

岩溶地区危岩和岩质崩塌易发性评价研究 ——以广西贺州市平桂区为例

黄 海, 江思义, 李海良, 李春玲, 吴秋菊

广西壮族自治区地质环境监测站, 南宁 530201

[摘要] 本文利用专家—层次分析法对岩溶地区危岩和岩质崩塌地质灾害易发性进行评价,以贺州市平桂区地质灾害详细调查成果资料作为依据,选取了地质灾害发育密度、地貌类型、坡度、植被指数、地层岩性、岩土体类型、覆盖层厚度、岩溶发育程度、地质构造、多年平均降雨量、居民地密度、路网密度、矿山开采强度 13 个影响岩溶地区危岩和岩质崩塌地质灾害易发性的地质环境因素,创建了岩溶地区危岩和岩质崩塌地质灾害易发性评价指标体系,再通过 GIS 的空间分析功能对岩溶地区危岩和岩质崩塌地质灾害易发性进行评价研究,评价结果对岩溶地区地质灾害的防治具有指导意义。

[关键词] 危岩和岩质崩塌;岩溶地区;专家—层次分析法;易发性

[分类号] P642.25

[文献标志码] A

Study on the evaluation of dangerous rocks and rock collapse susceptibility in Karst areas: A case study of Pinggui District, Hezhou City, Guangxi

HUANG Hai, JIANG Siyi, LI Hailiang, LI Chunling, WU Qiuju

The Guangxi Zhuang Autonomous Region Geological Environment Monitoring Station, Nanning 530201, China

Abstract: In this paper, an analytic hierarchy process (AHP) was used to evaluate the susceptibility of geological disasters of dangerous rocks and rock collapse in karst areas, where detailed survey results of geological disasters in Pinggui District, Hezhou City were taken as an example. In our analysis, we considered the geological disaster development density, landform type, slope, vegetation index, stratigraphic lithology, rock mass type, cover thickness and degree of Karst development, geological structures, number of years of average rainfall, resident density, road network density, mining strength, the type and amount of dangerous rocks in the Karst region, geological hazards such as rock

[收稿日期] 2023-09-13。

[基金项目] 广西壮族自治区自然资源厅地质调查研究项目(桂自然资办[2022]218号;桂国土资办[2018]317号)。

[第一作者] 黄海(1970—),男,高级工程师,研究方向:地质灾害调查、勘查与防治,E-mail:1144218603@qq.com。

[通信作者] 江思义(1987—),男,硕士,高级工程师,研究方向:岩土工程勘查与设计,E-mail:370333108@qq.com。

[引用格式] 黄海,江思义,李海良,等,2024.岩溶地区危岩和岩质崩塌易发性评价研究——以广西贺州市平桂区为例[J].成都理工大学学报(自然科学版),51(1):137-151.

Huang H, Jiang S Y, Li H L, et al., 2024. Study on the evaluation of dangerous rocks and rock collapse susceptibility in Karst areas: A case study of Pinggui District, Hezhou City, Guangxi[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 51(1):137-151.

collapse, and geological and environmental factors. An evaluation index system that measured vulnerability to geological hazards of dangerous rock and rock collapse in Karst areas was then established based on these factors. The evaluation system was then applied to the study area, which was evaluated and studied through the spatial analysis function of GIS. The evaluation results had guiding significance for the prevention and control of geological hazards in Karst areas.

Key words: dangerous rocks and rock collapse; Karst area; analytic hierarchy process; liability

危岩和岩质崩塌作为岩溶地区常见的地质灾害,具有其独特性;岩质崩塌和危岩地质灾害其灾害特征、孕灾机理和诱发因素有别于一般的崩塌、滑坡和泥石流地质灾害。从地质环境角度,对可能发生地质灾害的状况进行易发性预测评价具有重要的实际意义,预测结果可为岩溶地区地质灾害防治对策提供依据。

针对危岩或岩质崩塌的研究成果有不少,如黄海宁(2020)以贵州省寨子组崩塌为例,利用无人机遥感技术,对山区危岩进行识别,并进行了地质灾害风险性评价;高永才(2014)对云台山景区的危岩体进行了风险性评价,并提出了治理措施;何潇(2015)对长江巫峡望霞危岩的形成机制进行了分析,并对其危险性进行了评价;詹越(2016)总结分析了公路危岩崩塌的特征,并提出了危岩的监控方法和预警手段;谷虎(2019)以“8.8”四川省阿坝藏族羌族自治州九寨沟地震核心景区崩塌地质灾害为研究对象,进行了三维滚石运动模拟,并进行了风险评价;周迎等(2021)利用 ANP—信息量法对湖北省宜昌市点军区白垩系地层危岩崩塌地质灾害进行了易发性评价。目前,专门针对岩溶地区危岩和岩质崩塌地质灾害易发性的研究成果并未出现。国内外学者提出了多种地质灾害易发性评价方法并取得了丰硕的成果,方法主要有以下几种:层次分析法(王存智等,2021;吴福等,2019;江思义等,2021)、Logistic 模型(田春山等,2016)、信息量法(毕结昂等,2022)、证据权法(白光顺等,2022)、确定性系数法(屠水云等,2022)、多元线性回归模型(张超等,2016)、模糊综合评判法(王文俊等,2003)、不安定指数分析模型(任敬等,2018)等。选取合适的评价因子,并利用恰当的评价方法成为岩溶地区危岩和岩质崩塌易发性分区评价研究的关键。专家—层次分析法具有直观、简便、易于掌握等优点,并适用离散型模型(蔡鹤生等,1998),已经得到笔者和其他学者的广泛应用(吴福等,2019;江思义等,2021;江思义等,2019a,2019b,2019c)。

近年来,随着广西所有县(市、区)完成了 1:5 万地质灾害详细调查和风险普查,积累了大量的资料和数据,但相关的研究成果并未涌现。鉴于此,本文在资料收集和野外调查的基础上,结合研究区地质环境条件,采用专家—层次分析法,总结了基于 GIS 软件对岩溶地区危岩和岩质崩塌地质灾害易发性评价的方法。评价以广西贺州市平桂区的地质环境为基础,以期对广西及中国西南山区地质灾害防治对策提供指导和借鉴。

1 评价方法研究流程

通过资料分析和现场调研,采用专家—层次分析定权法对广西贺州市平桂区岩溶地区危岩和岩质崩塌地质灾害易发性进行研究,借助 GIS 平台实现可视化。具体步骤如下:1)在资料收集和野外调查的基础上,建立平桂区地质灾害数据库;2)根据研究区的实际情况,并结合规范和前人研究资料,采用专家打分法确定研究区地质灾害易发性的影响因子,并将其作为地质灾害易发性的量化指标;3)再通过层次分析法确定各因子权重,建立地质灾害易发性评价模型;4)结合研究区的实际情况,制定地质灾害易发性分区因子及影响程度分级表,计算出各单元网格的易发性指数 F 值。每个分区易发性指数计算采用易发性因子判别分值和对应的因子权重值的乘积来表示。易发性指数计算公式为 $F = \sum_{i=1}^m R(i) \cdot G(i)$,其中 F 为地质灾害易发性指数; $R(i)$ 为各影响因子的权重值; $G(i)$ 为对应影响因子的判别分值。 F 越大,表示该区的地质灾害易发性越高,反之,表示该单元的地质灾害易发性越低;5)通过 MapGIS 软件自动生成 F 等值线图,然后根据各评价单元实际情况对等值线进行修正,从而得到研究区地质灾害易发性分区图,并作出地质灾害易发性评价。基于专家—层次分析法的地质灾害易发性评价流程图(图 1)如下:

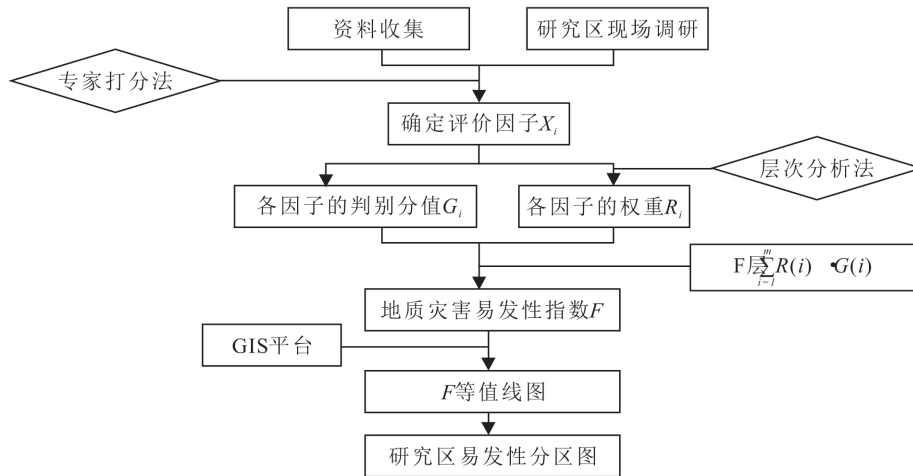


图 1 基于专家—层次分析法的地质灾害易发性评价流程图
 Fig. 1 Flow chart of geological hazard susceptibility evaluation based on AHP

2 工程实例及评级研究

2.1 研究区概况

贺州市平桂区地处广西东北部,坐标为东经 $111^{\circ}12' \sim 111^{\circ}41'$,北纬 $23^{\circ}52' \sim 24^{\circ}34'$,面积 $2\,022\text{ km}^2$ 。研究区地形和地质构造复杂,区内人类工程活动频繁,地质灾害频发(江思义等, 2019d)。据统计,平桂区岩溶区岩质崩塌 65 处,危岩 31 处,岩质崩塌和危岩共 96 处,占地质灾害总数的 24.06%。危岩和岩质崩塌制约城乡规划和开发建设,威胁人民生命财产安全。

2.2 评价因子确定

为科学、合理评价山区地质灾害易发性,需选取合适的方法,分析影响因子的组合特征和主次关系,合理的评价指标体系尤为关键。

根据研究区的实际情况,并结合规范和前人

研究资料,采用专家打分法,对岩溶区的危岩和岩质崩塌地质灾害易发性评价。本次评价以岩溶区的危岩和岩质崩塌地质灾害易发性做为目标层,选择了地质灾害发育现状、地形地貌、工程地质条件、区域地壳稳定性、气象条件、人类工程活动构成准则层即二级评判因子;为对研究区地质灾害发育特征、形成条件和影响因素的综合分析,选择了地质灾害发育密度(X_1)、地貌类型(X_2)、坡度(X_3)、植被指数(X_4)、地层岩性(X_5)、岩土体类型(X_6)、覆盖层厚度(X_7)、岩溶发育程度(X_8)、地质构造(X_9)、多年平均降雨量(X_{10})、居民地密度(X_{11})、路网密度(X_{12})、矿山开采强度(X_{13})对山区地质灾害易发性影响较为明显的 13 个因子构成措施层即三级评判因子。岩溶区的危岩和岩质崩塌地质灾害易发性分区评价指标体系见图 2。

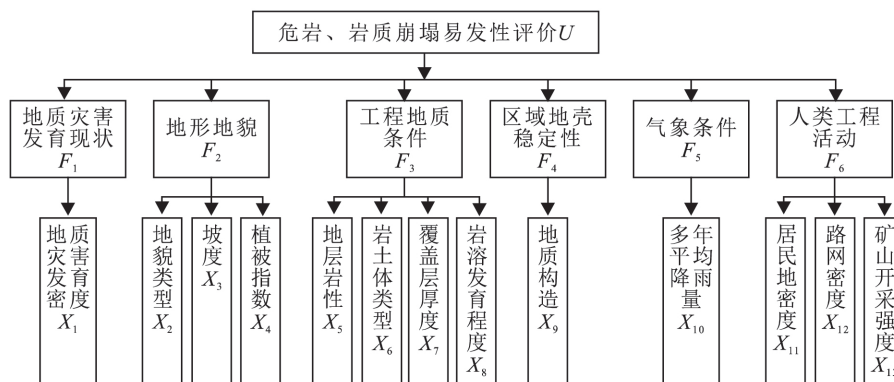


图 2 碳酸盐岩区危岩和岩质崩塌易发性分区评价指标体系
 Fig. 2 Zoning evaluation index system of dangerous rocks and rock collapse susceptibility in carbonate areas

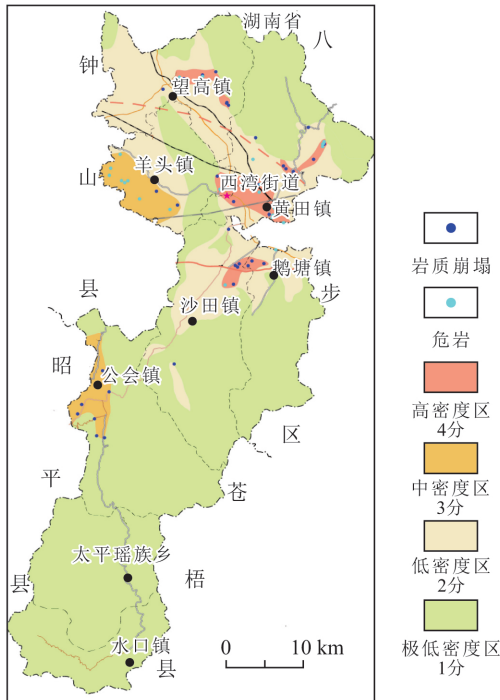
通过收集资料分析,并结合野外调查成果,再经专家打分法确定了对岩溶地区的危岩和岩质崩塌易发性评价各因子分区易发性的影响因子,现对各影响影响进行分析并分区计分,具体如下:

(1)地质灾害发育密度(X_1)

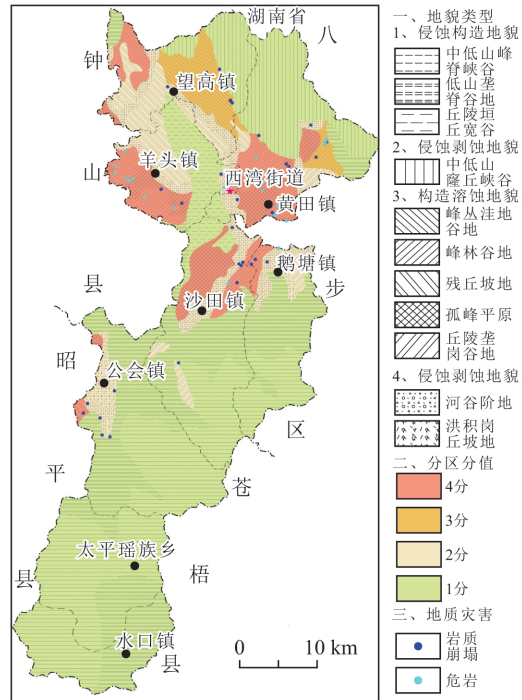
根据平桂区地质灾害密度分区结果,对该因子

赋值如下:地质灾害发育高密度区(≥ 0.3 点/ km^2)赋值 4 分、中密度区($0.1 \sim 0.3$ 点/ km^2)赋值 3 分、低等密度区($0.05 \sim 0.1$ 点/ km^2)赋值 2 分、极低密度区(< 0.05 点/ km^2)赋值 1 分。

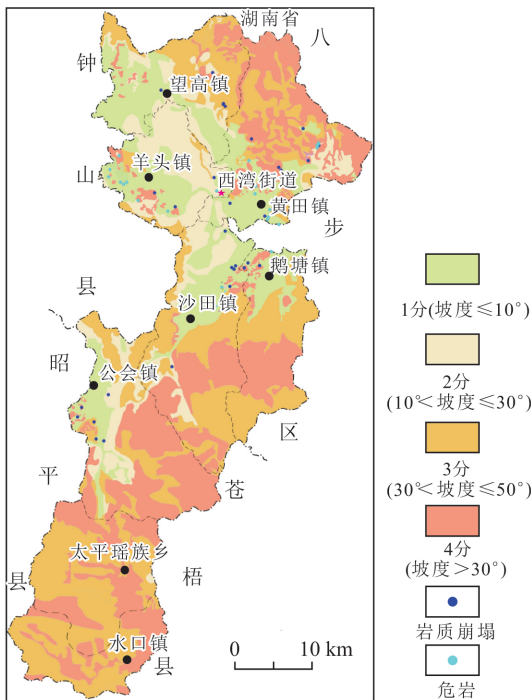
平桂区地质灾害发育密度单因子评价分区见图 3-A。



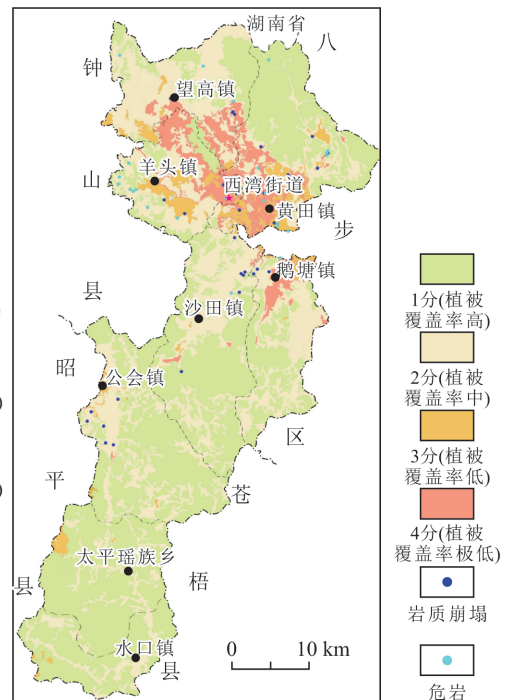
(A)地质灾害发育密度单因子分区图



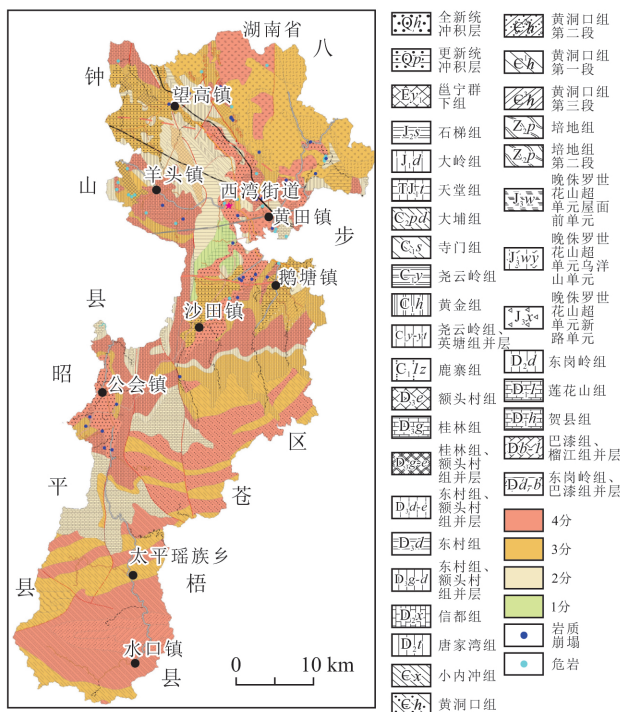
(B)地貌类型单因子评价分区图



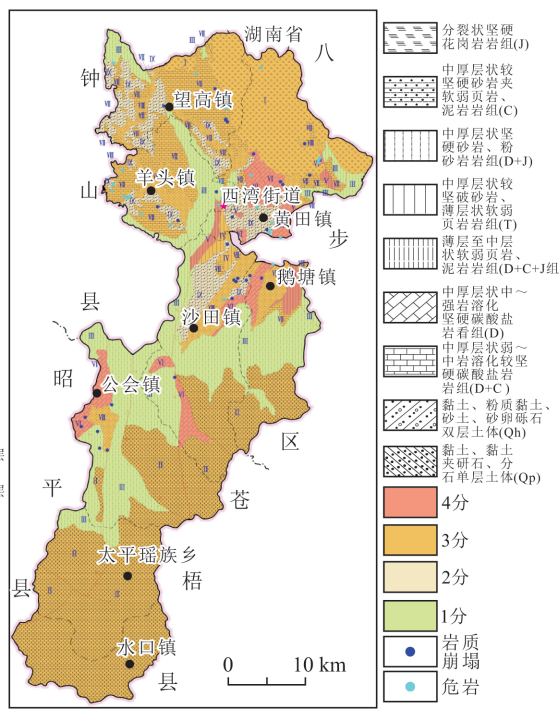
(C)坡度单因子评价分区图



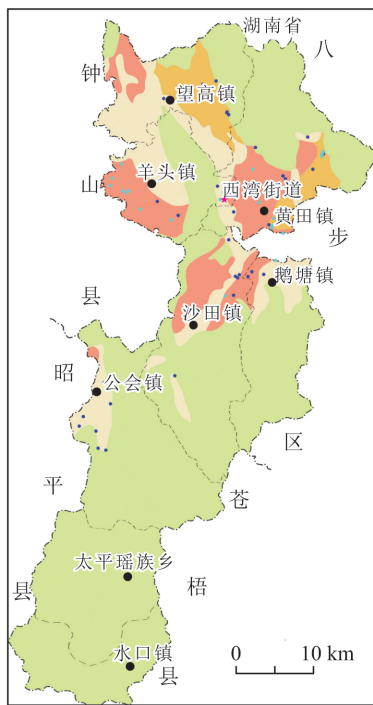
(D)植被指数单因子评价分区图



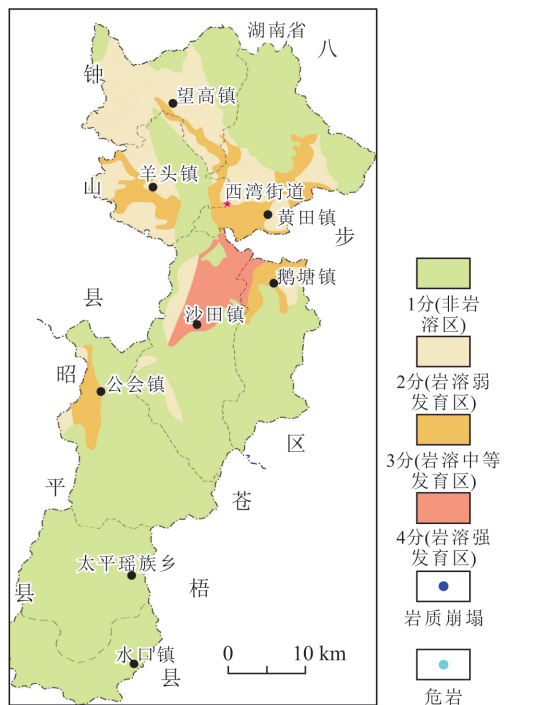
(E)地层岩性单因子评价分区图



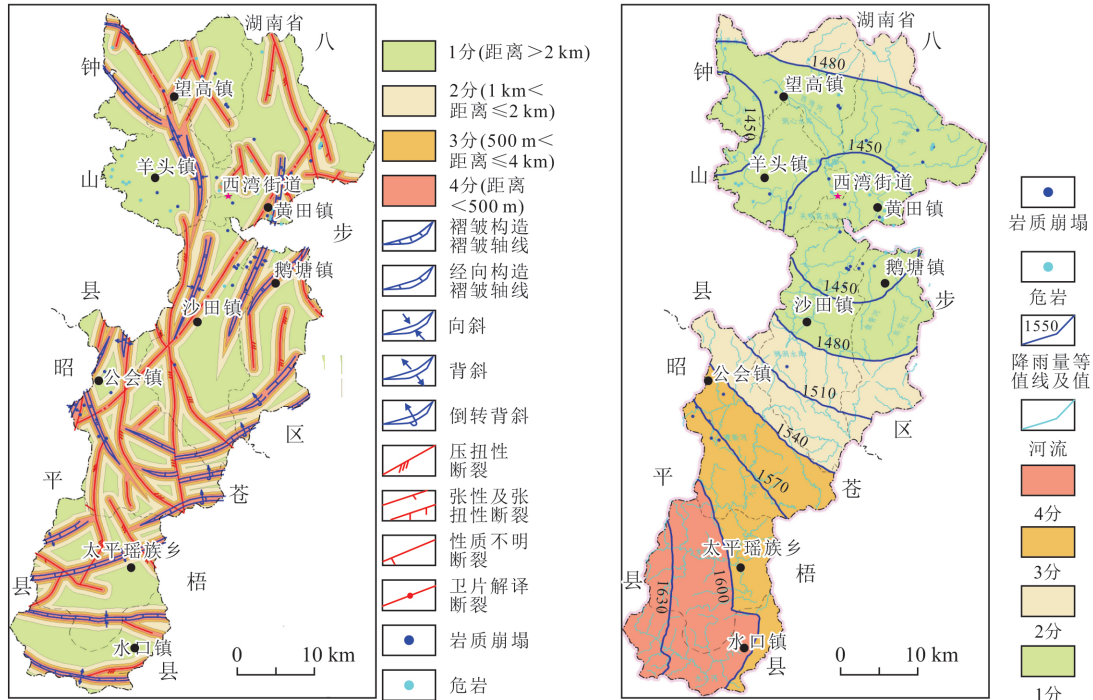
(F)岩土体类型单因子评价分区图



(G)覆盖层厚度单因子评价分区图

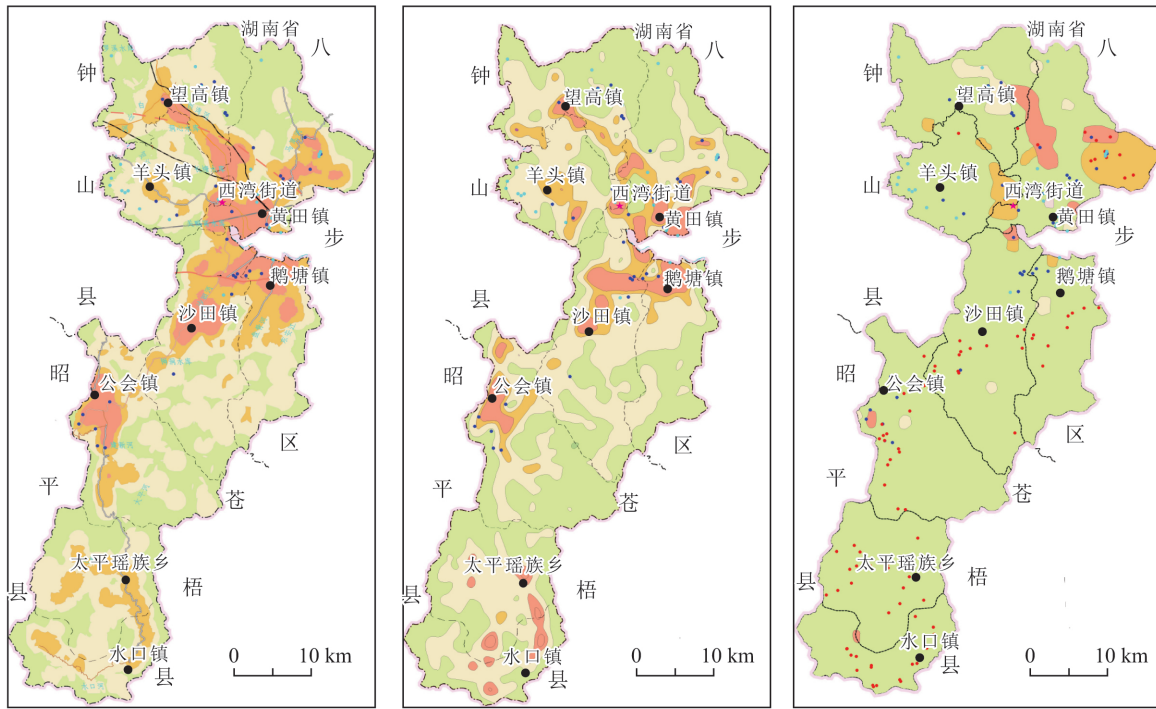


(H)岩溶发育单因子评价分区图



(I)构造距离单因子评价区划图

(J)多年平均降雨量单因子评价分区图



(K)居民地密度单因子评价分区图

(L)路网密度单因子评价分区图

(M)矿山开采强度单因子评价分区图

图 3 地质灾害易发性评价因子分区打分图

Fig. 3 Geological hazard susceptibility evaluation factor zoning scoring map

(2)地貌类型(X_2)

根据平桂区地质灾害与地貌类型的分布统计,并结合各地貌区与地质灾害的关联性,现将平

桂区地貌类型单因子评价赋值如下:孤峰平原、峰林谷地地貌区赋值 4 分,峰丛洼地谷地地貌区赋值 3 分,残丘坡地、丘陵垄岗谷地、河谷阶地、洪积

岗丘坡地地貌区赋值 2 分,其他地貌区赋值 1 分。平桂区危岩、岩质崩塌地貌类型单因子评价分区见图 3-B。

(3) 坡度(X_3)

根据平桂区崩塌、滑坡和不稳定斜坡地质灾害与坡度的关系统计,并结合其他研究资料,对平桂区坡度单因子评价赋值如下:坡度大于 50° 的区域赋值 4 分,坡度大于 30° 且小于等于 50° 的区域赋值 3 分,坡度大于 10° 且小于等于 30° 的区域赋值 2 分,坡度小于等于 10° 的区域赋值 1 分。平桂区危岩、岩质崩塌坡度单因子评价分区见图 3-C。

(4) 植被指数(X_4)

根据遥感解译,获得平桂区植被指数划分等级图。平桂区植被指数单因子评价分区见图 3-D。

(5) 地层岩性(X_5)

根据平桂区地质灾害与地层岩性的分布统计,并结合各地貌区与地质灾害的关联性,对工作区地层岩性单因子评价赋值为:泥盆系信都组(D_2x)、桂林组(D_3g)、第四系全新统(Qh)赋值 4 分;泥盆系唐家湾组(D_2t)、东岗岭组(D_2d)、额头村组(D_3e)、第四系更新统(Qp)赋值 3 分;泥盆系莲花山组(D_1l)、贺县组(D_1h)、东村组(D_3d)、石炭系尧山岭组(C_1y)、黄金组(C_1h)、鹿寨组(C_1z)、寺门组(C_1s)赋值 2 分;其他地层赋值 1 分。地层岩性单因子评价分区见图 3-E。

(6) 岩土体类型(X_6)

根据平桂区地质灾害与岩土体类型的分布统计,并结合各地貌区与地质灾害的关联性,各工程地质岩组单因子评价赋值为:中厚层稀裂状中—强岩溶化坚硬碳酸盐岩岩组赋值 4 分;中厚层稀裂状弱—中岩溶化较坚硬碳酸盐岩岩组、黏土、粉质黏土、砂土、砂卵砾石双层土体赋值 3 分;黏土、黏土夹砾石、碎石单层土体赋值 2 分;其他岩土体赋值 1 分。工程地质岩组单因子评价分区见图 3-F。

(7) 覆盖层厚度(X_7)

根据统计分析及本地区经验可知,覆盖层厚度越大的区域,危岩和岩质崩塌地质灾害发育密度越小,说明覆盖层厚度对地质灾害的影响和控制作用明显。因此,将平桂区划分为 >3 m、 $1\sim 3$ m、 <1 m 和非岩溶区共 4 类覆盖层厚度区,覆盖层厚度(按平均厚度计)单因子评价赋值为: <1 m 赋值 4 分、 $1\sim 3$ m 赋值 3 分、 >3 m 赋值 2 分、非

岩溶区赋值 1 分。平桂区危岩、岩质崩塌覆盖层厚度单因子评价分区见图 3-G。

(8) 岩溶发育程度(X_8)

岩溶塌陷易发性和岩溶发育程度呈正相关。将岩溶区岩溶发育程度分为强、中、弱 3 个级别,对岩溶塌陷影响程度分别为强、中、弱,其易发性评判分值分别为 4 分、3 分、2 分,非岩溶区评判分值为 1 分。平桂区岩溶发育单因子评价分区见图 3-H。

(9) 地质构造(X_9)

以区内已查明的构造为基础,向其两侧以 0.5 km 为间距设置 <0.5 km、 $0.5\sim 1.0$ km、 $1.0\sim 2.0$ km、 >2.0 km 等 4 个缓冲区,平桂区地质构造单因子评价赋值为: <0.5 km 赋值 4 分, $0.5\sim 1.0$ km 赋值 3 分, $1.0\sim 2.0$ km 赋值 2 分, >2.0 km 赋值 1 分。平桂区地质构造单因子评价分区见图 3-I。

(10) 多年平均降雨量(X_{10})

选取多年平均降雨量作为致灾单因子进行评价赋值,并根据降雨等值图(平桂区气象局制)进行区分赋值:多年平均降雨量 >1600 mm 赋值 4 分, $1540\sim 1600$ mm 赋值 3 分, $1480\sim 1540$ mm 赋值 2 分, <1480 mm 赋值 1 分,平桂区多年平均降雨量单因子评价分区见图 3-J。

(11) 居民地密度(X_{11})

通过对研究区居民地密度遥感解译分析,再实地核查后,将平桂区共划分为居民地密度高、中、低、极低 4 个区。平桂区居民地密度单因子赋值为:居民地密度高区赋值 4 分,居民地密度中等区赋值 3 分,居民地密度低区赋值 2 分,居民地密度极低区赋值 1 分。平桂区居民地密度单因子评价分区见图 3-K。

(12) 路网密度(X_{12})

通过遥感分析和野外调查,将研究区划分为路网密度高、中、低、极低 4 个区。平桂区人类工程活动强度单因子赋值为:路网密度高区赋值 4 分,路网密度中等区赋值 3 分,路网密度低区赋值 2 分,路网密度极低区赋值 1 分。平桂区路网密度单因子评价分区见图 3-L。

(13) 矿山开采强度(X_{13})

同样通过遥感分析和野外调查,将研究区划分为矿山开采强度强、中、低和非矿山开采区 4 个区。平桂区人类工程活动强度单因子赋值为:矿

山开采强度强赋值 4 分, 矿山开采强度中等赋值 3 分, 矿山开采强度低赋值 2 分, 非矿山开采区赋值 1 分。平桂区矿山开采强度单因子评价分区见图 3-M。

2.3 评价因素权重计算和分级赋值

(1) 建立层次结构模型

以岩溶地区的危岩和岩质崩塌地质灾害易发性分区为目标层(U 层), 将地质灾害发育现状(F₁)、地形地貌(F₂)、工程地质条件(F₃)、区域地壳稳定性(F₄)、气象条件(F₅)和人类工程活动(F₆)这 6 个一级指标为准则层(F 层), 以地质灾害发育密度(X₁)、地貌类型(X₂)、坡度(X₃)、植被指数(X₄)、地层岩性(X₅)、岩土体类型(X₆)、覆盖层厚度(X₇)、岩溶发育程度(X₈)、地质构造(X₉)、多年平均降雨量(X₁₀)、居民地密度(X₁₁)、路网密度(X₁₂)、矿山开采强度(X₁₃)这 13 个二级影响因素为方案层(X 层); 一级因子依次记为 F₁~F₆, 二级因子依次记为 X₁~X₁₃, 建立层次结构模型。

(2) 构建判别矩阵及层次总排序

评价因子确定后, 通过层次分析法计算各因子的影响大小(表 1~6), 检验系数 CR=CI/RI 满足一致性检验即可, CI 表示一致性指标, RI 表示随机一致性指标。

表 1 判断矩阵的标度及含义

Table 1 Scale and implication of the discrimination matrix

标度	含义
1	表示两个因素相比, 具有相同重要性
3	表示两个因素相比, 前者比后者稍重要
5	表示两个因素相比, 前者比后者明显重要
7	表示两个因素相比, 前者比后者强烈重要
9	表示两个因素相比, 前者比后者极端重要
2, 4, 6, 8	表示上述相邻判断的中间值
倒数	若因素 i 与因素 j 的重要性之比为 a _{ij} , 那么因素 j 与因素 i 的重要性之比 a _{ji} =1/a _{ij}

表 2 分区因子判别矩阵 U-F

Table 2 Partition factor judgment matrix U-F

U	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅	F ₆	W _i
F ₁	1	2	3/2	3	4	3/2	0.292
F ₂	1/2	1	3/4	3/2	2	3/4	0.146
F ₃	2/3	4/3	1	2	8/3	1	0.195
F ₄	1/3	2/3	1/2	1	3/2	1/2	0.100
F ₅	1/4	1/2	3/8	2/3	1	3/8	0.072
F ₆	2/3	4/3	1	2	8/3	1	0.195

CR=0.000<0.1。

表 3 分区因子判别矩阵 F₂-X

Table 3 Partition factor judgment matrix F₂-X

F ₂	X ₂	X ₃	X ₄	W _i
X ₂	1	1/2	2	0.30
X ₃	2	1	3	0.54
X ₄	1/2	1/3	1	0.16

CR=0.001<0.1。

表 4 分区因子判别矩阵 F₄-X

Table 4 Partition factor judgment matrix F₄-X

F ₃	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	W _i
X ₅	1.00	4.00	1/2	1.00	0.24
X ₆	1/4	1.00	1/6	1/4	0.07
X ₇	2.00	6.00	1.00	2.00	0.45
X ₈	1	4.00	1/2	1.00	0.24

CR=0.003<0.1。

表 5 分区因子判别矩阵 F₇-X

Table 5 Partition factor judgment matrix F₇-X

F ₇	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	W _i
X ₁₁	1	2	1	0.40
X ₁₂	1/2	1	1/2	0.20
X ₁₃	1	2	1	0.40

CR=0<0.1。

(3) 评价因子分级赋值

通过理论和实际分析, 按各评价因子对岩溶地区的危岩和岩质崩塌地质灾害影响程度进行量化分级, 分级结果见表 6。

(4) GIS 软件加权叠加分析

基于 GIS 平台的空间分析功能, 将评价分区图按权重大小计算后进行叠加, 从而得到研究区所有区域的地质灾害易发性指数, 并找到易发性指数的突变点, 进而确定岩溶地区的危岩和岩质崩塌地质灾害易发性分区界线值, 其中 F<0.2 为不易发, 0.2<F≤0.87 为低易发, 0.87<F≤1.47 为中等易发, 1.47<F≤2.423 为高易发。

最后基于 GIS 软件得到易发程度分区图(图 4), 对分区图加以分析得出平桂区岩溶地区的危岩和岩质崩塌地质灾害易发性分区表(表 7)。

3 结论

a. 本文在前人研究成果的基础上, 结合岩溶地区地质环境条件, 利用专家层次分析法, 提出了一种基于 MAPGIS 利用地质环境要素对岩溶地区的危岩和岩质崩塌地质灾害易发性评价的

表 6 岩溶地区危岩、岩质崩塌易发性分区评价各参评因素赋值标准及权重分配表

Table 6 Assignment criteria and weight distribution table of each participating factor in the zoning evaluation of dangerous rocks and rock collapse susceptibility in karst regions

一级评价因素	一级评价因素权重	二级评价因素	二级评价因素权重	评价因素赋值 Y_i			二级评价因素总权重	
				非易发	低易发	中易发		高易发
F_1 : 地质灾害发育现状	0.292	X_1 : 地质灾害发育密度(点/ km^2)	0.28	[0.05~0.1]	[0.1~0.3]	≥ 0.3	0.292	
F_2 : 地形地貌	0.146	X_2 : 地貌类型	0.30	其他地貌区 残丘坡地、丘陵垄岗 谷地、河谷阶地、洪积 岗丘坡地	峰丛洼地谷地	孤峰平原、峰林谷地	0.044	
		X_3 : 坡度	0.54	$\leq 10^\circ$	($10^\circ, 30^\circ$)	$> 50^\circ$	0.079	
		X_4 : 植被指数	0.16	极低	低	中等 高	0.023	
F_3 : 工程地质条件	0.195	X_5 : 地层岩性	0.24	其他岩性区 $D_1t, D_1h, D_3d, C_1y,$ C_1h, C_1z, C_1s	D_2t, D_2d, D_3e, Qp	D_2x, D_3g, Qh	0.047	
		X_6 : 岩土体类型	0.07	其他 黏土、黏土夹砾石、 碎石单层土体	中厚层较坚硬砂岩、薄层状软弱页 岩岩组、中厚层弱—中岩溶化较坚 硬碳酸盐岩岩组、黏土、粉质黏土、 砂土、砂卵石双层土体	薄层至中层状软弱页 岩、泥岩岩组、中厚层稀 裂状中—强岩溶化坚硬 碳酸盐岩岩组	0.014	
		X_7 : 覆盖层厚度	0.45	非岩溶区 $> 3\text{ m}$	$> 3\text{ m}$	1~3 m	$< 1\text{ m}$	0.088
		X_8 : 岩溶发育程度	0.24	非岩溶区	低	中	高	0.047
F_4 : 区域地壳稳定性	0.100	X_9 : 地质构造	0.13	$\geq 2000\text{ m}$	[1000 m, 2000 m)	[0, 500 m)	0.100	
F_5 : 气象条件	0.072	X_{10} : 多年平均降雨量	0.08	非岩溶区	弱发育	中等发育	强发育	0.072
		X_{11} : 居民地密度	0.40	极低密度区	低密度区	中密度区	高密度区	0.078
F_6 : 人类工程活动	0.195	X_{12} : 路网密度	0.20	极低密度区	低密度区	中密度区	高密度区	0.039
		X_{13} : 矿山开采强度	0.40	非矿山区	低密度区	中密度区	高密度区	0.078

表 7 平桂区岩溶地区危岩、岩质崩塌地质灾害易发性分区表
Table 7 Prone zoning table of geological disasters related to dangerous rocks and rock collapse in the karst area in Pinggui District

分区	分段号	分布范围	X ₁ : 地质灾害发育密度	X ₂ : 地貌类型	X ₃ : 坡度	X ₄ : 植被指数	X ₅ : 地层岩性	X ₆ : 岩土体类型	X ₇ : 覆盖层厚度/m	X ₈ : 岩溶发育程度	X ₉ : 地质构造	X ₁₀ : 多年平均降雨量/mm	X ₁₁ : 居民地密度	X ₁₂ : 路网密度	X ₁₃ : 矿山开采强度	面积/ km ²	所占比例/ %
高易发区 A	A ₁	望高镇西 边寨至牛 洞塘一带	高	峰丛洼地 谷地地貌	15°~70°	极低— 中等	泥盆系额头村组(D ₃ e)、 桂林组(D ₃ g)、东村组 和桂林组并层(D ₃ g- d),灰~深灰色灰岩、 含白云质团块灰岩、白 云岩为主	中厚层较坚硬碳酸盐 岩岩组	0~0.2	弱—中	尖峰顶压 扭性断 裂、十八 锦—平头 山断裂、 川岩—水 岩坝断裂	<1480	中密 度区	中密 度区	高密 度区	13.31	0.66
	A ₂	黄田镇龙 洞、路花、 大湾塘、 清面和新 村一带	高—中	孤峰平原 和河流阶 地	15°~70°	极低— 中等	泥盆系信都组(D ₂ x), 粉砂岩、泥质粉砂岩、细 砂岩为主夹页岩、砂质 页岩、白云质灰岩	中厚层较坚硬碳酸盐 岩岩组、中厚层稀裂 状坚硬碳酸盐岩岩 组、黏土、粉质黏土、 砂土、砂卵石双层 土体	0.3~5.0	中—高	新村—清 塘断 裂、新 路—石 灰 凹张扭性 断裂	<1450	高密 度区	中密 度区	高密 度区	24.24	1.20
	A ₃	西湾街道 和黄田镇 长龙、里 宁、安山 和担石一 带	高	孤 峰 原、峰 林 谷地	15°~70°	极低— 中等	泥盆系东村组(D ₃ d)、 桂林组(D ₃ g)、东村组 和额头村组并层(D ₃ d- e)、石英系黄 金 组 (C ₁ h),灰~深灰色灰 岩、含白云质团块灰岩、 白云岩为主	中厚层较坚硬碳酸盐 岩岩组、黏土、粉质黏 土、砂土、砂卵石双 层土体	0~0.3	中	新村—清 塘断 裂、老 虎 坳—老 寨 山断裂和 八步背斜	<1450	高密 度区	高密 度区	中密 度区	40.03	1.98
	A ₄	沙田镇栗 木、道石、 道东和龙 中一带	高	孤 峰 原、峰 林 谷地和河 流阶地	15°~70°	中等— 高	泥盆系桂林组(D ₃ g), 灰~深灰色中~厚层状 层孔虫晶灰岩、含白 云质团块灰岩、白云岩	中厚层较坚硬碳酸盐 岩岩组、黏土、粉质黏 土、砂土、砂卵石双 层土体	0~5	高	新村—清 塘断裂 和八步背 斜	<1450	中密 度区	中密 度区	低密 度区	11.93	0.59

续表 7

分 区	区 段 号	分 布 范 围	分 区 说 明													
			X ₁ : 地 质 灾 害 发 育 密 度	X ₂ : 地 貌 类 型	X ₃ : 坡 度	X ₄ : 植 被 指 数	X ₅ : 地 层 岩 性	X ₆ : 岩 土 体 类 型	X ₇ : 覆 盖 层 厚 度/m	X ₈ : 岩 溶 发 育 程 度	X ₉ : 地 质 构 造	X ₁₀ : 年 平 均 降 雨 量/mm	X ₁₁ : 居 民 地 密 度	X ₁₂ : 路 网 密 度	X ₁₃ : 矿 山 开 采 强 度	面 积/ km ²
中 易 发 区 B	B ₁	羊 头 镇 杜 山 脚 至 大 岩 一 带	中	孤 峰 原、峰 林 谷 地	15°~70°	低— 中 等	主 要 有 泥 盆 系 东 村 组 和 颛 头 村 组 井 层 (D ₃ d+e)、 唐 家 湾 组 (D ₂ t)、石 炭 系 尧 云 岭 组 (C ₁ y)、黄 金 组 (C ₁ h) 灰 ~ 深 灰 色 灰 岩、含 白 云 质 团 块 灰 岩、 白 云 岩 为 主	中 厚 层 较 坚 硬 碳 酸 盐 岩 岩 组	0~0.3	中	无	<1480	中 等 密 度 区	低 密 度 区	55.43	2.74
	B ₂	黄 田 镇 东 水 至 上 塘 一 带	低	峰 丛 洼 地 谷 地、孤 峰 平 原 和 丘 陵 壑 岗 谷 地	15°~70°	极 低— 中 等	地 层 复 杂，主 要 有 泥 盆 系 桂 林 组 (D ₃ g)、唐 家 湾 组 (D ₂ t)、信 都 组 (D ₂ x)、石 炭 系 黄 金 组 (C ₁ h)、大 埔 组 (C ₂ pd)、 尧 云 岭 组 和 英 糖 组 井 层 (C ₁ yvt)、深 灰 色 灰 岩、 粉 砂 质 泥 岩、泥 质 粉 砂 岩 夹 少 量 细 砂 岩 及 白 云 岩 等 为 主	中 厚 层 坚 硬 碳 酸 盐 岩 岩 组	0.3~3.0	中	新 村 一 清 断 水 塘 裂、新 路 一 灰 石 扭 断 张 扭 性 断 裂	<1480	高 密 度 区 中 密 度 区	中 密 度 区	58.35	2.89
	B ₃	沙 田 镇 芳 林 一 道 西 一 马 东 一 带	低	孤 峰 平 原、峰 林 谷 地 和 河 流 阶 地	15°~70°	中 等— 高	主 要 有 泥 盆 系 桂 林 组 (D ₃ g)、石 炭 系 黄 金 组 (C ₁ h)、深 灰 色 灰 岩、粉 砂 质 泥 岩、泥 质 粉 砂 岩 夹 少 量 细 砂 岩 及 白 云 岩 等 为 主	中 厚 层 坚 硬 碳 酸 盐 岩 岩 组	0~5	高	新 村 一 清 断 水 塘 裂、望 高 一 枫 树 头 压 扭 性 断 裂 和 钟 山 ~ 沙 田 短 轴 向 斜	<1510	高 密 度 区 中 密 度 区	低 密 度 区	70.16	3.47
	B ₄	公 会 镇 东 绿 至 新 农 一 带	中	残 丘 坡 地、孤 峰 平 原、河 谷 阶 地 和 洪 积 岗 丘 坡 地	15°~70°	中 等— 高	主 要 有 泥 盆 系 桂 林 组 (D ₃ g)、唐 家 湾 组 (D ₂ t)、贺 县 组 (D ₁ h) 和 信 都 组 (D ₂ x)、深 灰 色 灰 岩、粉 砂 质 泥 岩、泥 质 粉 砂 岩 夹 少 量 细 砂 岩 及 白 云 岩 等 为 主	中 厚 层 坚 硬 碳 酸 盐 岩 岩 组、黏 土、粉 质 黏 土、砂 土、砂 卵 砾 石 双 层 土 体	0~5	中	午 龙 村 一 沙 子 街 压 轴 性 断 裂 和 公 会 短 轴 向 斜	[1480, 1570]	中 密 度 区 低 密 度 区	低 密 度 区	37.13	1.84

续表 7

		分区说明															
分区	区段号	分布范围	X ₁ : 地质灾害 发育密度	X ₂ : 地貌类型	X ₃ : 坡度	X ₄ : 植被 指数	X ₅ : 地层岩性	X ₆ : 岩土体 类型	X ₇ : 覆盖层 厚度/m	X ₈ : 岩溶发育 程度	X ₉ : 地质构造	X ₁₀ : 多年平均 降雨量/mm	X ₁₁ : 居民地 密度	X ₁₂ : 路网 密度	X ₁₃ : 矿山开采 强度	面积/ km ²	所占 比例/ %
低易发区 C	C ₁	望高镇铁屎坪至下马岭一带、羊头镇罗古至老住洲一带	低	峰丛洼地、残丘坡地和河流阶地	15°~70°	中等— 极低	泥盆系桂林组和颛头村井层(D ₃ ge)、唐家湾组(D ₂ t)、石炭系黄金山组(C ₁ h)、尧云岭组(C ₁ y)、灰~深灰色灰岩、白云岩质团块灰岩、白云岩	中厚层坚硬碳酸盐岩岩组、黏土、粉质黏土、砂土、砂卵石双层土砂体	0~5	弱	罗古断裂、尖峰顶压扭性断裂、十八锦—平头山断裂、川岩—水岩坝断裂	<1480	中密度区	中密度区	中密度区	227.82	11.27
	C ₂	西湾街道和至沙田镇大坪一带	低	孤峰平原和河流阶地	15°~70°	中等— 高	石炭系黄金山组(C ₁ h)、灰~深灰色灰岩、白云岩团块灰岩、白云岩	中厚层坚硬碳酸盐岩岩组、黏土、粉质黏土、砂土、砂卵石双层土砂体	0~5	中	新村—清水塘断裂	<1450	中密度区	中密度区	低密度区	34.44	1.70
	C ₃	鹅塘镇夏岛至华山一带	低	丘陵谷地和河流阶地	10°~45°	中等— 高	地层复杂,主要有泥盆系东村组(D ₃ d)、浅灰~灰白色厚层状灰岩、白云质珍珠粒微晶灰岩、细晶白云岩;石炭系鹿寨组(C ₁ lz)、灰黑色薄层泥岩夹硅质岩、灰岩和砂岩	中厚层坚硬碳酸盐岩岩组、黏土、粉质黏土、砂土、砂卵石双层土砂体	0.5~3	弱	华山—大冲压扭性断裂、夏岛—南木断裂、岛向斜	<1450	中密度区	低密度区	低密度区	30.46	1.51
	C ₄	沙田镇松木一带	极低	丘陵谷地	10°~45°	高	泥盆系莲花山组(D ₁ l),岩性主要为紫红色砂砾岩、砂岩、粉砂岩、泥岩及少量灰岩、白云岩;与下伏前泥盆纪地层呈不整合接触	中厚层较坚硬碳酸盐岩岩组	0.5~3	弱	牛角口—牛屋界压扭性断裂	[1510,1540]	低密度区	低密度区	低密度区	3.58	0.18
	C ₅	沙田镇新民一带	极低	丘陵谷地	10°~45°	高	泥盆系莲花山组(D ₁ l),岩性主要为紫红色砂砾岩、砂岩、粉砂岩、泥岩及少量灰岩、白云岩;与下伏前泥盆纪地层呈不整合接触	中厚层较坚硬碳酸盐岩岩组	0.5~3	弱	牛角口—牛屋界压扭性断裂	[1510,1540]	低密度区	低密度区	低密度区	7.35	0.36
非易发区 D	D ₁	其他剩余区域	极低	非岩溶区	10°~45°	均有	区域内出露地层十分复杂	非碳酸盐岩岩组	0.5~5	非岩溶区	洞心向斜和西湾短轴向斜	<1630	非岩溶区	非岩溶区	非矿山区	1407.77	69.62

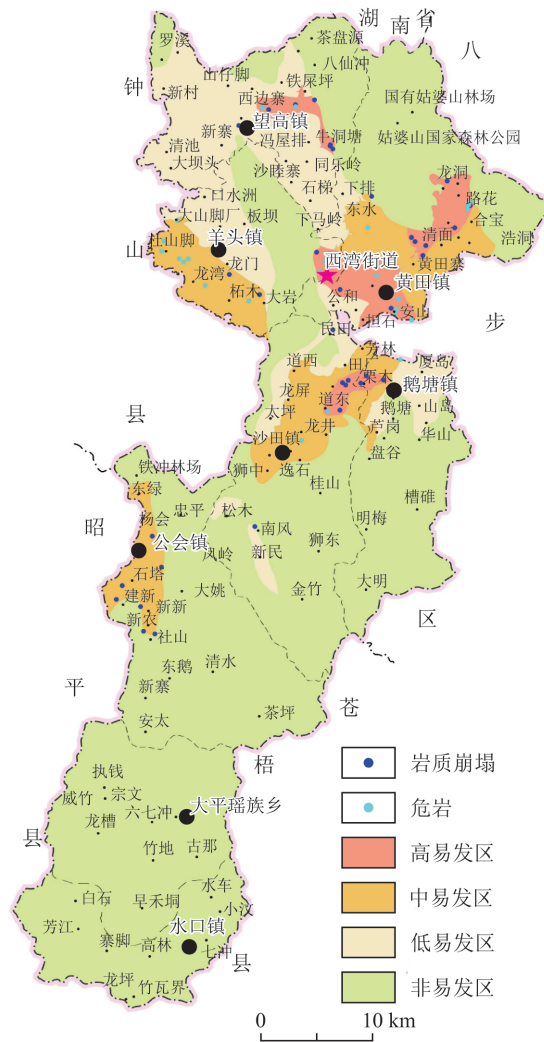


图 4 平桂区危岩和岩质崩塌地质灾害易发分区图

Fig. 4 Zoning map of dangerous rocks and rock-collapse-prone geological disasters in Pinggui District

方法。评价以广西贺州市平桂区的地质环境为基础,为岩溶地区的危岩和岩质崩塌地质灾害防治对策提供指导和借鉴。

b. 广西平桂区山区地质灾害易发性分区的地质环境因素细分为 13 个:地质灾害发育密度(X_1)、地貌类型(X_2)、坡度(X_3)、植被指数(X_4)、地层岩性(X_5)、岩土体类型(X_6)、覆盖层厚度(X_7)、岩溶发育程度(X_8)、地质构造(X_9)、多年平均降雨量(X_{10})、居民地密度(X_{11})、路网密度(X_{12})、矿山开采强度(X_{13})。

c. 依据预测分区指标计算,将研究区岩溶地区的危岩和岩质崩塌地质灾害易发分区分为高易发区(A)、中易发区(B)、低易发区(C)、非易发区(D)4 种类型,计算研究区的面积为 2 022.00 km²,

其中高易发区(A)的面积为 89.51 km²,占调查区总面积的 4.43%;中易发区(B)的面积为 221.07 km²,占调查区总面积的 10.93%;低易发区(C)的面积为 303.65 km²,占调查区总面积的 15.02%;非易发区(D)的面积为 1 407.77 km²,占调查区总面积的 69.62%。

d. 本文选取了岩溶地区危岩和岩质崩塌地质灾害易发性相关的 13 个地质环境条件作为评价因子,符合专家一层次分析法离散型模型的要求,并通过该方法构建判别矩阵及层次总排序,得到各因子的权重,方法简便、易于掌握,最后通过 GIS 软件直观表达,使研究区的地质灾害易发分区情况一目了然,便于提供给行政部门在地质灾害防治过程中决策使用。该评价体系具有直观、

简便、易于掌握等优点,并适用离散型模型的优点,值得在类似评价中推广应用。

[参 考 文 献]

- 毕结昂,徐佩华,宋盛渊,等,2022. 基于信息量—逻辑回归耦合模型的玛纳斯河流域地质灾害易发性评价[J]. 工程地质学报,30(5):1549—1560.
- Bi J A, Xu P H, Song S Y, *et al.*, 2022. Assessment of the susceptibility to geological hazards in the manas river basin based on the coupled information value-logistic regression model[J]. Journal of Engineering Geology, 30(5):1549—1560. (in Chinese)
- 白光顺,杨雪梅,朱杰勇,等,2022. 基于证据权法的昆明五华区地质灾害易发性评价[J]. 中国地质灾害与防治学报,33(5):128—138.
- Bai G S, Yang X M, Zhu J Y, *et al.*, 2022. Susceptibility assessment of geological hazards in Wuhua District of Kuming, China using the weight evidence method [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 33(5):128—138. (in Chinese)
- 蔡鹤生,周爱国,唐朝晖,1998. 地质环境质量评价中的专家—层次分析定权法[J]. 地球科学—中国地质大学学报,23(3):299—302.
- Chai H S, Zhou A G, Tang C H, 1998. Expert-analytic hierarchy weighting process in geological environmental quality assessment [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 23(3):299—302. (in Chinese)
- 高永才,2014. 云台山景区危岩体、边坡风险性评价及预警研究[D]. 焦作:河南理工大学档案馆.
- Gao Y C, 2014. Risk Assessment and Early Warning Study of Perilous Rocks and Slopes in Yuntai Mountain Scenic Region [D]. Jiaozuo: The Archive of Henan Polytechnic University. (in Chinese)
- 谷虎,2019. “8.8”九寨沟地震核心景区崩塌地质灾害风险评价[D]. 成都:成都理工大学档案馆.
- Gu H, 2019. Risk Assessment of Earthquake-induced Collapse Disaster in Jiuzhaigou Scenic Area [J]. Chengdu: The Archive of Chengdu University of Technology. (in Chinese)
- 黄海宁,2020. 基于无人机遥感技术的山区危岩识别及风险评价[D]. 成都:成都理工大学档案馆.
- Huang H N, 2020. Identification and Risk Assessment of Mountain Dangerous Rock Based on UAV Remote Sensing Technology. [D]. Chengdu: The Archive of Chengdu University of Technology. (in Chinese)
- 何潇,2015. 长江巫峡望霞危岩形成机制与危险性评价[D]. 重庆:重庆交通大学档案馆.
- He X, 2015. Formation Mechanism and Hazard Assessment of Wangxia Unstable Rocks in WU Gorge of Three Gorges, Yangze River[D]. Chongqing: The Archive of Chongqing Jiaotong University. (in Chinese)
- 江思义,吴福,黄希明,等,2021. 基于专家—层次分析法的岩溶地面塌陷易发性评价——以广西平桂区为例[J]. 矿产勘查,12(11):2294—2302.
- Jiang S Y, Wu F, Huang X M, *et al.*, 2021. Evaluation of vulnerability of karst collapse based on expert-analytic hierarchy process [J]. Mineral Exploration, 12(11):2294—2302. (in Chinese)
- 江思义,王启耀,李春玲,等,2019a. 基于专家—层次分析法的地下空间适宜性评价[J]. 地下空间与工程学报,15(5):1290—1299.
- Jiang S Y, Wang Q Y, Li C L, *et al.*, 2019a. Evaluation Suitability for the Underground Space Using Expert-analytic Hierarchy Process [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 15(5):1290—1299. (in Chinese)
- 江思义,吴福,王启耀,等,2019b. 岩溶地区地下空间开发适宜性评价——以桂林市规划中心城区为例[J]. 桂林理工大学学报,39(2):402—409.
- Jiang S Y, Wu F, Wang Q Y, *et al.*, 2019b. Suitability evaluation of underground space development in karst area: an example from Guilin [J]. Journal of Guilin University of Technology, 39(2):402—409. (in Chinese)
- 江思义,吴福,刘庆超,等,2019c. 岩溶地区建设用地地质环境适宜性评价——以广西桂林规划中心城区为例[J]. 中国地质灾害与防治学报,2019,30(6):84—93.
- Jiang S Y, Wu F, Liu Q C, *et al.*, 2019c. Suitability Evaluation of Construction Land in Karst Area—Taking city planning center of guilin as an example [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 30(6):84—93. (in Chinese)
- 江思义,石覃剑,袁范洋,等,2019d. 广西贺州市平桂区岩溶发育特征与分布规律[J]. 中国地质灾害与防治学报,30(2):106—113.
- Jiang S Y, Shi Q J, Yuan F Y, *et al.*, 2019d. Karst development characteristics and distribution in Pinggui District, Hezhou City of Guangxi Zhuang Autonomous Region [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 30(2):106—113. (in Chinese)
- 任敬,范宣梅,赵程,等,2018. 贵州省都匀市滑坡易发性评价研究[J]. 水文地质工程地质,45(5):165—172.
- Ren J, Fan X M, Zhao C, *et al.*, 2018. Evaluation of the

- landslide vulnerability in Duyun of Guizhou Province [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 45(5): 165—172. (in Chinese)
- 田春山,刘希林,汪佳,2016. 基于 CF 和 Logistic 回归模型的广东省地质灾害易发性评价[J]. *水文地质工程地质*, 43(6): 154—161.
- Tian C S, Liu X L, Wang J, 2016. Geohazard susceptibility assessment based on CF model and Logistic Regression models in Guangdong [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 43(6): 154—161. (in Chinese)
- 屠水云,张钟远,付弘流,等,2022. 基于 CF 与 CF-LR 模型的地质灾害易发性评价[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 33(2): 96—104.
- Tu S Y, Zhang Z Y, Fu H L, *et al.*, 2022. Geological hazard susceptibility evaluation based on CF and CF-LR model [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 33(2): 96—104. (in Chinese)
- 王存智,张炜,李晨冬,等,2022. 基于 GIS 和层次分析法的沙溪流域滑坡地质灾害易发性评价[J]. *中国地质调查*, 9(5): 51—60.
- Wang C Z, Zhang W, Li C D, *et al.*, 2022. Susceptibility evaluation of landslide hazards of Shaxi river basin based on GIS and AHP [J]. *Geological Survey of China*, 9(5): 51—60. (in Chinese)
- 吴福,江思义,刘庆超,等,2019. 广西桂林市规划中心城区岩溶塌陷易发性评价[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 30(5): 83—91.
- Wu F, Jiang S Y, Liu Q C, *et al.*, 2019. Evaluation of susceptibility of karst collapse in planning area of Guilin urban planning center of Guangxi Zhuang Autonomas Region[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 30(5): 83—91 (in Chinese)
- 王文俊,向喜琼,黄润秋,等,2003. 区域崩塌滑坡的易发性评价——以四川省珙县为例[J]. *中国地质灾害与防治学报*, (2): 33—36.
- Wang W J, Xiang X Q, Huang R Q, *et al.*, 2003. Areal landslides susceptibility analysis—A case study in Hong County, Sichuan Province [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, (2): 33—36. (in Chinese)
- 詹越,2016. 公路危岩崩塌安全监控及预警技术[D]. 重庆:重庆交通大学档案馆.
- Zhan Y, 2016. Highway Dangerous-rock Collapse Safety Monitoring and Early Warning Technology [D]. Chongqing: The Archive of Chongqing Jiaotong University. (in Chinese)
- 周迎,易武,黄晓虎,等,2021. 基于 ANP—信息量法的危岩崩塌灾害易发性评价[J]. *水力发电*, 47(9): 46—52.
- Zhou Y, Yi W, Huang X H, *et al.*, 2021. Evaluation of the vulnerability of dangerous rock collapse based on ANP-information method [J]. *Water Power*, 47(9): 46—52. (in Chinese)
- 张超,陈艳,张宇飞,等,2016. 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*, 43(3): 159—163.
- Zhang C, Chen Y, Zhang Y F, *et al.*, 2016. Geohazard susceptibility evaluation in Zhaotong of Yunnan based on the multivariate linear regression model [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 43(3): 159—163. (in Chinese)

(责任编辑:甘娟娟)