

济南泉域岩溶水数值预报与供水保泉对策

徐军祥¹, 邢立亭^{2,3}

(1.山东省地矿局, 济南 250013; 2.中国矿业大学资源与安全工程学院, 北京 100083;

3.济南大学城市发展学院, 济南 250002)

摘要: 基于保持泉水长期连续壮观喷涌和泉域岩溶生态地质环境良性循环发展等约束条件, 根据济南泉域岩溶地下水系统特征, 采用 MODFLOW 模拟裂隙岩溶介质地下水运动规律, 进行了回灌补源条件下的地下水、地表水联合调蓄模拟, 结果表明趵突泉枯水期水位控制在 27.6 m 以上, 四大泉群能够保证长年喷涌, 同时在西郊增大开采量, 提出济南泉域允许开采量不超过 39 万 m³/d 是泉域生态地质环境功能修复的前提。提出了回灌补源、水质供水、控制城市向直接补给区扩展和优化水资源配置等泉水保护建议。

关键词: 数值模拟; 开采布局优化; 泉水保护; 济南泉域

中图分类号: TV211.1.1+2

文献标识码: A

文章编号: 1672-4135(2008)03-0209-05

济南的保泉工作始于 20 世纪 80 年代初, 历经“采外补内”保泉、“节水”保泉、“引黄”保泉、“封井”保泉等阶段^[1], 虽然目前泉群已连续出流四年, 但都未从根本上解决泉水长期连续壮观喷涌和城市居民饮用优质地下水问题。综合分析济南地区水资源条件、水文地质特征、生态环境背景等问题及城市水资源供需状况等, 认为发挥岩溶地下水系统调蓄功能, 进行水资源地下调蓄^[2], 实施回灌补源工程措施等是保泉供水与泉域生态地质环境保护的有效措施^[3]。其中, 建立正确的水文地质和数学模型, 确定回灌补源条件下的泉域地下水开采优化布局则是关键。

1 模型的建立与验证

济南泉域西以马山断裂为界, 北部以济南岩体和石炭、二叠系地层为界, 东部以东坞断裂为界, 南部至寒武系中统张夏组底, 面积 847.5 km²。研究区主要包括裂隙岩溶含水层和西郊孔隙类含水层, 研究重点为裂隙岩溶含水系统。将研究区含水介质分为两层, 第一层为潜水含水层, 第二层为岩溶水含水层, 岩溶含水与孔隙水存在互补关系^[4]。泉域碳酸盐岩裂隙岩溶含水岩组地下水流具有统一的水面^[5], 可以近似地运用多孔介质渗流理论模型来描述, 故

采用非均质各向异性三维非稳定流数学模型来概化泉域水文地质条件, 选用 MODFLOW 模型进行数值求解^[6,7], 其微分方程为:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

其中: K_{xx} , K_{yy} 和 K_{zz} 为方向渗透系数, 量纲为 $(L \cdot T^{-1})$; h 为水位标高(L); W 为源汇项; S 为含水介质的贮水率。

计算区的总面积分成 80 行, 115 列, 共 9 200 个单元格, 每个单元格均为 500 × 500 m² 的正方形, 活动单元格 3 390 个。源汇项的处理: 工业、自备井开采地下水开采量按照井点处理, 模型识别与检验阶段地下水开采来源于实际调查; 泉流量按排水渠处理; 侧向交换量经模拟识别确定; 农业开采按强度处理; 降水入渗按强度给出。

采用 2003 年 6 月 6 日至 2004 年 6 月 6 日一个水文年的资料进行模型识别, 划分了 72 个时间段。结果为给水度分区 16 个, 水平水力传导系数分区 16 个, 越流系数分区 15 个, 贮水系数与导水系数分区各 32 个, 贮水系数最小值 5×10^{-5} , 导水系数最大值 53 000 m²/d。市区泉群附近拟合曲线见图 1。

收稿日期: 2008-05-06

责任编辑: 刘新秒

基金项目: 山东省研究生教育创新计划项目(SDYC08019); 国家自然科学基金(40672158)

作者简介: 徐军祥(1961-), 男, 山东广饶人, 博士、教授, 硕士生导师, 从事地质技术管理与研究。

采用 2003 年 6 月 6 日至 2003 年 7 月 28 日济西大抽水的各观测孔水位资料^[8]进行校正,将 52 天的大抽水,划分为 20 个时段。从校正结果可看出,在模型检验的时间段内,其观测孔水位同模型拟合阶段观测孔保持一致(图 2)。模型与实际情况具有良好的吻合性,模拟结果合理,表明模型可用来预报地下水动态。

2 模型预报及分析

2.1 计算方案的确定

在对泉域地下水数值模拟的基础上,结合济南市地下水开采现状及城市用水规划^[9],预报未来地

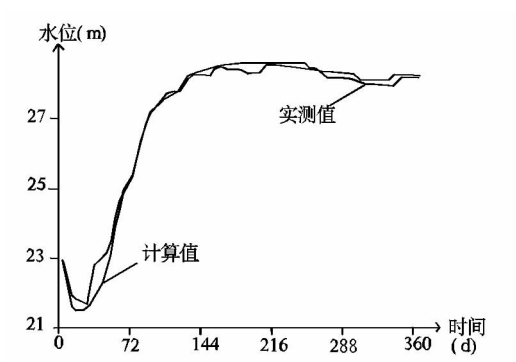


图 1 趵突泉观测孔拟合曲线

Fig. 1 Fitting curve for the observing hole of Baotu Spring

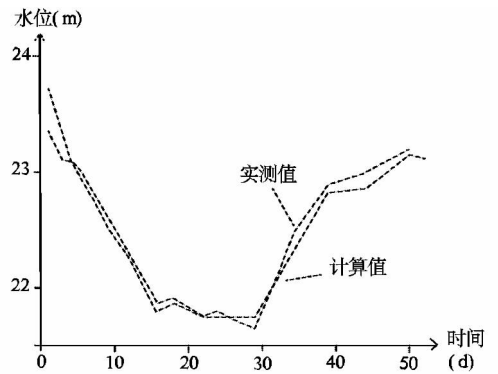


图 2 趵突泉 1 号观测孔校正曲线

Fig. 2 Correction curve for the observing hole No. 1 of Baotu Spring

下水位,制定不同的岩溶地下水资源开采方案,以为供水保泉和生态地质环境保护提供依据。预报初始水位采用 2007 年 6 月 15 日统测资料,预报时间为 5 年,终止时间为 2012 年 6 月 1 日,共 1 810 d。

降水量按照“四枯一丰”取值。根据历年降水资料统计分析,选定 1999 ~ 2003 年实测降水量作为计算值。农业开采量根据水利统计年鉴资料取值,生活用水量则取常量。

预先给定市区水位约束,计算开采量,以此确定泉域地下水允许开采量。第一方案是根据现状开采预测市区变化;第二方案是约束市区枯水期水位不低于趵突泉最低景观喷涌水位 27.5 m,计算各开采区开采量;第三方案是在约束市区枯水期水位不低于 27.5 m 并进行补源时,计算各开采区最大开采量。

2.2 预报结果分析

方案一:在维持现状水源地开采条件下,具体开采方案见表 1,并以此预报 2008 ~ 2012 年岩溶地下水动态。泉群附近岩溶水观测孔预报水位见图 3。

从第一方案预报的市区趵突泉 1 号观测孔动态曲线可以看出,如维持现状水源地开采,在前 4 个枯水年难以保证泉水连续流出。

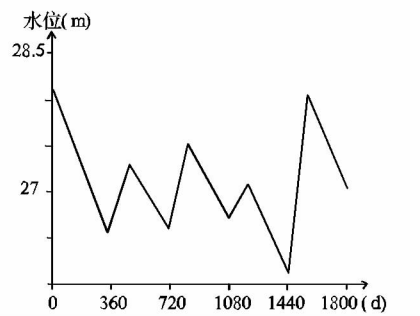


图 3 趵突泉 1 号观测孔预测曲线

Fig. 3 Prediction curve for the observing hole No. 1 of Baotu Spring

表 1 岩溶地下水计算开采方案(m³/d)

Table 1 Exploitation plan for the Karst groundwater

开采方案	自来水水厂 (万 m ³ /d)								
	桥子李	冷庄	古城	市区	东郊	腊山	峨眉山	大杨庄	自备井
第一方案	8.0	2.0	1.0	0.0	2.8	0.0	3.0	1.0	7.5
第二方案	4.5	1.8	2.0	0.0	2.5	0.0	1.0	0.8	3.0
第三方案	9.0	4.0	6.0	1.0	5.0	0.5	6.0	2.0	5.5

表 2 第二方案地下水量均衡关系(m³/d)

Table 2 Equilibrium of groundwater capacity under the Second Plan

补给项			排泄项				
降水补给	地表水补给	农业回灌补给	自来水厂开采	自备井	农业及生活	泉排泄	二类边
385690	4634	15225	126000	30000	135639	99701	16222

方案二：约束市区水位枯水期不低于 27.5 m，减采西郊与自备井开采量进行预报，总开采量为 15.6 万 m³/d,较第一方案减少 9.7 万 m³/d,具体开采方案见表 1。供水不足和未来需水部分分别利用引黄、引江水源替代。市区和西郊岩溶地下水观测孔预报水位见图 4。

从计算结果上可以看出，在整个预报期间,趵突泉地下水水位均高于临界水位,其它泉群也能够实现长年喷涌。由于关闭了一些开采量比较大的工业自备井,使得枯水期地下水位整体也较第一方案有很大的提升,地下水漏斗面积大范围减小。同时，从表 2 中可以看出,在第二方案中泉域地下水资源量处于正均衡。

方案三是补源后的优化开采方案,其中补给量除了降水入渗补给外,还有来自玉符河 11 万 m³/d、北沙河 9 万 m³/d、兴济河 3 万 m³/d 和孟家水库 2 万 m³/d 的补给,可增加地下水补给量共 25 万 m³/d。计算结果为在西郊、峨眉山、大杨庄、腊山、市区、东郊分别开采 19 万 m³/d、6.0 万 m³/d、2.0 万 m³/d、0.5 万 m³/d、1.0 万 m³/d 和 5.0 万 m³/d，工业自备井按 5.5 万 m³/d 计。典型岩溶地下水观测孔预报水位见图 5。

从计算结果可以看出,趵突泉水位控制在 27.6 m 以上,四大泉群能够保证长年喷涌。同时,从 2001 年枯水期和丰水期地下水位等值线图(图 6)可以看出,虽然在西郊增大了开采量,但由于玉符河、北沙河 20 万 m³/d 的补给,故地下水漏斗面积并没有明显增加。第三方案中,在预测未来 5 年间,地下水开采量增加到 39 万 m³/d,呈正均衡(表 3)。

通过上述 3 个开采方案的对比，可以发现：1) 降水偏枯的未来近 5 年中,设计的第一开采方案不能保证泉水喷涌。2)第二方案和第三方案均可保证

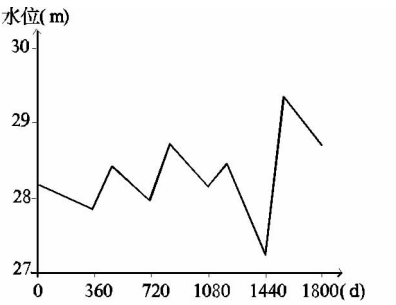


图 4 趵突泉 1 号观测孔预测曲线

Fig. 4 Predication curve for the observing hole No. 1 of Baotu Spring

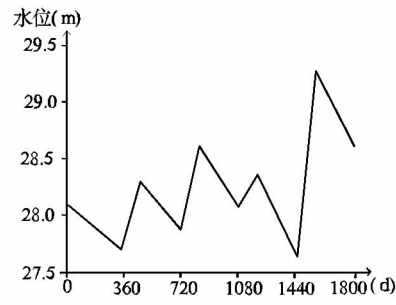


图5 趵突泉1号观测孔预测曲线

Fig.5 predication Curve of Baotu Sping 1

图 5 趵突泉 1 号观测孔预测曲线

Fig. 5 Prediction curve for the observing hole No. 1 of Baotu Spring

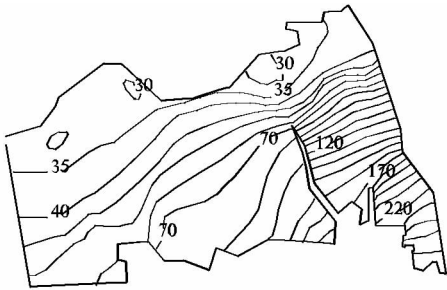


图 6 2011 年 10 月地下水平面流场

Fig. 6 Groundwater flowing field prediction in Oct.,2011

表 3 第三方案地下水量均衡关系(m³/d)

Table 3 Equilibrium of groundwater capacity under the Third Plan

补给项			排泄项				
降水补给	地表水补给	农业回灌补给	自来水厂开采	自备井	农业及生活	泉排泄	二类边
385690	250000	15886	335000	55000	135639	83706	36555

泉水常年喷涌,但第二方案各大水厂岩溶水开采总量仅为 15.6 万 m^3/d ,远远不能满足济南市的供水需求,需要引黄引江;而第三方案在增加了地下水的补给源后,各大水厂岩溶水开采总量为 39 万 m^3/d ,同时也保证了四大泉群的常年喷涌,水位呈总体抬升趋势。相对而言,第三方案是实现保泉供水较为理想的方案。

3 供水保泉对策

基于对济南泉域地下水系统的认识,根据本次数值模拟结果,建议实施回灌补源、分区域分质供水、优化开采布局等措施,以从根本上保证泉水长期连续壮观喷涌和居民能够饮用优质地下水。

3.1 实施回灌补源工程,修复地下水系统功能

利用地表水源实施回灌补源,兴建地下水库,进行地下水-地表水联合调度,能够收到扩大资源量、调节地下水位和保护生态环境的多重效果。

济南泉域岩溶地区适合回灌补源的地段有三种类型:(1)在直接补给区与间接补给区的山区沟谷,可以通过修筑沟谷拦水坝,以增加汛期截留洪水对地下水的渗漏补给;(2)在玉符河、北沙河流经直接补给区与间接补给区段,通过修筑河流拦水坝、渗井等,增加河水对地下水的渗漏补给;(3)利用直接补给区内的水库,在枯水期引水渗漏补源。

补源方式有沟谷、河流、直接补给区水库、塘坝自然渗漏和渗井补源。

近期由于缺少客水水源,为保证泉水常年喷涌,可实施南部山区回灌补源工程。卧虎山、锦绣川水库停止向市区供水,整修已有干渠,向兴隆-分水岭、玉符河等直接补给区放水进行回灌补源,而岳庄水库则用于向北沙河放水补源。

引江客水水源具备后,可提水将江水引入玉符河、北沙河及其它沟渠,对泉域岩溶地下水进行补源。

3.2 实施区域分质供水

从既保泉又让居民喝上优质饮用水的需求出发,必须走分质供水的路子,即下大力气改造济南供水管网系统,使居民生活用水管网与城市、工业用水管网分体运营。把优质的岩溶地下水供给居民生活饮用,把黄河水作为城市公共用水、工业生产用水。农业用水要倡导使用当地地表水、处理后的污水与黄河水,限制开采岩溶地下水。

具体可分为三步骤:首先改造集中工业区的供水系统;其次新建居民区、工业区的供水管道直接按照分质供水要求设计、建设;最后逐步改造老城区的供水系统。近期,建议首先实施分区域分质供水,即将鹊山引黄水库、百脉泉水等作为济南东北工业区供水水源。

3.3 调整优化岩溶地下水开采布局

基于保泉和地下水系统功能修复,在回灌补源条件下,据模拟优化计算,不包括农业开采,正常年份控制泉水水位标高在 27.5 m 以上,泉域岩溶水允许开采量 39 万 m^3/d 。其中,济西水源地开采 19 万 m^3/d ,西郊水厂开采 8.5 万 m^3/d 。虽然西郊有腊山、峨眉山、大杨庄、古城、桥子李和冷庄六个水厂,供水能力大于 46 万 m^3/d ,但只能作为必要时应急供水。

泉域以外白泉水源地可供水量 28.29 万 m^3/d ,长(清)-孝(里)水源地建议开采 8 万 m^3/d ,泉域岩溶水开采量 39 万 m^3/d ,合计 75 万 m^3/d ,完全可满足近、远期济南城市生活饮用水和高精尖工业用水需求。

3.4 控制城区向直接补给区内扩展

济南城市向市区南部发展将直接影响泉水补给量和地下水环境质量^[10]。为避免开发建设对泉水的影响,保持泉域生态环境的良性循环,必须严格实施“南控”。根据水文地质条件分析,“南控”线应为平安店-潘村-玉符河河谷-丰齐-大杨庄-刘长山-英雄山-羊头峪-牛旺一线,该线以南为泉域直接补给区,应为地下水重点保护区。

由于西部规划区地下水与市区泉水存在水力联系,“西进”宜在段店-大杨庄-大金庄-峨眉山-古城-朱庄以北规划建设。

“长清片区”位于地下水补给区上游,表层第四纪松散,洪积扇砂层分布广,渗漏强烈,从保泉角度不适于规划建设,应以涵养水源为主。

“东部新城”大部分位于济南泉域,属于济南的工业区,其北部已经存在地下水降落漏斗,地下水曾检出酚、氰化物、重金属离子,部分地段地下水存在工业污染。已列入规划的建设区,后期必须进行管网配置,包括分质供水、雨污分流、收集雨水等。

4 结语

岩溶地区生态环境脆弱,人类活动改变了济南

泉域“三水”转化条件,造成水资源总量减少。研究表明,要解决城市居民饮用优质地下水问题必须实施区域分质供水,要从根本上保持泉水长期连续壮观喷涌还必须实施回灌补源。但岩溶水系统回灌对泉水水质的影响还有待于深入研究。

参考文献:

- [1] 徐军祥.济南泉域岩溶地下水系统综合研究[D].北京:中国矿业大学, 2006.
- [2] 山东省地矿工程勘察院.济南地区水资源调蓄与生态环境地质调查评价[R].济南:山东省地矿工程勘察院, 2004.
- [3] 徐军祥,康凤新.山东省地下水资源可持续开发利用研究[M].北京:海洋出版社, 2001.
- [4] 奚德荫,李祥芝,邵卓,等.山东省济南市保泉供水水文地质勘探报告[R].济南:山东省地矿局 801 水文地质工程地质大队, 1988.
- [5] 邢立亭. 济南泉域岩溶地下水开发布局研究[J]. 人民黄河, 2007,29(2):46-47.
- [6] 蒋亚萍,陈余道.MODFLOW——一套水文地质学实用计算软件[J]. 广西地质, 1999,12 (3):75-78.
- [7] 张志忠,武强. 河水与地下水耦合模型的建立与应用[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2004,23(4), 449-452.
- [8] 山东省地矿工程勘察院. 济南西郊大型抽水试验报告[R]. 山东省地矿工程勘察院, 2004.
- [9] 济南市水利局. 济南市保泉综合技术研究[R]. 济南市水利局,2005.
- [10] 徐军祥,邢立亭,佟光玉,等. 济南泉域地下水环境演化与保护[J]. 水文地质工程地质, 2004,(6): 69-72.

Numerical Prediction for the Karst Groundwater and Spring Protection in Jinan Karst Spring Region

XU Jun-xiang¹, XING Li-ting^{2,3}

(1.Shandong provincial bureau of geology & mineral resources, Jinan 250013, China; 2.School of Resources and Safety Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China; 3.The School of City Development University of Jinan, Jinan 250002,China)

Abstract: Based on the restriction of spring spewing constantly all the year round and constructing an optimum eco-environmental with coordination, according to the characteristic of Jinan Karst groundwater system, the regularity of fissure-karst water movement is simulated with MODFLOW. The simulation results suggest that controlling the water level higher than 27.6 m and the allowable yield of groundwater is not more than $39 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, the spring can spew all the time. At last, the paper gives the suggestion on spring protection, such as groundwater recharge, water supply according as water quality, controlling suburb expanding and optimizing distribution of water field et al.

Key words: numerical simulation; optimizing distribution of water field; spring protection;Jinan spring region