

基于城市规划的城市地下空间开发适宜性评价探讨 ——以泰州市中心城区为例

张悦秋¹, 张利坡¹, 许宜辉¹, 华健², 王睿²

1. 江苏华东新能源勘探有限公司（江苏省有色金属华东地质勘查局八一三队），江苏 南京 210000

2. 中国地质调查局南京地质调查中心，江苏 南京 210000

DOI: 10.61369/SSSD.2025170001

摘要： 随着城市化进程的不断加快，各个城市中心城区也面临着土地资源紧张、空间发展受阻等问题。在此背景下，地下空间的开发也成为解决这些问题的重要途径。本文在探讨地下空间开发适宜性评价的核心要素与方法体系的同时，以泰州市中心城区为例，就基于城市规划的城市地下空间开发适宜性评价进行了分析，以期能够给相关人士提供一些参考。

关键词： 城市规划；城市地下空间开发；适宜性评价；泰州市中心城区

Discussion on Suitability Evaluation of Urban Underground Space Development Based on Urban Planning - A Case Study of Taizhou Central Urban Area

Zhang Yueqiu¹, Zhang Lipo¹, Xu Yihui¹, Hua Jian², Wang Rui²

1. Jiangsu East China New Energy Exploration Co., Ltd. (813 Team of East China Bureau of Geological Exploration for Nonferrous Metals, Jiangsu Province), Nanjing, Jiangsu 210000

2. Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing, Jiangsu 210000

Abstract： With the accelerating process of urbanization, central urban areas of various cities are facing problems such as tight land resources and hindered spatial development. Against this background, the development of underground space has become an important way to solve these problems. While discussing the core elements and method system of the suitability evaluation for underground space development, this paper takes the central urban area of Taizhou as an example to analyze the suitability evaluation of urban underground space development based on urban planning, aiming to provide some references for relevant personnel.

Keywords： urban planning; urban underground space development; suitability evaluation; central urban area of Taizhou

当前，我国城市化已经进入了“高质量”发展阶段，城市人口的不断增加以及功能的不断扩张，使得城市土地资源矛盾问题愈发突出，地下城市空间的合理运用则是有效的解决之道^[1]。泰州市目前中心城区也面临着严峻的用地资源矛盾。对此，《泰州市城市地下空间开发利用专项规划（2020-2035年）》（以下简称《规划》）中明确提出要构建“分层利用、功能复合、安全高效”的地下空间开发体系。而在推进这一体系构建的过程中，适宜性评价属于重要的前提，充分做好适宜性评价工作能够为地下空间开发以及规划提供精准指导，同时对于泰州市中心城市的建设与发展意义重大^[2-3]。

一、地下空间开发适宜性评价的核心要素与方法体系

对于地下空间开发适宜性评价而言，其是一项融合城市规划学、工程技术学以及地质科学于一体的系统工作^[4]。它的主要目的在于对地下空间开发的影响要素进行分析，同时基于科学的方法来对其权重以及适宜性等级等进行量化呈现，从而为地下空间的开发奠定坚实的信息和数据依据^[5]。从评价要素方面来看，主要对地貌与空间条件、岩土工程性质、水文地质条件以及不良地质条件等进行评价。而从评价方法方面来看，层次分析法（AHP）是权重确定的核心工具，模糊综合评价法主要用于对评价中不确定

性进行处理评价，同时引入三维地质模型、剖面图等资料，从不同角度、深度以及区域来分析城市地下适宜性空间分布，保障城市规划和评价结果之间能够深度衔接^[6-8]。

二、基于城市规划的城市地下空间开发适宜性评价探讨——以泰州市中心城区为例

（一）地下空间开发地质适宜性评价

1. 评价指标

此次研究主要是在收集工作区地下空间开发利用类型的基础

项目名称：扬子江城市群（泰州海陵）城市地质安全风险调查与地下空间资源利用适宜性评价项目；任务书编号：苏财资环〔2023〕30号、苏财资环〔2024〕33号。

上,对地下空间工程的类型进行有效梳理,在此基础上,对其开发具有影响的双因素进行研判^[9]。其中,主要评价要素包括地貌与空间要素、岩土体基本物理性质等指标并搭建相应的分级方案,划分I到V五个等级,I级(适宜性好)、II级(适宜性较好)、III级(适宜性一般)和IV级(适宜性较差)和V级(适宜性差)。

(1) 地貌与空间条件

该指标主要是对地形坡度、地下空间埋深等进行评价。前者最理想的标准是0.3~2°,如果坡度较大则会影响到建筑物以及交通路线规划,如果坡度较小则会影响到场地的排水;后者则会基于工程会由浅入深的变化,顶级越高也意味着成本要求更高。而基于泰州市中心城区的实际情况来看,具体分级呈现如下两表:

表1 地形坡度分级标准

分级	I级	II级	III级	IV级
坡度(°)	(0.3, 2]	(2, 10]	(10, 25]	>25

表2 地下空间埋深分级标准

分级	I级	II级	III级	IV级
地下空间埋深	浅层	中层	次深层	深层

(2) 岩土工程性质条件

在城市地下空间环境中,岩土体工程性质如何直接影响着地下空间的开发安全性与经济性^[10]。例如,当其工程性质比较好时,那么后续施工成本较低,而且安全性也得到了有效保障,而当其工程性质不佳时,则可能引发一系列的安全性以及经济性问题。此次研究,主要是通过有效的勘察来对泰州市岩土复杂性以及土体的压缩模量等进行设计指标。其中,岩土复杂性主要指的是,地下岩土层的构成,越复杂也就意味着其给工程带来的风险也较大,这里通过以下公式来表示:

$$F_i = \frac{\sum k_i}{\sum K}$$

其中,Fi指的是复杂程度, $\sum K$ 则分别表示工程地质层组的总数量,i则属于三维单元,表示具体的所处位置。此次评价指标的分级标准如表2所示。而对于土体的压缩模量而言,其是进行地基和建筑物沉降计算过程的一个重要参数,具体分级标准如表4所示。

表3 地层组合复杂程度分级标准

分级	IV级	III级	II级	I级
相对复杂度	(0, 0.25]	(0.25, 0.5]	(0.5, 0.75]	(0.75, 1.0]

表4 压缩模量分级标准

分级	I级	II级	III级	IV级
压缩模量(Mpa)	>15	(10, 15]	(4, 10]	<4

(3) 水文地质条件

在这一评价指标中,主要包括潜水层距离以及承压水层距离两个方面,它们共同体现着城市地下空间水文地质环境开发的适用性。前者,主要会对地下构筑物的结构带来相应的托浮作用;后者主要影响着地下空间利用,但是不会增加具体的开发难度。二者的具体分级标准如下两表所示:

表5 潜水含水层厚度分级标准

分级	I级	II级	IV级
潜水层距离(m)	>2	(0, 2]	潜水面下

表6 距含水层距离分级标准

分级	I级	II级	III级	IV级
距承压含水层距离(m)	>10	(5, 10]	(0, 5]	含水层内

(4) 不良地质条件

首先,是易液化沙土,地下空间中的砂土颗粒在内液化指数的作用下,会出现接触压力和摩擦力逐渐减小甚至消失的情况,进而引发砂土层变松,这也会引发喷水、冒砂等工程问题。其次,是软土层,其会导致地下空间开发中的地基失衡或者变形等问题,二者的分级标准如下表所示:

表7 砂土液化层厚度分级标准

分级	I级	II级	III级	IV级
液化等级	无液化	轻微液化	中等液化	严重液化

表8 距软土层三维距离分级标准

分级	I级	II级	III级	IV级
距软土层距离(m)	>10	(5, 10]	(0, 5]	软土

2. 评价方法

(1) 层次分析法

该方法又被称为AHP法,主要指的是将复杂多目标的决策问题当作一个整体,然后对目标进行分解,然后基于定性指标模糊量化方法来进行层次排序,进而为目标以及方案的优化提供依据。其计算过程主要包括四个部分,一是递阶层次结构模型的构建;二是判断矩阵的构造,这里基于专家经验以及1~9标度法,并基于比较分析来判断不同层次中诸元素的相对重要性,进而实现判断矩阵构建的目标;三是层次单排序与一致性检验,其具体公式如下:

$$CR = CI / RI$$

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1)$$

其中,CR表示判断矩阵的随机一致性比例;CI则指的是一般一致性指标;RI指的是平均随机一致性指标。如果CR小于0.1的时候,则可以说明其有满意一致性,权重分配系数合理,反之则需要对判断矩阵进行一致性调整;四是层次总排序与一致性检验。

(2) 模糊综合评价模型

一是对评价因素集进行明确。这里假设评价对象的影响因素数是,单体的因素用表 u_m 示,其可以表示为 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$;二是确定评语集,表示为 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$;三是模糊矩阵的确定, $R = (r_{ij})_{m \times n}$,其中每个因素对评语集中各评语等级的隶属度 r_{ij}, r_{ij} 表示因素 u_i 对评语等级 v_j 的隶属度;四是模糊综合合成,选取相应的模糊算子,然后运用福全方法计算的权重向量 T 与模糊矩阵 R 进行合成,然后得到农户评价结果 W ,其表示为

$$W = T \circ R = [t_1, t_2, \dots, t_m] \circ \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix}。其中“\circ”表示模糊$$

算子,有 $M(\wedge,V),M(\vee,V),M(V,\oplus),M(\cdot,\oplus)$ 4 种方法;五是得到各单元综合隶属度,按最大隶属度原则确定适宜性等级,若 $\max\{t_1,t_2,\dots,t_m\}=t_j$,则最后的评价结果就是 t_j 对应的评语等级 v_j 。

(二)评价结果

1. 总体结果

泰州市中心城区地下空间开发地质适宜性呈现“浅层优、深层差,北部优、南部差”的总体特征,适宜性好(I级)的区域主要集中在北部里下河冲湖积平原区(如罡杨镇、华港镇);适宜性较好(II级)区域分布于凤凰街道-京泰路街道一带的浅层-次浅层(0-30m);适宜性一般(III级)区域主要包括南部中国医药城周边的浅层-次浅层(0-30m)及北部大部分地区的次深层(30-50m);适宜性较差(IV级)区域集中在南部60m以深的深层空间及北部局部深层砂卵石层分布区(如图1、图2)。

2. 分层评价结果

从纵向深度维度看,不同深度地下空间适宜性差异显著,且与城市规划的开发优先级高度契合(如图3)。浅层(0-15m)适宜性整体为I-II级,仅南部局部区域因浅层软土(厚度3-5m)为III级;该深度区间是当前城市地下空间开发的主力层,适配商业、停车、市政管线等功能;次浅层(15-30m)适宜性以II级为主,局部(如南部中国医药城)为III级,评价显示其大部分区域稳定性较好(南部软土区除外),可以满足地铁轨道交通路线的建设需求,规划中要避免软土区或者运用盾构法穿越的方式来避免后续可能出现的沉降问题;次深层(30-50m)适宜性降至II-III级,深层隧道开发时需注意富水砂砾石的影响,然而对于高层建筑桩基是良好持力层;深层(50-100m)适宜性以III-IV级为主,受水文等地质条件制约,开发价值不大,建议作为“战略储备空间”或在技术条件成熟情况下进行科学开发。

3. 重点区域评价结果

根据《规划》指示海陵区规划4条轨道交通路线(1-4号线),区内设有20座站点。其中,包括了人民广场、客运西站等多个换乘站点。基于三维评价结果,沿轨道交通路线进行自动切割剖面,得出相应的地下空间开发地址适宜性。整体而言,海陵境内段50m以浅是没有制约性地质条件的,但是在20-30m深的时候,局部地区会有软土层,这显然是不利于轨道交通建设的。

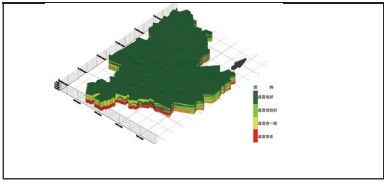


图1 地下空间开发地质适宜性评价三维图

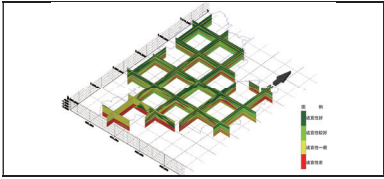


图2 地下空间开发地质适宜性评价剖面栅格图

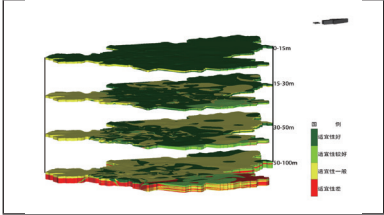


图3 地下空间开发地质适宜性分层评价图

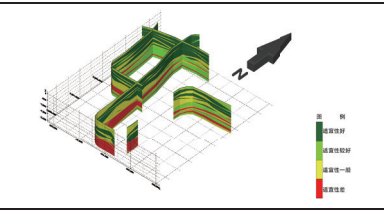


图4 轨道交通规划地下线路地质适宜性分层评价图

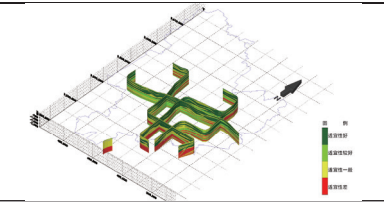


图5 轨道交通规划全部线路地质适宜性分层评价图

总之,地下空间开发适宜性评价对于城市规划建设有着良好的指导意义。此次研究中可以看到,泰州市中心城区地下空间适宜性“空间分层”“区域分异”特征,相关评价分析也希望能够给相关人士提供一些借鉴。未来,我们还需积极探索有效的适宜性评价模型,为城市地下空间可持续开发提供更全面的决策支持。

参考文献

[1] 任文宇. 城市地下空间资源开发适宜性评价 [D]. 中国矿业大学, 2024.
[2] 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(02): 339-347.
[3] 刘鑫宇, 董杰, 王睿, 等. 我国城市地下空间开发适宜性评价研究现状与发展趋势 [J]. 地质与勘探, 2024, 60(02): 348-355.
[4] 陈华强, 陈远辉, 张君楼, 等. 基于城市地质调查的惠州市地质资源评价研究 [J]. 矿产勘查, 2023, 14(12): 2502-2515.
[5] 马鑫. 城市地下综合管廊综合效益评价研究 [J]. 建筑与预算, 2023, (09): 35-37.
[6] 李玉才, 李伟荣, 熊伟, 等. 惠州市金山新城地下空间开发适宜性评价研究 [J]. 工程技术研究, 2023, 8(15): 8-10+24.
[7] 刘森, 董志良. 雄安新区城市地下空间资源开发适宜性评价 [J]. 河北地质大学学报, 2019, 42(06): 57-62.
[8] 苗庆伟, 高文学, 杨林, 等. 城市地下综合管廊热力管道风险评价指标研究 [J]. 煤气与热力, 2022, 42(12): 7-9+13.
[9] 王雪晨. 城市综合管廊项目综合效益评价研究 [D]. 北京建筑大学, 2022.
[10] 陈维. 城市地下综合管廊施工风险评价研究 [D]. 广西大学, 2022.