

吴亚楠,王延岭,周绍智,等.基于综合指数法的泰莱盆地岩溶塌陷风险性评价[J].中国岩溶,2020,39(3):391-399.
DOI:10.11932/karst20200307

基于综合指数法的泰莱盆地岩溶塌陷 风险性评价

吴亚楠^{1,2},王延岭^{1,2},周绍智^{1,2},唐丽伟^{1,2},焦玉国^{1,2}

(1. 山东省第五地质矿产勘查院, 山东 泰安 271000; 2. 山东省地矿局岩溶塌陷防治重点实验室, 山东 泰安 271000)

摘要:泰莱盆地岩溶地面塌陷始发于20世纪60年代,至今岩溶塌陷地质灾害仍不断发生,造成了日趋严重的经济损失和社会影响。本文将泰莱盆地作为整体研究对象,在对工作区地质环境条件进行充分分析的基础上,选取了包括岩溶塌陷影响因子及能反应社会影响的易损因子(包括灾损敏感因子和抗损强度因子)在内的共计12项指标作为岩溶塌陷评价要素,建立了研究区风险性评价体系;然后,利用层次分析法(AHP)计算各评价要素的权重,结合已有资料绘制各指标分级图并分别赋值;最后,利用MAPGIS软件叠加计算风险性指标,依据风险性分级标准进行研究区岩溶塌陷风险性评价分级区划。结果表明:高风险区主要分布在泰安市城区火车站、訾家灌庄、东羊娄—旧县一带;莱芜市大王庄镇孤山—后枯河及铁矿区孟公清、泉河一带,这些区域多位于水源地周边或矿山企业排水区,高强度的抽排地下水是岩溶塌陷发生的最主要的致塌因素。

关键词:岩溶塌陷;风险性评价;综合指数法;泰莱盆地

中图分类号:P642.25 文献标识码:A

文章编号:1001-4810(2020)03-0391-09 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

岩溶塌陷是指岩溶洞隙上方的岩、土体在自然或人为因素作用下引起变形破坏,并在地面形成塌陷坑(洞)的一种岩溶动力地质作用,包括基岩塌陷和地面塌陷两大类,本文所指的是后者。岩溶地面塌陷是指在岩溶发育区,上覆土体在人为或自然因素作用下突然发生坍塌的现象,其成因复杂,影响因素众多,且具有隐蔽性、突发性的特点^[1-4]。自20世纪50年代起,国内外相继开展了岩溶塌陷的研究,其研究进程可分为三个阶段:零散研究阶段(80年代以前)、区域研究阶段(80年代)、综合防治阶段(90年代以后)^[1-7],在岩溶塌陷的分布规律、成因类型、成因机

理及影响因素等方面研究成果丰富,为各地开展地质灾害防治提供了重要的基础资料和决策依据。

泰莱盆地是山东省岩溶塌陷地质灾害较为严重的区域之一,自20世纪60年代至今岩溶塌陷地质灾害不断发生,造成了日趋严重的经济损失和社会影响^[6]。许多专家、学者及工程技术人员对区内的典型塌陷点或塌陷区进行了研究与探讨。王淑彦^[8]针对津浦铁路泰安段路基塌陷,从覆盖层特征、孔隙水—岩溶水水力联系角度研究了塌陷发生发育的条件及机理;高宗军等^[9-10]从地下水动态与地质环境监测结果角度,讨论了泰安岩溶塌陷的成因机理,同时建立塌陷水岩耦合模型;王滨等^[11]结合泰安东羊娄塌陷的实例,从力学机制角度分析塌陷成因;焦玉国等^[12]

基金项目:山东省地矿局水工环项目(鲁地字2016[93]号);山东省地矿局科技创新项目(鲁地字2019[34]号)

第一作者简介:吴亚楠(1987—),女,工程师,硕士研究生,从事水环地质工作。E-mail:59097677@qq.com。

通信作者:焦玉国(1980—),男,高级工程师,从事水环地质工作。E-mail:sddkwy@163.com。

收稿日期:2019-05-13

的岩溶塌陷 103 处,166 次。塌陷主要分布在以下几个区域:①泰安市城区—旧县水源地一带;②莱芜铁矿区孟公清—西泉河一带;③莱芜市大王庄镇孤山—

寨里镇枯河一带;④泰安市徂徕镇桥沟、边家庄,莱芜市鹏山水源地、清泥沟水源地也有零星分布^[14-16](图 2)。

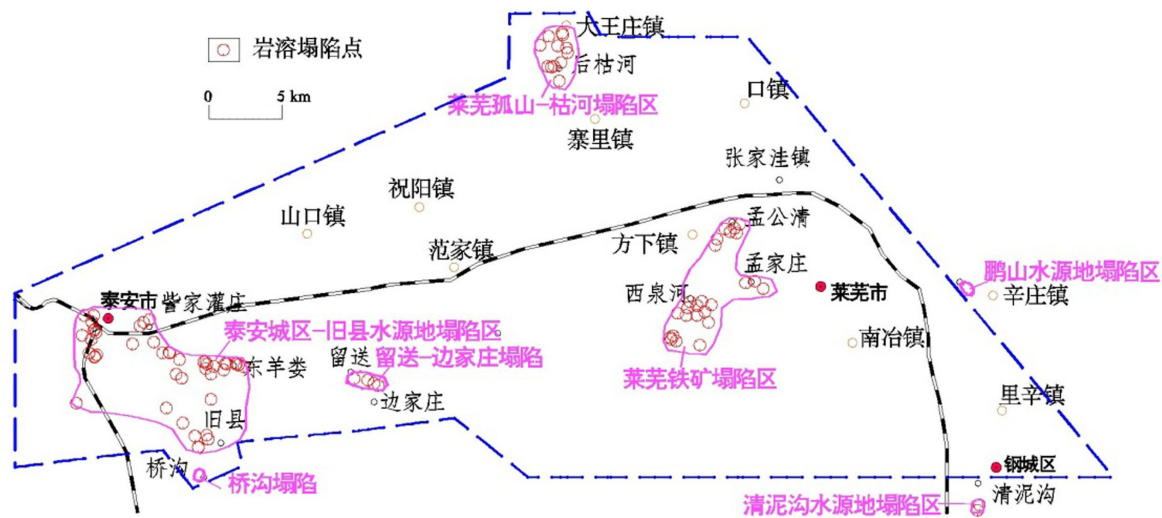


图 2 泰莱盆地岩溶地面塌陷点分布图

Fig. 2 Distribution of karst collapses in the Tailai basin

2 岩溶塌陷影响因素简述

2.1 岩溶及构造发育强度

碳酸盐岩类岩层的可溶性使得在岩土界面附近经常出现溶洞、溶隙等开口岩溶形态,这是塌陷产生的前提。研究区内寒武系、奥陶系灰岩岩溶裂隙发育,尤其是断裂带附近岩石破碎、裂隙发育,地下水与岩石密切接触,溶蚀作用强烈,同时也为岩溶塌陷的形成创造了物质运移空间。调查结果显示,已有塌陷点多发生在岩溶发育的断裂带及其影响带和褶皱发育区^[16]。

2.2 覆盖层特征

覆盖层是岩溶塌陷形成的物质基础。盆地内大部分被第四纪松散堆积物覆盖,在地下水位强烈波动时极易被冲刷、掏蚀、破坏,形成塌陷。统计显示,多元结构(黏性土与砂类土互层)的覆盖层最易发生塌陷;其次为二元结构(上部黏性土,底部砂类土)的覆盖层;一元结构(粉质黏土为主)最不易塌陷^[15-16]。

2.3 岩溶地下水动力条件

地下水动力条件是诱发岩溶塌陷的最主要动力条件,是塌陷形成的关键。据统计,泰莱盆地内已发

生的塌陷,均位于岩溶水供水水源地周围及工矿企业排水区。高强度地抽排地下水加快了地下水径流速度,增强了地下水的冲蚀携带能力,同时也增大了孔隙水或地表水对岩溶水的垂直补给强度,增强了潜蚀作用^[16-18]。

另外高强度地抽排地下水,使得岩溶地下水位波动剧烈,对覆盖层破坏力增大。据统计,有 47% 的塌陷发生在岩溶地下水位在基岩面附近波动时,30% 的塌陷发生在岩溶水位持续波动在灰岩顶板以下 30 m 以下,17% 的塌陷发生在岩溶水位位于灰岩顶板以下 10~30 m,仅有 6% 的塌陷发生时岩溶水位位于灰岩顶板之上^[13-16,18]。

3 岩溶塌陷风险性评价

岩溶塌陷的风险性评价是对塌陷区受到危害的可能性和危害程度进行评价,包括易发性评价和易损性评价两个方面^[19-21]。

3.1 评价指标体系

3.1.1 评价指标的选取

(1)易发性评价指标指的是在对工作区地质环

境条件进行充分分析的基础上,选取岩溶发育程度(K)、覆盖层特征(Q)和岩溶地下水动力条件(W)3项一级因子,然后对各一级因子进行细化、筛选,最终选取基岩岩性(Ti)、地质构造(Fd)、土层结构(Qs)、土层厚度(Qh)、地下水年变幅(Wv)、地下水位与基岩面的关系(Wr)、地下水开采模数(Ww)等7项二级指标因子作为本次评价工作的参评因子。

(2)易损性评价指标选取的易损性评价因子包括灾损敏感因子和抗损强度因子两类。根据工作区人口分布、经济发展以及防灾管理水平等方面的差异,选取人口密度(Lp)、经济密度(Le)两项指标作为灾损敏感因子,选取防灾减灾管理水平(Rf)、防灾减灾技术水平(Rt)、建筑物抗损性能(Rd)三项指标作为抗损强度因子,共计5项指标作为岩溶塌陷易损性评价因子。

3.1.2 评价模型

工作区岩溶塌陷风险性评价采用综合指数法,计算模型采用一元多项式,模型综合考虑各影响因素的重要性,根据影响因子的重要程度赋予不同的权值,模型为:

$$F = PA_i + HA_j$$

$$P = \sum_{i=1}^n X_i C_i$$

$$H = \sum_{j=1}^n X_j C_j$$

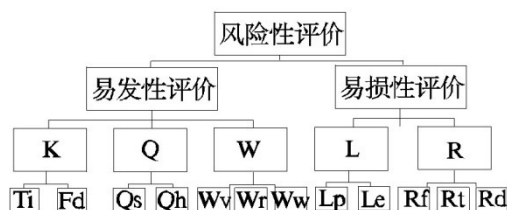


图3 岩溶塌陷风险性评价结构图

Fig. 3 Structure chart of karst collapse risk assessment

式中, F 为风险性评价综合指数; P 为易发性评价综合指数; H 为易损性评价综合指数; A_i 、 A_j 分别为风险性综合评价易发性、易损性指标权重; X_i 、 C_i 分别为易发性因子取值及权重; X_j 、 C_j 分别为易损性影响因子权重。

3.1.3 评价指标权重的确定

本项目采用层次分析法(AHP)来确定影响权重。根据塌陷发育的规律,以及对塌陷影响的重要性,将各层次中的因素两两对比,构建判断矩阵,最终计算得各指标权重(表1)。

表1 评价指标的权重

Table 1 Weights of assessment indexes

R层	A层	B层	C层	A相对R	B相对A	C相对R
风险性评价	易发性评价	K	Ti	0.40	0.20	0.246 2
			Fd			0.153 8
		Q	Qs	0.70	0.20	0.133 3
			Qh			0.066 7
			Wv			0.08
	易损性评价	W	Wr	0.40	0.50	0.16
			Ww			0.16
			Lp			0.30
		L	Le			0.20
			Rf	0.30	0.50	0.115 4
		R	Rt			0.192 3
			Rd			0.192 3

3.2 评价范围

从岩溶塌陷产生的先决条件出发,非岩溶区、裸露型岩溶区及古近系厚度大于30 m的覆盖型岩溶区不作为评价范围,实际评价面积为236.76 km²(图4)。

3.3 单指标评价分区

运用GIS技术,对包括地面调查、钻探、物探等不同来源数据进行综合处理,生成单指标专题图。然后根据岩溶塌陷的研究成果及已知岩溶塌陷点的分布,将各专题图进行定量化打分分类,最大值是7,最小值是1,分级标准见表2,各指标分区见图5。

3.4 易发性评价结果

利用MAPGIS的模型计算功能,将易发性指标进行叠加计算,根据所得易发性指数P值来判断易发性等级,划分标准见表3(依据经验值确定分级标准)。

评价区划分为岩溶塌陷易发性高区、中等和低区(图6)。

易发性高区总面积为33.90 km²。其中,泰安地

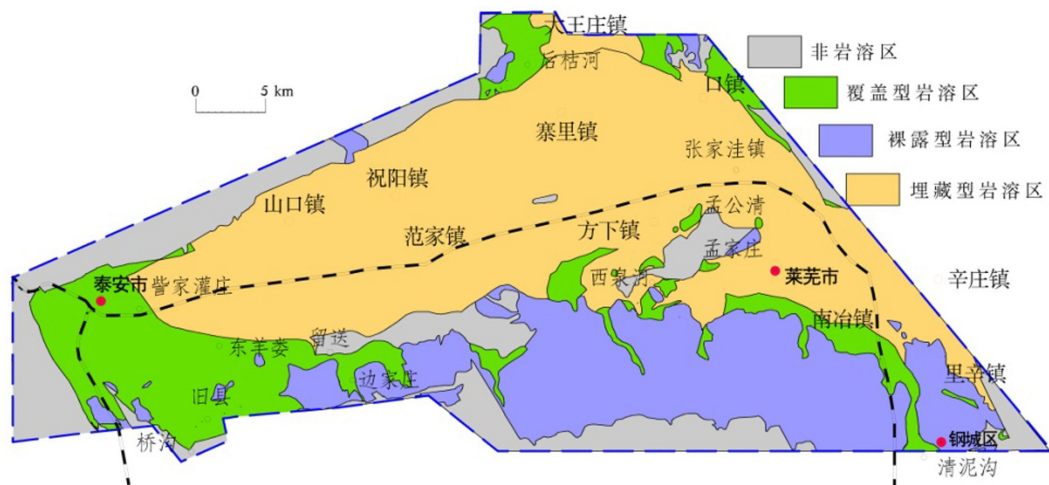


图 4 泰莱盆地岩溶类型分区图

Fig. 4 Map showing zonation of karst types in the Tailai basin

表 2 岩溶塌陷风险性评估因子取值表

Table 2 Factor values assigned for karst collapse risk assessment

A	B	C	强	较强	中等	弱
易发性 评价	K	Ti	奥陶系马家沟组	寒武系三山子组、 炒米店组、张夏组	寒武系朱砂洞组、 石炭—二叠纪	寒武系崮山组、馒头组
			7	5	3	1
	Fd	距断裂<100 m	距断裂 100~300 m	距断裂 300~500 m	距断裂>500 m	
			7	5	3	1
	Q	Qs	多元结构	二元结构	一元结构	/
			7	5	3	/
	Qh	0~10 m	10~20 m	20~30 m	>30 m	
			7	5	3	1
	Wv	>10 m	5~10 m	1~5 m	<1	
			7	5	3	1
易损性 评价	W	Wr	水位在基岩面附近波动	水位在基岩面以下 30 m 以深波动	地下水位在基岩面以下 10~30 m	地下水位在基岩面以 上波动
			7	5	3	1
	Ww	开采模数>100	开采模数 30~100	开采模数 10~30	开采模数<10	
			$10^4\text{ m}^3\cdot\text{a}^{-1}\cdot\text{km}^{-2}$	$10^4\text{ m}^3\cdot\text{a}^{-1}\cdot\text{km}^{-2}$	$10^4\text{ m}^3\cdot\text{a}^{-1}\cdot\text{km}^{-2}$	$10^4\text{ m}^3\cdot\text{a}^{-1}\cdot\text{km}^{-2}$
	L	Lp	>1 000(人·km ⁻²)	1 000~100(人·km ⁻²)	<100(人·km ⁻²)	/
			7	5	37	/
	Le	>1(亿元·km ⁻²)	0.3~1(亿元·km ⁻²)	<0.3(亿元·km ⁻²)	/	
			7	5	3	/
	Rf	泰安市城区—旧县、莱芜铁矿	莱芜大王庄—寨里	其它	/	
			3	5	7	/
R	Rt	泰安市城区—旧县	莱芜铁矿塌陷区、 大王庄—寨里	其它	/	
			3	5	7	/
	Rd	楼房为主的城市	楼房和平房共存的乡镇	以平房为主的农村	/	
			3	5	7	/

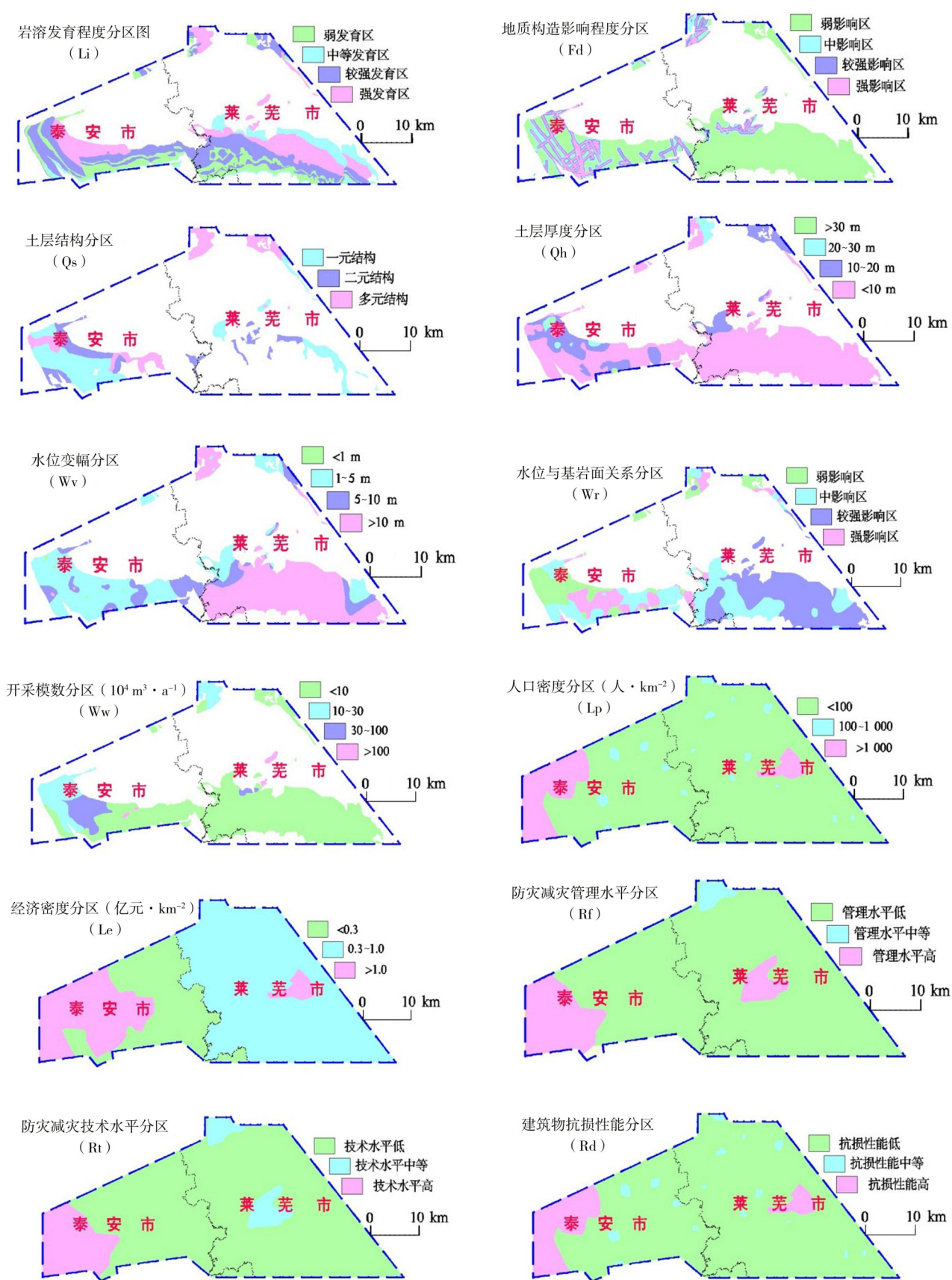


图5 各指标分区图

Fig. 5 Grading map of each factor



图 6 泰莱盆地岩溶地面塌陷易发性评价分区图

Fig. 6 Assessment map of karst collapse susceptibility in the Tailai basin

表 3 评价分级标准

Table 3 Grade criteria of risk assessment

序号	易发性分值H	风险性分值F	等级
1	$P \geq 5.0$	$F \geq 5.0$	高
2	$3.5 \leq P < 5.0$	$3.5 \leq F < 5.0$	中
3	$P < 3.5$	$F < 3.5$	低

区面积有 19.58 km²,泰安城区火车站—旧镇、范家灌庄—訾家灌庄及宁家结庄一带;省庄镇西苑庄—东苑庄、圣元官庄、东羊娄、西羊娄一带;徂徕镇杜家庄和埠阳庄东北有小面积分布。莱芜地区分布面积有 14.32 km²,分布在莱芜铁矿区牛泉镇西泉河、东泉河、杜官庄、侯家沟一带,方下镇张公清、耿公清、孟公清一带;大王镇的孤山、西上崮、东上崮,寨里镇的郝鱼池、东鱼池及前、后枯河等地区。

易发性中等区总面积为 117.74 km²。其中,泰安地区面积有 95.19 km²,主要分布在泰安城区—旧县水源地大部,邱家店镇逯家庄—徂徕镇留送—边家庄—苏家庄一带;莱芜地区面积有 22.55 km²,主要分布在大王庄镇东上崮、大鱼池一带、牛泉镇西牛泉、侯家沟以东—八里沟一带;凤城办事处孟家庄一带。

易发性低区评价面积为 85.12 m²。分布于上述 2 个易发区以外的隐伏型碳酸盐岩类分布区。

同时,由图 6 统计可得,61.8% 的已发岩溶塌陷点分布于易发性高区,38.2% 的塌陷点位于易发性中等区,易发性低区未有塌陷历史记载,这也证明了本

文评价方法可行及评价结果合理。

3.5 风险性评价结果

同前文,利用 MAPGIS 将各指标进行叠加计算,根据所得风险性指数 F 值确定岩溶塌陷风险性等级,划分标准见表 3。评价区划分为岩溶塌陷风险性高区、风险性中等区和风险性低区(图 7)。

风险性高区:总面积为 31.5 km²。其中,泰安地区 21.64 km²,主要分布于泰安城区火车站—旧镇及訾家灌庄一带,省庄镇圣元官庄—东羊娄一带;莱芜地区 9.86 km²,分布在莱芜大王庄镇孤山—后枯河一带,铁矿区孟公清—泉河及侯家沟一带。

风险性中等区:总面积为 153.14 km²。其中,泰安地区 113.53 km²,主要分布在泰安城区—旧县水源地大部,峨峪镇清沙沟一带;莱芜地区 39.61 km²,主要分布在大王庄镇东上崮,口镇东北部,牛泉镇东牛泉—杜官庄、茂盛堂—吕家楼,高庄街道办事处苍龙峡以南的第四系覆盖区。

风险性低区:评价面积为 52.12 km²。分布于上述两区以外的隐伏型碳酸盐岩类分布区。

4 结论及建议

(1) 本文将能反映社会影响的易损因子纳入到岩溶塌陷风险性评价指标体系中,弥补了以往岩溶塌陷危险性评价只关注易发性的不足之处,从而更



图7 泰莱盆地岩溶地面塌陷风险性评价分区图

Fig. 7 Zonation map of karst collapse risk assessment in the Tailai basin

全面的反应了岩溶塌陷的社会影响,为相关部门制定防灾减灾措施提供依据。

(2)泰莱盆地岩溶塌陷高风险区主要分布在泰安市城区火车站、訾家灌庄、东羊娄—旧县一带;莱芜市大王庄镇孤山—后枯河及铁矿区孟公清、泉河一带。这些区域多为水源地周围或矿山企业排水区,高强度地抽排地下水是岩溶塌陷发生的最主要致塌因素。

(3)为减少岩溶塌陷的发生及其带来的损失,相关部门应重视风险性高区地下水监测网络建设,可尝试建设地下水动态高频网络,了解地下水实时动态变化,为塌陷预警预报工作服务。如在岩溶发育段出现短时间强降水、岩溶地下水大幅变化等情况,及时通报相关部门,做好塌陷防范工作。同时加紧地质灾害排查工作,及时发现安全隐患,并制定应对措施。

参考文献

- [1] 康彦仁.岩溶地面塌陷的形成条件[J].中国岩溶,1988,7(7):9-17.
- [2] 张丽芬,曾夏生,姚运生,等.我国岩溶塌陷研究综述[J].中国地质灾害与防治学报,2007,18(3):126-130.
- [3] 罗小杰,沈建.我国岩溶地面塌陷研究进展与展望[J].中国岩溶,2018,37(1):101-111.
- [4] 吴亚楠.国内外岩溶塌陷监测方法综述[J].山东国土资源,2018,34(12):1-6.
- [5] 吴亚楠.泰安市城区—旧县水源地岩溶塌陷演化过程分析

[J].中国岩溶,2017,36(1):94-100.

- [6] 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(S1):9-13.
- [7] 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(S1):38-42.
- [8] 王淑彦.泰安路基塌陷机理的探讨[J].铁道工程学报,1985,(1):93-95.
- [9] 高宗军,张富中,鲁峰.山东泰安岩溶地面塌陷前兆及其预测预报[J].中国地质灾害与防治学报,2004,15(3):149-150.
- [10] 高宗军.岩溶地面塌陷形成机理与成因模式研究:以山东泰安—莱芜为例[J].中国工程科学,2008,10(4):38-43.
- [11] 王滨,李治广,董昕,等.岩溶塌陷的致塌力学模型研究:以泰安市东羊娄岩溶塌陷为例[J].自然灾害学报,2011,20(4):119-125.
- [12] 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(1):38-43.
- [13] 王延岭,陈伟清,蒋小珍,等.山东省泰莱盆地岩溶塌陷发育特征及形成机理[J].中国岩溶,2015,34(5):495-506.
- [14] 王延岭.山东省泰莱盆地岩溶地面塌陷影响因素分析[J].中国岩溶,2016,35(1):60-66.
- [15] 山东省第五地质矿产勘查院.山东省泰莱盆地岩溶塌陷地质灾害机理研究与风险区预测报告[R].2013.
- [16] 山东省第五地质矿产勘查院.山东省泰莱盆地岩溶塌陷地质灾害调查与防治[R].2013.
- [17] 山东省第五地质矿产勘查院.泰安市泰山区上高办事处訾家灌庄村岩溶塌陷区地质调查与评价报告[R].2002.
- [18] 泰安地质环境监测站.山东省泰安市地下水动态监测报告[R].1981-2014.
- [19] 贾龙,蒙彦,戴建玲.广佛肇地区岩溶塌陷易发性分析[J].中国岩溶,2017,36(6):819-829.

- [20] 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.
- [21] 罗小杰,罗程.覆盖型岩溶地面塌陷综合地质预测与危险性评估[J].中国岩溶,2016,35(1):51-59.

Risk assessment of karst collapse in the Tailai basin based on the synthetic index method

WU Yanan^{1,2}, WANG Yanling^{1,2}, ZHOU Shaozhi^{1,2}, TANG Liwei^{1,2}, JIAO Yuguo^{1,2}

(1. Shandong 5th Geo-Mineral Prospecting Institute, Taian, Shandong 271000, China; 2. Key Laboratory of Karst Collapse Prevention and Control of Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources, Taian, Shandong 271000, China)

Abstract The karst collapse in the Tailai basin began in the 1960s, which has caused increasingly serious economic losses and social impacts. Based on the analysis of the geological conditions, 12 indexes were selected as the assessment factors, including karst collapse influencing factors and social vulnerability factors, thus to establish a risk evaluation system. Then, the weight of each assessment element was calculated using the AHP method, and the classification diagram of each index was drawn and assigned separately. Finally, the risk index was calculated using MAPGIS software, and the risk classification of karst collapse was made according to the criteria. The results show that high-risk areas are mainly distributed in the following areas, (1) Taian City, urban railway station, Zijiaguanzhuang, Dongyang—Jiuxian; (2) Laiwu City, Gushan—Kuhe area of Dawangzhuang Town, and Menggongqing—Quanhe of the iron mining area. These areas are mostly around the water source area or the drainage areas of mining enterprises, where high-intensity pumping groundwater is the most important factor causing karst collapse.

Key words karst collapse, risk evaluation, synthetic index method, Tailai basin

(编辑 张玲)