水文地质工程地质
HYDROGEOLOGY & ENGINEERING GEOLOGY
中文核心期刊 CSCD核心期刊
中科双效期刊 中国科技核心期刊
Caj-cd规范获奖期刊

拒马河上游极端降雨引发的地质灾害特征与链生演化过程

朱　贺，张永双，任三绍，陶夏旭，刘明学

Characteristics and chain-generated processes of extreme rainfall-induced geohazards in the upper reaches of the Juma River

ZHU He, ZHANG Yongshuang, REN Sanshao, TAO Changxu, and LIU Mingxue

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202411008

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

白龙江流域中上游第四纪沉积物的发育特征及其灾害效应

Development characteristics and disaster effect of the Quaternary sediments in the middle and upper reaches of the Bailongiang River Basin

陈宗良, 叶振南, 王志宏, 王高峰, 高幼龙, 田运涛　水文地质工程地质. 2019, 46(2): 29-29

西南岩溶山区大型崩滑灾害研究的关键问题

Critical issues in rock avalanches in the karst mountain areas of southwest China

李滨, 殷跃平, 高杨, 邢爱国, 黄波林, 贺凯, 赵超英, 万佳威　水文地质工程地质. 2020, 47(4): 5-13

金沙江上游沃达滑坡发育特征与堵江危险性分析

Developmental characteristics and damming river risk of the Woda landslide in the upper reaches of the Jinshajiang River

吴瑞安, 马海善, 张俊才, 杨志华, 李雪, 倪嘉伟, 钟宁　水文地质工程地质. 2021, 48(5): 120-128

东南沿海地区玄武岩残积土雨水运移特征及滑坡失稳数值模拟

Rainfall infiltration characteristics and numerical simulation of slope instability in the basalt residual soil in the coastal area of Southeast China

张晨阳, 张泰丽, 张明, 孙强, 伍剑波, 王赫生　水文地质工程地质. 2019, 46(4): 42-50

四川省泸定县*Ms*6.8级地震地质灾害发育规律与减灾对策

Characteristics of geological hazards and it’s mitigations of the *Ms*6.8 earthquake in Luding County, Sichuan Province

铁永波, 张宪政, 卢佳燕, 梁京涛, 王东辉, 马志刚, 李宗亮, 鲁拓, 石胜伟, 刘民生, 巴仁基, 何龙江, 张新克, 甘伟, 陈凯, 高延超, 白永健, 龚凌枫, 曾孝文, 徐伟　水文地质工程地质. 2022, 49(6): 1-12

四川巴中市滑坡灾害与降雨雨型关系探讨

A discussion of the relationship between landslide disaster and rainfall types in Bazhong of Sichuan

张勇, 温智, 程英建　水文地质工程地质. 2020, 47(2): 178-182

关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202411008

朱贺, 张永双, 任三绍, 等. 拒马河上游极端降雨引发的地质灾害特征与链生演化过程 [J]. 水文地质工程地质, 2025, 52(3): 186-196.

ZHU He, ZHANG Yongshuang, REN Sanshao, et al. Characteristics and chain-generated processes of extreme rainfall-induced geohazards in the upper reaches of the Juma River[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2025, 52(3): 186-196.

拒马河上游极端降雨引发的地质灾害特征与链生演化过程

朱　贺[1,2], 张永双[1,2,3], 任三绍[1,2,3], 陶昶旭[1,3], 刘明学[4]

（1. 中国地质大学（北京）工程技术学院, 北京　100083; 2. 中国地质大学（北京）郑州研究院, 河南 郑州　450001; 3. 自然资源部重大工程地质安全风险防控技术创新中心, 北京　100083; 4. 中国地质环境监测院, 北京　100081）

摘要： 2023 年 7 月 29 日至 8 月 2 日, 华北地区发生了历史上罕见的极端降雨事件, 在京冀西部山区引发了大量突发性地质灾害, 造成严重的人员伤亡与财产损失。在总结分析京冀西部山区“23•7”极端降雨引发地质灾害特征的基础上, 采用现场调查、无人机航拍和数值模拟方法, 分析了拒马河上游地质灾害发育特征, 以西塔村地质灾害链为例, 模拟分析了地质灾害链的形成演化过程。结果表明: (1)京冀西部山区“23•7”极端降雨引发的地质灾害表现出明显的群发性和链生性, 浅表层崩塌、滑坡数量多, 常成为泥石流的物源, 共同构成崩塌滑坡-泥石流-堵河-溃决灾害链; (2)拒马河上游地质灾害链表现出长链条演进、多物源加积的特征, 单条灾害链长度可达 1.2 ~ 1.5 km, 浅表崩滑物源可在灾害链的形成区和流通区同时补给, 呈现灾害链规模放大效应; (3)数值模拟结果显示, 西塔村后山 2 条沟域灾害链单独启动工况下的最大堆积厚度分别为 7.1, 6.2 m, 同时启动工况下的最大堆积厚度达 8.6 m, 灾害链最大运动速率达 9.1 m/s, 表现出典型的单灾链多物源加积放大和多灾链汇聚放大特征, 成为京冀西部山区极端降雨引发地质灾害链的新特点。相关研究认识对于北方山区地质灾害链风险防范具有一定指导意义。

关键词： 极端降雨; 地质灾害链; 灾链体; 放大效应; 京冀西部山区

中图分类号： P642.2　　**文献标志码：** A　　**文章编号：** 1000-3665(2025)03-0186-11

Characteristics and chain-generated processes of extreme rainfall-induced geohazards in the upper reaches of the Juma River

ZHU He[1,2], ZHANG Yongshuang[1,2,3], REN Sanshao[1,2,3], TAO Changxu[1,3], LIU Mingxue[4]

(1. *School of Engineering and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing* 100083, *China*; 2. *Zhengzhou Institute, China University of Geosciences (Beijing), Zhengzhou, Henan* 450001, *China*; 3. *Technology Innovation Center for Risk Prevention and Control of Major Project Geosafety, MNR, Beijing* 100083, *China*; 4. *China Institute of Geo-Environment Monitoring, Beijing* 100081, *China*)

Abstract: From July 29 to August 2, 2023, a historically rare extreme rainfall event occurred in North China,

收稿日期： 2024-11-15; **修订日期：** 2024-12-09　　**投稿网址：** www.swdzgcdz.com

基金项目： 国家自然科学基金项目(42342055); 河南省自然科学基金重点项目(252300421291)

第一作者： 朱贺(2003—), 本博连读生, 主要从事工程地质与地质灾害的研究工作。E-mail: 1171846658@qq.com

通讯作者： 张永双(1968—), 教授, 博士生导师, 主要从事工程地质与地质灾害教学和研究工作。E-mail: zhys100@cugb.edu.cn

which triggered a large number of geohazards in the mountainous areas of western Beijing and Hebei, resulting in serious casualties and property losses. This study analyzed the characteristics of geohazards under the extreme rainfall of "23•7" in Beijing-Hebei region, using on-site investigation, UAV aerial photography, and numerical simulation methods. The analysis focused on the geohazard characteristics in the upper reaches of the Juma River, examining the formation and evolution process and movement characteristics of the geohazards chain in Xita village. The results show that the sudden geohazards in the Beijing-Hebei region exhibited a clustered pattern, with frequent shallow surface collapses and landslides, which often became the source of mudslides, forming of a complete disaster chain of shallow surface landslide-mudslide-river blockage-failure together. The geological disaster chain in the upper reaches of the river shows the characteristics of long chain evolution and multiple sources of material accumulation. The length of a single disaster chain can reach 1.2 ~ 1.5 km, with the sources of shallow avalanches and slides replenishing both in the formation area and circulation area of the disaster chain, amplifying the scale of the disaster. Numerical simulation results show that the movement speed of the geohazards chain in Xita Village reaches up to 9.1 m/s. The maximum accumulation thickness in the two ditches was 7.1 m and 6.2 m when activated individually, and 8.6 m in the case of simultaneous activation, with the movement process showing typical multi-source accretion and amplification. This study provides valuable insights for risk prevention and management of sudden geohazard chains under extreme rainfall in northern mountainous areas.

Keywords: extreme rainfall; geohazards chain; numerical simulation; amplification effect; Beijing-Hebei west mountain area

近年来, 在全球气候变化背景下, 极端降雨引发的突发性地质灾害频繁发生且呈现新的特点。由于极端降雨作用下突发地质灾害影响范围广、破坏性大和隐蔽性强, 受到国内外有关组织和学者的关注。世界气象组织与联合国减少灾害风险办公室发布的《2023 全球气候状况》[1] 显示, 全球各地均面临大范围极端降雨及其引发的滑坡、泥石流等突发地质灾害, 在欧洲中部和北部、亚洲东部、南美洲和非洲均造成严重影响。

国外学者对强降雨引发的滑坡泥石流灾害开展了大量研究, 例如 Rosi 等[2] 利用日降雨量特征和前期累积雨量之间的关系, 提出了意大利艾米利亚—罗马涅地区的滑坡降雨阈值; Lee 等[3] 发现侵蚀和夹带效应会显著放大滑坡-泥石流灾害链的规模与冲击力; Diwakar 等[4] 分析了尼泊尔卡纳利河的多期滑坡-泥石流物源长距离运动过程; Jain 等[5] 提出大颗粒块石是滑坡-碎屑流造成破坏的主要因素。国内学者在京冀西部山区突发地质灾害的形成机理研究方面取得了一些进展, 刘传正等[6] 提出灾害链运动过程中存在多级堵溃的"级联放大效应"; 张启义[7] 认为当地质灾害与建(构)筑物作用时, 部分工程会阻碍灾害运移, 导致淤积堵塞-溃决现象。但是, 由于地质灾害链成因复杂, 加之我国长期以来强降雨引发的突发地质灾害多集中在西南和南方地区[8－9], 北方地区极端降雨次数少、频率低, 对强降雨诱发的地质灾害链的关注程度低[10－12], 相关研究仍存在孕灾背景不清、物源类型和储量不明、灾害链运动过程没有考虑物源补给等不足, 影响了对极端降雨下的地质灾害链形成演化过程的认识, 导致强降雨下突发地质灾害的有效应对措施不到位、风险防范效果不理想。

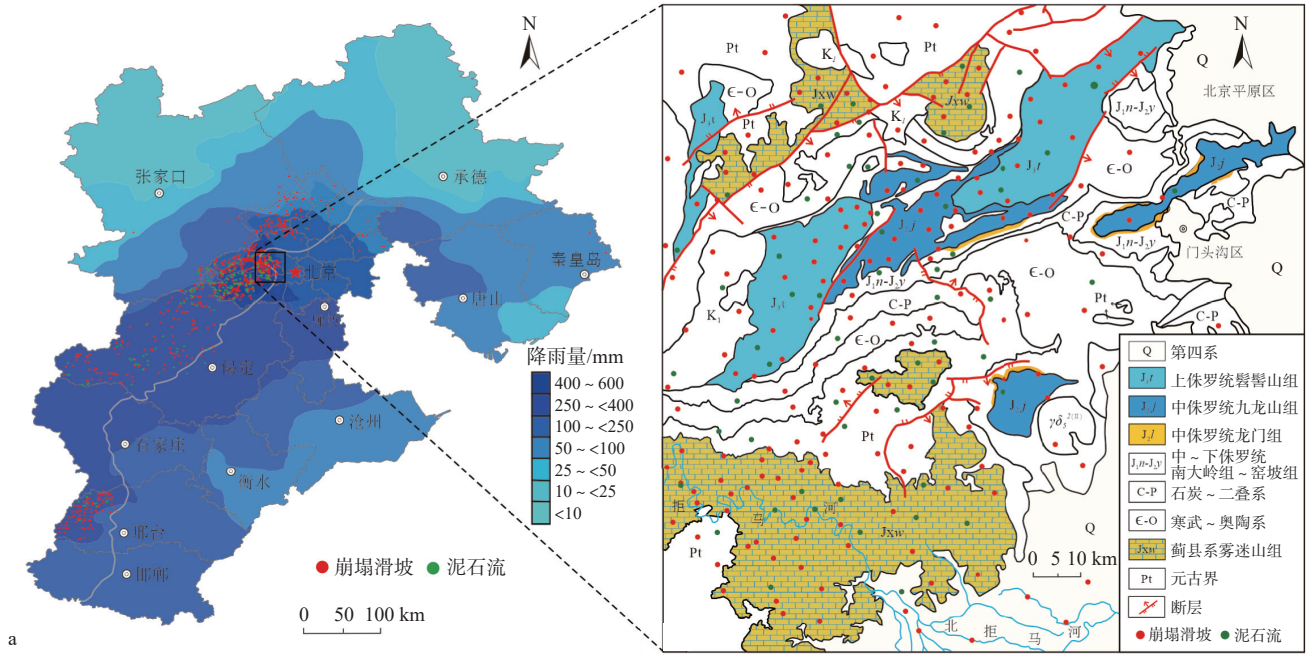
本文在分析京冀西部山区 2023 年 7 月 29 日至 8 月 2 日极端降雨(简称"23•7"降雨事件)引发地质灾害特征的基础上, 开展了拒马河上游西塔地质灾害链的物源补给特点及其规模放大效应研究, 采用 massflow 软件模拟分析了灾害链的形成演化过程, 并提出了针对性的防范对策建议, 对于京冀西部山区地质灾害风险防范具有一定的指导意义。

1　京冀西部山区孕灾背景

1.1　孕灾地质环境条件

京冀西部山区主体为太行山山脉, 地势险峻、地形割切强烈。区域地质构造复杂, 以北东向及北北东向断裂为主, 北西向断裂次之。断裂带附近节理裂隙大量发育、岩体较为破碎。区内自元古代至新生代各时期地层均有出露, 表面风化强烈, 堆积层覆盖较广, 残坡积物厚度为 0.5 ~ 5.0 m, 结构松散, 为地质灾害的发育提供了物质基础(图 1)。

京冀地区大气降水分布不均, 主要集中在 6—9 月, 表现为短时降雨强度大、出现时间集中、降水空



（a）“23・7”降雨量分布　　（b）京冀部分地区地质灾害分布

图 1　京冀地区“23•7”强降雨及其引发地质灾害分布

Fig. 1　Distribution of extreme rainfall and induced geohazards during July, 2023 in Beijing-Hebei region

间分布受地形影响明显。2023 年“23•7”极端降雨事件的降雨中心位于北京市房山区、门头沟区和河北保定、雄安西部等地，总降雨时长超过 80 h，平均降水量 626.3 mm，最大累积降雨量超过 1 000 mm，最大雨强 110.9 mm/h，成为突发地质灾害链的重灾区[13]（图 1）。

1.2　极端降雨突发地质灾害主要特征

2023 年京冀西部山区“23•7”极端降雨引发了大量地质灾害。据初步统计，河北省共发生地质灾害 592 处，其中崩塌滑坡 468 处、泥石流 107 处；北京市共发生地质灾害 1 257 处，其中崩塌滑坡 1 112 处、泥石流 132 处。突发地质灾害主要发育特征有 4 个方面。

（1）由于强降雨持续时间长、累积雨量大、降雨区域集中，京冀西部山区地质灾害表现出明显的群发性态势，其分布范围与强降雨区域一致，规模以小型为主，浅表层崩塌滑坡占比提高[14－15]。

（2）强降雨期间发生的各类地质灾害近 2 000 处，以新引发的地质灾害居多，激发已有地质灾害隐患次之，发生的地质灾害数量达历史新高。威胁破坏对象涉及道路、居民点、景区、学校等，直接经济损失达数亿元，并造成严重人员伤亡。

（3）强降雨引发的地质灾害类型主要为崩塌、滑坡、泥石流。以浅表层滑坡和风化卸荷带崩塌为主，大型基岩滑坡较少；泥石流灾害以沟谷型泥石流为主，坡面型泥石流次之。但相较以往，坡面型泥石流占比提高，在山区农村削坡建房等人类工程活动较强烈的地区分布更为广泛[16]。

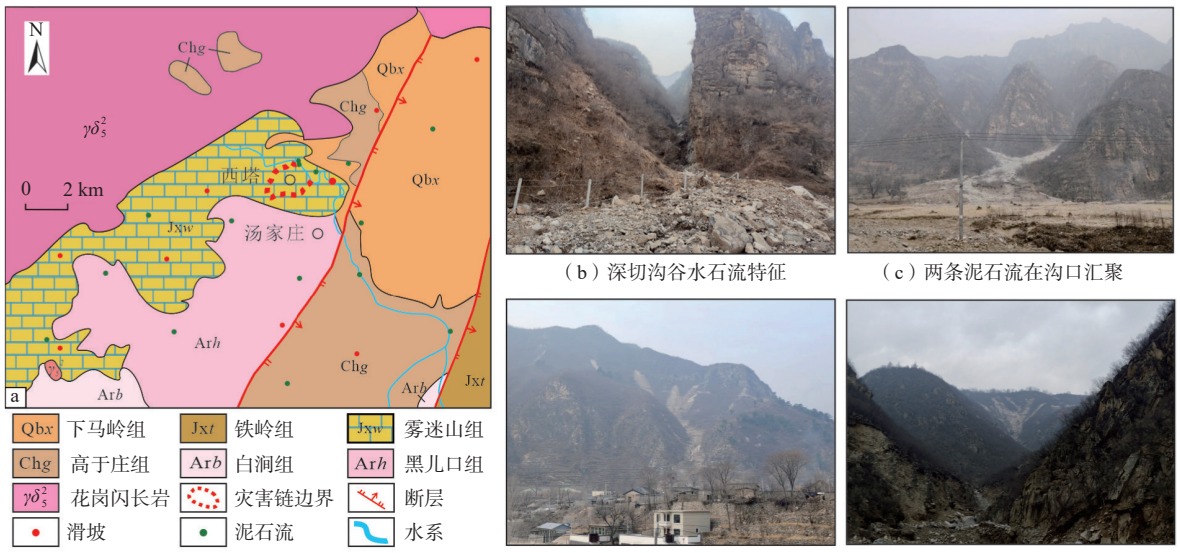
（4）极端降雨下突发地质灾害表现出典型的链生性，大量崩塌、滑坡物源与先期地质灾害堆积体补给后续的泥石流，不仅运动距离长、影响范围广，而且多物源加积和多灾种转化现象明显，导致地质灾害链的灾情放大。

2　拒马河上游地质灾害链发育特征

2.1　拒马河上游地质灾害总体特征

拒马河上游位于河北省涞水县与北京市房山区交接处，地势西高东低，海拔为 500 ~ 2 500 m，地形起伏较大，地形坡度多在 20°以上。区内褶皱与断裂构造发育，以东西向与北北东向断裂为主，北东向断裂次之；地层岩性以砂岩、白云岩、灰岩夹薄层泥页岩为主（图 2）。受长期风化卸荷的影响，斜坡浅表层岩体节理裂隙发育、破碎强烈，为突发地质灾害的发育提供了重要物质基础[14, 16－17]。

拒马河上游支流蓬头河沿岸调查结果表明，区域内泥石流类型有沟谷型泥石流和坡面型泥石流 2 类，泥石流固体物源主要来自岸坡浅表层残坡积物，其次为沟道内堆积物等。坡面型泥石流多形成于坡面凹槽区，形态上呈漏斗形，沟短坡陡，坡面堆积物先滑后流，规模较小（图 2）。



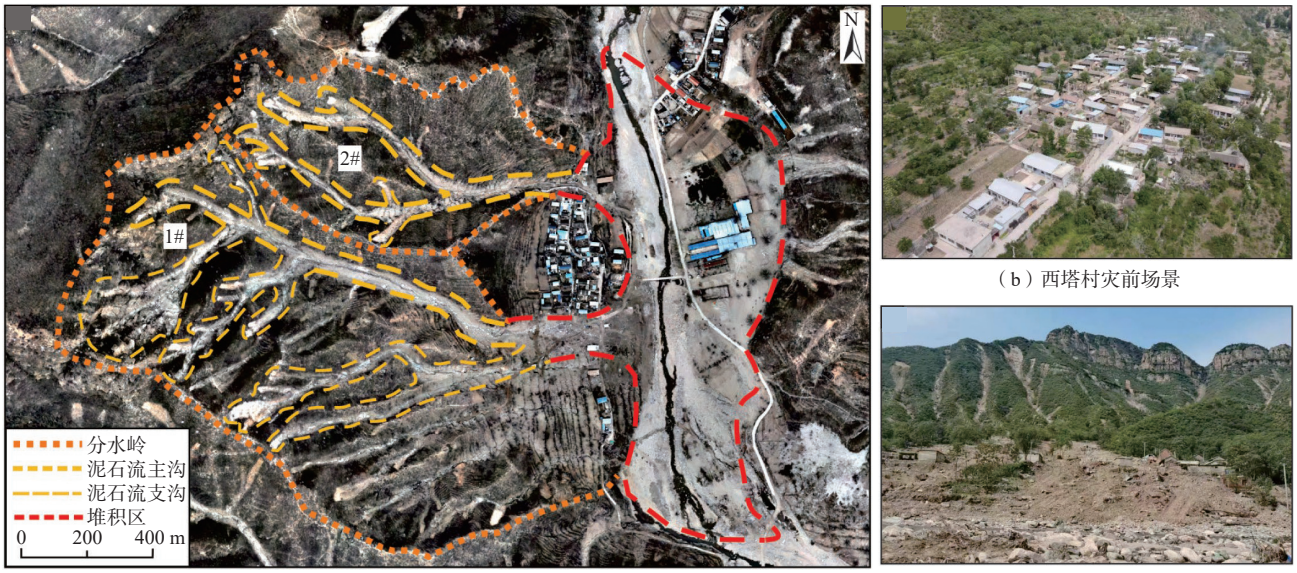
（a）蓬头河支流地质环境　（b）深切沟谷水石流特征　（c）两条泥石流在沟口汇聚　（d）浅层滑坡转化为泥石流　（e）浅层滑坡特征

图 2　拒马河上游蓬头河支流地质环境与地质灾害发育特征

Fig. 2　Geologic environment sketch of the upper reaches of the Juma River and characteristics of geohazards

2.2　西塔村滑坡-泥石流灾害链发育特征

拒马河上游发育 3 级河流阶地，其中 T_2 级阶地成为不少村庄的所在地。涞水县西塔村主体位于拒马河支流蓬头河右岸 T_2 级阶地，局部位于 T_3 级阶地前缘。村庄西侧后山是由蓟县系雾迷山组（Jx*w*）白云岩、灰岩夹薄层泥页岩构成的斜向坡，其中发育多条横向沟谷。斜坡浅表层为基岩风化形成的残坡积物，局部夹杂块石，厚度为 0.5 ~ 3.0 m。坡面植被覆盖较好，局部基岩裸露。“23•7”极端降雨发生之前，研究区长期降水稀少，坡面与沟道内岩土体风化强烈，结构松散，短时强降雨后大量降雨入渗，岩土体强度降低，失稳概率提高。极端降雨引发的滑坡-泥石流灾害链分别沿村庄附近的 2 条沟谷快速冲出，横穿西塔村并造成大量房屋被毁（图 3），人员伤亡严重。



（a）西塔村灾害链正射影像　（b）西塔村灾前场景　（c）西塔村灾后场景

图 3　西塔地质灾害链平面分区及受灾前后对比

Fig. 3　Zonation of geohazard chain in Xita Village and comparison before and after the disaster

根据实地调查结果，西塔村后山斜坡存在 2 条小型沟域（1#、2#），每个沟域上游又发育多条支沟。1#沟域由 1 条主沟与 4 条小型支沟组成，每条支沟又有若干条微型支沟。1#沟域面积约为 0.53 km^2，落差约为

600 m, 上游区域坡度为 30° ~ 55°, 中游区域坡度为 20° ~ 45°, 沟道内堆积物厚度为 1 ~ 2 m, 下游沟道趋于平缓, 沟口前有转折, 沟口宽约 30 m。2#泥石流沟由 2 条较大支沟组成, 在中下游区域汇聚形成 1 条主沟。2#沟域面积约为 0.22 km^2, 落差约为 400 m, 上游区域坡度为 25° ~ 45°, 中游区域坡度为 15° ~ 30°, 沟道内堆积物厚度为 0.5 ~ 2.0 m, 下游沟道同样趋于平缓, 沟口宽约 15 m。2 条泥石流冲出沟口后在居民点处汇合并形成大范围堆积扇, 堆积扇厚约 4 m, 分选现象明显, 泥石流中的细颗粒物质多聚集在底部, 大颗粒块石主要分布在前缘和两侧, 堆积扇顶部可见巨大块石, 直径可达 2 m。

从灾后无人机正射影像可以看出(图 3), 西塔村后山 1#沟域灾害链长度约 1.5 km、2#沟域灾害链长度约 1.2 km, 表现出典型的多灾种叠加、多物源加积的特点。沟域上游在极端降雨作用下坡积物垮塌同时刮划松散岩土体, 斜坡以浅表层堆积层滑坡和风化卸荷崩塌等形式发生变形破坏, 随后变为坡面泥石流, 汇入主沟道后转化为沟谷型泥石流。不少支沟物质在主沟的中游区域汇入, 在此运动过程中, 泥石流所携带的大颗粒物源对两侧沟道进行冲击与铲刮, 进一步导致两侧岩土体破碎和失稳, 大量松散堆积物从沟谷两侧被剥离下来, 形成大量小型坡面泥石流和浅表层滑坡, 并一起卷入泥石流中, 呈现长距离演进、多物源加积的沿程放大效应。2 条泥石流沟横穿村庄后在前缘蓬头河汇聚, 形成巨厚堆积扇并导致蓬头河短时堵塞, 体现了典型的多链条汇聚的规模放大效应, 这在以往北方山区地质灾害中极为少见。

3 西塔地质灾害链形成演化过程数值模拟

为了分析灾害链形成演化过程的物源汇聚和能量转化特点, 采用 massflow 软件开展了西塔滑坡-泥石流灾害链数值模拟, 该软件基于深度积分的连续介质力学理论, 通过改进 MacCormack—TVD 有限差分方法, 在复杂地形地貌情况下可以较好地再现突发滑坡、泥石流灾害的运动过程, 且具有计算精度高、计算速度快等优点, 可为深化地质灾害链动力学机制认识、灾情预测及制定相应的风险防控对策提供理论支撑。

3.1 模型建立

借助无人机航摄获取西塔村后山及邻区的高精度影像和原始地形的高精度数字高程模型(digital elevation model, DEM), 然后借助 ArcGIS 软件将研究区域 DEM 划分为 5 m×5 m 的均匀网格。

考虑到西塔滑坡-泥石流灾害链首先在 2 条沟域(1#、2#)分别发育、冲出沟口后在主河道附近汇合, 故假设极端降雨下灾害链在 2 条沟域同时启动, 设置 2 条沟域分别单独运动与 2 条沟道同时启动 3 种工况进行数值模拟, 据此诠释极端降雨下滑坡-泥石流灾害链的形成过程和演化机制。

3.2 参数选取

根据研究区历史泥石流特征和现有物源特性, 选用 Voellmy 模型进行西塔滑坡-泥石流灾害链数值模拟计算, 其模型表达式为:

$$\tau = \mu\sigma + \frac{\rho g v^2}{\xi} \tag{1}$$

式中: τ——底部的剪应力/Pa;

μ——摩擦系数;

σ——正应力/Pa;

g——重力加速度/(m·s^{-2});

v——速度/(m·s^{-1});

ρ——泥石流密度/(kg·m^{-3});

ξ——湍流系数/(m·s^{-2})。

经现场实地考察与反演验证, 模拟采用的泥石流密度取 1 550 kg/m^3。摩擦系数和湍流系数的取值通过实地考察并结合前人研究成果, 确定参数取值范围后进行反演分析得出[18 - 20], 选取摩擦系数 μ=0.15、湍流系数 ξ=500 m/s^2。洪峰流量采用经验公式进行计算:

$$Q_p = 0.278\psi F I \tag{2}$$

$$Q_c = (1+\varphi) Q_p D_c \tag{3}$$

式中: Q_c——泥石流峰值流量/(m^3·s^{-1});

Q_p——某一降雨期下暴雨洪峰流量/(m^3·s^{-1});

ψ——径流系数;

F——汇水面积/km^2;

I——点设计暴雨量/(mm·h^{-1});

φ——泥沙修正系数;

D_c——泥石流阻塞系数。

经计算, 本次研究中对灾链体的峰值流量取值 1#主沟为 105 m^3/s, 2#主沟为 70 m^3/s, 大型支沟为 28 m^3/s, 小型支沟为 10 m^3/s。根据实际情况, 确定滑坡-泥石流灾害链计算持续时间为 2 000 s。

基于实地调查分析与反演计算, 综合确定相关参数取值, 见表 1。

3.3 计算结果与分析

在西塔滑坡-泥石流灾害链形成与运动过程模拟中, 分别考虑了 1#、2#沟域单独启动和两者同时启动

表 1　灾害链数值模拟参数取值

Table 1　Parameter values for geohazard chain modeling

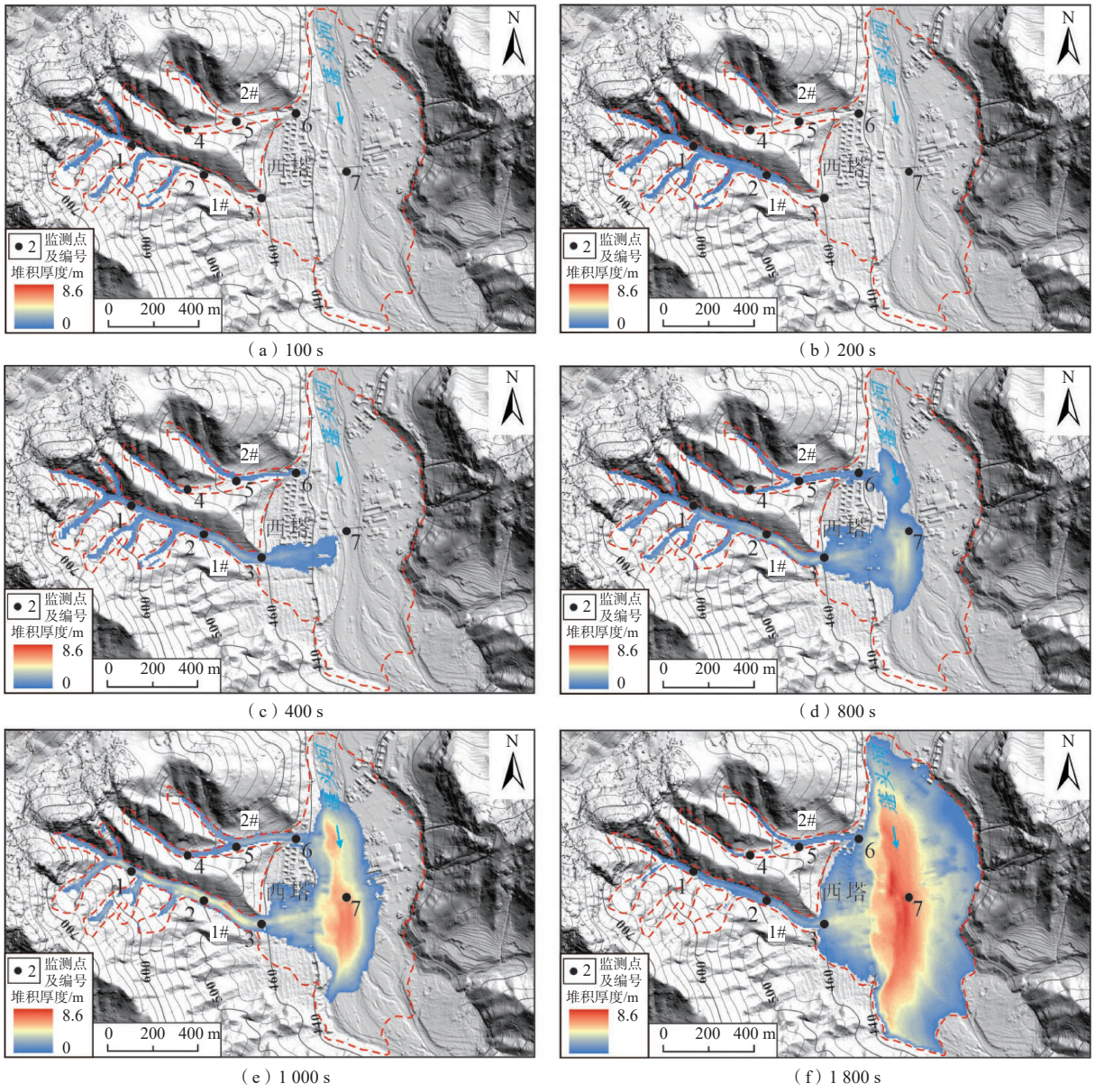
泥石流密度 /(kg·m^{-3})	摩擦系数	湍流系数 /(m·s^{-2})	持续时间 /s	1#主沟流量 /(m^3·s^{-1})	2#主沟流量 /(m^3·s^{-1})	大型支沟流量 /(m^3·s^{-1})	小型支沟流量 /(m^3·s^{-1})
1 550	0.15	500	2 000	105	70	28	10

3 种工况，并在沟道与居民点的不同位置设置监测点，获得了灾害链运动过程和不同时刻的堆积厚度及流速变化情况。结果表明，不同工况下的灾害链运动特征与堆积范围差异不大。现结合 1#和 2#主沟单独启动、同时启动工况下的模拟结果进行分析（图 4—7）。

3.3.1　灾害链运动过程中的堆积厚度变化

图 4 为灾害链运动过程中的堆积物厚度分布图，沿 1#、2#沟域分别设置主沟道灾链体厚度变化监测点，其中 7 号监测点为 1#和 2#沟域的灾链体同时运动时所得数据。

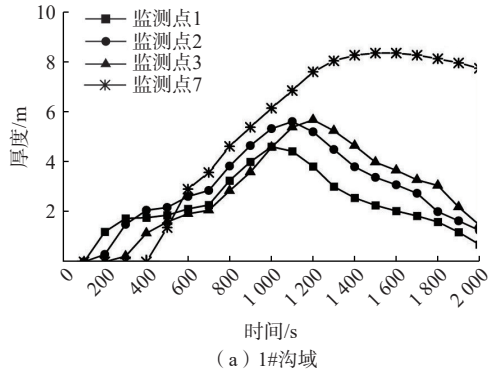
1#沟域单独启动时（图 5a），0 ~ 200 s 斜坡中上部浅表层物源启动并快速运移至主沟道内；200 ~ 400 s 主沟灾链体抵达沟口；400 ~ 800 s 灾链体冲出沟口、抵达村落后缘并发生扩散；800 ~ 1 200 s 穿过村落、抵



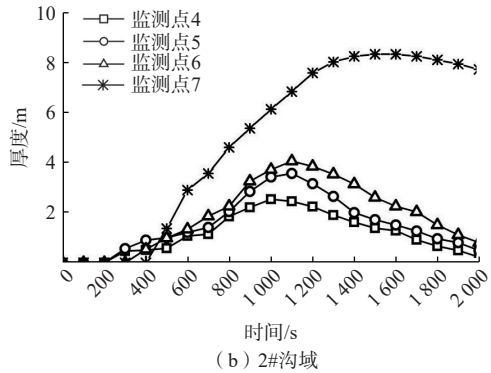
（a）100 s　（b）200 s　（c）400 s　（d）800 s　（e）1 000 s　（f）1 800 s

图 4　灾害链运动过程中堆积物厚度分布图

Fig. 4　Accumulation thickness distribution during geohazard chain movement processes



（a）1#沟域



（b）2#沟域

图 5　监测点堆积厚度变化曲线

Fig. 5　Deposition thickness curves of the monitoring points in gulley 1# (a) and 2# (b)

达前缘蓬头河主河道；1 200 ~ 2 000 s 在蓬头河主河道内完成堆积，最大堆积厚度为 7.1 m。

2#沟域单独启动时（图 5b），0 ~ 200 s 斜坡中上部浅表层物源启动、快速运移至支沟，并进一步抵达主沟道附近；200 ~ 300 s 2 条支沟泥石流汇聚至主沟道内；300 ~ 400 s 灾链体抵达沟口；400 ~ 800 s 灾链体抵达村落后缘并少量堆积；800 ~ 1 200 s 灾链体穿过村落、抵达主河道；1 200 ~ 2 000 s 灾链体在蓬头河主河道完成堆积，最大堆积厚度为 6.2 m。

当 1#和 2#沟域的灾链体同时运动时（图 4），前期启动过程和运移特征与单独启动工况类似，各自独立运动。在 800 ~ 1 200 s 时，1#主沟与 2#主沟的灾链体在村落前缘主河道内发生汇聚；在 1 200 ~ 2 000 s 时，2 条灾链体完成堆积，主河道内最大堆积厚度为 8.6 m，居民点最大堆积厚度 4.5m。

3.3.2　灾害链运动过程的速率变化

在运动速率方面，1#、2#沟域灾链体的流速相对独立，彼此影响较小。总体来看，在 0 ~ 1 000 s 灾链体流速持续增加并在 1 000 s 时达到峰值，1 000 ~ 2 000 s 略有下降，抵达居民点之后逐步减缓直至停止（图 6、图 7）。

1#沟域单独运动时（图 7a），0 ~ 200 s 斜坡中上部浅表层滑坡启动并运动至主沟内；200 ~ 400 s 灾链体速率逐渐增加，达到 5 ~ 6 m/s 后趋于稳定；400 ~ 800 s 灾链体以 5 ~ 6 m/s 的稳定流速继续运动；800 ~ 1 400 s 时主沟内灾链体速率先增加后下降，1 000 s 时上游灾链体最大速率 7.7 m/s，支沟内灾链体最大速率 5.1 m/s，中部沟道区域灾链体达到峰值速率 9.1 m/s，随后逐渐下降至 5 ~ 6 m/s，沟口处最大速率 6.6 m/s；1 400 ~ 2 000 s 灾链体速率逐步减缓至停止，最终在主河道内完成堆积。

2#沟域单独运动时（图 7b），0 ~ 300 s 2 条支沟中上部浅表层滑坡启动并快速运移至主沟内；300 ~ 800 s 主沟内灾链体速率逐渐增加，达到 4 ~ 5 m/s；800 ~ 1 400 s 主沟内灾链体速率先增加后下降，1 000 s 时上游灾链体最大速率 5.5 m/s，中部沟道区域灾链体达到峰值速率 7.2 m/s，在此后的运动过程中逐渐下降至 4 ~ 5 m/s，沟口处最大速率 6.2 m/s；1 400 ~ 2 000 s 速率逐步减缓至停止，最终在主河道内完成堆积。

从灾链体运动情况来看，2 条沟域上游的灾链体流速与增速均较快，在沟域中下游的速率趋于稳定，冲出沟口后灾链体流速降低，逐步减小至停止。模拟结果显示（图 6），灾链体穿过居民点时流速为 2 ~ 5 m/s，携带的大量物源具有极强的冲击力，造成居民点建筑物和公路等严重破坏，冲出沟口后在主河道堆积，速率逐步减缓至停止并最终堵塞河道。

3.3.3　结果验证与分析

经灾后实地考察，西塔村居民点位置平均堆积厚度为 2.3 m，最大厚度可达 4 m，在前缘蓬头河的河道处大量堆积物虽已经过清淤处理，但在对岸仍可见部分堆积物源残留及冲刷痕迹，说明模拟结果与实际情况一致。与 1#和 2#沟域单独启动相比，1#沟域与 2#沟域同时启动、运移和汇聚，灾害链的运动过程更复杂，灾链体的堆积厚度更大、致灾影响范围更广。在模拟计算过程中，3 种工况下均出现了主要沟道开始运动时，两侧小型支沟的浅表层物源随之启动，并在此后运动过程中汇聚至主沟中，显著增加了灾害链的物质总量。

4　讨论

4.1　极端降雨下地质灾害链的群发性

众所周知，降雨是诱发崩塌、滑坡、泥石流灾害的重要外动力因素，在浅表层堆积物较丰富的山区还可能导致大量群发性单体地质灾害。在极端降雨条件

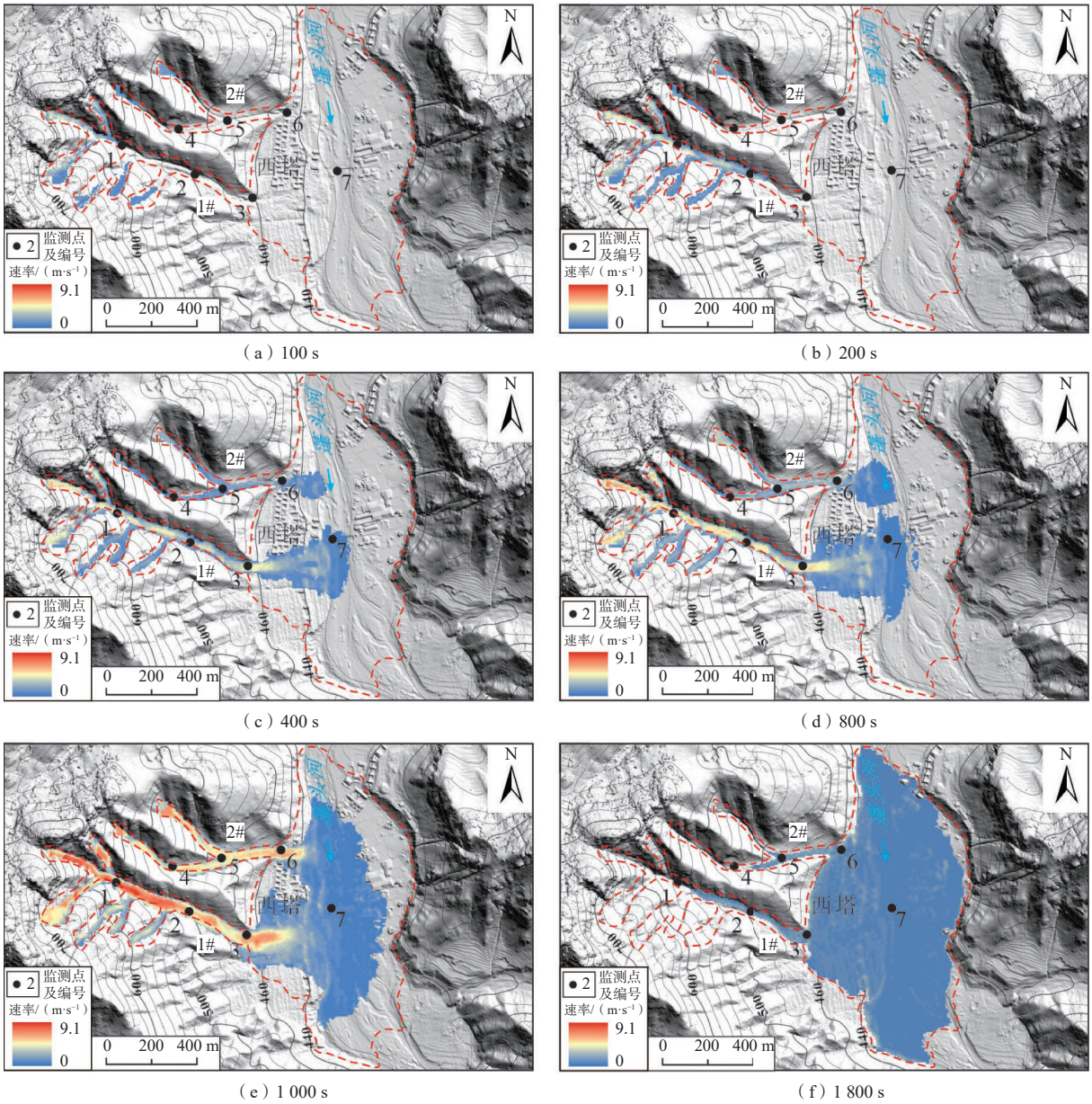


图 6　灾害链运动过程中的堆积物运移速率分布图

Fig. 6　Accumulation thickness distribution during geohazard chain movement processes

下（降雨量的历史重现率低于 10% 或高于历史极值），加上较丰富的斜坡松散堆积体和适宜的地貌条件，则会出现群发性的地质灾害链场景。这是京冀西部山区“23•7”极端降雨诱发地质灾害的新特点之一。

以往普遍认为北方山区地质灾害较不发育，相应的地质灾害防治措施及公众的防范意识相对薄弱。然而，极端气候变化（特别是“23•7”极端降雨事件）颠覆了人们以往的认知。未来极端降雨将成为常态[21]的背景下，加上京冀西部山区浅表层岩土体风化程度较高、在坡面浅表层与沟道内分布广泛，长期干旱后发生的短时强降雨更易引发地质灾害链[22－23]。这一态势务必引起高度重视。

4.2　地质灾害链多物源加积和多灾链汇聚放大效应

京冀西部山前过渡带虽然山势不高，但是发育大量三面环山、一面沟谷的微型地貌，为地质灾害链长距离运移和阶段转化提供了有利条件。同时，京冀西部山区地质构造复杂、岩体完整性差，在极端降雨作用下，沟道两侧岸坡的崩塌滑坡及坡面泥石流可能快速汇入主沟[24－25]成为地质灾害链的重要物源。值得指出的是，地质灾害链物源不仅仅分布在灾害链的源区[26－27]，在流通区沟道两侧的群发性坡面泥石流物源、中部沟道两侧铲刮物源及沟道底部下切侵蚀物

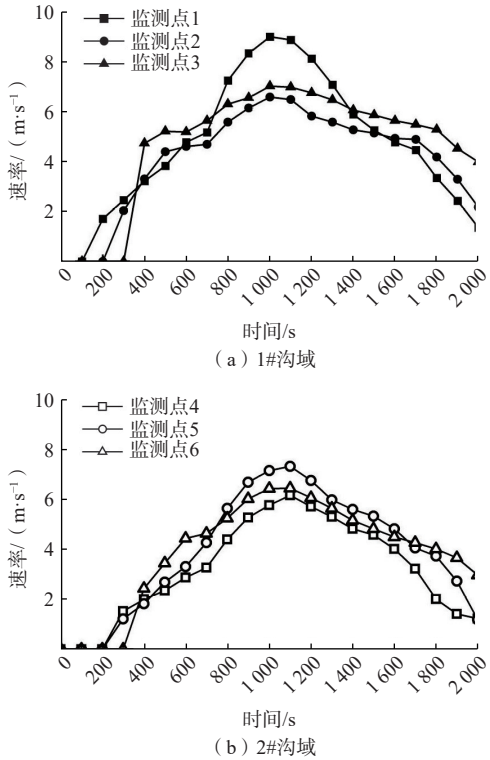


图 7 监测点速率变化曲线

Fig. 7 Velocity curves of monitoring points in gulley1# (a) and 2# (b)

源，在短时间内加积汇聚于主沟，呈现显著的多物源加积放大效应。这是京冀西部山区极端降雨下突发地质灾害链的另一新特点。

国内外学者以往对地质灾害链的研究，大多聚焦单链条的灾害链[28－29]，对群发灾害链的关注较少。京冀西部山区“23•7”极端降雨下突发地质灾害链不仅表现出典型的群发性，而且不可避免地出现多灾链的汇聚效应。也就是说，当诱发条件能级较低时，灾害链主要围限于小的汇水区或出沟口后能量基本散尽，仅形成单链条的地质灾害链；而在极端降雨条件下，多条灾害链可同时或在相近时间内冲出沟口，具有较大的冲击能量且可能发生多链条汇聚，出现多灾链汇聚放大现象。因此，多灾链汇聚形成巨灾链将是未来极端降雨条件下要面临的巨灾风险。

4.3 突发地质灾害链风险防范对策建议

地质灾害对工程建设安全的影响巨大，场地选址是减少地质灾害至关重要的一环。山前过渡带村落房屋建筑多聚集在沟口附近，如果村落占据行洪通道，难免受到不同程度的冲击和淤埋，导致严重的灾难。因此，对于突发地质灾害链风险防范应注意以下方面。

（1）在场地选址时应选在开阔平缓的二级或三级阶地之上，避免在沟口与行洪区厚层堆积层附近选址。

（2）极端降雨远超常规降雨阈值，诱发地质灾害链的可能性极大[28]，应确保留足排洪通道，加强监测预警。

（3）在地质灾害工程治理设计时，要贯穿上、中、下游系统防范的思路，充分考虑滑坡-泥石流复合灾害链的多物源加积和多灾链汇聚放大效应，结合地区物源情况制定防范标准，采取疏堵结合、韧性防控的综合措施。

（4）加强汛前地质灾害链风险应急演练，提高山区民众的防灾意识和应对能力，是提升韧性防控水平的重要手段。

5 结论

（1）极端降雨是京冀西部山区“23•7”突发地质灾害链的触发因素，地质灾害类型多样、群发性明显。拒马河上游具有陡峻的地形地貌和较丰富的物源条件，在长期干旱后的短时强降雨条件下，极易触发大范围的崩塌、滑坡和泥石流地质灾害，并转化为地质灾害链。

（2）京冀西部山区的地质灾害链主要表现为滑坡-泥石流灾害链，通常以长距离运移的泥石流为主体，浅表层滑坡在形成区和流通区以物源形式加积，部分灾害链在发生汇聚后还可能形成规模更大的灾害链，导致堵河成坝-溃决。对比以往彼此间影响较小且基本不会发生汇聚的单链条灾害链，汇聚后的群发灾害链规模更大、破坏力更强，成为极端降雨下突发地质灾害链的新特点。

（3）拒马河上游西塔村灾害链在形成演化过程中，1#、2#沟域上游浅表层滑坡、两侧岸坡动力铲刮、沟道侵蚀等多种物源的叠加大大提高了灾害链物源总量，放大了灾害链体的冲击力与破坏性，是造成本次灾害链损失巨大的关键因素。数值模拟分析表明，灾害链在沟道中的峰值速率为 9.1 m/s，穿越居民点时的最大速率超过 5 m/s；居民点最大堆积厚度 4.5 m，两条沟域单独启动时的最大堆积厚度分别为 7.1 m 和 6.2 m，同时启动情况下 1#、2#沟灾链体叠加汇聚后的最大堆积厚度为 8.6 m，同时堆积范围也显著增大。

（4）极端降雨下的地质灾害链突发性强、破坏性大，灾害链运动过程中表现出典型的多物源加积放大和多灾链汇聚放大效应，场地选址应选在开阔平缓的第二级或第三级阶地之上，避免在厚层堆积层附近并留足排洪通道。同时采取加强科普宣传力度，在强降

雨后及时开展预警预报等工作，进行风险防范。

值得指出的是，尽管本文采用 massflow 软件较好地再现了西塔地质灾害链的形成演化和致灾过程，但是在大量浅表层崩滑体如何汇入主沟道、怎样铲刮斜坡-沟道物质，从而放大灾链体规模等过程细节方面，还需要进一步改进。这也是地质灾害链成灾过程数值模拟和推演研究未来发展的方向。

参考文献（References）：

［1］ WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO). State of the global climate 2023[R]. Geneva: WMO, 2024.

［2］ ROSI A, SEGONI S, CANAVESI V, et al. Definition of 3D rainfall thresholds to increase operative landslide early warning system performances[J]. Landslides, 2021, 18(3): 1045 − 1057.

［3］ LEE S, AN H, KIM M, et al. Evaluation of different erosion–entrainment models in debris-flow simulation[J]. Landslides, 2022, 19(9): 2075 − 2090.

［4］ DIWAKAR K C, DANGI H, NAQVI M W, et al. Recurring landslides and debris flows near kalli village in the lesser Himalayas of western Nepal[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2023, 41(5): 3151 − 3168.

［5］ JAIN N, MARTHA T R, KHANNA K, et al. Major landslides in Kerala, India, during 2018–2020 period: An analysis using rainfall data and debris flow model[J]. Landslides, 2021, 18(11): 3629 − 3645.

［6］ 刘传正，黄帅. 郑州西部山区“7•20”山洪地质灾害成因研究［J］. 工程地质学报，2022, 30(3): 931 − 943.［LIU Chuanzheng, HUANG Shuai. Research on “7• 20” mountain torrents and geological disasters in Zhengzhou City, Henan Province of China[J]. Journal of Engineering Geology, 2022, 30(3): 931 − 943. (in Chinese with English abstract)］

［7］ 张启义. 北京房山区“23•7”特大暴雨灾害的成因及启示［J］. 中国防汛抗旱，2023, 33(10): 43 − 47.［ZHANG Qiyi. The cause and Enlightenment of the “23 •7” extremely rainstorm disaster in Fangshan District of Beijing City[J]. China Flood & Drought Management, 2023, 33(10): 43 − 47. (in Chinese with English abstract)］

［8］ 刘佳意，陈春利，付昱凯，等. 降雨诱发的浅表堆积层滑坡成因机理与稳定性预测模型［J］. 水文地质工程地质，2024, 51(2): 183 − 191.［LIU Jiayi, CHEN Chunli, FU Yukai, et al. Mechanism of rainfall-induced shallow landslide and stability prediction model[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(2): 183 − 191. (in Chinese with English abstract)］

［9］ 谭银龙，许万忠，曹家菊，等. 基于 Midas-GTS 的三峡库区金鸡岭滑坡成因机制与稳定性分析［J］. 水文地质工程地质，2023, 50(1): 113 − 121.［TAN Yinlong, XU Wanzhong, CAO Jiaju, et al. Mechanisms and stability analysis of the Jinjiling landslide in the Three Gorges Reservoir area based on Midas-GTS[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(1): 113 − 121. (in Chinese with English abstract)］

［10］ 刘檣漪，程维明，孙东亚，等. 中国历史山洪灾害分布特征研究［J］. 地球信息科学学报，2017, 19(12): 1557 − 1566.［LIU Qiangyi, CHENG Weiming, SUN Dongya, et al. Distribution characteristics of historical mountain flood in China[J]. Journal of Geo-Information Science, 2017, 19(12): 1557 − 1566. (in Chinese with English abstract)］

［11］ 陈跃红，徐聪聪，张晓祥，等. 中国山洪区划研究［J］. 地理学报，2023, 78(5): 1059 − 1073.［CHEN Yuehong, XU Congcong, ZHANG Xiaoxiang, et al. Regionalization of flash floods in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2023, 78(5): 1059 − 1073. (in Chinese with English abstract)］

［12］ 郭良，张晓蕾，刘荣华，等. 全国山洪灾害调查评价成果及规律初探［J］. 地球信息科学学报，2017, 19(12): 1548 − 1556.［GUO Liang, ZHANG Xiaolei, LIU Ronghua, et al. Achievements and preliminary analysis on China National flash flood disasters investigation and evaluation[J]. Journal of Geo-Information Science, 2017, 19(12): 1548 − 1556. (in Chinese with English abstract)］

［13］ 南赟，翟淑花，李岩，等. 北京地区“23•7”特大暴雨型地质灾害特征及预警成效分析［J］. 中国地质灾害与防治学报，2024, 35(2): 66 − 73.［NAN Yun, ZHAI Shuhua, LI Yan, et al. Analysis on the characteristics of geological disasters and effectiveness of early warning duiring heavy rainfall on “23 •7” in Beijing[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024, 35(2): 66 − 73. (in Chinese with English abstract)］

［14］ 杨晓亮，金晓青，孙云，等. “23•7”河北太行山东麓罕见特大暴雨特征及成因［J］. 气象，2023, 49(12): 1451 − 1467.［YANG Xiaoliang, JIN Xiaoqing, SUN Yun, et al. Evolution characteristics and formation of the July 2023 severe torrential rain on the eastern foothills of Taihang Mountains in Hebei Province[J]. Meteorological Monthly, 2023, 49(12): 1451 − 1467. (in Chinese with English abstract)］

[15] 杨舒楠, 张芳华, 胡艺, 等. “23•7”华北特大暴雨过程的基本特征与成因初探 [J]. 暴雨灾害, 2023, 42(5): 508 − 520. [YANG Shunan, ZHANG Fanghua, HU Yi, et al. Analysis on the characteristics and causes of the “23 •7” torrential rainfall event in North China[J]. Torrential Rain and Disasters, 2023, 42(5): 508 − 520. (in Chinese with English abstract)]

[16] 顾福计, 钱龙, 王梦洁, 等. 太行山河北段“23•7”强降雨引发的地质灾害规律研究 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(2): 55 − 65. [GU Fuji, QIAN Long, WANG Mengjie, et al. Analysis of geological hazards caused by the “23•7” heavy rainfall in the northern section of Taihang Mountain in Hebei Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024, 35(2): 55 − 65. (in Chinese with English abstract)]

[17] 张江涛, 何丽华, 李江波, 等. 河北“23•7”极端暴雨过程特征及成因初探 [J]. 大气科学学报, 2023, 46(6): 884 − 903. [ZHANG Jiangtao, HE Lihua, LI Jiangbo, et al. Preliminary study on the characteristics and causes of the “23•7” extreme rainstorm in Hebei[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2023, 46(6): 884 − 903. (in Chinese with English abstract)]

[18] OUYANG Chaojun, WANG Zhongwen, AN Huicong, et al. An example of a hazard and risk assessment for debris flows: A case study of Niwan Gully, Wudu, China[J]. Engineering Geology, 2019, 263: 105351.

[19] OUYANG Chaojun, HE Siming, TANG Chuan. Numerical analysis of dynamics of debris flow over erodible beds in Wenchuan earthquake-induced area[J]. Engineering Geology, 2015, 194: 62 − 72.

[20] 王俊飞, 金超, 袁鸿鹄, 等. 冬奥会延庆赛区造雪引水工程潜在泥石流灾害模拟与对策研究 [J]. 工程地质学报, 2023, 31(2): 514 − 525. [WANG Junfei, JIN Chao, YUAN Honghu, et al. Numerical simulation and countermeasures of potential debris flow disasters in Yanqing competition area of Olympic Winter Games Beijing[J]. Journal of Engineering Geology, 2023, 31(2): 514 − 525. (in Chinese with English abstract)]

[21] DUAN Wansuo, YANG Lichao, MU Mu, et al. Recent advances in China on the predictability of weather and climate[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2023, 40(8): 1521 − 1547.

[22] OGUZ E A, BENESTAD R E, PARDING K M, et al. Quantification of climate change impact on rainfall-induced shallow landslide susceptibility: A case study in central Norway[J]. Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards, 2024, 18(2): 467 − 490.

[23] VILLAÇA C, SANTOS P P, ZÊZERE J L. Modelling the rainfall threshold for shallow landslides considering the landslide predisposing factors in Portugal[J]. Landslides, 2024, 21(9): 2119 − 2133.

[24] 许强, 董秀军, 邓茂林, 等. 2010 年“7•27”四川汉源二蛮山滑坡-碎屑流特征与成因机理研究 [J]. 工程地质学报, 2010, 18(5): 609 − 622. [XU Qiang, DONG Xiujun, DENG Maolin, et al. The ermanshan rock slide debris flow of Junly 27, 2010 in Hanyuan, Sichuan: Characteristics and failure mechanism[J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(5): 609 − 622. (in Chinese with English abstract)]

[25] 崔鹏, 郭剑. 沟谷灾害链演化模式与风险防控对策 [J]. 工程科学与技术, 2021, 53(3): 5 − 18. [CUI Peng, GUO Jian. Evolution models, risk prevention and control countermeasures of the valley disaster chain[J]. Advanced Engineering Sciences, 2021, 53(3): 5 − 18. (in Chinese with English abstract)]

[26] 唐文坚, 范仲杰, 董林垚, 等. 暴雨型山洪灾害链监测预警研究与展望 [J]. 长江科学院院报, 2023, 40(7): 73 − 79. [TANG Wenjian, FAN Zhongjie, DONG Linyao, et al. Research framework and prospect for monitoring and early warning of rainstorm-induced mountain torrent disaster chain[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2023, 40(7): 73 − 79. (in Chinese with English abstract)]

[27] 高少华, 殷跃平, 李滨, 等. 雅鲁藏布江大峡谷则隆弄高位冰岩崩灾害链动力学特征 [J]. 工程地质学报, 2024, 32(3): 996 − 1009. [GAO Shaohua, YIN Yueping, LI Bin, et al. Dynamic characteristics of the rock-ice avalanche disaster chain in the Zelongnong Basin, Yarlung Zangbo River canyon region[J]. Journal of Engineering Geology, 2024, 32(3): 996 − 1009. (in Chinese with English abstract)]

[28] 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 [J]. 地质力学学报, 2022, 28(6): 1071 − 1080. [TIE Yongbo, ZHANG Xianzheng, GONG Lingfeng, et al. Research on the pattern of typical geohazard chains in the southwest mountainous region, China[J]. Journal of Geomechanics, 2022, 28(6): 1071 − 1080. (in Chinese with English abstract)]

[29] HE Shuangshuang, WANG Jun, LIU Songnan. Rainfall event–duration thresholds for landslide occurrences in China[J]. Water, 2020, 12(2): 494.

编辑: 张若琳