

雄安新区浅层地下水位上升诱发的潜在地质安全风险识别与评估¹

韩博^{1,2,3}, 马震^{1,2,3}, 刘宏伟^{1,2,3}, 郭旭^{1,2,3*}, 高伊航^{1,2,3}, 白耀楠^{1,2,3}

郭云涛⁴, 苗晋杰^{1,2,3}, 李状^{1,2,3}

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. 中国地质大学（北京）工程技术学院，北京 100083

摘 要：为应对雄安新区浅层地下水位上升诱发的地质安全隐患，保障新区高标准建设与长期稳定运行，基于地质调查与地下水位长期监测数据，采用层次分析法（AHP）与加权平均综合指数法，耦合 GIS 空间分析技术，系统识别浅层地下水位上升诱发的各类潜在地质安全风险，构建涵盖地形地貌、地下水位、岩土体性质、地质环境与人类工程活动等多层次多维度评估指标体系，开展地质安全风险量化评估与分区。研究表明，1）研究区浅层地下水位上升诱发的潜在地质安全风险主要有土体软化与地基承载力下降、砂土液化、结构上浮与渗漏、基坑突涌、地面回弹与地裂缝活化等；2）风险呈“规划建设区内部高、规划建设区外围低”的空间分布特征，高风险区占总面积的 0.69%，较高风险区占 5.21%，中风险区占 19.76%，低风险区占 74.34%；3）不同风险等级区域的主控因素差异显著，高风险区主要受地下水位埋深、地面高程和人类工程活动影响，较高-中风险区主要受地下水位埋深、地下水位上升速率、岩土体性质及人类工程活动共同控制，低风险区受地下水位影响较弱。该研究成果为雄安新区高标准高质量建设、地质安全防控及地下空间科学开发提供了重要技术支撑。

关键词：雄安新区；浅层地下水位上升；地质安全风险；风险识别；风险评估

中图分类号：P642

收稿日期：2026-3-18

Identification and Assessment of Geological Safety Risks Induced by Shallow Groundwater Level Rise in Xiong'an New Area

Han Bo^{1,2,3}, Ma Zhen^{1,2,3}, Liu Hongwei^{1,2,3}, Guo Xu^{1,2,3*}, Gao Yihang^{1,2,3}, Bai Yaonan^{1,2,3}

Guo Yuntao⁴, Miao Jinjie^{1,2,3}, Li Zhuang^{1,2,3}

1. Tianjin Center, China Geological Survey (North China Center of Geoscience Innovation), Tianjin 300170, China;
2. Xiong'an Urban Geological Research Center, China Geological Survey, Tianjin 300170, China;
3. Tianjin Key Laboratory of Coast Geological Processes and Environmental Safety, Tianjin 300170, China;
4. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

Abstract: To address the geological safety hazards induced by the rising shallow groundwater level in the Xiong'an

¹**基金项目：**中国地质调查局地质调查项目“京津冀协同发展区国土空间规划实施监测评价（No.DD202607203002）”和国家科技计划雄安科技创新专项项目（No.2024XAGG0019）”

作者简介：韩博（1984—），男，高级工程师，博士，主要从事水工环、城市地质与国土空间综合研究等工作。E-mail: hanbo1984@126.com, ORCID: 0000-0003-2318-7632.

***通讯作者：**郭旭（1983—），正高级工程师，主要从事水工环地质调查与科学研究工作。E-mail: liuhenry022@163.com

引用格式：韩博，马震，刘宏伟，郭旭，高伊航，白耀楠，郭云涛，苗晋杰，李状，2026. 雄安新区地下水位上升诱发的地质安全风险识别与评估. 地球科学, XX (XX): XXXX—XXXX.

Citation: Han Bo, Ma Zhen, Liu Hongwei, Guo Xu, Gao Yihang, Bai Yaonan, Guo Yuntao, Miao Jinjie, Li Zhuang, 2026. Identification and Assessment of Geological Safety Risks Caused by Groundwater Level Rise in Xiong'an New Area. *Earth Science*, XX (XX): XXXX—XXXX.

New Area and ensure the high-standard construction and long-term stable operation of the new area, this study systematically identifies various potential geological safety risks caused by the rise of shallow groundwater level based on geological survey data and long-term monitoring data of groundwater level. The Analytic Hierarchy Process (AHP) and weighted average comprehensive index method are adopted, coupled with GIS spatial analysis technology. A multi-level and multi-dimensional evaluation index system covering topography and geomorphology, groundwater level, geotechnical properties, geological environment and human engineering activities is constructed, and quantitative assessment and zoning of geological safety risks are carried out. The results show that: (1) The potential geological safety risks induced by the rising shallow groundwater level in the study area mainly include soil softening and reduction of foundation bearing capacity, sand liquefaction, structural uplift and seepage, gushing in foundation pits, ground rebound and ground fissure reactivation; (2) The risks present a spatial distribution characteristic of “high risk in Baiyangdian Lake area and its surrounding regions, relatively high to medium risk in the ‘one main and five auxiliary’ construction areas, and low risk in peripheral farmland and ecological protection areas”. The high-risk area accounts for 0.69% of the total area, the relatively high-risk area 5.21%, the medium-risk area 19.76%, and the low-risk area 74.34%; (3) The dominant controlling factors vary significantly in regions with different risk levels. The high-risk areas are mainly affected by groundwater depth, ground elevation and human engineering activities; the relatively high to medium-risk areas are jointly controlled by groundwater depth, rising rate of groundwater level, geotechnical properties and human engineering activities; while the low-risk areas are weakly affected by groundwater level and human engineering activities. The research results provide important technical support for the high-standard and high-quality construction, geological safety prevention and control, and scientific development of underground space in the Xiong'an New Area.

Key words: Xiong'an New Area; shallow groundwater level rise; geological safety risk; risk identification; risk assessment

0 引言

雄安新区作为国家级新区与未来城市发展模板,区域地下水环境的稳定与地质安全是其高质量建设、长期安全运营的核心前提与重要支撑。雄安新区所在的白洋淀流域平原因长期地下水超采,历史上形成了大范围的地下水位降落漏斗、地面沉降、地裂缝等地质环境问题(马震等, 2021), 而随着南水北调中线工程通水、地下水禁限采与生态补水等一系列治理措施的落地,区域地下水位已呈现止跌回升的趋势(李海涛等, 2021; Han *et al.*, 2024), 地下水动力场的显著改变打破了原有地质环境的平衡状态,极易诱发新的地质灾害与工程安全风险(Al-Sefry and Sen, 2006; 徐光黎等, 2014; Bob *et al.*, 2016; 汪凡茗, 2022; 赵亮等, 2025; 宋昀等, 2025)。因此,系统识别雄安新区地下水位上升诱发的潜在地质安全风险类型,构建科学合理的风险评估指标体系,评估风险空间分布,提出针对性的防控对策,对于保障雄安新区高标准高质量建设、地质安全防控及地下空间科学开发具有重要的理论价值与实践意义。

受气候变化与人类工程活动等多重因素影响,地下水位上升引发的地质与工程灾害在全球范围内较为普遍。国外学者多聚焦海平面上升导致滨海城市地下水位上升对地下结构、基础设施以及环境的影响研究(Ray, 2005; Chaudhary, 2012; Gattinoni, 2017; Ramesh *et al.*, 2018; Pierre-Louis, 2022; Hamlat *et al.*, 2025), 发现海平面上升 0.5m 将影响城市 65% 的区域,海平面上升导致城市地下水位上升,会引发基础设施腐蚀、地下结构淹没等灾害),地下水位每上升 1m,地基土压缩模量降低 10%~15%,承载力显著下降(Bhatnagar *et al.*, 2024; Kurylyk

et al., 2025; Koah Na Lebogo *et al.*, 2025; Soboh *et al.*, 2026)。而国内学者围绕地下水位回升引起的地质环境效应开展了大量研究（屠洪权和周健，1994；丘宏，2002；梁昌俊，2005；高广运等，2011；罗富荣等，2011；张鑫等，2012），特别是 2015 年以来，北京、河北、郑州等区域地下水位普遍持续回升，对地基承载力、砂土液化、地面回弹以及基础设施安全等相关研究进入全面深化期（Lu *et al.*, 2020；白俊峰等，2024；马宏等，2025；丁启振等，2025）。南水北调补水与生态补水是华北平原地下水位上升的主要驱动因素（田苗壮等，2023），地下水位上升会降低土体强度和地基承载力、引起砂土液化、结构上浮与渗漏、基坑突涌、地面不均匀回弹和地裂缝活化（Yao *et al.*, 2021；吴向峰，2023；Li H. Z. *et al.*, 2025；李原等，2023；赵亮等，2025）等病害。这些直接因地下水位上升产生的问题对城市基础设施安全与韧性城市形成严峻挑战。

现有国内外研究为地下水位上升的地质灾害效应分析提供了理论方法与技术支撑，但研究对象多聚焦于沿海城市、特殊地质单元，针对华北平原冲洪积平原区大规模地下水恢复背景下的地质安全风险研究相对不足。有关雄安新区的工程地质学研究多聚焦于地下水动态特征、地下空间开发地质适宜性、地热开发诱发的断层滑动风险、单一地面沉降问题研究等领域（李海涛等，2021；马震等，2021；韩博等，2024；刘宏伟等，2024；张曦等，2025），对特殊水文地质条件、城市发展规划的专项地质安全风险量化研究较为匮乏，特别是对新水情下地下水位上升诱发的地质安全风险类型划分、空间分布规律、多因素耦合安全防控尚未形成系统认知，难以满足新区高标准建设与安全防控的实际需求。基于此，本文立足雄安新区战略定位与地质环境特征，结合最新监测数据，系统开展地下水位上升诱发地质安全风险识别与评估研究，填补区域研究空白，为新区地质安全防控与城市高质量发展提供科学依据。

本文的研究内容和研究思路如下：首先，梳理雄安新区地质环境与地下水位上升特征，明确水位上升的主控因素；其次，基于地质环境条件与水位上升的耦合效应，全面识别诱发的各类地质安全风险；再次，构建科学合理的评估指标体系，采用层次分析法（AHP）与加权平均综合指数法，耦合 GIS 空间分析技术，开展风险量化评估与空间分区；最后，结合评估结果，提出针对性的风险防控措施与建议，为新区城市建设与地质安全管理提供支撑。

1 研究区概况

1.1 区域地质环境背景

研究区位于河北省中部，涵盖雄县、容城县、安新县三县行政区及周边部分区域，规划总面积约 1770km²。规划建设区包括“一主五辅”，“一主”即起步区，“五辅”即容城组团、雄县组团、安新组团、昝岗组团和寨里组团。研究区地势总体开阔平坦，自西北向东南微倾斜，海拔高程在 5~26m 之间（图 1a）。100m 范围内地层岩性主要为粉砂、细砂、中砂、粉土、粉质黏土、黏土以及少量淤泥质土，整体地层工程性质良好，地基土承载力特征值一般在 110~350 kPa 之间（韩博等，2023）。地下水类型主要为第四系松散孔隙水，分为四个含水层组，一般将第Ⅰ和第Ⅱ含水层组中的潜水和微承压水称为浅层地下水（图 1b），第Ⅲ和第Ⅳ含水层组中的承压水称为深层地下水（李海涛等，2021）。浅层地下水含水层组主要由全新统、上更新统和中更新统粉砂、细砂组成，层位埋深 0.0~200.0m，深层地下水含水层组主要为下更新统细砂、粗砂，层位埋深 200~500m。由于目前研究区浅层地下水位上升较快，而深层地下水含水层组埋深较深，本文仅分析浅层地下水位的变化特征，并对其上升诱发的潜在地质安全风险进行识别与评估。

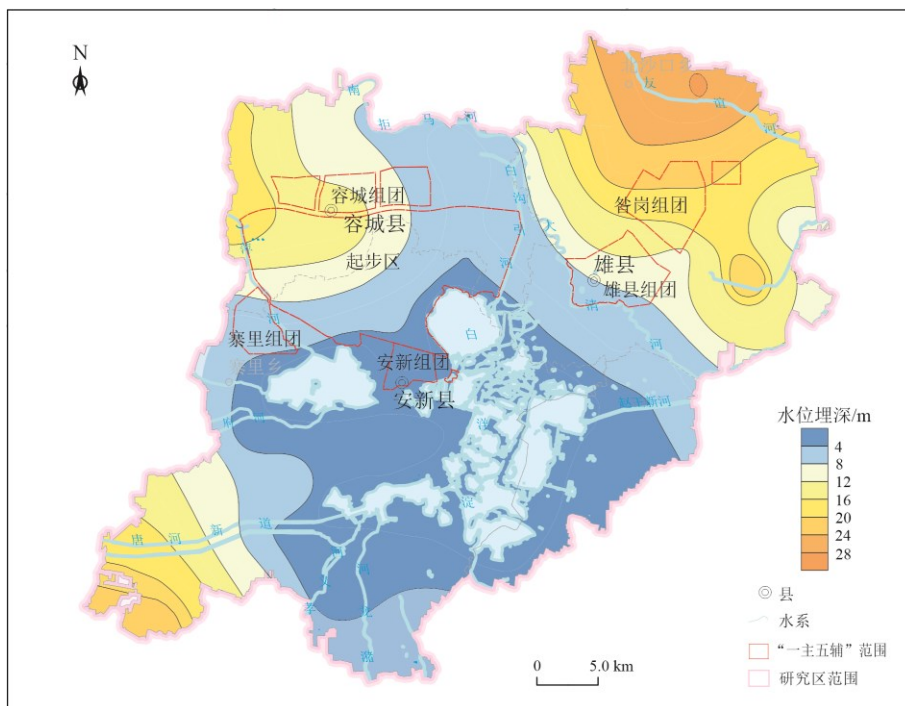


图2 研究区2024年6月浅层地下水位埋深空间分布图

Fig.2 Spatial distribution map of shallow groundwater level depth in the study area, June 2024

1.2.2 浅层地下水位时间演化特征

基于1991~2024年浅层地下水长期监测数据，研究区浅层地下水位变化可分为三个阶段（图3）：（1）1991~2017年，地下水位持续下降阶段，受长期人工过量开采影响，地下水水位降幅约15m，年下降速率约0.80m/a；（2）2018~2020年，地下水位止跌回升阶段，随着地下水禁采限采政策的实施，地下水平均埋深累计上升1.8~3.2m，年均上升速率0.45~0.8m/a，回升速率相对平缓；（3）2021~2024年，地下水位快速回升阶段，地下水平均埋深累计上升2.5~4.5m，年均上升速率0.85~1.50m/a（图4，图5）。这一阶段水位快速上升主要得益于南水北调中线工程补水与白洋淀生态补水的持续实施，年均补水量分别达 $3.2 \times 10^8 \text{m}^3$ 与 $2.8 \times 10^8 \text{m}^3$ ，有效补给了地下水系统（郭晓帅，2025），地下水位的快速回升已成为诱发区域地质安全风险的核心驱动因素。

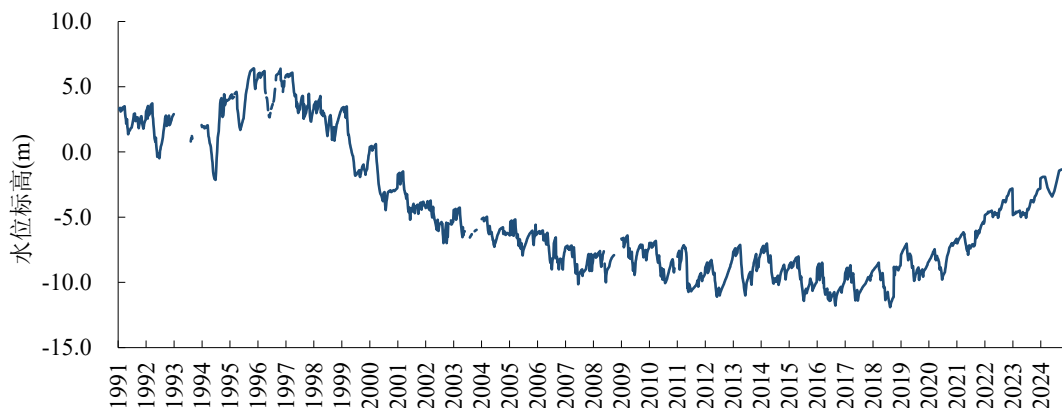


图3 容城县谷庄村监测井（监测深度：3-128m）1991~2024年浅层地下水位时间动态变化曲线

Fig.3 Temporal dynamic variation curve of shallow groundwater level from 1991 to 2024 at the Guzhuang Village monitoring well (monitoring depth: 3-128 m) in Rongcheng County

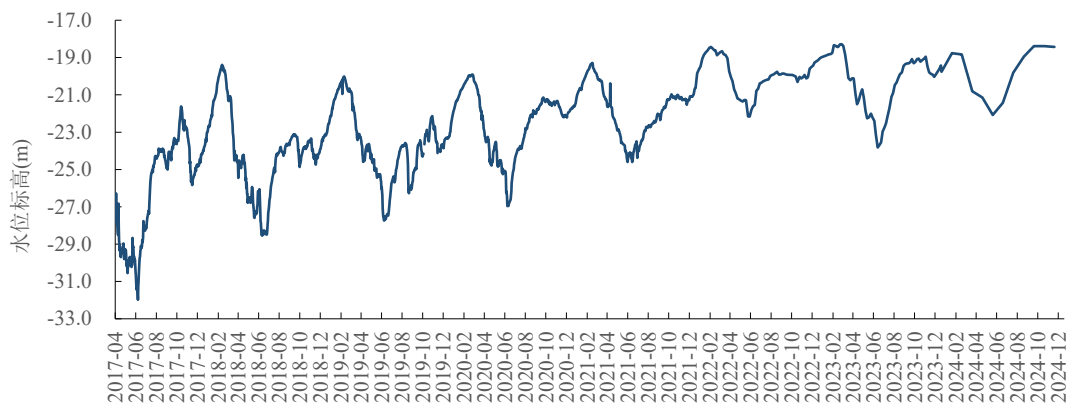


图4 雄县管岗镇高莘庄监测井（监测深度：56-85m）2017-2024年浅层地下水位时间动态变化曲线
Fig.4 Temporal dynamic variation curve of shallow groundwater level from 2017 to 2024 at the Gaoxinzhuang monitoring well (monitoring depth: 56–85 m) in Zhangang Town, Xiongxian County

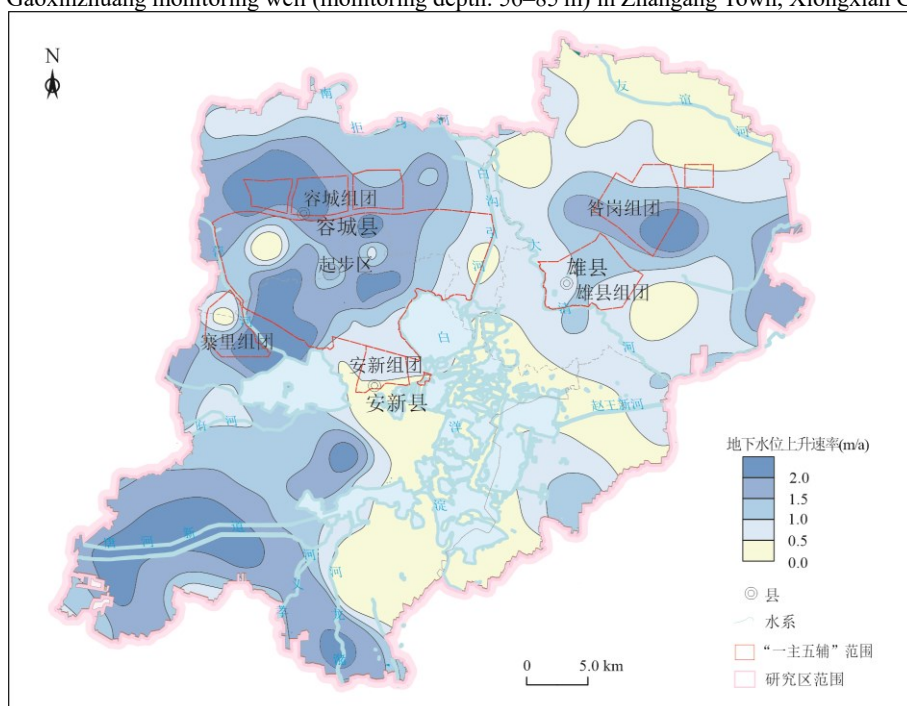


图5 研究区2022~2024年浅层地下水位上升速率分布图

Fig.5 Distribution map of shallow groundwater level rising rate in the study area from 2022 to 2024

1.2.3 浅层地下水位上升主控因素

研究区区域地下水位回升是自然因素与人为因素共同作用的结果,其中人为因素为主要驱动因子: 1) 生态补水补给,“十四五”期间,研究区统筹再生水、水库水、引黄水、引江水等多种水源,累计向白洋淀及周边河湖补水超 $30 \times 10^8 \text{m}^3$,大量生态补水通过渗漏补给浅层地下水,对地下水位回升的贡献率达 37%; 2) 地下水超采治理,新区全面推进地下水超采综合治理,实施水源置换、关井压采等措施,累计关停地下水超采井 1200 余眼,地下水开采量较 2017 年减少 42%,开采量减少对水位回升的贡献率达 33%; 3) 降水补给,2019—2025 年区域年均降水量较 2000—2018 年平均值增加 18%,降水入渗补给量显著增加,对地下水位回升的贡献率达 25%; 4) 灌溉回归水,研究区农业灌溉实施限采措施,农业灌溉年均回归水量 $0.8 \times 10^8 \text{m}^3$,补充浅层地下水,灌溉回归水对水位回升的贡献率约 5%。

表 2 雄安新区土体压缩模量平面分布特征（刘宏伟等，2024）
Table 2 Partition of soils compression modulus in Xiong'an New Area

深度/m	特征			
	$E \leq 4$	$4 < E \leq 11$	$11 < E \leq 15$	$E > 15$
0~5	南张镇西北局部地区	寨里乡南—安州镇西北—老河头镇北一带	雄安新区其他地区	贾光乡西部分地区、安新县城北局部地区
5~10		南张镇西北局部地区	雄安新区其他地区	端村镇北局部地区、大营镇西南
10~15			雄安新区其他地区	安州镇东部分地区、安新县城东北局部地区、南张镇东等局部地区
15~30		小里镇西及西南局部地区	雄安新区其他地区	端村镇西部分地区
30~50		双堂乡南—昝岗镇—朱各庄镇北—雄县县城西—龙湾镇南—苟各庄镇北—一线以东、南张镇西北、小里镇西南局部地区	雄安新区其他地区	
50~100		双堂乡南—昝岗镇—朱各庄镇西—雄县县城西—张北口镇北—圈头乡—七间房乡南—一线以东、南张镇东等局部地区	雄安新区其他地区	同口镇西南部分地区、八于乡南局部地区

2.2.2 砂土液化风险

研究区第四系松散堆积物中广泛分布着粉砂、细砂层，特别是“一主五辅”建设区 50m 深度内地层分布 3 层较稳定的含水砂层，分别为第⑧层、第⑩层和第⑬层工程地质层（图 7），此类砂土孔隙比大，地下水位上升会使砂土处于饱和状态，若遭遇地震、基坑开挖等扰动，饱和砂土颗粒间的有效应力会急剧减小，甚至趋于零，砂土失去抗剪强度，发生液化现象，即砂土液化风险（图 8）。研究区地处地震烈度Ⅶ度区，历史上曾发生过中小规模地震，且随着新区建设进程加快，基坑开挖、轨道交通建设等人类工程活动日益频繁，进一步增加了砂土液化的诱发概率。

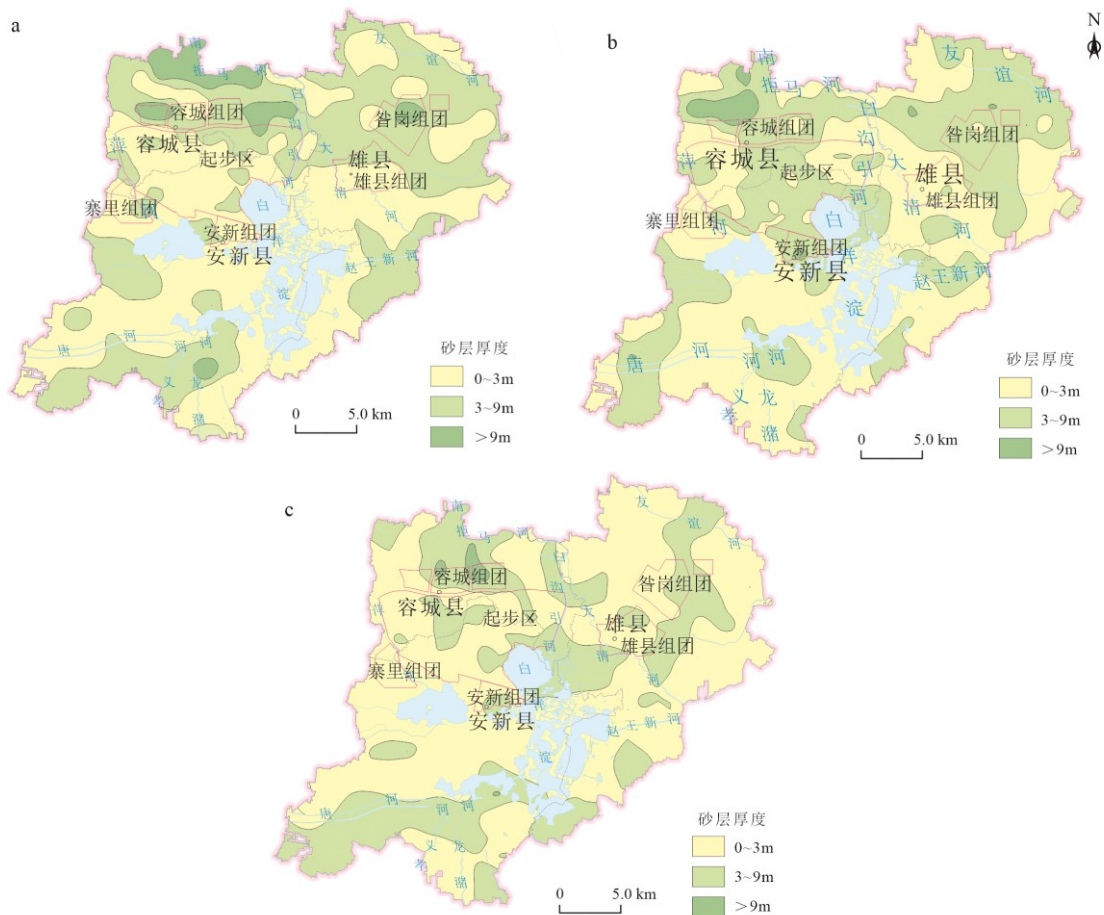


图7 研究区含水砂层厚度分区图

Fig. 7 Thickness zoning map of water-bearing sand layer

a—第⑧工程地质层；b—第⑩工程地质层；c—第⑬工程地质层

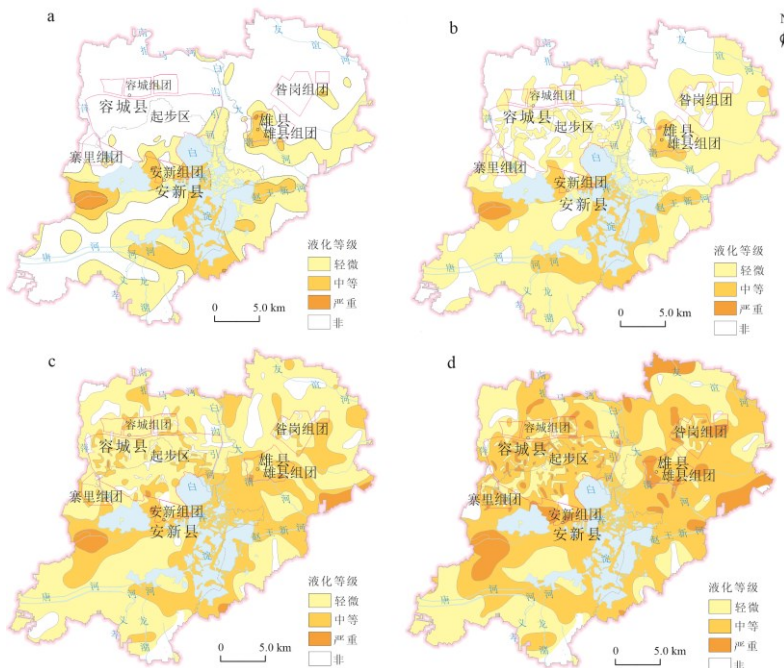


图8 研究区不同水位条件下砂土液化分布图

Fig.8 Sand liquefaction distribution under different water level conditions in the study area

a—2017 年现状水位埋深；b—10m 水位埋深；c—5m 水位埋深；d—2m 水位埋深

2.2.3 地下结构上浮与渗漏风险

地下水位上升使地下构筑物周围土体压力增大,同时构筑物受到的浮力显著增加,当浮力超过构筑物自重及抗浮措施承载力时,会导致构筑物上浮、变形。此外,地下水位上升导致地下水渗透压力增大,易引发地下结构出现渗漏现象,长期渗漏会腐蚀构筑物主体结构,降低构筑物使用寿命,甚至引发结构损坏。研究区浅层地下水位标高一般为 $-10.0\sim 1.0\text{m}$,近五年总体维持在 $-5.0\sim -10.0\text{m}$,埋深一般为 $3.0\sim 15.0\text{m}$,地下水位每上升 1m ,单位面积浮力增加 9.8kN/m^2 。特别是在起步区东部、容城组团、安新组团、寨里组团等区域,这种水位状态导致地下结构长期承受较大浮力和渗透压力,地下结构上浮与渗漏风险持续存在。

2.2.4 基坑突涌风险

基坑突涌是研究区地下水位上升诱发的主要施工期潜在地质安全风险。地下水位上升使基坑周边地下水头压力增大,当基坑支护结构强度不足、止水帷幕存在缺陷,或基坑开挖深度超过地下水位埋深时,地下水会冲破支护结构或通过岩土体孔隙、裂隙涌入基坑,形成涌水涌砂灾害。根据雄安新区规划(图9),研究区地下空间开发规模大,起步区、容东片区等重点区域基坑开挖深度普遍超过 10m ,而 50m 以浅地层中分布有3层较稳定的含水砂层(图7),顶板埋深分别为 $18.26\sim 37.2\text{m}$ 、 $29.4\sim 53.1\text{m}$ 和 $51.6\sim 71.9\text{m}$,为基坑突涌的发生提供了水文地质条件。地下水位每上升 1m ,地下水头压力增加 10kN/m^2 ,基坑突涌风险相应增加。

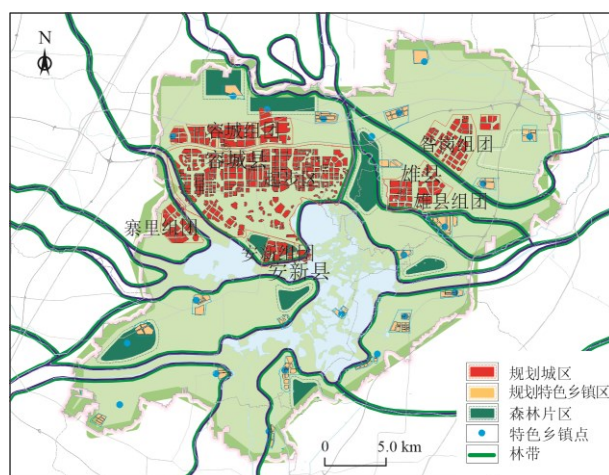


图9 研究区规划图

Fig. 9 Planning map of the study area

2.2.5 地面回弹与地裂缝活化风险

地面沉降是雄安新区历史上最突出的地质环境问题,主要由地下水过量开采导致松散土层压缩变形引发,而地下水位的显著回升会使原来处于压缩状态的松散土层发生弹性回弹,形成地面回弹现象。新区成立以来,地面沉降速率显著减小(图10),特别是研究区中部区域地面沉降已出现地面回弹。研究区第四系松散堆积物中含有大量的可压缩黏土、粉质黏土层,地下水位上升后,孔隙水压力增大,有效应力减小,土层颗粒重新排列,发生回弹变形,若回弹量不均匀,会使岩土体产生拉应力,诱发地面不均匀变形。同时,研究区已存在的地裂缝(图11),在地下水位快速回升过程中,地裂缝规模可能进一步增大,影响范围扩大,威胁农村居民点、周边农田及小型工程设施安全。

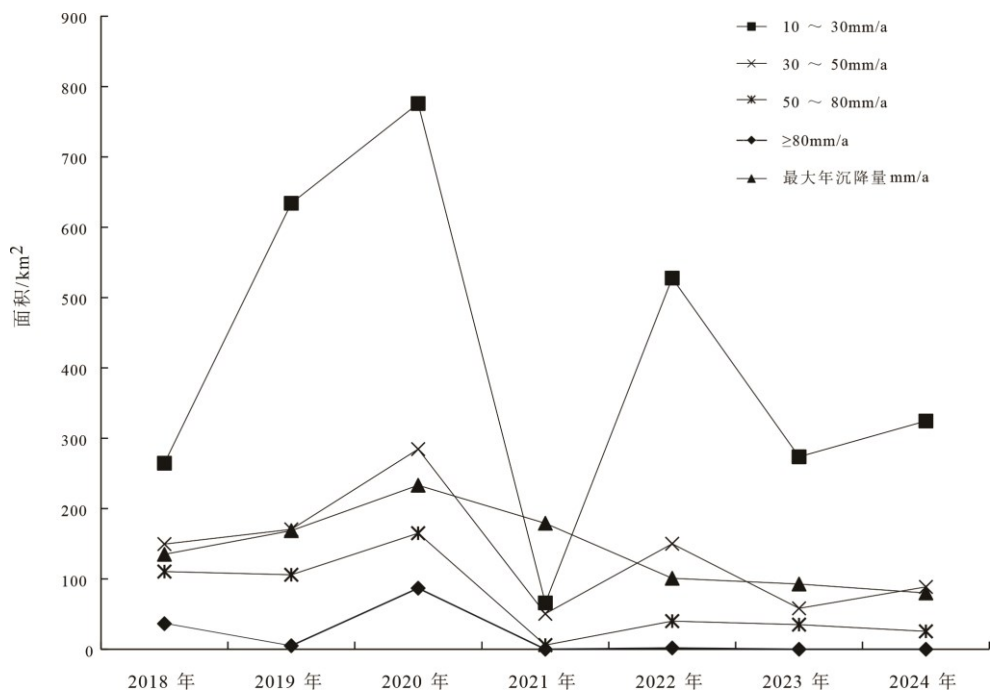


图 10 研究区 2018~2024 年地面沉降发育情况
Fig.10 Land subsidence in the study area, 2018-2024

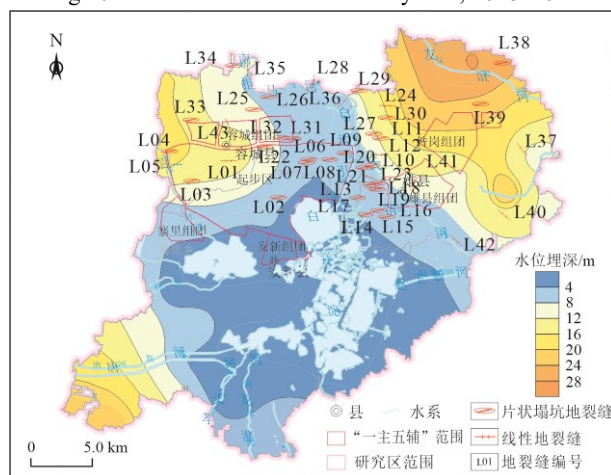


图 11 研究区地裂缝分布图
Fig.11 Distribution map of ground fissures in the study area

3 地质安全风险综合评估

3.1 评估方法

结合研究区地质安全风险的复杂性、层次性特点，兼顾评估的科学性与实用性，本文采用“层次分析法（AHP）—加权平均综合指数法”耦合 GIS 空间分析技术进行地质安全风险评估。评估流程主要包括 5 个步骤：1）构建评估指标体系，明确评估目标、准则层、指标层；2）采用 AHP 确定各指标权重，通过专家打分、一致性检验，确保权重分配合理；3）结合监测数据、调查资料，对各指标进行分级评分；4）开展综合评价，计算各评价单元的风险综合指数，确定风险等级；5）耦合 GIS 空间分析技术，绘制地质安全风险分区图，明确风险空间分布特征。

3.2 指标体系与分级标准

遵循“科学性、针对性、可操作性、系统性”原则，结合研究区地质安全风险识别结果，以“地质安全风险综合评估”为目标层（A），以地形地貌（B1）、地下水位（B2）、岩土体性质（B3）、地质环境（B4）、人类工程活动（B5）等五个维度为准则层，结合风险诱发机理及研究区实际情况，筛选出 12 个具体评价指标，构建多层次、多维度地质安全风险评估指标体系与分级（图 12，表 3）。对于地质安全风险等级划分，参照赵银鑫等（2024）的 4 类分法，按照风险相对由高到低的程度划分为I~IV级。

3.3 指标权重确定

采用层次分析法（AHP）确定各指标权重，具体步骤如下。

（1）构建判断矩阵

邀请水文地质、工程地质、环境地质、城市地质等领域 10 位专家，根据表 4 判断影响因素的相对重要程度，采用 1~9 标度法构建判断矩阵 A ，如式（1）所示。

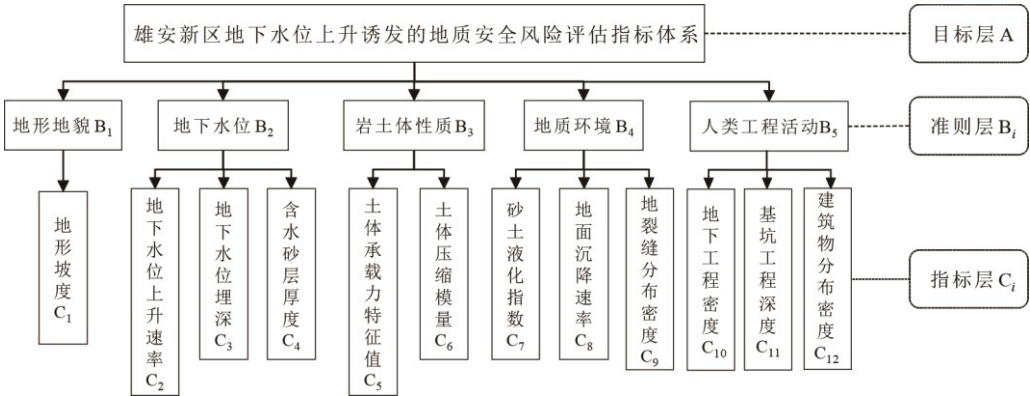


图 12 研究区地下水位上升诱发的地质安全风险评估指标体系

Fig.12 Assessment index system for geological safety risks induced by groundwater level rise in the study area

表 3 研究区地下水位上升诱发的地质安全风险评估指标分级标准

Table 3 Classification criteria of assessment indexes for geological safety risks induced by groundwater level rise in the study area

目标层	准则层	指标层	单位	风险等级			
				I（高）	II（较高）	III（中）	IV（低）
地质安全风险综合评估（A）	地形地貌（B1）	地面高程（C1）	m	$H \leq 5.0$	$5.0 < H \leq 7.0$	$7.0 < H \leq 9.0$	$H > 9$
		地下水位上升速率（C2）	m/a	$U \geq 2.0$	$1.5 \leq U < 2.0$	$0.5 \leq U < 1.5$	$U < 0.5$
	地下水位（B2）	地下水位埋深（C3）	m	$D \leq 4.0$	$4.0 < D \leq 8.0$	$8.0 < D \leq 12.0$	$D > 12.0$
		含水砂层厚度（C4）	m	$M \geq 7.5$	$5.0 \leq M < 7.5$	$2.5 \leq M < 5.0$	$M < 2.5$
	岩土体性质（B3）	土体承载力特征值（C5）	kPa	$f \leq 80$	$80 < f \leq 100$	$100 < f \leq 130$	$f > 130$
		土体压缩模量（C6）	MPa	$E \leq 4$	$4 < E \leq 11$	$11 < E \leq 15$	$E > 15$
	地质环境（B4）	砂土液化指数（C7）	—	$I \geq 18$	$6 \leq I < 18$	$0 < I < 6$	$I = 0$
		地面沉降速率（C8）	mm/a	$\Delta R \geq 50$	$30 \leq \Delta R < 50$	$10 \leq \Delta R < 30$	$\Delta R < 10$
		地裂缝分布密度（C9）	km/km ²	$L \geq 0.5$	$0.3 \leq L < 0.5$	$0.1 \leq L < 0.3$	$L < 0.1$
	人类工程活动（B5）	地下工程密度（C10）	%	$P \geq 50$	$30 \leq P < 50$	$10 \leq P < 30$	$P < 10$
		基坑工程深度（C11）	m	$N \geq 30$	$30 \leq N < 10$	$10 \leq N < 5$	$N < 5$
		建筑物分布密度（C12）	%	$Q \geq 50$	$30 \leq Q < 50$	$10 \leq Q < 30$	$Q < 10$

表 4 判断矩阵标度及其含义
Table 4 Identification and meaning of judging matrix

标度	表示含义
1	两个因素 A_i 与 A_j 相比, 具有同等重要性
3	两个因素 A_i 与 A_j 相比, A_i 比 A_j 稍微重要
5	两个因素 A_i 与 A_j 相比, A_i 比 A_j 比较重要
7	两个因素 A_i 与 A_j 相比, A_i 比 A_j 明显重要
9	两个因素 A_i 与 A_j 相比, A_i 比 A_j 强烈重要
2 4 6 8	上述相邻判断 1-3、3-5、5-7、7-9 的中值
倒数	若 A_i 与 A_j 相比重要性为 a_{ij} , 则 A_j 与 A_i 相比为 $a_{ji}=1/a_{ij}$

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: A 为判断矩阵; $a_{11} \cdots a_{nn}$ 为影响因素的相对重要程度.

(2) 确定权重向量

对构造的判断矩阵 A 采用几何平均法计算权重向量, 首先计算判断矩阵 A 行向量的几何平均, 再经过归一化后得到权重向量 w_i :

$$w_i = \frac{(\prod_{j=1}^n a_{ij})^{\frac{1}{n}}}{\sum_{k=1}^n (\prod_{j=1}^n a_{kj})^{\frac{1}{n}}} \quad i=1,2,3,\dots,n \quad (2)$$

式中: w_i 为权重向量; a_{ij} 为影响因素的相对重要程度; n 为矩阵阶数.

(3) 一致性检验

计算判断矩阵的最大特征值 (λ_{max}), 根据公式 (3)、(4) 进行一致性和随机性矩阵检验.

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n-1} \quad (3)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (4)$$

式中: CI 为一致性指标; λ_{max} 为最大特征根; n 为矩阵阶数; RI 为平均随机一致性指标, 根据表 5 查询. 结合随机一致性指标 (RI), 计算一致性比率 CR . 当 $CR < 0.1$ 时, 则判断矩阵通过一致性检验, 权重分配合理; 否则, 调整判断矩阵直至通过检验.

表 5 判断矩阵随机一致性指标
Table 5 Stochastic consistency index of judgment matrix

矩阵阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0.00	0.00	0.58	0.89	1.12	1.25	1.36	1.41	1.45

根据以上步骤, 建立准则层判断矩阵, 构建各准则层内指标层相应的判断矩阵, 根据判断矩阵得出各评价指标的权重, 计算得出最大特征根、对应的特征向量、各层次的单排序并进行判断矩阵一致性检验. 目标层到准则层的层次单排序权重值及一致性检验结果见表 6, 矩阵阶数大于 3 的 B2、B4 和 B5 的判断矩阵及其一致性检验结果见表 7、表 8 和表 9.

3 阶、4 阶、5 阶判断矩阵的最大特征值、权重向量计算准确, 一致性比率均小于 0.10, 均通过一致性检验, 表明两类判断矩阵均符合层次分析法 (AHP) 要求, 可用于地质安全风险评估指标权重分配及相关分析.

表 6 准则层判断矩阵 B 及一致性检验结果

Table 6 Judgment matrix of B and result of consistency test

目标层 A	地形地貌 (B1)	地下水位 (B2)	岩土体性质 (B3)	地质环境 (B4)	人类工程活动 (B5)	权重 (w_i)
地形地貌 (B1)	1	1/7	1/5	1/4	1/5	0.0415
地下水位 (B2)	7	1	3	4	3	0.4442
岩土体性质 (B3)	5	1/3	1	3	1	0.1997
地质环境 (B4)	4	1/4	1/3	1	1/4	0.0982
人类工程活动 (B5)	5	1/3	1	4	1	0.2164

$\lambda_{\max}=5.2486$, $CI=0.0621$, $CR=0.0555<0.1$

表 7 B2 判断矩阵及一致性检验结果

Table 7 Judgment matrix of B2 and result of consistency test

地下水位 (B2)	地下水位上升速率 (C2)	地下水位埋深 (C3)	含水砂层厚度 (C4)	权重 (w_i)
地下水位上升速率 (C2)	1	1/2	3	0.3207
地下水位埋深 (C3)	2	1	5	0.5701
含水砂层厚度 (C4)	1/3	1/5	1	0.1092

$\lambda_{\max}=3.0037$, $CI=0.00185$, $CR=0.0032<0.1$

表 8 B4 判断矩阵及一致性检验结果

Table 8 Judgment matrix of B4 and result of consistency test

地质环境问题 (B4)	砂土液化指数 (C7)	地面沉降速率 (C8)	地裂缝分布密度 (C9)	权重 (w_i)
砂土液化指数 (C7)	1	3	5	0.6370
地面沉降速率 (C8)	1/3	1	2	0.2583
地裂缝分布密度 (C9)	1/5	1/2	1	0.1047

$\lambda_{\max}=3.0037$, $CI=0.00185$, $CR=0.0032<0.1$

表 9 B5 判断矩阵及一致性检验结果

Table 9 Judgment matrix of B5 and result of consistency test

人类工程活动 (B5)	地下工程密度 (C10)	基坑工程深度 (C11)	建筑物分布密度 (C12)	权重 (w_i)
地下工程密度 (C10)	1	1/3	5	0.2843
基坑工程深度 (C11)	3	1	7	0.6431
建筑物分布密度 (C12)	1/5	1/7	1	0.0726

$\lambda_{\max}=3.0142$, $CI=0.0071$, $CR=0.0122<0.1$

表 10 雄安新区地下水位上升诱发的地质安全风险评估指标权重取值

Table 10 Weight values of evaluation indexes of geological safety risk induced by groundwater level rise in Xiong'an New Area

指标层	地形地貌 $w_{B1}=0.0415$	地下水位 $w_{B2}=0.4442$	岩土体性质 $w_{B3}=0.1997$	地质环境 $w_{B4}=0.0982$	人类工程活动 $w_{B5}=0.2164$	综合权重 w_i
地面高程 (C1)	1.0000					0.0415
地下水位上升速率 (C2)		0.3207				0.1425
地下水位埋深 (C3)		0.5701				0.2532
含水砂层厚度 (C4)		0.1093				0.0485
土体承载力特征值 (C5)			0.5000			0.0999
土体压缩模量 (C6)			0.5000			0.0999
砂土液化指数 (C7)				0.6370		0.0626
地面沉降速率 (C8)				0.2583		0.0254
地裂缝分布密度 (C9)				0.1047		0.0103
地下工程密度 (C10)					0.2843	0.0615
基坑工程深度 (C11)					0.6431	0.1392
建筑物分布密度 (C12)					0.0726	0.0157

由表 6 和表 10 可知, 准则层权重排序为: 地下水位 (0.4442) > 人类工程活动 (0.2164)

>岩土体性质（0.1997）>地质环境（0.0982）>地形地貌（0.0415），表明地下水位与岩土体性质是影响地质安全风险的核心因素。指标层中，地下水位埋深（0.2532）、地下水位上升速率（0.1426）、基坑工程深度（0.1392）、土体承载力特征值（0.0999）、土体压缩模量（0.0999）等指标权重较高，是风险评估的关键指标。

3.4 关键指标敏感性分析

为量化核心指标对地质安全风险等级的影响程度，明确主控因素的贡献差异，验证权重结果的可靠性，采用单因素敏感性分析方法，以风险综合指数为评价目标，固定其余 11 项指标取Ⅲ级（中风险）基准分值 0.5，分别对地下水位埋深、地下水位上升速率、基坑工程深度 3 项高权重指标进行单因素变动测试，计算指标每变动 1 个风险等级时综合风险指数的变化幅度，并引入敏感度系数 S 进行量化：

$$S = \frac{\Delta I_{SI} / I_{SI}^0}{\Delta X / X^0}$$

式中： ΔI_{SI} 为综合风险指数变化量； I_{SI}^0 为基准状态下综合风险指数； ΔX 为评价指标变化量； X^0 为基准状态下指标取值。

计算结果见表 11，3 项关键指标的敏感度均为正值，表明指标数值向风险增大方向变动时，综合风险指数同步上升。其中地下水位埋深的敏感度最高，敏感度系数达 0.422，即地下水位埋深每降低 10%，综合风险指数上升 4.22%，是影响地质安全风险的第一主控因素；其次为地下水位上升速率（敏感度系数 0.238）和基坑工程深度（敏感度系数 0.232），三者累计贡献了风险变动的 89%以上，与权重计算结果一致，进一步验证了地下水动力条件与人类工程活动是驱动地质安全风险的核心要素。

表 11 关键指标单因素敏感性分析结果
Table 11 Results of single-factor sensitivity analysis of key indicators

关键指标	基准取值（中风险）	指标变动方向	变动后取值	综合风险指数
地下水位埋深	10.0m	水位抬升→风险升高	6.0m（较高风险）	0.601
地下水位上升速率	1.0m/a	速率增大→风险升高	1.75m/a（较高风险）	0.560
基坑工程深度	7.5m	深度增大→风险升高	20.0m（较高风险）	0.558

注：基准状态下其余指标均取中风险分值 0.5，基准综合风险指数 $I_{SI}^0=0.500$ 。

3.5 评估结果

本次采用加权平均综合指数法进行地下水位上升诱发的地质安全风险评价。通过对评价指标进行赋分和权重计算，获得地质安全风险综合指数（ I_{SI} ），计算模型如下：

$$I_{SI} = \sum_{i=1}^n w_i P_i \quad (5)$$

式中： I_{SI} 为综合指数， w 为第*i*个评估指标权重， P 为第*i*个评估指标赋分值， n 为评估指标数量。

利用 GIS 软件的空间分析功能，将研究区 1770km² 面积按照 200m×200m 的单元进行划分，共划分 44250 个单元。根据表 3 对各个指标进行量化，并赋分值至评估单元，根据公式（5）叠加计算各单元地质安全风险的综合指数。根据综合量化值，将风险等级分为高风险（Ⅰ级 0.75~1.00）、较高风险（Ⅱ级 0.50~0.75）、中风险（Ⅲ级 0.25~0.50）、低风险（Ⅳ级 0~0.25）四个等级，最终得到综合地质安全风险分区图（图 13）。

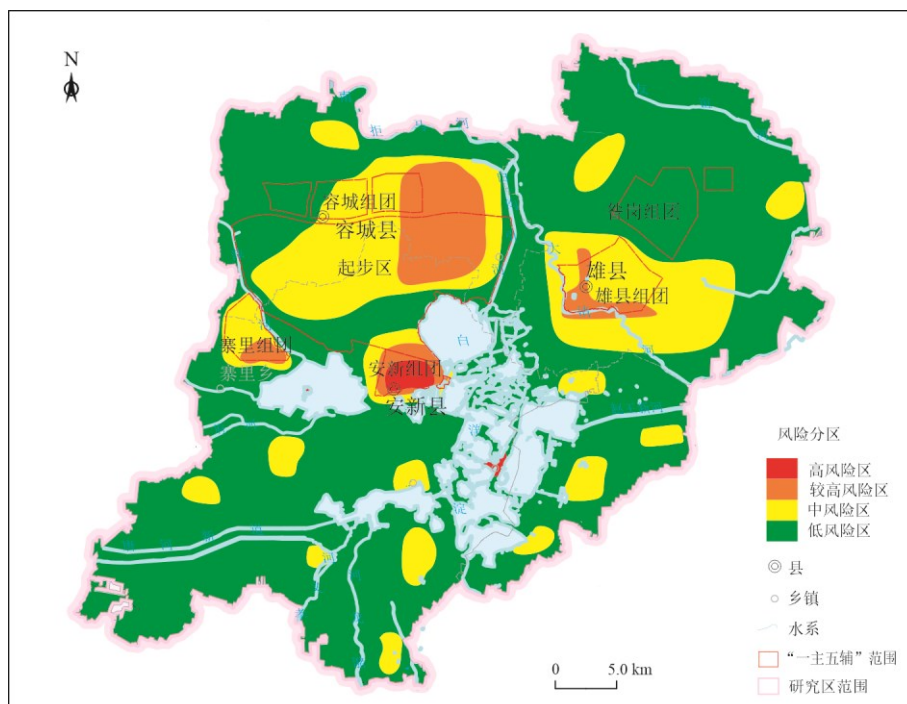


图 13 研究区地质安全风险平面分布图

Fig.13 Partition map of geological safety risk in the study area

根据地质安全风险综合评估结果,研究区地质安全风险呈现“规划建设区高—中风险(I级—III级)、非规划建设区低风险(IV级)”的空间格局。

(1) 高风险区(I级): 风险综合指数 $[0.75,1.00]$,面积约 12.18km^2 , 占总面积的 0.69% 。主要分布于“一主五辅”规划建设区安新组团和特色城镇圈头乡。该区域位于白洋淀周边,主要影响因素为地下水位埋深、土体压缩模量、土体承载力特征值和地面高程。该区域主要分布于冲湖积平原区,地下水位埋深很浅,在 $0.0\sim 2.0\text{m}$,地下水位上升速率 $0.0\sim 1.0\text{m/a}$,土体承载力特征值小于 90kPa ,土体压缩性较大,地面高程普遍低于 7m ,各类地质安全风险叠加显现。该区域地下水位上升诱发的核心风险为岩土体软化与地基承载力降低、砂土液化、基坑突涌、结构上浮等,地质环境稳定性较差。

(2) 较高风险区(II级): 风险综合指数 $[0.50,0.75]$,面积约 92.29km^2 , 占总面积的 5.21% 。主要分布于“一主五辅”建设区中的容城组团东部、起步区东部和南部、寨里组团东南部和雄县组团西南部。该区域主要影响因素为地下水位埋深、地下水位上升速率、土体压缩模量、土体承载力特征值和地面高程。该区域地下水位回升速率较快,水位回升速率在 $1.0\sim 2.0\text{m/a}$,地下水位埋深在 $4.0\sim 8.0\text{m}$,砂层较厚,人类工程活动强度较大,是新区地下构筑物建设、城市核心功能布局的重点区域。受地下水位快速回升与人类工程活动双重影响,该区域核心风险表现为岩土体软化与地基承载力降低、砂土液化、基坑突涌、结构上浮及渗漏,地质环境条件较为敏感,需通过针对性防控措施管控风险扩散。

(3) 中风险区(III级): 风险综合指数 $[0.25,0.50]$,面积约 349.65km^2 , 占总面积的 19.76% 。主要分布于“一主五辅”规划建设区起步区西部、容城组团西部、雄县组团东北部、寨里组团西北部、安新组团外围以及特色城镇规划建设区。该区域主要影响因素为土体压缩模量、土体承载力特征值、地下水位回升速率和人类工程活动。该区域地下水埋深中等,在 $8.0\sim 12.0\text{m}$ 之间,地下水位回升速率在 $0.5\sim 2.0\text{m/a}$,地面高程普遍高于 9.0m ,人类工程活动强度较高,存在轻微的砂土液化或地面沉降风险,但风险程度较低,通过简单的防控措施即可实现风险管控,对新区建设影响较小,地质环境条件整体稳定。

(4)低风险区(IV级): 风险综合指数[0,0.25), 面积约 1315.66km², 占总面积的 74.34%, 主要分布在研究区非规划建设区的村庄、农田、千年秀林和规划建设区的起步区西北部、容城组团西部、昝岗组团。该区域受地下水位和人类工程活动影响较小, 地下水位埋深较大, 普遍大于 15.0m, 地下水位回升速率在 0.5~1.5m/a, 人类工程活动强度低, 土体软化与地基承载力下降、砂土液化、基坑突涌、地面回弹与地裂缝活化等风险发生概率极低, 地质环境条件稳定, 受地下水位上升影响较小, 地质安全风险可控。

4 讨论

雄安新区浅层地下水位上升是生态环境修复与地下水超采治理的必然结果, 但其诱发的各类地质安全风险, 对新区高标准建设和长期稳定运行构成了潜在威胁。整体来看, 研究区高风险与较高风险区合计占总面积的 5.90%, 中风险区占总面积的 19.76%, 低风险区占总面积的 74.34%, 规划建设区大部分位于中风险区与低风险区, 少部分位于较高风险区, 表明研究区地下水位上升诱发的地质安全风险整体可控, 因此, 需重点聚焦高风险区和较高风险区的风险管控, 同时兼顾中风险区与低风险区的风险防范, 实现全域地质安全管控。

4.1 与国内同类城市对比

国内北京、上海等城市均经历过地下水位回升引发的地质环境问题, 与雄安新区形成可对比的研究场景。

北京地区因南水北调通水与地下水压采, 平原区地下水位自 2015 年起持续回升, 至 2025 年累计回升超 10m, 诱发的核心风险为砂土液化加剧、地下结构抗浮失效与地面回弹, 与雄安新区的风险类型高度相似(李原等, 2023; 田苗壮等, 2023)。二者的驱动机制存在差异: 北京水位回升以压采减量为核心驱动, 降水与生态补水贡献占比不足 30%; 而雄安新区生态补水对水位回升的贡献率达 37%, 河湖渗漏补给占比更高, 浅层水位回升的空间异质性更强, 白洋淀周边区域水位抬升速率显著高于内陆区域, 风险分布更集中于淀边低洼带。在防控措施上, 北京形成了“水位红线管控+工程抗浮升级”的管控体系, 将中心城区地下水位埋深控制在 8m 以上, 该经验可向雄安新区起步区等核心建设区推广, 但需针对雄安冲湖积平原软土厚度更大的特点, 强化地基软化的专项防控。

上海作为典型软土分布区, 历史上因地下水回灌与城市建设也出现过地下水位上升引发的地基承载力下降、隧道变形等问题(高广运等, 2011)。与雄安相比, 上海软土压缩性更高、灵敏度更大, 水位上升引发的土体软化效应更显著; 而雄安新区浅层分布多层粉细砂, 砂土液化与基坑突涌风险更为突出。上海在软土地基加固、隧道渗漏治理方面的工程技术体系, 可为雄安新区安新组团等高压压缩土分布区的地基处理提供技术参考。

4.2 与国际典型案例对比

全球范围内多个城市均出现过地下水位回升诱发的地质安全问题, 其驱动机制与防控经验可为雄安新区提供国际借鉴。欧洲典型代表为意大利米兰, 20 世纪 90 年代以来因工业地下水开采停止, 城市浅层地下水位累计回升超 20m, 引发了大面积地下车库上浮、地铁隧道衬砌渗漏、历史建筑地基变形等问题, 成为城市水位回升风险的经典案例(Gattinoni & Scesi, 2017)。米兰的风险防控以“被动治理+动态监测”为主, 通过在地下结构增设排水系统、布设高密度水位监测网实现风险管控; 而雄安新区处于规划建设阶段, 可将风险防控前置, 在工程设计阶段即纳入长期水位上升情景, 防控成本更低、主动性更强。

干旱区城市如沙特吉达、麦加，因城市排水渗漏与地下水开采减少出现水位上升，主要风险为地基土盐蚀膨胀、地下结构腐蚀（Al-Sefry & Şen, 2006; Bob *et al.*, 2016），与雄安平原区的风险类型差异较大，但其“源头控补+导排结合”的水位调控思路具有参考价值。沿海城市如爱尔兰科克，因海平面上升顶托导致地下水位抬升，核心风险为地下水漫溢与基础设施侵蚀（Soboh *et al.*, 2026），其风险评估中采用的多情景水位预测方法，可应用于雄安新区长期水位上升的风险动态预判。

4.3 研究局限性与展望

针对高风险区和较高风险区，需重点加强地下水位监测，合理控制地下水位埋深，将地下水位埋深控制在工程施工临界埋深以下。高风险区将地下水位升幅控制在 0.5m 以内，较高风险区控制在 0.5~1.0m，中风险区控制在 1.0~2.0m，低风险区结合生态修复需求，适度提升地下水位。在地下空间开发和建设过程中，可采用工程措施，提高地基承载力，降低地质安全风险发生的可能性。构建“监测—预警—治理—管控”四位一体的地质安全风险防控长效机制，将地质安全风险评估结果融入新区城市规划、地下空间开发、基础设施建设等全过程，保障新区建设运行安全。

本文所建立的研究区地质安全风险评价指标体系主要基于已有的基础地质资料，尚未覆盖全部指标，所采用的层次分析法主要依靠专家或决策者的知识、经验或主观判断来确定各项指标的重要性，评价结果具有一定科学性，但也具有一定的主观性。今后可通过补充现场监测试验数据等，建立更全面的地质安全风险评价指标体系，采用机器学习等更客观的权重赋值方法进行综合评价。同时，可开展不同水位上升情景下（如地下水位上升至 5m、2m）的风险预测，构建动态风险评估模型，对研究区地质安全风险进行动态评估。

5 结论与建议

（1）研究区地下水位上升诱发的直接潜在地质安全风险主要包括土体软化与地基承载力下降、砂土液化、基坑突涌、地下结构上浮与渗漏、地面回弹与地裂缝活化等 5 类，各类风险的致灾机理与地下水位上升引发的地下水动力条件变化、岩土体物理力学性质改变密切相关。

（2）构建了涵盖“地形地貌-地下水位-岩土体性质-地质环境-人类工程活动”的多维度多层次地质安全风险评估体系，采用 AHP 法、加权平均综合指数法与 GIS 空间分析技术，实现了雄安新区地质安全风险的精准评估和空间分区，具有较强的科学性和实用性。

（3）地质安全风险总体呈现“规划建设区内部高、规划建设区外围低”的空间分布格局，高风险区主要集中在安新组团和圈头特色城镇，面积占比 0.69%，较高风险区分布在容城组团东部、起步区东部和南部、寨里组团东南部和雄县组团西南部，面积占比 5.21%，中风险区位于高风险区与低风险区之间，面积占比 19.76%，低风险区主要位于“一主五辅”规划建设区外围，面积占比 74.34%。

（4）提出了“风险精准识别、地下水位科学调控、防控长效机制构建”的风险防控策略，明确了各类风险的防控重点和地下水位调控目标，构建了“监测—预警—治理—管控”四位一体的风险防控长效机制，为雄安新区地下水位调控、地质安全防控及城市高质量发展提供重要的地学支撑。

（5）未来随着研究区建设的不断推进和地质调查工作的不断深入，可进一步完善地下水位监测网络，建立更全面的地质安全风险评价指标体系，采用机器学习等更客观的权重赋

值方法进行综合评价。同时，可开展不同水位上升情景下的风险预测，构建动态风险评估模型，对研究区地质安全风险进行动态评估。

Reference

- Al-Sefry,A.S.,Sen,Z.,2006.Groundwater Rise Problem and Risk Evaluation in Major Cities of Arid Lands-Jedddah Case in Kingdom of Saudi Arabia. *Water Resources Management*, 20(1):91-108. doi:10.1007/s11269-006-4636-2
- Bai,J.F.,Liu,X.L.,Fu,X.,et al.,2024.Damage of High-Rise Building Substructure Caused by Groundwater Fluctuations. *Soil Engineer and Foundation*,38(1):76-80 (in Chinese with English abstract).
- Bhatnagar,I.,Dhanya,C.,Chahar,B.,2024.Do Groundwater Systems Experience a ‘Silent’ Stress? A Paradox of Rising Groundwater Levels and Stressed Aquifers. *Groundwater for Sustainable Development*, 25:101111. doi:10.1016/J.GSD.2024.101111
- Bob,M.,Rahman,N.,Elamin,A.,et al.,2016.Rising Groundwater Levels Problem in Urban Areas: A Case Study from the Central Area of Madinah City, Saudi Arabia. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 41(4):1461-1472. doi:10.1007/s13369-015-1976-3
- Chaudhary,Amin,T.M.,2012.Implications of rising groundwater level on structural integrity of underground structures-investigations and retrofit of a large building complex. *Structural Survey*, 30(2):111-129.
- Ding,Q.Z.,Zhou,J.L.,Zhang,H.Z.,et al.,2025.Study on Groundwater Dynamics and Its Relationship with Land Subsidence in Turpan Basin. *Earth Science*, 50(2):737-751 (in Chinese with English abstract).
- Gao,G.Y.,Chen,Q.S.,He,J.F.,et al.,2011.Effect of Rise of Groundwater Table on Seismic Ground Response of Soft Soil in Shanghai. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*,33(7):989-995(in Chinese with English abstract).
- Gattinoni,P.,Scesi,L.,2017.The Groundwater Rise in the Urban Area of Milan (Italy) and its Interactions with Underground Structures and Infrastructures. *Tunnelling and Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research*,62:103-114. doi:10.1016/j.tust.2016.12.001
- Guo,X.S.,Liu,F.,Zhen, P.N.,2025.Analysis of Spatiotemporal Variation Characteristics and Influencing Factors of Groundwater Levels in a Typical Area of Groundwater Control in Hebei Province. *Yellow River*,47(6):84-89,122(in Chinese with English abstract).
- Hamlat,A.,Hadidi,A.,Kadri,B.C.,2025.A GIS-Google Earth Based Approach to Identifying Regions Affected by Rising Groundwater Levels in Algeria. *Environmental Claims Journal*, 37(3):423-452. doi:10.1080/10406026.2025.2464009
- Han,B.,Xia,Y.B.,Ma,Z.,et al.,2023.Division of Engineering Geological Strata, Building of 3D Geological Structure and its Application in Urban Planning and Construction in Xiong’an New Area. *Geology in China*,50(6):1903-1918(in Chinese with English abstract).
- Han,B.,Ma,Z.,Lin,L.J.,et al.,2024. Planning and construction of Xiong’an New Area (city of over 5 million people): Contributions of China’s geologists and urban geology. *China Geology*,7(3):382-408. doi:10.31035/cg2024055
- Koah Na Lebogo,S., Zame,P.Z., Anaba Onana, A. et al., 2025. Assessment of groundwater rise zones using electrical resistivity for foundation stability analysis. *Discovery Geoscience*, 3(1):109. doi:10.1007/s44288-025-00216-4
- Kurylyk,L.B.,Russoniello,J.C.,Guimond,A.J.,et al.,2025.Invisible Groundwater Threats to Coastal Urban Infrastructure. *Nature Cities*,2(9):1-3. doi:10.1038/S44284-025-00298-8
- Li,H.T.,Feng,W.,Wang,K.L.,et al.,2021.Groundwater Resources in Xiong’an New Area and its Exploitation Potential. *Geology in China*,48(4):1112-1126(in Chinese with English abstract).

- Li,H.Z.,Gu,M.X.,Zhang,M.,et al.,2025.Research on the Influence of Groundwater Level Dynamic Rising Process on Buildings Based on Numerical Simulation. *Water*, 17(20):3014-3014. doi:10.3390/W17203014
- Li,Y.,Wang,R.,Zhang,J.M.,2023.Soil Liquefaction Influenced by Groundwater Level Rise in Beijing. *China Civil Engineering Journal*, 56(S2):95-103(in Chinese with English abstract).
- Liang,C.J.,2005. Influence of Groundwater Level Rise on Additional Stress and Foundation Bearing Capacity. *West-China Exploration Engineering*, (8):3-5(in Chinese with English abstract).
- Liu,H.W.,He,Q.C.,Li,Z.,et al.,2024.Geological safety risk assessment of underground space utilization in Xiongan New Area. *Hydrogeology & Engineering Geology*,51(5):207-220(in Chinese with English abstract).
- Lu,D.C.,Li,X.Q.,Du,X.L.,et al.,2020.Numerical Simulation and Analysis on the Mechanical Responses of the Urban Existing Subway Tunnel During the Rising Groundwater. *Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research*,98(C):103297. doi:10.1016/j.tust.2020.103297
- Luo,F.R.,Liu,C.W.,Han,X.,2011.Numerical Analysis on the Influence of the Rising Groundwater Level on the Metro Tunnel Structure. *China Railway Science*, 32(1):81-85(in Chinese with English abstract).
- Ma,H.,Xu,Q.Y.,Yang,Q.,et al.,2025. Spatial-temporal Evolution Characteristics and Driving Factors of Groundwater Level in Plain Area of Beijing. *Urban Geology*,20(3):292-300(in Chinese with English abstract).
- Ma,Z.,Xia,Y.B.,Li,H.T.,et al.,2021. Analysis of Natural Resources and Environment Eco-geological Conditions in the Xiong'an New Area. *Geology in China*,2021,48(3):677-696(in Chinese with English abstract).
- Qiu,H.,2002.The Influence of the Fluctuation of Groundwater Level on the Bearing Capacity of Foundation Soil in a Field. *Journal of East China Geological Institute*, (3):240-243(in Chinese with English abstract).
- Pierre-Louis,K.,2022. The Creeping Menace: Rising Groundwater. *MIT Technology Review*, 125(1):30-35.
- Ramesh,V.,Omer,R.J.,Attom,F.M.,2018.Laboratory simulation of the influence of groundwater rise and drip irrigation on the settlement of a sample of collapsible desert soil. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 15(6):1-7. doi:10.1080/19386362.2018.1475692
- Ray,2005.Participatory Governance: Addressing the Problem of Rising Groundwater Level in Cities. *Journal of Human Ecology*, 18(2):137-147. <https://doi.org/10.1080/09709274.2005.11905821>
- Soboh,M.,Beese,A.,O'SheaM.,2026. Assessing Coastal Groundwater Flooding due to Groundwater Emergence Caused by Sea Level Rise in Cork City, Ireland. *Journal of Hydrology: Regional Studies*,64.doi:10.1016/j.ejrh.2026.103205
- Song,Y.,Xu,J.,Xu,S.G.,et al.,2025.Influence of Underground Space Development on Groundwater Flow Field in SuXiChang Area. *Earth Science*, 50(11):4540-4550(in Chinese with English abstract).
- Tian,M.Z.,Zhao L.,Cui W.J.,et al.,2023.Control and Influence of Rising Groundwater Level on Land under the Background of South-to-North Water Diversion: A Case Study of Chaobai River Groundwater system in Beijing. *Geology in China*,50(3):872-886(in Chinese with English abstract).
- Tu,H.Q.,Zhou,J.,1994.Decreasing of Bearing Capacity of Shallow Sandy Soil Foundation Caused by Underground Water Table Rising. *Shanghai Geology*, (2):33-43(in Chinese with English abstract).
- Wang,F.M.,2022.Groundwater Level Changes on Foundation Pits and the Influence of Building Deformation (Dissertation). Kunming University of Science and Technology, Kunming:53-73(in Chinese with English abstract).
- Wu,X.F.,2023. Study on the Influence of Deformation Settlement on Building Foundation Caused by the Rising Groundwater Level in Yinchuan City(Dissertation). Ningxia University, Yinchuan:16-23(in Chinese with English abstract).
- Xia,Y.B.,Guo,X.,Wang,B.,et al.,2022. Study on the Geological Origin of Groundwater and Soil Corrosivity in

- Xiong'an New Area. *North China Geology*,45(3):69-76(in Chinese with English abstract).
- Xu,G.L.,Ma,Y.,Zhang,J.Q.,et al.,2014. Lessons from Impact of Rising of Ground Water Level on Underground Engineering in Tokyo. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 36(S2):269-273(in Chinese with English abstract).
- Yao,Y.Y,Zhang,M.S.,Deng,Y.K.,et al.,2021.Evaluation of Environmental Engineering Geology Issues Caused by Rising Groundwater Levels in Xi'an, China. *Engineering Geology*, 294. doi:10.1016/J.ENGGEOL.2021.106350
- Zhao,L.,Yin,S.D.,Sun,G.X.,2025.The Impact of Rising Groundwater Level on the Safe Use of Building Construction-Taking Zhengzhou City as an Example. *Journal of Zhongzhou University*,42(1):123-128(in Chinese with English abstract).
- Zhao,Y.X.,Song,K.,Ji, W.B.,et al.,2024. Geological Safety and Risk Analysis of Yinchuan Urban Underground Space Development. *Acta Geoscientica Sinica*,45(1):91-98(in Chinese with English abstract).
- Zhang,X.,Han,B.,Du,Y.N.,et al.,2025. Construction Achievements of Shallow Groundwater Monitoring Network in Xiong'an New Area. *North China Geology*,48(1):78-86(in Chinese with English abstract).
- Zhang,X.,Li,C.W.,Pan,K.,2012.Effect of Groundwater Fluctuation on Deformation Characteristics of Foundation Soils. *Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power*,33(5):95-98(in Chinese with English abstract).

中文参考文献

- 白俊峰, 刘新龙, 付旭, 等, 2024. 地下水位升降对高层建筑地下结构损伤问题研究. *土工基础*, 38(1):76-80.
- 丁启振, 周金龙, 张红忠, 等, 2025. 吐鲁番盆地地下水动态变化及其与地面沉降关系研究. *地球科学*, 50(2):737-751.
- 高广运, 陈青生, 何俊锋, 等, 2011. 地下水位上升对上海软土地地震反应的影响. *岩土工程学报*, 33(7):989-995.
- 郭晓帅, 刘飞, 甄品娜, 等, 2025. 河北典型压采区地下水位时空变化特征及影响因素分析. *人民黄河*, 47(6):89-89, 122.
- 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. *中国地质*, 50(6):1903-1918.
- 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. *中国地质*, 48(4):1112-1126.
- 李原, 王睿, 张建民, 2023. 地下水位上升对北京土层地震液化的影响. *土木工程学报*, 56(S2):95-103.
- 梁昌俊, 2005. 地下水位上升对附加应力和地基承载力的影响. *西部探矿工程*, (8):3-5.
- 刘宏伟, 何庆成, 李状, 等, 2024. 雄安新区地下空间利用地质安全风险评价. *水文地质工程地质*, 51(5):207-220.
- 罗富荣, 刘赅炜, 韩煊, 2011. 地下水水位上升对地铁隧道结构的影响分析. *中国铁道科学*, 32(1):81-85.
- 马宏, 徐庆勇, 杨庆, 等, 2025. 北京市平原区地下水位时空演变特征及驱动因素分析. *城市地质*, 20(3):292-300.
- 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. *中国地质*, 48(3):677-696.
- 丘宏, 2002. 地下水位升降对某场地地基土承载力的影响. *华东地质学院学报*, (3):240-243.
- 宋昀, 许洁, 许书刚, 等, 2025. 苏锡常地下空间开发对地下水流动场的影响. *地球科学*, 50(11):4540-4550.
- 田苗壮, 赵龙, 崔文君, 等, 2023. 南水北调背景下地下水位上升对地面沉降控制与影响—以北京潮白河地下水系统为例. *中国地质*, 50(3):872-886.
- 屠洪权, 周健, 1994. 地下水位上升对砂性土地基承载力的影响. *上海地质*, (2):33-43.
- 汪凡茗, 2022. 地下水位变化对基坑及建筑变形影响研究(硕士学位论文). 昆明: 昆明理工大学, 53-73.

- 吴向峰, 2023. 银川市地下水位上升对建筑物地基沉降变形的影响研究(硕士学位论文). 银川: 宁夏大学, 16-23.
- 夏雨波, 郭旭, 王冰, 等, 2022. 雄安新区水土腐蚀性地质成因研究. 华北地质, 45(3):69-76.
- 徐光黎, 马郅, 张杰青, 等, 2014. 东京地下水位上升对地下工程的危害警示. 岩土工程学报, 36(S2):269-273.
- 赵亮, 殷顺达, 孙广欣, 2025. 地下水位上升对建筑安全使用的影响—以郑州市区域为例. 中州大学学报, 42(1):123-128.
- 赵银鑫, 宋琨, 吉卫波, 等, 2024. 银川城市地下空间开发的地质安全风险分析. 地球学报, 45(1):91-98.
- 张曦, 韩博, 杜亚楠, 等, 2025. 雄安新区浅层地下水监测网建设成果概述. 华北地质, 48(1):78-86.
- 张鑫, 李聪伟, 潘恺, 2012. 地下水位波动对地基土变形特性的影响. 华北水利水电学院学报, 33(5):95-98.