

DOI: 10.16788/j.hddz.32-1865/P.2024.21.010

引文格式: 杜菁菁, 张岩, 骆祖江, 张庆. 2025. 基于比奥固结理论的盐城市地面沉降模拟预测[J]. 华东地质, 46(1): 114-126. (DU J J, ZHANG Y, LUO Z J, ZHANG Q. 2025. Simulation and prediction of Yancheng ground subsidence based on Bio-consolidation theory[J]. East China Geology, 46(1): 114-126.)

基于比奥固结理论的盐城市地面沉降模拟预测

杜菁菁¹, 张岩², 骆祖江³, 张庆¹

(1. 中国地质调查局南京地质调查中心, 江苏南京 210016; 2. 自然资源部地裂缝地质灾害重点实验室, 江苏南京 210018; 3. 河海大学, 江苏南京 210098)

摘要:城市地面沉降可能会对建筑物和基础设施造成损坏, 影响城市的整体稳定性和安全性。文章以江苏省盐城市区为研究对象, 以比奥固结理论为基础, 引入黏弹塑性土体本构模型, 并考虑土体参数随应力状态的非线性变化, 建立了盐城市建筑荷载和地下水开采与地面沉降三维变参数全耦合黏弹塑性模型。结果表明: 在建筑荷载和地下水开采条件下, 研究区地下水水位持续回升, 整体出现回弹现象, 但在建筑荷载较大的中心城区, 地面回弹量较小, 甚至出现轻微沉降, 且 2021—2023 年产生的最大水平位移为 15 mm。研究结果可为盐城市防治和减轻地面沉降危害提供科学依据。

关键词: 盐城市; 地下水开采; 地面沉降; 建筑荷载; 比奥固结理论

中图分类号: P642.26

文献标识码: A

文章编号: 2096-1871(2025)01-114-13

随着城市规模的不断扩大, 人类工程建设引发的地面沉降问题日益凸显。由城市建设引起的地面沉降成为地面沉降研究领域中的新问题, 并开始受到越来越多的关注。地面沉降是指土体中流体的释放从而导致浮托力减小甚至消失, 有效应力增加, 固体颗粒形成的孔隙被压缩。过度开采地下水、地下采矿、地铁和隧道施工等, 是诱发地面沉降的常见原因。在城市发展过程中, 由于用水需求量增加而过度开采地下水, 导致地下水位下降, 进而引发地下水层中的土层松动、收缩, 最终导致了地面沉降。这种地面沉降通常会对城市基础设施和建筑物造成损害, 严重影响城市的发展和居民的生活质量。然而, 地下水过度开采引发的地面沉降过程涉及多种确定性因素和随机性因素的综合影响。因此, 正确描述地下水渗流和地层应力变化, 确定地面沉降模型, 并以此预测地下水可开采量和地面沉降量, 对控制地面沉降

至关重要。

在 20 世纪 70 年代以前, 学者们主要使用太沙基一维固结理论预测法和相关分析法来描述地面沉降与地下水开采量之间的关系。在 20 世纪 70 年代以后, 随着对地面沉降机理认识的深入和计算机的广泛应用, 学者们开始应用数学模型预测法进行地面沉降的预测工作。苏河源(1979)指出各土层在水位变化条件下会存在一定的残余变形量, 并基于此提出了单位变形量法、经验系数法和应力-应变系数法等简便易行的预测地面沉降的方法。张云等(2005)通过试验认为饱和砂性土的应变与应力和时间有关, 且呈非线性关系, 并用幂函数拟合饱和砂性土的应力-应变-时间关系, 从而为继续研究长期抽水和地面沉降的关系提供了一定的理论依据。然而, 上述研究均采用了部分耦合模型(熊小锋等, 2017)进行实验数据处理, 而地下水流模型和土体变形模型中的参数在沉降

* 收稿日期: 2024-01-10 修订日期: 2024-08-12 责任编辑: 袁静

基金项目: 自然资源部地裂缝地质灾害重点实验室开放课题“荷载和地下水开采引发地面沉降地裂缝模拟预测三维变参数黏弹塑性全耦合模型研究(编号: EFGD20210507)”资助。

第一作者简介: 杜菁菁, 1994 年生, 女, 助理工程师, 硕士, 主要从事水工环地质调查研究工作。Email: 867293279@qq.com。

通信作者简介: 张庆, 1986 年生, 男, 高级工程师, 博士, 主要从事城市地质、地热资源调查评价等研究工作。Email: sys8633@126.com。

过程中是变化的,部分耦合模型只能体现在参数随沉降的变化中,无法将土的变形模型和地下水流模型在时间和空间上同步,孔隙水压力和变形也无法同时算出。目前,不论是国内还是国外用于模拟预测地下水开采与地面沉降之间关系的数学模型,均以 Darcy 定律和 Terzaghi 一维固结理论为基础(Francesco, 2013; Rogers 和 Chung, 2016; 朱春芳等, 2023),而忽略了弱透水层的释水机理,无法完整地刻画因地下水开采引发的地面沉降机制,进而影响模拟预测结果的精确度。

江苏省盐城市具有较为典型的地面沉降问题,故本次选择盐城市作为工作区域进行研究。自2016年以来,随着盐城市经济建设进程的加快,附加于软弱地层上的城市建筑荷载及工程设施不断增加,外部荷载的作用也加速了浅部地层的垂向变形,从而使区内地面沉降形成机理变得更为复杂(顾晟彦等, 2020; 黎伟等, 2015; 王艺伟, 2016; 薛禹群和张云, 2016)。盐城市建筑荷载主要分布在城区范围内,其中城北区、城西区 and 城南区最为密集。新建的高层建筑物主要分布于城东区 and 城南区。城南区荷载值大,且建筑密度较高,容易引起大面积的大沉降。城东区目前开发程度较低,现有建筑高度较低,新建的建筑多为高层建筑,荷载值较大,密度相对偏小,易引起局部的大沉降,

根据往年地面沉降监测资料,后续可能持续产生沉降。盐城市地下水开采始于20世纪60年代,80年代末地下水开采达到第一个高峰,全市地下水年开采总量达5500万 m^3 。由于开采较为集中,盐城市区地下水位急剧下降,地面沉降量均 $>100\text{mm}$ 。至1995年底,全市已有深井2257眼,年开采量超过1亿 m^3 (杨红尉和张凤莲, 2016)。

本文基于盐城市地质环境背景、水文地质、工程地质、野外调查以及物探成果,结合比奥固结理论(陈卓和骆祖江, 2017),引入黏弹塑性土体本构模型(韩帅等, 2023; 胡小荣等, 2022; 姜月华等, 2023),考虑土体参数随应力状态的非线性变化,建立了盐城市建筑荷载、地下水开采与地面沉降的三维变参数全耦合黏弹塑性模型,用以模拟和预测盐城市地面沉降的发展趋势。

1 研究区概况

本次研究的区域包括盐城市盐都区、亭湖区、经济技术开发区和城南新区,陆域面积约为2130 km^2 (图1)。研究区均被第四系所覆盖,厚度一般为200~360m(王艺伟, 2016)。根据地下水赋存条件,并结合地层时代特征,将区内的含水层由上到下分别划分为潜水含水层以及第I、第II、

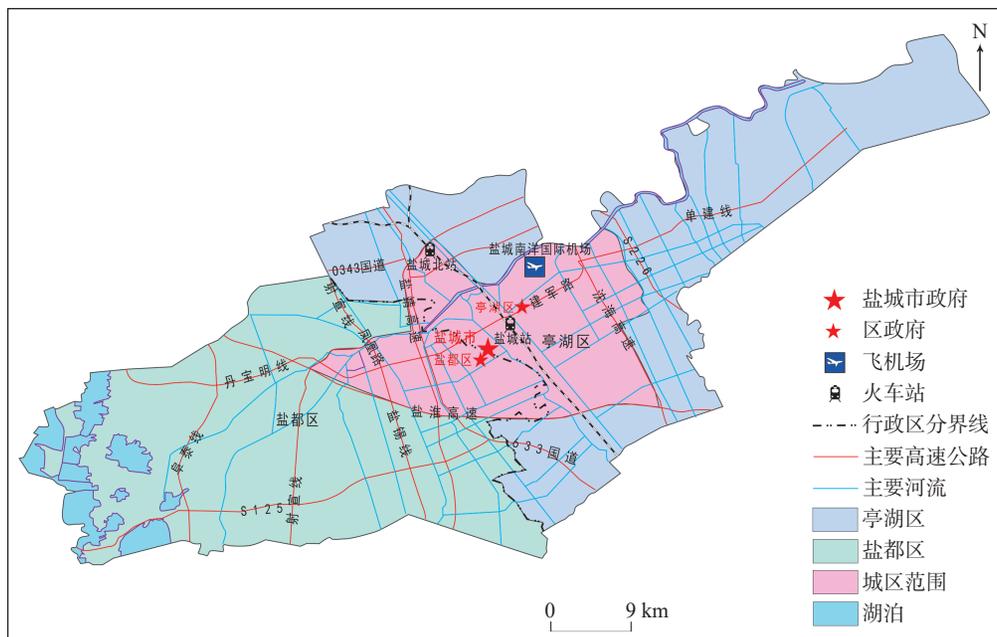


图1 研究区范围示意图

Fig. 1 The scope of the study area

第Ⅲ、第Ⅳ和第Ⅴ5个承压含水层,各含水层之间均以弱含水的黏性土层相分隔,形成了一个复合含水系统。潜水含水层为全新世滨海相沉积地层,广泛分布填土、淤泥质粉质黏土夹粉土和粉砂。第Ⅰ承压含水层为晚更新世滨海相沉积地层,广泛分布粉质黏土和粉砂。第Ⅱ承压含水层为中更新世泛滥平原相沉积地层,大部分为粉质黏土夹粉土。第Ⅲ承压含水层为早更新世河湖相沉积地层,多分布粉砂和黏土。第Ⅳ承压含水层和第Ⅴ承压含水层多为泥岩、砂岩和砂砾岩。

研究区内潜水含水层的利用程度一般,主要为零散分布在农村地区的民井,取水深度通常 $<6\text{ m}$ 。该层水受环境影响较大,水质较差,主要受大气降雨和地表水盐冲淡作用的影响(王艺伟, 2016)。第Ⅰ承压含水层利用程度较低,富水性一般较差。第Ⅱ承压含水层受人工开采影响较大,在研究区一带形成了一定规模的降落漏斗。第Ⅲ承压含水层水质较好,是盐城市主城区最主要的地下水开采层位,已形成了以盐城市区为中心的降落漏斗,使各含水层之间在垂向上形成了较大的水位差,导致了各含水层之间发生了强烈的水力联系,并且由于地下水开采和大气降雨季节性的影响,地下水位常发生强烈的波动。而在垂向上,第Ⅳ承

压含水层和第Ⅴ承压含水层的孔隙砂层胶结程度较好,且与第四系孔隙含水层之间分布有较稳定的由致密亚黏土组成的隔水层,厚度一般可达 $30\sim 50\text{ m}$,隔水性能良好,导致两者水力联系较弱。此外,第Ⅳ承压含水层和第Ⅴ承压含水层埋藏深度大,地下水开采利用程度较低,对土体变形的影响程度较小。因此,本文将整个第四系界定为研究范围,其中上部边界为地表面,下部边界为第Ⅲ承压含水层的底板,地下水流态概化为三维非稳定流。

2 水-土全耦合模型控制方程

2.1 比奥固结理论及本构方程

基于研究区的地质概况,本文采用盐城市区地下的第Ⅲ承压含水层参数进行数值建模。以往对地面沉降的计算多是采用一维太沙基固结理论(宗梦繁, 2021),而太沙基固结理论假定土层只有竖向变形,而无侧向膨胀。所以,在本次的三维情况下,该理论并不适用模拟研究。因此,本文以比奥固结理论为基础(陈晓平和白世伟, 2001; 何宏宇, 2019; 李辉, 2017; 罗跃等, 2018; 骆祖江等, 2019; 马青山和骆祖江, 2015; 维亚洛夫, 1987),建立了如公式(1)所示的盐城市三维水-土全耦合数学模型:

$$\left\{ \begin{array}{l} -G\nabla^2 w_x - \frac{G}{1-2\nu} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \\ -G\nabla^2 w_y - \frac{G}{1-2\nu} \cdot \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial u}{\partial y} = 0 \\ -G\nabla^2 w_z - \frac{G}{1-2\nu} \cdot \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial u}{\partial z} = -\gamma \\ -\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) + \frac{1}{\gamma_w} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(k_{xx} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{yy} \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{zz} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \gamma_w \right) \right) \right] + W = 0 \end{array} \right. \quad (1)$$

公式(1)可以简写成:

$$\left\{ \begin{array}{l} -[B]^T [D] [B] \{w\} + [B]^T [M] u = \{f\} \\ [C]^T \frac{\partial}{\partial t} \{w\} - \frac{1}{r_w} [C]^T [K] [C] u = \{Q\} \end{array} \right. \quad (2)$$

式中: $\{w\} = \{w_x, w_y, w_z\}^T$ 分别为计算点在 x, y, z 方向上的位移; $[D]$ 为应力应变关系矩阵,即本构方程; $\{f\} = \{f_x, f_y, f_z\}^T$ 分别为该点体积力在 x, y, z 方向上的体力; u 为超静孔隙水压力; $[M] = \{1, 1, 1, 0, 0, 0\}^T$; k_{xx} 、 k_{yy} 、 k_{zz} 分别为 3 个方向的渗透系数; Q

为计算点的等效流量; $[C] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} & \frac{\partial N_i}{\partial y} & \frac{\partial N_i}{\partial z} \end{bmatrix}^T$
 $(i = 1, 2, \dots, 8)$; γ_w 为水的重度; $[K] = \begin{bmatrix} k_x & 0 & 0 \\ 0 & k_y & 0 \\ 0 & 0 & k_z \end{bmatrix}$;
 $B_i = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial z} & 0 & \frac{\partial N_i}{\partial y} & 0 & 0 & \frac{\partial N_i}{\partial x} \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial z} & \frac{\partial N_i}{\partial x} & 0 & \frac{\partial N_i}{\partial y} & 0 \\ \frac{\partial N_i}{\partial x} & \frac{\partial N_i}{\partial y} & 0 & \frac{\partial N_i}{\partial z} & 0 & 0 \end{bmatrix}^T (i = 1, 2, \dots, 8)$

土体本构关系是描述土体应力-应变关系的数学表达式。流变特性的土是具有弹性、塑性和黏滞性的黏弹塑性体, 总应变增量 $d\varepsilon_v$ 分别为弹性应变增量 $d\varepsilon^e$ 、黏弹性应变增量 $d\varepsilon^{ve}$ 和黏塑性应变增量 $d\varepsilon^{vp}$ 的总和, 即:

$$d\varepsilon_v = d\varepsilon^e + d\varepsilon^{ve} + d\varepsilon^{vp} \quad (3)$$

2.2 土体动态参数演化

2.2.1 渗透系数与有效孔隙度的非线性关系

在建筑荷载及地下水开采的影响下, 孔隙水应力消散引起土体骨架应力重分布, 土体中的应力状态发生变化, 宏观上表现为土体的固结变形, 有效孔隙度 n 和渗透率等参数发生变化。根据 Kozeny-Carman 方程, 结合比奥固结理论及研究区实际情况, 忽略岩土颗粒表面积的变化与热膨胀颗粒体积的微小变化, 可以得到渗透率与体应变、初始有效孔隙度间的关系式为:

$$k = \frac{k_0}{1 + \varepsilon_v} \cdot \left(1 + \frac{\varepsilon_v}{n_0}\right)^3 \quad (4)$$

式中: n_0 为初始有效孔隙度; k_0 为初始渗透率; ε_v 为体应变。

2.2.2 变形模量和泊松比的非线性关系

根据邓肯-张模型的切线泊松比公式, 将土体的本构关系矩阵推广到非线性, 则公式(2)中本构关系矩阵 $[D]$ 中的弹性常数不再视为常量, 而是随应力状态发生改变。切线变形模量 E_t 和切线泊松比 ε_l 的表达式为:

$$\begin{cases} E_t = kP_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a}\right)^m \left[1 - R_f \frac{(1 - \sin\varphi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2c \cos\varphi + 2\sigma_3 \sin\varphi}\right]^2 \\ \varepsilon_l = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{kP_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a}\right)^n \left[1 - R_f \frac{(1 - \sin\varphi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2c \cos\varphi + 2\sigma_3 \sin\varphi}\right]^2} \end{cases} \quad (5)$$

式中: k 为无因次基数; P_a 为大气压力; m 、 n 为无因次指数; R_f 为破坏比; C 为土体的粘聚力; $\sigma_1 - \sigma_3$ 为主应力差; φ 为内摩擦角。

2.3 定解条件

2.3.1 初始条件

(1) 孔隙水压力初始条件。其值为 2016 年 1 月 1 日各含水层流场的实测值, 各含水层之间弱含水层的初始流场由上、下含水层插值给出:

$$u(x, y, z, t)|_{t=0} = u_0(x, y, z) = \gamma_w h_0(x, y, z, t_0) \quad (x, y, z) \in \Omega, \quad (6)$$

式中: $u_0(x, y, z)$ 为研究区域内已知初始孔隙水压力; $h_0(x, y, z, t_0)$ 为初始水头值; γ_w 为水的重度, Ω 为整个研究区域。

(2) 地应力初始条件。采用土体的自重应力估算土体的初始应力:

$$\begin{cases} \sigma_z = \gamma z \\ \sigma_x = K_0 \gamma z \end{cases} \quad (7)$$

式中: σ_x 、 σ_z 为土体的初始水平向和垂向应力; z 为各层计算点深度; K_0 为静止侧压力系数, $K_0 = \begin{cases} 1 - \sin\varphi' & \text{砂土} \\ 0.95 - \sin\varphi' & \text{黏土} \end{cases}$; φ' 为有效内摩擦角。

(3) 位移初始条件。2016 年 1 月 1 日各含水层的初始位移值设为 0, 作为模型的位移初始条件:

$$w(x, y, z, t)|_{t=0} = 0 \quad (x, y, z) \in \Omega, \quad (8)$$

式中: w 为计算点在 x 、 y 、 z 方向上的位移。

2.3.2 边界条件

根据研究区多年的工程地质条件与水文地质条件, 将其四周概化为第二类边界条件。研究区的顶部(地表)一方面接受大气降水的补给, 是补给边界, 另一方面地下水又通过其蒸发, 是排泄边界, 系统的底部为隔水边界。研究区所有侧向边界和底部边界在土力学上均概化为零位移边界, 具体表述如下:

(1) 流量边界条件 Γ_2 。

$$K \frac{\partial H}{\partial n} \Big|_{\Gamma_2} = q_L, \quad (9)$$

式中: q_L 为边界 Γ_2 上的已知单位面积流量。

(2) 自由面边界条件 Γ_3 。

$$u = Z; \quad q = -\mu \frac{\partial u}{\partial t} \cos\theta, \quad (10)$$

式中: μ 为土体给水度; θ 为自由面外法线方向与垂线的交角; q 为通过自由面边界 Γ_3 的单位面积流量; Z 为自由面所在的高程。

(3) 位移边界条件 Γ_4 。

$$\begin{aligned} w_x|_{\Gamma_4} &= \overline{w_x} \\ w_y|_{\Gamma_4} &= \overline{w_y}, \\ w_z|_{\Gamma_4} &= \overline{w_z} \end{aligned} \quad (11)$$

式中: $\overline{w_x}$ 、 $\overline{w_y}$ 、 $\overline{w_z}$ 分别代表位移边界 Γ_4 上 3 个方向的已知

位移,本次模拟将位移边界上3个方向的位移取值为0。

3 模型的建立与识别验证

3.1 模型的建立

根据研究区第四纪地层的结构特征及几何形状,对研究区进行三维剖分。在平面上剖分成4 355个矩形网格单元,垂向上从上往下将潜水含水层、第I承压含水层、第II承压含水层、第III承压含水层及各含水层之间的黏性土弱含水层剖分成7个独立的层位参与计算。垂向深度为230~350 m,面积为2 130 km²,单元总数为30 485个,节点总数为36 984个(图2)。

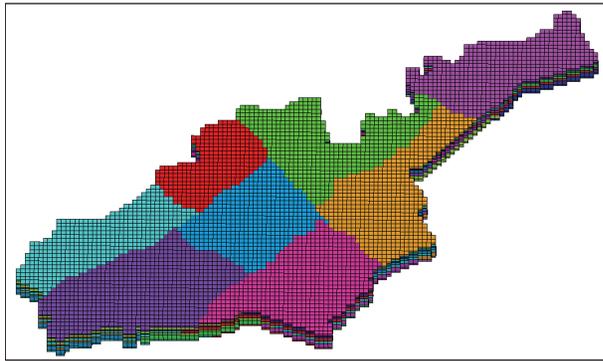


图2 研究区网格剖分立体图

Fig. 2 Grid subdivision stereogram of the study area

3.2 模型识别与验证

为了使地下水非稳定渗流三维有限元计算机程序和地下水渗流与土体变形全耦合三维有限元计算机程序具有更强的可操作性和更好的应用价值,且对计算结果有较好的表达效果,在Microsoft Windows 11操作系统环境下,使用Microsoft Visual Basic 6.0语言编制了可视化的计算机软件(GSM)。利用开发的有限元计算机模型软件,选取2016年1月1日至2020年12月31日为期5年的观测资料,对模型的参数进行反演分析,每个季度作为1个应力期,共分20个应力期,每个应力期为1个时间步长。经识别和验证,模型共分为54个参数分区,各层参数分区如图3—图9所示,参数值详见表1。以第III承压含水层为例,图10显示了盐城市2016—2018年累计地面沉降总量;以国家粮库监测井处为例,图11为该监测井处的水位拟合图。

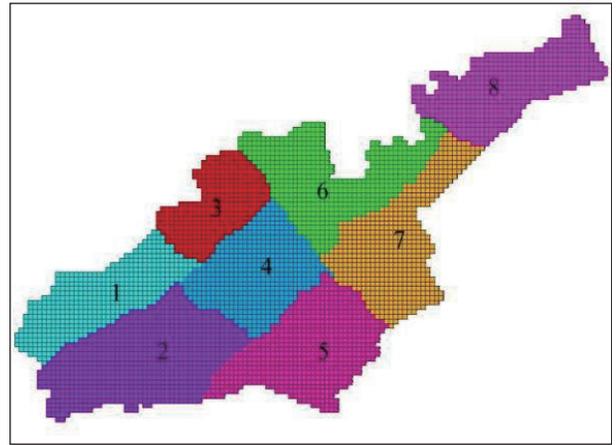


图3 盐城市潜水含水层参数分区图

Fig. 3 Parameter partition of phreatic aquifer group in Yancheng

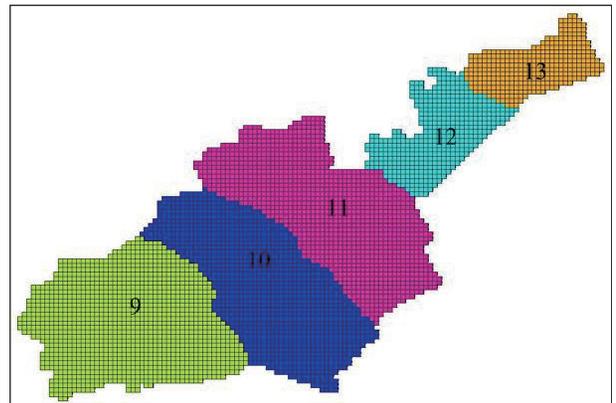


图4 盐城市第I弱含水层参数分区图

Fig. 4 Parameter partition of the first aquitard group in Yancheng

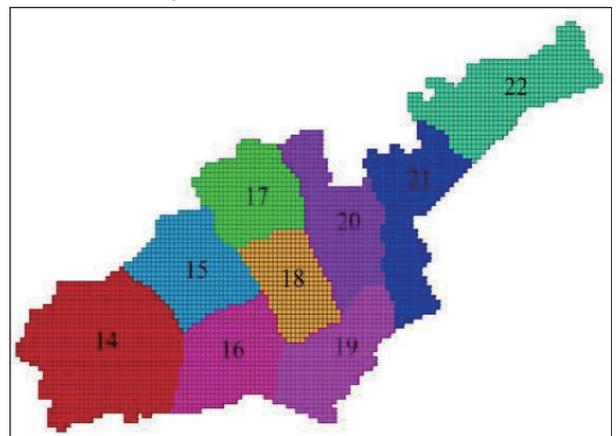


图5 盐城市第I承压含水层参数分区图

Fig. 5 Parameter partition of the first confined aquifer group in Yancheng

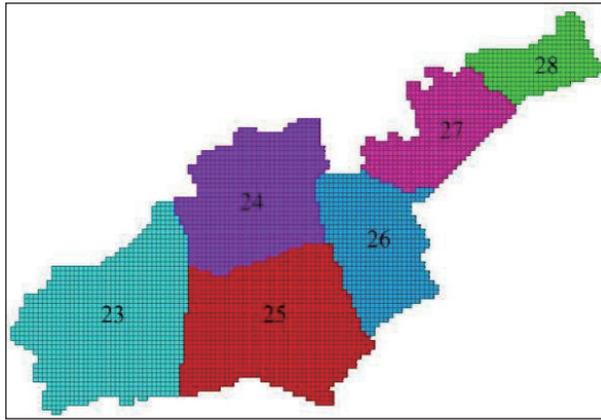


图6 盐城市第Ⅱ弱含水层参数分区图

Fig. 6 Parameter partition of the second aquitard group in Yancheng

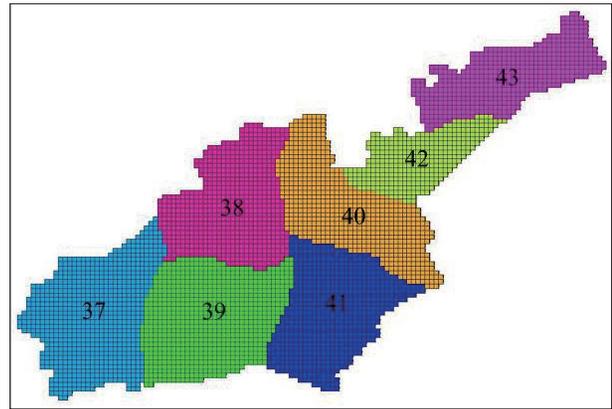


图8 盐城市第Ⅲ弱含水层参数分区图

Fig. 8 Parameter partition of the third aquitard group in Yancheng

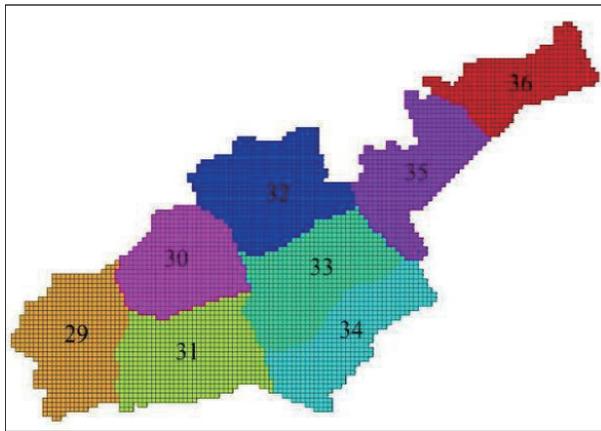


图7 盐城市第Ⅱ承压含水层参数分区图

Fig. 7 Parameter partition of the second confined aquifer group in Yancheng

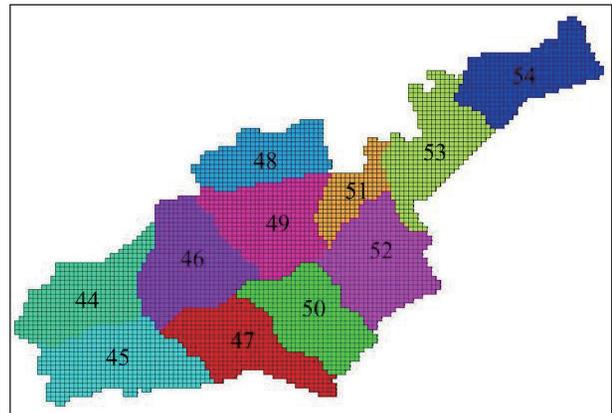


图9 盐城市第Ⅲ承压含水层参数分区图

Fig. 9 Parameter partition of the third confined aquifer group in Yancheng

表1 盐城市含水层参数分区表

Table 1 Parameter partition of aquifer in Yancheng

分区	主轴方向渗透系数/(m/d)			变形模量/MPa	泊松比	粘聚力/KPa	摩擦角/°	膨胀角/°	重度/(KN/m ³)	有效孔隙度
	K_{xx}	K_{yy}	K_{zz}							
1	3.2	3.2	0.32	27	0.40	3.0	33.6	0	20.42	0.422
2	4.4	4.4	0.44	26	0.45	5.0	34.3	0	21.54	0.418
3	2.8	2.8	0.28	24	0.39	6.0	35.1	0	20.73	0.425
4	3.5	3.5	0.35	25	0.38	8.0	35.7	0	21.41	0.416
5	3.2	3.2	0.32	23	0.36	5.5	34.8	0	19.86	0.419
6	3.6	3.6	0.36	25	0.42	4.5	34.2	0	20.28	0.428
7	4.1	4.1	0.41	27	0.47	4.0	34.0	0	19.75	0.431
8	3.4	3.4	0.34	22	0.48	3.0	33.6	0	20.64	0.418
9	5.2×10^{-3}	5.2×10^{-3}	5.2×10^{-4}	18	0.48	15.0	21.5	0	21.37	0.522
10	4.3×10^{-3}	4.3×10^{-3}	4.3×10^{-4}	16	0.47	17.0	23.2	0	20.68	0.518
11	4.6×10^{-3}	4.6×10^{-3}	4.6×10^{-4}	15	0.48	18.0	20.9	0	20.24	0.525
12	5.0×10^{-3}	5.0×10^{-3}	5.0×10^{-4}	17	0.48	14.0	21.2	0	19.57	0.516

续表 1

分区	主轴方向渗透系数/(m/d)			变形模量/MPa	泊松比	粘聚力/KPa	摩擦角/ $^{\circ}$	膨胀角/ $^{\circ}$	重度/(KN/m ³)	有效孔隙度
	K_{xx}	K_{yy}	K_{zz}							
13	5.5×10^{-3}	5.5×10^{-3}	5.5×10^{-4}	19	0.48	15.0	20.8	0	19.11	0.519
14	34	34	3.4	30	0.38	4.0	34.2	0	21.32	0.437
15	33	33	3.3	28	0.40	3.5	35.1	0	20.87	0.422
16	30	30	3.0	31	0.37	4.0	34.7	0	20.55	0.416
17	28	28	2.8	29	0.39	4.3	33.6	0	20.38	0.426
18	24	24	2.4	32	0.36	5.5	33.2	0	20.14	0.430
19	35	35	3.5	33	0.35	4.8	34.0	0	21.11	0.421
20	32	32	3.2	29	0.41	4.6	34.5	0	22.13	0.419
21	40	40	4.0	27	0.42	3.8	35.0	0	20.72	0.424
22	36	36	3.6	26	0.40	3.5	35.8	0	20.16	0.417
23	2.6×10^{-4}	2.6×10^{-4}	2.6×10^{-5}	25	0.44	18.2	20.6	0	19.76	0.492
24	3.0×10^{-4}	3.0×10^{-4}	3.0×10^{-5}	22	0.48	17.5	20.6	0	20.33	0.488
25	3.3×10^{-4}	3.3×10^{-4}	3.3×10^{-5}	21	0.46	17.2	20.6	0	19.54	0.485
26	2.8×10^{-4}	2.8×10^{-4}	2.8×10^{-5}	23	0.48	16.7	20.6	0	20.48	0.506
27	2.0×10^{-4}	2.0×10^{-4}	2.0×10^{-5}	24	0.47	16.1	20.6	0	21.25	0.490
28	2.4×10^{-4}	2.4×10^{-4}	2.4×10^{-5}	26	0.45	16.5	20.6	0	21.66	0.483
29	5.0	5.0	0.50	36	0.38	5.3	34.2	0	20.11	0.397
30	5.6	5.6	0.56	35	0.41	4.2	35.4	0	19.83	0.382
31	6.2	6.2	0.62	34	0.39	4.8	36.6	0	19.97	0.376
32	5.3	5.3	0.53	38	0.42	6.6	31.8	0	20.42	0.390
33	5.1	5.1	0.51	39	0.40	5.8	32.4	0	20.63	0.385
34	6.0	6.0	0.60	41	0.44	6.3	36.1	0	21.37	0.388
35	4.5	4.5	0.45	38	0.41	5.7	35.5	0	20.44	0.391
36	4.8	4.8	0.48	36	0.41	5.5	35.0	0	20.71	0.393
37	2.0×10^{-4}	2.0×10^{-4}	2.0×10^{-5}	32	0.48	17.6	21.1	0	20.64	0.492
38	1.6×10^{-4}	1.6×10^{-4}	1.6×10^{-5}	35	0.43	18.8	20.7	0	20.52	0.488
39	1.0×10^{-4}	1.0×10^{-4}	1.0×10^{-5}	34	0.46	19.4	20.5	0	20.73	0.485
40	1.2×10^{-4}	1.2×10^{-4}	1.2×10^{-5}	36	0.44	18.7	20.8	0	20.16	0.506
41	1.8×10^{-4}	1.8×10^{-4}	1.8×10^{-5}	35	0.42	18.2	21.2	0	19.92	0.490
42	7.0×10^{-5}	7.0×10^{-5}	7.0×10^{-6}	33	0.47	17.8	20.3	0	19.63	0.483
43	9.0×10^{-5}	9.0×10^{-5}	9.0×10^{-6}	32	0.45	17.5	20.4	0	19.17	0.482
44	13	13	1.3	45	0.39	5.8	34.8	0	20.18	0.435
45	12	12	1.2	46	0.41	6.2	34.2	0	20.54	0.432
46	18	18	1.8	50	0.40	6.0	33.7	0	21.62	0.426
47	20	20	2.0	48	0.38	5.9	33.4	0	20.35	0.420
48	16	16	1.6	46	0.36	6.5	32.8	0	21.24	0.433
49	12	12	1.2	53	0.39	6.4	32.5	0	21.33	0.428
50	14	14	1.4	48	0.37	6.1	33.4	0	21.17	0.419
51	9	9	0.9	49	0.41	5.8	35.5	0	20.93	0.413
52	8.5	8.5	0.85	51	0.43	5.7	36.1	0	20.54	0.417
53	3	3	0.3	47	0.45	5.3	37.0	0	20.36	0.437
54	4.5	4.5	0.45	45	0.46	5.0	37.5	0	20.22	0.422

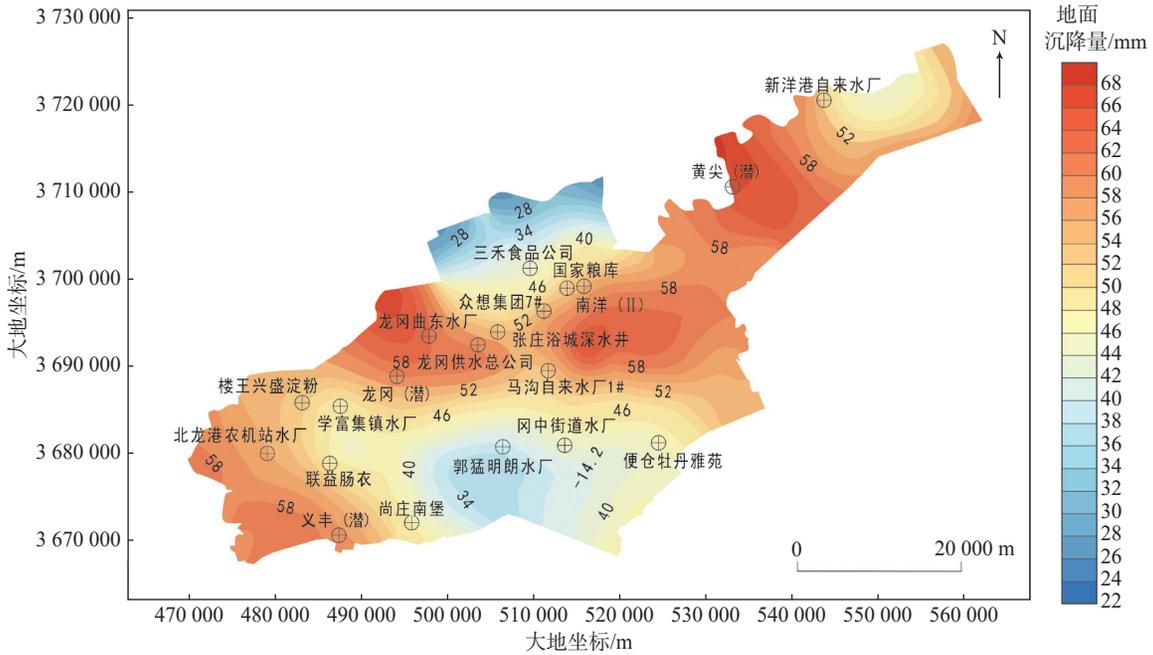


图10 2016—2018年盐城市累计地面沉降量图

Fig. 10 Accumulative land subsidence in Yancheng from 2016 to 2018

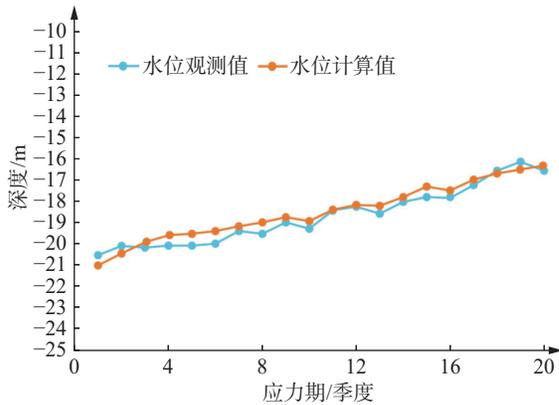


图11 盐城市国家粮库井(Ⅲ)地下水位拟合图

Fig. 11 Fitting condition of groundwater level under National Grain Depot Well(III) in Yancheng

4 研究区地面沉降模拟预测

4.1 地面沉降耦合模型预测

2013年,盐城市亭湖区地下水开采量为 $783.12 \times 10^4 \text{ m}^3$,盐都区地下水开采量为 $944.45 \times 10^4 \text{ m}^3$,两个区的开采强度均超过 $9\,000 \text{ m}^3/(\text{a} \cdot \text{km}^2)$ 。开采期后,开采量呈逐年下降趋势。至2020年,研究区地下水年开采量已下降至约 $95.07 \times 10^3 \text{ m}^3$,下降幅度超过94.5%。此外,工作区的地下水开采呈现出“开采层位集中、深井分布集中”的特点。地下

水开采主要集中在第Ⅲ承压含水层。

在同时考虑建筑荷载和地下水现状开采两种作用的情况下,利用已经识别和验证过的建筑荷载、地下水渗流与土体变形三维全耦合数值模型,预测计算2021年1月1日至2030年12月31日各含水层地下水流场和地面沉降的发展变化趋势。预测结果以第Ⅲ承压含水层为例,图12的动态曲线显示了国家粮库监测井第Ⅲ承压含水层水位和该监测井10年的累计地面沉降总量,图13为研

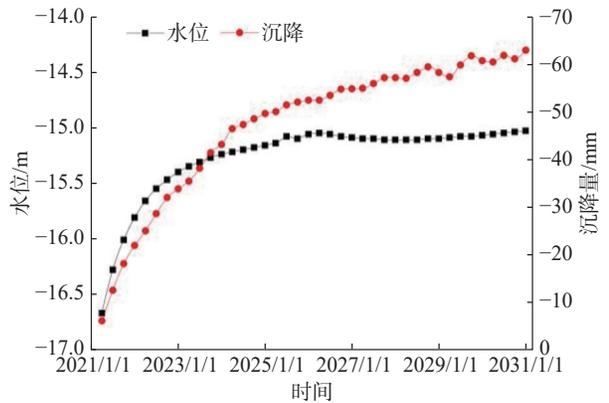


图12 国家粮库井第Ⅲ承压含水层水位和总地面沉降动态曲线图

Fig. 12 Dynamic curves of the water level of the third confined aquifer and the total ground subsidence at National Grain Depot Well

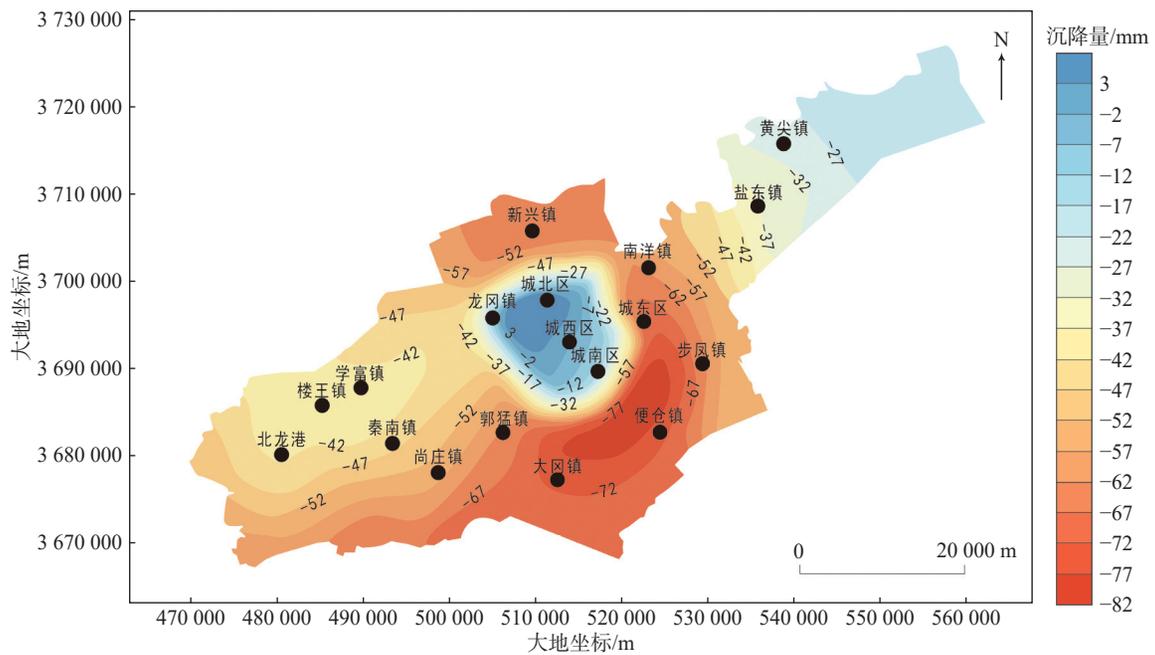


图 15 2021—2030 年预测累计地面沉降量等值线图

Fig. 15 Contour of the accumulative land subsidence from 2021 to 2030

的区域性大漏斗。

从 2021 年 1 月 1 日到 2030 年 12 月 31 日累计地面沉降量等值线图(图 15)可以看出,盐城市潜水含水层的最大压缩量位于城西区。第Ⅲ承压含水层发生较大幅度回弹,最大回弹量主要分布于新兴镇,最小回弹量主要分布于北龙港。

在建筑荷载和地下水现状开采条件下,盐城市 2021 年 1 月 1 日至 2030 年 12 月 31 日预测累计最大地面回弹量为 82 mm(图 15),最大地面回弹速率为 8.2 mm/a,主要位于大冈镇和便仓镇。预测累计最大地面沉降量为 3 mm,最大地面沉降速率为 0.3 mm/a,主要位于城北区和龙冈镇附近。

垂向上,潜水含水层和第Ⅰ弱含水层是沉降发生的主要层位,占总变形量的 45.5%;第Ⅱ承压含水层和第Ⅲ承压含水层是现状地下水开采时引发土体回弹的主要层位,占总变形量的 47.8%。地下水水位恢复呈现“前期增长快、后期逐渐稳定”的特点。

5 结论

(1)在建筑荷载和现状地下水开采作用下,盐

城市 2021 年 1 月 1 日至 2030 年 12 月 31 日潜水含水层预测最大压缩量位于城西区,第Ⅰ黏性土弱透水层最大压缩量位于城西区,第Ⅰ承压含水层最大回弹量位于大冈镇以东地区,第Ⅱ黏性土弱透水层最大回弹量位于北龙港,第Ⅱ承压含水层最大回弹量位于便仓镇和大冈镇,第Ⅲ黏性土弱透水层最大回弹量位于城北区和龙冈镇,第Ⅲ承压含水层最大回弹量位于新兴镇。

(2)截止到 2031 年 1 月 1 日,盐城市建筑荷载和现状地下水开采情况下的预测累计地面回弹量为 2~82 mm,城西区存在轻微沉降。盐城市区内一共存在 3 个典型的地面回弹漏斗,分别为以大冈镇和便仓镇为中心的大规模回弹漏斗、以楼王镇和学富镇为中心的次规模回弹漏斗和城中心的极小回弹漏斗。

(3)考虑建筑荷载与地下水现状开采共同作用时,2021—2030 年产生的最大水平位移为 15 mm,发生在第Ⅰ黏性土弱透水层。

(4)目前,盐城市区城市建设正处在高速发展阶段,建筑荷载的分布特征处在不断变化之中,地面沉降的分布特征也将随之发生变化,建议加强地面荷载的动态统计以及地下水开采的实时统计更新。

References

- CHEN X P, BAI S W. 2001. The numerical analysis of visco-elastic-plastic Biot's consolidation for soft clay foundation[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 23(4): 481-484 (in Chinese with English abstract).
- CHEN Z, LUO Z J. 2017. Sensitivity analysis of parameters on Biot's consolidation full coupled model[J]. *Journal of Nanchang University (Engineering & Technology)*, 39(4): 354-360, 379 (in Chinese with English abstract).
- FRANCESCO R D. 2013. Exact solution of Terzaghi's consolidation equation and extension to two/three-dimensional cases[J]. *Applied Mathematics*, 4(4): 713-717.
- GU S Y, YAO W J, XU M Z, WANG D. 2020. Risk evaluation of land subsidence in Yancheng of Jiangsu Province[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 31(1): 36-43 (in Chinese with English abstract).
- HAN S, HUI S J, SUN Q, ZHANG S, SHI L, ZHANG Y, ZHU Q W. 2023. Research on ecological restoration technology of high-steep slopes of abandoned mines based on geological safety evaluation[J]. *East China Geology*, 44(2): 216-227 (in Chinese with English abstract).
- HE H Y. 2019. Land subsidence analysis and numerical simulation of Dongguang[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- HU X R, CAI X F, LI C B, ZHANG Z R, QU P. 2022. Triple-shear elasto-plastic constitutive models of unsaturated clays in normal consolidation[J]. *Engineering Mechanics*, 39(1): 164-174 (in Chinese with English abstract).
- JIANG Y H, ZHOU Q P, NI H Y, CHEN L D, CHENG H Q, LEI M T, GE W Y, MA T, SHI B, CHENG Z Y, DUAN X J, SU J W, ZHU J Q, XIU L C, XIANG F, ZHU Z M, FENG N Q, XIE Z S, TAN J M, PENG K, GUO S Q, FU Y P, REN H Y, SUN J P, YANG Q, ZHU J L, WANG D H, LI M H, LIU G N, FAN C Z, WANG X F, SHI Y J, WANG H M, DONG X Z, CHEN H Y, HAO S F, DENG Y M, LI Y, XIAO Z Y, YANG H, LIU L, JIN Y, ZHANG H, MEI S J, QI Q J, LÜ J S, HOU L L, CHEN G, CHEN Z, JIA Z Y. 2023. Progress of environmental geological investigation and research in the Yangtze River Economic Zone[J]. *East China Geology*, 44(3): 239-261 (in Chinese with English abstract).
- LI H. 2017. Numerical simulation of land subsidence and compression characteristics of water loss under groundwater exploitation[D]. Ji'nan: Shandong University (in Chinese with English abstract).
- LI W, CHEN Y F, SHEN H Z, WU M J, ZHU Y. 2015. Ground subsidence effects since groundwater exploitation restriction in Wenhuan plain[J]. *Resources Survey & Environment*, 36(4): 306-310 (in Chinese with English abstract).
- LUO Z J, NING D, DU J J, LU W. 2019. Influence of building load and groundwater exploitation on land subsidence in Shengze, Wujiang[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 49(2): 514-525 (in Chinese with English abstract).
- LUO Y, YE S J, WU J C, YANG T L. 2018. Development and application of visualization system for numerical simulation of regional land subsidence[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 46(10): 28-33 (in Chinese with English abstract).
- MA Q S, LUO Z J. 2015. Numerical simulation of groundwater exploitation and land subsidence in Cangzhou City[J]. *Water Resources Protection*, 31(4): 20-26 (in Chinese with English abstract).
- ROGERS J D, CHUNG J W. 2016. Applying Terzaghi's method of slope characterization to the recognition of Holocene land slippage[J]. *Geomorphology*, 265: 24-44.
- SU H Y. 1979. Investigation of the deformation characteristics of various soil staata under the influence of pumping out & back of ground water in Shanghai[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, first issue, 24-35 (in Chinese with English abstract).
- VIANOA C C. 1987. The principle of rheology in soil Mechanics[M]. DU Y P. Beijing: Science Press (in Chinese).
- WANG Y W. 2016. Numerical simulation of regional land subsidence in coastal area of north Jiangsu[D]. Nanjing: Nanjing University (in Chinese with English abstract).
- XIONG X F, LUO Y, SHI X Q, WU J F, WU J C. 2017. Three-dimensional Land Subsidence Modeling Based on TOUGH2-FLAC3D and Control Strategies Evaluation[J]. *Geological Journal of China Universities*, 23(1): 172-180 (in Chinese with English abstract).
- XUE Y Q, ZHANG Y. 2016. Land subsidence and land fissures in the southern Yangtze River Delta[J]. *East China Geology*, 37(1): 1-9 (in Chinese with English abstract).
- YANG H W, ZHANG F L. 2016. Analysis of groundwater exploitation and utilization in Yancheng[J]. *Water Resources Protection and Management*, (1): 43-45 (in Chinese).
- ZHU C F, GONG J S, TAO X H, TAN M J, ZHOU K E, WANG H S, LI L, YE Y H. 2023. Comparison of the hydrochemical characteristics of shallow groundwater in the

- Huaihe River Basin during a ten-year period and its significance to environmental change[J]. *East China Geology*, 44(3): 282-291 (in Chinese with English abstract).
- ZHANG Y, XUE Y Q, SHI X Q, SONG Z. 2005. Study on nonlinear creep model for saturated sand[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 26(12): 1869-1873 (in Chinese with English abstract).
- ZONG M F. 2021. Theoretical and experimental study on one-dimensional nonlinear consolidation of soft soil based on continuous drainage boundary[D]. Wuhan: China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 陈晓平,白世伟. 2001. 软粘土地基粘弹塑性比奥固结的数值分析[J]. *岩土工程学报*, 23(4): 481-484.
- 陈卓,骆祖江. 2017. 比奥固结全耦合模型参数灵敏度分析[J]. *南昌大学学报(工科版)*, 39(4): 354-360, 379.
- 顾晟彦,姚维军,徐明钻,王丹. 2020. 江苏盐城地面沉降风险评估[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 31(1): 36-43.
- 韩帅,惠淑君,孙强,张帅,时磊,张颖,朱庆伟. 2023. 基于地质安全评价的废弃矿山高陡边坡生态修复技术研究[J]. *华东地质*, 44(2): 216-227.
- 何宏宇. 2019. 东光地面沉降分析及数值模拟研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 胡小荣,蔡晓锋,李春博,章志荣,瞿鹏. 2022. 正常固结非饱和黏性土的三剪弹塑性本构模型[J]. *工程力学*, 39(1): 164-174.
- 姜月华,周权平,倪化勇,陈立德,程和琴,雷明堂,葛伟亚,马腾,施斌,程知言,段学军,苏晶文,朱锦旗,修连存,向芳,朱志敏,冯乃琦,谢忠胜,谭建民,彭轲,郭盛乔,伏永朋,任海彦,孙建平,杨强,朱继良,王东辉,李明辉,刘广宁,范晨子,王新峰,史玉金,王寒梅,董贤哲,陈焕元,郝社峰,邓娅敏,李云,肖则佑,杨海,刘林,金阳,张鸿,梅世嘉,齐秋菊,吕劲松,侯莉莉,陈刚,陈孜,贾正阳. 2023. 长江经济带环境地质调查研究进展[J]. *华东地质*, 44(3): 239-261.
- 李辉. 2017. 地下水诱发地面沉降数值模拟分析研究[D]. 济南: 山东大学.
- 黎伟,陈远法,沈慧珍,吴孟杰,诸焯. 2015. 浙江温黄平原地下水控采后地面沉降效应分析[J]. *资源调查与环境*, 36(4): 306-310.
- 骆祖江,宁迪,杜菁菁,陆玮. 2019. 吴江盛泽地区建筑荷载和地下水开采对地面沉降的影响[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 49(2): 514-525.
- 罗跃,叶淑君,吴吉春,杨天亮. 2018. 区域地面沉降数值模拟可视化系统开发及应用[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 46(10): 28-33.
- 马青山,骆祖江. 2015. 沧州市地下水开采-地面沉降数值模拟[J]. *水资源保护*, 31(4): 20-26.
- 苏河源. 1979. 抽、灌水作用下上海土层变形特征的探讨[J]. *岩土工程学报*, 创刊号: 24-35.
- 王艺伟. 2016. 苏北沿海地区区域地面沉降模拟研究[D]. 南京: 南京大学.
- 维亚洛夫. 1987. 土力学的流变原理[M]. 杜余培,译. 北京: 科学出版社.
- 熊小锋,罗跃,施小清,吴剑锋,吴吉春. 2017. 基于 TOUGH2-FLAC3D 耦合的三维地面沉降数值模拟及控制策略研究[J]. *高校地质学报*, 23(1): 172-180.
- 薛禹群,张云. 2016. 长江三角洲南部地面沉降与地裂缝[J]. *华东地质*, 37(1): 1-9.
- 杨红尉,张凤莲. 2016. 盐城地下水开采及利用情况分析[J]. *水政水资源*, (1): 43-45.
- 朱春芳,龚建师,陶小虎,檀梦皎,周锴镔,王赫生,李亮,叶永红. 2023. 淮河流域浅层地下水水化学特征 10 年对比分析及其环境变迁意义[J]. *华东地质*, 44(3): 282-291.
- 张云,薛禹群,施小清,宋震. 2005. 饱和砂性土非线性蠕变模型试验研究[J]. *岩土力学*, 26(12): 1869-1873.
- 宗梦繁. 2021. 连续排水边界下软土一维非线性固结理论与试验研究[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉).

Simulation and prediction of Yancheng ground subsidence based on Bio-consolidation theory

DU Jingjing¹, ZHANG Yan², LUO Zujiang³, ZHANG Qing¹

(1. *Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, Jiangsu, China*; 2. *Key Laboratory of Earth Fissure Geological Disaster, Ministry of Natural Resources, Nanjing 210018, Jiangsu, China*; 3. *Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, China*)

Abstract: Ground subsidence occurred in urban area may cause damage to buildings and infrastructure, affecting the overall stability and safety of the city. This paper established a three-dimensional variable parameter fully-coupled viscoelastic-plastic model of building loads and groundwater mining with ground subsidence in Yancheng, Jiangsu Province based on the theory of Bio-consolidation, introduced the viscoelastic-plastic soil constitutive model, and meanwhile took the nonlinear change of soil parameters with the state of stress into account. The results show that the groundwater level in the study area continually rises under the conditions of construction loading and groundwater extracting, with an overall rebound phenomenon. However, in the centre of the city, where the building loads are high, the amount of ground rebound is small and even slight settlement occurs, and the maximum horizontal displacement produced over 10 years is 15 mm. The results of the study can provide scientific basis for the prevention and mitigation of ground subsidence hazards in Yancheng.

Key words: Yancheng; groundwater extraction; ground subsidence; building load; Bio-consolidation theory