

DOI:10.19948/j.12-1471/P.2024.04.06

李晓丽,王宇栋,田浩飞,刘恒麟,梁彤彤. 2024. 北京市延庆区帽山沟泥石流危险性研究[J]. 华北地质, 47(4): 57-63+90.

Li Xiaoli, Wang Yudong, Tian Haofei, Liu Henglin, Liang Xingtong. 2024. Risk study of debris flow in Maoshangou, Yanqing District, Beijing[J]. North China Geology, 47(4):57-63+90.

北京市延庆区帽山沟泥石流危险性研究

李晓丽,王宇栋,田浩飞*,刘恒麟,梁彤彤

(昆明理工大学公共安全与应急管理学院,昆明 650093)

摘要:【研究目的】泥石流因其范围广、成灾快、危害大的特点,易对山区基础工程设施造成破坏,并严重阻碍地区经济发展。近年来,北京山区地质灾害多发频发,延庆区作为北京的生态涵养区,旅游景点众多,但是泥石流隐患也比较多。为了降低泥石流的潜在威胁,对延庆区泥石流进行深入研究至关重要。【研究方法】本文以延庆区岔石口村泥石流沟作为研究对象,进行危险性分析和预测。【研究结果】研究结果显示:沟内松散堆积物可分为3类:冲洪积、残坡积和人工堆积,其动态储量为 $9.9 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。由洪峰值流量和一次泥石流冲出固体物质总量确定该泥石流规模为中型;在4个降雨工况下(10年、20年、50年和100年一遇),危险区面积分别为 0.0044 km^2 、 0.0051 km^2 、 0.0059 km^2 、 0.0068 km^2 。发展阶段属于衰退期。【结论】经过深入分析,发现该泥石流沟爆发中型泥石流的几率很大,将对下游道路和村庄居民造成危害。对此沟的详细研究不仅有助于深入理解该区域泥石流的成因机制、动力学特征及发展趋势,还能为类似地质环境条件下的单沟泥石流研究和灾害防治提供参考。

关键词:泥石流;形成条件;动力学特征;危险区预测;帽山沟

创新点:当前关于北京地区特别是延庆区内单沟泥石流的相关研究相对匮乏,本文研究了延庆区内帽山沟的孕育条件及基本特征。在预测潜在危险区域范围方面,本研究引入了地形变化和洪峰流量对泥石流的影响,使预测结果更准确,为后续的科学性及防灾减灾实践提供了参考依据。

中图分类号:P694

文献标志码:A

文章编号:2097-0188(2024)04-0057-08

Study on the risk of debris flow in Maoshangou, Yanqing District, Beijing

LI Xiaoli, WANG Yudong, TIAN Haofei*, LIU Henglin, LIANG Xingtong

(Faculty of Public Safety and Emergency Management, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: This paper is the result of debris flow hazard study.

[Objective] The debris flow, because of its wide range, rapid disaster and great harm, has caused damage to the basic engineering facilities in the mountain area, and seriously hindered the regional economic development. In recent years, geological disasters have occurred frequently in the mountainous areas of Beijing. Yanqing District, as the ecological conservation area of Beijing, has many tourist attractions, but there are also many hidden dangers of debris flow. **[Methods]** In order to reduce the potential threat of debris flow, it is very important to study related debris flow in Yanqing District. In this paper, the debris flow ditch in Chashikou village of

收稿日期:2024-08-19

基金项目:云南省基础研究计划:“青年基金项目(202401AU070142)”；云南省基础研究计划:“青年基金项目(202401CF070138)”；“云南省教育厅科学研究基金项目(2024J0078)”

作者简介:李晓丽(2000—),女,硕士研究生,主要从事地质灾害评估研究,E-mail: 2995591318@qq.com。

*通讯作者:田浩飞(1992—),男,工学博士,讲师,主要从事地质灾害防治、评估相关研究,E-mail: hftian@kust.edu.cn。

Yanqing District is taken as the research object to analyze and forecast the risk. **[Results]** The results show that loose deposits of Maoshangou can be categorized into three types: alluvial and diluvial deposits, residual-slope deposits, and artificial deposits, with a dynamic reserve of $9.9 \times 10^4 \text{ m}^3$. From the peak flow value and the total amounts of solids washed out by the primary debris flow, it can be determined that the size of this debris flow is medium. By varying rainstorm frequencies (10-, 20-, 50-, 100-year rainfall events), the respective hazardous areas are measured to be 0.004 4, 0.005 1, 0.005 9, and 0.006 8 km^2 . The stage of debris flow development is considered to be a recession period. **[Conclusions]** After thorough discussions, it was found that the chances of the debris flow gully erupting into a medium-sized debris flow are high, which will pose a hazard to the residents of the downstream roads and villages. The detailed study of this ditch not only helps to deeply understand the mechanism, dynamic characteristics and development trend of the debris flow in this region, but also provides a reference for the study of debris flow and disaster prevention and control of the single ditch under similar geological conditions.

Key words: debris flow; formation condition; dynamic characteristics; hazardous area prediction; Maoshangou

Highlights: At present, there is relatively little research on single-channel debris flow in Beijing area, especially in Yanqing area. In this paper, the breeding conditions and basic characteristics of Maoshan Ditch in Yanqing area are studied. In terms of predicting the scope of potential danger areas, this study introduced the influence of terrain change and flood peak discharge on debris flow, so as to make the prediction results more accurate and provide a reference for subsequent scientific research and disaster prevention and mitigation practice.

About the first author: LI Xiaoli, female, born in 2000, engaged in research on geohazard assessment, E-mail: 2995591318@qq.com.

About the corresponding author: Tian Haoifei, male, born in 1992, PhD, engaged in research related to the prevention and assessment of geological hazards, E-mail: hftian@kust.edu.cn.

Fund support: Supported by the Yunnan Provincial Basic Research Program-Youth Fund Project (202401AU070142), Yunnan Provincial Basic Research Program-Youth Fund Project (202401CF070138), Yunnan Provincial Department of Education Scientific Research Fund Project (2024J0078).

泥石流是一种由降水或冰川消融在山坡或沟谷引起的含有大量碎石块、泥土的混合双相颗粒流。泥石流具有爆发迅猛、冲击力强、成灾速度快的特点,能在极短时间内将大量泥沙、土块等流泻至堆积区,对流经之处的建筑物等产生毁灭性破坏(陈林, 2013; 袁菲菲, 2014; 涂剑等, 2017; Wang et al., 2019; Liu et al., 2021; 魏星宇等, 2022; 张伟, 2023; 刘云鹏等, 2024; 史继帅等, 2024)。近年来,北京山区发展迅速,大量工程活动使生态环境遭到破坏,导致山区泥石流灾害多发频发。为降低北京山区泥石流灾害的潜在风险,相关学者对北京山区泥石流进行了大量研究。延庆因其特殊的构造区位、复杂的地形地貌以及独特的生态环境形成了区别于北京其它地区的小环境。延庆区作为首都西北部的重要生态屏障和水源涵养区,其生态环境保护 and 灾害防治工作直接关系到北京市的整体生态安全和社会发展。此外,延庆世界地质公园在2024年5月成功通过世界地质公园评估,并计划将园区

面积从 620.38 km^2 扩大到 1 398.91 km^2 。

随着全球气候变化的加剧,极端天气事件频发,加上北京山区地形复杂,以及人类活动对自然环境的持续影响,使其频繁遭受泥石流等自然灾害的侵袭。对于北京山区而言,破坏最严重、危害最大的地质灾害当属泥石流。为降低泥石流灾害给北京山区所带来的巨大损失,众多专家学者依托野外调查和监测预警等基础资料,对北京山区泥石流展开了广泛研究(陈东杰, 2013; Cao, 2015; 孙佳丽, 2018; 申健等, 2018; 王海芝, 2020; 梁永顺等, 2021; 王颖等, 2021; 章新益等, 2021; 王瑞军等, 2022; 陈文鸿等, 2021, 2023; 王瑞军等, 2024)。无论是延庆世界地质公园的前期扩建准备工作,还是作为北京西北地区的生态涵养区,都迫切需要对延庆区进行地质灾害方面的深入研究。所以,本研究对延庆区的单沟泥石流进行了深入研究,选择了具有典型代表的帽山沟潜在泥石流沟作为研究对象,其地形地貌、地质条件及降雨特征等自然因素在很大程度上反映了北京

北部山区泥石流灾害的普遍特征。研究其泥石流孕灾特征、发育特征、动力学特征、危险区预测。希望本研究能够对其它单沟泥石流研究提供借鉴。

1 区域背景

延庆区位于北京市西北部,区内山地多,平均海

拔 500 m 以上,整体地势北东高、南西低。区内地貌类型包括中山区、低山山地区和盆地区。发育泥石流沟 65 条,帽山沟位于延庆区北部(图 1)。泥石流沟域自南东向北西展布,沟域面积 4.56 km²。主沟长 4.36 km,主沟纵坡降 105.9‰,冲淤变幅±0.2 m,植被覆盖率 70%。沟口通过 X002 县道,交通较便利。

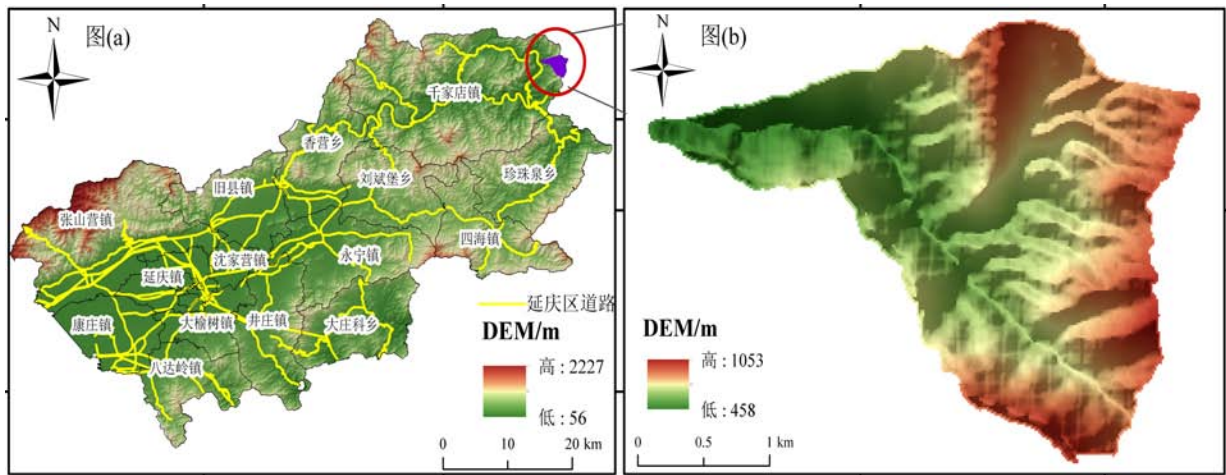


图 1 研究区地理位置图(a)及研究区高程图(b)

Fig.1 Study Area Location Map (a) and Study Area Elevation Map (b)

2 泥石流形成条件

2.1 地形地貌

帽山沟是典型的暴雨—沟谷型泥石流,沟谷整体流向 170°,山体平均坡度 28°,属低山地貌。上游地形较陡,物源丰富;中游沟域两侧及沟床内散落着一定量的松散堆积物,部分沟道存在堵塞、占用,导致水流无法顺畅排泄。沟谷中游及中下游多呈下切现象,中下游汇合后,沿下方冲沟排泄,人工形成的物源较复杂,地势较缓,纵坡降较小。沟域内地下水主要为松散岩类孔隙水,聚集于沟内卵石土层中,由于裂隙发育较好,因此具有优异导水性能,主要补给来源为降雨;地表水为冲沟的季节性流水,同样由降雨补给。沟域内耕地稀少,多见基岩。沟域内共发育 19 条支沟(表 1)。沟谷总长 39.84 km。主沟起点位于南西侧坡顶,高程 988 m,宽 45~100 m。主沟直线长 3.30 km,弯曲系数 1.32。左岸发育 8 条支沟,高程在 471~965 m 之间;右岸发育 11 条,高程在 511~955 m 之间(图 2)。该沟域的沟谷宽缓顺直,为松散堆积物的汇聚创造了有利条件,更易导致泥石流的形成。

2.2 水源条件

沟域属于温带大陆性季风气候。1990—2022 年的延庆区降雨数据显示:延庆区的年平均降雨量为

表 1 沟道信息统计

Table 1 Data statistics of main and branch gully

序号	相对位置	流动方向/°	长度/m	纵坡降/‰
1	主沟	290	4 360.56	105.49
2	左岸	315	432.16	275.27
3	左岸	45	288.27	343.965
4	左岸	40	655.46	260.88
5	左岸	355	312.31	325.56
6	左岸	295	339.03	290.73
7	右岸	205	337.38	528.44
8	右岸	230	598.47	336.77
9	右岸	190	412.97	339
10	右岸	195	542.30	321.86
11	右岸	270	256.29	234.10
12	右岸	265	725.29	266.24
13	右岸	260	417.95	241.39
14	右岸	250	718.78	337.75
15	右岸	260	431.51	372
16	右岸	340	804.67	345.82
17	右岸	265	900.80	296.81
18	右岸	190	860.19	167.76
19	右岸	230	2 469.68	161.10
20	右岸	195	909.69	171.41

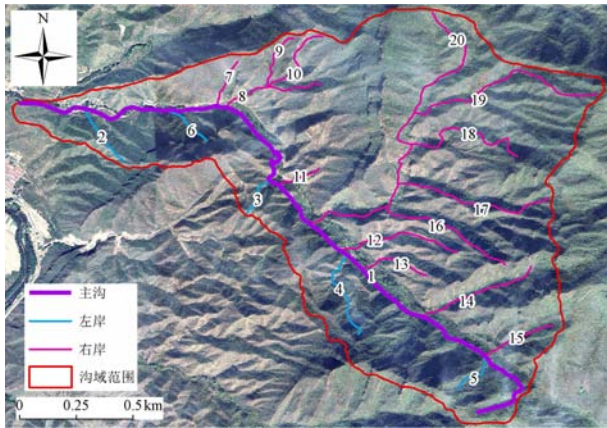


图2 沟域主支沟分布图

Fig.2 Distribution of main and branch gully

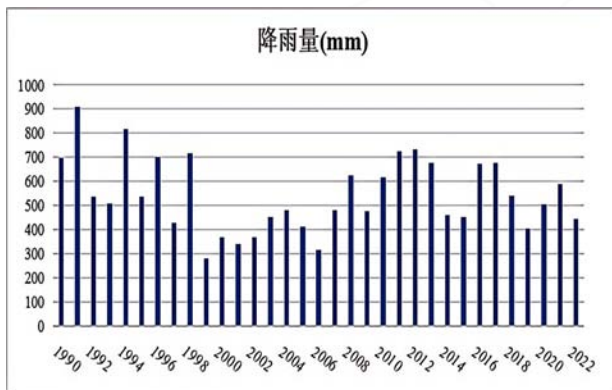


图3 研究区1990—2022年降雨量分布柱状图

Fig.3 Columnar chart of rainfall distribution from 1990 to 2022 in study area

0.2~1.5 m, 沟道可参与泥石流活动的物源量为 $6.79 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。沟道堆积物分布在主沟与支沟内及沟口, 主要成分为粉质粘土和碎石土; 坡面松散物分布集中在沟域中上游, 地貌为低山地貌, 地形坡度较大(表2)。

3 泥石流的动力学特征

3.1 泥石流流体重度

由于帽山沟没有监测数据, 本文选择查表法确定流体重度。统计分析沟域基本特征, 参考《泥石流灾害防治工程勘查规范》(T/CAGHP 006—2018), 选取15个影响因素判断泥石流易发等级(表3)。泥石流易发程度数量化评分最终得分68, 易发等级为轻度易发, 流体重度为 1.467 t/m^3 。

3.2 泥石流流速

泥石流速度可以客观反映泥石流的运动状态。

542.8 mm, 最大年降雨量为 906.8 mm(1991年)(图3), 比年平均降雨量高 364.0 mm, 最低年降雨量 279.8 mm(1999年), 33年间的日最大降雨量为 61.9 mm, 小时最大降雨量 31 mm。十年一遇、二十年一遇、五十年一遇及百年一遇降雨条件下, 小时雨强分别为 113.13 mm/h、129.81 mm/h、151.86 mm/h、168.54 mm/h。延庆区每年7—8月为汛期, 汛期的泥石流灾害风险随降雨量的增加而显著提高。

2.3 物源条件

帽山沟中物源类型可分为3类: 冲洪积、残坡积、人工堆积(图4)。沟道松散物主要分布在沟道中下游, 主要成分为块石土、碎石土, 宽度 50~150 m, 厚度

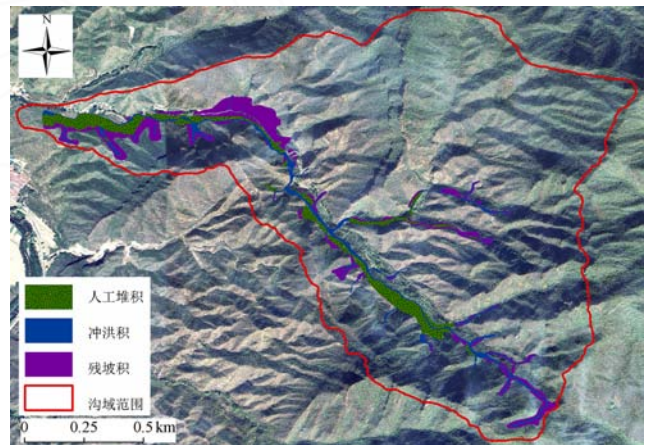


图4 堆积物分布图

Fig.4 Distribution of loose deposits

帽山沟属于稀性泥石流, 在本研究中, 根据沟谷发育类型和流体性质等, 采用北京地区稀性泥石流经验公式计算平均流速。

$$V_c = (m_w/a) R_c^{2/3} I^{1/2} \quad (1)$$

$$a = (\gamma H \phi + 1) 1/2 \quad (2)$$

式中: V_c 为断面平均流速, m/s; m_w 为河床外阻力系数, 依据规范中表 J.2 确定为 4.0; R_c 为水力半径, 用平均水深代替, m; I 为水力坡度, 一般用纵坡降代替; a 为摩擦系数; γH 为泥石流中固体物质容重, t/m^3 。沟谷内松散固体堆积物主要为碎石、块石和粉土, 取各类土的加权平均值, γH 为 2.2 t/m^3 ; ϕ 为泥沙修正系数, 按规范中表 I.2 确定为 0.418。

为了验证在不同条件下的动力学规律, 本研究分别选取 10 年一遇、20 年一遇、50 年一遇、100 年一遇 4 个降雨工况进行泥石流动力学研究(表4)。

表2 物源动静态储量统计

Table 2 Statistics on dynamic and static reserves of physical sources

物源类型	分布位置	平均厚度/m	动态储量 /10 ⁴ m ³	静储量 /10 ⁴ m ³
冲洪积	主沟沟道	0.72	1.54	13.35
残坡积	支沟坡面	0.52	2.92	7.03
人工堆积	主沟沟道	1.19	5.43	24.8
合计	沟域	0.81	9.9	45.18

表3 易发程度综合判别表
Table 3 Identification standard

序号	影响因素	沟谷情况	得分
1	崩塌、滑坡及水土流失(自然有零星崩塌、滑坡和冲和人为活动的)严重程度	沟存在	12
2	泥砂沿程补给长度比/%	17	8
3	沟口泥石流堆积活动程度	无河型变化,主流不偏	1
4	河谷纵坡I‰	105.9	9
5	区域构造影响因素	相对稳定区	5
6	沟域植被覆盖率/%	70	1
7	河谷近期一次变幅/m	2.2	8
8	岩性影响	硬岩	1
9	河谷松散物储量 /(10 ⁴ m ³ ·km ²)	9.9	5
10	沟岸山坡坡度/°	18	4
11	产沙区沟槽横断面	V型谷	5
12	产沙区松散物平均厚度/m	0.85	1
13	沟域面积/km ²	4.56	5
14	沟域相对高差/m	235	2
15	河谷堵塞程度	无	1
合计	/	/	68

表4 泥石流平均流速计算
Table 4 Calculation of the average flow rate

降雨工况P	10年一遇	20年一遇	50年一遇	100年一遇
沟谷纵坡降I‰	105.9	105.9	105.9	105.9
河床外阻力系数m _w	4.0	4.0	4.0	4.0
水力半径R _c /m	0.15	0.3	0.6	1.2
摩擦系数a	1.39	1.39	1.39	1.39
平均流速V _c /(m·s ⁻¹)	0.27	0.42	0.67	1.06

3.3 一次泥石流冲出固体物质总量

由于沟谷没有暴发过泥石流,沟段没有清晰泥痕,难以准确确定泥位。因此本文按照《城镇雨水系统规划设计暴雨径流计算标准》(DB11T 969—2016)中的第 I 区暴雨强度公式推算设计暴雨强度及雨水设计流量(表5)。

$$q = [2719(1+0.96lgP)/(t+11.591)0.902]$$
 (3)

$$Q_p = q\psi F$$
 (4)

$$Q_c = (1+\phi) Q_p D_c$$
 (5)

式中:q为设计暴雨强度,L/(s·hm²);t为降雨历

表5 动力学参数相关计算

Table 5 Calculated statistics related to dynamic parameters

降雨工况P	10年一遇	20年一遇	50年一遇	100年一遇
降雨历时 t/s	3600	3600	3600	3600
设计暴雨强度 q /(L/s·hm ²)	113.13	129.81	151.86	168.54
泥沙修正系数 φ	0.418	0.418	0.418	0.418
汇水面积 F/hm ²	456	456	456	456
雨水设计流量 Q _p /(m ³ ·s ⁻¹)	15.48	17.76	20.77	23.06
堵塞系数 D _c	1.0	1.0	1.0	1.0
断面峰值流量 Q _c /(m ³ ·s ⁻¹)	21.95	25.18	29.46	32.69
一次泥石流过程总量 Q/ 10 ⁴ m ³	2.09	2.39	2.80	3.11
一次泥石流冲出固体物 质总量 Q _H /10 ⁴ m ³	0.81	0.93	1.09	1.21

时,min;P为设计重现期,取10年、20年、50年、100年一遇。适用范围为5 min < t ≤ 1 440 min,P = 2 ~ 100 a。Q_p为频率为P的雨水设计流量,m³/s;ψ为径流系数,硬岩地区取0.3;F为汇水面积,hm²,Q_c为泥石流洪峰值流量,m³/s;D_c为泥石流堵塞系数,帽山沟沟槽顺直均匀,按《泥石流灾害防治工程勘查规范》中表J.1确定为1.0。

$$Q = 0.264TQ_c$$
 (6)

$$Q_H = Q(\gamma_C - \gamma_w)/(\gamma_H - \gamma_w)$$
 (7)

式中:;T为泥石流历时,根据北京泥石流历时一般特征,选取3 600 s;γ_c为泥石流容重,t/m³;γ_w为清水的重度,t/m³。Q为一次泥石流过程总量,104 m³;Q_H为一次泥石流冲出固体物质总量,104 m³。

由帽山沟的洪峰值流量和一次泥石流冲出固体物质总量确定该泥石流规模为中型(表5)。

4 泥石流危险区预测

4.1 泥石流危险区预测

根据《泥石流灾害防治工程勘查规范》选取14个泥石流发展阶段识别因子,结合精细化调查成果进行研究分析(表6)。经过综合判定,帽山沟处于衰退期。帽山沟的堆积区未形成堰塞体,可依据规范经验公式进行危险区预测(表7、图5)。

$$q = Q_{max}/L$$
 (8)

$$q = h_0 v$$
 (9)

$$v = Kr^{2/3} I^{1/5}$$
 (10)

表6 泥石流沟发展阶段的识别
Table 6 Identification of development stage of debris flow gully

识别标记	帽山沟发展现状
主支流侵蚀	主沟侵蚀速度小于支沟侵蚀速度
沟口扇型	沟口扇形堆积在萎缩中
沟口河型	河型基本稳定
挤压主流	主流向恢复变形前的方向发展
新老扇叠压	新老扇呈后退式覆盖
扇面变幅/m	0.2
沟域松散物模量($10^4\text{m}^3\cdot\text{km}^{-2}$)	< 5
松散物边坡	松散物边坡坡度小于 25°
崩塌塌岸泥沙补给	滑崩塌岸泥沙补给在缩小控制中
沟槽侵蚀变形	沟槽侵蚀变形以横向切蚀为主
沟坡坡型	沟坡坡型变缓
沟道沟型	沟型弯曲展宽
植被覆盖率	70%
触发雨强	触发雨强较大并逐步增大

表7 危险区预测的相关计算统计
Table 7 Calculated statistics related to the predicted hazardous area

设计频率P	10年一遇	20年一遇	50年一遇	100年一遇
过流断面宽度 L/m	19.78	19.78	19.78	19.78
过流断面湿周 P/m	20.49	20.55	20.63	20.69
过流断面面积 A/ m^2	7.02	7.64	8.40	8.95
水力半径 r/m	0.34	0.37	0.41	0.43
流速系数 K	10	10	10	10
泥石流流速 v/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	3.13	3.30	3.51	3.65
泥石流单宽流量 q/($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)	1.11	1.27	1.49	1.65
沟口过流断面最大平均流深 h_0/m	0.35	0.39	0.42	0.45
危险区范围 S/ km^2	0.0044	0.005 1	0.005 9	0.006 8

$r = A / P$ (11)

$A = h_0 L$ (12)

$P = 2h_0 + L$ (13)

式中: q 为泥石流单宽流量, m^2/s ; Q_{max} 为峰值流量, m^3/s ; L 为过流断面宽度, m ; h_0 为沟口过流断面最大平均流深, m ; v 为泥石流流速, m/s ; K 为流速系数; r 为水力半径, m ; A 为过流断面面积, m^2 ; P 为过流断面湿周, m ; S 为危险区范围, km^2 。

4.2 预防措施和建议

经过详尽的现场勘查与综合评估,沟域中游、下游及沟床区域内存在较多松散堆积物。当前已部署的专业监测预警系统为大楝树村居民安全提供了初步保障,但为了进一步筑牢安全防线,防患于未然,强烈建议立即启动并加速实施一系列针对性的治理措施与防范策略。一是强化生态修复与植被恢复:针对沟域内植被稀疏的区域,开展人工造林项目,种植杨、桦、椴柞树等符合当地环境的树种,减少水土流失,从根本上削弱泥石流等地质灾害的物质基础。二是建设拦挡工程:帽山沟的物源丰富,地形较开阔,且属于稀性泥石流,采用重力式拦砂坝进行泥石流防治更合适。为有效降低泥石流在流动过程中携带的大石块对下游区域造成的冲击影响,于沟域的中上游、中游及下游位置分别布设重力式拦砂坝,这些拦砂坝旨在分别阻挡各自区段内的泥石流固体物质,缩减泥石流影响范围。三是建设排导工程:在泥石流沟道的下游区域布置

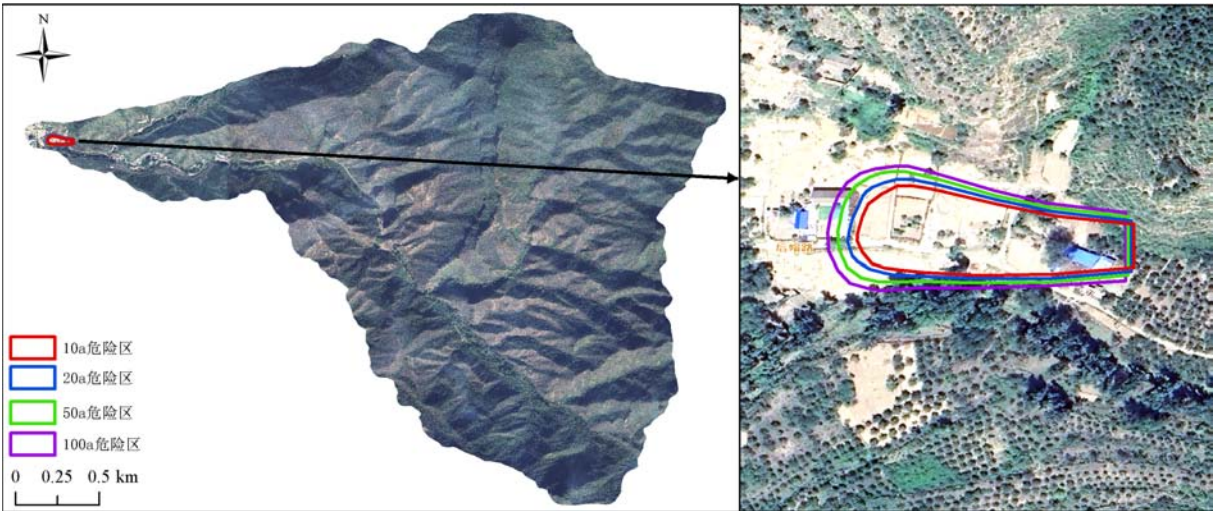


图5 帽山沟危险区预测图
Fig.5 Prediction of hazardous area of Maoshangou

排导槽,以便及时将沟口下游的堆积物引导、排泄至预设的安全区域。四是加强警示及宣传教育:在帽山沟附近醒目位置设置警示牌,明确标注避险路线及应急联系方式等,同时,通过宣传教育、应急演练等活动,提高村民对地质灾害的认识和自救互救能力,形成群防群治的良好氛围。

5 讨论

泥石流作为一种破坏力极强的自然灾害,深入研究泥石流的运动过程并预测其危险区,对泥石流的防灾减灾工作具有重要意义(Hirschberg et al., 2021; Cordoba et al., 2023; Chen et al., 2024; 黄泽森等, 2024; 景书渊, 2024; 赵蔓等, 2024)。本研究针对帽山沟进行了动力学特征研究及不同工况下的危险区预测。动力学参数的相关计算参照《泥石流灾害防治工程勘查规范》(T/CAGHP 006—2018)中的经验公式进行,经验公式最大的优势在于被广泛的实践应用所检验,是基于最新的科研成果与数据分析方法,能够较准确地反映泥石流的动力学特性。通过野外实地调查与室内研究分析,利用不同降雨工况下的动力学参数值,总结归纳岔石口村泥石流的运动规律,最终求得泥石流流速、泥石流流量等相关动力学参数值,由洪峰值流量值和一次泥石流冲出固体物质总量值确定该泥石流规模为中型。

本研究通过现场调查获得了泥石流过流断面宽度,利用经验公式计算出4个降雨频率条件下的沟口过流断面最大平均流深,使用ArcGIS和CAD软件绘制出泥石流危险区预测平面图。与传统的单沟泥石流危险区预测方法相比,此经验公式综合考虑了地形变化和洪峰流量值对泥石流的影响,结合遥感卫星影像和野外实地调查,确定帽山沟的危险区严重威胁沟口村庄及千沙公路的行人行车安全。与前人提出的多因子泥石流危险范围预测模型相比,本研究的结果准确性较高。由于经验公式的局限性,本文预测危险区范围时未考虑泥石流的终止位置,只适用于堆积扇相对较小的泥石流危险区划分。未来的单沟泥石流危险区预测研究应致力于提升经验公式的普适性和准确性。希望本研究能够为北京乃至其它地区的单沟泥石流研究提供借鉴。

6 结论

(1)帽山沟属于暴雨—沟谷型泥石流沟。沟域内松散物源可分为冲洪积、残坡积、人工堆积3种补给来源,动态储量为 $9.9 \times 10^4 \text{ m}^3$,其中人工堆积物所占比重最大。

(2)帽山沟目前处于衰退期。按泥石流一次冲出固体物质总量或峰值流量分类,该泥石流沟属于中型泥石流。在4个降雨工况下(10年一遇、20年一遇、50年一遇、100年一遇),预测的危险区面积分别为 0.0044 km^2 、 0.0051 km^2 、 0.0059 km^2 、 0.068 km^2 ,会对下游公路行车和大楝树村居民的生命财产安全造成威胁。

中文参考文献

- 陈林,杨帆. 2013. 多因子泥石流危险范围预测模型的运用—以均良村泥石流为例[J]. 中国水运月刊, (12): 61-62, 65.
- 陈文鸿,余斌,柳清文,等. 2023. 北京山区泥石流的单沟预报[J]. 长江科学院院报, 40(1): 94-100+115.
- 陈文鸿,余斌,柳清文,等. 2021. 北京山区泥石流激发降雨特征及其临界值[J]. 人民长江, 52(4): 27-33.
- 陈东杰. 2013. 京西门头沟区平原村泥石流风险评价[D]. 中国地质大学(北京).
- 黄泽森,刘力勋,黄文,等. 2024. 峨边彝族自治县哈曲乡瓦噶村哈曲来挖沟泥石流发育特征及防治建议[J]. 四川地质学报, 44(03): 489-493.
- 景书渊. 2024. 松桃县永安乡沙堡村半沟泥石流发育特征及工程治理措施[J]. 科技资讯, 22(16): 229-231.
- 梁永顺,孙永彬,王瑞军. 2021. 北京市延庆区秤勾湾沟泥石流特征及预警雨量研究[J]. 矿产勘查, 12(8): 1835-1843.
- 刘云鹏,钟果,肖华波,等. 2024. 曾家沟泥石流特征分析及危害程度评价[J]. 水电站设计, 40(02): 1-9+20.
- 申健,李瑜瑶,李巧刚. 2018. 北京房山地区泥石流特征分析[J]. 城市地质, 13(01): 59-63.
- 史继帅,姜亮,翟胜强. 2024. 四川甘洛县黑西洛沟“8·31”泥石流动力过程[J]. 中国地质灾害与防治学报, 35(03): 52-60.
- 孙佳丽. 2018. 北京市门头沟区泥石流灾害分布及临界雨量研究[J]. 地下水, 40(04): 146-148.
- 涂剑,马超,杨海龙. 2017. 北京山区暴雨泥石流激发雨量条件[J]. 中国水土保持科学, 15(5): 103-110.
- 王海芝. 2020. 北京地区暴雨泥石流预警阈值研究[J]. 第四纪研究, 40(5): 1371-1380.
- 王瑞军,张春雷,孙永彬,等. 2022. 北京石窑村泥石流沟发育形成特征与动力学研究[J]. 矿产勘查, 13(21): 344-352.
- 王瑞军,王帅东,孙永彬,等. 2024. 北京延庆泥石流隐患分布规律及

(下转至本期第90页)

- 溶塌陷区覆盖层的结构和厚度分布[J]. 中国岩溶, 37(02):272-279.
- 李传金, 刘建欢, 杜亚楠, 等. 2017. 扩展空间自相关法用于线性阵列时加权拟合问题研究[J]. 科学技术与工程, 17(08):111-114.
- 贾慧涛, 王子豪, 蔡向阳, 等. 2021. 微动技术在中深部地质勘探中的应用研究[J]. 安徽地质, 31(04):327-330.
- 鲁杏, 崔先文, 汤正江, 等. 2023. 天然源面波勘探方法在安徽小包庄铁矿区的应用研究[J]. 中国地质调查, 10(03):54-59.
- 刘庆华, 鲁来玉, 王凯明. 2015. 主动源和被动源面波浅勘方法综述[J]. 地球物理学进展, 30(6): 2906-2922.
- 丰赞, 沙椿. 2018. 面波联合勘探在深厚覆盖层地区应用实例分析[J]. 物探与化探, 42(02):392-397.
- 王继鑫. 2021. 基于微动勘探方法的浅层波速结构反演研究[D]. 中国地震局地壳应力研究所.
- 赵萧萧. 2022. 微动勘查技术在中深层地热勘探中的应用研究[D].

- 华北水利水电大学.
- 张维, 何正勤, 胡刚, 等. 2012. 用人工源和天然源面波联合探测浅层速度结构[J]. 震灾防御技术, 7(01):26-36.
- 李文灵, 黄真萍, 王福喜, 等. 2015. 瞬态面波与微震波波动勘测法的分析与对比[J]. 工程地球物理学报, 12(01):96-100.
- 李建宁. 2019. 主被动源面波联合勘探应用研究[D]. 安徽理工大学.
- 李欣欣, 李庆春. 2017. 利用改进的F-K变换法提取瑞雷波的频散曲线[J]. 地球物理学进展, 32(01):191-197.

References

- Ling Suqun, Jun Horita, Shizuo Noguchi. 2004. Estimation of shallows-wave velocity structure by using high precision surface wave prospecting and microtremor survey method[C]. 13th World Conference on Earth quake Engineering Vancouver, B.C., 1445.

(上接本期第63页)

- 演化趋势研究[J]. 世界核地质科学, 41(03):623-632.
- 王颖, 李新森, 付钰涵, 等. 2021. 北京山区泥石流灾害预警模型及应用效果[J]. 国土资源信息化, (05):58-62+42.
- 魏星宇, 沈军辉, 吴俊杰, 等. 2022. 泸—石高速甘草沟泥石流发育特征及危险性分析[J]. 自然灾害学报, 31(06):229-238.
- 袁菲菲. 2014. 北京房山区秋林铺村泥石流风险评价[D]. 中国地质大学(北京).
- 张伟. 2023. 某电站白石头沟泥石流特性及运动过程数值模拟研究[D]. 西安理工大学.
- 章新益, 孙永彬, 王诜, 等. 2021. 北京市延庆地区水泉沟村车道沟泥石流发育特征及动力学研究[J]. 矿产勘查, 12(2):461-469.
- 赵蔓, 孙俊, 朱恺悦. 2024. 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, 35(05):110-119.

References

- Cao C, Wang Y H, Chen J P, et al. 2015. Debris flow risk assessment based on cloud in Miyun Beijing[J]. Journal of Engineering Geolo-

- gy, 23(s1):624-630.
- Chen M, Luo Y, Tang C, et al. 2024. Quantitative assessment of expected direct economic losses of buildings for debris flows in multiple rainfall intensity scenarios in Yangling Gully, Southwest China[J]. Natural Hazards, (3):120.
- Cordoba F E, Groch D, Cogliati M G, Jaboyedoff M Gil V. 2023. A semi-quantitative risk assessment of debris flow in northernmost Patagonia, Argentina[J]. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 80(1):1-20.
- Hirschberg J, Badoux A, McArdell B W, et al. 2021. Evaluating methods for debris-flow prediction based on rainfall in an Alpine catchment[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 21(9):2773-2789.
- Liu B, Hu X W, Ma G T, et al. 2021. Back calculation and hazard prediction of a debris flow in Wenchuan meizoseismal area, China[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 80: 3457-3474.
- Wang N, Cheng W M, Zhao M, et al. 2019. Identification of the debris flow process types within catchments of Beijing mountainous area[J]. Water, 11(4):638.