



气候变化研究进展
Climate Change Research
ISSN 1673-1719, CN 11-5368/P

《气候变化研究进展》网络首发论文

题目: 气候变化灾害风险防范: 现状、挑战与科学问题
作者: 崔鹏, 王岩, 张国涛, 张正涛, 雷雨, 王昊, 王姣, 郝建盛, 朱宏
收稿日期: 2025-02-25
网络首发日期: 2025-06-30
引用格式: 崔鹏, 王岩, 张国涛, 张正涛, 雷雨, 王昊, 王姣, 郝建盛, 朱宏. 气候变化灾害风险防范: 现状、挑战与科学问题[J/OL]. 气候变化研究进展.
<https://link.cnki.net/urlid/11.5368.P.20250627.1605.002>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式 (包括网络呈现版式) 排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊 (光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊 (网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊 (网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物 (ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

崔鹏, 王岩, 张国涛, 等. 气候变化灾害风险防范: 现状、挑战与科学问题 [J]. 气候变化研究进展, 2025. DOI: 10.12006/j.issn.1673-1719.2025.015

Cui P, Wang Y, Zhang G T, et al. Disaster risk prevention under climate change: current status, challenges, and scientific issues [J]. Climate Change Research, 2025. DOI: 10.12006/j.issn.1673-1719.2025.015

气候变化灾害风险防范: 现状、挑战与科学问题

崔 鹏^{1,2}, 王 岩¹, 张国涛¹, 张正涛³, 雷 雨², 王 昊², 王 姣², 郝建盛¹, 朱宏¹

1 中国科学院地理科学与资源研究所陆地表层格局与模拟院重点实验室, 北京 100101; 2 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 成都 610299; 3 北京师范大学国家安全与应急管理学院, 北京 100875

摘要: 气候变化对自然灾害的影响日益加剧, 灾害活动出现新特点和新趋势, 灾害风险急剧增加, 防灾减灾面临新的挑战。文中从气候驱动因子跨圈层致灾特征、灾害活动的海-陆时空联动特性等角度分析了气候驱动下自然灾害的发生机制与活动特征, 阐述了气候变化灾害风险出现的新常态与新挑战, 探讨了自然灾害风险管理的成效与局限。面对灾害风险的新态势与新挑战, 为了加强灾害风险防范的科技支撑能力, 提出了 5 个关键科学问题: 气候变化对圈层过程的影响及致灾机制、极端天气驱动的巨灾预测与风险演化、巨灾对社会经济系统影响机制与风险评估、基于人工智能的自适应灾害风险动态防控体系、适应气候变化的韧性社会建设理论。

关键词: 气候变化; 自然灾害; 风险防范; 灾害演化; 气候适应

引 言

据 IPCC 第六次评估报告 (AR6)^[1], 自 20 世纪以来, 全球气温显著升高, 地球表面温度比工业化前水平上升了约 1.1℃。气候快速变暖, 导致圈层作用加强, 包括海洋和陆地在内的多圈层孕灾环境变得易于成灾, 极端事件频率、强度、空间范围、持续时间和时序等发生变化 (图 1)。其中, 超过 40℃ 甚至 50℃ 的高温天气在全球范围内变得越来越频繁。从 1970 年开始, 在过去 50 年中, 受气候变化影响, 自然灾害数量增加了 5 倍^[2]。首先, 气温的升高增加了海洋表层水温, 为热带风暴提供了更多的能量, 从而可能增加这些风暴的强度和降水量^[3]。全球变暖导致极端降雨事件增多, 冰川融化和海平面上升进一步加剧了沿海和内陆洪水风险^[4], 特别是高寒地区与冰雪消融相关的各类斜坡重力灾害 (冰崩、雪崩、冰岩崩、冻融滑坡等) 和沟谷灾害 (山洪、泥石流等) 及其灾害链 (冰湖溃决洪水等) 的发生频率和规模均呈现显著上升趋势^[5]。同时, 温度升高和降水模式的变化使区域干旱加剧, 增加了植被易燃性, 从而增加了野火的风险和强度, 例如澳大利亚和美国加利福尼亚近年来的大规模森林火灾^[6]; 极端干旱可能导致森林和草原失去稳定性, 使生态系统更加脆弱, 增加了生态

收稿日期: 2025-02-25; 修回日期: 2025-04-27

资助项目: 国家自然科学基金面上基金项目 (42371085); 国家自然科学基金青年基金项目 (42201086); 第二次青藏高原科学考察研究: 综合灾害风险评价与防御 (2019QZKK0906); 国家自然科学基金项目专项项目: 前沿战略研究项目 (42242103)

作者简介: 崔鹏, 男, 研究员

崩溃的风险^[7]。尽管地震本身不是由气候变化引起的，但是震后的次生灾害，如山体滑坡、泥石流等，通常是强降水等气候因子直接触发的^[8-10]，极端降雨导致震后次生地表灾害活动强度增加。再者，气候变化引发的灾害对社会经济脆弱地区和人群影响更加严重，加剧了社会不平等和贫富分化。

近年来，国内外学者对气候变化和防灾减灾的研究逐渐由定性分析向定量评估转变，尤其在 2022 年的 IPCC AR6 中，开始重视高温热浪、干旱、洪水等致灾机制的描述，并量化复合极端事件概率和未来风险^[11]。对暴雨的研究逐渐深入，细化了其影响、强降水的驱动因素和区域异质性，同时量化了城市化等人类活动对暴雨的影响程度。然而，对于滑坡、泥石流等山地灾害的研究尚需进一步提升。在适应和减缓气候变化方面，IPCC 的主张逐渐注重实际性，从早期呼吁采取政策到提出碳排放价格概念，再到提供具体指导意见和强调采用自然解决方案。过去几十年中，早期预警和灾害管理的干预已将自然灾害死亡率下降 30%。为了引起对极端天气与次生灾害事件的关注，2022 年世界气象组织（WMO）将“早期预警与早期行动”作为世界气象日的主题活动。

此外，自 1990 年起，联合国倡导了《国际减灾十年》计划，通过加强国际合作和技术支持，力求减少自然灾害造成的损失。该计划分为两个五年阶段，期间推动了各国在减灾方面的政策制定和实施。1994 年的横滨战略及行动计划强调了全球范围内的减灾合作，并将减灾纳入社会经济发展规划。2005 年，兵庫行动框架进一步强调了国家和社区的减灾能力。2015 年，《仙台计划》将重点转向了减少灾害损失的风险管理，并明确了全球目标和指导原则。随后，2015 年的《巴黎协定》和 2023 年的“阿联酋共识”都强调了应对气候变化的紧迫性和全球性合作，提出了具体的减排目标和行动计划。这些国际倡议和协定标志着国际社会对防灾减灾工作的关注角度从应对灾害转向了减少灾害风险及其管理，并凸显了对气候变化问题的日益重视。

为了进一步认识气候变化与防灾减灾的研究现状，本文从气候驱动下自然灾害的发生机制与活动特征、灾害风险的防范与减灾策略等方面进行综合分析，针对气候变化下的未来减灾做了一些思考并提出需要关注的科学问题。



图 1 相对工业化前（上），工业化后（下）自然灾害孕灾环境变化示意图

Fig. 1 Diagram illustrating changes in the disaster-prone environment before (above) and after (below) industrialization

1 气候驱动下自然灾害发生机制与活动特征

在全球变化的驱动下,气温升高、降水格局重塑、极端天气事件频发等气候因子的变化,正深刻影响着自然灾害的演化过程,其发生机制与活动特征亦随之演变。深入理解气候驱动下自然灾害的发生机制及其活动特征,是精准风险评估与科学防灾减灾的关键基础。

1.1 气候驱动因子跨圈层致灾特征

受大气圈、水圈、冰冻圈、岩石圈及生物圈等多圈层的耦合作用影响,气候驱动因子在不同空间尺度上调控灾害的孕育与演化过程。气候变暖改变了大气环流模式,其中包括急流的位置和强度,这些变化直接影响天气系统的发展和移动,导致极端天气与气候事件的发生

更加频繁和不可预测^[12]。同时, 气候变暖加剧了水循环过程, 导致了一系列灾害的发生。升温的海洋表面为热带风暴提供了更充足的能量来源, 增温的海水也提供了更多水汽, 致使多数地区热带气旋强度增加, 风暴加剧^[13]。升温也使陆地上空大气中可以包含更多的水汽, 气温每升高 1℃, 大气中水汽含量增加 7%左右。由于在水汽不饱和的情况下, 极端降水会随着温度按照克劳修斯-克拉珀龙 (C-C) 关系呈指数增长, 因此部分区域升温后, 极端降水事件的强度和频率都有所上升。但当温度非常高时, 水汽高度不饱和, 对流受到抑制, 区域降水和气温变化则呈现负相关关系^[14], 极端降水减少, 干旱风险显著增大^[15]。另外, 持续高温会造成土壤湿度快速降低, 改变陆-气反馈机制^[16], 使区域内土壤湿度-温度耦合从能量限制型转变为水分限制型, 极易造成类似于 2022 年长江流域的复合高温干旱事件^[17]。

气候变化导致了圈层间物质、能量等交换和水的相态转变过程增加, 成为全球范围内一系列复杂灾害过程的驱动因素^[5, 10, 18]。首先, 气候变暖加快高寒山区水体多相态转换速度^[19-20], 加剧了洪旱灾害水循环的空间分异性^[21], 为自然灾害形成提供有利的水源条件。在流体运动型灾害 (如洪水、泥石流和冰湖溃决等) 中, 液态水既是组成成分, 又是驱动力, 起决定性作用。气候变暖促使冰雪消融加剧, 冰川退缩强烈, 冰湖扩展或溃决现象更加常态化。冰湖扩张一方面降低了冰川水储量, 大大增加了可流动的液态水, 降低了冰湖溃决的水源临界条件, 更易造成冰湖溃决洪水或泥石流灾害^[22-23]。在固体运动型灾害 (如滑坡、崩塌、冰崩、雪崩、冻土等) 中, 温度升高为地表物质 (包括土壤、基岩、雪和冰) 提供水分, 固态水相变转化为液态水, 降低岩土等固体物质的内摩擦角和黏聚力, 增大岩土/雪等物质的重力负荷, 固态水向液态水的转变会增加孔隙水压力, 导致土壤强度显著降低, 并改变应力条件, 造成崩滑灾害或冻土路基融沉塌陷^[24]; 水分渗入冰雪体的裂缝或裂隙等结构面, 导致结构面两侧固态水融化使裂缝/裂隙贯通, 其冻融循环还可产生劈裂效应, 引发冰、雪体失稳而形成冰崩和雪崩; 水分还可以掏蚀坡脚, 增大临空面, 改变坡体的受力条件, 导致重力主导型灾害发生^[22, 25]。总之, 土壤、岩石或雪冰体中孔隙水压力增加减弱了斜坡上各种物质的强度, 加剧了斜坡冰雪/基岩/土体的不稳定性。气候变暖促使固-液相水源转换速度加快, 孕灾环境不稳定性增加, 增大了灾害的易发性; 同时, 在自然降雨激发灾害的情况下, 灾害发生的临界降雨阈值也会显著降低, 进一步增加了山地灾害的发生概率、规模和链生特性。

1.2 灾害活动的区域差异、模式转换与时空联动性

气候变化对自然灾害发生与发展过程产生了明显的区域性影响^[18], 不同地貌单元下自然灾害活动对气候变化的响应差异显著, 导致灾害活动特征表现出复杂的区域差异、模式转换与时空联动特性。

气候变化使 20 世纪 Hadley 环流和沃克环流减弱, 全球尺度上每年热带气旋发生数量呈现稳定下降的趋势^[26]。然而, 在 1990—2020 年全球范围的不同海域, 70% 的弱台风都有增强的趋势^[27]; 并且台风活动位置呈现出向两极移动的趋势, 西北太平洋海域尤为明显^[28-30]。其中, 我国台风灾害的影响范围向北扩展, 北方地区台风灾害风险增大,

如 2023 年 7 月受台风杜苏芮北上影响,海河发生流域性特大洪水灾害。相比开放海域,海岸线 400 km 内的近海热带气旋快速强化事件从 1980 年到 2020 年增加了 3 倍^[31]。此外,超强台风逐渐从秋季向盛夏前移,易与夏季风导致的极端暴雨事件叠加造成复合灾害^[32],对海岸带及滨海平原区的经济发达区域造成严重破坏。

气候变化下全球陆地区域干湿分布空间异质性增强,局部地区出现明显的模式转换现象。欧洲和亚洲发生洪水灾害的概率显著增加,而美国和非洲干旱的频率也逐渐上升^[1]。其中,10.8%左右的陆地面积呈现干湿加剧的模式,即“干旱地区将变得更加干燥,潮湿地区将变得更加潮湿”;9.5%的陆地呈现干湿反转的模式,即“干旱地区变得湿润,湿润地区变得干旱”,主要集中在萨赫勒南部、非洲中部和东部、地中海北部、东亚和亚马孙等地区^[33]。另外,全球范围内热浪强度和频次均为增加的趋势,且持续时间延长^[34]。其中,我国西北干旱/半干旱区约 41%的面积呈现显著“变暖变湿”趋势^[35],出现了高温热浪和极端暴雨同时加剧的现象。气候变化还造成中国大部分冷季极端干冷事件和暖季极端干热和湿热耦合事件的概率呈现不同幅度的增长,而冷季极端湿冷事件发生频次减少^[36]。陆地区域的高寒山地对气候变化最为敏感^[37],也是滑坡、崩塌、山洪、泥石流和冰湖溃决等地质灾害的高发区^[38]。高寒山地特殊的地貌条件、冻融作用、冰雪/岩体/土体等介质对温度变化的响应、物质多相态转换等气候暖化导致的孕灾环境条件变化,使地质灾害孕育和形成过程对气候变化的响应更加剧烈,呈现出新的活动特征、形成机理和运动规律,灾害发生规模和频度也显著增加^[18, 39-41]。

不同类型自然灾害对气候变化的响应还表现出“时空联动性”增强的特点,包括巨灾的共发和跨区域关联^[42]、高地-低地灾害的链式传递^[5]、多灾种灾害链生演化、复合灾害叠加和灾害效应的时空延拓。Fu 等^[43]指出 2022 年巴基斯坦洪水和东亚热浪巨灾之间具有动力关联特征,主要受大气内部变率调控,巴基斯坦作为最佳激发点,其盛夏的对流可以扰动对流层上层西风带,导致东亚地区出现持续热浪天气。气候变化下,高温-干旱-野火-暴雨-山洪泥石流灾害等链生效应显著增强。Ebel 等^[44]指出火灾区内的水文效应可能持续时间长达 10 年,由于火灾后地面覆盖物和植被根系恢复需要时间,在火灾后的 3~5 年内泥石流灾害风险非常高,而土壤恢复吸水能力并重新长出植被需要更长时间,因此火灾后的 5~8 年内山洪暴发风险会大幅上升。2030 年之前,加利福尼亚州、科罗拉多州和太平洋西北地区,超过 90%的极端火灾发生后,在空间上将随后 3 次极端降水事件高度重叠,大幅增加链生灾害风险^[45]。在 RCP8.5 情景下,21 世纪中期,每年极端野火天气之后至少发生一次极端暴雨事件;到 2100 年,这种复合事件的概率在加利福尼亚将会增加 100%。因此,未来极端火灾后的水文灾害风险将会大幅增加。高山区灾害具有更强的链生和群发特性,并直接威胁下游地区人类生活、生产和重大基础设施安全。如 2018 年林芝色东普沟冰岩崩-堵江事件、2021 年印度杰莫利冰岩崩-山洪泥石流等事件,造成数百人伤亡,威胁下游 50 余万人。全球 2.5 亿人居于高山水塔区,16 亿人依赖其水资源。全球变暖加剧高山地区冰冻圈退缩,改变降水和蒸发蒸腾模式,

扰动山地水资源供应时间和规模^[46]，同时由滑坡、泥石流、冰岩崩等单一灾害及链生灾害导致的远程灾害规模与频率明显增加^[47-48]。

综上，气候变化显著影响自然灾害的发生机制和活动特征。首先气候变暖改变了大气环流模式和水循环过程，导致极端天气事件更频繁和灾害事件预测难度增大。同时，也改变了陆-气反馈机制，土壤湿度-温度耦合型向水分限制型转变的风险增加，导致干旱和高温复合事件的发生。进而，气候变暖加剧了高寒山区的冰雪消融和冰川退缩，增加了洪水、泥石流、滑坡等自然灾害的频率和强度，降低了灾害发生的临界阈值。重要的是，气候变化显著影响自然灾害的发生和发展过程，不同地貌单元的灾害活动对气候变化的响应差异性显著，导致灾害特征变得更加复杂。全球范围内，热带气旋、洪水和干旱等极端天气事件频率和强度呈现区域性变化，高寒地区的地质灾害如滑坡、泥石流等因冰冻圈退缩而加剧。气候变化还增强了灾害的时空联动性，导致链生灾害与复合灾害频发。因此，全球变暖背景下，明确气候变化对自然灾害的区域效应和时空联动性，认识灾害新风险，有助于提高对灾害风险复杂系统的理解和制定因地制宜的应对措施，服务区域经济和社会的可持续发展。

2 气候变化条件下灾害风险防范及挑战

在气候系统持续变化的作用下，自然灾害的频率和强度不断增加，给灾害风险防范带来了前所未有的挑战。面对极端天气事件增多、灾害链效应增强以及区域风险提高，传统的防灾减灾模式和技术亟需调整和优化。因此，探讨气候变化背景下灾害风险的动态特征，分析现有防范体系的适应性，对构建更加科学、高效的灾害风险防范体系至关重要。

2.1 灾害风险新常态下的应对措施：现状与挑战

我国高度重视防灾减灾，不断完善应急管理体制和减灾技术，在过去 20 年中取得了“从无到有、从有到优”的显著成效。面对气候变化带来灾害风险的不确定性，尤其是灾害的规模和频率不断增加，灾害链效应增强，风险演化过程复杂化，我国注重灾害风险理论研究，积极研发减灾技术，不断探索政策措施来应对不断变化的灾害风险，以减轻灾害影响，保护人民的生命财产安全。

自然灾害风险防范主要包括非工程措施（“四预”：预防、预报、预测、预警）和工程措施（水利工程、岩土工程和生态工程等）两方面。在非工程措施方面，随着灾害形成机理认识的深化和灾害信息感知技术的发展，以地球观测技术为主要手段的灾害风险源判识技术逐步完善^[49]，为滑坡崩塌、洪旱、泥石流、森林火灾、台风等灾害发育及演变过程动态监测提供了技术支撑，使灾害监测和预警更加精准和及时。例如，通过卫星影像与近地面观测站实时监测台风的位置、移动路径和强度变化，为相关部门提供精准信息，提高了防灾减灾成效；气候模型依托集成模型和更高分辨率的数据，使暴雨、台风、热浪等极端气候事件预报预测能力与精准度持续提升，有助于高效采取应急措施^[50-51]；地质灾害预警预报也从传统基于地面灾害阈值监测预报发展到基于灾害动力过程的风险险情精细化预报预警^[52]；同时，人工智能技术的快速发展使我国以盘古、伏羲等为代表的气象大模型对中短期与次季节尺度

的极端降水的预测时效与精度处于国际领先水平^[53-54]。在灾害防治工程技术方面,在日趋成熟的各类灾害防治工程结构设计标准化和规范化工作取得了长足进步的同时,近年来开始注重绿色减灾的理念,生态措施与工程措施相结合的原理、方法和技术得到快速发展,灾害防治过程中注重生态系统的保护和恢复,注重研发基于自然的解决方案(Nature-based Solution)并将其作为工程措施的补充或者在一定条件下作为替代方案,如通过恢复湿地等生态系统提高对洪水等灾害的缓冲能力,实现生态保护和减灾效果的双赢。《“十四五”国家综合防灾减灾规划》等多项规划明确指出生态系统保护和修复在防灾减灾中的重要性,在粤港澳大湾区、深圳等地实践中取得了积极成效^[55-56];美丽中国科技支撑先导专项也利用生态措施与岩土措施结合的原理和技术治理山洪和泥石流,并在横断山成功建设了示范工程^[57-58]。

然而,全球变暖加剧了气候系统的不稳定性,增大了极端天气与气候事件的发生频率和强度,使原本 50 年一遇的极端强降水变为 20 年一遇甚至 10 年一遇;50 年一遇的极端高温现在预计每 6 年就会出现一次^[1]。WMO 指出,过去 50 年气候变化导致的自然灾害数量增加了 5 倍,灾害损失增加 7 倍多。有研究预测,当地球平均气温升幅达到 2℃时,预计全球范围内洪水灾害造成的经济损失将增加一倍^[59],而欧洲干旱造成的经济损失将增加 3 倍^[60]。到 21 世纪中期,气候变暖将使火灾天气达到“新常态”^[45,61],包括加利福尼亚在内的许多地区火灾季节将延长^[62],火灾季和雨季之间的间隔将大幅度缩短^[63]。2023 年中国出现“北涝南旱”的灾害新形势,凸显在规划建设中对新的灾害风险考虑时不够、常态与极端态应对协调性不足等新问题。全球已经进入一个气候变化的新常态,应做好前瞻性布局,将气候变化因素纳入防灾减灾、城市建设和重大工程的规划设计中^[64]。然而,随着气候变暖,预测和应对极端事件成为越来越严峻的挑战。

气候变化导致的极端灾害事件(巨灾)增加对灾害防范提出了更大的挑战。极端天气多发频发增加了灾害事件预报预测的不确定性,造成监测预警中的资源需求大幅度提高,预报和预警也必须综合考虑多种气候要素特别是极端态的出现及其链式影响,以确保预测预报的有效性和准确性。有些极端事件超出了现有城市和重大工程抗灾和防灾措施的设计标准,可能产生系统性风险,迫使我们必须审视各类建设和工程的安全问题,制定应对气候变化新风险标准和政策。因此,在应对气候变化导致的灾害风险时,需要综合考虑常态与极端态风险,权衡安全性和成本效益,发展灵活、稳健、适应性和可操作性强的解决方案,以应对不断变化的灾害风险,这也是灾害风险防范科学与实践的新挑战。

2.2 灾害风险管理成效与局限

2015 年联合国减灾署(UNDRR)发布《仙台减灾框架》,制定多项防灾减灾优先行动纲领^[65]。风险管理在全球范围内降低了人类对自然灾害的脆弱性,对比 1980—1989 年和 2007—2016 年 2 个时段,全球平均死亡率和损失率分别下降了 6.5 倍和近 5 倍^[66],突显了减轻灾害风险和加强国际合作的重要性。在此过程中,跨国合作项目和资金支持发挥了关键作用,比如绿色气候基金(GCF)资助了发展中国家的气候变化项目,推动了国际社会在气候变化和减灾方面的合作。通过加强国际合作和推动跨国项目,能够共同应对气候变化和自

然灾害挑战，有利于实现可持续发展目标。

在过去 20 年里，我国在大力支持灾害研究和风险防范技术研发的同时，注重减灾知识的传播和全民减灾能力的提升，通过举办各类公众教育活动，覆盖企业、农村、社区、学校、家庭，不断提高社区的自救互救能力和灾害准备能力。在“十三五”时期内，我国共创建了 6397 个全国综合减灾示范社区，设立 13 个全国综合减灾示范县，建设 12 个国家级消防科普教育馆，推广了灾害应急预案并组织模拟演练等活动。这些举措有效提升了公众的防灾意识和自救能力，为增强基层防灾减灾能力与意识做出了重要贡献。

然而，当前对全球气候变化及灾害风险的认识仍然不足，未来应对气候变化的态势仍然紧迫，全球极端型和缓发型灾害风险仍以前所未有的速度增加^[67]。全球仍有一半国家尚未布设灾害预警系统，无法及时应对灾害，且只有少数国家将灾害预警与灾害风险方法纳入法律法规^[67]。此外，当出现史无前例的极端灾害时，如 2021 年“7·20”河南郑州、2023 年“23·7”海河流域特大暴雨洪涝等，对巨灾事件的监测预警预报、应急管理和应对措施仍显不足，面对此类重大风险所带来的挑战，应对能力仍显薄弱^[68]。因此，未来气候变化下的防灾减灾与风险管理，应围绕大安全大应急框架，提出“国际-国家-基层”融合贯通的工程与非工程相结合的新型风险防范战略和应对机制^[69]。

3 气候变化灾害风险防范的前沿科学问题

近年来，人们对气候变化及其灾害效应的认识不断深入，国内外防灾减灾措施和政策也不断优化。但是，全球变暖导致的多尺度气候系统扰动增强，与气候变化关联的多圈层物理过程及其灾害效应是高度非线性的，认识和理解气候变化灾害风险相关的前沿科学问题，无疑将有助于应对自然灾害新风险带来的新挑战。

3.1 气候变化对圈层过程的影响及其致灾机制

自然灾害是地球圈层互馈作用最剧烈的表现，而全球变暖加速了圈层间的相互作用，使地表过程变化加快。单灾种巨型灾害和多灾种复合链生灾害呈现跨时空尺度演化、非线性复合叠加、多过程链生转化、多介质耦合作用、超强运动演进等典型特征，大大拓展了自然灾害的威胁范围和对象，是世界各国防灾减灾救灾必须长期面对的难题和巨大挑战^[38, 70]。而气候变化及其影响表现出长期积累和瞬时强扰动的时间耦合特征，在宏观、中观和微观尺度上直接影响着自然灾害的形成演化过程。但目前气候变化对圈层作用影响导致的灾害驱动因素变化及其与人类活动耦合叠加作用下，灾害形成与链生致灾机理尚无明确的系统科学认知，造成触发自然灾害的关键参数及阈值难以确定，制约了对自然灾害形成演化过程的认识和灾害预测，因而亟需揭示气候驱动的多圈层时空耦合作用诱发的多圈层、多时空耦合致灾效应。

3.2 极端天气驱动的巨灾预测与风险演化

全球变化与人类活动加剧背景下，极端事件频率增大，巨灾和复合链生灾害形成可能性大幅上升，其中“黑天鹅”“灰犀牛”和“蝴蝶效应”特征明显，且过程机理复杂，难以预测^[18]。近些年来，“天-空-地-体-海”等多维对地观测技术迅速发展，多类型新型传感器和多空间尺度观测平台的涌现为自然灾害风险信息感知提供了重要的数据支撑。然而，复杂

的气候与下垫面环境条件下,遥感技术的观测盲区导致灾害灾变过程信息捕捉具有较大局限,加之灾害发育显著的时空分异性,目前尚未突破复杂环境下灾害隐患点精准判识的难题,使得相当一部分造成重大伤亡损失的灾害发生在已经判识的灾害隐患点之外。再者,圈层间链生机制与放大效应仍是系统认知巨灾风险的难题,缺乏有效的复杂巨灾风险解耦的理论与技术,巨灾超前信息感知与风险诊断存在短板,巨灾的社会与经济风险评估模型缺失,风险应对预案编制依据不充分、可操作性不强^[71],从而导致巨灾风险防范面临巨大挑战。

3.3 巨灾对社会经济系统影响机制与风险评估

当前城市化进程和区域经济一体化不断加快,暴露于致灾范围内的承灾体类型与组合呈现多元化与复杂化特征,巨灾的社会经济影响评估机制由单一的直接损失向跨行业、跨地区的直接、间接与风险波及的复杂多层网络系统损失损害转变,使巨灾风险评估由传统的致灾-暴露-脆弱多指标加权的静态风险进一步向致灾与承灾体耦合下社会经济系统级联放大的系统性动态风险转变。在社会系统影响机制方面,人口的城镇聚集效应,使巨灾后用水、用电需求变化及社会福利等民众生计损害评估难度加大^[72],物资库建设与物资协同匹配亟待加强;在经济系统影响机制方面,巨灾导致的承灾体物理破坏引发交通、电力、通信等复杂多层网络系统的功能失效,沿产业链供需失衡产生的级联放大损失仍难以准确刻画,社会经济影响的传导路径机制与关键薄弱环节尚不清晰^[67]。同时,由于社会经济系统的跨区域密切联系与级联传导效应,巨灾风险评估需要内外风险综合评估,不仅防范灾区内部社会经济系统风险,也应进一步防范灾区外灾害沿交通链、人口流动、产业链流动波及的系统性风险^[73],需要探索新的多元系统动态风险评估理论与方法。

3.4 基于人工智能的自适应灾害风险动态防控体系

传统灾害风险评估多依赖静态历史数据与纯物理驱动模型,存在样本少、时效慢、场景适应弱等不足,难以满足快速变化的灾害风险评估需求。人工智能(AI)技术在灾害领域中处理多维多尺度非线性复杂关系建模时具有显著优势^[74],为自然灾害风险评估与防控提供了新的技术途径。AI在提高灾害预测的准确性和及时性、加强监测预警能力和实现精准预警、支持智能决策和应急响应方面体现了重要价值^[75-76]。但AI预测系统在快速变化的气候环境下表现并不稳定,目前尚无可照搬或可移植的成熟技术或解决方案^[77];并且AI的复杂性和“黑箱”特性也带来了对解释性的需求^[78]。因此,亟需构建基于人工智能技术的自适应灾害风险评估与动态防控体系,以提升灾害预测的准确性和防灾减灾的智能化水平。为解决这一问题,首先,要发展多源异构数据的动态感知与融合机制,解决高分辨率气象预报、地基传感观测网络、卫星遥感等多模态数据的时空配准与耦合建模难题;其次,创新复杂系统的跨尺度建模理论,需要解决建立气候环境演变-地貌过程响应-灾害链式传播之间的多尺度关联规则,以及线性与非线性过程描述、确定性与准确概率表征融合建模难题;第三,要在动力学机理及物理驱动模型的基础上,发展智能模型的自适应进化机制,研究迁移学习在气候变化和不同地面孕灾环境场景下的区域适应理论,开发具有灾害动力学机理、参数动态校准能力的神经网络架构,构建融合物理机制的可解释AI(XAI)模型。最后,基于上述

研究，构建虚实交互的数字孪生系统，需攻克多灾害耦合模拟、灾害体-承灾体-防灾减灾多维融合模拟、实时数据驱动的动态风险评估，以及结合现实应急决策变化的联动推演等关键技术。

3.5 适应气候变化的韧性社会建设

适应气候变化的韧性社会是自然科学与社会科学融合的复杂系统，旨在提升社会整体应对气候变化下的各类灾害影响、保持各项社会功能正常运行，并通过内部自适应机制不断提升自身面对风险时安全稳定运行的能力。如何定义适应气候变化的社会韧性，提出量化指标，并用以衡量社会应对气候变化相关灾害的能力，是构建适应气候变化的韧性社会的理论基础。当前研究主要从经济、社会、环境、政策等维度构建指标体系，以定性或半定量方式评估社会灾害韧性^[79]。然而，各评估指标之间的关联机制以及韧性等级划分仍缺乏科学统一标准，风险复杂网络系统的系统认知和人与自然有机协调机制有待深化，难以支撑在有限资源时社会韧性提升举措的制定和实施。为解决这一问题，首先，要深入剖析系统和子系统的相互作用，研究社会各系统间的关联及其对灾害响应的影响，从而优化整体的韧性策略。其次，要探究社会和生态系统的动态联系，明确生态系统服务对社会韧性的支撑作用，以及社会活动对生态系统的影响，研究基于自然的解决途径应对气候变化。再次，需要系统梳理现有工程建设规范标准应对气候变化新风险的支撑能力和不足，深入认识风险对各类工程的影响和应对需求，有针对性地补充和修订城镇和各类工程建设的规划设计标准，提高城镇与工程的抗灾能力和韧性。最后，通过优化和创新政策激励、资源配置和风险管理等策略与治理框架，增强社会整体韧性。对这些科学问题的探索，不仅需要跨学科的研究手段，还需推动理论向实践转化，确保研究成果切实应用于韧性社会建设。

4 结 语

气候变化正在逐渐改变圈层过程及其相互作用，加剧了灾害的复杂性和不确定性，导致灾害链效应增强。在此背景下，深入探究气候驱动下自然灾害的发育、形成和演化规律，揭示气候变化对圈层过程的影响及其致灾机制，构建贯穿防灾减灾各环节的风险管理框架，已成为当前防灾减灾研究的核心任务。同时，极端天气事件的加剧使巨灾的预测与风险演化研究面临新的挑战，亟需发展多灾种、多时空尺度的风险评估方法，解析巨灾对社会经济系统的冲击及其传播机制，提升巨灾的预警与应对能力。此外，为降低气候变化带来的灾害风险，构建适应气候变化的韧性社会至关重要，包括提升城乡基础设施的抗灾能力、优化社会治理体系、健全应急响应机制等。总体而言，应对气候变化背景下日益严峻的灾害风险，亟需发展灾害风险应对的理论方法体系，有针对性地研发应对新风险的技术，提升防灾减灾救灾的科技支撑水平，满足应对气候变化下灾害风险的迫切需求。

参考文献

- [1] Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, et al. Climate change 2021: the physical science basis [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021
- [2] WMO. Atlas of mortality and economic losses from weather, climate and water-related hazards [R/OL]. 2023 [2025-01-05]. <https://public.wmo.int/en/resources/atlas-of-mortality>
- [3] Bhatia K T, Vecchi G A, Knutson T R, et al. Recent increases in tropical cyclone

- intensification rates [J]. *Nature Communications*, 2019, 10 (1): 635. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-019-08471-z>
- [4] Myhre G, Alterskjær K, Stjern C W, et al. Frequency of extreme precipitation increases extensively with event rareness under global warming [J]. *Scientific Reports*, 2019, 9 (1): 16063. DOI: 10.1038/s41598-019-52277-4
 - [5] Wang H, Wang B, Cui P, et al., Disaster effects of climate change in High Mountain Asia: state of art and scientific challenges [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2024, 15 (3): 367-389
 - [6] Jolly W, Cochrane M, Freeborn P, et al. Climate-induced variations in global wildfire danger from 1979 to 2013 [J]. *Nature Communications*, 2015 (6): 7537
 - [7] Ciais P, Reichstein M, Viovy N, et al. Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003 [J]. *Nature*, 2005, 437 (7058): 529-533
 - [8] Huggel C, Carey M, Emmer A, et al. Anthropogenic climate change and glacier lake outburst flood risk: local and global drivers and responsibilities for the case of Lake Palcacocha, Peru [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2020, 20 (8): 2175-2193
 - [9] Huggel C, Clague J, and Korup O. Is climate change responsible for changing landslide activity in high mountains? [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2012, 37 (1): 77-91
 - [10] Wang Y, Cui P, Zhang C, et al. Antecedent snowmelt and orographic precipitation contributions to water supply of Pakistan disastrous floods, 2022 [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2024, 15 (3): 419-430
 - [11] IPCC. Climate change 2022: impacts, adaptation and vulnerability [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2022
 - [12] Barnes E. Revisiting the evidence linking Arctic amplification to extreme weather in midlatitudes [J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40 (17): 4734-4739
 - [13] Webster P, Holland G, Curry J, et al. Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment [J]. *Science*, 2005, 309 (5742): 1844-1846
 - [14] Wang Z, Duan A, Yang S, et al., Atmospheric moisture budget and its regulation on the variability of summer precipitation over the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2017, 122 (2): 614-630
 - [15] Trenberth K, Cheng L, Jacobs P, et al. Hurricane harvey links to ocean heat content and climate change adaptation [J]. *Earth's Future*, 2018, 6 (5): 730-744
 - [16] Hao Z, Hao F, Xia Y, et al. Compound droughts and hot extremes: characteristics, drivers, changes, and impacts [J]. *Earth-Science Reviews*, 2022, 235: 104241
 - [17] Ni Y, Qiu B, Miao X, et al. Shift of soil moisture-temperature coupling exacerbated 2022 compound hot-dry event in eastern China [J]. *Environmental Research Letters*, 2024, 19 (1): 014059
 - [18] 王岩, 王昊, 崔鹏, 等. 气候变化的灾害效应与科学挑战 [J]. *科学通报*, 2024. 69 (2): 286-300. Wang Y, Wang H, Cui P, et al. Disaster effects of climate change and the associated scientific challenges [J]. *Science Bulletin*, 2023, 69 (2): 286-300 (in Chinese)
 - [19] Cui P, Jia Y. Mountain hazards in the Tibetan Plateau: research status and prospects [J]. *National Science Review*, 2015, 2 (4): 397-399
 - [20] Li Z, Feng Q, Wang X, et al. Accelerated multiphase water transformation in global mountain regions since 1990 [J]. *The Innovation Geoscience*, 2023, 1 (3): 100033
 - [21] AghaKouchak A, Mirchi A, Madani K, et al. Anthropogenic drought: definition, challenges,

- and opportunities [J]. *Reviews of Geophysics*, 2021, 59 (2). DOI: 10.1029/2019rg000683
- [22] 崔鹏, 郭晓军, 姜天海, 等. “亚洲水塔”变化的灾害效应与减灾对策 [J]. *科学通报*, 2019, 34 (11): 1313-1321. Cui P, Guo X J, Jiang T H, et al. Disaster effects and mitigation strategies of the “Asian Water Tower” changes [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2019, 34 (11): 1313-1321 (in Chinese)
- [23] 贾洋, 崔鹏. 西藏冰湖溃决灾害事件极端气候特征 [J]. *气候变化研究进展*, 2020, 16 (4): 395-404. Jia Y, Cui P. The extreme climate background for glacial lakes outburst flood events in Tibet [J]. *Climate Change Research*, 2020, 16 (4): 395-404 (in Chinese)
- [24] Zhang T, Li D, East A, et al. Warming-driven erosion and sediment transport in cold regions [J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2022, 3 (12): 832-851
- [25] 崔鹏, 胡凯衡, 陈华勇, 等. 丝绸之路经济带自然灾害与重大工程风险 [J]. *科学通报*, 2018, 63 (11): 989-997. Cui P, Hu K, Chen H Y, et al. Natural disasters and major engineering risks in the Silk Road Economic Belt [J]. *Science Bulletin*, 2018, 63 (11): 989-997 (in Chinese)
- [26] Chand S, Walsh K, Camargo S. Declining tropical cyclone frequency under global warming [J]. *Nature Climate Change*, 2022, 12 (7): 655-661
- [27] Wang G, Wu L, Mei W, et al. Ocean currents show global intensification of weak tropical cyclones [J]. *Nature*, 2022, 611 (7936): 496-500
- [28] Cao X, Watanabe M, Wu R, et al. The projected poleward shift of tropical cyclogenesis at a global scale under climate change in MRI-AGCM3.2H [J]. *Geophysical Research Letters*, 2024, 51 (3): e2023GL107189
- [29] Studholme J, Fedorov A, Gulev S, et al. Poleward expansion of tropical cyclone latitudes in warming climates [J]. *Nature Geoscience*, 2022, 15 (1): 14-28
- [30] Zhao H, Zhao K, Klotzbach P, et al. Interannual and interdecadal drivers of meridional migration of western North Pacific tropical cyclone lifetime maximum intensity location [J]. *Journal of Climate*, 2022, 35 (9): 2709-2722
- [31] Li Y, Tang Y, Wang S, et al. Recent increases in tropical cyclone rapid intensification events in global offshore regions [J]. *Nature Communications*, 2023, 14 (1): 5167
- [32] Shan K, Lin Y, Chu P, et al. Seasonal advance of intense tropical cyclones in a warming climate [J]. *Nature*, 2023, 623 (7985): 83-89
- [33] Greve P, Orłowsky B, Mueller B, et al. Global assessment of trends in wetting and drying over land [J]. *Nature Geoscience*, 2014, 7 (10): 716-721
- [34] Wang G, Wang D, Trenberth K, et al. The peak structure and future changes of the relationships between extreme precipitation and temperature [J]. *Nature Climate Change*, 2017b, 7 (1): 268-274
- [35] Chi H, Wu Y, Zheng H, et al. Spatial patterns of climate change and associated climate hazards in Northwest China [J]. *Science Reports*, 2023, 13: 10418
- [36] Zhou P, Liu Z. Likelihood of concurrent climate extremes and variations over China [J]. *Environmental Research Letters*, 2018, 13 (9): 094023
- [37] Pepin N, Bradley R, Diaz H, et al. Elevation-dependent warming in mountain regions of the world [J]. *Nature Climate Change*, 2015, 5 (5): 424-430
- [38] 崔鹏, 贾洋, 苏凤环, 等. 青藏高原自然灾害发育现状与未来关注的科学问题 [J]. *中国科学院院刊*, 2017, 32 (9): 985-992. Cui P, Jia Y, Su F H, et al. Natural hazards in Tibetan Plateau and key issue for feature research [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*,

- 2017, 32 (9): 985-992 (in Chinese)
- [39] Cui P, Ge Y, Li S, et al. Scientific challenges in disaster risk reduction for the Sichuan–Tibet Railway [J]. *Engineering Geology*, 2022 (309): 106837
 - [40] Hao J, Cui P, Zhang X. The triggering mechanisms for different types of snow avalanches in the continental snow climate of the central Tianshan Mountains [J]. *Science China Earth Sciences*, 2022. DOI: 10.1007/s11430-021-9983-0
 - [41] Hao J, Wang Y, Li L. Snowpack variations and their hazardous effects under climate warming in the central Tianshan Mountains [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2024, 15 (2024): 442-451
 - [42] Zong X, Yin Y, and Yin M, Climate change unevenly affects the dependence of multiple climate-related hazards in China [J]. *npj Climate and Atmospheric Science*, 2024, 7 (1). DOI: 10.1038/s41612-024-00614-4
 - [43] Fu Z, Zhou W, Xie S, et al. Dynamic pathway linking Pakistan flooding to East Asian heatwaves [J]. *Science Advances*, 2024, 10 (17): eadk9250
 - [44] Ebel B, Martin D. Meta-analysis of field-saturated hydraulic conductivity recovery following wildland fire: applications for hydrologic model parameterization and resilience assessment [J]. *Hydrological Processes*, 2017, 31 (21): 3682-3696
 - [45] Touma D, Stevenson S, Swain D, et al. Climate change increases risk of extreme rainfall following wildfire in the western United States [J]. *Science Advances*, 2022, 8 (13): 1-11
 - [46] Immerzeel W, Lutz A, Andrade M, et al. Importance and vulnerability of the world's water towers [J]. *Nature*, 2020, 577 (7790): 364-369
 - [47] Pritchard H. Asia's glaciers are a regionally important buffer against drought [J]. *Nature*, 2017, 545 (7653): 169-174
 - [48] Li D, Lu X, Overeem I, et al. Exceptional increases in fluvial sediment fluxes in a warmer and wetter High Mountain Asia [J]. *Science*, 2021, 374 (6567): 599-603
 - [49] Dai K, Li Z, Xu Q, et al. Entering the era of earth observation-based landslide warning systems: a novel and exciting framework [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2020, 8 (1): 136-153
 - [50] IPCC. Climate change and land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2019
 - [51] IPCC. Climate change 2022: mitigation of climate change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2022
 - [52] 崔鹏, 邹强, 欧阳朝军. 一种山地灾害全过程数值模拟与险情预报方法 (CN113553792A) [P]. 2021-09-18. Cui P, Zou Q, Ouyang C J. A method for numerical simulation and risk prediction of mountain hazards (CN113553792A) [P]. 2021-09-18 (in Chinese)
 - [53] Bi K, Xie L, Zhang H, et al. Pangu-weather: a 3D high-resolution model for fast and accurate global weather forecast [J]. *Nature*, 2023, 619 (7970): 533-538
 - [54] Chen X, Wang Y, Li Q, et al. Fuxi: a deep learning system for subseasonal extreme precipitation prediction [J]. *Science Advances*, 2023, 9 (24): eadj5137
 - [55] Ch H, Wu Y, Zheng H, et al. Spatial patterns of climate change and associated climate hazards in Northwest China [J]. *Science Reports*, 2023, 13 (1): 10418
 - [56] 宫清华, 叶玉瑶, 王钧, 等. 粤港澳大湾区防灾韧性空间规划策略研究 [J]. *规划师*, 2021, 37 (3): 6, 22-27. Gong Q H, Ye Y Y, Wang J, et al. Resilient disaster prevention space

- planning of Guangdong-Hong Kong-Macao Great Bay area [J]. *Planners*, 2021, 37 (3): 6, 22-27 (in Chinese)
- [57] 张薰予. 基于自然的解决方案在深圳城中村的应用实践: 以“冈厦 1980”改造项目为例 [J]. *大自然保护协会*, 2022 (14): 56-62. Zhang X. Application of Nature-Based Solutions in Shenzhen Urban villages: a case study of the “Gangxia 1980” reconstruction project [J]. *The Nature Conservancy (China)*, 2022 (14): 56-62 (in Chinese)
- [58] 李明, 刘勤, 王玉宽, 等. 构建山区综合减灾与特色产业协同模式, 助力我国山区高质量发展[J].*科学院院刊*, 2023, 38 (12): 1818-1832. Li M, Liu Q, Wang Y K, et al. Synthetical solution of disaster risk reduction and green development: a novel mode promoting high-quality development in mountain areas of China [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2023, 38 (12): 1818-1832 (in Chinese)
- [59] 祁生文, 刘方翠, 徐梦珍, 等. 小流域生态-岩土协同减灾原理与方法初探 [J]. *水力发电学报*, 2024, 43 (2): 1-14. Qi S W, Liu F C, Xu M Z, et al. Preliminary study on principles and methods of ecological-geotechnical engineering coordinated disaster reduction for small watersheds [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2024, 43 (2): 1-14 (in Chinese)
- [60] Dottori F, Szewczyk W, Ciscar J, et al. Increased human and economic losses from river flooding with anthropogenic warming [J]. *Nature Climate Change*, 2018, 8: 781-786.
- [61] Cammalleri C, Naumann G, Mentaschi L, et al. Global warming and drought Impacts in the EU [J]. *Publications Office of the European Union*, 2020. DOI: 10.2760/597045
- [62] Abatzoglou J, Williams A, Barbero R. Global emergence of anthropogenic climate change in fire weather indices [J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46: 326-336
- [63] Goss M, Swain D, Abatzoglou J, et al. Climate change is increasing the likelihood of extreme autumn wildfire conditions across California [J]. *Environmental Research Letters*, 2020, 15 (9): 094016
- [64] Swain D, Langenbrunner B, Neelin J, et al. Climate change is narrowing and shifting precipitation seasonality in the North American West [J]. *Science Advances*, 2021, 7 (6): eabc5921
- [65] Liu K, Wang Q, Wang M, et al. Global transportation infrastructure exposure to the change of precipitation in a warmer world [J]. *Nature Communications*, 2023, 14 (2541): 1-9
- [66] United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR). Sendai framework for disaster risk reduction 2015–2030 [R/OL]. 2015 [2025-01-05]. <https://www.undrr.org/publication/sendai-framework-disaster-risk-reduction-2015-2030>
- [67] Formetta G, Feyen L. Empirical evidence of declining global vulnerability to climate-related hazards [J]. *Global Environmental Change*, 2019, 57: 101920
- [68] United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR). Global status report on disaster risk reduction [R/OL]. 2023 [2025-01-05]. <https://www.undrr.org/gar2023>
- [69] Kreibich H, Schröter K, Baldassarre D, et al. The challenge of unprecedented floods and droughts in risk management [J]. *Nature*, 2022, 608 (7921): 80-86
- [70] Tellman B & Eakin H. Governancing the ungovernable: practicing adaptation to climate change in the Anthropocene [J]. *Global Environmental Change*, 2022, 72: 102423
- [71] Cui P, Peng J, Shi P, et al. Scientific challenges of research on natural hazards and disaster risk [J]. *Geography and Sustainability*, 2021, 2 (3): 216-223
- [72] 崔鹏, 王姣, 王昊, 等. 如何科学防控与预警巨灾风险? [J]. *地球科学*, 2022, 47 (10): 3897-3899. Cui P, Wang J, Wang H, et al. How to scientifically prevent and warn of

- catastrophic risks? [J]. *Earth Science*, 2022, 47 (10): 3897-3899 (in Chinese)
- [73] Yang Y, Tatano H, Huang Q, et al. Evaluating the societal impact of disaster-driven infrastructure disruptions: a water analysis perspective [J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2021, 52: 101988
- [74] Zhang Z, Cui P, Hao J, et al. Analysis of the impact of dynamic economic resilience on post-disaster recovery “secondary shock” and sustainable improvement of system performance [J]. *Safety Science*, 2021, 144: 1-10
- [75] 佟彬, 殷跃平, 李曷, 等. 地质灾害人工智能大语言模型研究展望 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2025, 36: 1-12. Tong B, Yin Y P, Li B, et al. Review on artificial intelligence-based large language models for geological hazards [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2025, 36: 1-12 (in Chinese)
- [76] Xu C, Xue Z. Applications and challenges of artificial intelligence in the field of disaster prevention, reduction, and relief [J]. *Natural Hazards Research*, 2024, 4 (1): 169-172
- [77] Xie L, Zhang H, Chen X et al. Accurate medium-range global weather forecasting with 3D neural networks [J]. *Nature*, 2023, 619: 533-538
- [78] 张茂省, 贾俊, 王毅, 等. 基于人工智能(AI)的地质灾害防控体系建设 [J]. *西北地质*, 2019, 52 (2): 103-116. Zhang M X, Jia J, Wang Y, et al. Construction of geological disaster prevention and control system based on AI [J]. *Northwestern Geology*, 2019, 52 (2): 103-116 (in Chinese)
- [79] Ghaffarian S, Taghikhah F, Maier H. Explainable artificial intelligence in disaster risk management: achievements and prospective futures [J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2023, 98: 104123
- [80] Adger W, Hughes T, Folke C, et al. Social-ecological resilience to coastal disasters [J]. *Science*, 2005, 309 (5737): 1036-1039

Disaster risk prevention under climate change: current status, challenges, and scientific issues

CUI Peng^{1,2}, WANG Yan¹, ZHANG Guo-Tao¹, ZHANG Zheng-Tao³, LEI Yu², WANG Hao²,
WANG Jiao², HAO Jian-Sheng¹, ZHU Hong¹

1 Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2 Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Processes, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610299, China; 3 School of National Safety and Emergency Management, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: The impacts of climate change on natural disasters are intensifying, giving rise to new characteristics and trends in disaster activities, and a significant increase in disaster risks. Disaster prevention and mitigation efforts now face unprecedented challenges. This paper examines the mechanisms and activity patterns of natural disasters under climate-driven factors, focusing on cross-sphere disaster characteristics and the spatiotemporal ocean-land linkages of disaster activities. It highlights the “new normal” and challenges of disaster risks in the context of climate change and evaluates the effectiveness and limitations of current disaster risk management strategies. To enhance the scientific and technological capabilities for disaster risk prevention, this paper proposes five key scientific questions: (1) The impacts of climate change on sphere processes and their disaster-inducing mechanisms; (2) Prediction and risk evolution of catastrophic events driven by extreme weather; (3) Mechanisms and risk assessments of major

disasters on socio-economic systems; (4) AI-driven adaptive framework for dynamic disaster risk management; (5) Theoretical frameworks for building resilient societies to adapt to climate change.

Keywords: Climate change; Natural disasters; Risk prevention; Disaster evolution; Climate adaptation

