

济宁市调水量的确定

孟宪萌 束龙仓

(河海大学水资源环境学院 , 江苏 南京 210098)

摘要 济宁城区由于长期超采地下水引发了一系列环境地质问题 , 在分析该地区水文地质条件以及地表水与地下水相互转化关系的基础上 , 建立地表河流与地下水流耦合模型 , 并对耦合模型的参数进行了率定 , 而后建立济宁市需水量预测模型 , 并预测未来年份的需水量 , 将其与自回归模型预测的未来年份降水量以及河流水位代入耦合模型 , 运用 Visual MODFLOW 中的 Zone Budget 模块计算城区含水层蓄水量的变化 , 确定保证含水层处于正均衡或基本正均衡状态时所需调用的地表水量。
关键词 调水量 ; 需水量预测 ; 耦合模型 ; 自回归模型 ; Visual MODFLOW ; 济宁市
中图分类号 : TV213.4 **文献标识码** : A **文章编号** : 1006-7647(2007)S2-0035-03

山东省济宁市地处暖温带大陆性季风气候区 , 四季分明 , 多年平均降水量为 678.5 mm , 属于半湿润区。由于历史原因 , 该地区生产生活用水全部取自地下水 , 造成地下水严重超采 , 使得地下水水位持续下降 , 导致地面沉降、深层地下水受到污染等一系列环境地质问题^[1]。为有效遏制问题进一步恶化 , 在南水北调东线工程实施这一大背景下 , 计划从城区西面的京杭运河引水以削减济宁城区地下水的开采量 , 使地下水资源得到保护。

本文通过建立地表河流与地下水流耦合模型 , 运用耦合模拟率定模型参数 , 而后建立济宁市需水量预测模型 , 预测未来年份的城市需水量 , 并通过自回归模型预测未来年份的逐月降水量以及河、湖水位 , 运用 Visual MODFLOW 中的 Zone Budget 模块进行水均衡分析 , 确定为使济宁市区含水层处于正均衡时所需调的水量 , 为有关决策部门提供依据。

1 水文地质概念模型的建立

1.1 研究区域的确定

研究区域主要依据地下水水位降落漏斗的范围而定 , 以 2001 年平均潜水等水位线为依据 , 边界大致沿 30 m 标高的等水位线。南部以南四湖的北端小北湖为界 , 北部边界至南站镇、新驿镇附近 , 西边界到安居镇 , 东边界沿接庄—黄屯—颜店一线。区域内的地表水体主要有西面的京杭运河以及东面的洸府河。

1.2 含水层结构的概化

根据钻孔资料可将研究区的地层概化为 3 层 :
①潜水含水层 : 埋深 0 ~ 60 m , 平均厚度在 14 m 左右 , 其含水层大部分倾向南四湖方向 ;
②承压水含水层 : 埋深 60 ~ 150 m , 与潜水含水层之间的隔水层较稳定 , 平均厚度在 36.5 m 左右 , 呈北东—南西向的条带状分布 ;
③弱透水层 : 位于潜水含水层和承压水含水层之间 , 潜水通过弱透水层越流补给承压水。

1.3 初始条件与源汇项处理

根据实测资料的情况 , 选择模拟时段为 1999 年 1 月至 2001 年 12 月 , 以 1999 年 1 月 1 日研究区内的地下水水位分布作为初始条件。源汇项处理 :
①河湖入渗补给量。研究区内的京杭运河与洸府河对地下水的渗漏补给量按地表河流一维非恒定流与潜水含水层系统耦合求解^[2]。
②南四湖对地下水含水层的补给量则运用 Visual MODFLOW 中的河流模块进行模拟求解。
③大气降水补给量与蒸发损失量。根据研究区雨量站的分布按泰森多边形法进行分区 , 并根据地貌、包气带厚度等特征初定降水入渗补给系数与蒸发损失系数 , 而后在模型模拟识别中最终确定。
④地下水开采量。研究区内的市区以开采深层承压水为主 , 概化为点井 ; 北部的灌溉区域以开采潜水为主 , 概化为若干点井均匀分布在该区域。
⑤越流量。其大小取决于弱透水层厚度、岩性、上下含水层水位差等因素 , 由模型模拟识别确定。数值

模拟采用 Visual MODFLOW 软件,用有限差分法迭代求解。将模拟期(3 年)分为 36 个时段,每个时段分为 10 个步长。

2 地表河流与地下水流耦合模型的建立与求解^[3-6]

2.1 地表河流运动的数学模型

对于有限长河流,其水流运动规律符合一维明渠非恒定渐变流,当河水与地下水存在水力联系时,河流的运动规律可采用圣维南方程组的两个方程——连续方程和动量方程来描述^[7]:

$$\begin{cases} B \frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(Qu) + gA \frac{\partial h}{\partial x} - gAS_0 + gAS_f = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: Q 为流量; Z 为水位; A 为过水断面面积; h 为水深; S_0 为河底比降; S_f 为摩阻比降; u 为断面平均流速; q 为旁侧入流(耦合模型中为河流渗漏量); B 为河宽。

2.2 地下水流数学模型

对于由潜水含水层、弱透水层和承压水含水层组成的地下水流系统,各含水层以平面二维流为主,含水层之间通过弱透水层以垂向越流方式进行水量交换,地下水流系统可采用“拟三维”非稳定流定解问题描述,其二维渗流方程为

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + W = \mu_s \frac{\partial H}{\partial t} \\ H(x,y,t)|_{t=0} = H_0(x,y) \quad (x,y) \in D \\ H(x,y,t)|_{\Gamma_1} = H_0(x,y,t) \quad (x,y) \in \Gamma_1 \end{cases} \quad (2)$$

式中: K_x, K_y 分别为渗透系数在 x, y 方向的分量(假定渗透系数主轴方向与坐标轴的方向一致); H 为潜水含水层的水位; W 为源汇项; μ_s 为潜水含水层的释水率。

2.3 耦合模型的求解

对于地表河流的一维明渠非恒定渐变流采用有限差分的简化四点线性 Preissmann 隐式方法求解圣维南方程组^[8],对于地下水流运用 Visual MODFLOW 软件进行模拟,并通过水量转化机制实现二者的耦合,具体求解步骤为:首先假定河流渗漏补给地下水量 q ,通过地表河流运动数学模型计算河道沿程各断面水位,并将其代入地下水流模型,通过研究区各观测井计算水位与实测水位的比较率定水文地质参数,并通过 Visual MODFLOW 软件计算实际渗漏补给量 q' ,当 $|q - q'| > \epsilon$ (ϵ 为允许误差限)时,令 $q = q'$ 重复上述计算过程,直到 $|q - q'| \leq \epsilon$,此时所得的水文地质参数即为最终的率定结果。最终率定

的水文地质参数分区见表 1。

表 1 水文地质参数分区

分区	潜水含水层		承压水含水层 释水率 $\mu_s/10^{-4}\text{m}^{-1}$	
	渗透系数 $K(\text{m}\cdot\text{d}^{-1})$			给水度 μ
	x 向	y 向		
1	15	15	0.065	1.00
2	7	7	0.055	4.54
3			0.070	4.22
4			0.045	4.12
5			0.150	5.02

注:承压水含水层渗透系数 x 向和 y 向均为 7 m/d 。

3 降水量、蒸发量与河流水位的预测

降水量、蒸发量与河流入渗补给量是影响潜水位动态变化的重要因素,本文采用自回归模型预测未来年份研究区各雨量站的逐月降水量与水文站的河流水位^[9],另外,由于济宁城区潜水埋深大于蒸发极限埋深,蒸发作用十分微弱,因此可假定逐月蒸发量,这种处理对最终计算的结果影响很小。

3.1 一般自回归模型

一般自回归模型通常可表示为

$$x_t = \phi_{p,0} + \phi_{p,1}x_{t-1} + \phi_{p,2}x_{t-2} + \dots + \phi_{p,p}x_{t-p} + \varepsilon_t \quad (3)$$

其中 $\phi_{p,0} = (1 - \phi_{p,1} - \phi_{p,2} - \dots - \phi_{p,p})\mu$
式中: μ 为序列的均值; ε_t 与 $x_{t-1}, x_{t-2}, \dots$ 无关,并且本身是独立的随机变量(均值为零,方差为 σ_ε^2);
 $\phi_{p,1}, \phi_{p,2}, \dots, \phi_{p,p}$ 为自回归系数。

3.2 自回归模型的参数估计

自回归模型有 $(p+2)$ 个参数,即 $\phi_{p,1}, \phi_{p,2}, \dots, \phi_{p,p}$ 以及 μ 和 σ^2 。前 p 个参数为自回归系数,后两个参数为序列的均值和方差。最大自相关阶数 p 依据自相关系数序列目估选定,均值和方差由下式估计:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

自回归系数采用递推法估计,计算公式如下:

$$\phi_{k,k} = \frac{\rho_k - \sum_{j=1}^{k-1} \phi_{k-1,j} \rho_{k-j}}{1 - \sum_{j=1}^{k-1} \phi_{k-1,j} \rho_j}$$

$$\phi_{k,j} = \phi_{k-1,j} - \phi_{k,k} \phi_{k-1,k-j} \quad (j = 1, 2, \dots, k-1)$$

其中
$$\rho_k = \frac{\sum_{t=1}^{n-k} (x_t - \bar{x})(x_{t+k} - \bar{x})}{\sum_{t=1}^n (x_t - \bar{x})^2}$$

随机项 ε_t 的分布线型一般假定为 P -III 型,因其均值为零,所以没有 C_{v_ε} ,因此它有 2 个统计参数 $\sigma_\varepsilon, C_{s_\varepsilon}$, 计算公式如下:

σ_ε = σ_x √(1 - R^2), C_ε = C_s(1 - R^3) / (1 - R^2)^3

生成 ε_i 时,先生成 0 ~ 1 均匀分布的伪随机数 u_i,由 u_i 和 C_ε 用 ϕ 值表采用 3 点插值查出对应的 ϕ_i 值,由公式 ε_i = σ_ε ϕ_i 计算出服从 P-Ⅲ型分布的随机数 ε_i。

4 济宁市需水量预测模型构建

济宁市市区用水量由工业用水量、农业用水量、生活用水量 3 部分组成,因此,所构建的预测模型包括工业、农业、生活 3 部分需水量预测。

4.1 工业需水预测

工业需水预测方法较为成熟,目前主要采用万元产值用水量加以计算。根据济宁市“十五”计划与“十一五”规划,2010 年全市国内生产总值达到 2 000 亿元,市区总产值占 17%,市区工业产值占市区总产值的 50%,万元产值用水量以 2001 年为基础,以 10%的速率递减,预测结果见表 2。

表 2 工业需水预测结果

年份	市区工业 总产值/亿元	万元产值用 水量/m³	工业用水 量/万 m³
2002	62.6	107.1	6 705
2003	70.9	96.4	6 837
2004	80.4	86.8	6 971
2005	91.1	78.1	7 109
2006	103.2	70.3	7 249
2007	116.9	63.2	7 392
2008	132.4	56.9	7 538
2009	150	51.2	7 686
2010	170	46.1	7 838

4.2 农业需水预测

农业需水与灌溉面积、灌溉方式、种植结构、种植种类、气候条件等有关,济宁市市区农业用水主要用来灌溉菜田、稻田和茶园,其灌溉用水量与降水量呈现出负相关关系,因此农业用水量根据历史资料以及预测的年降水量进行预测。

4.3 生活需水量预测

对于生活需水量的预测,本文采用灰色预测模型(GM(1,1))^[10],以济宁市 1986 ~ 2001 年的生活用水量数据建立 GM(1,1)模型并进行预测。生活用水量的 GM(1,1)模型为

X(t + 1) = 36 241.391 524exp(0.040 89 t) - 35 291.391 524

拟合及预测结果见表 3。

5 调水量的确定

将预测的未来年份的各月降水量、河流水位以及开采量代入济宁市地表河流与地下水流耦合模型中,运用 Visual MODFLOW 软件中的 Zone Budget 模

块对济宁城区含水层(潜水含水层与承压水含水层)进行水均衡分析,计算结果见表 4。

表 3 数据拟合值及 2002 ~ 2010 年预测结果

年份	实际值/ 万 m³	拟合值/ 万 m³	相对 误差/%	年份	实际值/ 万 m³	拟合值/ 万 m³	相对 误差/%
1986	1 449	1 513	- 4.39	1999	2 539	2 574	- 1.37
1987	1 500	1 576	- 5.05	2000	2 596	2 681	- 3.29
1988	1 690	1 642	2.87	2001	2 672	2 793	- 4.53
1989	1 569	1 710	- 8.99	2002		2 910	
1990	1 775	1 781	- 0.36	2003		3 031	
1991	1 950	1 856	4.83	2004		3 158	
1992	2 024	1 933	4.49	2005		3 290	
1993	2 080	2 014	3.18	2006		3 427	
1994	2 121	2 098	1.09	2007		3 570	
1995	2 190	2 186	0.20	2008		3 719	
1996	2 287	2 277	0.45	2009		3 874	
1997	2 414	2 372	1.75	2010		4 036	
1998	2 479	2 471	0.33				

表 4 预测年份含水层水均衡计算结果 万 m³

年份	开采量	降水入渗 补给量	地表水入 渗补给量	蒸发量	侧向 补给量	含水层 储量变化
2002	6 328.76	612.6	737.75	0	4 292.6	- 685.8
2003	6 139.50	701.3	771.56	0	4 370.1	- 296.6
2004	6 285.89	679.6	763.61	0	4 402.2	- 440.5
2005	5 338.50	840.3	819.50	0.02	4 356.9	678.1
2006	5 476.71	831.8	801.32	0.03	4 235.1	391.5
2007	7 000.18	573.8	716.20	0	4 298.1	- 1 412.1
2008	5 781.49	1 292.4	1 049.98	2.66	4 579.6	1 137.8
2009	7 298.57	582.0	704.26	0	4 451.4	- 1 560.9
2010	7 454.21	548.6	726.62	0	4 669.9	- 1 509.2

由表 4 可以计算预测未来 9 年济宁城区含水层储量变化的平均值为 - 410.8 万 m³,为了使济宁城区含水层在预测期末处于正均衡状态,控制环境进一步恶化,每年至少需从城区西面的京杭运河调水 410.8 万 m³ 以削减城区地下水的开采量。

6 结 语

本文在建立济宁市地表河流与地下水流耦合模型以及济宁市需水量预测模型的基础上,通过自回归模型预测未来年份的降水量、蒸发量以及河流水位,最终计算出为使济宁市区含水层处于正均衡时所需调的地表水量,从而为保护该地区地下水资源、控制环境进一步恶化打下基础。由于未来年份的降水量与河流水位是通过自回归模型随机预测的,因此所预测的未来年份既有丰水年亦有平水年和枯水年,所计算的含水层储量变化为未来年份不同水平年的平均水平,因此得出的调水量更加合理。

参考文献:

[1] 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,2001:153-162.

(下转第 41 页)

表 3 兵团灌区 2007 年不同保证率下供需平衡分析结果

分 区	P = 75%					P = 50%				
	供水量/ 万 m ³	总需水量/ 万 m ³	缺水量/ 万 m ³	余水量/ 万 m ³	缺水率/ %	供水量/ 万 m ³	总需水量/ 万 m ³	缺水量/ 万 m ³	余水量/ 万 m ³	缺水率/ %
极端干旱气候 棉果微灌区	312036.3	307133.51	17408.36	22311.12	5.67	315948.48	307133.51	14785.97	23600.92	4.81
干旱气候粮经作物 喷灌和滴灌结合区	61480.64	71413.78	10072.91	139.77	14.10	62811.86	71413.78	8747.99	146.07	12.25
极端干旱气候 林果微灌区	51915.48	51661.87	4524.89	4778.51	8.76	55035.17	51661.87	2730.69	6103.99	5.29
干旱气候 棉花滴灌区	310360.54	330294.70	37556.02	17621.01	11.37	329094.29	330294.7	25559.24	24358.42	7.74
半干旱气候 粮油作物喷灌区	26521.23	30761.01	6240.00	2000.21	20.29	30038.01	30761.01	3526.93	2803.93	11.47
干旱气候园艺、蔬菜 喷灌和滴灌结合区	66270.16	72001.17	11337.63	5509.94	15.75	70472.83	72001.17	9047.50	7520.82	12.57
总 计	828584.35	863266.04	87139.82	52360.57	10.09	863400.64	863266.04	64398.32	64534.15	7.46

显,兵团灌区总缺水率为 10.09%和 7.46%,在允许的实际控制范围目标之内。

因供水考虑到生态环境需求(包括河道生态流量^[5])和水资源可持续利用,农一、二、三、十四师为塔里木河流域的源流区,还要考虑塔里木河^[2]综合治理的要求,水资源利用程度大致符合可持续利用意义下的极限要求,即调整经济耗水与生态耗水的比例关系。从供需平衡的结果来看,兵团灌区的节水灌溉工程建设还有很大的潜力。

在国家西部大开发的战略指引下,提出实施可持续发展战略,把生态环境保护和建设放在突出的位置,大力发展精准农业、节水农业、特色农业、高效农业,努力将兵团建设成为西部乃至全国的现代化农业和生态农业示范区。

要改变这种状况,解决问题的措施只有走发展高效节水农业之路,大力发展节水灌溉,通过各项措施,进一步提高水的有效利用率、减少农业用水总量,缓解农业用水的供需矛盾,逐步改善生态环境,增强灌区的可持续发展能力。

6 结 语

本文通过兵团 26.67 万 hm² 现代化灌溉工程涉

及一系列水资源问题做了初步的探讨与分析,通过对兵团 47 个灌区、139 个农牧团场按照降水量、蒸发量、干旱指数等参数为主要指标,兼顾地形、作物、水源条件的分区和对这些灌区涉及不同水源、灌溉形式的供需平衡分析,不仅得出了 47 个灌区不同保证率下的供需平衡结果,还得出了分区后及兵团灌区总的供需趋势,为科学、合理地提出了兵团灌区现阶段适宜发展节水灌溉的规模提供依据,对今后兵团的节水灌溉的发展具有积极深远的意义。

参考文献：

[1] 刘昌明, 陈志恺. 中国水资源现状评价和供需发展趋势分析[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001: 14-198.
[2] 王永琴. 塔里木河流域水资源利用与生态农业发展[J]. 新疆环境保护, 2000, 2(4): 198-201.
[3] 陈玉民, 郭国双, 王广兴, 等. 中国主要作物需水量与灌溉[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1995: 73-368.
[4] GB 50288—99, 灌溉与排水工程设计规范[S].
[5] 郑建平, 王芳, 华祖林. 海河河口生态需水量研究[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2005, 33(5): 518-521.

(收稿日期 2006-10-17 编辑 高建群)

(上接第 37 页)

[2] HALFORD K J, MAYER G C. Problems associated with estimating groundwater discharge and recharge from stream-discharge record[J]. Ground Water, 2000, 38(3): 125-135.
[3] 蒋业放, 张兴有. 河流与含水层水力耦合模型及其应用[J]. 地理学报, 1999, 54(6): 526-533.
[4] 武强, 孔庆友, 张自忠, 等. 地表河网-地下水流系统耦合模拟Ⅰ: 模型[J]. 水利学报, 2005, 36(5): 588-592.
[5] 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.

[6] 武强, 徐军祥, 张自忠, 等. 地表河网-地下水流系统耦合模拟Ⅱ: 应用实例[J]. 水利学报, 2005, 36(6): 754-758.
[7] 清华大学水力学教研组编. 水力学: 下册[M]. 北京: 人民教育出版社, 1981: 250-255.
[8] 赖良魁. 河网水力数值模拟的追赶法模型的应用[J]. 水文, 2001, 21(增刊): 17-20.
[9] 丁晶, 邓育仁. 随机水文学[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1988.
[10] 王其藩. 系统动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988.

(收稿日期 2006-09-29 编辑 熊水斌)