

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2019.02.16

南通滨海新区地下水应急水源地风险预测

张岩^{1,2}, 刘彦^{1,2}, 毛磊^{1,2}, 龚绪龙^{1,2}, 叶淑君³, 刘源^{1,2}, 李进^{1,2}

(1. 江苏省地质调查研究院, 江苏南京 210049; 2. 国土资源部地裂缝地质灾害重点实验室, 江苏南京 210049; 3. 南京大学, 江苏南京 210018)

摘要: 地下水过量开采一直是江苏沿海地区地面沉降产生与发展的主要影响因素, 地下水应急水源地的建设对提升城市供水保障能力、维护社会和谐、稳定具有重要现实和战略意义。为合理利用与保护沿海地区地下水资源, 有效地将地下水开采产生的地质灾害影响程度降到最小, 以南通滨海新区为例, 将地下水资源仅作为应急备用水源并提出两种地下水应急供水方案, 利用 GMS 软件建立了地下水水流-地面沉降耦合数值模型, 开展两种应急供水方案实施后地质风险的预测。结果表明: 在满足南通滨海新区应急供水需求的条件下, 两种方案实施后, 仅会在应急开采井所在的区域产生地下水位降落漏斗和地面沉降的现象, 同时在应急供水结束后, 地下水位快速回升, 地面沉降出现回弹的现象, 总体产生的地质环境风险很小, 两种地下水应急供水方案均具有可行性。

关键词: 地下水; 应急水源地; 地面沉降; 数值模拟

中图分类号: P641.8

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)02-0100-07

Risk prediction of groundwater emergency water sources in Nantong Binhai new area

ZHANG Yan^{1,2}, LIU Yan^{1,2}, MAO Lei^{1,2}, GONG Xulong^{1,2}, YE Shujun³, LIU Yuan^{1,2}, LI Jin^{1,2}

(1. Geological Survey of Jiangsu Province, Nanjing 210049, China; 2. Key Laboratory of Earth Fissures Geological Disaster, Ministry of Land and resources, Nanjing 210049, China; 3. Nanjing University, Nanjing 210049, China)

Abstract: Groundwater excessive exploitation has always been a main factor on the occurrence and development of land subsidence in Jiangsu coastal areas. The planning and construction of groundwater emergency water source has important practical and strategic significance for improving urban water supply security capacity and maintaining social harmony and stability. This paper took Binhai New Area in Nantong City as an example to realize rational exploitation and protection of groundwater resources and to effectively minimize the impact of the generated geological disasters. Two emergency water supply schemes were designed with the basis that groundwater resources should be used only as emergency water supply, and the geological risk prediction after the implementation of two emergency water supply schemes was carried out by establishing a coupling model of groundwater flow-land subsidence with GMS software. The results showed that under the condition of meeting the emergency water supply demand of Nantong Binhai New Area, the groundwater level falling funnel and ground subsidence only occur in the area where the emergency production well is located, after the implementation of the two schemes. In addition, after the emergency water supply ends, the underground water level rises rapidly, ground subsidence appears rebound phenomenon, the overall geological environment risk is very small, and both kinds of emergency water supply plans of groundwater are feasible.

Key words: groundwater; emergency water source; land subsidence; numerical simulation

1 研究背景

随着我国城市化进程的加快, 突发性污染造成

的水源危机事件频发, 2005 年吉林松花江受到苯类化合物污染事件、2007 年太湖蓝藻事件、2014 年兰州自来水苯含量超标等, 造成供水系统能力大幅下

收稿日期: 2018-07-30; 修回日期: 2018-11-15

基金项目: 中国地质调查局项目(1212011220005); 江苏省地质勘查基金项目(苏国土资函[2014]842号)

作者简介: 张岩(1987-), 女, 吉林榆树人, 硕士, 工程师, 主要从事水文地质、环境地质调查与研究工作。

降甚至瘫痪^[1],给国民经济和居民生活造成较大影响。江苏沿海地区供水水源以地表水为主,拥有两个以上相对独立的地表水源地或应急备用水源地的市(县)还比较有限,易引发供水危机,因此建设应急水源地势在必行。

江苏沿海地区深层地下水量丰质优,单井涌水量多为 2 000 ~ 3 000 m³/d,部分地区大于 3 000 m³/d;现有的 3 700 眼深井也为地下水应急水源地建设提供了有利条件,因此沿海地区完全具备了建立地下水应急水源地的基本条件。然而地下水具有资源与地质环境双重属性,过量开采易引发地面沉降等环境地质问题。大量研究表明:地下水过量开采是引起区域性地面沉降的主要原因^[2-3],在我国中东部地区的上海、天津、江苏、河北等 17 个省市均发生了地面沉降,至 2012 年底,沉降量超过 200 mm 的区域面积超过 90 000 km²^[4-9]。江苏省尤以苏锡常地区最为典型,近年来沿海地区不少区域也出现了地面沉降,形势较为严峻。因此在地面沉降约束条件下合理开发利用地下水,是江苏沿海地区社会与经济可持续发展的前提和保障。

本文以南通滨海新区为例,按照“安全、资源、环境”三位一体的总体思想,遵循优水优用、开发与保护并重等原则,开展地下水应急水源地的规划与地质风险预测,完善供水水源格局,以提升港区应急供水保障能力,为江苏沿海其他地区开展地下水应急水源地建设提供经验与示范。

2 研究区概况

江苏省南通滨海新区(以下简称“滨海新区”)隶属南通市,区位优势独特。辖区总面积约 585 km²,陆域范围约 292 km²,包括如东、通州、海门 3 地的部分地区,具体范围见图 1,区域远景规划控制总面积约为 820 km²。2013 年常住人口 13.2 × 10⁴ 人,2020 年规划人口 30 × 10⁴,2030 年规划人口 70 × 10⁴。

2.1 地下水资源概况

滨海新区位于长江下游地下水系统,地下水类型以松散岩类孔隙水为主,自上而下可划分为潜水、第 I、II、III、IV 承压含水层组。地下水的埋藏与展布受到古地理环境、古河流的水动力条件、所带物质丰富程度以及第四纪海进海退的影响,地下水富水性和水质差异较大。潜水和第 I、II 承压水多为咸水,开发利用较少,第 III、IV 承压水主要为淡水,为该地区的主采层。

(1)第 III 承压含水层组。该含水层组顶板埋深一般 180 ~ 210 m,岩性以中细砂、粉细砂为主,砂层厚度呈现南厚北薄趋势,滨海新区南部砂层厚度一般 40 ~ 60 m,北部砂层厚度一般 20 ~ 40 m。标准单井涌水量一般 1 000 ~ 3 000 m³/d,三余镇一带单井涌水量大于 3 000 m³/d(图 1)。水质为 TDS 小于 1 g/L 的淡水,水化学类型主要为 HCO₃ · Cl—Na 型。

(2)第 IV 承压含水层组。该含水层组地层属于新近纪上新统,顶板埋深一般 280 ~ 300 m,滨海新区南部岩性以含砾中砂、细中砂、中砂为主,北部岩性以含砾中细砂为主,砂层厚度一般 20 ~ 60 m。该含水层组富水性好,三余镇一带标准单井涌水量 3 000 ~ 5 000 m³/d(图 2),三余镇南北两侧标准单井涌水量 2 000 ~ 3 000 m³/d。水质一般为 TDS 小于 1 g/L 的淡水,水化学类型主要为 HCO₃—Na、HCO₃—Na · Ca 型。

(3)地下水水质情况。本文采集了滨海新区 III 承压水样 6 组、IV 承压水样 3 组,按照《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)进行生活饮用水水质评价,评价结果显示:第 III、IV 承压含水层水质普遍较好,仅局部地区铁、Cl⁻、Na⁺ 含量超过生活饮用水卫生标准,其他指标均符合生活饮用水卫生标准。经过简单的处理,第 III、IV 承压水均可作为应急供水的水源。

2.2 供水现状

滨海新区的生活供水通过区域供水管网供给,水源为长江水,并通过疏浚九圩港—遥望河和通吕运河—团结河两条引江通道,补充滨海新区的淡水资源。拟建东凌平原水库(总库容 2600 × 10⁴ m³)近期蓄集淡水,远期作为备用水源,同时将遥望港东侧海洋旅游度假区内湖体(面积 4.6 km²)作为备用水库,提高供水保障能力。地下水主要用于水产品公司的工业用水,共有深井 13 眼。

3 地下水应急水源地规划方案

目前南通滨海园区供水水源以地表水为主,地下水开采量较少,约 36 × 10⁴ m³/a,主要作为工业用水。本文主要考虑最为极端的情况,即发生突发性事件或极端性气候事件,常规供水水源已无法供水,全部需由地下水保障供水。

3.1 地下水应急保障目标

(1)应急供水目标。应急需水量 $Q = \text{人口} \times \text{应急供水定额} \times (1 + \text{三产系数}) \times (1 + \text{漏损系数})$

其中人口数根据港区远期规划 70 × 10⁴ 人口以

及港区作为通过能力超 10×10^8 t 深水大港的物流人口约 1×10^4 人进行估算,人均每天供水定额为 $80 \text{ L}^{[10]}$,“三产系数”取 0.2,漏损系数取 $0.15^{[11]}$ 。

经计算,滨海新区应急需水量为 $7.84 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

(2)应急供水持续时间。从最近 20 多年来我国县级以上城市水污染事件导致供水中断的情况来看,供水中断 24 h,影响人口超过 20×10^4 的事故大约有 12 起(表 1),停供天数一般为 1~7 d,极个别事故停水超过 10 d。江苏省政府于 2012 年作出要求,所建立的“备用水源地”最少需要满足 7 d 以上的居民生活用水需求。参照《江苏省饮用水水源地安全保障规划》,根据发生水资源突发事件的等级、应急供水的需求等,本次规划应急供水时间为 3、7、15 d。

3.2 地下水应急供水方案

结合区域水文地质条件,综合对比含水层富水

性条件、水质、地下水调节能力、恢复能力以及经济成本等原则,选定第 III 承压含水层作为目标层,圈定了开采井布置的靶区并设计了两种布局方案。第 III 承压含水层单井涌水量若以 $2\ 500 \text{ m}^3/\text{d}$ 计算,则至少需要新增深井 32 眼,供水总量达 $8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,可满足滨海新区应急供水需求。

方案 1:将新建的 III 承压开采井均布置在富水性最好的三余镇,作为集中开采区。在应急状态下采用集中式供水方式,便于调度也可简化供水管线及相关水质处理设备的复杂程度。开采井布置如图 3(a) 所示。

方案 2:将 III 承压开采井均匀地分布在富水条件较好的 3 个区域,三余镇(12 眼)、大豫镇东侧(10 眼)和西侧(10 眼),在应急条件下能分片区对滨海新区进行应急供水,开采井分布如图 3(b) 所示。

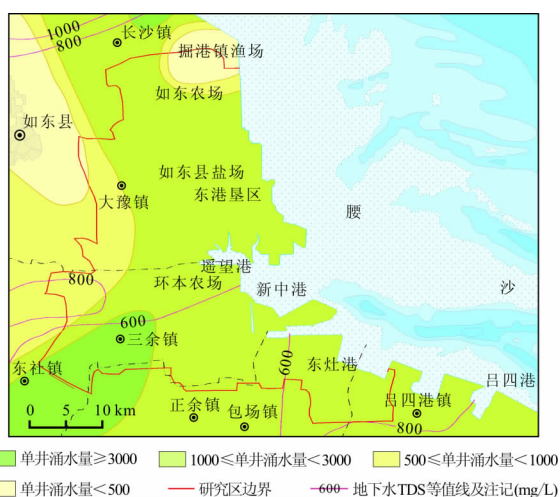


图 1 第 III 承压含水层富水性分区图(单位: m^3/d)

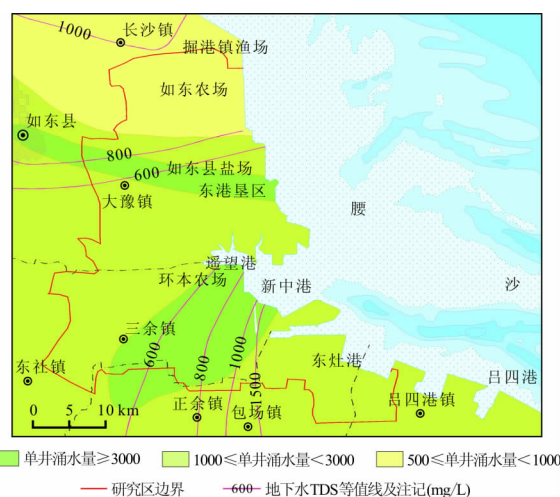


图 2 第 IV 承压含水层富水性分区图(单位: m^3/d)

表 1 近年来重大突发事件导致停水时长统计

年份	城市	事件原因	影响供水情况
1988	浙江长兴	含硝基苯流入长兴港	水厂停水 7 d
1989	河南漯河	颍河上游造纸厂排放废水造成污染事故	漯河市停水 5 d
1999	浙江宁海	取水口附近毒鱼	停水 3 d
2001	浙江宁海	1.5 t 硫酸亚铁排放土壤中,对水源造成持续污染	宁海县停水 14 d
2004	四川简阳	川化集团技术改造工程施工故障,严重超标排污近 20 d	简阳市停水 26 d
2005	吉林吉林	中石化吉林双苯厂爆炸污染松花江水源	吉林市停水 1 d
2005	黑龙江哈尔滨	中石化吉林双苯厂爆炸污染松花江水源	哈尔滨市停水 4 d
2006	河南许昌	河底腐草和有机物上浮	停水 7 d
2007	江苏无锡	太湖区域蓝藻大爆发	无锡市供水接近瘫痪,停水 4 d
2009	江苏盐城	水厂原水污染	20 万居民停水 66 h
2011	浙江新安江	车祸致苯酚污染	下游 5 个水厂停水 4 d
2012	山西长治	化工公司苯胺泄露	长治市铁西水厂停水 1 d

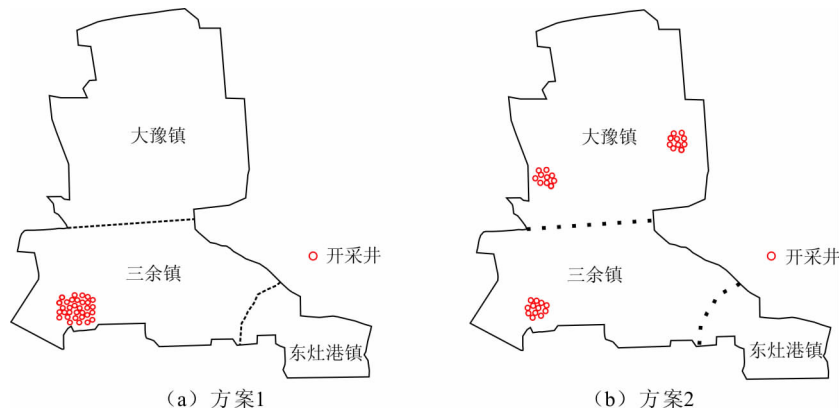


图 3 方案 1、方案 2 开采井布设图

4 地下水应急水源地评价与风险预测

在应急状态下,需要短时间内集中、高强度的开采地下水,易引发地面沉降等环境地质问题。评估应急开采地下水过程中产生的地质风险,既可判断地下水应急水源地建设的合理性,也可有效将产生的地质灾害的影响程度降到最小,为地下水应急水源地保护方案提供依据。因此本次以滨海新区为范围,构建了三维地下水流-地面沉降耦合模型,模拟预测与评估应急供水条件下地下水开采可能对地质环境造成的影响。

4.1 耦合模型的构建

(1)模型概化与离散。研究区垂向模拟深度为 500 m,根据含水系统结构(潜水、第 I、II、III、IV 承压含水层组和相应的弱透水层)自上而下共概化为 9 层,按矩形剖分共剖为 84 284 个有效单元。重点模拟主采层第 III、IV 承压含水层,含水层和弱透水层

表现明显的非均质各向异性,各含水层之间均通过弱透水层发生水力联系。侧向边界均为行政区划的人为边界,边界上有观测孔的地段,作为已知水头边界,其他均为流量边界;顶部边界概化为一类边界,根据第 I 承压水位统计给出,底部为隔水边界。区内地下水开采为唯一的排泄方式,保留区域已有开采井,需新打的 32 眼开采井按图 3 的方式布设。

土层变形概化:根据区域地面沉降特征分析,土层变形概化为一维垂向弹塑性沉降模型。此外,在沉降模拟中需考虑变形滞后的问题^[12-13]。

(2)数学模型。区域三维地下水流模型和一维沉降模型具体用数学模型(1)^[13]来描述,两者为显式耦合关系,即采用数值方法模拟计算时,每个时段先通过三维地下水流模型计算出水头,然后将水头值的变化代入一维沉降模型计算土层的变形量。该模型采用有限差分法进行求解,用 GMS 软件中 MODFLOW 模块求解水流模型,用 SUB 模块求解沉降模型。

$$\begin{cases}
 \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + w = S_s \frac{\partial h}{\partial t}, & x, y, z \in \Omega, t \geq 0 \\
 h(x, y, z, t) |_{t=0} = h_0, & x, y, z \in \Omega, t \geq 0 \\
 h(x, y, z, t) |_{\Gamma_1} = H, & x, y, z \in \Gamma_1, t \geq 0 \\
 K_n \frac{\partial h}{\partial n} |_{\Gamma_2} = q(x, y, z, t), & x, y, z \in \Gamma_2, t \geq 0 \\
 \Delta b = S_{sk} b \frac{\partial h}{\partial t}, & x, y, z \in \Gamma_3, t \geq 0 \\
 \Delta b |_{t=0} = 0, &
 \end{cases} \quad (1)$$

式中: Ω 为渗流区域; h 为水位标高,m; K 为渗透系数,m/d; w 为含水层的源汇项,d⁻¹; h_0 为初始水位,m; S_s 为储水率,m⁻¹; Γ_1 为渗流区域的一类边界; Γ_2 为渗流区域的二类边界; K_n 为二类边界界面法线方向的渗透系数,m/d, n 为二类边界界面的法线方向; Δb 为变形量,m; b 为土层厚度,m; S_{sk} 为骨架

储水率,m⁻¹(当水位低于前期最低水位时,该参数为 S_{ske} 为非弹性骨架储水率,当水位高于前期最低水位时,该参数为 S_{ske} 为弹性骨架储水率)^[13]。

(3)模型的识别与验证。本文选取模拟时间为 2005-2013 年,1 个季度为 1 个时间步长,将整个时间段离散为 36 个时间步长。各含水层的初始水位由

实测所得,设定初始沉降量为0。水文地质参数分区主要根据研究区岩性、古河道分布等进行划分,利用前人资料结合抽水试验资料等赋予初值,而土力学参数则由室内试验获得。图4、5举例说明了该模型的拟合精度。总体来看该模型的拟合精度较高,可以用于预报地下水开采引起的流场和地面沉降的变化。

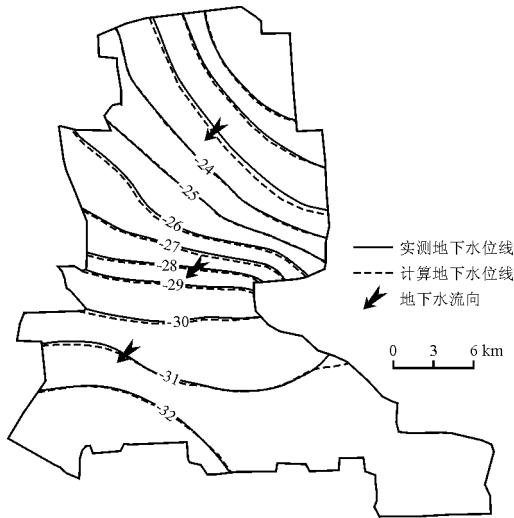


图4 验证期Ⅲ承压地下水流场拟合图(单位:m)

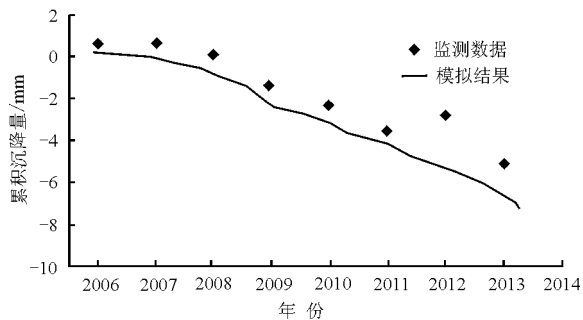


图5 地面沉降计算值与实测值拟合图

4.2 地下水应急水源地风险预测

利用上述识别验证的数值模型,以2013年12月底作为计算初始时刻,设置地面沉降量初值为0,将两种方案的开采井分别布设到模型中进行模拟计算。模型运行时间为45 d,其中应急开采时长为15 d,15 d后停止开采,模型继续运行30 d,用来模拟停采后区域的地下水位与地面沉降恢复情况。

(1)方案1预报结果。地下水应急供水开始后,应急开采井所在的区域地下水位快速下降且随着应急供水时间的增长,漏斗的范围及漏斗中心的水位降深逐渐增大,而其他地方地下水流场变化不大。应急供水15 d后,从区域Ⅲ承压地下水水位与地面沉降预测图(图6)可以看出,在三余镇处形成比较明显的地下水位降落漏斗,同时也产生了以

三余镇为中心的地面沉降现象,但未出现含水层疏干的情况。在应急供水3、7、15 d后,漏斗中心三余镇的水位分别为-32.62、-32.85、-33.24 m,地下水的水位变化量分别为0.47、0.7、1.09 m;地下水连续开采产生的累积地面沉降量分别为1.69、3.24、5.69 mm。当应急供水结束后,地下水位降落漏斗中心的水位快速回升,地面沉降出现回弹现象。供水结束30 d后,地下水位恢复到-32.97 m,与初始水位仅相差0.82 m,地面沉降量回弹至3.91 mm(表2),水位及地面沉降的变化量具体详见图7。

(2)方案2预测结果。在应急供水开始后,地下水位持续下降,开采井所在的区域地下水位下降明显。地下水连续开采15 d以后,从区域Ⅲ承压地下水水位与地面沉降预测图(图8)可以看出形成了三余镇、大豫镇东部两个地下水位降落漏斗,并产生了地面沉降问题,形成了4个地面沉降漏斗区。在应急供水3、7、15 d三余镇地下水位分别为-32.54、-32.68、-33.16 m,地下水位的下降幅度分别为0.39、0.53、1.01 m;地下水开采引起的地面沉降漏斗中心的沉降量分别为1.65、3.03、5.69 mm;大豫镇东部在应急供水3、7、15 d后地下水位分别为-23.7、-24.31、-25.05 m,相应的下降幅度分别为0.82、1.43、2.17 m;而引起的地面沉降漏斗中心的累积沉降量分别为2.37、4.43、7.27 mm,详见表2。

当应急供水结束后,地下水水位快速回升,地面沉降出现回弹现象。停止供水30 d后,从区域Ⅲ承压地下水水位与地面沉降预测图(图9)可以看出,地下水位明显回升,三余镇地下水位漏斗面积减小,大豫镇东部地下水位漏斗消失,而4个地面沉降漏斗区面积有所减小,沉降量有所回弹。供水结束后第5、10、30 d三余镇的水位回升至-32.97、-32.88、-32.69 m,沉降量回弹至3.97、3.46、2.28 mm;大豫镇东部水位回升至-24.48、-24.27、-23.8 m,沉降量回弹至4.92、4.17、2.73 mm(表2)。

本次规划的应急供水方案应急周期为3~15 d,从两个应急方案的预测结果来看,在应急供水开始后,仅会在开采井所在的区域产生地下水位降落漏斗和地面沉降的现象,如方案1仅在三余镇产生地下水位漏斗,连续开采15 d后漏斗中心最深水位为-33.24 m,产生的最大沉降量为5.69 mm;方案2在三余镇和大豫镇东产生地下水位降落漏斗,连续开采15 d后产生的最大沉降量为7.27 mm,均小于10 mm/a的区域地面沉降防控目标,基本不会造成区域性的环境地质问题。

表 2 两种方案开采与停采含水层水位、地面沉降变化对比表

开采方案	水位/ 沉降漏斗中心	应急供水 天数/d	水位/m	降幅/m	沉降量/ mm	停止供水 天数/d	水位/m	沉降量/ mm
方案 1	三余镇	3	-32.62	0.47	1.69	5	-33.12	4.81
		7	-32.85	0.70	3.24	10	-33.09	4.70
		15	-33.24	1.09	5.69	30	-32.97	3.91
	三余镇	3	-32.54	0.39	1.65	5	-32.97	3.97
		7	-32.68	0.53	3.03	10	-32.88	3.46
		15	-33.16	1.01	5.69	30	-32.69	2.28
方案 2	大豫镇西	3	-27.58	0.58	1.23	5	-28.50	2.81
		7	-28.15	1.15	2.41	10	-28.28	2.27
		15	-28.86	1.86	4.02	30	-27.95	1.21
	大豫镇东	3	-23.70	0.82	2.37	5	-24.48	4.92
		7	-24.31	1.43	4.43	10	-24.27	4.17
		15	-25.05	2.17	7.27	30	-23.80	2.73

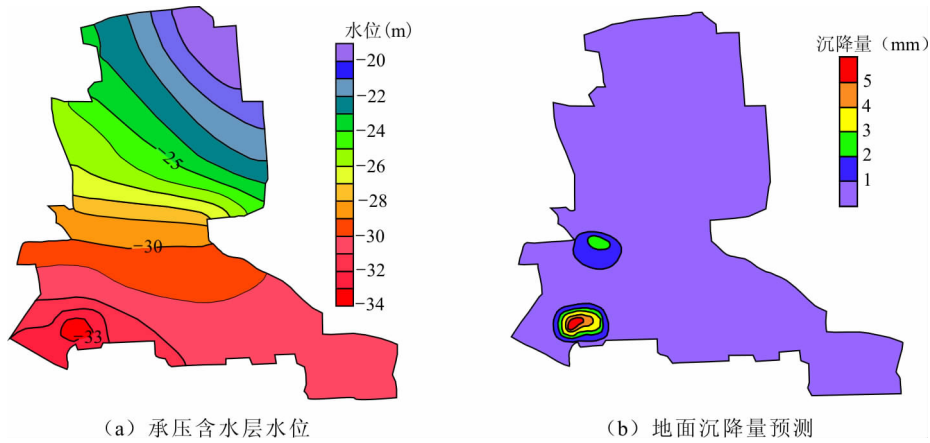


图 6 方案 1 应急供水 15 d 后第Ⅲ承压含水层水位、地面沉降预测图

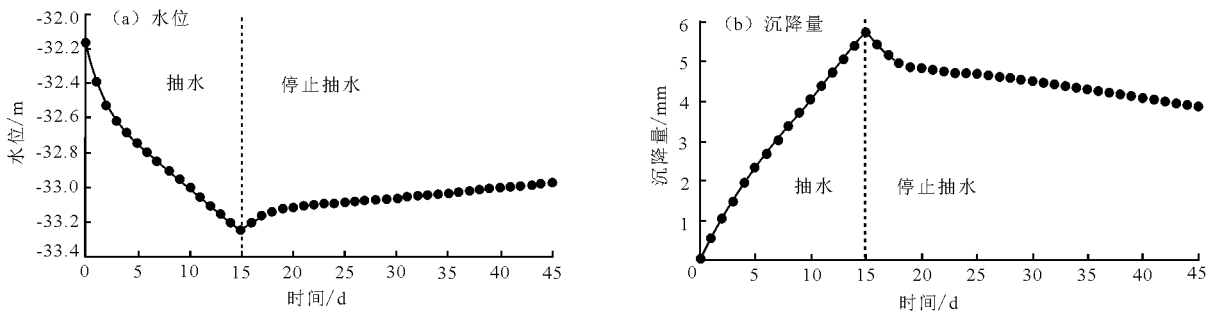


图 7 方案 1 三余镇沉降中心水位、沉降量变化图

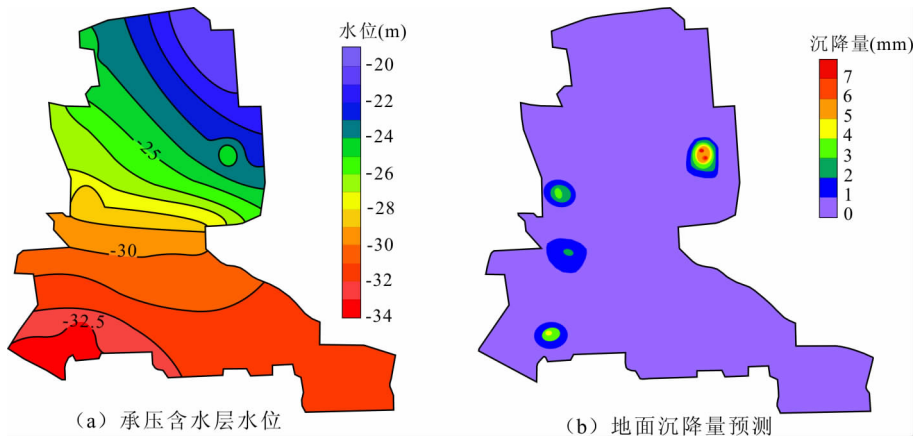


图 8 方案 2 应急供水 15 d 第Ⅲ承压含水层水位、地面沉降预测图

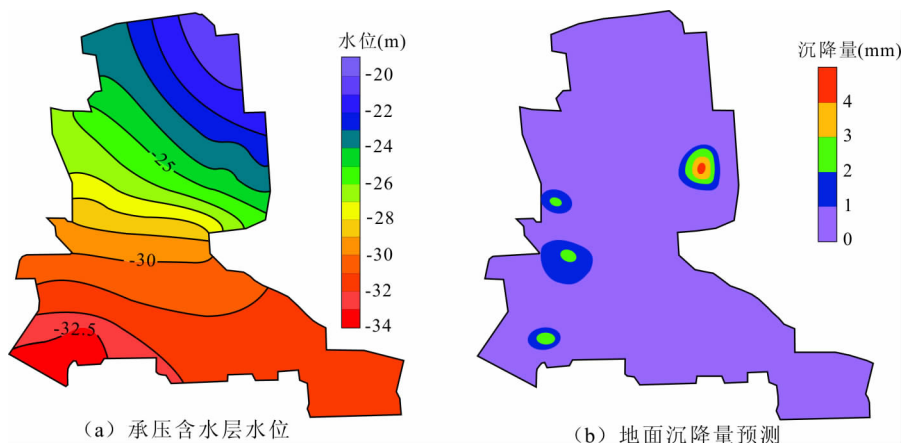


图9 方案2 停止供水30 d 第Ⅲ承压含水层水位、地面沉降预测图

在应急供水结束后,地下水位快速回升,地面沉降出现回弹的现象,方案1 在停止开采30 d 后,三余镇地面沉降回弹至3.91 mm,方案2 三余镇地面沉降回弹至2.28 mm,说明总体产生的地质环境风险很小,两种地下水应急供水方案均具有可行性。

5 结论

(1)本次在南通滨海新区的水文地质条件研究和应急供水需求分析的基础上,提出两种应急供水方案,将应急开采井集中布设在三余镇或将应急开采井分别布设在三余镇、大豫镇东侧和西侧3 处,两种方案的应急取水规模均可达 $8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

(2)利用GMS 软件建立了地下水流-地面沉降耦合模型,对两种方案应急供水产生的环境效应进行了模拟预测。模拟结果表明,两种方案在运行过程中仅在开采井所在区域产生了水位下降和地面沉降的问题,但含水层具有良好的恢复性,停止供水30 d 后,地下水位基本可以恢复,地面沉降也有所回弹,同时应急供水引起的最大地面沉降量小于 10 mm/a 的沉降控制指标。两种地下水应急供水方案均切实可行,可为滨海新区地下水应急水源地建设以及地下水资源合理开发利用与保护提供技术支撑。

(3)地下水开采一直是江苏沿海地区地面沉降的主要影响因素,本次实现了南通滨海新区地下水-地面沉降耦合模拟,预测了地下水应急开采条件下的地面沉降发展趋势,后续可继续开展以地面沉降为约束条件的地下水应急开采布局调整,这将为沿海地区制定地面沉降约束条件下的地下水可持续利用方案提供很好的借鉴。

建议江苏沿海地区充分发挥地下水资源应急保障作用,加快推进县级以上城市地下水源地规划与论证,因地制宜地选择地下水应急供水模式。同时

建立地下水应急水源地水位、水质、地面沉降等地质环境自动化监测系统,及时掌握地下水水位、水质及地面沉降动态,以提升地下水应急保障能力。

参考文献:

- [1] 张远东. 城市地下水应急水源地管理探讨[J]. 中国水利, 2010, (19): 49-51.
- [2] XUE Yuqun, ZHANG Yun, YE Shujun, et al. Land subsidence in China, [J]. Environmental Geology, 2005, 48(6): 713-720.
- [3] 薛禹群, 吴吉春, 张云, 等. 长江三角洲(南部)区域地面沉降模拟研究[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2008, 38(4): 477-492.
- [4] 于军. 基于arcgis 平台的苏锡常地区地面沉降管理信息系统研究[D]. 长春: 吉林大学, 2006.
- [5] 龚士良. 上海地下水流场变化及对地面沉降发展的影响[J]. 水资源与水工程学报, 2009, 20(3): 1-6.
- [6] 杨艳, 贾三满, 王海刚. 北京平原区地面沉降现状及发展趋势分析[J]. 上海地质, 2010, 31(4): 23-28.
- [7] 朱菊艳, 郭海朋, 李文鹏, 等. 华北平原地面沉降与深层地下水开采关系[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(3): 165-169.
- [8] 孙刚臣, 彭建兵, 张德媛. 西安市地面沉降成因机理中的若干问题探讨[J]. 灾害学, 2008, 23(S1): 40-44.
- [9] YE Shujun, XUE Yuqun, WU Jichun, et al. Progression and mitigation of land subsidence in China [J]. Hydrogeology Journal, 2015, 24(3): 1-9.
- [10] 上海市市政工程设计研究总院. 南通市区域供水应急水源地规划[R]. 上海市市政工程设计研究总院, 2011.
- [11] 江苏省地质环境勘查院. 南通市主城区应急供水项目地下水资源论证报告[R]. 江苏省地质环境勘查院, 2012.
- [12] 于军, 吴吉春, 叶淑君, 等. 苏锡常地区非线性地面沉降耦合模型研究[J]. 水文地质工程地质, 2007, 34(5): 11-16.
- [13] 贺小桐. 南通地下水流、地面沉降与淡水咸化耦合数值模拟研究[D]. 南京: 南京大学, 2016.