

王晓玮,赵志伟,陈伟清,等. 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.
DOI:10.11932/karst2017y44

泰安市覆盖型岩溶分布地区岩溶塌陷地下水位预警研究

王晓玮^{1,2},赵志伟²,陈伟清²,周绍智²

(1. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院,北京 100083; 2. 山东省第五地质矿产勘查院,山东 泰安 271000)

摘要:开展地下水位预警研究有助于中国北方覆盖型岩溶分布地区地下水资源开采的调蓄和岩溶塌陷地质灾害的预防。文章提出了此类地区岩溶地下水水位预警线的划定方法,基于统计分析绘制长序列监测水位的最小值、第5、第25、第75百分位值曲线作为地下水位预警判据模板,以基岩面附近的水位波动阈值和低于基岩面的深度建立岩溶塌陷地下水位预警判据模板,最终建立综合预警判据模板并确定分区预警结果。将该方法用于山东省泰安市城区—旧县岩溶水系统,通过2015年和2016年的单点预警结果和分区预警结果进行对比分析,认为该方法预警结果与实际情况基本相符,具有可推广性。

关键词:地下水位预警,泰安城区—旧县岩溶水系统,百分位图,岩溶塌陷

中图分类号:P641.8; P642.2

文献标识码:A

文章编号:1001-4810(2017)06-0795-06

0 综述

地下水是中国北方覆盖型岩溶分布地区重要的供水水源,但是近些年快速增加的需求导致了地下水的开采量激增,不但造成岩溶地下水位持续下降,在岩溶水强径流带大量开采岩溶地下水,造成的岩溶水位的剧烈变化,引发了一系列的岩溶地面塌陷地质灾害。为了预防超采地下水引发的供水危机和环境地质问题,有必要开展岩溶地下水位预警研究。

地下水预警是根据地下水监测实际资料分析地下水系统采补平衡、地下水水质状况以及引发的环境地质问题的危害程度,综合诊断地下水水情优劣^[1],包括了水位预警和水质预警。现有地下水位预警研究常见方法有数值模型、统计学方法、多元回归方法、相关指标结合方法等。王凯军等^[2]基于数值模拟方法以长春城区为例,建立了包括地下水位和水质的地下水资源管理预警模型;白利平等^[3]利用地下水流预测模型,得到了临汾盆地的潜水和中层承压水的预警水位;Adams等^[4]通过建立年内不同季节的地下水

位回归模型,用于预报下一水文年的最高水位并进行预警;葛慧玲等^[5]将地下水的补给与消耗量建立警情和警兆指标,结合地下水位状况判断地下水位形势。山东省水利厅编制了《山东省地下水位警戒线划定技术大纲》,用于指导省内各水源地制定地下水位基准线和预警线。与其他方法相比,统计学方法基于历史水位监测数据分析,资料获取相对简单,投入工作量较少,可以快速动态的对地下水位的状态进行预警预报。比较典型的是美国地质调查局于2002年在美国宾夕法尼亚的基于数理统计学方法的动态预警研究。李文鹏等^[1]采用此方法,利用北京市平原地区地下水长期监测资料进行统计分析,形成地下水位预警判据,构成不同含水层的地下水位区域预警。地下水运动是产生岩溶地面塌陷的主要动力因素之一,但由于机理较为复杂,目前地下水位作为岩溶塌陷的直接预警的方法研究并不多,冯克印等^[6]、姚春梅等^[7]开展了基于数值模拟技术的水动力场控制的岩溶塌陷预警研究,并以山东省临沂市为例进行了探讨。

目前,在北方覆盖型岩溶分布地区开展的地下水

资助项目:中国地质调查项目(DD20160254)

第一作者简介:王晓玮(1982—),男,博士研究生,主要研究方向为地下水资源管理。E-mail:wangxw@cugb.edu.cn。

收稿日期:2017-03-10

位预警研究较少,山东的警戒水位划定技术要求仅仅针对水源地,且警戒水位确定办法主要是从保障供水角度考虑,而岩溶塌陷的地下水位预警多只单纯考虑地下水位对岩溶塌陷的致塌作用,缺乏将地下水位预警技术与岩溶塌陷水位预警结合的研究。本文借鉴美国宾夕法尼亚地区的水位埋深预警判据模板,结合岩溶塌陷的地下水位预警,探索了覆盖型岩溶分布地区地下水位预警方法,并以覆盖型岩溶典型区和岩溶塌陷地质灾害典型发育区——山东省泰安市城区—旧县岩溶水系统为例进行了实例研究。利用此技术方法对整个水文地质单元内水资源开发利用和环境地质问题进行综合预警,可为水资源主管部门和各级政府的科学决策提供依据。

1 技术方法

1.1 历史地下水位预警判据

1.1.1 监测井的选择

应选择具有较长监测数据时间序列(至少大于15年),数据质量较高(无连续半年以上缺测现象),并且在区域内分布较为均匀的监测井用于分析。

1.1.2 计算地下水位百分位数

百分位数可表示为一组 n 个观测值按数值大小排列,处于 $p\%$ 位置的值称第 p 百分位数,其含义为至少有 $p\%$ 的数据项小于或等于这个值,且至少有 $(100-p)\%$ 的数据项大于这个值。对于监测点的历史水位数据,依据观测频次,计算其某观测日历史水位的第5、第25、第75百分位。

1.1.3 制作历史水位预警判据模板

绘制整个水文年度的历史水位百分位图,绘制水位的最小值、第5、第25、第75百分位值的曲线,作为预警判据模板。

1.2 岩溶塌陷地下水位预警判据

1.2.1 确定岩溶顶板位置

根据钻孔资料等确定监测井所处位置的基岩顶板高程 h 。

1.2.2 制作岩溶塌陷水位预警判据模板

岩溶地下水位在基岩顶板附近及覆盖层内的快速波动是北方覆盖型岩溶地区岩溶塌陷的重要诱发原因^[8-9],同时,当岩溶水位与第四系孔隙水位水头差较大时,也易发生岩溶塌陷^[9-10]。以 $h \pm i$ (m) 之间和 $h - j$ (m) 以下的范围作为岩溶塌陷水位预警判

据模板,其中 i 为塌陷发生时岩溶水位在基岩面附近的水位波动阈值,设 $k \leq i$,令 $h \pm k$ (m) 作为水位波动危险阈值; j 为水位大幅下降引发塌陷时岩溶水位低于基岩面的深度,通常 $j > i$,根据历史经验和机理研究成果确定。

1.3 单点预警结果的确定

1.3.1 建立综合预警判据模板

综合历史水位预警判据模板和岩溶塌陷水位预警判据模板,按照以下原则确定综合判据:

把第75百分位以上的区间定义为无需预警区,把第25至第75百分位的区间定义为绿色预警区,把第5至第25百分位的区间定义为蓝色预警区,把历史最小值至第5百分位的区间定义为橙色预警区,把历史最小值以下的区间定义为红色预警区; $h \pm k$ 以内水位范围直接作为红色预警区, $h \pm i$ 以外的其他范围直接作为橙色预警区, $h - j$ 以下水位范围直接作为红色预警区。

1.3.2 确定单点预警结果

将单点监测井的实时水位代入综合预警判据模板进行甄别,判断所处预警级别,得到监测井单点预警结果。

1.3.3 预警模板的更新

每个水文年应根据最新的水位监测结果对综合预警模板进行更新。

1.4 预警的发布

1.4.1 确定分区预警结果

根据岩溶塌陷地质灾害易发程度分区图划定的易发区范围为界确定预警分区,预警级别依据区内监测井单点预警结果综合确定,并绘制研究区的分区预警图。

1.4.2 发布预警警情

针对不同的分区预警结果,有针对性的发布预警警情和对策,包括建议提高岩溶塌陷灾害预警级别、优化地下水开采布局减少过量地下水开采等。

2 地下水位预警评价

2.1 研究区概况

泰安市城区—旧县岩溶水系统位于山东省泰安市城区及东南部,泰莱盆地西缘,为一单斜顺置型岩溶水系统^[11],面积约112 km²,含水系统分布受断裂构造及地层岩性的控制,包括城区和旧县两个富水地

段(图 1),现均开辟为水源地。岩溶水系统地层以古生界寒武系、奥陶系为主,含水层厚度 70 ~ 80 m,含水岩组发育层状岩溶裂隙,赋水性强,单井涌水量 1 000 ~ 5 000 m³ · d⁻¹;主要补给来源为第四系孔隙水通过“天窗”补给和侧向径流补给,地表水(主要是牟汶河)是该含水系统的又一重要补给来源;径流

方向在岱道庵断裂以东自东向西径流,在岱道庵断裂以西自北向南径流;天然状态下在旧县—许家埠一带排泄于第四系或地表,目前人工开采为其主要排泄方式。第四系松散层分布趋势是从东北向西南变薄,厚度 40 ~ 0 m,直接上覆于岩溶含水岩组之上。

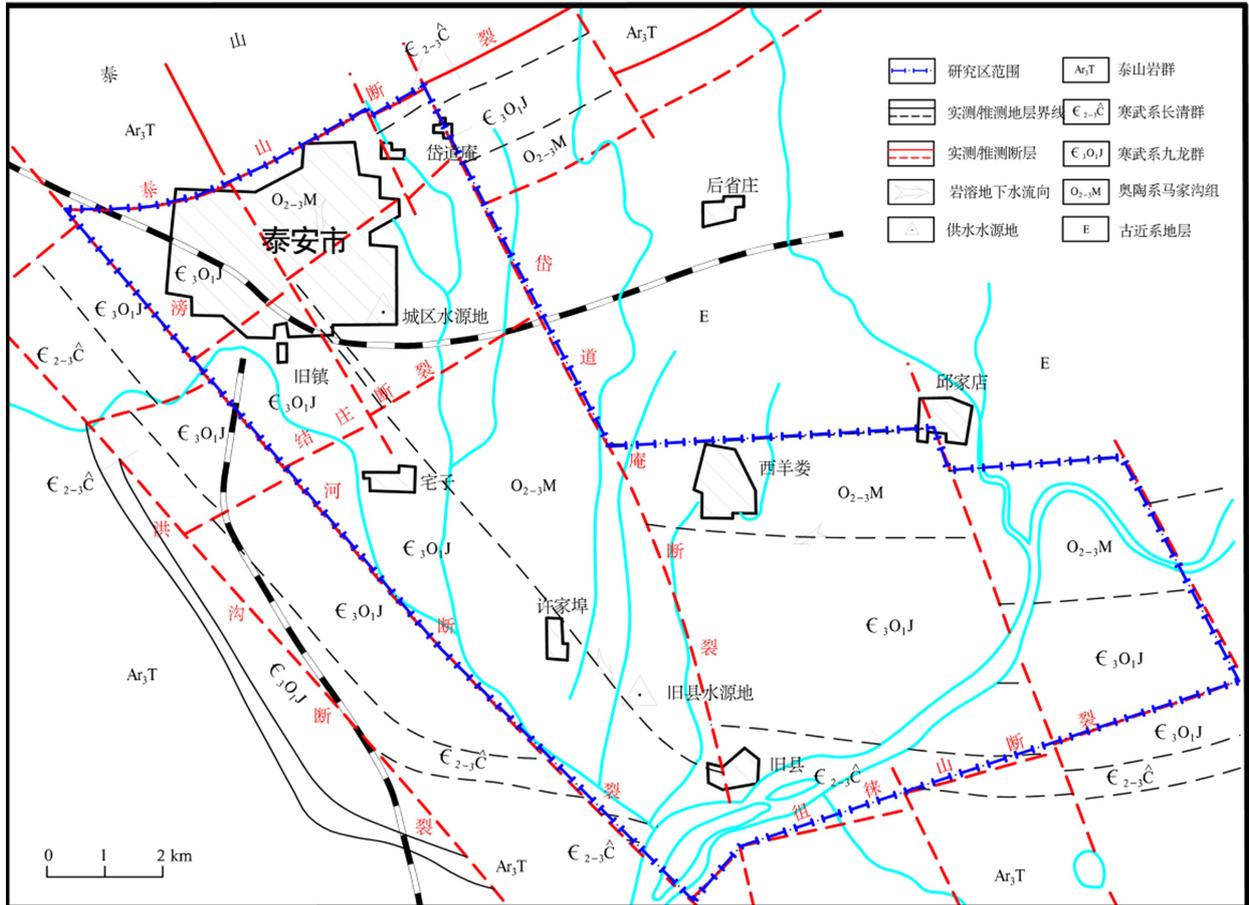


图 1 泰安市城区—旧县岩溶水系统基岩水文地质略图

Fig. 1 Simplified hydrogeology map of the karst system in Chengqu-Jiuxian, Tai'an City

城区水源地开采始于上世纪 50 年代末,1982 年前后开采量达到最高峰,取水量达到 5~6 万 m³ · d⁻¹,大量的取水引发岩溶塌陷^[12],1993 年前后自来水公司供水井已全部停采,目前单位自备井取水量约 2.1 万 m³ · d⁻¹。旧县水源地于 1982 年开发,2002 年开采量达到最高峰约 5 万 m³ · d⁻¹,引发了大面积的岩溶塌陷灾害,后进行限采,目前自来水公司补压井及农村供水井过 100 眼,干旱期间开采量仍可达到约 5 万 m³ · d⁻¹。

2.2 结果和讨论

在城区—旧县岩溶水系统中选取 7 眼监测井,沿岩溶水流向控制全区(表 1)。监测数据来源为泰安

市地质环境监测站长序列监测数据,监测频率为 3 次/月或 6 次/月。绘制各个监测点水位的最小值、第 5、第 25、第 75 百分位值的曲线,作为预警判据模板。泰安市的岩溶塌陷,塌陷在岩溶水位在基岩面附近波动与潜水向下渗透的双作用时最为强烈,其次为岩溶水位波动于灰岩顶板之下 10~30 m 以下^[8, 10],根据各个监测孔的施工资料确定基岩顶板高程 h , i 和 k 分别取 5 m 和 2 m,依据历史塌陷发生频率高低分别确定 j 。结合泰安市泰山区地质灾害易发区的划分结果和研究区水文地质条件,将研究区范围划分为 4 个预警分区。

表 1 研究区所选的代表性监测与地下水位预警模板设置

Table 1 Selected observation wells and the warning settings of single observation well

井号	井深/m	监测时段	监测频率	h/m	i/m	k/m	j/m	所属分区	易发区类型
201	294.77	1997—2015	3 次/月	130.57	±4	±2	30	城区北部	低易发区
206	150.26	1990—2015	6 次/月	126.79	±4	±2	30	城区南部	高易发区
208	100.03	1990—2015	6 次/月	118.14	±4	±2	25	城区南部	高易发区
212	175.00	1990—2015	6 次/月	109.19	±4	±2	25	城区南部	高易发区
225	294.77	1990—2015	3 次/月	110.41	±4	±2	20	羊娄—旧县	高易发区
230	120.90	1990—2015	3 次/月	117.14	±4	±2	15	羊娄—旧县	高易发区
236	150.05	1990—2015	3 次/月	132.44	±4	±2	15	东部径流区	中易发区

根据设置的模板的参数,选择城区南部的 208 井、羊娄—旧县的 230 和 225 井、东部径流区的 236

井等 4 眼监测井,分别绘制其单点预警结果(图 2)。

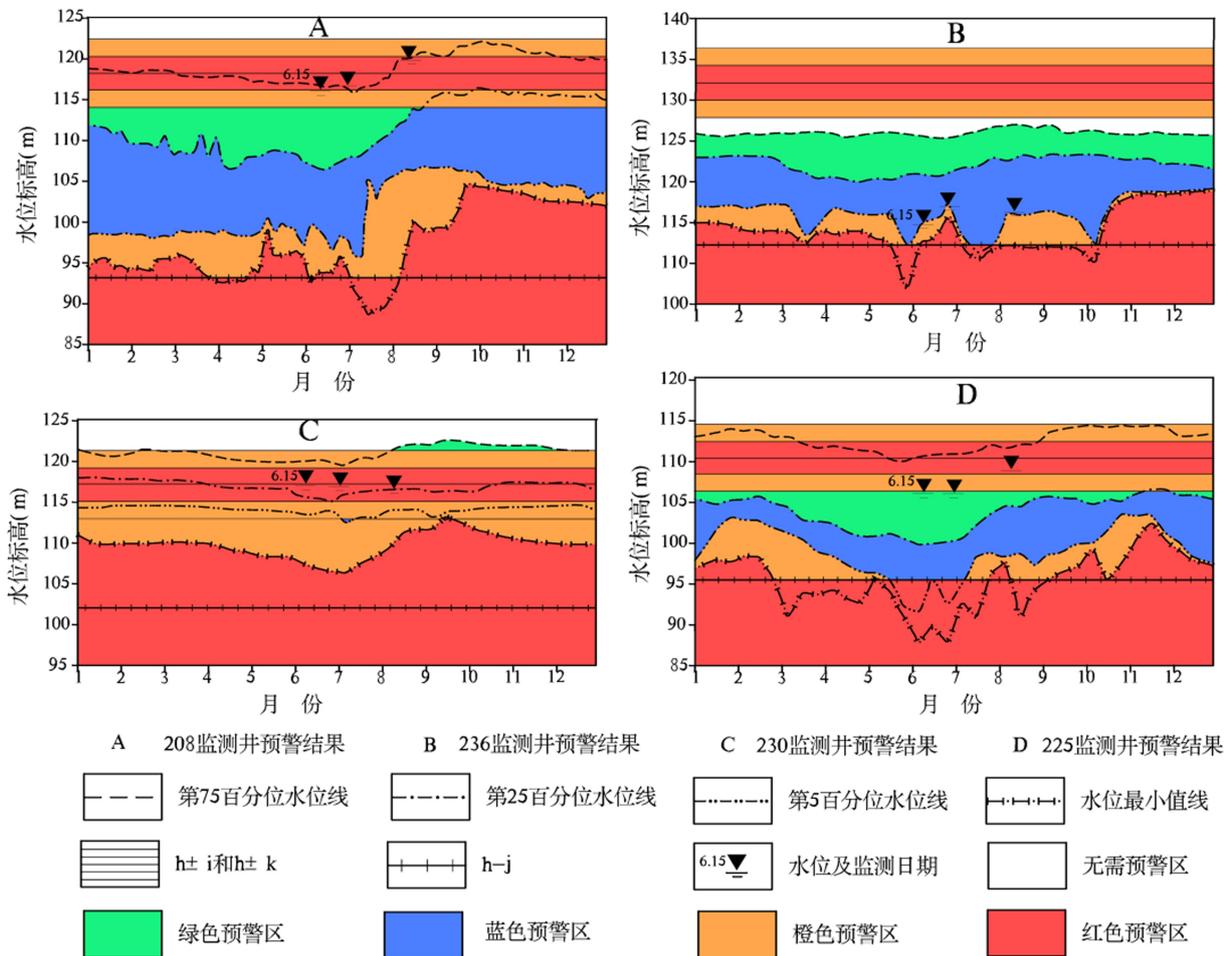


图 2 4 个监测井综合预警判据模板

Fig. 2 Comprehensive judgement criterion models of the 4 selected observation wells

结合单点预警结果,可以得到以下结论:

(1)根据单点预警结果,监测井 225 和 230 所在的羊娄—旧县区存在较为明显的系统性风险,橙色和

红色预警区范围较大;

(2)城区南部和羊娄—旧县是传统的岩溶塌陷高发区。2015 年研究区内发生了 3 次岩溶塌陷,均发

生在羊娄一旧县区,分别为 2015 年 6 月 18 日中旧县塌陷,2015 年 7 月 14 日中旧县北圣元官庄南塌陷和 2015.8.23 东苑庄西北塌陷;2016 年区内未发生塌陷。羊娄一旧县一带为岩溶水系统的径流—排泄区,含水岩层主要为奥陶系马家沟组灰岩,第四系厚度 11 m 左右,为上部亚砂土下部中细砂含砾石的双层盖层结构,从单点预警结果可以看出监测井 230 的水位一直位于红色预警区,225 的从水位也从橙色预警区进入红色预警。监测井 208 点位于岩溶水系统的径流区,含水岩层主要为奥陶系马家沟组灰岩,第四系厚度 14.15 m,为单一盖层结构,其预警结果也显示属于高易发,这与该区之前塌陷频发的状况相符,该区但由于近期进行了治理,因此 2015 年后并未发生塌陷。

(3)监测井 225 位于旧县水源地,其单点预警结

果表明,目前在供水保障方面具有较强的能力。主要原因是牟汶河坝蓄水,地表水位抬高,岩溶地下水能够得到充足的补给;但监测井 236 位于埠阳庄一带,所处位置为泰安市应急供水水源地,但其水位一直在蓝色预警区的下限运行,表明当地大量的岩溶水开采已经影响了水资源的保障能力。

依据 2015 年 3 次塌陷前的监测数据进一步绘制研究区的分区预警结果,并与 2016 年同期进行对比(图 3),可以看出,2016 年同期的预警级别与 2015 年相比,城区北部变化不大;城区南部预警级别普遍降低,基本小于 2015 年的预警级别;羊娄一旧县仍是红色预警级别,但是未发生岩溶塌陷;东部径流区的供水保障能力则呈现进一步下降的趋势。结合实际情况,可认为分区预警结果较为合理,提出的技术方法较为可行。

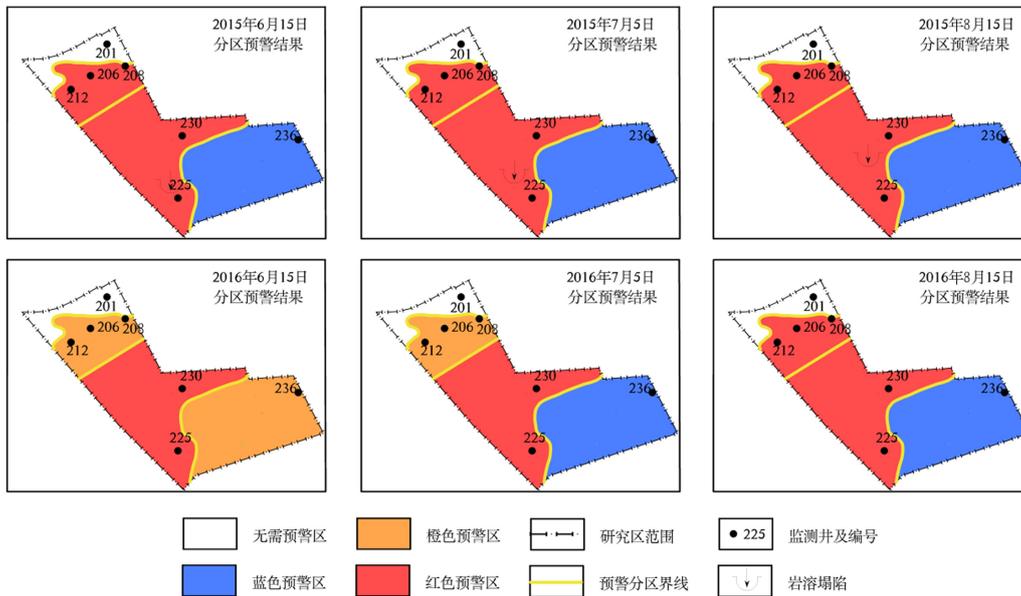


图 3 泰安市城区—旧县岩溶水系统 2015 及 2016 年分区水位预警结果

Fig. 3 Groundwater warning level division results of the karst system in Chengqu-Jiuxian in 2015 and 2016

3 结论和建议

(1)本研究探索了在以泰安市为代表的北方覆盖型岩溶分布区的地下水位预警方法,并进行了实例验证。该方法进行区域地下水位预警的基础是完善的地下水监测网络,依据长序列监测数据和岩溶塌陷发生记录,建立历史水位预警判据和岩溶塌陷地下水位预警判据,进而确定单点预警结果和分区预警结果,可以对岩溶地下水资源开发利用和岩溶塌陷地质灾害进行综合预警。

(2)结合研究区内 2015 年岩溶塌陷发育情况,通

过分析部分单点预警结果,认为预警结果与岩溶塌陷和供水保障的实际情况较为相符;选定雨季的三个时间点,将 2015 年的分区预警结果与 2016 年同期结果进行对比,认为城区南部的岩溶塌陷发生风险减小,羊娄一旧县发生塌陷的风险仍然较大,而埠阳庄一带供水保障能力略有下降,与实际情况基本相符。综合考虑认为提出的水位预警方法较为可行,可望在北方同类型地区推广应用。

(3)在北方覆盖型岩溶分布地区,地层结构、补排因素等的差异使得不同地区的岩溶塌陷灾害的发生发育在时空分布上具有很大的差异,应进一步加强岩

溶塌陷水位预警的研究,考虑时空要素的变化对预警模板的影响,以便取得更为合理可信的预警结果。

(4)当水位在 $h \pm i$ 范围内波动时,通过调节地下水资源的开采,可增加地下水资源的供应和降低岩溶塌陷发生的风险;应进一步研究如何通过增采,实现地下水资源的“以丰补欠”,并减少岩溶塌陷的发生,以及如何实现合理的开采布局达到这个目标,并量化计算这种措施能够降低的地下水位和增加的地下水资源供应量。

参考文献

- [1] 李文鹏,郑跃军,郝爱兵.北京平原区地下水位预警初步研究[J].地学前缘,2010(6):166-173.
- [2] 王凯军,曹剑峰,徐蕾,等.地下水管理预警系统的建立及应用研究:以长春城区为例[J].水科学进展,2005,16(2):238-243.
- [3] 白利平,王业耀,王金生.基于数值模型的地下水水位预警体系研究:以临汾盆地为例[J].中国地质,2009,36(1):246-253.
- [4] Adams B, Bloomfield J P, Gallagher A J, et al. An early warning system for groundwater flooding in the Chalk [J]. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 2010, 43 (2):185-193.
- [5] 葛慧玲,焦扬,任永泰.哈尔滨市地下水水位预警模型[J].东北农业大学学报,2011,42(2):77-83.
- [6] 冯克印,郑庭明,董强,等.基于水动力场控制的岩溶塌陷预警预报研究[J].工程勘察,2006(10):29-31,37.
- [7] 姚春梅,冯克印,王元波,等.数值模拟在岩溶塌陷预警系统建设中的应用:以临沂市城区岩溶塌陷为例[J].水文地质工程地质,2007,34(4):94-97,102.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 梁永平,王维泰.中国北方岩溶水系统划分与系统特征[J].地球学报,2010,31(6):860-868.
- [12] 张广安,鲁峰,渠涛,等.泰安市泰山区岩溶塌陷成因分析及防治措施[J].山东国土资源,2007,23(10):31-33.

Research on Groundwater Level Warning for karst collapse of covered karst areas in Tai'an City

WANG Xiaowei^{1,2}, ZHAO Zhiwei², CHEN Weiqing², ZHOU Shaozhi²

(1. School of Water Resource & Environment, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;

2. Shandong 5th Geo-mineral Prospecting Institute, Tai'an, Shandong 271000, China)

Abstract Research on Groundwater Level Warning (GLW) is helpful for the regulation of groundwater resources development and the protection of the geological disaster of karst collapses in covered karst areas in northern China. This paper proposed a method for the delineation of karst GLW. Specific steps include, (1) establish the criterion of GLW based on statistical analysis of groundwater level monitoring data and plot the minimum, 5th, 25th and 75th percentile curve of water level; (2) establish the criterion of GLW for karst collapse in line with the threshold value of water level fluctuation around roof of bedrock and beneath the roof when collapse happened; (3) firstly, establish the comprehensive judgment criterion model to determine the GLW of a single observation well, and determine the GLW divisions based on observation wells cluster finally. This method was verified in the Chengqu-Jiuxian karst system of Taian City in Shandong Province. According to the comparison of warning result of single observation well and GLW divisions between 2015 and 2016, the method was proved to meet the actual conditions and was reliable to be promoted.

Key words Groundwater Level Warning, Tai'an Chengqu-Jianxian karst system, percentile curve, karst collapse

(编辑 张玲)