

# 北京市门头沟区群发性坡面泥石流 成因及防治措施

李华东, 姜永玲

(中国地质工程集团有限公司, 北京 100093)

**摘要:** [目的] 研究北京市门头沟区群发性坡面泥石流灾害的成因机理, 为该类型泥石流防治提供理论依据。[方法] 采用多源数据融合与实地验证方法, 应用 Maxar WorldView 0.3 m 高分辨率遥感影像, 识别群发性、坡面型泥石流的空间分布范围、流通过程及堆积特征; 结合无人机倾斜摄影测量, 获取典型灾点高精度地形数据。[结果] ① 王平村群发性坡面泥石流是“地质环境基底-极端降雨-人类工程扰动”三元耦合作用的结果。地质上受背斜构造控制, 地形坡度  $19.49^{\circ}\sim 36.54^{\circ}$ , 残坡积层与基岩形成的“二元结构”, 为泥石流提供物源与滑动边界; ② 极端降雨(累积雨量  $>700$  mm, 最大雨强  $111.8$  mm/h) 导致土体饱和并触发流动; ③ 人类工程扰动改变了坡面地形, 降低了坡面稳定性。④ 灾害沿背斜轴线集中分布, 具有规模小、群发性高、隐蔽性强的特征。[结论] 提出“防治结合, 生态-经济协同”的综合模式: ① 在物源启动区及保护对象(居民区、铁路)上游布设柔性防护网, 较传统钢筋混凝土拦挡坝节省 70% 的投资; ② 在侵蚀沟槽区采用土工格室+植草措施, 较传统石砌挡墙节约 52% 的成本, 且减少 90% 以上土壤流失。

**关键词:** 群发性; 坡面泥石流; 高分辨率遥感; 柔性防护网; 土工格室

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2026)02-0155-12

中图分类号: P642.23

**文献参数:** 李华东, 姜永玲. 北京市门头沟区群发性坡面泥石流成因及防治措施[J]. 水土保持通报, 2026, 46(2): 155-166. Li Huadong, Jiang Yongling. Causes and mitigation measures of group-occurring slope debris flows in Mentougou District, Beijing City [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026, 46(2): 155-166.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2026.02.027

CSTR: 32312.14.stbctb.2026.02.027

## Causes and mitigation measures of group-occurring slope debris flows in Mentougou District, Beijing City

Li Huadong, Jiang Yongling

(China Geo-Engineering Corporation, Beijing 100093, China)

**Abstract:** [Objective] The formation mechanisms of clustered slope debris flows in Mentougou District, Beijing City, were analyzed in order to provide a theoretical basis for the prevention and control of this type of deloris flow. [Methods] A multi-source data fusion approach combined with field verification was adopted. ① Maxar WorldView 0.3 m high-resolution remote sensing images were applied for the first time to identify the spatial distribution, flow paths, and depositional characteristics of the group-occurring slope debris flows. ② UAV oblique photogrammetry was used to obtain high-precision topographic data of typical disaster sites. [Results] The group-occurring slope debris flows in Wangping Village resulted from the triple coupling of ‘geological environment basement-extreme rainfall-human engineering disturbance’. Geologically controlled by an anticline structure, with slope gradients ranging from  $19.49^{\circ}$  to  $36.54^{\circ}$ , the ‘dual structure’ formed by residual-slope deposits and bedrock provided material sources and sliding boundaries for the debris flows. Extreme rainfall (cumulative rainfall  $>700$  mm, maximum rainfall intensity of  $111.8$  mm/h) led to soil saturation and triggered the

收稿日期: 2025-07-26

修回日期: 2025-11-16

采用日期: 2025-11-28

资助项目: 中国地质工程集团有限公司科技研发项目“野外地质调查、勘查技术创新研究”(ZDKJCX2020GG11)

第一作者: 李华东(1984—), 男(汉族), 湖北省麻城市人, 硕士, 高级工程师, 主要从事地质灾害防治研究。Email: 2007020253@alu.cdtu.edu.cn。

通信作者: 姜永玲(1984—), 女(汉族), 黑龙江省绥化市人, 硕士, 高级工程师, 主要从事地质灾害防治研究。Email: jyllhd@163.com。

flows. Human engineering disturbances altered slope topography and reduced slope stability. The disasters were concentrated along the anticlinal axis, characterized by small scale, high group occurrence, and strong concealment. [Conclusion] An integrated model of ‘combining prevention and control, ecological-economic synergy’ is proposed. ① Flexible barriers are deployed in the material source initiation areas and upstream of protected objects (residential areas, railways), saving 70% of the investment compared to traditional reinforced concrete barrier dams. ② The application of geocells combined with grass planting measures in erosional gullies saves 52% of costs compared to traditional stone masonry retaining walls and reduce soil loss by over 90%.

**Keywords:** group occurrence; slope debris flow; high-resolution remote sensing; flexible barriers; geocells

依据《泥石流灾害防治工程勘查规范》(DZ/T0220—2006),泥石流按集水区地貌特征可分为沟谷型泥石流和坡面型泥石流,而群发性泥石流则是在一定区域和时间内,由暴雨、地震等同一主要致灾因素引起的多处泥石流同时或先后发生的现象。近年来,受极端气候的影响,暴雨洪水相伴生的泥石流灾害也呈频发、高发趋势。

国内外学者对坡面型及群发性泥石流开展了广泛的研究。Rom等<sup>[1]</sup>根据历史和近期遥感数据,对奥地利霍拉赫塔尔(Horlachtal)1947年以来的坡面型泥石流活动进行了调查,揭示了研究区内坡面型泥石流活动的差异,并指出局部降雨事件是其触发因素;韦凯等<sup>[2]</sup>通过模拟平台进行坡面泥石流模拟试验,提出了一种融合双注意力机制、时间卷积神经网络和双向门控循环单元(DA-TCN-BiGRU)的坡面泥石流风险预测方法;王仁超等<sup>[3]</sup>针对西南山区长输油气管道坡面泥石流的成灾特征,提出了调控水源、减少物源和水石分离的综合防治措施;徐伟等<sup>[4]</sup>根据日喀则市谢通门县尼玛弄自然村坡面泥石流的发育特征,提出了“导流槽+截流槽+导流堤”和“导流防护堤”两种工程治理方案;李钰等<sup>[5]</sup>对四川省甘洛县2019年群发性山洪泥石流灾害进行了调查,并对其影响因素和成因机理进行了分析,提出了加强灾区生态修复与水土保持,采取工程防治与生态防治相结合的治灾措施建议;Tsuchida等<sup>[6]</sup>对日本广岛郊区2014年8月20日暴雨引发的107处泥石流和59处山体崩塌进行了研究,发现断层、破碎带和节理等高渗透性区域导致边坡大规模快速失稳,沟谷中实际流量远大于预测值,有必要修正沟谷中不稳定沉积物流量的计算方法;Cabral等<sup>[7]</sup>通过对巴西圣保罗州马尔山脉东南部4个流域泥石流的研究发现,48 h内积累的降雨量与泥石流强度呈现出极强的相关性。这些研究为不同区域、不同类型泥石流的风险防控与治理提供了丰富的理论与技术支撑。

近年来,北京地区坡面泥石流灾害的研究也逐渐进入人们的视野。该区坡面型泥石流一般规模较

小,并且地表无明显沟槽发育,仅从地貌特征上难以识别,更难于防范和预警。王海芝等<sup>[8]</sup>对2016年“7·20”暴雨诱发的北京西部房山区霞云岭乡多处坡面泥石流进行了调查和分析,认为北京市坡面泥石流主要发生在坡面陡长且松散堆积物厚度较大的坡体,具有规模小,爆发快,破坏力强,群发性高,隐蔽性高等特点;王文等<sup>[9]</sup>对2018年“7·16”暴雨诱发的北京东北部云蒙山片区63处泥石流进行了研究,其中坡面型泥石流为30处,占比达到48.4%,坡面泥石流的启动坡度介于 $20.46^{\circ}\sim 57.35^{\circ}$ 之间,平均启动坡度为 $36.7^{\circ}$ 。

本研究以北京市门头沟区王平村为例,在地质背景分析、高精度历史遥感卫星影像对比、典型灾点无人机摄影测量的基础上,对门头沟区“23·7”暴雨期间,王平村北坡发生的泥石流进行了详细的调查,分析了其发育特征和成因机理。当前的坡面泥石流防治工程,多以刚性的拦挡结构为主,且未考虑防治措施与周边环境的协调,存在生态性与经济性不足的问题。

本研究创新性地提出“柔性防护网+土工格室”的防治措施建议,在规模相对较小、隐蔽性强、群发性高的坡面泥石流防治中,不仅具有经济节约、地形适应性强、生态效果好的特点,而且可以将柔性防护网布置在潜在坡面泥石流发育区,起到防患于未然的作用,为北京市西山地区及类似地质脆弱区防治坡面泥石流与水土流失提供重要参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

2023年7月29日至8月2日,北京地区遭遇历史罕见特大暴雨。此次暴雨累计持续83 h,全市平均降雨量331 mm,最大小时雨强111.8 mm;其中门头沟区平均降雨量高达538 mm,为该地区历史最大降雨量<sup>[10]</sup>。受暴雨影响,门头沟区王平镇是受灾最严重的地区之一,永定河流域洪水漫溢导致该镇交通中断,多个村庄房屋损毁。根据研究区附近(编号为

54 505)的门头沟区永定镇国家气象观测站监测数据<sup>[11]</sup>,研究区核心降雨时段集中在7月29日20时至8月2日7时(与此次特大暴雨持续时间一致)。此期间最大24 h降雨量(7月30日至7月31日)348.3 mm(图1),此次长时间、高强度降雨为研究区有气象记录以来的历史最高值。

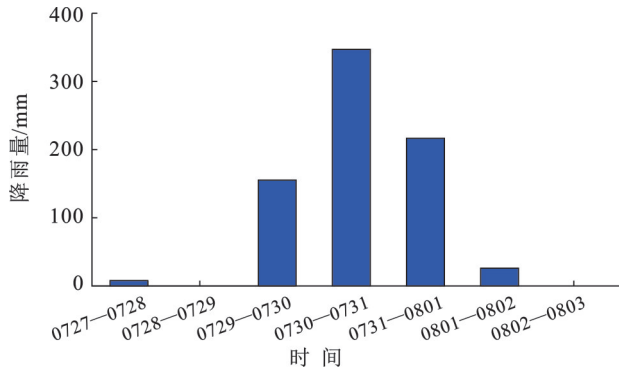


图1 降雨量统计  
Fig.1 Rainfall statistics

## 1.2 地质背景

门头沟区位于北京西山的核心部位,地处太行山与燕山的交汇处,在燕山期经历了大规模的地壳抬升和剥蚀,同时也经历了强烈的构造变形,区内褶皱和断裂构造发育,如百花山—髻髻山向斜、门头沟复式背斜、永定河断裂等。地层岩性多样,地质构造复杂,地形地貌受构造形迹的控制明显。

王平村位于门头沟区王平镇中部,永定河右岸。从地质图(图2)可以看出,王平村附近出露的主要为二叠系上统红庙岭组( $P_{2h}$ )、下统上杨家屯组( $P_{1sy}$ )和侏罗系下统南大岭组( $J_{1n}$ )地层,以永定河北—瓜草地—安家滩连线为轴,两侧地层近似呈对称分布,地层时代由老至新,属于典型的背斜地质构造。研究区边坡位于背斜核部附近的西北翼,背斜轴面倾向西南,西北翼三叠系地层( $T_{2s}$ )缺失。

研究区边坡地层岩性主要为砾岩、砂岩及粉砂岩等,由于背斜核部地层受挤压破碎、风化剥蚀,研究区边坡坡面普遍分布有一层残坡积碎石土层,背斜核部由于长期的水流侵蚀,形成沟谷地貌,即王平沟。研究区边坡可分为2段,西段位于王平沟左岸,长度约1.4 km,走向约NE58°,倾向SE,平均坡度23.2°,岩层产状 $262^\circ \angle 35^\circ$ ,坡脚为沿王平沟密集分布的居民房屋;北段位于永定河西侧,长度约1.3 km,走向约NE6°,倾向SE,平均坡度29.9°,岩层产状 $269^\circ \angle 80^\circ$ ,坡脚附近为永定河、国道G109及京门铁路。根据现场调查访问及实地踏勘调查,“23·7”暴雨发生前,研究区坡面植被发育较好,整体覆盖率达80%

以上,乔、灌、草植被结构较完整,乔木以侧柏、油松人工林为主,局部混生山杨、栎树等,伴生荆条、酸枣等灌木,坡面覆盖狗尾草、羊草等草本植物,仅在乔木根部附近及岩石露头处存在零星裸露区域,坡面以山地褐土为主。研究区坡面植被体系具有一定的水源涵养能力,一方面,乔木与灌木的冠层可截留部分降水,减少雨滴对地表的直接冲击;另一方面,草本植物密集的根系与枯枝落叶层可增加土壤孔隙度,提升表层土壤持水能力,对坡面土体起到较强固持作用。

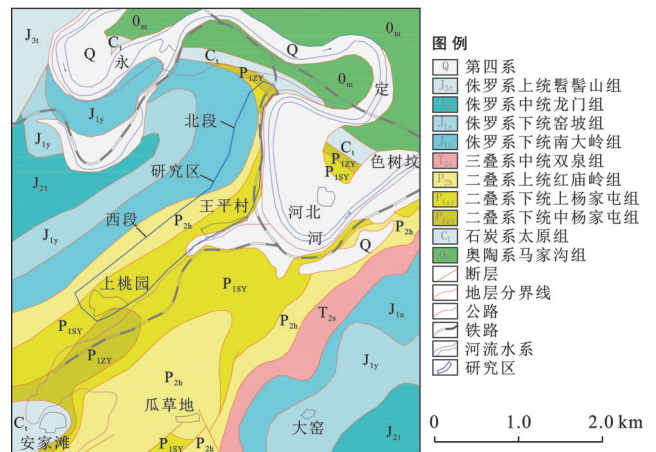


图2 研究区地质背景图

Fig.2 Geological background map of study area

## 1.3 研究方法

### 1.3.1 遥感影像数据处理

由美国商业航天公司 Maxar Technologies 旗下的 WorldView 系列卫星提供的遥感数据,空间分辨率0.3 m,是目前全球最先进、分辨率最高的商业遥感数据之一,且针对自然灾害、人道主义危机、环境事件等全球性重大事件,该遥感数据可通过公开渠道免费获取,这一特性使其在灾害影响评估、科学研究、应急响应等方面具有极高的应用价值。

本研究采用 maxar WorldView 公开的2023年京津冀洪灾前、后0.3 m分辨率遥感影像数据(图3)。由于该遥感影像无法直接下载,目前只能获取JPG格式的高清晰影像,需要下载研究区 Sentinel-2 B 遥感影像,在 ArcGIS 中对暴雨前、后研究区的高清晰影像进行地理配准,方便对比和观察。

地理配准步骤如下:①在 ArcGIS 中加载参考图层 Sentinel-2B 遥感影像及暴雨前、后 JPG 格式的高清晰影像;②选择“地理配准”工具条,点击“添加控制点”按钮,在待配准的图像上选择一个清晰、易辨认的特征点(如道路交叉口、建筑物拐角、河流交汇

处等),然后在参考图层上找到完全相同的点,并点击它;③按上述步骤,选择多个控制点,注意控制点

应尽量均匀分布在研究区图幅四周及中心区域,以减小配准误差;④点击“校正”,完成图像配准。

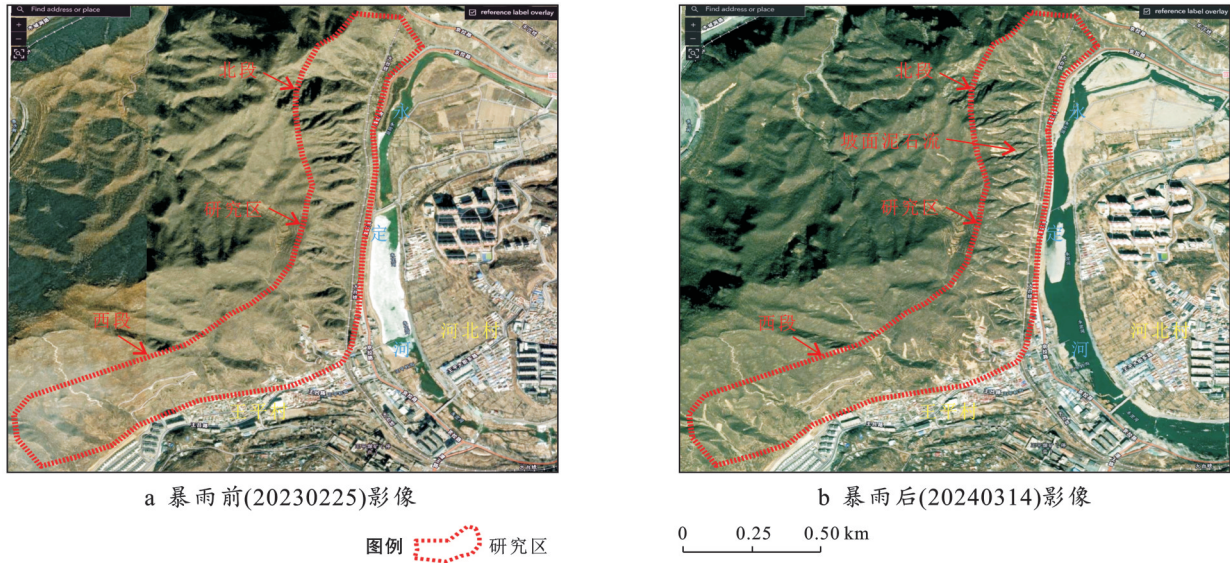


图3 研究区暴雨前后卫星影像

Fig.3 Satellite images of study area before and after rainstorm

在 ArcGIS 中,对配准后的暴雨前、后的高清影像进行可见光植被指数(VARI)分析,分别计算暴雨前、后的 VARI 值,计算公式如下:

$$\text{VARI} = (\text{Green} - \text{Red}) / (\text{Green} + \text{Red} - \text{Blue}) \quad (1)$$

以暴雨前的 VARI 值计算为例,具体步骤如下:

①在 ArcGIS 中加载经地理配准的暴雨前卫星影像,查看其红、绿、蓝 3 个波段的代号,如 Band\_1, Band\_2, Band\_3; ②加载 Band\_1, Band\_2, Band\_3 这 3 个图层; ③选择空间分析工具中的栅格计算器,按公式(1)进行栅格计算,即可得到 VARI 值。

VARI 值是一个在缺乏近红外数据时非常有效的“可见光植被指数”,其数值直接反映了像元内绿色植被的丰度和健康状况,健康的植被反射更多的绿光,吸收更多的红光,VARI 高值对应健康植被,低值或负值对应非植被地物。Green, Red 和 Blue 分别对应图像中绿、红、蓝 3 个波段,蓝光被加入分母以减少大气散射(大气对蓝光散射最强)的影响。

用暴雨后 VARI(VARI<sub>post</sub>)减去暴雨前 VARI(VARI<sub>pre</sub>),得到 VARI 变化量,计算公式为

$$\Delta \text{VARI} = \text{VARI}_{\text{post}} - \text{VARI}_{\text{pre}} \quad (2)$$

在  $\Delta \text{VARI}$  图像上,其值急剧下降的区域即是坡面泥石流发生的区域,设定一个合适的阈值(如  $\Delta \text{VARI} < -0.2$ ),就可以将这部分区域提取出来,生成一个二值图(泥石流区域/非泥石流区域),将提取出的二值图转化为多边形矢量文件,即可得到坡面泥石流的边界。

由于暴雨前后的影像不在同一个季节,植被颜色存在差异,且暴雨后的影像距暴雨发生时已超过 7 个月,可能存在人为修复、次生灾害、植被自然恢复等情况,对坡面泥石流的识别造成干扰,因此,还需要结合现场调查、无人机摄影测量等手段,排除利用影像识别泥石流时造成的误判,提高识别的精度。

从暴雨前后卫星影像对比图中可以看出,坡面泥石流主要集中发育于居民区北侧的山坡(西段)及永定河西侧的山坡(北段),分布面积约  $1.85 \text{ km}^2$ 。西段边坡相对较缓,坡面泥石流的启动高程较低,一般位于坡面中下部,主要威胁对象为坡脚的村庄和房屋;北段边坡较陡,启动高程一般位于坡面中上部,甚至是坡顶附近,相对高差大,主要威胁对象为坡脚国道 G109、京门铁路及永定河河道等。泥石流发生后,在坡面上留下了长条状的冲刷沟槽,沟槽呈“V”型或“U”型,冲刷沟槽在坡面上总体呈平行的梳状分布,在局部支沟发育的部位,呈散点状、“V”型对称状或放射状分布。

### 1.3.2 三维模型构建

在卫星影像对比分析的基础上,利用无人机对研究区典型的坡面泥石流灾害进行摄影测量,采用大疆经纬 M300 RTK 多旋翼无人机,悬停精度水平  $\pm 0.15 \text{ m}$ ,垂直  $\pm 0.10 \text{ m}$ ,机身搭载 5 个镜头(一个正摄、4 个倾斜),航向重叠率 80%、旁向重叠率 70%。飞行高度为 120 m,分辨率为 5 cm,地面布设 6 个控制点。对采集的数据进行去噪、滤波、分类等预处理。

理,利用 Context Capture 导入控制点坐标,验证配准误差;进行空中三角测量加密,生成点云数据和数字高程模型(DEM),构建测区的三维模型。

## 2 结果与分析

### 2.1 王平村坡面泥石流发育特征

#### 2.1.1 坡面泥石流发育特征

研究区西段边坡共发育坡面泥石流 42 处(W<sub>1</sub>—W<sub>42</sub>),泥石流启动部位最高位于高程 447 m 处,最低位于高程 216 m 处(表 1),相对高差达 231 m;坡面泥石流的流程长度最长达 431.54 m,最短仅为 10.77 m;沟道纵坡最大为 31.12°,最小为 19.49°,平均纵坡为 23.21°。

北段边坡共发育坡面泥石流 41 处(N<sub>1</sub>—N<sub>41</sub>),泥石流启动部位最高位于高程 378 m 处,最低位于高程 218 m 处,相对高差达 160 m;坡面泥石流的流程长度最长为 313.45 m,最短为 27.73 m;沟道纵坡最大为 36.54°,最小为 20.22°,平均纵坡为 29.90°。

综合统计西段和北段坡面泥石流,沟道纵坡介于 19.49°~36.54°之间,平均坡度 26.52°。

#### 2.1.2 坡面泥石流的危害特征

坡面泥石流发生的部位,原始地形总体较完整,地表无明显的汇水区、沟槽发育,植被发育较好,以灌木及草丛为主。地层岩性为残坡积层+基岩的“二元结构”,残坡积层以碎石、块石、角砾及黏性土为主,厚度一般 0.5~1.5 m,厚的部位 2.0~3.0 m,下伏基岩为砾岩、砂岩及粉砂岩等,中—强风化,节理裂隙较发育,典型的地质断面见图 4。

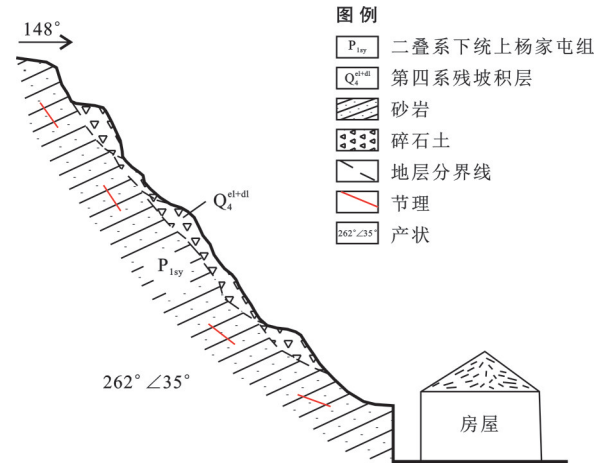


图 4 典型坡面地质断面

Fig.4 Typical geological cross-section of typical slope

在暴雨激发下,坡面松散饱和的覆盖层呈长条状向下流动、冲刷、扩散,摧毁了坡面原有的植被,局部发生揭底冲刷,冲刷深度 0.5~3.0 m,在坡面形成沟槽,沟槽内基岩裸露。当地形变缓时,流体呈扇状停积于冲沟沟口,当受到房屋、挡墙、路基等阻挡时,强烈的冲击力给建(构)筑物带来巨大破坏,停积的泥石流堆积物粒径大小混杂,有典型“泥包砾”的特点。

暴雨引发的王平村群发性坡面泥石流破坏了坡面的植被和土壤层,形成冲刷沟槽,造成水土流失,破坏生态环境,降低了坡面的整体性和稳定性,冲击和损毁了田地,损毁了房屋、公路、铁路等基础设施,淤塞河道,给人民的生命财产安全带来巨大的损失和隐患(图 5—7)。



图 5 王平村泥石流摧毁房屋及铁路

Fig.5 Destroyed houses and railways by debris flows at Wangping village

### 2.2 坡面泥石流形成机理

许多学者都对坡面泥石流的形成机理和演化模式进行了研究<sup>[12-13]</sup>。王平村北坡坡面泥石流是在前期累积降雨(时长 83 h)的基础上,坡面松散的覆盖层达到饱和,自重增加,抗剪强度减低,在短时强降雨

的触发下(最大小时雨强 111.8 mm),地面径流加速,饱和土体启动,发生局部溜滑。溜滑的土体顺坡面向下,揭底冲刷坡面覆盖层,形成坡面铲刮,进而形成坡面泥石流。王平村北坡泥石流的形成机理可用图 8 表示。

表 1 王平村坡面泥石流流统计

Table 1 Statistics of slope debris flows at Wangping village

| 序号              | 最高点/m | 最低点/m | 流程长度/m | 坡度/(°) | 序号              | 最高点/m | 最低点/m | 流程长度/m | 坡度/(°) |
|-----------------|-------|-------|--------|--------|-----------------|-------|-------|--------|--------|
| W <sub>1</sub>  | 447   | 405   | 119.62 | 20.56  | N <sub>1</sub>  | 246   | 204   | 120.55 | 20.39  |
| W <sub>2</sub>  | 344   | 305   | 112.95 | 20.20  | N <sub>2</sub>  | 270   | 205   | 174.55 | 21.86  |
| W <sub>3</sub>  | 425   | 333   | 275.8  | 19.49  | N <sub>3</sub>  | 239   | 227   | 27.73  | 25.64  |
| W <sub>4</sub>  | 329   | 234   | 260.91 | 21.35  | N <sub>4</sub>  | 300   | 237   | 142.66 | 26.21  |
| W <sub>5</sub>  | 412   | 390   | 47.41  | 27.65  | N <sub>5</sub>  | 327   | 202   | 256.52 | 29.16  |
| W <sub>6</sub>  | 386   | 373   | 37.34  | 20.38  | N <sub>6</sub>  | 279   | 202   | 151.95 | 30.45  |
| W <sub>7</sub>  | 410   | 339   | 195.36 | 21.31  | N <sub>7</sub>  | 218   | 203   | 36.25  | 24.44  |
| W <sub>8</sub>  | 408   | 259   | 431.54 | 20.20  | N <sub>8</sub>  | 271   | 195   | 141.20 | 32.56  |
| W <sub>9</sub>  | 410   | 378   | 61.91  | 31.12  | N <sub>9</sub>  | 263   | 195   | 131.03 | 31.26  |
| W <sub>10</sub> | 355   | 324   | 76.56  | 23.89  | N <sub>10</sub> | 254   | 196   | 107.91 | 32.51  |
| W <sub>11</sub> | 329   | 313   | 39.40  | 23.96  | N <sub>11</sub> | 300   | 197   | 179.49 | 35.02  |
| W <sub>12</sub> | 355   | 339   | 37.58  | 25.20  | N <sub>12</sub> | 225   | 198   | 53.34  | 30.41  |
| W <sub>13</sub> | 350   | 329   | 41.68  | 30.26  | N <sub>13</sub> | 302   | 197   | 183.10 | 34.99  |
| W <sub>14</sub> | 312   | 302   | 23.26  | 25.46  | N <sub>14</sub> | 226   | 196   | 59.17  | 30.47  |
| W <sub>15</sub> | 309   | 291   | 48.47  | 21.80  | N <sub>15</sub> | 255   | 195   | 109.00 | 33.40  |
| W <sub>16</sub> | 296   | 281   | 40.85  | 21.54  | N <sub>16</sub> | 256   | 206   | 84.40  | 36.33  |
| W <sub>17</sub> | 367   | 301   | 148.48 | 26.39  | N <sub>17</sub> | 271   | 208   | 105.80 | 36.54  |
| W <sub>18</sub> | 313   | 292   | 49.66  | 25.02  | N <sub>18</sub> | 312   | 195   | 207.20 | 34.38  |
| W <sub>19</sub> | 297   | 284   | 32.70  | 23.43  | N <sub>19</sub> | 304   | 260   | 82.68  | 32.15  |
| W <sub>20</sub> | 243   | 231   | 33.24  | 21.16  | N <sub>20</sub> | 280   | 205   | 128.22 | 35.80  |
| W <sub>21</sub> | 274   | 262   | 26.83  | 26.57  | N <sub>21</sub> | 334   | 297   | 72.20  | 30.83  |
| W <sub>22</sub> | 303   | 270   | 74.69  | 26.22  | N <sub>22</sub> | 334   | 296   | 76.16  | 29.93  |
| W <sub>23</sub> | 286   | 268   | 51.26  | 20.56  | N <sub>23</sub> | 282   | 208   | 130.10 | 34.67  |
| W <sub>24</sub> | 419   | 275   | 324.68 | 26.33  | N <sub>24</sub> | 301   | 205   | 169.75 | 34.44  |
| W <sub>25</sub> | 285   | 261   | 65.55  | 21.48  | N <sub>25</sub> | 298   | 209   | 150.21 | 36.34  |
| W <sub>26</sub> | 284   | 254   | 86.38  | 20.32  | N <sub>26</sub> | 344   | 196   | 264.32 | 34.05  |
| W <sub>27</sub> | 259   | 243   | 38.48  | 24.57  | N <sub>27</sub> | 365   | 197   | 289.69 | 35.45  |
| W <sub>28</sub> | 228   | 211   | 44.38  | 22.52  | N <sub>28</sub> | 378   | 200   | 313.45 | 34.60  |
| W <sub>29</sub> | 225   | 211   | 33.11  | 25.02  | N <sub>29</sub> | 226   | 196   | 72.50  | 24.44  |
| W <sub>30</sub> | 245   | 226   | 45.19  | 24.86  | N <sub>30</sub> | 274   | 192   | 170.07 | 28.83  |
| W <sub>31</sub> | 236   | 219   | 40.72  | 24.68  | N <sub>31</sub> | 280   | 227   | 106.17 | 29.95  |
| W <sub>32</sub> | 228   | 202   | 69.08  | 22.11  | N <sub>32</sub> | 341   | 267   | 146.12 | 30.43  |
| W <sub>33</sub> | 239   | 201   | 107.91 | 20.62  | N <sub>33</sub> | 297   | 245   | 107.42 | 28.95  |
| W <sub>34</sub> | 253   | 237   | 46.82  | 19.98  | N <sub>34</sub> | 345   | 253   | 186.30 | 29.59  |
| W <sub>35</sub> | 255   | 236   | 53.49  | 20.81  | N <sub>35</sub> | 283   | 269   | 33.11  | 25.02  |
| W <sub>36</sub> | 216   | 201   | 33.54  | 26.57  | N <sub>36</sub> | 264   | 190   | 207.63 | 20.88  |
| W <sub>37</sub> | 282   | 246   | 106.28 | 19.80  | N <sub>37</sub> | 257   | 221   | 98.79  | 21.37  |
| W <sub>38</sub> | 285   | 268   | 41.63  | 24.10  | N <sub>38</sub> | 263   | 225   | 91.29  | 24.60  |
| W <sub>39</sub> | 269   | 261   | 21.54  | 21.80  | N <sub>39</sub> | 261   | 243   | 34.99  | 30.96  |
| W <sub>40</sub> | 269   | 249   | 54.78  | 21.41  | N <sub>40</sub> | 265   | 241   | 53.67  | 26.57  |
| W <sub>41</sub> | 258   | 241   | 44.38  | 22.52  | N <sub>41</sub> | 251   | 237   | 40.50  | 20.22  |
| W <sub>42</sub> | 221   | 217   | 10.77  | 21.80  |                 |       |       |        |        |

注:W代表西段边坡;N代表北段边坡。



图 6 泥石流冲击公路及淤塞河床

Fig.6 Impacted road and silted riverbed by debris flows



图 7 泥石流造成的水土流失及环境破坏

Fig.7 Soil erosion and damaged environment resulted by debris flows

### 2.3 泥石流发生的影响因素

(1) 地形条件。不同于沟谷型泥石流,坡面型泥石流没有明显的沟谷边界,原始地形总体较完整,地形坡度直接影响水流速度和松散物质的启动,根据前人的研究<sup>[14-16]</sup>, $20^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 是坡面泥石流高发的坡度区间。

研究区西段边坡坡面泥石流发生的最大相对高差达 149 m( $W_8$ ),北段最大相对高差达 178 m( $N_{28}$ ),发生坡面泥石流的部位相对高差大,势能相差大,为坡面泥石流的发生提供了能量基础;同时,西段及北段边坡地形坡度为  $19.49^{\circ}\sim 36.54^{\circ}$ ,为坡面泥石流发生提供了适宜的坡度条件。

(2) 地层结构。地层结构是坡面泥石流产生的物质基础。王平村北坡坡面广泛覆盖有第四系残坡积碎石土,厚 0.5~3.0 m,这些堆积物结构松散、胶结性差,长时间降雨导致土体饱和、自重增加,易在地表径流冲刷或重力作用下启动;在覆盖层之下,为透水性较差的基岩面,现场调查与区域地质资料表明,研究区残坡积碎石土层的渗透系数经验值约为  $1.00\times 10^{-4}\sim 1.00\times 10^{-5}$  m/s,而中风化砾岩、砂岩等基岩的渗透系数则低至  $1.00\times 10^{-7}\sim 1.00\times 10^{-9}$  m/s。巨大的渗透性差异使得下渗水流在基岩界面处受

阻,形成临时饱和带,为上覆松散物源提供了良好的滑动边界条件。松散物源+基岩的地层结构,不仅为坡面泥石流提供了充足的物源,也为泥石流的启动提供了良好的边界条件。

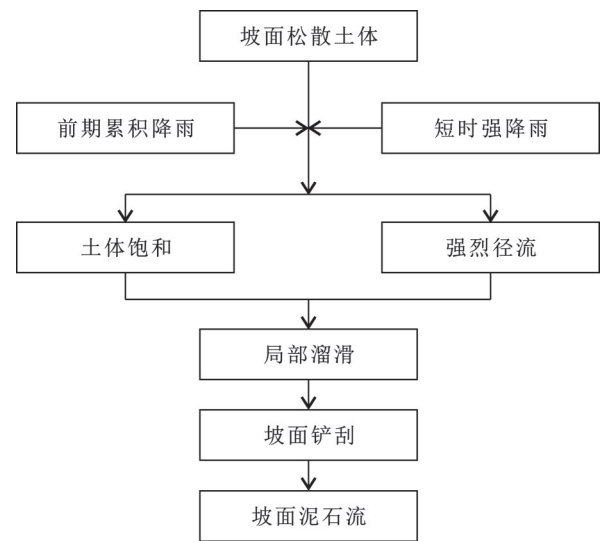


图 8 坡面泥石流的形成机理

Fig.8 Formation mechanism of slope debris flow

(3) 构造特征。构造线塑造了地形格局,形成山脉、断崖,错断山脊线,控制着水系、地震带等的发

育,导致岩石破碎、裂隙发育,风化强烈,其两侧也是地质灾害多发、群发的区域<sup>[17]</sup>。王平村北坡位于王平背斜的北翼,靠近背斜的核部,背斜核部是构造应力集中区,岩层褶皱强烈,节理裂隙密集,碎裂的岩体为地下水下渗提供了通道,加剧了岩体的风化破碎,形成大量的碎屑物质,为泥石流的形成提供了大量的松散固体物源。王平村北坡发育的 83 处坡面泥石流正是沿着王平背斜轴线的方向分布的。

(4) 极端降雨。“23·7”暴雨覆盖北京、河北中西部、天津西部等多个省市,历时长达 83 h,北京地区局地累积降雨量超历史极值,门头沟区平均降雨量高达 538 mm,最大小时雨强为 111.8 mm,为该区历史最大降雨量。“23·7”暴雨分布范围广,历时长,小时雨强大,是形成王平村群发性坡面泥石流的重要触发条件和诱发因素。

(5) 人类工程活动。研究区边坡脚居民房屋修建、切坡修筑公路、铁路等,改变了坡面地形,局部形成陡坎,上部松散的覆盖层失去有效支撑;坡面耕种等社会经济活动,不仅破坏了表土层结构,挖高填低的坡耕地也形成了欠稳定的坡体结构。人类工程活动对泥石流发生有两个方面的影响:一是开挖与切坡形成的临空陡坎,破坏了坡体原有的应力平衡状态,降低了坡面泥石流的启动阈值;二是坡面耕种破坏了表层的土壤结构,削弱了植被的固土与截流能力,为泥石流增加了物源供给。切坡及坡面耕种等人类工程活动为泥石流的形成提供了物源及动力条件,对自然环境及地质条件都产生了一定的影响和破坏,也是影响坡面泥石流形成的因素之一。为量化评估人类工程扰动与泥石流分布的空间相关性,本研究基于暴雨前高分辨率遥感影像,解译获取研究区内人类扰动区域(包括切坡修路、坡脚建房及坡耕地)的总面积为 0.47 km<sup>2</sup>。进而,生成距人类工程扰动区 100 m 的缓冲区(面积 0.85 km<sup>2</sup>),并与 83 处泥石流分布进行叠加统计与卡方检验分析。结果表明,67.47% 的泥石流事件(56 处)发生在距离人类扰动 100 m 范围内;在 100 m 缓冲区内的泥石流分布密度高达 56.85 条/km<sup>2</sup>,是缓冲区外(31.95 条/km<sup>2</sup>)的 1.78 倍。卡方检验结果显示,泥石流在人类扰动附近的聚集性在统计学上极为显著( $\chi^2=15.47$ ,  $df=1$ ,  $p<0.001$ )。该量化结果证实,人类工程活动是控制本次群发性坡面泥石流空间分布格局的关键致灾因子之一,其与地质构造和极端降雨共同构成了三元耦合的成灾模式。

因此,王平村群发性坡面泥石流是“地质环境基底(地形条件、地层结构、构造特征)-极端降雨触发-人类工程扰动”三元耦合作用的结果。

### 3 群发性坡面泥石流防治建议

常见的泥石流防治工程包括拦挡坝、排导槽、谷坊等措施,但针对坡面型泥石流,因为其规模一般较小,且发生具有隐蔽性,没有明显的汇水区,多以顺坡面往下冲刷为主,拦挡坝、排导槽等重力式拦、排措施可直接阻挡泥石流中的固体碎屑物,降低泥石流对下游村落、道路、耕地的冲击破坏,但体积较大,开挖方量大,在较陡的坡面布设,不仅施工困难,而且存在安全风险,一旦地基不稳固,还可能失稳成为潜在危险源。如何采用更安全、经济且生态稳定的工程措施对坡面泥石流进行防治,是地质工作者面临的一个挑战<sup>[18]</sup>。

#### 3.1 柔性防护网

在王平村坡面泥石流灾害防治中,当前的措施以重力式拦挡工程、截排水工程为主,即在坡面、坡脚修筑多道挡墙(坝)拦截固体物源,在坡后缘设置截排水沟,疏导地表径流。圪工量大、造价高,受边坡地形及场地条件限制,建筑材料难于运送到施工现场,需修筑施工便道倒运,不仅施工难度大,而且也破坏了原有的地质环境,工程措施与周边环境不协调,不符合生态化地质灾害防治的理念。

近年来,柔性网也逐渐被应用到泥石流的防治中,取得了较好的效果。贺咏梅等<sup>[19]</sup>根据泥石流沟的宽度及柔性网结构中是否有钢柱,将泥石流柔性防护系统分为 VX 型和 UX 型(图 9),当泥石流沟较窄时( $b<12$  m),采用 VX 型结构,当泥石流沟较宽时,采用 UX 型结构;日本 Aoban-dani 泥石流防治中<sup>[20]</sup>,采用 5 m 高的柔性网拦截泥石流,因其出色的变形能力和透水性,取得了较好的效果(图 10);Wendeler 及 Volkwein 等<sup>[21-22]</sup>在瑞士伯尔尼州泥石流防治中,提出了一种由 13 道柔性网组成的泥石流防治方案,并通过室内模拟试验和工程实践,验证了防治工程的可靠性(图 11);此外还有学者对泥石流柔性防护结构的设计荷载、计算模型、改进方案等进行了研究<sup>[23-24]</sup>,这些研究和实践为柔性网在泥石流防治中的应用提供了理论支撑和实践经验。根据前述研究,可将柔性防护网应用于王平村群发坡面泥石流的防治之中。

柔性防护网具有以下特征:

(1) 适应性强。布置位置灵活,可贴合坡面地形,施工便捷,安装速度快,维护方便,适合王平村北坡房前屋后、坡面较陡及机械设备和施工材料难以到达的部位。

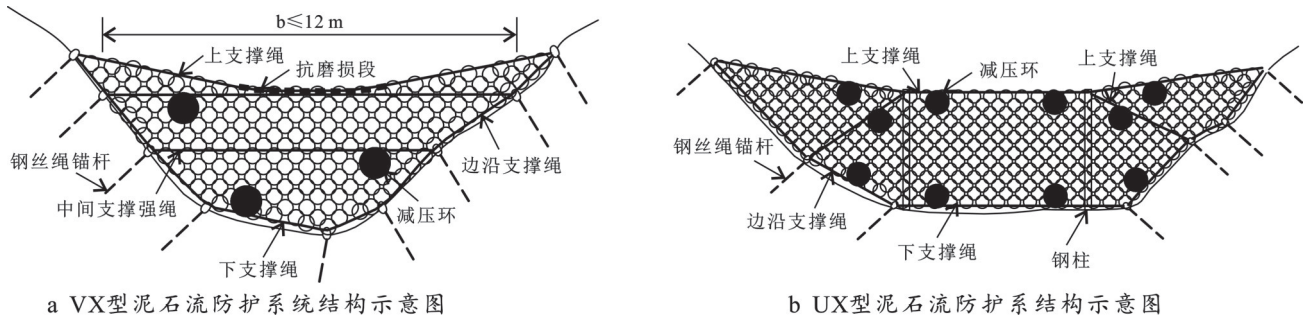


图 9 泥石流柔性防护结构示意图<sup>[19]</sup>

Fig.9 Schematic diagram of debris flow flexible barriers<sup>[19]</sup>



图 10 日本 Aoban-dani 泥石流拦阻网<sup>[20]</sup>

Fig.10 Debris flow barriers in Aoban-dani, Japan<sup>[20]</sup>



图 11 瑞士伯尔尼州多级泥石流防护柔性网<sup>[21-22]</sup>

Fig.11 Multi-level debris flow flexible barriers in Bern, Switzerland<sup>[21-22]</sup>

(2) 透水性好。网状结构允许水流通过,减少泥石流产生的静水压力,拦截碎块石物源,降低对房屋、道路及铁路线的威胁。

(3) 抗冲击能力强。可通过网的柔性变形吸收泥石流动能,分散冲击力。实际中可根据坡面斜长,在适宜的位置按一定间距布设一道或多道柔性网,调节坡面流体的流速,增强网的拦截能力。

(4) 造价较低。相比于拦挡坝、挡土墙、排导槽等刚性结构,柔性网拦截措施的成本较低,经选取典型断面试算,同一沟道防护断面,采用柔性网较钢筋混凝土拦挡坝节省投资约 70%。

(5) 生态友好。实施过程中不需要大规模挖填、

修筑施工便道,对原有地质环境扰动较小,且与周边环境协调。

(6) 可防范潜在的坡面泥石流。对于王平村北坡,由于地质环境基底及人类工程活动将长期共存,在暴雨激发下,仍存在发生坡面泥石流的风险。因此,不仅可以将柔性网应用于“23·7”暴雨后已经发生坡面泥石流部位的治理,也可将柔性网布设于坡面泥石流潜在发育区,形成防护屏障,减小潜在坡面泥石流的威胁,同时也能提高居民防范地质灾害的意识。

根据王平村坡面泥石流发育的特点,平均沟道纵坡为 26.52°,启动方量按 100 m<sup>3</sup>考虑(覆盖层厚度取 2 m,沟道宽度取 10 m,启动长度取 5 m),土体饱水重度取 23.0 kN/m<sup>3</sup>,坡面摩擦系数按 0.3 考虑,按相对高差 20 m 布设一道柔性防护网进行设计,启动土体的重力势能转化为克服坡面摩擦所做的功及对柔性网的冲击动能,由此,柔性网承受的冲击动能约 179.5 kJ。建议在王平村北坡泥石流物源启动区上游按相对高差 20 m 间距布设被动防护系统,被动防护网为 RXI-050 型,防护能级不低于 500 kJ,采用 R7/3/300 型高强度环形网,网孔直径 30 cm,抗拉强度 1 770 MPa,网高 5.0 m,钢柱基座用地脚螺栓锚固于稳定的基岩地层或混凝土锚墩基础中,锚杆抗拔力不小于 50 kN。柔性网的设计应符合《边坡柔性防护网系统》(JT/T 1328—2020)《建筑边坡工程技术规范》(GB 50330—2013)及《钢丝绳通用技术条件》(GB/T 20118—2017)的相关规定。

### 3.2 土工格室

土工格室是一种高强度合成材料,展开后呈蜂窝状立体网格,常用于软弱地基加固、公路铁路护坡及河道岸堤防护等工程领域。吴红兵<sup>[25]</sup>将土工格室应用于路基加固及道路边坡生态防护中,较传统的石砌挡墙节约成本 52%,取得了良好的经济效益和生态效益(图 12);杨晓华等<sup>[26]</sup>分析了土工格室生态护坡的作用机理,提出了平铺式和叠砌式两种生态护坡结构型式(图 13);韩宇琨等<sup>[27]</sup>研究表明,土工格室结

合植草后土壤流失可减少 90% 以上;此外还有不少学者对土工格室的理论计算、抗冲刷性能、启动机理

等进行了研究<sup>[28-29]</sup>。前述研究为土工格室在坡面泥石流及水土流失防治中的应用提供了参考。

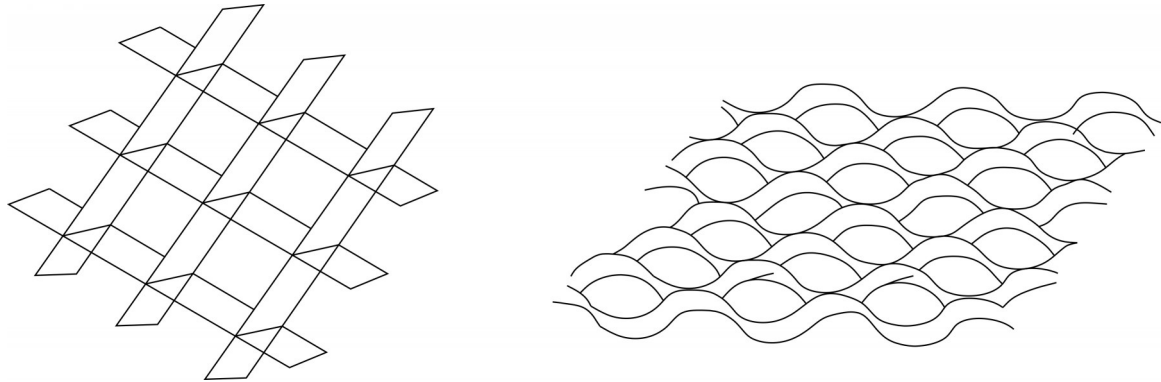


图 12 土工格室示意图<sup>[25]</sup>

Fig.12 Schematic diagram of geocells<sup>[25]</sup>

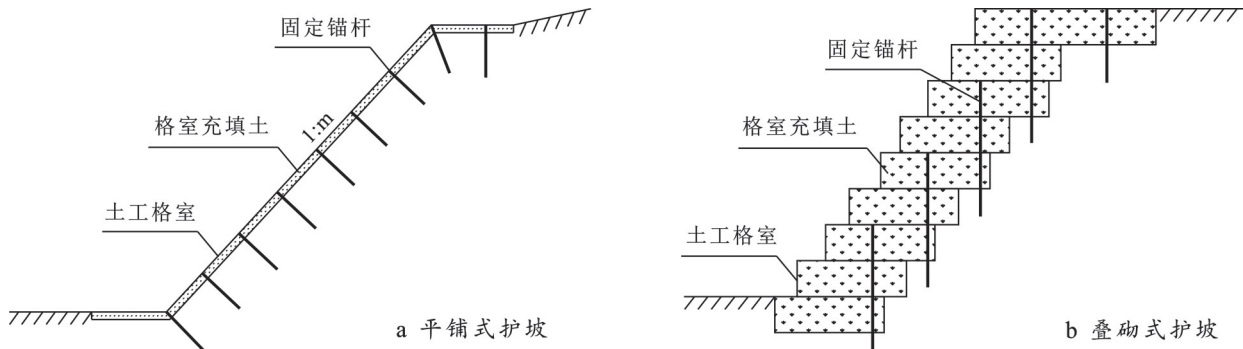


图 13 平铺式和叠砌式生态护坡<sup>[26]</sup>

Fig.13 Flat-laid and stacked ecological slope protection<sup>[26]</sup>

“23·7”暴雨后,王平村北坡原本植被覆盖的坡面,被泥石流冲刷形成数十条侵蚀沟,表层土壤流失严重,坡面裸露,局部冲刷至基岩面,植被恢复困难。根据前述研究,土工格室形成的菱形纹沟,能显著降低坡面侵蚀量,结合植草后可减少 90% 以上的土壤流失,可考虑将土工格室应用于王平村坡面泥石流的防治之中。土工格室常用材料为高密度聚乙烯(HDPE)和聚丙烯(PP),二者均具有较高的强度、良好的耐化学腐蚀性、抗紫外线老化性能和低温抗冲击韧性,其脆化温度低于-50℃,低温环境下不易脆化破裂。此外,土工格室的蜂窝结构具有良好的排水性能,可有效减少水分滞留,从而降低冻胀对结构和坡体的不利影响,表现出良好的抗冻融循环能力。HDPE材质的土工格室,其低温性能优于PP材质,且更耐老化,更能适应北京山区冬季的低温环境和冻融循环。

在坡面泥石流形成冲刷槽的部位,对坡面杂物、石块、树根等进行清理,确保坡面平整,便于土工格室与坡面紧密贴合,防止后期发生褶皱、翘边等质量问题;由上而下铺设土工格室,不得横向铺设,防止

形成横向通缝导致坡面滑塌,格室片材垂直于坡面,并充分张拉展开,用锚杆或限位帽固定绷紧,锚杆长度一般为土工格室高度的 2 倍加 30 cm,且锚入稳定的地层中不小于 0.5 m;相邻格室用连接扣链接,确保格室之间连接紧密,根据坡度、坡面覆盖层厚度及边坡稳定情况,可按 1.5 m 间距增设梅花型锚杆稳固坡面;土工格室张拉固定好后,用种植土由上而下填充格室空间,喷播草籽,覆盖无纺布,浇水养护。

相比传统的坡面泥石流防治方式,土工格室的三维蜂窝状结构及与坡面的锚固连接,能有效加固土体,分散坡面径流并减小冲刷,显著提升坡面整体稳定性,该技术施工便捷高效,可大幅降低工程成本,同时其透水透气的特性为植被恢复提供了良好的基础,实现了坡面泥石流防治与生态修复的有机结合,是兼顾安全性、经济性和生态性的优选方案。

柔性网和土工格室应按坡面泥石流危险性分区进行布置,柔性网重点布设在有防护对象的部位,以保护居民区、公路、铁路,土工格室则主要布设在有防护对象且已发生坡面泥石流形成冲刷槽的部位。

## 6 结论

(1) 将 Maxar WorldView 高分辨率遥感数据(空间分辨率 0.3 m)应用于群发性坡面泥石流研究,精准识别灾害空间分布与流道路径,为同类灾害的识别与分析提供了新方法。

(2) 王平村群发性坡面泥石流是“地质环境基底-极端降雨-人类工程扰动”三元耦合作用的结果。背斜构造导致岩体破碎及裂隙发育,提供丰富物源;地形坡度(19.49°~36.54°)与残坡积层-基岩“二元结构”构成灾害启动条件;“23·7”极端暴雨(累计雨量 538 mm,峰值小时雨强 111.8 mm)诱发饱和土体流动,人类切坡与耕种活动显著削弱坡面稳定性。

(3) 研究区共发育 83 处坡面泥石流,具有规模小,爆发快,隐蔽性强等特征。泥石流冲刷深度 0.5~3.0 m,严重破坏坡脚居民区、公路、铁路及永定河河道,导致水土流失、生态退化与基础设施损毁,造成重大经济损失。

(4) 在陡坡及施工受限区布设柔性网,通过地形适应性、透水性与抗冲击性实现潜在坡面泥石流灾害的主动防御,同一沟道防护断面,采用柔性网较钢筋混凝土拦挡坝节省投资约 70%;在侵蚀沟槽区,采用蜂窝状土工格室加固坡表,结合植草措施,减少 90% 以上土壤流失,较传统的石砌挡墙节约成本 52%。

### 参考文献(References)

- [1] Rom J, Haas F, Heckmann T, et al. Spatio-temporal analysis of slope-type debris flow activity in Horlachtal, Austria, based on orthophotos and lidar data since 1947 [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2023, 23(2):601-622.
- [2] 韦凯,李青,姚益,等.基于 DA-TCN-BiGRU 的坡面泥石流预测研究[J].*现代电子技术*,2024,47(6):1-8.  
Wei Kai, Li Qing, Yao Yi, et al. Research on slope debris flow prediction based on DA-TCN-BiGRU [J]. *Modern Electronics Technique*, 2024, 47(6):1-8.
- [3] 王仁超,孔纪名,崔云.西南山区长输油气管道坡面泥石流成灾特征与防治:以云南昆明水节箐高位溃决型泥石流为例[J].*山地学报*,2018,36(5):813-820.  
Wang Renchao, Kong Jiming, Cui Yun. Characteristics and countermeasures of slope debris flow in Kunming of Yunnan Province of China [J]. *Mountain Research*, 2018, 36(5):813-820.
- [4] 徐伟,王祖全,倪德兴,等.日喀则市谢通门县尼玛弄自然村坡面泥石流发育特征及防治对策[J].*中国地质调查*,2022,9(4):56-65.  
Xu Wei, Wang Zuquan, Ni Dexing, et al. Development

characteristics and prevention measures of slope debris flow in Nimanong natural village of Xietongmen County in Shigatse City [J]. *Geological Survey of China*, 2022, 9(4):56-65.

- [5] 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[J].*水土保持通报*,2020, 40(6):281-287.  
Li Yu, Gan Binrui, Wang Xiekang, et al. Formation mechanism of group flash flood/debris flow disasters in Ganluo County, Sichuan Province in 2019 [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2020, 40(6):281-287.
- [6] Tsuchida T, Moriwaki T, Nakai S, et al. Investigation and consideration on landslide zoning of multiple slope failures and debris flows of 2014 disaster in Hiroshima, Japan [J]. *Soils and Foundations*, 2019, 59(4):1085-1102.
- [7] Cabral V, Reis F A G V, Veloso V Q, et al. The dynamics of debris-flow events in Southeast Brazil [J]. *Journal of South American Earth Sciences*, 2025, 159: 105523.
- [8] 王海芝,胡福根,于森,等.北京市房山区霞云岭“7·20”坡面泥石流特点及形成因素浅析[J].*城市地质*,2021, 16(4):399-403.  
Wang Haizhi, Hu Fugen, Yu Miao, et al. Characteristics and formation factors of slope debris flow on “7·20” in Xiayunling, Fangshan District, Beijing [J]. *Urban Geology*, 2021, 16(4):399-403.
- [9] 王文,马超,张志,等.北京云蒙山片区“7·16”群发性暴雨泥石流特征研究[J].*山地学报*,2022,40(4):626-636.  
Wang Wen, Ma Chao, Zhang Zhi, et al. The characteristics of rainstorm-induced clustering debris flows on July 16, Yunmeng Mountain, Beijing, China [J]. *Mountain Research*, 2022, 40(4):626-636.
- [10] 李华东,邵旭升,冯少华.北京“23·7”特大暴雨引发的门头沟区地质灾害发育特征及成因[J].*中国地质灾害与防治学报*,2025,36(5):103-111.  
Li Huadong, Shao Xusheng, Feng Shaohua. Development characteristics and mechanism of geological hazards in Mentougou District triggered by “23·7” torrential rain [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2025, 36(5):103-111.
- [11] 刘家宏,梅超,王佳,等.北京市门头沟流域“23·7”特大暴雨洪水过程分析[J].*中国防汛抗旱*,2023,33(9): 50-55.  
Liu Jiahong, Mei Chao, Wang Jia, et al. Flood survey of “23·7” heavy rain in Mentougou watershed of Beijing [J]. *China Flood & Drought Management*, 2023, 33(9):50-55.
- [12] 王丽娟,马超,苗绿.坡面泥石流形态和堆积特征研究[J].*自然灾害学报*,2020,29(6):98-106.

- Wang Lijuan, Ma Chao, Miao Lü. Morphological and depositional characteristics of slope debris flow [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2020, 29(6):98-106.
- [13] 唐红梅,陈洪凯,唐兰.坡面泥石流演化模式及其试验[J].*山地学报*,2014,32(1):98-104.  
Tang Hongmei, Chen Hongkai, Tang Lan. Evolution model and test of slope debris flow [J]. *Mountain Research*, 2014, 32(1):98-104.
- [14] 汤人杰,徐光黎,汤忠强.温州群发性坡面泥石流临界雨量研究[J].*中国地质灾害与防治学报*,2019,30(3):60-66.  
Tang Renjie, Xu Guangli, Tang Zhongqiang. Study on critical rainfall of grouped slope debris flows in Wenzhou [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2019, 30(3):60-66.
- [15] 余斌,朱云波,刘秧.坡面泥石流降雨预报模型[J].*水科学进展*,2017,28(6):839-848.  
Yu Bin, Zhu Yunbo, Liu Yang. Prediction model of hill-slope debris flows [J]. *Advances in Water Science*, 2017, 28(6):839-848.
- [16] 朱云波,余斌,王治兵,等.四川德昌茨达“8·24”群发性滑坡型泥石流之地形条件[J].*山地学报*,2015,33(1):108-115.  
Zhu Yunbo, Yu Bin, Wang Zhibing, et al. Topographic research of group-occurring landslide-induced debris flow in Dechang, Sichuan [J]. *Mountain Research*, 2015, 33(1):108-115.
- [17] 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[J].*山地学报*,2011,29(6):738-746.  
Yu Bin, Ma Yu, Zhang Jiannan, et al. The group debris flow hazards after the Wenchuan earthquake in Longchi, Dujiangyan, Sichuan Province [J]. *Journal of Mountain Science*, 2011, 29(6):738-746.
- [18] 陈洪凯.生态文明视角下地质灾害防治新常态[J].*重庆师范大学学报(自然科学版)*,2020,37(4):51-56.  
Chen Hongkai. The new normalcy of geological disasters control under the vision of ecological civilization [J]. *Journal of Chongqing Normal University (Natural Science)*, 2020, 37(4):51-56.
- [19] 贺咏梅,成铭.柔性防护技术在泥石流防护中的应用及研究进展[J].*水土保持研究*,2007,14(3):292-294.  
He Yongmei, Cheng Ming. Research on the application of flexible system to mitigation of mudflow [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2007, 14(3):292-294.
- [20] Volkwein A, Wendeler C, Guasti G. Design of flexible debris flow barriers [J]. *Italian Journal of Engineering Geology and Environment*, 2011:1093-1100.
- [21] Wendeler C, Volkwein A, Roth A, et al. Hazard prevention using flexible multi-level debris flow barriers [C]//International Research Society Interpraevent. 11th Interpraevent Congress Proceedings. Dornbirn, Austria: International Research Society Interpraevent, 2008: 547-554.
- [22] Volkwein A. Flexible debris flow barriers: Design and application [R]. Birmensdorf: Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research WSL, 2014: 1-29.
- [23] 王东坡,赵军,张小梅,等.开口柔性防护网调控泥石流性能试验研究[J].*岩土力学*,2022,43(5):1237-1248.  
Wang Dongpo, Zhao Jun, Zhang Xiaomei, et al. Experimental study of regulation performance of open flexible debris flow barriers [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(5):1237-1248.
- [24] 邬泽,姜元俊,肖思友,等.碎屑流冲击下柔性防护网的力学简化模型[J].*岩石力学与工程学报*,2022,41(5):1008-1019.  
Wu Ze, Jiang Yuanjun, Xiao Siyou, et al. A simplified mechanical model of flexible barriers under granular flow impact [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(5):1008-1019.
- [25] 吴红兵.论土工格室柔性生态挡土墙的应用与前景[J].*山西交通科技*,2007(5):8-11.  
Wu Hongbing. The application and prospects of flexible and ecological retaining wall for geocell [J]. *Shanxi Science & Technology of Communications*, 2007(5):8-11.
- [26] 杨晓华,王文生.土工格室生态护坡在黄土地区公路边坡防护中的应用[J].*公路*,2004,49(8):179-182.  
Yang Xiaohua, Wang Wensheng. Application of geocell ecological slope protection in highway slope protection in loess area [J]. *Highway*, 2004, 49(8):179-182.
- [27] 韩宇琨,卢正,姚海林,等.土工格室加固边坡抗冲刷研究[J].*岩石力学与工程学报*,2021,40(增刊2):3425-3433.  
Han Yukun, Lu Zheng, Yao Hailin, et al. Study on erosion resistance of geocell reinforced slope [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(S2):3425-3433.
- [28] 王广月,孙秀玲,魏金祥.土工格室防护边坡抗冲刷规律试验研究[J].*水土保持通报*,2013,33(5):69-72.  
Wang Guangyue, Sun Xiuling, Wei Jinxiang. Experimental study of anti-erosion pattern on sideslope with geocell protection [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2013, 33(5):69-72.
- [29] 王子寒,张彪,景晓昆,等.土工格室防治坡面型泥石流启动机理研究[J].*自然灾害学报*,2022,31(5):140-149.  
Wang Zihan, Zhang Biao, Jing Xiaokun, et al. Study on starting mechanism of slope debris flow with geocell prevention [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2022, 31(5):140-149.