



显式统计预警模型下地质灾害预警方法及应用

李朝奎¹ 陈建辉¹ 魏振伟² 周倩¹ 周访滨³

1 湖南科技大学地理空间信息技术国家地方联合工程实验室,湖南 湘潭,411201

2 广东省第十地质大队,广东 中山,528427

3 长沙理工大学交通运输工程学院,湖南 长沙,410114

摘要:以第2代显式统计预警模型为基础,针对中山市地质条件及降雨情况,构建了满足该地区需求的统计预警模型。在此基础上叠加了地质灾害易发分区图,同时在模型计算过程中,对高程低于10 m的平原地区直接判定为无风险,减少了数据运算,实现了研究区更为精准、单元尺度更小的地质灾害分级预警。与中山市以往采用的单点监测预警效果相比,该模型针对不同的地形地貌进行分区,逐一构建小区域预警模型,得出了地质灾害预警分级图。实践表明,所提出的区域性预警方法较先前的单点预警方法定位更准确,预警等级表现更直观。

关键词:地质灾害;显式统计预警模型;灾害易发区;分级预警

中图分类号:P237

文献标志码:A

地质灾害严重威胁着人民的生命及财产安全,即便是在科技发达的今天,依然无法对其进行准确的预测预报。中国幅员辽阔,地质条件复杂,地貌类型各异,地质灾害多样,以崩塌、滑坡和泥石流居多。在不考虑突发性外界因素(如地震、火山活动)的前提下,地质灾害的发生取决于内因的控制(如地形地貌、底层岩性和地质构造等),同时又受到外因的影响,特别是大气降雨。因此,从数学角度来讲,一个完备的数学模型毫无疑问能够更为精确地指导地质灾害的预测与预防,在保证准确率的前提下,还能避免资金浪费。

目前,国内外在地质灾害预测方面开展了众多研究。其中,刘艳辉等^[1]将中国分为7个预警大区,74个预警区,陆续运用隐式及显式统计模型进行地质灾害的预测,有效减少了非必要预警区面积;王卫东等^[2]采用logistic回归模型编制了贵州省滑坡灾害区划图,表明了人为环境改造是该研究区发生滑坡灾害的主要原因;魏平新等^[3]采用已划分的预警单元,利用实时降雨、气象预报及群测群防数据,通过归一化建立了广东省预警分析模型,准确预测了灾害发生并组织群众撤离;武雪玲等^[4]以三峡库区长江干流岸坡为研究对

象,通过地形、地质、遥感等多方面数据融合,构建了粒子群算法-支持向量机模型,对滑坡的易发性进行了定量预测,其预测结果的总体正确率达90%以上;张路等^[5]以四川丹巴为例,采用自主研发的相干散射体时序合成孔径雷达干涉测量方法,从历史数据集中识别出多处不稳定滑坡体,并通过实地考察验证了该方法的优势性与准确性;胡圣武等^[6]通过事件树和模糊理论,结合GIS方法对台风过境不同时段进行了地质灾害动态变化趋势研究,其结果对地质灾害的预防起到了一定的指导作用;刘晓慧等^[7]通过对地质灾害现象及数据特征的分析,提出了面向对象的时空数据概念模型,实现了地质灾害生命周期各阶段状态的统一表达。国外方面,Glade等^[8]采取统计方法,基于物理衰减系数,利用前期降雨量和当日降雨量构建模型,对新西兰地区多处滑坡进行了阈值测算;Pedrozzi^[9]通过对具备均匀地质特征的小区域进行研究,较为准确地确定了研究区的滑坡预警阈值,并通过滑坡位移对比确定了人类活动、岩溶活动等对滑坡的影响;Convertino等^[10]提出了基于最大熵原理的滑坡模式预测空间显式模型,该模型再现了阿尔诺盆地多处历史滑坡的

收稿日期:2018-12-18

项目资助:国家自然科学基金(41571374,41671446);国家重点研发计划(2017YFB0503802,2018YFB0505401);特殊环境道路工程湖南省重点实验室开放基金(KFJ150502);湖南省自然资源科研项目(2019-12)。

第一作者:李朝奎,教授,博士,主要从事测绘及地理空间信息研究。chkl_hn@163.com

通讯作者:陈建辉,硕士生。1689777979@qq.com

分布,对约 37% 的观测滑坡进行了推断,准确率为 86%,同时表明了潜在滑坡灾害与 12 h 和 48 h 降雨量密切相关。

刘艳辉等^[1]提出的第 2 代显式统计预警模型考虑了地形、地质、工程活动和土地利用等因素,将这些因素归一化处理获得了地质灾害潜势度,以此作为预警背景值,再将实时降雨、前期有效降雨参与计算,得到了最终的预警产品。本文选取的广东省中山市地形以山地、丘陵和平原为主,地质灾害的发生受降雨影响较大,运用第 2 代显式统计预警模型对其地质灾害进行预测、预警,并根据其区域特性,对模型进行相应的调整与完善,使之更加体现区域特色。首先根据中山市地质调查报告筛选出影响地质灾害发生的多个因子,并运用确定性系数函数(coefficient function, CF)方法计算不同影响因子对中山市地质灾害的影响情况,再利用多因子叠加法^[11]对各影响因子的权重进行计算,进而计算出不同研究区的潜势度,最后以历史地质灾害的相关数据作为样本,回归出中山市不同地区的第 2 代地质灾害预警公式;通过叠加中山市地质灾害易发分区图,经逻辑运算,最终得到了中山市地质灾害预警等级图。实践表明,此方法得出的预警结果相对中山市原系统的单点预警方法,准确度有了大幅度提升,并显著缩小了预警范围。

1 显式统计预警模型的构建

1.1 基于 CF 模型的因子量化

地质灾害的影响因素多种多样,且每种因素有其特定的量纲,数值也有各自的区间;再者,有些影响因素是连续型,而有些则是离散型,这些导致了在数学公式中不能直接进行计算,需要对其进行统一的定量表达。

CF 模型是一个概率函数,最早由 Shortliffe 等^[12]提出,后由 Heckerman 等改进^[13],用来分析影响某一事件发生的各因子敏感性。早期,兰恒星等^[14]将此模型应用到云南小江流域的滑坡因子敏感性分析中,取得了较为理想的效果。CF 模型具体表示为:

$$CF = \begin{cases} \frac{P_a - P_s}{P_a(1 - P_s)}, & P_a \geq P_s \\ \frac{P_a - P_s}{P_s(1 - P_a)}, & P_a < P_s \end{cases} \quad (1)$$

式中, P_a 为事件在数据类 a 中发生的条件概率,理论上可看作数据类 a 中存在的地质灾害面积与

数据类 a 面积的比值; P_s 为整个研究区域事件发生的先验概率,理论上可看作整个研究区域地质灾害面积与整个研究区域面积的比值。然而,冯杭建等^[15]提出,采用地质灾害面积与分类面积的比值并不能合理地反映概率的大小,因此将两种面积的比值分别定义为灾害发生密度,即:

$$P_a = \frac{\text{分类 } a \text{ 中地质灾害个数}}{\text{分类 } a \text{ 的面积}} \quad (2)$$

$$P_s = \frac{\text{研究区地质灾害总数量}}{\text{研究区总面积}} \quad (3)$$

根据 CF 模型计算公式得出的 CF 值结果介于 -1 和 1 之间。其中,CF 值越靠近 -1,说明相应因子对地质灾害发生的贡献越小;相反,CF 值越靠近 1,则贡献越大;CF 值趋于 0,说明影响不确定。

1.2 影响因子的筛选与统计

根据中山市 2016 年地质灾害调查报告,全市共有地质灾害隐患点 120 余个,形成这些灾害的主要影响因素包含坡度、坡向、高程、年均雨量、岩土体类型、第四系成因、植被覆盖类型、距公路距离、距主要水系距离和人类工程活动(矿山、采石场等),故选取这些因子作为模型基础数据参与计算。实际操作过程中,受数据源完备性影响,采用坡度、坡向、高程、年均雨量、第四系与岩土体类型、距公路距离、距主要水系距离、距主要断层距离、土地利用类型这 9 种因子数据参与计算。

将中山市分为北部和南部两个研究区域,并根据中山市不同地形地貌将研究区分为 5 个小区,分别为北部丘陵区、北部平原区、中部五桂山山区、南部丘陵区、南部平原区。其中,北部(平原居多)以 2 km × 2 km 的网格划分,南部(山地居多)以 1 km × 1 km 的网格划分。将以上每一种影响因子进行分类,具体分类规则见表 1。

1.3 地质灾害潜势度计算

1.3.1 地质灾害潜势度

地质灾害潜势度是指某一地区在没有任何降雨、地震和人类活动等诱发因素影响下地质环境孕育地质灾害的潜在能力^[1,16-17]。第 2 代显式统计预警模型重点考虑地质灾害易发区本身的地质环境条件,将其归结为地质灾害潜势度,并考虑地质灾诱发因子——降雨量,综合形成地质灾害预警公式:

$$T = f(G, R_d, R_p) \quad (4)$$

式中, T 为预警指数; R_d 为当日雨量; R_p 为前一连续降雨过程的累计雨量,实际计算时通常采用前 3 d 或前 5 d 的雨量; G 为地质灾害潜势度,其计

表1 中山市地质灾害影响因子分类

Tab.1 Classification of Influence Factors of Geological Disasters of Zhongshan City

影响因子	分类
坡度/(°)	0~10,10~20,20~30,30~40,40~50,50~60,>60
坡向/(°)	0~22.5,22.5~67.5,67.5~112.5,112.5~157.5,157.5~202.5,202.5~247.5,247.5~292.5,292.5~337.5,337.5~360
高程/m	0~60,60~120,120~180,180~240,240~300,300~360,360~420,420~480,480~540
年均雨量/mL	800~1 000,1 000~1 200,1 200~1 400,1 400~1 600,1 600~1 800,1 800~2 000,2 000~2 200,2 200~2 400,>2 400
第四系与岩土体类型	海陆交互沉积层、山前、谷地冲洪积基层、砂砾岩、花岗岩、云开群条纹状混合岩及片岩、加里东期混合花岗岩、八村群砂岩、千枚岩、板岩
距公路距离/m	0~30,30~60,60~90,90~120,120~150
距主要水系距离/m	0~50,50~100,100~150,150~200,200~250,250~300,300~350,350~400,400~450,450~500
距主要断层距离/m	0~200,200~400,400~600,600~800,800~1 200,1200~1 400
土地利用类型	水田、旱地、有林地、疏林地、其他林地、高覆盖区、中覆盖区、低覆盖区、河渠、水库坑塘、滩涂、滩地、城市用地、农村居民用地、其他建设、裸土地

算公式为:

$$G = \sum_{j=1}^n t_j z_j \quad (5)$$

式中, t_j 为各个影响因子的权重; z_j 即为上述每个因子的综合 CF 值; n 代表各个影响因子的总数。影响因子的权重 t_j 的求解方法不尽相同, 本文引用多因子叠加方法对权重 t_j 进行求解^[11,18-21]。图 1 为北部平原区和中部五桂山山区的潜势度折线图, 可以看出, 相对平原地区, 五桂山山区的较大潜势度地区明显偏多。

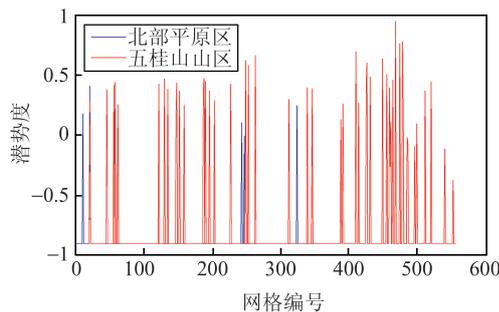


图1 不同地区潜势度折线图

Fig.1 Line Chart of Potentiality Parameter of Different Areas

1.3.2 多因子叠加计算因子权重

以网格为计算单元, 依据表 1 的分类, 运用式(1)计算各网格各影响因子不同分类的 CF 值, 并运用式(6)对不同类别的 CF 值叠加, 得到每个因子的 CF 值(即 z_j), 对不同因子的 CF 值进行合并, 得到该网格单元的综合 CF 值(记作 Z_{all}^k , 其中 k 为网格编号); 依据表 2, 对不同的 CF 值进行分级, 各级别百分比用 Z_{all-i} 表示, 其中 $i=1, 2, 3, 4, 5$; 同样, 运用式(6)对除某一个影响因子以外的其他影响因子依次进行叠加, 得到除某一影响因子以外的其他所有影响因子的综合贡献值(记作 $Z_{除某因子}^k$), 进而求得除某因子外其他因子综合贡

献值所占百分比(记作 $Z_{除某因子-i}$), 并按表 2 对贡献值进行分级。

$$z = \begin{cases} x + y - xy, & x \geq 0, y \geq 0 \\ \frac{x + y}{1 - \min\{|x|, |y|\}}, & xy < 0 \\ x + y + xy, & x < 0, y < 0 \end{cases} \quad (6)$$

表2 影响因子综合 CF 值分级

Tab.2 Divisions of Integrated CF Values of the Influence Factors

分级	CF 值分段	对地质灾害贡献	所有因子叠加	除某个因子外所有因子叠加
1	<-0.6	小	Z_{all-1}	$Z_{除某因子-1}$
2	-0.6~-0.2	较小	Z_{all-2}	$Z_{除某因子-2}$
3	-0.2~0.2	不确定	Z_{all-3}	$Z_{除某因子-3}$
4	0.2~0.6	较大	Z_{all-4}	$Z_{除某因子-4}$
5	>0.6	大	Z_{all-5}	$Z_{除某因子-5}$

按表 2 的级别划分, 不同影响因子各级别 CF 值的计算公式为:

$$\Delta Z_{某因子-i} = Z_{all-i} - Z_{除某因子-i} \quad (7)$$

式中, $\Delta Z_{某因子-i}$ 为各因子在各级别中的 CF 贡献值, $i=1, 2, 3, 4, 5$ 。

根据式(8), 计算各个因子的相对贡献大小, 最终经过式(9)归一化, 得到不同因子的权重。

$$t_{某因子相对贡献} = \sum_{i=1}^5 |\Delta Z_{某因子-i}| \quad (8)$$

$$t_j = \frac{t_{某因子相对贡献}}{\sum t_{某因子相对贡献}} \quad (9)$$

1.4 构建显式统计预警模型

采用多元回归模型^[22-23], 构建地质环境内在因素(已归为潜势度)、降雨量与地质灾害之间的关系, 即显式统计预警模型。实际参与回归统计时, 网格潜势度已由 § 1.3 计算出, 根据式(4), 当日雨量为发生地质灾害时雨量站传回的雨量, 前期雨量为发生地质灾害前 5 d 的累计雨量^[24], 预警指

数 T 按地质灾害个数参与计算。但考虑到研究区地质灾害相对较少,为保证预警指数的区分度,实际参与预测计算时,要对自变量系数及常数项进行处理。经大量数据模拟,推算出当自变量系数及常数项分别扩大 10 倍时,能够保证得到的预警指数有较好的区分度,同时不至于结果相差太大。

多元回归选取了中山市 2010—2016 年地质灾害发生时的相关数据进行计算,以灾害频发的中部五桂山山区为例,经多元回归并显著性检验,得到预警方程为:

$$T = -3.6204 + 6.24G + 0.135R_p + 0.104R_d \quad (10)$$

可见,该地区的地质灾害发生程度与潜势度关联较大,受前期雨量和当日雨量影响相差不大,这也与五桂山的山区特征相符。

根据历史数据计算的预警指数值,对地质灾害划分等级,各等级对应的预警指数范围如表 3 所示。

表 3 预警等级与预警指数范围

Tab. 3 Early Warning Levels and Ranges of Early Warning Indexes

回归得到的预警等级	预警指数范围
1	$T > 13$
2	$3.8 < T \leq 13$
3	$-4.5 < T \leq 3.8$
4	$-8 < T \leq -4.5$
无风险	$T \leq -8$

同理,对中山市其他 4 个分区的历史数据进行回归(受历史数据完备性影响,回归的预警公式可能与实际有较大偏差),得到各区域的预警方程如下:

北部丘陵:

$$T = -3.37 + 35.05G + 0.05R_p + 0.09R_d$$

北部平原:

$$T = -4.52 + 6.92G + 0.03R_p + 0.12R_d$$

南部丘陵:

$$T = -5.4 + 0.22G + 0.01R_d + 0.19R_p$$

南部平原:

$$T = -0.25 + 2.33G + 0.05R_d + 0.12R_p$$

2 地质灾害预警应用实例

2.1 实验对象及数据来源

本文以广东中山市为研究对象进行预警方法应用验证,获取了中山市 1:2 000 数字高程图,用于实验中高程、坡度、坡向等影响因子的提取,用

地类型因子图层经高分遥感影像解译获取,年降雨数据由气象局记录数据统计获取,相关地质、水系等因子图层由中山市地质部门获得,从而保证了实验数据的准确性与完整性;用于模型计算的降雨数据,均由中山市气象局安置的雨量监测站获得,从而保证了数据的权威性。

2.2 处理流程

前期数据处理在 ArcGIS 中完成,通过网格划分与计算得到各个网格的潜势度,每个网格的降雨量由雨量站监测并传入数据库。对于无雨量站数据的网格,其降雨量通过插值获得。

此外,根据以往实地地质灾害探查经验得出,曾经发生过地质灾害的区域应作为特别敏感区,即再次发生地质灾害的可能性更大。因此,在本文得到的结果预警图的基础上,叠加中山市地质灾害易发分区图,同时将这两个图层进行逻辑运算,其运算逻辑见表 4。考虑到中山市北部以大片平原居多,且地质灾害以滑坡、崩塌为主,因此实际数据处理中,高程低于 10 m 的平原区可不参与模型计算,直接判定为无风险,这样更符合实际认知,同时减少了数据处理量,节省了时间。

表 4 最终预警图的逻辑运算

Tab. 4 Logical Operations of Final Early Warning Picture

回归得到的 预警等级	地质灾害易发区分级		
	高易发区	中易发区	低易发区
1	一级	一级	二级
2	一级	二级	三级
3	二级	三级	四级
4	三级	四级	无风险
无风险	四级	无风险	无风险

2.3 结果及分析

选取中山市汛期时台风登陆的某一天降雨数据进行计算,其生成的预警图见图 2。可见,预警等级相对较高的区域位于中部五桂山地区及中南部山地地区。其中南部的一部分低预警等级区被高预警等级区包围,是因为中间低预警等级区为无人山区,未进行实地勘查而导致参与模型计算的数据缺失。中山市原预警系统采用单点预警方式^[25],即在地质灾害易发区选点安装多种监测设备,并根据设备监测值,依据经验进行预警等级的划分,其预测结果只以文本方式显示,不直观,预测不能覆盖全部区域,且区域描述有较大的模糊性。采用本文方法对研究区地质灾害预警等级进行了直观展示,研究区覆盖整个中山市,且综合考虑了更多地质环境条件,使得预警结果的可信度大大提高。

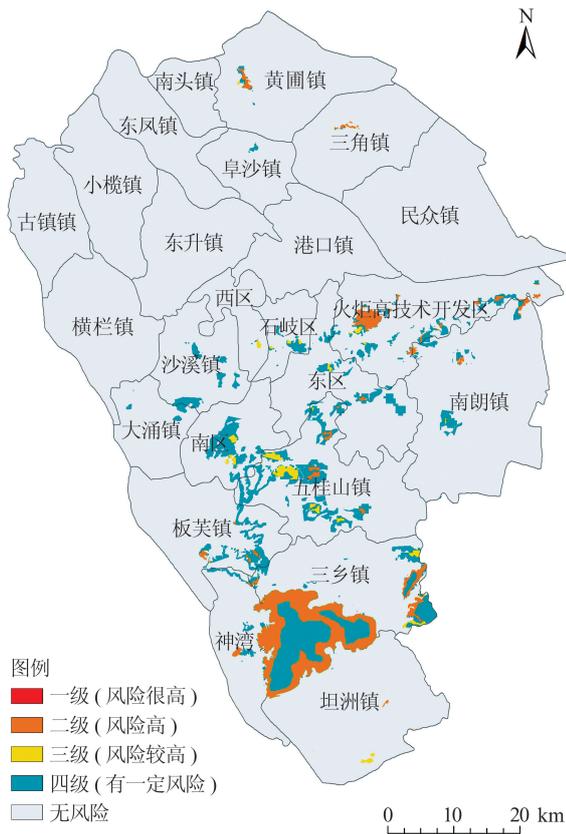


图2 地质灾害预警等级图

Fig2 Early Warning Grades of Geological Hazard

3 结 语

本文以第2代显式统计预警模型为基础,综合考虑了影响地质灾害发生的地质环境因素,采用多因子叠加法计算权重,在实现预警区域分级的基础上,为保证预警准确度,提出了两个处理方法:①通过叠加中山市已有的地质灾害易发分区图,对预警敏感区进行了更为合理的判定;②结合研究区实际情况,采取“一票否决”法,即对高程低于10 m的平原区,直接判定为无风险,其数据不参与模型计算,从而简化了计算量,减少了数据处理时间。

对于显式统计预警模型而言,其在大面积、多地灾样本的区域更为合适。最初计算单元网格的划分应遵照适度大小的原则,过大会导致数据太粗,过小会导致多元回归时样本数据差异不明显。因此,在大面积及地灾易发区应用本模型将能得到更为准确的结果^[26]。

模型本身作为数理统计模型的一种,会因统计数据不足而引起模型的不完整或不精确,因此掌握完整、充足、可靠的数据,并对模型进行有针对性的完善,将是此后研究工作的重点。

参 考 文 献

- [1] Liu Yanhui, Liu Chuazheng, Wen Mingsheng, et al. Study of Early Warning Models for Regional Geo-hazards in China [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2015, 23(4): 738-746 (刘艳辉, 刘传正, 温铭生, 等. 中国地质灾害气象预警模型研究[J]. 工程地质学报, 2015, 23(4): 738-746)
- [2] Wang Weidong, Chen Yanping, Zhong Sheng. Landslides Susceptibility Mapped with CF and Logistic Regression Model [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2009, 40(4): 127-133 (王卫东, 陈燕萍, 钟晟. 应用CF和Logistic回归模型编制滑坡危险性区划图[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2009, 40(4): 127-133)
- [3] Wei Pingxin, Yang Senlin. Realization and Significance of Early-Warning of Geo-hazard in Short-Time Meteorology in Guangdong [J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 2011, 22(2): 54-59 (魏平新, 杨森林. 广东省短时气象地质灾害预警的实现及意义[J]. 地质灾害与环境保护, 2011, 22(2): 54-59)
- [4] Wu Xueling, Shen Shaoqing, Niu Ruiqing. Landslide Susceptibility Prediction Using GIS and PSO-SVM [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(5): 665-671 (武雪玲, 沈少青, 牛瑞卿. GIS支持下应用PSO-SVM模型预测滑坡易发性[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2016, 41(5): 665-671)
- [5] Zhang Lu, Liao Mingsheng, Dong Jie, et al. Early Detection of Landslide Hazards in Mountainous Areas of West China Using Time Series SAR Interferometry—A Case Study of Danba, Sichuan [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(12): 2040-2049 (张路, 廖明生, 董杰, 等. 基于时间序列InSAR分析的西部山区滑坡灾害隐患早期识别——以四川丹巴为例[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2018, 43(12): 2040-2049)
- [6] Hu Shengwu, Wang Yuhong. GIS Dynamic Risk Assessment of Geological Disasters Based on Event Tree Analysis and Fuzzy Theory [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(7): 983-989 (胡圣武, 王育红. 基于事件树和模糊理论的GIS动态地质灾害评估[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2015, 40(7): 983-989)
- [7] Liu Xiaohui, Wu Xincui, Luo Xiangang. Object-Oriented Geological Disaster Data Model and Spatio-Temporal Process Expression [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(8): 958-962 (刘晓慧, 吴信才, 罗显刚. 面向对象

- 的地质灾害数据模型与时空过程表达[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2013, 38(8):958-962
- [8] Glade T, Crozier M, Smith P. Applying Probability Determination to Refine Landslide-Triggering Rainfall Thresholds Using an Empirical "Antecedent Daily Rainfall Model"[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2000, 157(6-8):1 059-1 079
- [9] Pedrozzi G. Triggering of Landslides in Canton Ticino (Switzerland) and Prediction by the Rainfall Intensity and Duration Method[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2004, 63(4):281-291
- [10] Convertino M, Troccoli A, Catani F. Detecting Fingerprints of Landslide Drivers: A MaxEnt Model[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2013, 118(3):1 367-1 386
- [11] Liu Yanhui, Liu Chuangzheng, Tang Can, et al. CF-Based Multi-factor Overlay Method to Determine Weights of the Factors for Geo-hazards[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2015, 26(1):92-97(刘艳辉, 刘传正, 唐灿, 等. 基于确定性系数模型的地质灾害多因子权重计算方法[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2015, 26(1):92-97)
- [12] Shortliffe E H, Buchanan G G. A Model of Inexact Reasoning in Medicine[J]. *Mathematical Biosciences*, 1975, 23(3-4):351-379
- [13] Heckerman D, Geiger D, Chickering D M. Learning Bayesian Networks: The combination of Knowledge and Statistical Data[J]. *Machine Learning*, 1995, 20(3):197-243
- [14] Lan Hengxing, Wu Faquan, Zhou Chenghu, et al. Analysis on Susceptibility of GIS Based Landside Triggering Factors in Yunnan Xiaojiang Watershed[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(10):1 500-1 506(兰恒星, 伍法权, 周成虎, 等. 基于 GIS 的云南小江流域滑坡因子敏感性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(10):1 500-1 506)
- [15] Feng Hangjian, Zhou Aiguo, Tang Xiaoming, et al. Susceptibility Analysis of Factors Controlling Rainfall-Triggered Landslides Using Certainty Factor Method[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2017, 25(2):436-446(冯杭建, 周爱国, 唐小明, 等. 基于确定性系数的降雨型滑坡影响因子敏感性分析[J]. 工程地质学报, 2017, 25(2):436-446)
- [16] Liu Chuangzheng, Li Tiefeng, Cheng Lingpeng, et al. A Method by to Analyse Four Parameters for Assessment and Early Warning on the Regional Geo-hazards[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2004, 31(4):1-8(刘传正, 李铁锋, 程凌鹏, 等. 区域地质灾害评价预警的递进分析理论与方法[J]. 水文地质工程地质, 2004, 31(4):1-8)
- [17] Li Yunjun, Liu Zhihong, Lv Yuanyang, et al. Establishment and Validation of a Meteorological Warning Model for Landslide Hazards in Sichuan Province[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2017, 19(7):941-949(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)
- [18] Liu Chuangzheng, Liu Yanhui. Early Warning Theory for Regional Geo-hazards and Design of Explicit Statistical System [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2007, 34(6):109-115, 125(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)
- [19] Xiao Tong. GIS-Based Research on Spatial Simulation of Landslide in Lanzhou[D]. Gansu: Lanzhou University, 2007(肖桐. 基于 GIS 的兰州市滑坡空间模拟研究[D]. 甘肃:兰州大学, 2007)
- [20] Liu Yanhui, Liu Chuangzheng, Lian Jianfa, et al. Method of Regional Early Warning of Geohazards Based on the Explicit Statistical Theory[J]. *Geology in China*, 2008, 35(2):344-350(刘艳辉, 刘传正, 连建发, 等. 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, 2008, 35(2):344-350)
- [21] Wang Shuang, Wang Qing, Si Ai, et al. Transforming Normal Height with Elevation Fitting Using Global Positioning System in Gravity Exploration [J]. *Geological Survey and Research*, 2012, 35(3):207-209(王爽, 王晴, 斯蔼, 等. 基于 GIS 的天津市突发性地质灾害预警预报系统设计与实现[J]. 地质调查与研究, 2012, 35(3):207-209)
- [22] Tang Chuan, Ma Guochao. Small Regional Geohazards Susceptibility Mapping Based on Geomorphic Unit[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2015, 35(1):91-98(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)
- [23] Cigna F, Tapete D, Lee K. Geological Hazards in the UNESCO World Heritage Sites of the UK: From the Global to the Local Scale Perspective[J]. *Earth-Science Reviews*, 2018, 176:166-194
- [24] Li Yumei, Di Jingyue, Xu Fengwen, et al. A Risk Warning Method Based on the Intraday Critical Precipitation for National Geological Disaster[J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2018, 8(3):77-83(李宇梅, 狄靖月, 许凤雯, 等. 基于当日临界雨量的国家级地质灾害风险预警方法[J]. 气象科技进展, 2018, 8(3):77-83)

- [25] Xu Yongqiang, Ma Juan. Dynamic Monitoring and Early Warning System of Geo-hazards Based on the Technology of Internet of Things [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2013, 24(3):90-93(徐永强,马娟.基于物联网技术的地质灾害动态监测预警体系及其架构[J].中国地质灾害与防治学报,2013,24(3):90-93)
- [26] Liang Run'e, Li Zhongshe, Miao Gaojian, et al. Current Situation and Prospect of Regional Geo-hazards Meteorological Early Warning Model [J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2013, 22(1): 30-34(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,2013,22(1):30-34)

Method and Application of Geological Hazard Early Warning Based on Explicit Statistical Principle

LI Chaokui¹ CHEN Jianhui¹ WEI Zhenwei² ZHOU Qian¹ ZHOU Fangbin³

1 National-Local Joint Engineering Laboratory of Geospatial Information Technology, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China

2 Tenth Geological Brigade of Guangdong Province, Zhongshan 528427, China

3 School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China

Abstract: On the basis of the second generation explicit statistical early warning model, based on the geological conditions and rainfall conditions of Zhongshan, a statistical early warning model for the area is constructed. On this basis, the zoning map of geological hazard is superimposed. At the same time, the plain area with elevation less than 10 meters is directly judged as no risk in the calculation process, so that it can reduce the amount of calculation and realize the more precise geological hazard warning in the study area. Compared with the early warning method of single point installation monitoring equipment in Zhongshan, the research area is divided into some small regions according to different terrain and geomorphology, and then the early warning formula of each region is derived. Finally, the early warning map of geological hazards is obtained by combining different regional formulas and geological hazard prone zoning maps. The experiment shows that the regional early warning method can be more accurate in positioning than the previous method, and the levels of early warning become more intuitive.

Key words: geological hazard; explicit statistical early warning model; geological disaster prone area; early warning by levels

First author: LI Chaokui, PhD, professor, specializes in surveying and mapping and geospatial information. E-mail: chkl_hn@163.com

Corresponding author: CHEN Jianhui, postgraduate. E-mail: 1689777979@qq.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41571374, 41671446; the National Key Research and Development Program of China, Nos. 2017YFB0503802, 2018YFB0505401; the Open Foundation of Key Laboratory of Special Environment Road Engineering of Hunan Province, No. KFJ150502; the Natural Resources Research Project of Hunan Province, No. 2019-12.