

• 自然灾害防治面临的挑战与应对 •

DOI: 10.3724/BNSFC-2025-0110

## 气候变化下山洪泥石流灾害风险演化特征与 前沿科技问题<sup>\*</sup>

崔 鹏<sup>1,4†\*\*\*</sup> 张国涛<sup>1†</sup> 王 岩<sup>1,4</sup> 王 姣<sup>2,4</sup> 张晨笛<sup>1</sup>  
谭春萍<sup>3</sup> 李朝月<sup>1</sup> 王子励<sup>2</sup> 周朝栋<sup>1</sup>

1. 中国科学院地理科学与资源研究所 山地自然灾害与工程安全重点实验室,北京 100101
2. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所 山地自然灾害与工程安全重点实验室,成都 610213
3. 四川大学—香港理工大学 灾后重建与管理学院,成都 610207
4. 中国科学院大学 资源与环境学院,北京 101408

**[摘要]** 气候变暖使地球圈层互馈作用日益增强、地表过程变化速率加快,加剧了山洪泥石流灾害发生的复杂性和不确定性,扩大了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。论文系统剖析了气候变化下山洪泥石流灾害“频次增加、强度升级、链式效应凸显、风险外延”的新态势,指出传统灾害风险防控体系在理论深度、预警精度、绿色韧性技术及管理—发展融合性等方面存在的不足,提出气候变化新态势下山洪泥石流灾害风险防控的四个前沿科技问题:山洪泥石流对气候变化的响应机制、高精度灾害预测与风险评估理论、流域灾害全过程物质—能量协同调控机理、山区灾害风险防控与流域绿色发展。进而,针对气候变化导致的山洪泥石流灾害风险新特点、减灾需求和科技前沿问题,提出加强气候变化重塑孕灾环境背景下山洪泥石流形成演化机理研究、研建风险评估与“理论—技术—数据”驱动的灾害风险预测预警理论与技术、发展工程—自然融合的绿色减灾模式、建立多元协同且减灾—发展有机融合的山区小流域风险防控机制等应对策略,以期能为气候变化新态势下山洪泥石流灾害风险精细防控与山区高质量发展提供理论依据与技术支撑。

**[关键词]** 山洪泥石流;气候变化;风险演化;风险防控;绿色减灾

山洪泥石流是山区小流域表层水土物质快速输移的过程,突发性强、成灾迅速、群发性和链生性等特点显著<sup>[1,2]</sup>,往往造成毁灭性灾害,是全球最频繁和最有破坏力的自然灾害之一,如2010年甘肃舟曲山洪泥石流造成5 500多间房屋被淹没或冲毁,2万多人受灾,1 765人遇难或失踪;2025年7月8日,西藏吉隆口岸区域,上游暴发冰湖溃决型山洪泥石流灾害导致17人失联,冲毁口岸大桥。随着山洪泥石流灾害防治体系的持续建设,减灾能力逐步增强,每年因灾死亡率呈逐年下降趋势,但受

气候变化、极端天气等因素的影响,灾害活动性有所加强,形成机理更加复杂,灾害损失仍居高不下。要进一步提升灾害防控的成效,需要系统深化小流域山洪泥石流的形成—运动—致灾过程和机理的科学认识。

气候变化背景下,极端高温与极端降水事件的频率和强度均显著增加,这些极端扰动通过加强陆地表层系统多圈层相互作用,驱动山洪泥石流灾害呈现新的时空格局与演化特征,如高寒区融雪洪水提前,“融雪—暴雨”混合型山洪泥石流更加频发<sup>[2]</sup>;区域“暖湿化”趋势

收稿日期:2025-10-14;修回日期:2025-12-27

† 共同第一作者。

\* 本文根据国家自然科学基金委员会第410期“双清论坛”讨论的内容整理。

\*\* 通信作者,Email: pengwei@imde.ac.cn

本文受到国家自然科学基金项目(42201086, U21A2008, 42242103)、国家重点研发计划项目(2024YFC3012701)的资助。

**引用格式:** 崔鹏,张国涛,王岩,等. 气气候变化下山洪泥石流灾害风险演化特征与前沿科技问题. 中国科学基金,2025,39(6):959-967.

Cui P, Zhang GT, Wang Y, et al. Evolutionary characteristics and frontier scientific issues in flash flood and debris flow disasters risk under climate change. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2025, 39(6):959-967. (in Chinese)

使干旱区短历时极端降水阈值突破历史极值,从而显著增加超常规洪水及泥石流的发生频率;极端降水—滑坡—堰塞湖—山洪泥石流的链生路径被进一步放大,灾害复合风险与级联风险显著抬升<sup>[3]</sup>,对现行以单灾种、静态设计为基础的山洪泥石流防控技术体系提出了新的科学挑战,亟需开展考虑多圈层耦合致灾机理的灾害活动与致灾特性、动态风险评估与韧性减灾技术研究。

本文立足国家防灾减灾重大战略需求,全面分析山洪泥石流形成运动演化过程、致灾机理、成灾特点以及气候变化下灾害风险演化新趋势,剖析山洪泥石流风险防控的新需求和目前的薄弱环节,提出应对气候变化下山洪泥石流灾害新风险的前沿科技问题与应对策略,以期为我国山洪泥石流前沿研究与科学前瞻性布局提供参考。

## 1 山洪泥石流形成运动致灾机制及其对气候变化的响应

### 1.1 灾害形成运动演化与致灾机制

山洪泥石流本质为水—沙混合体在沟道中的快速运移过程,其形成运动机理受地形地貌、地质构造、水文及气象条件等因素的高度非线性耦合作用控制。特别是内(构造)、外(气候)动力均具有长期累积与瞬时强扰动的时间耦合特征,加速了地表圈层的水文—物源—地貌的快速演化。在极端降水、冰雪融水等加剧的影响下,地表产流突变、物源补给激增、侵蚀规模放大与下游脆弱承灾体结构损毁是山洪泥石流致灾的四大关键过程(图1)。壤中暴流水文过程是地表产流突变和物源补给激增的共性水文机理,是坡面水—土耦合失稳建模的关键理论点<sup>[4,5]</sup>。水流条件不断提高可引起床面粗颗粒起动和河床结构解体,强泥沙补给可降低床面整体粗糙程度,提高近底层流速和侵蚀作用,从而加剧床面粗颗粒起动和河床结构破坏,增大流体密度和规模,形成大规模山洪或泥石流。在山洪泥石流沿程输移侵蚀过程中,会导致局部

下切侵蚀谷坡脚和破坏岸坡稳定,为崩塌、滑坡、堰塞湖等灾害链形成创造了条件<sup>[6]</sup>。而沟道堵塞体的形态、体量、分布决定着溃决的临界条件,多个串珠状堵塞体或堰塞体的级联溃决具有显著的多米诺效应<sup>[7]</sup>,其洪峰流量远远大于单溃决峰值流量的总和,破坏作用增大,更具有级联效应、时空扩展性和难预测性等特性<sup>[8]</sup>。

山洪泥石流通过冲击、淤埋等作用造成房屋、桥梁、涵洞等建筑和结构的损伤破坏,主要包括冲击破坏、冲蚀破坏、淤埋破坏、阻塞破坏等四种类型。高速运动的山洪泥石流体具有巨大动能,可直接冲击建筑物、桥梁等设施,导致结构损毁;也可通过冲蚀造成局部侵蚀与基础失稳等危害。淤埋破坏往往造成下游农田、房屋村落、道路交通等功能丧失。阻塞可暂时蓄积物质和能量,一旦释放则会引发更强的二次灾害过程,是破坏力更大的一种成灾模式。因此,建立基于山洪泥石流动力参数的结构破坏模型和不同类型破坏曲线<sup>[9]</sup>,可以合理设计并有效提高迎流面结构体抵抗泥石流冲击的能力,以较小造价提高换取保障结构体的安全性能。

综上所述,深入系统认识山洪泥石流的形成、运动、演进及成灾过程,建立相应的数学模型,是理解灾害风险演化规律、研发灾害监测预警和风险防控技术、认知和应对气候变化条件下灾害新风险的理论基础。

### 1.2 气候变化下灾害风险演化新态势

全球气候变化驱动地表圈层交互作用愈加频繁强烈,地表山洪泥石流灾害风险呈现出一系列新态势:灾害发生频次显著增加、灾害强度规模不断升级、灾害链效应愈加复杂、风险区域不断外延,给人类社会和生态环境带来了更严峻的挑战。

#### (1) 灾害发生频次显著增加

气候变暖增加大气水汽含量,显著强化极端短历时降水过程,致使山洪泥石流灾害频次上升。联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on

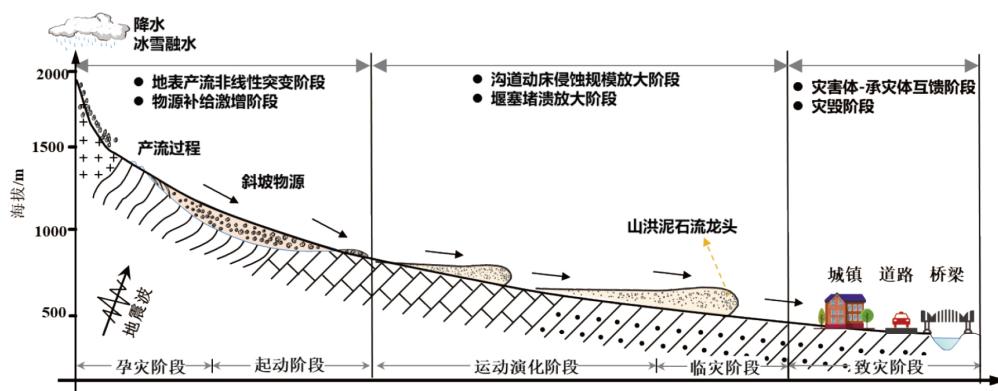


图1 山洪泥石流形成运动演化与致灾过程

Fig.1 Formation, Movement, Evolution, and Destroying Processes for Flash Flood and Debris Flow

Climate Change, IPCC)第六次评估报告指出,近几十年全球极端降雨量增幅达15%<sup>[10,11]</sup>,在地形抬升显著的高山峡谷区尤为突出。以2023年北京西郊为例,4天累计降水达1025.5毫米,远超多年均值,短时强降雨产生高强度地表径流,冲刷侵蚀松散物质,诱发坡面失稳与滑塌,触发特大山洪泥石流灾害。同时,气候变暖正通过极端降水与冰雪融水双重作用,显著提升山洪泥石流灾害风险,升温条件下藏东南高寒山区冰川泥石流和降雨型泥石流发生次数分别超过80%和60%<sup>[12]</sup>。与此类似, Dominik等<sup>[13]</sup>对2021年西欧洪灾归因结果表明,气候变暖使此类事件发生概率增加1.2~9倍。

### (2)灾害强度规模不断升级

气候变暖致使极端降雨事件的强度和规模持续增强,短历时强降水呈现非线性放大效应,单次事件的降水总量与峰值雨强均显著提升<sup>[14]</sup>,导致径流过程更加集中,增强了对地表的侵蚀、冲刷与物质搬运能力,使得山洪泥石流规模和强度大幅度增加。如2006年2月17日,菲律宾东部莱特岛圣伯纳德镇因连续暴雨引发山体崩塌,大量物源堆积,形成大规模泥石流灾害,损毁山脚吉恩萨贡村约300座房屋,造成超过1800人遇难<sup>[15]</sup>。此外,气候变暖引发的极端干旱增加了森林和草地生态系统的脆弱性,植被退化削弱了固土调水能力,大大减弱了植被通过调控地表水土过程预防和减轻山洪泥石流形成的天然阻滞功能。在高山区,坡面侵蚀作用增强、冰川消融加剧以及多年冻土退化进一步增加了松散物源和水源供给,从而大幅度增加了山洪泥石流的规模和强度。

### (3)灾害链效应愈发复杂

气候变化导致圈层相互作用加强,促使多过程复合与链生致灾的频率与强度持续上升,形成更复杂的灾害链。例如,由海温异常导致大气环流变化,使台风增强,路径北偏,深入内陆<sup>[16,17]</sup>,形成大范围强降水和群发性山洪泥石流,如2023年7月28日至8月1日,台风“杜苏芮”导致海河流域出现历史罕见极端暴雨过程,流域累积面雨量155.3毫米,形成流域性洪水灾害。在构造活动区,地震破坏山体结构产生大量松散岩土体,为次生泥石流灾害提供丰富的物源条件,改变流域产汇流条件而易于成洪,在极端降雨作用下形成大规模泥石流事件。因此,山区强震后往往都伴随着一个较长时期的山洪泥石流活跃期<sup>[18,19]</sup>,地表灾害风险显著增加。在高寒地区,气候变暖加速冰川消融,促使冰湖扩张,使冰湖溃决与下游泥石流复合风险急剧增加。如2025年7月西藏吉隆县萨勒乡泥石流,由冰川快速消融与冰湖溃决共同触发。另外,大规模灾害往往形成“滑坡—堰塞湖—溃决洪水/泥石流”灾害链,通过级联放大效应<sup>[20]</sup>造成更大规

模、更大范围的山洪泥石流灾害。

### (4)风险区域不断外延

气候变暖致使山洪泥石流危险区呈现出垂直与水平双维度扩展的特征,人类活动加速向山地推进,山前和浅山地带人口经济密度快速增加,这两种因素叠加导致风险边界持续外推。在高山区,气温升高驱动冰川加速退缩和冰湖快速扩张,暴露出大量松散沉积物,原本相对稳定的高海拔地带逐渐演化为新的风险源。据统计,1990—2018年全球冰川湖数量、面积与体积分别增加约53%、51%和48%<sup>[21]</sup>,显著改变了冰湖—堆石坝—沟谷体系结构,潜在溃决洪水及次生泥石流影响范围明显扩大。同时,人类活动加剧风险暴露,2000—2015年,全球直接暴露于洪水风险的人口增加约5800万<sup>[22]</sup>,城市化进程持续加快的山区和山前城市大大增加了承灾体的规模和暴露度。总之,近年来,无论是山区还是城市,在气候变暖和人类活动增强的背景下,灾害风险趋于增加,风险范围不断外延,表现出新的灾害风险趋势和特征。

## 2 山洪泥石流灾害风险防控的薄弱环节

### 2.1 灾害风险防控现状

随着科技进步和防控理念的提升,山洪泥石流风险防控已从传统的工程防治逐步发展到融理论认识、风险评估、监测预警和综合治理于一体的系统性工程,风险防控取得了显著成效,形成了较完善的理论体系、技术标准和管理框架。

在理论研究方面,产汇流模式以及水文模型、物源非线性补给以及水—土耦合作用成灾机理与过程模拟研究取得显著进展<sup>[23,24]</sup>,量化了山洪泥石流灾害发生的物理过程和关键控制因素,认识了运动演化规律,建立了灾害运动模型和适用于小流域的水文模型。

在非工程措施防治技术与成效方面,风险评估技术从多指标统计定性评价发展至基于全动力过程风险分析的多尺度定量评估体系,建立了“区域—流域—灾点”多尺度山洪泥石流灾害(链)风险定量评估方法与技术体系<sup>[1,25]</sup>;在理论研究基础上,发展了全过程监测多级预警的监测预报预警技术,实现山洪沟泥石流从主要断面监测到形成、运动、致灾全过程、多要素的全流域监测体系与典型区示范应用<sup>[9,26]</sup>,并向前期预报、分阶段预警与群测群防的全套技术体系发展和健全<sup>[26]</sup>,逐渐建立物理模型与多源数据融合、机器学习相结合的山洪泥石流灾害预测预报预警方法和技术体系,显著提高了山洪泥石流灾害预测的准确性,成功研发了山地灾害风险模拟与险情预报预警系统平台,初步实现了山洪泥石流灾害从等级预报向精细化险情预报“0”到“1”的突破。

在工程措施防控技术方面,当前针对山洪沟泥石流工程防治技术已从传统的工程措施转变为生态措施与工程措施相结合的综合治理模式,并基于流域分区特征和消能减灾原理,完善了坡面物质调控—沟道物能调控—生态恢复的小流域灾害综合减灾配置体系,把工程减灾提升到生态减灾的新阶段,推动了基于近自然解决方案的坡—沟系统协同的山洪泥石流减灾原理发展。

## 2.2 薄弱环节

气候变化造成的极端高温、强降水等极端天气,导致山洪泥石流呈现出新的活动特点和发展态势,山洪泥石流灾害链生效应愈加显著,灾害复合风险和级联风险显著增强,给我国山洪泥石流灾害风险防控带来了新的挑战。

一是灾害演化理论研究有待进一步深化。传统山洪泥石流理论模型多关注单一灾害类型,且多数模型在特定区域表现良好但泛化能力受限,在多灾种耦合与链生演化过程方面仍显不足;基于物理过程的灾害动力学模型计算复杂度高,在大范围实时模拟中面临挑战,常需简化处理,导致对灾害过程中诸多中间环节和反馈机制的忽略,针对链生灾害的联动机制模拟能力较弱。

二是预测预警模型准确性难以满足精准减灾需求。目前针对山洪泥石流传统区域预报多以小时级甚至日级为单位,局地特征与区域模型参数的偏差导致预报结果难以准确到具体小流域,特别是山区局地暴雨预报的落区、雨强指标,仍然无法满足小流域山洪泥石流的灾害预警预防要求有准确位置、时间和规模的快速响应需求;地基监测预警技术则有成本高且在灾害期间监测设备受损难以持续可靠获取数据的局限;仍以灾害事件预警为主,含有潜在损失信息的风险预警仍处于发展初期。

三是基于历史记录的现有防控标准有待提升,绿色韧性减灾理论技术欠缺。当前山洪泥石流防治标准多是基于历史气象数据、灾害记录和防治技术积累制定的,随着全球极端气候事件频率和规模快速增加,山洪泥石流衍生的复合链式灾害规模超出现有认知水平和防治标准,亟需根据极端天气常态化背景下新的灾害风险特点,修改补充山洪泥石流防治标准,提升灾害防治的韧性技术。同时,目前灾害防治仍然以结构性工程措施为主,由于缺少生态减灾措施的理论技术研究成果支撑,较少考虑生态措施,绿色韧性减灾缺乏科技支撑。

四是减灾与发展融合不够,影响到高质量安全持续发展。在小流域资源开发、产业发展过程中忽视灾害风险与安全保障,导致重大人员伤亡和经济损失,甚至出现因灾致贫和因灾返贫现象,严重影响到发展进程。需要树立风险意识,把风险防控与发展经济有机结合,探

索减灾与发展融合的原理、技术、实施途径与多部门协同的管理机制。

## 3 山洪泥石流灾害风险防控的前沿科技问题

### 3.1 山洪泥石流对气候变化的响应机制

全球变暖正通过水—土—气多要素耦合重构山洪泥石流孕灾环境,但其响应的深层机理与可预测性仍是限制防灾减灾的瓶颈:

(1)山区陆—气互馈作用加剧极端降水的难预测性,增加灾害响应机理研究的难度。气候增温使大气持水能力按克劳修斯—克拉佩龙关系指数增长,配合地形抬升效应,可在短时内释放异常高雨强,高海拔冰雪与多年冻土消融加速,地表热通量与潜热释放改变山谷风与边界层结构,触发局地对流并放大降水空间异质性。多过程耦合导致极端降水突破传统基于历史序列的统计阈值,使山洪泥石流的起动临界条件呈现高度非线性且瞬态变化,亟需深入系统探究,以此揭示山洪泥石流形成对气候变化的响应机制<sup>[27]</sup>。同时,极端降水输入能量与沟床物质间的耦合响应窗口缩短,使“降雨—入渗—失稳—输移”链式机理难以被现有观测网络捕获,气候变暖情景下山洪泥石流灾害形成机理研究缺乏精细过程的数据支撑,给深入认知灾害响应机理带来困难。因此,未来需要研究陆—气耦合模式与分布式水文—地貌耦合机理,建立高分辨率模型,同时同化大气边界层、土壤水热及岩土强度等多源实时数据,从而增强气候变暖驱动的不确定背景下提升山洪泥石流灾害机理的可解释性,支撑山洪泥石流灾害对气候变化响应机理研究的深化。

(2)气候自然变率与极端事件叠加增加了灾害对气候响应的非线性和不确定性,灾害形成演化机理呈现新特征。气候系统年代际波动叠加人为增温,使山洪泥石流孕灾成灾环境出现“变率—极端—灾害链”耦合放大特点。过去百年,南亚夏季风在20世纪后半叶显著减弱<sup>[28]</sup>,导致区域降水减少;而21世纪又转为增强,降水回升,这种年代际振荡直接改变流域降水集中度、时长与空间分布,进而调控山洪泥石流的起动阈值与规模。在全球变暖背景下,极端强降水、超强台风及旱涝急转等复合型事件显著增多<sup>[29]</sup>,突破水文地貌临界态,使灾害物源瞬时松动破坏、沟道响应骤增;如西南季风及青藏高原南坡在厄尔尼诺/拉尼娜相位下的强对流降水显著增强,导致泥石流群发性风险陡升。年代际变率使暴露风险呈时间波动,而极端事件则可能打破基于历史阈值的经验模型,提升灾害链触发与放大机制的非线性和不确定性。因此,灾害响应规律研究不仅需关注气候长期趋势,还应重视自然变率与极端气候事件的耦合作

用,特别是地表过程对极端事件响应和灾害链触发与放大机制的非线性影响。未来需要探索灾害形成演化机理的新特征与新趋势,构建多尺度耦合模型,系统解析气候模态与极端事件对灾害链的非线性驱动机制,深入探索山洪泥石流对气候变化的响应规律。

### 3.2 高精度灾害风险评估与预测理论

气候变化下极端天气过程对山洪泥石流灾害影响愈加频繁与复杂,加之地震、林火等自然物理扰动以及人类活动快速扩张,灾害形成的产汇流过程、水—土—生耦合机制等不确定性大大增加,给当前山洪泥石流灾害的精准预测与风险评估带来极大的科学挑战。

(1)山区产汇流过程与水土耦合的致灾机理解析不够,限制了高精度风险评估指标和模型的科学构建。现有产流理论普遍沿用超渗/蓄满两种产流模式,忽略了复杂地形下“壤中暴流—地表径流”快速转换的非线性特征,致使临界雨强和累积雨量阈值与前期土壤孔隙发育和含水状态动态匹配性差,难以给出具有物理一致性的致灾触发判据;坡面—沟道系统的水—土(岩)—生三组分耦合缺乏统一力学框架,风化土层根系加筋与瞬态孔隙水压力的正反馈作用未被同步刻画,导致土体抗剪强度估算误差普遍较大,直接影响土体破坏失稳概率与物源量估算的可靠性;水—土(岩)—生要素的时空耦合特征(如土壤厚度、基岩风化程度和地表切割深度、植被类型)直接影响产汇流路径与灾害风险。然而,现有风险评价多依赖单一指标(如坡度或降雨量),尚未充分考虑极端气候条件下特大山洪泥石流形成—运动—致灾全物理过程的指标体系<sup>[2]</sup>,如岩土、水文、生态指标等,并缺乏多因子协同的动态评估,未能充分耦合水文过程与土体力学强度变化及其破坏过程的交互效应。特别是,特大山洪泥石流灾害链,形成条件复杂、运动过程演化模式多样、链条衔接物理过程一定程度的随机性等特点致使基于动力学的全过程模拟方法存在极大的不确定性。此外,微地形数据分辨率不足无法解析阶梯—深潭、堰塞体等关键微地貌的影响,使能量耗散与溃决链式过程被严重简化,这些机理与指标(参数)的双重缺口,严重限制了动力学全过程模拟的可靠性,使得堰塞湖溃决洪水、危险性、易损性模拟计算均存在不同程度误差,工程尺度风险评估精度显著降低<sup>[4]</sup>。因此,提高灾害风险评估精度的关键在于深化气候变化条件下山区产汇流过程与水土耦合致灾机理研究。

(2)气候变暖驱动复杂山区气象—水文过程极端性与复杂性增强,难以精准捕捉与预测特大山洪泥石流灾害(链)风险演化态势。全球气候变暖通过热力学与动力学途径重塑山区陆—气耦合系统,加剧了大气持水能力与局地对流强度的指数级增长,高海拔冰雪消融引发山

谷风场重构,导致短时强降水的空间异质性显著增强<sup>[30]</sup>,且陡峭地形导致的信号遮挡使危险沟道无法实现连续观测,存在监测数据的网络空间覆盖盲区。区域高分辨率数值天气预测模式的空间分辨率(通常为3~10千米)仍不足以准确捕捉复杂地形对对流触发的精细调制,关键地形特征(如山脊线走向、峡谷形态)引发的局地辐合抬升、背风波效应等,是触发短时强降雨的关键因素,但在模式中易被平滑处理,导致强降水中心位置与量级的预报误差。而降水预报误差(包括空间位置偏移、量级偏差)会通过水文模型非线性响应被非线性放大,进而通过水文模型输入的不确定性传递导致灾害预报精度显著降低。极端暴雨山洪诱发滑坡堵塞河道形成堰塞湖,进而引发溃决洪水,这种级联灾害的破坏力远超单一灾害,且其演化路径和概率具有高度不确定性,致使实时耦合模型需同步求解百万级别网格的坡面入渗—沟道侵蚀—滑坡堵塞—堵塞体侵蚀—堰塞溃决系统性不确定性增加,GPU并行仍难在业务时效内完成滚动更新灾害链风险的准确预测;特别是这一典型的复杂介质、多过程、多场耦合的动力机理、转换条件、转换过程等一系列机理问题仍有待深化,成为灾害链风险准确预测的根本制约。因此,深入认识气候变暖驱动下复杂山区气象—水文过程极端性与复杂性及其地表水土物质动力响应机制,是精准捕捉与预测特大山洪泥石流灾害(链)风险演化态势,提高灾害风险预测能力的理论基础。

### 3.3 流域灾害全过程物质—能量协同调控

气候变化通过改变流域物质结构的稳定性与外界物质能量输入,打破流域物质运移—能量传输的原始平衡,导致灾害演化路径、频率与规模的巨大变化,表现出高度复杂性和不确定性,需要研发有针对性的全过程协同调控理论与关键技术。

(1)山洪泥石流形成—运动—致灾过程的复杂性和不确定性增加,成为物质—能量协同调控原理和技术研发的重要制约因素。山洪泥石流全物理过程可概括为“孕育—运移—致灾”三阶段,其本质为小流域气象—水文—地形—下垫面耦合驱动下能量与物质的跨尺度转化和边界调控<sup>[4,31]</sup>。当前山洪泥石流形成理论模型主要关注山区小流域气象水文过程和侵蚀破坏过程,聚焦水与固体物质耦合作用及其时空变化。运动阶段通常伴随高浓度固—液流在沟道内发生高频能量—物质交换,造成床面冲刷、岸坡失稳、局部淤积壅水乃至堰塞成湖,堰塞体溃决将能量脉冲式外泄,导致灾害级联放大,风险急剧扩散,致灾能力增强。当前瓶颈在于能量转化路径与关键参数缺乏定量刻画,物质—能量耦合机理尚未贯通,难以实现全物理过程无缝衔接模拟与动态风险

精准评估。同时,坡面植被的保水固土、滞水阻沙功能和阶梯化河床的耗能机制虽在局部边界条件和局部尺度被证实<sup>[14,32]</sup>,可抑制冲刷与下切,但其在流域尺度不同结构和材料的系统调控原理仍碎片化,无法指导多措施协同的灾害防治工程优化设计,难以支撑流域范围防治措施优化配置与协同治理实践。加之气候变化导致的极端天气激发作用,山洪泥石流形成—运动—致灾过程的复杂性和不确定性进一步增加,给物质—能量耦合协同调控原理和技术的研发带来新的困难,制约着山洪泥石流综合防治理论的深化与关键技术突破。

(2) 尚未形成气候扰动下工程—自然协同韧性治理的理论支撑与技术体系,制约绿色韧性小流域灾害防治成效。气候变化驱动下孕灾环境多尺度演化使山洪泥石流呈现机制复杂、因素多样的非线性风险,面对流域山洪泥石流灾害的韧性防控需求,现有治理模式对气候变化驱动的多尺度环境扰动响应滞后,缺少基于地貌—生态演替规律的滚动更新和有效的极端灾害事件应对措施,难以实现灾害防治措施生命周期内的性能持续优化。特别是传统防护工程在实际运行中受特大山洪泥石流冲击冲刷作用易发生结构破坏、表面磨蚀等问题<sup>[32]</sup>,局部破损后自我恢复能力有限,现有修复技术主要依赖高成本人工结构干预,植被—微生物等生态减灾材料与传统岩土材料的适配机理、功能协调与效能耐久等考虑不足,自适应维护与快速补强技术尚未形成标准化解决方案。同时,当前韧性评估缺乏将物质—能量全过程协调机制纳入韧性评价的指标体系和模型,难以对“材料—工程—配置”全链条的恢复力与适应力进行动态评估,且流域尺度多措施协同配置尚缺乏统一理论基础与技术框架,无法量化自然—工程措施在时空上的最优配置。因此,深化工程—自然措施协同调控理论,集成工程—自然协同的山洪泥石流治理关键技术,构建满足“材料→工程→配置”安全—适宜双目标的山洪泥石流韧性治理模式,将成为应对气候变化条件下山洪泥石流灾害风险绿色韧性防控的有力抓手。

### 3.4 山区灾害风险管理与流域绿色发展

气候变暖下灾害风险新特征对既有管理模式提出系统性挑战,风险防控与绿色发展协同机制不健全,制约了流域人居安全与高质量发展,亟需破解减灾与发展难以协同的问题。我国山区灾害高风险区与经济社会发展滞后区的空间范围高度重叠,加剧了风险管理的难度。长期以来,从体制机制上,灾害风险管理与区域发展并未实现有效统筹,表现为“政出多门”的碎片化管理和资源配置低效,减灾与发展未统筹兼顾,导致灾害中高风险地区因灾返贫的风险仍然较高。传统以岩土工

程措施为主的防灾减灾体系,较少考虑气候变化与生态环境的影响,难以持续发挥作用;同时,山区产业规划布局较少考虑面向全流域的防灾减灾需求,以致山区减灾与发展存在脱节。在流域尺度,目前的灾害风险管理与流域发展未能形成协同的统筹治理格局。

因此,如何将灾害风险管理与流域特色产业发展有机结合,建立“减灾促发展、发展强减灾”的良性循环机制,科学布局不同灾害风险区的产业,形成覆盖灾前、灾中、灾后全过程的流域综合治理新模式,是气候变化下山区发展面临的新问题,需要深化“灾—地—人”绿色协同理论,构建多层级、多主体、全过程参与的灾害风险协同管理体系,整合资源要素形成合力,推动山区灾害风险防范从以工程措施为主走向“山水林田湖草生命共同体”的整体性治理和建设,探索减灾效益、经济效益与生态效益整体优化的山区灾害风险管理与流域绿色发展协同的韧性减灾模式,支撑安全—生态—发展有机协调的高质量发展。

## 4 应对策略

基于气候变化下山洪泥石流灾害防控的前沿科技问题,从灾害基础理论、灾害防控技术、灾害风险管理等方面,提出加强基础理论研究、研发风险评估与预警新技术、构建绿色减灾体系和多元协同风险管理机制等四方面的应对策略。

### 4.1 加强灾害风险演化基础理论研究,深化气候变暖背景下灾害新风险科学认知

气候变暖背景下,极端天气使得山洪泥石流灾害风险呈现出“频次增加、强度升级、链式效应凸显、风险区域外延”的新特征和新形势。因此,亟需开展灾害风险演化四个方面的研究:(1)加强极端气候事件的非平稳性特征及其对灾害水源和物源条件影响机理研究,探索气候—水文—地貌—物源耦合致灾机制,提升孕灾条件演化、灾害形成过和极端事件激发的前瞻性认知;(2)开展山洪泥石流灾害链的共性水文机理研究,深化流域、坡面、沟道多尺度水土耦合和上下游灾害链全过程演化机理,发展坡面—沟道系统的水—土—生—力—能耦合演化成灾的统一力学框架,完善山洪泥石流及其灾害链物理模型;(3)剖析气候因子、水文条件与山洪泥石流灾害物理属性和动力特性的耦合机制,量化气温升高、水源激增、人类活动多因子交织的复杂过程及其对灾害演化的影响规律,揭示气候模态与极端事件对灾害(链)的非线性驱动机制,系统认识气候变化条件下山洪泥石流灾害演化的新态势;(4)结合山区社会经济空间格局和发展规划,解析气候变暖导致山洪泥石流灾害风险格局的非线性扩展和突变规律,深化气候变暖背景下灾害新风险的科学认知。

## 4.2 推动灾害风险评估风险理论与预警技术发展,提升灾害风险预测预警水平

面对当前山洪泥石流风险防控面临的隐患识别难、预警精度低、应急协同弱的短板,亟需开展以机理突破为根基、以技术创新为抓手、以数据融合为纽带的“理论—技术—数据”新技术系统研究,实现灾害监测预警能力的系统性跃升,亟需开展工作包括:(1)破解隐患识别难题,突破灾害风险“静态评估”向“动态演化”的认知跃迁,攻克“气象—水文—地质—植被”耦合致灾理论,形成“微观监测—宏观识别”过程连续的理论体系,提升山洪泥石流预测能力;(2)提升山洪泥石流风险预警精度,解决传统水文水动力模型在复杂地形与非均质介质条件下的适用性问题,构建融合物理机理与数据智能的双驱动灾害预报理论与技术,突破传统等级预警模式,实现从灾害过程模拟到险情动态推演的精细过程预报预警;(3)突破灾害信息超前感知、偏远地区数据传输等瓶颈,推动智能工程装备、仪器设备与数字化决策系统集成应用,实现现场信息的智能自主研判与应急处置方案的快速生成,压缩灾害响应时间窗口,提升生命搜救和应急处置效率。

## 4.3 加强生态减灾技术研发,建立绿色减灾模式与技术体系

加强基于融合成本较低、适应性较强的自然解决方案(如植被柔性结构、阶梯—深潭系统等)的山洪泥石流物质—能量调控原理研究,发展灾害防控工程材料和结构设计中关键参数的确定方法,形成传统减灾工程措施与基于自然措施协同的山洪泥石流全过程调控及减灾功能提升理论,亟需开展工作包括:(1)研发全过程协同调控的稳坡固土、拦砂调峰、逐级消能等减灾功能提升关键技术,突破不同防治措施协同减灾功能平衡的技术瓶颈,实现工程结构—自然措施协同的山洪泥石流灾害物质—能量长期高效调控;(2)研究工程结构—自然措施在时间和空间尺度上的协同调控以及减灾措施的自适应维护技术方法,实现山洪泥石流调控措施自身补强加固与快速修复,提升灾害防控工程的恢复能力和耐久性;(3)针对气候变化极端天气导致超大规模山洪泥石流灾害暴发和成灾的新特点,梳理以往灾害防灾技术标准,剔除不适用的技术规范,进行安全—成本权衡分析,制定适宜的特大灾害风险防控策略,修订完善防治标准,形成系统的灾害防治韧性技术体系;(4)建立工程结构—自然措施协同调控灾害效果的定量评价指标体系和减灾功能精细化评估模型,构建考虑坡面—沟道、支沟—主沟、上游—下游的全流域治理措施协同优化配置方案。建立全流域的工程结构—自然措施协同减灾优化配置技术,打造物能高效可持续调控的山区小流域山

洪泥石流绿色减灾模式与行业标准。

## 4.4 构建多元—多主体—多层级灾害风险综合管理机制与范式,保障山区安全与高质量发展

针对气候变化下山洪泥石流风险的新态势和新特点,亟需开展多元—多主体—多层级灾害风险综合管理机制与范式研究:(1)强化“价值观—主体—层级”三维耦合的综合管理范式研究,在国土空间规划中融入风险认知,把“坡面—沟道—流域”跨尺度生态—岩土协同减灾工程嵌入国土整治全过程,依据河谷、山地不同地貌单元的孕灾环境、灾害发育和“三生”(生产、生活、生态)条件,进行全流域生态减灾与生产发展规划,把孕灾条件调控、灾害治理与产业发展相结合,匹配特色绿色产业链,使减灾投入转化为产业增值。(2)以社区为最小治理单元,积极实施“隐患点+风险区”双控与“治未灾”前置策略,通过组织、意识、技术、设施、设防五维提升,把风险管理前移到居民日常生活。(3)以国家—省—市—县—社区五级架构贯通灾前减缓、灾中应急、灾后恢复全周期,明晰各级权责,探索政府、企业、专业机构、社会组织、公众协同形成风险共治与利益共享机制,以及风险转移、补偿、科技转化、跨区域协调等新的政策工具。从而形成灾害多发区“山水林田湖草生命共同体”建设的综合管理机制和模式,有效防控山区灾害风险,提升区域韧性,助力山区安全与高质量发展。

## 5 结语

气候变暖正在重塑山地孕灾环境,导致山洪泥石流呈现“频次增加、强度升级、链式效应凸显、风险外延”的新特征,与此同时,清洁能源、重大交通、城镇建设等一系列关键工程与基础设施向复杂易灾山区快速聚集,使灾害风险防范与安全运维面临空前挑战。已有山洪泥石流理论认知和风险防控技术不能适应极端气候驱动下的灾害新特征和新风险,亟需系统研究气候变化对山洪泥石流的影响机制,深入认识山洪泥石流孕育条件变化和形成机理,揭示复合与链生巨灾风险的演化规律,利用天空地多源探测与AI等先进技术发展针对灾害新特征与新风险的防灾减灾救灾技术,建立自然科学—工程技术—社会管理融合的灾害风险管理机制,探索具有气候韧性的平安美丽山区理论、模式与技术体系,推动自然灾害风险科学创新发展,全面提升山区灾害风险防范能力。

## 参考文献

- [1] 崔鹏,邹强.山洪泥石流风险评估与风险管理理论与方法.地理科学进展,2016,35(2):137—147.
- Cui P,Zou Q. Theory and method of risk assessment and risk management of debris flows and flash floods. Progress in Geography,

- 2016,35(2):137—147. (in Chinese)
- [2] 张国涛,崔鹏,张晨笛. 中国山洪灾害防控理论与技术:进展、挑战与对策. 地理科学进展,2025,44(7):1315—1333.  
Zhang GT,Cui P,Zhang CD. Theory and technology of flash flood disaster prevention and control in China:Progress, challenges, and countermeasures. Progress in Geography,2025,44(7):1315—1333. (in Chinese)
- [3] 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. 气候变化研究进展,2025(4):449—460.  
Cui P,Wang Y,Zhang GT,et al. Disaster risk prevention under climate change:Current status, challenges, and scientific issues. Climate Change Research,2025(4):449—460. (in Chinese)
- [4] 崔鹏,张国涛,张晨笛. 壤中暴流水文机理与致灾效应. 地理学报,2023,78(7):1627—1640.  
Cui P,Zhang GT,Zhang CD. Hydrological mechanism and disaster-causing effects of subsurface stormflow. Acta Geographica Sinica,2023,78(7):1627—1640. (in Chinese)
- [5] 赵建飞,梁忠民,刘金涛,等. 山丘区变动产流层分布式水文模型. 水科学进展,2022,33(3):429—441.  
Zhao JF,Liang ZM,Liu JT,et al. Variable runoff generation layer distributed hydrological model for hilly regions. Advances in Water Science,2022,33(3):429—441. (in Chinese)
- [6] 崔鹏,郭剑. 沟谷灾害链演化模式与风险防控对策. 工程科学与技术,2021,53(3):5—18.  
Cui P,Guo J. Evolution models,risk prevention and control countermeasures of the valley disaster chain. Advanced Engineering Sciences,2021,53(3):5—18. (in Chinese)
- [7] 张晨笛,林永鹏,徐梦珍,等. 怒江干流堰塞坝特征及稳定河床机制. 水利学报,2019,50(10):1165—1176.  
Zhang CD,Lin YP,Xu MZ,et al. Morphological characteristics and mechanism for riverbed stabilization of the barrier dams in Nujiang River. Journal of Hydraulic Engineering,2019,50(10):1165—1176. (in Chinese)
- [8] 夏湘朕,胡桂胜. 强震区滑坡-泥石流灾害链成灾特征、机制与演化过程. 安全与环境工程,2025,32(3):243—253.  
Xia XZ,Hu GS. Characteristics,mechanisms and evolution of landslide-debris flow geohazard chain under strong earthquake area. Safety and Environmental Engineering,2025,32(3):243—253. (in Chinese)
- [9] 雷雨,崔鹏,蒋先刚. 泥石流作用下砌体房屋破坏机理与结构优化. 四川大学学报(工程科学版),2016,48(4):61—69.  
Lei Y,Cui P,Jiang XG. Failure mechanism and structure optimization of masonry building due to debris flow impact. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition),2016,48(4):61—69. (in Chinese)
- [10] Ombadi M,Risser MD,Rhoades AM,et al. A warming-induced reduction in snow fraction amplifies rainfall extremes. Nature,2023,619(7969):305—310.
- [11] IPCC. Climate Change 2022:Impacts,adaptation, and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge,UK and New York,NY,USA:Cambridge University Press,2022.
- [12] 陈宁生,周海波,胡桂胜. 气候变化影响下林芝地区泥石流发育规律研究. 气候变化研究进展,2011,7(6):412—417.  
Chen NS,Zhou HB,Hu GS. Development rules of debris flow under the influence of climate change in Nyingchi. Advances in Climate Change Research,2011,7(6):412—417. (in Chinese)
- [13] Paprotny D,Tilloy A,Treu S,et al. Attribution of flood impacts shows strong benefits of adaptation in Europe since 1950. Science Advances,2025,11(33):eadt7068.
- [14] Prein AF,Liu CH,Ikeda K,et al. Increased rainfall volume from future convective storms in the US. Nature Climate Change,2017,7(12):880—884.
- [15] Evans SG,Guthrie RH,Roberts NJ,et al. The disastrous 17 February 2006 rockslide-debris avalanche on Leyte Island,Philippines:A catastrophic landslide in tropical mountain terrain. Natural Hazards and Earth System Sciences,2007,7(1):89—101.
- [16] Cao X,Watanabe M,Wu RG,et al. The projected poleward shift of tropical cyclogenesis at a global scale under climate change in MRI-AGCM3.2H. Geophysical Research Letters,2024,51(3):e2023GL107189.
- [17] Zhao HK,Zhao K,Klotzbach PJ,et al. Interannual and interdecadal drivers of meridional migration of western north Pacific tropical cyclone lifetime maximum intensity location. Journal of Climate,2022,35(9):2709—2722.
- [18] 崔鹏,邓宏艳,王成华,等. 山地灾害. 北京:高等教育出版社,2018.  
Cui P,Deng HY,Wang CH,et al. Mountain Hazards. Beijing:Higher Education Press,2018. (in Chinese)
- [19] 靳文,张国涛,邹强,等. 震后泥石流活跃期的新认识——以四川汶川“8·20”灾害事件为例. 山地学报,2019,37(5):787—796.  
Jin W,Zhang GT,Zou Q,et al. A new understanding of the activity behavior of post-earthquake debris flow;Taking the “8·20” event in Wenchuan,Sichuan,China as an example. Mountain Research,2019,37(5):787—796. (in Chinese)
- [20] Cui P,Zhou GGD,Zhu XH,et al. Scale amplification of natural debris flows caused by cascading landslide dam failures. Geomorphology,2013,182:173—189.
- [21] Shugar DH,Burr A,Haritashya UK,et al. Rapid worldwide growth of glacial lakes since 1990. Nature Climate Change,2020,10(10):939—945.
- [22] Tellman B,Sullivan JA,Kuhn C,et al. Satellite imaging reveals increased proportion of population exposed to floods. Nature,2021,596(7870):80—86.
- [23] Frey P,Church M. Bedload:A granular phenomenon. Earth Surface Processes and Landforms,2011,36(1):58—69.
- [24] Hu XB,Jiang YJ,Ning P,et al. A hydrodynamic-based physical unified modeling for simulating shallow landslide local failures, mass release and debris flow run-out extent behavior. Water Resources Research,2024,60(5):e2023WR036289.
- [25] Lei Y,Gu HH,Cui P. Vulnerability assessment for buildings exposed to torrential hazards at Sichuan-Tibet transportation corridor. Engineering Geology,2022,308:106803.
- [26] Hürlimann M,Coviello V,Bel C,et al. Debris-flow monitoring and warning:Review and examples. Earth-Science Reviews,2019,199:102981.
- [27] Qie JZ,Favillier A,Liébault F,et al. A supply-limited torrent that does not feel the heat of climate change. Nature Communications,2024,15:9078.
- [28] Roxy MK,Ritika K,Terray P,et al. Drying of Indian subcontinent by rapid Indian Ocean warming and a weakening land-sea thermal gradient. Nature Communications,2015,6:7423.
- [29] Turner AG,Annamalai H. Climate change and the south Asian summer monsoon. Nature Climate Change,2012,2(8):587—595.
- [30] 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(2):286—300.

- Wang Y, Wang H, Cui P, et al. Disaster effects of climate change and the associated scientific challenges. *Chinese Science Bulletin*, 2024, 69(2):286—300. (in Chinese)
- [31] Zhang GT, Cui P, Yin YZ, et al. Real-time monitoring and estimation of the discharge of flash floods in a steep mountain catchment. *Hydrological Processes*, 2019, 33(25):3195—3212.
- [32] 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. *水力发电学报*, 2024, 43(2):1—14.
- Qi SW, Liu FC, Xu MZ, et al. Preliminary study on principles and methods of ecological-geotechnical engineering coordinated disaster reduction for small watersheds. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2024, 43(2):1—14. (in Chinese)

## Evolutionary Characteristics and Frontier Scientific Issues in Flash Flood and Debris Flow Disasters Risk under Climate Change

Peng Cui<sup>1, 4†\*</sup>    Guotao Zhang<sup>1†</sup>    Yan Wang<sup>1, 4</sup>    Jiao Wang<sup>2, 4</sup>    Chendi Zhang<sup>1</sup>  
 Chunping Tan<sup>3</sup>    Chaoyue Li<sup>1</sup>    Zili Wang<sup>2</sup>    Chaodong Zhou<sup>1</sup>

1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Engineering Resilience, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2. State Key Laboratory of Mountain Hazards and Engineering Resilience, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610213, China

3. Institute for Disaster Management and Reconstruction, Sichuan University-The Hong Kong Polytechnic University, Chengdu 610207, China

4. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China

**Abstract** Climate warming intensifies the interactions among Earth's spheres and accelerates surface process dynamics, thereby exacerbating the complexity and uncertainty of flash flood and debris flow disasters. This phenomenon expands the scope and targets of disaster threats, presenting a persistent challenge and significant test for global disaster prevention, mitigation, and relief efforts in the long term. This paper systematically analyzes the emerging characteristics of flash flood and debris flow disasters under climate change, including increased frequency, enhanced intensity, pronounced chain effects, and extended risk peripheries. It identifies critical shortcomings in traditional disaster risk prevention systems regarding theoretical depth, early warning accuracy, green resilience technologies, and integration of management-development frameworks. The study proposes four frontier scientific issues for disaster risk prevention under evolving climatic conditions: response mechanisms of flash flood and debris flow to climate change, high-precision disaster prediction and risk assessment theories, watershed-scale material-energy synergistic regulation mechanisms across disaster lifecycles, and integrated risk prevention strategies coordinating mountainous disaster management with watershed ecological development. Furthermore, addressing new risk characteristics, disaster reduction demands, and technological frontiers caused by climate change, this paper recommends strengthening research on formation and evolution mechanisms of flash flood and debris flows under climate-altered disaster-prone environments, developing “theory-technology-data” driven disaster risk prediction and early warning systems, advancing engineering-natural synergistic green disaster mitigation models, and establishing multi-stakeholder collaborative risk prevention mechanisms that organically integrate disaster reduction with development objectives in small mountainous watersheds. These strategies aim to provide theoretical foundations and technical support for precision disaster risk control and high-quality development in mountainous regions under evolving climatic conditions.

**Keywords** flash flood and debris flow; climate change; risk evolution; risk prevention and control; green disaster reduction

**崔 鹏** 中国科学院院士, 巴基斯坦外籍院士, 中国科学院地理科学与资源研究所自然灾害研究中心研究员。主要从事山洪泥石流、滑坡、堰塞湖、冰雪崩等山地灾害与水土保持领域的研究。

**张国涛** 中国科学院地理科学与资源研究所自然灾害研究中心副研究员, 山地灾害防治与减灾联合实验室副主任。主要从事山洪泥石流水文机理与灾害防控理论研究。

(责任编辑 王磊 张强)

† Contributed equally as co-first authors.

\* Corresponding Author, Email: pengcui@imde.ac.cn