气候变化：风险评估

David King、Daniel Schrag、周大地、
齐晔、Arunabha Ghosh
项目经理: Simon Sharpe

主办方：

Harvard University Center for the Environment

清華大學 Tsinghua University

EEW Council on Energy, Environment & Water

CENTRE FOR THE STUDY OF EXISTENTIAL RISK
UNIVERSITY OF CAMBRIDGE

Sponsors

Foreign & Commonwealth Office

中国国家气候变化专家委员会

skoll global threats fund

Global Challenges Foundation

Institute and Faculty of Actuaries

Willis

关于作者

Sir David King（**大卫·金爵士**）是英国外交大臣的气候变化特别代表，曾经担任英国政府的首席科学顾问。他撰写了 500 多篇关于化学物理和科学与政策方面的论文，他在大学的职位包括剑桥大学的物理化学教授和牛津大学史密斯企业与环境学院的创始人。

Daniel P. Schrag **教授**是哈佛大学环境中心的主任，曾是美国总统科技顾问委员会委员。他是 Sturgis Hooper 地质学教授以及环境科学与工程学教授，研究环境技术和政策以及地球化学和气候学。他已经获得了一些荣誉，包括麦克阿瑟奖。

周大地教授是中国国家气候变化专家委员会的成员，曾担任国家发展和改革委员会能源研究所的所长。他是能源经济学和能源系统分析、可持续能源战略、节能和气候变化政策方面的专家。

齐晔教授是清华大学公共政策与管理学院清华 - 布鲁金斯公共政策研究中心的主任；他是布鲁金斯学会的高级研究员。他也是中国关于气候变化、环境、能源、自然资源和生物多样性政策以及可持续发展理论与实践的专家。

Arunabha Ghosh **博士**是能源、环境和水资源委员会（印度关于气候方面的顶级智库）的 CEO. 他是气候、能源、水资源和环境政策、经济学和治理方面的专家，曾向印度、欧洲和巴西的议会以及国家元首报告，之前也曾在普林斯顿大学和牛津大学、联合国开发计划署和世界贸易组织任职。他是清洁能源获取网络的创始董事会成员和国际贸易和可持续发展中心董事会成员。

报告状况

Sir David King 以英国外交大臣的气候变化特别代表的官方身份领导该项目。英国外交和联邦事务部委托该报告作为气候变化讨论的独立供稿。报告的内容代表作者的观点，而不应看作代表英国政府的观点。

致谢

作者们要感谢所有为本项目花费了时间和精力、贡献其专长的人员，包括本报告的供稿作者，以及参与我们会议的人员，尽管这里没有列出他们的姓名，但他们的真知灼见也对我们的分析大有裨益。

我们要感谢本项目的所有赞助商的慷慨支持，包括英国外交和联邦事务部、中国国家气候变化专家委员会、Global Challenges Foundation、英国政府科学办公室、斯库尔全球威胁基金会、英国精算师协会和威利斯研究网络。我们还要特别感谢英国能源和气候变化部科学团队、中国气象局 、CAN 公司和橡树岭国家实验室的气候变化科学研究所在本项目的不同领域的鼎力支持。

最后，我们还要感谢以下所有人员，他们在实践、智力和精神上的支持使本项目得以实现，他 们 是：James Ballantyne, Oliver Bettis, Steven Bickers, Shourjomoy Chattopadhyay, Vaibhav Chaturvedi, Partha Dasgupta, Hem Himanshu Dholakia, John Edwards, Vaibhav Gupta, Pradyot C. Haldar, Frances Hooper, Paulette Hunter Okulo, Anil Jain, Aarti Katyal, Sindhushree Khullar, Anthony W. King, Sylvia Lee, Stephan Lewandowsky, Amy Luers, 罗 勇 , Lisa Matthews, Bessma Mourad, Chris Nicholson, Harriet O’Brien, Dennis Pamlin, Bob Phillipson, Benjamin L. Preston, Aditya Ramji, Sudatta Ray, Denise Sadler, Sayantan Sarkar, Mihir Shah, Surbhi Singhvi, Morgan Slebos, Wang Mengni, Nicola Willey, Ken Wright, Zhang Jiansong, 郑琦，朱松丽，谈婷婷 。

气候变化：风险评估

David King、Daniel Schrag、周大地、
齐晔、Arunabha Ghosh
项目经理：Simon Sharpe

主办方：

Harvard University Center for the Environment

清華大學 Tsinghua University

EEW Council on Energy, Environment & Water

CENTRE FOR THE STUDY OF EXISTENTIAL RISK
UNIVERSITY OF CAMBRIDGE

Sponsors

Foreign & Commonwealth Office

中国国家气候变化专家委员会

skoll global threats fund

Global Challenges Foundation

Institute and Faculty of Actuaries

Willis

目录

部长前言

英国外交及联邦事务部副部长 Baroness Anelay of St Johns 阁下 06

执行概要 08

1. 引言 14

2. 该风险评估的原则和范围 18

风险评估第一部分：全球排放量 28

3.IPCC 情景的历史和目的 29

4. 从风险的角度分析排放情景 31

5. 目前的政策和计划对短期排放量的影响 32

6. 决定未来全球排放量的技术挑战 37

7. 结论 42

风险评估第二部分：直接风险 44

8. 引言 45

9. 全球气温上升 50

10. 热应力对人类的风险 57

11. 气候变化对农作物生产的风险 65

12. 水资源短缺风险 74

13. 干旱的风险 84

14. 河流洪水的风险 88

15. 海平面上升对沿海城市的风险 94

16. 全球海平面上升 99

17. 大规模突变或不可逆转的变化 103

18. 总结性评论 107

风险评估第三部分：系统性风险 109

19. 引言 110

20. 全球粮食系统受极端天气影响和恢复力 113

21. 气候变化对国家和国际安全的风险 119

风险评估第四部分：价值 129

22. 经济 130

23. 伦理 133

继续开展风险评估的建议 137

风险降低：合理应对措施的组成部分 140

24. 技术 141

25. 金融 143

26. 政治 146

27. 总结性思考 148

附录 150

前言

英国外交及联邦事务部副部长
Baroness Anelay of St Johns 阁下

气候变化会造成巨大的风险，这一点是毋庸置疑的。事实上，值得注意的，即使在大选前夕，英国三大政党的领导人聚集在一起也会说：“气候变化是当今世界面临的最严重的威胁之一。气候变化不仅仅对环境造成威胁，而且对国家和全球安全、消除贫困和经济繁荣也造成了威胁。”

进行气候变化的风险评估时，世界上任何地区的任何国家面临的直接问题是： 威胁有多严重？有多紧急？面对许多其它紧迫的国家目标（包括鼓励经济恢复和保护全世界人民）时，我们如何按照轻重缓急做出响应？这些都是很重要的问题，要全面地分析风险，我们必须实事求是地回答这些问题。

过去我们评估气候变化的风险时，往往采取了太过狭隘或不全面的方法。在公众讨论中，我们有时会把风险评估当作预测的问题，就好像长期的天气预报；或者是当作纯经济学的问题，就好像只要把所有数字输入计算器就可以准确地量化所有的威胁。而且，我们常常没有充分评估间接或系统性风险，例如影响国际安全的风险；而英国的第一次国家气候变化风险评估发现，这些间接或系统性的风险可能远远大于沿海洪水等直接风险。现在要评估气候变化的威胁，我们需要更加协调、成熟和整体的方法。

针对风险管理采取整体方法正是英国外交和联邦事务部的核心所在。整体方法适用于气候变化，也同样适用于其它领域，如防止核武器的扩散。今年早些时候，我在联合国安理会五个常任理事国会议上发言，讨论核裁军和核不扩散的问题。对这一至关重要的安全领域进行风险评估取决于对一些相互依赖的因素的理解，包括：科学告诉我们什么是可能的；政治分析告诉我们某个国家的意图是什么；以及有哪些系统性的因素，如区域的权力动态。

对气候变化的风险进行评估也需要我们采取类似的整体方法。因此，要全面了解气候变化的风险，我们必须：首先，考虑各国的规划和政策，这影响到未来的全球温室气体排放；第二，理解气候如何变化的科学；第三，考虑气候变化将如何影响全球经济和国际安全的复杂系统。

最后，我们还必须对风险的价值做出判断。也就是说，我们在多大程度上在意气候变化的影响？我们采取行动避免气候变化影响的重要性如何？ 我们可以容忍多高的风险发生概率？气候变化与核扩散问题一样，对上述这些问题的回答不能简单地从经济角度衡量；而是某种程度上取决于我们对（现在以及未来）人类生命的价值判断。关于国家安全的决策通常对预算会有影响，但极少会简化为成本与收益之间的简单公式。这就是为什么，我们公开、诚实地对待所做的任何价值判断很重要；这样公众也可以对这些价值判断进行讨论。

我们需要采取整体的方法进行风险评估；同样，也需要采取整体的方法做出响应。应对气候变化的风险需要技术创新、金融投资和政治领导。将以上三者相结合，才能做出适当和有效的响应。

我们已经开始看到一些积极的进步。技术创新已经极大地降低了可再生能源的成本，增加了可再生能源占全球能源投资的比例。反之，越来越多的国家正在采取政策措施来减少温室气体排放量，今年年底的巴黎会议也提供了加强全球响应的机会。

然而，为了防止自满自足，我们必须牢记一点：在某种程度上，气候变化与其它任何外交谈判的主题有所不同，即气候变化是由物理过程所支配。因此，气候变化的风险会随着时间的推移而增加，并一直持续下去，直到我们完全从根源上解决了该问题。从这个意义上讲，领导力非常重要，开拓进取，为大家指明前行的道路。

英国前首相 Margaret Thatcher（玛格丽特·撒切尔）在认识到气候变化风险的性质和规模的初期就显示出这样的领导力。1989 年，撒切尔夫人在联合国大会上说，我们不是万物的主宰，“*而是上帝的子民，地球的托管人，因此我们肩负着保护生命的责任，保护充满神秘和奇迹的生命。希望我们能够胜任这个任务。*”

我很高兴地看到，来自英国、美国、中国和印度的专家共同合作，编写了该报告，让气候变化的风险更加清晰化。我们在思考研究成果时，让我们铭记 25 年前的话语。让我们采取合理而有效的反应措施。让我们展示，我们能够胜任面前的任务。

执行概要

关于气候变化，任何政府必须做出的最重要的决定是一项当务之急：相对于在其它问题上必须花费的努力，我们应该花费多少努力来应对气候变化。此次风险评估旨在为该决策提供依据。

风险评估的结论

气候变化的风险评估至少要考虑三个方面：未来的全球温室气体排放路径；全球温室气体排放给气候带来的直接风险；以及气候变化与复杂的人类系统相互作用而产生的风险。这三个方面都存在很大的不确定性。根据我们的评估，我们得出以下关于最重要风险的结论。

排放：如果不做出政治承诺并加快技术创新，那么全球的排放量可能会遵循中等至高排放量路径：未来几十年持续增加，然后平稳下来，或逐渐减少。

- 总体来说，目前主要国家和地区的政策和计划与中等至高排放量路径是一致的，即未来几十年排放量持续增加。
- 实现低排放量路径面临着巨大的技术挑战，目前也没有充分解决该问题。如果不加快能源技术和能源系统的创新——包括风能和太阳能蓄热、核能、生物燃料、不使用汽油的客运、碳储存和大规模节能技术——那么排放量迅速减少并在本世纪末接近于零的可能性就会非常低。
- 由于开采大量新的煤炭储备以及油页岩和甲烷水合物的潜力，我们不能排除高排放量路径（排放量在整个 21 世纪持续增加）的可能性。
- 气候会对累积排放量作出反应，因此未将排放量降至接近零的任何路径都将导致风险随时间持续增加。

直接风险：气候变化的风险是非线性的。虽然平均环境可能逐步变化，但风险却可能迅速增加。在高排放量路径情景下，超过情况从“无法忽视”变成“无法忍受”的阈值的概率将随时间的推移而增加。

- 对于任何排放量路径，有可能存在广泛的**全球气温上升幅度**。除了最低排放量路径之外，本世纪下半叶全球气温上升可能超过 2℃。在中等至高排放量路径情景（RCP61）下，到 2150 年全球气温上升超过 4% 的可能性似乎达到 50%. 在最高排放量路径情景（RCP8.5）下，本世纪末全球气温上升 7℃的概率非常低，但在 22 世纪似乎超过 50%. 我们不能排除未来几个世纪全球气温上升 10℃的可能性。 （‘RCP’ 表示“代表性浓度路径”。这里，我们参考了政府间气候变化专门委员会第五次评估报告使用的温室气体浓度情景所隐含的排放路径。）
- 人类对热应力的**忍耐力**是有限的。在目前的气候条件下，炎热的国家经常出现短期内超过安全的工作气候条件的情况，而高温热浪也已经导致人员死亡。未来气候条件可能超过热应力的致命极限，甚至危害到在阴凉处休息的人们。全球气温上升约 5℃时，在印度北部、中国东南部和美国东南部等炎热地区，在特定的年份曝露于高温的人们遭受这种气候条件的概率开始变得很大；全球气温上升约 7℃时，这一概率可能超过 50%。

- **农作物**对高温的耐受性是有限的。一旦超过了临界阈值，产量可能大幅下降。对于美国中西部和玉米和中国南部的水稻这两个研究案例，全球气温上升超过 2℃时，在特定的年份超过此类阈值的概率与现在的接近0%相比日益增加；全球气温上升约4至5℃时，最坏情况下此概率分别约为25%（玉米）和 75%（水稻）。对提高这些容许阈值程度的生物物理限制可能是适应的重要约束。这也是大幅度的气候变化可能对全球粮食安全造成巨大风险的原因之一。

- **水资源压力**的阈值在很大程度上是任意的，但是根据人均水资源可用量，“中度”、“长期”和“极端”缺水这些阈值得到了广泛应用。仅因人口增长这一因素，到本世纪中期，全球面临极端缺水的人数预计将翻一番。在某些地区，气候变化可能增加风险：例如，在高排放量路径情景下，底格里斯 - 幼发拉底河流域面临极端缺水的概率在 2030 年以后可能会出现极大的增加，到 2070 年可能接近 100%。

- 在南亚和东亚，气候变化反而会稍微抵消日益增长的水资源短缺**风险**，同时增加洪水的风险。 在高排放量路径情景下，根据中间估值，目前“30 年一遇的洪水”，本世纪在黄河及印度河流域的发生概率会增加三倍，在恒河流域的发生概率增加六倍。在最坏情况下，到本世纪末该洪水在上述三个流域的发生概率将增加约 10 倍。

- 根据中间估值，在高排放量路径情景下，本世纪美国和南亚农田遭遇极端**干旱**的概率可能增加约 50%，全球翻一番，而非洲南部增至三倍。这些中间估值存在很大的不确定性：对于美国和南亚，在最好情况下，干旱发生率可能减半；在最坏情况下，干旱发生率可能增加三至四倍。

- **全球海平面上升** 1 米时，现在“100 年一遇的洪水事件”，在上海发生的概率会增加约 40 倍，在纽约会增加约 200 倍，在加尔各答会增加约 1000 倍。我们可以完善防洪设施以保持洪水的发生概率不变，但这样做需要高额的成本。而且，随着洪水的高度上涨，由洪灾引起的损失仍会加重。改造的阈值（超过该阈值，“撤离”沿海城市比进一步改善防洪设施更具有可行性）尚不明确，但是最重要的制约因素可能是社会政治而非经济或技术方面的。

- 气候模型表明，本世纪全球海平面上升不可能超过 1 米。可能出现的最坏情景将导致海平面到 22 世纪末上升数米。然而，由于气候系统的惯性原理，如果全球气温持续上升 2℃，随着冰盖逐渐融化，全球海平面必然会上升高达 10 至 15 米。但是该情况会在数百年还是数千年后出现，仍然存在很大的不确定性。

- 气候系统中的许多因素都能发生**突然或不可逆转的变化**。季风或海洋环流模式的变化、热带雨林的枯梢病、永久冻土层或海底甲烷水合物的碳排放都可能导致气候的大规模破坏。这些变化发生的概率仍然未知，但预计将随着全球气温的上升而增加。

风险评估第一部分：遵循高排放量路径的概率是多少？

系统性的风险：气候变化的风险是系统性的。最大的风险可能由气候与复杂的人类系统（例如全球粮食市场、国家内部的治理安排和国际安全）之间的相互作用引起。

- 随着气候变化增加极端天气事件发生的频率，初步分析表明，20 世纪下半叶对全球粮食生产的“100 年一遇”的冲击，到本世纪中期的发生概率可能增加三倍。如果政策和市场反应加剧而非缓解该冲击，现在可能的最坏情景是带来全球市场前所未有的价格上涨，受影响最严重的粮食价格与当前的价格水平相比增至三倍。

- 气候变化已增加了极端事件发生的概率，如 2010 年的俄罗斯高温热浪和 2007 年至 2011 年的叙利亚干旱。这些事件与粮食出口限制、现有的资源压力、治理不善和国家脆弱等其它因素相结合，都造成了动乱和冲突。在气候变化程度较低的情况下，此类风险最有可能进一步发生在这样的地区：气候变化已经减少了原本就紧张的资源，同时人口的高速增长也增加了对资源的需求量。

- 气候变化程度较高时，安全风险的程度似乎可能有所不同。极端的水资源短缺压力和肥沃土地的竞争可能成为冲突的来源。从一些地区迁移可能更加成为一种必要，而非选择；而且迁移的规模也可能是历史上前所未有的。国际社会提供人道主义支援的能力似乎有可能不堪重负。国家失败的风险可能大幅增加，同时影响很多国家，甚至威胁到那些目前被认为发达而稳定的国家。反之，不受统治的领土的扩张会增加恐怖主义的风险。国家或其它参与方将受到极大的诱惑，在应用地球工程学应对气候变化方面采取单边行动，而这也可能成为进一步的冲突来源。

价值：估计这些风险的价值本质上是一项具有主观性的行为。

- 对全球气候变化成本的标准经济估算对科学假设和人类生命价值的判断都非常敏感。由于这些估算往往忽略了一系列难以量化的影响，因此很可能低估风险而出现系统性的偏差。

- 即使经济成本可以准确估计，它们的总和却不能很好地衡量气候变化的风险。上个世纪的一些最悲惨的悲剧对全球 GDP 的影响却微不足道。同样，气候变化带来的一些最严重的风险也可能无法用金钱来衡量。

- 气候变化风险的任何估值都将涉及主观判断，最明显的是有关对后代福祉的重视。这些判断应该公开透明，人们还可以就此进行公开讨论。

继续风险评估的建议

在气候变化的风险评估方面，我们还有很大的提升空间。这是一个良机，可以为我们做出降低风险方面的决策提供依据。

我们关于风险评估的建议是：遵循正确的原则；扩大人们在风险评估过程中的参与度；持续不断地向最高决策机构报告。

遵循正确的原则。包括：

- **评估与目标和利益相关的风险。**首先了解我们希望避免什么风险；然后评估其可能性。

- **识别最大的风险。**关注发现更多关于长期变化和短期事件的最坏情景方面的信息。

- **考虑各种可能性。**要记住，如果影响是灾难性的，那么很低的概率也可能导致非常高的风险。

- **使用最佳的可用信息，**不管是经证明的科学真理，还是专家判断。最好的估计总不没有估计好。

- **从全局的角度看待问题。**评估系统性的风险，以及直接风险。评估受相关决策影响的整个空间和时间内的风险。

- **做出明确的价值判断。**认识到这些判断本质上是具有主观性的，并确保公开透明，人们可以就此进行公开讨论。

扩大人们在风险评估过程中的参与度。不同的参与者在风险评估的不同阶段发挥重要作用。

- **确定目标：**领导和决策者在开始阶段发挥作用，确定风险评估的目标和相关利益。

- **信息收集：**科学家们在理解气候变化及其直接影响方面发挥带头作用。政治学、技术、经济学及其它学科的专家可以提供未来全球排放量以及气候变化与人类系统互动时带来的间接影响方面的信息。

- **风险评估：**人们收集信息时可能收集任何有用或有趣的信息，风险评估却是根据一系列特定的原则询问与设定目标有关的证据。将收集信息与风险评估这两项任务相分离可以提高工作效率。不仅仅科学家要参与气候变化的风险评估，风险专家也要参与其中，来自国防、情报、保险和公共卫生等领域的风险专家也要参与其中。

持续不断地向最高决策机构报告。风险评估旨在为决策者降低风险提供依据。评估气候变化的特定的、地方的或行业的风险，可能要针对承担特定的、地方的或行业职责的机构。气候变化风险的整体评估应直接向承担整体治理职责的机构报告。在国家层面，这意味着政府首脑、内阁或国家安全委员会。在全球层面，则意味着政府首脑会晤并做出决策的机构。我们需要定期地、持续地进行风险评估，这样在不确定的方面，随着时间推移专家判断的任何更改或趋势就会一目了然。

风险降低：合理应对措施的组成部分

风险评估的目的主要是为了进一步加深我们对所面临问题的了解；同时，风险评估还可能让我们进一步洞察解决方案的性质。

超过一定阈值时，气候变化的最大风险会出现：逐步的情况变为突然的情况；不可忽视的情况变为不可容忍的情况。同样，超过出现非线性变化的阈值时，最大程度的风险降低会出现。

政治领导可以是非线性变化的一个来源。在现有技术水平线，政治领导就有机会在短期内显著地改变任何一个国家排放量的趋势。

技术创新是非线性变化的天然来源。新技术可能慢慢出现，然后在跨过一些无形的门槛后突然迅速地取代旧的技术。就实现低碳转型的一系列技术而言，重要的是加快这一变化的速度，并提前跨过这些门槛。当务之急是技术进步和政策措施（如碳定价）双管齐下，以尽快跨过清洁能源变得比化石能源更便宜的门槛。

在经济方面，微小的规则变化可以产生很大的结果变化。调整法规，并采取激励措施将长期风险评估纳入财政体系，可以显著地增加技术投资，从而为我们的长期经济利益服务。

反馈作用会加剧气候变化的风险：气温上升使冰雪融合；冰雪融化后，海洋吸收更多热量；这样气温上升得更快。有效的风险降低措施也将利用积极的反馈作用。政治干预可以改变市场氛围，这样市场将在清洁能源技术方面加大投资，从而加快技术进步，然后新的政治干预又成为可能。

气候变化的风险分为即时风险和长期风险，因此我们也要分别针对这两种情况采取行动。对于随时间的推移而增加的风险，如果我们的视野是短期的，那么就无法成功地加以控制。最终，只有我们将全球温室气体的排放量降至接近零时，气候变化的风险才能得以控制。因此，现在我们必须尽最大的努力降低排放量，而且还必须沿着一条未来有更大的能力降低更多排放量的道路前进。

气候变化的风险可能比人们通常意识到的程度更高，我们应对气候变化的能力也是如此。实事求是的风险评估并不是宿命论的借口。如果我们克服惰性，发挥创造力，将反馈作用相匹配，找到并超过非线性变化的阈值，那么未来保持安全气候的目标就不是遥不可及的。

超过一定阈值时，气候变化的最大风险会出现：逐步的情况变为突然的情况；不可忽视的情况变为不可容忍的情况。同样，超过出现非线性变化的阈值时，最大程度的风险降低会出现。

政治领导可以是非线性变化的一个来源。在现有技术水平线，政治领导就有机会在短期内显著地改变任何一个国家排放量的趋势。

技术创新是非线性变化的天然来源。新技术可能慢慢出现，然后在跨过一些无形的门槛后突然迅速地取代旧的技术。就实现低碳转型的一系列技术而言，重要的是加快这一变化的速度，并提前跨过这些门槛。当务之急是技术进步和政策措施（如碳定价）双管齐下，以尽快跨过清洁能源变得比化石能源更便宜的门槛。

在经济方面，微小的规则变化可以产生很大的结果变化。调整法规，并采取激励措施将长期风险评估纳入财政体系，可以显著地增加技术投资，从而为我们的长期经济利益服务。

反馈作用会加剧气候变化的风险：气温上升使冰雪融合；冰雪融化后，海洋吸收更多热量；这样气温上升得更快。有效的风险降低措施也将利用积极的反馈作用。政治干预可以改变市场氛围，这样市场将在清洁能源技术方面加大投资，从而加快技术进步，然后新的政治干预又成为可能。

气候变化的风险分为即时风险和长期风险，因此我们也要分别针对这两种情况采取行动。对于随时间的推移而增加的风险，如果我们的视野是短期的，那么就无法成功地加以控制。最终，只有我们将全球温室气体的排放量降至接近零时，气候变化的风险才能得以控制。因此，现在我们必须尽最大的努力降低排放量，而且还必须沿着一条未来有更大的能力降低更多排放量的道路前进。

气候变化的风险可能比人们通常意识到的程度更高，我们应对气候变化的能力也是如此。实事求是的风险评估并不是宿命论的借口。如果我们克服惰性，发挥创造力，将反馈作用相匹配，找到并超过非线性变化的阈值，那么未来保持安全气候的目标就不是遥不可及的。

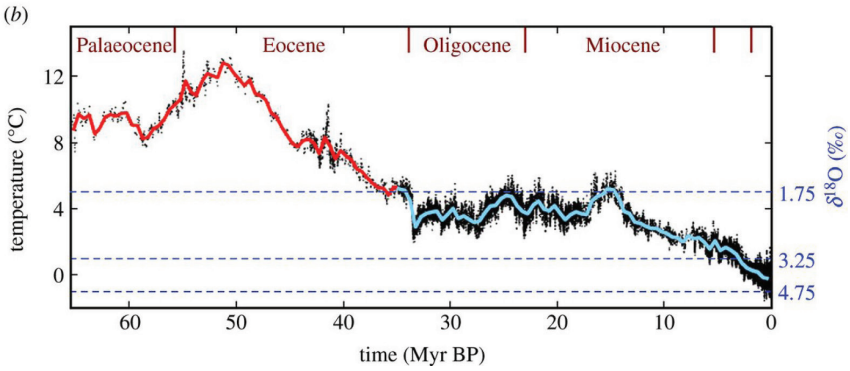
气候变化：风险评估

1. 引言

地球气候曾经发生过剧烈变化。地球经历过几次冰河时代，最寒冷时北美、欧洲和亚洲北部的大片区域都覆盖着三公里厚的冰层。地球也经历过极端高温的时期，那时亚热带气候出现在北半球高纬度地区。海洋高度的变化超过 100 米。

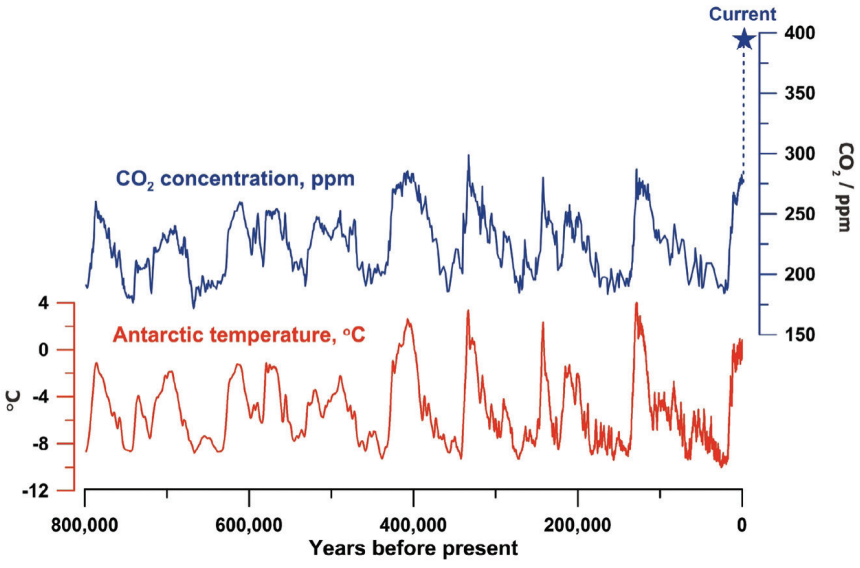
但是人类文明却没有见证太多变化。在人类文明出现的一万年左右，地球的气候一直异常稳定。全球气温和海平面几乎没有变化。我们利用这段稳定期种植农作物、建造城市和发展全球经济。

图 1：**过去 6000 万年** 全球深海温度的变化 [1]



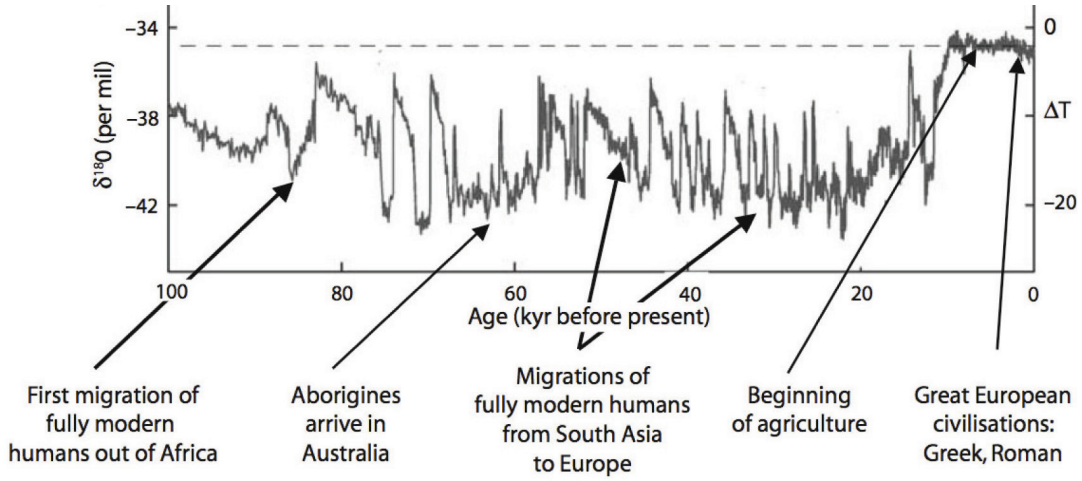
全球深海温度的测量基于在海洋中沉淀物氧同位素。自从海洋问题温度和大气温度约在 5000 万年前达到峰值 12 摄氏度，它的长期趋势一直下降。

图 2：**过去 80 万年**南极的气温和大气中二氧化碳浓度的变化 [2]



测量在过去 80 万年前南极气温和大气中二氧化碳的浓度基于从冰芯里获得的数据。从冰川期（低谷） 与 相对温暖的间冰川期（高峰）之间可以看出震荡的趋势。冰川期与间 冰川期之间的不同在于平均全球近地表气温相差 4-5 摄氏度。该图表表示温差大约为两倍，因为两极气温比全球平均气温更加多变。蓝色星星显示目前二氧化碳浓度。据图表的记录，在过去 80 万年前完全无法预料二氧化碳浓度最近几年的上升幅度。

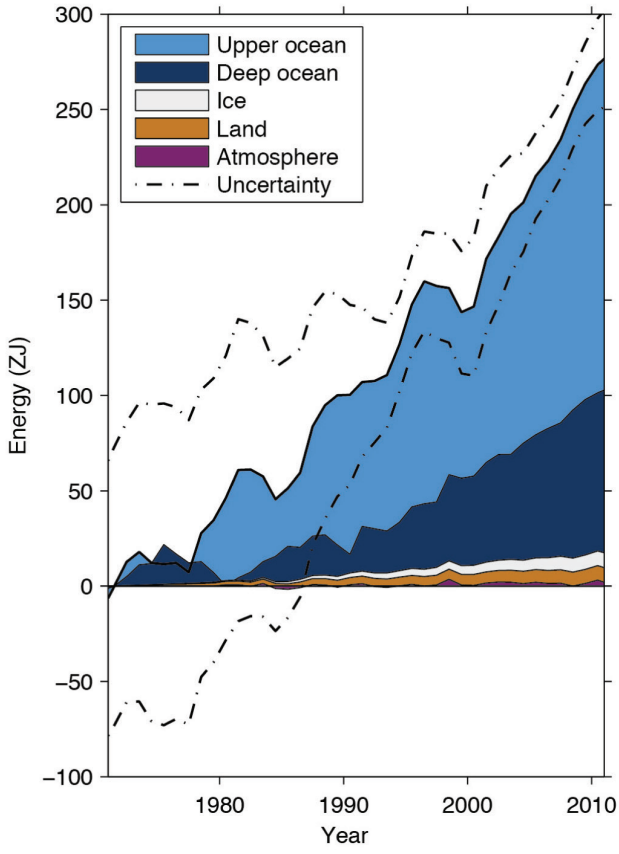
图 3：**过去 10 万年**在格陵兰岛测量的全球气温变化 [3]



上一次气候变化发生的时间是在人类文明开端之前。过去 10 万年前， 人类社会从狩猎采集社会转变到农耕社会，地球气候处于异常稳定时期。图表显示格陵兰岛本地温度变化。（如上所述，两极气温比全球平均气温容易改变，全球平均气温在约一千年前即上一次冰川时期出现上升，大约增加了 5 摄氏度。）

现在，稳定的时期正在结束。人类活动排放到大气中的温室气体吸收热量，给地球系统增加能量。额外的能量是巨大的：大约相对于每秒增加四枚落在广岛上的核弹的能量 [4]。因此，地球气候正在变暖并不足为奇。

图 4：**给地球系统增加的能量 - 参考** [5]



给地球系统增加的超过 90% 的能量会将会给海洋增温。仅有 2% 的能量给予大气增温，剩下的部分由陆地和融化的冰川平衡。整体增加的能量将急剧上升。

全球气温的微小变化会带来全球气候的巨大变化。如果世界降温 5˚C，我们就会处于冰河时代，上次冰河时代是大约 1 万年之前，也就是人类文明产生之前。如果世界升温 5˚C，那么我们所处的气候与 1 千万年前一样，那时人类还没有出现。

气候升温或降温 5˚C 在现实中是非常有可能的。现在孩子的有生之年可能会发生这样的情况。我们现在做出的决定将影响这些情况发生的可能性，并将继续影响未来数千年的气候。

我们为什么需要风险评估？

我们的出发点是，我们有兴趣了解我们决策可能的后果是什么。而且这些后果在空间和时间都很深远，因此我们有兴趣尽可能充分地了解。

风险是可能发生的不好的情况。风险评估提出这样的问题：“可能发生什么？”，“可能发生的严重程度如何？”以及“发生的可能性如何？”这些问题的回答可以为我们的应对决策提供依据。

气候变化符合风险（更学术的说法是“不确定性对目标的影响：[6]，或“一个事件或活动对人类认为有价值的事物带来不确定的、一般来说不良的影响”[7]）的定义，因为气候变化有可能对人类利益造成消极的影响，而且许多后果都是不确定的。我们知道，给地球带来能量会使地球变暖，气温上升，冰层融化，海平面上升。但我们不知道气候变暖的速度和程度，我们也无法准确地预测许多将会发生的相关变化。“气候变化可能有多严重”这一问题的回答还很不明确。

限制气候变化需要付出努力。虽然许多减少温室气体排放量的措施可能对公众健康、生活质量和经济增长[8]有利，但是未必容易落实。这些措施需要政治和金融资本的投资。各国政府和社会将不得不决定准备付出多少努力，以及如何确定应对气候变化及解决其它问题的优先级顺序。风险评估将是判断合理应对措施的依据。

有时人们认为，全面的风险评估将会适得其反，因为风险很大，解决方案却很困难，因此人们可能陷入一种无助的感觉，去寻找其它途径。在某些情况下的确如此。人类学家 Jared Diamond 在在回答“为什么有些社会会做出灾难性决策”这一问题时写道：

“…想象一个高耸的大坝下面有一条狭窄的河谷，如果某天大坝决堤，那么随之而来的洪水将会淹没一大片下游地区并淹死居住在那里的居民。当民意调查者询问大坝下游的人们，他们有多担心大坝决堤，发现离大坝最远的居民的恐惧感最小，越靠近大坝居民恐惧感越强，这是不足为奇的。然而令人惊讶的是，在你走过大坝下方几英里的地方恐惧值上升至最高之后再走近大坝时，这种恐惧感突然降为零！也就是说，居住在大坝下方的人，即大坝一旦决堤会必死无疑的人，丝毫不担心大坝决堤。这是否认心理在作祟：每天看到大坝时仍保持理智的唯一方法是否认它会决堤。尽管心理否认是建立在个体心理学基础上的现象，但它似乎同样适用于群体心理学。”[9]

我们编写该风险评估的前提是，我们都可以选择是否抬头看大坝。各国政府可以选择忽略，或者派最好的专家前往仔细检查。我们认为最好获得全面的信息。正如美国核战略家 Albert Wohlstetter 在冷战期间所写道：*“我们必须考虑一些令人非常不愉快的可能性，因为我们希望避免这些可能性。*[10]*”*

该报告的目的不是给出所有的答案，而是说明：提供气候变化风险评估的新框架，并提出我们对于评估结果的最佳估算（有时也是大致的估算）。我们希望这些结果能够受到挑战，得到更新和改进。读者是否同意我们的观点并不那么重要，重要的是读者能够理解我们为什么提出这些问题。

最后，我们提出了关于风险管理问题方面的一些想法。风险评估只是让我们更好地理解问题，而不是提供解决问题的指南，因此这只是我们报告的一小部分。我们就如何根据风险的规模采取国家和国际层面的措施更有效地应对气候变化提供了一些个人的观点，只是因为我们不希望给读者留下这样一个印象：我们已经走到了穷途末路，身处绝境。我们认为，情况远非如此。

尾注

1. Hansen, J.E. 和 Sato, M.（2012 年）。《根据地球气候史估算的气候敏感度》。http://www.columbia.edu/~jeh1/mailings/2012/20120508_ClimateSensitivity.pdf .
2. 该资料的来源是 COMET® 网站，见 http://meted.ucar.edu/ 大学大气研究公司（RCAR），部分通过与美国国家海洋和大气管理局（NOAA）、和美国商务部（DOC）的合作协议得到赞助。©1997-2015 大学大气研究公司。版权所有。
3. 图 14.1，来自 Young, O.R. 和 Steffen, W.（2009 年）。“地球系统: 维持地球生命支持系统”。来自 Folke, C., Kofinas, G. P. 和 Chapin, F.S.（编辑）（2009 年）。《生态系统管理原则》。纽约 Springer. 第 295 至 315 页。
4. Schellnhuber, H. J.（2013 年）。“避免难以管理的风险，管理不可避免的风险”。出自英国皇家国际事务研究所关于“采取具体气候变化行动”的报告。见 http://www.chathamhouse.org/sites/files/chathamhouse/home/chatham/public_html/sites/default/files/0900%20John%20Schellnhuber.pdf
5. 完整的 IPCC 标题：相对于 1971 年以及从 1971 年至 2010 年地球气候系统不同组成部分的增加的能量积累（单位：ZJ，1ZJ=1021J），除非另有说明。见数据来源文本。海洋升温（热含量变化）占主导，上层海洋（淡蓝色，700 米以上）升温幅度比中层海洋和深海（深蓝色，700 米以下；包括 2000 米以下从 1992 年开始的估值）。冰层融化（浅灰色；对于冰川和冰盖，格陵兰岛和南极冰盖从 1992 年开始的估值，以及北极海冰从 1979 年至 2008 年的估值）；大陆（陆地）升温（橙色）；大气升温（紫色；从 1979 年开始估算）幅度相对较小。海洋估值的不确定性在整体不确定性中也占主导（虚线是所有五个组成部分在 90% 置信区间的误差）。图 3.1-1 来自 Rhein, M., S.R. Rintoul, S. Aoki, E. Campos, D. Chambers, R.A. Feely, S. Gulev, G.C. Johnson, S.A. Josey, A. Kostianoy, C. Mauritzen, D. Roemmich, L.D. Talley 和 F. Wang（2013 年）。“海洋观测”。《2013 年气候变化：自然科学的基础》。IPCC 第五次评估报告第一工作组供稿 [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex 和 P.M. Midgley（编辑）]。英国剑桥和美国纽约：剑桥大学出版社。
6. 国际标准化定义机构。
7. 国际风险治理委员会（2012 年）。《国际风险管理理事会风险治理框架介绍》。见 http://www.irgc.org/wp-content/uploads/2015/04/An_introduction_to_the_IRGC_Risk_Governance_Framework_final_v2012.pdf.
8. 见《新气候经济》在线报告，见 http://newclimateeconomy.report/.
9. Diamond, J.（2011 年）“崩溃——社会如何选择失败或生存”。企鹅出版集团，第 436 页。
10. 在“核的新纪元”中引用。《经济学人》，2015 年 3 月 6 日。

2. 该风险评估的原则、范围和方法

该节供稿作者：David Hare 博士、Trevor Maynard, General Ronald E. Keys、Cherie Rosenblum 和 Claire Craig 博士

该评估的新颖之处是什么？

各国政府、研究机构及其它机构已经发布了许多气候科学报告和气候变化风险评估。最值得注意的是政府间气候变化专门委员会的报告，总结了数千名科学家的研究成果，对我们的集体知识做出了巨大的贡献。我们的评估在很大程度上也依赖于这些早期评估的结果。

虽然不断有新的和其他科学研究为我们的报告提供参考，但我们的主要目的是以符合风险评估原则的方式整理和展示现有的知识。尤其是，我们旨在提供一份风险评估，为政府做出从整体上应对气候变化问题的决策提供依据，包括排放方面的政策（气候政策术语是“减缓”）。这与其它风险评估不同，其它风险评估的主要目的是为政府做出应对气候变化的特定影响（称为“适应”）决策提供依据。

我们旨在采用整体方法考虑对理解风险最重要的不同因素和不同知识。评估考虑四个主要领域：

1. **未来全球温室气体排放的路径**：未来气候变化的速度和程度以及气候变化带来的所有风险很大程度上取决于未来全球排放的路径。没有任何一个国家的政府能够控制全球排放，因此从单个政府(或个人）的角度看，这主要取决于其它政府的行动，以及技术进步、经济发展趋势、投资者情绪和民意等非政府的力量。

2. **物理气候的变化，**及其给人类利益带来的直接风险。不管最后遵循的是哪种排放路径，风险取决于物理气候的反应：温室气体排放带来多大幅度的气温上升；气温变化如何影响降雨量；气温、降雨量及其它因素如何带来农作物产量的变化，等等。对人类利益的风险还将取决于我们在多大程度上成功适应这些变化。一旦超过了阈值，某些类型的适应措施不再有效，，最严重的风险就会出现。

3. **物理气候的变化与人类系统相互作用产生的系统性风险。**在复杂的系统中，微小的变化有时可能带来未来重大的影响。气候变化给人类利益带来的风险将不仅仅取决于物理气候变化的直接影响，而且取决于全球经济、粮食市场和国际安全体系等复杂人类系统的反应。

4. **我们选择在多大程度上重视所有可能发生的变化。**如果风险被定义为“不确定性对目标的影响”，或者对我们认为有价值的事物产生负面影响的可能性，那么要完成一份风险评估，我们就必须对我们的目标、我们认为有价值的事物以及我们对避免负面影响有多重视做出主观的判断。只有做出一些价值判断，风险评估才会对决策提供有用的依据。

在所有这四个领域，我们借鉴了不同的专业知识，采用了不同的方法。

我们对未来全球温室气体排放路径的评估是一项政治和技术的评估。关于短期趋势，我们的评估特别关注各国政府正在实施或已经宣布的政策、计划和目标。关于长期趋势，则专注于描述减少温室气体排放量的主要技术挑战，并考虑应对技术挑战的难度及所需花费的努力。该评估对不同排放路径的相对可能性做出一些判断，因此与 IPCC 评估等未做判断的评估不同。

关于物理气候变化及其给人类利益带来的直接风险部分是一个科学评估。该评估试图与风险评估的原则保持一致，即首先问我们希望避免什么风险，然后问该风险发生的可能性有多大。许多气候变化风险评估也将该原则用于考虑极端气候事件的风险，从而使用该信息为降低灾害风险和适应气候变化提供决策依据。我们还将该原则用于考虑长期变化，以及气候变量的平均值最终会达到极值或超过重要阈值的风险，因为这与能源和排放的决策有关。

我们考虑物理气候的变化与复杂的人类系统之间相互作用而产生的系统性风险，在很大程度上属于安全风险评估。意识到未来复杂系统的状态存在很大的不确定性，该评估使用情景模拟和军事博弈的工具帮助我们思考可能会发生什么。我们的评估方法与发表的气候变化和安全方面的许多文献有所不同，因为我们特意将短期内较低程度的气候变化带来的安全风险与长期尺度下较高程度的气候变化带来的长期安全风险之间做出明确区分。

最后，我们考虑在多大程度上重视所有可能发生的变化时，基于我们对该问题主观性的认识。我们不是试图对该问题进行量化，而是专注于明确量化方法的局限性。我们强调经济学能够指出的不可避免的道德问题，而非答案。我们不会提出任何估值是“正确的”，而是鼓励读者做出自己的判断。

风险评估每个部分最前面的引言更详细地描述了我们的方法。

风险评估的原则

虽然我们在风险评估的不同阶段借鉴了不同知识，运用了不同方法，但我们尽量运用一致的基本原则。我们通过风险评估方面的文献以及与金融和国家安全领域风险评估专家的讨论确定了这些原则[1]。

我们应用的风险评估原则如下：

1. **识别与目标相关的风险。正如一个风险评估指南所述：**“风险评估以具体的目标为出发点和落脚点”[2]。如上所述，我们风险评估最后要考虑价值，但我们认为价值的判断是非常主观的。即使这样我们也必须以一些目标为出发点，否则我们无法识别这些目标面临的风险。因此，我们假设共同目标是人类的繁荣和安全，我们要考虑的是实现该目标的风险。这就遵循了风险评估的原则，即我们先问什么风险最有可能影响我们的利益，然后问该风险发生的可能性有多大。（我们并没有先问最有可能发生的风险是什么，然后问该风险对我们的利益有什么影响。）

2. **识别最大的风险。**从逻辑上看，该原则遵循第一条原则。风险影响我们目标的可能性越大，与我们决策相关的可能性就会越大。如果风险只是简单地定义为可能性和影响的产物，那么最大的风险可能是最有可能发生的风险，或者是可能产生最大影响的风险，或者是介于以上两者之间的风险。从数学的角度说，这将取决于概率分布函数的形状。在实践中，我们最关心的风险通常是影响最大的风险，尤其是可能带来不可逆转后果的风险（比如死亡）。

3. **考虑各种可能性。**该原则遵循第二条原则，因为最大的风险可能出现在概率分布的任何地方。然而，每种可能性都值得单独考虑，因为我们不能忽略发生概率低但产生影响大的风险，这一点尤其重要。至于值得考虑的最低概率是多大，这需要我们做出判断。按照欧洲保险公司的规定，公司需要预防“200 年一遇”的偿付能力风险（也就是特定年份发生概率仅为 0.5% 的风险）。有人认为，如果保持稳定的气候环境与避免保险公司破产同样重要，那么我们在考虑气候变化风险时也应该采用同样的分界点[3]。英国政府《国家紧急事务风险清单》认真考虑了更低概率的风险：例如可能性估计在 20000 分之一到 2000 分之一之间的重大工业事故的风险[4]。当我们无法有效量化概率时，通常是考虑“可能的最坏情景”。同样，“可能性”的阈值问题也需要我们做出判断。

4. **使用最佳的可获得信息。**我们可以使用定量或定性的信息，以及试验结果或专家的判断。即使存在很大的不确定性，基于最佳的可获得信息做出最佳的预测，通常比完全没有预测要好。如果没有信息，那么缺乏信息本身就是与决策相关的数据点，就好像一个人冒着浓雾在悬崖顶上行走。

5. **采用整体的方法。**这意味着尽可能考虑所有相关的因素，包括人类的行为，以及一个系统不同部分之间复杂的相互作用。虽然模型有助于我们理解复杂的系统，但是模型考虑范围之外的因素也不容忽视。当我们无法用模型有效地模拟一个系统时，我们可以开发一些情景来想象该系统未来可能的状态。

6. **做出明确的价值判断。**在识别风险（例如，我们希望避免什么风险）和决定我们在多大程度上关心风险方面，我们都需要做出主观的价值判断。这些价值判断必须清晰明确，这样读者才能选择使用不同的价值。同时，一旦识别出一个风险，我们必须基于最佳的可获得信息完全客观地评估其可能性。

最后，根据国际风险管理委员会的建议[5]，我们明确区分了风险评估（分析和理解风险）和风险管理（决定如何应对风险）。

这里，我们提供了一些金融和安全领域的简要观点和政府科学建议，进一步说明一些风险评估原则及其与理解气候变化风险的关系。

从精算学的角度：David Hare 博士，英国精算师协会前任主席

气候变化首先是风险管理的问题——气候变化政策最重要的目标之一是将非常糟糕结果发生的可能性控制在可接受的范围内。

精算行业的风险评估基于对即使发生概率低、但也可能产生最大影响的情景的理解，也就是说，我们关心的是防止“破产风险”。在保险行业，精算师依靠三个因素来评估和管理破产风险：确定资金足以偿还“200 年一遇事件”可能造成的负债的模型；管理风险和评估未来风险的情景；以及利用信息披露和透明度帮助市场力量约束公司行为。

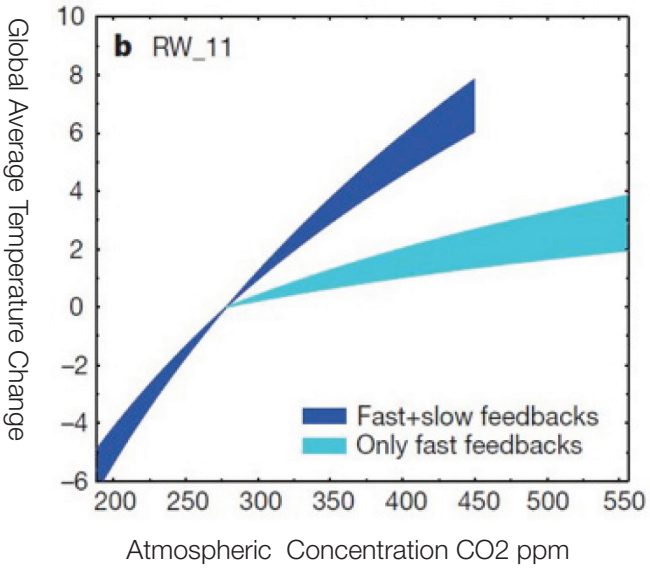
仅仅是建模本身并不能有效地评估或管理风险——对于气候变化的风险，风险评估的三个方面都是适用的：

- 风险模型代表世界（尽管不完美），应该反映所有合适的定量和定性数据。在确定对风险起重要作用的因素的过程中，我们千万不能仅仅因为无法量化而排除在考虑范围之外。

- 理解风险驱动因素和不可预见的风险对确定潜在的结果至关重要。对于气候变化，风险驱动因素包括人类排放、气候反馈和人类的脆弱性。不可预见的风险包括由气候变化对粮食和水资源供应的影响而引发的政治不稳定性等“二级”风险。
- 风险信息的透明度和披露至关重要，有助于市场和决策者合理地应对风险。

气候变化的一个关键风险驱动因素是全球气温对排放的反应。如果我们仅考虑“快速反馈”，那么计算的气温上升幅度相对较低。但过去的气候变化表明，从长期来看，“慢速反馈”可能导致更大的气温上升幅度（见图 5）。风险管理方法应该审查这些“慢速反馈”与我们有关的风险，并且考虑最关切的情景。在精算工作中，这些极端情况是我们认为最重要的。

图 5：**非建模风险案例**；气温对 CO2 敏感度的替代估值（图形包括 1 标准方差的不确定性，可能结果的完整范围更广）。[6]



好的决策往往基于对困难情景的探索，然后使用该信息缓解风险。在气候变化的情况下，问题仍然是：我们是否过多关注全球升温 2℃ 的情景，而忽略了全球升温 4℃ 或更极端的风险？到本世纪末，这些更极端的情景有可能发生，但由于影响的性质和规模存在着不确定性，因此适应措施能否成功也是不确定的。

从再保险行业的角度：Trevor Maynard，伦敦劳埃德保险公司风险管理和再保险负责人

再保险行业的风险评估使用多种方法，包括水平扫描、情景测试和巨灾建模。我们运用的风险评估原则包括：(i) 集中精力于最大的风险，(ii) 基于最佳的可获得信息进行分析，(iii) 避免平均化的危险，(iv) 持续不断地进行重新评估；(v) 考虑人为因素以及 (vi) 考虑不确定性。

人类因素对评估气候变化的风险至关重要。正如我们的巨灾模型考虑自然灾害的不确定性，因此我们的气候政策必须以风险评估为基础，而该风险评估需要考虑谈判失败、一些碳捕获技术无法提供或未来的管理者转变政策等种种可能性。一旦考虑了这些可能性，我们将看到极端结果更有可能发生，那么我们就可以决定加强行动避免其发生。

在确定最大风险时避免平均化带来的危险是很重要的。我的朋友 Lenny Smith 教授有一个很精彩的例子可以很好的说明这一点。假设三位决策者喜欢在河边散步，没有一个人会游泳。他们咨询科学顾问水的深度是否超过身高。顾问求助三所大学设计模型：第一所大学指出西海岸附近的水深超过身高；第二所认为事实并非如此，它认为河中心的水深超过身高；而第三所大学，非常喜欢自己的模型，认为其它两组都是错的，只有东海岸附近的水深超过身高。这个顾问注意到建模的不确定性，认为最好的方法是将三个结果平均一下。结果是令人遗憾的！事实上，每个模型都会推测出有生命危险，只不过不知道精确位置。通过平均化，这一至关重要的信息丢失了。

我认为，我们花了很多时间担心一个特定的气候模型是否对所有地区来说都是正确的。我们无法准确预测不同的地区气温如何变化，海平面上升幅度是多少；极端降雨或干旱发生怎样的变化——但大多数气候模型都会预测某个地方的灾难性结果，因此即使一些细节不准确，但关于严重后果的总体预测是比较有力的。

最佳的可获得信息可以有很多形式；有时我们只需要依赖于专家判断。在这些情况下，专家毫无偏见地进行评估至关重要。我常常担心，我们所使用的“保守”一词在保险行业的含义与在科学领域的含义正好相反。科学家的“保守”，意味着他们约束最深刻的恐惧，并等待更多的证据，然后做出评估；因此，“保守的”预测往往是低估了风险，并非最佳预测。在保险行业，“保守的”储备量比最佳预测所需的储备量要高。在风险评估方面，我认为保险行业的角度更适合。

从安全的角度：Ronald E. Keys，美国退役空军上将，美国空军空战司令部前指挥官，CAN 军事顾问委员会主席。Cherie Rosenblum，CAN 军事顾问委员会执行董事。

军事和安全界一直在信息不完善和不确定的情况下处理决策。前美国陆军参谋长 Gordon Sullivan 上将在第一份 CAN 军事顾问委员会报告中称：*“我们从未有过 100% 的确定性。我们也永远不会有。如果等到 100% 的确定性，那战场上就会发生非常糟糕的事情。”*在信息不全面的情况下做决策本身就存在风险，但正如 Sullivan 上将所言，决策者不容等待。Sullivan 上将的观点涉及到一个根本性问题，即为何风险评估、风险管理以及不确定情况下的行动能力对于处理气候变化的影响至关重要。

风险管理必须关注发生概率低但可能造成很大影响的风险。美国退役海军上将 Frank Bowman 曾说过：*“对于可能带来毁灭性后果的低概率事件，我们也必须加以考虑，并制定和部署缓解/适应计划。我们以同样的方式运营核潜艇舰队。有些人可能认为，这个过程的持续导致过度设计和过度谨慎。也许是这样，但美国潜艇的安全记录证明了这种方法的明智。对于气候变化的已知和未知信息，我们都要采取这样的方法。”*

在另一个关于气候变化的国家安全风险报告中，CNA 军事顾问委员会针对与极度不确定有关的‘缺乏想象力’提出了警告：

“在思考世界将如何应对未来气候变化时，我们认为警惕想象力缺乏非常重要。例如，2001 年夏天，正是（至少部分是）由于情报界的局限思维和安全分析师想象力缺乏，恐怖分子使用裁纸刀劫持商用飞机并把它们变成武器瞄准世界贸易中心和五角大楼才成为可能。关于这些威胁，9/11 委员会发现‘缺乏想象力是最重要的一个原因。我们认为领导人不明白威胁的严重性。危险…无论是在公共场合、媒体或国会上都不是政策辩论的一个主要话题……’未能考虑气候变化如何影响全球相互关联的系统可能是局限性思维，而不考虑气候变化如何影响美国国家力量和安全要素则是缺乏想象力。”

风险评估的主要目的之一是让决策者在不确定的情况下做出权衡选择。在信息不完善的情况下，风险评估让领导有一个评估威胁、可能性、结果和行动方案的过程，既可免除政治痛苦，又不受个人喜好影响。如果现在决策者由于“等待完善的信息”，而没有制定强有力的气候变化减缓和适应政策，那么他们就忽视了未来对我们经济和国家安全产生威胁的风险。事实上，风险分析真的很简单：“风险有多严重？我能否忍受？如果无法忍受，那么我如何回到可以接受的状态？我必须何时开始行动？”另外还有两点很关键：(i) 我如何知道我的计划是否及时有效地做出改变？以及 (ii) 如果我们做出了错误的决策，那么成本和后果严重程度如何？不做出任何决策实际上是让命运决定。军队的格言是：“做最坏的打算，报最大的希望，接受任何结果”，然后采取行动。

CAN 公司的军事顾问委员会由 16 名退役上将和海军上将组成，他们研究问题来评估其对国家和全球安全的影响。

政府科学顾问的观点：Claire Craig 博士，英国政府科学办公室主任 [1]

为了解系统性风险我们必须充分利用各种形式的科学和学术证据。

“人类创造的基础设施和地球的自然基础设施对我们的生存和福祉至关重要。超过七十亿人居住在地球上成为可能，是因为我们有能力来改善我们的环境。我们走到今天，主要靠创造社会和物理结构，并发现如何利用地球上的化石能源为我们的现代世界提供能量。尽管我们拥有创新精神和创造力，但仍深深依赖于自然基础设施、与动植物健康之间的联系、天气、气候以及地球上物理和生物环境的其它各个方面 [7] *。”*

英国政府科学办公室为各种情况提供科学建议，包括福岛核事故或最近的埃博拉爆发等紧急事故以及对城市的未来进行长期探索。

的确在所有情况下，管理对决策者有意义的任何风险（或机遇）都需要自然科学和人类科学的证据。一般来说，这是因为评估风险及其应对措施需要洞察复杂系统的行为，而人类和物理行为在这些系统中耦合。另外，由于我们的目标是改变未来，因此证据必须促进行动，而促进行动的证据需要洞察人类的行为。

一个实际的例子来自英国《全国紧急事务风险清单》[8]。在此清单中，每种风险后果的概述都明确包括直接和间接影响以及系统性影响。例如，流感的潜在后果包括处理感染的直接医疗影响，以及导致社会和经济破坏的间接影响，例如对基本服务连续性的潜在威胁、生产水平下降、短缺和分配困难等。

i 作者的观点代表个人

在最近的埃博拉紧急事件中，英国与美国、法国及其它合作伙伴合作，从源头上管理风险。要做到这一点，需要建立复杂的流行病学模型。但决策者还会借鉴行为科学和社会科学，包括人类学和历史学的知识，帮助理解诸如传统丧葬习俗等人类行为。这让人们更好地评估和预测风险，并制定和监控干预措施尽快降低感染率。

短期风险中所面临的事实对于长期风险同样适用。这也确实是我们对气候风险的理解。我们需要考虑作为风险乘数的气候变化的影响和不同风险来源之间的相互依赖关系[9]。 GO-Science 远见计划已经通过国际移民模式和洪灾风险[10]展示了气候变化与社会、技术和经济驱动因素之间如何紧密联系，共同影响未来的全球粮食和农业体系。这些研究表明，我们需要从孤立地考虑气候变化中的物理现象，转变为更好的理解气候变化与社会、技术和经济驱动因素是如何密切联系的。

风险评估在空间和时间的范围

风险评估为决策提供可能的后果分析，从而为决策提供依据。因此，风险评估应该具有广泛的空间和时间范围，足以包括决策的最严重后果，这是合乎逻辑的。

如上所述，我们风险评估的主要目的是为政府做出关于排放的决定提供依据。世界各地都面临着温室气体排放的后果——气候变化的风险，因此我们的风险评估应该覆盖全球范围。我们没有试图给出全面的范围，但我们描述了一系列世界范围的风险，我们认为国家（尤其是那些具有较大经济规模和政治影响力的国家）政府的决策者对这些风险会特别感兴趣。

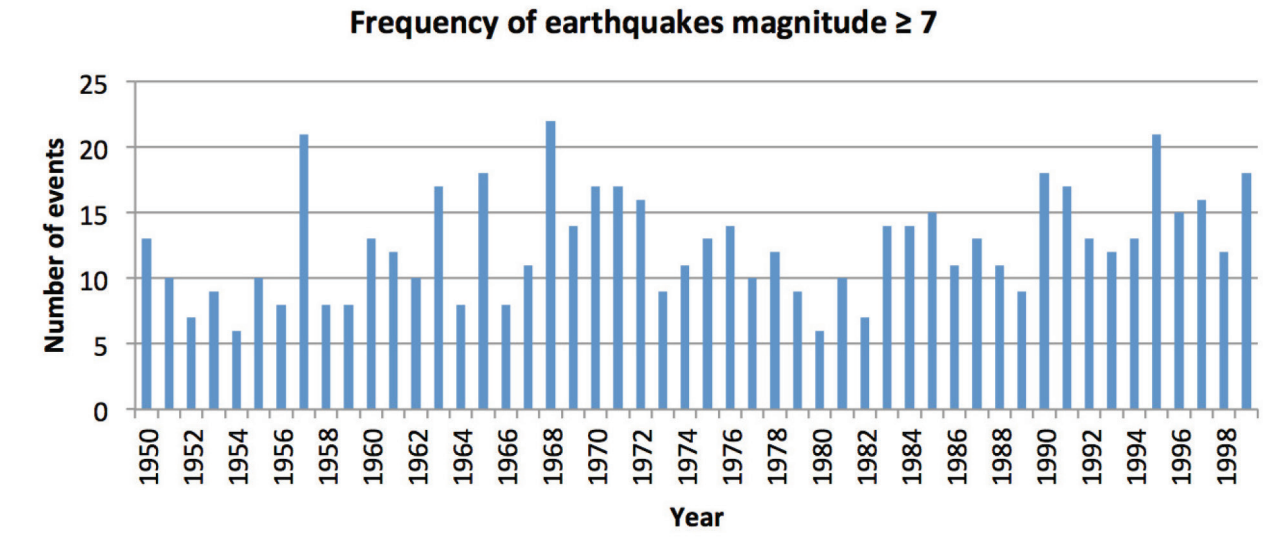
也许，气候变化风险评估的逻辑范围并不是那么显而易见的。风险评估通常专注于相对较短的时期：英国政府的*《全国紧急事务风险清单》*只考虑未来五年的情况，而*《国家安全风险评估》*只考虑了未来 20 年的情况。这么短的时间内气候变化的风险与排放决策无关：气候系统的惯性意味着我们现在对减排无动于衷会对至少未来几十年产生巨大影响。

与排放有关的决定所产生的影响从中期开始，这种影响会持续很长一段时间。燃煤发电厂一旦建成，很可能会持续运营几十年（但也不是必然的：如果收回成本，它可以提前关闭）。一旦二氧化碳排放到大气中，很大一部分将长期停留在大气中，一万年后仍会改变气候[11]。 因此从长远角度进行气候变化风险评估是合理的。

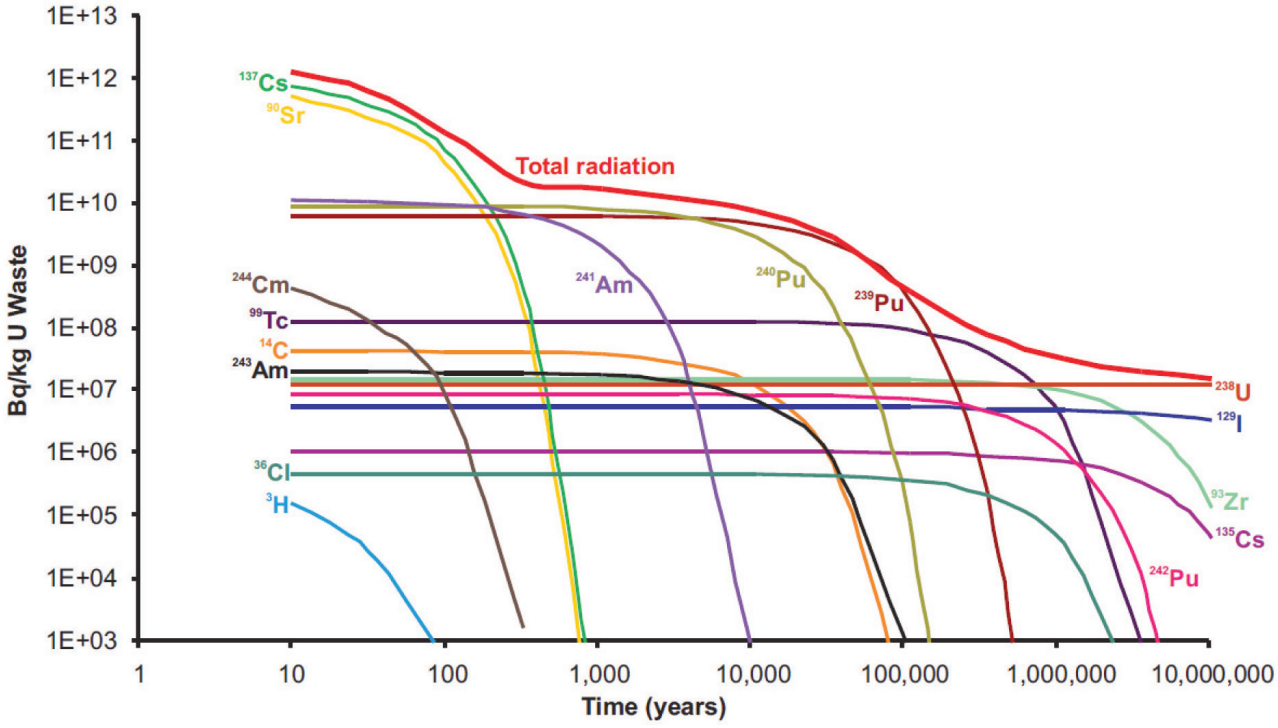
从长远角度考虑并非气候变化风险评估所独有的：在评估放射性核废料存储产生的风险时，政府考虑的时间范围是数千年、数万年甚至一百万年[12]。但是气候变化有一个使得长远考虑尤为重要的特征：气候变化的风险会随着时间的推移而增加。这的确有可能，因为只要有温室气体排放，其在大气中的浓度就会增加，全球气温就会随之上升。这使得气候变化的风险完全不同于地震等自然灾害的风险，因为自然灾害的风险往往是随时间推移基本恒定在一个既定水平，而放射性废物储存的风险会随着时间的推移逐渐减少（见图 6）。对于气候变化，如果我们不长远考虑，就意味着没有考虑最大的风险。

风险评估第一部分：遵循高排放量路径的概率是多少？

图表 6：**随时间的推移而几乎保持不变的风险**：大地震来源 [13]

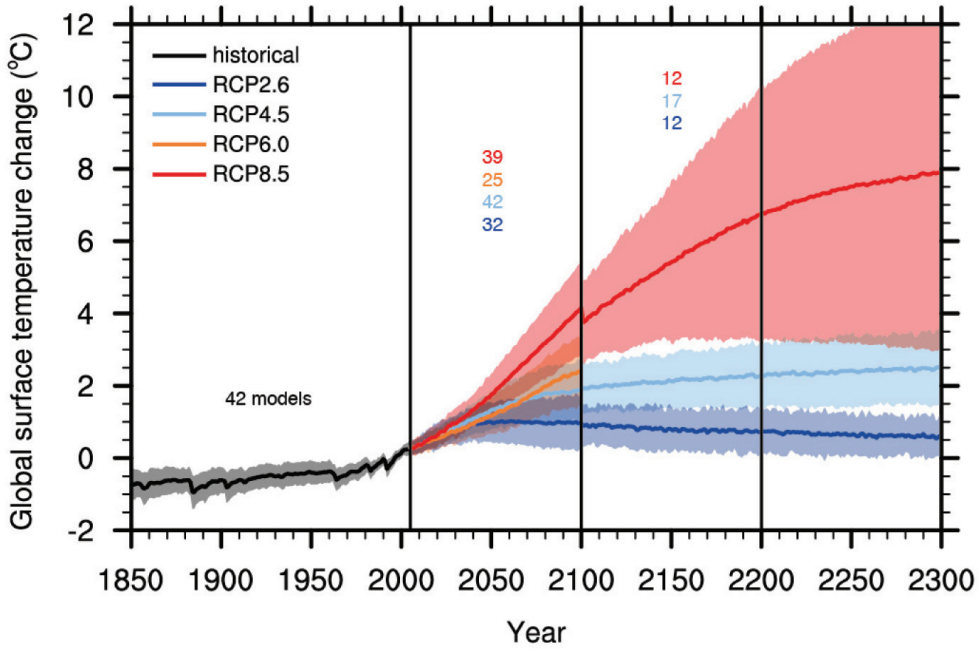


图表 7：**随时间的推移而下降的风险**： 核废料的放射性来源 [14]



风险评估第一部分：遵循高排放量路径的概率是多少？

图表 8：**随时间的推移而增加的风险**：气候变化来源 [15]



为了风险评估，我们没有对考虑的时间范围设定限制。然而在实践中，风险评估有意义的时间范围取决于可用信息的质量以及风险的复杂程度。对于气候系统中大规模、移动缓慢的组成部分，例如大陆冰层，考虑数百年甚至数千年后的变化是可能而且有益的。对于气候变化的直接风险，如对农作物产量的影响，我们一般评估到 2100 年的变化；在一些情况下，我们发现可以考虑更久远一些。对于系统性的风险，例如对全球安全的风险，考虑至本世纪末的情况极其困难。

总的来说，我们的目标是在信息或合理判断允许的情况下尽可能考虑最久远的情况，然后让读者自己决定在多大程度上重视不同时间段可能发生的风险。

尾注

1. 用于确定这些原则的来源包括：
   (i) 欧洲风险管理协会（2013 年）。《企业风险管理的结构化方法和 ISO31000 的要求》。来源于： http://www.ferma.eu/app/uploads/2011/10/a-structured-approach-to-erm.pdf
   (ii) 国际风险治理委员会（2008 年）。《国际风险管理理事会风险治理框架的介绍》。来源于： http://www.irgc.org/risk-governance/irgc-risk-governance-framework/
   (iii) 英国内阁办公室（2012 年）。《英国全国紧急事务风险清单》。
   (iv) 英国政府。《风险评估指南：英国如何评估紧急事故的风险》。来源于：https://www.gov.uk/risk-assessment-how-the-risk-of-emergencies-in-the-uk-is-assessed
   (v) 英国政府。《简报 2：国家安全风险评估》。
   (vi) 普华永道（2008 年）。《风险评估实用指南》。
   (vii) 英国安全与健康执行局（HSE）（2001 年）。《降低风险，保护人们：HSE 的决策过程》。来源于：www.hse.gov.uk/risk/theory/r2p2.pdf
   (viii) 发起机构委员会（2004 年）。《企业风险管理——整体框架》。
   (ix) 美国司法部（2005 年）。《评估和管理恐怖主义威胁》。
   (x) 工程委员会（2011 年）。《工程行业的风险指南》。来源于：http://www.engc.org.uk/about-us/guidance-on-risk

风险评估第一部分：遵循高排放量路径的概率是多少？

2. 普华永道（2008 年）。《风险评估实用指南》第 15 页。
3. Oliver Bettis（2014 年）。《风险管理和气候变化：破产风险》。来源于：http://www.lse.ac.uk/GranthamInstitute/wp-content/uploads/2014/01/Oliver-Bettis-Risk-Management-and-Climate-Change-Risk-of-Ruin.pdf
4. 内阁办公室（2012 年）。《全国性紧急事务风险清单》第 8 页。
5. 国际风险治理委员会（2008 年）。《国际风险管理理事会风险治理框架的介绍》第 8 页。
6. PALEOSENS 项目成员（20120）。“理解古气候的敏感性”。《自然》491, 683-691. doi:10.1038/nature11574. 又见 Kirby, A.“地球可能对二氧化碳‘双重敏感’”。《气候新网络》。http://www.climatenewsnetwork.net/2013/12/earth-may-be-doubly-sensitive-to-co2/
7. 2014 年政府首席科学顾问年报（2014 年）。《创新：管理风险，而不是避免风险》。见 https://www.gov.uk/government/publications/innovation-managing-risk-not-avoiding-it
8. 英国政府（2015 年）。《全国紧急事务风险清单 2015 年版》。见 https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/419549/20150331_2015-NRR-WA_Final.pdf
9. 关于“气候变化的国际维度”的远见报告，2011 年 7 月；https://www.gov.uk/government/publications/international-dimensions-of-climate-change
10. 政府科学办公室（2011 年）。《粮食和农业的未来》。见 https://www.gov.uk/government/publications/future-of-food-and-farming; 政府科学办公室（2011 年）。《迁移和全球环境变化：未来的挑战和机遇》。见 https://www.gov.uk/government/publications/migration-and-global-environmental-change-future-challenges-and-opportunities; 政府科学办公室（2004 年）。《未来的洪水》。见 https://www.gov.uk/government/publications/future-flooding.
11. Inman, M.（2008 年）。“碳是永久性的”。《自然气候变化报告》。来源于：http://www.nature.com/climate/2008/0812/full/climate.2008.122.html
12. 美国核未来蓝丝带委员会（2012 年），《致能源部长的报告》。第 90 页，来源于 http://energy.gov/sites/prod/files/2013/04/f0/brc_finalreport_jan2012.pdf 感谢伦敦经济学院的 Bob Ward 指出这一点。
13. 来源于 http://seismo.berkeley.edu/outreach/faq.html
14. 来源于 http://blogs.egu.eu/network/geosphere/2015/02/02/geopoll-what-should-we-do-with-radioactive-waste/
15. 完整的 IPCC 标题：根据 CMIP5 浓度驱动试验，全球年平均地表气温异常的时间序列（相对于 1986 至 2005 年）。对于每个 RCP 情景，图中显示出预测的多模型平均值（实线）和各模型分布中（阴影部分）5% 至 95% 的范围（±1.64 标准差）。2100 年处中断，是由于不同数量的模型延伸至 21 世纪以后，并没有物理意义。每个模型仅使用一个集合，图中的数字表示用于不同时间段的不同模型的数量。RCP6.0 情景只有两个模型可用，因此没有预测 2100 年以后的范围。来源：图 12.5, Collins, M., R. Knutti, J. Arblaster, J.-L. Dufresne, T. Fichefet, P. Friedlingstein, X. Gao, W.J. Gutowski, T. Johns, G. Krinner, M. Shongwe, C. Tebaldi, A.J. Weaver 和 M. Wehner（2013 年）。“长期的气候变化：预测、承诺和不可逆转性。”《2013 年气候变化：自然科学的基础》IPCC 第五次评估报告第一工作组供稿 [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex 和 P.M. Midgley（编辑）]。英国剑桥和美国纽约：剑桥大学出版社。

风险评估第一部分：

全球排放量

遵循高排放量路径的概率是多少？

风险评估第一部分：

全球排放量

遵循高排放量路径的概率是多少？

该节的供稿作者：Daniel Schrag 教授[i]，齐晔教授[ii]，Arunabha Ghosh 博士[iii]，Anil Jain 先生[iv]，周大地教授[v]，Sir David King 教授[vi]，David MacKay 教授[vii]，Elmar Kriegler 博士[viii]

在风险评估的这部分，我们试图探讨不同的全球未来排放量路径的相对可能性。该方法与气候变化评估的方法有所不同；在气候变化的评估中，我们假设所有排放量路径具有“相同的可能性”，而不考虑各自的概率。首先，我们会解释为何要采取不同的方法。

3. IPCC 情景的历史和目的

1992 年，政府间气候变化专门委员会（IPCC）开发了一系列情景（IS92）来评估未来温室气体的轨迹和未来的气候。使用情景的目的是让气候评估在同样的温室气体排放量情况下比较气候模型的结果。一共有六个情景，涵盖范围广泛，其中最低排放量情景为二氧化碳排放量到 2020 年达到最高值（每年低于 80 亿吨碳），而最高排放量情景为 21 世纪排放量稳步增加，到 2100 年碳排放量达到 350 亿吨。

2000 年，为了准备第三次评估报告，IPCC 发布了排放情景特别报告（SRES），取代了原先包含 40 种不同情景的 IS92，将情景按照控制排放的主要因素分为六大类。对于排放情景特别报告中的情景，每一类情景都对人口、经济增长、附件 I 国家与非附件 I 国家之间的经济差距和能源技术进行了预测。这些情景涵盖的范围比 IS92 情景的范围略窄，但仍然包括一个低排放情景（即本世纪大部分时间排放下降的情景）以及几个高排放情景（即到 2100 年排放持续增加的情景）。

在第五次评估报告中，IPCC 改用一组新的情景，称为“典型浓度路径”（RCP）。RCP 不再明确描述经济增长或人口增加等不同的社会因素，相反，RCP 描述导致 2100 年四种辐射强迫水平（+2.6, +4.5, +6.0 and +8.5 瓦 / 平方米）的种排放路径。RCP 是首次明确考虑 2100 年以后排放量的 IPCC 情景。从各种建模研究中我们得知，气温上升峰值主要取决于二氧化碳这一最重要温室气体的全球累积排放量，因为大部分二氧化碳在大气中停留成千上万年。将情景延伸至 2100 年以后非常重要，因为这样强调了稳定辐射强迫需要温室气体排放量最后降至接近零的水平。然而，由于社会因素不确定，因此 RCP 可能根据不同的社会经济发展轨迹而得出，例如，由于经济增长放缓导致的能源消费量增长放缓，可能抵消转向非化石能源系统的速度放缓或全球人口增速加快的因素。[ix]RCP 情景的简单性是一个优势，但是也让人们理解温室气体排放的潜在驱动因素变得有些困难。

---

i 哈佛大学环境中心主任
ii 清华大学，清华 - 布鲁金斯公共政策研究中心主任。
iii 能源、环境和水资源委员会 CEO
iv NITI（印度国家转型委员会）资深能源分析师。Jain 先生以个人身份提出观点，不一定代表 NITI 的官方观点。
v 中国国家发展和改革委员会能源研究所前所长。
vi 英国外交及联邦事务大臣的气候变化特别代表。
vii 剑桥大学工程学钦定教授；英国政府能源和气候变化部的前首席科学顾问。
viii 波茨坦气候影响研究所可持续解决方案副主席。
ix 该特点是新的情景过程中气候和社会经济情景并行发展中发现的（特殊问题：为气候变化研究开发社会经济情景的框架，气候变化 122(3)，2014 年）。目前，共享社会经济路径（SSP）扩大了 RCP 及其相关排放量情景的范围（https://secure.iiasa.ac.at/web-apps/ene/SspDb）.

风险评估第一部分：遵循高排放量路径的概率是多少？

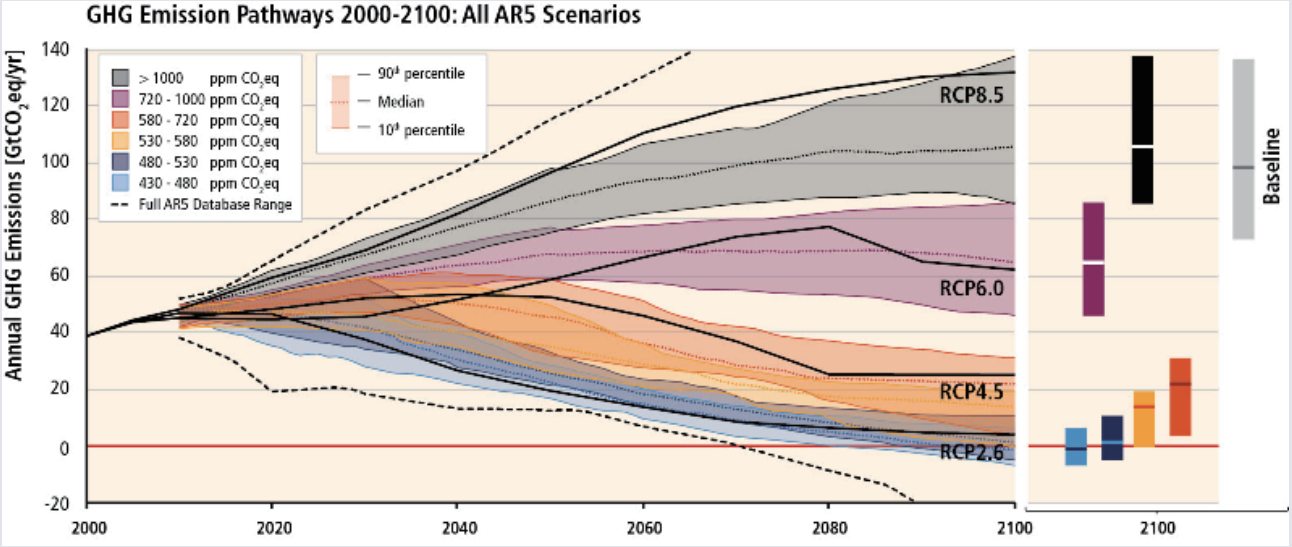
我们从来没有将这三代 IPCC 情景视为未来的“预测”，而仅仅是未来温室气体排放的不同可能性。这使气候科学评估主要专注于碳循环和气候系统，而不需要面对影响全球温室气体排放随时间变化的大量因素。考虑到所有参与国达成共识的复杂性以及所有社会因素的不确定性，人们就很容易理解为什么目前的研究避免讨论不同情景的概率。如果目标仅仅是评估气候科学，那么考虑一系列不同的排放轨迹、然后专注于碳循环和气候系统如何相互作用的方法，是非常合理的。

同时，IPCC 关于减缓气候变化的报告（“第三工作组”）所评估的情景，范围更广且深入地探讨了社会、政治、经济和技术因素是如何影响未来全球排放路径的。该工作有助于阐明未来排放可能的合理范围（见“设定可能的范围”部分），并帮助我们理解不同变量的相对重要性。

设定可能的范围

全球能源、土地利用、人口和经济的模型提供了根据社会经济的变化趋势和政策选择预测未来排放量的方法。近年来，这样的模型已经用来生成一千多个排放情景。综上所述，这些模型让我们了解本世纪全球温室气体排放的可能范围（见图 1）。

图 1：**IPCC 第五次评估报告第三工作组研究的排放情景。情景根据 2100 年二氧化碳的当量浓度进行分类（见不同的色块）。**[x] 来源：IPCC 第五次评估报告第三工作组图 6.7[1]



x 来源图的标题：全球二氧化碳的排放路径和表 6.2 规定的不同类别的京都气体。带状表示数据库中情景的第 10 到 90 个百分点。右上角的灰条表示基准情景的第 10 到 90 个百分点（见第 6.3.1 节）。底部表示对于 430-530ppm 和 530-650ppm 二氧化碳当量的排放情景，包括和不包括净负排放量大于每年 20Gt 二氧化碳当量的情景。来源：第五次评估报告第三工作组情景数据库

范围的最顶端是假定不采取任何减排措施而且化石燃料（尤其是煤）供应量、经济增长和人口增加都比较高的情景。在这些情景下，碳排放量到本世纪末将是现在的三倍以上。对于 IPCC 第五次评估报告中假定不采取任何减排措施的所有情景，不管如何假设人口增长、经济增长、碳排放强度和化石燃料供应的情况，本世纪排放量都会持续增加。在这些情景下，一般来说本世纪末排放量将达到 2010 年水平的两倍以上。

在考虑了各个国家和地区已经宣布或实施（并表现出在更久远的未来保持同样努力）的一些减排措施的情景下，碳排放量在本世纪中叶之前持续增加，并在本世纪末缓慢回归到当前的水平。

“气候稳定情景”是根据气温上升幅度或温室气体浓度的目标逆推出来的。范围最底端是符合有较大可能性将全球温升幅度控制在 2℃ 范围内的情景。这些情景一般要求到本世纪末达到近零排放，并要求能源供应和土地利用领域实现负排放以抵消土地利用排放的其它温室气体和运输部门的二氧化碳排放。

4. 从“风险”的角度分析排放情景

在本文中，我们的目的是评估气候变化给各国带来了哪些风险。排放路径（和累积排放量）最终将控制全球气候变化的幅度，因此必然会是评估工作的核心组成部分。但如果说风险是概率和影响作用力的产物，那么不估算概率，就无法估算风险。出于这个目的，仅仅设定碳中和的排放情景是远远不够的。

不同排放情景的概率评估能够帮助各国政府评估气候变化的风险，并做出正确的风险管理决策，从这方面来讲概率评估似乎发挥着根本性的作用。如果根据目前可用的信息（即使经济发展或技术变革等因素存在很大的不确定性），一些排放情景发生的概率要大于另外一些，那么让世界各地的政策制定者了解这些判断结果就显得至关重要。但如果政策制定者不知道这些判断结果，那他们要么就会曲解专家基于这种判断的排放情景选择，要么就会在没有明确说明的情况下，根据自己的概率估算进行决策。[2]

然而，对全球不同排放情景进行概率评估做起来比说起来难度要大。先不论其它温室气体和土地利用带来的二氧化碳排放量，仅仅预测未来全球化石燃料消耗产生的二氧化碳排放量，就需要预测未来两个世纪甚至更久远的全球经济增长和技术变化趋势，以及气候政策给排放量带来显著影响的可能性。我们仍然面临很多的不确定性，技术、政治和社会上各种出其不意的变化很有可能彻底改写答案。因此，评估工作显得异常艰巨。

作为着手点，我们可以先了解一些针对能源和排放情景已经得出的概率判断结果。IPCC 使用和审查的排放情景范围没有涵盖所有的可能性：燃烧所有可用的地下化石燃料会带来高排放量，其持续时间会比最高排放量情景路径都要长；而从理论上来说，经过大规模的碳捕获并将其储存在地下，碳排放量就会低于最低排放量情景路径。该排放情景范围的判定除了考虑其物理可能性，更多的还要考虑其合理性。一项基于碳排放情景的研究[3] 把具有“经济可行性”碳价格的上限设定为每吨二氧化碳 1000 美元，也得出了类似的判断结果。而另外一项研究得出结论，虽然模型能计算出本世纪末全球气温上升 2℃ 的气候路径（全球碳排放量于 2030 年开始下降，随后急速下降），但实现这些减排目标的难度很大，导致“在现实中几乎不可能实现这样的碳排放途径”[4]。而在这些情况下，我们很大程度上基于对政治的理解做出判断，而且以实际限制条件和技术难度的评估为依据。在这些实例中也很难去区分“不可行”、“不太可能”和“非常不可能”等概念的差别。

在本报告中，我们试着基于这些同样的因素做出判断。通过审视本世纪全球碳排放量的大致合理范围，我们提供了两种不同的方法来评估该范围内不同排放情景的概率，然后结合这两种方法得出最终结论。首先，基于对一些主要国家和地区的政策、计划和经济环境的了解，我们研究其未来几十年的排放路径。然后，我们要研究一系列的技术创新，需要整合其中一些技术来最终取代能源结构中的化石燃料，并实现二氧化碳的近零排放。实现这些技术创新的时间表，以及必要的能源基础设施建设都会在一定程度上限制不同排放情景发生的概率。

5. 目前的政策和计划对短期排放量的影响

在过去的两年里，一些最大的国家和地区已经在制定稳定或降低其温室气体排放量的目标方面取得了进展。其中一些进展可能是通过可再生能源技术（尤其是风能和太阳能光伏技术）价格的下降而取得的。此外，经济体大幅减少能源密集型行业在未来几年也可能发挥重要作用。下一小节，我们将回顾美国、欧盟、中国和印度温室气体排放可能的变化趋势，并简要讨论在未来几十年控制其温室气体排放量的因素。虽然该分析无法让我们评估进一步减排从而最终稳定大气中温室气体含量的时间和概率，但可以让我们定性地了解哪种 IPCC 排放情景更有可能发生。

美国

美国的温室气体排放量比 2005 年降低 10% 以上。其中一部分原因是 2014 年夏季之前持续的高油价，导致乘用车的行驶里程减少。2008 年金融危机的经济影响也是降低能源需求量增长的一个因素。最后，页岩气生产导致天然气价格持续走低，电力部门大量减少了煤炭消耗，这也是排放量下降的一个重要因素。另外，奥巴马政府已经采取措施进一步降低排放量，提出到 2025 年温室气体的排放量比 2005 年降低 26% 到 28% 的目标。为了实现该目标，美国环境保护署已经制定了两条联邦政策，旨在减少交通和电力部门的排放量。在各州的层面，美国也开展了重要的政策活动，尤其是加州在整个经济范围内实施的碳排放限额与交易体系，以及东北部的几个州针对电力部门的碳排放限额与交易市场。

降低温室气体排放量的第一个重要的联邦行动是修订企业平均燃油经济性标准。现在，这些标准要求到 2025 年乘用车的平均性能相当于 54.5 英里 / 美制加仑（65.5 英里 / 英制加仑）。此外，奥巴马政府于 2011 年首次制定了 2014 至 2018 年重型卡车、公共汽车和货车的燃油经济性标准。为了减少电力部门的排放量，美国环保署于 2012 年 4 月提出了针对新电厂的碳污染标准，禁止新建不具有减排技术（例如，碳捕获和封存技术）的燃煤电厂。最近，美国环保署颁布了一项针对现有发电厂的新规则，基于从煤炭转向天然气、提高现有电厂效率、提高电力需求效率及在目前的能源结构中增加可再生能源发电的潜力，规定了每个州的减排量。在未来数年，美国环保署的这些规定可能会在法庭上遇到挑战。能否成功实施这些规定对实现到 2025 年温室气体排放量比 2005 年降低 26% 到 28% 的目标至关重要。

在州的层面，加州通过了一项新的法律，提出到 2030 年温室气体排放量比 1990 年降低 40% 的目标。这是迄今为止美国各州最宏伟的减排目标，但是要准确地告知如何实现这些减排目标还为时过早。其它一些州也正在取得进展。例如，爱荷华州目前超过 30% 的电力来自风能发电。东北部的几个州通过了《区域温室气体减排行动》，这是电力部门的限额和交易体系。在刚开始的几年设定了比实际排放量高很多的限额，目前正在慢慢影响电力部门的新投资。

奥巴马政府的新举措代表了美国政策的一个重要转变，世界各地对实现更加激进的温室气体减排目标产生了新的兴趣，但是取得真正的进展仍面临许多挑战。首先，石油价格大幅下降，因此在美国 2005 年至 2014 年交通部门减排量的基础上进一步增加减排量会更加困难。第二，美国环保署的新规则在法庭上遇到挑战，而且 2016 年可能有新总统当选，而且新总统可能反对这样的努力，这就意味着不能保证美国制定的 2025 年目标能够实现。

欧盟

自 1990 年以来，欧洲的排放量下降了近 20%，这在很大程度上是由于能源和气候政策，以及能源密集型产业在经济体中所占比例的下降。目前，欧洲的人均排放量高于世界平均水平，但只有美国、加拿大和澳大利亚排放量的一半左右。最大的减排量最初来自欧洲最大经济体大量减少能源结构中煤炭的使用量：1990 年以后，德国和英国大幅减少了煤炭使用量，开始使用天然气；法国对核能发电的依赖性加强，继续减少煤炭的使用量。

气候政策发挥了越来越重要的作用，尤其在通过直接补贴和投资组合标准来提高可再生能源发电比例方面。值得注意的是，1989 年德国率先实施上网电价，促进太阳能和风能设施的安装。2014 年，德国可再生能源发电占总发电量的 27%，其中太阳能和风力发电分别占 6% 和 8% 左右。2013 年，西班牙风力发电占总发电量的 20% 以上，同时在太阳能光伏和集中式太阳能发电方面也进行了大量投资。英国和丹麦是世界上率先安装海上风力发电设施的国家。碳定价机制与可再生能源补贴相互补充：欧盟的碳排放交易体系（ETS）适用于 31 个国家的 11000 多个发电站和工厂；在 ETS 运行的前五年，碳交易价格为每吨二氧化碳 15 至 25 美元。近年来 ETS 价格下降，英国和瑞典等国家实施了碳税。同时，监管标准也用来逐步降低汽车的有害气体排放量。

考虑到已经取得的进展，欧盟看上去有可能实现到 2020 年温室气体排放量比 1990 年降低 20% 的目标。欧盟的下一个目标是到 2030 年将国内温室气体排放量至少降低 40%，该目标也应该可以实现；但是超过该目标需要克服一些有碍减排速度提高的技术和政策挑战。东欧国家加入欧盟，一方面，欧盟的扩张减缓了整体的转变速度；另一方面，欧盟也将这些国家纳入其政策过程。

欧洲的主要经济体虽已逐步脱离对煤炭的依赖，虽然没有完全脱离，但也已经达到了难以简单复制的程度。只有低碳能源生产显著提升之后方可进一步降低电力供应中的碳排放。一些欧洲国家已经将放弃新建核电项目（如德国），而其它国家则将其纳入能源方案之中（如英国）。因此，可再生能源前景甚为重要。值得注意的是，可再生能源发电占总发电量比重较高的国家已经经历了可再生能源波动性的难题。西班牙和爱尔兰有时不得不因为风电超出管理阀值而关闭风力发电，而德国和丹麦则在太阳能和风能发电高峰时段增加电力出口。人们意识到，当可再生电力能源发电占总发电量的 20% 到 40% 之时，应极大地提高需求管理、智能电网与能源存储的水平。成本的持续降低有助于需求管理、小型电网与能源存储水平的提高，而增加欧洲大陆电网互联的措施也可以促进这一过程。同时，欧洲也需要开始降低供热与运输部门的碳排放，迄今为止这两个领域的进展仍参差不齐。

在政策方面，欧洲将继续改革欧盟碳排放交易体系（ETS），使碳排放价格维持在一个行之有效的高度。近些年，二氧化碳的价格为每吨 5 欧元左右，而且煤炭价格也有所下降，因此煤炭比天然气更具有竞争力。若要煤炭使用退出，则须扭转当前碳排放价格。ETS 改革如果能考虑 ETS 与可再生能源以及节能政策的相互作用，则会进一步加快煤炭退出能源市场。根据 ETS 的限额和交易体系，不论是新能源部署或者提高能源利率方面的进展都会使得碳排放价格下跌，从而降低了其它领域削减碳排放的积极性。因此，如若平衡可再生能源、能源效率与碳排放价格三个方面的政策，ETS 则要么需设定碳排放限额（可根据需要降低限额以保持价格有效），或者采取类似于固定碳税的措施。同样地，我们还需要改革生物质能政策，确保不会导致森林砍伐和运输领域的碳排放量增加。今年欧盟能源联盟的成立为我们未来几年在欧盟各国实现这些目标带来一些希望。

中国

30 多年的快速经济增长导致中国的碳排放量迅速增加。1990 年，中国与能源相关的碳排放量为 22.7 亿吨二氧化碳，略高于全球总排放量的十分之一；而美国的排放量超过 50 亿吨，接近全球总排放量的四分之一。2014 年，中国的碳排放量增加至 90 亿吨左右，接近 1990 年的四倍；而美国仅增加 5%. 事实上，中国在 2008 年超过美国，成为世界上碳排放量最高的国家。1990 年，中国的人均碳排放量不到全球平均水平的一半；2007 年，中国的人均碳排放量超过全球平均水平，现在已经接近欧盟 28 个成员国的平均水平了。

2009 年，中国根据《哥本哈根协定》制定了 2020 年碳管理目标，争取到 2020 年碳排放强度（以单位 GDP 的碳排放量衡量）比 2005 年下降 40% 至 45%。到 2014 年底，中国的碳排放强度比 2005 年低 33%，有望实现哥本哈根的承诺。同时，中国的碳排放总量持续增加，从 2005 年的 51 亿吨增加至 2014 年的近 90 亿吨。

尽管中国的碳排放总量持续增加，碳排放的增速自 2005 年以来却一直稳步下降，2014 年接近于零。几项不同的政府政策在降低碳排放增速方面发挥了关键作用。首先，所有重要行业的能源效率正在提高。到 2014 年底，中国的能源强度已经比 2005 年降低了约 30%. 现在，燃煤发电厂每生产 1 千瓦时的电使用的煤少于 290 克 (标煤)。中国最好的燃煤发电厂现已成为全世界节能的引领者，全国所有发电厂的平均效率已经达到世界顶尖水平。《千家企业节能行动》是一项全国性的计划，专注于中国最大的能源消费企业，五年内的减排量比《京都议定书》规定的欧盟的减排量要多。

减缓碳排放增速的第二个因素是可再生能源的发展。中国是全球可再生能源投资的引领者，在可再生能源方面的投资占世界总量的四分之一。中国有全世界 30% 以上的风力发电装机容量，2014 年新增风力发电装机容量约占全世界的一半。2005 年太阳能发电的装机容量是 700MW，到 2014 年底已经超过 28GW，在不到 10 年的时间内增加了 40 倍。到 2015 年底，中国有可能超过德国，成为世界上最大的太阳能生产国。

减缓碳排放增速的第三个因素是对空气污染的担忧。由于担忧空气污染，中国已经在重点地区设定了煤炭消费量的上限，而且最终将在全国范围内实施。因此，2014 年的煤炭消费量比上一年降低 2.9 亿吨，这有助于稳定中国的碳排放量。

第四点，一些省市级政府已经带头探索低碳发展道路。从 2009 年到 2012 年，42 个省市参与了国家低碳发展试点项目。这些试点项目似乎对其它地区和地方政府的选择产生了影响。

最后，中国经过深思熟虑做出决定，在覆盖七个省市的碳交易试点项目基础上，于 2016 年启动全国范围的碳市场对碳排放进行定价。一旦完成，中国的碳市场将成为世界上最大的碳市场，是欧盟的限额和交易计划规模的两倍多。

在取得这些进展的背景下，中国和美国于 2014 年 11 月 12 日签署了《中美应对气候变化联合声明》。根据该联合协议，*“中国打算在 2030 年左右达到二氧化碳排放量的峰值，尽最大努力提前达到峰值，并打算到 2030 年将非化石燃料占一次能源消费的比例提高至 20% 左右。”*[5] 这是中国第一次承诺总排放量的目标。假设这些目标都实现了，中国的碳排放量将持续增加，在未来 15 年增加目前水平的三分之一至一半左右，人均碳排放量达到 10 吨左右，然后趋向稳定或下降。

实现排放量峰值方面取得的进展大部分将归功于电力行业之外的工业部门减少煤炭的使用量。但中国联合协议最重要的部分可能是承诺实现非化石能源占总能源结构 20% 的目标，这将为 2030 年以后的减排做准备，届时非化石能源将开始取代化石能源。实现该目标并非易事，因为需要新增 800 至 1000GW 的发电容量（包括风能、水力、太阳能及核能发电），投资额高达 1.8 万亿美元。但如果实现了这些目标，规模经济就有可能降低这些非化石能源技术的成本；而本世纪中叶其它发展中国家面临着能源方面的选择，因此这些非化石能源技术能够在发展中国家得到更广泛的应用。

印度

印度面临着提高人们生活水平的发展挑战。人均能源消费量与生活质量有着密切联系，因此上述策略需要增加人均和国家能源消费量。如今，化石燃料约占印度主要商业能源的将近 90%，而且该比例在未来近期不可能下降。然而，印度在提高发电、照明和交通运输技术水平方面有着大量机会，可以通过减少能源需求来调整碳排放强度。同样地，印度每年拥有 300 个晴天，因此可以利用太阳能的优势，另外还有大规模风能发电的潜能。因此，未来几十年印度可以从需求和供应两方面采取措施，通过提高能源效率和可再生能源的利用，从而调整碳排放强度。

由于地理位置和应对不良影响能力较弱的原因，热带发展中国家受气候变化的影响比其它国家都要严重。这些国家的大部分农民基本靠天吃饭，人口密集，脆弱的经济更是削弱了他们抵御气候变化的能力。鉴于上述原因，印度政府竭力调整其发展计划来减少排放量，并执行了《气候变化国家行动计划》确定的八大国家计划的一系列措施，例如提高能源利用效率、发展太阳能与林业发展等。之前的计划委员会（现在被印度国家转型委员会取代）成立了委员会，建议在第十二个五年计划（2012 至 2017 年）中调整碳排放强度，甚至尝试包容性增长。最近几次，计划委员会开发了一种基于情景的分析工具（印度能源安全预测 2047），并结合英国发布的“2050 全球能源计算器”在线工具，来帮助决策者应对印度能源挑战。该工具的目的是减少能源进口依赖，同时确保碳排放量的降低，从而实现能源安全。

目前，印度位列中国和美国之后，是世界上第三大碳排放国（如果将欧盟视为整体，印度则位列第四）。然而，从 2010 年人均 1.7 吨二氧化碳排放量或 21 亿吨总排放量来看，印度在碳排放量仍然远低于其它国家。显而易见的是，印度的总排放量（以及人均排放量）将随着人们生活水平的提高而增加。2010 年，印度与能源消耗有关的人均排放量为 1.26 吨二氧化碳，根据印度采取措施调整碳排放强度的能力，到 2047 年可能增加至 3.3 至 5.1 吨。

2011 年，印度的人均能源使用量为 614 千克油当量，人均用电量为 684 千瓦时。在这样的低能耗水平下，印度很大一部分人无法获取现代能源，或者能源供应经常中断。消费模式主要是为了满足烹饪和保暖等基本生活需要，而用于交通、照明等提高“生活质量”的部分微乎其微。如上所述，能源的总消费量一定会增加，但是能源利用的效率可以通过采用技术、行为改变和改善规划以及基础设施来提高。到 2047 年（印度独立 100 周年），印度对建筑空间的需求以及对钢材、交通和烹饪、生活用电的能源需求将比现在增加至少 3 倍。因此，采用高效的建筑规范、更多地使用公共交通、使用电动车和高效的设备都将调整印度的碳排放强度。

同样地，在能源供给方面，煤炭预计仍然是重工业能源和电力生产的主要来源，可再生能源、天然气和能源电气化仍有前景。并网和分布式可再生能源都有可能帮助满足贫困人口的用电和烹饪方面的能源需求（作为协同效益，还可以鼓励发展乡村企业）。[6] 在运输领域，将需求和供应双方的干预措施相结合（通过改善城市规划、使用电动车和公共交通来减少交通需求），也可以调整能源消耗。到 2047 年，电力占一次能源供应量和可再生能源的比例将分别从现在的 16% 和 4% 增至 22% 和 29%，从而实现碳排放强度降低的目标。

其中两项举措尤其值得注意。第一个举措是关于提高能源效率的国家计划。印度已经启动了创造性的“执行、实现和交易计划”，为八个工业领域的工厂制定了能效目标。如果上述工厂不能完成目标，则需向超额完成目标的工厂购买额外的节能证书 (2015 年是交易的第一年)。通过 2013 年启动的“超高能效设备电器推广项目”，能效将成为家用电器的主要驱动因素。能效也将影响到民用建筑和商业建筑空调及制冷设备的化学制剂与技术选择。政府也在各城市制定了需求侧管理计划来降低能源消耗。国家太阳能计划已于 2010 年启动，至今已经部署超过 4GW 的容量。但是，最近政府宣布计划到 2022 年安装 175GW 的可再生能源发电的装机容量，包括 100GW 的太阳能发电的装机容量。仅仅实现太阳能目标就需要相当于印度太阳能装机容量每 18 个月翻一番的增长速度。另外，人们还需要清楚地了解以下因素对这个目标的影响：驱动印度能源需求的三个因素（能源的获取、安全和效率），新的联邦和各州的政策和激励措施，资本投资的创新融资估计将高达 1000 亿美元或更多，以及用于制造业、培训和就业的额外融资。项目开发商将不得不努力解决土地、电网和备用电源的成本和供应方面的问题。[7]

总得来说，随着未来 30 年能源消耗的增加，印度在降低其经济体的能源排放强度、能源部门的碳排放强度方面有着巨大的潜力。由于太阳能发展潜力巨大，因此太阳能光伏成本的降低可能对印度限制煤炭消耗量的增加特别有用。同时，很重要的是承认过去印度 GDP 的年增长率已经接近 9%，最近几年有所放缓。印度在第十二个五年计划（2012 至 2017 年）期间计划 GDP 每年增长 7% 以上，也计划未来几十年的长期复合年增长率达到 7%。电力部门每年的发电容量增长率接近 10%，其中化石燃料和可再生能源都是其中一部分。印度不能为了实现碳减排目标而推迟其发展，因此未来几十年印度的总体排放量可能显著增加。印度可以通过提高能源利用效率和推广低碳战略（即使在锁定相关基础设施投资的情况下），在一定程度上缓和排放量的增加。调整碳战略的协同效益也将用太阳能和风能等本地资源代替进口能源，从而有助于遏制能源进口。[8]

关于未来三十年的全球排放

这四个不同地区不同的情况对于不同排放情景的可能性来说意味着什么？目前欧盟和美国在减排方面的进展令人鼓舞，但是改变的速度仍不符合最低排放量情景。同样，中国宣布到 2030 年排放量将达到峰值对避免高排放量情景非常重要，但仍然不足以实现最低排放量情景。也许最重要的消息是全球可再生能源设施的发展以及随之而来的可再生能源价格的下降。如果印度和其它发展中国家（如撒哈拉以南非洲国家）能够比预期更快速地扩大可再生能源的使用，那么高排放情景就不可能发生了。但是各国都面临着可再生能源供应波动性的挑战和能源储存的技术挑战，因此可再生能源能否继续其发展趋势实现更高水平的渗透仍然存在着不确定性。

要实现低排放情景，即把全球温升幅度控制在 2˚C 以内的高概率情景，那么欧盟必须实现到本世纪中叶减排 80% 的目标；美国和中国都必须加快进展，在未来 20 年大幅减少煤炭消费量；而印度必须取消原计划的煤炭消费量的增加，而是扩大太阳能及其它可再生能源的发展。其它国家和地区也必须跟上步伐，使非化石能源技术最终将对经济发展发挥根本性作用。

6. 决定未来全球排放量的技术挑战

还可以采用另外一种方法来限制全球不同排放路径发生的可能性，就是通过技术变革的速度和能源基础设施投资来评估不同的排放情景。不同国家低碳能源系统的定量模型能够确定必须实现哪些技术创新或基础设施投资才能促进减排，实现近零的排放水平。在下一小节，我们提出了一系列关于能源创新和低碳能源系统的问题。不同的技术和方法会产生不同的组合，在不同的国家和地区也可能出现不同的组合，给任何国家都能带来无限的选择空间。下面我们会讨论到技术创新和投资相关的问题，而在实现世界近零排放的目标上不是对每一个问题的回答都必须持肯定态度。然而，通过建模可以清楚地表明，尽管还不能确定每次创新的确切贡献率，最终还是需要这些创新的。

这种方法的一个重要方面是按照部门来评估一个国家的能源系统。例如，在世界范围内几乎所有运输部门的能源供给都来源于石油。使用温室气体零排放的替代资源来取代石油，不仅需要发展客运车辆的技术（例如电池驱动的电动车），还需要发展货运柴油的替代技术（仅仅靠电池无法满足货运的能源需求），以及喷气燃料的替代技术。在下面的讨论中，我们不会指定某些具体的技术，而是会在更广泛的范围里讨论技术解决方案，还会考虑到意料之外的技术性突破。同时，通过整个世界以及各个国家的排放情景量化模型，从能源创新必须发生以及能源基础设施投资的两个时间尺度上来讲，我们可以清楚地区分低排放和高排放情景。

1） 我们能够利用能源储存、需求管理、备用以及其他方法对大规模、高比例的风能和太阳能进行管理吗？未来可再生能源的成本是否能下降到一定的水平，使其在世界电力系统中占主导地位？

在过去的十年里，在降低风力和太阳能的发电成本上我们取得了巨大的进步。陆上风力发电，如果具有位置上的优势，已经足以和化石燃料（例如煤炭和天然气）发电竞争。在世界各地，我们看到风力发电量占整体发电量的百分比正处于增长趋势，例如爱尔兰（19%）、阿鲁巴（20%）和丹麦（28%）等国家，以及爱荷华州（30%）等地区。丹麦和英国等国家已经安装了海上风力发电设施，然而相对于陆上风电设施而言，这是一个成本更高的选择。而在降低太阳能光伏发电成本方面取得的进展尤为显著，这首先要归功于德国大力实施上网电价政策，使太阳能发电的供电量占整体供电量的比例在 2014 年达到 6% 左右。随之在世界范围内，中国、美国（尤其在加利福利亚）和欧洲南部国家等都在大规模推动大型太阳能发电设施的安装。安装规模的快速扩张给世界各地（尤其是中国）的制造业带来利好，价格不断下降。在许多国家，大型太阳能光伏发电设施的发电成本现在每瓦不到 2 美元，这也就鼓励了印度等许多国家重新考虑发电容量的投资决策。

可再生能源发电规模的扩大推动世界各个国家和地区做出更大的努力，针对风能和太阳能的波动性特点制定管理战略。虽然在过去已经提出了许多方法，但是直到最近上述国家和地区才实现了一定的可再生能源普及程度，为企业创造了市场条件，使其通过部署储能和需求管理策略获得盈利。接下来的二十年至关重要，关系到各国是否能够突破目前波动型性资源 20%到 30% 左右占比的限制，并和能源储存、更好的传输系统以及需求管理策略结合起来，在可再生资源可用的时候可以把负荷增加到原来的数倍，来实现更高的可再生能源渗透率。许多理论研究表明可能实现这种策略，但现在仍然不能明确细化其实施过程以及额外费用。另外，人们也可能重新对聚光太阳能发电技术以及其它可再生能源技术产生兴趣，因为它们本身具有一定的储能功能。对于拥有丰富天然气资源的地区（例如美国）而言，使用天然气涡轮发电作为备用电源可能有利于可再生能源的扩张。但在许多其他地区（例如印度），这样做都不会有什么效果。此外，如果使用化石燃料系统作为备用资源，在未来就无法按照要求实现大幅度的减排。

2) 从成本、安全性和扩散风险的角度出发，电力部门会认真考虑核电吗？

在世界范围内，英国等地区可再生资源有限，这决定了核电在实现其低碳排放目标计划中发挥了重要的作用。即使是在拥有大量可再生资源的国家，其储存或需求管理成本以及可再生能源实现深层渗透的可能性都存在着不确定性，而核电具有高度可靠性，对于实现零碳排放的基荷供电是一个具有吸引力的选择。

在未来几十年里，我们面临的挑战是降低核电成本，同时提高其安全性并尽可能地降低核武器扩散（包括核恐怖主义在内）等各种风险，并为处理核废料制定更好的策略。目前有很多关于新一代核电厂的提案，包括小模块反应堆，通过生产规模效益来降低成本，还包括具有更加标准化设计的大型核反应堆，通过简化工程设计和施工来降低成本，此外还有钍反应堆等其它新型反应堆。

在目前的核能部署工作上，中国发挥了主导作用。中国在建的核电反应堆有 24 个，在 2020 至 2021 年期间，中国有望把核电容量增加到原来的三倍以上，达到 60GW，到 2030 年其电容量有望达到 150GW。[9] 日本福岛海啸和核事故发生以后，德国和日本等国家已经开始放弃使用核电。即使对于致力于发展核电的国家，由于需要较大规模的资本投资，而且考虑到核电设计和施工试验会带来的风险，其核电技术创新进度本身也很缓慢。对于那些像美国一样拥有实质性核电计划的许多国家而言，由于 20 世纪 70 年代建设的核电站都已经退役，因此在未来三十年，高成本和安全相关的问题似乎会减少核电的使用。

3) 我们可以让乘用车行业彻底摆脱石油吗？（不考虑替换喷气燃料和柴油燃料的生物燃料）？

目前，运输部门的石油消耗是能源温室气体排放的最大来源之一。目前全球石油（包括液化天然气）日消耗量约为 9000 万桶，尽管美国和欧盟已经开始降低石油的消耗量，但是全球的石油消耗量还是会保持增长趋势。未来几十年只有在全球交通运输部门中大规模使用非化石燃料技术，才能够实现任何一种低碳排放情景并且使二氧化碳排放量保持稳定的适度增长（相对于现在的水平）。

当前电动车的技术正在取得巨大的进步，目前多家汽车制造商正在生产豪华版（特斯拉、宝马）和入门级别（雪佛兰、尼桑）的全电动汽车。然而，这些车辆的成本仍然很高；虽然在未来几年我们会在降低电池的成本上取得进步，但是目前这些车辆的价格大致相当于同类内燃机车辆价格的两倍。另一个创新领域是踏板车和摩托车等小型电动车，尤其是在中国和东南亚地区。虽然我们在电池电动车上取得的进展令人欢欣鼓舞，一些汽车制造商将氢燃料电池汽车作为非化石燃料运输的另一个替代方案进行投资。燃料电池汽车需要大量基础设施建设投资来运输和分配氢气，目前大规模的氢气制造来自于天然气，但是未来会来自于可再生能源。因此，以电池为动力的电动车最可能颠覆内燃机乘用车的技术，但燃料电池也可能会具有竞争力。

运输部门实现低排放情景面临的主要挑战是实现必要改变需要一定的速度和规模。2014 年，全球的汽车数量超过了十亿辆，而几乎所有车辆使用的都是内燃机。为了实现低排放目标，非化石燃料技术需要发挥颠覆性的作用，在本世纪中叶甚至更早主导世界各地销售的车辆。即使电动或燃料电池汽车能够与内燃机汽车竞争，在世界各地看到道路上行驶的车辆主要是电动或燃料电池汽车可能也需要几十年的时间。实现如此大的转变在制造和技术上是可能的，但只有做出重大努力才能在不久的未来实现一定的速度和规模。

4) 生物质或可替代性技术是否能以合理的成本替代柴油和喷气燃料？如何通过土地利用来管理生物质的影响？

未来实现非化石燃料经济面临的最大技术障碍可能就是如何取代目前用于航空喷气燃料和货运柴油燃料的石油。目前航空技术需要烃燃料，因为对燃料有高能源密度和低质量的技术要求。电动火车未来可以承担一部分货运，但是火车很难取代所有的卡车。在可预见的未来，由于动力电池技术面临功率—重量比的挑战，无论货运如何发展，都很难实现卡车货运的电动化。生物燃料可能替代石油衍生的柴油和喷气燃料。生物燃料通过各种生物化学和热化学工艺生产，包括在南非利用煤炭生产燃料的费托合成工艺。即使大幅度提升航空和卡车货运的效率，用生物燃料替代柴油和喷气燃料对于生物质原料的需求仍然是巨大的。例如，使用当前的费托合成技术每天生产1000万桶燃料(相当于目前石油需求的11%)，即使假设每公顷土地的生物质产量高达非常高(按照干重计算高达 20 吨），使用生物质作为制造原料仍然需要超过 1.25 亿公顷的农田。在世界各地粮食需求不断增长的背景下，目前还不清楚是否能够种植如此大规模的生物质作物，也不能确定每天 1000 万桶喷气和柴油燃料的产量就能满足能源需求。

目前已经开展了一些工作,研究回收生物燃料和化石燃料燃烧生成的二氧化碳并将其转化成燃料。该过程首先需要还原二氧化碳生成一氧化碳，然后使用可再生能源产生的氢通过费托合成工艺生成燃料。理论上，这是可能实现的，但化学还原二氧化碳生成一氧化碳是能源密集型的过程，而且实现其经济竞争力仍然是一个挑战。总体而言，即使大幅度提高石油的价格，并且设定高位的碳价，目前很明显仍然没有可用的技术能和石油匹敌。因此，很少有人致力于解决这个问题，而且未来几十年这似乎也不太可能成为首要工作。随着石油供应量下降，适当的石油替代技术终将出现，但等到大部分的石油储量被提取出来，也就不可能实现低排放情景的目标了。

5) 超大规模的碳储存可行吗（例如，每年数百亿吨）？

从排放源捕获二氧化碳，并将其储存在地质储层，也是减少二氧化碳排放量的一种方法，这种方法通常被称为碳捕获和封存（CCS）。通过 CCS 来实现低碳经济似乎特别具有吸引力，原因有以下几点。首先，CCS 可以让世界无需放弃已有电力基础设施的资本投资就能够过渡到低碳经济。目前全球有 2000 多家电厂的二氧化碳年排放量超过 100 万吨，这些发电厂的二氧化碳总排放量超过 100 亿吨，大约占全球排放总量的三分之一。从这些发电厂中选择一部分使用碳捕获技术进行改造，并选择适当的存储地点，这样在未来几十年里在继续使用其中一些设备的前提下，CCS 能够显著减少这些设备对环境产生的不利影响。

即使抛开大型燃煤电厂等现有化石燃料设施的使用，在水泥厂等产生固定排放源的工业部门中，也很难消除二氧化碳排放，因此想实现低碳经济，CCS 也是其重要组成部分。如果生物燃料成为货运运输和航空运输中非化石液体燃料的重要来源，那么生物燃料将会变成 CCS 一个特别重要的应用领域。无论是使用特定的技术把生物质转化为燃料，还是通过发酵或通过热化学反应生产燃料，生物燃料精炼厂都会集中排放大量的二氧化碳，但实现其减排的成本相对较低。这些设施在整个生命周期中的排放量是负值，因此 CCS 就可以被看作是从“空气中捕获二氧化碳”。

目前在世界范围内，利用地质储层的碳储存示范性项目为数不多。最成功的是位于北海的 Sleipner 油田，由挪威国家石油公司 StatOi 运营，自 1996 年以来每年向海底注入一百万吨二氧化碳。根据这方面的经验，无论是陆上还是海里，咸水层的碳储存有可能有效实现二氧化碳的永久性储存，但是现在还不知道如果 CCS 成为主导技术，地质储层是否能够容纳大量有待处理的二氧化碳（例如世界各地大型生物燃料炼油厂产生的二氧化碳）。二氧化碳储存的估算容量非常巨大，但一些研究从注入量限制、诱发地震的可能性以及泄漏的可能性等这些方面对该估算结果提出了质疑。除非在世界各地不同的地质环境中开展更多商业化规模的示范项目，那么就不可能保证 CCS 的使用规模达到一定程度，使其未来能够在低碳世界中发挥重要作用。

6) 能否大规模部署能够大幅度增加能源效率的技术和规划？

在提高能源效率方面，整个能源系统的所有部门都有巨大的潜力。很多研究特别指出建筑物；相对于目前的能耗水平，新型建材和新的建筑设计可以将建筑物的能源消耗量降低 70%以上，即使对于那些能源价格相对较高和已经实现高能效的国家来说也是如此。对于工业设施以及运输系统也有类似的观点，重点在于如何尽可能地使用更轻的材料（例如碳纤维）、更高效的电机和控制系统，并且改善城市规划，使用轻轨等更有效的系统。

通过减少工业产能所需的能源总量，能源效率在决定未来世界是遵循低碳排放还是高碳排放路径方面发挥关键作用。例如，如果乘用车用电力驱动，但重量更轻，比现在的车辆消耗的能源更少，那么需要建设的发电设施数量就要少得多。同样，如果生物燃料成为航空领域非化石液体燃料的一个重要来源，那么飞机能效更高，采用更轻的材料，就会减少炼油厂的数量，以及种植生物燃料所需的土地面积。

能效的显著提高虽然在理论上可能实现，但关键问题在于实际上能否在整个国家和地区范围内实现。一些人认为，许多能效的投资最终将减少投入，而且市场失灵会阻碍这样的投资。另一方面，能效取得的进展比预期要慢，导致某些经济学家开始质疑，对于能源效率和成本节约的分析是否正确。如果想在世界范围内限制排放量，并实现较低排放量的情景之一，那么从各个层面（小到电器和车辆，大到工厂和大型运输系统）尽可能多的实现能效收益将是至关重要的。

7) 快速建设大型能源基础设施的速度能有多快？

在全球范围内向低碳或零碳经济过渡需要对基础设施进行大量的全新投资，来取代现有基于化石燃料的系统。无论采用什么样的技术，新建设的基础设施将有很大一部分用来生产液体燃料。交通运输的电气化、工业能源需求以及建筑物的供暖都将大大增加对电力的总体需求，因此电力部门对基础设施建设会有更大的需求。如果电力需求有很大部分由风能或太阳能系统来满足，由于太阳能和风能与基于化石燃料的发电系统相比其容量因子相对较低（20% 至 30%），那么对新的容量需求将更大。因此，我们建设新的基础设施的速度可能会是限制我们降低排放量并实现低碳排放情景的能力的一个关键因素是。

例如在美国，目前新发电产能的安装速度是每年约 10GW。以这样的速率重建现有电网需要超过 100 年，但是建设大部分基于可再生资源的新能源系统电网需要的时间要少得多，而且发电量会成倍增长。在过去的十年里，中国一直在以每年大约 100GW 的速度建设新的发电容量，但是前提是其整体经济增长率超过 10%。对于其它国家而言，即使整体经济增长速度比较慢，其建立新基础设施的速度是否能达到足以降低全球温室气体排放量的程度呢？工业活动对于材料（例如水泥、钢等）的需求十分巨大，但并没有超出想象范围。然而，从风险分析的角度来看，似乎如果没有强大的政治意愿，那么就不太可能实现如此高水平的工业基础设施投资。

8) 从空气中捕获二氧化碳等突破性技术是否能够具有可行性？

在本次关于未来能源技术的讨论中，重要的是需要指出，预料之外的技术突破可能会改变我们对现有及未来技术选择的想法。这样具有突破性的一个例子就是除了结合 CCS 技术使用生物质（上面所讨论的），我们还可以以低成本发展从空气中捕获二氧化碳的技术。对于空气中碳捕获的成本估算目前变化幅度比较大，有几个小公司正在重点建设示范工厂。比起替代化石能源，通过这一技术以更低的成本实现低碳排放路径似乎不大可能，但如果空气中碳捕获具有经济可行性，那么就会提供另一种选择。特别需要指出的是，从空气中捕获二氧化碳不需要大量的土地面积来种植能源性作物，因而在生产非化石液体燃料中可能发挥着最重要的作用。

9) 即使存在大的经济诱因，如何在全球范围内限制如煤和油砂等低成本化石资源的使用？

最后一个问题是，是否有可能限制化石燃料的开采和消费，化石燃料资源丰富，因此很可能在下世纪及以后价格仍然会非常便宜。这些资源中最主要的是全球煤炭储量，目前代表了化石燃料探明储量中约 70% 的碳。煤炭资源总量（技术可采储量，不见得一定是经济可采储量）仍然很大，而且在整个俄罗斯和阿拉斯加还存在大量未被发现和未被开发的煤炭储量。油砂和页岩油等非常规石油资源也可以加入该碳库。

下个世纪某个时候石油储备开始萎缩，一个关键的问题就是这些化石资源是否会被用于生产液体燃料。在理想的情况下，具有颠覆性的新兴非化石燃料技术会使煤炭或非常规石油失去其经济性，从而避免了这个趋势的发生。但是，如果没有出现这样理想的情况，在开采化石能源并将其转化为液体燃料或合成气会带来高利润的情况下，是否仍有可能将这些化石燃料资源留在地下？这可能取决于全球对气候变化的关注是否提升到一定的高度，因而从政治、社会或道德的角度出发都不可能再使用这些化石资源，就像大多数国家从社会和政治上来讲雇佣童工等做法都是不可接受的。

从碳循环的角度来看，使用煤和非常规石油来代替常规的石油很显然会带来灾难性的结果。如果煤制油或页岩油成为世界能源系统的主要部分，这将扭转过去二十年在减排上取得的大部分进步，因此甚至中等排放情景也不可能实现。

从技术角度看待不同排放量情景概率的总结

前面的调查仅仅提供了关键技术问题的简要概述。事实上，上述的每个问题本身都可以拓展为一份独立的报告。在此讨论的目的并不是全面地分析全球能源系统的每个组成部分，而是简单地阐述世界实现低排放量路径必须实现的重要能源技术创新。

在快速降低全球二氧化碳排放量从而实现低排放路径方面，并不是每个问题的答案都是持肯定的态度。例如，无法想象非化石能源系统不使用核能（尽管核能让我们面临更困难的挑战）。但是，要将排放量限制在更有可能将全球温升幅度控制在 2˚C 以内的水平，需要对几乎所有问题做出积极的反应，这一点是毋庸置疑的的。然而，鉴于当前的技术发展水平，我们不知道这些问题的任何答案。另一个问题是时间。寻找技术解决方案，让我们自信地对这些问题做出肯定的回答，这需要快速实现，因为延迟将导致更多的碳排放到大气中。

为了对不同排放量情景的概率做出判断，我们面临的技术挑战的规模也证明了这样一个结论：实现低排放量情景似乎很不可能。要改变该结论，未来 10 到 20 年我们需要在能源技术创新方面取得重大的进展，对大多数关键问题做出积极的回答。

7. 结论

根据我们对主要国家和地区当前政策和计划的分析，未来几十年世界很可能继续遵循中等至高排放路径。如果欧盟和美国的减排目标和中国稳定排放量的目标能够实现，尤其是如果印度能够取消一部分原计划的新燃煤发电厂的建设，取而代之建设可再生能源设施，那么最高排放情景就不太可能发生了。但这只能实现中等排放路径，仍然远远超过将气候变化的影响控制在有害水平以下所需的排放水平。

实现低排放情景的技术挑战非常巨大，当前的政策也没有充分应对这些挑战。我们需要加强努力，加快能源技术的创新。由于许多创新通过部署大规模的能源系统而实现，因此需要全球的承诺。目前可再生能源（尤其是太阳能光伏系统）成本的发展趋势很有前景，但是对于实现未来几十年的排放目标来说仍然不够。

气候对人为温室气体排放的反应取决于二氧化碳的累积排放量。这就意味着部分减排是不够的，因为即使化石燃料燃烧少量但持续地排放二氧化碳，大气中的二氧化碳浓度仍将继续上升，从而带来更高的气候风险。加快化石燃料的使用，包括使用煤制液体燃料、开采甲烷水合物和开发页岩油，都可能扭转当前的减排趋势，导致排放量甚至比一些最高排放量情景还要高。在这种情况下，通过减缓经济增长和减少能源需求，气候变化本身就可能是排放量的最终限制因素。

尾注

1. Clarke L., K. Jiang, K. Akimoto, M. Babiker, G. Blanford, K. Fisher-Vanden, J.-C. Hourcade, V. Krey, E. Kriegler, A. Löschel, D. McCollum, S. Paltsev, S. Rose, P.R. Shukla, M. Tavoni, B.C.C. van der Zwaan, 和 D.P. van Vuuren, 2014 年：评估转变路径。出自：《2014 年气候变化：气候变化的减缓》。IPCC 第五次评估报告第三工作组供稿 [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel 和 J.C. Minx（编辑）]。英国剑桥和美国纽约：剑桥大学出版社，第 432 页
2. Schneider, S.H. （2002 年） ‘Can We Estimate the Likelihood of Climatic Changes at 2100?’《气候变化》，52，第 441 至 451 页。http://stephenschneider.stanford.edu/Publications/PDF_Papers/SHSClCh2100ed.pdf
3. Rogelj 等人（2013 年）。“2020 年的排放量水平要求将全球气温上升控制在 2°C 以内”，《自然气候变化》3，第 405 至 412 页。doi:10.1038/nclimate1758.
4. 波茨坦气候影响研究所（2013 年）。“可持续能源未来和气候保护路线图：SoSE 项目结果综合”。第 23 页 http://www.rose-project.org/Content/Public/RoSE_REPORT_310513_ES.pdf
5. 白宫新闻秘书办公室（2014 年）。《中美气候变化联合声明》。见 https://www.whitehouse.gov/the-press-office/2014/11/11/us-china-joint-announcement-climate-change

6. Arunabha Ghosh（2015 年）。“印度可再生能源大推进：有哪些驱动因素？”《原子科学公报》，已出版。
7. Arunabha Ghosh 和 Karthik Ganesan（2015 年）重新思考印度的能源战略。《自然》521(7551)：第 156 至 157 页。见 http://www.nature.com/news/policy-rethink- india-s-energy-strategy-1.17508.
8. 世界核能协会（2015 年）。《中国核电》 http://www.world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-A-F/China--Nuclear-Power/

风险评估第二部分：

直接风险

风险评估第二部分：

直接风险

8. 引言：一个长期的气候科学风险评估方法

人们认为，气候风险可以分为两类：极端天气事件风险和长期平均条件变化导致的风险。根据决策依据的性质，气候科学将以不同的方法评估这两种风险。

旨在为降低灾害风险的政策提供依据的评估自然会关注极端天气事件的风险。在任何既定的气候条件下，这些低概率、高影响事件都是“最坏情况”事件。因为极端天气事件当前已经造成了危险，而且可以提前几天或一个季节预测到，那么此类风险评估关注相对较短的时期也是合理的。旨在为适应气候变化的规划提供依据的评估也可能关心极端天气、随着时间的推移极端天气的频率或强度的任何变化以及在平均条件下的变化。对于一些规划，“最坏情况”可能是重要的；对于其它规划，“最可能发生”可能对政策决策更加相关。此类评估的时间段可能不需要超出相关经济部门的规划期。

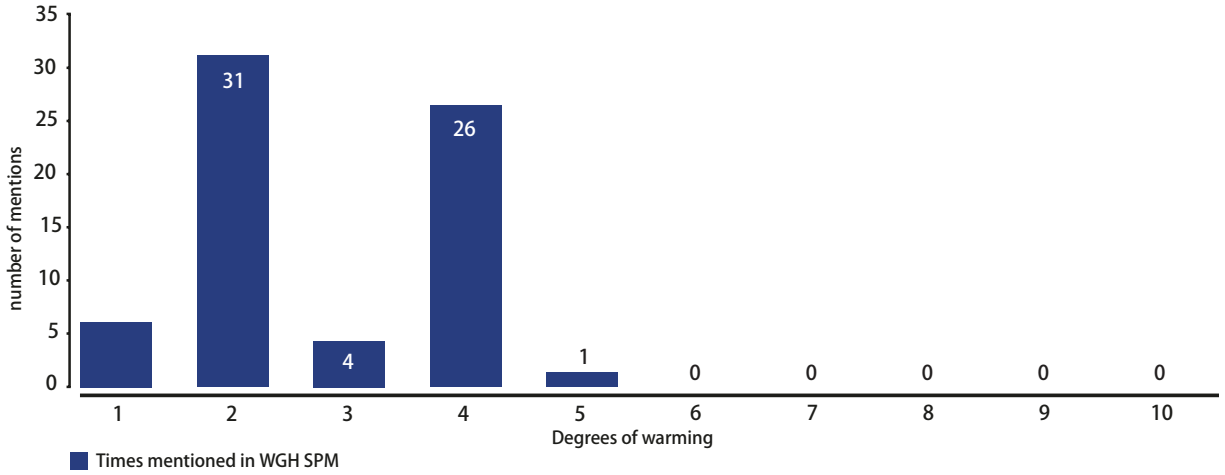
旨在为我们从整体上应对气候变化提供依据的风险评估必须考虑能够受到我们当前关于能源和排放量决策影响的整个时间段。该风险评估必须考虑“最坏情况”的结果，不仅要从个别事件的角度，还要从长期变化的角度考虑：平均条件自身可能达到极值的风险。在我们，这就是我们的报告该章节的目的。

对最重要的问题知之甚少

如果我们简单地认为全球平均气温上升代表气候变化的程度，那么影响最大的风险可能在气温上升幅度最高的情况下发生。在第九章，我们看到在非常高的排放量路径情景下，不能排除未来几个世纪气温上升超过 10°C 的可能性。处于气温上升幅度范围顶端的风险可能是与我们的评估最相关的风险。

然而，我们的大多数科学知识似乎是关于与较低幅度的气温上升有关的风险。图 1 显示出 IPCC《气候变化的影响、适应和脆弱性报告》中“决策者摘要”部分提及不同气温上升度数的次数。[1] 报告中多次提到气温上升 2°C 和 4°C 的影响，只有一次提到气温上升 5°C，没有提到气温上升超过 5°C 的情况。

图 1：在第二工作组决策者摘要部分不同升温度数被提及的次数



该报告的具体章节表明，相对而言人们对于气温上升较高度数带来的影响不仅知之甚少，而且这方面的研究也寥寥无几。以下的引述也说明了这一点：

- **作物**：相对而言，很少有研究考虑到全球平均气温上升 4˚C 或更高度数的情景下，气候变化对作物种植制度的影响。[2]
- **生态系统**：有极少的田野实验是关于本世纪末据 RCP8.5 情景预测的最高二氧化碳浓度下的生态系统，这其中没有一项实验考虑其它潜在的干扰因素造成的影响。[3]
- **健康**：大多数旨在量化与未来气候变化相关的健康负担方面的尝试都只考虑了全球气温低幅度上升的情况，一般是气温上升低于 2˚C 的情况。[4]
- **贫困**：尽管人们就未来气候变化对贫困影响的多样性达成高度一致的意见，但是很少有研究考虑更加多样的气候变化情景，或者气温上升 4˚C 及更高度数的可能性。[5]
- **人类安全**：目前关于人类安全和气候变化方面的许多文献都是基于当代的关系和观察，因此在分析快速或严重的气候变化对人类安全的影响方面较为有限。[6]
- **经济学**：经济损失会随气温上升的加快，但是关于气温上升大约 3˚C 或更高温度的定量估算却非常少。[7]

因此我们得出一个简单的结论，即我们需要了解更多气温上升较高度数带来的影响。但在许多情况下，这是很困难的。例如，由于遥远的未来气候变化非常大，因此几乎不可能预测错综复杂的动态系统（如生态系统或大气环流模式）可能发生的变化。

以决定我们希望避免的风险为起点

与其试图预测那些不可预测的风险，一个更易于管理的方法是以我们进行风险评估的第一个原则为起点：评估与目标相关的风险。或者换句话说：关注我们希望避免的风险。按照这一原则，风险评估通常是首先确定我们希望避免的影响（或影响的严重程度），然后评估其概率。[i] 如果风险随着时间的推移而变化，那么相应的方法是随着时间的变化评估其概率。从概念上讲，这种方法与先问最可能发生的风险、然后评估可能对我们的利益产生怎样影响的方法正好相反。

在这部分，对于我们考虑的每一个气候科学领域，我们都是首先问***“我们希望避免什么风险”，然后再问“这种风险发生的概率如何，以及概率随着时间的推移是如何变化的？”***

i. 见英国《全国紧急事务风险清单》案例。

识别最严重的风险

风险评估和风险管理的措施往往特别关注影响变得非线性或不可逆的阈值，或者在其之上没有更严重影响发生的风险。例如，关于地震中建筑物结构完整性的规定、保险公司的资本储备要求以及工作人员的健康和安全标准相对应地非常注重避免建筑物倒塌、保险公司破产和工作人员死亡的非线性影响。[8,9,10]

在可能的情况下，我们已经确定希望避免的影响严重程度的阈值或间断点。如果没有明显的阈值，我们也通过问*“可能发生的最坏情况是什么”*这一简单的问题来试图确保能够识别最严重的风险。

使用最佳的可获得信息

根据我们试图回答的问题，最佳的可获得信息可能是物理定律、模型的输出数据或者专家的判断。例如，为了进行风险评估，我们可能需要使用以上所有的信息，但是我们需要记住这些信息的可靠性程度不尽相同。

该报告中，我们依据科学进行风险评估；即便如此，我们仍需要记住文化偏好也可能影响专家做出判断的方式。在关于“风险评估原则”的章节，负责再保险的主管 Trevor Maynard 称，“保守的”估计一词的含义在科学领域和保险行业似乎相反，他为此感到担心。在此，科学家 Jay Gulledge 博士解释了该差异可能的根源及其对我们的风险评估重要的原因。

科学和风险评估对待错误的态度

Jay Gulledge 博士，美国橡树岭国家实验室环境科学部主任。

第一类错误

致力于提供关于气候变化方面有用信息的科学家与寻找此类信息的决策者之间，*“由与他们各自工作相关的气候信息这一薄弱的纽带相联系，但是又由于不同的需求、重点领域、过程和文化而相分离。”*[11] 经常将科学家与决策者相分离的一个因素是他们描述和处理未来结果不确定性的方式。

科学家们对得出不正确的结论持保守态度——他们宁可不得出结论，也不愿得出不正确的结论。因此，他们规定了标准做法，制定了文化规范，以此来保护科学知识库免受错误信息的污染。例如，科学家们通常应用统计学检验，估算预测的结果纯粹偶然发生而非由于假设原因发生的概率。如果随机结果的概率高于 5%，那么标准做法是否定该假设。具有讽刺意味的是，这一严格做法通常导致否定一个正确的假设，因为假设确实是随机结果的概率很低，可能低于 6%.[12]

这样的情景涉及两类不确定性，或者统计学术语称为“错误”。第一种可能性是，假设的原因为人们所接受，但事实上该假设是错误的。这种情况通常被称为“假阳性”错误，统计学上称之为“第一类错误”。相反，另一种可能性是，假设被否定，但事实上该假设是正确的。这种情况称为“假阴性”错误，或者“第二类错误”。科学家们对“假阴性”错误相对宽容：在大多数科学领域，估算犯第二类错误的概率都不是标准做法。

相比之下，专业的风险管理人员往往更关心第二类错误，因为第二类错误可能导致忽视可能带来严重后果的风险。[13] 例如，在特定的年份，任何特定的房屋被烧毁的概率都非常低，但是抵押贷款方却要求房主购买意外保险，以保护贷款方的投资。原因是，如果结果可能非常严重，那么即使结果发生的概率非常低，也可能带来极大的风险。因此，科学家们宽容第二类错误时，从决策者的角度看，他们的工作却可能不够严谨。

在不确定的情况下，有低估的倾向

气候科学家们厌恶第一类错误，宽容第二类错误；与此相一致的是，在面临很大的不确定性时，他们往往错误地低估风险。[14] 该现象的一个鲜明的例子就是 IPCC 的“关切理由”，于 2001 年首次公布，[15]2009 年更新。[16]“关切理由”是 IPCC 作者认为决策者可能感兴趣的气候变化影响的类别，包括对遭受威胁的独特生态系统的风险、极端天气事件、影响在不同地理位置和不同收入群体的分布、总体经济影响以及调节全球气候方面的急剧变化（例如，大冰盖突然倾覆，导致海平面急剧上升）。“关切理由”评估了每一类对全球气温上升 0 至 5°C 的敏感度。

21 世纪，由于政府强调气候变化方面的研究，人们可以获得更多证据来评估这些风险。考虑新的证据后，人们估计的“五大关切理由”对全球气温上升的敏感度比原先的评估结果更高。[17] 该结果表明，在信息不全面的情况下，科学家们倾向于低估风险。

沟通缺失

气候科学家对于第一类错误持厌恶态度；而据资料记载，公众往往低估低概率、高影响的结果。这两者之间可能存在危险的相互关系。例如，IPCC（政府间气候变化专门委员会）将“可能”定义为 66% 至 90% 的概率，而将“不可能”定义为 10% 至 33% 的概率。如果询问大学生，就登陆飓风发生的概率而言，“不可能”这个词意味着什么，最常见的回答是 1% 至 10%（即低于 IPCC 对于该词所定义的概率范围）。[18] 如果科学界在不确定的情况下倾向于低估影响的严重性，而公众也倾向于调低严重事件发生的概率，那么最后结果可能是，公众和决策者过于低估气候变化影响的严重程度。

美国国家科学院的结论

由于上述原因，美国国家科学院首先声明：*“科学需要改变重点领域和做法，这样科学界才能为决策者管理新兴的气候风险提供更好的支持。”*[19]

致力于为气候变化决策提供依据的科学家们需要采用更加风险敏感性的分析方法。在一些情况下，这种调整需要他们更加宽容第一类错误，而不那么宽容第二类错误。

Gulledge 博士描述的科学与风险管理的文化差异并非不可调和。人们可能期望他们不偏不倚，这样他们对两类错误的厌恶程度相同。在许多领域，利用科学来支持风险评估已经高度发达，包括预测极端天气事件。[ii]

---

ii. 例如，英国气象局国家灾害性天气警报机构使用事件发生的概率及事件影响的模型，有时会警告一些发生概率极低、但是一旦发生可能带来巨大影响的事件。

为了进行风险评估，我们试图确保不会因为不确定性高而忽略相关信息。同时，我们还致力于让不确定性和专家的判断尽可能清晰明了。为了做到这一点，我们采用了情报评估的初始规则[iii]，即让科学家们告诉我们：i) 他们知道什么；ii) 他们不知道什么；iii) 他们有什么想法。

例证

在接下来的报告中，我们应用该方法评估与全球气温上升、人类的热应力、农作物生产、水资源短缺压力、洪水、干旱、沿海城市和海平面上升以及气候系统的大规模破坏相关的风险。这些风险只是气候变化风险的一小部分，其中一些重要问题（如海洋酸化）未完全包含在内，但该报告对某些风险进行了相对简要的总结。

这部分的目的并不是提供科学文献的全面调查。事实上，每个章节都反映了各自作者的个人观点。这部分的目的仅仅是识别一些最严重的风险，并以有效传达给决策者的方式加以阐释。

尾注

1. 来源：全球挑战的基础，IPCC 第五次评估报告第二工作组“决策者摘要“的文本分析：http://globalchallenges.org/wp-content/uploads/Briefing-on-IPCC-AR5-WGII-and-WGIII.pdf
2. 见第 506 页。 IPCC（2014 年）。“2014 年气候变化：影响、适应和脆弱性。A 部分：全球和部门情况。” IPCC 第五次评估报告第二工作组供稿 [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea 和 L.L. White（编辑）]。英国剑桥和美国纽约，剑桥大学出版社，共 1132 页。
3. IPCC（2014 年），第 276 页。
4. IPCC（2014 年），第 735 页。
5. IPCC（2014 年），第 816 页。
6. IPCC（2014 年），第 779 页。
7. IPCC（2014 年），第 19 页。“决策者摘要”。《2014 年气候变化：影响、适应和脆弱性。A 部分：全球和部门情况》。IPCC 第五次评估第二工作组供稿 [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea 和 L.L.White（编辑）]。英国剑桥和美国纽约：剑桥大学出版社，第 1 至 32 页。
8. 世界银行全球减灾与恢复基金，知识专题 1-2：建筑性能，第 4 页，来自： http://wbi.worldbank.org/wbi/Data/wbi/wbicms/files/drupal-acquia/wbi/drm_kn1-2.pdf
9. Bettis, O.（2014 年）。风险管理和气候变化：破坏的风险。见 http://www.lse.ac.uk/GranthamInstitute/wp-content/uploads/2014/01/Oliver-Bettis-Risk-Management-and-Climate-Change-Risk-of-Ruin.pdf.
10. 英国安全与健康执行局（2001 年），《降低风险，保护人们： 英国安全与健康执行局的决策过程》（(2001 年），第 46 页。
11. Rogers, W 和 J. Gulledge（2010 年）《迷失东京：缩小气候科学与国家安全政策之间的差距》。 新美国安全中心，华盛顿特区。
12. Mabey, N., J. Gulledge, B. Finel 和 K. Silverthorne（2011 年） 《风险程度：制定气候安全风险管理框架》。 E3G，英国伦敦和华盛顿特区（第 61 页）。
13. Schneider, S.H. 和 Mastrandrea, M.D.，（2009 年）“风险、不确定性和评估危险的气候变化”。出自： 《气候变化科学和政策》，Schneider, S.H., Rosencranz, A., Mastrandrea, M.D., Kuntz-Duriseti, K. （编辑），岛屿出版社。
14. Engelhaupt, E.（2007 年）。“模型低估全球变暖的影响”，《环境科学和技术》，41，第 4488 至 4489 页。
15. Smith, J.B. 等人（2001 年）。“面对气候变化的脆弱性和关切理由：综合体。” 出自 J.J. McCarthy 等人编辑的《2001 年气候变化：影响、适应和脆弱性》。IPCC 第三次评估报告第二工作组供稿。剑桥：剑桥大学出版社。
16. Smith, J.B., 等人（2009 年）“通过 IPCC 更新的‘关切理由’评估危险的气候变化”。《美国国家科学院院刊》106，第 4133 至 4137 页。
17. Mabey, N., J. Gulledge, B. Finel 和 K. Silverthorne（2011 年）。《风险程度：制定气候安全风险管理框架》。 E3G，英国伦敦和华盛顿特区（第 65-68 页）。
18. Patt, A.G. 和 D.P. Schrag（2003 年）/ “使用特定的语言来描述风险和概率”。《气候变化 61：第 17-30 页》。
19. 美国国家研究理事会（2009 年）气候相关决策支持的策略与方法专门小组。美国国家学术出版社，华盛顿特区。

iii. 其中一部分来源于美国前国务卿 Colin Powell 将军，据说他曾说过：“看，我有一个规则。作为一名情报官员，你的职责是告诉我你知道什么，告诉我你不知道什么，然后告诉我你的想法是什么。但是你们总是将这三者分离。”

9. 全球气温上升

Jason Lowe **教授**，气候变化减缓咨询负责人和 Dan Bernie，**高级别科学家**，英国气象局哈德利中心。

就全球气温上升而言，我们希望避免什么情况？

2˚C：《联合国气候变化框架公约》旨在避免潜在危险的气候变化，并制定了将全球平均气温上升幅度（与工业化前水平相比）控制在 2˚C 以内的目标。[1] 选择适当的全球气温上升幅度是主观的政策选择，其依据是对未来气候影响和适应的难度的相对估计，以及人们有足够高的可能性将气温上升幅度限制在该范围的判断。

4˚C：最新的 IPCC 报告得出结论：*“全球气候变化风险较高甚至很高，全球平均气温与工业化前水平相比上升 4˚C 或更高，涉及所有的关切理由，涵盖对受威胁的独特系统严重而广泛的影响、大量的物种灭绝、全球和区域粮食安全的巨大风险以及高温度和高湿度条件对人类活动的影响（包括一年中的某些时间段在某些地区种植庄稼或室外工作）”*。[2]

7˚C：关注较高气温上升幅度的研究要少得多；但有限的研究表明，全球气温上升幅度越大，影响有可能会越严重。全球气温上升约 7˚C 时，一些地区有可能会出现超出人类生理承受能力的极端高温事件。[3]

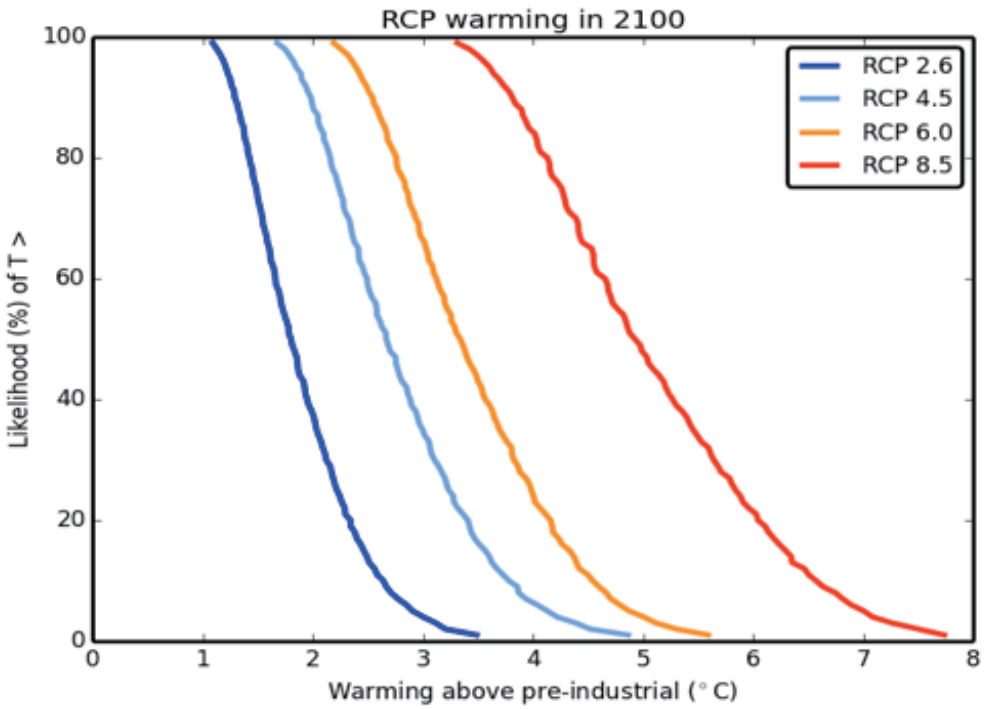
重要的是，虽然全球平均气温上升便于用作简单的度量指标，但是许多特定的风险取决于当地的气温上升和极端高温（如下面两节所讨论）。陆地气温上升比海洋快，因此大多数陆地区域的气温上升幅度将超过全球平均气温上升幅度，在一些地区甚至是远远超过。此外，极端高温也会有变化，例如一年中最热的一天。

我们超过确定的气温阈值的可能性有多大？

由于大气温室气体排放量和浓度的变化与气候响应之间的关系存在着不确定性，因此任何未来的排放量或浓度情景的气候响应必须以一个范围、频率分布或概率分布的形式表示。对于考虑的一系列浓度情景，IPCC 第五次评估预测 2081 年至 2100 年与现在相比气温上升的范围可能是 0.3ºC 至 4.8ºC（相当于与工业化前水平相比气温上升 0.9ºC 至 5.4ºC）。[4]

IPCC（政府间气候变化专门委员会）的这套气候模拟并未对气候系统中所有已知的不确定因素进行取样，而在既定的排放路径下，这样的实验装置会过度限制大气中温室气体浓度的扩散。AVOID2 项目中使用了与真实气候系统相似的气候模型，该模型将以排放量为基础，并考虑了与二氧化碳的相关性，以及碳循环—气候反馈系统中的不确定因素。[5] 在碳循环—气候反馈系统中，土壤、植被和海洋中碳的吸收和排放量可能会随着气候变化而改变，这反过来又加快了气候变化的过程。当这一附加因素被纳入气候模拟后，可以看到不同的模拟情景下，2100 年相对于工业化前全球气温上升不同幅度的概率。在这些模拟中，即使在最低排放量的情景下（RCP2.6），全球气温将超过工业化前水平 2ºC 的概率也大于 33%；在中间两种情景下，全球气温上升 4ºC 的概率很高；在最高排放量的情景下（RCP8.5），全球气温上升 4ºC 的概率约为 90%（如图 2 所示）。在最高排放量的情景下，还有较小的可能性全球气温上升 7ºC。

图 2：**按照基于 RCP 路径排放量的简单气候模型，预测 2100 年的气温上升情况。**RCP2.6 路径代表排放量迅速降低的情景。RCP8.5 代表持续专注于化石燃料、温室气体使用量显著增加的情景。



由于在一些情况下主要气候系统扰乱的影响和概率仍将增加，因此认识到这些概率随着时间的推移如何变化是非常重要的，视野要展望到 2100 年以后，尤其是对于排放量较高的情景。图 3 显示了在四种排放路径情景下，随着时间变化，气温上升幅度分别为 2˚C、4˚C 和 7˚C 的概率。

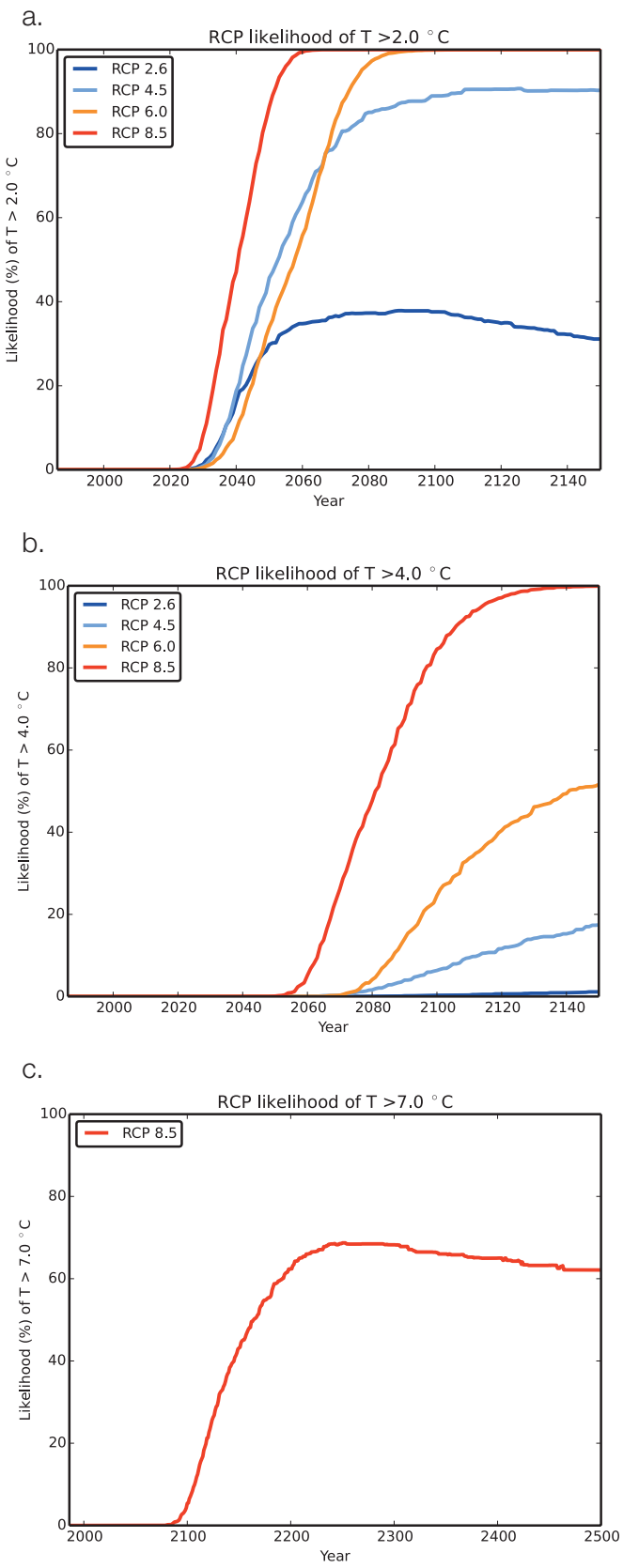
- 从图中可以看到，在最高排放量路径情景下，21 世纪上半叶气温上升 2˚C 的概率就能超过 50%；在除了最低排放量路径情景之外的其余情景下，21 世纪末气温上升 2˚C 的概率超过 80%。

- 在最高排放量路径情景和中间两个 2100 年后延续路径情景下，到 2150 年气温上升 4˚C 的概率似乎分别在 100%、50% 和 20% 左右； 而在最低排放量路径情景下，到 2150 年气温上升 4˚C 的概率仅为几个百分点。

- 在最高排放量路径情景下（即 RCP8.5 延伸情景；在该情景下，排放量在 2100 年之后的 50 年内保持不变，然后急剧下降），22 世纪气温上升 7˚C 的概率似乎超过 50%，而在 23 世纪此概率达到最高值 65% 左右。

替代的模型设计可能会显示出这些概率的一些细微差别，但定性的结论却是相同的。

图 3：根据简单的气候模型设计（其中涵盖了来自更复杂的总循环模型的气候敏感度范围），并对气候—碳循环反馈系统中的不确定因素进行取样，基于到 2500 年气温上升的预测情况，**这三张图分别显示了气温上升 2˚C 、4˚C 和 7˚C 的概率。**

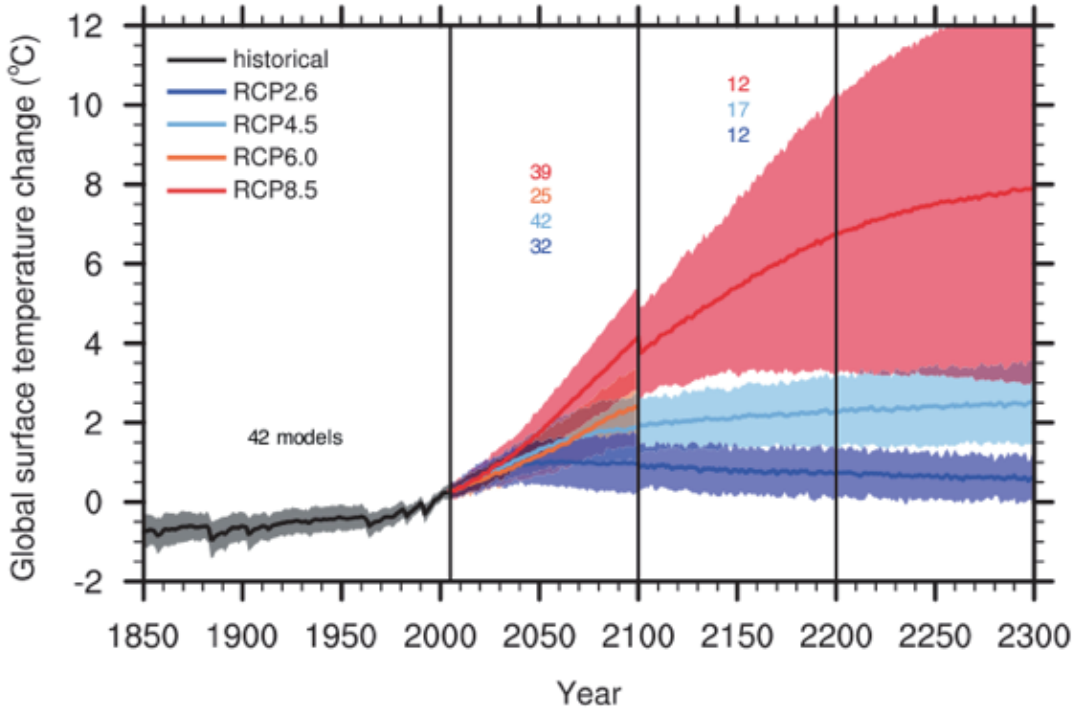


在下个世纪或更远的未来，地球可能继续升温吗？

如上所示，在 IPCC 第五次评估第一工作组考虑的最高排放量路径情景下，2100 年以后（与工业化前水平相比）气温上升 7˚C 以上的可能性很大。

要提供可能的气温最高上升幅度的稳健估计非常困难，甚至是不可能的。首先，目前尚不清楚如何定义较高排放量情景。例如，它可能包括已知的化石燃料储量，或者预计增加的化石燃料储量，这些都是非常不确定的。它可能会也可能不会包括开采和使用化石燃料的经济制约。对于该研究，我们的展望不会超越 RCP8.5 及其时间延伸情景。IPCC 模型模拟的瞬态演变在下面的图 4 显示。在其中一小部分气候模型中，2300 年全球平均气温（与工业化前水平相比）上升超过 10˚C。

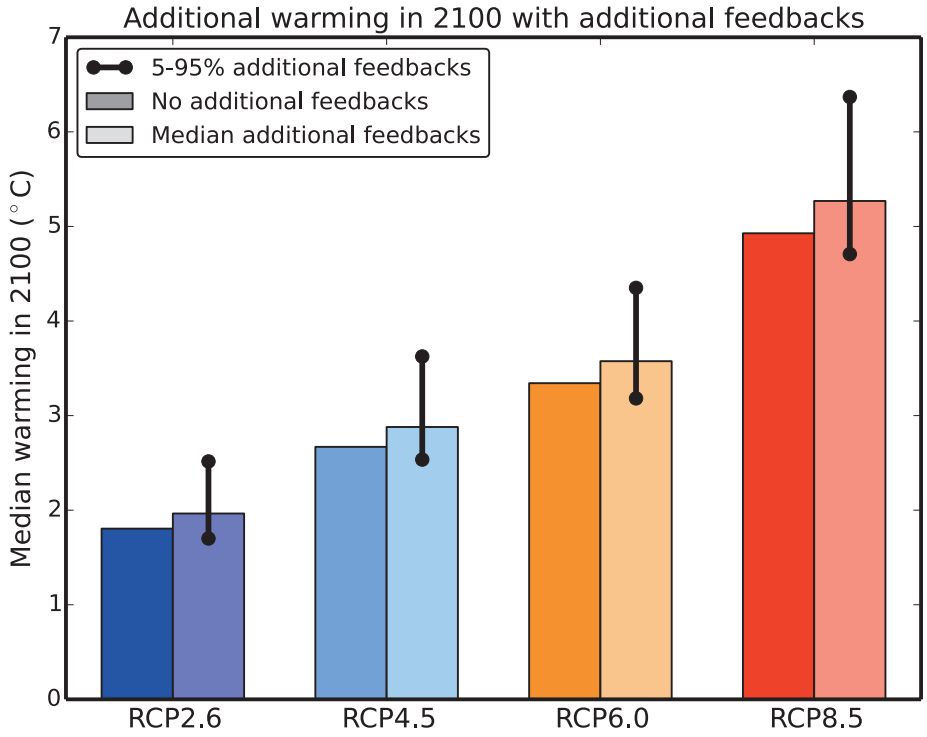
图 4：**IPCC 第五次评估气候模型的全球年平均地表气温异常时间序列**（相对于 1986 年至 2005 年）。（若以工业化前水平为基准，则在这些数字上加 0.6˚C [6]）。图中显示了每个 RCP 情景的预测情况，实线表示多模型的平均值，阴影部分表示 5% 至 95% 的范围在每个模型中的分布。



我们无法轻松估计气温最高上升幅度的第二个原因是气候系统响应中仍存在的不确定性。我们估计的气候敏感度上限值并无明确界限。此外，还有我们预测中缺失的一系列过程可能改变气温上升的幅度，例如，这些过程可能排放额外的温室气体。使用 IPCC 第五次评估公布的研究中已知地球系统反馈可能提供的额外作用力作为简单气候模型的额外组成部分，我们估计到 2100 年的气温上升幅度比 RCP8.5 情景下估计的气温上升幅度中位值高大约 1˚C（图 5）。[7] 换句话说，这可能会导致 RCP8.5 情景下气温上升幅度超过 4˚C 的概率达到 50% 的时间提前到来，按照中间估值会提前几年，而在更加极端但不可能的情况下会提前 10 年以上。

如果结果证明气候敏感度处于我们估计范围的高端，那么可能增加气温上升幅度的其它地球系统过程的影响可能更大，但要获得可靠的量化结果我们还需要额外的建模。然而，我们知道其中一些增加气温上升幅度的因素可能需要很长时间才能完全发挥作用，因此 2100 年以后这些因素产生的影响可能会更大。

图 5：**地球系统过程增加的气温上升幅度预测**（已在 IPCC 评估中考虑，但一般来说尚未纳入气候变化的预测）。



气温上升幅度的增加（例如我们在 RCP8.5 排放情景下的预测）在观测记录中是前所未有的，甚至（使用代理测量）回溯到公元 1000 年也从未有过。[8] 观察更久远的时间段，IPCC 第五次评估报告得出结论，在上新世中期（330 到 300 万年前），气温比工业化前水平高 1.9 到 3.6℃。在始新世早期（5200 到 4800 万年前），全球平均气温比工业化前水平高 9 到 14℃，因为当时大气中的二氧化碳浓度约为 1000ppm，略高于在 RCP8.5 情景下预期的 2100 年大气中的二氧化碳浓度。[9] 在考虑这些遥远的历史时期时，我们一定要考虑记录的不确定性以及过去的时期是否真的可以模拟人类世。

我们知道什么，我们不知道什么，我们的想法是什么？

我们必须基于对气候系统的理解对未来的气候进行预测。我们所拥有的明确而长期的基本物理知识告诉我们，大气中温室气体的增加将使地球变暖。[10] 我们知道，最近几十年地球气温已经上升，而且上升的幅度与预期的自然变化相比是不寻常的。[11] 这可以通过气候系统积累的额外能量来解释。

关于气候系统对辐射强迫变化的敏感度，我们目前有一系列的预测，但是我们不知道任何精确值。我们也理解许多过程决定该敏感度的过程。虽然有证据表明复杂的气候模型可以巧妙地模拟过去和现在气候的许多方面，IPCC 评估的专家判断认为，当代复杂气候模型预测的 21 世纪气温上升的第 5 至 95 个百分点这一范围对于未来温室气体浓度增加的范围来说过于狭窄。[12]

温室气体产生或释放后长时间留在大气层中的那部分量可能限制在一定范围内，但是具体的精确值却是未知的。我们也意识到气候变化与碳循环之间以及气候与大气化学之间的反馈作用。我们会通过某种方式将上述所有因素纳入对未来的定量研究，但是具体的精确值却是未知的。

我们知道，在遥远的过去气候系统已经遭到了大规模的破坏，类似于我们今天认为的临界点。我们认为，未来气温上升的幅度越大，发生这些事件的可能性就会越大，但是我们不知道触发这些事件所需要的精确条件。（见第 17 章）。

我们知道，一系列地球系统过程（例如永久冻土融化）可能加快地球变暖和气候破坏，其中大多数都已纳入 IPCC 评估的考虑。虽然我们已经开始估计这些影响，但是目前的气候模型或气候风险评估却很少考虑这些因素（图 6 是例外）。此外，还有一些过程可能大大增加气温上升的幅度，例如海洋沉积物里面及其下面的水合物储层可能释放甲烷。[13] 我们知道这些储层很庞大，而且在遥远的过去的很长时间造成了气温的大幅上升。我们最佳的估计认为，这些储层在下个世纪只会产生极其微弱的影响；但是对于更遥远的未来会发生什么，我们却知之甚少。

本章的撰写得到 AVOID2 计划（由英国政府和自然环境研究委员会资助）和英国能源与气候变化部门（DECC）的支持 。项目代号为 1104872。

尾注

1. 联合国（1992 年）。《联合国气候变化框架公约》。见 http://unfccc.int/resource/docs/convkp/conveng.pdf
2. IPCC（2014 年）。“决策者摘要”。出自：《2014 年气候变化：影响、适应和脆弱性。A 部分：全球和部门情况》。IPCC 第五次评估报告第二工作组供稿 [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea 和 L.L. White（编辑）]。英国剑桥和美国纽约，剑桥大学出版社，第 1 至 32 页。
3. Sherwood, S.C. 和 Huber, M.（2010 年）。“热应力导致的对气候变化的适应性限制”。《美国国家科学院院刊》107
4. IPCC（2013 年）表 SPM.2. “决策者摘要”。《2013 年气候变化：自然科学的基础》。IPCC 第五次评估报告第一工作组供稿 [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex 和 P.M. Midgley（编辑）]。英国剑桥和美国纽约：剑桥大学出版社。
5. Lowe, J., Huntingford, C., Raper, S.C.B., Jones, C.D., Liddicoat, C.D. 和 Gohar, L.K.（2009 年）。“从危险的全球变暖中恢复有多难？”《环境研究通讯》4 doi:10.1088/1748-9326/4/1/014012
6. 完整的 IPCC 标题：根据 CMIP5 浓度驱动试验，全球年平均地表气温异常的时间序列（相对于 1986 至 2005 年）。对于每个 RCP 情景，图中显示出预测的多模型平均值（实线）和各模型分布中（阴影部分）5% 至 95% 的范围（±1.64 标准差）。2100 年处中断，是由于不同数量的模型延伸至 21 世纪以后，并没有物理意义。每个模型仅使用一个集合，图中的数字表示用于不同时间段的不同模型的数量。RCP6.0 情景只有两个模型可用，因此没有预测 2100 年以后的范围。来源：图 12.5, Collins, M., R. Knutti, J. Arblaster, J.-L. Dufresne, T. Fichefet, P. Friedlingstein, X. Gao, W.J. Gutowski, T. Johns, G. Krinner, M. Shongwe, C. Tebaldi, A.J. Weaver 和 M. Wehner（2013 年）。“长期的气候变化：预测、承诺和不可逆转性。”《2013 年气候变化：自然科学的基础》IPCC 第五次评估报告第一工作组供稿 [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex 和 P.M. Midgley（编辑）]。英国剑桥和美国纽约：剑桥大学出版社。
7. Ciais, P., C. Sabine, G. Bala, L. Bopp, V. Brovkin, J. Canadell, A. Chhabra, R. DeFries, J. Galloway, M. Heimann, C. Jones, C. Le Quéré, R.B. Myneni, S. Piao 和 P. Thornton（2013 年）。“碳和其它生物化学循环”。《2013 年气候变化：自然科学的基础》。IPCC 第五次评估报告第一工作组供稿 [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex 和 P.M. Midgley（编辑）]。英国剑桥和美国纽约：剑桥大学出版社，第 465 至 570 页，doi:10.1017/CBO9781107415324.015.
8. Masson-Delmotte, V., M. Schulz, A. Abe-Ouchi, J. Beer, A. Ganopolski, J.F. González Rouco, E. Jansen, K. Lambeck, J. Luterbacher, T. Naish, T. Osborn, B. Otto-Bliesner, T. Quinn, R. Ramesh, M. Rojas, X. Shao 和 A. Timmermann（2013 年）。“古气候档案中的信息”。《2013 年气候变化：自然科学的基础》。IPCC 第五次评估报告第一工作组供稿 [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex 和 P.M. Midgley（编辑）]。英国剑桥和美国纽约：剑桥大学出版社，第 383 至 464 页，doi:10.1017/CBO9781107415324.013.
9. Masson-Delmotte, V. 等人（2013 年）。
10. 例如，Houghton, J.（2009 年）《全球变暖：完整的介绍》。剑桥：剑桥大学出版社。
11. Bindoff, N.L., P.A. Stott, K.M. AchutaRao, M.R. Allen, N. Gillett, D. Gutzler, K. Hansingo, G. Hegerl, Y. Hu, S. Jain, I.I. Mokhov, J. Overland, J. Perlwitz, R. Sebbari 和 X. Zhang（2013 年）。“气候变化的探测和归因：从全球到地区层面”。《2013 年气候变化：自然科学的基础》。IPCC 第五次评估报告第一工作组供稿 [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex 和 P.M. Midgley（编辑）]。英国剑桥和美国纽约：剑桥大学出版社，第 867 至 952 页，doi:10.1017/CBO9781107415324.022..
12. IPCC（2013 年）中的表 SPM.2. “决策者摘要”。
13. Masson-Delmotte, V. 等人（2013 年）。

10. 热应力对人们的风险

Tord Kjellstrom 博士，Alistair Woodward 教授，Laila Gohar 博士，Jason Lowe 教授，Bruno Lemke 博士，Lauren Lines，David Briggs 博士，Chris Freyberg 博士，Matthias Otto 博士，Olivia Hyatt 博士

我们可能希望避免的全球升温程度？

人体存在能够将其核心体温维持在 37˚C 左右的行为和物理机制。人体内温度一旦超过该水平，就会拖累人体系统和至关重要的生理功能，严重情况下甚至导致死亡。与这种热应力有关的气候条件可以用湿球黑球温度（WBGT）来衡量，其中包括温度、湿度、风速和太阳能辐射等因素。[1] 我们运用通过 Lemke 和 Kjellstrom 描述的方法得到的气候数据来计算阴凉处（无太阳能供热）或室内（无空调）的湿球黑球温度。[2] 我们考虑了与生存、睡眠、工作和运动这四个人类关切点相关的热应力阈值。

生存

生存阈值：极端的气候条件，如果人暴露于这种气候条件（无空调保护），那么人在睡眠或执行低能耗日常任务时，其核心体温会升至可能危及生命的水平。

对于白天，我们根据使一个在阴凉处休息 4 小时的普通人[i] 核心体温升至 42˚C 的湿球黑球温度设置生存阈值。我们估计，这种情况会在日最高湿球黑球温度不低于 40° C 时发生。当最热的月份有 3 天预计超过该阈值时（“最热的月份中最热的三天”），我们将此设定为阈值，因为此时几乎可以确定至少可以超过该阈值一次。

对于夜间的高温，我们将生存阈值定义为阻碍夜间核心体温下降、以至于第二天的热曝露直接加到前一天热曝露的条件。[3] 我们估计，平均最低湿球黑球温度不低于 36˚C 时，大多数人都会出现这种情况。（与白天同理，这里我们也使用“三夜”的假设）。

睡眠

我们将“睡眠”阈值定义为允许核心体温出现一定程度的下降、但不完全降至正常睡眠所需水平的气候条件：[4] 具体来说，夜间休息的八小时内核心体温维持 37˚C 以上。我们估计，当平均最低湿球黑球温度不低于 30˚C 时，大多数人会出现这种情况。（在此，我们仍使用“三夜”的假设）。

务必要注意，不同的人对热的敏感性差别很大，受到年龄、性别、健康状况和过去的曝晒经历等相关因素的影响。[5] 关于上述的生存和睡眠阈值，我们试图确定一个看似合理的温度中间值，例如，大约 50% 的人无法维持热平衡状态。

工作

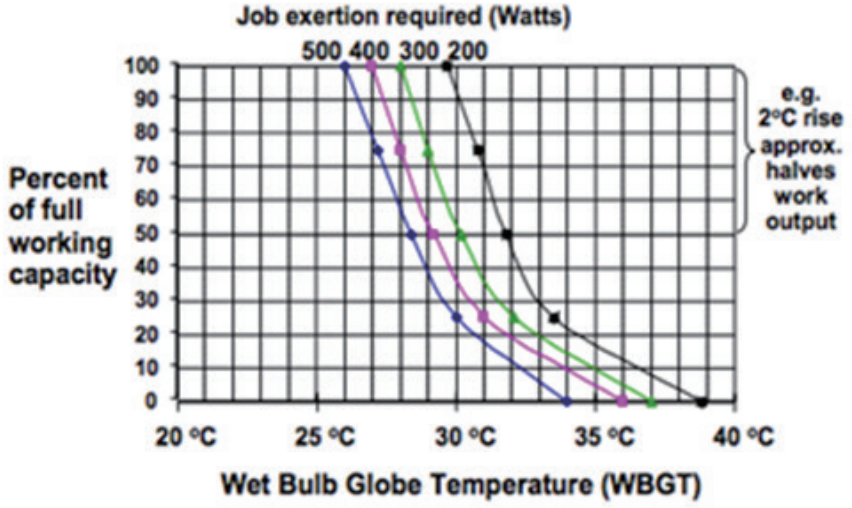
由于人体肌肉活动会在体内生成大量的热量，因此气候变化增加环境温度时，体力劳动者将面临特定的风险。[6] 我们已经根据美国职业安全与健康管理局[7]（OSHA）公布的基于时间的阈值限值和美国国家职业安全与健康研究所[8] 建议的“完全不工作”上限设定了工作极限。在这些指导原则（在图 1 中总结）的基础上，我们得出结论：湿球黑球温度达到 36˚C 时，即使有中途休息，中度 / 重度劳动也变得不安全[ii]。我们将“太热以至无法工作”定义为日均最高湿球黑球温度连续一个月不低于 36˚C 的条件。

Tord Kjellstrom 博士，瑞典于默奥大学，公共健康与医学院 ；Alistair Woodward 教授，奥克兰大学 . Laila Gohar 博士，英国气象局哈德利中心；Jason Lowe 教授，英国气象局哈德利中心 . Bruno Lemke 博士，新西兰纳尔逊理工学院；David Briggs 博士，英国皇家学院 . Chris Freyberg 博士，梅西大学；Matthias Otto 博士，新西兰纳尔逊理工学院；Olivia Hyatt 博士 健康与环境国际信托

i 以 120 瓦的速度散发热量

ii 大约相对于以 400 瓦的速度工作。

图 1: **高温和工作的关系** - 基于理想的人类正常生理条件和关键的气温阈值



Based on ISO Standard for Heat Stress in the Workplace (1989)

Wet Bulb Globe Temperature – a measure of heat stress that is sensitive to air temperature, radiant temperature, humidity and wind velocity

运动

该极限基于美国运动医学专家提出的指导性意见。[9] 该意见指出湿球黑球温度达到 28˚C 时，应停止竞技性户外运动。我们将“运动”阈值定义为最热的三个月里所有白天的湿球黑球温度超过 28˚C 的情况。鉴于对温度和湿度在 24 小时内分布情况的了解，我们推断，当三个月的平均湿球黑球温度不低于 28˚C 时，就满足了阈值条件。我们注意到，与 OSHA 的标准一样，该阈值也包含较大的“安全边缘幅度”，旨在保护最敏感的人群。

在目前的气候条件下，我们离这些阈值有多近？

热应力每年已导致很多人死亡或罹患疾病，尤其在低收入的热带国家。[10] 然而，即使在全世界最炎热的地区，人口聚集区内的温度都很少接近上述生存阈值。

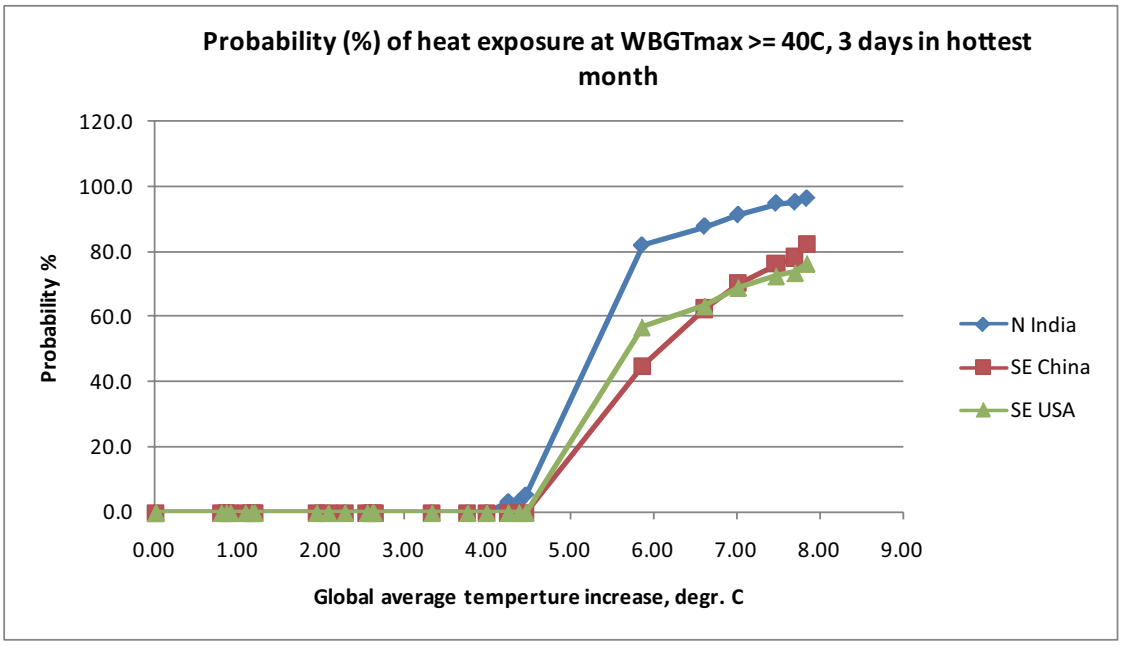
在一些炎热的国家，经常会短时间内超过 OSHA 工作标准，但却没有出现较长的时间内超过上述阈值的情况。[11] 同样，每年有许多地方会短时间内超过湿球黑球温度 28˚C 的运动极限（例如，2014 年 1 月，环境（干球）温度超过 40˚C 时，澳洲网球公开锦标赛被取消。[12] 然而，目前这些高温很少维持很长时间。

预测所选地区超过这些阈值的可能性随着全球平均气温上升而变化的趋势

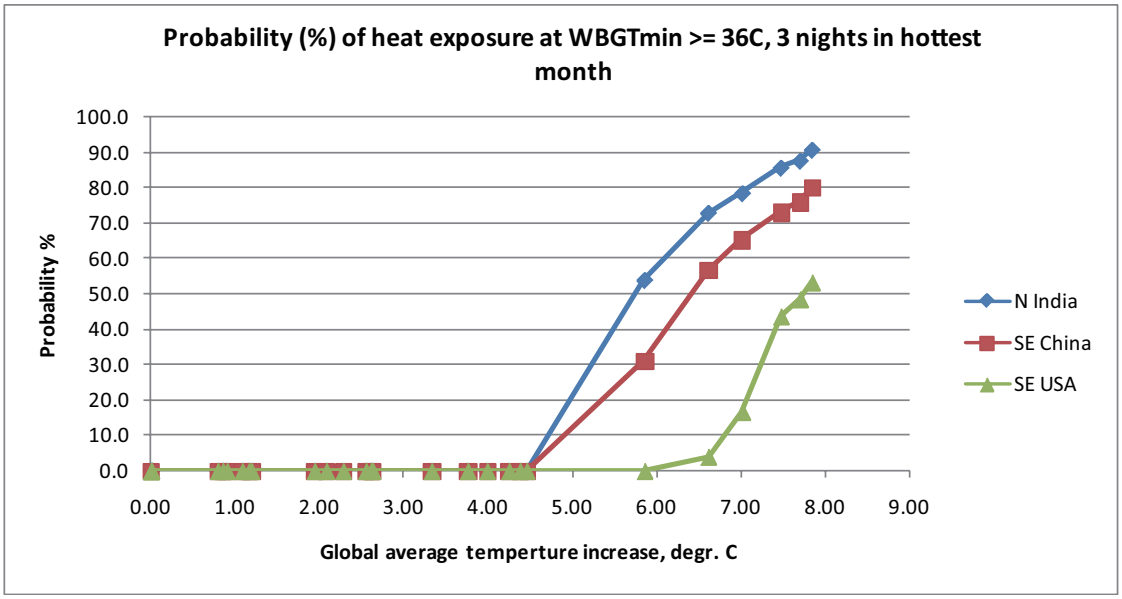
图 1 显示，随着全球气温的上升，印度北部、中国东南部和美国东南部三个地区超过这些阈值的概率如何增加。在这些图中，“概率”表示在气候条件超过相关阈值的区域，每个地区人口的预测占比。我们使用气候模型估计全球气温上升与当地气候条件之间的关系，并根据联合国的预测估计人口的空间分布。在该计算中存在一些近似值，但仍可用来描述风险。这些方法的详细描述可参加附件。

图 2:

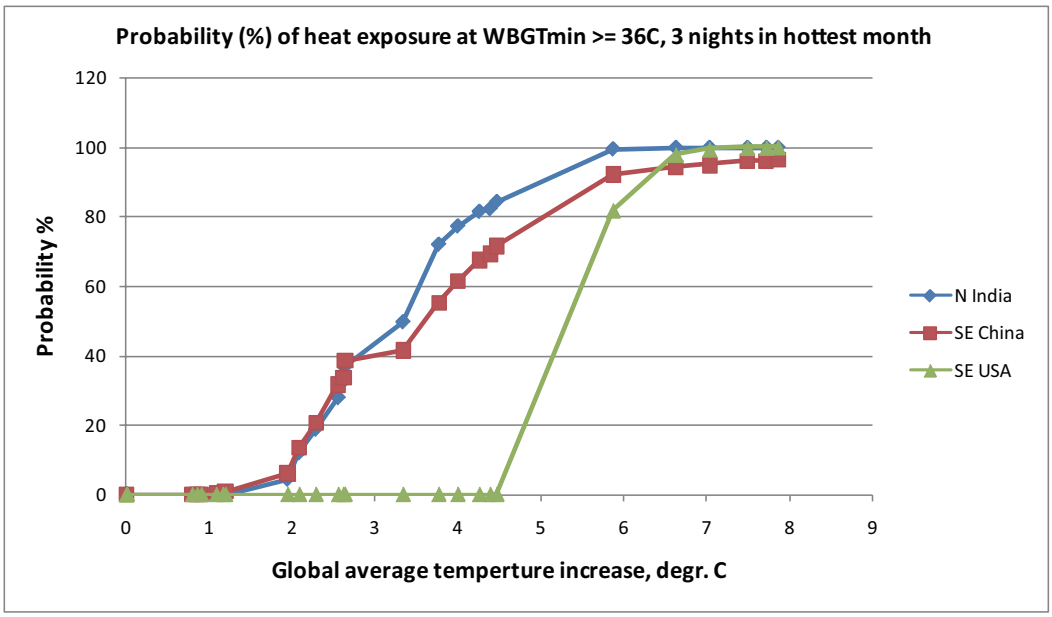
生存压力（白天）：一个在阴凉处休息了 4 小时的普通人在某地区曝露于使其核心体温升至 42˚C 的高温条件的概率（%）。我们将该阈值定义为一年中最炎热的月份有三天最高湿球黑球温度不低于 40˚C 的气候条件。温度上升是相对于当日而言的。



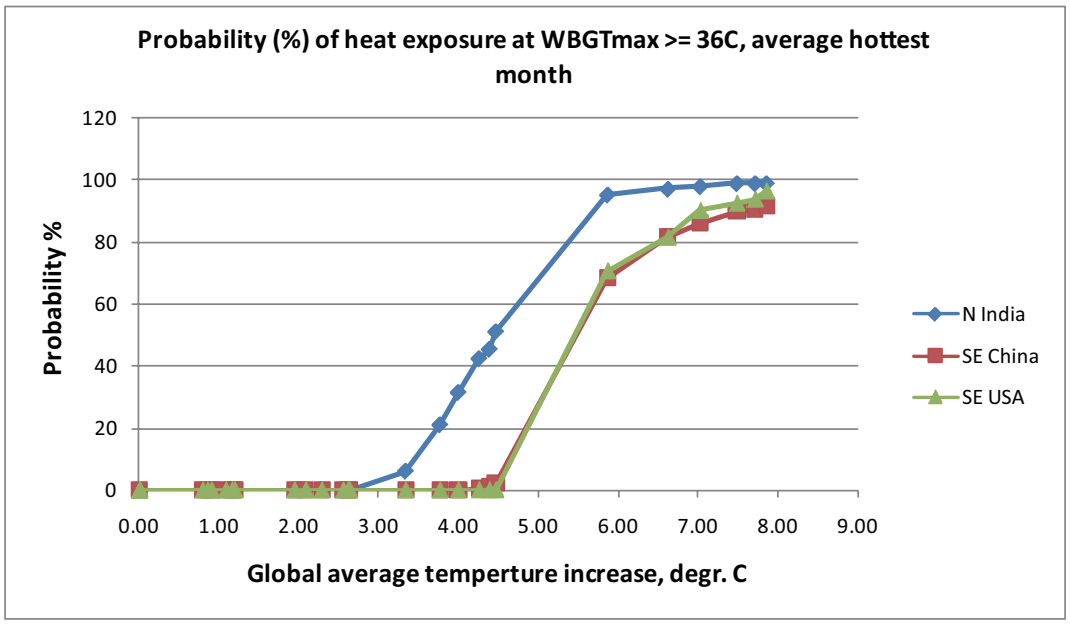
生存阈值（夜晚）：某人在某地区遭遇阻止其核心体温出现任何下降的条件的概率（%）。我们将该阈值定义为在最炎热的月份有三个夜晚的最低湿球黑球温度不低于 36˚C 的气候条件。温度下降是相对于当日而言的。



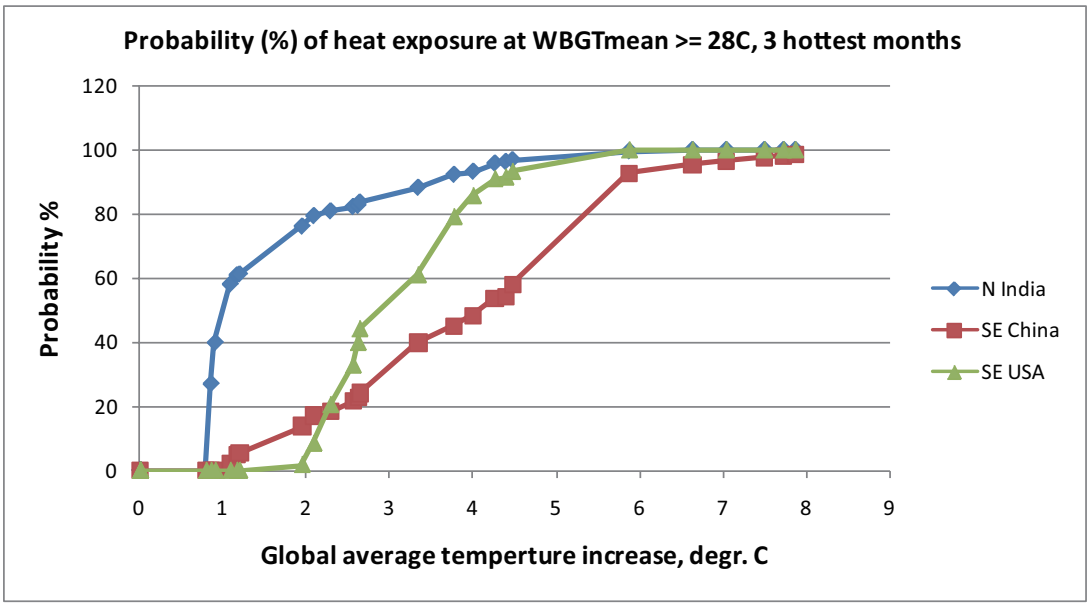
睡眠阈值: 某人在某地区遭遇阻止在夜间休息的8小时内其核心体温降至正常水平(37˚C)的概率(%)。我们将阈值定义为一个月中有三个夜晚的最低湿球黑球温度不低于 30˚C 的气候条件。温度下降是相对于当日而言的。



工作阈值：某人在某地区不能在 400 瓦下工作的概率（%）。我们将阈值定义为一个月中日均最高湿球黑球温度不低于 36˚C 的气候条件。温度上升是相对于当日而言的。



运动阈值：某人在某地区遭遇一年中最热的三个月中白天湿球黑球温度超过 28˚C 的概率。我们将阈值定义为三个月期间日均湿球黑球温度不低于 28˚C 的气候条件。温度上升是相对于当日而言的。



图中的预测表明，首次超过的极限值与运动有关。根据目前许多国家使用的危险热量的定义，如果全球气温平均气温比现在平均上升 1˚C，印度北部的人群在夏季不能参加竞技性户外活动的可能性约为 40%。如果上升 4˚C，那么这一概率在印度北部和美国东南部约为 80% 至 90%；同样的情况下，中国东南亚的人群受影响的概率为 50%。

根据这些估算，全球平均气温比现在上升 4˚C 之前，上述的工作极限就会出现。此时，印度北部气温过高以至人们在最炎热的月份无法开展中度 / 重度户外工作的概率约为 30%。全球平均气温上升 7 至 8˚C 时，所有地区超过阈值的概率接近 80% 到 100%。

一旦全球平均气温上升超过 5˚C，就会产生过高热量，人在睡眠时就无法降低核心体温（如上所述）。全球气温上升 6˚C 以上时，在印度北部和中国东南部，因曝露于高温而无法保证健康睡眠的概率会快速上升。我们预测，全球气温上升超过 8˚C 时，被调查地区的人们遭遇恶劣气候条件以至无法保证正常睡眠的概率为 50% 到 90%.

全球气温上升未达到 4˚C 时，我们设定的白天的生存阈值尚未超越。但如果气温继续上升，我们预测所有被调查地区的人群都将面临风险：全球气温上升 6˚C 以上时，遭遇无法忍受的气候条件（甚至在阴凉处休息时）的概率范围约为 50%（中国东南部）到 80%（印度北部）。

通过将这些结果与前一章的研究结果进行比较，我们可以了解这些风险随时间的推移如何变化。例如，值得注意的是，全球气温与现在相比上升约 4˚C（与工业化前水平相比上升约 4.8˚C）时，超过几个热应力阈值的概率会急速增加。正如前一章所示，到本世纪末，在最高排放量路径情景下，增加的可能性超过一半。

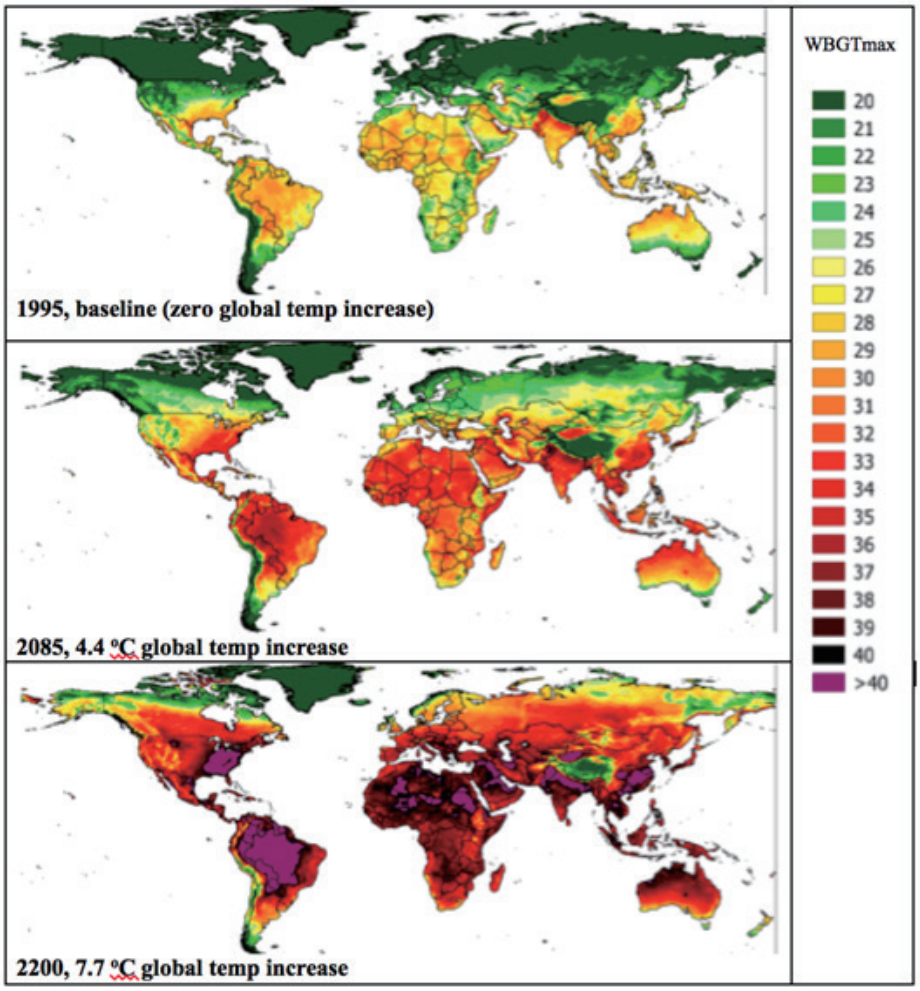
本世纪及以后时期，气候变化可能导致的最糟糕的热应力情况是什么？

我们在此使用的一个更加极端的阈值是基于热力学设定的：当湿球温度超过皮肤温度时（因为在这一温度人体无法散热）。当湿球温度超过 35˚C 时，这一情况将会发生 [iii]。[13] 实际上，由于所有的人群都需要一些中度或轻度的活动，因此环境温度更低时就会达到生存极限。

Sherwood & Huber（2010 年）表明，全球平均气温与现在的水平相比上升 7˚C 时，这些气候条件首先会在小范围地区出现，然而全球气温与现在的水平相比上升 10 至 11˚C 时，才会在全球人口密集的地区出现。我们在该报告的另一处得出结论：在高排放量情景（RCP8.5 情景）下，22 世纪全球平均气温与工业化前水平相比上升 7˚C 以上的“概率很大”（约 60%）。很难预测全球气温上升更高幅度时的风险。然而，到 2300 年，一小部分 IPCC 气候模型预测的全球平均气温上升与工业化前水平相比上升 10˚C 以上。

为了提供关于此处预测的更多信息，图 2 展示了三张地图，分别显示了三种全球气温上升情况下，这一年最炎热的月份的日均最高湿球黑球温度。[iv] 附录也包括预测随着全球平均气温的上升，进行不同程度的身体活动时，热应力造成工作时间的损失的比例。

图 3



iii 例如，温度为 35˚C、湿度为 100%；或其它等效组合。
iv 使用 HadGEM 气候模型生成，假设 RCP8.5 排放量路径情景。

我们知道什么，我们不知道什么，我们的想法是什么？

我们知道什么：我们清楚地了解人体对高温的反应，并明确界定了极端温度对身体机能和健康的极限。我们也了解影响影响面临热应力脆弱性的许多因素。世界上许多地区的调查发现，高温已经成为工作和运动的重要制约因素。全球气温正在上升；根据高信度预计，未来极端高温事件的发生将更加频繁。[14]

我们不知道什么：这些气候模型预测存在许多不确定性，尤其是地区差异性方面。 温度的预测比湿度和降雨量的预测可信度更高。社会适应甚至存在更大的不确定性：毫无疑问，社会适应会发生，但是我们不确定变化的速度、是否具有包容性以及适应的成本和可接受性（例如全天候使用空调及完全室内的生活方式）。

我们的想法是什么：重要的是认识到，这里显示的概率低估了许多地区的风险。这是因为当地的气象及其它环境因素导致温度存在很大差异（例如，城市热岛效应可能使夜间温度上升 10˚C）。人们曝露于户外条件的程度也有很大差异。无法获得人工降温的人们，以及为了维持生计而必须在户外工作却不受保护的人们，相比于可以不在高温下生活和工作的人们，受到的影响明显更为严重（与阴凉处相比，下午的太阳光增加 3 至 4˚C 的湿球黑球温度）。老年人、儿童及长期身体不佳的人们尤其易患高温引起的疾病。

因太热而无法舒服入睡时，白天曝露于高温的压力影响可能会增加。同样的，我们也预计，夜晚持续高温将显著降低工作效率。由于种种原因，我们认为，全球气温上升超过一定幅度时，带来的热应力影响可能威胁到人们依靠当地农业为生的低收入地区的可居住性。在世界上最炎热的地区，高温将威胁到其环境无法人工降温的行业和活动的存在，包括一些公用事业、建设以及应急响应服务（例如急救或消防服务）。

本章的撰写得到 AVOID2 计划（由英国政府和自然环境研究委员会资助）和英国能源与气候变化部门（DECC）的支持 。项目代号为 1104872。

尾注

1. Parsons K. （2014 年）。《人类的热环境。炎热、温和及寒冷的环境对人类健康、舒适度和工作效率的影响》。第三版，博卡拉顿，CRC 出版社。
2. Lemke B, Kjellstrom T（2012 年）。“根据气象数据计算工作场所的湿球黑球温度”，《职业健康 50》，267-278 页。
3. 基于该月的 30 年平均值。Krauchi K. （2007 年）。“从体温调节的角度重新考虑人类睡醒循环”。《生理学与行为 90》，第 236 至 245 页。
4. Krauchi K. （2007 年）。
5. Parsons（2014 年）。
6. Kjellstrom T, Holmer I, Lemke B (2009 年)。“由于气候变化，工作场所的热应力、健康和工作效率对中低收入国家带来越来越大的挑战”。《全球卫生行动 2：特别卷》，第 46 至 51 页。
7. OSHA (1999 年)。第 III 部分第 4 章：热应力。OSHA 技术手册。职业安全与健康管理局 [网络]; [2015 年 4 月 27 日访问]。华盛顿特区。网址：http://www.osha.gov/dts/osta/otm/otm_iii/otm_iii_4.html.
8. NIOSH（1986 年）。 推荐标准。 职场接触高温环境。DHHS (NIOSH) 出版 No.86-113. 卫生与人力资源服务部，1986 年 4 月。
9. Binkley H, Beckett J, Casa DJ, Kleiner DM, Plummer PE （2002 年）。“国家体育教练员协会立场声明：劳累型热疾病”。《体育训练期刊 2002 年》；37(3)：第 329 至 343 页；美国运动医学院（2007 年）。“训练和比赛中的劳累型热疾病”。体育和运动中的医学和科学 39(3)：第 556 至 572 页。
10. Hyatt OM, Lemke B, Kjellstrom T. (2010 年)。“职业热曝露的区域地图：过去、现在和潜在的未来。”《全球卫生行动 3》：第 1 至 11 页；Kjellstrom T, Lemke B, Otto M（2013 年）。“东南亚职业热曝露与影响映射：1980 年至 2009 年的趋势以及到 2050 年的未来预测”。《职业健康 51》：第 56 至 67 页。

11. Crowe J, Wesseling C, Solano BR, Umana M, Ramirez AR, Kjellstrom T, Morales D, Nilsson M. （2013 年）。“哥斯达黎加甘蔗收割者的热曝露”。《美国工业医学杂志 56》：第 1157 至 1164 页；Sheffield PE, Herrera JGR, Lemke B, Kjellstrom T, Romero L.（2013 年）。“随着气候变化，尼加拉瓜工作场所目前和未来的热应力”。《职业健康 51》：第 123 至 127 页。
12. 见 http://www.bbc.com/news/world-asia-25743438)
13. Sherwood S, Huber M. （2010 年）。“热应力导致的气候变化适应性限制”。《美国国家科学院院刊 107》：9552-4
14. IPCC (2014 年)。《2014 年气候变化：综合报告》。IPCC 第五次评估报告第一、二、三工作组供稿 [核心编写团队，R.K. Pachauri 和 L.A. Meyer（编辑）]。IPCC，瑞士日内瓦，共 151 页。

11. 气候变化对农作物生产的影响

John R. Porter 教授[i]，Manuel Montesino 博士[ii] 和 Mikhail Semenov 博士[iii]

为了评估气候变化对农作物生产的影响，我们大量参考了 IPCC 第五次评估报告中“粮食安全和粮食生产体系”[1] 这一章的内容。在此基础上，我们还增加了一些关于重要阈值的讨论。

我们希望避免什么？这些发生的可能性有多大？

就气候变化对单个农作物生产的风险而言，我们希望避免的一个风险就是农作物歉收。“作物歉收”可以定义为：*“农作物产量下降到一定水平，以至于没有多余的农作物可以作为商品进行交易，或者当地居民的营养需求无法得到满足。”*[2] 由于这一水平不容易界定，因此这一章考虑了两种情况：

i. 可能出现的最低平均产量；

ii. 在特定的年份农作物几乎颗粒无收的可能性。

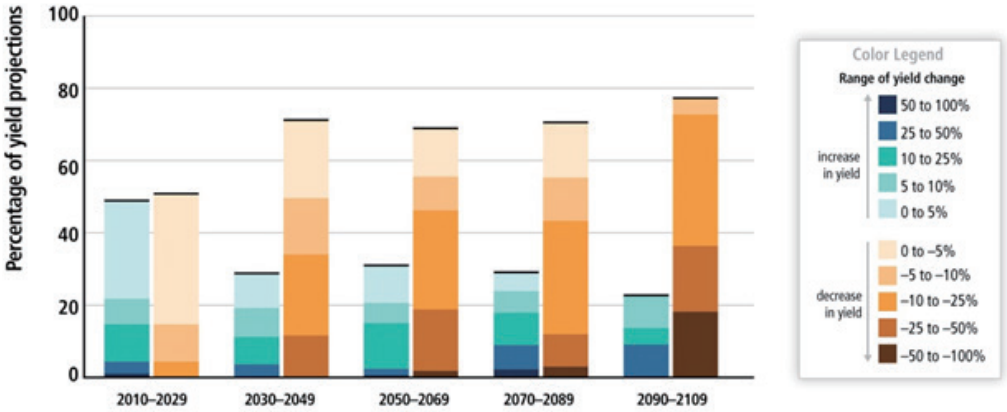
就气候变化对全球农作物生产的风险而言，我们希望避免农作物减产，以满足不断增长的粮食需求。

对单个农作物的风险：农作物歉收的风险

可能出现的最低平均产量

随着时间的推移，气候变化对农作物产量的负面影响预计也将日益严重。其影响的程度非常不确定。图 1 展示了该发展过程及其不确定性。

图 1：**21 世纪气候变化对农作物产量影响的预测总结。**[iv] 来源于 IPCC 第五次评估报告中第二工作组决策者摘要。[3]

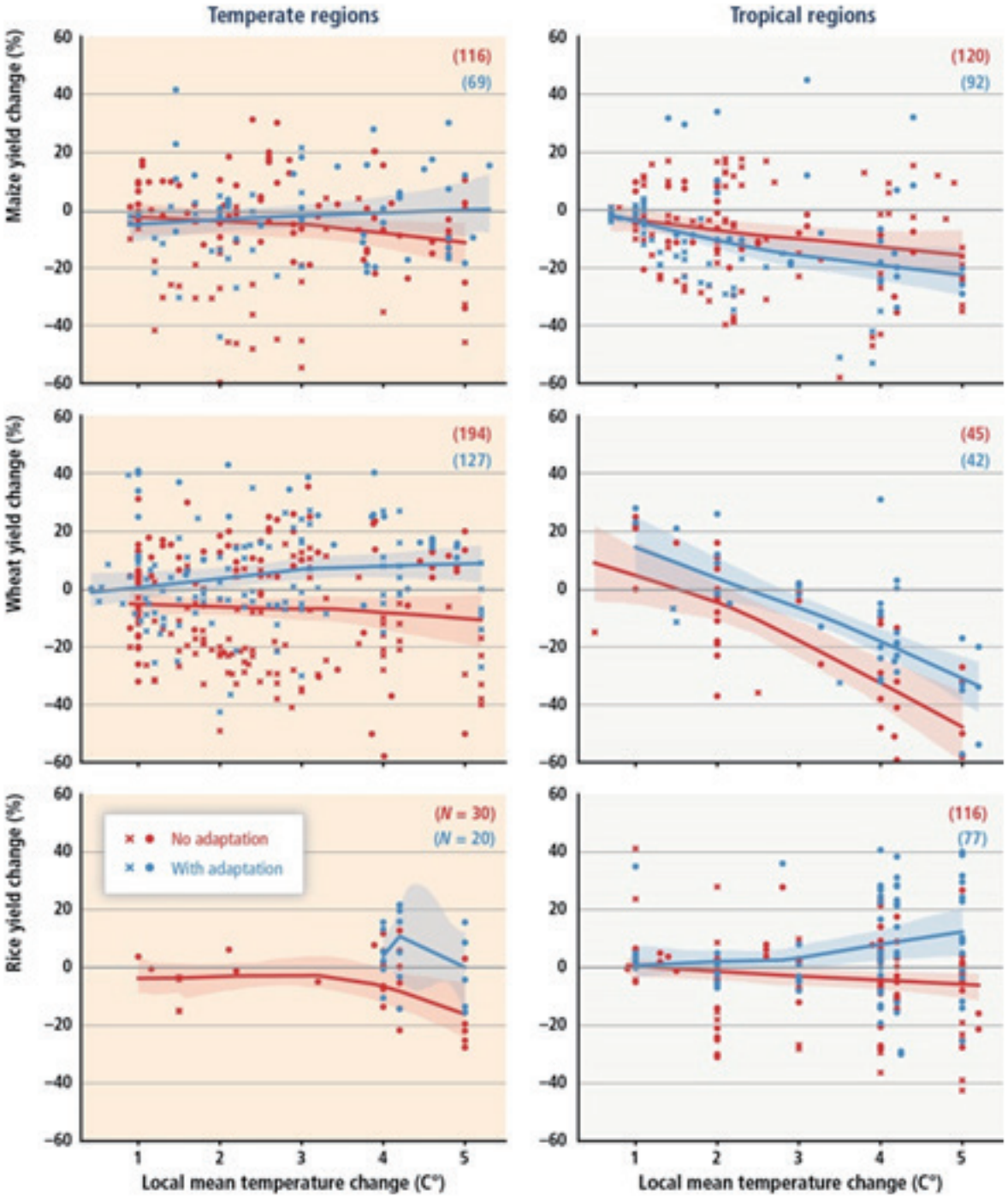


i. John R. Porter 教授是哥本哈根大学气候和粮食安全教授。
ii. Manuel Montesino 博士是哥本哈根大学的成员。
iii. Mikhail Semenov 博士是英国洛桑研究所的成员。
iv. 该图包括对不同排放量情景的预测，分别针对热带和温带地区、采取适应措施和不采取适应措施的情况。考虑到全球平均气温上升 4˚C 或以上的情景对农作物种植制度的影响方面的研究相对较少。对于短期和长期的五个时间段（以 20 年为单位），该图显示了横轴上每个时间段的数据（n=1090），包括每个未来预测期的中间点。农作物产量的变化是相对于 20 世纪末的水平。每个时间段的数据总和为 100%。

图 1 显示了农作物产量变化的总预测值，其中包含的变化因素有：不同的农作物、不同的地区、不同的气候变化水平以及不同的假设（包括是否采取了适应性措施）。根据该高层次概况，我们可以初步推断出一些“最坏情况”信息：到 2030 年至 2049 年，预测产量降低 25% 至 50% 的比例范围是 0 至 10%；到 2090 年至 2109 年，预测产量降低 50% 至 100% 的比例范围是 0 至 20%。

然而，均值是存在危险的。当我们把不同的研究数据分开（如图 2 所示），各种可能的结果就显而易见了。

图 2：**针对三种主要农作物分别生长在温带和热带地区的六种情景下**，模拟作物产量随当地气温变化而变化的情况（单位为百分比）。[v] 来源于 IPCC 第五次评估报告。[4]



从这些基础性的数据中，我们可以看出：对于面临同样的气温上升幅度、生长在同一地区的同一作物，不同的预测呈现出巨大差异。例如，两项研究都是分析对巴基斯坦小麦生产的影响，二者都假设温度变化为 3˚C，但其中一项研究估计产量会增加 23%，而另一项研究却估计下降 24%。类似地，一项研究分析气温上升 3˚C 对中国水稻生产的影响，估计水稻产量的变化将处于下降 40% 到增加 0.2% 这一范围内。[5] 这些范围的最低值粗略地展现了“可能发生的最坏情况”。

对这些最低预测值和最高预测值的发生概率，我们该如何评估呢？这其中存在许多不确定因素（下文将讨论），而这些预测并非概率性的。大致上，我们可以假设最坏情况和最好情况发生的概率是一样的，但是整体的趋势很明显：当地气温的上升会导致农作物产量的下降。（如下文所讨论，在人口不断增加的情况下，这将是必然趋势）。

IPCC 图中的数据显示，同样的气温上升范围对农作物生产的影响存在巨大的差异。但值得注意的是，这些数据所考虑的气温上升范围却相对较小。如图 2 所示，所有的预测都是基于当地气温上升 1 至 5˚C 的情况，而且其中大多数预测都基于该气温上升范围的低端。由于陆地气温上升幅度高于全球平均水平，因此大多数预测结果可能都在全球平均气温上升幅度范围内，大致在 1 至 3˚C 的区间。IPCC 第五次评估报告第二工作组决策者摘要中指出，“相对而言，很少有研究考虑到全球平均气温上升 4˚C 或更高度数的情景下，气候变化对作物种植制度的影响”。

第 9 章认为，在最坏的情况下，本世纪全球平均气温可能上升 7˚C 以上，而在未来的几个世纪，全球平均气温可能上升 10˚C 以上。相对而言，在全球平均气温上升较高的情景下，关于气候变化对作物生产的影响方面的研究寥寥无几。从这个意义上讲，我们对于最坏情况下气候变化对农作物生产的影响知之甚少。

由于气温上升与其对农作物产量的影响并非呈线性关系，因此缺乏这方面信息的问题显得尤为重要。世界银行题为“扭转升温趋势”的报告讨论了全球气温上升 4˚C 的影响：*“最近的研究也表明，若气温上升或变得更加极端，可能造成更严重的负面影响……特别是，我们面临着极端气温的破坏性作用造成对农作物产量非线性影响的新风险。田野实验显示，气温超过一定阈值后，农作物对气温高度敏感。在全球气温上升 4˚C 的情景下，该影响十分关键。目前，大多数农作物模型尚未考虑该影响，因此近来有人呼吁对当前的农作物—气候模型进行‘全面改造’。”*[6]

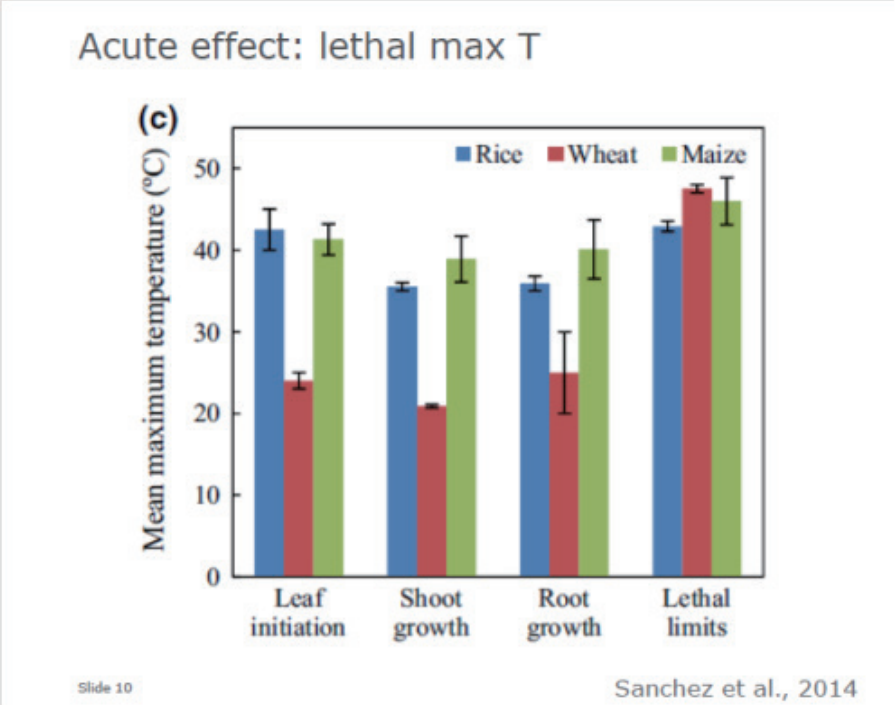
在特定的年份农作物几乎颗粒无收

以上所显示的农作物产量下降的情况，主要考虑的因素是平均气温上升导致生长季节缩短。生长季节缩短意味着播种、培育和结果的时间缩短。同时，一直以来我们都知道，短期的极端高温事件也会对农作物造成严重的破坏。如果气温超过某些临界阈值，尤其是在敏感时期，农作物产量可能出现大幅度下降。[7] 在农作物的花期，如果气温达到 30 至 34˚C，可能会抑制作物的花粉产生和结实，从而导致产量常年出现波动。图 3 显示了小麦、玉米和水稻的一系列阈值，其中包括致死温度限值，即 45 至 47˚C 之间，一旦超过这一温度，植物就会死亡。虽然少数农作物模型纳入了农作物对高温的非线性反应，[8] 但大多数农作物模型尚未考虑这一因素。

---

v. 针对三种主要农作物分别生长在温带和热带地区的六种情景下，模拟作物产量随当地气温变化而变化的情况（单位为百分比）。图中的点表示研究采用大气中二氧化碳浓度变化已知的情景；而其余的数据用 x 表示。注意，图中所示产量之间的差别并没有考虑二氧化碳的肥效作用，因为不同的研究中降水等其它因素的变化各不相同。我们对这些数据子集进行了 500 次的非参数回归（使用局部加权回归法，范围 =1，阶数 =1）。Bootstrap 样本用 95% 置信区间的阴影所表示。我们根据是否采取简单的农业适应气候变化的措施对回归线进行区分（蓝色表示采取措施，红色表示不采取措施）（表 7-2）。对于热带地区的玉米，不采取适应措施情况下的中央回归线比采取措施的中央回归线略高。这是因为数据的不对称性——并非所有的研究都将采取适应措施和不采取措施情况下的作物进行比较。图 7-8 显示了两种情况的成对比较。请注意，所有 6 张图的 1048 个数据点中，有 4 个数据点在显示的产量变化范围之外。为了清晰起见，我们将这 4 个数据点忽略。一些研究有相关的时间基线，中心点往往在 1970 年和 2005 年之间。要注意，农作物种植地区的当地气温上升幅度一般超过全球平均气温的上升（图 21-4）。

图 3：**水稻、小麦和玉米**—发芽、新枝生长、根系生长和死亡的平均最高气温



Manuel Montesino 博士、Mikhail Semenov 博士和教授 Dr John R Porter 博士对该风险评估进行了一项新的研究：农作物花期气温超过阈值的可能性随时间增加的情况。该研究观察在最高排放量情景（RCP8.5）下，三个不同种植地区的三种主要农作物花期气温超过阈值的最大概率的范围。其研究对象为：印度旁遮普省的小麦、中国江苏省的水稻和美国伊利诺斯州的玉米。[vi] 该研究还考虑了每种作物的不同品种和培育方法 [vii]。

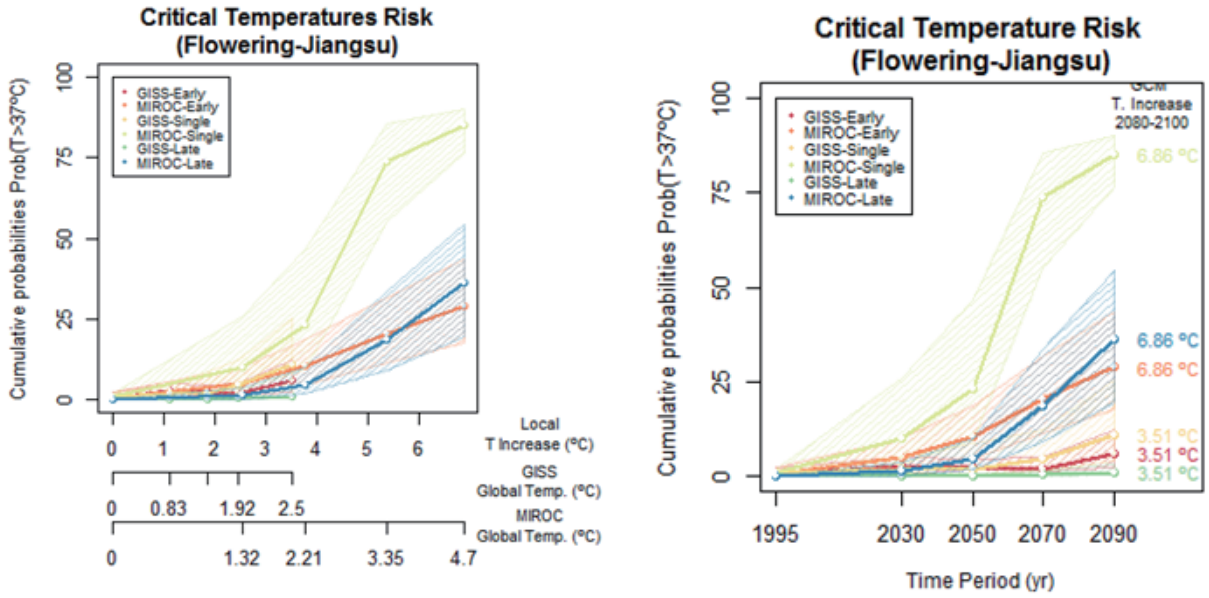
研究结果证实了早前的发现：花期高温所导致的农作物歉收具有重要的研究价值（尤其是对玉米和水稻而言）。在结合农作物和种植地区的研究中发现，中国江苏省的水稻面临的风险最严重。在 2090 年的高灵敏度模式下（见图 4），全球气温上升 4.7˚C（当地气温上升 7˚C），农作物花期（即农作物处于该生长周期时）气温超过阈值至少一次的概率从目前接近于 0% 的水平出现不同程度的增加：有两个品种（早稻和晚稻）超过 25%，而另一个品种（单季稻）超过 80%。我们也可以这样解读这一研究结果：当前，这种情况发生的循环周期是 100 年一次；而到了本世纪末，这种情况发生的周期将缩短为 8 年左右发生一次，或者 1.25 年发生一次（取决于不同的品种）。

数据来源于文献综述：Rosenzweig 和 Parry, 1994 年; Karim 等人, 1996 年; El-Shaher 等人, 1997 年; Kapetanaki 和 Rosenzweig, 1997 年; Lal et al., 1998 年；Moya 等人，1998 年；Winters 等人，1998 年；Yates 和 Strzepek, 1998 年；Alexandrov, 1999 年；Kaiser, 1999 年；Reyenga 等人，1999 年；Alexandrov 和 Hoogenboom, 2000 年；Southworth 等人， 2000 年；Tubiello 等人，2000 年；DeJong 等人，2001 年；Izaurralde 等人，2001 年；Aggarwal 和 Mall, 2002 年；Abou-Hadid, 2006 年；Alexandrov 等人，2002 年；Corobov, 2002 年；Chipanshi 等人， 2003 年；Easterling 等人，2003 年；Jones 和 Thornton, 2003 年；Luo 等人，2003 年；Matthews 和 Wassmann, 2003 年；Droogers, 2004 年；Howden 和 Jones, 2004 年；Butt 等人，2005 年；Erda 等人，2005 年；Ewert 等人，2005 年；Gbetibouo 和 Hassan, 2005 年；Izaurralde 等人，2005 年；Porter 和 Semenov, 2005 年；Sands 和 Edmonds, 2005 年；Thomson 等人，2005 年；Xiao 等人，2005 年； Zhang 和 Liu, 2005 年；Zhao 等人，2005 年；Abraha 和 Savage, 2006 年；Brassard 和 Singh, 2007 年、2008 年；Krishnan 等人，2007 年；Lobell 和 Ortiz-Monasterio, 2007 年；Xiong 等人，2007 年；Tingem 等人，2008 年；Walker 和 Schulze, 2008 年；El Maayar 等人，2009 年；Schlenker 和 Roberts, 2009 年；Thornton 等人，2009 年 a、 2010 年、2011 年；Tingem 和 Rivington, 2009 年；Byjesh 等人， 2010 年；Chhetri 等人，2010 年；Liu 等人，2010 年；Piao 等人，2010 年；Tan 等人，2010 年；Tao 和 Zhang, 2010 年、2011 年 a,b；Arndt 等人，2011 年；Deryng 等人，2011 年；Iqbal 等人，2011 年；Lal, 2011 年；Li 等人，2011 年；Rowhanji 等人，2011 年；Shuang-He 等人，2011 年；Osborne 等人，2013 年。

vi. 具体的地点为：印度旁遮普省（北纬 31.01°，东经 75.4°）；中国江苏省（北纬 32.9°，西经 119.16°）；美国伊利诺斯州（北纬 39.7°，西经 -89.5°）。

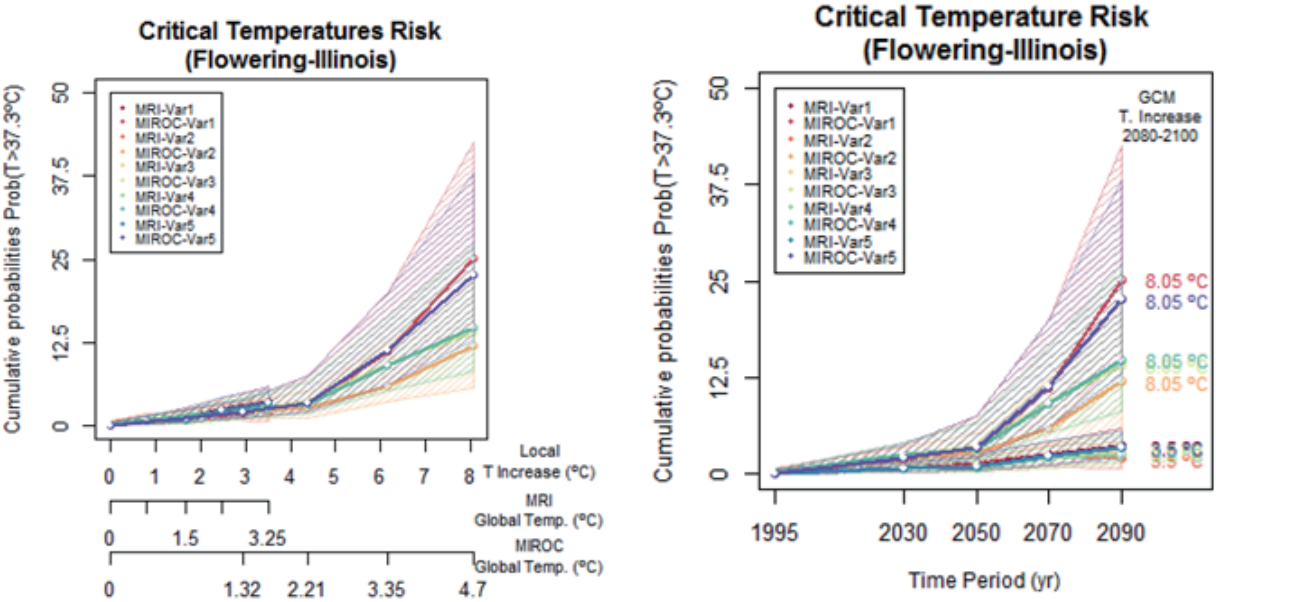
vii. 这里“培育”主要是指种植和播种日期。在一些情况下，我们假设不同品种的种植 / 播种日期相同；而在另一些情况下，若能获得相关数据，那么每个品种都有特定的种植 / 播种日期。

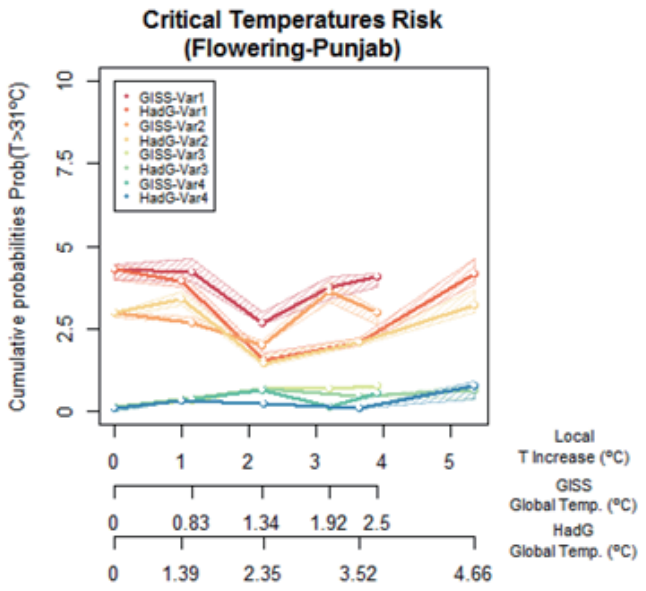
图 4：**江苏省水稻花期气温超过阈值的概率随着气温上升（a）和时间的推移（b）而变化的情况。**研究结果分别针对两种气候模型（GISS 和 MIROC）和三个品种的水稻。

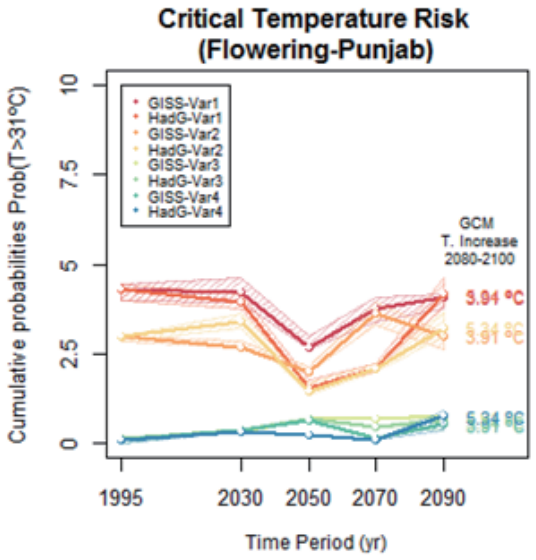


在伊利诺斯州，玉米花期气温超过阈值的循环周期目前约为 100 年一次；若全球气温上升 2 至 3˚C，则该循环周期缩短为 50 年一次（概率增加为 1 至 3%）；若全球气温上升 4.7˚C（当地气温上升 8˚C），则该循环周期缩短为 6 年一次（概率增加为 6 至 40%）。在旁遮普省，小麦在高温下受到严重影响的风险较小，因为当地小麦可以提前进入花期，从而避开最高温度。

图 5 和图 6：**伊利诺斯州的玉米（图 5）和旁遮普省的小麦（图 6）花期气温超过阈值的概率随着气温的上升（a）和时间的推移（b）而变化的情况。**研究结果分别针对两种气候模型（玉米是 MRI 和 MIROC 模型，而小麦是 GISS 和 HadG 模型）和几个不同品种的玉米和小麦。







需要提醒的是，此处所展示的研究结果并未量化气候变化对农作物的影响。这些研究结果仅涉及气温超过阈值的概率。我们得出了花期气温超过阈值将对农作物产生严重影响的结论，但是我们并未对其影响程度进行量化。若要对相关影响进行量化，将需要实验和更进一步的建模研究，但是概率的权衡结果是玉米和水稻（玉米、水稻和小麦为全球三大作物）在生长敏感期遭遇短暂高温后，将面临产量大幅下降的风险。

单个农作物生产的风险：我们知道什么，我们不知道什么，以及我们的想法是什么。

我们知道什么：

通过过去 30 至 40 年关于农作物生理学方面的研究，我们能够理解、量化从而在一定程度上预测环境因素（包括温度、二氧化碳浓度以及水和养分的供应）对主要农作物的影响。[10] 这些理解来源于实验室、生长箱和田间成千上百次的实验。

我们不知道什么：

农作物对气候变化的反应不确定性的一个主要来源是，生长和发育控制因素相结合是如何影响作物产量的。这对于非主要但也很重要的作物来说尤其如此，例如小米、高粱和蔬菜。一般来说，关于二氧化碳浓度、温度和养分变化的组合效应的研究比针对单个因素的研究要少。另一个主要的不确定性是疾病、害虫和杂草造成的生物胁迫的影响。考虑到这些因素就意味着，不确定性的真实范围甚至比作物模型预测的范围更广泛。

我们的想法是什么：

总体来说，模型未考虑的大多数因素及其预测可能带来负面影响。由于气候变化，预计入侵杂草将进一步蔓延，变得更有竞争力；研究表明，植物遭到虫害的风险倾向增加；预计更频繁的强降水、洪水和干旱将进一步降低作物的平均产量。[11]

全球农作物生产的风险：不能满足需求的风险

全世界已经有几亿人营养不良，但不是因为没有足够的粮食。粮食安全不仅取决于粮食的生产，还取决于人们是否能够获得和负担粮食、粮食的储存系统、运输和交易以及消费模式和营养。气候变化可能影响粮食安全的所有因素，而粮食安全还将受到非气候因素的影响。IPCC 称：*“气候变化对粮食安全的总体影响远比预测的仅对农业生产力的影响复杂，可能也要大得多。”*[12] 这一更复杂的风险在我们风险评估的第三部分“系统性风险”中阐述。

这里我们仅关注一个问题，即全球的农作物生产是否能满足不断增长的需求。由于人口数量的增长和经济发展，2005 年到 2050 年全球农作物的需求量预计将增加 60% 到 100%。[13] 联合国粮农组织估计，要满足这一需求，需要农作物的产量每十年增加约 14%。[14] 在过去，人们采用更好的农作物品种和管理方法，农业产量已取得了几乎同等比例的快速增长。由于发展中国家的农业集约化（主要是通过改善基础设施和作物管理，尤其是化肥的使用和更有效的灌溉），未来农业产量还有进一步增长的空间。问题是，我们能否在任何程度气候变化的情况下都能实现这样的高增长率，并维持较高的农业产量。

最终，这在很大程度上取决于我们称之为“适应”的能力。因此，了解适应是否有限制、约束或阈值（一旦超过该值，适应的难度将大大增加）是风险评估的关键问题。

旨在降低气候变化对农作物生产风险的主要适应性反应包括：

i. 在一年中不同的时间种植作物；

ii. 加强作物对极端条件的耐受性；

iii. 在不同的地点种植作物（生产地区的迁移）；

iv. 将不同作物一起种植。

上述所有反应措施可能受到一些限制或约束。例如：

i. 作物种植的时间。例如，生长期取决于昼长（“光周期”）和温度。改变种植的时间和地点可以获得的效果有限，因为对温度有利的改变可能对光周期不利。

ii. 农作物对高温的耐受性可以通过育种或转基因提高，但可能提高的程度最终受到生物物理限制。证据是，不论是同一作物的不同品种之间，还是作物本身之间，这些敏感性方面几乎没有遗传变异。[15]

iii. 闲置土地的供应有限，而且并不是所有这些土地都适合我们想要种植的作物。例如，将俄罗斯小麦生产向北迁移的可能性受到该地区土壤营养状况差的限制。（那些土壤还含有大量的碳；在这样的土地上耕种可能释放大量的二氧化碳和甲烷到大气中，从而进一步加剧气候变暖）。

iv. 过度依赖于几种主要的农作物意味着替代性作物的利用率太低，尚有待研究。

我们知道什么，我们不知道什么，我们的想法是什么？

我们知道，粮食安全以及粮食的需求与供应之间的平衡不仅仅关系到农作物的生产。重要的是，我们要观察，在整个过程中哪些环节可以增加产量、提高效率和减少损失（这些问题在第三部分进一步讨论）。同时，我们知道农作物的生产至关重要。

我们知道气候变化对农作物的生产造成威胁（如上所述），而且我们的适应能力也可能受到限制。关于何时何地会受到这些限制，我们的了解还不充分。

我们的想法可以用 IPCC 的主要结论进行总结：*“全球气温与 20 世纪末相比上升 4℃或更高，再加上粮食需求增加，将在全球和地区范围内对粮食安全造成巨大的风险”*[16]，*更详尽的阐述是：“因此，气候临界阈值的存在、主要农作物产量与温度和降雨量之间呈现非线性关系的证据表明，全球变暖也可能存在阈值，超过该值，目前的农业实践将无法支持人类文明，而营养不良的影响……也将变得更加严重。然而，目前估计全球气温上升情况下粮食产量受损对人类健康影响的模型，一般来说既未考虑临界阈值，也未考虑非线性响应函数，这反映了暴露 - 反应关系、未来的极端事件、适应的规模和可行性以及植物病虫害等其它影响因素的气候阈值存在不确定性。然而，据目前的模型推断，全球平均气温上升 4 到 6℃或更高时，全球粮食安全的风险将变得非常严重（证据中等，一致性高）。”*

尾注

1. Porter, J.R., L. Xie, A.J. Challinor, K. Cochrane, S.M. Howden, M.M. Iqbal, D.B. Lobell 和 M.I. Travasso （2014 年）。“粮食安全和粮食生产系统”，《2014 年气候变化：影响、适应和脆弱性。A 部分：全球和部门情况。》IPCC 第五次评估报告第二工作组供稿 [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea 和 L.L. White（编辑）]. 英国剑桥和美国纽约，剑桥大学出版社，第 485 至 533 页。
2. 根据 businessdictionary.com 的定义。
3. 图 SMP.7, 来自 IPCC（2014 年）第 18 页。“决策者摘要”。《2014 年气候变化：影响、适应和脆弱性。A 部分：全球和部门情况。》IPCC 第五次评估报告第二工作组供稿 [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea 和 L.L. White（编辑）]。英国剑桥和美国纽约，剑桥大学出版社，第 1 至 32 页。
4. 图 7-4，第 498 页，来自 Porter 等人（2014 年）。
5. 见框 7-1, IPCC（2014 年）第 509 至 512 页。《2014 年气候变化：影响、适应和脆弱性。A 部分：全球和部门情况。》IPCC 第五次评估报告第二工作组供稿 [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea 和 L.L. White (编辑)]。英国剑桥和美国纽约，剑桥大学出版社，共 1132 页。
6. 世界银行（2012 年）。扭转升温趋势：为什么一定要避免全球气温上升 4°c。华盛顿特区：世界银行。第 46 页。http://documents.worldbank.org/curated/en/2012/11/17097815/turn-down-heat-4° c-warmer-world-must-avoided
7. 植物试验已证明花期遭受高温胁迫对粮食作物产量的负面影响，这些试验分别针对小麦（FERRIS 和 RACHEL 等人，“花期遭受高温胁迫对小麦的粮食产量和田间栽培作物生物量的影响”，植物学年报 82.5（1998 年）：第 631 至 639 页）、水稻（Jagadish, S. V. K., P. Q. Craufurd 和 T. R. Wheeler，“高温胁迫和水稻的结实率（Oryza sativa L）”，实验植物学期刊 58.7（2007 年）：1627 年至 1635 年）和花生（Prasad 和 Pagadala V. Vara 等人，“短期遭受高温胁迫对花生的开花和结果的影响 (Arachis hypogaea L)”实验植物学期刊 51.345（2000 年：777-784）。
8. Challinor, A. J., 等人，“模拟高温胁迫对农作物年产量的影响”。《农业和林业气象学》135.1 （2005 年）：第 180 至 189 页。
9. Sanchez, B., Rasmussen, A. 和 Porter, J.（2014 年），“温度与玉米和水稻的生长：评论”。《全球变化生物学》20，第 408 至 417 页，doi: 10.1111/gcb.12389
10. Hay, R.K.M. 和 Porter, J. R.（2006 年）。《农作物产量的生理学》。 Blackwells 科学出版物。
11. Porter 等人（2014 年）。
12. Porter 等人（2014 年），第 502 页。
13. 世界银行（2012 年），第 44 页。

14. Porter 等人（2014 年），第 506 页。
15. 见 Sanchez 等人（2014 年）以及 Porter JR 和 Gawith M（1999 年）。“温度与玉米和水稻的生长：评论”。《欧洲农艺学杂志》10，第 23 至 36 页。
16. IPCC（2014 年）。“决策者摘要”。

12. 水资源压力的风险

Nigel Arnell 教授，沃克气候系统研究所主任。

由于水资源的需求量增加，甚至某些地方水资源的质量下降，因此许多地区都面临水资源压力。气候变化可能会改变水资源压力的风险。[1] 本节的重点是水资源压力的战略性定义，该定义基于可用水量和水资源需求量的广义指标。另一方面，操作性定义一般来说基于供应优质水的可靠性，并强烈依赖于当地情况。

我们希望避免什么风险？

衡量高尺度水资源短缺压力使用最广泛的指标基于水资源总量与人口的比例（“人均水资源量”）和供人类使用的资源比例。[2] 前者更简单，但不能反映人均用水量高带来的压力，例如农业灌溉用水量大的情况；另一方面，目前和未来取水量方面的数据可能存在高度的不确定性。

基于人均水资源可用量，我们有三个广泛使用的阈值来定义水资源压力的级别。年人均水资源可用量介于 1000 到 1700 立方米之间的流域或国家通常归类为“中度缺水”。如果年人均水资源可用量低于 1000 立方米，那么该地区归类为“长期缺水”。如果年人均水资源可用量低于 500 立方米，那么该地区“极端”缺水。[3] 这些阈值实际上是任意的，虽然最终来自于对非洲面临水资源压力情况的评估[4]。

2010 年，在全球约 69 亿的人口中，将近 36 亿人生活在年人均水资源可用量低于 1700 立方米的流域地区（表 W1），将近 24 亿人生活在年人均水资源可用量低于 1000 立方米的流域地区（长期缺水）。约 8 亿人生活在年人均水资源可用量低于 500 立方米的流域地区（极端缺水）。

表 W1：**生活在缺水的流域地区的人数（单位：百万）**。2050 年的数据基于人口数量以中等速度增长的假设，范围表示人口低速和高速增长的假设条件下的影响。

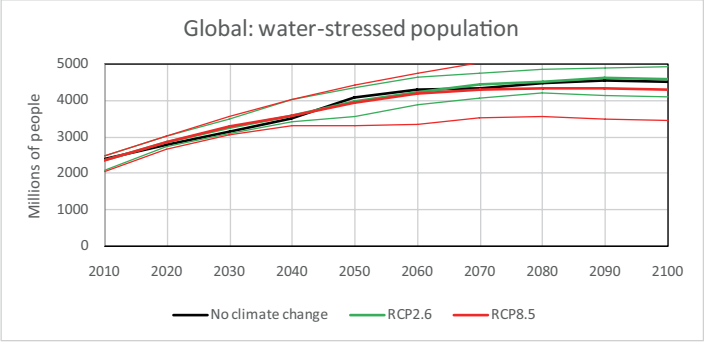
	2010年				2050年			
	<700立方米/人/年	<1000立方米/人/年	<500立方米/人/年	人口数量	<700立方米/人/年	<1000立方米/人/年	<500立方米/人/年	人口数量
北非	161	149	93	209	254（226-326）	243（212-281）	216（152-248）	329（291-382）
西非	54	16	4	309	484（373-609）	366（184-488）	36（20-117）	755（616-925）
中非	3	0	0	109	11（9-13）	7（6-8）	5（0-7）	239（201-276）
东非	93	9	1	193	326（272-441）	299（159-381）	103（12-220）	417（349-496）
南非	46	19	0	209	186（132-281）	101（44-177）	24（4-34）	487（395-608）
南亚	1394	1171	199	1705	2121（1906-2525）	1801（1511-2183）	745（628-1002）	2389（2151-2722）
东南亚	7	0	0	604	27（25-30）	0（0-0）	0（0-0）	791（727-889）
东亚	1201	690	386	1546	1084（1035-1183）	643（613-659）	358（340-388）	1433（1374-1510）
中亚	1	0	0	45	65（56-79）	1（1-1）	0（0-0）	69（61-84）
中东	0	93	70	214	0（0-0）	310（221-344）	190（164-208）	379（338-419）
澳大拉西亚	219	0	0	34	220（238-165）	0（0-0）	0（0-0）	50（49-44）
西欧	50	123	20	410	23（24-20）	137（165-54）	23（24-14）	424（441-343）
中欧	19	7	0	117	9（7-17）	1（7-1）	0（0-0）	101（102-95）
东欧	165	4	2	221	356（294-397）	3（3-4）	3（3-4）	186（177-195）
加拿大	5	5	0	34	7（7-5）	7（7-5）	7（7-0）	43（45-31）
美国	77	53	26	311	99（102-74）	73（75-55）	38（39-25）	389（401-303）
中美洲	57	26	0	196	124（111-153）	61（53-101）	30（28-36）	279（250-345）
巴西	0	0	0	195	0（0-0）	0（0-0）	0（0-0）	236（217-268）
南美	14	4	3	197	46（28-55）	18（16-25）	5（5-6）	277（250-329）
全球	3575	2375	809	6867	5449（4853-6381）	4079（3286-4773）	1789（1429-2316）	9283（8444-10272）

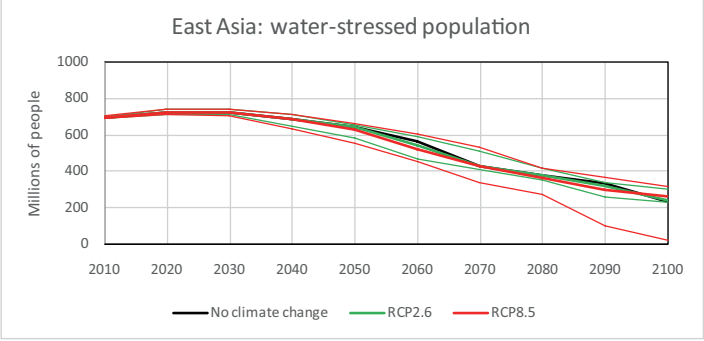
未来人们面临的水资源压力会发生哪些改变？

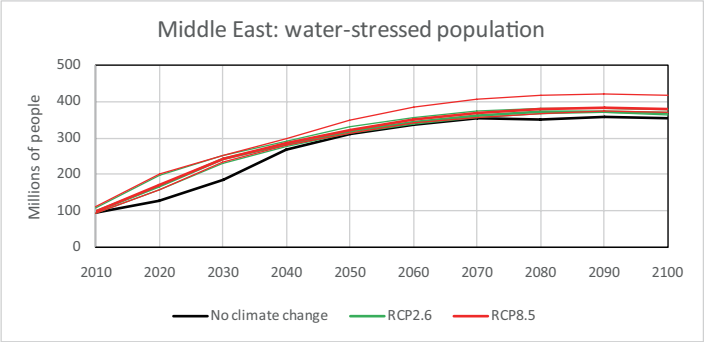
在 21 世纪，全球总人口数量的变化会带来人口面临水资源压力情况的变化。到 2050 年，在人口维持中等增速的假设条件下[5]，流域地区年人均水资源可用量不到 1000 立方米的人口数量将达到 40 亿——高于 2010 年占全球总人口数的比例。人口增长对于流域地区年人均水资源可用量低于 500 立方米的人口数量会产生更加明显的作用：流域地区年人均水资源可用量低于 500 立方米的人口数量到 2050 年将会翻一番，达到 18 亿。假设的人口数量变化会在一定程度上影响水资源压力变化的幅度（如表 1[6] 所示），但是即使人口增长速度缓慢，在全球和区域范围内，人们将面临更严重的水资源短缺。

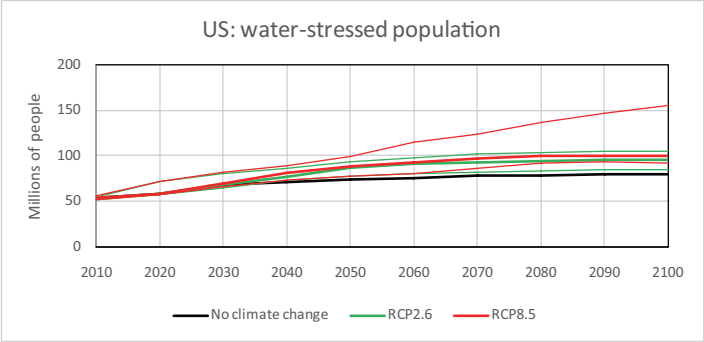
影响面临水资源压力人口数量的还有气候变化的因素。图 W1 中列出了在没有气候变化以及在两种不同的气候变化路径（即 RCP2.6 和 RCP8.5 情景，分别代表低水平和高水平温室气体排放量）的三种情景下，在 21 世纪，全球和五个地区流域中面临长期缺水问题（年人均水资源可用量低于 1000 立方米）的人口数量变化趋势。阴影区域代表了在气候变化为资源变化模式带来不确定性的情况下，可能会出现的数据范围是什么。所有的图都是在人口增长速度中等的假设条件下预测。

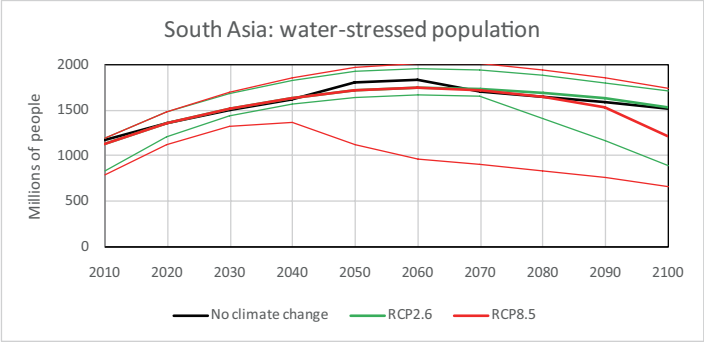
图 W1：**在出现和不出现气候变化的两种情况下流域地区面临水资源压力（年人均水资源可用量低于 1000 立方米）的人口数量。**图中显示了两种不同的气候路径（RCP2.6 和 RCP8.5）情景。实线表示每种路径情景下影响的中间估值，而阴影部分显示出 10% 到 90% 的范围。假设人口数量以中等速度增长。

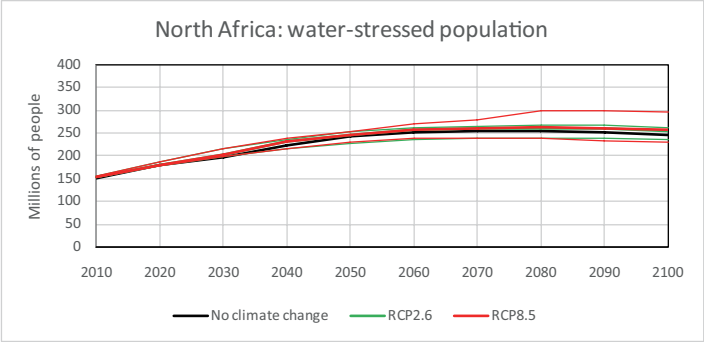










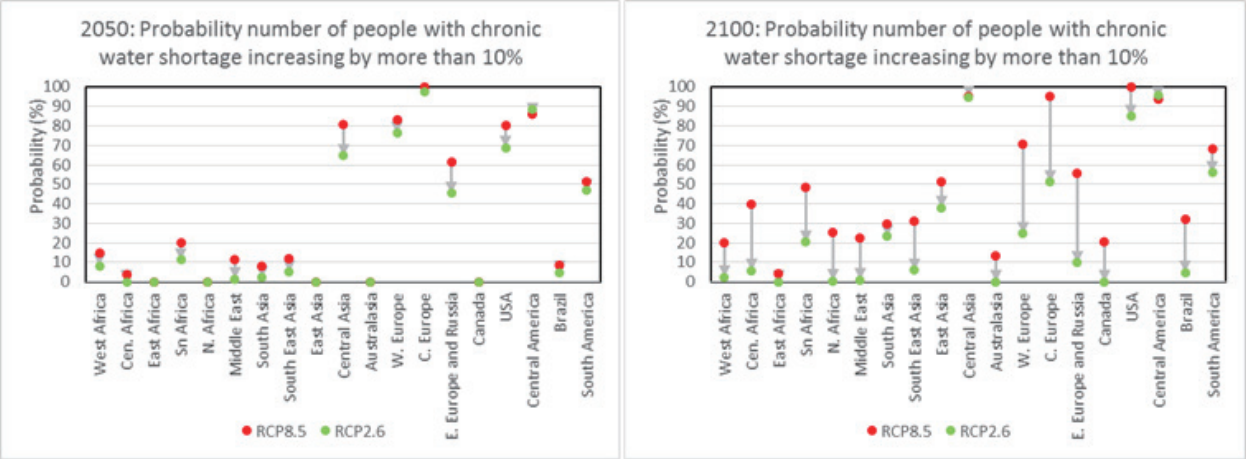


在未来不出现气候变化的情况下，东亚和南亚流域地区长期面临缺水情况的人口数量分别于 2030 年和 2060 年开始出现下降趋势。如果考虑到气候变化，那么会给东亚带来更多的降雨和河流径流。再加上人口数量的减少，明显缺水的情况会有所缓解——但气候变化也可能（如阴影部分所示）减缓人们缓解缺水问题的过程。同样，如图 W1 所示，气候变化可能会大幅度增加南亚流域地区长期面临缺水问题的人口数量——或者减少这部分的人口数量。在美国和中东，气候变化在整个 21 世纪都很有可能增加面临缺水问题的人口数量；而在北非，有超过一半的可能性会增加面临缺水问题的人口数量。

风险计算

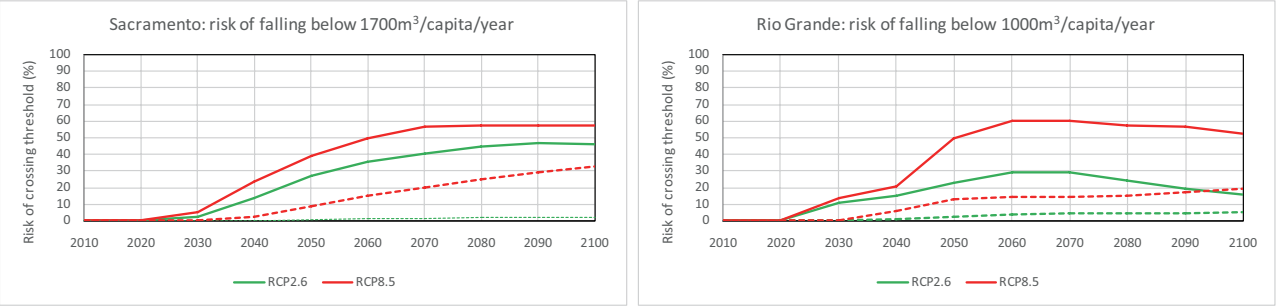
图 W2 显示了不同地区在两种气候路径情景下气候变化带来流域地区长期面临缺水情况的人口数量增加 10% 以上的风险。到 2050 年，出现概率最大的地区涵盖中亚、欧洲、美国、中美和南美。到 2100 年，大部分地区更多人面临缺水问题的概率与 2050 年相比将大幅增加。对于大部分地区，低排放量气候路径情景下该概率要远低于高排放量路径情景下的概率；尤其是到 2100 年，这种差距更为明显。

图 W2：**在两种气候路径情景下，相对于不出现气候变化的情况，气候变化带来流域地区长期面临缺水情况的人口数量增加 10% 以上的风险。**假设人口数量按照中等速度增长。

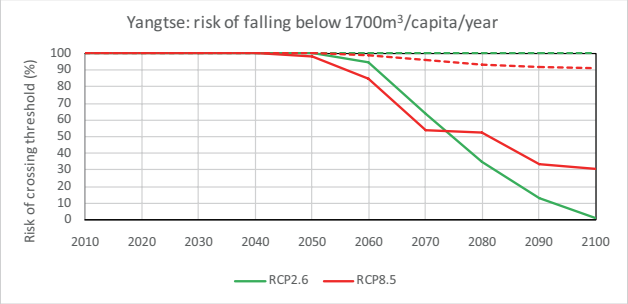


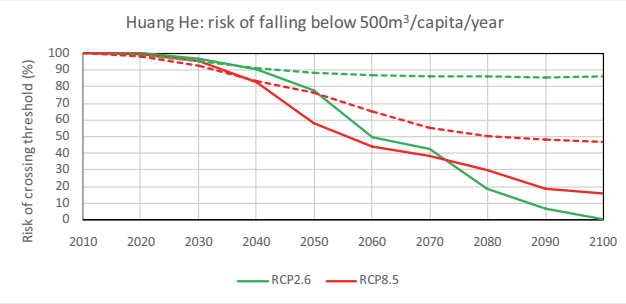
评估气候变化对于水资源匮乏带来的风险还可以使用基于流域尺度的方法。图 W3 显示了 九个主要流域人均水资源低于设定阈值的概率，这九个流域正在面临或有可能面临水资源的压力（注意，不同流域的阈值会有所不同）。虚线表示假设人口数量维持在 2010 年水平，在两种气候路径情景下低于该阈值的概率；实线表示中等人口增速情况下的概率。实现与虚线之间的差别代表人口变化对概率的影响（当然这种差别会因为不同的人口预测水平而有所不同）。

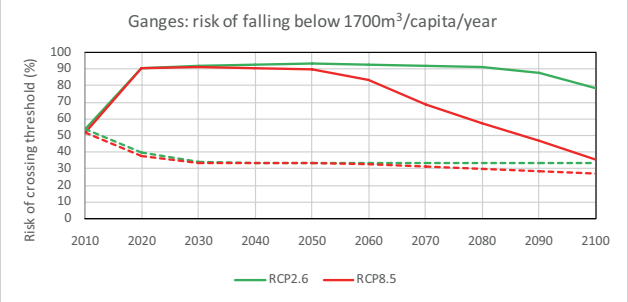
图 W3：**在两种气候路径情景下，九个主要流域人均水资源低于设定阈值的风险（注意，不同流域的阈值会有所不同）**。实线表示人口数量维持现在（2010 年）水平条件下的风险，而虚线表示中等人口增速假设条件下的风险。

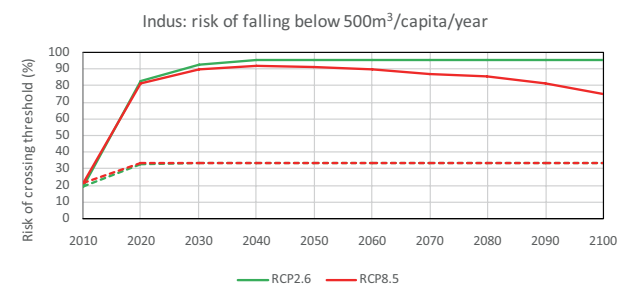


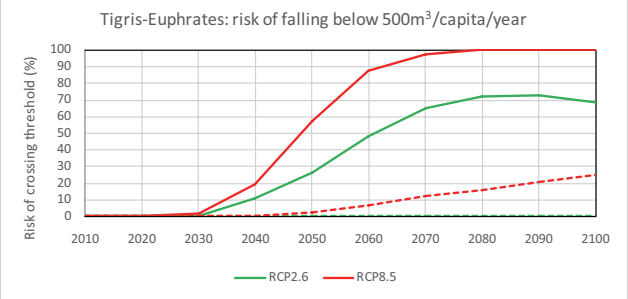
风险评估第二部分：直接风险

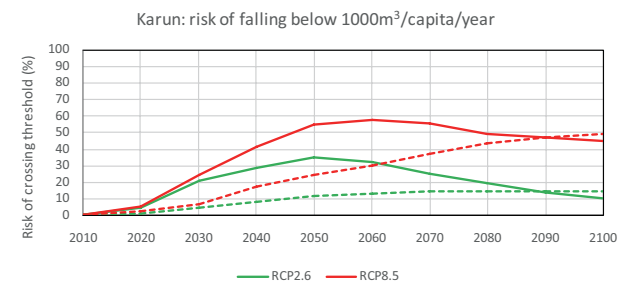


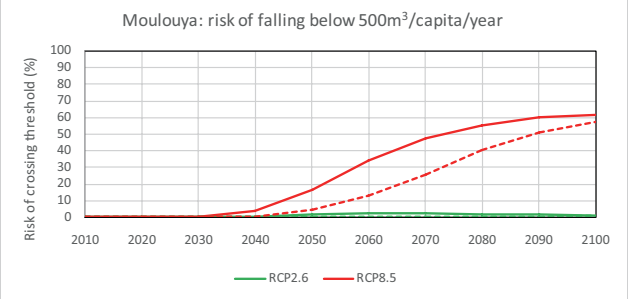












气候变化会给水资源压力可能带来的最坏情况是什么？

即使是假设人口数量呈现单一变化，气候变化对水资源压力的预期影响也存在着很大的不确定性。如前一节中指出的，影响超过某个设定阈值的可能性代表了不确定性的一个方面，但是另一项风险评估可以基于看似可能的“最坏情况”。

到 2050 年，在高排放量和出现最极端气候的情景下，在 40 亿流域地区人口面临长期缺水情况的基础上，可能会增加多达 6.2 亿人（表 W1）。图 W4 显示了 2050 年各地区的“最坏情况”以及影响分布中第 10 个百分点的情况（图 W1 阴影区域的上部分）。在某些地区，最坏情况和第 10 个百分点的情况没什么差别；但在其他地区，最坏情况的影响远远超过第 10 个百分点的情况，这反映了影响预测中存在较大的不确定性。然而，图 W4 所示的最坏情况不会同时出现：全球的“最坏情况”不等于地区最坏情况的总和。在任何一种可能的气候变化模式下，都不可能所有水资源短缺的地区都有最大限度的径流降幅。

图 W4：**2050 年气候变化对水资源压力可能的最坏影响。**从该图中可以看到，在 RCP8.5 气候路径情景和人口以中等速度增长的预测下，长期面临缺水的人口数量增长趋势。影响超过蓝点所示影响的概率为 10%，红点则表示计算的最严重影响。

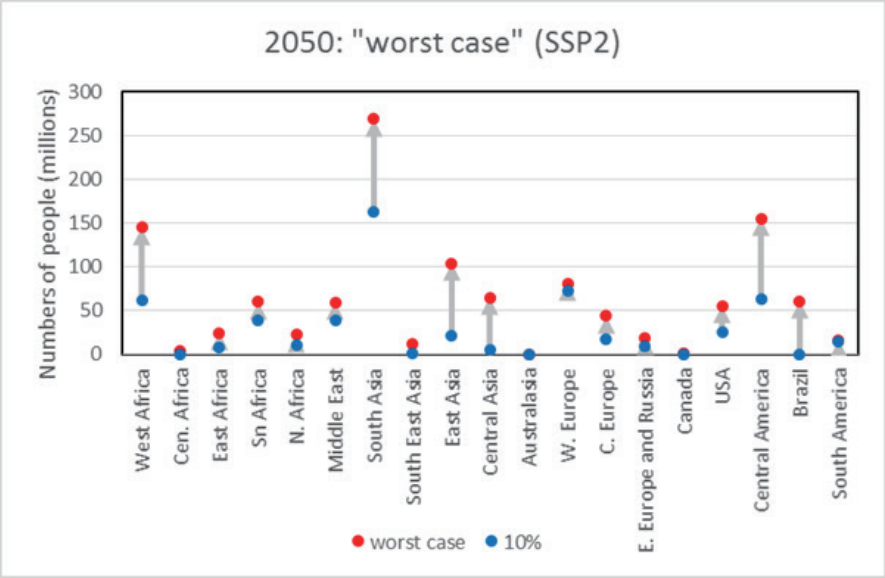


图 W4 中的评估基于一个假设，即用于估计影响的所有气候模型都具有同样的可能性，而且涵盖了潜在的区域气候变化影响范围。当然，事实情况不一定如此。全球范围的影响在很大程度上以对南亚的影响为主，其次是对东亚的影响；因此，全球范围的影响对南亚季风变化的预测可能会非常敏感（见框 1）。

框 1 – 印度季风气候的变化

Brian Hoskins 教授，英国皇家学会会员（FRS）

在影响研究中，假设一组最先进的气候模型对未来气候的预测跨越了可能的气候空间。特别需要指出的是，在确定由温室气体增加所带来的风险时，假定任何地区最坏的情况都被包括在模型预测中。然而，在 20 世纪的气候背景下开发并且验证的气候模型存在已知的缺陷，其中有一些缺陷在大多数模型上都会出现。其中的一些缺陷都有可能影响未来极端气候变化的模拟。此外，由于在气候系统可能会出现超过阈值的情况，目前不能明确这些气候模型是否能够模拟任何主要的气候变化。例如，永久冻土融化产生大量温室气体排放量，南极西部冰原出现不稳定或大西洋翻转环流出现大幅度的减少，这些都可能会是重大的气候变化。古气候使用的模型显示，它们无法模拟到底在过去世界的季风系统有什么不同。例如，撒哈拉沙漠在大约七千年以前覆盖着绿色的植被。然而，气候模型不产生这种大的降雨变化。最近的一项研究得出结论：*“最先进的模型基本上没有针对实际发生的突变进行测试。假设用这些模型对下个世纪进行模拟将提供突发性灾难事件的可靠预警，这在信心方面的一大飞跃。”*[7]。

印度夏季风让人惊奇的是，不同的年份之间发生一个小的变化都会产生巨大的影响：降雨增加 10% 就会有洪水，降雨减少 10%就会给农民带来巨大的问题。每年都会出现季风的活跃期和平静期。如果季风平静时间持续超过几周，也会造成重大农业问题。气候模型一般在预测时，都会略有加强季风降雨量；但是我们应当认识到，特定季风的改变（例如在印度），可能会出现更加显著的变化。由于温室气体的排放，气候系统的扰动较大，我们应该做好准备，印度季风带来的平均降雨量可能会在正常范围以外，而且不同年份之间的变化幅度以及在活跃 - 平静周期中都会有很大的不同。

我们知道什么，我们不知道什么，我们的想法是什么？

我们对未来风险的估计是基于：(i) 对地区未来气候变化的预测，(ii) 对气候变化的水文影响的预测，(iii) 对未来人口和面临水资源压力情况的预测。实际中发生的情况还取决于未来的适应措施。

对地区未来气候变化的预测，一部分取决于假设的排放量增加速度，一部分取决于预测的地区和季节性气候变化模式——尤其是降水。虽然不同模型中广泛的降水变化模式是一致的，但是具体、精确的变化幅度却不尽相同。因此，对水资源压力影响的定量估计也有所不同，而这些往往比不同气候模型中明显的降水变化差别更大。这是因为缺水问题集中在世界上的特定地区，在当地和区域范围内不同气候模型之间的差别是最大的。

随着气候模型更好地体现大气动力学和降水分布，对水资源压力影响的精确定量估计也将发生变化。但在未来数年，不同模型之间的差别仍然存在，因此任何一个地方都会有潜在气候变化影响的分布。

通过使用水文模型，我们将气候变化转化为径流的变化，从而评估气候变化对水资源短缺的影响。正如气候模型一样，不同的水文模型对同样的输入数据也会有不同的反应。水文模型不确定性的影响之间的比较仍处于初级阶段[8]，但从初步迹象来看，影响模型不确定性的增加将增加潜在影响的范围。此外，水文模型可能有类似的偏差（例如，所有的水文模型都倾向于高估干旱地区的河流流量），却没有任何一个水文模型明确考虑冰川体积变化的影响，即可能影响某些地区未来的水资源。

未来人口的预测也是不确定的（如表 W1 所示），因为这些预测是基于对生育率、死亡率和人口迁移变化的不同假设。不可能将可能性分配到不同的人口预测，因此有必要对可能的不同人口记录和预测情况分别进行风险评估。

最后，气候变化对“真实的”的水资源短缺的实际影响将取决于为了解决水资源短缺问题而设立的管理基础设施和机构。发达国家与发展中国家之间有着巨大的差别。一些管理干预措施将抵消气候变化的影响，但另一些可能不会。因此，未来的适应性措施对未来“真实的”水资源短缺的影响将取决于：(i) 适应性措施的实施程度（受到经济和制度能力等因素的限制，另外还可能受到一些物理制约，如是否有合适的地方作为蓄水库）以及 (ii) 适应性措施在实践中的有效性。

风险评估的经验教训

因此，本节的主要结论如下：

- 气候变化极大地改变了未来人们面临水资源短缺的风险，但是人口变化将极大地扩大或降低该影响。反过来说，气候变化极大地改变了——增加或减小——不断增加的人口数量对水资源的压力。
- 在某些地区，尤其是东亚和南亚的部分地区，气候变化降低了人们面临水资源短缺的概率，但这可能与洪水风险的巨大变化有关（见第 14 章）。
- 低排放量情景下气候变化造成的风险通常比高排放量情景低，但是这种差别因地而异，取决于该地区的流域靠近水资源短缺阈值的程度。在一些情况下，高排放量情景下的风险要比低排放量情景低，因为径流量的增加更大，足以让流域地区摆脱水资源短缺的情况。

本章的撰写得到 AVOID2 计划（由英国政府和自然环境研究委员会资助）和英国能源与气候变化部门（DECC）的支持 。项目代号为 1104872。

尾注

1. Jimenez-Cisneros, B.E., Oki, T., Arnell, N.W., Benito, G., Cogley, J.G., Doll, P., Jiang,, T. & Mwakalila, S.S.（2014 年）“淡水资源”。出自：Field’, C.B., Barros, V. 等人（编辑）。《2014 年气候变化：影响、适应和脆弱性。A 部分：全球和部门情况。》IPCC 第五次评估报告第二工作组供稿。剑桥：剑桥大学出版社。第 229 至 269 页。
2. Falkenmark, M., Berntell, A., Jagerskog, A., Lundqvist, J., Matz, M. & Tropp, H.（2007 年）《濒临新的水资源短缺边缘：呼吁良好的治理和人类的创造力》。斯德哥尔摩国际水资源研究院政策简报。斯德哥尔摩国际水资源研究院。
Rijsberman, F.（2006 年）水资源短缺：事实还是虚构？《农业水资源管理》80 (1-3) 5-22.
3. Falkenmark, M., Berntell, A., Jagerskog, A., Lundqvist, J., Matz, M. & Tropp, H. （2007 年）《濒临新的水资源短缺边缘：呼吁良好的治理和人类的创造力》。斯德哥尔摩国际水资源研究院政策简报。斯德哥尔摩国际水资源研究院。
Kummu, M., Ward, P.J., de Moel, H & Varis, O.（2010 年）水资源的物理性短缺是新现象吗？对过去两千年全球水资源短缺的评估。《环境研究通讯》5 （2010 年 7 月至 9 月）034006 doi:10.1088/1748-9326/5/3/034006
4. Falkenmark, M. （1989 年）“现在大规模的水资源短缺威胁非洲：为什么不解决问题？”Ambio 18 (2) 第 112 至 118 页。
5. 共同的社会经济路径（SSP）2. https://secure.iiasa.ac.at/web-apps/ene/SspDb/. 这与联合国 2012 年的中等人口预测相似。
6. SSP1 和 SSP3 用来代表极端情况：与联合国 2012 年的低和高人口预测相似。
7. Valdes,P.(2011). ‘ Built for stability’.Nature Geoscience 4 ,414-416.doi:10.1038/ngeo1200
8. Schewe, J., Heinke, J., Gerten, D., Haddeland, I., Arnell, N.W., Clark, D.B., Dankers, R., Eisner, S., Fekete, B., Colon-Gonzalez, F.J., Gosling, S.N., Kim, H., Liu, X., Masaki, Y., Portmann, F.T., Satoh, Y., Stacke, T., Tang, Q., Wada, Y., Wisser, D., Albrecht, T., Frieler, K., Piontek, F., Warszawski, L. & Kabat, P. （2014 年）气候变化情况下对水资源短缺的多模型评估。《美国国家科学院院刊》111，第 3245 至 3250 页，doi.10.1073/pnas.1222460110

13. 干旱的风险

Nigel Arnell 教授，沃克气候系统研究所主任。

我们希望避免什么风险？

干旱对全世界的人类、农业和经济都是重大的挑战。一般来说，有四种类型的“干旱”。

- **气象干旱** – 缺少降水
- **农业干旱** – 土壤缺水
- **水文干旱** – 河流流量和地下水不足
- **水资源干旱**—分配给用水户（如灌溉人员）的水量不足。

一种类型的干旱不一定直接映射到另一种类型的干旱。不论何种类型，干旱的持续时间、强度（缺水量）和空间范围有所不同。因此，对干旱的“影响”和“风险”定性都要比洪水的影响和风险困难很多。我们有许多不同的干旱指标，用于对不同的干旱进行定性。

本节关注气象干旱，根据累积降水赤字的指标对干旱进行定性。尤其是，本节关注在任何特定的时间，遭遇“极端干旱”的农田的平均比例。为此，我们将“极端干旱”定义为目前气候条件下，在 2% 的时间里出现的降水赤字水平。[i] 重要的是要注意，该衡量方法并未考虑气温上升的影响；气温上升会增加蒸发率，从而进一步增加风险。

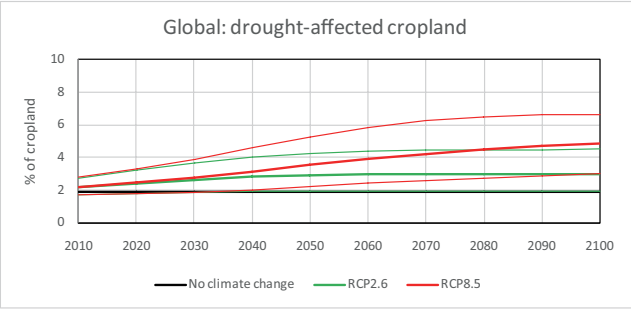
随着时间的推移，干旱的可能性如何变化？

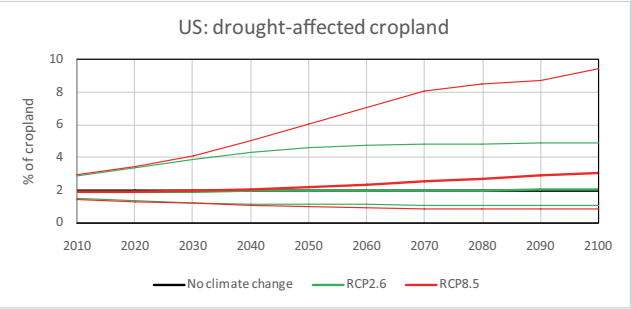
图 D1 显示了在全球范围内和四个主要地区，分别在高排放量（红色）和低排放量（绿色）路径情景下，遭遇干旱的农田的比例随[ii] 时间而变化的趋势。这相当于在特定的年份，特定部分的农田遭遇干旱的概率。

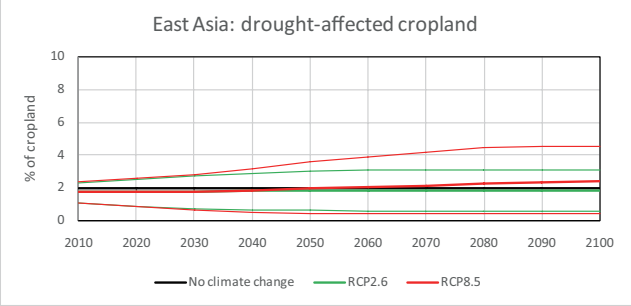
在高排放量路径情景下，根据中间估值，遭遇干旱的农田的比例到 2050 年将增加约 75%，到本世纪末将增加一倍以上。在该路径情景下，本世纪非洲南部的干旱发生率增加约两倍，美国和亚洲的干旱发生率增加约 50%。在低排放量路径情景下，干旱发生率的增幅低很多。此外，我们很清楚，这些预测存在很大的不确定性。不确定性的范围表明，在最佳情况下，某些地区的干旱发生率可能降低一般；而在最坏情况下，却可能增加三至四倍。

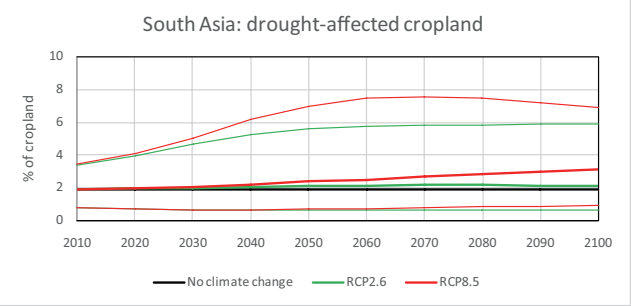
i 见方法框
ii （假设农田总面积没有变化）

图 D1：**在出现和不出现气候变化的情景下，各地区遭遇干旱的农田比例。**图中显示了两种气候路径（RCP2.6 和 RCP8.5）情景。实线表示每种路径情景的中间估值；阴影部分表示 10% 至 90% 的范围。









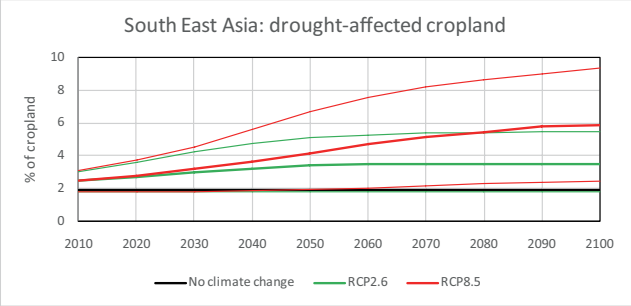
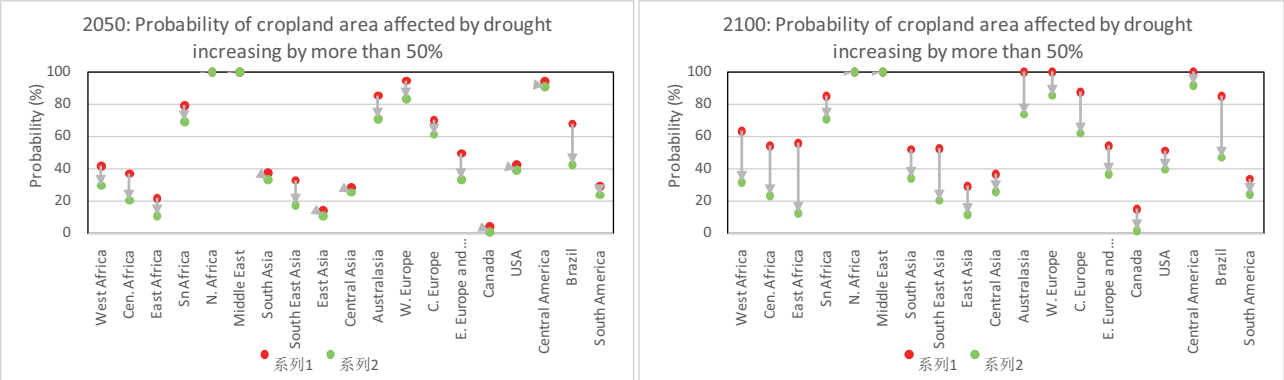


图 D2：在两种气候路径情景下，与不出现气候变化的情景相比，气候变化导致遭遇“干旱”的农田年平均面积增加 50% 以上的风险。



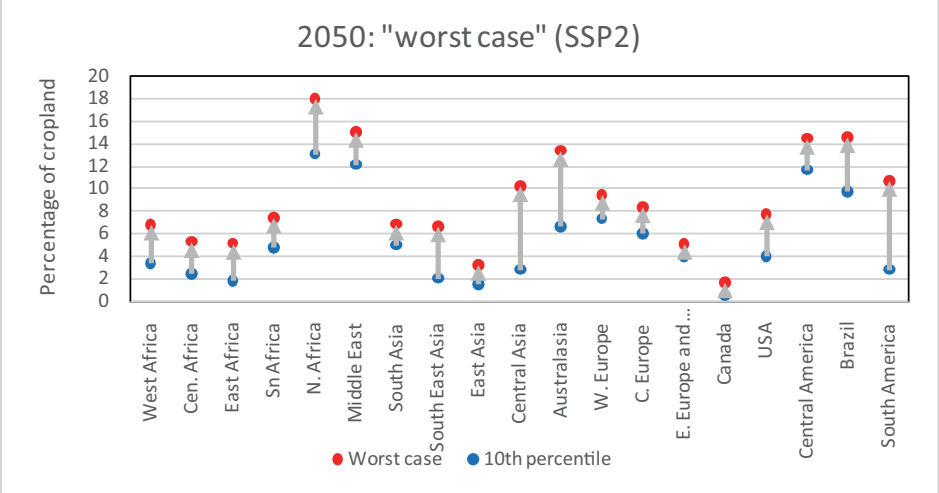
从图 D2 也可以看出这种不确定性。该图显示，分别在 2050 年和 2100 年，气候变化导致一个地区遭遇干旱的农田年平均面积增加 50% 以上的风险。到 2050 年，在高排放量情景下，非洲南部和北部、中东、澳大拉西亚、西欧和中美洲的概率高于 70%。与此相比，在东亚和加拿大，气候变化导致干旱程度增加的概率相对较低。在低排放量情景下，该风险更低，尤其是到 2100 年。

气候变化可能导致的干旱变化的最坏情况是什么？

在全球范围内，到 2050 年干旱的发生率增加 150% 的概率为 10%；可能的最坏情况是，21 世纪下半叶干旱的发生率增加 300%。在最坏情景下，每个地区遭遇干旱的农田比例（图 D3）至少增加一倍；除了加拿大和东亚，该比例至少增加三倍。全球的最坏情况不是各地区最坏情况的总和，因为没有一种可能的气候情景在每个地区都造成最严重的影响。

图 D3 基于一个假设，即用于估计影响的所有气候模型都具有同样的可能性，而且涵盖了潜在的区域气候变化影响范围。当然，事实情况不一定如此。因此，图中的数字只是起一定的指示作用。

图 D3：**2050 年气候变化对遭遇旱灾可能的最坏影响。**从该图中可以看到，与不出现气候变化的情景相比，在 RCP8.5 气候路径情景下，每年遭遇干旱的农田比例的增加。影响超过蓝点所示影响的概率为 10%，红点则表示计算的最严重影响。不出现气候变化的情景下，遭遇干旱的农田的年平均比例仅为 2% 以下。



我们知道什么，我们不知道什么，我们的想法是什么？

对未来干旱风险如何变化的预测基于 (i) 对未来地区性气候变化的预测；(ii) 对如何转化为干旱特征变化的预测 (iii) 对未来遭遇干旱的面积和人数的预测。所有这些预测都存在不确定性。

对未来地区性气候变化的预测部分取决于假设的排放量增速，部分取决于预测的地区和季节性降水变化。气候模型模拟通常显示，虽然气候变化导致全球降水量增加，但是在不同地区存在很大的差异。总的来说，潮湿的地区变得更加潮湿，但是干旱的地区变得更加干旱。然而，一个地区变化的幅度是不确定的，因为降雨量增加或下降的地区的边界是不确定的。气候变化导致所有的陆地区域气温上升，这增加了蒸发量，从而加剧了降雨赤字的影响。

气候变化转化为干旱变化的方式取决于当地的气候条件。大多数农业系统都根据当地的气候条件而调整，因此背离这些气候条件是具有挑战性的。这也是为什么我们根据当地的平均气候条件而非绝对值来设定干旱指标。然而，我们也可以设置不同的干旱衡量参数，为目前的干旱情况和未来的风险提供不同的指示。

最后，估计的未来对农业和社会的影响取决于遭遇干旱的人数及人们面临干旱影响的脆弱性的变化。这不仅取决于人口变化、经济增长和农田的面积，而且取决于我们在多大程度上制定缓解干旱的措施（例如预测和预警、补充水资源供应或市场干预）。

本章的撰写得到 AVOID2 计划（由英国政府和自然环境研究委员会资助）和英国能源与气候变化部门（DECC）的支持 。项目代号为 1104872。

14. 河流洪水的风险

Nigel Arnell 教授，沃克气候系统研究所主任。

我们希望避免什么风险？

河流洪水是世界上最为严重、最为普遍的天气灾害。根据慕尼黑再保险公司发布的自然灾害目录，1980 年至 2014 年，在所有造成损害的事件中，河流洪水占 41%；在导致的死亡人数上，占 27%；在造成的损失上，则占 32%[1]，通过改变降水的时间和数量，气候变化有可能使洪水暴发机理及其造成的损失发生重大改变。

持续或强烈降雨，以及雪融化都会引发河流洪水，其规模主要有以下三种：

- 强降雨产生大量雨水，引发巨大的坡面流，从而造成骤发洪水。此类洪水通常出现在局部地区，且规模较小。
- 持续强降雨或雪融化期间，广泛的泛滥平原的主要河流常会暴发洪水，其洪流可能持续数周。
- 还有一种是介于上述两种极端情况之间的洪水。它是指集水区域内，降雨或雪融化引起的局部性洪水。

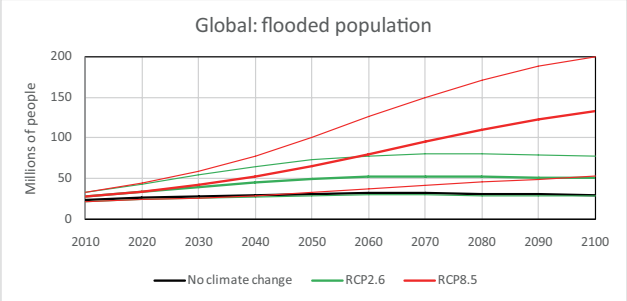
在不同国家，对于洪水的整体威胁而言，这三种大致范围的洪水所占的比例各不相同。由于洪水具有很强的地域性，在全球范围内，关于骤发洪水受灾人数方面的信息极少。因此，在全球层面，大多数信息都是针对主要河流，以及覆盖几千平方公里集水区的泛滥平原而言的。

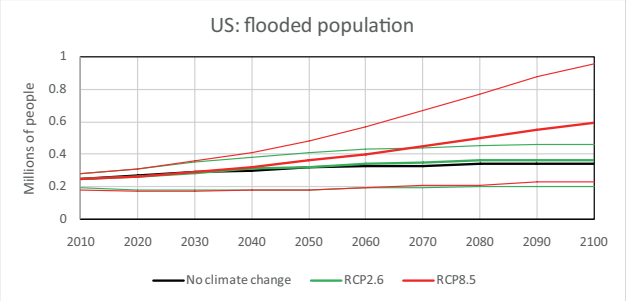
出于评估目的，我们以目前 30 年一遇的洪水的级别作为基准。2010 年，超过 7 亿人生活在主要的泛滥平原[2]。这些人中，平均 2000 万人遭受的洪水周期比 30 年一次更长[3]。他们中有近一半居住在南亚。部分易受洪水影响的人们受到了防洪措施的保护，实际上并没有目睹其财产被洪水淹没；但是由于洪水对社区和基础设施造成影响，因此他们可能会受到间接性损害[4]。

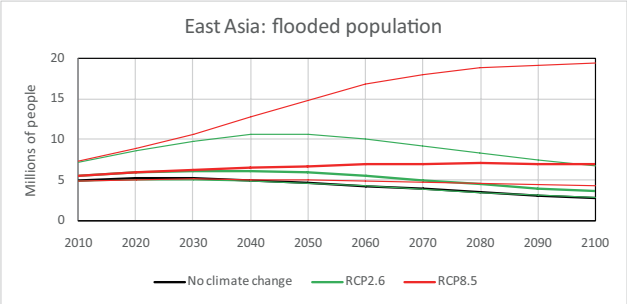
洪水造成的影响如何随时间的推移而变化？

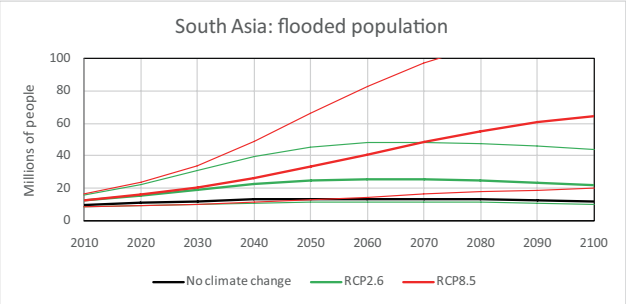
未来，仅人口数量改变这一因素，就会增加洪水的受灾人数。在某些地区，气候变化可能进一步增加该数量。图 F1 显示出，在全球范围以及世界四大主要地区，遭受比目前“三十年一遇”洪水更严重的洪灾的人数，分别在高排放量路径情景（红线）和低排放量路径情景下（绿线）随时间变化而变化的趋势。

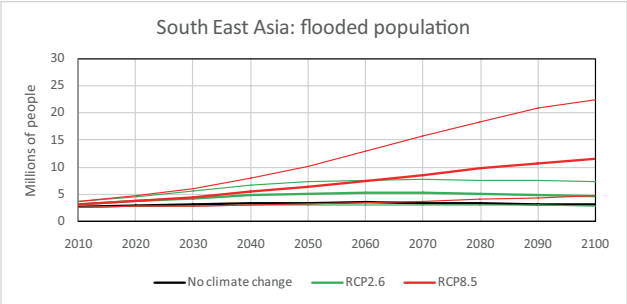
图 F1：**在出现气候变化和不出现气候变化的情况下，遭受河流洪水灾害的年平均人数。**图中显示了两种不同的气候路径（RCP2.6 和 RCP8.5）情景。实线表示每种路径情景下影响的中间估值，而阴影部分显示出 10% 到 90% 的范围。假设人口数量以中等速度增长。











在高排放量路径情景下，本世纪全球遭受洪灾的总人口增幅巨大，大约增加了五至六倍。这主要源自于南亚、东南亚和东亚地区的增长。高排放量路径情景与低排放量路径情景之间存在明显的差别，但由于降水量变化的不确定性，未来遭受洪水灾害的人口数量也存在很大的不确定性。

风险评估第二部分：直接风险

随时间的推移，洪水暴发的可能性如何变化？

图 F2：在五个代表性的集水区域，分别在两种不同的气候路径情景下，人们遭受比目前“30 年一遇”洪水更严重的洪灾的概率。

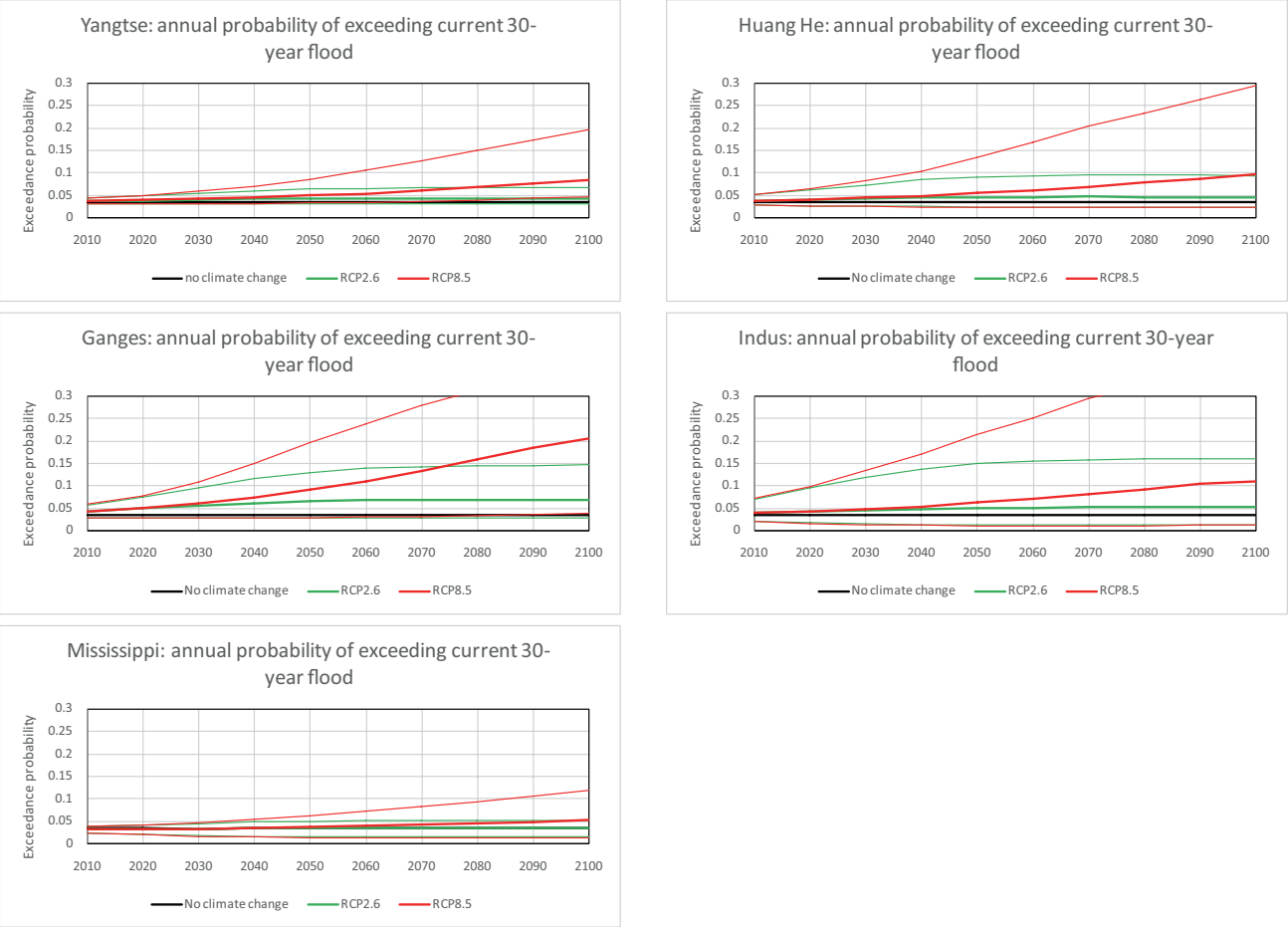


图 F2 显示出，21 世纪人们遭受比基准线“30 年一遇”洪水更严重的洪灾的概率变化。以亚洲为例，在高排放量路径情景下，洪水暴发的概率大幅增加：本世纪，根据中间估值，黄河和印度河区域的概率增至三倍，恒河地区的概率增至六倍（变为五年一次）。低排放量路径情景下的概率增加幅度远低于此。然而，数据显示，未来洪水暴发的概率变化存在很大的不确定性。 最佳情况下，部分地区洪水暴发的概率可能会略微下降。最坏情况下，到本世纪末，恒河、印度河与黄河地区暴发洪水的概率大约增加十倍。

图 F3：**在两种不同的气候路径情景下，与不出现气候变化的情况相比，气候变化导致遭受目前 30 年一遇的洪水灾害的人数增加 50% 以上的风险。**假设人口以中等速度增长。

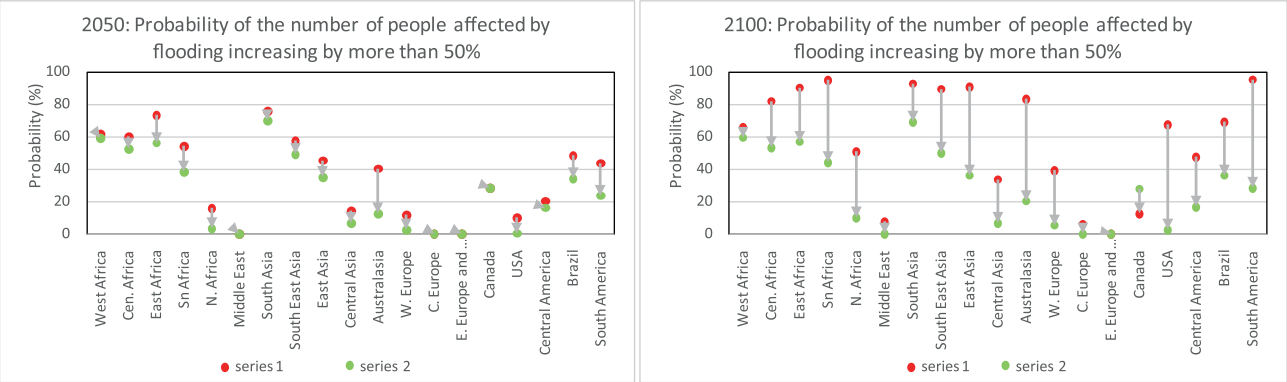


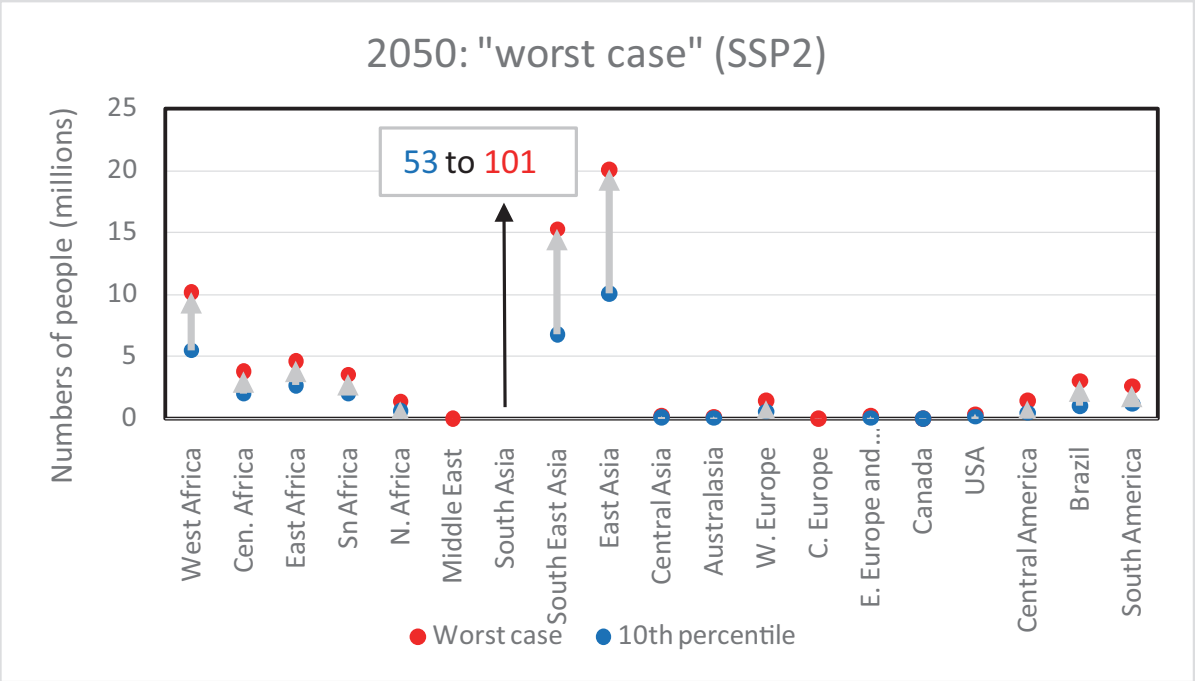
图 F3 显示出，在不同的地区，与不出现气候变化的情况相比，气候变化导致遭受目前 30 年一遇的洪水灾害的人数增加 50% 以上的风险。到 21 世纪 50 年代，仅气候变化这一因素导致非洲撒哈拉以南地区遭受洪灾的人数增加 50% 的可能性至少为 50%；而在亚洲，该可能性为 30% 至 70%。到 2100 年，风险会更大。在所有地区，低排放量路径情景下的概率要比高排放量路径情景低，2100 年尤为如此。

在气候变化导致河流洪水暴发情况发生的诸多变化中，可能出现的最坏情况是什么？

从图 F1 中可以明显看出，预测的气候变化影响存在巨大的不确定性。到 2050 年，在“最糟糕的”气候情景下（预测在易遭受洪灾人数最多的地区降雨量增幅最大的气候模型），每年会新增 1.15 亿人遭受洪灾（相对于不出现气候变化的情况）。图 F4 显示出不同地区的“最坏情况”。在大多数地区，“最坏情况”下受影响的人数是第 10 个百分点上受影响人数的大约两倍。然而，每个地区显示的最坏情况不会在同一个可能的气候情景下出现：全球的最坏情况不是各地区最坏情况的总和。

图 F4 基于一个假设，即用于估计影响的所有气候模型都具有同样的可能性，而且涵盖了潜在的区域气候变化影响范围。当然，事实情况不一定如此。因此，图中的数字只是起一定的指示作用。南亚的变化（乃至全球的总变化）很大程度上取决于预测的南亚季风变化（见前文关于水资源压力的章节）。

图 F4：**2050 年气候变化对遭受河流洪水灾害人数可能的“最糟糕”影响。**该图显示了在 RCP8.5 气候路径情景下遭受洪灾人数的增加，假设人口以中等速度增长。大于蓝点所示的影响的概率为 10%，红点表示计算得出的最严重影响。注意，南亚的影响程度比其它地区都要严重，因此在图中单独标注。



我们知道什么，我们不知道什么，我们的想法是什么？

对未来洪水风险如何变化的预测基于 (i) 对未来地区性气候变化的预测；(ii) 对如何转化为洪水特征变化的预测 (iii) 对未来遭受洪灾人数和实施防洪措施情况的预测。

对未来地区性气候变化的预测部分取决于假设的排放量增速，部分取决于预测的地区和季节性降水变化。根据气象第一原则，我们预计，在其他条件相同的情况下，强降雨事件的频率随着气温上升而增加，仅仅是因为水循环增强，升温后空气能容纳更多水分。因此，骤发洪水的概率预计会增加。

然而，大气环流模式的变化可能对持续暴雨的强度影响更大，而持续暴雨的强度对大多数河流流域的洪水影响是最大的，而且大气环流模式的变化目前是不确定的。潮湿的地区可能变得更加潮湿，但是精确的变化幅度却是不确定的，而且气候变化改变每天和每年的降雨量相对变率的程度也是不确定的。气温上升，一般来说也就意味着冬天降雪量减少，而在融冰季节的融雪量也减少；但是这也根据气温状况因地而异，而且冬天环流变化造成降水量增加或减少也可能抵消或增强该影响。

我们一般使用一个水文模型来估计降水量的变化对河流洪水特征的影响，可能还会结合一个水力模型来模拟洪水沿着河流网络穿过泛滥平原的路径。另外，我们通过将统计的频率分布与洪流的时间序列对应，来估计洪水暴发的频率。所有这些阶段都给预测的特定降水状况变化造成的影响带来不确定性。

最后，估计的未来对人类社会的影响取决于受灾人数及人们面临洪水影响的脆弱性的变化。这不仅取决于人口和经济增长，而且取决于我们在多大程度上开发物理防洪设施，建设建筑物和基础设施来减少受灾人数，以及采取措施帮助个人和社区应对洪灾和损害并从中恢复。

本章的撰写得到 AVOID2 计划（由英国政府和自然环境研究委员会资助）和英国能源与气候变化部门（DECC）的支持 。项目代号为 1104872。

尾注

1. MunichRe （2015 年） 自然灾害服务（NatCatSERVICE）数据库：1980 年至 2014 年全世界的损失事件。
2. 由联合国国际减灾战略（UNISDR）预览数据库定义。
3. 这里使用的方法在框 W1 中总结。
4 联合国开发计划署（UNDP）估计，每年约 5000 万到 6000 万人遭受河流洪水灾害，但该数据也包括遭受规模更小的洪灾的人数。UNDP（2009 年）《气候变化带来的风险和贫困： 2009 年关于降低灾害风险的全球评估报告》。 UNDP：纽约。

15. 海平面上升对沿海城市的威胁

Robert J. Nicholls,[i] Tim Reeder,[ii] Sally Brown[iii] 和 Ivan D. Haigh.[iv]

人类关于“海平面上升对沿海城市的影响”方面的理解，基于长期的前期努力，具有深刻的政治意义。从地质学的角度来看，在人类文明产生和发展的几千年里，海平面一直保持着异乎寻常的稳定。现在，该稳定时期已经结束，人类将面临的挑战是如何建立起具有前瞻性的长远期评估制度来应对这一变化。

2005 年，全球共有 136 个沿海城市的人口超过 100 万，全球沿海地区总人口多达 4 亿。[1] 海洋引起的洪灾不同程度地威胁着这些沿海城市。[2] 同时，洪灾对这些城市的威胁也在不断加剧，因为：沿海地区的人口、建筑设施持续增多；气候变化使得海平面不断上升；部分沿海城市由于人为因素（在土壤松动的地带修建排水设施或抽取地下水）而面临严重的海岸塌陷。

我们希望避免什么风险？

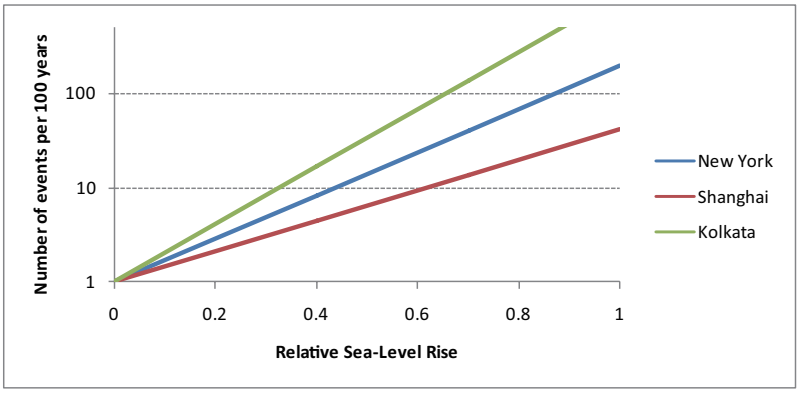
在 1965 年遭遇“贝尔西飓风”引发的巨大洪灾之前，新奥尔良市的人口最高记录约为 62.5 万[3]。那次洪灾之后，新奥尔良市改善了防洪措施，城市人口恢复到 50 万左右。2005 年，卡特里娜飓风席卷新奥尔良市，当地 80% 的地区被洪水淹没，造成 800 人死亡和超过 400 亿美元的经济损失。[4] 此后，当地花费了 150 亿美元进一步完善防洪措施，[5] 但仍有大量工厂企业迁出新奥尔良市，而目前新奥尔良市的人口仅为 30 万左右。这是由于洪灾频发，人们逐渐离弃新奥尔良市的过程吗？那么这一过程是否预示着沿海城市有可能因洪灾和海平面上升而被离弃？

在海平面上升和沿海城市的问题上，该案例包含了许多我们希望防止的方面：具有致命性和破坏性的大型洪灾，防洪的高额成本，以及城市逐渐衰落或被突然离弃的可能性。

风险是如何随海平面上升而加剧的？

发生洪灾的风险会随着海平面的上升而增大，因为海平面上升会提高海平面达到极端高度的可能性。图 1 表明，纽约、上海、加尔各答在本世纪发生目前 100 年一遇洪灾的频率随着海平面的上升而增加。举例来说，如果海平面相对上升 1 米，那么上海发生目前 100 年一遇洪灾的频率会增加约 40 倍，纽约会增加约 200 倍，加尔各答会增加约 1000 倍。

图 1：随着海平面的上升（相对于基准年），三个大型沿海城市发生目前（基准年）100 年一遇洪水事件的频率增加



就全球最大的 136 个沿海城市（2005 年）在未来 50 年左右的洪灾问题，Hallegatte 等人在 2013 年得出以下预测结论：[6]

- 仅仅因为人口、财产及其价值的增长，洪灾带来的经济损失将从每年 60 亿美元增加到每年 520 亿美元。
- 如果防洪措施得不到改善，附带的气候变化和海岸塌陷问题，还可能造成每年 1 万亿美元或以上的损失。
- 即使防御能力维持不变（比如，防洪措施的完善使得洪灾发生的概率保持不变），由洪灾引起的年均损失仍会加重，因为海平面上升会使得洪水高度上涨，从而加剧每次洪灾的破坏力。为了维持当前的洪灾风险水平（年均损失水平），我们应当提高防御能力，将洪灾发生概率降低到当前水平以下。
- 即使我们提高了防御能力，洪灾引发的损失也会因上文中所提到的原因而加剧。因此，做好应对更大灾难的准备，十分重要。

50 年之后，海平面将继续上升。我们必须继续积极地提高防御能力，以应对未来各种不确定的局面。那么，是否存在一些阀值（见下文）——一旦超过这些阀值，沿海城市（当前及未来）洪灾发生概率的增长趋势就会彻底改变？

改造城市以适应海平面上升，可能存在哪些制约因素？这些因素会何时凸显出来？

减缓气候变化，能够稳定海平面上升的速度，进而提高城市适应海平面上升的可能性。然而，即使全球温度趋于稳定，未来几百年海平面仍将继续上升，因为深海正在慢慢变暖，大冰原进入了新的平衡：而这已成为海平面必将持续上升的铁证。这也意味着沿海地区必须同时致力于减缓气候变化和城市改造，因为海平面上升的必然趋势要求我们必须做出改变。[7] 这一视角改变了气候变化减缓方面的讨论，即在更长远的时间内（比我们通常考虑的时间跨度要长），气候变化减缓对于防止极端气候现象的作用。

目前，还没大量资料或实证数据涉及海岸城市改造方面的制约因素。我们无法对这些制约因素进行严格意义上的预测。但是海平面平均高度的上升会提高特大洪灾或其他极端事件的发生概率，而这些事件必然会造成巨大损失并迫使人们做出一些反应，如逃离沿海城市、完善防洪措施或其他行为。

对相关讨论进行总结后，我们发现改造沿海城市可能存在的制约因素可分为以下三大类：

- **物理或工程方面的制约**：随着海平面的上升，改造沿海城市和提高防洪能力涉及很多工序，我们还需要投入越来越多的精力来保持沿海地区的干燥。每道工序的成本也会随之上涨。但沿海城市的价值极高，人们会有强大的动力为城市改造投入大量资金。关键的问题在于海平面上升的速度和防御设施的维护保养。如果海平面加速上升，需要的资金就更多，物理或工程方面的难度也会加大，虽然平均 100 年上升 1 米的速度并不会造成重大的技术挑战。维护保养方面，每年对防洪设施的维护平均需投入 1%-2% 的资金。在海平面上升水平相对较低的情况下，也可能会出现其它方面的制约，例如生态或当地水供应相关的影响。

1. Robert J. Nicholls 是南安普顿大学的海岸工程教授。
2. Tim Reeder 是环境机构的气候变化高级顾问。
3. Sally Brown 是南安普顿大学的研究员。
4. Ivan D. Haigh 是南安普顿大学的沿岸海洋学讲师。

- **经济 / 资金方面的制约**：在海平面上升幅度较小时，从撤离某个城市到继续保护某个城市，我们有很多不同的选择。当海平面上升幅度较大时，城市改造会变得更加迫切，继续保护所付出的高昂代价还可能会导致有组织的或无组织的撤离行为（如果撤离的成本相对较小）。然而，虽然我们可以考虑对大型城市进行搬迁，但搬迁的高额成本也会让人们产生“加强城市防御能力”的强烈动力。从成本收益的角度来看，保护策略更优，[8] 但前提必须是该城市拥有足够的资金；相对贫穷的城市将面临最严峻的挑战，其结局难以预知。此外，如果居民因为某次特大洪灾而对城市丧失了信心，那么该城市的经济基础就会受到打击，进而使得该城市获取相关资源（加强防御所需的资源）的能力下降。如果出现这样的情况，那么该城市很可能在经历几次事件之后，发生多级衰退。然而，衰退一旦出现，城市也可能会进行自我修复。

- **社会政治方面的制约**：相关的阀值和制约会随着一个城市的具体情况发生变化，这些情况包括：城市目前的基本情况，信心和对风险的态度。良好的政府治理能够落实有效的防御系统，并对其进行良好的维护保养。具有丰富防洪经验的城市，会有更充分的准备；他们更有可能进行长远的部署，以确保海平面继续上升时，城市可以迅速做出应对。一些城市仍不切实际地认为：当前的模式在未来仍可以继续；对于这些未准备的城市来说，相关制约可能会更快凸显出来。从许多方面来说，社会政治方面的制约都是最难定性和量化的，同时它也是实际操作中对沿海城市影响最大的因素。

一旦防洪的制约因素凸显出来，一些城市可能不得不在很大程度上被离弃，因为这些城市大部分的陆地区域都位于泛滥平原。然而，大多数沿海城市在沿海泛滥平原以外也有大面积的区域。因此，在这些情况下，撤离就意味着将城市的建筑设施重新设置在新的海陆交界区域。[9]

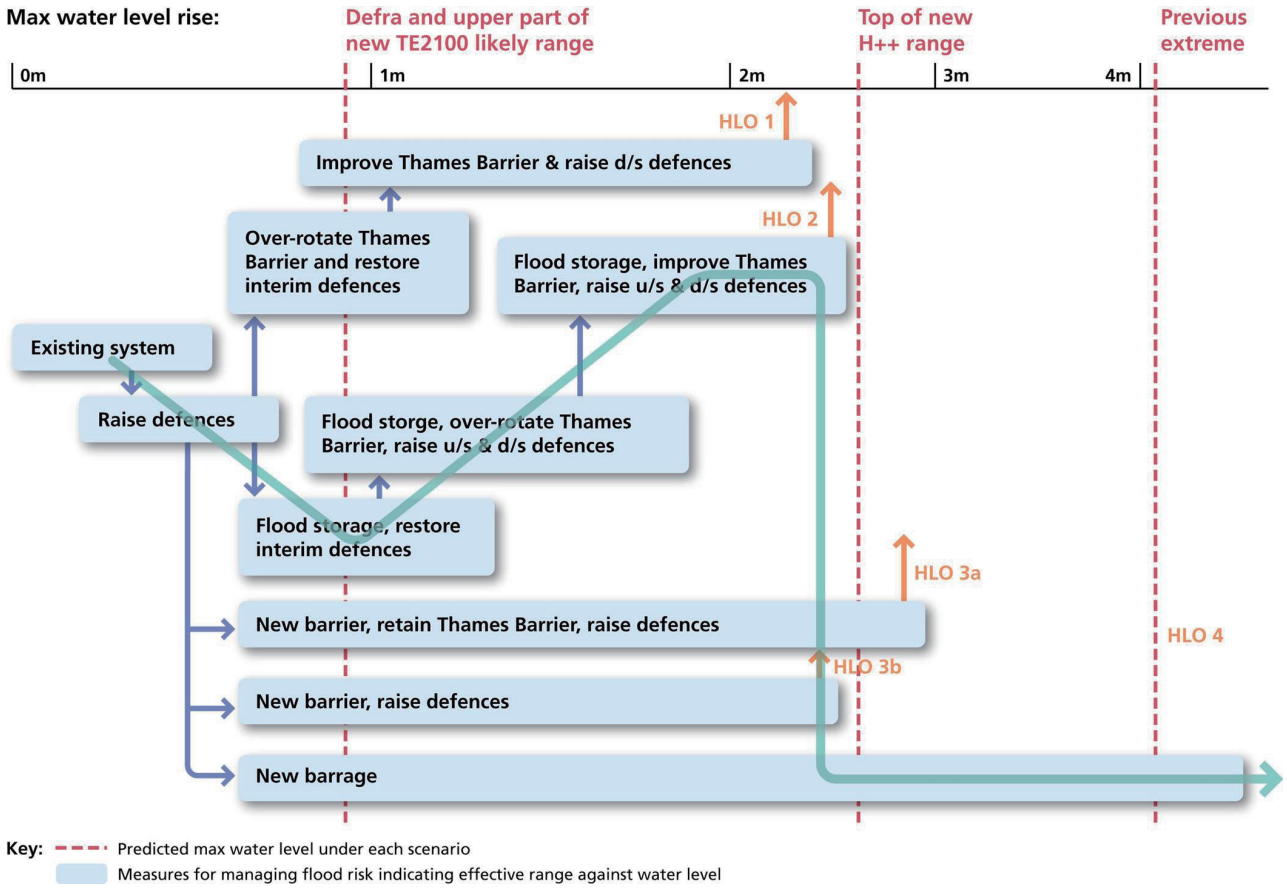
量化海平面上升阈值（一旦超过该阈值，城市不得不被离弃）的研究很少，尤其是关于海平面上升约 4 米以上时对任何城市可能或可行的改造措施的分析也很少。当然也有例外，比如在泰晤士河口，海平面平均上升 5 米被确定为城市改造的关键阈值，该阈值与封闭系统情景下加高海堤和建设潮汐屏障的限制有关。泰晤士河的所有水流都必须注入到海洋中，才会出现海平面上升高于 5 米的情况。[10] 在荷兰，三角洲计划认为到 2200 年海平面将上升 4 米。[11] 得出的结论是，海平面上升 4 米时， 继续加高堤坝及修复海滩和沙丘仍是有效的措施。

结论

我们对沿海城市海平面上升的阈值知之甚少，这个问题的确令人担忧。2100 年伦敦泰晤士河河口（TE2100）计划 [12]（如图 2 所示）、荷兰三角洲计划 [13] 和纽约 [14] 已经确定了未来的改造路径。其中包括一系列改造措施，在海平面上升时可以逐步地灵活应用于洪水的风险控制：根据环境要求可以放缓或加快应用的速度。这是计划解决海平面上升问题的具有前瞻性的最佳方法。该分析也阐明了每个城市何时达到阈值。

该方法可广泛应用于世界各地的沿海城市，进行改造措施的选择。[15] 这包括确定什么情况下防洪措施是可行的，以及何时可能需要撤离。通过采取前瞻性的方法对改造措施进行评估，我们可以清楚地看到所面临的长期挑战的全局，并规划长期的改造措施。

图 2：**显示了对应于极端水位的的上升（x 轴），TE2100 计划制定的 TE2100 项目计划高层选择和路径（y 轴）。**例如，蓝线表示一种可能的“路线”，即决策者最初遵循 HLO2，后来发现海平面上升速度比预期更快时，转换到 HLO4. 图中显示的海平面上升包括海平面上升的所有因素，不仅仅是平均海平面。[16]



尾注

1. Hanson, S, Nicholls, R. J., Patmore, N, Hallegatte, S, Corfee-Morlot, J, Herweijer, C 和 Chateau, J（2011 年） 面临极端气候条件的港口城市的全球排名。气候变化，140, (1), 第 89 至 111 页。（doi:10.1007/s10584-010-9977-4）
2. Hanson 等人，2011 年；Hallegatte, Stephane, Green, Colin, Nicholls, Robert J. 和 Corfee-Morlot, Jan（2013 年）未来主要沿海城市的洪水损失。《自然气候变化》3，第 802 至 806 页。(doi:10.1038/nclimate1979).
3. Grossi, P. 和 Muir-Wood, R. （2006 年）新奥尔良市的洪水风险：对未来的管理、可保险性和风险管理解决方案的影响，美国纽瓦克市，共 31 页。
4. Kates, R.W., C. E. Colten, S. Laska 和 S. P. Leatherman（2006 年）卡特里娜飓风后新奥尔良市的重建：以研究的视角。PNAS, 103 (40) 14653-14660; doi:10.1073/pnas.0605726103
5. Link, L.E. （2010 年）一场灾难的剖析、卡特里娜飓风和新奥尔良市的概况。《 海洋工程学》37，第 4 至 12 页。
6. Hallegatte 等人（2013 年）
7. Nicholls, R.J., P.P. Wong, V.R. Burkett, J.O. Codignotto, J.E. 等人（2007 年）。“沿海系统和低洼地区”。出自：Parry 和 M.L. 等人（编辑），IPCC 第四次评估报告《2007 年气候变化：影响、适应和脆弱性。A 部分：全球和部门情况》。英国剑桥：剑桥大学出版社，第 315 至 356 页；Wong, P.P., Losada, I.P., Gattuso, J.-P., Hinkel, J. 等人（2014 年）。“沿海系统和低洼地区”。出自：Field, C.B. 等人（编辑）IPCC 第五次评估报告《2014 年气候变化：影响、适应和脆弱性。A 部分：全球和部门情况。》英国剑桥：剑桥大学出版社，第 361 至 409 页。
8. 例如，Nicholls, Robert J, Tol, Richard S J 和 Vafeidis, Athanasios T （2008 年）南极西部冰盖崩塌的全球影响估计：FUND 的应用。气候变化，91, (1-2), 第 171 至 191 页。(doi:10.1007/s10584-008-9424-y).
9. Lonsdale, K.G, Downing, T.E, Nicholls, R. J, Parker, D, Vafeidis, A.T, Dawson, R 和 Hall, J（2008 年）对泰晤士河口海平面快速上升威胁的可能反应。《气候变化》，91, (1-2), 第 145 至 169 页。(doi:10.1007/s10584-008-9483-0).
10. Reeder T, Wicks J, Lovell L, Tarrant T.（2009 年）保护伦敦免受潮汐引发的洪水灾害：工程改造的限制。出自：Adger, N.W., Lorenzoni, I 和 O’Brien, K.（编辑）。《适应气候变化：阈值、价值和治理》。剑桥：剑桥大学出版社，第 54 至 63 页。
11. 三角洲委员会（2008 年）与水合作。人们生活的土地自己创造未来。三角洲委员会的研究发现。荷兰：三角洲委员会。
12. 英国环境署（2012a）泰晤士河河口 2100 年计划：通过伦敦和泰晤士河河口控制风险。TE2100 计划：2012 年。见 https://brand.environment-agency.gov.uk/mb/CtyxlR
13. 三角洲计划（2008 年），实施的计划见：http://www.government.nl/issues/delta-programme
14. 纽约气候变化委员会（2010 年）纽约适应气候变化：建立风险管理响应体系。《纽约科学院年报》，1196: 第 1 至 354 页。
15. Reeder, T. 和 Ranger N. （2011 年）“你如何适应一个不确定的世界？泰晤士河河口 2100 年项目的教训”。世界资源报告，华盛顿特区 2011 年。网址：http://www.wri.org/sites/default/files/uploads/wrr_reeder_and_ranger_uncertainty.pdf
16. Reeder, T. 和 Ranger N. （2011 年）

16. 全球海平面上升 [i]

Daniel Schrag 教授，哈佛大学环境中心主任

我们希望避免什么风险

正如前面章节中讨论时所提到的，对于海平面高度和海平面上升速度，很难界定其导致沿海城市出现显著问题的阈值。但很显然，海平面上升的速度越快，适应这种变化也就变得越困难，成本就越高。由于极地冰盖的融化，海平面在长期内上升 10 米以上的趋势可能已经不可避免了，但是有可能限制冰盖融化的速率。因此，我们希望了解发生什么样的变化会导致海平面上升的速率显著加速，并避免发生这种变化。

我们知道什么

大气中温室气体浓度增加会带来能量不均衡，其中不均衡的能量超过 90% 会被海洋吸收（相比约有3%会提高地球表面的温度）。这些额外的能量会提高海洋的热含量，而且由于热膨胀，海洋的体积也会增加。此外，极地冰盖和高山冰川的冰层会融化，会增加海洋的体积。最后，基本上和气候变化无关的是，从蓄水层抽水灌溉土地，水会被排放到溪流和河流，最终也会引起全球海平面的上升。自前工业化时代以来，全球平均海平面上升了 20 厘米左右。[1] 基于卫星测高精确的测量，我们了解到自 20 世纪 90 年代以来海平面的平均上升速度为 3.4 毫米 / 年，而且我们知道，这个速度正在加快。

目前海平面的上升主要来自于热膨胀，但在未来会主要来自极地冰层的融化。这些冰层中的含水量大约相当于以下全球平均海平面的上升幅度：

- **格陵兰岛冰层：7 米**
- **南极西部冰盖：6 米**
- **南极东部冰盖：50m 以上**

我们不知道什么

我们不知道这些冰层融化的速度可能会有多快。融化速度具有很大的不确定性：没有任何观察结果或模型能为速度预测提供足够的信息。格陵兰岛和南极西部冰层完全能融化的时间范围可能是数百年，或数千年。由于地形和冰层结构，南极东部冰层温度更低，更加不容易迅速瓦解，完全融化可能需要更长的时间。

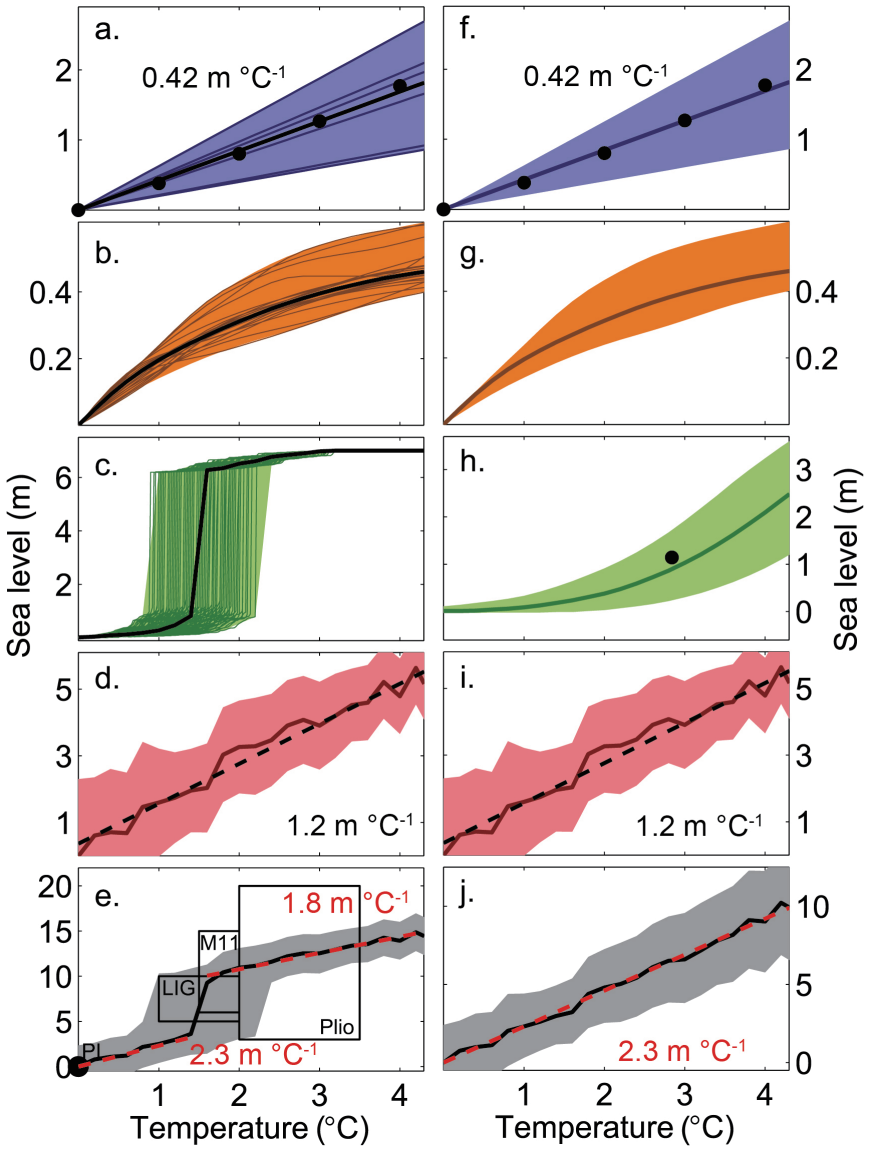
我们的想法是什么

古气候数据表明，在大气中的碳浓度高于 400ppm（目前的水平）时，格陵兰岛冰层可能就无法存在了；如果碳浓度达到 550ppm，那就几乎可以完全肯定其无法存在了——相当于我们前面在本报告中提到的在最低排放量情景下被定性很不可能。对于南极西部冰层以及南极东部冰层的一小部分，也会出现同样的情况。这意味着，我们可能已经确定未来长期内海平面必将会上升 10 到 15 米。从 IPCC 提供的图 1 可以看出，如果气温上升维持 2°C，那么长期海平面上升的中间估值约为 12 米。但是，上升的速度很难确定：需要 500 年还是 1 万年，还真是未知数。

---

i 该部分只是作者关于海平面上升风险的知识状况方面观点的简要总结，并不是现有文献的全面综述。要获得更多信息和参考资料，读者可参阅 IPCC 第五次评估报告第一工作组第 13 章的内容。

图 1：**随着长期全球气温的上升，必定发生的海平面上升**[2]，**必定发生的海平面上升是指**，无论全球做出怎样的努力来稳定全球温室气体的排放量，都必然会发生的海平面上升幅度。

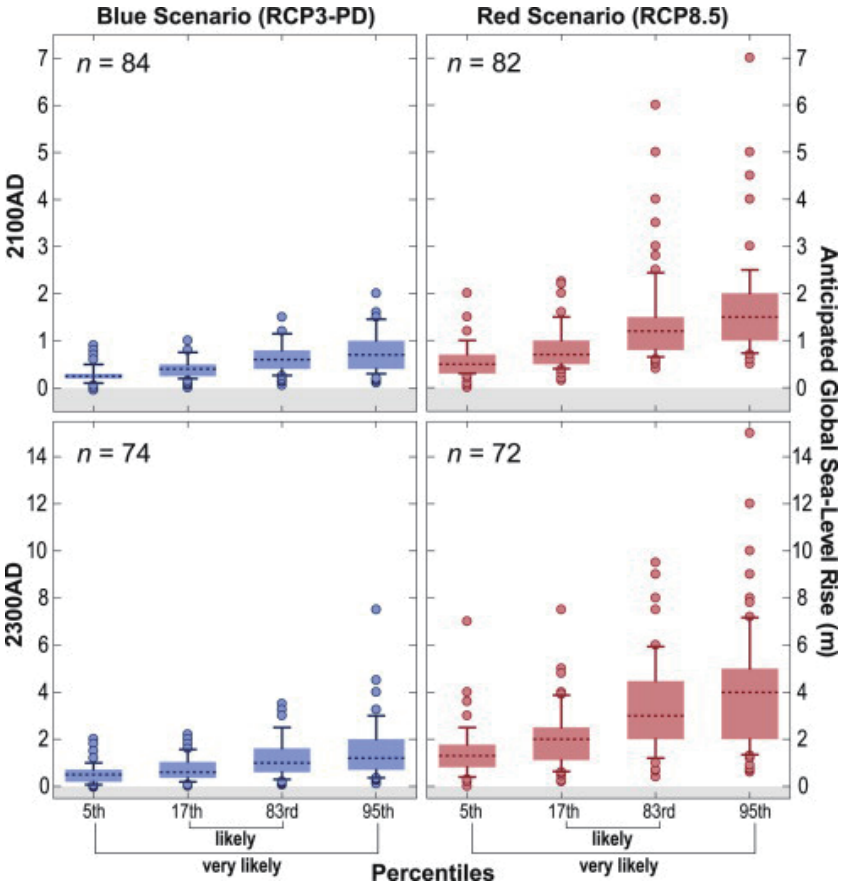


在本世纪相对较短的时间范围内，不确定性的范围要小得多，但从人的角度来看依然很显著。IPCC 对于海平面上升的预测往往会随着时间而增加。在第三次评估报告中，本世纪内海平面上升的预测范围为 0.2-0.6 米；第五次评估报告预测上升“可能的范围”上限会达 1 米，而且南极西部冰层的部分崩塌事件还带来了十分之几米的增加。最近的一些科学研究结果表明，这种崩塌已经开始发生。[3]

IPCC 的第三次评估报告发布的时候，有人预测，南极的冰层会增长，带来海平面变化的净减少。卫星测量的冰层总量数据显示出相反的变化趋势。虽然增加的降水会增加冰层的质量，但是从整体上来看南极正在失去冰层。而格陵兰的数据显示其冰层总量正在加速减少，但这些观测结果时间跨度只有十多年，就无法说明这个加速趋势是属于多年代际振荡的一部分，还是一个长期趋势的开始。

在本世纪，海平面上升可能至少会上升 40 厘米，更小幅度的上升需要减缓冰层融化，但目前观察的结果显示冰层融化速度会加快。海平面上升超过 1 米似乎不大可能，但其变化范围的上限具有更大的不确定性。从图 2 中可以看出专家意见不同的程度。

图 2：**对于低排放量和高排放量路径情景，对于到 2100 和 2300 年海平面可能上升的幅度专家给出的意见**（Horton 等人 [4]）[ii]



可能的最坏情况

可能的最坏情况就是海平面会急速上升，而且在本世纪末和下个世纪海平面会按照现在几倍的速度更快上升。出现以下两种情况之一，都会出现最坏的情况。

i. 格陵兰岛冰层表面在夏季加速融化。格陵兰岛只有几个地点有注出冰川，可以直接把冰带到海里，格陵兰岛的冰川现在已经在以接近实际可能的最大速度进行移动，而且受到一定摩擦作用的束缚。这些地点的数量正在增加，可能质量损失会出现加速趋势，尤其是在格陵兰北部地区；但较大幅度的加速可能来自于在夏季增强的冰层表面融化。卫星图像显示，格陵兰冰层表面融化的面积正在迅速扩大。经反馈，熔体池的形成也会引起冰层融化。目前还没有充分了解这些过程：黑碳沉积以及温度上升都可能发生了重要的作用。此外，目前还不知道夏季海冰的持续后退会产生什么样的影响。

ii. 南极洲的罗斯冰架和其他大型冰架发生坍塌。南极洲温度足够低，使得冰层损失的主要因素不是表面融化，而是冰川会流向海洋。目前，南极洲西部和东部冰川注入到海洋中的速度正在被大型冰架放缓——已经被推入海洋的浮动陆冰——其中包括覆盖罗斯海的罗斯冰架。罗斯冰架或其他关键冰架的崩塌将使冰流量的速率加快，在未来一个或两个世纪内会导致海平面上升数米。我们还不明白将会怎么发生这些过程，但一些工作表明，略有回暖（0 至 2° C）的水流经过冰架下方的大陆架时，冰层会从下面开始融化，造成冰架解体。但目前的观察结果十分有限，以至于我们都不知道这些过程正在发生。

---

ii 框形图显示了所有专家的调查结果，至少反映了对问题的部分响应。每个问题的受访者人数显示在左上角；由于不是每个人都回答了所有问题，因此受访者人数要少于总人数 90。参与者被要求估计两种温度情景下和两个时间点（分别为 2100 年和 2300 年）可能的（第 17 至 83 个百分点）和非常可能的（第 5 至 95 个百分点）海平面上升幅度，因此就产生了四组反应。阴影框表示第一和第三四分位数之间的间距。框内的水平虚线是反应的中间值。实线表示反应的标准差。实心圆表示超过中间值的两个标准差的个人反应。

同样需要强调的是，上述两种可能性在稳定或逆转海平面上升方面会产生不同的影响。如果可以减缓变暖，那么就能阻止格陵兰冰层的融化，例如建议通过太阳辐射管理（或“地球工程”），来冷却地球。然而由于流量依赖于冰层的引力不稳定性，而对表面温度非常不敏感，至少在相当长的时间范围内是这样，如果一个主要冰架解体，那就会加大阻止或减缓冰川注入海洋的难度。因此，随之而来的海平面上升可能会成为不可阻挡而且是不可逆转的趋势。

尾注

1. IPCC（2013 年）：“决策者摘要”。《2013 年气候变化：自然科学基础》。由 IPCC 第五次评估报告第一工作组供稿。[Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex 和 P.M. Midgley（编辑）]。英国剑桥和美国纽约，剑桥大学出版社。
2. 图 13.14 来自 IPCC（2013 年）。《2013 年气候变化：自然科学基础》。由 IPCC 第五次评估报告第一工作组供稿。 [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex 和 P.M. Midgley（编辑）]。英国剑桥和美国纽约，剑桥大学出版社，第 1535 页，doi:10.1017/CBO9781107415324.
3. http://www.sciencemag.org/content/348/6237/899 / http://www.the-cryosphere.net/9/1005/2015/tc-9-1005-2015.html
4. Horton 等人（2014 年）。“到 2100 年和 2300 年海平面上升的专家预测”。《第四纪科学评论》 http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0277379113004381

17. 大规模、不可逆转的突变

Jason Lowe 教授，英国气象局哈德利中心，气候变化缓解咨询负责人

我们希望避免什么风险

气候系统的许多因素不仅能够在较长的时期带来稳定、逐步的变化，而且超过临界阈值时还能带来非线性变化。其中一些因素可能导致相对突然的变化，还有些变化是不可逆转的。这两类变化都可能直接或间接地对气候造成大规模的影响，在世界上的某些地区往往造成严重的后果。

正如前一章所讨论的，格陵兰岛或南极冰层加速融化会使全球海平面急剧上升。在几个世纪或更长的时间范围，这种影响很可能是不可逆的。同样的，全球气温上升的加速可能导致大规模的永久冻土融化和更多二氧化碳或甲烷排放到大气中，或海底甲烷水合物的释放（如关于“全球气温上升”这一章所讨论）。

大气环流模式的变化很难预测，也很可能非常突然。如 “水资源压力”这一章所指出的，我们不能排除大规模季风变化的可能性。厄尔尼诺现象带来的变化也会引起全球多地出现极端天气。海洋环流的方式也会改变，特别是大西洋经向翻转环流也会减弱或断裂。这会影响北半球大部分地区的温度、降雨和一些极端天气。从区域来看，降雨及温度的变化及其它因素的影响会引起热带雨林出现大范围的枯梢病，例如亚马逊地区，而这反过来又会降低大气中二氧化碳的自然吸收，造成更严重的变暖现象。[1]

这些变化可能何时出现？

关于何时或全球气温上升多少度时可能会超过与这些大规模变化相关的阈值，存在很大的不确定性。然而，有证据表明，随着全球气候上升，超过这些阈值的概率也随之增加；如果气温上升的趋势延续下去，21 世纪就有可能超过其中几个阈值。气候研究的当务之急是要加强对这些触发点的了解。

政府间气候变化专门委员会（IPCC）的第五次评估报告回顾了本世纪正在经历的大规模变化的可能性及后果。[2] 这些发现来源于最新的 IPCC 报告（“表 12.4”）并已列入下表中。[3] 更多最新发布的研究报告更加肯定了这些发现。[4]

从风险评估的角度看，了解专家基于证据对影响程度、概率和时间做出的判断非常重要。

影响程度：一些变化的影响程度非常大。例如，甲烷水合物（包合物）释放的影响程度将是“灾难性”的。而冰层断裂的影响力则是“几近崩溃”的，将导致海平面上升数米——该情况在本世纪极不可能发生。某些情况下，影响较小的因素可能会带来严重的影响：例如，部分冰层断裂可能会导致海平面短期内迅速上升，而长期必然导致海平面上升得更高。IPCC“决策者摘要”预测，“随着气温上升 1–2° C 并且超过 3° C，[大范围单个事件带来的]‘风险’会大幅增加，这是由于冰层消失可能会使海平面出现无法逆转的大幅度上升。”[5]

“表 12.4：地球系统的不同组成部分（文献中提到有可能遭遇突然或不可逆转的变化）。第二栏显示，按照第五次评估报告的定义，某种潜在的变化是否可以被认为是突然发生的。第三栏表示，在突然变化的情况下，该过程是否可逆，同时提供了通常的恢复时间范围。第四栏在可能的情况下，评估了 21 世纪在本章考虑的情景下地球系统的各组成部分或现象发生突然变化的可能性” 。

气候系统组成部分的变化	是否可能突然发生（按照第五次评估报告的定义）	如果外力促使扭转，该过程是否可逆	预测在考虑的情景下该组成部分在 21 世纪发生变化的可能性
大西洋经向翻转环流断裂	是	未知	非常有可能大西洋经向翻转环流会发生迅速的变化（高信度）
冰盖崩塌	否	数千年不可逆转	格陵兰岛和南极西部冰盖几乎完全瓦解是极不可能发生的（高信度）
永久冻土释放碳	否	数千年不可逆转	永久冻土有可能将成为大气中温室气体的净源（低信度）
甲烷水合物的释放	是	数千年不可逆转	甲烷水合物释放带来灾难性后果计划不可能发生的（高信度）
热带雨林枯梢病	是	数百年内是可逆转的	大面积热带雨林消失的预测具有低信度
北方森林枯梢病	是	数百年内是可逆转的	大面积北方森林消失的预测具有低信度
夏季北极海冰消失	是	在几年到几十年之内是可逆转的	在强作用力情景（如 RCP8.5）下 2050 年之前北冰洋在 9 月份几乎没有冰是有可能的（中等信度）
长期干旱	是	在几年到几十年之内是可逆转的	特大干旱的频率和持续时间变化的预测具有低信度
季风环流	是	在几年到几十年之内是可逆转的	季风环流破坏的预测具有低信度

概率：上述可能性预测可参考 IPCC 的标准计算方法，其中以定性的方式表示可能性的预测范围。此处定性术语对应的范围如下：‘极不可能’：0-1%；‘很不可能’：0-10%；‘可能’：66-100%.[6] 尽管 IPCC 的报告中提及多个变化根据其标准术语是“很不可能“，但许多保守的利益相关方在考虑影响程度的同时，仍预计概率会异常地高。值得注意的是，对于个别大规模的变化，其可能性的不确定性仍然很大，无法进行预测。

时间：上述的概率预测仅考虑本世纪。如前所述，这些概率预测会随着全球气温的上升而增加；正如相关章节所述，在中等和高排放量情景下，全球气温上升预计会持续到本世纪以后。这些变化的后果预计也会延续到本世纪之后。

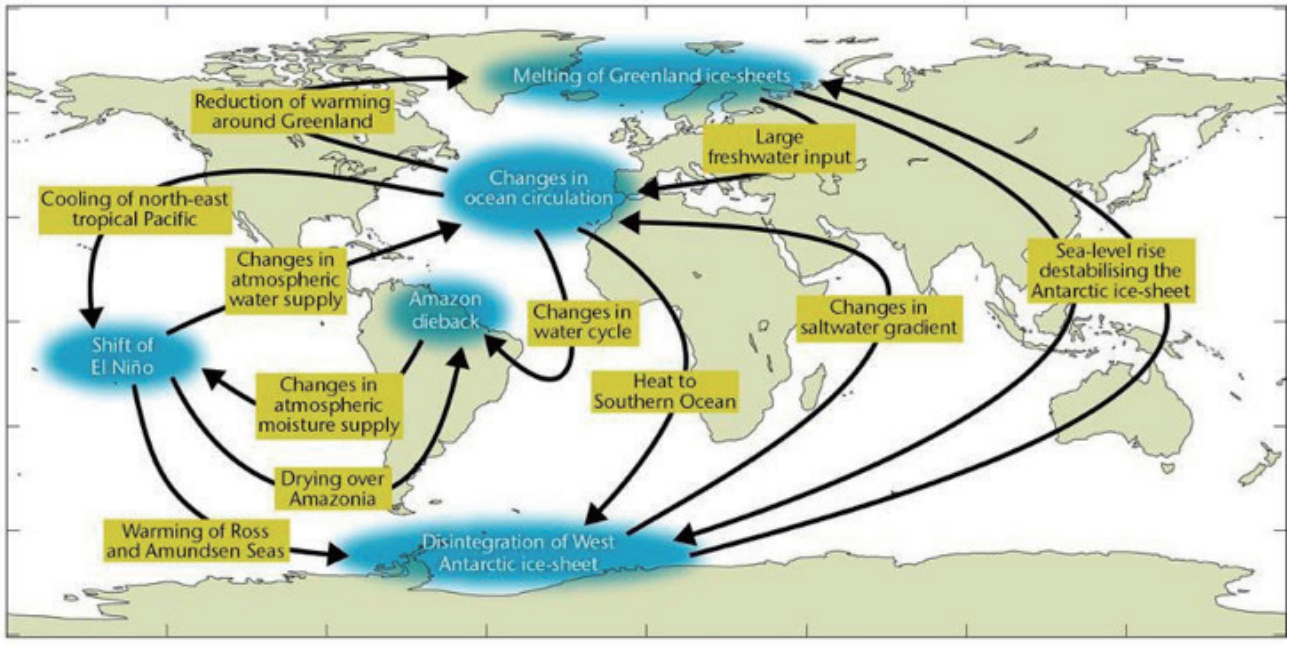
要了解这些可能的大规模变化带来的风险的规模，我们要对这三个因素——影响的程度、概率和时间——都要加以考虑。

系统性的相互作用

要考虑的另一个方面是这些大规模气候系统变化之间可能相互作用，一个变化导致一系列其他的重大事件。例如，我们可以推测，格陵兰岛的冰层加速融合，可能不仅仅造成海平面上升，而且会使大西洋翻转环流放缓。根据预测，大西洋环流的变化和海洋表面温度变化的一个后果是大气环流的变化，这可能对亚马逊森林的健康及其吸收大气中碳的能力造成负面影响。同时，格陵兰岛的海平面上升也可能影响南半球冰架和冰盖的稳定性，进一步海平面进一步上升。

图 2 显示出其中一些相互作用。(这是基于 Kriegler 等人的早期数据)[7]。该图有效地强调这样一个事实：气候变化的一系列作用可能在许多方面造成广泛的影响，呈现出重大的系统性风险。该报告的下一节将更详细地探讨该领域。显然，我们想要充分了解气候变化的风险，我们必须评估大规模气候变化的可能性、气候变化之间的相互作用以及触发气候变化的临界阈值。最近出现的复杂的地球系统模型最终为气候科学家们提供了一个工具，借此可以探索这些相互作用。

图 2：**大规模气候破坏可能的相互作用**。来源于 Kriegler 等人（2009 年），显示出可能的联系。



本章的撰写得到 AVOID2 计划（由英国政府和自然环境研究委员会资助）和英国能源与气候变化部门（DECC）的支持 。项目代号为 1104872。

尾注

1. Kriegler, E., Hall, J.W., Held, H., Dawson, R. 和 Schellnhuber, H.J.（2009 年）。“气候系统临界点不准确的概率评估”。《美国国家科学院院刊》106, 5041-5046. doi: 10.1073/pnas.0809117106.
2. Collins, M., R. Knutti, J. Arblaster, J.-L. Dufresne, T. Fichefet, P. Friedlingstein, X. Gao, W.J. Gutowski, T. Johns, G. Krinner, M. Shongwe, C. Tebaldi, A.J. Weaver 和 M. Wehner（2013 年）。“长期气候变化：预测、承诺和不可逆转性”。《2013 年气候变化：自然科学的基础》。IPCC 第五次评估报告第一工作组供稿 [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex 和 P.M. Midgley （编辑）]。英国剑桥和美国纽约：剑桥大学出版社。
3. 表 12.4，IPCC（2013 年）第 1115 页。《2013 年气候变化：自然科学基础》。IPCC 第五次评估报告第一工作组供稿 [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex 和 P.M. Midgley（编辑）]。英国剑桥和美国纽约，剑桥大学出版社，共 1535 页，doi:10.1017/CBO9781107415324.IPCC AR5 WG1 Table 12.4
4. Good, P. 等人（2014 年）。《关于临界点及其对长期气候目标重要性的最新观点》。见 http://avoid-net-uk.cc.ic.ac.uk/wp-content/uploads/delightful-downloads/2015/02/AVOID2_WPA5_v2_final.pdf.
5. IPCC（2014 年）。“决策者摘要”。《2014 年气候变化：影响、适应和脆弱性。A 部分：全球和部门情况。》IPCC 第五次评估报告第二工作组供稿 [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea 和 L.L. White（编辑）]。英国剑桥和美国纽约，剑桥大学出版社，第 12 页。
6. IPCC, 2013 年：决策者摘要。出自：《2013 年气候变化：自然科学基础》。IPCC 第五次评估报告第一工作组供稿。[Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex 和 P.M. Midgley（编辑）]。英国剑桥和美国纽约，剑桥大学出版社，第 4 页。
7. Kriegler 等人（2009 年）。

18. 总结性评论

这一章，我们考虑了气候变化及其影响的严重程度方面不同形式的阈值，包括：

- 物理气候系统本身的阈值：例如，导致未来冰层必然崩塌的气温上升度数；
- 生物物理阈值，例如可能对人类致命的温度和湿度，或超过作物忍耐极限的温度；
- 社会经济阈值，例如满足基本人类需求所需的人均水资源量，或撤离沿海城市要比防洪措施成本更低的界限；
- 政治决定设定的阈值，如气温上升控制在 2℃ 的目标。

显然，在许多情况下，一旦超过了阈值，影响的严重程度就会呈现非线性增长。例如：海平面上升速度显著增加；作物产量严重下降，而非适度下降；人死于热应力，而非面对非致命的热应力。避免这些影响可能成为决策者的当务之急，因此评估其可能性应该是风险评估的重中之重。

在可能的情况下，我们的评估观察超过这些阈值的概率随时间可能如何变化，或者随全球海平面的上升如何变化。在一些情况下，一旦超过了特定的时间点或温度，概率就可能出现非线性的增加。

影响阈值或可能重要的适应极限的存在，并非什么新鲜的概念。IPCC 第五次评估报告“适应机会、制约和限制”这一章[1] 提供了该话题的权威概况。然而，我们所采取的方法——展现超过这些阈值的概率随时间（或全球气温上升）的变化——似乎并不是通常的首选方法。IPCC 第五次评估报告第二工作组报告只包含了一张这种形式的图（显示了大规模珊瑚死亡的风险）[2]，而显示影响的严重程度随时间而变化的图有大约 20 张。[3]

正如本节开始所讨论的，首先确定我们希望避免什么风险、然后评估其可能性随时间而变化的趋势的方法，似乎与风险评估的原则一致。如果以这种方式展示结果，可以清楚地表明，在特定情景下（如高排放量路径情景），可能性可能变得非常高，这对决策者来说将是有用的信息。

我们似乎还有很大的空间进一步发展该方法。例如，我们可以设定更多与当地相关的社会经济阈值，以及开发出更好的方法来预测概率。

该方法的一个限制可能是，人们只关注气候变化的某一个影响，而忽略了许多影响相结合的作用。在现实世界中，气候变化的不同影响经常会相互重叠，相互作用。预测这类相互作用的困难——尤其是将人类活动也纳入考虑时——可能意味着容易忽视这些相互作用带来的风险。IPCC 发现，*“气候变化的相互作用对一个方面产生影响，改变了人们受影响的程度和脆弱性，或是导致人们采取适应和缓解措施，从而对同一方面或不同方面造成影响，这种情况一般未纳入或较好地纳入风险预测中。然而，一旦考虑到这一相互作用，人们就会发现许多之前未评估或意识到的紧急风险。”*[4]

这一风险评估最困难的方面——气候变化的影响与复杂的人类系统之间的相互作用——是该报告的下一部分的话题。

尾注

1. Klein, R.J.T., G.F. Midgley, B.L. Preston, M. Alam, F.G.H. Berkhout, K. Dow 和 M.R. Shaw（2014 年）：改造机会、制约和限制。出自：《2014 年气候变化：影响、适应和脆弱性。A 部分：全球和部门情况。》IPCC 第五次评估报告第二工作组供稿 [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea 和 L.L. White（编辑）]。英国剑桥和美国纽约，剑桥大学出版社，第 899 至 943 页。
2. 图 30-10，出自 Hoegh-Guldberg, O., R. Cai, E.S. Poloczanska, P.G. Brewer, S. Sundby, K. Hilmi, V.J. Fabry 和 S. Jung（2014 年）“海洋”。《2014 年气候变化：影响、适应和脆弱性。B 部分：地区情况。》IPCC 第五次评估报告第二工作组供稿 [Barros, V.R., C.B. Field, D.J. Dokken, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea 和 L.L.White（编辑）]。英国剑桥和美国纽约：剑桥大学出版社，第 1655 至 1731 页。
3. 见 https://ipcc-wg2.gov/AR5/report/full-report/ 中的图表。
4. Oppenheimer, M., M. Campos, R. Warren, J. Birkmann, G. Luber, B. O’Neill 和 K. Takahashi（2014 年）：“紧急风险和关键的脆弱性”。出自：《2014 年气候变化：影响、适应和脆弱性。A 部分：全球和部门情况。》IPCC 第五次评估报告第二工作组供稿 [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea 和 L.L. White（编辑）]。英国剑桥和美国纽约，剑桥大学出版社，第 1053 页。

风险评估第三部分：

系统性风险

风险评估第三部分：

系统性风险

19. 引言

我们的人类文明及其所依赖的自然环境都是错综复杂的动态系统。这种系统的定义特征是，系统由大量相互作用、相互依赖的部分所组成。这些相互作用经常是非线性的：它们的成因和影响之间并不成比例。一些微小的变化有时可能产生非常严重的影响。因此，这些系统的行为非常难以预测。[1]

如果高度的不确定性影响了我们的目标或我们重视的事物，那么就可能意味着很高的风险。系统的风险可以简单地定义为：“可能触发某个系统意想不到的大规模变化或可能给该系统带来无法控制的大规模威胁的风险”。[2]

在风险评估的部分，我们关注的是气候系统与人类社会和经济系统相互作用可能带来的风险。我们在本报告的开始指出，在人类文明发展的几千年里，气候一直保持着异乎寻常的稳定。但是现在，人类排放温室气体，对气候系统造成了强迫作用力，从而破坏了气候系统的稳定性。如前面的章节所述，这可能导致自然世界发生巨大的变化，远远超过人类经验的范围。我们从直觉上猜测，如果微小的变化有时都可能对复杂的系统产生非常严重的影响，那么巨大的变化也很有可能产生非常严重的影响了。

气候变化的系统性风险可能非常大，但是系统性的风险远远没有直接风险（如前面的章节所述）那么容易评估。在这部分，我们首先举了一个与气候事件的系统性风险相关的城市案例， 然后，我们考察了某个地区（北极）已经观察到的变化和未来可能的系统风险，以及这些变化将如何影响世界其它地区。最后，我们深入探讨了两类风险，这两类风险可能在国际层面造成重要的影响：即气候变化对全球粮食安全的风险，以及气候变化对国家和国际安全的风险。

城市层面的系统性风险案例：圣保罗面临的干旱

Jose Marengo 博士在位于巴西圣保罗的国家自然灾害监测和预警中心担任研究主任。自 2014 年 10 月以来，他就加入了一个危机特别工作组，该小组就如何处理巴西东南部的旱情为政府提供咨询建议。在这里，他描述了干旱的一些影响。

圣保罗大都会区是南美最大的都市，占巴西 GDP 的三分之一。在过去的一年里，圣保罗遭遇了严重的干旱。2014 年，城市周围的水库系统的降雨量下降到 1940 年以来记录的最低水平，而且 2014 年也正好处于高温期。我们很难评估气候变化对低降雨量可能性的影响程度，但气候变化很可能在增加高温的可能性方面发挥了作用。[3,4]（正如第 1 章所讨论的，未来气候变化可能增加世界上许多地区遭遇干旱的风险。）

降雨量低会减少水资源的可用量，而高温则会增加用水量，包括农业、工业和家庭的用水量。圣保罗在最近几十年的快速发展增加了它的脆弱性：人口的增长增加了用水需求量；历来吸收雨水并将其慢慢释放到水库的森林和湿地遭到破坏；而劣质的基础设施还会继续泄漏 30% 到 40% 的水量。

显然，这些带来的最直接的影响就是缺水。国有公共事业公司已将水库的提水量减少了三分之一，降低夜晚泵压，并为减少用水量的用户提供水费折扣。现在，该城市的部分地区依赖于运水车的供水。

水资源的匮乏阻碍了学校、医院和企业的运营。农业也受到了影响：西红柿和生菜等产品的价格在干旱达到高峰时上涨了 30%；其它受影响的农作物包括甘蔗、橘子和豆类。[5] 与此同时，该地区发生的森林火灾的次数从 2013 年到 2014 年增加了 150%。[6] 发电量也受到了影响。巴西 70% 的供电来自水力发电，而其中有 70% 来自圣保罗地区。到 2014 年年底，提供水力发电的水库几乎干涸。这样一来，2015 年能源关税预计会增加 20% 到 25%。[7]

缺水使得政府不得不实施供水配给制度，还会带来水费上涨和其他诸多不便，甚至在城市的某些区域还引发了抗议和社会动荡。到目前为止，干旱带来的总经济损失估计达 50 亿美元，使其成为 2014 年世界第五大成本最高的自然灾害。[8]

区域层面的系统性风险案例：北极的气候变化

Tero Mustonen 博士就职于荷兰非营利组织 Snowchange Cooperative 和东芬兰大学。他在工作中接触到了正在观察和记录气候变化及其影响的科学家和北极地区的原住民。在这里，他描述了一些观察到的变化，以及未来面临的一些风险。

北极变暖的速度是地球其它地区的两倍[9]，因此我们目前在北极观察到的变化能让我们对未来其它地区发生的变化规模有所了解。我们已经看到北极发生了巨大的变化。平均气温的上升已经导致过去前所未闻的极端高温：芬兰北部记录的最高气温已经高达 37.22ºC。[10] 格陵兰岛冰层的融化速度加快，而夏季海冰减少了约 40%，速度快于大部分科学模型预测的速度。[11] 在许多地区，永久冻土层——以前还可以被称之为永久性冻土层——正在开始解冻。整个地区正在经历持续的系统性变化，可能会为生态系统和人类社会带来严重的后果。[12]

生态系统发生的这些变化会直接影响北极地区的原住民。不可预测的天气模式已经破坏了居住在俄罗斯西北部的科拉萨米人一直以来遵循的传统日历。[13] 在欧亚大陆北部，斯科尔特萨米人预测到气候变化会对驯鹿放牧栖息地产生严重的影响，因此开始调整他们的文化，更多依靠内陆捕鱼为生。[14] 由于海冰的减少导致其猎取的动物种群出现衰退，因纽特人的狩猎和食物共享文化也受到了威胁。据北极理事会评估，今后物种的范围会缩小，可利用程度会下降，天气会变得更加不可预测，而且冰层状况的变化会威胁到出行安全，这些影响“给人类健康和粮食安全 ，甚至可能会给一些文化的存在带来严峻的挑战。”[15]

该地区的工业化社会也受到了干扰。虽然海冰的退缩可能扩大航运和海上石油开采的范围，但永久冻土的融化会威胁到建筑物、道路、管道和机场的稳定性。[16] 社区和工业设施可能需要搬迁。因为每年的冰冻期变短，也变得更难以预测，冰上道路和跨越苔原的交通运输以及陆地的石油和天然气开采将变得更加困难。[17] 不稳定的地面甚至会对核设施的安全运行构成严重的威胁，例如位于西伯利亚北部的比利比诺核电站。[18]

这些发生在北极的变化可能会增加世界其它地区面临的风险。正如前面的章节所指出的，永久冻土层的融合可能会加快全球气温的上升，而格陵兰岛冰层的融合可能会显著增加全球海平面的上升幅度。

国际层面的系统性风险

英国政府第一次国家气候变化风险评估的一部分内容是开展一项研究[19]调查气候变化对英国的“间接”风险：不是国内气候变化影响带来的风险，而是与其它国家相互作用而间接影响国家的风险。

该研究得出一个惊人的结论：“全球气候变化的影响会使英国目前面临的威胁增加数倍，其中一些影响可能比国内气候影响带来威胁的严重程度高出一个数量级”（强调）。该研究仅仅考虑全球温室气体排放与将全球温升控制在 2˚C 以内的目标相一致的情景。研究指出，全球温室气体排放更高的情景可能导致更严重的影响，尤其是在更长的时期。

该研究发现的最严重的风险大部分可以分为两类：对全球粮食安全的风险，以及对国家和国际安全的风险。在本文所呈现的风险评估中，我们也深入思考了这两类风险。下面两节总结了我们的研究结果。

尾注

1 Helbing, D.（2010 年）。“社会和经济中的系统性风险”。为国际风险管理理事会关于新兴风险的研讨会准备的论文，2009 年 12 月。见 http://irgc.org/IMG/pdf/ Systemic_Risks_Helbing2.pdf .
2 Helbing, D.（2010 年）。第 2 页。
3 Nobre, C.A., J. A. Marengo, M. E. Seluchi, A. Cuartas, L. M. Alves, H. Camargo（2015 年）。“2014 年巴西东南部创纪录的干旱和水资源危机。” 提交至《美国气象学会公报》，2015 年。
4 要获得关于潜在气候模式和类似干旱的更多详细信息，请查看 Cavalcanti IFA, Kouksy VE（2001 年）“巴西 2001 年夏季和秋季的干旱及相关的循环特性”，《气候分析》，1: 1-10 （见：http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/revista/pdf/criseing.pdf）；DAEE（2013 年 ）Macrometrópole. ‘Sumario Executivo-Plano Diretor de Aproveitamento de Recursos Hídricos para a Macrometrópole Paulista’.Departamento de Aguas e Energia Elétrica (DAEE). Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Regional, Secretaria do Meio Ambiente, Secretaria de Saneamento e Recursos Hídricos. Governo do Estado de São Paulo, 巴西圣保罗，共 44 页；Obregón, G. O., J. A Marengo, C. A. Nobre（2014 年），“降雨量和气候的变化：20 世纪圣保罗大都会区的长期趋势”，《气候研究》，61: 第 93 至 107 页，2014 年，doi: 10.3354/cr01241
5 根据圣保罗州粮食储存和市场分配中心（CEAGESP）、巴西柑橘协会、圣保罗粮食股票市场和巴西蔗产联盟。
6 根据 INPE (www.inpe.br)
7 巴西电能商业化协会
8 Munich Re（2015 年）《2014 年自然灾害：分析、评估和观点》。 TOPICS-GEO 2014. 德国慕尼黑。共 67 页。
9 Overland, J., Hanna, E., Hansses-Bauer, I., Kim, S.-J., Walsh,J, Wang, M., Bhatt, 美国（2014 年）。“气温”，《北极年度报告：2014 年更新版》，见 http://www.arctic.noaa.gov/reportcard/air_temperature.html
10 根据芬兰气象研究所
11 见 IPCC 报告（2013 年）第 9 页。“决策者摘要”。《2013 年气候变化：自然科学基础》。IPCC 第五次评估报告第一工作组供稿 [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex 和 P.M. Midgley（编辑）]。英国剑桥和美国纽约，剑桥大学出版社。以及 Larsen, J.N., O.A. Anisimov, A. Constable, A.B. Hollowed, N. Maynard, P. Prestrud, T.D. Prowse 和 J.M.R. Stone（2014 年）。“极地”。《2014 年气候变化：影响、适应和脆弱性。B 部分：区域情况。》IPCC 第五次评估报告第二工作组供稿 [Barros, V.R., C.B. Field, D.J. Dokken, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea 和 L.L.White（编辑）]。英国剑桥和美国纽约，剑桥大学出版社，第 1567 至 1612 页。
12 北极理事会（2013 年）。《2013 年北极恢复力中期报告》。斯德哥尔摩：斯德哥尔摩环境研究所和斯德哥尔摩恢复力中心。
13 Helbing, D.（2010 年）。“社会和经济的系统性风险”。为国际风险管理理事会关于新兴风险的研讨会准备的论文，2009 年 12 月，http://irgc.org/IMG/pdf/ Systemic_Risks_Helbing2.pdf
14 Feodoroff, P 和 Mustonen, T.《Näätämö 和 Ponoi 河 的合作治理计划》。孔蒂奥拉赫蒂： Snowchange Cooperative, 2013 年。
15 北极理事会（2005 年）。《北极气候影响评估》。剑桥：剑桥大学出版社，第 6 页。
16 北极理事会（2005 年）。第 6 页。
17 Helbing, D.（2009 年）
18 Bellona 2015a. 俄罗斯古老的比利比诺核电站安全系统故障导致反应堆紧急停堆。http://bellona.org/news/nuclear-issues/nuclear-issues-in-ex-soviet-republics/2010-11-glitching-safety-system-at-russias-aged-bilibino-npp-causes-emergency-reactor-shutdown. 于 2015 年 4 月 13 日引用。
19 普华永道（2013 年）。《气候变化的国际威胁和给英国带来的机会》 http://www.pwc.co.uk/sustainability-climate-change/publications/international-threats-and-opportunities-of-climate-change-to-the-uk.jhtml

气候变化对全球粮食安全的风险

为了更好地理解气候变化对全球粮食安全的系统性风险，英国外交和联邦事务部与英国政府科学和创新网络共同委托英国全球粮食安全项目，组建一个跨学科的工作小组进行评估，该工作小组由来自英国和美国的学者以及行业和政策专家组成。该工作小组研究了当前气候条件下极端天气对全球粮食系统的风险，以及气候变化是如何增加了并在未来进一步增加这些风险的。该工作小组的完整报告《极端天气和全球粮食系统的恢复能力》见 http://www.foodsecurity.ac.uk/assets/pdfs/extreme-weather-resilience-of-global-food-system.pdf[1]，其中包括管理和减少这些风险的建议。下一节是该报告风险评估的总结。

20．极端天气和全球粮食系统的恢复能力

为英国 - 美国极端天气和全球粮食系统恢复力工作小组编制

主要作者按姓名字母顺序排列（*= 主要作者召集人）[i]
Rob Bailey*[1], Tim G. Benton*[2,3], Andy Challinor[3], Joshua Elliott*[4], David Gustafson*[5], Bradley Hiller[6], Aled Jones*[6], Chris Kent[7], Kirsty Lewis*[7], Theresa Meacham[2], Mike Rivington[8], Richard Tiffin*[9] 和 Donald J. Wuebbles[10]

世界变化下的粮食供需和天气的影响

在全球层面，粮食需求量的增长速度要快于产量的增长速度，给土地带来越来越大的压力[2]。据粮农组织估计，到 2050 年粮食的需求量将在目前的基础上增加 60% 以上。人口数量和人口结构的变化以及全球财富的增加带动了粮食需求的增加。这样反过来又导致人均粮食需求增加，这往往与更多的畜产品需求有关。2007 年 8 月，从粮农组织的粮食价格指数和国际主要谷物的交易情况可以看到，粮食价格迅速上涨。气候变化对生产带来小规模冲击，再加上库存消费比率处于历史低位，导致了这次价格上涨[3]。某些国家为了保证本国的粮食安全，对本国粮食出口设置壁垒，进一步加剧了价格的上涨，导致粮农组织价格上涨超过 100%。2010 年 11 月又发生了类似的价格上涨，这在某种程度上受到东欧和俄罗斯天气的影响[4]。

这些价格暴涨对世界各地产生了严重的影响。在富裕的国家，虽然粮食供应充足，但粮食价格的显著上涨影响到最贫穷的人口，导致他们购买的粮食质量或数量下降，而且在这过程中花费会显著增加。在贫穷的国家，尤其是治理脆弱的国家，快速的粮食价格上涨扰乱了社会秩序，而且在某种程度上触发了“阿拉伯之春”及后续的结果[5]。2012 年，美国中西部遭遇了半个世纪以来最严重的干旱，引发国际玉米和大豆价格的暴涨。

一系列的价格暴涨及其带来的后果再次警醒世界，必须关注全球粮食供应及其波动性。2012 年，当时担任英国政府首席科学顾问的 John Beddington 爵士委任英国粮食研究伙伴关系组织完成了关于粮食系统恢复能力的报告。该报告得出结论：“目前没有合理的证据能够确定地描述，多变的天气会如何影响粮食生产系统和世界各地的贸易。但我们的观点是，我们需要针对这些问题开展进一步的调查，而且可能要更多地考虑合理的‘最坏情况’。……由于极端天气发生的频率不断增加，因此极端天气更有可能产生严重的影响，前所未有的极端事件也更有可能发生。”[6]

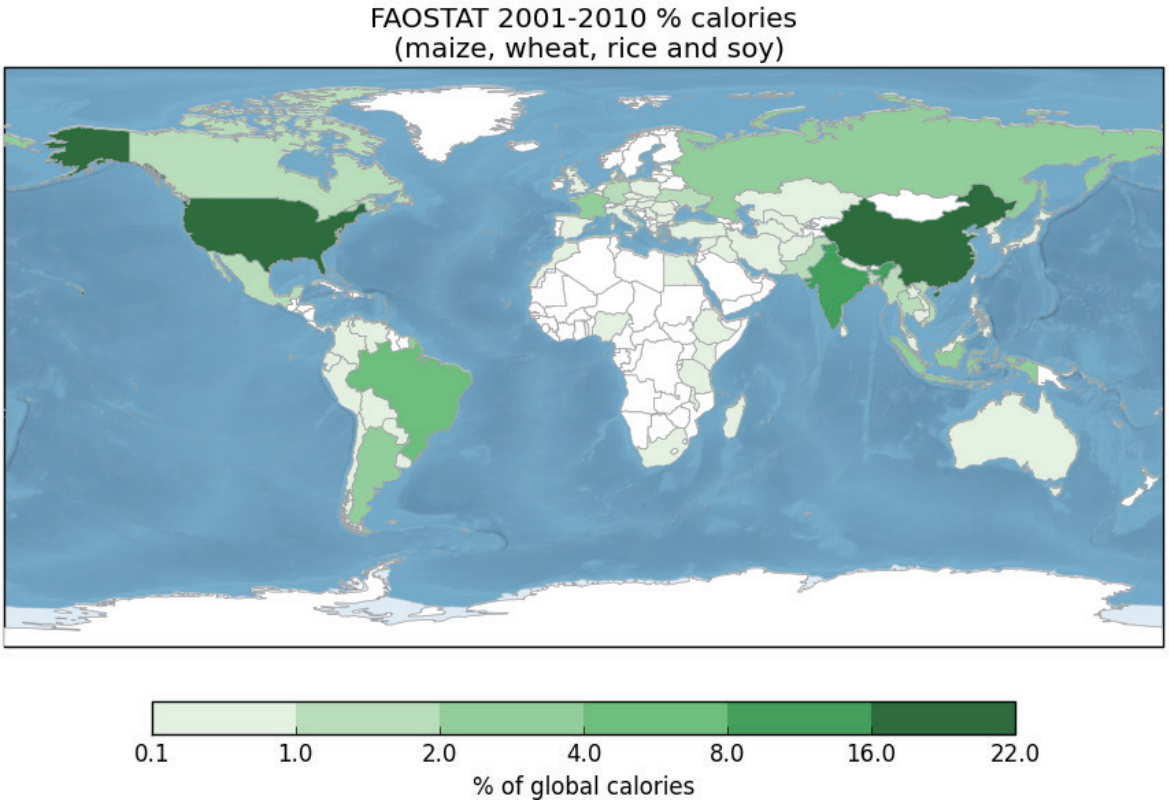
[i1] 英国皇家国际事务研究所 [2] 英国全球粮食安全项目 [3] 英国利兹大学 [4] 美国哥伦比亚大学，NASA 戈达德太空研究所 [5] 美国华盛顿国际生命科学学会（ILSI）研究基金会 [6] 英国安格利亚鲁斯金大学，全球可持续发展研究所 [7] 英国气象局 [8] 英国苏格兰阿伯丁，詹姆斯 • 赫顿研究所 [9] 英国雷丁大学粮食安全中心 [10] 美国伊利诺斯大学，大气科学系

这里，我们将工作小组的研究结果总结为三个领域：(i) 气候变化是如何对全球粮食系统产生冲击的，以及其中“可能的”最坏情况的冲击；(ii) 对最坏情况的冲击可能产生的市场和政策反应；以及 (iii) 上述情景和响应对不同的社会、经济体和环境可能产生什么影响。

天气和对于全球粮食系统的冲击

全球最重要的商品作物（玉米、大豆、小麦和大米）来自少数一些生产大国。全球大部分主要农作物遭受的产量冲击主要集中在全球某些特定地区（图 1），因此这些地区发生的极端天气事件对全球粮食生产的影响最严重。如果在两个或两个以上的地区同时出现极端天气事件——造成多个产粮区的减产——将会给生产带来严重的冲击；但是在了解不同产区极端天气事件的协方差方面，目前开展的研究还不够。目前我们迫切需要了解气象遥相关的驱动动力学，例如厄尔尼诺（可能正在变得更加极端）[7]，来量化主要粮食生产地区同时遭受生产冲击的可能性。

图 1. 每个国家的四种主要商品农作物总热量的比例。在每个国家，农业生产一般也集中在某些地区（见弗利 2011 年空间分辨图 S7a）。例如，美国生产的大部分热量来自于中西部地区的大豆和玉米；在巴西，农业生产（主要是生产大豆）集中在东南沿海地区；大米主要产自印度河 - 恒和平原、中国东南部和东南亚；而小麦生产集中在欧洲西北部和黑海地区。



通过分析最近农作物所遭受的冲击，我们发现天气事件（尤其是干旱）是这些冲击的主要驱动力。利用过去事件的案例，我们生成一系列关于天气对这四种农作物造成生产冲击的情景（包括现在或近期）。将上述情景相结合，我们得出可能的最糟糕情景。[ii]

ii 使用全球网格作物模型比较数据，根据历史和模拟的异常情况估算 1988 年 9 月和 2002 年 3 月四种作物的全球产量损失。

iii AgMIP/ISI-MIP 耦合模型 https://www.agmip.org/ag-grid/ggcmi/

1. 极端天气影响农作物生产的可能情景

对历史记录的分析表明，1988 年和 1989 年，干旱严重影响了玉米和大豆的产量，导致全球产量分别下降 12% 和 8.5%。2002 年 3 月，干旱影响了欧洲、俄罗斯、印度和中国的小麦以及印度的大米产量，导致小麦的全球产量下降 6%，而大米的全球产量下降 4%. 根据我们的预测，可能的最坏情况是严重影响玉米和大豆、小麦和大米的两种天气模式同时发生。没有进一步研究之前，我们无法量化该情景的风险，但我们认为该情景有可能对四种农作物都产生严重的影响。

风险随时间推移的变化情况：初步分析

通过使用气候 - 作物耦合模型，我们可以探索粮食系统遭遇重大冲击的风险变化情况。为了衡量我们是否应该担忧不断变化的风险，我们利用农业和气候影响的耦合模型进行了初步探索。[iii] 以热量标准来衡量全球粮食产量，耦合模型得出了玉米、大豆、小麦和大米产量在模拟天气下的分布情况（图 2 中，柱状图表示“历史趋势”和未来“短期”，而箱形图表示 4 个时间段）。通过比较柱状图，我们可以发现，与过去的几十年相比未来的分布形状会有所变化：会逐渐“变平”。这种形状的变化表示模拟的历史趋势与未来短期之间的差异显著增加，而这种差异在本世纪还会加大（图 2，顶部右边板块）。

这个耦合模型的分析结果表明，我们在 20 世纪后期所遭遇的极端粮食生产冲击在未来将会变得更加常见（图 2）。这些数据表明，在 20 世纪后期 200 年一遇的气候事件相当于损失约 8.5% 的热量（图 2 顶部），而在未来几十年里（2011 年至 2040 年），两百年一遇的气候事件在规模上会增加约 15%，相当于粮食产出热量损失约 9.8%。此外，根据耦合模型的研究结果，我们过去在 1951 年至 2010 年期间称之为百年一遇的气候事件，在本世纪中叶以前可能三十年就会发生一次。

图 2: 以热量标准来衡量全球粮食产量，耦合模型得出了玉米、大豆、小麦和大米产量的历史趋势（1951 至 2010 年）和在未来较短时期内（2011 至 2040 年）的分布情况，顶行和底行分别是考虑和不考虑大气中二氧化碳浓度增加带来的施肥效应的情况。每个时间段估算的 200 年一遇事件的规模用柱状图中的箭头表示。箱形图概括了作物产量分布情况，显示出整个 21 世纪变化可能不断增加的趋势。

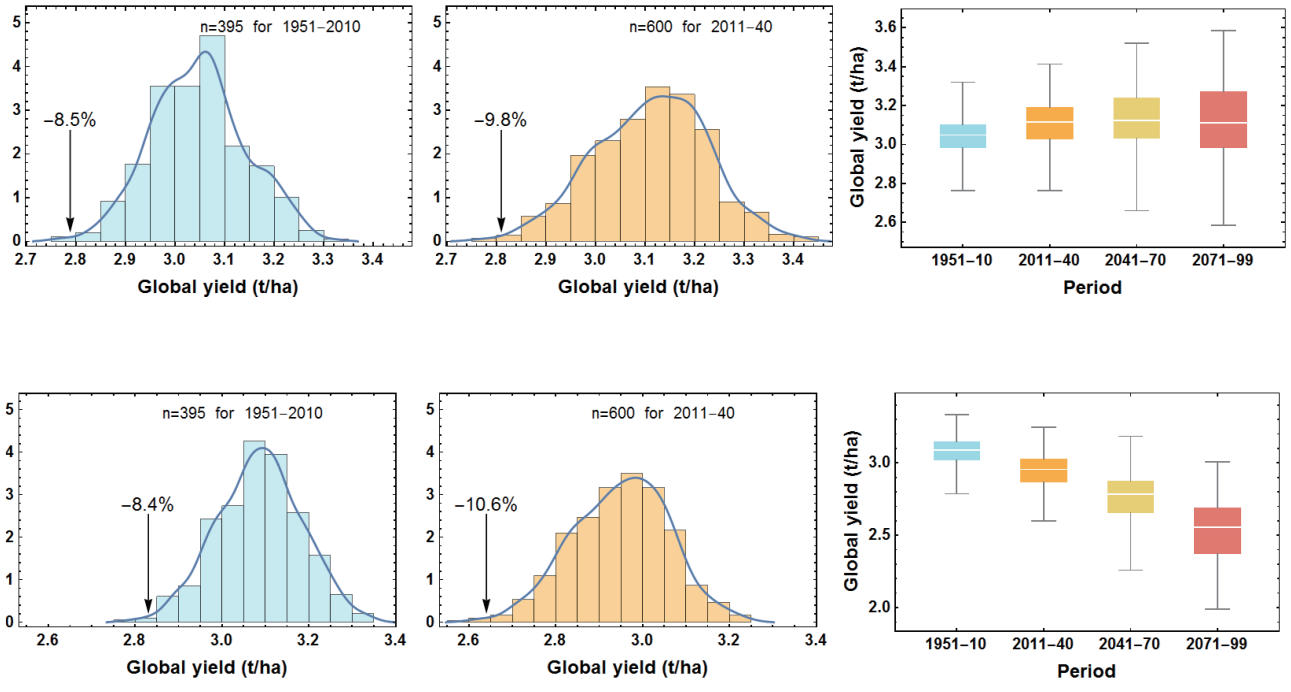


图 2 第一行中列出的分析假定二氧化碳施肥效应全部发挥了作用。大家针对二氧化碳施肥效应有益作用的程度又提出了一系列的问题。[9] 如果我们反过来假定没有这么大规模的二氧化碳施肥效应，就会发现在以后几十年会产生类似的、甚至更严重的影响（图 2 底部）：两百年一遇事件的规模在不久的将来会增加 25% 左右，左尾的极端值显示可能会发生历史上前所未有的事件。如果没有二氧化碳的（施肥）效应，那么历史上百年一遇的事件预计在 21 世纪下半叶不到十年就会发生一次。

这些结果只是初步分析，也由于缺乏高分辨率的全球气候模型而受到限制。我们还需要开展大量的工作来减少不确定性，并更好地理解极端天气的变化方式。然而迹象表明，由于更频繁的极端天气，全球粮食系统正面临着日益增加的风险。

面对天气对粮食生产造成的冲击，政府及市场的反应

近年来全球粮食贸易量的增长为我们带了益处，这些广为人知的益处包括：帮助一些国家解决粮食生产潜能不足、国内粮食需求缺口的问题；促进粮食生产的专业化和生产效率；缓和地区粮食产量失调，从而提高粮食系统的整体恢复能力。然而，粮食产量失调的具体情况是不一样的。在第三节中我们曾强调，若一个或多个主要生产区受到冲击，那么全球生产粮食系统就可能被破坏，因为全球粮食生产系统存在的一个固有的系统性风险就是地理位置集中。

正如 May 所指出（主要针对金融和生态系统，但同样适用于具有部分相同特性的全球粮食生产系统），系统的稳固性和脆弱性之间存在复杂的关联。[10] 系统内部联系增强，各国对本地粮食生产冲击的承受能力会随之增强；另一方面，如果某个重要粮食产地的生产受到冲击，那么距离它非常遥远的国家也可能受到影响。这同时也意味着，如果这种关联突然中断（例如，由于突然的贸易禁令），那么全球粮食系统的稳固性会降低。最近，一项研究对 1992 至 2009 年间全球贸易体系的变化进行了分析，并得出如下结论：

全球粮食系统所表现出的各项特征确实印证了其脆弱性，即对自动蔓延的粮食生产失调问题的承受能力较弱。过去二十年里，各国联系愈加紧密，全球粮食贸易呈增长态势，绝大多数国家的主要粮食供应或者粮食供应短缺都依赖于外部进口解决。[11]

实质上，随着粮食进口贸易的不断深化，面对当地的粮食生产冲击，各国的承受能力增强，且应对成本降低；但各国粮食系统的系统性风险却在加剧，如某个重要粮食产地受到生产冲击或者国家间联系突然减弱的风险。近来粮食价格的飙升，便清楚说明了与重要粮食产地的生产冲击或突发贸易限制相关的一些系统性风险。人们认为还有一些因素助长了此次价格飙升，这些因素包括：生物燃料指令、粮食储备量与需求量的比例偏低以及美元贬值。[iv]

历史经验表明，粮食生产受到冲击后，单个粮食产品价格会在短时间内增长一倍多。[12] 粮食系统面对气候造成的生产冲击的恢复能力，可以通过粮食价格、粮食可获取途径和可获取量受影响的程度来定义。因此，“恢复能力”的强弱取决于冲击的规模和相关的政策、市场反应（随着冲击通过全球粮食系统不断扩散，这些反应将可能加剧或缓解本次冲击的影响）。

过去十年粮食价格不断上升，许多国家的政府制定了战略应对措施来更好地管理粮食生产。然而，一些与需求和贸易措施相关的关键问题仍未得到解决。要避免未来粮食生产冲击的影响极度恶化，我们需要更好地理解，政策及市场反应如何加剧或缓解生产冲击对粮食价格的影响。而这些反应取决于各方的行为，同时各方行为又受到市场的影响。而政府在这一过程中发挥了重要作用，包括其

iv 世界商品价格以美元定价。美元贬值导致价格以其它货币计算时更低。这将导致供应量减少或需求量增加，从而推高全球价格

对市场的直接干预和对各方（包括农民、食品生产商、粮食零售商、消费者和救援机构）的间接影响。为了了解政府和市场可能对粮食（小麦、玉米、大豆和大米）生产冲击做出的反应，我们回顾了相关文献，分析了历史数据，并采访了 50 位来自世界各地的行业和政策专家。以框 1 中规定的粮食生产冲击可能的最坏情况为起点，我们对具体情景进行了预测，即天气与政府及市场反应在全球范围内相互作用，并最终发展为一场大规模的市场冲击。该情景针对 2016 年，假设条件包括：主要粮食生产国实行出口限制；主要进口国或高度依赖进口的国家对大宗采购及消费进行补贴。对该情景的详细描述请见完整版报告 [链接]；该报告还包括 2026 年的情景，该情景假设 2016 年后全球粮食系统的恢复能力会下降。

目前，我们无法对这些情景下价格所受的影响进行经济建模。在这些情景假设中，市场不均衡，粮食冲击的规模“史无前例”，典型的经济模型不太适合模拟这些情景下的短期价格。然而，从下文列出的 2016 年最坏合理情景下的粮食生产冲击和政府及市场反应情况，我们可以看到：FAO 粮食价格指数将创下新高，超过 250（报告撰写时该指数为 170 左右），同时单个粮食产品的价格也可能会上涨两倍之多。2008 年和 2011 年该指数分别为 226 和 238。假设其它条件相同，2026 年的情景预计将出现更高的粮食价格涨幅。对这些情景进行经济建模将是未来研究的一个方向。

可能加剧 2026 年生产冲击影响的因素

粮食生产冲击对全球粮食安全的影响不仅取决于主要参与者的反应，而且也取决于粮食系统的整体恢复能力和宏观经济形势。对 2026 年可能的最坏情景假设并不难：2016 年后的十年，粮食系统的恢复能力减弱，宏观经济形势低迷，全球粮食系统对同样冲击的承受力大幅下降。

逐步削弱全球粮食系统对供应冲击的恢复能力、并增加粮食价格危机可能性的因素包括：粮食储备量与需求量的比例偏低；中国的粮食自给自足能力下降；粮食刚性需求持续增加；油价回升；重要粮食出口地的基础设施长期投资不足；美元贬值。在这一系列的前提条件下，本报告所考虑的粮食生产冲击几乎必然导致更剧烈的粮食价格反应。因此，各国社会和政府的反应也可能会更极端。更多国家将可能出现内乱，政府利益面临更大威胁，导致国家干预力度加大。

可能的最坏情景对社会、经济和环境产生什么样的影响？

前一小节提出了 2016 年可能的最糟糕情景，即天气对全球产量造成冲击，市场参与者的反应加剧了这种冲击，可能导致 2016 年 FAO 粮食价格指数飙升至 250 以上。基于这种情景，我们就可以考虑对人口和国家经济造成的潜在影响。我们通过专家访谈来收集与国家层面的可能影响相关的信息。我们制定了一份“访谈问卷”，采访来自学术 / 研究机构、政府和私营部门的专家小组关于对巴西、中国、埃及、埃塞俄比亚、欧洲、印度、俄罗斯、沙特阿拉伯和美国可能产生的影响。

该分析显示出对国家和社会层面可能出现的最坏情景的广泛预期，与 2007 年 8 月和 2010 年 11 月价格飙升时所观察到的影响高度一致。

- 受影响最严重的是依赖进口的发展中国家，尤其是撒哈拉以南非洲。这些国家短期内可能出现严重的贫困率上升、营养安全状况恶化现象。对其经济产生的影响可能包括高价粮食补贴和社会转型造成的通货膨胀、国际收支失衡和预算压力增大；
- 其它依赖进口的国家可能会产生社会动荡。特别是在阿拉伯之春后和地区持续不稳定情况下，中东和北非地区严重依赖进口的国家会特别脆弱，不堪一击；

v 这是平均的情况。据分析，继 2007 年 8 月粮食价格飙升后，英国的粮食购买量呈现出复杂的变化模式：随着粮价上涨，英国家庭的粮食购买量下降 4.2%. 另外，人们还通过购买低价的粮食替代品来省钱。然而，这种方式并没有抵消粮价上涨的影响，总体来说一般的英国家庭在粮食方面的开支增加，2011 年比 2007 年增加 12%. 2011 年最贫穷的人们在粮食方面的开支比 2007 年增加 17%，因此相对来说增长率比平均增长率高 40% (https://www.gov.uk/government/publications/family-food-2011).

- 主要经济大国所受影响较小。美国和欧盟等工业化大国的消费者相对来说不受影响，因为食品支出只占家庭支出的一小部分。[12] 这些经济体的农作物领域和其它主要农业生产者可能会从价格上涨中获益，而其它领域可能会受到一定冲击。在中国，食品支出较少的消费者相对来说也不会受影响，因为政府会利用战略储备和价格控制进行干预，来缓冲食品价格通胀给他们带来的冲击。
- 长远来看，供给反应可能会产生负面影响。为了应对价格上涨，农业产量可能会通过粗放型和集约型生产方式相结合而增长。这在短期内将增加供应，帮助股市复苏，促进食品价格下降。然而，如果粗放型生产方式是以提高碳排放和 / 或牺牲土地生物多样性如森林为代价，那么就会产生长期的环境成本。同样，不可持续的集约型生产方式会使土壤退化，耗尽淡水资源供应，增加温室气体的排放，造成富营养化。粮食价格急剧飙升时，不可持续的生产反应可能带来更大的风险，可能对粮食生产恢复力产生长期影响。

结论

我们认为，天气对全球粮食生产造成严重冲击的风险似乎随着气候变化而迅速增加。此类事件可能会严重影响全球粮食市场的稳定和脆弱国家的人类安全。在完整报告中，我们识别出五个可以采取行动的大致领域。[v] 第一个也是最重要的领域，是更好地理解风险。尤其是，我们需要更好地理解天气冲击所形成的风险处在动态变化过程中。此外，我们还需要更好地理解冲击通过贸易网络传播的方式，以及可以缓解其影响的短期行动。最后，我们还可以采取战略行动，实现结构变化，从而建立全球和当地粮食系统的恢复能力。

尾注

1 又见 http://www.foodsecurity.ac.uk/assets/pdfs/climate-and-global-crop-production-shocks.pdf, http://www.foodsecurity.ac.uk/assets/pdfs/review-of-responses-to-food-production-shocks.pdf 和 http://www.foodsecurity.ac.uk/assets/pdfs/country-impacts-of-global-grain-production-shocks.pdf.

2 Bajzelj, B 等人（2014 年）。“粮食需求管理对气候变化减缓的重要性”。《自然气候变化》 4, 第 924 至 929 页。

3 全球粮食安全（2014 年）。“粮食价格暴涨和全球市场”。《洞察力》 3, 第 1 至 3 页，见 http://www.foodsecurity.ac.uk/assets/pdfs/1404-gfs-insight-food-price-spikes.pdf

4 Coulibaly, A.L.（2013 年） 《2010 年至 2011 年的粮食价格上涨：原因和影响》 背景论文 编号：2013-02-E. 议会图书馆。http://www.parl.gc.ca/Content/LOP/ResearchPublications/2013-02-e.htm

5 Lagi, M., Bertrand, K.Z. 和 Bar-Yam, Y. (2011 年)。“北非和中东的粮食危机和政治不安定。”arXiv preprint arXiv:1108.2455; Bellemare, M. F. （2015 年）。“粮食价格上涨、粮食价格波动性和社会动乱”。《美国农业经济学杂志》, 97, 第 1 至 21 页；Natalini, D. 等人（2015 年），“衡量各国粮食暴动可能性方法的定量评估”，《可持续发展》7 (4)，第 4360 至 4385 页。

6 Benton, T. 等人（2012 年）。《恶劣的天气和英国粮食链恢复力：综合报告的详细附录》。http://www.foodsecurity.ac.uk/assets/pdfs/frp-severe-weather-uk-food-chain-resilience.pdf

7 Cai, W. 等人（2014 年）。“温室效应导致极端厄尔尼诺事件的发生频率增加”。《自然气候变化》，4，第 111 至 116 页。

8 Foley, J. A. 等人（2011 年）。“地球种植业的解决方案”。《自然》478，第 337 至 342 页。

9 O'Leary, G. J. 等人（2015 年）。“开放式空气二氧化碳浓度增加实验和半干旱环境模型中，小麦的生长、产量和用水量随二氧化碳浓度的增加而变化的情况”。《全球变化生物学》。doi: 10.1111/gcb.12830; Feng, Z., Rütting, T., Pleijel, H., Wallin, G., Reich, P.B., Kammann, C.I., Newton, P.C.D., Kobayashi, K., Luo, Y., Uddling, J., 2015 年。二氧化碳浓度增加时陆生植物获取氮的限制。《全球变化生物学》（出版中）；Myers, S.S., Zanobetti, A., Kloog, I., Huybers, P., Leakey, A.D., Bloom, A.J., Carlisle, E., Dietterich, L.H., Fitzgerald, G., Hasegawa, T., 2014 年。二氧化碳浓度增加威胁到人类的营养。《自然》510，第 139 至 142 页。

10 May, R.M., 2013 年。生态系统和金融系统的网络。皇家学会哲学学报 a—数学物理和工程科学 371, 20120376.

11 第 11 页，出自 Puma, M. J. 等人（2015 年）。“评估全球粮食系统不断发展的脆弱性”。《环境研究快报》，10(2), 024007.

12 Charlebois, P 和 Hamann, N.（2010 年）《美元大幅贬值对农业市场的影响目录》 A38-4/21-2010E-PDF Project 10-055-r http://www.agr.gc.ca/pol/index_e.php

13 全球粮食安全（2012 年）《全球粮食系统和英国粮食进口：恢复力、安全和保障》。见 http://www.foodsecurity.ac.uk/assets/pdfs/gfs-and-uk-food-imports.pdf.

21．气候变化给国家和国际安全带来的风险

该节的供稿作者：**退役海军中将** Pradeep Chauhan[i]，**退役海军中将** Lee Gunn[ii]，**退役少将** A N M Muniruzzaman[iii]，**时殷弘教授** [iv]，Sarang Shidore[v], Arunabha Ghosh **博士** [vi], Catherine Trentacoste[vii], ED McGrady[viii], Francesco Femia[ix], Caitlin E. Werrell[x], Nadia Schweimler[xi]

气候变化给安全带来的风险可能是所有气候风险中最难以评估的，因为这些风险涉及到最长的因果链或影响链，以及最难预测的因素。然而，由于这些风险可能是所有风险中最严重的[1]，因此尽可能最大程度地评估这些风险也至关重要。

如果气候安全的评估没有清楚地表明所考虑的气候变化程度，就有可能混淆和低估风险。关注当前气候的风险可能足以为制定适应和恢复力政策提供依据，但是要针对长期影响（例如与全球排放量有关的影响）做出决策，就有必要从更长远的角度考虑。这里，我们特意尽可能明确地区分目前气候条件下的风险、未来较小幅度的气候变化带来的风险与未来较大幅度的气候变化带来的风险。

气候变化对目前安全的风险

过去十年越来越多可靠的实证证据表明，迄今为止发生的气候变化（全球平均气温上升 0.8˚C）已经在影响与人类、地区、国家和国际安全有关的动态发展。考察这些证据的目的并不是试图准确地描述因果关系，而是思考气候变化是如何改变概率，并与其它因素相互作用而增加概率的。这里我们给出三个例子。

叙利亚面临的旱灾、流离失所和冲突问题

中东、北非和地中海地区在过去的几十年经历了干旱化的趋势，冬季的降水量显著下降。根据过去的气候模型预测，[2] 气候变化对该趋势发挥了重要作用，而且使叙利亚在 2007 年至 2011 年期间遭受极端干旱的可能性增加了两到三倍。[3] 在干旱期间，严重的作物歉收和家畜死亡普遍存在。这也造成了国内大量（约两百万人）农牧民流离失所，其中很多人逃到城市；而城市地区本来就面临着伊拉克和巴勒斯坦难民造成的压力。[4] 到 2009 年，干旱导致超过 80 万叙利亚人失去全部的生计；到 2011 年，大约 100 万人面临粮食供应极端没有保障的困境，而 200 至 300 万人已经陷入极度贫困。[5] 虽然许多其它因素在推动后续政治动乱和冲突方面发挥了重要作用，但是很难想象普遍的贫困和大规模的流离失所在其中没有发挥作用。

---

i 退役海军中将 Pradeep Chauhan, AVSM & Bar, VSM, I.N.，前印度海军指挥官，海军参谋长、对外合作、战略威胁和转型助理
ii 退役美国海军中将 Lee F Gunn，美国海军部（海军和海军陆战队）前总检察长，第三远征打击大队原司令员，最近也曾担任 CAN 公共研究院的院长。
iii 少将 A N M Muniruzzaman，全球气候变化军事顾问委员会主席，孟加拉和平与安全研究所所长。
iv 时殷弘教授，中国人民大学国际关系教授，国际研究学院学术委员会主席，美国研究中心主任。
v Sarang Shidore，德克萨斯大学奥斯汀分校访问学者，之前是新德里国防分析研究所战略前景项目的负责人之一。
vi 能源、环境和水资源委员会 CEO.
vii Catherine Trentacoste，CAN 公司的研究科学家。
viii Ed McGrady，CAN 公司游戏负责人。gaming
ix Francesco Femia，气候与安全中心的创始人和负责人
x Caitlin E. Werrell，气候与安全中心的创始人和负责人
xi Nadia Schweimler，普华永道气候和发展知识网络

热浪、粮食价格暴涨和内乱

2010 年夏季，俄罗斯遭受了极端热浪。据估计，气候变化使这一事件发生的可能性增加了三倍。[6] 热浪还引发了干旱和火灾；由于这三种自然灾害，当年俄罗斯的小麦产量减少 30% 以上[7]。与此同时，相关的旱灾还影响了乌克兰和中国的小麦产量。产量减少以及国际市场上的保护主义措施、投机行为和大规模的粮食采购共同导致全球小麦价格的上涨，是 2010 年下半年小麦价格的两倍多。[8,9] 在埃及等高度依赖进口的国家，2010 年年底和 2011 年年初小麦的价格上涨了 300%。[10]

按人均计算，全世界排名前九位的小麦进口国都位于中东和北非。其中七个国家——利比亚、约旦、阿尔及利亚、突尼斯、也门、埃及和伊拉克——的人类发展指数的排名都比较低，而且平均家庭收入的 35% 到 45% 都用于采购粮食。2011 年，这七个国家都经历了造成平民死亡的政治抗议事件[11]。其中好几个国家都认为，粮食价格一直都是导致动乱的因素之一。尤其在突尼斯、约旦和也门，示威者挥舞着法国长棍面包在街头抗议[12]。在埃及，尽管城市的抗议活动主要针对其它社会和经济问题，然而在解放广场发生抗议事件的同时，埃及全国各地的农村地区也爆发了一系列面包抗议活动，这可能扩大了革命对农村地区的吸引力。[13]

显然，气候变化本身不会导致任何事件的发生。但是气候变化似乎能够与其它压力因素和薄弱点共同发挥作用，带来环境、经济、社会和政治制度的不稳定。

气候的可变性、变化和冲突

在过去的五年里，人们针对气候变化对非洲地方冲突的影响已经收集了切实的证据。在整个非洲大陆，人们发现降雨量的变化对“大规模和小规模的政治冲突”都会产生影响。[14] 人们还发现，在东非，气候变化、资源压力和牧民之间爆发的系列战争之间有着密切的联系。[15]

最近关于气候变化和冲突的研究调查跨越了更广泛的时间和地域范围，并发现了类似关系的证据。[16] 一项基于 60 个主要研究和 45 个冲突相关数据集的评估发现，在包括人与人之间和国际范围的各个层面，暴力发生的可能性都随着气候变化显著增加。[17] 为了发现冲突发生可能性的变化趋势，这些研究都刻意排除了那些可能缓解环境影响的因素，如国家治理和财富。从结果的实用性上来看，这是一个不足之处。然而，跨越时间和空间，在一系列层面上确定气候变化（尤其是降水量）与冲突的可能性之间存在统计学上显著的相关性，这样做又有优势。

气候变化对未来安全的风险

在不久的将来，人口和经济增长预计将大幅增加对资源的压力。与 2012 年相比，2030 年全球粮食、水资源和能源的需求预计分别增加 35%、40% 和 50%[18]。与此同时，气候变化可能对这些资源的供应产生负面影响。一些国家政府的国家安全和情报评估已经意识到，这些影响有潜在的融合趋势，并导致安全风险。[19]

关于长期安全风险方面的研究分析相对较少。IPCC 发现：“目前关于人类安全和气候变化的大多数文献都依据现代的关系和观察，因此在分析快速或严重气候变化对人类安全影响方面比较局限。”[20]

为协助我们评估短期内小幅度气候变化以及长期内大幅度气候变化中安全风险的变化，我们委托 CNA 公司前景分析和军事博弈专家设计了战争游戏和情景模拟演习，由能源、环境和水资源委员会主持，于 2015 年 3 月在德里举行。24 名参与者包括来自印度、中国、美国、英国、孟加拉国、德国、荷兰和芬兰的资深科学家、安全专家、外交官和部队退役军人。参与者扮演主要国家和地区的领导人的角色，游戏调查他们为了应对未来半个世纪或更长时期的气候变化，保护国民经济和安全利益所做出的决策。情景模拟演习以圆桌会议的形式，探讨某个情景的短期和长期重大安全风险，在这个情景下，气候变化进展的速度接近目前评估范围的上限。[xii] 两个模拟演习都是由四组参与者同时进行。这里所有用于演习的假设都是橡树岭国家实验室的气候变化科学研究所认为合理和可信的。
这里我们讨论了一些识别的最大安全风险，并按照主题加以分类。该评估除了对战争游戏和情景模拟演习进行分析，还包括各参与者更详细的观点，以及其它一些已发表研究（这些研究明确考虑较高程度的气候变化带来的安全风险）的相关结果。参考资料表明，其它评估也得出了类似的结论。

国家衰落

我们的情景模拟演习表明，短期内，在那些已经面临水资源短缺和粮食供应紧张、同时遭受贫困、社会紧张局势和治理不善的国家，气候变化将最有可能增加其国家衰落的风险。我们认为，中东和北非地区的国家可能面临特定的风险：这些国家已经面临水资源短缺，其中许多国家极度缺水。[21] 根据预测，2010 至 2050 年这些国家的人口也将大幅增长（埃及、叙利亚、也门和伊拉克的人口分别增长 50%、70%、90% 和 130%），进一步减少人均水资源供应量。同时，气候模型预测该地区有干旱化的趋势。一项研究预测，随着全球气温上升 2.7˚C [22]，其中大部分区域的径流量将减少 10-30%，受影响最严重的区域将减少 30-50%.

我们还认为，由于气候变化对农业产生影响，因此那些大部分人口依赖于自给农业的国家可能面临特定的不稳定风险。撒哈拉以南非洲缺乏粮食保障的人口比例是全世界最高的，2010 至 2012 年超过四分之一的人口营养不良，某些地区该比例甚至超过一半。[23] 到本世纪中叶，该地区的许多国家（整个非洲大陆超过 30 个国家）的人口将翻一番，[24] 而对于其中不少国家，人均可耕地面积将降至极端紧张的阈值以下。[25] 同时，非洲的陆地温度上升速度预计比全球平均陆地温度上升速度快；人们认为，气候变化很有可能降低谷类作物的生产力，对粮食安全造成严重的负面影响。[26] 显然，经济发展和气候变化的适应措施至关重要；经济发展缓慢和未采取气候变化适应措施的地区将面临最严重的风险。

气候变化可能同时在许多国家增加环境压力。德国全球变化咨询委员会的一份报告表明，衰落国家很有可能影响邻国的稳定性，再加上气候变化的因素，可能导致世界上一些气候变化影响尤为严重的地区出现“衰落区域”。[27] 印度退役海军中将 Chauhan 举了一个例子，表明影响南亚各国的紧张局势相互作用的方式。

关于气候变化和国家衰落的风险

退役海军中将 Pradeep Chauhan, AVSM & Bar, VSM, I.N.
民族国家还远远没有实现内部稳定。其中许多由于民族宗教的差异和社会经济的不平等，在整个国家历史中遭遇了几乎不间断的内部紧张局势。无论是从稳健性还是从地域性来讲，民族国家通过法令来治理国家的程度都会受到很大的限制。从历史上来看，在意外发生的大规模危机面前，常常会发现政府机构的应变能力严重不足。“国家衰落”不是一个被精确定义的术语，但其特征可概括为：(a) 无法完全掌握合法动用武力的权力，从而没有能力给自己的公民提供保障；(b) 没有能力提供公平分配的基本商品和服务；(c) 制定和执行集体决策的权力被严重削弱；(d) 非自愿的人口（包括难民）流动。

对于经济欠发达、资源紧张或由于其它原因处于动乱的国家，大幅度的气候变化会增加其陷入国家衰落状态的风险。在南亚地区，阿富汗和巴基斯坦的干旱，孟加拉国海持续不断的洪水和被海洋吞噬的土地，都让这些国家的政府承受了巨大的压力，并导致大规模人口迁移到印度。而印度内部人口从农村迁移到城市，进一步增加了城市的人口压力。其中许多大城市（包括加尔各答、钦奈和孟买）都属于沿海城市，随着海平面上升和降雨强度增大，这些城市将越来越容易遭遇到洪水的侵袭。与此同时，随着内部人口迁移和外部移民的不断涌入，以及季风的变化程度不断增加，“红色走廊”的不稳定性可能会进一步增加——经济贫困和治理不善的“红色走廊”跨越印度东部各州，而且那里的叛军经常会发动反对国家的暴力活动。通过军事干预来解决这一问题可能会变得势不可挡。

情景模拟演习参与者认为，未来长期内可能出现较高程度的气候变化，因此目前稳定发达国家的政治一体化也可能存在风险。这些风险可能由粮食和水资源匮乏、不平等和大规模的国内移民造成的社会压力、保护沿海城市的费用和难度增加、多重压力导致基础设施崩溃等共同作用而引发。[xiii]

恐怖主义

情景模拟演习的参与者发现，恐怖主义的风险与国家衰落的风险紧密联系。虽然恐怖主义的形成有很多复杂原因，但国家衰落或瘫痪后留下的权力真空给恐怖组织的形成和发展提供了便利。参与者认为，气候变化对不同国家造成的影响不同，以及大量人口流离失所的可能性，可能进一步加剧恐怖主义风险。这里，退役海军中将描述气候变化如何增加恐怖主义的吸引力，同时恐怖主义本身也在变得更加危险。

关于气候变化和恐怖主义

美国退役海军中将 Lee Gunn，海军部（海军和海军陆战队）前总检察长，第三远征打击大队原司令员，最近也曾担任 CAN 公共研究院的院长。

任何社会，不管整体上有多么繁荣，似乎都不可能完全不受恐怖分子的影响。满足两个基本条件就可能出现恐怖主义：一是存在一个有吸引力、凝聚力或破坏性的想法，二是社会一部分群体的权利被剥夺。社会的某个群体有越多的人感觉自己在经济上、文化上或政治上被剥夺权利或被边缘化，而且他们所处的环境越困难或越令人厌恶，那么他们居住的社区就越有可能成为恐怖分子的招募地点。

即使在目前的气候环境下，一些国家已经开始为满足本国人民的基本需求（安全、健康、就业以及摆脱贫困）而做出各种努力；而其它一些国家完全没有做出努力。这样一来，就会出现被边缘化的人群，恐怖主义对于这些人具有很强的吸引力，还会出现不受到政府有效管制的领土，让恐怖团体有机可乘不受到什么约束。气候变化尤其会严重影响那些已经最脆弱的国家，还有这些国家的最弱势群体。气候变化有可能显著增加这些国家弱势群体的脆弱程度，还会扩大不受政府控制的空间范围。[28] 与此同时，由于一些团体利用新技术和全球化趋势，恐怖主义正在变得越来越危险，而且我们可以预测该趋势会持续下去。

人口迁移和流离失所

正如退役少将 A N M Muniruzzaman 所说，气候变化可以通过许多方式导致人口迁移和流离失所，并随之产生安全风险。

关于气候变化以及人口迁移和流离失所的安全风险

退役少将 A N M Muniruzzaman, ndc, psc，孟加拉国和平与安全研究所所长，全球气候变化军事顾问委员会主席

从历史上看，人类从一个地方迁移另一个地方是为了过上更好的生活，逃离危险。通常，他们迁移的决定形成于一系列原因，而且不能归咎于一种原因。在下个世纪，气候变化的威力会日益显现。气候变化产生影响的方式包括：

- 海平面上升以及随之而来的洪灾和海岸侵蚀有可能会使低洼的沿海地区、孟加拉国和小岛屿国家的人们被迫离开。孟加拉国数以百万计的人们可能会流离失所，大约 40 个小岛屿国家可能面临部分或完全浸没。

- 河流洪水可能通过破坏农业生计直接或间接迫使人们流离失所。预计许多地区发生洪灾的频率都会增加，但受冰川融化影响，这一问题在南亚尤其严重。

- 由于气候变化，荒漠化和干旱预计会加剧。两者都会引发人口迁徙，尤其是在游牧社会或靠天吃饭的农业地区。

- 自然灾害往往会引发短期内人口流动，但一地区持续的极端事件可能导致迁移。未来这种极端高温事件可能持续发生。

预计未来数亿人口可能会由于气候变化而流离失所或被迫迁徙[29]，但我们不可能保证这个估计一定是正确的，因为这很大程度上取决于气候变化的速度和程度。人们已经就大规模迁移可能出现的安全风险达成共识[30,31,32,33]，包括：

- **不稳定边界：**移民和难民可能被当地居民或政府强制抵制。这可能导致组织和国家间的冲突；

- **资源冲突：**据观察，环境迁移更容易导致冲突，尤其是在目的国资源已经很紧张的情况下。[34] 随着气候变化，这样的情况会经常出现，因为同一个地区的国家受影响的方式相似；

- **种族和文化冲突：**移民和流离失所的人们不得不忍受艰难的生活条件和歧视，这可能导致社会分裂和紧张局势。从历史上看，如果移民与目的地国居民来自不同民族，或者他们各自的民族和社会群体之间本来就不信任，则更有可能发生冲突；[35]

- **疾病：**流离失所的人群往往缺乏适当的卫生和医疗设施，这可能导致疾病的跨境传播。

---

xiii 2007 年，美国的一群科学家、安全专家和历史学家开展的“时代恶果”情景模拟研究也得出了类似的结论。该研究表明，在“严重的”气候变化情景下（到 2040 年气温上升 2.6°C），“全球环境的大量非线性事件会引发大量非线性社会事件……包括美国在内的国家内部凝聚力将面临巨大的压力”；在“灾难性”情景下（到 2100 年气温上升 5.6°C），“极端气候变化引起的崩溃和混乱将破坏现代生活各方面的稳定性，出现问题的范围包括国家传统安全机器（尤其是军事）、国家权力和权威的其它方面。”

情景模拟演习的四组参与者都认为国家内部和国家之间的迁徙具有严重的安全风险。他们对经济成本和资源压力充满顾虑，同时也对政治和社会矛盾的处理深表担忧。来自大国的参与者格外关注在不同程度气候变化导致的大规模内部迁徙中，国家治理结构如何应付，以及如何保持社会凝聚力。与此同时，越来越多的国际移民和难民可能导致仇外和民族主义的崛起。在演习中值得注意的是，大量涌入某些大国的难民会对这些大国实行更加孤立的对外政策起到推波助澜的作用。

考虑较大程度气候变化下迁徙的研究认为，目前看似复杂的原因可以简化为一个更简单的等式。英国政府的前瞻报告[36]发现：**“环境变化…可能会导致整个族群永久性的流离失所，因为现有的定居点实际上是不适合居住的”。同样，IPCC 援引的一项研究认为，“全球气温上升 2˚C 和上升 4˚C 时人类迁徙最重要的本质区别在于，全球气温上升 4˚C 时，很多人会没有选择的余地被迫离开”。**[37]在这种情况下，被迫迁徙的人数可能比人类历史所经历的任何一次迁徙数量都多。[38]

正如我们在情景模拟演习中提到的，如果气候变化发展到很高的程度，那时我们就会知道世界实际所经历的排放路径，知道气候敏感性和气候变化的影响。那时我们会相当清楚进一步气候变化是否会带来更严重的后果。到那时，试图迁移到有利地域的人口和国家会相应增加。

人道主义危机、民族主义和全球治理

博弈游戏的参与者认为气候变化极有可能在未来几十年加剧人道主义危机。[39]在未来，国际社会有多大的能力和意愿来应对这些危机，却存在着更大的不确定性。在情景活动中，参与者表明，人在面临多重压力的时候可能背离人权、民主和协同全球治理相关的价值观，而转向民族主义。

活动结束后的分析表明，在活动中所有四个实例中，随着气候条件的恶化，需要资助和人道主义援助的地区数量的增加，至少有一个主要发达国家会减少对其它国家的援助，以便集中精力解决自身的内部问题；而在一些情况下，大多都国家都会这样做。在这种情况下，只有在出现难民和恐怖主义的时候，这些国家才会把目光再次转向其它国家。而一直坚持国际主义原则的国家也因为得不到足够的支持而承受了越来越多的负担。

德国气候变化咨询理事会也发现了类似的风险。它认为，在当前的气候环境下，国际社会已经认识到应对衰败国家面临着很大的困难。鉴于这一点，未来更大幅度的气候变化可能会超过传统安全政策的控制范围，并会威胁到全球治理体系的整体运行[40]。

资源竞争和国家间冲突

上面我们已经提到，气候变化会增加资源压力，从而有可能增加国家失败的风险。这里，我们讨论相同的资源压力是否可能导致国家之间的冲突。首先，Sarang Shidore 谈一谈水资源压力的情况。

关于跨国界水资源和冲突风险

德克萨斯大学奥斯汀分校的访问学者 Sarang Shidore，曾是新德里国防分析研究所战略前景项目的负责人之一。

虽然很多研究都涉及到气候变化与地方冲突之间的联系，但是相对而言其中很少提到国家间冲突会受到气候的影响。而涉及到这方面的研究主要关注的往往是跨界水资源，跨界水资源长期以来让各国互相依赖，而且还会引起国家间的争端。[41] 一般来说，很少有人支持“水战”的假说——该假说认为，资源稀缺必然会增加各国之间的武装冲突和战争。事实上，一些研究经过深入剖析发现，各国即使在忧虑的情况下依然自愿和其它国家建立了众多合作机制。其中一些例子是印度和巴基斯坦签订的印度河用水条约、湄公河委员会，以及非洲尼罗河资源使用相关的条约和磋商。

然而，有证据表明，如果不同的国家共享一个水源，那么水资源的匮乏和变动会增加政治紧张局势；由于其它原因导致两国关系不佳的时候更是如此，这可能引起外交、贸易和其它形式的非军事冲突。[42] 水资源引起的政治紧张局势已经出现在南亚的印度、巴基斯坦、孟加拉国和中国（共享印度河、恒河和布拉马普特拉河）、中亚的吉尔吉斯斯坦、乌兹别克斯坦和哈萨克斯坦（共享锡尔河的水资源）以及非洲的埃及、埃塞俄比亚和苏丹（共享尼罗河的水资源）。还有一些地方容易出现水资源短缺，也可能引起国家间的紧张关系，包括约旦河（以色列、巴勒斯坦和约旦）、底格里斯河 - 幼发拉底河（土耳其、叙利亚和伊拉克）以及位于撒哈拉以南非洲地区北部、东部和南部缺水地区的一些河流，如奎托河（纳米比亚、安哥拉和博茨瓦纳）。

有一个重要注意事项需要我们谨记在心，那就是现在的研究机构大多数涉及的是目前的气候。例如，在全球气温上升 3°C 的情景下，气候变化对资源变化、稀缺和（某些情况下）过剩的影响很可能会远远大于现代历史中的任何记录，并且可能成为一个主要的不稳定因素，而这些已经超出了对以往资源冲突事件的研究范围。

博弈游戏之后的分析发现，在四场游戏中，随着时间的推移满足国家对粮食、燃料和水等资源的需求日益成为当务之急——某些情况下甚至比传统的国家安全还重要。游戏中我们没有发现这样的行为：即决定使用武力入侵一个地区来控制该地区的资源。这可能与这样一个事实有关：气候变化往往对那些军事和经济实力已经相对较弱的国家资源产生最严重的影响，进一步加深国与国之间的不平等。

游戏没有详细探讨特定的跨界河流可能出现的紧张局势；然而，情景模拟演习将其视为很长一段时期内的重要风险。中东、中亚和南亚地区水资源非常紧张，以至于冲突方之间水资源供应合作的历史趋势可能会打破。人们认为海水淡化可能成为一项重要的技术，但其高额的能源成本可能会制约该技术在发展中国家（尤其是远离海岸的地区）的应用。

正如时殷弘教授所说，情景模拟演习的参与者强调了与全球粮食系统的稳定性相关的风险。

关于全球粮食安全和冲突风险

时殷弘教授，人民大学国际关系教授

人们不太了解较高程度的气候变化对粮食生产影响的严重性，也不清楚我们适应气候变化的能力如何。在可能最坏情况下，粮食生产无法满足不断增长的需求，那时粮食将成为全球最受欢迎的资源。全球市场可能变得不稳定，价格居高，而且波动性强。粮食价格的大幅波动或粮食供应的限制可能导致高度依赖进口国家的失败。

对安全又廉价商品供应的需求以及市场信心的丧失迫使高消费发达国家将进口安全放在首位。这就会导致它们在发展中国家租赁或购置耕地时产生竞争，必要时它们会软硬兼施迫使合约得以执行。在发展中国家自身都面临短缺的情况下，发生冲突的风险会很大。同时，海外资产对于粮食安全的重要性会使大国投入更多来保护战略贸易路线，这些路线自身可能会受军事对抗的影响。

这些事件并非不可避免。历史上有许多灾难导致侵略的例子，但也有许多相反的例子，尤其是佛教和道教广为传播的国家。未来气候变化的困难有可能激发国际合作解决共同问题以及全球政治文化的积极转变。然而，从今天的角度来看，很少有人对这样的结果怀有坚定的信心。

地球物理工程

在其中两个游戏中，参与者决定投资地球物理工程（通过管理太阳辐射的形式）来限制全球气温上升。然而此举本身就被认为存在重大的风险，参与者要权衡治理失控、国家孤立和资源（粮食、燃料和水）枯竭等日益增加的风险的利弊。参与者认为，目前地球物理工程没有一个普遍认可的权威决策机构，而且缺乏阻止单个国家、地区、公司甚至个人采取单边行动的手段，这会引发安全风险。[43]

结论

情景演习的参与者承认，即使仅仅预测未来几十年人类社会和文明将如何发展都将遇到极大的不确定性。技术发展以及未来国家和国际层面的治理都是重要的未知数。。
某些技术领域被认为会对某些风险产生直接影响：海水淡化、农作物育种或改良以及可再生能源储存技术的进步速度都有可能影响资源紧张的程度及其可能产生的风险。此外，还有一些尚未被发明出来的未来技术可能带来的“未知的影响”。任何技术对缓解风险的贡献不仅取决于技术进步的速度，而且取决于技术是否得到公平利用。而技术的公平利用又取决于治理。

治理在决定系统是崩溃还是在压力下保持活力方面发挥了至关重要的作用。情景模拟演习的参与者认为，就像未知的技术一样，未来也可能出现当前无法想象的治理模式，超越了我们熟悉的民主与专政、集权或分立、民族主义或国际主义之间的区别。市场、军队、宗教、国家、联盟、地区协会和全球结构之间的相对重要性都可能发生变化。

尽管存在很大的不确定性，人们认识到人类经济存在于自然物理环境，不能与之分离。气候变化可能让自然物理环境的很多地区面临巨大的压力，造成任何治理系统都难以管理的紧张局势。随着压力的增加，系统（包括城市基础设施、州政府和国际运输和贸易体系）风险的规模也随之增加。人们认为，即使气候变化的程度很低，破坏性的风险都可能非常大；而气候变化程度更高或更快时，破坏性的风险可能以非线性的方式增加。

尾注

1. 按照普华永道的建议（2013 年）。《气候变化的国际威胁以及对英国的机会》 http://www.pwc.co.uk/sustainability-climate-change/publications/international-threats-and-opportunities-of-climate-change-to-the-uk.jhtml
2. Hoerling 等人（2012 年），“关于地中海地区干旱频率的增加”，《美国气象学会杂志》——又见美国国家海洋和大气管理局新闻稿：http://www.noaanews.noaa.gov/stories2011/20111027_drought.html
3. Kelley, C.P., Mohtadi, Shahrzad M., Cane, M. A., Seager, R. 和 Kushnir,Y.（2015 年）。“肥沃新月的气候变化和最近叙利亚干旱的影响”。《美国国家科学院院刊》11，第 3241 至 3246 页。
4. Femia, F. 和 Werrell, C.（2012 年）。“叙利亚：气候变化、干旱和社会动乱”。气候和安全中心。 http://climateandsecurity.org/2012/02/29/syria-climate-change-drought-and-social-unrest/ ;

   Femia, F. 和 Werrell, C.（编辑）（2013 年）。《阿拉伯之春和气候变化》。美国进步中心，气候和安全中心，Stimson. https://climateandsecurity.files.wordpress.com/2012/04/climatechangearabspring-ccs-cap-stimson.pdf ; Gleick, P.（2014 年）“叙利亚的水资源、干旱、气候变化和冲突”，《天气、气候和社会》6，第 331 至 340 页，见 http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/WCAS-D-13-00059.1
5. Femia, F. 和 Werrell, C.（编辑）（2013 年）。第 25 至 27 页。

6 Otto, F. E. L., N. Massey, G. J. vanOldenborgh, R. G. Jones 和 M. R. Allen（2012 年），调和 2010 年俄罗斯热浪的两种归因方法，《地球物理研究通讯》39, L04702, doi:10.1029/2011GL050422.

7 Femia, F. 和 Werrell, C.（编辑）（2013 年）。第 7 页。

8 Porter, J.R., L. Xie, A.J. Challinor, K. Cochrane, S.M. Howden, M.M. Iqbal, D.B. Lobell 和 M.I. Travasso (2014). “粮食安全和粮食生产系统”。《2014 年气候变化：影响、适应和脆弱性。A 部分：全球和部门情况》IPCC 第五次评估报告第二工作组供稿 [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea 和 L.L. White（编辑）]。英国剑桥和美国纽约：剑桥大学出版社，第 485 至 533 页。

9 Sternberg, T.（2011 年）“地区干旱有全球影响”。《自然》 472, 169. doi:10.1038/472169d

10 Femia, F. 和 Werrell, C. （编辑）（2013 年）。

11 Femia, F. 和 Werrell, C.（编辑）（2013 年）。第 12 至 13 页。

12 Femia, F. 和 Werrell, C.（编辑）（2013 年）第 17 至 19 页。

13 Mahr, K.（2011 年）。“面包是生命：欧洲的粮食和抗议。” 《时代周刊》http://science.time.com/2011/01/31/bread-is-life-food-and-protest-in-egypt/

14 Hendrix, S. 和 Saleyhan, I.（2012 年）“非洲的气候变化、降雨和社会冲突”。《和平研究杂志》49，第 35-50 页。

15 Butler, C.K 和 Gates, S.（2012 年）“非洲范围的战争：气候、冲突和产权”。《和平研究杂志》49 ，第 23-34 页。

16 Hsiang, S. M 和 Burke, M.（2013 年）。“气候、冲突和社会稳定：证据说明了什么？” 《气候变化》123，第 39-55 页。

17 Hsiang, S. M., Burke, M. 和 Miguel, E.（2013 年）。“量化气候对人类冲突的影响”。《科学》341，第 1212 -1226 页。

18 国家情报委员会（2012 年）。《2030 年全球趋势：另类世界》。https://globaltrends2030.files.wordpress.com/2012/11/global-trends-2030-november2012.pdf

19 例如，美国国防部 2010 年和 2014 年的《四年防务评估报告》认为气候变化“加快不稳定性”，而且“成倍增加威胁”，分别见（http://www.defense.gov/QDR/QDR%20as%20of%2029JAN10%201600.pdf 和 http://www.defense.gov/pubs/2014_Quadrennial_Defense_Review.pdf）。英国 2020 年战略防御和安全审查（英国政府（2010 年）。《在不确定的年代保护英国：战略防御和安全审查》 https://www.sis.gov.uk/media/pdfs/strategic-defence.pdf）承认气候变化的安全风险，特别委托英国外交部解决该问题。澳大利亚 2013 年国家安全战略（澳大利亚政府（2013 年）。《强大而安全：澳大利亚国家安全战略》 http://apo.org.au/files/Resource/dpmc_nationalsecuritystrategy_jan2013.pdf ）称：“稀缺资源的竞争加剧了气候变化的影响，尤其是增加了自然灾害的频率和严重程度，可能导致全球动荡和紧张局势，尤其是在脆弱国家。”

20 IPCC（2014 年）。“2014 年气候变化：影响、适应和脆弱性。A 部分：全球和地区方面。”IPCC 第五次评估报告第二工作组供稿 [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea 和 L.L. White（编辑）]。英国剑桥和美国纽约：剑桥大学出版社，第 779 页。

21 数据来源于联合国统计司的数据（2011 年）——环境指标：内陆水资源。 http://unstats.un.org/unsd/ENVIRONMENT/waterresources.htm Malin Falkenmark 于 1989 年提出，1700 和 1000 立方米的年人均淡水资源可用量分别作为水资源紧张和水资源短缺的阈值。这是基于家庭、农业和工业最低用水要求的估算。

22 见 IPCC（2014 年）图 3-4。《2014 年气候变化：影响、适应和脆弱性。A 部分：全球和部门情况》。IPCC 第五次评估报告第二工作组供稿 [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea 和 L.L. White（编辑）]。英国剑桥和美国纽约：剑桥大学出版社，共 1132 页。

23 见 7.1.2 节， Porter, J.R., L. Xie, A.J. Challinor, K. Cochrane, S.M. Howden, M.M. Iqbal, D.B. Lobell 和 M.I. Travasso（2014 年）。“粮食安全和粮食生产系统”。《2014 年气候变化：影响、适应和脆弱性。A 部分：全球和部门情况》。IPCC 第五次评估报告第二工作组供稿 [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea 和 L.L. White（编辑）]。英国剑桥和美国纽约：剑桥大学出版社，第 485 至 533 页。

24 联合国经济和社会事务部，人口司（2013 年）。《世界人口展望：2012 年版本》。 见 http://esa.un.org/wpp/Documentation/publications.htm

25 将联合国人口司《世界人口展望：2012 年版本》的人口数据和预测与联合国粮农组织人均耕地面积的数据（见 http://data.worldbank.org/indicator/AG.LND.ARBL.HA.PC）相结合，与联合国各组织一样将土地资源紧张定义为 0.07 公顷的人均耕地面积，见 http://www.un.org/en/events/environmentconflictday/pdf/GN_Renewable_Consultation.pdf 和 http://www.fao.org/fileadmin/templates/solaw/files/thematic_reports/TR_02_light.pdf

26 见“执行概要”，出自 Niang, I., O.C. Ruppel, M.A. Abdrabo, A. Essel, C. Lennard, J. Padgham 和 P. Urquhart（2014 年）。“非洲”。《2014 年气候变化：影响、适应和脆弱性。B 部分：地区情况》。IPCC 第五次评估报告第二工作组供稿 [Barros, V.R., C.B. Field, D.J. Dokken, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea 和 L.L. White（编辑）]。英国剑桥和美国纽约：剑桥大学出版社，第 1199-1265 页。

27 德国全球变化咨询委员会（2007 年）。《过渡中的世界：气候变化带来安全风险》 http://www.wbgu.de/fileadmin/templates/dateien/veroeffentlichungen/hauptgutachten/jg2007/wbgu_jg2007_kurz_engl.pdf

28 美国国防部《2014 年四年防务评估报告》—— CAN 军事顾问委员会（2014 年）援引该报告。《国家安全和加快气候变化的风险》，第 2 页 https://www.cna.org/sites/default/files/MAB_2014.pdf

29 Myers, N.（2005 年）。“环境难民：一个紧急的安全问题。” 在 5 月 23-27 日第 13 届经济论坛上报告；基督徒互援会（2007 年）。《人类潮流：真正的移民危机》。伦敦：基督徒互援会。

30 国际人口行动组织（2010 年）。《气候变化、移民和人口增长》。http://pai.org/wp-content/uploads/2012/01/climatemigration.pdf

31 CAN 公司（2007 年）。《国家安全和气候变化的威胁》。维吉尼亚州亚历山大市：CAN 公司。

32 高级代表和欧盟委员会（2008 年）。《气候变化和国际安全》，提交给欧洲理事会的论文，S113/08，第 4 页。

33 Guterres, A.（2009 年）。“气候变化、自然灾害和人类流离失所：联合国难民事务高级专员的观点。” 联合国难民署。

34 Reuveny, R.（2007 年）。“气候变化引发的移民和暴力冲突”。《政治地理学》26，第 656 至 673 页。

35 Reuveny, R. （2007 年）。“气候变化引发的移民和暴力冲突”。《政治地理学》26，第 656 至 673 页。

36 政府科学办公室（2011 年）。《移民和全球环境变化：未来的挑战和机遇》。伦敦政府科学办公室。来自 http://www.bis.gov.uk/assets/foresight/docs/migration/11-1116-migration-and-global-environmental-change.pdf

37 Gemenne, F.（2011 年）。“为什么数字不合情理：环境变化导致人口流离失所的估计和预测”。《全球环境变化》21, S41-S49. 为 Smith, K.R., A. Woodward, D. Campbell-Lendrum, D.D. Chadee, Y. Honda, Q. Liu, J.M. Olwoch, B. Revich 和 R. Sauerborn（2014 年）所引用。“人类健康：影响、适应和协同效益”。《2014 年气候变化：影响、适应和脆弱性。A 部分：全球和部门情况。》 IPCC 第五次评估报告第二工作组供稿 [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea 和 L.L. White（编辑）]。英国剑桥和美国纽约：剑桥大学出版社，第 709 至 754 页。

38 Campbell, K. M., Gulledge, J. McNeill, J. R., Podesta, J. Ogden, P., Fuerth, L. Woolsey, J., Lennon, A. T. J., Smith, J., Weitz, R., Mix, D.（2007 年）。《时代的恶果：全球气候变化对外交政策和国家安全的影响》。战略和国际研究中心，新美国安全中心。http://csis.org/files/media/csis/pubs/071105_ageofconsequences.pdf

39 美国国防部（2014 年）。《战略趋势计划：到 2045 年的全球战略趋势》https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/348164/20140821_DCDC_GST_5_Web_Secured.pdf

40 德国全球变化咨询委员会（2007 年）。《过渡中的世界：气候变化带来安全风险》。 http://www.wbgu.de/fileadmin/templates/dateien/veroeffentlichungen/hauptgutachten/jg2007/wbgu_jg2007_kurz_engl.pdf

41 Bernauer, T. 和 Kalbhenn, A.（2010 年）。“国际淡水资源政治，”丹麦，R. A.（编辑）《国际研究百科全书》(Hoboken, NJ: Wiley-Blackwell), 5800-5821.

42 Devlin, C. 和 Hendrix, C. S.（2014 年）。“回归的趋势和触发点：气候变化、降雨和国家之间的冲突”。《政治地理学》43, 第 27 至 39 页。又见 Bernauer, T. 和 Siegried, T.（2012 年）。“中亚的气候变化和国际水资源冲突”。《和平研究杂志》49，第 227 至 239 页。

43 Ghosh, A.（2014 年）“环境机构、国际研究计划和地球工程研究的经验教学”。《地球工程：我们的气候工作报告》，2 月 25 日。见 http://geoengineeringourclimate.com/2014/02/25/environmental-institutions-international-research-programmes-and-lessons-for-geoengineering-research-working-paper/.

风险评估第四部分：

价值

风险评估第四部分：

价值

正如开篇所提到的，我们的目标（即我们所认为有价值的方面）存在着不确定性，这种不确定性所造成的影响便是气候变化风险。该风险评估的前三个部分已经描述了气候变化的一些影响。这些影响的意义（即对我们的重要性）还有待商讨。

本节我们会从经济学开始探讨：关于气候变化风险的意义，经济学能够告诉我们什么？不能够告诉我们什么？其次，在气候变化的伦理问题方面，我们会阐述一些个人观点。最后，为了信息透明，我们会对自己的观点进行陈述。

22．经济

在气候变化经济学方面，《斯特恩报告》应该是最出名的一份评估报告。该报告提出了一个最广为引用的结论：面对气候变化，不作为的成本远高于有作为。该报告预计，“有作为”的成本将是全球年均 GDP 的 1-2% 左右[i]，而“不作为”的代价将在全球年均 GDP 的 5-20% 左右。[1]

《斯特恩报告》另一个被广泛认可（但不如前一个结论出名）的成就是：将气候变化问题主要视为一个风险管理问题。该报告为我们提供了四种方法来对比“有作为”和“不作为”的影响，以帮助我们进行决策，而上文中的成本收益对比法就是其中的一种。以下是其它三种：

i) 该方法着重于把不良后果（如温度上升到某一程度）的发生概率降至一个可容忍的水平。报告还对概率降低的成本进行了定量评估，但未对不良后果的影响进行定量评估。（该报告的大多数章节采取了这一方法）

ii) 对比“有作为”和“无作为”对长期经济增长和发展前景的影响。

iii) 对比“有作为”和“无作为”对自然界和人类生活质量的影响。

《斯特恩报告》在经济建模的章节中指出，其气候变化总成本的估算办法存在固有的难点和缺陷，并提醒读者不要“仅按字面意思去理解估算结果”。该报告发表仅两年后，其作者 Nicholas Stern（尼古拉斯 • 斯特恩）曾这样写道：**“现在看来，我认为《斯特恩报告》的四种对比方法都低估了“不作为”的代价。”**[2] 2013 年，Stern 发表题为《气候变化潜在风险的经济模型结构：将对风险的严重低估带入本已存在局限的科学模型中》的文章，[3] 并提出更为深刻的结论：**“将策略研究视为一项重大的风险管理问题，以更加实事求是的方式来讨论气候变化的风险，至关重要……许多科学家都指出我们的模型严重低估了气候变化的风险。在这样的情况下，如果假装当前主导策略研究的经济模型代表了核心的实际情况，就是不负责任。”**

i 最近，“新的气候经济”研究表明，为了提高资源效率、投资基础设施和刺激创新而精心设计的政策可以让经济发展和气候风险管理目标在短期和中期内互相促进，相辅相成。

从人类最早开始尝试估算气候变化的经济成本以来，除了对风险的低估，一直困扰我们的还有一个更为深层次的问题：如果这类估算没有以一种透明的方式呈现，就可能被误认为是完全客观的，那么其中所隐含的重要主观判断因素就可能被忽略。[4]

经济学家 Cameron Hepburn 解释了此类经济成本估算的局限性，此类经济模型常常低估气候变化风险的原因，以及其对（政策）决策的影响。

极不完整的气候经济模型

Cameron Hepburn，**牛津大学环境经济学教**授

引言

气候变化的经济分析对气候政策的制定已经产生了切实的影响（也应该产生影响）。气候政策不能仅由科学家决定，因为其中牵涉的利益和价值，远远超出了气候科学的范畴。伦理学家可以帮助我们对相关的一些问题进行全面的考虑，包括如何对待被挽救的生命和不同民族、代际之间利益的取舍。而在某种时刻，为了回答决策者的问题，我们必须做出某种抉择。气候行动应该更激进还是保守？不同干预政策的利弊所在？哪些人能够、应该且愿意承担气候行动的成本？应该如何评估气候变化内在的风险和不确定性？这些政治问题都必然需要经济、政治方面的分析。

在进行这样的“抉择”时，经济学家会使用一种具有影响力的标准化工具——综合评估模型。这类模型通常会以一个基准经济状况为起点，该基准经济状况会包含一个假定的排放量水平；然后对降低排放量（以限制气候变化的危害）的边际成本和边际收益进行估算。也就是说，将减少一吨二氧化碳排放的成本与这一吨二氧化碳会带来的边际社会损失进行对比，后者也被成为“碳排放社会成本”。

如果碳排放社会成本的估算为决策提供的仅仅是一个确切的数字，而没有提出进一步的问题，那么决策者就可能被误导。决策者希望知道“这个数字”是无可厚非的，而且一些有效的决策确实需要这样的一个数字。 但在碳排放社会成本的估算过程中存在太多科学上的不确定性，以至于任何这样的单一数字都必然存在“假精度”的嫌疑（论文第一节）。这些科学上的不确定性伴随着一些具有争议的伦理选择（论文第二节）。 而且这些数字本身可能存在偏差（论文第三节）。

即便如此，人们依旧在估算并使用这样的数字。例如，美国行政管理和预算局及环境保护署对碳排放的合理社会成本进行了一项联合分析，以用于制定政府政策。 一些高调的、有影响力的经济学家曾得出结论：每吨二氧化碳的碳排放社会成本为 36 美元；一年半之后，经过一段时间的慎重考虑，他们把这一数字改为了现在（2015 年 6 月）的 37 美元 / 吨。 本篇论文在解读和使用这类碳排放社会成本估值时，时刻谨记以下三点：

1. 气候变化的危害仍存在大量科学上的不确定性

虽然，科学家现在对二氧化碳排放与全球平均温度上升之间的关系已十分了解，但碳排放在特定时间内，对特定区域的具体影响还存在诸多不确定性。 为了方便起见，经济学家用一个简单的“危害函数”代表温度和总体危害之间的关系，该函数体现了在既定年份温度上升对GDP所造成的相应损失。为方便起见，科学家们通常会将气候变化的危害假定为温度增长的一个二次函数。因而，气候变化的危害是随气温上升而平稳增长的，不存在任何突变。当然，还存在其他预测气候变化潜在危害的函数，同时自然科学所提供的证据显示：包含阀值和触发因素的函数还在大量应用。

各种综合评估模型的分析显示，生态系统对温度上升有着各种不同的反应，不同反应的碳排放成本可出现较大差异。例如，FUND 的 Ceronsky 等人建立了一个十分标准的综合评估模型，该模型显示：若温盐环流停止，相应的碳排放社会成本将上升至每吨二氧化碳 1000 美元。简言之，由于人类对气候系统的干预可能会引发各种风险，所以很难确定普遍适用的碳排放社会成本。

2. 价值判断是在所难免的

即使我们能够分离并排除“碳排放、二氧化碳浓度、气温和经济影响的关联链”中存在的科学上的所有不确定性，我们仍不可能对碳排放社会成本的单个估值给出可靠的详细解释。因为任何估算都必然存在一些无法避免的社会价值判断。 这些价值判断涉及一系列领域，但其中最具争议的四个领域是：

- 对未来人类的影响: 即用贴现率来反映气候变化在遥远未来对人类的影响(与当前的影响进行对比)。该方法是继《斯特恩报告》以来最具争议的气候变化参量之一。它所使用的贴现率低于之前的同类研究， 这也一定程度上导致了其得出的碳排放社会成本远远高出之前的研究。

- **风险偏好**：由于气候变化的风险与人类对地球气温上升的容忍度有关，所以对风险偏好的价值判断也很重要。风险偏好程度越低，得出的碳排放社会成本越高。

- **贫富差距偏好**：根据预测，气候变化对穷人的影响将大于对富人的影响。如何对这类问题进行价值判断，很大程度上取决于相关研究设定的贫富差距偏好度。

- **人类生命**：科学家预计气候变化将导致人类大规模的死亡，如果用货币来衡量人类生命的价值，那么碳排放社会成本的总体估算就存在一个重大不确定事项。

一些经济学家和伦理学家致力于研究气候变化的综合性评估模型，他们对这些价值判断进行了深入讨论。此处不会详细陈述相关讨论。但需要指出的是，使用市场价格和市场数据并不能避免这些伦理问题，例如，用政府债券的市场利率来代表社会贴现率。使用市场数据的决定本身就是一个（具有争议的）伦理选择。

3. 忽略偏差可能会导致估值偏低，从而产生误导

在碳排放社会成本的估算中，科学上的不确定性和价值判断的不可避免性都是不可忽视的。此外，还有一个问题也同样不可忽视，即综合评估模型所得出的估值存在系统性偏差的可能性。产生这种可能性的主要原因是：综合评估模型只纳入了能够被其模式化的因素，忽略了大量的不确定因素或者难以量化的因素。

而这些被忽略的因素很可能会导致消极的后果。事实上，部分被忽略的因素可能会带来极度消极的后果，包括生态系统崩溃或者一些极端事件，例如，格陵兰岛冰层发生不可逆的融化，导致海平面发生灾难性的上升。而其它难以量化的后果，如文化和生物多样性损失，也简单地被忽略了。虽然一些被忽略的气候影响因素也可能是积极的，但是综合来看，这些被忽略的因素很可能是极其消极的，从而导致碳排放社会成本出现系统性低估，并使得相应的气候政策够过于软弱。事实上，联合国政府间气候变化专门委员会发表的评估报告中就表示：其提供的估值应被视为保守估值（这也与当前主流的科学研究态度相一致）。

结论

部分学者认为，鉴于以上局限性，综合评估模型是有害的或者至少是无益的。我们应公开地、清楚地指出：碳排放社会成本的估算存在许多不确定因素和主观因素，还存在潜在的误差。相关估算研究应提醒读者注意估算存在的缺陷，并建议读者不要完全相信任何一个估算值。

但放弃这些评估模型并不能解决问题。因为气候变化经济学所固有的智力难题，并不会因为我们忽略它而消失。相反，经济学家应做得更好，建立更加透明的模型：将价值判断和各种不确定因素清晰化，以便政策制定者和大众参考；让广泛的领域参与到相关敏感话题的讨论中。

除了透明性，新一代的综合评估模型将把我们的注意力集中到更有益的方向，即从之前的短期边际变化转向系统性的重大转变。我们应该做的不是通过政策在碳排放社会成本与减排成本这两个核心估值之间寻求平衡，我们或许更应该通过政策干预，来到达以下两个目的：(i) 将严重后果的发生概率降至相当低的水平，即使付出相对较高的成本；(ii) 提高积极性变革，即能够带来巨大社会收益的变革（如清洁技术成本的突破性进展）的发生概率。

对碳排放社会成本的估算并不妨碍我们对重大变革进行思考。但是，局限于碳排放平均社会成本的思维往往会将气候策略导向一系列的干预政策，而这些政策都只是对现有体系的细微的改变和发展。相比气候变化的风险，这种过渡性改良所可能带来的益处是远远不够的。相反，综合评估模型应该帮助决策者思考如何实现重大的突破性变革。如今，对自然生态系统和工业生态系统而言，突破性的变革绝不是“非主流”的选择，而是势在必行的。

23. 伦理

在 Hepburn 所说的“大量不确定的或难以量化的影响因素”中，最有可能被大多数经济估算忽略的就是：该报告前一部分所提及的许多系统性风险。如上文所述，这些风险包括国家衰败、大规模人员流离失所和冲突的发生。

值得指出的是，这类事件（即使在最坏的情况下）极少对全球 GDP 产生明显冲击。除了对个别国家的经济造成了严重打击外，一战和二战对全球 GDP 的影响简直不值一提。[5]1958 年到 1962 年，中国发生了大饥荒，其年均 GDP 降低了 5% 左右，[6] 但由于当时中国的 GDP 总量仅占全球 GDP 总量的 5% 左右，[7] 所以这次事件对全球产出的影响微乎其微。当然，这些事件之所以为人们所铭记，不是因为它们对 GDP 的影响，而是因为千万生命的逝去。

问题的关键在于，在经济估算中被忽略的那些气候变化的影响因素，也许是有意义的。从人类的角度讲，那些影响因素可能极为重要。这些影响因素的价值很大程度上与伦理有关。在此，我们将陈述 Martin Rees 教授在气候变化伦理问题方面的个人观点。Martin Rees 教授是该报告最后一次会议的主持人。

在气候变化伦理问题方面的个人观点

Martin Rees 教授，皇家天文学家，前英国皇家学会主席，剑桥大学宇宙学和天体物理学名誉教授

我是一名天文学家。我知道我们的地球已经存在了 45 亿多年，但是当下的这一百年很特殊。在这一百年里，地球生物圈的命运第一次为单个物种（即我们人类）所决定。造成该局面的原因包括：人类行为对生态系统造成的压力和先进技术带来的意外弊端。

在过去的千百年里，人类在地震、火山喷发这样的自然灾害面前，都显得不堪一击。但有一点让人类很安心：这些自然灾害每年发生的概率都比较稳定，与穴居人时代相比，几乎没有变化（当然，如今这些自然灾害对人类造成的经济损失比穴居人时代要大的多。）

相比之下，我们现在进入了一个新的阶段——“人类纪”，在这个阶段，人类活动会在全球范围内对地球生态系统产生巨大影响。不断增长的人口和经济，对土地和水资源造成了巨大压力。人类占了全球生物量的 40%，而这一百分比还在不断增长。越来越多的动植物出现灭绝。此外，便是气候变化的问题。该报告前面的章节已说明了气候变化带来的巨大风险。而气候变化与我们所熟悉的自然灾害不同，它的风险正在加剧，且还将随着时间的推移继续加剧。

科学家在探索气候变化的真相时，必须尽可能地保持客观。科学家的权威是建立在这种客观性之上的。但每当谈及某一问题的经济、社会和道德方面，科学家就成了普通民众，不再是专家，不再拥有特殊的权威。清楚地区分这一点很重要，这样就不会将科学和观点混为一谈。因此，我希望声明：在陈述接下的内容时，我只是一名关心气化变化的民众，而非一名科学家。

我认为，当前对气候政策的争议更多地是源于伦理上的分歧而非科学上的分歧，特别是我们应该承担多少对子孙后代的义务。用标准化的贴现率来估算气候变化对未来的影响，实际上是忽略了 2050 年以后可能发生的一切。在 2050 年以前，气候变化确实不太可能出现毁灭性的后果，因此人们自然会得出这样的结论：其他公共政策目标比“应对气候变化”更重要。

然而，今年出生的孩子很可能会活到 2100 年以后。目前在世的青年人，他们的孙辈将经历 22 世纪以后的几十年。任何关心这些后代或者关心长远未来的人都会认为，为了避免后代遭遇最恶劣的气候状况，我们现在进行投入是值得的。这也是呼吁人们行动起来应对气候变化的最有力的理由。

想象一个类似的情况，假设天文学家发现了一个彗星，并通过计算推测该彗星将可能在 2080 年（即 65 年以后）撞击地球，发生概率不确定，比方说有 10% 的概率。我们会轻松地说这个问题会在 50 年后被解决？因为 50 年后人类会更加富有，或者 50 年后那颗彗星就远离地球了？我不认为我们会这样想。我们一定会达成共识，即刻行动起来，竭尽所能改变这颗彗星的轨迹或者降低其对人类的影响力。

第二个伦理问题涉及我们对另一群人的义务，他们不是未来的人，而是在经济上处于弱势的那些人。人们已普遍认同一个观点，那就是“气候变化责任最小的人群将承担最大的威胁”。没有空调的人受高温的伤害最严重；在温饱线上挣扎的人受农作物歉收的影响最大；住房不牢固的人受极端天气事件的威胁最严峻。选择不作为，就是选择将痛苦加诸无数生命。

最后，第三个伦理问题与非人类环境有关。我们知道，人类已经威胁到生物的多样性，而气候变化进一步加剧了这种威胁。通过化石记录，我们了解到，历史上地球曾出现过 5 次大规模的物种灭绝，而当前物种灭绝的水平已与这五次大规模物种灭绝不相上下。正如一些人所说，我们正在摧毁一本“生命之书”，而这是一本我们尚未阅读的书。显然，在某些情况下，这会对我们的利益产生直接影响：

如果鱼类逐渐消亡，我们的食物来源就会减少。在热带雨林里，一些植物的基因可能还具有医学价值。但对部分人而言，生物多样性的观点具有浓厚的人本主义色彩；其实，生命本身就具有价值。伟大的生态学家 E O Wilson 曾说过，如果人类对自然的掠夺导致了大规模的物种灭绝，“这将会是我们的后代最不能原谅的行为”。

对于许多人而言，宗教信仰是伦理问题的指南针。我支持科学与宗教间进行积极的对话；在梵蒂冈的几次会议上，我与宗教领袖讨论过气候变化的问题。一次类似的会议结束后，多名宗教、政治、商业方面的领袖和科学家发表了一份声明，宣布“坚决地减缓”气候变化是人类的“道德和宗教义务”。[8] 很多不同信仰的人，在对气候变化的问题进行思考之后，都得出了这一相同的结论。

当我身处梵蒂冈，透过窗户看到圣彼得大教堂的穹顶时，我对气候变化问题有了更进一步的思考。欧洲的大教堂至今仍能让我们竖然起敬。想象一下，在建成之际，这些教堂在当时人们的眼中是多么的伟大，其投入是多么的浩大！大多数参与建造教堂的人，对世界的认知都仅限于他们所居住的村落。即使是受教育最多的人，对欧洲以外的世界也几乎一无所知。他们认为世界只存在了几千年左右，并可能将在一千年内灭亡。然而，尽管当时的人们视野狭窄（无论是时间上还是空间上）、生活充满剥削与艰辛、技术落后，但他们将人类的潜能发挥到了极致，建造了如此雄伟辉煌的建筑；他们设计、建造了这些伟大的教堂，尽管他们知道自己活不到教堂建成的那一天。几百年后，他们留下的宝贵遗产仍使我们为之振奋。

这与我们今天的长篇大论形成了鲜明的对比。与我们的祖先不同，我们对这个世界有着很深的了解，甚至还知道这个世界以外的东西。新技术丰富了我们的生活，深化了我们对世界的理解。虽然我们仍会对许多现象感到害怕，但是科学的进步使我们不再一味的惧怕。我们知道：我们身处的地方曾是浩瀚宇宙中的一个“淡蓝圆点”，这颗星球的未来是以几十亿年来计算的。在本世纪，人类的集体行动将决定这颗星球的命运。

在当今这个迅速变化的世界，虽然我们不会去打造一个留存千古的丰碑，但是坚持错误的政策，剥夺子孙后代的公平继承权，留给他们一个枯竭的、更为危险的世界，无疑是可耻的。我们需要科学家、经济学家和技术专家们全力以赴，结合二十一世界最强大的知识力量，制定出明智的政策。但若想成功实现这一切，我们还需要政治领导人的全力投入和选民的全力支持。我们要对自己的子孙负责，对最为穷苦的人们负责，对地球生命的多样性和丰富性负责，这些责任都要求我们不能有一丝懈怠。

我们自己的观点

在价值的问题上，任何一位专家或领袖，任何一门学科都不能“一言堂”。在了解气候变化的事实后，每个人都应该做出自己的决定。

正如该报告的主要作者所言，在气候变化风险的价值判断方面，我们并不比其他人更具权威，但为了维护透明、避免疑惑，我们在此提出自己的观点。

刚开始我们曾说过，我们假设我们的共同目标是人类的繁荣与安全。气候变化对这些目标带来的巨大风险是显而易见的。我们为这些风险对我们的家庭、国家、文明和我们所关心的一切事物造成的影响深感忧虑。目前，我们遭受的风险就已经远远超过我们愿意承受的程度了。

我们相信，现在的情况远非绝境。相反，我们可以大有所为。虽然我们不能完全消除气候变化的风险，但一定能够减少这些风险。因此在该报告的最后一部分，我们提出了关于如何加强努力以实现该目标的一些想法。

尾注

1. Stern, N. （2007 年）。《气候变化经济学——斯恩特报告》。见 http://www.cambridge.org/us/academic/subjects/earth-and-environmental-science/climatology-and-climate-change/economics-climate-change-stern-review?format=PB
2. Stern, N. （2009 年）。“全球交易：气候变化和创造进步和繁荣的新时代”。《公共事务》，纽约，第 94 页。
3. Stern, N.（2013 年）。“气候变化潜在风险的经济模型结构：将对风险的严重低估带入本已存在局限的科学模型中”。《经济文献杂志》51(3)，第 838 至 859 页。见 http://personal.lse.ac.uk/sternn/128nhs.pdf .
4. Funtowicz, S. O. 和 Ravetz, J. R.（1994 年）。“夜莺的价值：作为后常态科学的生态经济学”。《生态经济学 10》，第 197 至 207 页。见 http://www.nusap.net/downloads/funtowiczandravetz1994.pdf
5. Jaeger, C., Schellnhuber, H.J. 和 Brovkin, V.（2008 年）。“斯恩特报告和亚当斯密的谬误”。《气候变化》 DOI 10.1007/s10584-008-9436-7. 见 http://www.eci.ox.ac.uk/publications/downloads/schellnhuber08-stern-and-adam.pdf
6. Stern N. （2013 年）。
7. 见图 12，来自 Keller, W., Li, B. 和 Shiue, C.H.（2013 年）。“上海的贸易和中国的经济增长：鸦片战争以来的持续性、复苏和变化”。《IMF 经济评论》61，第 336 至 378 页。见 http://www.palgrave-journals.com/imfer/journal/v61/n2/fig_tab/imfer201310f12.html
8. 梵蒂冈广播电台（2015 年）。“关于气候变化研讨会的最后宣言”。梵蒂冈广播电台。见 http://en.radiovaticana.va/news/2015/04/28/final_declaration_on_workshop_on_climate_change/1140356

继续开展风险评估的建议

继续开展风险评估的建议

我们开始为编写该报告而召开一系列会议时，就开始意识到，气候变化的风险评估以及将这些评估传达给决策者的方式仍有改进的空间。我们召开的一系列会议也进一步证明了我们的想法，并为做出改进提供了一些建议。

风险评估试图为气候变化的风险提供一个概况，但是并不力求全面，也远非完美。 我们希望这些建议对未来进行全面风险评估有用。

我们的第一个建议是最大限度地应用风险评估的一般原则。我们试图应用的原则在引言中有所阐述。简单地总结如下：

i. **评估与目标和利益相关的风险。**首先了解我们希望避免什么风险；然后评估其可能性。
ii. **识别最大的风险。**关注发现更多关于长期变化和短期事件的最坏情景方面的信息。
iii. **考虑各种可能性。**要记住，如果影响是灾难性的，那么很低的概率也可能导致非常高的风险。
iv. **使用最佳的可用信息，**不管是经证明的科学真理，还是专家判断。最好的估计总不没有估计好。
v. **从全局的角度看待问题。**评估系统性的风险，以及直接风险。评估受相关决策影响的整个空间和时间内的风险。
vi. **做出明确的价值判断。**认识到这些判断本质上是具有主观性的，并确保公开透明，人们可以就此进行公开讨论。

我们认为，气候变化的风险评估至少在三个方面应用这些原则：未来的全球温室气体排放路径；全球温室气体排放给气候带来的直接风险；以及气候变化与复杂的人类系统相互作用而产生的风险。这三个方面都存在很大的不确定性。根据我们的评估，我们得出以下关于最重要风险的结论。上述最后一条原则尤其适用于第四阶段：风险的估值。

我们需要定期地、持续地进行风险评估，这样在不确定的方面，随着时间推移专家判断的任何更改或趋势就会一目了然。在上述三个方面，我们可以通过设定和使用一系列一致的指标来实现。最近，国际能源署提出一系列“跟踪能源行业去碳化的高级能源指标”，比如公共和私营部门在低碳能源研究、开发和部署方面的投资，以及运输燃料总需求的碳强度[i]等指标。这些指标和其它类似的指标能够帮助未来评估不同的全球排放路径的相对可能性。各种不同的指标已经用于衡量气候对温室气体排放的反应。风险评估的第二部分指出，使用一致的指标预测未来全球海平面的上升和 IPCC 描述为“关切理由”的风险类别，才能让人们看到后来的评估比之前的评估预测的风险更大。设定一系列与系统性风险相关的指标可能更加困难，但并非不可能。在这三个方面，使用这些指标可以显著地帮助决策者面对各种不同的专家意见时做出自己的判断。

我们的第二个建议是扩大人们在风险评估过程中的参与度。该建议遵循我们的第一个风险评估原则，即领导者和决策者的作用不仅仅是接受完成的风险评估，而且在风险评估开始时设定要评估风险的目标和利益。这将有助于科学家和其他专家确保评估尽可能具有相关性。

科学家在理解气候变化及其直接影响方面当然起到领导作用。同时，政治、技术、经济及其它学科的专家也可以提供与未来全球温室气体排放以及气候变化与人类系统相互作用产生的间接影响相关的信息。

为了确保将最重要的信息或不确定性传达给决策者，可以将信息收集和风险评估相分离。信息收集活动（如初步的科学研究）可以自由地收集任何有用或有趣的信息，而风险评估却是根据一系列特定的原则询问与设定目标有关的证据。将收集信息与风险评估这两项任务相分离可以提高工作效率。情报机构经常使用这种分离方法。不仅仅科学家要参与气候变化的风险评估，而且专业知识核心部分为风险评估的专家也要参与其中，这对风险评估大有裨益。来自国防、情报、保险和公共卫生等领域的专家也可以参与风险评估。

我们的第三个建议是气候变化的风险评估应该向最高决策机构报告。风险评估旨在为决策者降低或管理风险提供依据。评估气候变化的特定的、地方的或行业的风险，可能要针对承担特定的、地方的或行业职责的机构。气候变化风险的整体评估应直接向承担整体治理职责的机构报告。在国家层面，这意味着政府首脑、内阁或国家安全委员会。在全球层面，则意味着政府首脑会晤并做出决策的机构。

改善风险评估的目的当然是更好地为风险降低的决策提供依据。风险降低以及气候变化风险的合理应对措施是该报告最后一部分的主题。

尾注

i 这些和其他类似的指标可能有助于未来评估不同的全球排放途径的相对可能性。各种这样的指标已经应用在气候系统对温室气体排放的反馈中。我们的风险评估的第二部分指出，采用连续度量方法估计未来全球海平面上升水平，和对 IPCC 描述为“有原因关注”的风险类别的评估可以看到，后评估的风险要大于早期评估的风险。定义一组与系统风险相关的指标可能比较困难，但不是不可能。在所有这三个领域中，使用这样的指标可以显着帮助决策者在面临着差异巨大的专家意见是做出自己的判断。

风险降低：合理应对措施的组成部分

风险降低：合理应对措施的组成部分

风险评估能让我们更好地理解我们所面临的问题，但不一定能告诉我们如何解决问题。不同的是，风险评估可以帮助我们思考“如何合理地应对风险”这个问题中的“合理性”。

2015 年 4 月，我们在伦敦召开了一系列会议，最后我们提出本报告，并讨论了这个问题。大部分参会者都是来自以下三个领域的专家：科技、金融和政治。在这里，在最后总结前，我们从科技、金融和政治的角度探讨了在面临气候变化风险时，什么才是合理的应对措施。

24．技术

David King 爵士[i]，Jim Skea 教授[i]，Tim Green 教授[iii]

不产生温室气体排放的能源其生产成本需要低于煤、天然气或石油的生产成本。清洁能源只有具备成本上的竞争优势，才能够在全球范围内得到广泛的推广，尤其是在新兴经济体和发展中国家。科学家和工程师需要主要关注所面临的技术挑战。技术进步的速度虽然惊人，但相对于温升控制在 2° C 之内的合理概率，目前的进步速度还不够快。

我们需要取得进步的技术

没有一蹴而就的捷径可走。我们必须要在六个主要领域取得进展。首先，清洁能源有三种主要的供应类型：可再生能源（特别是太阳能和风能）、核能和用于碳捕获与封存的煤炭和天然气。在不同的国家和地区，这些清洁能源都各自发挥着重要的作用。在印度、非洲和东南亚等阳光充足的地区，太阳能发挥了核心的作用。在日本和北欧等偏北的地区，风能与核能发挥了重要的作用。而在煤炭和天然气资源丰富的地区，碳捕捉与封存发挥了重要的作用。

所有能源的来源一般都包含三个因素。首先是我们有能力在其价格处在低位的时候储备该能源以备不时之需。然后就是我们有能力以低成本把能源运送到需要的地方。最后就是我们有能力通过提高能效来控制我们的整体需求。例如，我们可以通过电池、电容器和大型机械等方法来储存能源，按照具体的需求，其规模可以大到电网级，其持续时间可以从几分钟到几个季度。

最新进展

近年来，太阳能和风力发电设施的价格已经大幅下降。这很大程度上都要归功于 1989 年开始在德国实行、随后覆盖整个欧盟的上网电价政策。随着产量每翻一番，光伏电池板的价格就会下降 17%，而且在世界上许多地方，光伏发电和陆上风力发电设施的价格和现在新的化石燃料发电设施的价格相当。随着越来越多的研究，发电厂和设施成本下降的速度会加快。另外，在发展集中式太阳能发电技术以用于沙漠地区方面，我们仍有进步的空间。

i David King 爵士，英国外交大臣的气候变化特别代表，前政府首席科学顾问；
ii Jim Skea 教授，英国研究理事会能源战略研究员和伦敦帝国理工学院环境政策中心可持续能源教授；
iii Tim Green 教授，伦敦帝国理工学院能源未来实验室主任。

然而，对于发展具有价格竞争力的能源储存和智能电网，上网电价并没有起到什么作用。虽然已经实现了一些显著的创新，特别是在电池方面，但是由于其成本、性能和系统的影响存在诸多不确定性，许多其他存储技术发展还不够成熟。对于智能电网，需要开展规模化的示范项目，来积累发电设施部署的经验，并了解其带来的行为和社会性影响。这也迫切需要大力推动政府资助的研究、开发和部署活动（RD&D）。[1]

加快进步

我们有四条能够加快能源创新的关键信息。它们是：所需的投资规模；需要有一个任务重点，将信号发送给私营部门，并支撑具体的行动；需要为新技术进入市场创造有利条件；以及需要协调一致的国际行动。

1. **规模**。我们需要更加重视发现新的、更便宜的方法来生产、储存和分配清洁能源。在面临这个迫切的需求时，我们尤其需要注意的是政府对于创造一个更加洁净未来的投资占其国家收入的比例正在呈现下降趋势。解决这个失衡问题迫切需要公关部门发挥作用。国际能源机构指出，要将全球气温上升幅度（与工业化前水平相比）控制在 2℃ 以内，清洁能源技术的 RD&D 投资需要增加三到六倍。[2] 芬兰是能源的 RD&D 投资占国家收入比例最高的国家，达到 0.13%；在发达国家，全球中值水平仅为 0.035%（2012 年数据）。即便在能源行业中表现最好的部门（如太阳能和风能），研发销售比也低于 2%。与消费类电子产品行业和制药行业（研发销售比分别为 5% 以上和 15%）相比，该比例相差甚远。[3]

2. **任务重点**。大部分能源部门 RD&D 投资的重点是扩大化石燃料资源基础，并且能够以较低的成本开采能源。公共部门的 RD&D 可以发挥其独特的作用，有目的性地克服障碍，开发并采用变革性的低碳技术。我们面临的挑战——能够让我们的任务聚焦——就是将低碳技术的成本降低到一定水平，让这些技术能够成功地与现有技术竞争。对于低碳转型的核心技术而言，如果 RD&D 方案能够实现这样的降成本目标，那么人们将能够更有效地分配资源，也就能更快地实现所期望的结果。

   RD&D 把任务重点明确放在低碳转型上，就能够把正确的信号传递给私营部门，而私营部门在将这些技术推向市场的过程中发挥着关键作用。可以参考的类似案例就是取得巨大成功的半导体行业。在过去的 30 年里，半导体行业通过以任务为导向的路线图（国际工程师技术路线图），保持了摩尔定律（计算机芯片的晶体管数量每两年翻一番），该路线图由公共部门和行业资助的赛前合作 RD&D 项目驱动。

3. **为清洁能源技术进入市场创造适当的条件**。除了 RD&D 投资，还需要拉动市场的政策，将低碳技术转化为具有吸引力的商业提案。清洁能源技术补贴和碳定价机制都有利于创造合适的市场条件。通过增加需求量以及相应的生产量和规模经济，这些政策能够提前让清洁能源的价格和以化石燃料为基础的成熟能源系统展开竞争。

   这已经被视为行之有效的方法，还需要采取简单的措施对小规模技术进行大批量的部署——其中的实例包括光伏上网电价、车辆能效的法规以及产品标准和高效家用电器的标签。这种方法需要进一步推广。为了实现风险共享，需要支持具有技术成熟度的大规模技术，例如海上风电、核能、生物能以及碳捕捉与封存技术。特别需要对市场设计进行调整，这样才能够促进储存和智能电网等技术的发展，给系统带来好处。

   此外还需要支持新技术度过‘死亡谷’的阶段——在‘死亡谷’的期间，一项技术可能已经准备好进入市场，但尚未能战胜现有技术已占据市场的优势。公众的支持可以帮助初创科技公司度过这一时期生存下来，否则他们可能会失败。

4. **协调一致的国际行动。**RD&D 的投资规模需要采取协调一致的国际措施。这样做能够实现规模经济、共享研究目标、汇总研究成果，就共同的 RD&D 目标和里程碑达成一致意见，并避免重复劳动。每个国家将继续组织和管理自己的方案，还可以通过成立总体技术委员会协调与合作伙伴的努力。这样的委员会能够制定 RD&D 路线图（如上述的半导体行业），实现具有成本竞争力的低碳技术。这样的国际通行做法能够加强 RD&D 投资的效率，加快低碳能源技术的推广，鼓励私营部门进入一个潜在的巨大市场，从而增加避免危险气候变化的机会，因而是必须要采取的措施。

25．金融

Rowan Douglas, Steve Waygood, James Cameron[iv]

虽然经历了几代的更迭，但各国政府都在努力协调金融市场和社会利益。长期以来大家都能强烈地感受到气候风险领域的紧张局势，这可以说是当代最显著的市场失灵。要纠正这种失败，并有效应对气候变化的风险，我们需要在以下三个方面做的更好：风险披露；碳定价；以及激励长期的投资。

风险披露

各个行业和政策利益团体都在共同呼吁做出努力，避免进一步累积未被报告和未被管理的风险。如果累积的风险 ——无论是短期的泡沫或长期的环境外部效应——没有得到理性的思考，而且没有在早期阶段得到有效的管理，那么它往往会通过市场冲击、混乱和整个系统的亏损表现出来，直到其无法再被忽视，而这往往会造成灾难性的后果。

在过去的二十年里，环境、社会和治理报告及披露措施发生了一场革命。其中一些革新完善了面向单个企业或社会的风险披露，而这代表了有价值的进展。然而，这种措施的扩散效应可能会造成投资者的困惑，而且许多风险（包括气候变化相关的风险）的评估尚未被充分纳入到金融系统中进行有效的管理。

保险行业的经验很具有启发性。在 20 世纪 80 年代末和 90 年代初，传统的风险评估方法建立在损失经验的基础上，不足以应付一系列前所未有的、新出现的风险。该行业从那时候开始改变其做法，利用科学、系统建模和情景，去更好地了解目前风险的分布和极端情况。现在通过三个关键指标来进行全面的风险评估：i) 每年的平均损失；ii) 20 年一遇事件的年度损失；以及 c) 200 年一遇事件的年度损失。根据这些指标，风险管理能够保证保险公司保持偿付能力，即使在最坏情况下也能实现其承诺。这类似于其它行业的“压力测试”。特别之处在于整个保险和再保险行业如何在主流金融监管、信用评级、资产分析和年度报告中进行压力测试。

这种方法能够揭示风险暴露的真实水平，由此改变了保险公司和更广阔市场的风险治理方法，使公共、私营和混合所有制部门的组织比过去更加灵活、透明，而且更具可比性。保险业已经有能力以可持续的方式承担风险，市场在这方面的信心更足；我们已经对不确定性进行分类，并降低这些不确定性，而且有充足的资本可根据风险用于合理的调整分配。估值和决策已经能够更好地考虑风险，而且培养了相应的应变能力。

iv Rowan Douglas 是 Capital, Science & Policy Practice 的 CEO 和韦莱集团 Willis Research Network 的主席。Steve Waygood 是 Aviva Investors 的首席投资官。James Cameron 是海外发展研究所的主席和气候变化资本集团的前主席和创始人。此外，还要感谢 Bryony Worthington, Mark Campanale, Nick Robins, Paul Dickinson 和 Ingrid Holmes 贡献的宝贵意见和建议。

风险降低：合理应对措施的组成部分

根据保险业采取的方法，有可能设计出适用于所有实体（公共、私营和混合所有制）的统一风险报告框架，其中包括企业、城市甚至国家。这样就能实现在风险级别、概率阈值和时间段的共同模板下去评估每个实体利益面临的风险，并将其转化成年度成本，这样就能通过提高灵活度或降低风险来相应地降低成本。在公司层面，这就提供了风险导向的视角，来说明并且规范在环境、社会和治理报告中已经开展的相关工作。在国家层面，将借鉴英国等国家发布民事应急和安全风险相关国家评估报告的成功经验。在各个层面，它都会提供信息，有利于规划和为未来做打算、提升应变能力以及管理新出现的风险。

就这种做法如何有助于管理气候变化风险，我们以一家专注煤炭生产的能源公司为例。碳的价格达到每吨 100 美元，或欧盟宣布其削减 50% 煤炭消费量目标的时候，该公司将其列为面临极端损失的情景之一。经过临时负债的评估，第二年这样做的概率可估计为“百分之一”或 1%，但是在未来几年随着政策环境的变化这个概率值可能大幅度增加。正如保险业所经历的，在很短的时间内，管理者和监管者会熟悉这种方法，主要的风险情景将成为从业者、市场和利益相关者之间讨论和细化的对象。提高透明度，建立强有力的框架，并通过这种方法生成容易处理的数据，能够给市场带来好处。市场将能够按照比例降低资产价值，并确保资本分配的方式不仅考虑到当前的风险，而且还要考虑到未来风险随时间可能发生的变化。

当然，一些公司可能会有动机游说政府不要管理气候风险。虽然这样可能有利于公司获利，但是可能会违背股东们更广泛的利益。股东——甚至是整个社会——应该就这个问题做出自己的决定，但是目前他们很难看到：(i) 行业协会由哪些企业成员组成；(ii) 这些贸易机构关于气候变化都有什么观点；或 (iii) 这项工作是否符合他们的利益。因此，除了需要改善风险的信息披露，还应该把所有企业对气候变化的所有支持进行公共记录变成标准规范。

碳定价

各国政府应认识到，实体经济的碳估值是必不可少的。不以某种形式使用碳定价，就几乎不可能在复杂、动态和多样化的经济中认真处理温室气体排放的问题。明确碳定价能够带来巨大的好处，它可以引导企业通过各种方式实现政府设定的公共政策目标（企业这样做当然是出于稳定价格的初心），而决策者无论多么英明，都不可能提前预设这些路径。与此同时，碳定价并不是万能的，并应始终被看作是众多价格为基础和非价格为基础的政策干预措施的其中之一，这些政策干预很容易共存，而且是有效应对气候变化必须采取的措施。

绝大多数的政府和投资者一致希望确定碳的价格，从而合理、系统性地分配资本，来避免气候风险（该气候风险以难以计算的方式影响了他们整体投资组合的价值）。通过调整风险，还能从其他低碳和资源有效的投资中获得更好的回报。

实施碳定价的方法有很多，但最适当的形式会因政治和法律文化的不同而有所不同。然而，在任何一个国家，碳定价系统需要足够简单、持久和透明，以便于市场理解和采取相应的行动。而且它的经济覆盖面要足够广泛，才能有一定的影响力（实现这一点很可能需要一系列策略，而不是单一的政策）。

但是，碳的价格应该是多少呢？根据我们到目前为止的经验，即使碳的价格处在低位，仍然可以显著减少排放量，同时还能促进资源利用效率，而且总体上不会给经济带来任何额外的成本。然而，我们还了解到，处于相对低位的碳定价不会带来有效气候风险管理所需要的技术转变。由于经济模型无法预测这种转变，我们没有办法知道什么级别的定价才是有效的。因此，一个合乎逻辑的做法就是按照日益严格化的标准设置碳定价，与减排潜力相关的信息披露保持一致的步伐，直到我们看到理想的改变发生。如果所有人都能清楚地认识到转变的方向，那么我们就能提前而且以更低的成本看到我们想要的改变。

风险降低：合理应对措施的组成部分

谁应该为碳排放买单？迄今为止，各国政府大多通过碳定价和产品标准，把转变的负担放在碳生命周期的消费端，由化石燃料消费者来支付碳排放。另一种可替代的方法可能就是让化石燃料生产商来为碳排放买单。这会带来两个显著的好处：从管理的角度来看，在开采（或进口）环节进行征税比其它任何环节都要简单；从源头征税能够确保价格纳入整个经济体中，而不只是其中的一部分。第三个优势就是能够激励对碳捕获和封存技术的投资。如果化石燃料生产商利用碳捕获和封存技术，能够表明它们产生的碳未被燃烧或其等效的排放量安全返回到地面，那么他们就不需要承担碳价格。这在原则上相当于在欧洲成功制定法规，要求包装、汽车和家电生产商负责处理其已经报废的产品。

谁应该获得其中的收益呢？任何碳定价系统一旦产生了显著的效果，就会面临既得利益者的反对。政府可能会发现，如果他们拥有强大的公众支持，就更容易克服这种反对意见。政府可以通过维持系统收入中性，把收益返回给公众来获得他们的支持。另外一个好处是，这样的系统包含了一个正反馈：如果对开采的每吨碳征收定额税，而且税收总收入按照一定比例返还给市场参与者，那么一个参与者采取行动减少其税负，就会激励其他参与者采取同样的行动（因为总收入的减少会增加净税收）。这个和基于固定碳量定价政策的负反馈恰恰相反，如限额交易体系，其中任何一个参与者碳消耗的减少都会降低总需求，从而减少了对其他参与者仿效的激励。

最后，比上面讨论的任何细节更加重要的是信誉问题。如果投资者相信该系统能够经得住时间的考验，那么碳定价就是有效的。这就需要明显的政治意愿和强大的机构支持。如果主要经济体同意共同实施稳健的碳价格机制，并逐步提升碳价格，那么国际社会可能会产生更强的信心。

激励长期的投资

据国际能源机构估计，要将全球温升幅度控制在 2° C 以内，那么从现在到本世纪中叶我们每年的清洁能源投资规模需达到约 1 万亿美元。而且，我们还需要进一步的投资来减少其它部门的排放量。随着我们进一步认识气候风险的严重程度，这个投资数字可能会改变；然而，目前我们已经清楚地看到，大量的资金投入是必要的。

幸运的是，我们在全球股市的投资超过 50 万亿美元，而且主权债务和政府间债务已经达到了 100 万亿美元，目前看起来我们并不缺可用的资金。在金融危机期间，我们为支撑全球金融体系而发行了主权债务，其增长的速度和规模表明，我们能够按照这里暗示的速度和规模进行相应的融资。而融资的关键在于是否有政治意愿。

这笔资金的集资和花费需要大量的规划、努力和国际协调。如果希望高效、有效并可持续性地实现这一目标，我们需要国际社会制定一个长期的集资计划。各国政府领导人可以成立类似 G20 的机构来设定这个计划的总体方向。该计划需要考虑所有形式的大规模融资。主权债务属于最适合长期投资的资产类别之一，但在金融危机期间大量发行主权债务，已经让很多国家的债务水平影响到他们的信用评级。因此这个计划必须包括一个新的、更加细致入微的方法来评估基于债务的风险，还需要充分利用多边开发银行、基础设施投资、项目融资、企业债券、外国直接投资和股权投资。对于所有这些资产类别，该计划将需要考虑哪些资产所有者持有可用资金，而且重要的是，还需要考虑什么样的激励机制能够让他们从投资中长期受益。这关键在于制定政策来开展“银行可担保”的项目。

目前金融体系有一个关键的弱点，那就是几乎所有的参与者由于激励制度的导向专注于短期的利益——即所谓的‘视野的悲剧’。基金经理的业绩会按照季度表现进行评估；投资咨询公司会受益于更换基金经理；经纪人根据交易量得到佣金，因此受到激励去促进市场活动，而证券交易所也是如此，其收入与发生的交易次数挂钩。几乎没有人会关注一年或两年以后的事情。过于关注短期效益也会给整体经济带来问题，因为这会导致资本分配不当。公司董事不再投资长期的商机；同时，市场也无法再管理长期风险，虽然有一些公司放眼长期发展的正确方向，但是其它专注于短期利益的公司会给他们带来利益上的损失。

这并不是我们一定要接受的情况。各国政府、证券交易所和机构投资者等通过自己制定的法律、自己执行的法规和自己编写的合同来设定游戏规则。任何一个参与者都可以改变游戏规则，从而改变行为上的激励。例如，可以修订法律，明确规定资产管理人承担的信托责任包括良好的管理能力和长期环境、社会和治理的风险评估。根据这一原则，目前已经提出[v]责任投资方面的条款应该被写进基金管理合同，这样就可以通过考察其超过基准的长期能力以及其管理能力来综合评估基金经理的绩效，而且如果他们没能正确考虑潜在的环境、社会和治理风险以及不可持续性的发展趋势而损害了长期投资组合的价值，那么客户就能以失职罪起诉基金经理和投资咨询公司。

本着同样的精神，我们建议各国政府密切关注国家金融监管部门及其全球协调机构，来评估是否需要更新其任务，确保他们在密切关注气候变化有关的深层次、长期的金融风险。如果采取措施将长期风险的评估纳入金融体系，我们将在有效管理风险方面取得更快的进步。

26．政治

Bryony Worthington 男爵夫人，英国议会上议院成员

2008 年，英国为应对气候风险通过了一项具有里程碑意义的法案：《气候变化法案》。按照该法律框架，通过实施一系列 “碳预算”（每五年为一个周期），英国将致力于降低温室气体排放，到 2050 年实现 80% 减排的目标（与 1990 年相比）。英国是世界上第一个把气候风险的科学证据写进长期法律框架中的国家。这之所以成为可能，是因为英国达成了强大的政治共识，认为英国有能力也有责任采取行动，来减少其给全球气候带来的问题。正如之前有人指出的，用这种方式展现其领导力能够促使其它国家纷纷效仿，现在 60 多个国家都通过了法律，旨在解决气候影响的相关问题。

英国管理气候变化风险方法反映了我们的政治局势。造成气候变化的参与者和行为大部分来自于私营部门。因此，政治领导人运用法治来创建一个新的碳排放管理体系，指导今后欧盟以及英国的政策制定，其中包括其他法律法规，而且会影响公司的决策。

其它国家拥有不同的政治背景，因此预计它们会采取不同的措施应对气候风险。例如，在中国，由于政府参与经济规划的程度比较高，其气候变化的应对措施体现在五年计划。该蓝图提出了实现该计划的愿景，包括一系列具体的目标，而且为相应方案和项目提供了融资框架。在美国，虽然联邦政府面临着政治僵局，但是各州和各个城市在气候变化方面正在努力取得进展。加利福尼亚州等州已经通过了全面的一揽子立法程序，实施排放标准，引入碳定价机制。其他一些地方没有制定新的法规，现有的《清洁空气法案》虽然仍然面临着法律上的挑战，但仍然被用来激励各方采取措施。

然而，先不论管辖范围，各国在解决温室气体排放的问题上面临着一些共同的政治性挑战。降低气候变化的风险需要做出改变，但这并不符合许多强大利益集团目前的经营模式。在一些地方，规范现有活动的措施遭到强烈反对，引起政治紧张局势，导致提出的干预措施会受到阻挠或被弱化。这个问题的全球性特征，以及对经济竞争力的担忧，都可以成为反对单边行动的有力论据。在此背景下，政治家们需要仔细思考如何帮助关键的经济部门实现转变。这可能意味为碳密集程度最高的行业部署的技术提供补偿和激励。

实践证明，在很多情况下，采取措施鼓励更清洁、更具有颠覆性的新技术更容易被政治力量接受。然而，如果这些技术的成本被认为过高，那么政治力量可能会收回对它的支持，有时候这种情况会突然发生。

v 由联合国环境规划署融资计划的资产管理工作组提出

支持清洁发展方式的政治力量应更多地表达自己的意见，这有助于创建一个更加平衡的政治环境，对于资源丰富和有针对性的民间社会代表而言也是如此。

未来签订的国际气候变化协议不会是一个建立在由政治力量决定的碳预算基础上、自上而下的立法框架；相反，该协议是一个更加具有包容性、法律效力更低的文件，反映了共同行动的意愿。然而，这样的行动很容易就无法满足风险评估建议的要求。因此，我们必须利用接下来的时间树立信心，强化政治意愿，并确保该协议代表的是目前这个框架内最好的规划。与此同时，我们必须认真考虑在未来几年如何提高我们行动的有效性。

清洁技术的部署已经取得了明显的发展势头，目前首先要做的就是必须找到方法，使国际行动可以进一步增强其发展势头，并防止高碳排放基础设施的再投资。《蒙特利尔议定书》规定逐渐淘汰破坏臭氧层的化学物质，表明了在特定经济部门设定技术标准的国际协议可以非常有效。同样的方法可以应用到各个碳排放源中。例如，欧盟、中国和美国各有不同的发电站和汽车排放标准规范。如果这几个大经济体同意使用同样的标准，那么就会大大激励世界各地的行业参与者满足这些标准；而且技术进步很可能会超过预期，各国政府由此可以达成一致意见，制定实施更加严格标准的时间表。在任何行业，大批国家带头将有助于激励其它国家仿效。

我们会继续努力，确保采取合理的措施应对气候风险，而且我们对风险会有更深的共识，这将鞭策我们继续采取行动。

世界摆脱奴隶制度是一个历时百年的战斗。而全球应对过量温室气体排放的战斗已经持续了 25 年之久，并且已经取得了很大的进展。人类的思维具有解决问题的导向，越来越多的人正在参与到这个任务中。在接下来的 25 年里，积极寻求变化的步伐似乎会加快。只要有足够的政治意愿，我仍然坚信，我们能够而且将会避免威胁我们生存的最坏气候变化情景的发生。

尾注

1 King, D.A., Browne, J., Layard, R., O’Donnell, G, Rees, M., Stern, N 和 Turner,A.（2015 年）。全球应对气候变化的阿波罗计划。伦敦经济学院，已出版。

2 国际能源机构（2013 年）。跟踪 2013 年清洁能源发展：国际能源机构在清洁能源部长级会议上的报告。见 http://www.iea.org/publications/tcep_web.pdf

3 Laleman, R. 和 Albrecht, J. （2012 年）。比较欧洲光伏和风能的措施，可再生能源，61: 33-37，第 3 页。又见 Grubb, M.，与 Hourcade, J.-C 和 Neuhoff, K.（2014 年）行星经济学：能源、气候变化和可持续发展的三个领域。牛津：Earthscan, Routledge, 第 321 页。

27．总结性思考

正如我们最后一位供稿作者所言，我们正在迎接一场战斗：一场维护未来气候安全的战斗。不管我们是否注意到，各种强大的力量正在参与到这场战斗中。既得利益者抗拒改变的力量、基础设施系统的惯性以及不以人类意志为转移的热力学定律似乎都成为我们在这场战斗中的阻力。

要赢得这场战役，我们必须调动同样强大的力量来支持改变：人类的创造力、技术和领导力的力量。我们必须有与物理定律一般不屈的意志和决心。

超过一定阈值时，气候变化的最大风险会出现：渐变演变为突变，不可忽视的情况变为不可容忍的情况。风险也可能以同样的方式得到最大程度的降低。循序渐进的措施是不够的：我们必须寻找非线性、不连续的、变革性的改变。
政治领导可以是非线性变化的一个来源。政治领导可以让政府从不作为变为采取行动，让社会从冷眼旁观变为积极参与。在现有技术水平下，政治领导就有机会在短期内显著地改变任何一个国家排放量的趋势。

技术创新是非线性变化的天然来源。新技术可能慢慢出现，然后在跨过一些无形的门槛后会突然迅速地取代旧技术。就赢得这场战役需要的一系列技术而言，重要的是加快这一变化的速度，并提前跨过这些门槛。当务之急是技术进步和政策措施（如碳定价）双管齐下，以尽快跨过清洁能源变得比化石能源更便宜的门槛。

在经济方面，微小的规则变化可以产生很大的结果变化。适当地调整法规，并采取激励措施将可以显著地改变资金流动，从而为我们的长期经济利益服务。

非线性变化的力量不仅限于政治领导者、技术人员和市场。社会变革也可能是不连续、不可预测和急剧的。反抗奴隶制度（或殖民主义）的战役可能持续了一个世纪，但变革最终来临时，就会来得很快。

反馈作用会加剧气候变化的风险：气温上升使冰雪融合；冰雪融化后，失去了冰层的海洋会吸收更多热量，这样气温上升得更快。要赢得这场战役，我们必须建立起积极的反馈循环。政治干预可以改变市场氛围，这样市场将在清洁能源技术方面加大投资，从而加快技术进步，然后新的政治干预又成为可能。

在这场战役中，每个国家都必须尽自己最大的努力做出贡献。那些对大气中累积排放量承担最大责任的国家需要付出最大的努力。那些拥有丰富阳光、风、河流、潮汐和地热资源的国家必须推动开发这些资源的技术创新，并率先将它们推向全球市场。最大的生产国和消费国必须共同努力，确保全球市场受益于规模经济，降低所有国家清洁能源的成本，同时改善最贫困人口的能源供应情况。虽然所有国家都可以发挥自己的作用，减少污染性能源的补贴，但是那些拥有全球金融中心的国家更应该带头改变游戏规则。

气候变化的风险分为即时风险和长期风险，因此我们也要分别针对这两种情况采取行动。对于随时间的推移而增加的风险，如果我们的视野是短期的，那么就无法成功地加以控制。最终，只有我们将全球温室气体的排放量降至接近零时，气候变化的风险才能得以控制。因此，现在我们必须尽最大的努力降低排放量，而且还必须沿着一条未来有更强的能力降低更多排放量的道路前进。

气候变化的风险可能比人们通常意识到的程度更高，我们应对气候变化的能力也是如此。实事求是的风险评估并不是宿命论的借口。如果我们克服惰性，发挥创造力，将反馈作用相匹配，找到并扩过非线性变化的边界，那么未来保持安全气候的目标就不是遥不可及的。

我们的父辈和祖辈中有许多人曾经为了国家的未来努力奋斗，他们做出的牺牲是我们大部分人都无法企及的。先不要提我们应该给后代留下什么；至少因为亏欠过去的，我们就要在现在这场战斗中打一次体面的仗。

伦敦、北京、德里、剑桥（麻省）
2015 年 6 月 14 日

附 录：

热应力对人类的风险——方法和其它结果

方法

将全球气温上升与当地热应力相关气候条件相联系

我们使用 HadGEM2-ES 气候模型的温度值和湿度值[1]（即露点），对 RCP8.5 情景路径下，全球的 67000 个地表单元格（0.5° x 0.5°），在不同的时间段（1993 年、2025 年、2050 年、2075 年和 2200 年；每个时间段的估值为每 25 年到 30 年的均值）的热应力指数，即“湿球温度”（WBGT）进行了估算。 相关估值体现了两百年内地表单元格热应力的变化情况。

月度（公历月）热应力水平为 30 年的均值，因此 6 月的热应力水平为 900 天（30 个 6 月）的均值。我们还计算了每月温度的日变率和标准差（假设其为高斯分布），该数据可用于辨别每月最炎热的三天的温度下限。

将热应力与核心体温和热应力相联系

WBGT 指数以温度和湿度为基础，结合体感空气流动情况的预测和来自热辐射的其它热量，计算出生理热曝露水平，该指数可用于评估气候变化对健康的影响。[2] 该热应力水平还受到新陈代谢速度（身体活动水平）和衣物的影响。

对 WBGT 方法、计算和解释的详细资料，请查看 www.ClimateCHIP.org 网站上的《2014 年气候变化对健康的影响及预防技术报告》。[3] 关于亚洲部分地区“与工作及其它体力活动相关的”热应力情况，该报告进行了详细阐述。[4]

我们运用 de Dear 公式 (新南威尔士大学，澳大利亚) 对 WBGT 指数与生理极限之间的关系进行了估算。作为世界气象监视网热舒适度计算工具（http://web.arch.usyd.edu.au/~rdedear/），de Dear 公式可用于计算热应力对核心体温的影响。WBGT 指数的计算包含了 de Dear 公式中插入的几个变量，这几个变量计算了核心体温（体重 70kg，着单薄衣物）约 4 小时内的时间趋势。

如何处理模拟未来气候变化的不确定性
由于温室气体排放量的增加，气候变化的程度尚不确定，所以 WBGT 指数未来的变化趋势也存在不确定性。为了降低这种不确定性干扰，在计算 21 世纪末的 WBGT 指数时，在 HadGEM2-ES 变暖空间格局的假设条件下，我们通过模式尺度法，对不同全球平均气温变化水平下的局部气温变化进行推算[5]。其中全球气温变化水平的选择依据是：世界气候研究计划“耦合模型对比项目”（第 5 阶段；CMIP5）[6] 模拟的 RCP8.5 情景下 21 世纪末气温上升的数值分布情况，这些数值分布也纳入了 IPCC 第五次评估报告。[7] 因此，本文所得出的 WBGT 指数反映了在气温对气候作用力加强的响应中所存在的部分不确定性。但由于 WBGT 指数的计算只包含单个气候变暖空间分布（比如，HadGEM2-ES 模型），所以 WBGT 指数并未包含局部地区对气候变化的响应所存在的不确定性，也没有包含湿度对气候变化的响应所存在的不确定性。

附录

地理区域

该研究中的三个地理区域是印度北部、中国东南部和美国东南部。这三个区域经纬单元格的数量分别是 281、953 和 602 个。

印度北部：包括拉贾斯坦邦、旁遮普省、哈里亚纳邦、昌迪加尔、德里、比哈尔和北方邦

美国东南部：路易斯安那州、密西西比州、阿拉巴马州、乔治亚州、佛罗里达州、南卡莱罗纳州、北卡莱罗纳州、弗吉尼亚州、西弗吉尼亚州、肯塔基州、田纳西州、阿肯色州

中国东南部：地图中两条直线以下的区域。

人口

我们将每个网格的人口划分为四个年龄组，并计算出成年人和老年人（年龄 >=15 岁）的人口加权热曝露概率。其中，2099 年前的人口数据源于联合国人口署的估计（由 Briggs 计算，2014 年），而 2099 年以后，我们采用的是总人口变动估值：

由于我们对（2200 年）全球最高温度变化概率的估算是以人口比例为基础的，所以无需考虑 2085 年至 2200 年的人口数量变化。为简单起见，我们假设在第二个一百年内，相应地区人口的空间分布保持不变。

工时损失（更多信息如下）

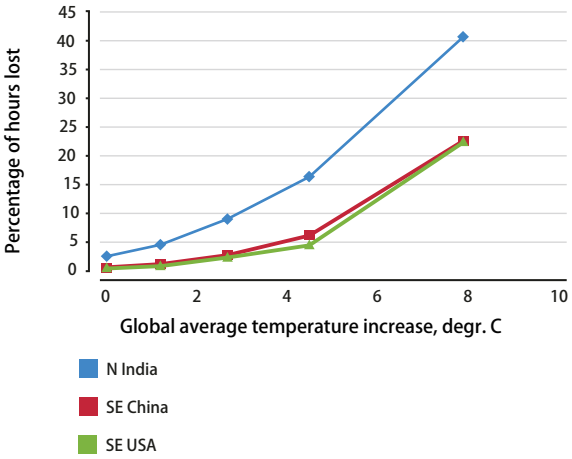
在 www.ClimateCHIP.org 的《2014 年气候变化对健康的影响及预防技术报告：4》中，我们阐述了体现高温与工时损失量化关系的风险函数。[8]

附录

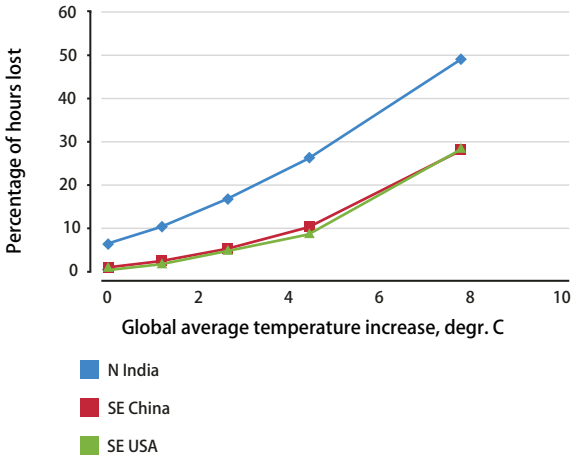
其它结果

该图表以另一种方式显示了研究结果，三项研究分别估算了随着全球平均气温的上升（0 至 8˚C），不同程度的体力活动下，高温造成工时损失的比例。

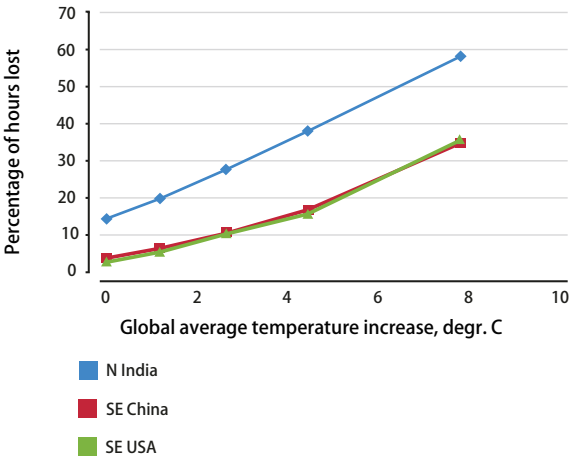
功率为 200W/h 时的工时损失比例（%）



功率为 300w/h 时的工时损失比例（%）



功率为 400w/h 时的工时损失的比例（%）



附录

尾注

1 从德国波茨坦研究所 ISI-MIP 数据库中下载（Hempel, S., Frieler, K., Warszawski, L., Schewe, J. 和 Piontek, F.（2013 年）。“保持趋势的误差修正—ISI-MIP 方法”。《地球系统动力学》，4，第 219 至 236 页，doi:10.5194/esd-4-219-2013, 2013 年。）气候模型数据来自 RCP8.5 情景模拟，假设到本世纪末作用力接近 8.5 瓦 / 平方米。

2 Kjellstrom T, Holmer I, Lemke B. (2009 年)。“工作场所的热应力、健康和生产力：气候变化对中低收入国家带来越来越大的挑战”。《全球卫生行动》；2. doi:10.3402/gha.v2i0.2047.

3 Kjellstrom T, Lemke B, Otto M, Dear K, Hyatt O. (2014 年)“职业热应力。为 WHO 气候变化对健康影响的整体评估项目（始于 2009 年）供稿”。《2014 年技术报告》：4，见 www.ClimateCHIP.org.

4 Kjellstrom T, Lemke B, Otto M（2013 年）。“东南亚职业热曝露与影响的映射关系：1980 年至 2009 年的趋势以及到 2050 年的预测趋势”。《职业健康》51：第 56 至 67 页。

5 Collins, M., R. Knutti, J. Arblaster, J.-L. Dufresne, T. Fichefet, P. Friedlingstein, X. Gao, W.J. Gutowski, T. Johns, G. Krinner, M. Shongwe, C. Tebaldi, A.J. Weaver 和 M. Wehner（2013 年）。“长期气候变化：预测、承诺和不可逆性”。《2013 年气候变化：自然科学基础》。IPCC 第五次评估报告第一工作组供稿 [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex 和 P.M. Midgley（编辑）]。英国剑桥和美国纽约：剑桥大学出版社，共 1535 页，doi:10.1017/CBO9781107415324.

6 Taylor, K.E., R.J. Stouffer, G.A. Meehl（2012 年）。“CMIP5 概况和实验设计。”《美国气象学会公告》，93，第 485 至 498 页，doi:10.1175/BAMS-D-11-00094.1, 2012.

7 IPCC（2013 年）。“决策者摘要”。《2013 年气候变化：自然科学的基础》。IPCC 第五次评估报告第一工作组供稿 [Stocker,T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex 和 P.M. Midgley（编辑）]。英国剑桥和美国纽约：剑桥大学出版社。

8 Kjellstrom 等人，2014 年

附录：水资源压力的风险——方法

在既定的气候路径（或排放量情景）、经济—社会情况和影响指标体系中，导致气候变化具有特定风险（即不确定性）的主要因素可以分为三类：(i) 气候变化的总体规模（例如，用全球平均气温的变化表示），(ii) 既定气候变化的总体规模下，相应气候变量变化的空间和季节分布，(iii) 局部和区域气候变化转化为“影响力”。通过多次模拟所有可能存在的合理情景，我们可以评估这些不确定因素对气候变化风险的影响，以及气候变化风险随时间的变化情况，但这在实践中并不可行。因此，本文在估算 21 世纪气候变化的潜在影响范围时，结合了某一给定气候路径下全球地表年平均温度变化的概率分布估值和体现全球地表平均温度变化影响的损失函数。其中，21 世纪气温变化的估算运用了概率型的 [1] 的 MAGICC 简单气候模型，[2] 该模型设置了多个参数组合得出每年气温变化的分布情况。

各影响指标的损害函数建立过程如下：将不同气候模型得出的气候变化模拟趋势换算为全球平均温度的具体变化，再将单个空间影响模型与具体的经济—社会情景结合，估算出具体温度变化的影响 [3]。在这一过程中，我们运用了 21 个气候模型 [4]，因此每个时间段有 21 个损害函数，代表 21 种气候变化模式（因为社会经济特征随时间的推移而变化）。假设这 21 个气候变化模拟趋势具有同等的合理性。我们分别对两种气候路径（以 RCP2.6 和 RCP8.5 情景为代表）和三种（出现人口变化的）社会经济情景下的影响进行了评估。这三种社会经济情景出自“共享社会经济路径”预测 [5]，分别代表了人口增速中等、较低和较高的假设情况。

水资源短缺压力与河流洪水影响的估算是基于 MacPDM 全球水文模型对河水流量的模拟 [6]。该模型以 0.5° ×0.5° 为最小空间单位，以 1961 年至 1990 年的气候条件为基准，计算了约 1300 个流域和岛屿的人均水资源。该模型按照水资源短缺的程度对各流域进行了级别划分，计算了各级别流域的区域总人口和全球总人口 [7]。

在主要的泛滥平原，遭遇比目前 30 年一遇的洪水更严重洪灾的年平均人数估值为：计算未来各网格遭遇目前 30 年一遇洪水规模的概率变化，并乘以各个经纬单元格泛滥平原的人口数 [8]。在流域层面，每年遭遇比目前 30 年一遇洪水更严重洪灾的概率变化估值为：计算各流域内的每个网格概率变化的加权平均值（以泛滥平原人口数为权重；所以零人口的经纬单元格对均值无影响）。

对干旱发生频率的影响估算是基于一年内标准化降水指数（SPI）的变化，该指数通过每月降水量计算得出。以气候基准期（1961 年至 1990 年）的标准化降水指数为参照值，降水指数小于 -2 的月份即为“干旱”；在气候基准期内，降水概率低于 2% 时，可称为“极端干旱”。通过计算这一阈值发生频率的变化，我们估算出了全球农田遭遇“极端干旱”的年平均面积 [9]。《联合国开发计划署 2009 年的全球灾难风险评估报告》采用了 SPI（以 6 个月为计算周期）和降水量变率来描述干旱风险，其评估所用的 SPI 阈值为 -1，发生概率约为 15%。

当然，该评估也有许多需要注意的地方。一年中可能的气温变化的分布估算是基于一个简单的气候模型（MAGICC 模型）及一组合理的参数。气候变化的空间格局根据 21 个气候模型估算，假设所有的气候模型具有同等的合理性：就一个地区可能的变化而言，不同的气候模型组合可能给出不同的范围。损害函数基于这些气候模型的变化尺度模式，并假设一个地区的气候与全球平均气温呈现线性变化关系 [10]：也许事实并非如此，一些特定的地区可能存在巨大的“阶跃变化”或非线性变化。仅使用一个影响模型来估算水文变化；对于同样的气候变化，不同的模型可能给出不同的结果 [11]。因此，潜在影响的范围可能会被低估，尽管超过阈值的概率分析可能更稳健（没有迹象表明这里使用的 MacPDM 模型与其它全球水文模型有系统性的差别）。最后，水资源短缺压力、洪水风险和干旱风险的变化可能有不同的指标，这些指标对气候变化的全球和区域影响可能给出不同的指示。

因此，这些结果仅作起到指示作用：气候路径和地区之间的差别比影响和风险的实际程度更加稳定。

尾注

1 Lowe, J. A., C. Huntingford, S. C. B. Raper, C. D. Jones, S. K. Liddicoat 和 L. K. Gohar （2009 年）。“从全球变暖的危险中恢复有多困难？”《环境研究快报》，4(1), 014012 10.1088/1748-9326/4/1/014012.

2 Meinshausen, M., S. C. B. Raper 和 T. M. L. Wigley（2011 年）。“使用简单模型模仿大气 - 海洋和碳循环耦合模型，MAGICC6 第一部分：模型描述和校准”。《大气化学和物理》，11(4)，第 1417 至 1456 页，10.5194/acp-11-1417-2011.

3 Arnell, N.W., Brown, S., Gosling, S.N., Hinkel, J., Huntingford, C., Lloyd-Hughes, B., Lowe, J.A., Osborn, T., Nicholls, R.J. Zelazowski, P.（2014 年）。“全球范围内的气候影响功能：气候作用力和影响之间的关系”。《气候变化》doi 10.1007/s10584-013-1034-.

4 Meehl, G. A., C. Covey, T. Delworth, M. Latif, B. McAvaney, J. F. B. Mitchell, R. J. Stouffer 和 K. E. Taylor （2007 年）。“世界气候研究计划 CMIP3 多模型数据集—气候变化研究的新时代。”美国气象学会公告，88(9), 1383-

5 O’Neill, BC, Kriegler, E., Riahi, K., Ebi KL, Hallegatte, S, Carter, TR, Mathur, R, van Vuuren DP（2014 年）。“气候变化研究的一个新的情景框架：共享社会经济路径的概念。”《气候变化》122 第 387 至 400 页。这些情景可见：https://secure.iiasa.ac.at/web-apps/ene/SspDb/.

6 Gosling, S.N. & Arnell, N.W.（2010 年）。“利用全球水文模型模拟全球目前的河流径流：模型的修改、验证和灵敏度分析。”《水文过程》 25 (7)，第 1129 至 1145 页。doi:10.1002/hyp.7727.

7 与 Gosling, S.N. & Arnell, N.W.（2013 年）的方法相同，“气候变化对水资源短缺影响的整体评估。”《气候变化》doi:10.1007/s10584-013-0853-x，但使用的是不同的社会经济情景。

8 洪流模拟在 Arnell, N.W. & Gosling, S.N.（2014 年）中描述。“在全球范围内气候变化对河流洪水的影响。”《气候变化》doi:10.1007/s10584-014-1084-5，虽然这里的指标是不同的。

9 Ramankutty N, Evan AT, Monfreda C, Foley JA （2008 年）。“农业地球：1. 2000 年全球农业用地的地理分布。”《全球生物地化循环》22. doi: Gb1003 10.1029/2007gb002952.

10 Arnell, N.W., Brown, S., Gosling, S.N., Hinkel, J., Huntingford, C., Lloyd-Hughes, B., Lowe, J.A., Osborn, T., Nicholls, R.J. Zelazowski, P. （2014 年）。“全球范围内的气候影响功能：气候作用力和影响之间的关系。”《气候变化》doi 10.1007/s10584-013-1034-.

11 Schewe, J., Heinke, J., Gerten, D., Haddeland, I., Arnell, N.W., Clark, D.B., Dankers, R., Eisner, S., Fekete, B., Colon-Gonzalez, F.J., Gosling, S.N., Kim, H., Liu, X., Masaki, Y., Portmann, F.T., Satoh, Y., Stacke, T., Tang, Q., Wada, Y., Wisser, D., Albrecht, T., Frieler, K., Piontek, F., Warszawski, L. 和 Kabat, P. （2014 年）。“气候变化情况下水资源匮乏的多模型评估。”《美国国家科学院院刊》111，第 3245 至 3250 页，doi.10.1073/pnas.1222460110.

附录：第二部分和第三部分图表中的文字说明

第 46 页图 1：
number of times different degrees of warming are mentioned in WGII SPM
第二工作组“决策者摘要”部分提及不同气温上升度数的次数
Times mentioned in WGII SPM
第二工作组“决策者摘要”提到的次数

第 51 页图 2：
RCP warming in 2100
RCP 情景下 2100 年气温上升幅度
Warming above pre-industrial (˚C)
与工业化前水平相比气温上升幅度（˚C）
Likelihood (%) of T>
气温上升的可能性（%）

第 52 页图 3：
RCP likelihood of T>2.0˚C
RCP 情景下气温上升 2.0˚C 的可能性
Likelihood (%)of T>2.0˚C
气温上升 2.0˚C 的可能性
Year 年份

RCP likelihood of T>4.0˚C
RCP 情景下气温上升 4.0˚C 的可能性
Likelihood (%)of T>4.0˚C
气温上升 4.0˚C 的可能性
Year 年份

RCP likelihood of T>7.0˚C
RCP 情景下气温上升 7.0˚C 的可能性
Likelihood (%)of T>7.0˚C
气温上升 7.0˚C 的可能性
Year 年份

第 53 页图 4：
Historical
历史值
Global surface temperature change (˚C)
全球地表温度变化（˚C）
Year 年份

第 54 页图 5：
Additional warming in 2100 with additional feedbacks
额外的反馈作用造成 2100 年额外的气温上升幅度
5-95% additional feedbacks
5-95% 的额外反馈作用
No additional feedbacks
没有额外的反馈作用
Median additional feedbacks
中等程度的额外反馈作用
Median warming in 2100 (˚C)
2100 年气温上升幅度中间值（˚C）

第 58 页图 1：
The relation between heat and work-a function of ideal human physiology and a pointer to fundamental temperature thresholds
热量与工作之间的关系——理想的人体生理学函数和基本温度阈值的指标
Job exertion required (watts)
需要的工作努力（瓦特）
Percent of full working capacity
满负荷工作的百分比
e.g. 2˚C rise approx. halves work output
例如，气温上升 2˚C，工作产出减半
Wet Bulb Globe Temperature (WBGT)
湿球黑球温度（WBGT）
Based on ISO Standard for Heat Stress in the Workplace (1989)
基于工作场所热应力的 ISO 标准（1989 年）
Wet Bulb Globe Temperature——a measure of heat stress that is sensitive to air temperature, radiant temperature, humidity and wind velocity
湿球黑球温度——热应力的衡量指标，对气温、辐射温度、湿度和风速敏感

第 59 页图 2：
Probability (%) of the heat exposure at WBGTmax >=40˚C , 3 days in hottest month
最炎热的月份有 3 天人民曝露于最高湿球黑球，温度高于 40 摄氏度的高温条件的概率
Global average temperature increase, degree.
全球平均上升气温度数

N India 印度北部
SE China 中国东南部
SE USA 美国东南部

第 62 页图 3：
WBGTmax 最高湿球黑球温度
1995, baseline (zero global temp increase)
1995 年，基准线（全球气温上升为零）
2085, 4.4 ˚C global temp increase
2085 年，全球气温上升 4.4˚C
2200, 7.7 ˚C global temp increase
2200 年，全球气温上升 7.7˚C

第 65 页图 1：
Percentage of yield projections
预测的产量百分比
Color legend 颜色图标
Range of yield change
产量变化的范围
Increase in yield 产量增加
Decrease in yield 产量下降

附录

第 66 页图 2：
Temperate regions 温带地区
Tropical regions 热带地区
Maize yield change (%)
玉米产量变化（%）
Wheat yield change (%)
小麦产量变化（%）
rice yield change (%)
水稻产量变化（%）
no adaptation
不采取适应措施的情况
with adaptation
采取适应措施的情况
local mean temperature change (˚C)
当地平均气温变化（˚C）
local mean temperature change (˚C)
当地平均气温变化（˚C）

第 68 页图 3：
Actual effect: lethal max T
实际影响：致命的最高温度
Mean maximum temperature (˚C)
平均最高气温（˚C）
Rice 水稻
Wheat 小麦
Maize 玉米
Leaf initiation 发芽
Shoot growth 新枝生长
Root growth 根系生长
Lethal limits 死亡限值
Sanchez et al., 2014
Sanchez 等人（2014 年）

第 69 页图 4：
Critical temperature risk (flowering-Jiangsu)
临界温度风险（花期 - 中国江苏省）
Cumulative probabilities (T>37˚C)
累积概率（温度高于 >37˚C）
Local T increase (˚C)
当地气温上升（˚C）
GISS Global Temp (˚C)
GISS 模型下全球气温（˚C）
MIROC Global Temp (˚C)
MIROC 模型下全球气温（˚C）

Critical temperature risk (flowering-Jiangsu)
临界温度风险（花期 - 中国江苏省）
GCM Cumulative probabilities (T>37˚C)
GCM 模型下累积概率（温度高于 >37˚C）
T increase 2080-2100
2080 年到 2100 年气温的上升
Time Period (yr)
时间段（年）

Critical temperature risk (flowering-Illinois)
临界温度风险（花期 - 美国伊利诺斯州）
Cumulative probabilities (T>37.3˚C)
累积概率（温度高于 >37.3˚C）
Local T increase (˚C)
当地气温上升（˚C）
MRI Global Temp (˚C)
MRI 模型下全球气温（˚C）
MIROC Global Temp (˚C)
MIROC 模型下全球气温（˚C）

Critical temperature risk (flowering- Illinois)
临界温度风险（花期 - 美国伊利诺斯州）
Cumulative probabilities (T>37.3˚C)
累积概率（温度高于 >37.3˚C）
GCM T increase 2080-2100
2080 年到 2100 年气温的上升
Time Period (yr)
时间段（年）

第 70 页图表
Critical temperature risk (flowering-Punjab)
临界温度风险（花期 - 印度旁遮普省）
Cumulative probabilities (T>31˚C)
累积概率（温度高于 >31˚C）
Local T increase (˚C)
当地气温上升（˚C）
GISS Global Temp (˚C)
GISS 模型下全球气温（˚C）
HadG Global Temp (˚C)
HadG 模型下全球气温（˚C）

Critical temperature risk (flowering- Punjab)
临界温度风险（花期 - 印度旁遮普省）
Cumulative probabilities (T>31˚C)
累积概率（温度高于 >31˚C）
GCM T increase 2080-2100
2080 年到 2100 年气温的上升
Time Period (yr)
时间段（年）

第 76 页图 W1:
Global: water-stressed population
全球：面临水资源短缺压力的人数
Millions of people
人数（单位：百万）
No climate change
不出现气候变化的情况

US: water-stressed population
美国：面临水资源短缺压力的人数
Millions of people
人数（单位：百万）
No climate change
不出现气候变化的情况

East Asia: water-stressed population
东亚：面临水资源短缺压力的人数

Millions of people
人数（单位：百万）
No climate change
不出现气候变化的情况

South Asia: water-stressed population
南亚：面临水资源短缺压力的人数
Millions of people
人数（单位：百万）
No climate change
不出现气候变化的情况

Middle East: water-stressed population
中东：面临水资源短缺压力的人数
Millions of people
人数（单位：百万）
No climate change
不出现气候变化的情况

North Africa: water-stressed population
北非：面临水资源短缺压力的人数
Millions of people
人数（单位：百万）
No climate change
不出现气候变化的情况

第 78 页图 W2
2050: probability number of people with chronic water shortage increasing by more than 10%
2050 年：面临长期缺水的人数增加 10% 的概率
Probability (%) 概率（%）
West Africa 西非
Cen. Africa 中非
East Africa 东非
Sn. Africa 南非
N. Africa 北非
Middle East 中东
South Asia 南亚
South East Asia 东南亚
East Asia 东亚
Central Asia 中亚
Australasia 澳大拉西亚
W. Europe 西欧
C. Europe 中欧
E. Europe and Russia 东欧和俄罗斯
Canada 加拿大
USA 美国
Central America 中美洲
Brazil 巴西
South America 南美

2100: probability number of people with chronic water shortage increasing by more than 10%
2100 年：面临长期缺水的人数增加 10% 的概率
Probability (%) 概率（%）
West Africa 西非
Cen. Africa 中非
East Africa 东非
Sn. Africa 南非
N. Africa 北非
Middle East 中东
South Asia 南亚
South East Asia 东南亚
East Asia 东亚
Central Asia 中亚
Australasia 澳大拉西亚
W. Europe 西欧
C. Europe 中欧
E. Europe and Russia 东欧和俄罗斯
Canada 加拿大
USA 美国
Central America 中美洲
Brazil 巴西
South America 南美

第 78 页图 W3：
Sacramentor: Risk of falling below 1700m3/capita/year
萨克拉门托：年人均水资源可用量低于 1700 立方米的风险
Risk of crossing the threshold (%)
超过阈值的风险（%）

Rio Grande: Risk of falling below 1000m3/capita/year
格兰德河流域：年人均水资源可用量低于 1000 立方米的风险
Risk of crossing the threshold (%)
超过阈值的风险（%）

Yangtse: Risk of falling below 1700m3/capita/year
长江流域：年人均水资源可用量低于 1700 立方米的风险
Risk of crossing the threshold (%)
超过阈值的风险（%）

Huang Ho: Risk of falling below 500m3/capita/year
黄河流域：年人均水资源可用量低于 500 立方米的风险
Risk of crossing the threshold (%)
超过阈值的风险（%）

Ganges: Risk of falling below 1700m3/capita/year
恒河流域：年人均水资源可用量低于 1700 立方米的风险
Risk of crossing the threshold (%)
超过阈值的风险（%）

Indus: Risk of falling below 500m3/capita/year
印度河流域：年人均水资源可用量低于 500 立方米的风险
Risk of crossing the threshold (%)
超过阈值的风险（%）

Tigris-Euphrates: Risk of falling below 500m3/capita/year
底格里斯河 - 幼发拉底河流域：年人均水资源可用量低于 500 立方米的风险
Risk of crossing the threshold (%)
超过阈值的风险（%）

Karun: Risk of falling below 1000m3/capita/year
卡鲁恩河流域：年人均水资源可用量低于 1000 立方米的风险
Risk of crossing the threshold (%)
超过阈值的风险（%）

Moulouya: Risk of falling below 500m3/capita/year
穆卢耶河流域：年人均水资源可用量低于 500 立方米的风险
Risk of crossing the threshold (%)
超过阈值的风险（%）

第 80 页图 W4:
2050: worst case (SSP2)
2050 年：最坏情况（共同的社会经济路径 2）
Number of people (million)
人数（单位：百万）
West Africa 西非
Cen. Africa 中非
East Africa 东非
Sn. Africa 南非
N. Africa 北非
Middle East 中东
South Asia 南亚
South East Asia 东南亚
East Asia 东亚
Central Asia 中亚
Australasia 澳大拉西亚
W. Europe 西欧
C. Europe 中欧
E. Europe and Russia 东欧和俄罗斯
Canada 加拿大
USA 美国
Central America 中美洲
Brazil 巴西
South America 南美
Worst case 最坏情况

第 85 页图 D1：
Global: Drought-affected cropland
全球：遭受干旱的农田
% of cropland
农田的比例（%）
No climate change
不出现气候变化的情况

US: Drought-affected cropland
美国：遭受干旱的农田
% of cropland
农田的比例（%）
No climate change
不出现气候变化的情况

East Asia: Drought-affected cropland
东亚：遭受干旱的农田
% of cropland
农田的比例（%）
No climate change
不出现气候变化的情况

South Asia: Drought-affected cropland
南亚：遭受干旱的农田
% of cropland
农田的比例（%）
No climate change
不出现气候变化的情况

Southern Africa: Drought-affected cropland
非洲南部：遭受干旱的农田
% of cropland
农田的比例（%）
No climate change
不出现气候变化的情况

第 86 页图 D2:
2050: probability of cropland area affected by drought increasing by >50%
Probability (%)
2050 年：遭受干旱的农田面积增加 50% 的概率
概率（%）
West Africa 西非
Cen. Africa 中非
East Africa 东非
Sn. Africa 南非
N. Africa 北非
Middle East 中东
South Asia 南亚
South East Asia 东南亚
East Asia 东亚
Central Asia 中亚
Australasia 澳大拉西亚
W. Europe 西欧
C. Europe 中欧
E. Europe and Russia 东欧和俄罗斯
Canada 加拿大
USA 美国
Central America 中美洲
Brazil 巴西
South America 南美

2100: probability of cropland area affected by drought increasing by >50%
Probability (%)
2100 年：遭受干旱的农田面积增加 50% 的概率
概率（%）

West Africa 西非
Cen. Africa 中非
East Africa 东非
Sn. Africa 南非
N. Africa 北非
Middle East 中东
South Asia 南亚
South East Asia 东南亚
East Asia 东亚
Central Asia 中亚
Australasia 澳大拉西亚
W. Europe 西欧
C. Europe 中欧
E. Europe and Russia 东欧和俄罗斯
Canada 加拿大
USA 美国
Central America 中美洲
Brazil 巴西
South America 南美

第 86 页图 D3：
2050: worst case
2050 年：最坏情况
Percentage of cropland
农田的百分比
West Africa 西非
Cen. Africa 中非
East Africa 东非
Sn. Africa 南非
N. Africa 北非
Middle East 中东
South Asia 南亚
South East Asia 东南亚
East Asia 东亚
Central Asia 中亚
Australasia 澳大拉西亚
W. Europe 西欧
C. Europe 中欧
E. Europe and Russia 东欧和俄罗斯
Canada 加拿大
USA 美国
Central America 中美洲
Brazil 巴西
South America 南美
Worst case 最坏情况

第 89 页图 F1:
Global: flooded population
全球：遭受洪灾的人数
Millions of people
人数（单位：百万）
No climate change
不出现气候变化的情况

US: flooded population
美国：遭受洪灾的人数
Millions of people
人数（单位：百万）
No climate change
不出现气候变化的情况

South Asia: flooded population
南亚：遭受洪灾的人数
Millions of people
人数（单位：百万）
No climate change
不出现气候变化的情况

East Asia: flooded population
东亚：遭受洪灾的人数
Millions of people
人数（单位：百万）
No climate change
不出现气候变化的情况

SE Asia: flooded population
东南亚：遭受洪灾的人数
Millions of people
人数（单位：百万）
No climate change
不出现气候变化的情况

第 90 页图 F2：
Yangtse: annual probability of exceeding current 30-year flood
长江流域：洪水暴发概率超过目前的 30 年一次
Exceedance probability
超过概率
No climate change
不出现气候变化的情况

Huang Ho: annual probability of exceeding current 30-year flood
黄河流域：洪水暴发概率超过目前的 30 年一次
Exceedance probability
超过概率
No climate change
不出现气候变化的情况

Ganges: annual probability of exceeding current 30-year flood
恒河流域：洪水暴发概率超过目前的 30 年一次
Exceedance probability
超过概率
No climate change
不出现气候变化的情况

Indus: annual probability of exceeding current 30-year flood
印度河流域：洪水暴发概率超过目前的 30 年一次
Exceedance probability
超过概率

No climate change
不出现气候变化的情况

Mississippi: annual probability of exceeding current 30-year flood
密西西比河流域：洪水暴发概率超过目前的 30 年一次
Exceedance probability
超过概率
No climate change
不出现气候变化的情况

第 91 页图 F3
2050: probability of number of people affected by flooding increasing by>50%
Probability (%)
2050 年：遭受洪灾人数增加 50% 的概率
概率（%）
West Africa 西非
Cen. Africa 中非
East Africa 东非
Sn. Africa 南非
N. Africa 北非
Middle East 中东
South Asia 南亚
South East Asia 东南亚
East Asia 东亚
Central Asia 中亚
Australasia 澳大拉西亚
W. Europe 西欧
C. Europe 中欧
E. Europe and Russia 东欧和俄罗斯
Canada 加拿大
USA 美国
Central America 中美洲
Brazil 巴西
South America 南美

2100: probability of number of people affected by flooding increasing by>50%
Probability (%)
2100 年：遭受洪灾人数增加 50% 的概率
概率（%）
West Africa 西非
Cen. Africa 中非
East Africa 东非
Sn. Africa 南非
N. Africa 北非
Middle East 中东
South Asia 南亚
South East Asia 东南亚
East Asia 东亚
Central Asia 中亚
Australasia 澳大拉西亚
W. Europe 西欧
C. Europe 中欧
E. Europe and Russia 东欧和俄罗斯
Canada 加拿大
USA 美国
Central America 中美洲
Brazil 巴西
South America 南美

第 92 页图 F4
2050: worst case (SSP2)
2050 年：最坏情况（共同的社会经济路径 2）
Number of people (million)
人数（单位：百万）
West Africa 西非
Cen. Africa 中非
East Africa 东非
Sn. Africa 南非
N. Africa 北非
Middle East 中东
South Asia 南亚
South East Asia 东南亚
East Asia 东亚
Central Asia 中亚
Australasia 澳大拉西亚
W. Europe 西欧
C. Europe 中欧
E. Europe and Russia 东欧和俄罗斯
Canada 加拿大
USA 美国
Central America 中美洲
Brazil 巴西
South America 南美
Worst case 最坏情况

第 94 页图 1：
Number of events per 100 years
每 100 年的事件数量
New York 纽约
Shanghai 上海
Kolkata 加尔各答
Relative sea-level rise 相对的海平面上升幅度

第 97 页图 2：
Max water level rise 最高水位上升
Defra and upper part of new TE2100 likely range
英国食品和农村事务部（Defra）和新的 TE2100 计划可能范围的上端
Top of new H++ range
新的 H++ 范围的顶端
Previous extreme
之前的极端
Improve Thames Barrier & raise d/s defences
改善泰晤士河的屏障，加高防御工事
Over-rotate Thames Barrier and restore interim defences
推翻泰晤士河的屏障，恢复临时的防御工事
Flood storage, improve Thames Barrier, raise u/s &

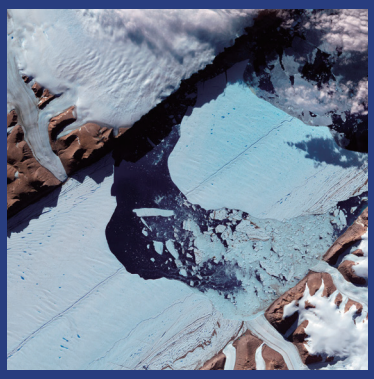
d/s denfences
储存食物，改善泰晤士河的屏障，加高防御工事
Existing system
现有的系统
Raise defences
加高防御工事
Flood storage, over-rotate Thames Barrier, raise u/s & d/s defences
储存食物，推翻泰晤士河的屏障，加高防御工事
Flood storage, restore interim defences
储存食物，恢复临时的防御工事
New barrier, retain Thames Barrier, raise defences
建设新的屏障，保留泰晤士河的屏障，加高防御工事
New barrier, raise defences
建设新的屏障，加高防御工事
New barrage
建设新的拦河坝
Key: predict max water level under each scenario
关键：预测每种情景下的水位
Measures for managing flood risk indicating effective range against water level
控制洪水风险的措施，并说明控制水位的有效范围

第 100 页图 1 和第 101 页图 2：
Sea level (m) 海平面（米）
Temperature (˚C) 温度（˚C）

Blue scenario 蓝色情景
Red scenario 红色情景
Anticipate global sea-level rise (m)
预测全球的海平面上升幅度（米）
Likely 有可能
Very likely 非常有可能
Percentile 百分点

第 105 页图 2：
Melting of Greenland ice-sheets
格陵兰岛冰层融合
Reduction of warming around Greenland
格陵兰岛气温上升幅度下降
Large freshwater input
大量淡水注入
Cooling of north-east tropical Pacific
热带太平洋东北部气温下降
Changes in ocean circulation
海洋环流的变化
Shift of El Nino
厄尔尼诺的转移
Changes in atmospheric water supply
大气水供应的变化
Changes in atmospheric moisture supply
大气水分供应的变化
Amazon dieback
亚马逊热带雨林枯梢病
Changes in water cycle
水循环的变化
Heat to Southern Ocean
南大洋升温
Changes in seawater gradient
海水梯度的变化
Sea-level rise destablising the Antarctic ice-sheet
海平面上升，破坏南极冰盖的稳定性
Drying over Amazonia
亚马逊流域干旱
Warming of Ross and Amundsen Seas
罗斯海和阿蒙森海气温上升
Disintegration of West Antarctic ice-sheet
南极西部的冰盖崩塌

第 115 页图 2：
Global yield (t/ha)
全球产量（吨 / 公顷）
Global yield (t/ha)
全球产量（吨 / 公顷）
Global yield (t/ha)
全球产量（吨 / 公顷）
Period 时间段
Global yield (t/ha)
全球产量（吨 / 公顷）
Global yield (t/ha)
全球产量（吨 / 公顷）
Global yield (t/ha)
全球产量（吨 / 公顷）
Period 时间段



本报告对外公开，保留部分著作权。
浏览 http://www.csap.cam.ac.uk/projects/climate-change-risk-assessment/ 可下载英文原版报告。

主办方：

Harvard University Center for the Environment

清華大學 Tsinghua University

EEW Council on Energy, Environment & Water

CENTRE FOR THE STUDY OF EXISTENTIAL RISK UNIVERSITY OF CAMBRIDGE

Sponsors

Foreign & Commonwealth Office

中国国家气候变化专家委员会

skoll global threats fund

Global Challenges Foundation

Institute and Faculty of Actuaries

Willis