

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.016>



苏锡常地下空间开发对地下水水流场的影响

宋 昀¹, 许 洁¹, 许书刚^{2,3}, 姜 雪^{1*}, 龚绪龙^{2,3}, 吴月权¹, 孙自永¹

1. 中国地质大学(武汉)环境学院, 湖北武汉 430078

2. 江苏省地质调查研究院, 江苏南京 210018

3. 自然资源部地裂缝地质灾害重点实验室, 江苏南京 210049

摘要: 定量研究城市地下空间开发对地下水环境的影响, 对于城市地下空间合理开发及精准管理具有重要的理论和实际意义。深入探讨地下空间开发程度高且典型的苏锡常地区城市地下空间开发对地下水水流场的影响。在构建苏锡常地区水文地质概念模型的基础上, 建立地下水水流数值模型, 基于校正后的地下水水流数值模型, 预测地铁运行对地下水水流场的影响。由于地铁对地下径流的阻碍作用, 迎水面地下水位出现 0~0.4 m 的壅高, 背水面地下水位出现 0~0.8 m 的下降, 并引起 17.56 km 范围内的水力梯度增大。地铁投入运行之后, 地铁附近地下水位变幅前 5 年较大, 后 5 年较小; 地下水径流方向在局部发生变化, 而区域流向没有发生显著改变。

关键词: 苏锡常地区; 地下空间开发; 地下水流数值模型; 地下水流场; 水文地质。

中图分类号: P641

文章编号: 1000-2383(2025)11-4540-11

收稿日期: 2021-09-11

Influence of Underground Space Development on Groundwater Flow Field in Su-Xi-Chang Area

Song Yun¹, Xu Jie¹, Xu Shugang^{2,3}, Jiang Xue^{1*}, Gong Xulong^{2,3}, Wu Yuequan¹, Sun Ziyong¹

1. School of Environmental Studies, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430078, China

2. Jiangsu Institute of Geological Survey, Nanjing 210018, China

3. Key Laboratory of Geohazards on Ground Fissures, Ministry of Land and Resources, Nanjing 210049, China

Abstract: Quantitative research on the impact of urban underground space development on groundwater environment has important theoretical and practical significance for rational development and accurate management of urban underground space. In this paper it discusses the influence of urban underground space development on groundwater flow in Su-Xi-Chang area. Based on construction of the hydrogeological conceptual model of Su-Xi-Chang area, the groundwater flow numerical model was established. Based on the corrected groundwater flow numerical model, the influence of subway operation on groundwater flow was predicted. Due to the obstruction of underground runoff by subway, the upstream groundwater level increases by 0~0.4 m, while the backwater level decreases by 0~0.8 m, increasing the hydraulic gradient in the range of 17.56 km. After the subway is put into operation, the variation in groundwater level near the subway is larger in the first five years and smaller in the second five years. The direction of groundwater runoff changes locally, but the regional direction does not change significantly.

基金项目: 苏南现代化建设示范区综合地质调查项目(Nos. 苏财资环[2020]20号, 苏财资环[2020]53号)。

作者简介: 宋昀(1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事地下水数值模拟、流域水文模型等方面的研究。ORCID: 0000-0003-1088-0980. E-mail: sy478874805@163.com

*** 通讯作者:** 姜雪, ORCID: 0000-0001-7564-6533. E-mail: jiangxue@cug.edu.cn

引用格式: 宋昀, 许洁, 许书刚, 姜雪, 龚绪龙, 吴月权, 孙自永, 2025. 苏锡常地下空间开发对地下水水流场的影响. 地球科学, 50(11):4540~4550.

Citation: Song Yun, Xu Jie, Xu Shugang, Jiang Xue, Gong Xulong, Wu Yuequan, Sun Ziyong, 2025. Influence of Underground Space Development on Groundwater Flow Field in Su-Xi-Chang Area. *Earth Science*, 50(11):4540~4550.

Key words: Su - Xi - Chang area; underground space development; numerical model of groundwater flow; ground flow field; hydrogeology.

0 引言

在世界范围内,地铁作为现代化大众地下交通工具,可以有效地拓宽城市空间和缓解地面交通压力,城市地下空间的开发和建设对于促进城市综合可持续发展具有重要的战略意义(郭红东等,2020; von der Tann *et al.*, 2021; 谭飞等,2021).然而随着城镇化建设速度的加快,城市地下空间规划、建设、管理及运行等都会不可避免地对地下水环境产生影响并造成了一些环境地质问题(Chae *et al.*, 2008; 张徽等,2008; 王军辉等,2013; Colombo *et al.*, 2017; Lan, 2017; 张广泉,2021),已成为被公众和学者广泛关注的话题,也是近年来水文地质学研究的热点.

地铁工程建设相当于地下挡水墙,阻挡原有的地下水径流途径.地铁结构也会伸入含水层,破坏含水层结构,影响地下水的补、径、排条件(郭红东等,2020).已有不少学者针对城区地铁工程引起的地面沉降、地下水水质恶化、地下水位变幅、地下水流场变化等地下水环境问题做了研究.国外对此课题研究较早,Santos *et al.*(2008)采用序贯开挖法对圣保罗地铁2号线(西延线)隧道造成的地面沉降进行了分析预测,发现地铁的建设造成了一定程度的地面沉降.Shin *et al.*(2015)采用数值模拟的方法,对韩国汉城地铁区地下水状况进行了分析,模拟结果表明地铁可使地下水净基流量减少,地铁系统对首尔地下水环境产生了显著影响.De Caro *et al.*(2020)采用水文地质模拟方法对意大利都灵地铁1号线设计对地下结构的干扰进行了分析,发现地铁会使下水位发生局部变化.国内学者对武汉、南京、成都、兰州等地区地铁建设引起的地下水环境问题进行了研究,并提出了针对性的防护措施(熊志涛等,2014; 陈永祥和黄思霜,2020; 高咏等,2020; 郭红东等,2020; 徐瑞御等,2020).这些研究很多都集中在预测城区地铁线路建设运行引起的地下水位和流场变化上,并取得了较为统一的认识:由于地铁建设阻断了地下水径流通道,使得迎水面地下水位抬升、背水面地下水位下降,并导致一系列地下水环境问题的发生.地铁建设所引起的地下水环境问题主要包括周边地下水位的波动、邻近局部区域地下水水质的恶化、附近地下建筑物

的腐蚀破坏等(Chae *et al.*, 2008; 王晓睿等,2019; 郭红东等,2020; 王宇博,2020).已有研究大多针对局部城市地区,而随着城市化进程的加快,地铁的密度和覆盖范围将不断增大,针对区域尺度地铁工程建设对地下水环境影响的研究显得尤为重要.

苏锡常地区位于中国最具经济发展活力的长江经济带,自改革开放东部地区发展战略实施以来,经济社会人口迅速发展,一直走在全国前列.自2007年以来,苏锡常地区主城区相继兴建了多条地铁线路,对于促进苏锡常城区发展具有重要意义.随着江苏省十四五规划的提出与实施,苏锡常地区将继续推进经济社会可持续发展和加强城市地下空间的科学利用(江苏省人民政府办公厅,2020,2021).苏锡常地区属水网湖荡平原,地势低平,地下水开发程度高,极易受到人类活动的影响并导致一系列环境地质问题(陈国栋,2004).因此,研究其区域地下空间开发建设对地下水环境的影响程度至关重要.鉴于此,本文以苏锡常地区为研究区,在综合分析区域水文地质基础资料和地下空间开发概况的基础上,构建地下水水流数值模型,利用GMS软件进行求解.结合苏锡常地区的地下水位监测数据对地下水水流模型进行校正,并基于校正后的地下水水流模型预测地铁工程的建设及运行对区域地下水流场的影响.研究结果可为苏锡常地下空间开发规划提供科学依据.

1 研究区概况

苏锡常研究区地处于长江三角洲南缘,面积为8 877.17 km²,位于119°40'~121°20'E和30°40'~32°00'N.区域北滨长江、南临太湖,自然地理条件优越.区内位于亚洲大陆东部中纬度地带,属亚热带湿润季风气候,年降水量在1 000 mm以上,雨水充沛.区域城市化程度很高,地铁开发非常密集.

研究区地势平坦,区内地下水主要接受地表水入渗、大气降水和农业灌溉用水的补给,排泄消耗于蒸发、人工开采和流向地表水体.区内主要地下水类型为松散岩类孔隙水,从上至下可依次划分为浅层地下水含水层组和Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ承压含水层组.浅层地下水含水层组可分为潜水含水层与微承压含

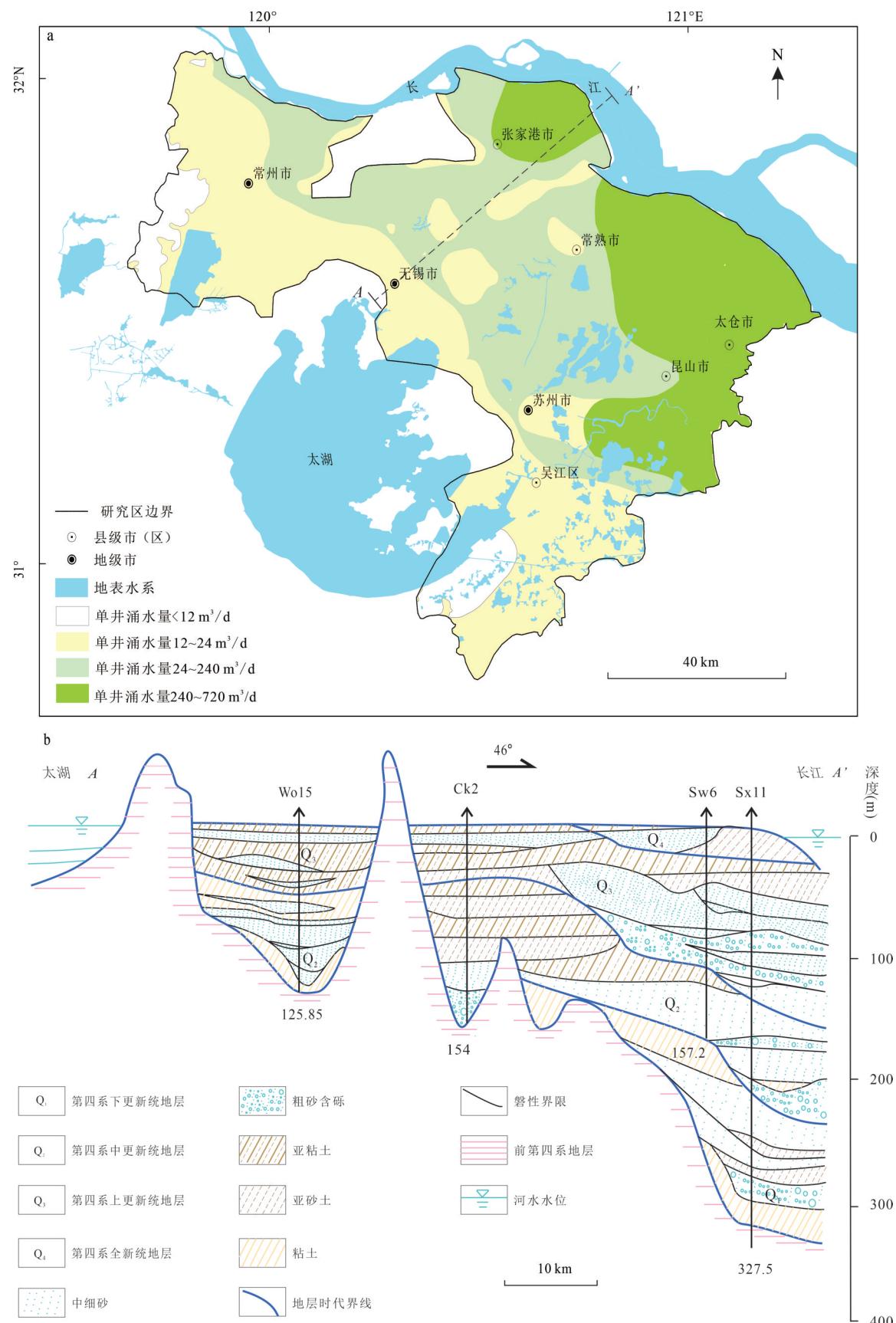


图 1 研究区范围及水文地质条件示意

Fig.1 Schematic diagrams of study area and hydrogeological conditions

a. 研究区范围及潜水、I 承压水富水性分区示意;b. 太湖-长江水文地质剖面(改编于 Bu *et al.*, 2020)

水层,由全新统和上更新统粉质粘土、粉土、粉砂组成,底板埋深为10~25 m,厚度为10~25 m,水位埋深为0.5~2.5 m,在沿江地区以亚砂土为主,单井涌水量为10~50 m³/d;在苏锡常腹地平原地区以粉质粘土为主,单井涌水量一般小于10 m³/d. I承压含水层组含水层由1~2层粉砂、粉细砂组成,底板埋深为50~85 m,顶板埋深为25~30 m,厚度为5~35 m,水位埋深为3~15 m,在沿江及苏州东部地带富水性较好,单井涌水量为300~1 000 m³/d;在腹地的广大平原地区富水性稍差,单井涌水量一般小于100 m³/d. II承压含水层组由含砾中粗砂、粉细砂、中细砂所组成,底板埋深为100~150 m,顶板埋深为60~110 m,厚度为10~55 m,水位埋深为10~87 m,透水性和富水性良好,单井涌水量为1 000~3 000 m³/d. III承压含水层由中细砂、粉细砂组成,底板埋深为135~195 m,顶板埋深为120~160 m,厚度为5~30 m,水位埋深为15~65 m,单井涌水量在沿江地带砂层分布较厚的地区为1 000~2 000 m³/d,其他地区均在300~500 m³/d左右. 研究区范围及水文地质条件示意图见图1.

2 研究区模型构建

2.1 水文地质概念模型

苏锡常研究区主要发育有I、II、III三个承压含水层,其相互间有着非常密切的水力联系.为了更准确地模拟区内地下水的流动特征,本文在概化过程中,基于地下水动力学原理,把含水层的地下水流动视为水平二维流动来处理,而将弱透水层内的流动视为一维垂向流动,不同含水层之间通过越流联系起来.参考已有学者关于苏锡常水文地质概念模型边界条件的研究(梁秀娟等,2005;张敏,2008):研究区北侧长江作为强补给边界,将其概化为已知水头边界,水头值为长江边界附近的承压含水层的水位;南侧环太湖以及北部江阴一带为基岩,直接出露地表,构成裂隙较发育的含水岩体,因此将其视为有弱透水补给的二类边界,根据达西定律进行估算,单宽流量为100~300 m³/(d·km);西部II承压含水层尖灭,为隔水边界;东侧是江苏省与上海市的省界,由于受两地区开采的影响,形成地下水分水岭,可考虑为零流量边界.I承压和III承压含水层的东部与北部边界与II承压含水层类同,西部

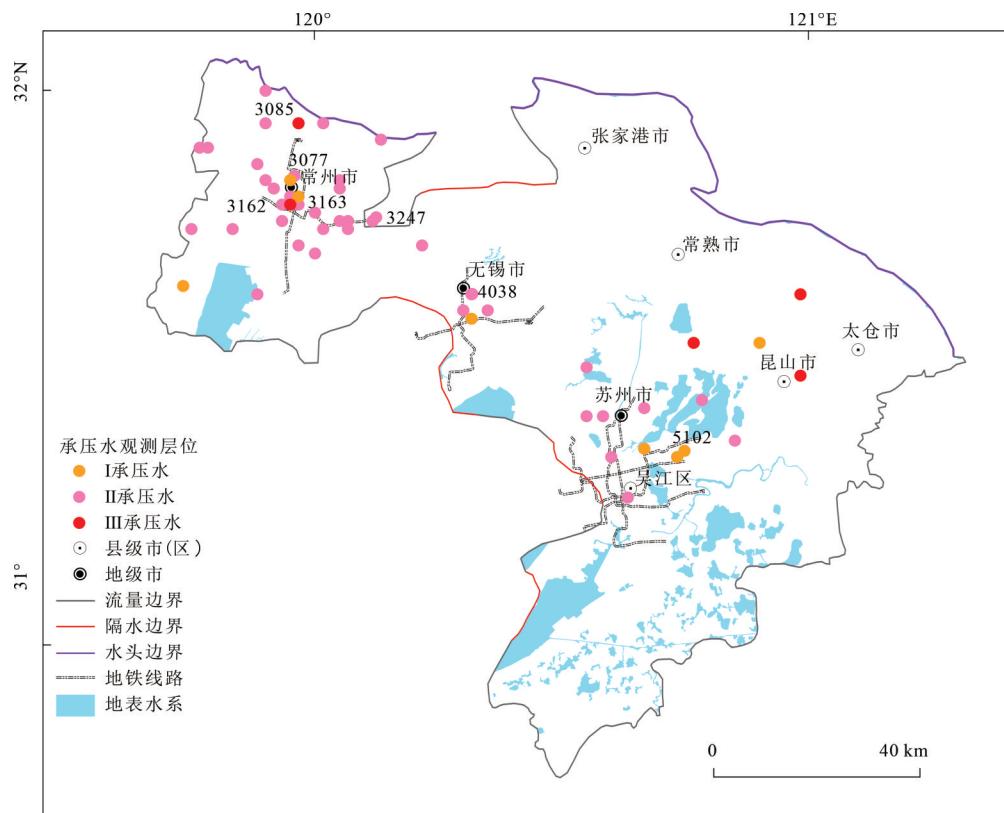


图2 研究区承压观测井位置及边界条件示意

Fig.2 Schematic diagram of position and boundary conditions of pressure observation wells in the study area

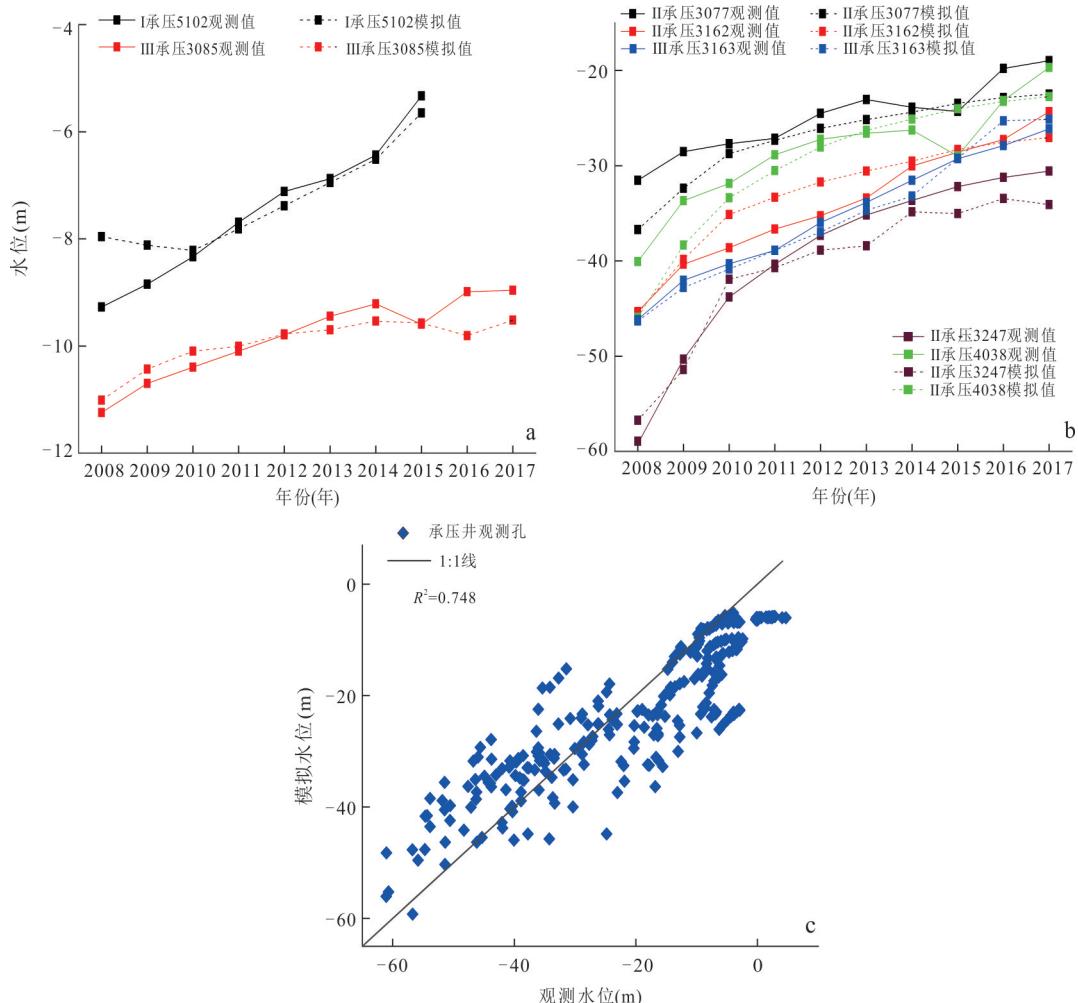


图3 承压观测孔水位对比

Fig.3 Comparison diagrams of water level of confined observation hole

a. I承压 5102、III承压 3085 观测孔水位对比图；b. II承压 3077、3162、3247、4038、III承压 3163 观测孔水位对比图；c. 承压井观测孔模拟水位与观测水位散点图

表1 I承压含水层水文地质参数

Table 1 Hydrogeological parameters of confined aquifer I

分区代号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
含水层渗透系数 K (m/d)	40	40	37.5	30	25	22.5	17.5	15	10
贮水系数 μ^*	0.006 0	0.005 5	0.007 5	0.006 0	0.006 0	0.009 5	0.008 5	0.006 5	0.004 5

边界为含水层自然尖灭,为隔水边界(张敏,2008).在垂向上,I承压含水层获得上部潜水的越流补给,为补给边界,整体下部以白垩系泥岩为主,为隔水边界(梁秀娟等,2005).研究区边界条件示意图如图2所示.区内地下水通过蒸发及向地表水排泄产生的排泄耦合到上边界作为整体统一考虑.结合2001—2010年苏锡常开采数据,区内地下水通过人工开采产生的排泄根据开采井的开采量计算.

2.2 数学模型和数值模型

根据前文描述的水文地质概念模型,将苏锡常地区的地下水数学模型概化为三维非均质各向同性的非稳定流模型.利用GMS软件包中基于有限差分法的MODFLOW模块对该模型进行求解.

将ARCGIS中处理好的研究区矢量数据导入GMS中,综合考虑模拟精度、运算时间、承压水位观测孔等,进行网格的剖分.本次数值模拟垂向上共剖分3层,自上而下分别是I、II、III承压含水层.经

表2 II承压含水层水文地质参数

Table 2 Hydrogeological parameters of confined aquifer II

分区代号	渗透系数 K (m/d)	贮水系数 μ^*	分区代号	渗透系数 K (m/d)	贮水系数 μ^*
1	50	0.0085	14	10	0.0020
2	40	0.0045	15	6.67	0.0040
3	33.33	0.0055	16	5	0.0055
4	26.67	0.0085	17	5	0.0035
5	26.67	0.0045	18	4.17	0.0045
6	23.33	0.0075	19	2.67	0.0013
7	21.67	0.0065	20	2.67	0.0035
8	20	0.0075	21	1.67	0.0045
9	20	0.0060	22	1	0.0012
10	16.67	0.0065	23	1	0.0004
11	13.33	0.0080	24	1	0.0006
12	13.33	0.0035	25	0.67	0.00035
13	10	0.0035			

表3 III承压含水层水文地质参数

Table 3 Hydrogeological parameters of confined aquifer III

分区代号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
渗透系数 K (m/d)	125	125	60	50	5	40	25	25	17.5	14	7.5	5
贮水系数 μ^*	0.009	0.005	0.004	0.008	0.0075	0.005	0.007	0.0055	0.003	0.0055	0.003	0.001

表4 I-II承压含水层和II-III承压含水层间弱透水层越流系数分区

Table 4 Partition of overflow coefficients of I-II and II-III confined aquifers

分区代号	1	2	3	4	5	6	7	8
I-II承压含水层间越流系数(1/d)	I、II承压含水层连通区	0.00058	0.0005	0.00001	0.000004	0.000001	0.0000005	0.0000003
II-III承压含水层间越流系数(1/d)	II、III承压含水层连通区	0.0001	0.00001	0.000008	0.000005	0.000003	0.000001	0.000001

剖分处理后,模型第一层有效单元网格13 989个,第二层有效单元网格13 917个,第三层有效单元网格13 915个.根据研究区的水文地质条件,结合江苏省地质调查研究院勘察成果、野外试验和已有学者对于苏锡常地区水文地质参数分区的工作(王晓梅等,2003;张敏,2008),经过综合分析后,确定本模型的初始参数分区.水文地质参数分区及对应的参数值在模型识别过程中进行校正.越流补给量和侧向径流补给量根据达西定律进行估算;人工开采排泄量根据开采井的开采量计算(张敏,2008).将前文描述的水文地质初始条件和边界条件赋予模型.地下水初始流场是基于2007年钻孔水位实测数据,通过克里格插值得到.本文假设以年为单位,以2008年为模型识别时段的初始时刻,2017年为模型识别时段末刻.承压观测孔位置见图2.

2.3 模型的识别与校正

本文利用2008—2017年地下水位监测数据对

模型进行初步识别和校正.通过分析2001—2010年的开采量变化,在2005年之后,II、III承压水开采井的开采量很小且几乎保持不变.故2011—2017年开采量都设为2010年的开采量,来进行模型的校正.在模型校正过程中,利用模型计算出的地下水水头值与实测地下水位数据进行对比,分析二者的差别,并找出二者不匹配的原因.结合研究区实际水文地质条件,通过预估-校正法和手工试错法不断调整渗透系数、贮水系数、越流系数等其他相关参数.在模型模拟过程中,经过多次调试对参数进行优选,最终使模拟区域的观测孔水位模拟值与实测值达到最佳拟合为止.经校正后观测孔模拟水位与观测值对比图如图3所示.

经统计,在图3a所示的模拟期水位变幅小于5 m的观测孔中,模拟值与观测值的绝对误差在0~0.5 m之间的占比多达83.33%,0.5~1.5 m的仅占16.67%;在图3b所示的模拟期内水位变幅大于5 m

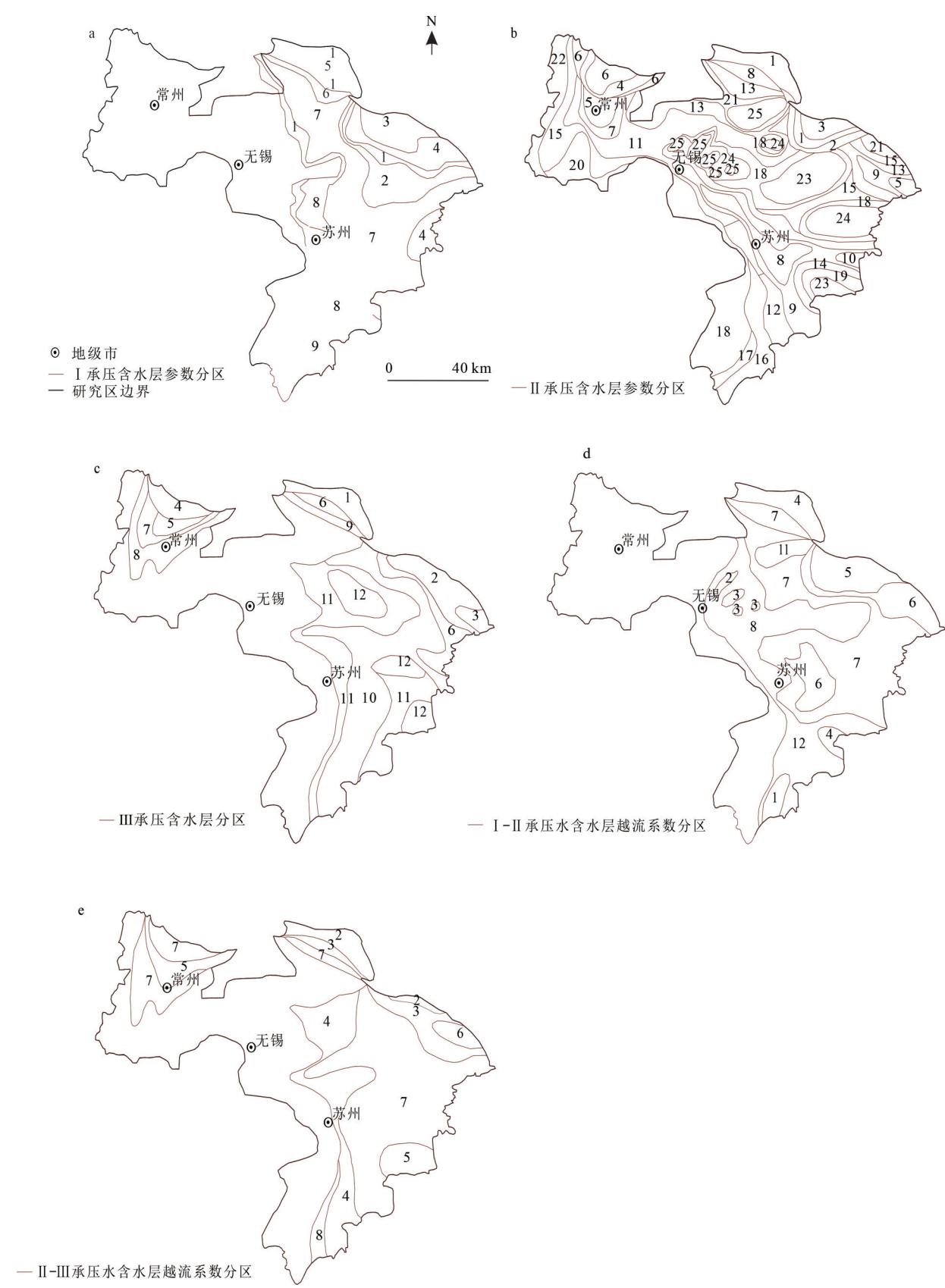


图4 承压水含水层参数和越流系数分区

Fig.4 Zonal diagrams of parameters and overflow coefficient of confined water aquifer

a. I 承压含水层参数分区; b. II 承压含水层参数分区; c. III 承压含水层参数分区; d. I-II 承压含水层越流系数分区; e. II-III 承压含水层参数和越流系数分区

表5 模型中考虑的地铁线路情况表

Table 5 Subway lines considered in the model

地铁线路	修建年份
苏州二号线	2009年
苏州三号线	2014年
苏州四号线	2012年
苏州五号线	2016年
无锡一号线	2009年
无锡二号线	2011年
无锡三号线	2016年
无锡四号线	2018年
常州一号线	2014年
常州二号线	2017年

的观测孔中,3162、3247、4038、3163号观测孔的模拟值与观测值的整体平均绝对误差都小于其模拟期最大水位变幅的10%,水位拟合良好,误差在允许范围内;在图3c中可以看出承压井观测孔的模拟值与实际值的总体相关性较好,判定系数 R^2 为0.748。由于模型拟合时观测值使用的是年平均值,部分实测值与模拟值存在偏差,但总体仍能说明所建立的地下水数值模型能够反映实际的地下水流动情况,可以用于后续模拟地铁建设附加下的地下水水流场。经过模型校正最终确定模型的承压水含水层参数和越流系数分区图见图4, I-III承压含水层水文地质参数见表1~表3, I-II承压含水层和II-III承压含水层间弱透水层越流系数分区见表4。

3 地铁工程对地下水水流场的影响

基于校正后的水流模型,预测了苏锡常城区地铁工程对地下水水流场的影响。在预测过程中,模型所采用的渗透系数等参数为校正后的分区和相应的值,模型的边界条件与校正模型中的设置保持一致。预测模型中将地铁线路假设为隔水体。在预测模型中考虑地铁存在的情况如表5。笔者分别预测了地铁建成初期(2010年)、地铁建成5年后(2015年)以及地铁运行10年后(2020年)地下水水流场的变化情况。

将预测结果与未考虑地铁的预测流场进行对比,分析地铁运行对地下水水流场的影响(图5)。

(1)在苏锡常城区地铁规划初期(2010年),受无锡一号线、苏州二号线地铁工程的影响,I承压含水层水位产生很小程度的壅高。对比图5a、5b可知,在考虑地铁工程存在的条件下,无锡附近-5.6 m等水头线处和苏州附近-7.6 m等水

头线处地下水位都会产生0~0.4 m的水位抬升,渗流均为NE-SW方向。主要是由于地铁建设会对地下水水流产生阻碍作用,减少沿线地下水含水层过水断面的面积,从而使承压含水层地下水位产生一定程度的抬升(熊志涛等,2014)。

(2)在苏锡常城区地铁投入运行5年后(2015年),相比于2010年,在没有考虑地铁存在时苏锡常受自然补给使整体地下水位抬升;在考虑地铁工程的影响时,I承压含水层水位产生更大程度的升降,地铁附近水位等值线变密。对比图5a、5c可知在不考虑地铁工程存在时,无锡附近等水位线由-5.6 m壅高到-4.8 m,苏州附近等水位线由-7.6 m抬升至-6 m。主要是因为无锡和苏州附近的I承压含水层由于受到上部潜水越流形式的补给,使苏锡常整体水位抬升。对比图5c、5d可知在考虑地铁工程存在时,常州附近地下水位和地下水水流态基本无变化;无锡附近-4.8 m等水头线处地下水位产生0~0.4 m的水位上升,渗流由NE-SW方向转变为SE-NW方向,水位线在以无锡为中心的16.86 km半径范围内变密,水力梯度增大,地下水水流态产生微弱的变化;苏州附近-6 m等水头线处地下水位产生0~0.4 m的水位抬升,渗流均为NW-SE方向。相比于常州和无锡,苏州水位线在以苏州为中心的17.56 km半径范围内变得更密,局部水力梯度变得更大,地下水水流态产生更显著的变化。同时苏州南方地下水流向的背水面位置处会出现0~0.8 m的地下水位下降。一方面主要是因为相比于常州,无锡和苏州附近属于沿太湖区域,其含水层厚度更小,地铁对无锡和苏州附近地下水径流排泄产生更大的影响;另一方面是因为地下水水流经苏州附近处时受到地铁线路阻碍作用,使得迎水面位置水位上升,而背水面位置处水位有所下降。

(3)在苏锡常城区地铁投入运行10年后(2020年),对比图5e、5f可知,在考虑地铁工程的存在时,城区地铁附近地下水位基本无变化,仅在苏州附近-5.2 m等水头线处渗流方向向南偏移,水位线在以苏州为中心的15.54 km半径范围内变密,局部水力梯度增大,但地下水水流态改变程度较微弱。一方面主要是由于苏州相对于常州和无锡地铁较多,这些地铁走向与地下水流向相交,会对地下水产生阻碍作用;另一方面主要是因为区内地下水会通过向邻近河流排泄、垂直向上蒸发或者补给深层地下水等方式自行调节,

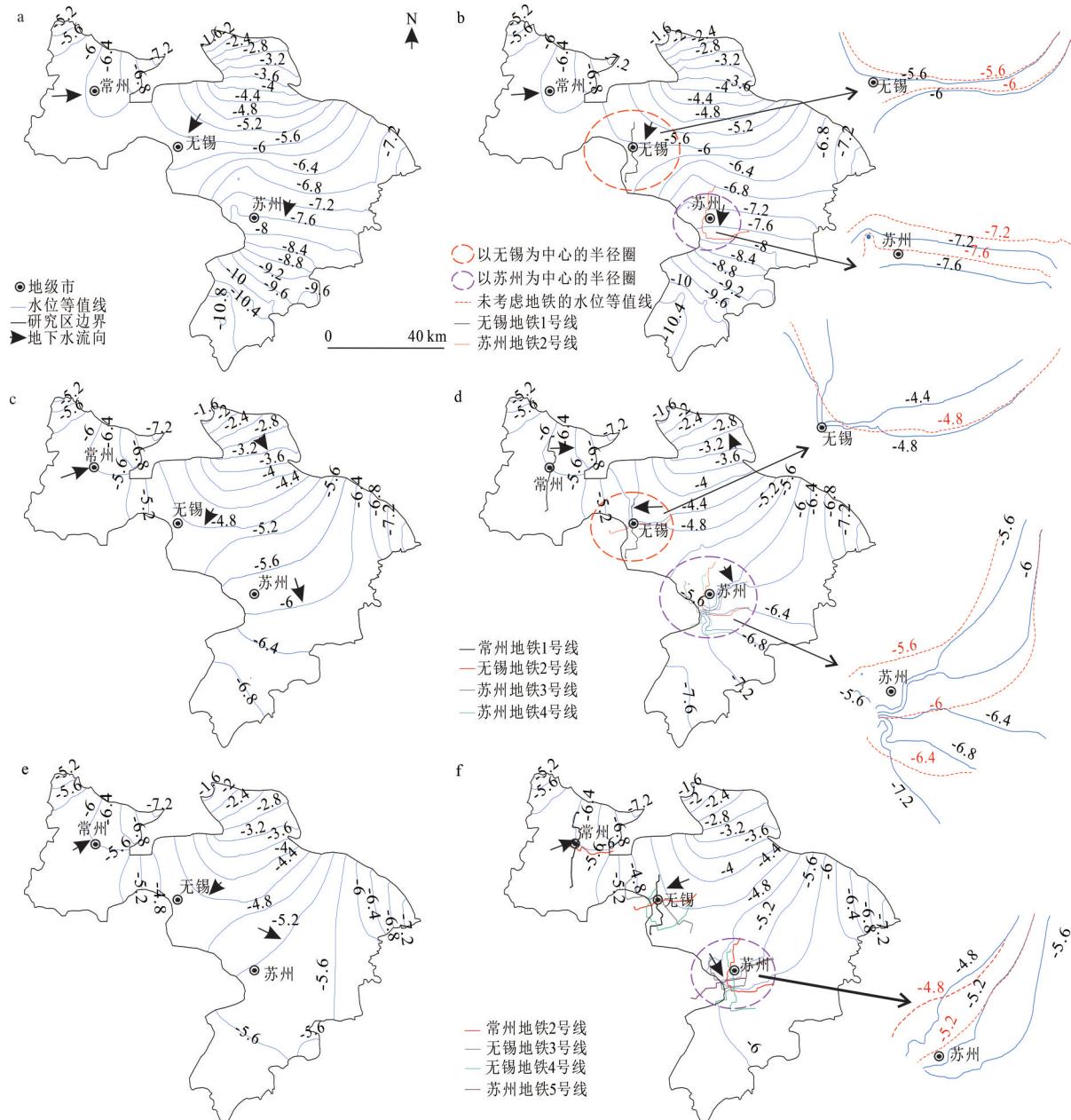


图 5 苏锡常地铁投入前后 I 承压流场示意

Fig.5 I Schematic diagrams of confined flow field before and after Su-Xi-Chang metro

a.2010年地铁未投入预测 I 承压流场;b.2010年地铁投入初期预测 I 承压流场;c.2015年地铁未投入预测 I 承压流场;d.2015年地铁投入预测 I 承压流场;e.2020年地铁未投入预测 I 承压流场;f.2020年地铁投入预测 I 承压流场

使整体流场方向在地铁运行 10 年后趋于一致。

4 结论

本文利用数值模拟方法预测分析了苏锡常城市地铁运营对区域地下水流场的影响。通过对比分析有地铁和无地铁两种条件下的地下水流场演化结果,探讨了地铁运营对地下水流场的影响。相比于相关学者的已有研究(高咏等,2020;De Caro *et al.*, 2020;

郭红东等,2020),本文的研究着眼于区域尺度下地铁运营对地下水流场的影响,主要得到以下结论:

(1) 地铁工程不会引起全区地下水径流方向发生太大的改变,而只会导致线路沿线局部小范围的地下水流场变化。总体来说,地铁工程引起的水位变幅造成沿线地下水环境不利影响的可能性较小。

(2) 研究结果揭示了苏锡常地区不同地铁线路建设运行对地下水流场的影响机制,对于江苏省十四五规划中科学预测和规划苏锡常

地区地下空间开发有着重要的参考价值,也对于深入探讨城市地下空间开发对于区域地下水环境的影响程度有着很好的借鉴意义。

(3)由于收集到的地下空间开发数据和资料有限,本文只考虑了地铁存在情况下流场的变化,而实际情况存在其他地下空间结构,因此在未来关于地下空间对于地下水环境影响的数值模拟研究中需要综合考虑地下停车场、地下管道等其他地下空间开发形式才能做出更符合实际的决策。

References

- Bu, J. W., Sun, Z. Y., Ma, R., et al., 2020. Shallow Groundwater Quality and Its Controlling Factors in the Su-Xi-Chang Region, Eastern China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(4): 1267. <https://doi.org/10.3390/ijerph17041267>
- Chae, G. T., Yun, S. T., Choi, B. Y., et al., 2008. Hydrochemistry of Urban Groundwater, Seoul, Korea: The Impact of Subway Tunnels on Groundwater Quality. *Journal of Contaminant Hydrology*, 101(1/2/3/4): 42–52. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2008.07.008>
- Chen, G. D., 2004. The Environment Geological Problems of Urbanization in Southern Jiangsu. *Volcanology & Mineral Resources*, 25(2): 111–115 (in Chinese with English abstract).
- Chen, Y. X., Huang, S. S., 2020. Three-Dimensional Flow Numerical Simulation of a Station on Chengdu Metro Line 7 Based on FEFLOW. *Ground Water*, 42(6): 8–10 (in Chinese with English abstract).
- Colombo, L., Gattinoni, P., Scesi, L., 2017. Influence of Underground Structures and Infrastructures on the Groundwater Level in the Urban Area of Milan, Italy. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 12(1): 176–184. <https://doi.org/10.2495/sdp-v12-n1-176-184>
- De Caro, M., Crosta, G. B., Previati, A., 2020. Modelling the Interference of Underground Structures with Groundwater Flow and Remedial Solutions in Milan. *Engineering Geology*, 272: 105652. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105652>
- Gao, Y., Liang, C., Che, Z. G., 2020. The Influence of Typical Subway Project in Nanjing on Underground Flow Dynamics. *Science Technology and Engineering*, 20(28): 11711–11717 (in Chinese with English abstract).
- General Office of Jiangsu Provincial People's Government, 2020. Opinions of the People's Government of Jiangsu Province on Strengthening the Development and Exploitation of Urban Underground Space. *Gazette of the People's Government of Jiangsu Province*, (13): 21–25 (in Chinese with English abstract).
- General Office of Jiangsu Provincial People's Government, 2021. The Circular of Jiangsu Provincial People's Government on Printing and Distributing the 14th Five Year Plan for National Economic and Social Development of Jiangsu Province and the Outline of Long Term Goals for the Year 2035. *Gazette of the People's Government of Jiangsu Province*, (5): 5–14 (in Chinese with English abstract).
- Guo, H. D., Wei, L. S., Zheng, W., et al., 2020. Impact from Subway Project on Groundwater Environment in Lanzhou Fault Basin. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 51(8): 119–128 (in Chinese with English abstract).
- Lan, Y. Y., 2017. Analysis of the Influence of Nanchang Metro Line 4 on Groundwater. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 61: 012112. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/61/1/012112>
- Liang, X. J., Lin, X. Y., Su, X. S., et al., 2005. GMS and Groundwater Flow Simulation in Suzhou - Wuxi - Changzhou Area. *Yangtze River*, 36(11): 26–28, 36 (in Chinese with English abstract).
- Santos, O. J. Jr, Celestino, T. B., 2008. Artificial Neural Networks Analysis of São Paulo Subway Tunnel Settlement Data. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23(5): 481–491. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2007.07.002>
- Shin, E., Kim, H. S., Ha, K., et al., 2015. Regional Groundwater Flow Characteristics Due to the Subway System in Seoul, Korea. *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 20(3): 41–50. <https://doi.org/10.7857/jsgc.2015.20.3.041>
- Tan, F., Wang, J., Jiao, Y. Y., et al., 2021. Research Status and Trend of Urban Underground Space Suitability Evaluation. *Earth Science*, 46(5): 1896–1908 (in Chinese with English abstract).
- von der Tann, L., Ritter, S., Hale, S., et al., 2021. From Urban Underground Space (UUS) to Sustainable Underground Urbanism (SUU): Shifting the Focus in Urban Underground Scholarship. *Land Use Policy*, 109: 105650. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105650>
- Wang, J. H., Han, X., Zhou, H. L., 2013. Effect of Urban Metro Operation on Groundwater Environment. *Journal of Engineering Geology*, 21(3): 408–415 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X. M., Zhu, G. R., Yu, Q., et al., 2003. Numerical Simulation of Groundwater Flow of Main Aquifer in Suzhou-Wuxi-Changzhou Area. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 20(10): 1–6 (in Chinese with English abstract).

- neering Geology, 30(1): 26—29 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X.R., Jiang, H.J., Zhu, K., et al., 2019. Research on Ground Settlement Laws of Urban Subway Tunnel Construction Process Based on Earth Pressure Shield. *Earth Science*, 44(12): 4293—4298 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y.B., 2020. Research on Anti-Floating Water Level Base on Regional Numerical Simulation: Take Phase II of Shijiazhuang Metro Line 1 as an Example. *Railway Investigation and Surveying*, 46(3): 28—36 (in Chinese with English abstract).
- Xiong, Z.T., Zhang, Y., Wen, M.X., et al., 2014. Analysis of Influence of Engineering Construction of Wuhan Metro Line 3 and Line 4 on Groundwater Flow Field. *Resources Environment & Engineering*, 28(3): 308—312 (in Chinese with English abstract).
- Xu, R.Y., Wei, J.L., Xiao, Q.F., 2020. Analysis on the Influence of Groundwater in the First Phase of Chengdu Metro Line 8. *Henan Science and Technology*, (7): 122—125 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G.Q., 2021. Scientifically Exploiting Underground Space to Create a Safe and Happy City—Interview with Peng Suping, Academician of China Academy of Engineering and Expert in Engineering Geology and Geo-physical Exploration. *China Emergency Management*, (4): 30—33 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, H., Wang, W.K., Yang, X.T., et al., 2008. Influence of Urban Subway Construction on the Groundwater Environment: A Case Study on Line II of Xi'an Subway. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 36(5): 42—44 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, M., 2008. Study on Optimal Pumping of Groundwater Based on GMS (Dissertation). Nanjing Normal University, Nanjing (in Chinese with English abstract).
- 高咏, 梁聰, 车增光, 2020. 南京典型段地铁工程对地下水流动的影响. *科学技术与工程*, 20(28): 11711—11717.
- 江苏省人民政府办公厅, 2020. 江苏省人民政府办公厅关于加强城市地下空间开发利用的指导意见. 江苏省人民政府公报, (13): 21—25.
- 江苏省人民政府办公厅, 2021. 江苏省人民政府关于印发江苏省国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要的通知. 江苏省人民政府公报, (5): 5—14.
- 郭红东, 魏林森, 郑伟, 等, 2020. 地铁工程对兰州断陷盆地地下水环境的影响分析. *水利水电技术*, 51(8): 119—128.
- 梁秀娟, 林学钰, 苏小四, 等, 2005. GMS 与苏锡常地区地下水水流模拟. *人民长江*, 36(11): 26—28, 36.
- 谭飞, 汪君, 焦玉勇, 等, 2021. 城市地下空间适宜性评价研究国内外现状及趋势. *地球科学*, 46(5): 1896—1908.
- 王军辉, 韩煊, 周宏磊, 2013. 城市地铁运营期间对地下水环境影响分析. *工程地质学报*, 21(3): 408—415.
- 王晓梅, 朱国荣, 余勤, 等, 2003. 苏锡常地区主采层地下水数值模拟. *水文地质工程地质*, 30(1): 26—29.
- 王晓睿, 姜洪建, 朱坤, 等, 2019. 基于土压盾构的城市地铁隧道构筑过程地表沉降规律. *地球科学*, 44(12): 4293—4298.
- 王宇博, 2020. 基于区域数值模拟的抗浮水位研究: 以石家庄地铁 1 号线二期为例. *铁道勘察*, 46(3): 28—36.
- 熊志涛, 张艺, 文美霞, 等, 2014. 武汉地铁三、四号线工程建设对地下水水流场的影响分析. *资源环境与工程*, 28(3): 308—312.
- 徐瑞御, 魏镜玲, 肖庆峰, 2020. 成都地铁 8 号线一期地下水影响分析. *河南科技*, (7): 122—125.
- 张广泉, 2021. 科学开拓地下空间 打造安全幸福城市: 访中国工程院院士、工程地质与工程物探专家彭苏萍. *中国应急管理*, (4): 30—33.
- 张徽, 王文科, 杨晓婷, 等, 2008. 城市地铁工程建设对地下水环境的影响分析: 以西安地铁 II 号线为例. *工程勘察*, 36(5): 42—44.
- 张敏, 2008. 基于 GMS 的地下水开采优化方案研究: 以苏锡常地区地下水开采为例(硕士学位论文). 南京: 南京师范大学.

中文参考文献

- 陈国栋, 2004. 苏锡常地区城市化进程中的环境地质问题. *资源调查与环境*, 25(2): 111—115.
- 陈永祥, 黄思霜, 2020. 基于 FEFLOW 的成都地铁 7 号线某站点三维水流数值模拟. *地下水*, 42(6): 8—10.