

地下水数值模拟及地下水漏斗可视化研究实例

黄修东, 束龙仓

(河海大学水文水资源学院, 南京 210098)

摘要: 根据济宁市漏斗区的地质及水文地质条件, 利用地下水数值模拟软件 Visual MODFLOW 建立了研究区地下水流模拟模型, 并依据数值模拟的计算结果, 利用可视化语言 IDL 对研究区地下水流场进行了可视化显示和分析。结果表明: 将地下水流场的可视化与地下水数值模拟相结合, 能够提高地下水数值模拟的可视化水平, 得到更直观、更深层次的地下水流场信息, 为地下水资源开采决策提供必要的地下水动力场信息。

关键词: 地下水位降落漏斗; Visual MODFLOW; 数值模拟; 可视化; IDL

中图分类号: P641.2

文献标识码: A

Abstract: Based on the analysis of geological and hydrogeological conditions in the cone of depression, Jining City, groundwater flow numerical model was established in the paper. According to the results of the numerical simulation, the groundwater flow field is visualized and analyzed by using IDL. The result shows that the combination of groundwater flow field visualization and groundwater numerical simulation can improve the visualization method of groundwater numerical simulation and provide more intuitionistic and deeper information of groundwater flow field, which are very necessary for decision making of groundwater resources development.

Key words: cone of depression; Visual MODFLOW; numerical simulation; visualization; IDL

0 引言

地下水数值模拟软件提供了强大的数值模型计算功能, 前后处理能力也逐渐增强, 但是对于计算结果的可视化方面仍不能较好地满足研究者的要求, 而有关地下水流场可视化的研究则普遍缺乏与数值模型的有效结合^[1]。本文根据济宁市漏斗区的地质及水文地质条件, 利用地下水模拟软件 Visual MODFLOW 建立了研究区地下水流模拟模型, 并依据数值模拟的计算结果, 利用可视化语言 IDL 对研究区地下水流场进行了可视化显示和分析。IDL (Interactive Data Language) 是美国 RSI 公司 (Research system Inc) 的产品, 是对科学数据进行获取、可视化显示、分析及应用开发的理想软件工具, 目前, IDL 已被广泛的应用在地形环境虚拟仿真, 数据可视化分析, 医学影像, 应用开发等方面^[3, 5]。

1 研究区概况

地下水源是济宁市的主要供水水源, 城市的工业多集中于市区, 再加上长期过量地开采地下水, 地下水水位持续下降, 已形成了较大规模的以城市为中心的地下水水位降落漏斗。

本文研究以济宁市区为中心, 即地下水水位降

落漏斗的中心所在地, 以 2001 年平均潜水等水位线为依据, 大致沿 30m 标高的等水位线为边界。南边到南四湖北端的小北湖, 北部到南站镇、新驿镇附近, 西边到安居镇, 东边界沿接庄—黄屯—颜店一线。研究区南北长约 36km, 东西宽约 22km, 面积约为 682km², 研究区示意图如图 1 所示。研究区含水岩层主要是地表至地下 150m 左右深度的各类砂层及砾石层, 大致呈北东—南西向的条带状分布, 多由 8~12 层组成。岩性以中、细砂为主。在埋深 30m 以内是含石英颗粒为主, 分选、磨圆较好的细砂; 而分选、磨圆较差的粗砂及少量小砾石, 则多出现在 50m 以下。含水层主要是呈多层结构分布的第四系孔隙含水层, 分为潜水 (60m 以上) 和深层承压水 (80m~150m)。

2 地下水流数值模拟

根据研究区地质钻孔资料及含水层埋藏条件, 将研究区内地层概化为 3 层, 从上至下, 依次为潜

收稿日期: 2007-07-02; 修订日期: 2007-11-19

基金项目: 十一五国家科技支撑计划课题 (200613AB14BOA)。

作者简介: 黄修东, (1979-), 男 (汉族), 山东枣庄人, 博士研究生。

水含水层，弱透水层和承压水含水层，潜水通过弱透水层越流补给承压水。

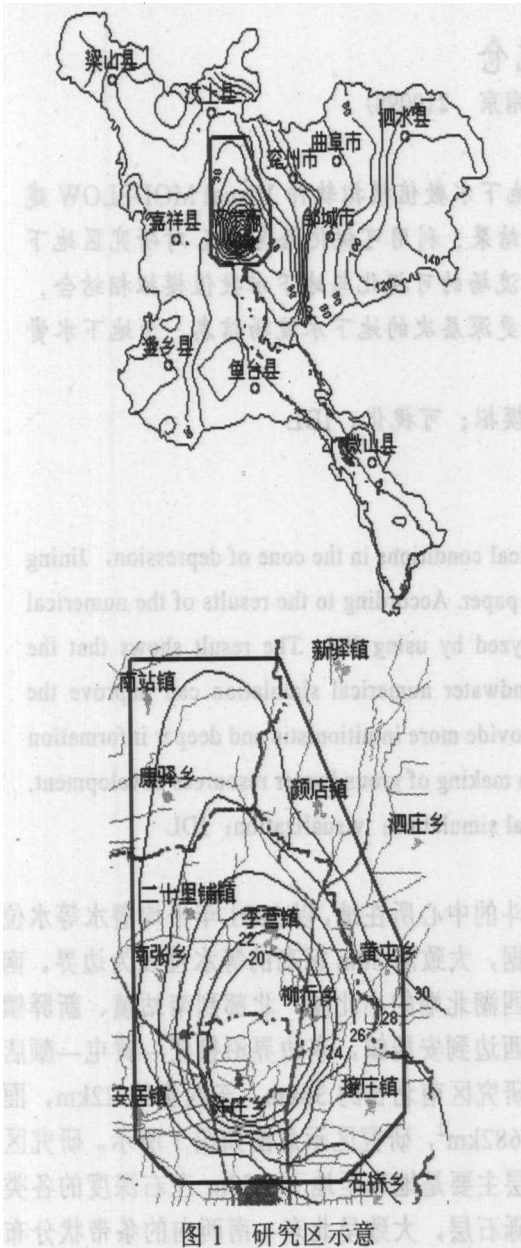


图1 研究区示意

研究区内水位呈非稳定状态，含水层为非均质各向同性，同一参数分区内可视为均质，水流服从达西定律。本次数值模拟采用 Visual MODFLOW 软件，用有限差分法迭代求解。补给以降水入渗和京杭运河等其他河流的入渗补给为主，降水入渗补给系数分区见图2；排泄以人工开采和补给河流为主。将研究区内洸府河、京杭运河、小北湖用河流模块模拟，进行较为详细的水量交换模拟计算，对于其它小的河渠湖塘等水体，由于位置处于漏斗区内，地下水水位埋深较大，在绝大部分时间内起到补给潜水的的作用，因此，只模拟计算其补给潜水的的水量。根据边界附近的水位观测孔资料将边界概化为通用水头边界(GHB)。在济宁地区，许多生产单位、科研机构已经进行了大量野外钻探、抽水试验等研究工作，基本覆盖了本次研究区域，因此，在借鉴前人参数分区的基础上，用

Visual MODFLOW 对参数进行新的率定、分区。在平面上，将研究区剖分为 150 行，150 列，共计 22500 个单元格。其中，有效单元格 18939 个，无效单元格 3561 个，每个单元格面积约为 0.036km²。在垂向上分为三层。根据实际资料情况，选择模拟时段为 1999 年 1 月至 2001 年 12 月，共 3 年(1096d)，以 1999 年 1 月份研究区内的水头分布作为初始条件，模拟以每月(约 30d)为一个应力期，共分为 36 个应力期。

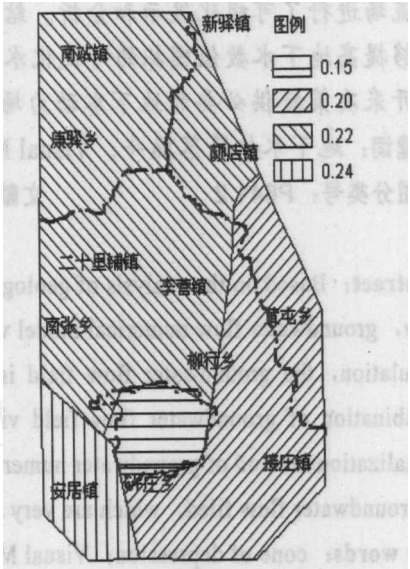


图2 降水入渗补给系数分区

利用试错法对模型参数进行了率定，经过反复调参，得到了较为理想的模型识别结果。例如，在第 12 应力期末，23 个拟合点的绝对误差均位于±1m 范围内，其中在±0.5m 内的拟合点数占到 83%，类似地，在第 24 应力期末和 36 应力期末，绝对误差位于±0.5m 内的拟合点数分别占到 78%和 74%。图3和图4为2个观测井水位计算值与观测值的拟合过程线。

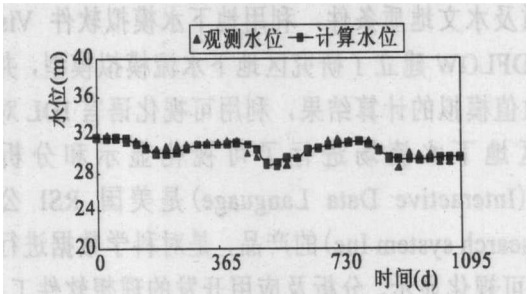


图3 水位拟合过程线(M1190920 观测井)

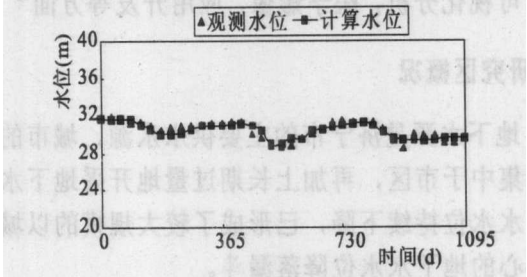


图4 水位拟合过程线(M110037A 观测井)

3 地下水流场的可视化

Visual MODFLOW 输出模块提供了一定的可视化功能, 能够将模拟结果直接在计算机屏幕上显示, 也可以以图形或文本的文件格式输出, 显示的图形包括可以标记出渗流速度矢量大小的平面、水头剖面等值线图和平面的、剖面示踪流线图以及局部区域水均衡图等一系列图件, 主要是二维、静态显示。本文基于 IDL 可视化语言, 读取上述数值模拟计算结果的地下水水位数据、降深数据, 进行可视化显示和分析, 可以实现地下水位降落漏斗的曲面显示、水位降深的曲面显示及动画演示地下水位降落漏斗的形成过程。

地下水位降落漏斗采用地下水位 DEM 曲面表示。本文首先利用 Delaunay 三角形方法将地下水面上的三维点集进行三角化, 然后用无偏、最优的 Kriging 插值算法将数值模拟得到的地下水水位数据进行插值, 从而得到地下水面的 DEM 模型。DEM 实现的部分代码如下:

```
TRIANGULATE, x, y, tr //tr 是输出变量, 保存了计算返回的 Delaunay 三角形组  
Gdsurface=GRIDDATA(X, Y, Z1, METHOD=Kriging, DIMENSION=[201, 321], triangles = tr) //插值得到的数据为每个曲面的均匀网格数据 {x, y, z}。
```

为了增强显示效果, 本次采用在阴影曲面上同

时叠加网格曲面的显示方式, 比过去常用的单一的阴影曲面或网格曲面显示取得了更好的显示效果, 同时利用地下水位本身的数据装载颜色, 采用颜色渲染的方式表达地下水面, 即用渐变的颜色表达地下水面, 从而使每个网格上的颜色与水位值相对应; 同时还可以任意角度旋转地下水面, 可以从不同角度观察地下水面, 快速、正确地分析地下水降落漏斗的时空演化规律。图 5、6 分别是模拟第 1 应力期末、第 12 应力期末的潜水位降落漏斗曲面图。从图中可以直观地看出模拟期地下水位降落漏斗的形成、扩展过程, 以及地下水位降落漏斗的位置。由图可知, 研究区地下水水位普遍呈下降趋势, 形成降落漏斗, 且降落漏斗范围不断扩大, 漏斗中心地下水水位不断下降, 地下水位下降剧烈的范围主要集中在市区, 原因是市区开采集中, 是地下水利用强度最大的地区, 连续的过量开采已经形成了厚度很大的疏干含水层, 至模拟第 36 应力期末, 即 2001 年末, 疏干含水层的厚度已超过 30m, 迫切需要进行人为干预恢复地下水水位, 这也为开展人工回灌及地下水、地表水的联合调蓄提供了较大的地下储水空间。

采用同样的处理方法, 读取地下水位降深值, 可以显示不同时刻的地下水位降深 DEM 曲面, 从而直观的显示各个位置在不同时刻的累计地下水位降深。

在漏斗渐变过程的动态演示中得到的信息, 有时是难以或不可能通过其它途径观察得到的。

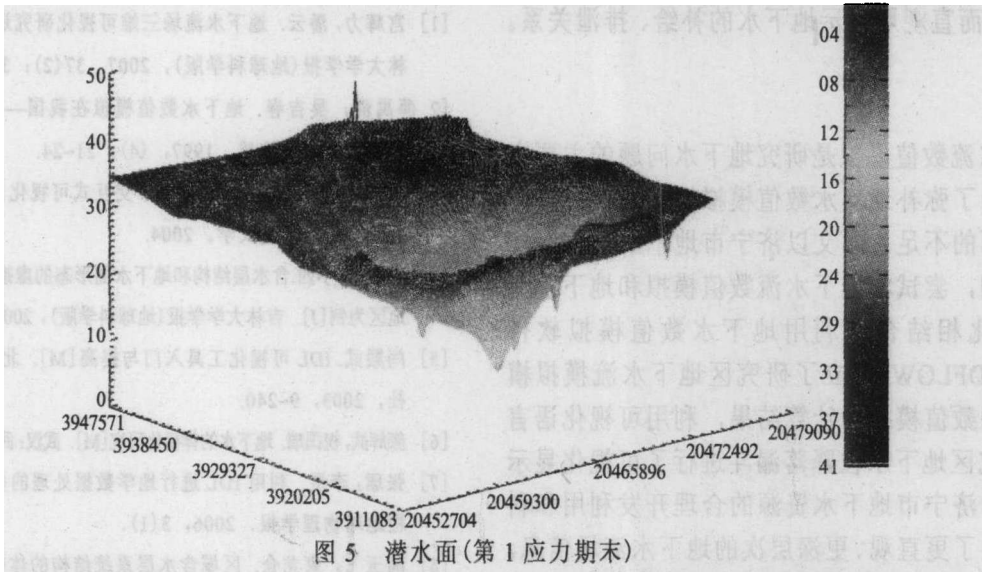


图 5 潜水面(第 1 应力期末)

地下水位降落漏斗的动画演示, 可以将不同时刻的地下水面依次进行三维可视化表达, 从而动态演示地下水降落漏斗的形成、扩展过程, 在 IDL 中可以利用 XInterAnimate 函数实现, 当把地下水位数据装载到动画缓冲区以后, 可以控制动画的速度, 在动画演示的任意时刻暂停, 生成的动画可以写成

mpeg 格式的视频文件保存起来。本次模拟以每月(约 30d)为一个应力期, 共分为 36 个应力期, 把每个应力期末(每个月末)的地下水位数据装载到动画缓冲区, 从动画演示过程, 可以直观地看出地下水位的年际变化以及年内变化, 图 7 为潜水位降落漏斗动画演示。

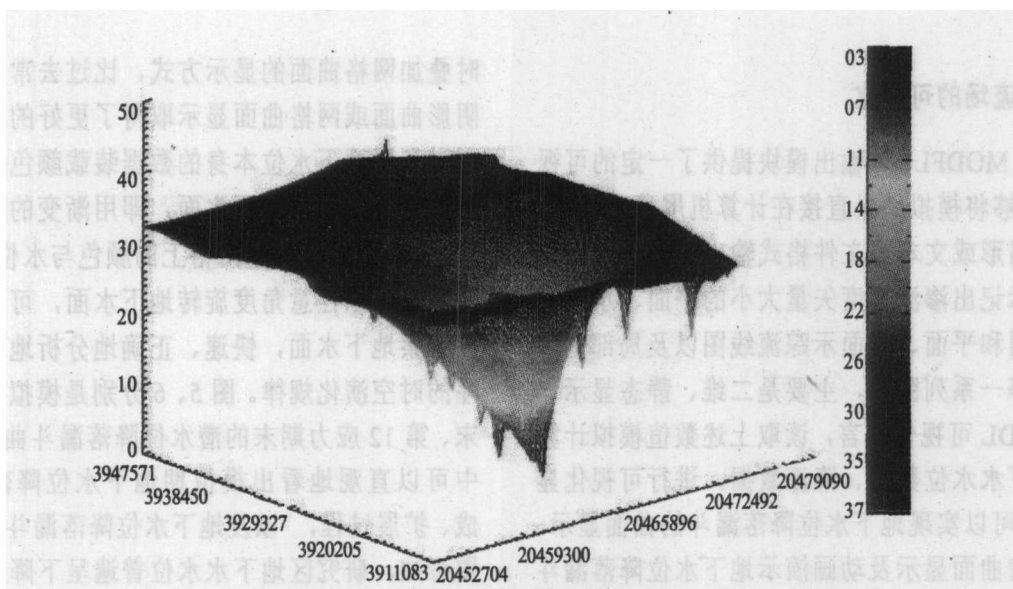


图6 潜水面(模拟第12应力期末)

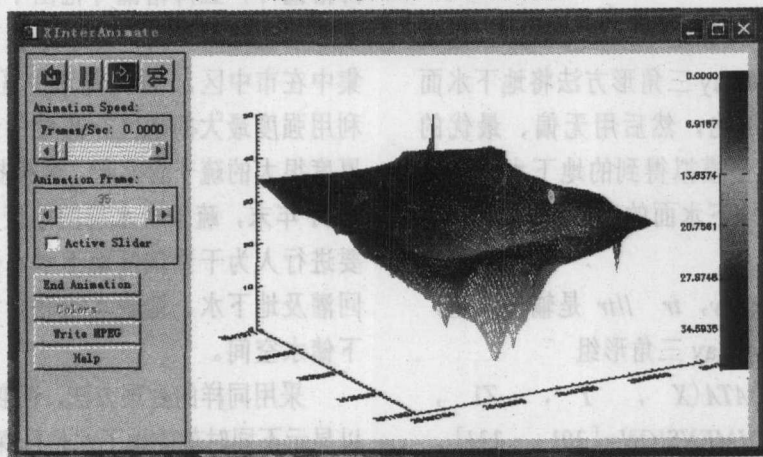


图7 潜水水位降落漏斗动画演示

另外,利用IDL灵活的数据读取和强大的可视化功能,还可以可视化地表达地下水的流速、流向等信息,从而直观地显示地下水的补给、排泄关系。

4 结论

地下水流数值模拟是研究地下水问题的主要方法之一,为了弥补地下水数值模拟软件在输出结果可视化方面的不足,本文以济宁市地下水水位降落漏斗区为例,尝试将地下水流数值模拟和地下水流场的可视化相结合,利用地下水数值模拟软件Visual MODFLOW建立了研究区地下水流模拟模型,并依据数值模拟的计算结果,利用可视化语言IDL对研究区地下水位降落漏斗进行了可视化显示和分析,为济宁市地下水资源的合理开发利用和科学管理提供了更直观、更深层次的地下水流场信息。

在地下水数值模拟和地下水流场可视化的研究中,前提是提高地下水流数值模型的置信程度,在此基础上,将地下水流场可视化与数值模拟紧密结合,不断提高可视化的水平,从而为地下水研究提供更准确、更科学的数值计算和可视化结果。

参考文献

- [1] 宫辉力,潘云.地下水流场三维可视化研究进展与前景[J].吉林大学学报(地球科学版),2007,37(2):384~391.
- [2] 薛禹群,吴吉春.地下水数值模拟在我国——回顾与展望[J].水文地质工程地质,1997,(4):21~24.
- [3] 仇英华.基于IDL的河口海岸交互式可视化系统初步研究[D].上海:华东师范大学,2004.
- [4] 朱琳,苏小四.含水层结构和地下水面形态的虚拟模拟——以苏锡常地区为例[J].吉林大学学报(地球科学版),2007,37(2):400~404.
- [5] 闫殿武.IDL可视化工具入门与提高[M].北京:机械工业出版社,2003,9~240.
- [6] 颜辉武,祝国瑞.地下水的体视化研究[M].武汉:武汉大学出版社,2004.
- [7] 张珏,李星.利用IDL进行地学数据处理的多种插值法[J].工程地球物理学报.2006,3(1).
- [8] 陶玉飞,束龙仓.区域含水层系统结构的体视化表达及地下水位预测——以江苏省宿迁市为例,水文,2006,26(4):51~54.
- [9] Wu Qiang, Xu Hua. An approach to computer modeling and visualization of geological faults in 3D[J].Computers & Geosciences, 2003, 29: 503~509.
- [10] 吴夏鹭,束龙仓.开采条件下的地下水溶质运移规律的研究——以山东济宁漏斗区为例[J].工程勘察,2006,(2):27~30.