

# 中国气候风险领域的科技创新进展与展望

韩钦梅<sup>1</sup>, 李婧华<sup>2</sup>, 巢清尘<sup>\*1</sup>

(1. 国家气候中心, 北京 100081; 2. 中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081)

**【摘要】**气候变暖背景下, 高频高强高影响的极端天气气候事件对自然生态系统和经济社会系统产生了可观测的明显影响, 识别和定量评估气候变化风险、提高适应气候变化能力是学界和决策者高度重视的研究方向。本文从自然生态系统、社会经济系统、气候风险管理等角度梳理了气候变化风险领域科技创新的发展历程, 分析当前研究的不足, 结合国家适应气候变化战略提出了未来创新发展方向。气候变化风险研究仍处于初步阶段, 需要进一步完善气候变化风险评估体系, 形成综合风险评估体系; 加强影响机理和综合风险研究, 充分认识构成风险的关键要素, 明晰重点领域气候风险阈值, 减少气候变化风险预估的不确定性, 为因地制宜实施气候变化适应技术提供科学支撑。

**【关键词】**气候变化; 气候风险; 科技创新; 发展

中图分类号: X21 文献标识码: A 文章编号: 1673-288X(2024)03-0027-07 DOI: 10.19758/j.cnki.issn1673-288x.202403027

全球气候变暖仍在持续, 极端高温不断刷新记录, 中国气象局国家气候中心发布的《中国气候变化蓝皮书 2023》显示, 2022 年全球平均温度较工业化前水平(1850—1900 年平均)高出 1.13°C, 为 1850 年有气象观测记录以来的第六高值; 2013—2022 年全球平均温度较工业化前水平高出 1.14°C; 2022 年, 亚洲陆地表面平均气温较常年值(1981—2010 年)偏高 1.0°C, 是 1901 年以来第二暖年份。中国升温速率高于同期全球水平, 1901—2022 年, 中国地表年平均气温呈显著上升趋势, 平均每 10 年升高 0.16°C, 高于同期全球平均升温水平。2022 年中国地表平均气温较常年值(1981—2010 年)偏高 0.92°C, 为 20 世纪初以来的三个最暖年份之一<sup>[1]</sup>。

根据世界气象组织(WMO)数据, 1970—2021 年, 与水相关的极端天气气候事件造成了 4.3 万亿美元的经济损失, 死亡人数超过 200 万,

仅 2022 年与洪水相关的经济损失就超过了过去 20 年(2002—2021 年)的平均水平, 与干旱相关的经济损失达 76 亿美元, 比过去 20 年的平均水平高出近 200%<sup>[2]</sup>。气候变化也加剧了中国区域性气候风险, 引发频次更多、强度更强、范围更广的极端天气气候事件, 这对我国的粮食安全、生态安全、水安全、能源安全和人群健康产生了复杂的影响。2022 年, 中国因气象灾害造成了 11165.6 万人受灾, 279 人死亡, 直接经济损失达 2147.3 亿元人民币<sup>[3]</sup>。未来气候变暖加剧背景下, 全球气候风险进一步加大, 引起各国的高度关注。

中国在应对气候变化领域取得了有目共睹的进展。首先, 应对气候变化科技创新规划、政策体系不断健全, 出台了《“十三五”国家科技创新规划》《“十三五”应对气候变化科技创新专项规范》等一系列科技创新政策, 从部门到地方积极响应, 发布技术指南、编制相关标准、

基金项目: 2021 年国家社会科学基金重点项目“碳中和视域下中国参与全球气候治理的制度性挑战及对策研究”(项目编号 21AZD123)。

作者简介: 韩钦梅, 博士, 主要研究方向为气候变化与风险评估, Email: hanqm@cma.gov.cn。

通讯作者: 巢清尘, 研究员, 主要研究方向为气候风险管理与气候变化政策, Email: chaoqc@cma.gov.cn。

开展科普宣传等,形成了较为完备的国家和地方应对气候变化科技政策体系。其次,“全球变化及应对”等9项重点专项被纳入国家重点研发计划,结合其他专项和国家自然科学基金项目,有力推动应对气候变化的科学研究。在国家大力支持下,从事气候变化领域研究的科研机构数量达到3505个,国家和部门重点实验室约有100个,自2014年起我国在应对气候变化领域的学术文献数量一直居于世界第二,2016—2018年间共有30项相关科技成果获得国家科学技术奖<sup>[4]</sup>。最后,我国积极开展气候变化国际合作交流,深入参与《联合国气候变化框架公约》谈判,参与政府间气候变化专门委员会(IPCC)科学报告编制工作的中方专家学者数量不断增多。我国参与IPCC第一次评估报告(FAR)编写的专家仅有1位,第二次评估报告(SAR)有2位,第三次评估报告(TAR)有8位,第四次评估报告(AR4)和第五次评估报告(AR5)分别有10位和18位<sup>[5]</sup>,而第六次评估报告(AR6)时,多达37位中方专家学者参与编写,我国在国际气候谈判和气候治理中的话语权得到不断增强。

当前,我国在应对气候变化领域科技创新能力有待进一步提升。本文整理了我国气候风险领域的新要求、新挑战,通过梳理气候风险领域的科技创新历程和发展变化,分析未来的科技创新方向,以期应对气候变化相关研究提供支持。

## 1 气候风险领域科技发展的新需求

### 1.1 全球气候治理的新挑战

《联合国气候变化框架公约》缔约方大会(COP)是联合国会员国召开的年度会议,用来评估应对气候变化的进展及在《联合国气候变化框架公约》(简称“公约”)的指导方针内制定气候行动计划。减少气候风险,加强适应能力一直是公约的目标之一。2015年,第21届缔约方大会(COP21)通过了《巴黎协定》,确立了提高气候变化适应能力、加强抵御力和减少对

气候变化脆弱性的全球适应目标。2022年的第27届缔约方大会(COP27)议题之一是“适应、损失及损害”,讨论如何提高生活在更易受到气候灾害影响地区人群的适应能力,建立损失与损害的融资机制等,此次大会的一项关键性成果即建立由发达国家提供资金帮助脆弱性较高的国家应对气候变化的“损失与损害”基金。2023年第28届缔约方大会(COP28)的重要议题是全球盘点,大会通过“阿联酋共识”,明确全球适应目标,提出在饮水安全、粮食安全、健康、生态系统和生物多样性、基础设施和人类居住、脱贫和生计、当地知识等七方面的任务,特别强调所有缔约方要开展气候变化风险影响、脆弱性和风险评估,要在2027年建成全民早期预警体系。

近几届缔约方大会显示,随着全球升温幅度越来越接近1.5℃边界,在不断提高温室气体减排力度的同时,如何降低气候风险,增强适应能力,已成为世界各国越来越关注的问题。

### 1.2 我国应对气候变化的新要求

当前气候变化形势严峻,全球气候变暖仍在持续并且呈现加速的态势。2023年,气候变暖程度再创新高,全球近三分之一的海洋受到海洋热浪的侵袭,重要的生态系统和食物系统受到损害。全球各地极端天气气候事件频发并创下新纪录,全球首次单月升温超过1.5℃<sup>[6]</sup>。在此背景下,我国多地遭遇创纪录的高温和暴雨事件,复合型气候风险加剧。随着全球气候变暖加剧,气候风险显著增加,强有力的减缓和适应措施成为应对气候变化的关键。

我国一贯坚持减缓和适应并重,实施积极应对气候变化国家战略。2020年9月,国家主席习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上郑重宣布,我国将力争于“2030年前实现碳达峰、2060年前实现碳中和”,即“双碳”目标。这是基于推动构建人类命运共同体的责任担当和实现可持续发展的内在要求而作出的重大战略决策。面对疫情后期全球碳排放量快速反弹、俄乌冲突对能源转型的影响以及国际经济

贸易激烈竞争等复杂的国际形势,我国坚定不移地将碳中和、碳达峰纳入生态文明建设整体布局 and 经济社会发展全局,积极稳妥推进能源转型,推动实现经济、社会、环境协同发展。党的二十大报告指出,应对气候变化,落实“双碳”目标是贯彻新发展理念、构建新发展格局、推动高质量发展的内在要求,强调要“协同推进降碳、减污、扩绿、增长”。

另一方面,自首次发布《国家适应气候变化战略》(2013年),到出台《国家适应气候变化战略2035》(2022年),我国持续统筹推进适应气候变化工作。《国家适应气候变化战略2035》提出了我国在2025年、2030年和2035年的阶段性目标,对当前至2035年的适应气候变化工作作出统筹部署。当前,我国在适应气候变化方面取得了良好进展,初步搭建起适应气候变化政策体系,气候监测预警水平、水资源和农业等重点领域适应气候变化能力逐步提升,但相关工作仍面临诸多挑战。应当进一步科学评估气候变化影响和风险,强化应对适应气候变化、生态文明建设和经济高质量发展等各项工作的统筹协同,聚焦气候敏感脆弱领域和关键区域,重点开展适应气候变化行动,增强气候变化综合适应能力。

## 2 气候风险领域的科技创新趋势

### 2.1 气候风险领域的科技创新历程

自1988年,国际社会开始系统开展气候变化评估工作。1990年,IPCC第一次评估报告(FAR)发布,此次报告直接推动了“公约”的通过,随后IPCC分别在1995年、2001年、2007年和2014年发布了第二次(SAR)、第三次(TAR)、第四次(AR4)和第五次评估报告(AR5)。其中,在第三次评估报告中,首次提出气候变化风险的概念并评估了不同升温情况下关注因子(reasons for concern, RFC)的风险水平<sup>[7]</sup>。第四次评估报告在评估关键脆弱性的概念基础上,对气候变化风险进行了讨论<sup>[8]</sup>。第五次评估报告引入“暴露度”和“脆弱性”等

概念,认为气候变化风险是气候相关灾害与人类和自然系统的暴露度和脆弱性的相互作用,将气候变化风险表述为危险性、暴露度、脆弱性3个核心要素的函数<sup>[9]</sup>,形成了气候变化风险评估理论框架。

IPCC在2023年发布的第六次综合评估报告(AR6),开启了对气候风险的系统性评估。同时采用典型浓度路径(RCPs)和共享社会经济情景(SSPs)预估未来气候变化的排放情景。报告以图框形式集中呈现了三个工作组所采用的模拟情景和路径,包括第一工作组首次提出的用于评估气候响应、覆盖气候变化人为驱动因素的共享社会经济情景(SSPs),第一、二工作组用于评估区域气候变化、影响和风险的典型浓度路径(RCPs),第三工作组基于升温幅度对1202种模拟排放路径归纳形成的分类情景(C1~C8),同时还引入相对于1850—1990年的全球温升水平(GWLs)以整合对气候变化及其相关影响和风险的评估。IPCC第六次评估报告用综合反映气候系统变化的方式,从大尺度的气候变化、气候变化过程以及区域气候变化信息的思路来开展评估,通过综合多种模拟情景路径集中呈现关于未来排放、气候变化、关联影响和 risk 的研究过程,明确指出情景研究假设的局限性,充分加强了IPCC三个工作组之间的衔接和一致性<sup>[10]</sup>。

### 2.2 气候风险领域的科技发展变化

本文通过Web of Science平台SCIE数据库检索2016—2023年的研究型论文和综述型论文资料,对气候风险领域的科技发展趋势进行了分析。其中,对“气候风险”关键词的分析表明(图1),初期的研究热点涉及洪水(flood)、干旱(drought)、风暴潮(storm surge)等自然灾害,以及适应(adaptation)、脆弱性(vulnerability)、治理(governance)等风险管理。近年来,除了自然灾害风险关键词的频次依旧在持续增加外,空气污染(air pollution)、城市化(urbanization)、极端事件(extreme events)等城市社会系统风险关注度也在不断提升。同时,有关机器学习



涝北旱”的空间格局和水资源分布产生更显著的影响,对粮食增产、南水北调工程等产生不利影响<sup>[4]</sup>。因此,一方面要完善流域防洪工程体系,构建水资源及洪涝干旱智能化监测体系,实施重大水网工程(例如南水北调),提高水资源优化配置能力。另一方面开展气候变化背景下水资源脆弱性和适应性的系统研究,从水资源的供需关系、城市水资源安全、跨流域水资源管理等方面深入进行气候变化风险研究,开展水文、地理、气象和生态等多学科交叉研究与合作,加强水资源灾害防治,提高水资源系统应对气候变化的能力。

气候变化及极端天气气候事件对我国的森林、草地、湿地和荒漠等陆地生态系统的地理分布、物候、结构和功能以及脆弱性产生了可明显观测到的影响,未来气候变暖背景下影响将会进一步加深<sup>[4]</sup>。当前,关于气候变化对生态系统影响的研究难点主要在于区分气候变化与其他因素的作用,由于生物种类较多,甄别气候变化的影响具有较大难度,这使得预测未来风险时难以识别关键风险,进而对生态系统适应认知不足。因此,未来应该着重开展气候变化对生态系统影响的机理、过程和归因分析,研究陆地生态系统对气候变化响应的临界条件,进一步分析其适应能力与可因地制宜采取的适应技术等。

近几十年来,强台风和海洋热浪等极端气候事件频次和强度都有所增加,中国近海显著变暖、海平面持续上升,加大了海岸侵蚀和海水入侵的影响,提高了沿海地区的洪涝灾害风险<sup>[4]</sup>。我国沿海地区是经济最发达、人口最稠密的区域,较高的暴露度以及适应能力不足带来的气候脆弱性,导致海岸带气候灾害风险较高。当前亟需完善海洋灾害观测预警与评估体系,开展强台风、风暴潮、海岸带的复合洪水等极端事件的变化机理和归因等研究,建立健全海洋生态预警监测体系;开展降低海岸带系统脆弱性和综合风险的研究,提升海岸带及沿岸地区防灾御灾能力。

### 3.3 经济社会系统

气候变化对农业产生了正负两方面的效应。一方面气候变化增加了农业热量资源,延长了农作物适宜生长季,提高了作物有效积温,另一方面气候变化使得气象灾害风险增加,三大粮食作物(玉米、水稻、小麦)生产面临的气候风险增加,总体而言负面影响大于正面影响<sup>[12]</sup>。当前气候变化对农业生产的综合影响认识不足,特别是缺少农业气象灾害与病虫害灾害对农业产量的定量化关系,以及当前作物模型中缺乏对适应措施影响的动态评估。因此,未来需要加强气候变化对农业产量影响的系统化综合评估,引入多种要素,建立区域性农业适应技术清单,开发能够评估适应技术在内的影响综合评估模型,建立适应气候变化的粮食安全保障体系。

气候变化可直接或间接影响人体健康。气候变化引发的极端天气气候事件可直接导致人类死亡,也可以通过气象要素的变化影响病原体和虫媒等传播媒介进而促进疾病传播,同时气象要素的变化也会引起人体呼吸系统、心脑血管系统的变化,对人体健康造成间接损害。为了减缓气候变化对人体健康造成的伤害,我们需要开展气候变化健康风险和适应能力评估,识别气候变化健康风险及脆弱人群,基于评估结果,充分考虑区域差异,制定适应能力提升计划。通过多部门联动和数据共享,加强气候变化对健康影响的交叉学科研究,完善气候敏感疾病的预警技术,建设有效的监测预警系统。积极开展宣传科普工作,提高全民参与应对气候变化的意识。

气候变化对重大工程的运营产生了显著影响,对生态建设类工程影响多为正面,对南水北调工程、青藏铁路工程等负面影响更大<sup>[4]</sup>。未来需要加强基础设施和重大工程的气候影响监测、风险预警及管理,动态评估风险等级,完成气候变化风险区划,因地制宜实施适应政策。

气候变化与城市化进程叠加会影响城市宜居性,特别是未来气候变化对海平面上升、生态

系统退化等产生显著作用,进而影响到人居环境。在气候变化背景下,科学分析城市气候变化现状,根据区域气候变化趋势预估、识别气候变化对城市社会、经济与生态的主要影响和风险,合理开展基于气候变化的区域风险评估。根据风险评估结果调整优化城市功能布局,合理布局防灾避险场所等。

### 3.4 气候变化综合风险及管理

气候变化风险具有间接性、相互性和连锁性,风险产生因子间还存在相互作用的复杂性,包括对人类社会经济活动和人类系统可能造成的不利影响及系统性风险。建立气候-经济综合评估模型(IAM: Integrated Assessment Model)以评估全球气候变化的经济成本,经济学家通过分析“可接受的/可容忍的”风险,为应对气候变化提供参考<sup>[13]</sup>。从评估方法来看,间接风险评估包括宏观与微观分析方法,定量与定性研究方法。依据 IPCC 气候风险的评估框架,可以将目前国内外的各种评估方法分为四类:(1) 基于致灾危险性的风险评估方法,包括单一危险性要素和多要素的评估,这是传统的灾害风险研究及气候风险分析的常用方法;(2) 基于影响评估的间接风险评估方法,如成本效益分析、综合评估模型(IAM)等主流方法开展的社会经济风险评估,主要是社会科学领域采用的方法;(3) 基于脆弱性的间接风险评估方法,例如中英气候变化风险评估项目开展的系统性气候风险研究(中英报告)。(4) 风险评估的综合方法,结合上述几种途径的综合评估,例如综合采用经济影响评估、脆弱性指标阈值评估、专家评估、案例研究、多目标决策、情景分析等定性定量方法,以提升研究结论的科学性和可靠性的混合研究方法。我国科学家开展了围绕多个灾种的复合风险分析,发展了气候变化间接风险或系统性风险评估方法。

在气候风险管理方面,中国在适应气候变化体制、机制和法制建设方面做出了很大的努力,积极统筹适应气候变化工作,在发展中国家率先制定和实施国家适应气候变化战略,开展

碳中和下的气候变化适应研究,使得我国在气候变化适应理论和方法研究上取得了不错的进展。但总体上“适应”仍然是应对气候变化的薄弱环节,主要表现在:基于脆弱性曲线定量评估气候变化对不同行业/区域的影响及其综合风险理论和方法仍存在差距;适应理论、技术及政策研究存在滞后,相关经济社会方面的研究明显不足。因此,依据《国家适应气候适应气候变化 2035》的指导思想和基本原则,需要进一步加强气候变化与社会学、经济学结合的研究,建立气候变化风险评估体系,加强适应行动成本与效益评估方法研究,逐步构建起重点领域和敏感产业适应行动效益的考核指标。

## 4 未来展望

当前气候风险领域科技水平还存在较大不足,亟需建立跨部门、跨领域和包含多重压力源或复合灾害的综合风险方法体系,加强对社会经济系统风险理论和方法的探索,对气候变化风险开展更科学系统评估,识别高风险高脆弱区域。另外,需要在气候变化风险监测预测和评估领域加强人工智能新技术方法的运用。在气候变化风险管理方面,要不断探索基于自然的解决方案,开展适应和减缓协同技术创新,提升风险管理与可持续发展目标的协同增效作用,真正做到减缓与适应并重。我国对气候变化领域研究工作的经费投入有待进一步加强,目前,国家在减缓气候变化方面投入的科研经费较多,但在气候变化影响与适应和战略研究方面资金投入较少,未来应加大对适应基础技术研究的投入,有利于确定适应政策的优先级,进而促进国家、地方政府、相关部门等不同主体制定合适的适应气候变化政策,进一步提高我国的适应气候变化能力,真正做到“减缓”与“适应”并重。

参考文献:

- [1] 中国气象局国家气候中心.中国气候变化蓝皮书(2023)[M].北京:科学出版社,2003.
- [2] WMO. Atlas of mortality and economic losses from weather, Cli-

- mate and water-related hazards [M]. Geneva: World Meteorological Organization, 2023.
- [3] 中国气象局国家气候中心. 中国气象灾害年鉴(2023) [M]. 北京: 气象出版社, 2023.
- [4] 《第四次气候变化国家评估报告》编写委员会. 第四次气候变化国家评估报告 [M]. 北京: 科学出版社, 2022.
- [5] 巢清尘, 周波涛, 孙颖, 等. IPCC 气候变化自然科学认知的发展 [J]. 气候变化研究进展, 2014, 10(1): 7-13.
- [6] WMO. State of the Global Climate 2023 [M]. Geneva: World Meteorological Organization, 2023.
- [7] IPCC. The Third assessment report climate change 2001: synthesis report [M]. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2001.
- [8] IPCC. The Fourth assessment report climate change 2007: synthesis report [M]. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2007.
- [9] IPCC. Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: global and sectoral aspects: working group II contribution to the IPCC fifth assessment report [M]. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2014.
- [10] 王倩, 翟盘茂. 国际气候变化科学评估中所反映的气候变化科学的重要进展 [J]. 气象科技进展, 2021, 11(03): 113-118.
- [11] 廖捷, 胡开喜, 江慧, 等. 全球大气再分析常规气象观测资料的预处理与同化应用 [J]. 气象科技进展, 2018, 8(1): 133-142.
- [12] 吴绍洪. 中国“气候变化的影响、风险与适应”研究进展——中国《第四次气候变化国家评估报告·第二部分》解读 [J]. 中国人口·资源与环境, 2023, 33(1): 80-86.
- [13] DOW K, BERKHOUT F, PRESTON B L. Limits to adaptation to climate change: a risk approach [J]. Current Opinion in Environmental Sustainability, 2013, 5(3-4): 384-391.
- [14] Committee on Climate Change, China Expert Panel on Climate Change. UK-China Co-operation on Climate Change Risk Assessment: Developing Indicators of Climate Risk [R]. (2018-10-16) [2024-06-04]. <http://www.theccc.org.uk/publication/indicators-of-climate-risk-china-uk>.

## Progress and prospects of scientific and technological innovation in climate risk in China

HAN Qinmei<sup>1</sup>, LI Jinghua<sup>2</sup>, CHAO Qingchen\*<sup>1</sup>

(1. National Climate Center, Beijing 100081, China; 2. Cadres Training College of China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Extreme weather and climate events with high frequency, high intensity and high impact have observable adverse impacts on natural ecosystem and economic society under the context of climate change. Identifying and quantitatively assessing climate change risks and improving the ability to adapt to climate change are the key research points that policy makers attach great importance to. This paper reviews the development process of scientific and technological innovation in the field of climate change risk from the perspectives of natural ecosystem, social and economic system and climate risk management, summarizes the shortcomings of current research, and puts forward the direction of future innovation and development in combination with the national adaptation strategy to climate change. Research on climate change risk is still in the preliminary stage. Improving the methodological assessment system of climate change risk and forming a comprehensive risk assessment framework is in urgent need. The risk mechanism and aggregate risk research should be strengthened to fully understand the key factors and thresholds in key areas that constitute risks, reduce the uncertainty of climate change prediction, and provide scientific support for the implementation of climate change adaptation technologies according to local conditions.

**Keywords:** climate change risk; technological innovation; development

(责任编辑 张燕)