

# 济南泉域岩溶水系统管理模型研究

秦品瑞<sup>1</sup>, 张慧<sup>1</sup>, 彭凯<sup>1</sup>, 荆浩森<sup>2</sup>

(1. 山东省地矿工程勘察院, 山东 济南 250014; 2. 山东省地矿工程集团有限公司, 山东 济南 250014)

**摘要:**利用 Visual Modflow 软件建立了济南泉域岩溶地下水数值模拟模型, 并在此基础上, 采用响应矩阵法建立了济南泉域岩溶水系统管理模型, 重点研究并利用模型定量计算了济西、西郊、市区、东郊开采地下水以及补源等对泉水位的影响, 进行了 2 个方案的优化管理, 对济南市水资源进行优化配置, 为实现“保泉供水”向政府提供了可靠的决策依据。

**关键词:**岩溶水; 数值模拟; 响应函数; 优化管理; 济南市

**中图分类号:**TV213.4 **文献标识码:**B

## 0 引言

济南以泉城闻名于世, 城因泉名, 泉以水生。然而随着济南市经济、文化的快速发展与人口的增加, 水资源的“供”“需”矛盾突出, “泉源上奋, 水涌若轮”的趵突泉出现断流, 济南人守着泉水喝黄河水, “泉城”已名不符实, 城市形象受到损害, 因此, “保泉供水”成为济南亟待解决的重大课题<sup>[1]</sup>。

20 世纪 70 年代国外就开始研究地下水系统的管理问题, 现在这方面的理论和方法日趋成熟, 特别是自 Maddock(1972)提出响应函数(Response function)的概念以来, 响应矩阵法(Response matrix method)越来越广泛地应用于解决地下水系统的各种管理问题<sup>[2,3]</sup>。该文就是采用响应矩阵法, 进行了济南泉域岩溶水管理模型研究, 其目标就是要达到既能保持泉水常年出流的景观, 又尽可能在泉域范围内多开采一部分地下水, 确保泉城老百姓喝上优质地下水。

## 1 响应矩阵的生成

响应矩阵的生成是建立泉域地下水管理模型的基础。其原理是运用地下水系统数值模拟模型来确定系统输出对系统输入的响应关系——单位脉冲响应函数, 并形成其函数值的集合——响应矩阵。

因此, 首先根据济南泉域地质、水文地质条件分析确定了该次模拟范围: 西以马山断裂为界, 北部以济南岩体和石炭、二叠纪地层为界, 东部以东坞断裂为界, 南部至寒武纪张夏组底, 面积 847.5 km<sup>2</sup><sup>[4]</sup>。模拟区概化为 3 层结构, 第一层孔隙含水层当潜水处理, 第二层为弱透水层只考虑垂向一维流, 第三层为具承压性质的岩溶含水层。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。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, 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 Visual Modflow 软件建立模型进行数值求解, 并依据泉域 2005—2007 年地下水动态资料对模拟模型进行了识别和检验, 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泉域地下水动态规律, 为管理模型的有效建立了良好的基础。其微分方程为:

$$\begin{cases} L(H) = \sum_{i=1}^N Q_i \cdot \delta(x-x_i, y-y_i, t) + w(x, y, t) \\ H(x, y) = g_0(x, y) \quad (t=0, \quad x, y \in \Omega) \\ H(x, y, t)|_{\Gamma_1} = g_1(x, y, t) \quad (t > 0, \quad x, y \in \Gamma_1) \\ L_1(H)|_{\Gamma_2} = g_2(x, y, t) \quad (t > 0, \quad x, y \in \Gamma_2) \end{cases} \quad (1)$$

\* 收稿日期: 2012-05-10; 修订日期: 2012-08-07; 编辑: 陶卫卫

作者简介: 秦品瑞(1982—), 男, 安徽濉溪人, 工程师, 主要从事水工环、地质灾害等方面工作; E-mail: qinpinrui1982@126.com。

其中： $L(H) = \frac{\partial}{\partial x}(T \frac{\partial H}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(T \frac{\partial H}{\partial y}) - \mu(\frac{\partial H}{\partial t})$ ,  $L_1(H) = T \frac{\partial H}{\partial n}$

式中： $H$  为承压水水头； $T$  为承压含水层导水系数； $Q_i$  为位于  $(x_i, y_i)$  点的可控制输入信号（抽水量或注水量）； $w(x, y, t)$  为不可控制量（降水、蒸发或越流）的代数和； $g_0(x, y)$  为水头分布初始值； $g_1(x, y, t)$  为第一类边界条件值； $g_2(x, y, t)$  为第二类边界条件值； $\delta(x - x_i, y - y_i, t)$  为单位脉冲函数<sup>[5,6]</sup>。

数值模拟模型(1)的初值条件为非齐次，即  $g_0(x, y) \neq 0$ ，此时地下水系统不是线性齐次系统，因此不能直接应用叠加原理确定单位脉冲响应矩阵。为解决此问题，把定解问题(1)分解为下列两个叠加问题：

$$\begin{cases} L(h) = w(x, y, t) \\ h(x, y) = g_0(x, y) \quad t = 0 \\ h(x, y, t) |_{r_1} = g_1(x, y, t) \quad t > 0 \\ L_1(h) |_{r_2} = g_2(x, y, t) \quad t = 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} L(s) = \sum_{i=1}^N Q_i \cdot \delta(x - x_i, y - y_i, t) \\ s(x, y) = 0 \quad t = 0 \\ s(x, y, t) |_{r_1} = 0 \quad t > 0 \\ L_1(s) |_{r_2} = 0 \quad t > 0 \end{cases} \quad (3)$$

其中： $H = h + s$ 。

式中： $H$  为受天然补、径、排条件及人工干扰作用下的地下水水位； $h$  为仅受天然补、径、排条件作用下的地下水水位； $s$  为仅受人工干扰作用下的地下水水位降深。

对于一个具有齐次初始条件的线性地下水流系统(2)，在给其中某些源或汇施加脉冲后，在系统中某一点产生的水位总响应，可以由各源或汇单独施加脉冲对该点所产生的响应的代数和求得：

$$H(i, n) = \sum_{j=1}^l \sum_{k=1}^N \beta(i, j, n - k + 1) Q(j, k) + h(i, n) \quad (4)$$

式中： $l$  表示有  $l$  口抽水井(或注水井)作用于地下水系统； $H(i, n)$  为实际地下水水位值； $h(i, n)$  为零输入响应，即仅受边值条件和天然补径排条件下的地下水水位。

式(4)称为地下水水位响应函数，即实际的地下水水位值(实际输出)是线性系统的输出与零输入响应的叠加。对泉域地下水系统施加单位脉冲，形成响应矩阵，并以此为基础建立管理模型<sup>[7]</sup>。

## 2 地下水系统管理模型的建立

### 2.1 方案设计

#### 2.1.1 总体方案

该次管理模型的总体方案是在保持泉水持续喷涌的前提下，在现有开采布局的情况下最大限度地开采泉域裂隙岩溶地下水资源量，以满足日益增长的用水需求。针对济南泉域地下水管理问题，拟定了 2 个管理方案，即现状管理方案和优化补源管理方案，每个方案保泉水位分别取 27.0 m(使市区四大泉群能够出流)和 27.5 m(使市区四大泉群有一定的出流景观)。

现状管理方案：现状条件下地下水开采优化方案；优化补源管理方案：优化补源条件下地下水开采优化方案。根据以往保泉供水等相关资料分析研究，拟定在北沙河、玉符河、兴济河进行回灌补源，补源量分别为 3 万 m<sup>3</sup>/d, 8 万 m<sup>3</sup>/d, 3 万 m<sup>3</sup>/d, 回灌补源期为每年 6—9 月实施，以充分利用雨季降水和水库多余弃水。

#### 2.1.2 各水文年份降水率保证

根据 1959 年至 2007 年共 49 年济南市降水序列资料，进行年降水量频率分析，得出典型年降水量见表 1。

表 1 典型年降水量

频率	95%(特枯)	75%(枯)	50%(平)	25%(丰)
降水量(mm)	398.9	522.8	622.8	764.4

#### 2.1.3 管理期和管理时段划分

对以上各总体方案分别依据降水保证率，制定丰水年( $P=25\%$ )、平水年( $P=50\%$ )、枯水年( $P=75\%$ )和特枯年( $P=95\%$ )4 种水文年份的次级子方案。这样，共拟定出  $4 \times 4$  种水资源规划管理方案，如表 2 所列。

表 2 拟定的不同水文年地下水资源优化管理方案

水文年		丰水年 (1)	平水年 (2)	枯水年 (3)	特枯年 (4)
现状管理 方案	保泉水位 27.0	PA1	PA2	PA3	PA4
	保泉水位 27.5	PB1	PB2	PB3	PB4
优化补源 管理方案	保泉水位 27.0	PC1	PC2	PC3	PC4
	保泉水位 27.5	PD1	PD2	PD3	PD4

泉域内降水具有明显的季节性，降水多集中在 6—9 月份，地下水水位受到降水量的影响，表现为汛期水位升高，枯水季节水位缓慢下降。一般 6 月份水位最低，10 月水位最高。根据以上特点，将各水文年划分出 3 个管理时段，即 10, 11, 12, 次年 1 月为第一管理时段，时间为 123 天；2, 3, 4, 5 月为第二

管理时段, 时间为 120 天; 6, 7, 8, 9 为第三管理时段, 时间为 122 天。

### 2.2 目标函数

保证在满足环境约束, 水位约束, 补给量约束等条件下, 所能获得的最大的地下水资源的利用量。

$$\max Z = \sum_{k=1}^3 \sum_{j=1}^8 C_i Q(j, k) \quad (5)$$

式中:  $j$  为管理亚区数目;  $k$  为管理时段;  $Q(j, k)$  为  $j$  区  $k$  时段开采量;  $C_i$  为权系数。

### 2.3 约束条件

#### 2.3.1 生产约束

保证开采量不超过现有开采井的供水能力, 即上限为各亚区的最大开采能力, 下限根据济南市区供水管网调整能力确定其供水量的约束值。

$$Q_i \geq Q_{\min}(k) \quad (6); \quad Q_i \leq Q_{\max}(j) \quad (7)$$

式中:  $Q_{\min}(k)$  为第  $k$  时段地下水资源最小需求量;  $Q_{\max}(j)$  为第  $j$  管理区地下水的最大开采能力。

#### 2.3.2 生活约束

要满足日常生活用水对地下水资源的需求, 即:

$$\sum_{j=1}^8 Q(j, k) \geq Q_{\min} \quad (8)$$

$Q_{\min}$  为对地下水资源的最小需求量。考虑到该次管理模型的目标之一就是确保泉城老百姓喝上优质地下水, 因此按每人每天最小生活用水需求量 80 L, 泉域人口 300 万人计算, 则每天最少需要 24 万  $m^3$  地下水用于居民生活。因此将 24 万  $m^3/d$  作为该次管理模型的地下水资源最小需求量。

#### 2.3.3 环境约束

环境约束是指保持泉水常年喷涌, 控制水位下降, 保泉水位分别取 27.0 m 和 27.5 m。同时为保

证地下水资源长期开发, 防止土壤沙漠化以及防止由于水位过低引起的吊泵等后果, 主要地段的水位降深应受到约束, 即:

$$\sum_{j=1}^8 \sum_{k=1}^3 [\beta(i, j, k-t) Q(j, k)] \leq S_{allow}(i, k) - S_{add}(i, k) \quad (i = 1, 2, \dots, NC) \quad (9)$$

式中:  $S_{allow}(i)$  为第  $i$  控制点的水位允许降深;  $S_{add}(i)$  为第  $i$  控制点水位附加降深;  $\beta(i, j, k-t)$  为单位脉冲响应系数。

#### 2.3.4 可持续开发约束

为保证泉域裂隙岩溶水资源的可持续开发, 不能破坏泉域地下水系统的水均衡条件, 总开采量不能超过允许开采量。即:

$$\sum_{k=1}^3 \sum_{j=1}^8 Q(j, k) \leq Q_a \quad (10)$$

$Q_a$  为不破坏水均衡条件下的最大开采量。

#### 2.3.5 非负约束

$$Q(j, k) \geq 0 \quad (11)$$

式中:  $Q(j, k)$  为  $j$  区  $k$  时段开采量。

## 3 管理模型运行结果分析

对于上述线性规划问题, 利用单纯形法程序进行计算求解, 代入响应函数值, 求得各典型年份不同方案下泉域地下水资源最大开采量。

### 3.1 现状管理方案

利用计算机求解, 在现状开采方案下, 当保泉水位取 27.0 m 时各管理亚区各典型年份岩溶水优化开采量见表 3, 当保泉水位取 27.5 m 时各管理亚区各典型年份岩溶水优化开采量见表 4。

表 3 各管理亚区各典型年份岩溶水优化开采量(现状方案, 27.0 m)

典型水文年	时段	管理亚区优化开采量(万 $m^3/d$ )								
		桥子里	冷庄	古城	峨眉山	大杨庄	腊山	市区	东郊	合计
PA1 丰水年 764.4mm	10-1月	8.00	4.00	10.00	15.00	0.00	0.00	0.00	5.00	42.00
	2-5月	8.00	4.00	10.00	0.23	0.00	0.00	0.00	5.00	27.23
	6-9月	4.75	4.00	9.48	0.00	0.00	0.00	0.00	9.60	27.83
PA2 平水年 622.8mm/a	10-1月	8.00	4.00	10.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.00	27.00
	2-5月	8.00	4.00	8.5	0.00	0.00	0.00	0.00	5.00	25.5
	6-9月	4.00	4.00	10.00	1.1	0.00	0.00	0.00	5.9	24.00
PA3 枯水年 522.8mm/a	10-1月	无最优解								
	2-5月	无最优解								
	6-9月	无最优解								
PA4 特枯年 389.9mm/a	10-1月	无最优解								
	2-5月	无最优解								
	6-9月	无最优解								

表 4 各管理亚区各典型年份岩溶水优化开采量(现状方案,27.5 m)

典型水文年	时段	管理亚区优化开采量(万 m <sup>3</sup> /d)								
		桥子里	冷庄	古城	峨眉山	大杨庄	腊山	市区	东郊	合计
PB1 丰水年 764.4mm	10-1月	8.00	4.00	10.00	11.00	0.00	0.00	0.00	5.00	38.00
	2-5月	8.00	4.00	10.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.00	27.00
	6-9月	5.35	4.00	9.85	0.00	0.00	0.00	0.00	8.90	28.10
PB2 平水年 622.8mm/a	10-1月	无最优解								
	2-5月									
	6-9月									
PB3 枯水年 522.8mm/a	10-1月	无最优解								
	2-5月									
	6-9月									
PB4 特枯年 389.9mm/a	10-1月	无最优解								
	2-5月									
	6-9月									

从表 3、表 4 分析可知,同目前开采现状相比较,优化计算后的开采方案对济西水源地(桥子里、古城、冷庄)和西郊水源地(峨眉山、大杨庄、腊山)的水资源开采布局重新做了调整,将济西水源地的开采比例增高,相应的将西郊水源地开采比例调低。这表明在减少了对泉群威胁较大的西郊水源地开采量的同时,使得对泉群威胁较小的济西水源地得到了有效开发,即减少了对市区泉水的影响,又可截取泉域西北部的岩溶水外泄量,使得泉域地下水资源开采总量有了一定得增加。从社会经济效益来看,此方案在基本保证农灌水井和自备井的使用后,在

保泉水位取 27.5m 时,仅丰水年能满足“保泉供水”目标。因此,该方案有局限性,它不能从根本上解决保泉与供水之间的矛盾,所以要考虑下一个优化补源下的管理方案。

### 3.2 优化补源管理方案

利用计算机求解,在优化补源开采方案下,当保泉水位取 27.0 m 时各管理亚区各典型年份岩溶水优化开采量见表 5,当保泉水位取 27.5 m 时各管理亚区各典型年份岩溶水优化开采量见表 6。

表 5 各管理亚区各典型年份岩溶水优化开采量(优化补源,27.0 m)

典型水文年	时段	管理亚区优化开采量(万 m <sup>3</sup> /d)								
		桥子里	冷庄	古城	峨眉山	大杨庄	腊山	市区	东郊	合计
PC1 丰水年 764.4mm	10-1月	8.00	4.00	10.00	15.00	0.00	0.00	0.00	5.00	42.00
	2-5月	8.00	4.00	10.00	0.23	0.00	0.00	0.00	5.00	27.23
	6-9月	7.35	4.00	10.00	4.30	0.00	0.00	0.00	8.95	34.6
PC2 平水年 622.8mm/a	10-1月	8.00	4.00	10.00	3.98	0.00	0.00	0.00	5.00	30.98
	2-5月	8.00	4.00	10.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.00	27.00
	6-9月	5.40	4.00	10.00	2.50	0.00	0.00	0.00	8.45	30.35
PC3 枯水年 522.8mm/a	10-1月	8.00	4.00	10.00	2.42	0.00	0.00	0.00	5.00	29.42
	2-5月	8.00	4.00	10.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.00	27.00
	6-9月	3.75	4.00	10.00	0.68	0.00	0.00	0.00	8.00	26.43
PC4 特枯年 389.9mm/a	10-1月	无最优解								
	2-5月									
	6-9月									

从表 5、表 6 可以看出,与上一方案相比,在回灌补源条件下,丰、平、枯 3 个典型水文年均能满足保泉供水需求,且具有一定的开采潜力。优化结果表明,枯水年份趵突泉水位控制在 27.5 m 以上,四大泉群常年连续喷涌条件下,济南泉域地下水在满足自备井 7 万 m<sup>3</sup>/d 与农业灌溉 9 万 m<sup>3</sup>/d 的情

况下,优化开采量可达 26.19 万 m<sup>3</sup>/d,这表明,在降水偏枯年份,为保持泉水持续喷涌,回灌补源是一有效措施。但同时要指出,在目前补源方案下,降水特枯年份仍然无法满足既保持泉水喷涌,又保证老百姓喝到优质地下水这一目标,如果要满足,必须开采泉域外地下水供给泉域内。

表 6 各管理亚区各典型年份岩溶水优化开采量(优化补源,27.0 m)

典型水文年	时段	管理亚区优化开采量(万 m <sup>3</sup> /d)								
		桥子里	冷庄	古城	峨眉山	大杨庄	腊山	市区	东郊	合计
PD1	10—1月	8.00	4.00	10.00	11.00	0.00	0.00	0.00	5.00	38.00
丰水年	2—5月	8.00	4.00	10.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.00	27.00
764.4mm	6—9月	7.95	4.00	10.00	4.74	0.00	0.00	0.00	8.93	35.62
PD2	10—1月	8.00	4.00	10.00	3.35	0.00	0.00	0.00	5.00	30.35
平水年	2—5月	8.00	4.00	10.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.00	27.00
622.8mm/a	6—9月	3.63	4.00	8.35	0.00	0.00	0.00	0.00	8.5	24.48
PD3	10—1月	8.00	4.00	10.00	0.57	0.00	0.00	0.00	5.00	27.57
枯水年	2—5月	8.00	4.00	10.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.00	27.00
522.8mm/a	6—9月	3.2	4.00	0	8.45	0.00	0.00	0.00	7.95	24.00
PD4	10—1月	无最优解								
特枯年	2—5月									
389.9mm/a	6—9月									

## 4 结语

综上,该次济南泉域地下水优化管理方案是在满足一定的约束条件,保泉水位分别取 27 m 和 27.5 m 的条件下,求得各水源地岩溶水开采量的最优时空分布,不仅在时间上确定出各典型水文年各管理期地下水最佳开采量,还在空间上给出了每个管理亚区的优化调配结果,对于泉域岩溶水的合理开采具有现实指导意义。

## 参考文献:

[1] 房佩贤. 济南泉域裂隙岩溶水管理策略探讨[J]. 长春地质学院

院报,1990,19(5):1-8.

- [2] 林学钰,廖资生. 地下水管理[M]. 北京:地质出版社,1995:78-91.
- [3] 许涓铭,易云华. 地下水资源管理模型研究综述与展望[A]//我国水资源危机与出路[C]. 北京:兵器工业出版社,1991.
- [4] 徐军祥,邢立亭. 济南泉域岩溶水数值预报与保泉供水对策[J]. 地质调查与研究,2008,31(3):209-213.
- [5] 郭士昌,姚春梅,张乐进,等. 临沂市城区岩溶地下水流模拟[J]. 山东国土资源,2009,25(4):27-29.
- [6] 武强,朱斌,徐华. 基于数字信号处理技术的地下水资源管理模型研究——以西北某水源地规划管理模型的建立为例[J]. 中国矿业大学学报,2005,34(2):160-165.
- [7] 王国利,张文国. 济南泉域裂隙岩溶水系统管理模型[J]. 大连理工大学学报,1999,(3):689-693.

## Study on Karst Water System Management Model of Jinan Spring Areas

QIN Pinrui<sup>1</sup>, ZHANG Hui<sup>1</sup>, PENG Kai<sup>1</sup>, JING Haosen<sup>2</sup>

(1. Shandong Geo-engineering Exploitation Institute, Shandong Jinan 250014, China; 2. Shandong Geo-engineering Limited Corporation, Shandong Jinan 250014, China)

**Abstract:** By using visual modflow software, Jinan spring field numerical simulation model of karstic groundwater has been established. On this basis, by using response matrix method, Jinan spring domain karst water system management model has been set up. By using this system, the influence of exploiting groundwater source to east, west, urban districts and Jixi area for compensating spring levels, two ways for optimizing water resources management, optimize the allocation of water sources in Jinan city have been carried out. It will provide a reliable basis for decision-making to realize "protect the spring water supply" by the government.

**Key words:** Karst water; numerical simulation; response function; optimizing management; Jinan city