

引用格式: 陈春利, 方志伟, 2023. 福建省地质灾害气象预警有效降雨模型研究 [J]. 地质力学学报, 29 (1): 99-110. DOI: [10.12090/j.issn.1006-6616.2022090](https://doi.org/10.12090/j.issn.1006-6616.2022090)

Citation: CHEN C L, FANG Z W, 2023. Research on an effective rainfall model for geological disaster early warning in Fujian Province, China [J]. Journal of Geomechanics, 29 (1): 99-110. DOI: [10.12090/j.issn.1006-6616.2022090](https://doi.org/10.12090/j.issn.1006-6616.2022090)

福建省地质灾害气象预警有效降雨模型研究

陈春利, 方志伟

CHEN Chunli, FANG Zhiwei

中国地质环境监测院 (自然资源部地质灾害技术指导中心), 北京 100081

China Institute of Geo-Environment Monitoring (Consultative Centre of Geo-Hazard Mitigation, MNR), Beijing 100081, China

Research on an effective rainfall model for geological disaster early warning in Fujian Province, China

Abstract: Rainfall is one of the most important external factors inducing geological disasters, especially prominent in China's mountainous regions. Many group-occurring geological disasters induced by heavy rainfall occurred in southeast China's middle and low mountainous regions, causing many casualties and property losses. Taking Fujian Province as an example, we carefully examined the actual rainfall data of historical geological disaster cases and conducted correlation studies on typical rainfall processes inducing group-occurring geological disasters based on quantitative rainfall estimation with county-level administrative districts as the statistical unit. We also carried out a partial correlation analysis based on quantitative indicators of the geological environment for verification. The result shows that the occurrence of geological disasters in Fujian correlates with adequate rainfall within three days, and it is reduced by a reduction coefficient of 0.79 daily. Based on that finding, we established an effective rainfall model for Fujian Province and verified it through field monitoring and early warning applications. Applying this rainfall model to geological disaster early warning in Fujian can reduce the warning area, lower the warning level, shorten the warning duration, and improve the accuracy of geological disaster early warning by maintaining the hit ratio. The results of the study can help to characterize the rainfall accurately and can provide a scientific basis for the reasonable assessment of rainfall factors in regional geological disaster early warning.

Keywords: group-occurring geological disaster; southeastern China; rainfall; effective rainfall model; geological disaster early warning

摘要: 降雨是诱发地质灾害最主要的外部因素之一, 在中国东南沿海中低山丘陵区强降雨诱发的地质灾害集群发生, 造成了大量人员伤亡和财产损失。以福建省为例, 深入挖掘多年历史地质灾害案例的降雨实况资料, 以县级行政区为统计单元, 基于量化降雨估测对诱发群发性地质灾害的典型降雨过程进行相关性研究, 并基于地质环境的量化指标进行了偏相关分析验证, 建立了福建省有效降雨模型并通过现场监测和预警应用进行了验证。研究表明: 福建地区地质灾害的发生与灾害发生 3 日内降雨相关, 且以 0.79 为折减系数逐日折减, 据此建立了福建地区有效降雨模型; 将福建地区有效降雨模型应用于地质灾害气象预警, 可以在保证地质灾害命中率的前提下, 减少预警区面积、降低预警等级、缩短预警持续时间, 提高地质灾害气象预警的精准性。研究结果有助于准确把握降雨特征, 可为区域地质灾害气象预警中降雨因子的合理评估提供科学依据。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42207213); 中国地质调查局地质环境监测项目 (121210140001500); 中国地质调查局地质调查项目 (0001212018CC60020)

This research is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No.42207213), the Geological Environment Monitoring Program of CGS (Grant No.121210140001500), and the Geological Survey Program of the China Geological Survey (Grant No.0001212018CC60020).

第一作者: 陈春利 (1987-), 女, 博士, 高级工程师, 主要从事地质灾害成灾机理及预警预报等方面的研究。E-mail: chen_chunli@126.com

收稿日期: 2022-07-15; 修回日期: 2022-11-14; 责任编辑: 范二平

关键词：群发性地质灾害；东南地区；降雨；有效降雨计算模型；地质灾害预警预报
 中图分类号：P694 文献标识码：A 文章编号：1006-6616 (2023) 01-0099-12
 DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2022090

0 引言

降雨是诱发地质灾害最主要的外部因素之一，强降雨诱发的地质灾害以群发性、突发性为显著特征，严重危害公民生命财产安全(刘传正, 2004; 周平根, 2004)。在充分考虑地形地貌、地层岩性和力学性质等内在因素条件下，研究地质灾害与降雨事件的关联性，开展区域地质灾害的预警预报，是防范降雨诱发地质灾害的有效途径，并已取得显著成效(王雁林, 2005; 李欣, 2006; Baum and Godt, 2010; 魏平新和李秀娟, 2015; 陈春利等, 2016; Piciullo et al., 2018; 方然可等, 2021)。

国内外学者通过地质灾害案例的统计分析总结诱发地质灾害的降雨特征，主要集中在地质灾害与雨型、降雨周期、降雨持时、暴雨持续时间等时空分布规律研究(刘艳辉等, 2009, 2011)，以及降雨诱发地质灾害的阈值研究，包括临界累计雨量阈值(24 h、1 d、3 d、7 d、15 d 累计雨量等)和临界降雨强度阈值(谢守益等, 1995; 柳源, 1998; Glade et al., 2000; Aleotti, 2004)。实际上，由于地表径流和蒸腾作用，渗入岩土体的降雨量小于气象记录实况降雨量，因此近年来在降雨诱发滑坡的研究中逐步引入有效降雨量概念(Crozier, 1999; 李铁锋和丛威青, 2006; 简文彬等, 2013; 吴益平等, 2014)。在以往的研究中，国内外学者通过折减系数模拟土壤含水量的衰减过程，提出了前期有效降雨模型(Crozier and Eyles, 1980; Crozier, 1986; 陈景武, 1990; 刘传正等, 2009)，其中 Crozier 提出的模型应用最为广泛(Crozier and Eyles, 1980; Crozier, 1986)，许多地方的对比检验效果都比较理想(李铁锋和丛威青, 2006; 吴益平等, 2014)。

在中国东南沿海和西部山区等地区，岩体风化差异大、坡残积层发育，持续强降雨过程特征明显，降雨诱发的群发性地质灾害群集发生，易造成大量人员伤亡和财产损失，是降雨诱发群发性地质灾害气象预警的重点研究区(韦方强等, 2010; 刘艳辉和刘丽楠, 2016; 贺凯等, 2016; 熊炜等, 2018; 闫金凯等, 2020; 李壮等, 2020; 韩帅等, 2022; 张浩韦等, 2022)。相关学者针对东南沿海地区的研究得到了

台风影响第一天地质灾害对当日雨量更敏感，第二天地质灾害表现为受到前期有效雨量和当日雨量共同影响的特征(刘艳辉和刘丽楠, 2016)，以及福建山区的1~3天降雨是导致发生滑坡的重要降雨区间(伍宇明等, 2014)等重要结论，但针对有效降雨模型的研究较少。文章以福建省中低山丘陵区为例，研究地质灾害与有效降雨量的相关性，针对性地研究岩土体入渗降雨量对地质灾害的诱发作用，提出福建省有效降雨模型，为区域地质灾害气象预警中降雨因子的合理评估提供依据。

1 研究区概况

福建省地处华南褶皱系的东部，地势西北高、东南低(图1)，山地丘陵占陆地面积的90%左右，山坡坡度一般 $10^{\circ}\sim 30^{\circ}$ ，局部大于 30° 。地貌类型复杂，按成因可分为断块侵蚀、断块剥蚀、侵蚀溶蚀和断块堆积4种基本类型。地层发育较齐全，除志留系、中一下泥盆统和下第三系缺失外，自太古界至第四系均有出露。岩性以岩浆岩为主，约占全省陆地面积的64%；变质岩主要分布在西北地区，面积约占陆地面积22%，主要分布在福建西北地区；沉积岩主要分布于闽西南地区，占全省陆地面积14%。区内北东—北东东、北西—东西及南北走向断裂十分发育，其中南平—宁化(北东)断裂带与

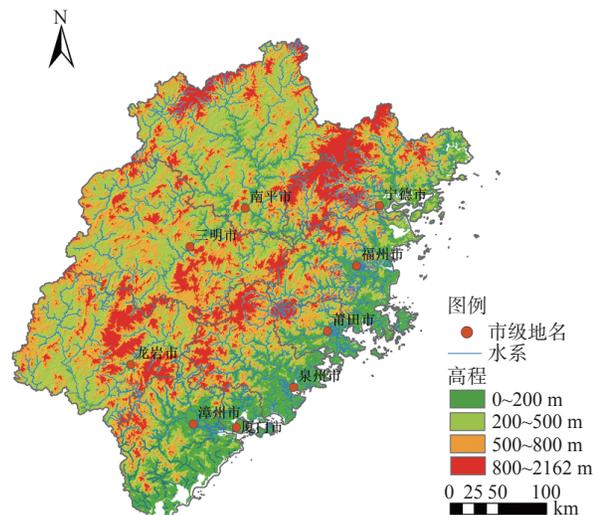


图1 福建省地势图

Fig. 1 Topographic map of Fujian

政和-大埔(北北东)构造-岩浆带将福建省割切为闽西北、闽西南及闽东 3 个地体(韦德光等, 1997; 图 2)。地表附近多数为高角度断层和节理, 花岗岩风化壳广泛分布, 坡麓地区残积、残坡积物构成的坡积裙大量发育, 为降雨条件下发生浅层滑坡提供了物质基础(何永金, 1995; 王涛等, 2003; 李欣, 2006)。



图 2 福建省构造分区图(韦德光等, 1997)

Fig. 2 Tectonic zones in Fujian(Wei et al., 1997)

气候分区显示福建省地处南亚热带和中亚热带海洋性季风气候区, 温暖湿润, 雨量丰沛, 大多数地区年降雨时间介于 120~200 天之间, 年暴雨时间介于 3.3~7.5 天, 内陆多于沿海, 集中于春、夏两季, 春季多梅雨, 夏季多台风暴雨, 10 月至翌年 2 月为旱季。据气象观测资料统计, 全省年均降雨量 1036~2048 mm, 大于 1800 mm 的多雨中心一处是在周宁、寿宁、宁德、柘荣、屏南一带, 另一处在武夷山、邵武、光泽一带(图 3)。区内水系发育, 河流众多, 河网密度达 0.1 m/km², 水系走向多呈南东东方向, 山地性河流居多, 河床比降大, 水量丰富, 流量和 水位季节变化显著。地下水赋存类型主要为基岩裂隙水、碳酸盐岩岩溶裂隙水和松散孔隙水。

根据福建省地质灾害详细调查成果, 全省地质灾害易发区面积达 8.8×10⁴ km², 占全省陆地面积的 75%。由于福建地区濒临西太平洋, 降雨量大且相对集中, 台风暴雨多, 气候、地质环境条件决定了福建省为降雨诱发群发性地质灾害多发区之一(黄俊宝, 2013; 叶龙珍等, 2015; 狄靖月等, 2019; 闫金凯等, 2020)。据《全国地质灾害通报》(中国地质环境

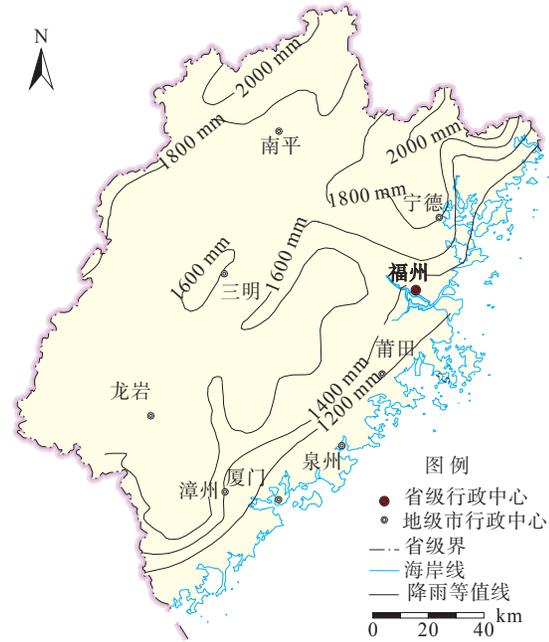


图 3 福建省年降雨等值线图

Fig. 3 Contour map of annual rainfall in Fujian

监测院, 2011—2020), 2011—2020 年, 福建省共发生地质灾害 5343 起, 造成 190 人死亡失踪, 直接经济损失 5.4 亿元。滑坡、崩塌、泥石流是主要灾害类型, 集中发生在 5—9 月, 地质灾害发生数量与月均降雨量耦合性较好(图 4)。台风暴雨、强降雨作用下群发性地质灾害多发(表 1), 在福建北部、中西部等地区降雨诱发的地质灾害集群出现(图 5)。

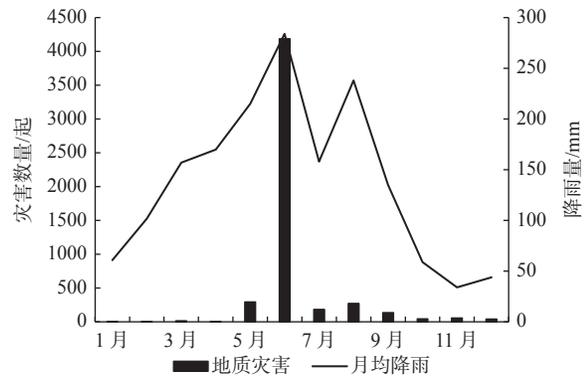


图 4 地质灾害与月平均降雨量关系图(2010—2019 年)

Fig. 4 Relationship between monthly rainfall and geological disaster (2010—2019)

2 福建地区有效降雨模型

降雨是引发地质灾害的重要因素, 地质灾害的发生不仅与当日雨量密切相关, 也存在一定的滞后效应, 且随着降雨时间的前移, 前期降雨的影响逐

表 1 福建省典型群发性地质灾害发生数量统计表 (2010—2019 年)

Table 1 Group-occurring geological disasters in Fujian (2010–2019)

年份	降雨时间	降雨情况	地质灾害数量/起	典型案例
2010	6月13日—27日	全省大部分县市降雨量超过100 mm, 59个县(市、区)的733个乡镇降雨量超过250 mm, 26个县(市、区)的158个乡镇降雨量超过500 mm, 以建宁樱桃岭的875 mm最大	1574	南平市“6·14”滑坡灾害(造成24人死亡失踪)
2011	8月29日—9月3日	台风“南玛都”在福建登陆, 福建东部局部地区出现了大暴雨	85	
2012	8月2日—3日	台风“苏拉”在福建登陆, 北部局部区域和西部大部分区域出现暴雨、大暴雨	41	
2015	5月18日—21日	中南部地区出现大范围的大暴雨, 局地特大暴雨	107	
2016	5月7日—9日	西部的三明、南平两市发生的特大暴雨, 多处雨量站点监测实况雨量大于150 mm/d, 成片区出现大暴雨量级及以上等级的降雨	43	福建泰宁“5·8”特大型泥石流灾害(造成36人死亡失踪, 直接经济损失600万元)
2019	7月6日—9日	福建大部有暴雨, 局地有大暴雨, 累计雨量100~250 mm	22	

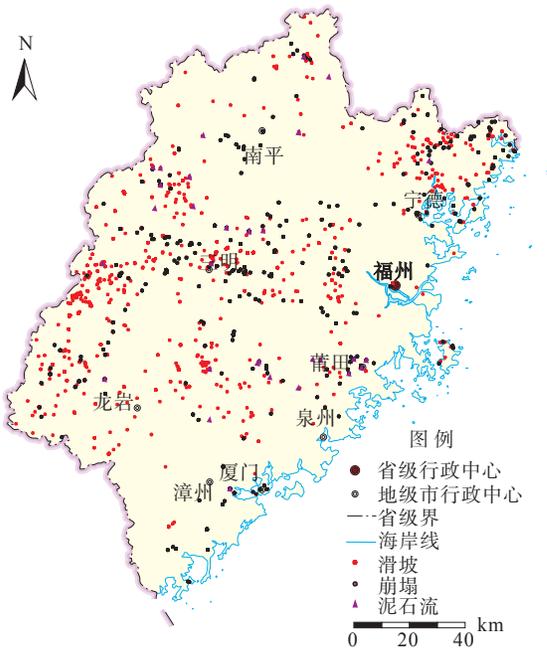


图 5 福建省降雨诱发地质灾害分布图 (2010—2019 年)

Fig. 5 Distribution of the rainfall-induced geological disasters in Fujian(2010–2019)

渐减弱。1980年, Crozier 在降雨诱发的滑坡预报研究中引入 API 方法, 提出用于计算滑坡事件的前期有效降雨模型(公式(1); Crozier, 1986)。许多研究者采用 Crozier 提出的前期有效降雨模型或者对其修改后计算前期有效降雨量(李长江等, 2011), 但是各自所取的累积降雨影响时段(n)和有效降雨系数(k)差异较大(表 2)。

$$P_{a0} = \sum_{i=1}^n k^i R_i \quad (1)$$

公式中: P_{a0} 为前期有效降雨量, mm; i 为计算日前期降雨时间, 天; R_i 为计算日前第 i 日的日降雨量, mm; k 为有效降雨系数; n 为前期有效降雨时间, 天。

在地质灾害气象风险预警中, 以前期有效降雨和当日降雨作为地质灾害诱发因子, 建立有效降雨模型是实现预警的基础, 而确定研究区累积降雨影响时段(n)和有效降雨系数(k)是准确计算有效降雨的关键, 但由于测试条件限制目前多取经验参数。文中在 Crozier 提出的前期有效降雨模型通式的基础上, 考虑群发性地质灾害与降雨的耦合作用, 通过相关性分析确定研究区累积降雨影响时段(n)和有效降雨系数(k), 进而提出有效降雨模型。

通过筛选近 10 年福建地区的降雨诱发地质灾害案例, 保留有准确发灾时间记录的地质灾害案例 460 起, 逐日匹配空间分辨率为 5 km 的定量化降雨估测数据(QPE), 形成 460 个有灾前逐日历史降雨数据的地质灾害样本。以县级行政区为统计单元, 当日 8 时至次日 8 时为统计时间段, 若该时段内发生地质灾害, 则记录为 1 次诱发地质灾害的降雨事件, 筛选的 460 起地质灾害统计为 178 个诱发地质灾害的降雨事件, 其中发生 3 起以上地质灾害的降雨事件 48 起, 最大规模为单日群发地质灾害 41 起。对持续性降雨诱发群发性地质灾害的过程进行追溯, 形成 28 个未引发地质灾害的降雨事件。利用 SPSS 软件分析 206 个降雨事件中地质灾害发生数量与日降雨量的相关性(表 3), 发现福建地区地质灾害发生与前 1 日降雨相关系数最高, 其次为当日降雨和前 2 日降雨, 前 3 日以及之前的日降雨量与地质灾害数量在 0.05 和 0.01 水平上均不满足显著相关。同时考虑内动力条件对地质灾害的控制作用, 采用地质灾害潜势度指标(刘艳辉等, 2008)量化地质环境条件, 并开展偏相关分析(表 4), 同样得到地质灾害发生数量与当日降雨、前 1 日降雨和前 2 日降雨相关性较显著, 与前 3 日及其以前降雨量相关性不显著的结论。因此, 该区域有效降雨计

表 2 地质灾害有效降雨量计算模型一览表 (Crozier and Eyles, 1980; 李长江等, 2011; 唐红梅等, 2013; 狄靖月等, 2019; 刘艳辉等, 2019)

Table 2 Summary of the effective rainfall calculation models for geological disasters (Crozier and Eyles, 1980; Li et al., 2011; Tang et al., 2013; Di et al., 2019; Liu et al., 2019)

时间	提出者	计算方法	衰减系数	计算时间/天	参数说明	研究区
1980	Crozier M J Eyles R J	$P_{a0} = \sum_{i=1}^{10} K^i R_i$	0.84	10	P_{a0} 为前期有效降雨量, mm; i 为计算时间, d; K 为衰减系数; R_i 为第 i 日的日降雨量, mm	美国(渥太华)
1985	濂微克美	$P_{a0} = \sum_{i=1}^{14} \alpha_i R_i$	$0.5^{i/T}$	14	P_{a0} 为前期有效降雨量, mm; i 为计算时间, d;	日本
1991	谭万沛	$P_{a0} = \sum_{i=1}^{14} \alpha_i R_i$	$0.5^{i/2}$	14	α_i 为衰减系数; R_i 为计算日前第 i 日的日降雨量, mm; T 为半衰期	中国(四川、云南、 西藏4条泥石流沟)
1993	谢正伦等	$P_{a0} = \sum_{i=1}^7 \alpha_i R_i$	$0.5^{i/T}$	7		中国(台湾)
2000	中国科学院水利部成都山地 灾害与环境研究所	$P_{a0} = \sum_{i=1}^{20} K^i R_i$	0.8	20	P_{a0} 为前期有效降雨量, mm; i 为计算时间, d; K 为衰减系数; R_i 为第 i 日的日降雨量, mm	中国(云南)
2001	王礼先等	$P_{a0} = \sum_{i=1}^{20} K^i R_i$	0.8	15		中国(北京)
2004	詹钱登等	$P_{a0} = \sum_{i=1}^7 \alpha_i R_i$	0.8	7	P_{a0} 为前期有效降雨量, mm; i 为计算时间, d; α_i 为衰减系数; R_i 为计算日前第 i 日的日降雨量, mm	中国(台湾)
2005	Zezeze	$P_{a0} = \sum_{i=1}^{30} \alpha_i R_i$	0.9	30		葡萄牙
2013	唐红梅等	$P_{a0} = \sum_{i=1}^4 K^i R_i$	0.6	4	P_{a0} 为前期有效降雨量, mm; i 为计算时间, d; K 为衰减系数; R_i 为第 i 日的日降雨量, mm	中国(重庆)
2019	刘艳辉等	$T_i = \sum_{x=1}^m k^x T_{ix}$	0.84	7	T_i 为有效雨量, mm; i 为预警单元编号; m 为 有效降雨时间, d; k 为衰减系数; T_{ix} 为前 x 天 的降雨量, mm; x 为预警当日向前计算的时间	中国(四川)
2019	狄靖月等	$P_{a0} = \sum_{i=0}^{10} K^i R_i$	0.8	15	P_{a0} 为前期有效降雨量, mm; i 为计算时间, d; K 为衰减系数; R_i 为第 i 日的日降雨量, mm	中国(东南地区)

表 3 地质灾害发生数量与日降雨量相关性分析

Table 3 Correlation between the number of geological disasters and daily rainfall

日降雨量/mm	当日	前1日	前2日	前3日	前4日	前5日	前6日	前7日	前8日	前9日
相关系数	0.290**	0.463**	0.137*	-0.066	0.046	-0.057	-0.049	-0.051	-0.058	-0.085

注:**—在0.01水平(双侧)上显著相关; *—在0.05水平(双侧)上显著相关

表 4 地质灾害发生数量与日降雨量偏相关分析

Table 4 Partial correlation between the number of geological disasters and daily rainfall

日降雨量/mm	当日	前1日	前2日	前3日	前4日	前5日	前6日	前7日	前8日	前9日
偏相关系数	0.293**	0.464**	0.137*	-0.067	0.048	-0.057	-0.049	-0.052	-0.059	-0.087

注:**—在0.01水平(双侧)上显著相关; *—在0.05水平(双侧)上显著相关

算时间为3日内, 即 n 取 2。

在确定有效降雨影响时段为3日内的基础上, 采用有效降雨模型通式(公式(1))分别计算有效降雨系数在0~1范围内对应的有效降雨量与地质灾害发生数量的相关性, 发现相关系数呈先升后降的趋势(图6), 在有效降雨系数 $k=0.79$ 时地质灾害发生数量与有效降雨量相关性最强(表5)。根据上述分析, 确定福建地区有效降雨系数为0.79, 累计降雨影响时段为3日内, 提出福建地区有效降雨计算模型:

$$P = \sum_{i=0}^2 0.79^i R_i \quad (2)$$

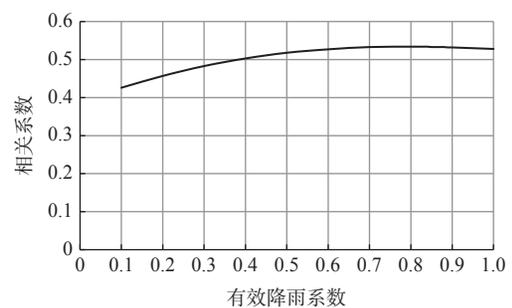


图 6 有效降雨系数-相关系数变化曲线

Fig. 6 Variation curve of effective rainfall coefficient with correlation coefficient

表 5 地质灾害发生数量与有效降雨量相关性分析

Table 5 Correlation between the number of geological disasters and effective rainfall

有效降雨系数	$k=0.77$	$k=0.78$	$k=0.79$	$k=0.80$	$k=0.81$	$k=0.82$	$k=0.83$	$k=0.84$
相关系数	0.53404**	0.53408**	0.53409**	0.53406**	0.53401**	0.53392**	0.53380**	0.53365**

注:**—在0.01水平(双侧)上显著相关

公式中： P 为有效降雨量，mm； i 为计算日前期降雨时间，天； R_i 为计算日前第 i 日的日降雨量，mm。

3 现场监测验证

为验证基于相关性分析建立的有效降雨模型的适用性，通过在福建北部地区开展的降雨入渗现场监测结果辅以验证。监测点位于福建北部宁德市蕉城区石后乡大岭村，在斜坡表层坡积-残积土中开挖监测井开展降雨入渗现场监测，监测期自2020年9月—2021年8月，监测指标包括降雨量、地下水位以及斜坡表层不同深度土体体积含水率(图7)。根据已有研究结果，福建地区降雨诱发地质灾害以浅层土质滑坡为主，通过地下水位监测可开展滑坡预测(何永金, 1995; 许建聪等, 2005; 王智磊等, 2011; 黄俊宝, 2013; 伍宇明等, 2014)，通过斜坡地下水位的上升—消落与降雨序列的响应验证有效降雨模型。

降雨监测显示，监测期内降雨时间为197天，其

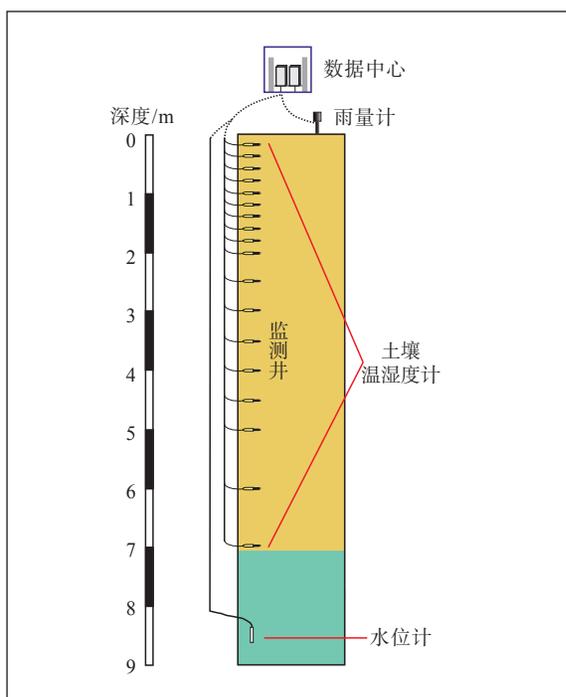


图 7 降雨入渗现场监测示意图

Fig. 7 Schematic diagram showing the site monitoring of rainfall infiltration

中出现暴雨11次，大雨8次，降雨集中出现在5月—8月，2021年8月累计降雨量为全年最多，达到了645 mm。一次集中强降雨导致短期内地下水位突涨，降雨停止后地下水位急速下降；受斜坡整体水文环境影响，年尺度斜坡地下水位呈现典型的线性下降段(9月—次年2月)和上升段(5月—8月)，与早季—雨季交替一致(图8)。

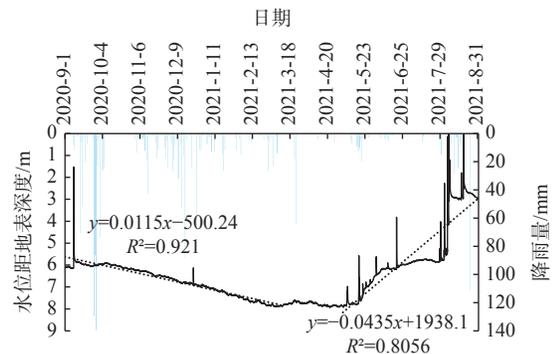


图 8 降雨-地下水位关系图

Fig. 8 Diagram of the rainfall and groundwater level

选择与前、后序降雨有间歇期，且引发地下水位显著波动的降雨过程，通过地下水位的上升—消散验证有效降雨作用周期。2021年5月8日降雨66 mm，导致地下水位上涨0.93 m，该日前20日内最大日降雨量13.3 mm，且前2日无降雨，当日降雨停止后无降雨直至3日后(5月12日)降雨24 mm，但未引起地下水位波动，可排除前序、后续降雨干扰。此时段地下水位呈线性上升，根据趋势模拟无降雨影响下地下水位，降雨后第3天实测地下水位与趋势性模拟水位重合，此后走势基本一致(图9)，由此判断单次降雨影响时段为降雨3日内，与上文提到的有效降雨影响时段吻合。

进一步选择降雨集中的2021年7月26日—8月31日进行验证，由于此前25日内无显著降雨(7月2日—7月26日)可排除前序降雨影响。自7月26日期逐日分别计算3日内累计降雨与有效降雨(公式(2))，可见有效降雨和3日累计降雨均与地下水位上涨波动趋势一致，但采用公式(2)计算的有效降雨量更能及时反映地下水位消落，如8月7日、8月21日，前一日峰值后地下水位出现消落，

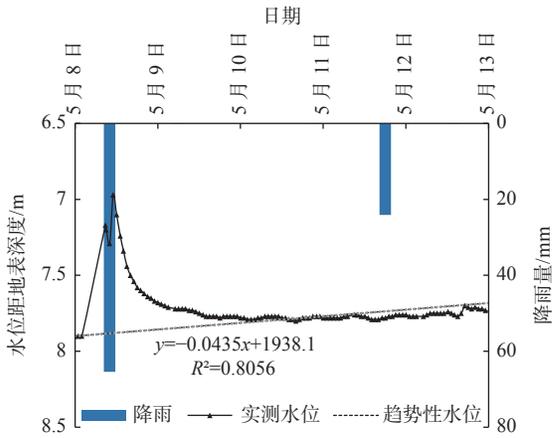


图 9 地下水水位消落曲线

Fig. 9 Fluctuation curve of the groundwater level

计算的有效降雨量也呈现峰值后的大幅下降, 而 3 日累计降雨量仍保持不变或仅出现小幅下降(图 10), 可见上文提出的有效降雨模型更能及时反映斜坡稳定性变化趋势。

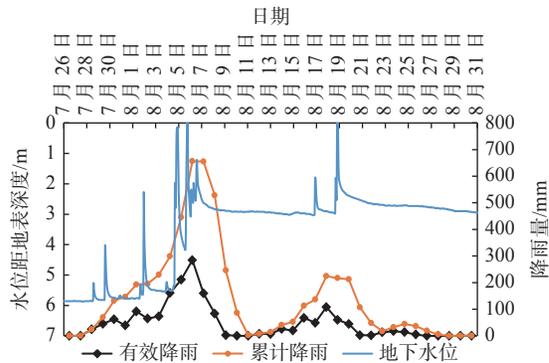


图 10 地下水水位-降雨量响应关系图

Fig. 10 Response diagram of the groundwater level and rainfall

4 预警应用验证

建立有效降雨模型的相关性分析采用福建地区近 10 年(2011—2019 年)的样本, 为进一步验证模型适用性, 将该有效降雨模型应用于 2020、2021 年的地质灾害气象预警计算。对强降雨诱发的地质灾害进行筛选, 选择 2021 年 6 月 28 日—7 月 3 日福建南平地区的降雨-致灾过程进行验证分析。此次降雨过程共持续 5 天, 累计降雨量超过 300 mm, 期间在南平市降雨诱发地质灾害 4 起(图 11)。此次降雨过程前 4 日无强降雨, 7 月 2 日降雨结束, 无前后序降雨叠加影响, 便于开展针对性的分析验证。将研究区划分为精度为 5 km 的预警网格单元, 采用

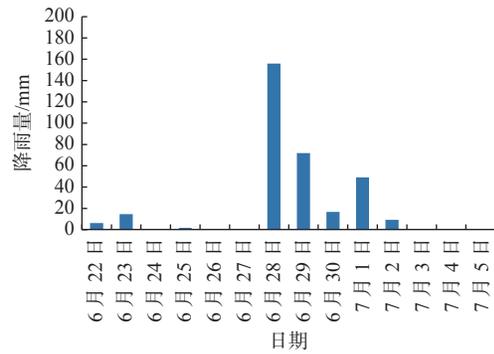


图 11 2021 年 6 月 28 日—7 月 3 日福建南平地区降雨分布图

Fig. 11 Rainfall distribution in Nanping, Fujian from June 28 to July 3, 2021

相匹配的定量化降雨估测数据为输入因子, 计算有效降雨, 代入地质灾害气象预警模型进行预警反演(公式(3)、(4)), 并与目前我国大部分地区采用的有效降雨模型(公式(5); 温铭生等, 2019)的预警结果进行对比验证。

$$W_j = Q_j \times P_j \quad (3)$$

$$T_j = \begin{cases} \text{红色预警 } W_j \geq W_r \\ \text{橙色预警 } W_0 \leq W_j \leq W_r \\ \text{黄色预警 } W_y \leq W_j \leq W_0 \\ \text{不预警 } W_j \leq W_y \end{cases} \quad (4)$$

$$P_j = \sum_{i=0}^6 0.84^i R_i \quad (5)$$

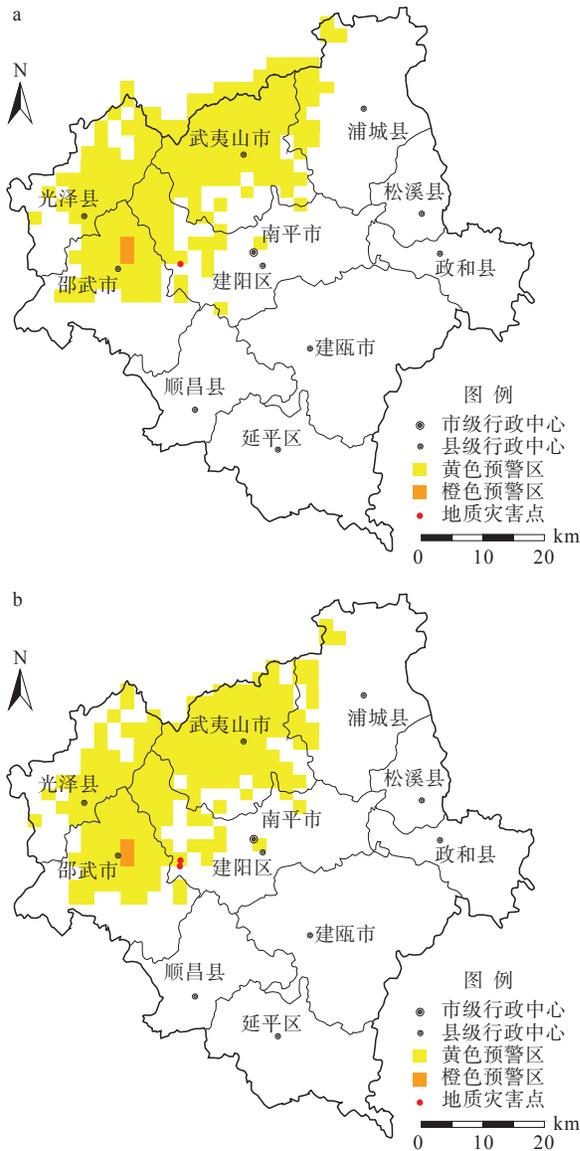
公式中, j 为网格预警单元序号; Q_j 为第 j 个网格预警单元的地质环境条件量化指标; W_j 为第 j 个网格预警单元的预警指数; P_j 为第 j 个网格预警单元的诱发因子指数, 文中采用有效降雨模型计算并进行归一化后进行表达, mm; W_r 为预警指数的红色预警临界值; W_0 为预警指数的橙色预警临界值; W_y 为预警指数的黄色预警临界值; T_j 为第 j 个网格预警单元的预警等级; i 为计算日前期降雨时间, 天; R_i 为计算日前第 i 日的日降雨量, mm。

预警结果显示, 此次降雨过程引发地质灾害 4 起(表 6), 在相同的预警模型及预警指标的前提下, 采用文章提出的有效降雨模型(公式(2), 以下简称“新模型”)与采用目前应用较多的有效降雨模型(公式(5), 以下简称“原模型”)计算有效降雨均命中了全部地质灾害(图 12, 图 13)。但采用新模型较采用原模型的预警时间短、预警等级低、预警区面积更小(表 7)。尤其在持续降雨的中后期, 有效降雨采用新模型的预警区面积显著减小, 预警区面

表 6 发灾情况一览表

Table 6 List of geological disasters

发生日期	发生时间	发灾地点	灾害类型	灾害规模/m ²	造成人员伤亡/人	直接经济损失/万元	主要诱因
2021-6-28	13时	南平市建阳区书坊乡松坑村南木溪10号	泥石流	3000	0	2	特大暴雨
2021-6-28	12时	南平市建阳区建阳区书坊乡饶坝村	滑坡	8000	3	10	特大暴雨
2021-7-1	9时	南平市浦城县九牧镇中垄村	崩塌	50	0	0.2	降雨
2021-7-1	10时	南平市邵武市水北镇三都村下洪源组	滑坡	600	0	0.1	暴雨



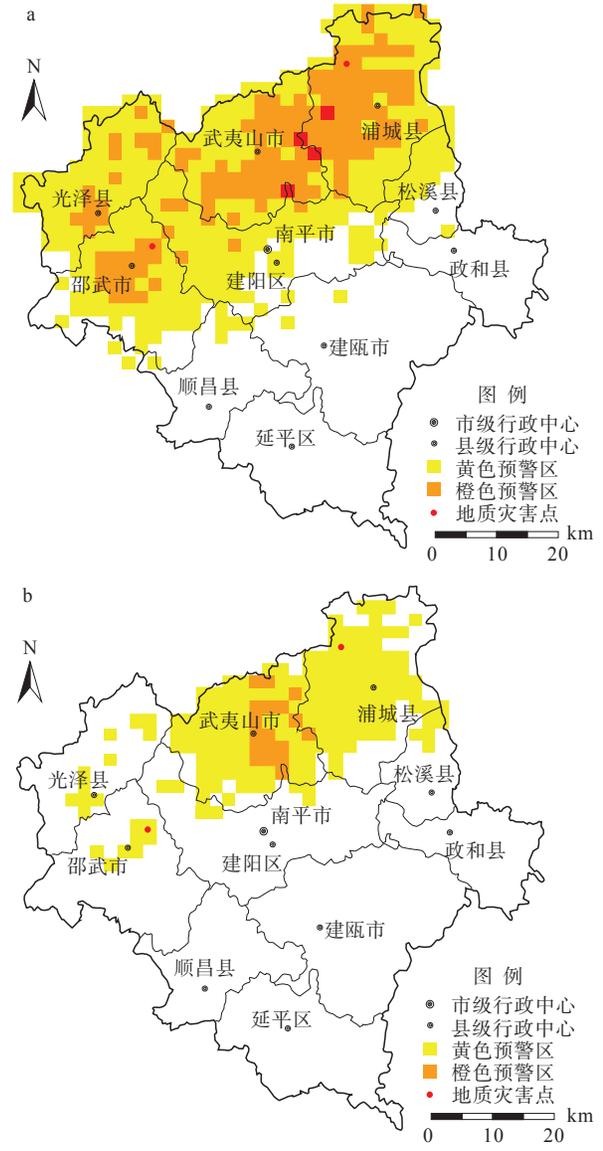
a—原模型预警结果 b—新模型预警结果

图 12 6月28日预警结果

Fig. 12 Warning results of June 28

(a) Results of the original model; (b) Results of the new model

积平均减小 55%(图 14)。6月28日,采用新模型和原模型评估有效降雨的预警结果均为局部橙色预警、大范围黄色预警,两个模型的预警区面积较接近,实际发生的地质灾害均位于黄色预警区内。



a—原模型预警结果; b—新模型预警结果

图 13 7月1日预警结果

Fig. 13 Warning results of July 1

(a) Results of the original model; (b) Results of the new model

7月1日,采用新模型评估有效降雨的预警结果为局部橙色预警、大范围黄色预警,而原模型的预警结果为局部红色预警、大范围橙色和黄色预警,实际发生的地质灾害均位于黄色预警区内,采用新模

表 7 预警结果对比一览表

Table 7 Comparison list of the early warning results

预警日期	预警等级		预警区面积/km ²		地质灾害命中率/%	
	原模型	新模型	原模型	新模型	原模型	新模型
6月28日	橙色预警	橙色预警	5275	4925	100	100
6月29日	橙色预警	橙色预警	5950	4900	-	-
6月30日	橙色预警	橙色预警	9875	9675	-	-
7月1日	红色预警	橙色预警	8775	4875	100	100
7月2日	红色预警	橙色预警	9475	2275	-	-
7月3日	橙色预警	无预警	7725	0	-	-
7月4日	橙色预警	无预警	4950	0	-	-
7月5日	黄色预警	无预警	475	0	-	-

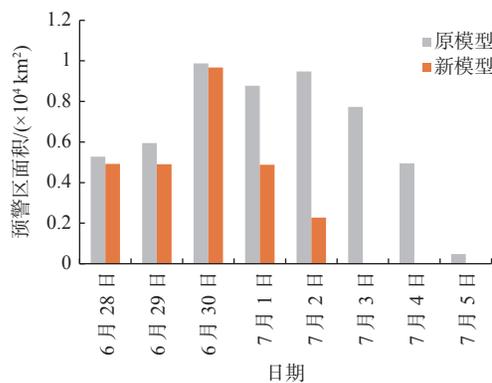


图 14 预警区面积对比图

Fig. 14 Comparison of the warning area

型的预警区面积为原模型的 56%。结合地质灾害气象风险预警等级划分标准(中国地质灾害防治工程行业协会, 2018), 采用新模型的预警结果更合理。同时, 采用新模型评估有效降雨在 7 月 3 日至 7 月 5 日未发布预警, 缩短了持续预警时长, 结合实际地质灾害发生情况分析该时间段不预警更合理, 避免了预警空报。可见, 在保证预警命中率的前提下, 采用新模型评估有效降雨进行预警计算显著减少空报面积, 提升了预警精准性。

5 结论

(1) 福建地区降雨诱发地质灾害受当日降雨和前期降雨诱发作用显著, 通过筛选诱发地质灾害的典型降雨事件, 通过相关性分析确定了福建地区的有效降雨系数为 0.79, 降雨影响期为 3 日内, 提出了福建地区有效降雨模型;

(2) 通过现场降雨入渗监测验证, 有效降雨模型

可通过降雨量因子模拟降雨条件下斜坡浅表层地下水位的雨后上涨—消落的趋势, 验证了福建地区有效降雨模型的合理性;

(3) 将福建地区有效降雨模型应用于地质灾害气象预警, 结果显示, 采用文中提出的有效降雨模型进行预警分析可以在保证地质灾害命中率的前提下, 减少预警区面积、降低预警等级、缩短预警持续时间, 提高地质灾害气象预警的精准性。

References

- ALEOTTI P, 2004. A warning system for rainfall-induced shallow failures[J]. *Engineering Geology*, 73(3-4): 247-265.
- BAUM R L, GODT J W, 2010. Early warning of rainfall-induced shallow landslides and debris flows in the USA[J]. *Landslides*, 7(3): 259-272.
- CHEN C L, HE K, WEN M S, et al., 2016. Trend prediction research of geological hazard in the Yangtze economic zone based on gray system theory[J]. *Journal of Geomechanics*, 22(3): 706-713. (in Chinese with English abstract)
- CHEN J W, 1990. Study on debris flow forecast in Jiangjia Gully[C]//WU J S, KANG Z C, TIAN L Q, et al. Observation and research on debris flows in Jiangjia gully in Yunnan. Beijing: Science Press: 197-213. (in Chinese)
- China Geological Disaster Prevention engineering Industry Association, 2018. Early warning of geological hazard based on the meteorological factor: T/CAGHP 039-2018[S]. Beijing: China University of Geosciences Press. (in Chinese)
- China Institute of Geological Environment Monitoring, 2011-2020. National geological disaster bulletin of China. (in Chinese)
- China Institute of Geological Environment Monitoring, 2019. Construction of 1: 500, 000 geological disaster early warning model. (in Chinese)
- CROZIER M J, EYLES R J, 1980. Assessing the probability of rapid mass movement[C]//Proceedings of the 3rd Australia-new Zealand conference on geomechanics. Institution of Professional Engineers: 247-253.
- CROZIER M J, 1986. Landslides: causes, consequences and environment[M]. London: Croom Helm: 185-189.

- CROZIER M J, 1999. Prediction of rainfall-triggered landslides: a test of the Antecedent Water Status Model[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 24(9): 825-833.
- DI J Y, XU F W, LI Y M, et al., 2019. Precipitation type and threshold analysis of geological disasters in southeast[J]. *Journal of Catastrophology*, 34(1):62-67; 93. (in Chinese with English abstract)
- FANG R K, LIU Y H, SU Y C, et al., 2021. A early warning model of regional landslide in Qingchuan County, Sichuan Province based on logistic regression[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 48(1): 181-187. (in Chinese with English abstract)
- GLADE T, CROZIER M, SMITH P, 2000. Applying probability determination to refine landslide-triggering rainfall thresholds using an empirical “antecedent daily rainfall model” [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 157(6-8): 1059-1079.
- HAN S, LIU M J, WU J B, et al., 2022. Risk assessment of slope disasters induced by typhoon-rainfall in the southeast coastal area, China: a case study of the Shiyang north slope[J]. *Journal of Geomechanics*, 28(4): 583-595. (in Chinese with English abstract)
- HE K, CHEN C L, FENG Z, et al., 2016. A review on the collapse hazards of tower-shaped rock[J]. *Journal of Geomechanics*, 22(3): 714-724. (in Chinese with English abstract)
- HE Y J, 1995. Characteristics and mechanism of major geological hazards in Fujian province and protection and controlling method against them[J]. *Geology of Fujian*, 14(4): 263-271. (in Chinese with English abstract)
- HUANG J B, 2013. Preliminary studying of landslide critical rainfall in Dehua County[J]. *Geology of Fujian*, 32(1): 65-69. (in Chinese with English abstract)
- JIAN W B, XU X T, ZHENG M Z, et al., 2013. On effective rainfall of slope instability[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 34(S2): 247-251. (in Chinese with English abstract)
- LI C J, MA T H, SUN L L, et al., 2011. A new approach to calibrate antecedent precipitation for rainfall-triggering landslide forecast[J]. *Mountain Research*, 29(1): 81-86. (in Chinese with English abstract)
- LI T F, CONG W Q, 2006. A method for rainfall-induced landslides prediction based on Logistic regression and effective antecedent rainfall[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 17(1): 33-35. (in Chinese with English abstract)
- LI X, 2006. On weather prognosis and prewarning of geologic hazard in the flood season of Fujian province[J]. *Geology of Fujian*, 25(3): 164-168. (in Chinese with English abstract)
- LI Z, GAO Y, HE K, et al., 2020. Analysis of the fluidization process of the high-position and longrunout landslide in Shuicheng, Liupanshui, Guizhou Province[J]. *Journal of Geomechanics*, 26(4): 520-532. (in Chinese with English abstract)
- LIU C Z, 2004. Study on the early warning methods of landslide-debris flows[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 31(3): 1-6. (in Chinese with English abstract)
- LIU C Z, LIU Y H, WEN M S, et al., 2009. Early warning theory for regional geohazards in China[M]. Beijing: Geological Publishing House. (in Chinese)
- LIU Y, 1998. Critical precipitation of rainstorm for causing landslide[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*(3): 43-45. (in Chinese with English abstract)
- LIU Y H, LIU C Z, LIAN J F, et al., 2008. Method of regional early warning of geohazards based on the explicit statistical theory[J]. *Geology in China*, 35(2): 344-350. (in Chinese with English abstract)
- LIU Y H, TANG C, LI T F, et al., 2009. Statistical relations between geohazards and rain-type[J]. *Journal of Engineering Geology*, 17(5): 656-661. (in Chinese with English abstract)
- LIU Y H, TANG C, WU J B, et al., 2011. Spatial and temporal distribution characteristics of geo-hazards and rainfall in different scales[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 22(3): 74-83. (in Chinese with English abstract)
- LIU Y H, LIU L N, 2016. Rainfall-induced mechanism based early warning model for slopes of dualistic layers in weathered granitic area[J]. *Journal of Engineering Geology*, 24(4): 542-549. (in Chinese with English abstract)
- Liu Yanhui, SuYongchao. 2019. Early warning model of regional geological disasters based on meteorological factor in Qingchuan County, Sichuan Province[J]. *Journal of Engineering Geology*, 27(1): 134-143. (in Chinese with English abstract)
- PICUULLO L, CALVELLO M, CEPEDA J M, 2018. Territorial early warning systems for rainfall-induced landslides[J]. *Earth-Science Reviews*, 179: 228-247.
- TANG H M, WEI L, TANG Y H, et al., 2013. Correlation analysis and prediction model for rainfall-induced landslide in Chongqing area[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 24(4): 16-22. (in Chinese with English abstract)
- WANG T, WANG Z Y, LAI S Q, 2003. Assessment of the regional environmental geological quality based on GIS for Fujian province[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 10(2):8-11; 50. (in Chinese with English abstract)
- WANG Y L, 2005. Study on the early-warning and prediction of land-slide hazards and countermeasures in the southern Shaanxi Province[J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 16(4): 345-349. (in Chinese with English abstract)
- WANG Z L, SUN H Y, LIU Y L, et al., 2011. Time series analysis about groundwater level in slope and rainfall[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 45(7): 1301-1307. (in Chinese with English abstract)
- WEI D G, JIE Y J, HUANG T G, 1997. Regional geological structure of Fujian[J]. *Regional geology of China*, 16(2): 162-170. (in Chinese with English abstract)
- WEI F Q, JIANG Y H, YANG H J, et al., 2010. Relationship between Debris flow activity and precipitation characteristics in Southeastern China[J]. *Mountain Research*, 28(5): 616-622. (in Chinese with English abstract)
- WEI P X, LI X J, 2015. The meteorologic early warning research of sudden geo-hazard in Guangdong province[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 26(1): 138-144. (in Chinese with English abstract)

- abstract)
- WU Y M, LAN H X, GAO X, et al., 2014. Rainfall threshold of storm-induced landslides in typhoon areas: a case study of Fujian province[J]. *Journal of Engineering Geology*, 22(2): 255-262. (in Chinese with English abstract)
- WU Y P, ZHANG Q X, TANG H M, et al., 2014. Landslide hazard warning based on effective rainfall intensity[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 39(7): 889-895. (in Chinese with English abstract)
- XIE S Y, ZHANG N X, XU B, 1995. Probability analysis of precipitation-induced slide of typical landslides in three gorge area of the Yangtze River[J]. *Journal of Engineering Geology*, 3(2): 60-69. (in Chinese with English abstract)
- XIONG W, LIU K, FAN W, 2018. Analysis on internal dynamic geological genesis of shallow landslide in Qin-Ba mountain area[J]. *Journal of Geomechanics*, 24(3): 424-431. (in Chinese with English abstract)
- XU J C, SHANG Y Q, CHEN K F, et al., 2005. Analysis of shallow landslide stability under intensive rainfall[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 24(18): 3246-3251. (in Chinese with English abstract)
- YAN J K, HUANG J B, LI H L, et al., 2020. Study on instability mechanism of shallow landslide caused by typhoon and heavy rain[J]. *Journal of Geomechanics*, 26(4): 481-491. (in Chinese with English abstract)
- YE L Z, LIU K, HUANG G P, et al., 2015. The characteristics and influence factors of catastrophic geological disaster in Fujian province[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and control*, 26(1): 98-102. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG H W, LIU F Z, WANG J C, et al., 2022. Hazard assessment of debris flows in Kongpo Gyamda, Tibet based on FLO-2D numerical simulation[J]. *Journal of Geomechanics*, 28(2): 306-318. (in Chinese with English abstract)
- China Institute of Geological Environment Monitoring, 2011-2020. National Geological Disaster Bulletin of China[R]. Beijing: China Institute of Geological Environment Monitoring: 1-2. (in Chinese)
- Wen M S, CHEN C L, LIU Y H, et al., 2019. Construction of 1: 500, 000 geological disaster early warning model. Beijing: China Institute of Geological Environment Monitoring, 11-13. (in Chinese)
- ZHOU P G, 2004. Indicator system and techniques of landslide monitoring[J]. *Journal of Geomechanics*, 10(1): 19-26. (in Chinese with English abstract)
- ### 附中文参考文献
- 陈春利, 贺凯, 温铭生, 等, 2016. 基于灰色系统理论的长江经济带地区地质灾害趋势预测研究[J]. *地质力学学报*, 22(3): 706-713.
- 陈景武, 1990. 蒋家沟暴雨泥石流预报研究[M]/吴积善, 康志成, 田连权, 等. 云南蒋家沟泥石流观测研究. 北京: 科学出版社: 197-213.
- 狄靖月, 许凤雯, 李宇梅, 等, 2019. 东南地区引发地质灾害降水分型及阈值分析[J]. *灾害学*, 34(1): 62-67, 93.
- 方然可, 刘艳辉, 苏永超, 等, 2021. 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*, 48(1): 181-187.
- 韩帅, 刘明军, 伍剑波, 等, 2022. 东南沿海台风暴雨型单体斜坡灾害风险评价: 以泰顺仕阳北坡为例[J]. *地质力学学报*, 28(4): 583-595.
- 贺凯, 陈春利, 冯振, 等, 2016. 塔柱状岩体崩塌灾害研究现状[J]. *地质力学学报*, 22(3): 714-724.
- 何永金, 1995. 福建省主要地质灾害的特点、成因及其对策[J]. *福建地质*, 14(4): 263-271.
- 黄俊宝, 2013. 德化县滑坡成灾临界降雨量研究[J]. *福建地质*, 32(1): 65-69.
- 简文彬, 许旭堂, 郑敏洲, 等, 2013. 土坡失稳的有效降雨量研究[J]. *岩土力学*, 34(S2): 247-251.
- 李长江, 麻士华, 孙乐玲, 等, 2011. 降雨型滑坡预报中计算前期有效降雨量的一种新方法[J]. *山地学报*, 29(1): 81-86.
- 李铁锋, 丛威青, 2006. 基于 Logistic 回归及前期有效雨量的降雨诱发型滑坡预测方法[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 17(1): 33-35.
- 李欣, 2006. 福建省汛期地质灾害气象预报预警介绍[J]. *福建地质*, 25(3): 164-168.
- 李壮, 高杨, 贺凯, 等, 2020. 贵州省六盘水水城高位远程滑坡流态化运动过程分析[J]. *地质力学学报*, 26(4): 520-532.
- 刘传正, 2004. 区域滑坡泥石流灾害预警理论与方法研究[J]. *水文地质工程地质*, 31(3): 1-6.
- 刘传正, 刘艳辉, 温铭生, 等, 2009. 中国地质灾害区域预警方法与应用[M]. 北京: 地质出版社.
- 柳源, 1998. 滑坡临界暴雨强度[J]. *水文地质工程地质*, (3): 43-45.
- 刘艳辉, 刘传正, 连建发, 等, 2008. 基于显式统计原理的地质灾害区域预警方法初步研究[J]. *中国地质*, 35(2): 344-350.
- 刘艳辉, 唐旭, 李铁锋, 等, 2009. 地质灾害与降雨型的关系研究[J]. *工程地质学报*, 17(5): 656-661.
- 刘艳辉, 唐旭, 吴剑波, 等, 2011. 地质灾害与不同尺度降雨时空分布关系[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 22(3): 74-83.
- 刘艳辉, 刘丽楠, 2016. 基于诱发机理的降雨型滑坡预警研究: 以花岗岩风化壳二元结构斜坡为例[J]. *工程地质学报*, 24(4): 542-549.
- 刘艳辉, 苏永超. 四川青川县区域地质灾害气象风险预警模型研究[J]. *工程地质学报*, 2019, 27(01): 134-143.
- 唐红梅, 魏来, 唐云辉, 等, 2013. 重庆地区降雨型滑坡相关性分析及预报模型[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 24(4): 16-22.
- 王涛, 王增银, 赖树钦, 2003. 基于 GIS 的区域环境地质评价: 以福建省为例[J]. *安全与环境工程*, 10(2): 8-11, 50.
- 王雁林, 2005. 陕南地区滑坡灾害气象预报预警及其防范对策探析[J]. *地质灾害与环境保护*, 16(4): 345-349.
- 王智磊, 孙红月, 刘永莉, 等, 2011. 降雨与边坡地下水位关系的时间序列分析[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 45(7): 1301-1307.
- 韦德光, 揭育金, 黄廷淦, 1997. 福建省区域地质构造特征[J]. *中国区域地质*, 16(2): 162-170.
- 韦方强, 江玉红, 杨红娟, 等, 2010. 东南地区泥石流活动与降水气候特征的关系[J]. *山地学报*, 28(5): 616-622.
- 魏平新, 李秀娟, 2015. 广东省突发性地质灾害气象预警实践[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 26(1): 138-144.
- 吴益平, 张秋霞, 唐辉明, 等, 2014. 基于有效降雨强度的滑坡灾害危

- 险性预警[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 39(7): 889-895.
- 伍宇明, 兰恒星, 高星, 等, 2014. 台风暴雨型滑坡降雨阈值曲线研究: 以福建地区为例[J]. 工程地质学报, 22(2): 255-262.
- 谢守益, 张年学, 许兵, 1995. 长江三峡库区典型滑坡降雨诱发的概率分析[J]. 工程地质学报, 3(2): 60-69.
- 熊炜, 刘可, 范文, 2018. 秦巴山区浅层滑坡内动力地质成因分析[J]. 地质力学学报, 24(3): 424-431.
- 许建聪, 尚岳全, 陈佩福, 等, 2005. 强降雨作用下的浅层滑坡稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 24(18): 3246-3251.
- 闫金凯, 黄俊宝, 李海龙, 等, 2020. 台风暴雨型浅层滑坡失稳机理研究[J]. 地质力学学报, 26(4): 481-491.
- 叶龙珍, 柳侃, 黄国平, 等, 2015. 福建重大地质灾害特征及其影响因素[J]. 中国地质灾害与防治学报, 26(1): 98-102.
- 张浩韦, 刘福臻, 王军朝, 等, 2022. 基于FLO-2D数值模拟的工布江达县城泥石流灾害危险性评价[J]. 地质力学学报, 28(2): 306-318.
- 中国地质环境监测院, 2011—2020. 全国地质灾害通报[R]. 北京: 中国地质环境监测院: 1-2.
- 温铭生, 陈春利, 刘艳辉, 等, 2019. 1: 50万地质灾害气象预警模型建设[R]. 北京: 中国地质环境监测院: 11-13.
- 中国地质灾害防治工程行业协会, 2018. 地质灾害区域气象风险预警标准: T/CAGHP 039-2018[S]. 北京: 中国地质大学出版社.
- 周平根, 2004. 滑坡监测的指标体系与技术方法[J]. 地质力学学报, 10(1): 19-26.