

林芝市公路地质灾害易发性区划及气象预报模型

陶星宇¹, 柳锦宝¹, 黄志刚², 巴桑³, 卓玛⁴, 陈军¹, 肖斌¹, 高瑜莲⁵, 费晓燕⁶

(1.成都信息工程大学 资源环境学院, 四川 成都 610225; 2.福建省气象服务中心,

福建 福州 350001; 3.西藏高原大气环境科学研究所, 西藏 拉萨 850000; 4.西藏自治区气候中心,

西藏 拉萨 850000; 5.北京师范大学 地理学部, 北京 100875; 6.四川公众项目咨询管理有限公司, 四川 成都 610051)

摘要: [目的] 对西藏自治区林芝市公路地质灾害易发性区划及气象预报模型进行研究, 为实施该市境内公路沿线地质灾害气象预报提供理论依据。[方法] 首先, 选取了林芝市公路沿线 15 km 缓冲区内的断层密度、土壤类型、坡度、沟谷密度、年降水量、土地利用、裸岩率和距河流的距离 8 个地质灾害易发性区划因子, 通过信息量及逻辑回归方法确定各区划因子的系数, 得到了地质灾害易发性区划模型; 再进一步依据地质灾害发生当日、前 1 日、前 2 日和前 3 日的日降水数据, 使用逻辑回归方法建立了地质灾害气象预报模型。[结果] 林芝市公路沿线 15 km 缓冲区内的大部分地区地质灾害易发性概率小于 0.4, 且离道路越近, 地质灾害易发性概率越大。将该预报模型用于历史地质灾害点数据进行检验, 发现该模型的预报准确率为 85.71%, 漏报率为 14.29%。[结论] 受地形地貌、降水资料等影响, 该模型预报结果可能与实际情况存在一定的偏差, 但能反映基本趋势。

关键词: 公路; 地质灾害; 易发性区划; 逻辑回归方法; 气象预报模型

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2022)02-0195-08

中图分类号: X43, P642.22

文献参数: 陶星宇, 柳锦宝, 黄志刚, 等. 林芝市公路地质灾害易发性区划及气象预报模型[J]. 水土保持通报, 2022, 42(2): 195-202. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.02.027; Tao Xingyu, Liu Jinbao, Huang Zhigang, et al. Zoning of highway geological hazard susceptibility and meteorological forecast model in Linzhi City [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(2): 195-202.

Zoning of Highway Geological Hazard Susceptibility and Meteorological Forecast Model in Linzhi City

Tao Xingyu¹, Liu Jinbao¹, Huang Zhigang², Ba Sang³,

Zhuo Ma⁴, Chen Jun¹, Xiao Bin¹, Gao Yulian⁵, Fei Xiaoyan⁶

(1.School of Resources and Environment, Chengdu University of Information Technology,

Chengdu, Sichuan 610225, China; 2.Fujian Meteorological Service Center, Fuzhou, Fujian

350001, China; 3.Tibet Plateau Atmospheric Environment Science Institute, Lasa, Tibet 850000, China;

4.Tibet Autonomous Region Climate Center, Lasa, Tibet 850000, China; 5.Faculty of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 6.Sichuan Public Project Consulting Management Co. Ltd., Chengdu, Sichuan 610051, China)

Abstract: [Objective] The susceptibility zoning and meteorological forecast model of highway geological hazards were studied in order to provide a theoretical basis for implementing the meteorological forecast of geological hazards along the highways in Linzhi City, Tebit Autonomous Region. [Methods] Firstly, eight zoning factors, including fault density, soil type, slope, valley density, annual precipitation, land use, bare rock ratio and distance from rivers, were selected in the 15 km buffer zone along the highway in Linzhi City. The coefficients of each zoning factor were determined by the information and logistic regression method, and the zoning model of geological hazard susceptibility was obtained. Secondly, based on the daily precipitation data of the rainfall occurrence day, the first day, the second and the third day before the landslide hazards, a meteorological forecast model of geological hazards was established by using logistic regression method.

收稿日期: 2021-10-08

修回日期: 2021-11-09

资助项目: 中国气象科技研究院科技合作项目“川藏铁路工程区域气候预测技术系统研发”(2019ZQKK0105); 国家自然科学基金项目(42065008); 四川省科技厅重点研发项目(2021YFS0328); 四川省科技厅重点研发项目(2020YFG0146); 四川省教育厅人文社科重点研究基地科研项目(ZHYJ21-YB03); 西藏自治区科学技术协会项目; 中国气象局创新发展专项(CXFZ2021J055)

第一作者: 陶星宇(1997—), 女(汉族), 四川省宜宾市人, 硕士研究生, 研究方向为生态环境遥感监测与 GIS 应用。Email: 616584600@qq.com。

通讯作者: 柳锦宝(1979—), 男(汉族), 湖北省黄梅县人, 博士, 副教授, 主要从事生态环境遥感监测与 GIS 应用方面的研究。Email: lj@cuit.edu.cn。

[Results] The susceptibility of most areas in the 15 km buffer zone along the highway in Linzhi City was less than 0.4, and the closer to the road, the greater probability of geological hazard susceptibility. The accuracy rate of the model was 85.71%, and the failure rate was 14.29%. [Conclusion] Affected by topography, geomorphology and precipitation data, the prediction results of the established model may deviate from the actual situation, but it can reflect the basic trend.

Keywords: highway; geological hazards; susceptibility zoning; logistic regression method; weather forecast model

林芝市境内主要公路大多分布于河流两侧的阶地上,使得因强降水引起的地质灾害的威胁以冲毁公路为主,其中,降水诱发的滑坡、崩塌、泥石流是林芝市地质灾害中威胁、损失最大的灾种^[1]。截止到2019年,通过市县地质灾害调查与区划查明的地质灾害点约152处,隐患点约1213处,而由降水诱发的地质灾害占全市各类地质灾害总数的80%,几乎每年都会发生几十次不同程度、不同规模的地质灾害,造成重大损失。近年来,地质灾害的发生愈加频繁,造成的经济损失越来越重,2016年10月11日,林芝市贡茶场白龙沟发生大型泥石流地质灾害,造成直接经济损失2154.59万元;2018年10月17日,雅鲁藏布江林芝市米林县加拉村段发生滑坡地质灾害,造成直接经济损失118158.94万元。在汛期,林芝市大部分地质条件比较复杂的路段往往会发生滑坡、崩塌、泥石流等严重的地质灾害,对沿线交通设施、群众的生命安全构成严重的威胁。因此,加强林芝市公路沿线地质灾害防治及气象预报工作具有重要意义。

预报模型是成功开展地质灾害气象预报的基础,近年来,地质灾害气象预报模型的研究得到了国内外学者及政府的高度重视^[2-7],刘传正等^[8]针对三峡库区建立了降水判据模型,提出了地质灾害预报与防治措施,给地质灾害预报研究提供了新方向;Keiko^[9]基于多元线性回归法对诱发地质灾害的降水量因子进行了分析^[9],这种只考虑降水量而未考虑到地质灾害背景条件的阈值模型,结果差异很大,实际应用受到限制^[10-14]。因此,对地质背景与降水量相结合的预报模型开始了研究,在多因子模型的基础上,浙江、贵州、江苏、广东、四川、广西、甘肃等省开始构建了地质灾害气象预报系统^[15-21];费晓燕、陈宫燕等^[22-23]结合降水资料和地质环境特征,基于逻辑回归方法分别对四川省和林芝市进行地质灾害气象预报研究。而现在在国内大多研究的是大范围地质灾害气象预报,小范围预报和服务对象等方面考虑较少^[24-25],对于构建小范围公路地质灾害气象预报模型方面的研究更是少之又少。目前,陈洪凯等^[26]选取了暴雨、温度、植被覆盖率、灾害体、年均降水量、岩性条件、路基位置、地震烈度、地貌类型、地质构造等10个因子,针对川藏公路提出了地质灾害危险性区划模型;孟兆兴等^[27]基

于信息量法、逻辑回归模型及空间逻辑回归模型对川藏公路进行了易发性评价。目前,对于公路沿线地质灾害的研究主要集中在易发性评价方面,未结合降水量因子进行分析,无法进行地质灾害预报服务。因此,本研究则在地质灾害易发性评价的基础上,进一步进行地质灾害气象预报模型研究。本研究通过建立林芝市公路沿线15 km缓冲区,对林芝市公路沿线地质灾害易发性区划和降水诱发地质灾害关系进行研究,构建林芝市公路沿线地质灾害气象预报模型,为实施林芝市境内公路地质灾害气象预报提供了依据。

1 研究区概况

本研究以林芝市公路沿线15 km缓冲区为研究区,林芝市位于西藏自治区的东南部喜马拉雅山脉中段,南靠冈底斯山脉,北傍念青唐古拉山,地处雅鲁藏布江中下游,属高山峡谷区,山高谷深,土质基本为沙壤结构,森林覆盖率为46%,是中国第三大林区。研究区内主要为山地地貌与河谷、山间盆地侵蚀堆积地貌区,地形完整性差,地形起伏大,平均海拔3000 m,最低点海拔155 m,是陆地垂直地貌落差最大的地区。同时,该区域是强烈的构造隆起区与不同的地质构造区的交汇地带^[28],该研究区属于藏东南地区强烈的挤压带,包括喜马拉雅板片、雅鲁藏布江缝合带、冈底斯—念青唐古拉板块、班公错—怒江缝合带、羌塘—三江复合板块、金沙江缝合带^[29-30]。研究区内均发育有各个时代的地层,岩石类型分布复杂,主要有泥盆系、三叠系的板岩、片岩、片麻岩、大理岩以及侏罗纪的泥岩等^[31]。受印度洋暖流与北方寒流的影响,形成了热带、亚热带、温带和寒带并存的复杂气候带,年降水量达到650 mm左右,降水多且集中。对研究区内2010—2019年日降水量数据进行年均月降水量统计分析,由于2015年气象站点数据较少,不具备典型性,则将其剔除,剔除后发现5—9月(主汛期)的年均月降水量较大,其中,7月最大,年均月降水量达到了4055 mm。因此,在地形地貌、地质构造、地层岩性和降水等因素的共同作用下使得林芝市成为西藏自治区地质灾害最严重的地区,其中,2010—2019年研究区灾害点及隐患点分布如图1所示。

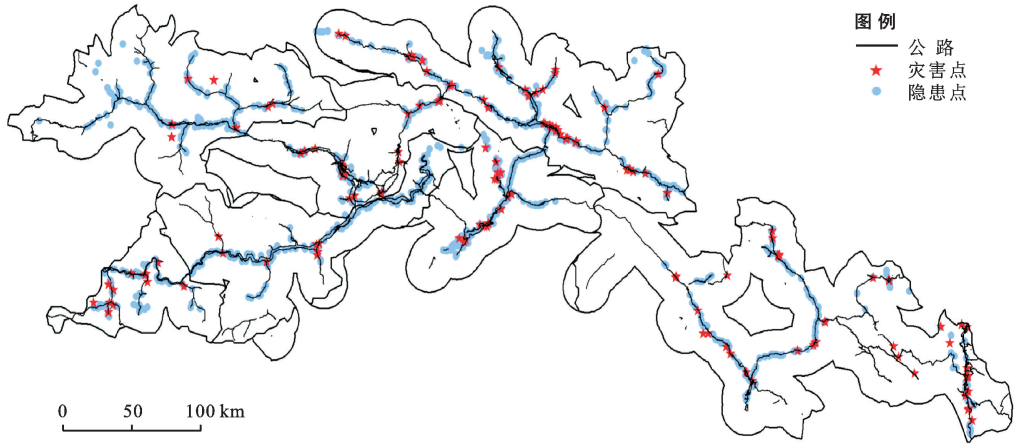


图 1 林芝市公路沿线灾害点及隐患点分布

2 研究数据及方法

2.1 数据来源

本研究中使用的数据主要包括 Landsat 8 影像、DEM 数据、土地利用、土壤、降水量、河流、道路、断层、地质灾害点及隐患点等数据。其中,Landsat 8 影像源于美国地质勘探局官网 USGS(<https://earthexplorer.usgs.gov/>); DEM 数据源于 NASA 官网(<https://www.nasa.gov/>) SRTM1 30 m 数字高程数据;土地利用数据源于 NASA 官网 2018 年 MOD12Q1 产品数据;土壤类型数据源于《1:100 万中华人民共和国土壤图》;河流、道路数据源于 Open Street Map 官网(<https://www.openstreetmap.org/>);断层数据源于全国地质信息资料网(<http://www.drc.cgs.gov.cn>)全国 1:250 万地质数据;降水量、地质灾害点及隐患点数据由林芝市气象局及自然资源局提供,时间段为 2010—2019 年;坡度、沟谷密度数据是基于 DEM 数据在 ArcGIS 软件中提取得到;裸岩率数据是基于 Landsat8 影像提取得到,时间为 2019 年 11 月 29 日。

2.2 研究方法

(1) 逻辑回归方法。逻辑回归方法在解决地质灾害问题中,具有计算方法简单、能自动筛选影响因素等优点。可将对地质灾害发生产生影响的区划因子作为自变量,将地质灾害是否发生作为因变量(1 代表发生,0 代表未发生)^[32]。考虑到各因子为非连续变量,本研究使用二元逻辑回归方法进行分析^[33],计算公式为:

$$\ln \frac{p}{1-p} = A + B_1 \cdot X_1 + B_2 \cdot X_2 + \dots + B_n \cdot X_n \quad (1)$$

式中: P 为地质灾害发生的概率值; $(1-P)$ 为未发生地质灾害的概率值; X_1, X_2, \dots, X_n 为区划因子; B_1, B_2, \dots, B_n 为各区划因子对应的逻辑回归系数。

(2) 单因子信息量方法。由于各区划因子有不同标准的数据类型和数据量级,不能直接对其进行分析。所以,在使用逻辑回归方法之前需要将各区划因子进行异质数据同化。信息量法在本质上是一种数据驱动的定量统计方法,2001 年信息量法被用于地质灾害易发性分级中。信息量法的主要思路为:根据历史灾害点,对各区划因子进行分级,将各区划因子的真实值转化为反映该研究区区划因子等级的信息量值,再根据信息量值来评判各区划因子与地质灾害的相关性。本研究即采用信息量法用于逻辑回归模型的异质数据同化。

对于单一评价因素的信息量 i , 计算公式为:

$$i = \log_2 \frac{N_i/N}{S_i/S} \quad (2)$$

式中: S 为研究区内评价单元的总面积; N 为评价单元内发生地质灾害的总数量; S_i 为评价单元内特定类别的面积; N_i 为分布在评价单元内特定类别的地质灾害的数量。

3 地质灾害易发性区划研究

3.1 地质灾害易发性区划因子选取

通过前期对林芝市公路沿线 15 km 缓冲区内的地形地貌、地质环境和生态环境的研究,发现其与地质灾害的分布紧密相关,同时,在中外地质灾害易发性区划模型的研究中,多数使用了坡度、断层、降水量等因子作为区划因子。因此,本研究最终选定 8 个区划因子作为地质灾害易发性区划模型的评价指标,包括断层密度、土地利用类型、土壤类型、坡度、沟谷密度、年均降水量、裸岩率和距河流的距离。再根据文献调研、实际经验和地质灾害点及隐患点分布规律对 8 个区划因子进行重分类(图 2)。

3.1.1 地形地貌指标

(1) 坡度。坡度与气象水文条件、地表状况等因

素紧密相关,是评价地质灾害的重要因素之一。一般情况下,坡度较大的地方会为地质灾害的发生提供大量物质来源。但坡度增大到一定程度后,发生地质灾害的概率将不会增大。本研究将坡度划分为 $0^{\circ}\sim 10^{\circ}$, $10^{\circ}\sim 20^{\circ}$, $20^{\circ}\sim 30^{\circ}$, $30^{\circ}\sim 40^{\circ}$, $>40^{\circ}$ 共 5 级。

(2) 沟谷密度。沟谷密度是气候、地形地貌、地层岩性、植被等因素综合影响的反映,沟谷密度与地面破碎程度成正比,地面越破碎,地表物质的稳定性越

低,地质灾害的发生概率越高。本研究基于自然断点法将沟谷密度分为 $0\sim 0.12$, $0.12\sim 0.22$, $0.22\sim 0.32$, $>0.32\text{ km/km}^2$ 共 4 级。

(3) 裸岩率。裸岩率是划分石漠化等级的重要参数,有些位居山地陡坡、土层较薄地带极易发展为裸露或裸岩地,从而引发地质灾害。本研究依据相等间隔法将裸岩率分为 <0.0 , $0.0\sim 0.2$, $0.2\sim 0.4$, $0.4\sim 0.6$, $0.6\sim 0.8$, $0.8\sim 1.0$ 。

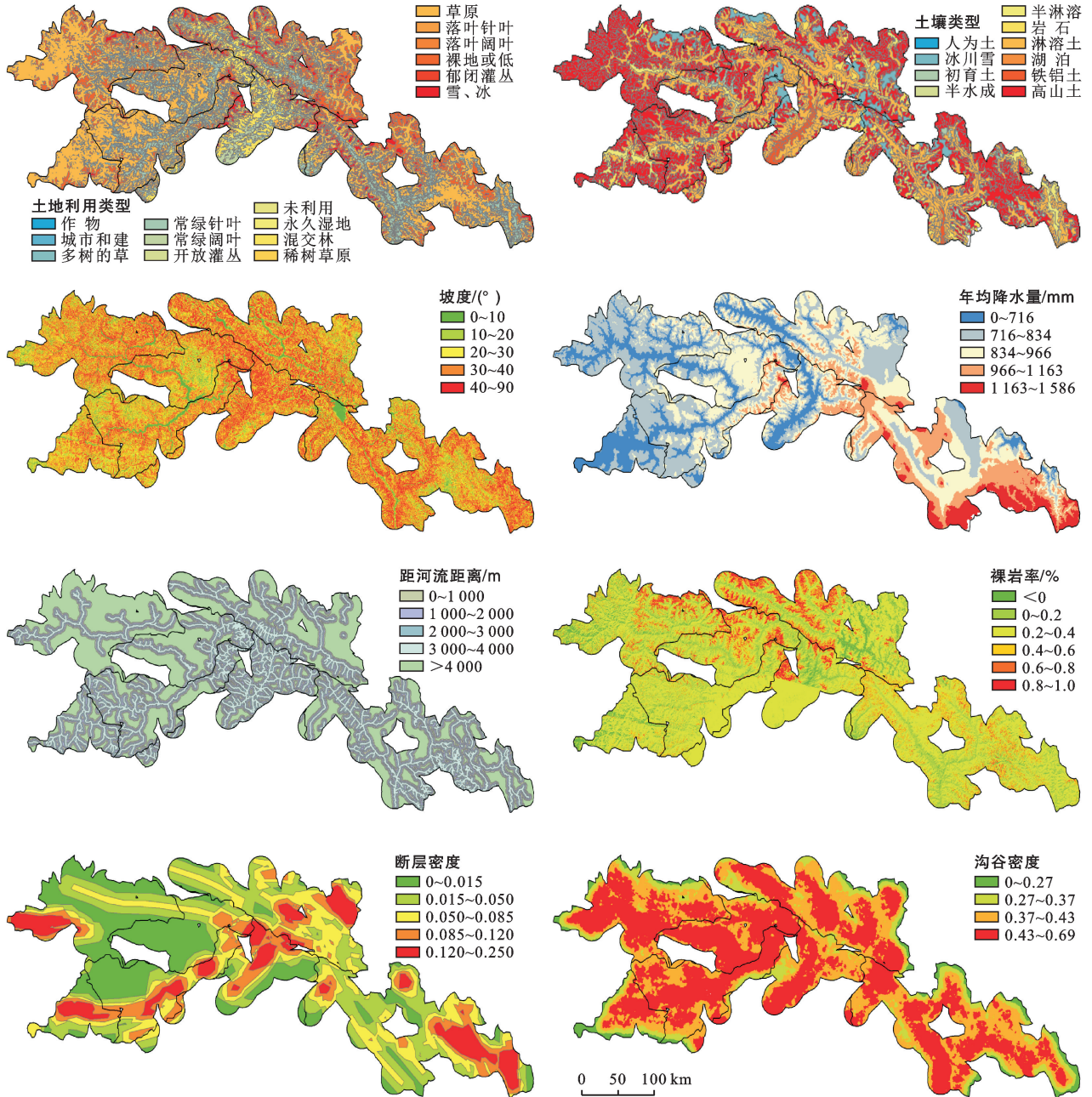


图 2 林芝市公路沿线各区划因子分布

3.1.2 地质环境指标

(1) 断层密度。断层是影响地质灾害发生的重要因素之一,总体上距离断层越远,地质灾害点的分布密度越小,地质灾害的强发育区是在断层两侧的

10 km 范围内^[34]。一般采用距断层的距离或断层密度来判断断层对地质灾害的影响程度。本研究选用断层密度作为评价指标,基于自然断点法将其分为 $0\sim 0.015$, $0.015\sim 0.05$, $0.05\sim 0.085$, $0.085\sim 0.12$,

$>0.12 \text{ km/km}^2$ 共 5 级。

(2) 距河流的距离。河流作为水文地质因素,其对地质岩层的影响十分显著,由此引发的地质灾害较为常见。水流反复流经会引起岩层塌陷,从而增加地质灾害的发生概率。本研究根据研究区实际情况,基于 ArcGIS 多环缓冲区工具将距河流的距离分为 $0\sim 1\ 000$, $1\ 000\sim 2\ 000$, $2\ 000\sim 3\ 000$, $3\ 000\sim 4\ 000$, $>4\ 000 \text{ m}$ 共 5 级。

3.1.3 生态环境指标

(1) 土地利用类型。土地利用类型可体现地表植被覆盖的状况和人类工程活动的强度。其中,植被覆盖状况与地质灾害发生密切相关,同时,人类工程活动(道路、房屋)也加剧了地质灾害的发生。本研究基于 MOD12Q1 土地利用产品数据的类型说明表进行分类。

(2) 土壤类型。不同土壤的特性会对地质灾害造成不同程度的影响,如土壤保水性能、渗水速率和含沙量等都会影响地质灾害的发生。本研究基于 $1:100$ 万中国土壤数据库中的土类进行分类。

(3) 年均降水量。降水条件对地质灾害的发生非常重要,降水下渗、洪水掏蚀河岸、水位变化等都会诱发地质灾害,根据前期对林芝市公路沿线降水特征分析,绝大多数地质灾害是由强降水诱发的。本研究基于自然断点法将年均降水量分为 $462\sim 716$, $716\sim 834$, $834\sim 966$, $966\sim 1\ 163$, $>1\ 163 \text{ mm}$ 共 5 级。

为了避免各区划因子数据类型和数据量级的不同而对结果产生影响,本研究基于单因子信息量方法对重分类后的 8 个指标进行异质数据同化,计算结果见表 1。因子信息量值越大,表明地质灾害易发性概率越大。

表 1 单因子信息量计算结果

因子	分类	信息量 i	因子	分类	信息量 i
断层密度/ ($\text{km} \cdot \text{km}^{-2}$)	$0\sim 0.015$	-1.53	年平均 降水量/ mm	$462\sim 716$	1.91
	$0.015\sim 0.05$	-0.28		$716\sim 834$	-0.43
	$0.05\sim 0.085$	0.66		$834\sim 966$	-1.85
	$0.085\sim 0.12$	-0.14		$966\sim 1\ 163$	-3.76
	$0.12\sim 0.235\ 3$	1.49		$1\ 163\sim 1\ 586$	0.00
距河流的距离/m	$0\sim 1\ 000$	2.51	土地利用	常绿针叶林	-0.40
	$1\ 000\sim 2\ 000$	-0.12		常绿阔叶林	-0.84
	$2\ 000\sim 3\ 000$	-2.40		落叶针叶林	0.00
	$3\ 000\sim 4\ 000$	-3.09		落叶阔叶林	0.58
	$>4\ 000$	-4.45		混交林	-0.06
土壤类型	半淋溶	3.78		郁闭灌丛	0.00
	半水成	4.91		开放灌丛	0.00
	冰川雪	0.00		多树草原	0.49
	初育土	-0.91		稀树草原	1.22
	高山土	-1.51		草原	0.46
	湖泊	3.11	永久湿地	3.76	
	淋溶土	-0.11	作物	0.00	
	人为土	0.00	城市和建成区	0.00	
	铁铝土	0.04	作物和自然植被镶嵌体	0.00	
	岩石	0.00	雪、冰	0.00	
坡度/($^{\circ}$)	$0\sim 10$	1.80	裸地或低植被覆盖地	-4.46	
	$10\sim 20$	-0.40	未利用	0.00	
	$20\sim 30$	-0.54	裸岩率	<0	-0.13
	$30\sim 40$	-0.12		$0\sim 0.2$	0.35
	$40\sim 90$	-0.43		$0.2\sim 0.4$	0.13
沟谷密度/ ($\text{km} \cdot \text{km}^{-2}$)	$0\sim 0.12$	-2.69		$0.4\sim 0.6$	-4.65
	$0.12\sim 0.22$	-1.34		$0.6\sim 0.8$	-2.98
	$0.22\sim 0.32$	0.54	$0.8\sim 1$	-3.55	
	$0.32\sim 0.42$	1.55			

3.2 地质灾害易发性区划模型建立

本研究基于逻辑回归方法建立地质灾害易发性

区划模型,以 1 213 个有效隐患点作为建模数据,152 个有效灾害点作为模型验证数据(图 1)。同时,为了

使得二元逻辑回归分析更具有科学性,本研究基于张锡涛、常鸣等人^[35-36]的研究,在以隐患点为中心的 3 km 缓冲区外随机选取对应数量的无灾害发生样本点。使用 ArcGIS 软件提取隐患点样本和无灾害发生样本的区划因子信息量值。将地质灾害是否发生作为因变量,断层密度、土地利用、土壤类型、坡度、沟谷密度、年降水量、裸岩率和距河流的距离信息量值作为自变量,在 SPSS 软件中构建二元逻辑回归模型。为了减少无灾害发生样本数据对模型产生的影

响,多次进行无灾害发生样本的选取并循环建模,最优结果的 Nagelkerke 方差可达到 0.769, Cox & Snell R 方差可达到 0.577。表 2 为区划因子逻辑回归结果,其中, B 为系数, $S.E$ 为标准差, Wald 统计量越大表示该因子的重要性越强,从表 2 可以看出,各区划因子重要性依次为:河流、坡度、土壤类型、断层密度、年降水量、土地利用、沟谷密度、裸岩率, 8 个区划因子的显著性均小于 0.05,显著性较高,具有统计学意义。

表 2 研究区区划因子逻辑回归方程

区域因子	系数 B	标准差 $S.E$	Wald	自由度	显著性	Exp(B)
断层密度	0.742	0.096	60.301	1	0.000	2.100
土地利用	0.427	0.087	24.309	1	0.000	1.532
土壤类型	0.407	0.046	76.972	1	0.000	1.503
坡度	0.871	0.074	138.311	1	0.000	2.389
距河流的距离	0.609	0.030	409.397	1	0.002	1.839
沟谷密度	0.275	0.088	9.847	1	0.000	1.316
年降水量	0.251	0.042	36.459	1	0.031	1.285
裸岩率	0.279	0.129	4.655	1	0.000	1.322

将表 2 中各因子系数代入公式中计算地质灾害易发性概率值,计算公式为:

$$H = \frac{\text{EXP}(0.742X_1 + 0.407X_2 + 0.871X_3 + 0.275X_4 + 0.251X_5 + 0.427X_6 + 0.279X_7 + 0.609X_8 - 1.25)}{1 + \text{EXP}(0.742X_1 + 0.407X_2 + 0.871X_3 + 0.275X_4 + 0.251X_5 + 0.427X_6 + 0.279X_7 + 0.609X_8 - 1.25)} \quad (3)$$

式中: H 为地质灾害易发性概率值; X_1 — X_8 分别为断层密度、土壤类型、坡度、沟谷密度、年降水量、土地利用、裸岩率、距河流的距离信息量值。

将 8 个区划因子的信息量值和系数代入公式(3)计算出地质灾害易发性概率值,用 ArcGIS 软件进行加权叠加分析得出林芝市公路地质灾害易发性概率值,然后进行易发性分区,形成分区图(图 3)。以 0.1 为间隔,将林芝市公路地质灾害易发性概率分为 10 级。从图 3 可知,林芝市公路地质灾害易发性概率超过 0.8 的主体区域主要分布在朗县中部、林芝县东部、墨脱县境内扎墨公路、察隅县东部的察佐公路及察丙路附近;工布江县、波密县大部分区域易发性概率小于 0.4,不易发生灾害。总体趋势是离道路越近,易发性概率越大。

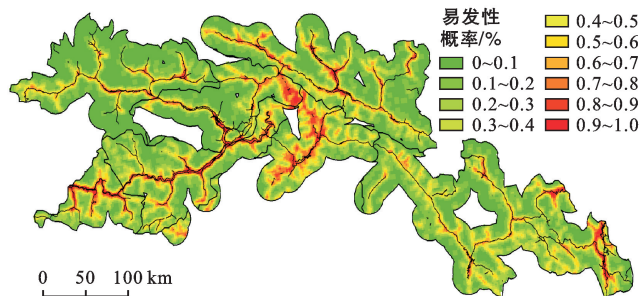


图 3 林芝市公路沿线地质灾害易发性区划

4 地质灾害气象预报模型研究

4.1 地质灾害与降水诱发灾害概率关系研究

本研究基于前期整理的 2010—2019 年地质灾害资料和降水资料,将地质灾害是否发生作为因变量,日降水量作为自变量,以逻辑回归方法作为耦合手段分析地质灾害与降水诱发灾害概率关系。林芝市截止至 2019 年约有 66 个气象站点的日降水数据,由于 2010—2019 年增加或弃用的气象站点较多,则利用 ArcGIS 邻域分析工具,分别提取 2010—2019 年距历史灾害点最近雨量站的日降水量平均值作为灾害点的降水量。相比于降水量空间插值的方式,此方法保证了灾害发生当日及前期降水量的准确性。样本点选择方式是选择历史地质灾害点中有准确降水量的样本点 152 个,并加入同等数量的无灾害发生样本点,其中,无灾害发生样本点的日期选择方式是选取 2010—2019 年汛期(5—9 月)较长时间无灾害发生的日期,并随机分配给无灾害发生样本点。

基于灾害点样本、无灾害发生样本和前 6 日的日降水数据,构建逻辑回归模型。拟合发现,前 4 日、前 5 日和前 6 日降水量未通过显著性检验。剔除后重新建模,最优结果的 Nagelkerke 方差可达到 0.516, Cox & Snell R 方差可达到 0.387,各建模因子均通过显著性检验(表 3)。

降水诱发地质灾害概率的公式为:

$$Y = \frac{\text{EXP}(0.082D_0 + 0.107D_1 + 0.063D_2 + 0.116D_3 - 1.984)}{1 + \text{EXP}(0.082D_0 + 0.107D_1 + 0.063D_2 + 0.116D_3 - 1.984)} \quad (4)$$

式中: Y 为降水诱发地质灾害概率值; D_0, D_1, D_2, D_3 分别为灾害发生当日、前 1 日、前 2 日、前 3 日降水量。

表 3 研究区建模因子逻辑回归方程

项目	系数 B	标准差 S.E	Wald	自由度	显著性	Exp(B)
前 3 日降水	0.116	0.031	14.267	1	0.000	1.123
前 2 日降水	0.063	0.028	4.882	1	0.027	1.065
前 1 日降水	0.107	0.027	16.171	1	0.000	1.113
当日降水	0.082	0.019	18.358	1	0.000	1.086

4.2 地质灾害气象预报模型建立

根据刘传正等人对国内外地质灾害气象预报模型原理的总结^[37],本研究选取显式统计预报模型的方法,基于逻辑回归方法,对地质灾害易发性概率 H 值与降水诱发地质灾害概率 Y 值进行分析,最终得到研究区内地质灾害发生的概率值^[38],其计算公式为:

$$T = a \cdot H + b \cdot Y \quad (5)$$

式中: T 为地质灾害发生概率值; H 为地质灾害易发性概率值,是地质要素对地质灾害发生的综合体现; Y 为降水诱发地质灾害概率值; a 为易发性区划占地质灾害发生概率权重系数; b 为降水因素占地质灾害发生概率权重系数。

经拟合, T 模型逻辑回归结果的 Nagelkerke 方差可达到 0.681, Cox & Snell R 方差可达到 0.51, 模型拟合度较高,通过了显著性检验,获得最终的系数详见表 4。由于模型最终结果是概率值,因此,本研究将表 4 中的系数归一化至 0~1 之内,系数四舍五入后得到 $a = 0.373, b = 0.627$ 。

表 4 研究区 T 模型逻辑回归方程

项目	系数 B	标准差 S.E	Wald	自由度	显著性	Exp(B)
H 值	3.451	0.489	49.731	1	0.000	31.531
Y 值	5.811	0.695	69.866	1	0.027	333.793

4.3 地质灾害气象预报模型检验

为了确保模型的可操作性,本研究选取部分历史地质灾害点对模型进行精度验证,将日降水量数据和地质灾害易发性概率 H 值放入地质灾害气象预报 T 模型中,计算出地质灾害发生概率 T 值。再结合统计分析及专家经验,确定 T 值超过 0.4 发布黄色预警,超过 0.6 发布橙色预警,超过 0.8 发布红色预警。

4.3.1 模型预测准确率计算 选取 49 个未参与建模的灾害点数据作为模型的检验数据。将 49 个灾害点对应的当日、前 1 日、前 2 日和前 3 日降水量数据和

地质灾害易发性概率 H 值放入地质灾害气象预报 T 模型中计算,得到不同预报等级的灾害点个数,预报结果详见表 5。从表 5 来看,预报区 85.71% 的灾害点达到黄色预报级别,14.29% 的灾害点达到橙色预报级别,14.29% 的灾害点达到红色预报级别。所以,该模型的预报准确率为 85.71%,模型的漏报率为 14.29%。

表 5 研究区地质灾害模型预报效果等级分布

黄色预报		橙色预报		红色预报	
灾害点	比例/%	灾害点	比例/%	灾害点	比例/%
42	85.71	7	14.29	7	14.29

4.3.2 模型个例检验 本研究以 2020 年 7 月 11 日 318 国道林芝县至波密县路段多处发生的地质灾害为例,验证地质灾害气象预报模型的应用效果。7 月 8—11 日连续 4 日 318 国道林芝县至波密县路段有强降水,7 月 8—11 日降水量最大值分别为 23.0, 35.6, 77.3 和 78.5 mm, 将这 4 日降水量数据带入地质灾害气象预报模型计算得到 2020 年 7 月 11 日地质灾害预报结果(图 4)。据统计,2020 年 7 月 11 日 318 国道林芝县至波密县路段发生的地质灾害点有 3 个,均达到了橙色预报级别,其中,达到了红色预报级别的灾害点有 2 个。至此,本研究认为该模型的预报准确性较高,可以为林芝市境内公路沿线地质灾害气象预报提供一定的依据。

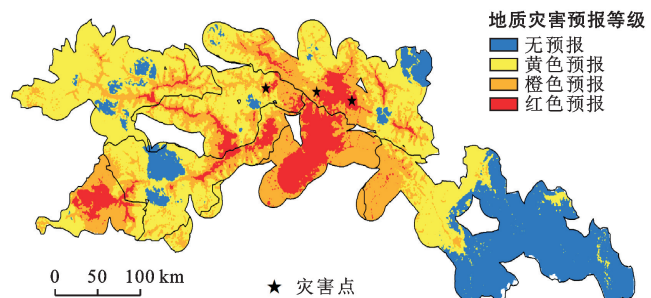


图 4 研究区 2020 年 7 月 11 日地质灾害预报结果

5 结论

(1) 针对林芝市公路沿线的地质特性,选取了断层密度、土地利用、土壤类型、坡度、沟谷密度、年降水量、裸岩率和距河流的距离 8 个地质灾害易发性区划因子,并通过信息量及逻辑回归方法确定各区划因子的系数,系数分别为 0.742, 0.407, 0.871, 0.275, 0.251, 0.427, 0.279, 0.609。根据林芝市公路地质灾害易发性区划结果图可以看出,地质灾害易发性概率超过 0.8 的主体区域主要分布在墨脱县境内扎墨公路、察隅县东部的察佐公路及察丙路附近;大部分区域易发性概率小于 0.4,总体趋势是离道路越近,易发性概率越大。

(2) 基于地质灾害易发性概率值和灾害发生当日、前 1 日、前 2 日和前 3 日的日降水数据,通过逻辑回归方法构建了林芝市公路地质灾害气象预报模型。通过对模型进行检验发现,模型预报准确率为 85.71%,漏报率为 14.29%。

(3) 受林芝市公路沿线地形地貌影响,气象站点分布不均匀,高海拔地区站点少,地质灾害发生地的实际降水与降水资料有偏差。同时,历史地质灾害点信息监测及采集困难,存在错报及漏报情况。所以,本研究的预报结果可能与实际情况有一定的偏差,但能反映基本趋势。在未来的研究中,研究人员可通过灾害数据筛选、气象预报模型优化等方式降低模型漏报率,保证实际运行时的预报准确度。

【参 考 文 献】

- [1] 陈官燕, 普布桑姆, 次仁, 等. 西藏林芝降水引发的山洪地质灾害分布特征[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, 29(2): 100-103.
- [2] 陈豫英, 赵光平, 王红英, 等. 宁夏地质灾害气象预报预警研究[J]. 自然灾害学报, 2008, 17(3): 81-86.
- [3] Capparelli G, Pasquale I, Giulio G R, et al. Modelling the rainfall-induced mobilization of a large slope movement in Northern Calabria [J]. *Natural Hazards*, 2012, 61(1): 247-256.
- [4] 景学义, 王开宇, 贾艳辉, 等. 哈尔滨市地质灾害气象诱因分析及监测预警[J]. 自然灾害学报, 2008, 17(1): 139-142.
- [5] 颜如德, 江洪, 颜澜. 闽东地质灾害气象预警等级预报研究[J]. 海峡科学, 2020(6): 26-27, 89.
- [6] 黎力, 朱永亮, 陈亮, 等. 重庆市地质灾害气象风险预警问题研究[J]. 安徽农业科学, 2019, 47(24): 234-236, 241.
- [7] 李环禹, 陈朝晖, 范文亮, 等. 区域降雨型滑坡风险分析统计模型研究[J]. 自然灾害学报, 2018, 27(4): 103-111.
- [8] 刘传正, 李铁锋, 温铭生, 等. 三峡库区地质灾害空间评价预警研究[J]. 水文地质工程地质, 2004, 31(4): 9-19.
- [9] Keiko I, Sadohara S. Slope management planning for the mitigation of landside hazards in urban areas [J]. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 2006, 5(1): 183-190.
- [10] 陈悦丽, 陈德辉, 李泽椿, 等. 降雨型滑坡的集合预报模型及其初步应用的试验研究[J]. 大气科学, 2016, 40(3): 515-527.
- [11] Lepore C, Sameer A K, Peter S, et al. Rainfall-induced landslide susceptibility zonation of Puerto Rico [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2012, 66(6): 1667-1681.
- [12] 张仲福. 陇东黄土高原泥流灾害临界雨量研究[J]. 地质灾害与环境保护, 2020, 31(3): 18-24.
- [13] 狄靖月, 许凤雯, 李宇梅, 等. 东南地区引发地质灾害降水分型及阈值分析[J]. 灾害学, 2019, 34(1): 62-67, 93.
- [14] 田述军, 樊晓一. 基于临界雨量的震后泥石流预测预报研究: 以白沙河流域为例[J]. 自然灾害学报, 2015, 24(4): 176-182.
- [15] 余丰华, 麻士华, 张义顺, 等. 浙江省突发性地质灾害预警预报系统应用研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2006, 17(1): 36-39.
- [16] 陈百炼, 帅士章, 吴战平. 贵州省地质灾害气象预警系统[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2005, 16(3): 111-113, 118.
- [17] 徐玉琳, 孙国曦, 陆美兰, 等. 江苏省突发性地质灾害气象预警研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2006, 17(1): 46-50.
- [18] 傅朝义, 张鑫林, 李再凯, 等. 广东省地质灾害预警信息系统流程设计[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2006, 17(1): 51-55.
- [19] 李云君, 刘志红, 吕远洋, 等. 四川省滑坡灾害气象预警模型建立与验证[J]. 地球信息科学学报, 2017, 19(7): 941-949.
- [20] 温智熊, 蓝俊康, 梁一敏. 广西龙胜县崩塌和滑坡地质灾害的气象预警预报[J]. 桂林理工大学学报, 2018, 38(3): 464-468.
- [21] 梁润娥, 余志山, 王延江, 等. 兰州市滑坡灾害预警模型研究[J]. 人民长江, 2012, 43(S1): 38-40.
- [22] 费晓燕, 柳锦宝, 屈伯强, 等. 四川省降雨诱发滑坡灾害的气象预警模型[J]. 水土保持通报, 2017, 37(5): 315-321, 327.
- [23] 陈官燕, 普布桑姆, 次仁旺姆, 等. 基于 Logistic 回归方法的林芝市山洪地质灾害预警研究[J]. 中国农学通报, 2019, 35(23): 124-130.
- [24] 林旭, 王兆博, 付晓春, 等. 区域性地质灾害气象预报方法[J]. 吉林农业, 2018(23): 115.
- [25] 丁伟翠, 杨强, 王爱军, 等. 陇东黄土区地质灾害气象预警方法与应用: 以泾川县为例[J]. 地球信息科学, 2011, 13(6): 811-818.

- stress from UAV multispectral imagery using machine learning algorithms [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2021, 189(8): 106414.
- [13] 李苗苗, 吴炳方, 颜长珍, 等. 密云水库上游植被覆盖度的遥感估算[J]. *资源科学*, 2004, 26(4): 153-159.
- [14] Hansen M C, Potapov P V, Moore R, et al. High-resolution global maps of 21st century forest cover change[J]. *science*, 2013, 342(6160): 850-853.
- [15] Tamiminia H, Salehi B, Mahdianpari M, et al. Google Earth Engine for geo-big data applications: A meta-analysis and systematic review [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2020, 164: 152-170.
- [16] Fashae O A, Adagbasa E G, Olusola A O, et al. Land use/land cover change and land surface temperature of Ibadan and environs, Nigeria [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2020, 192(2): 1-18.
- [17] Chen Bangqian, Xiao Xiangming, Li Xiangping, et al. A mangrove forest map of China in 2015: Analysis of time series Landsat 7/8 and Sentinel-1A imagery in Google Earth Engine cloud computing platform [J]. *Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2017, 131: 104-120.
- [18] Sun Zhongchang, Xu Ru, Du Wenjie, et al. High-resolution urban land mapping in China from sentinel 1A/2 imagery based on Google Earth Engine [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(7): 752.
- [19] 陈炜, 黄慧萍, 田亦陈, 等. 基于 Google Earth Engine 平台的三江源地区生态环境质量动态监测与分析[J]. *地球信息科学学报*, 2019, 21(9): 1382-1391.
- [20] Pereira O J R, Merino E R, Montes C R, et al. Estimating water pH using cloud-based landsat images for a new classification of the Nhecolndia Lakes (Brazilian Pantanal)[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(7): 1090.
- [21] 赵海凤. 四川省森林生态系统服务价值计量与分析[D]. 北京: 北京林业大学, 2014.
- [22] 黄从德. 四川森林生态系统碳储量及其空间分异特征[D]. 四川 成都: 四川农业大学, 2008.
- [23] Holben, Brent N. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1986, 7(11): 1417-1434.
- [24] Carlson T N, Ripley D A. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1997, 62(3): 241-252.
- [25] 李晶, 崔绿园, 闫萧萧, 等. 草原矿区长时序植被覆盖度变化趋势对比分析[J]. *测绘通报*, 2019(8): 130-134, 157.
- [26] 张本昀, 喻铮铮, 刘良云, 等. 北京山区植被覆盖动态变化遥感监测研究[J]. *地域研究与开发*, 2008, 27(1): 108-112.
- [27] 李林叶, 田美荣, 梁会, 等. 2000—2016 年呼伦贝尔草原植被覆盖度时空变化及其影响因素分析[J]. *生态与农村环境学报*, 2018, 34(7): 584-591.

(上接第 202 页)

- [26] 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.
- [27] 孟兆兴. 基于 GIS 的川藏公路鲁朗—通麦段滑坡易发性评价[D]. 河北 邯郸: 河北工程大学, 2020.
- [28] 李斌, 彭福坦. 西藏林芝地区原生植被保护和恢复研究[J]. *林业建设*, 2004(6): 12-18.
- [29] 张泽明, 丁慧霞, 董昕, 等. 冈底斯岩浆弧的形成与演化[J]. *岩石学报*, 2019, 35(2): 275-294.
- [30] 宋涛, 刁谦, 真允庆. 青藏高原地热资源与地幔柱构造的关系: 地幔热柱多级演化导致岩浆上侵成为浅部热源[J]. *河北地质大学学报*, 2018, 41(6): 1-24.
- [31] 刘晓. 基于遥感与 GIS 的林芝中部地区地质灾害危险性评价研究[D]. 辽宁 大连: 辽宁师范大学, 2019.
- [32] 盛逸凡, 李远耀, 徐勇, 等. 基于有效降雨强度和逻辑回归的降雨型滑坡预测模型[J]. *水文地质工程地质*, 2019, 46(1): 156-162, 172.
- [33] 唐红梅, 魏来, 高阳华, 等. 基于逻辑回归的重庆地区降雨型滑坡预报模型[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2013, 24(3): 32-37.
- [34] 黄润秋, 李为乐. “5·12”汶川大地震触发地质灾害的发育分布规律研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(12): 2585-2592.
- [35] 张锡涛, 刘翔宇, 谢谟文, 等. 基于岩质滑坡引发泥石流的影响范围评价模型[J]. *工程地质学报*, 2013, 21(4): 598-606.
- [36] 常鸣, 唐川, 苏永超, 等. 雅鲁藏布江米林段泥石流堆积扇危险范围预测模型[J]. *工程地质学报*, 2012, 20(6): 971-978.
- [37] 刘传正, 刘艳辉. 地质灾害区域预警原理与显式预警系统设计研究[J]. *水文地质工程地质*, 2007, 34(6): 109-115, 125.
- [38] 梁润娥, 李中社, 苗高建, 等. 区域地质灾害气象预警模型研究现状与展望[J]. *安全与环境工程*, 2013, 20(1): 30-35.