

陈绪钰, 倪化勇, 李明辉, 等. 基于加权信息量和迭代自组织聚类的地质灾害易发性评价[J]. 灾害学, 2021, 36(2): 71–78. [ CHEN Xuyu, NI Huayong, LI Minghui, et al. Geo-hazard Susceptibility Evaluation Based on Weighted Information Value Model and ISODATA Cluster [ J ]. Journal of Catastrophology, 2021, 36 ( 2 ): 71 – 78. doi: 10.3969/j.issn.1000 – 811X.2021.02.013. ]

## 基于加权信息量和迭代自组织聚类的 地质灾害易发性评价<sup>\*</sup>

陈绪钰<sup>1</sup>, 倪化勇<sup>2</sup>, 李明辉<sup>1</sup>, 田 凯<sup>1</sup>, 宋 志<sup>1</sup>, 高延超<sup>1</sup>

(1. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610081; 2. 中国地质调查局南京地质调查中心, 江苏 南京 210016)

**摘要:** 以三峡库区忠县-方斗山地区为研究对象, 首先选取坡度、坡向、坡高、岩土体类型、坡体结构、构造、水的作用、人类工程活动等8个评价因子建立地质灾害易发性评价指标体系, 并对因子状态进行分级; 然后, 采用层次分析法计算各指标因子的权重, 应用加权信息量模型进行地质灾害易发性评价; 再者, 利用迭代自组织聚类模型对地质灾害易发性评价结果进行分级区划; 最后, 对地质灾害易发性评价的精度进行定量评价。结果表明: 地质灾害易发性评价结果与实际地质灾害发生的吻合度高、评价结果可靠、评价方法精度高、适用性强; 岩土体类型、坡体结构、水的作用及人类工程活动是地质灾害发育的主要控制因素; 地质灾害易发性划分为极高易发、高易发、中易发、低易发、极低易发五个等级。建立的评价方法从权重确定和等级划分方面完善了地质灾害易发性评价理论体系, 可为区域地质灾害易发性评价提供理论指导和技术参考。

**关键词:** 地质灾害; 易发性; 层次分析法; 加权信息量模型; 迭代自组织聚类算法; 三峡库区

**中图分类号:** P642.4; P642.5; X43; X915.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000–811X(2021)02–0071–08

doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2021.02.013

我国地质环境条件复杂, 构造活动频繁, 地质灾害点多面广<sup>[1]</sup>, 威胁人口众多, 防范难度大<sup>[2]</sup>。对地质灾害进行调查、易发性评价, 并编制地质灾害易发性区划图, 可为地质灾害防治、城市建设、国土空间规划等提供科学依据, 是地质灾害防治工作重要内容。

近年来区域地质灾害预测评价等相关研究较多, 评价模型方法种类多, 不同学者对逻辑回归法、加权组合法、确定性系数法、证据权法以及信息量法等模型在地质灾害易发性评价中的应用进行了大量的探索和研究<sup>[3]</sup>。张俊<sup>[4]</sup>、王佳佳<sup>[5]</sup>等运用信息量模型和逻辑回归模型对三峡库区万州区滑坡灾害易发性进行了评价, 并对比了信息量模型和逻辑回归模型的精度; 刘宇恒等<sup>[6]</sup>运用基于层次分析法的加权组合方法对茂县的斜坡地质灾害易发性进行了评价; 刘艳芳等<sup>[7]</sup>运用确定系数法对的秭归县滑坡易发性进行了评价; 王珂等<sup>[8]</sup>基于证据权模型对川西鲜水河断裂带滑坡易发性进行了评价; 张超等<sup>[9]</sup>基于多元线性回归模型对云南昭通地质灾害易发性进行了评价; 李秀明等<sup>[10]</sup>基于多因素模糊综合评判法对湖南省桑植

县的地质灾害易发性进行了评价。

这些研究为地质灾害易发性评价提供了丰富的参考。但已有研究除层次分析法外, 很多研究仍然将各影响因子重要性视为相同, 尚未考虑不同因素对地质灾害影响的差异<sup>[4]</sup>。而在评价因子状态分级或打分时, 仍依靠主观经验划分或等距划分, 缺少客观依据。且在最终的易发性等级划分过程中, 主要依据人为设定阈值、GIS软件自带的自然断点、等距等分类方法, 存在主观因素影响过大、未体现分级间差异的问题。

本文以三峡库区忠县-方斗山地区为研究对象, 综合选取了控制地质灾害发育的8个评价因子; 综合各因子条件下地质灾害面积比、分级面积和地质灾害累计发生频率曲线分析对因子状态进行分级; 采用层次分析法计算各指标因子的权重, 应用加权信息量模型进行地质灾害易发性评价, 并利用迭代自组织聚类模型对地质灾害易发性评价结果进行分级区划; 最后, 将评价结果与实际地质灾害进行了对比分析, 并对地质灾害易发性评价的精度进行定量评价。

\* 收稿日期: 2020–08–12 修回日期: 2020–10–12

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC1505406); 中国地质调查局项目(DD20160249、DD20190524); 国家自然科学基金(41572294)

第一作者简介: 陈绪钰(1985–), 男, 汉族, 江西瑞昌人, 硕士, 高级工程师, 主要从事环境地质与城市地质调查评价研究工作。

E-mail: cxuyu@cgs.cn

## 1 评价模型基本原理

### 1.1 加权信息量模型

信息量模型可以较好的融合工程地质专家的主观经验及成灾因子与地质灾害相关性的客观特征，模型算法稳定性较好且内涵明确，操作简单，应用广泛。但传统的信息量模型未充分考虑各因子对地质灾害发生“贡献”的差异，均视为同等的贡献率，进行单因子叠加运算，影响评价结果的准确性。因此，本文采用层次分析法对信息量模型加以改进，对每个指标因子赋予不同的权重，以体现其不同的贡献率，使得评价结果更加准确合理。

信息量模型通过对历史灾害数据信息进行统计分析，利用概率形式进行定量描述，反映了不同成灾要素区间对地质灾害形成的贡献大小，地质灾害信息量  $I_{A_j \rightarrow B}$  表达式为：

$$I_{A_j \rightarrow B} = \ln \frac{P(B/A_j)}{P(B)}, (j = 1, 2, 3, \dots, n). \quad (1)$$

式中： $P(B/A_j)$  为指标因子  $A$  在  $j$  状态下发生地质灾害  $B$  的概率； $P(B)$  为地质灾害  $B$  发生的概率， $I_{A_j \rightarrow B}$  为对应指标因子  $A$  中第  $j$  状态下地质灾害  $B$  发生的信息量， $n$  为指标因子  $A$  被划分为的状态分级数。在具体计算过程中，为了计算方便通常将总体概率改用样本频率进行估算，于是上式可转化为：

$$I_{A_j \rightarrow B} = \ln \frac{N_j/N}{S_j/S}, (j = 1, 2, 3, \dots, n). \quad (2)$$

式中： $N_j$  为对应指标因子  $A$  第  $j$  状态的地质灾害面积之； $N$  为研究区内已知地质灾害的总分布面积； $S_j$  为指标因子  $A$  第  $j$  状态的总面积； $S$  为研究区总面积。

层次分析法（AHP）是一种定性和定量相结合的，系统性、层次化的多目标决策分析方法，广泛应用于各个领域。利用层次分析法对信息量模型加以改进，根据各指标因子的贡献率大小，运用层次分析法计算各指标因子的权重，将指标因子的权重与信息量相乘，得到加权信息量。设第  $n$  个指标因子的权重为  $\omega_i (i = 1, 2, \dots, n)$ ，则加权信息量为：

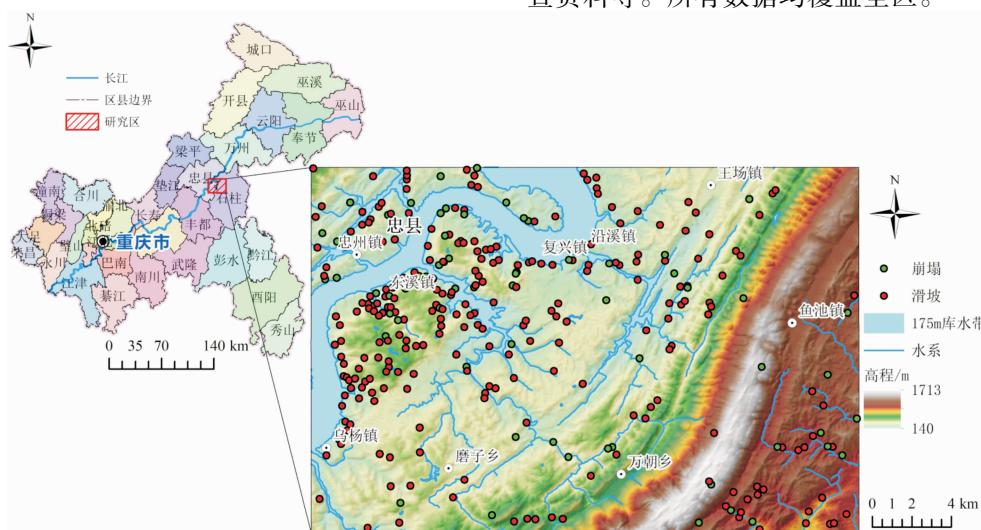


图 1 研究区位置示意图及地理概况

### 1.2 迭代自组织聚类模型

迭代自组织聚类（ISODATA）是一种常用的动态聚类分析方法<sup>[11]</sup>，应用范围广、容易实施、简单高效，尤其是在图像分割、空间数据分类方面应用最多，并可在常用的地理信息软件和数据分析软件中实现，分类结果体现了同类对象的相似性、不同类对象的相异性。因此运用迭代自组织聚类对信息量模型的计算结果进行分类，可科学地对地质灾害易发性等级进行划分，避免了人为设定信息量阈值进行分类的主观性。

迭代自组织聚类算法的聚类中心由样本均值的迭代决定，并加入了试探性的步骤，即能吸取中间结果所得到的经验，在迭代过程中可以将类一分为二，也可以将两类合并，即“自组织”，根据初始类聚中心和设定的类别数目等参数迭代，最终得到一个比较理想的聚类结果<sup>[12]</sup>。对信息量模型计算结果按照迭代自组织聚类算法进行分析，最终得到的聚类结果即地质灾害易发性划分的结果。

## 2 研究区概况与评价单元的划分

### 2.1 研究区概况

研究区为忠县 - 方斗山地区，位于重庆市东北部、四川盆地与长江中下游的过渡段，三峡库区腹心地带，行政区划隶属于重庆忠县和石柱县（图 1）。研究区地理坐标为  $108^{\circ}00'00'' \sim 108^{\circ}15'00''E$ ,  $30^{\circ}10'00'' \sim 30^{\circ}20'00''N$ ，面积约  $445 \text{ km}^2$ 。该区属亚热带季风湿润带，具有四季分明、天气温和、日照充足、雨量充沛的特显。

### 2.2 数据源

本文的主要数据源有：1:50 000 地质灾害分布图；1:50 000 地形数据，用于提取坡度、坡向、坡高、水系等信息；1:50 000 工程地质图，用于提取工程地质岩组、坡体结构、构造等信息；1:50 000 土地利用现状分布图；地质灾害数据库；野外调查资料等。所有数据均覆盖全区。

### 2.3 评价单元划分

研究区属于中低山丘陵地区, 根据国家1:50 000空间数据标准, 选取 $25\text{ m} \times 25\text{ m}$ 分辨率的栅格单元作为基本评价单元, 研究区栅格划分981行, 764列, 共计749 484个栅格单元。由于175 m库水区均为水面覆盖, 可不参与评价, 除去该区域共646 255个栅格单元。在此基础上进行地质灾害指标因子的状态分级及易发性评价。

## 3 评价指标体系建立与权重确定

### 3.1 评价因子选取

野外调查是确定地质灾害评价因子最直接的方法, 本文在对研究区所有地质灾害进行了野外详细调查的基础上, 通过对地质灾害的发育特征与影响因素进行分析, 综合前人的研究成果与研究区的地质环境条件, 选取地形地貌因子: 坡度、坡向、坡高; 工程地质条件因子: 岩土体类型、坡体结构、构造; 外界环境因子: 水的作用、人类工程活动, 共8项评价因子。

### 3.2 评价因子状态分级

应用ArcGIS的空间分析工具, 统计各个因子不同区间内栅格总数分布情况和发生地质灾害栅格的频率, 同时对地质灾害面积比、分级面积和地质灾害累计发生频率进行统计。其中, 地质灾害面积比=评价因子各区间内发生的地质灾害面积/全区地质灾害总面积; 分级面积比=评价因子各区间面积/评价因子总面积; 地质灾害累计发生频率=滑坡面积比的累加。根据地质灾害面积比、分级面积和地质灾害累计发生频率曲线的分布状态, 分析各因子不同区间的地质灾害的数量、密度、易发性, 从而对因子的不同状态进行分级。

(1) 坡度: 分为 $[0^\circ, 10^\circ]$ ,  $[10^\circ, 25^\circ]$ ,  $[25^\circ, 40^\circ]$ ,  $[40^\circ, 64^\circ]$ 四级。

(2) 坡向: 分为float、N-NE、E-S、SW-W、NW五个状态分级。

(3) 坡高: 分为 $[0\text{ m}, 50\text{ m}]$ ,  $[50\text{ m}, 100\text{ m}]$ ,  $[100\text{ m}, 150\text{ m}]$ ,  $[150\text{ m}, 320\text{ m}]$ 四级。

(4) 岩土体类型: 区内岩土体有11个类型, 较硬-软弱中-厚层状砂岩夹泥岩岩性综合体(A1)、较硬-软弱相间薄-厚层状砂岩与泥岩不等厚互层岩性综合体(A2)、软弱-较硬薄层状泥页岩夹灰岩岩性综合体(A3)、软弱-较硬薄层泥岩、页岩夹中厚层状砂岩岩性综合体(A4)、软弱厚层-块状泥岩、粉砂质泥岩岩性综合体(A5)、坚硬中厚层-块状砂岩岩性综合体(B1)、软弱-较硬中-薄层泥岩、粉砂质泥岩夹砂岩岩性综合体(B2)、较坚硬薄-厚层状中强岩溶化灰岩及白云岩岩性综合体、较坚硬薄-厚层状中强岩溶化灰岩及白云岩岩性综合体(C1)、较坚硬中-薄层状弱岩溶化灰岩及白云岩岩性综合体(C2)、较坚硬-软弱薄-厚层状弱岩溶化白云岩、灰岩夹薄层泥岩岩性综合体(C3)、软弱-较坚硬中-薄层泥

岩、页岩夹中-薄层中-弱岩溶化灰岩岩性综合体(C4)。进一步将岩土体类型因子等级分为4级, 不稳定岩土体(A1)、较不稳定岩土体(A2、A3、A4、A5)、较稳定岩土体(B1、B2)、稳定岩土体(C1、C2、C3、C4)。

(5) 坡体结构: 根据岩层倾向与坡向间的夹角( $\theta$ )、岩层倾角( $\alpha$ )和坡度( $\beta$ )来划分, 可先将坡体结构划分为6类, 顺向飘倾坡( $0^\circ \leq \theta \leq 30^\circ$ ,  $\alpha < \beta$ )、顺向伏倾坡( $0^\circ \leq \theta \leq 30^\circ$ ,  $\alpha > \beta$ )、顺斜向坡( $30^\circ < \theta \leq 60^\circ$ )、横向坡( $60^\circ < \theta \leq 120^\circ$ )、逆向坡( $120^\circ < \theta \leq 180^\circ$ )、水平坡(坡度 $\beta \leq 5^\circ$ )。坡体结构因子分级与坡体结构类型划分一致。

(6) 构造: 研究区为典型的隔挡式褶皱, 西北靠大池干井背斜, 东南临石柱向斜, 忠州向斜、方斗山背斜平行状穿越研究区, 背斜紧闭、向斜宽阔, 方斗山背斜核部发育楠木垭-大垭口逆断层。根据构造形迹的发育特征和影响范围, 将研究区构造划分为3个级别, 并将不同级别的构造带的影响范围划分为5个影响级别, 如表1所示。地质灾害面积比随构造影响距离的增大而减少, 说明构造因子对地质灾害发育的控制作用明显。

表1 研究区构造影响分级

构造级别	影响距离/m				
	1级带	2级带	3级带	4级带	5级带
1	2 000	4 000	6 000	8 000	>8 000
2	1 000	2 000	3 000	4 000	>4 000
3	500	1 000	1 500	2 000	>2 000

(7) 水的作用: 研究区位于三峡库区, 库水位变化对两岸斜坡的稳定性影响大。对库区各影响距离范围的地质灾害进行统计, 水的作用因子划分为5个级别,  $[0\text{ m}, 300\text{ m}]$ 、 $[300\text{ m}, 600\text{ m}]$ 、 $[600\text{ m}, 1 000\text{ m}]$ 、 $[1 000\text{ m}, 1 600\text{ m}]$ 、 $\geq 1 600\text{ m}$ 。

(8) 人类工程活动: 根据区内土地利用类型, 将土地利用划分为5大类, 林地、耕地、建设用地、灌木林、草地及其他。灌木林、草地及其他内地质灾害不发育, 合并为一个等级。

### 3.3 评价因子权重的确定

权重是表征各评价因子对地质灾害发生的贡献的大小的量化值, 本次运用层次分析法计算各指标因子的权重。计算方法如下:

(1) 对选取的8项评价因子, 根据其对于地质灾害发生的重要性, 进行两两比较, 采用1~9标度法, 将相对重要性的值转化为矩阵<sup>[13]</sup>。

(2) 根据构建的判断矩阵, 利用方根法计算矩阵的最大特征根 $\lambda_{\max} = 8.1975$ , 对应的特征向量 $\omega = (0.1177, 0.0653, 0.0841, 0.1987, 0.1654, 0.0910, 0.1390, 0.1390)$ 。一致性比例 $CR = 0.0200$ , 满足一致性检验要求。而特征向量就是各评价因子权重组的向量(表3)。从权重的大小可以看出, 岩土体类型、坡体结构权重最大, 对于地质灾害发生的影响程度最大。

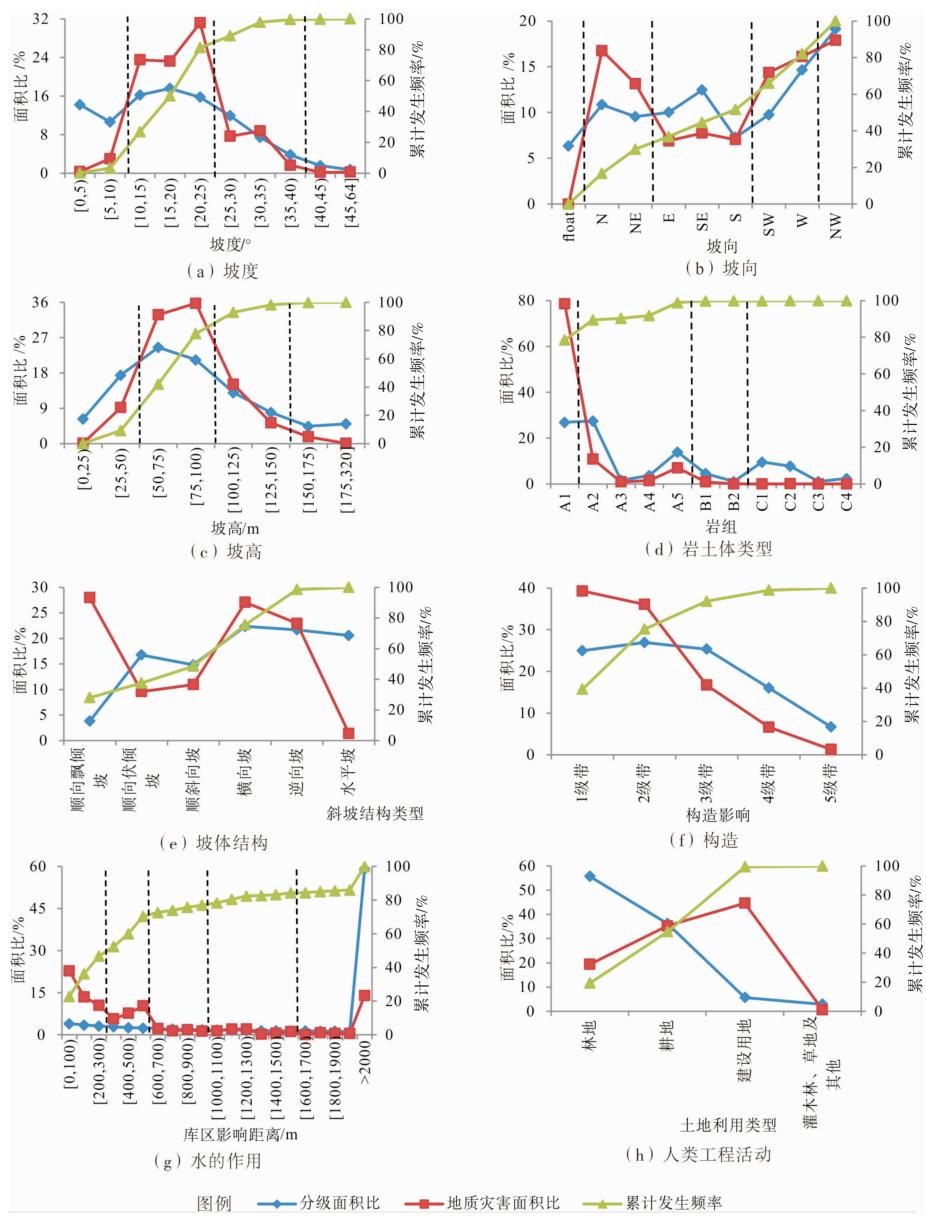


图2 因子状态分级统计图

表2 评价因子重要性判断矩阵

评价因子	坡度	坡向	坡高	岩土体类型	坡体结构	构造	水的作用	人类工程活动
坡度	1	2	2	1/2	1/2	1	1	1
坡向	1/2	1	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2
坡高	1/2	2	1	1/2	1/2	1	1/2	1/2
岩土体类型	2	2	2	1	1	2	2	2
坡体结构	2	2	2	1	1	2	1	1
构造	1	2	1	1/2	1/2	1	1/2	1/2
水的作用	1	2	2	1/2	1	2	1	1
人类工程活动	1	2	2	1/2	1	2	1	1

表3 评价因子权重

评价因子	坡度	坡向	坡高	岩土体类型	坡体结构	构造	水的作用	人类工程活动
权重	0.1177	0.0653	0.0841	0.1987	0.1654	0.0910	0.1390	0.1390

表4 评价因子加权信息量计算

评价因子	等级	信息量	权重	加权信息量	排序
地形地貌因子	[0, 10)	-2.867 5	0.117 7	-0.337 5	33
	[10, 25)	0.652 1		0.076 8	6
	[25, 40)	-0.352 7		-0.041 5	19
	≥40	-2.230 2		-0.262 5	30
坡度/°	float	-7.052 8		-0.460 5	34
	N-NE	0.553 3		0.036 1	11
	E-S	-0.455 8	0.065 3	-0.029 8	17
	SW-W	0.321 7		0.021 0	12
	NW	-0.095 0		-0.006 2	16
	[0, 50)	-1.358 3		-0.114 2	23
坡高/m	[50, 100)	0.579 8	0.084 1	0.048 8	8
	[100, 150)	-0.036 9		-0.003 1	15
	≥150	-2.398 7		-0.201 7	27
	不稳定	1.546 8		0.307 4	3
岩土体类型	较不稳定	-1.198 9	0.198 7	-0.238 2	29
	较稳定	-2.591 0		-0.514 8	35
	稳定	-7.052 8		-1.401 4	37
	顺向飘倾坡	2.884 5		0.477 1	1
工程地质条件因子	顺向伏倾坡	-0.804 0		-0.133 0	25
	顺斜向坡	-0.433 7	0.165 4	-0.071 7	22
	横向坡	0.277 0		0.045 8	9
	逆向坡	0.080 7		0.013 4	13
	水平坡	-3.873 7		-0.640 7	36
	1级带	0.653 0		0.059 4	7
构造	2级带	0.421 2		0.038 3	10
	3级带	-0.600 0	0.091 0	-0.054 6	21
	4级带	-1.275 3		-0.116 0	24
	5级带	-2.378 3		-0.216 4	28
	[0, 300)	2.144 5		0.298 1	4
水的作用/m	[300, 600)	1.597 6		0.222 1	5
	[600, 1 000)	-0.279 5	0.139 0	-0.038 8	18
	[1 000, 1 600)	-0.334 0		-0.046 4	20
	≥1 600	-2.038 8		-0.283 4	31
外界环境因子	林地	-1.450 0		-0.201 5	26
	耕地	0.034 5	0.139 0	0.004 8	14
	建设用地	3.047 7		0.423 6	2
	灌木林、草地及其他	-2.174 1		-0.302 2	32

量图。

对各分级因子状态的加权信息量按从高到低进行排序, 前六种状态依次为: 坡体结构为顺向飘倾坡; 土地利用为建设用地; 岩土体类型为不稳定的A1岩性综合体; 距三峡库区距离为[0 m, 300 m]; 距三峡库区距离为[300 m, 600 m]; 坡度为[10°, 25°]。在这些区域, 地质灾害易发程度最高, 而这些因子对区内地质灾害影响最为明显, 是地质灾害发育的主要控制因素。

根据地质灾害易发性加权信息量计算结果, 区内总信息量范围为-4.178~1.727。信息量值越

## 4 地质灾害易发性评价

### 4.1 加权信息量的计算

首先, 利用式(2)信息量算公式, 根据上述各评价因子的分级状态, 通过ArcCIS的空间分析模块进行统计分析, 并计算得到评价因子各分级状态的信息量, 同时得到各评价因子的信息量图。再利用式(3)将得到的信息量与因子权重相乘后再相加, 最终得到各评价单元的加权信息量(表4), 同时得到地质灾害易发性总加权信息

高, 地质灾害易发性越高。

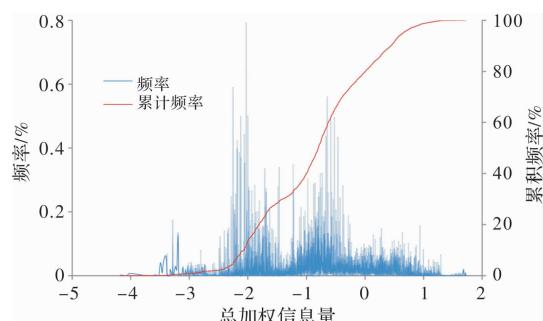


图3 总加权信息量频率统计图

#### 4.2 基于迭代自组织聚类算法的易发性区划

研究区易发性等级划分为5个级别: 极高易发、高易发、中等易发、低易发、极低易发。根据1.2中迭代自组织聚类算法, 通过ArcGIS的空间分析模块对地质灾害易发性总加权信息量图进行聚类分析, 划分为5类, 得到地质灾害易发性区划图(图4)。聚类分析的参数如表5。

表5 迭代自组织聚类分析结果

类别	易发性	聚类信息量的平均值	协方差
1	极低易发	-2.215 41	0.155 86
2	低易发	-1.329 23	0.050 43
3	中等易发	-0.737 25	0.029 59
4	高易发	-0.124 49	0.037 16
5	极高易发	0.580 88	0.083 52

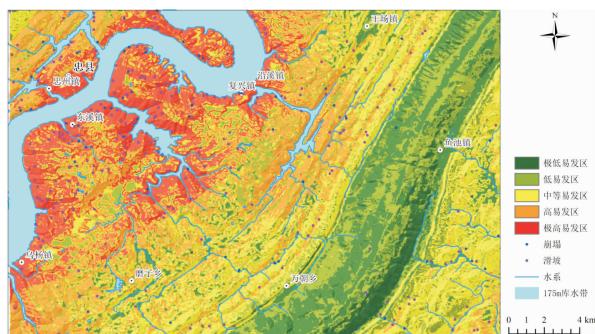


图4 研究区地质灾害易发性区划图

## 5 结果分析与精度评价

### 5.1 易发性评价结果分析

根据研究区地质灾害易发性评价结果(图4、表6), 研究区地质灾害易发性分布主要有以下几个特点:

(1) 地质灾害极高易发区分布面积  $65.85 \text{ km}^2$ , 占全区面积的 16.05%, 集中分布于三峡库区两岸小于 1 000 m 的区域, 区内主要为不稳定岩土体(A1), 斜坡坡度以  $10^\circ \sim 40^\circ$ , 土地利用类型主要为建设用地、耕地及林地。岩土体类型、水的作用对该区域的控制作用明显。

(2) 地质灾害高易发区分布面积  $92.34 \text{ km}^2$ , 占全区面积的 22.86%, 主要分布于极高易发区外围及较不稳定岩土体分布区域, 区内主要为较不稳定岩土体和较稳定岩土体, 斜坡结构类型以逆向坡为主, 斜坡坡度以  $10^\circ \sim 40^\circ$ , 土地利用类型以林地为主。

(3) 地质灾害中等易发区分布面积  $104.53 \text{ km}^2$ , 占全区面积的 25.87%, 主要分布于研究区东南角与磨子乡-万朝镇-王场镇一带, 主要分布为较不稳定岩土体, 斜坡结构类型以顺向伏倾坡和逆向坡为主, 土地利用类型以耕地和林地为主。

(4) 地质灾害低易发区、地质灾害极低易发区分布面积共  $142.28 \text{ km}^2$ , 占全区面积的 35.22%, 主要分布于方斗山和地形平坦区域, 主要分布为稳定岩土体, 斜坡结构类型以水平坡、顺向伏倾坡及逆向坡为主, 土地利用类型以林地为主。

(5) 岩土体类型、坡体结构、水的作用、人类工程活动是研究区内地质灾害易发性最主要的控制要素。

### 5.2 精度评价

运用ROC曲线(receiver operating characteristic curve)对研究区地质灾害易发性评价的精度进行定量评价<sup>[14]</sup>, 曲线下面积(AUC)越大, 说明易发性评价的精度越高、预测效果越好。本次利用加权信息量模型易发性评价结果获得的ROC曲线如图5所示, 曲线下面积 AUC = 0.877, 说明地质灾害易发性评价的结果与实际地质灾害发生的吻合度高、评价精度高、评价结果可靠, 表明本文地质灾害易发性评价方法在研究区适用性好。

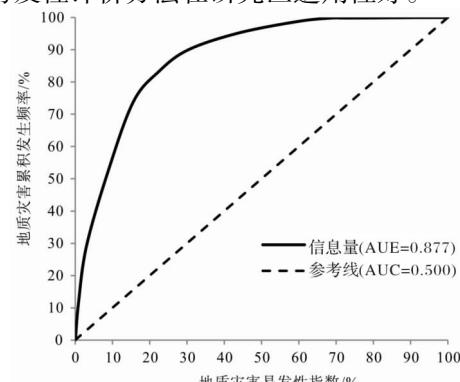


图5 易发性评价 ROC 曲线

表6 易发性分区与地质灾害分布对比表

易发性等级	面积 $a$ / $\text{km}^2$	占总面积比例 $b$ /%	灾害点面积 $c$ / $\text{km}^2$	占总灾害点面积比率 $d$ /%	地质灾害实际发生比率 $(d/b)$ /%
极高易发区	64.85	16.05	4.89	74.98	467.05
高易发区	92.34	22.86	1.19	18.29	80.05
中易发区	104.53	25.87	0.39	6.01	23.25
低易发区	80.63	19.96	0.040	0.61	3.06
极低易发区	61.65	15.26	0.006 9	0.10	0.69

根据地质灾害易发性评价结果(表6)可以看出, 地质灾害主要发育于极高易发区和高易发区, 区内地质灾害面积占总地质灾害面积的93.27%, 中易发区内地质灾害面积占总面积的6.01%, 低易发区和极低易发区内地质灾害面积仅占地质灾害总面积的0.71%。在各等级易发区面积相近的情况下, 地质灾害发生面积、占总灾害面积比率、地质灾害实际发生比率均随着易发性等级的降低而显著减少, 差距明显。地质灾害易发性分区等级与实际地质灾害发生的情况吻合, 划分结果合理, 基于加权信息量和迭代自组织聚类的地质灾害易发性评价方法适应性好。

## 6 结论

本文以三峡库区忠县-方斗山地区为例, 探索了基于加权信息量和迭代自组织聚类的地质灾害易发性评价方法, 利用该方法对三峡库区忠县-方斗山地区的地质灾害易发性进行了评价, 并验证了评价方法的精度和可靠性, 得出以下结论。

(1) 以三峡库区忠县-方斗山地区为研究对象, 选取坡度、坡向、坡高、岩土体类型、坡体结构、构造、水的作用、人类工程活动等8个评价因子建立地质灾害易发性评价指标体系, 并运用基于层次分析法的加权信息量模型开展区域地质灾害易发性评价, 结果表明评价结果与实际地质灾害发生的情况吻合度高、评价结果可靠、评价方法精度高、适用性强。

(2) 采用迭代自组织聚类模型的地质灾害易发性进行分区, 结果表明地质灾害易发性分区等级与实际地质灾害发生的情况吻合, 划分结果合理, 基于迭代自组织聚类的地质灾害易发性分区方法适应性好。

(3) 综合各因子条件下地质灾害面积比、分级面积和地质灾害累计发生频率曲线分析对因子状态进行分级, 体现了各因子状态对地质灾害的影响的差异, 避免了评价因子状态分级的主观性和机械化, 划分方法科学合理。

(4) 对各评价因子的加权信息量分析表明, 在坡体结构为顺向飘倾坡、土地利用为建设用地、岩土体类型为不稳定的A1岩性综合体、距三峡库区距离为0~600 m、坡度为10°~25°的区域内地质灾害易发程度最高, 岩土体类型、坡体结构、水的作用及人类工程活动是地质灾害发育的主要控制因素。

(5) 研究区内地质灾害划分为极高易发区、高易发区、中易发区、低易发区、极低易发区五个区域, 分布面积分别为64.85 km<sup>2</sup>、92.34 km<sup>2</sup>、104.53 km<sup>2</sup>、80.63 km<sup>2</sup>和61.65 km<sup>2</sup>。极高、高易发区主要分布于不稳定岩土体和较不稳定岩土体分布区、斜坡坡度以10°~40°。低、极低易发区主要分布于方斗山和地形平坦区域, 主要分布为稳定岩土体, 斜坡结构类型以水平坡、顺向伏倾坡及逆向坡为主, 土地利用类型以林地为主。

## 参考文献:

- [1] 许强, 董秀军, 李为乐. 基于天-空-地一体化的重大地质灾害隐患早期识别与监测预警[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(7): 957~966.
- [2] 李媛, 曲雪妍, 杨旭东, 等. 中国地质灾害时空分布规律及防范重点[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2013, 24(4): 71~78.
- [3] 王志旺, 李端有, 王湘桂. 区域滑坡空间预测方法研究综述[J]. 长江科学院院报, 2012, 29(5): 78~85.
- [4] 张俊, 殷坤龙, 王佳佳, 等. 三峡库区万州区滑坡灾害易发性评价研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(2): 284~295.
- [5] 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.
- [6] 刘宇恒, 邓辉, 熊倩莹. 基于层次分析法的茂县斜坡地质灾害易发性评价[J]. 长江科学院院报, 2017, 34(5): 31~35.
- [7] 刘艳芳, 方佳琳, 陈晓慧, 等. 基于确定性系数分析方法的秭归县滑坡易发性评价[J]. 自然灾害学报, 2014, 23(6): 209~217.
- [8] 王珂, 郭长宝, 马施民, 等. 基于证据权模型的川西鲜水河断裂带滑坡易发性评价[J]. 现代地质, 2016, 30(3): 705~715.
- [9] 张超, 陈艳, 张宇飞, 等. 基于多元线性回归模型的云南昭通地质灾害易发性评价[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(3): 159~163.
- [10] 李秀明, 杨桂芳, 万君, 等. 基于多因素模糊综合评判的地质灾害易发性评价—以湖南省桑植县为例[J]. 国土资源科技管理, 2015, 32(5): 102~108.
- [11] 王燕凤, 马宁. 基于ISODATA算法的图像分割[J]. 西北民族大学学报(自然科学版), 2014, 32(93): 38~40.
- [12] 李润青, 谢明鸿, 黄冰晶. 一种基于初始点密度最大的改进型ISODATA聚类算法[J]. 软件导刊, 2017, 16(12): 94~98.
- [13] 张炳江. 层次分析法及其应用案例[M]. 北京: 电子工业出版社, 2014: 10~83.
- [14] 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, 27(12): 1554~1562.
- [15] 魏伦武, 王德伟, 丁俊, 等. 四川康定城地质灾害危险性分区评价[J]. 沉积与特提斯地质, 2006, 26(2): 81~87.

## Geo-hazard Susceptibility Evaluation Based on Weighted Information Value Model and ISODATA Cluster

CHEN Xuyu<sup>1</sup>, NI Huayong<sup>2</sup>, LI Minghui<sup>1</sup>, TIAN Kai<sup>1</sup> and SONG Zhi<sup>1</sup>

(1. Chengdu Center of China Geological Survey, Chengdu 610081, China;

2. Nanjing Center of China Geological Survey, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** Taking the Zhongxian-Fangdoushan area in the Three Gorges Reservoir area as the research object, we firstly select 8 evaluation factors such as slope, slope direction, slope height, rock and soil type, slope structure, structure, water function and human engineering activities to establish evaluation index system for geo-hazard susceptibility. It classifies the factor state. Then, using AHP to calculate the weight of each index factor, weighted

information value model is used to evaluate geo-hazard susceptibility. Furthermore, the iterative self-organizing clustering model is used to classify the results of geo-hazard susceptibility evaluation. Finally, the evaluation results are compared with the actual geo-hazards, and the accuracy of geo-hazard susceptibility evaluation is quantitatively evaluated. The results show that the susceptibility evaluation results of geo-hazards coincide with the actual occurrence of geo-hazards, the evaluation results are reliable, the evaluation methods have high accuracy and applicability. Rock and soil type, slope structure, water action and human engineering activities are the most important controlling factors for the development of geo-hazards. The established evaluation method improves the theoretical system of geo-hazard susceptibility evaluation, which can provide theoretical guidance and technical reference for regional geo-hazard susceptibility evaluation. The evaluation results can provide scientific basis for the prevention and control of geo-hazards and territorial spatial planning in this region.

**Key words:** geo-hazard; susceptibility; AHP; Weighted Information Value Model; ISODATA Cluster Algorithm; Three Gorges Reservoir Area

(上接第 46 页)

## 参考文献：

- [1] 谢五三, 宋阿伟, 田红. 中小河流域暴雨洪涝灾害风险评估及效果检验[J]. 气象科学, 2018, 38(2): 264–270.
- [2] 鹿明, 廖小罕, 岳焕印, 等. 面向中国洪涝灾害应急监测的无人机空港布局[J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(6): 854–864.
- [3] 王晶, 薛联青, 张敏, 等. 不同降水频率下淮河流域洪涝灾害风险评估[J]. 水电能源科学, 2019, 37(9): 1–5.
- [4] 姬华生, 周志彬, 符必昌. 某长距离输水管道系统水力特性分析[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(51): 27–30.
- [5] 王彦祥, 颜炳魁, 田颖玲, 等. 长距离输水管线停泵水锤分析及防护[J]. 中国给水排水, 2019, 35(7): 57–61.
- [6] 王丹, 张强, 陶付领, 等. 大型输水工程网络三维场景建设

- [7] 宋松柏, 王小军. 基于 Copula 函数的水文随机变量和概率分布计算[J]. 水利学报, 2018, 49(6): 687–693.
- [8] 李智, 刘玉菲, 任星芮男, 等. 基于 SWMM 的城市洪涝风险管理研究[J]. 水利水电技术, 2019, 50(11): 35–42.
- [9] 方佳毅, 史培军. 全球气候变化背景下海岸洪水灾害风险评估研究进展与展望[J]. 地理科学进展, 2019, 38(5): 625–636.
- [10] 徐绪堪, 王京. 基于犹豫模糊集的城市型水灾害风险评估[J]. 统计与决策, 2019, 35(5): 51–55.
- [11] 温欣岚, 罗占业, 樊美娜, 等. 链式风险评估方法研究及工程应用[J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(3): 154–160.
- [12] 徐得潜, 张倩. 基于 AHP–GRA 的合流制污水管道风险评估[J]. 安全与环境学报, 2019, 19(4): 1149–1154.

## Hydrological Risk Assessment of Urban Landscape Long Distance Water Delivery System after Flood Disaster

WU Hanmei, DUAN Guofan and LI Chune

(City College of Science and Technology, Chongqing University, Chongqing 402167, China)

**Abstract:** It can effectively maintain the integrity of urban landscape facilities after flood disaster by accurately assessing the risk in the operation process of long-distance water delivery system. we present a hydrological risk assessment method based on ms-ar model. Firstly, the coupling relationship between the structural importance of water delivery nodes and the invulnerability of network structure is analyzed, the average structural importance of nodes is calculated, the contribution level of nodes to the system damage is determined, and the invulnerability of network structure of water delivery system is expressed by using the discrete property of node structural importance, and the structural reliability coefficient of long-distance water delivery system is obtained; secondly, the structure of long-distance water delivery system is constructed by using Ditlevsen boundary. Finally, ms-ar model is used to iterate the parameters to achieve the maximum likelihood estimation, and obtain the quality simulation sequence of long-distance water delivery system to complete the risk assessment process. The simulation results show that this method can get accurate hydrological risk assessment results of long-distance water delivery system, and provide effective help for urban landscape flood restoration.

**Key words:** flood disaster; long distance water conveyance system; risk assessment; damage resistance; MS-AR model