

地下水开发利用

济南泉域岩溶地下水动态开采模型研究

孙斌, 魏月, 赵振华, 高文锋, 于大潞, 郑丽爽

(山东省地矿工程勘察院, 山东 济南 250014)

摘要:通过收集近 3 年来济南泉域岩溶地下水开采量、降雨量、泉水流量及泉群水位资料,进行了相关性分析及回归分析。揭露了四大泉群之间内在联系及影响泉群水位变化关键变量间的相互关系,以此为基础建立了岩溶地下水年内动态开采模型。该模型量化了不同时期地下水的开采量,有利于引导当前开采模式下水资源配置,对实现泉水保护及城市供水具有重要意义。

关键词:开采量;流量;开采模型;泉水位;济南泉域

中图分类号:P641.8

文献标识码:B

自 1972 年以来,济南泉水经历了多次断流,后经社会各界的不懈努力才得以喷涌。从 2003 年泉水持续喷涌以来,四大泉群水位一直维持一个相对稳定状态,这一结果与保泉工作密不可分,近几年对济南泉域研究的重点方向主要为保泉条件下岩溶水资源开发利用^[1-4],多关注保泉与供水之间的权衡,但众多研究成果中普遍存在保泉水位限制偏低,不符合保泉政策及现实要求,为维持泉水持续喷涌的良好现状,进一步优化水资源配置,该文通过对四大泉群水位、流量及降雨量数据的分析研究,在目前开采模式下建立了地下水资源年内动态开采模型,引导水资源开采计划,从而实现保泉与供水双赢。

1 四大泉群流量及水位关系特征

1.1 四大泉群流量相关性分析

济南泉域边界条件经以往保泉勘探工作已基本查明,南边界为地表水分水岭,北边界为岩体,西边界为马山断裂,东边界为东坞断裂^①,岩溶地下水天然排泄途径主要为市区四大泉群自流排泄。通过对 2008—2010 年四大泉群月流量监测数据进行分析,发现各泉群流量有所不同,以黑虎泉泉群流量为最大,其次为趵突泉泉群、五龙潭泉群,珍珠泉泉群流量最小,四大泉群流量最大的月份集中在每年 8—

11 月份,趵突泉、黑虎泉和五龙潭泉群流量具有明显的季节变化特征,而珍珠泉流量季节变化不大,比较稳定。

各大泉群流量与四大泉群总流量具有一定线性关系(图 1),其中,趵突泉、黑虎泉流量与四大泉群总流量具有很好的线性关系,五龙潭和珍珠泉流量与四大泉群总流量也具有较好的线性关系。表 1 中 Pearson 和 Spearman^[5]相关分析法均显示趵突泉、黑虎泉与四大泉群总流量具有高度相关关系,平均相关系数为 0.95 左右,五龙潭、珍珠泉与四大泉群

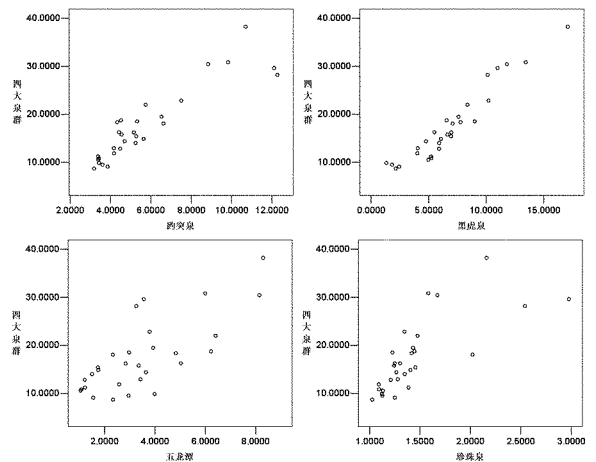


图 1 趵突泉、黑虎泉、五龙潭及珍珠泉与四大泉群流量散点图

收稿日期:2013-03-23;修订日期:2013-05-29;编辑:陶卫卫

作者简介:孙斌(1982—),男,山东荣成人,工程师,主要从事水文地质与环境地质勘察工作;E-mail:spinhlr@163.com。

①山东省地质矿产局八〇一水文地质工程地质大队,奚德荫、李祥芝、邵卓,山东省济南市保泉供水水文地质勘探报告,1988年。

总流量相关度稍低;从单个泉群流量之间相关关系来看,趵突泉和黑虎泉相关系数最大,均大于 0.93,五龙潭与珍珠泉相关系数也较大,为 0.85 左右,黑虎泉与珍珠泉相关程度也较高。

表 1 四大泉群流量及其与总流量之间相关系数

Pearson	趵突泉	五龙潭	黑虎泉	珍珠泉	四大泉群
趵突泉	1				
五龙潭	0.727	1			
黑虎泉	0.942	0.750	1		
珍珠泉	0.863	0.858	0.882	1	
四大泉群	0.960	0.851	0.980	0.927	1
Spearman	趵突泉	五龙潭	黑虎泉	珍珠泉	四大泉群
趵突泉	1				
五龙潭	0.605	1			
黑虎泉	0.935	0.621	1		
珍珠泉	0.761	0.846	0.772	1	
四大泉群	0.932	0.796	0.944	0.867	1

以上相关分析结果表明:一方面,趵突泉和黑虎泉泉群流量决定着四大泉群流量变化;另一方面,趵突泉和黑虎泉之间存在联系,珍珠泉和五龙潭之间存在联系,而且前两者之间的联系程度要高于后两者。

1.2 四大泉群水位相关性分析

泉群水位数据相比流量数据的获取要简便快捷许多,而且也更利于实时动态监测、管理,对单个泉群而言地下水水位高低是泉群流量大小的一种表现形式,掌握岩溶地下水水位动态变化信息,可以更直观地了解泉流量特征。通过对四大泉群中具有代表性水点水位相互关系分析发现,趵突泉和黑虎泉水位高度相关,相关系数高达 0.999(表 2),五龙潭和趵突泉、黑虎泉的水位为高度相关,相关系数也达到了 0.85 左右,珍珠泉和五龙潭水位为低度相关,相关系数仅为 0.31,而珍珠泉和趵突泉、黑虎泉的水位相关程度极弱,相关系数小于 0.3。

表 2 四大泉群水位之间相关系数

Pearson	趵突泉	五龙潭	黑虎泉	珍珠泉
趵突泉	1			
五龙潭	0.858	1		
黑虎泉	0.999	0.856	1	
珍珠泉	0.281	0.310	0.293	1
Spearman	趵突泉	五龙潭	黑虎泉	珍珠泉
趵突泉	1			
五龙潭	0.823	1		
黑虎泉	0.993	0.806	1	
珍珠泉	0.170	0.321	0.170	1

四大泉群水位分析结果表明,四大泉群之间联系程度存在差异,各泉群之间的联系强弱等级为,趵突泉∩黑虎泉>五龙潭∩(趵突泉、黑虎泉)>>五龙潭∩珍珠泉>珍珠泉∩(趵突泉、黑虎泉)。

1.3 流量与水位关系分析

对单个泉群而言,流量变化可以映射出水位变化,四大泉群附近虽水文地质条件稍有差异^①,但泉水成因具有相似性,因此四大泉群总流量与各泉群水位之间必然存在一定关系。图 2 显示趵突泉、黑虎泉和五龙潭水位与四大泉群总流量之间具有极为相似的关系特征,直接表现形式为水位大致随流量呈直线上升趋势,而珍珠泉水位基本相对稳定,与总流量为非线性关系。

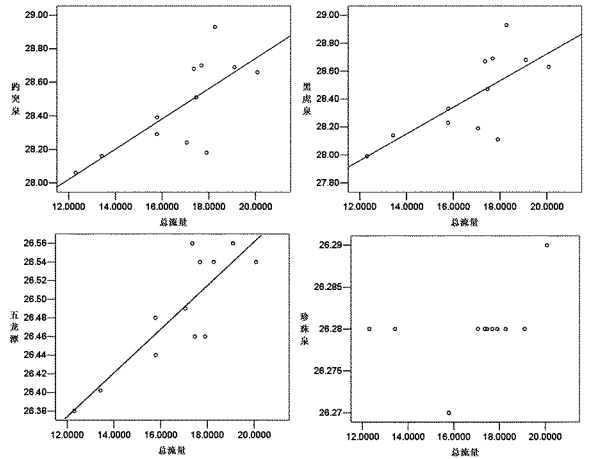


图 2 四大泉群各自水位与总流量关系图

为定量研究总流量与水位之间的关系特征,采用回归分析建立流量(Q)与水位(L)的量化方程,具体结果如下:

$$\begin{aligned}
 L_{\text{Bao}} &= 26.937 + 0.09Q \\
 L_{\text{Hei}} &= 26.816 + 0.095Q \\
 L_{\text{Wu}} &= 26.092 + 0.023Q \\
 L_{\text{Zhen}} &= 26.263 + 0.001Q \quad (1)
 \end{aligned}$$

对回归分析结果进行显著性检验,发现趵突泉、黑虎泉及五龙潭回归总体是显著的,所得的回归方程具有代表性,可以针对泉群总流量及水位做相应预测分析,而珍珠泉的回归直线对观测数据的拟合程度差,没有通过显著性检验,回归结果无意义。

① 山东省地矿工程勘察院,韩连山、陈奂良等,济南市轨道交通建设对泉水影响研究(线网规划阶段)——泉水地下流场特征研究,2010年。

2 系统变量选取与分析

2.1 济南岩溶地下水系统

济南泉域属于一个相对独立的水文地质单元,它是由隔水或相对隔水的岩层及断裂圈闭而成,由相互作用和相互依赖的若干组成部分结合而成的具有特定功能的整体,单元内为具有统一水力联系的含水岩系,是一个地下水系统。济南泉域岩溶地下水系统主要源项为大气降水直接入渗补给、雨水转化为地表水后间接补给、雨水补给第四系及基岩裂隙含水层后间接补给,主要汇项为人工开采、泉水排泄及侧向径流(量较小可忽略)。对于一个系统而言,自然要受到外部环境各种激励作用,而系统本身对这些作用必然作出响应,从系统整体角度考虑,在所有的源汇项中大气降水和人工开采是最直接的外部激励作用^[6],泉水排泄则是对以上外部环境作用响应的表现形式,间接映射到泉群水位(图 3)。

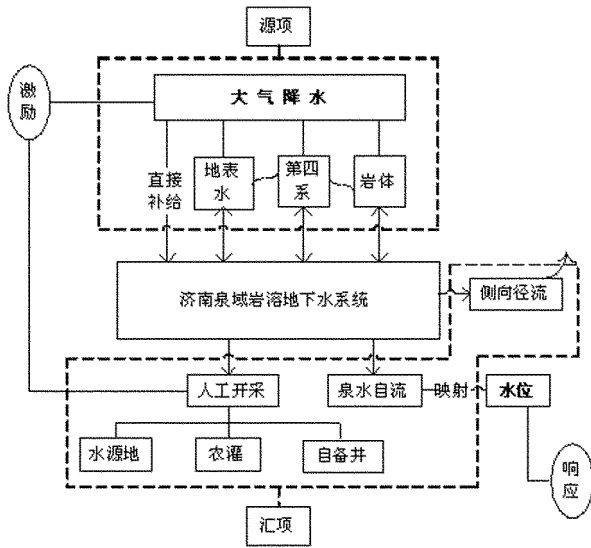


图 3 济南岩溶地下水系统模型图

2.2 岩溶水开采模式

济南泉域附近存在众多岩溶地下水人工开采点(表 3),主要包括市区水厂(解放桥、泉城路、普利门、饮虎池、羊头峪、历南、东八里洼、华能路)、西郊水厂(峨眉山、腊山、大杨庄)、东郊水厂(白泉、李庄、宿家)、济西水厂(古城、冷庄、桥子李),西郊农业灌溉井群及部分自备水井。目前开采主要以三大水厂为主,其次为农灌期开采和部分自备井偷采,三大水厂的开采模式则以东郊水厂长期为主,西郊长期开

采为辅,济西水厂补采配合,但近几年开采数据,表明地下水开采总量逐渐降低(图 4)。

表 3 济南泉域附近岩溶地下水人工开采点特征

开采点	开采状态	开采类型
市区水厂	停采	禁采
西郊水厂	开采	长期
东郊水厂	开采	长期
济西水厂	开采	枯水期
西郊农灌井群	开采	农灌期
自备井	开采	禁采

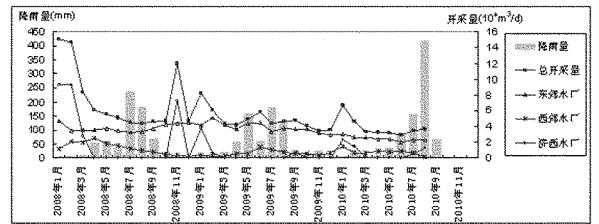


图 4 东郊、西郊、济西及总开采量动态图

2.3 总流量与开采量降雨量分析

为查明降雨量、人工开采量对济南岩溶地下水系统激励作用强度的大小,或者说为查明在不同降雨量、不同开采量激励条件下,泉群流量会做出如何响应,采用偏相关分析法进行定量分析。

对济南泉域岩溶地下水系统而言,大气降水对泉流量的激励作用存在滞后性^[7],在补给的过程中受到含水岩组性质、水动力条件、地质构造等众多因素影响,导致该系统外部表现形式必然存在一个缓冲期;同样,因为市区内水厂已经停采,而东郊、西郊、济西水厂与泉群排泄点均有一定的距离,地下水开采也不会对泉水流量立即产生影响,也存在一个缓冲期。综合分析以往观测资料,将缓冲期定为一个月^①。确定分析数据集为:

$$\epsilon = \{W_i, P_i, Q_{i+1}\} (i = 1, 2, \dots, n)$$

其中: W_i —该时间步长内三大水厂总开采量(万 m³/d); P_i —该时间步长内平均降雨量(mm); Q_{i+1} —下一时间步长内总流量(万 m³/d); n —样本容量。

分析结果(表 4)显示,总开采量对总流量的偏相关系数为-0.321,而降雨量对总流量的偏相关系数为 0.544。这表明开采量与总流量成负相关关

① 山东省地矿工程勘察院,马河宽、罗斐、高明志,济南市水文地质环境地质调查报告,2011 年。

系,降雨量与总流量呈正相关关系,开采量增大和降雨量减小均会导致泉流量减少,反之亦然。2 个变量对总流量的相关程度累计为 0.865,这表明样本 86.5% 的信息可以得到解释,2 个变量的选择具有意义。

表 4 总流量降雨量总开采量的偏相关分析

分析 1	总流量	总开采量	分析 2	总流量	降雨量
总流量	1	-0.321	总流量	1	0.544
总开采量	-0.321	1	降雨量	0.544	1

以上相关分析结果可以看出,降雨量、开采量和总流量 3 个变量的选取对于济南岩溶地下水系统具有代表性,基本能够解释系统所受外部激励作出的响应,从而建立总流量(Q)、降雨量(P)、三水厂总开采量(W)的回归模型:

$$Q_{t+1} = 18.87 + 0.054P_i - 0.572W_i \quad (2)$$

3 开采模型及开采量预测

通过以上分析发现:一方面,在受到降雨量和开采量 2 个激励项的不同作用后,济南泉域岩溶地下水系统以不同的泉流量作出响应,降雨量主要受气象因素控制,无法从根本上进行人为改变,而开采量则主要是受人为因素影响,可以根据不同需要、不同条件进行相应调整,所以在自然降雨条件下,可以通过开采量动态调整来达到间接调控泉流量的目的;另一方面,泉群流量与地下水位之间存在密切的联系,多年动态监测数据也表明随着岩溶地下水水位逐渐降低,泉群流量也会逐渐减少直至停喷,地下水位成为映射泉群流量的重要标志。

根据前面分析结果,建立趵突泉水位与总开采量、降雨量的数学模型为:

$$W_i = 556.241 + 0.0944P_i - 19.425L_{\text{Baoi}+1}$$

结合《济南市保持泉水喷涌应急预案》^[8]不同泉水保护目标条件下的 3 个预警水位线(黄色 28.15 m、橙色 28.00 m、红色 27.60 m),并综合考虑降雨量年际变化特征及西郊农灌开采影响,建立岩溶地下水年内动态开采量模型:

$$W = \begin{cases} 9.427 + 0.0944P_i & 2 \leq i \leq 6 \\ 12.341 + 0.0944P_j & j = 1, 11, 12 \\ 20.111 + 0.0944P_k & 7 \leq k \leq 10 \end{cases}$$

式中:W—当月岩溶地下水开采量(万 m³/d);P—当月平均降雨量(mm);i,j,k—月份。

从模型可以得出:在用水高峰期、农灌期及枯水期条件下,以黄色预警水位为目标,预测岩溶水开采量为 $9.427 + 0.0944P_i$;在丰水期条件下,以红色预警水位为目标,预测岩溶水开采量为 $20.111 + 0.0944P_k$;在平水期则以橙色预警水位为目标,预测岩溶水开采量为 $12.341 + 0.0944P_j$ 。

4 结论及建议

(1)通过分析发现,四大泉群总流量主要取决于趵突泉和黑虎泉流量,趵突泉和黑虎泉之间、五龙潭和珍珠泉之间均存在联系,且前两者联系程度要高于后两者。

(2)该模型量化了当前开采模式下岩溶地下水月动态开采量,即枯水期月份开采量为 $9.427 + 0.0944P_i$ 万 m³/d,平水期月份开采量为 $12.341 + 0.0944P_j$ 万 m³/d,丰水期月份开采量为 $20.111 + 0.0944P_k$ 万 m³/d,在不同自然降雨条件下它便于引导年内不同时期不同泉水保护目标条件下的开采量。

(3)受西郊农灌开采及部分自备井开采数据收集困难等因素影响,模型未拟合这部分开采量,在利用模型进行岩溶水开采量预测时应扣除相应项。

(4)模型分析采用的数据系列长度相对较短,该模型不适于远期非正常气象条件下开采量预测,应适当增加数据系列长度修正模型,在有条件情况下增加对农灌开采量调查,进一步完善模型。

参考文献:

- [1] 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):22-26.
- [2] 张海林,李常锁,罗斐.济南市主要水源地地下水资源潜力评价[J].山东国土资源,2011,27(11):24-27.
- [3] 秦品瑞,张慧.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):33-37.
- [4] 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.
- [5] 余建英,何旭宏.数据统计分析与 SPSS 应用[M].北京:人民邮电出版社,2006:164-165.
- [6] 路洪海,陈诗越,张重阳.济南泉域排泄区地下水演变趋势分析[J].人民黄河,2009,31(6):81-82.
- [7] 祁晓凡,杨丽芝.济南泉域地下水位动态及其对降水响应的交叉小波分析[J].地球科学进展,2012,27(9):969-978.

Study on Dynamic Exploitation Model of Karst Groundwater in Jinan Spring Area

SUN Bin, WEI Yue, ZHAO Zhenhua, GAO Wenfeng, YU Dalu, ZHENG Lishuang
(Shandong Geo - engineering Exploration Institute, Shandong Jinan 250014, China)

Abstract: Through collecting datas of exploitation quantity, precipitation, spring water discharge and spring water level of Jinan spring area in recent three years, correlation analysis and regression analysis have been carried out. It revealed the internal relation between four springs and relation among main variables which affect the spring water level. On these basis, annual dynamic exploitation model of karst groundwater has bee set up. The model quantifies the exploitation quantity of groundwater in different period. It is beneficial to guide the allocation of groundwater resources on the current exploitation mode, and has important significance on spring protection and city water supply.

Key words: Exploitation quantity; discharge; exploitation model; spring water level; Jinan spring area