

DOI: [10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.02.12](https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.02.12)

基于贡献率权重模型的川藏铁路沿线 大型滑坡危险性区划

边江豪^{1,2}, 李秀珍¹, 徐瑞池¹, 王 栋³

(1. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川成都 610041; 2. 北京航天控制仪器
研究所, 北京 100854; 3. 中铁二院工程集团有限责任公司, 四川成都 610031)

摘要: 川藏铁路工程是国家重大基础设施建设项目, 保障铁路的顺利建设和后期安全运营十分重要。铁路沿线发育广泛、危害严重的大型滑坡已成为全线的关键控制性问题, 关乎工程建设的成败。以川藏铁路工程沿线大型滑坡作为主要研究对象, 采用历史数据分析、实地调查、遥感解译的研究方法, 基于 ArcGIS 平台, 采用贡献率权重模型对铁路沿线区域进行了大型滑坡危险性评价, 并利用自然断点法对危险性评价结果进行分区及统计分析。研究结果表明: 川藏铁路沿线共发育大型、特大型滑坡共 147 处, 其中大型滑坡 106 处, 特大型滑坡 41 处, 主要分布于白玉至江达段、昌都至八宿段、朗县至加查段等区段; 铁路沿线处于高中低度三个等级危险区的面积分别为 $35\ 918.5\text{ km}^2$ 、 $95\ 484.3\text{ km}^2$ 和 $12\ 039.7\text{ km}^2$, 高度危险区大型滑坡分布密度为 $0.001\ 99\text{ 处}/\text{km}^2$, 约为中度或低度危险区的 2 倍, 高度危险区主要集中在邦达—八宿段、古乡—拉地段、白玉—江达段。根据贡献率权重模型求得的川藏铁路沿线大型滑坡危险度等级与野外实地调查的大型滑坡分布密度是一致的。相关研究成果可以为川藏铁路工程建设提供科学参考与依据。

关键词: 大型滑坡; 危险性区划; 贡献权重模型; 川藏铁路

中图分类号: P694

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2021)02-0084-10

Hazard zonation of large-scale landslides along Sichuan—Tibet Railway based on contributing weights model

BIAN Jianghao^{1,2}, LI Xiuzhen¹, XU Ruichi¹, WANG Dong³

(1. Chengdu Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610041, China; 2. Beijing Academician Control Device Institute, Beijing 100854, China; 3. China Railway Eryuan Engineering Group Co. Ltd., Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: Sichuan—Tibet Railway is the national important infrastructure construction projects, and ensuring the smooth construction and the safe post operation of the railway is very important. The large-scale landslides with extensive development and serious damage along the railway have become the key control nodes of the railway and even the whole line, which is related to the success of the project construction. This paper takes large landslides along the railway (including giant landslides) as the main research object. Based on the field investigation and remote sensing interpretation of the large-scale landslides, the contributing weights model is used to assess the large-scale landslides hazard along the railway area in the ArcGIS platform and the Natural Breaks method is used to partition and statistically analyze the hazard assessment results. The results show that there are 147 large and extra-large landslides along the Sichuan-Tibet Railway, including 106 large landslides and 41 large landslides,

收稿日期: 2020-04-16; 修订日期: 2020-06-12

基金项目: 国家自然科学面上基金(41772386); 国家重点研发计划项目(YS2018YFGH000001); 中铁二院科学技术研究计划项目(KYY2018010(18-19))

第一作者: 边江豪(1991-), 男, 河南新乡人, 硕士研究生。主要从事山地灾害研究工作。E-mail: 1206186739@qq.com

通讯作者: 李秀珍(1975-), 女, 内蒙古乌盟人, 地质工程专业, 博士, 研究员, 主要从事地质灾害评价及预测研究。

E-mail: lxzljt@imde.ac.cn

mainly distributed in the zone of Baiyu to Jiangda, Changdu to Basu, Lang County to Jiacha. The areas along the railway in the three-level (high, moderate and low) dangerous areas are 35 918.5 km², 95 484.3 km² and 12 039.7 km² respectively, and the distribution density of large-scale landslides in the high hazard area is 0.001 99/km⁻², which is approximately two times of the moderate and the low hazard area. The high hazard area is mainly concentrated in the zone of Bangda to Basu, Guxiang to Layue, and Baiyu to Jiangda. It can be seen that the hazard scale of the large landslide along the Sichuan-Tibet Railway calculated by the contributing weights model is consistent with the landslide distribution density of the field survey. Relevant research results can provide scientific reference and basis for the construction of Sichuan-Tibet Railway project.

Keywords: large-scale landslide; hazard zonation; contributing weights model; Sichuan—Tibet Railway

0 引言

川藏铁路即新建成都至拉萨的铁路,全长约1 832 km,是西藏重要东出通道。川藏铁路经过四川省西北部与西藏自治区东南部,处于欧亚板块的接触带,具有构造运动强烈、新构造运动活跃,地震活动频度高等特征,加之受到青藏高原强烈隆升作用的影响,导致区内的地形起伏大,沟谷地貌发育,山高谷深、地质条件复杂、断裂构造发育,其高陡斜坡、破碎岩土体等地形地貌广泛分布,为滑坡、泥石流、崩塌等山地灾害的形成提供了“有利”的条件。受内外营力的相互作用,沿线区域成为山地灾害最为发育、最为活跃、危害最为严重的地区之一^[1-3]。根据调查统计,川藏铁路沿线共发育山地灾害1 359处,其中崩塌滑坡747处,包含大型(体积 $\geq 100 \times 10^4$ m³)、特大型(体积 $\geq 1 000 \times 10^4$ m³)滑坡147处,占到崩滑总数的接近20%。大型滑坡因其规模巨大,一旦发生,造成的危害和经济损失尤为严重。例如,川藏铁路沿线区域波密县102大型滑坡,体积达 510×10^4 m³,毁坏国道公路近10 km^[4]。川藏铁路沿线发育广泛、危害严重的大型滑坡已成为铁路局部乃至全线的关键控制节点,关乎工程建设的成败。

川藏铁路沿线区域有关滑坡等山地灾害有相关学者进行了研究。例如魏永幸、程谦恭等对线路沿线巨型、高速远程滑坡动力学过程及其演化机理与防治对策进行了研究^[1]。张小刚、梁光模等系统地查明了西藏主要干线公路沿线滑坡的分布、类型、活动特征、影响因素及机理和防治对策^[4-5];李秀珍等^[6],钟卫等^[7],边江豪等^[8]分析了川藏交通廊道康定至林芝段崩滑的空间特征和潜在危害,并归纳总结了可能产生的危害方式;钟卫等^[7]在调查川藏铁路康定—昌都段沿线崩滑灾害基础上,提出了基于崩滑灾害影响的地质灾害选线建议。已有的研究成果为川藏铁路山地灾害的进一步研究奠定了重要基础。但是目前针对川藏铁路工程,有关大型滑坡的研究较少,尤其是大型滑坡的危险度评价

方面。

目前,关于滑坡危险性评价方法有层次分析法、随机森林法、新组合赋权法等多种^[9-11],其中不同的评价方法有不同特点。贡献率权重叠加模型结构简单、物理意义清楚、不受使用区域限制、人为主观因素影响较小^[12]。因此,本研究在对拟建川藏铁路沿线崩塌滑坡灾害进行野外实地调查和遥感解译的基础上,以铁路沿线危害较为严重的大型滑坡(含特大型滑坡)作为主要研究对象,采用贡献率权重叠加方法对铁路沿线区域进行大型滑坡危险性评价,以期为川藏铁路工程的选定线及安全建设和运营提供科学参考和防灾减灾依据。

1 川藏铁路沿线自然地质环境背景

川藏铁路横穿青藏高原东南缘地形急变带、是迄今为止人类历史上最具挑战性的铁路建设工程^[13],其穿越21座4 000 m以上的雪山,横跨14条江河,主要途径具有河谷、侵蚀剥蚀和冰川作用的三大地貌单元,即山前冲积平原区、川西盆地—高原过渡区、青藏高原地貌区^[14]。

铁路沿线岩性复杂,各个时代地层发育齐全,沉积类型繁多,其中三叠系分布最广,以海相或海陆相成因为主。川藏铁路地处印度板块与欧亚板块相互碰撞的汇聚带附近,构造复杂,大小活动断层广布,主要断裂带有:鲜水河断裂、理塘断裂、金沙江断裂、澜沧江断裂、怒江断裂、雅鲁藏布断裂等。沿线经过由多期区域构造运动形成的板块缝合带,以及扬子准地台、松潘—甘孜褶皱带、昌都地块、改则—那曲褶皱带、拉萨地块三大构造单元;同时横跨南北地震带与青藏高原地震区,烈度高,地震活动十分频繁,历史上曾多次发生7级以上地震。

铁路沿线东部为太平洋与印度洋气流影响的海洋性气候,西部为西北环流影响的大陆性气候。地势对气候控制程度十分明显,铁路沿线降水、气温、湿度等气候因素复杂多变,不同海拔高度气候差异极为悬殊。铁

路跨越长江、澜沧江、怒江、雅鲁藏布 4 大水系,途经金沙江、澜沧江、怒江、帕隆藏布、尼洋河、拉萨河 6 大水系干流。

2 川藏铁路沿线大型滑坡灾害概况

自 2015 年以来,课题组历时 3 年,通过对铁路沿线崩塌滑坡灾害的 10 多次野外实地调查,并结合多源多时相遥感影像数据的判译,共查明川藏铁路沿线共发育

有崩滑灾害共计 747 处,崩塌 334 处,滑坡 413 处,其中大型、特大型滑坡共 147 处(图 1)。按照中国地质调查局的滑坡崩塌泥石流灾害详细调查规范将滑坡体积规模以大型($100 \times 10^4 \sim 1000 \times 10^4 \text{ m}^3$)与特大型(大于 $1000 \times 10^4 \text{ m}^3$)来划分,其中大型滑坡 106 处,特大型 41 处。初步统计,大型滑坡的总规模为 $3.98 \times 10^8 \text{ m}^3$,特大型滑坡的总规模为 $14.09 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。实地调查的川藏铁路沿线典型大型滑坡(含特大型滑坡,下同)如图 2 所示。



图 1 川藏铁路沿线大型滑坡分布图

Fig. 1 Distribution map of large landslides along Sichuan—Tibet Railway

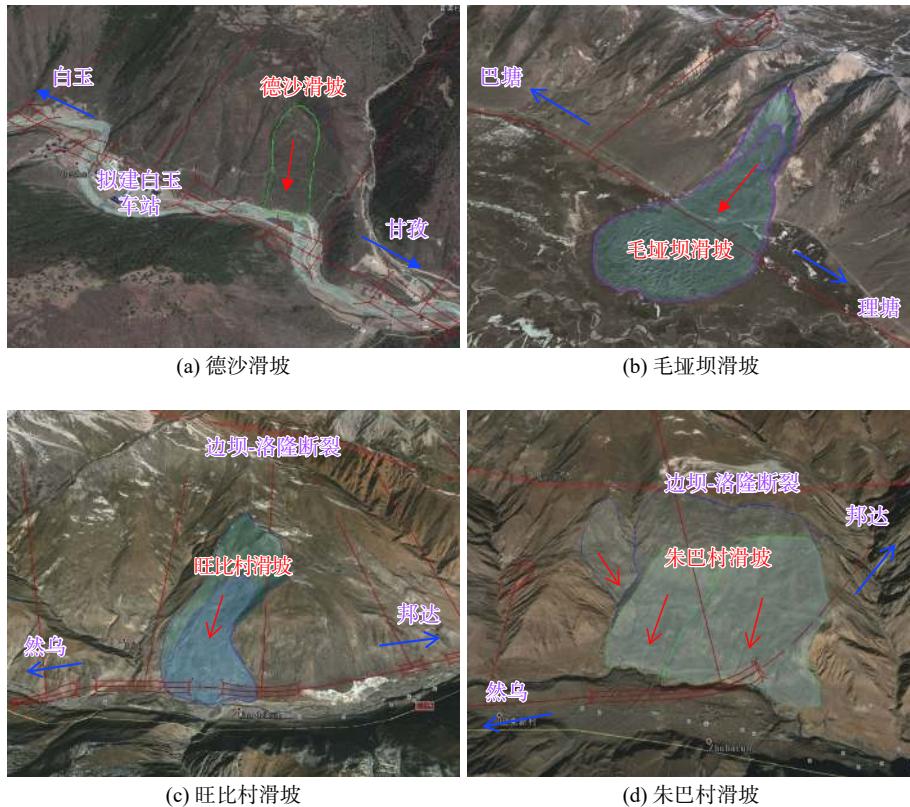


图 2 川藏铁路沿线典型大型滑坡

Fig. 2 Typical landslide of Sichuan—Tibet Railway

川藏铁路全长 1 800 多公里,跨越了多个县/市区。依据铁路火车站区间段划分,大型滑坡主要分布于白玉至江达段、昌都至八宿段、朗县至加查段等区段,其中

昌都至八宿段分布数量最多,为 61 处,其次白玉至江达段、朗县至加查段,数量分别为 44 处和 17 处。灾害分布密度白玉至江达段最大,线密度为 0.53 处/km,朗

县至加查段和昌都到八宿段次之,线密度分别为0.36处/km、0.34处/km(表1)。

川藏铁路横跨了四川与西藏两个省区,8个市/州,30多个县/区。根据行政区域统计大型滑坡分布特征,

可以看出八宿县分布的大型滑坡数量最多,占到大型滑坡总数的42.86%,其次为白玉县,占到大型滑坡总数的23.13%(图3)。

表1 川藏铁路沿线大型(含特大型)滑坡分段数量统计表

Table 1 Statistical table on the number of large landslides along the Sichuan-Tibet Railway

编号	区段	线路长度/km	大型滑坡/处	特大型/处	总数量/处	线密度处/km
1	成都至康定段	239.78	9	0	9	0.040
2	康定至白玉段	423.75	1	1	2	0.005
3	白玉至江达段	83.72	39	5	44	0.530
8	江达至昌都段	119.86	5	0	5	0.040
9	昌都至八宿段	177.58	31	30	61	0.340
10	八宿至波密段	206.39	1	1	2	0.010
11	波密至林芝段	208.81	2	2	4	0.020
12	林芝至朗县段	164.21	2	0	2	0.010
13	朗县至加查段	46.96	16	1	17	0.360
14	加查到拉萨段	211.79	0	1	1	0.005
合计		1 882.85	106	41	147	—

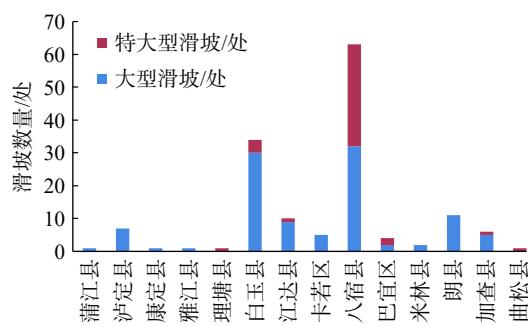


图3 川藏铁路不同县、市大型滑坡分布数量统计图

Fig. 3 Statistics on the number of large landslides in different counties and cities of Sichuan-Tibet Railway

3 基于贡献率权重模型的滑坡危险度区划方法

滑坡危险度区划是将一定区域内滑坡发育的内部条件、诱发滑坡发生的外部条件以及滑坡所造成的影响进行综合统计,定量或半定量地评价区域内滑坡的危害程度^[15],其区划内容主要包括:选择评价指标、建立区域模型、确定危险度划分等级、可靠性检验等^[16]。

在分析背景条件的基础上,本文选用贡献率权重叠加模型对研究区进行滑坡危险度区划。首先统计各本底因子对滑坡发育影响的贡献率值;接着对各本底因子的贡献率进行均值化、归一化处理,并计算各因子的自权重和各因子间的互权重;最后将各因子的贡献率、自权重、互权重相乘叠加得到区域内滑坡危险度分布情况,按照分区标准对危险度进行分区从而得到滑坡危险度区划结果(图4)^[17-22]。其中本底因子是指影响滑坡

形成和孕育的基本环境因素,如坡度、高差、坡向等,不考虑降雨、地震等诱发因素。贡献率是分析滑坡发育本底因子作用程度的一个指标。

具体步骤如下:

(1) 计算本底因子贡献率

滑坡发育本底因子作用程度可通过本底因子贡献率进行量化,根据下式进行计算:

$$U_{0i}(\%) = U_i / \sum U_i \times 100\% \quad (1)$$

式(1)中, U_{0i} 为滑坡本底因子贡献率, U_i 为本底因子的滑坡贡献指数, i 为本底因子($i=1, 2, \dots, 6$)。

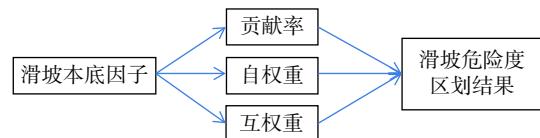


图4 贡献率权重叠加模型的滑坡危险性区划原理简易图

Fig. 4 Simple diagram of landslide hazard zonation based on contributing weights model

(2) 计算本底因子权重

本底因子权重分为自权重与互权重两部分,其中自权重是某一因子内部不同取值范围相互之间的权重,而互权重是各因子相互之间的权重。

将各滑坡本底因子的贡献率按高、中、低3级贡献程度划分后,分别按照下式计算各因子的权值。

$$W_i = U_{0i} / \sum U_{0i} \quad (2)$$

式中: W_i ——本底因子自权重;

U_{0i} ——本底因子贡献率。

互权重是通过自权重来计算，其计算公式如下：

$$W'_i = U_j \left/ \sum U_j \right. \quad (3)$$

式中: W_i —本底因子互权重;

U_i ——各因子综合贡献率($U_i = \sum U_{0i}$);

i —滑坡评价指标($i=1, 2, 3$)。

(3) 危险度区划

用贡献权重叠加法进行危险度区划公式如下：

$$H = \sum_{i=1}^6 W_i W_i' U_i \quad (4)$$

式中: H —危险度;

W_i —自权重;

W' ——互权重;

U ——贡献指数。

4 川藏铁路沿线大型滑坡危险性区划

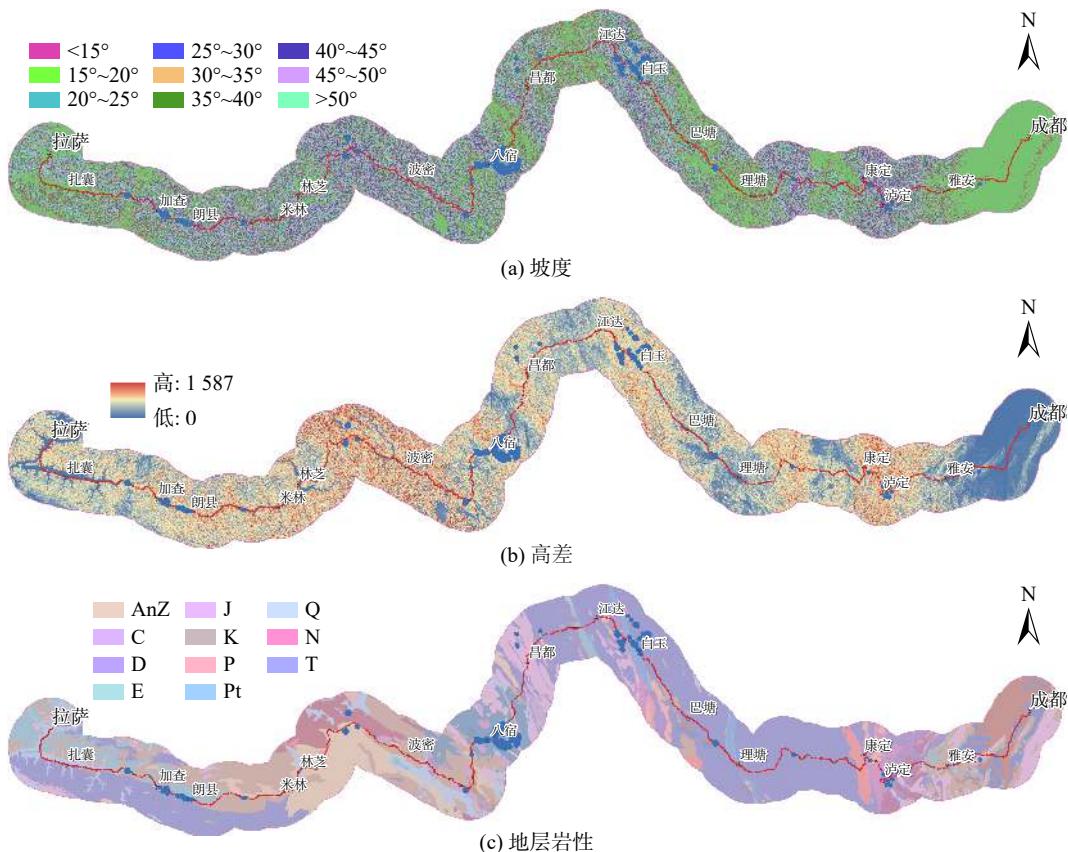
4.1 铁路沿线大型滑坡发育本底因子贡献率

依据已有研究,结合对川藏铁路沿线大型滑坡灾害及其环境背景调查分析,选择与大型滑坡发育密切相关的坡度、地层岩性、高差、坡向、断裂带、河流水系共

6个因子作为危险性评价的本底因子(图5)。

根据贡献率权重模型,以及拟建铁路沿线 147 处大型滑坡灾害点的分布数量、面积、体积三个量化的滑坡评价指标,利用上述公式(1),对川藏铁路沿线一定范围内的坡度、高差、地层岩性、坡向、断裂带、河流水系对滑坡发育的贡献率进行计算。

在具体计算中,用 ArcGIS 对坡度进行处理,每隔 5° 进行级别划分,将坡度分为 9 级,再根据上述分析对坡度因子不同级别的贡献率进行计算,结果见图 6(a);将铁路沿线的高差每 100 m 分 1 级,共分为 12 级,得出高差因子贡献率信息,见图 6(b);利用 1 : 20 万的地质图获得滑坡点的地层岩性,包括前震旦系(AnZ)、元古界(Pt)、泥盆系(D)、石炭系(C)、二叠系(P)、三叠系(T)、侏罗系(J)、白垩系(K)、古近系(E)、新近系(N)、第四系(Q)共 11 种类型,得出地层岩性因子贡献率信息,见图 6(c);将坡向划分为北(N)、东北(EN)、东(E)、东南(ES)、南(S)、西南(WS)、西(W)、西北(WN)共 8 个方向,得出坡向贡献率信息,见图 6(d)。断裂带密度是指单位面积内断裂带的长度,以 0.01 间隔分一级,共分成 9 个等级,得出断裂带贡献率信息,见



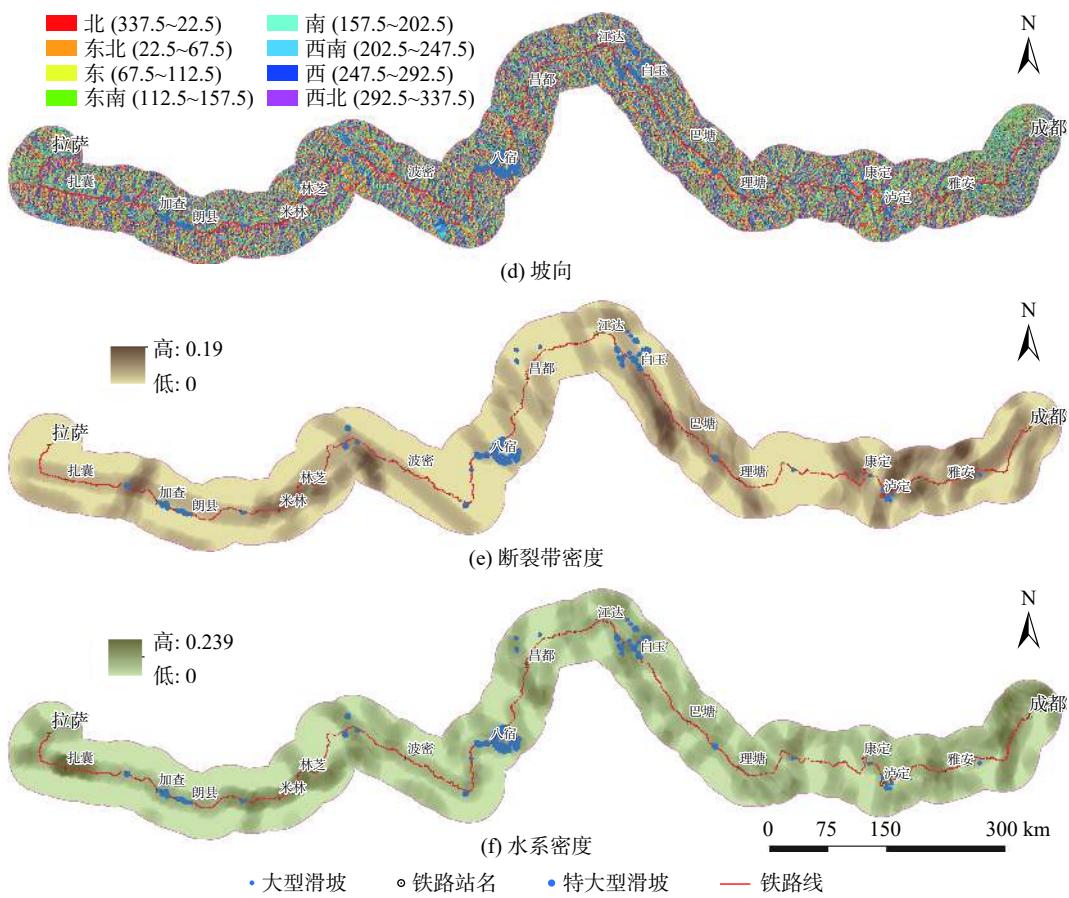


图 5 各本底因子与大型滑坡分布图

图 6(e)。水系密度是指单位面积内河流的长度,用水系密度作为河流水系的分析因子,每 0.01 间隔分一级,分成 9 个等级,得出河流水系贡献率信息,见图 6(f)。

4.2 铁路沿线大型滑坡发育本底因子权重

基于上述各本底因子的贡献率计算结果,利用上述式(2)和式(3)分别计算高差、坡度、坡向、地层岩性、断裂带、河流水系等各本底因子的自权重与互权重,其计算结果见表2。

4.3 铁路沿线大型滑坡危险性区划结果

4.3.1 危险性区划

采用贡献率权重因子叠加模型,根据公式(4)将滑坡本底因子的贡献自权重、互权重、贡献率相乘叠加,以 $90\text{ m}\times 90\text{ m}$ 网格单元为基本评价单元,得到铁路沿线连续空间的滑坡危险度值。然后,再利用ArcGIS中的自然断点法对连续空间的滑坡危险度值进行分区,分为低危险度区、中危险度区、高危险度区3个区。3个区间的取值分别为 $0.0176\sim 0.1001$ 、 $0.1001\sim 0.1825$ 、 $0.1825\sim 0.2649$,最终得到川藏铁路沿线的危险性区划。

图(图 7)

4.3.2 结果分析

川藏铁路沿线研究区总面积为 $143\ 442.6\ km^2$, 根据大型滑坡危险性区划结果(图 8、表 3), 低度危险区的面积为 $35\ 918.5\ km^2$, 中度危险区的面积为 $95\ 484.3\ km^2$, 高度危险区的面积为 $12\ 039.7\ km^2$; 其中中度危险区的面积最多, 占到 66.5%, 其次为低度危险区。高度危险区主要集中在邦达—八宿段、古乡—拉地段、白玉—江达段。

从大型滑坡点分布数量分析,中度危险区分布的大型滑坡数量最多,为91处,占到大型滑坡总数的61.9%,其次是低度危险区,高度危险区滑坡分布的数量最少。

从滑坡分布密度来看,滑坡危险区的等级越高,大型滑坡的分布密度越大。高度危险区滑坡分布密度为0.001 99处/km²,为最高,约为中度危险区或低度危险区的2倍。

由此可见,根据贡献率权重模型计算得出的川藏铁路沿线大型滑坡危险度等级与实际调查的滑坡分布密度结果是一致的。

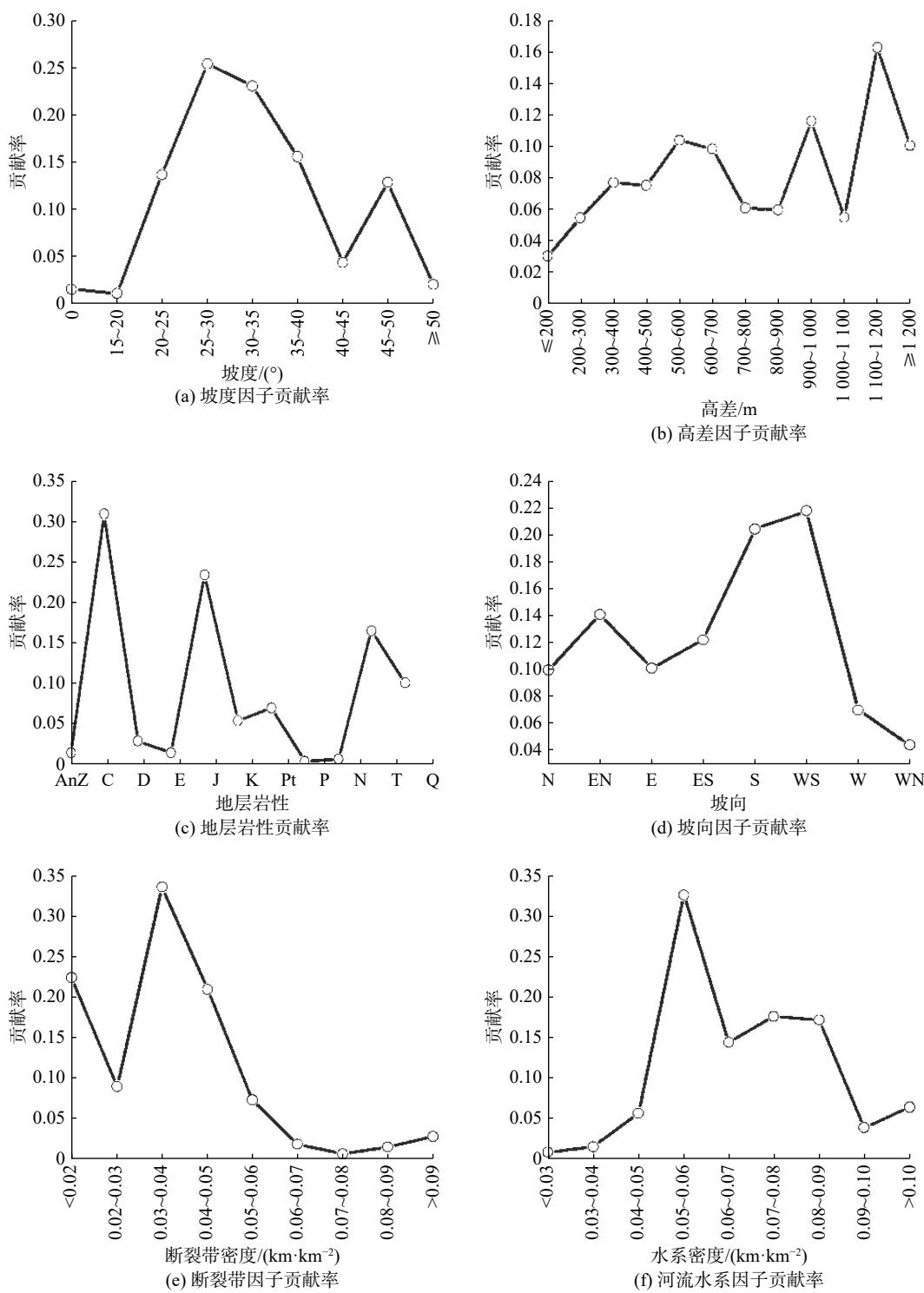


图 6 因子贡献率图

Fig. 6 Factor contribution rate

5 结语

川藏铁路工程是国家重大基础设施建设项目,保障铁路的顺利建设和后期安全运营十分重要。本文以铁路沿线发育广泛、危害严重的大型滑坡(含特大型)作

为主要研究对象,在对大型滑坡灾害进行野外实地调查和遥感解译的基础上,基于 ArcGIS 平台,采用贡献率权重模型对铁路沿线区域进行了大型滑坡危险性评价,并利用自然断点法对危险性评价结果进行分区及统计分析。结果表明:

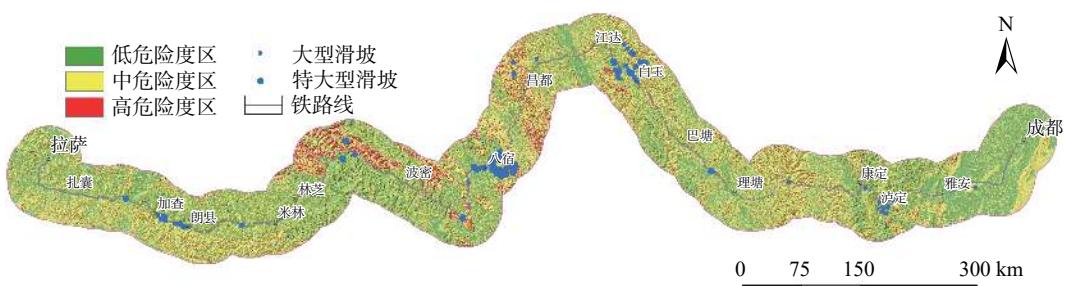


图 7 川藏铁路沿线大型滑坡危险性区划图

Fig. 7 Hazard zoning map of large-scale landslides along the Sichuan-Tibet Railway

表 2 川藏铁路大型滑坡本底因子权重

Table 2 Contributing weights of background factors of large landslides in Sichuan-Tibet Railway

因子	自权重			互权重
	高	中	低	
高差	0.52	0.31	0.17	0.17
坡度	0.60	0.35	0.06	0.15
坡向	0.50	0.31	0.19	0.18
地层岩性	0.57	0.34	0.09	0.17
断裂带	0.57	0.37	0.07	0.17
河流水系	0.62	0.31	0.07	0.16

表 3 不同危险度等级区间大型滑坡分布特征
Table 3 Characteristics of large landslides of different hazard rating

危险度等级区划	总面积/ km ²	面积所占百分比/ %	滑坡点数/ 处	数量所占百分比/ %	滑坡密度/(处·km ⁻²)
低度危险区	35 918.5	25.0	32	21.8	0.000 89
中度危险区	95 484.3	66.5	91	61.9	0.000 95
高度危险区	12 039.7	8.5	24	16.3	0.001 99
总计	143 442.6	100	147	100	—

(1) 拟建川藏铁路沿线共发育大型、特大型滑坡共147处, 其中大型滑坡106处, 特大型滑坡41处, 主要分布于白玉至江达段、昌都至八宿段、朗县至加查段等区段。

(2) 铁路沿线处于高中低三个等级危险区的面积分别为35 918.5, 95 484.3, 12 039.7 km²。滑坡危险区的等级越高, 大型滑坡的分布密度越大。高度危险区大型滑坡分布密度为0.001 99处/km², 约为中度或低度危险区的2倍。高度危险区主要集中在邦达—八宿段、古乡—拉地段和白玉—江达段。

(3) 根据贡献率权重模型计算出川藏铁路沿线大型滑坡危险度等级与野外实地调查的大型滑坡分布密度是一致的。贡献率权重模型用于川藏铁路沿线大型滑坡危险性区划是可行的。相关研究成果可以为川藏铁路工程的选定线、安全建设提供科学参考和防灾减灾

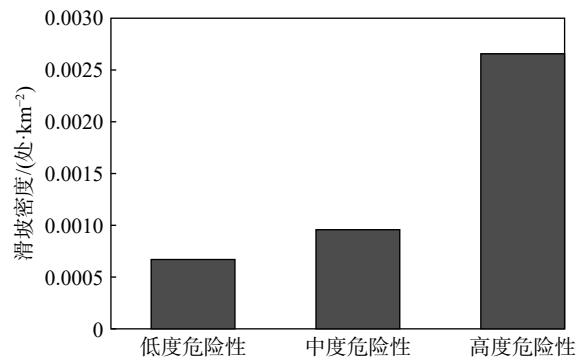


图 8 不同危险度等级内的大型滑坡分布密度

Fig. 8 Distribution density of large landslides of different hazard rating

依据。

下一步研究中, 将在充分考虑川藏铁路沿线影响大型滑坡危险性的不同本底因素的基础上, 进一步考虑引起铁路沿线大型滑坡发生的降雨、地震等诱发因素的影响, 分不同工程地质区段分别建立考虑诱发因素影响下铁路沿线大型滑坡的动态危险性评价及预测模型。

参考文献 (References) :

- [1] 彭建兵, 崔鹏, 庄建琦. 川藏铁路对工程地质提出的挑战 [J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(12): 2377–2389.
[PENG Jianbing, CUI Peng, ZHUANG Jianqi. Challenges to engineering geology of Sichuan-Tibet railway [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(12): 2377–2389. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 李秀珍, 崔云, 张小刚, 等. 川藏铁路全线崩滑灾害类

- 型,特征及其空间分布发育规律 [J]. 工程地质学报, 2019, 27(增刊1): 110–120. [LI Xiuzhen, CUI Yun, ZHANG Xiaogang, et al. Types and characteristics and spatial distribution law of landslides and collapses along Sichuan-tibet Railway [J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(Sup1): 110–120. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 姚令侃, 陈强.“5·12”汶川地震对线路工程抗震技术提出的新课题 [J]. 四川大学学报(工程科学版), 2009, 41(3): 43–50. [YAO Lingkan, CHEN Qiang. New research subjects on earthquake resistant techniques of line engineering extracted from “5·12” Wenchuan earthquake [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2009, 41(3): 43–50. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 张晓刚, 王成华. 川藏公路“102”滑坡群的基本特征 [J]. 山地研究, 1998(2): 151–155. [ZHANG Xiaogang, WANG Chenghua. Analysis on characteristics of ‘102’ landslide group in Sichuan-Tibet road [J]. Mountain Reserch, 1998(2): 151–155. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 梁光模, 张小刚, 吴国雄, 等. 西藏干线公路滑坡研究与防治 [M]. 成都: 四川科学技术出版社, 2007. [LIANG Guangmo, ZHANG Xiaogang, WU Guoxiong, et al. Study and prevention of landslide in Tibet trunk highway [M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 2007. (in Chinese)]
- [6] 李秀珍, 钟卫, 张小刚, 等. 川藏交通廊道滑坡崩塌灾害对道路工程的危害方式分析 [J]. 工程地质学报, 2017, 25(5): 1245–1251. [LI Xiuzhen, ZHONG Wei, ZHANG Xiaogang, et al. Hazard ways of landslides and avalanches on road engineering in Sichuan-Tibet traffic corridor [J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(5): 1245–1251. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 钟卫, 李秀珍, 崔云, 等. 崩塌滑坡灾害对川藏铁路康定—昌都段选线的影响 [J]. 铁道标准设计, 2018, 62(1): 34–38. [ZHONG Wei, LI Xiuzhen, CUI Yun, et al. The influence of landslide and collapse hazards on railway alignment in Kangding-Changdu section of Sichuan-Tibet railway [J]. Railway Standard Design, 2018, 62(1): 34–38. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 边江豪, 李秀珍. 川藏铁路旺北村特大型滑坡特征及对铁路危害分析 [J]. 铁道标准设计, 2018, 62(2): 53–57. [BIAN Jianghao, LI Xiuzhen. Analysis of the characteristics of Wangbei village super large-scale landslide and its harm to Chengdu-Lhasa railway [J]. Railway Standard Design, 2018, 62(2): 53–57. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 许冲, 戴福初, 姚鑫, 等. GIS支持下基于层次分析法的汶川地震区滑坡易发性评价 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增刊2): 3978–3985. [XU Chong, DAI Fuchu, YAO Xin, et al. Gis-based landslide susceptibility assessment using analytical hierarchy process in Wenchuan earthquake region [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(Sup2): 3978–3985. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 刘坚, 李树林, 陈涛. 基于优化随机森林模型的滑坡易发性评价 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(7): 1085–1091. [LIU Jian, LI Shulin, CHEN Tao. Landslide susceptibility assesment based on optimized random forest model [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2018, 43(7): 1085–1091. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 李映红, 陶占盛, 秦喜文, 等. 基于组合赋权法的地质灾害可拓学评价模型研究 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011, 43(11): 141–144. [LI Yinghong, TAO Zhansheng, QIN Xiwen, et al. Comption weight method for determing the index weight in geological disaster risk extenics evaluation [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2011, 43(11): 141–144. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 乔建平, 王萌. 贡献权重叠加法的滑坡危险度区划研究 [J]. 自然灾害学报, 2011, 20(2): 8–13. [QIAO Jianping, WANG Meng. Study on landslide hazard zonation using contributing weight overlay method [J]. Journal of Natural Disasters, 2011, 20(2): 8–13. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 张广泽, 蒋良文, 宋章, 等. 横断山区川藏线山地灾害和地质选线原则研究 [J]. 铁道工程学报, 2016, 33(2): 21–24. [ZHANG Guangze, JIANG Liangwen, SONG Zhang, et al. Research on the mountain disaster and geological alignment fundamental of Sichuan-Tibet railway running through N-S mountain area [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016, 33(2): 21–24. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 王立朝, 温铭生, 冯振, 等. 中国西藏金沙江白格滑坡灾害研究 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(1): 1–9. [WANG Lichao, WEN Mingsheng, FENG Zhen, et al. Researches on the baige landslide at Jinshajiang river, Tibet, China [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(1): 1–9. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 姚令侃, 邱燕玲, 魏永幸. 青藏高原东缘进藏高等级道路面临的挑战 [J]. 西南交通大学学报, 2012, 47(5): 719–734. [YAO Lingkan, QIU Yanling, WEI Yongxing. Challenges in construction of railway and highway from Sichuan to Tibet through eastern margin of Tibetan Plateau [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2012, 47(5): 719–734. (in Chinese with English abstract)]
- [16] FAUSTO GUZZETTI. Landslide fatalities and evaluation of landslide risk in Italy [J]. Engineering Geology, 2000, 58: 89–107.
- [17] 乔建平, 石莉莉. 滑坡危险度区划方法及其应用 [J].

- 地质通报, 2009, 28(8): 1031–1038. [QIAO Jianping, SHI Lili. Landslide fatalness zoning method and its application [J]. Geological Bulletin of China, 2009, 28(8): 1031–1038. (in Chinese with English abstract)]
- [18] QIAO J P, ZHU A X, WU C Y, et al. Botton factors applied to zoning study of the risk level of landslides in the Three Gorges Reservoir Area [J]. Wuhan University Journal of Natural Sciences, 2006, 11(4): 761–766.
- [19] 陈国辉, 吴森, 潘国耀. 基于贡献率模型的管道河(沟)道水毁灾害危险性评价指标体系 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(4): 123–128. [CHEN Guohui, WU Sen, PAN Guoyao. Assessment index system of washout hazard of pipeline across-river based on contribution model [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(4): 123–128. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 刘佳, 赵海军, 马凤山, 等. 基于改进变异系数法的G109拉萨—那曲段泥石流危险性评价 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(4): 63–70. [LIU Jia, ZHAO Haijun, MA Fengshan, et al. Risk assessment of G109 Lhasa-Naqu debris flow based on improved coefficient of variation [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(4): 63–70. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 付平, 张新辉, 刘元坤, 等. 滇中香炉山引水隧洞工程区地应力场特征及断裂影响模糊综合评价 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(5): 123–132. [FU Ping, ZHANG Xinhui, LIU Yuankun, et al. Characteristics of in-situ stress field and fuzzy comprehensive evaluation of the influence of active faults on the water diversion engineering of Xianglushan Tunnel Area in central Yunnan [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(5): 123–132. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 乔建平. 滑坡风险区划理论与实践 [M]. 成都: 四川大学出版社, 2010. [QIAO Jianping. Theory and Practice of Landslide Risk Zoning [M]. Chengdu: Sichuan University Press, 2010. (in Chinese)]