

DOI:10. 3880/j. issn. 1004 - 6933. 2018. 03. 05

济南岩溶水系统数值模拟与保泉供水开采方案

秦品瑞

(山东省地矿工程勘察院,山东 济南 250014)

摘要:采用 Visual Modflow 软件建立济南岩溶水系统地下水数值模拟模型,结合济南市地下水开采现状及城市供水规划,利用地下水数值模型求解连续 5 年平水年、四枯一丰及采用济南地区 1982—1991 年 10 年降水资料 3 种降水组合下的济南泉域地下水开采方案。结果表明,这 3 个方案均能满足“保泉供水”目标,规划设定的水源地开采量是合理的,对实现“保泉供水”有着显著作用。
关键词:岩溶水;数值模拟;保泉供水;模型预报;地下水;开采方案;济南
中图分类号:P641.8 **文献标志码:**A **文章编号:**1004 - 6933(2018)03 - 0030 - 07

Numerical simulation of Ji’nan karst water system and groundwater exploitation scheme of keeping spring spurting and water supply

QIN Pinrui

(Shandong Provincial Geo-Mineral Engineering Exploration Institute, Ji’nan 250014, China)

Abstract: The groundwater numerical simulation model of Ji’nan karst water system is established using Visual Modflow software. Combined with the present situation of groundwater exploitation in Ji’nan City and the urban water supply plan, we pursue an optimized groundwater exploitation schemes under 3 precipitation combinations of five normal years continuously, four withered years and one plentiful year, and 10 years (1982—1991) precipitation data by the groundwater numerical simulation model. The result shows that these three schemes can satisfy the goal of “keeping spring spurting and water supply”, and the planned amount of water resources exploitation is reasonable, which plays a significant role in achieving the goal of “keeping spring spurting and water supply”.
Key words: karst water; numerical simulation; keeping spring spurting and water supply; model prediction; ground water; exploitation scheme; Ji’nan City

济南的保泉工作始于 20 世纪 80 年代初^[1-2],为使趵突泉恢复“泉源上奋,水涌若轮”的本来面貌,济南一直进行着泉水保卫战,并提出了“开源”“节流”“回灌补源”和“南部山区环境综合治理”等一系列保泉供水的措施。尽管如此,依然难解泉水断流的威胁,虽然目前泉群已连续出流 13 年,但仍未从根本上解决既保持泉水连续喷涌,又保证老百姓喝到优质地下水的问题,济南人守着优质的地下泉水却喝黄河水,“泉城”已名不符实,城市

形象受到损害^[3]。
随着“保泉”与“供水”课题研究的深入,人们对济南泉群发生、发展过程的地下水演变规律有了更深刻的了解^[4]。笔者从济南岩溶含水系统方面入手,根据水文地质条件,建立济南岩溶含水系统地下水数值模拟模型,并在此基础上,结合济南市地下水开采现状及城市供水规划(拟在长清归德镇曹楼、郭庄建立济西二期水源地,计划向市区供水 10 万 m³/d;在齐河县赵官屯煤矿,结合煤矿排

基金项目:山东地矿重大科技攻关项目(2012-045)
作者简介:秦品瑞(1982—),男,高级工程师,主要从事水文地质、环境地质研究。E-mail:qinpinrui1982@126.com

水疏压,计划向市区供水 10 万 m³/d),利用数值模型对上述供水规划进行预测预报,并计算不同降水组合下其他各岩溶地下水水源地的最优开采量,以期为实现“保泉供水”向政府提供决策依据。

1 济南岩溶水系统地下水数值模拟

济南地区在总体上是一个古生界地层为主体的北倾单斜构造,区内断裂较发育。就区域水文地质条件而言,济南地区寒武、奥陶系地层受到一系列北北西或北西向断层切割,石灰岩在空间位置上被分割成许多断块^[5]。这些断裂往往又构成这些断块的相对隔水边界,如东坞断裂构成济南泉域的东边界,它又是白泉泉域的西边界,马山断裂构成长清—孝里铺断块的东边界,又是济南泉域的西边界。每一断块就其水文地质意义都是一个相对独立的水文地质单元——地下水系统或泉域。它们都有相似的补给、径流、排泄条件,具有分散补给(汇水)、山前集中排泄的水文地质特征,存在一个或几个排泄区(富水区)。但这几个断块在构造、地层岩性及含水岩组等方面都具有一致性,其作为边界的断裂只是起到一个相对阻水的作用,仍然存在透水或弱透水段,有水量交换。因此,为了更好地认识济南泉域的水文地质特征及其与相邻的水文地质单元的关系,优化地下水开采布局,本文将这几个断块(东阿岩溶水系统、长孝岩溶水系统、济南泉域、白泉泉域)

作为一个整体(济南岩溶水系统)进行建模研究^[6-10](图 1)。

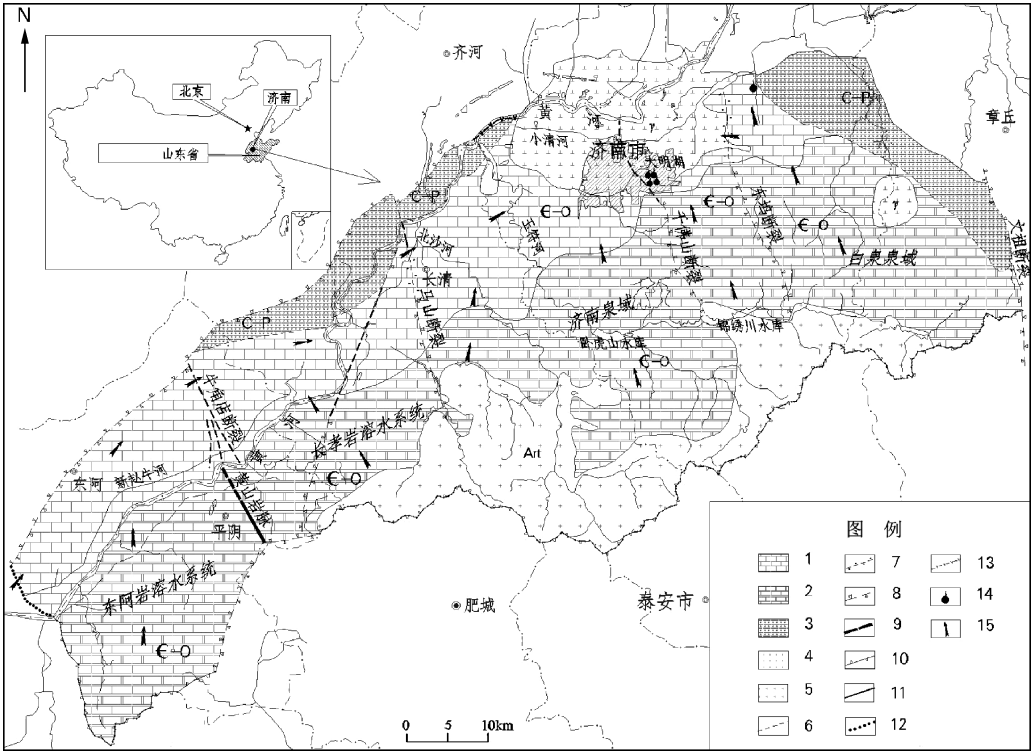
1.1 边界条件

东部边界:以文祖断裂为界,概化为隔水边界;西部边界:以平阴—东平地下(地表)分水岭为界,概化为隔水边界;南部边界:以平阴—东平的地下(地表)分水岭、孝直断裂以及寒武系中统张夏组底界面为界,概化为隔水边界;北部边界:在济南泉域西侧以一系列近东西向断裂为界,济南泉域以火成岩体为界,济南泉域东侧以奥陶系灰岩顶板埋深 600 m 线为界,该边界大部分概化为隔水边界,仅将济南泉域西北角概化为流量边界。

内部边界:港沟断裂大部分为透水,仅在莲花山至港沟西山段隔水;孙村断裂具透水性;曹范断裂除南端地层隔水外,大部分透水;沙湾断层隔水;千佛山断裂在南郊宾馆以南隔水,以北具有透水性;东坞断裂在徐家庄以南隔水,以北具有透水性;马山断裂在新周庄村以南隔水,以北具有透水性;文化桥断裂、石马断裂、炒米店断裂、平安店断裂具有透水性;孝里铺断裂在前隆至大房庄、孝里铺至兴隆镇村段隔水,孝里铺至大房庄段具有透水性。

1.2 含水层结构概化

从水文地质特征出发,模拟区概化为 3 层结构,第一层为第四系孔隙含水层,当潜水处理;第二层为第四系黏土层及石炭二叠系弱透水层,只考虑垂向



注:1—岩溶水富水区;2—岩溶水弱富水区;3—含煤頁砂岩;4—火成岩体;5—泰山岩群;6—透水断层;7—弱透水断层;8—阻水断层;9—阻水岩脉;10—地表分水岭;11—零流量边界;12—补给边界;13—排泄边界;14—泉群;15—地下水流向。

图 1 济南岩溶水系统与水文地质边界

一维流;第三层为具有承压性质的岩溶含水层。本次将寒武-奥陶系九龙群和马家沟群地层整体概化为一个含水层。第一层与第三层可通过中间的弱透水层发生水力联系,各个地段的联系程度不同,模型中通过调整弱透水层垂向渗透系数来实现对越流程度的控制^[11-13]。根据勘探资料溶蚀裂隙发育特征和抽水试验资料,济南岩溶水系统碳酸盐岩裂隙岩溶含水岩组地下水流具有统一的水面,水流符合达西流,可以近似地运用多孔介质渗流理论模型来描述^[14-18]。综上所述,可将裂隙岩溶含水系统概化为非均质的各向异性的承压三维非稳定流。

1.3 地下水补排项

地下水补给项主要包括大气降水入渗、灌溉回渗和河渠入渗^[19-24]。其中大气降水入渗补给是区内主要补给来源,由入渗补给系数确定^[25],根据入渗补给区岩性不同,选择了不同入渗系数,研究区多年平均入渗补给量约为 $126 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$;区内多年平均灌溉回渗量为 $4.2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$;河渠入渗主要包括黄河入渗,以及玉符河、北沙河、南沙河、巴漏河等入渗,除黄河外,其他河流均属季节性河流。据统计,不考虑人工补源,多年平均入渗量为 $5.95 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

地下水排泄项主要包括水源地开采、自备井及矿坑排水、农业开采、泉排泄和边界排泄等。其中水源地开采研究区在2007年的排水大约为 $59.7 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,自备井及矿坑排水大约为 $22.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,农业开采排水大约为 $28.1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,泉排泄 $13.1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,边界排泄约为 $5.3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

1.4 模型验证

计算区的总面积划分为 254 行、170 列,共 43 180个单元格,每个单元格面积为 $500 \text{ m} \times 500 \text{ m}$,活动单元格 12 520 个。本次利用济南市 2005—2007 年地下水动态资料对模拟模型进行识别和检验,不仅较准确地完成了水文地质参数的调整,还使模型能够较准确地反映济南岩溶水系统地下水动态规律,并利用 2013 年 9 月—2014 年 10 月的地下水动态资料对模型进行检验(图 2),结果表明所建立的数学模型与实际的水文地质条件相符,模型可用于预报地下水动态^[26]。

2 结果与分析

2.1 计算方案的确定

将识别与验证模型稍加调整即得预报模型^[27]。根据济南岩溶水系统水文地质条件,预报时在原有水源地基础上,结合济南市地下水开采现状(表 1)及城市供水规划,维持除济南泉域岩溶水水源地外

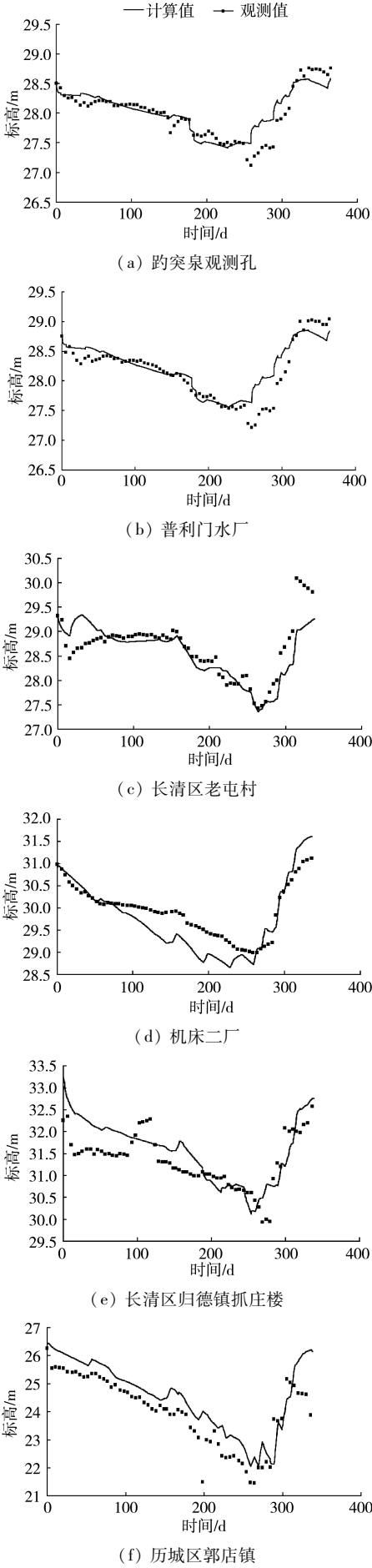


图 2 各典型岩溶水观测井水位过程拟合曲线

现有水源地实际开采量,新增济西二期水源地 10 万 m³/d 及赵官屯 10 万 m³/d 规划开采量,采用不同的降水组合,并以 2007 年 10 月 1 日水位标高为模型预报初始水位,给定地下水开采约束条件,计算开采量,以此确定济南泉域岩溶水水源地在不同降水情况下的允许开采量,预测各开采状态下地下水位动态变化过程,满足约束条件时说明方案可行,否则需重新调整方案(图 3)。

本次预报按不同降水量组合共设计了 3 种方

表 1 济南岩溶水系统岩溶地下水 2007 年开采现状

10 ⁴ m ³ /d			
开采区域	取水名称	开采量	小计
东阿岩溶水系统	水源地(下马头、东阿等)	8.4	16.4
	工业、生活自备井	2.4	
	农业开采	5.6	
长孝岩溶水系统	水源地(长孝、孝里等)	5.1	12.9
	工业、生活自备井	1.5	
	农业开采	6.3	
济南泉域	水源地(济西、西郊等)	15.4	30.2
	工业、生活自备井	5.8	
	农业开采	9.0	
白泉泉域	水源地(武家、黄土崖等)	12.7	30.1
	工业、生活自备井	5.3	
	农业开采	4.6	
	矿坑排水	7.5	
总计			89.6

案:方案 1 为连续 5 年平水年;方案 2 为四枯一丰(选取济南地区 1999—2003 年降水资料);方案 3 为济南地区 1982—1991 年 10 年降水组合,各组合具体降水量见表 2。农业开采量根据水利统计年鉴资料对照不同降水量进行取值^[28],生活用水量则取常量,自备井及矿坑排水在本次预报过程中维持现有开采量不变。

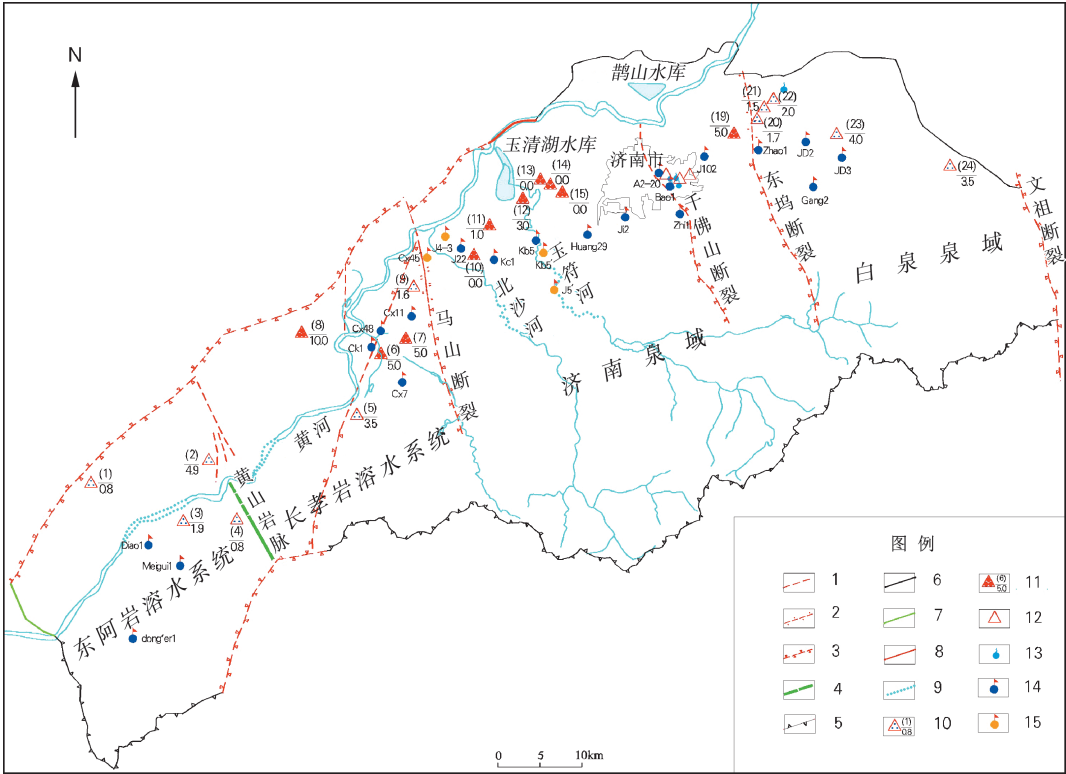
表 2 预测各降水组合降水量 mm

方案	降水量					平均降水量
	①	②	③	④	⑤	
方案 1	622.80	622.80	622.8	622.8	622.8	622.80
方案 2	560.00	437.20	590.0	370.0	985.6	588.56
方案 3	646.85	560.06	640.7	581.7	395.8	641.70
	992.00	532.30	340.3	1047.3	680.0	

注:济南市多年平均年降水量为 642 mm;①~⑤代表年份,对于方案 1,①~⑤代表连续 5 年平水年;对于方案 2,①~⑤分别代表 1999—2003 年 5 年;对于方案 3,则代表 1982—1991 年 2 个 5 年。

2.2 约束条件

①为保持趵突泉等四大泉群持续喷涌,保泉水位取趵突泉最低景观喷涌水位 27.5 m,即枯水期趵突泉水位不低于 27.5 m。②为保证济南岩溶水系统裂隙岩溶水资源的可持续开发,总开采量不能超过允许开采量。③开采状态下,各地段地下水位不应出现持续下降趋势。



注:1—透水断层;2—弱透水断层;3—阻水断层;4—阻水岩脉;5—地表分水岭;6—零流量边界;7—补给边界;8—排泄边界;9—河流渗漏段;10—开采水源地,编号/开采量(万 m³/d);11—济南市区供水水源地,编号/开采量(万 m³/d);12—停采水源地;13—泉群;14—岩溶水观测点;15—孔隙水观测点。

图 3 济南岩溶水系统预报各水源地开采分布

2.3 预报结果及分析

将上述 3 个降水组合的数据输入模型进行预报, 济南泉域岩溶水水源地开采方案见表 3, 各方案下济南岩溶水系统地下水量均衡关系见表 4。

方案 1 在连续 5 年平水年降水情况下, 济南泉域岩溶水水源地具体开采方案见表 3, 典型岩溶地下水观测孔预报水位见图 4~5。

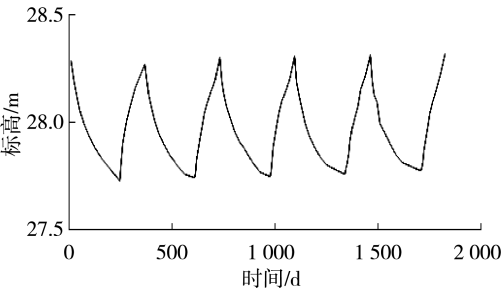


图 4 方案 1 中趵突泉 1 号观测孔预报曲线

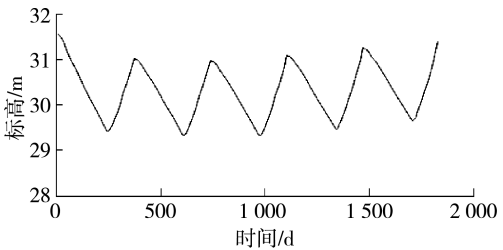


图 5 方案 1 中西郊 J22 观测孔预报曲线

从预测的结果可以看出: 在预测的连续 5 个平水年内, 趵突泉枯水期地下水水位均高于临界水位 27.5 m, 四大泉群能够实现长年喷涌。从图 4、图 5 可以看出, 两个观测孔水位均没有持续下降, 而是随降水周期作周期性波动。相应的, 从地下水量均衡关系(表 4)可以看出, 该方案在连续 5 年平水年内地下水量正均衡。以上预测结果说明, 拟定的济南泉域内各岩溶水水源地开采方案是合理的。该降水组合下可向济南市区供水 31 万 m³/d(济西二期水源地 10 万 m³/d、赵官屯 10 万 m³/d、泉域内各岩溶水水源地 11 万 m³/d), 每人每天生活用水(根据

2007 年济南市统计资料, 指城市居民家庭每一用水人口平均每天日常生活使用的自来水^[29], 下同)按 80 L 计算, 可以同时满足 387.5 万人生活用水。

方案 2 在四枯一丰降水量情况下, 济南岩溶水系统具体开采方案见表 3, 典型岩溶地下水观测孔预报水位见图 6~7。

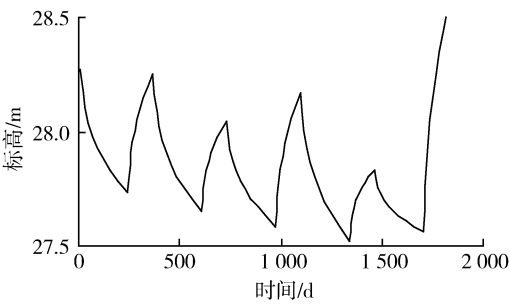


图 6 方案 2 中趵突泉 1 号观测孔预报曲线

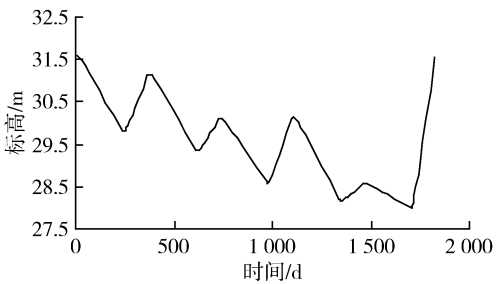


图 7 方案 2 中西郊 J22 观测孔预报曲线

从预测结果可以看出: 在预测的四枯一丰 5 个水文年内, 预测趵突泉最低水位 27.52 m, 高于临界水位 27.5 m, 四大泉群能够实现长年喷涌。从图 6、图 7 可以看出, 虽然受连续枯水年降水量偏少的影响, 两个观测孔前 4 年水位持续下降, 但受第 5 年丰水年降水量较大(985.6 mm)的影响, 水位迅速升高, 且均都能够回复到初始水位。相应的, 从地下水量均衡关系表(表 4)可以看出, 该方案在四枯一丰 5 个水文年内地下水量均衡。以上预测结果说明, 拟定的济南泉域内岩溶水水源地开采方案是合理

表 3 济南泉域岩溶水水源地计算开采方案 10⁴m³/d

开采方案	济南泉域岩溶水水源地开采量								合计
	桥子李	冷庄	古城	峨眉山	大杨庄	腊山	市区	东郊	
方案 1	0.0	2.0	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.0	11.0
方案 2	0.0	1.0	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.0	9.0
方案 3	4.0	3.0	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	5.0	13.5

表 4 各开采方案下济南岩溶水系统地下水量均衡关系 10⁴m³/d

开采方案	补给项				排泄项					均衡项 (补-排)
	降水 补给	河渠 侧渗	农业 回灌	边界流入	自来水 厂开采	自备井及 矿坑排水	农业 开采	泉排泄	二类边	
方案 1	122.5	5.96	3.8	0.07	57.2	22.5	25.5	13.6	2.6	10.93
方案 2	116.1	4.2	4.3	0.07	55.2	22.5	28.5	10.8	1.2	6.47
方案 3	126.2	5.88	4.2	0.07	59.7	22.5	28.1	13.1	2.3	10.65

的方案可以向济南市区供水 29.0 万 m³/d(济西二期 10 万 m³/d、赵官屯 10 万 m³/d、泉域内各岩溶水水源地 9.0 万 m³/d),每人每天生活用水按 80 L 水计算,可以同时满足 362.5 万人生活用水。

方案 3 在采用 1982—1991 年 10 年降水资料情况下,济南岩溶水系统具体开采方案见表 3,典型岩溶地下水观测孔预报水位见图 8~9。

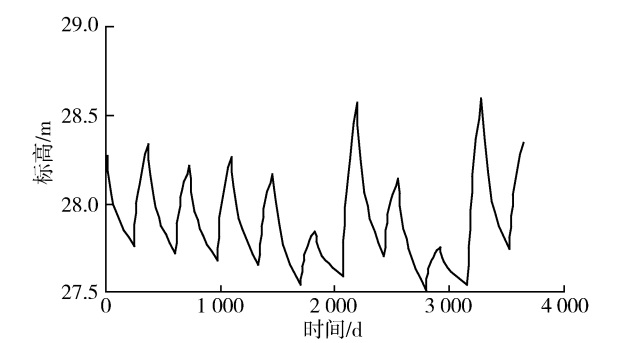


图 8 趵突泉 1 号观测孔预报曲线

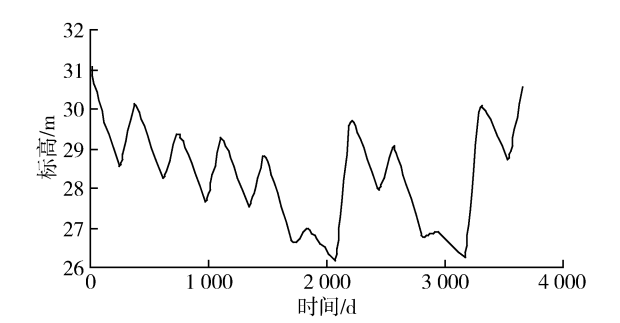


图 9 西郊 J22 观测孔预报曲线

从预测结果可以看出:在预测的连续 10 个水文年里,趵突泉枯水期地下水水位均高于临界水位 27.5 m,四大泉群能够实现长年喷涌。从图 8、图 9 可以看出,两个观测孔水位均没有持续下降,受特枯年份的影响,在第五年和第八年枯水期地下水水位最低,但随着丰水年的到来,受大气降水补给,地下水位迅速升高至前期初始水位之上。总的来说,地下水位随降水周期作周期性波动。相应的,从地下水均衡关系(表 4)可以看出,该方案在连续 10 个水文年内地下水量均衡。以上预测结果说明,拟定的济南泉域内各岩溶水水源地开采方案是合理的。该方案可以向济南市区供水 33.5 万 m³/d(济西二期 10 万 m³/d、赵官屯 10 万 m³/d、泉域内各岩溶水水源地 13.5 万 m³/d),每人每天生活用水按 80 L 水计算,可以同时满足 418.8 万人生活用水。

3 结 论

“保泉”和“供水”是济南泉域岩溶地下水系统互为制约的两个目标函数,优化开采方案,探求保泉

之路,需建立在保证济南市人民生活需水的基础上。通过 3 个方案的预报及分析,可以发现本次预报的 3 个降水组合下的济南泉域岩溶水开采方案均能够满足既保持泉水持续喷涌(趵突泉水位高于 27.5 m),又保证老百姓喝到优质地下水(泉域人口按 300 万,每人每天生活用水 80L,共需 24 万 m³/d)这一目标,而本次设计的 3 个降水组合除第 3 个降水组合的平均降水量为济南市多年平均降水量外,其余两个降水组合的平均降水量均小于济南市多年平均降水量 642 mm,且考虑了连续枯水年的特殊情况,说明济南市政府规划的济西二期水源地 10 万 m³/d 及赵官屯煤矿 10 万 m³/d 的开采量是合理的,对于实现“保泉供水”有显著作用。

参考文献:

[1] 徐军祥,邢立亭. 济南泉域岩溶水数值预报与供水保泉对策[J]. 地质调查与研究,2008,31(3):209-213. (XU Junxiang, XING Liting. Karst groundwater simulation predication and method of spring protection and water supply[J]. Geology Survey and Research,2008,31(3):209-213. (in Chinese))

[2] 吴兴波,牛景涛,牛景霞. 济南泉域地下水保护对策探析[J]. 水资源保护,2004,20(5):64-66. (WU Xingbo, NIU Jintao, NIU Jinxia. Analysis of groundwater protection countermeasure in Ji'nan spring field[J]. Water Resources Protection,2004,20(5):64-66. (in Chinese))

[3] 李常锁,秦品瑞. 济南市水资源概况及开发利用初探[J]. 山东国土资源,2010,26(10):21-25. (LI Changsuo, QIN Pinrui. Primary study on general situation exploitation and utilization of water resource in Jinan[J]. Shandong Land and Resources,2010,26(10):21-25. (in Chinese))

[4] 陈磊,吴悦菡,王培,等. 基于风险的济南市水生态安全评价[J]. 水资源保护,2016,32(1):29-35. (CHEN Lei, WU Yuehan, WANG Pei, et al. Risk-based safety assessment of water ecology in Ji'nan City[J]. Water Resources Protection,2016,32(1):29-35. (in Chinese))

[5] 秦品瑞,张慧,彭凯,等. 济南泉域岩溶水系统管理模型研究[J]. 山东国土资源,2012,28(12):32-36. (QIN Pinrui, ZHANG Hui, PENG Kai. Study on simulation of Jinan karst water system [J]. Shandong Land and Resources,2012,28(12):32-36. (in Chinese))

[6] 孙斌,彭玉明. 济南泉域边界条件,水循环特征及水环境问题[J]. 中国岩溶,2014,33(3):272-279. (SUN Bin, PENG Yuming. Boundary condition, water cycle and water environment changes in the Jinan spring region[J]. Carsologica Sinica,2014,33(3):272-279. (in Chinese))

[7] 韩连山,汪玉静,韩昱. 千佛山与趵突泉泉水形成关系研究[J]. 山东国土资源,2015,31(12):27-32. (HAN

- Lianshan, WANG Yujing, HAN Yu. Research on relationship between the formation of the Baotu Spring and Qianfo Mountain [J]. Shandong Land and Resources, 2015,31(12):27-32. (in Chinese))
- [8] 孟庆斌,邢立亭,滕朝霞. 济南泉域“三水”转化与泉水恢复关系研究[J]. 山东大学学报(工学版),2008,38(5):82-87. (MENG Qingbin, XING Liting, TENG Zhaoxia. The relationship of Spring protection and transformation pattern between precipitation groundwater and surface water in the Jinan spring region[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2008, 38(5):82-87. (in Chinese))
- [9] 路洪海,章程. 济南泉域岩溶水质演变及其对人类活动的响应[J]. 水土保持研究,2007,14(6):242-244. (LU Honghai, ZHANG Cheng. The variations of groundwater quality and its relationship with human activity [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2007, 14(6): 242-244. (in Chinese))
- [10] 宋恩武. 浅谈济南泉水保护与工程建设的关系[J]. 西部探矿工程, 2016, 28(4): 166-168. (SONG Enwu. Discussion on the relationship between Ji'nan spring protection and engineering construction [J]. West-China Exploration Engineering, 2016, 28(4): 166-168. (in Chinese))
- [11] 孙斌,彭玉明,李常锁,等. 济南岩溶水系统划分及典型泉域水力联系[J]. 山东国土资源,2016,32(10):31-34. (SUN Bin, PENG Yuming, LI Changsuo. Division of karst water system and hydraulic connection of typical spring fields in Jinan City [J]. Shandong Land and Resources,2016,32(10):31-34. (in Chinese))
- [12] 张志祥. 延河泉域岩溶地下水资源数值模拟研究[D]. 太原:太原理工大学,2005.
- [13] 卢丹美. 地下水数值模型和软件的特点及在我国的应用现状[J]. 中国水运, 2013(1): 107-109. (LU Danmei. Characteristics of groundwater numerical model and software and its application in China[J]. China Water Transport,2013(1):107-109. (in Chinese))
- [14] 陈崇希,唐仲华. 地下水研究. 地下水流动问题数值方法[M]. 北京:中国地质大学出版社,1990.
- [15] 张奇. 数值模型在地下水管理中的应用[J]. 水文地质工程地质,2003,30(6):72-79. (ZHANG Qi. Application of numerical models in groundwater management [J]. Hydrogeology and Engineering Geology,2003,30(6):72-79. (in Chinese))
- [16] 戚星. 复杂水文地质条件下地下水数值模型的应用[J]. 金属矿山, 2016(4): 146-150. (QI Xing. Application of groundwater numerical model under complex hydrogeological condition [J]. Metal Mine,2016(4):146-150. (in Chinese))
- [17] 李璇,束龙仓,鲁程鹏,等. 石川河地下水水库建库条件分析及地下水位动态预测[J]. 水资源保护,2017,33(3):13-18. (LI Xuan,SHU Longcang,LU Chengpeng,et al. Analysis of groundwater reservoir construction conditions and prediction of groundwater level variation in Shichuan River groundwater reservoir [J]. Water Resources Protection,2017,33(3):13-18. (in Chinese))
- [18] 朱君,安瑞瑞. 复杂断层矿区地下水三维数值模拟[J]. 水资源保护,2016,32(6):45-50. (ZHU Jun,AN Ruirui. Three-dimensional numerical simulation of groundwater in mining areas with complex faults [J]. Water Resources Protection,2016,32(6):45-50. (in Chinese))
- [19] 王礼恒,李国敏,董艳辉. 裂隙介质水流与溶质运移数值模拟研究综述[J]. 水利水电科技进展,2013,33(4):84-88. (WANG Liheng,LI Guomin,DONG Yanhui. Review of numerical simulation of flow and solute transport in fractured media [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,,2013,33(4):84-88. (in Chinese))
- [20] 张文卿,陈建生,姜淑坤,等. 基于同位素水化学分析的松嫩平原大布苏湖流域地下水补给源研究[J]. 水资源保护, 2017, 33(1): 9-14. (ZHANG Wenqing, CHEN Jiansheng,JIANG Shukun,et al. Study of recharge source of Dabusu Lake in Songnen Plain based on isotopic and hydrochemical analysis [J]. Water Resources Protection, 2017,33(1):9-14. (in Chinese))
- [21] 张文卿,陈建生,徐焱. 大布苏湖岸泥林地下潜流破坏成因[J]. 河海大学学报(自然科学版),2017,45(3):197-203. (ZHANG Wenqing, CHEN Jiansheng, XU Yi. Destruction causes of subsurface flow in mud forest along bank of Dabusu Lake [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2017,45(3):197-203. (in Chines))
- [22] 李追,周志芳,郭巧娜. 疏勒河流域花海灌区地下水位动态演变趋势[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2016,44(3):252-257. (LI Zhui,ZHOU Zhifang, GUO Qiaona. Trend analysis of dynamic change of groundwater level in Huahai irrigation area of Shule River Basin [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2016,44(3):252-257. (in Chinese))
- [23] 李兆峰,周志芳,李明远,等. 弱透水层释水过程中水力参数响应规律[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017,45(4):340-344. (LI Zhaofeng,ZHOU Zhifang, LI Mingyuan, et al. Variation of hydraulic parameters of aquitard during water release [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2017, 45(4): 340-344. (in Chinese))
- [24] 陈建生,张健,詹沪成,等. 黄土夹砂层的持水机制[J]. 河海大学学报(自然科学版),2016,44(5):412-417. (CHEN Jiansheng, ZHANG Jian, ZHAN Lucheng, et al. Water-holding mechanism of sand layer in loess [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2016,44(5):412-417. (in Chinese))

(下转第103页)

- 1995,37(2):233.
- [30] 黄苑媚,刘志刚,谢恩义,等. 水流速率对全缘马尾藻幼孢子体生长和生理活性的影响[J]. 广东海洋大学学报, 2014, 34 (6): 45-50. (HUANG Yuanmei, LIU Zhigang,XIE Enyi,et al. The effects of water velocity on the growth and physiological activitiesof juvenile sporophyte of *sargassum integerrimum* [J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2014, 34 (6): 45-50. (in Chinese))
- [31] MADSEN J D,CHAMBERS P A,JAMES W F,et al. The interaction between water movement, sediment dynamics and submersed macrophyte[J]. Hydrobiologia,2001,444: 71-84.
- [32] WANG Jun, XU Qinsong, WEI Shuli, et al. Zinc accumulation and its effects on physiological dynamics and calcium distribution in submerged macrophyte, *potamogeton crispus* L. [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica,2009,29(11):2249-2255
- [33] 刑雅囡,阮晓红. 硫化物胁迫对马来眼子菜生理生化指标的影响[J]. 水资源保护,2010,26(4):46-48. (XING Yanan, RUAN Xiaohong. Effects of sulfide (S^{2-}) on physiological and biochemical indicators of *potamogeton malaianus* [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010,26(4):46-48. (in Chinese))
- [34] 覃晓艳,林萍,马佳,等. 五种水生植物对生活污水的生理响应[J]. 湖北农业科学,2013,52(17):4058-4062. (QIN Xiaoyan, LIN Ping, MA Jia, et al. Physiological responses of 5 kinds of hydrophytes to domestic sewage [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2013, 52 (17): 4058-4062. (in Chinese))
- [35] WETZEL R G. Limnology:lake and river ecosystems[J].
+++++
(上接第 36 页)
- [25] 郭红梅. 地下水数值模拟在济南地铁规划中的应用研究[J]. 勘察科学技术, 2012 (5): 32-37. (GUO Hongmei. Application of groundwater numerical simulation on subway plan in Jinan [J]. Site Investigation Science and Technology, 2012 (5): 32-37. (in Chinese))
- [26] 王茂枚,束龙仓,季叶飞,等. 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,et al. Causes of spring's of flux attenuation and simulation of spring's regime-a case in Jinan karst spring area [J]. Carsologica Sinica,2008,27(1):19-23. (in Chinese))
- [27] 汪家权,吴义锋,钱家忠,等. 济南泉域保泉与供水的地下水开采方案研究[J]. 农业环境科学学报,2004,23(6):1228-1231. (WANG Jiaquan, WU Yifeng, QIAN Jiazhong,et al. Schieme of groundwater exploited to keep springs spurting and water supply in Jinan springs zone Eos Transactions American Geophysical Union, 2001 , 21 (2): 1-9.
- [36] 燕文明,刘凌,赵倩维,等. 小型浅水湖泊表层沉积物氮氧化古菌群落结构特征[J]. 河海大学学报(自然科学版),2016,44(5):449-453. (YAN Wenming, LIU Ling, ZHAO Qianwei, et al. Characteristics of community structure of AOA in surface sediments of small shallow lakes [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2016, 44 (5): 449-453. (in Chinese))
- [37] 郑世英,商学芳,王景平. 可见分光光度法测定盐胁迫下玉米幼苗抗氧化酶活性及丙二醛含量[J]. 生物技术通报, 2010 (7): 106-109. (ZHENG Shiyong, SHANG Xuefang, WANG Jingping. Determination of antioxidant Enzyme activity and contents of MDA in maize seedlings under salt stress with visible spectrophotometry [J]. Biotechnology Bulletin, 2010 (7): 106-109. (in Chinese))
- [38] 李婉路,张光生,成小英. Cd^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Pb^{2+} 对菹草生长胁迫影响及其应答机制[J]. 食品与生物技术学报, 2016, 35 (9): 1001-1007. (LI Wanlu, ZHANG Guangsheng, CHENG Xiaoying. Stress effect and response mechanism of Cd^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} and Pb^{2+} on *Potamogeton crispus* L. growth [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2016, 35 (9): 1001-1007. (in Chinese))
- [39] 李轶,殷亚远,王超,等. 纳米二氧化钛和铜对大型溞的联合毒性[J]. 河海大学学报(自然科学版),2016,44(2):95-100. (LI Yi, YIN Yayuan, WANG Chao, et al. Joint toxicity of titanium dioxide nanoparticles and copper on daphnia magna [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2016, 44 (2): 95-100. (in Chinese))
(收稿日期:2017-12-29 编辑:彭桃英)
- [J]. Journal of Agro-environment science, 2004, 23 (6) 1228-1231. (in Chinese))
- [28] 姚成,章玉霞,李致家,等. 无资料地区水文模拟及相似性分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2013,41(2):108-113. (YAO Cheng, ZHANG Yuxia, LI Zhijia et al. Hydrological simulations and similarities in ungauged basins [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2013, 41 (2): 108-113. (in Chinese))
- [29] 滕朝霞. 利用 MODFLOW 模型计算分析济南市保泉生态需水量[J]. 中国农村水利水电, 2008 (8): 35-37. (TENG Zhaoxia. Calculation and analysis of ecological water requirement in Jinan by using MODFLOW model [J]. China Rural Water and Hydropower, 2008 (8): 35-37. (in Chinese))
(收稿日期:2017-05-20 编辑:彭桃英)