

冯亚伟, 毛宁利, 李卫利. 山东荆泉地区岩溶地面塌陷预警分区研究[J]. 中国岩溶, 2024, 43(2): 421-431.

DOI: 10.11932/karst20240207

山东荆泉地区岩溶地面塌陷预警分区研究

冯亚伟^{1,2}, 毛宁利^{1,2}, 李卫利^{1,2}

(1. 山东省鲁南地质工程勘察院(山东省地质矿产勘查开发局第二地质大队), 山东 兖州 272100;

2. 山东省地矿局岩溶地质重点实验室, 山东 兖州 272100)

摘要:以荆泉断块岩溶水系统为研究对象,通过建立地下水流模型和数学模型,旨在实现不同环境条件下岩溶塌陷预警分区,指导岩溶水开发利用。结果显示:在其它条件保持不变的情况下,随着降雨量的不断减小,研究区红色预警区面积不断增大,抽水井越密集的地方,越容易产生岩溶塌陷,岩溶水开采量的增加和降雨量的变化都是诱发岩溶塌陷的主要原因。建议以岩溶塌陷为约束条件,加强区内地下水开采优化控制与布局,在保证生产生活用水的前提下,降低岩溶塌陷发生概率。

关键词:岩溶塌陷; 预警; 不同环境; 数值模拟

创新点:(1)通过建立地下水流模型和数学模型,预测不同环境条件下岩溶水动力条件;(2)通过建立综合评价模型,实现不同环境条件下岩溶塌陷预警分区。

中图分类号: P642.25; P641.8 **文献标识码:** A

文章编号: 1001-4810(2024)02-0421-11

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

山东作为全国的经济文化大省,近年来经济社会发展迅速,人类工程活动强烈,对地质环境的影响较大,特别是岩溶发育区地质环境问题频发,主要岩溶地质环境问题有岩溶塌陷^[1-4]、岩溶地下水水质恶化^[5-8]及岩溶大泉流量衰减^[9]等,其中岩溶塌陷问题首当其冲。2015年以来,山东省荆泉断块岩溶塌陷灾害频发,截止目前,共发生岩溶塌陷地质灾害约58起^[10],以西坞沟村岩溶塌陷为例,该塌陷发生于2016年5月26日清晨,在马铃薯田地,当时该田地正在灌溉,地面突然下陷,形成一个平面呈圆形、直径约12 m、深约13 m的塌陷坑,距京沪高铁直线距离仅80余米。频繁发生的岩溶塌陷地质灾害,不仅在当地居民中造成恐慌,还严重威胁着公共安全。

通常岩溶塌陷的形成是由于上覆砂层被基岩渗

透带中的水侵蚀至岩溶管道,在基岩面之上形成空腔,随着侵蚀的继续,空腔持续变大,达到砂土层的极限平衡之后,形成塌陷^[11]。由于岩溶塌陷的突发性和破坏性,国内外众多学者致力于研究其预警方法,以期降低危害。综合来看,当今预警方法更多地是在查明岩溶塌陷影响因素及分布规律的基础上^[12],通过开展水气压力监测^[13-15]、HVSr探测^[16]、大地电磁法探测^[17]及数值模拟^[18]等手段,总结岩溶塌陷成因机理^[19-21],建立层次分析模型(AHP)^[22-23],划定岩溶塌陷预警分区^[24],从而提出岩溶塌陷防治措施^[25]。

本文是在建立水文地质概念模型和数学模型的基础上,分析岩溶条件及覆盖层条件分布特征,并采用数值模拟方法预测不同环境条件下岩溶地下水的动力条件,建立综合评价模型,以实现不同环境条件下岩溶塌陷的预警分区,以期对相关政府职能部门防灾减灾决策的制定提供借鉴。

第一作者简介:冯亚伟(1990—),男,工程师,主要从事水文地质环境地质方面研究。E-mail: 1102844258@qq.com。

收稿日期: 2023-01-03

1 研究区概况

荆泉断块岩溶水系统位于山东省滕州市东北部(图1)。西南部以峰山断裂为界,北部边界为长龙断裂,南部受桑村穹隆所控制。研究区地处暖温带半湿润大陆性季风气候区,属淮河流域南四湖水系,多年平均降水量 758.9 mm(1956—2019 年),降水主要集中在每年的 6—9 月份,占全年降水量的 70%~80%;多年平均气温 14.0 ℃(1956—2019 年),年际变化不大。

区内岩溶地下水的补给以大气降水入渗、侧向径流补给为主,其次为地表水渗漏、第四系孔隙水越流和农田灌溉水回渗补给;整体由 EN 向 WS 方向径

流,水力坡度沿径流方向逐渐变小,主径流带分布在冯卯—邵疃—余寨一线;主要排泄方式为荆泉水源地集中开采和农业分散开采。岩溶裂隙主要发育在奥陶系马家沟组和寒武系张夏组灰岩、白云质灰岩及豹皮灰岩等地层中,岩溶水极强富水地段位于峰山断裂东侧的余寨—罗庄一带,岩溶发育极为强烈,含水层厚 50~70 m,钻孔单井涌水量大于 3 000 $\text{m}^3 \cdot (\text{d} \cdot \text{m})^{-1}$,最大达 6 988 $\text{m}^3 \cdot (\text{d} \cdot \text{m})^{-1}$ 。京沪高铁滕州段从滕州市东北经过荆泉水源地主开采区北侧,水源区内,岩溶隐伏于第四系松散岩之下,岩溶发育于寒武—奥陶系碳酸盐岩内,溶洞竖向直径一般 1~2 m,最大约 6 m,溶洞多为空洞或半充填,充填物为黏土夹碎石及粗砂、砾砂等。

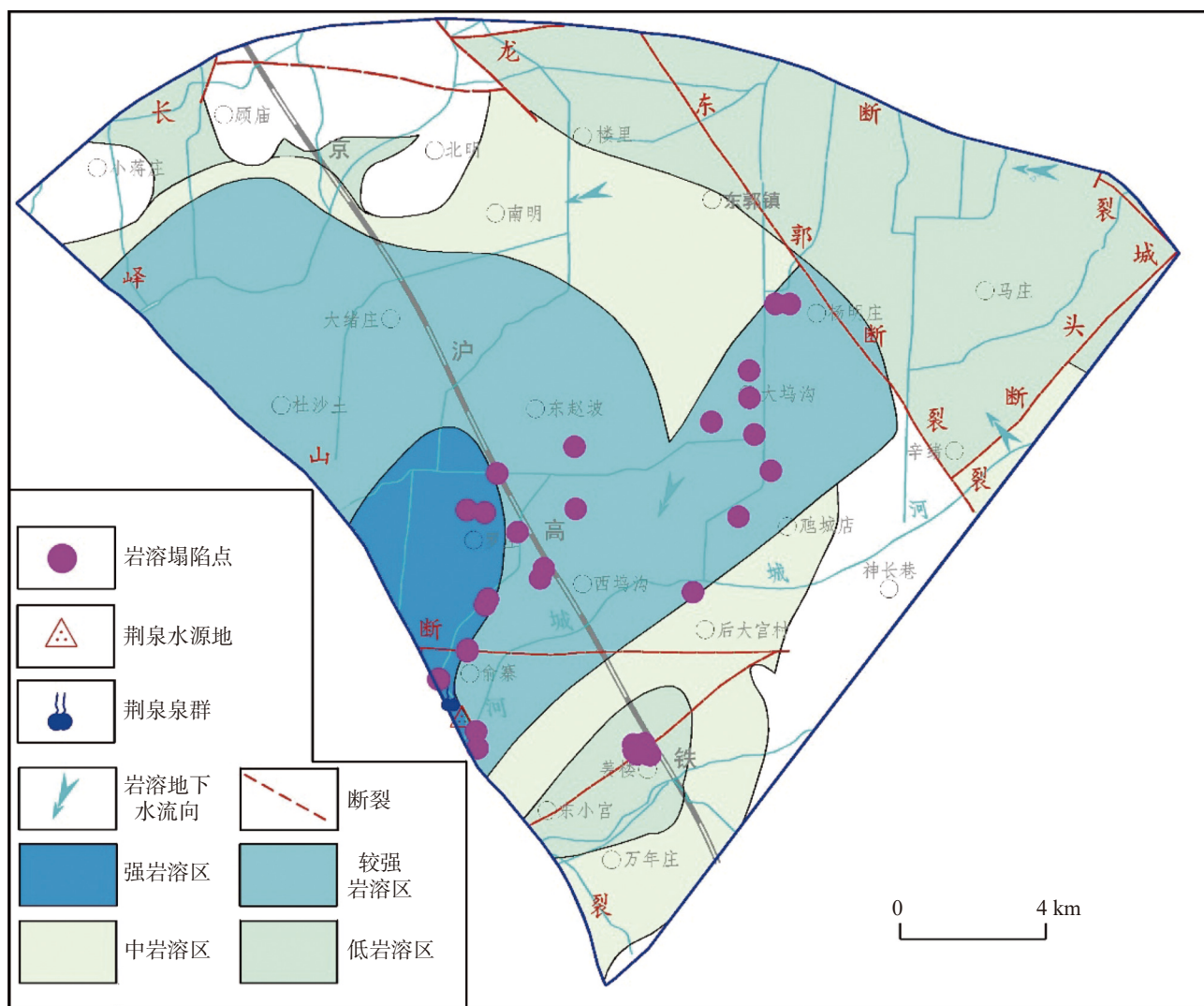


图1 荆泉地区岩溶发育分区及岩溶塌陷分布图

Fig. 1 Grades of karst development and distribution of karst collapses in the Jingquan area

2 地下水流数值模型

2.1 概念模型及数学模型

2.1.1 水文地质概念模型

可将整个含水层系统概化为三个含水层: 第一层为浅层含水层组, 包括第四系孔隙水和基岩裸露区浅层岩溶水; 第二层为弱透层, 主要是第四系黏土层。为了分层一致, 将奥陶系及寒武系裂隙深层含水层组一定深度范围划为弱透层; 第三层为深层含水层, 主要是奥陶系和寒武系碳酸盐岩类岩溶水岩组。

2.1.2 地下水流动数学模型

根据 Darcy 定律和水均衡原理, 忽略密度变化对地下水的影响, 建立三维流动数学模型:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + w = \mu_s \frac{\partial h}{\partial t} \\ h(x, y, z, t)|_{t=0} = h_0(x, y, z) \\ h(x, y, z, t)|_{(x, y, z) \in B_1} = h_i(x, y, z, t) \\ -K_n \frac{\partial h}{\partial n} \Big|_{(x, y, z) \in B_2} = q(x, y, z, t) \end{cases}$$

式中: $h(x, y, z, t)$ 为某点 t 时刻地下水水位/L; K_{xx} 、 K_{yy} 和 K_{zz} 分别为沿 x 、 y 和 z 方向的渗透系数/ $L \cdot T^{-1}$; w 为单位体积单位时间内注入或抽出的水量/ $L \cdot T^{-1}$; μ_s 为单位储水系数/ $L \cdot T^{-1}$; t 为时间/ T ; $h_0(x, y, z)$ 为流场初始水位/L; B_1 为一类边界条件; B_2 为二类边界条件; $q(x, y, z, t)$ 为二类边界上单位面积已知流量 $L \cdot T^{-1}$ 。

2.2 数值模型

根据收集到的降雨、地下水开采、地下水及地表水监测等资料显示, 2017 年 6 月至 2018 年 6 月资料最为全面, 故本次模拟时间段选择 2017 年 6 月 1 日至 2018 年 5 月 31 日, 共 1 年, 时间步长为 30 d。

2.2.1 边界及初始条件

(1) 边界条件 在建立地下水流数学模型之前, 应对实际水文地质条件进行概化, 建立水文地质概念模型, 并将含水系统概化为非均质各向同性的二维非稳定流^[26]。本次模拟范围为荆泉断块岩溶水系统, 总面积约 630 km², 其边界条件: 北部边界为长龙

断裂, 西部边界为峰山断裂, 东北部边界为皂山—龙宝山断裂, 南部边界为桑村穹隆核部变质岩、岩浆岩构成的阻水边界, 东南部边界为地表分水岭; 上边界主要接受大气降水、灌溉回渗补给, 存在蒸发排泄及地表水体的补给和排泄; 根据钻孔资料统计, 含水层大多集中在 200 m 以浅, 其下岩溶发育微弱, 故可将水流系统的下边界定为地面以下约 200 m 处为隔水边界。

(2) 初始条件 根据 2017 年 6 月所得到的地下水位统测资料, 采用反距离加权法对其进行插值得到初始水位等值线, 并将其作为模型校正期的初始水位。总的来说, 岩溶水及孔隙水的流向均为自 E 向 W, 东部水位标高基本介于 80~100 m 之间, 西部水位标高介于 60~70 m 之间。

2.2.2 参数分区及参数值

含水层水文地质参数分区及取值的主要依据是

①研究区地质和水文地质图; ②前人在研究区的研究成果; ③根据抽水试验获得的参数。在此基础上, 利用数值模型调整参数, 将数值模型计算结果与实测结果进行对比。本次确定的第四系含水层与岩溶含水层参数分区及参数值分别为: 浅层分为 14 个区, 渗透系数介于 4~100 m·d⁻¹ 之间, 给水度介于 0.009~0.015 之间; 弱透层分为 7 个区, 渗透系数介于 0.05~20.5 m·d⁻¹ 之间, 给水度介于 0.01~0.014 之间; 深层分为 29 个区, 渗透系数介于 5~520 m·d⁻¹ 之间, 给水度介于 1.0×10⁻⁶~7.0×10⁻⁶ 之间。

2.2.3 模型源汇要素

(1) 大气降水入渗 根据区内第四系岩性、基岩出露情况及地形地貌等地质特征对模型降雨入渗进行分区, 由于区内隔水层较厚, 故在垂向上, 降水入渗只涉及浅层含水层。本次降水入渗共分 17 个区, 入渗系数介于 0.15~0.33 之间。

(2) 河流渗漏 区内主要渗漏河流为城河, 该河流从模拟区东北部流过, 按照河底岩性及分布特征, 结合河流水位宽度等信息, 得到河流渗漏强度为 6.501 m³·(d·m)⁻¹。

(3) 人工开采模拟 区内集中供水开采井分布在西南部荆泉水源地附近, 其它为农业供水开采井, 由于农业用水难以准确统计, 在计算过程中, 对农村生活用水和灌溉水井分布进行了适当概化。

2.2.4 参数识别及模型检验

(1)观测孔水位动态拟合 将模型计算水位与收集到的实际观测孔水位进行对比分析,从模型水位动态拟合来看,效果较好,水位变化趋势基本相同,模拟水位与实际观测水位差值总体较小。

(2)等水位线对比 利用区内2017年12月和2018年6月两次统测地下水水位数据画出的等水位线图与模拟结果拟合对比发现,两者具有较好的一致性。

2.2.5 模拟结果

不同环境条件下地下水水位预测结果见图2。

3 预警分区方法

3.1 评价指标选取及赋值

由于岩溶塌陷的影响因素具有复杂性和多变性,发生的条件具有突发性和隐蔽性,很难对其进行准确预测,故引入层次模糊数学方法,对岩溶塌陷进行综合分析。通过对区内岩溶塌陷影响因素进行分析,认为其主要受到覆盖层条件(岩性、厚度)、地下水条件(地下水径流强度、水位变幅、地下水面与基岩

面距离)以及岩溶条件(地层岩性、发育程度)的影响,故将以上条件作为层次模糊评判预测因子(表1),建立综合评价模型。

3.2 评价指标权重

在所建立的模型中,基本条件层有3个评价指标,因子层有7个评价指标,则评价单元 j 所构成的相应模糊子集为:

$$B_j = B_1, B_2, B_3^T \quad (1)$$

$$C_j = C_1, C_2, C_3, \dots, C_7^T \quad (2)$$

权重反应了各影响因子的相对重要性。本次选用因子所设的权重,均采用本地专家经验法和试算法确定,即先由专家凭经验确定一套试算权重初值,选择一些塌陷程度不同的单元进行权重反演;若相差太大,再对权重进行调整,直到调试合理后方可设为计算权重,由此得到各因子的权重(表2)。

然后,将每种预测因子所得的预警分区进行数字化模拟,得到带有相应属性的坐标点,这些坐标点所在的预警分级共分为红、橙、黄三个等级及安全区域,然后将红色、橙色和黄色预警分区内的坐标点分别赋予数值区间4~3、3~2、2~1,将其与二级权重(WC)对应相乘,最后将得到的每种预测因子下的数

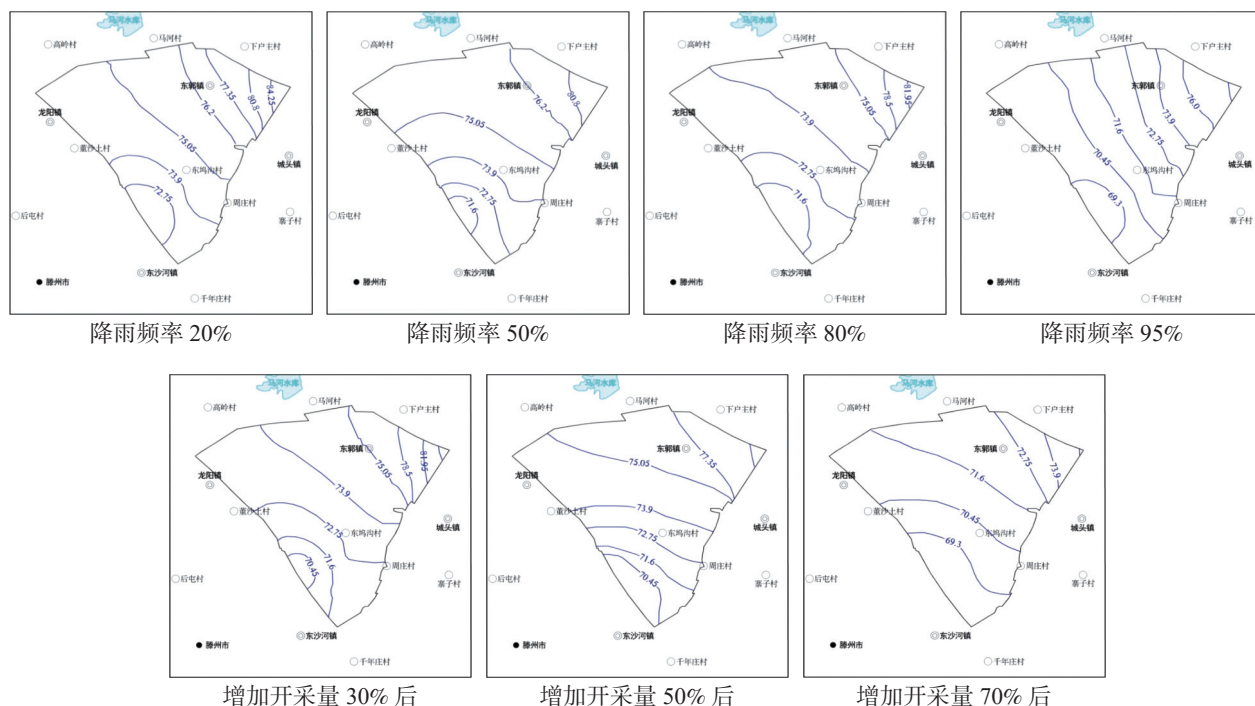


图2 不同环境条件下地下水水位模拟结果

Fig. 2 Simulation results of groundwater level under different environmental conditions

表 1 岩溶塌陷综合评判等级和赋值表
Table 1 Grade and assignment of comprehensive evaluation for karst collapses

因子		分级和取值				
条件层(B)	因子层(C)	代号	不易发区	低易发区	中易发区	高易发区
岩溶条件(B1)	岩溶地层岩性	C1	寒武系馒头组、崮山组碎屑岩夹灰岩	寒武系炒米店组薄层—中厚层灰岩、奥陶系马家沟组东黄山段薄层白云岩	奥陶系马家沟组五阳山段中厚层灰岩、土峪段薄层—中厚白云岩	寒武系三山子组中厚层白云岩、张夏组厚层灰岩、奥陶系北庵庄段中厚层灰岩
	浅部岩溶发育程度	C2	较差	中等	较发育	强烈发育
覆盖层条件(B2)	土层厚度/m	C3	>15	0~5	5~10	10~15
	土层岩性	C4	残积黏土	冲积黏土	含砾粉质黏土	中粗砂和细砂等
地下水条件(B3)	地下水水面与基岩面距离/m	C6	10~15	5~10	2.5~5	<2.5
	地下水水位变幅/m	C7	0.5~1	1~1.5	1.5~2	>2
	地下水径流强度	C8	弱	一般	较强	强

表 2 预测因子权重分配表
Table 2 Weight allocation of prediction factors

目的层	条件层		因子层		
	条件(B)	权重(WB)	因子	一级权重	二级权重(WC)
岩溶塌陷预测	岩溶条件(B1)	0.4	岩溶塌陷埋深C1	0.271	0.108 4
			浅部岩溶发育程度C2	0.729	0.291 6
	覆盖层条件(B2)	0.3	土层厚度C3	0.687	0.206 1
			土层岩性C4	0.313	0.093 9
	地下水条件(B3)	0.3	地下水水面与基岩面距离C5	0.438	0.131 4
			地下水水位变幅C6	0.243	0.072 9
			地下水径流强度C7	0.319	0.095 7

字化数据累加,进行综合分析。

3.3 各要素分布特征

在岩溶塌陷预警过程中,岩溶条件中的地层岩性和岩溶发育程度、覆盖层条件中的土层岩性和厚度等参数,在一定时期内是基本不变的。因此,本次只进行地下水条件的模拟分析,即可根据各要素分布特征进行岩溶塌陷的预警。

3.3.1 岩溶顶面分布及岩溶发育特征

据已施工的 30 余个钻孔显示的开口型岩溶裂隙埋藏深度,运用克里格方法进行数学插值计算,结合已发生岩溶塌陷位置,得到各岩溶塌陷相对应的

开口型岩溶裂隙埋深(图 3)。区内开口型岩溶裂隙埋深大致由 NE 向 SW 方向递减,在罗庄村的南部和东北部出现较大起伏。已发生岩溶塌陷附近开口型岩溶裂隙埋藏深度最低为 28.1 m,位于虬城店村西,最深达 34.4 m,位于杨明庄村附近。故本次将开口型岩溶裂隙埋深大于 28 m 的地区定为红色预警区,20~28 m 的地区定为橙色预警区,0~20 m 的地区定为黄色预警区。

据统计,区内发生于三山子组中厚层白云岩、张夏组厚层灰岩以及马家沟组中厚层灰岩中的岩溶塌陷占总数的 65.6%,发生于炒米店组薄层—中厚层灰岩、马家沟组薄层白云岩中的岩溶塌陷占总数的 34.4%^[10](图 4)。本次将三山子组中厚层白云岩、张

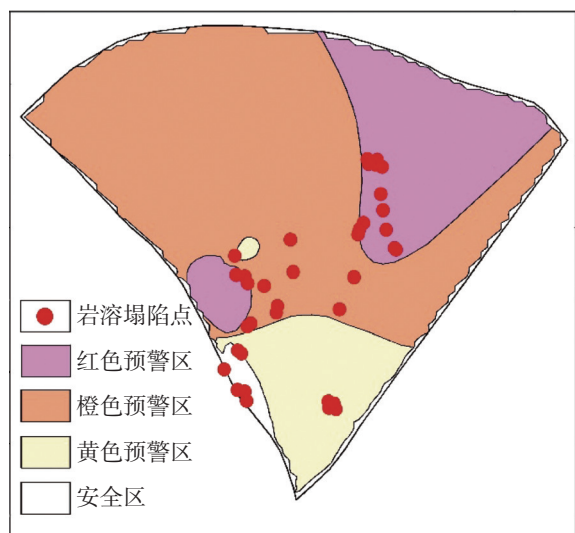


图3 开口型岩溶裂隙埋藏深度及预警情况/m

Fig. 3 Buried depth and early warning of open karst fissures/m

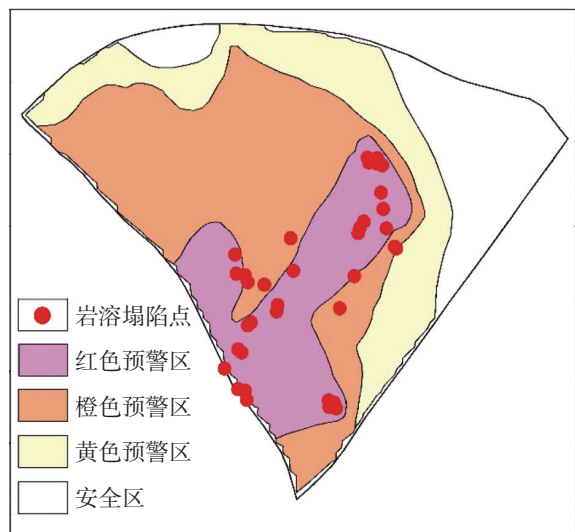


图4 岩溶发育程度预警情况

Fig. 4 Early warning of karst development degrees

夏组厚层灰岩以及马家沟组中厚层灰岩分布区定为红色预警区;将马家沟组中厚层白云岩及灰岩分布区定为橙色预警区;将炒米店组薄层—中厚层灰岩、马家沟组薄层白云岩分布区,定为黄色预警区;其余馒头组、崮山组碎屑岩夹灰岩分布区定为安全区域。约86.2%的已发岩溶塌陷分布在红色预警区,其余均位于橙色预警区。

3.3.2 覆盖层岩性结构及厚度分布特征

结合研究区内的地质和水文地质特征,搜集区内30余个钻孔资料,对上覆第四系岩层厚度进行插值计算,得到覆盖层岩性及厚度预警信息。

根据岩溶裂隙的上覆土层岩性信息(图5),将土层岩性分为砂土、含砾粉质黏土、冲击黏土和残积黏土,分别对应红色、橙色、黄色和安全预警区。将覆盖层的土层厚度分为5~15 m、15~30 m、30~50 m及大于50 m或小于5 m四个级别,分别对应红色、橙色、黄色和安全预警区。

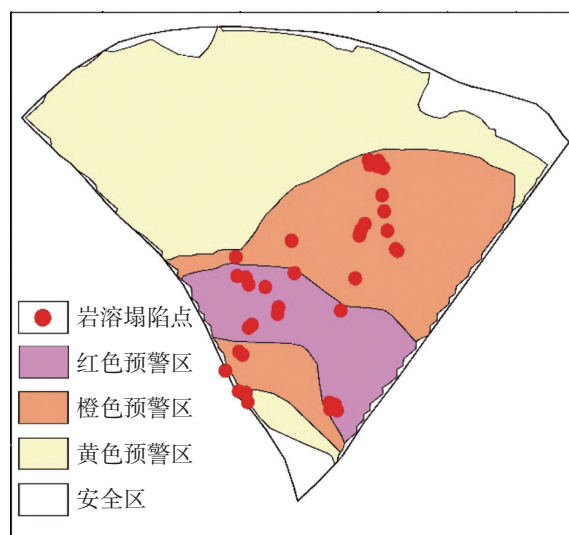


图5 覆盖层岩性预警分区图

Fig. 5 Zoning of early warning for overburden lithology

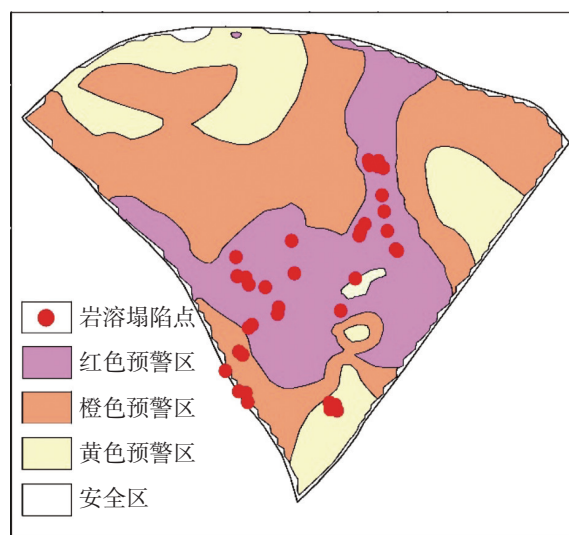


图6 覆盖层厚度预警分区图

Fig. 6 Zoning of early warning for the overburden thickness

据统计,研究区覆盖层厚度10~15 m、5~10 m、0~5 m及其它厚度的岩溶塌陷分别占总数的48.3%、37.9%、13.8%及0,分别对应红色、橙色、黄色和安全预警区(图6)。

3.3.3 岩溶地下水条件分布特征

岩溶地下水条件分布特征的研究是利用数值模拟方法,建立前述水文地质概念模型及地下水流动数学模型。预测现状条件下,20%、50%、80%及95%降雨频率下,岩溶地下水条件预警分区,以及现状降雨条件下,开采量增加30%、50%及70%时,岩溶地下水条件预警分区。

根据已发生岩溶塌陷区水文地质条件现状,将研究区水位变幅分为2 m以上的红色预警区、1.5~2 m的橙色预警区、1~1.5 m的黄色预警区和小于1 m的安全区;岩溶水水位与基岩面距离0~2.5 m的红色预警区、2.5~5 m的橙色预警区、5~10 m的黄色预警区和大于10 m的安全区,以及地下水强径流的红色预警区、较强径流的橙色预警区、一般径流的黄色预警区和弱径流的安全区。

4 预警结果

4.1 不同降雨条件下,岩溶塌陷预警

降雨入渗导致上覆的第四系土层自重加大,岩土体内部的抗滑阻力降低,同时对围岩产生较大的动水压力和冲刷作用;另外,当岩溶水位下降到基岩顶板以下时,水的承压性会消失,对盖层土体的浮托力也会消失,进而加速了土体的破坏。因此,降雨量是影响岩溶塌陷的一个重要因素。综合1956—2019年的降雨量数据,对现状条件,不同降雨频率下,岩溶塌陷产生的可能性进行预警研究,研究结果如

表3、图7。

总的来说,降雨频率从20%增加到95%的过程中,在开采量等其它条件保持不变的条件下,随着降雨量的不断减小,研究区从无红色预警区增加到红色预警区占整个区域的25.74%,呈逐渐增大的趋势,且橙色预警区最大可占研究区的一半以上;研究区预警严重程度呈现由西南往东北逐渐递减的趋势。主要是因为,在其它条件不变的条件下,随着降雨量的不断减少,区内岩溶水水位不断下降,岩溶空腔产生负压,在地表大气压的作用下,土体较易被破坏,从而出现岩溶塌陷。

4.2 不同开采量条件下,岩溶塌陷预警

人为对岩溶水的过度开采,势必造成岩溶水水位的下降,岩溶水水位下降的同时在岩溶管道中形成真空环境,导致岩溶水浮托力丧失,相当于土体自重增大,上覆第四系土层在失去支撑力的情况下,极易产生岩溶塌陷。因此,在查明现状开采量的基础上,对枯水期不同开采量条件下,岩溶塌陷产生的可能性进行预警研究,具有十分重要的意义(图8)。

由图8可知,在不同开采量条件下,红色预警区主要集中在研究区的中部,且随着开采量的增加,红色预警区域逐渐扩大;对于已发生的岩溶塌陷,开采量增加30%、50%和70%条件下,分别有6.9%、31.03%和65.51%的岩溶塌陷位于红色预警区内;对于岩溶塌陷隐患点,开采量增加30%、50%和70%条件下,分别有11.76%、61.76%和67.65%的岩溶塌陷位于红色预警区内。

表3 不同降雨频率下,岩溶塌陷预警结果一览表

Table 3 Early warning results of karst collapses under different rainfall frequency

不同降雨频率条件下	降雨频率/%	20	50	80	95
	降雨量/mm	1 081.5	918.18	823.02	480.1
红色预警区/%		—	—	20.43	25.74
橙色预警区/%		—	11.52	58.79	58.39
黄色预警区/%		—	55.25	20.79	15.86
不同预警区已发生岩溶塌陷数量占比/%	红色预警区	—	—	74.14	86.21
	橙色预警区	—	20.69	15.52	13.79
	黄色预警区	86.2	65.52	10.34	—
不同预警区岩溶塌陷隐患点数量占比/%	红色预警区	—	—	100	100
	橙色预警区	—	26.47	—	—
	黄色预警区	100	73.53	—	—

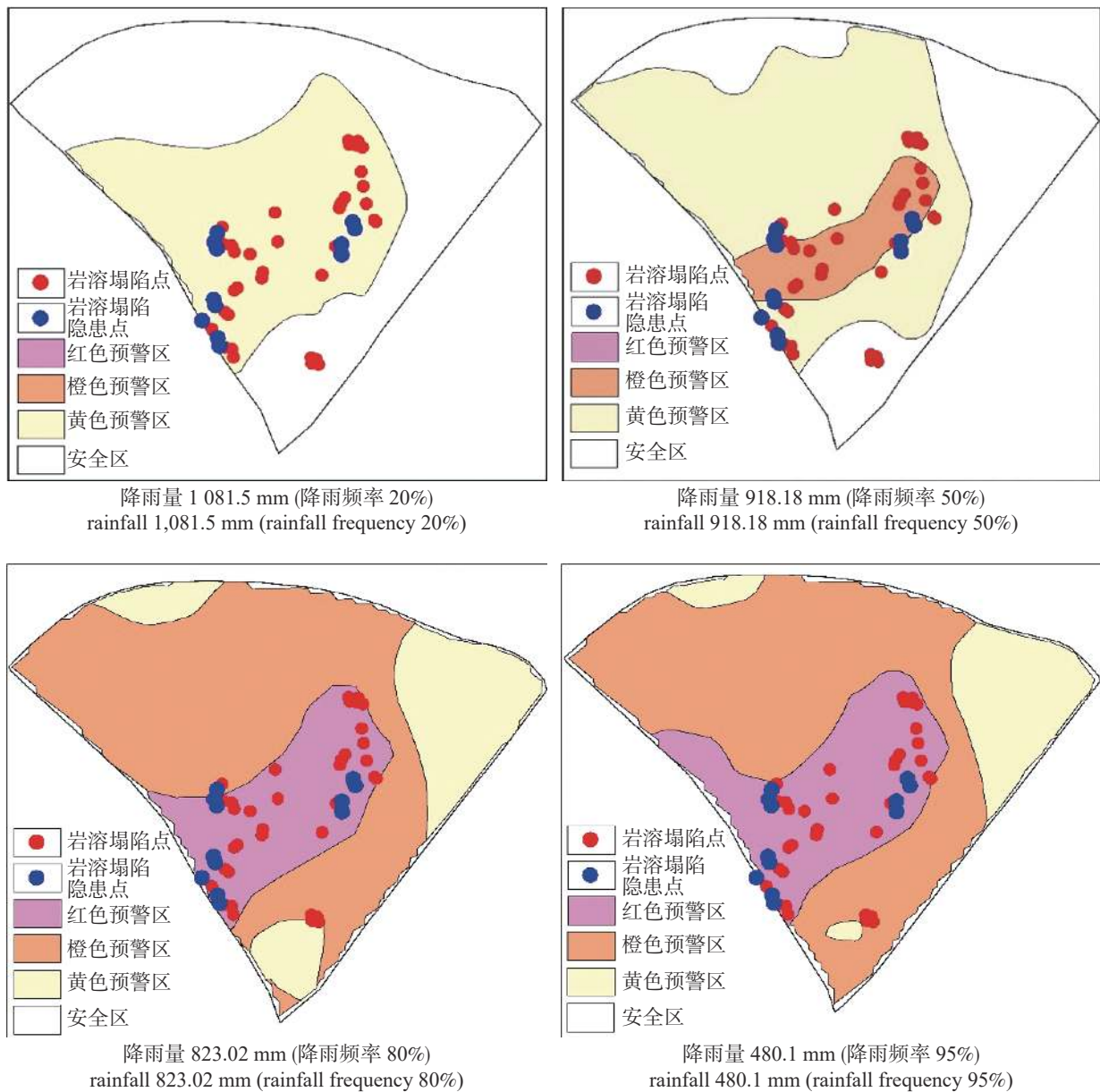


图 7 现状条件,不同降雨频率下,岩溶塌陷预警分区图

Fig. 7 Zoning of early warning for karst collapses under different rainfall frequency

总的来说,岩溶水开采量的增加是诱发岩溶塌陷的主要因素之一,尤其在研究区的西南地区,此处抽水井相较于其它地区更为密集,受其影响更为严重,在开采量达到 50% 时已有超过 60% 的岩溶塌陷隐患点达到红色预警。

5 结论

(1)影响岩溶塌陷的因素主要为覆盖层条件(岩性、厚度)、地下水条件(地下水径流强度、水位变幅、地下水与基岩面距离)以及岩溶条件(地层岩性、发育程度)三个方面,岩溶条件及覆盖层条件在一定时

期内是基本不变的,岩溶塌陷的预警是将以上两种条件作为固定条件的基础上,用数值模拟的方法对地下水条件的变化进行预测分析。

(2)在其他条件保持不变的情况下,随着降雨量的不断减小,研究区红色预警区面积逐渐增大,且预警严重程度呈现由西南往东北逐渐递减的趋势,抽水井越密集的地方,越容易产生岩溶塌陷。岩溶水开采量的增加和降雨量的变化都是诱发岩溶塌陷的主要原因。

(3)今后应以岩溶塌陷为约束条件,优化区域岩溶地下水的开采与布局,在保证生产生活用水的前提下,降低岩溶塌陷发生的概率。

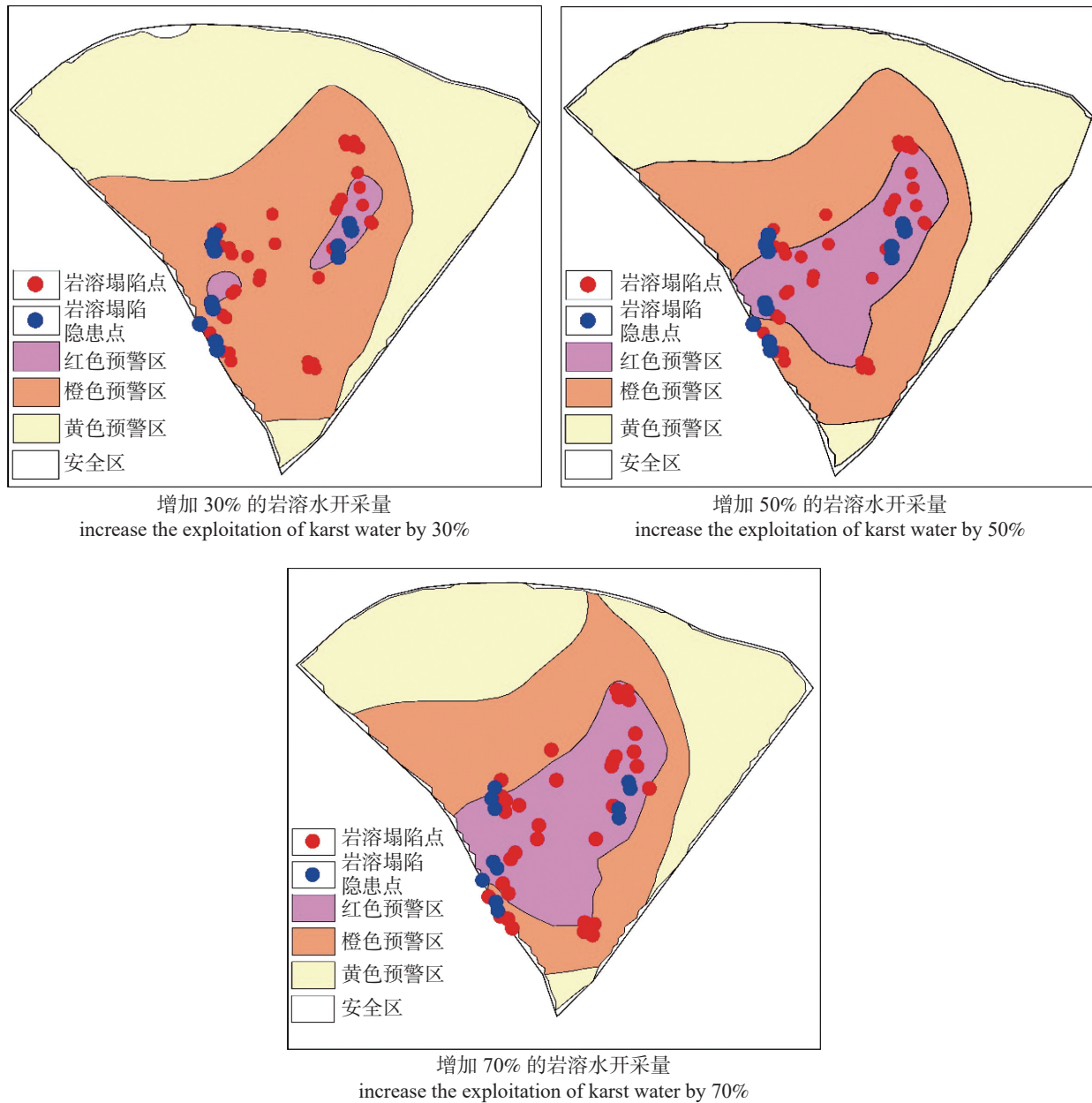


图 8 现状条件,不同岩溶水开采量条件下,岩溶塌陷预警分区图

Fig. 8 Zoning of early warning for karst collapses under different conditions of karst water exploitation

参考文献

[1] 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, 21(9): 61-63.
LI Qingchun, FENG Keyin, ZHENG Tingming, DONG Qiang. Characteristics and origin analysis of karst collapse in Linyi City[J]. Shandong Land and Resources, 2005, 21(9): 61-63.

[2] 万志博, 武雄, 徐晟, 李元仲, 杨蕊英, 陈鸿汉, 高明显, 张顺风. 枣庄市十里泉岩溶塌陷机理分析[J]. 水文地质工程地质, 2006, 33(3): 109-111.
WAN Zhibo, WU Xiong, XU Sheng, LI Yuanzhong, YANG Ruiying, CHEN Honghan, GAO Mingxian, ZHANG Shunfeng. Mechanism of karst collapse in Shiliquan area in Zaozhuang City[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2006, 33(3): 109-111.

[3] 王延岭, 陈伟清, 蒋小珍, 管振德. 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.
WANG Yanling, CHEN Weiqing, JIANG Xiaozhen, GUAN Zhende. Development features and formation mechanisms of karst collapses in the Tailai basin, Shandong Province[J]. Carso-logica Sinica, 2015, 34(5): 495-506.

[4] 高峰, 王振涛, 靳丰山, 张宪尧, 刘善军. 山东省莱芜盆地岩溶塌陷风险性评价[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(11): 359-362.
GAO Feng, WANG Zhen tao, JIN Fengshan, ZHANG Xianyao, LIU Shan jun. Risk assessment of karst collapse in the Laiwu of Shandong Province[J]. China Population, Resources and Environment, 2016, 26(11): 359-362.

[5] 冯亚伟, 陈洪年, 卜华, 贾德旺. 羊庄岩溶水系统水化学成因及

- 同位素特征[J]. 中国岩溶, 2019, 38(3): 394-403.
- FENG Yawei, CHEN Hongnian, BU Hua, JIA Dewang. Hydrochemical genesis and isotope characteristics of Yangzhuang karst water system[J]. *Carsologica Sinica*, 2019, 38(3): 394-403.
- [6] 马燕华, 苏春利, 刘伟江, 朱亚鹏, 李俊霞. 水化学和环境同位素在示踪枣庄市南部地下水硫酸盐污染源中的应用[J]. 环境科学, 2016, 37(12): 4690-4699.
- MA Yanhua, SU Chunli, LIU Weijiang, ZHU Yapeng, LI Junxia. Identification of sulfate sources in the groundwater system of Zaozhuang: Evidences from isotopic and hydrochemical characteristics[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(12): 4690-4699.
- [7] 张秋霞, 周建伟, 林尚华, 魏东, 张黎明, 袁磊. 淄博洪山、寨里煤矿区闭坑后地下水污染特征及成因分析[J]. 安全与环境工程, 2015, 22(6): 23-28.
- ZHANG Qiuxia, ZHOU Jianwei, LIN Shanghua, WEI Dong, ZHANG Liming, YUAN Lei. Characteristics and causes of groundwater pollution after Hongshan-Zhaili mine closure in Zibo[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2015, 22(6): 23-28.
- [8] 王珺瑜, 王家乐, 靳孟贵. 济南泉域岩溶水水化学特征及其成因[J]. 地球科学, 2017, 42(5): 821-831.
- WANG Junyu, WANG Jiale, JIN Menggui. Hydrochemical characteristics and formation causes of karst water in Jinan spring catchment[J]. *Earth Science*, 2017, 42(5): 821-831.
- [9] 王茂枚, 束龙仓, 季叶飞, 陶玉飞, 董贵明, 刘丽红. 济南岩溶泉水流量衰减原因分析及动态模拟[J]. 中国岩溶, 2008, 27(1): 19-23.
- WANG Maomei, SHU Longcang, JI Yefei, TAO Yufei, DONG Guiming, LIU Lihong. Influences of SO_4^{2-} on the solubility of calcite and dolomite[J]. *Carsologica Sinica*, 2008, 27(1): 19-23.
- [10] 冯亚伟, 李志峰, 仝路, 曾斌. 山东荆泉断块区覆盖型岩溶塌陷控制因素和影响因素分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(3): 73-82.
- FENG Yawei, LI Zhifeng, TONG Lu, ZENG Bin. Analysis on factors controlling and influencing overburden karst collapse in Jingquan fault block, Shandong Province[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2020, 31(3): 73-82.
- [11] Sophie Messerklinger. Formation mechanism of large subsidence sinkholes in the Lar valley in Iran[J]. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 2014(47): 237-250.
- [12] 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 karst collapse in the Tailai basin of Shandong Province[J]. *Carsologica Sinica*, 2016, 35(1): 60-66.
- [13] Jiang X Z, Lei M T, Zhao H Q. Review of the advanced monitoring technology of groundwater-air pressure (enclosed potentiometric) for karst collapse studies[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2019, 78(24): 701.
- [14] 王晓玮, 赵志伟, 陈伟清, 周绍智. 泰安市覆盖型岩溶分布地区岩溶塌陷地下水位预警研究[J]. 中国岩溶, 2017, 36(6): 795-800.
- WANG Xiaowei, ZHAO Zhiwei, CHEN Weiqing, ZHOU Shaozhi. Research on groundwater level warning for karst collapse of covered karst areas in Tai'an City[J]. *Carsologica Sinica*, 2017, 36(6): 795-800.
- [15] 高宗军, 鲁统民, 王敏, 冯建国, 刘书江, 王姝. 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.
- [16] Liang Donghui, Gan Fuping, Zhang Wei, Jia Long. The application of HVSR method in detecting sediment thickness in karst collapse area of Pearl River Delta, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2018, 77: 259.
- [17] Djibir Foudili, Abderrezak Bouzid, Mohamed Chérif Berguig, Said Sofiane Bougchiche, Abdeslam Abtout, Mehdi A Guemache. Investigating karst collapse geohazards using magnetotellurics: A case study of M'rara basin, Algerian Sahara[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2019, 160: 144-156.
- [18] Liu Honglei, Li Lianchong, Li Zhichao, Yu Guofeng. Numerical modelling of mining-induced inrushes from subjacent water conducting karst collapse columns in Northern China[J]. *Mine Water and the Environment*, 2018, 37(4): 652-662.
- [19] Shi Hai, Li Quanming, Zhang Qinglong, Yu Yuzhen, Xing Yujian, Yu Kun. Mechanism of shallow soil cave-type karst collapse induced by water inrush in underground engineering construction[J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2020, 34(1): 04019091.
- [20] Wei Yongyao, Sun Shulin. Comprehensive critical mechanical model of covered karst collapse under the effects of positive and negative pressure[J]. *Bulletin of Engineering Geology & the Environment*, 2018, 77(1): 177-190.
- [21] Li Hao, Bai Haibo, Wu Jianjun, Ma Zhanguo, Ma Kai, Wu Guangming, Du Yabo, He Shixin. A cascade disaster caused by geological and coupled hydro-mechanical factors—Water inrush mechanism from karst collapse column under confining pressure[J]. *Energies*, 2017, 10: 1938.
- [22] Wu Yuanbin, Jiang Xiaozhen, Guan Zhende, Luo Weiquan, Wang Yanling. AHP-based evaluation of the karst collapse susceptibility in Tailai basin, Shandong Province, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2018, 77: 436.
- [23] Wei Aihua, Li Duo, Zhou Yahong, Deng Qinghai, Yan Liangdong. A novel combination approach for karst collapse susceptibility assessment using the analytic hierarchy process, catastrophe, and entropy model[J]. *Natural Hazards*, 2020, 105(1): 405-430.
- [24] 黄健民, 郑小战, 胡让全, 陈建新, 吕镁娜, 陈小月, 郭宇, 刁群. 广州金沙洲岩溶地面塌陷灾害预警预报研究[J]. 现代地质, 2017, 31(2): 421-432.
- HUANG Jianmin, ZHENG Xiaozhan, HU Rangquan, CHEN Jianxin, LYU Meina, CHEN Xiaoyue, GUO Yu, DIAO Qun. A study of warning and forecasting of karst collapse geological dis-

- aster in Jinshazhou of Guangzhou[J]. *Geoscience*, 2017, 31(2): 421-432.
- [25] 曹锋, 吴春寅. 枣庄地区岩溶地面塌陷成因与防治[J]. *中国岩溶*, 1998, 17(2): 104-110.
- CAO Feng, WU Chunyin. Genesis, prevention and control of surface collapse in Zaozhuang[J]. *Carsologica Sinica*, 1998, 17(2): 104-110.
- [26] 张俊华, 于福荣, 李志萍. FEFLOW 在黄龙工业园地下水数值模拟中的应用[J]. *人民黄河*, 2011, 33(6): 69-70.

Zoning of early warning for karst collapses in the Jingquan area of Shandong Province

FENG Yawei^{1,2}, MAO Ningli^{1,2}, LI Weili^{1,2}

(1. *Shandong Provincial Lunan Geology and Exploration Institute (No.2 Geological Brigade of Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources), Yanzhou, Shandong 272100, China;*
2. *Key Laboratory of Karst Geology, SDGM, Yanzhou, Shandong 272100, China*)

Abstract As one of the most common geological disasters in the Jingquan area, covered karst collapses mostly occurred in the dry seasons from 2015 to 2017. With the frequent occurrence of karst collapses, the sustainable development of economy and the safety of people's lives and property are threatened. Therefore, it is urgent for us to find out the current situation of karst collapses, analyze their influencing factors and distribution rules, and carry out the research on the zoning of early warning for karst collapses under different environmental conditions, in order to provide a decision-making basis for carrying out targeted prevention and control. In view of the frequent occurrence of covered karst collapses in the Jingquan area, based on the exploration data of karst collapses in this area, this study analyzes and studies the background conditions and influencing factors of collapse formation with methods such as mathematical statistics, numerical simulation and comprehensive evaluation model. Through numerical simulation and fuzzy mathematical methods, the zoning of early warning for karst collapses under different environmental conditions (rainfall frequency of 20%, 50%, 80% and 95%, and the increase of mining volume of 30%, 50% and 70%) is studied, and targeted prevention and control measures are put forward.

The research conclusions mainly include the following four aspects: (1) The aquifer system in the Jingquan area can be generalized into three aquifer groups as a whole. The first layer—the shallow aquifer group—includes pore water in the Quaternary coverage area and shallow water in the exposed bedrock area. The second layer—the weakly permeable aquifer group—includes the Quaternary clay layer and the fractured deep aquifers of Cambrian and Ordovician in a certain depth range. The third layer—the deep aquifer group—includes Ordovician aquifers of carbonate fissure karst water and Cambrian aquifers of carbonate karst water. (2) In this study, the lower boundary of the water flow system has been set at the buried depth of 200 m in the Jingquan area. The atmospheric precipitation infiltration and the lateral runoff supply of groundwater are the main supply sources of groundwater in the study area. The main discharge of groundwater in the area is the exploitation of groundwater. The exploitation amount of the water source has been obtained through monitoring data, and the scattered exploitation amount has been obtained through investigation and statistics. (3) Given that other environmental conditions remain unchanged, the area of the red-early-warning area gradually increases with the continuous reduction of precipitation, and the degree of early warning gradually decreases from southwest to northeast. The denser the pumping wells are, the likelier karst collapses occur. The increase of karst water exploitation and the change of rainfall are the main causes of karst collapses. (4) In order to prevent karst collapses in this area, we should strengthen the management of water resources and make rational use of groundwater resources. We should also strengthen the monitoring of karst collapses in the red-warning area, and adopt a variety of engineering measures to change the geological background conditions of karst collapses to the greatest extent.

Key words karst collapse, early warning, different environments, numerical simulation

(编辑 张玲)