

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2020.02.04

基于 ArcGIS 的“三高”地区高速公路泥石流危险性评价

张 明¹, 王章琼¹, 白俊龙¹, 李元松¹, 王亚军¹, 张 兵²

(1. 武汉工程大学土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430073;

2. 中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 湖北 武汉 430052)

摘要: 泥石流是我国高寒、高海拔、高烈度(“三高”)地区最常见的地质灾害之一,给高速公路带来严重威胁,有必要对“三高”地区泥石流进行危险性评价。选取岩石风化程度、到断层距离、坡度、地表切割深度、坡向、季节性冰雪、水系分布、植被、人类工程活动为泥石流影响因子,采用 AHP 法确定泥石流影响因子权重,建立影响因子分级、赋值标准以及泥石流危险性分级标准;在此基础上,构建泥石流危险性评价体系。以乌尉高速公路 K53+000~K78+000 段为例,利用 ArcGIS 得到研究区泥石流危险性区划图,进行危险性评价。研究表明,研究区泥石流高危险区、危险区、中等危险区、低危险区分别占 20%、35%、30%、15%,且高危险区主要沿沟壑分布。研究成果可为“三高”地区高速公路勘察、选线提供参考。

关键词: “三高”地区;ArcGIS;泥石流;危险性评价;层次分析法

中图分类号: TU457;P642.23

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2020)02-0024-09

Hazard assessment of debris flow along highway of high altitude cold and intensity regions with aid of ArcGIS

ZHANG Ming¹, WANG Zhangqiong¹, BAI Junlong¹, LI Yuansong¹, WANG Yajun¹, ZHANG Bing²

(1. School of Resource and Civil Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan, Hubei 430073, China;

2. CC Second Highway Consultants, Co. Ltd, Wuhan, Hubei 430052, China)

Abstract: Debris flow is one of the most common geological disasters in the high altitude cold and intensity regions of our country, which brings serious threat to highway, it is necessary to carry on the risk assessment to the debris flow in the high altitude cold and intensity regions. Select degree of rock weathering, distance to fault, slope, surface amplitude, slope direction, seasonal ice and snow, water system, vegetation, human engineering activities as influencing factors of debris flow. AHP is used to determine the weight of influencing factors of debris flow, the classification of influencing factors, assignment standard and risk classification standard of debris flow are established. on the basis of which, the risk assessment system of debris flow is constructed. take the K53+000-K78+000 section of Wuyu Highway as an example, the debris flow risk zoning map of the study area is mapped based on ArcGIS, and the risk assessment is carried out. The results show that high risk area, caution area, medium risk area, low risk area of the debris flow accounted for 20%, 35%, 30%, 15% respectively in the study area. and distribution of the high risk area along gully. The research results can provide reference for highway investigation and route selection in the High altitude cold and intensity regions.

收稿日期: 2019-08-12; 修订日期: 2019-09-17

基金项目: 湖北省教育厅科技计划项目(B2017058)

第一作者: 张 明(1995-),男,甘肃平凉人,岩土工程专业,研究生,主要从事地质灾害研究。E-mail:3296534072@qq.com

通讯作者: 王章琼(1984-),男,湖北武汉人,工程地质专业,博士研究生,副教授,主要从事地质灾害、岩石力学方面的研究。

E-mail:wzqcug@163.com

Keywords: high altitude cold and intensity regions; ArcGIS; debris flow; hazard assessment; AHP

0 引言

随着“一带一路”发展战略的快速实施与推进,我国加大了对西部地区高速公路建设的投入。“三高”地区(高寒、高海拔、高烈度)高速公路成为构建“丝绸之路”经济带的交通要道^[1]。该区域地势陡峻、风化剥蚀强烈、沟谷发育、气候恶劣、新构造活跃、冰雪覆盖面积较广,故地质灾害频发。有调查显示,泥石流是高速公路沿线最常见的地质灾害之一^[2-4],给高速公路运营带来严重的威胁。因此,对“三高”地区高速公路泥石流进行危险性评价尤为重要。

在泥石流危险性评价过程中,确定评价指标是重要环节。选取泥石流评价指标时,通常从地质条件、地形条件、气象水文条件三个方面考虑^[5-7]。我国幅员辽阔,地质、地形地貌、气候具有多样性、复杂性的特点。因此,开展泥石流危险性评价时,评价指标应体现出差异性。在地形起伏较大、降水偏多、海拔较高区域(如云贵高原),评价指标主要为岩性、坡度、降雨量、流域面积、植被、土地利用类型、地震^[8-16];在雨水充沛、构造活跃的多山区域(如川滇山地),评价指标主要为坡度、流域面积、流域相对高差、流域切割密度、降雨量、主沟长度、土地利用类型^[17-23];在雨量分布不均匀、相对高差大、山地较多区域(如秦巴山地),评价指标主要为松散物源储量、流域面积、主沟比降、泥砂补给段长度、降雨量、流域面积^[24-28];在海拔高、干旱、冰川侵蚀强烈区域(如天山山脉),评价指标主要为流域面积、主沟长度、流域相对高差、流域切割密度、松散物质储量、年降雨量^[29-34];在海拔较高、降雨较少、高山峡谷区域(如太行山脉),坡度、构造条件、植被、降雨量、沟床纵坡、降雨强度、流域相对高差、堆积物平均厚度^[35-39]。综上,国内学者选取的评价指标较为全面。然而,“三高”地区兼具高烈度、降雨少、季节性冰雪覆盖面积广等特点,上述评价体系并不适用于该区域。

鉴于此,本文针对“三高”地区区域特点,构建泥石流危险性评价体系,以乌尉高速公路 K53 + 000 ~ K78 + 000 段为例进行泥石流危险性评价。

1 基于 AHP 法的泥石流危险性评价体系

本文采用 AHP 法确定影响因子权重,建立影响因子分级、赋值标准以及泥石流危险性分级标准。在此基础上,构建泥石流危险性评价体系。

1.1 影响因子权重

(1) AHP 模型

本文以泥石流为目标层,地质条件、地形地貌、气象水文、土地类型为准则层,岩石风化程度、到断层距离、坡度、地表切割深度、坡向、季节性冰雪、水系分布、植被、人类工程活动为指标层,建立“三高”地区泥石流的 AHP 模型(表 1)。

表 1 泥石流的 AHP 模型
Table 1 AHP model of debris flow

目标层	准则层	指标层
泥石流(A)	地质条件(B ₁)	岩石风化程度 到断层距离
	地形地貌(B ₂)	坡度 地表切割深度 坡向
	气象水文(B ₃)	季节性冰雪 水系分布
	土地类型(B ₄)	植被 人类工程活动

(2) 构造判断矩阵

本文以地质条件、地形地貌、气象水文、土地类型作为泥石流评价模型的第一层次指标,以此构建判断矩阵 A,以第一层次指标所包含影响因子分别构建判断矩阵 B₁、B₂、B₃、B₄(表 2 ~ 表 6)。

表 2 第一层次指标重要性判断矩阵 A
Table 2 The importance judgment matrix of first level
index A

指标名称	地形地貌	气象水文	地质条件	土地类型
地形地貌	1	6/5	3/2	2
气象水文	5/6	1	4/3	3/2
地质条件	2/3	3/4	1	5/4
土地类型	1/2	2/3	4/5	1

表 3 地质条件类影响因子重要性判断矩阵 B₁
Table 3 The importance judgment matrix of Geological influence factors B₁

影响因子	岩石风化程度	到断层距离
岩石风化程度	1	4/5
到断层距离	5/4	1

表 4 地形地貌类影响因子重要性判断矩阵 B₂
Table 4 The importance judgment matrix of topographic influence factors B₂

影响因子	坡度	地表切割深度	坡向
坡度	1	3/2	2
地表切割深度	2/3	1	5/4
坡向	1/2	4/5	1

表 5 气象水文类影响因子重要性判断矩阵 B_3

Table 5 The importance judgment matrix of meteorological and hydrological influence factors B_3

影响因子	季节性冰雪	水系分布
季节性冰雪	1	3/2
水系分布	2/3	1

表 6 土地类型类影响因子重要性判断矩阵 B_4

Table 6 The importance judgment matrix of influence factors about land structure B_4

影响因子	植被	人类工程活动
植被	1	3/2
人类工程活动	2/3	1

(3) 确定权重及一致性检验

计算各判断矩阵对应的最大特征根以及特征向量。其中 $\lambda_{\max}$ 为判断矩阵的最大特征根, W 为 $\lambda_{\max}$ 对应的归一化特征向量, 其分量 W_i 为对应评价指标的相对权重值。引入 CI 值作为检验判断矩阵是否满足一致性。 CI 值的越小, 其一致性越好, 当值为 0 时, 其一致性最好; 同时为了得到判断矩阵的一致性程度, 则需要引入 RI (RI 为平均随机一致性指标), 计算出 CR (CR 为判断矩阵随机一致性比例), 当 $CR < 0.1$ 时, 则满足一致性检验要求; 否则则需重新取值计算, 1 阶或 2 阶矩阵, 其 $\lambda_{\max} = n$, CI 、 CR 均为 0, 故具有较好的一致性, 因此, 不需要进行一致性检验。

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (1)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (2)$$

本文利用 MATLAB 得到判断矩阵归一化处理后的特征向量, 其特征向量元素对应各指标的相对权重值, 并利用公式(1)、(2)进行一致性检验(表 7)。

(4) 确定组合权重

将各影响因子权重进行组合, 利用公式(3)得到第二层次影响因子相对于目标层的总权重(表 8)。其计算公式为:

$$W_i = W_{ai} \times W_{bi} \quad (3)$$

式中: W_i ——第二层次影响因子相对于目标层的权重, 即组合权重;

W_{ai} ——第一层次指标相对于目标层的权重, 即判断矩阵 A 归一化后的特征向量元素;

W_{bi} ——第二层次影响因子相对于第一层次指标的权重, 即判断矩阵 B_1 、 B_2 、 B_3 、 B_4 归一化后的特征向量元素。

表 7 各判断矩阵一致性检验结果

Table 7 The consistency test results of judgment matrix

	A	B_1	B_2	B_3	B_4
$\lambda_{\max}$	4.001 9	2	3.000 5	2	2
CI	0.000 6	0	0.000 25	0	0
CR	0.000 7	0	0.000 43	0	0

表 8 泥石流影响因子组合权重

Table 8 The combination weight of influencing factors about debris flow

	地质条件	地形地貌	气象水文	土地类型	组合权重
	0.215 7	0.334 2	0.275 7	0.174 4	
岩石风化程度	0.444 4	0	0	0	0.095 9
到断层距离	0.555 6	0	0	0	0.119 8
坡度	0	0.462 2	0	0	0.154 5
地表切割深度	0	0.301 6	0	0	0.100 8
坡向	0	0.236 2	0	0	0.078 9
季节性冰雪	0	0	0.600 0	0	0.165 4
水系分布	0	0	0.400 0	0	0.110 3
植被	0	0	0	0.600 0	0.104 6
人类工程活动	0	0	0	0.400 0	0.069 8

1.2 影响因子分级及赋值标准

首先根据各影响因子的特点, 将岩石风化程度、坡向划分为 4 个等级(表 9), 将到断层距离、坡度、地表切割深度划分为 5 个等级(表 9), 将季节性冰雪、水系分布、植被、人类工程活动划分为 2 个等级(表 10)。通过查阅文献, 判断影响因子各等级对泥石流发育的影响大小, 并相应的对影响因子各等级赋值, 影响越大, 赋值越大, 赋值区间为[0-1]。

表 9 泥石流影响因子分级及赋值标准(1)

Table 9 The classification and evaluation criteria of influencing factors about debris flow(1)

岩石风化程度		坡向/(°)		到断层距离/m		坡度/(°)		地表切割深度/m	
分级区间	赋值	分级区间	赋值	分级区间	赋值	分级区间	赋值	分级区间	赋值
微风化	0.4	[0~45°)、[315°~360°)	0.2	≥4 000	0.2	[0°~15°)	0.2	[0~15)	0.2
中等风化	0.6	[45°~135°)	0.4	[3 000~4 000)	0.4	[15°~25°)	0.4	[15~25)	0.4
强风化	0.8	[225°~315°)	0.6	[2 000~3 000)	0.6	[25°~35°)	0.6	[25~35)	0.6
全风化	1.0	[135°~225°)	1.0	[1 000~2 000)	0.8	[35°~45°)	0.8	[35~50)	0.8
				[0~1 000)	1.0	≥45°	1.0	≥50	1.0

表 10 泥石流影响因子分级及赋值标准(2)

Table 10 The classification and evaluation criteria of influencing factors about debris flow(2)							
季节性冰雪		水系分布		植被		人类工程活动	
分级区间	赋值	分级区间	赋值	分级区间	赋值	分级区间	赋值
无	0.2	无	0.4	有	0.4	无	0.2
有	1	有	1	无	0.6	有	0.6

1.3 泥石流危险性等级

根据公式(4)对各影响因子进行权重叠加,其结果用综合值 K_v 表示。

$$K_v = \sum_i^n a_i x_i \tag{4}$$

式中: a_i ——影响因子相对权重值;
 x_i ——影响因子等级赋值。

根据研究区各区域的综合值 K_v ,将泥石流危险性划分为 4 个等级,依次为高危险区、危险区、中等危险区、低危险区,不同危险等级对应的综合值取值范围不同(表 11)。

表 11 泥石流危险性分级标准

Table 11 The hazard classification criteria of debris flow				
综合值 K_v	[0 ~ 0.45)	[0.45 ~ 0.55)	[0.55 ~ 0.65)	[0.65 ~ 1]
危险性区划	低危险区	中等危险区	危险区	高危险区

2 基于 ArcGIS 的泥石流危险性评价

2.1 研究区概况

研究区位于天山山脉北部及中部,研究路线起点位于后峡西南方向,约 2 km 处,终点位于天山胜利隧道进口处,里程桩号为 K53 + 000 ~ K78 + 000,共 25 km。线路整体呈北东到南西向,沿乌鲁木齐河分布。

该区域属于典型的“三高”地区,即高寒、高海拔、高烈度地区,主要为中山峡谷地貌,呈“V”形,地势起伏大、沟谷发育,岩体主要为灰黑色、灰绿色、灰色硅质岩和青灰色、灰色、灰白色灰岩,坡体凹处有少量第四系覆盖物,主要为崩坡积和少量残积土。该区域属于温带大陆性干旱气候,具有温差大、寒暑变化剧烈、降水量少且分布不均、蒸发强烈、干燥多风等特点,同时区内季节性冰雪覆盖面积较大。上述不良地质条件为泥石流的发生埋下巨大隐患。

2.2 影响因子图层

基于上述评价体系中的影响因子分级、赋值标准,利用 ArcGIS 建立各影响因子图层,图中不同颜色对应不同赋值,赋值越大,表明影响因子该区间对泥石流发

育的贡献程度越大(图 1 ~ 图 9)。

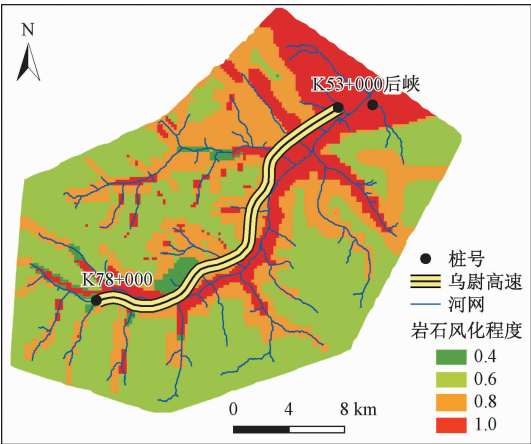


图 1 岩石风化程度
Fig.1 Rock weathering degree

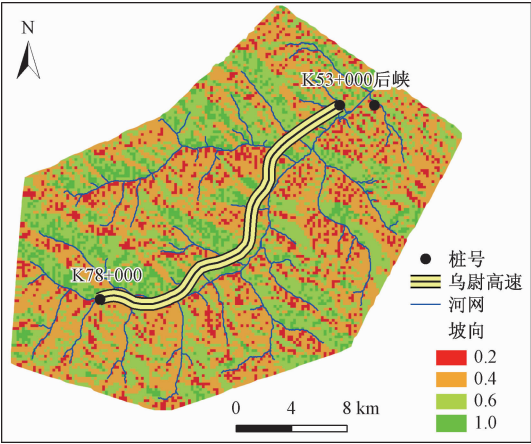


图 2 坡向
Fig.2 Aspect

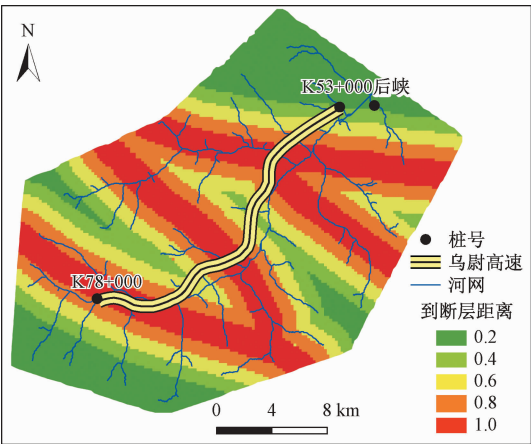


图 3 到断层距离
Fig.3 Distance to fault

2.3 研究区泥石流危险性评价

在建立影响因子图层的基础上,利用 ArcGIS 的空

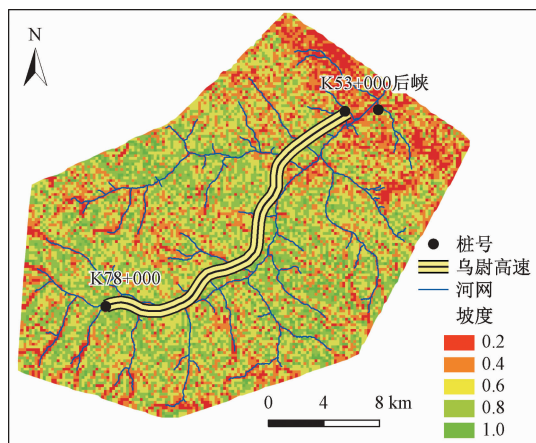


图 4 坡度

Fig. 4 Falling gradient

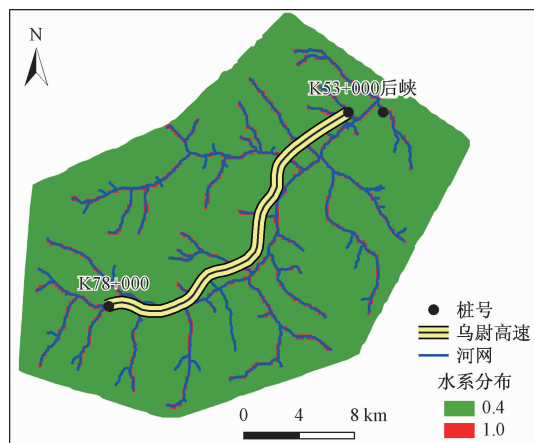


图 7 水系分布

Fig. 7 River system

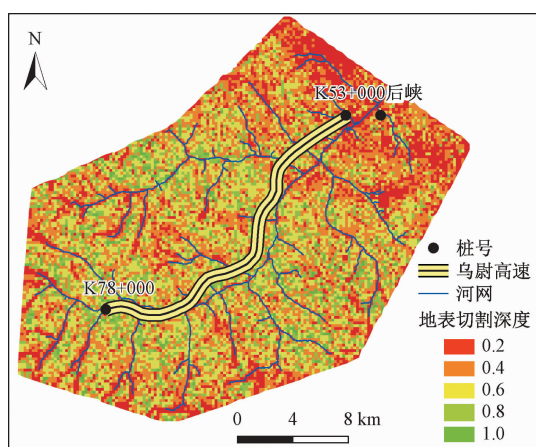


图 5 地表切割深度

Fig. 5 Surface cutting depth

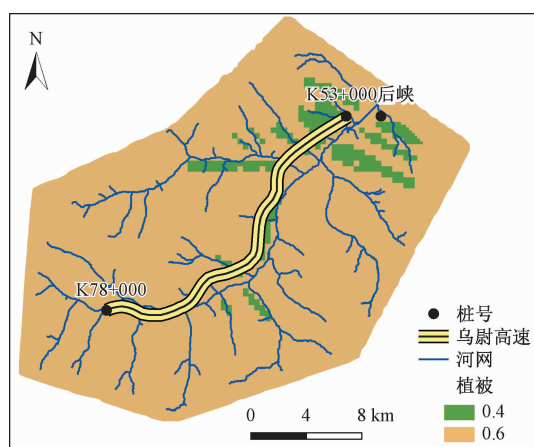


图 8 植被

Fig. 8 Vegetation

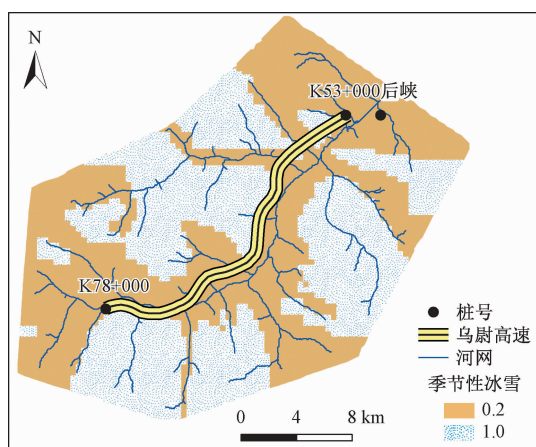


图 6 季节性冰雪

Fig. 6 Seasonal ice and snow

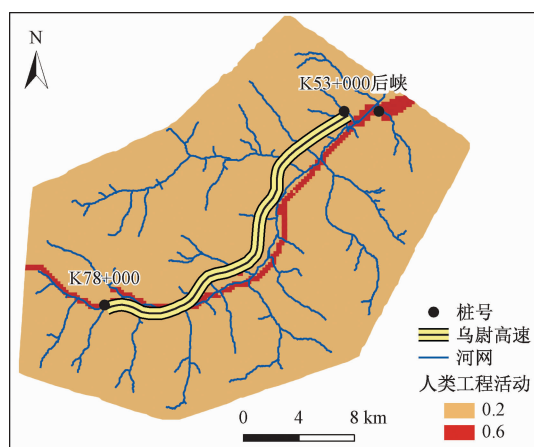


图 9 人类工程活动

Fig. 9 Human engineering activities

间叠加功能,将各图层进行叠加,得到研究区危险性区划图(图 10)。图 10 中以不同色相对泥石流危险性等

级进行表示,颜色最深的区域为泥石流高危险区,主要分布于研究区南部及中部偏北区域;危险区分布面积

较广,主要分布于高危险区;中等危险区主要沿深切沟壑分布;低危险区面积相对较少,主要分布于研究区北部的倾斜平原和西南部分。黄色的线表示在建的乌尉高速公路 K53+000~K78+000 段。由图 10 可见,该高速公路路线避开了高危险性区,由此验证了该公路选线的合理性及本文研究结果的科学性。对研究区危险性大小不同的区域面积进行了统计,并绘制了泥石流各危险区面积占比的饼状图(图 11),其中高危险区、危险区、中等危险区、低危险区分别占研究区总面积的 20%、35%、30%、15%。

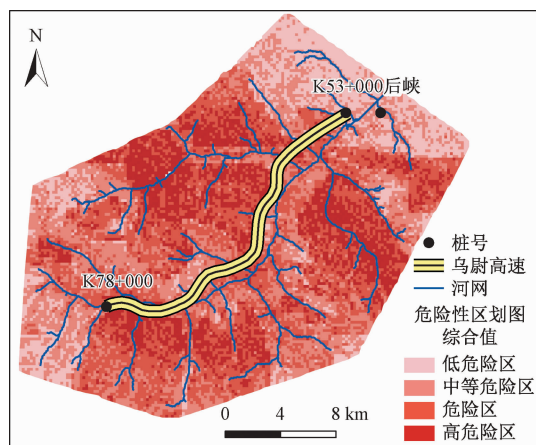


图 10 研究区泥石流危险性区划图

Fig. 10 Debris flow risk zoning map in the study area

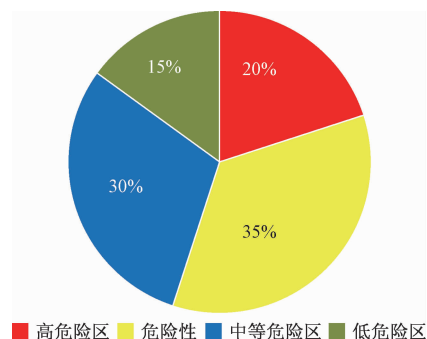


图 11 泥石流各危险区面积占比

Fig. 11 The proportion of debris flow area in each dangerous area

3 结论

(1)采用 AHP 法得到泥石流影响因子权重,根据权重大小得到影响因子的重要性:季节性冰雪>坡度>到断层距离>水系分布>植被>地表切割深度>岩石风化程度>坡向>人类工程活动。

(2)研究区大部分区域属于危险区和中等危险区,其中高危险区主要沿几条深切沟谷分布。同时统

计了危险性等级不同的区域面积,得出高危险区、危险区、中等危险区、低危险区的面积分别占 20%、35%、30%、15%。

参考文献:

- [1] 姜成潼,王亚军,李元松,等. 基于多判据的“三高”地区公路边坡稳定性的综合评价[J]. 武汉大学学报, 2018, 40(4): 419-424. [JIANG C T, WANG Y J, LI Y S, et al. Evaluation of highway slope stability in high altitude cold and intensity regions based on multi-criterion [J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2018, 40(4): 419-424. (in Chinese)]
- [2] 李元松,高晖,陈峰,等. 乌尉高速公路边坡稳定性综合评价[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(4): 150-156. [LI Y S, GAO H, CHEN F, et al. Comprehensive assessment of slope stability in Wu—Wei highway [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(4): 150-156. (in Chinese)]
- [3] 罗路广,裴向军,裴钻,等. 天山北麓溜砂坡分布特征及易发性研究[J]. 灾害学, 2018, 33(2): 200-205. [LUO L G, PEI X J, PEI Z, et al. Distribution characteristics and susceptibility of talus slopes in the northern piedmont of Tian-Shan mountain [J]. Journal of Catastrophology, 2018, 33(2): 200-205. (in Chinese)]
- [4] 孙景鑫,雷加强,李志农,等. 新疆干旱区公路交通发展与环境问题探讨[J]. 西部交通科技, 2015(12): 1-6. [SUN J X, LEI J Q, LI Z N, et al. Discussions on highway transport development and environmental issues in arid area of Xinjiang [J]. Western China Communications Science & Technology, 2015(12): 1-6. (in Chinese)]
- [5] SHIEH C L, CHEN Y S, TSAI Y J, et al. Variability in rainfall threshold for debris flow after the Chi-Chi earthquake in central Taiwan, China [J]. International Journal of Sediment Research, 2009, 24(2): 177-188.
- [6] QUAN LUNA B, BLAHUT J, VAN WESTEN C J, et al. The application of numerical debris flow modelling for the generation of physical vulnerability curves[J]. Natural Hazards and Earth System Science, 2011, 11(7): 2047-2060.
- [7] OKANO K, SUWA H, KANNO T. Characterization of debris flows by rainstorm condition at a torrent on the Mount Yakedake volcano, Japan [J]. Geomorphology, 2012, 136(1): 88-94.

- [8] 孔艳,王保云,王乃强,等. 滇西高山峡谷区泥石流危险性评价——以怒江傈僳族自治州为例[J]. 云南师范大学学报(自然科学版), 2019, 39(3): 63 – 70. [KONG Y, WANG B Y, WANG N Q, et al. Debris flows risk assessment in the alpine canyon of western Yunnan: a case study in nujiang lisu autonomous prefecture[J]. Journal of Yunnan Normal University(Natural Sciences Edition), 2019, 39(3): 63 – 70. (in Chinese)]
- [9] 吴建峰,张凤太,颜潇,等. 基于 GIS 和 AHP 方法的喀斯特地区泥石流危险性评价[J]. 人民珠江, 2017, 38(12): 86 – 90. [WU J F, ZHANG F T, YAN X, et al. Risk assessment of debris flow in Karst area based on GIS and AHP[J]. Pearl River, 2017, 38(12): 86 – 90. (in Chinese)]
- [10] 吴文建,张世涛,张光政,等. 基于灰色关联分析法的泥石流危险性评价——以泸水县银坡河泥石流为例[J]. 地质灾害与环境保护, 2017, 28(3): 30 – 32. [WU W J, ZHANG S T, ZHANG G Z, et al. Debris flow risk assessment based on grey correlation analysis method a case study of yinpohe debris flow in Lushui County [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2017, 28(3): 30 – 32. (in Chinese)]
- [11] 强跃,李莉,李绍红,等. 基于改进组合赋权物元可拓模型的泥石流危险性评价[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(5): 104 – 109. [QIANG Y, LI L, LI S H, et al. Debris flow hazard assessment based on improved matter-element extension model [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(5): 104 – 109. (in Chinese)]
- [12] 唐川,朱大奎. 基于 GIS 技术的泥石流风险评价研究[J]. 地理科学, 2002, 22(3): 300 – 304. [TANG C, ZHU D K. Assessment of debris flow risk of Yunnan Province by using GIS [J]. Scientia Geographica Sinica, 2002, 22(3): 300 – 304. (in Chinese)]
- [13] 闫满存,王光谦,刘家宏. GIS 支持的澜沧江下游区泥石流爆发危险性评价[J]. 地理科学, 2001, 21(4): 334 – 338. [YAN M C, WANG G Q, LIU J H. GIS-based risk assessment of the debris flows in the lower Lancang river watershed [J]. Scientia Geographica Sinica, 2001, 21(4): 334 – 338. (in Chinese)]
- [14] 陈晓清,谢洪. 基于 GIS 的泥石流危险度区划研究——以拟建向家坝、溪洛渡水电工程库区为例[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 13(增刊 1): 46 – 50. [CHEN X Q, XIE H. Study on regionalization of debris flow danger degree under GIS support—taking the reservoir area of Xiangjiaba, Xiluodu water power engineering as an example[J]. Journal Soil and Water Conservation, 1999, 13(Sup1): 46 – 50. (in Chinese)]
- [15] 岳溪柳,黄玫,全斌,等. 贵州毕节地区泥石流危险性评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2014, 25(1): 12 – 17. [YUE X L, HUANG M, QUAN B, et al. Debris-flow hazard assessment in Bijie district, Guizhou Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2014, 25(1): 12 – 17. (in Chinese)]
- [16] 罗健,郭宁,杨峥. 安宁河流域西昌北段东岸沟谷泥石流危险度评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, 29(4): 40 – 49. [LUO J, GUO N, YANG Z. Risk assessment of gully debris flow at the east bank of the Xichang north section of the Anning river basin[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2018, 29(4): 40 – 49. (in Chinese)]
- [17] 杨涛,唐川,朱金勇,等. 四川省汶川县绵虬镇小流域泥石流危险性评价[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(10): 82 – 87. [YANG T, TANG C, ZHU J Y, et al. Hazard assessment of debris flow in small watershed of Miansi town, Wenchuan, Sichuan Province [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2018, 35(10): 82 – 87. (in Chinese)]
- [18] 熊俊楠,韦方强,刘志奇. 四川省小流域泥石流危险性评价[J]. 地球信息科学学报, 2017, 19(12): 1604 – 1612. [XIONG J N, WEI F Q, LIU Z Q. Hazard assessment of debris flow in Sichuan Province [J]. Journal of Geo-Information Science, 2017, 19(12): 1604 – 1612. (in Chinese)]
- [19] 杨小凤,朱军,曹云刚,等. 基于不同方法的泥石流危险性评价对比分析——以四川汶川七盘沟泥石流为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2017, 28(1): 22 – 29. [YANG X F, ZHU J, CAO Y G, et al. Risk assessment of Qipangou debris flow based on determining weight method and effectiveness analysis [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2017, 28(1): 22 – 29. (in Chinese)]
- [20] 魏斌斌,赵其华,韩刚,等. 基于灰色关联法的地震灾区泥石流危险性评价——以北川县泥石流为例[J]. 工程地质学报, 2013, 21(4): 525 – 533. [WEI B B, ZHAO Q H, HAN G, et al. Grey correlation method based hazard assessment of debris

- flow in quake-hit area; taking debris flows in Beichuan as an example[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2013, 21(4): 525–533. (in Chinese)]
- [21] 罗真富, 蒲达成, 谢洪斌, 等. 基于GIS和信息量法的泥石流流域滑坡危险性评价[J]. *中国安全科学学报*, 2011, 21(11): 144–150. [LUO Z F, PU D C, XIE H B, et al. Landslide hazard evaluation in debris flow catchment area based on GIS and information method [J]. *China Safety Science Journal*, 2011, 21(11): 144–150. (in Chinese)]
- [22] 方兴, 刘章军. 基于模糊概率的区域泥石流危险性评价[J]. *灾害学*, 2010, 25(增刊1): 232–235. [FANG X, LIU Z J. Fuzzy probability-based evaluation for regional debris flow hazard[J]. *Journal of Catastrophology*, 2010, 25(Sup1): 232–235. (in Chinese)]
- [23] 苏强平, 汪西林, 关文彬. 基于GIS下的岷江干旱河谷地区泥石流发生域危险性评价[J]. *中国水土保持科学*, 2004, 2(2): 98–102. [SU Q P, WANG X L, GUAN W B. Risk assessment of debris flow in dry valley region of Minjiang river basin based on GIS [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2004, 2(2): 98–102. (in Chinese)]
- [24] 王高峰, 叶振南, 李刚, 等. 白龙江流域舟曲县城城区地质灾害危险性评价[J]. *灾害学*, 2019, 34(3): 128–133. [WANG G F, YE Z N, LI G, et al. Geological hazard risk assessment of Zhouqu County in Bailong river basin [J]. *Journal of Catastrophology*, 2019, 34(3): 128–133. (in Chinese)]
- [25] 田运涛, 王高峰, 高幼龙, 等. 基于组合赋权模糊综合评价的泥石流危险度评价——以白龙江中游为例[J]. *人民长江*, 2018, 49(增刊1): 81–85. [TIAN Y T, WANG G F, GAO Y L, et al. Debris flow risk evaluation based on combined weighted fuzzy comprehensive evaluation: case of the middle reaches of Bailong River [J]. *Yangtze River*, 2018, 49(Sup1): 81–85. (in Chinese)]
- [26] 王俊豪, 金华丽, 倪天翔, 等. 基于层次分析法的模糊综合评判模型在康乐县泥石流沟危险性评价中的应用[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2017, 28(3): 52–57. [WANG J H, JIN H L, NI T X, et al. The application of fuzzy comprehensive evaluation model based on analytic hierarchy process in risk assessment of debris flow gully in Kangle County[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2017, 28(3): 52–57. (in Chinese)]
- [27] 田丰, 张军, 冉有华, 等. 甘肃陇南市泥石流灾害危险性及其影响因子评价[J]. *灾害学*, 2017, 32(3): 197–203. [TIAN F, ZHANG J, RAN Y H, et al. Assessment of debris flow disaster hazard and influence factors in Longnan district [J]. *Journal of Catastrophology*, 2017, 32(3): 197–203. (in Chinese)]
- [28] 姚勇, 高加成, 姚文花. 临潼大水沟泥石流特征分析及危险性评价[J]. *铁道工程学报*, 2010, 27(11): 5–9. [YAO Y, GAO J C, YAO W H. Features analysis and hazard assessment of dashuigou debris flow in Lintong [J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2010, 27(11): 5–9. (in Chinese)]
- [29] 邓恩松, 魏学利, 朱志新, 等. 中巴公路奥布段冰川型泥石流危险性评价[J]. *公路交通科技*, 2018, 35(5): 16–23. [DENG E S, WEI X L, ZHU Z X, et al. Hazard evaluation of glacial debris flows in aoyitake-bulunkou section of karakoram highway [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2018, 35(5): 16–23. (in Chinese)]
- [30] 叶潇潇, 钱德玲, 朱志鹏, 等. 基于组合赋权法的中巴公路奥依塔克至布伦口段泥石流危险性评价[J]. *水土保持通报*, 2018, 38(1): 246–251. [YE X X, QIAN D L, ZHU Z P, et al. Hazard assessment of debris flow at aoyitake-bulunkou section of China-Pakistan highway based on combined weight method [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2018, 38(1): 246–251. (in Chinese)]
- [31] 吕擎峰, 李军鹏, 赵本山, 等. 基于灰色关联度法的可拓理论在霍尔古吐水电站坝址区泥石流危险性评价中的应用[J]. *工程地质学报*, 2016, 24(2): 211–219. [LYU Q F, LI J P, ZHAO B S, et al. Debris flow risk assessment at huogututu hydropower dam site using grey correlation method and extension theory [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2016, 24(2): 211–219. (in Chinese)]
- [32] 元伟涛, 张旺生, 邢宝石, 等. 新疆西昆仑地区泥石流灾害分析与评价[J]. *水土保持通报*, 2016, 36(1): 303–307. [YUAN W T, ZHANG W S, XING B S, et al. Analysis and evaluation on debris flow disaster in west Kunlun area of Xinjiang region [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2016, 36(1): 303–307. (in Chinese)]
- [33] 任光明, 张涛. 基于层次分析法与可拓法的新疆某泥石流危险性评价[J]. *水电能源科学*, 2013, 31(9): 144–147. [REN G M, ZHANG T. Risk assessment of debris flow in Xinjiang based on AHP

- and extension method [J]. Water Resources and Power, 2013, 31(9): 144 - 147. (in Chinese)]
- [34] 杨三强,郝培文,万战胜. G217 天山公路典型泥石流沟危险性评价研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2008, 19(3): 26 - 28. [YANG S Q, HAO P W, WAN Z S. Evaluation of hazard degree about typical debris flow on Tianshan Highway [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2008, 19(3): 26 - 28. (in Chinese)]
- [35] 王维早,王滨,许强. 基于灰色关联度理论的河北省太行山区下瓦盆泥石流灾害危险性评估研究[J]. 地球与环境, 2012, 40(1): 121 - 125. [WANG W Z, WANG B, XU Q. Study on the risk assessment of xiawacha debris flow in the Taihang mountain area of Hebei Province based on the theory of grey correlation [J]. Earth and Environment, 2012, 40(1): 121 - 125. (in Chinese)]
- [36] 王维早,雷霆,许强. 基于层次分析法的河北省太行山区泥石流灾害危险性评估研究[J]. 地球与环境, 2010, 38(3): 357 - 362. [WANG W Z, LEI T, XU Q. Assessment study of debris flow risk in the Taihang mountain area, Hebei Province based on AHP [J]. Earth and Environment, 2010, 38(3): 357 - 362. (in Chinese)]
- [37] 高士平,杜丽娟,王瑞君,等. 基于 3S 技术的河北省泥石流灾害预测模型研究[J]. 地理与地理信息科学, 2007, 23(4): 93 - 96. [GAO S P, DU L J, WANG R J, et al. Research on forecasting debris flow disaster in Hebei Province using 3S technology [J]. Geography and Geo-Information Science, 2007, 23(4): 93 - 96. (in Chinese)]
- [38] 王欣宝,王昕洲,王艳. 河北元氏县佃户营泥石流危险性评价与防治[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2000, 11(3): 93 - 97. [WANG X B, WANG X Z, WANG Y. The evaluation and prevention on the debris flow risk in Dianhuying of Yuanshi County of Hebei Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2000, 11(3): 93 - 97. (in Chinese)]
- [39] 张春山. 北京地区泥石流灾害危险性评价[J]. 地质灾害与环境保护, 1995, 6(3): 33 - 40. [ZHANG C S. The dangerous character assesement of mud-rock flow disaster in Beijing area [J]. Journal of Geological Hazards and Enveronment Preservation, 1995, 6(3): 33 - 40. (in Chinese)]

(上接第 23 页)

- [18] 张倬元,王士天,王兰生. 工程地质分析原理 [M]. 北京:地质出版社, 2009. [ZHANG Z Y, WANG S T, WANG L S. Principle of engineering geology analysis [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009. (in Chinese)]
- [19] 李俊. 湖南红层地区顺层岩质高陡边坡稳定性及处治技术研究[D]. 长沙:中南大学, 2010. [LI J. Stability study and processing technical of the high steep rock bedded slope in red beds area of Hunan Province [D]. Changsha: Central South University, 2010. (in Chinese)]