

熊芸莹,李晓晖,袁 峰,等. 基于自组织神经网络和 K-means 算法的地下空间地质环境质量三维分类及评价[J]. 地球科学与环境学报, 2023, 45(4): 929-940.

XIONG Yun-ying, LI Xiao-hui, YUAN Feng, et al. 3D Classification and Evaluation of Underground Space Geological Environment Quality Based on SOM and K-means Algorithm[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2023, 45(4): 929-940.

DOI: 10. 19814/j. jese. 2022. 11071

• 环境与可持续发展专刊 •

基于自组织神经网络和 K-means 算法的 地下空间地质环境质量三维分类及评价

熊芸莹^{1,2}, 李晓晖^{1,2*}, 袁 峰^{1,2}, 卢志堂¹, 吴少元³, 窦帆帆^{1,2}

(1. 合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009;

2. 合肥工业大学 安徽省矿产资源与矿山环境工程技术研究中心, 安徽 合肥 230009;

3. 厦门地质工程勘察院, 福建 厦门 361008)

摘 要:针对地下空间地质环境质量,前人运用三维地质信息化技术已开展了大量三维综合评价研究,但其评价结果对于规划和施工建议略显不足。其原因主要是评价过程主观性较强,综合评价结果难以充分表达地质环境的真实类别,难以关注更需受到重视的不良地质环境条件等。针对上述问题,利用自组织神经网络(SOM)和 K-means 算法对地下空间地质环境质量三维评价信息进行分类研究;以福建省厦门市马銮湾新城南岸片区为实例,基于三维空间分析方法提取三维评价指标因子,开展基于自组织神经网络和 K-means 算法的地下空间地质环境质量三维评价,最后利用评价获得的地质环境类别与主导因子进一步提出规划和施工建议。结果表明:基于自组织神经网络和 K-means 算法的评价方法能够有效挖掘多维多源地质数据中的隐含信息,识别出关键区分因子,为地下空间地质环境质量评价提供了新的思路和方法。

关键词:地质环境质量评价;地下空间;自组织神经网络;K-means 算法;聚类分析;地质建模;福建中图分类号:X141;P642 文献标志码:A 文章编号:1672-6561(2023)04-0929-12

3D Classification and Evaluation of Underground Space Geological Environment Quality Based on SOM and K-means Algorithm

XIONG Yun-ying^{1,2}, LI Xiao-hui^{1,2*}, YUAN Feng^{1,2}, LU Zhi-tang¹,
WU Shao-yuan³, DOU Fan-fan^{1,2}

(1. School of Resources and Environment Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China; 2. Anhui Province Engineering Research Center for Mineral Resources and Mine Environments, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China; 3. Xiamen Institute of Geological Engineering, Xiamen 361008, Fujian, China)

Abstract: With the vigorous development of 3D geological information technology, many 3D comprehensive evaluation studies have been conducted on underground space geological environment quality, but the evaluation results are slightly insufficient for planning and construction suggestions. The main reason is that the evaluation process is subjective,

收稿日期:2022-11-25;修回日期:2023-04-27 投稿网址: <http://jese.chd.edu.cn/>

基金项目:安徽省公益性地质工作项目(2023-g-1-18);安徽省自然科学基金项目(1808085QD116)

作者简介:熊芸莹(1999-),女,四川广安人,理学硕士研究生,E-mail:xiونغyunying@163.com.

* 通讯作者:李晓晖(1986-),男,河北定州人,副教授,理学博士,E-mail:lxhlixiaohui@163.com.

comprehensive evaluation results are difficult to fully express the true category of geological environment, and it is difficult to pay attention to unfavorable geological environment conditions that require more attention. In response to the above issues, the self-organizing map (SOM) and K-means algorithm were used to classify and study 3D evaluation information of underground space geological environment quality. Taking the south bank of Maluan bay new city in Xiamen city, Fujian province as an example, 3D evaluation index factors were extracted based on 3D spatial analysis method, and 3D evaluation of underground space geological environment quality was carried out based on SOM and K-means algorithm. Finally, the geological environment category and dominant factors obtained from the evaluation were used to propose planning and construction suggestions. The results show that the evaluation method based on SOM and K-means algorithm can effectively mine hidden information in multi-dimensional and multi-source geological data, identify key distinguishing factors, and provide new ideas and methods for the evaluation of underground space geological environment quality.

Key words: geological environment quality evaluation; underground space; SOM; K-means algorithm; cluster analysis; geological modeling; Fujian

0 引言

在城镇化进程不断推进的背景下,土地资源短缺问题已经成为制约城市发展的主要因素^[1-3]。地下空间是重要的建设用地储备资源,许多城市陆续开展了地下空间的开发利用工作^[4-5]。而地下空间的开发利用过程具有极高的技术难度和不确定性,在开发过程中极易遭遇一系列工程、水文或环境地质问题,严重制约着城市地下空间的发展^[6]。地质环境作为地下空间开发利用的载体,其自然地质条件稳定性强烈影响着地下空间的大规模开发利用^[7]。因此,为了科学、有序地进行地下空间开发,防止资源浪费和降低开发风险,应当对地下空间地质环境质量进行综合评价与分析^[8-9]。

以往受研究技术的限制,地下空间地质环境质量评价主要集中在二维空间,特别是从浅、中、深 3 个层位进行二维评价^[10]。但随着三维地质信息技术的不断发展,越来越多的学者引入三维地质模型开展地下空间地质环境质量三维评价研究^[11-12]。叶菁等利用 Voxel 模型对研究区进行三维剖分,引入地质体约束进行地质环境质量三维评价,降低了评价模型的不确定性^[13];郝英红等融合三维地质建模、三维空间分析和三维综合评价等多种技术方法,完成了地下空间地质环境质量三维评价^[14];Hou 等将三维地质模型集成到地下空间地质环境质量评价中,探讨了三维地质模型对评价结果的影响^[15]。与二维评价方法相比,三维评价方法能够全面、准确地反映地下空间地质环境的真实情况,更加准确地表

达评价结果在深度方向上的空间异质性^[16]。但当前研究成果在地下空间建设和施工中的应用仍略显不足,其原因主要在于评价确权过程中人为影响大、主观性过强;综合评价结果难以客观表达地质环境的真实类别,容易忽略更需受到重视的不良地质条件等^[17-18]。因此,亟待新的方法技术引入地下空间地质环境质量评价中,提高评价结果的准确性和实用性。

近年来,机器学习方法的应用越发广泛。根据是否使用具有标签的训练集,可将机器学习分为监督学习和非监督学习两种。监督学习需要有标签的训练集来训练模型,使模型具有预测未来输出的能力;非监督学习是从无标签的训练集中解析出隐藏在数据中的内在结构,从而对测试集进行输出的方法。目前机器学习方法在地质环境和地质灾害监测分析等方面已取得了不少成果。例如,通过实地调查和遥感监测等技术手段,借助监督学习实现地质环境与灾害的深度信息挖掘,以实现地质灾害的定量预测^[19-21]。而在地下空间地质环境质量评价研究中,具有标签的训练集难以获取,因此非监督学习方法可能更为适合。聚类分析是一种从数据出发,通过寻找数据间内在联系、对多个变量进行分类的非监督学习方法。常用的算法主要有 K-means 算法、凝聚法以及自组织神经网络(Self-organizing Map, SOM)等。由于研究所涉及的数据维度高且数据量大,自组织神经网络和 K-means 算法的时间复杂度随着样本数的增加呈线性增加,较其他聚类分析算法时间复杂度低,所以选择自组织神经网络和 K-

means 算法开展研究。但相关研究表明,进行单次聚类得到的结果往往精度较低或者与实际数据结构不符。为进一步消除聚类分析时的不确定性,有必要采用多次聚类的方法开展研究^[22]。

本文以福建省厦门市马銮湾新城南岸片区为例,采用自组织神经网络融合 K-means 算法对地下空间地质环境质量三维评价因子进行聚类分析^[23-25];从数据自身寻找其中隐藏的结构和关联信息,解决以往评价过程中存在的主观性强和实用性较低等问题,从而获得更为客观、合理的评价结果,更有针对性地提出规划和施工建议,更好地服务于地下空间的开发利用。

1 研究区概况

1.1 地质概况

本文研究的区域为福建省厦门市马銮湾新城南岸片区。该区域地势整体南高北低,由西南向东北倾斜下降^[26]。区域内上层地层为第四系松散堆积层,基岩主要为侏罗系凝灰岩类和燕山早期侵入花岗岩^[27]。区域工程地质层组按时代从新到老依次可划分为第四系全新统长乐组、第四系上更新统龙海组、上侏罗统南园组等;按厦门市标准工程地质层组可划分为 6 个工程地质层和 15 个亚层(表 1)。

研究区临近马銮湾内湾区,地下水较为发育^[27],地层含水量高且地下水埋深较浅,临海区域地下水稳定水位埋深为 0~5.2 m,在施工过程中容易发生管涌和突涌等事件。区内含有大量的海相沉

积深灰、灰黑色淤泥等软土地层,软土具有流塑、软塑的特性,极易造成地基不均匀沉降^[27]。研究区地处厦门市马銮湾清淤回填造陆工程的范围内,区内存在大面积的人工填土区域,其厚度主要集中在 4~7 m,局部可达 10 m,填土层的均匀性、密实度较差,易造成基坑失稳等问题^[28]。

1.2 地下空间地质环境质量影响因素

基于《城市地下空间规划标准》(GB/T 51358—2019)及现有的地下工程研究和建设经验^[29-31],从岩土体工程性质、水文地质、特殊地质结构和特殊土 4 个方面构建三维评价指标体系(图 1)。其中,岩土体是地下空间开发利用的介质与环境,其工程性质决定着地下空间地质体的稳定性;研究区临近海湾,海水腐蚀及地下水发育等水文地质特征会对地下空间建设造成影响;复杂的地质结构也会增加地下工程的不确定性;研究区内广泛分布的填土、软土及残积土等均会影响地质环境质量。

1.3 数据准备

基于厦门、漳州、泉州同城化地区综合地质调查项目中的钻孔数据和相关土工试验参数等,利用武汉智图云起科技有限公司研发的 Smart3DMap 软件内建的三维隐式建模方法,构建三维地质模型并实现三维离散单元化^[32-33]。综合考虑计算机软硬件条件、建模范围大小、模型精度以及深度方向上地质层最小厚度等情况,将三维离散化单元尺寸定义为 10 m×9 m×2 m,包含 2 807 403 个单元块,构建结果如图 2 所示。基于三维评价模型,运用三维空间

表 1 研究区工程地质层组

Table 1 Engineering Geological Formations in the Study Area

地层			工程地质层	亚层	地层描述
第四系	全新统	长乐组	(1)	1-1	人工填土,松散—稍密,主要由黏性土和部分建筑垃圾回填而成
			(2)	2-1	淤泥,流塑—软塑,深灰、灰黑色,主要成分为黏、粉粒
				2-2	含砾中细砂,松散—稍密,局部中密
				2-3	淤泥质土,松软状,主要由黏、粉粒混中粗砂组成
				2-4	粉质黏土,可塑—硬塑,主要由黏、粉粒及砂砾粒组成
				2-5	含砾粗中细砂,稍密—中密
				2-6	砂砾质黏土,以粉、黏粒和石英砂粒为主
	上更新统	龙海组	(3)	3-1	粉质黏土,可塑—硬塑
				3-2	含砾中细砂,稍密—中密,局部含泥团,含泥质一般为 10%~20%
				3-3	粗砂、砾石,稍密—中密,饱和,以石英质中、粗砂为主
	未分		(4)	4-1	粉质黏土,可塑—硬塑,主要由粉、黏粒组成
				4-2	残积砂质黏性土,可塑—硬塑,花岗岩风化形成,局部为火山晶屑凝灰岩风化的黏、粉粒
侏罗系	上统	南园组	(5)	5-1	全强风化凝灰岩,主要成分为火山晶凝灰岩风化的产物,岩体极破碎,呈散体结构,属极软岩
燕山期侵入岩			(6)	6-1	全强中风化花岗岩
				6-2	微风化花岗岩

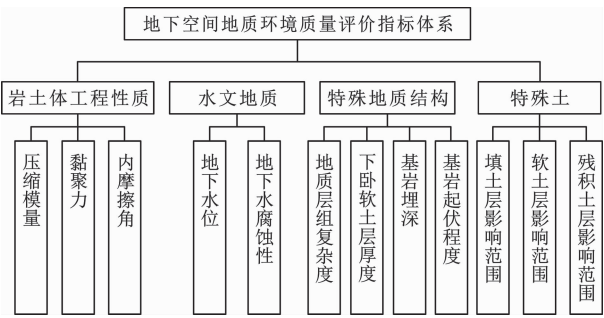


图 1 地下空间地质环境质量评价指标体系

Fig. 1 Evaluation Index System of Underground Space Geological Environment Quality

统计分析、三维距离场分析等多种三维空间分析方法^[16,34]对三维评价指标进行分析提取。最后,对所有单元块的三维评价指标信息进行聚类,寻找指标信息中隐藏的数据间内在联系。

2 分析方法

2.1 自组织神经网络

自组织神经网络是 Kohonen 于 1981 年提出的^[35],是一种非监督学习算法。它根据原始数据之间的拓扑关系,对输入数据进行自组织学习,学习的结果是得到输入数据所对应的获胜神经元。自组织神经网络包含输入层和输出层。输入层主要用于数据的输入,其神经元个数与输入数据的维数相同。其表达式为

$$x_{ij}=[x_{i1},x_{i2},\cdots,x_{im}] \tag{1}$$

式中: n 为样本总数; m 为样本数据属性维数; x_{ij} 为第 i 个样本中第 j 个属性的数值, $i=1,2,\cdots,n,j=1,2,\cdots,m$ 。

在输出层中,神经元在二维空间中按一定规律排列,常见的排列形式有矩形和六边形。在学习之前,每个神经元都会被赋予一个初始权重,可写为

$$w_{ij}=[w_{i1},w_{i2},\cdots,w_{im}] \tag{2}$$

式中: N 为输出层中神经元总数; w_{ij} 为第 i 个神经元对当前输入样本第 j 个属性的权重值, $i=1,2,\cdots,n$ 。

输出层主要用于学习结果的输出,输出层中的神经元通过邻域关系与其相邻的神经元相连。自组织神经网络实质是神经元根据权重与输入向量进行距离计算,距离较小的神经元获胜,将输入数据映射到获胜神经元上,并通过迭代不断调整位置^[36]。训练结束后,相似数据点被映射到邻近神经元上,从而实现聚类功能。

自组织神经网络的复杂性与输出层的神经元数

量成二次关系,其网络大小的设计是否合理是算法实现的关键。一般来说,输出层中神经元总数^[37-38]为

$$N=5\sqrt{n} \tag{3}$$

一般输出层网络由行列数(h)一致的神经元组成,则神经元的行列数为

$$h=\sqrt{N} \tag{4}$$

2.2 K-means 算法

K-means 算法是一种通过迭代求解的划分聚类算法。该算法直观、易于理解,且时间复杂度低,是广泛使用的聚类算法^[39]。K-means 算法的原理是通过计算样本与初始化聚类中心的距离,并将样本分配到距离最近的类中,反复迭代,直至类中心不再发生改变。该方法需要预先指定聚类数,且不同聚类数会产生不同的聚类结果。聚类数可通过计算 Davies-Bouldin 指数 (DBI) 来确定^[40]。Davies-Bouldin 指数是通过计算类内距离之和与类间距离之比来优化 k 值的选择。Davies-Bouldin 指数越小,聚类效果越佳。

2.3 自组织神经网络融合 K-means 算法多次聚类法

自组织神经网络和 K-means 算法各有优点和不足。自组织神经网络具有强大的可视化能力,可以将高维数据进行转换并映射到低维拓扑特征图上,能够很好地训练非线性数据,但其分类精度不高;K-means 算法计算简单,便于理解,但初始聚类中心的选择对其结果影响较大。而自组织神经网络融合 K-means 算法多次聚类法,首先利用自组织神经网络对初始高维数据进行训练,得到初步聚类结果,然后利用 K-means 算法在已知聚类中心点的情况下,有效提升聚类结果的精确性,更好地弥补两种算法单独应用时的劣势。

3 数据处理过程

不同维度的量纲会导致距离的计算依赖于量纲较大的属性而得到不合理的结果。为了保证结果的可靠性,需要事先对数据进行 Z-score 标准化处理,使所有的评价指标符合正态分布,数据标准化、统一化,提高数据可比性。

首先对研究数据进行标准化处理,再根据式 (3)、(4) 计算得到自组织神经网络边长为 92,将经过标准化处理后的样本进行自组织神经网络训练,获得自组织神经网络的统一距离矩阵 (U-Matrix) (图 3)。在图 3 中,每个小格子表示一个神经元。本文中,每个神经元的本质是一个 13 维的行向量 (与输入数据属性维度相同),神经元的颜色表示该

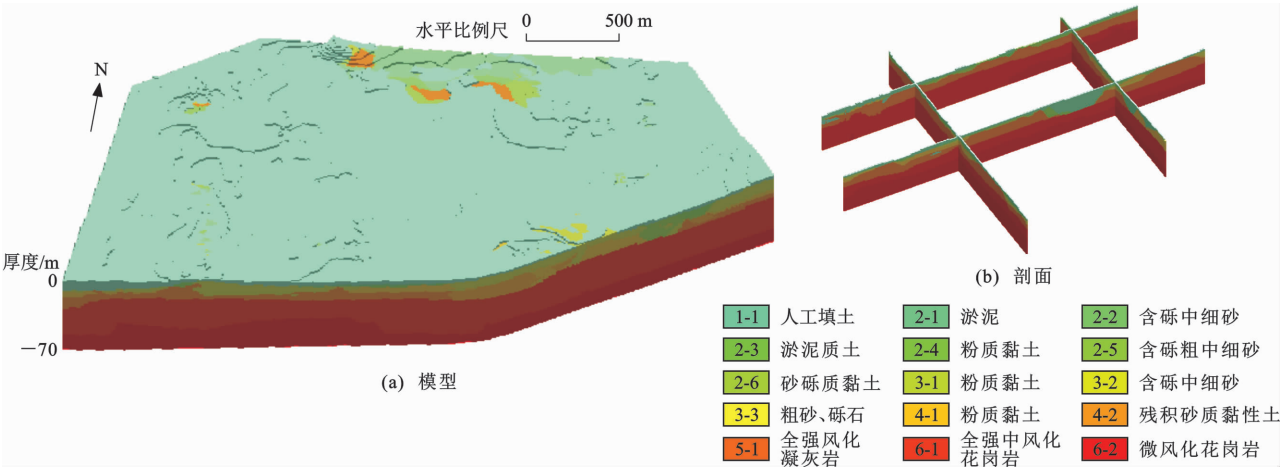
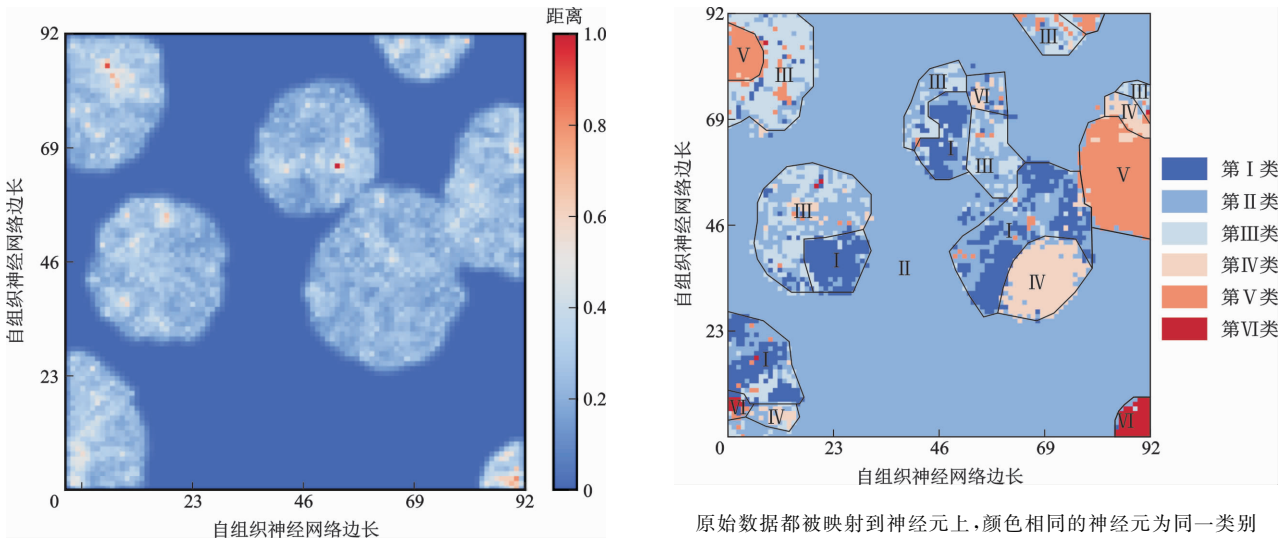


图 2 三维工程地质结构模型及其剖面

Fig. 2 3D Engineering Geological Structure Model and Its Profile



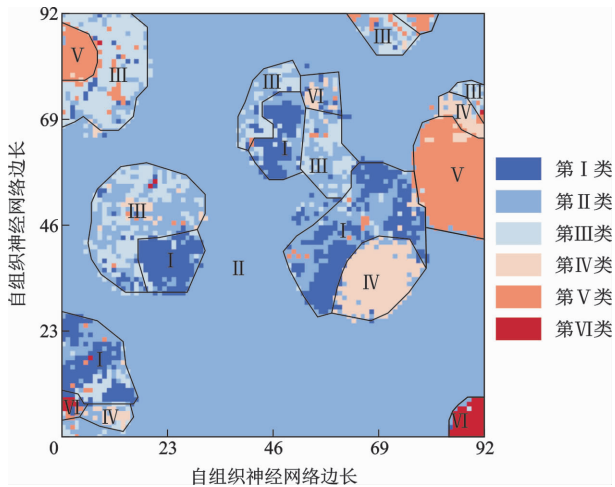
神经元与其临近神经元之间的平均距离。红色表示距周围神经元较远,蓝色表示距周围神经元较近。

基于 K-means 算法对自组织神经网络训练结果中的神经元进行聚类,进而可将对应映射的样本数据进行聚类。结果表明: $k=6$ 时,Davies-Bouldin 指数最小,聚类效果最佳。聚类结果如图 4 所示。最后以各个评价单元的中心点坐标为索引,将聚类结果展布到三维空间中(图 5)。

4 评价结果分析

4.1 地下空间地质环境质量三维分类及主导因子识别

为了更好地对上述分类结果进行分析与讨论,本文以均值比 $\omega = \frac{\mu_{ij}}{\mu_{i'j}}$ 为量化指标,识别各类别的主



原始数据都被映射到神经元上,颜色相同的神经元为同一类别

图 4 基于自组织神经网络和 K-means 算法的聚类结果

导因子(图 6)。其中, μ_{ij} 表示第 i 类第 j 个属性的均值; $\mu_{i'j}$ 表示除了第 i 类的其他类别第 j 个属性的均值。 $|\omega-1|$ 越大,说明此类别该属性与其他类别之间的差别越大,越有可能是此类别的主导因子;而 $|\omega-1|$ 越小,说明该属性在各个类别之间没有较大差异,不能作为关键因子区分各类。组分映射图是对每个神经元进行每一维度切片的映射图^[41]。它包含了一个输入特征的相对分布,即各个单元格中描述了样本集属性均值的归一化值(图 7)。本文进一步利用组分映射图进行协同判别。

以第 I 类为例,抗压强度、填土层影响范围以及下卧软土层厚度的 $|\omega-1|$ 值较大[图 6(a)]。结合图 7 可以发现,在抗压强度和填土层影响范围这两个维度映射图中,第 I 类的神经元响应程度明显区

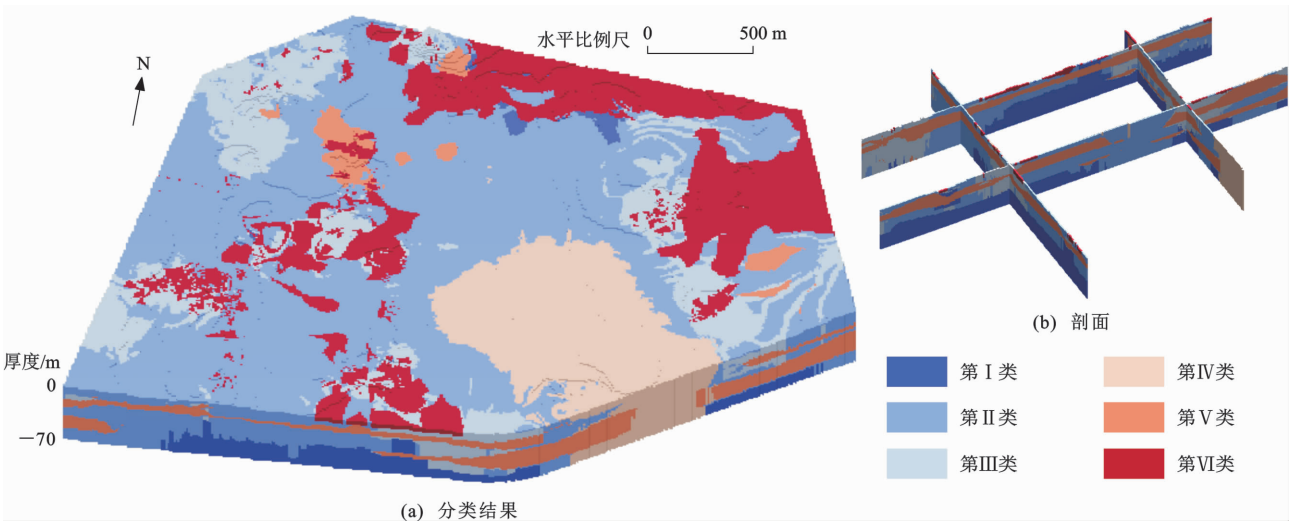


图 5 基于自组织神经网络和 K-means 算法的地下空间地质环境质量分类结果及其剖面

Fig. 5 Classification Result and Its Profile of Underground Space Geological Environment Quality Based on SOM and K-Means Algorithm

别于其他类别,而下卧软土层厚度与其他类别没有明显差异。由此判定,第 I 类的主导因子为抗压强度和填土层影响范围。其他类别主导因子判定方法同上,据此能够得到各个类别的主导因子(表 2)。

表 2 各类别的主导因子

Table 2 Dominant Factors of Each Category	
类别	主导因子
第 I 类	抗压强度、填土层影响范围
第 II 类	风化基岩
第 III 类	基岩起伏程度
第 IV 类	地质层组复杂度、残积土层影响范围
第 V 类	黏聚力和内摩擦角
第 VI 类	下卧软土层厚度和软土层影响范围

4.2 地下空间地质环境质量评价

基于表 2 得到的各类别主导因子,结合三维地质结构模型中切取的剖面与评价结果中对应剖面,利用箱型图对主导因子的原始数据进行分析(图 8)。

(1)第 I 类的抗压强度明显高于第 II、III、IV、V、VI 类[图 8(a)]。根据图 2 展示的三维工程地质结构模型及其剖面,发现第 I 类主要分布在模型底部地下 40 m 左右,仅少部分出露在地表。而填土层影响范围较大,说明该类别单元距填土层较远,表明第 I 类主要为较坚硬的基岩,岩石稳定性较好。

(2)第 II 类的抗压强度均值为 30 MPa 左右[图 8(b)]。结合图 2 展示的三维工程地质结构模型及其剖面,发现第 II 类基本为覆盖在基岩上层的、深度大约在地下 20 m 左右的全中风化岩石层,其抗压强度较低,岩石松散且稳定性较差。

(3)第 III 类的基岩起伏程度高于第 I、II、IV、V、VI 类[图 8(c)]。结合图 5 展示的地下空间地质环境质量分类结果及其剖面,发现第 III 类含有条带状区域,说明这些区域处于基岩起伏较大的位置。

(4)第 IV 类距软土层和残积土的距离较远,地质层组复杂度远低于第 I、II、III、V、VI 类[图 8(d)~(f)]。结合图 2 展示的三维工程地质结构模型,发现该区域的填土层厚度较厚,且在纵向上地质层组较其他区域较少,说明该区地层变化较少,地质层组复杂度低。

(5)第 V 类土体力学性质中的内摩擦角和黏聚力相对第 I、II、III、IV、VI 类较高[图 8(g)、(h)]。结合图 2 展示的三维工程地质结构模型,发现该区域基本为物理性质较好的粉质黏土层,力学性质较好,土质较稳定。

(6)第 VI 类距软土层较近,下卧软土层厚度相对第 I、II、III、IV、V 类较厚[图 8(i)、(j)],说明该类别中存在大面积软弱地层和软硬交替的复合地层,且集中分布在研究区的上层。

结合基于组分映射图的主导因子识别和基于箱型图的原始数据分析结果,以及地下空间地质环境质量分类结果(图 5)中各类别的空间分布,可以针对地质环境特点对地下空间工程提出施工建议(表 3),为地下空间建设和可持续发展提供保障。

5 讨 论

为了讨论基于自组织神经网络和 K-means 算法的地下空间地质环境质量评价结果的有效性,本

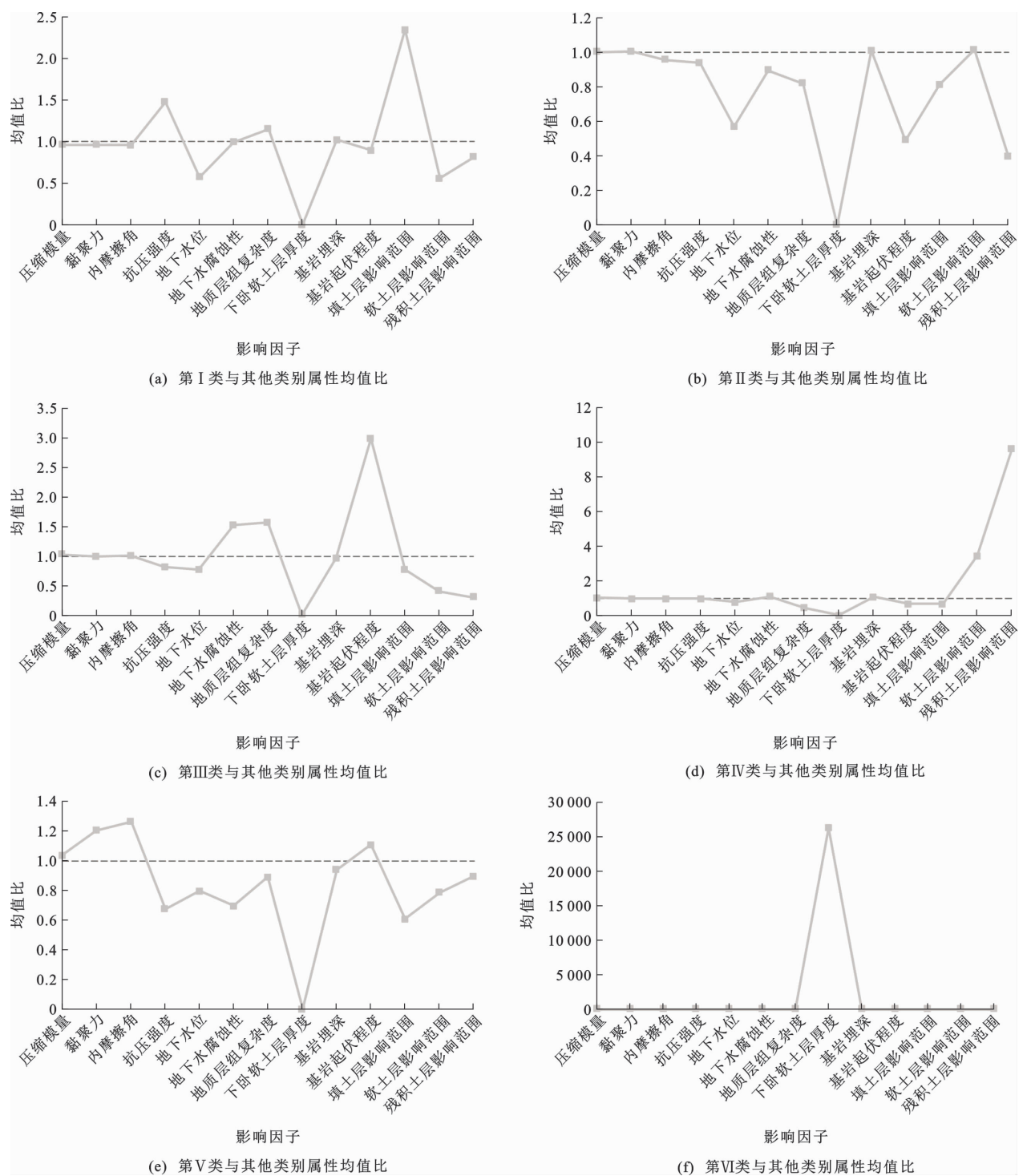


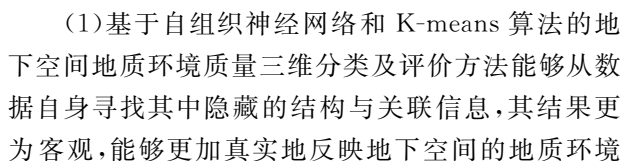
图 6 各类别与其他类别属性均值比

Fig. 6 Ratios of the Mean Value of Attribute of Each Category to Other Categories

文进一步完成了基于层次分析法和多级指数叠加法的地下空间地质环境质量评价^[42]。评价结果如图 9 所示。

将基于自组织神经网络和 K-means 算法的地下空间地质环境质量三维评价结果(图 5)与基于层次分析法和多级指数叠加法的地下空间地质环境质量三维评价结果(图 9)进行对比可以发现,两种评

价结果各类别的分布趋势较为一致,仅在少部分区域存在差异。例如,基于层次分析法和多级指数叠加法的地下空间地质环境质量三维评价结果中,地质环境质量较差的第 VI 类区域周围存在一圈第 III 类单元块,这是由综合评价结果的分级阈值设置造成的,不同的分级方法会得到不同的评价结果。而本文直接通过聚类得出各个类别单元块,可能避免了



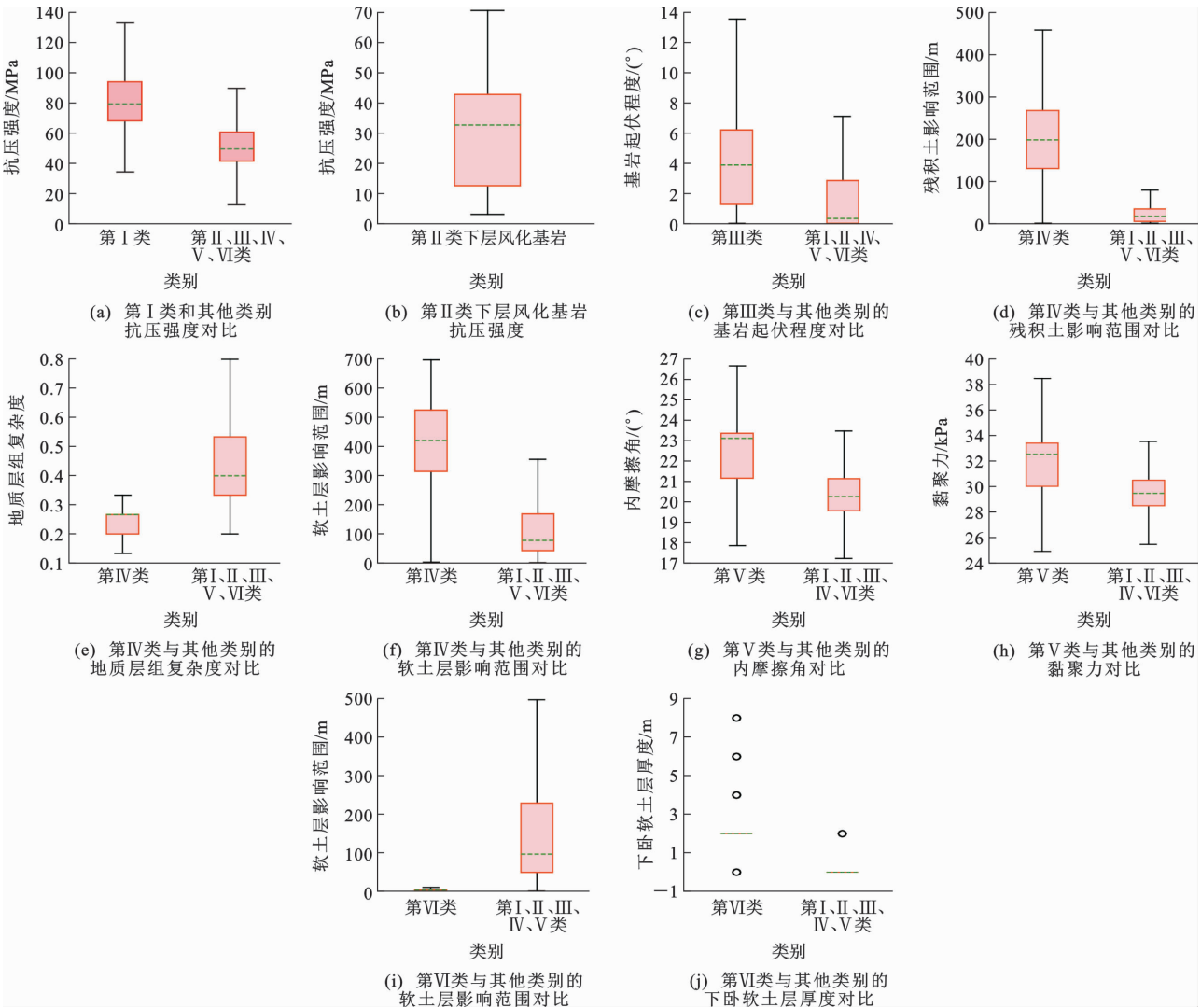


图 8 各类别主导因子与其他类别对比箱型图

Fig. 8 Box Charts of Comparison Between Dominant Factors of Each Category and Other Categories

表 3 各类别地质环境质量评价及施工建议

Table 3 Geological Environment Quality Evaluation and Construction Suggestions of Each Category

类别	地质环境特点	施工方法或建议
第Ⅰ类	主要为较坚硬的基岩,岩石稳定性较好	利用较为坚硬的围岩作为基点进行支护,但在施工过程中应进行监测,并附应急措施
第Ⅱ类	主要为填土层和全中风化岩石层	填土层的均匀性和密实性较差,应该注意基坑失稳等问题;而风化岩石的稳定性较差,容易发生塌方等事故,应该采用加强支护、支挡、衬砌等措施
第Ⅲ类	处于基岩起伏较大的位置	进行桩基施工时,极易造成桩锤沿基岩面倾斜,产生斜孔或偏孔,可增加钢护筒对孔桩进行保护
第Ⅳ类	距软土层和残积土层距离较远,填土层厚,地质层组复杂度低	填土层的均匀性和密实性较差,应该注意基坑失稳等问题
第Ⅴ类	土的抗剪强度较高	岩土体力学性质较好,土质较稳定,但仍需注意土坡稳定性的问题
第Ⅵ类	存在大面积软弱地层和软硬交替的复合地层	软弱地层的稳定性很差,容易造成失稳和不均匀变形,影响上部建设;应该提高软弱地层强度,保证其稳定性,降低软弱土的压缩性

质量特征。

(2)福建省厦门市马銮湾新城南岸片区实例评价结果显示:本文提出的方法能够快速将研究区地下空间地质环境质量分为 6 类,并识别出各类别的主导因子;其结果与传统评价方法在一定程度上具有一致性,显示出该方法的可行性与可靠性;基于评

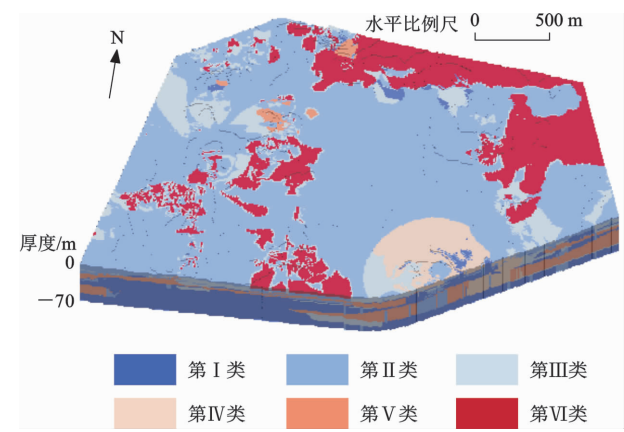


图 9 基于层次分析法和多级指数叠加法的地下空间地质环境质量三维评价结果

Fig. 9 3D Evaluation Result of Underground Space Geological Environment Quality Based on AHP and Multi-level Exponential Superposition Method

价结果,能够进一步指出各类别施工和运营过程中可能出现的施工风险问题,并提供相应的施工建议,显著提高了评价结果的实用性;其方法与成果可为城市地下空间工程规划和建设提供更为有效的决策依据。

参考文献 :
References :

[1] 彭芳乐,乔永康,程光华,等.我国城市地下空间规划现状、问题与对策[J].地学前缘,2019,26(3):57-68.
PENG Fang-le, QIAO Yong-kang, CHENG Guang-hua, et al. Current Situation and Existing Problems and Coping Strategies for Urban Underground Space Planning in China[J]. Earth Science Frontiers, 2019, 26(3):57-68.

[2] LIN D, BROERE W, CUI J Q. Underground Space Utilization and New Town Development: Experiences, Lessons and Implications[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022, 119:104204.

[3] ZHANG M D, XIE Z, HE L. Does the Scarcity of Urban Space Resources Make the Quality of Underground Space Planning More Sustainable? A Case Study of 40 Urban Underground Space Master Plans in China [J]. Frontiers in Environmental Science, 2022, 10:966157.

[4] 王守智.我国地下空间开发利用的“公益优先”原则探析[J].中国土地,2022(2):14-17.
WANG Shou-zhi. On the Principle of “Public Welfare Priority” in the Development and Utilization of Underground Space in China[J]. Chind Land, 2022(2): 14-17.

[5] 李晓昭,王睿,顾倩,等.城市地下空间开发的战略需求[J].地学前缘,2019,26(3):32-38.
LI Xiao-zhao, WANG Rui, GU Qian, et al. Prediction of Strategic Demand of Urban Underground Space Development[J]. Earth Science Frontiers, 2019, 26(3):32-38.

[6] 黄宏伟.隧道及地下工程建设中的风险管理研究进展[J].地下空间与工程学报,2006,2(1):13-20.
HUANG Hong-wei. State of the Art of the Research on Risk Management in Construction of Tunnel and Underground Works[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(1):13-20.

[7] 王松泉,李友.地下空间开发地质环境质量评价指标体系研究[J].绿色科技,2021,23(14):173-176.
WANG Song-quan, LI You. Research on Evaluation Index System of Geological Environment Quality for Underground Space Development[J]. Journal of Green Science and Technology, 2021, 23(14):173-176.

[8] LI X Z, LI C C, AURELE P, et al. Multiple Resources and Their Sustainable Development in Urban Underground Space[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 55:59-66.

[9] 杨晓刚,王睿,黄伟亮.基于国内典型城市对比的地下空间开发利用现状及问题分析[J].地学前缘,2019,26(3):69-75.
YANG Xiao-gang, WANG Rui, HUANG Wei-liang. Status and Challenges of Underground Space Development and Utilization in China Based on Comparative Analysis of Typical Chinese Cities[J]. Earth Science Frontiers, 2019, 26(3):69-75.

[10] 王永立.天津市中心城区地下空间资源评价[J].地球科学与环境学报,2008,30(2):166-171.
WANG Yong-li. Underground Space Resource Evaluation at Central Urban District of Tianjin City[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2008, 30(2):166-171.

[11] 奚悦,张万斌,李培楠,等.城市地下空间资源质量三维精细化评价[J].浙江大学学报(工学版),2022,56(4):656-663,710.
XI Yue, ZHANG Wan-bin, LI Pei-nan, et al. Three-dimensional High-resolution Evaluation of Urban Underground Space Resource Quality[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2022, 56(4): 656-663, 710.

[12] XI Y, LI X J, ZHU H H, et al. Three-dimensional High-precision Assessment of Mountainous Urban Underground Space Resources: A Case Study in Chongqing, China [J]. Tunnelling and Underground

- Space Technology, 2022, 123(5): 104439.
- [13] 叶菁, 侯卫生, 邓东成, 等. 基于可变模糊集的城市地下空间资源三维质量评价[J]. 资源科学, 2016, 38(11): 2147-2156.
- YE Jing, HOU Wei-sheng, DENG Dong-cheng, et al. 3D Quality Assessment for Urban Underground Space Resources Based on Variable Fuzzy Set[J]. Resources Science, 2016, 38(11): 2147-2156.
- [14] 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.
- HAO Ying-hong, LI Xiao-hui, CHEN Zhong-liang, et al. Study on 3D Evaluation Method of Geological Environment Quality for Urban Underground Space Development: A Case Study of Binhu New District, Hefei City[J]. Geography and Geo-information Science, 2021, 37(1): 11-16.
- [15] HOU W S, YANG L, DENG D C, et al. Assessing Quality of Urban Underground Spaces by Coupling 3D Geological Models: The Case Study of Foshan City, South China[J]. Computers & Geosciences, 2016, 89: 1-11.
- [16] 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.
- [17] 李旭. 基于 GIS 的城市地下空间资源开发适宜性评价[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- LI Xu. Evaluation of the Suitability for Urban Underground Space Resources Development Using GIS[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.
- [18] 蒋杰. 杭州市钱塘新区地下空间开发地质适宜性评价[D]. 北京: 中国地质科学院, 2021.
- JIANG Jie. Evaluation on Geological Suitability of Underground Space Development in Qiantang New Area, Hangzhou City[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2021.
- [19] LAN H X, LIU X, LI L P, et al. Remote Sensing Precursors Analysis for Giant Landslides[J]. Remote Sensing, 2022, 14(17): 4399.
- [20] LAN H X, ZHOU C H, WANG L J, et al. Landslide Hazard Spatial Analysis and Prediction Using GIS in the Xiaojiang Watershed, Yunnan, China[J]. Engineering Geology, 2004, 76(1/2): 109-128.
- [21] 窦杰, 向子林, 许强, 等. 机器学习在滑坡智能防灾减灾中的应用与发展趋势[J]. 地球科学, 2023, 48(5): 1657-1674.
- DOU Jie, XIANG Zi-lin, XU Qiang, et al. Application and Development Trend of Machine Learning in Landslide Intelligent Disaster Prevention and Mitigation[J]. Earth Science, 2023, 48(5): 1657-1674.
- [22] 殷锋, 曹旭, 漆翔宇. 基于聚类的推荐算法综述[J]. 西南民族大学学报(自然科学版), 2021, 47(3): 303-309.
- YIN Feng, CAO Xu, QI Xiang-yu. Review of Clustering-based Recommendation Algorithms[J]. Journal of Southwest Minzu University(Natural Science Edition), 2021, 47(3): 303-309.
- [23] SANTOS M R, ROISENBERG A, IWASHITA F, et al. Hydrogeochemical Spatialization and Controls of the Serra Geral Aquifer System in Southern Brazil: A Regional Approach by Self-organizing Maps and K-means Clustering[J]. Journal of Hydrology, 2020, 591: 125602.
- [24] 黄燕鹏, 汪远昊, 王超, 等. 基于自组织神经网络和 K-means 的场地地下水污染特征分析与分区管控研究[J]. 环境工程, 2022, 40(6): 31-41, 47.
- HUANG Yan-peng, WANG Yuan-hao, WANG Chao, et al. Characteristics Analysis and Zoning Control of Groundwater Pollution Based on Self-organizing Maps and K-means[J]. Environmental Engineering, 2022, 40(6): 31-41, 47.
- [25] BRENTAN B, MEIRELLES G, LUVIZOTTO E J, et al. Hybrid SOM+K-means Clustering to Improve Planning, Operation and Management in Water Distribution Systems[J]. Environmental Modelling & Software, 2018, 106(8): 77-88.
- [26] 周红, 林孟, 陈江畅. 基于 GIS 和 SWMM 的城市雨洪模型构建模拟与效益评价: 以厦门市马銮湾片区为例[J]. 现代城市研究, 2020, 35(12): 112-119.
- ZHOU Hong, LIN Meng, CHEN Jiang-chang. Simulation and Benefit Evaluation of Urban Rain Flood Model Based on GIS and SWMM: A Case Study of Maluan Bay Area in Amoy[J]. Modern Urban Research, 2020, 35(12): 112-119.
- [27] 黄建南. 厦门地下空间开发利用规划与岩土工程研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2009.
- HUANG Jian-nan. Research of Plan About Development and Utilization of Underground Space and Geotechnical Engineering in Xiamen City[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2009.
- [28] 丁晟平, 崔胜辉, 徐礼来, 等. 1957~2019 年厦门市马銮湾海岸线和围填海时空演变及互动关系分析[J]. 应用海洋学学报, 2021, 40(2): 260-270.
- DING Sheng-ping, CUI Sheng-hui, XU Li-lai, et al.

- Spatial-temporal Evolution and Interaction of Shoreline and Sea Reclamation Around Maluan Bay of Xiamen from 1957 to 2019[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2021, 40(2): 260-270.
- [29] GB/T 51358—2019, 城市地下空间规划标准[S].
GB/T 51358—2019, Standard for Urban Underground Space Planning[S].
- [30] 彭建兵, 黄伟亮, 王飞永, 等. 中国城市地下空间地质结构分类与地质调查方法[J]. *地学前缘*, 2019, 26(3): 9-21.
PENG Jian-bing, HUANG Wei-liang, WANG Fei-yong, et al. Geological Structural Classification of and Geological Survey Method for Urban Underground Space in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2019, 26(3): 9-21.
- [31] TONG F, TAN F, MA B, et al. A Suitability Evaluation Method of Urban Underground Space Based on Rough Set Theory and Conditional Entropy: A Case Study in Wuhan Changjiang New Town[J]. *Applied Sciences Basel*, 2022, 12(3): 1347.
- [32] 花卫华. 多约束下复杂地质模型快速构建与定量分析[D]. 武汉: 中国地质大学, 2010.
HUA Wei-hua. Rapid Modeling and Quantitative Analysis of the Complex Geological Bodies with Multi-constraint[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2010.
- [33] 梁 栋, 花卫华, 赵亚博, 等. 一种基于地层相关结构约束的地质模型修正方法[J]. *地球科学*, 2021, DOI: 10. 3799/dqkx. 2021. 139.
LIANG Dong, HUA Wei-hua, ZHAO Ya-bo, et al. Error Correction in Geological Model Based on Stratigraphic Interdependency [J]. *Earth Science*, 2021, DOI: 10. 3799/dqkx. 2021. 139.
- [34] 窦帆帆, 李晓晖, 袁 峰, 等. 地下空间地质适宜性三维评价系统设计与应用[J]. *地下空间与工程学报*, 2021, 17(增 2): 529-535, 574.
DOU Fan-fan, LI Xiao-hui, YUAN Feng, et al. Development and Application of 3D Geological Suitability Evaluation System for Underground Space [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2021, 17(S2): 529-535, 574.
- [35] KOHONEN T. The Self-organizing Map[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1990, 78(9): 1464-1480.
- [36] MARINAI S, FAINI S, MARINO E, et al. Efficient Word Retrieval by Means of SOM Clustering and PCA[M]//BUNKE H, SPITZ A L. Document Analysis Systems VIII. DAS 2006 Lecture Notes in Computer Science. Berlin: Springer, 2006: 336-347.
- [37] ASTEL A, TSAKOVSKI S, BARBIERI P, et al. Comparison of Self-organizing Maps Classification Approach with Cluster and Principal Components Analysis for Large Environmental Data Sets[J]. *Water Research*, 2007, 41(19): 4566-4578.
- [38] 任婷玉, 梁中耀, 陈会丽, 等. 基于模式识别方法的湖泊水质污染特征聚类研究[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2019, 55(2): 335-341.
REN Ting-yu, LIANG Zhong-yao, CHEN Hui-li, et al. Clustering of Lake Variables Based on Pattern Recognition Method[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2019, 55(2): 335-341.
- [39] HAN J W, KAMBER M, PEI J. 数据挖掘概念与技术[M]. 范 明, 孟小峰, 译. 北京: 机械工业出版社, 2007.
HAN J W, KAMBER M, PEI J. Data Mining Concepts and Technologies [M]. Translated by FAN Ming, MENG Xiao-feng. Beijing: China Machine Press, 2007.
- [40] DAVIES D L, BOULDIN D W. A Cluster Separation Measure[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1979(2): 224-227.
- [41] VESANTO J. SOM-based Data Visualization Methods [J]. *Intelligent Data Analysis*, 1999, 3(2): 111-126.
- [42] 吴少元. 基于三维单元模型的地下空间地质适宜性评价[J]. *人民长江*, 2022, 53(12): 111-117.
WU Shao-yuan. Geological Suitability Evaluation of Underground Space Based on Three-dimensional Element Model [J]. *Yangtze River*, 2022, 53(12): 111-117.