

地下水流场的3维数值模拟及可视化研究

——以常州-武进地区为例

颜辉武^{1,2)} 马晨燕²⁾ 费立凡²⁾

¹⁾(清华大学深圳研究生院环境工程与管理研究中心,深圳 518055)

²⁾(武汉大学资源与环境科学学院,武汉 430079)

摘要 通过研究常州-武进地区地下水流场的3维数值模拟,揭示了该地区产生地面沉降的主要成因。首先分析了该地区的水文地质条件,在此基础上建立了第Ⅱ承压含水层地下水流场的3维数值模型,采用3维有限差分法对其进行数值求解,并利用体视化中的混合体绘制算法,结合计算机动画技术实现了地下水流场的3维动态可视化。经过研究发现,该地区第Ⅱ承压含水层是最主要开采层,其长期超采是产生地下水降落漏斗与地面沉降的主要原因;地下水降落漏斗中心主要分布在沪宁铁路沿线工农业发达的人口密集区,地面沉降范围与地下水降落漏斗范围基本吻合,且沉降量和沉降速率与地下水水位下降幅度和下降速度趋势一致;但是当地下水水位出现大幅回升时,地面回弹现象并不明显,这表明地面沉降基本上是不可逆的。因此,该地区必须严格控制第Ⅱ承压含水层的地下水开采量,以免造成环境地质灾害的进一步恶化。

关键词 地下水流场 3维数值模拟 体视化 组合体绘制 环境地质学分析

中图分类号: TP391 P208 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2004)12-1491-05

The Research on 3D Numerical Simulation of the Groundwater Flow Field and Its Visualization

——Take the Changzhou-Wujin District as an Example

YAN Hui-wu^{1,2)}, MA Chen-yan²⁾, FEI Li-fan²⁾

¹⁾(Research Center for Environmental Engineering & Management, Shenzhen Graduate School, Tsinghua University, Shenzhen 518055)

²⁾(School of Resource & Environment Science, Wuhan University, Wuhan 430079)

Abstract This paper aims at the study of 3D numerical simulation of the groundwater flow field of the Changzhou-Wujin district, for revealing the main cause of the depression of the ground surface. First, the hydro-geological conditions of this area are analyzed. Based on this, a 3D numerical model of the groundwater flow field of the second confined aquifer is established. Then the numerical solution of this model is found using the 3D finite difference method. And finally, the 3D dynamic visualization of the groundwater flow field is realized using the hybrid rendering algorithm of the volume rendering combined with the techniques of computer animation. Through this study, it has been found that the main mined layer is the second confined aquifer of this district and its long term over exploitation is the main reason for giving birth to the cones of depression of the groundwater and the depression of the ground surface; the centers of the cones of depression of the groundwater are mainly distributed along the Shanghai-Nanjing railway where the industry and agriculture are flourishing and is heavily populated; the range of the depression of the ground surface and that of the cones of depression of the groundwater are basically identical, and the depression intensity and the depression rate of the ground surface are much related to the falling extent and the falling rate of the groundwater level. However, the phenomenon of the rebound of the ground surface is not prominent, when the groundwater level rises to great extent, that means the process of the depression of the ground surface is basically irreversible. Therefore, it is absolutely necessary to strictly control the mining amount of the groundwater of the second confined aquifer of this district, so as to avoid the further deterioration of the environmental geological catastrophes.

基金项目: 国家自然科学基金项目(49971061); 南京师范大学江苏省GIS重点实验室基金项目(164070301901)

收稿日期: 2004-08-11; **改回日期**: 2004-09-13

Keywords groundwater flow field, three-dimensional numerical simulation, volume visualization, hybrid volume rendering, environmental geoscientific analysis

1 引言

随着工农业生产的发展和人们生活水平的提高,地下水资源的供需矛盾日趋紧张,地下水的超采已成为世界性的环境灾害问题。常州-武进地区,虽然位于气候湿润、降雨丰富的江苏南部,且北有长江,南有太湖,河渠湖泊众多,全区年平均降雨量为 1 100mm 左右(据江苏省气象局数据),地表水资源十分丰富,但是由于地表水普遍受到污染,区域水环境质量较低,达不到开发利用的要求,因此,水资源的利用主要依靠地下水提供。长期以来,该地区过量开采地下水引发了一系列环境地质问题,与之相关的生态环境平衡也遭到破坏,严重影响了该地区的可持续发展。因此,利用地理信息系统技术与可视化技术研究该地区的地下水现实情况和发展趋势^[1],制定切实可行的措施,防止环境地质灾害的发生和恶化对该地区的可持续发展具有十分重要的意义。

2 地下水流场的 3 维数值模拟

2.1 水文地质条件概述

研究区范围北抵长江,南至武进市的行政区边界,另外为研究方便,使研究区为一相对独立的地下水系统,在东北部还包括江阴市的部分沿江地区。其范围东西宽约 55km,南北长约 81km。

研究区第 4 系松散层厚度 180~200m,部分地段累计砂层厚度达 50~160m。自上而下共划分 4 个含水层(组)与 4 个隔水层,依次分别为潜水含水层及第 I、II、III 承压含水层。第 II 承压含水层是研究区的最主要开采层,总开采量的 70%以上来自该层,具有厚度大、分布广泛、富水性强的特点。含水层岩性主要为细砂、中砂及含砾粗砂,含水层厚度最大可达 60 余米,常州市区为 24~48m。该层之上有数 10m 厚的上部隔水层与其上的第 I 承压含水层相隔,虽能得到部分向下的越流补给量,但补给量有限,从而造成在强烈的开采条件下,产生大的水位降深并诱发地面沉降等环境地质灾害,常州市区地下水降落漏斗中心的水位埋深曾达到 80m,现在地面沉降中心区累计沉降超过 1.2m^[2]。

2.2 第 II 承压含水层地下水流 3 维数学模型

根据地下水的水均衡原理和达西(Darcy)定律,结合对研究区的水文地质条件分析以及研究区内第 II 承压含水层具体的初始水头条件、边界条件(如图 1 所示,在本研究区第 II 承压含水层的 AB 边界属于定水头边界;BC 边界与 DA 边界属于阻水边界;CD 边界属于变水头边界),可建立第 II 承压含水层地下水流的 3 维数学模型^[3,4]

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x}(K_{xx} \frac{\partial H}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K_{yy} \frac{\partial H}{\partial y}) + \\ \frac{\partial}{\partial z}(K_{zz} \frac{\partial H}{\partial z}) + W = \mu_s \frac{\partial H}{\partial t} & (x, y, z) \in D \\ H(x, y, z, t)|_{t=0} = H_0(x, y, z) & \text{初始条件} \\ H(x, y, z, t) = \varphi_1(x, y, z) & \text{在 AB 上} \\ H(x, y, z, t) = \varphi_2(x, y, z, t) & \text{在 CD 上} \\ \frac{\partial H}{\partial n} = 0 & \text{在 BC, DA 上} \end{cases} \quad (1)$$

其中, K_{xx} , K_{yy} 和 K_{zz} 为主方向上的渗透系数,单位为 (LT^{-1}) ; H 为水头(L); W 为单位体积流量 (T^{-1}) ,这里用以代表流出汇(开采井)的水量; μ_s 为多孔介质的贮水率(或释水率),表示当水头下降一个单位时,从单位体积空隙介质中贮存(或释放)的水量,其量纲为 L^{-1} ; t 为时间(T); n 为边界的外法线方向; D 为渗流区域。

2.3 第 II 承压含水层地下水流模型的 3 维有限差分数值求解

2.3.1 3 维有限差分方程的建立

(1) 渗流区的时、空离散剖分

对于地下水流的偏微分方程,可以通过离散将其转换为差分格式,这里采用矩形网格有限差分,对研究区第 II 承压含水层地下水流模型进行离散剖分,平面剖分格距为 $2 \times 2 \text{ km}^2$,东西向 28 列,南北向 41 列,垂向剖分为 3 层,其空间剖分网格总容量为 $28 \times 41 \times 3$ 。

以 1999~2000 年的数据作为研究样例,根据长江水位的枯水期、汛期变化规律,在时间上剖分为 4 个应力期:1999-01~1999-05, 1999-06~1999-09, 1999-10~2000-05, 2000-06~2000-12。在每个应力期内选取 1 个月作为时步单位,共 24 个时步。

(2) 差分方程的建立

进行时、空剖分后,对于任一水力单元,流入和

流出某个计算单元的水流之差应等于该单元中贮水量的变化,从而根据达西定律可得差分方程(水头对时间的偏导数采用后向差分):

$$\begin{aligned}
 & CR_{i,j-1/2,k} \cdot (H_{i,j-1,k}^m - H_{i,j,k}^m) + \\
 & CR_{i,j+1/2,k} \cdot (H_{i,j+1,k}^m - H_{i,j,k}^m) + \\
 & CR_{i-1/2,j,k} \cdot (H_{i-1,j,k}^m - H_{i,j,k}^m) + \\
 & CR_{i+1/2,j,k} \cdot (H_{i+1,j,k}^m - H_{i,j,k}^m) + \\
 & CR_{i,j,k-1/2} \cdot (H_{i,j,k-1}^m - H_{i,j,k}^m) + \\
 & CR_{i,j,k+1/2} \cdot (H_{i,j,k+1}^m - H_{i,j,k}^m) + QS_{i,j,k} \\
 & = \mu_{S_{i,j,k}} (\Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k) \frac{H_{i,j,k}^m - H_{i,j,k}^{m-1}}{t_m - t_{m-1}} \quad (2)
 \end{aligned}$$

其中, H 为水力单元的水头, CR 为水力传导率, $QS_{i,j,k}$ 为水力单元 (i, j, k) 处的所有外部源汇项, μ_s 是贮水率, $\Delta c \Delta v$ 为过水断面的面积; Δr 为两个水力单元之间的距离。

如果已知 $m-1$ 时刻各水力单元的水位,通过对模型中的所有水力单元建立同式(2)一样的方程,形成一个方程组。求解这个方程组就可以得到在 m 时刻的水位。依次类推,可以最终求得任一时步内地下水系统的水位。

2.3.2 水文地质条件处理及其参数的赋值

(1) 确定边界条件

研究区第 II 承压含水层的边界条件如图 1 所示,图中的 AB 边界属于定水头边界; BC 边界与 DA 边界属于阻水边界; CD 边界属于变水头边界。



图 1 第 II 承压含水层的边界条件

(2) 确定初始水头条件

选取研究区范围内 1998 年底的若干观测井位的观测数据加上模型边界的水头数据,生成水位等值线,然后经网格离散,得到研究区内各网格的水头

值,作为模型的初始水头条件。

(3) 参数分区及其赋值

关于参数空间分布的近似表达采用分区法,即将参数相近的地带划分为若干个区,每一个区具有同一的水文地质参数。

(4) 开采井处理

受古河道发育规模的控制,常州-武进地区第 II 承压含水层主要分布在沿京杭大运河的北西-南东向条形区间内,顶板埋深 70~130m,厚度 23~50m。由于位置和埋藏深度的原因,大气降水和长江侧向补给都十分微弱,开采量是以消耗本身的贮存资源为主。第 II 承压含水层又是本研究区内最主要的开采层,总开采量的 70% 以上来自该层。因此,由于地下水开采而引起的如地面沉降等诸多地质灾害主要是由于对第 II 承压含水层的超采所造成的。

通过详细的资料收集和整理,得到了研究区域内第 II 承压含水层 517 口开采井的历年历月单井抽水量。

在模型计算中,水平方向上:(1)若开采井位于某一格网,则该开采井的开采量分配给此格网;(2)若开采井位于两格网的交线上,则该开采井的开采量平均分配到两格网;(3)若开采井位于 4 个格网的交点处,则该开采井的开采量平均分配到 4 个格网。垂直方向上:开采井的开采量根据导水系数加权进行分配。

2.3.3 数值求解

常用的求解方法包括直接法和迭代法。绝大多数直接法通过向前和向后的替代来求得结果。直接法在没有舍入误差的假设下,能在预定运算次数内求得精确解,适用于中等规模或者较大型的带形和稀疏方程组,其最基本的解法是 Gauss 消去法。迭代法是基于一定的递推格式,产生逼近方程组精确解的近似解序列。对于较高阶的方程组,特别是某些偏微分方程数值求解过程中出现的方程组,非常适用^[5]。

采用 MODFLOW 提供的逐次超松弛迭代法 (SOR) 子程序包,进行研究区域第 II 承压含水层地下水模型的 3 维有限差分数值求解^[6]。

2.3.4 模型的拟合与校验

为了使数学模型能正确反映计算区的水文地质条件和地下水水流状态,可根据实测的水位及其动态变化曲线,对模型进行拟合与校验,即通过反复试算,不断地调整水文地质参数和边界条件,使计算的水位值与实测的水位值之差为最小,从而达到数值仿真的目的。

根据实测资料,选取研究区内 8 个观测孔进行

地下水水位动态拟合。这 8 个孔基本上覆盖了整个计算区,有一定的代表性,模拟时间为 1999-01~2000-12,经过反复调整参数,使模拟的水位动态曲线与实测的水位动态曲线达到了较好的拟合。图 2、图 3 是其中两个观测孔的模型验证结果。

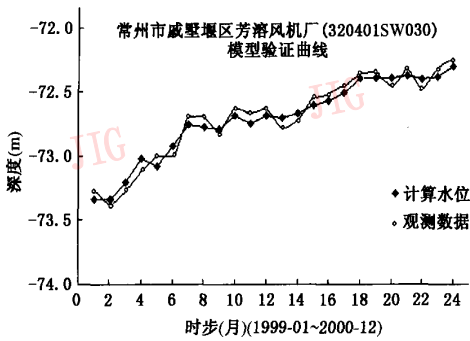


图 2 320401SW030 观测孔模型验证曲线

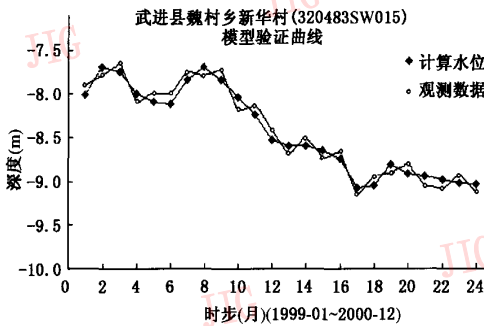


图 3 320483SW015 观测孔模型验证曲线

其中,横坐标表示以月为时步单位,从 1999-01~2000-12 共 24 个时步;纵坐标表示地下水水位深度,单位为米。

2.3.5 流场数据生成

使用地下水模拟软件 MODFLOW 对上述模型进行分析计算,得到了研究区内 1999~2000 年第 II 承压含水层地下水的水位与降深数据、分项流量数据。

3 地下水流场的可视化

地下水流场可视化的表达主要包括:表现第 II 承压含水层中地下水降落漏斗的发展过程和表现第 II 承压含水层中地下水的流速、流向随时间的变化规律两个内容。地下水降落漏斗采用地下水水位 DEM 曲面表示,地下水流速、流向采用 3 维箭头表示,流场的赋存环境则采用 3 维体视化表现。因此,从本质上讲,地下水流场可视化表达是体视化中一种典型

的混合绘制技术问题,即将几何数据与体数据在同一幅图中进行混合显示。体绘制的具体过程如下^[7]:

- (1) 为几何体赋予颜色和不透明度;
- (2) 对几何体采用光线跟踪算法进行绘制,同时保留每个像素点的深度值;
- (3) 对体数据进行光线投射与采样,记录每个采样点的颜色、不透明度和深度;
- (4) 对两个深度表进行排序;
- (5) 按照从前到后的图像合成方法进行图像合成。得到每一帧图像后,结合计算机动画技术实现了研究区(第 II 承压含水层)地下水流场的三维动态可视化,从而可以生动、直观地表现研究区第 II 承压含水层中地下水降落漏斗的运动变化过程,地下水流的流速和流向情况。

图 4 与图 5 分别表示研究区第 II 承压含水层在 1999 年 12 月这一时步地下水降落漏斗的空间分布和地下水流场情况。

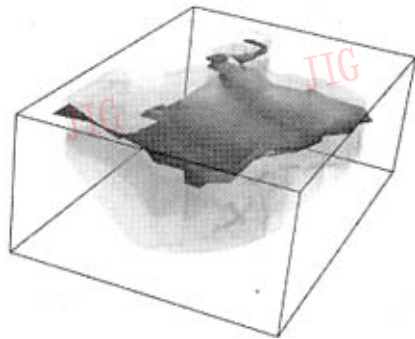


图 4 1999 年 12 月地下水降落漏斗的空间分布

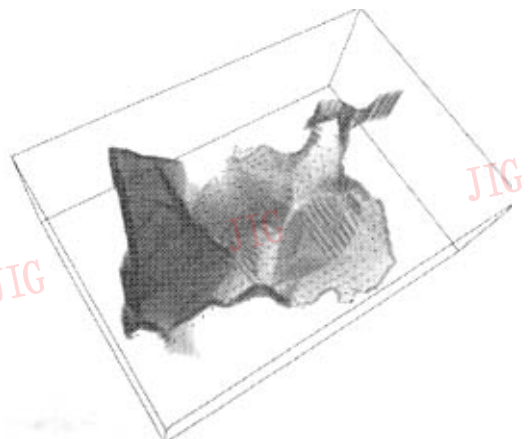


图 5 第 II 承压含水层 1999 年 12 月的流场情况

4 结 论

本研究区第 II 承压含水层天然条件下水力坡度小,径流缓慢,地下水总体流向南东。但是,由于长期超采,地下水位持续下降,形成了区域和局部性的降落漏斗,含水层内部调剂补偿作用强烈,从而增加了径流强度,使径流方向转向降落漏斗中心(图 6)。

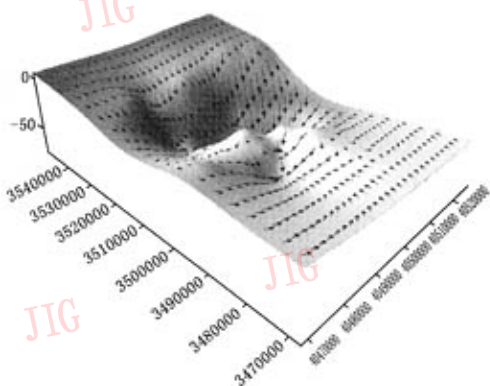


图 6 1999 年 12 月地下水降落漏斗的 2 维表示

结合常州-武进地区的地理底图,研究发现该地区地下水降落漏斗中心主要分布在沪宁铁路沿线工农业发达的人口密集区。同样,通过对该地区同时时期的地面沉降分布等值线图(图 7)与第 II 承压含水层的地下水降落漏斗图进行比较研究,还能发现:(1)该地区的地面沉降范围与第 II 承压含水层的地下水降落漏斗范围基本吻合,而且沉降量和沉降速率与地下水位下降幅度和下降速度趋势一致;(2)当地下水位出现大幅回升时,地面回弹现象并不明显,



图 7 1999 年常州武进地区地面沉降现状图

这表明地面沉降基本上是不可逆的;(3)地面沉降的发生时间滞后于水位下降的时间,且沉降量在相同水位降深条件下,并有逐年减缓的趋势。

因此,必须严格控制该地区第 II 承压含水层的地下水开采量,以免造成环境地质灾害的进一步扩大与恶化。

参 考 文 献

- 1 Turner A Keith. 应用三维地理信息系统研究地下水特征在提高水文地质研究程度中的作用[A]. In: 地理信息系统及其在地质领域中的应用论文集[C],地矿部科技司计算机办公室编译,北京:地质出版社,1993:12~20.
- 2 苏锡常地区地下水资源利用与重大地质环境问题防治研究项目研究报告(补充部分)[R],北京:中国地质环境调查研究院,2001.
- 3 薛禹群. 地下水动力学[M]. 北京:地质出版社,1997.
- 4 陈崇希,林敏. 地下水动力学[M]. 武汉:中国地质大学出版社,1998.
- 5 周志芳. 岩体地下水运动模拟的理论与应用研究[D]. 南京:南京大学,1998.
- 6 MODFLOW 公司. 三维有限差分地下水水流模型[M]. 郭卫星,卢国平译,南京:南京大学出版社,1998.
- 7 Fruhauf M. Combining Volume Rendering with Line and Surface Rendering [A]. In: Proceedings of Eurographics'91 [C], Netherlands, 1991:21~32.



颜辉武 1970 年生。副教授。2002 年于武汉大学资源与环境科学学院获地图学与地理信息工程专业博士学位,现为清华大学环境科学与工程系博士后。研究兴趣包括环境信息系统、地学信息 3 维可视化、Web GIS 及地图学理论和应用。
E-mail: yhwmc@263.net



马晨燕 1973 年生。讲师。2000 年于武汉大学资源与环境科学学院获地图学与地理信息工程专业硕士学位,现为武汉大学资源与环境科学学院在职博士研究生。研究兴趣包括地图集制作与地图综合、地学信息 3 维可视化与电子地图。



费立凡 1949 年生。教授、博士生导师。2002 年于德国汉诺威大学地图制图与地学信息研究所获地图制图专业博士学位。研究兴趣包括地图综合、地学信息 3 维可视化与网络地理信息系统。