

张杰,毕攀,魏爱华,等.基于模糊综合法的烟台市栖霞中桥岩溶塌陷易发性评价[J].中国岩溶,2021,40(2):215-220.
DOI:10.11932/karst2021y07

基于模糊综合法的烟台市栖霞中桥岩溶塌陷易发性评价

张杰¹,毕攀^{2,3},魏爱华^{2,3},陶志斌¹,朱慧超¹

(1. 山东省第三地质矿产勘查院, 山东 烟台 264000; 2. 河北地质大学水资源与环境学院, 河北 石家庄 050031; 3. 河北省水资源可持续利用与开发重点实验室, 河北 石家庄 050031)

摘要:在分析烟台市栖霞中桥区地质条件及岩溶塌陷产生条件的基础上,选择岩溶发育条件、构造条件、覆盖层条件、水文条件和人类活动条件共5个因子,构建层次型指标体系。同时为增加评价结果的客观性和准确性,选择采用模糊数学法构建各指标的隶属函数,并借助 ArcGIS 软件,最终实现对研究区岩溶塌陷灾害的易发性评价。分区评价结果表明:已发生岩溶塌陷点分布在岩溶塌陷的极易发生区和易发生区,说明本次评价分区具有合理性;对岩溶塌陷灾害极易发区和易发区应严格控制地下水的开采,以防止岩溶塌陷灾害的发生。

关键词:岩溶塌陷;指标体系;模糊数学法;易发性分区

中图分类号:P642.25 **文献标识码:**A

文章编号:1001-4810(2021)02-0215-06 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



0 引言

岩溶塌陷是岩溶地区主要的地质灾害类型之一^[1-2]。岩溶地面塌陷的形成受多种因素的影响,而各因素间又具有明显的相关性和归类性,从而产生的塌陷无论是从时间上,还是空间上都具有很大的不确定性^[3-6]。因此,对岩溶塌陷灾害进行易发性评价对防灾减灾工作具有重要的实际意义。

岩溶塌陷易发性评价主要是综合评价影响岩溶塌陷的各因素对灾害发生可能性的大小,从评价方法上主要有定性评价与定量评价两种^[7-8]。由于影响塌陷灾害的因素十分复杂,岩溶塌陷研究初期主要是以定性分析为主,但定性评价不能全面地反映多因素对塌陷的共同作用。随着地理信息系统在地质灾害方面的广泛应用,为岩溶塌陷的定量评估预测提供了条件^[9-10]。当前,很多学者已选用了多种评价

方法应用到地质灾害易发性评价工作中,如采用模糊数学理论、人工神经网络法、突变理论、信息量法及判别分析理论等,通过建立对应的评价模型,实现了对多种地质灾害易发程度的量化评价^[11-15]。而在岩溶塌陷易发性评价方面,层次分析法是应用最广泛的一种方法,但这种方法在构建判断矩阵的过程中容易受到人为主观因素的影响^[16]。而模糊数学法可有效地避免人为主观判断,大大地提高了计算结果的客观性^[4,17]。同时,GIS技术在地质灾害方面的应用也减小了人为因素在数据处理方面的干扰,使定量评价的结果更客观。

本文在前人工作成果基础上,分析了烟台市栖霞中桥区岩溶塌陷灾害发育的地质条件及其塌陷灾害点的特征,探讨了中桥区岩溶塌陷灾害的发育机理和致塌因素,借助 ArcGIS 软件采用层次分析和模糊数学评价法对研究区进行了岩溶塌陷易发性评价

资助项目:山东省地下水水源地调查评价(胶东半岛东部),鲁地环(2016)09号;山东省岩溶发育区地质环境调查(胶东半岛段),鲁地环(2018)06号

第一作者简介:张杰(1983—),男,高级工程师,本科生,水文地质与工程地质。E-mail:kcyzhangjie@126.com。

通信作者:魏爱华(1984—),女,副教授,博士研究生,地质工程专业。E-mail:aihuawei411@163.com

收稿日期:2020-01-20

分区。本次评价的结果可为烟台市建设规划,防灾减灾等工作提供参考。

1 研究区概况

研究区位于烟台市栖霞中桥区,西起大台,东至高疃镇西侧,北起东石棚,南到京甲村。地形总体上呈南北高中间低,西高东低,中部为冲积河谷,南北两侧为剥蚀丘陵,山坡部分岩石裸露。研究区内断裂构造较发育,主要有北部中桥—臧家庄盆地北部边缘的吴阳泉断裂、中部被吴阳泉断裂切割的NE向断裂、北部NNE向断裂等。

研究区内第四系松散层主要沿河床及沟谷分布,成因类型有残坡积、坡洪积、冲洪积、冲积等。岩性主要为砾、碎石、砂及黏土组成,根据钻孔和剖面资料可知,区内松散层主要是粉质黏土和砂砾石互层的多元结构,厚度多为5~46 m,大部分地区小于15 m,水道观东南—泗水西—白洋河上游一带及燕地河流域西岸附近区域厚度在15~25 m,中桥西南—泗

水东南一带以及白洋河上游西南一带厚度大于25 m。

根据地下水赋存特征及含水层性质,研究区范围内主要分布第四系松散岩类孔隙含水岩组、碳酸盐岩类岩溶裂隙含水岩组、碎屑岩类孔隙裂隙含水岩组、基岩裂隙含水岩组。区内地下水的径流主要受地形、地貌和构造条件的控制,局部受人工开采尤其是矿山开采活动的影响。区内地下水总体流向与地形坡向基本一致,在白洋河北部地下水由北向南径流,白洋河南部为由南向北径流,两者径流至白洋河河谷后由西向东径流。由于近年来受人工开采及矿山开采疏干排水影响,在中桥村东北部及东部形成了两个地下水降落漏斗。

根据岩溶地层的埋藏条件,研究区可划分为裸露型、覆盖型和埋藏型三种类型岩溶区(图1)。自2005年以来,区内地下水开采强度增加,尤其是区内水泥厂开采活动,导致地下水水位下降明显,岩溶地面塌陷也不断发生。截止到2017年底,区内共计发

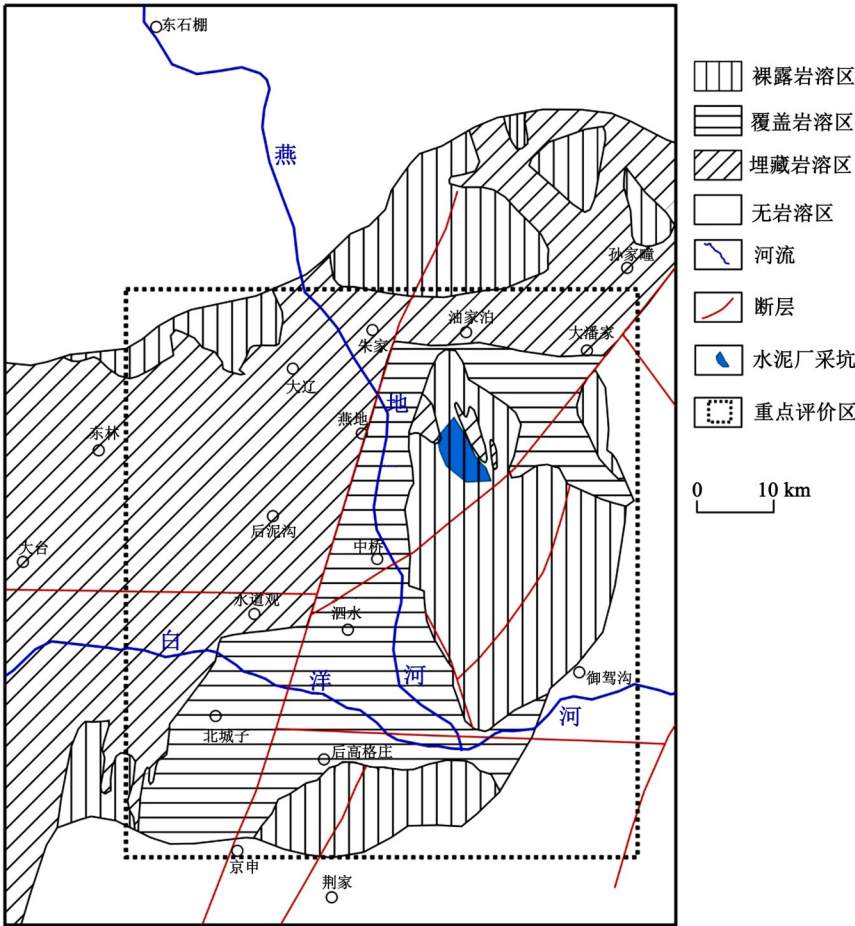


Fig. 1 Map showing general situation of the study area

生岩溶塌陷 14 次 12 处(其中两处为重复塌陷),已发生塌陷点全部分布于覆盖型岩溶区(图 2)。因此,地下水开采活动的加剧是导致该区岩溶塌陷灾害发生的一个重要因素。

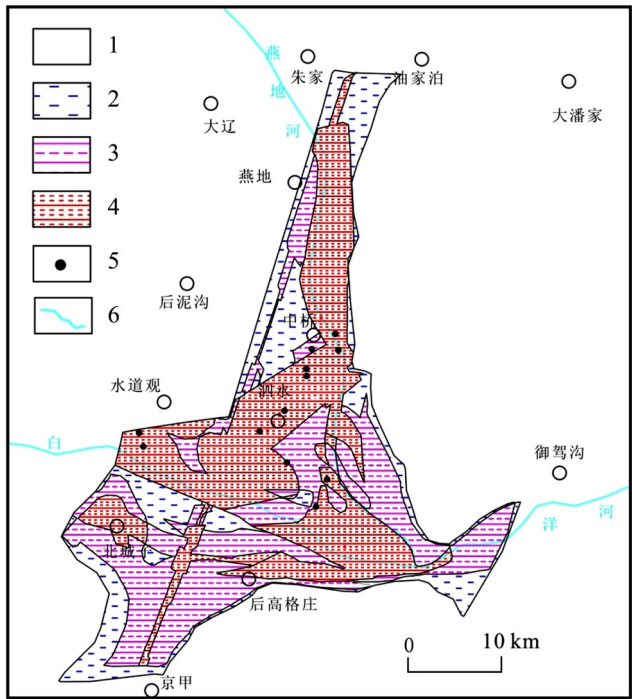


图 2 重点区岩溶塌陷易发性等级分区图

Fig. 2 Rank zoning of karst collapse susceptibility in focused areas
1-不易发区 2-较易发区 3-易发区 4-极易发区 5-塌陷点 6-河流

2 岩溶塌陷易发性评价模型

为进一步细化评价结果的精度,结合研究区实

际岩溶塌陷发生条件及已发生塌陷点的分布特征,本次评价对重点评价区展开详细工作(图 1)。

2.1 评价指标体系的构建

通过对岩溶塌陷灾害成因条件和机理的分析,从岩溶发育、构造、覆盖层、水文和人类活动条件共 5 个方面建立具有三层次结构的岩溶塌陷易发程度评价模型。其中目标层(A)为岩溶塌陷易发性评价,准则层(B)包括:岩溶发育、构造、覆盖层、水文和人类活动条件共 5 个一级指标,而对应的指标层(C)又对应 7 个二级指标,详见表 1。

2.2 确定评判集

岩溶塌陷易发性评价是对评价对象的所有评价结果的集合,记为 V。本次对岩溶塌陷易发性分区的评价结果采用四级评判标准,具体分级情况见式(1)。评价指标体系中对应的各等级的指标详细划分标准见表 1。

$$V=\{V_1,V_2,V_3,V_4\}$$
 (1)

式中:V₁为岩溶塌陷极易发区Ⅳ,V₂为岩溶塌陷易发区Ⅲ,V₃为岩溶塌陷较易发区Ⅱ,V₄为岩溶塌陷不易发区Ⅰ。

2.3 权重的确定

根据所建评价指标体系中各指标对岩溶塌陷易发性的影响程度,首先分别对准则层和指标层各分层指标进行两两对比,构建对应的判断矩阵,判断矩阵指标通过 T L Satty 提出的 1~9 比例标度法确定,然后依据建立的判断矩阵,采用方根法确定各层指

表 1 岩溶塌陷易发性评判因子划分表

Table 1 Classification of assessment factors for karst collapse susceptibility

目标层 (A)	准则层(B)	指标层(C)	易发性等级			
			极易发区Ⅳ(6)	易发区Ⅲ(4)	较易发区Ⅱ(2)	不易发区Ⅰ(1)
岩溶塌 陷易发 性评价 A	岩溶发育条 件(B ₁)	岩溶发育程度(C ₁)	发育	中等	不发育	非碳酸岩区
	构造条件(B ₂)	与断裂构造距离(C ₂)	<50 m	50~200 m	200~500 m	>500 m
	覆盖层条件 (B ₃)	覆盖层结构(C ₃)	多层结构	双层结构	单层结构	裸露区
		覆盖层厚度(C ₄)	<15 m	15~25 m	25~35 m	>35 m
	水文条件(B ₄)	地下水位与基岩 面的关系(C ₅)	地下水水位经常在 灰岩面附近波动	地下水水位在灰岩 面以上波动	地下水水位在灰岩 面以下波动	---
		距离地表水体的 距离(C ₆)	<100 m	100~200 m	200~500 m	>500 m
	人类活动条 件(B ₅)	人类抽排水强度(C ₇)	很强	强	中等	弱

标判断矩阵的最大特征值和对应的特征向量。最后通过对特征向量进行均一化处理,获得本层次因子相对于上一层中对应因素的权重^[1,4,7]。

为保证所求权重分配的合理性,还需要对判定结果进行一致性检验。本次检验采用 CI 和 CR 两个指标,具体计算见式(2)与(3)。

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (n > 1) \quad (2)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (3)$$

在式(2)和(3)中:CI 为判断矩阵的一致性指标, n 为矩阵的阶数,CR 为判断矩阵的随机一致性比率,

RI 为判断矩阵的平均随机一致性指标(可查表获得)。当 $CR \leq 0.10$ 时,说明构造的判断矩阵有较好一致性,计算结果可接受,反之,则需重新构建判断矩阵。根据本次构建的评价指标体系,在进行一致性判断时,只需对准则层 B 中 5 个因子对目标层 A(记为 A-B)构建的判断矩阵进行一致性检验,而指标层 C 对准则层 B(统记为 B-C)各判断矩阵自动满足。

通过对构造的 A-B 判断矩阵进行计算,求得 $CR = 0.02 < 0.1$ 符合一致性检验。因此,根据构造的 A-B 与 B-C 判断矩阵计算,可求出对应的权重 w_1 与 w_2 ,计算结果见表 2。

表 2 评价因子权重分配表

Table 2 Weights of assessment factors

目标层	准则层对目标层权重 w_1	指标层对准则层权重 w_2	指标层对目标层权重 w
岩溶塌陷易发性 评价 A	岩溶发育条件(0.044 1)	岩溶发育程度(1)	0.044 1
	构造条件(0.130 2)	与断裂构造距离(1)	0.130 2
	覆盖层条件(0.451 9)	覆盖层结构(0.666 7)	0.301 3
		覆盖层厚度(0.333 3)	0.150 6
	水文条件(0.302 3)	地下水位与基岩面的垂直距离(0.75)	0.226 7
		距地表水体的距离(0.25)	0.075 6
	人类活动条件(0.071 5)	人类抽排水强度(1)	0.071 5

2.4 隶属度函数的确定

隶属度的确定实际上是单个指标的评判问题。依据建立的评价指标体系,考虑到定性指标与定量指标在量化取值方面的差异,分别对定性和定量指标建立隶属函数,以实现隶属度的确定。

定量指标隶属函数的构建参照连续函数的取值特点,选择对应各级别取值范围(区间)值,通过归一化处理后选用半梯形和三角形的组合分布形式作为隶属函数^[8,11]。本次评价体系中的定量评价指标有 C_2 、 C_4 和 C_6 ,其都是指按 I 级至 IV 级评价标准呈现数值减小的趋势,因此可建立如下的隶属函数,具体见式(4)~(7)。

$$\mu_1(x) = \begin{cases} 0 & x \leq s_2 \\ \frac{x - s_2}{a_3 - s_2} & s_2 < x < a_3 \\ 1 & x \geq a_3 \end{cases} \quad (4)$$

$$\mu_2(x) = \begin{cases} 0 & x \leq s_1 \text{ or } x \geq a_3 \\ \frac{x - s_1}{s_2 - s_1} & s_1 < x < s_2 \\ 1 - \mu_1(x) & s_2 \leq x < a_3 \end{cases} \quad (5)$$

$$\mu_3(x) = \begin{cases} 0 & x \leq a_1 \text{ or } x \geq s_1 \\ \frac{x - a_1}{s_1 - a_1} & a_1 < x < s_1 \\ 1 - \mu_2(x) & s_1 \leq x < s_2 \end{cases} \quad (6)$$

$$\mu_4(x) = \begin{cases} 1 & x \leq a_1 \\ 1 - \mu_3(x) & a_1 < x < s_1 \\ 0 & x \geq s_1 \end{cases} \quad (7)$$

(4)~(6)式中: $\mu_i(x)$ 代表对应定量指标对评价集中分级 $V_i(i=1,2,3,4)$ 的隶属度, x 为具体评价单元对应指标的实际值。其中, a_1 、 a_2 和 a_3 为定量指标对应的分级临界值, $s_1=(a_1+a_2)/2$, $s_2=(a_2+a_3)/2$ 。

由于定性指标难以进行连续取值或用数学表达式描述,因此对定性指标(C_1 、 C_3 、 C_5 和 C_7)采用离散取值的方法,其对应的隶属度的确定依据式(8)。

$$\mu_i(x) = \begin{cases} 1 & x = c_i \\ 0 & x \neq c_i \end{cases} \quad (8)$$

上式(8)中 $\mu_i(x)$ 代表评价定性指标对分级 V_i (同上)的隶属度, c_i 为对应的分级 V_i (同上)的定性描述内容, x 为评价单元对应指标的实际情况。

2.5 模糊综合评判

由于评价体系中因子较多,采用分层模糊数学综合评判法进行判断,首先通过对各层计算求得的权重 w_1 和 w_2 实现权重 w 的确定(见表2)。并依据构建的隶属函数,最终确定综合判别指数值(记为 S),其计算公式如(9)与(10)。另外,为了方便剖分网格数目较多时处理数据,将综合专家打分结果(见表1),采用加权平均法(即合成算子选择加权平均型)对 S 进行量化计算。

$$S = W \cdot R \quad (9)$$

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (10)$$

上式(9)和(10)中, $\circ$ 为合成算子, W 为因素权重向量(由 w 组成), R 为判断矩阵, r_{ij} 表示因素 C_i ($i=1,2,3,4,5,6,7$)对评语 V_j ($j=1,2,3,4$)的隶属度, m 为对应因素的个数($m=7$), j 为划分的等级数($j=4$)。

3 易发性评价分区结果

根据研究区实际资料、建立评价指标体系,借助ArcGIS软件首先生成各因子分区图,再依据确定的权重,采用模糊综合评判法对各剖分单元进行计算,最后依据岩溶塌陷易发性分区划分标准实现分区。本次分区采用的模糊综合评判标准为:当判别指数值 $S \geq 3.5$ 时为岩溶塌陷极易发区, $2.5 \leq S < 3.5$ 为易发区, $1.5 \leq S < 2.5$ 为较易发区, $S < 1.5$ 为不易发区。经过计算,重点区岩溶塌陷易发性分区情况见图2。

根据分区结果,从整体上看无灰岩、埋藏和裸露型岩溶分布区为岩溶塌陷不易发区,而岩溶塌陷易发性分区主要发生在覆盖型岩溶分布区。下文主要对岩溶塌陷的较易发区、易发区及极易区的分布情况进行进一步分析。

(1)岩溶塌陷极易发区主要位于燕地—中桥一线的东侧、中桥村—泗水村—水道观村一线及其东南地区、北城子和后高格庄周边的覆盖型岩溶分布区。该区域岩溶发育强烈且断层较多,松散覆盖层的厚度多小于25 m,主要呈多层结构。由于受矿山排水和地下水开采的影响,此区域地下水动力条件变化强烈,因此该分区具备岩溶塌陷灾害发生的条件,极易导致塌陷的产生。在已发生的12处塌陷点中有11处分布在该分区。

(2)岩溶塌陷易发区主要位于中燕地村以南、泗水村东南及北城子村—后高格状村一带的覆盖型岩溶分布区。该区域岩溶发育中等,覆盖层厚度多为20~30 m,在河床及其附近为单层结构,其他区为多层结构。该区距离矿山较远,受矿山排水活动的影响较小,但局部受泗水附近工业和农业用水开采影响。总体上,该分区地下水动力条件有一定变化,但不是十分强烈,在一定条件下易引起岩溶塌陷的产生。已发生塌陷点有1处分布于该区。

(3)岩溶塌陷较易发区主要分布于覆盖型岩溶与埋藏型、裸露型岩溶分布交界附近,以及中桥西部和北城子东北部附近。总体上,该区域岩溶不发育,覆盖层多为厚度大于30 m的单层粉质黏土。区内地下水位变幅相对较小,发生岩溶塌陷的可能性较小。现阶段未在该区发现塌陷点。

4 结论

(1)在分析研究区岩溶塌陷产生条件及分布规律的基础上,应用层次分析法建立了具有三层层次结构的评价模型,综合模糊数学法,借助ArcGIS软件对研究区实现了岩溶塌陷易发性分区评价;

(2)根据评价结果,已发生岩溶塌陷点分布在岩溶塌陷的极易发生区和易发生区,表明建立的评价模型对研究区进行的岩溶塌陷易发性分区结果具有可靠性;

(3)岩溶塌陷极易发生区主要分布于覆盖型岩溶区,其覆盖层结构多呈多层结构,厚度多分布在10~25 m的范围内,断裂构造发育。由于矿山排水和地下水开采,地下水位波动强烈,使该区具备了导致岩溶塌陷产生的条件。为防止岩溶塌陷灾害的产生,应合理开采地下水。

参考文献

- [1] 潘宗源,贾龙,刘宝臣. 基于AHP和ArcGIS技术的岩溶塌陷风险评价:以遵义永乐镇为例[J]. 桂林理工大学学报, 2016, 36(3):464-470.
- [2] 魏永耀,孙树林,黄敬军,等. 徐州岩溶塌陷时空分布规律及成因分析[J]. 中国岩溶, 2015, 34(1): 52-57.
- [3] 王恒恒,张发旺,郭纯青,等. 基于层次分析法的城市岩溶塌陷危险性评价:以武汉市南部为例[J]. 中国岩溶, 2016, 35(6):667-673.
- [4] 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(6): 836-841.
- [5] Perrin J, Cartannaz G, Noury E, et al. A Multi-criteria Ap-

- proach to Karst Subsidence Hazard Mapping Supported by Weights—of—evidence Analysis [J]. *Engineering Geology*, 2015, 197: 296-305.
- [6] 李铎,魏爱华,贾磊,等. 山东福山铜矿岩溶裂隙水充水矿井涌水量预测[J]. *中国岩溶*, 2017, 36(3): 319-326.
- [7] 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.
- [8] 施驰. 贵州省岑巩县地质灾害危险性评价与区划[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2018.
- [9] 雷明堂,蒋小珍,李瑜. 地理信息系统(GIS)在岩溶塌陷评价中的运用[J]. *中国岩溶*, 1994, 13(4): 351-356.
- [10] 钟宇,张明堃,潘玲,等. 基于 GIS 的武汉市武昌区岩溶塌陷危险性评价[J]. *天津师范大学学报(自然科学版)*, 2015, 35(1): 48-53.
- [11] 蒋清明,邓英尔,王朝朝,等. 天磨沟泥石流危险性综合评判及风险性分析[J]. *地质灾害与环境保护*, 2017, 28(4): 7-12.
- [12] 李忠,张耀文,李海君. 改进型 BP—网络的岩溶塌陷预测评价[J]. *辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*, 2013, 32(1): 1-6.
- [13] 姜春露,姜振泉. 基于 Fisher 判别分析法的岩溶塌陷预测[J]. *地球科学与环境*, 2012, 34(1): 91-95.
- [14] 周国清,陈昆华,何素楠,等. 基于逻辑回归模型的来宾市岩溶塌陷敏感性评价[J]. *安全与环境工程*, 2014, 21(6): 36-41.
- [15] Hu R L, Yeung M R, Lee C F, et al. Regional Risk Assessment of Karst Collapse in Tangshan, China [J]. *Environmental Geology*, 2001, 40: 1377-1389.
- [16] Taheri K, Gutierrez F, Mohseni H, et al. Sinkhole Susceptibility Mapping Using the Analytical Hierarchy Process (AHP) and Magnitude—frequency Relationships: A Case Study in Hamadan province, Iran [J]. *Geomorphology*, 2015, 234: 64-79.
- [17] 贺怀振,魏永耀,黄敬军. 基于模糊综合评判模型的徐州地铁沿线岩溶塌陷稳定性评价[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2017, 28(3): 66-72.

Assessment of susceptibility to karst collapse in the Qixia Zhongqiao district of Yantai based on fuzzy comprehensive method

ZHANG Jie¹, BI Pan^{2,3}, WEI Aihua^{2,3}, TAO Zhibing¹, ZHU Huichao¹

(1. The Third Exploration institute of Geology and Mineral Resources of Shandong Province, Yantai, Shandong 264000, China; 2. School of Water Resources and Environment, Hebei GEO University, Shijiazhuang, Hebei 050031, China; 3. Hebei Province Key Laboratory of Sustained Utilization and Development of Water Resources, Shijiazhuang, Hebei 050031, China)

Abstract This work builds on investigations of geology and the conditions of karst collapse of the Qixia Zhongqiao District of Yantai. A hierarchical index system is established using 5 evaluation factors including karst development, structure, overburden bed, hydrogeology and human activities. In order to improve objectivity and accuracy of the evaluation, the memberships functions of every index are constructed to calculate the weight of the evaluation factors using fuzzy mathematical theory. In terms of ArcGIS, assessment of karst collapse susceptibility in the study area is achieved. The results show that all of existing collapses are located in the areas extremely susceptible and susceptible to karst collapse, indicating that the assessment is reasonable. To control the possibility of karst collapse in these areas, it is necessary to strictly control the exploitation of groundwater.

Key words karst collapse; index system; fuzzy mathematical method; susceptibility assessment

(编辑 张玲)