

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2020.04.08

基于改进变异系数法的 G109 拉萨—那曲段 泥石流危险性评价

刘佳^{1,2,3}, 赵海军^{1,2}, 马凤山^{1,2}, 郭捷^{1,2}, 孙琪皓^{1,2,3}, 段学良^{1,2,3}

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所/中国科学院页岩气与地质工程重点实验室, 北京 100029;
2. 中国科学院地球科学研究院, 北京 100029; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 泥石流危险性评价对于重大工程选址、建设和防护具有指导意义。现阶段区域泥石流危险性评价的方法主要集中在层次分析法等主观方法上, 对于客观方法应用较少。基于此现状, 本文确定了泥石流危险性评价的主要影响指标, 对客观变异系数法进行改进, 使之同时考虑主客观因素, 基于综合指数模型建立了泥石流危险性评价模型。并以西藏国道 G109 拉萨市和那曲市地区路段为研究对象, 利用改进变异系数法, 借助 ArcGIS 软件建立评价模型并进行危险性分区。评价结果显示: 泥石流高危区主要分布在拉萨至羊八井路段, 与现场实地调查结果吻合较好, 改进变异系数法可以作为评价泥石流危险性的方法。

关键词: 泥石流; 层次分析法; 改进变异系数法; 国道 G109

中图分类号: P642.23

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2020)04-0063-08

Risk assessment of G109 Lhasa-Naqu Debris flow based on improved coefficient of variation

LIU Jia^{1,2,3}, ZHAO Haijun^{1,2}, MA Fengshan^{1,2}, GUO Jie^{1,2}, SUN Qihao^{1,2,3}, DUAN Xueliang^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Shale Gas and Geoengineering, Institute of Geology and Geophysics/Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2. Innovation Academy for Earth Science, CAS, Beijing 100029, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The risk assessment of debris flow has guiding significance for the site selection, construction and protection of major projects. At present, the methods of regional debris flow hazard evaluation mainly focus on subjective methods such as AHP, and objective methods are less applied. This paper determines the main impact indicators of debris flow risk assessment, improves the objective coefficient of variation method, and considers both the subjective and objective factors. Based on the comprehensive index model, the debris flow risk assessment model is established. Taking the G109 section of the national road from Lhasa to Naqu in Tibet as a case study, the improved coefficient of variation method was used to establish the evaluation model and risk division by ArcGIS software. The evaluation results show that the high risk area of debris flow is mainly distributed in the Lhasa to Yangbajing section, which is in good agreement with field investigation. The improved coefficient of variation method can be used to evaluate the risk of debris flow.

Keywords: debris flow hazard; AHP; improved coefficient of variation method; Highway G109

收稿日期: 2019-11-22; 修订日期: 2020-01-07

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究专题(2019QZKK0905)

第一作者: 刘佳(1995-), 女, 山东东营人, 硕士研究生, 主要从事工程地质和岩石力学研究。E-mail: liujia18@mails@163.com

通讯作者: 赵海军(1981-), 男, 宁夏中卫人, 博士, 副研究员, 主要从事工程地质和岩石力学研究工作。E-mail: zhaohaijun@mail.iggcas.ac.cn

iggcas.ac.cn

0 引言

青藏公路是世界上海拔最高、线路最长的公路,自建成后便加快了内陆与高原地区的物资运输速度,促进了西藏经济建设和人民生活改善。公路沿线泥石流灾害是损毁路基、路面及桥梁、隧道等构造物的重要外在动力,也是造成公路长时间中断的主要原因之一^[1]。所以,利用数学方法和计算机技术,建立更高效的评价模型进行危险性分区,对泥石流的预测和防治至关重要。

国内外对泥石流危险性评价的研究自 20 世纪伊始。HOLLINGSWORTH 等^[2]采用因子叠加法和打分方法构建滑坡泥石流危险度评价的基本框架,实现了滑坡危险度的评估;MANTOVANI 等^[3]基于 RS 技术对欧洲滑坡灾害进行研究和分区;CHUNG 等^[4]针对调查区的滑坡灾害情况,采用 GIS 的专业模型扩展分析功能进行了多指标综合区划;YALCIN^[5]利用层次分析法和二元统计法研究了滑坡灾害易发性;PRADHAN 等^[6]利用神经网络方法结合逻辑回归模型对马来西亚檳岛地区滑坡灾害进行危险性分区;YANG 等^[7]对比了两种集对分析方法在泥石流危险性评价中的应用;殷坤龙等^[8]应用 GIS 调查研究后发现滑坡灾害发育具有区域性和重复性的规律;黄润秋等^[9]利用 GIS 技术和数学模型方法进行地灾区划;LIU^[10]提出了泥石流灾害等级与发生频率之间指数关系的理论解;张春山等^[11]研究了区域地质灾害风险评价要素权值的计算方法;薛东剑等^[12]借助遥感数据解译和地面调查以及 GIS 技术,运用信息量模型和逻辑回归模型完成了对青川、平武县的地质灾害危险性评价。REN 等^[13]建立了 SPA-GRA 模型并利用了变异系数法来确定矿山参数;由此看来,随着科技进步、社会发展,GIS 等计算机科学技术 and 多种数学方法逐渐被应用于泥石流危险性评价。

尽管评价方法不断增加,但目前泥石流评价仍存在问题^[14]:如评价指标赋权过程中,层次分析法主观性过强,客观变异系数法具有一定局限性、未考虑主观因素的影响等等。本文以国道 G109 沿线拉萨至那曲地区路段为例,通过利用层次分析法来改进变异系数法,弥补了原方法适用性差的缺陷,并利用改进的变异系数法对研究区进行了泥石流危险性分区,从而确定危险区域。

1 评价模型构建

1.1 评价指标的选取

评价指标是整个评价体系最基本的组成元素。泥

石流灾害的形成与其所处的地貌形态、物质、构造、水文、气象和植被条件等多种因素密切相关^[15],在充分考虑调查区灾害特点的基础上,并着重考虑泥石流灾害形成所需要的三个基本条件^[16],选取地层岩性、地形地貌、地质构造(活动断裂)、气候气象与地震五类因子作为公路沿线泥石流危险性评价的指标因子,以此作为评价体系中的准则层,选取依据如下:

(1)区内主要分布有花岗岩、砂岩、页岩及第四系堆积物等,易风化的岩浆岩和较软弱岩层在温度变化剧烈、日照强烈的青藏高原,更易于风化、崩解堆积于泥石流沟两岸,往往能为泥石流提供更加丰富的物质基础。

(2)地形条件的影响主要体现在重力势能以及能量转化梯度方面,而重力势能的高低和能量转化率实质上受坡体地形坡度和起伏度(泥石流坡体物源区至沟口的垂直距离)的影响:坡度不仅影响斜坡内的应力分布,同时对斜坡上松散物质的堆积厚度起着决定性作用,进而决定着斜坡的稳定性^[17]。相对高差大和地表切割强烈地区的岩土体剥蚀作用强烈,水流速度相对较快,具备了泥石流的赋存条件^[18]。

(3)由于欧亚板块与印度板块的不断挤压,青藏高原构造活动剧烈。断裂构造越发育则岩体中次生结构面越多、岩体越破碎。构造作用主要体现在断层等宏观表现上,主要根据采样区内各类构造线的密度分布状况^[19],对所发育的泥石流沟的固体物储备方量、补给形式以及泥石流的性质有很大影响。地质构造的复杂程度将直接影响到岩层的稳定性^[20];进而为泥石流发育提供丰富的物源基础。

(4)气候也是泥石流产生的重要影响因素,它不仅影响风化作用,还会因为暴雨、连续降雨诱发泥石流滑坡等地质灾害。降雨过程中,孔隙水压力不断升高,直接影响滑裂面以下土体向泥石流转化的速度^[21]。

(5)地震烈度越高(地震加速度越大)则岩土体易遭受破坏,为泥石流发育提供丰富物质条件;地震通过为泥石流提供固体物质来源、水源、动力条件和激发条件等影响泥石流的形成和发展^[22]。

1.2 评价指标体系的建立

根据层次分析法的相关理论,评价指标体系一般包括目标层、准则层和指标层。目标层是指泥石流危险性的评价;准则层即评价危险性的指标因子,选取原则如上所述;指标层是对准则层的细化,综合考虑调查区内外因素,将准则层细分为六个指标:岩石易风化程度、平均坡度、起伏度、断层线密度(单位面积内断

裂线的长度)、地震加速度、汛期(6~9月)月均降水量。对三个评价分析层次分别用字母 A、B、C 表示,最终建立危险性评价指标体系(图 1)。

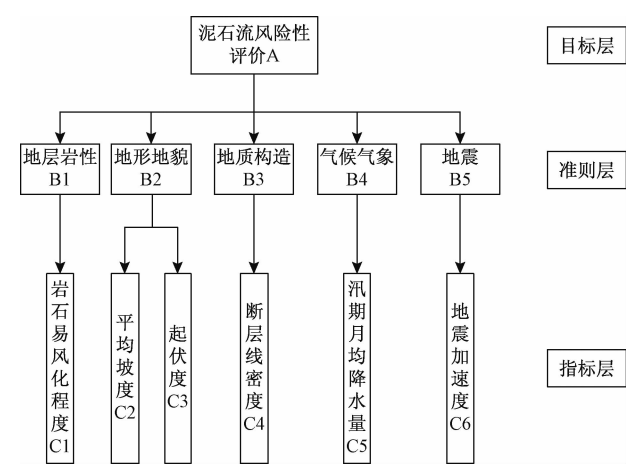


图 1 危险性评价指标体系
Fig.1 The assessment system of risk indicators

1.3 改进变异系数法的提出

泥石流危险性评价因子权重的确定有主观和客观两种方法。对于主观方法来说:传统层次分析法在计算权重系数时,相对权的最小平方方法复杂一些,但其所需的一致性检验步骤保证了判断矩阵的合理性和一致性。使用层次分析法主要是为了定性定量地研究所赋权重问题,具有试探性,所构造判断矩阵具有很大主观性,若是专家经验不足或者对所构造矩阵意见不一就会导致准确度较低甚至错误的结论。对于客观变异系数法来说:此方法具有一定局限性,仅考虑数据的变异离散程度而确定权重系数,这点对于不可量化的评价指标因子不适用。所以本文对变异系数法灵活创新运用,利用层次分析法来修正可量化评价的指标因子所占权重,从而得到综合考虑主观、客观两方面因素的评价模型。

1.3.1 层次分析法

本文将采用两种层次分析法,即传统层次分析法和权的最小平方方法,要使上述两种方法所得的权重值之间的差异程度与其相对应的分配系数间的差异程度

相一致,引入距离函数的概念^[23],得到相应比例系数从而取得最终层次分析法所得权重值。

(1)传统层次分析法

此方法大致可以分为四个步骤(详细计算过程及一致性检验方法参见文献^[24]):在这一过程中根据专业人员建议,考虑西藏地区特殊的地质环境条件,构造判断矩阵见表 1 和表 2。

表 1 指标判断矩阵(1)

Table 1 Indicator judgment matrix					
A	B1	B2	B3	B4	B5
B1	1	1/2	1	1/3	2
B2	2	1	2	1	3
B3	1	1/2	1	1/4	2
B4	3	1	4	1	3
B5	1/2	1/3	1/2	1/3	1

表 2 指标判断矩阵(2)

Table 2 Indicator judgment matrix		
B2	C2	C3
C2	1	2
C3	1/2	1

(2)权的最小平方方法

权的最小平方方法是由 A. T. W. Chu 等于 1979 年提出,于 1988 年介绍到我国^[25]。权的最小平方方法的基本原理是在一定的约束条件下,建立目标函数,对其一致性判断矩阵 A 求得最小值,即一致性判断矩阵排序向量的最优解^[26]。由权的最小平方方法构成的最优化问题,用向量形式可表示为^[27]:

①目标函数: $\min J = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (w_i - a_{ij} w_j)^2, (i, j = 1, 2, 3, \dots, n)$ (1)

②约束条件:

$S. T. \sum_{i=1}^n a_{ij} w_j = 1, (i, j = 1, 2, 3, \dots, n)$ (2)

通过求解可得最优解为:

$W^* = \frac{B^{-1}e}{e^T B^{-1}e}$ (3)

式中: W^* ——一致性判断矩阵排序权向量。

$$B = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n a_{i1}^2 + (n-2) & -(a_{12} + a_{21}) & \cdots & -(a_{1n} + a_{n1}) \\ -(a_{21} + a_{12}) & \sum_{i=1}^n a_{i2}^2 + (n-2) & \cdots & -(a_{2n} + a_{n2}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -(a_{n1} + a_{1n}) & -(a_{n2} + a_{2n}) & \cdots & \sum_{i=1}^n a_{in}^2 + (n-2) \end{bmatrix}$$
 (4)

$$e = (1, 1, 1, \dots, 1)^T \quad (5)$$

式中: a_{ij} ——判断矩阵中的数值;

w_i 或 w_j ——权重系数。

1.3.2 对变异系数法进行改进

变异系数又称为标准差率,它是利用求取一组数据的标准差与平均值之比,来作为评价体系指标权重的客观赋权方法。该方法可以直接利用 ArcGIS 软件中关于指标因子的栅格数据文件的平均值和标准差,通过简单计算就可以得到各权重系数,具体计算公式如下:

$$CV = \frac{S}{R} \quad (6)$$

$$M_i = \frac{CV_i}{\sum_{i=1}^n CV_i} \quad (7)$$

式中: S ——某组指标因子数据的标准差;

R ——平均值;

CV_i ——某组指标因子的变异系数;

M_i ——指标因子所占的客观权重。

此处,首先选取传统层次分析法和权的最小平方方法进行组合赋权,各自的权重系数依据距离函数所得,目的是减少误差、增大可信度。

$$W_{12} = \alpha W_1 + \beta W_2 \quad (8)$$

$$\alpha = 0.511, \beta = 0.489 \quad (9)$$

式中: W_{12} ——聚合赋权法所确定的权重;

W_1 ——传统层次分析法所确定的权重;

W_2 ——权的最小平方方法所得结果。

其次,利用组合赋权后的权重系数,对变异系数法进行改进。对于不可量化的评价指标,权重系数取层次分析法所得结果,这一过程可以避免变异系数法不能衡量不可量化指标权重的缺点;对于可量化评价指标,本着总权重和为 1 的原则,权重系数为由层次分析法所得的总权重系数与变异系数法所得的各个评价指标权重系数的乘积:

$$V_i = \begin{cases} (\sum_{i=1}^n W_{12i}) * M_i & (i = 1, 2, \dots, n, \text{皆为可量化指标}) \\ W_{12i} & (i \text{ 为不可量化指标}) \end{cases} \quad (10)$$

式中: V_i ——评价指标改良后最终权重系数;

W_{12i} ——利用上述组合赋权法确定的权重系数;

M_i ——变异系数法确定的指标权重。

1.4 综合评价模型

确定各个评价指标因子的权重,仅仅是完成了

该指标因子在致灾评价中作用高低的评价,而要想获得最终的综合评价结果以及建立综合风险性分区,需要利用各个指标因子的权重与分级分数的乘积确定。本文采用加权综合评分模型进行综合评价,公式如下:

$$Q = \sum_{i=1}^n x_i * v_i \quad (11)$$

式中: Q ——泥石流危险性系数;

x_i ——第 i 个指标因子在某一评价单元的分级赋值分数;

v_i ——该指标因子的权重系数。

2 研究区域危险性分析

2.1 研究区概况

研究区域位于西藏自治区拉萨市至那曲市的国道 G109(毗邻青藏铁路)附近 10 km 范围内,地处青藏高原东南部,北邻唐古拉山脉,南靠喜马拉雅山脉,地势总体北高南低,西高东低;构造活动剧烈,多高山河谷地貌;区域内包括西藏拉萨市和那曲市的众多重要地区:拉萨、当雄、那曲、安多和唐古拉山口(其为西藏自治区和青海省的分界)。气候属于高原气候,平均气温低,昼夜温差大。据已有调查资料显示:那曲地区已发生地质灾害 110 多处,造成几千亿元经济损失。

2.2 计算过程

2.2.1 数据来源

本文研究数据主要涉及泥石流评价指标因子的数据。其中,地层岩性和断层线密度数据主要来自于 1:50 万地质图资料;地形坡度和起伏度的 DEM 数据来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>),借鉴前人泥石流危险性评价经验^[28-29]采用 30 m 精度(考虑到数据获取的难易程度和最大利用效果);汛期月均降雨量数据来源于全国降雨统计资料;地震加速度数据来自于《中国地震动峰值加速度区划图》(GB 18306—2015)。将这些数据导入 ArcGIS 软件并划分网格,共有 11 917 个面积为 1 km × 1 km 的网格,形成栅格数据文件,并将其分为五级。

2.2.2 权重系数的计算

根据前面章节内容提到的评价指标权重的确定方法,代入数据整理计算后可得结果。传统层次分析法(W_1)和权的最小平方方法(W_2)、组合后的层次分析法(W_{12})、变异系数法(M)以及改进变异系数法(V)的计算结果见表 3。

表 3 各种方法所得权重
Table 3 The weights obtained by various methods

权重 系数	易风化 程度	平均 坡度	起伏度	断层线 密度	汛期月均 降雨量	地震加 速度
W_1	0.139 8	0.191 9	0.094 5	0.132 0	0.356 7	0.085 1
W_2	0.134 0	0.215 1	0.087 9	0.111 6	0.356 4	0.095 0
W_{12}	0.137 0	0.203 2	0.091 3	0.124 2	0.356 6	0.089 9
M	—	0.219 9	0.317 6	0.29	0.030 7	0.141 8
V	0.137 0	0.189 8	0.274 1	0.250 3	0.026 5	0.122 4

2.2.3 确定评价指标分级分数

泥石流的形成离不开特定的自然地理、地质和气候条件:利用 ArcGIS 软件,根据上述所选评价指标因子,对西藏地区拉萨至那曲国道 G109 附近 10 km 范围(前人研究主张距离铁路 5 km 以上的泥石流均不会对青藏铁路交通干线产生破坏性影响^[30],为了综合评价更广泛的区域灾害特点,本文决定扩大为 10 km 范围)内的区域进行指标因子等级划分(表 4),结合

“《中国公路综合自然区划》体系框架研究”和文献^[31]的研究成果,将六类评价指标分别划分为五个等级(图 2);为便于更直观地了解等级划分结果,对其部分指标数据采取适当取整处理,分别赋值 1、3、5、7、9;与大部分研究中都选择 15 作为分级数值相比,此方法使得分级分数间拉开差距,更具明显性(g 为地震加速度,取值 10 m/s^2)。

2.3 结果验证分析

利用 ArcGIS 数据处理功能,得到研究区域泥石流灾害各个指标因子的分级图,在此基础上,利用软件的加权叠加功能,形成泥石流综合评价危险性分区图(图 3)。借助其数据统计功能,对改进变异系数法所建模型进行分析:泥石流危险度中高区域(中等、较高、高)面积约 $2.3 \times 10^3\text{ km}^2$,占调查区总面积的 20%,主要分布在:国道 G109 拉萨至羊八井路段约 $1\,000\text{ km}^2$ 范围内;羊八井—当雄路段道路右侧部分

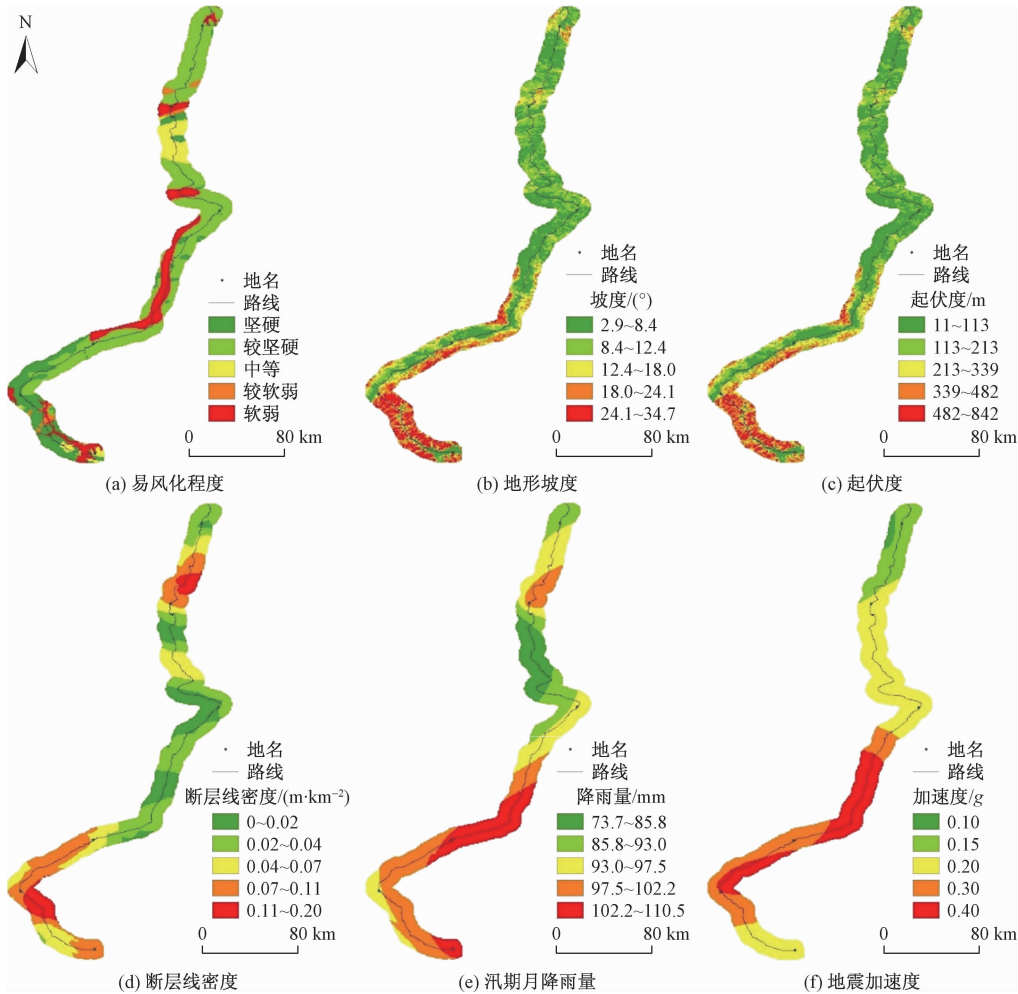


图 2 评价指标分级图
Fig. 2 Classifying picture of evaluation index

区域;当雄县东北方向约 30 km 处的道路左侧拐角处约 170 km² 范围;以及安多县周围部分区域。泥石流危险度低区域(较低、低)约占总调查面积的 80%;大部分分布在那曲县城北部。将实际灾害数量分布特点(图 3)和危险性分区图对照,结合灾害点数量在各个等级危险区的分布情况(图 4),综合来看评价可靠度较高。根据现场调查结果及四川省广汉地质工程勘察院所撰写的地灾调查与区划报告资料得出,23 处(约占泥石流总量的 79%)泥石流位于评价模型中高危险区,其余 6 处(约占泥石流总量的 21%)处于低、较低危险区。根据现场调查情况分析,图 3 中高危险区往往处于高山峡谷段,地势较陡,而低危险区往往地势平坦,这就验证了改进变异系数方法具有较好的准确度和合理性。

表 4 泥石流评价指标等级划分

Table 4 Debris flow evaluation index classification

指标 分级	岩石易 风化程度	平均 坡度/(°)	起伏 度/m	断层线密度/ (m·km ⁻²)	地震 加速/g	汛期月均 降雨量/mm
1	坚硬的岩浆 岩岩组	3.0 ~ 8.0	11 ~ 113	0 ~ 0.02	0.1	74.0 ~ 86.0
2	坚硬的沉积 岩岩组	8.0 ~ 12.0	113 ~ 213	0.02 ~ 0.04	0.15	86.0 ~ 93.0
3	较坚硬的变 质岩岩组	12.0 ~ 18.0	213 ~ 339	0.04 ~ 0.07	0.2	93.0 ~ 98.0
4	软弱的沉积 岩岩组	18.0 ~ 24.0	339 ~ 482	0.07 ~ 0.11	0.3	98.0 ~ 102.0
5	第四纪松散 堆积层	24.0 ~ 35.0	482 ~ 842	0.11 ~ 0.2	0.4	102.0 ~ 111.0

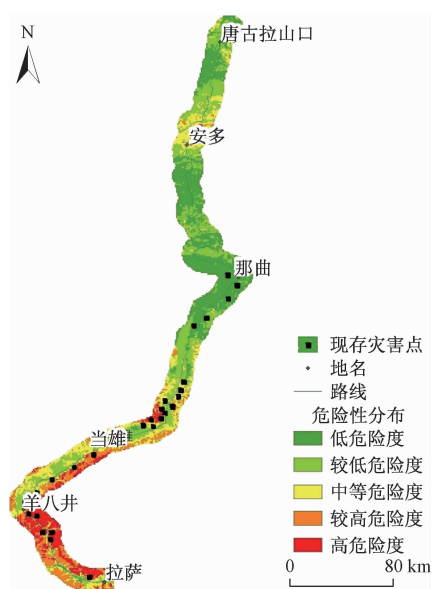


图 3 危险性分布图

Fig. 3 The distribution map of hazards

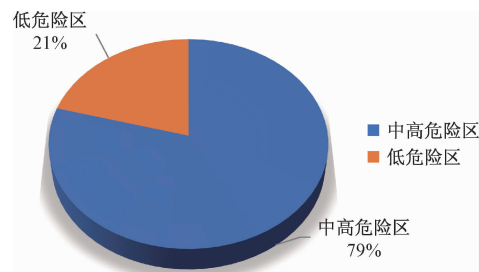


图 4 灾害数量分布图

Fig. 4 The quantity distribution map of disaster

3 结论

本文针对西藏拉萨至那曲地区的国道 G109 附近 10 km 范围内的泥石流危险性评价问题,利用改进变异系数法借助 ArcGIS 的数据统计和加权叠加等功能,构建了高效合理的泥石流危险性评价模型,并进行泥石流危险性分区及评价,所得主要结论包括:

(1)提出了一种改进变异系数法,该方法克服了层次分析法的主观性及客观变异系数法的局限性,并将其应用于泥石流危险性综合评价模型,以此确定的中高危险区与泥石流高发区重合度较大,此方法可靠性较高。

(2)研究区泥石流中高危险区域面积约 2.3×10^3 km² (仅占调查区总面积的 20%),泥石流发生数量占总量的 79%,国道 G109 东侧比西侧危险性更高,拉萨至当雄路段尤其明显;泥石流低危险区约 9.6×10^3 km², 占总调查面积的 80%,但灾害数量仅占 21%。

(3)变异系数法在地质灾害危险度研究中还不是很广泛,利用改进变异系数法,可克服原方法只能计算可量化指标的缺点,具有更广泛的应用空间。

参考文献:

- [1] 陈洪凯,唐红梅,马永泰. 公路泥石流研究及治理 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2004: 1-11. [CHEN H K, TANG H M, MA Y T. Highway debris flow research and treatment [M]. Beijing: China Communications Press, 2004: 1-11. (in Chinese)]
- [2] HOLLINGSWORTH R, KOVACS G S. Soil s lumps and debris flows: prediction and protection [J]. Environmental & Engineering Geoscience, 1981, xviii (1): 17-28.
- [3] MANTOVANI F, SOETERS R, VAN WESTEN C J. Remote sensing techniques for landslide studies and hazard zonation in Europe [J]. Geomorphology,

- 1996, 15(3/4):213-225.
- [4] CHUNG C J F, FABBRI A G. Validation of spatial prediction models for landslide hazard mapping[J]. *Natural Hazards*, 2003, 30(3):451-472.
- [5] YALCIN A. GIS-based landslide susceptibility mapping using analytical hierarchy process and bivariate statistics in Ardesen (Turkey): Comparisons of results and confirmations[J]. *Catena*, 2008, 72(1):1-12.
- [6] PRADHAN B, LEE S. Delineation of landslide hazard areas on Penang Island, Malaysia, by using frequency ratio, logistic regression, and artificial neural network models[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2010, 60(5):1037-1054.
- [7] YANG F G, LIANG Y, SINGH V P, et al. Debris flow hazard assessment using set pair analysis models: Take Beichuan County as an example[J]. *Journal of Mountain Science*, 2014, 11(4):1015-1022.
- [8] 殷坤龙, 朱良峰. 滑坡灾害空间区划及GIS应用研究[J]. *地学前缘*, 2001, 8(2):279-284. [YIN K L, ZHU L F. Landslide hazard zonation and application of gis[J]. *Earth Science Frontiers*, 2001, 8(2):279-284. (in Chinese)]
- [9] 黄润秋, 许强, 沈芳, 等. 基于GIS的地质灾害区域评价与危险性区划系统研究[C]. 第三届海峡两岸山地环境灾害研讨会论文集, 台北, 2001. [HUANG R Q, XU Q, SHEN F, et al. GIS-based research on regional assessment and risk zoning system of geological hazards [C]. *Proceedings of the Third Symposium on Mountainous Environmental Disasters across the Taiwan Straits, Taipei, 2001*. (in Chinese)]
- [10] LIU X L. Gully-specific debris flow hazard assessment in China[J]. *Chinese Geographical Science*, 2003, 13(2):112-118.
- [11] 张春山, 张业成, 马寅生, 等. 区域地质灾害风险评价要素权值计算方法及应用——以黄河上游地区地质灾害风险评价为例[J]. *水文地质工程地质*, 2006, 33(6):84-88. [ZHANG C S, ZHANG Y C, MA Y S, et al. Calculation method and application of the right-weightly value on geological hazards in region [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2006, 33(6):84-88. (in Chinese)]
- [12] 薛东剑, 何政伟, 陶舒, 等. “5.12”震后区域地质灾害危险性评价研究——以青川、平武县为例[J]. *地球科学进展*, 2011, 26(3):311-318. [XUE D J, HE Z W, TAO S, et al. The “5.12” earthquake-after regional hazard assessment of geological disasters—case study in Qingchuan and Pingwu County [J]. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(3):311-318. (in Chinese)]
- [13] REN H G, TAN Z Y. Multiple attribute decision making of slope parameters based on SPA-GRA model [J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2019, 37(6):5341-5348.
- [14] 陈飞飞, 姚磊华, 赵宏亮, 等. 泥石流危险性评价问题的探讨[J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(32):114-123. [CHEN F F, YAO L H, ZHAO H L, et al. Discussion on the risk assessment of debris flow [J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(32):114-123. (in Chinese)]
- [15] 牛全福, 陆铭, 李月锋, 等. 基于灰色关联与粗糙依赖度的甘肃兰州市区泥石流危险性评价[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2019, 30(5):48-56. [NIU Q F, LU M, LI Y F, et al. Hazard assessment of debris flow in Lanzhou City of Gansu Province based on methods of grey relation and rough dependence [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2019, 30(5):48-56. (in Chinese)]
- [16] WU C F, LIN Y P, CHIANG L C, et al. Assessing highway's impacts on landscape patterns and ecosystem services: a case study in Puli Township, Taiwan[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 128:60-71.
- [17] 宁娜, 马金珠, 张鹏, 等. 基于GIS和信息量法的甘肃南部白龙江流域泥石流灾害危险性评价[J]. *资源科学*, 2013, 35(4):892-899. [NING N, MA J Z, ZHANG P, et al. Debris flow hazard assessment for the Bailongjiang river, southern Gansu [J]. *Resources Science*, 2013, 35(4):892-899. (in Chinese)]
- [18] 尹超, 王晓原, 张敬磊, 等. 基于遗传算法和云模型的公路沿线泥石流灾害危险性区划[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(11):2266-2275. [YIN C, WANG X Y, ZHANG J L, et al. Hazard regionalization of debris flow disasters along highways based on genetic algorithm and cloud model [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(11):2266-2275. (in Chinese)]
- [19] 柳源. 中国地质灾害(以崩、滑、流为主)危险性分析与区划[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2003, 14(1):95-99. [LIU Y. Risk analysis and zoning of geological hazards (chiefly landslide, rock fall and debris flow) in China [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2003, 14(1):95-

99. (in Chinese)]
- [20] 张杰坤. 泥石流研究综述[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1994, 5(4):1-8. [ZHANG J K. Summary of debris flow research[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1994, 5(4):1-8. (in Chinese)]
- [21] 周健, 高冰, 张姣, 等. 初始含水量对砂土泥石流启动影响作用分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(5):1042-1048. [ZHOU J, GAO B, ZHANG J, et al. Influence of initial water content on sandy debris flow starting process [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(5):1042-1048. (in Chinese)]
- [22] 马东涛, 石玉成. 试论地震在泥石流形成中的作用[J]. 西北地震学报, 1996, 18(4):38-42. [MA D T, SHI Y C. An approach on effects of earthquakes on formation of debris flow [J]. Northwestern Seismological Journal, 1996, 18(4):38-42. (in Chinese)]
- [23] 张晨, 王清, 陈剑平, 等. 金沙江流域泥石流的组合赋权法危险度评价[J]. 岩土力学, 2011, 32(3):831-836. [ZHANG C, WANG Q, CHEN J P, et al. Evaluation of debris flow risk in Jinsha River based on combined weight process[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(3):831-836. (in Chinese)]
- [24] 蔡鹤生, 周爱国, 唐朝晖. 地质环境质量评价中的专家-层次分析定权法[J]. 地球科学, 1998, 23(3):299-302. [CAI H S, ZHOU A G, TANG Z H. Expert analytic hierarchy weighting process in geological environmental quality assessment[J]. Earth Science, 1998, 23(3):299-302. (in Chinese)]
- [25] 王念秦, 姚勇. 基于模糊数学和权的最小平方方法的泥石流易发性评价方法[J]. 灾害学, 2008, 23(2):5-9. [WANG N Q, YAO Y. Method of debris-flow proneness evaluation based on fuzzy mathematics and least-square method [J]. Journal of Catastrophology, 2008, 23(2):5-9. (in Chinese)]
- [26] 李洪涛, 何宏. 基于权的最小平方方法的沈阳市土地利用现状评价[J]. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(增刊2):115-118. [LI H T, HE H. Evaluation on actual land use of Shenyang based on weighted least square method[J]. China Population, Resources and Environment, 2010, 20(Sup2):115-118. (in Chinese)]
- [27] 周静, 李远富, 何志敏, 等. 基于权的最小平方方法和可拓学的高陡岩质边坡稳定性评价[J]. 路基工程, 2018(4):1-6. [ZHOU J, LI Y F, HE Z M, et al. Stability evaluation of high steep rock slope based on the weighted least-square method and extenics[J]. Subgrade Engineering, 2018(4):1-6. (in Chinese)]
- [28] 廖家伟. “3S”技术在宝兴县泥石流潜在危险性评价中的应用[D]. 成都: 成都理工大学, 2016. [LIAO J W. Application of RS, GIS&GNSS technology in the potential risk assessment of debris flow in Baoxing County [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2016. (in Chinese)]
- [29] 陈思. 基于 DEM 的辽南山地泥石流沟谷的发育特征研究[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2016. [CHEN S. Mud avalanche valleys' developing features in south Liaoning mountainous area based on DEM method [D]. Dalian: Liaoning Normal University, 2016. (in Chinese)]
- [30] 费杜秋, 刘峰贵, 周强, 等. 青藏铁路沿线滑坡泥石流灾害风险分析[J]. 干旱区地理, 2016, 39(2):345-352. [FEI D Q, LIU F G, ZHOU Q, et al. Risk analysis of landslide and debris flow disasters along the Qinghai-Tibet Railway [J]. Arid Land Geography, 2016, 39(2):345-352. (in Chinese)]
- [31] 齐洪亮, 尹超, 田伟平, 等. 基于 ArcGIS 的中国公路地质灾害危险性区划[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2015, 35(5):22-27. [QI H L, YIN C, TIAN W P, et al. Risk regionalization of highway geohazards in China based on ArcGIS [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2015, 35(5):22-27. (in Chinese)]