

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2020.03.13

基于 GIS 和信息量模型的安徽池州地质灾害 易发性评价

王 雷¹, 吴君平², 赵冰雪^{1,3}, 姚志强¹, 张乐勤¹

(1. 池州学院地理与规划学院, 安徽 池州 247000; 2. 安徽省地质环境监测总站,
安徽 合肥 230000; 3. 南京大学地理与海洋科学学院, 江苏 南京 210023)

摘要:以安徽省池州市为研究区,选取坡度、坡向、工程地质岩组、断裂、道路、河流、降雨量、土地利用类型 8 个影响因子进行地质灾害易发性评价。基于全市 345 个地质灾害点(崩塌和滑坡)样本数据,采用信息量模型对研究区各影响因子的信息量进行计算,依据灾害点密度将区域灾害易发性划分为 5 个等级:低易发区、较低易发区、中易发区、较高易发区和高易发区。结果表明:安徽省池州市地质灾害高易发区和较高易发区主要分布在坡度较大的山区河谷两侧,反映人类工程活动破坏、流水冲刷作用和地形地貌因素是影响该区地质灾害的主要因素。其中,高易发区和较高易发区面积为 1 801.47 km²,分别占全区总面积的 7.89% 和 13.88%,高易发区和较高易发区内的灾害点分别占有所有灾害点的 48.7% 和 21.5%,其中高易发区的灾积比为 6.17,明显高于其他易发等级。对地质灾害易发性的方法与技术的研究,旨在为该区的灾害防治和经济建设提供技术参考。

关键词: 地质灾害;易发性评价;GIS;信息量模型;池州

中图分类号: P642

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2020)03-0096-08

Susceptibility assessment of geohazards in Chizhou City of Anhui Province based on GIS and informative model

WANG Lei¹, WU Junping², ZHAO Bingxue^{1,3}, YAO Zhiqiang¹, ZHANG Leqin¹

(1. College of Geography and Planning, Chizhou University, Chizhou, Anhui 247000, China;

2. Anhui Geological Environmental Monitoring Station, Hefei, Anhui 230000, China; 3. School of
Geographic and Oceanographic Science, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210023, China)

Abstract: Eight factors including slope, aspect, engineering geological group, faults, roads, rivers, rainfall and land use were chosen to evaluate the susceptibility of geohazards in Chizhou City. 345 sample data of geological disaster including 146 landslides and 199 collapses were selected, the information value model was used to calculate the information value of the influence factors. According to the density of disaster points, the susceptibility of regional geohazards is divided into five grades: extremely low susceptible area, low susceptible area, middle susceptible area, high susceptible area and extremely high susceptible area. The results indicate that the extremely high risk and the high risk areas are mainly distributed on both sides of rivers and valleys in mountainous areas. It shows that human engineering activities, flow erosion and topography are the main factors affecting the geological disasters in Chizhou. The area of high-risk areas and extremely high-risk areas is 1 801.47 km², accounting for 7.89% and 13.88% of the total area respectively, and accounted for 48.7% and 21.5% of all geological disaster spots, respectively. The ratio between the extremely high risk areas and

收稿日期: 2019-09-11; 修订日期: 2019-11-17

基金项目: 池州学院自然科学研究项目(CZ2018ZRZ10); 安徽高校自然科学研究项目(KJ2019A0866)

第一作者: 王 雷(1988-), 男, 安徽贵池人, 硕士, 讲师, 主要从事数字地形分析和 GIS 应用研究。E-mail: wlei1020@126.com

the total area is 6.17, significantly higher than other susceptibility grades. The research on the methods and techniques of geological disasters susceptibility is aimed at providing technical reference for disaster prevention and economic construction in this area.

Keywords: geological disaster; susceptibility assessment; GIS; information value model; Chizhou

0 引言

池州地处安徽西南,北与安庆市隔江相望,南邻黄山市,西与江西省毗邻。池州西北部为沿江平原,地势低平,河湖交错,地表由第四纪全新世和更新世冲积、坡积和洪积物组成;中部为岗冲相间丘陵区,由中元古界浅变质岩及古生代碎屑岩和碳酸盐岩及燕山晚期岩浆岩等组成;东南部以九华山、老山、牯牛降和仙寓山构成南部山区骨架(图1)。区域内地质构造单元属于扬子准地台区,横跨下扬子台坳和江南台隆两个二级构造单元,经过多期次的构造运动,褶皱、断裂构造较为发育,使岩石破碎,易于风化。地层间的主干断裂有东至断裂、葛公断裂、高坦断裂、江南深断裂、周王深断裂等。在安徽省地质灾害防治“十三五”规划中,池州市被列为崩塌、滑坡、泥石流、岩溶塌陷的重点防治区域^[1]。

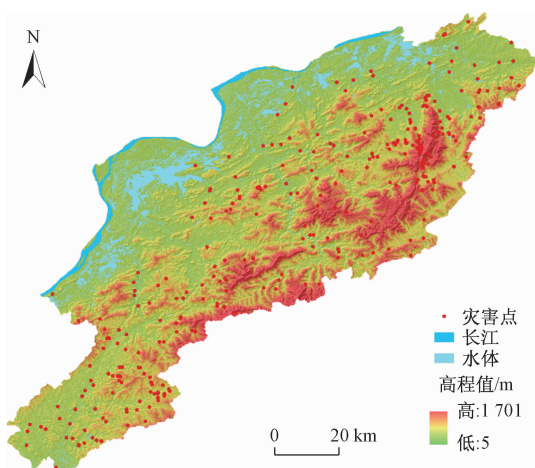


图1 研究区概况

Fig.1 Overview of study area

目前有多位学者对地质灾害的易发性评价方法进行了研究,但由于不同的地质、气候、人类活动环境下,影响因素有所不同,各因子的适宜性也有差别,目前没有形成统一的方法^[2-4]。常用的地质灾害易发性评价模型主要有:人工神经网络^[5-6]、信息量法^[7-10]、综合指数法^[11-12]、层次分析法^[13-14]、逻辑回归分析^[15-16]、证据权法^[17]等。信息量法具有原理简单,易

于建模且具有较高精度的特点,近年来,以GIS为代表的空间信息技术结合信息量模型已广泛应用于地质灾害易发性的评价中^[7-10,18-19]。

基于信息量模型,借助GIS技术分析地质灾害易发性,步骤如下:(1)选取与地质灾害相关的影响因子,完成基础数据的整理;(2)运用ArcGIS重分类和区域统计工具统计各影响因子不同区间的灾害信息;(3)依据统计信息,分析各因子的空间分布特征及其与灾害发生的关系,计算致灾因子不同区间的信息量;(4)对单因子不同区间按信息量重新赋值,获得单因子信息量图,借助叠加分析方法,获得综合信息量图层;(5)采用分位数法将综合信息量图层划分为50个区间,在此基础上依据不同区间的灾害点密度将图层划归为5个易发区间;(6)统计不同易发区间的面积占比与灾积比,判断区间划分的合理性。

1 数据来源

研究数据包括全市388个历史地质灾害点,来源于安徽省地质环境监测总站池州站,其中滑坡146个,崩塌199个,塌陷21个,泥石流22个。考虑该区主要的灾害类型为崩塌和滑坡以及不同灾害类型致灾因素差异,本文选取其中的345个滑坡和崩塌灾害点作为灾害点数据。坡度和坡向通过ASTER GDEM V2数据生成,数据来源于地理空间数据云,分辨率为30 m;道路数据源于Open Street Map,在此基础上,借助Google影像完善道路网;河流数据基于DEM通过ArcGIS水文分析工具获取;地层岩性和断裂数据来源于安徽省地质图;土地利用类型数据来源于FROM-GLC(<http://data.ess.tsinghua.edu.cn/>),分辨率为10 m;降雨量数据来源于安徽省水文局水文信息网(<http://yc.wswj.net/ahsxx/LOL/public/public.html>),有效站点数92个,选取2014—2018年的年均降雨量作为站点的年降雨量值,通过张力样条插值生成全区降雨量空间分布图。

2 信息量模型

信息量模型源于信息理论中量化描述信息的一种统计评价方法,由美国数学家,信息论创始人香农提

出^[20],被许多学者广泛的应用到地质灾害易发性评价中。地质灾害的发生受多种因素的影响,在不同的地理环境中,各种影响因素对地质灾害的发生的作用有所差异。地质灾害的发生与否与评价过程中各因素信息量的大小有关,以已发生灾害的影响因素为依据,推算标志灾害发生概率的信息量,建立评价模型,从而对整个区域的灾害易发性做出评价。信息量通过事件概率来计算,见公式(1)

$$I(E, x_1 x_2 \cdots x_n) = \ln \frac{p(E | x_1 x_2 \cdots x_n)}{p(E)} \quad (1)$$

其中 $I(E, x_1 x_2 \cdots x_n)$ 为因素 $x_1 x_2 \cdots x_n$ 组合条件下地质灾害发生的信息量, $p(E | x_1 x_2 \cdots x_n)$ 为 $x_1 x_2 \cdots x_n$ 组合下地质灾害发生的概率, $p(E)$ 为地质灾害发生的概率。式(1)可改写为:

$$I(E, x_1 x_2 \cdots x_n) = I(E, x_1) + I_{x_1}(E, x_2) + \cdots + I_{x_1 x_2 \cdots x_{n-1}}(E, x_n) \quad (2)$$

$I_{x_1}(E, x_2)$ 为因素 x_1 存在的条件下,因素 x_2 所提供的信息量。

通常情况下,影响地质灾害发生的因素有很多,在排除因子相互影响的前提下,可计算各因子的单因子信息量,通过叠加得到多因子共同作用下的综合信息量,见公式(3)

$$I(E, x_1 x_2 \cdots x_n) = \sum_{i=1}^n I_i \quad (3)$$

式(3)中 I_i 为各因子的信息量,可用频率估计条件概率来估算因素 x_i 对地质灾害发生事件(E)提供的信息量。

ArcGIS 中采用栅格数据组织评价单元,通常情况下,每个栅格单元由多个影响因素,各因素又被划分为多个区间或类别,对每个栅格单元的信息量进行求和就得到该栅格单元的信息量,见公式(4)

$$I_i = \sum_{j=1}^n I(E, x_{ij}) = \sum_{j=1}^n \ln \frac{N_{ij}/N}{A_{ij}/A} \quad (4)$$

式中: n ——评价因子个数;

A ——研究区评价单元总面积;

N ——研究区内含有灾害点的总数;

A_{ij} ——研究区含有评价因素 x_{ij} 的单元总面积;

N_{ij} ——分布在评价因素 x_{ij} 的灾害点总数。

I 为栅格单元的信息量预测值, I 值有正有负,当 I 大于 0 时表示多因素的组合有利于栅格单元发生地质灾害,反之则表示不利于地质灾害的发生。信息量的值越大表示越易于发生灾害。

3 基于 GIS 的地质灾害易发性评价

3.1 灾害影响因子分析

本文通过收集影响地质灾害发生的相关基础数据,最终选取坡度、坡向、工程地质岩组、断裂、道路、河流、降雨量、土地利用类型 8 个影响因子进行地质灾害易发性评价。利用 ArcGIS 对因子进行分级,离散型因子根据已有的分类标准,如:工程地质岩组、土地利用类型。连续型因子中坡度、坡向采用细化等间距的分级方式;降雨量按 100 mm 等间距分级;距断裂、道路和河流的距离参考已有研究^[9,21],结合区间内的灾害密度进行分级,各因子划分区间见表 1。

(1) 地形因素

地形决定着区域地面能量与物质的再分配,是影响地质灾害发生的基础条件。基于 DEM 进行坡度和坡向计算。其中坡度以 5° 为间隔,划分为 10 个等级。坡向以正北为 0° ,依顺时针方向增至 360° ,每隔 30° 将坡向划分为 12 个区间,另外 ArcGIS 中 -1 代表水平面,故共有 13 个区间。

由图 2(a)可见,随着坡度的增大整体灾害密度表现为上升趋势,坡度大于 20° 以上的区间占总面积的 32.34%,区间内灾害密度高。从图 2(b)可知,坡向与灾害发生总体表现为东南 ($90^\circ \sim 210^\circ$) 方向密度较高,西北方向密度低,这与池州夏季受东南季风影响,阳坡的水热条件更为显著,易于造成地质灾害相吻合。

(2) 地质构造

依据池州市岩土体类型划分和特征一览表^[22]将区域划分为 7 类工程地质岩组:坚硬-较坚硬块裂状花岗岩为主岩浆岩岩组(R);坚硬-较坚硬中-厚层状岩溶较发育的碳酸盐岩岩组(O);较坚硬-软弱层状碳酸盐岩与碎屑岩岩组(P+T);坚硬-软弱薄-厚层状砂岩泥岩页岩为主碎屑岩岩组(S);坚硬-较软弱中厚-巨厚层状砂砾岩为主碎屑岩岩组(K);较坚硬-软弱片状含云母千枚岩、板岩岩组(Pt2);第四纪松散岩类岩组(Q)。由图 2(c)可见:地质灾害发生密度最大的是 R,其面积占总面积的 11.67%,灾害密度为 10.97 个/100 km²。

研究区内经过多次的地质构造,发育了多条断裂,断裂带附近受断裂作用影响易发生地质灾害。以断裂带为中心做 5 个等级的缓冲区。由图 2(d)可见,灾害发生的密度在断裂带附近明显高于其它地方。

(3) 道路

池州属于皖南低山丘陵区,山区村落主要沿河道

和山谷分布,且房屋多依山而建。山区道路在建设过程中多存在开挖坡体的情况,这会直接影响坡体的稳定性,形成地质灾害隐患。以池州主要道路为中心做5个等级的缓冲区。由图2(e)可见,临近道路的区域灾害点密度明显大于其它区域。

(4) 河流

池州境内有三大水系,九条主要河流,其中多数河流由南向北汇入长江。在夏季强降雨条件下,山体斜坡易受水体的冲刷,影响其稳定性。以河网为中心做5个等级的缓冲区。由图2(f)可见,灾害发生的密度整体与临近河流的距离成负相关性。

(5) 降雨量

池州市属于亚热带季风性气候,受东南季风的影响,

降雨量整体呈东南高西北低的特点。在降雨的主要季节,山区受地形因素的影响,降雨在短时局部空间上差异往往较为明显,且总体与海拔的高度成正比。由图2(g)可见,随着降雨量的增加地质灾害的密度呈明显的上升趋势,其中降雨量大于2 000 mm的区域灾害密度为10.80个/100 km²,其面积占总面积的10.74%。

(6) 土地利用类型

在FROM-GLC 10 m土地利用数据集的基础上,将池州土地利用类型划分为耕地、林地、草地、水域、不透水面和裸地。由图2(h)可见,裸地的灾害密度高达41.1个/100 km²,这主要是由于矿山开发造成了多起地质灾害。

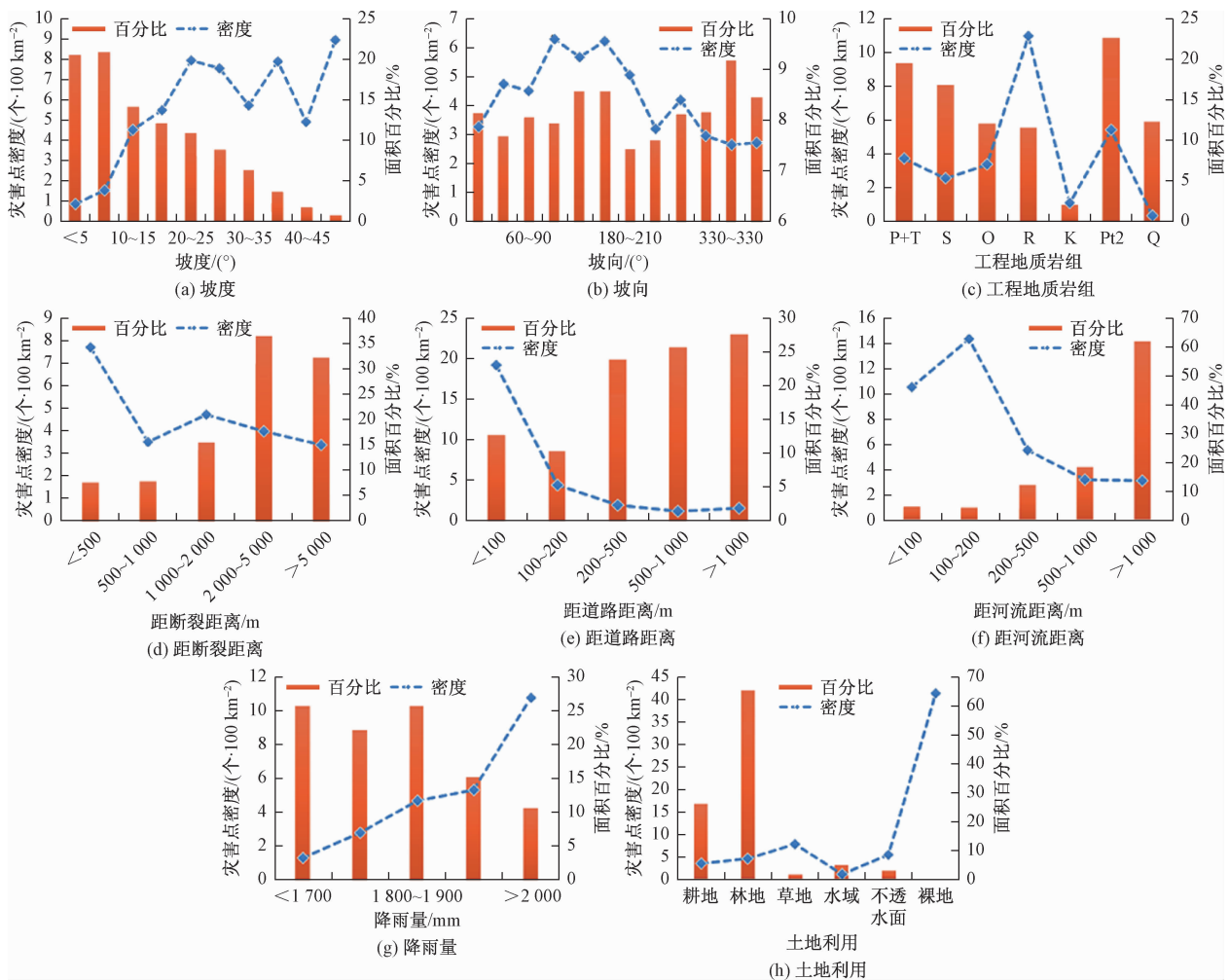


图2 因子对地质灾害发育贡献统计

Fig. 2 Statistics of factors contribution to the development of geological disasters

3.2 致灾因子信息量计算

运用 ArcGIS 重分类得到8个因子专题图(图3),图层栅格单元大小30 m×30 m,统计因子不同区间的

面积及灾害发生数量获得各因子不同区间的信息量表(表1)。根据信息量值对各因子图层重新赋值得到各致灾因子的信息量图层,利用栅格计算器叠加单因子

信息量图层得到综合信息量分布图。

3.3 地质灾害易发性评价

对灾害易发性的分级,多数学者采用“自然断点法”^[9-10,18],该方法认为数据本身有断点,其适宜性受到一定限制。本文首先对综合信息量采用“分位数”分类法分为 50 个区间,从而保证每个区间的面积较为平均,在此基础上,统计每个区间的灾害点密度。参考吴树仁提出的分区标准^[4],依据不同信息量区间的灾害点密度划分易发性等级,将密度小于 0.5 个/100 km² 的定为低易发区;大于 0.5 个/100 km²,小于 2 个/100 km² 的定为较低易发区;大于 2 个/100 km²,小于 5 个/100 km² 的定为中易发区;大于 5 个/100 km²,小于 15 个/100 km² 定为较高易发区;大于 15 个/100 km² 的定为高易发区。据此,由低易发区至

高易发区的信息量区间分别为(-11.23, -4.44)、(-4.44, -1.19)、(-1.19, -0.05)、(-0.05, 0.99)、(0.99, 6.68)分类标准见图 4,结果见图 3(i)。

4 结果评价

通过叠加以上 8 个致灾因子,并对地质灾害易发性结果进行区域统计分析,可得各易发区内主要的致灾因子的组合形式,结合图 3(i)可见:

(1) 高和较高易发区面积为 1 801.47 km²,约占全区面积的 21.77%,主要分布在坡度较大的山区河谷两侧。究其原因是山区道路和村落多沿河道和山谷而建、人为开凿边坡和河流冲刷作用下容易造成滑坡、崩塌等地质灾害。

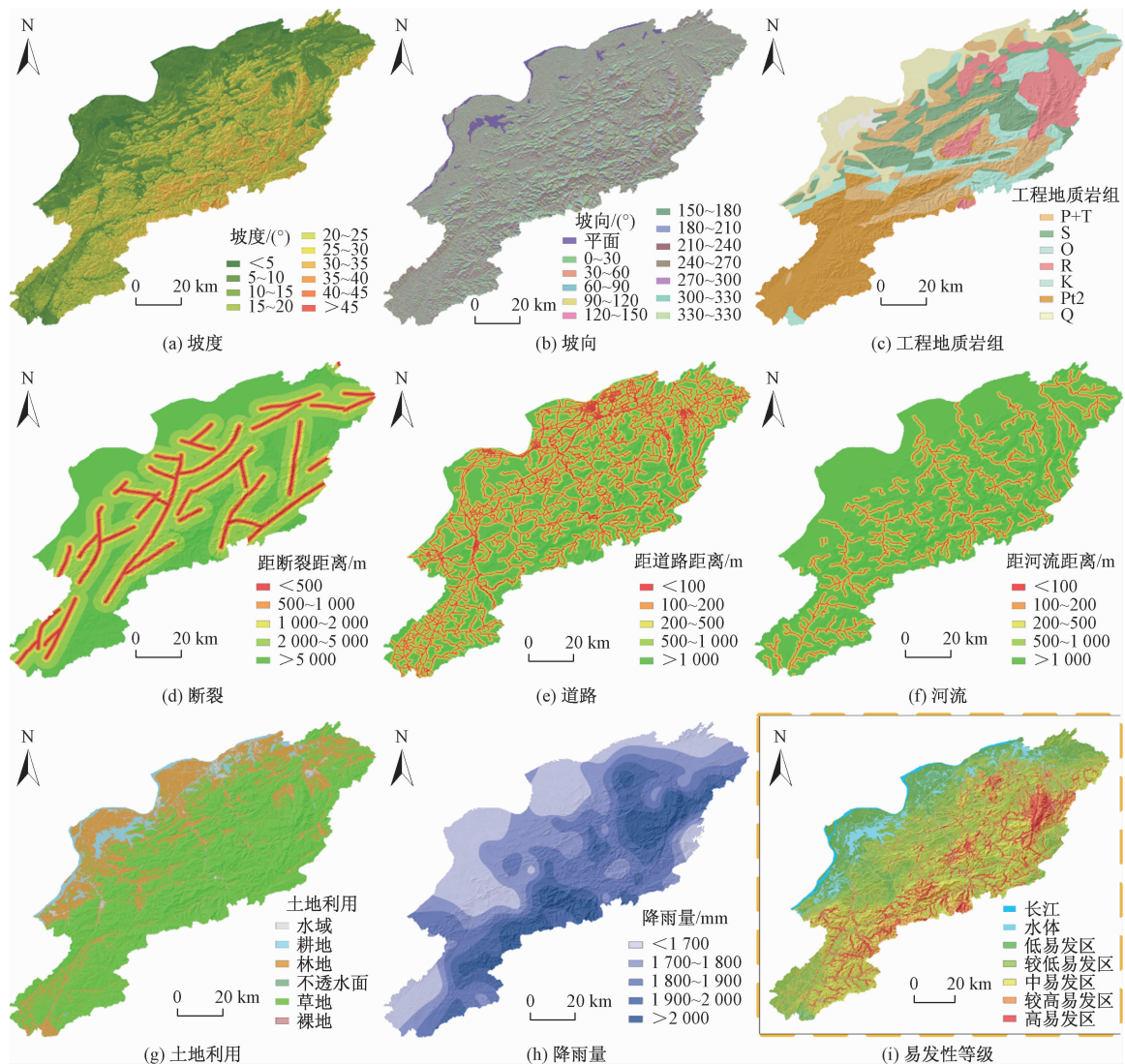


图 3 评价因子分级和易发性等级

Fig. 3 The classified distribution maps of evaluation factors and susceptibility

表 1 致灾因子信息量

Table 1 Information value of evaluation factors

指标因子	类型	信息量	排序	指标因子	类型	信息量	排序
坡度	< 5°	-1.55	54	工程地质岩组	P + T	-0.10	33
	5° ~ 10°	-0.98	49		S	-0.48	46
	10° ~ 15°	0.08	27		O	-0.21	37
	15° ~ 20°	0.28	17		R	0.97	4
	20° ~ 25°	0.65	8		K	-1.31	52
	25° ~ 30°	0.60	12		Pt2	0.27	19
	30° ~ 35°	0.32	15		Q	-2.37	55
	35° ~ 40°	0.64	9	断裂	< 500 m	0.61	11
	40° ~ 45°	0.17	23		500 ~ 1 000 m	-0.17	34
	> 45°	0.76	7		1 000 ~ 2 000 m	0.12	26
坡向	0° ~ 30°	-0.24	38		2 000 ~ 5 000 m	-0.05	32
	30° ~ 60°	0.12	25		> 5 000 m	-0.20	36
	60° ~ 90°	0.08	28	道路	< 100 m	1.53	2
	90° ~ 120°	0.41	13		100 ~ 200 m	0.06	29
	120° ~ 150°	0.30	16		200 ~ 500 m	-0.70	47
	150° ~ 180°	0.40	14		500 ~ 1 000 m	-1.19	51
	180° ~ 210°	0.19	22		> 1 000 m	-0.94	48
	210° ~ 240°	-0.27	39	河流	< 100 m	0.92	6
	240° ~ 270°	0.00	31		100 ~ 200 m	1.22	3
	270° ~ 300°	-0.34	42		200 ~ 500 m	0.27	18
	300° ~ 330°	-0.46	45		500 ~ 1 000 m	-0.28	40
	330° ~ 360°	-0.43	44		> 1 000 m	-0.31	41
土地利用	耕地	-0.17	35	降雨量	< 1 700 mm	-1.16	50
	林地	0.06	30		1 700 ~ 1 800 mm	-0.39	43
	草地	0.62	10		1 800 ~ 1 900 mm	0.12	24
	水域	-1.46	53		1 900 ~ 2 000 mm	0.25	20
	不透水面	0.23	21		> 2 000 mm	0.95	5
	裸地	2.29	1				

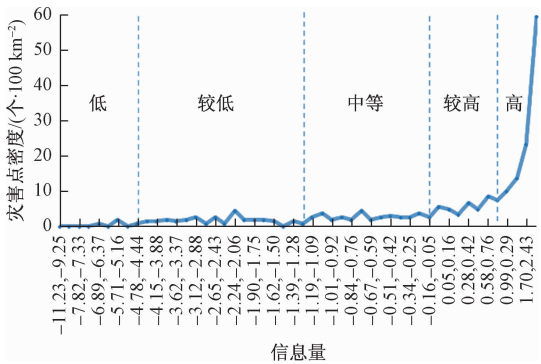


图 4 地质灾害易发性分级标准

Fig. 4 The standard of the susceptibility classification

(2) 中易发区面积为 2 156.38 km², 约占全区面积的 26.07%, 主要位于远离道路和河流的山区, 该区域受道路和流水等因素的影响较小, 但由于地形坡度较大, 较易在其他人为因素的影响下发生地质灾害。

(3) 较低和低易发区面积 4 313.84 km², 约占全区面积的 52.15%, 主要分布在沿江平原地带和南部山区地势较为平缓的区域。沿江平原地带由于地势平

坦, 地质灾害发生的可能性较小, 南部山区部分远离道路、河流且坡度较小区域, 地质灾害发生的概率也不大。

表 2 不同易发性等级对应的实际灾害

Table 2 Actual disaster distribution in different susceptibility classification

易发性等级	面积/ km ²	灾害点 个数	单位面 积个数/ 100 km ²	面积 占比/ % (a)	灾害点 占比/ % (b)	灾积比 b/a
低易发区	1 493.70	5.00	0.33	18.06	1.45	0.08
较低易发区	2 820.14	38.00	1.35	34.09	11.01	0.32
中易发区	2 156.38	60.00	2.78	26.07	17.39	0.67
较高易发区	1 148.44	74.00	6.44	13.88	21.45	1.54
高易发区	653.03	168.00	25.73	7.89	48.70	6.17

通过 GIS 区域统计分析工具, 获取各易发等级区域的灾害点数量, 统计不同易发等级的单元个数、各区域的面积占比、各区域的灾害点占总数量的比例、不同易发等级内的地质灾害比例。由表 2 可见, 随着易发性等级的提高, 单位面积内的灾害点数量由 0.33 增加到 25.73。高易发区和较高易发区占区域总面积的

21.77%,而灾害发生数量占总灾害的 70.15%,其中高易发区占 48.7%,灾积比为 6.17,明显高于其他易发等级。

5 结论

(1) 基于信息量模型,选取 8 个主要的致灾因子,借助 GIS 技术对安徽池州地质灾害的易发性进行评价。通过计算不同因子对地质灾害的信息量,叠加计算获得该区地质灾害易发性分布图,依据灾害发生密度将易发性分为低易发区、较低易发区、中易发区、较高易发区和高易发区 5 类。

(2) 矿山开采区、道路附近 100 m 内、河流附近 200 m 内、块裂状花岗岩为主岩浆岩岩组、断裂带附近 500 m 以内、降雨量大于 2 000 mm 的山区、坡度大于 20°、山体的东南坡面是研究区地质灾害发生的集中区域。

(3) 从高易发区的分布来看,坡度较大的山区道路和河流附近易发生地质灾害,表明在地形坡度较大的区域人类工程活动和流水作用对地质灾害的发生影响明显。

(4) 随着易发性等级的提高,地质灾害发生的比例快速上升,易发性等级与实际灾害发生的相符,高和较高易发区的地质灾害占总灾害数量的 70.15%,高易发区灾积比为 6.17,评价结果可靠,可为该区的地质灾害防治和经济建设提供科学依据。

参考文献:

- [1] 安徽省国土资源厅. 安徽省地质灾害防治“十三五”规划(2016—2020 年)[EB/OL]. http://www.ahgtt.gov.cn/zwgk/gkml_show.jsp?row_id=102018070000019152, 2018-07-26. [Department of Land and Resources of Anhui Province. “13th Five-Year plan” for prevention and control of geological disasters in Anhui province (2016—2020 years) [EB/OL]. http://www.ahgtt.gov.cn/zwgk/gkml_show.jsp?row_id=102018070000019152, 2018-07-26. (in Chinese)]
- [2] VAN WESTEN C J, VAN ASCH T W J, SOETERS R. Landslide hazard and risk zonation: why is it still so difficult? [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2006, 65(2): 167–184.
- [3] 张春山, 吴满路, 张业成. 地质灾害风险评价方法及展望[J]. *自然灾害学报*, 2003, 12(1): 96–102. [ZHANG C S, WU M L, ZHANG Y C. Method and prospect of geological disaster risk assessment [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2003, 12(1): 96–102. (in Chinese)]
- [4] 吴树仁, 石菊松, 张春山, 等. 地质灾害风险评估技术指南初论[J]. *地质通报*, 2009, 28(8): 995–1005. [WU S R, SHI J S, ZHANG C S, et al. Preliminary discussion on technical guideline for geohazard risk assessment [J]. *Geological Bulletin of China*, 2009, 28(8): 995–1005. (in Chinese)]
- [5] 成玉祥, 任春林, 张骏. 基于 BP 神经网络的地质灾害风险评估方法探讨——以天水地区为例[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2008, 19(2): 100–104. [CHENG Y X, REN C L, ZHANG J. Geologic hazard risk assessment based on BP-neural network: A case study of Tianshui area [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2008, 19(2): 100–104. (in Chinese)]
- [6] CONFORTI M, PASCALE S, ROBUSTELLI G, et al. Evaluation of prediction capability of the artificial neural networks for mapping landslide susceptibility in the Turbolo River catchment (northern Calabria, Italy) [J]. *Catena*, 2014, 113: 236–250.
- [7] 张以晨, 秦胜伍, 翟健健, 等. 基于信息量的长白山地区泥石流易发性评价[J]. *水文地质工程地质*, 2018, 45(2): 150–158. [ZHANG Y C, QIN S W, ZHAI J J, et al. Susceptibility assessment of debris flow based on GIS and weight information for the Changbai mountain area [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2018, 45(2): 150–158. (in Chinese)]
- [8] 王佳佳, 殷坤龙, 肖莉丽. 基于 GIS 和信息量的滑坡灾害易发性评价——以三峡库区万州区为例[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(4): 797–808. [WANG J J, YIN K L, XIAO L L. Landslide susceptibility assessment based on GIS and weighted information value: a case study of Wanzhou district, Three Gorges reservoir [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(4): 797–808. (in Chinese)]
- [9] 张向营, 张春山, 孟华君, 等. 基于 GIS 和信息量模型的京张高铁滑坡易发性评价[J]. *地质力学学报*, 2018, 24(1): 96–105. [ZHANG X Y, ZHANG C S, MENG H J, et al. Landslide susceptibility assessment of new Jing-Zhang high-speed railway based on GIS and information value model [J]. *Journal of Geomechanics*, 2018, 24(1): 96–105. (in Chinese)]

- [10] 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 Y M, GUO D, BAI B X, 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)]
- [11] 施成艳, 鹿献章, 刘中刚. 基于 GIS 的安徽黄山市徽州地区地质灾害易发性区划[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2016, 27(1): 136 – 140. [SHI C Y, LU X Z, LIU Z G. GIS-based zoning of geological hazard's susceptibility in Huizhou district of Huangshan City of Anhui Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2016, 27(1): 136 – 140. (in Chinese)]
- [12] 谢婉丽, 滕宏泉, 杜蕾, 等. 基于 GIS 结合模糊信息方法在灾害危险性区划中的应用——以大西安地区崩滑地质灾害为例[J]. 灾害学, 2018, 33(3): 111 – 116. [XIE W L, TENG H Q, DU L, et al. The application of GIS-based fuzzy information method in disaster risk Division—taking the landslide geological hazard in the great Xi'an region as an example[J]. Journal of Catastrophology, 2018, 33(3): 111 – 116. (in Chinese)]
- [13] 杜国梁, 张永双, 高金川, 等. 基于 GIS 的白龙江流域甘肃段滑坡易发性评价[J]. 地质力学学报, 2016, 22(1): 1 – 11. [DU G L, ZHANG Y S, GAO J C, et al. Landslide susceptibility assessment based on gis in Bailongjiang watershed, Gansu Province[J]. Journal of Geomechanics, 2016, 22(1): 1 – 11. (in Chinese)]
- [14] 杨德宏, 范文. 基于 ArcGIS 的地质灾害易发性分区评价——以旬阳县为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2015, 26(4): 82 – 86. [YANG D H, FAN W. Zoning of probable occurrence level of geological disasters based on Arc GIS—a case of Xunyang[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2015, 26(4): 82 – 86. (in Chinese)]
- [15] CAN T, NEFESLIOGLU H A, GOKCEOGLU C, et al. Susceptibility assessments of shallow earthflows triggered by heavy rainfall at three catchments by logistic regression analyses [J]. Geomorphology, 2005, 72(1/2/3/4): 250 – 271.
- [16] 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 J M, ZHAO G H, LIAO Y J, 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)]
- [17] 范强, 巨能攀, 向喜琼, 等. 证据权法在区域滑坡危险性评价中的应用——以贵州省为例[J]. 工程地质学报, 2014, 22(3): 474 – 481. [FAN Q, JU N P, XIANG X Q, et al. Landslides hazards assessment with weights of evidence: a case study in Guizhou, China[J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 22(3): 474 – 481. (in Chinese)]
- [18] 王宁涛, 彭轲, 黎清华, 等. 基于 RS 和 GIS 的地质灾害易发性定量评价: 以湖北省五峰县为例[J]. 地学前缘, 2012, 19(6): 221 – 229. [WANG N T, PENG K, LI Q H, et al. Quantitative evaluation of geological disaster liability based on RS & GIS analysis: a case study of Wufeng County, Hubei Province[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(6): 221 – 229. (in Chinese)]
- [19] 张波, 石长柏, 肖志勇, 等. 基于 GIS 和加权信息量的湖北鄂州地质灾害易发性区划[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, 29(3): 101 – 107. [ZHANG B, SHI C B, XIAO Z Y, et al. Geologic hazards susceptibility assessment in E'zhou City of Hubei Province based on GIS and weighted information value[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2018, 29(3): 101 – 107. (in Chinese)]
- [20] SHANNON C E. A mathematical theory of communication[J]. Bell System Technical Journal, 1948, 27(4): 623 – 656.
- [21] 杨根云, 周伟, 方教勇. 基于信息量模型和数据标准化的滑坡易发性评价[J]. 地球信息科学学报, 2018, 20(5): 674 – 683. [YANG G Y, ZHOU W, FANG J Y. Assessment of landslide susceptibility based on information quantity model and data normalization [J]. Journal of Geo-Information Science, 2018, 20(5): 674 – 683. (in Chinese)]
- [22] 池州市自然资源和规划局. 池州市地质概况 [EB/OL]. <http://zrzyghj.chizhou.gov.cn/content/detail/5832b715ad9430a40d000003.html>. [Chizhou Bureau of Natural Resources and Planning. Geological Survey of Chizhou City [EB/OL]. <http://zrzyghj.chizhou.gov.cn/content/detail/5832b715ad9430a40d000003.html>. (in Chinese)]