

陈志超, 张智超, 罗旋, 等. 基于隐患点详查及非线性叠加算法的地质灾害风险区划[J]. 灾害学, 2019, 34(1): 94-98. [CHEN Zhichao, ZHANG Zhichao, LUO Xuan, et al. Geological disaster risk zonation based on the potential points of geo-disasters survey and the nonlinear superposition algorithm[J]. Journal of Catastrophology, 2019, 34(1): 94-98. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2019.01.018.]

基于隐患点详查及非线性叠加算法的地质灾害风险区划*

陈志超^{1,2}, 张智超^{1,2}, 罗旋^{1,2}, 叶龙珍^{1,2}

(1. 福建省地质工程勘察院, 福建 福州 350002; 2. 国土资源部丘陵山地地质灾害重点实验室, 福建 福州 350002)

摘要: 针对地质灾害风险评价中存在的隐患点与风险级别不一致、易损性评价指标单一等问题, 提出了基于隐患点详查及非线性叠加算法的地质灾害风险区划模型。模型通过针对性的隐患点调查, 收集隐患点数据, 从中选取与地质灾害风险相关的指标参数, 形成隐患点模块 H , 遴选地质灾害的主要影响因素建立影响因素模块 T 。在对研究区域进行网格划分的基础上, 进一步通过密度比、归一化算法、AHP 等分析方法得出网格区域内两组模块的指标评分标准及指标间权重, 得出 H 、 T 值。将 H 、 T 评分值代入模型 $R = H^{\alpha} T$ 计算得出网格的最终风险数值。根据网格坐标, 生成 DEM 数据, 并形成区域的风险区划图件。通过对比, 建立的风险区划模型较传统模型具有较高的准确率和较低的错误率, 具有较好的实用性和科学性。

关键词: 地质灾害; 风险区划; 隐患点调查; 非线性叠加; 密度比; AHP

中图分类号: X43; P642 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2019)01-0094-05

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2019.01.018

地质灾害风险区划一直以来都是地质灾害研究的主要方向, 研究整体已较为成熟^[1]。以往主要的分区思路是以地质灾害点、隐患点分布图为基础, 通过危险性、易损性各项因子的评价和叠加计算, 形成最终地质灾害风险区划图。以往学者的研究方向主要集中在指标参数的选取和划分^[2-3]、指标计算模型优化^[4-5]、地质灾害危险性判别^[6]、区划精度提升^[7]、成图方式的选择^[8]等内容上。上述方向均取得了一定的研究成果, 但整体上仍存在三方面的不足:

(1) 以往地质灾害风险分区采用较多的是线性叠加的计算模式, 这将使得危险性与易损性的各项因子之间仅存在简单的并集关系, 这使得在局部的无危险区或无易损性区, 通过评价参数的叠加仍存在较高的地质灾害风险。而事实上, 部分高危危险区并不存在威胁对象, 部分高易损区也可能不存在地质灾害发生的基础条件(平原)^[9], 因此, 评价的结果将与事实相悖。

(2) 也有不少学者采用非线性建模方式^[10], 如模糊逻辑^[11-12]、逻辑回归^[13]等。但多数方法是通过宏观评价区域的地质环境参数进行风险区划的, 而较少将可能发生地质灾害区域(隐患点)本身以及其威胁对象作为研究重点^[14], 因此多数分

区结果侧重于反映区域滑坡、崩塌的易发情况, 而忽略了地质灾害与人的相关性。

(3) 对于易损性指标的获取, 主要参考研究区域的人口分布情况, 而较少考虑斜坡体实际的威胁状态, 这将使分区结果的实用性和科学性大大降低。

本次研究针对上述问题, 提出以区域地质灾害隐患点详细调查为基础, 通过隐患点威胁状态各指标与区域地质灾害危险性指标间的非线性叠加, 并根据叠加后的 DEM 数据进行地质灾害风险分区的区划模式。区划成果的实用性及科学性较以往有着较大提高, 可为地质灾害的管理和预警提供有效的参考。

1 风险区划模式

1.1 区划模式特征

与传统风险区划方式不同的是, 研究采用的区划手段是建立在区域地质灾害隐患点(高陡边坡、已发地灾点)详细调查的基础之上, 相较于以往通过地质环境图件进行叠加分析的区划方式,

* 收稿日期: 2018-05-07 修回日期: 2018-07-11

基金项目: 福建省科技厅引导性项目(2016Y0003); 福建省自然科学基金项目(2015J01158); 福建省广义地质项目(20171207)

第一作者简介: 陈志超(1988-), 男, 福建厦门人, 工程师, 硕士, 主要从事岩土体稳定性与防灾减灾方面的研究工作。

E-mail: 364834911@qq.com

详细调查更能切合区域地质灾害及地质环境的实际情况, 从而提高了区划的准确性。

此外, 根据隐患点调查的结果, 在风险评价指标的计算过程中, 将评价因子为 2 组集合: 隐患因素模块 (H) 和影响因素模块 (I), 其中隐患因素指对于研究区域内地质灾害危险性和易损性产生影响的指标参数, 其不仅考虑了以往易损性评价中的人口指标, 还根据区域调查结果, 引入了潜在规模、坡高、坡度等小范围内的危险性指标。通过整合多项指标, 可更为精确的得出隐患点对于区域的威胁性。影响因素模块指研究区域内的地质环境对地质灾害发生发育产生影响各项指标参数。通过集合间的非线性叠加得出风险评价价值, 从而使隐患因素和影响因素存在的关系为: $H \cap I$ 。

将隐患因素形成独立集合有利于隐患区域真实威胁性判断, 突出威胁对象因素在地质灾害风险区划中的作用, 避免无隐患点区域存在高风险区的矛盾状况。将影响因素单独成集有利于风险区划图在后期使用中的扩展性, 即在人工开挖边坡等对区域地质环境进行人为改造活动后, 可根据新的威胁对象状态对风险区划图进行修正。

1.2 区划模型技术路线

区划模型主要遵循以下技术路线。

(1) 隐患点调查: 采用隐患点实地调查的形式收集隐患点资料, 根据风险区划精度开展研究区域的高陡边坡详细调查。隐患点选取原则为: ①存在威胁对象; ②人工切坡高于 5 m 且坡度大于 30°; ③坡脚威胁对象间距与坡高比小于 0.5。根据风险区划的要求, 对隐患点的坐标、坡高、切坡坡度、潜在灾害规模、威胁对象范围及可能造成的人员财产损失进行记录。

(2) 隐患点投影: 通过 GIS 软件, 将隐患点根据坐标投影至研究区域地图中, 并根据制定的指标打分规则, 对隐患点的信息进行打分, 将最终分值以属性的形式对隐患点进行赋值。

(3) 网格划分: 根据研究区域特点和评价精度, 将研究区域划分为相同大小的网格, 统计网格内各地灾点属性数值。

(4) 指标打分: 根据网格内各地质灾害点和地质环境情况对各指标进行评分, 具体评分方法见第 2 章。根据评分结果对网格进行属性赋值。

(5) 风险评价指标非线性计算: 将所有指标分为隐患因素集和影响因素集两组集合, 对网格内两组集合分别进行线性叠加计算(式 2、式 3), 得出隐患模块和影响模块两组数值。并最终将两组数值进行非线性叠加, 得出网格的风险数值(式 1)。

$$R = H^{\alpha} T; \quad (1)$$

$$H = \sum_{j=1}^m (\omega_j \sum_{i=1}^n \frac{X_{ij}}{n}); \quad (2)$$

$$T = \sum_{j=1}^m \omega_j Y_j. \quad (3)$$

式中: R 为风险数值, H 为隐患模块, T 为影响因素, α 为指数权重, X 、 Y 分别为隐患指标和影响模块指标的打分值, ω 为权重因子, n 为隐患点数量, m 为影响因子数量。

(6) 风险区划图生成: 根据叠加后的风险数值和网格坐标生成 DEM 数据, 通过 Mapgis 软件生成风险区划图。

2 指标体系建立

2.1 指标打分方法

根据地质灾害的基本特点, 选定隐患模块的指标为: 坡高、切坡坡度、潜在灾害规模及威胁的人员财产共 4 组指标。为消除指标量纲不统一对综合评估带来的影响, 采用极差法对指标值进行标准化处理, 将其量化到 0~1 之间, 指标评分结果根据野外调查的结果, 由式(4)进行确定。

$$X = \frac{I_i - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}}, \quad (4)$$

式中: X 为上述隐患点影响因子的打分值, I 为某指标的实际值, I_{\max} 、 I_{\min} 为研究区域范围内该指标的最大和最小值, n 为网格内隐患点数量。实际操作过程中, 为避免异常数据对评分值的影响, 可根据隐患点实际情况, 剔除异常数据, 并对异常数据的打分值进行重新界定。

影响模块指标为: 地层岩性、地形、降雨、植被发育情况和构造特征 5 组指标。指标参数的确定方法主要通过已有的地质环境图件和地质灾害点的分布图件进行宏观的确定。具体方法为: ①从地质环境图件中分类出影响模块指标所对应的图层信息, 将各指标的图层与灾害点图层进行叠加, 统计各影响因素中不同类型单元已发地质灾害数量和规模, 利用密度比法(式 5)确定影响因素各分类的密度比值, 再将各分类密度比值进行归一化处理(式 6), 最终确定打分标准。

$$F_{ij} = \frac{Z_{ij}/S_{ij}}{Z_i/S_i}; \quad (5)$$

$$Y = F_{ij} / \sum_{j=0}^n F_{ij}. \quad (6)$$

式中: F_{ij} 表示第 i 种影响因素第 j 分类密度比值; Z_{ij} 表示第 i 种影响因素第 j 分类中发生地质灾害总数量、总面积或总规模; S_{ij} 表示第 i 种影响因素第 j 分类中总面积; Z_i 表示研究区发生地质灾害总数量、总面积或总规模; S_i 表示研究区总面积。 f 为网格所处的 j 分类的打分值。

2.2 权重确定方法

指标参数间线性叠加所需的权重采用层次分析法 AHP 进行确定, 即对同一层各因素 u_i ($i=1$,

2, ..., n)相对于上一层支配因素的重要程度进行两两比较,按照1~9标度法标度的含义,构造比较矩阵。根据式(2)求出矩阵的特征根 ω 。

$$A\omega = \lambda_{\max}\omega, \tag{7}$$

所得到的 ω 经归一化处理作为各影响因素在该准则层的权重。将 λ_{\max} 带入式(8),进行一致性检验。

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}, \tag{8}$$

式中: n 为判断矩阵的阶数。计算一致性比例 $CR = CI/RI$, RI 为随机一致性指标,可根据介绍通过查表得出,当 $CR < 0.1$ 时,判断矩阵满足要求。否则,需要对判断矩阵重新进行调整。

指数权重 α 根据区域地质灾害发育特征,由专家讨论以及经验进行最终确定。

3 实例分析

3.1 区域概况及图层绘制

研究选择的地质灾害风险区划区域为福建省宁德市蕉城区,区域东西宽达70 km,南北长约50 km,总面积1 354 km²。通过区域内1:5万地质灾害及隐患点详查,查明地质灾害点188处,隐患点(高陡边坡)866处。调查期间记录隐患点和地质灾害点的相关数据,并通过Mapgis软件投影至区域地图上。形成地质灾害点图层(图1)和隐患点图层(图2)。区域根据区域面积,按1 km×1 km划分网格。



图1 地质灾害投影图

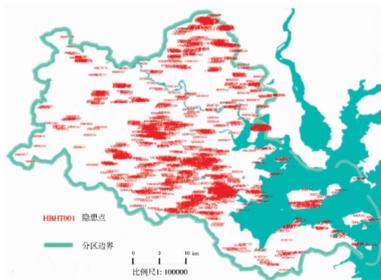


图2 隐患点投影图

3.2 指标评价

3.2.1 隐患模块指标评分

将网格内所有隐患点的隐患模块参数代入式4

计算各指标的评分值 X_{ij} ,将网格内 n 处隐患点平均化后得到该网格的 i 指标评分值。并将该值赋予网格对应的属性值。其中人员财产指标采用威胁1人=50万的标准将威胁对象全部转化为财产金额,便于比较。根据宁德蕉城区隐患点的实际情况,在评分取值过程中剔除潜在规模大于50 000 m³、威胁财产大于5 000万元的地灾点,并规定上述情况隐患点相应指标评分取最大值。以某网格为例,网格内存在两处隐患点,表1为网格的评分计算表,网格评分值为网格各指标的最终评分结果。

表1 网格评分计算表

隐患点信息	坡高/m	坡度/(°)	潜在规模/m ³	威胁人员财产/万元
隐患点A	10	30	20000	1100
隐患点B	18	32	10000	2800
最大值 I_{\max}	50	80	50000	5000
最小值 I_{\min}	5	15	20	60
隐患点A 打分值	0.11	0.23	0.40	0.21
隐患点B 打分值	0.29	0.26	0.20	0.55
网格评分值 X	0.20	0.25	0.30	0.38

3.2.2 影响因素模块指标评分

将区域的地质环境图系各图层与地质灾害分布图层进行叠加,统计不同地质环境分图层(岩性图层、地貌图层等)内各个分区(岩浆岩组、沉积岩组等)的地灾点数量,根据密度比方法,计算各分区的密度比值,归一化后得出各分区的评分值。根据网格所在区域的地质环境情况,赋予网格相应的评分值属性。由于篇幅所限,仅列出地层影响因素评分计算表(表2)。

表2 地层影响因素评分计算表

	凝灰岩组	花岗岩组	流纹岩组	第四系沉积组
地灾点数 Z	69	88	27	4
面积 S	710	350	154	140
密度比 F	0.70	1.81	1.26	0.21
评分标准 Y	0.18	0.46	0.32	0.05

3.3 权重计算

各根据上节所述方法,首先构造隐患点模块对比矩阵 A 和影响因素模块对比矩阵 B 。

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 4 & 1 & 2 & 2 \\ 1/4 & 1/2 & 1/2 & 1/2 & 1/2 \\ 1 & 2 & 1 & 2 & 1 \\ 1/2 & 2 & 1/2 & 1 & 1 \\ 1/2 & 2 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}; \tag{9}$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1/2 & 1/3 \\ 1 & 1 & 1/2 & 1/3 \\ 2 & 2 & 1 & 1/2 \\ 3 & 3 & 1/2 & 1 \end{bmatrix}。 \tag{10}$$

计算得出矩阵 A 的特征向量为 $\omega = [0.6648,$

0.1915, 0.5140, 0.3324, 0.3830], 归一化得出影响因素集 $u_{影} = [地层岩性、地形地貌、降雨、植被发育情况、构造]$ 各因子间的权重 $\omega_H = [0.32, 0.09, 0.25, 0.16, 0.18]$ 。矩阵 B 的特征向量为 $\omega = [0.25, 0.25, 0.47, 0.80]$, 归一化得出隐患因素集 $u_{隐} = [坡高、坡度、潜在规模、威胁人员财产情况]$ 各因子间的权重 $\omega_T = [0.14, 0.14, 0.27, 0.45]$ 。最终计算两组矩阵一致性比例 CR 分别为 0.043、0.36, 均小于 0.1, 符合一致性要求。

3.4 基于非线性算法的风险分区

将评分值与权重计算结果代入式 2、式 3, 计算得出各网格的隐患模块和影响因素模块的评分值 H 、 T 。分值代入式 1 计算得出各网格的风险数值 R , 其中根据区域地质灾害发育情况及专家建议, 指数权重 α 取 0.7。采用等间距法, 将风险数值划分为无风险区、低风险区、中风险区、较高风险区和高风险区五个不同等级, 并通过 GIS 软件绘制最终的地质灾害风险区划图(图 3)。区划图中高风险区域主要位于宁德城关、石后乡、洋中镇及三都镇等人口密集且存在高陡边坡的地区, 无危险区域主要位于无人员居住的山区以及地势相对平坦的平原区, 整体区划结果与实际情况基本吻合。

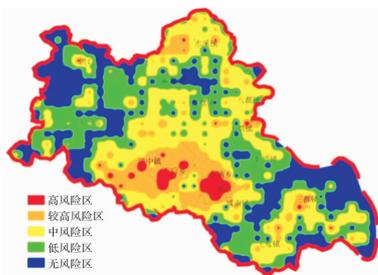


图 3 宁德蕉城地质灾害风险区划图

4 成果分析

为验证风险区划成果的有效性, 将非线性算法的风险分区图与常规通过地质环境因素和人口密度因素进行线性叠加的地质灾害易发分区图进行对比, 可以看出二者存在较大的差别。常规方法得出的地质灾害高风险区主要集中在海拔较高但人烟稀少的山区, 对于实际地质灾害较为密集的城关区域则显示为无风险区或低风险区, 这与图 1 中显示的地质灾害发生情况是相悖的。根据表 3 的具体的数值统计(准确率定义为高风险区和较高风险区内地质灾害点所占比例, 错误率定义为低风险区和无风险区地质灾害所占比例), 非线性叠加分区模式有效的提高了分区成果的准确率并降低了分区成果的错误率, 整体上与地质灾害实际发生情况契合度更高, 更好的反映出地质灾害

风险情况。另一方面, 非线性叠加分区模式存在零值区域, 也体现出人类活动对于地质灾害发生的重要性, 更好的体现了地质灾害风险分区的实用性。综上所述, 非线性叠加分区模式对于地质灾害的预警和防治具有较高的实用性和科学性, 能够较好的指导地质灾害预防和预报工作。

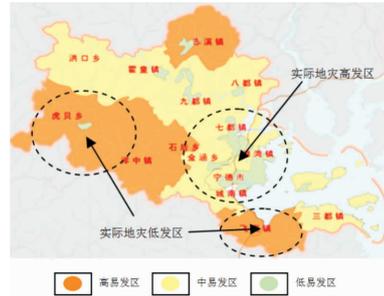


图 4 常规方法地质灾害风险区划图

表 3 成果对比表

风险分区	非线性叠加分区模式		线性叠加分区模式	
	地质点数	占比/%	地灾点数	占比/%
高风险区	79	42.0	53	28.2
较高风险区	71	37.8	58	30.9
中风险区	29	15.4	45	23.9
低风险区	9	4.8	32	17.0
无风险区	0	0.0	—	—
准确率%	79.8	58.2		
错误率%	4.8	17.0		

5 结论

文章建立了基于隐患点调查和非线性叠加算法的风险区划模型, 并通过宁德城区地质灾害风险区划为例做了详细阐述, 总体上可得出如下结论。

(1) 风险分区模型主要建立在前期的隐患点调查基础上, 通过有针对性的隐患点调查能够收集详实而有效的风险分区基础数据, 避免了通过图鉴分析分区的盲目性和不确定性。

(2) 模型将隐患点独立成集, 并通过隐患点调查结果, 进一步细化隐患点参数影响因素。突出了区域地质灾害易损性对地质灾害风险的影响力。

(3) 非线性叠加算法使隐患模块和影响因素模块形成交集关系。在突出了区域地质灾害易损性对地质灾害风险的影响力的同时, 避免了无隐患点区域存在高风险区的矛盾状况。

(4) 通过建立的风险分区模型与传统的线性叠加分区模型进行对比, 可得出基于隐患点调查和非线性叠加算法的风险区划模型具有较高的准确率和较低的错误率, 并划分出了地质灾害的无风险区域。总体上, 具有较高的科学性和实用性。

参考文献:

- [1] DAI F C, GAO H X. Overview on landslide risk zoning and prediction research[J]. *Journal of Catastrophology*, 2010, 25(2): 124-128.
- [2] 蔡向阳, 铁永波. 基于 CVM 的地质灾害风险价值评估方法探索[J]. *灾害学*, 2017, 32(1): 212-215, 227
- [3] 孟庆华, 孙炜锋, 王涛. 陕西凤县地质灾害易发性评价研究[J]. *工程地质学报*, 2011, 19(3): 388-396.
- [4] 俞布, 潘文卓, 宋健, 等. 杭州市滑坡地质灾害危险性区划与评价[J]. *岩土力学*, 2012, 33(1).
- [5] 王雁林, 郝俊卿, 赵法锁, 等. 汶川地震陕西重灾区地质灾害风险区划探讨[J]. *灾害学*, 2011, 26(4): 35-39.
- [6] 郭富赞, 孟兴民, 张永军, 等. 甘肃山区城镇地质灾害风险区划技术方法探讨[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2014, 50(5): 604-610.
- [7] 霍艾迪, 张骏, 卢玉东. 地质灾害易发性评价单元划分方法—以陕西省黄陵县为例[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2011, 41(2): 523-535.
- [8] 刘亮亮, 谢菲. 基于 GIS 的地质灾害风险区划评价—以维西傈僳族自治县为例[J]. *地质灾害与环境保护*, 2016, 27(1): 37-43.
- [9] 高华喜. 滑坡灾害风险区划与预测研究综述[J]. *灾害学*, 2010, 25(2): 124-128.
- [10] 沈玲玲, 刘连友, 许冲, 等. 基于多模型的滑坡易发性评价—以甘肃岷县地震滑坡为例[J]. *工程地质学报*, 2016, 24(1): 19-28.
- [11] Bui D T, Pradhan B, Lofman O, et al. Spatial prediction of landslide hazards in Hoa Binh province(Vietnam): a comparative assessment of the efficacy of evidential belief functions and fuzzy logic models[J]. *Catena*, 2012, 96(2): 28-40.
- [12] Sharma L, Patel N, Ghose M, et al. Synergistic application of fuzzy logic and geo-informatics for landslide vulnerability zonation—a case study in Sikkim Himalayas, India[J]. *Applied Geomatics*, 2013, 5(4): 271-284.
- [13] BAI S, WANG J, ZHANG Z, et al. Combined landslide susceptibility mapping after Wenchuan earthquake at the Zhouqu segment in the Bailongjiang Basin, China[J]. *Catena*, 2012, 99(4): 18-25.
- [14] 姚翔龙, 赵法锁, 王雁林, 等. 陕南秦巴山区地质灾害隐患调查识别探讨—以柞水县为例[J]. *灾害学*, 2016, 31(3): 230-234.

Geological Disaster Risk Zonation Based on the Potential Points of Geo-disasters Survey and the Nonlinear Superposition Algorithm

CHEN Zhichao^{1,2}, ZHANG Zhichao^{1,2}, LUO Xuan^{1,2} and YE Longzhen^{1,2}

(1. *Fujian Geological Engineering Survey Institute, Fuzhou 350002, China*;

2. *Key Laboratory of Ministry of Land and Resources, Fuzhou 350002, China*)

Abstract: There are two problems in the past geological disaster risk zoning: the inconsistency between the potential points of geo-disasters and the level of risk, and the over-simplicity of vulnerability assessment indicators. Focusing on these problems, this study established a model of geological disaster risk zoning based on the survey on potential points of geo-disasters and the nonlinear superposition algorithm. Through the targeted survey on potential points, the data related to the geological disaster risk index are collected to establish the independent module of potential points H. In addition, according to the influence factors of geological disasters induced by geological environments, the module of influence factors T is also established. On the basis of the meshing of the area studied, and through the analysis methods such as density ratio, normalization algorithm, AHP, the weight and standard of evaluation of the indexes of the two moduli in the grid are further obtained, which yields the values of H and T. Then the final value at risk can be calculated by introducing H and T into $R = H^\alpha T$. The DEM data are created according to the coordinate of the grid and the regional risk zoning map can be drawn. Compared with the traditional linear superposition model, the introduced model has higher accuracy and lower error rate, which is a practical and scientific approach.

Key words: geological disaster; risk zoning; survey on the potential points of geo-disasters; nonlinear superposition; density ratio; AHP