
应用
技术

FAHP-GIS 在 FAST 台址单体 滑坡危险性评价中的应用

潘网生¹, 李鑫², 张晓周², 傅良同¹, 姚兴¹

(1. 黔南民族师范学院 旅游与资源环境学院, 贵州 都匀 558000; 2. 长安大学 水利与环境学院, 陕西 西安 710054)

摘要: [目的] 研究贵州省平塘县 500 m 口径球面射电望远镜 (FAST) 工程台址光明顶滑坡的危险性及其区划, 为该区及相似地区的滑坡灾害监测与防治提供参考依据。[方法] 选取地形地貌、岩性岩组、地质构造、人类工程活动及灾害历史等作为一级评价指标, 在此基础上发展二级评价指标, 运用 GIS 技术构建基于模糊层次法 (FAHP) 的滑坡危险性评价指标体系, 并完全参与对指标隶属度矩阵的运算, 开展针对喀斯特单体滑坡危险性评价研究。[结果] 光明顶坡体总体居于中危险和低危险水平, 局部高危险, 高危险区域主要位于 1 H 馈源塔和断层破碎带区域的 3 个支撑柱附近, 高危险区约占研究区面积的 4%。[结论] 光明顶坡体存在安全隐患, 已经对精密的射电望远镜设施的安全运行构成威胁。本文评价结果与实际情况基本相符, 评价方法在单体滑坡危险性评价研究方面具有创新性, 且可操作。

关键词: FAST 台址; 模糊层次法; GIS; 单体滑坡; 危险性评价

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2020)04-0108-08

中图分类号: P694

文献参数: 潘网生, 李鑫, 张晓周, 等. FAHP-GIS 在 FAST 台址单体滑坡危险性评价中的应用[J]. 水土保持通报, 2020, 40(4): 108-115. DOI: 10. 13961/j. cnki. stbctb. 2020. 04. 015; Pan Wangsheng, Li Xin, Zhang Xiaozhou, et al. Application of FAHP-GIS for hazard assessment of single landslide at FAST site [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(4): 108-115.

Application of FAHP-GIS for Hazard Assessment of Single Landslide at FAST Site

Pan Wangsheng¹, Li Xin², Zhang Xiaozhou², Fu Liangtong¹, Yao Xing¹

(1. School of Tourism and Resources Environment, Qiannan Normal University for Nationalities, Duyun, Guizhou 558000, China; 2. School of Water and Environment, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: [Objective] Hazard and zoning of the Guangmingding landslide at the engineering site of the 500 m aperture spherical radio telescope (FAST) in Pingtang County, Guizhou Province were studied in order to provide a reference basis for the monitoring and prevention of landslide disaster at the FAST site and similar areas. [Methods] Topography & geomorphy, lithology & rock formation, geological structure, human engineering activities and disaster history were selected as the first-level assessment indexes, and based on this, the second-level assessment indexes were developed. Based on fuzzy analytic hierarchy process (FAHP), the research on hazard assessment of kast single landslide was carried out, assessment index system was built and the matrices of layers were completely operated by GIS technology. [Results] Most of Guangmingding slope was at generally medium and low hazard levels while some local area was at high hazard level. The high hazard areas were mainly located near the 1 H feed tower and three support columns in the fault fracture zone, and the high hazard areas accounted for about 4% of the study area. [Conclusion] The Guangmingding slope had potential safety problem, which is a threaten to operation of precision radio telescope facilities. The results are basically consistent with the actual situation, the method is innovative and operable in the hazard assessment of single landslide.

Keywords: FAST site; fuzzy analytic hierarchy process; GIS; single landslide; hazard assessment

收稿日期: 2020-04-24

修回日期: 2020-05-22

资助项目: 贵州省科学技术基金重点项目“平塘 FAST 天文旅游景区地质灾害风险评价及防治对策研究”(黔科合基础[2018]1416); 贵州省教育厅创新群体重大项目(黔教合 KY 字[2016]054); 贵州省教育厅工程研究中心项目(黔教合 KY 字[2017]025)

第一作者: 潘网生(1975—), 男(汉族), 江苏省镇江市人, 博士, 副教授, 主要从事地质灾害与地质环境方面的研究。E-mail: 450392404@qq.com。

地质灾害危险性评价是地质灾害易发性评价的深化与拓展,是地质灾害风险性评价的必要前提,也是地质灾害防治和监测的重要基础和依托,其理论与实践应用为国民经济的安全运行提供了有力保障^[1-2]。当前,地质灾害危险性评价模型众多,如证据权重模型^[3]、层次分析模型^[4-5]、模糊数学模型^[6]、信息量模型^[7]、趋势面模型^[8]、逻辑回归模型^[9]、概率模型^[10]等。其中,以模糊数学模型最为典型,其在地质灾害危险性、风险性和敏感性区划与评价方面发挥了重要作用^[11-13]。此外,模糊数学模型可以轻松实现与层次分析模型的嫁接与组合,发展为模糊层次模型(FAHP)^[14],可作为模糊理论的重要衍生和有益补充,对当前的防灾、减灾工作产生了积极影响。然而,基于模糊数学的各类模型主要运用于区域性地质灾害研究,很少涉及单体地质灾害的评价研究工作。尽管有学者尝试开展线性或带状区域的地质灾害危险性评价^[15-16],但其研究思路并没有脱离区域性地质灾害危险性评价模式,评价指标体系构建也与区域性地质灾害危险性评价无本质差异。部分学者基于模糊层次法开展单体滑坡危险性评价,给出单体滑坡的危险概率,但没有考虑评价指标等级的空间差异,忽略了评价结果的空间区划与表达^[17-18]。部分学者虽考虑了评价结果的空间表达,但空间分析技术仅被用来处理评价指标权重,并没有完全参与基于模糊层析法的指标隶属度运算^[19-20]。本文以贵州省平塘县 500 m 口径球面射电望远镜(FAST)台址内的光明顶单体

坡体作为研究对象,拟开展基于 GIS 与模糊层次法相结合的单体滑坡危险性评价研究,并充分运用 GIS 理论与方法构建有针对性的评价指标体系,旨在对为 FAST 工程的滑坡灾害防治与监测提供科学依据,并为边坡稳定性分析提供参考。

1 研究区概况

研究区域位于贵州省黔南州平塘县克度镇金科村大窝凼的 500 m 口径球面射电望远镜(FAST)台址光明顶(见图 1)。该台址处于云贵高原向江南丘陵过渡的斜坡地带,海拔 850~1 200 m,被基座相连的 7 座山峰环绕,为典型的喀斯特封闭峰丛洼地。台址周围山体陡峻,最大落差达 350 m,其出露地层属中三叠统垄头组(T_2 l),为中厚层灰岩、白云岩及夹泥质灰岩,中度风化,具有较强硬度,垂向节理和裂隙发育,危岩灾害隐患明显。洼地底部及其斜坡地带以堆积块石、砂砾及黏土等结合体为主,厚度不均,且变化大,强度差,风化严重。台址中心被一南北走向,产状 $270^\circ \angle 60^\circ$,宽度约 30 m 的断层破碎带分割。其东侧岩层产状较缓($13^\circ \sim 120^\circ \angle 5^\circ \sim 12^\circ$),西侧岩层产状较陡($270^\circ \sim 320^\circ \angle 18^\circ \sim 35^\circ$)^[21]。该封闭洼地的大气降水经由人工开挖隧道排至台址东侧的水淹凼,洼地底部的植被因射电望远镜反射面的安置被完全清除,洼地围峰内侧植被因危岩治理被部分清除。洼地内人类工程活动剧烈,整个区域需承受约 15 000 t 的设备荷载。

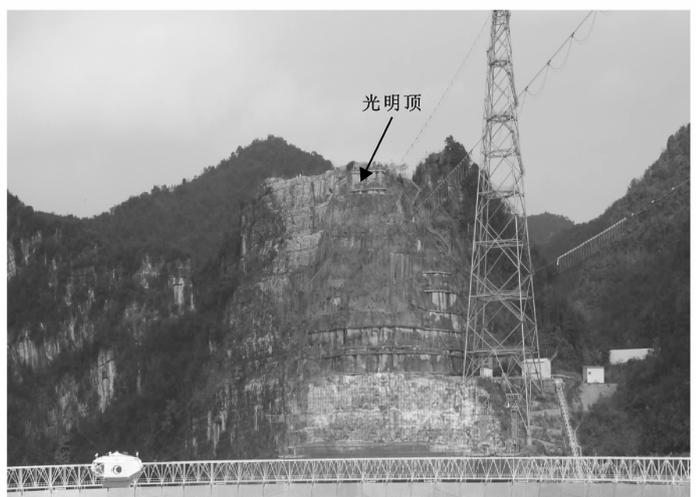


图 1 光明顶坡体位置与立面特征

本文选取位于 FAST 台址东北角的光明顶高陡边坡作为研究对象(见图 1)。该坡体紧靠断层破碎带东侧,岩层产状 $13^\circ \angle 8^\circ$,坡体岩块中等风化,强度较高,坡面节理和垂向裂隙发育,溶蚀沟槽明显,危岩隐患突出。坡脚处有一条宽 5 m 的内部检修道路经

过,坡脚上方建设有 1 H 馈源塔,坡脚下方有望远镜圈梁穿过,并分布有 7 根支撑柱。该坡体距离望远镜反射镜面最近距离仅 20 m 远,坡面一旦发生滑坡等地质灾害,将会对射电望远镜的安全运行带来极其严重的不良影响。

2 材料与方法

2.1 研究数据来源

自 FAST 投入试运行后,以项目选址区为中心的 5 km 半径范围均属无线电静默区,任何电子设备不得进入该区域开展任何作业工作。因此,本文研究数据主要来源于有关数据库、前人研究成果及作者现场勘察。其中,FAST 卫星影像图片和地形地貌纠正数据 (DEM、等高线) 来源于 Bigmap 地图下载器,经与文献^[21-22]及实地勘察结果做对比验证,证实该下载资料准确可靠。FAST 光明顶坡体立面影像照片、灾害现状等有关数据分别来源于作者 2018 年 11 月 30 日和 2019 年 1 月 10 日的两次现场勘察 (FAST 设备检修期)。岩性岩组和地质构造数据来源于中国区域地质志/贵州志 (2017 版)^[23],灾害历史、人类工程活动分布现状等数据主要来源于贵州省环境监测院陆治斌研究员所提供的相关资料。需要说明的是,本文 FAST 卫星影像图片和地形地貌之所以选择 2014 年 9 月份数据,是因为此时 FAST 项目尚未完工,有利于突出研究对象 (光明顶坡体) 的整体形态和早期地貌特征 (完工之后的光明顶坡体因生态恢复需要,对边坡做了植筋披绿处理)。

2.2 研究方法

模糊数学理论 (Fuzzy) 与层次分析法 (AHP) 可参考文献 [24—25]。本文采用的模糊层次法 (FAHP) 正是基于模糊理论和层次分析法所延伸出的一种综合评价方法。该方法求解步骤与一般层次分析法 (AHP) 基本一致,且模糊矩阵的一致性检验计算要相对简单,检验标准更具科学性^[14]。此外,由于 GIS 是一种在空间数据处理、空间分析及其表达方

面具有强大功能的空间信息系统^[26],其在地质灾害危险性评价方面具有独特优势,是地学信息模型构建及其分析的重要工具。地质灾害危险性评价所涉及的坡度、坡向、岩性、岩组、地质构造、水文、气象及人类工程活动等空间数据的提取、空间插值、数据格式转换及空间信息叠加等,GIS 均能够提供便捷的处理手段和完善的技术方案。因此,本文基于 ArcGIS 软件实现模糊层次模型的构建、模糊评判矩阵列向量的数据获取及其最大隶属度的计算、等级划分和结果的输出^[12,15]。

2.2.1 构建层次结构模型 首先,针对单体滑坡地质灾害危险性评价这一决策目标,结合滑坡体所在区域特点,系统梳理该单体滑坡的所有影响元素 (如灾变历史、坡度、坡向、岩性、岩组、地质构造、水文、气象及人类工程活动等);其次,根据评价对象的灾变演化历史、地质地理现状、可能的诱发元素等对上述元素进行类别划分,构建第二级指标层;最后,根据各元素对二级指标的归属关系,分别将其划分到各二级指标,从而构建第三级指标层^[27]。

2.2.2 构建模糊判断矩阵 模糊判断矩阵 $\mathbf{R} = (r_{ij})_{n \times n}$ 是论域 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ 上模糊关系的矩阵表示^[14],通常有互补型或互反型模糊矩阵两种形式,本文采用互补型模糊矩阵描述模糊关系。其中, u_i 为论域中的元素,即研究对象; r_{ij} 为模糊判断矩阵的元素, r_{ij} 数值大小是 u_i 和 u_j 相对于上一指标层某元素重要性程度的标度。当 $r_{ij} > 0.5$ 时,若 r_{ij} 越大,说明 u_i 相对于上一指标层的某元素比 u_j 更重要;反之当 $r_{ij} < 0.5$ 时,若 r_{ij} 越小,说明 u_j 相对于上一指标层的某元素比 u_i 更重要。因此,基于互补型模糊判断矩阵的同层任意两元素间的模糊关系可采用 0.1~0.9 的标度给出^[17],具体含义详见表 1。

表 1 模糊判断矩阵元素 r_{ij} 标度定义^[17]

r_{ij} 取值	标度定义	说明
0.9	极其重要	相对于上一指标层某元素,元素 u_i 比元素 u_j 极其重要
0.8	很重要	相对于上一指标层某元素,元素 u_i 比元素 u_j 很重要
0.7	明显重要	相对于上一指标层某元素,元素 u_i 比元素 u_j 明显重要
0.6	稍微重要	相对于上一指标层某元素,元素 u_i 比元素 u_j 稍微重要
0.5	同等重要	相对于上一指标层某元素,元素 u_i 比元素 u_j 同等重要
0.4, 0.3, 0.2, 0.1	反比较	相对于上一指标层某元素,元素 u_j 是否比元素 u_i 重要,其判断公式为: $r_{ji} = 1 - r_{ij}$

2.2.3 构造互补型模糊判断一致矩阵 根据文献^[14],将互补型模糊判断矩阵 $\mathbf{R} = (r_{ij})_{n \times n}$ 做一致性转换,须满足以下 3 个基本条件:

$$\begin{cases} r_{ii} = 0.5 & (i=1, 2, \dots, n) \\ r_{ij} = 1 - r_{ji} & (i, j=1, 2, \dots, n) \\ r_{ij} = r_{jk} - r_{ik} & (i, j, k=1, 2, \dots, n) \end{cases}$$

因此,对互补型模糊判断矩阵 $\mathbf{R}=(r_{ij})_{n \times n}$ 逐行求和,记为 r_i ,

$$r_i = \sum_{k=1}^n r_{ik} \quad (1)$$

则模糊判断一致矩阵 \mathbf{R}^* 各元素为:

$$r_{ij} = (r_i - r_j) / 2n + 0.5 \quad (2)$$

2.2.4 计算指标权重和一致性检验 根据文献[28]给出的互补型模糊判断矩阵权重向量公式:

$$\omega_i = \frac{\sum_{j=1}^n r_{ij} + \frac{n}{2} - 1}{n(n-1)} \quad i \in N \quad (3)$$

构建互补型模糊判断一致矩阵 \mathbf{R}^* 的权重向量

$$\mathbf{W} = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)^T$$

构建互补型模糊判断一致矩阵 \mathbf{R}^* 的权重矩阵

$$\omega^* = [\omega_i / (\omega_i + \omega_j)]_{n \times n} \quad (4)$$

为使模糊矩阵一致性检验标准更具合理性和有效性,判断矩阵 \mathbf{R}^* 与其权重矩阵 \mathbf{W}^* 相容指标 $S(\mathbf{R}^*, \mathbf{W}^*)$ 检验公式可参考文献[28]:

$$S(\mathbf{R}^*, \mathbf{W}^*) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{r_{ij} \omega_{ij}}{\max(r_{ij}^2, \omega_{ij}^2)} \quad (5)$$

当 $S(\mathbf{R}^*, \mathbf{W}^*) \geq 0.8$, 称 $\mathbf{R}^*, \mathbf{W}^*$ 基本相容, \mathbf{R}^* 是一致可接受的; 当 $S(\mathbf{R}^*, \mathbf{W}^*) = 1$, 则称 $\mathbf{R}^*, \mathbf{W}^*$ 为完全相容, \mathbf{R}^* 是完全一致性互补判断矩阵[28]。

2.2.5 建立评价矩阵 设模糊评价的评语集为 $V = \{V_1, V_2, \dots, V_n\}$, 其中, V_i 为某分级指标被划分为第 i 等级的评语。本文根据专家建议对单体滑坡灾害的分级指标逐一打分, 构建模糊评价矩阵 $\mathbf{P} = (P_{ij})_{n \times n}$, P_{ij} 即表示某分级指标隶属于评语集 V_i {如无危险、低危险、中危险或高危险等} 的程度大小。

2.2.6 基于 GIS 的综合评价 基于 GIS 的数据处理和空间分析功能, 首先从最低层指标开始, 分别对单体滑坡各分级指标的评语集 V 进行量化; 其次, 基于 GIS 逐一量化第 i 指标 ($i=1, 2, \dots, n$) 对 $V = \{V_1, V_2, V_3, V_4\}$ 的隶属度; 即利用栅格计算器赋予各指标相应权重 W_i , 根据公式 $J_i = W_i^T \cdot P_i$ 计算各指标对 V_i 的隶属程度, 根据公式 $K = J_i \cdot V^*$ 分别计算并输出各空间单元的危险性评价结果。

3 结果与分析

3.1 评价模型的结构设计、评价指标及其分级标准

3.1.1 评价模型结构设计 本文以光明顶坡体实际资料为基础, 开展具有针对性的单体滑坡危险性评价应用研究。拟构建 A, B, C 3 级指标的层次模型结构, A 级指标为单体滑坡危险性评价, B 级指标分别为地形地貌 (B_1)、岩性岩组 (B_2)、地质构造 (B_3)、人类工程

活动 (B_4) 及灾害历史 (B_5) 等 5 个基本因子, 再分别由 B 级指标进一步发展 C 级指标 (如 C_1, C_2, \dots, C_n)。

3.1.2 评价指标的选取与说明 地形地貌 (B_1) 包含了重要的地形特征要素, 如山顶点、山脚点、山脊线、山谷线、陡坎线、断崖线、地形起伏度、坡度、坡向和坡型等, 是判断坡体危险性程度的重要指标之一。本文选取坡度、坡型和坡向作为地形地貌 (B_1) 的 C 级指标, 参与光明顶滑坡危险性评价研究, 上述 3 项 C 级指标数据可通过 DEM (或 TIN) 获得。岩性岩组 (B_2) 主要包含坡体岩石软硬程度 (岩性)、岩层产状 (倾角、倾向)、岩组结构等, 对坡体稳定性具有重要影响, 是单体滑坡危险性评价的重要指标之一。本文首先选取岩性、倾角、岩组结构作为 C 级指标。同时, 考虑单体滑坡是否为顺层滑坡, 引入岩层倾角与坡度二者的关系作为 C 级指标。地质构造 (B_3) 对宏观层面的区域地壳稳定性研究意义重大, 每一次地质构造事件所留下诸如褶皱、断层 (断裂)、劈理、节理 (裂隙) 等构造遗迹, 对微观层面的边坡稳定性分析也具有重要影响。根据对光明顶坡体实地勘察结果, 本文选取断层和节理裂隙作为地质构造 (B_3) 的 C 级指标。人类工程活动 (B_4) 对地质环境的影响日益明显, 如若处理不当, 会直接诱发滑坡等地质灾害。根据光明顶坡体周边人工设施、设备分布情况, 本文选取景区道路、馈源塔和支撑柱等作为人类工程活动 (B_4) 的 C 级指标。灾害历史 (B_5) 记录了灾害曾经发生的时间和地点。历史性地质灾害是否仍具有威胁, 往往取决于人类对其治理程度以及距离其远近。因此, 本文选取灾害治理和距离远近作为灾害历史 (B_5) 的 C 级指标, 参与光明顶滑坡危险性评价。其中, 关于灾害治理因子的量化处理方法, 即以灾害点治理工程所覆盖的区域面积作为灾害治理所产生的积极影响和作用范围参与滑坡危险性评价研究。关于 B 级指标选取需要说明的是, FAST 台址区域无地表河水系, 但分布有地下暗河, 该台址区域洼地底部标高约 840.9 m, 地下暗河顶面标高约 787.15 m, 该暗河最近的地表排出口位于研究区域东侧的水淹沟, 其最大淹没深度标高约 772.5 m^[21], 即该段暗河平均坡降约 3.2%。根据喀斯特水系发展演化规律和过程^[22], 并结合 FAST 所在区域降雨丰沛情况判断, 水系 (地下暗河) 对该区域喀斯特作用相对强烈, 从而间接影响区域坡体稳定性。但由于本文旨在探讨单体滑坡危险性, 该地下暗河具体位置尚不清楚, 其对光明顶坡体的影响在空间分布上并无明显差异, 降雨因素也是如此。因此, 针对光明顶滑坡危险性评价可不考虑水系和天气这两个指标。

3.1.3 评价指标的分级标准 本文将光明顶滑坡危险),分别对各 C 级指标按以上 4 级标准进行分级量化,结果详见表 2。

表 2 滑坡危险性评价指标体系及评价指标分级

评价目标 A	评价指标		评价等级			
	一级 B	二级 C	无危险	低危险	中危险	高危险
滑坡危险性评价	B ₁ 地形地貌	C ₁ 坡度/(°)	[0,5)	[5,15)	[15,30)/(45,90]	[30,45)
		C ₂ 坡型	无此情况	[-1,0)	[0,1)	(-∞,-1)/[1,+∞)
		C ₃ 坡向	[0,90)	[270,360]	[180,270)	[90,180)
	B ₂ 岩性岩组	C ₄ 岩性	硬	较硬	较软	软
		C ₅ 倾角/(°)	0	(0,10]	(10,20]	(20,90]
		C ₆ 倾角与坡度关系	无此情况	反倾	锐角顺层	平行顺层
		C ₇ 岩组结构	整体性好	整体性稍差	部分破碎	完全破碎
	B ₃ 地质构造	C ₈ 距断层远近/m	(1 000,+∞)	(100,1 000]	(50,100]	[0,50]
		C ₉ 距节理裂隙远近/m	(50,+∞)	(20,50]	(10,20]	[0,10]
	B ₄ 人类工程活动	C ₁₀ 距道路切坡远近/m	(100,+∞)	(60,100]	(30,60]	[0,30]
		C ₁₁ 距馈源塔基远近/m	(100,+∞)	(60,100]	(30,60]	[0,30]
		C ₁₂ 距支撑柱远近/m	(100,+∞)	(60,100]	(30,60]	[0,30]
	B ₅ 灾害历史	C ₁₃ 灾害治理	清除并加固	重点加固	简单处理	没有采取措施
		C ₁₄ 距灾害点远近	(100,+∞)	(60,100]	(30,60]	[0,30]

3.2 模糊矩阵构建及计算处理

根据表 1 标度含义,分别构建一级评价指标(B)相对于评价目标(A)的互补模糊判断矩阵 R¹ 和二级评价指标(C)相对于一级评价指标(B)的互补模糊判断矩阵 R₁²,R₂²,R₃²,R₄²,R₅²。

$$R^1 = \begin{bmatrix} 0.50 & 0.43 & 0.34 & 0.46 & 0.38 \\ 0.57 & 0.50 & 0.40 & 0.53 & 0.45 \\ 0.66 & 0.60 & 0.50 & 0.63 & 0.55 \\ 0.54 & 0.47 & 0.37 & 0.50 & 0.42 \\ 0.62 & 0.55 & 0.45 & 0.58 & 0.50 \end{bmatrix}$$

$$R^1 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.3 & 0.2 & 0.4 & 0.3 \\ 0.7 & 0.5 & 0.3 & 0.6 & 0.3 \\ 0.8 & 0.7 & 0.5 & 0.8 & 0.6 \\ 0.6 & 0.4 & 0.2 & 0.5 & 0.4 \\ 0.7 & 0.7 & 0.4 & 0.6 & 0.5 \end{bmatrix}$$

$$R_1^2 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.8 & 0.7 \\ 0.2 & 0.5 & 0.4 \\ 0.3 & 0.6 & 0.5 \end{bmatrix}$$

$$R_2^2 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.8 & 0.7 & 0.8 \\ 0.2 & 0.5 & 0.4 & 0.5 \\ 0.3 & 0.6 & 0.5 & 0.7 \\ 0.2 & 0.5 & 0.3 & 0.5 \end{bmatrix}$$

$$R_3^2 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.8 \\ 0.2 & 0.5 \end{bmatrix}$$

$$R_4^2 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.1 & 0.3 \\ 0.9 & 0.5 & 0.7 \\ 0.3 & 0.3 & 0.5 \end{bmatrix}$$

$$R_5^2 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.7 \\ 0.3 & 0.5 \end{bmatrix}$$

由公式(2)求得一级评价指标(B)相对于评价目标(A)的模糊判断一致性矩阵 R^{1*} :

由公式(3)求得一级评价指标(B)相对于评价目标(A)的权重向量 W¹ :

$$W^1 = \begin{bmatrix} 0.18 \\ 0.20 \\ 0.22 \\ 0.19 \\ 0.21 \end{bmatrix}$$

由公式(4)求得权重矩阵 W^{1*} :

$$W^{1*} = \begin{bmatrix} 0.50 & 0.47 & 0.45 & 0.49 & 0.46 \\ 0.53 & 0.50 & 0.48 & 0.51 & 0.49 \\ 0.55 & 0.52 & 0.50 & 0.54 & 0.51 \\ 0.51 & 0.49 & 0.46 & 0.50 & 0.48 \\ 0.54 & 0.51 & 0.49 & 0.52 & 0.50 \end{bmatrix}$$

由公式(5),S(R^{1*},W^{1*})=0.957>0.8,则 R^{1*},W^{1*} 基本相容,R^{1*} 是一致性互补判断矩阵。同理,可计算二级评价指标(C)相对于一级评价指标(B)的一致性矩阵(R₁^{2*},R₂^{2*},R₃^{2*},R₄^{2*},R₅^{2*})、权重矩阵(W₁^{2*},W₂^{2*},W₃^{2*},W₄^{2*},W₅^{2*})及相容性指标 S(R₁^{2*},W₁^{2*}),S(R₂^{2*},W₂^{2*}),S(R₃^{2*},W₃^{2*}),S(R₄^{2*},W₄^{2*}),S(R₅^{2*},W₅^{2*})。二级评价(C)指标权重和相容性指标的计算结果详见表 3。结果显示,上述相容性指标 S(R₁^{2*},

W_1^*), $S(R_2^*, W_2^*)$, $S(R_3^*, W_3^*)$, $S(R_4^*, W_4^*)$, $S(R_5^*, W_5^*)$ 计算结果均大于 0.8, 表明模糊判断矩阵 $R_1^*, R_2^*, R_3^*, R_4^*, R_5^*$ 一致可接受, 二级(C)指标权重 $W_1^*, W_2^*, W_3^*, W_4^*, W_5^*$ 计算结果可信。

表 3 滑坡危险性评价二级指标(C)权重及相容性系数

一级(B)	指标权重 W_i^*	二级(C)	指标权重 W_j^*	相容性指标 $S(R_i^*, W_j^*)$
地形地貌 (B ₁)	0.18	C ₁ 坡度/(°)	0.38	0.963
		C ₂ 坡型	0.29	
		C ₃ 坡向	0.33	
		C ₄ 岩性	0.29	
岩性岩组 (B ₂)	0.20	C ₅ 倾角/(°)	0.23	0.958
		C ₆ 倾角与坡度关系	0.25	
		C ₇ 岩组结构	0.23	
地质构造 (B ₃)	0.22	C ₈ 距断层远近/m	0.58	0.961
		C ₉ 距节理裂隙远近/m	0.42	
人类工程活动 (B ₄)	0.19	C ₁₀ 距道路切坡远近/m	0.29	0.952
		C ₁₁ 距馈源塔基远近/m	0.37	
		C ₁₂ 距支撑柱远近/m	0.34	
灾害历史 (B ₅)	0.21	C ₁₃ 灾害治理	0.55	0.973
		C ₁₄ 距灾害点远近	0.45	

3.3 基于 GIS 的综合评价

首先, 根据指标在不同状态或阶段条件下对滑坡危险性程度的贡献值大小, 实现分级指标的量化, 任意单一指标的分级量化之和为 1, 由此构建完善的二级指标(C)的模糊评价矩阵 P_i^2 。

$$P_1^2 = \begin{bmatrix} 0.10 & 0.20 & 0.25 & 0.45 \\ 0 & 0.30 & 0.30 & 0.40 \\ 0.10 & 0.15 & 0.30 & 0.45 \end{bmatrix}$$

$$P_2^2 = \begin{bmatrix} 0.05 & 0.10 & 0.25 & 0.60 \\ 0.10 & 0.20 & 0.30 & 0.40 \\ 0 & 0.10 & 0.40 & 0.50 \\ 0.10 & 0.20 & 0.25 & 0.45 \end{bmatrix}$$

$$P_3^2 = \begin{bmatrix} 0.10 & 0.20 & 0.30 & 0.40 \\ 0.10 & 0.15 & 0.25 & 0.50 \end{bmatrix}$$

$$P_4^2 = \begin{bmatrix} 0.10 & 0.15 & 0.30 & 0.45 \\ 0.05 & 0.10 & 0.25 & 0.60 \\ 0.10 & 0.20 & 0.30 & 0.40 \end{bmatrix}$$

$$P_5^2 = \begin{bmatrix} 0.05 & 0.15 & 0.35 & 0.45 \\ 0.10 & 0.20 & 0.30 & 0.40 \end{bmatrix}$$

其次, 根据表 2 的危险性等级划分准则, 基于 GIS 的空间数据处理功能提取各二级(C)指标分级信息。其中: 坡度、坡型和坡向数据来源于 DEM 数据层; 距断层、节理裂隙、道路切坡、馈源塔基、支撑柱及灾害点的远近均采取做缓冲区处理; 小型灾害点主要

有 2 处, 一处做清除并加固处理, 另一处做重点加固处理。各二级指标(C)图层处理结果如图 2 所示。

最后, 通过 GIS 的空间分析功能实现 $P_i^2 = W_i^{2T} \cdot P_i^1$ (W_i^{2T} 为二级指标权重矩阵 W_i^2 的转置) 和 $J = W_1^{1T} \cdot P_1^1$ (W_1^{1T} 为一级指标权重矩阵 W_1^1 的转置) 的求解运算, 分别得到二级指标(C)和一级指标(B)被评定为 V_i 的隶属度; 再通过 GIS 求解 $K = J \cdot V^*$ ($V^* = (15, 45, 70, 90)^T$, 取评价区间的平均值, 得到任一空间栅格单元的滑坡危险性评价结果, 并对该评价结果进行归一化处理, 以 $[0, 0.3)$, $[0.3, 0.6)$, $[0.6, 0.8)$, $[0.8, 1]$ 为区段做重分类, 得到光明顶滑坡危险性评价区划图(见图 3)。

3.4 结果验证与分析

基于 GIS 的模糊层次单体滑坡危险性评价结果与现场实际基本相符, 特别是关于危岩体和高危险区, 评价结果与实际情况吻合程度高。首先, 结合现场勘察和有关资料验证几处危岩体, 未治理前的光明顶危岩体主要有 3 处, 第 1 处危岩体位于 1 H 馈源塔上方, 除了两块呈 V 形分布的条带状破碎岩体外, 还存在一条较深的顺坡岩溶凹槽, 岩体节理发育, 且具有较大势能, 虽经重点加固处理, 但仍有遭受破坏和发生滑动的可能, 一旦发生滑坡, 其危险性和风险性都极大, 属于滑坡高危险区, 该现状与本文评价结果相吻合; 第 2 处危岩体位于坡顶, 被做清除和加固处理, 因坡顶相对平坦, 发生滑坡危险性的可能性较低, 其危险性等级也较低, 现场实际与本文评价结果相吻合, 属于滑坡低危险区; 第 3 处危岩体位于光明顶西北坡面的中下部, 沿水平方向呈长条带状分布, 虽然较大, 但由于经过清除和加固处理, 加之该坡面较陡, 坡脚又相对平坦, 距离射电望远镜的设施设备也相对较远, 因此即使发生错动滑落, 其危险性等级也相对较低, 该现状也与本文评价结果一致, 即距离支撑柱较近的一端为滑坡中危险区, 距离支撑柱较远的另一端为滑坡低危险区。其次验证本文评价结果中另一处滑坡高危险区, 该区域位于断层破碎带上 3 个支撑柱附近, 由于紧挨陡崖, 其危险性一方面受制于断层自身的不稳定, 另一方面则受制于上方陡崖的威胁, 且该陡崖自身的稳定性又受断层控制, 这一现状与评价结果也相吻合。经统计, 光明顶高危险区约占研究区面积的 4%, 集中分布于 1 处危岩体和断层破碎带上。中危险区域约占研究区面积的 20%, 主要位于光明顶坡体的南侧, 沿南坡和断层破碎带分布。低危险区域约占研究区面积的 33%, 主要位于光明顶坡体的坡顶、西坡和东坡及断层破碎带东侧的支撑柱附近, 且环绕中危险区域分布。无危险区约占研究区面

积的 43%，主要位于光明顶北坡，该区域稍远离断层破碎带，地质结构相对稳定，且相对远离射电望远镜

设施设备，即使发生滑坡地质灾害，其危险性等级也极低。

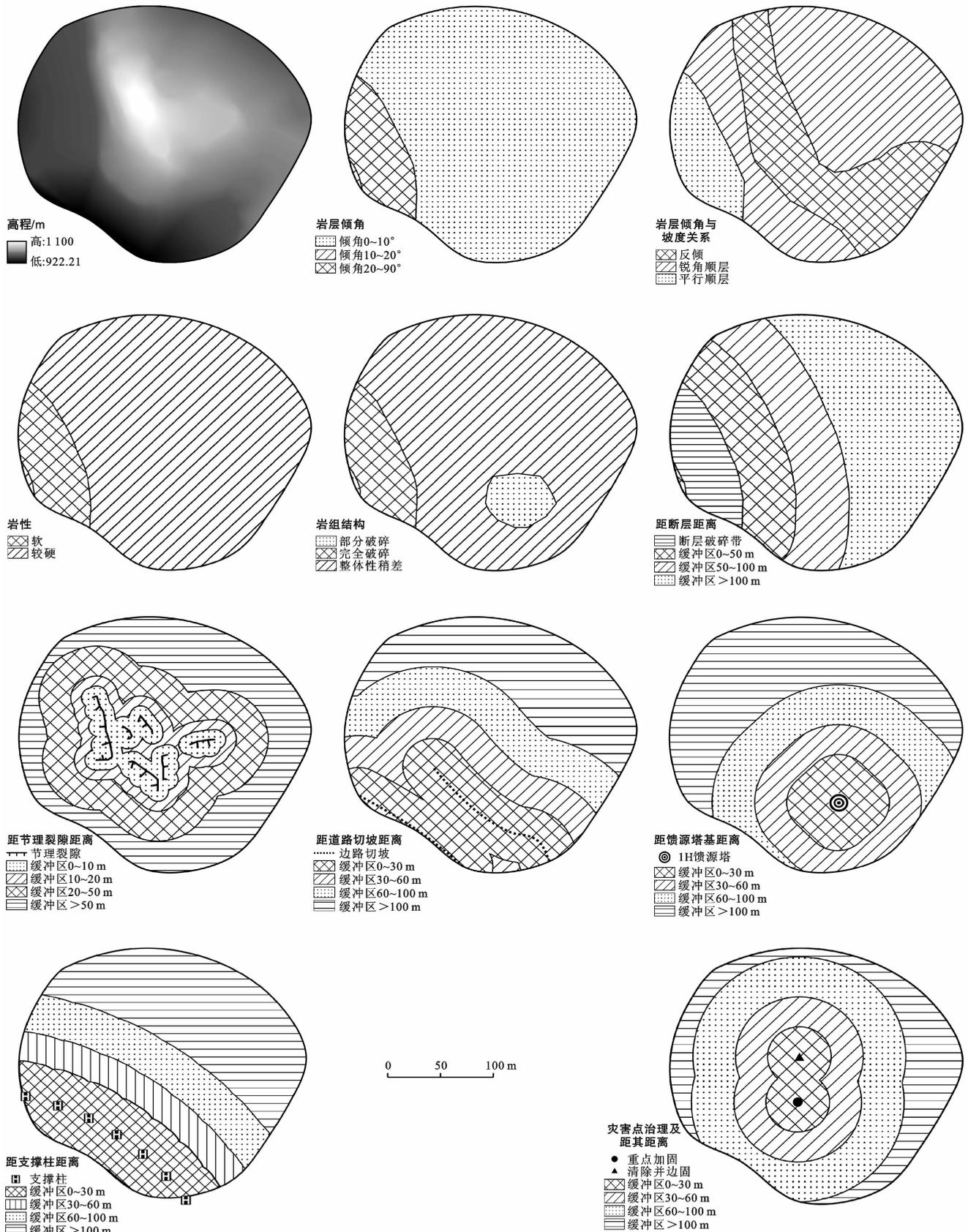


图 2 基于 GIS 的光明顶坡体滑坡危险性评价指标图层预处理

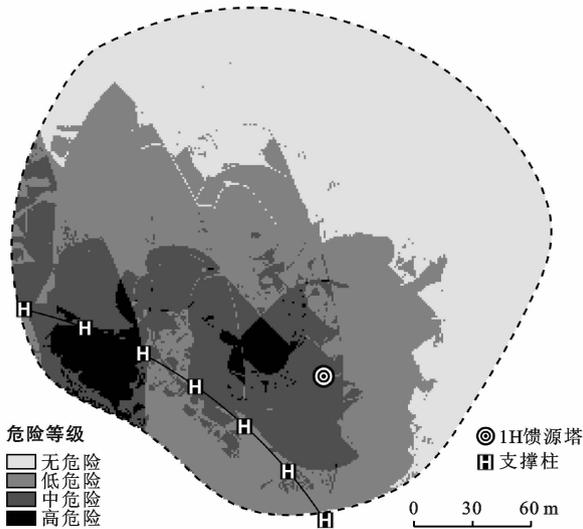


图 3 光明顶滑坡危险性评价分区

4 结论与讨论

4.1 讨论

(1) 单体滑坡危险性评价是单体滑坡风险性评价的重要基础,也是开展滑坡机理研究和坡体形变监测的必要前提。尽管其评价指标选取和体系构建较区域危险性评价更具针对性和科学性,但不能取代单体滑坡的稳定性分析,可以作为有益补充。

(2) 目前已有的相关研究成果中,无论是单体滑坡还是区域滑坡,也无论是滑坡危险性评价还是滑坡风险性评价,在空间表达与模型的结合方面仍存在一定的缺陷,以致评价结果并不是评价模型的真实表达。因此,评价模型与空间表达技术(如 GIS)的融合是必然途径。伴随科技发展与进步,当前及今后深入开展该领域相关研究工作仍具有重要的现实意义,希望本研究成果可以为相关类似研究提供借鉴和参考。

4.2 结论

(1) 开展基于 GIS 技术的模糊层次矩阵空间叠合运算实验,并将其应用于喀斯特单体滑坡危险性评价研究,其方法具有可操作性和可复制性,是 GIS 理论与方法在滑坡危险性评价和风险性评价领域的一次有益探索,具有实践创新价值。

(2) FAST 光明顶坡体总体居于中危险和低危险水平,局部高危险,高危险区域主要位于 1 H 馈源塔基和断层破碎带区域的 3 个支撑柱附近。FAST 精密设备的安全运行已然受到光明顶滑坡隐患的威胁,这一评价结果与实际情况基本相符,结果可靠,对光明顶滑坡及类似喀斯特滑坡高危险区域的地质灾害防治和监测具有指导意义。

致谢:感谢贵州省环境地质监测院陆治斌研究员给本文研究提供调查资料;感谢贵州省有色金属和核工业地质勘查局物化探总队尹桂林高级工程师对本文写作提供的帮助。

[参 考 文 献]

- [1] 王念秦,郭有金,刘铁铭,等. 基于支持向量机模型的滑坡危险性评价[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(35): 70-78.
- [2] 潘懋,李铁锋. 灾害地质学[M]. 北京:北京大学出版社, 2002.
- [3] Lee S, Choi J. Landslide susceptibility mapping using GIS and the weight-of-evidence model [J]. International journal of geographical information science, 2004, 18(8):789-814.
- [4] Sujit M, Ramkrishna M. Landslide Susceptibility analysis of Shiv-Khola watershed, darjiling; A remote sensing & GIS based analytical hierarchy process (AHP) [J]. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2012, 40(3):483-496.
- [5] 樊晓一,乔建平,陈永波. 层次分析法在典型滑坡危险度评价中的应用[J]. 自然灾害学报, 2004, 13(1):72-76.
- [6] 刘琳. 临潼区地质灾害危险性分区与评价[D]. 陕西西安:西安科技大学, 2008.
- [7] 高治群,薛传东,尹飞,等. 基于 GIS 的信息量法及其地质灾害易发性评价应用:以滇中晋宁县为例[J]. 地质与勘探, 2010, 46(6):1112-1118.
- [8] 李晓聪. 趋势面分析法在地质灾害危险性区划中的应用[D]. 山西太原:太原理工大学, 2007.
- [9] Seyede Z M, Ataollah K, Karim S, et al. GIS-based spatial prediction of landslide susceptibility using logistic regression model [J]. Geomatics, Natural Hazards & Risk, 2011, 2(1):33-50.
- [10] Park H J, Jung H L, Woo I K. Assessment of rainfall-induced shallow landslide susceptibility using a GIS-based probabilistic approach [J]. Engineering Geology, 2013, 161(1):1-15.
- [11] 王毅,唐川,李为乐,等. 基于 GIS 的模糊数学模型在泥石流敏感性评价中的应用[J]. 自然灾害学报, 2017, 26(1):19-26.
- [12] 王骏,李东林,覃伟. 基于 GIS 和模糊综合评判法的重庆涪陵区地质灾害易发性区划[J]. 重庆三峡学院学报, 2016, 32(3):81-86.
- [13] 陈晓利,祁生文,叶洪. 基于 GIS 的地震滑坡危险性的模糊综合评价研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2008, 44(3):434-438.
- [14] 张吉军. 模糊层次分析法(FAHP)[J]. 模糊系统与数学, 2000, 14(2):80-88.

- 溶磷能力测定及其优化培养[J]. 微生物学通报, 2009, 36(8):1183-1188.
- [20] Jayandra K J, Sanjay S, Chandra S N. Occurrence of Salt, pH, and temperature-tolerant, phosphate-solubilizing bacteria in alkaline soils [J]. *Current Microbiology*, 1999, 39(2):89-93.
- [21] Louw H A, Webley D M. A study of soil bacteria dissolving certain mineral phosphate fertilizers and related compounds [J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2008, 22(2):227-233.
- [22] 赵小蓉, 林启美. 微生物解磷的研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2001(3):7-11.
- [23] Williamson B, Alexander I J. Acid phosphatase localised in the sheath of beech mycorrhiza [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1975, 7(3):195-198.
- [24] Gimsing A L, Borggaard O K, Jacobsen O S, et al. Chemical and microbiological soil characteristics controlling glyphosate mineralisation in Danish surface soils [J]. *Applied Soil Ecology*, 2004, 27(3):0-242.
- [25] Jin H P, Bolan N, Megharaj M, et al. Isolation of phosphate solubilizing bacteria and their potential for lead immobilization in soil [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 185(2):829-836.
- [26] 范丙全, 金继运, 葛诚. 溶磷草酸青霉菌筛选及其溶磷效果的初步研究[J]. 中国农业科学, 2002, 35(5):525-530.
- [27] Xu Bing, Li Bai, Qin Ling, et al. Solubilization of rock phosphate by different ectomycorrhizal fungi (in solution culture) [J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2000, 22(4):76-80.
- [28] 刘辉, 吴小芹, 陈丹. 4 种外生菌根真菌对难溶性磷酸盐的溶解能力[J]. 西北植物学报, 2010, 30(1):149-155.
- [29] 金术超, 杜春梅, 平文祥, 等. 解磷微生物的研究进展[J]. 微生物学杂志, 2006, 26(2):73-78.
- [30] 张友胜. 植物叶绿素特征及其在森林生态学研究中的应用[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(3):1014-1017.
- [31] 朱培森, 杨兴明, 徐阳春, 等. 高效解磷细菌的筛选及其对玉米苗期生长的促进作用[J]. 应用生态学报, 2007, 18(1):107-112.
- [32] Rodriguez R J, White J J, Arnold A E, et al. Fungal endophytes: Diversity and functional roles [J]. *New Phytologist*, 2009, 182(2):314-330.
- [33] Sun Yue, Wang Qi, et al. Endophytic fungal community in stems and leaves of plants from desert areas in China [J]. *Mycological Progress*, 2012, 11(3):781-790.
- [34] Suryanarayanan T S, Wittlinger S K, Faeth S H. Endophytic fungi associated with cacti in Arizona [J]. *Mycological Research*, 2005, 109(5):635-639.

(上接第 115 页)

- [15] 操丽, 邓清禄, 耿丹, 等. 基于 GIS 与模糊逻辑法的川气东送管道地质灾害危险性评价[J]. 安全与环境工程, 2013, 20(6):38-42, 48.
- [16] 胡圣武. 基于模糊理论和典型线路的地质灾害评价的 GIS 方法研究[J]. 测绘科学, 2011, 36(4):86-88, 65.
- [17] 张栋, 范育青, 辛程鹏. 基于 FAHP 的高原山地滑坡危险性评价[J]. 环境工程, 2014, 32(10):133-136, 144.
- [18] 黄海亮, 焦光伟, 王亚超, 等. 基于 GIS 覆土油罐滑坡危险性模糊评价[J]. 后勤工程学院学报, 2016, 32(1):35-40.
- [19] 刘海燕, 庞小平. 利用 GIS 和模糊层次分析法的南极考察站选址研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2015, 40(2):249-252, 257.
- [20] 曹璞源, 胡胜, 邱海军, 等. 基于模糊层次分析的西安市地质灾害危险性评价[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(8):136-142.
- [21] 沈志平, 宋二祥, 朱博勤, 等. FAST 开挖系统关键技术及安全性研究[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [22] 宋建波, 刘宏, 王文俊, 等. 大射电望远镜贵州选址理论与方法[M]. 北京: 地质出版社, 2006.
- [23] 贵州省地质调查院. 中国区域地质志/贵州志[M]. 北京: 地质出版社, 2017.
- [24] 杨纶标, 高英仪, 凌卫新. 模糊数学原理及应用[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2011.
- [25] 张宁, 万忠梅. 基于层次分析法的梅河口市地质灾害易发性区划[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2016, 47(2):250-253.
- [26] 黄杏元, 马劲松. 地理信息系统概论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008.
- [27] 高丽琰, 余江宽, 张幼莹, 等. 基于 GIS 的层次分析法在宁夏地质灾害易发性评价的应用[J]. 防灾科技学院学报, 2017, 19(4):8-15.
- [28] 徐泽水, 达庆利. 衡量判断矩阵相容性的一个通用指标[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2001, 31(6):94-97.