

# 横断山区暴雨型山洪灾害发育特征与形成模式

李怡帆<sup>1,2</sup>, 张晨笛<sup>1</sup>, 张国涛<sup>1</sup>

(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. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049)

**摘要:** 横断山区是中国山洪灾害发育最集中、灾情最严重的区域之一,也是西南重大工程、美丽乡村建设的重点部署区。然而,现有研究对横断山区的山洪灾害发育特征与形成模式尚缺乏系统梳理和总结,制约了西南山区防洪理论和技术体系的发展完善。本文聚焦横断山区山洪灾害形成、运动、成灾的物理过程,提炼了横断山区山洪的主导孕灾条件(多重湿润季风环流条件、高位能地形地貌条件与高异质性下垫面条件)和灾害发育特征(时空分异、能量集中、链生性与群发性),从灾害全过程的视角提出了横断山区山洪灾害的三大形成模式:高水力坡降主导的生—水—土耦合的山地产汇流模式、山洪运动过程的强水沙耦合运动模式、承灾体较高暴露度导致灾害损失严重的成灾模式。最后,基于现有研究存在的问题提出了横断山区山洪灾害研究面临的四大未来科学挑战,以期推动横断山区乃至全国的山洪理论体系建设、区域山洪灾害风险精准评估与精细化预警预报等防灾减灾基础研究工作。

**关键词:** 横断山区;暴雨型山洪;孕灾条件;灾害发育特征;形成模式

DOI: 10.11821/dlxb202403004

## 1 引言

横断山区指中国川滇藏境内由一系列近南北走向、东西相间的并列岭谷组成的广大地区<sup>[1]</sup>。本文中,横断山区具体北以昌都—德格—马尔康—若尔盖为界,西至类乌齐—察隅—腾冲一线,南临保山—南涧—攀枝花—寻甸偏北,东抵文县—北川—都江堰—天全—永善—会泽以西,包括中国四川西部、西藏东南部、云南北部、青海与甘肃部分地区(图1),总面积约42万km<sup>2</sup><sup>[2]</sup>。

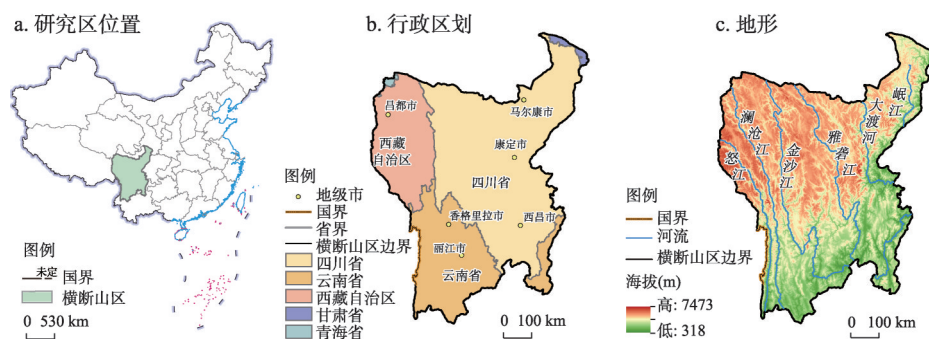
横断山区西邻青藏高原,东连四川盆地,横跨西南一、二级地形阶梯,是中国唯一兼具太平洋和印度洋水系的地区,区内横断山脉是中国最长、最宽和最典型的南北向山系群<sup>[3]</sup>。该区域地质构造、地形地貌、气候水文与土壤植被条件复杂,是中国环境异质性及生物多样性最为丰富的自然地理单元之一<sup>[4]</sup>。同时,区域内崩塌、滑坡、泥石流和山洪等灾害频发且分布广泛<sup>[5]</sup>,是中国地质灾害最为严重的区域之一,区域社会经济高质量发展受到严重制约。

收稿日期: 2023-06-30; 修订日期: 2023-12-18

**基金项目:** 第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0903-02); 国家重点研发计划(2022YFC3002902); 国家自然科学基金项目(42201086) [Foundation: The Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research Program, No.2019QZKK0903-02; National Key R&D Program of China, No.2022YFC3002902; National Natural Science Foundation of China, No.42201086]

**作者简介:** 李怡帆(1998-), 女, 山东滨州人, 博士生, 主要从事山洪灾害规律研究。E-mail: liyf.20b@igsnrr.ac.cn

**通讯作者:** 张晨笛(1988-), 男, 河北保定人, 博士, 助理研究员, 主要从事山洪灾害及山区河流地貌演变研究。  
E-mail: zhangchendi@igsnrr.ac.cn



注：基于自然资源部标准地图服务网站GS(2020)4619号标准地图制作,底图边界无修改。

图1 横断山区概况

Fig. 1 Overview of the Hengduan Mountains

区内河流水系发达、地势落差大,具有极高水资源与水能资源禀赋。长江上游支流雅砻江、大渡河是南水北调西线工程规划选址地<sup>[6]</sup>,中国十三大水电基地中五个位于横断山区<sup>[7]</sup>,金沙江、雅砻江流域等清洁能源基地是“西电东送”的主力电源点,将有力支持“双碳”目标实现。在建的川藏铁路雅安至林芝段穿过横断山区,是川藏铁路线路中地形起伏最剧烈、工程地质条件最复杂、建设难度最大的路段<sup>[8]</sup>。随着多项国家重大战略工程落地横断山区,探明区内自然环境特点、总结区域规律的科学及工程意义不断突显。

山洪是世界范围内危害最为严重的自然灾害之一<sup>[9]</sup>,具有点多面广、突发性强、破坏力强等特点,严重威胁附近居民生命财产安全<sup>[10-11]</sup>。根据水利部《中国水旱灾害防御公报》,2000—2021年山洪灾害共造成16769人死亡失踪,占全国因洪涝灾害死亡失踪人口的66.4%<sup>[12]</sup>。横断山区是中国山洪灾害最集中、灾情最严重的区域,每年灾情远超全国均值<sup>[13]</sup>。在全球气候变化背景下,极端气候事件发生频率增大,高寒区土壤活动层增厚、冰川融水径流增加<sup>[14]</sup>,叠加横断山区小流域较大地形梯度,这一区域山洪发生的规模与频率均呈增加趋势,灾害威胁也随之增大<sup>[15]</sup>。

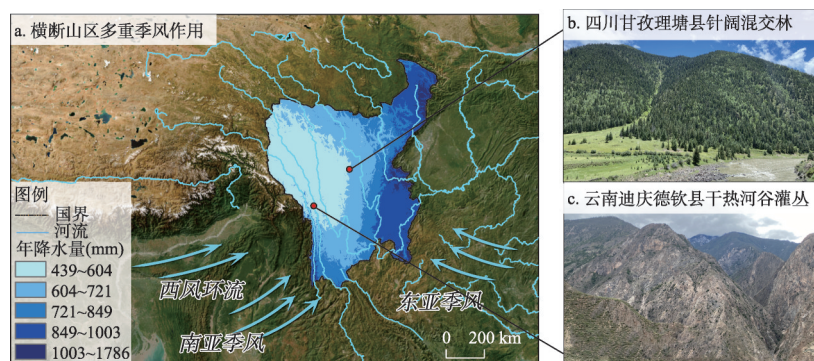
山洪形成、运动及成灾机制复杂,为典型的多因素、多尺度、多过程复杂问题<sup>[10, 16]</sup>,受区域环境特征影响显著<sup>[17-18]</sup>。在横断山区高时空异质性的区域背景下,区内山洪灾害的特点及成灾机制独特且复杂。然而,这些特点和机制尚未系统梳理提炼,制约了区域内山洪灾害机理挖掘、预报预警技术研发、防灾减灾体系建设。由此,本文从气候、地形地貌、下垫面条件3个方面阐明横断山区利于山洪形成的孕灾条件,提炼该区域山洪时空分异、能量集中、链生性与群发性的特点,总结生一水一土耦合的山地产流模式、强水沙耦合运动模式与高暴露成灾模式的山洪灾害形成模式,最后提出横断山区山洪灾害研究的4个未来科学挑战。

## 2 横断山区山洪孕灾条件

### 2.1 多重湿润季风环流条件

横断山区是典型的多重季风环流气候区。该区跨越中亚热带与高原温带,年均气温13℃,年均降水量982.3 mm<sup>[19]</sup>,多年平均降雨量最高可达中国其他典型山区的3.7倍,整体水资源丰沛<sup>[20]</sup>。降水特点表现为夏多冬少,水汽来源具有显著的季节差异<sup>[21]</sup>,夏季丰富的水汽源于孟加拉湾和南海的西南季风与东南季风输送,冬季为数不多的降水主要由西风带南支急流主导(图2)。1979年以来,横断山区东南季风指数与西南季风指数呈

波动变化趋势<sup>[22]</sup>, 区域变暖趋势显著, 极端高温事件强度增加, 降水量与极端降水事件强度变化不显著<sup>[19, 21]</sup>。在大尺度环流系统与起伏地形共同作用下, 降水量空间差异大、季节分配不均、日变化明显<sup>[23]</sup>: 年降雨量从东南、西南两侧向金沙江腹地减少(图2); 湿季(5—10月)降雨量占全年的90%左右<sup>[24]</sup>; 夏季平均夜雨率可达50%以上, 是典型的夜雨区<sup>[25]</sup>。山区地形热力效应下山地环流结构复杂, 高原山地局地小气候与强对流天气易引起突发性暴雨<sup>[26]</sup>, 诱发山洪泥石流等山地灾害。



注: 图b~c均由作者于2022年8月25日拍摄。

图2 横断山区多重季风作用及典型植被景观对比

Fig. 2 Effect of multiple monsoons on the Hengduan Mountains and comparison of typical vegetation landscape

高山深谷的地貌“狭管”效应与河谷局地环流共同作用形成了区域特有的干热河谷小气候区<sup>[27]</sup>, 广泛分布于南北走向的三江地区(怒江、澜沧江、金沙江), 镶嵌于湿润、半湿润环境中的深切河谷局部, 呈干热气候特征与旱生植被特征的河谷生态景观<sup>[28]</sup>。“干”“热”特征主要表现为干季持续时间长, 地温、气温高, 最冷月平均气温高于12℃, 最暖月平均气温24~28℃, 年平均积温超过7000℃<sup>[27]</sup>。年均蒸发量(2750~3850 mm)约为年均降水量(600~800 mm)的4~6倍, 年平均干燥度2.0以上<sup>[27]</sup>。雨季降水以蒸散和地表径流形式快速流失, 干季“石砾化”严重的裸露地表吸热升温、水分蒸发剧烈<sup>[28]</sup>, 土壤保水性能较差<sup>[29]</sup>。植被群落以稀树灌木草丛为明显特征<sup>[27]</sup>, 存在季节性的自然荒漠化过程。严重的细沟侵蚀与坡面侵蚀<sup>[30]</sup>叠加高陡边坡在长期风化下产生的丰富堆积物, 使干热河谷成为特大型山洪泥石流高发区<sup>[31]</sup>。

## 2.2 高位能地形地貌条件

横断山区最突出的地貌特征为并行发育的南北走向高耸山脉与高能量河流, 水系沿构造线发育, 区域横断面(东西向)中高山深谷交替出现(图3b)。横断山区地势整体西北高、东南低(图1c), 随青藏高原隆升与区域内高能量河流侵蚀下切, 岭谷高差不断扩大, 平均可达1000~3000 m, 局部高差甚至超过5000 m(如四姑娘山、贡嘎山等<sup>[3]</sup>)。高位能、大梯度地形造成该区域气温递减率是中国其他典型山区的1.4~1.6倍<sup>[32]</sup>, 塑造了典型的植被垂直带谱特征。

印欧板块碰撞产生的巨大向北作用力导致拉萨羌塘地块东向挤出<sup>[23]</sup>, 造成位于青藏高原东南缘的横断山区构造活动剧烈。在横断山区及其周缘发育有6条主要区域性构造界线(图3a), 其中南金沙江缝合带、双湖澜沧江缝合带与班公怒江缝合带区域软弱岩石发育、边界断裂新活动性强<sup>[33]</sup>, 有利于河流侵蚀下切, 分别对应发育金沙江、澜沧江以及怒江河谷。



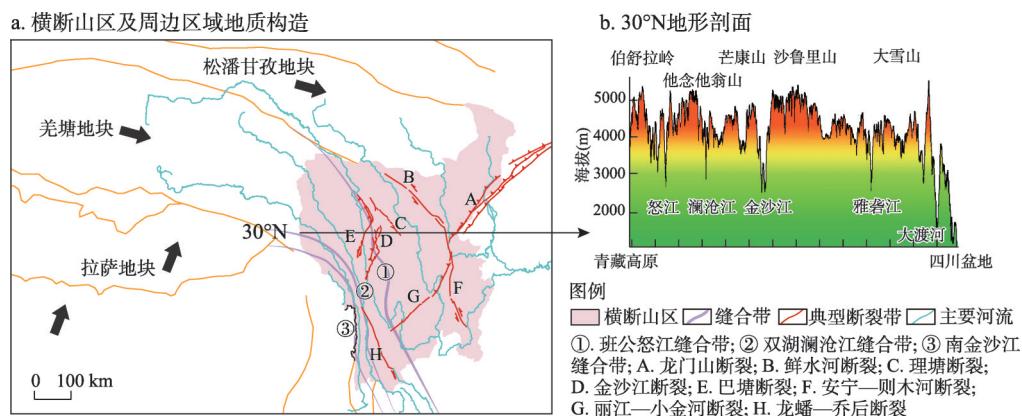


图3 横断山区及邻区地质构造单元空间分布与30°N地形剖面

Fig. 3 Spatial distribution of geological tectonic units in the Hengduan Mountains with adjacent areas and topographic profile in 30°N section

横断山区的河流水系具有较独特的形态特征。区域内几条大河干流的纵剖面在青藏高原东南缘区域部分多呈上凸形态<sup>[34-37]</sup>。几条主要河流的长度比(约为2.6)均大于全球河网几何结构规律数值(约为2.1)<sup>[38-39]</sup>,表明区内河网处于不平衡不稳定状态。该状态可能与青藏高原东南缘差异隆升<sup>[40]</sup>、湿润季风造成的持续强降雨<sup>[36, 41-42]</sup>等因素有关,此外,堰塞湖形成及高能溃决洪水对水系迁移与河流形态演变产生重要影响<sup>[37]</sup>。构造运动与地貌动力过程的复杂相互作用导致横断山区河网与中国其他山区差异显著。

区域内的下切河流比降较大,怒江、澜沧江、金沙江干流平均比降分别达2.79‰<sup>[37]</sup>、2.4‰<sup>[43]</sup>与1.76‰<sup>[44]</sup>,滇藏边界附近怒江主河局部坡降甚至超过1%。同时河流横向约束较强(如怒江干流平均河宽仅92.38 m),河谷一般呈现“V”型和超“V”型<sup>[37]</sup>。横断山区内几条大河不断下切引发的溯源侵蚀深刻影响着其支流的河道形态及流域地貌特征,三江地区一级河流平均比降均达10%以上<sup>[39]</sup>,小流域平均坡度、加权平均坡度与溪沟平均比降等均显著高于其他区域<sup>[45]</sup>,为山洪形成运动提供了较有利的地形条件。

### 2.3 高异质性地垫面条件

横断山区大经纬跨度、大地形梯度与强交互作用季风使区域内水热条件多样,叠加基岩母质孕育多样性较高的植物群落与土壤类型(图4a~4b),导致区内下垫面条件空间异质性强,水平分异与垂直分异较显著。由南至北的温湿递减使区域植被整体上呈现出南部优于北部的特点,海拔落差造就的植被垂直带谱由低到高表现为常绿阔叶林与干旱草灌、针叶林与暗针叶林、灌丛草甸、流石滩与冰雪带<sup>[2, 46]</sup>,同时,植被垂直带谱呈现显著的坡向分异规律<sup>[47]</sup>。

常绿针叶林与灌草镶嵌类为横断山区主要植被类型<sup>[2]</sup>,分别分布在以海拔4000 m为界的低海拔和高海拔区域。全区土壤类型共31种,棕壤、红壤与高山草甸草原土为主导类型,土壤质地以砂壤土为主。横断山区山洪灾害点主要分布的自然植被下垫面为针叶林与灌草镶嵌类,对应发育了山洪灾害多发的土壤类型,如红壤、褐土、紫色土等(图4c~4d)。常绿针叶林以陡峭湿润森林为主,植被生长良好,覆被褐土、黄棕壤、暗棕壤等,土层及枯落层较厚,土体结构松散,土壤丰富大孔隙结构为壤中暴流产生创造了水文连通条件<sup>[48]</sup>,加速坡面—沟道汇水过程,是山洪灾害发育的主要下垫面类型之一。灌草镶嵌类以矮草为主,如干热河谷稀树灌木草丛的乔灌盖度仅3%~6%,植被郁闭度低,大面积土壤与基岩裸露<sup>[30]</sup>,广泛发育红壤、燥红壤、紫色土等土壤类型,土壤瘠薄、入

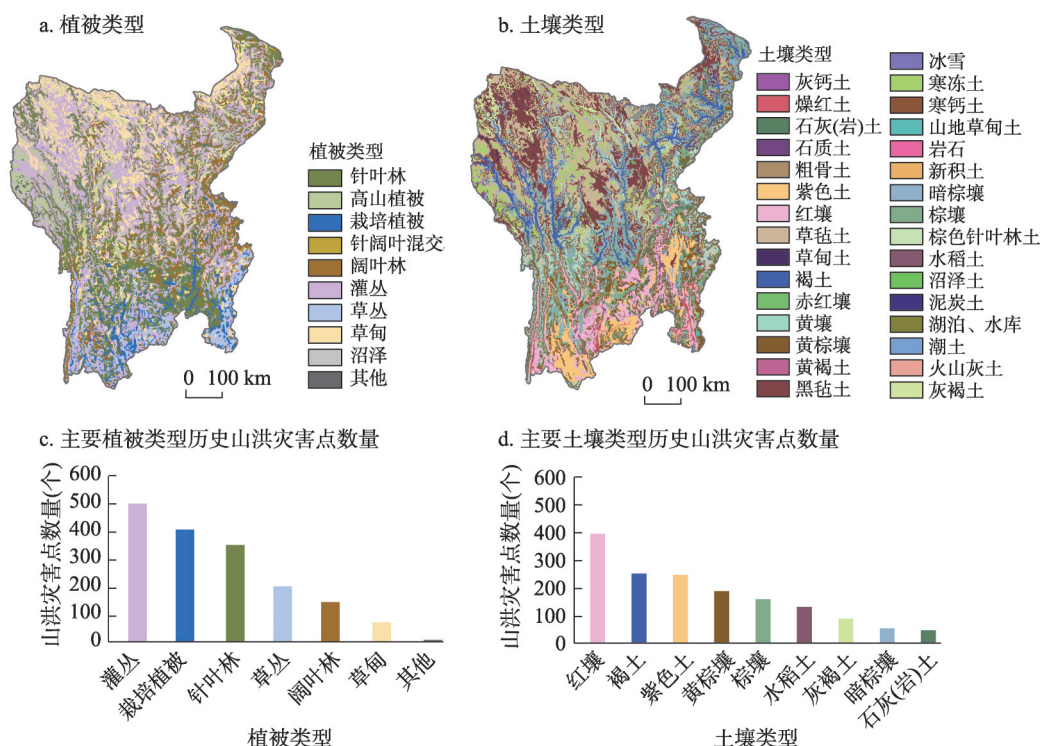


图4 横断山区植被与土壤类型及各地表环境因子历史山洪数量分布直方图

Fig. 4 Vegetation and soil types in the Hengduan Mountains and frequency distribution histograms for historic flash floods with different surface environmental factors

渗性能较差, 表面发育坚硬致密风化壳或土壤结皮, 导水性较弱<sup>[29]</sup>, 多以地表超渗产流为主、径流含沙量较高<sup>[49]</sup>, 同样是山洪与泥石流灾害高发区<sup>[31]</sup>。

### 3 区域山洪灾害发育特征

#### 3.1 时空分异

季风气候作用下横断山区山洪呈显著的时空分异特征: 雨季多发、夜间多发, 山洪区沿深切峡谷带状分布。横断山区山洪灾害集中发生于5—9月, 其中夏季(6—8月)发生的数量可达全年总量80%以上<sup>[50-51]</sup> (图5a)。而且, 横断山区山洪灾害发生频率呈逐年波动上升趋势<sup>[51]</sup>, 1979—2015年山洪事件数量以12次/10a速率增加<sup>[50]</sup>。特别是汶川地震等强震及其次生灾害后, 下垫面条件剧变, 山洪发生的临界雨量较震前降低了45%~67%<sup>[52]</sup>, 规模及发生频率均显著增加。横断山区夜雨性使最大小时雨量频繁出现于夜间或凌晨, 导致洪水位夜间暴涨。如2018年云南麻栗坡与2020年四川冕宁山洪灾害, 区域性强降雨过程出现于23时至次日06时<sup>[26, 53]</sup>。区域山洪呈现南部多于北部的空间格局<sup>[50]</sup>, 山洪灾害空间集聚特征明显, 主要集中于海拔3500 m以下的三江并流高山峡谷区、云贵高原及四川盆地周边山地单元<sup>[51, 54]</sup> (图5b)。

横断山区山洪的时空分异特征是区域强降雨时空分布格局与大梯度地形综合作用的结果。横断山区夏季降雨呈从南至北递减趋势, 多雨区主要集中于区域东南与西南。高

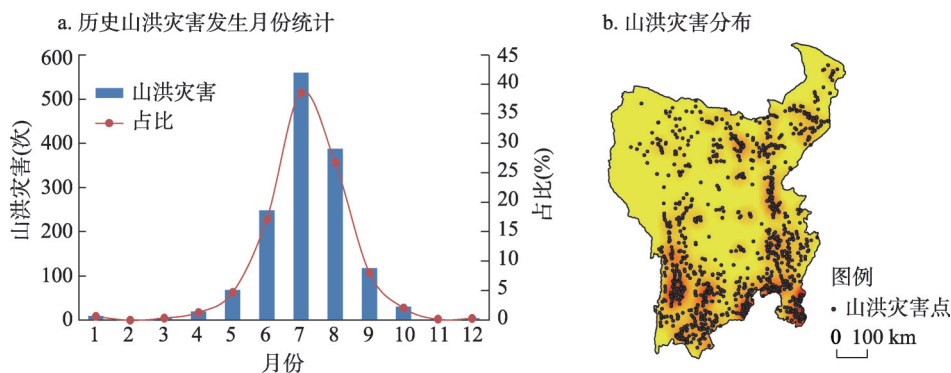


图5 横断山区历史山洪时间和空间分布

Fig. 5 Temporal and spatial distributions of historic flash floods in the Hengduan Mountains

山峡谷区的地形特点进一步导致局地强对流天气频发，区域河流干支流较大的比降塑造了各级小流域集水区陡峻的地形，提供了有利于山洪发育的孕灾背景组合。

### 3.2 能量集中

横断山区山洪灾害具有暴涨陡落、历时短暂、峰值较高、暴发时能量集中的特性。短历时表现为降雨—径流响应过程迅速，河道水位上涨快速并伴随有较高流速，一般涨水过程仅持续10~30 min。如2021年四川黑水县“7·14”山洪泥石流灾害冲击历时仅15 min，2021年四川营山县“8·7”山洪灾害中河道水位涨至堤顶仅10 min左右。水流能量一般指单宽水流能量，按式(1)计算<sup>[37]</sup>。横断山区主要河流小流域强降雨期间流量显著增大，山洪洪峰流量相较于枯水期流量最高可提高360倍<sup>[55-56]</sup>。山区主要河流横向约束较强、河道宽度较窄，强降雨期间流量显著增大，同时小流域支流坡降较高<sup>[45]</sup>。结合式(1)可知，山洪条件下区域小流域单宽水流能量较集中。急剧增加的流量在束窄陡峻河道中运动最高流速可达4~10 m/s<sup>[55-58]</sup>。2010年四川文家沟（流域面积7.7 km<sup>2</sup>，平均河床坡度33.78%）大规模山洪泥石流平均流速9.89 m/s，流量达1108 m<sup>3</sup>/s<sup>[57]</sup>，单宽流量44.32 m<sup>2</sup>/s，单宽水流能量达32.94 N/(m/s)；2010年四川红椿沟（流域面积5.35 km<sup>2</sup>，平均河床坡度35.8%）山洪泥石流平均流速为8.67 m/s，流量达745.76 m<sup>3</sup>/s，单宽流量29.83 m<sup>2</sup>/s，单宽水流能量为22.11 N/(m/s)，洪流的瞬时冲击力达到3225 t<sup>[55]</sup>。

$$p_b = \gamma q S_w, \quad q = Q/W_D \quad (1)$$

式中： $p_b$ 为单宽水流能量； $\gamma$ 为水容重； $q$ 为单宽流量； $Q$ 为流量； $W_D$ 为河宽； $S_w$ 为坡降。

山洪高度集中的水流能量一方面使水流本身具有较强冲击力、难以防范，另一方面使水流具有较高挟沙能力，从而可能引起河床剧烈冲刷下切、大量粗颗粒甚至漂石起动，水沙耦合运动将在下游造成严重的人员伤亡与经济损失。

### 3.3 链生性

山洪灾害的链生性是指暴雨型山洪诱发的，灾害固液物质运动过程中出现多灾种传递转化、链式演进的特性<sup>[59]</sup>。横断山区高山深谷区地形复杂、气候分域显著<sup>[60-61]</sup>，坡面、沟道堆积物类型多样，为山洪泥石流的灾害链生过程提供了能量条件和物质条件。山洪较高的能量可驱动物源起动<sup>[61]</sup>，强震则加剧区域灾害链生特征<sup>[62-63]</sup>。具体表现为，洪水运动过程不断吸收流域内物源演化形成泥石流，泥石流在高速运动过程中刮铲、侵蚀沟底及坡脚，可能进一步诱发坡岸失稳与滑坡灾害。崩滑物质与泥石流携带巨木、漂石淤堵河道可能形成堰塞坝—湖<sup>[64]</sup>，造成上游回水淹没成灾，一旦溃决将引起流量激增，甚至



可能形成峰值流量达  $1 \times 10^4 \sim 2 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{s}$  的高强度溃决洪水, 威胁下游数千米甚至数百千米河道范围<sup>[65-66]</sup>, 形成“山洪—泥石流—(滑坡)—堰塞湖—溃决洪水”的典型灾害链过程。横断山区强烈构造隆升与大梯度地形诱发较多大型、巨型古滑坡<sup>[8]</sup>, 目前多处于暂时稳定状态。高能溃决洪水冲击古滑坡坡脚可能引起古滑坡复活再度堵江, 进一步提升溃决洪水风险和影响范围<sup>[59]</sup>。此时, 灾害链延伸为“山洪—泥石流—堰塞湖—溃决洪水—古滑坡复活—堵江—溃决洪水”(图6)。如2020年四川省丹巴县梅隆沟山洪泥石流阻塞小金河形成堰塞湖, 淹没上游村镇道路与水电设施, 随后堰塞坝溃决洪水冲刷古滑坡坡脚, 导致滑坡整体变形与前缘滑动, 冲毁下游140户房屋、1座电厂<sup>[65-67]</sup>。

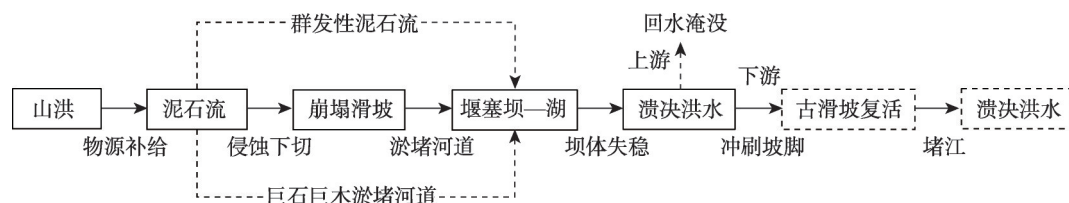


图6 横断山区山洪灾害链生过程

Fig. 6 Disaster chain process started with flash floods in the Hengduan Mountains

此外, 横断山区强震增加了山洪泥石流潜在物源<sup>[62-63]</sup>, 增大了山洪泥石流灾害的发生概率与规模<sup>[68]</sup>, 也增大了以山洪灾害为起点的灾害链规模。汶川地震后土壤侵蚀强度较震前增加了25%<sup>[52]</sup>, 泥石流起动的前期累积雨量与小时雨强分别降低22.1%与31.6%<sup>[69]</sup>, 山洪—泥石流演化过程与堰塞坝发育过程加快。如震后龙门山区域磨子沟、湍沟等6个典型小流域山洪泥石流—堰塞湖链生灾害发生频率显著增加<sup>[59]</sup>。

### 3.4 群发性

横断山区频发的地震活动使灾害敏感区拓宽, 强降雨覆盖与强烈地表扰动叠加的区域山洪泥石流成群发生。主要表现为, 在区域性强降雨下, 主支流或多条溪沟水位同时陡涨, 相邻地区多处溪沟山洪及其次生灾害同时发生。空间分散、数量集中、暴发时间重叠、冲出持续时间长的特点使群发性灾害较单沟灾害的灾害效应叠加并放大, 冲出的固体物质质量级可达百万立方米, 相较于单沟冲出方量扩大10倍以上。2010年都江堰龙池镇51条沟道暴发泥石流, 冲出总量达  $353 \times 10^4 \text{ m}^3$ <sup>[70]</sup>, 2013年强降雨诱发北川湍江河段69条沟道发生山洪泥石流<sup>[71]</sup> (图7)。

横断山区山洪的群发性常与链生性同时出现, 群发性山洪泥石流堵塞干流, 形成串珠状堰塞坝群, 或改变水沙平衡使干流局部淤积雍高水位, 堰塞湖或局部高水头蓄积的势能一旦释放可大幅提高洪水动能、威胁下游堰塞坝稳定, 堰塞坝级联溃决引起的持续物质补给与能量放大导致灾害链延长和灾害效应放大。如2013年汶川县七盘沟爆发的山洪泥石流经5处震后崩滑堰塞体逐级溃决放大后, 流量扩大至初始流量的6倍, 流速提高为初始流速的2倍, 冲毁村镇90%以上房屋, 造成14人死亡失踪<sup>[72]</sup>。

## 4 横断山区山洪灾害形成模式

基于横断山区山洪灾害的主导孕灾条件和发育特征, 从山洪灾害形成、运动、成灾3个主要发展过程提炼总结了区域山洪灾害形成模式 (图8)。

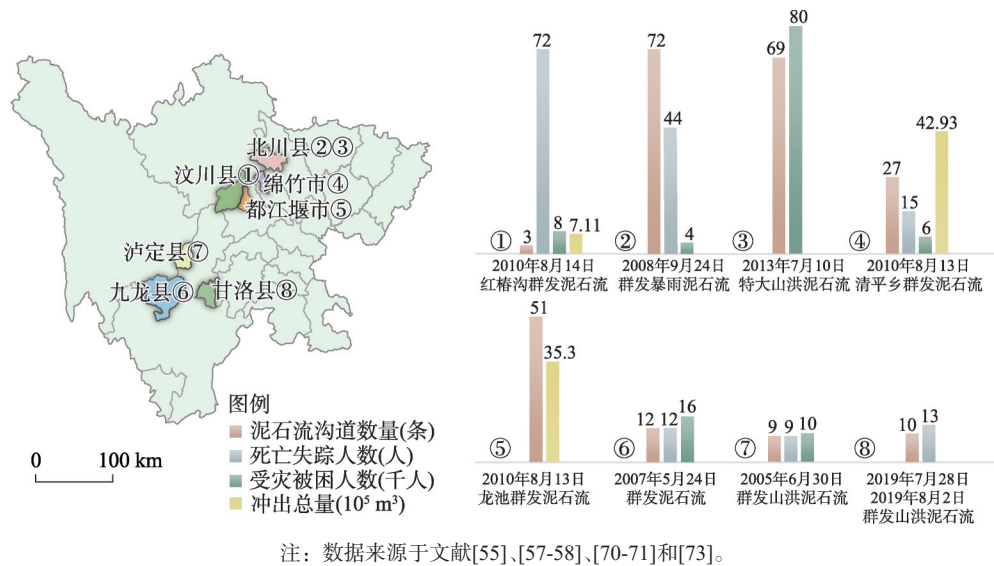


图7 2008年以来四川省典型群发性山洪泥石流灾害空间分布与灾害损失

Fig. 7 Spatial distribution and losses of typical clustered flash flood and debris flow disasters in Sichuan province since 2008

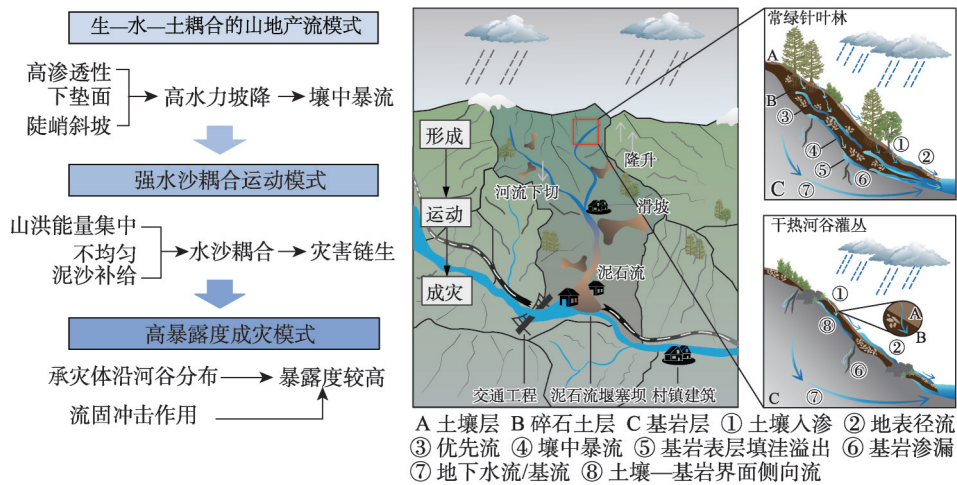


图8 横断山区山洪灾害形成模式

Fig. 8 Formation modes of flash flood disasters in the Hengduan Mountains

4.1 生—水—土耦合的山地产流模式

山区坡面—沟谷—河道的产汇流过程是山洪形成的基础，且受下垫面条件影响显著。横断山区山洪灾害高发区为海拔3500 m以下除高山寒漠带外的山区河流源头流域，主导植被为常绿针叶林<sup>[2]</sup>。常绿针叶林森林植被的林冠、树干与枯落物降雨截流作用明显，占降雨总量的25%~31%；地表层土壤渗透性强，渗透系数最高达57.0 mm/min<sup>[74]</sup>。在高渗透性土壤和陡峭斜坡共同作用下，壤中暴流（Subsurface Stormflow）是横断山区常绿针叶林覆被的小流域的主要产流机制，平均基流指数可达0.71<sup>[75-76]</sup>。降雨经植被截留与土壤入渗形成优先流，或在土壤基岩界面经积水饱和、填洼溢出形成壤中暴流<sup>[77]</sup>，是



水分垂直与水平运移的主要路径。土壤蓄水与壤中暴流引起降雨—径流响应过程存在非线性出流阶段与线性稳定产流阶段,重力驱动的土壤水分垂向连通性与坡面—沟谷的横向连通性是产流非线性增加的重要控制因素<sup>[78]</sup>。强震活动使横断山区下垫面破碎化严重,植被冠层与根土系统遭到破坏,坡面水动力过程与水文响应过程改变引起地表径流、壤中暴流、垂直入渗水分比例发生变化,壤中暴流响应时间提前、规模增大,径流产生与突变的降雨阈值显著降低,加剧山洪灾害突发性<sup>[79]</sup>。

干热河谷稀疏地表植被对降雨的年截留率约 14%,降雨再分配作用较差<sup>[80]</sup>。表层土壤渗透性差,稳定入渗速率仅 0.03~8.67 mm/min<sup>[29]</sup>。上述特点使区域降雨多以蒸散或地表超渗径流与岩—土界面侧向流混合产流的形式快速流失<sup>[49]</sup>,细沟侵蚀、坡面侵蚀发育,水土流失严重<sup>[27]</sup>。

总体来讲,横断山区下垫面条件与大梯度地形共同塑造了生—水—土耦合的山地产流模式。密集根系网络与丰富的岩石碎片形成丰富大孔隙结构土壤和高渗透性坡积物<sup>[48]</sup>,陡峻坡面形成较大的水力坡降,共同创造了以壤中暴流为主的变动产流模式。虽然地震等外部干扰与植被差异影响下垫面的渗透特性,但并不影响高水力坡降条件下生—水—土耦合产流机制作为横断山区的主导性产流机制。

## 4.2 强水沙耦合运动模式

横断山区河床物质组成级配较宽<sup>[56]</sup>,覆盖粘粒到漂石<sup>[31]</sup>,而暴雨山洪水沙补给条件的非恒定性极强,在水力分选和颗粒作用下呈现水沙强耦合运动特点。

横断山区河流通过坡岸冲刷、滑坡泥石流汇入及河道冲淤形成空间分布不均匀的泥沙补给,频繁的地震与次生灾害产生的大量松散堆积体,进一步加剧了泥沙补给空间分布的复杂性<sup>[56]</sup>。水流作用下河道细颗粒优先起动,床面逐渐粗化。横断山区河床物质颗粒较粗,甚至包含粒径超过 10 m 的巨石,且在水力作用下常排列形成具有消减水能、稳定床面的河床结构<sup>[61, 81]</sup>。如山区河流常见的阶梯—深潭结构通过急流缓流交替出现的流态高效消耗水流能量,消能率可达 80%<sup>[82-83]</sup>。在水流能量与河床结构消能动力平衡下,河床结构有效抑制了床面冲刷<sup>[42]</sup>。如震后在四川省文家沟布设的人工阶梯—深潭结构相较于没有消能考虑的谷坊坝群在控制河床下切与泥石流发生方面表现出明显优势<sup>[61]</sup>。

局部强泥沙补给可引发淤积、抬高水位,增加山洪淹没风险。在横断山区行洪排沙能力较弱的宽窄相间河道、河流交汇区等纵坡变化的特殊河段<sup>[84]</sup>,泥沙补给的空间非均匀性引起泥沙淤积,导致水位壅高与局部淹没。山洪过程中泥沙淤积引起的河道抬升或展宽可能导致河流改道或游荡分汊河型发育<sup>[56]</sup>,从而出现行洪不畅、预警预报困难等防灾减灾难题。

山洪冲刷下切引起的崩滑泥石流灾害形成的泥沙补给过大,可能堵江形成堰塞湖。堰塞坝如溃决将导致瞬时流量放大,加剧下游洪水冲击和淹没风险。2020 年丹巴泥石流堰塞坝溃决后,产生了相当于 20 a 一遇、峰值流量达 823.5 m<sup>3</sup>/s 的溃决洪水,造成下游 6 个村镇受到威胁,约 2 万人被迫疏散<sup>[66]</sup>。堰塞坝也可以通过发育河床结构对抗水流冲刷、稳定存在,从而控制河流下切、稳定河势<sup>[42]</sup>。汶川地震中稳定存在的叠溪海子堰塞湖(坝)群与九寨沟地震中保留良好的古堰塞坝、湖群瀑布都是堰塞坝(群)稳定河道的典型实例<sup>[42]</sup>。特大洪水冲刷、粗颗粒冲击可能破坏河床结构<sup>[85]</sup>,导致堰塞坝失稳溃决,活跃的构造运动也可能改变河道纵坡面形态,引发新一轮河道侵蚀下切<sup>[83]</sup>。

横断山区内山洪能量集中,易引发河道剧烈侵蚀下切,而区内频繁的地质灾害提供丰富且空间分布不均匀的泥沙补给,在水流能量作用下山洪过程呈水沙强耦合运动特点,冲刷淤积交替出现,以河道为载体为灾害链形成发育创造条件。

### 4.3 高暴露度成灾模式

横断山区的生活生产区、道路等基础设施大多处于山洪灾害高易发区<sup>[86-87]</sup>。虽然区内山洪主要承灾体的脆弱性随社会经济发展与重大工程开工建设有所降低,但大量高暴露度的承灾体仍然使区内山洪灾害易引发严重的人员伤亡与工程损毁<sup>[86-87]</sup>。

横断山区土地资源较紧缺,村落多聚集于地势平坦、水热条件较好的河流阶地或沟谷出口处的山洪泥石流堆积扇,这些区域为山洪灾害高风险区,因此人口建筑物对山洪灾害的暴露度较高<sup>[86, 88]</sup>。村镇建筑作为山洪灾害的主要承灾体,其倒塌与山洪致灾死亡人数直接相关<sup>[89]</sup>,而房屋破坏情况主要受山洪水动力特征、输沙特征、建筑物强度与布局等因素影响<sup>[90-91]</sup>。横断山区村镇房屋多为生土、木、砖混结构的单层或多层建筑,普遍存在建房选址随意、地基不牢、房屋整体性差、建筑强度不高等问题<sup>[92-93]</sup>,在山洪过程中易遭受洪水和漂石冲击、磨蚀、地基侵蚀、水沙淤埋和浸泡破坏<sup>[86, 95]</sup>。横断山区山洪中固体颗粒的冲击作用远大于单纯水流作用,水沙混合物的最大冲击力可达清水的4.3倍<sup>[90]</sup>,山洪转变为泥石流后,其中的块石冲击力可达细颗粒浆体冲击力的20倍<sup>[94]</sup>。另外,水流动能的空间不均匀分布导致沿线建筑物的破坏程度存在空间差异<sup>[91]</sup>,如凹岸建筑物破坏程度强于凸岸,急弯过渡段破坏最严重<sup>[96]</sup>,河漫滩不同区位建筑物所受的冲击力随洪水路径与流态的变化而有所差异<sup>[97]</sup>。

横断山区道路多沿河谷分布,暴露度较高。山洪较强冲刷作用可能使路基边坡失稳滑塌、淹没浸泡沿河公路铁路、淤埋损毁沟口处道路桥涵<sup>[95]</sup>。对桥梁而言,山洪水沙冲击导致桥墩保护层破坏、内部钢筋暴露断裂,桥墩振动与上部盖梁位移,甚至桥梁整体垮塌<sup>[94, 98]</sup>。对于水利水电工程,山洪输运的大量泥沙可能淤堵进水口、侵占库容,甚至威胁工程安全。

横断山区大部分村镇、重要基础设施等依附主干河流呈带状分布,易导致人员伤亡和财产损失。同时,山洪挟带的漂石、漂木等大型固体的冲击作用加剧承灾体结构破坏和灾害损失,而现有的建筑防洪标准尚未充分考虑山洪过程中固体冲击的防范要求,未形成与当地山洪风险匹配的建筑防洪标准,防洪工程和非工程体系建设较为滞后<sup>[87]</sup>。

## 5 未来科学挑战

横断山区空间分异的下垫面条件限制了对生一水一土耦合产汇流过程的微观动力学机理、关键影响因素、与流域河道宏观水文过程相互作用机制等的认识;现有暴雨山洪运动过程的认识多关注径流—水位等水文分析,对水沙输移、河床演变等动力过程关注不足。而且,对山洪流固体冲击与承灾体相互作用机制的认识有限,难以定量评估减灾措施的效果,阻碍了相关防灾减灾技术发展。这些问题严重制约了横断山区山洪动态监测预警体系建设,难以满足精准防灾减灾需求。为此,本文提出了横断山区暴雨型山洪灾害研究面临的4个主要科学挑战:

### (1) 山区生一水一土耦合产流过程的微观机理

解析土壤孔隙结构的三维特征及相关物理指标,明确以根土界面与土石层孔隙为流通过程的优先流的水分运移规律与影响因素,探明岩土界面土壤水向壤中暴流发展的动态过程与临界条件,进一步揭示壤中暴流运移与坡面沟谷水文连通的互馈响应规律,构建基于多界面水分输移机制的山洪水文过程量化方法<sup>[99]</sup>,为构建和优化适用于横断山区不同分区下的水文水动力模型提供理论支持。

## (2) 山洪水沙耦合运动机理及精准模拟

分析高位能崩塌滑坡汇入与河床冲刷粗化层破坏引起的泥沙超量补给的动力学机制, 总结堰塞坝—湖体系对河道稳定性的影响, 揭示横断山区河流在复杂床面结构条件和不均匀非恒定水沙补给条件下的河床演变全过程机理, 是阐明山洪诱发灾害链形成发育机制的重要前提, 也是构建基于物理过程的山洪地貌动力演变全过程数值模拟的理论基础, 有助于系统提升山洪灾害防御能力。

## (3) 山洪承灾体暴露度降低原理和技术

量化山洪流体及大型固体颗粒对承灾体的冲击力, 揭示承灾体的动力响应及破坏机制<sup>[86]</sup>。基于山洪动力过程与承灾体破坏机制构建防洪减灾理论体系与施工技术标准, 建立考虑修筑防护工程、优化承灾体空间布局等人为干预措施影响的山洪灾害风险定量评估方法, 研发并评估承灾体空间布局优化方案和防护技术, 从而有效降低横断山区承灾体整体暴露度, 为人员及设施安全提供保障对策。

## (4) 生态水文分区下的山洪动态监测预警体系

建立生态水文分区理论与技术方法体系, 构建贯通气候地形相互作用、产汇流过程、水沙耦合运动、承灾体与灾害相互作用的全过程山洪动力模拟与分区风险评估系统<sup>[100]</sup>, 利用多源数据融合、物联网感知与多链路远程传输等技术, 构建“空—天—地”一体化山洪全要素动态监测体系。在雨情水位多阶段预警、上下游联动预警与“专群结合”预警系统基础上, 融合山洪全过程动力模拟系统与全要素监测体系, 构建生态水文分区下的山洪动态监测预警体系, 为多目标、多区域防洪减灾提供技术方案与科学支撑。

## 参考文献(References)

- [1] Yang Qinye, Zheng Du. An outline of physico-geographic regionalization of the Hengduan mountainous region. *Journal of Mountain Research*, 1989, 7(1): 56-64. [杨勤业, 郑度. 横断山区综合自然区划纲要. 山地研究, 1989, 7(1): 56-64.]
- [2] Yang Jing, Dai Junhu, Yao Huarong, et al. Vegetation distribution and vegetation activity changes in the Hengduan Mountains from 1992 to 2020. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(11): 2787-2802. [杨靖, 戴君虎, 姚华荣, 等. 1992—2020年横断山区植被分布与植被活动变化. 地理学报, 2022, 77(11): 2787-2802.]
- [3] Gan Peiqi. A geographical description of the Hengduan Mountains. *Western China*, 2007(Suppl.2): 1-4. [甘沛奇. 关于横断山脉的地理描述. 中国西部, 2007(增刊2): 1-4.]
- [4] Sun Hui, Tang Ya, Huang Xueju, et al. Present situations and its R&D of dry valleys in the Hengduan Mountains of SW China. *World Sci-Tech R & D*, 2005, 27(3): 54-61. [孙辉, 唐亚, 黄雪菊, 等. 横断山区干旱河谷研究现状和发展方向. 世界科技研究与发展, 2005, 27(3): 54-61.]
- [5] Bai Yongjian, Tie Yongbo, Meng Mingjie, et al. Characteristics and temporal-spatial distribution of geohazards in western Sichuan. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2022, 42(4): 666-674. [白永健, 铁永波, 孟铭杰, 等. 川西地区地质灾害发育特征与时空分布规律. 沉积与特提斯地质, 2022, 42(4): 666-674.]
- [6] Wang Yu, Zhou Xiangnan, Peng Shaoming, et al. Water allocation of the first phase of South-to-North Water Diversion Western Route Project based on balanced provisioning of water resources in the Yellow River basin. *Advances in Water Science*, 2023, 34(3): 336-348. [王煜, 周翔南, 彭少明, 等. 基于黄河流域水资源均衡调配的南水北调西线一期工程水量配置. 水科学进展, 2023, 34(3): 336-348.]
- [7] Li Sheng, Gao Jie, Fang Guangda, et al. Review and prospect of cascade hydropower development in China. *Hydropower and Pumped Storage*, 2022, 8(2): 1-6. [李昇, 高洁, 方光达, 等. 我国流域梯级水电开发的回顾与展望. 水电与抽水蓄能, 2022, 8(2): 1-6.]
- [8] Zhang Guangze, Jiang Liangwen, Song Zhang, et al. Research on the mountain disaster and geological alignment fundamental of Sichuan-Tibet railway running through N-S mountain area. *Journal of Railway Engineering Society*, 2016, 33(2): 21-24, 33. [张广泽, 蒋良文, 宋章, 等. 横断山区川藏线山地灾害和地质选线原则研究. 铁道工程学报, 2016, 33(2): 21-24, 33.]
- [9] Cornwall W. Europe's deadly floods leave scientists stunned. *Science*, 2021, 373(6553): 372-373.
- [10] Best J, Ashmore P, Darby S E. Beyond just floodwater. *Nature Sustainability*, 2022, 5(10): 811-813.



- [11] Khajehi S, Ahmadalipour A, Shao W, et al. A place-based assessment of flash flood hazard and vulnerability in the contiguous United States. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 448. DOI: 10.1038/s41598-019-57349-z.
- [12] Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Summary of China Flood and Drought Disaster Prevention Bulletin 2021. Beijing: China Water Power Press, 2022. [中华人民共和国水利部. 中国水旱灾害防御公报 2021. 北京: 中国水利水电出版社, 2022.]
- [13] Tu Yong, Wu Zebin, He Bingshun. Analysis on the characteristics of flash flood disasters in China from 2011 to 2019. *China Flood & Drought Management*, 2020, 30(Suppl.1): 22-25. [涂勇, 吴泽斌, 何秉顺. 2011—2019年全国山洪灾害事件特征分析. 中国防汛抗旱, 2020, 30(增刊1): 22-25.]
- [14] Cui Peng, Guo Xiaojun, Jiang Tianhai, et al. Disaster effect induced by asian water tower change and mitigation strategies. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2019, 34(11): 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(11): 1313-1321.]
- [15] Hirabayashi Y, Mahendran R, Koirala S, et al. Global flood risk under climate change. *Nature Climate Change*, 2013, 3(9): 816-821.
- [16] Asano Y, Uchida T. Detailed documentation of dynamic changes in flow depth and surface velocity during a large flood in a steep mountain stream. *Journal of Hydrology*, 2016, 541: 127-135.
- [17] Wang Q, Xu Y P, Cai X T, et al. Role of underlying surface, rainstorm and antecedent wetness condition on flood responses in small and medium sized watersheds in the Yangtze River Delta region, China. *CATENA*, 2021, 206: 105489. DOI: 10.1016/j.catena.2021.105489.
- [18] Camarasa-Belmonte A M. Flash floods in Mediterranean ephemeral streams in Valencia Region (Spain). *Journal of Hydrology*, 2016, 541: 99-115.
- [19] Xu Fei, Jia Yangwen, Niu Cunwen, et al. Variation character of annual, seasonal and monthly temperature and precipitation. *Mountain Research*, 2018, 36(2): 171-183. [徐飞, 贾仰文, 牛存稳, 等. 横断山区气温和降水年季月变化特征. 山地学报, 2018, 36(2): 171-183.]
- [20] Jia Yangwen, Hao Chunfeng, Niu Cunwen, et al. Spatio-temporal variations of precipitation and runoff and analyses of water-heat-human-land matching characteristics in typical mountainous areas of China. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(11): 2288-2302. [贾仰文, 郝春洋, 牛存稳, 等. 典型山地降水径流时空演变及“水—热—人—地”匹配性分析. 地理学报, 2019, 74(11): 2288-2302.]
- [21] Bian Yaojin, Sun Peng, Zhang Qiang, et al. Spatial distribution characteristics of extreme climatic events in the Hengduan mountains region. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2021, 52(9): 1-15. [卞耀劲, 孙鹏, 张强, 等. 横断山区极端气候变化的时空格局. 水利水电技术(中英文), 2021, 52(9): 1-15.]
- [22] Huan Yu, Li Yueqing. The synergy between the East Asian summer monsoon and the South Asian summer monsoon and its relations with anomalous rainfall in southern China. *Plateau Meteorology*, 2018, 37(6): 1563-1577. [桓玉, 李跃清. 夏季东亚季风和南亚季风协同作用与我国南方夏季降水异常的关系. 高原气象, 2018, 37(6): 1563-1577.]
- [23] Zhang Xiangmin. The challenge of physical geography on the southeast edge of Qinghai-Tibet Plateau to railway transportation corridor. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2023, 43(1): 1-17. [张向民. 青藏高原东南缘自然地理对铁路交通廊道提出的挑战. 防灾减灾工程学报, 2023, 43(1): 1-17.]
- [24] Xu Ruichi, Li Xiuzhen, Hu Kaiheng, et al. A dynamic risk assessment for mountain hazards in the Hengduan Mountain region, China. *Mountain Research*, 2020, 38(2): 222-230. [徐瑞池, 李秀珍, 胡凯衡, 等. 横断山区山地灾害的动态风险性评价. 山地学报, 2020, 38(2): 222-230.]
- [25] Yu Zhongshui, Kang Shichang, Jiang Jianying. Spatial and temporal variations of the night-rain rate during summer over the Tibetan Plateau. *Mountain Research*, 2011, 29(5): 627-632. [余忠水, 康世昌, 蒋建莹. 青藏高原夏季夜雨率空间分布及其变化特征. 山地学报, 2011, 29(5): 627-632.]
- [26] Chen Boyu, Chen Yun, Sun Jisong, et al. Characteristics and formation mechanism of the sudden rainstorm inducing the “6·26” mountain torrent disaster in Mianning, Sichuan province. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2023, 47(1): 1-19. [陈博宇, 湛芸, 孙继松, 等. 诱发四川冕宁“6·26”山洪灾害的突发性暴雨特征及其形成机制. 大气科学, 2023, 47(1): 1-19.]
- [27] Yang Jida, Zhang Zhiming, Shen Zehao, et al. Review of research on the vegetation and environment of dry-hot valleys in Yunnan. *Biodiversity Science*, 2016, 24(4): 462-474. [杨济达, 张志明, 沈泽昊, 等. 云南干热河谷植被与环境研究进展. 生物多样性, 2016, 24(4): 462-474.]
- [28] He Yongbin, Lu Peize, Zhu Tong. Causes for the formation of dry-hot valleys in Hengduan Mountain-Yunnan province. *Resources Science*, 2000, 22(5): 69-72. [何永彬, 卢培泽, 朱彤. 横断山—云南高原干热河谷形成原因研究. 资源科

- 学, 2000, 22(5): 69-72.]
- [29] Xiong D H, Zhou H Y, Yang Z, et al. Slope lithologic property, soil moisture condition and revegetation in dry-hot valley of Jinsha River. *Chinese Geographical Science*, 2005, 15(2): 186-192.
- [30] Luo J, Ma X Y, Wang L, et al. The influence of short-term heavy rainfall on hydraulic characteristics and rill formation in the Yuanmou dry-hot valley. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(22): 15232. DOI: 10.3390/ijerph192215232.
- [31] Wang Zhaoyin, Qi Lijian, Wang Xuzhao. Debris flow control with energy dissipation structures-experiences from Wenjiagou. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, 43(3): 253-263. [王兆印, 漆力健, 王旭昭. 消能结构防治泥石流研究: 以文家沟为例. *水利学报*, 2012, 43(3): 253-263.]
- [32] Hu Shi, Zhao Ruxin, Jia Yangwen, et al. The characteristic of vegetation vertical zonality and the influential factors in typical mountains in China. *Chinese Journal of Nature*, 2018, 40(1): 12-16. [胡实, 赵茹欣, 贾仰文, 等. 中国典型山地植被垂直地带性特征及其影响要素. *自然杂志*, 2018, 40(1): 12-16.]
- [33] Yi Shujian, Cui Peng, Wu Chunhao, et al. Control effects of suture zones on distribution of soft rock and its engineering influence along Sichuan-Tibet railway corridor. *Journal of Engineering Geology*, 2021, 29(2): 275-288. [易树健, 崔鹏, 伍纯昊, 等. 川藏铁路廊道板块缝合带对软岩分布的控制效应及其工程影响. *工程地质学报*, 2021, 29(2): 275-288.]
- [34] Li Minhui, Chen Yi, Wu Baosheng. Analysis of features and factors controlling typical drainage networks in the Tibetan Plateau. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2020, 60(11): 951-957. [李敏慧, 陈毅, 吴保生. 青藏高原典型流域河网特性及控制因素. *清华大学学报(自然科学版)*, 2020, 60(11): 951-957.]
- [35] Song Zhuoqin. The geomorphology of the typical rivers in the eastern Tibet and their active tectonic implications [D]. Beijing: Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, 2014. [宋卓沁. 青藏高原东缘典型河流地貌及其活动构造指示[D]. 北京: 中国地震局地震预测研究所, 2014.]
- [36] Xing Yukun, Liu Jing, Wang Wei, et al. Longitudinal profile analysis of rivers draining edges of the Tibetan Plateau and its geomorphology implications. *Geological Bulletin of China*, 2023, 42(1): 107-121. [邢宇堃, 刘静, 王伟, 等. 青藏高原周缘的河流纵剖面特征及其对构造地貌演化的启示. *地质通报*, 2023, 42(1): 107-121.]
- [37] Zhang Chendi, Lin Yongpeng, Xu Mengzhen, 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. [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.]
- [38] Bai R, Li T J, Huang Yue F, et al. An efficient and comprehensive method for drainage network extraction from DEM with billions of pixels using a size-balanced binary search tree. *Geomorphology*, 2015, 238: 56-67.
- [39] Liu Le, Wang Zhaoyin, Yu Guoan, et al. Statistical features of the drainage network in the Qinghai Tibet Plateau and the effect of the uplift. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2015, 55(9): 964-970. [刘乐, 王兆印, 余国安, 等. 青藏高原河网统计规律及高原抬升的影响. *清华大学学报(自然科学版)*, 2015, 55(9): 964-970.]
- [40] Kirby E, Whipple K X, Tang W Q, et al. Distribution of active rock uplift along the eastern margin of the Tibetan Plateau: Inferences from bedrock channel longitudinal profiles. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2003, 108 (B4): 2217. DOI: 10.1029/2001JB000861.
- [41] Zhang J Y, Jing L Z, Scherler D, et al. Spatiotemporal variation of late Quaternary river incision rates in southeast Tibet, constrained by dating fluvial terraces. *Lithosphere*, 2018, 10(5): 662-675.
- [42] Liu Huaixiang, Wang Zhaoyin, Lu Yongjun, et al. Mechanism of morphological evolution in incised river and its relationship to streambed structures. *Advances in Water Science*, 2011, 22(3): 367-372. [刘怀湘, 王兆印, 陆永军, 等. 山区下切河流地貌演变机理及其与河床结构的关系. *水科学进展*, 2011, 22(3): 367-372.]
- [43] Zheng Haolei. Response of sediment transport to cascade reservoirs in the Lancang River [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022. [郑浩磊. 澜沧江梯级水库建设的输沙响应[D]. 杭州: 浙江大学, 2022.]
- [44] Cui Lei, Gu Hongbin, Gao Fan. Analysis and suggestions on hydropower development utilizing the natural river sections of Jinsha River. *Water Power*, 2022, 48(1): 1-4, 129. [崔磊, 顾洪宾, 高繁. 水电开发利用金沙江自然河段的分析与建议. *水力发电*, 2022, 48(1): 1-4, 129.]
- [45] China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Research Center of Flood Control, Drought Relief and Disaster Reduction Technology, Ministry of Water Resources. Atlas of Flash Flood Disasters in China. Beijing: Sinomap Press, 2021. [中国水利水电科学研究院, 水利部防洪抗旱减灾技术研究中心. 中国山洪灾害图集. 北京: 中国地图出版社, 2021.]
- [46] Liu Lunhui, Yu Youde, Zhang Jianhua. The division of vertical vegetation zone in Hengduanshan. *Acta Botanica Yunnanica*, 1984, 6(2): 205-216. [刘伦辉, 余有德, 张建华. 横断山自然植被垂直带的划分. *云南植物研究*, 1984, 6

- (2): 205-216.]
- [47] Liu Lunhui, Yu Youde, Zhang Jianhua. Discussion upon the regularities of vegetational distribution in the Hengduan Mountains. *Acta Botanica Yunnanica*, 1985, 7(3): 323-335. [刘伦辉, 余有德, 张建华. 横断山区植被分布规律的探讨. *云南植物研究*, 1985, 7(3): 323-335.]
- [48] Wang F, Wang G X, Cui J F, et al. Hillslope-scale variability of soil water potential over humid alpine forests: Unexpected high contribution of time-invariant component. *Journal of Hydrology*, 2023, 617: 129036. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2022.129036.
- [49] Shi Chunmao, Luo Ya, Yang Shengtian, et al. Responses of soil moisture at different slope position to rainfall in dry-hot valley. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(5): 1352-1362. [石春茂, 罗娅, 杨胜天, 等. 干热河谷区不同坡位土壤水分对降雨的响应特征. *应用生态学报*, 2022, 33(5): 1352-1362.]
- [50] Sun X Y, Zhang G T, Wang J, et al. Spatiotemporal variation of flash floods in the Hengduan Mountains region affected by rainfall properties and land use. *Natural Hazards*, 2022, 111(1): 465-488.
- [51] Xiong Junnan, Li Jin, Cheng Weiming, et al. Spatial-temporal distribution and the influencing factors of mountain flood disaster in southwest China. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(7): 1374-1391. [熊俊楠, 李进, 程维明, 等. 西南地区山洪灾害时空分布特征及其影响因素. *地理学报*, 2019, 74(7): 1374-1391.]
- [52] Ding Hairong, Li Yong, Zhao Guohua, et al. Analysis of flash flood formation character and cause in the upper reaches of Minjiang River after Wenchuan earthquake. *Journal of Catastrophology*, 2013, 28(2): 14-19. [丁海容, 李勇, 赵国华, 等. 汶川地震后岷江上游山洪发育特征与成因分析. *灾害学*, 2013, 28(2): 14-19.]
- [53] Dong Xingxin, Wang Li, Feng Dehua. Analysis on the cause of the heavy rain which caused the mudslide in Malipo, Yunnan province. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2021, 11(2): 181-187. [董兴欣, 王郦, 冯德花. 诱发云南麻栗坡特大山洪泥石流的暴雨成因分析. *气象科技进展*, 2021, 11(2): 181-187.]
- [54] Cui Peng, Jia Yang, Su Fenghuan, et al. Natural hazards in Tibetan Plateau and key issue for feature research. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2017, 32(9): 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(9): 985-992.]
- [55] Tang Chuan, Li Weile, Ding Jun, et al. Field investigation and research on giant debris flow on August 14, 2010 in Yingxiu town, epicenter of Wenchuan earthquake. *Earth Science*, 2011, 36(1): 172-180. [唐川, 李为乐, 丁军, 等. 汶川震区映秀镇“8·14”特大泥石流灾害调查. *地球科学(中国地质大学学报)*, 2011, 36(1): 172-180.]
- [56] Zhu Xinghua, Cui Peng, Ge Yonggang, et al. Effects of Wenchuan Earthquake on the evolution of rivers in Wenchuan Earthquake region in Sichuan Province. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 2012, 29(1): 1-6, 12. [朱兴华, 崔鹏, 葛永刚, 等. 汶川地震对震区河流演化的影响. *长江科学院院报*, 2012, 29(1): 1-6, 12.]
- [57] You Yong, Chen Xingchang, Liu Jinfeng. "8·13" extra large debris flow disaster in Wenjia Gully of Qingping township, Mianzhu, Sichuan province. *Journal of Catastrophology*, 2011, 26(4): 68-72. [游勇, 陈兴长, 柳金峰. 四川绵竹清平乡文家沟“8·13”特大泥石流灾害. *灾害学*, 2011, 26(4): 68-72.]
- [58] Tie Yongbo, Tang Chuan, Ni Huayong. Group debris flow hazards effect and it's prevention. *Mountain Research*, 2010, 28(6): 753-757. [铁永波, 唐川, 倪化勇. 群发性泥石流的危害效应及防范探讨. *山地学报*, 2010, 28(6): 753-757.]
- [59] Cui Peng, Guo Jian. Evolution models, risk prevention and control countermeasures of the valley disaster chain. *Advanced Engineering Sciences*, 2021, 53(3): 5-18. [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.]
- [60] Tie Yongbo, Ge Hua, Gao Yanchao, et al. The research progress and prospect of geological hazards in Southwest China since the 20th Ccentury. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2022, 42(4): 653-665. [铁永波, 葛华, 高延超, 等. 二十世纪以来西南地区地质灾害研究历程与展望. *沉积与特提斯地质*, 2022, 42(4): 653-665.]
- [61] Wang Zhaoyin, Zhang Chendi. Bedforms, energy dissipation and disaster mitigation mechanism in mountain rivers of Southwest China. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, 50(1): 124-134, 154. [王兆印, 张晨笛. 西南山区河流河床结构及消能减灾机制. *水利学报*, 2019, 50(1): 124-134, 154.]
- [62] Xiang Lingzhi, Cui Peng, Fang Hua. Mechanism of disaster chain after earthquake and the impact to urban reconstruction in Wenchuan earthquake area. *Journal of Catastrophology*, 2010, 25(Suppl.1): 278-281. [向灵芝, 崔鹏, 方华. 震后灾害链生机制及其对汶川地震城镇重建的影响. *灾害学*, 2010, 25(增刊1): 278-281.]
- [63] Yin Yunhe, Han Xiang, Deng Haoyu, et al. Framework of risk reduction measurements for earthquake-landslide-debris flow disaster chain in Southwest China. *Journal of Catastrophology*, 2021, 36(3): 77-84. [尹云鹤, 韩项, 邓浩宇, 等. 中国西南地区地震—滑坡—泥石流灾害链风险防范措施框架研究. *灾害学*, 2021, 36(3): 77-84.]
- [64] He J, Zhang L M, Fan R L, et al. Evaluating effectiveness of mitigation measures for large debris flows in Wenchuan,



- China. Landslides, 2022, 19(4): 913-928.
- [65] Tie Yongbo, Zhang Xianzheng, Gong Lingfeng, et al. Research on the pattern of typical geohazard chains in the southwest mountainous region, China. *Journal of Geomechanics*, 2022, 28(6): 1071-1080. [铁永波, 张宪政, 龚凌枫, 等. 西南山区典型地质灾害链成灾模式研究. *地质力学学报*, 2022, 28(6): 1071-1080.]
- [66] Liu D Z, Cui Y F, Jin W, et al. Channel aggradation triggered by dam failure amplifies the damage of outburst flood. *Landslides*, 2023, 20(7): 1343-1362.
- [67] Zhang Haiquan, He Wenxiu, Zhao Bo, et al. Analysis of field investigation and monitoring of "6·17" Meilong valley debris flow- Aniangzhai landslide disaster chain in Danba county, Sichuan province. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(29): 12481-12489. [张海泉, 何文秀, 赵波, 等. 四川丹巴县"6·17"梅龙沟泥石流—阿娘寨滑坡灾害链现场调查与监测分析. *科学技术与工程*, 2021, 21(29): 12481-12489.]
- [68] Jin W, Cui P, Zhang G T, et al. Evaluating the post-earthquake landslides sediment supply capacity for debris flows. *CATENA*, 2023, 220: 106649. DOI: 10.1016/j.catena.2022.106649.
- [69] Tang Chuan, Liang Jingtao. Characteristics of debris flows in Beichuan epicenter of the Wenchuan Earthquake triggered by rainstorm on September 24, 2008. *Journal of Engineering Geology*, 2008, 16(6): 751-758. [唐川, 梁京涛. 汶川震区北川"9·24"暴雨泥石流特征研究. *工程地质学报*, 2008, 16(6): 751-758.]
- [70] Yu Bin, Ma Yu, Zhang Jiannan, et al. The group debris flow hazards after the Wenchuan Earthquake in Longchi, Dujiangyan, Sichuan province. *Mountain Research*, 2011, 29(6): 738-746. [余斌, 马煜, 张健楠, 等. 汶川地震后四川省都江堰市龙池镇群发泥石流灾害. *山地学报*, 2011, 29(6): 738-746.]
- [71] Liu Jian, Ge Yonggang, Zhang Jianqiang, et al. Characteristics and causes of "7·10" super-huge debris flows in Jian river section of Beichuan. *Science of Soil and Water Conservation*, 2014, 12(4): 44-50. [刘剑, 葛永刚, 张建强, 等. 北川岷江河段"7·10"特大山洪泥石流灾害特征与成因分析. *中国水土保持科学*, 2014, 12(4): 44-50.]
- [72] Qin Haokun, Zhang Haiquan, Zhang Bo. Analysis of formation conditions of multi-stage blocking debris flow in Qipangou after Wenchuan earthquake. *Journal of Engineering Geology*, 2016, 24(Suppl.1): 100-107. [覃浩坤, 张海泉, 张波. 汶川震区震后七盘沟多级堵溃泥石流形成条件分析. *工程地质学报*, 2016, 24(增刊.1): 100-107.]
- [73] Li Yu, Gan Binrui, Wang Xiekang, et al. Formation mechanism of group flash flood/debris flow disasters in Ganluo county, Sichuan province in 2019. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2020, 40(6): 281-287. [李钰, 甘滨蕊, 王协康, 等. 四川省甘洛县2019年群发性山洪泥石流灾害的形成机理. *水土保持通报*, 2020, 40(6): 281-287.]
- [74] Sun Zhixiang, Cui Junfang, Yang Ruxin, et al. Evaluation and construction of pedo-transfer function of saturated hydraulic conductivity of forest soils in Hengduan Mountain region. *Soils*, 2022, 54(3): 594-601. [孙志祥, 崔俊芳, 杨汝馨, 等. 横断山区森林土壤饱和导水率传递函数的评价与构建研究. *土壤*, 2022, 54(3): 594-601.]
- [75] Gao Dongdong, Wu Yong, Chen Meng, et al. Baseflow separation and rainfall infiltration calculation of small watershed in Gongga mountain forest system. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, 24(6): 949-955. [高东东, 吴勇, 陈盟, 等. 贡嘎山森林系统小流域基流分割与降雨入渗补给计算. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(6): 949-955.]
- [76] Qiu A N, Zhang Y J, Wang G X, et al. A modified TOPMODEL introducing the bedrock surface topographic index in Huangbengliu watershed, China. *Journal of Mountain Science*, 2022, 19(12): 3517-3532.
- [77] Wang F, Wang G X, Cui J F, et al. Preferential flow patterns in forested hillslopes of east Tibetan Plateau revealed by dye tracing and soil moisture network. *European Journal of Soil Science*, 2022, 73(4): e13294. DOI: 10.1111/ejss.13294.
- [78] Zhang G T, Cui P, Gualtieri C, et al. Stormflow generation in a humid forest watershed controlled by antecedent wetness and rainfall amounts. *Journal of Hydrology*, 2021, 603: 127107. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.127107.
- [79] Zhang G T, Cui P, Gualtieri C, et al. Increased nonstationarity of stormflow threshold behaviors in a forested watershed due to abrupt earthquake disturbance. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2023, 27(15): 3005-3020.
- [80] Xiong Zhuang, Ye Wen, Zhang Shubin, et al. Rainfall redistribution and its relationship with meteorological factors in Yuanjiang valley-type savanna, Southwest China. *Journal of Northwest Forestry University*, 2019, 34(1): 47-53. [熊壮, 叶文, 张树斌, 等. 元江稀树灌丛降雨再分配及其与气象因子的关系. *西北林学院学报*, 2019, 34(1): 47-53.]
- [81] Liu Huaixiang, Wang Zhaoyin, Liu Le, et al. Quantified study on the riverbed structure intensity and its relationship with stream power. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2011, 30(5): 114-118, 138. [刘怀湘, 王兆印, 刘乐, 等. 河床结构强度及其与水流能量关系的定量研究. *水力发电学报*, 2011, 30(5): 114-118, 138.]
- [82] Zhang C D, Hassan M A, Saletti M, et al. A unit-scale framework for designing step-pool sequences. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2023, 149(1): 04022033. DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0002033.
- [83] Wilcox A C, Wohl E E, Comiti F, et al. Hydraulics, morphology, and energy dissipation in an alpine step-pool channel. *Water Resources Research*, 2011, 47(7): W07514. DOI:10.1029/2010WR010192.

- [84] Lei Ming, Yu Hait, Xu Zexing, et al. Numerical simulation of retrogressive pebble deposition in the changing slope zone of a mountainous river. *Advanced Engineering Sciences*, 2019, 51(1): 45-51. [雷明, 余海逖, 许泽星, 等. 山区变比降河道卵砾石溯源淤积的数值模拟. *工程科学与技术*, 2019, 51(1): 45-51.]
- [85] Zhang Chendi, Li Zhiwei, Wang Zhaoyin. A physical-based model of individual step pool stability with grain collision. *Advances in Water Science*, 2016, 27(5): 705-715. [张晨笛, 李志威, 王兆印. 碰撞作用下单个阶梯—深潭稳定性模型. *水科学进展*, 2016, 27(5): 705-715.]
- [86] Si Guangwu, Chen Jiangang, Chen Xiaoqing, et al. Review of the types of rural building damage caused by the flash flood and the flood-resistant strengthening techniques. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(23): 9671-9681. [司光武, 陈剑刚, 陈晓清, 等. 山洪对村镇建筑破坏方式与建筑防洪加固技术研究现状. *科学技术与工程*, 2021, 21(23): 9671-9681.]
- [87] Luo Peng, Shi Wenjing, Wan Bingqing, et al. Distribution pattern and prevention and control strategies for flood risks in China. *China Water Resources*, 2023(8): 11-15. [罗鹏, 施文婧, 万冰清, 等. 我国洪水风险分布特征及防治策略. *中国水利*, 2023(8): 11-15.]
- [88] Lei Yu, Cui Peng, Jiang Xiangang. Failure mechanism and structure optimization of masonry building due to debris flow impact. *Advanced Engineering Sciences*, 2016, 48(4): 61-69. [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.]
- [89] Wei L, Hu K H, Hu X D. Rainfall occurrence and its relation to flood damage in China from 2000 to 2015. *Journal of Mountain Science*, 2018, 15(11): 2492-2504.
- [90] Zeng L, Ge Y G, Chen J G, et al. Influences of a debris flow disaster chain on buildings in remote rural areas, Southwest China. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2022, 13(1): 2777-2795.
- [91] Sturm M, Gems B, Keller F, et al. Understanding impact dynamics on buildings caused by fluvial sediment transport. *Geomorphology*, 2018, 321: 45-59.
- [92] Ge Xueli, Zhu Lixin, Yu Wen. Overview of researches on disaster prevention of buildings in village and town. *Journal of Natural Disasters*, 2014, 23(2): 8-14. [葛学礼, 朱立新, 于文. 我国村镇建筑防灾研究概述. *自然灾害学报*, 2014, 23(2): 8-14.]
- [93] Li Gang, Liu Xiaoyu, Li Hongnan. Seismic damage investigation and analysis on rural buildings in Wenchuan earthquake. *Journal of Dalian University of Technology*, 2009, 49(5): 724-730. [李钢, 刘晓宇, 李宏男. 汶川地震村镇建筑结构震害调查与分析. *大连理工大学学报*, 2009, 49(5): 724-730.]
- [94] Wang Dongpo, Chen Zheng, He Siming, et al. Physical model experiments of dynamic interaction between debris flow and bridge pier model. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(9): 3363-3372. [王东坡, 陈政, 何思明, 等. 泥石流冲击桥墩动力相互作用物理模型试验. *岩土力学*, 2019, 40(9): 3363-3372.]
- [95] Chen Yuanchuan, Chen Hongkai. Geological risk classification of mountain area riverside highway. *Highway*, 2012, 57(10): 1-10. [陈远川, 陈洪凯. 山区沿河公路地质风险分类. *公路*, 2012, 57(10): 1-10.]
- [96] Zhen Yiwei, Liu Shuguang, Zhong Guihui, et al. Characterization and impact factors of the damage to village buildings by mountain torrent disasters in Wenchuan county. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2022, 42(1): 1-11, 23. [甄亿位, 刘曙光, 钟桂辉, 等. 山洪对汶川县村镇建筑的破坏特征及影响因素分析. *防灾减灾工程学报*, 2022, 42(1): 1-11, 23.]
- [97] Sturm M, Gems B, Keller F, et al. Experimental analyses of impact forces on buildings exposed to fluvial hazards. *Journal of Hydrology*, 2018, 565: 1-13.
- [98] Li Cong, Zou Qiang, Lei Yu, et al. Dynamic response of double column bridge pier subjected to debris flow. *Yangtze River*, 2022, 53(12): 204-214. [李聪, 邹强, 雷雨, 等. 泥石流作用下双柱桥墩动力响应研究. *人民长江*, 2022, 53(12): 204-214.]
- [99] Cui Peng, Zhang Guotao, Zhang Chendi. Hydrological mechanism and disaster-causing effects of subsurface stormflow. *Acta Geographica Sinica*, 2023, 78(7): 1627-1640. [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.]
- [100] Du Jun, Ren Hongyu, Lin Qingming, et al. Research progress on the prevention of flash flood disasters. *Journal of Catastrophology*, 2019, 34(2): 161-167. [杜俊, 任洪玉, 林庆明, 等. 山洪灾害防御研究进展. *灾害学*, 2019, 34(2): 161-167.]

## The development characteristics and formation modes of rainstorm-triggered flash flood disasters in the Hengduan Mountains

LI Yifan<sup>1,2</sup>, ZHANG Chendi<sup>1</sup>, ZHANG Guotao<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The Hengduan Mountains Region is one of the regions with the most densely distributed and severe flash flood disasters in China. It is also the key area for major engineering projects and beautiful countryside construction in southwest China. However, previous studies have not systematically summarized the development characteristics and formation modes of flash flood disasters in this region, which restricts the development and establishment of flood control theory and technical system in the southwestern mountains. This paper focuses on the physical processes of generation, movement and hazard-formation of flash flood disasters in the Hengduan Mountains. It clarifies the dominant disaster-inducing conditions (multiple humid monsoon circulation conditions, high potential energy conditions and high heterogenous underlying surface conditions) and disaster development characteristics (high spatio-temporal heterogeneity, highly concentrated energy, disaster chain and clustered occurrence) of flash floods in the Hengduan Mountains. Based on the entire processes of flash flood disasters, three major formation modes are summarized: the runoff generation of vegetation-hydrology-soil coupling dominated by high hydraulic gradient in mountainous areas, strong runoff-sediment coupled movement, and serious disaster losses due to high exposure of disaster bearing objects. Finally, based on the issues in previous research, four future research challenges for flash flood disasters in the Hengduan Mountains are proposed. Our work contributes to the development of disaster prevention and reduction research, including basic theoretical system, precise risk assessment of regional disasters, and fine early warning and forecasting of flash floods.

**Keywords:** Hengduan Mountains; rainstorm-triggered flash flood; disaster-inducing condition; disaster development characteristic; formation mode