

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.00-15

基于机器学习的滑坡崩塌地质灾害气象风险预警研究

李阳春¹, 刘黔云¹, 李 潇¹, 顾天红², 张 楠¹

(1. 贵州省地质环境监测院, 贵州 贵阳 550001; 2. 贵州省气象台, 贵州 贵阳 550001)

摘要:在划分气象风险等级时,传统地质灾害气象风险预警方法忽略了承灾体脆弱性因素,且气象风险预报等级整体偏高,导致高等级风险区空报率较高。基于此,提出基于机器学习的滑坡、崩塌灾害气象风险预警方法。利用信息量法,分析气象因素影响程度。选取坐标点、降雨量、易发生等级,将其作为机器学习人工神经网络的输入节点,判断是否发生崩塌、滑坡灾害;针对地质灾害区域,根据影响程度计算气象引发因子指数,结合滑坡、崩塌灾害潜势度 G 和承灾体脆弱性 M ,确定气象风险预警指数 R ,划分预警级别,完成滑坡、崩塌灾害气象风险预警。实验结果表明,设计方法有效降低了三级预报和四级预警空报率,提升了预警精细化程度。

关键词:机器学习; 地质灾害; 滑坡灾害; 崩塌灾害; 气象风险; 预警

中图分类号: TP694

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2021)03-0118-06

Exploring early warning and forecasting of meteorological risk of landslide and rockfall induced by meteorological factors by the approach of machine learning

LI Yangchun¹, LIU Qianyun¹, LI Xiao¹, GU Tianhong², ZHANG Nan¹

(1. Guizhou Geological Environment Monitoring Institute, Guiyang, Guizhou 550001, China; 2. Meteorological Observatory of Guizhou, Guiyang, Guizhou 550001, China)

Abstract: In the traditional methods of meteorological risk early warning and forecasting, the vulnerability factors of disaster bearing bodies are ignored when classifying the meteorological risk level, and the meteorological risk prediction level is relatively high, which leads to the high air report rate in high-level risk areas. Based on this, a method of early warning and forecasting of meteorological risk of landslide and collapse geological disasters based on machine learning is proposed. By using the information quantity method, the influence degree of meteorological factors is analyzed, and the coordinate point, rainfall and prone level are selected as input nodes of machine learning artificial neural network to judge whether geological disaster occurs; for the area of ground damage, the meteorological cause sub index is calculated according to the influence degree. Combined with the potential degree of geological disaster and vulnerability of disaster bearing body, the meteorological risk warning index is determined, divide the warning and forecast level, and complete the forecast of geological disaster meteorological risk. The experimental results show that the proposed method can effectively reduce the three-level forecast air report rate and the fourth level air alarm rate, and improve the precision of the early warning forecast.

Keywords: machine learning; geological hazard; landslide; rockfall; meteorological risk; early warning and forecast

0 引言

滑坡、崩塌灾害是地质灾害中的重要灾种,对社会

经济、生命财产、地理环境都产生了重要影响^[1]。贵州是地质灾害高发易发地区,常见诱发因素主要为降雨^[2]。因此,研究地质灾害气象风险预警方法,对地质灾害防

收稿日期: 2021-03-29; 修订日期: 2021-05-25

第一作者: 李阳春(1983-),男,湖北武汉人,硕士,高级工程师,研究方向为地质灾害综合防治。E-mail: 82066240@qq.com

通讯作者: 张 楠(1987-),男,重庆綦江人,本科,高级工程师,研究方向为地质灾害气象风险预警。E-mail: 675400947@qq.com

治具有重要作用。研究者对该领域进行了很多研究。文献 [3] 应用 GIS 数据处理功能, 分析地质灾害区域的工程地质, 针对复杂地质的地理环境, 绘制出各气象风险等级下区域地质灾害分布图, 但该方法对气象因素提取不全面, 造成气象风险预警等级整体偏高。文献 [4] 分析气象环境与降水量之间的规律性, 包括降雨阈值和临界降雨量等, 通过地质灾害调查统计, 综合评价气象风险, 但该方法对降雨量的相关性分析较差, 划分的气象风险预警等级同样较高。

针对以上问题, 提出基于机器学习的滑坡、崩塌灾害气象风险预警方法。借助机器学习算法中人工神经网络实现贵州省滑坡、崩塌灾害气象风险预警方法的研究。实验结果表明: 采用设计方法有效降低了滑坡、崩塌三级、四级预警空报率, 提升了预警精细化程度。

1 贵州省滑坡、崩塌灾害气象风险预警方法设计

1.1 气象因素对滑坡、崩塌灾害影响程度计算

为实现贵州省滑坡、崩塌灾害气象风险预警, 需要提取贵州省滑坡、崩塌灾害相关气象因素, 计算气象因素对滑坡、崩塌灾害的影响程度。汇总贵州省各区域的地质灾害详细调查报告、气象局实测降雨量数据, 采用资料查阅、实地访问调查等方式, 以月报形式统计气象引发灾害事件, 同时综合考虑 GPS、天气雷达、闪电定位、自动雨量站等数据来源, 采集非常规观测资料, 获取灾害隐患点数据和灾害易发分区数据。筛选与滑坡、崩塌灾害相关的气象因素。将滑坡、崩塌灾害的发生看作气象因素和下垫面相互作用结果。其中, 气象因素主要为降水, 包括降雨诱发作用、降雨滞后作用等因素。利用信息量法, 客观反映预警单元的地质条件, 分析气象因素对滑坡、崩塌灾害提供的信息量^[5]。计算气象因素和地质灾害的相关函数 $A(y, x_i)$, 公式为:

$$A(y, x_i) = \log_2 B(y|x_i), i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

式中: y ——贵州省地质灾害;

x_i ——第 i 种地质灾害相关气象因素;

n ——因素数量。

x_i 是与 y 有关的变量, $B(y|x_i)$ 为各变量 x_i 条件下的条件概率^[6]。计算单个气象因素 i 的信息量值 I_i , 公式为:

$$A(y, x_i) = \sum_{i=1}^n I_i \quad (2)$$

将整个贵州省区域划分为单元网格, 利用频率统计, 估算条件概率 $B(y|x_i)$, 确定省内地质灾害敏感性^[7]。则地质灾害相关气象因素的总信息量值 Q , 计算公式为:

$$Q = \sum_{i=1}^n \frac{E_i/E}{C_i/C} I_i \quad (3)$$

式中: E_i ——第 i 种气象因素引发的地质灾害点数量;

E ——地质灾害点总数;

C_i ——第 i 种气象因素引发的地质灾害点面积;

C ——贵州省内总面积。

通过总信息量值, 定量分析气象因素对地质灾害的影响程度, Q 值为正时, 判定气象因素利于地质灾害发生, Q 值为负时, 则判定不利于灾害发生, 且气象因素影响程度大小与 Q 值大小呈正相关^[8]。至此完成气象因素对地质灾害影响程度的计算。

1.2 地质灾害发生的判断

在确定气象因素对地质灾害影响程度基础上, 利用机器学习中的神经网络, 判断贵州省各区域是否发生地质灾害。首先, 参照采集地质环境数据, 结合岩性特征、地形地貌、以及气候条件因素, 对贵州省各区域进行条件比较, 利用 GIS 空间分析功能, 定量划分贵州省地质灾害易发生区, 并明确其易发生等级^[9]。划分结果见图 1。

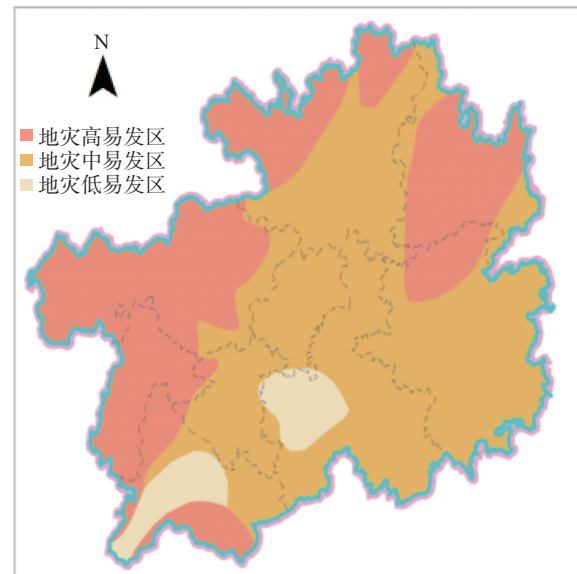


图 1 贵州省地质灾害易发区分布示意图

Fig. 1 Distribution of geological disaster-prone areas in Guizhou Province

根据贵州省近 20 年历史降雨量数据, 以及记录的滑坡、崩塌灾害数据, 明确各区域的降雨量数据, 包含当日临界雨量和 5 日临界雨量。同时, 根据滑坡、崩塌灾害野外调查结果, 对临界雨量值进行适当调整, 以此减小历史统计数据误差^[10]。最后, 将预报区域中易发生区等级、实际降雨量、坐标点 X 坐标和 Y 坐标, 作为机

器学习的人工神经网络 4 个输入节点, 利用线性函数, 激活神经网络的输入层和输出层, 再利用 Sigmoid 函数, 激活隐含层, 输入前对数据进行归一化处理, 使各数据处于同等水平, 消除量纲影响, 避开 Sigmoid 函数训练数据的饱和区^[11]。神经网络结构见图 2。

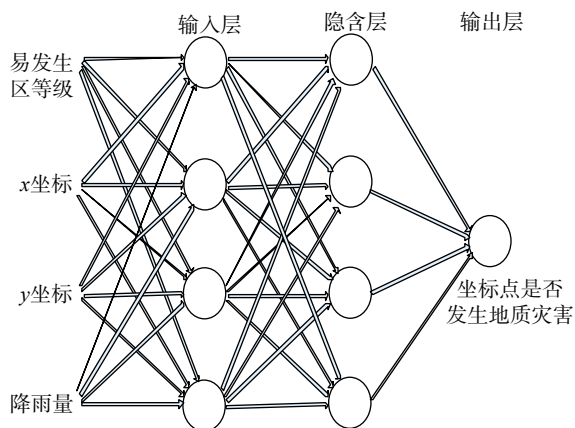


图 2 滑坡、崩塌灾害机器学习神经网络结构

Fig. 2 Structure of machine learning neural network for geological disasters

图 2 中, 设置网络误差收敛到最小时, 其相对应的隐含层节点数为 4, 将滑坡、崩塌灾害性发生可能性, 作为神经网络的 1 个输出节点。根据机器学习输出结果, 判定坐标点区域是否发生滑坡、崩塌灾害, 完成滑坡、崩塌灾害发生的判断。

1.3 滑坡、崩塌灾害气象风险等级划分

针对贵州省滑坡、崩塌灾害发生区域, 根据气象因素影响程度, 计算气象引发因子指数, 结合该区域的地质灾害潜势度、承灾体脆弱性, 划分气象风险的预警等级。

对预警区域进行单元编号, 计算单元区域 j 内的有效降雨量 H_j , 公式为:

$$H_j = \sum_{u=1}^m \frac{F_j}{C_j} k T_{ju} \quad (4)$$

式中: m ——有效降雨日数;

u ——预警当日向前计算的天数;

F_j ——区域 j 的当日和 5 日预报雨量值;

C_j ——当日和 5 日临界雨量值;

T_{ju} ——区域 j 固定天数前的降雨量^[12-13]。

计算单元区域 j 的气象引发因子指数 D_j , 公式为:

$$D_j = H_j \xi Q' \quad (5)$$

式中: ξ ——有效降雨系数;

Q' ——代表单元区域滑坡、崩塌灾害气象因素分量。

计算滑坡、崩塌灾害潜势度 G , 公式为:

$$G = \sum_{d=1}^h a_d V_d \quad (6)$$

式中: h ——地质环境因子总个数;

a_d ——地质环境因子 d 的权重;

V_d ——地质环境因子 d 的量化值。

采用评价指标方式, 在承灾体范围内, 提取一级指标和二级指标, 计算承灾体脆弱性 M , 公式为:

$$M = \sum_{r=1}^Y b_r s_r \quad (7)$$

式中: Y ——评价因子总个数;

b_r ——评价因子 r 的权重;

s_r ——脆弱性评价因子 r 的量化值。

气象风险可概化公式为:

$$R = M \times G \times D_j \quad (8)$$

其中, R 为区域 j 的气象风险预警指数, 取值介于 0~1 之间, 预警指数越大, 判定其地质灾害越易发生^[14-17]。

其预警级别见表 1 ~ 表 3。

表 1 滑坡、崩塌灾害高易发区气象风险预警级别

Table 1 Early warning level of meteorological risk in high areas prone to geological disasters

累积降水 /mm	预报小雨 0.01 ~ 10	预报中雨 10 ~ 25	预报大雨 25 ~ 50	预报暴雨 50 ~ 100	预报大暴雨 ≥100
≤30		蓝色	黄色	橙色	红色
30 ~ 50	蓝色	黄色	橙色	红色	红色
50 ~ 100	黄色	橙色	红色	红色	红色
≥100	橙色	红色	红色	红色	红色

表 2 滑坡、崩塌灾害中易发区气象风险预警级别

Table 2 Warning level of meteorological risk in areas prone to geological disasters

累积降水 /mm	预报小雨 0.01 ~ 10	预报中雨 10 ~ 25	预报大雨 25 ~ 50	预报暴雨 50 ~ 100	预报大暴雨 ≥100
≤30			蓝色	黄色	橙色
30 ~ 50		蓝色	黄色	橙色	红色
50 ~ 100	蓝色	黄色	橙色	红色	红色
≥100	黄色	橙色	红色	红色	红色

在滑坡、崩塌灾害气象风险预警级别中, 滑坡、崩塌灾害气象风险预警的等级为:

(1) 蓝色预警 (一级): 有一定风险, 关注降雨;

(2) 黄色预警 (二级): 风险较高, 关注降雨, 做好监控;

(3) 橙色预警 (三级): 风险高, 注意降雨, 做好监控及应急准备;

(4) 红色预警 (四级): 风险很高, 注意降雨, 做好监

表 3 滑坡、崩塌灾害低易发区气象风险预警级别

Table 3 Early warning level of meteorological risk in low areas prone to geological disasters					
累积降水/mm	预报小雨 0.01 ~ 10	预报中雨 10 ~ 25	预报大雨 25 ~ 50	预报暴雨 50 ~ 100	预报大暴雨 ≥100
≤30				蓝色	黄色
30 ~ 50			蓝色	黄色	橙色
50 ~ 100		蓝色	黄色	橙色	红色
≥100	蓝色	黄色	橙色	红色	红色

注: 其中预报降水为24 h预报降雨量, 累积降水为最近五天累计降雨量。

控与应急撤离准备。

将气象风险预警指数 R , 与预警临界值相比较, 确定该区域是否发布预警, 以及相应的预警级别, 完成基于机器学习的贵州省滑坡、崩塌灾害气象风险预警方法设计。

2 实验分析

选取两种常规滑坡、崩塌灾害气象风险预警方法, 与此次设计方法进行对比实验, 比较各预警等级的空报率大小。

2.1 实验准备

将滑坡、崩塌灾害, 作为贵州省地质灾害研究范围, 采集降雨量数据和地质灾害数据, 作为实验数据源, 在样本中剔除不符合降雨诱发地质灾害个例、以及不匹配区域站降雨资料的降雨量数据。其降雨量历史信息见图 3。

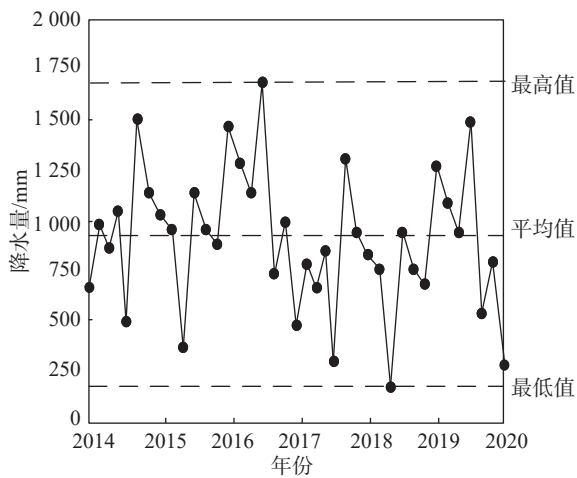


图 3 贵州省降水量变化
Fig. 3 Precipitation change in Guizhou Province

各区域的当日临界雨量和 5 日临界雨量, 其各级预警的具体数值见表 4。

表 4 贵州省当日临界雨量和 5 日临界雨量
Table 4 Critical rainfall and mm rainfall of 5 th Day of Guizhou Province

灾害易发区域		一级	二级	三级	四级
当日临界雨量/m	不易发区	92	55	37	28
	低易发区	110	67	45	34
	中易发区	132	79	53	40
	高易发区	254	151	101	76
5日临界雨量/m	不易发区	223	133	89	67
	低易发区	243	157	103	77
	中易发区	262	157	105	79
	高易发区	304	181	121	91

统计可得 2014—2020 年之间, 贵州省地质灾害共发生 1 204 处, 发生地质灾害具体数据见表 5。

表 5 贵州省典型地质灾害统计数据
Table 5 Statistical data of typical geological disasters in Guizhou Province

灾害点类型	灾害点数量/个	分布市镇数量/个	占灾害点总数比例/%
滑坡	1 032	58	85.7%
崩塌	111	19	9.2%
泥石流	29	12	2.4%
地面塌陷	25	8	2.1%
地裂缝	7	3	0.5%

可见滑坡、崩塌占灾害总数的 94.9%, 三组预警方法分别根据以上历史数据中的滑坡、崩塌灾害, 对贵州省地质灾害气象风险进行预警, 并以 2020 年地质灾害作为参照, 对比检验三组预警结果。

2.2 实验结果

2.2.1 崩塌灾害空报率测试结果

2020 年崩塌灾害隐患点数量共 29 处, 三组方法均可准确预测出该类地质灾害, 其预警等级见图 4。

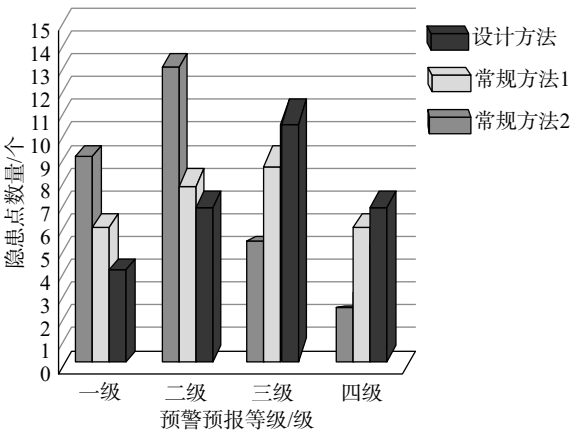


图 4 崩塌预警结果
Fig. 4 Collapse forecast and early warning results

由图 4 可知,两组常规方法三级预报数量和四级预警数量要明显多于设计方法,隐患点崩塌预警的严重程度整体偏高。进一步统计所有年份中,各预警级别的空报率,实验对比结果见表 6。

表 6 崩塌预警空报率
Table 6 Empty reporting rate of collapse early warning and forecast

	设计方法	常规方法1	常规方法2
一级预报/%	0	0	0
二级预报/%	0	0	0
三级预报/%	8.27	14.92	17.92
四级预警/%	7.26	13.29	19.26

由表 6 可知,相比常规方法 1 和常规方法 2,设计方法对崩塌的三级预报空报率分别降低了 6.65% 和 9.65%,四级预警空报率分别降低了 6.03% 和 12.0%。

2.2.2 滑坡灾害空报率测试结果

2020 年滑坡灾害隐患点数量共 33 处,三组方法都准确预测出该类地质灾害,其预警等级见图 5。

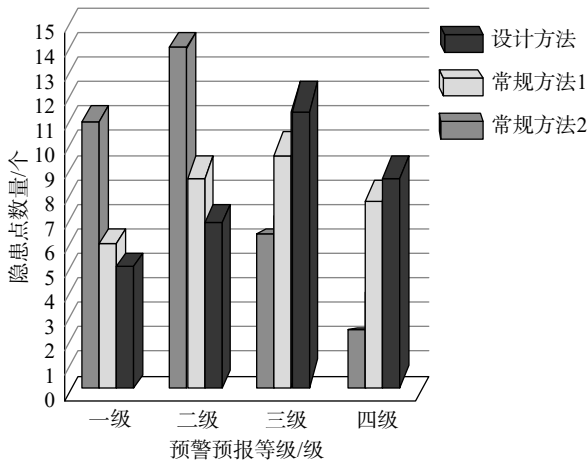


图 5 滑坡预警结果
Fig. 5 Landslide forecast and early warning results

由图 5 可知,针对滑坡这一地质灾害,两组常规方法的三级预警数量和四级预警数量,同样多于设计方法,隐患点预警的严重程度仍整体偏高。进一步统计所有年份中,各预警级别的空报率,实验对比结果见表 7。

由表 7 可知,相比常规方法 1 和常规方法 2,设计方法对滑坡的三级预警空报率分别降低了 5.04% 和 7%,四级预警空报率分别降低了 8.51% 和 11.17%,且常规方法 2 的二级预警仍存在空报率。

3 结论

针对现有滑坡、崩塌地质灾害预警方法中存在的

表 7 滑坡预警空报率
Table 7 Empty reporting rate of landslide early warning and forecast

	设计方法	常规方法1	常规方法2
一级预报/%	0	0	0
二级预报/%	0	0	1.21
三级预报/%	9.92	14.96	16.92
四级预警/%	6.12	14.63	17.29

不足,本文提出采用机器学习算法对地质灾害气象风险进行预警的方法。

(1)该方法通过采用机器学习神经网络中节点的输入,有效预测地质灾害发生。

(2)采用设计方法与常规方法对比中,本文方法对崩塌预警的三级预报空报率分别降低了 5.04% 和 7%,四级预警空报率分别降低了 8.51% 和 11.17%;对滑坡预警的空报率中,三级预报空报率分别降低了 5.04% 和 7%,四级预警空报率分别降低了 8.51% 和 11.17%,验证了本文方法适用于贵州省滑坡、崩塌灾害气象风险预警。

但此次研究仍存在一定不足,在今后研究中,会持续验证每年实际发生的地质灾害,修正该模型,进一步提高地质灾害预警精度。

参考文献 (References) :

[1] 申欣凯,吕义清,张静,等.基于ArcGIS的山西省暴雨灾害风险评估[J].国土资源科技管理,2020,37(1): 61-73. [SHEN Xinkai, LYU Yiqing, ZHANG Jing, et al. Risk assessment of rainstorm disaster in Shanxi Province based on ArcGIS[J]. Scientific and Technological Management of Land and Resources, 2020, 37(1): 61-73. (in Chinese with English abstract)]

[2] 罗贵东,于竹娟,张驹.基于概率分布的达州市地质灾害发生频次与降水量级的关系[J].成都信息工程大学学报,2020,35(6): 697-703. [LUO Guidong, YU Zujuan, ZHANG Ju. The relationship between the frequency of geological disasters and the precipitation in Dazhou based on probability distribution[J]. Journal of Chengdu University of Information Technology, 2020, 35(6): 697-703. (in Chinese with English abstract)]

[3] 李宇梅,杨寅,狄靖月,等.全国地质灾害气象风险精细化网格预报方法及其应用[J].气象,2020,46(10): 1310-1319. [LI Yumei, YANG Yin, DI Jingyue, et al. Meteorological risk assessment method of geological disaster in China and its mesh refinement application[J]. Meteorological Monthly, 2020, 46(10): 1310-1319. (in Chinese with English abstract)]

- [4] 兰腾达. 宁德市地质灾害气象风险预警系统应用与展望 [J]. 福建地质, 2020, 39(2): 155–160. [LAN Tengda. Application and prospect of early warning of meteorological risk system for geological hazards, Ningde City [J]. *Geology of Fujian*, 2020, 39(2): 155–160. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 薛俊卓, 詹辉, 张国良, 等. 长输油气管道河沟段水毁灾害气象风险评价研究 [J]. 安全与环境工程, 2020, 27(2): 168–174. [XUE Junzhuo, ZHAN Hui, ZHANG Guoliang, et al. Meteorological risk assessment of river channel washout disaster of long-distance oil and gas pipelines [J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2020, 27(2): 168–174. (in Chinese with English abstract)]
- [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. [LI Li, ZHU Yongliang, CHEN Liang, et al. Study on geological hazard meteorological risk early warning in Chongqing [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2019, 47(24): 234–236. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 罗鸿东, 李瑞冬, 张勃, 等. 基于信息量法的地质灾害气象风险预警模型: 以甘肃省陇南地区为例 [J]. 地学前缘, 2019, 26(6): 289–297. [LUO Hongdong, LI Ruidong, ZHANG Bo, et al. An early warning model system for predicting meteorological risk associated with geological disasters in the Longnan area, Gansu Province based on the information value method [J]. *Earth Science Frontiers*, 2019, 26(6): 289–297. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 杨竹云, 李华宏, 胡娟, 等. 昭通市地质灾害特征及气象风险预警模型研究 [J]. 云南大学学报(自然科学版), 2019, 41(4): 753–764. [YANG Zuyun, LI Huahong, HU Juan, et al. Research on features of geological hazard and meteorological risk early-warning model in Zhaotong [J]. *Journal of Yunnan University(Natural Sciences Edition)*, 2019, 41(4): 753–764. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 方然可, 刘艳辉, 苏永超, 等. 基于逻辑回归的四川青川县区域滑坡灾害预警模型 [J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(1): 181–187. [FANG Ranke, LIU Yanhui, SU Yongchao, et al. A early warning model of regional landslide in Qingchuan County, Sichuan Province based on logistic regression [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(1): 181–187. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 杨寅, 包红军, 彭涛. 台风“鲇鱼”强降水引发的地质灾害气象风险预警检验与分析 [J]. 暴雨灾害, 2019, 38(3): 221–228. [YANG Yin, BAO Hongjun, PENG Tao. Verification and analysis of meteorological early warning of geological hazards during precipitation of Typhoon "MEGI" [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 2019, 38(3): 221–228. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 包红军, 曹勇, 林建, 等. 山洪灾害气象预警业务技术进展 [J]. 中国防汛抗旱, 2020, 30(1): 40–47. [BAO Hongjun, CAO Yong, LIN Jian, et al. Operational technology advances in meteorological early warning for flash flood disasters [J]. *China Flood & Drought Management*, 2020, 30(1): 40–47. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 方楠, 黄清瀚, 丁雨鑫, 等. 浙江省近3 a气象类灾害预警信息特征 [J]. 浙江农业科学, 2020, 61(6): 1246–1250. [FANG Nan, HUANG Qinghan, DING Yuxin, et al. The characteristics of meteorological disaster early warning information in Zhejiang Province in recent 3 years [J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2020, 61(6): 1246–1250. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 高树静, 董廷坤, 王程龙. 基于机器学习的车道线检测系统仿真与优化 [J]. 计算机仿真, 2020, 37(2): 140–143. [GAO Shujing, DONG Tingkun, WANG Chenglong. Simulation and optimization of lane detection system based on machine learning [J]. *Computer Simulation*, 2020, 37(2): 140–143. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 李爽爽. 精细化暴雨监测预报及风险预警系统的开发与应用 [J]. 浙江气象, 2020, 41(3): 29–35. [LI Shuangshuang. Development and application of refined rainstorm monitoring and forecasting and risk early warning system [J]. *Journal of Zhejiang Meteorology*, 2020, 41(3): 29–35. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 刘云, 康卉君. 江西崩塌滑坡泥石流灾害空间时间分布特征分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(4): 107–112. [LIU Yun, KANG Huijun. Spatial-temporal distribution of landslide, rockfall and debris flow hazards in Jiangxi Province [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2020, 31(4): 107–112. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 程素珍, 路璐, 翟淑花, 等. 2004—2018年北京市突发地质灾害时空分布特点和监测预警状况 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(6): 38–46. [CHENG Suzhen, LU Lu, ZHAI Shuhua, et al. Temporal-spatial distribution and monitoring and early warning of sudden geological disasters in Beijing during the period of 2004 to 2018 [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2020, 31(6): 38–46. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 李滨, 殷跃平, 高杨, 等. 西南岩溶山区大型崩滑灾害研究的关键问题 [J]. 水文地质工程地质, 2020, 27(4): 5–13. [LI Bin, YIN Yueping, GAO Yang, et al. Critical issues in rock avalanches in the karst mountain areas of southwest China [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 27(4): 5–13. (in Chinese with English abstract)]