

Visual MODFLOW 在李官堡水源地水流模拟中的应用

无芳¹, 迟宝明¹, 易树平¹, 吴法伟²

(1. 吉林大学 环境与资源学院, 吉林 长春 130026; 2. 辽宁水文水资源勘测局, 沈阳 110003)

摘 要: 数值模拟方法目前是模拟地下水流动和评价地下水资源量的主要技术方法之一。Visual MODFLOW 软件具有系统化和可视化的突出特点, 因此应用该软件建立地下水系统的数学模型, 对沈阳市李官堡水源地的水流情况进行了模拟和预测。模拟结果表明, 该水源地为建设项目提供所需的 $9.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 水量是可行的。模型的建立对傍河型水源地的建设和开采水量的预测有一定的借鉴价值。

关键词: Visual MODFLOW; 李官堡水源地; 数值模拟

中图分类号: P331

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2006)05-0099-04

The Application of Visual MODFLOW Software in the Water Flow Simulation for Liguangu Water Source Area

DING Yuan-fang¹, CHI Bao-ming¹, YI Shu-ping¹, WU Fa-wei²

(1. College of Environment & Resources, Jilin University, Changchun 130026, China;

2. Hydrology & Water Resource Survey Bureau of Liaoning Province, Shenyang 110003, China)

Abstract: At present, the numerical simulation method is one of the main technique methods that simulate the groundwater flow and evaluate the groundwater resources quantity. The Visual MODFLOW software has the outstanding characteristics such as systematism and vision. So the software is applied to set up mathematical model of groundwater system, in order to simulate and predict the water flow circumstance of the Liguangu water source area in Shenyang city. The outcomes of simulation show that it is feasible to provide the needed water for the project. The model establishment has application meaning in a way for building the groundwater resource area along river and estimation of groundwater mining quantity.

Key words: Visual MODFLOW; Liguangu water source area; numerical simulation

Visual MODFLOW 的英文全称是 Visual Modular Three-dimensional Finite-difference Groundwater flow model (可视化三维有限差分地下水水流模型), 该软件由加拿大 Waterloo 水文地质公司在美国地质调查局 80 年代开发的 MODFLOW 软件的基础上开发研制的, 并于 1994 年 8 月首次在国际上公开发售^[1]。从开发至今在科研、生产、工业、环保、城乡规划、水资源利用等许多行业和部门得到了广泛的应用, 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。与其他数值模拟软件相比, 其突出特点是: (1) 系统化。在数值模拟过程中, 把各个步骤紧密地连接起来, 从开始建模、输入和修改各类水文地质参数与几何参数、运行模型、反演校正参数一直到现实输出结果, 使整个过程从头到尾系统化、规范化^[2]; (2) 可视化。可视化技术是展示分析数值模拟过程和最终结果的强有力的工具, Visual MODFLOW 很好地体现了这项技术在地下水数值模拟评价过程中的应用效果。因此, 利用 Visual MODFLOW 软件定量研究沈阳市李官堡水源地的开采水量。

李官堡水源地始建于 1958 年, 设计供水能力为 $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。由于沈阳市工业布局的调整, 该水源地的开采量由 2000 年前的 $15.4 \sim 22.2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 锐减到 2002 年的 $5.7 \times$

$10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。此外, 由于辽宁省“东水西调”工程的实施, 引入浑江水, 使大伙房水库增容。沈阳大伙房输水配套工程在 2008 年供水后, 利用分配给沈阳市的 $222 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的水量, 替换包括李官堡在内的浑河沿岸水质相对较差的水源, 替换后的水源作为其它用水或储备水源。因此, 欲将李官堡水源作为新市一建设项目的供水水源, 该项目于 2007 年底建成投产。由于李官堡水源地已运行 40 多年, 实际开采能力已不能达到设计供水能力, 为避免破坏浑河流域水资源生态平衡, 重新计算论证该水源地是否能满足建设项目所需的 $9.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的生产用水需求。

1 研究区概况

李官堡水源地位于沈阳市区的西南部, 浑河北岸, 属于傍河型水源地^[3]。研究区范围为西至沈大高速公路以西, 西北至辽沈路附近, 东部至铁路线, 南至浑河北岸, 面积为 37.84 km^2 (图 1)。本区属于北温带受季风影响的半湿润大陆性气候, 多年平均降水量为 671.6 mm/a , 丰枯水期交替出现, 年内降水多集中在 5~9 月, 该时段降水量占全年的 80% 左右^[4]。

浑河流经沈阳城区, 河床由砂砾石、砂卵石组成。李官堡水源地分布于浑河的河漫滩地带, 地面标高在 35~40 m

* 收稿日期: 2005-10-09

作者简介: 无芳(1981-), 男, 吉林汪清人, 硕士研究生, 从事地下水信息化研究。

之间,地形从东南向西北缓慢倾斜。目标含水层总厚度约 80 m 左右,地表覆盖厚约 4 m 的亚砂土或亚黏土,下伏第三系泥岩构成隔水底板。含水系统在垂向上可概化为冲积、冲洪积孔隙潜水和坡洪积、冰水沉积孔隙微承压水两类亚系统(图 2)。孔隙潜水分布于浑河河漫滩的中上部,孔隙微承压水下伏于孔隙潜亚系统下部,两者之间并无严格的界线。孔隙潜水含水介质为砂砾石、砂卵石,厚 34~ 43 m,局部有不连续的亚黏土透镜体;地下水位埋深 5~ 10 m,近浑河地带较浅;渗透系数 50~ 80 m/d。孔隙微承压水含水介质为半胶结砂砾、砂卵石夹黏土含水层,局部为砂砾石层,厚 40 m 左右;地下水位与潜亚系统统一;渗透系数 5~ 10 m/d。

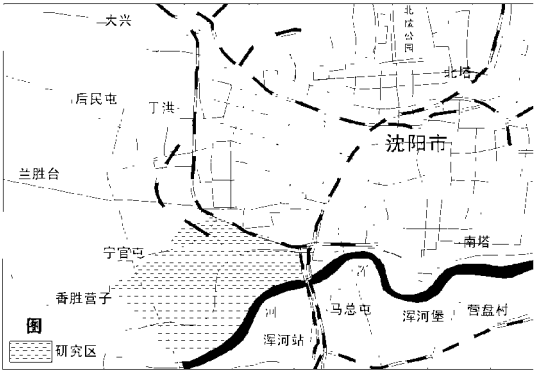


图 1 研究区位置图

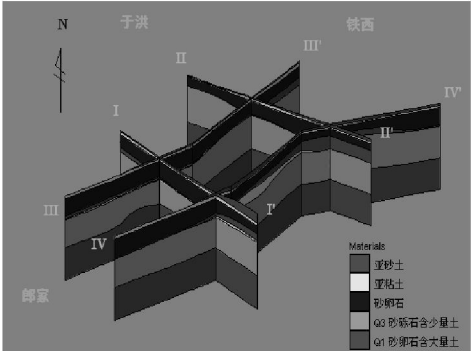
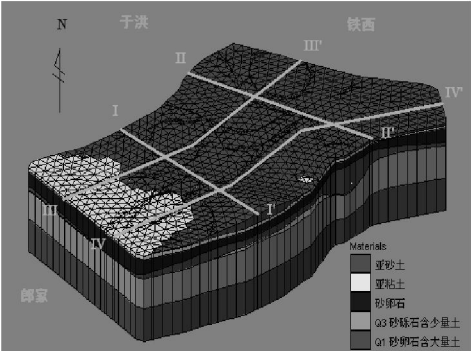


图 2 李官堡水源地含水系统示意图(左)和剖面透视图(右)

2 模型建立

2.1 水文地质概念模型的建立^[5]

(1) 含水系统结构的概化: 含水系统的两个亚系统之间无连续、稳定的隔水层, 相互间水力联系密切, 并且具有统一的地下水位; 含水层岩性相对较单一, 以砂砾石、砂卵石夹黏土为主, 故可将含水系统概化为非均质各向同性。

(2) 水动力条件的概化: 研究区含水层厚度大且遍布全区, 地下水的运移符合达西定律, 因此地下水运移可视为二维非稳定流。

(3) 边界条件的概化: 垂向边界: 上部边界为潜水面, 是位置不断变化的水量交换边界; 下部边界第三系泥岩顶板为界, 概化为隔水边界。 侧向边界: 南部浑河为常年性河流, 且由于下游水闸的存在, 流量、水位较稳定, 概化为一类水头边界; 东北部和西南部接受地下水和河流冲洪积扇群第四系潜流的侧向补给, 故概化为二类流量边界; 西北部以李官堡水源地与于洪水源地之间的地下分水岭为界, 概化为零流量边界。

(4) 源汇项的概化: 补给项: 浑河河水的垂向渗漏和侧向补给, 是水源地最主要的补给源; 另外尚有地下水的侧向补给和降雨入渗; 排泄项: 以人工开采量为主, 还有西南方向的侧向流出量; 由于大量人工开采导致区内地下水位埋深较大, 在 6~ 10 m 之间, 蒸发量接近于零。

2.2 数学模型的建立

根据上述水文地质概念模型, 可建立本区的数学模型, 如下式所示:

$$\left\{ \begin{aligned} &\frac{\partial}{\partial x} \left[K(h-B) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K(h-B) \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \varepsilon_1(x, y, t) - \varepsilon_2(x, y, t) = \mu \frac{\partial h}{\partial t} \quad (x, y) \in D, t \geq 0 \\ &h(x, y, 0) = h_0(x, y) \quad (x, y) \in D \\ &h(x, y, t)|_{\Gamma_1} = h_1(x, y, t) \quad (x, y) \in \Gamma_1, t \geq 0 \\ &K(h-B) \frac{\partial h}{\partial n} \Big|_{\Gamma_2} = q(x, y, t) \quad (x, y) \in \Gamma_2, t \geq 0 \end{aligned} \right.$$

式中: h ——地下水位(m); B ——含水层底板标高(m); $\varepsilon_1(x, y, t)$, $\varepsilon_2(x, y, t)$ ——含水层的补给强度和排泄强度(m/d); $q(x, y, t)$ ——第二类边界单宽流量(m²/d); K ——渗透系数(m/d); $h_0(x, y)$ ——初始水位(m); $h_1(x, y, t)$ ——第一类边界点水位(m); μ ——潜水含水层储水系数(给水度); n ——内法线。

2.3 模型的离散和资料的处理

利用 Visual MODFLOW 软件对于数学模型进行求解, 具体处理如下:

(1) 研究区的剖分(空间离散)。考虑计算区范围和精度的要求, 采用等间距有限差分的离散方法, 进行自动矩形网格剖分, 共剖分矩形网格单元 5 402 个, 每个单元面积为 80.00 m× 129.00 m, 垂向剖分 1 层, 其中有效单元 3 670 个, 有效计算区面积为 37.87 km²(图 3)。

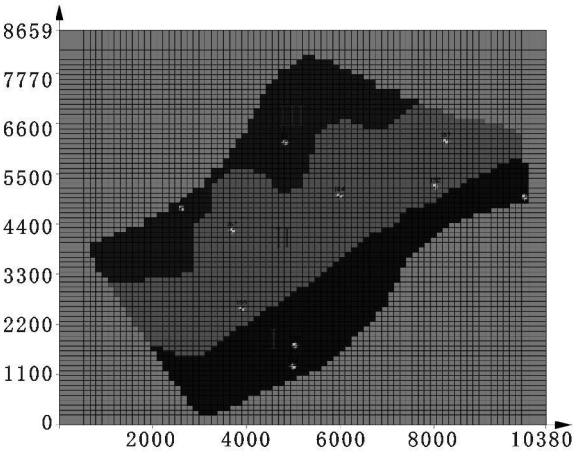


图 3 计算区矩形剖分及参数分区图

(2) 计算时段的确定(时间离散)。根据该计算区抽水井和观测井的水位观测资料, 考虑区内地下水位的年和年际

变化,确定模拟期为 2002 年 2 月 15 日到 2003 年 9 月 15 日,预测终止时间为 2013 年 12 月 31 日。其中选取 2002 年 2 月 15 日到 2003 年 5 月 15 日进行数学模型的识别;选取 2003 年 5 月 16 日到 2003 年 9 月 15 日(丰水期)进行数学模型的验证;选取 2004 年 1 月 1 日到 2013 年 12 月 31 日进行开采预测。

(3) 参数分区和水文地质参数初值的确定。水文地质参数是水文地质模型成败的关键,它的正确性与合理性直接关系到模型的准确性和可信度^[6]。根据水文地质条件,将研究区分为 3 个参数区(图 3)。计算时所选的参数有渗透系数、给水度、降雨入渗系数。渗透系数和给水度的值主要根据区内抽水试验计算成果来确定,根据区内岩性的空间分布规律,渗透系数采用水流平行界面的等效渗透系数公式来计算^[7]。降水入渗系数取用当地经验值(表 1)。

(4) 模型输入。边界和源汇项采用模型的相应模块来输入。由于浑河下游水闸的作用,自然状态下水位变化不明显,计算丰、枯水期的平均水位,采用 Visual MODFLOW 中的定水头(CHD)模块输入;侧向流量通过单宽流量计算,利用补给(Recharge)模块输入;降雨补给采用有效降水量,利用补给模块(Recharge)输入;研究区内 48 眼开采井在计算时按其分布处理为单井,将地下水开采量分配到相应的计算单元上,采用井(Well)模块输入。

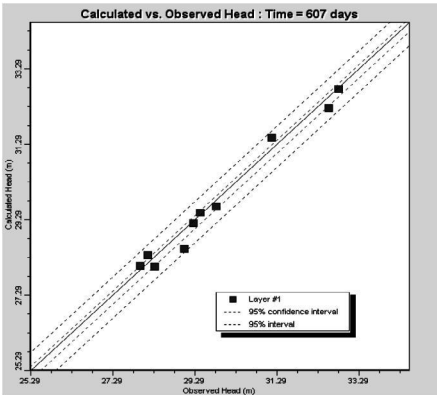
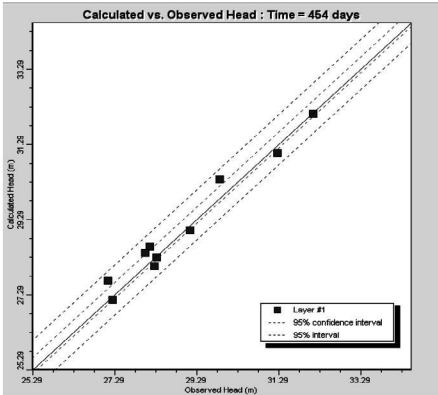


图 4 模型识别(左)和验证(右)水位拟合图

通过对地下水水位、流场与源汇项等方面的拟合统计分析,拟合误差基本在合理范围之内,说明含水层结构、边界条件概化、水文地质参数的选取及源汇项的选取基本上是合理的,所建立的数学模型较为真实地刻画了研究区地下水系统的特征,仿真性强,可以运用该模型进行地下水流系统的预报。

4 模型预测

此次模型预测在 75% 的降水保证率(586.1 mm)的基础

3 模型识别和验证

用 2002 年 2 月 15 日研究区的观测流场作为模型识别的初始流场,输入各项所需数据,运行模型。通过调整参数,从水位、流场、水均衡等多方面进行拟合,使各项拟合同时达到较好为止,获得水文地质参数的识别值(表 1)。如在水位拟合中(图 4),选取了 10 个代表性的观测点,水位拟合的最大误差绝对值为 0.546 m,平均误差绝对值为 0.245 m。

表 1 李官堡水源地水文地质参数

分区	$k/(\text{m} \cdot \text{d}^{-1})$		μ		α	
	初始值	识别值	初始值	识别值	初始值	识别值
I 区	39.92	40.55	0.15	0.14	0.16	0.16
II 区	30.01	29.58	0.13	0.13	0.14	0.14
III 区	25.30	22.29	0.11	0.11	0.12	0.12

注: k 为渗透系数, μ 为给水度, α 为降雨入渗系数。

为进一步验证所建立的数学模型和模型参数的可靠性,利用 2003 年 5 月 15 日~ 2003 年 9 月 15 日丰水时段的地下水位动态观测资料对数学模型进行验证。模型验证时段的主要补给来源为降水入渗和侧向径流补给等,河流边界取多年丰水期平均水位;排泄主要为人工开采。其中,模型验证末水位拟合结果(图 4),最大误差绝对值为 0.519 m,平均误差绝对值为 0.199 m。

上进行,人工开采量值取项目论证所需的 $9.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的水量,其它各项仍按模型识别时的输入。

4.1 现状开采预测

保持现有的开采井布局,并维持 $9.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 开采量的情况下,进行数值模拟,运行模型至 2013 年,预测 2004 年至 2013 年各枯、丰水期的地下水位变化趋势。提取 2004、2007、2010、2013 年末刻预测流场(图 5、图 6、图 7、图 8)。

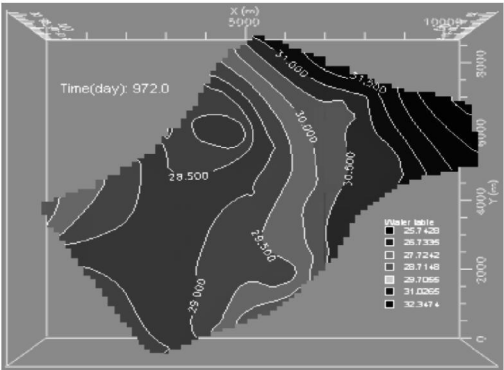


图 5 2004 年末刻预测流场

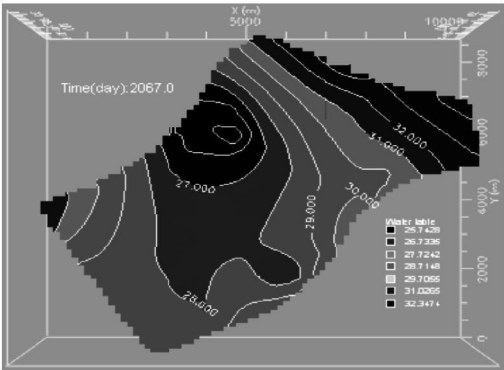


图 6 2007 年末刻预测流场

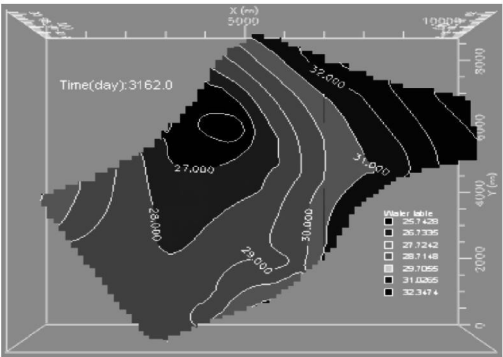


图 7 2010 年末刻预测流场

由于该水源地 2003 年的实际开采量为 $6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 增大开采至 $9.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 水位持续下降。从预测流场图的可看出, 水位的总体趋势先下降后缓慢上升。可以推知开采量小于等于天然补给量与补给增量之和, 在此开采量条件下, 水源地的开采动态类型属于稳定型。因此, 该水源地虽已运行多年, 设计可开采量有所下降, 但仍然满足建设项目所需的水量, 不会产生严重的环境生态问题。

4.2 优化开采预测

由现状开采布局的预测图可以看出, 在研究区的西北部出现了开采漏斗, 最大降深近 20 m。为减少降落漏斗所产生的影响, 调整现有开采井的布局, 关闭漏斗中心处的若干开采井, 在东北和西北增加若干开采井, 在调整开采井布局的基础上进行模拟预测。选取多次调整模拟中较好的布局 (图 9), 仍维持 $9.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 开采量的情况下, 进行预测。提取 2004、2007、2010、2013 年末刻预测流场 (图 10、图 11、

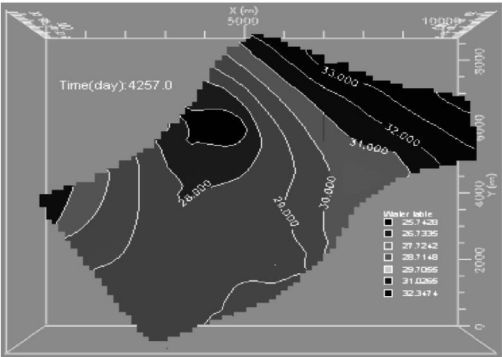


图 8 2013 年末刻预测流场

图 12、图 13)。

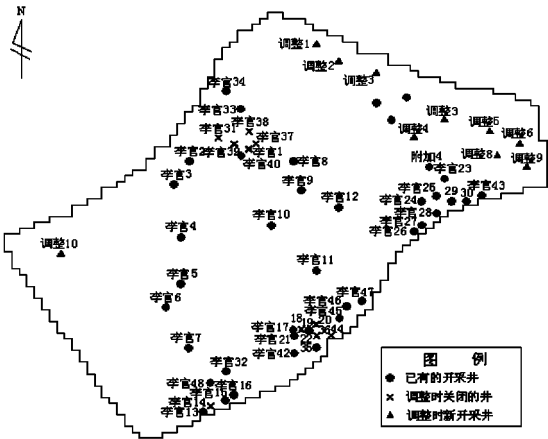


图 9 调整开采井布局图

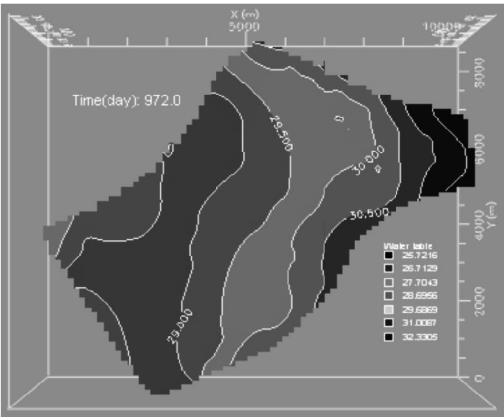


图 10 2004 年末刻预测流场

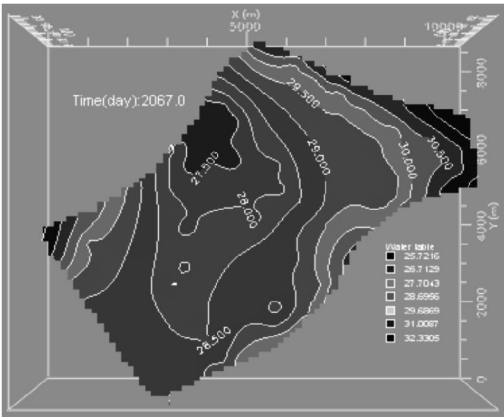


图 11 2007 年末刻预测流场

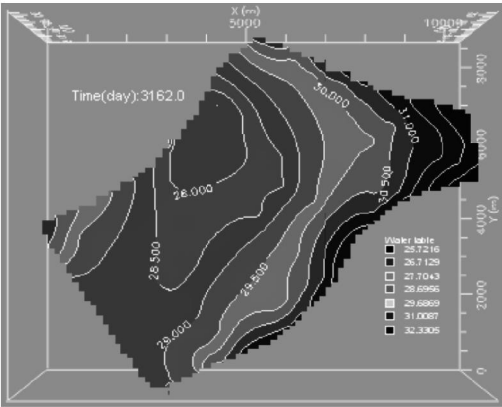


图 12 2010 年末刻预测流场

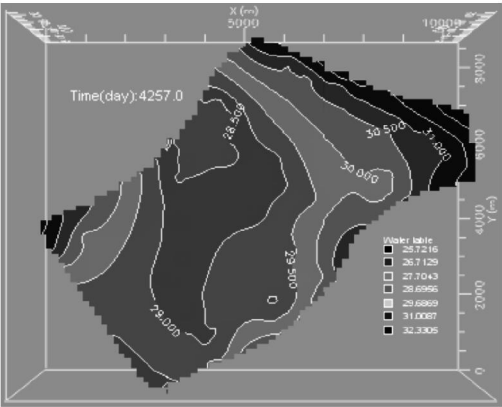


图 13 2013 年末刻预测流场

感数据(如 SPOT 数据)结合, 建立像元分离模型。

(3) 多种模型的集成: 不同的情况下, 应该根据实际情况

选择适合需要的模型。但若能将两个或者两个以上的方法进
行混合利用, 取长补短, 也许会使分解精度得到进一步提高。

参考文献:

[1] 朱述龙. 基于混合像元的遥感图像分类技术[J]. 解放军测绘学院学报, 1995, 12(4): 226– 229.

[2] 陶秋香. 非线性混合光谱模型及植被高光谱遥感分类若干问题研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2004.

[3] 陈述彭, 童庆喜, 郭华东. 遥感信息机理研究[M]. 北京: 科学出版社, 1998. 201– 212.

[4] 李郁竹. 农作物气象卫星遥感监测和估产研究进展和前景探讨[J]. 气象科技, 1997, (3): 29– 43.

[5] 桂预风, 张继贤, 林宗坚. 土地利用遥感动态监测中混合像元的分解方法研究[J]. 遥感信息, 2000, (2): 18– 21.

[6] 吴波, 张良培, 李平湘. 非监督正交子空间投影的高光谱混合像元自动分解[J]. 中国图象图形学报, 2004, 9(11): 1392– 1396.

[7] 毛克彪, 覃志豪, 张万昌. 针对 ETM 基于 BP 网络像元分解模型分类研究[J]. 遥感信息, 2004, (2): 27– 30.

[8] 霍东民, 刘高焕, 骆剑承. 基于 PCM 改进算法的遥感混合像元模拟分析[J]. 遥感学报, 2005, 9(2): 131– 136.

[9] Charles Ichoku, Arnon Karnieli. A review of mixture modeling techniques for sub-pixel land cover estimation[J]. Remote Sensing Reviews, 1996, 13: 161– 186.

[10] 陶秋香, 赵长胜, 张连蓬. 植被高光谱遥感分类中一种新的非线性混合光谱模型及其解算方法[J]. 矿山测量, 2004, (1): 28– 31.

[11] Marsh, S E, Switzer, P, Kowalik, W S, et al. Resolving the percentage of component terrains within single resolution elements[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1980, 46(8): 1079– 1086.

[12] Wang, F. Fuzzy supervised classification of remote sensing images[J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 1990, 16(1): 194– 201.

[13] 李剑萍, 郑有飞. 气象卫星混合像元分解研究综述[J]. 中国农业气象, 2000, 21(2): 44– 47.

[14] 马超飞, 马建文, 布和敖斯尔. USLE 模型中植被覆盖因子的遥感数据定量估算[J]. 水土保持通报, 2001, 21(4): 6– 9.

[15] Dengsheng Lu, E M, Matus Batistella. Linear mixture model applied to Amazonian vegetation classification[J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 87: 456– 469.

[16] 王喜鹏, 张羊贞. 应用神经网络模型分解 AVHRR 混合像元[J]. 遥感学报, 1998, 2(1): 51– 56.

[17] 桂预风, 张继贤, 林宗坚, 宣文玲. 基于灰神经网络理论的混合像元分解方法研究[J]. 遥感信息, 2000, (4): 27– 28.

[18] 范闻捷, 徐希孺. 混合像元组分信息的盲分解方法[J]. 自然科学进展, 2005, 15(8): 993– 1000.

[19] G I Metternicht, A Fermont. Estimating Erosion Surface Features by Linear Mixture Modeling [J]. Remote Sensing of Environment, 1998, 64: 254– 265.

[20] Allan Aasbjerg Nielsen. Spectral Mixture Analysis: Linear and Semi-parametric Full and Iterated Partial Unmixing in Multi- and Hyperspectral Image Data[J]. Mathematical and Vision, 2001, 15: 17– 37.

[21] X. Zhou, S. Folving. Application of spectral mixture modelling to the regional assessment of land degradation: a case study from basilicata, Italy [J]. Land Degradation & Rehabilitation, 1994, 5: 215– 222.

[22] 陶秋香, 陶华学, 张连蓬. 线形混合光谱模型在植被高光谱遥感分类中的应用研究[J]. 勘察科学技术, 2004, (1): 21– 24.

(上接第 102 页)

和现状开采情况预测流场图相比, 适当调整开采井的布局后, 地下水位下降趋势比较平缓, 开采漏斗也不十分明显。预测末期, 地下水位大体维持在预报初期的水位。

MODFLOW 软件的广泛应用表明, 利用它进行模拟, 能较为真实地反映地下水流的实际情况, 可以为水源地的开采提供一种可视化的结果, 更好的规划水资源的合理利用。

5 结 论

(1) 通过使用 Visual MODFLOW 软件对李官堡水源地进行数值模拟, 展现其系统化结构、快捷化操作、模块化输入、可视化显示等特点, 是进行地下水数值模拟的有力工具。

(2) 使用 Visual MODFLOW 软件进行模拟时, 对水文

地质条件的概化和各项参数的选取, 直接影响着所建模型的准确性和可信度。

(3) 模型识别时, 注意调整后的参数是否能反映含水层的实际性质, 为拟合而拟合的做法是应当避免的; 数值模拟的目的在于预测和应用, 伪拟合的模型不可能达到目的, 也就没有利用的价值。

(4) 现状开采条件下, 李官堡水源地能够满足提供 $9.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的水量, 并且不会产生严重的环境地质问题。因此, 从数量上说, 用该水源地来提供建设项目所需的水量是可行的。同时重新优化调整开采井的布局, 避免开采漏斗的扩大, 维持水源地的良性运转。

参考文献:

[1] 丁继红, 周德亮, 马生忠. 国外地下水模拟软件的发展现状与趋势[J]. 勘察科学技术, 2002, (1): 37– 42.

[2] 王宏, 姜华君, 邹立芝. Modflow 在华北平原区地下水库模拟中的应用[J]. 世界地质, 2003, 22(1): 69– 72.

[3] 戴长雷, 迟宝明, 陈鸿雁. 傍河型地下水水源地论证[J]. 工程勘察, 2005, (2): 26– 32.

[4] 杨维, 丁斌, 王恩德, 等. 地下水傍河水源地数值模拟[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2004, 20(4): 325– 328.

[5] 房佩贤, 卫中鼎, 廖资生. 专门水文地质学[M]. 北京: 地质出版社, 1996. 104– 113.

[6] 韩志勇, 郑西来, 林国庆. 大沽河下游地区地下咸水恢复方案的数值分析[J]. 工程勘察, 2004, (6): 25– 29.

[7] 李同斌, 邹立芝. 地下水动力学[M]. 长春: 吉林大学出版社, 1995. 14.