

# 北京市南港沟泥石流发育特征及孕灾成因

赵云辉<sup>1,2</sup>, 马海志<sup>2,3</sup>, 柳文涛<sup>1</sup>, 田华俊<sup>1</sup>, 王长安<sup>4</sup>, 张中俭<sup>2</sup>

[1. 防灾科技学院 防灾减灾工程学院, 河北 三河 065200;

2. 中国地质大学(北京) 工程技术学院, 北京 100083; 3. 北京城建勘测设计研究院  
有限责任公司, 北京 100083; 4. 成都理工大学 地球与行星科学学院, 四川 成都 610059]

**摘要:** [目的] 研究北京市房山区南港沟泥石流的发育特征, 揭示北京西南山区暴雨型泥石流的物源组成差异及孕灾机制, 为当地及类似区域的泥石流防治提供理论支撑。[方法] 以北京“23·7”暴雨后南港沟发生的泥石流灾害为研究对象, 通过无人机获取地形数据, 结合野外实地调查, 分析地形、物源及水源条件; 利用 FLO-2D 模型模拟泥石流动力过程, 重点量化树枝状沟谷-高陡边坡地貌下的泥石流运动参数, 并与现场调查结果进行验证。[结果] 南港沟地形起伏大、沟谷深切, 物源丰富且类型多样(含崩滑堆积、坡面侵蚀及沟床堆积物), 大气降水为主要水源, 暴雨是泥石流的主要激发因素。FLO-2D 模拟显示, 泥石流最大滑移速度为 6.75 m/s, 最大堆积深度为 14.6 m, 模拟结果与现场调查的误差率为 3.995%, 处于合理范围。综合分析确定南港沟泥石流易发等级指数为 2~3, 属于易发泥石流沟。[结论] 南港沟泥石流为暴雨沟谷型稀性泥石流, 其形成遵循“降雨—径流—揭底—汇聚”过程, 属易发沟。

**关键词:** 南港沟泥石流; 发育特征; 孕灾成因; FLO-2D

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)06-0132-08

中图分类号: TV144

**文献参数:** 赵云辉, 马海志, 柳文涛, 等. 北京市南港沟泥石流发育特征及孕灾成因[J]. 水土保持通报, 2025, 45(6): 132-139. Zhao Yunhui, Ma Haizhi, Liu Wentao, et al. Developmental characteristics and disaster-causing mechanisms of debris flow at Nangang gully, Beijing City [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(6): 132-139.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.06.033

CSTR: 32312.14.stbctb.2025.06.033

## Developmental characteristics and disaster-causing mechanisms of debris flow at Nangang gully, Beijing City

Zhao Yunhui<sup>1,2</sup>, Ma Haizhi<sup>2,3</sup>, Liu Wentao<sup>1</sup>, Tian Huajun<sup>1</sup>, Wang Chang'an<sup>4</sup>, Zhang Zhongjian<sup>2</sup>

[1. College of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, Institute of Disaster Prevention, Sanhe, Hebei 065200, China; 2. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 3. Beijing Urban Construction Survey and Design Institute Co., Ltd., Beijing 100083, China; 4. College of Earth and Planetary Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China]

**Abstract:** [Objective] The development characteristics of the debris flow in Nangang gully, Fangshan District, Beijing City were analyzed to reveal the differences in material source composition and disaster-causing mechanisms of rainstorm-induced debris flow in the southwest mountainous areas of Beijing City, in order to provide theoretical support for debris flow prevention and control in the local area and similar regions. [Methods] Taking the debris flow disaster that occurred in Nangang gully after the ‘23·7’ rainstorm in Beijing as the research object, topographic data were acquired using unmanned aerial vehicle (UAV), and terrain, material source, and water source conditions were analyzed in combination with field investigations. The FLO-2D model was used to simulate the dynamic process of the debris flow, with a focus on quantifying movement parameters under the

收稿日期: 2025-05-12

修回日期: 2025-09-09

采用日期: 2025-09-12

资助项目: 中国地震局地震科技星火计划项目“基于三维动态演化的黄土地震滑坡致灾范围研究与预测”(2510321004); 河北省自然科学基金“强震诱发低角度斜坡流滑三维时空动态演化和致灾范围研究”(D2023512028)

第一作者: 赵云辉(1993—), 男(汉族), 河北省昌黎县人, 博士, 讲师, 主要从事地质灾害防治研究。Email: zyh@cidp.edu.cn。

通信作者: 马海志(1967—), 男(汉族), 北京市人, 博士, 博士生导师, 教授级高级工程师, 主要从事工程勘察及地质灾害防治研究。Email: mahaizhi@cki.com.cn。

dendritic gully-high and steep slope topography. The results were then validated against field investigation data. [Results] Nangang gully featured large topographic relief and deeply incised valleys, with abundant and diverse material sources (including landslide deposits, slope erosion deposits, and channel deposits). Atmospheric precipitation served as the main water source, and rainstorms were the primary triggering factor for debris flow. The FLO-2D simulations showed that the maximum sliding velocity of the debris flow was 6.75 m/s, and the maximum accumulation depth was 14.6 m. The error rate between the simulation and field investigation results was 3.995%, which was within a reasonable range. A comprehensive analysis confirmed that the susceptibility index of debris flow in Nangang gully was 2—3, classifying it as a debris flow-prone gully. [Conclusion] The Nangang gully debris flow is a typical rainstorm-induced gully-type dilute debris flow, with its formation following the process of ‘rainfall infiltration—runoff concentration—channel bed scouring—material convergence’, and the gully is classified as a debris flow-prone area. The FLO-2D simulation has been verified to be reliable.

**Keywords: debris flow in Nangang gully; developmental characteristics; disaster-causing mechanisms; FLO-2D**

泥石流作为山区频发且危害极大的地质灾害,严重威胁着人类生命财产安全、基础设施及生态环境<sup>[1]</sup>。北京山区面积约 $1.04 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,占全市总面积的62%,受地形、气候及地质条件影响,泥石流灾害主要分布于房山、延庆、昌平、怀柔等山区区县。据北京市生态环境状况公报<sup>[2]</sup>数据,1949年以来北京市共发生有记录的泥石流灾害300余次,年均3~5次,其中2012年“7·21”特大暴雨引发的泥石流造成160余人遇难,直接经济损失超百亿元;2023年“7·23”暴雨导致房山、昌平多地泥石流暴发,损毁房屋500余间,中断道路200 km余。房山区南港沟因独特的地形地貌、地质构造以及气候条件,成为泥石流的高发区域。在2016年和2023年,南港沟先后遭受泥石流侵袭,致使大量房屋受损、农田毁坏、道路中断,给当地居民的生产生活带来极大困扰,严重阻碍了区域经济发展<sup>[3-4]</sup>。

关于北京地区泥石流的研究始于20世纪80年代,早期以灾害编目和成因定性分析为主;21世纪以来,逐步引入数值模拟(如FLO-2D, RAMMS)、遥感监测等技术,在延庆白河峡谷、昌平十三陵等区域开展了危险性评价与防治示范。进入21世纪后,国内外学者针对泥石流的发育特征与孕灾成因展开了大量研究。在发育特征方面,众多学者从地形地貌、物源条件、水源条件等多个维度进行剖析。王瑞军等<sup>[5]</sup>研究发现,北京延庆地区泥石流沟的所在地多为“U”形或者“V”形的地势,物源条件丰富,基本涵盖崩塌散落物、冲洪积堆积物以及人类活动堆积物等多种类型。马俊学等<sup>[6]</sup>对北京市昌平区韩台村“23·7”暴雨山洪泥石流灾害的研究表明,泥石流的发生多与短时强降雨等因素有关,短时强降雨会导致泥石流沟及两边山体上的地表径流流量骤增,从而导致

泥石流发生。在孕灾成因领域,学界普遍认为泥石流的产生往往伴随着降雨等自然因素。常鸣等<sup>[7]</sup>针对四川省康定市姑咱镇“8·3”特大山洪泥石流的研究结果,认为流域内陡峭的地形、风化碎裂的花岗岩体所提供的丰富物源,以及持续性降雨与冰雪消融耦合的极端气候,是导致灾害发生的主要因素。同时,人类活动如工程建设、植被破坏等,也在一定程度上增加了泥石流的发生风险。马志亮等<sup>[8]</sup>以秦岭地区鸡窝子山洪泥石流为对象,经野外调查与数值模拟发现,极端短时强降雨是诱发泥石流的关键因素,强降雨形成的洪流裹挟着被揭底侵蚀的沟道松散物质形成“消防水管”效应。FLO-2D技术作为一种先进的数值模拟手段,在泥石流研究中得到了广泛应用。该技术基于非牛顿流体理论和中央有限差分法,通过迭代计算流体运动控制方程,能够精准模拟泥石流的运动过程,包括流速、泥深、堆积范围等关键参数<sup>[9-11]</sup>。潘梦宇等<sup>[12]</sup>运用FLO-2D软件对长江流域卿家沟泥石流在不同降雨重现期下的动力过程进行模拟,深入分析了泥石流的危险性和建筑物的易损性,为泥石流灾害风险评价提供了科学依据。赵蔓等<sup>[13]</sup>利用该软件对云南兰坪县啦井村泥石流进行模拟预测和风险评价,结果显示啦井村沟道泥石流的淤积深度和最大流速随着降雨强度的增大而增加。黄勋等<sup>[14]</sup>基于FLO-2D内嵌的流体计算模拟方法,构建了泥石流暴发频率的计算模型,该模型从泥石流形成机理出发,根据灾害的堆积特征来反演灾害的形成条件,利用一次性固体物质冲出量和发生灾害的洪水流量计算模拟,最后反推出发生泥石流的概率和频率。

通过以上研究总结发现,现有研究存在三方面不足:①对房山西南山区泥石流的系统性研究较少,

尤其缺乏“地形-物源-降雨”耦合机制的定量分析；②参数化模拟中区域特异性参数(如曼宁系数、物源启动阈值)的本地化验证不足；③多方法(如无人机航测与数值模拟)的协同应用尚处于探索阶段。因此,针对南港沟泥石流的深入研究,可填补北京西南山区泥石流机理研究的理论体系,同时为制定科学有效的灾害防治措施提供理论支撑,切实保障当地居民的生命财产安全,为区域灾害防治提供本地化范式。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

#### 1.1.1 区域环境地质概况

南港沟位于北京市房山区史家营乡柳林水村,沟口地理坐标为  $115^{\circ}43'50''E, 39^{\circ}49'28''N$ 。该区域交通便利,贾史路(X019)连接国道G108可直达北京城区。流域面积  $1.68 \text{ km}^2$ ,地形呈西北高东南低,沟床纵坡比较大。泥石流沟最大长度  $1.8 \text{ km}$ ,平均纵坡  $241.29\%$ ,相对高差  $553.6 \text{ m}$ 。南港沟平面形态近似树枝状,沟道呈深切“V”字形,这种地貌有利于降水迅速汇集形成地表径流,为泥石流发生提供了地形条件。图1为南港沟泥石流全貌图。

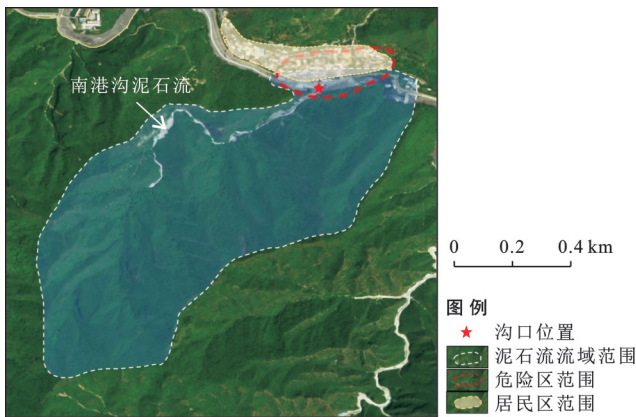


图1 南港沟泥石流全貌图

Fig.1 Panoramic view of Nangang gully debris flow

南港沟经历多次构造运动,形成复杂断裂构造体系。区域内主要岩性为青白口系下马岭组页岩夹粉砂岩、蓟县系铁岭组燧石条带及团块白云岩和白云质灰岩,以及第四系松散冲洪积物。岩石节理裂隙发育,抗风化能力差异较大。受构造运动影响,地震活动虽相对较弱,但历史上仍有有感地震记录,地震活动促使岩石破碎,为泥石流提供潜在物源。

#### 1.1.2 流域气候条件

研究区属暖温带半湿润大陆性季风气候,四季分明,降水集中在6—8月,多以暴雨形式出现。年平均气温为  $10.8^{\circ}\text{C}$ ,7月平均气温  $24.2^{\circ}\text{C}$ ,1月平均气温

$-4.4^{\circ}\text{C}$ 。年均降水量  $628.7 \text{ mm}$ ,其中单日最大降雨量可达  $67.0 \text{ mm}$ ,夏季暴雨是触发泥石流的重要气象因素。

### 1.2 研究方法

为获取南港沟泥石流发生区域的地形数据,采用无人机航拍技术对该区域进行航测作业,生成准确的DEM数据,通过ArcGIS工具将栅格数据转化为FLO-2D兼容的ASCII文件,坐标系采用WGS84 UTM Zone 48 N,高程单位定义为米。同时,综合考虑计算效率与精度需求,将全域划分为  $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$  结构化网格。

通过无人机航测生成的DOM影像,结合野外调查的GPS定位,精准圈定崩滑堆积物、坡面侵蚀区及沟床堆积带的分布范围,较传统罗盘测量精度大幅度提升;利用DEM计算各物源区的坡度、坡向,为物源动储量估算提供地形参数。结合无人机航测影像数据和现场调查计算,查明各物源类型的分布情况,计算物源储量及可能参与泥石流活动的储量。

南港沟泥石流物源体积的现场调查计算公式采用的是汶川震区泥石流计算模型<sup>[15]</sup>,该模型基于崩塌、沟道、坡面物源的空间分布特征,通过面积和厚度的乘积估算储量。南港沟与汶川震区虽地质背景不同,但同属构造活动带,且物源形成机制相似,物源类型均以坡面侵蚀为主,故计算模型适用性良好。计算公式为<sup>[15]</sup>

崩滑物源:

$$V_{bh} = 3.035A_{bh}^{0.95} \quad (1)$$

沟道物源:

$$V_g = 4.398A_g^{1.223} \quad (2)$$

坡面物源:

$$V_p = 1.369A_p^{0.898} \quad (3)$$

式中; $V_{bh}$ 为崩滑体体积( $10^4 \text{ m}^3$ ); $A_{bh}$ 为崩滑体面积( $\text{m}^2$ ); $V_g$ 为沟道物源体积( $10^4 \text{ m}^3$ ); $A_g$ 为沟道物源面积( $\text{m}^2$ ); $V_p$ 为坡面物源体积( $10^4 \text{ m}^3$ ); $A_p$ 为坡面物源面积( $\text{m}^2$ )。

模拟的可靠性通过模拟计算和现场调查计算的一次泥石流固体冲出物总量来验证。在FLO-2D模拟运算过程中,泥石流冲出固体物质总量的计算方法为先将每个单元的计算面积与堆积深度相乘,得到乘积后再汇总求和,主要借助ArcGIS软件来完成。在泥石流现场调查中,一次泥石流固体冲出物按照《泥石流灾害防治工程勘察规范》<sup>[16]</sup>附录J提供的计算公式进行计算。

$$Q_H = Q(\gamma_c - \gamma_w) / (\gamma_H - \gamma_w) \quad (4)$$

式中: $Q_H$ 为一次泥石流冲出固体物质总量( $\text{m}^3$ ); $Q$

为一次泥石流过程总量( $m^3$ ),  $Q=KTQ_c$ , 其中,  $K$ 为流量系数, 此处取 0.264,  $T$ 为一次泥石流持续时间( $s$ ),  $Q_c$ 为泥石流断面峰值流量( $m^3/s$ );  $\gamma_c$ 为泥石流重度( $t/m^3$ );  $\gamma_w$ 为水的重度( $t/m^3$ );  $\gamma_H$ 为泥石流固体物质的重度( $t/m^3$ )。

泥石流沟易发等级评价方法参照文献[16]附录G的泥石流沟易发程度量化评分表, 易发等级指数计算公式为

$$I = \sum_{i=1}^n W_i \times S_i \quad (5)$$

式中:  $I$ 为泥石流沟易发指数;  $W_i$ 为第  $i$ 项评价指标权重;  $S_i$ 为第  $i$ 项指标得分(取值 1~5);  $n$ 为评价指标总数( $n=5$ )。

选取 5项核心指标及权重进行计算, 分别为沟床坡比, 权重 0.25; 物源动储量, 权重 0.25; 50 a 一遇小时雨强, 权重 0.20; 植被覆盖率, 权重 0.15; 历史灾害频次, 权重 0.15。各项指标量化评分后加权求和得易发等级指数: 指数小于 1.0 为低易发, 1.0~2.0 为较易发, 2.0~3.0 为易发, 大于 3.0 为高易发。

## 2 结果与分析

### 2.1 南港沟泥石流发生的影响因素

#### 2.1.1 地形因素

南港沟所在区域为山区, 地形起伏大, 沟谷深切, 两岸坡度多在  $50^\circ \sim 80^\circ$  之间, 局部陡坡超过  $80^\circ$ 。坡面植被覆盖率约 93%, 沟道内植被覆盖率 60%~80%。部分区域基岩裸露, 根据现场调查, 泥石流沟道两侧山体新鲜基岩面出露最大高度 1.1 m。这种地形使得降雨时坡面径流速度快, 侵蚀能力强, 易携带泥沙石块进入沟道, 为泥石流形成创造了地形基础。同时, 陡峭地形为松散固体物质积累提供了临空条件, 有利于泥石流启动。

#### 2.1.2 物源因素

研究表明, 南港沟泥石流物源主要包括崩滑堆积、坡面侵蚀和沟床堆积 3 种类型。崩滑堆积物源总量达  $1\ 702\ m^3$ , 可提供松散固体物源约  $1\ 700\ m^3$ , 其中能够参与泥石流活动的动储量约  $980\ m^3$ ; 坡面侵蚀物源总量为  $13\ 634\ m^3$ , 可提供松散固体物源约  $13\ 634\ m^3$ , 估算其动储量约  $8\ 593\ m^3$ ; 沟床堆积物源总量为  $14\ 113\ m^3$ , 能够参与泥石流活动的动储量约  $9\ 290\ m^3$ 。经统计, 南港沟泥石流物源总量共计  $29\ 400\ m^3$ , 其中可参与泥石流活动的动储量为  $8\ 600\ m^3$ 。

#### 2.1.3 降雨因素

南港沟的水体补给以大气降水为主。综合该地区历史上曾经发生的山洪泥石流特征来看, 地表径流

受暴雨影响出现流量骤增, 是泥石流暴发的核心诱因, 属于典型的暴雨沟谷型泥石流。参考《北京市水文手册》暴雨图集, 北京地区史家营乡所在的区域 50 a 一遇暴雨小时雨强可达  $101\ mm/h$ , 依据气象部门监测, 2023 年 7 月 31 日特大暴雨时最大雨强为  $118\ mm/h$ 。

#### 2.1.4 泥石流形成过程

南港沟泥石流作为典型的暴雨沟谷型泥石流, 其形成有着复杂的机制。在降雨初期, 持续降水使土壤含水量达到饱和, 孔隙水压力显著升高, 进而导致堆积物的黏聚力与内摩擦角降低。当强降雨持续, 流域内山坡产生地表径流, 沟床形成沟道水流。强劲的地表径流不断冲刷沟床堆积物, 对其进行掏蚀破坏, 使得沟道堆积物被彻底启动, 与水流混合形成初始的泥石流物质。此后, 在沟道水流的强大动力作用下, 沟道内的松散堆积物源被揭底冲刷、卷动裹挟, 不断加入泥石流物质中, 最终推动泥石流运动<sup>[17-18]</sup>。随着径流速度的增大, 侵蚀力不断增强, 被揭底的固体物质不断增多, 以滚雪球的方式向下游运动, 从而暴发泥石流灾害。泥石流体冲出沟口后, 将沟口附近的耕地毁坏, 并将沿途村民房屋破坏。

综上所述, 南港沟沟域独特的地形地貌成为泥石流孕育的温床。其地势陡峭、沟谷纵坡显著, 为泥石流的形成创造了先天的地形条件。同时, 采矿活动在坡面及沟道遗留下大量堆积物, 这些松散固体物质为泥石流提供了充足的物质基础。而暴雨作为关键的触发因素, 一旦降临, 便会激活上述条件, 最终促使泥石流的暴发, 图 2 为南港沟泥石流孕灾机制示意图。

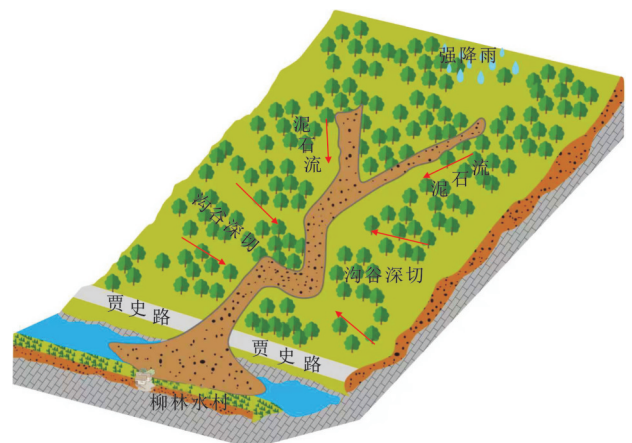


图 2 南港沟泥石流孕灾机制

Fig.2 Mechanism of disaster-causing environment for Nangang gully debris flow

### 2.2 南港沟泥石流灾害特征

#### 2.2.1 基本物理力学参数

通过现场调查和采样分析, 确定南港沟泥石流

属于稀性泥石流。根据《泥石流灾害防治工程勘察规范》<sup>[16]</sup>,结合现场堆积物特征,确定泥石流容重为  $1.68 \text{ g/cm}^3$ 。通过对堆积扇上泥石流堆积物测量和估算,冲出的固体物质总量约  $1.70 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。现场发现第四系松散冲洪积物中最大孤石直径为  $50 \text{ cm}$ ,根据降水量和水动力条件综合分析,泥石流流速为  $2.4 \sim 6.9 \text{ m/s}$ 。

### 2.2.2 FLO-2D 运动过程演化

(1) 流量及降雨过程。基于《泥石流灾害防治工程勘察规范》<sup>[16]</sup>附录 I 方法,采用雨洪法耦合泥沙动力学修正模型,构建南港沟泥石流流量过程线,具体流程如下:

采用公式(6)计算出水口断面洪峰流量。

$$Q = 0.278\phi_i F \quad (6)$$

式中: $Q$ 为最大洪峰流量( $\text{m}^3/\text{s}$ ); $\phi$ 为洪峰径流系数; $i$ 为最大平均暴雨强度( $\text{mm}/\text{h}$ ); $F$ 为集水面积( $\text{km}^2$ )。

考虑物源启动与沟道输移特征,采用公式(7)、(8)进行流量修正。

$$Q_c = (1 + \phi) Q D_c \quad (7)$$

$$\phi = \frac{\gamma_c - \gamma_w}{\gamma_h - \gamma_c} \quad (8)$$

式中: $Q_c$ 为泥石流断面峰值流量( $\text{m}^3/\text{s}$ ); $\phi$ 为泥沙修正系数; $\gamma_c$ 为泥石流容重( $\text{g}/\text{cm}^3$ ); $\gamma_w$ 为清水容重( $\text{g}/\text{cm}^3$ ,取1); $\gamma_h$ 为泥石流中固体物质比重(无量纲); $D_c$ 为堵塞系数。

南港沟泥石流峰值流量计算参数中,汇水面积为  $1.68 \text{ km}^2$ ,暴雨洪峰流为  $24.57 \text{ m}^3/\text{s}$ ,暴雨强度为  $118 \text{ mm}/\text{h}$ ,径流系数为  $0.55$ ,泥沙修正系数为  $1.73$ ,堵塞系数为  $1.30$ ,泥石流峰值流量为  $51.96 \text{ m}^3/\text{s}$ 。图 3 为南港沟泥石流发生时降雨强度随时间的变化曲线。

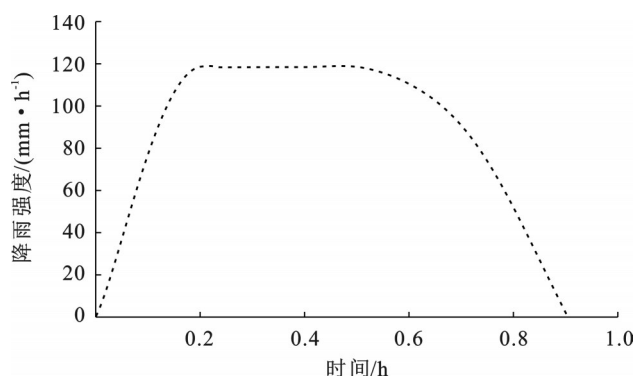


图 3 南港沟降雨强度随时间的变化

Fig.3 Variation of rainfall intensity with time in Nangang gully

(2) 泥石流演进关键参数。南港沟泥石流推演参数主要通过野外现场调查、FLO-2D 模拟计算手册

和现有研究成果综合确定。曼宁系数参考《泥石流灾害防治工程勘察规范》<sup>[16]</sup>中稀性泥石流沟道建议值,并结合南港沟现场调查植被覆盖率( $60\% \sim 80\%$ )与梁鸿熙等<sup>[19]</sup>对类似地形的模拟结果( $0.22 \sim 0.28$ )综合确定,本研究取  $0.25$ ,通过多次模拟,综合分析结果发现,当曼宁系数改变  $0.05$  时,最大滑移速度偏差  $8.3\%$ ,最大堆积深度偏差  $6.1\%$ 。层流阻滞系数采用 FLO-2D 模拟计算手册中稀性泥石流默认值,潘梦宇等<sup>[12]</sup>在长江流域验证适用;层流阻滞系数发生变化不超过  $10$  时,速度与深度的偏差均小于  $5\%$ 。泥石流容重主要通过现场调查采样的实测平均值确定,与马俊学等<sup>[6]</sup>对北京“23·7”暴雨泥石流的容重测算结果( $1.65 \sim 1.72 \text{ g}/\text{cm}^3$ )基本一致。容重变化  $0.05 \text{ g}/\text{cm}^3$  时,滑移速度偏差  $4.1\%$ ,堆积深度偏差  $3.7\%$ 。可见曼宁系数对模拟结果影响显著,故采用现场实测与文献对比双重验证,确保其合理性。黏滞系数与屈服应力通过 FLO-2D 模拟计算手册推荐范围值选取,并结合蒋涛涛<sup>[3]</sup>、马俊学等<sup>[6]</sup>、廖立业等<sup>[17]</sup>对北京地区泥石流的研究成果确定,对比多次模拟结果发现,黏滞系数每增加  $10\%$ ,模拟结果的最大流速降低  $3.9\%$ ,堆积深度增加  $1.1\%$ ;屈服应力每增加  $10\%$ ,最大流速降低  $5.8\%$ ,堆积范围缩小  $4.7\%$ 。

南港沟泥石流 FLO-2D 数值模拟研究具体参数及数值见表 1。

表 1 南港沟泥石流 FLO-2D 数值模拟主要参数  
Table 1 Main parameters for FLO-2D numerical simulation of Nangang Gully debris flow

参数名称	数值	
网格大小/m	$10 \times 10$	
曼宁系数 $N$	$0.25$	
层流阻滞系数 $K/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	$2\ 280$	
泥石流容重 $\gamma/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$1.683$	
黏滞系数 $(\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1})$	$\alpha_1$	$0.008\ 11$
	$\beta_2$	$13.72$
屈服应力/Pa	$\alpha_2$	$0.004\ 58$
	$\beta_2$	$11.24$

注: $\alpha_1$ 表示黏滞系数基准值; $\beta_1$ 表示黏滞系数的浓度敏感系数; $\alpha_2$ 表示屈服应力基准值; $\beta_2$ 表示屈服应力的浓度敏感系数。

(3) 泥石流演进过程。根据 FLO-2D 数值模拟结果,南港沟泥石流的最大滑移速度为  $6.75 \text{ m/s}$ ,受沟口道路及河流沟道影响,泥石流的最大堆积深度达到  $14.6 \text{ m}$ 。同时,FLO-2D 模拟的沟床侵蚀深度显示,主沟中段存在强侵蚀区,最大侵蚀深度达  $1.2 \text{ m}$ ,与野外实测的沟床基岩出露深度( $1.1 \text{ m}$ )基本一致,验证了沟底堆积物被揭底冲刷的形成机制。南港沟泥石流的堆积深度和滑移速度过程模拟见图 4。

(4) 模拟结果精度验证。研究表明,FLO-2D 模拟的一次泥石流固体冲出物总量结果(16 340 m<sup>3</sup>)和现场调查结果(17 020 m<sup>3</sup>)较为接近,误差为 3.995%,其可靠性和精度满足要求。

模拟与调查的固体冲出物总量误差主要源于 3 方面:①由于南港沟泥石流主沟两侧,有若干条较小的支沟,模拟结果中只包含了主沟的固体冲出物总量,支沟中的并未包含,对于固体冲出物总量而言,支沟中只占极小部分,因此模拟计算结果相对合

理;②地形数据精度问题,10 m 网格忽略了沟道内 0.5~1.0 m 的微起伏,导致局部流速计算出现偏差;③降雨强度的估算采用 118 mm/h,而实际沟内可能存在局地暴雨或者局部雨强下降的情况,使结果出现偏差。另外,现场采样获取的泥石流容重作为 FLO-2D 模拟的核心输入参数,模拟得出的最大堆积深度(14.6 m)与沟口实测堆积扇厚度(14.2 m)偏差 2.8%,验证了现场调查与模拟数据的一致性以及模拟结果的合理性。

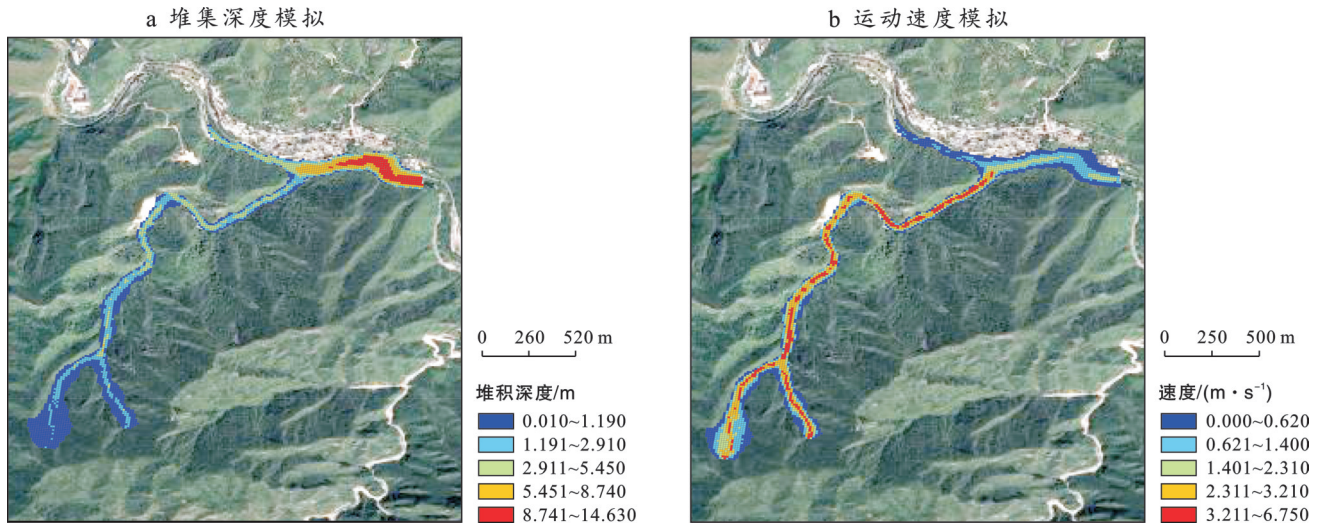


图 4 南港沟泥石流运动过程模拟  
Fig.4 Simulation of movement process of Nangang gully debris flow

### 2.3 易发程度评价

根据模拟结果,南港沟泥石流流域范围大部分的易发等级指数为 2~3,尤其是下游村口堆积区(图 5)。结合现场调查,南港沟泥石流沟床坡比(241.29%)得分 3.0,物源动储量(9 600 m<sup>3</sup>)得分 3.0;50 a 一遇雨强(118 mm/h)得分 4.0,植被覆盖率(60%~80%)得分 2.0,历史灾害(2 次)得分 1.5。按照公式(5)加权求和得泥石流沟易发等级指数为 2.8,因此,南港沟泥石流沟易发程度为易发泥石流沟。

## 3 结论与讨论

### 3.1 结论

(1) 南港沟泥石流属于典型的暴雨沟谷型泥石流,其发育依赖于特定的地形、物源与水源条件。该地地形陡峻,沟谷纵坡大,为泥石流发生提供了地形条件,采矿形成的坡面及沟道堆积物提供了丰富物源,暴雨为其提供了丰富的水源条件。通过现场调查和采样分析,确定南港沟泥石流为稀性泥石流。

(2) 南港沟泥石流的形成机制遵循“降雨浸润—径流汇集—沟床揭底—物源汇聚”的动态过程。沟谷经过一定时间的雨水冲刷,致使沟中的土体强度

下降,持续降雨使山坡上地表径流迅速增大,由于沟谷纵向深切,水流速度较快,将沟床堆积物和沟坡堆积物冲入泥石流沟,随着水流共同形成泥石流物质。随着水流加快,沟底堆积物被强烈揭底冲刷,参与到泥石流中的物源不断增加,最终爆发泥石流灾害,造成破坏。

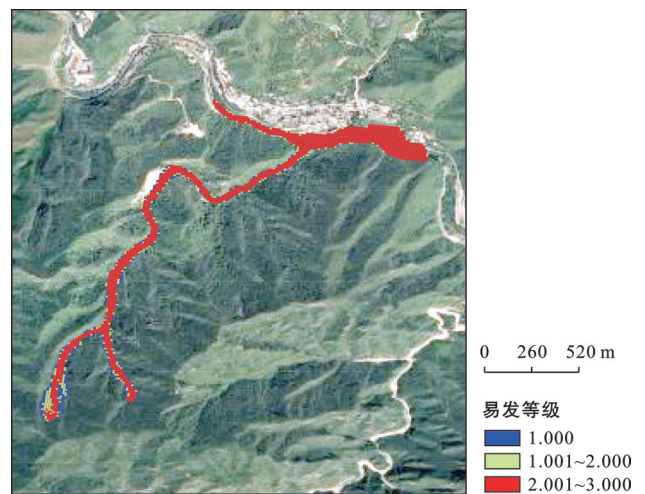


图 5 南港沟泥石流易发等级分布  
Fig.5 Distribution of susceptibility grade of Nangang gully debris flow

(3) FLO-2D模拟结果表明,南港沟泥石流最大滑移速度为6.75 m/s,最大堆积深度达14.6 m,模拟的一次固体冲出物总量与现场调查结果误差率为3.995%,误差结果合理,验证了模型在该区域的适用性。结合模拟结果与现场调查,依据泥石流沟易发等级评价标准,确定南港沟泥石流易发等级指数位于2~3之间,属于易发泥石流沟。

### 3.2 讨论

本研究中,FLO-2D模拟存在一定局限性。①基于结构化网格(10 m×10 m)难以精准刻画沟道内孤石(最大直径50 cm)的局部阻塞效应,②物源补给设定为一次性启动,未考虑泥石流运动中沟坡持续侵蚀的动态补给过程。在后续研究中,可细化模拟过程,比如可局部增设5 m×5 m的结构性网格、细化雨强分布,使雨强更接近于实际,以此避免上述问题。

本研究建立了“无人机航测—野外调查-FLO-2D模拟”技术框架,可为北京西南山区及北方类似地貌区的泥石流灾害机理分析、参数量化及风险评估提供方法参考,其成果对区域泥石流防治工程布局具有科学指导意义。

### 参考文献(References)

- [1] 王高峰,杨强,陈宗良,等.白龙江流域甘家沟泥石流风险评估研究[J].泥沙研究,2020,45(4):66-73.  
Wang Gaofeng, Yang Qiang, Chen Zongliang, et al. Risk assessment of debris flow in the Ganjia gully of the Bailongjiang Basin [J]. Journal of Sediment Research, 2020, 45(4): 66-73.
- [2] 北京市生态环境局.2024年北京市生态环境状况公报[EB/OL][2025-05-09].<https://www.beijing.gov.cn>. Beijing Municipal Ecology and Environment Bureau.2024 Beijing Ecological Environment Status Bulletin [EB/OL]. [2025-05-09]. <https://www.beijing.gov.cn>.
- [3] 蒋涛涛.北京市史家营乡泥石流风险评价与预警模型研究[D].北京:中国地质大学(北京),2021.  
Jiang Taotao. Study on risk assessment and early warning model of debris flow in Shijiaying Township, Beijing [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2021.
- [4] 史学磊,韩旭东,杨秀元,等.三峡库区溪沟湾滑坡的诱发因素及前期降雨影响[J].地质力学学报,2023,29(2):253-263.  
Shi Xuelei, Han Xudong, Yang Xiuyuan, et al. Factors inducing the Xigouwan landslide in the Three Gorges reservoir area and the influence of antecedent precipitation [J]. Journal of Geomechanics, 2023, 29(2): 253-263.
- [5] 王瑞军,王帅东,孙永彬,等.北京延庆泥石流隐患分布规律及演化趋势研究[J].世界核地质科学,2024,41(3):623-632.  
Wang Ruijun, Wang Shuaidong, Sun Yongbin, et al. Study on the distribution law and evolution trend of debris flow hazards in Yanqing, Beijing [J]. World Nuclear Geoscience, 2024, 41(3): 623-632.
- [6] 马俊学,高会然,许冲.北京市昌平区韩台村“23·7”暴雨山洪泥石流灾害特征分析[J].水利水电技术(中英文),2024,55(7):1-18.  
Ma Junxue, Gao Huiran, Xu Chong. Characteristics of flash flood-debris flow disaster induced by the ‘23·7’ rainstorm in Hantai village, Changping District, Beijing [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2024, 55(7): 1-18.
- [7] 常鸣,许强,王运生,等.四川康定姑咱“8·3”特大山洪泥石流发育特征及孕灾成因研究[J].武汉大学学报(信息科学版),2024,49(11):2136-2144.  
Chang Ming, Xu Qiang, Wang Yunsheng, et al. Development characteristics and disaster-causing mechanisms of the “8·3” catastrophic flash flood and debris flow in Guzan, Kangding, Sichuan Province [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2024, 49(11): 2136-2144.
- [8] 马志亮,庄建琦,吴靓,等.基于数值模拟的强降雨诱发低频泥石流特征分析和危险性评价:以秦岭鸡窝子山洪泥石流为例[J].水土保持通报,2025,45(1):147-157.  
Ma Zhiliang, Zhuang Jianqi, Wu Jing, et al. Characteristics analysis and risk assessment of low-frequency debris flow induced by heavy rainfall based on numerical simulation: A case study of Jiwozi flash flood and debris flow in Qinling Mountains [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(1): 147-157.
- [9] 刘福臻,张浩韦,肖东升.基于FLO-2D数值模拟的结底岗村公路泥石流危险性评价[J].科学技术与工程,2022,22(13):5417-5424.  
Liu Fuzhen, Zhang Haowei, Xiao Dongsheng. Risk assessment of highway debris flow in Jiedigang village based on FLO-2D numerical simulation [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(13): 5417-5424.
- [10] 李宝幸,蔡强,宋军,等.基于FLO-2D的泥石流灾害风险评估:以麦多沟泥石流为例[J].自然灾害学报,2022,31(4):256-265.  
Li Baoxing, Cai Qiang, Song Jun, et al. Risk assessment of debris flow hazard based on FLO-2D: A case study of debris flow in Maiduo gully [J]. Journal of Natural Disasters, 2022, 31(4): 256-265.
- [11] 渠敬凯,杨为民,申俊峰,等.基于DEM数据预处理的小流域泥石流防治工程效果分析:以漳县方家沟泥石流为例[J].水文地质工程地质,2024,51(4):206-219.  
Qu Jingkai, Yang Weimin, Shen Junfeng, et al. Analysis of debris flow engineering treatment effect based on DEM data preprocessing in small watershed: A case

- study of Fangjiagou debris flow, Zhangxian County [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2024, 51(4): 206-219.
- [12] 潘梦宇,雷雨,顾海华,等.基于建筑易损性分析的泥石流风险评价[J].*人民长江*,2024,55(10):133-140.  
Pan Mengyu, Lei Yu, Gu Haihua, et al. Risk assessment of debris flow based on building vulnerability analysis [J]. *Yangtze River*, 2024, 55(10):133-140.
- [13] 赵蔓,孙俊,朱恺悦.云南兰坪县啦井村泥石流模拟预测及风险评价[J].*中国地质灾害与防治学报*,2024,35(5):110-119.  
Zhao Man, Sun Jun, Zhu Kaiyue. Simulation prediction and risk evaluation of debris flow in gullyprone ditches of Lajing village, Lanping County, Yunnan Province, China [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2024, 35(5):110-119.
- [14] 黄勋,唐川,周伟.基于数值模拟的暴雨泥石流暴发频率计算模型[J].*工程地质学报*,2014,22(6):1271-1278.  
Huang Xun, Tang Chuan, Zhou Wei. Numerical simulation of occurrence frequency estimation model for debris flows [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2014, 22(6):1271-1278.
- [15] 方群生,唐川,王毅,等.汶川极震区泥石流流动储量与总物源量计算方法研究[J].*防灾减灾工程学报*,2016,36(6):1008-1014.  
Fang Qunsheng, Tang Chuan, Wang Yi, et al. A calculation method for predicting dynamic reserve and the total amount of material source of the debris flows in the Wenchuan meizoseismal area [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2016, 36(6): 1008-1014.
- [16] 中国地质灾害防治工程行业协会.泥石流灾害防治工程勘查规范:T/CAGHP 006—2018[S].武汉:中国地质大学出版社,2018.  
China Association of Geological Hazard Prevention Engineering. Specification of Geological Investigation for Debris Flow Stabilization: T/CAGHP 006—2018 [S]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2018.
- [17] 廖立业,曾庆利,袁广祥.北京怀柔7·16暴雨泥石流发育特征与形成机理[J].*工程地质学报*,2021,29(3):807-816.  
Liao Liye, Zeng Qingli, Yuan Guangxiang. Characteristics and mechanism of the rainstorm-induced debris flow on July 16 in Huairou, Beijing [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2021, 29(3):807-816.
- [18] 唐得胜,唐川,朱静.汶川震区震后沟谷暴雨泥石流暴发的可能性分析[J].*水电能源科学*,2015,33(9):148-151.  
Tang Desheng, Tang Chuan, Zhu Jing. Outbreak probability analysis of gully debris flow in Wenchuan earthquake zone [J]. *Water Resources and Power*, 2015, 33(9):148-151.
- [19] 梁鸿熙,尚敏,徐鑫.基于FLO-2D数值模拟的泥石流流动与堆积影响因素研究[J].*工程地质学报*,2016,24(2):228-234.  
Liang Hongxi, Shang Min, Xu Xin. Research on the influencing factors of flow and deposition of debris flow based on the FLO-2D simulation [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2016, 24(2): 228-234.
- 
- (上接第76页)
- [24] 张小芳,张春平,杨增增,等.单播措施下三江源区高寒退化草地恢复效果评估[J].*草地学报*,2022,30(10):2834-2844.  
Zhang Xiaofang, Zhang Chunping, Yang Zengzeng, et al. Evaluation of restoration effect in alpine degraded meadow under single sowing in the three rivers source regions [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(10):2834-2844.
- [25] 郭美琪,刘琳,荆晶莹,等.基于植物-土壤反馈原理的退化草原免耕补播修复物种选择研究[J].*草业学报*,2023,32(12):14-23.  
Guo Meiqi, Liu Lin, Jing Jingying, et al. Species selection for no-tillage reseeding in grassland restoration based on plantsoil feedback [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2023, 32(12):14-23.
- [26] Zhou Hanzhang, Liu Huan, Jia Haiyan, et al. Effects of different sowing dates on plant height, leaf-stem ratio and dry-fresh ratio of forage sorghum in autumn idle fields [J]. *Agricultural Science & Technology*, 2018 (2):57-66.
- [27] 李希来,马昀娇,段成伟,等.施肥和补播对不同坡向斑块退化高寒草甸生物量和物种多样性的影响[J].*中国草地学报*,2024,46(5):1-13.  
Li Xilai, Ma Yunqiao, Duan Chengwei, et al. Effects of fertilization and reseeding on biomass and species diversity of patchy degraded alpine meadows with different slope directions [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2024, 46(5):1-13.
- [28] Beer C, Ciais P, Reichstein M, et al. Temporal and among-site variability of inherent water use efficiency at the ecosystem level [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2009, 23(2):2008GB003233.
- [29] Keenan T F, Hollinger D Y, Bohrer G, et al. Increase in forest water-use efficiency as atmospheric carbon dioxide concentrations rise [J]. *Nature*, 2013, 499(7458):324-327.