

文章编号: 0455-2059(2006)06-0016-06

秦王川盆地南部地下水流场数值模拟

魏国孝, 王刚, 李常斌, 王德军, 朱锋, 徐涛

(兰州大学资源环境学院, 甘肃兰州 730000)

摘要: 地下水数值模拟是地下水在多孔介质中分布过程机理的模拟, 借助 Arcview GIS 和 Aqua3D 专业地下水水流模拟软件, 根据研究区水文地质勘探资料、抽水试验及地下水水位长观资料, 建立了秦王川灌区南部地下水非稳定流的二维模型。采用 Galerkin 有限元三角形网格剖分技术, 求解模型, 运用识别后的模型预测了秦王川灌区南部在达到设计水平年条件后, 5年内地下水位将平均上升 0.98 m, 盐渍化范围将进一步扩大。

关键词: 数值模拟; 地下水; 有限元; 非稳定流; Aqua3D

中图分类号: P333; TV124.7

文献标识码: A

秦王川盆地是引大入秦工程的主要灌区之一, 灌区内随着灌溉配套工程的逐步实施, 灌溉面积逐年增加, 灌溉引水量不断增加, 经济效益和社会效益日益明显。但由于灌溉回归水不断入渗补给地下水, 再加上地下水在自北向南渗流的过程中, 局部受到基底隆起与粘土层的阻隔, 地下水排泄不畅, 使灌区内局部区域地下水位呈显著上升趋势, 并在局部出现了沼泽和湿地。因此, 建立符合实际的地下水渗流动态数值模型, 掌握秦王川盆地南部地下水位的动态变化已成为当务之急。本文建立了秦王川灌区南部地下水的渗流数值模型, 预测了灌区在达到设计水平年后5年内地下水位的变化, 为有效控制地下水位和防治土壤次生盐渍化提供了科学依据^[1]。

1 研究区概况

秦王川盆地位于甘肃省兰州市西北部, 隶属永登县和皋兰县, 地理坐标为 $103^{\circ}30' \sim 103^{\circ}45' E$, $36^{\circ}20' \sim 36^{\circ}50' N$, 地处冷温带亚干旱区, 气候干燥, 多年平均降雨量为 265 mm, 多年平均蒸发量为 1879 mm, 属典型干旱大陆性气候。从地形地貌上看属于乌鞘岭褶皱山岭南侧的边缘低山区, 其东、西、南三面被低缓的黄土丘陵环抱, 相对高出盆地 40~60 m, 自北向南倾斜, 地面总体坡降 $1/80 \sim 1/100$ 。盆地内主要为冲洪积平原。盆地南部(西槽—陈家梁子一线以南的盆地汇水区)为该区域的主体地层, 为第四系松散堆积层。根据岩

性结构特征及相对关系和所处的地貌部位划分, 主要为上更新统冲洪积砂砾石层全新统冲洪积物。

2 水文地质概念模型的建立

2.1 含水层系统的概化

研究区内的主体地层为第四系上更新统冲洪积砂砾石层和全新统冲洪积物松散堆积层, 上更新统地层主要分布在冲洪积平原的下部, 在何家梁—牛路槽—当铺、陈家梁—当铺及宗家梁—俞家梁等处低缓的垄岗状台地上出露地表, 表层覆盖有 1~2 m 厚的砂壤土, 下部岩性以砂碎石为主, 夹有含砾砂、中细砂层、砂壤土、粉质粘土的夹层或透镜体。分布于宽浅沟谷及盆地出口的外通沟道区, 宽浅沟谷区岩性以砂砾石为主, 夹有中细砂、粉质壤土、砂壤土、粉质粘土及粘土层, 各岩性层在剖面上交错分布。

研究区内广泛分布第四系松散层孔隙潜水, 含水层为砂碎石及中细砂层。由于受地质构造、地形地貌和沉积条件的制约, 自北而南沉积物颗粒渐细, 地下水位埋深逐渐变浅, 富水性渐弱, 含水层由北部单一的潜水含水层, 向南逐渐过渡为具有统一水力联系的双层或多层结构的潜水—承压含水层。由于沉积环境的变化交替, 粘性土的分布在水平方向上都有较大的变化, 隔水层呈断续状或透镜体分布, 很难在区域内找到一层分布比较稳定的隔水层, 故承压水和潜水在区域上有不可分割的水力联系, 构成了统一的含水层系统, 可视

收稿日期: 2006-03-02.

基金项目: 教育部重大项目资助(10425).

作者简介: 魏国孝(1966-), 男, 甘肃会宁人, 副教授, 研究方向为干旱区水资源与环境, e-mail: gxwei@lzu.edu.cn.

为统一的多层介质的潜水含水系统^[2]。本次模拟将研究区概化成非均质各向同性二维非稳定流潜水含水层。

2.2 边界条件的概化

根据已有的观测资料,本次模拟将研究区划分为一个既独立又与外界有联系的不完整的水文地质单元地下水系统,面积28.05 km²。

研究区北部边界根据区内观测孔的分布由人为确定,北部灌区所形成的地下潜流通过该断面进入模拟区,该边界确定为二类边界(Neumann边界)^[2]。东、西两侧为盆地周边的低山丘陵,为隔水边界,确定为零通量边界,内部边界为基岩隆起区,为隔水边界。南部边界为地下水的排泄通道,从多年的观测资料来看水位动态变化很小,因此可以概化为第一类边界^[3,4](图1)。

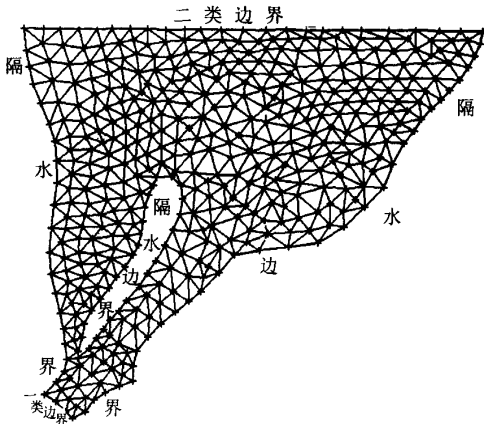


图1 研究区边界条件与有限元网格剖分图

Fig. 1 Study area boundary conditions and finite element discrimination mesh

研究区顶边界潜水面,接受大气降水、田间灌溉回归水、潜水蒸发等^[5~8]。底边界为基岩面,根据1987年甘肃省水利水电勘测设计研究院第一分院完成的《甘肃省引大入秦工程电干渠工程地质勘察报告》中基岩等值线图确定(图2)。

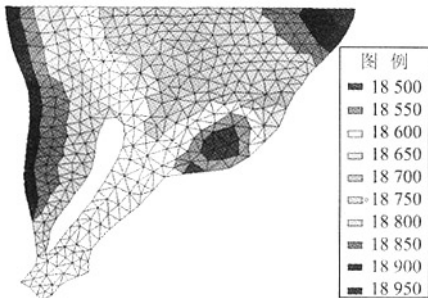


图2 研究区底边界条件图

Fig. 2 The bottom conditions of study area

3 数学模型

对研究区建立的概念模型,可用如下数学模型描述地下水的运动

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x}[k(H-B)]\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y}[k(H-B)]\frac{\partial H}{\partial y} \\ + \delta(x,y,t) = \mu \frac{\partial H}{\partial t}, & (x,y) \in D, \\ H(x,y,t)|_{t=0} = H_0, & (x,y) \in D, \\ k(H-B)\frac{\partial H}{\partial n} = q(x,y,t), & (x,y) \in \Gamma_2, \\ H(x,y,t) = H_1(x,y,t), & (x,y) \in \Gamma_1. \end{cases} \quad (1)$$

其中 H 为水头, H_0 为水头初始值, H_1 为第一类边界上的水头, B 为潜水含水层隔水底板高程, K 为渗透系数, D 为研究区域, μ 为给水度, Γ_1 为研究区第一类边界, Γ_2 为研究区第二类边界, q 为边界上单宽流量, δ 为各补给、排泄项综合强度^[7]。

方程(1)是非线性的,从解析解的角度来讲,该数学模型的解就是一个描述水头值在研究区分布的代数表达式。除了个别简单情况外,方程(1)的解析解是很难求得的^[9,10]。Aqua3D采用Galerkin有限元三角形网格剖分技术,把研究区含水层剖分成一个由多个相互联系的三角形单元组成的统一的网格系统,然后在剖分的各三角形单元上作线性插值并构造基函数^[2],将方程(1)转化为求常微分的初值问题,写成矩阵的形式

$$\begin{cases} [A]_{m \times n} [H]_{n \times 1} + [D]_{m \times n} \left\{ \frac{dH}{dt} \right\}_{n \times 1} = \{F\}_{n \times 1}, \\ [H]_{n \times 1} |_{t=0} = \{H_0\}_{n \times 1}. \end{cases} \quad (2)$$

其中 $[A]_{m \times n}$ 为导水矩阵, $[D]_{m \times n}$ 为贮水矩阵, $\{F\}_{n \times 1}$ 为水量矩阵。

$$A_{i,j} = \sum_{\beta=1}^p \frac{k_{\beta} m_{\beta}}{4\Delta\beta} b_i b_j + c_i c_j,$$

式中

$$\begin{aligned} m_{\beta} &= \sum_{L=i,j,k} \frac{\Delta H_L}{3} \\ &= \frac{1}{3} [(H_i - B_i) + (H_j - B_j) + (H_k - B_k)], \\ b_i &= \frac{1}{2\Delta\beta} (y_j - y_k), \quad c_j = \frac{1}{2\Delta\beta} (x_j - x_k), \\ D_{i,j} &= \begin{cases} \sum_{\beta=1}^p \frac{\Delta\beta}{12} \mu, & i \neq j, \\ \sum_{\beta=1}^p \frac{\Delta\beta}{6} \mu, & i = j. \end{cases} \end{aligned}$$

其中 $\Delta\beta = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} 1 & x_i & y_i \\ 1 & x_j & y_j \\ 1 & x_k & y_k \end{vmatrix}$ 为三角单元的面积, $i(x_i, y_i)$, $j(x_j, y_j)$, $k(x_k, y_k)$ 为剖分三角单元的顶点坐标.

4 模型的识别及结果

根据研究区面积大小、含水层系统结构特征、流场分布特征及边界条件^[5,9], 本次模拟在空间上把研究区剖分成1层, 平面上离散为771个三角形单元, 401个节点, 其中边界节点78个(包含4个一类边界节点), 见图1. 模型的求解是由Aqua3D程序自动迭代求解.

含水层各个剖分单元的参数初值(主要是渗透系数 k 和重力给水度 μ)均按抽水试验及前人资料给出初始值. 《甘肃省引大入秦工程秦王川灌区南部排水主沟道地质勘测报告》中对抽水试验结果进行统计分析后建议采用的渗透系数值如表1所示. 然后经模型计算、调试、验证后, 最终确定. 降雨入渗、灌溉回归、蒸发系数, 依据该区的试验资料、灌溉制度叠加后, 再分配到相应的含水层单元或节点上. Aqua3D把二类边界节点作为汇源项来处理, 其流量大小(流入为正, 流出为负)根据断面水文地质条件、借助达西定律来确定. 一类边界节点根据多年的水位观测赋值为1849.5 m.

表 1 渗透系数建议选用值

Table 1 The proposed value of conductivity

m/d			
试验方法	试验点数	算术平均值	建议选用值
砂碎石	抽	12	31.14
	注	21	10.11
	渗	30	18.03
含砾石	抽	5	7.58
	注	3	7.70
	渗	2	4.20
砂质土	抽		
	注	4	1.88
	渗	2	6.62
壤土	抽		
	注	3	0.87
	渗	9	0.50

研究区内有长观资料的时间是2003年12月~2005年3月, 根据秦王川灌区农作物需水特点, 从每年的11月底至第2年的3月初, 灌区内基本上无灌溉, 也无水量开采, 故选取2004年11月30日~

2005年2月28日作为模型的识别时段. 取时间步长为1天, 共计89个时间步长.

各节点的初始水位值利用研究区内布设的24眼观测井, 见图3. 在2004年11月30日同时刻的水位观测值, 采用无偏最优克里金插值方法辐射到研究区内^[11,12], 形成初始流场, 并与该时刻的实测流场进行比较(图4), 结果表明采用克里金插值形成的初始流场与实测流场具有较高的拟合度, 可以用来进行流场模拟.

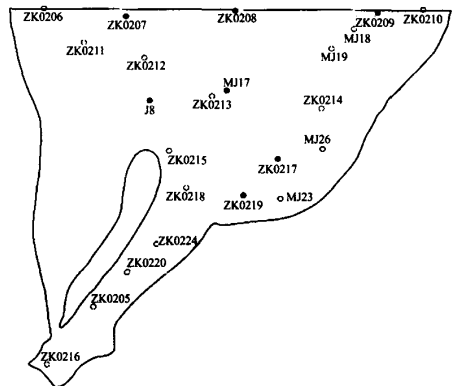


图 3 研究区内观测井位置分布图

Fig. 3 The location of observed wells in the study area

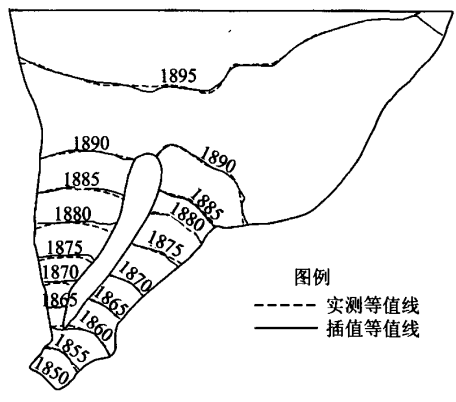


图 4 插值流场与实测流场对比

Fig. 4 Compare of interpolated and measured flow filed

经过多次运行模型、调参、优选, 最终使各观测井水位值与实测值达到最佳拟合状态^[9]. 图5随机给出了两眼观测井的水位动态拟合曲线. 从总体上看, 观测井的模拟水位与实测水位的动态变化趋势及相位基本一致, 绝对误差 $|\Delta H| \leq 0.5$ m的拟合点在90%以上. 水位出现偏差的原因是由于模型的概化过程中忽略了水文地质参数各向异性和时变性, 但从水位过程的变化趋势和与实测值的拟合程度来看, 本模型基本达到了对含水系统的仿真, 可以用来对地下水位预报. 识别后的水文地

质参数分区和值如图 6 和表 2 所示。

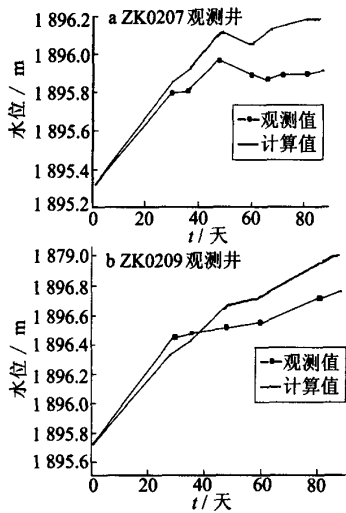


图 5 2004 年 12 月~2005 年 2 月观测井水位动态拟合曲线图
Fig. 5 Measured and calculated water level in tow randomly chosen observation wells from Dec. 2004 to Feb. 2005

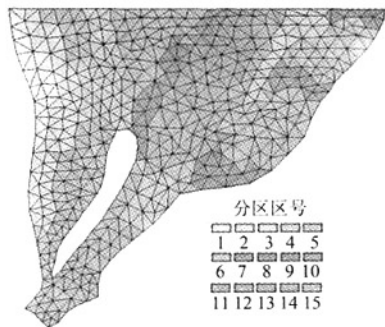


图 6 识别后的水文地质参数分区图
Fig. 6 Hydrogeology parameters division map after calibration

表 2 识别后的水文地质参数分区值

Table 2 The hoydraligy parameter value after calibration

分区号	$k / m \cdot s^{-1}$	μ	分区号	$k / m \cdot s^{-1}$	μ
1	6.0×10^{-5}	0.07	2	8.0×10^{-5}	0.09
3	1.1×10^{-4}	0.08	4	1.2×10^{-4}	0.16
5	1.4×10^{-4}	0.10	6	1.7×10^{-4}	0.15
7	1.9×10^{-4}	0.18	8	2.0×10^{-4}	0.11
9	2.2×10^{-4}	0.21	10	2.5×10^{-4}	0.20
11	3.0×10^{-4}	0.23	12	3.2×10^{-4}	0.24
13	3.3×10^{-4}	0.25	14	3.6×10^{-4}	0.26
15	4.1×10^{-4}	0.28			

5 地下水位 的 预报

根据《甘肃省引大入秦工程供水结构优化调整方案报告》到达设计水平年 2010 年, 秦王川设计

灌溉面积为 $3.17 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 灌溉用水量达 $1.114 \times 10^8 \text{ m}^3$. 毛灌溉定额 $5880 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, 净灌溉定额 $3926 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, 渠系利用系数为 0.699, 田间水利用系数 0.893, 灌溉水利用系数 0.597.

研究区内, 渠道的入渗、降水的入渗、潜水的蒸发年际间变化不大, 可以近似视为定值, 采用模型识别后的数值. 变化大的是通过北部边界进入研究区的潜流量, 根据历年的观测资料预测到达设计水平年, 从北部灌区通过北部二类边界进入研究区的潜流量将达 $9.9864 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$. 把该水量根据研究区水文地质断面实际情况和灌溉制度以汇项的形式分配到二类边界流量边界节点上, 其典型节点流量图如 7 所示.

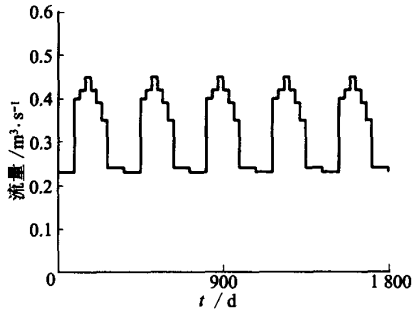


图 7 预测期内边界典型节点流量过程图
Fig. 7 The typical flux value of boundary node during prediction

南部边界由于水位年际间变化很小, 仍用验证期的水位值. 以 2005 年 12 月 31 日的水位作为预报的初始流场(图 8), 直到 2010 年 12 月 31 日. 每 30 天作为一个时间步长, 共计 70 个时段. 根据识别后的模型参数和上述初始条件运行模型, 预测到达设计水平年不同时期的地下水水流场(图 9, 10).

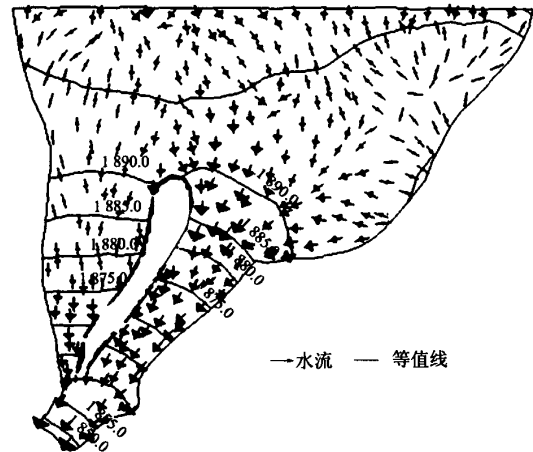


图 8 预测期初始流场图
Fig. 8 Initial flow field during prediction

- [12] CIENIAWSKI S E, WAYLAND J, RANJITHAN S. Using genetical gorithms to solve multiobjective groundwater monitoring problem[J]. *Water Resources Research*, 1995, 31(2): 399-409.

The numerical simulation of groundwater in the south of Qinwangchuang Basin

WEI Guo-xiao, WANG Gang, LI Chang-bin, WANG De-jun, ZHU Feng, XU Tao

(School of Resources and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The substance of groundwater numerical simulation is the mechanism simulation of ground water in the porous medium. Based on the hydrological geology, hydrological geological parameter obtained from the wells and the long term observed groundwater level data and by using the ArcGIS and professional groundwater soft——Aqua3D, the two dimension transient groundwater flow modes were built in the south of Qinwangchuang Basin. Through the identified model, we concluded that the groundwater level would rise 0.98 m in 5 years and the pickled range would deteriorate when the conditions in the basin reach the designed conditions.

Key words: numerical simulation; groundwater; finite element; transient flow; Aqua3D