

2021

碳中和目标与气候风险 气候变化经济损失评估

滕 飞 王天鹏 郭江汶



清华大学能源环境经济研究所
INSTITUTE of ENERGY, ENVIRONMENT and ECONOMY
TSINGHUA UNIVERSITY



执行摘要

气候变化对经济的影响与损失是明确的，中国受气候变化的不利影响高于全球平均水平，气候风险及气候安全问题日益突出。科学证据表明，气候变化的事实毋庸置疑，并且已经对全球自然生态系统和人类社会经济系统产生显著影响。如果不加控制，未来全球气候变化的影响和损失都将加剧，人类赖以生存的自然生态系统和社会经济系统面临严峻风险。中国气候增温幅度明显高于全球平均。上世纪中期以来，中国年平均气温上升速率为每十年升温 0.27°C ，高于同期全球平均水平。受气候变化影响，中国高温热浪事件明显增多，年降水日数减少，但暴雨日数增加，区域性和阶段性干旱加剧。由于气候灾害频发，导致的年均直接经济损失超过 500 亿美元，占国内生产总值的约 0.4%。未来随着经济总量增长以及全球经济一体化进程加深，气候变化对我国经济安全造成的风险将日益增加。

气候变化将通过极端天气事件、缓发事件、临界点及其级联事件等产生气候损失，而现有气候灾害损失统计仅包括部分极端天气事件造成的直接损失，可能显著低估了气候风险。近年来，气候变化的不利影响日益显现。世界气象组织估计，在过去 50 年，气候灾害总数超过 11000 起，死亡人数超过 200 万人，而经济损失高达 3.64 万亿美元。但现有的气候灾害损失统计仅关注了极端天气事件造成的直接气候损失，而没有包括缓发事件损失及间接损失。而未来由于气候变化接近或超过重要的阈值，可能引发灾难性损失，并可能通过复杂的社会经济网络导致多个风险同时超出临界点，产生级联风险。目前对缓发事件、临界点及其级联风险的研究尚不充分。但对于中国而言，仅气候变化热损失造成的工作时间损失一项即相当于新冠疫情影响的 40%，潜在的气候风险或远大于气候灾害的直接经济损失统计。

实现碳中和目标可以使中国避免约 80% 的累计气候变化损失，在 2020-2100 年间减少约 134 万亿美元的气候损失。未来的气候损失与全球温升密切相关，并随温升非线性增加。在 NDC 情景下，全球温升在 2100 年将达到 3.5°C，气候变化损失占中国 GDP 的比重将达到 5.6%，而累计气候变化损失将达到 189 万亿美元。在碳中和情景下，2100 年全球温升可以控制在 1.5°C 左右，而中国的气候变化损失可以控制在 GDP 的 1% 以下，累计气候变化损失将减少到 55 万亿美元。碳中和目标将减少累计 134 万亿美元的气候损失。85% 以上的气候损失将发生在 2050-2100 年，因此拖延行动意味着将巨大的气候风险转移给后代，并且为社会经济的长期可持续发展埋下隐患。

气候变化经济损失的评估具有不确定性，但这些不确定性并不是不行动的理由，相反这些不确定性表明更大范围的气候风险可能存在，因此实现碳中和目标是有效管理气候风险的必要策略。气候变化是复杂的物理过程，而气候损失的评估则涉及到同样复杂的社会经济系统，以及气候系统与社会经济系统的复杂交互。虽然在过去几十年，对于气候损失机理及损失函数的研究大大推进了人们对于气候风险的理解，但仍远未达到充分的程度。但气候变化及气候损失的不确定性，并不是不行动的理由。由于缓发事件、临界点和级联风险的影响，气候变化损失的范围可能远远超过我们的预估。因此气候损失的不确定性实际上增强了，而不是削弱了行动的理由。从风险管理的角度，中国的碳中和目标不仅是能源系统和经济结构可持续转型的目标，更是减少气候变化经济损失的最安全和最有效的方式。



气候变化是当今人类面临的最严重的全球性环境问题，也是最具挑战的风险管理问题。气候变化的风险主要来自于三个方面¹，一是全球低碳转型受挫、温室气体排放持续增加的风险；二是气候变化引起的直接影响超过“无法忍受”的阈值的风险；三是气候变化风险与其他风险相互作用，使得灾害叠加、放大形成的系统性风险。由于气候变化的广泛影响和人类社会在影响面前的脆弱性，气候变化正进一步对全球各国的国家安全和经济繁荣带来严重威胁。中英两国的研究团队对气候变化风险进行了多年的联合研究，本报告将在之前的研究基础之上对中国气候变化的经济损失，及碳中和目标下中国可以避免的经济损失进行定量评估。

一、中国的碳中和目标及进展

2020年9月22日，中国国家主席习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上首次对外宣布了中国的碳中和目标²。根据这一目标，中国将提高国家自主贡献力度，采取更加有力的应对气候变化政策和措施，二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值，并努力争取到2060年前实现“碳中和”。中国宣布的“碳中和”目标，引起了国际社会的极大重视，为疫情后停滞不前的全球气候议程注入了强大动力。随后，习近平主席在2020年12月召开的气候雄心峰会上进一步阐明了中国的减排目标³：除碳达峰及碳中和目标外，到2030年，中国单位国内生产总值二氧化碳排放将比2005年下降65%以上，为实现碳中和提出了更加具体的阶段性目标和要求。2021年3月11日，十三届全国人大四次会议表决通过了关于《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要（草案）》（下称《“十四五”规划纲要》）的决议⁴。在《“十四五”规划纲要》中，将2030年前碳达峰写入远景目标，并将三个与气候变化直接相关的约束性目标列入“十四五”时期经济社会发展主要目标：包括单位国内生产总值能源消耗和二氧化碳排放分别降低13.5%和18%，以及森林覆盖率提高到24.1%。

2021 年 COP26 前夕，中共中央和国务院联合发布了《中共中央国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》（下称《意见》）⁵。《意见》总结了碳中和的主要目标，并提出了 2025 年、2030 年和 2060 年的三个阶段性目标。其中，到 2025 年，单位国内生产总值能耗比 2020 年下降 13.5%，单位国内生产总值二氧化碳排放比 2020 年下降 18%，非化石能源消费比重达到 20% 左右，森林覆盖率达到 24.1%，森林蓄积量达到 180 亿立方米。到 2030 年单位国内生产总值二氧化碳排放比 2005 年下降 65% 以上，非化石能源消费比重达到 25% 左右，风电、太阳能发电总装机容量达到 12 亿千瓦以上，森林覆盖率达到 25% 左右，森林蓄积量达到 190 亿立方米，二氧化碳排放达到峰值并实现稳中有降。2060 年非化石能源消费比重达到 80% 以上，实现碳中和目标。2021 年 10 月 28 日，中国向联合国气候变化公约秘书处递交了《中国落实国家自主贡献成效和新目标新举措》及《中国本世纪中叶长期温室气体低排放发展战略》两份文件。按《巴黎协定》及其决定要求，对 2015 年提出的 2030 年国家自主贡献（NDC）目标进行了更新与强化。

表 1 中国气候变化减缓目标及实现情况汇总

	2020 年 NAMA 目标	2020 实际完成情况	2025 “十四五”规划目标	2030NDC	更新后的 2030NDC	2060 目标
二氧化碳排放目标				2030 年左右达峰并争取尽早达峰	二氧化碳排放力争 2030 年前达到峰值	实现碳中和目标
风电、太阳能总装机容量		5.35 亿千瓦***			12 亿千瓦以上	
单位 GDP 二氧化碳排放强度	比 2005 年下降 40-45%	比 2005 年下降 48.1%	比 2020 年下降 18% (相当于比 2005 年下降 57.4%)	比 2005 年下降 60%-65%	比 2005 年下降 65% 以上	
非化石能源占能源消费比重	15%	15.9%	20% 左右	20% 左右	25% 左右	80% 以上
森林覆盖率	比 2005 年增加 4000 万公顷**	23.04% (相当于增加 4600 万公顷)	24.1%		25% 左右*	
森林蓄积量	比 2005 年增加 13 亿立方米**	175.6 亿立方米 (相当于增加 51 亿立方米)	180 亿立方米	比 2005 年增加 45 亿立方米	比 2005 年增加 60 亿立方米 190 亿立方米*	

注：

*《“十四五”规划纲要》中列入的约束性目标，但未列入中国提交的更新 NDC

** 根据第六次全国森林资源清查数据，中国 2005 年森林面积 1.75 亿公顷（森林覆盖率为 18.2%），森林蓄积量 124.56 亿立方米

*** 包括并网风电及并网光伏

括号中为作者测算数据，非官方报告数据

正式将国内承诺转化为国际承诺。这是中国在 2009 年提交的国家适当减缓行动目标 (NAMAs)、2015 年提交的 2030 年 NDC 目标后,再一次向联合国气候变化公约秘书处递交国家应对气候变化目标。表 1 总结了 2009 年历次提交的气候变化目标及其完成情况。

作为世界最大的发展中国家,中国的人均能源消费远低于发达国家。中国在碳排放和能源消费的“双上升”阶段决定宣布在 2030 年前实现碳达峰、2060 年前实现碳中和的目标,是在国际社会面对气候危机与疫后复苏的双重挑战面前,展现出的强而有力的大国担当。从碳达峰到碳中和、零排放,欧盟大约需要 60 年时间,美国需要 45 年,而中国则力争用 30 年时间实现从碳达峰到碳中和,速度和难度均远大于发达国家。中国的碳中和之路面临巨大挑战,为应对这一艰巨的转型挑战。中国政府在过去一年中在制度和机制上进行了充分的准备。

2021 年 5 月,中国成立了碳达峰碳中和工作领导小组。领导小组是中国处理跨部门或综合性事务的特殊议事协调机制。早在 2007 年,中国在国务院下就成立了“国家应对气候变化及节能减排工作领导小组”作为应对气候变化的议事协调机构。此次新成立的碳达峰碳中和工作领导小组和已有的气候变化领导小组共同构成了中国应对气候变化的顶层制度设计。自 2021 年 5 月碳达峰碳中和工作领导小组第一次全体会议以来,中国各级政府抓紧制定碳达峰、碳中和的时间表、路线图,并编制了 2030 年前碳达峰行动方案和分领域、分行业实施方案,即“1+N”政策体系。其中 2021 年 10 月 24 日发布的《意见》作为“1+N”政策体系中的“1”,分别明确了 2025 年、2030 年和 2060 年的三个阶段性目标,对指导和统筹相关工作起到纲领性的作用。10 月 26 日,国务院印发了《2030 年前碳达峰行动方案》(下称《行动方案》)⁶,作为“N”系列政策中的首要文件,对未来计划出台的 30 多项“N”系列政策起到抓总和统领作用。《行动方案》主要聚焦于如何实现 2030 年前碳达峰目标,分 2025 年和 2030 年两个阶段,对推进碳达峰工作进行了总体部署。《行动方案》详尽阐述了实现碳达峰具体需要开展的工作和解决的问题,并提出了“碳达峰十大行动”:具体包括能源绿色低碳转型、节能降碳增效、工业领域碳达峰、城乡建设碳达峰、交通运输绿色低碳、循环经济助力降碳、绿色低碳科技创新、碳汇能力巩固提升、绿色低碳全民、各地区梯次有序碳达峰行动等。

碳达峰、碳中和“1+N”政策体系的两项关键性文件和国家自主贡献目标在气候变化缔约方大会 COP26 召开前夕相继发布和更新,展现了中国推动国内和国际气候治理的雄心。中国在 2030 年前实现碳达峰、2060 年实现碳中和的目标,一方面将有效促进自身能源结构转型,适应新时期中国经济社会高质量发展的内在要求;另一方面,这一目标也是中国积极参与并引领全球气候治理的郑重承诺,为全球应对气候变化和实现可持续发展目标贡献了中国力量和智慧。

实现碳中和目标需要中国进行艰苦的努力以实现能源和经济系统的巨大转型，在近中期和长期都会对中国的发展路径产生深远影响。这一影响是双向、复杂且动态的：高碳基础设施的提前退役和碳约束的引入无疑将影响要素价格，对中国经济的短期增长产生影响；但同时通过向碳中和的系统性转型，中国经济在中长期将更具发展韧性与潜力。现有文献大多以 GDP 作为指标，以评估了减排对经济发展的宏观影响。一般而言，基于将 GDP 作为内生变量的可计算一般均衡模型（CGE）的大多数研究表明减排将对 GDP 产生负面影响。这主要由于以下两个机制的相互作用⁷：首先，由于减排引入了排放约束和碳价格，碳密集型的产品和服务价格将随之上升，进而提高了企业的要素成本和家庭最终服务的成本；其次，减排需要额外新增投资，这些新增投资将挤占其他部门的投资或消费。但也有基于凯恩斯模型的研究表明⁸，减排行动增加的公共投资实际上提高了 GDP。现有研究主要的局限在于，大多数评估模型可以捕捉到减排与 GDP 之间的直接联系，但通常没有捕捉到间接联系，如空气质量提高带来的经济效益，以及本报告将特别关注的避免气候损失带来的经济效益。系统评估这些效益有利于我们从成本和效益两个角度更全面地理解碳中和目标的重要性和紧迫性。

正如 15 年前斯特恩爵士带领团队发布的《斯特恩报告》⁹ 所告诉我们的，面对气候变化，不行动带来的损失可能远大于减排的成本。在我们用“一切照旧”（BaU）来形容不应对气候变化的基准情景时，我们应当意识到，实际上气候系统并不会一切照旧的运行。在排放“一切照旧”时，气候系统及其风险将产生巨大而不可逆转的变化。本报告将聚焦于评估未来不同情景下中国的气候损失，以及中国碳中和目标可以避免的气候损失。本报告的结果将表明，通过和全球一同实现碳中和目标，中国可以很大程度上避免气候变化带来的负面影响，并减少气候变化通过导致能源消费增加、粮食减产、生产率下降和海平面上升所带来的经济损失及冲击。换言之，这些避免的气候损失应被考虑为采取减排行动的经济效益。这些潜在的巨大经济效益，是中国采取积极减排行动，实现碳中和目标的重要原因。



二、中国的气候灾害直接经济损失

气候科学的研究已经证实温室气体排放会导致大气中温室气体的浓度升高，从而导致更高的气候强迫¹⁰。并导致平均地表温度升高。而地球能量收支的变化进而显著影响全球水循环和降水模式，进而导致极端天气事件的频率和强度增加，例如强降水、洪水，以及干旱和热浪。世界气象组织的研究表明¹¹，在气候变化的影响下，全球极端天气的强度和频率都在增加。在过去 50 年，天气灾害的数量增加了 5 倍。虽然由于早期预警系统和灾害管理的改进，由于天气灾害造成的死亡人数减少了约 3 倍。但在过去 50 年，气候灾害总数超过 11000 起，死亡人数超过 200 万人，而经济损失高达 3.64 万亿美元。其中导致损失最大的依次是干旱、风暴、洪水和极端气温。而在未来气候变化条件下，这些极端天气发生的频率和强度将进一步增加。最近发布的 IPCC 第六次评估报告第一工作组报告指出，气候系统的变化与未来全球变暖加剧直接相关。未来极端事件的频率和强都将增加，包括极端高温、热浪、强降水、干旱、热带气旋，北极海冰、积雪和多年冻土的进一步减少。而对中国气候变化的研究表明，中国的温升幅度显著高于全球平均水平。1960 年以来，中国区域每 10 年平均气温上升约为 0.27°C ，高于同期全球水平¹²。对于中国天气灾害造成的经济损失的分析则表明，在过去十年，天气灾害带来的年直接经济损失超过 500 亿美元，约占中国年 GDP 的 0.4%（图 1）。而未来随着气候变化日益严重，天气灾害的强度、频率和影响将进一步加强，对中国经济的长期稳定发展构成系统性风险。



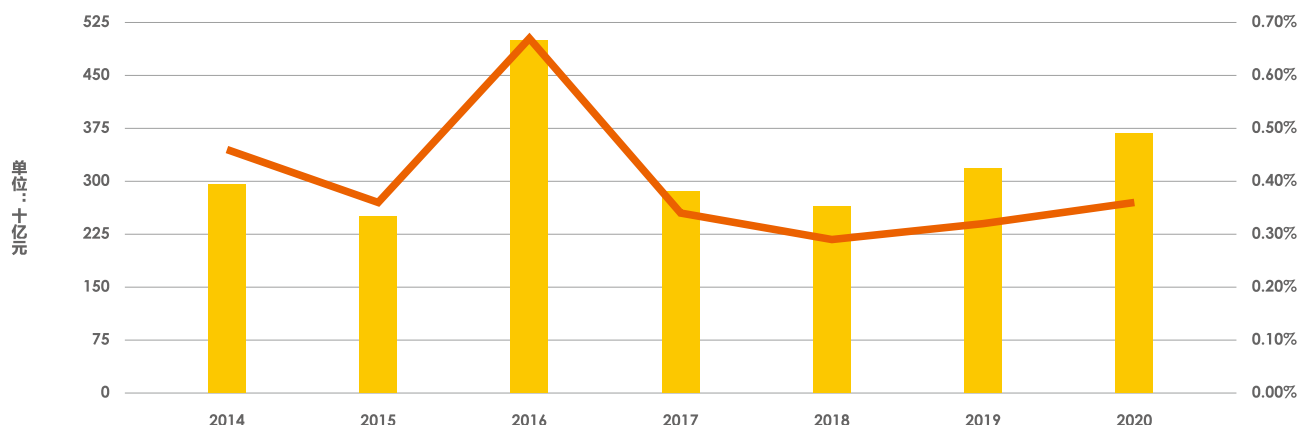


图 1 中国气候灾害直接损失及 GDP 占比 (2014-2020)

注：气候灾害直接损失数据来自历年《中国气候公报》，占 GDP 比例为作者测算

但以上对于气候灾害的统计并不能完整勾勒出气候变化损失的全貌。这是由于以下几个原因：首先，气候灾害是基于被认为属于“灾害”的极端天气事件进行记录的，例如洪水、干旱以及野火等。而一些缓发事件（Slow onset）如海平面上升及生物多样性损失等并未被考虑在内；其次，气候灾害通常只统计直接财产损失和人员损失，而并不包括次生的经济影响，例如由于洪水导致受灾地区工商业活动停止，进而导致的人员收入与生计损失。这些由于缓发气候事件造成的直接和间接经济损失可能远超过目前气候灾害统计的直接损失。例如《柳叶刀》的研究表明¹³（图 2），2019 年全球由于热事件造成的劳动时间损失即达到 3000 亿小时，是由于新冠肺炎造成的全球 2019 年劳动时间损失的一半。而对中国而言，2019 年热事件约造成了中国 283 亿小时的劳动时间损失，是新冠肺炎造成的劳动时间损失的 40%。因此仅从劳动时间的影响估计，气候变化造成的影响相当于每 2-3 年遭受一次新冠疫情的冲击。本报告将在下一节分析气候变化在未来可能对中国经济造成的关键影响。

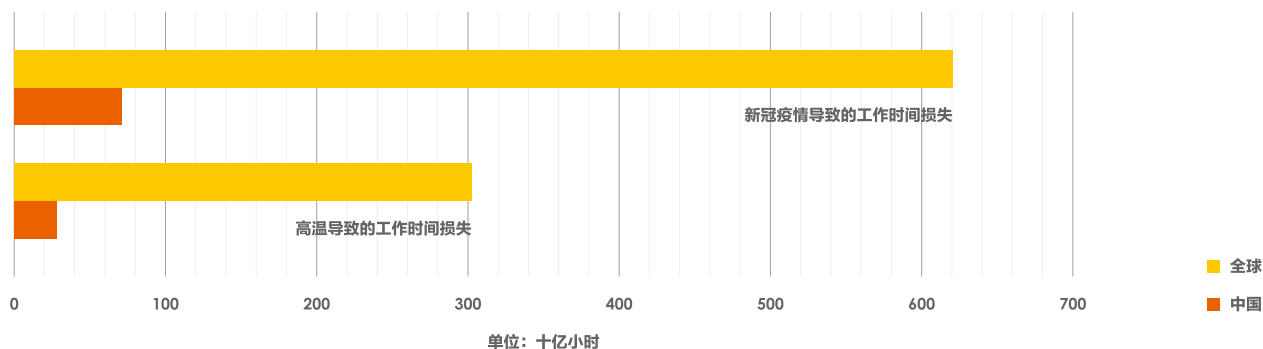


图 2 由于热事件及新冠导致的工作时间损失比较：中国与全球

三、未来的气候变化损失

全球气候变化会改变全球及区域气候特征，特别是增加极端天气事件的频率和强度，如极端热事件增多、干旱洪水发生频率增加、海平面加速上升等。这些区域气候特征的变化会改变区域生态系统，进而造成其他间接影响，例如物种多样性丧失及灭绝风险增加、森林和高纬度苔原的退化等¹⁴。并且由于生态系统为人类社会提供了诸多服务，气候变化对生态系统的影响也会波及到人类社会经济系统。例如，气候变化导致海洋中鱼类资源损失，会进一步降低渔业和养殖业的生产效率¹⁵。除了通过生态系统变化影响人类社会经济系统外，气候变化对人类社会的直接影响也非常显著。随着全球变暖程度的加剧，气候变化可能会造成农作物减产，进而影响粮食安全。同时，气候变化还会导致部分疾病发病率上升、制冷需求增加、沿海土地和资产淹没等，这些都会对社会经济系统的运行形成冲击^{16、17}。以下部分将对不同类型的气候变化影响分别进行介绍。

气候变化对能源系统的影响

气候变化对能源系统的影响涉及到不同的方面，包括能源的需求和供应等¹⁸。在能源需求方面，气候变化导致的平均温度及其分布的变化会改变用能行为模式，并显著影响供暖和制冷需求。在能源供应方面，气候变化可能会影响火电和核电发电机组的冷却水温度，进而影响发电机组的效率。而可再生能源，包括水电、太阳能发电和风电，也会受气候变化导致的降水、气温、风速和太阳辐射变化的影响¹⁹⁻²¹。同时，气候变化和极端天气事件也会影响输配电基础设施或传输容量，从而影响能源系统可靠性²²。

从能源需求来看，现有研究普遍认为气候变化会导致未来制冷需求的增加和采暖需求的下降，但对影响的程度尚有分歧。一些研究认为这两种影响可以互相抵消，因而在全球层面，气候变化对总的能源需求影响可以忽略。例如，最近的一项研究利用计量经济学方法研究了温度变化与能源需求之间的关系，发现虽然热带地区国家将因气候变化而大幅增加对电力的消费，但温带和寒带地区

国家的供暖需求减少抵消了热带地区国家电力需求的增长，因此未来气候变化对总能源需求的影响较小²³。然而，也有一些研究结果表明，考虑了非住宅部门的能源需求变化，以及空调普及率的放大效应后¹⁸，气候变化将导致能源需求迅速增长。在同时考虑了气候变化对农业、工业、商业和居民部门的能源需求变化后，研究结果表明在 RCP8.5 情景下 2050 年前后全球受气候影响的能源需求将增加 25-58%，而在 RCP4.5 情景下，全球能源需求在 2050 年会上升 11-27%²⁴。虽然现有研究均认为供热需求的减少可以不同程度地抵消制冷需求增加，但由于供暖通常由燃油或燃气锅炉提供，制冷则主要依靠电力，因此几乎所有研究都表明未来全球电力需求将因气候变化的驱动而增长¹⁸。与全球的情况类似，不同研究对于中国能源需求受气候变化的影响程度的结论也存在较大差异。一些研究认为，在 RCP4.5 情景下，2021 到 2050 年，国内电力需求将增加 58.6%²⁵。而另一些研究则认为，在 RCP2.6、4.5 和 8.5 情景下，到 2100 年，气候变化引起的中国用电量变化分别占 2017 年用电量的 1.0%、3.53% 和 8.53%²⁶。这些研究之间的差异体现了气候变化对能源需求的影响程度尚有争议，结果存在较大不确定性。

从能源供应的角度来看，气候变化的影响主要体现在对发电效率的影响和对风、光、水等可再生资源的影响。火电厂和核电厂都是通过加热水变成蒸汽，进而推动涡轮机转动发电。该热力循环过程中会产生大量废热，一般需要冷却水带走热量。现有研究发现，冷却水的温度每升高 1℃，火电厂和核电厂的输出功率会下降 0.32%~1%^{27、28}。而气候变化导致河流径流量变化也会影响冷却水的使用，进而影响发电效率。与火电和核电相比，燃气发电几乎不需要冷却水，其输出功率主要受环境空气干球温度的影响。环境空气温度升高会降低空气密度，导致通过燃气轮机的空气质量流量减少。

对于风电、光电和水电等可再生能源发电，气候变化会影响风速、光照、水资源分布等，进而影响可再生能源的发电能力。早期研究认为在气候变化情景下我国水电可用容量将减少³⁰。但最近的研究倾向于认为，在气候变化情景下，由于径流增加我国水电发电量到 2100 年相比 2011 年增加 3.16~21.93%³¹。气候变化也会改变全球的温差分布，进而影响风电发电量。现有研究发现在全球变暖背景下，北极和陆地升温明显，北半球的高低纬和陆海温差下降，北半球风能减弱，全球风能资源预计将向南转移³²，因此我国大部分地区的风电资源都将减少³³。对于光伏发电的影响，研究通常认为气候变化对区域太阳能发电有不显著或者很小的正向或负向影响^{18、33}，此外云及其分布也是影响光伏发电的重要因素。除了发电资源和发电效率外，气候变化还会通过影响能源的运输，尤其是影响输配电系统的稳定运行来影响能源供应。总体而言，气候变化对能源供应和需求均有不同影响，但对空调电力需求的影响更加突出，这不仅会造成电力需求的额外增长，也会对未来电力系统的负荷和峰荷产生重要影响。

气候变化对劳动生产率的影响

气候变化造成的高温天气增多会使得工作环境，尤其是室外作业环境变得恶劣，进而影响劳动生产效率。由于劳动生产率直接影响经济产出和国民收入，因而评估气候变化对劳动生产率的影响对于量化气候损失至关重要。很多研究都表明，气候变化造成的职业热暴露会对全球层面的劳动生产率有显著的负面影响，其影响因素包括气温、湿度、工作强度等³⁵⁻³⁸。为了量化这些因素对劳动生产率的影响，现有研究通常将湿球黑球温度（Wet Bulb Globe Temperature, WBGT）作为劳动生产率的主要决定因素，该参数综合了空气温度与湿度等多种气候条件³⁸。

现有研究表明，在 WBGT 超过一定阈值后，劳动生产率会迅速下降，且不同强度的工作类型对于 WBGT 的敏感程度也有区别。一般认为，农业、建筑业等室外暴露多的行业更易受气候变化的负面影响，而室内作业和室外阴凉作业等工作类型所受的热暴露影响相对较小³⁸。Dasgupta 等人的研究发现，室内或室外阴凉处的全球有效劳动力在 3.0° C 的变暖情况下会减少 18.3%，其中非洲地区受到的负面影响最大，有效劳动力会下降 25.9%。而在高暴露工作条件和 3.0° C 升温情景下，气候变化对劳动生产率的负面影响显著增大，预计有效劳动力的平均减少率在非洲达到 32.8%³⁹。Knittel 等人的研究也表明，到 2050 年，东南亚和中东地区高暴露工作的年平均劳动生产率在 RCP4.5 情景下降了 31%，而在 RCP8.5 情景下的年平均劳动生产率下降了 38%⁴⁰。

劳动生产率的降低会导致经济产出的下滑。在调研了不同研究的评估结果后，一项分析表明在考虑到适应措施后，到 2100 年因热相关劳动生产率变化造成的全球经济损失将占全球 GDP 的 0.31%（0.14–0.5%，RCP2.6 情景）至 2.6%（1.4–4%，RCP8.5 情景），由生产率降低的经济损失主要发生在南亚和东南亚、撒哈拉以南非洲和中美洲³⁶。而如果不考虑适应措施，气候损失将进一步增加。



气候变化对农业的影响

气候变化对农业部门的冲击是深刻且复杂的。气候变化将改变农作物生长所需的气候条件，从而对主要农林业作物的产量产生影响^{41、42}。气候变化导致的温度变化是影响农业产出的重要因素。由于不同作物都有适宜于其生长的最佳温度，如果当地的气温低于其最适温度，气候变化导致的温度升高可能会使作物产量增加。相反，如果当前温度超过作物的最佳温度，气候变化会进一步导致作物的产量下降⁴²。与气温类似，降水条件的改变也会对不同的作物类型造成差异化的影响。此外，极端气候事件如洪涝、干旱等会对农作物生长造成灾难性影响，从而大幅降低农业产出⁴³。除了气候变化的负面影响之外，实验室研究还表明，气候变化伴随的二氧化碳浓度升高对农作物生长有施肥效应，可能对农业部门产生正向作用⁴⁴。但最近的研究表明，由于其他营养素的限制，二氧化碳的施肥效应将会快速下降。

目前已有大量研究分析了气候变化对作物产量的影响，这些研究大致可以分为两类。一类研究是借助基于过程的农业模型从功能上模拟温度、降水、CO₂ 浓度、土壤条件等气候和生态要素对作物产量的影响。目前，农业模型比对和改进项目 (AgMIP) 协调了多个基于过程的农业模型，以分析天气参数对站点级别农作物产量的影响⁴⁵。基于过程的农业模型模拟精度高，且可以进行跨模型比较，但其对计算资源和专业知识的都要求都很高，应用难度较大。除了基于过程的农业模型外，统计模型也是研究气候变化如何影响农业产出的重要工具。统计模型主要基于历史观察数据，通过回归分析估计温度、降水等气候参数对特定国家或地区作物产量的影响⁴⁶。与基于过程的农业模型相比，统计模型建模相对简单，但受限于数据可获得性问题，其无法进行站点级别的分析。此外，由于气候变化很可能导致未来的气候条件超出历史观测的范围，统计模型对样本外情形进行预测的能力相对较弱。

几乎所有的基于过程的农业模型和统计模型研究都显示气候变化会严重威胁未来全球的农业产量。最新的一项研究基于最新版本的农业过程模型分析了气候变化对主要农作物产量的影响，发现在 SSP5-RCP85 情景下全球玉米、大豆和水稻的产量在本世纪末均会受到气候变化的负面影响，其中玉米的产量将下降约 24%⁴⁷。其他利用过程模型的研究也确认了气候变化对农业产量的负面影响，例如一项基于 AgMIP 中五个过程模型的研究分析了气候变化对农作物产量的影响，结果显示在 RCP85 情景下全球平均农业产量到 2050 年将减少 17%⁴⁸。基于计量的统计模型得到了一致的结果，基于动态计量经济学模型对全球网格化年度作物产量的面板数据集进行的分析表明，到本世纪中期，气候变化可能使全球作物产量减少 3-12%，到本世纪末减少 11-25%⁴⁹。

气候变化对海平面上升的影响

气候变化将导致海平面上升，并显著影响沿海地区和岛屿国家的社会生态系统。根据 IPCC AR6 第六次评估报告，自 1901 年以来，全球平均海平面上升了约 20 厘米，这种上升速度是前所未有的⁵⁰。由于海平面上升的预估具有较高的不确定性，也有研究基于专家调查数据对未来全球平均海平面（GMSL）上升进行了预估，结果表明在 RCP2.6 情景下，2100 年 GMSL 可能上升 0.30-0.65 米，到 2300 年上升 0.54-2.15 米。而在 RCP 8.5 下，到 2100 年 GMSL 可能上升 0.63-1.32 米，到 2300 年上升 1.67-5.61 米⁵¹。海平面上升的影响主要体现在对沿海地区造成的危害，包括低纬度地区的淹没和洪水，湿地侵蚀，生态系统破坏，工业、农业用地及固定资产淹没破坏，以及沿海地区人口向内陆迁移等。

为了对沿海地区对海平面上升的脆弱性进行评估，需要考虑诸多要素，包括确定受海平面上升影响的人群、评估因海平面上升损失的土地、湿地、资产、分析潜在的适应和保护成本（如修建堤坝）等。全球或国家层面的海平面上升影响评估需要依托大量高精度的地理信息数据和社会经济数据来进行建模。这些模型可以评估海平面上升和社会经济发展在各段海岸线造成的生物物理和社会经济后果，如海岸侵蚀、沿海洪水和湿地变化等方面的影响。

从社会经济角度来看，海平面上升可以在未来造成巨大的经济损失。利用 DIVA 模型的分析表明，海平面上升将造成显著的经济影响。与 1.5°C 温升目标相比，2.0°C 下的全球经济损失会额外增加约每年 1.4 万亿美元。而在 RCP 8.5 情景下，全球每年因洪水产生的损失在 2100 年可以达到全球 GDP 的 2.8%⁵⁴。如果不采取适应措施，在全球平均海平面上升 25-123 厘米的情况下，预计 2100 年全球 0.2-4.6% 的人口居住区将被淹没，每年的损失为全球国内生产总值的 0.3-9.3%⁵⁵。如果用堤坝来保护海岸，2100 年的年度投资和维护成本为 120-710 亿美元，远小于海平面上升导致的经济损失。



气候变化对人体健康的影响

气候变化会从多个角度影响人类健康。气候要素的改变会导致部分疾病的发病率和死亡率增加。而由于温度变化导致传染病虫媒分布发生变化，一些以前未发生过的健康威胁可能由于气候变化在某些地区开始出现。现有研究考虑的气候变化健康影响主要包括极端高温热死亡、极端事件灾害、传染性疾病的发病率上升、粮食短缺造成的营养不良等⁵⁶⁻⁵⁹。

极端气候事件是人类健康的一大威胁。极端高温天气增加将造成热相关疾病或死亡增加，死亡原因包括心血管和呼吸系统并发症、肾衰竭、电解质失衡、胎儿流产和早产等⁶⁰。一项使用来自 43 个国家的经验数据的分析表明，1991-2018 年期间，37.0% 的暖季热相关死亡可归因于人为排放引发的气候变化⁶¹。对全球范围内从 1993 年到 2012 年的 20 年间近 15 000 次极端天气事件的调查则表明，这些事件导致了超过 53 万人的死亡，对应的经济损失超过 2.5 万亿美元⁵⁸。

许多区域性和地方性研究发现温度升高有助于很多传染性疾病在人群中的传播。对哥伦比亚和埃塞俄比亚高原的每月疟疾病例的分析结果表明，在气候变暖的年份，疟疾的分布会向高海拔地区转移⁶²。此外由于气候变化导致的粮食减产可能进一步造成营养不良等问题。在高排放情景下，粮食短缺问题将会加剧，从而造成更为严重的营养不良甚至饥荒问题⁵⁷。最后，气候变化对健康的影响还与经济收入、社区环境、政府管理水平等密切相关。一般而言，低收入国家由于医疗服务不完善、政府治理力度不足等原因，其居民更易受到气候变化导致的健康威胁⁶³。

气候变化的其他影响

除了上述领域外，气候变化还会对旅游业、生物多样性等诸多方面产生影响。气候变化对生态环境的塑造会改变不同地区的旅游资源，从而影响旅游业收入。一项借助汉堡旅游模型对全球不同地区旅游业受气候变化的影响方式进行了分析，结果表明目前较温暖国家的旅游业收入将因气候变化明显减少，而较寒冷国家的旅游业收入则会增加⁶⁴。除了旅游资源外，气候变化对生物多样性的冲击也很显著。一项研究通过 1850 年到 2100 年年度温度和降水数据对 30,000 多个海洋和陆地物种在潜在危险气候条件下的暴露时间进行了预测，结果显示在 2°C 温升情形，预计全球将有不到 2% 的生物集群会发生超过其组成物种 20% 的突然暴露事件。然而，暴露风险会随着全球变暖的程度而加速，在 4°C 温升时，全球 15% 的生物集群会受到威胁⁶⁵。此外，气候变化对水资源分布、人口被动迁移、历史遗迹毁坏等方面的影响也不可忽视。

四、将气候变化与经济损失相连接

为了预估未来不同气候变化情景下中国的气候损失，我们需要首先将气候变化情景中气候变量的变化转换为对经济变量的影响，这一步骤称之为构建气候损失函数。其次我们需要将受气候变量影响的经济变量输入经济模型，以模拟气候变化造成的系统性经济影响和损失。

气候损失函数是量化气候损失的重要工具，它可以建立起气候变量与经济变量之间的函数关系。气候损失函数可以分为直接损失函数和间接损失函数两种。这两种损失函数均以气候响应参数作为自变量，如温度、降水等⁷⁴，但函数因变量有所不同。直接损失函数会将气候响应参数直接转化为GDP损失或福利损失^{74、75}，其常见于综合评估模型之中。与直接损失函数不同，间接损失函数会将气候响应参数转化为经济要素或变量的变化⁷⁶，例如，海平面上升导致的土地和资本损失，或极端高温天气导致的劳动生产率下降等。这类损失函数常常无法直接提供气候损失的量化结果，但其可以被应用于可计算一般均衡模型等综合评估模型中来评价气候变化对不同领域的经济影响，并考虑气候影响在不同部门之间的传导。

为了评估碳中和目标对中国关键部门气候损失的影响，我们构建了能源经济模型与地球系统模式的耦合评估框架（图3）。在该框架下我们利用气候损失函数连接了气候系统与社会经济系统⁷⁶⁻⁷⁸。其中，气候系统在温室气体排放驱动下输出主要的气候变量，而损失函数模块可以通过一系列损失函数将气候变化转化为经济变量。能源经济模型 C-GEM（China-in-Global energy model）作为可计算一般均衡模型可以模拟产品和要素在市场上的流动，并评估气候变化导致的经济变量变化如何冲击整个经济系统。

对于气候变量，我们采用了第六次国际耦合模式比较计划（CMIP6）中 CanESM5 模型和 IPSL-CM6A-LR 模型对 RCP1.9、RCP4.5 和 RCP7.0 情景下全球格点化的温度、降水、湿度等数据。在得到气候变量后，我们需要通过气候损失评估模块对气候变量进行处理。为此，我们做了大范围

的文献调研工作，构建了不同类型气候损失的评估方法（见附录）。我们主要考虑了气候变化对能源系统、劳动生产率、农业产量和海平面上升等四方面的经济影响。其中农业损失是目前气候灾害直接损失统计中的主要部分，而能源系统、劳动生产率及海平面上升则属于缓发事件，并未被记入目前的气候灾害损失统计。在本研究中，我们并未考虑气候变化对健康的影响，这是因为一方面我们尚缺乏全面的气候变化影响健康的数据，另外一方面我们目前采用的分析模型尚无法处理健康对经济发展的影响。但现有研究已经表明，气候变化对健康的影响可能是气候损失中一项重要的部分。



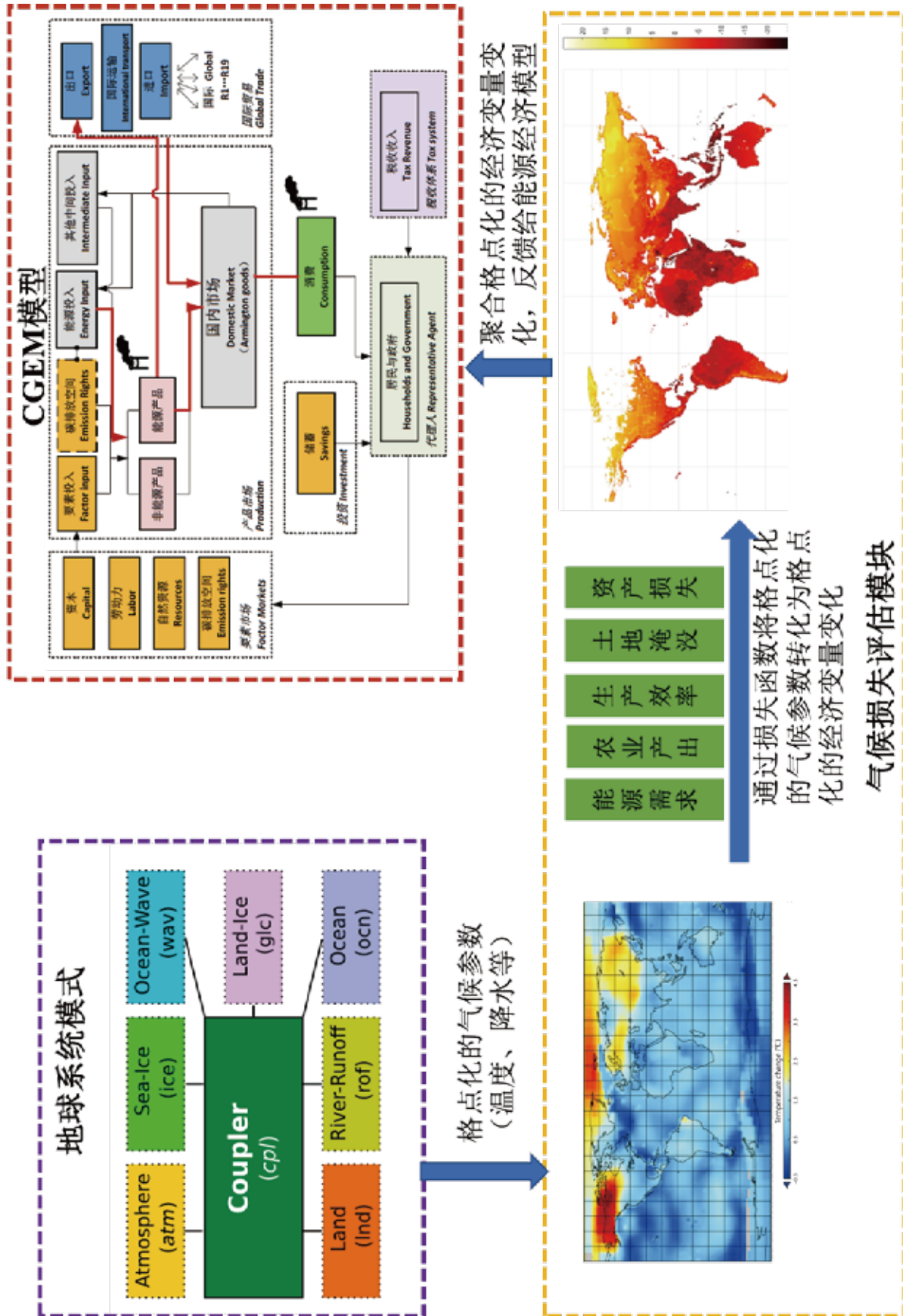


图 3 能源经济模型与地球系统模式耦合评估框架

五、未来的排放路径与气候情景

为了评估不同气候政策强度下，气候变化在中国造成的经济损失，我们分别构建了基准情景、NDC 情景和碳中和情景(图 4)。在基准情景下,全球各国将“冻结”现有的气候减排政策而不再提高。在这一情景下，人类活动相关的 CO₂ 排放总量会从当前的 36 Gt 上升到本世纪末的 75 Gt。我们采用 IPCC 情景数据集中的 RCP 7.0 路径来代表基准情景，该排放路径对应的 2100 年辐射强迫为 7.0 W/m²。NDC 情景假设所有国家或地区将在 2030 年履行其 NDC 承诺。2030 年后，假设每个国家的碳强度将按照实现 NDC 目标所需的减排率继续下降，并将所有国家或地区 2030 年后的碳强度下降率的下限设定为 2%。与基准情景相比，NDC 情景下的 CO₂ 排放总量会先稳定在现有水平，并在 2060 年左右才开始快速下降。到 2100 年，NDC 情景下的全球总 CO₂ 排放约为 15 Gt，不到当前排放的一半。我们采用 IPCC 情景数据集中的 RCP 4.5 路径来代表 NDC 情景，此时辐射强迫约为 4.5 W/m²。

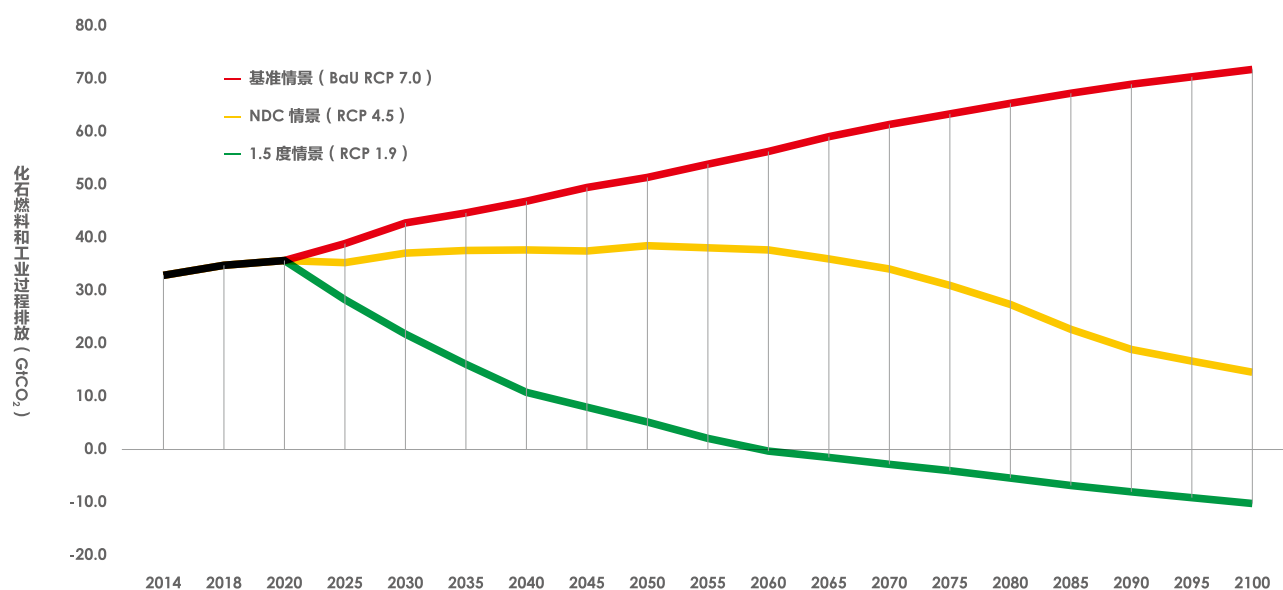


图 4 不同情景下的全球排放路径 (GtCO₂)

碳中和情景是指在本世纪末将全球平均温升水平控制在 1.5 度左右的温室气体排放路径。为了实现这一目标，全球总 CO₂ 排放水平在 2060 年前后实现零排放，并在之后进入负排放阶段。在碳中和情景下，全球 2100 年的 CO₂ 排放量约为 -10 Gt，辐射强迫水平为 1.9 W/m²。其中，负排放的实现主要依赖生物质结合碳捕集与封存(BECCS)及直接空气捕集与封存(DACCS)等技术的部署。

不同情景下的温室气体排放水平直接影响未来全球温升的幅度。图 5 表示了基准情景、NDC 情景和碳中和情景下，由地球系统模式评估得到的全球平均温升幅度的变化趋势。模拟结果显示，在 2050 年前，三种情景对应的全球平均温升幅度比较接近。其中，2050 年基准情景下的全球温升幅度最高，约为 2.6 度，而 NDC 情景和碳中和情景下的全球平均温升幅度分别为 2.2 度和 2.1 度。在 2050 年后，三种情景对应的全球平均温升幅度开始出现较大差异，其中基准情景和 NDC 情景下的全球平均温升幅度都呈上升趋势，而碳中和情景下温升幅度开始出现下降。等到 2100 年，基准情景、NDC 情景和碳中和情景下的全球平均温升幅度分别为 5.2 度、3.5 度和 1.6 度。

气候变化造成的全球不同区域变暖程度存在地域差异。如图 5，分区域来看，基准情景、NDC 情景和碳中和情景下的模拟结果均显示北半球的温升幅度整体要高于南半球，而靠近北极圈的地区温升幅度最高，在基准情景下的温升幅度最高可达到 10 度以上。此外，中国、美国、欧洲等主要经济体的温升幅度都高于全球平均水平。

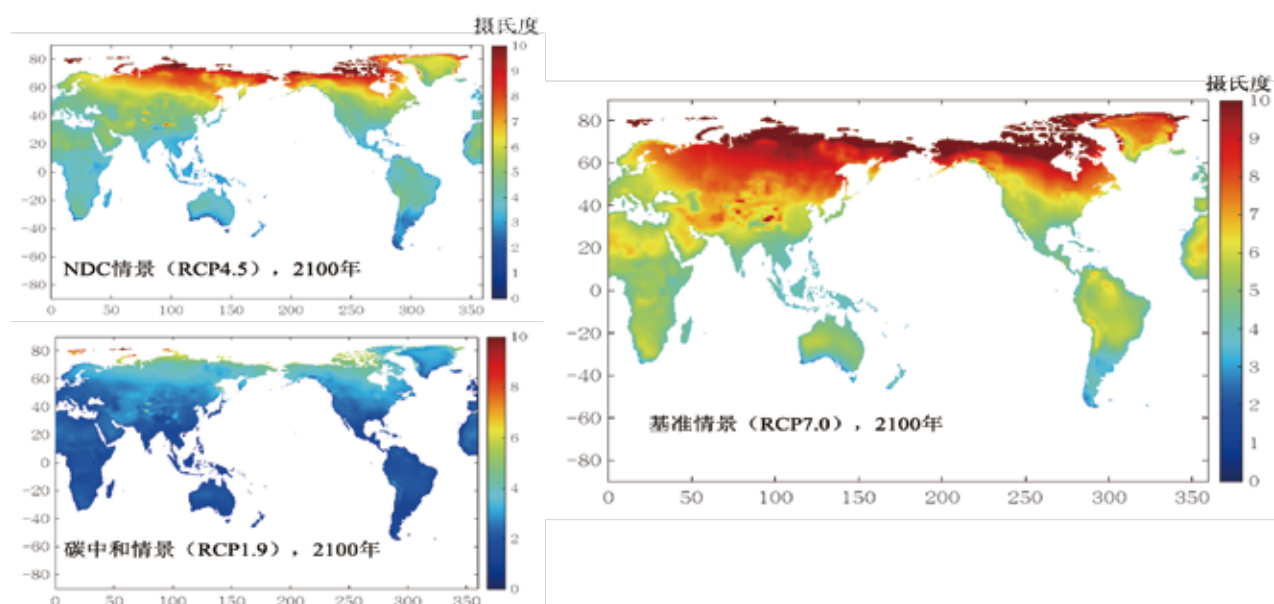


图 5 不同排放情景下全球 2100 年的温升分布

六、关键部门气候损失评估

在评估碳中和目标对中国关键部门气候损失的影响时，我们主要考虑了气候变化对能源需求、劳动生产率、农作物产量和海平面上升导致的土地淹没与财产损失等四个方面的影响。以下部分将分气候损失类型对评估结果进行分析。

气候变化对能源需求的影响

基于方法部分介绍的损失函数构建方法，我们对中国能源消费量受气候变化影响的程度进行了格点化分析（图 6）。在高排放情景下（RCP7.0），中国到 2100 年的能源需求会因气候变化增长超过 130%。分能源品种来看，制冷相关电力消费增加是造成能源需求扩大的主要原因，尤其是服务业部门和家庭部门的电力消费因气候变化出现显著增长。能源需求，尤其是电力需求的快速增长主要由于高温天数（大于 27.5 度的天数）在高排放情景下迅速增加。根据地球系统模式的模拟结果，本世纪末中国大部分地区高温天数较基年增加了 50 天至 100 天，部分地区甚至增加了超过 150 天，使得这些地区对空调制冷的需求大大增加。与高排放情景相比，在中等排放情景下（RCP4.5），中



国本世纪末的能源需求增长约 90%，增长幅度仍然很高。在碳中和情景下，全球平均温升幅度被控制在 1.5 度左右，高温天数与高排放情景和中等排放情景相比下降很多。制冷相关的电力需求虽然仍然增长，但并不显著。此时中国因气候变化导致的总能源需求增长率维持在 20% 左右，远低于高排放情景和中等排放情景。

中国能源需求受气候变化的程度呈现出区域异质性特点。其中，华南和华东地区受气候变化的影响最大，在高排放情景下这些地区本世纪末的能源需求会因气候变化增长 2 倍左右。紧随其后的是东北地区和部分西北地区。西南地区和部分华北地区能源需求受气候变化的负面影响相对较小，本世纪末这些地区的能源需求增长普遍在 50% 以下。此外，还有部分地区由于供暖需求降低抵消了制冷需求的上升，尤其是在碳中和情景下，一些地区的能源需求呈下降趋势。

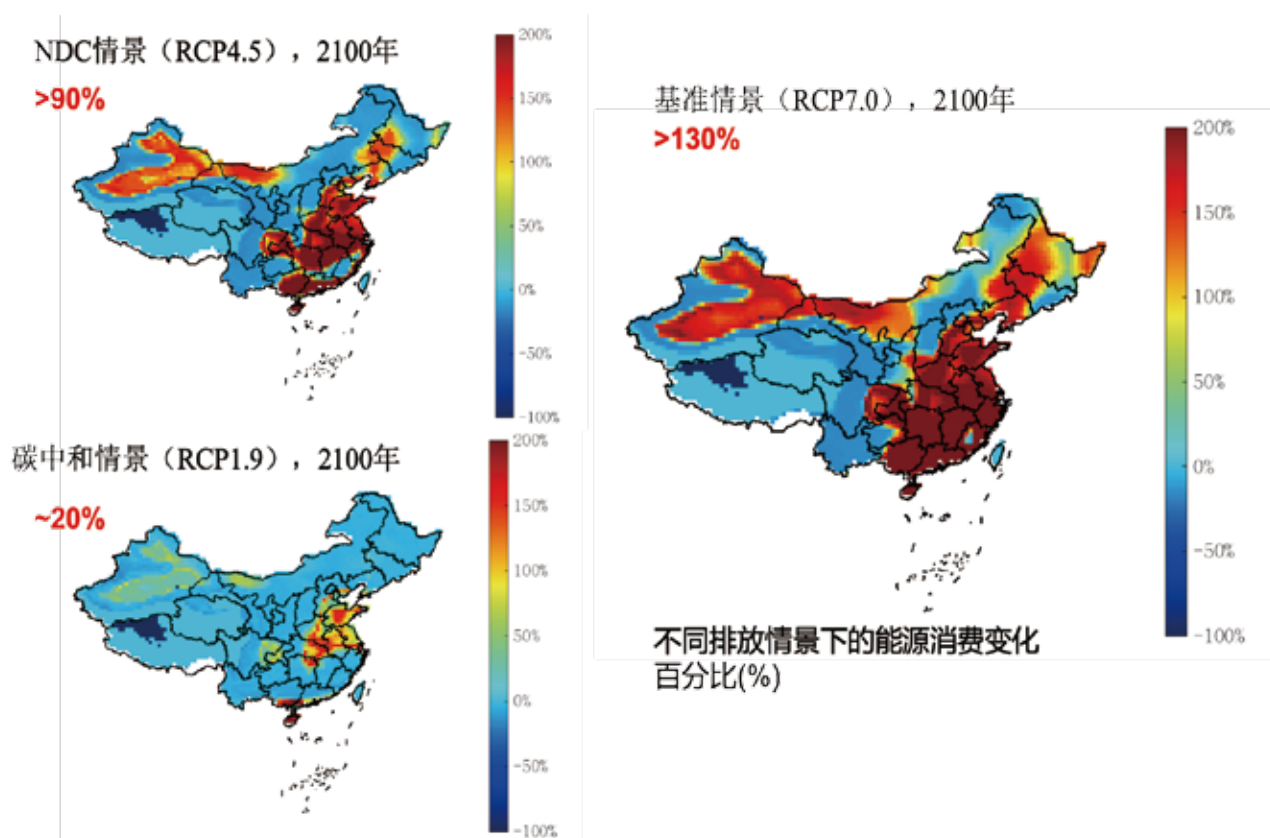


图 6 不同排放情景下中国总能源消费变化率

气候变化对劳动生产率的影响

基于 CMIP6 中地球系统模式输出的格点化温度、湿度等数据，研究预测了不同排放情景下中国未来劳动生产率的变化趋势（图 7）。在高排放情景下，中国华东和华南地区的劳动生产率下降最为明显，部分地区下降幅度可以达到 10%。由于华东和华南地区的人口密度大、经济产值高，这些地区劳动生产率的显著下降对于中国整体经济的负面冲击很大。中国其他地区劳动生产效率受气候变化的负面影响相对较小，下降率一般在 3% 以下。在进行人口加权后，高排放情景下中国整体劳动生产效率在本世纪末下降约 6%。与高排放情景相比，中等排放情景下中国各地区的劳动生产率下降幅度均在 4% 以下，总体劳动生产效率下降了约 3%，仅有高排放情景的一半。对于碳中和情景，中国劳动生产效率受气候变化的负面影响相对较小，总体劳动生产率在本世纪末下降了不到 0.7%，远低于高排放情景和中等排放情景。碳中和情景可以避免绝大部分因劳动生产率下降造成的气候损失。

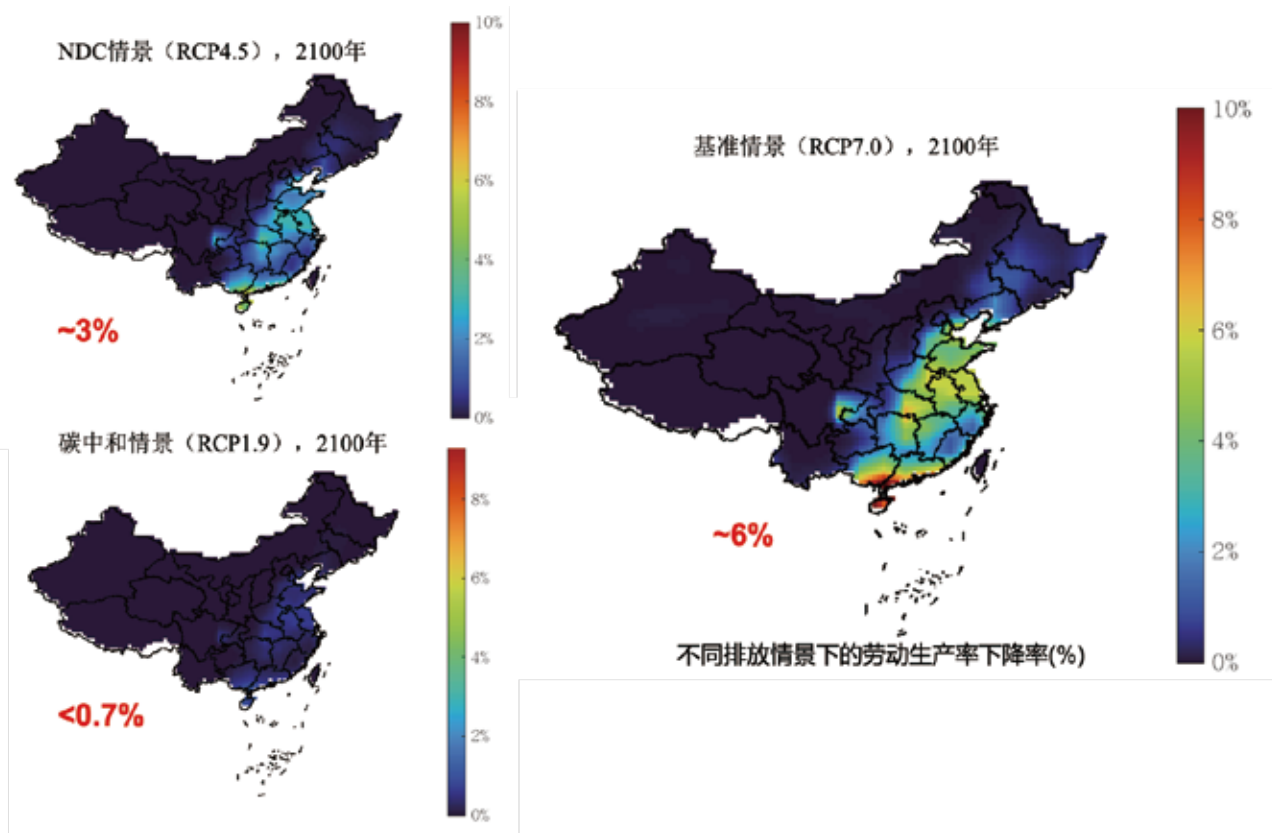


图 7 不同排放情景下中国劳动生产率下降率

气候变化对农业产出的影响

在分析气候变化对农作物产量的影响时，我们主要考虑了小麦、水稻、玉米和大豆这四种主要的农作物，并区分了灌溉区与非灌溉区。我们利用仿真器 Persephone（见附录）分别模拟了气候变化对不同农作物的影响，汇总得到总的农作物产量变化率（图 8）。在高排放情景下，中国主要农作物产量下降了约 33%，粮食产量的大幅下降可能对我国未来的粮食供应安全形成严重威胁。其中，东部地区的粮食减产幅度远超西部地区，覆盖东北、华北及中部等粮食主产区。在中等排放情景下，气候变化对中国粮食产量的负面影响有所下降，从高排放情景下的 33% 降低到 20%，但粮食主产区受到的威胁仍然非常显著。最后，碳中和情景下，气候变化对中国粮食产量的负面影响在只有 8% 左右，远低于高排放情景。

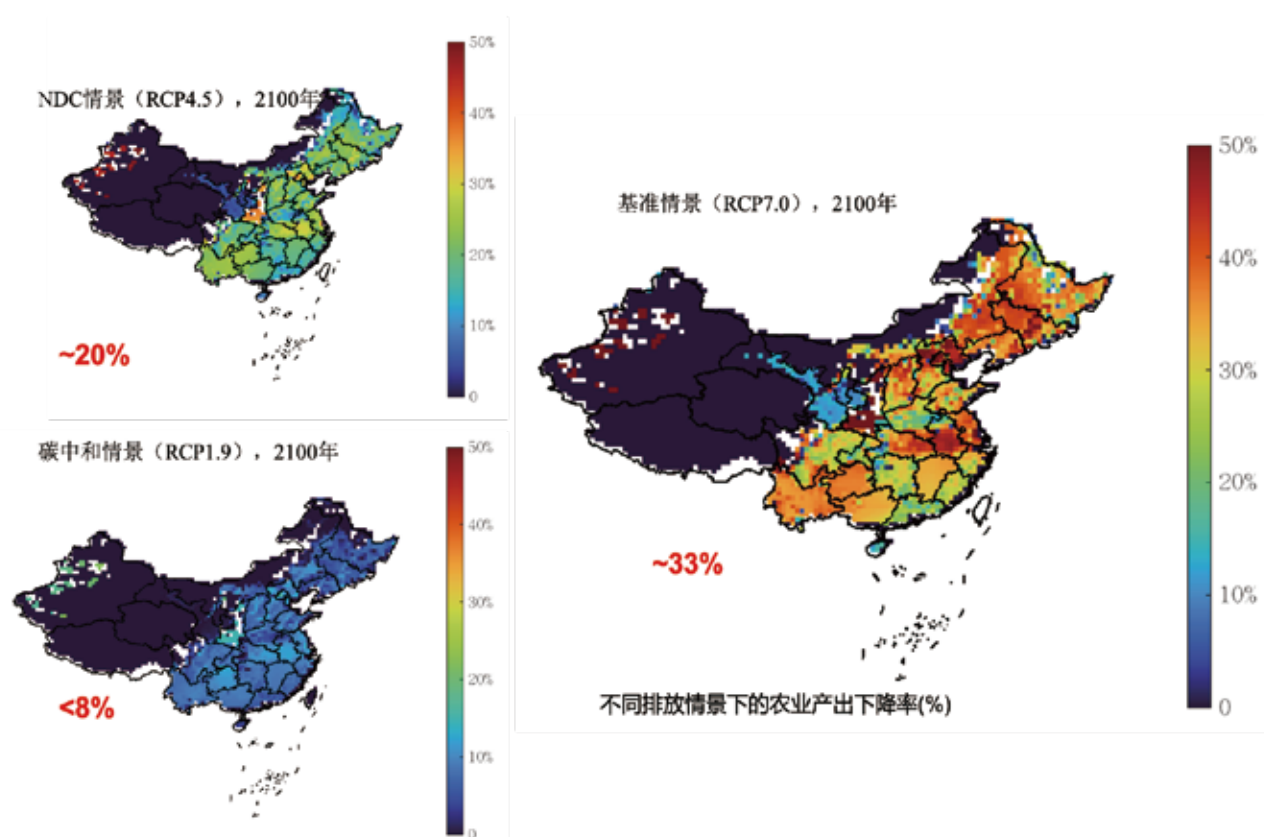


图 8 不同排放情景下中国农作物产量下降率

气候变化导致的海平面上升影响

根据气候损失评估模块的模拟结果，在高排放情景下，中国本世纪末因海平面上升淹没导致的资产损失超过 6 万亿美元(2011 年不变价)，相较于 NDC 情景和碳中和情景分别高出 19% 和 50% (图 9)。对于土地淹没损失，中国因海平面上升淹没的土地面积占总土地面积的比重较小，在高排放情景下也仅有 0.26% 左右。但考虑到沿海地区的经济水平、人口密度和资产规模高出内陆地区很多，土地淹没带来的经济损失要远大于土地本身的损失量。

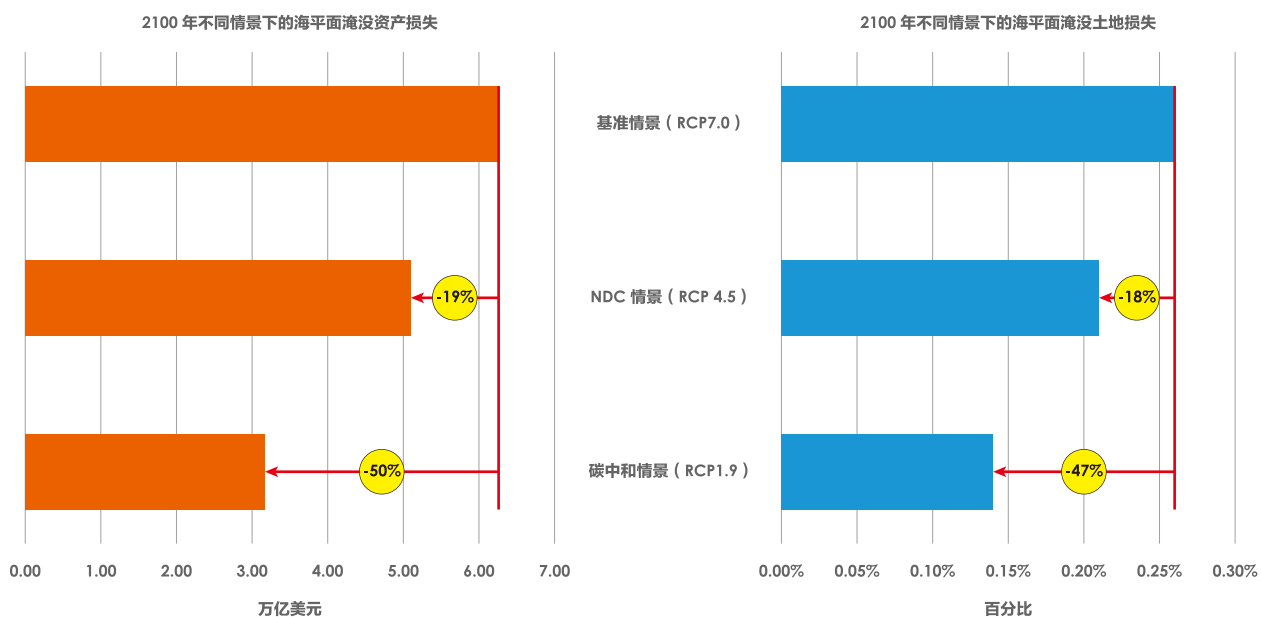


图 9 2100 年海平面上升造成的资产和土地损失

七、碳中和目标对经济总损失的影响

在用气候损失评估模块模拟出气候变化对未来中国能源需求、农作物产量、劳动生产效率和土地资产淹没损失后,我们进一步利用 C-GEM 模型模拟了不同排放情景下气候变化造成的经济总损失。作为可计算的一般均衡模型, C-GEM 模型可以模拟气候变化造成的不同损失类型在经济部门之间的传导。由于气候变化对经济系统的负面冲击,中国主要经济部门的经济产出会出现不同程度的下降,这里我们以模型模拟的 GDP 损失率作为衡量气候损失的主要指标,具体结果见图 10。

在基准情景下,全球温室气体排放水平持续快速增长,气候变化在中国造成的经济损失占 GDP 的比重也逐年增加,在 2030 年占比达到 1.6%,2050 年上升到 4.3%,2100 年进一步达到 8.9%,对应的经济损失绝对量分别为 0.34 万亿美元、1.6 万亿美元和 9.7 万亿美元,对于经济系统的负面冲击非常显著。与高排放情景相比, NDC 情景可以在一定程度上减轻气候变化对中国经济的负面影响。从 GDP 损失率来看, NDC 情景下在 2040 年以前发生的气候损失与基准情景比较接近,在 2040 年后开始明显低于基准情景下的气候损失。到 2100 年, NDC 情景下气候变化造成的中国 GDP 损失率为 5.6%, GDP 损失量较基准情景降低了约 3.7 万亿美元,下降幅度为 38%。最后,对于碳中和情景,由于全球平均温升幅度被控制在 1.5 度左右,气候变化在中国造成的经济总损失远低于基准情景和 NDC 情景。到 2100 年,中国因气候变化产生的 GDP 损失率可控制在 0.8% 左右, GDP 损失量低于 0.8 万亿美元。此外,由于碳中和情景下全球的碳排放水平在 2060 年后达到负排放,对应的全球平均温升幅度开始降低,因此中国的气候损失规模也在 2060 年达到峰值后逐渐下降,其中峰值期间的 GDP 损失率为 2% 左右。

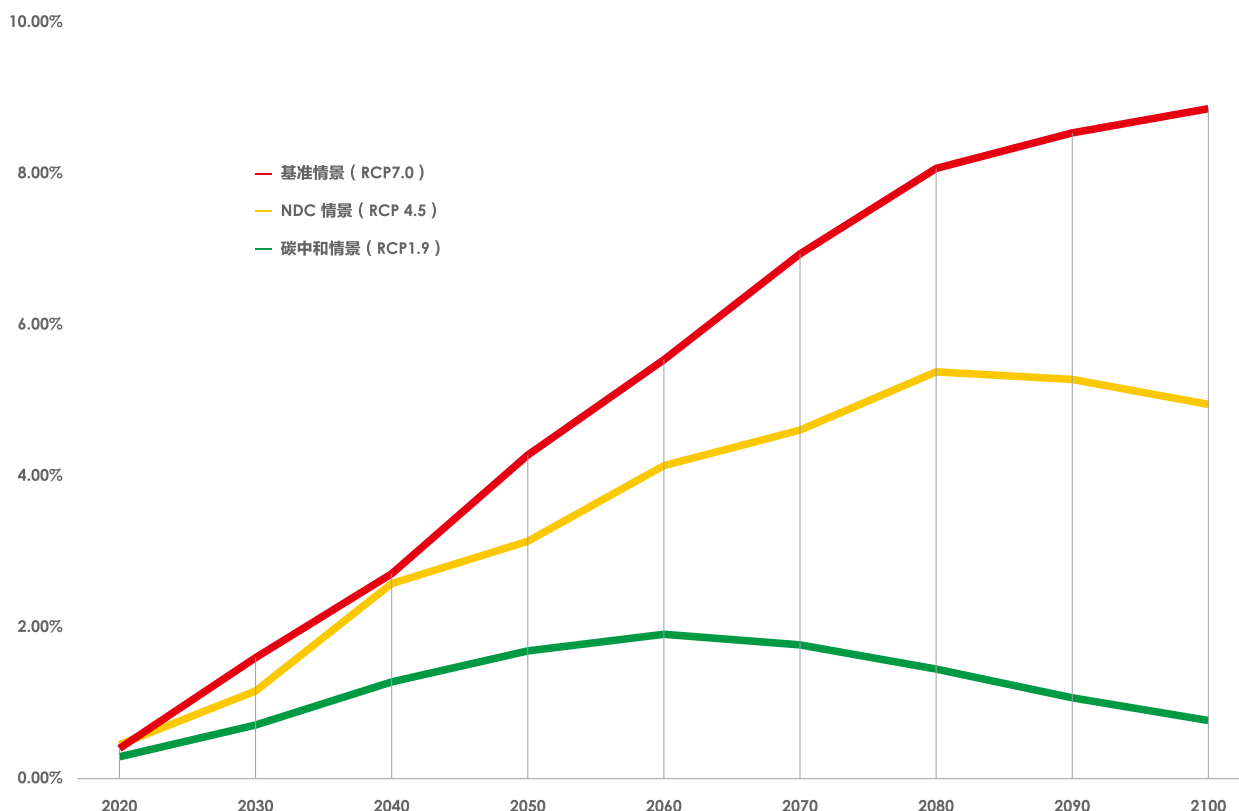


图 10 不同情景下气候损失占中国 GDP 的比重

由于气候变化对经济系统的影响是长期的，图 11 进一步考虑了气候变化造成的中国累积 GDP 损失（未考虑贴现率）。在基准情景下，中国 2021-2050 年间的累积 GDP 损失为 18.5 万亿美元，略高于 NDC 情景下的 16.9 万亿美元，是碳中和情景下气候损失的两倍以上。NDC 情景与基准情景下 2021-2050 年间累积气候损失较为接近的原因在于主要的减排力度体现在 2050 年之后，因而减排避免的经济损失在 2050 年前并不突出。当考虑 2021-2100 年间中国累计的气候损失时，基准情景下的累积损失为 289.9 万亿美元，高出 NDC 情景下的累积损失约 53%，两者之间的差距远大于 2021-2050 年期间的累积结果。碳中和情景也是如此，在 2021-2100 年间，碳中和情景下中国累积气候损失为 55.2 亿美元，只有基准情景下的 1/5。因此，由于气候系统的滞后性，近期减排行动避免的气候损失只有在长期才会显现。而为了避免未来巨额的气候损失，必须在近中期就开始部署减排行动，而不能等到气候损失显现时才开始行动。但因为减排行动的成本需要由当代承担，而避免的绝大多数气候损失是在未来才能实现，因此气候变化的代际公平问题对气候治理意义重大。如果政策制定者仅关注近期的社会发展目标，而不考虑社会和经济系统的长期发展与风险，则采取强化减排行动的动机就会不足，进而将在未来面临难以逆转的巨大气候风险。

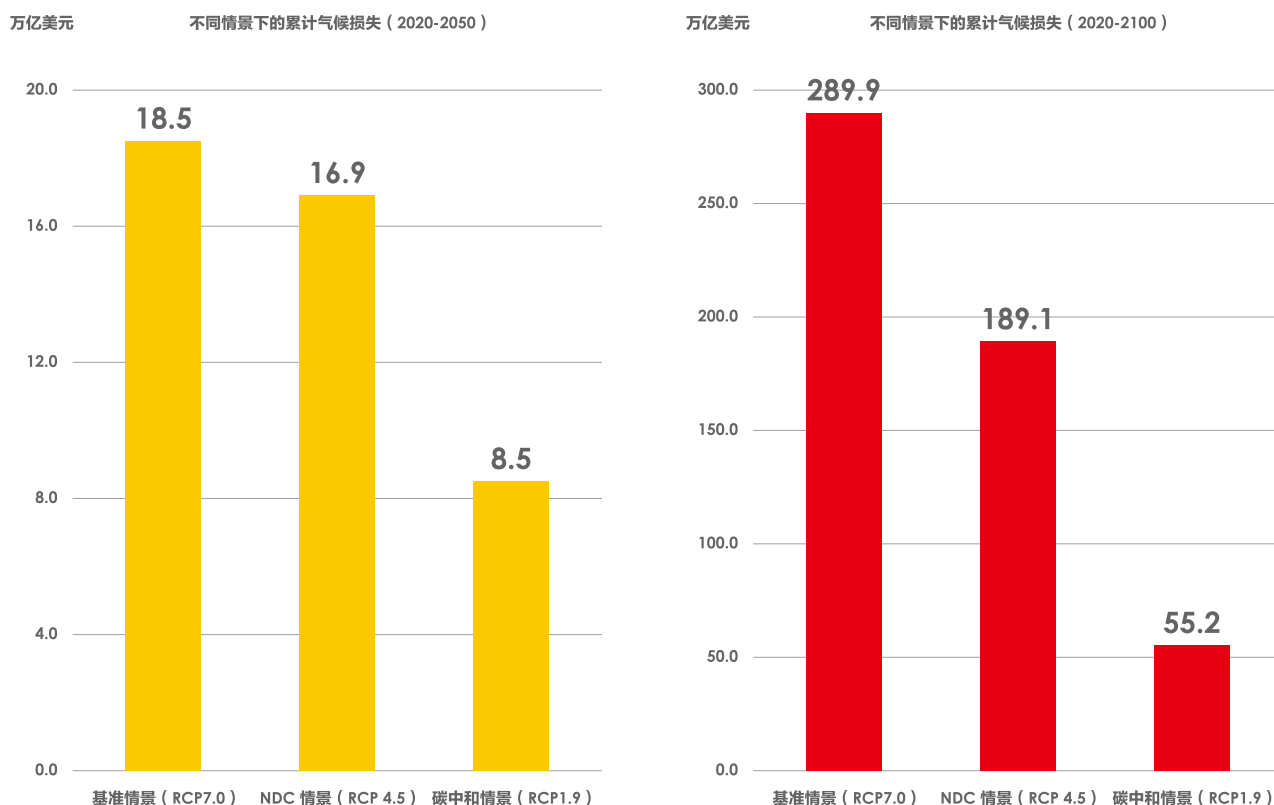


图 11 不同情景下 2020-2050 年和 2020-2100 年间中国累积气候损失

通过实现碳中和目标，中国可以大幅降低气候变化带来的经济损失，避免未来累计的气候风险。需要注意的是，由于我们采用 2014 年作为基年，因此我们估计的气候损失实际上是“额外于”已经发生的气候损失的。正如我们在第二节中看到的，由于全球温升已经上升了 1.2 度，气候变化对社会经济系统的影响已经发生。这些已经发生的影响应当被叠加到我们的结果之上。此外，我们在研究中由于受到模型及数据的限制，并没有考虑气候变化对人体健康的影响，而现有研究表明气候变化将极大影响人体健康，并可能主导对气候损失的估计。第三，我们的研究中也并没有包括对气候变化巨灾或者“临界点”（tipping points）导致气候损失的估计。一旦达到这些临界点（例如北大西洋环流的停止），气候系统的微小变化就可能引发巨大的影响，这些影响可能是灾难性的并且无法逆转。第四，由于我们采用的是由复杂的地球系统模式给出的气候预测结果，并以此驱动经济分析。而我们采用的地球系统模式并没有覆盖 CMIP6 的所有范围，因此并没有全面的考虑气候系统的不确定性。最后，本项目下其他研究报告表明，气候变化的间接风险和系统性风险同样重要。由于社会经济系统的复杂性，气候变化的风险可能通过我们目前尚未察觉的风险链条进行传播，并形成跨越部门、国家和系统的重大系统性风险。而目前我们对系统性风险的传播机制和风险管理措施仍然知之甚少。因此，我们对气候变化损失的评估在很大程度上仅表明了未来气候损失的下限。

八、结论

中国正在切实落实承诺的“双碳”目标，并在最近一年中在制度安排和战略规划上已经做好了落实准备，但中国面临的转型困难前所未有的。发达国家的低碳转型以淘汰现有高碳基础设施为主，并且其大多数现有基础设施也已经达到技术寿命，进入自然淘汰阶段。而以中国为代表的发展中国家，不仅要实现存量基础设施的低碳转型，更要大规模投资于低碳的新增基础设施以满足新增能源需求，因而转型难度远远超过发达国家。实现碳中和目标所需的低碳投资规模巨大，但从管理气候风险的角度，这些投资的必要性毋庸置疑。气候变化的风险正在威胁着发展成果，而其复杂性和速度正在快速增加，并有可能超出人类社会现有的减少和管理气候风险的能力。因此为实现碳中和的低碳投资不仅是对能源转型和可持续发展的投资，更是减少气候风险的风险管理策略之一。

与气候变化相关的经济损失已经发生，并正在对生产生活产生破坏性的影响。根据现在对气候灾害直接损失的评估，气候灾害导致的直接经济损失在近 10 年大约占到中国 GDP 的 0.4%。但这一统计并没有包括气候灾害的间接损失，也没有包括温度和海平面上升等缓发事件造成的经济损失。未来随着全球平均温升的进一步增加，气候变化造成的经济损失也将日益增加。这些气候损失至少



包括四个方面，首先是由于极端天气事件造成的经济损失，这部分损失是目前统计中主要关注的部分，未来将随着极端天气事件频率和强度的增加而增加；其次是由于温度及海平面上升等一系列缓发事件造成的气候损失，这部分损失目前并没有被完全统计，但未来将随着时间的累计而将变得愈加突出；第三是由于“临界点”被突破而可能造成的灾难性损失，虽然对于临界点的科学认识尚不充分，但有证据表明我们正在接近若干气候临界点，而部分临界点被突破的后果可能是灾难性的；最后是由于气候级联风险造成的损失，这些损失的风险传播链条和机制尚未完全明确，但现有研究已经表明这些级联风险可能引发大规模的经济和社会风险及损失。

我们利用地球系统模式的气候系统预估数据，并与损失函数及经济模型相结合，预估了未来不同气候变化情景下中国的气候变化损失。我们综合考虑了目前对于损失的研究进展以及模型和数据限制，选取了能源需求、农业、劳动生产率和海平面上升导致的土地淹没和资产损失等四类经济损失。这四类经济损失中既包括极端天气事件导致的损失(如洪涝对农业的影响)，也包括缓发事件(如海平面上升造成的土地淹没)导致的损失。我们的研究表明，在2020-2100年，实现碳中和目标可以避免约80%的累计气候变化损失。在NDC情景下，全球温升在2100年将达到3.5度，气候变化损失占中国GDP的比重将达到5.6%，而累计气候变化损失将达到189万亿美元。而在碳中和情景下，2100年全球温升可以控制在1.5度左右，而中国的气候变化损失可以控制在GDP的1%以下，累计气候变化损失将减少到55万亿美元。由于我们的研究并没有覆盖所有可能的气候损失类别，因此实际的气候变化损失可能高于我们的估计。从风险管理的角度出发，我们永远无法了解真正的风险，但这并不妨碍我们的主要结论：气候变化已经对中国经济造成了严重的损失，并且在未来将随着气候变化更加严峻。从风险管理和避免未来气候损失的角度，我们有充分的理由将实现碳中和作为气候风险管理的主要策略，以避免将巨大的气候风险转移给后代。



附录

对于能源需求，温室气体排放导致的温升效应会增加部分品种的能源需求，如空调制冷用电等，也会降低其它一些类型的能源需求，如取暖所需的煤炭、天然气等。为了将居民能源需求与全球变暖程度的关系进行量化，Enrica Cian 等人利用计量的方法分析了热带地区与温带地区对石油、天然气和电力的终端需求与温度阈值之间的关系^{24、79}。结果显示气候变化导致的温升效应会显著增加终端能源需求²⁴。我们参考了现有研究结论，认为大于 27.5 度和低于 12.5 度的天数变化是影响能源需求变化的主要气候因素。我们首先根据 CMIP6 中地球系统模式的输出结果，在不同情景下计算了不同格点大于 27.5 度和低于 12.5 度的天数变化。然后，我们基于损失函数将格点化温度阈值的变化转化为格点化能源需求的变化。为了将格点化的能源需求与 C-GEM 模型的区域划分对应，我们对格点数据进行了聚合。在聚合时，气候损失评估模块简化假设了不同区域内各格点一致的人均能源消费量，并基于格点化的人口分布将格点数据聚合为区域数据。根据聚合结果，C-GEM 模型中能源需求函数的转移系数也会做相应调整，以反映气候变化对能源需求的影响。

在评估气候变化对中国劳动生产率的影响，我们参考了 Kjellstrom 等人的研究，构造了气候变化与劳动生产率之间的定量关系，将参数湿球黑球温度 (Wet Bulb Globe Temperature, WBGT) 作为劳动生产率的主要决定因素^{38、80}。考虑到不同工作类型受气候变化负面影响的程度不同，我们将 C-GEM 模型中的经济部门分为了轻度强度工作(服务业)、中度强度工作(工业)和重度强度工作(农业和建筑业) 三类，它们受到气候变化的负面影响程度依次加深。与能源需求类似，为了将劳动生产率变化引入能源经济模型 C-GEM，我们基于格点化的人口分布将格点化的劳动生产率下降数据聚合为 C-GEM 模型对应区域的参数。在聚合格点化的劳动生产率数据后，我们通过在 C-GEM 模型中调整对应的劳动生产力供给参数来模拟因劳动生产率降低造成的经济损失。

气候变化将改变农作物生长所需的气候条件，从而影响粮食产量。为了量化气候变化对粮食产量的影响，我们参考了 Snyder 等人的研究，通过仿真工具 Persephone 来近似模拟多个复杂农作

物模型对于气候变化影响的输出结果⁸¹。以统计分析方法为基础，仿真器 Persephone 通过回归分析拟合复杂农作物模型输出的未来温度、降水、CO₂ 浓度等气候参数与粮食产量变化数据之间的关系。通过回归模型的建立，仿真器 Persephone 可以通过较少的计算资源模拟未来不同气候政策情景下全球格点化的农作物产量变化，便于其在综合评估模型中的应用。为了在 C-GEM 模型中分析粮食产量变化对不同经济部门的影响，我们将格点化的农作物产量变化聚合为区域层次的农作物产量变化。聚合过程中，我们参考了全球粮食产量数据集⁸²，构建了各个格点的基础农作物产量地图。通过将聚合后的产量变化作为土地生产率的变化指标来衡量气候变化的负面影响，我们在 C-GEM 模型中相应更新了经济系统中的土地生产率参数。

海平面上升对沿海地区的危害是气候变化的主要负面影响之一。我们主要考虑了海平面上升造成的中国土地和资产损失。为了量化土地和资产损失，我们在气候损失评估模块纳入了两个开源模型 BRICK⁸³ 和 CIAM⁸⁴，其连接框架见图 A1。在图 A1 中，BRICK (Building blocks for Relevant Ice and Climate Knowledge) 是一个模块化的半经验模型框架，可以模拟全球温度的变化和不同地区的海平面上升水平。在默认的 BRICK 模型配置中，全球平均表面温度和海洋吸热主要由其子模块 DOECLIM 模拟。全球平均表面温度的变化会驱动全球平均海平面 (GMSL) 的变化，BRICK 模型可以模拟格陵兰岛和南极洲冰盖、热膨胀以及冰川和冰盖对全球平均海平面的贡献。最后，BRICK 模型还包含一个降尺度的子模块，可以将全球平均海平面变化转换为区域层面的平均海平面变化。

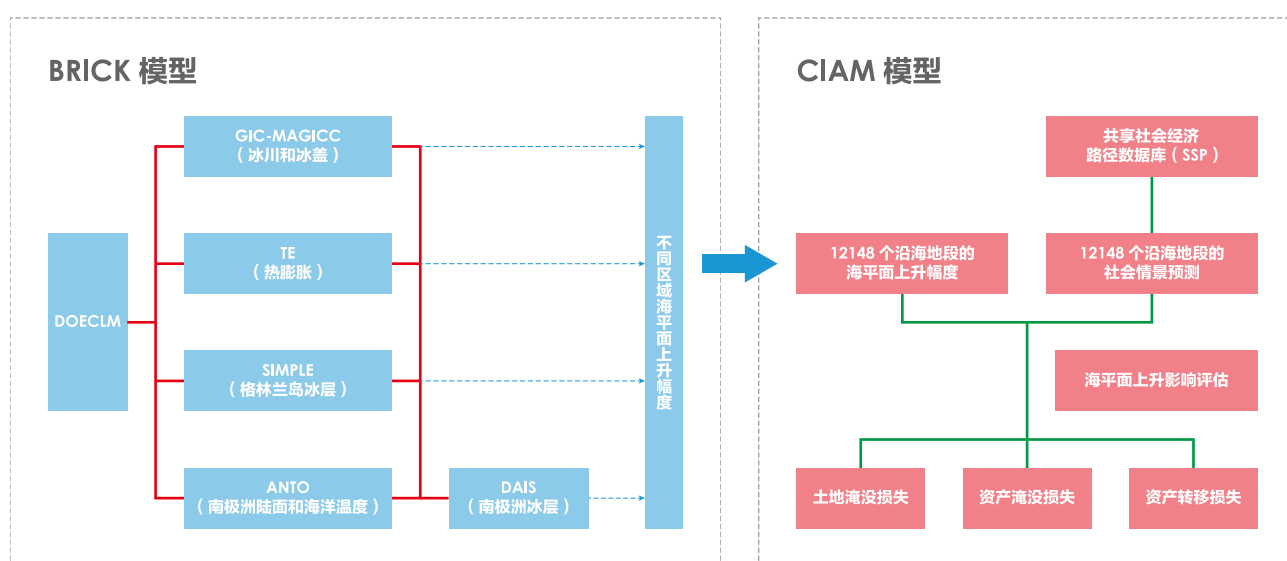


图 A1 用于海平面上升影响评估的 BRICK-CIAM 模型

在 BRICK 模型模拟出区域平均海平面变化幅度后，我们主要利用 CIAM 模型（Coastal Impact and Adaptation Model）来模拟海平面上升造成的土地和资产损失。CIAM 模型是一个高空间分辨率评估模型，其通过将最低成本的适应决策分解到地方层面来评估海平面上升对沿海地区的影响⁸⁴，其底层数据来自于 DIVA 模型⁸⁵。在利用 BRICK 模型和 CIAM 模型模拟出各个沿海地段的土地和资产损失后，我们将各沿海地段的影响进行了聚合，并将聚合后的结果引入可计算一般均衡模型 C-GEM 中。对于土地损失，在估算出不同区域的土地损失率后，模型通过调整 C-GEM 模型经济系统中的土地资源存量来研究经济产出的变化。由于土地要素是 C-GEM 模型中农业部门的重要投入，因此主要受影响部门也以农业部门为主。对于海平面上升造成的资产损失，C-GEM 模型中的资本存量也会相应进行调整。■

参考文献

01. 中国国家气候变化专家委员会 & 英国气候变化委员会 . 中 - 英合作气候变化风险评估 : 气候风险指标研究 = UK-China cooperation on climate change risk assessment. (中国环境出版集团 , 2019) .
02. 习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话 . http://www.xinhuanet.com/politics/leaders/2020-09/22/c_1126527652.htm.
03. 习近平在气候雄心峰会上的讲话 (全文) - 新华网 .
http://www.xinhuanet.com/politics/leaders/2020-12/12/c_1126853600.htm.
04. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要 . http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm.
05. 中共中央 国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见 . http://www.gov.cn/zhengce/2021-10/24/content_5644613.htm.
06. 国务院关于印发 2030 年前碳达峰行动方案的通知 (国发 [2021] 23 号) . http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content_5644984.htm.
07. Fujimori, S., Oshiro, K., Shiraki, H. & Hasegawa, T. Energy transformation cost for the Japanese mid-century strategy. *Nature Communications* 10, (2019) .
08. Pollitt, H., Alexandri, E., Chewpreecha, U. & Klaassen, G. Macroeconomic analysis of the employment impacts of future EU climate policies. *Climate Policy* 15, 604–625 (2015) .
09. Stern, N. *The Economics of Climate Change: The Stern Review*. (Cambridge University Press, 2007) . doi:10.1017/CBO9780511817434.
10. IPCC. *The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. (2021) .
11. World Meteorological Organization (WMO) . *The Atlas of Mortality and Economic Losses from Weather, Climate and Water Extremes (1970–2019)*. (WMO, 2021) .
12. 中国气候与生态环境演变 : 2021. (科学出版社 , 2021) .
13. Watts, N. et al. The 2020 report of The Lancet Countdown on health and climate change: responding to converging crises. *The Lancet* 397, 129–170 (2021) .
14. IPCC. *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. In Cambridge University Press: 2014.
15. Rogers, L. A.; Griffin, R.; Young, T.; Fuller, E.; St. Martin, K.; Pinsky, M. L., Shifting habitats expose fishing communities to risk under climate change. *Nature Climate Change* 2019, 9, (7) , 512-516.
16. IPCC Summary for Policymakers. In: *Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels.*; In Press, 2018.
17. Weatherdon, L.; Magnan, A.; Rogers, A.; Sumaila, R.; Cheung, W., Observed and Projected Impacts of Climate Change on Marine Fisheries, Aquaculture, Coastal Tourism, and Human Health: An Update. *Frontiers in Marine Science* 2016, 3.
18. Yalaw, S. G. et al. Impacts of climate change on energy systems in global and regional scenarios. *Nature Energy* 2020, 5, (10) , 794-802.

19. Panagea, I. S.; Tsanis, I. K.; Koutroulis, A. G.; Grillakis, M. G., Climate Change Impact on Photovoltaic Energy Output: The Case of Greece. *Advances in Meteorology* 2014, 2014, 264506.
20. Dallili, N.; Edrissy, A.; Carriveau, R., A review of surface engineering issues critical to wind turbine performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2009, 13, (2) , 428-438.
21. Hamududu, B.; Killingtveit, A., Assessing Climate Change Impacts on Global Hydropower. *Energies* 2012, 5, (2) .
22. Bartos, M.; Chester, M.; Johnson, N.; Gorman, B.; Eisenberg, D.; Linkov, I.; Bates, M., Impacts of rising air temperatures on electric transmission ampacity and peak electricity load in the United States. *Environmental Research Letters* 2016, 11, (11) , 114008.
23. Rode, A.; Carleton, T.; Delgado, M.; Greenstone, M.; Houser, T.; Hsiang, S.; Hultgren, A.; Jina, A.; Kopp, R. E.; McCusker, K. E.; Nath, I.; Rising, J.; Yuan, J., Estimating a social cost of carbon for global energy consumption. *Nature* 2021, 598, (7880) , 308-314.
24. van Ruijven, B. J.; De Cian, E.; Sue Wing, I., Amplification of future energy demand growth due to climate change. *Nature Communications* 2019, 10, (1) , 2762.
25. Mei, H.; Li, Y. P.; Suo, C.; Ma, Y.; Lv, J., Analyzing the impact of climate change on energy-economy-carbon nexus system in China. *Applied Energy* 2020, 262, 114568.
26. Fan, J.-L.; Hu, J.-W.; Zhang, X., Impacts of climate change on electricity demand in China: An empirical estimation based on panel data. *Energy* 2019, 170, 880-888.
27. Handayani, K.; Filatova, T.; Krozer, Y.; Anugrah, P., Seeking for a climate change mitigation and adaptation nexus: Analysis of a long-term power system expansion. *Applied Energy* 2020, 262, 114485.
28. Durmayaz, A.; Sogut, O. S., Influence of cooling water temperature on the efficiency of a pressurized-water reactor nuclear-power plant. *International Journal of Energy Research* 2006, 30, (10) , 799-810.
29. Liao, X. W.; Hall, J. W.; Hanasaki, N.; Lim, W. H.; Paltan, H., Water shortage risks for China' s coal power plants under climate change. *Environmental Research Letters* 2021, 16, (4) , 044011.
30. Wang, B.; Liang, X.-J.; Zhang, H.; Wang, L.; Wei, Y.-M., Vulnerability of hydropower generation to climate change in China: Results based on Grey forecasting model. *Energy Policy* 2014, 65, 701-707.
31. Fan, J.-L.; Hu, J.-W.; Zhang, X.; Kong, L.-S.; Li, F.; Mi, Z., Impacts of climate change on hydropower generation in China. *Mathematics and Computers in Simulation* 2020, 167, 4-18.
32. Karnauskas, K. B.; Lundquist, J. K.; Zhang, L., Southward shift of the global wind energy resource under high carbon dioxide emissions. *Nature Geoscience* 2018, 11, (1) , 38-43.
33. Gao, Y.; Ma, S.; Wang, T., The impact of climate change on wind power abundance and variability in China. *Energy* 2019, 189, 116215.
34. Wild, M.; Folini, D.; Henschel, F.; Fischer, N.; Müller, B., Projections of long-term changes in solar radiation based on CMIP5 climate models and their influence on energy yields of photovoltaic systems. *Solar Energy* 2015, 116, 12-24.
35. Zhao, M.; Lee, J. K. W.; Kjellstrom, T.; Cai, W., Assessment of the economic impact of heat-related labor productivity loss: a systematic review. *Climatic Change* 2021, 167, (1) , 22.
36. Matsumoto, K. i., Climate change impacts on socioeconomic activities through labor productivity changes considering interactions between socioeconomic and climate systems. *Journal of Cleaner Production* 2019, 216, 528-541.
37. Kjellstrom, T.; Kovats, R. S.; Lloyd, S. J.; Holt, T.; Tol, R. S. J., The Direct Impact of Climate Change on Regional Labor Productivity. *Archives of Environmental & Occupational Health* 2009, 64, (4) , 217-227.
38. Kjellstrom, T.; Kovats, R. S.; Lloyd, S. J.; Holt, T.; Tol, R. S. J., The Direct Impact of Climate Change on Regional Labour Productivity. *Archives of Environmental & Occupational Health* 2009, 64, (4) , 217-227.
39. Dasgupta, S.; van Maanen, N.; Gosling, S. N.; Piontek, F.; Otto, C.; Schleussner, C.-F., Effects of climate change on combined labour productivity and supply: an empirical, multi-model study. *The Lancet Planetary Health* 2021, 5, (7) , e455-e465.
40. Knittel, N.; Jury, M. W.; Bednar-Friedl, B.; Bachner, G.; Steiner, A. K., A global analysis of heat-related labour productivity losses under climate change—implications for Germany' s foreign trade. *Climatic Change* 2020.

41. Ortiz-Bobea, A.; Ault, T. R.; Carrillo, C. M.; Chambers, R. G.; Lobell, D. B., Anthropogenic climate change has slowed global agricultural productivity growth. *Nature Climate Change* 2021, 11, (4) , 306-312.
42. Cline, W. R., *Global Warming and Agriculture*. 2005; Vol. 2.
43. Vogel, E.; Donat, M. G.; Alexander, L. V.; Meinshausen, M.; Ray, D. K.; Karoly, D.; Meinshausen, N.; Frieler, K., The effects of climate extremes on global agricultural yields. *Environmental Research Letters* 2019, 14, (5) , 054010.
44. Darwin, R.; Kennedy, D., Economic effects of CO₂ fertilization of crops: transforming changes in yield into changes in supply. *Environmental Modeling & Assessment* 2000, 5, (3) , 157-168.
45. Rosenzweig, C.; Jones, J. W.; Hatfield, J. L.; Ruane, A. C.; Boote, K. J.; Thorburn, P.; Antle, J. M.; Nelson, G. C.; Porter, C.; Janssen, S.; Asseng, S.; Basso, B.; Ewert, F.; Wallach, D.; Baigorria, G.; Winter, J. M., The Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project (AgMIP) : Protocols and pilot studies. *Agricultural and Forest Meteorology* 2013, 170, 166-182.
46. Moore, F.; Baldos, U.; Hertel, T., Economic impacts of climate change on agriculture: A comparison of process-based and statistical yield models. *Environmental Research Letters* 2017, 12.
47. Jägermeyr, J. et al, Climate impacts on global agriculture emerge earlier in new generation of climate and crop models. *Nature Food* 2021, 2, (11) , 873-885.
48. Nelson, G. C. et al, Climate change effects on agriculture: Economic responses to biophysical shocks. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 2014, 111, (9) , 3274-3279.
49. Wing, I. S.; De Cian, E.; Mistry, M. N., Global vulnerability of crop yields to climate change. *Journal of Environmental Economics and Management* 2021, 109, 102462.
50. IPCC Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; 2021.
51. Horton, B. P.; Khan, N. S.; Cahill, N.; Lee, J. S. H.; Shaw, T. A.; Garner, A. J.; Kemp, A. C.; Engelhart, S. E.; Rahmstorf, S., Estimating global mean sea-level rise and its uncertainties by 2100 and 2300 from an expert survey. *npj Climate and Atmospheric Science* 2020, 3, (1) , 18.
52. Hinkel, J.; Klein, R. J. T., Integrating knowledge to assess coastal vulnerability to sea-level rise: The development of the DIVA tool. *Global Environmental Change* 2009, 19, (3) , 384-395.
53. Prah, B. F.; Boettle, M.; Costa, L.; Kropp, J. P.; Rybski, D., Damage and protection cost curves for coastal floods within the 600 largest European cities. *Scientific Data* 2018, 5, (1) , 180034.
54. Jevrejeva, S.; Jackson, L. P.; Grinsted, A.; Lincke, D.; Marzeion, B., Flood damage costs under the sea level rise with warming of 1.5 °C and 2 °C. *Environmental Research Letters* 2018, 13, (7) , 074014.
55. Hinkel, J.; Lincke, D.; Vafeidis, A. T.; Perrette, M.; Nicholls, R. J.; Tol, R. S. J.; Marzeion, B.; Fettweis, X.; Ionescu, C.; Levermann, A., Coastal flood damage and adaptation costs under 21st century sea-level rise. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 2014, 111, (9) , 3292.
56. Gasparrini, A. et al, Projections of temperature-related excess mortality under climate change scenarios. *The Lancet Planetary Health* 2017, 1, (9) , e360-e367.
57. Hasegawa, T.; Fujimori, S.; Takahashi, K.; Yokohata, T.; Masui, T., Economic implications of climate change impacts on human health through undernourishment. *Climatic Change* 2016, 136, (2) , 189-202.
58. Hashim, J. H.; Hashim, Z., Climate Change, Extreme Weather Events, and Human Health Implications in the Asia Pacific Region. *Asia Pacific Journal of Public Health* 2015, 28, (2_suppl) , 8S-14S.
59. Hales, S., Quantitative risk assessment of the effects of climate change on selected causes of death, 2030s and 2050s. World Health Organization: 2015.
60. Campbell, S.; Remenyi, T. A.; White, C. J.; Johnston, F. H., Heatwave and health impact research: A global review. *Health & Place* 2018, 53, 210-218.
61. Vicedo-Cabrera, A. M. et al; Gillett, N.; Haines, A.; Mengel, M.; Huber, V.; Gasparrini, A., The burden of heat-related mortality attributable to recent human-induced climate change. *Nature Climate Change* 2021, 11, (6) , 492-500.
62. Siraj, A. S.; Santos-Vega, M.; Bouma, M. J.; Yadeta, D.; Carrascal, D. R.; Pascual, M., Altitudinal Changes in Malaria Incidence in Highlands of Ethiopia and Colombia. *Science* 2014, 343, (6175) , 1154-1158.

63. Krieger, N., Climate crisis, health equity, and democratic governance: the need to act together. *Journal of Public Health Policy* 2020, 41, (1) , 4-10.
64. Bigano, A.; Hamilton, J.; Tol, R., The Impact of Climate Change on Domestic and International Tourism: A Simulation Study. *SSRN Electronic Journal* 2006, 7.
65. Trisos, C. H.; Merow, C.; Pigot, A. L., The projected timing of abrupt ecological disruption from climate change. *Nature* 2020, 580, (7804) , 496-501.
66. Fankhauser, S., The Social Costs of Greenhouse Gas Emissions: An Expected Value Approach. *The Energy Journal* 1995, 15, (2) , 157-184.
67. Nordhaus, W. D. *Managing the Global Commons: The Economics of Climate Change*; Cambridge, MA: MIT Press: 1994.
68. Tol, R., The Economic Effects of Climate Change. *Journal of Economic Perspectives* 2009, 23, 29-51.
69. Nordhaus, W. *The 'DICE' Model: Background and Structure of a Dynamic Integrated Climate-Economy Model of the Economics of Global Warming*; Cowles Foundation for Research in Economics, Yale University: 1992.
70. Tol, R. S. J., Estimates of the Damage Costs of Climate Change. Part 1: Benchmark Estimates. *Environmental and Resource Economics* 2002, 21, (1) , 47-73.
71. Mendelsohn, R.; Nordhaus, W. D.; Shaw, D., The Impact of Global Warming on Agriculture: A Ricardian Analysis. *The American Economic Review* 1994, 84, (4) , 753-771.
72. Hsiang, S.; Kopp, R.; Jina, A.; Rising, J.; Delgado, M.; Mohan, S.; Rasmussen, D. J.; Muir-Wood, R.; Wilson, P.; Oppenheimer, M.; Larsen, K.; Houser, T., Estimating economic damage from climate change in the United States. *Science* 2017, 356, (6345) , 1362-1369.
73. Challinor, A. J.; Watson, J.; Lobell, D. B.; Howden, S. M.; Smith, D. R.; Chhetri, N., A meta-analysis of crop yield under climate change and adaptation. *Nature Climate Change* 2014, 4, (4) , 287-291.
74. 张海玲; 刘昌新; 王铮, 气候变化综合评估模型的损失函数研究进展. *气候变化研究进展* 2018, 14, (1) , 40-49.
75. Ramon, O.; Anil, M. *Literature Review of Integrated Impact Assessment Models of Climate Change with Emphasis on Damage Functions*; BC3: 2010.
76. Döll, S. *Climate change impacts in computable general equilibrium models: An overview*; Hamburg Institute of International Economics (HWWI) : 2009.
77. Trevor, H.; Solomon, H.; Robert, K.; Kate, L., *American Climate Prospectus: Economic Risks in the United States*. In Columbia University Press: 2014.
78. Acheim, A.; Orlov, A.; Wei, T.; Glomsrød, S. *GRACE model and applications*; CICERO Center for International Climate and Environmental Research: 2018.
79. De Cian, E.; Sue Wing, I., Global Energy Consumption in a Warming Climate. *Environmental and Resource Economics* 2019, 72, (2) , 365-410.
80. Bröde, P.; Fiala, D.; Lemke, B.; Kjellstrom, T., Estimated work ability in warm outdoor environments depends on the chosen heat stress assessment metric. *International Journal of Biometeorology* 2018, 62, (3) , 331-345.
81. Snyder, A.; Calvin, K. V.; Phillips, M.; Ruane, A. C., A crop yield change emulator for use in GCAM and similar models: Persephone v1.0. *Geosci. Model Dev.* 2019, 12, (4) , 1319-1350.
82. Iizumi, T.; Sakai, T., The global dataset of historical yields for major crops 1981–2016. *Scientific Data* 2020, 7, (1) , 97.
83. Wong, T. E.; Bakker, A. M. R.; Ruckert, K.; Applegate, P.; Slangen, A. B. A.; Keller, K., BRICK v0.2, a simple, accessible, and transparent model framework for climate and regional sea-level projections. *Geosci. Model Dev.* 2017, 10, (7) , 2741-2760.
84. Diaz, D. B., Estimating global damages from sea level rise with the Coastal Impact and Adaptation Model (CIAM) . *Climatic Change* 2016, 137, (1) , 143-156.
85. Athanasios, T. V.; Nicholls, R. J.; McFadden, L.; Tol, R. S. J.; Hinkel, J.; Spencer, T.; Grashoff, P. S.; Boot, G.; Klein, R. J. T., A New Global Coastal Database for Impact and Vulnerability Analysis to Sea-Level Rise. *Journal of Coastal Research* 2008, (24) , 917 -- 924.

作者简介

滕飞是清华大学能源环境经济研究所副所长、副教授，他的研究方向主要为中国和全球能源系统分析模型的构建及情景模拟，以及国际与中国气候变化治理的政策分析。他是政府间气候变化专家委员会（IPCC）第五次及第六次评估报告的作者。他参与了中英气候变化风险评估合作项目第二期和第三期的工作，并在第三期担任中方团队的技术总协调。滕飞拥有清华大学机械工程学士学位，以及管理科学与工程硕士和博士学位。

王天鹏是清华大学能源环境经济研究所的博士后研究员。他的研究方向主要为气候变化综合评估模型的构建及情景模拟，以及能源经济模型与地球系统模式的耦合。王天鹏拥有清华大学生命科学学士学位，以及管理科学与工程的博士学位。

郭江汶是英国皇家国际事务研究所（Chatham House）环境与社会部高级研究员。她的研究方向主要为能源政策、环境治理、可持续供应链以及绿色增长规划和实施。她在相关领域拥有20多年经验，参与多个发展中国家重要政策部署。她目前担任中英气候风险评估项目第三期项目主任，并提供战略指导，以确保气候风险评估能够在全球、国家和次国家层面纳入有效的风险治理。



清华大学能源环境经济研究所
INSTITUTE of ENERGY, ENVIRONMENT and ECONOMY
TSINGHUA UNIVERSITY

清华大学能源环境经济研究所是清华大学下属的能源与气候变化政策研究机构。我们的使命是创造、发展和传播促进可持续能源转型与应对气候变化的知识、理念和方法。

3e.tsinghua.edu.cn
电话: +86 10 6277 2753
传真: +86 10 6277 2759



英国皇家国际事务研究所 (Chatham House) 是位于伦敦的世界顶级政策研究所。我们的使命是和各国政府和社会携手建设一个持续稳定、繁荣和公正的世界。

www.chathamhouse.org
电话: +44 (0) 20 7957 5700
传真: +44 (0) 20 7959 5710



Foreign, Commonwealth
& Development Office

非常感谢英国外交、联邦事务及发展部资助的中英气候变化风险评估合作项目对研究提供的支持。