Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng

Research
Next Ten Years: Create a Better Future—Review

我国遵循《巴黎协定》的2 °C目标实现碳中和——探索全球排放情景、气候变暖水平和极端事件预测

张小曳[a,b,*]，仲峻霆[a,b]，张希良[a,c]，张达[a,c]，苗长虹[a]，王德英[a,b]，郭立峰[a,b]

[a] Henan University and Chinese Academy of Meteorological Sciences Joint Laboratory for Climate Change Mitigation and Carbon Neutrality, Zhengzhou 450000, China
[b] State Key Laboratory of Severe Weather, Monitoring and Assessment Center for Greenhouse Gases and Carbon Neutrality, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China
[c] Institute of Energy, Environment and Economy, Tsinghua University, Beijing 100086, China

ARTICLE INFO

Article history:
Received 21 August 2024
Revised 10 November 2024
Accepted 26 November 2024
Available online 3 December 2024

关键词
气候变化
2 °C目标路径
碳中和
排放情景
平衡减缓

摘要

在统筹发展与安全的背景下，我国可以通过积极探索符合本国国情的碳达峰和碳中和路径，瞄准《巴黎协定》2 °C目标，而非初期依赖大规模负排放技术（如直接空气碳捕集与封存，DACCS）的理想化1.5 °C目标路径。研究表明，对我国而言，追求1.5 °C目标路径会付出较2 °C目标路径多3~4倍的成本，可行性逐渐降低。我国预计将在2028年左右实现碳达峰，人为CO_2排放量约为128亿吨，并最终进入碳中和阶段。这有望使全球变暖水平在21世纪50年代出现低于此前预期的走势，从而降低气候临界点与极端事件的风险，尤其是在全球其他两大碳排放体（欧洲与北美）已实现碳达峰的背景下。尽管自然碳汇在我国实现碳中和的过程中发挥作用，但在过渡阶段并不具有决定性作用。本文还关注了国际气候合作中日益受到重视的气候过冲、气候临界点、极端事件、气候变化的损失与损害以及甲烷减排等问题，强调在应对这些问题时需统筹兼顾我国的发展、安全与公平。我国实现碳中和将对全球排放情景、未来变暖水平、极端事件预测以及全球关注的气候热点问题（如气候临界点、气候危机和“从全球变暖进入全球沸腾时代”的论述）产生重要影响。最后，本文还总结了基于我国2 °C目标路径的全球排放情景研究建议。

© 2024 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

1. 引言

气候变化是当今世界面临的最严峻挑战之一。政府间气候变化专门委员会（IPCC）自1988年成立以来，已开展多轮评估，对气候变化科学研究的进展进行系统总结及预测[1]。这些评估不仅揭示了气候系统变化的机制与影响，也为政策制定提供了科学依据。近年来，随着全球温室气体排放增加以及极端天气事件频发，气候变化的风险日益突出，对社会和经济的影响不断加剧[2]。为应对这一挑战，各国纷纷承诺实现碳中和，旨在将全球平均气温较工业化前水平升幅控制在2 °C以内，并努力把升温控制在1.5 °C之内，这也是《巴黎协定》所确立的目标[3]。

作为东亚最大的发展中国家，我国承诺于2030年前实现碳达峰，并力争在2060年前实现碳中和。这些目标对我国的可持续发展至关重要，并对全球气候变化产生深远影响，包括未来极端事件的趋势、气候临界点、气候危

* Corresponding author.
E-mail address: xiaoye@cma.gov.cn (X. Zhang).

2095-8099/© 2024 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).
英文原文：Engineering 2025, 44(1): 207–214
引用本文：Xiaoye Zhang, Junting Zhong, Xiliang Zhang, Da Zhang, Changhong Miao, Deying Wang. China Can Achieve Carbon Neutrality in Line with the Paris Agreement's 2 °C Target: Navigating Global Emissions Scenarios, Warming Levels, and Extreme Event Projections. *Engineering*, https://doi.org/10.1016/j.eng.2024.11.023

机以及“从全球变暖进入全球沸腾时代”的论述。在全球气候变化背景下，如何在减少温室气体排放的同时统筹兼顾国家发展与安全，是我国必须应对的关键问题。

本研究旨在评估我国应对全球气候变化挑战的策略，探索在力争将全球变暖升幅控制在2 ℃以内的《巴黎协定》目标下，我国实现碳达峰和碳中和的路径，并对这些路径对未来气候变化问题的潜在影响进行评估和讨论。研究还探讨了国际气候变化合作中的甲烷减排问题及其对我国的影响，强调在全球气候治理中兼顾公平与效率。

2. 如何实现符合我国国情的碳达峰/碳中和路径

2.1.《巴黎协定》中的2 ℃和1.5 ℃目标

在国际气候变化研究中，已有大量论文探讨如何将全球平均地表温度（GMST）到2100年的十年际升温幅度（相较于1850—1900年平均温度水平）控制在2 ℃或1.5 ℃以内。这些论文的核心内容是提出在碳中和目标下人为碳减排路径的发展趋势。《巴黎协定》的一个重要方面在于，如果缔约国在2075年前实现净零CO_2排放，则有很大可能到2100年将全球升温控制在约2 ℃以内。我国已签署《巴黎协定》，并承诺力争在2060年前实现碳中和，领先国际目标15年。《巴黎协定》还提出，各国应力争将升温控制在1.5 ℃以内，而要实现该目标，全球需在2055年左右实现净零CO_2排放[3]。若要实现1.5 ℃目标，我国的人为CO_2排放应在2021年左右达到峰值，并在2055年左右实现大幅下降。然而，这种情景高度理想化，对我国而言几乎不可能实现（图1）。

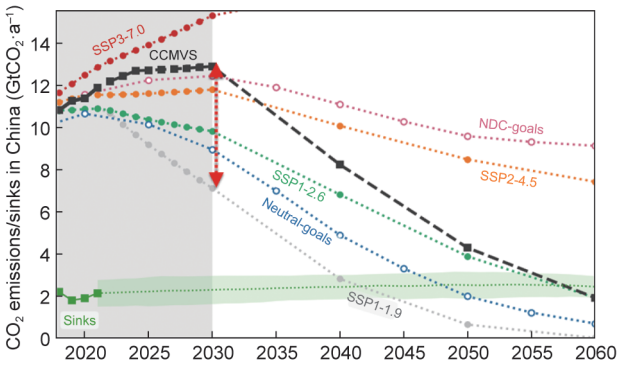

图1. 我国基于CCMVS系统结果的碳中和路径与1.5 ℃极低稳定情景路径（SSP1-19）之间的差异。$GtCO_2 \cdot a^{-1}$：十亿吨CO_2每年。NDC：国家自主贡献。

图1所示数据来源于两方面的对比：一是中国气象局（CMA）碳源汇监测核校支持（CCMVS v1.0）系统提供的我国人为碳排放数据；二是基于IPCC第六次评估报告（AR6）中的共享社会经济路径（SSPs）及其情景所得数据。CCMVS系统由CMA温室气体与碳中和监测评估中心开发，具备四层嵌套网格的人为碳排放与碳汇监测、核校支持业务系统，且遵循《2006年IPCC国家温室气体清单指南2019年修订版》（https://www. ipcc-nggip. iges. or. jp/public/2019rf/index.html）。该系统融合了全球最大规模的大气CO_2浓度数据，由我国国家温室气体观测网观测并与世界共享。CCMVS系统旨在通过结合卫星数据、地面测量和建模工具，及时准确地监测和核校各类碳排放源，提供各区域碳源与碳汇的可靠数据，从而支持政策决策和碳减排工作[4–6]。

2.2. 我国可遵循碳中和路径以实现《巴黎协定》的2 ℃目标

根据国家发展和改革委员会与生态环境部发布的碳排放系数，并结合清华大学（THU）及多家单位提供的数据测算，我国2021年能源活动和工业过程总排放约为116亿吨CO_2。然而，通过大气CO_2浓度观测数据同化反演方法[4]，CMA估算2021年总排放约为119亿吨[6]。在统一标准后，我国2021年能源和工业过程相关的碳排放总量在113亿吨至120亿吨之间，因此119亿吨是一个合理的基准数值。2014年我国温室气体排放总量的不确定性范围为−5.2%~5.3%，因此可对CO_2排放数值采用−5.0%~5.0%的不确定性范围。

清华大学与中国气象科学研究院（CAMS）联合发布的一项研究构建了符合《巴黎协定》2 ℃减排目标的碳中和路径[7]。基于碳中和基准情景，对我国未来经济增长率的假设见表1 [7]。由于我国尚未完全实现从碳强度控制向碳总量控制的转变，本研究仍以碳强度为单位提出减排进程，并基于国内生产总值（GDP）预测估算我国未来人为碳排放的关键节点。该基准情景下的减排举措基于我国提出的“2030年前碳达峰、2060年前碳中和”，以及“将全球升温控制在2 ℃以内”的目标。

根据IPCC的评估结果，为了以超过66%的概率实现将全球变暖控制在2 ℃以内的目标，全球需在2075年左右实现碳中和，前提是没有减排责任分担机制，且减排发生在最具成本效益的时间和地点。用“碳强度下降率”来表示，全球碳强度需要在不同阶段实现相应年度下降幅度，即2020—2030年每年下降4.0%~9.0%；2030—2040年每年下降6.0%~9.0%；2040—2050年每年下降7.0%~9.0%；2050—2060年每年下降11.0%~19.0%。与此同时，我国的“十四五”规划提出了碳强度下降18%的目标，折算为每年下降率约为4%。因此，本研究设定了一个“阶梯式”的碳强度下降率，即2020—2030年每年下降3.9%~4.4%；2030—2040年每年下降6.0%~8.0%；

表1 年均GDP增长率与碳强度下降率的设定（改编自参考文献[7]）

Year	Annual GDP growth rate			Annual average carbon intensity reduction rate		
	Baseline scenario	High growth	Low growth	Baseline scenario	High reduction rate	Low reduction rate
2021—2025	5.8%	6.1%	5.5%	3.9%	3.9%	3.9%
2026—2030	4.8%	5.4%	4.6%	4.4%	6.0%	4.0%
2031—2035	3.8%	4.5%	3.6%	6.0%	8.0%	4.0%
2036—2040	3.3%	3.5%	3.1%	8.0%	10.0%	6.0%
2041—2045	3.0%	3.2%	2.9%	10.0%	12.0%	8.0%
2046—2050	2.9%	3.0%	2.8%	12.0%	14.0%	10.0%
2051—2055	2.9%	3.0%	2.7%	14.0%	16.0%	12.0%
2056—2060	2.8%	3.0%	2.6%	16.0%	18.0%	14.0%

2040—2050年每年下降12.0%~14.0%；2050—2060年每年下降14.0%~16.0%。

考虑到我国中长期GDP和碳强度下降率存在显著不确定性，Zhang等[7]在基准情景的基础上增加了四种设定，即高经济增长、低经济增长、高碳强度下降率和低碳强度下降率，如表1所示。在此基础上，可以推导出我国实现碳中和的可能路径及其不确定性范围[7]。

由于2023年新型冠状病毒肺炎（COVID-19）疫情结束后我国经济强劲反弹，当年碳强度仅下降约0.3%，“十四五”规划前三年累计下降约4.7%，这与原年均下降3.9%、五年累计下降18%的设定存在差距。因此，本文将“十四五”期间的碳强度下降率调整为累计下降11.3%（原路径为18%）。“十五五”期间的下降率保持不变，累计下降20%。经过这些调整后，2023—2030年的修正排放路径与原路径差异不大，不会对2030年之后的减排路径设计产生实质性影响。由此得出我国实现2 ℃目标的最新碳中和路径（图2）。研究结果显示，我国可以提出以下国家自主贡献目标：到2035年，能源相关的CO_2排放量比2030年减少约10%——大致等同于研究提出的2035年较2030年下降近12%的目标。2035年之后的减排轨迹则可遵循研究设计的路径继续推进。

根据本研究结果，为实现《巴黎协定》全球气温升幅控制在2 ℃以内的目标，我国可在不依赖气候变化“过冲”的情景下，在早期大规模采用直接空气碳捕集与封存（DACCS）及生物质能碳捕集与封存（BECCS）等负排放技术，于2060年实现碳中和（图2）。具体而言，我国的人为碳排量将在2028—2029年间达到峰值，峰值排放量约为128亿吨。此后，随着我国优先发展可再生能源、推进能源体系转型，排放量将持续下降，并通过陆地生态系统提供的21亿吨碳汇实现碳补偿，最终于2060年左右实现碳中和。

基于以我国2 ℃目标路径驱动的全球排放情景，本研究使用了三种模拟器来预测全球平均地表温度相对于1850—1900年的未来升温情况，发现到2100年，全球地表温度（GST）的升幅约为2 ℃，但存在一定误差。研究还发现，21世纪中期之后的GST升幅低于先前SSP2-4.5的情景预测。这表明，我国统筹兼顾发展与安全的碳中和路径，可以实现《巴黎协定》的2 ℃目标，并可能对临界点和极端事件的预测产生影响（具体细节将在另一项研究中详细阐述）。这三种模拟器分别是温室气体诱导气候变化评估模型（MAGICC）[8]、有限振幅脉冲响应模型（FaIR）[9–10]和挪威国际气候与环境研究中心的简单气候模型（CICERO-SCM）[11]。

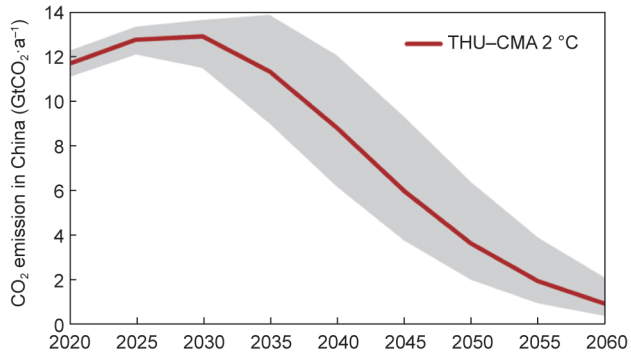

图2. 根据我国碳中和目标修订的碳排放路径。红色线条THU-CMA 2 ℃表示基准情景下的碳排放路径，灰色区域表示考虑基准年排放、不确定的经济增长率、碳强度下降速率等因素时的碳排放不确定性范围。

2.3. 自然生态系统碳汇将在我国实现碳中和、抵消剩余排放方面发挥积极作用，但减排仍是实现碳中和的关键

根据IPCC的定义，碳中和是人为碳排放与人为碳清除之间的平衡[1]。事实上，自然生态系统作为碳汇也有助于中和部分人为碳排放[12–13]。由于地球系统模型首先需要输入未来人为碳排放数据作为驱动因子，才能得出相应的自然生态系统碳汇，因此，尽管IPCC对碳中和的定义强调通过人为手段中和人为排放，但也提出了基于自然解决方案的碳中和路径[14]，并指出自然生态系统的碳

汇最终可用于中和人为碳排放[14]。我国陆地生态系统的碳汇估算范围约为10亿吨[15–16]到41亿吨[17]（图3）。CAMS估算，2018—2021年我国陆地生态系统年均碳汇为20.9亿吨CO_2 [6]，该水平预计在实现2060年碳中和的过程中将继续保持或略有上升。该估算主要基于未来气候变暖下陆地和海洋生态系统的碳汇能力不会显著增长，甚至可能下降[18]。IPCC的AR6报告预测，未来气候变化将削弱海洋碳汇的效率。当前海洋和陆地碳汇吸收了人为碳排的一半以上；然而，随着全球气温升高，这些碳汇的吸收能力将减弱。报告中的情景强调，特别是在高排放路径下，海洋作为碳汇的能力显著下降；若全球能大幅减排，则这种下降会有所缓解[19]。2021年，约20亿吨的碳汇水平仅占我国约119亿吨人为碳排的18%左右[6]。考虑到我国土地利用中对“耕地红线”（保护耕地不被开发）和“生态红线”（保护我国大面积生态资源不被开发）的要求，再加上水资源[20]是我国发展的限制性因素，自然生态系统碳汇在实现碳中和中的作用虽具重要意义，但并非主战场。

2.4. 在我国实现碳中和的路径中，无需在早期大规模采用负排放技术

自工业革命以来，全球经济和能源系统对化石燃料的依赖导致大量温室气体在大气中积累。即使立即采取减排措施，已有气体仍将继续推动地球温度上升。这种“惯性”可能使气候目标难以在短期内实现。因此，国际上提出了“气候过冲”概念，指的是为实现长期气候目标（如将全球平均变暖水平限制在较工业化前水平高1.5 ℃以内）而在未来某一阶段暂时超过该目标，然后通过人工负排放手段使温度回落到目标水平以下[21]。2023年《气候过冲委员会报告》[22]强调，即使全球温室气体排放立即停止，已释放的气体仍将继续导致全球气温上升。报告建议采取多项措施，包括加快减排、开发碳清除技术、研究太阳辐射管理技术，以及加强气候适应措施和气候融资支持，尤其是对低收入国家的支持[22]。世界自然基金会（WWF, https://www.worldwildlife.org/stories/what-is-climate-overshoot-and-whydoes-it-matter）指出，大多数气候模型预测全球气温将暂时超过1.5 ℃目标，然后再回落。基金会强调，气候过冲可能导致高温持续时间延长，给生态系统、生物多样性和人类社会带来严重影响。全球必须迅速果断地采取行动，限制碳排放并落实可持续发展目标。

为了使气温重新降至目标水平以下，需要大规模部署碳清除技术以及碳捕集、利用与封存（CCUS）技术，这对技术发展和经济承受能力提出了巨大挑战[23]。例如，目前大气中直接空气捕集（DAC）所需的技术和大型科学装置的捕集成本因具体技术和运行条件不同而异，从每吨CO_2数百美元到上千美元不等，且应用范围较小[23]。虽然全球目前已有部分公司和研究机构启动了DAC的试验和示范项目，但DAC仍主要处于验证技术可行性和经济可行性的阶段[24–25]。我国先前最大的全产业链CCUS示范项目，即齐鲁石化-胜利油田百万吨CCUS项目，每年可减少100万吨CO_2排放。如果我国完全依赖CCUS技术实现碳中和，将需要数千个类似规模的项目，这将产生巨大的经济压力。因此，尽管CCUS技术未来可能在实现碳中和过程中发挥作用，但不应抱有“先排放、再清除”的气候过冲幻想。相反，我国应持续加快可再生能源在电力系统中的大规模应用，大幅提升绿色电力在我国关键和优势产业链产品全生命周期中的应用比例，并积极调整产业结构，持续减少对高化石能源消耗和高排放行业的依赖。

当然，IPCC的AR6报告强调，碳捕集与封存（CCS）以及其他负排放技术在实现碳中和的过程中，具有重要的

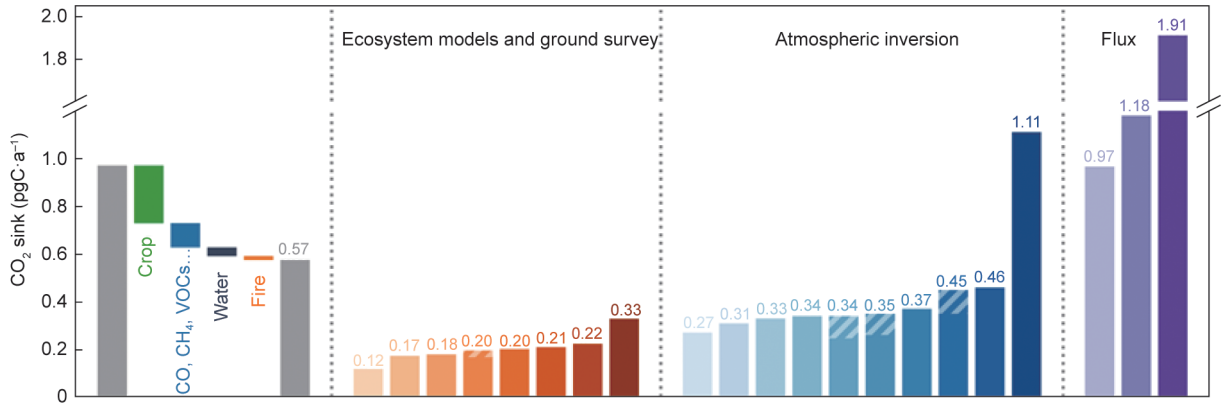

图3. 我国陆地生态系统碳汇估算：基于CCMVS反演的估算（最左）、基于过程模型的估算（左）、基于大气反演的估算（右），以及基于地面通量观测的估算（最右）（单位：拍克碳每年，PgC·a^{-1}）。最左侧详细展示了CCMVS反演的组成部分，包括：总反演碳汇（灰色）、农田碳汇（绿色）、非CO_2气体当量碳汇（蓝色）、水生态系统碳汇（黑色）以及野火当量碳汇（橙色）。左、中、右三个柱状图中的数值分别来自不同研究数据。

潜在作用，特别是在后期阶段[26]。《联合国气候变化框架公约》（UNFCCC）官方网站上的相关文献（https://unfccc.int/documents/629380）也探讨了CCS的技术潜力，及其当前在技术、经济和社会文化方面所面临的障碍。

3. 气候变暖水平及我国碳达峰至碳中和进程中的可能影响

3.1. 随着我国实现碳达峰并进入碳中和进程，超过气候变化“临界点”的风险是否仍如预期？

影响全球气候变暖的因素包括自然因素和人为因素。自20世纪50年代以来，导致气候变暖的主导因素是不断增加的人为CO_2排放量[27]。2023年，全球向大气中排放了约374亿吨人为CO_2 [28]，导致大气中CO_2浓度每年增加约2~3 ppm（ppm为百万分之一），该趋势由我国的温室气体观测网络和全球大气观测网络所观测到[6,29]。在全球总碳排放量中，我国的人为碳排放量约为119亿吨，对全球气候变化产生了显著影响。

随着全球和我国的人为CO_2排放量达到峰值，大气中CO_2浓度的观测增长速率将会变低。这是因为全球人为碳排放累积量最大的北美地区已于2007年达到峰值（https://www.epa.gov/climate-indicators/climate-change-indicators-us-greenhouse-gas-emissions），而累积排放量排名第二的欧洲也在2008年达峰（https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/total-greenhouse-gas-emission-trends）。紧随其后的累积排放第三大区域是东亚，其中我国的CO_2排放预计将在2028年左右达峰[7]，意味着全球人为碳排放可能不会超过2030年的水平。随着全球人为碳排放达峰并进入碳中和阶段，每年的人为碳排放减少将降低大气中CO_2浓度的增长速率。然而，由于每年仍将存在低于峰值的人为碳排放，大气中仍将有超出自然循环范围的CO_2，这将继续影响地球的能量平衡，导致气候变暖过程无法立刻停止，而将持续一段时间。在全球年度人为碳排放通过人为减排与自然碳汇的共同作用于2100年前实现碳中和之前，自工业革命以来大气中残留的CO_2及其他温室气体仍将导致GST高于工业化前早期水平。不过，到2100年，全球气温升幅将控制在高于1850—1900年平均温度2 ℃以内，并将呈现出降温趋势。

IPCC将气候变化临界点定义为“全球或区域气候从一种稳定状态到另外一种稳定状态的关键门槛”，如果越过，则在地球系统的特定部分触发大规模且可能不可逆的变化[27]。Lenton等[30]在一项关于地球气候系统临界点的开创性研究中，确定并讨论了人类活动可能触发的多种气候临界点，如西伯利亚永久冻土的融化和亚马孙雨林的消失。Steffen等[31]探讨了人类世时期的地球系统潜在轨迹，特别指出，如果突破某些临界点，地球系统可能进入“温室地球”状态。Rockström等[32]引入了“地球系统边界”的概念，界定了人类能够安全活动的环境限度，并强调跨越这些限度可能会触发不可逆的环境变化和临界点现象。这些临界点的变化可能导致全球气候系统发生剧烈且不可预测的转变。Ritchie等[33]指出，即便是非常小的外部扰动（如人为温室气体排放的增加），也可能对地球系统中的组成部分（指“临界要素”）产生重大且不可逆的影响。随着化石燃料燃烧导致大气中温室气体浓度的不断上升，人类活动或将触发这些临界点，而一旦出现变化，这些变化所带来的影响将令我们无所适从。已有研究表明，在前工业时期的全球气候条件下，对于关键的临界要素（如冰盖融化）来说，全球变暖的阈值较低[34]。然而，这一假设可能并不适用于所有情形，特别是对于那些变化过程较慢的临界要素（如大西洋经向翻转环流崩溃）[34]。最新研究发现，如果超过阈值的持续时间较短，且低于临界点发挥效应所需的时间尺度，那么即便温度暂时超标，也未必会立即引发系统状态的改变[35]。

我国预计将在2028年左右达到人为CO_2排放峰值，并进入碳中和进程，这将有助于减缓全球温室气体排放速度，从而在将全球温升控制在2 ℃以内目标方面发挥关键作用。全球达到气候变化临界点可能不会高于当前的预期[36]。我国的行动可能会激励其他国家，特别是发展中国家，采取更加积极的气候行动。这种全球合作将提升避免或推迟达到临界点的可能性。未来的研究应重点关注如何建立能够更准确描述地球系统多尺度特征的地球系统模型，如何准确量化气候变暖的程度，以及在更贴近现实的情景设定下，我国的碳达峰与碳中和如何对不同临界点作出贡献。

3.2. 随着我国碳中和进程的推进，极端天气和气候事件是否仍将如预期般频繁和反复发生？

从全球来看，极端高温事件的频率和强度正在增加[37]，而极端寒冷事件则呈下降趋势。这一趋势在全球大多数地区均较为明显。人为导致的温室气体排放是全球冷热极端变化的主要驱动因素[38]。预计我国将在2030年左右实现碳达峰，并迅速推进碳中和进程，这一重大转型在全球气候行动中占据关键地位。我国的政策行动有可能对全球气候产生深远影响，尤其在影响全球极端天气事件的频率和强度方面意义重大。理论上，如果能够控制温室气

体排放，将有助于遏制全球平均气温的持续上升，从而减缓极端天气和气候事件的发生频率与强度。然而，也必须考虑气候系统的复杂滞后效应和非线性特征。已经积累的大量温室气体可能在一段时间内仍将持续加热地球，使得在短期内难以彻底降低极端事件的风险[39]。未来的研究应更加深入探索气候系统中极端事件的变化及其驱动机制，同时探索如何实施定量的气候变化适应行动，以及工程手段在降低气候变化影响和风险中可以发挥怎样的作用。

4. 气候变暖下的损失与损害问题

区分并量化由气候变暖造成的损失与损害，是气候变化研究领域中的一个重要研究方向[40]。这一课题也极具挑战性，因为评估和量化气候变化引发的损失与损害问题非常复杂[2]。以下是一些常见的评估方法。

（1）灾害损失评估：该方法通过对比气候变化前后气候灾害的强度，将增量部分视为由气候变化引起的损失。例如，对于飓风、洪水等自然灾害，可以比较其发生频率、强度和影响范围等指标的变化。

（2）情景分析：该方法基于成本曲线和经济模型进行情景分析，模拟不同升温水平对生态系统、经济发展和各行业的影响和冲击。该方法可预测未来可能因气候变化造成的潜在损失，并为政策制定提供科学依据。

（3）支付意愿调查：该方法通过调查公众为避免气候灾害所愿意支付的费用来量化气候变化带来的损失。此方法可反映公众对气候变化的认知与态度，以及其在环境保护方面的价值取向[41]。

许多其他相关领域的文献，如环境经济学、生态学和气象学，也为评估和量化气候变化造成的损失与损害提供了重要的理论和方法支持[42]。需要指出的是，由于气候变化本身的复杂性和不确定性，当前对其损失与损害的评估和量化仍处于初步阶段，尚需持续发展与完善。

5. 我国碳中和进程中的公平性问题——碳中和与甲烷减排的概念

IPCC对碳中和的定义并不包括其他温室气体（如甲烷）的中和[1]。相比之下，《巴黎协定》中所提到的碳中和是指包括甲烷在内的温室气体中和[3]。农业活动是甲烷的重要来源[43]，包括牛、羊等反刍动物在消化过程中产生的甲烷、水稻种植过程中产生的甲烷，以及堆肥储存和有机废弃物处理过程中产生的甲烷[44]。我国的国土面积与美国或整个欧洲相当，但人口却是美国的四倍，是欧洲的两倍以上。我国在牛肉、羊肉和大米方面的消费量远高于西方国家，因此对我国而言，将甲烷纳入碳中和目标挑战更大。其他主要的甲烷来源还包括化石燃料的开采与利用，如煤矿开采、天然气开采和石油生产等，都是甲烷的重要排放源[43–44]。在油气开采过程中，甲烷排放主要来自矿井排放、气体泄漏和燃烧过程。此外，垃圾填埋场和污水处理厂也是甲烷的重要来源[45]。

由于我国人口基数大、经济规模大，导致甲烷排放量高于西方国家，因此在碳中和目标中纳入甲烷成为我国在全球气候变化谈判中的潜在风险问题。在《巴黎协定》之后召开的第二十六届缔约方大会（COP26）上，欧盟与美国提出了“全球甲烷承诺”，强调这种温室气体对气温控制目标构成威胁，并主张到2030年将其排放量减少30%。我国并未签署该承诺。如果将甲烷纳入碳中和承诺，我国实现碳中和的时间将被推迟至2075年，这与我国当前推进碳中和的努力不一致。我国对碳中和的承诺，体现了其“合道而顺德”的治理和发展理念，使我国在全球气候变化谈判中占据有利的道义高地。这也反映出我国需要走上一条有别于过去40年辉煌成就的新型绿色、低碳、高质量的发展道路。碳中和将对我国的能源结构、产业结构及社会经济发展产生深远而长期的影响，是我国面对乃至引领第四次工业革命的重要机遇。这也有可能改变自1750年工业革命以来世界经济与社会的运行方式。

6. 总结

本文探讨了我国实现碳达峰与碳中和的路径、我国实现碳中和后全球变暖的趋势，以及碳中和进程中的公平性问题等关键议题。本文讨论了《巴黎协定》中的2 ℃和1.5 ℃温控目标、我国在符合2 ℃目标情景下实现碳中和的路径、气候过冲、临界点、极端事件、损失与损害、碳中和的概念，以及国际社会关于甲烷减排的主张。基于对上述重要问题的思考，本文提出了以下研究方向建议：

（1）更贴近现实的碳中和路径与排放情景。IPCC第一工作组（WGI）对气候预测的评估一直依托于世界气候研究计划（WCRP）开展的气候模型比较计划（CMIP）。在情景模型对比实验（Scenario-MIP）中，地球系统模型运行了一组涵盖广泛未来可能性的代表情景，由科研界共同努力制定，既具可行性，又能促进综合研究，并对科学性和政策相关性的问题作出回应。上一轮情景实验（CMIP6）在很大程度上支撑了AR6评估报告，而这一实验在十年前启动，考虑到当前的政策发展、排放水平和变

暖趋势，AR6中评估的极高变暖情景（RCP8.5/SSP5-8.5）和极低稳定情景（SSP1-1.9）目前都受到情景不切实际的负面评价。在主要排放国家和地区所展现出的减排力度和政策背景下，一个排放极高同时具备高度社会与经济发展的情景被认为不具现实可行性。另一方面，由于全球温室气体排放水平仍处于高位且不断上升，以及未能如多数实现2015年《巴黎协定》温控目标的情景要求那样，在21世纪20年代初达到排放峰值，最低稳定情景将需要以极高的速度和极大的规模削减排放并进行碳清除，而这被认为愈发难以实现。

新一轮情景（CMIP7及其他情景）预计将于2025年启动，不再以2015年为起点，并将在IPCC第七次评估报告（AR7）中进行分析。这些新情景将纳入现实可行性约束及其他因素（如以排放为基础的设定、过冲过程、公平性等），并将提供新的研究成果。随着全球主要碳排放地区的排放趋势（如达峰与迈向碳中和）逐步明确，全球排放情景的新变化有助于明确对不同变暖水平的实现路径的认知。亟须开展相关研究，形成新的见解，助力实现《巴黎协定》的目标。

（2）更精确的地球系统模型：需要开发能够更准确描述复杂地球系统多尺度特征的地球系统模型，实现地球系统模型与经济社会综合评估模型之间的耦合，并基于更贴近现实的情景精确量化全球变暖水平，尤其要关注在2 ℃/1.5 ℃温控目标下的碳预算及其高精度气候变化预测。

（3）精准观测研究：需要开展精准研究，以支持对极端天气和气候事件的预测、估算与快速归因，深入理解气候系统中极端变化及其驱动机制，准确、快速地量化人为活动和自然强迫的相对贡献。

（4）网格布局、损失与损害、临界点问题：需加强对可再生能源网格布局预测、损失与损害、气候临界点等更贴近实际条件方面的研究。

（5）生态系统与气候变化反馈：需要进一步研究生态系统在结构与功能变化的定量关系及其与气候变化之间的相互反馈机制。

（6）风险与缓解：必须对气候变暖适应行动和项目在降低影响、缓解或预防风险中的作用开展定量研究，同时研究极端气候条件下重大生态工程的影响与综合风险；还应揭示极端事件对经济与社会的影响及灾害发生机制，并评估其综合风险及对环境/生态的影响。

（7）提高效率与降低成本：需要建立在温室气体减排、关键单元技术、生态系统碳汇技术和系统集成技术方面提高效率、降低成本的理论与方法。

（8）颠覆性技术：需要研究温室气体减排领域中颠覆性技术的驱动机制和发展模式。

（9）地球工程：应开展中长期气候响应的地球工程研究，以及具备韧性的城市建设和高效协同的基础设施能源利用技术研究；还应研究未来交通、应用、源-负荷交互与可再生能源集成协同的相关技术与系统。

需要指出的是，我国未来CO_2排放达峰及迈向碳中和路径中存在诸多不确定性，值得读者关注。其主要的不确定性来源如下：

第一，我国能源消费结构的变化可能难以准确预测。随着经济发展模式的演变、产业结构的调整以及新技术的出现，未来我国的能源消费结构可能会出现难以准确预测的变化。例如，新兴产业的能源需求模式可能与传统产业截然不同。如果出现高能耗但发展潜力巨大的新兴产业，能源消费的预测将变得更加复杂。

第二，我国未来每年可再生能源装机容量的估算可能存在偏差。可再生能源的发展受到多种因素的影响，如政策、技术突破、资源勘探成果以及市场投资热情。政策调整可能会改变可再生能源项目的建设速度，而技术突破则可能使原本不具备开发条件的可再生能源成为新的装机增长点。另一方面，技术瓶颈也可能阻碍装机容量的增长。

第三，我国未来年度能源增长的预测也存在不确定性。这不仅包括国内经济形势变化对能源需求的影响，例如，经济增长速度超出预期所导致的能源消费大幅增加，也包括国际能源市场波动对我国能源进口与使用战略的影响。

第四，CCS等负排放技术的发展情况仍未可知。如果未来这些技术能够大规模、低成本地应用，将极大改变碳中和的实现路径和速度；但目前其技术成熟度和商业应用前景仍存在较大不确定性。

第五，各地区减排行动的协同效果和实施情况不尽相同。我国地域广阔，不同地区的经济发展水平和减排能力存在差异。在全国实现碳达峰和碳中和目标的过程中，地方政策的落实情况及地区间减排的协同效应可能与预期不同，进而影响整体目标的实现时间和路径。

这些不确定性如同笼罩在我国碳达峰与碳中和目标之上的迷雾。我们必须清醒地认识到它们的存在，以便为未来道路上的各种变化做好准备，确保我国“双碳”目标的顺利实现。

致谢

本研究得到了国家自然科学基金专项项目“面向我国碳中和最优路径实现的自然-社会系统多尺度相互作用模

式耦合、数据监测支持和决策支撑研究的顶层设计（总课题）”（42341202）和中国气象科学研究院基本科研业务费（2021Z014）的支持。

Compliance with ethics guidelines

Xiaoye Zhang, Junting Zhong, Xiliang Zhang, Da Zhang, Changhong Miao, Deying Wang, and Lifeng Guo declare that they have no conflict of interst or financial conflicts to disclose.

References

[1] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate change 2021: the physical science basis. In: Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, Connors SL, Péan C, Chen Y, et al., editors. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC; 2021.

[2] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate change 2022: impacts, adaptation and vulnerability. Report. Geneva: IPCC; 2022.

[3] United Nations Climate Change. The Paris Agreement. Report. Bonn: United Nations Framework Convention on Climate Change; 2015.

[4] Guo L, Zhang X, Zhong J, Wang D, Miao C, Zhao L, et al. Construction and application of a regional kilometer-scale carbon source and sink assimilation inversion system (CCMVS-R). Engineering 2024;33:263–75.

[5] Wu CY, Zhang XY, Guo LF, Zhong JT, Wang DY, Miao CH, et al. An inversion model based on GEOS-Chem for estimating global and China's terrestrial carbon fluxes in 2019. Adv Clim Chang Res 2023;14(1):49–61.

[6] Zhong J, Zhang X, Guo L, Wang D, Miao C, Zhang X. Ongoing CO_2 monitoring verify CO_2 emissions and sinks in China during 2018–2021. Sci Bull 2023;68(20):2467–76.

[7] Zhang D, Huang XD, Zhong JT, Guo LF, Guo SY, Wang DY, et al. A representative CO_2 emissions pathway for China toward carbon neutrality under the Paris Agreement's 2 °C target. Adv Clim Chang Res 2023;14(6):941–51.

[8] Meinshausen M, Raper SCB, Wigley TML. Emulating coupled atmosphere-ocean and carbon cycle models with a simpler model, MAGICC6—Part 1: model description and calibration. Atmos Chem Phys 2011;11(4):1417–56.

[9] Leach NJ, Jenkins S, Nicholls Z, Smith CJ, Lynch J, Cain M, et al. FaIRv2.0.0: a generalized impulse response model for climate uncertainty and future scenario exploration. Geosci Model Dev 2021;14(5):3007–36.

[10] Millar RJ, Nicholls ZR, Friedlingstein P, Allen MR. A modified impulse-response representation of the global near-surface air temperature and atmospheric concentration response to carbon dioxide emissions. Atmos Chem Phys 2017; 17(11):7213–28.

[11] Sandstad M, Aamaas B, Johansen AN, Lund MT, Peters G, Samset BH, et al. CICERO simple climate model (CICERO-SCM v1.1.1)—an improved simple climate model with a parameter calibration tool. Geosci Model Dev 2024; 17(17):6589–625.

[12] Trumper K. The natural fix: the role of ecosystems in climate mitigation: a UNEP rapid response assessment. Report. Kenya: UN Environment Programme; 2009.

[13] Daba MH, Dejene SW. The role of biodiversity and ecosystem services in carbon sequestration and its implication for climate change mitigation. Env Sci Nat Resour 2018;11(2):1–10.

[14] Seddon N, Chausson A, Berry P, Girardin CA, Smith A, Turner B. Understanding the value and limits of nature-based solutions to climate change and other global challenges. Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci 2020; 375(1794):20190120.

[15] Jiang F, Chen JM, Zhou L, Ju W, Zhang H, Machida T, et al. A comprehensive estimate of recent carbon sinks in China using both top-down and bottom-up approaches. Sci Rep 2016;6(1):22130.

[16] Piao S, Fang J, Ciais P, Peylin P, Huang Y, Sitch S, et al. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China. Nature 2009;458(7241):1009–13.

[17] Wang J, Feng L, Palmer PI, Liu Y, Fang S, Bösch H, et al. Large Chinese land carbon sink estimated from atmospheric carbon dioxide data. Nature 2020; 586(7831):720–3.

[18] Piao S, Yue C, Ding J, Guo Z. Perspectives on the role of terrestrial ecosystems in the 'carbon neutrality' strategy. Sci China Earth Sci 2022;65(6):1178–86.

[19] Ruane AC. AR6 synthesis report of the IPCC Sixth Assessment Report. Report. Geneva: IPCC; 2024.

[20] Wang Z, Li W, Li Y, Qin C, Lv C, Liu Y. The 'three lines one permit' policy: an integrated environmental regulation in China. Resour Conserv Recycling 2020; 163:105101.

[21] Schleussner CF, Ganti G, Lejeune Q, Zhu B, Pfleiderer P, Prütz R, et al. Overconfidence in climate overshoot. Nature 2024;634(8033):366–73.

[22] Climate Overshoot Commission. Reducing the risks of climate overshoot. Report. Paris: Climate Overshoot Commission; 2023.

[23] McQueen N, Gomes KV, McCormick C, Blumanthal K, Pisciotta M, Wilcox J. A review of direct air capture (DAC): scaling up commercial technologies and innovating for the future. Prog Energ 2021;3(3):032001.

[24] Breyer C, Fasihi M, Bajamundi C, Creutzig F. Direct air capture of CO_2: a key technology for ambitious climate change mitigation. Joule 2019;3(9): 2053–7.

[25] Chauvy R, Dubois L. Life cycle and techno-economic assessments of direct air capture processes: an integrated review. Int J Energy Res 2022;46(8):10320–44.

[26] Metz B, Davidson O, De Coninck H, Loos M, Meyer L. Summary for policymakers. Report. Geneva: IPCC; 2005.

[27] Hansen J, Johnson D, Lacis A, Lebedeff S, Lee P, Rind D, et al. Climate impact of increasing atmospheric carbon dioxide. Science 1981;213(4511):957–66.

[28] International Energy Agency (IEA). CO_2 emissions in 2023. Report. Paris: IEA; 2024.

[29] World Meteorological Organization (WMO). WMO greenhouse gas bulletin. Report. Geneva: WMO; 2022.

[30] Lenton TM, Held H, Kriegler E, Hall JW, Lucht W, Rahmstorf S, et al. Tipping elements in the Earth's climate system. Proc Natl Acad Sci 2008;105(6):1786–93.

[31] Steffen W, Rockström J, Richardson K, Lenton TM, Folke C, Liverman D, et al. Trajectories of the Earth system in the Anthropocene. Proc Natl Acad Sci 2018;115(33):8252–9.

[32] Rockström J, Steffen W, Noone K, Persson A, Chapin FS, Lambin EF, et al. A safe operating space for humanity. Nature 2009;461(7263):472–5.

[33] Ritchie PD, Clarke JJ, Cox PM, Huntingford C. Overshooting tipping point thresholds in a changing climate. Nature 2021;592(7855):517–23.

[34] Ritchie PDL, Clarke JJ, Cox PM, Huntingford C. Overshooting tipping point thresholds in a changing climate. Nature 2021;592:517–23.

[35] Robinson A, Calov R, Ganopolski A. Multistability and critical thresholds of the Greenland ice sheet. Nat Clim Change 2012;2:429–32.

[36] Wang S, Foster A, Lenz EA, Kessler JD, Stroeve JC, Anderson LO, et al. Mechanisms and impacts of Earth system tipping elements. Rev Geophys 2023; 61(1):e2021RG000757.

[37] Tuholske C, Caylor K, Funk C, Verdin A, Sweeney S, Grace K, et al. Global urban population exposure to extreme heat. Proc Natl Acad Sci 2021;118(41): e2024792118.

[38] Seneviratne SI, Zhang X, Adnan M, Badi W, Dereczynski C, Di Luca A, et al. Chapter 11: weather and climate extreme events in a changing climate. In: Climate change 2021: the physical science basis. Cambridge: Cambridge University Press; 2021.

[39] Hoell AJ, Herring SC, Stott P. Explaining extreme events from a climate perspective II. In: Proceedings of the 104th AMS Annual Meeting; 2024 Jan 28–Feb 1; Baltimore, MD, USA; 2024. Washington, DC: American Meteorological Society (AMS); 2024.

[40] Auffhammer M. Quantifying economic damages from climate change. J Econ Perspect 2018;32(4):33–52.

[41] Stern N. The economics of climate change: the Stern review. New York, NY: Cambridge University Press; 2007.

[42] Mechler R, Bouwer LM, Schinko T, Surminski S, Linnerooth-Bayer J. Loss and damage from climate change: concepts, methods and policy options. Berlin: Springer Nature; 2019.

[43] International Energy Agency (IEA). Global methane tracker 2023. Report. Paris: IEA; 2023.

[44] Saunois M, Stavert AR, Poulter B, Bousquet P, Canadell JG, Jackson RB, et al. The global methane budget 2000–2017. Earth Syst Sci Data 2020;12(3):1561–623.

[45] Jiang J, Yin D, Sun Z, Ye B, Zhou N. Global trend of methane abatement inventions and widening mismatch with methane emissions. Nat Clim Chang 2024;14(4):393.