科学通报 2024 年 第 69 卷 第 2 期: 286 ~ 300
香山科学会议专栏 评 述
第S68次学术讨论会·地球系统与全球变化

气候变化的灾害效应与科学挑战

王岩[1], 王昊[2], 崔鹏[1,2*], 陈德亮[3], 唐金波[2], 欧廷海[3], 郝建盛[1], 王姣[2], 张国涛[1], 雷雨[2], 伍纯昊[2]

1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室, 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. Department of Earth Sciences, University of Gothenburg, Gothenburg 40530, Sweden
* 联系人, E-mail: pengcui@imde.ac.cn

2023-04-09 收稿, 2023-07-04 修回, 2023-07-18 接受, 2023-07-24 网络版发表
国家自然科学基金(41941017)、第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0906)和中国科学院前沿科学重点研究项目(QYZDY-SSW-DQC006)资助

摘要 自然灾害是地球系统各圈层相互作用最剧烈的一种表现形式, 对人类社会有着深远的影响. 气候变化导致的温度升高和降雨增多对灾害发生的水源、物源、能量等条件都有所影响, 致使自然灾害出现新特点和新趋势, 灾害风险急剧增加; 自然灾害间的相互作用变强, 促使复合灾害和级联灾害风险均有明显上升. 本文归纳总结了自然灾害在强度、频率、持续时间、触发时间与位置、规模或影响范围等方面的变化规律, 阐述其对气候变化的响应机制, 提出气候变化灾害风险的五大科学挑战, 包括: 气候变化驱动的圈层相互作用和内外动力耦合致灾机制、跨时空尺度灾害发育规律、极端事件信息感知与数据驱动的风险判识、灾害动力学与风险演化规律、灾害风险管理与韧性社会构建. 积极主动地应对这些挑战有助于深化对地球系统的科学理解, 适应全球变化, 减小灾害风险.

关键词 气候变化, 自然灾害, 灾害效应, 响应机制, 科学挑战

气候变化在地球系统各个圈层, 包括大气圈、岩石圈、水圈、生物圈和冰冻圈, 均有迹可循; 各圈层的相互作用共同影响着气候系统的变化(图1). 自然灾害是地球系统各圈层相互作用最剧烈的一种表现, 对人类社会有着深远的影响. 在外营力气候变化驱动下多圈层相互作用加强, 所引发的地球表生灾变过程表现出多介质多过程复合叠加、多灾种衍生链生的特点, 灾害风险与破坏程度愈加显著[1~4]. 在内动力地震与外营力强降雨的共同作用下, 2022年9月上旬, 四川省甘孜州泸定县遭遇地震与震后山洪泥石流, 造成近百人遇难. 气候变暖与异常天气共同作用于陡峭且易断裂的地形和地质条件下, 导致2021年2月7日发生了印度杰莫利地区的高位冰-岩崩塌事件[5], 引发了大规模泥石流, 致使下游两处水电站遭到破坏, 至少150人遇难[6]. 全球变暖加剧了气候系统的不稳定性, 2021年7月中旬, 台风“烟花”和异常西太平洋副热带高压的共同影响, 以及太行山地形对水汽的阻挡作用, 造成郑州“7·20”特大暴雨灾害, 并引起城市内涝、山洪、滑坡等次生灾害, 导致1478.6万人受灾, 因灾死亡失踪398人[7~9]. 近年来, 不同类型巨灾频发, 与气候变化相关自然灾害的数量激增是造成灾害总数上升的主要原因, 严重威胁了人民的生命财产和居住环境安全.

气候变化导致灾害出现新特点与新趋势. 人类活

引用格式: 王岩, 王昊, 崔鹏, 等. 气候变化的灾害效应与科学挑战. 科学通报, 2024, 69: 286–300
Wang Y, Wang H, Cui P, et al. Disaster effects of climate change and the associated scientific challenges (in Chinese). Chin Sci Bull, 2024, 69: 286–300, doi: 10.1360/TB-2023-0325

© 2023《中国科学》杂志社

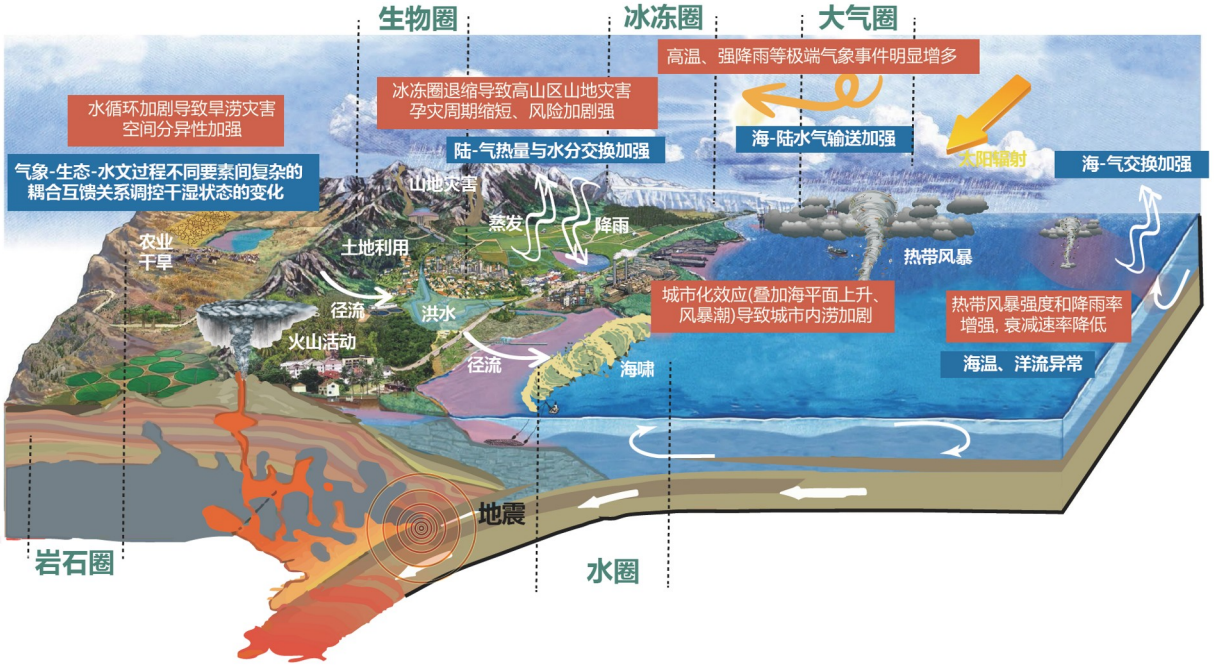


图 1 气候变化下五大圈层相互作用和灾害效应
Figure 1 Interactions and disaster effects among five major spheres under climate change

动致使全球气候以前所未有的速度变暖, 地表平均气温、沿海海平面、多年冻土活动层厚度等多项气候变化指标打破了历史观测纪录[10], 高温、强降水等极端天气气候事件的频率与强度均在增高, 气候变化导致灾害也呈现出新特点与新趋势. 气候变化对灾害的影响主要反映在5个方面[10,11]. (1) 强度: 如每年1%的沿海风暴增加会导致年最高温度和洪水水位显著上升; (2) 频率: 强降雪、龙卷风、洪水等灾害的发生次数明显增加; (3) 持续时间: 高温日数增加、连续干旱时间延长、热带气旋驻足时间延长等; (4) 触发时间: 春季霜冻提前, 季节性降雨延迟、融雪洪水提前等; (5) 规模或影响范围: 海洋热浪和热带气旋规模扩大, 暴雨洪涝影响范围扩张等. 再者, 全球和区域性气候系统发生剧烈变化, 巨灾更加频繁, 不同灾害间的相互作用加强[12], 灾害复合风险和级联风险显著增加[10,13]. 例如, 2010年5月, 热带风暴阿加莎侵袭危地马拉, 造成该地区大范围强降雨, 雨水下渗并溶解地下岩层, 造成大范围沉洞坍塌; 同期, 帕卡亚火山爆发, 火山灰和碎片覆盖了危地马拉大部分地区, 阻塞了排水管道, 增加了热带风暴期间的洪水强度, 同时形成大范围火山泥流, 导致多人遇难[14]. 此类复合灾害突发性强, 规律不清, 触发因子不明, 难以有效预测.

近年来, 气候变化灾害效应研究取得了新进展, 但仍存在很大局限性. 气候变化的灾害效应一直是学术界非常关注的科学问题, 相关研究可以追溯到20世纪90年代初, 研究主要聚焦于识别气候变化对灾害的影响. 近年来, 该方向侧重于开发预测模型和风险管理策略, 以便更好地准备和应对气候变化条件下自然灾害的新变化, 提出更好的适应性措施, 减少灾害风险[15~17]. 但目前对气候变化的灾害效应认识依然有很多不足, 跨圈层多因子耦合作用下, 极端天气、强震、人类活动等巨型灾害及复合链生灾害的形成、演化与防治研究仍是防灾减灾学科的前沿[18,19]; 对内外动力耦合驱动下的台风、海啸、山洪泥石流、冰湖溃决与滑坡等自然灾害的物理机制和过程认识不明[20], 难以定量分析气候变化的灾害效应、减少复杂因素作用下灾害风险预测的不确定性. 这些防灾减灾研究的不足, 严重制约了自然灾害风险理论和风险防控技术的发展. 因此, 亟须系统地认识气候变化对自然灾害的影响机理、自然灾害对气候变化的响应特点, 实现气候变化下自然灾害高精度预测与有效应对, 减少自然灾害损失, 保护人民的生命和财产安全, 帮助社会规划气候变化适应性措施, 减少气候变化下灾害对社会发展的不利影响.

1 近年来气候变化对自然灾害的影响

1.1 气候变化的致灾特点

近年来全球显著升温的异常态势, 超出了过去数百年、数千年的气候系统自然变率. 相较1850~1900年, 2001~2020年的平均表面温度升高0.99°C; 其中陆面增温1.47°C, 海面温度升高0.79°C[10]. 冰川消融加剧, 相对1979~1988年, 2010~2019年北极海冰面积9月(3月)减小了40%(10%)左右[10]. 高山区雪线上移, 冻土退化严重[21]. 2002~2014年间全球平均海平面上升2.74±0.58 mm/a, 其中海温升高造成的热膨胀贡献为1.38±0.16 mm/a; 冰盖和冰川的贡献约为1.37±0.09 mm/a[22]. 20世纪下半叶, 海温变化造成北半球的大部分热带风暴路径发生了极向移动, 强度有所增加, 但频率有所下降[23]; 风暴潮高度变化, 极端海平面聚集升高, 海岸洪水风险增加30%以上[24].

此外, 变暖导致气候波动性变大, 造成水循环加速, 水的再分配过程偏向极端化, 干(湿)季更干(湿), 时空差异均有增加的趋势, 极端降雨频次与降雨强度均明显增加, 多地出现新的天气与气候特征[10,16]. 有记录以来, 极端干旱的非洲撒哈拉沙漠区域鲜有降雪事件, 而2016年以来却发生多次强降雪过程. 其中, 2018年降雪量超过40 mm; 2021年底遭遇极端天气, 不仅观测到了降雪, 部分地区还遭遇了强降雨, 甚至是冰雹天气[25]. 在目前全球平均增暖~1.1°C的现状下, 十年一遇的极端高温事件频率将增加2.8倍, 强度增加1.2°C; 十年一遇极端降水事件频率增加1.3倍, 强度增加6.7%; 十年一遇干旱事件(如农业干旱、生态干旱等)频率增加1.7倍, 干旱指数增加0.3[10]. 研究表明, 在更温暖和湿润的条件下, 风化破裂会加速. 任何与风化有关的系统, 如地球的碳循环、表面侵蚀或生物过程, 在更温暖和更湿润的气候下都存在加速岩石破裂过程的影响[26,27], 有利于增加高山区山地灾害物源条件.

同时, 控制大气波动的环流背景场也发生明显变化[10], 其中自20世纪80年代以来, 北半球Hadley环流延伸, 会使Walker环流位置和强度均有很大变化, 并进一步导致极端El Niño事件加强[28]. 而已有研究指出, 极端El Niño事件会引起包括中国在内多数区域的暴雨、洪涝等自然灾害的发生. 也有研究发现, 气候变暖使北大西洋经向环流减弱, 北大西洋瞬变波的强迫作用减弱, 中高纬西风加速减弱, 最终导致青藏高原等地区的极端降水事件增加[29]. 21世纪, 东亚季风与南亚季风等季风系统可能有显著增强的趋势[10], 而季风增强与西风减弱的协同作用有助于高亚洲山区局部强降水生成[30].

总之, 气候变暖使得地球系统各圈层环境向易于成灾的趋势演化, 自然灾害风险显著增加.

1.2 气候变化背景下自然灾害活动特征

尽管不同自然灾害的形成条件和主要驱动力具有明显差异, 但总体可分为3种类型: 热力主导、重力主导以及水力主导. 受高温或高热力梯度驱动的高温热浪、热带气旋、龙卷风、火灾等是常见的热力主导型灾害. 重力主导型灾害多为地势落差较大的山地灾害, 如崩塌、雪崩、滑坡、泥石流等; 由海底运动造成的海啸也属于重力型灾害. 干旱、区域洪水、海平面升高等灾害主要由于水力条件变化引起的. 而在圈层相互作用下, 部分灾种受多种作用力共同驱动, 如山洪形成时, 重力和水力都是必要条件. 此外, 不同自然灾害活动具有显著的时空尺度差异(图2), 其中重力主导型以小尺度、短时灾害为主, 但是暴发突然、破坏力强; 水力主导型灾害时空跨度相对较大, 影响范围广[12,31]. 气候快速变暖造成大多数灾害的孕灾时间缩短, 灾害活动特征发生明显变化.

升温导致全球高温热浪事件频发, 白天和夜间复合高温热浪事件的影响显著上升. 2020年, Wang等人[32]指出, 1960~2012年, 北半球夏季复合热浪事件频率和强度均显著增长, 分别为~1.03 d/10 a和~0.28°C/10 a. 同时, 风暴潮、台风等极端海洋气候事件发生频率增多, 强度加大. 1982年以来, 全球范围内海洋热浪的发生频率增加了1倍, 且范围更广, 持续时间更长; 近30年占全球70%的弱台风无论在全球尺度还是海盆尺度上也出现明显的增强趋势[33]. 在沿海居民优先居住的低海拔平坦区, 海平面上升速度将比全球平均速度快4倍[34,35], 复合型洪水风险明显上升.

同时, 水循环的加速也加剧了全球旱涝时空分布的极端化, 使得雨季的降水变得更多, 旱季的干旱会更为严重; 同时, 旱涝/涝旱急转事件的历时、烈度和强度呈增加趋势[36]. 区域旱涝灾害时空分布甚至出现新态势. 美国西部的水资源高度依赖融雪径流, 但该地区春季雪旱灾害的概率从1985年的20%上升到2016年的40%[37]. 中国西北干旱半干旱区, 在极端降水增加与融雪径流加剧的双重作用下, 近年来洪水灾害频发, 例如2002年塔克拉玛干沙漠洪灾、2012年吐鲁番洪灾、

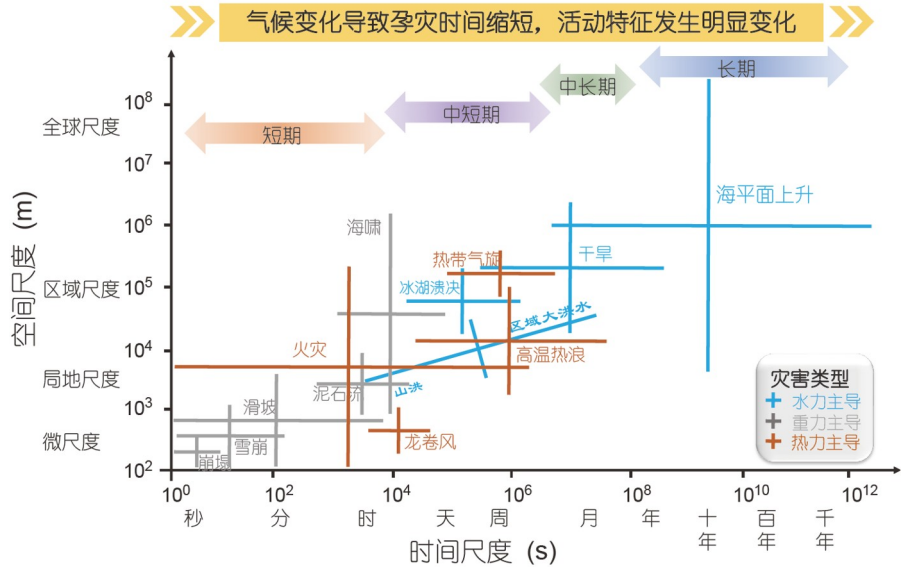


图 2 自然灾害的主要类型与其时空尺度特征
Figure 2 Major types and spatiotemporal characteristics of natural disasters

2017年塔里木河等区域屡次发生沙漠洪水灾害，2021年7月中旬，塔克拉玛干沙漠北缘受洪水袭击，淹没面积达300多平方公里，影响严重. 而2022年长江流域出现旱涝并存的局面: 汛期长江上游降水偏多, 区域性洪涝频发; 而中下游降水偏少, 旱情严重[38]. 旱涝新特征主控因子不明, 显著增加了相关灾害预测难度.

海拔依赖性增温的高山区以及热岛效应显著的城市区对气候变暖的响应均存在明显的放大效应. 其中, 冰冻圈的退化改变了高山区水文地质条件和地表孕灾环境, 加剧了以重力主导的山地灾害的频率、规模和复杂性; 灾害活动总体空间特征具有高强度与高频性、突发性、季节性、群发性、周期性等特征[39~42]. 而城市的三维几何结构不利于热量散发, 以及人为热量的释放, 使得城市高温日数增加、热浪频次增加; 热岛效应对一些超大城市的升温贡献更为显著[10,43], 其中城市化对中国东部城市高温热浪的贡献可以达到30%~50%[44]. 城市热岛效应导致大气更不稳定、垂直上升和水汽辐合运动加强, 导致在过去30年来, 城市短历时极端强降水增加35%, 增幅比周边郊区高3倍以上[45]. 城市下垫面硬化造成渗透能力减弱, 径流增强, 城市洪水风险增大. 城市化不仅使洪水峰值明显升高, 也缩短了洪水事件中洪峰出现的时间; 同时, 城市化也使山洪影响范围与洪泛区面积明显扩张[46].

综上, 气候变暖背景下, 自然灾害频率、规模、历时、触发时间、影响等出现了新特征和新趋势; 但目前气候变化对自然灾害孕育、形成、运动、致灾等演化过程的影响机制并不清楚, 有待深入研究, 以便有效预估灾害风险.

2 自然灾害对近年来气候变化的响应机制

2.1 气候变化影响自然灾害形成演化的表现形式

自然灾害的演化过程(孕育、形成、运动和致灾)与地球系统各圈层的耦合交互作用密切关联. 在宏观尺度上, 气候变暖导致各圈层间相互作用加强, 同时也改变了物质与能量在各圈层间的传输速率和通量, 影响温度、降雨、径流、土体性质等自然灾害关键要素的时空格局演化. 其中, 气候变暖导致海温升高和海气相互作用加强, 引起大气环流系统和气候态的偏移, 导致全球不同地区热带风暴、沿海与内陆旱涝灾害差异性响应. 在微观角度, 气候变化背景下, 冰冻圈、水圈、岩石圈、生物圈作用的长期变化叠加极端天气等天气气候系统短期波动的瞬时强扰动, 进一步影响灾害发生的水源、物源、能量等条件, 在一定程度上改变了灾害发生频次、位置和强度等特征. 如冰冻圈的退缩补充了冰湖溃决、冰川泥石流的水源补给, 也增加了冰岩崩、雪崩、冻融滑坡等下垫面失稳风险和物质条件. 再者, 气候变化诱发的灾害通常具有明显的复

合-链生效应. 70%以上的自然灾害都可以触发或者增强其次生灾害的发生与影响程度[12]. 例如, 在气候变暖导致的平均海平面上升、风浪和风暴潮加强的共同作用下, 极端海平面显著上升, 沿海城市洪水风险大幅增加[47,48]. 近年来, 气候变化诱发南、北极极端高温事件频发, 导致大量冰崩事件发生, 冰崩坠入海中形成涌浪, 甚至诱发海啸事件, 对海洋航行与靠近南、北两极的沿海地区造成威胁, 但目前复合灾害的孕灾环境、触发机制和阈值、运动过程中不同灾害的链生规律等均不清楚, 对于灾害动力学的发展提出了极大的挑战.

2.2 不同类型自然灾害对气候变化的响应机制

不同地貌单元下自然灾害的主要驱动力有很大差异. 例如, 源发区在海洋上的自然灾害多以热力驱动, 内陆区多发的洪旱灾害多以水力主导, 而地形落差造成的位能是引发山地灾害的关键驱动力. 驱动力的差异使得不同地貌单元内自然灾害对气候变化的反馈存在很大差异. 而明确海洋-内陆-高山区等不同地貌单元内重要自然灾害对气候变化的响应机制, 是评估气候变暖背景下自然灾害风险与未来发展趋势的关键.

(1) 海气相互作用加强导致海洋灾害复合风险和破坏力增强. 海洋灾害中的热带气旋(tropical cyclone, TC)是破坏力最强的自然灾害之一, 主要发生在西北与东北太平洋、北大西洋、印度洋和南太平洋的热带或副热带洋面上. 温暖的热带洋面(高于26.5°C)、相对潮湿的中层大气、条件性不稳定大气、一定强度的低层绝对涡度、弱的水平风垂直切变、科氏力、有利的环流背景场等是TC发生与发展的重要条件. 不同尺度的气候系统变化通过调控上述要素影响TC的形成与发展: 天气尺度的Rossby波、赤道Kelvin波等能够激发TC生成[49]; 在季节尺度上, 西北太平洋和北大西洋地区30~60 d周期的马登-朱利安振荡(Madden Julian Oscillation, MJO)可能影响盛行西风与对流层上层的纬向风等物理变量[50]. 当MJO处于活跃位相时, 垂直风切变较弱, 叠加纬向风辐合作用驱动的热带波动次数增加, 导致该区域TC发生频数显著增加[51]. 年际尺度上, 2~7年准周期的厄尔尼诺-南方涛动事件(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)作为热带海-气相互作用的最主要模态, 通过改变大气水平分布和垂直结构影响TC的频数、位置和活动强度. 当El Niño事件发生时(ENSO暖相位), 西北太平洋的冷海温异常抑制TC生成[52]; 同时, 越赤道西风气流与东北信风辐合形成的季风槽向东延伸, 促使低层大气相对涡度、对流强度和对流层中低层相对湿度增加, 抑制垂直风切变, 导致TC的生成位置向西北太平洋的东南象限移动, 造成该区域TC频数相对增加[53]和强度增强[54]. 当La Niña事件发生时(ENSO冷相位), 各项特征变化相反, TC位置更靠西和高纬, 更可能经过冷洋面, 不易发展加强[54,55]. 在年代际尺度上, 太平洋年代际振荡(Pacific Decadal Oscillation, PDO)与大西洋多年代际振荡(Atlantic Multidecadal Oscillation, AMO)等海气耦合系统的变化对TC频数、强度和位置的变化起主要作用. PDO暖位相过渡至冷位相, 驱动西北太平洋季风槽西移[56], 导致该区域东南部垂直风切变增大以及对流层低层相对涡度增强[54,57], 造成西北太平洋TC生成频数显著减少[57].

总体来看, 全球变暖背景下, TC频率略有下降[58,59]; 但海气相互作用增强触发更强的大气响应(蒸发加剧、对流旺盛等), 导致TC强度增加[60]、TC降雨增强[61]、TC移动速度和登陆后的衰减系数降低[62,63], 破坏力显著增加[64].

(2) 水循环加剧导致旱涝灾害空间分异性加强. 全球升温与大气水汽循环过程加快及分布不均是控制全球与区域旱涝时空格局的关键因素. 气候变化通过影响气象-生态-水文过程不同要素间复杂的耦合互馈关系调控干湿状态的变化[65], 使其对升温的响应特征更加复杂. 温室气体强迫增强背景下, 大气变暖导致饱和水汽压升高, 大气饱和水汽压差变大, 使得蒸散发潜力升高[66]; 降雨下渗提供的土壤水分补给不足以弥补蒸散发增加导致的水分消耗, 全球土壤含水量降低[67,68]. 因此, 降水微弱波动与温度显著上升造成潜在蒸散发增加, 是干旱区面积扩张的主要原因[69]. 此外, 气候变化造成的积雪消融、冰川退缩、水体缩减等会加大水文条件波动, 使水系系统更加脆弱, 生态干旱和退化加剧, 同时造成积雪覆盖区雪旱现象的发生. 另外, 大尺度的环流异常和陆气互馈也是影响干旱发生的重要过程[70]. 有研究指出, 北半球高纬地区的显著增温削弱了全球经向的温度梯度, 中纬度地区的水汽传输和降水减少, 造成欧洲中部近几十年的异常干旱[71].

洪水灾害是天气与气候系统、下垫面陆表系统和人类社会系统相互作用的结果[72]. 天气与气候系统主要影响强降雨的变化; 地形、植被和土壤等下垫面陆表系统要素调控降雨产汇流过程, 决定极端径流的形成; 人口密度增加和城镇化等要素影响社会经济系统的洪水暴露度[73]. 饱和水汽压随气温升高呈非线性增

长，致使极端降雨强度以Clausius-Clapeyron(C-C)关系响应气候变暖[74,75]，全球干旱和湿润地区的极端降水强度均在增加. 极端降雨增加以及升温造成的雨雪比改变和融雪时间提前是导致极端径流和洪水季节改变的主要因素[76,77]. 再者，多尺度气候系统的协同作用通过大气水汽条件和不稳定层结等控制极端降雨形成的热力和动力过程[78]，如在太平洋与北美遥相关型(Pacific-North American, PNA)环流模态的驱动下，ENSO与中尺度MJO的协同作用造成的雷暴对流降雨是导致北美特大山洪灾害的主要原因[79]. 另外，全球变暖背景下，沿海城市受到热带气旋引起的风暴潮、极端强降水、海平面上升的复合影响加强，更容易引发重大洪涝灾害[80].

因此，认识多尺度气候系统变化，理解其协同影响机制以及与水圈、生物圈等其他圈层的耦合互馈关系是明确洪旱灾害对气候变化响应机制、有效预测洪旱灾害风险的关键.

(3) 冰冻圈退缩导致高山区山地灾害孕灾周期缩短、风险加剧. 气候变化通过影响水文循环、地形地貌演化以及自然生态系统水土保持能力等因素，改变不同地貌单元灾害体的组成要素及组合关系，从而影响山地灾害形成和运动过程(图3). 尤其，高寒区山地是全球气候变化响应最敏感的区域，增温幅度更大，导致极端高温和极端降雨频发、雪线上移、冰川消融、冻土退化等环境变化[81~83]，改变了高原地区水文地质条件和地表孕灾环境，加剧了灾害发生的频率、规模和复杂性. 孕灾环境的改变主要体现在水源条件、固体物质条件、能量条件和孕灾条件组合的变化[3,84].

例如，青藏高原地区：(1) 近年来，气温整体上升(0.20~0.55°C/10 a)[2]，温度升高导致冻土退化，使高寒区冻土活动层深度增大，增加了地下水储水空间，加速了地表水向地下水转化，土体中液态水的含量亦急剧上升[21]. 同时，多年冻土消融也有助于局地地表径流的增加[85]，使得流水冲刷河岸和沟床物质动力增强，利于山洪、泥石流、崩塌等灾害的发生. (2) 冰川退缩、雪线上移、冻土消融等孕灾环境的变化致使裸露岩体、

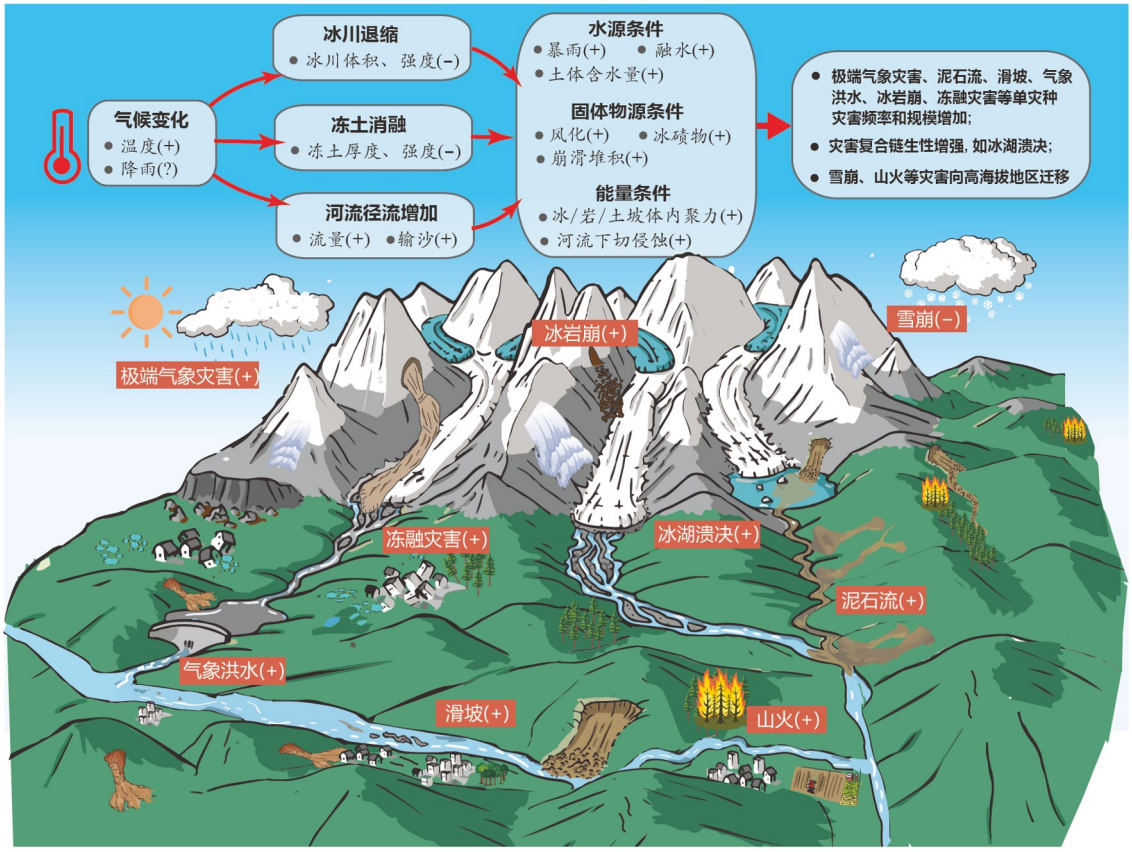


图 3 高山区主要灾害对气候变化的响应机制示意图
Figure 3 Schematic representation of response mechanisms of major disasters to climate change in mountainous regions

冰碛物、冰滑堆积体失去积雪和冰川的支撑保护，暴露度增加, 增大了流域固体物质空间分布和动储量, 在降雨和流水侵蚀作用下极易失稳破坏、起动形成崩塌滑坡和泥石流灾害. 同时, 土体中不同相态水的转化改变了土体力学性质, 使土体更易破坏[86]. 除此之外, 多年冻土区和季节性冻土区域冻融交替活跃，导致山地斜坡土体失稳, 极易发生滑坡体和坍塌[87~89]. (3) 气候变化导致位能-动能和热能-动能转化条件改变. 温度升高导致冰雪消融加速和径流增加，河流侵蚀下切作用加剧, 增加岸坡的陡峭程度和相对高差, 从而构成了坡面水-土等物质位能向动能转化的有利条件[90]; 部分坡体甚至形成较高的临空面, 直接增大了坡体位能, 成为潜在崩滑隐患点[91]. 同时, 气温升高导致冰雪融水加剧, 固态水变为液态水; 液态水在斜坡上获得动能, 具有流动、侵蚀、搬运的能力，为灾害形成提供能量和动力条件.

综上，如何科学认知气候变化引起的裸露土体分布、地表水文过程、土体内部结构与物理力学性质等孕灾条件变化，进而揭示高山峡谷区不同时空尺度水-土耦合作用机理、山地灾变过程和成灾致灾机理，定量确定气候变化对山地水-土过程演变与灾变过程的贡献率，对于精准预测不同气候变化情景下山地灾害活动趋势与特征至关重要.

2.3 气候变化灾害效应的区域特征

多尺度环流系统联合作用、海陆热力差异、山地气象的海拔依赖性特征、城市化带来的热岛效应等致使自然灾害对气候变化的响应在区域尺度上呈现出显著不均衡性. 其中，全球陆地干湿状况曾经被认为“干旱地区将变得更加干燥(dry gets drier, DD), 潮湿地区将变得更加潮湿(wet gets wetter, WW)”模式. 观测数据表明，美国东部、澳大利亚北部和欧亚大陆北部符合WW规律，萨赫勒、阿拉伯半岛、中亚和澳大利亚部分地区符合DD规律；而非洲中部和东部、地中海北部、东亚地区等却呈现出“干变湿-湿变干(dry gets wetter and wet gets drier, DWWD)”的变化模式, 过去干旱的澳大利亚中部和美国中西部部分地区现在已经变得湿润[92,93]; 东南亚、印度半岛、东非和安第斯山脉北部等地区的洪灾频率与强度将显著增加，而欧洲北部和东部、安纳托利亚、中亚、北美洲中部和南美洲南部等地区的洪灾频率却逐渐降低[94].

在“五高”(高海拔、高寒、高应力、高陡、高烈度)特征明显的高山区，气候变化呈现出更明显的海拔依赖性，其对自然灾害的影响更具区域差异性. 冰岩崩、滑坡、泥石流和冰湖溃决等山地灾害涉及复杂的多介质、多相态相互作用，与极端天气气候事件相比, 地貌条件、冻融作用、冰雪/岩/土体的赋存状态和强度变化对山地灾害形成演化具有更强的调控作用. 例如，气候变暖导致高纬度季节性冻土区南界向北移动, 中纬度高山区季节性冻土下界向高海拔移动，对应冻融滑坡、崩塌等灾害的高发区也将随之迁移. 此外, 变暖导致的雨雪比增加, 改变下垫面积雪特性, 促使喜马拉雅山西部等大陆性气候区的湿雪崩更加频繁；高温、干旱的复合作用使亚洲的天山-喜马拉雅山-横断山、北美洲的落基山和南美洲安第斯山等高山地区森林火灾向更高海拔迁移[95].

综上, 未来气候变暖背景下, 各个区域防灾减灾关注的重点问题也会有所不同. 厘清气候变化灾害效应的区域特征，对加强和实施全球气候变暖下不同的响应政策至关重要.

3 自然灾害风险演化未来发展趋势

3.1 孕灾环境未来趋势与影响估计

若不执行大规模温室气体减排措施，预计增暖将在全球和区域范围内快速加剧，同时引起热力、水力、重力(地貌改变造成的局地位能变化)等孕灾条件的变化. 有研究指出，在当前排放延续情景下，2100年北半球夏季复合高温热浪事件频率预计将比2012年增加8倍, 强度也将是现在的3倍以上[32]. 自2000年起, 北半球高山区，如落基山脉和青藏高原的最大雪水当量预计21世纪末减少量将是历史基准线的4倍[96,97] . 21世纪末, 积雪覆盖减少, 预计将使其周边区域的雪旱灾害频率增加2倍以上[37]; 全球陆地上的年降水量在SSP1-1.9低排放情景下预计将增加2.4%，而在SSP5-8.5高排放情景下为8.3%(0.9%~12.9%)，欧洲和北美洲等部分区域强热带风暴的强度预计将是目前的3倍以上[98]. 2015年，Winsemius等人[99]指出，21世纪末洪水灾害风险预计将增加20倍, 尤其是在东南亚和非洲地区. 未来海洋和大部分陆地区域的蒸发量均将增加；蒸发量的增加将使地中海、北美西南部、非洲南部、南美西南部和澳大利亚西南部的土壤水分减少，干旱风险增加. 预计到21世纪末，干旱区将扩张至全球陆地面积的50%~56%[100].

再者，变暖促使气候系统中的多个要素加速接近突变点, 将造成巨大的灾害风险[10,101]: 全球增温1.5~3°C时，格陵兰冰盖融化消失，会造成海平面温度升高2~7 m; 平均增温3~5°C时, 西南极冰盖消融, 将造成海平面上升5 m. 这些均可能导致沿海海洋与城市巨灾发生，直接威胁沿海地带人居环境. 全球增温3.5~5°C时, 亚马逊热带雨林大范围毁灭，直接导致大范围生态损失灾害. 升温4~6°C时, 北部冻土快速消融, 会释放CH_4和CO_2等温室气体, 进一步加剧气候变化的幅度. 此外, 印度地区局地升温达到0.5°C时，就会引起印度季风快速突变减弱, 造成区域降水减少, 特大干旱灾害的频率与幅度增加. 因此, 掌握气候变化规律、合理节能减排, 是有效应对气候变化灾害风险的前提.

3.2 暴露度和脆弱性的变化增加多数区域灾害未来风险概率

气候变化直接导致致灾因子危险性不断增加，并且全球化带来的人口增长、城市化、土地利用变化等社会因素也逐步影响灾害风险的暴露度、脆弱性和危害[102,103]. 随着全球人口不断增长和城市化进程的加速, 越来越多的人口将生活在自然灾害易发区域. 这意味着即使灾害的概率没有增加，由于人口密度和城市化程度的增加，灾害带来的损失也将更加严重[104]. 此情景下易受影响的地区包括人口稠密的城市和近海沿线的城市等[105]. 而气候变暖放大效应显著的高寒山区, 冰川与雪盖面积减少、水利工程扩张、旅游业快速发展等变化导致山区灾害暴露度和脆弱性均有明显上升[106].

此外, 随着人类活动的不断扩张, 土地利用方式也发生了变化，包括林地开垦、耕地扩张、水资源过度开发等. 这些变化可能会导致生态系统的破坏和自然灾害的加剧[103]. 例如，森林开垦和过度采伐会导致土地侵蚀和滑坡，耕地扩张和水资源过度开发可能导致干旱和水灾等. 此情景下易受影响的地区包括经济发展较快、土地利用变化明显的地区.

值得注意的是，未来灾害风险变化的程度和趋势也具有显著区域性差异[107]. 有研究指出，气候波动造成的社会脆弱性增大在发展中国家表现比较突出，尤其在孟加拉国、印度尼西亚和非洲等国家[108]. 此外, 随着气候变化导致海平面上升，风暴潮和海啸等灾害风险增加，沿海城市和岛屿等低洼区域的灾害风险更大; 高温与干旱共同影响下，未来森林火灾风险增加, 其中在北美洲和欧洲等区域的风险较高; 而冰冻圈融化消融造成的山体滑坡、冰岩崩、雪崩等的灾害风险在高山区更为突出[41,109]. 由于自然灾害风险受多因素的影响，风险等级取决于未来温升水平、脆弱性、暴露度、社会经济发展水平和适应措施[110]，针对未来灾害风险的定量化预估存在很大不确定性，应对气候变化的灾害风险仍具有极大的挑战.

4 应对气候变化灾害风险的科学挑战

气候变化本身的复杂性，与其造成的自然灾害新特征、新趋势以及复合与链生灾害风险的升高，使自然灾害预测预警和风险预估的难度极大，为全球应对气候变化灾害风险带来新的科学挑战，如图4和表1所示, 主要包括以下几方面内容.

4.1 气候变化驱动的圈层相互作用和内外动力耦合致灾机制

固体地球内部运动(内动力作用)导致的物质交换和能量传输, 可以改变地表温度, 并将地球内部的碳、氮等物质带至海洋圈和大气圈中，对气候系统起到一定的调节作用[111]. 而全球变暖导致水循环和碳循环等过程加速, 各圈层相互作用加强, 在内外动力共同作用下，小规模、大影响的极端事件与其复合事件增多[10]. 因此, 在圈层相互作用下, 揭示内外动力耦合孕灾、成灾、致灾机理是预测防范重大灾害风险的基础和亟待解决的前沿科学问题. 内、外动力均具有长期累积与瞬时强扰动的时间耦合特征，而两者的空间耦合更是加速了地质体稳定性演变. 但目前对构造作用-地形急变-气候变化综合作用下孕灾环境的演化及其对地表灾害驱动的定量关系仍认识不清, 对宏观(区域)、中观(坡体)和微观(岩土体)多尺度融通的难题仍有待破解.

4.2 跨时空尺度灾害发育规律

气候变化促使孕灾环境易于成灾，自然灾害发育特征的时空尺度变化增大，部分自然灾害的孕灾机制与形成规律发生改变. 然而, 由于气象的高度变异性、物理上的不可接近性以及地球圈层之间复杂的相互作用, 叠加多尺度气候系统扰动, 触发灾害的关键参数及其阈值难以确定, 定量关系不明确, 限制了对自然灾害形成与演化的认识及预报. 此外, 在气候变化-自然灾害研究中，气候变量降尺度到灾害时空尺度的过程中存在诸多不确定性，不仅局地短临灾害性天气事件预报

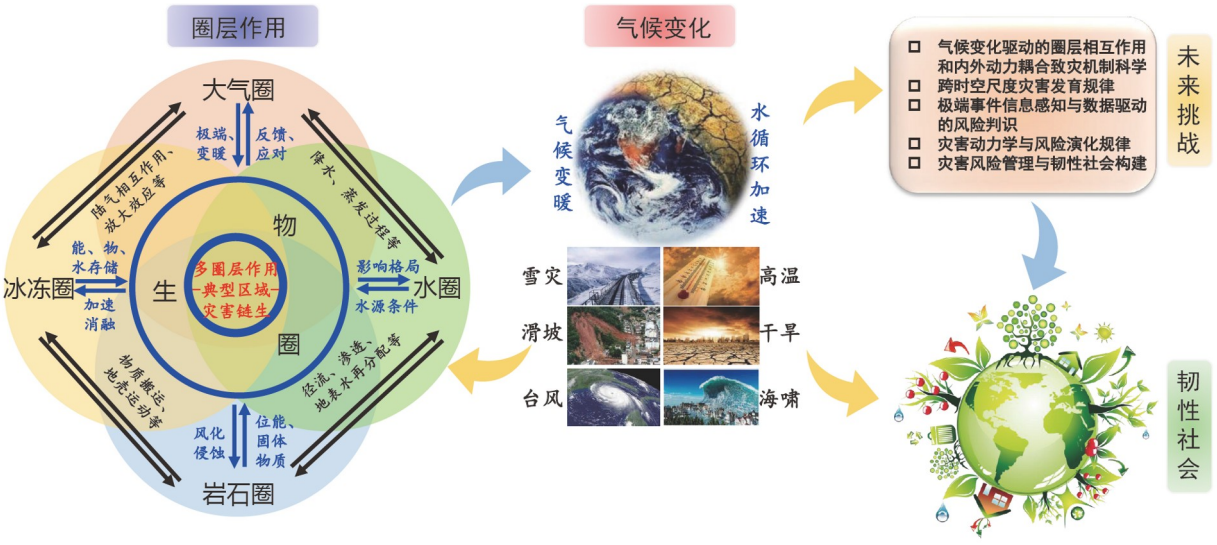


图 4 多圈层作用下气候变化的灾害效应与应对其风险的科学挑战

Figure 4 The scientific challenges of disaster effects of climate change and its risks under multi-sphere interactions

表 1 应对气候变化灾害风险的科学挑战及其关键因素与核心应对方案

Table 1 Scientific challenges, key factors, and core strategies for addressing disaster risks of climate change

科学挑战	关键因素	核心应对方案
气候变化驱动的圈层相互作用和内外动力耦合致灾机制	跨圈层物质能量循环机制和多灾种链式演化效应	建立地球深部-浅部-表部的高分辨率物性-结构-运动模型
跨时空尺度灾害发育	多灾种时间群聚、空间群发性	打通时间关隘和空间隧道
极端事件信息感知与数据驱动的风险判识	感知信息缺失、关键突变因子不明	建立全要素、全过程综合风险智能诊断系统
灾害动力学与风险演化规律	复杂多项介质多场耦合灾害的多物理过程解耦	跳出确定论, 考虑多项-多场-多介质耦合灾害风险的不确定因素
灾害风险管理与韧性社会构建	风险评估方法不确定性、区域特征差异性	建立“预防-预备-响应-恢复”多维度智能化风险管理框架

困难, 而且目前空间大尺度长期气候预测精度仍满足不了自然灾害演化研究和应用的需求. 不同致灾因子时空关联度与规律不清, 进一步影响不同灾害在时间上的群聚和空间上的群发机制与特征. 因此, 打通不同尺度空间关隘和时间隧道, 揭示复杂下垫面陆-气耦合系统变化规律及其灾害效应, 深化认识跨时空尺度灾害发育规律, 也是未来关键科学挑战之一.

4.3 极端事件信息感知与数据驱动的风险判识

极端灾害事件是一类特殊的非常规突发事件, 其态势演化是应急救灾的首要问题. 从概率的角度来讲, 极端灾害事件属于小概率事件, 但其造成的破坏和损失往往非常严重[112]. 其中, “黑天鹅”事件样本量少, 影响因子不明, 关键信息无法感知; “灰犀牛”事件缺乏完善信息统计, 量变到质变的转换机制和突变因子难以确定. 由于极端灾害事件信息高度缺失、时滞和失真, 确定极端灾害目前处于什么状态、未来将如何演化等问题是制约极端灾害事件风险预测的关键科学问题[113]. 极端灾害风险事件预测问题应以极端灾害威胁的承灾体功能属性作为研究目标, 深入分析极端灾害事件的形成、演化及致灾机制. 并在此基础上, 采用贝叶斯极值理论进行建模, 定量刻画极端灾害风险事件与特征因素的关联关系[114~116], 以实现时域上潜在极端灾害风险事件预测以及空间上同类型极端灾害风险事件预测的目的.

4.4 灾害动力学与风险演化规律

主导气候变化的物理系统是一类高度非线性的动

力系统, 其在外力的微扰作用下常演化出难以控制的混沌效应. 从宏观角度看, 气候系统的混沌效应表现出极强的内禀随机特性, 从而使得由气候变化诱导的灾害风险预测具有明显的不确定性. 并且人类对气候系统的外在随机干扰越大, 人类所面临的灾害风险就越高, 灾害风险预测的不确定性更加突出. 目前, 灾害动力学系统主要以确定论为指导进行构建, 并已取得了很大的进步. 但是复杂多项介质多场耦合灾害的多物理过程解耦难度大, 同时其多界面特征阻碍灾害运动和结构信息的获取, 导致以确定论构建起来的灾害动力学理论难以考虑多项-多场-多介质耦合作用下灾害形成、演化及致灾过程中的不确定因素. 因此如何定量描述灾害风险的随机成分和预测的不确定性仍然是灾害动力学发展的一个科学瓶颈.

4.5 灾害风险管理与韧性社会构建

灾害风险系统是复杂的, 孕灾、致灾和成灾要素相互联系、相互依赖并相互影响. 全球化使得气候变化驱使下的灾害风险通过社会、经济和环境系统传播和扩散, 风险形势正在快速变化, 带来越来越大的影响. 通过灾害风险管理, 降低气候变化灾害风险影响, 是未来灾害风险科学的主要目标. 而社会经济差异增大了气候变化灾害风险的复杂性. 世界气象组织(World Meteorological Organization, WMO)指出, 1970~2021年间, 全世界由于极端天气、气候导致的死亡人口中, 90%以上在发展中国家[117]. 所以在考虑社会经济作用的灾害风险管理体系时应当关注公正性和包容性[16,105], 与发达国家相比, 发展中国家更注重绿色转型的成本效益[118]. 从灾害风险管理的“预防-预备-响应-恢复”4个维度来看, 制定适合区域特点的灾害可接受风险水平标准是目前灾害风险管理预防和预备阶段的首要挑战. 这主要体现在风险评估方法的不确定性、区域特征的差异性、经济利益和社会参与以及人文因素的影响. 而灾害风险管理的响应与恢复阶段, 则需要重点关注建立和有效提升社会的灾害韧性, 构建一个能适应气候变化的韧性社会[119]. 韧性社会具有承受灾害事件的打击并从中恢复的能力. 韧性为包括气候变化在内的政策制定和管理提供了一个非常实用的框架并以发展为风险管理的一个重要理念. IPCC AR6中提出的气候韧性发展框架就是对灾害风险管理和气候韧性社会建设的探索[105].

综上所述, 本文首先通过对气候变化的致灾特点与自然灾害活动特征等的归纳总结, 量化不同种类灾害的活动变化趋势; 其次, 通过主要驱动力的差异来划分灾害类型, 分类介绍灾害对气候变化的响应机制, 并强调了同类型灾害在不同区域的空间差异; 再者, 主要围绕自然灾害的自然属性介绍灾害风险演化趋势与影响; 最后, 围绕气候变化的灾害效应, 提出五大科学挑战. 本文提倡以提高自然灾害预测预警的准确性和有效性、降低气候变化灾害风险为目标, 加强新理论、新方法、新技术的研发, 包括清洁能源和绿色减灾技术等的创新, 减缓气候系统的扰动, 并通过调整社会系统、经济系统和生态系统等来适应气候变化. 建议通过综合、多样化的方法解决不同挑战中的关键问题, 有效应对气候变化带来的灾害风险.

参考文献

1 Cui P, Hu K H, Chen H Y, et al. Risks along the Silk Road Economic Belt owing to natural hazards and construction of major projects (in Chinese). Chin Sci Bull, 2018, 63: 989–997 [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. 科学通报, 2018, 63: 989–997]

2 Cui P, Jia Y. Mountain hazards in the Tibetan Plateau: Research status and prospects. Natl Sci Rev, 2015, 2: 397–399

3 Cui P, Peng J, Shi P, et al. Scientific challenges of research on natural hazards and disaster risk. Geogr Sustain, 2021, 2: 216–223

4 Ding Y, Mu C, Wu T, et al. Increasing cryospheric hazards in a warming climate. Earth-Sci Rev, 2021, 213: 103500

5 Zhou Y S, Li X, Zheng D H, et al. The joint driving effects of climate and weather changes caused the Chamoli glacier-rock avalanche in the high altitudes of the India Himalaya (in Chinese). Sci China Earth Sci, 2021, 64: 1909–1921 [周玉杉, 李新, 郑东海, 等. 气候变化和异常天气共同导致印度杰莫利冰-岩崩塌. 中国科学: 地球科学, 2021, 51: 2112–2125]

6 Qi W, Yang W, He X, et al. Detecting Chamoli landslide precursors in the southern Himalayas using remote sensing data. Landslides, 2021, 18: 3449–3456

7 Wei P, Xu X, Xue M, et al. On the key dynamical processes supporting the 21.7 Zhengzhou record-breaking hourly rainfall in China. Adv Atmos Sci, 2022, 40: 337–349

8 Xue M. Preface to the special collection on the July 2021 Zhengzhou, Henan extreme rainfall event. Adv Atmos Sci, 2023, 40: 335–336

9 Yin J, Gu H, Liang X, et al. A possible dynamic mechanism for rapid production of the extreme hourly rainfall in Zhengzhou City on 20 July

2021. J Meteorol Res, 2022, 36: 6–25
10 Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, et al. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2021
11 Zhao W. Extreme weather and climate events in China under changing climate. Natl Sci Rev, 2020, 7: 938–943
12 Gill J C, Malamud B D. Reviewing and visualizing the interactions of natural hazards. Rev Geophys, 2014, 52: 680–722
13 Pescaroli G, Alexander D. Understanding compound, interconnected, interacting, and cascading risks: A holistic framework. Risk Anal, 2018, 38: 2245–2257
14 Llana S M. Tropical Storm Agatha Floods Kill 150, Cause Giant Sinkhole in Guatemala City. 2010, https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=2010%E5%B9%B4%E7%93%9C%E5%9C%B0%E9%A9%AC%E6%8B%89%E5%B8%82%E6%B2%89%E6%B4%9E&oldid=63877521
15 Van Aalst M K. The impacts of climate change on the risk of natural disasters. Disasters, 2006, 30: 5–18
16 Pörtner H O, Roberts D C, Adams H, et al. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2022
17 Thomas V. Climate Change and Natural Disasters: Transforming Economies and Policies for a Sustainable Future. New York: Taylor & Francis, 2017
18 Hore K, Kelman I, Mercer J, et al, Climate Change and Disasters. New York: Springer, 2018
19 Lahsen M, Ribot J. Politics of attributing extreme events and disasters to climate change. Wiley Interdiscip Rev Clim Change, 2022, 13: e750
20 Benevolenza M A, DeRigne L A. The impact of climate change and natural disasters on vulnerable populations: A systematic review of literature. J Hum Behav Soc Environ, 2019, 29: 266–281
21 Guo D, Wang H, Li D. A projection of permafrost degradation on the Tibetan Plateau during the 21st century. J Geophys Res Atmos, 2012, 117: D05106
22 Rietbroek R, Brunnabend S E, Kusche J, et al. Revisiting the contemporary sea-level budget on global and regional scales. Proc Natl Acad Sci USA, 2016, 113: 1504–1509
23 Kunkel K E, Karl T R, Brooks H, et al. Monitoring and understanding trends in extreme storms: State of knowledge. Bull Am Meteorol Soc, 2013, 94: 499–514
24 Golian S, Murphy C, Wilby R L, et al. Dynamical-statistical seasonal forecasts of winter and summer precipitation for the Island of Ireland. Int J Climatol, 2022, 9: 44–56
25 Knight J. Snowfall in the Sahara desert: An unusual weather phenomenon. 2022, https://theconversation.com/snowfall-in-the-sahara-desert-an-unusual-weather-phenomenon-176037
26 Eppes M C, Keanini R. Mechanical weathering and rock erosion by climate-dependent subcritical cracking. Rev Geophys, 2017, 55: 470–508
27 Eppes M C, Magi B, Scheff J, et al. Warmer, wetter climates accelerate mechanical weathering in field data, independent of stress-loading. Geophys Res Lett, 2020, 47: 2020GL089062
28 Chen X, You Q. Effect of Indian Ocean SST on Tibetan Plateau precipitation in the early rainy season. J Clim, 2017, 30: 8973–8985
29 Bothe O, Fraedrich K, Zhu X. Large-scale circulations and Tibetan Plateau summer drought and wetness in a high-resolution climate model. Int J Climatol, 2011, 31: 832–846
30 Song C, Wang J, Liu Y, et al. Toward role of westerly-monsoon interplay in linking interannual variations of late spring precipitation over the southeastern Tibetan Plateau. Atmos Sci Lett, 2021, 23: e1074
31 Shi P J. Disaster Risk Science (in Chinese). Beijing: Beijing Normal University Publishing Group, 2016 [史培军. 风险灾害科学. 北京: 北京师范大学出版社, 2016]
32 Wang J, Chen Y, Tett S F B, et al. Anthropogenically-driven increases in the risks of summertime compound hot extremes. Nat Commun, 2020, 11: 528
33 Wang G, Wu L, Mei W, et al. Ocean currents show global intensification of weak tropical cyclones. Nature, 2022, 611: 496–500
34 Conway D, Nicholls R J, Brown S, et al. The need for bottom-up assessments of climate risks and adaptation in climate-sensitive regions. Nat Clim Chang, 2019, 9: 503–511
35 Nicholls R J, Lincke D, Hinkel J, et al. A global analysis of subsidence, relative sea-level change and coastal flood exposure. Nat Clim Chang, 2021, 11: 338–342
36 Yang P, Zhang S, Xia J, et al. Analysis of drought and flood alternation and its driving factors in the Yangtze River Basin under climate change. Atmos Res, 2022, 270: 106087
37 AghaKouchak A, Chiang F, Huning L S, et al. Climate extremes and compound hazards in a warming world. Annu Rev Earth Planet Sci, 2020, 48: 519–548
38 Ma M, Qu Y, Lyu J, et al. The 2022 extreme drought in the Yangtze River Basin: Characteristics, causes and response strategies. River, 2022, 1:

162–171
39 Cui P, Dang C, Cheng Z, et al. Debris flows resulting from glacial-lake outburst floods in Tibet, China. Phys Geogr, 2010, 31: 508–527
40 Cui P. Progress and prospects in research on mountain hazards in China (in Chinese). Prog Geogr, 2014, 33: 145–152 [崔鹏. 中国山地灾害研究进展与未来应关注的科学问题, 地理科学进展, 2014, 33: 145–152]
41 Cui P, Jia Y, Su F H, et al. Natural hazards in Tibetan Plateau and key issue for feature research (in Chinese). Bull Chin Acad Sci, 2017, 32: 985–992 [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. 中国科学院院刊, 2017, 32: 985–992]
42 Jia Y. The impact mechanism of climate warming on mountain hazards in the southeast of Tibet (in Chinese). Doctor Dissertation. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018 [贾洋. 气候变暖对藏东南山地灾害的影响机制. 博士学位论文. 北京: 中国科学院大学, 2018]
43 Yuan Y F, Zhai P M. Latest understanding of extreme weather and climate events under global warming and urbanization influences (in Chinese). Trans Atmos Sci, 2022, 45: 161–166 [袁宇锋, 翟盘茂. 全球变暖与城市效应共同作用下的极端天气气候事件变化的最新认知. 大气科学学报, 2022, 45: 161–166]
44 Wu X, Wang L, Yao R, et al. Quantitatively evaluating the effect of urbanization on heat waves in China. Sci Total Environ, 2020, 731: 138857
45 Li Y, Fowler H J, Argüeso D, et al. Strong intensification of hourly rainfall extremes by urbanization. Geophys Res Lett, 2020, 47: e2020GL088758
46 Feng B, Zhang Y, Bourke R. Urbanization impacts on flood risks based on urban growth data and coupled flood models. Nat Hazards, 2021, 106: 613–627
47 Vousdoukas M I, Mentaschi L, Voukouvalas E, et al. Extreme sea levels on the rise along Europe's coasts. Earth Future, 2017, 5: 304–323
48 Vousdoukas M I, Mentaschi L, Voukouvalas E, et al. Global probabilistic projections of extreme sea levels show intensification of coastal flood hazard. Nat Commun, 2018, 9: 2360
49 Chen J, Zheng Y, Zhang X, et al. Distribution and diurnal variation of warm-season short-duration heavy rainfall in relation to the MCSs in China. Acta Meteorol Sin, 2014, 27: 868–888
50 Madden R A, Julian P R. Detection of a 40–50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific. J Atmos Sci, 1971, 28: 702–708
51 Huang P, Lin I I, Chou C, et al. Change in ocean subsurface environment to suppress tropical cyclone intensification under global warming. Nat Commun, 2015, 6: 7188
52 Huang P, Xie S P. Mechanisms of change in ENSO-induced tropical Pacific rainfall variability in a warming climate. Nat Geosci, 2015, 8: 922–926
53 Molinari J, Vollaro D. What percentage of western North Pacific tropical cyclones form within the monsoon trough? Mon Weather Rev, 2013, 141: 499–505
54 Wang C, Wu L. Interannual shift of the tropical upper-tropospheric trough and its influence on tropical cyclone formation over the western North Pacific. J Clim, 2016, 29: 4203–4211
55 Wang B, Chan J C L. How strong ENSO events affect tropical storm activity over the western North Pacific. J Clim, 2002, 15: 1643–1658
56 Zhao H, Chen S, Klotzbach P J. Recent strengthening of the relationship between the western North Pacific monsoon and western North Pacific tropical cyclone activity during the boreal summer. J Clim, 2019, 32: 8283–8299
57 Hu C, Zhang C, Yang S, et al. Perspective on the northwestward shift of autumn tropical cyclogenesis locations over the western North Pacific from shifting ENSO. Clim Dyn, 2018, 51: 2455–2465
58 Chand S S, Walsh K J E, Camargo S J, et al. Declining tropical cyclone frequency under global warming. Nat Clim Chang, 2022, 12: 655–661
59 Knutson T R, McBride J L, Chan J, et al. Tropical cyclones and climate change. Nat Geosci, 2010, 3: 157–163
60 Bhatia K T, Vecchi G A, Knutson T R, et al. Recent increases in tropical cyclone intensification rates. Nat Commun, 2019, 10: 635
61 Emanuel K. Assessing the present and future probability of Hurricane Harvey's rainfall. Proc Natl Acad Sci USA, 2017, 114: 12681–12684
62 Kossin J P. A global slowdown of tropical-cyclone translation speed. Nature, 2018, 558: 104–107
63 Li L, Chakraborty P. Slower decay of landfalling hurricanes in a warming world. Nature, 2020, 587: 230–234
64 Emanuel K. Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years. Nature, 2005, 436: 686–688
65 Zhao Z C, Luo Y, Huang J B. Global warming and floods/droughts (in Chinese). Clim Change Res, 2023, 19: 258–262 [赵宗慈, 罗勇, 黄建斌. 全球变暖与旱涝事件. 气候变化研究进展, 2023, 19: 258–262]
66 Yuan X, Wang L, Wu P, et al. Anthropogenic shift towards higher risk of flash drought over China. Nat Commun, 2019, 10: 4661
67 Berg A, Sheffield J, Milly P C D. Divergent surface and total soil moisture projections under global warming. Geophys Res Lett, 2017, 44: 236–244
68 Zhou T, Zhang W. Anthropogenic warming of Tibetan Plateau and constrained future projection. Environ Res Lett, 2021, 16: 044039
69 Zhang X, Hao Z, Singh V P, et al. Drought propagation under global warming: Characteristics, approaches, processes, and controlling factors. Sci Total Environ, 2022, 838: 156021

70 Zhang P, Jeong J H, Yoon J H, et al. Abrupt shift to hotter and drier climate over inner East Asia beyond the tipping point. Science, 2020, 370: 1095–1099
71 Büntgen U, Urban O, Krusic P J, et al. Recent European drought extremes beyond Common Era background variability. Nat Geosci, 2021, 14: 190–196
72 Kundzewicz Z W, Hirabayashi Y, Kanae S. River floods in the changing climate—Observations and projections. Water Resour Manage, 2010, 24: 2633–2646
73 Fang J, Du J, Xu W, et al. Advances in the study of climate change impacts on flood disaster (in Chinese). Adv Earth Sci, 2014, 29: 1085–1093 [方建, 杜鹃, 徐伟, 等. 气候变化对洪水灾害影响研究进展. 地球科学进展, 2014, 29: 1085–1093]
74 Gu L, Chen J, Yin J, et al. Responses of precipitation and runoff to climate warming and implications for future drought changes in China. Earth Future, 2020, 8: e2020EF001718
75 Yin J B, Guo S L, Gu L, et al. Thermodynamic response of precipitation extremes to climate change and its impacts on floods over China (in Chinese). Chin Sci Bull, 2021, 66: 4315–4325 [尹家波, 郭生练, 顾磊, 等. 中国极端降水对气候变化的热力学响应机理及洪水效应. 科学通报, 2021, 66: 4315–4325]
76 Blöschl G, Hall J, Parajka J, et al. Changing climate shifts timing of European floods. Science, 2017, 357: 588–590
77 Harpold A A, Rajagopal S, Crews J B, et al. Relative humidity has uneven effects on shifts from snow to rain over the western U.S. Geophys Res Lett, 2017, 44: 9742–9750
78 Pfahl S, O'Gorman P A, Fischer E M. Understanding the regional pattern of projected future changes in extreme precipitation. Nat Clim Chang, 2017, 7: 423–427
79 Huang X, Swain D L. Climate change is increasing the risk of a California megaflood. Sci Adv, 2022, 8: eabq0995
80 Gori A, Lin N, Xi D, et al. Tropical cyclone climatology change greatly exacerbates US extreme rainfall-surge hazard. Nat Clim Chang, 2022, 12: 171–178
81 Wang B, Ma Y, Su Z, et al. Quantifying the evaporation amounts of 75 high-elevation large dimictic lakes on the Tibetan Plateau. Sci Adv, 2020, 6: eaay8558
82 Gao J, Yao T, Masson-Delmotte V, et al. Collapsing glaciers threaten Asia's water supplies. Nature, 2019, 565: 19–21
83 Yao T, Thompson L, Yang W, et al. Different glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings. Nat Clim Chang, 2012, 2: 663–667
84 Yao T D. A comprehensive study of Water-Ecosystem-Human activities reveals unbalancing Asian Water Tower and accompanying potential risks (in Chinese). Chin Sci Bull, 2019, 64: 2761–2762 [姚檀栋. 青藏高原水-生态-人类活动考察研究揭示"亚洲水塔"的失衡及其各种潜在风险. 科学通报, 2019, 64: 2761–2762]
85 Wang G, Hu H, Li T. The influence of freeze-thaw cycles of active soil layer on surface runoff in a permafrost watershed. J Hydrol, 2009, 375: 438–449
86 Emmer A, Klimeš J, Hölbling D, et al. Distinct types of landslides in moraines associated with the post-LIA glacier thinning: Observations from the Kinzl Glacier, Huascarán, Peru. Sci Total Environ, 2020, 739: 139997
87 Crozier M J. Deciphering the effect of climate change on landslide activity: A review. Geomorphology, 2010, 124: 260–267
88 Gariano S L, Guzzetti F. Landslides in a changing climate. Earth-Sci Rev, 2016, 162: 227–252
89 Huggel C, Clague J J, Korup O. Is climate change responsible for changing landslide activity in high mountains? Earth Surf Process Landf, 2012, 37: 77–91
90 Hou Y L, Chigira M, Tsou C Y. Numerical study on deep-seated gravitational slope deformation in a shale-dominated dip slope due to river incision. Eng Geol, 2014, 179: 59–75
91 Grämiger L M, Moore J R, Gischig V S, et al. Beyond debuttressing: Mechanics of paraglacial rock slope damage during repeat glacial cycles. J Geophys Res Earth Surf, 2017, 122: 1004–1036
92 Greve P, Orlowsky B, Mueller B, et al. Global assessment of trends in wetting and drying over land. Nat Geosci, 2014, 7: 716–721
93 Zhang Q, Yang J H, Wang P L, et al. Progress and prospect on climate warming and humidification in Northwest China (in Chinese). Chin Sci Bull, 2023, 68: 1814–1828 [张强, 杨金虎, 王朋岭, 等. 西北地区气候暖湿化的研究进展与展望. 科学通报, 2023, 68: 1814–1828]
94 Hirabayashi Y, Mahendran R, Koirala S, et al. Global flood risk under climate change. Nat Clim Chang, 2013, 3: 816–821
95 Senande-Rivera M, Insua-Costa D, Miguez-Macho G. Spatial and temporal expansion of global wildland fire activity in response to climate change. Nat Commun, 2022, 13: 1208
96 Wieder W R, Kennedy D, Lehner F, et al. Pervasive alterations to snow-dominated ecosystem functions under climate change. Proc Natl Acad Sci USA, 2022, 119: e2202393119
97 Yang Y, Chen R, Liu G, et al. Trends and variability in snowmelt in China under climate change. Hydrol Earth Syst Sci, 2022, 26: 305–329
98 Hawcroft M, Lavender S, Copsey D, et al. The benefits of ensemble prediction for forecasting an extreme event: The Queensland Floods of

February 2019. Mon Weather Rev, 2021, 149: 2391–2408
99 Winsemius H C, Aerts J C J H, van Beek L P H, et al. Global drivers of future river flood risk. Nat Clim Chang, 2015, 6: 381–385
100 Huang J, Yu H, Guan X, et al. Accelerated dryland expansion under climate change. Nat Clim Chang, 2016, 6: 166–171
101 Armstrong McKay D I, Staal A, Abrams J F, et al. Exceeding 1.5°C global warming could trigger multiple climate tipping points. Science, 2022, 377: eabn7950
102 Garschagen M, Doshi D, Reith J, et al. Global patterns of disaster and climate risk—An analysis of the consistency of leading index-based assessments and their results. Clim Change, 2021, 169: 11
103 United Nations Office for Disaster Risk Reduction. Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction 2022: Our World at Risk: Transforming Governance for a Resilient Future. United Nations, 2022
104 Conceição P. Human Development Report. 2019: Beyond Income, beyond Averages, beyond Today: Inequalities in Human Development in the 21st Century. United Nations Development Programme, 2019
105 Skea J, Shukla P, Kılkış Ş. Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2022
106 Shukla P R, Skea J, Buendia E C, et al. 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. Consultative Group for International Agricultural Research, 2019
107 Boccard N. Analysis of trends in disaster risk. Int J Disaster Risk Reduct, 2021, 53: 101989
108 Ahmed S A, Diffenbaugh N S, Hertel T W. Climate volatility deepens poverty vulnerability in developing countries. Environ Res Lett, 2009, 4: 034004
109 Cui P, Guo X J, Jiang T H, et al. Disaster effect induced by Asian water tower change and mitigation strategies (in Chinese). Bull Chin Acad Sci, 2019, 34: 1313–1321 [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. 中国科学院院刊, 2019, 34: 1313–1321]
110 Wang L, Zhang B C, Shi Y, et al. Interpretation of the IPCC AR6 on the impacts and risks of climate change (in Chinese). Clim Change Res, 2022, 18: 389–394 [王蕾, 张百超, 石英, 等. IPCC AR6报告关于气候变化影响和风险主要结论的解读. 气候变化研究进展, 2022, 18: 389–394]
111 Guo A L, Zhang G W, Dong Y P, et al. Qinling Mountains: A hot spot of Earth multi-spherical interaction (in Chinese). J Northwest Univ (Nat Sci Ed), 2021, 51: 922–934 [郭安林, 张国伟, 董云鹏, 等. 秦岭: 地球多圈层相互作用的热点. 西北大学学报(自然科学版), 2021, 51: 922–934]
112 Garnier E. Extreme Events and History: For a Better Consideration of Natural Hazards. New York: Springer, 2021
113 Endsley M R. Toward a theory of situation awareness in dynamic systems. Hum Factors, 1995, 37: 32–64
114 Nolde N, Joe H. A Bayesian extreme value analysis of debris flows. Water Resour Res, 2013, 49: 7009–7022
115 Veh G, Korup O, Walz A. Hazard from Himalayan glacier lake outburst floods. Proc Natl Acad Sci USA, 2020, 117: 907–912
116 Bousquet N, Bernardara P. Extreme Value Theory with Applications to Natural Hazards. New York: Springer, 2021
117 World Meteorological Organization. Atlas of Mortality and Economic Losses from Weather, Climate and Water-related Hazards. 2023, https://public.wmo.int/en/resources/atlas-of-mortality
118 Bhattacharya A, Kharas H, McArthur J W. Why Developing Country Voices Will Shape the Global Climate Agenda. Washington DC: Brookings Institution, 2022
119 Chen D L, Qin D H, Xiao C D, et al. Climate resilience and its implications for China (in Chinese). Clim Change Res, 2019, 15: 167–177 [陈德亮, 秦大河, 效存德, 等. 气候恢复力及其在极端天气气候灾害管理中的应用. 气候变化研究进展, 2019, 15: 167–177]

Summary for “气候变化的灾害效应与科学挑战”

Disaster effects of climate change and the associated scientific challenges

Yan Wang[1], Hao Wang[2], Peng Cui[1,2*], Deliang Chen[3], Jinbo Tang[2], Tinghai Ou[3], Jiansheng Hao[1], Jiao Wang[2], Guotao Zhang[1], Yu Lei[2] & Chunhao Wu[2]

[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 Earth Surface Process, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610299, China;*
[3] *Department of Earth Sciences, University of Gothenburg, Gothenburg 40530, Sweden*
* Corresponding author, E-mail: pengcui@imde.ac.cn

Climate change can be observed in various spheres of the Earth’s system, including atmosphere, lithosphere, hydrosphere, biosphere and cryosphere. The interactions among these spheres collectively impact the changes of the climate system. Natural disasters represent the most intense manifestation of the interactions among the Earth’s spheres, and they have profound impacts on human society. In this study, we discuss the impact of climate change on natural disasters by examining the characteristics of climate change-induced hazards and the activity patterns of natural disasters. Furthermore, the response mechanisms of natural disasters to climate change are elaborated by exploring the formation and evolution of different types of natural disasters. Additionally, the future trends of disaster-pregnant environment under climate change are estimated, and the future trends of disaster risk are revealed by jointly considering the exposure and vulnerability.

The main driving forces and formation conditions of natural disasters vary greatly among different geomorphic units, but they can generally be classified into three categories: Thermally driven disasters, gravitationally driven disasters, and hydrologically driven disasters. For example, heatwaves, tropical cyclones, tornadoes, and wildfires are common examples of thermally driven disasters which are forced by high temperatures or great thermal gradients. In addition, gravitationally driven disasters mainly occur in mountainous areas with significant differences in elevation, such as landslides, snow-ice avalanches and debris flows. The tsunamis caused by seabed movement are also gravity disasters. Furthermore, the disasters such as droughts, regional floods and sea-level rise are primarily driven by the changes in hydraulic conditions, and thus are classified as hydrologically driven disasters.

In the context of enhanced climate change, the interactions among multiple spheres of the Earth’s system are strengthened, causing the disaster-pregnant environment to evolve towards a more vulnerable state. Thus, the natural disasters present some new characteristics and trends, and the disaster risk shows a sharp increase. The interactions among different types of natural disasters have also become stronger, resulting in a significant rise in the risk of compound and cascading disaster. The differences in driving forces lead to significant variations in the disaster feedback to climate change among the varied geomorphic units. For example, the strengthened interaction between ocean and atmosphere leads to enhanced compound risk and destructive power of marine disasters. Besides, the intensification of water cycle contributes to increased spatial heterogeneity in drought and flood disasters, whose durations, intensities, and magnitudes show significant increasing trends. In addition, the high mountainous areas with altitude-dependent warming and the urban areas with significant heat island effects have obvious amplification effects in the responses to climate warming.

This study advocates the goal of improving the accuracy and effectiveness of natural disaster prediction and early warning, and reducing the risk of climate change-related disasters. Five major scientific challenges of climate change-related disaster risk are proposed: (1) The mechanisms of climate change-driven interactions among Earth’s spheres and the coupling of internal and external forces; (2) the spatio-temporal patterns of disaster development across different scales; (3) the perception of extreme event information and the data-driven risk identification; (4) the dynamics of disasters and the evolution of risk; (5) the disaster risk management and the resilient social development. By addressing the key issues in these five challenges through comprehensive and diversified approaches, we can deepen our scientific understanding on the Earth’s system, adapt to global changes, and reduce disaster risks.

climate change, natural hazards, disaster effects, response mechanisms, scientific challenges

doi: 10.1360/TB-2023-0325