

基于流域单元的地质灾害易发性评价

支泽民, 刘峰贵, 周强, 夏兴生, 陈琼

Evaluation of geological hazards susceptibility based on watershed units A case study of the Changdu City Tibet

ZHI Zemin, LIU Fenggui, ZHOU Qiang, XIA Xingsheng, and CHEN Qiong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202111026>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于不同评价单元和灾害熵的泥石流危险性分析

Hazard analysis of debris flows based on different evaluation units and disaster entropy: A case study in Wudu section of the Bailong river basin

李小龙, 宋国虎, 向灵芝, 罗亮, 唐良琴, 沈娜, 梁梦辉 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 107-115

基于遥感影像多尺度分割与地质因子评价的滑坡易发性区划

Landslide susceptibility assessment based on multi-scale segmentation of remote sensing and geological factor evaluation

李文娟, 邵海 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 94-99

黄河流域甘肃段地质灾害发育特征

The development characteristics of geological hazards in Gansu segment of the Yellow River basin

郭富, 宋晓玲, 刘明霞 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 130-136

北京山区突发性地质灾害易发性评价

Assessment on the susceptibility of sudden geological hazards in mountainous areas of Beijing

罗守敬, 王珊珊, 付德荃 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 126-133

基于GIS和加权信息量的湖北鄂州地质灾害易发性区划

张波, 石长柏, 肖志勇, 张金朝, 邬磊, 刁彪, 卢胜周 中国地质灾害与防治学报. 2018, 29(3): 101-107

张波, 石长柏, 肖志勇, 张金朝, 邬磊, 刁彪, 卢胜周 中国地质灾害与防治学报. 2018, 29(3): 101-107

渤海海域海底地质灾害危险性区划

Risk zonation on the submarine geological hazards in Bohai Sea

宋玉鹏, 孙永福, 杜星, 刘晓瑜, 王振豪, 曹成林 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 140-146



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202111026

支泽民, 刘峰贵, 周强, 等. 基于流域单元的地质灾害易发性评价——以西藏昌都市为例 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(1): 139-150.

ZHI Zemin, LIU Fenggui, ZHOU Qiang, et al. Evaluation of geological hazards susceptibility based on watershed units: A case study of the Changdu City, Tibet[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(1): 139-150.

基于流域单元的地质灾害易发性评价 ——以西藏昌都市为例

支泽民¹, 刘峰贵^{1,2}, 周强^{1,2}, 夏兴生^{1,2}, 陈琼^{1,2}

(1. 青海师范大学地理科学学院, 青海 西宁 810008;

2. 高原科学与可持续发展研究院, 青海 西宁 810008)

摘要:作为在山地地区易发的自然灾害种, 地质灾害每年都给中国造成严重的经济损失。为揭示阐明典型高山峡谷区地质灾害易发性影响因素, 文章以昌都市为研究区例, 基于区内孕灾环境的差异, 对其进行流域划分, 同时选取海拔、坡度、地形起伏度等 10 个指标构建地质灾害易发性评价指标体系, 基于随机森林模型对各流域地质灾害易发性空间分布进行研究。结果表明: (1) 昌都市地质灾害类型主要以小型灾害为主, 大型灾害分布相对较少但危害巨大, 险情等级较高, 同时, 区域内地质灾害的空间分布具有沿河流与道路呈条带状分布的特征; (2) 总体来看, 各流域地质灾害的影响因素大致相同, 但仍具有一定的差异性, 金沙江流域受海拔与道路影响较为突出, 澜沧江流域受居民点密度影响较为突出, 而怒江流域受道路因素影响较为突出; (3) 各流域地质灾害易发性空间分布存在差异, 金沙江流域低易发面积占比最大, 澜沧江与怒江流域均为中易发面积占比最大; 三大流域均以高易发所占比最小, 但在全流域内均有分布, 且主要分布于人类活动较为强烈、岩性较软等区域。

关键词: 昌都市; 随机森林; 地质灾害; 易发性; 流域单元

中图分类号: P694

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2023)01-0139-12

Evaluation of geological hazards susceptibility based on watershed units: A case study of the Changdu City, Tibet

ZHI Zemin¹, LIU Fenggui^{1,2}, ZHOU Qiang^{1,2}, XIA Xingsheng^{1,2}, CHEN Qiong^{1,2}

(1. College of Geography, Qinghai Normal University, Xining, Qinghai 810008, China;

2. Academy of Plateau Science and Sustainability, Xining, Qinghai 810008, China)

Abstract: As a natural disaster prone to occur in mountainous areas, geological hazards cause serious economic losses to China every year. In order to reveal the factors influencing of geological hazards susceptibility in typical mountain valley, this paper takes Changdu City as the study area. Firstly, we analyze the spatial distribution of geological hazards, and then divides it into three major watersheds based on the differences of disaster-inducing environments in the study area, selects 10 indicators such as elevation, slope and terrain relief to build a evaluation index system of geological hazard susceptibility, and the weights of index determined based on the Random Forest. The spatial distribution of geological hazards in each watershed of Changdu City is obtained by overlaying with GIS, and it is found that: (1) The types of geological hazards in Changdu City are mainly

收稿日期: 2021-11-21; 修订日期: 2022-03-01

投稿网址: <https://www.zgdzzhyfzxb.com/>

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0906)

第一作者: 支泽民(1994-), 男, 山西朔州人, 博士研究生, 主要从事土地科学及灾害风险科学研究。E-mail: zhizemin@126.com

通讯作者: 陈琼(1975-), 女, 浙江诸暨人, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事土地科学及人地关系研究。E-mail: qhchenqiong@163.com

small disasters, while the distribution of large disasters is relatively small but the hazards are huge and the danger level is high.

(2) In general, the factors influencing geological hazards are more or less the same in each basin, but there are still some differences, with the factor of medium altitude and road being more prominent in the Jinsha River basin, the factor of density of settlements being more prominent in the Lancang River basin, and the factor of road being more prominent in the Nujiang River basin. (3) The Jinsha River basin has the largest area of low susceptibility, and the Lancang and Nujiang River basins have the largest area of medium susceptibility; all three basins have the smallest area of high susceptibility, but they are distributed in the whole basin, and mainly in areas with strong human activities and soft lithology.

Keywords: Changdu City; random forest; geological hazards; susceptibility; watershed unit

0 引言

全球政府间气候变化专门委员会(IPCC)第六次工作报告《Climate Change 2021: The Physical Science Basis》指出,近几十年来地球升温过程明显,人类活动导致的气候变暖得到验证^[1]。在此背景下,极端气候事件的发生频率逐渐增大,全球地质灾害发生风险逐渐增大^[2]。我国作为世界上受地质灾害影响最为严重的国家之一^[3],地质灾害频发,其中尤以西南地区受灾较为严重^[4]。作为第一阶梯与第二阶梯的过渡区,西南地区地质环境脆弱,断层活动相对活跃,导致区域内地质灾害频发。同时,伴随着海拔高度的上升,冻融现象逐渐增多,冻融风险增大^[5],由冻融引发的地质灾害逐渐增多。因此,对于该类型区域的地质灾害易发性评价就变的极为重要。

目前,地质灾害易发性的评价等相关研究较为普遍,指标体系构建较为成熟,方法多种多样,包括信息量法^[6-8]、层次分析法^[9-10]、频率比法^[11-13]、人工神经网络法^[12,14-16]以及逻辑回归法^[15-17]等。祁于娜等^[18]利用层次分析法与熵值法对地质灾害易发性指标因子进行权重确定,对山区城镇地质灾害易发性进行评价;陈绪钰等^[19]利用加权信息量法对地质灾害易发性指标因子进行权重确定,利用迭代自组织聚类对三峡库区忠县区域进行地质灾害易发性评价并划区;李远远等^[20]利用确定性系数法对易发性指标敏感性值进行计算,将其作为支持向量机分类依据,建立 CF-SVM 模型对泸水县地质易发性进行评价等。研究多以小区域进行展开,针对大区域的地质灾害易发性评价又相对较为笼统,缺乏研究区内小区域环境的综合考虑,不能较好地体现研究区内地质灾害易发性的空间分布与主导因素。因此,针对目前关于该区域地质灾害研究较少、流域地质灾害易发性评价相对短缺。文章以昌都市为研究区,将其划分为三大流域,利用 GIS 空间分析方法及随机森林模型对昌都市各流域内地质灾害易发性进行评价,以期得到各

流域地质灾害易发性空间分布。同时,对各流域内地质灾害易发性影响因素进行分析,针对不同流域地质灾害易发性主导因素进行防灾减灾管理,为区域经济社会发展提供参考,为区域防灾减灾治理提供依据。

1 研究区概况

1.1 昌都市概况

昌都市位于西藏自治区东部,横断山区西北部,属典型的高山峡谷区,地质灾害多发、高发^[11]。受全球气候变化的影响,冻融引起的地质灾害风险逐渐增大,冻融式地质灾害明显增多^[4],其中,比较著名的“白格滑坡”即为冻融引起的地质灾害^[21-22]。昌都市境内三条大江与横断山脉交错排列,地质构造被称为三江弧形构造,复褶皱带与大型断裂带北部为北西向,向南为明显北东向突出的弧形转弯,至芒康—察瓦龙一线改作近南北向。古生界地层有少量奥陶系,缺志留系,有较多泥盆系和石炭系,广泛出露二叠系;中生界地层以三叠系出露最广,其次是侏罗—白垩系和白垩系。新生界第三系主要展布于青泥洞至贡觉一带。境内活动断层密集分布,新构造运动活跃,地层岩性复杂,岩浆侵入活动普遍^[23],为地质灾害发育提供了良好的地质环境条件(图 1)。气候属高原亚温带亚湿润气候,区域内降水分配由西北至东南呈现明显的不均匀趋势,连续性的降水和短时间内的强降雨对于地质灾害的发生又具有主导作用^[24],这就为昌都市地质灾害的发生提供了极好的气候环境。作为西藏自治区重要的农业分布区^[25],人口数量相对较多,人口分布具有典型的高山峡谷区人口分布特征,呈现“大分布,小聚居”的集聚特征^[26],即人口分布范围较广,但在河谷区域内又呈现极为密集分布状况,区内人口以少数民族人口比例较大^[27],防灾意识薄弱。因此,对于该类型区域地质灾害易发性研究具有十分重要的意义。

1.2 昌都市流域划分

昌都市河流分布众多,从东到西分布的主要河流

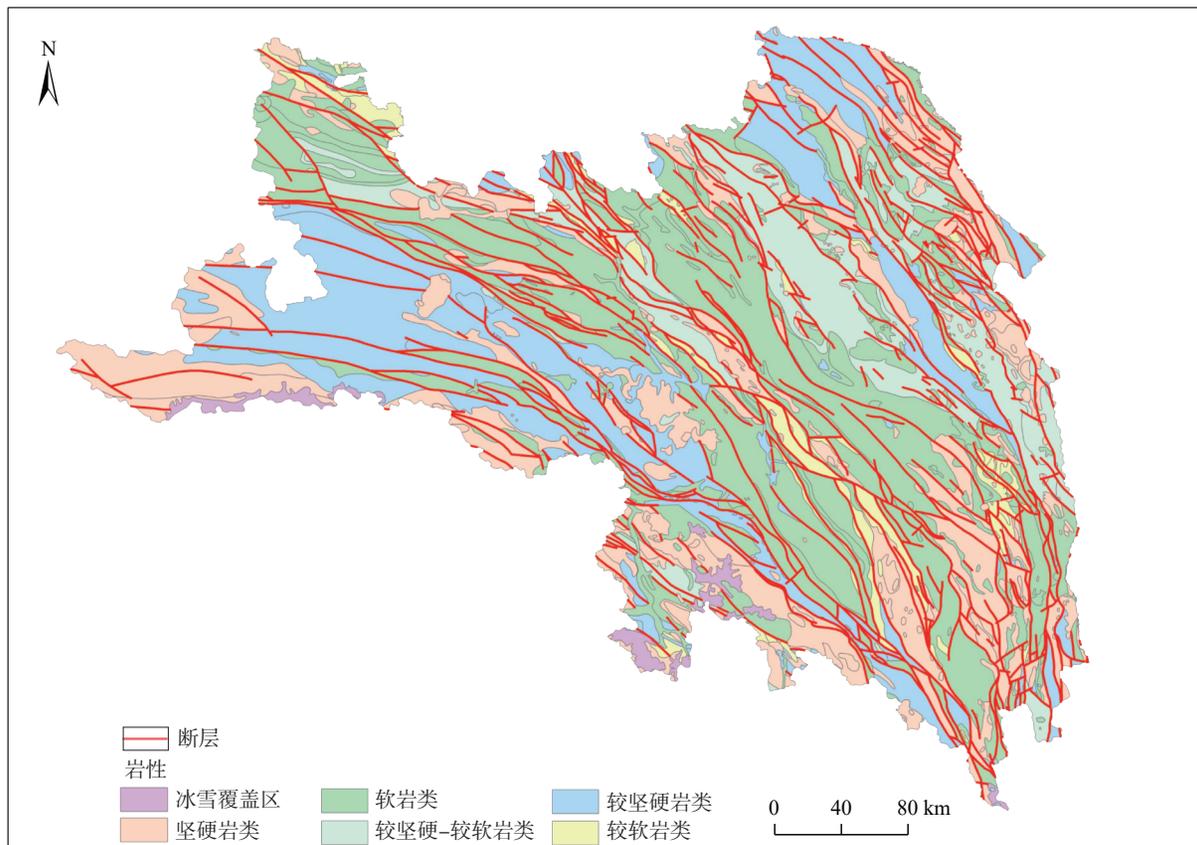


图 1 昌都市断层岩性空间分布

Fig. 1 The distribution of fault and lithology in Changdu

有金沙江、澜沧江和怒江,即常说的“藏东”三江。受三大水系(金沙江、澜沧江、怒江)的影响,区内沟谷纵横,地表破碎,坡体坡度较大,稳定性较差,从而导致地质灾害发育环境良好。同时,三大流域孕灾环境差异明显,唐川等人基于小区域地貌单元的区域地质灾害研究发现,基于地貌单元的地质灾害研究不仅能更好地体现区域内综合特性,对于易发性评价结果而言,与地质灾害的实际分布会更加贴合^[28-29],模型更加适用。因此,文章利用 ArcGIS“水文分析”工具,基于高程数据进行“填洼”、计算“流向”、计算“流量”、设置“汇水面积”等操作,将昌都市划分为金沙江、澜沧江以及怒江三大流域(图 2),在流域单元对地质灾害的易发性进行评价。

1.3 昌都市地质灾害发育特征

(1) 分类

昌都市共发育地质灾害 2 554 处,包括滑坡、崩塌、泥石流、地面塌陷、不稳定斜坡等,从上世纪 50 年代到 2019 年均有灾害发生,其中崩塌灾害点发育 694 处,滑坡灾害点发育 653 处,泥石流灾害点 926 处,共 2 273 处,为昌都地区主要的三大地质灾害类型。

根据《地质灾害排查规范》按灾害点规模将昌都市地质灾害划分为巨型、特大型、大型、中型以及小型 5 个等级^[30],根据地质灾害稳定性将昌都市地质灾害划分为稳定、较稳定、稳定性较差、不稳定以及易发 5 个等级(表 1)。

根据《国家地质灾害险情等级划分标准》中对地质灾害危险等级的划分,将昌都市地质灾害划分为 I 级、II 级、III 级、IV 级 4 个危险级别^[31]。昌都市地质灾害主要以 III 级、IV 级为主,灾害点共计 2 210 处,占比达 97.23%(表 2)。

(2) 分布

从空间分布上来讲,利用 ArcGIS“邻域分析”工具对昌都市地质灾害与道路、河流的距离进行提取发现,距道路距离 300 m 以内灾害点数量为 1 547 处,占比达到 68.06%;距河流距离 300 m 以内灾害点数量共 1 444 处,占比达 63.53%(表 3)。

2 数据来源与方法

2.1 数据来源

文章数据主要通过野外调查与网络收集等多渠

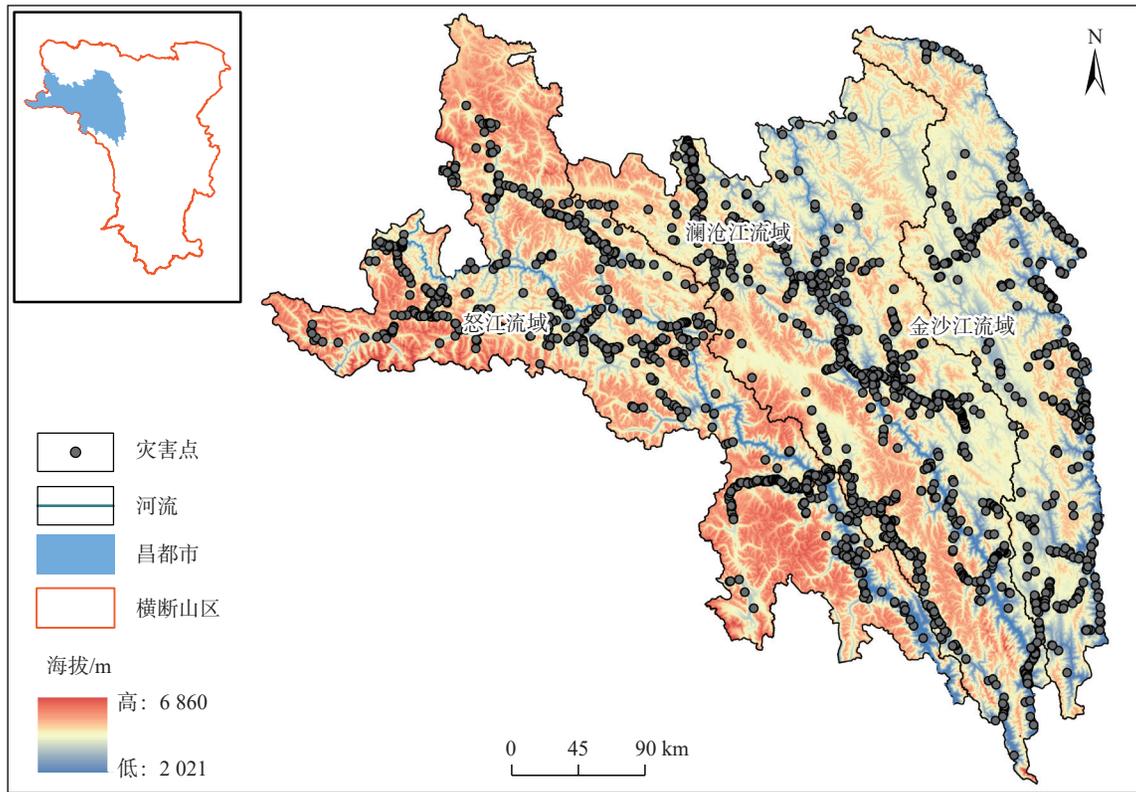


图 2 三大流域分布

Fig. 2 Distribution map of three major watersheds

表 1 按规模等级与稳定性划分灾害点等级

Table 1 Classification of disaster site level by size class

规模等级	数量/处	占比/%	稳定性评价	数量/处	占比/%
巨型	3	0.13	稳定	44	1.94
特大型	9	0.40	较稳定	425	18.70
大型	116	5.10	稳定性较差	818	35.99
中型	676	29.74	不稳定	831	36.56
小型	1 469	64.63	易发	154	6.78

表 2 按险情等级划分灾害点等级

Table 2 Classification of disaster sites by danger level

险情等级	数量/处	占比/%
I 级	10	0.44
II 级	53	2.33
III 级	324	14.25
IV 级	1886	82.97

道、多方式对数据进行获取。工程岩组数据、断层数据来源于中国地质调查局 1 : 250 万中国地质图 (<https://www.cgs.gov.cn/>)。作为影响地质灾害易发性的指标因子,需要将工程岩组数据按岩性硬度进行赋值,而岩性的软硬程度与地质灾害的易发性呈负相关关系,即岩性越软越易造成地质灾害的发生,其对于地质灾害易发性的贡献值就越大。因此,文章参考其它学者所做研究将

表 3 按距河流、道路距离划分

Table 3 Classification based on distance from rivers and roads

距离/m	距道路距离		距河流距离	
	数量/处	占比/%	数量/处	占比/%
(0,100]	1 092	48.04	742	32.64
(100,200]	287	12.63	455	20.02
(200,300]	168	7.39	247	10.87
>300	726	31.94	829	36.47

岩性数据进行赋值^[32-33],以便进行下一步工作(表 4)。灾害点数据来自于野外调查收集,同时,笔者参加第二次青藏高原综合科学考察项目对调查数据进行部分点的验证,主要包括八宿县、卡若区、江达县、类乌齐县地区大型灾害点。海拔高程数据分辨率为 30 m,来源于地理空间数据云平台 (<http://www.gscloud.cn/home>) 的 ASTER GDEM 30 m 数据,坡度与地形起伏度通过海拔数据基于 ArcGIS 工具提取获得。行政区划数据、河流、道路与居民点数据来源于全国地理信息资源服务系统 (<https://www.webmap.cn/main.do?method=index>) 全国 1 : 25 万基础地理信息数据库。

2.2 随机森林模型

随机森林(Random Forests, RF)模型作为一种较为

表 4 岩性赋值表^[32-33]

Table 4 The assignment table of lithology

序号	硬度分组	主要岩性描述	赋值
1	坚硬岩类	变质岩、二长斑岩、闪长岩、石英砂岩、石英岩、长石、正长岩、玄武岩、花岗岩、辉绿岩、安山岩、中厚层灰岩和板岩等	0.1
2	较坚硬岩类	板岩、基性火山岩、碳酸盐岩、变质砂岩、超基性岩、大理岩、碎屑岩、中性火山岩等	0.3
3	较坚硬-较软弱岩类	片岩、片麻岩类等	0.5
4	较软岩类	灰岩、千枚岩、砂质泥岩、泥灰岩、粉砂岩等	0.7
5	软岩类	泥岩、泥质页岩、绿泥石片岩、粉砂岩、灰砂岩、灰岩粉砂岩、角闪片岩、砾岩、泥岩、千枚岩砂岩、砂岩、页岩、绢云母片岩等	0.9

常用的机器学习方法,属于组合式的深度学习方^[34],对于解决非线性问题具有较大的优势^[35],作为一种分类回归树的数据挖掘方法^[34],其原理是通过集成多个决策树,分类投票获取类别。同时,该方法对于运算数据的要求较低,对于多要素类的问题研究,可定量提供要素对于结果的重要性程度,相对更具有客观性,准确性也较高^[36]。与其他机器学习算法相比,RF具有一定的抗过拟合能力,即其可通过对决策树进行平均,降低过拟合风险,对于模型运算中产生的噪声与异常值具有较高的容忍度^[35-36],能够度量变量的重要性程度,该特点对于地质灾害易发性影响因子重要性判定具有极大的优势。因此,文章使用RF对地质灾害易发性进行评价,主要使用R 4.0.4环境下的R studio编译器调用随机森林(RF)软件包进行迭代运算。其原理见图3^[37]。

3 地质灾害易发性评价

3.1 评价指标体系构建

地质灾害易发性评价是一个较为复杂的过程,需要综合考虑历史灾害数据及现存外部自然环境与诱发因素等条件,基于已有研究^[37-39],结合昌都市实际孕灾环境特征,综合考虑数据的可获取性,从影响地质灾害易发性的环境条件与诱发因子综合考虑,分别选取海拔、坡度、地形起伏度、断层密度、岩性、历史灾害点密度、多年平均归一化植被覆盖指数(*NDVI*)以及多年平均降水量、河流密度、2017年道路密度、2017年居民点密度共11个指标作为评价地质灾害易发性的因子。其中,不同指标的选取依据与地质灾害的相关关系如下:

(1) 海拔

研究区位于横断山区西北部,青藏高原东南部,地貌形态复杂多样。区内分布台地、平原、高山等地貌类型,通过海拔将地形地貌对地质灾害的影响进行表征,减少地貌类型人为赋值所造成的误差。

(2) 坡度

坡度对于斜坡内应力的分布以及径流的形成具有明显的影响作用,坡度越大,地质灾害发生的概率越大。

(3) 地形起伏度

地形起伏度作为地表曲率的表征,指的是某一区域单位内海拔最高点与海拔最低点的差值,地形起伏度较大时,斜坡应力结构容易发生变化,地质灾害发生概率变大。

(4) 岩性

岩土体类型不同时,岩性硬度、应力分布就存在差异,从而影响地质灾害发生的分布区域与发育的规模。

(5) 断层密度

横断山区西北部位于青藏高原边缘,断层活动强烈,分布密集,利用断层密度表征活动断层对地质灾害发育的影响。

(6) 年均降水量

降水作为地质灾害的重要诱发因素,尤其7、8月

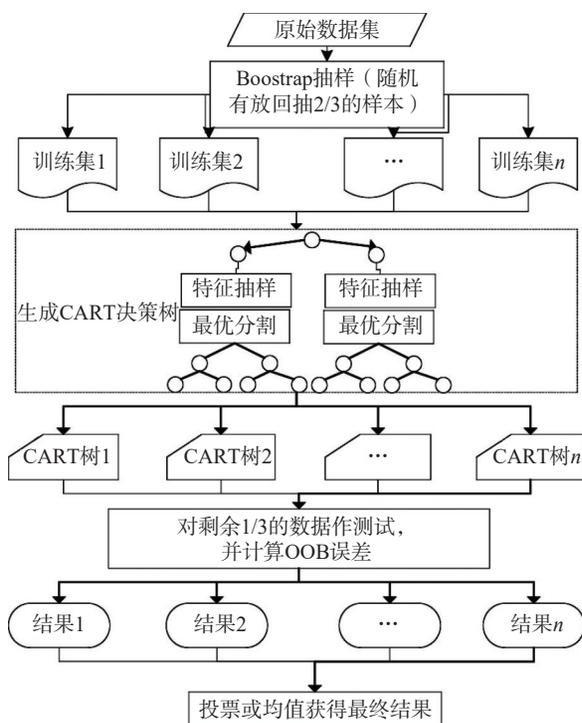


图 3 随机森林(RF)模型原理图^[37]

Fig. 3 Schematic diagram of Random Forest (RF) model

作为该区域降水的主要集中日期,是造成地质灾害发生的重要因素。

(7)河流密度

河流水系通过切割沟谷,使地表切割破碎,碎片化严重,河流的下切侵蚀导致边坡的应力结构发生改变,从而导致地质灾害发生;同时,泥石流形成后一般更易汇入附近河流,因此,文章河流密度表征河流水系对地质灾害发生的影响。

(8)归一化植被指数(NDVI)

植被覆盖度越高,植被对于松散堆积物的固结能力越强,对于水分的涵养能力就越高,从而导致地质灾害发生的可能性减小,文章利用 NDVI 表征植被覆盖度。

(9)2017 年道路密度

高山峡谷区道路的修建往往会导致道路两侧边坡的稳定性发生变化,改变其应力结构,同时,车辆的扰动对于道路两侧山体的影响也较为严重,作为川藏线与滇

藏线的必经地区,道路修建与车辆扰动对地质灾害的影响较大,因此将其作为地质灾害易发性的评价指标之一。

(10)2017 年居民点密度

居民点作为表征人类活动与人类工程活动的指标因子,居民点密度越大,该地区人类工程活动越强,对于自然环境的影响就更大,地质灾害发生的概率则越大。

(11)历史灾害点密度

历史地质灾害点密度用以表征该区域地质条件下地质灾害发生的概率,灾害点密度越大,该地区发生地质灾害的可能性越大。

同时,对地质灾害点密度与各指标之间建立回归分析,不同指标与地质灾害的相关性如表 5,剔除相关性较低的年均降水量,则剩余的指标为海拔、坡度、地形起伏度、断层密度、岩性、历史灾害点密度、多年平均归一化植被覆盖指数(NDVI)以及河流密度、道路密度、居民点密度(图 4)。

表 5 地质灾害点密度与各指标相关性

Table 5 Correlation between geological hazard sites and each index

参数	海拔	坡度	地形起伏度	岩性	断层密度	年均降水量	河流密度	道路密度	NDVI	居民点密度
取值	-0.253***	-0.084	0.095*	0.251**	0.055***	-0.001	0.046	0.052	0.054*	0.056**

注: *为通过0.1显著性检验, **为通过0.05显著性检验, ***为通过0.01显著性检验, 未标记为未通过显著性检验。

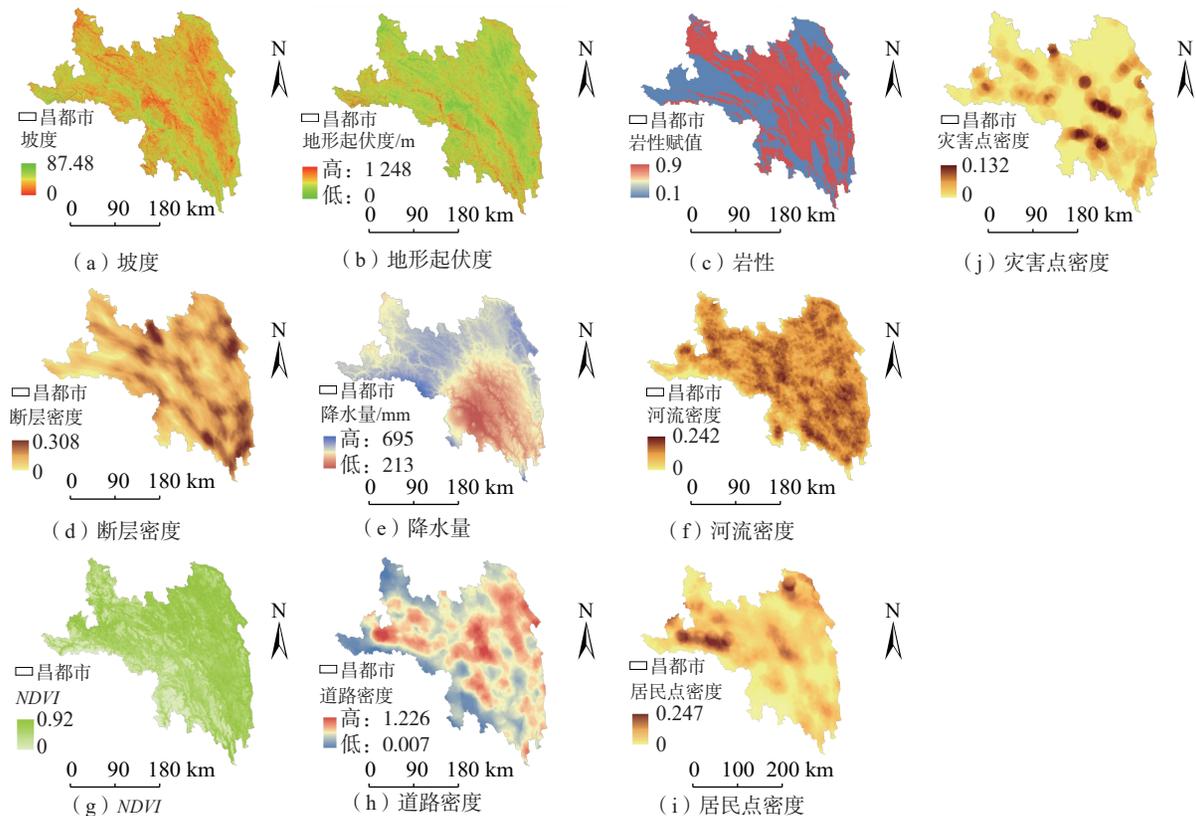


图 4 地质灾害易发性评价指标空间分布图

Fig. 4 Spatial distribution of geological hazard susceptibility evaluation indicators

3.2 易发性影响因素

首先,对各个指标数据进行处理,首先将不同分辨率的栅格数据统一重采样为1 km分辨率。考虑到研究区域面积较大,文章选取常用的正方形格网法进行地质灾害易发性评价,分别为各流域创建分辨率为1 km的格网对研究区地质灾害易发性进行评价,将其分别划分为23 289, 44 535, 42 609个评价单元。利用ArcGIS“加权求和”工具将各指标进行加权求和作为随机森林模型中的目标变量,将各指标作为预测变量。同时,随机森林模型的构建中,回归树的数量 n_{tree} 与树节点 m_{try} 作为随机森林的重要参数, n_{tree} 代表设定树的个数, m_{try} 代表随机森林选取的特征数($m \leq$ 总特征数),即造成地质灾害易发的因子的数量,选取适当数量的特征数进行迭代,按照节点不纯度最小原则从 m 个特征中选择最优的特征节点进行分裂。通过设置不同的 n_{tree} 与 m_{try} 值,通过迭代运算,从而计算出不同随机特征数下的随机森林的袋外误差(OOB)^[40],OOB袋外误差越小,模型预测精度越高^[41](图5)。同时,通过随机森林模型运行重要性函数后,基于模型返回的 $IncMSE\%$ 值可对各指标进行重要性分析,即计算各要素 $IncMSE\%$ 值的总和后,将每个指标 $IncMSE\%$ 值所占 $IncMSE\%$ 总和的比重作为各指标要素的权重,从而进行易发性评价分析。

通过构建昌都市地质灾害易发性评价指标体系,基于随机森林模型对各流域地质灾害易发性影响因素重要性程度进行分析。影响金沙江流域地质灾害易发性首先为岩性,地质活动频繁,岩性复杂,是地质灾害频发的重要影响因素;其次,金沙江流域地质灾害易发性影响因素为道路密度,作为由东部省份进入西藏的重要通道,经济发展速度相对西部其他县域发展较快,区域基础设施建设相对较快,大量的道路修建对于地质灾害的影响较大;第三, $NDVI$ 对金沙江流域地质灾害易发性影响较大,植被作为对地表松散物质固结能力较强的表层物质, $NDVI$ 值越小,表征植被覆盖度越差,对于地表松散物质的固结能力越弱,从而导致地质灾害更易发;第四影响因素为海拔高度,昌都市位于横断山高山峡谷区西北部,而金沙江流域作为昌都市东部山区的边缘,自东向西海拔变化较大,对于地质灾害的影响相对较大;第五影响因素为断层密度;第六影响因素为河流密度,河流对地表的切割导致流域内地表较为破碎,同时河流对于边坡的切割导致河流两侧较容易发生地质灾害;其后依次为灾害点密度、居民点密度、地形起伏度以及坡度,见图6(a)。

与金沙江流域地质灾害的影响因素较为一致,澜沧

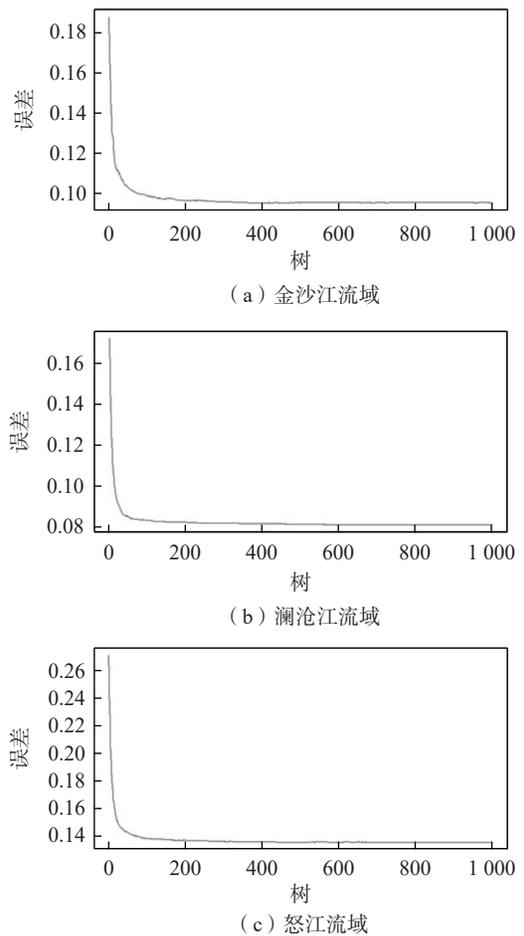


图5 拟合优度误差趋势图

Fig. 5 Trend chart of goodness of fit error

江流域受岩性与断层密度影响较大,均受到“三江”弧形构造的约束,从而导致岩性与断层成为影响地质灾害易发性的主要因素;其次, $NDVI$ 为澜沧江流域地质灾害易发性的第二大影响因素;第三大影响因素为居民点密度,相对金沙江流域与怒江流域,澜沧江流域面积与怒江流域面积相近,但居民点较为密集,占昌都市居民点的44.85%,人类活动加剧了地质灾害的发生。澜沧江流域地质灾害易发性同时也受河流密度影响较大,境内扎曲与那曲于卡若区合流形成澜沧江,剧烈的河流侵蚀导致的边坡失稳造成的地质灾害在该流域内遍布^[42-43];其后依次包括历史灾害点密度、海拔、道路密度、坡度以及地形起伏度,见图6(b)。

怒江流域受岩性与断层密度影响也较大;其次,怒江流域地质灾害易发性也主要受到道路密度的影响较大,由于道路修建的快速发展,尤其以怒江流域内坝县道路密度最大,道路修建改变边坡的应力结构造成边坡失稳,从而导致地质灾害极易发生;怒江流域内 $NDVI$ 对于地质灾害易发性影响也较为严重;其后的影

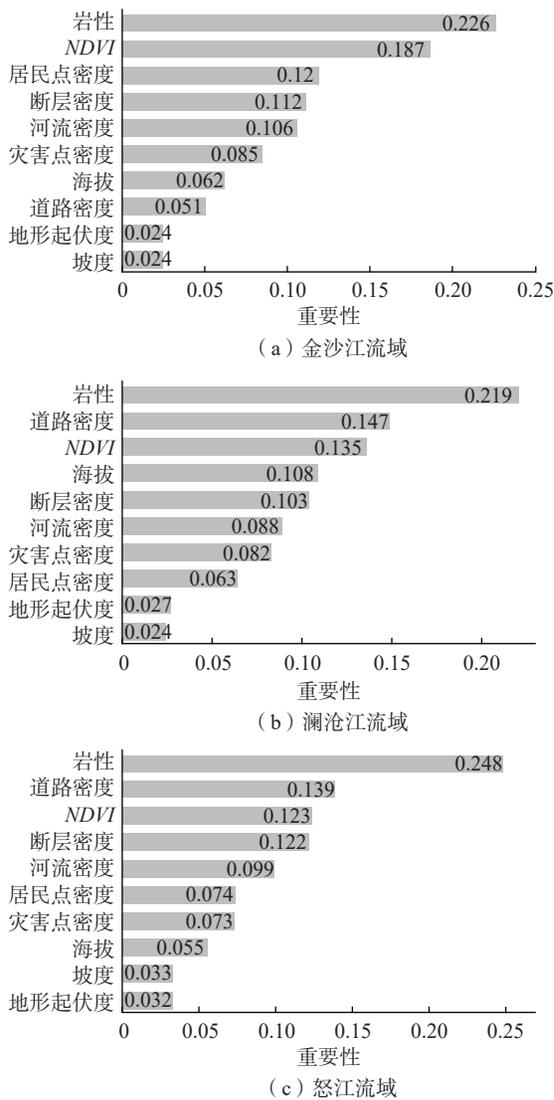


图 6 流域易发性影响因素重要性分布图

Fig. 6 Importance distribution of factors affecting the vulnerability

响因素依次为河流密度、居民点密度、历史灾害点密度、海拔高度、坡度以及地形起伏度,见图 6(c)。

3.3 流域地质灾害易发性评价

通过随机森林模型对昌都市各流域地质灾害易发性各指标影响因素重要性程度进行确定,以各指标重要性程度作为易发性评价影响因子权重,基于 GIS“叠加分析”工具进行计算,得到各流域地质灾害易发性空间分布结果,同时,为了保证评价结果分区的客观性与准确度,利用 GIS“自然断点法”将各流域分别划分为“不易发”“低易发”“中易发”以及“高易发”4 个等级(图 7)。

(1)金沙江流域地质灾害易发性评价

金沙江流域地质灾害高易发区面积 3 445 km²,占区内金沙江流域面积的 14.94%,是金沙江流域地质灾

害易发性分区域中面积占比最小的区域,主要分布于中易发区域周围,金沙江流域中游北部以及下游地区;中易发区面积 6 472 km²,占区内金沙江流域面积的 28.07%,中易发区域主要分布于中游区域北部、下游区域北部地区,且在下游地区集中分布;低易发区面积 8 830 km²,占区内金沙江流域面积的 38.29%,是金沙江流域易发性分区中占比最大的区域,主要分布于不易发区周围区域,主要分布于上游区域与中游区域,下游区域低易发区呈零星分布;不易发区面积为 4 312 km²,占区内金沙江流域面积的 18.70%,其主要分布于金沙江流域中游以及下游靠近西部区域,整体呈现“低-高-低”的易发性变化趋势,见图 7(a)。

(2)澜沧江流域地质灾害易发性评价

澜沧江流域高易发区面积 6 683 km²,占区内金沙江流域面积的 15.08%,是澜沧江流域地质灾害易发性分区中面积占比最小的区域,主要分布于上游西部以及中游中部地区;中易发区面积 18 196 km²,占区内澜沧江流域面积的 41.07%,是澜沧江流域地质灾害易发性分区中面积占比最大的区域,澜沧江全流域内基本都有分布,集中分布与上游中部与中游地区;低易发区面积 12 623 km²,占区内澜沧江流域面积的 28.49%,主要分布于澜沧江流域上游地区,毗邻金沙江流域地区;不易发区面积 6 803 km²,占区内澜沧江流域面积的 15.35%,主要分布于澜沧江流域边缘地区,在南部地区澜沧江下游分布面积较多且较为集中,见图 7(b)。

(3)怒江流域地质灾害易发性评价

怒江流域地质灾害高易发区面积 4 112 km²,占区内怒江流域面积的 9.80%,为怒江流域地质灾害易发性分区中面积占比最小的区域,主要分布于上游东北部以及中部地区,中下游地区分布较少;中易发面积 14 965 km²,占区内怒江流域面积的 35.67%,也为怒江流域地质灾害易发性分区中面积占比最大的区域,该区主要分布于流域上游以及下游西部地区,且在上游地区呈集中分布趋势,下游地区呈零星分布趋势;低易发面积 13 720 km²,占区内怒江流域面积的 32.70%,主要分布于不易发区边缘,上中下游地区均有分布且在北部地区与中部地区呈集中分布态势;不易发面积 9 161 km²,占区内怒江流域面积的 21.83%,主要分布于怒江流域上游西部地区以及下游中部地区,见图 7(c)。

3.4 评价结果精度验证

总体来看,通过对各流域地质灾害点分布进行易发性评价结果核验,金沙江流域中易发及以上区域地质灾

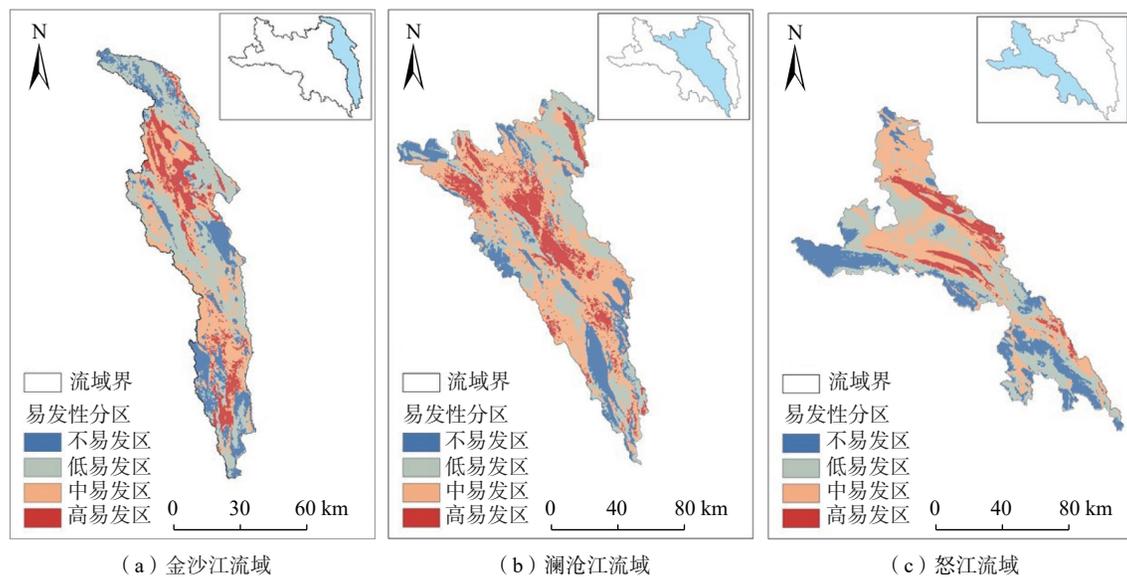


图 7 流域地质灾害易发性分布

Fig. 7 Distribution map of geological hazard susceptibility in Jinsha River Basin

害点数量占金沙江流域地质灾害总数的 54.93%，澜沧江流域中易发及高易发区域地质灾害占灾害点总数的 79.68%，怒江流域中易发及高易发区域地质灾害占灾害点总数的 61.29%。同时，结合随机森林模型的整体精度，昌都市各流域地质灾害易发性评价结果较为准确，符合昌都市实际地质灾害分布结果，具有一定的可信度。

4 结论与讨论

4.1 结论

文章通过对西藏昌都市地质灾害空间分布特征进行分析，同时将其划分为三大流域，选取海拔、坡度、地形起伏度、断层密度、岩性等 10 个指标构建昌都市地质灾害易发性评价指标体系，基于随机森林模型对各流域地质灾害易发性影响因素重要性程度进行分析，利用 GIS“叠加分析”得到各流域地质灾害易发性分布，结论如下：

(1) 昌都市地质灾害类型主要以小型灾害为主，大型灾害分布相对较少但危害巨大，险情等级较高，同时，区域内地质灾害的空间分布具有沿河流与道路呈条带状分布的特征，该特征与各流域地质灾害易发性影响因素具有一定的相关性。

(2) 总体来看，各流域地质灾害的影响因素大致相同，首先，地层岩性与活动断层的分布以及 NDVI 均为地质灾害发生的前提条件，道路密度、河流密度对于各流域地质灾害的发生起到诱发作用，同时，各流域间地

质灾害发生的影响因素也存在一定的差异性，金沙江流域受海拔与道路影响较为突出，澜沧江流域受居民点密度影响较为突出，而怒江流域受道路因素影响较为突出。

(3) 各流域地质灾害易发性空间分布存在差异，金沙江流域低易发面积占比最大，澜沧江与怒江流域均为中易发面积占比最大；三大流域均以高易发所占比最小，但在全流域内均有分布，且主要分布于人类活动较为强烈、岩性较软等区域。

4.2 讨论

(1) 大量研究表明，基于区域地貌单元的地质灾害易发性评价可更好地符合区域特性，因此，在接下来的工作中可进一步放大研究尺度，合理利用 GIS 等技术手段，对区域地质灾害进行精细化研究，提高研究的实际利用价值；

(2) 以崩塌、滑坡以及泥石流等典型地质灾害为例，虽然影响地质灾害发生的因素总体相同，但各灾种的成灾机理还是存在一定差异，将各灾种分开进行易发性评价相对符合实际，其实际应用价值相对更高。

参考文献 (References):

- [1] IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis [R]. Geneva: IPCC, 2021.
- [2] 高杨, 李滨, 冯振, 等. 全球气候变化与地质灾害响应分析 [J]. 地质力学学报, 2017, 23(1): 65-77. [GAO Yang, LI Bin, FENG Zhen, et al. Global climate change and geological disaster response analysis [J]. Journal of Geomechanics, 2017,

- 23(1): 65 – 77. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 殷跃平. 中国地质灾害减灾战略初步研究 [J] . *中国地质灾害与防治学报*, 2004, 15(2): 1 – 8. [YIN Yueping. Initial study on the hazard-relief strategy of geological hazard in China [J] . *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2004, 15(2): 1 – 8. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 自然资源部. 2019年全国地质灾害通报 [R] . 北京: 中华人民共和国自然资源部, 2020. [Ministry of Natural Resources of People's Republic of China. The Bulletin of National Geological Disaster in 2019 [R] . Beijing: Ministry of Natural Resources of People's Republic of China. 2020. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 彭惠, 穆柯, 董元宏. 川藏交通走廊冻融侵蚀风险评价与区划研究 [J] . *公路*, 2019, 64(10): 157 – 161. [PENG Hui, MU Ke, DONG Yuanhong. Research on risk assessment and regionalization of freeze-thaw erosion in Sichuan-Tibet transportation corridor [J] . *Highway*, 2019, 64(10): 157 – 161. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 谭玉敏, 郭栋, 白冰心, 等. 基于信息量模型的涪陵区地质灾害易发性评价 [J] . *地球信息科学学报*, 2015, 17(12): 1554 – 1562. [TAN Yumin, GUO Dong, BAI Bingxin, et al. Geological hazard risk assessment based on information quantity model in Fuling District, Chongqing City, China [J] . *Journal of Geo-Information Science*, 2015, 17(12): 1554 – 1562. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 赵帅, 赵洲. 基于信息量模型的地质灾害易发性评价 [J] . *水力发电*, 2019, 45(3): 27 – 32. [ZHAO Shuai, ZHAO Zhou. Geological hazard risk assessment based on information quantity model [J] . *Water Power*, 2019, 45(3): 27 – 32. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 陈立华, 李立丰, 吴福, 等. 基于GIS与信息量法的北流市地质灾害易发性评价 [J] . *地球与环境*, 2020, 48(4): 471 – 479. [CHEN Lihua, LI Lifeng, WU Fu, et al. Evaluation of the geological hazard vulnerability in the Beiliu City based on GIS and information value model [J] . *Earth and Environment*, 2020, 48(4): 471 – 479. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 王哲, 易发成. 基于层次分析法的绵阳市地质灾害易发性评价 [J] . *水文地质工程地质*, 2007, 34(3): 93 – 98. [WANG Zhe, YI Facheng. Evaluation of geological hazard probability of occurrence based on analytical hierarchy process in Mianyang City [J] . *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2007, 34(3): 93 – 98. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 金艳珠, 谈树成, 虎雄岗, 等. 基于层次分析法与GIS相结合的岩溶塌陷地质灾害易发性分区评估——以云南省师宗县为例 [J] . *热带地理*, 2012, 32(2): 173 – 178. [JIN Yanzhu, TAN Shucheng, HU Xionggang, et al. Geo-hazard susceptibility zoning evaluation of Karst collapse based on the combination of AHP and GIS: A case study of Shizong, Yunnan [J] . *Tropical Geography*, 2012, 32(2): 173 – 178. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 李郎平, 兰恒星, 郭长宝, 等. 基于改进频率比法的川藏铁路沿线及邻区地质灾害易发性分区评价 [J] . *现代地质*, 2017, 31(5): 911 – 929. [LI Langping, LAN Hengxing, GUO Changbao, et al. Geohazard susceptibility assessment along the Sichuan-Tibet railway and its adjacent area using an improved frequency ratio method [J] . *Geoscience*, 2017, 31(5): 911 – 929. (in Chinese with English abstract)]
- [12] CHOI J, OH H J, LEE H J, et al. Combining landslide susceptibility maps obtained from frequency ratio, logistic regression, and artificial neural network models using ASTER images and GIS [J] . *Engineering Geology*, 2012, 124: 12 – 23.
- [13] LEE S, SAMBATH T. Landslide susceptibility mapping in the Damrei Romel area, Cambodia using frequency ratio and logistic regression models [J] . *Environmental Geology*, 2006, 50(6): 847 – 855.
- [14] YILMAZ I. Landslide susceptibility mapping using frequency ratio, logistic regression, artificial neural networks and their comparison: a case study from Kat landslides (Tokat—Turkey) [J] . *Computers & Geosciences*, 2009, 35(6): 1125 – 1138.
- [15] ROSSI M, GUZZETTI F, REICHENBACH P, et al. Optimal landslide susceptibility zonation based on multiple forecasts [J] . *Geomorphology*, 2010, 114(3): 129 – 142.
- [16] 田春山, 刘希林, 汪佳. 基于CF和Logistic回归模型的广东省地质灾害易发性评价 [J] . *水文地质工程地质*, 2016, 43(6): 154 – 161. [TIAN Chunshan, LIU Xilin, WANG Jia. Geohazard susceptibility assessment based on CF model and Logistic Regression models in Guangdong [J] . *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2016, 43(6): 154 – 161. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 黄健敏, 赵国红, 廖芸婧, 等. 基于Logistic回归的降雨诱发区域地质灾害易发性区划及预报模型建立——以安徽歙县为例 [J] . *中国地质灾害与防治学报*, 2016, 27(3): 98 – 105. [HUANG Jianmin, ZHAO Guohong, LIAO Yunjing, et al. Research on rainfall induced regional geo-hazard forecast model based on the logistic regression [J] . *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2016, 27(3): 98 – 105. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 祁于娜, 王磊. 层次分析-熵值定权法应用于山区城镇地质灾害易发性评价 [J] . *测绘通报*, 2021(6): 112 – 116. [QI Yuna, WANG Lei. Application of AHP-entropy weight method in hazards susceptibility assessment in mountain town [J] . *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2021(6): 112 – 116. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 陈绪钰, 倪化勇, 李明辉, 等. 基于加权信息量和迭代自组织聚类的地质灾害易发性评价 [J] . *灾害学*, 2021,

- 36(2): 71 – 78. [CHEN Xuyu, NI Huayong, LI Minghui, et al. Geo-hazard susceptibility evaluation based on weighted information value model and ISODATA cluster [J]. *Journal of Catastrophology*, 2021, 36(2): 71 – 78. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 李远远, 梅红波, 任晓杰, 等. 基于确定性系数和支持向量机的地质灾害易发性评价 [J]. *地球信息科学学报*, 2018, 20(12): 1699 – 1709. [LI Yuanyuan, MEI Hongbo, REN Xiaojie, et al. Geological disaster susceptibility evaluation based on certainty factor and support vector machine [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2018, 20(12): 1699 – 1709. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 曹鹏, 黎应书, 李宗亮, 等. 西藏昌都白格滑坡斜坡地质结构特征及成因机制 [J]. *地球科学*, 2021, 46(9): 3397 – 3409. [CAO Peng, LI Yingshu, LI Zongliang, et al. Geological structure characteristics and genetic mechanism of baige landslide slope in Changdu, Tibet [J]. *Earth Science*, 2021, 46(9): 3397 – 3409. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 邓建辉, 高云建, 余志球, 等. 堰塞金沙江上游的白格滑坡形成机制与过程分析 [J]. *工程科学与技术*, 2019, 51(1): 9 – 16. [DENG Jianhui, GAO Yunjian, YU Zhiqiu, et al. Analysis on the formation mechanism and process of baige landslides damming the upper reach of Jinsha River, China [J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2019, 51(1): 9 – 16. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 李孝攀. 基于GIS的甘孜—昌都区域地质灾害易发性区划及其铁路线路规划设计应用研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2018. [LI Xiaopan. Research on geological hazard space division and application of railway line planning and design in Ganzi-Changdu region based on GIS [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 高华喜, 殷坤龙. 降雨与滑坡灾害相关性分析及预警预报阈值之探讨 [J]. *岩土力学*, 2007, 28(5): 1055 – 1060. [GAO Huaxi, YIN Kunlong. Discuss on the correlations between landslides and rainfall and threshold for landslide early-warning and prediction [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(5): 1055 – 1060. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 王腾, 孙晓光, 卓永, 等. 近36年藏东“三江”流域农业气候资源变化特征 [J]. *中国农业通报*, 2017, 33(9): 106 – 113. [WANG Teng, SUN Xiaoguang, ZHUO Yong, et al. Agricultural climate resources: variation characteristics in the river source region of eastern Tibet in recent 36 years [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2017, 33(9): 106 – 113. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 毛刚, 胡月萍, 陈媛. 地质灾害频发山区聚落安全性探索——以横断山系的集镇和村庄为例 [J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2014, 46(1): 101 – 108. [MAO Gang, HU Yueping, CHEN Yuan. The safety of the settlement in mountain area with frequent geological disasters: Examples of villages and towns in the Hengduan Mountains [J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition)*, 2014, 46(1): 101 – 108. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 昌都市统计局国家调查局昌都调查队. 2018年昌都地区统计年鉴 [Z]. 昌都, 2019. [Changdu City Bureau of Statistics National Bureau of Investigation Changdu Survey Team. 2018 Changdu Regional Statistical Yearbook [Z]. Changdu, 2019. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 唐川, 马国超. 基于地貌单元的小区域地质灾害易发性分区方法研究 [J]. *地理科学*, 2015, 35(1): 91 – 98. [TANG Chuan, MA Guochao. Small regional geohazards susceptibility mapping based on geomorphic unit [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2015, 35(1): 91 – 98. (in Chinese with English abstract)]
- [29] 鲁霞, 兰安军, 母浩江, 等. 基于信息量模型的盘州市地质灾害易发性评价 [J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(14): 5544 – 5551. [LU Xia, LAN Anjun, MU Haojiang, et al. Geological hazard risk assessment based on information quantity model in Panzhou City [J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(14): 5544 – 5551. (in Chinese with English abstract)]
- [30] 中华人民共和国国土资源部. 地质灾害排查规范: DZ/T 0284—2015 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2015. [Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. Specification of dynamic survey on geological hazards: DZ/T 0284—2015 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2015. (in Chinese)]
- [31] 中华人民共和国国土资源部. 滑坡崩塌泥石流调查规范: DZ/T0261-2014 [S]. 北京: 中华人民共和国自然资源部, 2014. [Ministry of Natural Resources of People's Republic of China. Landslide and debris flow investigation specifications: DZ/T0261-2014 [S]. Beijing: Ministry of Natural Resources of People's Republic of China. 2014. (in Chinese with English abstract)]
- [32] 王盈, 金家梁, 袁仁茂. 藏东南地区地质灾害空间分布及影响因素分析 [J]. *地震研究*, 2019, 42(3): 428 – 437. [WANG Ying, JIN Jiali, YUAN Renmao. Analysis on spatial distribution and influencing factors of geological disasters in southeast Tibet [J]. *Journal of Seismological Research*, 2019, 42(3): 428 – 437. (in Chinese with English abstract)]
- [33] 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 Feng, ZHANG Jun, RAN Youhua, 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 with English abstract)]
- [34] BREIMAN L. Random forests [J]. *Machine Learning*, 2001, 45: 5 – 32.
- [35] REICHSTEIN M, CAMPS-VALLS G, STEVENS B, et al. Deep learning and process understanding for data-driven Earth system science [J]. *Nature*, 2019, 566(7743): 195 – 204.
- [36] 方匡南, 吴见彬, 朱建平, 等. 随机森林方法研究综述 [J]. *统计与信息论坛*, 2011, 26(3): 32 – 38. [FANG Kuangnan, WU Jianbin, ZHU Jianping, et al. A review of technologies on random forests [J]. *Statistics & Information Forum*, 2011, 26(3): 32 – 38. (in Chinese with English abstract)]
- [37] 廖小平, 徐风光, 蔡旭东, 等. 香丽高速公路边坡地质灾害发育特征与易发性区划 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2021, 32(5): 121 – 129. [LIAO Xiaoping, XU Fengguang, CAI Xudong, et al. Development characteristics and susceptibility zoning of slope geological hazards in Xiangli expressway [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, 32(5): 121 – 129. (in Chinese with English abstract)]
- [38] 屠水云, 张钟远, 付弘流, 等. 基于CF与CF-LR模型的地质灾害易发性评价 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2022, 33(2): 96 – 104. [TU Shuiyun, ZHANG Zhongyuan, FU Hongliu, et al. Geological hazard susceptibility evaluation based on CF and CF-LR model [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2022, 33(2): 96 – 104. (in Chinese with English abstract)]
- [39] 罗守敬, 王珊珊, 付德荃. 北京山区突发性地质灾害易发性评价 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2021, 32(4): 126 – 133. [LUO Shoujing, WANG Shanshan, FU Dequan. Assessment on the susceptibility of sudden geological hazards in mountainous areas of Beijing [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, 32(4): 126 – 133. (in Chinese with English abstract)]
- [40] 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)]
- [41] 刘飞. 青藏高原生态风险综合评估与区域分异 [D]. 西宁: 青海师范大学, 2020. [LIU Fei. Comprehensive assessment ecological risk and regional differentiation in the Qinghai-Tibet Plateau [D]. Xining: Qinghai Normal University, 2020. (in Chinese with English abstract)]
- [42] 向茂西, 李永红, 贺卫中, 等. 陕西省汉中市汉台区地质灾害形成条件分析 [J]. *科技视界*, 2014(9): 37 – 39. [XIANG Maoxi, LI Yonghong, HE Weizhong, et al. Analysis of the formation conditions of geological disaster in Hantai, Hanzhong, Shaanxi [J]. *Science & Technology Vision*, 2014(9): 37 – 39. (in Chinese with English abstract)]
- [43] 张田田, 杨为民, 万飞鹏. 浑河断裂带地质灾害发育特征及其成因机制 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2022, 52(1): 149 – 161. [ZHANG Tiantian, YANG Weimin, WAN Feipeng. Characteristics and formation mechanism of geohazards in Hunhe fault zone [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2022, 52(1): 149 – 161. (in Chinese with English abstract)]