

两水源地间相互影响的数值评价

宋寿鹏¹, 杨涛², 康卫东³

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 石家庄经济学院, 石家庄 050031; 3. 西北大学 地质学系, 西安 710029)

摘 要: 四柏树水源地和炼油厂水源地是靖边县的主要供水水源。两水源地处于同一水文地质单元且相距较近, 地下水联系较为紧密。为了更好地为地下水资源的可持续开发提供依据, 利用 Modflow 软件建立区域地下水流数值模型, 并运用模型分析了不同开采条件下两水源地的相互影响评价。结果表明: 两水源地均属开采“消耗”型水源地; 区域上地下水位(头) 近于等幅下降, 水源地开采区内大致以芦河为界分别形成两个以水源地开采区为中心地下水降落漏斗; 随着水源地开采量的增加, 两水源地水位(头) 降均呈逐渐增大的趋势, 相互的影响也越来越显著。

关键词: 水源地; Modflow; 数值模拟; 影响评价

中图分类号: P641.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2010)06-0202-05

Numerical Evaluation of the Interaction between Two Water Sources

SONG Shou-peng¹, YANG Tao², KANG Wei-dong³

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shijiazhuang University of Economics, Shijiazhuang 050031, China; 3. Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710029, China)

Abstract: Groundwater in the Sibaishu and Refinery water sources provides main sources of water supply for Jingbian county. The groundwater hydraulic connection of two water sources which are in the same hydro-geologic unit is much closer. For the purpose of formulation of sustainable groundwater development plan, a regional groundwater flow model was constructed for the area with Modflow software. Under the program of different increasing exploitations, the interaction between two water sources was analyzed by the model. The results of this study showed that two water sources belonged to mining consumption type. In region, the groundwater head dropped with the same extent, two groundwater drawdown funnels as the center of mining areas are formed by Lu River as the boundary. With the increase of water exploitation, the head of two water sources is gradually increased and the interaction becomes more and more significant.

Key words: water source; Modflow; numerical simulation; influence evaluation

靖边县地处陕北黄土高原北部与毛乌素沙漠南缘过渡地带^[1], 境内石油、天然气矿产资源十分丰富, 是国家能源重化工榆林基地的重要组成部分。四柏树水源地和炼油厂水源地是县内主要的供水水源, 且两者处于同一水文地质单元, 地下水联系比较紧密。在两水源地已开展的地水文地质研究工作中, 往往只研究单一水源地, 而忽略两水源地间的相互影响^[2]。

本次工作依托前人的水文地质成果^[2], 建立联合两水源地的区域地下水流模型, 模拟不同开采条件, 以期查明两水源地间的相互联系与影响, 这对区域水资源的开发及生态环境的保护具有重要的意义。

1 研究区概况

靖边县境内的四柏树水源地和炼油厂水源地分别位于芦河的北南两侧, 相距约 6 km, 属干旱-半干旱内陆性季风气候区, 多年平均降水量 396.1 mm, 降水量年际间呈丰、平、枯交替的周期性变化规律, 6-9 月降水约占全年降水量的 71%, 且多以暴雨形式降落。

研究区地处祁-吕-贺山字型构造体系伊陕盾地与新华夏系第三沉降带-陕甘宁盆地的复合部位的北部, 为一向西缓倾的单斜构造, 地层有老到新依次为: 侏罗系中统安定组(J_{2a})、白垩系下统洛河组(K_{1L})、环河组(K_{1h})、第三系上新统泥岩(N₂)和第四系地层(Q)。

收稿日期: 2010-04-07

资助项目: “十一五”国家科技支撑计划项目(2008BAJ08B14-06); 上海市重点学科(地质工程)建设项目(B308)

作者简介: 宋寿鹏(1980-), 男, 山东莱州人, 博士研究生, 从事于水文地质研究。E-mail: 08_song@mail.tongji.edu.cn

2 三维地下水流数值模拟

2.1 水文地质概念模型

本次模拟计算区面积 154 km²; 平面上包含两水源地分布区; 垂向上为地面以下侏罗系顶面以上之间的部分, 厚约 400~ 500 m。

现状条件下, 南边界和西边界为补给边界, 北边界和东边界为排泄边界; 出于安全供水考虑, 计算时对各含水层的南边界处理为定流量边界, 西边界径流补给量较小, 计算时大部分地段处理为零流量边界, 北边界和东边界处理为变流量边界。

模拟区含水层结构可分为 5 层: 第 1 层为第四系潜水含水层, 北部的砂层为透水性较好的非均质、各向同性含水层, 南部的黄土层为透水性较差的均质、水平与垂直各向异性的含水层; 第 2 层为弱透水的粉质黏土层和黏性土层, 视为均质、各向同性介质; 第 3

层为白垩系环河组砂泥岩承压水含水层, 第 4、5 层是按开采层与非开采层人为划分的白垩系洛河组厚层交错砂岩承压水含水层。第 3 层与第 4、5 层之间水力联系密切, 实际上就是一个垂向上呈现非均质的双层结构承压水含水层; 第 1 层与第 3、4 层之间通过透水性较弱的第 2 层发生水力联系, 第 2 层是上部潜水与下部承压水发生水量交换的必经“通道”。

模拟区南、西边界接受地下水侧向径流补给, 潜水含水层还接受降水入渗补给, 北部存在潜水蒸发排泄与灌溉水入渗补给。模拟区的芦河在上段补给地下水, 在下段排泄地下水; 因河床底部存在一层淤泥质粉质黏土层, 故上段河水下渗补给地下水的水量较小(约 900 m³/d), 从水源地安全考虑可忽略不计。

2.2 数学模型

综上所述, 将模拟区地下水流系统可用下面偏微分方程的定解问题来描述^[3]:

$$\left\{\begin{aligned} &\frac{\partial}{\partial x}(K \frac{\partial H}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K \frac{\partial H}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(K \frac{\partial H}{\partial z}) = 0 \\ &\frac{\partial}{\partial x}(K \frac{\partial H}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K \frac{\partial H}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(K \frac{\partial H}{\partial z}) = S_s \frac{\partial H}{\partial t} \\ &H = z \\ &\mu \frac{\partial H}{\partial t} = - (K - \varepsilon) \frac{\partial H}{\partial z} + \varepsilon \end{aligned}\right. \quad \begin{aligned} &(x, y, z) \in \Omega, t > 0 && \text{潜水} \\ &(x, y, z) \in \Omega, t > 0 && \text{承压水} \\ &&& \text{潜水浸润面边界} \end{aligned}$$
$$\left\{\begin{aligned} &H(x, y, z, 0) = h_0 \\ &K \frac{\partial H}{\partial n} \Big|_{\Gamma_2} = q \\ &K \frac{\partial H}{\partial n} \Big|_{\Gamma_3} = q_0 + \alpha(H - h_0) \end{aligned}\right. \quad \begin{aligned} &(x, y, z) \in \Omega && \text{初始条件} \\ &t > 0 && \text{南、西定(零)流量边界} \\ &t > 0 && \text{北、东变流量边界} \end{aligned}$$
$$\lim_{r \rightarrow r_w} (r \int_0^{2\pi} d\theta \int_{z'}^{z''} K \frac{\partial H}{\partial r} dr') + \lim_{r \rightarrow r_w} (r' \times 2 \int_{\frac{\pi}{2}}^{\frac{3\pi}{2}} \sin \phi d\phi \int_0^{2\pi} K \frac{\partial H}{\partial r} d\theta) \Big|_{w_i} = Q_i \quad \text{井点}$$

式中: H ——地下水位标高(m); K ——渗透系数(m/d); μ ——给水度; S_s ——弹性释水率; x, y, z ——坐标变量(m); t ——时间变量(d); ε ——潜水面垂向交换量(入为正、出为负)(m³/d·m²); h_0 ——地下水初始水位标高(m); q ——第 2 类边界流量(m³/d·m²); q_0 ——第 3 类边界处初始时刻流量(m³/d·m²); α ——第 3 类边界系数(1/d); Q_i ——第 i 眼开采井开采量(m³/d); r, θ, z' ——辅助柱坐标变量; r', θ', ϕ ——辅助球坐标变量; n ——边界外法线方向; Γ_2 ——二类边界; Γ_3 ——三类边界; w_i ——第 i 眼开采井的井点位置; Ω ——模拟区范围。

2.3 数值模型的建立

2.3.1 网格剖分及参数分区 本次研究选用 Processing Modflow Pro 集成软件系统中的 Modflow 模块进行数值模拟^[4,5]。模型区潜水含水层渗透系数和给水度有 3 个分区, 承压含水层渗透系数和贮水率有 1 个分区(图 1)。

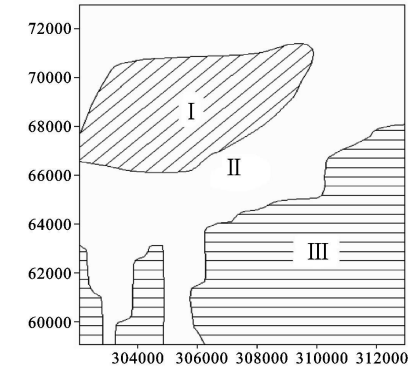
各分区参数的初值按抽水试验成果并结合前人资料给出^[2]。潜水和承压含水层的初始流场由抽水试验前第四系含水层及白垩系含水层各自的井孔水位统测资料获得, 采用数值模拟方法获得了天然状态下的地下水流场(图 2)。

2.3.2 边界流量 模拟区南、西边界为二类定流量边界, 边界流量取现状地下水径流量。北、东边界为变流量边界(即 3 类边界), 边界流量为边界初始流量加上边界的增减量; 边界初始流量取现状地下水径流量, 未来边界流量的增减量按与边界处水位升降值成正比计算, 比例系数为现状地下水径流量除以潜水含水层厚度或承压水顶板以上的水头高度。

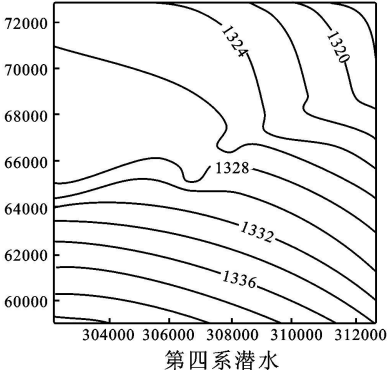
3.3.3 模型的识别与检验 模型校验和识别利用大型抽水试验资料^[2], 利用抽水阶段及恢复水位阶段的试验数据用作模型检验^[6,7]。本次群孔抽水试验有 7 个观测孔的实测资料可用作调参依据, 经反复调参^[8], 典型观测孔的实测水位曲线与计算水位曲线拟合误差

绝对值绝大多数小于 0.5 m,由此可见,各观测孔的水位拟合效果是较好的,从而得到水文地质参数分区结果(表 1)。模型识别和检验结果证明所建立的数学

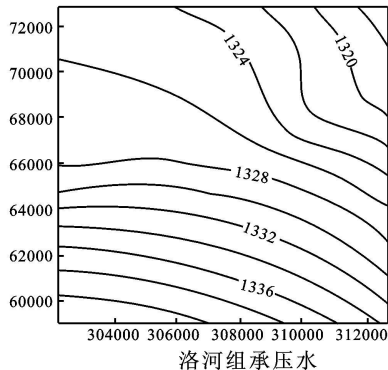
模型、边界条件、水文地质参数和源汇项的确定都是合理的,基本反映了地下水流系统和含水层系统特征,故可利用模型进行水源地开采的地下水位预报。



图中坐标为 6 度带投影公里网
图 1 水文地质参数分区图



第四系潜水



洛河组承压水

图中坐标为 6 度带投影公里网
图 2 模型地下水初始流场图

3 数值评价结果分析

3.1 数值评价思路介绍

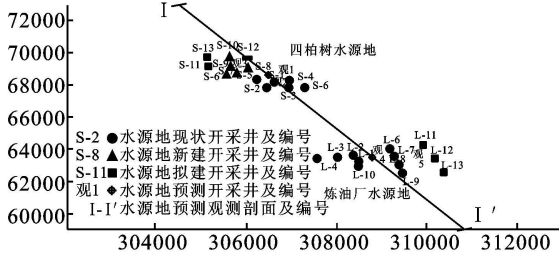
依据所建模型,预测两水源地现状条件及不同增采条件下开采 30 a 后的结果,评价两水源地增采对水源地自身及区域水环境的影响。

表 1 参数识别结果

分层号	渗透系数/ (m · d ⁻¹)		给水度	弹性释水率/ (m ⁻¹)
	水平	垂直		
1	I	1.26	0.18	—
	II	0.61	0.12	—
	III	0.01	0.1	—
2	0.01	0.01	—	1 × 10 ⁻²⁰
3	1.33	1.33	—	1 × 10 ⁻⁶
4, 5	2.443	2.443	—	2 × 10 ⁻⁶

现状条件下,模拟区总开采量为农灌开采量 (0.98 万 m³/d) 和水源地开采量 (四柏树水源地为 0.66 万 m³/d,炼油厂水源地为 0.54 万 m³/d) 之和。与现状条件相比,水源地增采条件下,农灌开采量均

保持不变;开采井数目略有增加,其中,四柏树水源地开采井由 11 眼增至 14 眼,炼油厂水源地由 9 眼增至 12 眼,两水源地开采井布局见图 3。



图中坐标为 6 度带投影公里网
图 3 水源地已建与设计开采井布局图

3.2 四柏树水源地单独增采

(1) 地下水位时空变化趋势。由图 4 可知:地下水开采 2 a 后观测孔地下水位降速开始变缓,开采 20 a 后变的更加平缓,但开采 30 a 也未达到稳定状态,说明水源地属开采“消耗”型水源地;随着四柏树水源地开采量的增加,开采 20 a 后炼油厂水源地水位 (头) 下降速度由 9 mm/a 至 33 mm/a 逐渐增加。

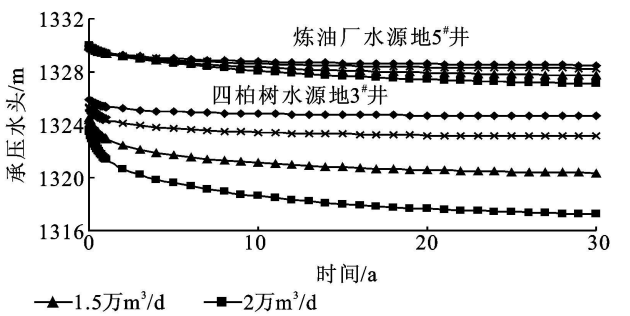
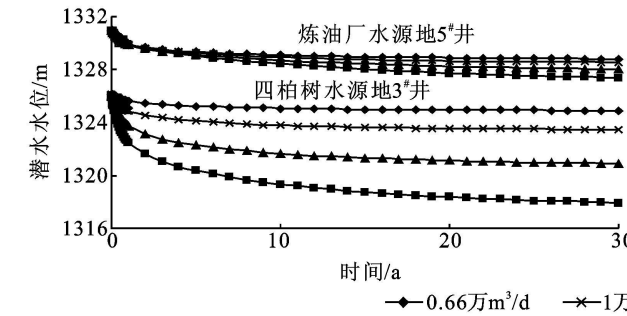
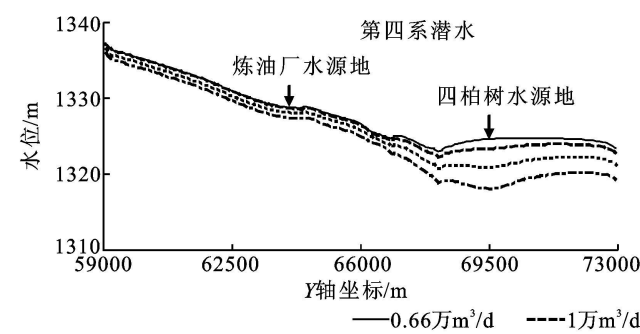


图 4 地下水位 (头) 历时曲线

四柏树水源地增采后并未影响地下水径流的总方向,地下水仍由南西向北东方向径流。由图 5 可知:水源地开采后的水位降已扩展到四周边界,随着

开采量的增加水位降在增大,区域上地下水位 (头) 的下降幅度差异不是很大,近于等幅下降,仅在水源地开采区内降幅增大,两水源地大致以芦河为界分别形成两个地

下水降落漏斗, 且均以水源地开采区为中心呈近似圆形



的宽浅的封闭降落漏斗, 四柏树水源地漏斗较为明显。

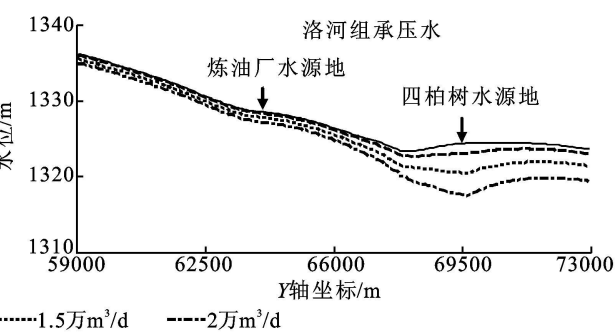


图5 30年末I-I剖面地下水位

(2) 两水源地相互影响分析。根据图6可得: 随着开采量的增加, 两水源地水位(头)降均呈逐渐增大的趋势; 四柏树水源地水位(头)降最多至8.09 m, 炼油厂水源地水位(头)降最多至3.58 m; 四柏树水源地增采使得炼油厂水源地30 a末水位(头)降均以1.07的比例同趋势逐渐增大, 但两水源地水位(头)降均在可控范围以内。

3.3 炼油厂水源地单独增采

(1) 地下水位时空变化趋势。对比图7与图4、图8与图5可得: 地下水位下降规律、地下水流场与降深场变化规律与四柏树水源地单独开采情况基本一致; 区别仅在于炼油厂水源地的漏斗随着开采量的增加越来越明显。随着四柏树水源地开采量的增加, 开采20 a后炼油厂水源地水位(头)下降速度由6 mm/a至28 mm/a逐渐增加。

油厂水源地的水位(头)降最多至10.88 m; 炼油厂水源地增采使得四柏树水源地30 a末水位(头)降均以0.97的比例同趋势逐渐增大, 但两水源地水位(头)降均在可控范围。

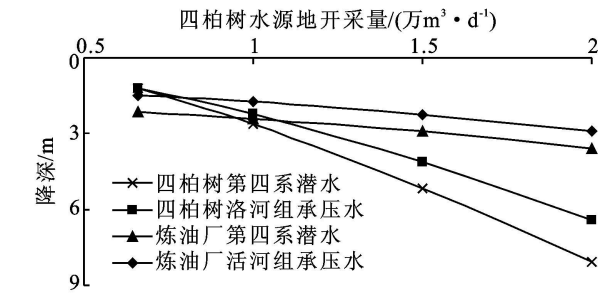


图6 水源地井单元最大水位降深曲线

3.4 区域水资源影响对比分析

水源地开采对区域水资源的影响主要体现在地下水位(头)。无论四柏树水源地还是炼油厂增采都会引起水源地水位(头)下降速度的成倍增加, 而同样两水源地的增采也会引起水源地30 a末地下水位(头)降深以某一比例增加, 这说明两水源地间的相互影响较明显, 在水源地实际增采时需统筹。

(2) 两水源地相互影响分析。由图9可知: 随着开采量的增加, 两水源地水位(头)降均呈逐渐增大的趋势; 四柏树水源地水位(头)降最多至2.60 m, 炼

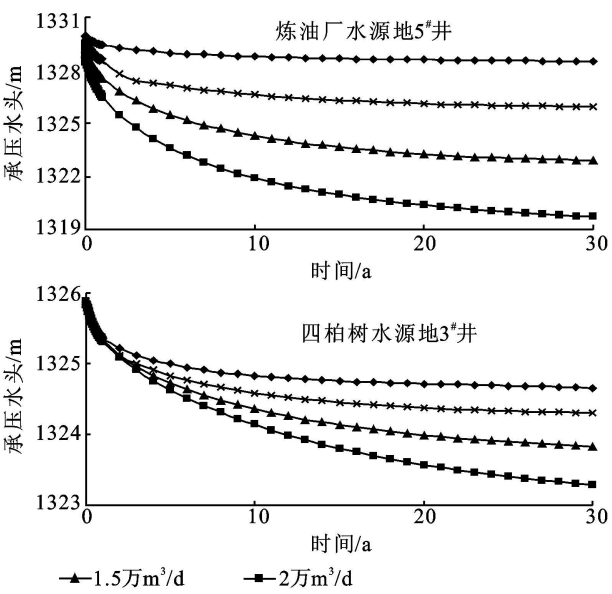
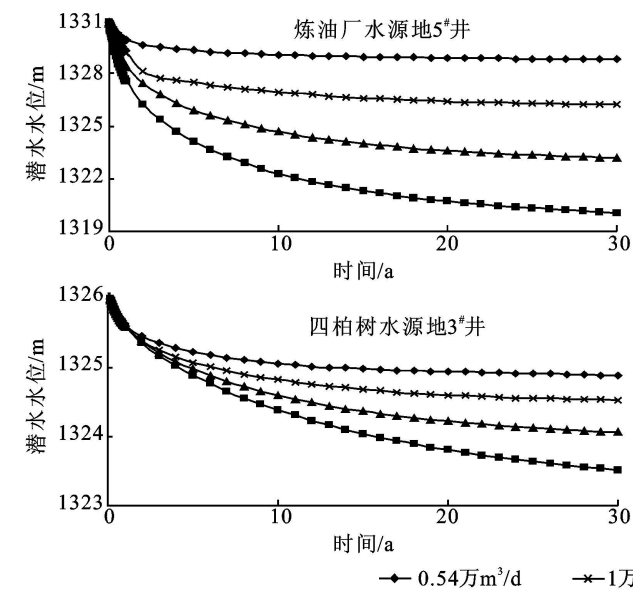


图7 地下水位(头)历时曲线

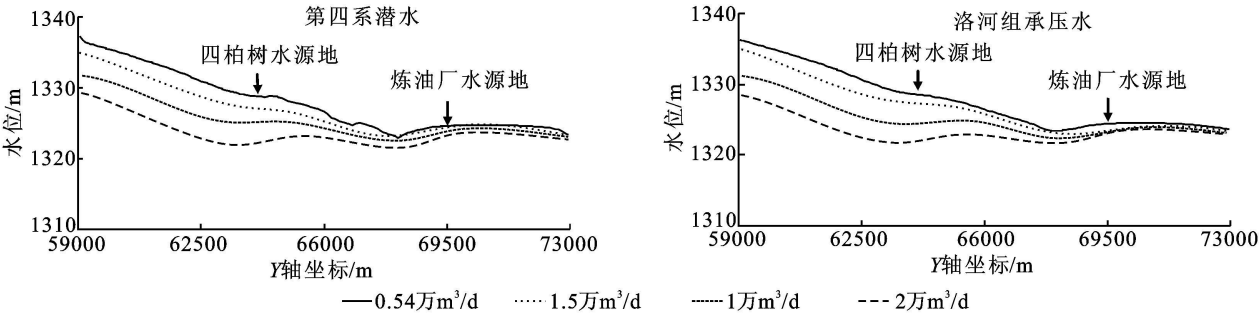


图 8 30 年末 I-I 剖面地下水位(头)

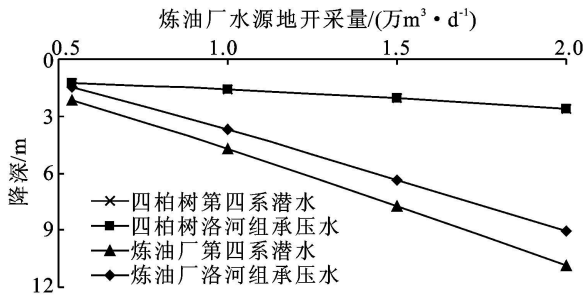


图 9 水源地井点单元最大水位降深曲线

4 结论

通过数值评价, 综合分析了两水源地的运行对区域水环境的影响。研究表明:

(1) 两水源地均属开采“消耗”型水源地。随着开采量的增加, 水位(头)降在增大, 区域上地下水位(头)的下降幅度差异不是很大, 近于等幅下降, 仅在水源地开采区内降幅增大, 两水源地大致以芦河为界分别形成两个地下水降落漏斗, 且均以水源地开采区为中心呈近似圆形宽浅的封闭降落漏斗。

(2) 两水源地在现状条件下单独增采时, 随开采量的增加, 两水源地开采后相对稳定的水位(头)下降速度及 30 a 末水位(头)降深均呈逐渐增大的趋势, 相互的影响也越来越显著, 在水源地实际增采时需统筹安排。

(3) 水资源数值评价是预测开采条件下远期年区域水资源状况的有效手段, 对区域生态环境的保护与水资源合理开发利用有着积极的作用。

参考文献:

[1] 王玮, 马思锦. 靖边平原地下水开发利用模式初探[C]//中国西部环境问题与可持续发展国际学术研讨会论文集. 2004: 588-592.

[2] 王玮, 马思锦, 郭洪钧. 四柏树水源地三维水文地质数值模拟中的参数最优估计[J]. 地下水, 2003, 25(3): 141-146.

[3] 孙训正. 地下水流的数学模型和数值方法[M]. 北京: 地质出版社, 1981: 25-51.

[4] 李俊亭. 地下水数值模拟[M]. 北京: 地质出版社, 1992: 44-52.

[5] Chiang W H, Kinzelbach W. 3D-groundwater modeling with PMWIN a simulation system for modeling groundwater flow and pollution[M]. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005.

[6] 李佩成. 地下水动力学[M]. 北京: 农业出版社, 1993: 183-201.

[7] 陈雨孙, 颜明志. 抽水试验原理与参数测定[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.

[8] 邹正盛, 郑清洁. 求水文地质参数的计算机配线法[J]. 工程勘察, 2001(6): 30-33.

(上接第 201 页)

[4] 傅抱璞. 山地气候要素空间分布的模拟[J]. 气象学报, 1988, 46(3): 319-326.

[5] 傅抱璞. 地形和海拔高度对降水的影响[J]. 地理学报, 1992, 47(4): 302-314.

[6] 卢其尧, 傅抱璞, 虞静明. 山区农业气候资源空间分布的推算方法及小地形的气候效应[J]. 自然资源学报, 1988, 3(2): 101-112.

[7] 翁笃鸣. 山地温度状况的分析和推算(一)[J]. 气象, 1985, (3): 34-38.

[8] 欧阳宗继, 赵新平, 赵有中, 等. 山区局地气候的小网格研究方法[J]. 农业工程学报, 1996, 12(3): 144-148.

[9] 内蒙古自治区改造中低产田的综合农业气象工程研究

课题组. 内蒙古东部丘陵山区水热资源的推算和分析[J]. 内蒙古气象, 1996(4): 11-14.

[10] 穆兴民, 陈国良. 黄土高原降水与地理因素的空间结构趋势分析[J]. 干旱区地理, 1993, 16(2): 71-76.

[11] 穆兴民, 徐学选, 陈国良. 黄土高原降雨量的地理地带性研究[J]. 水土保持通报, 1992, 12(4): 27-32.

[12] 钱锦霞, 张建新, 王果静, 等. 基于 Citystar 地理信息系统的农业气候资源格点推算[J]. 中国农业气象, 2003, 24(1): 47-50.

[13] 吴文玉, 马晓群. 基于 GIS 的安徽省气温数据栅格化方法研究[J]. 中国农学通报, 2009, 25(2): 263-267.

[14] 孟庆香, 刘国彬, 杨勤科. 基于 GIS 的黄土高原气象要素空间插值方法[J]. 水土保持研究, 2010, 17(1): 10-14.