

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2020.02.014

# 南通市地下水压缩开采对水质咸化的控制效应

陆 玮, 李 兆, 骆祖江

(河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 211100)

**摘要:**为了准确评价南通市地下水压缩开采对水质咸化的控制效应,根据南通市的水文地质条件,概化出了南通市的水文地质概念模型,建立了南通市地下水渗流与溶质运移三维耦合数值模型,分别预测了现状开采和压缩开采条件下2018—2034年逐年地下水水位和地下水中氯离子质量浓度的变化趋势。预测结果表明:现状开采条件下2034年底南通市第Ⅲ承压含水层中氯离子质量浓度大于250 mg/L和270 mg/L的面积分别达到355.17 km<sup>2</sup>和30.67 km<sup>2</sup>,2030—2034年咸化速率为9.59 km<sup>2</sup>/a;压缩开采条件下2034年底氯离子质量浓度大于250 mg/L和270 mg/L的面积分别为329.21 km<sup>2</sup>和1.76 km<sup>2</sup>,2030—2034年咸化速率为7.52 km<sup>2</sup>/a,压缩开采方案能有效控制第Ⅲ承压水的咸化问题。

**关键词:**地下水;压缩开采;水质咸化;三维数值模型;南通市

**中图分类号:**P641.8 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2020)02-0085-07

**Control effect of groundwater compression mining on water salinization in Nantong City**//LU Wei, LI Zhao, LUO Zujiang(*School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China*)

**Abstract:** In order to accurately evaluate the control effect of groundwater compression mining on water salinization in Nantong City, the hydrogeological conceptual model of Nantong City is generalized according to the hydrogeological conditions of Nantong City, and a three-dimensional coupled numerical model for groundwater seepage and solute transport in Nantong City is developed to predict the variation trends of groundwater level and the mass concentration of Cl<sup>-</sup> in groundwater from 2018 to 2034 under the present and compressed mining conditions, respectively. The results shows that by the end of 2034 the areas of the third confined aquifer with the mass concentration of Cl<sup>-</sup> greater than 250 mg/L and 270 mg/L will reach 355.17 km<sup>2</sup> and 30.67 km<sup>2</sup>, respectively, with the salinization rate of 9.59 km<sup>2</sup>/a from 2030 to 2034 at current condition, while under the condition of compressed mining, the areas with the mass concentration of Cl<sup>-</sup> greater than 250 mg/L and 270 mg/L reach 329.21 km<sup>2</sup> and 1.76 km<sup>2</sup>, respectively, with the salinization rate of 7.52 km<sup>2</sup>/a from 2030 to 2034, indicating that the compression mining scheme can effectively control the problem of water salinization in the third confined aquifer.

**Key words:** groundwater; compression mining; water salinization; three-dimensional numerical model; Nantong City

南通市地下水资源较为丰富,一直以来以开采优质的第Ⅲ承压水来满足日常生活用水需求,但随着地下水的开采和地下水位的下降,从20世纪80年代起出现了水质咸化现象<sup>[1-4]</sup>,进入90年代后水质咸化现象日趋严重<sup>[5]</sup>。王琦等<sup>[6-7]</sup>通过对比分析地下水动力场和水化学场的变化特性,认为过量开采第Ⅲ承压水,导致上覆地层中的咸水入侵进入第Ⅲ承压水是咸化的主要原因。目前地下水开采对

第Ⅲ承压水咸化影响的定量分析研究成果较少,难以为第Ⅲ承压水咸化的防控提供科学依据。本文以地下水渗流理论和溶质运移理论<sup>[8]</sup>为基础,建立了南通市地下水非稳定渗流与溶质运移三维耦合数值模型,通过模拟预测地下水现状开采和压缩开采条件下第Ⅲ承压水的咸化趋势,定量评价了南通市地下水压缩开采对第Ⅲ承压水咸化的控制效应,可为第Ⅲ承压水咸化的科学防控提供参考。

作者简介:陆玮(1995—),女,硕士研究生,研究方向为水文地质。E-mail:563812935@qq.com

通信作者:骆祖江,教授。E-mail:luozujian@sina.com

# 1 地质概况

南通市东临黄海,南望长江,与上海隔江相望,地理位置优越。研究区范围包括崇川区、港闸区和通州区,如图 1 所示。区域内除有少量基岩出露外,其余地区均为第四纪松散沉积物所覆盖,厚度一般为 200~360 m,垂向上相互交错分布着多层砂层,构成了一个错综复杂的含水层系统<sup>[9-11]</sup>,从上至下依次分为:全新统的潜水含水层(组)、上更新统的第 I 承压含水层(组)、中更新统的第 II 承压含水层(组)、下更新统的第 III 承压含水层(组)。图 2 为研究区水文地质剖面,各含水层之间以弱含水的黏性土层分隔或直接接触,存在着较为强烈的水力联系,贮存着丰富的地下水资源,其中潜水、第 I 承压水和第 II 承压水均为咸水,第 III 承压水为淡水,水质好,水量大。



图 1 研究区平面示意图

Fig. 1 Schematic plan of the study area

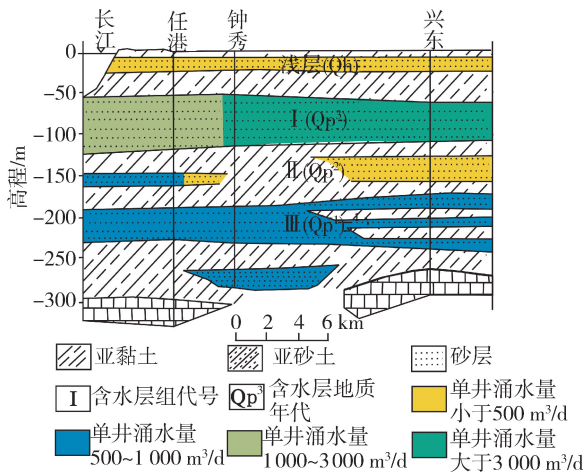


图 2 研究区 A—A' 断面水文地质剖面示意图

Fig. 2 A-A' hydrogeological profile of the study area

# 2 概念模型

本次模拟计算平面上以行政区域为界,垂向上包括整个第四纪地层,四周侧向边界均概化为通用水头边界和溶质运移通量边界,底部以第 III 承压含

水层底板为界,是一层厚度 30~50 m 的致密亚黏土,隔水性能良好,概化为隔水边界和溶质运移零通量边界。顶部在接受大气降水补给的同时,地下水又通过其蒸发排泄,在水力学上既是补给边界又是排泄边界,在溶质运移方面概化为通量边界;将大气降水入渗补给和地下水蒸发排泄两者合并考虑,概化为综合有效入渗补给强度。整个计算区含水层无论是平面上还是剖面上,富水性变化较大,概化为非均质层,垂直方向和水平方向的渗透性相差较大,概化为各向异性。各含水层中的地下水除水平运动外还通过层间的黏性土弱含水层或“天窗”发生水力联系,地下水流态为三维非稳定流,地下水开采按点井给出。

# 3 数学模型

## 3.1 地下水渗流模型

根据南通市的水文地质概念模型,将主渗透方向设为与坐标轴方向一致,建立了南通市地下水系统三维非稳定渗流数学模型<sup>[12-13]</sup>,模型的微分方程、初始条件和流量边界分别为

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

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

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

$$\left\{ \begin{aligned} & \left[ K'_{xx} \left( \frac{\partial H}{\partial x} \right)^2 + K'_{yy} \left( \frac{\partial H}{\partial y} \right)^2 + K'_{zz} \left( \frac{\partial H}{\partial z} \right)^2 - \right. \\ & \left. \frac{\partial H}{\partial z} (K'_{zz} + q_w) + q_w \right] |_{\Gamma_3} = \mu \frac{\partial H}{\partial t} \quad (x, y, z \in \Gamma_3) \\ & H(x, y, z, t) = z \quad (x, y, z \in \Gamma_3) \end{aligned} \right. \quad (4)$$

式中:  $K_{xx}$ 、 $K_{yy}$ 、 $K_{zz}$  分别为含水层各向异性主渗透方向的渗透系数, m/d;  $H$  为点  $(x, y, z)$  在  $t$  时刻的水头值, m;  $W$  为源汇项, L/d;  $\mu_s$  为储水率,  $m^{-1}$ ;  $t$  为时间, d;  $\Omega$  为计算域;  $H(x, y, z, t)$  为渗流场水头, m;  $H_0(x, y, z, t_0)$  为初始水头值, m;  $q(x, y, z, t)$  为已知流量;  $\cos(n, x)$ 、 $\cos(n, y)$ 、 $\cos(n, z)$  分别为流量边界外法线方向与坐标轴方向夹角的余弦;  $\mu$  为饱和差或给水度;  $q_w$  为自由面单位面积上的大气降雨入渗补给量。式(3)和式(4)分别为第二和第三类流量边界。

### 3.2 溶质运移模型

在不考虑溶质吸附、化学反应以及生物降解的情况下,将坐标轴方向设为与溶质运移方向一致,建立了南通市地下水系统三维非稳定流溶质运移数学模型,模型的微分方程<sup>[14]</sup>、初始条件和边界条件分别为

$$\begin{aligned} \frac{\partial(n\rho)}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x}\left(nD_{xx}\frac{\partial\rho}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(nD_{yy}\frac{\partial\rho}{\partial y}\right) + \\ &\frac{\partial}{\partial z}\left(nD_{zz}\frac{\partial\rho}{\partial z}\right) - \frac{\partial}{\partial x}(nv_x\rho) - \frac{\partial}{\partial y}(nv_y\rho) - \\ &\frac{\partial}{\partial z}(nv_z\rho) + I \end{aligned} \quad (5)$$

$$\rho(x,y,z,t)|_{t=0} = \rho_0(x,y,z,t_0) \quad (x,y,z \in \Omega) \quad (6)$$

$$\begin{aligned} nD_{xx}\frac{\partial\rho}{\partial x}\cos(x,n) + nD_{yy}\frac{\partial\rho}{\partial y}\cos(y,n) + \\ nD_{zz}\frac{\partial\rho}{\partial z}\cos(z,n)|_{\Gamma_2} = f(x,y,z,t) \quad (t > 0; \\ x,y,z \in \Gamma_2) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \left(nv_x\rho - nD_{xx}\frac{\partial\rho}{\partial x}\right)\cos(x,n) + \left(nv_y\rho - nD_{yy}\frac{\partial\rho}{\partial y}\right) \cdot \\ \cos(y,n) + \left(nv_z\rho - nD_{zz}\frac{\partial\rho}{\partial z}\right)\cos(z,n)|_{\Gamma_3} = \\ g(x,y,z,t) \quad (t > 0; x,y,z \in \Gamma_3) \end{aligned} \quad (8)$$

其中

$$\begin{aligned} D_{xx} &= \alpha_L \frac{v_x^2}{v} + \alpha_T \frac{v_y^2}{v} + \alpha_T \frac{v_z^2}{v} + D_e \\ D_{yy} &= \alpha_L \frac{v_y^2}{v} + \alpha_T \frac{v_x^2}{v} + \alpha_T \frac{v_z^2}{v} + D_e \\ D_{zz} &= \alpha_L \frac{v_z^2}{v} + \alpha_T \frac{v_x^2}{v} + \alpha_T \frac{v_y^2}{v} + D_e \end{aligned}$$

式中: $\rho$ 为流体中溶质的质量浓度,mg/L; $n$ 为孔隙度; $I$ 为源汇项; $D_{xx}$ 、 $D_{yy}$ 、 $D_{zz}$ 为沿坐标轴方向的水动力弥散系数分量, $m^2/d$ ;  $D_e$ 为分子有效扩散系数, $m^2/d$ ;  $v_x$ 、 $v_y$ 、 $v_z$ 为介质中流体沿坐标轴方向的平均线性速度, $m/d$ ;  $\alpha_L$ 、 $\alpha_T$ 分别为纵向和横向弥散度, $m$ ;  $\rho(x,y,z,t)$ 为溶质的质量浓度分布,mg/L;  $\rho_0(x,y,z,t_0)$ 为已知溶质的质量浓度分布,mg/L;  $\Omega$ 代表整个模型区域;  $f(x,y,z,t)$ 为 $\Gamma_2$ 边界上已知的弥散通量;  $\cos(n,x)$ 、 $\cos(n,y)$ 、 $\cos(n,z)$ 分别为边界 $\Gamma_2$ 外法线方向与坐标轴方向夹角的余弦;  $g(x,y,z,t)$ 为已知函数,表示 $\Gamma_3$ 边界法线方向上的对流弥散总通量。式(7)和式(8)分别为第二和第三类边界条件。

### 4 模型的识别验证

采用地下水三维模拟软件 Visual Modflow<sup>[15-17]</sup>进行模拟计算,在平面上剖分为 $159 \times 100$ 的网格单元,如图3(a)所示,其中有效单元为8332个,无效单元为7568个。剖面上从上至下分别将潜水、第

I承压、第II承压、第III承压含水层以及各含水层之间的黏性土弱含水层剖分成独立的层位,共分7层,图3(b)(c)分别为第35行和第43列网格剖分结果。选取2014年8月31日至2016年8月31日和2016年8月31日至2017年12月31日分别作为模型的识别和验证阶段,把每个月作为一个应力期,识别阶段共分为24个应力期,验证阶段共分为17个应力期,每个应力期为一个时间步长。

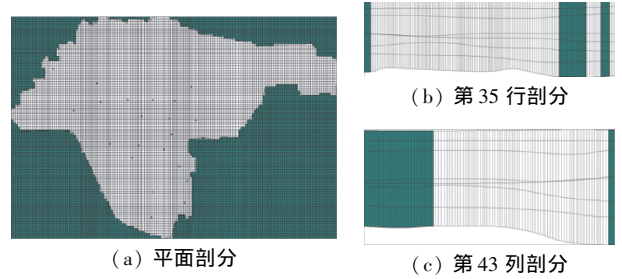


图3 研究区网格剖分

Fig. 3 Grid meshing of the simulation field

研究区分布有85口开采井,10口水位观测井,17口水质监测井,基本覆盖全区。各含水层的初始等水位线图由实测资料得到,各含水层之间黏性土弱含水层的初始等水位线图由其上下含水层插值得到。选取地下水中分布广泛且较为稳定的氯离子作为地下水咸化的模拟因子<sup>[18]</sup>,各含水层的氯离子初始质量浓度场由实际监测资料给出,各含水层之间黏性土弱含水层的氯离子初始质量浓度场由其上下含水层插值得到。参数的初始值根据前人资料结合经验给出<sup>[19]</sup>,经过识别、验证,模型共分为59个参数分区,其中潜水含水层4个,第I黏性土弱含水层4个,第I承压含水层8个,第II黏性土弱含水层4个,第II承压含水层5个,第III黏性土弱含水层14个,第III承压含水层20个。综合有效入渗补给系数为 $2 \times 10^{-6}$ 。图4为第III承压含水层水文地质参数分区,表1为第III承压含水层各分区水文地质参数。图5和图6分别为识别阶段和验证阶段第III承压含水层水位及水质监测井的拟合情况,可见实测值与计算值吻合良好,表明反演计算所得的参数准确、可靠,模型模拟结果符合实际情况。

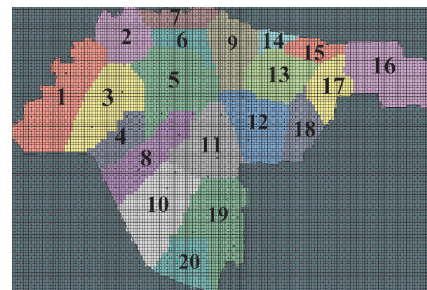


图4 第III承压含水层水文地质参数分区

Fig. 4 Hydrogeological parameter division for aquifer No. III

表1 第Ⅲ承压含水层各分区水文地质参数

Table 1 Hydrogeological parameters of each zones for aquifer No. III

分区	渗透系数/(m·d <sup>-1</sup> )			有效孔隙度	储水率/ m <sup>-1</sup>	弥散度/m	
	K <sub>xx</sub>	K <sub>yy</sub>	K <sub>zz</sub>			纵向	横向
1	50.0	50.0	5.0	0.440	0.000950	7	0.7
2	20.0	20.0	2.0	0.443	0.000650	8	0.8
3	17.5	17.5	1.6	0.296	0.000960	21	2.1
4	22.0	22.0	2.2	0.432	0.000400	8	0.8
5	50.0	50.0	5.0	0.438	0.000950	8	0.8
6	60.0	60.0	6.0	0.442	0.000650	8	0.8
7	25.0	25.0	2.5	0.444	0.000650	8	0.8
8	8.0	8.0	0.8	0.428	0.000400	15	1.5
9	7.0	7.0	0.7	0.442	0.000095	9	0.9
10	1.0	1.0	0.1	0.206	0.000500	32	3.2
11	15.0	15.0	1.5	0.285	0.000850	25	2.5
12	18.0	18.0	1.8	0.433	0.001600	9	0.9
13	10.0	10.0	1.0	0.440	0.001600	9	0.9
14	30.0	30.0	3.0	0.441	0.000400	9	0.9
15	12.0	12.0	1.2	0.441	0.000450	9	0.9
16	25.0	25.0	2.5	0.448	0.000910	12	1.2
17	20.0	20.0	2.0	0.442	0.000400	9	0.9
18	1.5	1.5	0.2	0.441	0.001600	9	0.9
19	8.0	8.0	0.8	0.200	0.000500	35	3.5
20	30.0	30.0	3.0	0.235	0.000500	29	2.9

模拟预测。现状共有 85 口开采井,其中第 I 承压含水层分布有 59 口开采井,总开采量为 444.21 万 m<sup>3</sup>/a;第Ⅲ承压含水层分布有 26 口开采井,总开采量为 179.51 万 m<sup>3</sup>/a,其中港闸、崇川两区开采量为 89.51 万 m<sup>3</sup>/a,通州区开采量为 90.00 万 m<sup>3</sup>/a。降水量采用 2007—2017 年的年平均值,同时考虑区内蒸发作用,确定综合降雨入渗补给系数为 2 × 10<sup>-6</sup>。图 7 和图 8 分别为 2018 年 1 月 1 日第Ⅲ承压含水层等水位线和氯离子质量浓度场。

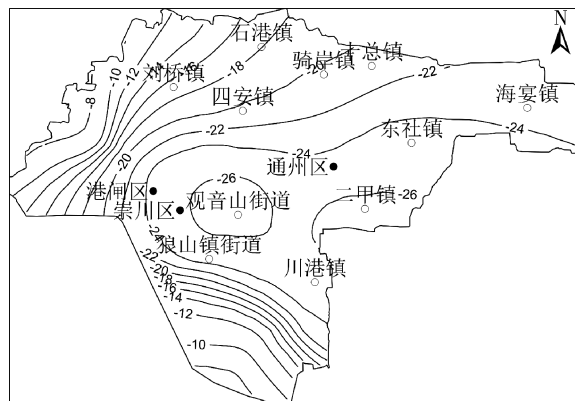


图7 第Ⅲ承压含水层等水位线(单位:m)

Fig. 7 Flow field for aquifer No. III (unit: m)

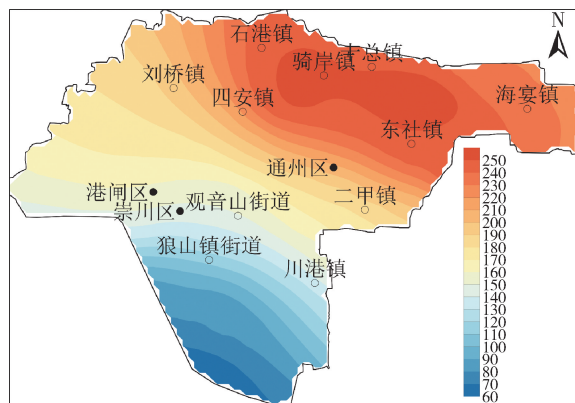


图8 第Ⅲ承压含水层氯离子质量浓度场(单位:mg/L)

Fig. 8 Chloride ion concentration for aquifer No. III (unit: mg/L)

a. 地下水水位预测。图 9 为 2024 年和 2034 年 12 月 31 日第Ⅲ承压含水层预测等水位线,可以看出第Ⅲ承压含水层地下水水位整体上出现了回升现象。2018—2034 年,最靠近降落漏斗的观山音街道附近水位回升最快,水位上升 7.86 m,狼山镇街道水位回升 4.12 m,其余地区水位也呈缓慢上升趋势。

b. 地下水咸化预测。图 10 为 2024 年和 2034 年 12 月 31 日第Ⅲ承压含水层预测氯离子质量浓度场,可以看出第Ⅲ承压含水层中氯离子质量浓度大于 250 mg/L 的面积从 2018 年初的 147.35 km<sup>2</sup>增加到 2034 年底的 355.17 km<sup>2</sup>,其中质量浓度大于 270 mg/L 的面积达到 30.67 km<sup>2</sup>。2018—2019 年、2020—2024 年、

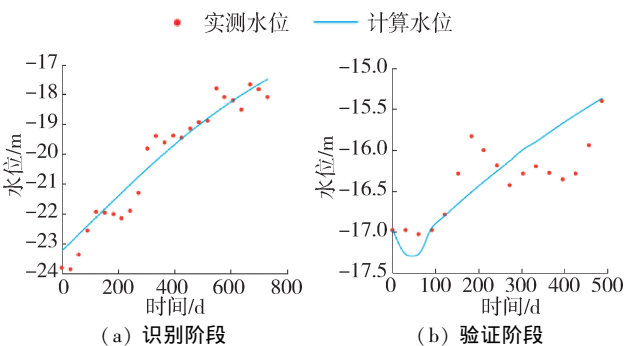


图5 地下水水位拟合结果

Fig. 5 Fitting graph of the groundwater level

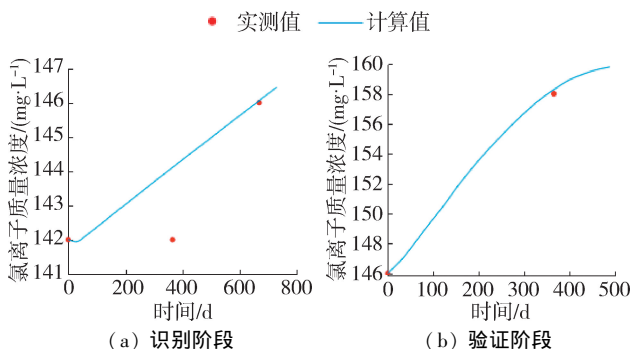


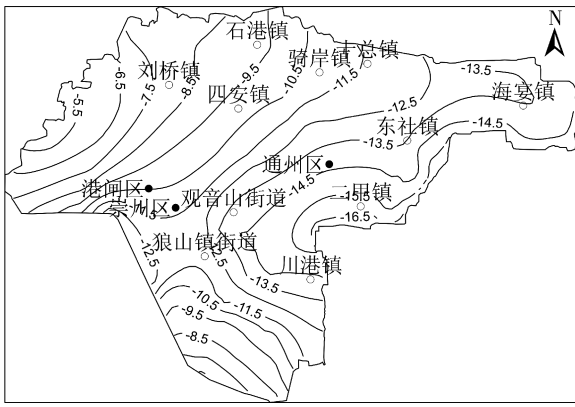
图6 地下水氯离子质量浓度拟合结果

Fig. 6 Fitting graph of the groundwater chloride ion concentration

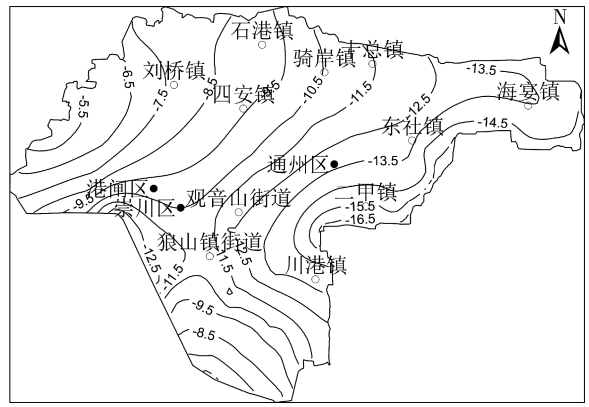
## 5 地下水水位与咸化趋势预测

### 5.1 现状开采条件下地下水水位与咸化趋势

按 2017 年现状开采布局及开采量对 2018—2034 年的地下水水位变化和地下水咸化趋势进行



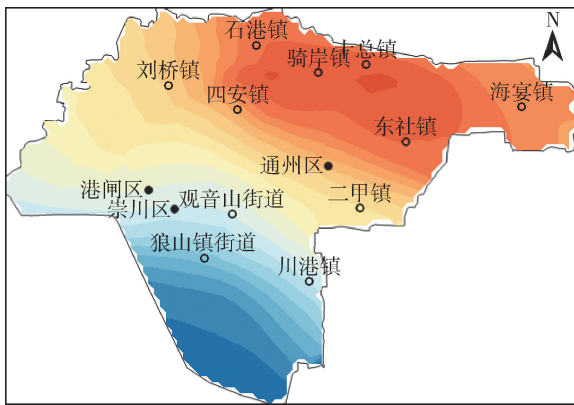
(a) 2024年12月31日



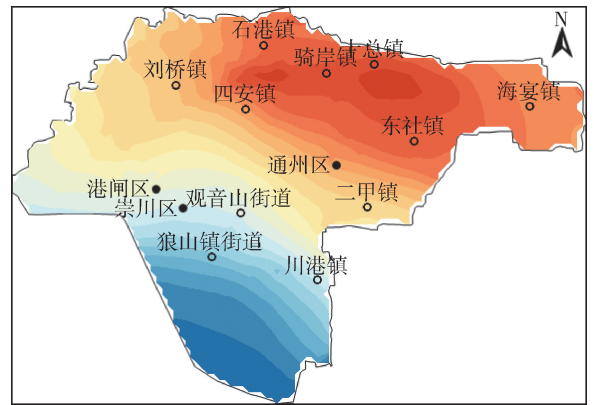
(b) 2034年12月31日

图9 现状开采条件下第Ⅲ承压含水层预测等水位线(单位:m)

Fig.9 Predicted flow field for aquifer No. III under current mining conditions(unit: m)



(a) 2024年12月31日



(b) 2034年12月31日

图10 现状开采条件下第Ⅲ承压含水层预测氯离子质量浓度场(单位:mg/L)

Fig.10 Predicted chloride ion concentration for aquifer No. III under current mining conditions(unit: mg/L)

2025—2029年、2030—2034年第Ⅲ承压水咸化速率分别为 $19.31 \text{ km}^2/\text{a}$ 、 $12.76 \text{ km}^2/\text{a}$ 、 $11.49 \text{ km}^2/\text{a}$ 和 $9.59 \text{ km}^2/\text{a}$ 。

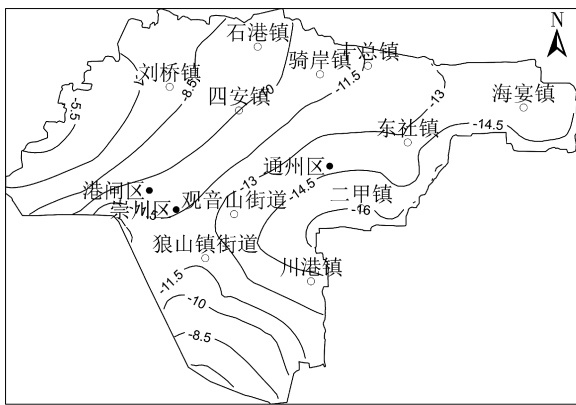
## 5.2 压缩开采条件下地下水水位与咸化趋势

南通市地下水压缩开采方案中共分为两个阶段,第一阶段为2018—2019年,研究区分布有55口开采井,其中第Ⅰ承压含水层分布有31口开采井,总开采量为 $352.05 \text{ 万 m}^3/\text{a}$ ,相比现状开采减少 $92.16 \text{ 万 m}^3/\text{a}$ ;第Ⅲ承压含水层分布有24口开采井,总开采量为 $154.60 \text{ 万 m}^3/\text{a}$ ,相比现状开采减少 $24.91 \text{ 万 m}^3/\text{a}$ ,其中港闸、崇川两区开采量为 $74.50 \text{ 万 m}^3/\text{a}$ ,通州区开采量为 $80.10 \text{ 万 m}^3/\text{a}$ 。第二阶段为2020—2034年,在第一阶段基础上不改变开采井的分布,继续减少每口井的开采量,其中第Ⅰ承压含水层总开采量减少为 $301.35 \text{ 万 m}^3/\text{a}$ ,相比现状开采减少 $142.86 \text{ 万 m}^3/\text{a}$ ;第Ⅲ承压含水层总开采量减少为 $108.90 \text{ 万 m}^3/\text{a}$ ,相比现状开采减少 $70.61 \text{ 万 m}^3/\text{a}$ ,其中港闸、崇川两区开采量为 $55.80 \text{ 万 m}^3/\text{a}$ ,通州区开采量为 $53.10 \text{ 万 m}^3/\text{a}$ 。降雨入渗量同现状开采条件。

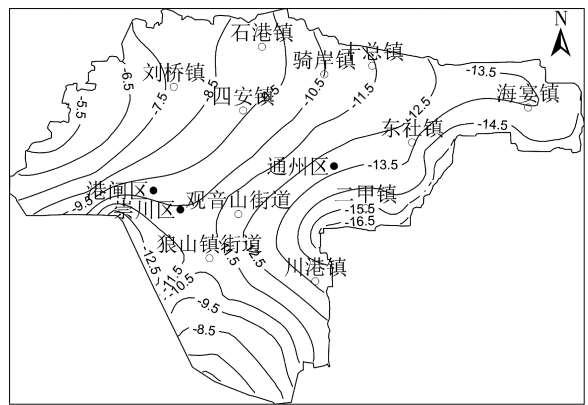
a. 地下水水位预测。图11为2024和2034年12月31日第Ⅲ承压含水层预测等水位线,可见第Ⅲ承压含水层地下水水位整体上是回升的。从2018—2034年,最靠近降落漏斗的观音山街道附近水位回升最快,水位上升 $8.00 \text{ m}$ ,相比现状开采水位上升了 $0.14 \text{ m}$ ,狼山镇街道水位回升 $4.31 \text{ m}$ ,相比现状开采水位上升 $0.19 \text{ m}$ 。

b. 地下水咸化预测。图12为压缩开采条件下2024和2034年12月31日第Ⅲ承压含水层预测氯离子质量浓度场,可以看出第Ⅲ承压含水层中氯离子质量浓度大于 $250 \text{ mg/L}$ 的面积从2018年初的 $147.35 \text{ km}^2$ 增加到2034年底的 $329.21 \text{ km}^2$ ,其中质量浓度大于 $270 \text{ mg/L}$ 的面积为 $1.76 \text{ km}^2$ 。2018—2019年、2020—2024年、2025—2029年、2030—2034年第Ⅲ承压水咸化速率分别为 $17.50 \text{ km}^2/\text{a}$ 、 $11.92 \text{ km}^2/\text{a}$ 、 $9.93 \text{ km}^2/\text{a}$ 和 $7.52 \text{ km}^2/\text{a}$ 。

由以上分析可知,现状和压缩开采两种条件下,第Ⅲ承压含水层地下水水位均逐渐上升,与上覆含水层之间的水头差均逐渐减小,因此上覆含水层的咸水入侵速度均逐渐减缓。相比于现状开采,压缩开



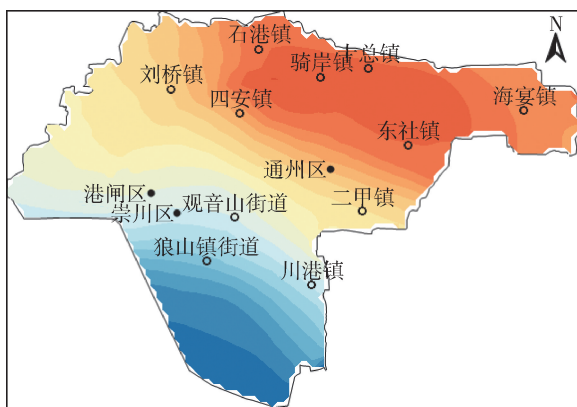
(a) 2024年12月31日



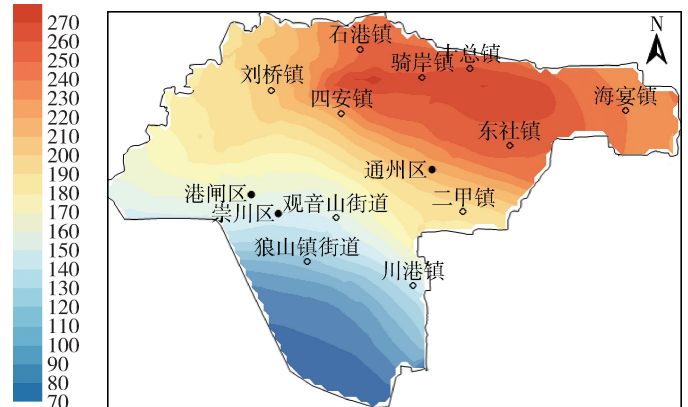
(b) 2034年12月31日

图 11 压缩开采条件下第Ⅲ承压含水层预测等水位线(单位:m)

Fig. 11 Predicted flow field for aquifer No. III under compression mining conditions(unit: m)



(a) 2024年12月31日



(b) 2034年12月31日

图 12 压缩开采条件下第Ⅲ承压含水层预测氯离子质量浓度场(单位:mg/L)

Fig. 12 Predicted chloride ion concentration for aquifer No. III under compression mining conditions(unit: mg/L)

采用压缩开采条件下第Ⅲ承压水咸化速率明显减慢,且咸化面积明显减少。由此可以判断,采用压缩开采方案能有效控制南通市第Ⅲ承压水的咸化问题。

25.96 km<sup>2</sup>和 28.91 km<sup>2</sup>,咸化速率明显减慢,采用压缩开采方案能有效控制南通市第Ⅲ承压水的咸化问题。

## 6 结论

a. 保持现状开采条件下,2034年底第Ⅲ承压含水层中氯离子质量浓度大于 250 mg/L 和 270 mg/L 的面积达到 355.17 km<sup>2</sup>和 30.67 km<sup>2</sup>,2018—2019年、2020—2024年、2025—2029年、2030—2034年第Ⅲ承压水咸化速率分别为 19.31 km<sup>2</sup>/a、12.76 km<sup>2</sup>/a、11.49 km<sup>2</sup>/a 和 9.59 km<sup>2</sup>/a。

b. 压缩开采条件下,2034年底第Ⅲ承压含水层中氯离子质量浓度大于 250 mg/L 和 270 mg/L 的面积分别达到 329.21 km<sup>2</sup>和 1.76 km<sup>2</sup>,2018—2019年、2020—2024年、2025—2029年、2030—2034年第Ⅲ承压水咸化速率分别为 17.50 km<sup>2</sup>/a、11.92 km<sup>2</sup>/a、9.93 km<sup>2</sup>/a 和 7.52 km<sup>2</sup>/a。

c. 压缩开采条件下,相比于现状开采条件 2018—2034年第Ⅲ承压含水层中氯离子质量浓度大于 250 mg/L 和 270 mg/L 的面积分别减少了

## 参考文献:

- [1] 邱琳. 应对南通沿海地区深层地下水咸化问题的思考[J]. 江南论坛, 2011(12): 41-42. (QIU Lin. Consideration on salinization of deep groundwater in Nantong coastal area[J]. Jiangnan Forum, 2011(12): 41-42. (in Chinese))
- [2] 邱琳. 江苏南通部分地区深层地下水咸化成因及对策[J]. 人民长江, 2012, 43(1): 52-54. (QIU Lin. Cause analysis of deep groundwater in partial area of Nantong City and countermeasures[J]. Yangtze River, 2012, 43(1): 52-54. (in Chinese))
- [3] 周慧芳, 谭红兵, 张文杰. 南通地区地下水循环与水化学时空变化规律研究[J]. 人民长江, 2014, 45(23): 103-108. (ZHOU Huifang, TAN Hongbing, ZHANG Wenjie. Groundwater circulation and temporal and spatial variation of hydrogeological chemistry in Nantong area, Jiangsu Province[J]. Yangtze River, 2014, 45(23): 103-

108. (in Chinese))
- [ 4 ] 周慧芳,谭红兵,高将,等.南通地区地下水咸化机理分析及改良措施[J].水资源保护,2015,31(4):70-76. (ZHOU Huifang, TAN Hongbing, GAO Jiang, et al. Analysis of salinization mechanism of groundwater in Nantong area and its improvement measures [J]. Water Resources Protection,2015,31(4):70-76. (in Chinese))
- [ 5 ] 杨楠,周俊,李世君,等.地下水开采引起水质变化的机理:以北京怀柔应急水源地为例[J].水资源保护,2013,29(3):15-18. (YANG Nan,ZHOU Jun,LI Shijun, et al. Mechanism of water quality variation caused by groundwater exploitation: a case study of Huairou emergency water source area in Beijing [J]. Water Resources Protection,2013,29(3):15-18. (in Chinese))
- [ 6 ] 王琦,马青山,骆祖江.南通市深层地下水咸化成因探究[J].中国煤炭地质,2017,29(11):41-45. (WANG Qi, MA Qingshan, LUO Zujiang. Probe into deep groundwater salinization genesis in Nantong City[J]. Coal Geology of China,2017,29(11):41-45. (in Chinese))
- [ 7 ] 单卫华,邢卫兵.南通沿海地区主采层地下水咸化特征[J].地质学刊,2008,32(4):286-291. (SHAN Weihua, XING Weibing. On salination properties of main groundwater mining strata along costal region in Nantong [J]. Journal of Geology, 2008, 32 (4) : 286-291. (in Chinese))
- [ 8 ] 李伟,骆祖江,王琰,等.地下水渗流与溶质运移三维耦合数值模型[J].勘察科学技术,2013(5):16-21. (LI Wei,LUO Zujiang, WANG Yan, et al. Three dimensional coupling numerical model of groundwater seepage and solute transportation [J]. Site Investigation Science and Technology,2013(5):16-21. (in Chinese))
- [ 9 ] 陈晓燕,马勇骥,崔勇.南通市深层地下水资源调查评价[J].治淮,2015(1):80-81. (CHEN Xiaoyan, MA Yongji, CUI Yong. Investigation and evaluation of deep groundwater resources in Nantong City[J]. Zhi Huai,2015(1):80-81. (in Chinese))
- [ 10 ] 安晓宇,王琦,桑辉,等.南通市地下水开采与地面沉降模拟预测[J].勘察科学技术,2013(1):43-47. (AN Xiaoyu, WANG Qi, SANG Hui, et al. Numerical simulation and prediction of groundwater exploitation and land subsidence in Nantong[J]. Site Investigation Science and Technology,2013(1):43-47. (in Chinese))
- [ 11 ] MA Qingshan, LUO Zujiang, HOWARD K W F, et al. Evaluation of optimal aquifer yield in Nantong City, China, under constraints of land subsidence[J]. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 2017, 51(1):124-137.
- [ 12 ] 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. (FU Yanling. Plan and evaluation of groundwater exploitable resources on the basis of land subsidence control in the regional loose sediment area [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012, 42(2):476-484. (in Chinese))
- [ 13 ] TSANG C F. The modeling process and model validation [J]. Groundwater, 2010, 29(6):825-831.
- [ 14 ] MA Qingshan, LUO Zujiang, WANG Qi. Evaluation of groundwater environment capacity: a case study of Nantong City, China [J]. Fresenius Environmental Bulletin, 2017, 26(8):5236-5250.
- [ 15 ] 王庆永,贾忠华,刘晓峰,等. Visual MODFLOW 及其在地下水模拟中的应用[J].水资源与水工程学报,2007(5):90-92. (WANG Qingyong, JIA Zhonghua, LIU Xiaofeng, et al. Visual MODFLOW and its application to groundwater simulation [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2007(5):90-92. (in Chinese))
- [ 16 ] 李广来,孙宏亮,倪艳芳,等. Visual Modflow 模型在地下水污染模拟预测中的应用研究[J].环境科学与管理,2017,42(6):92-94. (LI Guanglai, SUN Hongliang, NI Yanfang, et al. Regionalization of groundwater pollution control based on Visual Modflow [J]. Environmental Science and Management, 2017, 42 (6) : 92-94. (in Chinese))
- [ 17 ] 蔚东升,刘洁,冯兆东. Visual MODFLOW 在国内的应用[J].能源与节能,2014(6):96-97. (WEI Dongsheng, LIU Jie, FENG Zhaodong. Application of Visual MODFLOW in China [J]. Energy and Energy Conservation, 2014(6):96-97. (in Chinese))
- [ 18 ] 侯印伟,束龙仓,李广贺.关于地下水水质模拟中模拟因子选择的研究:以济宁市地下水水质模型为例[J].长春地质学院学报,1990(3):297-300. (HOU Yinwei, SHU Longcang, LI Guanghe. Research on modelling factors selection in groundwater quality modelling: make an example of groundwater quality model in Jining City [J]. Journal of Changchun University of Earth Science, 1990 (3):297-300. (in Chinese))
- [ 19 ] 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):19-23. (LUO Zujiang, ZHANG Yingying, SHI Chunhua. Three-dimensional numerical model for groundwater resource evaluation and plan in loose Quaternary sediments in Nantong [J]. Water Resources Protection, 2009, 25(5):19-23. (in Chinese))

(收稿日期:2019-04-24 编辑:熊水斌)