

DOI:10.19948/j.12-1471/P.2024.03.08

韩博,夏雨波,王国明,高伊航,郭旭,张曦,刘宏伟,苗晋杰,白耀楠,李状. 2024. 雄安新区起步区地下空间资源开发利用地质适宜性及资源量评价[J]. 华北地质, 47(3):74-87.

Han Bo, Xia Yubo, Wang Guoming, Gao Yihang, Guo Xu, Zhang Xi, Liu Hongwei. 2024. Evaluation on geological suitability and resource quantity for development and utilization of underground space in the Start-up area of Xiong'an New Area[J]. North China Geology, 47(3):74-87.

雄安新区起步区地下空间资源开发利用地质适宜性及资源量评价

韩博^{1,2,3}, 夏雨波^{1,2,3}, 王国明^{1,2*}, 高伊航^{1,2,3}, 郭旭^{1,2,3}, 张曦⁴,
刘宏伟^{1,2,3}, 苗晋杰^{1,2,3}, 白耀楠^{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. 河北雄安新区规划研究中心, 保定 071700)

摘要:【研究目的】雄安新区作为千年大计、国家大事, 开发利用地下空间资源可有效缓解“环境污染、资源短缺、交通拥堵”等“大城市病”问题, 促进新区高质量发展。【研究方法】本文以雄安新区起步区为研究对象, 通过层次分析法, 分析了影响研究区地下空间资源开发利用的地质因素, 建立了地下空间资源开发利用地质环境适宜性评价指标体系, 评价了地下空间开发利用地质适宜性, 并估算了地下空间可利用资源量。【研究结果】研究表明, 研究区地下空间开发利用地质适宜性评价指标可划分为4大类10个指标, 主要影响指标为含水砂层、地面沉降、液化砂土、水土腐蚀性等; 按浅层、次深层和深层将评价结果划分为适宜区、一般区和敏感区, 适宜区和一般区总面积约占起步区面积80%以上, 资源量整体较好。【结论】该评价结果为起步区地下空间资源开发利用提供了参考, 为起步区高质量建设及可持续发展提供了可靠的技术支撑; 同时, 地下空间资源开发利用具有不可逆性, 易受地质环境因素影响, 其开发利用必须因地制宜、合理规划、科学布局。

关键词: 地下空间; 地质适宜性; 指标体系; 可利用资源量; 雄安新区

创新点: 遴选了影响地下空间资源开发利用的地质因子, 建立了起步区地下空间资源开发利用地质环境适宜性评价指标体系; 利用层次分析法, 构建起步区地下空间开发利用地质适宜性分区, 并评估起步区地下空间可利用资源量, 为起步区地下空间资源开发利用提供重要参考。

中图分类号: P642; TU91

文献标志码: A

文章编号: 2097-0188(2024)03-0074-14

Evaluation on geological suitability and resource quantity for development and utilization of underground space in the start-up area of Xiong'an New Area

HAN Bo^{1,2,3}, XIA Yubo^{1,2,3}, WANG Guoming^{1,2*}, GAO Yihang^{1,2,3}, GUO Xu^{1,2,3},
ZHANG Xi⁴, LIU Hongwei^{1,2,3}, MIAO Jinjie^{1,2,3}, BAI Yaonan^{1,2,3}, LI Zhuang^{1,2,3}

收稿日期: 2023-06-05

基金项目: 中国地质调查局项目: “雄安新区水土质量与地质调查评价(DD20189122)”、“京津冀协同发展区暨雄安新区资源环境承载力监测评价(DD20221727)”、“太行吕梁山区地质灾害精细调查与风险管控(DD20230438)”

作者简介: 韩博(1984-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事水工环地质、城市地质及国土空间综合研究工作, E-mail: hanbo1984@126.com。

*通讯作者: 王国明(1983-), 男, 硕士, 高级工程师, 环境地球化学专业, 主要从事水工环地质、环境地球化学研究, E-mail: 470383057@qq.com。

- (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. *Planning Research Center of Xiong'an New Area, Baoding 071700, China)*

Abstract: This paper is the research on the underground space evaluation.

[Objective] As a grand project and a national event, the development and utilization of underground space resources in Xiong'an New Area can effectively alleviate "big city diseases", such as "environmental pollution, resource shortage and traffic congestion", and promote high-quality development of new city. **[Methods]** Taking the start-up area of Xiong'an New Area as the research area, this paper analyzes the geological factors that affect the development and utilization of underground space resources in the start-up area through analytic hierarchy process, establishes the evaluation index system of geological suitability, evaluates the geological suitability, and evaluates the quantity of available resources for development and utilization of underground space resources in the Start-up area. **[Results]** The results show that the evaluation indexes can be divided into 4 categories and 10 indexes. The main influencing indexes are water-bearing sand layer, land subsidence, liquefied sand and corrosion of soil and water, etc. According to shallow, sub-deep and deep underground space, the suitability evaluation results are divided into suitable area, general suitable area and sensitive area. The total area both suitable area and general suitable area accounts for about 80% of the total area, indicating that the overall geological suitability is good for development and utilization of underground space in the Start-up area. **[Conclusions]** The results provide a reference for the development and utilization of underground space resources in the study area, and provide a reliable technical support for the high-quality construction and sustainable development of the study area. At the same time, the development and utilization of underground space resources has irreversibility and is easily affected by geological environment factors, so its development and utilization must be adapted to local conditions, rational planning and scientific layout.

Key words: underground space; geological suitability; index system; quantity of available resource; Xiong'an New Area

Highlights: The geological factors affecting the development and utilization of underground space resources are selected, and the evaluation index system of geological environment suitability for the development and utilization of underground space resources in the start-up area is established. Using analytic hierarchy process, the geological suitability zoning of underground space development and utilization in the start-up area is constructed, and the amount of available resources in the underground space of the start-up area is evaluated, which provides an important reference for the development and utilization of underground space resources in the Start-up area.

About the first author: HAN Bo, male, born in 1984, Ph.D., senior engineer, mainly engages in the research on hydrogeology, engineering geology, environmental geology and urban geology; E-mail: hanbo1984@126.com.

About the corresponding author: WANG Guoming, male, born in 1983, master, senior engineer, mainly engaged in the research on hydrogeology, engineering geology, environmental geology and environmental geochemistry; E-mail: 470383057@qq.com.

Fund support: Supported by the projects of China Geological Survey (No.DD20189122, No.DD20221727, No.DD20230438).

雄安新区作为北京非首都功能疏解集中承载地,要建设成为高质量发展的全国样板、现代化经济体系的新引擎、高质量高水平社会主义现代化城市。起步区作为雄安新区的先行建设区,是雄安新区未来之城的主体区,开展起步区地下空间资源开发利用地质环境适宜性与资源量评价是推动高标准高质量建设雄安新区的必要基础,是服务雄安新区规划建设、自然资源管理、生态环境保护与城市

安全运行、“智慧城市”与生态文明建设的需求,对打造多要素城市地质调查示范基地具有重要意义。

地下空间资源作为与“领土、领空、领海”并列的“第四”国土资源(Chen et al., 2018; 刑怀学等, 2022),其科学开发利用是解决“大城市病”问题、优化城市空间结构、改善城市生态环境、提高城市发展韧性的重要途径(Edelenbos et al., 1998; Wout, 2016)。在目前有限的城市地表空间前提下,城市

地下空间资源的开发与利用势必成为未来城市可持续发展的必然趋势(杨文采等, 2019; 郭朝斌等, 2019; 王成善等, 2019; 李晓昭等, 2019; 葛伟亚等, 2021; 黄宽等, 2024)。但地下空间资源的开发利用是不可逆的, 目前对地下空间的开发利用并不十分合理, 在很大程度上处于盲目开发和碎片化开发的阶段, 造成了地下空间资源的浪费、空间布局不合理、开发时序混乱甚至可能导致地质灾害等问题, 给城市建设和人民生命财产造成损失; 杨木壮等, 2009; Admiraal and Cornaro, 2016)。因此, 地下空间开发利用的合理性、安全性、可持续性正成为当前研究的热点(Li et al., 2016; Nathan et al., 2018), 特别在地下空间资源开发利用适宜性评价方面, 得到了众多学者的愈发关注。

近年, 在地下空间开发利用适宜性评价方面已开展了较多研究(Saaty, 1997; 程光华等, 2019; 谭飞等, 2021; 李鹏岳等, 2021; 张茂省等, 2023), 大部分学者使用了层次分析法(Saaty, 1990; 夏友和马传明, 2014; 王兰化等, 2015; Zhou et al., 2019; 张明阳等, 2020; 李鹏岳等, 2021; 刘宏伟等 2022; 韩博等, 2024), 并对层次分析法进行了优化。美国学者 Sterling et al. (1982) 通过综合叠加的方法确定了 Minneapolis 可开发利用的地下空间的分布范围。蔡鹤生等(1998)探讨了专家—层次分析定权法的基本原理和方法, 并进行了实际应用。彭建等(2010)利用层次分析法和专家问卷调查法, 建立了一套适用于某地级市地下空间开发利用适宜性分区的评价方法。马邦闯等(2020)将层次分析法和粗糙集方法相结合计算评价指标的权重。马莎等(2021)基于熵权—层次分析法构建判断矩阵并确定权重。部分学者采用了熵权法、灰色评估法、层次分析法、专家调查法、模糊综合评价法等 1 种或者 2 种方法组合, 确定评价指标的权重, 建立不同的研究模型, 对城市地下空间开发进行适宜性评价(潘朝等, 2013; 马邦闯等, 2020; 蒋杰等, 2021; 张晓波等, 2023; 郭骏瀚等, 2023)。

本文以雄安新区起步区为研究区, 充分考虑地质环境条件, 借鉴国内外地下空间开发利用经验, 从保障地下构筑物地质安全和保护地下水环境角度, 采用层次分析法, 借助 GIS 地理信息系统对 70

m 以浅不同深度的地下空间开发利用地质适宜性进行了评价, 并对不同深度地下空间资源量进行了评估, 为雄安新区起步区地下空间开发利用提供了技术支撑。

1 地理位置与地质环境条件

1.1 地理位置

雄安新区位于太行山东麓、河北平原中部, 地处京、津、保腹地, 距北京约 105 km, 距天津约 115 km, 距石家庄约 165 km, 距保定约 40 km, 距北京大兴新机场约 66 km, 规划范围包括雄县、容城、安新三县行政辖区(含白洋淀水域), 任丘市郑州镇、苟各庄镇、七间房乡以及高阳县龙化乡, 规划面积约 1 770 km²。起步区作为雄安新区的先行建设区, 是雄安新区未来之城的主体区, 规划范围西依萍河、北靠荣乌高速、东接白沟引河、南临白洋淀, 规划面积约 200 km²(图 1)。

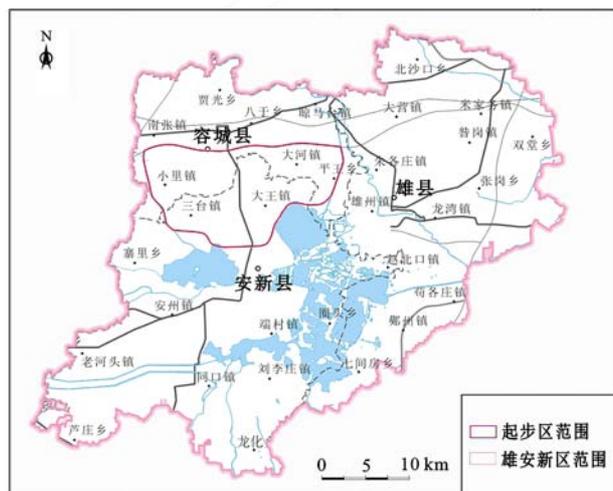


图 1 雄安新区起步区地理位置示意图
Fig.1 Geographical location of the start-up area in Xiong'an New Area

1.2 地形地貌

雄安新区地势西北高、东南低, 地面高程多在 5 ~ 20 m, 地面坡降在 0.2‰ ~ 0.7‰(图 2)。地貌属于平原区, 地表均被第四系松散沉积物所覆盖。安新县城—雄县县城一线以北为冲洪积平原区, 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; 安新县城—雄县县城一线以南为冲湖积平原区, 由近代河流相冲积和湖沼相沉积形成(邹承杰, 2018; 夏雨波等, 2022)(图 3)。

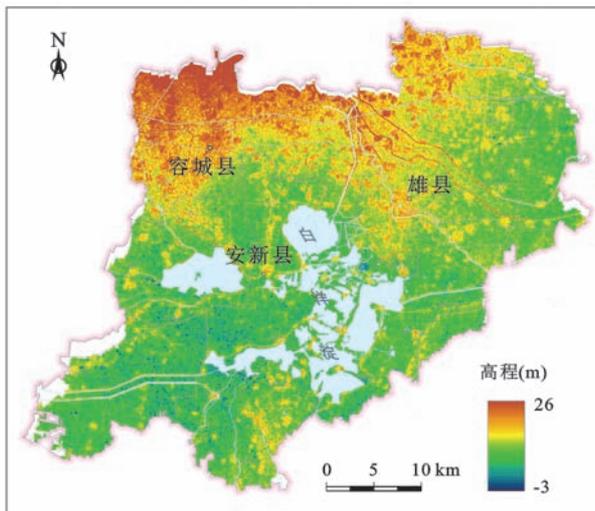


图2 雄安新区高程图

Fig.2 Elevation map of Xiong'an New Area

1.3 区域地质构造

雄安新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)、武清霸县断凹(IV₂³⁹)、高阳台凸(IV₂⁴¹)、饶阳断凹(IV₂⁴²)等5个主要IV级构造单元。主要发育有6条断裂,分别为牛东断裂、徐水南断裂、保定-石家庄断裂、老河头断裂、高阳-博野断裂和容东断裂(马震等,2021)(图4)。其中,徐水南断裂和容东断裂穿过起步区。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。

1.4 水文地质条件

雄安新区地下水类型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

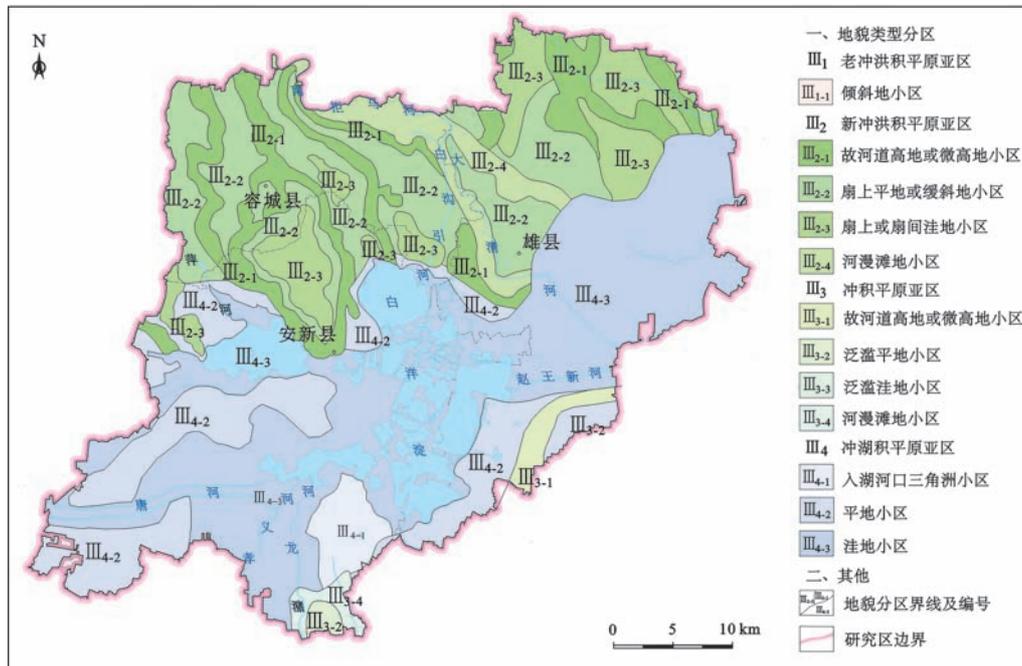


图3 雄安新区地貌图

Fig.3 Geomorphological map of Xiong'an New Area

运移于其孔隙中。雄安新区含水层主要分为四个含水层组,70 m以浅地层主要揭露第I含水层组和第II含水层组(图5)。第I含水层组岩性主要为冲洪积、冲湖积粉土夹薄层粉细砂、细砂,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;第II含水层组岩性主要为细砂、中砂,地下水类型属微承压水,含水层厚度约30~90 m,底界深度约120~200 m,单井涌

水量为852~2 999 m³/d,东南部该含水层组上段有咸水区分布,地层多以砂、黏互层与砂夹黏土为主,含水层底板埋深约40~100 m,溶解性总固体含量约2~3 g/L。将第I和第II含水层组称为浅层地下水。地下水腐蚀性主要为微腐蚀性和中腐蚀性,总体趋势从东北向西南逐渐增强。起步区第I含水层组岩性主要为冲洪积粉土夹薄层粉细砂、细砂,无咸水区分布。

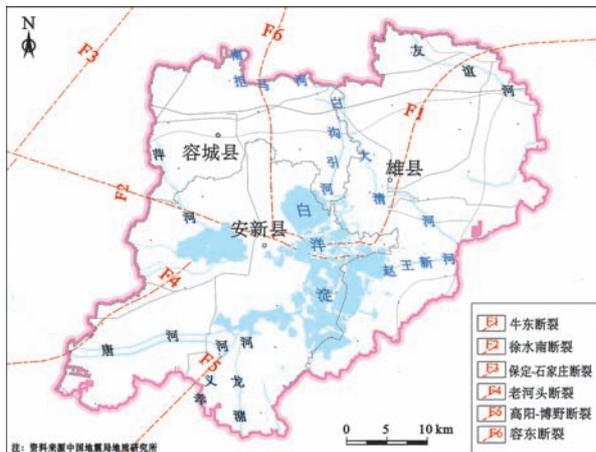


图4 雄安新区主要断裂分布图
Fig.4 Distribution map of major faults in Xiong'an New Area

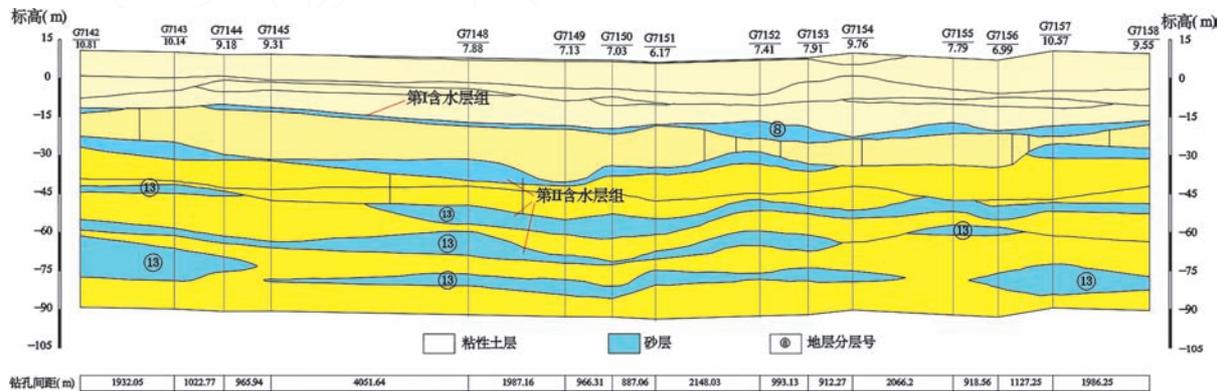


图5 雄安新区水文地质剖面图
Fig.5 Hydrogeological profile of Xiong'an New Area

2 影响起步区地下空间开发利用的地质因素分析

根据前期地质调查成果,影响雄安新区起步区地下空间开发的主要地质因素包括含水砂层分布及厚度、砂土液化、地面沉降与地裂缝和水土腐蚀性。

2.1 含水砂层分布及厚度

地下结构工程施工时易受含水砂层影响,易产生流砂、突水和涌水等问题,建成后还将长期面临浮力、渗漏等威胁。因此,含水砂层分布和厚度对地下空间开发影响较大。

影响起步区地下空间开发利用的主要含水砂层是第⑧工程地质层、第⑩工程地质层和第⑬工程地质层(韩博等,2023b),其中第⑧层含水砂层平均厚度3.19 m,厚度小于3 m的砂层分布面积占57.41%,

1.5 工程地质条件

雄安新区西北部为冲洪积平原区,100 m以浅地层岩性主要为粉砂、细砂、中砂、粉土、粉质黏土及黏土互层,东南部为冲湖积平原区,除了粉砂、细砂、中砂、粉土、粉质黏土及黏土外,还存在淤泥质土。起步区100 m以浅地层结构可分为18个工程地质层组(韩博等,2023a),岩性主要为粉砂、细砂、中砂、粉土、粉质黏土及黏土互层,整体地层工程性质良好,其中10 m以深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)。

介于3~9 m占39.31%,大于9 m占3.27%。第⑩层含水砂层平均厚度3.21 m,厚度小于3 m的砂层分布面积占43.65%,介于3~9 m占55.58%,大于9 m占0.77%。第⑬层含水砂层平均厚度3.19 m,厚度小于3 m的砂层分布面积占54.16%,介于3~9 m占43.30%,大于9 m占2.54%。各砂层分布及厚度分区见图6~图8。

2.2 地面沉降与地裂缝

不均匀沉降和地裂缝可能导致城市地下管线的破坏,可能对地铁等交通工程设计和运行安全造成重大影响。根据2019年地面沉降速率统计,起步区大部分地区地面沉降速率小于30 mm/a,西部和中部部分地区地面沉降速率大于30 mm/a,东部、南部地区地面沉降介于10~20 mm/a,沉降速率最大的地区主要集中在三台镇东北部附近(图9)。

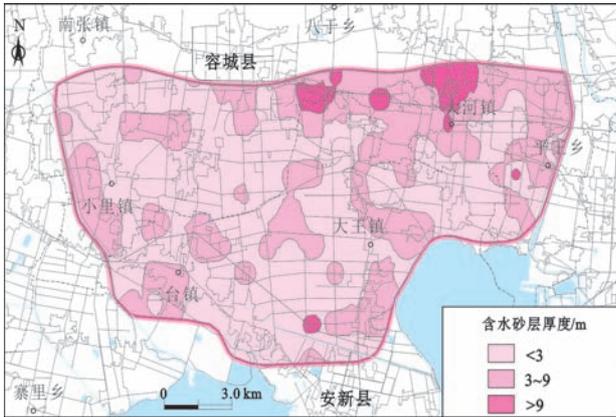


图6 起步区含水砂层厚度分区图(第⑧工程地质层)
Fig.6 Thickness partition map of water-bearing sand layer in the start-up area (No.8 engineering geological layer)

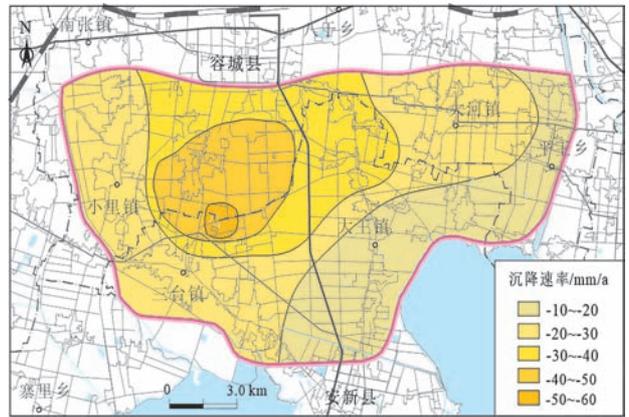


图9 起步区地面沉降速率图(2019年)
Fig.9 Land Subsidence Rate in the start-up area (2019)

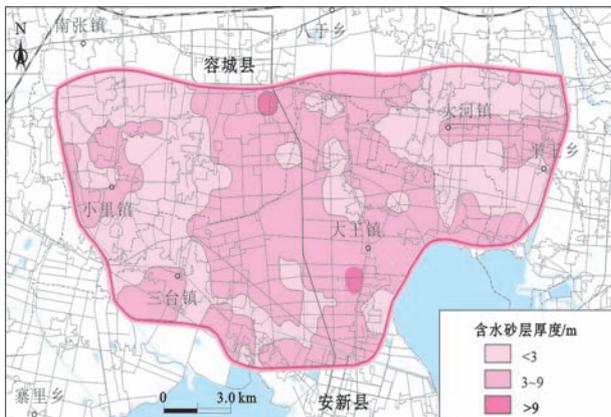


图7 起步区含水砂层厚度分区图(第⑩工程地质层)
Fig.7 Thickness partition map of water-bearing sand layer in the start-up area (No.10 engineering geological layer)

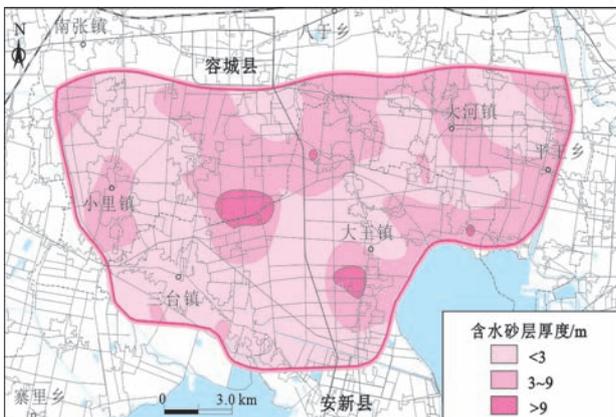


图8 起步区含水砂层厚度分区图(第⑬工程地质层)
Fig.8 Thickness partition map of water-bearing sand layer in the start-up area (No.13 engineering geological layer)



图10 起步区地裂缝分布图
Fig.10 Ground fractures distribution in the start-up area

起步区共发现地裂缝9处,主要表现为线性和片状塌坑两种形式。其中,线性地裂缝共计2处,均为小型地裂缝,开裂长度多不足100 m,宽度范围0.2~6.7 m,延伸方向无明显规律性;片状塌坑地裂缝共计7处,一般无方向性,塌坑长度范围1.3~11.9 m,宽度范围0.3~5.2 m(图10)。

2.3 液化砂土

饱和砂土在发生液化后,会失去抗剪能力,岩土体自稳能力丧失。起步区内地表以下20 m深度范围内分布有粉土、粉细砂层,存在地震砂土液化的可能。依据《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)相关规定,雄安新区地震烈度为7度,设计基本地震加速度0.10 g,但根据雄安新区规划要求,采用了基本设防烈度8度(0.2 g)进行评价。初判条件下,全区不存在液化砂土。但为了保障雄安新区千

年大计万无一失,进行了现状水位、预估水位(埋深10 m)两种情况下的详判(图11)。在现状水位下,起步区潜在中等液化区域主要分布在东南的安新县县城,潜在轻微液化区域主要分布在白洋淀紧邻区域:安新县城西北部三台镇高公堤村—安新镇留村、安新县同口镇南曲堤村—端村镇端村、容城县平王乡留通村—平王乡李朗村。预估水位10 m时,随着水位升高,液化程度加重,液化区域内地基液化等级以轻微为主,中等—严重液化区域与现状水位结果基本相同。

2.4 水土腐蚀性

水土腐蚀性会影响地下构筑物建材使用年限,

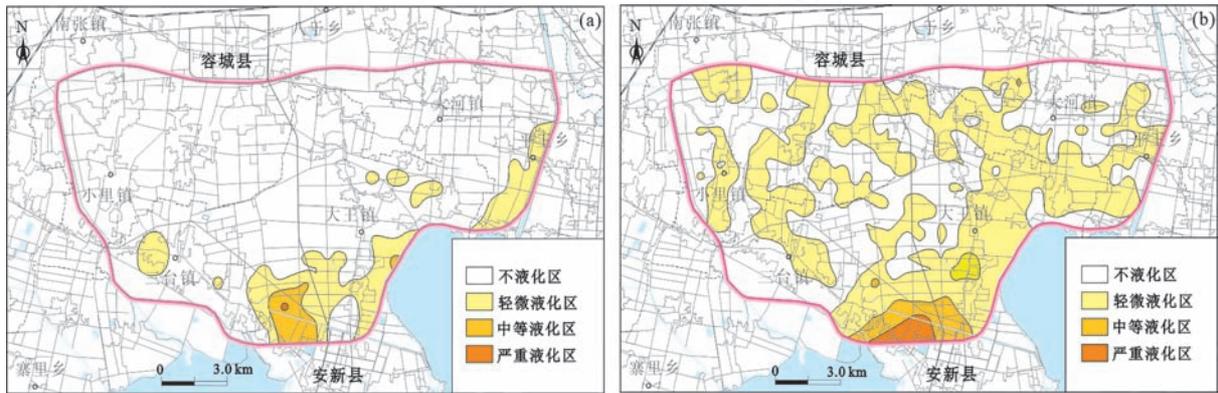


图11 起步区现状水位条件(a)和预估10 m水位条件(b)下砂土液化分布区

Fig.11 Distribution area of sand liquefaction under current water level conditions (a) and estimated water level of 10 meters (b) in the start-up area

3 适宜性评价

3.1 评价空间域划分

根据雄安新区起步区控制性详细规划中关于地下空间资源开发利用的相关规定以及地下空间开发利用现状综合分析,研究区仓储购物、生活娱乐、综合管廊、停车场、民防工程、垃圾处理站等建设空间主要在地表以下0~30 m空间域;地下快速交通、高压变电站、水处理中心等建设空间主要集中在30~50 m空间域;地下蓄水分洪、特种工程等战略基础设施建设空间将在50 m以下空间域,因此,本次研究将雄安新区70 m以浅地下空间划分为浅层0~30 m、次深层30~50 m、深层50~70 m三个空间域分别进行地质环境适宜性评价。

3.2 评价方法

地下空间开发利用适宜性评价是一个多层次、

影响地下构筑物使用寿命。起步区地下水对混凝土结构以微弱腐蚀为主、无中强腐蚀区,微腐蚀区主要分布在三台镇—大王镇以北,弱腐蚀区主要分布在大王镇与三台镇中间部分区域。地下水对钢筋混凝土中钢筋以微弱腐蚀为主,微腐蚀区分布在起步区北部,弱腐蚀区分布在起步区大王镇以南。地下水对钢结构无强腐蚀区,中腐蚀区主要分布在大王镇西南零星分布,弱腐蚀区在起步区内其他地区广泛分布。起步区土对混凝土结构以及钢筋混凝土中钢筋的腐蚀性均为微腐蚀或弱腐蚀,无中强腐蚀性,对钢结构的腐蚀性均为微腐蚀(夏雨波等,2022)。

多因素的复杂性工作,目前多采用层次分析法、专家问卷调查法、灰色理论法、模糊综合评价法、熵权法等方法进行评价,还没有成熟、规范、统一的评价方法。其中,层次分析法作为一种多目标分析决策方法,原理简单且具有扎实的理论基础,是一种系统化、层次化、定性和定量分析相结合的分析方法,被广泛应用于地下空间开发利用适宜性评价分析中。层次分析法是在系统分析复杂多目标决策问题的本质和影响因素的基础上,将多目标的复杂问题分解成若干个因素,并按关系分组形成目标、准则、指标等层次结构,通过定性和定量分析确定层次中各因素的相对重要性。基本步骤包括:建立层次结构评价指标体系、确定判断矩阵、确定评价指标权重向量和一致性检验(刘宏伟等,2022)。

3.3 评价指标体系及取值标准

基于研究区基础地质、工程地质、水文地质以

及环境地质等相关资料,对研究区地质环境基本特征进行了全面分析研究,确定研究区地下空间开发利用适宜性主要取决于地形地貌、工程地质条件、水文地质条件、环境地质问题等4个方面。地形地貌主要选取地形坡度作为评价指标,工程地质条件主要选取岩土体组合特征、岩土体承载力、砂土液化等作为评价指标,水文地质条件主要选取地下水位埋深、含水层富水性、含水层厚度、地下水腐蚀性等作为评价指标,环境地质问题主要选取地面沉降、地裂缝、坑塘等作为评价指标。

基于以上评价指标,综合研究区不同深度地下空间的地质环境条件,遵循客观性、有针对性、可操作性等原则,基于层次分析法的分析思路,借鉴多个城市的相关研究成果,针对浅层空间(0~30 m)、次深层空间(30~50 m)、深层空间(50~70 m)分别构建起步区地下空间资源开发利用地质适宜性评价指标体系(图12~图14)。

评价指标的取值标准,以相关标准规范为准,结合研究区实际情况,对每一划分区间赋值,对无法直接量化的评估指标,可采用专家打分法来定性分级及赋值。根据每个评价指标影响程度的大小,可将各评价指标划分为优良(1.0)、一般(0.5)、差(0.0)3个等级,确定了影响雄安新区起步区地下空间资源开发利用的地质适宜性评价指标的量化标准(表1)。

3.4 判断矩阵及权重

(1) 确定判断矩阵

分析系统的本质问题以及影响因素,构造多层次模型。一个完整的多层次结构模型包括目标层、准则层和指标层。对重要性的划分采用1-9标度法(表2)。

根据表2判断影响因素的相对重要程度,确定判断矩阵A:

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

(2) 确定评价指标权重向量

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 ω_i :

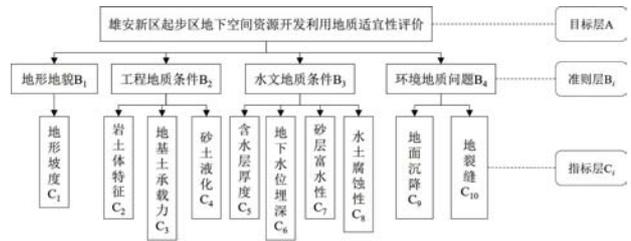


图12 雄安新区起步区浅层地下空间资源(0~30 m)开发利用地质适宜性评价指标体系

Fig.12 Evaluation index system of geological suitability for development and utilization of shallow underground space (0~30 m) in the start-up area of Xiong'an New Area

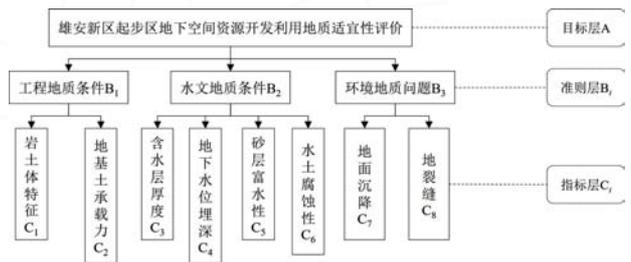


图13 雄安新区起步区次深层地下空间(30~50m)资源开发利用地质适宜性评价指标体系

Fig.13 Evaluation index system of geological suitability for development and utilization in sub-deep underground space (30~50m) in the start-up area of Xiong'an New Area

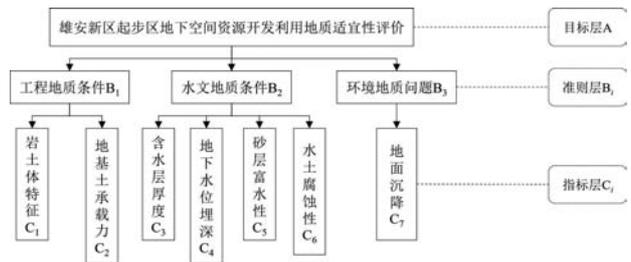


图14 雄安新区起步区深层地下空间(50~70m)资源开发利用地质适宜性评价指标体系

Fig.14 Evaluation index system of geological suitability for development and utilization in deep underground space (50~70m) in the start-up area of Xiong'an New Area

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

(3) 检验判断矩阵一致性

构造的判断矩阵需要根据公式(3)、(4)进行一

表1 雄安新区起步区地下空间开发利用地质适宜性评价指标分级标准

Table 1 Classification standard of suitability evaluation index for development and utilization of underground space in the start-up area of Xiong'an New Area

| 目标层 | 准则层 | 指标层 | 分级标准 | | |
|---------------------------------|--------|--------------------|----------|------------|--------|
| | | | 优良(1.0) | 一般(0.5) | 差(0.0) |
| 地下空间资源 开发利用地质 适宜性分层评 价 | 地形地貌 | 地形坡度/ $^{\circ}$ | < 15 | 15 ~ 25 | > 25 |
| | | 岩土体组合特征 | 单层、双层 | 三层 | 多层 |
| | 工程地质条件 | 岩土体承载力/kPa | > 160 | 90 ~ 160 | < 90 |
| | | 砂土液化 | ≤ 6 | 6 ~ 18 | > 18 |
| | 水文地质条件 | 地下水位埋深/m | > 10 | 5 ~ 10 | < 5 |
| | | 含水层厚度/m | < 3 | 3 ~ 9 | > 9 |
| | 环境地质问题 | 含水层富水性/(m^3/d) | < 100 | 100 ~ 1000 | > 1000 |
| | | 水土腐蚀性 | 弱 | 中 | 强 |
| | | 地面沉降速率/(mm/a) | < 30 | 30 ~ 50 | > 50 |
| | | 地裂缝 | 无或稀疏 | 较为密集 | 密集 |

表2 判断矩阵标度及其含义

Table 2 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 A_i 与 A_j 相比, A_i 比 A_j 稍微重要 |
| 5 | 两个因 A_i 与 A_j 相比, A_i 与 A_j 比较重要 |
| 7 | 两个因 A_i 与 A_j 相比, A_i 与 A_j 明显重要 |
| 9 | 两个因 A_i 与 A_j 相比, A_i 与 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 $a_{ji}=1/a_{ij}$ |

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。

RI 可根据表3进行查询, 并计算随机一致性比率 CR 。当 $CR < 0.1$ 时, 则认为此判断矩阵通过一致性检验; 当 $CR \geq 0.1$ 时, 则认为不满足一致性要求。

(4) 确定评价指标权重

由于不同深度影响地下空间资源开发利用的地质因素不相同, 因此, 不同开发深度, 评价指标权

表3 判断矩阵随机一致性指标

Table 3 Stochastic consistency index of judgment matrix

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

重也不相同。以浅层地下空间开发利用为例, 根据前面所述方法步骤, 首先构造准则层的判断矩阵, 然后再构造各准则层内的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、各层次单排序以及进行判断矩阵一致性检验。在计算出各指标的单排序权重后, 可根据准则层权重, 计算出指标层各指标的总权重, 因此, 浅层、次深层、深层地下空间资源开发利用地质适宜性评价指标权重取值见表4。

3.5 综合评价

当前, 国内外学者主要采用综合指数法、模糊综合评判法、多目标线性加权法等模型进行评价, 其中, 综合指数法是应用于评价地下空间资源开发利用地质适宜性的最广泛方法, 因此, 本文选用综合指数法开展雄安新区起步区地下空间资源开发利用地质适宜性评价, 公式如下:

$$S = \sum_{i=0}^n W_i P_i \quad (5)$$

式中: S —综合评价指数; W_i —第 i 个评价指标权重; P_i —第 i 个评价指标分值。

3.6 评价结果

雄安新区起步区面积约 200 km^2 , 采用 MapGIS 软件的空间分析功能, 按照 200 m \times 200 m 的矩形区域对全域进行划分, 共划分 44 250 个计算单元。根据雄安新区评价指标量化标准(表1)对各个指标进行量化, 并赋值至评价单元, 根据式(5)叠加各指标分值, 将影响因素图层进行加权叠加, 得到叠加后研究区的适宜性综合评价指数, 并将其合理分为 3

表4 起步区地下空间评价指标权重取值

Table 4 Weight values of evaluation indexes of underground space in the start-up area

| 指标层 | 地形地貌 | 工程地质条件 | 水文地质条件 | 环境地质问题 | 综合权重 W_i | | |
|---------|-----------------|------------------|-----------------|-----------------|------------|---------|---------|
| | $W_{B1}=0.0809$ | $W_{B2}=0.4005$ | $W_{B3}=0.3788$ | $W_{B3}=0.1397$ | 浅层 | 次深层 | 深层 |
| 地形坡度 | 1.0000 | | | | 0.080 9 | | |
| 岩土体组合特征 | | 0.549 9(0.650 0) | | | 0.220 2 | 0.278 6 | 0.278 6 |
| 岩土体承载力 | | 0.209 8(0.350 0) | | | 0.084 0 | 0.150 0 | 0.150 0 |
| 砂土液化 | | 0.240 2 | | | 0.096 2 | | |
| 地下水位埋深 | | | 0.115 3 | | 0.043 7 | 0.049 4 | 0.049 4 |
| 含水层厚度 | | | 0.381 6 | | 0.144 6 | 0.163 6 | 0.163 6 |
| 含水层富水性 | | | 0.403 5 | | 0.152 8 | 0.172 9 | 0.172 9 |
| 水土腐蚀性 | | | 0.099 5 | | 0.037 7 | 0.042 6 | 0.042 6 |
| 地面沉降速率 | | | | 0.800 0 | 0.111 8 | 0.114 3 | 0.142 9 |
| 地裂缝 | | | | 0.200 0 | 0.027 9 | 0.028 6 | |

段来表明不同的适宜性程度,其划分标准为:当 $0.67 \leq S$ 时,为适宜;当 $0.33 \leq S < 0.67$ 时,为一般适宜;当 $S < 0.33$ 时,为适宜性差。将获得的各指标评价结果的栅格图叠加后得到研究区地质适宜性分区,共分为三级,即敏感区 ($S < 0.33$)、一般区 ($0.33 \leq S < 0.67$)、适宜区 ($0.67 \leq S$),同时,根据研究区实际地质环境条件,将地面沉降大于 50 mm/a 、严重砂土液化区和砂层厚度大于 9 m 的指标为敏感指标,将敏感指标存在的地区直接划分为敏感区。最终得到不同深度地下空间资源开发利用地质适宜性评价成果见图 15~图 17。

由图 15 可知,起步区浅层地下空间敏感区 6.76 km^2 ,主要包括含水砂层厚度大于 9 m 区域和易严重砂土液化区域;一般区面积 75.15 km^2 ,主要包括含水砂层厚度介于 $3 \sim 9 \text{ m}$ 区域、中等砂土液化区、地面沉降速率介于 $30 \sim 50 \text{ mm}$ 之间区域和地下水强

腐蚀区;适宜区 114.09 km^2 。

由图 16 可知,起步区次深层空间敏感区 1.43 km^2 ,主要包括含水砂层厚度大于 9 m 的区域;一般

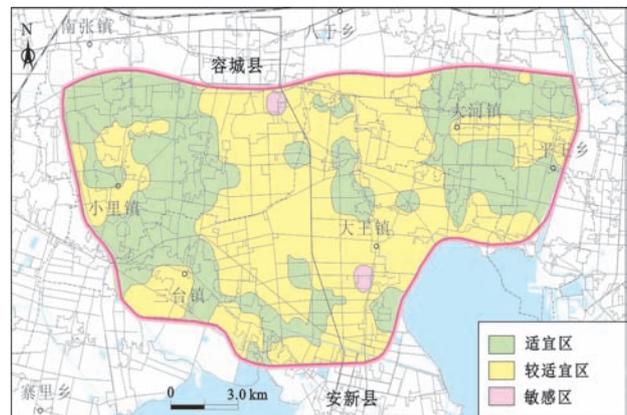


图 16 次深层地下空间地质适宜性评价 (30~50 m)
Fig.16 Evaluation on geological suitability of sub-deep underground space (30~50 m)

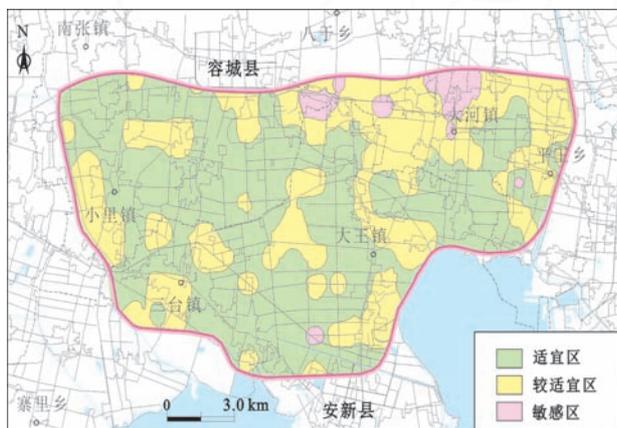


图 15 浅层地下空间地质适宜性评价 (0~30 m)
Fig.15 Evaluation on geological suitability of shallow underground space (0~30 m)

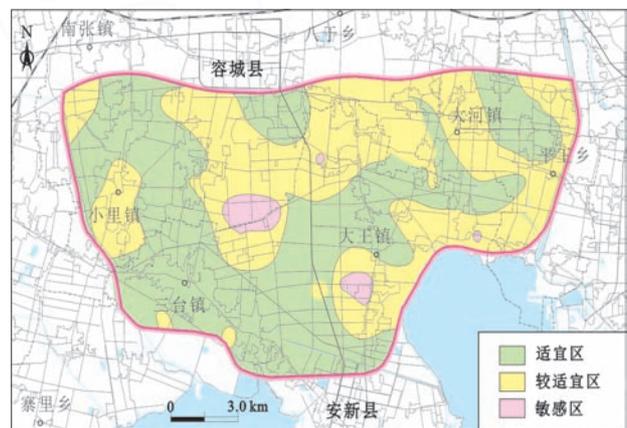


图 17 深层地下空间地质适宜性评价 (50~70 m)
Fig.17 Evaluation on geological suitability of deep underground space (30~50 m)

区 126.39 km²,主要包括⑩层含水砂层厚度介于3~9 m区域、地面沉降速率介于30~50 mm之间区域和地下水强腐蚀区;适宜区 68.18 km²。

由图 17 可知,起步区深层空间敏感区 4.65 km²,主要包括含水砂层厚度大于9 m的区域;一般区 115.06 km²,主要包括含水砂层厚度介于3~9 m区域、地面沉降速率介于30~50 mm之间区域和地下水强腐蚀区;适宜区 76.28 km²。

雄安新区起步区地下空间开发利用地质适宜性评价表见表 5 所示。

4 资源量估算

起步区 50 m 以浅地层土体结构较均匀、颗粒较细、砂层相对较少,适于地下空间开发。以坑塘调查及第四纪地质研究为基础,对起步区地下空间 50 m 以浅地层的资源量禀赋进行了估算,并计算了地下空间资源的损耗量。通过对比分析起步区地下空间土体结构特征,估算出 50 m 以浅不同深度地下空间资源量禀赋,见图 18~图 22 及表 6。

由图 18 可知,0~5 m 地层中,黏性土为 3.3×10^8

表 5 雄安新区起步区地下空间开发利用适宜性评价表

Table 5 Evaluation on geological suitability of underground space development and utilization in the start-up area of Xiong'an New Area

| 层位 | 适宜性分区 | 分布 | 建议 |
|---------------------|-------|--|---|
| 浅层地下空间 (0~30 m) | 敏感区 | 含水砂层厚度大于9 m 区域呈片状分布于大河镇以北与起步区北边界以南之间区域、胡村-于庄村一线西北侧区域和马家庄村周围 1 km 区域内,呈点状位于大河镇平王乡西南 1.2 km 处和小里镇西北 1 km 处;安新县西北部易严重砂土液化区。 | 地下空间开发利用避开敏感区,若无法规避,应开展专题研究确定抗坑底突涌、含水层保护、抗液化处理等措施。 |
| | 一般区 | 全区含水砂层厚度介于3~9 m 区域;平王乡东北部、大王镇西南和南部、三台镇东南部中等砂土液化区;容城县周围地面沉降速率介于30~50 mm 之间区域;三台镇西南部地下水强腐蚀区。 | 地下空间开发利用可在一般区开展,通过采取抗坑底突涌、预防不均匀地面沉降、抗液化处理和地下水腐蚀防护等措施来确保地下空间开发建设的安全。 |
| | 适宜区 | 除上述两类地区之外的区域。 | |
| 次深层地下空间 (30~50m) | 敏感区 | 含水砂层厚度大于9 m 区域呈点状位于小里镇午方北庄村东北 500 m 处、大王镇西南 800 m 和东北 1.3 km 处。 | 地下空间开发利用避开敏感区,若无法规避,应开展专题研究确定抗坑底突涌、含水层保护等措施。 |
| | 一般区 | 全区含水砂层厚度介于3~9 m 区域;容城县周围地面沉降速率介于30~50 mm 之间区域;三台镇西南部地下水强腐蚀区。 | 地下空间开发利用可在一般区开展,通过采取抗坑底突涌、预防不均匀地面沉降和地下水腐蚀防护等措施来确保地下空间开发建设的安全。 |
| | 适宜区 | 除上述两类地区之外的区域。 | |
| 深层地下空间 (50~70 m) | 敏感区 | 含水砂层厚度大于9 m 区域呈点状位于三台镇东北 3 km 处、大王镇西南 1 km 处。 | 地下空间开发利用避开敏感区,若无法规避,应开展专题研究确定抗坑底突涌、含水层保护等措施。 |
| | 一般区 | 全区含水砂层厚度介于3~9 m 区域;容城县周围地面沉降速率介于30~50 mm 之间区域;三台镇西南部地下水强腐蚀区。 | 地下空间开发利用可在一般区开展,通过采取抗坑底突涌、预防不均匀地面沉降和地下水腐蚀防护等措施来确保地下空间开发建设的安全。 |
| | 适宜区 | 除上述两类地区之外的区域。 | |

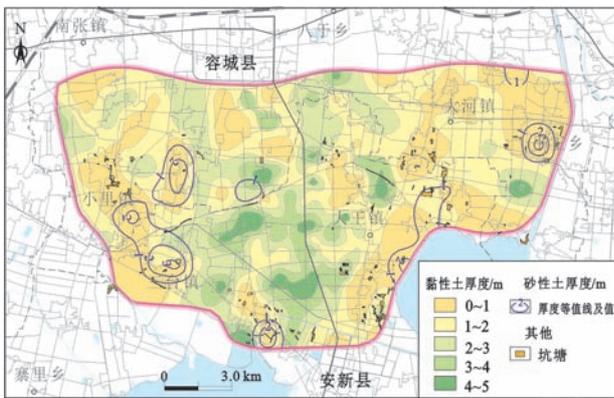


图18 地下空间0~5 m可利用资源分布图

Fig.18 Distribution map of available resources in underground space depth from 0 to 5 m

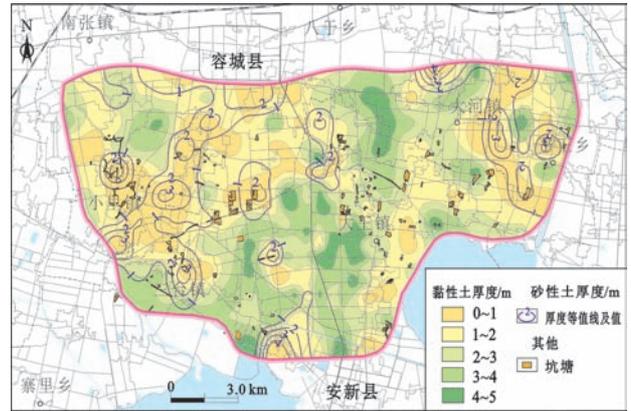


图19 地下空间5~10 m可利用资源分布图

Fig.19 Distribution map of available resources in underground space depth from 5 to 10 m

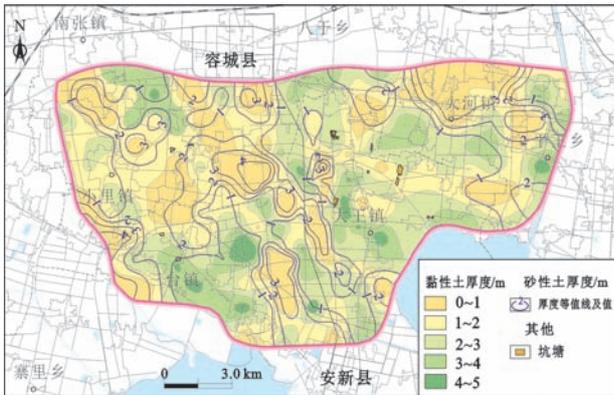


图20 地下空间10~15 m可利用资源分布图

Fig.20 Distribution map of available resources in underground space depth from 10 to 15 m

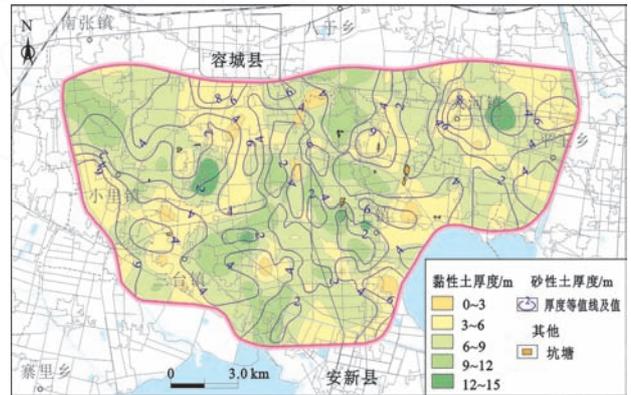


图21 地下空间15~30 m可利用资源分布图

Fig.21 Distribution map of available resources in underground space depth from 15 to 30 m

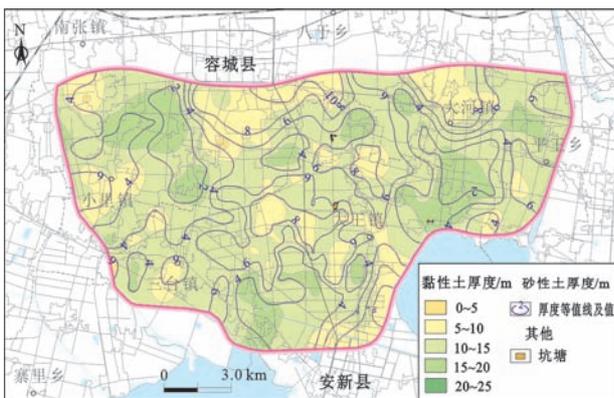


图22 地下空间30~50 m可利用资源分布图

Fig.22 Distribution map of available resources in underground space depth from 30 to 50 m

m^3 , 占整个体积的3.4%;砂性土为 $0.5 \times 10^8 m^3$, 占0.5%;粉土为 $4.9 \times 10^8 m^3$, 占5.0%。

由图19可知,5~10 m地层中,黏性土为 $4.1 \times 10^8 m^3$, 占整个体积的4.2%;砂性土为 $1.2 \times 10^8 m^3$, 占

1.2%;粉土为 $4.5 \times 10^8 m^3$, 占4.6%。

由图20可知,10~15 m地层中,黏性土为 $3.6 \times 10^8 m^3$, 占整个体积的3.7%;砂性土为 $2.7 \times 10^8 m^3$, 占2.7%;粉土为 $3.6 \times 10^8 m^3$, 占3.7%。

由图21可知,15~30 m地层中,黏性土为 $13.6 \times 10^8 m^3$, 占整个体积的13.8%;砂性土为 $7.3 \times 10^8 m^3$, 占7.4%;粉土为 $8.6 \times 10^8 m^3$, 占8.7%。

由图22可知,30~50 m地层中,黏性土为 $23.6 \times 10^8 m^3$, 占整个体积的24.0%;砂性土为 $10.7 \times 10^8 m^3$, 占10.9%;粉土为 $5.2 \times 10^8 m^3$, 占5.3%。

5 结论

(1)影响雄安新区起步区地下空间开发的主要地质因素包括含水砂层分布及厚度、砂土液化、地面沉降与地裂缝和水土腐蚀性。

(2)起步区浅层地下空间敏感区 $6.76 km^2$, 一般

表6 地下空间资源量计算结果
Table 6 Calculation results of underground space resources

| 深度 (m) | 地下空间资源量(单位:×10 ⁴ m ³) | | | | 地下空间损耗量(单位:×10 ⁴ m ³) | | | |
|-----------|--|------------|-----------|------------|--|--------|--------|-------|
| | 填土 | 黏性土 | 粉土 | 砂性土 | 填土 | 黏性土 | 粉土 | 砂性土 |
| 0~5 | 9 198.39 | 32 987.92 | 48 906.82 | 4 673.45 | 324.14 | 377.16 | 714.88 | 0.007 |
| 5~10 | 0 | 41 115.87 | 44 976.15 | 11 907.13 | 0 | 287.57 | 436.78 | 0.005 |
| 10~15 | 0 | 36 318.82 | 35 734.03 | 26 875.18 | 0 | 98.17 | 91.32 | 40.28 |
| 15~30 | 0 | 135 892.21 | 86 293.02 | 73 179.85 | 0 | 92.56 | 20.89 | 21.47 |
| 30~50 | 0 | 235 560.85 | 51 558.65 | 107 346.20 | 0 | 0.28 | 0 | 0 |

区面积 75.15 km², 适宜区 114.09 km²; 次深层空间敏感区 1.43 km², 一般区 126.39 km², 适宜区 68.18 km²; 深层空间敏感区 4.65 km², 一般区 115.06 km², 适宜区 76.28 km²。

(3) 起步区地下空间 0~5 m 地层中, 黏性土为 3.3×10⁸ m³, 砂性土为 0.5×10⁸ m³, 粉土为 4.9×10⁸ m³。5~10 m 地层中, 黏性土为 4.1×10⁸ m³, 砂性土为 1.2×10⁸ m³, 粉土为 4.5×10⁸ m³。10~15 m 地层中, 黏性土为 3.6×10⁸ m³, 砂性土为 2.7×10⁸ m³, 粉土为 3.6×10⁸ m³。15~30 m 地层中, 黏性土为 13.6×10⁸ m³, 砂性土为 7.3×10⁸ m³, 粉土为 8.6×10⁸ m³。30~50 m 地层中, 黏性土为 23.6×10⁸ m³, 砂性土为 10.7×10⁸ m³, 粉土为 5.2×10⁸ m³。

(4) 地下空间资源的开发利用应避免敏感区, 若无法规避, 应开展专题研究确定抗坑底突涌、含水层保护等措施; 在一般区进行地下空间资源开发利用时, 应通过采取抗坑底突涌、预防不均匀地面沉降和地下水腐蚀防护等措施来确保地下空间开发建设的安全。

(5) 本次雄安新区起步区地下空间资源开发利用地质适宜性与资源量评价结果为起步区地下空间开发利用提供参考; 同时, 地下空间资源开发利用具有不可逆性, 易受地质环境因素影响, 其开发利用必须因地制宜、合理规划、科学布局。

中文参考文献

- 蔡鹤生, 周爱国, 唐朝晖. 1998. 地质环境质量评价中的专家—层次分析定权法[J]. 地球科学, 23(3):299-302.
- 程光华, 王睿, 赵牧华, 等. 2019. 国内城市地下空间开发利用现状与发展趋势[J]. 地学前缘, 26(3): 39-47.
- 葛伟亚, 王睿, 张庆, 等. 2021. 城市地下空间资源综合利用评价工作构想[J]. 地质通报, 40(10):1601-1608.
- 郭朝斌, 王志辉, 刘凯, 等. 2019. 特殊地下空间应用与研究现状[J].

- 中国地质, 46(3):482-492.
- 郭骏瀚, 刘凯, 邓岳飞, 等. 2023. 基于熵权优化法的地下空间资源地质适宜性评价[J]. 地质通报, 42(2/3):385-396.
- 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.
- 韩博, 夏雨波, 马震, 等. 2023b. 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, 张曦, 杜亚楠, 等. 2023a. 基于粗糙集理论的雄安新区地下空间土体可利用属性重要性评价[J]. 华北地质, 46(3):43-48.
- 韩博, 马震, 夏雨波, 等. 2024. 雄安新区地下空间资源开发利用地质适宜性评价[J]. 地质通报, 43(4):594-610.
- 黄宽, 张万益, 王丰翔, 等. 2024. 地下空间储能国内外发展现状及调查建议[J]. 中国地质, 51(1):105-117.
- 蒋杰, 葛伟亚, 马青山, 等. 2021. 南昌市中心城区地下空间开发地质适宜性评价[J]. 地质通报, 40(5):734-744.
- 马邦闯, 谭飞, 焦玉勇, 等. 2020. 基于粗糙集与AHP的地下空间开发地质适宜性评价模型构建方法研究[J]. 安全与环境工程, 27(6): 153-159.
- 马莎, 刘聪聪, 张润华, 等. 2021. 基于熵权-层次分析法的地下空间适宜性评价[J]. 科学技术与工程, 21(23):10013-10020.
- 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.
- 李林, 王涛, 董英, 等. 2023. 地质结构约束下的城市多要素三维属性建模方法研究以西咸新区为例[J]. 西北地质, 56(3):169-177.
- 李鹏岳, 王东辉, 李胜伟, 等. 2021. 山前冲积平原型城市地下空间开发利用地质适宜性评价—以成都市为例[J]. 地质通报, 40(10): 1644-1655.
- 李鹏岳, 韩浩东, 王东辉, 等. 2021. 城市地下空间资源开发利用适宜性评价现状及发展趋势[J]. 沉积与特提斯地质, 41(1):121-128.
- 李晓昭, 王睿, 顾倩, 等. 2019. 城市地下空间开发的战略需求[J]. 地学前缘, 26(3):32-38.
- 刘宏伟, 王国明, 马传明, 等. 2022. 沉积平原区地下空间开发利用适宜性评价指标体系研究—以北京通州区和河北廊坊北三县为例[J]. 华北地质, 45(4): 68-74.
- 潘朝, 吴立, 左清军, 等. 2013. 基于模糊数学的武汉市地下空间开发地质适宜性评价[J]. 安全与环境工程, 20(2):19-23.
- 彭建, 柳昆, 郑付涛, 等. 2010. 基于AHP的地下空间开发利用适宜

- 性评价[J]. 地下空间与工程学报, 6(4):688-694.
- 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[J]. 地球科学, 46(5):1896-1908.
- 王成善,周成虎,彭建兵,等. 2019. 论新时代我国城市地下空间高质量开发和可持续利用[J]. 地学前缘, 26(3):1-8.
- 王兰化,马武明,李明明,等. 2015. 天津滨海新区地下空间开发适宜性评价[J]. 地质调查与研究, 38(4):299-304.
- 夏友,马传明. 2014. 郑州市地下空间资源开发利用地质适宜性评价[J]. 地下空间与工程学报, 10(3):493-497.
- 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.
- 邢怀学,窦帆帆,葛伟亚,等. 2022. 城市地下空间开发利用地质适宜性三维评价指标体系研究—以杭州市为例[J]. 地质论评, 68(2):607-614.
- 杨木壮,张建峰,郑先昌. 2009. 城市地下空间开发利用的潜在不利影响及其对策[J]. 现代城市研究, 24(8):24-28.
- 杨文采,田钢,夏江海,等. 2019. 华南丘陵地区城市地下空间开发利用前景[J]. 中国地质, 46(3):447-454.
- 张茂省,董英,孙萍萍,等. 2023. 城乡融合与地上地下空间协同探测评价的理论与方法以关中平原城市地质调查评价为例[J]. 西北地质, 56(3):153-168.
- 张晓波,刘凯,蒋鹏,等. 2023. 基于约束条件的深圳市南山区地下空间开发地质适宜性评价[J]. 水文地质工程地质, 50(4):213-224.
- 张明阳,王一鸣,叶文荣,等. 2020. 温州市规划区地下空间开发地质环境适宜性评价[J]. 土木工程学报, 53(S1):378-384.
- 邹承杰. 2018. 河北省容城县中更新世以来的钻孔沉积物地球化学特征及古气候演化[D]. 河北地质大学硕士学位论文.
- Chen Z L, Chen J Y, Liu H, et al. 2018. Present status and development trends of underground space in Chinese cities: evaluation and analysis[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 71: 253-270.
- Edelenbos J, Monnikhof R, Haasnoot J, van der Hoeven F, Horvat E, van der Krogt R. 1998. Strategic study on the utilization of underground space in the Netherlands [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 13(2): 159-165.
- Li XZ, Li CC, Parriaux Aurèle, et al. 2016. Multiple resources and their sustainable development in Urban Underground Space[J]. Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research, 55: 59-66.
- Ma S, Liu CC, Zhang RH, et al. 2021. Evaluation for suitability of underground space using entropy weight-analytic hierarchy process [J]. Science Technology and Engineering, 21(23): 10013-10020.
- Nathan D, Mark B, John D N. 2018. Going underground: An exploration of the interfaces between underground urban transport infrastructure and its environment[J]. Tunnelling and Underground Space Technology. 81: 450-462.
- Saaty T L. 1997. A scaling method for priorities in hierarchical structures [J]. Journal of Mathematical Psychology, 15(3): 234-281.
- Saaty T L. 1990. How to make a decision: The analytic hierarchy process[J]. European Journal of Operational Research, 48(1):9-26.
- Sterling R L, Nelson S. 1982. Planning the development of underground space[J]. Underground space, 7(2):86-103.
- Wout Broere. 2016. Urban underground space: Solving the problems of today's cities[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 55: 245-248.
- Zhou D K, Li X Z, Wang Q, et al. 2019. GIS-based urban underground space resources evaluation toward three-dimensional land planning: A case study in Nantong, China[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 84(1): 1-10.

References

- Admiraal H, Cornaro A. 2016. Why underground space should be included in urban planning policy and how this will enhance an urban underground future[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 55:214-220.