

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2026.02.002

# 面向盾构施工方法的地质环境质量 三维综合评价方法研究

吴晓义<sup>1</sup>, 李晓晖<sup>1</sup>, 邢怀学<sup>2</sup>, 窦帆帆<sup>3</sup>

(1. 合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 中国地质调查局南京地质调查中心, 江苏 南京 210016; 3. 江苏第二师范学院 地理科学学院, 江苏 南京 211200)

**摘要:** 盾构法是一种广泛应用于地下工程建设的技术,但在施工中面临一系列的地质环境问题。现有的研究针对地下空间地质环境质量进行综合评价,存在着针对性不强、应用场景局限等问题。文章以杭州钱塘新区为研究对象,基于研究区三维地质模型,构建针对盾构施工方法的三维地质环境质量评价指标体系,采用多种空间分析方法进行评价因子提取,并利用离差最大化模型对多种综合评价结果进行组合,更好地兼顾主观和客观赋权评价模型的特点和优势。研究结果表明,该方法能够为地铁盾构施工提供更为准确的决策支持,更好地服务于城市地下空间工程建设。

**关键词:** 地下空间;地质环境质量;钱塘新区;盾构施工;组合评价

**中图分类号:** TU984.113 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-5060(2026)02-0151-09

## Research on a three-dimensional comprehensive evaluation method of geological environmental quality for shield tunneling construction

WU Xiaoyi<sup>1</sup>, LI Xiaohui<sup>1</sup>, XING Huaixue<sup>2</sup>, DOU Fanfan<sup>3</sup>

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, China; 3. School of Geography, Jiangsu Second Normal University, Nanjing 211200, China)

**Abstract:** The shield tunneling method is widely used in underground engineering construction, but it faces a series of geological environmental challenges during implementation. Although existing studies have conducted comprehensive evaluations of geological environmental quality in underground spaces, they often lack specificity and have limited applicability. Therefore, this paper takes Qiantang New Area in Hangzhou City as a case study. Based on a three-dimensional geological model of the study area, a three-dimensional geological environmental quality evaluation index system tailored to shield tunneling construction is established. Various spatial analysis methods are employed to extract evaluation factors, and a model maximizing deviation is utilized to integrate multiple comprehensive evaluation results, aiming to balance the strengths of subjective and objective weighting models. The results demonstrate that this method can provide more accurate decision support for metro shield tunneling construction, better serving urban underground space engineering projects.

**Key words:** underground space; geological environmental quality; Qiantang New Area; shield tunneling construction; combined evaluation

随着城市化进程迅速发展,城市人口不断增加,地面交通压力不断增大。由于传统交通方式

已难以满足出行需求,因此,地下轨道交通因其无污染、快速、安全等优势,逐渐成为主要交通工具。

收稿日期:2024-09-02;修回日期:2024-12-23

基金项目:安徽省公益性地质工作资助项目(2023-g-1-18)

作者简介:吴晓义(2000—),女,河北邯郸人,合肥工业大学硕士生;

李晓晖(1986—),男,安徽合肥人,博士,合肥工业大学副教授,硕士生导师,通信作者,E-mail:lixiaohui@hfut.edu.cn;

邢怀学(1981—),男,山东青岛人,中国地质调查局南京地质调查中心正高级工程师,硕士生导师。

在地下轨道交通设施的施工中,盾构法因其对环境影响小、机械化程度高等优点,得到了广泛应用。然而,地下工程施工中面对的地质条件和外部环境相对复杂,存在诸多安全隐患。其中,开挖面失稳问题是盾构施工中最常见且危害最大的施工问题之一<sup>[1]</sup>。此外,地下水及特殊地质条件也是盾构施工中常面临的问题。近年来,我国盾构法施工安全事故频繁发生,给生命和财产造成了严重损失,带来不良的社会影响,引发人们对地下地质环境导致的施工安全和风险问题的关注。因此,建立一套系统全面、科学合理的盾构施工地质环境质量综合评价指标体系,对地下工程施工地质环境质量进行科学、客观、合理的评价且合理有效的管理施工过程,降低施工风险至关重要。

目前,已有多位学者针对地下空间地质环境质量展开了综合评价,但多数集中于二维评价,相关研究依靠平面化的岩土特征、水文地质条件、地形地貌和环境地质等方面的数据信息,得出综合评价结果<sup>[2-5]</sup>。然而,上述二维综合评价方法未能充分考虑三维空间的异质性,影响了评价结果的精细程度。此外,二维评价结果在深度方向上分辨率较低,难以应用于地下空间立体精细规划。随着计算机三维技术的发展和研究的积累,城市地下空间开发地质环境质量研究逐步从二维转向三维<sup>[6-7]</sup>。与二维评价相比,三维综合评价结果能够更好地描述地层间的属性变异性及环境质量的变化特征,更加细致、准确地表征三维环境下地下空间地质环境评价结果在不同深度的空间分层异质性。但已有研究大多集中于宏观尺度下的综合性评价,针对性和实用性较弱,难以被施工单位和设计院实践应用。因此,地下空间地质环境质量三维综合评价工作应紧密围绕地下空间的特定开发场景展开,通过建立针对性的评价策略,以推进评价结果的深度应用。

本文以杭州钱塘新区为实例研究区,根据研究区地质特征及地铁盾构法施工的特点,建立了针对地铁盾构施工方法的地质环境质量三维综合评价模型;利用三维空间分析方法提取多种三维评价信息,并采用离差最大化模型对层次分析法、熵权法和 TOPSIS(technique for order preference by similarity to ideal solution)法这 3 种单一评价方法的结果进行组合,使评价过程中的主观性和客观性得以平衡。采用盾构法建设的杭州市 21 号地铁线路的地下空间地质环境质量综合评价结果显示,本文采用的方法能够为城市地下空间的施工开发和规划

建设提供科学的指导依据。

## 1 实例研究区地质概况

### 1.1 地形地貌条件

杭州市钱塘新区地处中国浙江省杭州市东部,紧邻杭州市中心,研究区域如图 1 所示。



图 1 研究区范围

钱塘新区地形地貌较为单一,地势较为平坦,主体为冲海积平原区,由钱塘江和外海潮流携带的泥砂在人类历史时期堆积而成,海拔多在 7.5 m 以下,地势低平略有起伏,仅在中西部有部分白垩系火山岩和寒武、震旦系残丘零星分布出露(青龙山、白虎山、狮子山、赭山等)。工作区地表河湖交错,网格水系发育,表层多为砂质粉土、黏质粉土,局部为粉砂。区内分布陆屿及古河道,江河岸边筑有大型人工堤坝,系近代人工围垦而成。

### 1.2 工程地质条件

钱塘新区分布有深厚的第四系地层,区内岩相变化大、岩性复杂,浅层地下空间以砂质粉土、粉砂和黏质粉土为主。其中人工填土层主要分布于岩土表层,该层系人类活动的产物;区内工程地质性质较差的层位多为淤泥质黏性土,也是工程地质问题易发的层位,使用地铁盾构施工会发生土体应变且导致地表沉降,在施工过程中及其后期都应注意防范不均匀沉降等工程问题。

粉土、粉砂、中粗砂、砾砂、卵砾石等地层主要以中密-密实为主,工程地质性质较好,尤其是埋深较大的圆砾层,其厚度大、分布广泛且稳定,为各类桩基特别是摩擦桩的首选持力层,但盾构机掘进砂土、砂质粉土层时,若水头压力过高,且盾构推进过程中对土层产生扰动,可能导致砂土液化,引发隧道下沉。此外,若上部土层具有不稳定性,而下部土层相比上部土层具有较高强度,采用盾构施工时极易出现向软弱地层方向偏移的情况,造成喷涌现象,使盾构姿态难以控制,开仓换

刀风险加大。

### 1.3 水文地质条件

实例研究区可以划分为冲海积平原和低山丘陵水文地质块段。地下水类型包括松散岩类孔隙水、碳酸岩类裂隙岩溶水、基岩裂隙水。由浅至深进一步划分为潜水含水层、第Ⅰ承压含水层、第Ⅱ承压含水层。

潜水含水层组由第四系全新统的黏质粉土、砂质粉土、粉质黏土和粉砂等组成,广泛分布在近地表地层,水位通常埋藏在3 m以下,受大气降水和地表水的影响,一般随季节变化在1~3 m浮动。该含水层的厚度在1.5~28.8 m之间,其底板埋深在10.8~38.5 m之间,透水性相对较差。主体含水层为第Ⅰ承压含水层和第Ⅱ承压含水层,且中间隔水层缺失,富水性由东北向西南递减,相同程度富水性区域呈条带分布。在施工过程中,盾构机穿越地层富含地下水时,隧道内潮湿,存在盾尾渗漏和螺旋机出土孔喷水喷砂两大风险,若处置不当或不及时,会造成地面沉降,导致地面塌方、建筑物损坏等危害。

## 2 方法

### 2.1 地下空间地质环境质量三维综合评价方法

本文采用的地下空间地质环境质量三维综合评价方法主要由以下部分组成<sup>[8]</sup>:①开展城市相关地质数据的整理,包括钻孔数据、剖面数据和土木试验数据等,将已有的钻孔数据进行标准化分层,建立钻孔数据库;②基于隐式三维地质建模方法开展工程地质模型和水文地质模型的构建,隐式建模方法通过构建隐式函数来描述地质体的三维几何形态,与传统的显式建模方法相比,在处理复杂地质结构时具有更高的自动化和灵活性;③根据已有数据和三维地质模型,从岩土体条件和环境地质条件等构建面向盾构施工方法的地下空间地质环境质量三维评价模型;④基于三维评价模型,采用相适应的三维空间分析方法,开展三维评价要素的提取,构建三维评价要素集;⑤基于三维评价数据集开展地下空间开发地质环境质量三维综合评价<sup>[7]</sup>。

### 2.2 面向盾构法施工的三维综合评价模型

面向盾构法施工的地下空间地质环境质量三维综合评价模型,需要充分结合杭州市钱塘新区地下空间地质环境特征以及盾构法施工中常见的地质环境问题,并根据三维地质模型等三维空间数据的特点,在岩土工程、水文地质和地质结构等

维度集成多种三维评价指标。各评价指标的选择需要遵循系统性、科学性、生态性、实用性原则,并采用分级和分层的方式进行组织。

### 2.3 综合评价方法

#### 2.3.1 层次分析法

层次分析法是一种用于决策分析的方法,适用于多准则决策问题<sup>[9]</sup>。层次分析法的计算步骤为:①将问题分解成目标、准则和方案,形成一个层次结构模型;②根据专家意见,使用1—9标度法,对各准则或方案进行两两比较,构造判断矩阵;③对判断矩阵进行归一化处理,求出各准则或方案的相对权重;④计算一致性比率(consistency ratio, CR),判断矩阵是否具有—致性,若CR值小于0.1,则表示通过,否则需要调整;⑤计算层次总排序,在通过—致性检验后,将各个层次的权重向量进行综合,得到方案的总排序权重,并最终选出最优方案。

#### 2.3.2 熵权法

熵权法是一种根据指标所包含的信息量确定指标权重的客观赋权法<sup>[10]</sup>,运算步骤主要包括:①假设有 $m$ 个评价对象, $n$ 个评价指标,构建原始的决策矩阵 $\mathbf{X}=(x_{ij})_{m \times n}$ ,其中 $x_{ij}$ 表示第 $i$ 个对象在第 $j$ 个指标下的数值;②对数据进行标准化处理,标准化后得到标准化矩阵 $\mathbf{R}=(r_{ij})_{m \times n}$ ,其中 $r_{ij}$ 为标准化后的值,范围在 $[0,1]$ ;③计算每个指标的熵值 $e_j$ ;④计算权重,根据信息熵的计算结果,计算第 $j$ 个指标的权重 $w_j$ 。计算公式如下:

$$e_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m \frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^m r_{ij}} \ln \left( \frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^m r_{ij}} \right) \quad (1)$$

$$w_j = (1 - e_j) / \left[ \sum_{j=1}^n (1 - e_j) \right] \quad (2)$$

#### 2.3.3 TOPSIS法

TOPSIS法是一种综合评价方法,利用理想最优解和最劣解来衡量方案的优劣<sup>[11]</sup>。本文采用熵权法改进的TOPSIS法计算权重,利用熵权法计算得到的权重 $w_j$ ,构造加权标准化矩阵 $\mathbf{V}=(v_{ij})_{m \times n}$ , $v_{ij}=r_{ij} \times w_j$ ,确定正理想解 $Y_j^+$ 和负理想解 $Y_j^-$ :

$$Y_j^+ = \max(v_{1j}, v_{2j}, \dots, v_{mj}) \quad (3)$$

$$Y_j^- = \min(v_{1j}, v_{2j}, \dots, v_{mj}) \quad (4)$$

计算理想解 $D_i^+$ 和负理想解 $D_i^-$ 的距离:

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n Y_j^+ - v_{ij}^2} \quad (5)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n Y_j^- - v_{ij}^2} \quad (6)$$

计算每个方案的贴近度  $C_i$ , 其取值范围为  $[0, 1]$ ,  $C_i$  越大, 表示第  $i$  个方案越优。

$$C_i = D_i^- / (D_i^+ + D_i^-) \quad (7)$$

### 2.3.4 离差最大化模型

在地下空间开发地质环境质量三维综合评价中, 选择合适的评价方法至关重要, 常用的方法包括层次分析法、熵权法和 TOPSIS 法等<sup>[6, 8, 12-13]</sup>。层次分析法通过专家经验和知识确定各评价指标的权重, 并构建判断矩阵和一致性检验, 确保了评价过程的逻辑性和合理性。然而, 层次分析法存在一定的主观性, 权重确定过程易受专家个人偏好影响, 可能导致评价结果出现偏差<sup>[14-15]</sup>。熵权法则通过计算指标的熵值来客观分配权重, 有效避免了主观因素的影响, 但熵权法忽略了各指标在实际应用中的重要性, 导致重要指标的权重被低估, 且权重的分配完全依赖于数据分布特征, 当数据质量不高或不完整时, 会直接影响评价结果的可靠性<sup>[16]</sup>。TOPSIS 法则通过计算评价对象的理想解与负理想解之间的距离, 为地质环境质量的优劣排序提供了量化依据, 但在多维度和复杂地质环境中, 准确选取和量化评价指标存在一定难度, 直接影响了评价结果的准确性和客观性<sup>[17]</sup>。因此, 单一的评价方法在实际应用中存在一定的偏差和局限性。为了克服单一评价方法的片面性, 一些学者提出了“组合评价”的方式, 如 DEMATEL-ANP 法、次分析法熵权法、组合赋权优劣解距离法等<sup>[18-20]</sup>。

上述方法往往忽视了利用权重进行直接组合对最终评价价值造成的潜在主观影响。为提高评价结果的准确性和可靠性, 文献<sup>[21]</sup>提出了将各单一评价方法的评价价值按照某种思想进行组合, 以获得更加理想的评价结果。而离差最大化模型是通过组和各单一评价方法的评价结果值, 能够充分发挥单一评价模型的优势, 进一步提高评价结果的科学性和可靠性。

离差最大化模型通过计算各个对象的属性离差值, 并根据离差值的大小来确定权重。离差值越大, 代表该对象的属性波动性越强, 对总体结果的影响也越大, 因此该对象属性的权重也应越大<sup>[22-23]</sup>。以往传统评价方法过于依赖专家经验, 主观性较强, 客观性较差, 而离差最大化组合评价模型能够客观反映评价结果间的差异<sup>[23-24]</sup>。该方法已广泛应用于煤矿安全评价、深基坑支护设

计和生态安全等领域, 有效提升了评价结果的客观性和准确性<sup>[22, 25-26]</sup>。

本研究假设针对盾构施工地质环境质量评价中的评价对象有  $m$  个, 对象集为  $S = \{S_1, S_2, \dots, S_m\}$ , 每个评价对象有  $c$  个属性指标(如岩土工程指标、水文地质指标、地质结构指标等); 各属性指标集为  $G = \{G_1, G_2, \dots, G_c\}$ 。用  $y_{ij}$  表示评价对象  $S_i$  在属性  $G_j$  下的属性值, 其中  $i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, c$ , 可设属性矩阵  $Y = (y_{ij})_{m \times c}$ 。各单一评价方法用  $f$  表示, 本文采用 3 种评价方法, 可设评价方法集  $f = \{f_1, f_2, f_3\}$ , 将得到的评价结果矩阵设为  $F, F = (f_{ij})_{m \times n}, i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n$ 。设评价对象  $S_i$  与评价对象  $S_t$  在组合评价方法下结果值之间的离差为:

$$d_{it} = \sum_{j=1}^n \omega_j |f_{ij} - f_{tj}| \quad (8)$$

构建模型, 在组合评价方法下, 所有评价对象间在不同的单一评价方法下的评价价值间总离差为:

$$D = \sum_{i=1}^m \sum_{t=1}^m \sum_{j=1}^n \omega_j |f_{ij} - f_{tj}| \quad (9)$$

$$D_{\max} = \sum_{i=1}^m \sum_{t=1}^m \sum_{j=1}^n \omega_j |f_{ij} - f_{tj}|, \quad \text{s. t.} \quad \sum_{j=1}^n \omega_j^2 = 1 \quad (10)$$

其中,  $\omega_j > 0, j = 1, 2, \dots, n$ 。

基于离差最大化组合评价价值模型的求解, 得到组合评价权重为:

$$\omega_j = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{t=1}^m |f_{ij} - f_{tj}|}{\sqrt{\sum_{j=1}^n (\sum_{i=1}^m \sum_{t=1}^m |f_{ij} - f_{tj}|)}} \quad (11)$$

由于要求各权重之和为 1, 对  $\omega_j$  进行归一化处理, 得最终组合评价权重为:

$$\omega_j^* = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{t=1}^m |f_{ij} - f_{tj}|}{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^m \sum_{t=1}^m |f_{ij} - f_{tj}|} \quad (12)$$

可得对象  $S_i$  的组合评价价值为:

$$F_i = \omega_1^* f_{i1} + \omega_2^* f_{i2} + \dots + \omega_n^* f_{in}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (13)$$

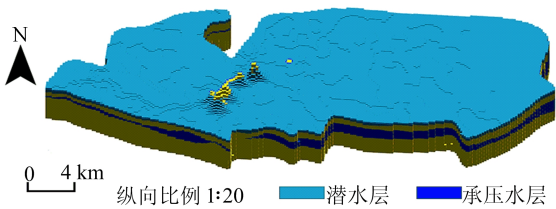
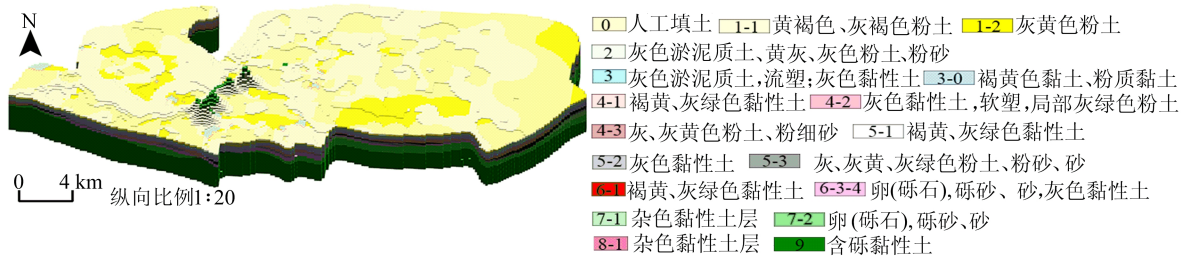
## 3 过程与结果

### 3.1 地下空间地质结构三维地质建模

三维地质模型是地下空间地质环境质量综合评价的基础和前提。构建的三维地质模型

可以充分融合多源多维地学数据,准确表达地质结构和特征。本文基于钻孔数据库、剖面图、数字高程模型等多元地学数据,采用三维

隐式建模方法建立了钱塘新区工程地质结构三维模型和水文地质结构三维地质模型,分别如图 2、图 3 所示。



### 3.2 三维综合评价模型构建

在地下工程建设中,不同的施工方法在工艺流程、材料选择、施工设备以及操作技术上存在显

著差异,因此对地质环境条件也有着不同的要求。例如,传统的明挖法需要大量的支撑系统,对场地的平整度和空间开阔度有较高要求;而盾构法则依赖于盾构机的连续掘进和衬砌安装,对地质条件和地下水位变化的适应性有更高要求。

本文综合考虑盾构施工方法的特征和杭州市钱塘新区地质特点,从岩土工程条件、水文地质条件和地质结构条件 3 个方面出发,构建了针对盾构施工地质环境质量三维评价模型,见表 1 所列。

表 1 针对盾构施工地质环境质量三维评价模型

一级指标	二级指标	指标说明	三维空间分析方法
岩土工程条件	软土	软土层的厚度和力学性质决定了盾构机的稳定性和地面变形的可能性,是评估的关键	三维距离场分析
	粉砂土	粉砂土层关系到泥水平衡和地层的稳定性,对于防止隧道周围水土流失至关重要	三维距离场分析
水文地质条件	地表水	地表水系的分布对盾构施工区域的地下水位和地层稳定性有显著影响	三维距离场分析
	含水层		三维距离场分析
	含水层厚度	含水层的厚度、水压和水质对盾构施工中的水涌风险和隧道结构的潜在侵蚀作用具有决定性影响	三维厚度分析、三维空间拓展分析
	承压水层顶板埋深		三维高度统计分析、三维空间拓展分析
地质结构条件	工程地质层组相对复杂度	地质层组的复杂度对于控制盾构机的导向和防止隧道结构变形至关重要	三维复杂度分析、三维空间拓展分析
	下伏软土层厚度	可以反映地层的不均匀性,对盾构机的选型、掘进参数的设定以及隧道结构设计的合理性具有指导意义	三维厚度分析、三维空间拓展分析
	基岩面顶板埋深	可以反映地层的不均匀性,对盾构机的选型、掘进参数的设定以及隧道结构设计的合理性具有指导意义	三维高度统计分析、三维空间拓展分析
	基岩面起伏程度	基岩面的起伏程度对于控制盾构机的导向和防止隧道结构变形至关重要	三维曲面分析、三维空间拓展分析

### 3.3 三维评价要素分析提取及综合评价

针对上文建立的三维综合评价模型,须基于相应的三维空间分析方法开展三维评价要素的分析和提取,构建三维评价数据集。

为开展三维空间分析,研究首先对三维地质模型进行离散化处理,将其分成  $200\text{ m} \times$

$200\text{ m} \times 2\text{ m}$  的规则矩形块体单元。

然后采用多种三维空间分析方法(三维统计分析、三维距离场分析等)对离散化后的地质模型进行分析处理,挖掘其中蕴含的多维信息,使评价更准确、全面。三维评价要素结果如图 3 所示。

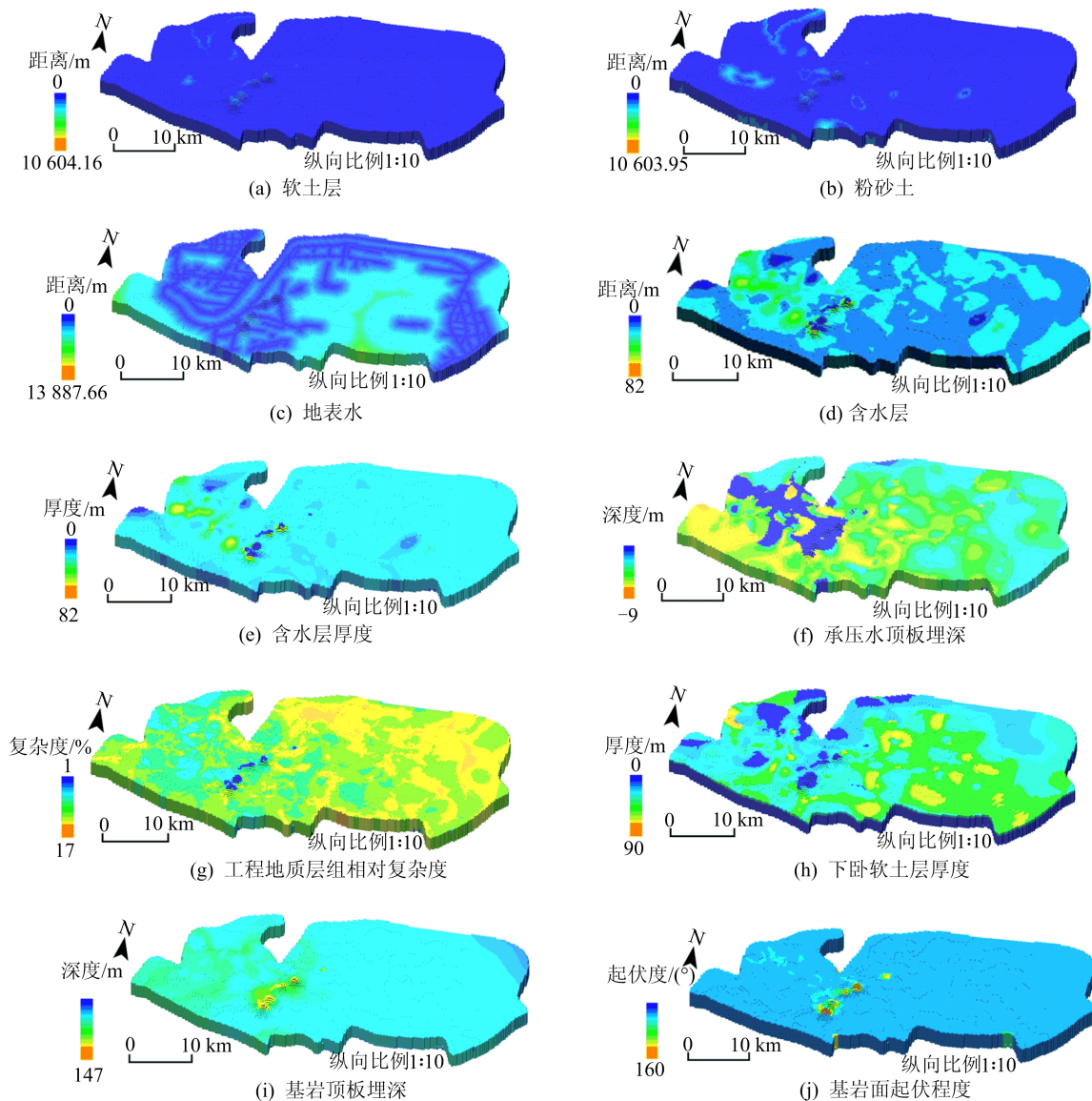


图 3 三维评价要素结果

三维评价方法不仅考虑了水平方向上的地质变化,还充分考虑了深度方向上的地质特征。根据文献[6]的研究表明,该方法能够更好地支撑地下工程和城市规划等领域的决策制定。

结合三维空间下构建的评价要素数据集,本文综合以往成果和《城市地下空间规划标准》(GB/T 51358—2019)、《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2001)等国家及行业相关标

准,将各评价要素划分为地质环境质量优、良、中、差 4 个级别,并组织专家进行评分。评价要素的评分数值越小,则对地质环境质量的影响越大,越不适宜地下空间开发;相反,分值越大,则对地质环境质量的影响越小,越适宜地下空间开发。具体划分见表 2 所列。

基于上述三维评价要素数据集,本文分别采用层次分析法、熵权法和 TOPSIS 法 3 种单

一评价模型进行地下空间地质环境质量三维综合评价,评价结果如图 4 所示。

本文采用层次分析法并结合以往研究成果

及专家经验,进行了不同层级权重的计算,见表 2 所列。形成权重的判断矩阵的 CR 值小于 0.1,表明权重矩阵已通过一致性检验。

表 2 评价因子与量化标准

一级因子	二级因子	量化标准				权重
		[1.00,0.75]	(0.75,0.50]	(0.50,0.25]	(0.25,0]	
岩土工程条件(B1)	软土(C1)/m	>20	(10,20]	(5,10]	[0,5]	0.666 7
	粉砂土(C2)/m	>20	(10,20]	(5,10]	[0,5]	0.333 3
	地表水(C3)/m	>100	(100,30]	(30,10]	(10,0]	0.140 4
水文地质条件(B2)	含水层(C4)/m	>20	(10,20]	(5,10]	[0,5]	0.232 2
	含水层厚度(C5)/m	[0,4]	(4,15]	(15,20]	>20	0.232 2
	承压水层顶板埋(C6)/m	>20	(10,20]	(5,10]	[0,5]	0.395 2
	工程地质层组相对复杂度(C7)/%	(0,0.25]	(0.25,0.50]	(0.50,0.75]	(0.75,1.00]	0.200 0
地质结构条件(B3)	下伏软土层厚度(C8)/m	[0,4]	(4,15]	(15,20]	>20	0.400 0
	基岩顶板埋深(C9)/m	[0,-10]	(-10,-30]	(-30,-40]	>-40	0.200 0
	基岩面起伏程度(C10)/(°)	<2	(2,10]	(10,25]	>25	0.200 0

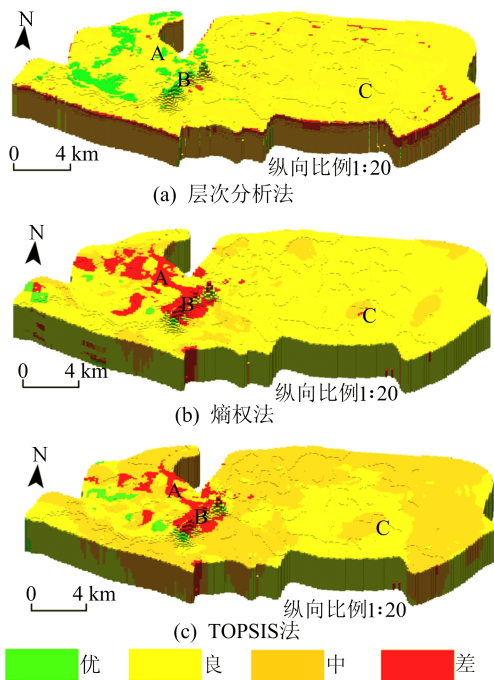
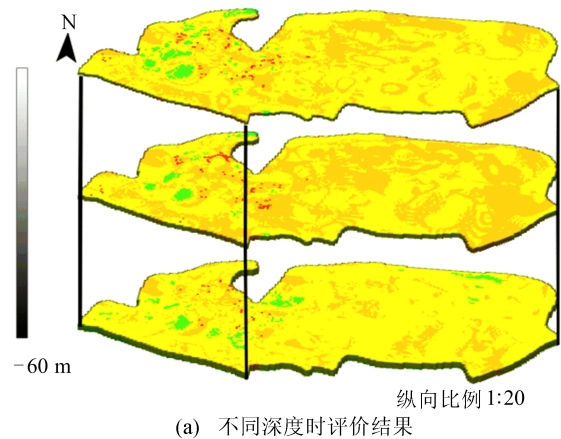


图 4 单一评价结果

由图 4 可知,3 种单一评价方法的结果存在显著差异。在 A、B、C 区域中,熵权法和 TOPSIS 法结果基本一致,但在 A 和 B 区域,熵权法和 TOPSIS 法的结果与层次分析法结果存在显著差异。层次分析法结果显示,A 区域存在砂土液化现象,但由于该区域无软土分布,岩土体的综合特征仍然良好,其原因主要是由于层次分析法中粉砂土的权重较低,而软土的权重较高,这种权重分配可能由于专家主观原因忽视了粉砂土的重要性,间接夸大了软土在地质环境评价中的影响。

相比之下,熵权法和 TOPSIS 法属于数据驱动的客观评价方法,其依赖于数据特征进行计算和决策,但数据驱动方法同样存在局限性。熵权法通过指标的信息熵来确定权重<sup>[27]</sup>,在计算熵值时对数据的分布形态较为敏感,若数据分布不均匀或存在离群点,则容易导致部分信息被忽略。此外,地质环境指标之间可能存在相互关系,例如软土厚度与含水层厚度的关联性,而 TOPSIS 法在计算过程中通常忽略了这些指标间的相互关系,从而可能影响数据驱动评价结果的准确性。

为克服单一评价方法的局限性,研究最终采用离差最大化组合评价方法,将以上 3 种方法得到的评价结果进行组合。离差最大化评价模型计算显示,层次分析法、熵权法和 TOPSIS 法的组合评价权重分别为: $\omega_1^* = 0.388 2$ , $\omega_2^* = 0.041 5$ , $\omega_3^* = 0.570 3$ 。最终评价结果如图 5 所示。



(a) 不同深度时评价结果

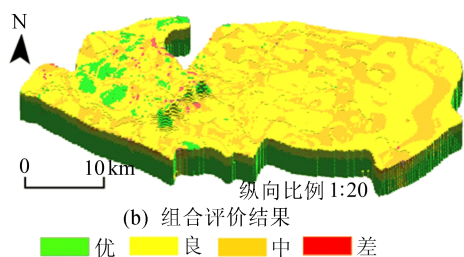


图 5 离差最大化组合评价结果

## 4 讨 论

根据杭州市钱塘新区的三维评价结果,可以准确识别施工过程中可能面临的地质风险,包括软土、砂土液化和地下水渗漏等问题,通过提前识别这些风险,使设计单位的设计方案得到优化,例如,调整施工的深度和盾构掘进参数,以适应软土、砂土液化和地下水渗漏等地质条件。施工单位能够采取预防措施,包括调整盾构机参数和增加地质监测,从而降低施工过程中的风险。

浅层( $0 \sim < -10$  m):下沙街道、萧山国际机场、空港新城西部、向前村及三丰村附近浅层地质

环境质量条件良好,盾构施工较为适宜;但在河庄街道以南、南阳街道以东由于富水性较强,存在砂土液化的风险,地质环境质量条件较差,在盾构机开挖前,应对富水砂土层进行预注浆加固,通过注入水泥浆或其他加固材料,提高土体的强度和稳定性,减少液化风险。

中层( $-10 \sim < -30$  m):乔司农场、杭州经济技术开发区北部、萧山科技城、萧东村及第二农垦场附近地质环境质量条件较好,适宜盾构施工。

深层( $-30 \sim -60$  m):总体地质环境质量逐渐趋于良好。但在中深地层中掘进,盾构机可能遇到坚硬的岩层或硬质土层,这些地层对刀具磨损严重,降低掘进效率,提高开发成本;深部地层的岩石压力较大,也增加了施工难度。因此,应根据地质环境条件规划与设计对应的方案,以确保施工的高效性和安全性。

本文基于杭州市轨道交通建设规划,选取拟开展盾构施工的地铁 21 号线作为研究对象,从离差最大化组合评价结果中获取地铁 21 号线拟施工区域下方的地质环境质量三维综合评价结果,如图 6 所示。

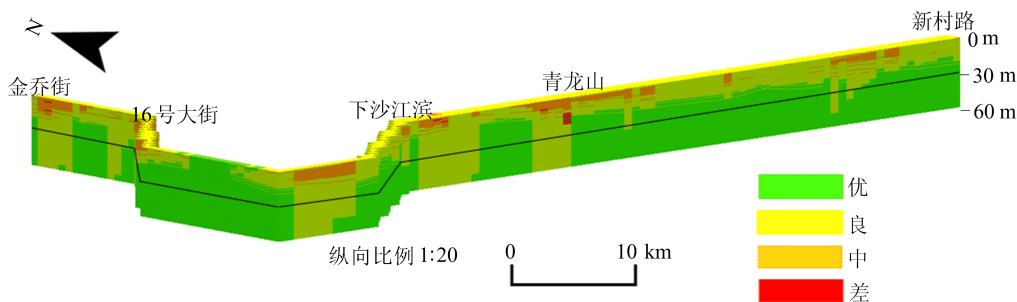


图 6 地铁 21 号线评价结果

从图 6 可以看出:杭州市拟盾构施工建设的地铁 21 号线在地下  $20 \sim 30$  m 间地质环境质量总体较优,但在金乔街、下沙江滨和青龙山地区地质环境质量良,需要在设计和施工中得到格外关注;在地下  $10 \sim 20$  m 间,金乔街和青龙山地区地质环境质量相对较差,该区域广泛分布软土和粉砂土,在施工前对软土和粉砂土层进行注浆加固,可以提高地层的稳定性和强度,减少盾构推进过程中的变形和沉降,并建立完善的地表沉降监测系统,实时监测施工区域的地表沉降和变形情况,及时调整施工参数,防止地层沉降和地表结构损坏。

## 5 结 论

1) 本研究从工程建设出发,综合考虑杭州市

钱塘新区的地质特征和盾构施工特点,构建了面向盾构施工的地质环境质量三维评价指标模型,并针对实例研究区进行综合评价研究。研究表明,采用的模型与方法可为盾构施工提供更为精确的地质环境质量方面的决策支持,能够更好地服务于城市地铁工程建设。

2) 离差最大化组合评价模型能够客观反映评价结果间的差异,综合考虑多种单一评价模型的特点,充分体现单一评价模型各自的优势,进一步提高评价结果的科学性和可靠性。

3) 实例应用结果显示,面向可能开展的盾构施工,杭州市钱塘新区内下沙街道及金乔街附近地质环境质量较好,适宜利用盾构法开展施工建设,但在河庄街道以南、南阳街道以东地区可能存

在砂土液化的风险,在施工过程中需要采用地基加固、排水降压和改进掘进参数等措施,避免地层沉降等一系列问题。

### [参 考 文 献]

- [1] 姜厚停,龚秋明,周永攀,等. 北京地铁盾构施工遇到的工程地质问题[C]//2010年全国工程地质学术年会暨“工程地质与海西建设”学术大会论文集. 北京:北京工业大学建筑工程学院,2010:6.
- [2] DUAN Y Q, XIE Z Q, ZHAO F, et al. Suitability of underground space development in plateau cities based on geological environment analysis: case study in Kunming, China [J]. *Journal of Urban Planning and Development*, 2021, 147(2):05021014.
- [3] 李鹏岳,韩浩东,王东辉,等. 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*, 2021, 41(1):121-128.
- [4] BOIVIN D J. Underground space use and planning in the Quebec City area [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 1990, 5(1/2):69-83.
- [5] YUAN H P, CHEN C H, WANG Y X, et al. Joint investigation and 3D visual evaluation of rock mass quality [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 2020:1-16.
- [6] 郝英红,李晓晖,陈忠良,等. 城市地下空间开发地质环境质量三维评价方法研究:以合肥市滨湖新区为例[J]. *地理与地理信息科学*, 2021, 37(1):11-16.
- [7] 窦帆帆. 城市地下空间地质环境三维定量评价研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2022.
- [8] DOU F F, LI X H, XING H X, et al. 3D geological suitability evaluation for urban underground space development: a case study of Qianjiang Newtown in Hangzhou, Eastern China [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2021, 115:104052.
- [9] 朴春花. 层次分析的研究与应用[D]. 保定:华北电力大学,2008.
- [10] 王欣,牟唯嫣,贾晓芳,等. 基于熵权法的 TOPSIS 综合评价法在城市公共交通中的应用[J]. *应用数学进展*, 2021, 10(12):4253-4261.
- [11] 苑辉,韩少强,马楠,等. 基于熵权 TOPSIS 模型在入河排水口水质综合评价中的应用[J]. *水资源研究*, 2022, 11(1):61-69.
- [12] 路明浩,李晓昭,支兵发,等. 基于改进熵权法的地下空间开发适宜性三维评价[J]. *地下空间与工程学报*, 2022, 18(5):1401-1412,1451.
- [13] 解智强,彭俊婷,侯至群,等. 基于层次分析法与 GIS 的城市地下空间开发适宜性评价:以昆明市为例[C]//《规划师》论丛:国土空间规划与城乡融合发展. 南宁:《规划师》杂志社,2023:456-463.
- [14] 蒋杰. 杭州市钱塘新区地下空间开发地质适宜性评价[D]. 南京:中国地质科学院,2021.
- [15] 张丽蓉,尤七七,罗灵茜,等. TOPSIS 法权重的选取:几种赋权方法的对比[J]. *统计学与应用*, 2023, 12(4):901-909.
- [16] 张晓捷. 基于熵权 TOPSIS 法的长租公寓财务风险评价及防范研究[D]. 南宁:广西大学,2022.
- [17] 常青,刘德生,杨阳. 改进 TOPSIS 的多属性决策方法[J]. *兵工自动化*, 2024, 43(6):49-55.
- [18] 洪文霞,冯兴见. 基于组合赋权云模型的全过程工程咨询关键风险评价研究[J]. *宁波工程学院学报*, 2023, 35(1):40-47.
- [19] 冯辉红,李莹,唐田. 基于组合赋权与优劣解距离法(TOPSIS)的水下隧道施工方案决策研究[J]. *科技促进发展*, 2020, 16(5):543-551.
- [20] 曹文贵,杨伟康,翟友成. 基于 D-S 证据理论的岩体质量分级组合评价方法[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2015, 42(5):86-91.
- [21] 李珠瑞. 离差最大化思想下的组合评价研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2012.
- [22] 白丽丽,白尚旺,党伟超,等. 基于离差最大化组合赋权的煤矿安全评价研究[J]. *计算机应用与软件*, 2021, 38(4):82-87.
- [23] 李珠瑞,马溪骏,彭张林. 基于离差最大化的组合评价方法研究[J]. *中国管理科学*, 2013, 21(1):174-179.
- [24] 瞿幼苗. 面向智能决策的推理引擎技术[D]. 西安:西北工业大学,2018.
- [25] 苏海涛,王建月,周娟. 基于离差最大化的组合评价模型对产业技术创新评价的应用研究[J]. *工业技术经济*, 2018, 37(5):112-118.
- [26] 张启鑫,陈艳,杨德礼. 基于离差最大化组合赋权的生态评价模型及 10 个副省级城市的实证研究[J]. *管理学报*, 2010, 7(12):1846-1856.
- [27] 刘家福,张柏豪,祝悦,等. 吉林省松花江流域城市洪灾韧性与生态系统服务耦合研究[J]. *安全与环境学报*, 2024, 24(12):4870-4880.

(责任编辑 吴 亮)