

Visual MODFLOW 在平原型水库水环境 数值模拟中的应用

丁飞¹, 何霖², 张奇林³, 孙有⁴, 潘云^{5,6}, 李涛⁷

- (1. 沈阳建筑大学 市政与环境工程学院, 沈阳 110168; 2. 大连市勘察测绘研究院有限公司, 大连 116021;
3. 云南地质工程勘察设计研究院, 昆明 650041; 4. 辽宁省水利水电勘测设计研究院, 沈阳 110003;
5. 广岛大学国际协力研究科, 日本, 739-8529; 6. 首都师范大学 资源环境与 GIS 北京市重点实验室, 北京 100037;
7. 青岛天人环境工程有限公司, 山东 青岛 266101)

摘要: Visual MODFLOW 软件是广泛应用于地下水流和溶质运移模拟系统。本次在平原型水库地表水与地下水系统模拟中应用该软件进行了一些探索应用, 以扩展软件的应用领域。本文以沈阳石佛寺水库为例, 应用该软件模拟了水库不同蓄水高度对地下水产生的影响, 并提出不同的布井方案, 预测水库不同蓄水高度情形时的地下水可开采量。通过本次应用研究, 表明 Visual MODFLOW 在平原型水库水环境数值模拟中操作方便, 预报准确可靠, 功能强劲, 具有广泛的应用和推广前景。

关键词: Visual MODFLOW; 地下水数值模拟; 石佛寺水库

中图分类号: TV697; X523 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2008)02-0079-03

Application of Visual MODFLOW numerical simulation for water environment in a plain reservoir

DING Fei¹, HE Lin², ZHANG Qi-lin³, SUN You⁴, PAN Yun^{5,6}, LI Tao⁷

- (1. College of Civil & Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China; 2. Dalian Academy of Reconnaissance and Mapping Co., LTD, Dalian 116021, China; 3. Yunnan GEO-Engineering Investigation Institute, Kunming 650041, China; 4. Investigation and Design Institute of Water Resources and Hydropower of Liaoning, Shenyang 110003, China; 5. Graduate School for International Development and Cooperation, Hiroshima University, 739-8529, Japan; 6. Beijing Key Lab of Resources Environment and GIS, Capital Normal University, Beijing, 100037, China; 7. Qingdao Tianren Environmental Engineering CO., LTD., Qingdao, 266101, China)

Abstract: Visual MODFLOW is a software widely used for groundwater flow and solute modeling. Here, it is used to simulate surface water and groundwater of a plain reservoir to extend its application. Shifosi Reservoir in Shenyang was studied as a case to simulate the influence of reservoir water levels to groundwater, put forward the different schemes of well placement. Exploitable groundwater capacity was forecasted with the different reservoir water level. Through the application research, it shown that Visual MODFLOW is easy to operate in plain reservoir for numerical simulation of the water environment, the forecaste is accurate and reliable, and the function is strong, it has a wide range of application and promotion prospects.

Key words: Visual MODFLOW; numerical simulation for groundwater; Shifosi Reservoir

0 引言

Visual MODFLOW 是由加拿大 WaterlooHydrogeologicInc 在 MODFLOW 软件基础上, 应用现代可视化技术开发研制的。该系统是目前国际上最为流行、且被各国同行一致认可的三维地下水流和溶质运移模拟评价的标准可视化专业软件系统, 已

在地下水流和溶质运移模拟中广泛应用, 但对于处理平原型水库地表水与地下水环境数值模拟方面研究较少, 本次应用 Visual MODFLOW 软件在这方面进行了一些尝试, 以拓宽该系统的应用范围, 为此针对沈阳石佛寺平原型水库水环境进行数值模拟, 预测水库不同蓄水高度库区地下水位变化并提出地下水合理开发利用方案。

收稿日期: 2008-01-03; 修稿日期: 2008-01-29

作者简介: 丁飞(1979-), 男(汉族), 安徽省望江县人, 在读硕士, 研究方向: 水资源管理与评价。

1 研究区水文地质概况

石佛寺库区(图1)位于下辽河断陷平原辽河冲洪积扇的中部,地貌成因类型上属于堆积地形,包括漫滩区、一级阶地及湖沼洼地,区内第四系冲洪积层广泛发育。库区内主要含水层岩性为中粗砂、砾砂与圆砾层。根据区内的地形地貌及含水层的分布、埋藏条件,富水性、水头性质等特征将库内划分为两个水文地质分区:

(1) 强富水区。位于辽河低漫滩,地下水类型为孔隙潜水。含水层厚约40 m,渗透系数 $K=70\sim 100$ m/d,单位涌水量 $q=1\ 000\sim 2\ 000$ m³/(d·m)。以辽河侧向补给为主,地下水动态为水文型。

(2) 中等富水区。分布一级阶地上,地下水类型为浅层承压水。含水层厚15~27 m,渗透系数 $K=50\sim 70$ m/d, $q=600\sim 1\ 000$ m³/(d·m)。地下水补给源有河流入渗、地下径流、稻田入渗、降水入渗等,其排泄以人工开采为主,地下径流排泄、蒸发为辅,地下水动态为气象一开采型。

该区地下水动态特征为每年有两个峰值:第一个峰值出现在每年8月、9月,此时为降雨入渗补给输入较强的丰水期;第二个峰值出现在次年2月、3月份,为雪水融化渗入补给,峰值较小。最低水位出现在每年的5~7月,地下水的年变幅一般为0.5~3.0 m。

2 水文地质概化模型的建立

(1) 模拟区确定:模拟计算的范围为南侧从高坎一达连屯一腰中台一龙岗子,距水库大坝约1.6 km,西北边从后屯到北甸子,距大坝约2.5 km,东北边从西小河到白沙坨子。面积89.72 km²。

(2) 含水层类型的确定:根据含水层的类型、岩性、厚度、导水特征等,将模型概化为非均质各向同性含水层,局部可视为均质。

(3) 地下水流的概化:计算区地下水位受枯水期影响有一定变化,水流呈非稳定状态,但总体上区域地下水为层流运动,水流符合达西定律,全区可视为非稳定二维平面流。

(4) 模拟区边界类型的划分:以变水头边界来考虑,主要用9个点来控制,分别为南岸的葛三家子、达连、腰中台、龙岗子、北岸的细水河、白沙坨子、陈平、北甸子、后屯。并利用1980~2000年的降雨量和同期的历史水位来推测出蓄水后未来十年水位。

3 地下水系统水流模拟模型的建立

由前述地下水系统的概念模型,可建立本研究区潜水系统地下水运动的数学模型。

$$\mu \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} [K(h-z) \frac{\partial h}{\partial x}] + \frac{\partial}{\partial y} [K(h-z) \frac{\partial h}{\partial y}] + W(x,y,t) - \sum_{j=1}^m Q_j \sigma(x-x_j, y-y_j) \quad (1)$$

$$x, y \in G$$

$$h(x, y, t)_{t=0} = h_0(x, y, t)$$

$$h(x, y, t)|_{\Gamma_1} = h_1(x, y, t) \quad \Gamma_1 \in G$$

$$K \frac{\partial H}{\partial n} \Big|_{\Gamma_2} = \frac{K_1}{m_1} (H_n - H) \quad \Gamma_2 \in G$$

式中: x, y 为空间坐标,m; $K(x, y)$ 为渗透系数,m/d; μ 为潜水给水度; t 为时间变量,d; $W(x, y, t)$ 为垂向补排强度,m/d; $Q(x_j, y_j, t)$ 为 t 时第 j 号井抽水量,m³/d; z 为含水层底板标高,m; $h(x, y, t)$ 为地下水待求水位,m; $h_0(x, y, t)$ 为渗流场内初始水位值,m; $h_1(x, y, t)$ 为第一类边界水位值,m; K_1 和 m_1 为河岸边弱透水层的渗透系数和厚度,m/d和m; n 为第二类边界内法线方向单位向量; H 为边界内侧地下水的水位; H_n 为边界外侧的河水位。

4 地下水系统水流的数值模拟及预测

本次数值模拟计算的方法采用的是有限单元法,选用Visaul Moldflow软件模拟计算。

(1) 计算区的剖分:根据区内流场特征、系统的结构特征、水力特征和边界条件,将全区剖分为58行,80列,见图2。

(2) 计算时段的确定:根据该区地下水长期观测资料情况,考虑区内地下水位的年和年际变化,选定2006年10月26日为模拟的起始时间,2016年9月30日为预测终止时间,即3657天。其中2006年10月26日到2007年4月30日,为平水期,主要用于校正水文地质参数、边界性质和各项补、排量验证,即模拟模型的识别。每个水文年分24个计算时段,其中每年1月~3月以及10月~12月按月划分时段,4月~9月按旬划分时段。

(3) 参数划分和水文地质参数初值的确定:根据参数分布规律和渗流场之特征,渗透系数和给水度分为四个区,以辽河为界,南、北岸名分两个区,南岸以漫滩区和阶地分界线为界,北岸以拉马河为界。见各区参数值表1。

(4) 降雨分区分为5个区,北岸分为两个区同渗透系数分区,南岸分为阶地区、库内蓄水区 and 蓄水

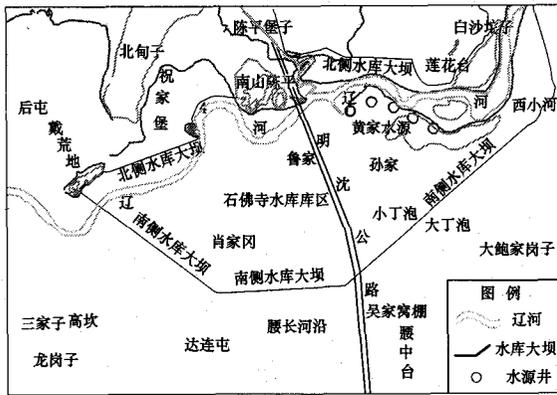


图 1 系统概况简图

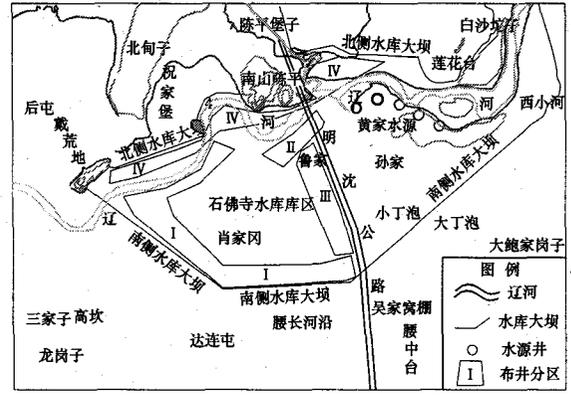


图 2 布井分区图

表 1 各区参数值表 m/d

分区	1	2	3	4
渗透系数 K	45	50	60	50
给水度 μ	0.18	0.18	0.25	0.18

区之外的漫滩区,各区降雨入渗系数见表 2。蒸发按蒸发强度分配到各区,极限蒸发深度以 4.5 m 来考虑。

表 2 各区参数值表 m/d

分区	1	2	3	4	5
降雨入渗系数	0.12	0.15	0.18	0.18	0.12

(5) 地下水系统模拟的识别和验证。模拟模型的识别就是用地下水系统的实际输入量(项)影响模拟后,运行模型做出响应(输出),并将其与实际观测的响应进行对比。经反复改进和修正,使二者达最大程度之拟合。为此,选用 2006 年 10 月 26 日全区的统测水位作为识别的初始流场、以 2007 年 4 月 30 日的实测地下水位作为对比流场。本次计算采用先正演拟合水位间接校正参数的方法。即根据 2006 年 10 月 26 日到 2007 年 4 月 30 日期间,地下水系统各输入项资料和表中给出的参数初值,运行模拟模型,求解全各计算节点水位。如果计算水位与实测水位相差较大,则根据参数的变化范围和实际水位差值,再试给一组参数,直至两者拟合较好止。这时所选用的一组参数即为校正后所求的参数。模拟模型校正参数详见表 3。

表 3 模拟模型校正参数表 m/d

参数名称	1	2	3	4
渗透系数 K	45	50	60	50
给水度 μ	0.18	0.18	0.25	0.18

(6) 水库不同蓄水高度情形时的布井取水方案。布井方案是在保持现有黄家市政水源开采布局和开采能力 $4.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,未来农业布局保持 2006 年现状条件,分别对水库蓄水 46.0 m、46.5 m 和 47.0 m 高度分别设计布井方案,并且考虑不对库外产生影响的基础上设计的布井方案。布井位置见图 2,井数及单井出水量及表 4。

表 4 井数及单井出水量 m^3/d

蓄水高度	I		II		III		IV	
	井数	单井出水量	井数	单井出水量	井数	单井出水量	井数	单井出水量
46.0	19	3 900	4	4 000	24	3 500	14	4 000
46.5	20	3 900	4	4 000	24	3 500	17	4 000
47.0	20	3 900	4	4 000	24	3 500	17	4 000

5 预报结果及分析

经过识别后的数学模型,即可作为模拟计算的正式模型。经计算石佛寺地区地下水开采量以及多年均衡量见表 5。

表 5 计算结果表 $\text{m}^3/\text{d}, \text{m}^3$

蓄水高度	水源开采量	总补给量	总排泄量	总均衡量
46.0	27.51	1248236800	1248239232	-2432
46.5	29.10	1339990016	1339991936	-1920
47.0	29.10	1399064960	1399069312	-4352

注:表中模拟时间为 2006 年 10 月 26 日至 2016 年 9 月 30 日。由于总共为 10 年,数据太多,所以各年预测值不一列出。

(1) 由表 5 可见区内地下水补给量和消耗量基本上是平衡的。

(2) 地下水储存量的补给和消耗多年是变化的,而且每年不同时期地下水储存量的补给和消耗

(下转第 84 页)

而增大,并且两者较好地符合对数关系。土壤全盐含量对吸持作用产生了较大影响,这对土壤水的物理行为和运动必将产生影响。全盐含量增大使土壤溶

液浓度增大,土壤溶液浓度增大会使得土壤水渗透势降低,这种水势的降低使作物吸收水分难度加大,使土壤中的作物可利用的有效水分减少。

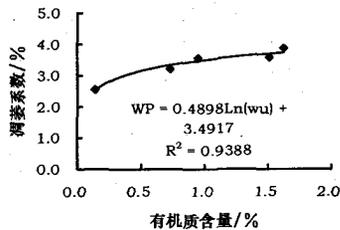


图4 42% < PHC < 45%、0.50g/kg < PTS < 0.70g/kg 时凋萎系数与物理性粘粒含量的关系

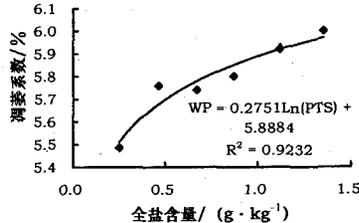


图5 28% < PHC < 30%、0.30% < wu < 0.50% 时,凋萎系数与土壤全盐含量的关系

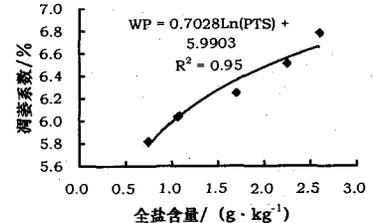


图6 47.5% < PHC < 48%、0.60% < wu < 0.80% 时,凋萎系数与土壤全盐含量的关系

(2) 随着土壤物理性粘粒含量和有机质的增加,拟合所得公式对数的系数越来越大,说明土壤的物理性粘粒含量和有机质越大,全盐含量对凋萎系数的影响越大。土壤全盐含量增大,土粒表面土壤水势降低,土粒表面水膜厚度增加,也就使得土壤的凋萎系数增大。土壤物理性粘粒含量越大,土壤的比表面积就越大,增加相同水膜厚度增加的水量越大。土壤有机质含量变大,土粒吸湿的水量也变大。

3 结 语

土壤的凋萎系数主要受土壤质地、有机质含量和土壤全盐含量的影响。土壤凋萎系数随着土壤物理性粘粒含量的变大而变大,且两者较好的符合线

性关系;土壤凋萎系数随着土壤有机质含量的变大而变大,且两者较好的符合对数关系;土壤凋萎系数随着土壤全盐含量的变大而变大,且两者较好的符合对数关系。本文以指导农业生产为目的,仅就土壤凋萎系数的影响作出定性探讨,欲用土壤物理参数确定土壤凋萎系数需进一步研究。

参考文献:

- [1] 张明炷. 土壤学与农作学[M]. 北京:中国水利水电出版社,1994.
- [2] SL-1999 土工试验规程[S]. 1999. 3.
- [3] 李小刚. 甘肃景电灌区盐化土壤的吸湿系数与凋萎湿度及其预报模型[J]. 土壤学报, 2001, 38(4):498-504.

(上接第81页)

也是变化的。在每年的汛期(6月1日~9月10日)由于水库不蓄水,此时需要依靠地下水储存量的调节作用来弥补消耗量,而所消耗的储存量基本上能在蓄水时期得到补偿。

(3) 每年蓄水期10~12月水库渗漏补给量大,其次为5~6月,1~4月相对小;不蓄水期7~9月水库渗漏补给量比较小。

(4) 蓄水46.0 m、46.5 m和47.0 m时布井供水后,辽河北岸库外地下水位基本与现状地下水位持平,水库大坝南侧地下水位比现状地下水位低1~2 m。

6 结 语

(1) 通过在石佛寺水库地区地表、地下水数值模拟中的应用研究,表明 Visual MODFLOW 在平原型水库数值模拟中操作方便,预报准确可靠,功能

强劲,具有广泛的应用和推广前景。

(2) 在综合考虑数值模拟的预报结果以及区域以往的开采资料的基础上,认为本区在原有潜水开采量为 $4.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的基础上,新增潜水设计开采量 $24.6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 是具有补给保证的。

参考文献:

- [1] 潘俊,陈欣,孙才志. 年调节平原型水库与地下水联合调蓄分析[J]. 水文地质工程地质, 2004, (2):67-71.
- [2] 李文跃,张博,洪梅,等. Visual MODFLOW 在大庆龙西地区地下水数值模拟中的应用[J]. 世界地质, 2003, 22(2):161-165.
- [3] 孙纳正. 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.
- [4] 李宏卿,吴琼,张福林,等. Visual MODFLOW 在建立长春市地下水开采预警系统中的应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2003, (3):56-59.