

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2019.05.11

## 广西桂林市规划中心城区岩溶塌陷易发性评价

吴 福,江思义,刘庆超,何 源,李海良

(广西壮族自治区地质环境监测总站,广西南宁 530029)

**摘要:** 本文对岩溶地区岩溶塌陷易发性进行研究,利用地质环境要素通过专家-层次分析法对岩溶塌陷易发性进行评价,并通过 MapGIS 软件实现可视化。以桂林市规划中心城区为例,选取了岩溶发育程度、土层厚度、土层结构、第四系底部土层岩性、第四系底部土层液性指数、地下水年变化幅度、岩溶水承压性、塌陷密度、人类工程活动 9 个影响岩溶塌陷易发性的地质环境因素,建立了岩溶塌陷易发性评价指标体系和评价方法,并对研究区进行了评价,其成果可为桂林市规划中心城区的岩溶塌陷防治对策提供指导和借鉴。

**关键词:** 岩溶地区;专家-层次分析定权法;地质环境;岩溶塌陷;易发性

中图分类号: P642.2

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2019)05-0083-09

## Evaluation of susceptibility of karst collapse in urban planning area of Guilin City of Guangxi Zhuang Autonomous Region

WU Fu, JIANG Siyi, LIU Qingchao, HE Yuan, LI Hailiang

(The Guangxi Zhuang Autonomous Region Geological Environment Monitoring Station,  
Nanning, Guangxi 530029, China)

**Abstract:** This paper studies the prone zones of karst collapse in karst areas, evaluates the prone zones of karst collapse through expertanalytic hierarchy process with geological environment elements, and realizes visualization by MapGIS software. In a case study of urban planning area in Guilin, nine geological environment elements which influence the susceptibility of karst collapse are selected; the degree of karst development, soil thickness, soil layer structure, quaternary soil layer lithology, the liquidity index at the bottom of the quaternary soil layer, variations in groundwater in karst water pressure, the density of collapse and human engineering activities with susceptibility of karst collapse evaluation index system and evaluation method established and the study area evaluated. The results can be used to provide guidance and reference as prevention and cure of karst collapse for urban planning area in Guilin.

**Keywords:** karst region; expertanalytic hierarchy process; geological environment; karst collapse; susceptibility

### 0 引言

岩溶塌陷作为岩溶地区特有的地质灾害,成为了

制约岩溶地区城乡建设与发展的地质环境问题之一,基于对岩溶塌陷地质灾害特征及其影响因素的分析,从地质环境角度,对可能发生岩溶塌陷地质灾害的状

收稿日期: 2019-06-08; 修订日期: 2019-06-15

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(12120114022101);广西壮族自治区国土资源厅、桂林市人民政府地质调查项目(桂国土资办[2014]70号)

第一作者: 吴 福(1972-),男,广西北海人,硕士,高级工程师,主要从事地质环境监测、地质灾害防治工作。E-mail:404630357@qq.com

通讯作者: 江思义(1987-),男,湖北天门人,硕士,工程师,主要从事地质调查和岩土工程勘察与设计工作。E-mail:370333108@qq.com

况进行易发性预测评价具有重要的实际意义,预测结果可为岩溶塌陷防治对策提供依据<sup>[1-2]</sup>。

目前对岩溶塌陷易发性进行评价的研究成果有很多,如李公岩等<sup>[3]</sup>采用袭扰系数法对山东省枣庄盆地进行了岩溶塌陷易发性评价;刘善军<sup>[4]</sup>以山东省泰安市为例,对隐伏岩溶区进行了岩溶塌陷易发性程度评价,为该类岩溶塌陷防治提供决策依据;其后,焦玉国等<sup>[5]</sup>利用综合指数法对泰安市的岩溶塌陷进行了易发性评估;曾斌等<sup>[6]</sup>利用层次分析法对在建的杭长高速公路进行了岩溶塌陷易发性评价,并提出了相应的预防和治理措施;金艳珠等<sup>[7]</sup>利用层次分析法,并结合 GIS 技术对云南省师宗县进行了岩溶塌陷易发性评估;武鑫等<sup>[8]</sup>利用层次分析-模糊综合评价法对徐州市进行了岩溶塌陷易发性评价,并建立了岩溶塌陷监测预警系统;黄立勇<sup>[9]</sup>以浙江省江山市为例,采用模糊数学法,建立了岩溶塌陷易发性预测与评价模型,对研究区进行了岩溶塌陷易发性评价。选取合适的评价因子,并利用恰当的评价方法成为岩溶塌陷易发性分区评价研究的关键。因此更加合理、有效、科学地对岩溶塌陷进行易发性评价有待继续研究。

针对以上问题,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,将专家打分法和层次分析法相结合,利用 MapGIS 的制图与空间分析功能,提出了一种基于 MapGIS 利用地质环境要素对岩溶塌陷易发性评价的方法。评价以桂林市规划中心城区的地质环境为基础,专家打分法和层次分析法相结合为理论,通过 MapGIS 软件对评价结果实现可视化,为桂林市规划中心城区的岩溶塌陷防治对策提供指导和借鉴。

## 1 评价方法研究

随着 GIS 技术的发展,岩溶塌陷易发性分区的评价方法不断涌现<sup>[2,9]</sup>,逐渐从定性、半定量的方法向定量的方法发展<sup>[9]</sup>。

进行对比分析,层次分析法有如下优点:(1)适用于离散模型,尤其适用于无结构特性的系统评价以及多目标、多准则、多时期的系统评价;(2)步骤简单明确,容易被决策者了解和掌握。并结合专家打分法直观、简便的特点,专家-层次分析定权法在地质环境评价中早就得到过应用<sup>[10]</sup>。MapGIS 广泛运用于国土领域,其强大的制图和空间分析功能,为国土规划提供技术支持。基于 MapGIS 平台利用专家-层次分析定权法从地质环境条件的角度对岩溶塌陷易发性进行评价,

该方法简便实用,有利于环境地质调查成果的转化<sup>[11]</sup>。具体评价步骤如下:(1)根据研究区地质环境条件,并参考前人的经验<sup>[2-9]</sup>,筛选出评价因子,再通过专家打分法确定研究区岩溶塌陷易发性分区评价因子。(2)利用地质调查成果,通过 MapGIS 按各因子的影响程度大小对研究区进行分区,分区按影响程度大小最多分 4 类区,最少分 2 类区,并对区按因子的影响程度由小到大分别打分(0、1、2、3),把打分结果对各分区进行参数赋属性。(3)运用层次分析法确定各评价因子的权数。(4)制定岩溶塌陷易发性分区因子及影响程度分级表,并对各评价因子评价图的每个分区进行函数计算得到易发性指数  $F$  值。每个分区易发性指数计算采用适宜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:

$$F = \sum_{i=1}^m R(i) \cdot G(i)$$

式中: $F$ ——易发性指数;

$R(i)$ ——各影响因子的权重值;

$G(i)$ ——对应影响因子的判别分值。

$F$  越大,表示该区的岩溶塌陷易发性越高;反之,表示该单元的岩溶塌陷易发性越低。(5)利用 MapGIS 空间分析功能,将各因子的分区图按因子的权重进行叠加,得到叠加后研究区的易发性指数,将得到的易发性指数合理分为 4 段,利用 MapGIS 属性赋参数,将 4 段值分别赋予 4 种不同颜色,实现可视化,得到易发性分区图。

## 2 工程实例及评级研究

### 2.1 研究区概况

研究区包含桂林市主城区、临桂新区,其总面积为 880 km<sup>2</sup>,其中研究区岩溶区面积为 603.35 km<sup>2</sup>。桂林作为国际旅游名城,研究区有极大的发展需求。

通过环境地质调查,为本次研究提供了研究区的 1:5 万工程地质图、水文地质图、构造纲要图、地下水位埋深等值线图、地下水入渗系数分布图、岩溶地面塌陷易发程度分区图、岩溶发育程度分区图、地下河对城市建设影响现状评价图、第四系土体结构及土体厚度等值线图、特殊土分布图、研究区内钻孔及水文地质监测孔的分布及相关数据、以及岩土体的原位试验和室内土工试验的试验结果。

### 2.2 评价因子的选取

影响岩溶塌陷的因素众多,不同空间位置、不同的地质环境背景条件和影响因素所起的作用各不相同。

为准确预测评价岩溶塌陷易发性的空间分布,需要选择合适的方法,查清不同影响因素的组合特征,并确定不同情况下各影响因子的主次作用,关键在于建立适当的评价指标体系并进行权重计算。

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,选择的岩溶塌陷易发性分区评价因子主要有5大方面:基岩、土层、地下水、已有塌陷和人类工程活动,这5大方面又可以细分为9个指标:岩溶发育程度、土层厚度、土层结构、第四系底部土层岩性、第四系底部土层液性指数、地下水年变化幅度、岩溶水承压性、塌陷密度、人类工程活动。主要以上述因素进行半定量综合评价,对岩溶塌陷易发性进行综合分区。岩溶塌陷易发性评价指标体系如图1。

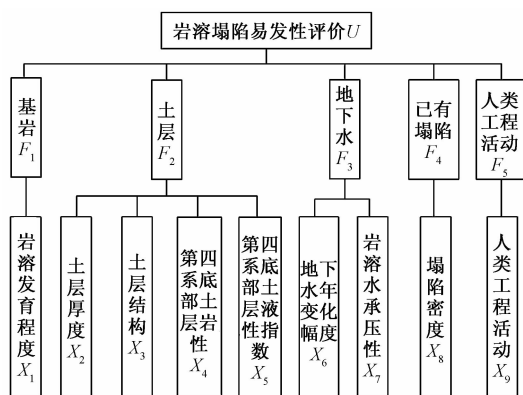


图1 岩溶塌陷易发性分区评价指标体系

Fig. 1 Evaluation index system of karst collapse prone zone

为了达到岩溶塌陷易发性评价的目的,结合地质调查成果,又收集了研究区相关图件及数据资料。从对环境地质的影响角度,分别对各评价因子的资料进行分析处理,得出各因子的分区计算图,下面对各个评价因子进行详细叙述。

### 2.2.1 岩溶发育程度

岩溶塌陷易发性与岩溶发育程度呈正相关。将岩溶区岩溶发育程度分为强、中等、弱三个级别,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3分、2分、1分,非岩溶区评判分值为0分。研究区中部、七星区、象山区、柘木及临桂县城等地岩溶发育程度强;庙岭、兰塘、岩口村、横山村、东村、唐家村、北东侧四联村、南洲村、东侧丫吉村、东南测的苏家村、罗安村、兴隆村一带岩溶发育程度为中等区;东南侧湖塘村至二塘乡、五塘村,西南庙岭镇至刘村、田基头一带,北侧定江镇等岩溶发育程度弱。绘制出研究区岩溶发育分区图。

### 2.2.2 土层厚度

松散破碎的覆盖层是塌陷体的主要组成部分。现将研究区内土层厚度划分为0~15 m、15~30 m、>30 m三个等级,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3分、2分、1分,基岩裸露区其易发性分区评判分值为0分。庙岭镇、雁山镇、定江镇、二塘乡、朝阳乡等地土层厚度0~15 m;桂林市主城区、大河乡、临桂新区、柘木镇等地土层厚度15~30 m,对岩溶塌陷影响中等,其易发性评判分值为2分;大河乡阳家村、星华村、桂林市象山区、和平村等地土层厚度>30 m区,对岩溶塌陷影响弱,其易发性评判分值为1分;基岩裸露区其易发性分区评判分值为0分。最终得出第四系土层等厚度分区图。

### 2.2.3 土层结构

土层结构与土的崩解剥落存在密切关系:土层结构愈多,土体强度愈低、土质愈疏松,土层稳定性愈差,故土层结构愈多,愈易发生塌陷。土体结构分为多层、双层及单层土体,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3分、2分、1分,基岩裸露区其易发性分区评判分值为0分。研究区内漓江、桃花江一、二级河流阶地及西部庙岭镇、田基头等地为双层结构土体;桂林市七星区、雁山区、朝阳乡、定江镇、二塘乡以及西部面村—横山村—兰塘村等地土层为单层结构。最终得到第四系土层结构分区图。

### 2.2.4 第四系底部土层岩性

第四系底部土层岩性对土体崩解和崩塌的影响明显,砂土颗粒较粗,土体连接性差、崩解快,而粉土,粉质黏土、黏土等颗粒较细,粘结性强,特别是黏土,含有较多结合水,具有抗剪强度,崩解速度慢。因此,第四系底部土层岩性黏粒含量愈多崩解量愈少,呈负相关。砂砾石层、粉土、黏土,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3分、2分、1分,基岩裸露区其易发性分区评判分值为0分。研究区内漓江、桃花江一、二级河流阶地及西部庙岭镇、田基头等地第四系土层岩性为砂砾石层;粉土区研究区内未见;桂林市七星区、雁山区、朝阳乡、定江镇、二塘乡以及西部面村—横山村—兰塘村等地第四系底部岩性为黏土区。最终得出第四系底部土层岩性分区图。

### 2.2.5 第四系底部土层液性指数

第四系底部土层液性指数愈大,土体颗粒粘结力愈弱,土体愈容易膨胀、抗剪强度愈低、愈容易崩解,将第四系底部土层液性指数划分为流塑(软塑)、可塑、硬塑(坚硬)三个级别,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 3 分、2 分、1 分,基岩裸露区其易发性分区评判分值为 0 分。研究区内地下水位基本都基岩面以上,且基岩面附近的土层在地下水流长期作用下有一层软~流塑状态土,故第四系底部土层液性指数多为流塑(软塑);第四系底部土层液性指数为可塑、硬塑或坚硬的区域未见。最终得出第四系底部土层液性指数分区图。

#### 2.2.6 地下水年变化幅度(m/年)

地下水位频繁的、长期的变动,有利于潜蚀、渗蚀、真空吸蚀、气爆冲蚀等作用,从而使土层崩解剥落直至崩塌。地下动幅度愈大,波动频率愈高,愈容易发生岩溶塌陷。将地下水位变化幅度分为  $>10\text{ m}$ 、 $5\sim10\text{ m}$ 、 $<5\text{ m}$  三个等级,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 3 分、2 分、1 分。根据对研究区内地下水丰、平、枯期的水位监测得到各水点的水位变化数据显示,研究区内地下水位变化幅度均小于  $5\text{ m/年}$ 。因此,将研究区内地下水位变化幅度统一划分为  $<5\text{ m}$ ,对岩溶塌陷影响弱。绘制出地下水变化幅度分区图。

#### 2.2.7 岩溶水承压性

岩溶水的承压性主要影响地下水位的波动,进而影响土体物理状态,以至于土体崩解,土体由天然状态变为饱水状态,再由饱水状态变为表面风干(失水)状态后,再次遇水则会增加其崩解速度与崩解量。因此,岩溶水在基岩面上下反复波动时,对土体影响最大,最容易使土体崩解,产生崩塌。将岩溶水划分为在基岩面上下反复波动、在基岩面以下波动、在基岩面以上波动三个级别,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 3 分、2 分、1 分。根据对研究区内地下水丰、平、枯期的水位监测得到各水点的水位变化数据显示,研究区内临桂新区、桂林市市区、定江镇、雁山镇以及卫家渡村人类工程活动强烈,抽排水对地下水位影响较大,地下水位在基岩面上下  $0\sim1\text{ m}$  反复波动;其他区域地下水在基岩面以上波动。得到岩溶水承压性分区图。

#### 2.2.8 已有塌陷密度

将已有塌陷密度分为  $>2\text{ 个}/10\text{ km}^2$ 、 $0\sim2\text{ 个}/10\text{ km}^2$  以及无岩溶塌陷三个等级,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 3 分、2 分、1 分。桂林市主城区、临桂新区、庙岭镇、雁山镇、朝阳乡等地已有塌陷发育密度大于  $2\text{ 个}/10\text{ km}^2$ ;定江镇、大河乡、二塘乡、临桂新区岩口村、雁山镇三立村等地已有塌陷发育密度  $0\sim2\text{ 个}/10\text{ km}^2$ ;研究区西部拓

村、花村、江西村等地无塌陷发育。得出已有塌陷密度分区图。

#### 2.2.9 人类工程活动

桂林市人类工程活动可分为强烈、中等、弱三个级别,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 3 分、2 分、1 分。桂林市主城区、临桂新区、定江镇、庙岭镇、雁山镇、大厦村及雁山头一带为工程活动强区,该区为已建、正在建设或将要建设区,区内地势平坦,地下水埋深较浅,工程活动主要为楼房及道路基础建设,伴有桩基施工及抽排地下水活动,地下水位降低以及桩基施工的振动作用对岩溶塌陷影响程度强;拓木镇、朝阳乡、临桂横山村一田基头、二塘乡、枫林村一罗安村一带人类工程活动中等,该区主要为农业生产区,区内多以村为单位集中抽排地下水进行农业灌溉,地下水开采往往具有季节性强、集中、量大的特点,短期内地下水开采强度较高,对岩溶塌陷影响程度中等;中部侯山、金山、西北部刀冲一拓村,南东部大山头一兴隆村一带人类工程活动弱对岩溶塌陷影响程度弱。最终得出研究区内人类工程活动影响分区图。

#### 2.3 评价因素权重计算和分级赋值

##### 2.3.1 利用层次分析法建立岩溶塌陷易发性分区评价层次结构模型

以岩溶塌陷易发性分区为目标层( $U$ 层),以将基岩( $F_1$ )、土层( $F_2$ )、地下水( $F_3$ )、已有塌陷( $F_4$ )和人类工程活动( $F_5$ )这 5 个一级指标为准则层( $F$ 层),以岩溶发育程度、土层厚度、土层结构、第四系底部土层岩性、第四系底部土层液性指数、地下水年变化幅度、岩溶水承压性、塌陷密度和人类工程活动这 9 个二级影响因素为方案层( $X$ 层);一级因子依次记为  $F_1\sim F_5$ ,二级因子依次记为  $X_1\sim X_9$ ,建立层次结构模型。

##### 2.3.2 构建判别矩阵及层次总排序

通过对岩溶塌陷易发性因素的分析,利用层次分析 1~9 标度法(表 1)表示因素之间的影响强弱,逐项就各层中的因子对上一层目标的相对重要性进行两两比较,构造判别矩阵,同时参考专家意见,确定它们的相对重要性并赋以相应的分值,构造判断矩阵。再计算最大特征根、对应的特征向量、各层次单排序以及进行判断矩阵一致性检验,其计算结果见表 1~表 4。

##### 2.3.3 岩溶塌陷易发性分区评价因素分级赋值

分区指标量化分级是在易发性分级基础上,通过对研究区各因子影响因素、因子数据统计分析,确定因子强和弱两个极限值,按照各评价因子对研究区影响

表 1 判断矩阵的标度及含义

Table 1 The 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 The partition factors judgment matrix  $U-F$

| $U$   | $F_1$ | $F_2$ | $F_3$ | $F_4$ | $F_5$ | $W_{Gi} (i=2,3,4)$ |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------------|
| $F_1$ | 1     | 5     | 2     | 5     | 4     | 0.46               |
| $F_2$ | 1/5   | 1     | 1/3   | 1     | 1/2   | 0.08               |
| $F_3$ | 1/2   | 3     | 1     | 3     | 2     | 0.24               |
| $F_4$ | 1/5   | 1     | 1/3   | 1     | 1/2   | 0.08               |
| $F_5$ | 1/4   | 2     | 1/2   | 2     | 1     | 0.01               |

注:  $CR=0.002<0.1$ ,显然满足一致性检验,故上述特征向量  $W_i$  可作为权向量。

表 3 分区因子判别矩阵  $F_2-X$

Table 3 The partition factors judgment matrix  $F_2-X$

| $F_2$ | $X_2$ | $X_3$ | $X_4$ | $X_5$ | $W_{Bk} (k=1,2,3,4)$ |
|-------|-------|-------|-------|-------|----------------------|
| $X_2$ | 1     | 2     | 0.5   | 2     | 0.26                 |
| $X_3$ | 1/2   | 1     | 1/3   | 1     | 0.14                 |
| $X_4$ | 2     | 3     | 1     | 3     | 0.45                 |
| $X_5$ | 1/2   | 1     | 1/3   | 1     | 0.14                 |

注:  $CR=0.004<0.1$ ,显然满足一致性检验,故上述特征向量  $W_i$  可作为权向量。

程度,以國限或递减规律取值来实现量化分级,各因子的量化分级详见表 5。

表 5 研究区岩溶塌陷地质灾害易发性分区因子赋值标准及权重分级表

Table 5 Evaluation standard and weight classification table of karst collapse prone factors in the research area

| 一级评价因素        | 一级评价因素权值 | 二级评价因素                             | 二级评价因素权值 | 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        |           |
|               |          |                                    |          | 0            | 1           | 2        | 3          |           |
| $F_1$ :基岩     | 0.458 8  | $X_1$ :岩溶发育程度                      | 0.458 8  | 非岩溶区         | 弱发育         | 中等发育     | 强发育        | 0.458 8   |
|               |          | $X_2$ :土层厚度                        | 0.263    | 基岩裸露区        | >30m        | 15~30m   | <15m       | 0.021 1   |
|               |          | $X_3$ :土层结构                        | 0.141 1  | 基岩裸露区        | 单层结构        | 双层结构     | 多层结构       | 0.011 3   |
| $F_2$ :土层     | 0.080 3  | $X_4$ :第四系土层底部岩性                   | 0.454 7  | 基岩裸露区        | 碎石土、粉质黏土、黏土 | 粉土       | 砂土         | 0.036 5   |
|               |          | $X_5$ :第四系底部土层液性指标                 | 0.141 1  | 基岩裸露区        | 硬塑          | 可塑       | 流塑         | 0.011 3   |
|               |          | $X_6$ :地下水年变化幅度(m/年)               | 0.333 3  | /            | <5m         | 5~10 m   | >10 m      | 0.081 5   |
| $F_3$ :地下水    | 0.244 6  | $X_7$ :岩溶水承压性                      | 0.666 7  | /            | 在基岩面以上波动    | 在基岩面以下波动 | 在基岩面上下反复波动 | 0.163 1   |
|               |          | $X_8$ :塌陷密度(个/10 km <sup>2</sup> ) | 0.080 3  | /            | 0           | 0~2      | >2         | 0.080 3   |
| $F_5$ :人类工程活动 | 0.139 0  | $X_9$ :人类工程活动                      | 0.139 0  | /            | 弱           | 中等       | 强          | 0.139 0   |

表 4 分区因子判别矩阵  $F_3-X$

Table 4 The partition factors judgment matrix  $F_3-X$

| $F_3$ | $X_6$ | $X_7$ | $W_{Gi} (i=2,3,4)$ |
|-------|-------|-------|--------------------|
| $X_6$ | 1     | 1/2   | 0.67               |
| $X_7$ | 2     | 1     | 0.33               |

注:  $CR=0.000<0.1$ ,显然满足一致性检验,故上述特征向量  $W_i$  可作为权向量。

2.3.4 MapGIS 加权叠加及量化分析

利用 MapGIS 空间分析功能,将各因子的分区图按因子的权重进行叠加,得到叠加后研究区的易发性指数,将得到的易发性指数合理分为 4 段,对应不同的易发性程度。其划分标准如下:按岩溶塌陷易发性综合评价得分的高低,进行岩溶塌陷易发性分区。本次采用突变点法进行确定,经过统计分析,叠加后综合值范围为 0~2.423,找出突变点作为易发程度分区界线值,其中  $F<0.2$  为不易发,  $0.2<F\leq 0.87$  为低易发,  $0.87<F\leq 1.47$  为中等易发,  $1.47<F\leq 2.423$  为高易发,由此初步将相应的区域划分为非易发区、低易发定区、中易发区和高易发区 4 个不同等级的分区。

根据 MapGIS 初步分区结果,后结合桂林市规划中心城区地貌及地质等实际情况,按不利因素考虑,对 4 个分区进行修编,得到最终易发程度分区图(图 2),并通过分析该图对研究区作出了岩溶塌陷易发性评价,最后得出桂林市规划中心城区岩溶塌陷易发性分区表(表 6)。

3 结论

(1)桂林规划中心城区的岩溶塌陷易发性分区的地质环境因素细分为 9 个:岩溶发育程度、土层厚度、

表 6 桂林市规划中心城区岩溶塌陷易发性分区表  
Table 6 Evaluation suitability of karst collapse susceptibility in the planning center of Guilin City

| 分区<br>区号        | 分布范围                                  | 岩溶发育<br>程度( $X_1$ ) | 土层厚度/<br>$m(X_2)$                                                                | 土层结构<br>( $X_3$ )                                                                                  | 第四系底部<br>土层岩性( $X_4$ )                                               | 分区说明                             |                                                    |                                       |                                          | 人类工程<br>活动( $X_9$ ) | 面积/<br>$km^2$ | 所占<br>比例/<br>% |
|-----------------|---------------------------------------|---------------------|----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------------|---------------------|---------------|----------------|
|                 |                                       |                     |                                                                                  |                                                                                                    |                                                                      | 第四系<br>底部土层<br>液性<br>指数( $X_5$ ) | 地下水位<br>变化幅度/<br>( $m \cdot a^{-1}$ )<br>( $X_6$ ) | 岩溶水承<br>压性( $X_7$ )                   | 塌陷密度/<br>(个· $10 km^{-2}$ )<br>( $X_8$ ) |                     |               |                |
| I <sub>1</sub>  | 桂林市中心城区、<br>朝阳乡等地                     | 强烈                  | 一般 5 ~ 10 m, 部<br>分地段 15 ~ 30 m,<br>北部矮山塘村、五<br>福村以及桂林市<br>三里店一带覆盖<br>层厚度可达 40 m | 主要为桂平组<br>( $Qhg$ )、白沙组( $Qpb$ )<br>双层结构冲积砂砾石<br>层, 次为临桂组( $Ql$ )<br>单层结构溶余堆积黏<br>土、粉质黏土           | 泥盆系上统东村<br>组( $D_3d$ )、桂林组<br>( $D_3g$ )、融县组<br>( $D_3r$ )灰岩、白云<br>岩 | 呈软一流塑<br>性状                      | < 5                                                | 受人类工程活动<br>影响, 地下水在基<br>岩面上下反复波<br>动层 | 现有塌陷 233 个,<br>塌陷密度 22.4<br>个/ $10 km^2$ | 强烈                  | 约<br>104.16   | 11.84          |
|                 |                                       |                     |                                                                                  |                                                                                                    |                                                                      |                                  |                                                    |                                       |                                          |                     |               |                |
| I <sub>2</sub>  | 临桂新区、沙塘<br>村、盐口村等地                    | 强烈                  | 厚度一般 < 15 m                                                                      | 主要为临桂组( $Ql$ )单<br>层结构溶余堆积黏<br>土、粉质黏土, 次为望<br>高组( $Qpw$ )双层结构<br>含砾黏土                              | 泥盆系上统融县<br>组( $D_3r$ )灰岩                                             | 呈软一流塑<br>性状                      | < 5                                                | 受人类工程活动<br>影响, 地下水在基<br>岩面上下反复波<br>动层 | 现有塌陷 81 个,<br>塌陷密度 16.4<br>个/ $10 km^2$  | 强烈                  | 约<br>49.37    | 5.61           |
|                 |                                       |                     |                                                                                  |                                                                                                    |                                                                      |                                  |                                                    |                                       |                                          |                     |               |                |
| I <sub>3</sub>  | 拓木镇东部龙<br>门村、六坊村等<br>地                | 强烈                  | 厚度一般 0 ~ 30 m                                                                    | 主要为桂平组<br>( $Qhg$ )、望高组<br>( $Qpw$ )双层结构冲积<br>砂砾石层、含砾黏土<br>层, 次为临桂组( $Ql$ )<br>单层结构溶余堆积黏<br>土、粉质黏土 | 泥盆系上统融县<br>组( $D_3r$ )灰岩                                             | 呈软一流塑<br>性状                      | < 5                                                | 受人类工程活动<br>影响, 地下水在基<br>岩面上下反复波<br>动层 | 现有塌陷 21 个,<br>塌陷密度 9.9 个/<br>$10 km^2$   | 强烈                  | 约<br>21.12    | 2.40           |
|                 |                                       |                     |                                                                                  |                                                                                                    |                                                                      |                                  |                                                    |                                       |                                          |                     |               |                |
| I <sub>4</sub>  | 定江镇西部宝<br>路村、栗家村等<br>地                | 强烈                  | 厚度一般 < 15 m                                                                      | 主要为临桂组( $Ql$ )及<br>残坡积层( $Q^{cl}$ )单层<br>结构溶余堆积黏土、<br>粉质黏土                                         | 泥盆系上统融县<br>组( $D_3r$ )灰岩                                             | 呈软一流塑<br>性状                      | < 5                                                | 受人类工程活动<br>影响, 地下水在基<br>岩面上下反复波<br>动层 | 现有塌陷 0 个, 塌<br>陷密度 0 个/<br>$10 km^2$     | 强烈                  | 约<br>8.74     | 0.99           |
|                 |                                       |                     |                                                                                  |                                                                                                    |                                                                      |                                  |                                                    |                                       |                                          |                     |               |                |
| II <sub>1</sub> | 临桂县庙岭镇<br>西部莲花村、塔<br>山村、横山村、<br>田基头等地 | 强—<br>中等            | 厚度一般 < 15 m                                                                      | 主要为临桂组( $Ql$ )单<br>层结构溶余堆积黏<br>土、粉质黏土, 次为桂<br>平组( $Qhg$ )、望高组<br>( $Qpw$ )双层结构冲积<br>砂砾石层、含砾黏土      | 泥盆系上统融县<br>组( $D_3r$ )灰岩                                             | 呈软一流塑<br>性状                      | < 5                                                | 多在基岩面以上<br>波动                         | 现有塌陷 37 个,<br>塌陷密度 5.3 个/<br>$10 km^2$   | 中等                  | 约<br>70.44    | 8.00           |
|                 |                                       |                     |                                                                                  |                                                                                                    |                                                                      |                                  |                                                    |                                       |                                          |                     |               |                |

高  
易  
发  
区  
I

中  
易  
发  
区  
II



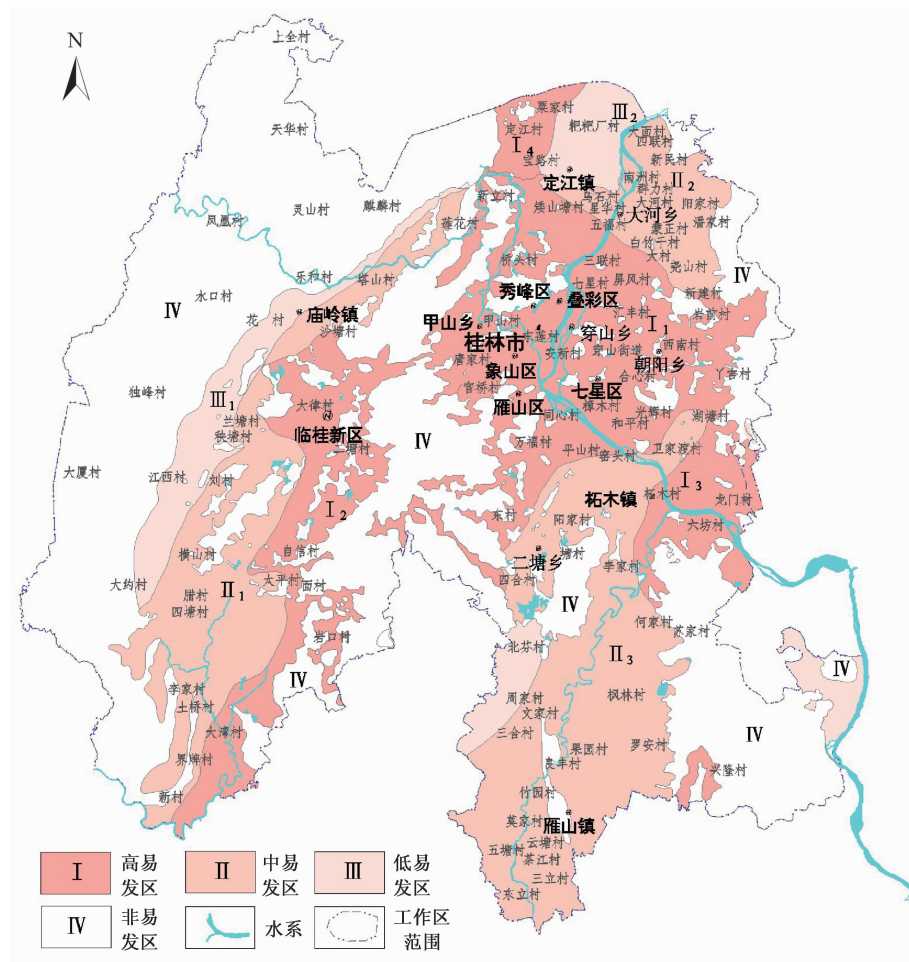


图 2 桂林市规划中心城区岩溶塌陷易发性评价图

Fig. 2 Evaluation map of karst collapse susceptibility in the planning center of Guilin city

土层结构、第四系底部土层岩性、第四系底部土层液性指数、地下水年变化幅度、岩溶水承压性、塌陷密度、人类工程活动。

(2) 依据预测分区指标计算,将研究区岩溶塌陷易发分区分为高易发区(I)、中易发区(II)、低易发区(III)、非易发区(IV)四种类型,计算研究区的面积为 880.00 km<sup>2</sup>,其中高易发区(I)的面积为 183.39 km<sup>2</sup>;中易发区(II)的面积为 207.55 km<sup>2</sup>;低易发区(III)的面积为 41.53 km<sup>2</sup>;非易发区(IV)的面积为 447.53 km<sup>2</sup>。

#### 参考文献:

- [1] 雷明堂,项式钧. 近 20 年来中国岩溶塌陷研究回顾[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1997, 8(增刊 1): 9-13.
- LEI Mingtang, XIANG Shijun. Review on the research of karst collapse in China in the past 20 years [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and

Control, 1997, 8(S1): 9-13.

- [2] 雷明堂,蒋小珍,李瑜. 岩溶塌陷综合预测评价的理论与方法[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1997, 8(增刊 1): 38-42.

LEI Mingtang, JIANG Xiaozhen, LI Yu. The theory and method of comprehensive evaluation of karst collapse prediction [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1997, 8(S1): 38-42.

- [3] 李公岩,周绍智,万继涛,等. 山东省枣庄盆地岩溶塌陷形成条件及易发区划分方法探讨[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2003, 12(14): 49-53.

LI Gongyan, ZHOU Shaozhi, WANG Jitao, et al. Discussion on formation condition and method of zoning susceptible regions of karst collapse in Zaozhuang Basin, Shandong Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2003, 12(14): 49-53.

- [4] 刘善军. 隐伏岩溶区岩溶塌陷易发程度评价——以

- 泰安为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2004, 15(3): 87-90.
- LIU Shanjun, Evaluation on the karst collapse susceptible degree in covered karst region; Example for Tai'an City [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2004, 15(3): 87-90.
- [5] 焦玉国, 陈伟清, 程凤. 山东泰安市岩溶塌陷易发性评估与防治对策[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2014, 25(3): 38-43.
- JIAO Yuguo, CHEN Weiqing, CHENG Feng. Risk assessment and governance countermeasures for karst collapse in Shandong Tai'an City [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2014, 25(3): 38-43.
- [6] 曾斌, 杨木易, 邵长杰, 等. 基于层次分析法的杭长高速岩溶塌陷易发性评价[J]. 安全与环境工程, 2018, 25(1): 29-38.
- ZENG Bin, YANG Muyi, SHAO Changjie, et al, Susceptibility assessment of karst collapse of Hangchang Expressway projects based on analytic hierarchy process [J]. Safety and Environmental Engineering, 2018, 25(1): 29-38.
- [7] 金艳珠, 谈树成, 虎雄岗, 等. 基于层次分析法与GIS相结合的岩溶塌陷地质灾害易发性分区评估——以云南省师宗县为例[J]. 热带地理, 2012, 32(3): 173-178.
- JIN Yanzhu, TAN Shucheng, HU Xionggang, et al. GeoHazard susceptibility zoning evaluation of karst collapse based on the combination of AHP and GIS: A case study of Shizong, Yunnan [J]. Tropical Geography, 2012, 32(3): 173-178.
- [8] 武鑫, 黄敬军, 缪世贤. 基于层次分析-模糊综合评价法的徐州市岩溶塌陷易发性评价[J]. 中国岩溶, 2017, 36(12): 836-841.
- WU Xin, HUANG Jingjun, MIAO Shixian, et al. Susceptibility zoning and mapping of karst collapse in Xuzhou using analytic hierarchy process-fuzzy comprehensive evaluation method [J]. Crasologica Sinica, 2017, 36(12): 836-841.
- [9] 黄立勇. 江山市岩溶塌陷机理及易发性模拟预测研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2015.
- HUANG Liyong. Research on the simulation prediction and mechanism of karst collapse in Jiangshan [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2015.
- [10] 陈元旭, 马国雄. 地质调查科技成果转化研究[J]. 中国矿业, 2017, 10(增刊26): 59-64.
- CHEN Yuanxu, MA Guoxiong. Research on the transformation of scientific and technological achievements of geological survey [J]. China Mining Magazine, 2017, 10(S26): 59-64.
- [11] 蔡鹤生, 周爱国, 唐朝晖. 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, 1998, 23(3): 299-302.
- CHAI Hesheng, ZHOU Aiguo, TANG Chaohui. The experts in evaluation for geological environment analytical hierarchy process [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 1998, 23(3): 299-302.

## 敬告作者和读者

为适应我国科技信息化建设的需要,扩大作者、读者学术交流渠道,本刊已加入《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》及《中文科技期刊数据库》。今后,本刊将作者著作权使用费与本刊稿酬一次性付给。如果作者不同意将文章编入上述数据库,请在投稿时声明,本刊将作适当处理。谢谢!

《中国地质灾害与防治学报》编辑部