第 42 卷 第 5 期	中	国	岩	溶	Vol. 42 No. 5
2023 年 10 月	CARSOI	OGI	CA	SINICA	Oct. 2023

邹连庆,褚福建,王振涛,等.基于发生指数的临沂岩溶塌陷预警模型研究[J].中国岩溶,2023,42(5):1085-1097. DOI:10.11932/karst20230518

# 基于发生指数的临沂岩溶塌陷预警模型研究

邹连庆<sup>1,2</sup>, 褚福建<sup>1,2</sup>, 王振涛<sup>1,2</sup>, 姚春梅<sup>1,2</sup>, 陈亚男<sup>3</sup>, 廉 波<sup>4</sup>, 魏忠爱<sup>5</sup>, 蒙永辉<sup>1,2</sup> (1. 山东省国土空间生态修复中心, 山东济南 250014; 2. 自然资源部黄河三角洲土地利用安全野外科学 观测研究站, 山东滨州 251900; 3. 临沂市自然资源和规划局测绘院, 山东临沂 276001; 4. 山东省 第七地质矿产勘查院, 山东临沂 276006; 5. 临沂市自然资源开发服务中心, 山东临沂 276001)

**摘** 要:临沂市区中奥陶系灰岩岩溶发育,第四系覆盖层较薄,具备岩溶塌陷发育条件。20世纪80 年代至21世纪初期岩溶塌陷灾害频发。文章以临沂市区岩溶塌陷作为研究对象,对其分布规律及 影响因素进行了研究,提出了基于岩溶塌陷发生指数的预警模型,该模型以水位为主控监测因素,多 因素叠加综合判定进行预警,并使用历史数据对模型进行验证,结果表明:该模型在临沂市城区重点 监测区预警结果验证的可靠性较高,可为其他地区岩溶塌陷地质灾害监测预警提供借鉴。 关键词:岩溶塌陷;综合判定;监测预警;临沂市区;中奥陶系灰岩;第四系覆盖层

中图分类号: P642.25 文献标识码: A 文章编号: 1001-4810 (2023) 05-1085-13

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

## 0 引 言

岩溶塌陷是指隐伏岩溶洞隙上的岩、土体在自 然或人为因素作用下发生变形破坏,并在地面形成 塌陷坑(洞)的一种岩溶地质作用和现象<sup>[1-2]</sup>。20世 纪80年代至21世纪初期,是临沂城区岩溶塌陷频 发高发期,期间发生岩溶塌陷20余次,造成了严重 的经济损失。临沂市岩溶塌陷的发生、发展主要受 城区岩溶水水位影响,具有空间上的隐蔽性、时间上 的突发性,因此对塌陷进行监测预警具有一定的 难度。

许多专家、科研人员、工程技术人员对岩溶塌陷 土体变形、诱发因素的监测预警方式,光纤传感、地 质雷达等技术方法进行了探索<sup>[3-8]</sup>,也对临沂城区岩 溶塌陷特征、成因、岩溶塌陷危险性评价、易损性和 期望损失评价等方面进行了研究[9-11]。

本文以临沂市区岩溶塌陷作为研究对象,对其 在地质条件和诱发因素作用下的发育分布规律进行 了分析<sup>[11-13]</sup>,在以地下水位为主的监测体系下,提出 了一种以水位为主控监测因素,多因素叠加综合判 定的监测预警模型,并以历史塌陷实例对比分析,验 证了该模型在临沂市城区重点监测区预警结果的可 靠性。

## 1 研究区概况

研究区位于临沂市城区及其西部,地处山东省 中南部山区南缘,区域有丘陵和平原两种主要地貌 类型:北部和西南部地区海拔大于 200 m,为丘陵地 貌类型,东部沂河、涑河、祊河两侧的大部分区域海

收稿日期: 2023-04-20

资助项目:山东省重点研发计划项目(2021CXGX010704);临沂市自然资源和规划局项目(SDTZLY-2019-21);临沂市自然资源开发服务中心项目 (SDGP371300202102000363)

第一作者简介:邹连庆(1985-),男,高级工程师,硕士研究生,主要从事水工环地质工作。E-mail: zoulianqing2010@163.com。

通信作者:褚福建(1964-),男,高级工程师,主要从事水工环地质工作。E-mail: chufujian@shandong.cn。

拔低于 100 m, 为山前冲洪积平原地貌类型, 整体地 势西北高东南低, 发育有三级堆积内叠阶地, 塌陷多 产生于地表水汇集、与地下水运动交替较为强烈的 河流一级阶地。区域上沂河、祊河、涑河、南涑河、 陷泥河等河流, 总体流向自北向南, 丰水期、枯水期 与地下水可以形成补给排泄关系, 对区域地下水有 重要影响作用。

研究区属温带大陆型季风气候,气温适宜,四季 分明,光照充足,雨量充沛,雨热同季,无霜期长。区 内年平均陆面蒸发量 507~563 mm、水面蒸发量 889~1 128 mm,降水量 871.9 mm(1951—2021年多 年平均值),近10年5—9月份降水占全年降水量的 80.96%(2011—2021年)。

## 1.1 地质背景

研究区及周边地层分布受一定的构造控制,古 生界寒武系、奥陶系、石炭系、二叠系自西向东呈 NW—SE向展布,倾向 NE,至沂沭断裂带西侧形成 临沂单斜,在该地层的厚层灰岩及砂砾岩段,岩溶及 裂隙发育,富水性好;新生界第四系则主要发育于祊 河、沂河两侧,厚度 20 m 以内;区域地质构造活动频 繁,断裂构造分布广泛<sup>[14-16]</sup>(图 1)。

区域岩体按工程地质特征,可分为坚硬的中厚 层灰岩、白云岩岩组、较坚硬的中厚层状砂岩岩组、 较弱的薄厚层状页岩岩组、坚硬的块状侵入岩组和 坚硬的块状火山岩岩组。土体按工程地质特征可分 为黏性土、砂性土双层结构及黏性土单层结构。

## 1.2 水文地质条件

研究区所处水文地质单元三边隔水一边透水: 探沂—临沂断裂构造组合带分布石炭系、二叠系不 透水岩层,构成区域东部及北部隔水边界;岩坡断裂 及巨龙山至卧牛山一带地下水分水岭,分布寒武系 不透水的页岩层,构成区域西部隔水边界;区域南部 分布中奥陶系灰岩,为透水边界<sup>[14-16]</sup>。

大气降水入渗补给为区域地下水的主要补给来 源,其次为区内河流、地表水的渗漏补给及农田灌溉 回渗补给。单元西北部为地下水补给区,地下水接 受补给后由北西向南东径流,在南部朱陈泉群或越 过朱陈断裂西段补给下游的方式进行排泄<sup>[14-16]</sup>。

研究区内地下水类型主要为松散岩类孔隙水、 碳酸盐岩类裂隙岩溶水两类:松散岩类孔隙水含水 层为黄色黏质砂土及砂质黏土,砂层极不发育,单井 涌水量小于100m<sup>3</sup>·d<sup>-1</sup>,富水性差;碳酸盐岩类裂隙 岩溶水赋存于奥陶系及寒武系厚层灰岩、白云岩、 白云质灰岩、泥质灰岩等裂隙岩溶中,为承压水且向 上补给松散岩类孔隙水,钻孔资料显示岩溶发育在 垂向上具有不均匀性,埋深20~50m、80~100m、 120~150m存在岩溶发育段,三个岩溶段之间水力联 系密切,水平方向的富水性与岩溶发育分布规律及 方向一致,由补给区—径流区—排泄区逐渐增大<sup>[14-16]</sup>。 研究区内碳酸盐岩类裂隙岩溶向上补给松散岩类孔 隙水后形成岩溶水孔隙水混合水位,水位埋深 2~10m,水位年变幅多为1~3m,最大可到6m,水位、 水量随季节变化明显。

## 1.3 岩溶塌陷孕灾地质背景

可溶岩是岩溶发育的物质基础<sup>[17]</sup>,区内岩溶地 层主要由中奥陶系灰岩及寒武系凤山组的厚层灰岩、 白云岩、白云质灰岩、泥质灰岩组成,岩石致密坚硬, 但岩溶裂隙发育。发育的蜂窝状岩溶孔洞孔径 30~50 mm,垂向埋深 20~50 m、120~150 m 两段岩溶 发育程度高,沿断裂构造发育程度高,发育有较大的 溶洞,地下水交替循环强烈;灰岩与第四系接触带附 近岩溶极发育,上覆第四系松散层厚度 3~15 m,为黏 性土、砂性土双层结构,结构松散,易被水流带走,产 生潜蚀作用生成土洞,砂性土拱承载力较低,故易发 生塌陷<sup>[14-16]</sup>。

## 2 岩溶塌陷发育特征、影响因素

## 2.1 岩溶塌陷发育

研究区 1993 年至 2012 年岩溶塌陷高发期共发 生岩溶塌陷 17次(表1),塌陷点较为集中,兰山小 区一苗庄小区一杜三岗村铁路沿线一道沟村一后 岗头村已发岩溶塌陷点基本连接成片,面积约 30 km<sup>2</sup>。区内岩溶塌陷多为突发,发生前大多没有 明显迹象,之后突然发生,发生过程及时间短<sup>[10]</sup>;区 内塌陷坑形态上多呈碟形或坛形,平面上呈圆形或 椭圆形,塌洞较浅,塌坑直径一般 4.0~10.0 m<sup>[14-16]</sup>; 区内塌陷具有重复性特征,如在兖石铁路沿线道沟 村、杜三岗村一线,于 1994 年、1995 年、2003 年、 2007 年、2011 年多次发生岩溶塌陷,兰山小区在 2003 年 5 月、6 月接连发生塌陷(图 2)。



图 1 研究区区域地质概况

Fig. 1 Regional geological overview of the study area

### 2.2 岩溶塌陷分布规律及影响因素

岩溶塌陷地质灾害的形成受到包括地形地貌、 地质构造、地层岩性等内在地质条件和地下水开采、 人类工程活动、降水等外在诱发因素的影响,研究区 内岩溶塌陷的分布规律体现出与其相关影响因素的 一致性<sup>[18]</sup>。

2.2.1 岩溶塌陷受地质条件的影响

(1)岩溶塌陷受地形地貌影响,多发生于河、塘、 古河道等地表水体附近。研究区岩溶塌陷多分布于 养鱼池,小涑河、陷泥河旧河道等地段,该地段地下水、地表水、大气降水交替转换强烈,动力条件充分,上覆第四系厚度小于10m,在地下水动力作用下,易形成土洞;汛期或者丰水期,地下水位处于较高水平,随着降水逐渐增多,地表水或地面积水会导致表层土体富水,重量加大强度降低,当土体洞穴上方的覆盖层重力突破平衡临界值,地表土层则会向土洞内部陷落从而产生塌陷。区内已发岩溶塌陷与地表水体距离1km内的数量占76.2%(表 2)。

(2)岩溶塌陷受地质构造影响,多沿断裂带分布。

1088

Table 1   List of main karst collapses										
皮旦	相应左日	相应合黑	防持人粉		陷坑形态					
厅石	广与 湖阳十月   湖阳世直	阳功门致	陷坑长度/m	陷坑宽度/m	陷坑深度/m	地层结构	覆层厚度/m			
1	1993.6	苗庄小区	1	25.0	15.0	5.0	-	-		
2	1994.3	道沟村	1	3.0	3.0	2.8	二元相结构	3.0		
				6.3	6.3	2.3				
3	1994.4	国棉八厂	3	8.0	8.0	5.0	二元相结构	8.0		
				2.2	2.2	2.1				
4	1995.4	药材批发市场	多个	<3.0	<3.0	2.8	-	-		
				10.0	10.0	2.5				
5	2002.8	杜三岗村	3	4.5	4.5	2.5	-	6.1		
				1.5	1.5	2.5				
6	2003.2	苗庄小区	-	-	-	-	二元相结构	4.0		
7	2003.5	临沂监狱	1	15.0	7.0	4.0	二元相结构	-		
8	2003.6	兰山小区	1	4.7	4.7	4.0	二元相结构	10.0		
9	2003.6	红埠寺村	1	0.8	0.8	-	二元相结构	-		
10	2003.6	兰山小区	1	5.5	4.0	2.5	二元相结构	10.0		
11	2005.6	雅禾纺织	1	20.0	10.0	5.0	二元相结构	-		
12	2007.8	道沟村	1	1.0	1.0	9.0	二元相结构	-		
13	2008.1	道沟村	1	1.5	1.5	-	二元相结构	-		
14	2008.5	大岭村	9	-	-	-	二元相结构	6.0		
15	2011.6	后岗头村	1	-	-	2.5	二元相结构	-		
16	2011.8	道沟村	1	0.5	0.5	_	二元相结构	-		
17	2012.7	大岭村	2	5.0 3.3	3.0 1.2	2.0 1.5	二元相结构	-		

表 1 主要岩溶塌陷情况一览表 Table 1 List of main karst collapse

苗庄小区、兰山小区、道沟村塌陷点均位于断裂带 附近,断裂构造发育地段及其影响带岩石破碎,裂隙 发育,成为地下水的良好赋存空间和运移通道<sup>[19]</sup>,地 表水及地下水对基岩作用强烈,溶蚀作用增强,岩溶 裂隙、溶孔、溶洞逐渐发展形成,非构造发育带岩溶 发育程度比构造带的发育明显减弱,断裂构造影响 区域岩溶发育程度,岩溶发育程度又控制岩溶塌陷 的发生<sup>[18]</sup>。

根据物探资料显示,苗庄小区塌陷点附近存在 一近南北向断裂构造,该断裂附近连续发育直径 1 m 左右的溶洞,断裂东侧埋深 10 m 以下 25 m 以上 也存在一处岩溶发育区。区内已发的岩溶塌陷距地 质构造在 1 km 内的占 71.4%(表 2)。

(3)岩溶塌陷受地层岩性影响,多分布在浅部岩 溶愈发育,覆盖层厚度较小的双层结构盖层区。研 究区内发生的岩溶塌陷点多分布在 5~11 m 厚度的 黏性土、砂性土双层结构盖层区,下部砂层厚度相对 较薄,盖层下奥陶系马家沟群五阳山组灰岩、白云质 灰岩,岩溶极发育。

2.2.2 岩溶塌陷受诱发因素的影响

(1)岩溶塌陷受地下水动力条件的影响,多发生 于地下水降落漏斗范围内及水位变化较大季节。地 下水动力条件是诱发岩溶塌陷的最主要动力条件, 也是其形成的关键。地下水位变幅、地下水位与基 岩面的关系及开采强度是构成岩溶塌陷地下水动力 条件的主要因素<sup>[20]</sup>。地下水位变化幅度的决定了岩 溶空腔及土洞内气压变化的幅度;岩溶地下水位与 基岩面的关系首先决定了岩溶水对覆盖层的各种力 学作用,其次反映了岩溶水与孔隙水的补排关系,以 及由此决定的渗流力的大小;而地下水开采量则反 映了人类活动对地下水环境的影响程度,是影响地



图 2 岩溶塌陷点 (坑) 分布图 Fig. 2 Distribution of karst collapse points

表 2 岩溶塌陷分布规律 (地质条件) Table 2 Distribution law of karst collapse

(geological conditions)

		· · · · ·	
	距离/km	塌陷数量/个	所占比例/%
地表水体	<1	16	76.2
	>1	5	23.8
断裂带	<1	15	71.4
	>1	6	28.6

下水变幅及其与基岩面关系的关键因素。三个因素 相互影响,共同作用,构成诱发岩溶塌陷地质灾害的 水动力条件<sup>[18,20]</sup>。20世纪80年代末期为临沂市区地 下水降落漏斗形成初期,该阶段水位年平均变幅 2.42 m; 20世纪90年代随城市快速发展,后岗头— 杜三岗一线地下水开采量增加,漏斗面积迅速扩展, 漏斗中心位置西移,该阶段水位年变幅已达到 7.02 m,漏斗中心水位年均下降速率 1.35 m,水位处 于灰岩顶板下。研究区岩溶塌陷发生的时间、地点 与地下水漏斗的发展具有时空一致性,多发生在漏 斗范围内(图 3),按照与地下水降落漏斗中心的距离 统计(与同时期地下水降落漏斗中心进行位置对比), 66.7%的岩溶塌陷发生在距离漏斗中心小于2km的 区域内(表 3)。

另外,降水作为地下水位的影响因素,降水强度 和年内分配均匀程度也影响着岩溶塌陷的发育强度。 长时间干旱后的强降雨容易导致岩溶塌陷的产生。 1993 年至 2012 年研究区岩溶塌陷高发期内发生的 塌陷多集中在 5-8 月(图 4)。枯水期末期的 4 月底 及 5 月易出现全年最低水位值,水力坡度增大,地下 水渗透力增大,随着丰水期降水到来,大气降水下渗 补给孔隙水,水流速度越快潜蚀作用越强,上覆盖层 被水流带走的颗粒物就越多;同时岩溶水携带的第 四系颗粒物随着岩溶水含水层流失,空腔中产生负



1990年漏斗范围 1995年漏斗范围 2000年漏斗范围 2004年漏斗范围 2009年漏斗范围 塌陷点及塌陷年份

图 3 岩溶水降落漏斗及塌陷点分布图

Fig. 3	Distribution	of de	epression	cones	of karst	water	and	collapse	points
--------	--------------	-------	-----------	-------	----------	-------	-----	----------	--------

表 3	岩溶塌陷分布规律 (诱发因素)	
-----	-----------------	--

Table 3 Di	Distribution law of karst collapse (inducing factors)							
	距离/km	塌陷数量/个	所占比例/%					
漏头由心。	<2	14	66.7					
₩ij <u>-</u> Ţ , Ţ , <b>Ŭ</b> ,	>2	7	33.3					

压;当地下水水位上下波动正好位于奥陶系灰岩与 第四系接触面附近时,反复造成压力不平衡的状态, 易造成地表覆盖层的破坏。兰山小区(图 5)、苗庄 小区、道沟村均在该时间段内发生了岩溶塌陷。

(2)岩溶塌陷受人类活动影响,多分布于铁路或 开采井的影响范围内。通过研究区塌陷分布可以看 出,其发生与人类工程活动的分布有一定的相关性, 各类引起地层震动、地下水位波动的人类工程可能 诱发并导致岩溶塌陷的发生。如铁路列车行驶引起 铁轨及土层震动,其致塌机制与耦合效应的破坏累 积有关<sup>[21]</sup>,相比其他区域来说,距离铁路越近,影响 时间越长,因受到频繁的机械振动而产生致灾力的 可能性更大。

另外,地下水开采使区域内地下水流速和水力 坡度增大,侵蚀作用增强。塌陷多发的苗庄小区、兰 山小区、杜三岗、全庄红埠寺等周边均存在抽水井。 抽水井开采量越大、距离抽水井越近,塌陷发生的可 能性也越大。

## 3 监测预警模型建设

## 3.1 岩溶塌陷成因机制

岩溶塌陷必须具备一定的物质基础和水动力条件。临沂城区广泛分布着岩溶发育地层,较薄的二



图 4 月发生岩溶塌陷频率统计分布 Fig. 4 Statistical distribution of monthly karst collapse frequency





Fig. 5 Water level process diagram of karst collapse point (Lanshan community)

元相结构覆盖层使其具备了岩溶塌陷发生的物质条件;随着城市规模扩大,水资源开发大幅度提高,地下水开采使区域整体水位呈现迅速下降趋势,1985—2010年临沂城区地下水位年平均下降约1m,岩溶塌陷受到水动力作用影响时间长<sup>[14-16]</sup>。

岩溶地下水水位的持续下降,使原岩溶水向上 补给给第四系孔隙水的量发生改变。由于岩溶地下 水水位在灰岩顶板附近波动,或长期处于灰岩顶板 以下,导致第四系覆盖层中微小土壤颗粒随地下水 位波动于溶洞裂隙漏失,土洞逐渐形成(图 6);随着 非黏性土颗粒进一步流失及黏性土颗粒的向下掉落, 土洞扩大,直至无法支撑上覆盖层,在重力作用下快 速塌落形成塌陷<sup>[21-22]</sup>。

岩溶塌陷在具备物质条件、水动力条件基础上, 经渗透潜蚀和真空吸蚀等作用,发生地面塌陷灾害, 其生成模式可概化如下:

	(渗透潜蚀	
$Q_4松散层岩溶发育地层 + J$	<动力作用 真空吸蚀 = 其他	→地面塌陷
地质条件	外在诱因	结果

## 3.2 评价模型

通过岩溶塌陷监测预警模型生成概化模式选取 影响因素,采用综合指数法进行多因素叠加综合判



#### 图 6 岩溶塌陷形成机制示意图



定,计算模型综合考虑地质条件及诱发因素,根据不同因素重要程度赋予影响因子不同的权值<sup>[23-25]</sup>:

$$F = AG + (1 - A)T \tag{1}$$

$$G = \sum_{i=1}^{n} g_i w_i$$
 (2)

$$T = \sum_{j=1}^{n} t_j w_j \tag{3}$$

式中:F为岩溶塌陷发生指数;G为地质条件综合指数;T为诱发因素综合指数;A、1-A分别为地质条件综合指数、诱发因素综合指数的指标权重;g<sub>i</sub>、w<sub>i</sub>为分项地质条件影响因子取值及权重;t<sub>j</sub>、w<sub>j</sub>为分项 诱发因素影响因子权重。

当地下水水位监测数据、降雨量数据满足监测 频率,即可利用该模型进行岩溶塌陷预警。同一监 测点岩溶发育程度、盖层厚度、结构等地质条件以 及与抽水井距离、人类工程活动影响等诱发因素影 响因子的取值在一段时间内相对固定,可将其视为 定量;水位与基岩面关系、水位变幅等与水位有关的 影响因子可视为变量。通过上述模型进行修正,地 下水水位成为综合判定预警模型的主控因子<sup>[25-26]</sup>。

$$F = AQ + (1 - A)V \tag{4}$$

$$Q = \sum_{i=1}^{n} q_i w_i \tag{5}$$

$$V = \sum_{j=1}^{n} v_j w_j \tag{6}$$

式中:F为岩溶塌陷发生指数;Q为判定条件定量综合指数;V为判定条件地下水水位变量综合指数;A、 1\_A分别为综合指数的指标权重;q<sub>i</sub>、w<sub>i</sub>为定量影响 因子取值及权重;v<sub>j</sub>、w<sub>j</sub>变量影响因子取值及权重 (以地下水水位为主控因子的相关影响因子)。该评 价模型得出岩溶塌陷发生指数越高表示发生岩溶塌 陷的可能性越大。

#### 3.3 指标权重

采用层次分析法(AHP)来确定影响权重,参考前人对临沂岩溶塌陷危险性现状评价权重取值<sup>[11,13]</sup>,选取研究区内已发生塌陷,明确评价因子进行反演,与实际情况产生较大差别时即对因子权重进行调整,根据前述塌陷发育、分布规律,以及对塌陷影响的重要性,确定最终各因素指标权重(表4)及分项条件影响因子取值范围(表5)。

表 4 指标权重取值表

Table 4 List of index weight value

基本条件	权重取值	分项条件	权重取值
		岩溶发育程度	0.257 4
		盖层厚度	0.074 4
地质条件	0.572 1	盖层结构	0.097 3
		与构造距离	0.085 8
		与地表水体距离	0.057 2
		水位与界面距离	0.124 1
		水位变幅	0.132 6
诱发因素	0.427 9	与降落漏斗中心距离	0.055 6
		降水量	0.038 5
		人类工程活动	0.077 1

#### 3.4 模型验证

依据评价模型及指标权重, 岩溶塌陷发生指数 理论结果值范围为 0~10。通过模型模拟验证, 研究 区岩溶塌陷发生指数有以下特点: 通过研究区数据 差值模拟进行空间尺度预警, 得出的发生指数数值 普遍分布于 5.5~9.5, 对紧邻研究区的外围区域进行 预警, 得出的发生指数数值普遍分布于 4~7; 通过实 际发生塌陷监测点历史数据进行时间尺度预警, 得 出历史塌陷点发生塌陷时的发生指数数值均大于 8, 小于 9.5。

Table 5 List of the value range of influencing factors									
甘木欠仲	分项条件								
<b></b>			0~2	2~4	4~6	6~8	8~10		
	岩溶发	育程度	无	很不发育	不发育	发育	很发育		
	盖层厚度/m		<0.5 >25	20~25	15~20	0.5~3 11~15	3~11		
地质条件	盖层	结构	无	一元结构	一元结构	二元结构	多元结构		
	与构造距离/m		>1 000	700~1 000	400~700	200~400	<200		
	与地表水体距离/m		>1 000	700~1 000	400~700	200~400	<200		
	水位与 基岩面 关系		水位处于 基岩面 以上	水位偶尔处 于基岩面以 下5~10 m	水位偶尔处 于基岩面以 下10~20 m	水位长期处 于基岩面以 下10~20 m	基岩面附近5 m以 内波动或长期处于 基岩面20 m以下		
	水位变幅/m		<1	1~4	4~7	7~10	>10		
诱发因素	与降落漏斗中心距离		>8 000或不处于 漏斗范围内	5 000~8 000	3 000~5 000	2 000~3 000	<2 000		
		小时降雨量	<2.6	2.6~8	8~12	12~16	>16		
	降水量/mm	日降雨量	<10	10~25	25~50	25~50	>50		
	「〒/ <b>小</b> 王/mill	月降雨量 环比增长	<40	40~60	60~80	80~100	>100		
	与抽水井距离/m		>500	200~500	100~200	50~100	<50		

表 5 影响因子取值范围表 Table 5 List of the value range of influencing facto

依据上述结果同实际情况进行比较,初步将预 警等级按照发生指数数值划分为高预警等级(发生 指数>8),较高预警等级(8>发生指数>7),一般预警 等级(7>发生指数>6),低预警等级(发生指数<6)四 个等级。以2003年数据进行模拟预警验证为例,验 证过程中各影响因素的取值确定以当时地质条件、 触发条件等数据为基础,通过对已知点进行影响因 子赋值,并利用 GIS 软件中数据差值及叠加计算功 能进行区域赋值。

2003年研究区内水位监测频率6次/月,数据为 每月的1,6,11,16,21,26日,选取塌陷发生前研究 区数据(5月6日、6月21日)生成研究区岩溶塌陷 发生指数分区图(图7)。5月6日模拟预测结果显 示,谏河—兰山小区—国棉八场—带,梨杭村—杜三



图 7 岩溶塌陷发生指数分区图 Fig. 7 Zoning map of occurrence index of karst collapse 岗村一带达到高预警等级;6月21日模拟预测结果, 兰山小区断裂带沿线,梨杭村—杜三岗—苗庄小区 一带达到高预警等级。5月8日、6月22日接连在 兰山小区32号楼东部发生岩溶塌陷,塌陷点均位于 岩溶塌陷高预警等级区域内,该模型在空间预测上 具有一定的可靠性。

以兰山小区 2003 年 4 月 1 日至 7 月 26 日水位 监测数据, 计算塌陷发生指数(图 8), 依据预警结果, 兰山小区监测点岩溶塌陷预警达到高预警等级的时 间段有三个: 4 月 11 日, 5 月 1 日至 6 月 6 日, 6 月 21 至 6 月 26 日。2003 年 5 月 8 日、6 月 22 日发生 塌陷, 发生时间处于该时间段内, 发生于指数大于 9 及指数突然变大的时段。以兰山小区 2022 年同时 期数据(4月1日至7月30日,监测频率提升为1次/ 日)进行分析对比(图9),研究区内未出现高预警等 级时间段,4月至6月发生指数维持在一般预警等级, 7月9日指数大于7,达到较高预警等级,7月21日 达到最高值后回落。历史验证表明,该模型在时间 预测上也具有一定的可靠性。

基于水位主控因素改进的监测预警模型,相较 于单纯以水位作为预警阈值进行预警更为合理,具 有更高的精确性,同时能有效提升空间监测预警的 时效性。该监测预警模型的预测精度,取决于各影 响因素条件的调查及监测精度,提高水位主控监测



图 8 兰山小区岩溶塌陷发生指数 (2003.4.1—2003.7.26)

Fig. 8 Occurrence index of karst collapse in Lanshan community (2003.4.1-2003.7.26)



Fig. 9 Occurrence index of karst collapse in Lanshan community (2022.4.1-2022.7.30)

因素的观测点密度,能够提升预警模型空间准确性,加密水位观测频率,可有效提升预警模型时间准确性。在岩溶塌陷易发的月份加密监测点状预警,出现高发生等级时,及时进行区域预警,在实际应用中更为简便。

## 4 结 论

(1)研究区 20 世纪 90 年代初期地下水位下降、 地下水降落漏斗面积扩展,在地下水动力作用下,岩 溶塌陷频发高发。从地质条件及诱发因素分析,已 发灾害多分布在浅部岩溶发育、覆盖层厚度较小的 双层结构盖层区。地表水体及断裂带附近,塌陷多 发生在漏斗范围内、水位变化较大季节以及人类工 程活动影响的范围。

(2)对临沂城区岩溶塌陷进行模型概化,提出基于岩溶塌陷发生指数的预警模型。选取地质条件、诱发因素等共10个因子叠加综合判定预警指数,并基于水位主控因素进行改进,使预警阈值更为合理,有效提高预警的精确性和时效性。

(3)利用监测模型进行预警时,地下水监测网络 密度及监测频率越高,预警的精度就越高。

## 参考文献

[1] 贺可强, 王滨, 杜汝霖. 中国北方岩溶塌陷[M]. 北京: 地质出版社, 2005.

HE Keqiang, WANG Bin, DU Rulin. Karst collapse in Northern China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2005.

[2] 中国地质灾害防治工程行业协会. 岩溶地面塌陷防治工程勘 查规范(试行)T/CAGHP 076-2020[S]. 武汉:中国地质大学出 版社, 2020.

China Association of Geological Hazard Prevention. Code for geological investigation of karst collapse prevention (Trial) T/CAGHP 076-2020[S]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2020.

- [3] 王金晨, 吴迪, 娄万鹏, 吴远斌. 岩溶塌陷监测技术及发展趋势[J]. 工程技术研究, 2021, 6(8): 55-57.
- 【4】 蒙彦, 雷明堂. 岩溶塌陷研究现状及趋势分析[J]. 中国岩溶, 2019, 38(3): 411-417.
   MENG Yan, LEI Mingtang. Analysis of situation and trend of sinkhole collapse[J]. Carsologica Sinica, 2019, 38(3): 411-417.
- [5] 王甫强,张占彪,李虎,柯洋.光纤传感技术在岩溶地面塌陷地 质灾害监测中的应用[J].城市勘测,2021(4):174-178.
   WANG Fuqiang, ZHANG Zhanbiao, LI Hu, KE Yang. Application of optical fiber sensing technology in geological hazard monitoring of karst ground collapse[J]. Urban Geotechnical

Investigation & Surveying, 2021(4): 174-178.

- [6] 梁明,张观长. 地质雷达方法在城市岩溶塌陷隐患识别中的应用[J]. 西部资源, 2021(3): 101-103.
   LIANG Ming, ZHANG Guanchang. The application of GPR method in the hidden danger identification of urban karst col-
- lapse[J]. Western Resources, 2021(3): 101-103.
  [7] 汝亮, 张业智, 朱裕振, 高菡, 刘雪. 泰安市岩溶塌陷特征及探测方法研究[J]. 山东国土资源, 2020, 36(10): 65-72.
  RU Liang, ZHANG Yezhi, ZHU Yuzhen, GAO Han, LIU Xue. Study on the characteristics and detection methods of karst collapse in Tai'an City[J]. Shandong Land and Resources, 2020, 36(10): 65-72.
- [8] 蒋小珍, 雷明堂. 岩溶塌陷灾害的岩溶地下水气压力监测技术及应用[J]. 中国岩溶, 2018, 37(5): 786-791.
   JIANG Xiaozhen, LEI Mingtang. Monitoring technique and its application of karst groundwater-air pressure in karst collapse[J]. Carsologica Sinica, 2018, 37(5): 786-791.
- [9] 蒙彦,黄健民,贾龙.基于地下水动力特征监测的岩溶塌陷预
   警阈值探索:以广州金沙洲岩溶塌陷为例[J].中国岩溶,2018, 37(3):408-414.

MENG Yan, HUANG Jianmin, JIA Long. Early warning threshold of sinkhole collapse based on dynamic characteristics from groundwater monitoring: A case study of Jinshazhou of Guangzhou, China[J]. Carsologica Sinica, 2018, 37(3): 408-414.

- [10] 李清春, 冯克印, 郑庭明, 董强. 临沂市城区岩溶塌陷特征及成因分析[J]. 山东国土资源, 2005(9): 61-64.
   LI Qingchun, FENG Keyin, ZHENG Tingming, DONG Qiang. Characteristics and origin analysis of karst collapse in Linyi City[J]. Shandong Land and Resources, 2005(9): 61-64.
- [11] 杨全城,姚春梅,邵景力,李景波,卞加升. 模糊综合评判在临 沂城区岩溶塌陷危险性评价中的应用[J]. 山东国土资源, 2010, 26(6): 23-26.
  YANG Quancheng, YAO Chunmei, SHAO Jingli, LI Jingbo, BIAN Jiasheng. Application of fuzzy comprehensive evaluation

method in evaluating karst collapse risks in Linyi urban district[J]. Shandong Land and Resources, 2010, 26(6): 23-26.

[12] 姚春梅,杨全城,邵景力,雷晓东.山东临沂市城区岩溶塌陷易 损性和期望损失评价[J].中国地质灾害与防治学报,2010, 21(2):74-76.

YAO Chunmei, YANG Quancheng, SHAO Jingli, LEI Xiaodong. Vulnerability and expectation loss assessment of karst collapse in Linyi City, Shandong Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2010, 21(2): 74-76.

- [13] Yao Chunmei, Yuan Fang, Meng Fanqi, Yang Quancheng, Shan Jicheng. Study on risk assessment method of karst collapse: Taking the karst collapse in Linyi urban areas as an example[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 310(5): 1-9.
- [14] 姚春梅, 徐品, 刘瑞峰, 张永伟, 姚英强, 王元波, 商婷婷, 王小 燕. 临沂市城区岩溶塌陷预警系统建设及研究报告[R]. 山东 省地质环境监测总站, 2008.

YAO Chunmei, XU Pin, LIU Ruifeng, ZHANG Yongwei, YAO Yingqiang, WANG Yuanbo, SHANG Tingting, WANG Xiaoyan. Construction and research report of karst collapse early warning system in Linyi City[R]. Shandong Geological Environment Monitoring Station, 2008.

- [15] 邹连庆,刘瑞峰,姚英强,王集宁,商婷婷,付娟,王兆林,王小 燕,刘建梅.临沂市城区岩溶塌陷预警运行维护项目阶段总结 报告(2008年—2018年)[R].山东省地质环境监测总站,2018.
- [16] 马海会. 临沂市区岩溶地面塌陷成因机理与防治对策研究
  [D]. 青岛: 山东科技大学, 2010.
  MA Haihui. Formation mechanism and prevention countermeasures of karst ground collapse in Linyi urban district[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2010.
  [17] 吴远斌, 刘之葵, 殷仁朝, 杨建兴, 罗伟权, 雷明堂, 戴建玲, 潘

Weiquan, LEI Mingtang, DAI Jianling, PAN Zongyuan. Karst development characteristics and distribution law in Huaihua basin, Hunan Province[J]. Carsologica Sinica, 2022, 41(5): 759-772, 807.

[18] 冯亚伟. 山东省岩溶塌陷分布规律及成因机制[J]. 中国岩溶,
 2021, 40(2): 205-214.
 FENG Yawei. Distribution and genesis of karst collapse in Shan-

dong Province [J]. Carsologica Sinica, 2021, 40(2): 205-214.

[19] 吴亚楠,周绍智,王延岭,焦玉国,陈伟清,程凤,赵志伟.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.

WU Ya'nan, ZHOU Shaozhi, WANG Yanling, JIAO Yuguo, CHEN Weiqing, CHENG Feng, ZHAO Zhiwei. Summary of karst collapse monitoring methods in China and abroad[J]. Shandong Land and Resources, 2018, 34(12): 1-6.

- [20] 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.
   WANG Yanling. Research on influential factors of the karst collapse in the Tailai basin of Shandong Province[J]. Carsologica Sinica, 2016, 35(1): 60-66.
- [21] 吴亚楠,杨云涛,焦玉国,刘志涛,王延岭,翟代廷,周绍智,魏 凯,程凤.山东省岩溶塌陷发育特征及诱因分析[J].中国岩溶, 2023,42(1):128-138,148.

WU Ya'nan, YANG Yuntao, JIAO Yuguo, LIU Zhitao, WANG Yanling, ZHAI Daiting, ZHOU Shaozhi, WEI Kai, CHENG Feng. Analysis on development characteristics and inducement of karst collapse in Shandong Province[J]. Carsologica Sinica, 2023, 42(1): 128-138, 148.

[22] 高宗军,鲁统民,王敏,冯建国,刘书江,王妹.基于岩溶水动态的岩溶地面塌陷预测预报方法[J].中国岩溶,2019,38(5): 739-745.

GAO Zongjun, LU Tongmin, WANG Min, FENG Jianguo, LIU Shujiang, WANG Shu. Prediction of karst ground collapse based on karst water regime[J]. Carsologica Sinica, 2019, 38(5): 739-745.

- [23] 姜春露,姜振泉.基于Fisher判别分析法的岩溶塌陷预测[J].
   地球科学与环境学报, 2012, 34(1): 91-95.
   JIANG Chunlu, JIANG Zhenquan. Prediction of karst collapse based on Fisher discriminant analysis method[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2012, 34(1): 91-95.
- [24] 杨荣康,杨元丽,蒋镇涛,王乾,刘腾飞.基于两级模糊数学综合评判法的岩溶塌陷危险性评价:以安顺市中心城市规划区为例[J].贵州地质,2017,34(2):109-115.

YANG Rongkang, YANG Yuanli, JIANG Zhentao, WANG Qian, LIU Tengfei. Karst collapse risk assessment base on twolevel fuzzy mathematical comprehensible evaluation: Taking the urban planning area in Anshuan as an example[J]. Guizhou Geology, 2017, 34(2): 109-115.

[25] 吴亚楠, 王延岭, 周绍智, 唐丽伟, 焦玉国. 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.

WU Ya'nan, WANG Yanling, ZHOU Shaozhi, TANG Liwei, JIAO Yuguo. Risk assessment of karst collapse in the Tailai basin based on the synthetic index method[J]. Carsologica Sinica, 2020, 39(3): 391-399.

 [26] 蒋小珍, 雷明堂, 管振德. 岩溶塌陷灾害的水动力条件危险性 评价指标: 以广西贵港青云村为例[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(6): 1316-1321.
 JIANG Xiaozhen, LEI Mingtang, GUAN Zhende. Characteriza-

tion criteria of karst collapse hazard on groundwater fluctuations in Qingyun village, Guigang, Guangxi, China[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(6): 1316-1321.

## Study on the early warning model based on the occurrence index of karst collapse in Linyi City

ZOU Lianqing<sup>1,2</sup>, CHU Fujian<sup>1,2</sup>, WANG Zhentao<sup>1,2</sup>, YAO Chunmei<sup>1,2</sup>, CHEN Yanan<sup>3</sup>, LIAN Bo<sup>4</sup>, WEI Zhongai<sup>5</sup>, MENG Yonghui<sup>1,2</sup>

(1. Shandong Provincial Territorial Spatial Ecological Restoration Center, Jinan, Shandong 250014, China; 2. Field Scientific Observation and Research Station for Land Use Safety in the Yellow River Delta, Ministry of Natural Resources, Binzhou, Shandong 251900, China; 3. Surveying and Mapping Institute of Linyi Natural Resources and Planning Bureau, Linyi, Shandong 276001, China; 4. Shandong Seventh Institute of Geology and Mineral Resources, Linyi, Shandong 276006, China; 5. Linyi Services Center for Natural Resources Development, Linyi, Shandong 276001, China)

**Abstract** The urban area of Linyi City is endowed with the basic conditions for the development of karst collapse. In this area, Ordovician limestone with karst development is widely distributed, and the limestone is covered by a thin Quaternary overburden with a binary phase structure. From the 1980s to the early 21<sup>st</sup> century, the rapid development of Linyi City, the increase of groundwater exploitation and the decline of the overall regional water level led to the frequent occurrence of geological disasters of karst collapses, causing serious economic losses and social impact.

In this study, the karst collapse in Linyi City is taken as the research object. The distribution law, geological conditions, and inducing factors of karst collapses are studied through statistical analysis. According to the analysis of the genesis mechanism of karst collapse in Linyi City, an early warning model based on the occurrence index of karst collapse is proposed. Taking the water level as the main monitoring factor, this model is constructed to comprehensively judge the early warning by the combination of multi-factors, and is verified by historical data.

During the high incidence period from 1993 to 2012, a total of 17 karst collapses occurred in the study area. These karst collapses were caused by geological conditions such as topography, geological structure, and formation lithology, as well as inducing factors such as groundwater exploitation, human engineering activities, and precipitation. The distribution law of karst collapse reflects the consistency with its related influencing factors. Karst collapses are mainly distributed in the caprock area of double-layer structure with shallow karst development and small overburden thickness. They are also distributed near the surface water body and fault zone. Generally, karst collapses take place in the funnel areas and in the seasons with a large variation of water levels, They also occur in the influence range of human engineering activities. With a comprehensive index method, an early warning model based on the judgment made through multi-factors is established. The model comprehensively considers geological conditions and inducing factors and selects 10 influencing factors, including karst development degree, caprock thickness, caprock structure, distance from structure, distance from surface water, distance between water level and limestone roof, water level amplitude, distance from the center of depression cone, precipitation, and human engineering activities. Different weights of influencing factors and the range of influencing factors of each sub-condition are given and the early warning level is divided into four grades according to the occurrence index value.

The model is verified by using historical data of the collapse when it occurred. For example, the data of 2003 was used for simulation and early warning validation. The karst collapse occurred in the east of the No.32 building in Lanshan community on May 8 and June 22 in 2003, and all the collapse points were located in the area at a high early warning level, and also fell into the time period of high early warning level. The results show that the model has high reliability in the verification of early warning in key monitoring areas of Linyi City, which can provide a reference for monitoring and early warning of karst collapse in other areas.

**Key words** karst collapse, comprehensive judgment, monitoring and early warning, Linyi City, middle Ordovician limestone, Quaternary cover

(编辑杨杨黄晨晖)