



川藏公路巴塘至拉萨段典型地质灾害危险性分析

曹 亮¹, 叶唐进^{2,3}, 陶 伟¹

1. 西藏大学工学院, 西藏 拉萨 850000; 2. 四川建筑职业技术学院, 四川 德阳 618000;

3. 大连理工大学 建设工程学部, 辽宁 大连 116024

摘 要: 川藏公路巴塘至拉萨段沿线边坡地质灾害较为严重。根据多年来采集的边坡灾害数据, 利用地理信息系统(GIS)综合插值等多种方法分析了该段公路沿线典型边坡地质灾害的危险性。研究表明: 低度、中度、高度危险区占总里程的 78.9%, 总长度 1 008 km, 其中高度达到 30.28%, 而基本无危险区里程为 270 km, 占总里程的 21.1%。通过野外复核, 该分析结果较为合理可靠。

关键词: 公路边坡; 地质灾害; 危险性评价; 川藏公路

RISK ANALYSIS OF TYPICAL GEOLOGICAL HAZARDS IN BATANG-LHASA SECTION OF SICHUAN-TIBET HIGHWAY

CAO Liang¹, YE Tang-jin^{2,3}, TAO Wei¹

1. College of Engineering, Tibet University, Lhasa 850000, China; 2. Sichuan College of Architectural Technology, Deyang 618000, Sichuan Province, China; 3. Department of Construction Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning Province, China

Abstract: The slope geohazard along Batang-Lhasa section of Sichuan-Tibet Highway is serious. Based on the slope disaster data collected over the years, the risk of typical slope geohazard along the section is analyzed by using several interpolation methods of geographical information system (GIS). The results show that the low, medium and high risk zones account for 78.9% of the total distance, with the whole distance of 1008 km, among which the high risk zone reaches 30.28%, and the distance of basically no risk zone is 270 km, making up 21.1%. The analysis results are reasonable and reliable through field verification.

Key words: highway slope; geological hazard; risk evaluation; Sichuan-Tibet Highway

0 引言

川藏公路沿线进入雨季地质灾害频发。由于新构造运动, 该地区岩层破碎, 河流深切, 地壳抬升强烈, 地震活动频繁, 极易形成陡边坡, 为崩塌、滑坡、泥石流创造条件。大规模、高频度发生的地质灾害常常阻

碍川藏公路的运输。经有关部门调查, 川藏公路沿线各类地质灾害共 3 422 处, 其中泥石流 1 036 处, 滑坡 419 处, 崩塌 1 525 处, 其他灾害 45 处, 造成诸多交通不便、人员伤亡和财产损失^[1]。

前人针对公路边坡地质灾害做了大量研究: 王勇^[2]

收稿日期: 2021-10-25; 修回日期: 2022-01-19。编辑: 张哲。

基金项目: 国家自然科学基金项目“G318 西藏境内溜砂坡流水作用下失稳与运动机理”(No.41662020)。

作者简介: 曹亮(1993—), 男, 硕士, 主要从事岩土工程及地质灾害研究, 通信地址 西藏自治区拉萨市城关区藏大东路 10 号, E-mail//2359913523@qq.com

通信作者: 叶唐进(1981—), 男, 副教授, 在站博士后, 主要从事高原工程地质与灾害地质的研究, 通信地址 四川省德阳市嘉陵江西路 4 号, E-mail//237492042@qq.com

对公路边坡的灾害进行了详细的调查分析,并对技术难点提出了见解;刘祥^[3]介绍了公路边坡如何维护的众多措施;Yin 等^[4]利用地面激光扫描技术(TLS)对边坡灾害进行风险性评估;Lee 等^[5]通过构建三维可视化系统来治理危险边坡;Jeong 等^[6]探讨了公路边坡上观测到的地质构造的地质价值,并对滑坡问题的治理方法进行了研究.在对边坡危险性分级方面,王佳运等^[7]开展了黄土高原城镇边坡地质灾害风险分级系统的研究,并建立了分级矩阵表用来确定边坡的风险级别;刘洪博等^[8]对 S303 公路边坡进行了等级分析,为今后的治理提出了相应的建议与参考;闫丽雯^[9]以白云山某边坡为例,采用经验公式对公路边坡进行稳定分析;泮俊^[10]利用动态与信息化方法对边坡灾害进行分析,并借助 GEO-SLOPE 软件进行数值模拟;Aslam 等^[11]提出灾害潜力评估算法;Lan 等^[12]基于混合贝叶斯网络建模对风险进行评估;Zhao 等^[13]基于空间案例利用推理方法进行灾害评估;邹强等^[14]通过 GIS 划分了 G318 沿线地质灾害的危险性等级;陈洪凯等^[15]利用 GIS 对灾害情况建库,将危险划分等级.虽然众多学者对公路边坡地质灾害危险性进行了大量研究,但是大多存在方法过于复杂化使得效率降低并且准确性不高的问题,其方法仍须改进与完善.

巴塘至拉萨公路位于川藏公路东段,是进藏的重要路线,具有经济发展、国防建设的重要使命,因此对该地区公路边坡的危险性预测有非常大的研究意义.传统的公路边坡危险性评价要通过野外实测才能采集

到数据,然而有些地方人力与现代技术无法收集到准确的数据^[16].利用 GIS 软件的插值分析法成为解决这一难题的有效方法,针对以往操作复杂且准确率不高的情况,可建立一套适用性强、效果好的方案.此方案以 GIS 为主要工具,通过野外详细调查准确获取巴塘-拉萨地区 266 个典型公路边坡的特征及空间坐标,以插值原理作为理论验证,将多种插值方法的数据拟合成最终结果,提高实际工程的准确性和操作效率,为巴塘至拉萨公路边坡危险性分级提供参考^[17].

1 边坡概况及数据来源

巴塘至拉萨公路位于川藏公路东段,本研究起自巴塘终至拉萨段,途径芒康、左贡、邦达、八宿、然乌、波密、通麦、林芝、工布江达.该段公路自西向东跨越三大山系,跨过四大水系^[18-19].其中巴塘至邦达 332 km,邦达至波密 313 km,波密至巴河 311 km,巴河至拉萨 322 km^[20],总里程 1 278 km.

巴塘至拉萨属于川藏南线,各地降雨量有所偏差,海拔不等,环境较为复杂.这些因素决定了该地区灾害频发.其中通麦一带山体较为疏松,极易发生泥石流和塌方.玉普乡到然乌镇、八宿县到邦达镇、芒康县部分地区为灾害多发区.

自 2015 年以来,对 266 个典型公路边坡多次进行现场实测,其中包括滑坡、碎屑坡、崩塌和泥石流(图 1).将采集土样进行室内土工实验,得出其中 53 个公路边坡为稳定边坡,213 个公路边坡为不稳定边坡(图2).

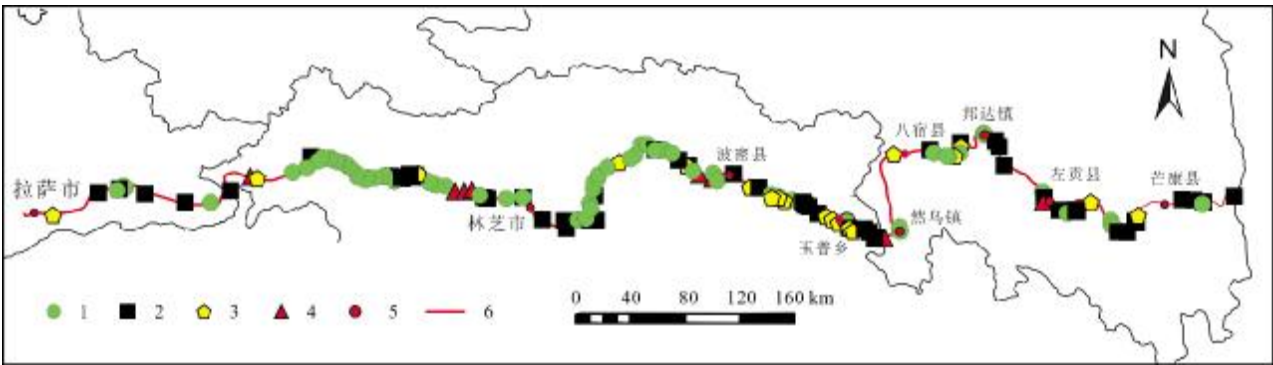


图 1 公路边坡灾害分布图

Fig. 1 Distribution map of highway slope disasters

1—滑坡 (landslide); 2—崩塌 (collapse); 3—碎屑坡 (debris slope); 4—泥石流 (debris flow); 5—行政中心 (administration center); 6—国道 (national highway)

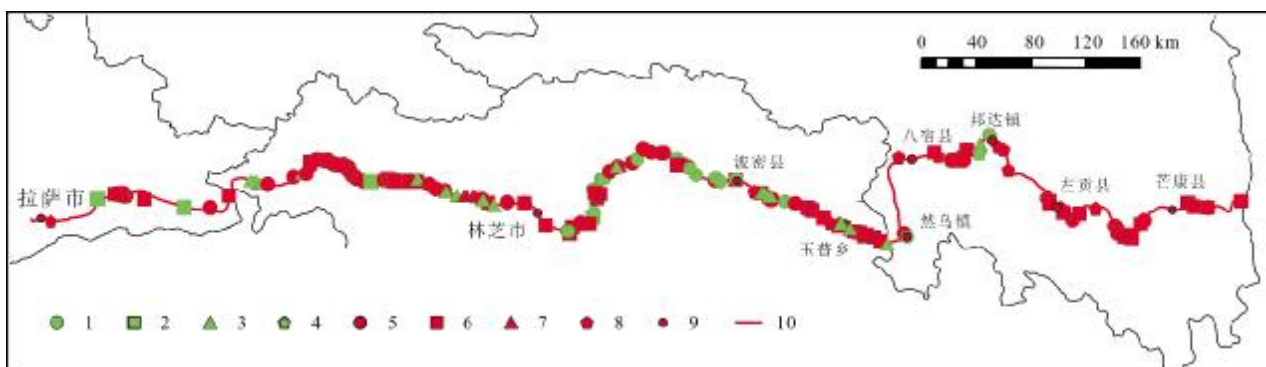


图2 公路边坡灾害稳定性分布图

Fig. 2 Distribution map of highway slope stability

1—稳定滑坡(stable landslide); 2—稳定崩塌(stable collapse); 3—稳定泥石流(stable debris flow); 4—稳定碎屑坡(stable debris slope); 5—不稳定滑坡(unstable landslide); 6—不稳定崩塌(unstable collapse); 7—不稳定泥石流(unstable debris flow); 8—不稳定碎屑坡(unstable debris slope); 9—行政中心(administration center); 10—国道(national highway)

2 公路边坡稳定性危险性分析

2.1 插值预测原理

插值预测原理应用广泛, 以下介绍其最典型的3种方法。

1) 反距离权重插值(IDW)

IDW 以距离为权重进行加权平均, 已知坐标值为 $X_i, Y_i, Z_i (i=1, 2, \dots, n)$, 根据离散点的值, 通过距离加权值求 Z 值^[16]。

$$Z = \left[\sum_{i=1}^n \frac{Z_i}{d_i^2} \right] \div \left[\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^2} \right] \quad (1)$$

其中:

$$d_i = \sqrt{(X - X_i)^2 + (Y - Y_i)^2} \quad (2)$$

2) 克里金插值(Kriging)

Kriging 可以简单地表达为:

$$Z(\partial) = \mu(\partial) + \varepsilon(\partial) \quad (3)$$

其中, $Z(\partial)$ 为 ∂ 点处的变量值, $\mu(\partial)$ 为确定趋势值, $\varepsilon(\partial)$ 为随机误差^[21]。对于 $\mu(\partial)$ 可以为一个常量, 也可以是空间坐标线性函数, 其表达式为:

$$\mu(\partial) = b_0 + b_1x + b_2y + b_3x^2 + b_4y^2 + b_5xy \quad (4)$$

3) 趋势面法插值(Trend)

Trend 可简单表达为:

$$W_i = \hat{W}_i + \zeta \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad (5)$$

其中 $\hat{W}_i$ 表示地理要素的宏观分布规律, 属于确定性因素作用的结果; ζ 表示微观区域, 被认为是随机因素影响的结果。

Trend 法的形式为一个拟合的非线性函数, 常用

的二维与三维表达式如下:

$$\hat{W}_1 = a_0 + a_1X + a_2Y \quad (6)$$

$$\hat{W}_2 = a_0 + a_1X + a_2Y + a_3X^2 + a_4XY + a_5Y^2 \quad (7)$$

$$\hat{W}_3 = a_0 + a_1X + a_2Y + a_3X^2 + a_4XY + a_5Y^2 + a_6X^3 + a_7X^2Y + a_8XY^2 + a_9Y^3 \quad (8)$$

2.2 过程及方法

2.2.1 分析方法

1) 根据野外调查, 对典型的公路边坡进行统计分析, 利用 GIS 技术将地质条件信息转换为 SHP 数据, 再对 SHP 数据进行行处理;

2) 将 SHP 数据导入 GIS 插值模块, 用 IDW、Kriging 及 Trend 同时分析, 得出影响稳定性的各指标图层;

3) 根据插值原理在理论上验证可行性^[22-23];

4) 将得出的3种结果进行拟合, 提高准确率, 得出最优分级。

2.2.2 数据处理与分析过程

对巴塘至拉萨段 1 278 km 公路的边坡调查共采集了 266 个数据, 涵盖了所有类型, 通过对研究区获取的地质资料所判断的滑坡、泥石流、崩塌和碎屑坡等主要灾害类型, 采用 GIS 中的插值与图像处理技术进行研究。

将 266 个边坡的空间坐标都转换成经纬度的形式, 将所有数据用 Excel 列成表格, 用 ArcGIS“添加数据”功能添加该表格, 将数据转换成 SHP 格式。打开 SHP 数据的“打开属性表”功能, 创建字段设置成文本

型,任意命名(要求英文),稳定的设为 0,不稳定的设为 1.

反距离权重插值的操作:在工具盒子中选择“特殊分析”,在下拉菜单中选“IDW 插值”,在输出选项中任意输入结果文件的名称,其他选项默认即可,最终点击“确定”.

克里金插值与趋势面法插值的具体步骤与 IDW 的步骤相似,在此不做过多的介绍.其中趋势面法插值拥有两种基本模型,即线性与逻辑型.逻辑型趋势面适用于预测空间确定位置是否存在某种现象,因此本研究实例选用逻辑型最为合适^[45].

2.3 结果及分析

同时用反距离权重插值、克里金插值、趋势面法插值 3 种方法进行分级稳定性分析,最终得出发生滑坡的概率图(图 3—5).

反距离权重插值是一种常用而简单的空间插值方法,它根据距离的不同有所变化,为确定性插值;克里金是通过统计学得出的方法,为不确定性插值;趋势面法插值是数学函数定义的平滑表面与输入点进行拟合^[45]得出的一种插值方法.其中反距离权重插值法与位置距离的远近有密切联系,不同的地理位置产生的误差有所不同;克里金插值应用广泛精准度高,测出结果比较接近于实际;趋势面法准确率相对不高.虽然 3 种方法都有误差,但是都满足准确度要求,将 3 种方法的结果进行拟合,得出最终结果(图 6).

通过对反距离权重插值、克里金插值、趋势面法插值及综合插值与复核数据对比,得出不同危险区域的里程与各插值的绝对误差,如表 1 所示.

从表 1 可知,反距离权重插值、克里金插值和趋势面法插值在高度危险区和中度危险区的里程与复核数

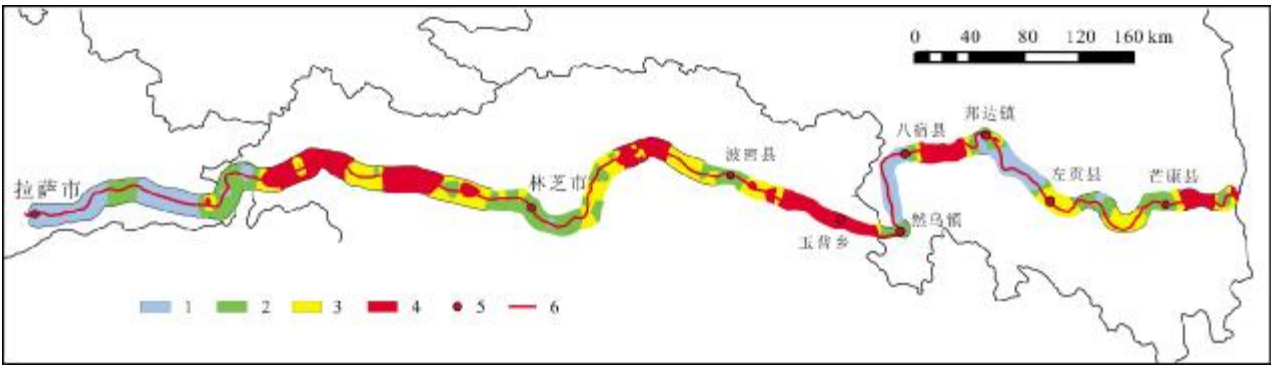


图 3 反距离权重插值

Fig. 3 Inverse distance weight interpolation

1—基本无危险区(basically no risk area); 2—低度危险区(low-risk area); 3—中度危险区(medium-risk area); 4—高度危险区(high-risk area); 5—行政中心(administration center); 6—国道(national highway)

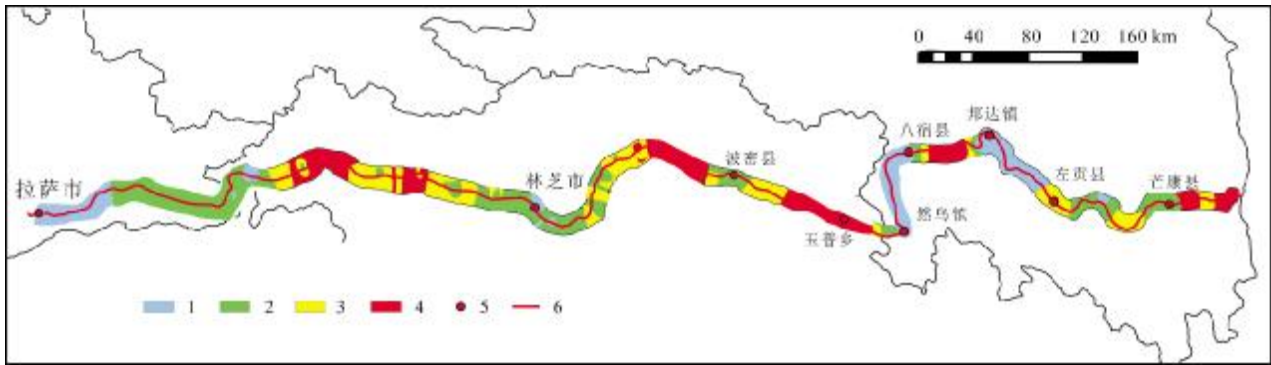


图 4 克里金插值

Fig. 4 Kriging interpolation

1—基本无危险区(basically no risk area); 2—低度危险区(low-risk area); 3—中度危险区(medium-risk area); 4—高度危险区(high-risk area); 5—行政中心(administration center); 6—国道(national highway)

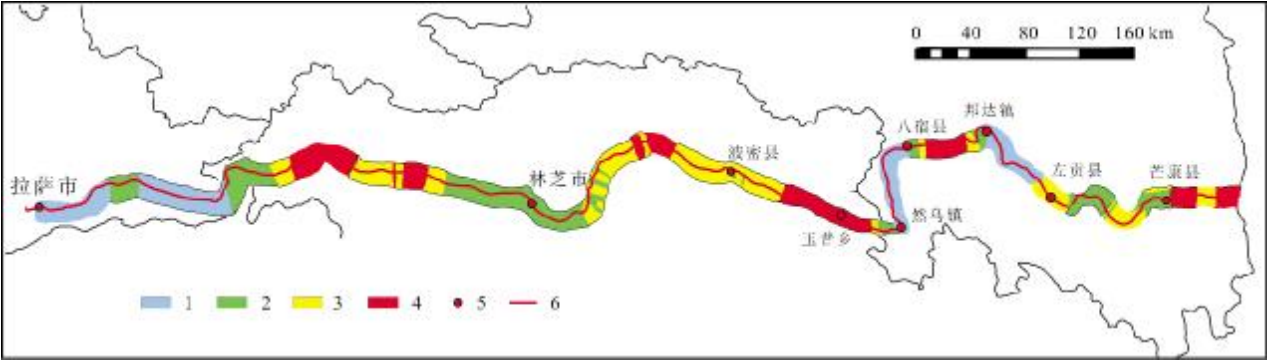


图 5 趋势面法插值

Fig. 5 Trend surface interpolation

1—基本无危险区(basically no risk area); 2—低度危险区(low-risk area); 3—中度危险区(medium-risk area); 4—高度危险区(high-risk area); 5—行政中心(administration center); 6—国道(national highway)

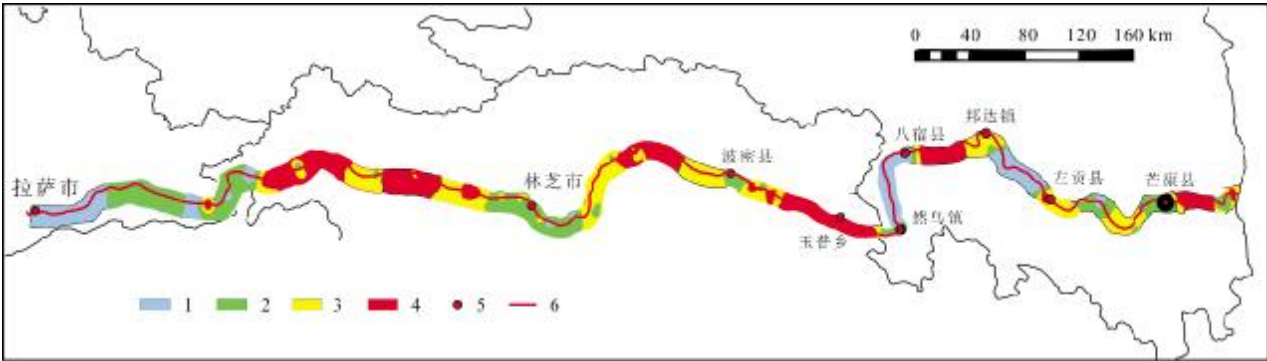


图 6 川藏公路巴塘至拉萨段公路边坡危险性分级图

Fig. 6 Risk grading map of slope disaster along Batang-Lhasa section of Sichuan-Tibet Highway

1—基本无危险区(basically no risk area); 2—低度危险区(low-risk area); 3—中度危险区(medium-risk area); 4—高度危险区(high-risk area); 5—行政中心(administration center); 6—国道(national highway)

表 1 不同插值法危险区统计复核对比表

Table 1 Comparison of statistical verification of risk areas with different interpolation methods

插值方法	高度危险区/km	中度危险区/km	低度危险区/km	基本无危险区/km	绝对误差/%
IDW	390.08	302.04	295.82	290.06	4.19
Kriging	374.53	320.18	330.86	252.43	4.57
Trend	355.89	337.26	273.82	311.03	8.55
综合插值	386.88	312.66	308.76	269.70	1.98
复核数据	379	320	304	275	—

据相近,在低度危险区和基本无危险区与复核数据略有偏差,绝对误差分别为 4.19%、4.57%和 8.55%。趋势面法插值相对于前两种误差较大,为了将误差降为最低,将 3 种插值法拟合,最终得出综合插值,绝对误差为 1.98%。

通过表 1 对比分析公路边坡野外考察资料,利用复核数据算出各插值绝对误差,得出综合插值误差在 1.98%,川藏公路巴塘至拉萨段典型地质灾害危险性分析与实际情况比较一致。

通过图 6 将公路边坡危险性划分为 4 级:基本无危险区、低度危险区、中度危险区、高度危险区。统计各等级区域里程,结果见表 2。

表 2 公路危险等级情况统计表

Table 2 Statistics of different highway hazard levels

危险等级	里程/km	占总里程比例/%	灾害数量/处
基本无危险区	269.7	21.1	5
低度危险区	308.76	24.16	22
中度危险区	312.66	24.46	44
高度危险区	386.88	30.28	142

从表 2 可知,川藏公路巴塘至拉萨段大部分处于低度危险区以上,低度、中度、高度危险区里程之和占研究区总里程的 78.9%,其中高度危险区里程占 30.28%,里程最大,基本无危险区里程最小,为 269.7 km,占总里程的 21.1%.

研究区的灾害性分布在不同路段具有不同的特征(见表 3).

从表 3 可知,中度危险区与高度危险区灾害主要分布路段较多,基本无危险区与低度危险区灾害主要分布路段较少.灾害类型以崩塌、滑坡、泥石流为主.

3 结 论

根据多年采集的边坡地质灾害数据,利用地理信息系统(GIS)多种插值法分析了川藏公路巴塘至拉萨段沿线典型边坡灾害的危险性,得到如下几点结论:

1)通过野外复核多种插值法分析结果,得出反距离权重插值、克里金插值和趋势面法插值误差都在允许范围内,都可以进行地质灾害危险性分析,综合插值法得出的结果更为准确.

2)通过综合插值分析,得出全线低度、中度、高度危险区占总里程的 78.9%,共 1 008 km,其中高度危险区达到 30.28%,而基本无危险区为 270 km,占总里程的 21.1%.

3)通过野外调查复核对比,得出 GIS 插值分析最终结果的绝对误差为 1.98%,其准确性高,值得推广应用.

参考文献(References):

[1]李建忠,郑来林,耿全如,等.西藏波密-林芝环境地质灾害及防治[J].沉积与特提斯地质,2006,26(3):81-84,88.
Li J Z, Zheng L L, Geng Q R, et al. Geological hazards and controlling factors along the Bomi-Nyingchi zone, Xizang[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2006, 26(3): 81-84, 88.
[2]王勇.西藏山区公路边坡生态防护措施研究[D].西安:长安大学,2016.
Wang Y. Ecological protection of highway slope in Tibet mountain regions[D]. Xi'an: Chang'an University, 2016.
[3]刘祥.西藏草甸区高等级公路边坡防护[J].中国公路,2020(4):98-99.
Liu X. Slope protection of high grade highway in Tibet meadow area[J]. China Highway, 2020(4): 98-99. (in Chinese)
[4]Yin C, Li H R, Hu Z N, et al. Application of the terrestrial laser scanning in slope deformation monitoring: Taking a highway slope as an example[J]. Applied Sciences, 2020, 10(8): 2808.
[5]Lee J D, Chang K T, Bhang K J, et al. Construction of 3D visualization system for dangerous slope management[J]. Proceedings of the Korea Contents Association Conference, 2018: 119-120.
[6]Jeong J H, Kim S H, Park B S, et al. Case study on the mitigation of dangerous slope considering the value of geoheritage[J]. The Journal of Engineering Geology, 2020, 30(1): 71-84.
[7]王佳运,石小亚,罗金,等.黄土高原山区城镇边坡地质灾害风险分级系统——以吉县吉昌镇为例[J].灾害学,2021,36(1):122-127.
Wang J Y, Shi X Y, Luo J, et al. Risk classification system of slope geo-hazards of mountainous town in Loess Plateau: Taking Jichang Town of Jixian County for example [J]. Journal of Catastrophology,

表 3 公路边坡灾害主要分布路段及类型
Table 3 Main sections and types of highway slope hazard

危险等级	灾害主要分布路段	主要灾害类型
基本无危险区	蔡公堂至章多,甲玛至日多,安久拉山至八宿,美玉至列达	
低度危险区	章多至甲玛,日多至松多,百巴至林芝,列达至东达,如美至芒康	崩塌、滑坡、泥石流
	金达至工布江达,巴河至百巴,林芝至拉月,业拉山至美玉	滑坡、崩塌
中度危险区	古乡至松宗	泥石流、滑坡
	田妥至列达,东达至如美	崩塌,碎屑流
	松多至金达,工布江达至巴河	碎屑流、滑坡
	拉月至索通	滑坡、泥石流
高度危险区	松宗至然乌,八宿至业拉山	碎屑流、崩塌
	金沙江至芒康	滑坡、崩塌

- 2021, 36(1): 122–127.
- [8]刘洪博, 佟磊, 张龙, 等. S303 公路边坡崩塌灾害体发育特征及其危险性评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(4): 34–38.
- Liu H B, Tong L, Zhang L, et al. Slope collapse hazard development characteristics and risk assessment of S303 Highway[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(4): 34–38.
- [9]同丽雯. 基于瑞典条分法和 Bishop 法的广州市白云山某边坡地质灾害危险性分析[J]. 中国金属通报, 2019(12): 106–107.
- Yan L W. Risk analysis of a slope geological hazard in Baiyun Mountain, Guangzhou based on Swedish slice method and Bishop method[J]. China Metal Bulletin, 2019(12): 106–107. (in Chinese)
- [10]泮俊. 山区公路高边坡危险性分级及动态设计研究[D]. 西安: 长安大学, 2016.
- Pan J. Research on hazard classification and dynamic design of mountainous highway high slope[D]. Xi'an: Chang'an University, 2016.
- [11]Aslam B, Zafar A, Khalil U. Correction to: Development of integrated deep learning and machine learning algorithm for the assessment of landslide hazard potential [J]. Soft Computing, 2021, 25 (21): 13795.
- [12]Lan M, Zhu J P, Lo S. Hybrid Bayesian network-based landslide risk assessment method for modeling risk for industrial facilities subjected to landslides [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2021, 215: 107851.
- [13]Zhao Z, Chen J H, Xu K H, et al. A spatial case-based reasoning method for regional landslide risk assessment[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2021, 102: 102381.
- [14]邹强, 崔鹏, 杨伟. G318 川藏公路段泥石流危险性评价[J]. 山地学报, 2013, 31(3): 342–348.
- Zou Q, Cui P, Yang W. Hazard assessment of debris flows along G318 Sichuan-Tibet highway[J]. Journal of Mountain Science, 2013, 31(3): 342–348.
- [15]陈洪凯, 唐红梅. 川藏公路地质灾害危险性评价[J]. 公路, 2011 (9): 17–23.
- Chen H K, Tang H M. Evaluation of geological disaster fatallness along Sichuan-Tibet highway[J]. Highway, 2011(9): 17–23.
- [16]汤国安, 杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2012: 289–290.
- Tang G A, Yang X. Geographic information system spatial analysis experiment course[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2012: 289–290. (in Chinese)
- [17]靳远成, 赵鹏辉, 薄雾, 等. 基于无人机影像的边坡精细化建模及稳定性分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2020, 18(6): 178–183.
- Jin Y C, Zhao P H, Bo W, et al. Refined modeling and stability analysis of slope based on UAV images[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2020, 18(6): 178–183.
- [18]汤明高, 傅涛, 张维科, 等. 西藏 G318 典型地质灾害成因机制及防治对策 [J]. 公路交通科技, 2012, 29(5): 30–36.
- Tang M G, Fu T, Zhang W K, et al. Genetic mechanism of geohazard along national highway 318 in Tibet and prevention countermeasure [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2012, 29(5): 30–36.
- [19]杨志华, 吴瑞安, 郭长宝, 等. 川西巴塘断裂带地质灾害效应与典型滑坡发育特征[J]. 中国地质, 2022, 49(2): 355–368.
- Yang Z H, Wu R A, Guo C B, et al. Geo-hazard effects and typical landslide characteristics of the Batang fault zone in the western Sichuan[J]. Geology in China, 2022, 49(2): 355–368.
- [20]叶唐进, 谢强, 王鹰. 川藏公路藏东段边坡稳定性研究与治理评价 [J]. 地质力学学报, 2019, 25(2): 233–239.
- Ye T J, Xie Q, Wang Y. Stability investigation and treatment evaluation of slopes in the eastern Tibet section of the Sichuan-Tibet highway[J]. Journal of Geomechanics, 2019, 25(2): 233–239.
- [21]Thomas A, Aryal J. Spatial analysis methods and practice: Describe-explore-explain through GIS[J]. Journal of Spatial Science, 2021, 66 (3): 533–534.
- [22]Meng F A, Liang X J, Xiao C L, et al. Integration of GIS, improved entropy and improved catastrophe methods for evaluating suitable locations for well drilling in arid and semi-arid plains[J]. Ecological Indicators, 2021, 131: 108124.
- [23]Tercan E. Land suitability assessment for wind farms through best-worst method and GIS in Balikesir Province of Turkey[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2021, 47: 101491.