

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.01.012

基于聚类集成的地下空间地质环境质量三维评价

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. 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. 福建省厦门地质工程勘察院, 福建 厦门 361008)

摘要:城市地下空间开发利用是解决城市土地资源紧缺的重要手段,地下空间地质环境质量评价是地下空间合理安全利用和降低开发风险的前提和保障。为了降低评价过程中的主观性和评价结果中多种评价指标交叉交融的不确定性,文章基于三维地质模型,采用多种聚类模型的聚类集成算法对地下空间地质环境质量进行评价。利用 K-means、高斯混合模型、自组织神经网络等聚类模型计算结果,结合重标记法的聚类集成算法实现地质环境质量评价。以厦门市某区为例,基于三维评价指标信息,利用上述分析方法进行评价,并与层次分析法结合多级指数叠加法评价结果进行对比分析。结果表明,基于聚类集成的评价方法能够有效应用于地下空间地质环境质量三维分类及评价研究,相关评价结果可以更客观地为地下空间的安全合理开发提供支持和保障,更好地服务于城市地下空间的建设和可持续发展。

关键词:地下空间;自组织神经网络;K-means 算法;高斯混合模型;聚类集成;三维

中图分类号:TU984.113 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2025)01-0078-08

3D evaluation of geological environment quality in underground space based on clustering ensemble

XIONG Yunying^{1,2}, LI Xiaohui^{1,2}, YUAN Feng^{1,2},
LU Zhitang¹, WU Shaoyuan³, DOU Fanfan^{1,2}

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

Abstract: The development and utilization of urban underground space is an important means to solve the shortage of urban land resources. The evaluation of geological environment quality of underground space is the premise and guarantee of safe and rational utilization of underground space and reduction of development risks. In order to reduce the subjectivity in the evaluation process and the uncertainty of the cross integration of multiple evaluation indices in the evaluation results, this paper uses the clustering ensemble algorithm based on multiple clustering models to evaluate the geological environment quality of underground space based on the three-dimensional(3D) geological model. Using the results of K-means, Gaussian mixture model, self-organizing neural network and other clustering models, combined with the clustering ensemble algorithm based on re-labeling method, the geological environment quality evaluation is realized. Taking a district in Xiamen City as an example, based on the 3D evaluation index information, the above analysis method is used for evaluation, and compared with the analytic hierarchy process(AHP) combined with the multi-level index superposition method. The results show that the evaluation method based on clustering ensemble can be effectively applied to

收稿日期:2022-12-02;**修回日期:**2023-01-10

基金项目:安徽省自然科学基金资助项目(1808085QD116);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(PA2019GDZC0093)

作者简介:熊芸莹(1999—),女,四川邻水人,合肥工业大学硕士生;

李晓晖(1986—),男,河北定州人,博士,合肥工业大学副教授,硕士生导师,通信作者,E-mail:lxhlixiaohui@163.com.

the 3D classification and evaluation of geological environment quality of underground space, and its related evaluation results can provide support and guarantee for the safe and rational development of underground space more objectively, and better serve the construction planning and sustainable development of urban underground space.

Key words: underground space; self-organizing neural network; *K*-means algorithm; Gaussian mixture model; clustering ensemble; three-dimensional(3D)

随着城市经济快速发展、城镇化不断推进,人类对居住环境质量要求日益提高,造成城市空间需求骤增^[1-2]。而高需求与低发展之间的不均衡性导致了城市建设用地粗放低效、城镇空间分布和规模结构不合理、各种“城市病”日益突出等一系列问题。地下空间作为城乡建设的重要后备储蓄资源,对其开发利用是解决城市土地资源紧缺的重要手段,科学合理地开发利用地下空间是实现城市可持续发展的关键^[3]。地下空间开发的对象是地下岩土体,极易受到地质环境和一系列水文、环境、工程地质问题的限制,且地下空间的开发利用过程是不可逆的,一旦发生工程事故会造成不可挽回的损失^[4]。地下空间开发利用施工比地面建设工程更需要可预见性。因此,在地下空间开发前和开发过程中对这些限制因素进行综合分析和评价至关重要,能够为实现城市可持续发展的城市地下空间规划提供必要的地学建议。

过去数年,大多数学者的地下空间地质环境质量评价都集中在二维水平,主要将地下空间压缩为浅、中、深 3 个层位进行二维评价^[5-7]。而地下空间是三维立体的,其评价单元应该是存在于空间中的三维单元。以往多数研究将具有三维属性的评价数据投影到二维空间中会出现三维空间信息丢失等问题,会影响评价结果的准确性^[8-9];在深度方向上,二维层位的评价结果也会限制其适用性。随着计算机三维可视化、三维地质建模等技术的发展,部分学者就地下空间的三维评估方法和工作流程进行了详细的描述,产生了更多的三维评价信息,以此提高评价的准确性^[10-13]。

此外在评价方法方面,截至目前,绝大多数的评价工作都是从确权方法结合综合评价模型的角度对地下空间地质环境进行评价^[14-15]。在确权方法方面,主要包括主观和客观方法。以层次分析法^[16]为代表的主观确权法具有非常强的主观性,极易受评价者主观意识左右;以熵权法^[17]为代表的客观确权法仅仅反映了基于评价因素信息的权重,没有考虑评价因素之间的相关性,没有与研究区的实际情况相联系。在综合评价模型方

面,研究者常用的多目标线性加权法^[18]容易忽略关键限制因素,模糊综合评价法^[19]十分依赖隶属度函数的选择。这些问题都在一定程度上影响了评价结果精度。

聚类分析是一种通过寻找数据间内在联系而对多个变量进行数学分类的多元统计方法。通过聚类分析从数据的角度寻找数据中隐藏的结构信息,合理区分地下空间地质环境质量的类别。但目前没有一种聚类方法具有普适性,都有一定局限性,例如受初始参数设置影响大、同一数据集采用不同聚类算法得到的聚类结果不同等。而聚类集成可以有效弱化单个聚类算法的局限性,聚合多个基聚类结果可以得到一个更好的聚类结果,提高算法的稳定性和性能^[20]。

针对以往研究中存在的问题,本研究以厦门市某地区为实例,基于数据驱动和去繁从简的思想,综合利用 *K*-means、高斯混合模型、自组织神经网络等聚类模型,实现对地下空间地质环境质量分类,并通过重标记法集成多种聚类结果得到更加稳健的分类评价结果。研究将传统地下空间地质环境质量综合评价工作中的分级理念转变为分类方式,通过机器学习方法获得更加客观的评价结果,相关方法能够在一定程度上解决以往综合评价主观性过强的问题,预期能够更好地服务于地下空间的开发利用过程,促进社会建设的和谐发展。

1 方 法

研究所采用的评价流程主要包括三维地质建模、三维评价模型构建、三维空间分析、空间聚类模型和三维综合评价,如图 1 所示。

在三维地质建模和三维空间分析的基础上获得三维评价指标,基于该指标利用多种基聚类模型的聚类结果进行聚类集成,最后与基于层次分析法结合多级指数叠加的地下空间地质环境质量评价结果进行对比,分析其一致性与差异性,讨论基于聚类集成的地下空间地质环境质量三维评价的可靠性。

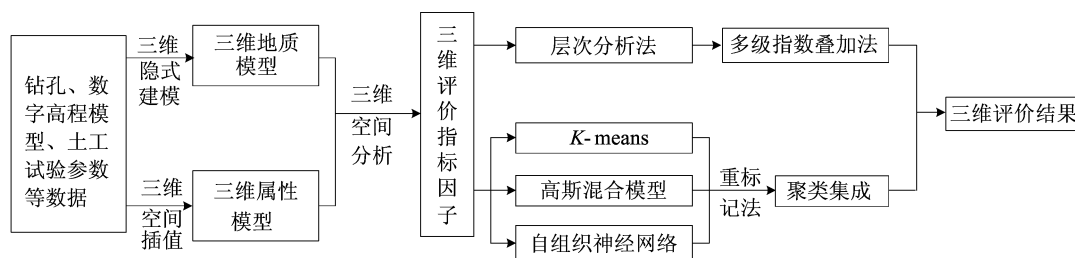


图 1 地下空间开发利用地质环境质量评价流程

1.1 聚类集成方法

聚类分析是一种无监督学习,依据数据之间的相似性对其进行分组,使得划分在同一组中的数据对象尽可能相似,同时与其他组中的数据对象尽可能相异。聚类集成是利用集成学习思想,将统一数据集的多个聚类结果合并,得到一个新的聚类结果,从而提高聚类结果的鲁棒性^[21]。聚类集成主要包括 2 个步骤:基聚类的生成和一致性函数的设计。

1.1.1 基聚类器的生成

基聚类常用的 2 种生成机制是利用同一聚类算法的不同参数或利用不同聚类算法生成。研究表明,集成聚类结果的好坏与基聚类间的差异性和准确性息息相关,在保证准确性的前提下,基聚类器之间的差异性越大越好^[22]。而同一算法的差异性相对于不同算法来说还不够明显,因此本研究选择基于不同簇划分原理的 *K*-means、高斯混合模型以及自组织神经网络 3 种聚类模型作为基聚类器。

K-means 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,是最广泛使用的聚类算法。但存在初始聚类中心的选择对其聚类结果影响较大、容易陷入局部最优等缺点。在聚类过程中使用距离作为数据间的相似性度量,该运算过程不断重复迭代直到收敛^[23]。

高斯混合模型是 *K*-means 聚类的一种优化算法。*K*-means 聚类是计算各个数据距各个聚类中心的距离,而高斯混合模型聚类计算各个数据属于各个类别的概率,是一种基于概率模型的聚类算法,其假设所有数据样本都是来自多个参数不同的高斯分布,且来自同一分布的数据样本被划分为同一类。

自组织神经网络是一种基于神经网络的聚类算法,由输入层和输出层组成。在输入层中,神经元节点个数与输入数据的维度相同。输出层是由多个神经元组成的,各个神经元与其相邻的神

元之间由邻域关系来相连,输入层与输出层以权重向量 W_{ij} 相连。其原理为将输入层中相似的数据映射到输出网格上相邻位置,并通过迭代过程来进行位置的调整,反映了相邻类簇之间的相似程度。网络训练结束后,在输入空间中彼此靠近的数据点被映射到邻近的映射单元上,但自组织神经网络存在学习时间长和分类精度不高等相关缺陷。

1.1.2 一致性函数的设计

一致性函数的设计也是聚类集成的重要步骤,不同函数的使用规则不同,将多个基聚类结果进行整合,寻找不同基聚类结果中不同簇之间的对应关系,得到最终一致性结果。当前已经有多种一致性函数,例如证据累积、概率累计、超图划分以及重标记法等。在本文研究中,数据维度高、数据量大,而前几种一致性函数的时间复杂度高,因此选择时间复杂度较低的重标记法作为一致性函数。

在聚类分析中,聚类结果的簇标记仅代表分组属性,属于同一组的簇在不同基聚类结果中的簇标记可能不同。因此重标记法要解决的关键问题就是如何实现不同基聚类的不同簇标签之间的映射。重标记法是将不同基聚类中的不同簇间互相重叠的数据对象个数看作相似度,依据相似度找到不同基聚类结果中在逻辑上相互等价的簇^[24],再根据重标记后所有基聚类器的簇标记生成最终的聚类集成结果。

2 实例研究

2.1 地质背景与数据基础

本文研究区为厦门市马銮湾新城某地区。厦门市政府推动跨岛发展和区域协同,岛内大提升岛外大发展协同推进,而马銮湾新城作为岛外发展的重点区域,社会经济的不断发展对于地下空间开发和建设需求强烈。

研究区位于马銮湾内湾西南部,区内北部靠近海湾地势较低,南部地势相对较高,整体呈西南

侧向东北侧倾斜下降^[25]。区内地层较多,上层主要为第四系松散堆积层。基岩少量出露地表,主要为燕山早期侵入花岗岩,研究区临近海湾,地层含水量高且地下水位较高,该区地下水较为发育,在施工过程中容易发生管涌和突涌等问题,而且区内滩涂较发育,主要是以海相沉积为主的深灰、灰黑色的淤泥和淤泥质土,淤泥层具有触变性强、压缩性高、透水性差及蠕变性大等不良工程性质^[26-27]。区内广泛分布着一部分由砂质黏土、黏土、碎石层等组成的第四纪残坡积层,属风化残积层,由于年代跨越时间较长,无法划分,同时厚度变化也较大。

根据厦门花岗岩风化壳研究结果^[28],表明厦门的残坡积层是城市建设的主要持力层,而残积土遇水易软化,强度急剧降低,导致边坡和基坑失稳,在桩基施工时易产生流泥、流砂现象。同时研究区处于厦门市马銮湾清淤回填造陆工程的范围中,区域内有大面积的人工填土区域,其厚度较

厚,且均匀性、密实度均较差,易造成基坑失稳等问题。上述地质问题均会影响研究区地下空间的开发和利用,因此在城市建设过程中应给予足够的重视。

研究所采用的数据主要包括区域数字高程模型、钻孔数据和相关的土工试验参数等。分别对钻孔数据和土工试验参数进行整理编录、标准化,再录入数据库中,为构建三维地质模型建立了详实的数据基础。

2.2 三维地质建模与属性建模

基于收集整理的钻孔数据,利用武汉智图云起科技有限公司研发的 Smart3D 软件内建的三维隐式建模方法构建三维地质模型。综合可以计算机软硬件条件、模型大小以及深度方向上地质层最小厚度等因素,将三维地质模型进行三维单元离散化,将单元尺寸定义为 $10\text{ m} \times 9\text{ m} \times 2\text{ m}$,共包含 2 807 403 个三维单元块,模型构建结果如图 2 所示。

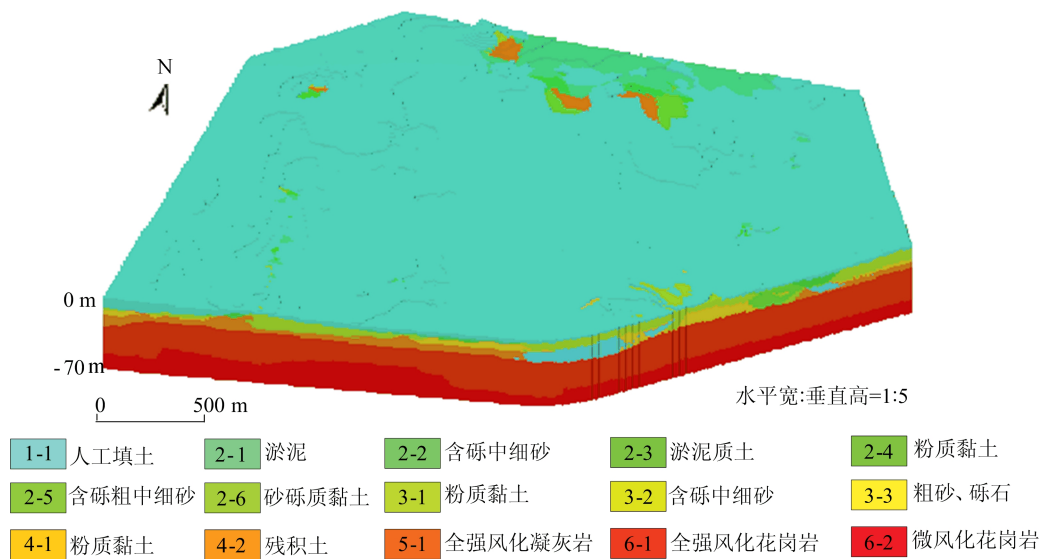


图 2 研究区三维地质模型

基于土工试验参数数据,利用三维空间插值方法进行插值计算。为了保证插值结果的可靠性和准确性,应该以三维地质模型中的地层为约束,插值结果输出为三维属性模型,主要包括压缩模量、黏聚力、内摩擦角等。

2.3 三维评价指标选取

城市地下空间地质环境质量评价是一个多因素、多层次的评价过程。该评价过程是一个复杂的系统,影响和制约地下空间开发利用的因素很多,合理构建地下空间地质环境质量三维评价指标对地下空间开发利用至关重要。目前为止,很

多学者对评价指标体系的构建进行了研究^[29-33],但由于评价指标要结合实际需求、区域特征以及评价结果的应用性进行挑选^[9],至今没有一套统一的评价指标体系标准。

本文在综合分析研究区地质环境条件的基础上,结合地下空间工程已有研究结果和相关实际经验^[34-35],依托研究区已有地质数据资料情况,从岩土体工程性质、水文地质、地质结构、特殊土条件等 4 个方面选取了 12 个评价因子构建三维评价指标体系,具体评价指标体系情况见表 1 所列。

表 1 地下空间地质环境质量评价指标

一级指标	二级指标	三维空间分析方法
岩土体工程性质	压缩模量	三维空间插值分析
	黏聚力	三维空间插值分析
	内摩擦角	三维空间插值分析
水文地质	地下水位	三维空间统计分析
	地下水腐蚀性	三维空间统计分析
地质结构	地质层组复杂度	三维空间统计分析
	下卧软土层厚度	三维空间统计分析
	基岩埋深	三维空间统计分析
	基岩起伏程度	三维曲面特征分析
特殊土	填土层影响范围	三维距离场分析
	软土层影响范围	三维距离场分析
	残积土层影响范围	三维距离场分析

3 分析过程与结果

基于三维空间分析方法构建的三维评价数据集如图 3 所示。与传统的二维评价数据相比,基

于三维空间分析方法获取的三维评价数据能更好地描述地层之间的属性差异性和三维地质适宜性的变化规律^[11]。运用三维空间分析方法,可以更好地提取关键的评价因子,更为充分利用多维多源地质数据。在进行聚类之前,为了保证结果的可靠性,需要对评价指标信息进行标准化处理,主要是为了消除不同指标维度的量纲不同而导致计算结果依赖于量纲较大维度的偏差。本文采用 Z-score 标准化处理,使得所有评价指标信息符合正态分布,提高数据可比性^[23]。

本文选取的 3 种基聚类都是需要预先指定聚类数的算法,最佳聚类数量可以为每个聚类数计算戴维斯-博尔丁指数^[36](Davies-Bouldin index, DBI)来评估。

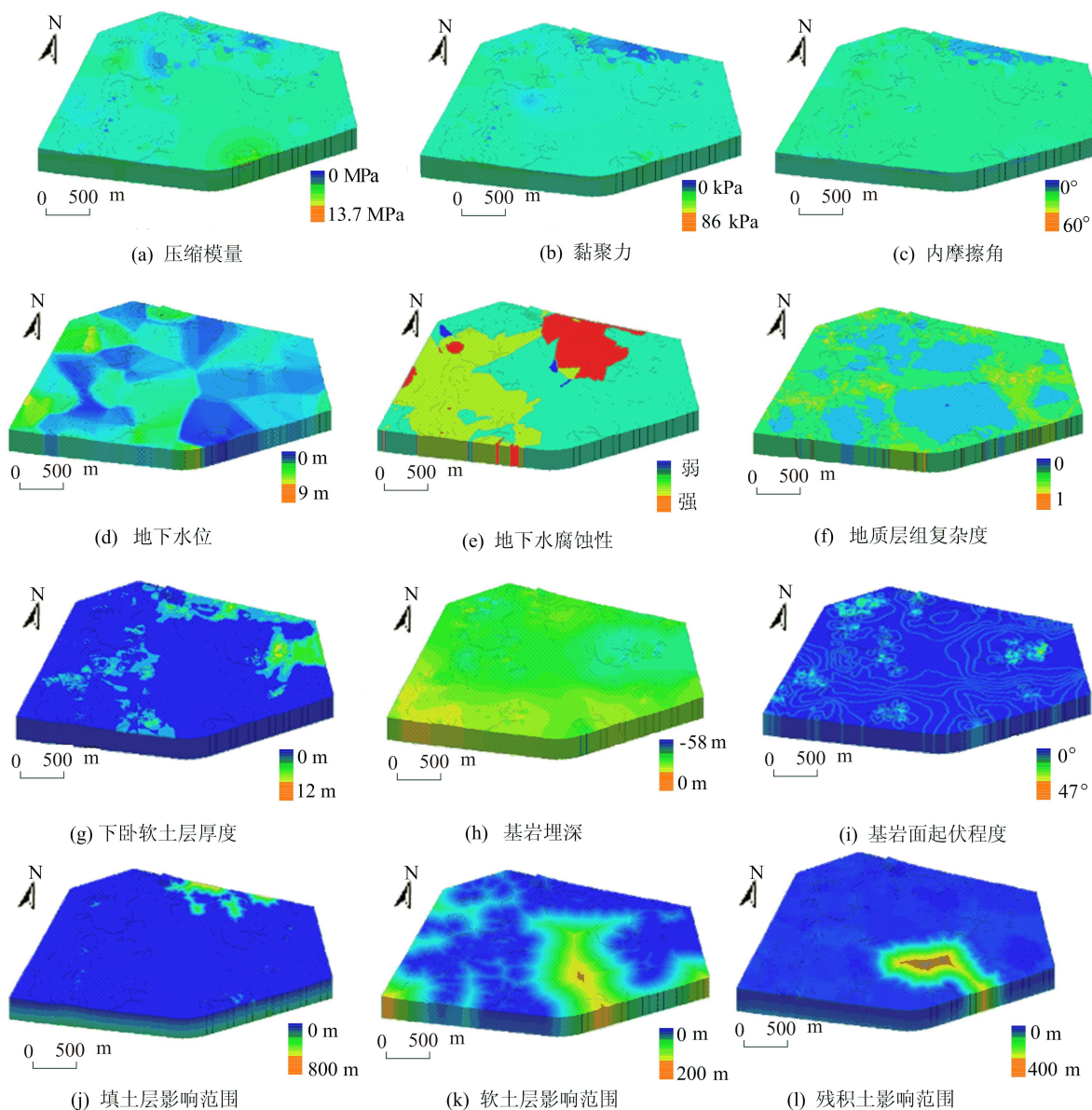


图 3 地下空间地质环境质量三维评价数据集

DBI 的原理为计算样本点类内距离之和与类间距离之比,来优化聚类数的选择。类内距离之和最小且类间距离最大时,聚类结果最佳,因此 DBI 值越小,聚类效果越佳。

实验结果表明,当聚类数为 6 时,DBI 值最小,即聚类效果越佳。因此分别为 K-means、高斯混合模型、自组织神经网络预先设定 $K=6$ 进行聚类集成分析,最后通过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,如图 4 所示。

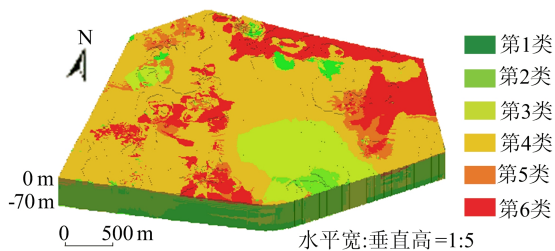


图 4 基于聚类集成的地下空间地质环境质量三维评价结果

4 评价结果分析与讨论

基于聚类集成的地下空间地质环境质量三维评价结果总体情况如图 5 所示,图 5 中显示了整体地质环境质量评价结果以及浅层(-10 m 以上)、中层(-30~-10 m)、深层(-30 m 以下)的三维评价结果。

研究结果显示,在不同深度层位上的地质环境质量差异较大,特别是浅层与其以下所有层之间的质量差异最大。总体来说,研究区地下空间地质环境质量总体较好,质量差的区域主要集中在浅层区域,中层、深层的大部分区域地质环境质量均较好。

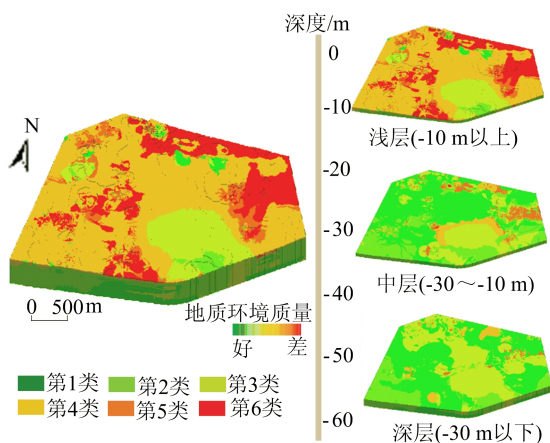


图 5 地质环境质量三维评价及不同深度层位结果

从浅层的评价结果来看,地质环境质量受岩土体工程性质条件、软土层共同影响。由于研究区临近海湾,区域浅层范围内软土广泛分布,软土的压缩模量、黏聚力以及内摩擦角等岩土体工程性质条件差,且浅层底部有较厚软土,稳定性很差,容易造成失稳和不均匀变形。浅层范围内还广泛分布大量填土,均匀性、密实度均较差,易造成基坑失稳。在进行后续开发利用时,应该加强安全管理和施工监管。

从中层的评价结果来看,中层的地质环境质量总体较好,而研究区中层东北侧和东侧地质环境较差的主要原因是该区位于软土层或与软土层的距离较近。中层地质环境质量较差区域主要集中在 -20~-10 m 之间,-20 m 以下的地质环境质量良好。

从深层的评价结果来看,深层的地质环境质量最好,深层的主体为基岩,基岩的岩土体工程性质较好,且基岩中地下水并不发育,水文地质条件较好。虽然深层的地质环境质量较好,但是随着深度的增加,开发成本和工程难度会明显提升,因此在进行规划和建设时要从多个方面去评估并开展进一步的综合分析。

同时,本研究进一步应用了现有的层次分析法结合多级指数叠加法,最后利用 K-means 将综合评价叠加值进行分级,完成地下空间的地质环境质量评价,如图 6 所示,并与基于聚类集成的评价结果图 5 进行对比。

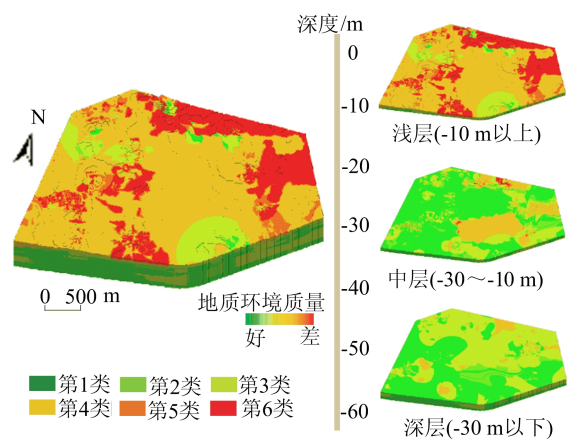


图 6 基于层次分析法和多级指数叠加法的评价结果

从图 5、图 6 可以看出,在整体上,2 种评价方法的结果较为相似,特别是地质环境质量较差区域的分布基本一致,但是在局部区域也存在差异。为了进一步分析 2 种评价方法的一致性和差异性,引入 Kappa 系数^[37]来进行检验。Kappa 系数

基于混淆矩阵来计算,取值为 $-1\sim 1$ 之间,基于聚类集成和基于层次分析法,结合多级指数叠加法评价结果计算的 Kappa 系数约等于 0.41,同时得到混淆矩阵见表 2 所列。表 2 中, x 为对应单元块数占该类单元总块数的百分比。

从表 2 可以看出:2 种评价方法的相同类别单元块对应效果较好,即混淆矩阵中对角线上的值最大,第 1 类、第 3 类、第 4 类和第 6 类均满足;第 2 类和第 5 类虽然对角线元素不是最大值,但

其最大值分布在其相邻的类别中。这主要是由于基于层次分析法结合多级指数叠加法在进行类别划分时,主要依靠人为划定,相邻类别之间的界限模糊。同时在进行层次分析法结合多级指数叠加法的过程中,严重依赖人为确权,主观性太强,而且容易导致评价结果的中和。而基于聚类集成的评价方法全过程人为干预少,更加客观。因此,可以说明基于聚类集成的评价结果具有一定可靠性。

表 2 基于聚类集成和基于层次分析法结合多级指数叠加法一致性检验的混淆矩阵

混淆矩阵	第 1 类		第 2 类		第 3 类		第 4 类		第 5 类		第 6 类	
	单元块数	$x/\%$	单元块数	$x/\%$	单元块数	$x/\%$	单元块数	$x/\%$	单元块数	$x/\%$	单元块数	$x/\%$
第 1 类	1 012 734	74.939	197 712	14.630	140 786	10.418	168	0.012	12	0.001	17	0
第 2 类	47 167	29.037	92 939	57.216	22 158	13.647	146	0.071	31	0.019	25	0.015
第 3 类	302 777	37.643	96 301	11.973	389 430	48.416	15 668	1.948	52	0.006	171	0.015
第 4 类	872 57	21.048	11 894	2.869	74 010	17.853	169 867	40.976	70 475	17.000	1 050	0.253
第 5 类	984	4.176	202	0.857	94	0.399	11 852	50.303	8 278	35.134	2151	9.129
第 6 类	374	0.732	131	0.256	0	0	17 911	35.058	3 249	6.359	29 425	57.594

5 结 论

1) 本研究利用 K-means、高斯混合模型、自组织神经网络等聚类模型计算结果,结合基于重标记法的聚类集成算法实现地下空间地质环境质量评价。从评价结果来看,基于聚类集成的地下空间地质环境质量评价方法能够有效地反映地下空间三维地质环境的空间变异性,能够较好地应用于地下空间开发利用评价中。

2) 将本文评价结果与层次分析法结合多级指数叠加法的地下空间地质环境质量评价结果进行一致性和差异性分析,结果表明基于聚类集成的评价结果具有一定可靠性。同时基于聚类的地质环境质量评价能够避免传统评价方法存在的问题,在一定程度上提高评价结果精度和可信度。

3) 由于本研究收集的数据有限,本文仅从方法探索的角度进行研究,未来可以进一步整合研究区的三维评价要素,以丰富三维评价指标体系。使得评价结果能够更加准确、更加接近真实地质和施工情况,从而更好地服务于地下空间的规划和施工建设。

[参 考 文 献]

[1] STERLING R, HAN A, BOBYLEV N, et al. Sustainability issues for underground space in urban areas[J]. Urban De-

sign & Planning, 2012, 165(4):241-254.

- [2] BOBYLEV N. Underground space as an urban indicator: measuring use of subsurface[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 55(5):40-51.
- [3] 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.
- [4] TAN F, WANG J, JIAO Y Y, et al. Suitability evaluation of underground space based on finite interval cloud model and genetic algorithm combination weighting[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 108(6):103743.
- [5] 张明阳, 王一鸣, 叶文荣, 等. 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, 2020, 53(增刊 1):378-384.
- [6] 何阳, 熊雄, 徐定芳, 等. 地下空间资源开发利用地质环境适宜性评价: 以常德市为例[J]. 城市地质, 2021, 16(1):84-93.
- [7] TONG D, 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):1-13.
- [8] HOU W, YANG L, DENG D, 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(4):1-11.
- [9] 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.

(下转第 91 页)

- image classification method using multifeature vectors and optimized KELM[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2021, 14:2781-2795.
- [22] 伊燕平,卢文喜,张耘,等. 基于径向基函数神经网络的地下水数值模拟模型的替代模型研究[J]. 水土保持研究, 2012, 19(4):265-269.
- [23] SHIELDS M D, ZHANG J X. The generalization of Latin hypercube sampling[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2016, 148:96-108.
- [24] 济南市水文局, 济南市城乡水务局. 济南市水资源公报 [EB/OL]. [2022-12-10]. http://jnwater.jinan.gov.cn/art/2018/12/21/art_27547_2761410.html.
- [25] 济南市城乡水务局. 济南市地下水资源调查与评价[R]. 济南:济南市城乡水务局, 2008.
- [26] 吴义锋. 济南市岩溶地下水数值模拟研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2004.
- [27] 骆乾坤, 王佩, 朱国荣. 水文地质参数识别的快速和谐搜索算法[J]. 水文地质工程地质, 2011, 38(4):14-19.
- [28] 王宿轩. 基于 MODFLOW 和进化算法的济南泉域地下水数值模拟研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2017.

(责任编辑 吴 亮)

(上接第 84 页)

- [10] DOU F, LI X, XING H, et al. 3D geological suitability evaluation for urban underground space development: a case study of Qianjiang newtown in Hangzhou, Eastern China [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2021, 115(1):104052.
- [11] DOU F, XING H, LI X, et al. 3D Geological suitability evaluation for urban underground space development based on combined weighting and improved TOPSIS[J]. Natural Resources Research, 2022, 31(1):693-711.
- [12] 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(增刊 2):529-535, 574.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 赵思成, 胥犇, 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.
- [16] 赵团芝, 侯艳声, 胡新锋. 宁波市地下空间开发利用地质环境适宜性评价[J]. 城市地质, 2016, 11(4):88-93.
- [17] 姜云, 吴立新, 车德福. 地下空间资源质量熵权与可变模糊集组合评估[J]. 中国矿业大学学报, 2009, 38(6):872-877, 896.
- [18] 沈育志. 结合实例探讨地下空间开发地质适宜性评价方法[J]. 资源信息与工程, 2017, 32(3):149-150, 152.
- [19] 吴立新, 姜云, 车德福, 等. 城市地下空间资源质量模糊综合评价与 3D 可视化[J]. 中国矿业大学学报, 2007, 36(1):97-102.
- [20] 杨康. 基于基聚类器对齐的聚类集成方法研究[D]. 太原:山西大学, 2021.
- [21] GIONIS A, MANNILA H, TSAPARAS P. Clustering aggregation[J]. ACM Transactions on Knowledge Discovery from Data, 2007, 1(1):4-34.
- [22] 李玥. 基于聚类集成的特征选择方法研究[D]. 西安:西安邮电大学, 2021.
- [23] JIA W H, MICHELINE K, JIAN P, et al. 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, 2007:59-63.
- [24] ZHOU Z, TANG W. Clusterer ensemble[J]. Knowledge-Based Systems, 2006, 19(1):77-83.
- [25] 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(12):112-119.
- [26] 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.
- [27] 黄建南, 耿家强, 林树枝. 地下空间工程适宜性探讨[J]. 福建建设科技, 2009(6):4-7.
- [28] 任国林, 尹子良, 闫运来, 等. 厦门花岗岩风化壳工程地质分带及风化岩石的工程地质特征[J]. 福建地质, 1990(2):100-110.
- [29] 姜云, 吴立新, 杜立群. 城市地下空间开发利用容量评估指标体系的研究[J]. 城市发展研究, 2005(5):47-51, 75.
- [30] 郑桂森, 卫万顺, 王继明, 等. 城市区域地质条件适宜性评价量化指标研究[J]. 城市地质, 2018, 13(1):9-17.
- [31] 李红昌, 查甫生, 康博. 城市地下空间评估指标体系:以南通市为例[J]. 合肥工业大学学报(社会科学版), 2020, 34(5):113-120.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] 郭超, 阎长虹, 刘军熙, 等. 基于 GIS 的东营市浅层地下空间质量评估[J]. 工程地质学报, 2014, 22(2):334-340.
- [35] 欧孝夺, 杨荣才, 周东, 等. AHP 法在南宁市地下空间开发地质环境适宜性评价中的应用[J]. 桂林工学院学报, 2009, 29(4):474-480.
- [36] DAVIES D, BOULDIN D. A cluster separation measure [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1979(2):224-237.
- [37] TANG W, HU J, ZHANG H, et al. Kappa coefficient: a popular measure of rater agreement[J]. Shanghai Archives of Psychiatry, 2015, 27(1):62-67.

(责任编辑 吴 亮)