2024年5月 第45卷第3期:423-432

www.cagsbulletin.com

扬州城市规划区地下水应急供水方案可行性研究

朱明君^{1,2)}, 党 磊³⁾, 谢月清³⁾, 李明月³⁾

1)江苏省地质调查研究院,江苏南京 210049;
 2)自然资源部地裂缝地质灾害重点实验室,江苏南京 210049;
 3)南京大学地球科学与工程学院,表生地球化学教育部重点实验室,江苏南京 210023

摘 要: 突发事件会引起大范围的地表水污染,对城市供水水源的安全形成挑战,严重威胁人民生命安全, 危害生态环境和经济社会稳定。地下水与地表环境联系较弱,利用地下水作为应急水源是最安全的水资源 保障措施。本研究以扬州城市规划区为例,确定了规划区应急需水量为17.2万m³/d,应急时长为15d,主 要开采的第II、III承压含水层限采红线水位埋深分别为20m、30m,根据研究区应急供水需求制定了4种 应急供水方案。方案1和2为水源地集中供水,方案3为分散式供水,方案4为分散与集中式联合供水。依 据工作区水文地质条件和地下水位监测数据,基于 HydroGeoSphere 构建并校正了研究区三维地下水-地表 水耦合数值模型,利用数值模型分析了不同供水方案应急抽水引起的地下水位降落趋势及其与地下水开采 红线的关系。研究表明,分散与集中式联合供水方案可以明显减小工作区内的水位波动,减缓水源地的供水 压力,降低地面沉降风险,对现有管网的利用也较为充分,可作为应急供水的首选方案。 关键词:地下水;水位红线;应急供水;数值模拟;HydroGeoSphere;扬州 中图分类号:P641.8 文献标志码:A doi: 10.3975/cagsb.2024.031501

Suitability Assessment of Groundwater Emergency Supply Plans in Yangzhou City

ZHU Mingjun^{1, 2)}, DANG Lei³⁾, XIE Yueqing³⁾, LI Mingyue³⁾

 Geological Survey of Jiangsu Province, Nanjing, Jiangsu 210049;
 Key Laboratory of Earth Fissures Geological Disaster, Ministry of Land and Resources, Nanjing, Jiangsu 210049;
 Key Laboratory of Surficial Geochemistry, Ministry of Education, School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210023

Abstract: Emergencies cause large-scale surface water pollution, challenge the safety of urban water supply sources, seriously threaten people's safety, and endanger the ecological environment, economic, and social stability. The connection between groundwater and land surface is weak; therefore, using groundwater as an emergency water source is the safest water resource measure. In this research, the Yangzhou urban planning area was selected as the study area. We determined that the volumetric water required during an emergency is 172 000 m³/d, and the emergency period is 15 days. Additionally, the alert depths of the water level in the second and third confined aquifers are 20 m and 30 m, respectively. Four emergency water supply schemes were used according to the emergency water supply plan. Schemes 1 and 2 depict centralized water supplies, Scheme 3 shows a distributed water supply, and Scheme 4 presents a combination of distributed and centralized water supplies. Based on the hydrogeological conditions and observation results of the study area, a three-dimensional coupled groundwater and surface water numerical model was constructed and calibrated using Hydrogeosphere software. Water table variations caused by emergency pumping of different water supply schemes and their relationship with compliant drawdowns were analyzed. The results show that the hybrid water supply scheme can significantly reduce the variation in water level in the study area, slow down the water supply

本文由江苏省地勘基金项目(编号:苏财资环[2019]14号)资助。

收稿日期: 2023-10-20; 改回日期: 2024-02-22; 网络首发日期: 2024-03-19。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介:朱明君,女,1985年生。硕士,高级工程师。主要从事水工环地质、浅层地热能研究。E-mail:1055565003@qq.com。

pressure of the water source, and reduce the risk of ground subsidence. Moreover, it makes full use of existing pipe networks. Therefore, a hybrid water supply scheme is recommended as the first choice for emergency water supplies. **Key words:** groundwater; alert depth of water level; emergency water supply; numerical simulation; HydroGeoSphere; Yangzhou

水资源是生产生活的重要保障,大部分城市的 供水水源是地表水体。然而,地表水暴露于地表, 易受到灾难性自然事件的影响(马建华,2010; Vrba et al., 2016),例如极端干旱、地震及其引发的次生 环境灾害。同时,地表水体也易受到人类活动造成 的污染事件的影响(刘晓东等,2020;魏潇淑等, 2022),例如车祸、撞船、设备处置不当等引起的化 学物品泄漏、氮磷过量引起的水体蓝藻爆发。突发 事件会引起大范围的地表水污染,对城市供水水源 的安全性形成挑战,严重威胁人民生命安全,危害 生态环境和经济社会稳定。随着污染形式的多元化 与复杂化以及极端天气的频繁化,保障供水安全要 求越来越严格,建立现代化水源管理体系保障饮用 水水源的安全已显得尤为迫切。

与地表水相比, 地下水与地表环境联系相对较 弱,水污染事件和极端气候对地下水的影响较为缓 慢,利用地下水作为应急水源是最安全的水资源保 障措施(吴爱民等, 1998; 段永侯等, 2004; 文冬光等, 2012)。国内外很多地区研究了利用地下水作为水源 地的方案,例如杨国强等(2021)以宁波市大嵩江流 域为例,提出了"沟谷型"、"封存型"淡水水源地 与地下淡水库建设相结合的区域地下水应急供水模 式。为保障北京房山的水资源供给, 沈媛媛等(2011) 基于数值模型分析了房山岩溶水应急水源地的持续 开采能力。为应对极端干旱引起的水资源短缺问题, Mussá et al.(2015)研究了南非鳄鱼河流域地下水应 急供水的可行性及其对降落漏斗和河流基流的影 响。Endo et al.(2022)调查了 2016 年日本熊本地震 后本地地下水应急供水的程度和效果,发现地下水 应急供水有效缓解了震后水资源供给压力。

位于长江下游流域的江苏水系发达,水流较慢, 但是人口较多,工业活动频繁,发生蓝藻、化工物品 泄漏引起的水污染概率比上游流域更高(刘振胜等, 2005)。此外,当前极端天气与极端事件难以准确预 测,水资源安全供给存在不确定性,因此制定地下 水应急供水方案意义重大(张远东,2010;王中根等, 2011;刘一鸣等,2022)。然而江苏地区属于陆海交替 的沉积环境,含水层中黏土和亚黏土层较厚,地下 水开采易引起地面沉降问题(胡喜梅等,2017)。为避 免地质灾害的发生,对地下水开发进行水位控制可 有效缓解地面沉降等环境地质问题(张宗祜等,1997; 王琨等,2014;代锋刚等,2018)。鉴于此,地下水应急 供水方案必须同时考虑水资源应急供水的规模和地 下水开采红线,避免发生次生灾害。

本文选取扬州城市规划区为研究区,通过分析 研究区的供水需求以及地下水开采红线,制定了四 个地下水应急供水方案。根据研究区水文地质条件 构建三维地表水-地下水耦合数值模型,利用校正 后的地下水流模型评估不同应急供水方案引起的流 场变化及其触发开采红线情况,从而阐明不同应急 供水方案的可行性,为研究区水资源供给提供了技 术支撑,对其他地区也具有借鉴意义。

1 研究区介绍

本次研究区范围为扬州城市规划区,总面积约 2 358 km²,行政区划包括广陵区、邗江区、江都区 以及仪征市朴席镇。研究区南部濒临长江,与镇江 市隔江相望,北接高邮,东和泰州毗连,西与仪征 市交界(图 1)。

1.1 自然地理条件

研究区处于长江三角洲平原的顶端、长江与京 杭大运河交汇处,是南水北调东线工程水源地。整 体地势西高东低,从西向东呈扇形逐渐倾斜,西北 部为丘陵,京杭大运河以东、通扬运河以北为里下 河平原区,南部沿江一带为长三角平原区。

1.2 气象与水文

研究区属北亚热带湿润季风气候区,常年平均 气温 14.4 ℃,平均无霜期 218 d。年度平均相对湿 度为 79%,区内降水丰富,多年平均降水量 1 020 mm,降水的年际、季节变化较大,主要集中 在 6—9月,占全年的 51.7%。

研究区属长江水系,区内河流纵横,湖荡交错, 水网密布,河流与湖泊兼具着防洪排涝与抗旱的功 能。新通扬运河横穿东西,京杭大运河纵横南北, 现已成为南水北调之主要干道。研究区最大的湖泊 为邵伯湖,位于研究区北部,该湖泊北与高邮湖相 连,南与廖家沟、太平河、金湾河及芒稻河相连。 这些河流最终都向南汇聚到芒稻河中,并在江都区 三江营流入长江。

1.3 水资源开发利用与管理

研究区深层地下水的开采始于 20 世纪 60 年代, 发展于八九十年代; 自九十年代中后期至 21 世纪初, 区内深层地下水年开采量基本稳定在 2 500 万 m³ 左右。 第三期



图 1 研究区位置图 Fig. 1 Location map of the study area

由于地下水的过量开采导致地下水位持续下降, 易引发地下水污染、地面沉降(如江都区东北部某地 区近 10 年累计沉降量超过 50 mm,地面沉降速率 局部超过 5 mm/a)等环境地质问题的出现,政府相 继出台《省政府关于实行最严格水资源管理制度的 实施意见》(苏政发(2012)27 号)、《扬州市人民政府 关于实行最严格水资源管理制度的实施意见》(扬府 发〔2012〕236 号)等政策建议,明确扬州市地下水 资源管理在控制取水总量基础上,全面实施地下水 位控制。表 1 为扬州市地下水水位控制红线(姚炳魁 等, 2014)。

1.4 研究区供水现状及应急供水需求

区内供水主要集中在地表水系,主要包括江都 区高水河邵伯水源地、江都高水河、江都芒稻河、 江都三江营、市区长江三江营、市区廖家沟以及市 区长江瓜洲等7处水源地。除江都区高水河邵伯水 源地为乡镇集中式饮用水源地,其余6个均为县级 以上集中式饮用水(图2)。

扬州市城乡供水"十三五"专项规划中论证表 明,扬州市的两大水源地长江和大运河主要面临突 发排污、输入性突发污染和移动风险源污染等三大 污染源的污染风险,以及由此产生的油类、苯酚、农 药、硫酸等化学污染物。当前,扬州城市规划区的应 急供水方案主要利用地表水,然而当前极端事件变 得越来越频繁,特殊情况会引起区域内地表水体大 面积污染,因此有必要制定地下水应急供水预案。

表 1 扬州市地下水水位控制红线一览表 Table 1 List of alert depth for groundwater level control in Vangzhou City

in rangznou City					
目标	区体	限采水位	禁采水位		
含水层	区域	埋深/m	埋深/m		
第Ⅱ承压	沿江一带	15	37		
	其他地区	20			
第Ⅲ承压	沿江一带	25	17		
	其他地区	30	4/		



图 2 研究区地表水水源地与供水点分布图 Fig. 2 Distribution of surface water source area and water supply point in the study area

根据扬州市水资源公报(2018 年),区内共有人 口 245.84万,年供水量为 34.4万 m³/d。江苏省住建 厅参照江苏省城市供水安全保障工作评价指标体系, 对省内各城市的供水安全考核中,将城市应急供水 规模达日常供水量的 50%列为基本合格线。本次工 作综合考虑各区域的人均综合生活用水量指标,设 定区内应急供水量为平均日常用水量的 50%。按此 计算,研究区应急供水量合计为 17.2万 m³/d。

根据《江苏省地下水压采方案(2014-2020年)》, 截至 2020年,扬州市市直、邗江区、广陵区以及江 都区共保留第Ⅱ、Ⅲ承压井 130 眼。当前扬州市管 网已经实现区域全覆盖,保留的应急供水水井绝大 部分属于工业用水水井或者水厂自备井,供水管网 已全面覆盖到这些区域,具备实现应急供水的基础 条件。

2 研究方法

2.1 地下水-地表水耦合数值模型

水流数值模型是开展应急供水分析的重要方法 (李国敏等, 1996; 王旭升等, 2008; 徐力刚等, 2009; Cai et al., 2020; 李旭等, 2022), 本次模拟选取 HydroGeoSphere 作为数值模拟工具(Therrien et al., 2010; 张将伟等, 2018)对研究区开展地下水-地表水 耦合模拟。

2.1.1 区域地下水-地表水概念模型

耦合数值模型覆盖扬州城市规划区,模型边界 基于行政区边界做了简单调整,以便更好地模拟降 雨径流过程。当行政边界附近存在连通水系时,模 型以水系为边界。当行政边界附近无连通水系时, 模型边界做平滑处理。耦合模型包括了地表水与地 下水两个模块。

地表水模块主要模拟降雨引起的陆面径流,以 及过境水引起的河道水流过程。地表河网密集,水 系交错复杂,但地表水主要水系为南北向的淮河入 江道以及南水北调水道,因此地表水模块重点刻画 了南北向水道,含邵伯湖、京杭大运河、里运河、 凤凰河、廖家沟、太平河、金湾河、高水河及芒稻 河。里运河主要用于通航和南水北调,河流不与其 它河流存在天然水力联系,其它河流间水力联系密 切。地表水模块的陆面高程变化基于数字高程地图 刻画。

区内地下水类型主要为松散岩类孔隙地下水, 受沉积作用的影响,含水层在垂向上具有多层结构 的特点。地下水模块主要模拟地下水流动过程,共 考虑包气带、潜水含水层以及第Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ承压含水 层。潜水含水层和包气带紧密联系,受人类活动和 气候变化影响较大,该层主要接受降雨入渗补给和 高水位河道补给。由于埋藏较浅,排泄也主要以蒸 发排泄为主,潜水位年内变化明显。

第I至III承压含水层为研究区的主要开采含水 层,含水层岩性主要为粉砂至粗砂,渗透系数变化 大,三个承压含水层在研究区内均有不同程度的缺 失。由于含水层埋藏较深,含水层主要接受侧向水 流补给,排泄方式主要为侧向排泄和地下水开采。

蒸散发是水文循环的重要组成部分,区域内土 地利用以水域、城市和耕地为主。对于水域以水面 蒸发为主,其它地区主要是土壤的蒸发和植被的蒸 腾过程。

2.1.2 地下水-地表水数值模型

(1)模型剖分

传统地下水模型的构建分平面剖分和垂向地层 剖分两个步骤。由于本次构建的是全面耦合的地下 水与地表水模型,因此模型平面网格剖分采用了地 表水模型的剖分结果(图 3a),初始渗透系数如图 3b。

垂向剖分基于含水层和隔水层的调查结果。首 先基于钻孔数据构建了含水层顶底板的高程



图 3 三维模型剖分(a)与渗透系数分布图(b) Fig. 3 Three-dimensional model segmentation (a) and permeability coefficient distribution (b)

分布图, 然后通过 Arcmap 数据空间分析将高程数 据转化为模型能够读取的格式(asc 格式), 接着加载 到模拟工具中, 实现了潜水含水层到第 III 承压含 水层的垂向剖分。对于承压含水层, 由于含水层总 是处于饱水状态, 未对含水层进行垂向加密。对于 变饱和的潜水层, 水流过程受到了降雨与蒸发的强 烈影响, 因此地表以下部分会发生剧烈的含水率变 化。利用理查德方程计算变饱和水流过程时难度较 大, 因此在潜水含水层采用了逐步加密的办法, 即 在靠近地表部位为分米级网格精度, 逐步过渡到下 部饱水带的米级网格精度。基于以上网格剖分, 整 个模型共超过 32 万个网格节点(图 3a)。

(2)初始及边界条件

水流模型的初始条件设置为研究区 2017 年末 观测水位,边界条件设置与含水层及其边界特征有 关。承压含水层整体呈现南部水头高、北部水头低 的特征,根据水力梯度特征上游设置为水头边界, 下游边界以及东西向边界设置为通量边界。

第I承压含水层南部水位约为4m,向北逐步降 落到-7m,第II、III承压含水层南部水位也接近4m, 与I承压相比水位降落较快,到北部边界水位分别 降落到了-14m、-10m左右。

模型所需的渗透系数及其空间分布根据研究区 水文地质调查获得。表层土壤在城市与河道地区渗 透系数为 0.001~0.1 m/d。潜水含水层至第 III 承压 含 水 层 的 南 部 地 区 渗 透 系 数 相 对 较 大,在 0.1~14 m/d 间变化。第 III 承压含水层的北部渗透系 数稍大,可能是与古河道沉积有关。潜水含水层在 西部渗透系数较低,第 I~III 承压含水层在西部和西 南部地区有不同程度的含水层缺失。

2.2 应急供水方案及模拟

本次地下水应急抽水研究共包括 4 种方案,方 案 1 和方案 2 为集中式应急水源地供水,方案 3 为 分散式地下水应急供水,方案 4 为集中式水源地和 分散式地下水混合供水。综合分析以往的水污染事 件,本次拟将应急供水时长设置为 15 d。

综合考虑地下水资源量、水质、可更新能力、 场地建设条件和环境地质问题五个指标,方案1和 方案2分别选取研究区南部的大桥镇以及东南部的 浦头镇为集中式应急水源地靶区,以第II、III承压含 水层为目标取水层位开展数值模拟计算,根据计算 结果择优选取其中一处为应急供水水源地的靶区。

采用 HydroGeoSphere 软件构建并校正研究区 三维地下水-地表水耦合数值模型,利用数值模型 分析不同供水方案应急抽水引起的地下水位降落趋 势及其与地下水开采红线的关系。

3 研究结果

3.1 地下水数值模型校正

研究区内共搜集到 16 口观测井的 2017—2018 年 的月观测数据。利用观测井数据对地下水数值模型 进行校正,水位模拟与观测值对比结果(图 4)显示, 线 性 回 归 决 定 系 数 R²=0.98,均 方 根 误 差 RMSE=0.72,平均绝对误差 MAE=0.55。总的来说, 模型模拟结果尚可,然而由于地下水监测井及其观 测频次较少,模型存在异参同效问题。不过由于本 研究的核心是评估多个地下水应急供水方案的可行 性,因此校正后的模型能够胜任本次任务。



Fig. 4 Comparison between simulated and observed water levels

图 5 显示了模拟期末刻承压含水层模拟与观测的 等水位线空间分布对比结果。承压含水层的水力梯度 变化受到了区域含水层分布和地下水开采的共同影 响。图 5a 显示,第 I 承压含水层由于开采量很小,整 体水位变幅不大,南部水位仍为 4 m 左右,向北逐步 降落到-6 m,较初刻水位有小幅度的回升,整体拟合 效果较好。图 5b 显示,第 II 承压含水层南部水位 2~4 m,到北部边界降落到了-13 m 左右,且出现两侧 低、中间高的现象。该含水层较大的降深可能与该地 区发育古河道有关,古河道储水量大,地下水开采利 用较多。图 5c 显示,第 III 承压含水层南部水位 1~3 m, 其梯度变化与第 II 承压含水层较为接近,到北部边界 水位降落也较大,整体拟合效果较好。

3.2 集中式应急抽水模拟

位于江都区的大桥镇和浦头镇地处长江三角洲 平原沿江地带,砂层厚度大,弱透水层薄,补给条件 好,尤其是第II承压水的循环更新能力强,是研究区 集中式地下水应急水源地建设的备选靶区。模拟计 算 2 处靶区在给定供水方案下的地下水流场变化, 优选 1 处作为集中式应急供水水源地优选靶区。

3.2.1 大桥镇集中式应急抽水模拟

方案 1 在大桥镇集中式应急水源地靶区布设 8 个开采井群(图 6a, c 所示),考虑应急开采供水规 模,每个井群需达到 2.15 万 m³/d 的供水要求。在模 型设置中,按照完整井成井,过滤器完全贯穿第 II 承压含水层,数值模拟计算各抽水井在应急抽水期 的降深以及后续水位恢复情况(图 7)。

根据模型计算结果,在应急供水 15 d 中,抽水 井的水位持续下降(表 2),前 7 d 的平均水位降深为 15.20 m, 8—15 d 平均水位降深为 7.38 m。应急供水

15 d 后,该集中式应急供水会形成直径约 5.9 km、 面积约 27 km²的降落漏斗。停止抽水后地下水水位 逐渐回升,其恢复过程相对较慢,停止抽水 135 d 之后,基本恢复正常。

3.2.2 浦头镇集中式应急抽水模拟

方案 2 在浦头镇集中式应急水源地靶区布设 8 个开采井群(图 6a, b),应急供水规模以及井群抽 水方式设置均和方案 1 相同。采用数值模拟模型计 算各抽水井在应急抽水期的降深以及后续水位恢复 情况(图 8)。



图 a 中西部以及图 b、图 c 西南部的的深蓝色区域为各承压含水层的缺失区,其余颜色为水位渲染。

The dark blue area in Fig. a, b and c represent the missing area of each confined aquifer, the remaining colors are rendered for water level. 图 5 第 I (a)、II (b)、III (c)承压含水层末刻等水位线对比图





图 6 大桥镇与浦头镇集中式应急水源地井群位置图 Fig. 6 Location map of centralized emergency water source wells in Daqiao Town and Putou Town



a—井 1; b—井 2; c—井 3; d—井 4; e—井 5; f—井 6; g—井 7; h—井 8。 a-well 1; b-well 2; c-well 3; d-well 4; e-well 5; f-well 6; g-well 7; h-well 8. 图 7 大桥镇集中式应急供水井群水位降深时间序列图

Fig. 7 Time series diagrams of water level drop for centralized emergency water supply well groups in Daqiao Town

表 2 大桥镇抽水井群抽水 7 d、15 d 内的 水位降深情况表

表 3 浦头镇抽水井群抽水 7 d、15 d 内的 水位降深情况表

Table 2Table of drawdown within 7 and 15 days ofpumping from the pumping well group in Daqiao Town

Table 3Table of drawdown within 7 and 15 days ofpumping from the pumping well group in Putou Town

井群 编号	日均抽水量 /m ³	抽水 7 d 后 水位降深/m	抽水 15 d 后 水位降深/m
1	21 542.59	13.45	19.36
2	21 542.59	15.70	23.70
3	21 542.59	17.24	25.72
4	21 542.59	17.21	25.68
5	21 542.59	13.06	18.67
6	21 542.59	15.50	23.87
7	21 542.59	16.34	24.45
8	21 542.59	13.13	19.21

井群	日均抽水量	抽水 7 d 后	抽水 15 d 后
编号	/m³	水位降深/m	水位降深/m
1	21 542.59	22.41	35.05
2	21 542.59	28.60	46.24
3	21 542.59	30.80	48.50
4	21 542.59	28.62	43.82
5	21 542.59	27.25	40.53
6	21 542.59	28.56	43.23
7	21 542.59	27.47	42.07
8	21 542.59	19.65	29.69





图 8 浦头镇集中式应急供水井群水位降深时间序列图

Fig. 8 Time series diagrams of water level drop for centralized emergency water supply well groups in Putou Town

结果显示,在持续抽水 7 d 之后,井群所在区 域地下水位迅速下降(表 3), 1~8 号井的平均降深在 26.67 m;在应急供水 15 d之后,平均水位降深达到 了 41.14 m,且形成直径约 5.6 km、面积约 16 km² 的地下水位降落漏斗。总体来讲,前7d水位下降 速率大,后面8d水位下降速率变缓。但是在这个 模拟过程中,水位下降幅度太大,在第7d降深超 过了限采埋深(20m),第15d水位降深超过了禁采

埋深(30 m)。

综合对比大桥镇与浦头镇应急供水靶区的供 水方案可知,大桥镇比浦头镇更适合作为集中式应 急供水水源地的靶区。

3.3 分散式应急抽水模拟

根据《江苏省地下水压采方案(2014-2020年)》, 截止 2020年,扬州市市直、邗江区、广陵区以及江 都区共保留第Ⅱ、Ⅲ承压井 130 眼。方案 3 考虑到 现有深井的分布中,部分乡镇及街道保留有多眼地 下水井,为了便于模拟校正,剔除部分分布较为密 集以及供水能力较差的水井,挑选富水性优良的水 井为开采井,在保证每个乡镇及街道均有开采井的 前提下,最终挑选出 91 眼深井作为分散式供水的 应急取水井,取水井分布如图 6 所示。按照"富者 多供"的原则将 17.2 万 m³/d 的开采量细分至各深 井,进行数值模拟计算。

在应急供水持续7d之后,在第II承压含水层的 抽水井附近出现了明显的水位下降,整体来看,下 降幅度在1~4m之间;在持续抽水15d之后,富水 性较差的区域出现了小范围的降落漏斗,整体下降 幅度在3~7m之间(图9)。

第Ⅲ承压含水层的抽水井的数量较少,供水所 占的比重比较小。所以在增加抽水量之后,整个区 域内地下水位并没有太大的波动,只有在抽水井附 近水位有一定的下降,在15d之内下降幅度均小于 5m。

3.4 分散与集中式联合应急抽水模拟

方案 4 采用分散与集中联合应急供水。集中供水量和分散供水量实行约 1:1 的分配比例,集中供水井群开采第II承压水并提供 8.32 万 m³/d 的水量,分散式开采井开采第II、III承压水并提供 8.88 万 m³/d 的水量。这样既充分利用现有的开采井,又可以避免长时间集中式抽水引起地面沉降等地质灾害。

根据模拟结果(图 10),采用分散与集中联合的 开采方式之后,第II承压含水层的水位分布发生了 明显的变化,与集中式供水、分散式供水所形成的 流场有较大不同。由于抽水量的显著减小,原有的 开采井因抽水形成的降落漏斗明显小于分散式开采 所形成的降落漏斗。在集中开采区域,总体上, 前7d水位下降幅度比较大,平均水位下降7.43 m, 后 8 d,水位下降速度变缓,各井群平均水位下降 3.59 m。应急供水15 d 后,集中开采区最大水位埋 深为12.86 m,未超第II承压水限采水位(沿江为 15 m)。在分散开采区,第II承压水水位整体降幅不 大,没有形成水位降落漏斗,埋深较大的区域主要位 于研究区东北部,最大水位埋深为18.68 m,未超第II



图 9 分散式应急供水 15 d 后第II承压含水层 水位标高等值线图 Fig. 9 Contour map of the water level elevation of the second confined aquifer after 15 days of decentralized

emergency water supply





承压水限采水位(20 m)。第III承压水最大水位埋深 21.26 m, 亦未超限采水位(沿江 25 m, 其他区域 30 m)。

区域内第Ⅲ承压水位标高等值线变化和分散式 开采方式相比,由于抽水量减小,无论是抽水 7 d 之后还是抽水 15 d 之后,地下水位波动明显较小, 没有形成大的降落漏斗,只有抽水井附近出现了水 位波动。

综合以上结果,分散与集中联合应急供水方案 可以明显减小工作区整体的水位波动,减缓水源地 的供水压力。在持续15d的抽水之后,没有超出禁 采水位,全区出现地面沉降等地质灾害的风险大大 降低。

4 结论

第三期

以扬州城市规划区为例,依据工作区水文地质 条件,通过构建研究区三维地下水-地表水耦合数 值模型,对研究区内的水文过程进行模拟,并对设 计的抽水方案进行模拟,4种方案有不同的特点。

(1)方案1和方案2分别选用大桥镇和浦头镇作 为集中式应急供水水源地备选靶区,通过建立抽水 井群进行集中式供水。模拟计算2处靶区在给定供 水方案下的地下水流场变化,结果显示,在应急供 水15d中,位于2处靶区的抽水井群水位均持续下 降并形成明显的水位降落漏斗,但浦头镇的最大水 位降深超过区域禁采水位,引发地质环境问题的风 险较大,而大桥镇的最大水位降深未超过禁采水位, 因此将大桥镇优选为集中式应急供水水源地的最佳 靶区。

(2)方案 3 为分散式应急抽水,将抽水量根据各 区富水能力的强弱分配至全区不同乡镇的抽水井, 能省去建设集中水源地的费用,但富水条件较弱的 区域供水量无法得到有效保障,且有引发地面沉降 的风险。

(3)方案 4 为集中与分散式联合抽水,在进行紧 急供水时,集中供水井群开采第II承压水并提供 8.32 万 m³/d 的水量,现有 91 眼分散开采井开采第 II、III承压水共 8.88 万 m³/d 的水量,应急供水 15 d 后,第II承压水最大水位埋深 18.68 m,未超第 II承压水限采水位(20 m)。第III承压水最大水位埋深 21.26 m,亦未超限采水位(沿江 25 m,其他区域 30 m)。因此,采用集中和分散式联合供水不仅能更 好地保障供水需求,也可以明显减小工作区内的水 位波动,减缓水源地的供水压力,降低地面沉降风 险,对现有管网的利用也较为充分,可作为应急供 水的首选方案。

Acknowledgements:

This study was supported by Jiangsu Provincial Geological Exploration Fund Project (Jiangsu Provincial Department of Finance Resources and Environment Department No. 14[2019]).

参考文献:

- 代锋刚,张发旺,王滨,等,2018. 群矿开采条件下山西潞安矿 区的地下水流场变化[J]. 地球学报,39(1):94-102.
- 段永侯, 王家兵, 王亚斌, 等, 2004. 天津市地下水资源与可持续利用[J]. 水文地质工程地质, (3): 29-39.
- 胡喜梅,马传明,邓波,等,2017. 江苏省沿海地区地面沉降风 险评价[J]. 地质科技情报,36(2):222-228.
- 江苏省水利厅, 2013. 江苏省地下水压采方案(2014-2020年)[R]. 南京: 江苏省水利厅.
- 李国敏, 陈崇希, 1996. 地下水溶质运移三维有限元模拟软件的

设计与应用[J]. 地球科学, 21(1): 103-107.

- 李旭, 苏世林, 文章, 等, 2022. 单井注抽试验测算地下水流速 的数值分析[J]. 地球科学, 47(2): 633-641.
- 刘晓东, 王珏, 2020. 地表水污染源识别方法研究进展[J]. 水科 学进展, 31(2): 302-311.
- 刘一鸣,何阳,熊雄,等,2022. 常德市地下水应急水源地应急 供水可行性评价及方案研究[J]. 中国地质调查,9(1): 115-124.
- 刘振胜, 李英, 黄薇, 等, 2005. 长江下游干流枯季水量分配方 案研究[J]. 人民长江, (10): 15-17, 67.
- 马建华, 2010. 西南地区近年特大干旱灾害的启示与对策[J]. 人 民长江, 41(24): 7-12.
- 沈媛媛, 辛宝东, 郭高轩, 等, 2011. 北京房山岩溶水应急水源 地地下水流数值模拟及预测[J]. 南水北调与水利科技, 9(5): 103-106, 114.
- 王琨, 束龙仓, 刘波, 等, 2014. 地下水安全开采量的内涵及安 全开采控制水位划定[J]. 水资源保护, 30(6): 7-12.
- 王旭升,2008. 自流井有限差分模拟的校正模型[J]. 地球科学, (1):112-116.
- 王中根,朱新军,李尉,等,2011. 海河流域地表水与地下水耦 合模拟[J]. 地理科学进展,30(11):1345-1353.
- 魏潇淑, 陈远航, 常明, 等, 2022. 流域水污染监测与溯源技术 研究进展[J]. 中国环境监测, 38(5): 27-37.
- 文冬光,林良俊,孙继朝,等,2012.中国东部主要平原地下水 质量与污染评价[J].地球科学,37(2):220-228.
- 吴爱民,费瑾,邵景力,等,1998. 枣庄地下水与水资源可持续 开发利用规划研究[J]. 地球学报,19(4):371-376.
- 徐力刚, 张奇, 左海军, 2009. 地表水地下水的交互与耦合模拟 研究现状与进展[J]. 水资源保护, 25(5): 82-85, 102.
- 扬州市水利局, 2018. 扬州市水资源公报[R]. 扬州: 扬州市水 利局.
- 杨国强,李云,姜月华,等,2021. 宁波市地下水应急供水模式 探讨——以大嵩江流域为例[J]. 人民长江,52(9):46-51.
- 姚炳魁, 冯志祥, 黄晓燕, 等, 2014. 江苏省地下水水位红线控制管理研究[R]. 南京: 江苏省地质调查研究院.
- 张将伟, 卢文喜, 曲延光, 等, 2018. 基于 Monte Carlo 方法的地 表水地下水耦合模拟模型不确定分析[J]. 水利学报, 49(10): 1254-1264.
- 张远东, 2010. 城市地下水应急水源地管理探讨[J]. 中国水利, (19): 49-51.
- 张宗祜, 施德鸿, 沈照理, 等, 1997. 人类活动影响下华北平原 地下水环境的演化与发展[J]. 地球学报, 18(4): 337-344.

References:

- CAI Jinbang, WANG Ping, SHEN Huan, et al., 2020. Water Level Prediction of Emergency Groundwater Source and Its Impact on the Surrounding Environment in Nantong City, China[J]. Water, 12(12): 3529.
- DAI Fenggang, ZHANG Fawang, WANG Bin, et al., 2018. Changes of the Groundwater Flow Field of Lu'an Mining Area, Shanxi Province, under the Condition of Group Mining[J]. Acta Geoscientica Sinica, 39(1): 94-102(in Chinese with English abstract).
- DUAN Yonghou, WANG Jiabing, WANG Yabin, et al., 2004. Groundwater resources and its sustainable development in Tianjin[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, (3):

29-39(in Chinese with English abstract).

- ENDO T, IIZUKA T, KOGA H, et al., 2022. Groundwater as emergency water supply: case study of the 2016 Kumamoto Earthquake, Japan[J]. Hydrogeology Journal, 30: 2237-2250.
- HU Ximei, MA Chuanming, DENG Bo, et al., 2017. Risk Evaluation of Land Subsidence in Coastal Areas of Jiangsu Province[J]. Geological Science and Technology Information, 36(2): 222-228(in Chinese with English abstract).
- LI Guomin, CHEN Chongxi, 1996. Design and application of 3-D finite element groundwater transport simulation software[J]. Earth Science, 21(1): 103-107(in Chinese with English abstract).
- LI Xu, SU Shilin, WEN Zhang, et al., 2022. Numerical Analysis of Estimating Groundwater Velocity through Single-Well Push-Pull Test[J]. Earth Science, 47(2): 633-641(in Chinese with English abstract).
- LIU Xiaodong, WANG Jue, 2020. Advances in methods for identifying surface water pollution sources[J]. Advances in Water Science, 31(2): 302-311(in Chinese with English abstract).
- LIU Yiming, HE Yang, XIONG Xiong, et al., 2022. Feasibility assessment and scheme research on emergency water supply of groundwater emergency source in Changde City[J]. Geological Survey of China, 9(1): 115-124(in Chinese with English abstract).
- LIU Zhensheng, LI Ying, HUANG Wei, et al., 2005. On water distribution plan in dry season of the lower Yangtze river[J]. Yangtze River, (10): 15-17, 67(in Chinese with English abstract).
- MA Jianhua, 2010. Revelation and countermeasures of catastrophic drought disasters in recent years in Southwest China[J]. Yangtze River, 41(24): 7-12(in Chinese with English abstract).
- MUSSÁ F E F, ZHOU Y, MASKEY S, et al., 2015. Groundwater as an emergency source for drought mitigation in the Crocodile River catchment, South Africa[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 19(2): 1093-1106.
- SHEN Yuanyuan, XIN Baodong, GUO Gaoxuan, et al., 2011. Numerical Simulation and Prediction of Groundwater Flow in Emergency Karst Well Fields in Fangshan, Beijing[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 9(5): 103-106, 114(in Chinese with English abstract).
- THERRIEN R, MCLAREN R G, SUDICKY E A, et al., 2010. HydroGeoSphere-a three-dimensional numerical model describing fully-integrated subsurface and surface flow and solute transport[R]. Canada: Groundwater Simulations Group.
- VRBA J, RENAUD F G, 2016. Overview of groundwater for emergency use and human security[J]. Hydrogeology Journal, 24(2): 273-276.
- WANG Kun, SHU Longcang, LIU Bo, et al., 2014. Connotations of safe yield of groundwater and determination of controlled

groundwater level for safe exploitation[J]. Water Resources Protection, 30(6): 7-12(in Chinese with English abstract).

- WANG Xusheng, 2008. Revised Model for Finite-Difference Modeling of Flowing Artesian Wells[J]. Earth Science, (1): 112-116(in Chinese with English abstract).
- WANG Zhonggen, ZHU Xinjun, LI Wei, et al., 2011. A Coupled Surface-water/Groundwater Model for Haihe River Basin[J].
 Progress in Geography, 30(11): 1345-1353(in Chinese with English abstract).
- Water Resources Department of Jiangsu, 2013. Underground water pressure mining plan in Jiangsu Province(2014-2020)[R]. Nanjing: Jiangsu Water Resources Department.
- WEI Xiaoshu, CHEN Yuanhang, CHANG Ming, et al., 2022. Research Progress on the Monitoring and Traceability Technology of Water Pollution in River Basins[J]. Environmental Monitoring in China, 38(5): 27-37(in Chinese with English abstract).
- WEN Dongguang, LIN Liangjun, SUN Jizhao, et al., 2012. Groundwater Quality and Contamination Assessment in the Main Plains of Eastern China[J]. Earth Science, 37(2): 220-228(in Chinese with English abstract).
- WU Aimin, FEI Jin, SHAO Jingli, et al., 1998. A Plan Study on the Sustainable Development and Utilization of Groundwater and Water Resources in Zaozhuang City[J]. Acta Geoscientia Sinica, 19(4): 371-376(in Chinese with English abstract).
- XU Ligang, ZHANG Qi, ZUO Haijun, 2009. Status and progress of research on interaction and coupled modeling of surface water and groundwater[J]. Water Resources Protection, 25(5): 82-85, 102(in Chinese with English abstract).
- YANG Guoqiang, LI Yun, JIANG Yuehua, et al., 2021. Discussion of emergency groundwater supply mode in Ningbo City: case of Dasong River Basin[J]. Yangtze River, 52(9): 46-51(in Chinese with English abstract).
- Yangzhou Water Conservancy Bureau, 2018. Yangzhou Water Resources Bulletin[R]. Yangzhou: Yangzhou Water Conservancy Bureau(in Chineses).
- YAO Bingkui, FENG Zhixiang, HUANG Xiaoyan, et al., 2014. Research on Management of Groundwater alert level in Jiangsu Province[R]. Nanjing: Geological Survey of Jiangsu Province(in Chineses).
- ZHANG Jiangwei, LU Wenxi, QU Yanguang, et al., 2018. Uncertainty analysis of surface water and groundwater coupling simulation model based on Monte Carlo method[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 49(10): 1254-1264(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Yuandong, 2010. Discussion on the management of urban emergency groundwater source[J]. China Water Resources, (19): 49-51(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Zonghu, SHI Dehong, SHEN Zhaoli, et al., 1997. Evolution and Development of Groundwater Environment in North China Plain under Human Activities[J]. Acta Geoscientica Sinica, 18(4): 337-344(in Chinese with English abstract).