

雄安至北京大兴国际机场快线起步区地下段结构 抗浮设防水位取值研究

韩博^{1,2)}, 高伊航^{1,2)}, 马震^{1,2)}, 郭旭^{1,2)*}, 刘宏伟^{1,2,3)},
张曦⁴⁾, 李海涛^{2,5)}, 杜亚楠⁶⁾, 白耀楠^{1,2)}, 李状^{1,2)}

1)中国地质调查局天津地质调查中心(华北地质科技创新中心), 天津 300170;

2)中国地质调查局雄安城市地质研究中心, 天津 300170;

3)天津市海岸带地质过程与环境安全重点实验室, 天津 300170;

4)河北雄安新区规划研究中心, 河北雄安 071700;

5)中国地质环境监测院, 北京 100081;

6)雄安城市规画研究设计院有限公司, 河北雄安 071700

摘要: 抗浮设防水位直接影响到地下结构的安全与建设费用, 在地下结构建设中至关重要, 因此, 科学合理地确定地下结构的抗浮设防水位具有巨大的社会意义和经济价值。本文以“雄安新区至北京大兴国际机场快线地下工程段”为研究对象, 系统分析了研究区水文地质条件以及地下水位年内年际动态变化规律, 利用数值模拟法和类比预测法确定了地下结构抗浮设防水位标高建议值。结果表明, 该场地区域浅层地下水水位埋深一般为 5.0~20.0 m, 地下水水位标高一般为-10.0~1.0 m。近五年场地浅层地下水水位标高一般为-5~-10 m, 埋深一般为 3.0~15.0 m, 地下水位逐年升高, 回升速率约 1.0 m/a。地下结构抗浮设防水位标高取值建议取使用期抗浮设防水位采用数值模拟法预测结果。该成果服务了“雄安新区至北京大兴国际机场快线(R1线)”项目场地抗浮设计, 为雄安新区重大建设工程项目的抗浮安全设计提供了示范。

关键词: 雄安新区; 水文地质条件; 数值模拟; 类比预测; 抗浮设防水位

中图分类号: P641 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2023.103101

Study on the Values of Anti-floating Fortification Water Level for the Underground Structure in the Starting Area of Xiongan-Beijing Daxing International Airport Express Line

HAN Bo^{1,2)}, GAO Yihang^{1,2)}, MA Zhen^{1,2)}, GUO Xu^{1,2)*}, LIU Hongwei^{1,2,3)}, ZHANG Xi⁴⁾,
LI Haitao^{2,5)}, DU Ya'nan⁶⁾, BAI Yaonan^{1,2)}, LI Zhuang^{1,2)}

1) Tianjin Center, China Geological Survey (North China Center of Geoscience Innovation), Tianjin 300170;

2) Xiongan Center of Urban Geological Research, China Geological Survey, Tianjin 300170;

3) Tianjin Key Laboratory of Coast Geological Processes and Environmental Safety, Tianjin 300170;

4) Planning Research Center of Xiongan New Area, Xiongan, Hebei 071700;

5) China Institute of Geo-Environment Monitoring, Beijing 100081;

6) Xiongan Urban Planning and Design Institute Co., Ltd., Xiongan, Hebei 071700

Abstract: The anti-floating water level directly affects the safety and construction cost of an underground structure. Therefore, it is of great social significance and economic value to determine the anti-floating water

本文由中国地质调查局地质调查项目“雄安新区资源环境动态调查监测”(编号: DD20211292)、“京津冀协同发展区暨雄安新区资源环境承载能力监测评价”(编号: DD20221727)和“太行吕梁山地区地质灾害精细调查与风险管控”(编号: DD20230438)联合资助。

收稿日期: 2023-08-14; 改回日期: 2023-09-27; 网络首发日期: 2023-11-01。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 韩博, 男, 1984年生。博士, 高级工程师。主要从事水工环地质调查与国土空间综合研究工作。通信地址: 300170, 天津市河东区大直沽八号路4号。E-mail: hanbo1984@126.com。

*通信作者: 郭旭, 男, 1983年生。博士, 高级工程师。主要从事水工环地质调查与研究工作。通信地址: 300170, 天津市河东区大直沽八号路4号。E-mail: 29205136@qq.com。

level of underground structures scientifically and reasonably. Taking the underground structure of the Express Railway Line from Xiongan New Area to Beijing Daxing International Airport as the research object, this study systematically analyzed the hydrogeological conditions and the interannual dynamic variation of the groundwater level in the study area and used the numerical simulation method and analog forecasting method to determine a recommended value of the anti-floating water level elevation of the underground structure. The results showed that the depth of shallow groundwater at this site is generally 5 to 20 m and that the elevation of the groundwater level is generally -10 to 1 m. In the past five years, the elevation of the shallow groundwater level at the site has generally been -5 to -10 m, and the burial depth has generally been 3 to 15 m. The groundwater level has been increasing each year, and the recovery rate is approximately 1 m/a. The numerical simulation method was used to predict a recommended value of the anti-floating water level of the underground structure during its service life. The results serve the anti-floating design of the Express Line from Xiongan New Area to the Beijing Daxing International Airport (Line R1) project site and provide a demonstration of anti-floating safety design of major engineering construction projects in Xiongan New Area.

Key words: Xiongan New Area; hydrogeological conditions; numerical simulation; analog prediction; anti-floating fortification water level

“雄安新区至北京大兴国际机场快线”是雄安新区“四纵两横”区域轨道交通网的重要干线, 拟建的雄安起步区段为地下线, 位于冲洪积平原地貌单元, 浅层地下水水位以下。地下水作为一种宝贵的资源, 在雄安新区实行限采或禁采措施。特别是2017年设立雄安新区以来, 通过地下水禁(限)采、南水北调和白洋淀生态补水及种植结构调整等措施, 地下水位呈稳定和上升态势(马震等, 2021, 2022; 李海涛等, 2021)。而地下水的广泛回升会产生浮力, 地下工程结构会因浮力过大而产生变形破坏等抗浮失稳问题(蔡国成等, 2015; 曹洪等, 2016; 游庆等, 2019; 赵银鑫等, 2023)。因此, 科学合理地确定抗浮设防水位对地下工程结构的安全使用与建设费用具有十分重要的意义。

近年来, 地下工程结构的抗浮问题越来越得到人们的关注。众多学者根据其所研究地区的实际情况, 综合考虑不同的地质条件、建筑条件和地貌条件等自然因素和人为因素, 提出了地下抗浮设防水位的确定方法和抗浮措施(张欣海, 2004; 兰坚强, 2008; 刘国亮等, 2009; 何翠香, 2010; 彭柏兴, 2013; 胡政等, 2018; 游庆等, 2019)。也有一些学者通过数值模拟方法预测研究区地下水流场或建设场地抗浮设防水位(Yang et al., 2012; 代锋刚等, 2017; 刘军, 2017; 郭小铭, 2018; 李会锋, 2023), 或者通过动态曲线比拟法及趋势分析法对研究区场地最高水位进行预测并确定抗浮设计水位的合理取值(李永彪等, 2019; 温伟光等, 2021)。上述研究多基于短期调查水位数据, 缺乏长期的系统的区域水文观测数据, 如果取值过高, 容易造成浪费, 如果取值过低, 又会造成危害(王宇博等, 2019; 罗益斌等, 2022)。地下工程结构抗浮设防水位取值是十分复杂的问题, 截至目前, 尚未形成一套统一的技术方法体系(许兆鹏等, 2019)。

本文以“雄安新区至北京大大兴国际机场快线雄安地下工程段”为例, 利用已有的长期监测资料, 系统分析了研究区水文地质条件及地下水位年内年际动态变化规律, 采用数值模拟法和类比预测法, 研究了该区域地下水位动态演化规律以及未来发展趋势, 结合近期勘察水位, 确定地下工程结构抗浮设防水位标高建议值。

1 研究区概况

1.1 工程概况

雄安新区至北京大兴国际机场快线是支撑北京非首都功能疏解的区域快线, 也是雄安新区内“一千多支”快线系统的重要组成部分(图1)。地下工程段 KC-1 标段起止里程为 K71+900—K81+772.279, 约 9.87 km。本标段以地下线形式沿起步区东西轴北侧走廊向东敷设, 包括起点—雄安航站楼站—金融岛站—第五组团站—雄县站高架分界, 大部分为地下线, 共计车站 3 座, 区间 4 个。各站点工程概况如表 1、表 2。根据本标段沿线地形地貌、区域水文地质条件、水系分布、地下水流场等情况, 确定本次研究区范围东侧以大清河为界、南侧以白洋淀为界、北侧以南拒马河为界、西侧以雄安新区行政边界为界(图 1)。

1.2 研究区地质背景条件

研究区地势西北高、东南低, 地面高程多在 5~20 m, 地面坡降在 0.2‰~0.7‰。地貌属于平原区, 地表均被第四系松散沉积物所覆盖。地貌类型为冲洪积平原区, 上部地层为近代河流冲积物或扇前洼地堆积物, 下伏河流相冲洪积物(马震等, 2021, 2022; 夏雨波等, 2022)(图 2)。

研究区地质构造单元属于 I 级中朝准地台、II 级华北断拗、III 级冀中台陷, 地跨廊坊断凹(IV₂³⁷)、牛

驼镇断凸(IV₂³⁸)、保定断凹(IV₂⁴⁰)等三个主要IV级构造单元, 主要发育有 2 条断裂, 分别为徐水南断裂和容东断裂(马震等, 2021)。其中, 徐水南断裂和容东断裂穿过研究区。根据浅震资料显示, 这些断层均在晚更新世地层以下, 不存在活动断层。

研究区 100 m 深度范围内地层岩性主要为粉砂、细砂、中砂、粉土、粉质黏土及黏土互层, 可分为 18 个工程地质层组, 地层工程性质良好, 其中 10 m 以下地层岩性主要为可塑-硬塑粉质黏土、黏土和中密-密实粉土、砂土, 地基土承载力特征值一般在 140~350 kPa 之间。主要的环境地质工程地质问题

有地下水超采、地面沉降与地裂缝、砂土液化、涌水、流沙以及基坑失稳等(韩博等, 2020, 2023)。

2 研究区水文地质条件

2.1 含水层组特征

研究区地下水类型主要为第四系松散岩类孔隙水, 含水层岩性以粉细砂、中砂为主, 地下水赋存并运移于孔隙中。研究区 600 m 深度范围内自上而下可划分为 4 个含水组, 其富水性受地貌条件和沉积物成因类型控制明显, 且与含水层岩性、厚度及地下水的补给条件密切相关。100 m 深度地层

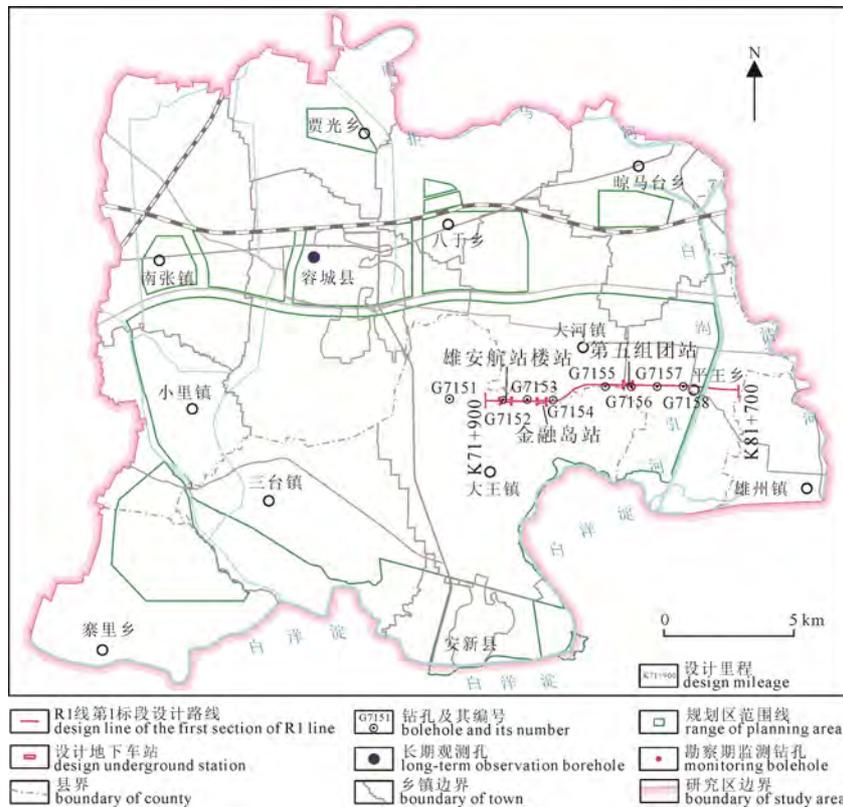


图 1 雄安新区至北京大兴国际机场快线地下工程段平面示意图

Fig. 1 Schematic map of the Express Line from Xiongan New Area to Beijing Daxing International Airport

表 1 标段区间工程概况表
Table 1 Overview of the project between stations

序号	区间	里程	长度/m	底板埋深/m	敷设方式
1	起点—雄安航站楼站	K71+900.000—K72+492.579	592.579	23.47~23.65	地下
2	雄安航站楼站—金融岛站	K72+809.779—K73+868.091	1 058.312	23.95~26.62	地下
3	金融岛站—第五组团站	K74+133.491—K77+294.635	3 161.144	22.9~31.6	地下
4	第五组团站—雄县站	K77+601.035—K81+772.279	4 171.244	0~36.3	地下+U槽+地面

表 2 勘察期间主要建筑物附近地下水位统计表
Table 2 Statistical table of groundwater level near major buildings during the investigation stage

地下水性质	雄安航站楼站		金融岛站		第五组团站		含水层
	埋深/m	高程/m	埋深/m	高程/m	埋深/m	高程/m	
潜水	12.80	-5.80	14.4	-5.30	12.4	-5.60	20 m 以上地层
潜水	12.45	-5.45	11.9	-5.45	12.5	-5.64	
浅层承压水	12.65	-5.65	12.0	-5.32	12.6	-5.83	粉细砂层
浅层承压水	14.49	-7.48	13.0	-5.74	12.56	-5.80	粉细砂层

主要揭露第 I 含水组 and 第 II 含水组, 属于浅层地下水, 包括潜水和浅层承压水(李海涛等, 2021), 标段沿线范围含水层剖面见图 3 所示。标段沿线底板最大埋深 36 m, 主要位于第 I 含水组范围内。第 I 含水组含水层岩性主要为冲积、冲湖积粉土、粉质黏土夹薄层细砂、粉细砂(马震等, 2019), 地下水类型属潜水, 含水层厚度一般小于 10 m, 底界深度 17~34 m, 单井涌水量小于 1 000 m³/d。

2.2 地下水补给、径流和排泄

研究区内浅层地下水属潜水-浅层承压水类型, 补给条件主要为入渗补给, 主要包括降水入渗、河(淀)水入渗、灌溉回归等, 其次是侧向

径流补给; 现状条件下, 地下水径流方向总体由西北向东南方向流动, 在白洋淀附近形成局部水丘, 地下水向周边径流; 人工开采为主要排泄方式, 其次是侧向径流排泄和越流排泄, 淀区周边存在少量蒸发。

2.3 地下水位变化特征

2.3.1 近 5 年场地地下水位

研究区近 5 年以来, 区域地下水等水位线如图 4 所示。由图可知, 近 5 年, 研究区沿白洋淀淀区、南拒马河—白沟引河周边水位最高, 向起步区水位逐渐降低。标段沿线场地地下水水位标高一般为 6.0 ~ -15.0 m, 埋深一般为 3.0~22.0 m, 由西向东地下水水位逐渐升高, 年平均地下水位上升 1.0~2.0 m。2017 年 6 月该标段沿线场地地下水水位标高一般为 -5.0 ~ -15.5 m, 埋深 12.0~22.0 m。2018 年 6 月标段沿线场地地下水水位标高一般为 -4.0 ~ -14.3 m, 埋深 11.0~20.0 m。2019 年 6 月标段沿线场地地下水水位标高一般为 0.7 ~ -12.3 m, 埋深 7.0~19.0 m。2020 年 6 月标段沿线场地浅层地下水水位标高一般为 2.6 ~ -8.9 m, 埋深 5.0~16.0 m。2021 年 6 月标段沿线场地浅层地下水水位标高一般为 1.0 ~ -7.5 m, 埋深 6.0~14.0 m。2022 年 6 月标段沿线场地地下水水位标高一般为 2.0 ~ -6.5m, 埋深 5.0~12.0 m。

2.3.2 勘察期间场地地下水位

根据勘察报告(袁柱等, 2021a, b)可知, 勘察期间(2021 年 4—5 月), 研究区场地地下水水位高程 -5.0~ -7.5 m, 埋深 10~15 m, 各车站场地地下水水位如表 2 所示。

2.3.3 地下水位动态变化特征

(1) 地下水年内动态特征

研究区浅层地下水水位动态类型为入渗-开采型。其中, 地下水位埋深小于 10 m 的浅层地下水,



图 2 研究区地貌图

Fig. 2 Geomorphological map of the study area

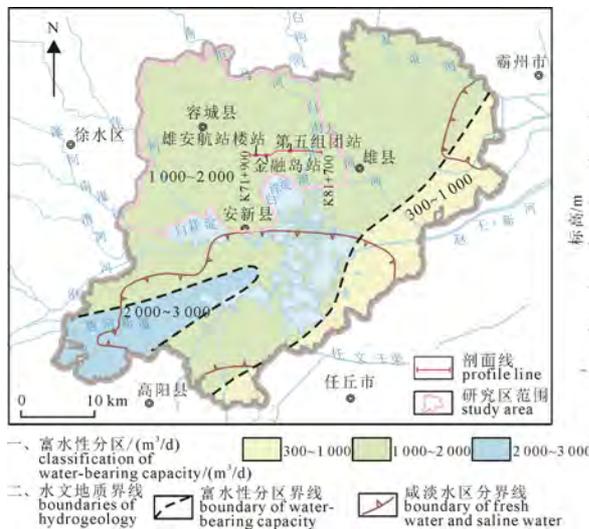
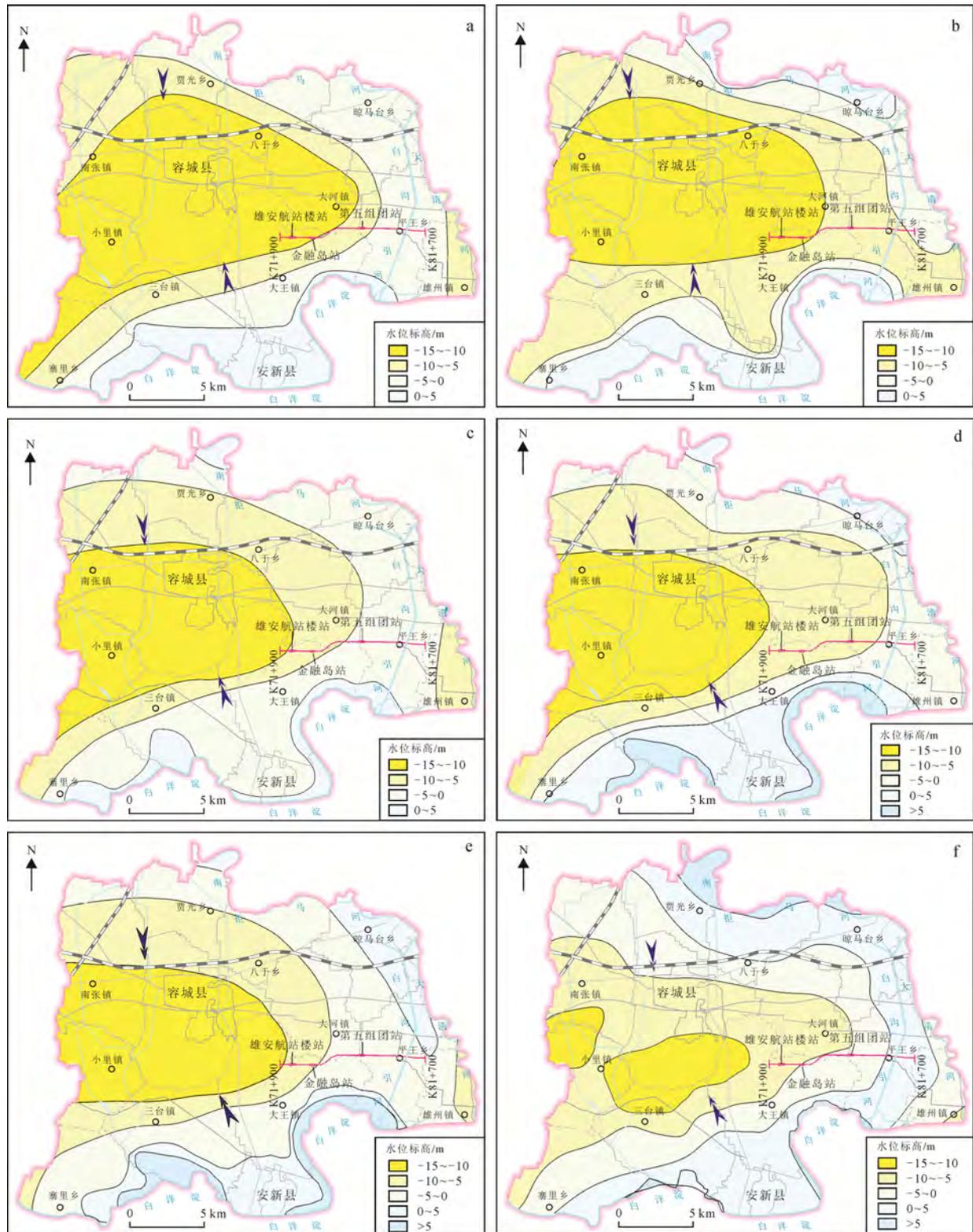


图 3 雄安新区水文地质略图(李海涛等, 2021)与含水层组剖面图

Fig. 3 Hydrogeological map of the shallow aquifer in Xiongan New Area (LI et al., 2021) and profile of aquifer groups

主要位于白洋淀及淀区周边区域, 水位变化主要受淀区地表水渗漏及降水入渗补给影响, 该区年内地下水水位变幅较小, 为 2.0 m 左右。地下水埋深大于 10 m 的浅层地下水, 主要位于农业灌溉区, 年内

动态具有明显的季节性变化规律, 每年 4—6 月中旬为主要开采期, 水位呈下降趋势, 7 月出现全年最低水位, 随后雨季来到, 农灌停采, 水位回升至冬灌时节, 11 月前后冬灌开始, 此后又继续回升,



a—2017年6月等水位线图; b—2018年6月等水位线图; c—2019年6月等水位线图;

d—2020年6月等水位线图; e—2021年6月等水位线图; f—2022年6月等水位线图。

a—contour map of water level for June, 2017; b—contour map of water level for June, 2018; c—contour map of water level for June, 2019; d—contour map of water level for June, 2020; e—contour map of water level for June, 2021; f—contour map of water level for June, 2022.

图4 研究区浅层地下水等水位线图(2017年6月—2022年6月)

Fig. 4 Contour map of the shallow groundwater table in the study area (June, 2017–June, 2022)

至翌年 2—3 月份达到最高水位, 地下水位年变幅为以 2.0~4.0 m 为主, 局部大于 4.0 m, 且春灌地下水开采量比冬灌地下水开采量大, 对地下水位影响更加显著(图 5)。

(2)地下水年际动态特征

20 世纪 80 年代到 90 年代中期, 浅层地下水位年内变化主要受降雨和农业灌溉的影响, 地下水位缓慢下降(孙超等, 2022), 1996—2016 年, 地下水位持续较快下降, 浅层地下水位降幅约 15.0 m, 年下降速率约 0.8 m。2014 年开始实施禁(限)采措施, 直至 2016 年禁限采的效果才逐渐凸显, 地下水位下降幅度有所减少, 特别是 2017 年设立雄安新区以来, 通过地下水禁(限)采、南水北调和白洋淀生态补水及种植结构调整等措施, 研究区浅层地下水位呈稳定和上升趋势, 年均上升幅度为 1~2 m(图 6)。

3 确定抗浮设防水位取值

3.1 抗浮设防水位取值方法与地下水位预测分析方法

抗浮设防水位要以区域水文地质条件为基础, 从较大范围的区域性水文条件结合场地地质条件来分析。它与区域水文地质、工程地质条件、地下水

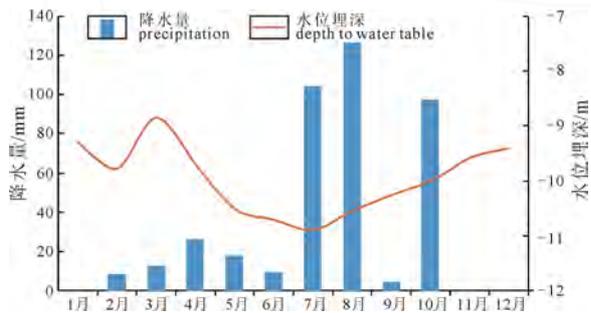


图 5 容城县城关谷庄村(容 2-2)浅层地下水位 2017 年动态曲线图

Fig. 5 Annual dynamic curve of shallow groundwater level in Guangzhuang village (Rong 2-2), Rongcheng County, 2017

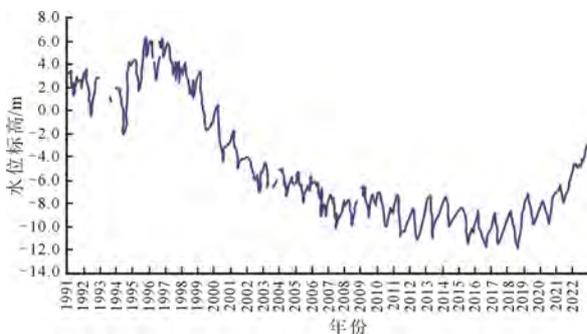


图 6 容城县城关谷庄村监测井浅层地下水位历时曲线(1991—2022)

Fig. 6 Duration curve of shallow groundwater level of monitoring well in Guangzhuang village in Rongcheng (1991—2022)

补径排和贮存条件等有关。根据岩土工程勘察规范(GB 50021-2001)、建筑地基设计规范(GB 50007-2011)、高层建筑岩土工程勘察标准(JGJ/T 72-2017)、建筑工程抗浮技术标准(JGJ 476-2019)等相关规范, 明确了地下工程结构抗浮设防水位取值方法和预测方法。

3.1.1 抗浮设防水位取值方法

《建筑工程抗浮技术标准》(JGJ 476-2019)中第 5.1 条中明确规定了施工期和使用期抗浮设防水位取值方法。

3.1.2 地下水位预测分析方法

地下水位预测分析计算方法有: (1)经验证的时间序列分析法、趋势外推法和类比预测法。(2)数值计算或数值模拟方法。本文主要采用数值模拟法和类比预测法, 开展研究区区域地下水位未来的变化规律及发展趋势预测。

3.2 数值模拟法

数值模拟法是目前应用最广泛的地下水位预测方法, 本次研究基于已有资料, 根据雄安新区控制性详细规划水网规划(图 7)以及 R1 线标段总体设计, 建立研究区地下水数值模型, 在地下水限采和强降雨工况下, 预测施工期(2025 年)和使用期(100 年)标段沿线场地地下水水位的变化趋势。

3.2.1 地下水数值模型构建

本次研究区面积 492 km², 主要涉及雄安新区容城县、起步区、安新县北部区域。

(1)水文地质概念模型

①含水层及弱透水层的概化

根据研究区区域水文地质特征、雄安新区起步区控制性详细规划以及地下水开发利用状况,

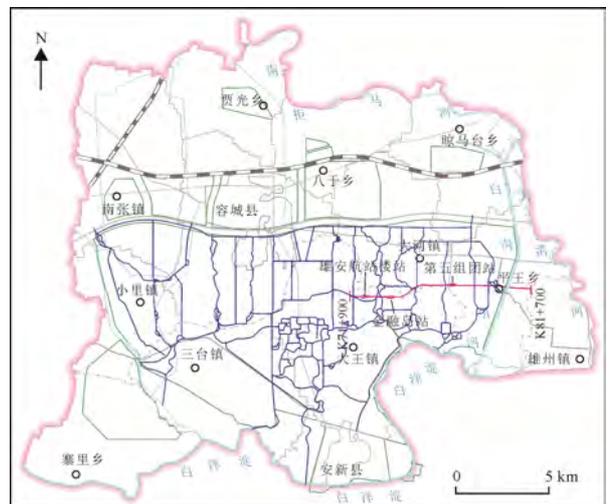


图 7 起步区水系规划图

Fig. 7 Water system planning diagram of the starting area

将研究区 100 m 以浅范围内的第四系含水层作为模拟目的层, 在垂向上将整个模拟层概化为 1 个潜水含水层、5 个承压含水层和 7 个弱透土层。

②边界条件概化

本次研究区上部以地表为边界, 接受大气降水补给与蒸发排泄。第一含水层(第 6 层)南部为白洋淀, 为定流量边界; 第二至六含水层(第 8、10、13、15、17 层)南部为定流量边界, 边界流量通过达西定律计算。西北部为新区边界, 概化为定流量边界, 边界流量通过达西定律计算。东部、北部分别以大清河、白沟引河和南拒马河为界, 概化为定流量边界。底部以 100 m 处第四系黏性土层为界, 可看作隔水边界。

(2)地下水流动的有限差分数学模型

当不考虑水的密度变化的条件下, 依据研究区水文地质条件, 以达西定律和连续性原理为理论依据, 建立研究区地下水在三维空间流动的数学模型:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x}\left(K_{xx}\frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(K_{yy}\frac{\partial h}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_{zz}\frac{\partial h}{\partial z}\right)+\varepsilon=S_s\frac{\partial h}{\partial t},(x,y,z)\in\Omega,t\geq 0 \\ h(x,y,z,t)|_{t=0}=h_0(x,y,z)\in\Omega \\ h(x,y,z,t)|_{\Gamma_1}=h_1(x,y,z,t),(x,y,z)\in\Gamma_1,t\geq 0 \\ k\frac{\partial h}{\partial n}|_{\Gamma_2}=q(x,y,z,t),(x,y,z)\in\Gamma_2,t\geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, K_{xx} 、 K_{yy} 、 K_{zz} —含水层 x 、 y 、 z 方向的渗透系数, 单位 m/d ; h —水头函数, 单位 m ; ε —单元的源汇函数; S_s —贮水系数, 单位 m^{-1} ; t —时间, 单位 s ; Ω —渗流区域; h_0 —初始水头, 单位 m ; h_1 —第一类边界条件上的水头函数, 单位 m ; Γ_1 —第一类边界条件; k —第二类边界的渗透系数, 单位 m/d ; n —第二类边界外法线方向的单位矢量; q —第二类边界单位面积流量函数, 单位 m/d ; Γ_2 —第二类边界条件。

3.2.2 地下水数值模型的识别与验证

(1)空间离散与时间离散

平面上采用矩形网格剖分边长为 $225\text{ m}\times 200\text{ m}$ 的长方形网格, 分为 150 行, 150 列。垂向上分为 13 层, 为便于垂向上各层水量的转换计算, 各层采用统一的剖分格式, 计算节点位于单元中心, 每层剖分成 22 500 个计算单元。选择 2017 年 6 月至 2022 年 6 月作为模型的识别验证期, 并取时间步长为 1 个月, 共计 60 个时间步长。

(2)参数及源汇项分析

①模型结构及初始值

本次模拟中各模拟层顶、底板高程依据研究区内 778 个工程地质钻孔资料, 通过克里金(Kriging)插值方法计算出各层节点的顶、底面高程值。地下水初始水位利用 2017 年 6 月浅层地下水统测水位(图 3)。

②识别与验证期源汇项处理

1)降雨入渗量

$$Q_{\text{降}}=F\cdot X\cdot a/10 \quad (2)$$

式中, $Q_{\text{降}}$ —降水入渗量, 单位 万 m^3 ; a —降水入渗系数, 采用雄安新区综合地质调查项目中相关参数数据(图 8), 采用加权平均值法, 计算研究区降水入渗系数为 0.134; X —年降水量, 单位 mm ; F —降水接受面积, 单位 km^2 。经计算, 研究区 2017 年、2018 年和 2019 年总降雨入渗补给量分别为 $3\ 198.89\times 10^4\text{ m}^3$ 、 $3\ 732.05\times 10^4\text{ m}^3$ 和 $2\ 981.92\times 10^4\text{ m}^3$ 。

2)侧向流入流出量

$$Q_{\text{侧}}=K\cdot I\cdot M\cdot B\cdot t \quad (3)$$

式中, K —含水层渗透系数, 单位 m/d , 渗透系数根据含水层岩性及断面抽水试验资料所得数据确定; I —水力坡度, 水力坡度根据潜水等水位线获得; M —含水层厚度, 单位 m , 含水层厚度根据钻孔、民井地层以及工程地质剖面获得; B —含水层断面长度, 单位 m , 断面长度根据等水位线图获取; t —补给时间, 1 个水文年, 取值 365 d。

3)地表水入渗量

$$Q_{\text{河道入渗}}=\Delta Q(1-\lambda)\times L \quad (4)$$

$$\Delta Q=b\sqrt{\frac{Q_{\text{上游}}}{a}} \quad (5)$$

式中, ΔQ —单位河长损失量, 单位 $10^4\text{ m}^3/\text{km/a}$; λ —浸润损失系数, 根据河床岩性取值 0.45; L —计算河段长度, 单位 km ; $Q_{\text{上游}}$ —上游来水量, 单位 10^8 m^3 ; a 、 b —参数, 根据河床岩性 a 取 6.35×10^{-5} , b 取 2.44。研究区南拒马河年入渗补给量为 $182.41\times 10^4\text{ m}^3$, 大清河年入渗补给量为 $217.55\times 10^4\text{ m}^3$, 白沟引河年入渗补给量为 $169.60\times 10^4\text{ m}^3$, 见表 3。

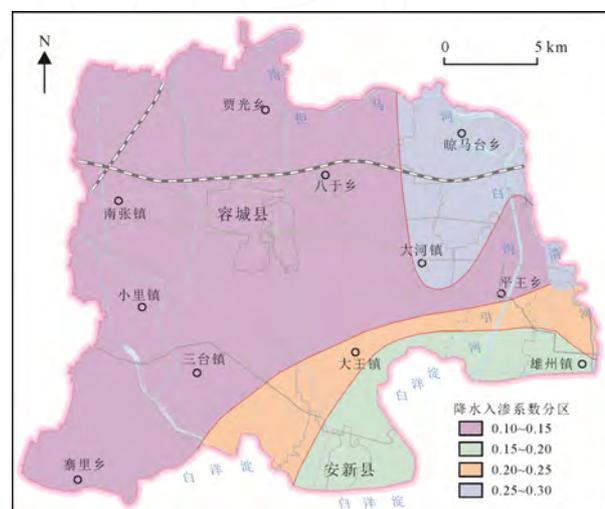


图 8 雄安新区降水入渗系数分布图

Fig. 8 Distribution of precipitation infiltration coefficient in Xiongan New Area

表3 河流入渗量计算表
Table 3 Calculation table of river infiltration

水系名称	多年平均径流量 (/10 ⁴ m ³ /a)	河道长度 /km	年平均入渗量 (/10 ⁴ m ³ /a)
南拒马河	1 609.67	13.81	182.41
大清河	1 609.67	16.47	217.55
白沟引河	1 609.67	12.84	169.60

表4 白洋淀渗漏量模拟实验成果表
Table 4 Results of the simulation experiment on leakage of Baiyangdian Lake

水位/m	单宽渗漏量/(m ³ /d)	周边渗漏量/(m ³ /d)
4.9	0	0
6.0	0.074	1.620
6.5	0.159	3.482
7.0	0.257	5.628
7.3	0.294	6.488
8.5	0.500	11.147
9.0	0.597	13.074

4)白洋淀渗漏量

$$Q_{\text{白洋淀渗漏}} = (-21.248 H + 3.812H) \times t \quad (6)$$

式中, H —白洋淀平均水位, 单位 m; t —计算时段, 取 365 d。参照河北省水科所侧渗模拟研究的不同淀水位与周边渗漏量间的关系(表 4), 估算得出白洋淀年平均入渗量为 $1\,916.1 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

5)地下水蒸发量

潜水蒸发量采用潜水蒸发系数法计算, 计算公式为:

$$Q_{\text{蒸发}} = \varepsilon \cdot F \quad (7)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \left(1 - \frac{\Delta}{\Delta_0}\right)^n \quad (8)$$

式中, $Q_{\text{蒸发}}$ —潜水蒸发量, 单位 10^4 m^3 ; ε —地下水蒸发强度, 单位 mm; ε_0 —水面蒸发量, 以 E601 型观测值为准, 研究区年均水面蒸发量为 1 300 mm; Δ —水位埋深, 单位 m; Δ_0 —蒸发极限埋深, 单位 m; n —不同岩性参数。 F —蒸发面积, 单位 km^2 , 为水位埋深小于 4 m(蒸发极限)区域的面积。

6)地下水实际开采量

研究区地下水开采主要用于农业灌溉、工业开采和生活用水, 农业灌溉主要开采 150 m 以浅的浅层地下水, 生活用水主要开采 150~300 m 的深层地下水。收集研究区各县浅层地下水开采量见表 5, 研究区浅层多年平均开采量为 $12\,899.52 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ 。模型中地下水开采量的输入主要采用开采井的形式。

7)水文地质参数确定

通过模型校验调试后, 将模型参数概化如表 6。

(3)模型识别验证结果

模型的校验是模型反复调整的过程, 通过不断调整模型的条件与参数, 使模拟结果与实际流场高度拟合(图 9)。

3.2.3 地下水位变化趋势预测

(1)分析预测工况设定

根据雄安新区起步区规划及水系总体布局, 按水网建成前的施工期和建成后的使用期分别设定预测工况:

①施工期(2025 年), 在地下水限采条件下, 预测标段沿线场地地下水流程变化规律及发展趋势。

②使用期(100 年), 在地下水限采条件+强降雨(历史最强年降雨量 931 mm)下, 预测标段沿线场地 100 年后地下水流程变化规律及发展趋势。

表5 浅层地下水开采量统计表
Table 5 Statistics of shallow groundwater exploitation

县市	年均开采量/(10 ⁴ m ³ /a)
安新县	5 119.88
容城县	7 689.64

表6 地层渗透系数及给水度初值
Table 6 Initial values of the formation permeability coefficient and water yield

地层号	岩性	水平渗透系数 $K_{xx}/(\text{m}/\text{d})$	垂直渗透比 K_{xx}/K_{yy}	给水度 S_y	贮水率 $S_s/(\text{m}^{-1})$
1~5	粉土+粉质黏土	0.015	0.001	0.003	0.001
6	粉细砂	13.160	0.001	0.070	0.001
7	粉质黏土	0.009	0.001	0.045	0.001
8	粉细砂	12.210	0.001	0.070	0.001
9	粉质黏土	0.001	0.001	0.045	0.001
10	粉细砂	22.155	0.001	0.070	0.001
11~12	粉质黏土	0.001	0.001	0.045	0.001
13	粉细砂	19.530	0.001	0.070	0.001
14	粉质黏土	0.015	0.001	0.045	0.001
15	粉细砂	12.592	0.001	0.070	0.001
16	粉质黏土	0.001	0.001	0.045	0.001
17	粉细砂	12.592	0.001	0.070	0.001
18	粉质黏土	0.001	0.001	0.045	0.001

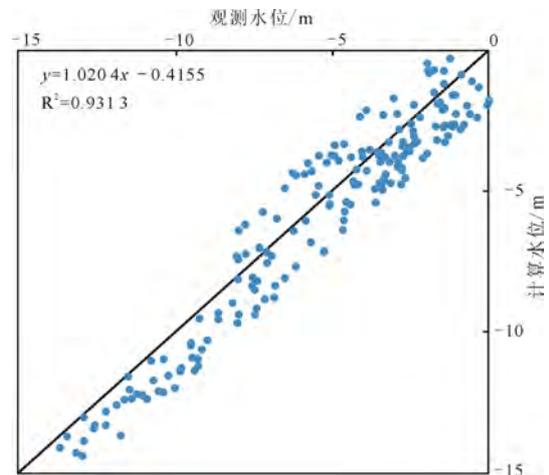


图9 观测值与计算值拟合对比
Fig. 9 Comparison of goodness of fit between the measured and calculated values

地下水初始流场采用 2017 年 6 月地下水流场, 以月为应力期, 一个应力期设置 10 个步长离散, 施工期模拟至 2025 年, 使用期模拟 100 年。

(2) 预测结果分析

① 施工期(2025 年)地下水水位预测趋势

施工期(2025 年), 在地下水限采情景下, 标段沿线区域地下水流场预测结果见图 10 和表 7。结果显示, 在地下水限采条件下, 标段沿线场地地下水水位逐年呈上升趋势, 到 2025 年, 标段沿线场地地下水水位标高分别为: 起点—雄安航站楼站沿线 $-3.4 \sim -2.7$ m, 雄安航站楼站最高 -2.4 m; 雄安航站楼站—金融岛站沿线 $-2.4 \sim -1.5$ m, 金融岛站最高 -1.2 m; 金融岛站—第五组团站沿线 $-1.2 \sim 0.9$ m, 第五组团站最高 1.3 m。

② 使用期(100 年)地下水水位预测趋势

起步区水系建成后, 在地下水限采条件+强降雨工况下, 标段沿线区域地下水流场稳定后的预测结果见图 11 和表 8, 结果显示, 使用期(100 年)内, 标段沿线地下水水位稳定后的标高一般在 $6.0 \sim 6.5$ m 之间, 其中: 起点—雄安航站楼站沿线 $6.4 \sim 6.3$ m; 雄安航站楼站最高 6.3 m; 雄安航站楼站—金融岛站沿线 $6.3 \sim 6.2$ m; 金融岛站最高 6.2 m; 金融岛站—第五组团站沿线 $6.2 \sim 6.3$ m, 第五组团站最高 6.2 m。

3.3 类比预测法

类比预测法是本地无多年观测资料时利用场地周边同水文地质单元的长期监测孔资料类比本地地下水多年动态变化的方法。研究区标段沿线场地仅有勘察年份的地下水水位资料, 而没有多年

表 7 施工期沿线场地地下水水位预测表

Table 7 Prediction table of groundwater level at sites during the construction period

序号	标段沿线场地	里程	水位标高/m	最高水位标高/m	敷设方式	施工方法
1	起点—雄安航站楼站	K71+900.000—K72+492.579	$-3.4 \sim -2.7$	-2.7	地下	明挖
2	雄安航站楼站	K72+492.579—K72+809.779	$-2.7 \sim -2.4$	-2.4	地下	明挖
3	雄安航站楼站—金融岛站	K72+809.779—K73+868.091	$-2.4 \sim -1.5$	-1.5	地下	明挖
4	金融岛站	K73+868.091—K74+133.491	$-1.5 \sim -1.2$	-1.2	地下	明挖
5	金融岛站—第五组团站	K74+133.491—K74+602.724	$-1.2 \sim -0.8$	-0.8	地下	明挖
		K74+602.724—K76+979.978	$-0.8 \sim -0.5$	-0.5	地下	盾构
		K76+979.978—K77+294.635	$-0.5 \sim 0.9$	0.9	地下	明挖
6	第五组团站	K77+294.635—K77+601.035	$0.9 \sim 1.3$	1.3	地下	明挖
7	第五组团站—1 标终点 (含白沟引河)	K77+601.035—K77+991.552	$1.3 \sim 1.8$	1.8	地下	明挖
		K77+991.552—K80+046.150	$1.8 \sim 4.5$	4.5	地下	盾构
		K80+046.150—K80+374.553	$4.5 \sim 6.3$	6.3	地下	盾构
		K80+374.553—K80+627.876	6.3	6.3	地下	盾构
		K80+627.876—K80+941.732	$6.3 \sim 5.9$	6.3	地下	盾构
		K80+941.732—K81+180.804	$5.9 \sim 5.8$	5.9	地面	明挖
		K81+180.804—K81+530.271	$5.8 \sim 5.6$	5.8	地面	U 槽
K81+530.271—K81+772.279	$5.6 \sim 5.5$	5.6	地面	路基		

表 8 使用期内标段沿线场地地下水水位预测表

Table 8 Prediction table of groundwater level at sites along Lot 1 during the service period

序号	标段沿线场地	里程	水位标高/m	最高水位标高/m	敷设方式	施工方法
1	起点—雄安航站楼站	K71+900.000—K72+492.579	$6.4 \sim 6.3$	6.4	地下	明挖
2	雄安航站楼站	K72+492.579—K72+809.779	6.3	6.3	地下	明挖
3	雄安航站楼站—金融岛站	K72+809.779—K73+868.091	$6.3 \sim 6.2$	6.3	地下	明挖
4	金融岛站	K73+868.091—K74+133.491	6.2	6.2	地下	明挖
5	金融岛站—第五组团站	K74+133.491—K74+602.724	$6.2 \sim 6.3$	6.3	地下	明挖
		K74+602.724—K76+979.978	$6.3 \sim 6.2$	6.3	地下	盾构
		K76+979.978—K77+294.635	$6.2 \sim 6.3$	6.3	地下	明挖
6	第五组团站	K77+294.635—K77+601.035	$6.2 \sim 6.1$	6.2	地下	明挖
7	第五组团站—1 标终点 (含白沟引河)	K77+601.035—K77+991.552	$6.1 \sim 6.0$	6.1	地下	明挖
		K77+991.552—K80+046.150	$6.0 \sim 6.4$	6.4	地下	盾构
		K80+046.150—K80+374.553	$6.4 \sim 6.5$	6.5	地下	盾构
		K80+374.553—K80+627.876	6.5	6.5	地下	盾构
		K80+627.876—K80+941.732	$6.5 \sim 6.0$	6.5	地下	盾构
		K80+941.732—K81+180.804	$6.0 \sim 5.8$	6.0	地面	明挖
		K81+180.804—K81+530.271	$5.8 \sim 5.4$	5.8	地面	U 槽
K81+530.271—K81+772.279	$5.4 \sim 5.2$	5.4	地面	路基		

的历史地下水位资料, 对此可利用标段沿线周边区域水文地质单元的孔隙水多年水位变化过程线, 根据各车站地下水位标高与长期观测孔水位标高之间的关系, 推求出各地下车站位置地下水多年动态曲线, 进而利用多年动态曲线推测出各车站历年最高水位标高。这种方法主要适用于本场地没有但附近有区域长期观测孔数据的场地推求多年地下水动态特征。根据相同水文地质单元容城县城关镇谷庄村浅层地下水监测点的多年水位动态监测曲线(图 6), 比拟分析得出标段沿线雄安航站楼站、金融岛站、第五组团站地下水多年动态变化曲线, 如图 12 所示。结果显示, 1991—2022 年, 雄安航站楼站最高地下水位标高为 3.8 m, 金融岛站最高地下水位标高为 4.2 m, 第五组团站最高地下水位标高为 3.6 m。

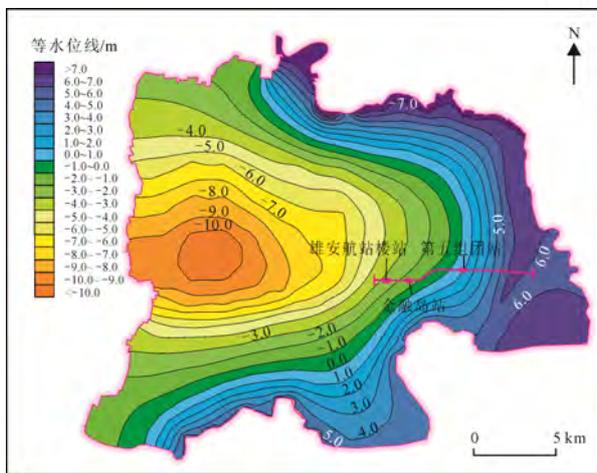


图 10 施工期(2025 年)沿线场地地下水流场预测图

Fig. 10 Prediction diagram of underground water flow field at sites during the construction period (2025)

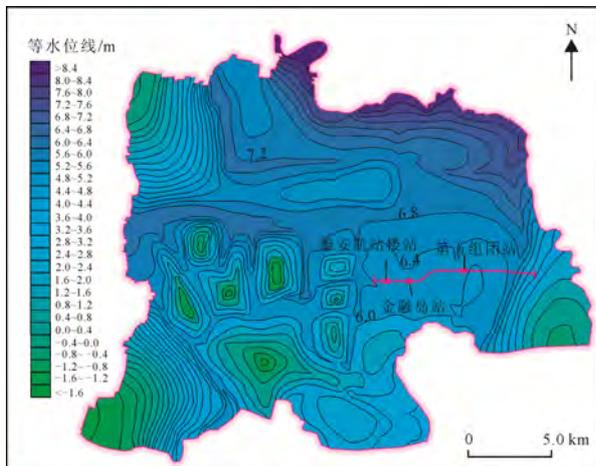


图 11 水系建成后使用期(100 年后)沿线场地地下水流场预测图

Fig. 11 Prediction diagram of the underground water flow field of sites during the service period after completion of rivers system (after 100 years)

3.4 抗浮设防水位确定

对比分析数值模拟最高水位、近 5 年地下水位、勘察期最高水位和类比预测法最高水位汇总结果, 见表 9、表 10。

由表 9 可知, 标段沿线多年动态曲线拟合法的历史(1991—2022 年)最高水位最高, 但 3~5 年的施工期不可能达到历史最高水位, 因此, 建议施工期(2025 年)抗浮设防水位采用数值模拟法预测结果, 其中: 起点—雄安航站楼站沿线抗浮设防水位取 -2.7 m; 雄安航站楼站取 -2.4 m; 雄安航站楼站—金融岛站沿线取 -1.5 m; 金融岛站取 -1.2 m; 金融岛站—第五组团站沿线取 0.9 m, 第五组团站取 1.3 m。

由表 10 可知, 使用期(100 年)内抗浮设防水位标高最高, 因此, 建议使用期(100 年)抗浮设防水位采用数值模拟法预测结果, 其中: 起点—雄安航站楼站沿线取 6.4 m; 雄安航站楼站取 6.3 m; 雄安航站楼站—金融岛站沿线取 6.3 m; 金融岛站

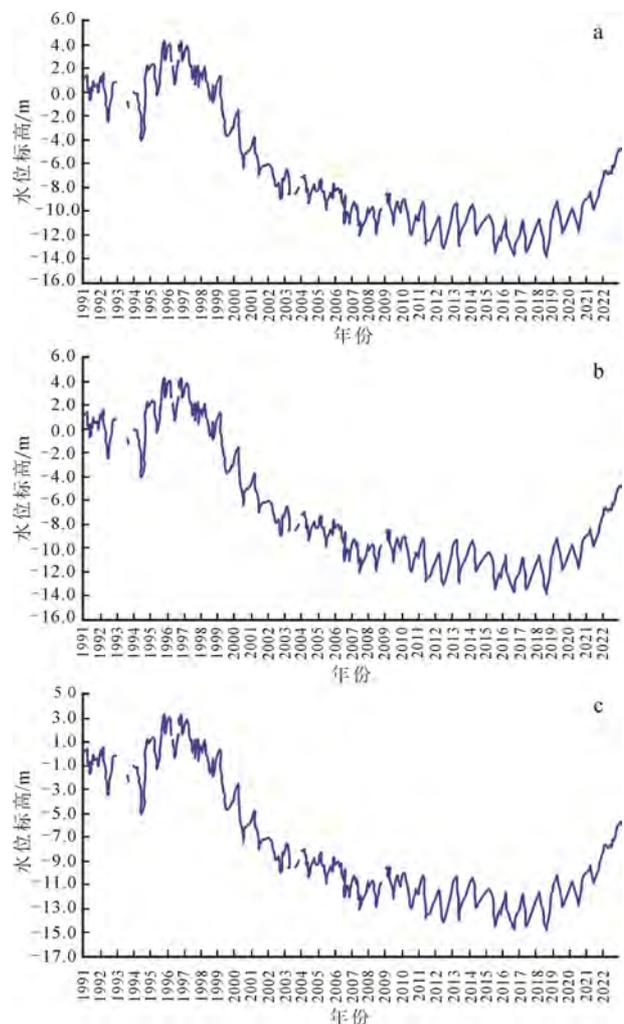


图 12 雄安航站楼站(a)、金融岛站(b)、第五组团站(c)浅层地下水水位动态变化类比曲线

Fig. 12 Analog curve of the dynamic change of shallow groundwater level at Xiongan Terminal Station (a), Jinrongdao Station (b), and Diwuzutuan Station (c)

表 9 施工期标段沿线场地地下水最高水位标高结果汇总表

Table 9 Summary table of the highest groundwater level elevation in the study area during the construction period

场地	里程	地面标高 /m	最高地下水水位高程/m			
			数值模拟法	近 5 年	勘察期	多年动态曲线拟合法
起点—雄安航站楼站	K71+900.000—K72+492.579	6.6~7.2	-2.7	-5.45	-5.45	—
雄安航站楼站	K72+492.579—K72+809.779	7.2	-2.4	-5.45	-5.45	3.8
雄安航站楼站—金融岛站	K72+809.779—K73+868.091	7.2~8.5	-1.5	-5.30	-5.30	—
金融岛站	K73+868.091—K74+133.491	8.0	-1.2	-5.30	-5.30	4.2
	K74+133.491—K74+602.724		-0.8	-5.60	-5.60	—
金融岛站—第五组团站	K74+602.724—K76+979.978	6.2~7.7	-0.5	-5.60	-5.60	—
	K76+979.978—K77+294.635		0.9	-5.60	-5.60	—
第五组团站	K77+294.635—K77+601.035	6.8	1.3	-5.60	-5.60	3.6
	K77+601.035—K77+991.552		1.8	—	—	—
	K77+991.552—K80+046.150		4.5	—	—	—
	K80+046.150—K80+374.553		6.3	—	4.51	—
第五组团站—1 标终点 (含白沟引河)	K80+374.553—K80+627.876	6.8~12.2	6.3	6.93	6.93	—
	K80+627.876—K80+941.732		6.3	—	4.63	—
	K80+941.732—K81+180.804		5.9	—	1.13	—
	K81+180.804—K81+530.271		5.8	—	—	—
	K81+530.271—K81+772.279		5.6	—	—	—

注: 表中“—”表示无数据值。

表 10 使用期标段沿线场地地下水最高水位标高结果汇总表

Table 10 Summary table of the highest groundwater level elevation in the study area during the service period

场地	里程	地面标高 /m	最高地下水水位高程/m			
			数值模拟法	近 5 年	勘察期	多年动态曲线拟合法
起点—雄安航站楼站	K71+900.000—K72+492.579	6.6~7.2	6.4	-5.45	-5.45	—
雄安航站楼站	K72+492.579—K72+809.779	7.2	6.3	-5.45	-5.45	3.8
雄安航站楼站—金融岛站	K72+809.779—K73+868.091	7.2~8.5	6.3	-5.30	-5.30	—
金融岛站	K73+868.091—K74+133.491	8.0	6.2	-5.30	-5.30	4.2
	K74+133.491—K74+602.724		6.3	-5.60	-5.60	—
金融岛站—第五组团站	K74+602.724—K76+979.978	6.2~7.7	6.3	-5.60	-5.60	—
	K76+979.978—K77+294.635		6.3	-5.60	-5.60	—
第五组团站	K77+294.635—K77+601.035	6.8	6.2	-5.60	-5.60	3.6
	K77+601.035—K77+991.552		6.1	—	—	—
	K77+991.552—K80+046.150		6.4	—	—	—
	K80+046.150—K80+374.553		6.5	—	4.51	—
第五组团站—1 标终点 (含白沟引河)	K80+374.553—K80+627.876	6.8~12.2	6.5	6.93	6.93	—
	K80+627.876—K80+941.732		6.5	—	4.63	—
	K80+941.732—K81+180.804		6.0	—	1.13	—
	K81+180.804—K81+530.271		5.8	—	—	—
	K81+530.271—K81+772.279		5.4	—	—	—

注: 表中“—”表示无数据值。

取 6.2 m; 金融岛站—第五组团站沿线取 6.3 m, 第五组团站取 6.2 m。

4 结论

(1)研究区 100 m 深度范围内地下水类型主要以松散岩类孔隙水为主, 沿线构筑物基底主要位于潜水含水层中。补给来源主要为大气降水入渗、河(淀)水入渗、灌溉回归、渠系及渠灌入渗等入渗补给。排泄方式以人工开采为主, 其次是侧向径流和越流排泄以及少量的蒸发。

(2)研究区 1996—2016 年, 地下水位持续较快下降, 浅层地下水位降幅约 15.0 m, 年下降速率约 0.8 m。2017 年设立雄安新区以来, 通过地下水禁(限)采、南水北调和白洋淀生态补水及种植结构调整等措施, 浅层地下水位呈稳定和上升趋势, 年上升幅度在 1~2 m。

(3)标段沿线场地近 5 年和勘察期内最高地下水位标高分别为: K71+900—雄安航站楼站沿线 -5.45 m, 雄安航站楼站—金融岛站沿线 -5.30 m, 金融岛站—第五组团站沿线 -5.60 m, 第五组团站

—K81+772.279 沿线 6.93 m(白沟引河水位)。三车站场地 1991—2020 年历史最高水位分别为: 雄安航站楼站 3.8 m、金融岛站 4.2 m、第五组团站 3.6 m; 白沟引河水位 6.93 m。

(4)施工期(2025 年), 在地下水限采条件下, 标段沿线重要场地抗浮设防水位取值分别为: 雄安航站楼站取-2.4 m; 金融岛站取-1.2 m; 第五组团站取 1.3 m; 使用期(100 年), 在地下水限采+强降雨工况下, 标段沿线重要场地抗浮设防水位取值分别为: 雄安航站楼站取 6.3 m; 金融岛站取 6.2 m; 第五组团站取 6.2 m。

(5)当基底水压力大于建筑结构荷载时, 应采取有效的抗浮设防措施。施工时, 应做好填土压实, 扩大散水及路面硬化工作, 基坑肥槽回填应采用弱渗水材料, 防止大气降水或地表水直接入渗或上、下层地下水水力联系加强, 造成建筑基底局部水压力增大, 对结构的抗浮稳定性产生不利影响。

Acknowledgements:

This study was supported by China Geological Survey (Nos. DD20211292, DD20221727, and DD20230438).

参考文献:

- 蔡国成, 陶灵法, 吴炳华, 2015. 宁波平原地区地下建筑抗浮设防水位的探讨[J]. 科技通报, 31(7): 45-48.
- 曹洪, 潘泓, 骆冠勇, 2016. 地下结构截排减压抗浮概念及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 35(12): 2542-2548.
- 代锋刚, 张发旺, 王滨, 等, 2017. 含水层结构变异对区域地下水循环影响数值模拟[J]. 地球学报, 38(S1): 64-68.
- 郭小铭, 2018. 数值模拟在区域地下水抗浮水位设计中的应用[J]. 地下水, 40(2): 8-10.
- 韩博, 夏雨波, 马震, 等, 2023. 雄安新区工程地质层组划分、三维地质结构构建及其在城市规划建设中的应用[J]. 中国地质, 50(6): 1903-1918.
- 韩博, 夏雨波, 裴艳东, 等, 2020. 雄安新区地下空间工程地质特征及环境地质效应[J]. 工程勘察, 48(3): 1-8.
- 何翠香, 2010. 如何确定北京地铁工程的抗浮设防水位[J]. 工程勘察, (S1): 747-751.
- 胡政, 陈再谦, 2018. 基于长观水位及历史降雨量的建筑抗浮水位取值研究[J]. 中国岩溶, 37(2): 246-253.
- 兰坚强, 2008. 地下水的抗浮设防水位取值及工程实例[J]. 工程勘察, (3): 36-39, 52.
- 李海涛, 凤蔚, 王凯霖, 等, 2021. 雄安新区地下水资源概况、特征及可开采潜力[J]. 中国地质, 48(4): 1112-1126.
- 李会锋, 2023. 基于数值模拟技术预测某场地抗浮设防水位的研究[J]. 河北水利电力学院学报, 33(1): 44-49.
- 李永彪, 吴耀武, 曹广勇, 等, 2019. 合肥地铁 2 号线抗浮设防水位的取值研究[J]. 赤峰学院学报(自然科学版), 35(5): 99-101.
- 刘国亮, 杨志武, 孙国春, 2009. 浅析天津市市区地下水抗浮设防水位确定方法[J]. 地下水, 31(2): 102-104.
- 刘军, 2017. GMS 软件技术在某市地下轨道交通工程抗浮设防水位确定中的应用[J]. 地下水, 39(3): 22-23, 32.
- 罗益斌, 陈继彬, 王媛媛, 等, 2022. 膨胀土地区地下结构抗浮失效机理及主动抗浮措施应用[J]. 水文地质工程地质, 49(6): 64-73.
- 马震, 黄庆彬, 林良俊, 等, 2022. 雄安新区多要素城市地质调

- 查实践与应用[J]. 华北地质, 45(1): 58-68.
- 马震, 夏雨波, 李海涛, 等, 2021. 雄安新区自然资源与环境-生态地质条件分析[J]. 中国地质, 48(3): 677-696.
- 马震, 夏雨波, 王小丹, 等, 2019. 雄安新区工程地质勘查数据集成与三维地质结构模型构建[J]. 中国地质, 46(S2): 123-138.
- 彭柏兴, 2013. 长沙地区水文地质特征与抗浮设防水位的确定[J]. 城市勘测, 28(1): 161-166.
- 孙超, 王昕洲, 叶莹莹, 等, 2022. 河北省地下水资源承载能力评价及预警方法研究[J]. 水文地质工程地质, 49(6): 55-63.
- 王宇博, 徐永亮, 周玉凤, 等, 2019. 基于 GMS 模型的保利未来城抗浮设防水位研究[J]. 河北地质大学学报, 42(5): 56-62.
- 温伟光, 路清, 刘晓磊, 等, 2021. Mann-Kendall 趋势分析在抗浮设防水位确定中的应用[J]. 勘察科学技术, (2): 37-41.
- 夏雨波, 郭旭, 王冰, 等, 2022. 雄安新区水土腐蚀性地质成因研究[J]. 华北地质, 45(3): 69-76.
- 许兆鹏, 吴剑锋, 唐沛, 等, 2019. 区域地铁抗浮设防水位设计技术体系与应用研究[J]. 工程勘察, 47(7): 29-35.
- 游庆, 陆有忠, 2019. 地下室抗浮设防水位标高取值的讨论以及抗浮措施[J]. 地质与勘探, 55(5): 1314-1321.
- 袁柱, 刘大伟, 姚金, 等, 2021a. 雄安新区至北京大兴国际机场快线项目金融岛站岩土工程勘察报告[R]. 雄安: 广州地铁设计研究院股份有限公司.
- 袁柱, 刘大伟, 姚金, 等, 2021b. 雄安新区至北京大兴国际机场快线项目第五组团站岩土工程勘察报告[R]. 雄安: 河北雄安轨道交通快线有限责任公司.
- 张欣海, 2004. 深圳地区地下建筑抗浮设计水位取值与浮力折减分析[J]. 勘察科学技术, (2): 12-15, 20.
- 赵银鑫, 宋琨, 吉卫波, 等, 2023. 银川城市地下空间开发的地质安全风险[J]. 地球学报, 45(1): 91-98.
- 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2009. 岩土工程勘察规范(GB 50021-2001)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社: 89-91.
- 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2011. 建筑地基基础设计规范(GB 50007-2011)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社: 15-17.
- 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2017. 高层建筑岩土工程勘察标准(JGJ/T 72-2017)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社: 20-24.
- 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2019. 建筑工程抗浮技术标准(JGJ 476-2019)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社: 21-25.

References:

- CAI Guocheng, TAO Lingfa, WU Binghua, 2015. Discussion About Anti Up-floating Groundwater Level of The Underground Buildings in Ningbo Plain Area[J]. Bulletin of Science and Technology, 31(7): 45-48(in Chinese with English abstract).
- CAO Hong, PAN Hong, LUO Guanyong, 2016. A new anti-floating method by drainage: concept and application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 35(12): 2542-2548(in Chinese with English abstract).
- DAI Fenggang, ZHANG Fawang, WANG Bin, et al., 2017. Numerical Simulation of Structural Variation of Aquifer Effect on Regional Groundwater Circulation[J]. Acta Geoscientia Sinica, 38(S1): 64-68(in Chinese with English abstract).
- GUO Xiaoming, 2018. Application of numerical simulation in design of regional water level for prevention of up-floating[J]. Ground Water, 40(2): 8-10(in Chinese with English abstract).
- HAN Bo, XIA Yubo, MA Zhen, et al., 2023. Division of engineering geological strata, building of 3D geological structure and its application in urban planning and construction in Xiongan New Area[J]. Geology in China, 50(6): 1903-1918(in Chinese with English abstract).
- HAN Bo, XIA Yubo, PEI Yandong, et al., 2020. Engineering geological characteristic and environmental geological effect of underground space in Xiongan New Area[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 48(3): 1-8(in Chinese with English

abstract).

- HE Cuixiang, 2010. How to determine the anti-floating water level of Beijing subway project[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, (S1): 747-751(in Chinese with English abstract).
- Hebei Xiongan Rail Express Co., Ltd., 2021. Geotechnical investigation report of Financial Island Station of Xiongan New Area to Beijing Daxing International Airport Express Line project[R]. Xiongan: Hebei Xiongan Rail Express Co., Ltd.(in Chinese).
- Hebei Xiongan Rail Express Co., Ltd., 2021. Geotechnical investigation report of the Fifth Group Station of Xiongan New Area to Beijing Daxing International Airport Express Line project[R]. Xiongan: Hebei Xiongan Rail Express Co., Ltd.(in Chinese).
- HU Zheng, CHEN Zaiqian, 2018. Research on the water level of anti-floating of building structure based on long-term boreholes and rainfall observations[J]. *Carsologica Sinica*, 37(2): 246-253(in Chinese with English abstract).
- LAN Jianqiang, 2008. Value of anti-floating waterproof level of groundwater and engineering example[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, (3): 36-39, 52(in Chinese with English abstract).
- LI Haitao, FENG Wei, WANG Kailin, et al., 2021. Groundwater resources in Xiong'an New Area and its exploitation potential[J]. *Geology in China*, 48(4): 1112-1126(in Chinese with English abstract).
- LI Huifeng, 2023. Study on prediction of anti floating water level of a site based on numerical simulation technology[J]. *Journal of Hebei University of Water Resources and Electric Engineering*, 33(1): 44-49(in Chinese with English abstract).
- LI Yongbiao, WU Yaowu, CAO Guangyong, et al., 2019. Study on the value of anti-floating water level for Hefei Metro Line 2[J]. *Journal of Chifeng University(Natural Science Edition)*, 35(5): 99-101(in Chinese).
- LIU Guoliang, YANG Zhiwu, SUN Guochun, 2009. Brief analysis on determination method of anti-floating waterproof level of groundwater in Tianjin urban area[J]. *Ground Water*, 31(2): 102-104(in Chinese).
- LIU Jun, 2017. Application of GMS software in the determination of anti floating water level of underground rail transit project[J]. *Ground Water*, 39(3): 22-23, 32(in Chinese with English abstract).
- LUO Yibin, CHEN Jibin, WANG Yuanyuan, et al., 2022. Anti-floating failure mechanism of underground structures in expansive soil area and application of active anti-floating measures[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 49(6): 64-73(in Chinese with English abstract).
- MA Zhen, HUANG Qingbin, LIN Lianjun, et al., 2022. Practice and application of multi-factor urban geological survey in Xiongan New Area[J]. *North China Geology*, 45(1): 58-68(in Chinese with English abstract).
- MA Zhen, XIA Yubo, LI Haitao, et al., 2021. Analysis of natural resources and environment eco-geological conditions in the Xiong'an New Area[J]. *Geology in China*, 48(3): 677-696(in Chinese with English abstract).
- MA Zhen, XIA Yubo, WANG Xiaodan, et al., 2019. Integration of engineering geological investigation data and construction of a 3D geological structure model in the Xiong'an New Area[J]. *Geology in China*, 46(S2): 123-138(in Chinese with English abstract and in English).
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of The People'S Republic of China, 2017. Standard for geotechnical investigation of tall buildings (JGJ/T 72-2017)[S]. Beijing: China Architecture and Construction Press: 20-24(in Chinese).
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of The People'S Republic of China, 2011. Code for design of building foundation (GB 50007-2011)[S]. Beijing: China Architecture and Construction Press: 15-17(in Chinese).
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, 2009. Code for investigation of geotechnical engineering (GB 50021-2001)[S]. Beijing: China Architecture and Construction Press: 89-91(in Chinese).
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of CHINA, 2019. Technical standard for building engineering against uplift (JGJ 476-2019)[S]. Beijing: China Architecture and Construction Press: 21-25(in Chinese).
- PENG Boxing, 2013. Discussion on the characters of groundwater and water level for prevention of up-floating in Changsha area[J]. *Urban Geotechnical Investigation & Surveying*, 28(1): 161-166(in Chinese with English abstract).
- SUN Chao, WANG Xinzhou, YE Yingying, et al., 2022. Research on evaluation and early warning of groundwater resources carrying capacity in Hebei Province[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 49(6): 55-63(in Chinese with English abstract).
- WANG Yubo, XU Yongliang, ZHOU Yufeng, et al., 2019. Research on water level for prevention of up-floating of Poly Future City base on GMS model[J]. *Journal of Hebei GEO University*, 42(5): 56-62(in Chinese with English abstract).
- WEN Weiguang, LU Qing, LIU Xiaolei, et al., 2021. Application of Mann-Kendall trend analysis in groundwater level for prevention of up-floating[J]. *Site Investigation Science and Technology*, (2): 37-41(in Chinese with English abstract).
- XIA Yubo, GUO Xu, WANG Bing, et al., 2022. Study on the geological origin of groundwater and soil corrosivity in Xiong'an New Area[J]. *North China Geology*, 45(3): 69-76(in Chinese with English abstract).
- XU Zhaopeng, WU Jianfeng, TANG Pei, et al., 2019. Construction and application of the technical system of regional groundwater level for the anti-floating design of subway[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 47(7): 29-35(in Chinese with English abstract).
- YANG Q C, LIANG J, YANG Z P, 2012. Numerical modeling of groundwater flow in Daxing(Beijing), China[J]. *Energy Procedia*, 14: 1671-1676.
- YOU Qing, LU Youzhong, 2019. Discussion on the value of basement's anti-floating water level elevation and the anti-floating measures[J]. *Geology and Exploration*, 55(5): 1314-1321(in Chinese with English abstract).
- YUAN Zhu, LIU Dawei, YAO Jin, et al., 2021a. Geotechnical investigation report of Financial Island Station of Xiongan New Area to Beijing Daxing International Airport Express Line Project[R]. Xiongan: Guangzhou Subway Design & Research Institute Co., LTD.(in Chinese).
- YUAN Zhu, LIU Dawei, YAO Jin, et al., 2021b. Geotechnical investigation Report of the Fifth Group Station of Xiongan New Area to Beijing Daxing International Airport Express Project[R]. Xiongan: Hebei Xiongan Rail Transition Co., LTD.(in Chinese).
- ZHANG Xinhai, 2004. Analysis of defence water level and reduction factor of buoyancy for underground buildings in Shenzhen area[J]. *Site Investigation Science and Technology*, (2): 12-15, 20(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Yinxin, SONG Kun, JI Weibo, et al., 2023. Geological Safety and Risk Analysis of Yinchuan Urban Underground Space Development[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 45(1): 91-98(in Chinese with English abstract).