

文章编号: 1004—5589 (2025) 04—0653—18

王宏, 周丽, 乔东玉, 等. 郑州高新区地下空间开发利用适宜性三维评价 [J]. 世界地质, 2025, 44 (4): 653—670. DOI: 10.3969/j.issn.1004-5589.2025.04.010.

WANG H, ZHOU L, QIAO D Y, et al. 3D evaluation of suitability of underground space development and utilization in Zhengzhou High-Tech Zone [J]. World Geology, 2025, 44 (4): 653—670. DOI: 10.3969/j.issn.1004-5589.2025.04.010.

郑州高新区地下空间开发利用适宜性三维评价

王宏^{1,2,3,4}, 周丽^{1,2,3,4}, 乔东玉^{1,2,3,4}, 于雪鸥⁵, 卢琪⁶, 孙昊阳^{7*}, 林冰仙⁷

1. 河南省地质研究院, 郑州 450016;
2. 自然资源部 中原城市群多要素城市地质大数据工程技术创新中心, 郑州 450016;
3. 河南省城市地质工程技术研究中心, 郑州 450016;
4. 河南省自然资源科技创新中心 (智慧城市时空大数据), 郑州 450016;
5. 河南省地质科学研究所有限公司, 郑州 450001;
6. 河南省第三地质勘查院有限公司, 郑州 450019;
7. 南京师范大学 地理科学学院, 南京 210023

摘要: 针对现有地下空间评价方法多基于二维平面, 难以准确反映三维立体空间开发利用适宜性这一问题, 笔者提出一种基于规则体元模型的多要素地下空间开发利用适宜性三维评价方法, 使用规则体元模型作为评价的统一载体, 运用多种三维空间分析方法, 建立地下空间地质体模型和多要素三维体元属性模型, 结合层次分析法构建包含限制和分级指标的体系, 对郑州高新区地下空间开发利用适宜性进行三维评价。结果显示, 郑州高新区地下空间开发适宜性优良区域占比 >65%, 限制开发区域比较小, 工程地质和水文地质条件较好, 适合进行地下空间的开发利用; 在空间分布上, 研究区地下空间浅层适宜性最佳, 随着埋深增加, 适宜区域比重略有下降, 水平空间上呈现西部开发潜力和适宜性较东部更大。相较于二维平面的地下空间评价方法, 本研究所采用的基于三维体元模型的多要素地下空间开发利用适宜性评价方法, 有助于组织、管理、计算和表达任意位置的地下空间适宜性情况, 解决了传统二维分层评价深度信息损失的问题, 提升了深度方向的评价分辨率和结果可视性, 有利于为地下空间规划和建设提供更为丰富的信息和服务。

关键词: 地下空间; 开发利用; 适宜性评价; 三维空间分析; 郑州高新区

中图分类号: X141 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1004-5589.2025.04.010

3D evaluation of suitability of underground space development and utilization in Zhengzhou High-Tech Zone

WANG Hong^{1,2,3,4}, ZHOU Li^{1,2,3,4}, QIAO Dongyu^{1,2,3,4}, YU Xueou⁵, LU Qi⁶, SUN Haoyang^{7*}, LIN Bingxian⁷

收稿日期/Received: 2024-10-29; 修订日期/Revised: 2025-07-08; 出版日期/Published: 2025-11-25

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2020YFC1511704); 2024 年度河南省科技攻关项目 (242102210073); 2025 年度河南省地质研究院科研项目 (2025-905-XM02、2025-907-XM02); 郑州市自然资源和规划局项目 (郑财招标采购 2020-111)

第一作者: 王宏 (1987—), 男, 高级工程师, 主要从事数学数据库建设与地学信息系统开发工作。E-mail: mickeydad@126.com

* 通信作者: 孙昊阳 (1998—), 男, 博士研究生, 主要从事地质数据治理方面的研究工作。E-mail: shy_gis@njnu.edu.cn

© Editorial Office of World Geology. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

1. Henan Academy of Geology, Zhengzhou 450016, China;
2. Technology Innovation Center for Multi-element Urban Geological Big Data of Zhongyuan Urban Agglomeration, MNR, Zhengzhou 450016, China;
3. Henan Research Center of Urban Geological Engineering Technology, Zhengzhou 450016, China;
4. Henan Natural Resources Science and Technology Innovation Center (Smart City Space-Time Bigdata), Zhengzhou 450016, China;
5. Henan Institute of Geological Sciences Co., Ltd., Zhengzhou 450001, China;
6. Henan Third Geological Exploration Institute Co., Ltd., Zhengzhou 450019, China;
7. School of Geographic Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China

Abstract: To address the limitation of existing suitability evaluation methods for underground space development and utilization that predominantly rely on two-dimensional (2D) analyses and fail to accurately characterize three-dimensional (3D) underground space, the authors propose a multi-elements 3D suitability evaluation method based on a regular voxel model. By employing a voxel model as a unified evaluation framework, this study utilizes multiple 3D spatial analysis techniques to construct geological models and multi-factor 3D voxel attribute models of underground space. Combined with the analytic hierarchy process (AHP), an evaluation system incorporating constraint and graded indexes is constructed to evaluate the suitability of underground space development and utilization in the Zhengzhou High-Tech Zone. The results indicate that over 65% of the underground space in the study area is classified as highly suitable for development, with only a small proportion classified as restricted areas. Overall, the engineering geological and hydrogeological conditions are favorable for development and utilization. In terms of spatial distribution, the shallow layer exhibits the highest suitability, with a slight decrease in suitable areas as depth increases. Horizontally, the western part of the study area shows greater development potential and suitability than the eastern part. Compared with traditional 2D evaluation methods, the multi-factors 3D suitability evaluation method for underground space development and utilization based on 3D voxel model enables organization, management, computation, and visualization of evaluation results at any spatial location. It effectively addresses the loss of vertical information inherent in traditional 2D layered evaluation, enhances the evaluation resolution and result visibility in the vertical dimension, and provides more comprehensive information and services for underground space planning and construction.

Keywords: underground space; development and utilization; evaluation of suitability; 3D spatial analysis; Zhengzhou High-Tech Zone

0 引言

城市用地不足是中国大多数城市发展过程中遇到的难题^[1-2]。地下空间作为一种天然的资源,有着巨大的开发利用潜力^[3-4]。自二十世纪七八十年代起,国内外学者^[5-7]开启城市地下资源和地下空间开发规划的研究。在评价指标体系构建方面,传统的指标体系仅包含诸如地形地貌、工程水文地质条件等方面^[8-9]。近年来,已有研究从地质条件适宜性、建设现状以及地下空间开发效益等角度建立综合的评价指标体系^[10-12]。地下空间的资源分布,既有二维平面上的空间分布,又有竖向层次的布

局,一些研究者^[13-15]将地下空间在竖向上划分为3~4层,分层次地构建地下空间开发适宜性评价体系。在指标权重的确定方法方面,层次分析法是目前研究采用的主要方法^[16],在此基础上,利用模糊数学理论方法^[17-18]、多目标线性加权函数^[10]等进行加权叠加分析。

地下空间是一个三维立体空间,对地下空间开发适宜性进行三维评价较传统的评价方式更加科学^[19-20]。传统的地下空间开发适宜性评价虽然将地下空间在竖向上划分了多个层位,但将不同层位的众多信息“压缩”在相应的二维平面上进行评价,试图用二维评价结果代表某一特定深度范围的

结果。在这一过程中,损失了大量的三维信息,降低了评价结果的可用性和精确性。目前,应用三维建模技术对地下空间开发适宜性进行三维评价逐渐成为研究热点。孟天宇等^[21]构建了用于评价南京江北新区地下空间资源质量评价的三维地质模型,通过三维空间统计、层次分析法等最终得到地下空间资源质量的三维可视化评价结果。赵思成等^[22]针对山地城市特点,利用三维体元建模技术,对地下空间进行划分。与二维评价方法相比,三维评价结果可以直观地展现地下空间资源在不同深度的空间差异,具备更好的可视化表达效果。

郑州作为中国中部地区重要的中心城市,目前正处于加快建设国家中心城市的重要时期,科学、综合地利用地下空间资源对优化郑州城市规划布局、空间转型升级具有重要作用。根据《郑州市城市总体规划(2018—2035年)》,2035年郑州市的常住人口将达到1800万左右,而郑州市土地面积仅有7567 km²。人均土地面积将持续减少,进行地下空间的开发利用符合郑州城市现代化发展的趋势。郑州高新区位于郑州市西北部,是重要的科技创新、招商引资、绿色发展区域,拥有较大的地下空间开发需求。本文针对郑州高新区开展地下空间开发适宜性三维评价研究,在多源数据集成与融合的基础上,提出一种基于规则体元模型的多要素

地下空间开发利用适宜性三维评价方法,使用规则体元模型作为评价的统一载体,建立地下空间地质体模型和多要素三维体元属性模型,结合层次分析法构建包含限制和分级指标的体系,对郑州高新区地下空间开发利用适宜性进行三维评价,为郑州高新区地下空间开发利用提供合理化建议。

1 研究区地下空间资源开发利用的影响要素分析

以郑州高新区作为研究区,其范围包括郑州西南绕城高速、连霍高速、京广铁路、陇海铁路合围的区域,面积约97 km²(图1a)。根据评价工作实际情况,垂直方向评价范围为0~100 m。本次研究按照对资源的影响和利用导向确定评估要素,从地形地貌、工程地质条件、水文地质条件、地质环境问题以及已有地下空间开发利用现状等方面确定地下空间开发利用的关键影响因子。

1.1 地形地貌

研究区海拔69~123 m,主要为山前冲洪积平原地貌,地形平缓,地形地貌条件较好。

1.2 工程地质条件

研究区内第四纪地层发育,地面被较厚的第四纪松散堆积物覆盖。根据郑州市主城区三维地质结构调查结果^①,研究区内工程地质单元为山前冲洪

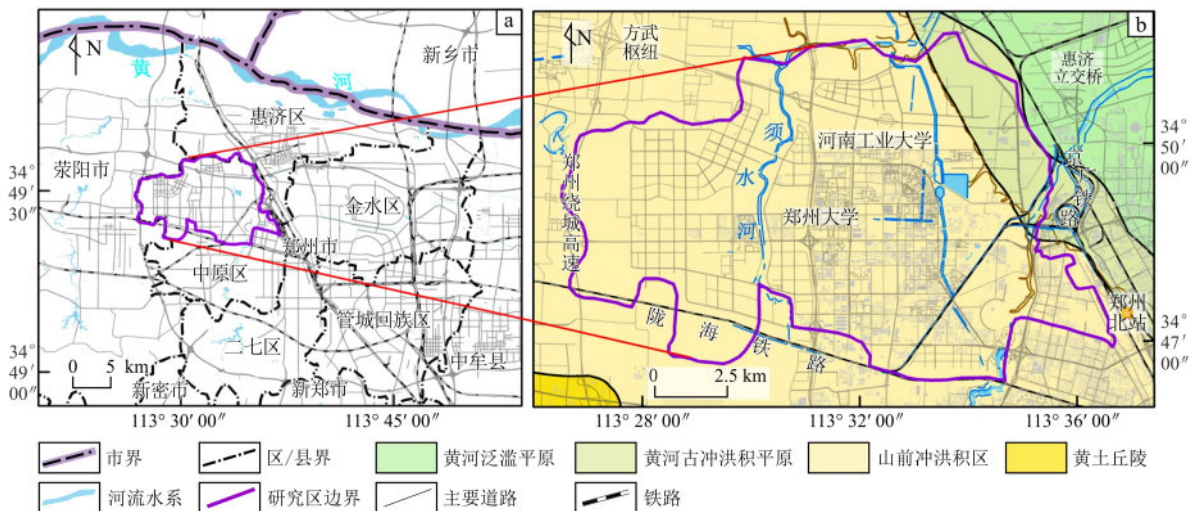


图1 郑州高新区位置图(a)和工程地质分区图(b)

Fig. 1 Location (a) and engineering geological zoning (b) of Zhengzhou High-Tech Zone

① 中化地质矿山总局河南地质局. 郑州市主城区三维地质结构调查报告. 郑州: 中化地质矿山总局河南地质局, 2022.

积区和黄河古冲洪积平原,以山前冲洪积区为主(图1b)。地表出露地层多为上更新统上段洪积相褐黄色粉土,厚度12~23.9 m,土质较均匀,含少量钙质结核。下伏地层为中更新统洪积相棕红、褐红色粉质黏土,含较多铁锰质斑块及钙质结核。针对研究区地质条件特征,对地层均匀性、地基承载力特征值、边坡稳定性、厚度加权平均压缩模

量、地层可挖性等主要影响因素进行分析。

地层均匀性 郑州高新区岩土体类型一般为填土、粉土、粉质黏土、细砂土,不同土体类型对地下空间开发利用影响如表1所示^[23]。区内沉积特点及沉积韵律基本一致,垂向上土体结构主要为粉土-粉质黏土双层结构,西南部局部分布粉土-粉质黏土-细砂三层结构。

表1 不同土体类型对地下空间开发利用影响

Table 1 Impacts of different soil types on underground space development and utilization

土层类别	结构特征及物理参数特点	对地下空间开发的影响
填土	非均匀土质、高压缩性、湿陷性、低强度	可能会引起较大的地层位移和累计地面沉降差异
粉土	介于砂类土和黏性土之间	在地下水条件不利时可能发生坍塌
砂土	透水性强、压缩速度快、内摩擦角大、抗剪强度较高	在地下水水位高的地区进行地下空间开发时可能产生涌水或渗漏、塌方、塌陷等地质灾害
可塑、软塑状黏性土	黏性土中黏粒含量较大,压缩量大,黏聚力决定抗剪强度,内摩擦角较小	变形量大,对地下空间开发影响较大
坚硬、硬塑的黏性土	压缩量小,抗剪强度较大,自稳能力好,内摩擦角较大	变形量较小

地基承载力 研究区0~-100 m内岩石可变形性较差。在石佛镇附近区域,0~-30 m内的地基承载力特征值为 $f_{ak} \leq 90$ kPa,研究区其他区域地基承载力特征值为90~160 kPa。研究区-30~-50 m的地基承载力特征值为160~300 kPa,-50~-100 m的地基承载力特征值 >300 kPa。

边坡稳定性 研究区0~-30 m内,黏聚力参数均 >17 kPa,内摩擦角参数 $\leq 21^\circ$,稳定性好;-30~-50 m内,黏聚力参数为20~24 kPa,内摩擦角参数为 $20^\circ \sim 24^\circ$;-50~-100 m内,石佛镇—须水河以西的区域,黏聚力参数为27~29 kPa,内摩擦角参数为 $15^\circ \sim 20^\circ$,石佛镇—须水河以东区域,黏聚力参数为29~31 kPa,内摩擦角参数为 $10^\circ \sim 15^\circ$ 。

厚度加权平均压缩模量特征值 研究区0~-30 m内,在西四环—沟赵乡一带,加权压缩模量为9.9~10.8 MPa,其余地区的加权压缩模量为9.0~9.9 MPa;-30~-50 m内,西四环—沟赵乡一带,加权压缩模量为10~12 MPa,其余地区的加权压缩模量为8~10 MPa;-50~-100 m内,研究区加权压缩模量为12.2~13.5 MPa。

地层可挖性 在地下空间工程施工过程中,地层的开挖难易程度对建设的效率有较大的影响。研究区0~-15 m,-50~-100 m内,地层不含钙质胶结层和卵石层,在-15~50 m内,沟赵乡东北部和东南部的区域,有钙质胶结层分布。

1.3 水文地质条件

地下空间工程在施工工程中容易受到地下水类型、流向、埋深、富水性、水位变化和腐蚀性的不利影响。本研究区地下水埋深较大,上部缺乏粗颗粒潜水含水层,不能形成统一的潜水位,在上部粉土-粉质黏土交界处,在地表水体附近,第一层地下水以上层滞水形式存在,分布范围较小。本区稳定地下水含水层埋深为45~90 m,具有承压水性质。

1.4 地质环境问题

不良岩土体是指在工程建设中对其上部的建筑物产生危害的土体,这是由其特殊的工程地质性质决定的。在郑州市主城区不良岩土体主要包括:湿陷性黄土、液化砂土和淤泥质软土。本研究区内有少部分湿陷性黄土分布。如以湿陷性黄土作为地基,湿陷变形对上部工程的结构造成损伤破坏。湿

陷性黄土地基的湿陷性评价结果显示, 湿陷量的计算值均小于 300 mm、自重湿陷量小于 70 mm, 为 I 级轻微非自重湿陷。

1.5 已有地下空间开发利用现状

既有地表和地下建(构)筑是地下空间开发利用适宜性评价中不可忽视的现实因素。研究区已开发地下空间包括附建式和单建式, 其中附建式地下空间开发以地下 1~2 层为主, 少数开发至地下 3~4 层, 开发深度以 15 m 以浅为主, 地下空间的开发功能主要为配建停车, 极少数用于地下商业开

发; 单建式地下空间包括地下交通设施、地下市政设施两类, 其中, 地下通道一般为 10 m 以浅的浅层开发, 市政综合管廊为 15 m 以浅的浅层开发, 城市轨道交通为 15~25 m 的中层开发。

2 地下空间开发利用适宜性三维评价方法

2.1 评价流程

本研究采用的地下空间开发利用适宜性三维评价总体流程如图 2 所示, 可分为 3 个步骤:

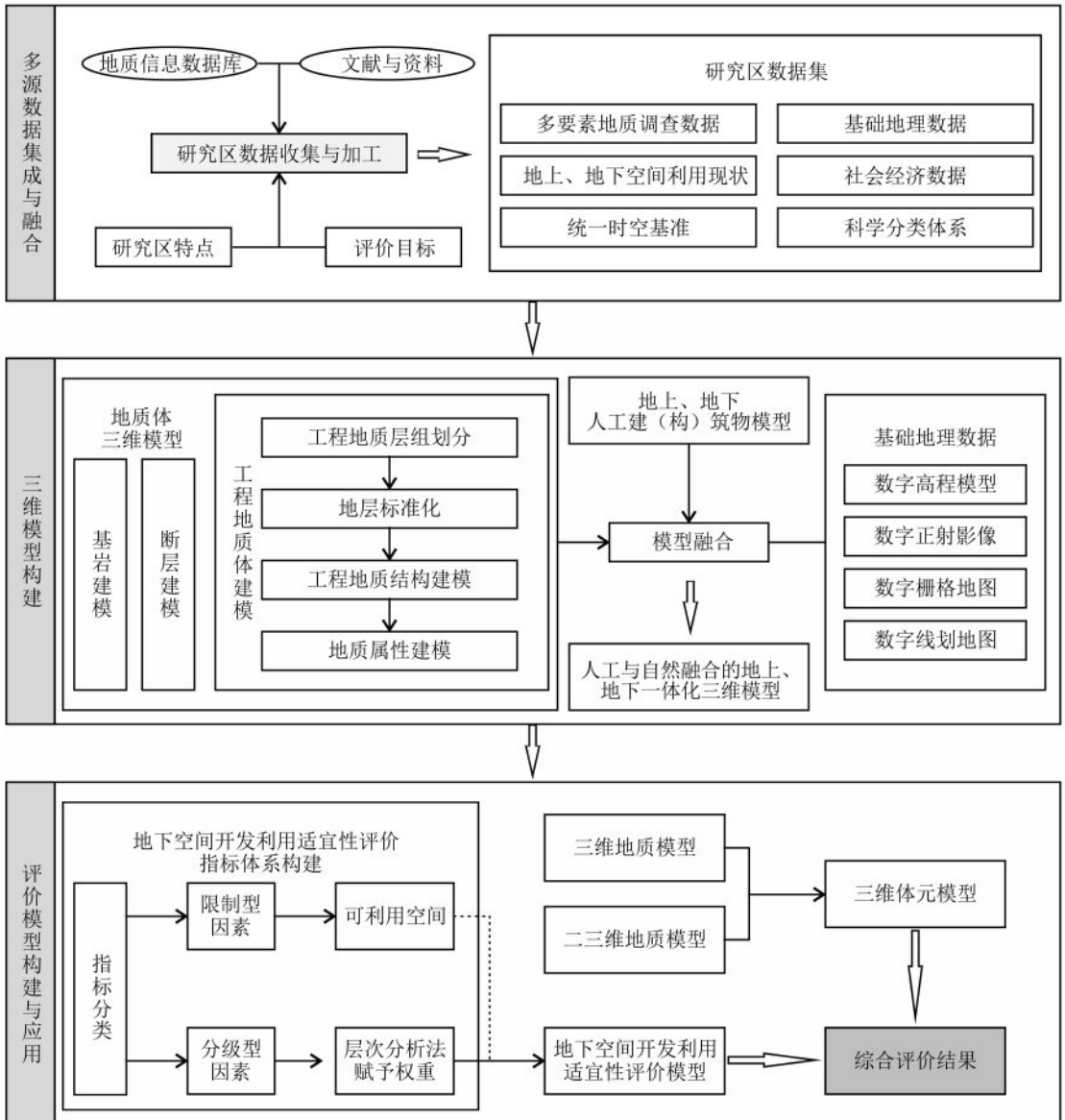


图 2 评价流程

Fig. 2 Evaluation process

多源数据集成与融合 广泛收集研究区内自然、环境、人文、社会经济等资料,了解研究区特点以及规划和发展目标等信息,开展数据资料的调研和收集,并对数据进行加工、分析、整合,形成具有统一时空基准与科学分类体系的数据集。

三维模型构建 基于研究区地形地貌和工程地质钻孔等数据构建研究区地质体结构模型和属性模型,构建研究区基岩模型和断层模型,融合研究区基础地理数据、人工建(构)筑物三维模型,形成自然与人工对象融合的地上、地下一体化三维模型。

地下空间开发利用适宜性评价模型构建与评价 结合研究区实际情况,构建涵盖地质条件、自然地理、社会经济等要素的地下空间开发适宜性评价指标体系,厘定地下空间开发利用影响因素,结合层次分析法,确定其中的主要影响因素和二级因子及其权重,建立研究区地下空间适宜性评估模型;根据要素在二维平面上的分布、竖向空间上的影响范围,结合地质模型和其他评价数据,构建用于评价的三维体元模型;获得研究区地下空间开发

利用适宜性评价结果并进行可视化。

2.2 评价方法

(1) 层次分析法

地下空间的评估要素复杂多样,因素相互联系、相互制约,在对多目标进行综合分析时,需得出不同指标因子间的重要性关系。考虑地下空间的复杂性与模糊性,采用层次分析法来确定各分级指标的重要性。层次分析法主要包括构造判断矩阵、计算评价指标权重、一致性检验3个步骤^[24],经组织专家构建判断矩阵,并通过判断矩阵中特征向量的归一化,可确定多个指标的相对优劣次序和量化权重,最后通过一致性检验调整权重使判断矩阵符合一致性规则。采用层次分析法,有利于明确影响要素的分析和指标体系建立。

(2) 三维体元评价方法

为了对地下空间属性建模和地下空间适宜性评价的数据进行统一组织、管理、计算和表达,我们设计了一种基于三维规则体元的数据结构(图3),从而支持三维数据的生成构建、分析计算与渲染可视化。本数据结构以三维规则体元作为承载评价数

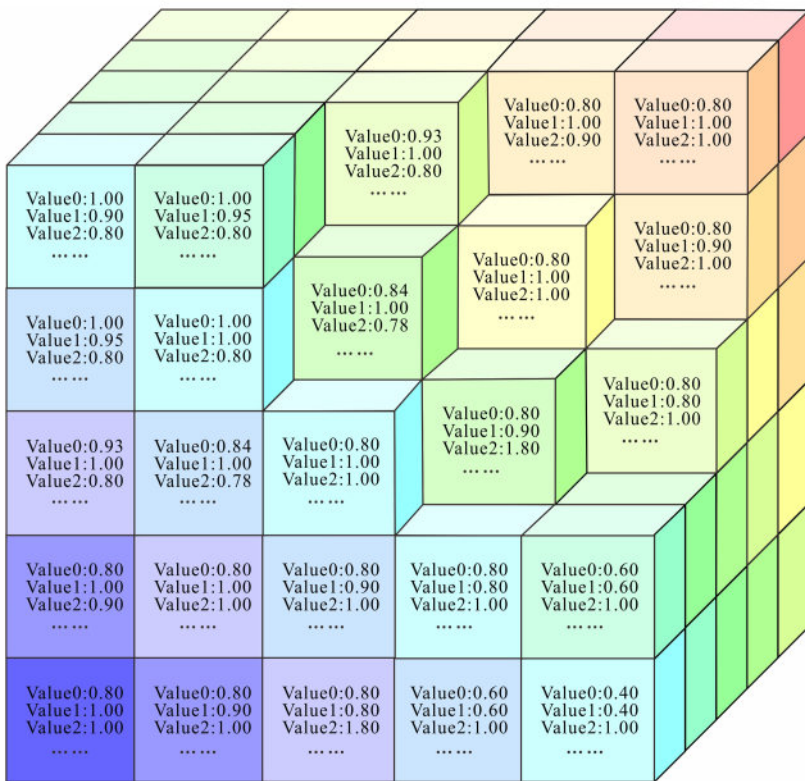


图3 三维体元数据模型示意图

Fig. 3 Diagram of 3D voxel model

据的基本单元, 在垂直方向和其他两个方向采用不同的步长分辨率以提升评价精度和存储效率。基于规则体元方法的空间分割方式相对简单, 更适用于表达和模拟连续空间变化问题的建模, 而且容易实现卷积、插值、叠加分析和几何变换, 具有计算高效、空间标识便捷等优势。

通过构建上述三维规则体元模型进行地下空间开发适宜性的三维评价。三维体元构建流程 (图 4) 为: 首先, 根据实验区的范围 (包括水平范围和纵向范围)、网格离散步长等参数构建初始体元。然后, 针对多源异构数据, 将不同的属性值通过不同的策略写入体元: 对于二维数据, 将矢量数据转为栅格, 通过设置影响范围深度, 将二维栅格拉伸为三维体元; 对于已知结构的地质模型、建(构)筑物模型, 采用三维空间离散化技术建立三维体元, 通过三维空间插值的方式将属性值写入

体元。

为实现上述算法, 本研究使用 C#语言, 基于 .Net framework 4.7.2 框架, 完成了地下空间开发利用适宜性三维评价系统的研发工作。本系统集成评价体系构建与指标权重计算、二、三维矢量-栅格数据处理、三维评价体元生成与融合、评价结果计算与可视化等功能模块为一体, 旨在为研究区地下空间评价提供从数据处理到评价结果展示的全流程支持。

3 研究区地下空间开发利用三维适宜性评价

3.1 地下空间开发利用适宜性评价体系构建

根据目前所掌握的各类资料, 结合郑州高新区地下空间实际情况, 确定研究区地下空间开发利用适宜性评价指标体系, 将其分为限制型指标和分级型指标两类, 如图 5 所示, 其中灰色的为限制型指标。

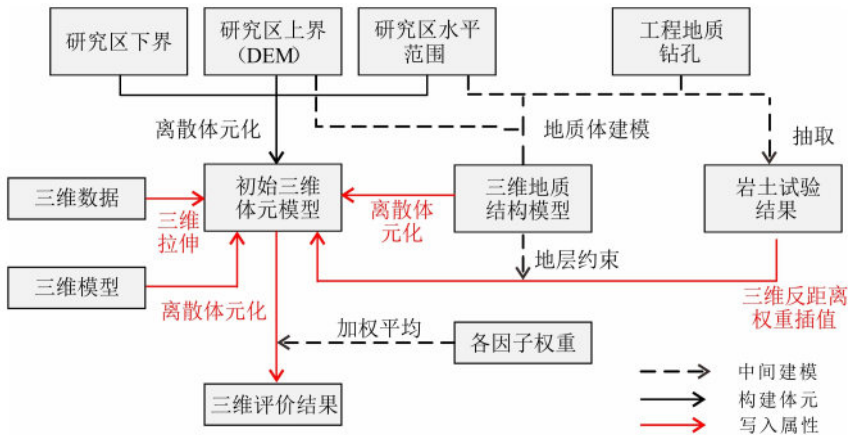


图 4 基于三维体元的建模和评价技术路线

Fig. 4 Technical route of modeling and evaluation based on 3D voxels

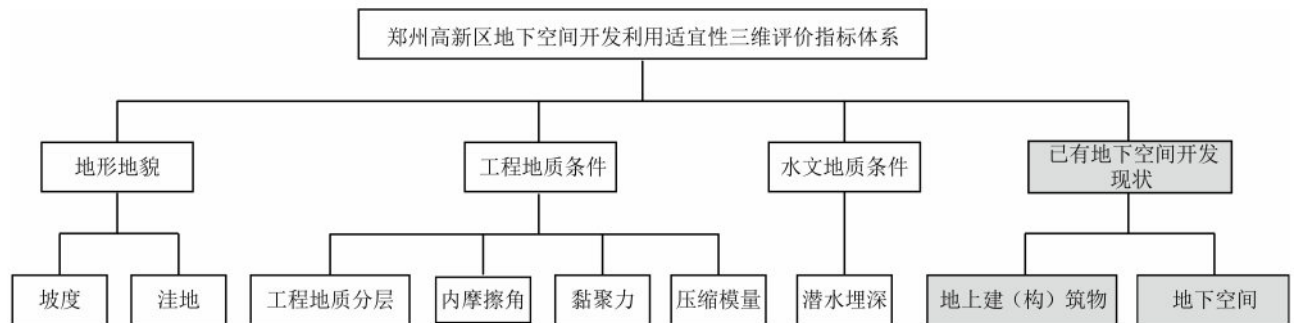


图 5 郑州高新区地下空间开发利用适宜性三维评价指标体系

Fig. 5 Three-dimensional evaluation index system for suitability of underground space development and utilization of Zhengzhou High-Tech Zone

3.2 评价因素数据处理

(1) 限制型因素

限制型因素是对地下空间开发利用影响突出的主导限制性要素,一旦被确认为限制区域,则在非必要时不应当开发。若被分为限制开发区域则被赋予“0分”,并在其他指标中不进行加权,限制型因素指标如表2所示。

对地上建筑的地下影响空间按表3进行推算。

表2 限制型因素指标

Table 2 Restrictive factor indexes

因素分类	因素名称	限制开发区域	无影响区域
已开发区域	地上建(构)筑物的地下延伸空间	建筑地下影响区域	其他区域
	地下建(构)筑物,如地下室、储藏室、防空洞、地下交通等	本体区域及影响区域	其他区域

表3 建筑物基础对地下空间资源影响深度分级

Table 3 Classification of impact depths of building foundations on underground space resources

建筑类别	建筑层数/层	高度/m	影响深度/m
低层建筑	1~3	<9	6~10
多层建筑	4~9	9~30	10~30
高层建筑	10~29	30~100	30~50(或到基岩)
超高层建筑	≥30	>100 m	>50(或到基岩)

地上建(构)筑物的地下影响空间如图6所示。

对于已建成的各类地下建(构)筑物,一般认为在其周围存在一个矩形的影响范围。将地下空间范围与研究区范围进行叠加,根据地下空间底板和层高,推算其影响空间,位于影响范围的为限制开发区域,其余为无影响区域。地下空间的分布如图7所示。

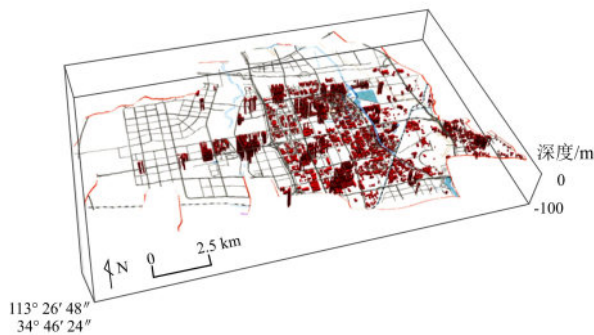


图6 地上建(构)筑物的地下延伸空间

Fig. 6 Underground extension space of aboveground buildings

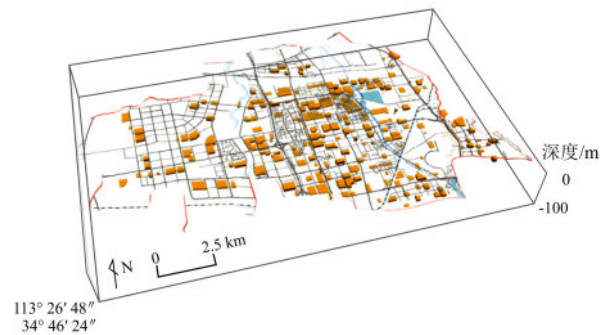


图7 已建成地下建(构)筑物影响空间

Fig. 7 Impact space of existing underground buildings and structures

(2) 分级型因素

结合适宜性评级指标体系,将地形地貌、工程地质条件、水文地质条件的7个分级型因素按4级指标进行分级,分为“适宜性优”、“适宜性良”、“适宜性中”和“适宜性差”,并相应地赋值为

“10分”、“6分”、“3分”和“1分”,赋值标准与指标权重如表4所示。

(3) 工程地质结构模型

根据郑州市多要素城市地质调查工作对郑州市工程地质层序的划分,按地貌及岩土工程特性,研

表 4 分级型因素的赋值标准与指标权重
Table 4 Valuation criteria and index weights for grading factors

一级指标	二级指标	适宜性优	适宜性良	适宜性中	适宜性差	依据规范
地形地貌	坡度/ (°)	<10	10 ~ 30	30 ~ 50	>50	《城乡规划工程地质勘察规范》 ^[25]
	洼地	其他	/	洼地	/	《城市地下空间规划标准》 ^[26]
工程地质条件	工程地质土体	密实碎石土	中密碎石土; 密实或中等密实的砾砂、粗砂、中砂; 密实硬塑的黏性土	稍密碎石土; 密实的粉砂、细砂; 密实的粉土; 经过科学设计施工压实的人工填土	饱和疏松状粉砂、细砂; 饱和稍密的粉土; 疏松流塑状的黏性土 (软弱地基); 人工填土; 淤泥、淤泥质土; 其他工程上的不良特殊土体 (如膨胀土、盐渍土等)	《岩土工程勘察规范》 ^[27] 、《高层建筑岩土工程勘察规范》 ^[28]
	压缩模量/MPa	>20	10 ~ 20	5 ~ 10	<5	
	内摩擦角/ (°)	>30	20 ~ 30	10 ~ 20	<10	
	黏聚力/kPa	>50	30 ~ 50	10 ~ 30	<10	
水文地质条件	潜水埋深/m	>30	15 ~ 30	7.5 ~ 15	<7.5	《城乡规划工程地质勘察规范》 ^[25]
	赋值	10	6	3	1	/

注: “/” 表示无此级别。

究区由山前冲洪积区和黄河古冲洪积平原两个工程地质分区组成。其中, 山前冲洪积工程地质区工程地质层序划分为 10 个层组 44 个层序, 黄河古冲洪积平原工程地质区工程地质层序划分为 17 个层组 68 个层序。郑州高新区工程地质结构建模使用真实钻孔数据 2 222 个, 提取钻孔的地层分层信息, 并做标准化处理, 在此基础上进行三维工程地质结构建模 (图 8)。

为了评价地层建模结果, 另选 5 个钻孔作为验证钻孔。在验证钻孔相同位置处提取虚拟钻孔分层数据, 用于对比和真实钻孔之间的误差。误差分析提取虚拟钻孔和原始数据钻孔分层之间的深度差、误差与真实地层深度的比例。经计算, 平均误差为 0.011 4 m, 平均误差占比 0.22%, 建模精度良好, 结果如表 5 所示。

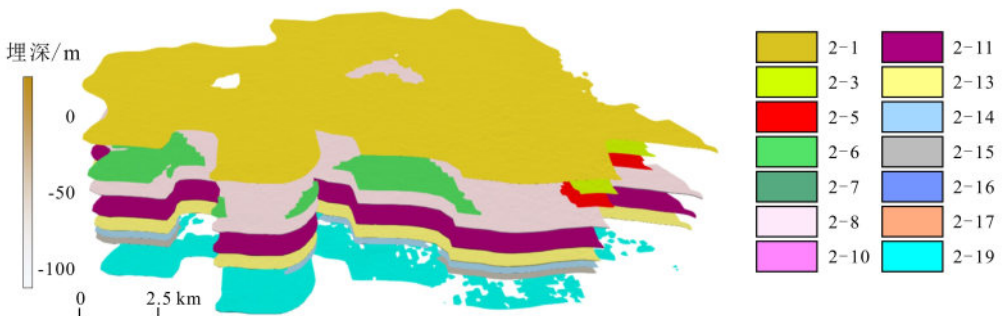


图 8 郑州高新区松散层地质体模型

Fig. 8 Geological body model of loose layer in Zhengzhou High-Tech Zone

表 5 建模结果与真实钻孔对比分析评价

Table 5 Comparative analysis and evaluation between modeling results and actual boreholes

钻孔号	分层号	真值分层深度/m	建模分层深度/m	误差值/m	误差占比/%
E8 (1) JZ1-II 19-254	1	3.2	3.198 3	0.001 7	0.05
	3	5.1	5.085 6	0.014 4	0.28
	5	3.0	2.996 6	0.003 4	0.11
	8	20.2	20.213 4	0.013 4	0.07
	11	13.0	12.960 8	0.039 2	0.30
	13	19.5	19.456 1	0.043 9	0.23
北四环 ZK86077	1	2.6	2.593 4	0.006 6	0.25
	8	15.2	15.204 5	0.004 5	0.03
	11	36.2	36.186 6	0.013 4	0.04
	13	11.9	11.899 2	0.000 8	0.01
	14	13.1	13.107 8	0.007 8	0.06
盛世港湾 13	1	0.8	0.798 2	0.001 8	0.23
	6	2.2	2.196 9	0.003 1	0.14
	8	11.5	11.499 2	0.000 8	0.01
	11	19.5	19.486 7	0.013 3	0.07
AB010632	1	0.8	0.781 2	0.018 8	2.35
	8	21.9	21.869 8	0.030 2	0.14
	11	22.3	22.310 9	0.010 9	0.05
	13	10.0	9.994 3	0.005 7	0.06
石 1-1 孔	8	23.8	23.768 4	0.031 6	0.13
	11	16.6	16.603 2	0.003 2	0.02
	13	9.6	9.574 5	0.025 5	0.27
平均值				0.011 4	0.22

(4) 地质属性建模

根据压缩模量、黏聚力、压缩系数、内摩擦角、重度、干重度、比重、含水率、饱和度、孔隙比、液性指数、塑性指数、塑限、液限等土工试验结果,采用三维反距离权重插值方法,以三维地质层组分层结果作为空间约束,结果写入三维体元属性模型,建模结果如图 9 所示。

采用赋值标准和指标权重,对各指标进行处理和分级评价。依据数字高程模型(digital elevation model, DEM)进行坡度分析,利用分级条件进行坡度分类和模型构建(图 10a);根据 DEM 进行水文汇流分析,计算得到洼地区域(图 10b);依据岩土力学性质,将地质体模型中的土层分为优势持力层、软弱敏感层、其他地层(图 10c);在普通土体的工程地质条件指标中,对工程性能起决定作

用的是土的承载力标准值、压缩模量、黏聚力和内摩擦角;对于特殊土体,则应当考察其特殊的工程性质对工程的影响程度,根据地质属性三维建模结果,对每一体元中的数值进行重分类(图 10d ~ f);对钻孔数据中的稳定水位深度进行二维空间插值,计算潜水埋深并分级(图 10g)。

3.3 指标评价权重计算

依据前文构建的评价体系,组织区域地质专家,根据研究区地下空间条件和专家们丰富的工作经验,按照中间层和决策层的体系,对图 5 中的评价因子进行两两对比和打分,结果如表 6 ~ 8 和图 11 所示。

3.4 评价结果

基于本文提出的评价指标体系及权重,综合上文得到的各指标的评价分级结果,通过加权计算得

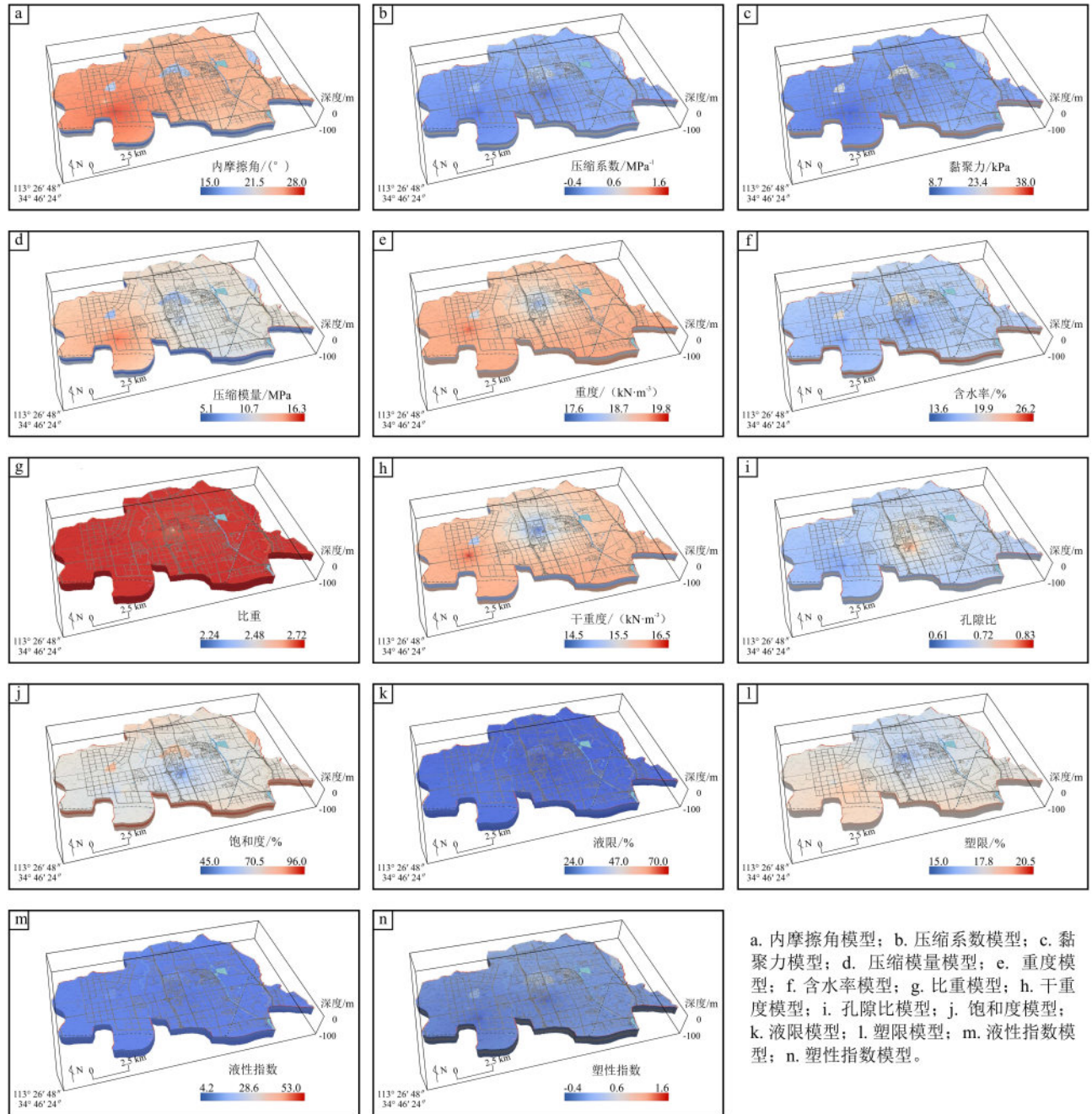


图 9 郑州高新区地质属性模型

Fig. 9 Geological attribute models of Zhengzhou High-Tech Zone

到研究区地下空间开发利用适宜性综合评价结果。根据城市地下空间规划标准^[26], 将地下空间分为浅层 (0 ~ -15 m)、次浅层 (-15 ~ -30 m)、次深层 (-30 ~ -50 m) 和深层 (-50 ~ -100 m), 对于各层的限制开发区、适宜性差区、适宜性中区、适宜性良区和适宜性优区进行容积统计和可视

化展示 (图 12 ~ 16), 评价结果汇总如表 9 所示。

根据综合评价结果的空间分布和定量的分层评价结果统计, 研究区地下空间开发利用适宜性总体情况良好, 主要为适宜性良区, 适宜性优、良区域容积超过总容积 65%。研究区内限制开发区域的总体占比为 2.17%, 占比较小, 说明该区域地下空

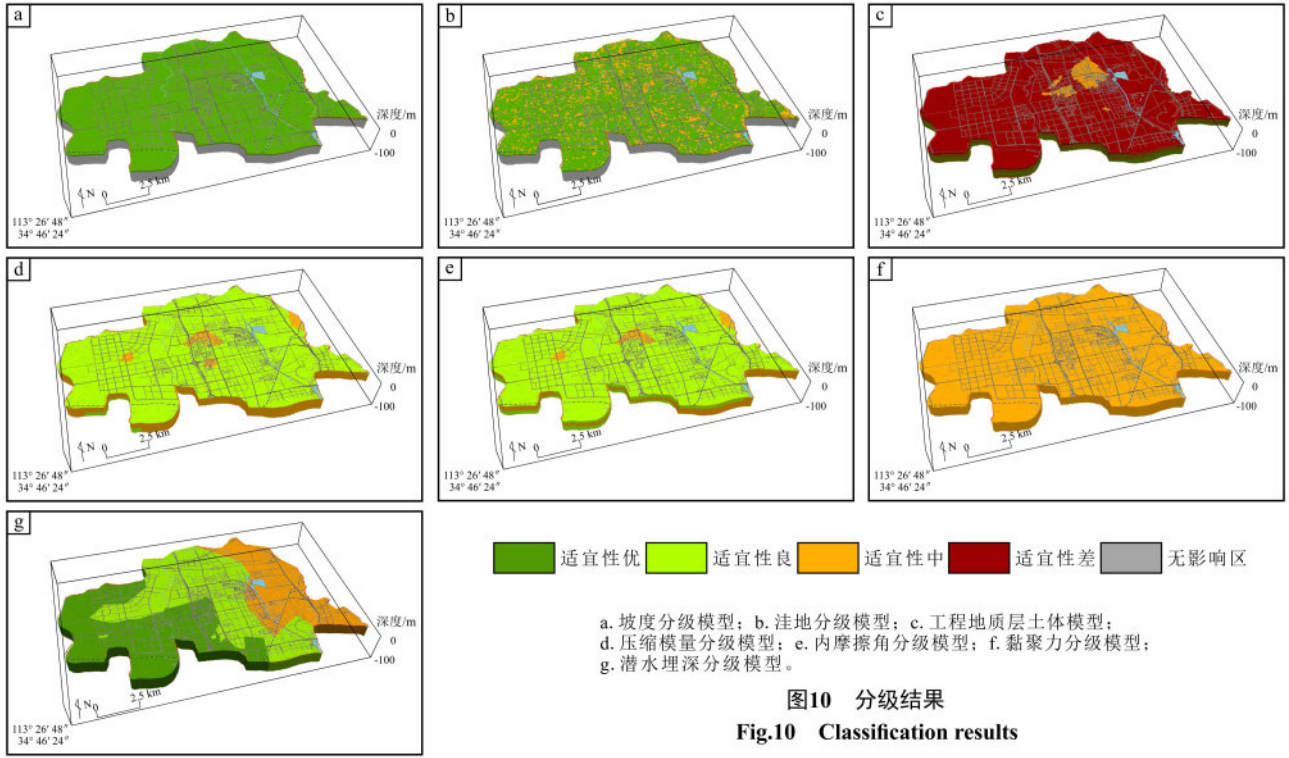


表 6 中间层评价因子判断矩阵

Table 6 Judgment matrix of intermediate evaluation factors

	地形地貌	工程地质	水文地质	权重
地形地貌	1	0.2	0.5	0.122 2
工程地质	5	1	3	0.647 9
水文地质	2	0.333 3	1	0.229 9

注：一致性比例为 0.003 6；权重为 1.000 0；矩阵最大特征值为 3.003 7。

表 7 地形地貌评价因子判断矩阵

Table 7 Judgment matrix of terrain and geomorphological evaluation factors

	地形地貌	坡度	洼地	权重
地形地貌	1	0	0	0
坡度	1.000 0	1	0	0.666 7
洼地	2.000 0	0	1	0.333 3

注：一致性比例为 0.000 0；权重为 0.122 2；矩阵最大特征值为 2.000 0。

表 8 工程地质条件评价因子判断矩阵

Table 8 Judgment matrix of engineering geological condition evaluation factors

	工程地质	地质分层	黏聚力	压缩模量	内摩擦角	权重
工程地质	1	0.333 3	0.333 3	0.333 3	0.333 3	0.647 9
地质分层	3	1	3	3	3	0.5
黏聚力	0.333 3	1	1	1	1	0.166 7
压缩模量	0.333 3	1	1	1	1	0.166 7
内摩擦角	0.333 3	1	1	1	1	0.166 7

注：一致性比例为 0.000 0；权重为 0.647 9；矩阵最大特征值为 4.000 0。



图 11 综合评价权重体系

Fig. 11 Comprehensive evaluation weights system

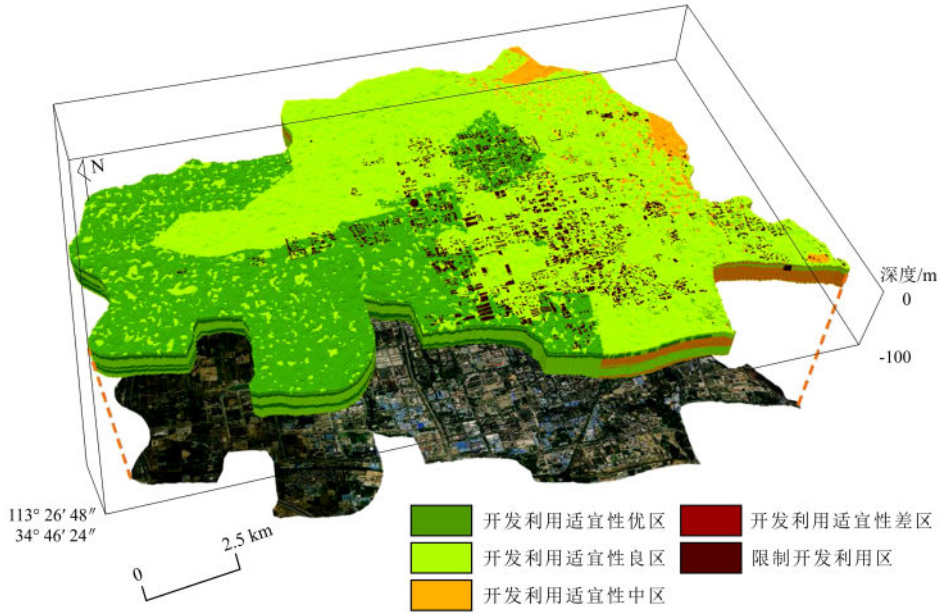


图 12 郑州高新区地下空间评价结果

Fig. 12 Evaluation results of underground space in Zhengzhou High-Tech Zone

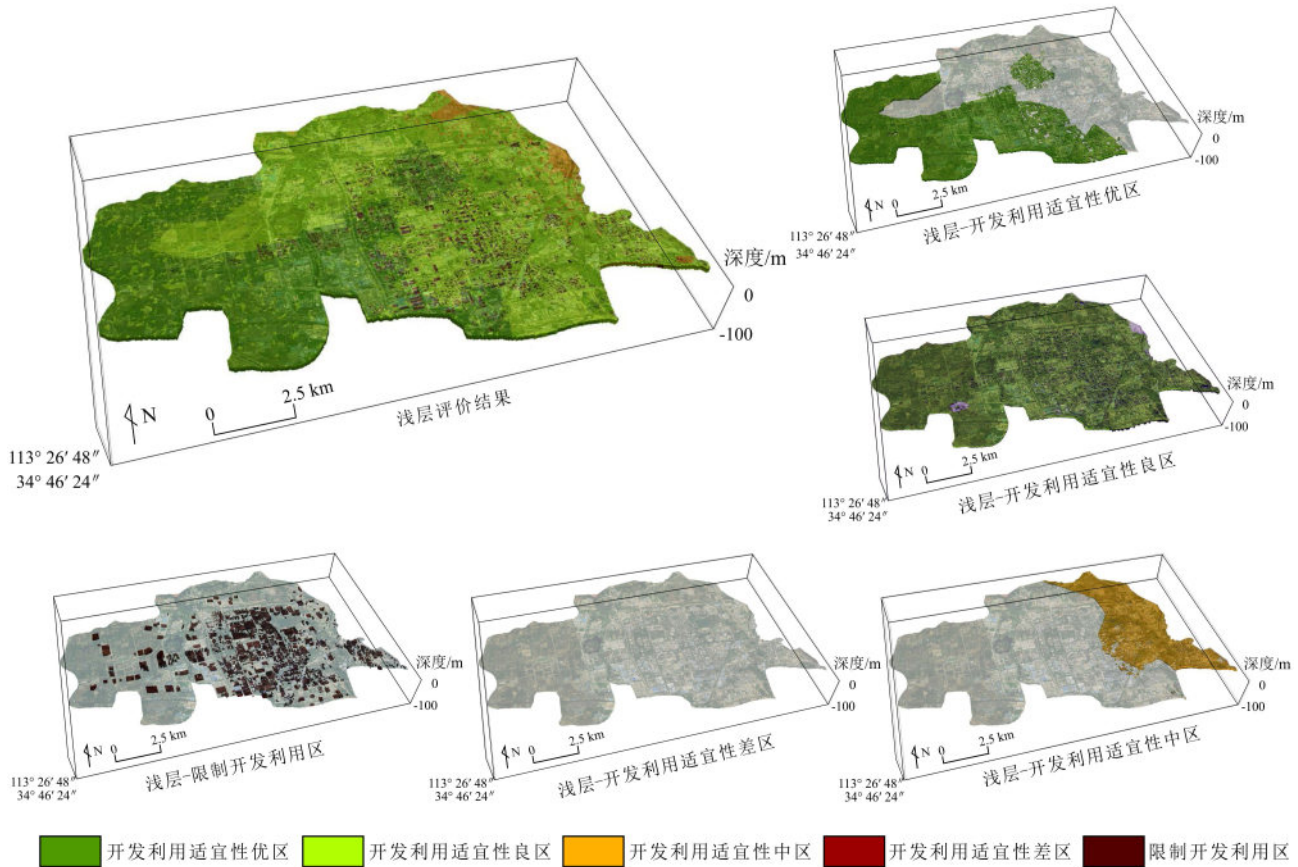


图 13 郑州高新区浅层空间开发利用评价结果

Fig. 13 Evaluation results of shallow underground space development and utilization in Zhengzhou High-Tech Zone

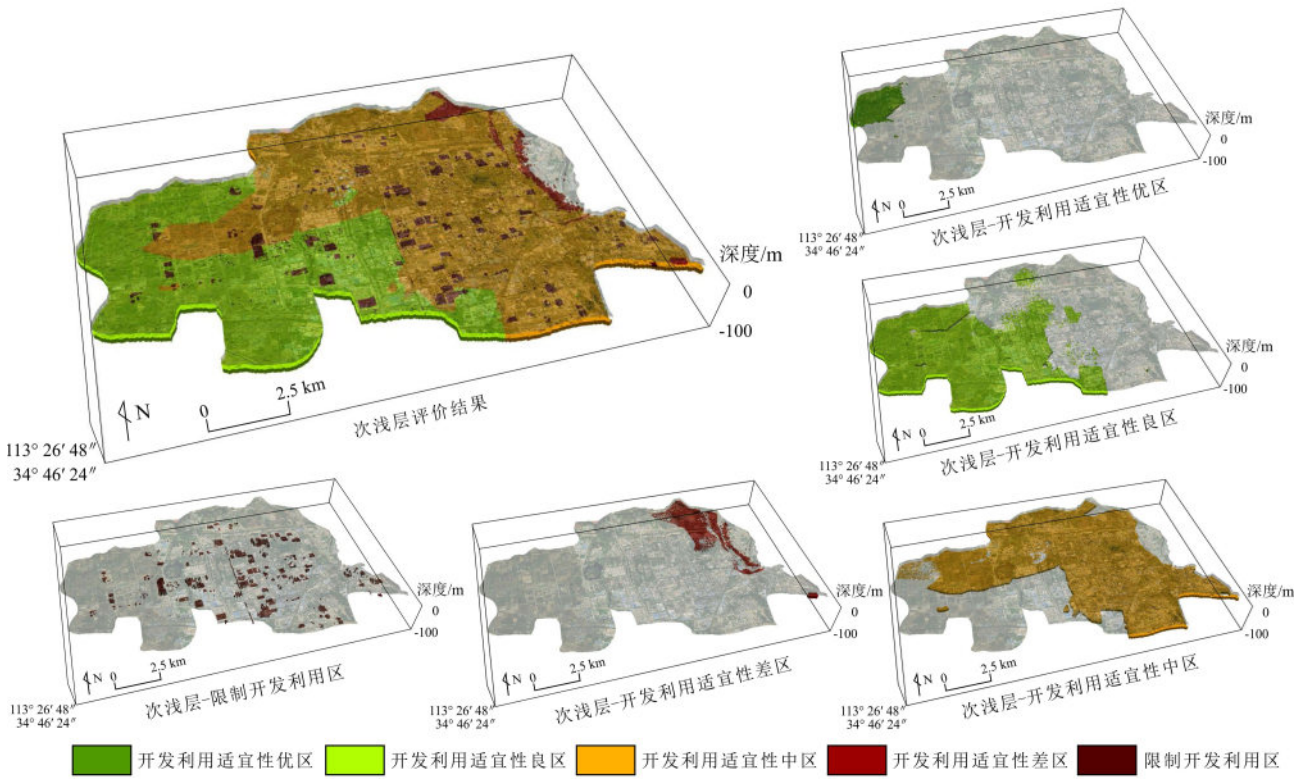


图 14 郑州高新区次浅层空间开发利用评价结果

Fig. 14 Evaluation result of sub-shallow underground space development and utilization in Zhengzhou High-Tech Zone

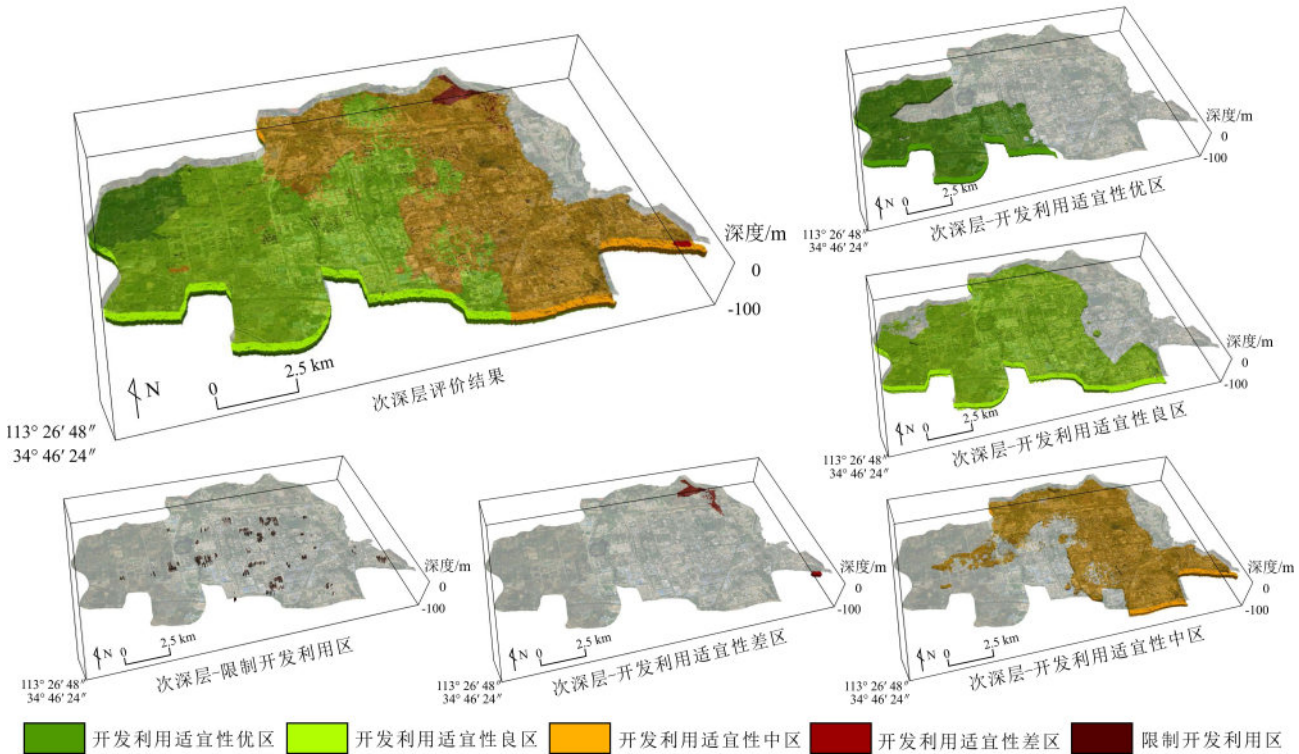


图 15 郑州高新区次深层空间开发利用评价结果

Fig. 15 Evaluation result of sub-deep underground space development and utilization in Zhengzhou High-Tech Zone

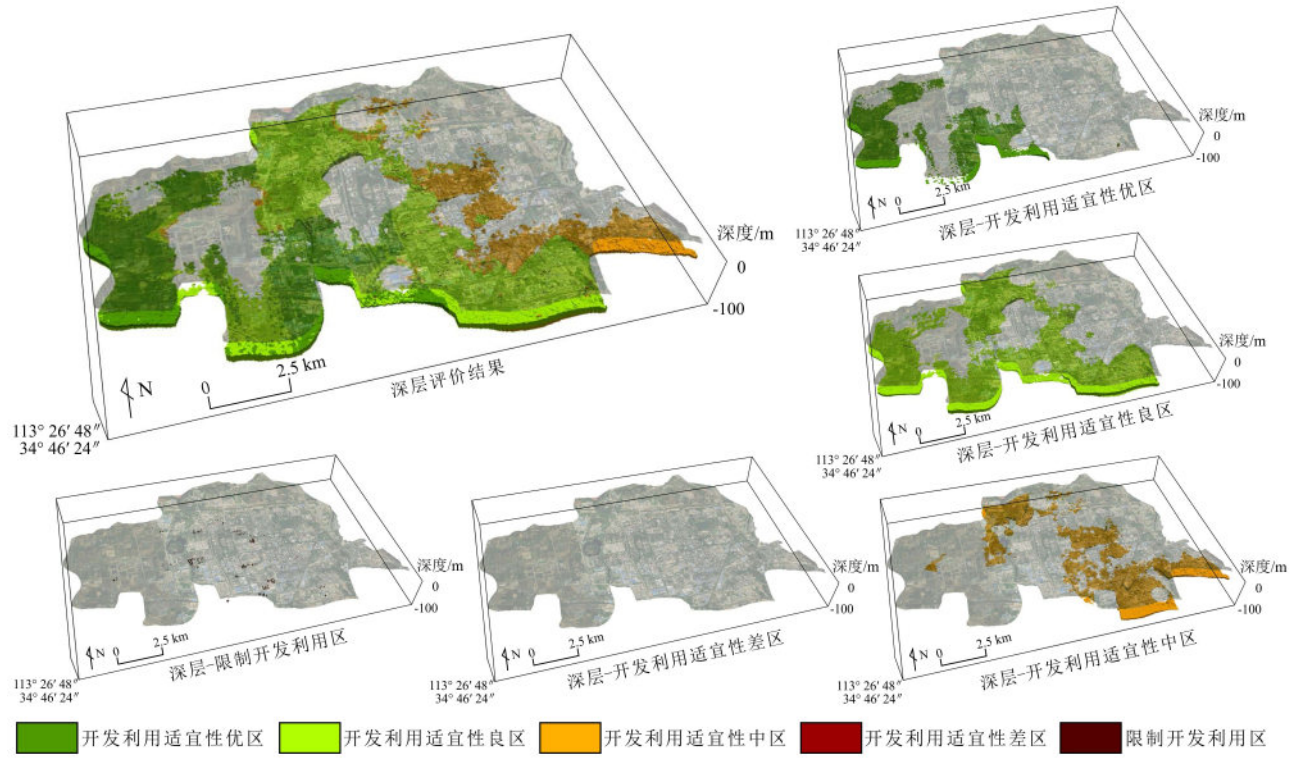


图 16 郑州高新区深层空间开发利用评价结果

Fig. 16 Evaluation result of deep underground space development and utilization in Zhengzhou High-Tech Zone

表 9 地下空间开发适宜性评价结果容积分区统计

Table 9 Volume partition statistics of suitability evaluation results for underground space development

评价深度	适宜性结果 (容积/占比)				
	限制开发区	适宜性差区	适宜性中区	适宜性良区	适宜性优区
浅层	84 615 000 / 5.69	0 / 0	129 686 250 / 8.72	854 446 875 / 57.43	418 935 625 / 28.16
次浅层	21 075 625 / 1.52	25 424 375 / 1.83	830 810 000 / 59.87	478 635 000 / 34.49	31 845 625 / 2.29
次深层	6 508 750 / 0.39	6 046 250 / 0.36	488 765 625 / 29.48	821 295 625 / 49.54	335 254 375 / 20.22
深层	1 053 125 / 0.15	0 / 0	144 331 875 / 21.01	430 934 375 / 62.72	110 756 250 / 16.12
总计	113 252 500 / 2.17	31 470 625 / 0.60	1 593 593 750 / 30.53	2 585 311 875 / 49.52	896 791 875 / 17.17

注: 容积单位为 m^3 ; 占比单位为%。

间开发程度相对较低, 开发潜力大。研究区限制开发区和适宜性差区的占比极小, 工程地质、水文地质条件较好, 有利于地下施工。

具体而言, 浅层的适宜性良区 (57.43%) 和优区 (28.16%) 容积占比较大, 显示浅层空间的适宜性较高, 适合进行较多的地下空间开发。次浅层的适宜性中区 (59.87%) 占比最大, 优区较少。次深层主要为适宜性良区 (49.54%) 和优区

(20.22%), 也具有较大的开发潜力, 但总体适宜性略低于浅层。深层以适宜性良区 (62.72%) 为主, 开发潜力不如浅层。各层次适宜性差区的容积和占比都较低, 尤其在浅层和深层没有适宜性差区, 说明这些层次的开发具备较强的适宜性。

4 讨论

本文采用基于三维体元属性模型的地下空间开

发利用适宜性三维评价方法,有助于组织、管理、计算和表达任意空间位置的地下空间适宜性情况,增强了传统方法在深度方向的可视性和分辨率,可为后期的城市建设规划、以及地下空间规划提供更好的服务。

使用规则体元作为评价单元的方法具有数据承载能力强、计算效率高、空间相统一的优点,能够充分承载地下空间开发利用适宜性评价所需的多维数据。但是,规则体元存在数据量大、边界不贴合的问题,今后研究中,可采用自适应的不规则体元进行评价,能在一定程度上优化上述问题。另外,受实际数据情况影响,本文主要探讨了现有建筑、地形地貌、工程地质、水文地质因素对地下空间开发利用的影响,随着研究的深入以及所掌握资料的不断丰富,还需将地质环境、人文与社会经济、开发需求与资源量等因素纳入考量,以提升评价结果精度。

5 结论

(1) 郑州高新区地下空间开发利用适宜性评价研究评价结果为适宜性良区、适宜性优区域容积超过总容积 65%,限制开发区和适宜性差区的占比极小,工程地质、水文地质条件较好,有利于地下施工。

(2) 研究区工程地质条件和水文地质条件总体较好。工程地质方面,不良土体主要分布于地表,良好土体和优良土体相互夹层,总体呈现深层土质较好的趋势,优良土体主要分布于西侧山前冲洪积区;水文地质方面,总体呈现西优东差的趋势,须水河以西区域地下水埋深较深,有利于减小施工难度、降低施工成本、减小对建筑物的影响作用,对地下空间的开发利用较为有利,瑞达路以东区域水文地质条件相对较差,在进行地下空间开发时,应结合地质条件采取降水、截水、抗浮等措施。

(3) 在分层适宜性上,浅层开发条件最佳,优区和良区占比达 85%,适合商业、停车场等项目;次浅层和次深层良区占比较大,但优区占比相对较少,适合仓储及部分公共设施开发。深层以适宜性良区为主,优区占比相对较低,适合储能、地

热等深层项目,如开发需进一步评估。

(4) 在垂直空间上,研究区地下空间开发适宜性表现出层次分明的特点,浅层适宜性最佳,深层具备特定用途开发潜力。在水平分布上,研究区由东向西总体呈现由差至优的趋势,西部的地下空间开发利用适宜性情况较好,同时西部区域现有地上-地下建(构)筑物开发程度低,有利于在未来进行地下空间的规划和开发利用。

参考文献:

- [1] 邢怀学, 窦帆帆, 葛伟亚, 等. 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, 2022, 68 (2): 607-614.
XING H X, DOU F F, GE W Y, et al. The research on 3D evaluation index system of geological suitability for urban underground space development and utilization [J]. Geological Review, 2022, 68 (2): 607-614.
- [2] 陈绪钰, 王东辉, 倪化勇, 等. 长江经济带上游地区丘陵城市工程建设适宜性评价: 以泸州市规划中心城区为例 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2020, 50 (1): 194-207.
CHEN X Y, WANG D H, NI H Y, et al. Building suitability evaluation of hilly city in upper reaches of Yangtze River Economic Belt: in case study of urban central planning of Luzhou City [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2020, 50 (1): 194-207.
- [3] 倪雨萍, 蒋欣, 郭宁波. 城市地下空间信息基础平台建设与管理 [M]. 上海: 同济大学出版社, 2018: 1-52.
NI L P, JIANG X, GUO H B. Construction and management of urban underground space information infrastructure [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2018: 1-52.
- [4] 易荣, 阎浩, 祁民, 等. 基于城市规划的城市地下空间开发适宜性评价探讨 [J]. 地质与勘探, 2024, 60 (2): 339-347.
YI R, YAN H, QI M, et al. Suitability evaluation of urban underground space development based on urban planning [J]. Geology and Exploration, 2024, 60 (2): 339-347.
- [5] LEGGET R F. Cities and geology [M]. New York: McGraw-Hill, 1973: 1-624.
- [6] STERLING R L, NELSON S. Planning the development of underground space [J]. Underground Space, 1982, 7 (2): 86-103.

- [7] 钱七虎. 中国城市地下空间开发利用的现状评价和前景展望 [J]. 民防苑, 2006 (增刊1): 1-5.
QIAN Q H. Evaluation and prospect of the development and utilization of underground space in Chinese cities [J]. Civil Defence Realm, 2006 (Suppl. 1): 1-5.
- [8] 牛学瑶, 马骏驰, 李翔, 等. 廊坊规划区工程建设及地下空间开发适宜性研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19 (5): 1401-1411, 1421.
NIU X Y, MA J C, LI X, et al. Feasibility study on engineering construction and underground space development in Langfang planning area [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2023, 19 (5): 1401-1411, 1421.
- [9] 曹晖, 杨汉元, 姜文, 等. 长沙市地下空间开发地质环境适宜性评价 [J]. 中国矿业, 2019, 28 (增刊2): 142-147.
CAO H, YANG H Y, JIANG W, et al. The geological environment suitability assessment of underground space development in Changsha City [J]. China Mining Magazine, 2019, 28 (Suppl. 2): 142-147.
- [10] 熊峰, 李翔, 刘梦林, 等. 地下空间开发利用适宜性评价: 以武汉长江新城为例 [J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18 (1): 12-19, 34.
XIONG F, LI X, LIU M L, et al. Suitability evaluation of underground space exploitation: a case study of Changjiang New Town in Wuhan [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2022, 18 (1): 12-19, 34.
- [11] 刘家男, 刘艳芳, 王祥, 等. 武汉市地下空间开发利用潜力评价 [J]. 测绘科学, 2021, 46 (10): 202-211.
LIU J N, LIU Y F, WANG X, et al. Evaluation of development and utilization potential of underground space in Wuhan City [J]. Science of Surveying and Mapping, 2021, 46 (10): 202-211.
- [12] 李煜楠, 甄俊伟, 屈向阳, 等. 基于 ArcGIS 的广东省汕尾市地质灾害风险评价 [J]. 世界地质, 2024, 43 (4): 586-599.
LI Y N, ZHEN J W, QU X Y, et al. Risk assessment of geological disasters based on ArcGIS in Shanwei City, Guangdong Province [J]. World Geology, 2024, 43 (4): 586-599.
- [13] 徐少文, 吴静红, 师文豪, 等. 苏州历史古城区地下空间开发地质环境适宜性三维评价 [J]. 科学技术与工程, 2024, 24 (28): 12043-12054.
XU S W, WU J H, SHI W H, et al. 3D evaluation of geological environment suitability of underground space development in Suzhou historic and ancient urban area [J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24 (28): 12043-12054.
- [14] 花卫华, 张子琛, 陈启浩, 等. 城市地下全要素多尺度语义表达模型及应用 [J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19 (3): 714-724, 814.
HUA W H, ZHANG Z S, CHEN Q H, et al. Multi-scale semantic expression model of urban underground total elements and its application [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2023, 19 (3): 714-724, 814.
- [15] 李春. 城市地下空间分层开发模式研究 [D]. 上海: 同济大学, 2007.
LI C. The research on development model of urban underground space delamination [D]. Shanghai: Tongji University, 2007.
- [16] 张静, 马宏伟, 郇恒飞, 等. 基于 AHP 的大连金普新区地下空间开发利用地质条件适宜性评价 [J]. 地质通报, 2023, 42 (9): 1603-1609.
ZHANG J, MA H W, HUAN H F, et al. Suitability evaluation of geological conditions for underground space exploitation and utilization in Jinpu New Area of Dalian based on AHP [J]. Geological Bulletin of China, 2023, 42 (9): 1603-1609.
- [17] 周长红, 张树栋, 吴荣泽, 等. 武清开发区地下空间开发地质适宜性评价 [J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18 (增刊2): 520-528.
ZHOU C H, ZHANG S D, WU R Z, et al. Geological environment suitability assessment of underground space development in Wuqing Development Zone [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2022, 18 (Suppl. 2): 520-528.
- [18] 夏伟强, 董杰, 何鹏, 等. 青岛主城区地下空间开发利用地质因素的影响评价及适宜性分区 [J]. 地质学报, 2019, 93 (增刊1): 233-240.
XIA W Q, DONG J, HE P, et al. Evaluation and suitability zoning of geological factors affecting the development and utilization of underground space in the main urban area of Qingdao [J]. Acta Geologica Sinica, 2019, 93 (Suppl. 1): 233-240.
- [19] 唐鑫, 龚绪龙, 许书刚, 等. 苏南都市圈城市地下空

- 间资源开发利用现状与地质调查对策 [J]. 地质论评, 2022, 68 (2): 593-605.
- TANG X, GONG X L, XU S G, et al. Development and utilization of urban underground space resources and geological survey countermeasures in southern Jiangsu metropolitan area [J]. *Geological Review*, 2022, 68 (2): 593-605.
- [20] 罗跃春, 陈开明, 龙明滔, 等. 广东省中山市地下空间开发利用三维适宜性评价 [J]. 地质通报, 2025, 44 (5): 848-857.
- LUO Y C, CHEN K M, LONG M T, et al. 3D suitability evaluation of underground space development and utilization in Zhongshan City of Guangdong Province [J]. *Geological Bulletin of China*, 2025, 44 (5): 848-857.
- [21] 孟天宇, 王睿, 葛伟亚, 等. 基于三维建模的南京江北新区地下空间资源质量评价 [J]. 地理信息世界, 2022, 29 (5): 94-100, 105.
- MENG T Y, WANG R, GE W Y, et al. Quality evaluation of underground space resources in Jiangbei New Area of Nanjing based on 3D modeling [J]. *Geomatics World*, 2022, 29 (5): 94-100, 105.
- [22] 赵思成, 胥彝, 李晓军, 等. 山地城市核心区地下空间开发适宜性三维评价 [J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2022, 50 (1): 70-78.
- ZHAO S C, XU B, LI X J, et al. 3D evaluation of suitability of underground space development in core areas of mountainous cities [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2022, 50 (1): 70-78.
- [23] 童林旭, 祝文君. 城市地下空间资源评估与开发利用规划 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009: 1-153.
- TONG L X, ZHU W J. The evaluation and development planning of urban underground space resources [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009: 1-153.
- [24] SHAPIRA A, SIMCHA M. AHP-based weighting of factors affecting safety on construction sites with tower cranes [J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2009, 135 (4): 307-318.
- [25] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城乡规划工程地质勘察规范: CJJ 57—2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012: 1-35.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for geo-engineering site investigation and evaluation of urban and rural planning: CJJ 57-2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012: 1-35.
- [26] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. 城市地下空间规划标准: GB/T 51358—2019 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2019: 1-19.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. Standard for urban underground space planning: GB/T 51358-2019 [S]. Beijing: China Planning Press, 2019: 1-19.
- [27] 中华人民共和国建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 岩土工程勘察规范: GB 50021—2001 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009: 1-148.
- Ministry of Construction of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for investigation of geotechnical engineering: GB 50021-2001 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009: 1-148.
- [28] 中华人民共和国建设部. 高层建筑岩土工程勘察规程: JGJ 72—2004 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004: 1-77.
- Ministry of Construction of the People's Republic of China. Specification for geotechnical investigation of tall buildings: JGJ 72-2004 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2004: 1-77.