文章编号: 0455-2059(2010)05-0031-08

基于GIS技术和FEFLOW的秦王川盆地南部地下水数值模拟

孙继成[1], 张旭昇[1], 胡雅杰[1], 朱 锋[2], 徐 涛[3], 魏国孝[1]
(1. 兰州大学 西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000;
2. 四川省清源工程咨询有限公司, 成都 610072;
3. 中国长江电力股份有限公司, 湖北 宜昌 443133)

摘 要: 在系统分析研究区地质及水文地质条件的基础上, 确定了研究区范围和边界条件, 借助GIS技术和FEFLOW建立了研究区地下水系统概念模型和数学模型及相应的地下水系统数值模型. 用2004−2005年地下水动态观测井的地下水动态观测资料对数值模型进行了识别和率定, 运用识别后的模型对现状水平年(2004年)的地下水系统进行了模拟与分析. 结果表明: 建立的模型能够较好地反应研究区水文地质空间分布及组合方式, 具有一定的代表性, 可以用于数值模拟计算. 选择2005年为预测初始时间, 2015年为终止时间, 利用模型对研究区进行预测. 在模型运行10年后, 研究区北部区域地下水位上升3∼5 m, 中部区域的上升5∼10 m, 南部区域的上升10∼15 m. 分析模拟区域地下水上升范围, 为今后实施排水措施奠定了一定的技术基础, 也为排水措施的选址提供了一定的依据.

关键词: 地下水系统; FEFLOW; 数值模拟; 秦王川盆地
中图分类号: X143; X826 **文献标识码:** A

Numerical simulation of groundwater system in the south of Qinwangchuan basin based on GIS technique and FEFLOW

SUN Ji-cheng[1], *ZHANG Xu-sheng*[1], *HU Ya-jie*[1], *ZHU Feng*[2], *XU Tao*[3], *WEI Guo-xiao*[1]
(1. Key Laboratory of Western China's Environmental Systems with the Ministry of Education, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;
2. Qingyuan Engineering Consultant Firm in Sichuan Province, Chengdu 610072, China;
3. China Yangze Power Co Ltd, Yichang 443133, Hubei, China)

Abstract: Based on the analysis of the geological and hydrogeological conditions, the scope of the research area and the boundary conditions were determined and the conceptual model, mathematical model and numerical model of the groundwater system in the research area were constructed with the help of GIS technology and FEFLOW software. Meanwhile, the numerical model was calibrated with the observed dynamic level of groundwater from 2004 to 2005, and the groundwater system at present (in 2004) simulated and analyzed by using the calibrated model. The results confirmed that the established model could well reflect the distribution and combination of the hydrogeological conditions and could be used to create a numerical simulation. We selected 2005 as the beginning year and 2015 as the ending year, and used the model to forecast the future conditions in the research area. After the model has run for ten years, the groundwater level would rise 3∼5 m in the north section, 5∼10 m in the central section and 10∼15 m in the

收稿日期: 2009-10-26; **修回日期:** 2010-03-02
基金项目: 国家自然科学基金委创新群体项目(40721061)
作者简介: 孙继成(1985−), 男, 甘肃民乐人, 硕士研究生, e-mail: sunjcheng08@lzu.cn, 研究方向为干旱区水资源与环境;
魏国孝(1966−), 男, 甘肃会宁人, 副教授, e-mail: gxwei@lzu.cn, 研究方向为干旱区水资源与环境, 通信联系人.

万方数据

south section. Through an analyis of the rising range of groundwater level of the research area, the technology basis was established to actualize the measure of drainage for future and provide a basis for selecting the location for measuring the drainage.

Key words: groundwater system; FEFLOW; numerical simulation; Qinwangchuan basin

地下水系统是指受控于一定水文地质条件, 在某一空间域形成的与相邻地质体相对隔绝而内部水力联系密切的含水系统或单元, 既包括地下水含水系统又包括地下水流系统. 由于水文地质条件的复杂性(地形起伏多变、含水层厚度不一、非均质、各相异性、多种形式源汇项)和水文地质参数的时空变异性, 在很大程度上限制了人们对地下水系统的认识和量化. 利用数值模拟软件对地下水流和溶质运移等问题进行模拟的方法以其有效性、灵活性和相对廉价性逐渐成为地下水研究领域的一种不可缺少的重要方法, 得到了广泛应用[1]. 本文在系统分析研究区地质、水文地质条件的基础上, 经过对地质体的科学的概化, 建立研究区概念模型、数学模型和数值模型[2], 并利用三维地下水数值模拟软件——FEFLOW 对模型进行求解. 同时, 利用研究区已有的观测孔长观资料及水均衡项资料对建立的模型进行了率定. 利用率定后的模型在现状条件下, 对研究区地下水资源进行评价, 并根据研究区内用水发展的趋势需求, 对研究区内地下水进行模拟与预测.

1 研究区概况

秦王川盆地位于甘肃省兰州市西北部, 隶属于永登县和皋兰县, 是引大入秦工程的主要灌区之一, 海拔高程 1 890~2 300 m, 地理位置东经 103°30′~103°45′, 北纬 36°20′~36°50′, 地处冷温带亚干旱区. 据永登气象站与中川气象站实测资料, 多年平均降雨量 240~290 mm, 多年平均蒸发强度 1 879.7 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所环抱, 相对高出盆地 40~60 m, 盆地南北长 42 km, 东西宽 10~12 km, 面积约 504 km^2. 盆地地形自北向南倾斜, 地面坡降 1/80~1/100. 盆地内主要为冲洪积平原所占据, 盆地中部断续分布有长数公里, 宽 0.5~2.0 km, 相对高出冲洪积平原 5~20 m 的第三系基岩山梁, 呈垄岗状, 南北向展布. 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和全新统冲洪积物. 盆地南部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.

2 水文地质概念模型

建立地下水系统的概念模型, 是根据建模的要求和具体的水文地质条件, 对系统的主要因素和状态进行刻画, 简化或忽略与系统目的无关的某些系统要素和状态, 以便于数学描述, 并建立地下水系统模拟模型. 水文地质条件的概化通常包含以下几个方面: 地下水流系统区域几何形状的概化; 含水性质及地下水流状态的概化; 初始流场模拟与边界性质的概化; 参数性质的概化[3].

2.1 模拟范围

根据相关水文地质资料, 将研究区地下水系统划分为一个基本独立的地下水系统, 主要是西槽—陈家梁子一线以南的盆地汇水区. 根据灌区的水文地质条件和工作范围, 布置了四条水文地质剖面, 剖面的布置尽量与地下水流向垂直. Ⅰ号剖面布置于工作区的最北边, 可控制自整个灌区北面进入工作区的来水量, Ⅱ, Ⅲ, Ⅳ号剖面近平等间距布置于 Ⅰ 号剖面南侧. 研究区水文地质平面图见图 1, 东、西两侧为盆地周边的低山丘陵, 属隔水边界, 南侧有地下水的排泄通道, 这样构成了一个既封闭, 又有排泄通道的堤坝式汇水盆地. 均

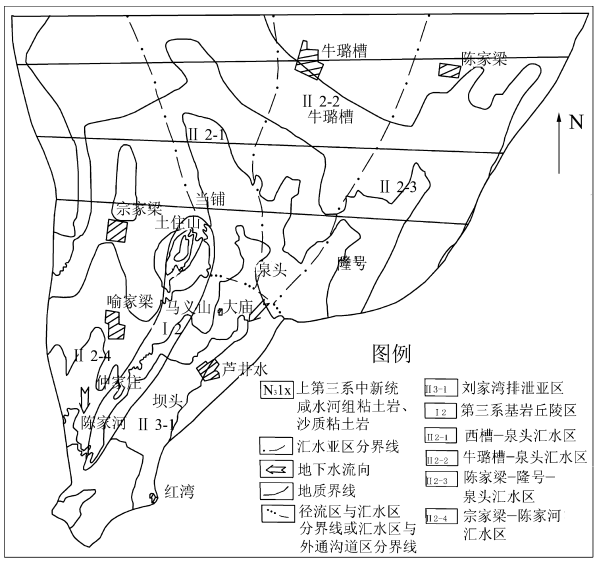

图 1 研究区水文地质平面图

Fig. 1 Hydrogeological ichnography of the research area

万方数据

衡区选择为 I 号剖面以南的汇水盆地区, 面积 27.53 km^2.

2.2　含水层结构特征

盆地南部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. 受构造、地貌和沉积条件的制约, 自北而南沉积物颗粒渐细, 地下水位埋深渐浅, 富水性渐弱, 含水层次增多, 北部是单一的潜水含水层, 向南逐渐过渡为双层或多层结构的潜水—承压含水层的统一含水体. 第四系松散层承压水主要分布在盆地南部当铺、下牛路槽、隆号一带及李麻沙沟沟道区, 含水层岩性为全新统含砾中粗砂或粉细砂层, 局部为砂砾碎石层, 由北向南颗粒逐渐变细.

由于沉积环境的变化交替, 黏性土的分布在水平方向上和垂直方向上都有较大变化, 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, 可视为统一的多层介质的潜水含水系统[4−5].

从空间上看, 地下水流整体上以水平运动为主、垂向运动为辅, 地下水系统符合质量守恒定律和能量守恒定律. 含水层分布广、厚度大, 在常温常压下地下水运动符合达西定律. 考虑浅、深层之间的流量交换以及软件的特点, 地下水运动可概化成空间三维流. 地下水系统的垂向运动主要是层间的越流, 地下水三维模型可以很好地解决越流问题. 地下水系统的输入、输出随时间、空间变化, 故地下水为非稳定流. 参数随空间变化, 体现了系统的非均质性, 但没有明显的方向性, 所以含水层可以概化成非均质、各向同性.

根据模拟区水文地质条件, 通过研究模拟区地下水补给和动态变化特征, 将本研究区概化成非均质、各向同性、空间三维结构、非稳定地下水流系统.

2.3　研究区边界条件概化

南部盆地最北边为 I 号剖面, 可控制自整个灌区北面进入工作区的来水量, 秦王川北部灌区所形成的地下潜流通过该断面进入南部盆地, 断面布置与地下水位等直线基本垂直, 该断面作为第一类边界处理. 东、西两侧为盆地周边的低山丘陵, 属隔水边界. 距离南侧出口较近处为封闭的隔水边界; 南侧出口有地下水的排泄通道, 且地下水出露, 可作为第二类边界. 下边界为地下 50∼100 m, 部分地区大于 100 m. 此界面以下是前第四系及侵入岩, 裂隙不发育, 视为隔水边界. 这样构成了一个既封闭又有排泄通道的堤坝式汇水盆地. 研究区边界条件见图 2.

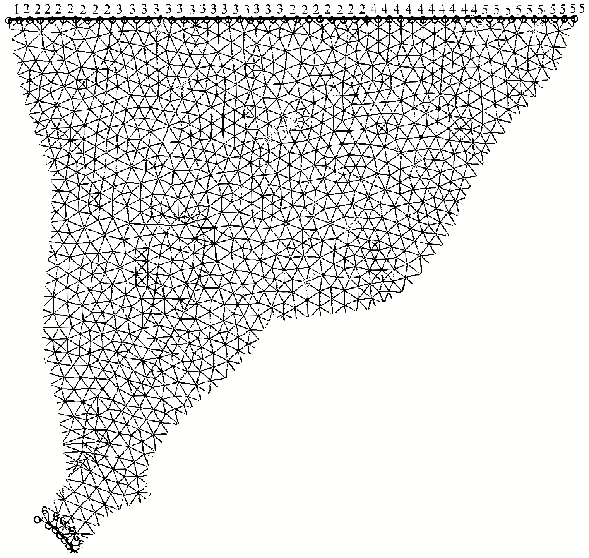

图 2　研究区边界条件图

Fig. 2　Boundary conditions of the research area

3　地下水系统数学模型

依据渗流连续性方程及达西定律, 研究区非均质、各向同性、空间三维结构、非稳定地下水流系统, 可用下面偏微分方程及其定解条件来描述[6−10]. 选择地下水模型软件FEFLOW求解该定解问题, 以建立研究区地下水数值模拟模型:

$$
\begin{aligned}
&S\frac{\partial h}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}(K\frac{\partial h}{\partial x})+\frac{\partial}{\partial y}(K\frac{\partial h}{\partial y})+\\
&\qquad\frac{\partial}{\partial z}(K\frac{\partial h}{\partial z})+W,\quad (x,y,z)\in\Omega,t\geqslant 0,\\
&\mu\frac{\partial h}{\partial t}=K(\frac{\partial h}{\partial x})^2+K(\frac{\partial h}{\partial y})^2+K(\frac{\partial h}{\partial z})^2-\\
&\qquad\frac{\partial h}{\partial z}(K+P),\qquad (x,y,z)\in\Gamma_0,t\geqslant 0,\\
&h(x,y,z,t)|_{t=0}=h_0(x,y,z),\\
&\qquad\qquad (x,y,z)\in\Omega,t=0,\\
&h(x,y,z,t)|_{\Gamma_1}=h_1(x,y,z),\\
&\qquad\qquad (x,y,z)\in\Gamma_1,t\geqslant 0,\\
&K_n\frac{\partial h}{\partial n}|_{\Gamma_2}=f_1(x,y,z,t),(x,y,z)\in\Gamma_2,t\geqslant 0.
\end{aligned}
$$

其中: Ω 为渗流区域; Γ_0 为潜水渗流域; Γ_1, Γ_2 为渗流区第一类、第二类边界; h 为水位标高(m); h_0 为含水层初始水位分布(m); $h_1(x, y, z, t)$ 为第一类边界上的水头(m); K 为渗透系数(m/d); S 为含水介质的贮水率(1/m); W 为源汇项(1/d); μ 为重力给水度; P 为降水入渗和蒸发(m/d); $f_1(x, y, z, t)$ 为第二类边界上的水分通量(m^3/(m·d)); K_n 为边界法线方向的渗透系数(m/d); $\boldsymbol{n}$ 为边界外法线方向.

万方数据

4 地下水数值模拟模型

在对研究区水文地质情况进行概化后,构建数值模拟模型. 运行模型模拟地下水位的变化过程,将模拟结果与地下水观测井反映的实测地下水位变化过程相比较,检验模型是否能够客观正确地刻画地下水流系统的变化状态,并最终确定计算区域的水文地质参数[11].

本次工作采用FEFLOW 5.2(finite element subsurface flow & transport simulation system)软件作为平台,以Arcview GIS作为数据处理工具来对研究区进行数学模型模拟. FEFLOW具有友好的用户可视化操作界面,集成了GIS数据处理技术、先进的数值算法和方便的数据输入输出,是一款功能齐全、技术先进、操作性强的地下水模拟软件,可用于复杂三维非稳定水流和污染物运移的模拟.

4.1 区域剖分

在建立研究区地下水数值模拟模型,进行地下水模拟前,首先必须对模拟区进行三角形剖分. 计算区面积为27.53 km^2,采用FEFLOW软件进行自动三角形网格剖分,剖分单元2 208个,节点2 472个,相应空间上则是由6节点组成的三棱柱体构成的空间地质体. 研究区空间有限元剖分见图3.

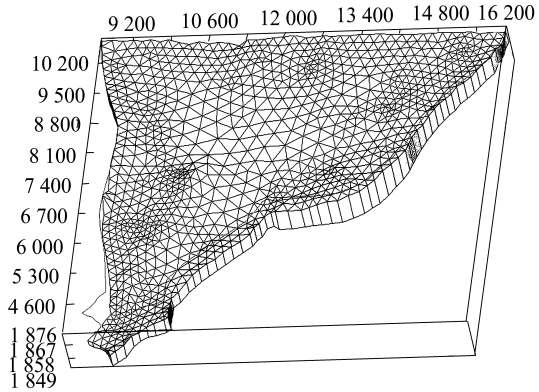

图3 研究区空间有限元剖分图

Fig. 3 Finite element discrimination in space of the research area

4.2 时间离散

根据获得的长观孔水位资料,选择2003年11月至2005年3月对模型进行识别、验证,确定一个月为一个应力期(即模型运行的时段:在相同的时段内,补给项、排泄项等不发生变化). 其中2003年11月至2004年11月为模型识别期,2004年11月至2005年3月为模型检验期.

4.3 水文地质参数分区和初始值确定

含水层岩性在研究区内西槽—陈家梁一线附近及以北地区为砂(砾)碎石层,含水层厚5.0~6.7 m,颗粒由北向南逐渐变细. 向南部到当铺、隆号一带,含水层以含砾砂、细砂为主,局部为砂碎石,含水层厚3~5 m,且以多层介质共同组成含水层为主.

潜水埋深特征表现为由北向南逐渐变浅的规律. 西槽—上牛路槽—陈家梁一线以北地区地下水位埋深大多为20~35 m,向南由15~20 m渐变为5~10 m,在红玉村、方家坡以南区地下水位埋深小于5 m,再向南到当铺、隆号一带地下水溢出地表而呈沼泽湿地.

含水层的渗透性具有水平分带性. 牛路槽—下牛路槽一带,透水性较强,渗透系数为13.46~27.00 m/d; 西槽以北到周家梁段含水层亦属强透水层,渗透系数达25.0~44.4 m/d; 西槽—当铺一带渗透系数为10.00~15.78 m/d,渗透性较强; 而东部的陈家梁—方家坡段含水层具中等透水性,渗透系数为5.55~11.95 m/d.

水文地质参数主要有渗透系数和给水度,主要根据该区水文地质勘察、抽水实验资料及对水文地质条件的分析确定. 区域从总体上可划分为三个大的Ⅰ级水文地质单元,马义山第三系基岩丘陵区,该区周边为隔水边界; 盆地中部汇水区,包括西槽—泉头汇水亚区、牛路槽—泉头汇水亚区、陈家梁—隆号—泉头汇水亚区、宗家梁—陈家河汇水亚区; 盆地外通沟道区,包括刘家湾排泄亚区. 总计为七个Ⅱ级水文地质单元. 水文地质分

表1 水文地质分区及水文地质参数

Tab. 1 Hydrogeological zoning and parameter

Ⅰ级分区	Ⅱ级分区	含水层岩性特性	k(m/d)	μ
低山丘陵区	第三系基岩丘陵区	基岩		
盆地中部汇水区	西槽—泉头汇水亚区	主要为砂碎石,夹含砾砂	10.0~20.0	0.15~0.25
	牛路槽—泉头汇水亚区	主要为砂碎石	15.0~30.0	0.20~0.25
	陈家梁—隆号—泉头汇水亚区	主要为砂碎石,局部为细砂	10.0~16.3	0.07~0.25
	宗家梁—陈家河汇水亚区	砂碎石	10.0~15.0	0.20~0.25
	宗家梁—陈家河汇水亚区	中粗(细)砂	5.0~10.0	0.07~0.20
盆地外通沟道区	刘家湾排泄亚区	砂碎石	10.0~15.0	0.20~0.25

万方数据

区及水文地质参数结果见表1, Ⅰ, Ⅱ级水文地质分区见图4[12].

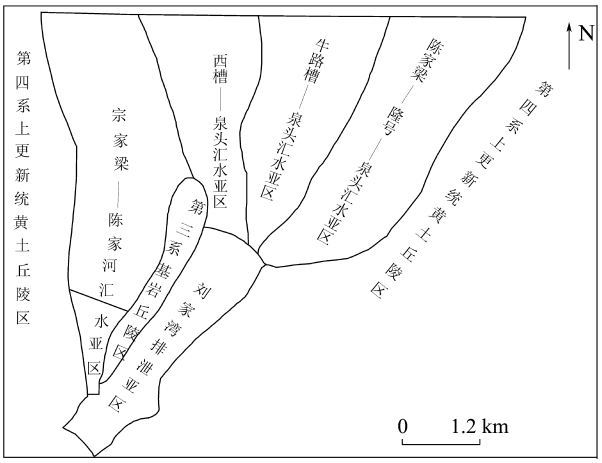

图 4　研究区水文地质分区图

Fig. 4　Hydrogeological zoning ichnography of the research area

在有限元法计算中, 还需确定研究区内地面标高、基岩等值线及初始地下水位值. 地面标高值根据勘测资料及DEM数据得到. 根据甘肃省水利水电勘测设计院第三总队1∶50 000潜水等水位线图获取水位等值线, 应用模型自带的插值模块对每个计算单元进行Kriging插值, 作为初始水位. 根据水利水电勘测设计研究院第二分院秦王川灌区南部基底基岩等值线图插值整个研究区等值线.

4.4　源汇项的计算与处理

模型的源汇项计算包括补给量和排泄量计算. 根据现有资料, 在均衡计算期内, 天然状态下盆地南部地下水均衡基本特征为"入渗径流型", 上游地下潜流和灌溉水径流组成地下径流主题, 通过沟道向区外排泄是地下水消耗的主要形式. 该研究区的补给项有大气降雨入渗量、田间灌溉入渗量、渠系入渗量和北部盆地通过Ⅰ号剖面的地下潜流量等. 排泄项有区内蒸发量、沟谷潜流量及沟谷明流量等. 以上各项计算时以盆地内构造单元为一级水文地质单元, 灌区为二级水文地质单元控制, 兼顾研究区内的土壤类型和土地利用类型, 把计算得到的各量进行叠加, 然后利用FEFLOW的IN(+)/OUT(−)模块对应分配到相应的剖分单元, 得出研究区源汇项[13].

5　模型的识别与验证及均衡分析

模型的识别与验证的过程是把模型通过数值模拟得到的结果和野外试验对含水层施加某种影响所得的实际观测结果或长期动态观测资料进行比较, 看两者是否一致. 若不一致, 就要修正模型, 直到满意为止.

运行FEFLOW模拟软件中自带的计算程序, 可得到水文地质概念模型在给定水文地质参数和各均衡项条件下的地下水位时空分布. 通过拟合同时期的流场和长观孔的历时曲线识别水文地质参数、边界值和其他均衡项, 使所建模型符合研究区的水文地质条件, 以便更准确地定量研究模拟区的补给和排泄量, 预测在给定条件下的地下水流场的演化趋势[14].

5.1　模型的识别

根据现有的观测资料, 模型模拟识别时段选择为2003年11月至2004年10月, 周期一年, 模型输出时间步长选择为一天. 为了进一步验证所建立的数学模型和水文地质参数的可靠性, 利用地下水动态监测资料对模型进行检验. 各观测孔计算水位埋深与实测水位拟合过程曲线如图5所示.

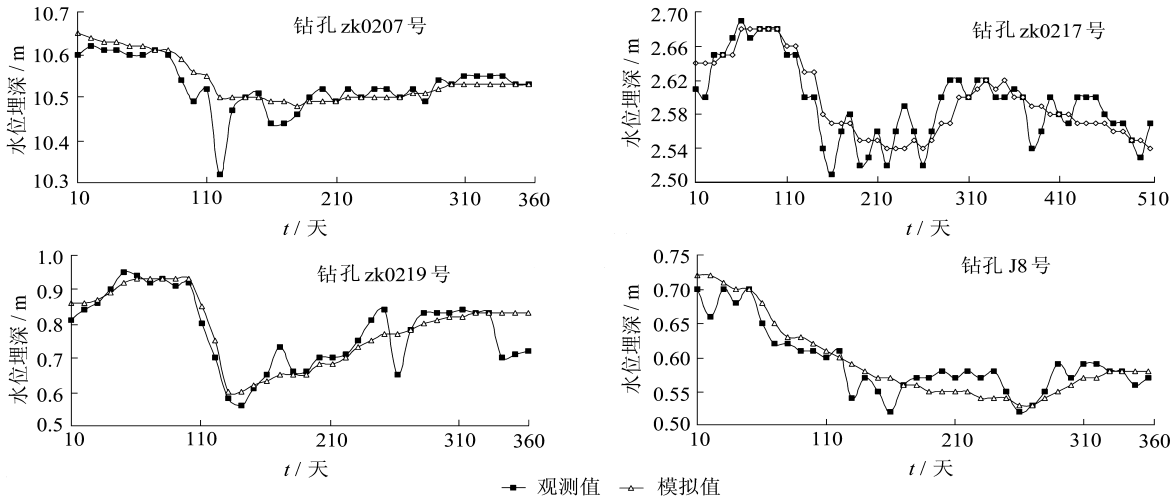

图 5　2003年11月至2004年10月水位曲线拟合图

Fig. 5　Diagram of water level curve from Nov. 2003 to Oct. 2004

万方数据

观测孔的历时曲线的形状直接反映了研究区各种影响因子之间的关系. 从图5地下水位动态变化过程拟合情况来看, 模型的计算值与实际观测值变化趋势较为接近, 基本能够满足模拟要求.

各观测孔水位埋深观测值与模拟值间的相关系数在MS-Excel中应用线性回归法求得. $R^2=1$表明模拟值与观测值完全吻合; 当$R^2<1$时, 值越小反映出数据吻合程度越低; 当$R<0.6$时相关性差, 没有参考价值[15]. 各观测孔观测值与模拟值相关性如图6所示.

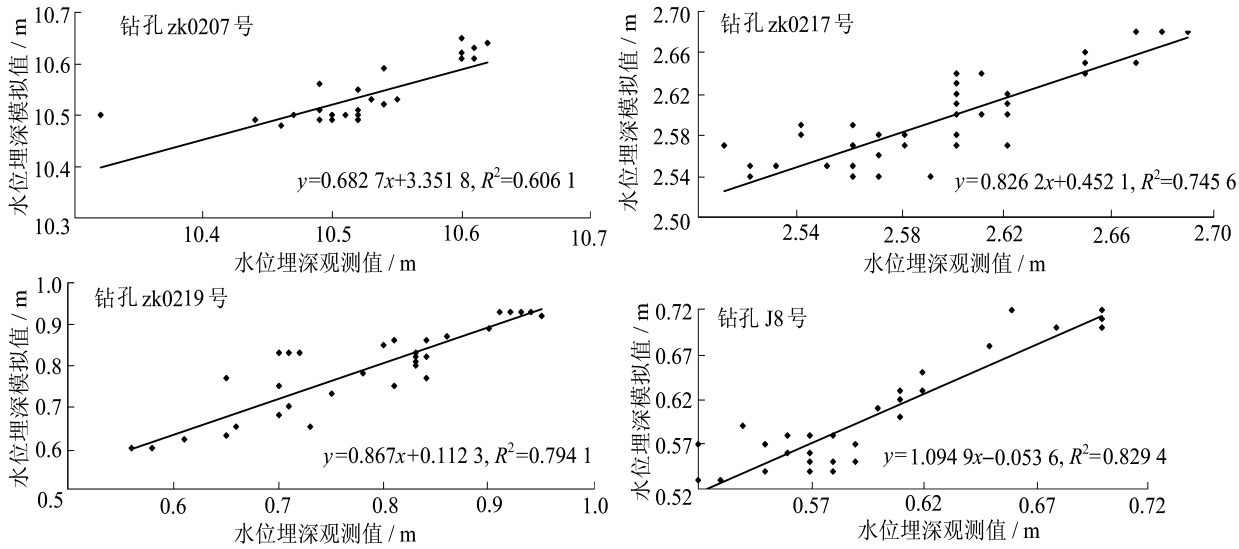

图 6 观测孔观测值与模拟值相关性图

Fig. 6 Correlation chart between observed value and simulative value of the observation wells

从图6来看, 各组实测值与模拟值之间的相关性较好. 本次所建立的模型各参数基本可靠, 可以继续另选一个时段对模型进行验证.

5.2 模型的验证

模型的率定是整个模拟过程中极为重要的一步, 通常要经过反复的修改参数和调整某些源汇项才能达到较为理想的拟合结果. 为了保证所建模型经多次调参、校正后, 模型能再现所研究的实际地质体, 在已经确定的各参数不变的条件下, 根据另外一段时间内的预测结果与相应时段现场实际观测资料的对比, 来进一步检验考核模型. 利用地下水动态监测资料(2004年11月至2005年3月)对模型进行验证. 各观测孔验证曲线见图7.

各观测孔的历时曲线直接体现了外界物理条件对地下水的作用. 受上游灌区农作物灌溉制度

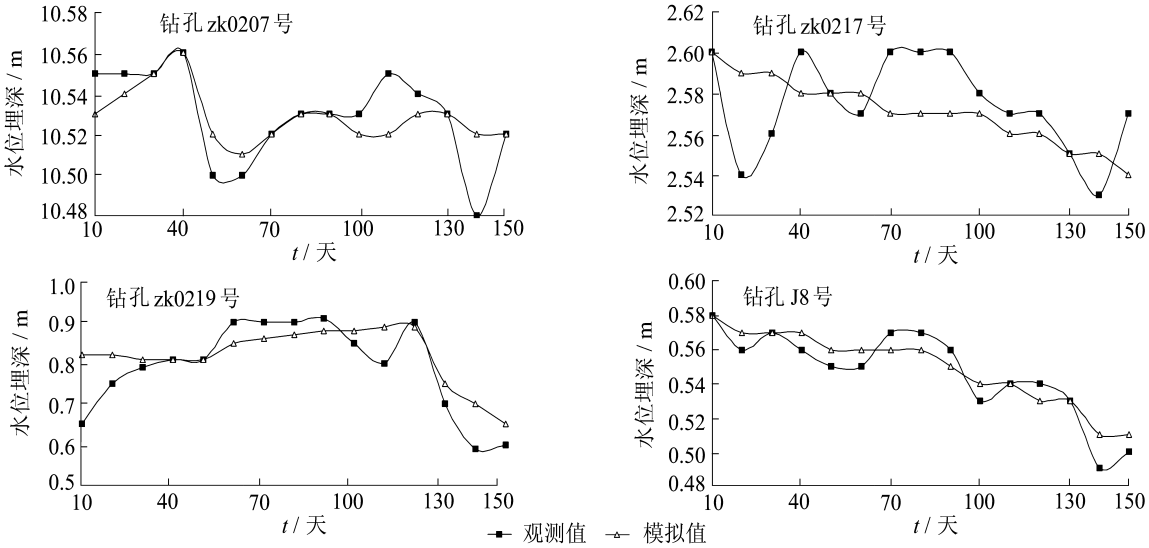

图 7 观测孔验证曲线图

Fig. 7 Curve of the observation wells

万方数据

及引水方案的影响, 农田灌溉后, 部分水量将补给地下水, 致使研究区水位在一定程度上上升. 从模拟的结果来看, 模型的计算值与实际观测值变化趋势较为接近, 所建立的数学模型和采用的计算参数是基本符合客观实际的, 能够反映地下水系统的水力特征, 可以用于数值模拟计算.

5.3　地下水均衡分析

通过对地下水各均衡要素分析, 得出研究区地下水系统在现状水平年2004年水量均衡结果, 见表2. 由表2可知, 研究区在现状水平年年内地下水系统总补给量和总排泄量均衡差为136.99×10^4 m^3, 为正均衡.

表 2　现状水平年地下水计算均衡成果表

Tab. 2　Balanced results of groundwater system at present

	项目	数量/10^4m^3	占比/%
补给量	经 I 号剖面的径流量	841.70	84.06
	灌溉水入渗量	137.52	13.73
	降雨入渗量	22.10	2.21
	合计	1 001.32	
排泄量	土面蒸发量	121.48	14.05
	水面蒸发量	157.34	18.20
	沟谷潜流量	172.10	19.91
	沟谷明流量	413.41	47.83
	合计	864.33	
均衡期始末储量变化量		136.99	

6　模型预测

对模型定解条件和源汇项的各参数率定后, 在已建立的地下水流数值模拟模型的基础上, 进行现状条件下的数值模拟, 进而预测未来年份的地下水位及流场变化情况. 为了使模型有比较长的预测期, 选择2005年为预测初始时间, 2015年为终止时间. 假设2005−2015年北部和南部盆地灌溉面积及灌溉制度都发生变化, 利用前述所建模型对秦王川南部盆地进行预测, 采用模型识别后所确定的参数运行模型. 模型运行后水位变化情况如图8所示, 预测方案见表3, 其地下均衡预测结果见表4.

由图8可以看出, 在模型运行的10年后, 在研究区北部由于地下水补排相对通畅, 在实施引水灌溉工程后, 补给量大于排泄量, 北部区域地下水水位将上升3~5 m; 中部区域受弱透水介质的阻隔, 排泄不畅, 地下水水位将上升5~10 m; 南部排泄区域为两个排水通道, 主要排水沟道区域位于东部, 也是地下水水位发生变化最大的区域, 经过10年的积累, 地下水水位将上升10~15 m. 地下水水位的持续上升, 加之干旱区蒸发相当强烈, 不可避免地会将土壤中的盐分带至地表或接近地表处, 引起土壤的次生盐渍化. 分析模拟区域地下水上升范围, 为今后实施排水措施奠定了一定的技术基础, 也为排水措施的选址提供了一定的依据.

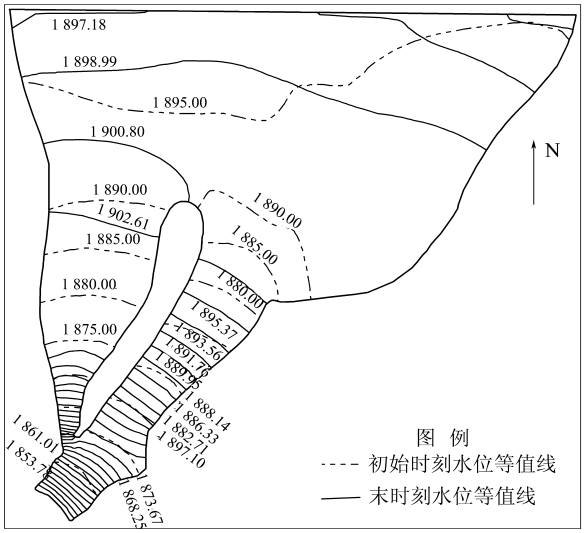

图 8　预测水位对比图

Fig. 8　Comparison chart of predicated water level

表 3　盆地南部地下水预测方案

Tab. 3　Predicated plan for the groundwater in the south of the basin

预测阶段	以北灌溉面积/10^4hm^2	毛灌溉定额/(m^3/hm^2)	净灌溉定额/(m^3/hm^2)	净灌溉面积/hm^2
2005−2010年	1.72	5 880	3 926.4	2 284.67
2011−2015年	2.00	5 880	3 750.0	2 200.00

表 4　研究区地下水均衡预测表

Tab. 4　Predicated balanced results of groundwater system of the research area

10^4m^3

年份	I-I 剖面流量	灌溉入渗量	降雨入渗量	蒸发量	沟谷明流量	沟谷潜流量	均衡量
2005	841.70	137.52	25.71	278.32	430.4	172.1	124.11
2006	841.70	137.52	25.82	285.22	432.6	172.6	114.62
2007	841.70	137.52	25.90	290.12	434.0	173.1	107.90
2008	841.70	137.52	25.99	291.20	435.2	173.5	105.31
2009	841.70	137.52	26.03	291.34	436.6	173.9	103.41
2010	841.70	137.52	26.06	292.39	437.8	174.2	100.89
2011	1 108.11	135.52	26.08	296.35	538.8	174.9	259.66
2012	1 108.11	135.52	26.08	301.57	539.4	175.6	253.14
2013	1 108.11	135.52	26.08	302.82	539.8	175.8	251.29
2014	1 108.11	135.52	26.08	304.78	540.1	176.5	248.33
2015	1 108.11	135.52	26.08	306.70	540.4	176.7	245.91

7　结论及建议

在系统分析研究区地质及水文地质条件的基础上, 确定了研究区范围和边界条件; 充分利

万方数据

用GIS软件强大的编辑及转换功能,以专业地下水模拟软件——FEFLOW为平台,建立了研究区三维地质结构模型,再现了实际地质体,实现了对研究区的模拟. 通过收集和分析有关研究区地质、水文地质条件等方面的资料,建立相应水文地质模型. 利用地下水长观资料对模型进行识别,通过反复调参,进行验证,结果表明所建模型基本符合计算要求. 进而选择2005年为预测初始时间,2015年为终止时间,利用模型对研究区进行预测,并对地下水数值模拟模型进行求解和均衡分析. 研究表明: 研究区在现状水平年年内地下水系统总补给量是$1\,001.32\times10^4$ m^3,总排泄量864.33×10^4 m^3,均衡差为136.99×10^4 m^3,为正均衡. 其中,经过Ⅰ—Ⅰ剖面的地下径流量为841.70×10^4 m^3,占总补给量的84.06%; 灌溉水入渗补给量为137.52×10^4 m^3,占总补给量的13.73%; 降雨入渗补给量为22.10×10^4 m^3,占总补给量的2.21%. 排泄项中沟谷明流量为413.41×10^4 m^3,占总排泄量的47.83%,为主要排泄量; 沟谷潜流量172.10×10^4 m^3,占总排泄量的19.91%; 蒸发量为278.82×10^4 m^3,占总排泄量的32.25%,基本符合实际情况. 在北部灌区调整灌溉面积后,南部地区均衡量成倍增加,由现状水平年的137×10^4 m^{3}增至最多年份的260×10^4 m^3. 秦王川灌区在实施引水灌溉后,在气候、地形地貌、土壤结构、地下水及人类活动等诸多因子的综合影响下而产生了次生盐渍化,问题比较严重. 当务之急是采取合理的排水措施,避免次生盐渍化的产生.

通过对秦王川盆地南部地下水系统的三维数值模拟研究,表明灌区内的地下水位将会持续上升. 为此建议: 建设南部区域排水系统,降低研究区内地下水位,防止研究区发生沼泽化、次生盐渍化; 在灌区现有各种观测资料基础上,尽快建立灌区水、盐动态监测体系网,对地下水动态及土壤水盐动态进行长期监测及预报; 立项对整个灌区进行地下水动态监测及水文地质勘查工作,布设合理的监测体系,并根据监测资料建立溶质运移模型,控制不利条件产生; 为有效控制研究区土地盐渍化的大面积发生,建议调整灌区作物种植结构,适量开采地下水,这在技术上是可以实现的.

参 考 文 献

[1] 贺国平,邵景力,崔亚莉,等. FEFLOW在地下水流模拟方面的应用[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2003, 30(4): 356−361.

[2] 徐乐昌. 地下水模拟常用软件介绍[J]. 铀矿冶, 2002, 21(1): 33−38.

[3] 李竞生,姚磊华. 含水层参数识别方法[M]. 北京: 地质出版社, 2003.

[4] 吴剑锋,朱学愚. 由MODFLOW浅谈地下水流数值模拟软件的发展趋势[J]. 工程勘察, 2000(2): 12−15.

[5] 魏国孝,王刚,李常斌,等. 秦王川盆地南部地下水流场数值模拟[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2006, 42(6): 16−21.

[6] 孙讷正. 地下水流的数学模型和数值方法[M]. 北京: 地质出版社, 1981: 42−56.

[7] 薛禹群. 地下水动力学[M]. 北京: 地质出版社, 1997: 37−53.

[8] 李同斌,周立芝. 地下水动力学[M]. 长春: 吉林大学出版社, 1998: 32−41.

[9] 薛禹群,谢春红,吴吉春. 水文地质数值法存在的问题及其对策[J]. 地球科学进展, 1996, 11(5): 472−474.

[10] 陈崇希,裴顺平,王逊. 非完整河的数值模拟方法及建模中的若干问题[J]. 勘察科学技术, 1999(4): 3−12.

[11] Chen Chong-xi, Jiao Jiu-ji. Numerical simulation of pumping test in multiply wells with no-darcian flow in the well bore[J]. Ground Water, 1999, 37(3): 465−474.

[12] 甘肃省引大入秦工程秦王川盆地南部次生盐渍化治理工程可行性研究报告[R]. 兰州: 甘肃省水利水电设计研究院, 2004.

[13] 魏国孝,王德军,王刚,等. GIS技术和FEFLOW在酒泉东盆地地下水系统数值模拟中的应用[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2006, 43(6): 1−6.

[14] 李宝元. 天堂河流域浅层地下水运动数值模拟研究[D]. 北京: 中国农业大学水利与土木工程学院, 2002: 56−72.

[15] 郝芳华,程红光,杨胜天. 非点源污染模型: 理论方法与应用[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2006: 52−53.

(责任编辑: 王春燕)

万方数据