

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

骆祖江¹, 张英英¹, 施春华²

(1. 河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 江苏省地质工程勘察院, 江苏 南京 210012)

摘要 根据南通市第四纪松散沉积层地下水系统的水文地质机制, 构建了地下水运动的三维数值模型, 并在模型识别、验证的基础上, 针对各含水层地下水位的控制要求, 调整了现有地下水的开采布局, 以乡镇为单位, 确定出各含水层的地下水可开采资源量及最优开采布局, 并预测了 2006 年底至 2021 年底逐年地下水水位动态变化情况。

关键词 地下水资源评价; 可采资源量; 第四纪松散沉积层; 含水层; 三维数值模型; 南通市

中图分类号 TV213.4 **文献标识码** A **文章编号** 1004-6933(2009)05-0019-05

Three-dimensional numerical model for groundwater resource evaluation and plan in loose Quaternary sediments in Nantong

LUO Zu-jiang¹, ZHANG Ying-ying¹, SHI Chun-hua²

(1. College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Geo-Engineering Investigation Institute of Jiangsu Province, Nanjing 210012, China)

Abstract: A three-dimensional numerical model was established according to the hydrogeological mechanisms of the groundwater system in the loose Quaternary sediments in Nantong. Based on the validation and verification of this model, the current exploitation pattern was adjusted for better control of the water table of each aquifer. Then, the exploitable quantity of groundwater and the optimal exploitation pattern were determined for every village or town. A prediction of the dynamic change of the groundwater table from 2006 to 2021 was also made.

Key words: groundwater resources evaluation; exploitable quantity; loose Quaternary sediments; water-bearing stratum; three-dimensional numerical model; Nantong

南通市地处江苏省东南部长江口北岸, 濒江临海, 是沿江沿海地区新兴城市, 面积约 8 000 km², 沉积了巨厚的第四纪松散沉积层。根据岩性和时代, 第四纪松散沉积层内从上而下分布的含水层有全新世潜水含水层、晚更新世第Ⅰ承压含水层、中更新世第Ⅱ承压含水层、早更新世第Ⅲ承压含水层, 各含水层之间均以弱含水的黏性土层相分隔, 并发生较为强烈的水力联系。以往人们在对这一类型的地下水系统进行评价时, 往往采用二维流或准三维流模型^[1]进行研究, 将各含水层通过其间的弱含水层发生的水力联系概化为垂向补给(排泄)强度或越流

量, 常常造成计算结果的重复或缺失。本文采用真三维模型^[2], 将南通市整个第四系含水系统作为一个整体进行模拟计算, 在对模型进行识别、验证的基础上, 对各含水层的地下水可采资源量进行了评价预测, 极大地提高了模型计算的置信度。

1 研究区水文地质概念模型

本次模拟计算将南通市由上往下从潜水含水层至第Ⅲ承压含水层作为一个统一的水文地质系统, 计算目的层为第Ⅰ、第Ⅱ、第Ⅲ承压含水层, 各含水层之间的黏性土弱含水层也按独立的层位参与计

算,共分 7 层。各层均概化为非均质各向异性。该水文地质系统南部是长江边界,其从上往下切割至第Ⅰ承压含水层,故将潜水含水层、第Ⅰ承压含水层及之间的黏性土弱含水层的长江边界概化为定水头边界,其余均为通用水头边界。系统顶部一方面接受大气降雨的补给,是一补给边界,另一方面地下水又通过其蒸发,是一排泄边界;系统底部为隔水边界。各含水层之间的垂向水力联系极为复杂,地下水位均受地下水开采的影响,故将整个地下水流动概化为三维非稳定流。区内地下水的开采均以乡镇为单位,按大井处理。

2 数学模型

根据区内水文地质概念模型,建立下列与之相适应的数学模型^[3-4]:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_{xx}\frac{\partial H}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(K_{yy}\frac{\partial H}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_{zz}\frac{\partial H}{\partial z}\right)+W=S_S\frac{\partial H}{\partial t}\quad (x,y,z)\in\Omega\quad (1)$$

$$H(x,y,z,t)|_{t=0}=H_0(x,y,z,t_0)\quad (x,y,z\in\Omega)\quad (2)$$

$$K_{xx}\frac{\partial H}{\partial x}\cos(n,x)+K_{yy}\frac{\partial H}{\partial y}\cos(n,y)+K_{zz}\frac{\partial H}{\partial z}\cos(n,z)|_{\Gamma_2}=q(x,y,z,t)\quad (x,y,z)\in\Gamma_2\quad (3)$$

$$H(x,y,z,t)|_{\Gamma_1}=H_1(x,y,z,t)\quad (x,y,z)\in\Gamma_1\quad (4)$$

$$K_{xx}\left(\frac{\partial H}{\partial x}\right)^2+K_{yy}\left(\frac{\partial H}{\partial y}\right)^2+K_{zz}\left(\frac{\partial H}{\partial z}\right)^2-\frac{\partial H}{\partial z}(K_{zz}+q_w)+q_w|_{\Gamma_3}=\mu\frac{\partial H}{\partial t}\quad (x,y,z)\in\Gamma_3\quad (5)$$

式中: S_S 为贮水率,1/m; K_{xx} 、 K_{yy} 、 K_{zz} 为含水层各向异性主轴方向渗透系数,m/d; H 为点 (x,y,z) 在 t 时刻的水头值,m; W 为源汇项,1/d; t 为时间,d; Ω 为计算区; $H_0(x,y,z,t_0)$ 为点 (x,y,z) 处的初始水位,m; $H_1(x,y,z,t)$ 为第一类边界上的水头值,m; $q(x,y,z,t)$ 为第二类边界上单位面积的补给量,m/d; $\cos(n,x)$ 、 $\cos(n,y)$ 、 $\cos(n,z)$ 分别为流量边界外法线方向与坐标轴方向夹角的余弦; μ 为饱和差(自由面上升)或给水度(自由面下降),它表示在自由面改变单位高度下,从含水层单位截面积上吸收或排出的水量; q_w 为自由面单位面积上大气降雨入渗补给量与地下水蒸发量之和,m/d; Γ_1 、 Γ_2 、 Γ_3 分别为第一类边界、第二类边界和自由面边界。

3 模型的识别与验证

上述模型采用有限差分法对地下水流进行数值

模拟^[5],含水层采用不等距正交的长方体剖分网格^[6],并采用强隐式法(SIP)联立迭代求解代数方程组^[7]。将工作区在平面上剖分成 150×100 的矩形网格单元,垂向上从上往下将潜水含水层和第Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ承压含水层及各含水层之间的黏性土弱含水层剖分成独立的层位参与计算,共分 7 层,每层的有效计算单元为 7 276 个,共计 50 932 个,详见图 1~3。以 2004 年 12 月 1 日至 2005 年 12 月 31 日作为模型识别时段,以 2006 年 1 月 1 日至 2006 年 12 月 1 日作为模型验证时段,将 2004 年 12 月和 2006 年 10、11 月分别单独作为一个地下水开采制度期,其余时段均以每个季度作为一个地下水开采制度期,共分 9 个制度期,每个制度期又分 10 个计算时间步长。

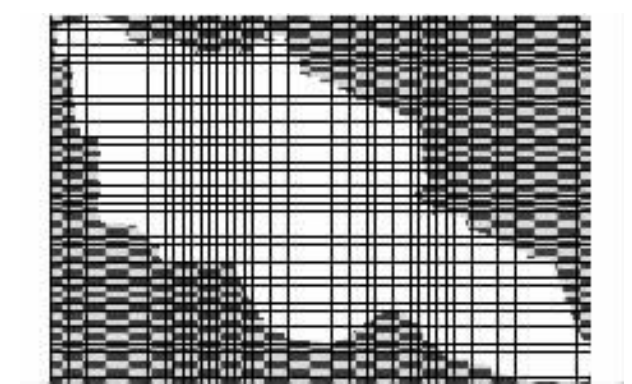


图 1 研究区平面网格剖分



图 2 研究区第 77 行剖面剖分

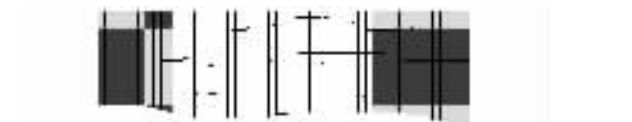


图 3 研究区第 95 列剖面剖分

各含水层均有一定数量的地下水位观测井用来进行水位拟合,共计 34 个观测井,基本能控制工作区地下水流场。各乡镇各含水层地下水的开采量由实际调查获得,各含水层的初始流场由实测给出,各含水层之间的黏性土弱含水层的初始流场由上下含水层插值给出,各含水层及之间的黏性土弱含水层通用水头边界上的水头值由实测值经插值给出。各含水层及之间的黏性土弱含水层参数分区的参数初值均按前人资料结合经验给出^[8-10]。以 2005 年 4 月 1 日为例,图 4 给出了第Ⅲ承压含水层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。以第Ⅲ承压含水层为例,初始时刻实际流场图见图 5,含水层末时刻的地下水位计算流场见图 6,与实际流场相吻合。

4 模型可靠性分析

衡量一个模型计算的结果是否正确,能否用来预测地下水系统的动态变化特征,取决于两个方面的因素:一方面模型的识别要符合地下水系统的结构与功能特征,另一方面模型要收敛、稳定。根据模型识别结果,地下水系统各参数分区参数值的级别大小均符合常规,边界上的水量交换强弱程度和实际系统基本一致,各观测井水位计算值和实测值拟合程度也较好。由模拟计算而得的各含水层的地下水流场也和研究区内地下水流场的宏观变化规律相一致。描述地下水系统的数学模型如果收敛、稳定,则由该模型计算所得的各个时期含水系统的地下水量均应符合水均衡的要求。根据本次模型识别计算所得的各含水层各时期的水均衡要素可知,逐年的地下水流入量和流出量基本相等,说明模型的收敛性和稳定性较好,详见表 2 和表 3。

综合以上两点说明,本次三维数值模型计算所得结果正确、可信,可以用来预测地下水系统的动态变化。

5 地下水可采量评价与预测

5.1 规划与预测方案

南通各县市地下水可采量相差悬殊,目前已形成了以如东和海门一带为中心的区域性地下水位降落漏斗,因此,应根据地下水系统的结构和功能特征,调整现有地下水的开采布局,对各县市地下水的可开采资源量进行评价、预测,优化确定出地下水的

可开采量。到 2021 年 12 月,第Ⅰ、Ⅱ承压含水层的最低地下水位应分别控制在 - 10 m、- 30 m 水平,且地下水位降落漏斗中心大致与工作区中心相一致,第Ⅲ承压含水层最低地下水位海安、如皋控制在 - 20 m,通州、南通市区、海门、如东应控制在 - 40 m,启东控制在 - 35 m。根据现有掌握的地下水系统动态资料,以 2006 年 12 月 1 日作为预测的初始时刻,以 2006 年地下水的开采布局为基础,调整现有地下水的开采格局,以满足 2021 年 12 月对第Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ承压含水层上述最低地下水位的控制要求。

5.2 规划与预测结果

模型运行结果表明 按上述规划方案进行开采,全市第Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ承压含水层地下水总的可采量为 17870.56 万 m³/a,其中 第Ⅰ承压含水层地下水可采量为 2882.11 万 m³/a,占总可采量的 16.1% 第Ⅱ承压含水层地下水可采量为 2418.48 万 m³/a,占总可采量的 13.5% ;第Ⅲ承压含水层地下水可采量为 12569.97 万 m³/a,占总可采量的 70.4%。2017 年后各含水层中的地下水位降落漏斗扩展在平面上和剖面上均趋于平缓,2021 年后均达到稳定,第Ⅰ、Ⅱ承压含水层的最低地下水位分别稳定在 - 8.8 m 和 - 29.6 m 左右,第Ⅲ承压含水层中的最低地下水位海安稳定在 - 20.0 m 左右,如皋稳定在 - 19.9 m 左右,如东稳定在 - 39.4 m 左右,南通市区稳定在 - 39.4 m 左右,通州市稳定在 - 39.8 m 左右,海门市稳定在 - 39.9 m 左右,启东稳定在 - 33.2 m 左右,详细的地下水流场变化见图 8 和图 9,各县市在各含水层中 2006 年的地下水可采量与规划开采量对比见表 4。

表 2 第 6 制度期各含水层流入量 m³/d

含水层	降雨蒸发 综合补给	黄海边界 侧向补给	长江边界 侧向补给	储存释放	上层流入	下层流入	总流入
潜水含水层	2540.30	0.43	0.97	4591.50	0.00	267.31	7400.51
第Ⅰ弱透土层	0.00	0.13	14132.00	0.19	5554.90	1110.90	20798.11
第Ⅰ承压含水层	0.00	13938.00	10551.00	64078.00	20530.00	0.00	109097.00
第Ⅱ弱透土层	0.00	0.03	0.00	8424.30	24163.00	19.10	32606.43
第Ⅱ承压含水层	0.00	64653.00	0.00	105400.00	32304.00	9613.30	211970.30
第Ⅲ弱透土层	0.00	2.30	0.00	4837.20	144840.00	15344.00	165023.49
第Ⅲ承压含水层	0.00	57929.00	0.00	167550.00	155390.00	0.00	380869.00

表 3 第 6 制度期各含水层流出量 m³/d

含水层	黄海边界 侧向流出	长江边界 侧向流出	储存增加	流入上层	流入下层	井开采	总流出
潜水含水层	0.16	0.00	358.07	0.00	5554.90	1487.50	7400.63
第Ⅰ弱透土层	0.00	0.00	0.00	267.31	20530.00	0.00	20797.31
第Ⅰ承压含水层	0.00	4723.30	0.00	1110.90	24163.00	79099.00	109096.20
第Ⅱ弱透土层	0.00	0.00	0.00	0.00	32304.00	0.00	32304.00
第Ⅱ承压含水层	0.00	0.00	0.00	19.10	144840.00	67111.00	211970.10
第Ⅲ弱透土层	10.87	0.00	1.96	9613.30	155390.00	0.00	165016.14
第Ⅱ承压含水层	20546.00	0.00	596.20	15344.00	0.00	344380.00	380866.20

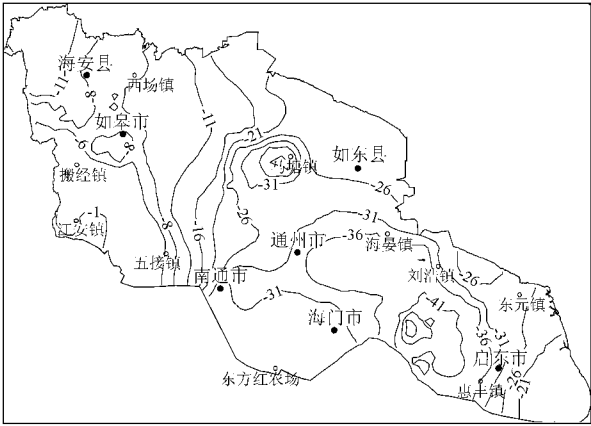


图 8 第Ⅲ承压含水层 2012 年 12 月 1 日规划
预测流场(单位: m)

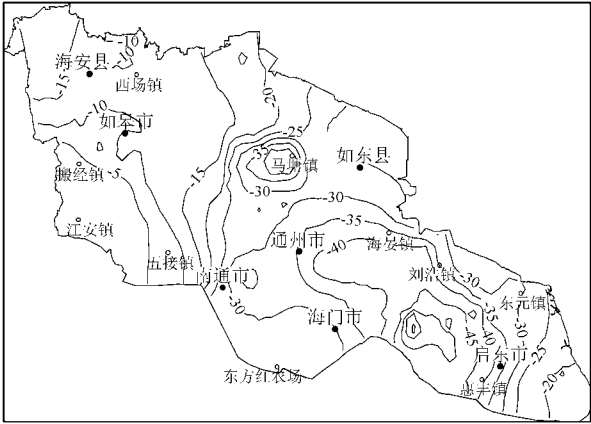


图 9 第Ⅲ承压含水层 2021 年 12 月 1 日规划
预测流场(单位: m)

表 4 各县市 2006 年地下水开采量与规划开采量

地区	2006 年开采量			规划开采量		
	I	II	III	I	II	III
海安	0.79	261.15	1850.00	259.87	275.19	1930.46
如皋	127.99	2.93	558.17	360.39	615.55	1396.61
如东	0.00	0.00	1300.00	462.29	459.82	2582.68
南通市市区	438.77	14.96	434.60	427.13	229.10	770.52
通州	142.99	0.00	1260.00	702.12	387.06	1485.35
海门	50.00	0.00	1953.68	320.11	249.52	1705.69
启东	6.29	0.00	2500.00	350.20	202.24	2698.66

6 结 论

- a. 南通市地下水系统的水文地质条件极为复杂,各含水层之间发生较强烈的水力联系。将由多含水层组成的含水层系统概化成二维或准三维模型时,需要对各含水层进行逐一评价,常造成计算上重复或缺失,而本次评价采用三维数值模型,将各承压含水层之间的黏性土层作为弱含水层直接参与计算,成功刻画了南通市地下水系统的结构和功能,大大提高了计算的精度。
- b. 模拟结果表明,在满足水位控制要求的前提

下,南通市绝大部分县市各承压含水层的地下水规划总可采量均比现状开采量有大幅度的提高。因此,只有合理规划地下水的开采格局,才能在有效控制地下水位下降的同时,充分开发利用地下水资源。

参考文献：

[1] 叶淑君. 地下水流二维、准三维及三维模型模拟结果比较[J]. 水文地质工程地质, 2003(5) :23-27.

[2] 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.

[3] MICHAEL G M, ARLEN W H. A modular three-dimensional finite difference groundwater flow model [M]. Washington : United States Government Printing Office, 1988.

[4] 付延玲. 盐城市地下水资源预测评价[J]. 资源调查与环境, 2005, 26(1) :34-59.

[5] TSANG Chin-fu. The modeling process and model validation [J]. Groundwater, 1991, 29(6) :825-831.

[6] 丁雪华, 朝伦巴根. 基于 Visual MODFLOW 模型的三湖灌域地下水资源评价[J]. 灌溉排水学报, 2007, 26(3) :93-96.

[7] PATRICK L A. Natural disasters[J]. Surficial Geology, 1996, 21(3) :34-36.

[8] 骆祖江, 武永霞. 盐城市地下水资源规划评价三维数值模型[J]. 水资源保护, 2005, 21(5) :37-41.

[9] 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(6) :9-14.

[10] 骆祖江, 姚炳魁, 王晓梅. 复合含水层系统地下水资源评价三维数值模型[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2005, 35(2) :188-194.

(收稿日期 2008-08-06 编辑 熊水斌)

· 简讯 ·

“第五届世界水论坛”在伊斯坦布尔举行

2009 年 3 月 16 日,“第五届世界水论坛”在土耳其伊斯坦布尔金号角会展中心隆重开幕,2.8 万名代表出席会议。中国代表团成员出席了开幕式。第五届世界水论坛的中心主题是“跨越水的鸿沟,强调全球各地区参与水管理或受水影响的各方之间应加强沟通、交流和协调”。论坛在中心主题下设立了 6 个子主题,分别是全球变化和风险管理、推进人类发展和千年发展目标、管理和保护水资源及供水设施以满足人类和环境的需求、水治理和管理、水融资,以及教育、知识和能力建设。在子主题下又设立 24 个议题。在此后的一周时间里,论坛通过部长级会议、区域日、议题分会、水展和水博览会以及水文化活动等多种形式,展开研讨和交流,共同为世界水问题的解决做出努力。论坛期间,有 156 个国家代表团包括 90 多位部长,63 名市长和 148 位议员出席了论坛。

(编辑部供稿)