

长江北部三角洲—里下河沉积典型过渡区 承压地下水数值模拟

李 朗, 姚炳魁, 黄晓燕

(江苏省地质调查研究院, 南京 210018)

摘 要:姜堰市地处长江北部三角洲沉积区与里下河沉积区间的过渡带, 孔隙承压地下水分布复杂, 南北差异明显, 地下水资源评价难度大。对研究区复杂孔隙承压地下水系统进行了三维数值模拟, 并在模型识别、验证的基础上, 确定出符合水位控制要求的可开采资源量及优化开采布局。结果证明, 通过三维数值模型进行地下水资源评价, 既能客观再现复杂的水文地质结构和水文地质条件, 同时也有助于对地下水资源进行科学有效管理。

关键词:沉积区过渡带; 孔隙承压地下水; 资源评价; 数值模拟

中图分类号:TV211.1+2

文献标志码:A

江苏省中部长江北部三角洲沉积区与里下河沉积区的交界地带, 由于地处两个不同的水文地质单元, 受古地貌、古沉积环境的影响不尽相同, 孔隙承压地下水的赋存条件极为复杂。该区域地处湖荡低洼平原, 地面高程较低, 作为该区域主要用水来源之一的孔隙承压水若过量开采, 地下水位的快速下降极易引发地面沉降等环境地质灾害。本文以姜堰市为例, 旨在通过建立承压地下水三维数值模型来刻画该过渡区复杂的水文地质结构, 优化地下水可采量和开采布局, 进而调控地下水位的下降趋势来缓解上述不合理开采对环境的影响。

1 研究区水文地质概况

姜堰市域内松散岩类孔隙水, 从浅到深依次为全新统潜水含水层、上更新统第 I 承压含水层、中更新统第 II 承压含水层、下更新统第 III 承压含水层, 其间以弱含水的粘性土层相分隔(图 1)。由于地处长江北部三角洲平原沉积区与里下河湖荡平原沉积区的过渡地带, 研究区含水层沉积环境复杂, 北部里下河湖荡平原沉积区砂层颗粒较细, 以中细砂、粉细砂为主, 砂层厚度薄且呈多层状, 水量一般; 南部长江三角洲沉积区含水层组具

有厚度大、砂层层次少(局部地段第四系含水层组之间无稳定隔水层, 为连通性巨厚状砂层)、颗粒粗(多为砂砾结构)、水量丰富的特点, 中部过渡区含水层富水性在南北之间。当地地下水主要开采层为第 I、II、III 承压含水层, 由于上世纪 90 年代至本世纪初地下水开采量的剧增, 目前区内各层地下水位下降明显, 均已形成区域性地下水位降落漏斗。

2 研究区承压地下水系统模拟模型

2.1 承压地下水系统概念模型

将研究区第四纪松散承压含水层系统概化为 5 层, 为第 I、第 II、第 III 承压含水层及各含水层间的粘性土弱含水层, 各层均概化为非均质各向异性。各层的水平侧向边界均按通用水头边界处理, 模型底板的垂向边界作隔水边界处理, 考虑到潜水层的垂向补给作用, 模型顶板的垂向边界作流量边界处理。各含水层由于受到人工开采的长期强烈影响, 且局部地段因隔水层缺失使各含水层上下联通, 地下水渗流特征极其复杂, 故将整个地下水流态概化为三维非稳定流。研究区地下水开采均以开采井为单位, 按实际统计开采量赋予。

2.2 数学模型

根据水文地质概念模型,建立与之相适应的数学模型^[1]:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial H}{\partial z} \right) + W = \mu_s \frac{\partial H}{\partial t} \dots (x, y, z) \in \Omega \\ H(x, y, z, t) |_{t=0} = H_0(x, y, z) \dots (x, y, z) \in \Omega \\ H(x, y, z, t) |_{\Gamma_1} = H_1(x, y, z, t) \dots (x, y, z) \in \Gamma_1 \\ K_n \frac{\partial H}{\partial n} \Big|_{\Gamma_2} = -q(x, y, z, t) \dots (x, y, z) \in \Gamma_2 \end{cases}$$

式中: H 为点 (x, y, z) 在时刻 t 的水头值(L); K_x, K_y, K_z 为各主方向渗透系数(L·T⁻¹); μ_s 为储水率(L⁻¹); W 为源汇项(T⁻¹); H_0 为计算域初始水头(L); H_1 为第一类边界的水头值(L); $q(x, y, z, t)$ 为第二类边界上的单位面积流量(L·T⁻¹); Ω 为计算域; Γ_1, Γ_2 分别为第一类边界、第二类边界; t 为时间(T)。

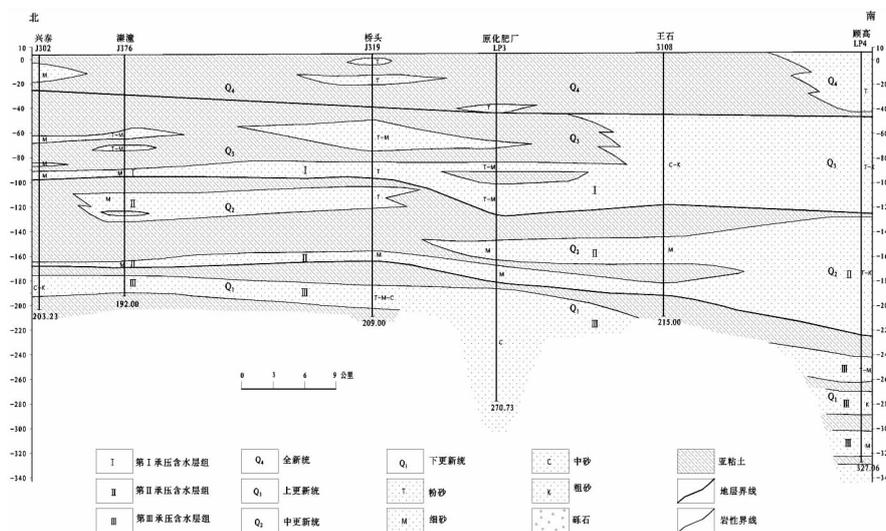


图1 姜堰市孔隙松散层南北向水文地质剖面图

2.2 模型的识别与验证

上述模型采用有限差分法^[2-4]进行数值求解,各层网格划分为不等距平面长方体,并运用共轭梯度法(PCG)联立迭代求解数学方程^[5]。在平面上全区划分为 49 × 43 的矩形网格单元,在剖面上将第 I、II、III 三个承压含水层和含水层间的二个粘性土弱透水层划分为独立的层位进行计算,共 5 层,每层有效计算单元为 1052 个(图 2 ~ 图 3)。2009 年 1 月 1 日至 2010 年 6 月 30 日作为模型的识别时段,2010 年 7 月 1 日至 2010 年 12 月 31 日作为模型的验证时段。将每个季度作为一个开采制度期,每个制度期分 5 个时间步长,识别时段 6 个制度期,验证时段 2 个制度期。

含水层的初始水位由实测给出,弱透水层的初始水

位由上下含水层水位插值获得。区内各开采井的开采量均由实际调查获得。用于水位拟合的观测孔位总计 11 个,基本控制全区。各含水层通用边界上的水头值由实测经插值后赋予,边界水力传导系数按前人资料结合野外试验数据赋予,潜水含水层对第 I 承压含水层的水量补给强度在综合参考区域地质条件、临近区域和前人研究结果的基础上赋予经验值^[6-9]。各含水层参数分区的参数初值根据区域水文地质条件结合野外试验数据赋予。

以第 III 承压含水层为例,图 4 为 2009 年 12 月 31 日各观测井的计算水位与实测水位拟合情况,其水位拟合误差均在 1 m 以下,末时刻的计算流场与实测流场拟合情况见图 5。模型参数分区见表 1。

表1 拟合后模型水文地质参数

| 层位 | 分区数 | 渗透系数 K/m·d ⁻¹ | | 储水率 μ_s /m ⁻¹ |
|-------------|-----|---|---|---|
| | | x | z | |
| 第 I 承压含水层 | 10 | 0.50 - 14.00 | 0.05 - 1.40 | 1×10^{-5} - 5×10^{-4} |
| 第 I 弱含水层 | 4 | 3.0×10^{-7} - 5.0×10^{-6} | 3.0×10^{-8} - 5.0×10^{-7} | 5×10^{-9} - 8×10^{-9} |
| 第 II 承压含水层 | 12 | 1.00 - 18.00 | 0.1 - 1.80 | 5×10^{-5} - 7.5×10^{-4} |
| 第 II 弱含水层 | 5 | 7.0×10^{-7} - 6.0×10^{-6} | 7.0×10^{-8} - 6.0×10^{-7} | 1×10^{-8} - 2×10^{-8} |
| 第 III 承压含水层 | 11 | 3.00 - 23.00 | 0.3 - 2.30 | 1×10^{-3} - 8×10^{-5} |

2.3 模型结果可靠性分析

模型的识别应符合地下水系统的结构特征和水位

动态变化趋势,另外模型要收敛、稳定。从总体上看,模型计算得到的各含水层水位流场在变化趋势、周期、等

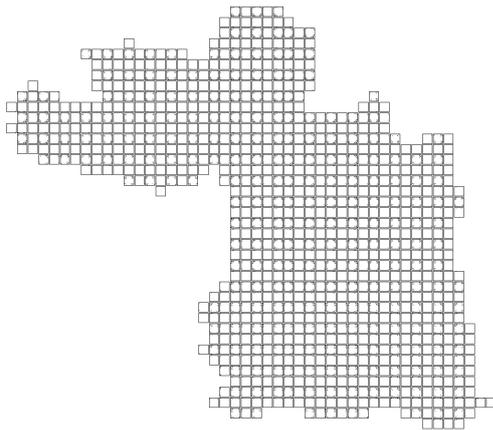


图 2 平面剖分网格

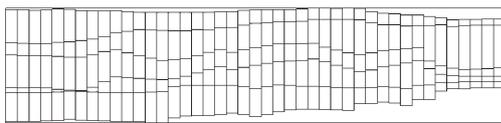


图 3 研究区第 25 列剖面剖分网格

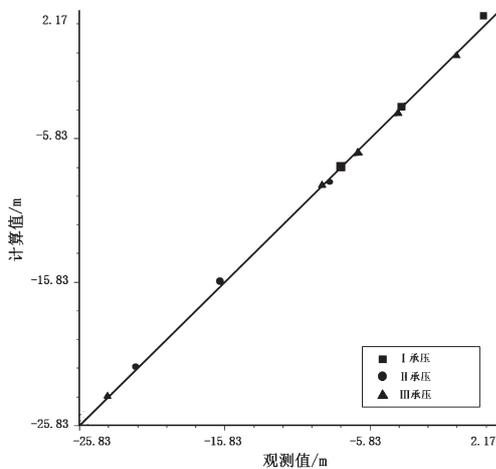


图 4 2009 年 12 月 31 日观测井水位计算值与实测值对比

3 承压地下水可采资源评价

3.1 评价方案

由于地处长江三角洲沉积区与里下河沉积区的过渡地带,姜堰承压含水层南北富水性差异较大,而地下水开采量在区域分布也极不均衡,导致姜堰市各承压含水层已形成区域性水位降落漏斗。因此,为防止地面沉

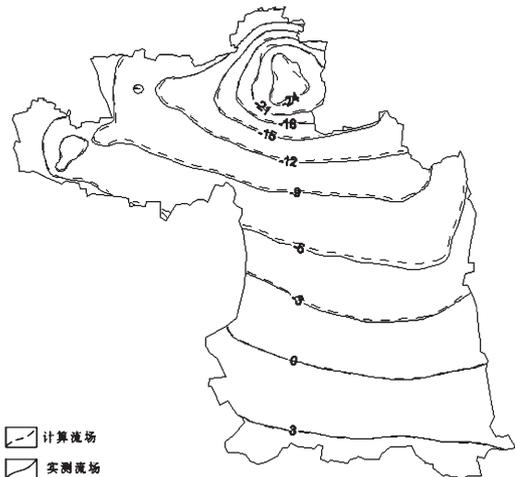


图 5 2010 年 12 月 31 日第 III 承压含水层流场拟合图

降等环境地质灾害的发生,提出至 2020 年第 I、II、III 承压含水层的最低水位应分别控制在 -15 m、-20 m、-28 m。将 2011 年 4 月 17 日~2020 年 12 月 31 日作为预测时段,以 2011 年地下水的开采布局为基础,通过调整地下水的开采布局,最终得到符合水位控制条件的优化承压地下水可开采量和满足此可开采资源量的合理开采布局。

3.2 评价结果

模型运行结果表明:按规划方案进行开采,全市第 I、II、III 承压含水层的优化可开采量为 2516.58 万 m³,其中第 I 承压地下水可开采量为 474.45 万 m³,占比 18.31%;第 II 承压地下水可开采量为 729.76 万 m³,占比 28.17%;第 III 承压地下水可开采量为 1386.37 万 m³,占比 53.52%。2014 年后各含水层中的水位降落漏斗发展均趋于平缓,2017 年后达到稳定,2020 年 12 月 31 日第 I、II、III 承压含水层的预测最低地下水位标高分别为 -14.59 m、-19.92 m、-25.12 m(图 6),满足水位控制要求。目前水位下降较快的乡镇各主采层地下水可采资源量调整情况见表 2。

表 2 水位较深乡镇主采层开采调整量(10⁴m³/a)

| 含水层 | 白米 | 华港 | 姜庄 | 溱潼 | 沈高 | 兴泰 |
|-----|--------|-------|-------|--------|-------|-------|
| I | 36.5 | 21.6 | 27.3 | 12.2 | -8.38 | 1.58 |
| II | 45.9 | -11.6 | -2.84 | 11.8 | -25 | 16.8 |
| III | -20.23 | 10 | -13.5 | -36.22 | 33.67 | -14.4 |

4 结束语

由于地处两种沉积环境的过渡带,姜堰市孔隙承压地下水赋存条件复杂,且局部区域因弱透水层缺失而存在上下含水层联通的现象,同时由于前期过量开采,各

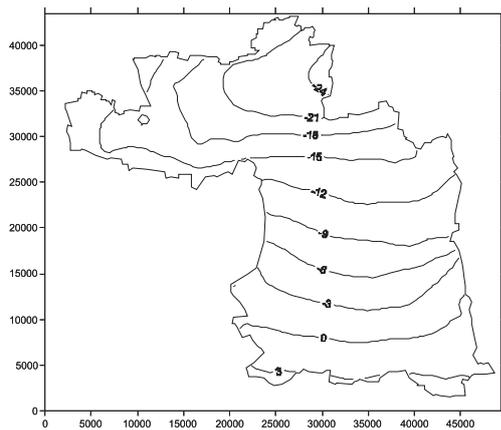


图6 第Ⅲ承压含水层末时刻预测流场图

承压含水层均形成区域性水位降落漏斗,地下水渗流具有明显的三维特征。通过三维数值模型所建立的地下水资源评价系统,既客观再现该区域孔隙承压水复杂的水文地质结构,模型的水文地质参数、边界条件也符合区域水文地质特征,同时流场的宏观规律和地下水动态拟合较好,模型正确可靠,具有较高的仿真度。运用该模型进行地下水资源量评价,既有助于实现对孔隙承压含水层系统的统一管理,又可发现地下水开采布局存在的缺陷,最终实现对承压地下水资源的可持续利用。

参考文献:

- [1] Bear J.地下水水力学[M].北京:地质出版社,1985.
- [2] 邵景力,赵宗壮,崔亚莉,等.华北平原地下水流模拟及地下水资源评价[J].资源科学,2009,31(3):361-367.
- [3] 卢丹美.地下水数值模型和软件的特点及在我国的应用现状[J].中国水运,2013,13(1):107-109.
- [4] 王浩,陆垂裕,秦大庸,等.地下水数值计算与应用研究进展综述[J].地学前缘,2010,17(6):1-12.
- [5] 任铭,张永胜,景元萍.一类偏微分方程的几种并行迭代算法[J].武汉理工大学学报:信息与管理工程版,2011,33(1):69-73.
- [6] 周念清,朱蓉,朱学愚.MODFLOW在宿迁市地下水资源评价中的应用[J].水文地质工程地质,2000,27(6):9-13.
- [7] 骆祖江,张英英,施春华.南通市第四纪松散沉积层地下水资源评价规划三维数值模型[J].水资源保护,2009,25(5):19-24.
- [8] 付延玲.基于地面沉降控制的区域性松散沉积层地下水可采资源规划评价[J].吉林大学学报:地球科学版,2012,42(2):476-484.
- [9] 张文喆,王锦国,徐烁.徐州奎河浅层地下水数值模拟[J].科学技术与工程,2013,13(13):3793-3797.

Numerical Simulation for Confined Groundwater in Typical Transition Region Between Yangtze River North Delta Deposition and Lixia River Deposition

LI Lang, YAO Bingkui, HUANG Xiaoyan

(Geological Survey Institute of Jiangsu Province, Nanjing 210018, China)

Abstract: Located in transition region between Yangtze River North Delta deposition area and Lixia River deposition area, the distribution of pore confined groundwater in Jiangyan is complex, and its north-south differences are obvious, so the groundwater resource is difficult to evaluate. A three-dimensional numerical model is built for the groundwater system of pore confined aquifer in Jiangyan. Based on the recognition and verification of this model, the exploitable amount of groundwater and the optimized exploitation pattern are established for control requirement of the waterlevel in the each aquifer. The results prove that the groundwater resources evaluation with three-dimensional numerical model, not only reproduces the complex hydrology structure and condition of aquifers, but also contributes to the scientific and effective management of groundwater resources.

Key words: transition region of sediment area; pore confined groundwater; resources evaluation; numerical simulation