# 江阴南部地区建筑荷载和地下水开采与 地面沉降耦合研究

宁迪<sup>1)</sup>,骆祖江<sup>1)</sup>,葛伟亚<sup>2)</sup>,贾军元<sup>2)</sup>

1) 河海大学地球科学与工程学院,南京, 211100;2) 中国地质调查局南京地质调查中心,南京, 210016

内容提要:针对江阴南部地面沉降问题,结合地下水开发利用现状和城市建设规划,根据比奥固结理论,引入黏性土流变理论,将土体本构关系拓展至黏弹塑性,并考虑土体的土力学参数和水力学参数随应力场的动态变化,建立江阴南部地区建筑荷载、地下水开采与地面沉降三维全耦合数值模型,分别模拟预测了江阴南部地区 2015 年 12月 31 日至 2030 年 12月 31 日建筑荷载、地下水开采单独作用及二者叠加作用三种情况下地面沉降发展趋势。模拟结果显示,建筑荷载为引起江阴南部地区地面沉降的主因,其次是地下水开采,二者的主压缩层分别为第 I 黏性土弱含水层和第 II 黏性土弱含水层,分别占总压缩量的 42.94%和 62.60%;建筑荷载和地下水开采叠加作用下引发的地面沉降具有耦合效应,二者叠加量小于单独作用引发量的线性叠加。

关键词:江阴南部;建筑荷载;地下水开采;地面沉降

21世纪前,长期超量开采地下水是引起大面积 地面沉降的主要因素(张建伟等,2016;李莎等, 2018),但随着国家实施地下水开采管控政策,区域 性地面沉降问题依然存在。江阴南部地区在2000 年实行苏锡常地区5年内全面禁止开采深层地下水 的政策后,近年来的地面沉降速率仍维持在5~10 mm/a,部分地区地面沉降速率达到15 mm/a,地面 沉降发展形势严峻(Chen Chongxi et al.,2003;姜洪 涛,2005;胡建平,2011;姜月华等,2017)。加之江 阴南部地区属于长江古河道相沉积,随着城市化进 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浅部地层 垂向变形,从而使区内地面沉降形成机理变得更为 复杂,查明江阴南部地区地面沉降的形成原因、发展 趋势,进行科学防控尤为重要。

目前,国内外对地面沉降形成机理研究主要集中在地下水渗流,即认为抽水是地面沉降形成的外因(Shen Shuilong et al.,2011; 贾超等,2015);建筑荷载对地面沉降影响的研究主要集中在定性分析或单个建筑物定量分析,未能在城市的宏观尺度上进行研究(Cui Zhendong et al.,2010; 贾亚杰,2015; 伊尧国等,2017)。本文根据比奥固结理论(钱家欢

等,1996;介玉新等,2007),综合考虑建筑荷载和地 下水开采两种因素,建立了江阴南部地区建筑荷载 和地下水开采与地面沉降三维全耦合数值模型,旨 在评价重大工程建设和地下水开采对地面沉降的作 用,为地面沉降防控提出科学依据。

# 1 江阴南部地区概况

江阴市位于江苏省东南部长江河口带南侧,北 纬 31°40′34″至 31°57′36″、东经 119°59′至 120°34′ 30″,地处苏锡常"金三角"地带。研究区位于江阴南 部,主要包括霞客镇、祝塘镇,总面积约 200 km<sup>2</sup>。 第四系沉积主要以湖沼相沉积为主,层厚度呈西薄 东厚的变化趋势,西部 40~140 m,东部 40~160 m。 根据含水砂层的成因时代、埋藏分布、水力联系及水 化学特征,松散岩类孔隙水自上而下可依次划分为: 潜水含水层、第 I 承压含水层、第 II 承压含水层。地 下水开采的主要层位是第 II 承压含水层。

# 2 地质概念模型

# 2.1 边界条件

平面上以行政区域为界,剖面上以整个第四系 为界,上部边界为地表面,下部边界为第Ⅱ承压含水

注:本文为国家自然科学基金(编号:41874014)和苏南现代化建设示范区1:50000环境地质调查(编号:DD20160245)的成果。

收稿日期:2019-04-23;改回日期:2019-10-17;责任编辑:章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2019.06.020

作者简介: 宁迪, 女, 1995年生。硕士研究生, 地质工程专业; 通讯地址: 211100, 江苏省南京市江宁区佛城西路 8 号; Email: 1183372118 @qq.com。通讯作者: 骆祖江, 男, 1964年生。教授, 博士生导师; 主要从事水文地质、工程地质等研究; Email: luozujiang@sina.com。

层的底板。根据多年关于研究区工程地质条件与水 文地质条件资料,将其四周概化为第二类边界条件。 顶部既接受大气降水的补给,地下水又通过其蒸发, 是补给和排泄边界,底部为第Ⅱ承压含水层的底板, 是隔水边界。研究区所有侧向边界和底部边界均概 化为零位移边界。

# 2.2 地层结构特征

江阴南部地区第四纪地层,厚度一般为110~ 130 m,地下水资源极为丰富,自上而下可依次划分 为潜水含水层和第 I、II 承压含水层,岩性以粉质黏 土、粉土和含砾粉质黏土为主,各含水层之间均以弱 含水的黏性土层相分隔,并发生水力联系,形成一个 复合含水系统。各含水层的水力学性质和土力学性 质在空间上变化较大,将其概化为非均质各向异性 含水层。

## 2.3 地下水流态特征

江阴南部地区由于早年大量开采地下水,且主

采层为第 II 承压含水层,已形成了以祝塘社区为中 心的地下水位降落漏斗,各含水层之间水位差较大, 水力联系较为强烈,并且由于受地下水开采和大气 降雨季节性的影响,地下水位波动很大,故将地下水 流态概化为三维非稳定流。

# 2.4 源汇项和建筑荷载

地下水开采、大气降雨入渗补给及地下水蒸发 排泄作为研究区的源汇项处理,运用大井法概化地 下水开采情况,将建筑荷载概化为点荷载,综合考虑 大气降雨补给与地下水蒸发排泄(图1)。

# 3 数学模型

# 3.1 比奥固结理论

依据比较严格的比奥固结理论(Luo Zujiang et al.,2011;骆祖江等,2013),建立了江阴地区建筑荷载和地下水开采与地面沉降三维全耦合数学模型:

$$\begin{cases} -G \nabla^2 \omega_x - \frac{G}{1-2v} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial \omega_x}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \frac{\omega_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \frac{\omega_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} = 0; \\ -G \nabla^2 \omega_y - \frac{G}{1-2v} \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial \omega_x}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \frac{\omega_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial}{\partial y} \frac{\omega_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} = 0; \\ -G \nabla^2 \omega_z - \frac{G}{1-2v} \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial}{\partial x} \frac{\omega_x}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \frac{\omega_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial}{\partial z} \frac{\omega_z}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \frac{\omega_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial}{\partial z} \frac{\omega_z}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \frac{\omega_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial}{\partial y} \frac{\omega_z}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \frac{\omega_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial}{\partial y} \frac{\omega_z}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \frac{\omega_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial}{\partial y} \frac{\omega_z}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \frac{\omega_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial}{\partial y} \frac{\omega_z}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \frac{\omega_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial}{\partial y} \frac{\omega_z}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \frac{\omega_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial}{\partial y} \frac{\omega_z}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \frac{\omega_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial}{\partial y} \frac{\omega_z}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \frac{\omega_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial}{\partial z} \frac{\omega_z}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \frac{\omega_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial}{\partial z} \frac{\omega_z}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \frac{\omega_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial}{\partial z} \frac{\omega_z}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \frac{\omega_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial}{\partial z} \frac{\omega_z}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \frac{\omega_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial}{\partial z} \frac{\omega_z}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \frac{\omega_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial}{\partial z} \frac{\omega_z}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \frac{\omega_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial}{\partial z} \frac{\omega_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial}{\partial z} \frac{\omega_z}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \frac{\omega_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial}{\partial z} \frac{\omega_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial}{\partial z} \frac{\omega_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial}{\partial z} \frac{\omega_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial}{\partial z} \frac{\omega_z}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \frac{\omega_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial}{\partial z} \frac{\omega_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial}{\partial z} \frac{\omega_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial}{\partial z} \frac{\omega_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial}{\partial z} \frac{\omega_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial}{\partial z} \frac{\omega_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial}{\partial z} \frac{\omega_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial}{\partial z} \frac{\omega_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial}{\partial z} \frac{\omega_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial}{\partial z} \frac{\omega_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial}{\partial z} \frac{\omega_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial}{\partial$$

式中:G为剪切模量; $\nabla$ 为拉普拉斯算子; $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ 分别为x, y, z方向的位移;v为泊松比;u为超静孔 隙水压力; $\gamma$ 为土的重度;t为时间; $K_x, K_y, K_z$ 分别 为x, y, z方向的渗透系数; $\gamma_u$ 为水的重度,即单位 体积水的重量;W为源汇项。

式(1)可以简写成:

$$\begin{cases} -\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{D}\boldsymbol{B}\boldsymbol{\omega} + \boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{M}\boldsymbol{u} = \boldsymbol{f}; \\ \boldsymbol{C}^{\mathrm{T}}\frac{\partial}{\partial t}\boldsymbol{\omega} - \frac{1}{\gamma_{w}}\boldsymbol{C}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{K}\boldsymbol{C}\boldsymbol{u} = \boldsymbol{Q} \end{cases}$$
(2)

式中:  $\boldsymbol{\omega} = [\boldsymbol{\omega}_x, \boldsymbol{\omega}_y, \boldsymbol{\omega}_z]^{\text{T}}; \boldsymbol{D}$  为应力应变关系矩阵;  $\boldsymbol{f} = [f_x, f_y, f_z]^{\text{T}}, f_x, f_y, f_z$ 分别为体积力(连续分布于物体内部各点的力)在 x, y, z 方向上的分量;  $\boldsymbol{M} = [1, 1, 1, 0, 0, 0]^{\text{T}}; \boldsymbol{Q}$  为计算点的等效流量;  $\boldsymbol{C}$  为弹性柔度矩阵;  $\boldsymbol{B}$  为应变位移矩阵;  $\boldsymbol{K}$  为固体刚度矩阵。

# 3.2 土体本构关系

结合土体的非线性流变理论,推广土体本构关

系至黏弹塑性,则该土体的某一点在某一时刻的应 变增量可表示为

$$d\varepsilon = d\varepsilon_{ep} + d\varepsilon_{ve} + d\varepsilon_{vp}$$
(3)

式中: d $\varepsilon$  为总应变增量; d $\varepsilon_{ep}$  为弹塑性应变增量; d $\varepsilon_{vp}$  为 新塑性应变增量; d $\varepsilon_{vp}$  为 新塑性应变增量; d $\varepsilon_{vp}$  为 新塑性应变增量。

### 3.3 定解条件

- 3.3.1 初始条件
- 3.3.1.1 孔隙水压力初始条件

孔隙水压力初始条件为

$$\begin{cases} u (x, y, z, t) \mid_{t=0} = u_0(x, y, z) = \\ h_0(x, y, z, t_0) \cdot \rho_w g; \\ (x, y, z) \in \Omega \end{cases}$$
(4)

式 中:  $u_0(x,y,z)$  为 初 始 孔 隙 水 压 力;  $h_0(x,y,z,t_0)$  为初始水位; $\rho_w$  为水的密度;g 为重力 加速度; $\Omega$  为整个研究区域。该模型的初始水位值 为各含水层组的 2014 年 12 月 31 日的初始流场。

## 3.3.1.2 地应力初始条件

已知土体的自重应力,可以估算土体的初始应力:

$$\begin{cases} \sigma_z = \gamma z'; \\ \sigma_x = k_1 \gamma z'_{\circ} \end{cases}$$
(5)

式中: $\sigma_x$ 、 $\sigma_z$ 为土体的初始水平向和垂向应力;z'为各层计算点深度; $k_1$ 为静止侧压力系数,

$$k_1 = \begin{cases} 1 - \sin \varphi'(\textcircled{0} \pm); \\ 0.95 - \sin \varphi'(\textcircled{3} \pm) \end{cases}$$

 $\varphi'$ 为有效内摩擦角。

# 3.3.1.3 位移初始条件

模型的位移初始条件为 2014 年 12 月 31 日各 含水层的初始位移值,初始位移值设为 0。

$$\omega(x, y, z, t) \Big|_{t=0} = 0, (x, y, z) \in \Omega$$
(6)

3.3.2 边界条件

**3.3.2.1** 流量边界条件 Γ<sub>2</sub>

$$\left. K \frac{\partial H}{\partial n} \right|_{\Gamma_2} = q_{\bar{L}} \tag{7}$$

式中:K 为渗透系数;H 为水位;n 为孔隙度; $q_{\bar{L}}$  为边 界 $\Gamma_2$  上的已知单位面积流量。

**3.3.2.2** 自由面边界条件 Γ<sub>3</sub>

$$u = Z; q = -\mu \frac{\partial u}{\partial t} \cos\theta \tag{8}$$

式中: $\mu$ 为土体给水度; $\theta$ 为自由面外法线方向与垂 线的交角;q为通过自由面边界 $\Gamma_3$ 的单位面积流量; Z为自由面所在的海拔高度。

# 3.3.2.3 位移边界条件 Γ<sub>4</sub>

$$\begin{cases} w_x \mid_{\Gamma_4} = \overline{w_x} \\ w_y \mid_{\Gamma_4} = \overline{w_y} \\ w_z \mid_{\Gamma_4} = \overline{w_z} \end{cases}$$

$$(9)$$

式中: $w_x, w_y, w_z$ 为位移边界 $\Gamma_4$ 上3个方向的已知位移,本次模拟取3个方向位移为0。

#### 3.4 参数动态变化

#### 3.4.1 孔隙度与渗透系数的非线性

地下水开采和建筑荷载作用在土体上,宏观表 现为土层压缩甚至是地面沉降,微观表现为水力学 参数的变化。以比奥固结理论为研究基础,严格对 照邓肯一张方程及孔隙度 n、渗透系数 K 相关定义, 得到二者之间的关系,表达式为(骆祖江等,2018);

$$n = \frac{n_0 + \varepsilon_v}{1 + \varepsilon_v};$$
  

$$K = K_0 \left(\frac{n}{n_0}\right)^3 \left(\frac{1 - n_0}{1 - n}\right)^2$$
(10)

式中: $n_0$ 为初始孔隙度; $K_0$ 为初始渗透系数; $\varepsilon_y$ 为体

$$\widehat{\mathrm{triv}}\mathfrak{B}, \boldsymbol{\varepsilon}_{\mathrm{v}} = -\left(\frac{\partial \boldsymbol{\omega}_{x}}{\partial x} + \frac{\partial \boldsymbol{\omega}_{y}}{\partial y} + \frac{\partial \boldsymbol{\omega}_{z}}{\partial z}\right),$$

## 3.4.2 弹性模量和泊松比的非线性

以邓肯一张的非线性模型为依据,进一步推广 土体的本构关系至非线性,则应力应变关系矩阵中 **D**的弹性常数 *E*、*v* 为随应力状态改变的变量,切线 弹性模量 *E*,和切线泊松比 *v*,的表达式为:

$$E_{t} = E_{0} p_{a} \cdot \left(\frac{\sigma_{3}}{p_{a}}\right)^{m} \cdot \left[1 - R_{f} \frac{(1 - \sin\varphi) (\sigma_{1} - \sigma_{3})}{2 c \cdot \cos\varphi + 2\sigma_{3} \sin\varphi}\right]^{2};$$

$$v_{t} = \frac{v_{0} - DF \lg \frac{\sigma_{3}}{p_{a}}}{\left\{1 - \frac{D(\sigma_{1} - \sigma_{3})}{E_{0} p_{a} \cdot \left(\frac{\sigma_{3}}{p_{a}}\right)^{m} \cdot \left[1 - R_{f} \frac{(1 - \sin\varphi) \cdot (\sigma_{1} - \sigma_{3})}{2 c \cdot \cos\varphi + 2\sigma_{3} \sin\varphi}\right]^{2}\right\}^{2}}$$

$$(11)$$

式中: $p_a$  为大气压强; $\sigma_1$ 为第一主应力; $\sigma_3$ 为第三主 应力; $R_i$  为破坏比; $\varphi$  为内摩擦角;c 为黏聚力; $v_0$ 为 围压为 100 kPa 时的泊松比; $E_0$  为 $\sigma_3$  = 100 kPa 时 的弹性模量;F 为试验常数,F = 0.04;m 为弹性模量 与固结压力曲线的斜率;D 为土体试验参数,D = 3。

4 模型求解与校正

采用伽辽金加权余量法对上述数学模型进行求

解,将模型求解过程结合 Fortran95 语言编制成计算 机程序,进行模拟计算(彭国伦,2005;Wang Shufang et al.,2010;付延玲,2016)。根据研究区的实际水 文地质结构特征及几何形状,对研究区进行三维剖 分。研究区数值模型的平面尺度为 18670 m×19550 m,垂向深度约 130 m,面积约为 200 km<sup>2</sup>。将整个研 究区在平面上剖分成 10529 个矩形网格单元,垂向 上从上往下将潜水含水层、第 **[**承压含水层、第 **[**]承





压含水层及各含水层之间的黏性土弱含水层均剖分 成独立的层位参与计算,共分5层,单元总数为 52645个,节点总数为65514个(图2)。

选取 2014 年 12 月 31 日至 2015 年 12 月 31 日 为期一年的资料,对江阴南部地区建筑荷载、地下水 开采与地面沉降三维耦合数值模型的参数进行反演 分析,以每个月作为一个应力期,共分 12 个应力期, 每个应力期为 1 个时间步长。

大气降雨入渗系数受包气带岩性、地下水位埋 深、土壤含水量、地形特征、植被等诸多因素影响。 根据霞客镇与祝塘镇的具体情况,在经过模型调试, 扣除蒸发量以后,确定有效降雨入渗补给系数,霞客



图 2 江阴南部地区网格剖分立体图 Fig. 2 Meshing stereogram in southern area of southern area of Jiangyin, Jiangsu

镇为 0.01138, 祝塘镇为 0.00562。计算有效入渗面 积时扣除水域面积和硬化的水泥路面或工厂厂房、 居民小区, 经调查统计得出: 霞客镇与祝塘镇有效入 渗面积分别为 76.01 km<sup>2</sup>与 40.71 km<sup>2</sup>。地下水开 采量主要根据实地调查统计, 经模型反演计算确定。 研究区日均抽水量共计约为 4750 m<sup>3</sup>/d, 其中祝塘 镇祝塘社区日均抽水量约为 2750 m<sup>3</sup>/d, 祝塘镇文 林社区日均抽水量约为 1000 m<sup>3</sup>/d。

全区有 3 口观测井进行水位拟合(图 1)。经调 参、反演后,模型共 5 层 28 个分区。以第 II 承压含 水层为例(图 3),各分区的水文地质参数值详见表 1。

表 1 江苏江阴南部地区第 Ⅱ 承压含水层参数分区及各分区参数值一览表	
-------------------------------------	--

Table 1 Parameter partition parameter value of the second confined aquifer in southern area of Jiangvin, Jiangsu

分区	主轴方	方向渗透系数(m/d)		变形模量 (MPa)	泊松比	黏聚力 (kPa)	摩擦角 (°)	膨胀角 (°)	土的重度 (kN/m <sup>3</sup> )	有效 孔隙度
20	3.00	3.00	0.300	52	0.47	44	18	0	17	0.455
21	3.10	3.10	0.310	55	0.48	42	18	0	19	0.448
22	2.90	2.90	0.290	50	0.48	40	19	0	19	0.446
23	1.85	1.85	0.185	53	0.46	45	17	0	20	0.445
24	1.87	1.87	0.187	55	0.46	41	17	0	20	0.450
25	1.05	1.05	0.105	56	0.47	44	20	0	21	0.445
26	1.20	1.20	0.120	57	0.48	46	20	0	18	0.443
27	1.35	1.35	0.135	55	0.48	44	19	0	18	0.448
28	1.50	1.50	0.150	58	0.47	45	18	0	19	0.452



参数分区图 Fig. 3 Parameter partition of the second confined aquifer in southern area of Jiangvin, Jiangsu

图 4 为研究区 2014 年 12 月~2015 年 12 月研 究区沉降量拟合情况,图 5 为祝塘社区 1-1 号井位 地下水位的拟合情况,由于模型中设置的降雨入渗 系数为平均值,2015 年 2 月~2015 年 4 月江阴南部 地区降雨量偏大,导致计算水位和实测水位差别较



图 4 2014 年~2015 年江阴南部地区沉降量拟合图 Fig. 4 Settlement fitting map from 2014 to 2015 in southern area of Jiangyin, Jiangsu

大,综合图 4 和图 5,该模型拟合情况较好,数据拟 合程度较高。



图 5 江阴南部祝塘社区 1-1 井位地下水位拟合图 Fig. 5 Fitting map of groundwater level of well 1-1 in Zhutang community in southern area of Jiangyin, Jiangsu

# 5 地面沉降发展趋势预测

模型预测计算时间为 2015 年 12 月 31 日至 2030 年 12 月 31 日,分别模拟了江阴南部地区建筑 荷载、地下水开采单独作用及二者叠加作用三种情 况下地面沉降发展情况,对比分析三种情况的计算 数据。

# 5.1 建筑荷载对地面沉降的影响

江阴南部地区建筑荷载分布较密集的地区有祝 塘社区、璜塘社区、峭岐社区、马镇社区、文林社区, 建筑物大都为3~8层楼高,超高层建筑较少。在无 地下水开采,仅有建筑荷载作用的情况下,江阴南部 地区潜水含水层、第 I 黏性土弱含水层、第 I 承压含 水层、第 II 黏性土弱含水层和第 II 承压含水层均产 生一定程度的压缩变形,导致地面沉降的发生。从 2015年12月31日到2030年12月31日,江阴南部 地区建筑荷载引发的地面沉降中心的所在区域累计 地面沉降量的平均值在60 mm 左右,各层最大压缩 量均位于祝塘社区,累计最大地面沉降量为110.04 mm,最大地面沉降速率为7.34 mm/a。

江阴南部地区建筑荷载引发的地面沉降中心主 要集中在祝塘、文林、璜塘、峭岐、马镇等建筑荷载较 密集的地方,如图 6a。由建筑物荷载引发的地面沉 降以建筑物中心点为漏斗中心,建筑荷载越密集荷 载越大的地方,地面沉降量越大,影响的范围也越 广。

## 5.2 地下水开采对地面沉降的影响

将第Ⅱ承压含水层作为模型的开采层,保持模



图 6 江阴南部地区 2015~2030 年预测累计地面沉降量 分布图:(a)单一建筑荷载;(b)单一地下水开采;(c)建 筑荷载和地下水开采叠加作用

Fig. 6 Prediction of cumulative land subsidence distribution from 2015 to 2030 in southern area of Jiangyin, Jiangsu:(a) Single building load; (b) Single groundwater exploitation; (c) Superimposition of building load and groundwater exploitation

型识别、验证阶段的开采情况,由于第Ⅱ承压含水层 开采量较小,同时接受第Ⅰ承压含水层、第Ⅱ黏性土 弱含水层的补给,开采量小于补给量,导致江阴南部 地区 2015 年~2030 年第Ⅱ承压含水层水位上升,第 Ⅰ承压含水层、第Ⅱ黏性土弱含水层水位下降。

地下水开采引起地下水位下降,土体渗流场发 生变化,导致土体发生变形。江阴南部地区地下水 开采引发的地面沉降中心主要集中在祝塘、文林社 区,由地下水开采引发的地面沉降漏斗分布范围与 地下水位降落漏斗分布范围基本相吻合(图 6b)。 从 2015 年 12 月 31 日到 2030 年 12 月 31 日,江阴 南部地区地下水开采引发的地面沉降中心所在区域 累计地面沉降量的平均值在 20 mm 左右,各层最大 压缩量均位于祝塘社区,累计最大地面沉降量为 35. 24 mm,最大地面沉降速率为 2. 35 mm/a。

# 5.3 建筑荷载和地下水开采叠加作用 对地面沉降的影响

同时考虑建筑荷载和地下水开采,保持相同的 荷载点分布及开采井分布格局,江阴南部地区 2015 年12月31日到2030年12月31日,潜水含水层、 第 I 黏性土弱含水层、第 II 承压含水层水位上升,第 I 承压含水层、第 II 黏性土弱含水层水位下降。

江阴南部地区建筑荷载、地下水开采叠加作用 下引发的地面沉降主要集中在祝塘、文林等区域,大 部分区域累计地面沉降量以 65 mm 为主,各层最大 压缩量均位于祝塘社区,累计最大地面沉降量为 131.29 mm,最大地面沉降速率为8.75 mm/a。同时 形成了以祝塘社区为中心的沉降漏斗区,与建筑荷 载调查密集区和地下水位降落漏斗区分布一致(图 6c)。

# 5.4 结果分析

江阴南部地区建筑荷载和地下水开采分别作用 及二者叠加作用下的各层最大压缩量见表 2。从 2015 年 12 月 31 日到 2030 年 12 月 31 日,影响各层 压缩量主要因素各不相同,其中,引发潜水含水层、 第 I 黏性土弱含水层、第 I 承压含水层压缩的主要 影响因素是建筑荷载,其次是地下水开采,符合建筑 荷载主要影响浅部地层的特点;引发第 II 黏性土弱 含水层、第 II 承压含水层压缩的主要影响因素为地 下水开采,其次是建筑荷载。在建筑荷载单独作用 条件下,第 I 黏性土弱含水层是主压缩层,单层压缩 量占总沉降量的 42.94%;在地下水开采单独作用 条件下,第 II 黏性土弱含水层是主压缩层,单层压缩 量占总沉降量的 62.60%;在建筑荷载和地下水开 采叠加作用条件下,第 I 黏性土弱含水层是主压缩 层,单层压缩量占总沉降量的 33.40%。

# 表 2 江阴南部地区建筑荷载和地下水开采单独作用及 叠加作用下各层预测压缩量最大值(2015~2030)

Table 2 Maximum predicted compression of each layer under the action of building load and groundwater exploitation alone and superposition of building load and groundwater exploitation ( $2015 \sim 2030$ ) in southern area of Jiangyin, Jiangsu

层位	单一建筑 荷载(mm)	单一地下水 开采(mm)	建筑荷载与地 下水开采叠加 作用(mm)
潜水含水层	8.09	0.45	8.08
第 I 黏性土弱含水层	47.25	1.18	43.85
第 I 承压含水层	25.41	7.5	34.84
第Ⅱ黏性土弱含水层	21.41	22.07	37.26
第Ⅱ承压含水层	7.88	4.04	7.26

江阴南部地区建筑荷载和地下水开采分别作用 及二者叠加作用下的累计最大地面沉降量和地面沉 降速率见表 3。从上述预测结果可以看出,江阴南 部地区大部分区域由单独建筑荷载引发的地面沉降 量大于单独地下水开采引发的地面沉降量,地面沉 降的主要影响因素为建筑荷载,其次为地下水开采。 建筑荷载和地下水开采叠加作用引发的地面沉降量 小于二者单独作用引发的地面沉降量之和,这是由 于二者叠加作用时产生耦合效应所致。

从 2015 年 12 月 31 日到 2030 年 12 月 31 日, 地面沉降中心所在区域,单独由建筑荷载引发的地 面沉降量平均值在 60 mm 左右,单独由地下水开采 引发的地面沉降量可达 20 mm 左右,二者对地面沉 降的贡献比约为 3:1。综合比较 2015~2030 年单 独建筑荷载作用和单独地下水开采作用引发的累计 地面沉降量,局部地段最大贡献比约为 3.6:1,究 其原因是因为霞客镇、祝塘镇近几年新建大量轻重 工业工厂,厂房规模大、楼层高且分布集中,同时,预 测结果也显示,地面沉降漏斗中心与工厂密集区基 本吻合,充分说明大片密集厂区建筑荷载是引发江 阴南部地区地面沉降问题的主因。

表 3 江阴南部地区建筑荷载和地下水开采单独作用及 叠加作用下地面沉降量和沉降速率预测值(2015~ 2030)

Table 3 Prediction value of land subsidence and subsidence rate under building load and groundwater exploitation alone and superposition of building load and groundwater exploitation ( $2015 \sim 2030$ ) in southern area of Jiangyin, Jiangsu

各项要素	区名	单一建 筑荷载	单一地 下水 开采	建筑荷载与 地下水开采 叠加作用	建筑荷载与 地下水开采 线性之和
	祝塘	110.04	35.24	131.29	145.28
累计最大	文林	84.08	21.87	96.41	105.95
地面沉降	璜塘	36.92	9.84	42.60	46.76
量(mm)	峭岐	35.02	9.95	40.43	44.97
	马镇	35.33	9.43	40.64	44.76
	祝塘	7.33	2.35	8.75	9.62
最大地面	文林	5.61	1.46	6.43	7.06
沉降速率	璜塘	2.46	0.66	2.84	3.12
(mm/a)	峭岐	2.33	0.66	2.70	3.00
	马镇	2.36	0.63	2.71	2.98

# 6 结论

(1)以比奧固结理论作为理论基础的江阴南部 地区建筑荷载和地下水开采与地面沉降三维全耦合 模型,更加准确地模拟了不同情况下的地面沉降过 程,进一步提高了地面沉降计算的精确性。

(2)建筑荷载单独作用、地下水开采单独作用、 建筑荷载和地下水开采叠加作用的主压缩层分别为 第 I 黏性土弱含水层、第 II 黏性土弱含水层和第 I 黏性土弱含水层,主压缩层压缩量分别占总压缩量 的 42.94%、62.60%和 33.40%。

(3)建筑荷载是引发江阴南部地区地面沉降的 主要原因,其次为地下水开采。地面沉降中心单独 建筑荷载作用和单独地下水开采作用对地面沉降的 贡献比约为3:1,局部地段最大贡献比约为3.6:1。 建筑荷载和地下水开采叠加作用具有耦合效应,产 生的沉降量小于建筑荷载和地下水开采单独作用产 生沉降量的线性叠加。

**致谢**:国家自然科学基金委和中国地质调查局 南京地质调查中心对本文提供基金支持,河海大学 付延玲阅读本文初稿后提出宝贵意见,在此致以诚 挚的谢意。

#### 参考文献 / References

(The literature whose publishing year followed by a "&" is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a "#" is in Chinese without English abstract)

- 付延玲,骆祖江,廖翔,张建忙.2016.高层建筑引发地面沉降模拟预 测三维流固全耦合模型.吉林大学学报(地球科学版),46(6): 1781~1789.
- 胡建平.2011.苏锡常地区地下水禁采后的地面沉降效应研究.导师: 施斌.南京:南京大学博士学位论文:1~101.
- 贾超,张国荣,王嘉斌,张永伟. 2015.地下水开采诱发地面沉降研究 及其工程应用:以山东德州地区为例.地球科学与环境学报,37 (4):102~110.
- 姜洪涛. 2005.苏锡常地区地面沉降及其若干问题探讨.第四纪研究,(1):29~33.
- 姜月华,林良俊,陈立德,倪化勇,葛伟亚,成杭新,翟刚毅,王贵玲,班 宜忠,李媛,雷明堂,谭成轩,苏晶文,周权平,张泰丽,李云,刘红 樱,彭柯,王寒梅. 2017.长江经济带资源环境条件与重大地质问 题.中国地质,44(6):1045~1061.
- 贾亚杰. 2015.基于地下水位变化高层建筑群引起地层分层沉降规律 研究.导师:崔振东.徐州:中国矿业大学硕士学位论文:1~149
- 介玉新,高燕,李广信.2007.城市建设对地面沉降影响的原因分析. 岩土工程技术,,21(2):78~82.
- 李莎,成建梅,宫辉力.2018.基于变渗透系数的地下水开采——地面 沉降三维模拟研究.水文地质工程地质,45(3):14~21.
- 骆祖江,王琰,田小伟,田俊花.2013.沧州市地下水开采与地面沉降 地裂缝模拟预测.水利学报,44(2):198~204.
- 骆祖江,张鑫,田小伟. 2018.沧州市地面沉降灾害预测预警.工程地 质学报,26(2):365~373.
- 彭国伦. 2005.Fortran95 程序设计.北京:中国电力出版社.
- 钱家欢,殷宗泽. 1996.土工原理与计算.北京:水力水电出版社.
- 吴建斌,胡颖,骆祖江. 2018.江苏吴江盛泽地区建筑物荷载对地面沉 降的影响.地质学刊,42(1):167~174.
- 伊尧国,刘慧平,韩春萌,刘湘平,张洋华,齐建超. 2017.建筑荷载作 用下城市地面沉降地理信息模型——以天津市东南部沉降区为 例.北京师范大学学报(自然科学版),53(6):681~688.
- 张建伟,胡克,岳玮,刘宝林,王建,高擎.2016.上海城区地面沉降及 其对地下水采灌量的响应.长江流域资源与环境,25(4):567~ 572.
- Chen Chongxi, Pei Shunpei , Jiao Jiu . 2003.Land subsidence caused by groundwater exploitation in Suzhou City, China. Hydrogeology Journal, 11(2):275~287.
- Cui Zhendong, Tang Yiqun. 2010.Land subsidence and pore structure of soils caused by the high-rise building group through centrifuge model test. Environmental Geology, 113(1~4):44.
- Fu Yanling, Luo Zujiang, Liao Xiang, Zhang Jianmang. 2016&. A threedimensional full coupling model to simulate and predict land subsidence caused by high-rise building. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 46(6) :1781~1789.
- Hu Jianping. 2011&. Astudy on the land subsidence effect after prohibiting extraction of groundwater in Suzhou—Wuxi—Changzhou area. Supervisor: Shi Bin. Nanjing: Nanjing University Ph. D. Dissertation:1~101.

- Jia Chao, Zhang Guorong, Wang Jiabin, Zhang Yongwei.2015&. Study on land subsidence caused by groundwater extraction and its application: taking Dezhou area of Shandong as an example. Journal of Earth Sciences and Environment, 37(4):102~110.
- Jiang Hongtao. 2005&. Problems and discussion in the study of land subsidence in the Suzhou—Wuxi—Changzhou area. Quaternary Sciences, 2005(1):29~33.
- Jiang Yuehua, Lin Liangjun, Chen Lide, Ni Huayong, Ge Weiya, Cheng Hangxin, Zhai Gangyi, Wang Guiling, Ban Yisi, Li Yuan, Lei Mingtang, Tan Chengxuan, Su jingwen, Zhou Quanping, Zhang Taili, Li Yun, Liu Hongying, Peng Ke, Wang Hanmei. 2017& Research on conditions of resources and environment and major geological problems in Yangtze River economic zone. Geology in China, 44(6): 1045~1061.
- Jia Yajie. 2015 &. Land subsidence caused by high-rise building group based on the varying groundwater table. Supervisor: Cui Zhendong. Xuzhou: China University of Mining and Technology: 1~149.
- Jie Yuxin, Gao Yan, Li Guangxin. 2007&. Analysis on the land subsidence induced by city construction. Geotechnical Engineering Technique, 21(2) :78~82.
- Li Sha, Cheng Jianmei, Gong Huili. 2018&. Three dimensional simulation of groundwater exploitation and land subsidence based on variable permeability. Hydrogeology and Engineering geology, 45 (3):14~21.
- Luo Zujiang, Wan Yan, Tian Xiaowei, Tian Junhua.2013&. Simulating and forecasting of groundwater exploitation, land subsidence and ground fissure in Cangzhou city. Journal of Hydraulic Engineering, 44(2):198~204.
- Luo Zujiang, Zeng Feng. 2011. Finiteelement numerical simulation of land subsidence and groundwater exploitation based on visco elasticplastic biot's consolidation theory. Journal of Hydrodynamics, 23(5):615~624.
- Luo Zujiang, Zhang Xin, Tian Xiaowei. 2018&. Prediction and early warning of Cangzhou land subsidence disaster. Journal of Engineering Geology, 26(2) :365~373.
- Peng Guolun.2005#. Fortran 95.Beijing : China Electric Power Press.
- Qian Jiahuan, Yin Zongze. 1996 #. Principle and Calculation of Geotechnics. Beijing; China Waterpower Press.
- Shen Shuilong, Xu Yeshuang. 2011. Numericalevaluation of land subsidence induced by groundwater pumping in Shanghai. Revue Canadienne De Géotechnique, 48(9):1378~1392.
- Wang Shufang, Zheng Mingxin. 2010. Application of biot consolidation theory to analyze land subsidence. Advanced Materials Research, 168~170:2615~2618.
- Wu Jianbin, Hu Ying, Luo Zujiang.2018&. Impact of building load on land subsidence in Shengze area of Wujiang, Jiangsu Province. Journal of Geology,42(1):167~174.
- Yi Yaoguo, Liu Huiping, Han Chunmeng, Liu Xiangping, Zhang Yanghua, Qi Jianchao. 2017 & Geographical information model of urban land subsidence induced by building load – case of southeastern subsidence area in Tianjin. Journal of Beijing Normal University (Natural Sciences), 53(6) :681~688.
- Zhang Jianwei, Hu Ke, Yue Wei, Liu Baolin, Wang Jian, Gao Qin. 2016&. Land subsidence in Shanghai city and its response to groundwater exploitation and reinjection. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2016, 25(4):567~572.

NING Di<sup>1)</sup>, LUO Zujiang<sup>1)</sup>, GE Weiya<sup>2)</sup>, JIA Junyuan<sup>2)</sup>

School of Earth Science and Engineering, Hohai University, Nanjing, 211100;
 Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing, 210016

**Objectives**: Due to the long-term over-exploitation of groundwater and the rapid development of urbanization, a large area of land subsidence has taken place in the Suzhou—Wuxi—Changzhou area. The southern Jiangyin area is one of the most serious areas of land subsidence. In order to find out the reasons for the formation and development trend of land subsidence in southern Jiangyin area, at the same time, in order to determine the impact of building load and groundwater exploitation on land subsidence in southern Jiangyin area, a three-dimensional fully coupled numerical model of building load, groundwater exploitation and land subsidence in southern Jiangyin area was established.

**Methods**: Based on Biot's consolidation theory, a three-dimensional fully coupled mathematical model of building load, groundwater exploitation and land subsidence in southern Jiangyin area was established. At the same time, the rheological theory of cohesive soil was introduced into the mathematical model, and the constitutive relationship of soil was extended to viscoelastic—plastic, and the dynamics of soil mechanics parameters and hydraulic parameters with stress field was considered. The development trend of land subsidence in the south of Jiangyin under three conditions from December 31, 2015 to December 31, 2030 is predicted by simulation, which were building load acting alone, groundwater exploitation acting alone and superposition of building load and groundwater exploitation.

**Results**: The simulation results show that from 2015 to 2030, building load is the main factor causing land subsidence in southern Jiangyin, and groundwater exploitation is the secondary factor. The main compression layer of land subsidence caused by building load alone is the first clay weak aquifer, and the compression amount produced by the main compression layer is 42.94% of the total compression amount. The main compression layer of land subsidence caused by groundwater exploitation alone is the weak aquifer of the second clay, and the compression amount produced by the main compression layer is 62.60% of the total compression amount. The land subsidence induced by the superposition of building load and groundwater exploitation has a coupling effect, and the compression produced by the superposition of the two is less than the sum of the compression caused by the single action.

**Conclusions**: Based on Biot's consolidation theory, the three-dimensional fully coupled model of building load and groundwater mining and land subsidence in southern Jiangyin area can more accurately simulate the process of land subsidence under different conditions, and further improve the accuracy of land subsidence calculation. Three-dimensional fully coupled numerical model of building load, groundwater exploitation and land subsidence in southern Jiangyin can be used to evaluate the impact of groundwater exploitation and major engineering construction on Jiangyin City, and provide countermeasures and suggestions for the prevention and control of land subsidence in southern Jiangyin.

Keywords: southern Jiangyin; building load; groundwater exploitation; land subsidence

Acknowledgements: National Natural Science Foundation of China and Nanjing Center of China Geological Survey provided fund support for this paper. Fu Yanling, associate professor of Hohai university, put forward valuable Suggestions after reading the first draft of this paper

First author: NING Di, female, born in 1995, master's degree in Geological Engineering. Email:

第65卷 第6期	勂	质	论	评	GEOLOGICAL BEVIEW	Vol. 65	No. 6
2019年11月		1)A		*1		Nov.,	2019

#### 1183372118@ qq.com

**Corresponding author**: LUO Zujiang, male, born in 1964, professor, doctoral supervisor. Mainly engaged in hydrogeology, engineering geology and other aspects of research. Email: luozujiang@ sina.com

Manuscript received on: 2019-04-23; Accepted on: 2019-10-17; Edited by: ZHANG Yuxu

Doi: 10.16509/j.georeview.2019.06.020

# 地质论评 2019年第65卷增刊1 目次

# 水工环、城市地质与生态文明建设

基于工程实例对北京地区卵石地层人工挖孔桩安全防护措施的探讨 蒋力, 王炜, 曾振 (1)
西藏查孜温泉水化学特征分析 李皓婷, 郭宁, 孙会肖, 刘昭, 男达瓦 (3)
基于 DRASTIC 模型的丹阳市地下水防污性能评价 李亮, 贾军元, 邢怀学, 周迅 (5)
鲁中山区新生代沉积盆地古近系含水层富水性分析
伽马能谱在某放射性废物库现场定量分析中的初步应用 田贵, 刘自超 (9)
北海涠洲岛钙质海滩沉积特征初步研究 王丹, 施翌, 韦龙明, 闫钰, 常晓亮, 林伯槐 (11)
北海涠洲岛珊瑚多色性分布规律初步研究 王丹, 闫钰, 韦龙明, 郑昊, 刘红玲 (13)
基于包气带剖面研究黄土地下水补给 王雨山,潘建永 (15)
基于地震孕震物理模式的地下流体前兆空间分布特征分析 周慧玲,苏鹤军,张慧,李晨桦(17)
航放测量在新疆某矿区环境调查中的应用 朱卫平,朱宏伟,徐璐平,张迪硕 (19)
西藏觉拥温泉水化学特征分析
沉积物—水界面水流通量研究之渗流仪直接测量法回顾与进展
李海龙,王学静,陈一超(24) 李阳,李海涛,孙璐,赵凯,李木子,李海龙,王学静,陈一超(24)
并行电法在大坝爆破振动评价中的应用 谭磊, 江晓益, 江树海 (27)
凝灰岩岩基风化带精细划分技术
浅析铜陵地区地质构造与岩溶塌陷分布的关系 孟艨, 李振武, 祝华龙(33)

#### 基础地质学科研究

滇西三江造山带中南段地球化学分区特征
安徽省中酸性侵入岩时空分布规律分析 安永梅, 侯克斌 (39)
秦岭岩群中斜长角闪岩的年代学及地质意义 柏治安, 时毓, 刘希军, 刘磊, 赵增霞, 黄倩雯 (41)
佳木斯地块东部二叠纪花岗岩体的锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征及其地质意义
·····································
内蒙古巴尔哲地区碱性花岗岩地球化学特征、年代学及地质意义 陈金勇, 范洪海, 王生云, 张佳 (45)
内蒙古敖汉旗早三叠世正长花岗岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征 陈井胜, 李斌, 刘淼, 杨帆, 李伟, 张立东 (47)
佳木斯地块东缘南双鸭山组碎屑锆石年代学及其大地构造意义 崔维龙, 曾振, 张兴洲 (49)
鄂尔多斯盆地东北部延安组白色砂岩中高岭石成因探讨 丁波, 刘红旭, 杨胜富, 杨龙, 任志勇, 李平, 张宾 (51)
鄂尔多斯盆地纳岭沟铀矿床成矿流体来源及与铀成矿关系:来自含矿层碳酸盐胶结物 C—O 同位素的约束
······丁波, 刘红旭, 杨胜富, 杨龙, 任志勇, 李平, 张宾 (53)
柴达木山花岗岩的岩石学、地球化学及锆石 U-Pb 年代学研究 贺小元, 王永, 郭瑞华 (55)
秦岭杂岩中侵入体的地球化学及年代学特征 黄倩雯, 时毓, 刘磊, 赵增霞, 柏治安, 覃康乐 (57)
滇西丽江地区新生代富碱斑岩锆石微量元素特征 黄永高, 罗改, 张彤, 贾小川, 杨学俊, 熊昌利 (59)
桃山大布铀矿床成矿流体特征
辽西髫髻山组的形成时代及地球化学特征 李斌, 陈井胜, 刘森, 杨帆, 吴振, 杜继宇 (63)