



司法、基础设施和环境事业部

气候复原是否适合作为气候政策目标？

Robert J. Lempert, Giacomo Marangoni, Klaus Keller, Jessica Duke

本文专为兰德帕地长远全球政策
与未来人类处境研究中心撰写

This is a Chinese translation (simplified characters) of *Is Climate Restoration an Appropriate Climate Policy Goal?* RR-2442/1

有关本出版物的更多信息，请查询 www.rand.org/t/RR2442

兰德公司出版，加州圣莫尼卡
版权所有© 2018 兰德公司
RAND® 是兰德公司的注册商标。

有限的平面和电子媒体发行权

本文件和文中所含商标受法律保护。本作品的知识产权归兰德公司所有，不得用于商业用途。未经授权，严禁在网络上发布本作品。本文件仅允许个人复制使用，但不得擅自修改和删节。未经许可，不得复制或以其他形式将兰德公司的任何研究文献用于商业用途。有关翻印和链接授权的信息，请查询 www.rand.org/pubs/permissions。

兰德公司是一家解决公共政策挑战的研究机构，旨在协助推进全球社区的安全、卫生与繁荣事业。兰德公司致力于公共利益，属于非营利性、无党派组织。

兰德公司的出版物未必代表其研究客户和赞助商的观点。

赞助兰德公司

欢迎通过下列网址提供可免税的慈善捐赠

www.rand.org/giving/contribute

www.rand.org

序言

自1992年《联合国气候变化框架公约》通过以来，社会各界在维持稳定的指导思想下，致力于控制气候变化的幅度，换言之，接受一定程度的气候变化，但将其幅度控制在可接受的范围内。本报告初步探讨了气候复原的概念，即设法在一到两代人的时间内将大气中的温室气体浓度恢复到工业化前的水平。兰德帕地中心收到气候复原的早期倡导者费尔科夫斯基夫妇的慷慨捐赠，本报告遂以此为契机，从高度不确定性环境下进行风险管理角度考察气候复原。本报告采用一个简单的综合评估模型，来探讨有可能实现不同气候复原目标的技术、经济和政策条件，以及社会在制定气候复原目标的情况下变得更美好（相对于不制定目标的情况下）的条件。本报告还探讨了有助于管理气候复原风险的短期措施。

本报告面向那些想要了解气候复原概念的读者，以及有志于扩展人类应对气候变化挑战之可选方案的各界人士。

关于兰德帕地长远全球政策与未来人类处境研究中心

兰德帕地中心隶属于兰德创新事业部，其宗旨是通过在一系列最需要的政策领域积极传播和应用新型长期政策分析(LTPA)方法，促进全人类未来的总体生活质量和处境。一直以来，不乏有识之士站在全球视角思索人类的处境或长远前景，但始终缺乏一种系统性和分析性的方法将有关工作与当下的政策决策结合起来。而这正是帕地中心矢志跨越的鸿沟。

如果对本报告有任何疑问或意见，请与首席作者Robert J. Lempert (Robert_Lempert@rand.org)联系。有关帕地中心及其属下其他项目和倡议的信息，可在网上查询(www.rand.org/pardee)。有关帕地中心活动和项目的其他查询，请通过Robert_Lempert@rand.org与帕地中心主任Robert J. Lempert 联系。

兰德基础设施、适应性与环境政策项目组

本项目在兰德基础设施、适应性与环境政策项目的配合下实施。基础设施、适应性与环境政策项目组关注城市化以及其他发展问题，其研究课题包括基础设施建设、基础设施融资、能源政策、城市规划和公私合作的角色、交通运输政策、气候应对、减缓和适应、环境可持续性、水资源管理和海岸防护。项目研究从政府机构、基金会以及私营部门获得资助。

兰德司法、基础设施与环境事业部从事下列领域的研究与分析：民事及刑事审判，基础设施发展和融资，环境政策，交通规划和技术，移民和边防，公共和职业安全，能源政策，科学和创新政策，太空，电信，以及人工智能及其他计算技术的趋势和影响。有关兰德基础设施、适应性与环境政策项目组的更多信息，请查询 www.rand.org/jie/irep 或通过 irep@rand.org 与项目组主任 Benjamin Preston 联系。

目录

序言	iii
图目录	vi
表目录	vii
内容摘要	viii
鸣谢	x
缩略语	xi
1. 引言	1
2. 气候复原与风险	4
气候复原技术	6
考虑权衡取舍	7
模拟模型等探究	10
3. 计算实验	12
4. 模拟结果	16
气候复原可行的条件	16
管理额外风险	20
气候复原发挥催化作用的条件	22
政策持久性	25
5. 结论与建议	28
附录：对DICE模型的修正	32
参考文献	35

图目录

图2.1. 有无气候复原情况下的大气层温室气体浓度	4
图4.1. 2050年复原目标和2100年复原目标的浓度路径	17
图4.2. 在648种前景中分别实现每个气候目标的最高年度成本	18
图4.3. 在年度成本不超过2% GWP的前提下分别实现2°C目标、 2100年复原目标及2100年复原目标暨2°C目标的条件	19
图4.4. 不同目标对应的浓度和气温路径	21
图4.5. 追求2100年复原目标会不会引发道德风险的条件	24
图4.6. 在选定前景中脱碳与碳捕获之间的资金流动	26

表目录

表2.1. 乌托邦—敌托邦矩阵显示在与气候复原目标相符（绿色）和 不符（浅红色）的前景中追求目标所产生的后果.....	9
表3.1. 分析中的关键因素.....	13
表4.1. 低成本路径的占比.....	17
表4.2. 实现气候目标所需的情景及其综合测验的密度/覆盖率标准	20
表4.3. 图4.5中各种情景之代表性前景的参数值	24
表4.4. 最佳和最差DAC情景之代表性前景的参数值.....	24
表A.1. 表2.1所列举的不确定性对应的DICE参数名称.....	34

内容摘要

气候复原是否适合作为人类应对气候变化的目标？长期以来，宏伟的目标一直推动着气候政策。举例来说，《巴黎协定》呼吁将全球平均气温的升幅控制在2°C以内。这样宏伟的目标会让地球气候在千年内发生重大变化。因此，支持者提出了气候复原这一愈加雄心勃勃的目标，旨在使地球气候恢复到工业革命开始之前的状态。

支持者设想了多种类型的气候复原，而其中一种备受关注同时也是本研究的焦点，即在一到两代人的时间内使温室气体浓度恢复到工业化前的水平——300ppm。气候复原支持者的动机似乎包括：目标简单而纯粹；在巨大的挑战前有机会催化创新；以及避免概率不大但后果严重的极端气候影响风险。另一方面，气候复原是一项艰巨的任务，在实施过程中，有可能挤占其他气候变化应对措施的资源，或者削减对其他远大的气候目标的投入，从而产生不利影响。

因此，本报告从风险管理的角度考虑气候复原。广义而言，风险是指不确定性对目标的影响。风险管理试图了解不确定性的影响，并设法增加有利的机会、减少不利的风险。这一宽泛的定义强调，风险管理通常必须在高度不确定性环境下进行，其中受风险影响和处置风险的相关各方并不了解或认同备选前景的可能性，抑或其行为与后果有何关联。即使不制定复原目标，气候变化也构成高度不确定性下风险管理的典型挑战。制定了气候复原目标后，高度不确定性下的风险管理这一概念的相关性更加突出。

为帮助判断气候复原目标的适当性，我们运用增强版的动态综合气候—经济(DICE)模型，结合有关从大气中提取碳的技术成本与性能、温室气体减排技术的成本与性能、以及未缓和气候变化的严重性等不同假设，来探究在各种可能前景中追求气候复原的后果。虽然在一系列提案的基础上几经简化——包括专注于直接空气捕获(DAC)，分析还是得出了关于证明气候复原可行的前景以及证明追求气候复原具有催化作用的前景的有用结论。

如果气候复原证明是可行的，换言之，如果社会能够以合理的成本重返工业化之前的温室气体浓度，这将降低极端气候影响的风险，并提高

实现其他气候目标的可能性。成功的气候复原需要在未来实现相当于目前最乐观假设的DAC技术成本与性能。如果追求气候复原证明具有催化作用（即提高广泛部署负排放技术的可能性），则能够为降低气候风险开辟迫切需要的技术路径，尤其是实现2°C目标的其他路径。然而，即使追求气候复原提高了DAC部署的可能性，同时也会降低脱碳的可能性，进而抵消整体的有益效果。本研究表明，追求气候复原可避免这种道德风险，即在DAC成功的可能性至少达到脱碳成功一半的条件下创造净催化效应。

分析还表明，有助于管理气候复原风险的短期措施可能包括，把这些目标与2°C目标相结合以降低超调的风险，以及为可能代价不菲的公益事业制定适当的长期融资机制。此外，模型动态显示，雄心勃勃的气候复原目标可能寻求在二十一世纪末（大概是2075年前后，即工业革命300周年的时候）使二氧化碳浓度恢复到工业化前的水平。

鸣谢

彼得·费尔科夫斯基的慷慨捐赠，以及他引人入胜的一席谈话，激发了我们研究气候复原的兴趣。本研究由兰德帕地长远全球政策与未来人类处境研究中心以及宾夕法尼亚州气候风险管理中心共同赞助。在此，我们衷心感谢Edward Parson和Michelle Miro两位报告审核人提出见地非凡的反馈和建议，同时感谢Brent Constantz、Peter Eisenberger、David Keith及Klaus Lackner拨冗参与有益的讨论。Elke Weber、Gabrielle Wong-Parodi、Nancy Tuana以及Robert Nicholas也提供了宝贵意见。我们未察觉与任何作者存在实际或感知的利益冲突。本报告中的任何结论或建议皆系作者之见解，不一定反映赞助机构的观点。当然，有关谬误和意见也出自作者。分析所用的结果、模型代码、分析代码、以及数据和模型输出，将根据GNU通用公共许可证发布。本报告中的数据集、软件工具等资源均按原样提供，不附带任何性质的明示或默示保证。在任何情况下，对于使用这些资源所产生的任何主张、损害赔偿或其他责任，作者或著作权人概不负责。

缩略语

BECCS	生物能源结合碳捕获和封存
CO ₂	二氧化碳
DAC	直接空气捕获
DICE	动态综合气候—经济模型
GDP	国内生产总值
GHG	温室气体
GWP	世界生产总值
IPCC	政府间气候变化专门委员会
ppm	百万分率
RDM	鲁棒决策

1. 引言

气候复原是否适合作为人类应对气候变化的目标？长期以来，宏伟的目标一直推动着气候政策。《巴黎协定》呼吁将全球平均气温的升幅控制在2°C以内（自工业革命以来，全球气温已上升约1°C）。倡导团体呼吁将大气中的温室气体浓度降到350ppm以下，而目前大约为400ppm。这些宏伟的目标会让地球气候在千年内发生重大变化。因此，支持者提出了气候复原这一愈加雄心勃勃的目标，旨在使地球气候恢复到工业革命开始之前的状态。

支持者设想了多种类型的气候复原，而其中一种备受关注同时也是本研究的焦点，即在一到两代人的时间内使温室气体浓度恢复到工业化前的水平——300ppm。¹ 由于二氧化碳这种最重要的温室气体会在大气层中滞留几个世纪之久，气候复原需要从大气中提取温室气体。但是，提取大气中二氧化碳的需要超越了气候复原。要实现《巴黎协定》的2°C目标，需要一并推行快速脱碳和所谓的“负排放”，近年来这一点越来越明确。快速脱碳涉及改造能源、交通和建筑环境，以减少人类的温室气体排放；而负排放涉及去除大气中已经存在的温室气体。政府间气候变化专门委员会(IPCC)制定了实现2°C目标的各种情景，无一不包括大量的负排放，很大程度上是从生物燃料动力能源所产生的排放中分离出来的（称为BECCS，生物能源结合碳捕获和封存）。负排放将在未来几十年开始，然后随着（“正”）排放下降，在2050年以后使大气中的温室气体净减少（Clarke等人，2014年）。气候复原设想负排放技术（特别是直接空气捕获(DAC)）不断推陈出新，并大大加快其部署的规模和速度。

气候复原支持者似乎有多重动机。设想恢复到某种原始状态往往会激发环保行动（Purdy，2015年）。气候复原是一个简单而纯粹的目标，而这正是《巴黎协定》的数值化目标所欠缺的。在巨大的挑战面前也有机会催化创新（Omenn，2006年）。因此，气候复原目标可以加快迫切需要的负排放技术创新。总而言之，这两项因素极可能营造一幅好

¹ 示例见气候复原促进组织“健康气候联盟”（日期不详）。

局面：追求气候复原目标可能会增加社会克服气候变化挑战的意愿、兴趣和手段。虽然大多数经济分析显示，社会应接受一定程度的气候变化（Nordhaus, 1994年；Drouet、Bosetti和Tavoni, 2015年），但实现气候复原可以避免概率不大但后果严重的极端气候影响风险。当前行动与将全球平均气温升幅控制在2°C以内的要求相去甚远，也令许多关注气候变化的人感到失望（示例见Schleussner等人, 2016年）。支持者认为，气候复原通过更引人注目的远大目标打破了这种自满情绪。对一些环保意识强烈的人来说，使气候恢复到工业化之前的状态似乎是应有之义。

另一方面，气候复原是一项艰巨的任务，在实施过程中，有可能挤占其他气候变化应对措施的资源，或者削减对其他远大的气候目标的投入，从而产生不利影响。因此，本报告从风险管理的角度考虑气候复原（Renn, 2008年）。广义而言，风险是指不确定性对目标的影响（Jones等人, 2014年）。风险管理试图了解不确定性的影响，并设法增加有利的机会、减少不利的风险。这一宽泛的定义强调，风险管理通常必须在高度不确定性环境下进行，其中受风险影响和处置风险的相关各方并不了解或认同备选前景的可能性，抑或其行为与后果有何关联（Lempert等人, 2003年）。即使不制定复原目标，气候变化也构成高度不确定性下风险管理的典型挑战。制定了气候复原目标后，高度不确定性下的风险管理这一概念的相关性更加突出。

为帮助判断气候复原目标的适当性，我们运用了简单的模拟，结合有关负排放技术的成本与性能、温室气体减排技术的成本与性能、以及未缓和气候变化的严重性等不同假设，来探究在各种可能前景中追求气候复原的后果。虽然在一系列负排放技术的基础上几经简化——包括专注于直接空气捕获(DAC)，分析还是得出了关于证明气候复原可行的前景以及证明追求气候复原具有催化作用的前景的有用结论。

如果气候复原证明是可行的，换言之，如果社会能够以合理的成本重返工业化之前的温室气体浓度，这将降低极端气候影响的风险，并提高实现其他气候目标的可能性。成功的气候复原需要在未来实现相当于目前最乐观假设的DAC技术成本与性能。如果追求气候复原证明具有催化作用（即提高广泛部署负排放技术的可能性），则能够为降低气候风

险开辟迫切需要的技术路径，尤其是实现2°C目标的其他路径。然而，即使追求气候复原提高了DAC部署的可能性，同时也会降低脱碳的可能性（Campbell-Arvai等人，2017年），进而抵消整体的有益效果。研究表明，追求气候复原可避免这种道德风险，即在DAC成功的可能性至少达到脱碳成功一半的条件下创造净催化效应。

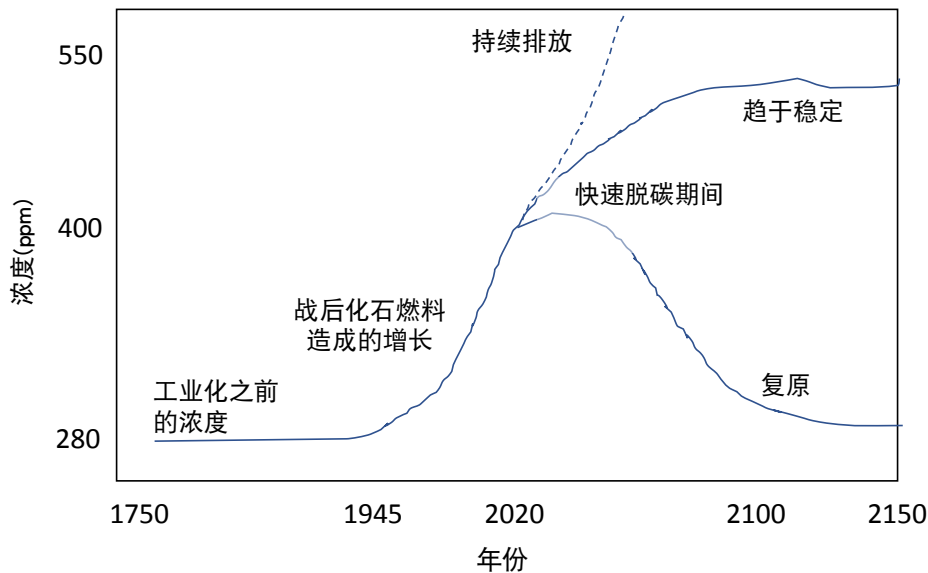
分析还表明，有助于管理气候复原风险的短期措施可能包括，把这些目标与2°C目标相结合以降低超调的风险，以及为可能代价不菲的公益事业制定适当的长期融资机制。此外，模型动态显示，雄心勃勃的气候复原目标可能寻求在二十一世纪末（大概是2075年前后，即工业革命300周年的时候）使二氧化碳浓度恢复到工业化前的水平。

2. 气候复原与风险

几千年来，人类的平均生活水平变化不大。十八世纪初普通家庭的物质财富和能源消费水平与古代普通家庭相当（Maddison，2001年）。工业革命打破了这种停滞不前的局面，主要是得益于化石燃料的消费，先是煤炭，然后是石油，经济随之快速发展，生活水平得以提升。这种急速上升始于欧美，随后，特别是第二次世界大战以后延伸到全球。在过去的七十年里，全球经济增长了十倍以上。光是过去二十年，就有十亿人摆脱了极端贫困（《经济学人》，2013年）。

同时，上述经济活动显著改变了地球大气层的成分。如图2.1所示，目前吸热温室气体的浓度比十八世纪八十年代约280ppm的水平高出40%，其中四分之三的增幅发生在上世纪七十年代以后。温室气体在大气层中驻留了几十年甚至数百年，已开始给地球的气候带来明显变化。由于温室气体长期驻留，加上地球气候系统的热惯性，即使现在停止一切排放，气候仍将持续变化数十年。

图2.1. 有无气候复原情况下的大气层温室气体浓度



作为回应，世界各国已承诺（至少在名义上）将大气层温室气体浓度稳定在一定水平，以免气候变化带来危害（《联合国气候变化框架公约》，1992年）。要选择一个安全的稳定水平，需要经过道德评价和科学判断，但不公平的后果则使问题复杂化。穷人和那些生活在特别脆弱地区（如地势低洼的岛国）的人们，可能比富人和那些生活在其他地区的人们受到更严重的气候变化影响。除此之外，对于特定水平的温室气体会产生什么后果，有关科学认识也存在高度不确定性（示例见Moss，1995年；Keller等人，2005年；Drouet、Bosetti和Tavoni，2015年）。

国际社会已确定一个目标：将全球平均气温升幅控制在不超过工业化之前2°C的水平。¹ 该目标意味着目前尚不确定温室气体浓度要稳定在什么水平，其范围从略高于到远超过工业化之前的水平。对应2°C目标的浓度水平在某种程度上取决于气候敏感性的数值，这是一项关键的科学不确定性，反映地球气候对温室气体浓度上升的反应（示例见Rogelj等人，2014年；Olson等人，2012年；D. Harvey，2007年；Weitzman，2012年）。

无论社会认为哪个气温上限是安全的，其实现方式一般都需要快速脱碳。换言之，在几十年的时间里，全球经济要从目前80%以上能源依赖化石燃料，转变成既满足约90亿人的需要而温室气体净排放为零或很少的理想状态（Harvey等人，2013年）。这将需要显著提高全球能源、交通运输、建筑、工业和农业等部门的能效，并淘汰燃烧化石燃料的传统做法，改用诸如可再生能源、核电或碳捕获和封存等多种能源。这一转型意味着，为了达到发展目标，未来几十年全球大概需要在能源、交通运输和其他基础设施系统上投入数十万亿美元（政府间气候变化专门委员会，2014年）。脱碳可能会使这些成本增加几个百分点，而且肯定会有数十万亿资金从全球各地和不同的经济部门流出（Keller等人，2005年；Clarke等人，2014；政府间气候变化专门委员会，2014年）。

气候复原设想在此项脱碳工作的基础上迈出更大一步——部署大量人造设备并加强生物物理工艺，提取大气中已存在的多余二氧化碳。根据政府间气候变化专门委员会（Clarke等人，2014年）及其他机构（白宫，2016年）制定的最新情景，设想通过以下方式达到2°C目标：纳入来自土地治理和种植生物燃料作物（植物靠从大气中吸收碳来生长）等来

¹ 《巴黎协定》全文可在网上查阅（联合国，2015年）。

源的负排放，燃烧这些燃料产生能量，然后捕获所排放的二氧化碳并封存在地下。如图2.1所示，气候复原将使上述活动的时机提早成熟，规模和范围大大扩展。

气候复原技术

从大气中提取二氧化碳的方法多种多样。最直接的方法莫过于重新造林（即植树）连同改善农业用地和天然土地的治理。重新造林和改善土地治理虽有助益，但单靠此法不能达到从大气中去除二氧化碳的要求（Psarras等人，2017年）。可以规模化部署的技术包括DAC、BECCS以及增强型生物物理系统，例如，海洋铁肥、增强风化和海洋碱化（Buesseler等人，2008年）。本报告侧重于DAC，因为该技术似乎对外界的影响最小，譬如破坏生态系统和占用农田方面。

许多新企业目前正在研发DAC技术。²大多数人设想有一天会部署成千上万台环境空气处理机器。批量生产这些机器可以形成规模经济，从而降低成本。机器内的化学反应会提取二氧化碳。一种DAC技术采用阴离子交换树脂，在干燥时吸收二氧化碳，在潮湿时则释放二氧化碳（Lackner，2013年）。树脂经过烘干后，暴露在环境空气中，再把树脂送回受潮室，捕获所释放的二氧化碳，然后无限地重复该过程。另一种技术采用湿捕获方案来达到类似的效果。举例来说，Carbon Engineering已开发出一种工艺：利用二氧化碳与氢氧化钙溶液反应生成碳酸钙颗粒，再经过分解释放纯二氧化碳加以封存。该公司预计，达到商业规模后，每年可捕获100万吨二氧化碳，捕获、提纯和压缩成本为每吨100~150美元（Keith等人，2015年）。

捕获的碳可以封存在条件适合的地质层中，比如那些蕴藏石油和天然气达数百万年的地质层。更有趣的是，一些支持者设想将捕获的碳制造成混凝土和骨料等建筑材料加以封存，用于建设面向二十一世纪的城市和其他基础设施。截止至本世纪末，全球中产阶级人口有望达到90亿以上。这些用捕获碳制成的产品是否有市场，还不得而知。但是，作为一种可行的建议，Blue Planet公司开发出一种工艺：空气通过溶解二氧化碳的溶液后，与钙离子(Ca²⁺)结合成碳酸钙（Constantz和Bewernitz，2014年）。碳酸钙层包裹颗粒形成骨料，再与水泥混合形成混凝土。该公司

²有关公司的名单见Air Miners网站（Air Miners，日期不详）。

目前向旧金山国际机场销售骨料用于航站楼整修工程，而这些骨料就是用捕获碳结合从混凝土废料中提取的钙³制成，据说这一商业模式实现了盈利。⁴

DAC技术的热力学要求有别于那些从化石燃料发电厂的排放物中提取碳的工艺。此类排放物的二氧化碳浓度约为30,000ppm（Zevenhoven和Kilpinen，2001年），而脱碳装置的目标是提取近100%的逸出温室气体。DAC技术处理的空气当中温室气体浓度要低得多，从某种角度看难度更大。但是，有效的DAC工艺只需提取通过空气中约一半的二氧化碳，这样可以保证高效运行。根据Lackner（2013年）的测算，像他那样的工艺在90%的理论热力学效率下，可以将二氧化碳浓度从400ppm降到200ppm。相应的能量需求很低，理论下限约为20千焦/摩尔二氧化碳，占燃烧产生每摩尔二氧化碳所释放能量的5%左右。此外，DAC技术通常只需要低等级（因而通常是低成本）的余热，例如烘干Lackner的树脂所用的余热。

虽然未来的DAC工艺也许会达到很高的热力学效率，但需要投入大规模运营才能起到实质性的气候复原作用。为了从大气中提取1吉吨(Gt)的二氧化碳，使二氧化碳浓度从400ppm下降到200ppm，机器需要处理5,000吉吨的空气，这些空气大致能以20米的厚度覆盖地球陆地面积。成本估算范围极大，这也在意料之中。倡导者设想低成本的能源及其他投入，结合在实践中不断精进和大规模生产来降低制造与运营成本，直接捕获成本可低至约50美元/吨二氧化碳。因此，这些机器处理5,000吉吨空气的成本约为500亿美元。目前，人类社会每年生产数百万辆汽车，汽车作为一种非常复杂、滥用严重但高度可靠的机器，以每磅计算成本与牛排大致相当。这些汽车的水箱每年也处理约5,000吉吨空气。DAC工艺能否达到这样的成本与性能水平，目前还不得而知。

考虑权衡取舍

人们经常以不同的世界观看待可能具有颠覆性的争议话题，比如气候复原。世界观包含一系列连贯的政策偏好，对未来的期望，有关世界如何运行的心理模型，以及重视的目标。梳理这些世界观，并探究为何我们追求适合一种前景的政策却出现不同的前景，或有助于了解相关的风险与机会。

³ 其他可能的钙源包括来自海水淡化厂和污水处理厂的盐水，这些工厂会产生含过量阳离子水。天然的海水和地质盐水也可以作为钙源。

⁴ 消息来自与Blue Planet首席执行官Brent Constantz的私下交流。

表2.1采用所谓的“乌托邦—敌托邦”矩阵来说明这种情况（van Asselt和Rotmans，1997年）。右边两栏列举了两个短期政策选项：追求气候复原或不追求气候复原。每行显示相关的前景，不同的选择使得每条政策都至少有一种与之相符（绿色）的前景以及一种与之不符（浅红色）的前景。前者代表“乌托邦”式（至少在某些情况下）的理想结果；后者代表可能上升到“敌托邦”程度的不利后果。表2.1各行涵盖了三种前景，分别标记为：“气候复原可行”，“气候复原不可行但可能有催化作用”，以及“气候复原既不可行又没有催化作用”。在第3章中，本研究的建模实践提供了更精确的定义。就目前而言，我们注意到这些前景突出了追求气候复原目标可能会导致理想结果的两条路径。追求该目标也许确实可以复原气候，即大气中的二氧化碳浓度恢复到300ppm。抑或者，追求该目标可能达不到300ppm，但仍然有助于促进负排放技术的普及和强化公众应对气候变化的承诺。

如表2.1第一行所示，在二十一世纪将大气中的二氧化碳浓度切实降到300ppm可能具有重要意义。首先，在许多情况下（但并非全部，具体如下所述），达到其他气候目标（如2°C）是气候复原的子集，换言之，在许多情况下达到300ppm将在本世纪末之前使全球平均气温升幅控制在2°C以内。此外，气候复原可以减少极端气候影响的风险——甚至超出《巴黎协定》目标所列举的风险。气候是一个超越已知界限的复杂系统。许多地球系统运转的时间尺度为几十年甚至更长，例如，海洋变暖、冰原溶化以及生态系统的变化（Applegate等人，2015年；Hansen等人，1984年）。科学对温室气体浓度升高的影响不尽了解。因此，无法保证该系统不会接近甚至超过风险临界线，举例来说，格陵兰和南极冰原不可逆的融化，可能导致海平面上升好几米（Alley等人，2005年；Kriegler等人，2009年）。此外，几年内看似安全的温室气体水平，在几十年后未必仍然安全。气候复原如取得成功，可以带来一些保障，避免（推测起来）概率不大但后果严重的气候影响。

如表2.1第二行所示，即使证明不可能达到300ppm，追求气候复原目标有助于强化公众应对气候变化的承诺和促进负排放技术的部署。即使对于脱碳的假设相对乐观，要实现2°C目标在一定程度上仍需要这些技术。负排放技术越普及，对一条或多条脱碳路径失败的对冲作用越大，从而更有可能达到2°C目标。

**表2.1. 乌托邦—敌托邦矩阵显示在与气候复原目标相符（绿色）和
不符（浅红色）的前景中追求目标所产生的后果**

未来世界	短期行动	
	追求气候复原	不追求气候复原
气候复原可行	<ul style="list-style-type: none"> 减少气候变化风险 实现其他气候目标 <p>要管理的额外风险：</p> <ul style="list-style-type: none"> 气温超调 过度依赖负排放 资金需求与可用收入之间存在暂时错配 达到大规模后减缓负排放 	<ul style="list-style-type: none"> 增加气候变化风险 降低实现其他气候目标的可能性（道德风险）
气候复原不可行 但可能有催化作用	<p>下列原因提高了实现2°C目标的可能性</p> <ul style="list-style-type: none"> 强化公众应对气候变化的承诺 负排放技术引起更多关注 <p>要管理的额外风险：</p> <ul style="list-style-type: none"> 不能妥善处理失败 	<p>降低实现其他气候目标的可能性（道德风险）</p>
气候复原既不可行 又没有催化作用	<ul style="list-style-type: none"> 在高成本、无效的工作上浪费资源 降低实现其他气候目标的可能性 	<ul style="list-style-type: none"> 避免高成本、无效的工作 避免分散更有效活动的资源

本研究不展开分析气候复原目标（相对于2°C目标）所带来的额外机会，对于激励企业家和融资方追求负排放发挥多大作用，也无意评估气候复原作为应对气候挑战的备选框架怎样强化公众承诺。不过，我们大可提出一些假说。

气候复原支持者强调，其他气候目标旨在限制人类造成的破坏，而气候复原旨在促使地球气候恢复到以化石燃料驱动的工业革命开始之前的状态。支持者还强调，新技术令人备感振奋。对于后者，心理学家发现，许多人只有在获知可接受的解决方案时，才承认问题的严重性。⁵ 气

⁵ 根据行为决策学，大多数证据表明，风险信息与具体计划相结合，不仅会提高感知风险，还会促使行为改变（Fischhoff和Davis, 2014年）。这一发现在公共卫生领域尤为明显（Leventhal, 1965年；Witte和Allen, 2000年），也见于气候风险传播文献（Pidgeon和Fischhoff, 2011年）。

候复原——特别是若捕获的碳被回收制成建材而不是封存在地下，就原本可能棘手的挑战提出一套看似精妙且无害的技术方案。

对于前者，气候复原似乎强调一种纯洁感，目标是让大气层恢复到较早时期、污染较小的状态。更广义地说，环境思想家杰迪戴亚·珀迪（2015年）界定了几个世纪以来美国环境思想的四个代表性流派：神恩主义，只要人们辛勤劳动、发挥才智，大自然就会满足人类的需要；浪漫主义，注重原始自然的美学和精神价值；功利主义，认为大自然是需要科学管理的资源宝库；以及生态主义，认为大自然是一个相互关联的复杂系统，可能会以意想不到的方式回应人类的干预。支持者可能认为，气候复原让所有问题迎刃而解，既与神恩主义和功利主义的观点产生共鸣，不会冒犯生态主义，又可以挽救浪漫主义。

另一方面，表2.1第三行指出，如果气候复原既不可行又没有催化作用，追求此目标会浪费资源并降低实现其他气候目标的可能性。社会有许多需求，而应对气候变化的资金必然是有限的。专注于气候复原可能会减少对最终证明更有效的其他技术的短期投资。如果我们对于从大气中去除二氧化碳并安全封存的能力盲目自信，也许会削弱公众承担首先不排放温室气体的短期代价的承诺。追求最终证明不可行的气候复原目标，可能会影响其他远大气候政策目标的正当性。

在气候复原可行或有催化作用的前景中追求气候复原，也可能产生需要管理的额外风险，具体见表2.1前两行。这些风险以及气候复原所带来的整体权衡取舍，是本报告其余部分的主题。

模拟模型等探究

为了阐明这些权衡取舍，量化表2.1中的前景，并建议可平衡风险与回报的短期行动，我们运用了简单的模拟模型，来评估气候复原在气候、技术和经济等条件高度不确定下的前途。我们在所谓鲁棒决策(RDM)的多情景决策分析过程中采用模拟，这是在高度不确定性进行风险管理的主要方法（Lempert等人，2003年；Lempert等人，2006年）。该研究探讨了在一系列看似合理的前景中追求气候复原目标的后果，有关前景包括DAC技术能否发展成为具吸引力的方案，以及此项技术与高成本或低成本的脱碳方案共存。这些探索有助于量化表2.1所列的权衡取舍。

由于模拟模型必然是对现实的狭义抽象（尤其是本研究使用的模型），本研究还考虑了模拟未包含的因素可能对其结论造成的最大影响。最重要的是，建模将DAC技术视作唯一的负排放源，因此本研究的讨论试图从这个狭小的焦点展开归纳。同样，本研究通过多情景建模探索了广泛的前景，但忽略了每次模拟运行中的学习。因此，本研究只是定性探索了不断变化的环境导致气候政策目标随时调整的路径，不论是因为目标显然难以达到，还是因为短期内追求目标会催化技术突破，从而为未来开辟新的可能性。

总体而言，模拟多情景建模以及据此得出的评论意见初步解答了三个问题：

1. 关于技术成本、性能等因素什么样的假设组合与认为气候复原可行的前景相符？
2. 气候复原目标有催化作用意味着什么？
3. 在气候复原似乎可行或有催化作用的前景中如何管理气候复原的风险？

3. 计算实验

与许多RDM实践相似，本研究采用“XLRM”框架（Lempert等人，2003年）来帮助指导模型开发和数据收集。表3.1所示的XLRM框架非常有用，它有助于把相关因素组织起来，纳入到以决策为中心的分析中。X、L、R和M等字母指的是对RDM分析很重要的四类因素：量化决策者寻求实现的目标的指标(M)；决策者用来追求这些目标的政策杠杆(L)；影响政策选择与结果之间的联系的不确定性(X)；以及结果与不确定性和杠杆的关系(R)，在模拟模型中通常会实例化。

本研究将追求特定气候复原目标的短期决策当作政策杠杆，然后分析探讨了这种选择可能产生的积极和消极后果。特别是，我们将追求下列其中一个气候目标的选择作为**政策杠杆(L)**：

- 2°C目标：到2100年将全球平均气温升幅控制在2°C以内。
- 2050年复原目标：到2050年将大气中温室气体浓度降至280ppm。
- 2100年复原目标：到2100年将大气中温室气体浓度降至280ppm。
- 2100年复原目标暨2°C目标：到2100年将大气中温室气体浓度降至280ppm并将全球平均气温升幅控制在2°C以内。

我们假设追求气候目标的短期决策会产生两方面的效果：其一、将社会导入规划的路径，结合脱碳与碳捕获来达成目标；其二、推动该路径贯彻实施所需的短期研究、投资和政策。对于第一方面，分析推算了与每个目标相符的最优减排与碳捕获和封存路径，汇报相应的成本、资金流动及气温/浓度路径作为成果。对于第二方面，研究考虑了短期内追求目标可能会影响脱碳和DAC技术的未来成本与性能。

为了初步评估这些目标的影响，我们采用2016年动态综合气候—经济(DICE)模型的修正版作为**关系(R)**（Nordhaus，2017-a）。DICE模型是一种高度聚合和常用的综合评估模拟，它将Ramsey经济增长模型与气候系统的简化表示相结合（美国国家科学、工程与医学研究院，2016年）。DICE模型从传统的单一目标、功利主义社会福祉角度，计算最佳的长期温室气体减排路径（Adler等人，2017年）。本研究认为政策杠杆是最优化的制约因素。

表3.1. 分析中的关键因素

不确定性(X)	政策杠杆 (L)
<p>DICE模型参数:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 气候敏感性 [2°C、3.1°C、4.5°C] • 温室气体减排成本 [225、450、650美元/吨二氧化碳] • 碳捕获 <ul style="list-style-type: none"> ○ 成本[50、200、500美元/吨二氧化碳] ○ 普及速度 [5%、10%、15%/年] • 封存碳的半排出期 [150年、5,000年] • 碳产品市场 <ul style="list-style-type: none"> ○ 边际成本 [0、-50美元/吨二氧化碳] ○ 市场规模 [1、10 吉吨碳/年] 	<p>目标:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 2°C目标 • 2050年复原目标 • 2100年复原目标 • 2100年复原目标暨2°C目标
<p>后处理模型结果的参数:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 复原目标的影响 <ul style="list-style-type: none"> ○ 减排成本 ○ 碳捕获成本 	
关系(R)	指标(M)
<ul style="list-style-type: none"> • DICE模型 <ul style="list-style-type: none"> ○ 修正后纳入脱碳和两种封存 ○ 使用优化社会福利现值的减排和碳捕获轨迹 	<ul style="list-style-type: none"> • 社会福利净现值 • 减排和碳捕获的年度成本 • 气候变化造成的灾害 • 最高全球气温和大气浓度 • 达到气候目标的最高年度成本

气温目标被定义为从2100年起保持的一个上限阈值，与《巴黎协定》等大部分气候政策框架一致，这些框架默许任何阈值超限的容忍幅度和持续时间（Geden和Löschel, 2017年）。同样，复原目标被定义为从指定日期（2050年或2100年）起保持的上限阈值。

Keller、McInerney和Bradford（2008年）的前期研究把DAC纳入到DICE模型。除了在鲁棒决策分析中采用该模型外，我们还结合两种封存方案（一种是地下封存，另一种是制成骨料和水泥等建材）加强了Keller、McInerney和Bradford（2008年）的表示法。模型方程的完整列表载于附录。

在我们的DICE模型中，DAC技术表示为直接降低大气中温室气体浓度，并假设DAC会增加能源需求（3.64艾焦/吉吨从大气中去除的二氧化碳），捕获每吨二氧化碳的单位成本不变，以及每年的部署增长率最大化。为简单起见，我们在本研究中省略了Keller、McInerney和

Bradford（2008年）原本考虑在实践中不断精进所带来的成本下降。因此，假定的DAC成本代表学习发生后的渐近值。这种简化会高估短期内的碳捕获数量，但对累积核算几乎没有影响。例如，当运行在实践中不断精进的模型版本时，90%以上的碳捕获发生在成本从初始值大幅下降至渐近值以后。

在该模型中，运用DAC技术捕获的碳可以封存在地下。这个过程以捕获成本中包含的固定单位成本和泄漏率表示，而泄漏率与累计封存量成比例，会增加大气中的温室气体浓度。运用DAC技术捕获的碳也可以封存在建材中。这个过程以固定的边际成本（可能是负数，反映销售相关材料的潜在收入）与此类销售的最大年市场规模（假设始终不变）表示。

DICE模型会计算从2015年起至2260年为止期间减排和碳捕获的部署时间序列，步长为五年。每条计算出的路径都符合指定的气候政策目标，并使用单一目标功利主义函数最大化社会福祉的净现值。作为附加**指标(M)**，该模型报告了这些技术的每年部署率和成本，连同全球气温、温室气体浓度以及气候变化造成的灾害。该模型还报告了任何给定年份的最高成本、气温和温室气体浓度。本研究使用这些指标比较备选路径的合适性和追求备选气候目标的潜在后果。

运行一次DICE模型，即可针对许多可能的世界前景分别提供最佳的减排、碳捕获和封存时间序列，惟受气候目标的选择所约束。这些时间序列取决于假定的前景，而前景以表3.1所示七项**不确定性(X)**中每种对应的一组数值来表示。在每种前景中，模型在假定完全信息的情况下测算最优路径。每条脱碳路径以排放控制率的时间序列表示，任何时间段内的0%控制对应完全依赖化石燃料，而100%控制对应使用可再生能源、核能和其他脱碳方案等最具成本效益组合的完全无碳能源系统。本研究没有试图计算短期路径如何对冲不确定性，或者探寻响应新信息的适应性路径（Keller等人，2004年），而是通过比较不同前景中的最优路径得出见解。

不确定的输入参数会对模型结果造成不同的影响。气候敏感性模型输入参数值的不确定性会影响达成2°C目标的难度，参数值越高，相同的累计排放量增幅会造成越大的暖化效应。模型将温室气体减排成本表示为排放控制率的幂函数，指数为2.6，表示随着无碳比重的增长，提供可靠和廉价能源的难度越来越大。这些成本的不确定性以幂函数上限的系数表示，并影响达到气候目标的最佳减排量。随着外源性技术的进步，该

上限成本会随时下降。DAC技术的成本与性能的不确定性以从大气中提取一吨二氧化碳的固定成本和每年碳提取量的最高增长率（普及速度）来表示。DAC技术所产生碳的市场不确定性以每吨提取碳的负成本（例如收入）和创收产品中可售碳量的年度上限来表示。这些不确定的参数都会影响达到气候目标的最佳碳捕获量。模型假设未作产品出售的碳被封存在地下。我们没有明确考虑从发电厂排放物中捕获碳的封存需求。因此，我们把DAC技术与化石燃料发电厂碳捕获之间在封存需求上的潜在冲突留待将来考虑。

表3.1所示的气候敏感性和温室气体减排成本值跨越报告估计值的合理子集（示例见Olson等人，2012年；Drouet、Bosetti和Tavoni，2015年；Knutti、Rugenstein和Hegerl，2017年）。碳捕获成本和普及速度的范围反映了近期评估（美国国家研究委员会，2015年）以及对企业家和倡导者的访谈结果。⁷碳产品的利润和市场规模的下限为零（即没有市场），上限为企业家和倡导者的设想值。

除另有注明外，我们考虑了所有四个目标的各项不确定性，特别是针对2°C和复原目标分别考虑了对DAC技术的各种成本与性能假设。

对模型结果进行后处理时，我们还采用了两项额外的不确定参数，如表3.1所示，该等参数以高度抽象的方式表示在短期内追求气候复原目标，可能会提高未来诞生低成本碳捕获技术的概率，同时可能会降低未来诞生低成本减排技术的概率。这方面的分析载于第4章末尾的方框中。

这个修正后的DICE模型作为Pyomo（Python数学建模开源软件包）中的非线性程序执行，并运用IPOPT（对大规模非线性优化执行内点算法的软件包）求解。DICE模型在假定完全信息的情况下，测算每种前景中最优的减排和碳捕获轨迹。我们对七项不确定性采用全因子设计，并分别针对所考虑的四个政策杠杆在 $3^4 \times 2^3 = 648$ 种世界前景⁸中运行DICE优化，结果生成庞大的运行数据库。数据库中的每个条目代表一种前景中的一个气候政策目标及相应的结果。第4章将使用可视化和统计分析来概括该数据库的信息。模型代码和模型输入输出数据可以向其中一位作者索取。

⁷ 谨此感谢Brent Constantz、Peter Eisenberger、David Keith和Klaus Lackner接受采访并提供有用信息。

⁸ 四项不确定参数，每项有三个可能的值；三项不确定参数，每项有两个可能的值。

4. 模拟结果

我们使用上述多情景鲁棒决策框架，以定性和定量的方式探究了与气候复原被认为可行的前景相符的条件，气候复原目标有催化作用意味着什么，以及在气候复原似乎可行或有催化作用的前景中如何管理气候复原的风险。

气候复原可行的条件

多情景分析表明，2100年复原目标的路径多于2050年复原目标的路径，但少于2°C目标的路径。

图4.1显示了在多种世界前景中分别实现2050年复原目标和2100年复原目标的最具成本效益的全球大气浓度路径。⁹ 2100年复原目标有很多条路径。有些路径的浓度在2075年前后上升到超过600ppm，然后到2100年快速下降至280ppm；另一些路径的浓度从未显著超过435ppm，然后在本世纪末之前（最早在2060年或2075年）下降至280ppm。相比之下，2050年复原目标的实现路径较少，浓度峰值皆低于435ppm，然后快速下降，达到本世纪中期的目标。

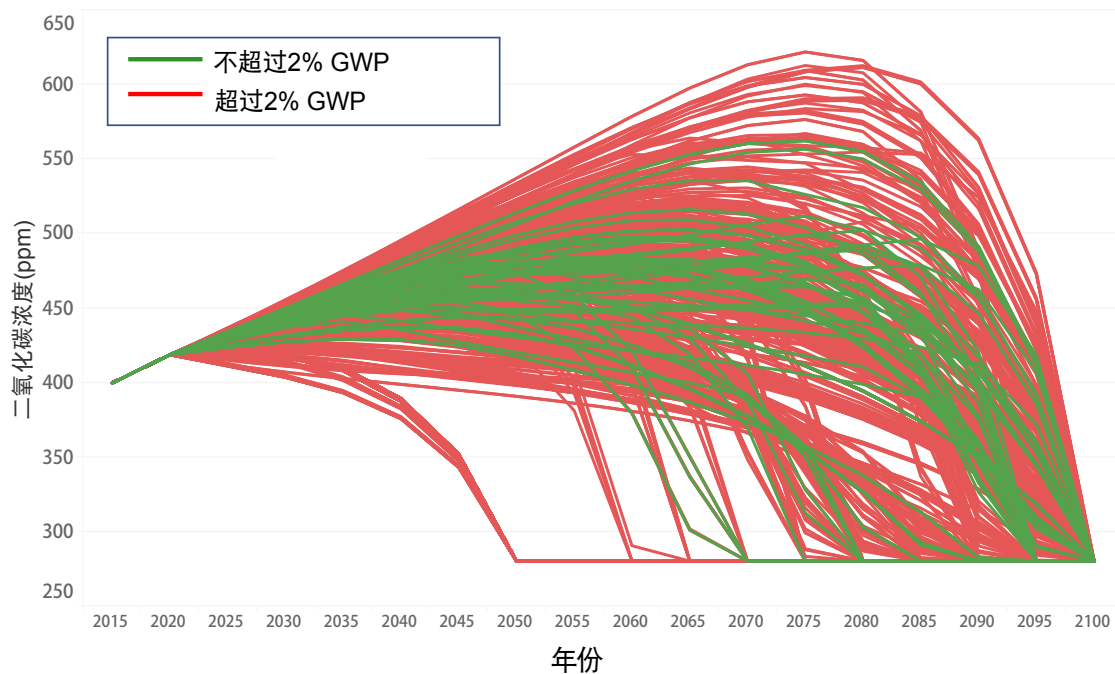
作为社会经济可行性的一项测度标准，我们假设社会为达到这些气候目标而支付代价的意愿是有限的。特别是，我们假设社会所能接受的路径有个前提：达到气候目标（温室气体减排以及碳捕获与封存）的年度成本减去碳产品的销售收入后，不超过每年世界生产总值(GWP)的2%，这大致相当于目前全球军费支出占国内生产总值(GDP)的比例（世界银行，日期不详）。该数值显然只代表对人们愿意为应对气候变化投入多少资源的一种判断。例如，在第二次世界大战期间，美国为了赢得胜利投入了大约40%的GDP（Chantrill，日期不详）。图4.1用绿色表示符合上述2% GWP标准的路径，用红色表示不符合2% GWP标准的路径。绿色路径对应表2.1中气候复原可行的前景。

这个2% GWP的约束条件大大限制了可行路径的比重。表4.1显示了分别实现四个目标的低成本路径比重。2100年复原目标的路径中大约11%可实现目标而从未在任何一年超越2% GWP的阈值，而2°C目标则为2%。模拟

⁹ 模型无法在每种前景中求解（即达到预期目标）。图4.1只显示了模型有解的前景，具体为2,592种前景中2,105种有解（大约78%）。

还显示，2050年复原目标没有符合该成本约束条件的路径。请注意，这些路径的数量不代表概率，后者取决于归结于各种不确定性组合的可能性。

图4.1. 2050年复原目标和2100年复原目标的浓度路径



附注：绿色和红色分别显示成本低于或高于2% GWP的路径。

表4.1. 低成本路径的比重

目标	在全部路径中的比重
2°C目标 (有DAC)	21.9%
2°C目标 (无DAC)	11.1%
2050年复原目标	0.0%
2100年复原目标	11.4%
2100年复原目标暨2°C目标	11.6%

相反，这些路径数量表明在成本约束下错过或达到目标的条件。¹⁰ 2°C目标与2100年复原目标相结合后，低成本路径数量略多于只有2100年

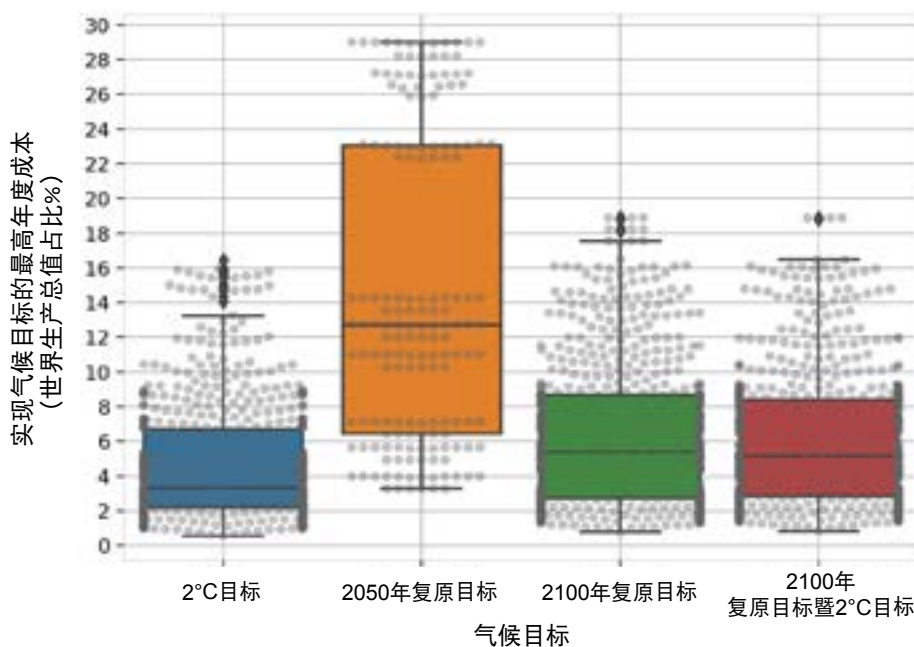
¹⁰ 如图4.5所示，鲁棒决策分析通常在分析结束时使用不精确的概率来区分备选政策方案，而不是开始时作为输入值。

复原一个目标的情况，因为合并两个目标可摊平在某些前景中随时产生的成本。由于相关路径是让温室气体浓度上升到较高水平，然后快速（高成本）下降到目标水平，原本应在本世纪后期超越2% GWP的成本阈值。¹¹

图4.1中的图案对2% GWP成本约束条件的精确值相对不敏感。图4.2显示了达到所有四个目标的最高年度成本分布。2050年复原目标所有路径的最高年度成本均超过世界生产总值的3.3%。相比之下，2°C目标、2100年复原目标及2100年复原目标暨2°C目标的分布大致相似，有许多路径满足成本约束条件。在某些条件下，所有四个目标都会产生极高的年度成本，超过世界生产总值的15%以上。总体而言，图4.2表明如果社会愿意投入10%~20%的世界生产总值，将有更多的路径实现气候复原。

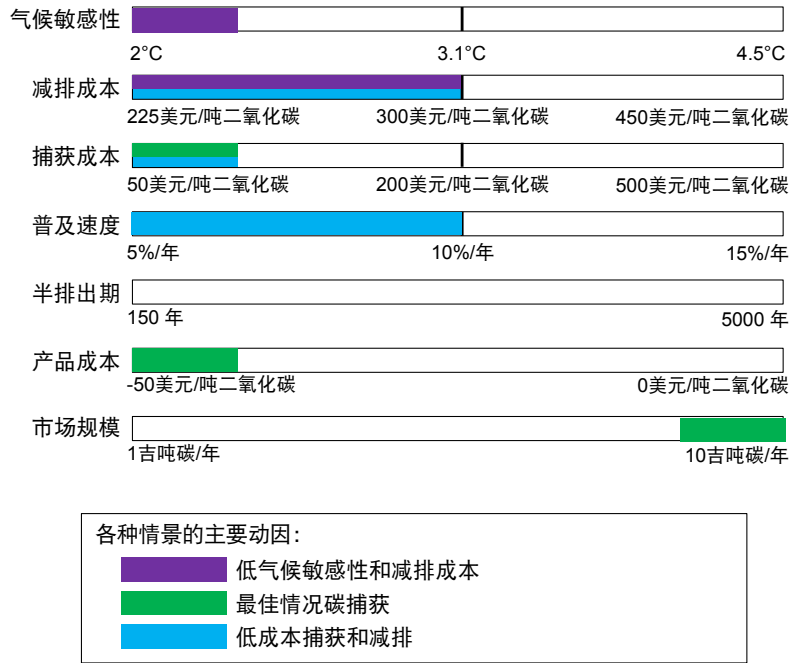
在什么条件下可以达到目标而不超出2% GWP的成本约束条件？图4.3用统计“情景发现”分析的结果回答了这个问题，该分析确定了对各气候目标获得低成本路径最重要的不确定性组合（Lempert，2013年）。

图4.2. 在648种前景中分别实现每个气候目标的最高年度成本



¹¹ 该研究并未向DICE模型输入2% GWP的阈值作为约束条件。这样做让我们从大量模拟中收集的信息受局限，因为模型在大多数前景中无法达到气候目标。

图4.3. 在年度成本不超过2% GWP的前提下分别实现2°C目标、2100年复原目标及2100年复原目标暨2°C目标的条件



该分析得出三个情景，概括了达到2°C目标和复原目标的所有可能途径。低成本路径一般属于下列情景之一：

1. **低气候敏感性和减排成本**情景，定义标准是：气候敏感性为2°C，减排成本低于或等于300美元/吨二氧化碳
2. **最佳情况碳捕获**情景，定义标准是：捕获成本为50美元/吨二氧化碳，市场规模达10吉吨碳/年，捕获碳的价格约为50美元/吨二氧化碳
3. **低成本捕获和减排**情景，定义标准是：捕获成本为50美元/吨二氧化碳，减排成本低于或等于300美元/吨二氧化碳，DAC技术普及速度达每年10%以下。

如表4.2所示，2°C目标的低成本路径一般属于低气候敏感性和减排成本情景或者最佳情况碳捕获情景。2100年复原目标或2100年复原目标暨2°C目标的低成本路径一般属于最佳情况碳捕获情景或者低成本捕获和减排情景。如果某条路径不符合其中任一情景的定义标准，一般会产生高成本。总体而言，该分析表明表2.1的“气候复原可行”前景对应表4.2所定义的最佳情况碳捕获或低成本捕获和减排两种情景。这些情景也为下面讨论效益与成本提供了依据。

表4.2. 实现气候目标所需的情景及其综合测验的密度/覆盖率标准

目标	情景1	情景2	情景组合
2°C目标	低气候敏感性和减排成本情景 D/C = 96%/49%	最佳情况碳捕获情景 D/C = 51%/35%	D/C = 83%/70% 两者共存的案例: • 占全部案例的2% • 占低成本案例的8%
2100年复原目标	最佳情况碳捕获情景 D/C = 69%/50%	低成本捕获和减排情景 D/C = 83%/41%	D/C = 91%/74% 两者共存的案例: • 占全部案例的2% • 占低成本案例的16%
2100年复原目标暨2°C目标	最佳情况碳捕获情景	低成本捕获和减排情景	D/C = 88%/73% 两者共存的案例: • 占全部案例的2% • 占低成本案例的16%

附注：D/C = 密度/覆盖率。

表4.2还为低成本路径“一般属于”某种情景这样的表述提供了定量标准。表中显示了各种情景的密度和覆盖率指标（Bryant和Lempert，2010年）。密度指符合各种情景标准（即低成本）的路径比重。覆盖率指符合各种情景标准的全部低成本路径比重。值得注意的是，情景发现分析确定了达到不同目标的次要因素。特别是，地下封存碳的半排出期对区分气候复原的低成本路径与高成本路径起到的作用较小。

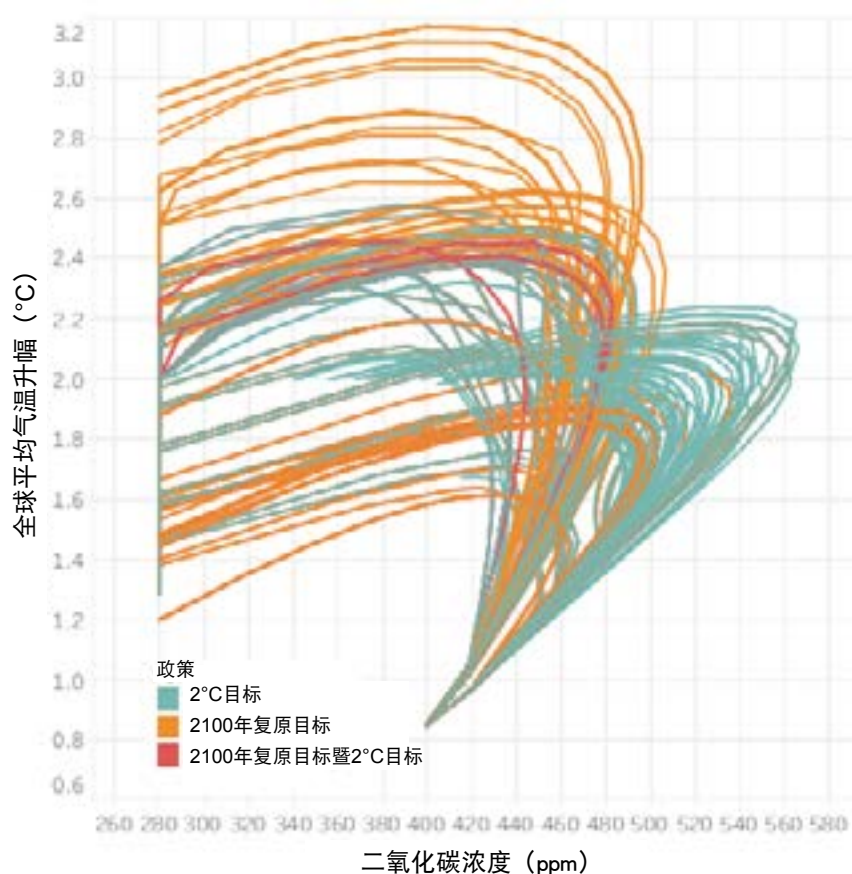
管理额外风险

即使在似乎可行的情景中，追求气候复原也可能产生不良后果，特别是超调和削弱脱碳动机的风险。该分析有助于识别此类风险，并提出降低风险的方法。

当某条路径允许全球气温或浓度超过期望的界限，预期DAC技术将促使其安全回落的时候，就有可能发生超调。如果这种预期出错，就会引发风险。例如，有些2100年复原路径允许气温升幅超过3°C，如图4.4所示。这些路径出现在低气候敏感性的前景中。由于本研究不将气候影响的不确定性视作气温变化的应变变量，气候敏感性也是全球气温变化所造成的社会福祉影响的一项指标。低气候敏感性意味着高气温所造成的影

响较小。同样，有些2°C路径允许浓度在低气候敏感性和低成本DAC的前景中上升到极高水平。在此类前景中，模型可等到本世纪后期再从大气中提取大量的碳，以便减少应对气候变化的净现值。

图4.4. 不同目标对应的浓度和气温路径



两组路径都容易因为假设不成立而受影响。例如，如果全球采取初期允许浓度上升的2100年复原路径，然后发现气候敏感性高于预期，则难免造成重大气候灾害。如果全球采取高浓度的2°C路径，然后发现气候敏感性或DAC技术成本高于预期，也难免造成重大气候灾害。这种超调的可能性凸显出将气候复原嵌入气候变化风险管理方针的必要性。特别是，图4.4表明，追求2100年复原目标暨2°C目标可以减少超调的可能性，而且对低成本路径比重影响不大（如表4.1所示）。

气候复原发挥催化作用的条件

支持者认为气候复原具有催化作用，有助于提高DAC技术普及的可能性和强化公众应对气候变化的承诺。另一方面，对这些技术的依赖持续招致批评，其中一个原因是担心追求负排放技术会削弱全球经济脱碳的动机（Anderson和Peters，2016年）。这种担忧通常称为道德风险，反映人们如果认为自己不用承担行动的后果，就会倾向于采取不负责任或不顾后果的行动。举例来说，筑堤降低小规模洪水的风险，可能会鼓励更多人迁徙到高风险的洪泛平原。

为了探讨气候复原有催化作用意味着什么及其反而引发道德风险的可能性，我们首先注意到，模拟表明如果DAC技术部署变得更有可能，将会产生显著的效益。特别是，通过比较有无DAC技术的模拟结果，可以清楚地看到DAC技术为实现当前的2°C目标和降低极端气候灾害的风险开辟了更广阔的路径。

在没有DAC技术的情况下运行DICE模型，分析显示只有很小的机会实现2°C目标。如表4.1所示，如果允许模型纳入DAC技术，所考虑的路径中实现2°C目标的数量是排除DAC技术的两倍。纳入DAC技术后，低气候敏感性和减排成本情景或最佳情况碳捕获情景均具备了达到2°C目标的低成本路径。排除DAC技术后，只有前一个情景具备低成本路径。

此外，DAC技术的可用性为降低最严重的气候变化风险提供了选择。请注意，在图4.1中，大约13.5%的低成本2100年复原路径在本世纪末之前达到280ppm。图4.3的情景发现分析确定，低DAC成本和气候敏感性是决定2100年复原目标能否提前实现最重要的不确定性。当DAC成本很低（50美元/吨二氧化碳）而气候敏感性较高（4.5°C）的时候，气候变化有可能造成很大灾害，这使得DAC成为在本世纪末之前达到目标的最具成本效益的方法。换言之，受2100年复原目标催化的碳捕获能力带来了更广阔的路径，在高气候敏感性预示着危险气候变化的前景中更快地降低浓度。

为了将这些结果置于潜在道德风险的背景下，我们注意到，全球经济脱碳的成本和未缓和气候变化的影响这两个因素的组合，会产生四种截然不同的气候变化挑战观点。诚如Morton（2015年）以及Wagner和Weitzman（2015年）所指出的，许多倡导者关注的是两种较简单的组合：一种是气候变化可能造成严重灾害，但减排成本很小；另一种是减

排成本很高，但气候变化造成的灾害不大。前者可称为**环保不难**情景。¹²此外，还有另外两种组合：一种是危害小、脱碳成本低；另一种是脱碳成本高、气候危害大。后者可称为**大难题**情景，当中提高DAC技术的可能性证明是最重要的。然而，追求气候复原也许会使**环保不难**情景的可能性降低。

我们可以利用模拟模型结果的数据库，来探究以下问题的取舍：让**大难题**情景可能更易解决，但**环保不难**情景可能更难出现。假设设定短期气候复原目标会增加低成本负排放的可能性，因为其侧重于研究、投资、以及推进必要技术和政策的方针。假设同时设定该目标会减少低成本脱碳的可能性，因为其导致研究、投资、政策承诺和消费者行为偏离减少温室气体排放的技术和政策。如果追求气候复原目标的最终结果使得理想情景不大可能出现，而不是改善任何一种情景的结果，则存在道德风险问题。

图4.5显示了这种权衡取舍（该图的计算方式见本章末尾的方框）。如果确信脱碳的成本高昂，决策者可能会认定**大难题**的预期结果改善比实现**环保不难**情景的可能性降低更重要，即使低成本DAC的可能性很低。但是，如果**环保不难**情景已经有可能，决策者可能会要求在承诺实现气候复原目标之前，先证明低成本DAC是可能的。**大难题**和**环保不难**两个情景的特点是都可能造成严重气候影响。在气候影响较小的情况下，道德风险与有催化作用的气候复原之间也存在类似的权衡取舍，但对低成本DAC的可能性要求更高，如图4.5所示。¹³

¹² 请注意上述低气候敏感性和减排成本情景是环保不难情景的一个特例。

¹³ 与图4.1的颜色一样，这里的具体数字显然取决于2% GWP被相当随意地定义为低成本，但总体图案对此数值不敏感。

图4.5. 追求2100年复原目标会不会引发道德风险的条件

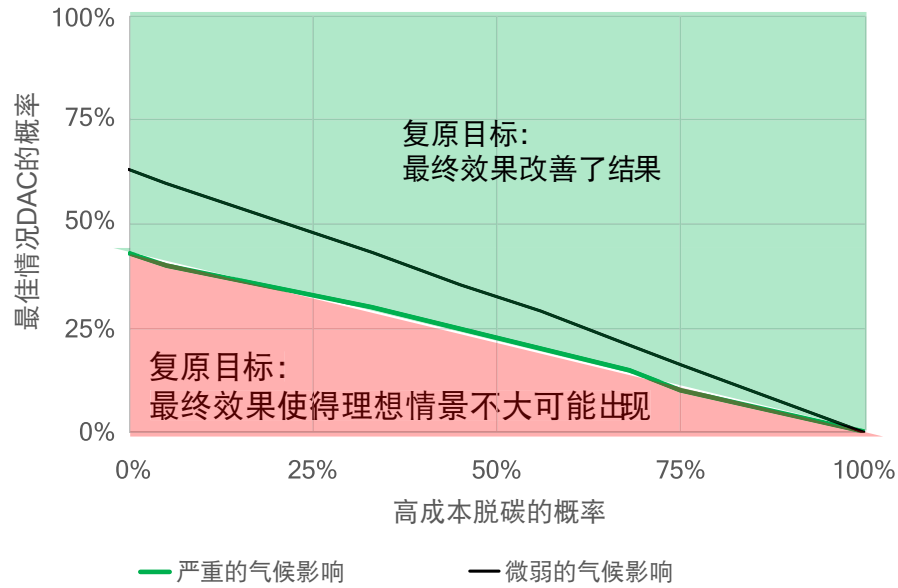


表4.3. 图4.5中各种情景之代表性前景的参数值

	最低值	最高值
气候敏感性	2°C	4.5°C
温室气体减排成本	225美元/吨二氧化碳	650美元/吨二氧化碳

表4.4. 最佳和最差DAC情景之代表性前景的参数值

	最佳情况DAC	最差情况 DAC
捕获成本	50美元/吨二氧化碳	500美元/吨二氧化碳
普及速度	15%/年	5%/年
半排出期	5,000 年	150 年
产品成本	-50美元/吨二氧化碳	0美元/吨二氧化碳
市场规模	10吉吨碳	1吉吨碳

政策持久性

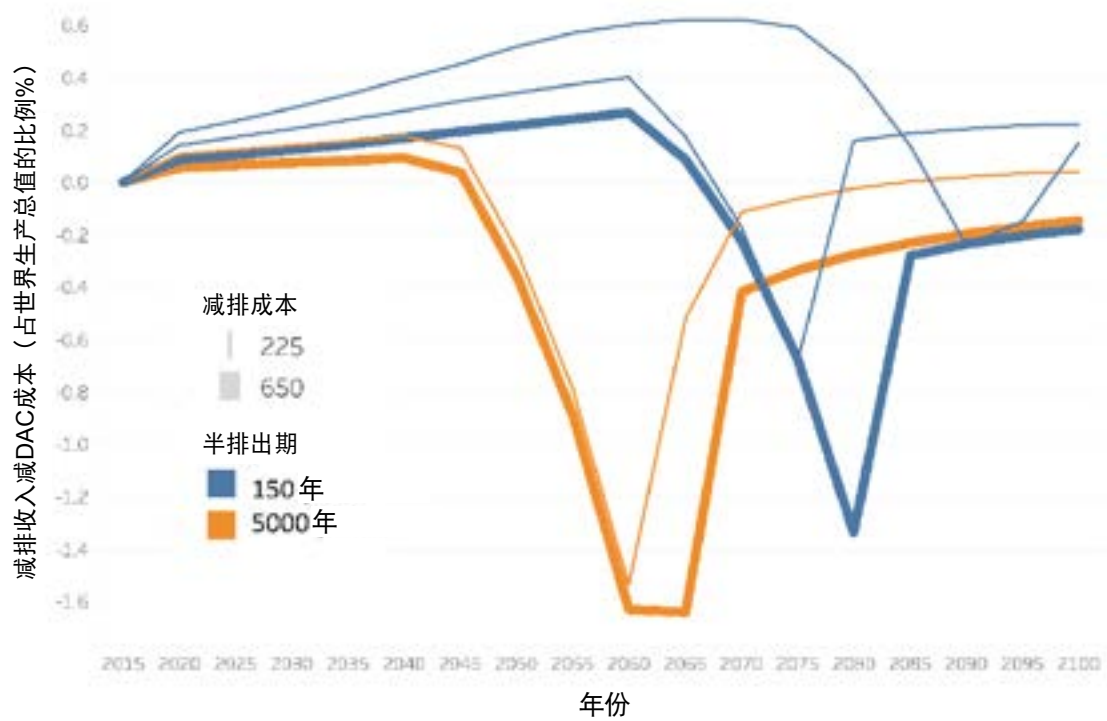
为成功应对气候变化带来的风险，当今的气候政策应鼓励持续数十年的措施。然而，回顾历史，一些政策改革带来了长期持续的社会变化，另一些则逐渐淡出视野，未留下长远效果。随着时间的推移，那些坚持不懈的改革往往会形成受益者和支持者（Patashnik，2003年，2008年），而形成这种拥护群体的气候政策可望显著提高二十一世纪的脱碳率（Lempert，2007年；Isley等人，2015年）。

气候复原的一些特点似乎有利于政策持久性，也有一些特点可能不利于政策持久性。追求气候复原目标可能会创造一个年产值达数十亿美元的产业，实质业务就是从大气中去除碳，并可能向全世界的开发商销售以碳基建筑建材。该产业及其客户将会构成一个拥护群体，可望促进达到气候复原目标所需的政策、投资和研究的持久性。从社会的角度来看，这可能是有益的，而为了使气候保持稳定则需扩大负排放。但是，一旦大气中的二氧化碳浓度开始下降，庞大的负排放产业或许会对社会判断浓度应当稳定在何等水平造成不当影响。

此外，该产业要长期保持适当的收入流可能会比较困难。气候复原是一项公益事业，它造福每一个人，而不仅仅是那些为之付出代价的人。假设社会用温室气体排放的碳价收入来资助气候复原，这种“污染者付费”的原则（即对环境灾害负有责任的人支付修复代价）往往获得更多的政治支持，而不是其他社会资源的投入。

因此，图4.6显示，按照对减排成本（225美元和650美元/吉吨二氧化碳）和地下封存碳的半排出期（150年和5,000年）的不同假设，2100年复原目标的五条路径均呈现收入从温室气体减排净流入到气候复原。之所以选择这些案例，是因为其实现气候复原的成本低。当减排成本高昂（粗线）时，最具成本效益的路径呈现DAC激增（长达几十年）现象，导致大量资金净流入（远超过碳价金额）到气候复原。封存碳的半排出期短（150年）会延迟和减少在最具成本效益的路径中直接捕获的激增。这需要注入大量非气候相关的资金，故可能会削弱对气候复原目标的长期承诺。把DAC分散到较长的时期内，将会减少对资金的集中需求，但也会增加相关路径的总体成本。

图4.6. 在选定前景中脱碳与碳捕获之间的资金流动



探究道德风险

简单的政策实验有助于探究追求气候复原产生或避免道德风险的条件。

我们首先就下列情景选择一种代表性前景：(1)本文关于脱碳成本和气候影响的四种假设组合的每一种，以及(2)最佳和最差情况DAC情景。表4.3和表4.4显示了这些代表性情景的参数。通过模型计算出在这八种情景中分别符合2°C目标的净现值，以 $NPV_{C,D}^S$ 表示，其中：C=高成本、低成本，分别代表高成本脱碳和低成本脱碳；D=最佳、最差，分别代表最佳情况和最差情况DAC；s=大、小，分别代表巨大和微小的气候危害。假设先验概率 P_{Costly} 和 P_{Best} 分别代表高成本脱碳（表4.3）和最佳情况DAC（表4.4）的可能性。对于巨大和微小的气候危害，作为这两项先验概率的应变变量，追求2°C目标的预期净现值的计算公式如下：

$$\begin{aligned} \overline{NPV}^S(P_{Costly}, P_{Best}) &= P_{Costly} P_{Best} NPV_{Costly, Best}^S + P_{Costly} (1 - P_{Best}) NPV_{Costly, Worst}^S \\ &+ (1 - P_{Costly}) P_{Best} NPV_{Inexp, Best}^S + (1 - P_{Costly}) (1 - P_{Best}) NPV_{Inexp, Worst}^S \end{aligned}$$

追求气候复原对这项预期值有何影响？正如本报告所指，我们假设该目标会提高最佳情况DAC的概率，也会在同程度上降低低成本脱碳的概率，新概率的计算公式如下：

$$\begin{aligned} P'_{Best} &= \text{Min}[(1 + \varepsilon) P_{Best}, 1] \\ P'_{Costly} &= P_{Costly} + \varepsilon(1 - P_{Costly}) \end{aligned}$$

其中 ε 代表设定目标对两个概率的正面和负面影响。因此，追求气候复原会改变预期值，计算公式如下：

$$\Delta \overline{NPV}^S(P_{Costly}, P_{Best}) = \overline{NPV}^S(P'_{Costly}, P'_{Best}) - \overline{NPV}^S(P_{Costly}, P_{Best})$$

请注意，这种差异只考虑追求气候复原目标对预期的影响，而非对实际经过路径的影响。

所以，当最终预期收益大于零，即 $\Delta \overline{NPV}^S(P_{Costly}, P_{Best}) > 0$ 时，追求气候复原可避免道德风险。图4.5显示了满足这一条件的先验概率集，以及进而促使决策者赞成追求气候复原的预期。

5. 结论与建议

在过去的250年里，人类活动的规模扩大了大约五十倍。在工业革命之初，全球约有十亿人口，年人均收入为100美元，年人均能耗相当于100桶石油，主要来自燃烧木柴。今天，全球有70多亿人口，年人均收入达6,000美元，年人均能耗相当于5,000桶石油，主要来自燃烧石油和其他会排放温室气体的化石燃料。这样一来，人类福祉得到巨大改善，同时也引发了气候变化——因为吸热温室气体在大气中不断积累。更糟糕的是，这些气体大部分在大气中驻留了数百年。所以，即使现在停止一切排放（这是不可能的），气候仍将持续变化。气候需要一千年才能恢复到工业化之前的状态。

达到《巴黎协定》的2°C目标是一项巨大的挑战，需要在全球范围内以前所未有的速度推行彻底的技术和行为变革。社会能否完成这项任务，尚属未知之数。显然，气候复原也是一项宏大而不确定的事业。问题是，制定这个更远大的目标会增强还是削弱人类应对气候变化挑战的努力？

对气候复原的兴趣源于有可能降低风险、有道德上的明确性、增加“自下而上”创新的机会，以及激励公众承诺采取气候行动。简而言之，支持者认为追求气候复原可以促进各种技术的部署，使较小的目标（如2°C目标）更容易实现，而事实上实现较小的目标也可能需要追求气候复原。此外，气候复原如获成功，可以显著缩短人类面对大气中高浓度温室气体的时间，从而降低相关风险。地球系统有着许多人类不太了解的进程，其运行的时间尺度长达十年以上，伴随着很多非线性阈值，一旦突破，危害陡增而且有时不可逆转（Alley等人，2002年；Keller等人，2005年；Wuebbles等人，2017年）。在温室气体浓度升高的环境下生活，就像坐在一条随时会弹起的弹簧上。而使二氧化碳浓度恢复到工业化之前的水平可以降低这种风险。

气候复原还有一定程度的道德明确性。2°C目标与任何此类稳定目标一样，体现了在感知的脱碳成本与效益之间的权衡取舍，但这种权衡取舍经常得不到承认（示例见Garner、Reed和Keller，2016年）。尽管决策者声称此类稳定目标完全以科学为依据，但这些目标很容易引发一系列充满争议的道德判断。宣告气候复原目标显然也涉及道德判断和权衡取舍，但却具有稳定目标所欠缺的纯粹性和明确性。

对倡导者来说，气候复原还为加强公众应对气候变化的承诺提供了有用的框架。在某程度上，道德明确性发挥了作用。此外，虽然气候复原并非灵丹妙药（因为它只有结合深度脱碳才能成功），但在看似无望的挑战面前该目标确实提出了精妙的技术方案。追求气候复原还可以促成自下而上应对气候挑战的新气象，吸引企业家和倡导者（至少在短期内）追求这一目标，而无需动员全社会参与。长远来看，追求气候复原具有一些有利于政策持久性的特点。如果技术上证明可行，不断增长的气候复原产业可望推动政策朝着有利于持续与成长的方向发展。

但是，气候复原的成功终究需要技术能力的发展一帆风顺。我们的分析表明，要实现气候复原，企业家对DAC技术最乐观的假设必须成为现实。因此，无法保证实现气候复原的可能性。问题在于：追求一个引人注目但雄心勃勃的目标，还是因为根本不确定目标能否实现而选择保守一些，哪种做法更可取。

本研究提供了一套框架来帮助裁定这个问题，即考虑追求气候复原会提高DAC成功的可能性，同时也会在同等程度上降低低成本脱碳的可能性这一情景。这套非常狭窄的框架应用于分析中考虑的一系列前景，得出如下结论：如果DAC的先验概率（即在着手追求目标之前）达到低成本脱碳的先验概率的一半以上，追求气候复原目标会产生净收益。因此，有些人担心低成本脱碳前途未卜，而那些对低成本脱碳抱有信心的人更多地是怀疑碳复原目标的效益。本研究未涉及的其他因素也同样重要，其中包括机会成本和超调的风险，以及判断道德明确性和潜在的激励行动会在多大程度上改变道德风险情景的基本前提。如果气候复原的总体效果是加强对气候行动的承诺，那么它就会产生净收益，不论先验成功率高低如何。

本研究的简单模拟明确省略了许多重要因素，只专注于DAC这个唯一的潜在负排放源，过分强调气候复原对该技术的需求。实际上，BECCS、海洋铁肥及其他技术有可能分担从大气中提取碳的负担。但在这些技术中，DAC的不良副作用似乎最小。因此，本研究可能过分强调所需的DAC部署规模，也可能低估了利用更广泛的技术组合追求气候复原所带来的一些不良后果。本研究的模拟也只比较了在完全信息的情况下追求气候复原的路径。模拟没有探寻响应新信息的适应性路径，

故而更难以评估在高度不确定性面前展开复杂的社会学习过程中，追求新颖和潜在变更性技术所固有的实际机会与风险。

尽管如此，本研究确实提出了可能有助于管理气候复原风险的短期措施，即增加有益结果的可能性，同时减少不利影响的可能性。

第一，本研究建议倡导者可寻求在本世纪后期（而非2050年以前）实现气候复原。模拟中最早的低成本复原路径从现在起大约六十年后达到工业化之前的浓度，根据记载是瓦特发明蒸汽机开启工业革命300周年的时候。与2050年复原目标相比，2075年复原目标在不无可能与引起足够反响之间做到了适度的平衡。

第二，为了避免超调的风险，气候复原目标最好与气温目标相结合，例如2°C。模拟结果显示，综合目标的难度与单独的复原目标相仿，但降低了依赖于二十一世纪后期快速部署碳捕获系统的路径所产生的风险。

第三，使大气中温室气体浓度成功恢复到工业化之前的水平，可能需要在短期内制定长期融资机制。在短期内，企业家可利用现有的融资来源进行DAC技术创新与论证。长远来看，气候复原是一项代价不菲的公益事业。经验表明，社会在公益事业方面的资金投入往往不够。因此，无论效益如何，在气候复原工作需要大量投资的时候，资金却没有着落，这种窘况是完全有可能发生的。作为一种解决方案，社会可以用激励脱碳的碳价收入来支付气候复原的成本。“污染者付费”原则与治理成本之间的这种联系，常常引起公众的共鸣。然而，有关模拟表明，气候复原的巨大资金需求在短期内远超过碳价收入的资金流，故需要某种类型的跨代融资机制。

此外，模拟表明，碳价收入与碳捕获支出之间的任何挂钩机制，应分阶段逐渐引入。许多路径追求的脱碳与气候复原组合不平衡，导致超调或年度成本偏高。鉴于这些技术的未来成本与性能目前还存在高度不确定性，最好推迟这两项因素与相同碳价直接挂钩的时间。

最后，研究表明，平衡机会与避免不良影响的最重要短期措施，可能是让社会采纳一套风险管理框架，并且把社会对气候变化的反应当作政策试验的过程。基于进化学习的理念，这种政策试验承认复杂社会问题固有的不确定性和模糊性，我们的相关看法是片面的，现有认识必然是不完整的，而且依循一套结构完善、有实证基础的程序测试、否决和

改进社会挑战的潜在解决方案至为重要（Ansell，2011年；Stilgoe，2015年）。追求气候复原为解决气候变化开辟了新的潜在路径，迄今尚未展开情景探索，但无法保证这些情景会变成现实。因此，气候复原需要一个学习的过程。我们最好以满腔热忱追求气候复原，同时将其融入到测试、实验、修正和发现的过程中。

附录：对DICE 模型的修正

本研究所用的模型以2016年版的全球暖化经济学动态综合气候—经济(DICE)模型为基础，该模型已经被用于推算对碳的社会成本的最新估计数字(Nordhaus, 2017-a)。援引的基本方程组载于已发表的有关论文(Nordhaus, 2017-b)，更多信息载于前一版本附带的用户手册(Nordhaus和Sztorc, 2013年)。下面重点介绍了为适应和解释直接空气碳捕获和封存，专门就本研究添加或更改的参数、变量和方程式。

我们把研究重点放在二十一世纪，因而考虑原本100个时间步长(每个五年)中50个的时间范围——从2015年到2260年。在时间步长 $t-1$ 的年度人为排放($E[t-1]$ ，吉吨二氧化碳/年)累积到大气中，使时间 t 的二氧化碳浓度上升($MAT[t]$ ，吉吨碳)。在我们的代码中，一部分排放可与每年从空气捕获的选定碳量($ESEQDAC[t-1]$ ，十亿吨二氧化碳/年)抵消：

$$MAT[t] == MAT[t-1]*b11 + MU[t-1]*b21 + (E[t-1]-ESEQDAC[t-1])*tstep*12/44。$$

$b11$ 、 $b21$ 和 MU 是原始DICE碳循环建模中的气候参数和变量， $tstep$ 是时间步长中的年数；而 $12/44$ 将吉吨二氧化碳转换为吉吨碳。

DAC的运作需要能量，我们假设每封存一吉吨二氧化碳耗能3.64艾焦($seqdac_cons$)。按照目前的DAC技术，上述能耗大约15%是电力；其余是热能，主要是来自天然气。鉴于发电(~ 0.13 吉吨二氧化碳/艾焦)和天然气燃烧(~ 0.055 吉吨二氧化碳/艾焦)的平均碳强度，我们估计运作DAC消耗1艾焦能量的基线二氧化碳排放代价为0.067吉吨二氧化碳($seqdacpen2co2$)。由此产生的额外DAC排放($ESEQDACPEN[t]$ ，吉吨二氧化碳)如下

$$ESEQDACPEN[t] == seqdacpen2co2 * seqdac_cons * ESEQDAC[t]。$$

工业碳排放($EIND[t]$ ，吉吨二氧化碳/年)相应增加，除非将全球能源系统中的更多化石燃料替换成无碳替代品($MIU[t]$ ，以减幅为分子、工业排放加DAC相关排放之和为分母的分数)：

$$EIND[t] == (1 - (MIU[t])) * (sigma[t] * YGROSS[t] + ESEQDACPEN[t])。$$

$\sigma[t]$ 代表每单位GDP（YGROSS[t]，万亿美元）的预计基线工业排放（吉吨二氧化碳），其中包括任何气候危害。

为了模拟DAC部署惯性和避免不切实际的行为，我们从2025年开始限制从一个时间步长到下一个时间步长的普及率（seqdac_maxgrowth，%/年）：

$$ESEQDAC[t] \leq (1 + \text{seqdac_maxgrowth}/100)^{tstep} * ESEQDAC[t-1]。$$

2020年（假设为DAC可大规模运作的第一年）设有1吉吨碳的绝对上限。

部分捕获的二氧化碳会再用于制造建材（ESTOR_MARKET[t]，吉吨二氧化碳），其余则封存在地下（ESTOR_GROUND[t]，吉吨二氧化碳）：

$$ESEQDAC[t] == ESTOR_MARKET[t] + ESTOR_GROUND[t]。$$

封存的碳和封存在地下的碳积累在一个可能泄漏的储层中（MRES[t]，吉吨碳）：

$$MRES[t] == tstep * 12/44 * ESEQDAC[t] + \text{resret} * MRES[t-1]，$$

其中，resret是每五年的储层保留率，等于 $0.5^{(1/\text{reshalflife}/tstep)}$ ，已考虑储层的半排出期时间（reshalflife，年）。由此产生的泄漏碳排放（ECCSLEAK[t]，吉吨二氧化碳/年）如下

$$ECCSLEAK[t] == 44/12 * (1 - \text{resret}) * MRES[t-1]。$$

泄漏排放加上内源性工业排放（包括DAC）和外源性土地利用排放（etree[t]，吉吨二氧化碳/年）得出人为二氧化碳总排放：

$$E[t] == EIND[t] + \text{etree}[t] + ECCSLEAK[t]。$$

从空气中封存每吨二氧化碳的单位成本为mcostseqdac0美元，包括额外的运输和处理成本，因此DAC总支出（SEQDACCOST[t]，万亿美元/年）如下

$$SEQDACCOST[t] == 1e-3 * \text{mcostseqdac0} * ESEQDAC[t]。$$

上述成本一部分可与负成本（即用封存碳制成的建筑材料的潜在市场收入）抵消，在模型中以负成本（MKTSTORCOST[t]，万亿美元/年）表

示，由特定的统一负成本（ $mcoststor_market0$, 美元/吨二氧化碳）产生：

$$MKTSTORCOST[t] == 1e-3 * mcoststor_market0 * ESTOR_MARKET[t].$$

市场上限为 $maxestor_market$ 吉吨碳/年，表示此类产品实际有限的需求。然后，通过修改原始DICE预算方程式来计算所有成本：

$$Y[t] == YNET[t] - ABATECOST[t] - SEQDAC COST[t] - MKTSTORCOST[t],$$

我们从GDP（不计气候危害）（ $YNET[t]$, 万亿美元/年）中减去所有与减缓气候变化相关的成本：减排（ $ABATECOST[t]$, 万亿美元/年），DAC运作，以及对DAC衍生市场产品的收入的校正。然后，我们得出可用于最终产品投资的财富（ $Y[t]$, 万亿美元/年）。

模型的其余部分遵循标准的2016年版DICE模型的结构和参数设置。鉴于要考虑大量的情景，我们将世界生产总值分配至储蓄的部分固定为惯常水平，以便提高计算的效率。

表A.1列出了表2.1中不确定性所对应的DICE参数名称，前文已给出解释或属于原始模型方程的一部分。

表A.1. 表2.1所列举的不确定性对应的DICE参数名称

不确定性	DICE 参数
气候敏感性	$t2xco2$
温室气体减排成本	$Pback$
碳捕获, 成本	$mcostseqdac0$
碳捕获, 普及速度	$seqdac_maxgrowth$
封存碳的半排出期	$Reshalflife$
碳产品市场, 边际成本	$mcoststor_market0$
碳产品市场, 市场规模	$maxestor_market$

$t2xco2$ 代表二氧化碳浓度翻倍的平衡态气温影响，而 $pback$ 是在假定今天出现完全减排情景下额外减排一吨二氧化碳的成本。一般而言，这代表最高统一减排成本，其随着时间的推移和减排量逐渐减少而下降。

政策杠杆作为DICE变量的上限或下限，在优化过程中强制执行。指标根据优化的变量水平推算。如需查询代码，可向作者索取。

参考文献

- Adler, M., D. Anthoff, V. Bosetti, G. Garner, K. Keller, and N. Treich, “Priority for the Worse-Off and the Social Cost of Carbon,” *Nature Climate Change*, Vol. 7, 2017.
- Air Miners, homepage, undated. As of March 29, 2018:
<http://www.airminers.org>
- Alley, R. B., P. U. Clark, P. Huybrechts, and I. Joughin, “Ice-Sheet and Sea-Level Changes,” *Science*, Vol. 310, No. 5747, 2005, pp. 456–460.
- Alley, R. B., J. Marotzke, W. Nordhaus, J. Overpeck, D. Peteet, R. Pielke, R. Pierrehumbert, P. Rhines, T. Stocker, L. Talley, and J. M. Wallace, *Abrupt Climate Change: Inevitable Surprises*, Washington, D.C.: National Research Council, 2002.
- Anderson, K., and G. Peters, “The Trouble with Negative Emissions,” *Science*, Vol. 354, No. 6309, 2016, pp. 182–183.
- Ansell, C. K., *Pragmatist Democracy: Evolutionary Learning as Public Philosophy*, Oxford, UK: Oxford University Press, 2011.
- Applegate, P. J., B. R. Parizek, R. E. Nicholas, R. B. Alley, and K. Keller, “Increasing Temperature Forcing Reduces the Greenland Ice Sheet’s Response Time Scale,” *Climate Dynamics*, Vol. 45, No. 7–8, 2015, pp. 2001–2011.
- Bryant, B. P., and R. J. Lempert, “Thinking Inside the Box: A Participatory, Computer-Assisted Approach to Scenario Discovery,” *Technological Forecasting and Social Change*, Vol. 77, 2010, pp. 34–49.
- Buesseler, K. O., S.C. Doney, D. M. Karl, P. W. Boyd, K. Caldeira, F. Chai, K. H. Coale, H. J. de Baar, P. G. Falkowski, K. S. Johnson, and R. S. Lampitt, “Ocean Iron Fertilization—Moving Forward in a Sea of Uncertainty,” *Science*, Vol. 319, No. 5860, 2008.
- Campbell-Arvai, V., P. S. Hart, K. T. Raimi, and K. S. Wolske, “The Influence of Learning About Carbon Dioxide Removal (CDR) on Support for Mitigation Policies,” *Climatic Change*, Vol. 43, No. 3–4, 2017.
- Chantrill, Christopher, “What Is the Total U.S. Defense Spending,” webpage, USGovernmentSpending.com, undated. As of February 11, 2018:
https://www.usgovernmentspending.com/defense_spending

- 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, and D.P. van Vuuren, “Assessing Transformation Pathways,” in 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 and J.C. Minx, eds., *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, UK, and New York: Cambridge University Press, 2014, pp. 413–510.
- Constantz, B. R., and M. A. Bewernitz, “Carbon Sequestration Methods and Systems,” U.S. Patent EP2892635 A, 2014.
- Drouet, L., V. Bosetti, and M. Tavoni, “Selection of Climate Policies Under the Uncertainties in the Fifth Assessment Report of the IPCC,” *Nature Climate Change*, Letters 5, 2015, pp. 937–940.
- Economist*, “Towards the End of Poverty,” June 1, 2013.
- Fischhoff, B., and A. L. Davis, “Communicating Scientific Uncertainty,” *PNAS*, Vol. 111, No. 4, 2014, pp. 13664-13671.
- Garner, G., P. Reed, and K. Keller, “Climate Risk Management Requires Explicit Representation of Societal Trade-Offs,” *Climatic Change*, Vol. 134, No. 4, 2016, pp. 713–723.
- Geden, O., and A. Löschel, “Define Limits for Temperature Overshoot Targets,” *Nature Geoscience*, Vol. 10, No. 12, 2017, pp. 881–882.
- Hansen, J., A. Lacis, D. Rind, G. Russell, P. Stone, I. Fung, R. Ruedy, and J. Lerner, “Climate Sensitivity: Analysis of Feedback Mechanisms,” in American Geophysical Union, *Climate Processes and Climate Sensitivity*, 1984, pp. 130–163. As of March 29, 2018: <https://doi.org/10.1029/GM029p0130>
- Harvey, Danny, “Allowable CO2 Concentrations Under the United Nations Framework Convention on Climate Change as a Function of the Climate Sensitivity Probability Distribution Function,” *Environmental Research Letters*, Vol. 2, No. 1, 2007.
- Harvey, H., J. Orr, M. Franklin, and C. Vondrich, “A Trillion Tons,” *Daedalus*, Vol. 142, No.1, 2013, pp. 8–25.
- Healthy Climate Alliance, homepage, undated. As of March 28, 2018: <https://www.healthyclimatealliance.org>
- Intergovernmental Panel on Climate Change, ed., *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*, Cambridge, UK, and New York: Cambridge University Press, 2014.

IPCC—See Intergovernmental Panel on Climate Change.

Isley, S. C., R. J. Lempert, S. W. Popper, and R. Vardavas, “The Effect of near-Term Policy Choices on Long-Term Greenhouse Gas Transformation Pathways,” *Global Environmental Change*, Vol. 34, 2015, pp.147–158.

Jones, R. N., A. Patwardhan, S. Cohen, S. Dessai, A. Lammel, R. Lempert, M. M. Q. Mirza and H. v. Storch, “Foundations for Decision Making,” in Intergovernmental Panel on Climate Change, eds., *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*, 2014, pp. 195– 228.

Keith, David, Maryam Mahmoudkhani, Alessandro Biglioli, Brandon Hart, Kenton Heidel, and Mike Foniok, “Carbon Dioxide Capture Method and Facility,” U.S. Patent 9,095,813 B2, August 4, 2015.

Keller, K., M. Hall, S.-R. Kim, D. F. Bradford, and M. Oppenheimer, “Avoiding Dangerous Anthropogenic Interference with the Climate System,” *Climatic Change*, Vol. 73, 2005, pp. 227–238.

Keller, K., D. McInerney, and D. F. Bradford, “Carbon Dioxide Sequestration: How Much and When?” *Climatic Change*, Vol. 88, 2008, pp. 267–291.

Knutti, R., M. A. A. Rugenstein, and G. C. Hegerl, “Beyond Equilibrium Climate Sensitivity,” *Nature Geoscience*, Vol. 10, No. 10, 2017, p. 727.

Kriegler, E., J. W. Hall, H. Held, R. Dawson, and H. J. Schellnhuber, “Imprecise Probability Assessment of Tipping Points in the Climate System,” *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Vol. 106, No. 13, 2009, pp. 5041–5046.

Lackner, K., “The Thermodynamics of Direct Air Capture of Carbon Dioxide,” *Energy*, Vol. 50, 2013, pp. 38–46.

Lempert, Robert J., “Scenarios That Illuminate Vulnerabilities and Robust Responses,” *Climatic Change*, Vol. 117, 2013, pp. 627–646.

Lempert, Robert J., D. G. Groves, S. W. Popper, and S. C. Bankes, “A General, Analytic Method for Generating Robust Strategies and Narrative Scenarios,” *Management Science*, Vol. 52, No. 4, 2006, pp. 514–528.

Lempert, Robert J., Steven W. Popper, and Steven C. Bankes, *Shaping the Next One Hundred Years: New Methods for Quantitative, Long-Term Policy Analysis*, Santa Monica, Calif.: RAND Corporation, MR-1626-RPC, 2003. As of March 29, 2018:
https://www.rand.org/pubs/monograph_reports/MR1626.html

Leventhal, H., “Effects of Fear and Specificity of Recommendation Upon Attitudes and Behavior,” *Journal of Personality and Social Psychology*, Vol. 2, No. 1, 1965, pp. 20–29.

- Maddison, A., *The World Economy, Volume 1: A Millennial Perspective*, Paris: Organisation for Economic Co-operation and Development, 2001.
- Morton, O., *The Planet Remade: How Geoengineering Could Change the World*, Princeton, N. J.: Princeton University Press, 2015.
- Moss, R. H., “Avoiding Dangerous Interference in the Climate System—the Roles of Values, Science and Policy,” *Global Environmental Change-Human and Policy Dimensions*, Vol. 5, No. 1, 1995, pp. 3–6.
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, *Assessment of Approaches to Updating the Social Cost of Carbon: Phase 1 Report on a Near-Term Update*, Washington, D.C.: National Academies Press, 2016.
- National Research Council, *Climate Intervention: Carbon Dioxide Removal and Reliable Sequestration*, Washington, D.C.: National Academies Press, 2015.
- Nordhaus, W. D., *Managing the Global Commons: The Economics of Climate Change*, Cambridge, Mass.: MIT Press, 1994.
- , “Revisiting the Social Cost of Carbon,” *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Vol. 114, No. 7, February 2017-a, pp. 1518–1523. As of March 28, 2018:
<http://www.pnas.org/content/114/7/1518.long>
- , “Scientific and Economic Background on DICE Models,” webpage, October 2017-b. As of March 29, 2018:
<https://sites.google.com/site/williamdnordhaus/dice-rice>
- Nordhaus, W. D., and P. Sztorc, *DICE 2013R: Introduction and User’s Manual*, October 2013. As of March 30, 2018:
http://www.econ.yale.edu/~nordhaus/homepage/homepage/documents/DICE_Manual_100413r1.pdf
- Olson, R., R. Sriver, M. Goes, N. M. Urban, H. D. Matthews, M. Haran, and K. Keller, “A Climate Sensitivity Estimate Using Global Average Observations and an Earth System Model,” *Journal of Geophysical Research, Atmospheres*, Vol. 117, 2012.
- Omenn, G. S., “Grand Challenges and Great Opportunities in Science, Technology, and Public Policy,” *Science*, Vol. 314, No. 5806, 2006, pp. 1696–1704.
- Patashnik, E., “After the Public Interest Prevails: The Political Sustainability of Policy Reforms,” *Governance: An International Journal of Policy, Administration, and Institutions*, Vol. 16, No. 2, 2003, pp. 203–234.

- , *Reforms at Risk: What Happens After Major Policy Changes Are Enacted*, Princeton, N. J.: Princeton University Press, 2008.
- Pidgeon, N., and B. Fischhoff, “The Role of Social and Decision Sciences in Communicating Uncertain Climate Risks,” *Nature Climate Change*, Vol. 1, 2011, pp. 35–41.
- Psarras, P., H. Krutka, M. Fajardy, Z. Zhang, S. Liguori, N. M. Dowell, and J. Wilcox, “Slicing the Pie: How Big Could Carbon Dioxide Removal Be?” *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, Vol. 6, No. 5, 2017.
- Purdy, J., *After Nature: A Politics for the Anthropocene*, Cambridge, Mass: Harvard University Press, 2015.
- Renn, O., *Risk Governance: Coping with Uncertainty in a Complex World*, London: Routledge, 2008.
- Rogelj, J., M. Meinshausen, J. Sedlacek, and R. Knutti, “Implications of Potentially Lower Climate Sensitivity on Climate Projections and Policy,” *Environmental Research Letters*, Vol. 9, No. 3, 2014.
- Schleussner, C.-F., J. Rogelj, M. Schaeffer, T. Lissner, R. Licker, E. M. Fischer, R. Knutti, A. Levermann, K. Frieler, and W. Hare, “Science and Policy Characteristics of the Paris Agreement Temperature Goal,” *Nature Climate Change*, Vol. 6, No. 9, 2016, pp. 827–835.
- Stilgoe, J., *Experiment Earth: Responsible Innovation in Geoengineering*, London: Routledge, 2015.
- United Nations, Paris Agreement: Opening for Signature, December 12, 2015. As of March 28, 2018:
<https://treaties.un.org/doc/Publication/CN/2016/CN.63.2016-Eng.pdf>
- United Nations Framework Convention on Climate Change, 1992. As of March 29, 2018:
<https://unfccc.int/resource/docs/convkp/conveng.pdf>
- , Adoption of the Paris Agreement: Paris Agreement, December 2015.
https://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/english_paris_agreement.pdf
- van Asselt, M. and J. Rotmans, “Uncertainties in Perspective,” in J. Rotmans and B. de Vries, eds., *Perspectives on Global Change*, Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1997.
- Wagner, G. and M. L. Weitzman, *Climate Shock: The Economic Consequences of a Hotter Planet*, Princeton, N. J.: Princeton University Press, 2015.
- Weitzman, M. L., “GHG Targets as Insurance Against Catastrophic Climate Damages,” *Journal of Public Economic Theory*, Vol. 14, No. 2, 2012, pp. 221–244.

- White House, *United States Mid-Century Strategy for Deep Decarbonization*, Washington, D.C., November 2016. As of March 29, 2018:
https://unfccc.int/files/focus/long-term_strategies/application/pdf/us_mid_century_strategy.pdf
- Witte, K., and M. Allen, “A Meta-Analysis of Fear Appeals: Implications for Effective Public Health Campaigns,” *Health Education and Behavior*, Vol. 27, No 5, 2000, pp. 591–615.
- World Bank, “Military Expenditure (% of GDP),” webpage, undated. As of March 29, 2018:
<https://data.worldbank.org/indicator/MS.MIL.XPND.GD.ZS>
- Wuebbles, D. J., D.W. Fahey, K.A. Hibbard, D.J. Dokken, B.C. Stewart, and T. K. Maycock, eds., *Climate Science Special Report: A Sustained Assessment Activity of the U.S. Global Change Research Program*, Washington, D.C., 2017. As of March 29, 2018:
<http://www.nytimes.com/packages/pdf/climate/2017/climate-report-final-draft-clean.pdf>
- Zevenhoven, R., and P. Kilpinen, “Flue Gases and Fuel Gases,” Helsinki University of Technology, 2001.