

南昌市中心城区地下空间开发地质适宜性评价

蒋杰¹, 葛伟亚², 马青山^{2*}, 田福金², 贾军元²

JIANG Jie¹, GE Weiya², MA Qingshan^{2*}, TIAN Fujin², JIA Junyuan²

1. 中国地质科学院, 北京 100037;

2. 中国地质调查局南京地质调查中心, 江苏 南京 210016

1. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;

2. Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, Jiangsu, China

摘要:地下空间资源是未来城市发展的重要空间资源,也是可持续发展战略中不可缺少的部分。为了支撑南昌市地下空间的科学开发,基于地质调查成果,从地形地貌、工程地质条件、水文地质条件、活动断裂与地震效应、环境地质问题 5 个方面对南昌市地质环境影响因素进行识别,构建地下空间开发地质适宜性评价指标体系,采用层次分析法和灰色关联分析法建立数学模型,对不同深度地下空间的地质适宜性进行了评价。评价结果显示,研究区中层地下空间地质条件复杂,浅层和深层地下空间更适宜开发。该结果为南昌市地下空间专项规划的编制提供了技术支持。

关键词:地下空间开发;地质适宜性评价;层次分析法;灰色关联分析法;南昌市

中图分类号:TU984.11⁺3;P5 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2021)05-0734-11

Jiang J, Ge W Y, Ma Q S, Tian F J, Jia J Y. Geological environment suitability assessment of underground space development in Nanchang City. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(5): 734-744

Abstract: Urban underground space is an important spatial resource for future cities and an indispensable part of sustainable development strategy. In order to support the scientific development of underground space in Nanchang, the geological environment influencing factors were identified from five aspects, including topography and geomorphology, engineering geological conditions, hydrogeological conditions, active faults and seismic effects, and environmental geological issues. Based on the construction of an evaluation index system for the geological suitability of underground space development, the geological suitability of underground spaces at different depths was evaluated through analytic hierarchy process and grey relational analysis. The results show that the geological conditions of the middle underground space in the study area are complex, and the shallow and deep layers are more suitable for development. This result provides technical support for the preparation of the special plan for underground space in Nanchang.

Key words: underground space development; geo-suitability evaluation; analytic hierarchy process; grey relation analysis; Nanchang City

人口膨胀、资源短缺、环境恶化是 21 世纪的三大难题,究其根源主要是人地关系恶化导致的。土地资源是不可再生资源,在有限的空间里人口急剧增长,导致土地供需矛盾加剧,城市面临无地可建的窘境,同时城市高楼密布、交通容量不足,进而引发了交通拥堵、环境恶化等当代的“城市病”。针对

这些问题,现阶段最好的解决办法是提高土地利用,打造立体城市,“上天入地”谋发展,积极开发地下空间^[1]。

城镇化率是城市发展程度最直观的体现。根据统计数据,江西省在 2000 年城镇化率为 27.7%,发展至今其城镇化率已接近 60%,中国城镇化的

收稿日期:2021-02-23;修订日期:2021-04-13

资助项目:中国地质调查局项目《南昌多要素城市地质调查项目》(编号:DD20189240)

作者简介:蒋杰(1995-),男,在读硕士生,从事城市地质与地下空间探测研究。E-mail:jiangjie95@foxmail.com

* 通信作者:马青山(1988-),男,博士,助理研究员,从事水工环地质研究。E-mail:ssqm2007@163.com

特点是人口向中心城市聚集,所以南昌作为江西省的省会,面临着巨大的人口压力,也意味着需要提升城市容量及综合承载力。向地下要空间,是城市发展的必然,随着科学水平的提高,地下空间开发利用的程度已经成为衡量城市现代化程度的标准^[2]。中国许多城市早已进行地下空间开发,但是研究程度尚浅,缺乏科学规划的指导,冒进式开发极易造成资源浪费。由于地下空间开发具有不可逆性,所以在开发利用前要进行全面的规划评估,将地下空间规划融入城市发展框架中^[3]。需要充分考虑地下空间资源量、地下空间开发的地质适宜性、开发潜力等,在此基础上进行科学开发。

地下空间的开发是一个多要素整合的过程,受地质环境条件的严重制约,盲目开发不仅会提升施工难度与风险,还会影响地下构筑物的使用和运维,对此许多学者对地下空间开发地质适宜性评价方法开展了大量研究^[4-8]。目前常用的确权方法为层次分析法和梯形模糊数定权法。综合评价一般采用多目标线性函数法或模糊综合评判法。众多研究提出了很多评价方法体系,但是往往不具备普适性,不同的地域其地质情况千差万别,所以需要结合实际的地质环境选择最契合的方法进行评价。南昌市地下空间开发起步较晚,其地质条件复杂且洪涝灾害频发,导致地下空间开发速度缓慢,且现有的学术成果大多是对地下人防工程及地下轨道交通的研究,尚未进行地下空间开发地质适宜性评价。在此背景下,本文旨在探索南昌市地下空间开发地质适宜性评价方法,在城市地质调查成果的基础上,对研究区地质环境影响因素进行识别,采用层次分析法结合灰色关联分析法进行评价,最后圈定出南昌市地下空间开发地质适宜性的空间分布范围,对各层位存在的问题进行分析讨论,为南昌市地下空间专项规划的编制提供依据。

1 研究区概况

南昌古称豫章、洪都,处江西省中部偏北,历史文化底蕴深厚,“襟三江而带五湖,控蛮荆而引瓠越”就是描述其优越的地理位置,是中国唯一一个与长江三角洲、珠江三角洲和海峡西岸经济区相邻的省会城市。南昌属亚热带湿润季风气候,夏炎冬寒,全境以平原为主,中心城区平均海拔 22 m,是理

想的“花园城市”。南昌位于扬子准地台南缘,紧邻华南加里东褶皱带,地质构造复杂,研究区出露的地层有第四系、古近系—新近系、白垩系、前震旦系等,第四系为主要出露地层,包括全新统、上更新统和中更新统(图 1)。研究区包含松散岩类孔隙水、红层孔隙裂隙水、基岩裂隙水 3 种地下水类型,以及松散岩类孔隙含水层、红层孔隙裂隙含水层、变质岩裂隙含水层、岩浆岩裂隙含水层 4 类含水岩组。地下水补给来源有河流侧向补给、大气降水垂向补给、红层地下水越流补给等,富水性由西向东逐渐增强。

南昌市经济发展速度较快,但是其地下空间开发起步较晚,现有地下空间开发程度远远跟不上城市发展速度。目前南昌市的地下空间利用方向主要是城市人防工程,根据地理国情监测数据,南昌市土地面积为 7402 km²,但是建设用地面积仅 863 km²,目前建成区面积已经超过 400 km²,中心城区建设用地紧缺,可见其对地下空间开发有很大的需求,科学、合理地进行地下空间开发是当前的重要工作。

2 地下空间开发地质适宜性评价方法

2.1 评价空间范围

“上天容易入地难”,地下空间作为一种土地资源,其开发是永久性工程,具有“先入为主”的特性,先开发的地下空间会对后续的开发造成影响,所以在进行规划开发时应具有前瞻性,需要科学地进行分层开发^[9]。研究区为南昌市中心城区规划范围,面积约 834.56 km²,参考中国主要城市地下空间层位划分,将研究区地下空间在垂向上划分为 3 层。

(1)浅层 L_1 (0~10 m):浅层地下空间开发难度较低,是现阶段地下空间开发的主要层位,但是浅层地下空间大多被建筑地基、地下商业街、市政设施等占据,对于地下空间现存的构筑物,目前缺乏系统的调查,难以精确划定其分布范围及深度,所以本次评价不考虑该因素,仅对地质条件适宜性进行分析。

(2)中层 L_2 (10~30 m):中层地下空间是未来重点开发的层位,多用于开发地下交通和地下综合管廊,功能主要集中在交通集散、公共基础设施安放、地下人防工程等,目前国家大力推进建设地下综

步骤如下。

(1) 建立层次结构模型

进行地下空间地质适宜性评价时,需要处理大量不同形式的数据,首先要根据问题的性质将目标分解为若干元素,元素之间形成层次,高层次的元素作为准则约束下一层次的相关元素,建立一个包含目标层、准则层和方案层的层次结构模型。

(2) 构造判断矩阵及层次排序

层次分析法的优势在于,它不是把所有的评价因子放在一起进行单纯的定量比较,而是将各因子两两对比,采用相对重要性降低不同性质指标间对比的困难,提高准确性。通过对层次结构模型分析,采用九标度法对各层次中的元素逐项进行成对比较,构造判断矩阵,再通过参考国内外研究成果并咨询专家意见,对各指标进行量化赋值。

层次排序包括层次单排序和层次总排序。层次单排序是方案层各元素对应准则层元素的相对重要性排序权值,而层次总排序是在完成方案层的层次单排序后,计算准则层所有因素对于总目标的相对重要程度的排序权值。得到权重计算结果后,为了保持判断逻辑的前后一致,需要进行一致性检验,计算一致性比例 CR ,当 $CR<0.1$ 时,判断矩阵通过一致性检验,说明层次排序权值分配合理,否则需对判断矩阵进行修正。以研究区浅层(0~10 m)地下空间为例,评价因子量化分级与指标权重计算结果如表 2 所示。

$$CI=\frac{\lambda_{\max}-m}{m-1}, CR=\frac{\sum_{j=1}^m CI(j) a_j}{\sum_{j=1}^m RI(j) a_j} \tag{1}$$

式中: CI 为一致性指标; $\lambda_{\max}$ 为判断矩阵最大特征根; m 为判断矩阵阶数; RI 为随机一致性指标,其取值根据矩阵阶数通过查表获得。

表 2 研究区浅层(0~10 m)地下空间分区因子影响程度分级
Table 2 The geo-environment suitability partitioning factors and influence degree ranking of shallow layer(0~10 m) in the research area

因子名称		评价指标分级标准				权重	综合权重
一级	二级	适宜	较适宜	适宜性中等	适宜性差		
地形地貌条件	地形坡度	坡度 $\leq 3^\circ$	3°<坡度 $\leq 8^\circ$	8° $\leq$ 坡度 $<15^\circ$	坡度 $>15^\circ$	0.043	0.065
	地貌类型	丘陵、岗地	Ⅲ、Ⅳ级阶地、岗间冲沟	Ⅰ、Ⅱ级阶地	湖积平原、河漫滩	0.022	
工程地质条件	基岩埋深	$>30\text{ m}$	15~30 m	5~15 m	0~5 m	0.021	0.480
	岩土体综合特征	地层均一,岩土体工程性质好,无特殊土分布	地层较均一,岩土体工程性质较好,无特殊土分布	地层不均一,岩土体工程性质一般,有特殊土分布	地层不均一,岩土体工程性质较差,有特殊土分布	0.090	
	地基承载力	$f_a \geq 200\text{ kPa}$	$150\text{ kPa} \leq f_a < 200\text{ kPa}$	$80\text{ kPa} \leq f_a < 150\text{ kPa}$	$f_a < 80\text{ kPa}$	0.225	
	软土厚度	无软土	0~5 m	5~10 m	10~15 m	0.098	
	卵砾石厚度	$\leq 4.9\text{ m}$	4.9~8.2 m	8.2~11.7 m	$>11.7\text{ m}$	0.046	
	地下水位埋深	15~20 m	10~15 m	5~10 m	$<5\text{ m}$	0.144	
水文地质条件	含水层厚度	$\leq 7\text{ m}$	7~14 m	14~21 m	$>21\text{ m}$	0.073	0.290
	含水层富水性	$\leq 300\text{ t/d}$	300~1000 t/d	1000~3000 t/d	$>3000\text{ t/d}$	0.073	
地震效应	场地类别	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	0.006	0.038
	砂土液化	不液化	轻微液化	中等液化	严重液化	0.011	
	活动断裂	无活动断裂	非全新世活动断裂	微弱、中等全新世活动断裂	强烈全新世活动断裂	0.021	
环境地质问题	流砂管涌易发性	不易发	低易发	中易发	高易发	0.088	0.126
	地下水腐蚀性	微腐蚀	弱腐蚀	中腐蚀	强腐蚀	0.019	
	土壤腐蚀性	微腐蚀	弱腐蚀	中腐蚀	强腐蚀	0.019	
评判分值		10	6	3	1		

2.4 评价单元灰色关联度计算

地下空间开发与地面工程不同,地下空间开发受到多种因素制约。但是由于地质资料有限,进行适宜性评价时很难将所有影响开发的因素纳入评价指标体系中。而且现有的地质资料中,定量指标与定性指标之间没有明确的数量关系,具有极大的不确定性和波动性,定量指标的变化可能会导致相应的定性指标发生改变,但是这些指标又共同影响着综合评价。

在进行综合评价时,常用的方法主要是多目标线性加权函数法,将评价指标量化分级后,量化分值乘以相应的权重便可得出评价结果。该方法较简单,可在一定程度上体现各指标对综合评价的影响,但是对权重的依赖较严重,主观性较强,容易导致评价结果失真。由于地质资料有限且数据具有较大的波动性,部分指标没有明显的规律性且会因为主观条件的改变而变化,所以地下空间开发地质适宜性评价是基于贫信息背景的数据整合过程,是一个典型的灰色系统^[16]。使用灰色关联分析法进行综合评价,可以更好地体现出各个指标对目标层的贡献大小,简单来说,就是通过计算参考序列和特征序列之间的关联程度,量化数据间的关联性强弱,以此达到辅助决策的目的^[17]。灰色关联分析法通常包括以下 4 步。

(1) 确定参考序列和特征序列

灰色关联分析法中,参考序列是所需评价数据的对比标准,一般采用各指标的最优值构成参考序列,而特征序列就是由各指标组成的数据序列。计算灰色关联度,首先需要划分评价单元,根据研究区数据覆盖情况将评价单元确定为 500 m×500 m,然后根据层次分析法定权结果,以各指标最优情况的得分作为参考序列 x'_0 ,以评价单元内各指标的得分作为特征序列 x'_i ,特征序列越接近参考序列,则关联程度越大^[18]。

$$X'_0 = (x'_0(1), x'_0(2), \dots, x'_0(m)) \quad (2)$$

(2) 对数据进行无量纲化处理

评价指标体系中涉及到多种物理意义不同的评价因子,导致数据的量纲也不相同,难以直接进行比较,因此在进行关联度计算前需要对参考序列和特征序列的数据进行无量纲化处理^[19]。一般采用初值法对数据进行无量纲化处理:

$$x_i(k) = \frac{x'_i(k)}{x'_i(1)} \quad (3)$$

(3) 计算灰色关联系数及关联度

首先计算各特征序列与参考序列的绝对差,得到灰色关联系数 ξ_i ,灰色关联系数是参考序列与特征序列在曲线上各个点的关联程度值,关联系数可能有多个结果且信息较分散,难以直观地比较,所以需要将关联系数集中为一个数,通过求平均值得到关联度 γ_i ^[20]。

$$\xi_i(k) = \frac{\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|}{|x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|} \quad (4)$$

式中: ρ 为分辨系数,在 (0,1) 取值, ρ 越小关联系数间差异越大,一般 ρ 取 0.5。

$$\gamma_i = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \xi_i(k) \quad (5)$$

(4) 灰色关联度排序

通过 GIS 软件的空间分析功能,计算出各评价单元的灰色关联度,关联度数值越大代表该单元地质情况与最优情况越接近,采用等区间均分法划分关联度区间,根据关联度大小划分出 4 个适宜性等级,以此圈定研究区不同的适宜性范围。

3 地下空间地质适宜性评价结果及讨论

3.1 单因子评价结果分析

根据表 2 中对评价因子影响程度的分级,绘制单因子的评价分区图,以浅层 (0~10 m) 地下空间评价结果为例进行分析。

(1) 地形坡度

地下空间的开发会严重影响坡地的连续性,导致场地稳定性降低。研究区以平原为主,地形起伏较小,仅西北丘陵区略有起伏,中心城区地面高程基本介于 22~25 m 之间,地形坡度对开发造成的影响较小,靠近丘陵区进行开发时需要进行必要的支护加固措施。

(2) 地貌类型

研究区地势总体呈现西北高、东南低的特点,根据地貌成因及特征,可划分为构造剥蚀低山丘陵、侵蚀剥蚀岗地和侵蚀堆积平原 3 种地貌类型。通过参考国内外相关研究成果^[21],结合微地貌特征与地下空间开发的影响机理分析^[22],将地貌单元划分为 4 个等级:丘陵岗地为适宜开发区,其地形简单,稳定性较高,主要分布在赣江西岸;Ⅲ、Ⅳ级阶

地和岗间冲沟为较适宜区,呈条带状夹杂在丘陵岗地间,在东岸小冲沟中呈放射状分布;Ⅰ、Ⅱ级阶地为中等适宜区,集中分布在青山湖、瑶湖、艾溪湖以南的区域;河漫滩和湖积平原地势较低,有多年洪涝受灾历史,较不适宜进行开发,其主要分布在赣江东岸的沿江地带和扬子洲(图 2)。

(3) 基岩埋深

基岩埋深主要影响浅层和中层地下空间的开发,工程上对于均一的土或岩石,均可通过技术手段解决开发难题,但在基岩埋深较浅的地区会在地下形成土岩结合面,由于土体和岩石物理力学性质差异较大,不利于地下构筑物的稳定,且基岩面一般起伏较大,较难进行改造。研究区基岩埋深呈现西浅东深的规律,埋深范围为 0~39 m,适宜和较适宜区主要分布在赣江东岸和扬子洲,基岩埋藏较深,对浅层地下空间开发影响较小,但对后续开发中层和深层地下空间存在影响;中等和较差适宜区主要分布于赣江西岸,埋深普遍小于 15 m,对浅层地下空间开发影响较大(图 3-a)。

(4) 地基承载力

地基承载力是进行地下空间开发利用的重要参数,地下空间开发会使地层的天然应力状态发生

改变,在外力作用下,地下构筑物可能会产生剪切变形,严重影响地下构筑物的稳定。根据相关研究成果将承载力划分为 4 个等级,研究区内的适宜和较适宜区占比约 93%,西岸的承载力整体优于东岸,适宜性中等的区域仅分布在赣江近岸地带,由于水岩作用导致承载力降低,浅层范围没有适宜性差的区域分布(图 3-b)。

(5) 岩土体综合特征

由于地下空间开发完全位于地下,所以岩土体综合特征会直接影响到地下工程的安全稳定。不同的岩土体力学性质差异较大,综合考虑地层均一性、岩土体物理力学性质、特殊土体分布及对施工影响程度大小,将岩土体综合特征划分为 4 个等级:若地层由单一岩土体构成,定性该区域地层为工程综合性能优良地层,适宜进行开发,包括均一的粘性土、砂性土或中风化的硬质岩石;对于单一的卵砾石地层、以粘性土为主的双层土结构地层及强风化的硬质岩石,评价为工程综合性能较优良地层,较适宜开发;考虑到研究区内软质岩石遇水易发生崩解,将软质岩石进行安全降级处理^[23],将强风化软质岩石、以砂性土为主的双层土结构地层,以及有软土存在的多层土结构地层评价为工程综合性

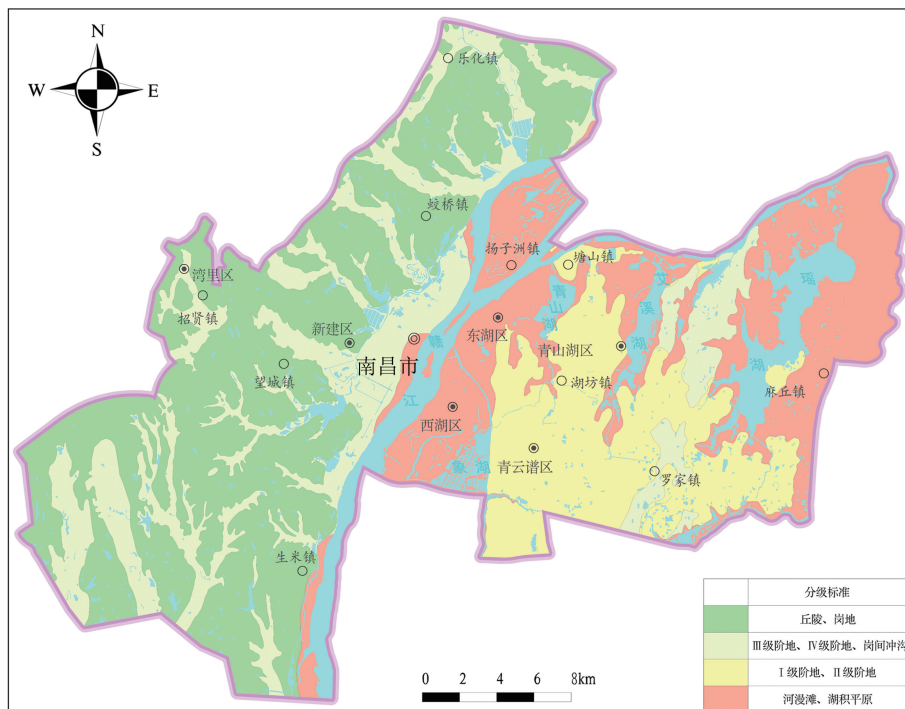


图 2 地貌类型评价分区图

Fig. 2 Evaluation map of landform types

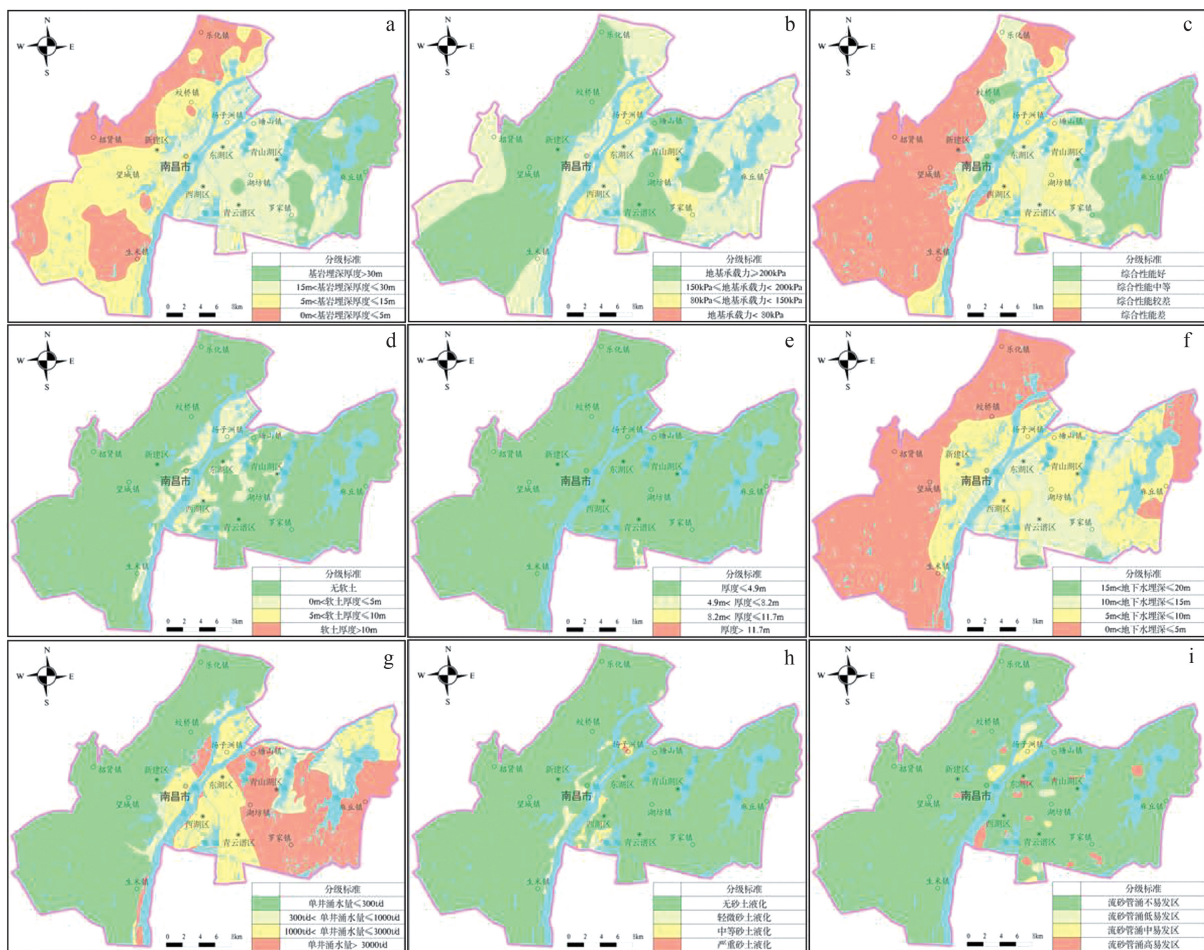


图3 浅层地下空间影响因素分项评价示意图

Fig. 3 Illustration of shallow underground space factors evaluation

a—基岩埋深;b—地基承载力;c—岩土体综合特征;d—软土厚度;e—卵砾石厚度;f—地下水埋深;

g—含水层富水性;h—砂土液化;i—流砂管涌易发性

能中等;由于岩石与土体的接触面物理力学性质差异较大,施工困难,将土岩结合面及强风化软岩分布区评价为工程综合性能差,开发适宜性差^[24]。研究区内适宜和较适宜开发区主要分布于赣江东岸,其地层简单均一,稳定性较高;适宜性中等地区主要分布在河湖近岸地带,其地层均一,但是受地下水影响较大,整体工程性能有所下降;适宜性差的区域集中分布在赣江西岸,其地层均一性差且存在大面积土岩结合面,对开发造成较大影响(图3-c)。

(6) 软土厚度

软土具有“三高两低”的工程特性,即含水量、压缩性及孔隙比较高,抗剪强度和渗透性较低,影响地下空间的稳定性,易造成地基不均匀沉降、基坑失稳等工程问题。研究区软土主要分布于象湖、

青山湖和艾溪湖等近岸地带,以及赣江两岸的河湖相沉积层中,多为流塑状淤泥质粉质粘土,呈单层透镜状分布,空间连续性较差,平均累计厚度为3 m,西湖区累计厚度最大可达7.67 m(图3-d),研究区软土厚度变化较大,顶板埋深普遍在0~10 m,对浅层地下空间开发影响最大。

(7) 卵砾石厚度

卵砾石具有较高的抗剪强度,且多与砂性土混合分布在同一层位,软硬交替的地层易产生压缩变形,且卵砾石层透水性强、排水固结快,在进行地下空间开发时较难控制。研究区卵砾石层主要分布在赣江东岸,埋深普遍大于10 m,累计厚度介于0~25 m之间,区域厚度变化较大,对浅层地下空间开发几乎不造成影响(图3-e),但由于赣江东岸含水

层富水性较强、卵砾石厚度大,构成了强富水卵砾石层,对中层、深层地下空间的开发制约最严重^[25]。

(8) 地下水位埋深

进行地下空间开发时,地下水埋深越浅,地下水流场越容易被破坏,同时由于地下水对地下构筑物存在浮托作用,当地下水位发生急剧变化时,地下水压力会对地下工程结构造成破坏^[26]。研究区地下水位埋深范围为1.46~23.86 m,水力条件复杂,东西两侧的埋深较小,中部区域埋深较大,埋深小于10 m的区域占比约83%,主要影响浅层地下空间的开发(图3-f)。

(9) 含水层厚度

含水层厚度间接体现了区域地下水的赋存情况,地下空间开发会破坏含水层天然应力状态,导致喷涌、流砂等现象,影响开发安全。研究区浅层地下空间含水层厚度普遍较小,对工程开发影响甚微,主要的含水层位分布于中层地下空间,自西向东含水层厚度逐渐增大,其平均厚度为14 m,东部含水层最大厚度可达31.4 m,对中层地下空间开发影响较大,需提前采取控水措施。

(10) 含水层富水性

含水层富水性是区域地下水水量及补给能力的体现,富水性强会增大地下施工过程中地下水的控制难度,不利于地下空间开发。研究区富水性自西向东逐渐增强,赣江西岸主要为基岩裂隙水,赋存于岩体风化壳中,富水性贫乏,东岸主要为松散岩类孔隙水,分布广泛,且该区域水量丰富,部分地区单井涌水量超过3000 t/d,地下水径流条件好,同时具有一定承压性,对3个层位地下空间开发均有较大影响(图3-g)。

(11) 活动断裂

活动断裂分布区一般稳定性较差、岩石破碎程度较高,是地下水的良好通道,可能发生坍塌、冒顶、基坑涌水等工程问题。通过查阅区域地震资料,研究区仅赣江断裂为微弱全新活动断裂,其余均为无活动断裂,参考建筑抗震设计规范,当场地内存在断裂构造时,若抗震设防烈度小于8°,可忽略其对建筑的影响,采取适当的工程技术手段即可安全开发。研究区内抗震设防烈度为6°,所以活动断裂指标仅作为不利因子考虑,不作为敏感因子。参考前人研究成果,断裂带对地下空间开发的影响呈线状辐射,在断裂带两侧的影响半径为50 m,断

裂交叉区按最不利等级考虑,超出影响半径范围后断裂带对地下空间开发无影响。

(12) 场地类别

场地类别是表征场地稳定性的指标,可以反映不同场地条件对地震效应的缓冲程度。研究区以Ⅱ类场地为主,西部存在少量Ⅰ类场地,总体稳定性较高。

(13) 砂土液化

砂土液化一般发生在饱水的砂性土层,任何剧烈震动都可能导致砂土的内部颗粒发生移动,导致原本作用在骨架上的应力转向孔隙水,使颗粒悬浮在水中,发生液化。研究区第四纪松散沉积物主要分布在赣江的近岸区域,其细砂层与中砂层主要分布在20 m以浅范围内,并且丰水期潜水水位最浅时可小于5 m,这是发生砂土液化的必要条件^[27]。所以,砂土液化主要对浅、中层地下空间开发造成影响,深层地下空间基本不会发生砂土液化(图3-h)。

(14) 流砂管涌易发性

流砂与管涌是研究区易发的地质灾害,对浅层和中层地下空间开发影响较大,处理不当会导致基底突涌、基坑悬浮。研究区有多年洪涝受灾历史,流砂管涌一旦发生,会将岩土体整体破坏并在颗粒间迅速形成流砂管涌的通道,抢救不及时或措施不当都可能导致土体结构破坏,对地下构筑物和防洪堤坝构成巨大威胁。流砂管涌易发性评价参考了相关学术成果与规范,首先根据土体相关性质进行初判,划分出非流砂管涌土和过渡型土,再对过渡型土进行复判,结合曲率系数、不均匀系数、区分粒径、临界水力比降等参数进行综合判别,最后根据量化的易发性大小进行评价分区。研究区浅层地下空间有流砂管涌风险的区域占比为4.5%,易发区呈点状散布,高易发区主要分布在赣江东岸,在进行开发时需要着重考虑(图3-i)。

(15) 土壤腐蚀性

土壤腐蚀性是关系到地下构筑物稳定性和使用寿命的重要因素,由于土壤中有较多的孔隙和盐分,孔隙可作为传送水和氧气的通道,导致土壤与地下建筑材料发生电化学反应,造成腐蚀,对地下工程危害极大。例如在地下埋设的输气管道可能因为腐蚀而破裂,导致资源泄露,不仅经济损失巨大,还会破坏生态环境。研究区内土壤腐蚀性均为微腐蚀,对地下空间开发影响较小,但要结合地下

构筑物的使用寿命及地下空间开发的不可逆性进行考虑,在较长的时间维度里,仍需针对土壤腐蚀采取防护措施。

(16) 地下水腐蚀性

由于地下水具有侵蚀建筑材料的能力,且地下水中重金属成分越多,腐蚀速度越快,影响地下构筑物的稳定性^[28]。研究区地下水腐蚀性为微腐蚀,对浅层地下空间开发影响较小,地下空间开发面临的最大挑战是如何降低地下水的影响。研究区水力条件复杂,对于重要的工程和永久性建筑,需要对地下水腐蚀性进行常态化监测。

3.2 综合评价结果分析

根据层次-灰色关联分析法的步骤,将所有单因子评价分区图进行叠加,通过 GIS 软件计算出每个单元格的灰色关联度,并将所有单元格根据关联度大小进行分区,最终圈定出适宜性范围,得到综合评价结果。研究区浅层(0~10 m)地下空间部分单元格灰色关联度计算结果如表 3 所示,灰色关联度分区如图 4-a 所示。

根据灰色关联度计算结果,各层位地质适宜性综合评价分区结果如下。

(1)浅层(0~10 m)地下空间地质适宜性评价结果见图 4-b,其中适宜开发的区域占总面积的 12.59%,较适宜占 74.50%,适宜性中等占 12.09%,适宜性差占 0.81%,浅层地下空间总体适宜性较好,适宜性较差的区域主要集中在赣江近岸地带,在西湖区近岸地带有软土分布,且流砂管涌易发性较高。赣江两岸地质条件差异较大,赣江西岸基岩埋深较浅,局部存在土岩结合面,软硬交替的地层会提升地下工程施工难度,赣江东岸的主要问题是地下水埋深较浅、富水性强,进行开发时需要采取防水措施。综合评价结果认为,浅层地下空间总体适合进行开发,但不建议在赣江近岸地带进行开发。

(2)中层(10~30 m)地下空间地质适宜性评价结果见图 4-c,其中适宜开发的区域占总面积的 46.28%,较适宜占 14.41%,适宜性中等占 35.59%,适宜性差占 3.72%,中层地下空间评价结果呈现出较强的分界性,以赣江为界,两岸适宜性差异较大,赣江西岸比东岸更适合进行开发。赣江东岸的地质条件复杂,存在大面积土岩结合面,同时还存在较厚的卵砾石层,厚度最大可达 12 m,同样对开发造成较大影响的还有含水层富水性,部分区域最大

表 3 部分单元格灰色关联度计算结果

Table 3 The calculation result of grey correlation degree of the evaluation unit

因子	参考序列	G60	G61	G62	G63	G64	G65	G66
地形坡度	0.043	0.043	0.043	0.043	0.043	0.043	0.015	0.043
地貌类型	0.022	0.008	0.022	0.008	0.008	0.008	0.022	0.008
基岩埋深	0.021	0.009	0.009	0.012	0.009	0.009	0.007	0.009
岩土体综合特征	0.090	0.037	0.037	0.037	0.037	0.037	0.032	0.037
地基承载力	0.225	0.009	0.012	0.009	0.009	0.012	0.012	0.012
软土厚度	0.098	0.098	0.054	0.054	0.098	0.054	0.098	0.054
卵砾石厚度	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046
地下水位埋深	0.144	0.059	0.059	0.059	0.059	0.059	0.051	0.059
含水层厚度	0.073	0.073	0.073	0.073	0.073	0.073	0.073	0.073
含水层富水性	0.073	0.030	0.026	0.030	0.030	0.026	0.073	0.026
场地类别	0.006	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.022	0.012
砂土液化	0.011	0.011	0.011	0.011	0.005	0.011	0.011	0.006
活动断裂	0.021	0.021	0.021	0.012	0.021	0.021	0.021	0.021
流砂管涌易发性	0.088	0.048	0.088	0.088	0.048	0.088	0.088	0.088
地下水腐蚀性	0.019	0.019	0.019	0.019	0.019	0.019	0.019	0.019
土壤腐蚀性	0.019	0.019	0.019	0.019	0.019	0.019	0.019	0.019
关联度		0.724	0.790	0.698	0.675	0.736	0.801	0.698

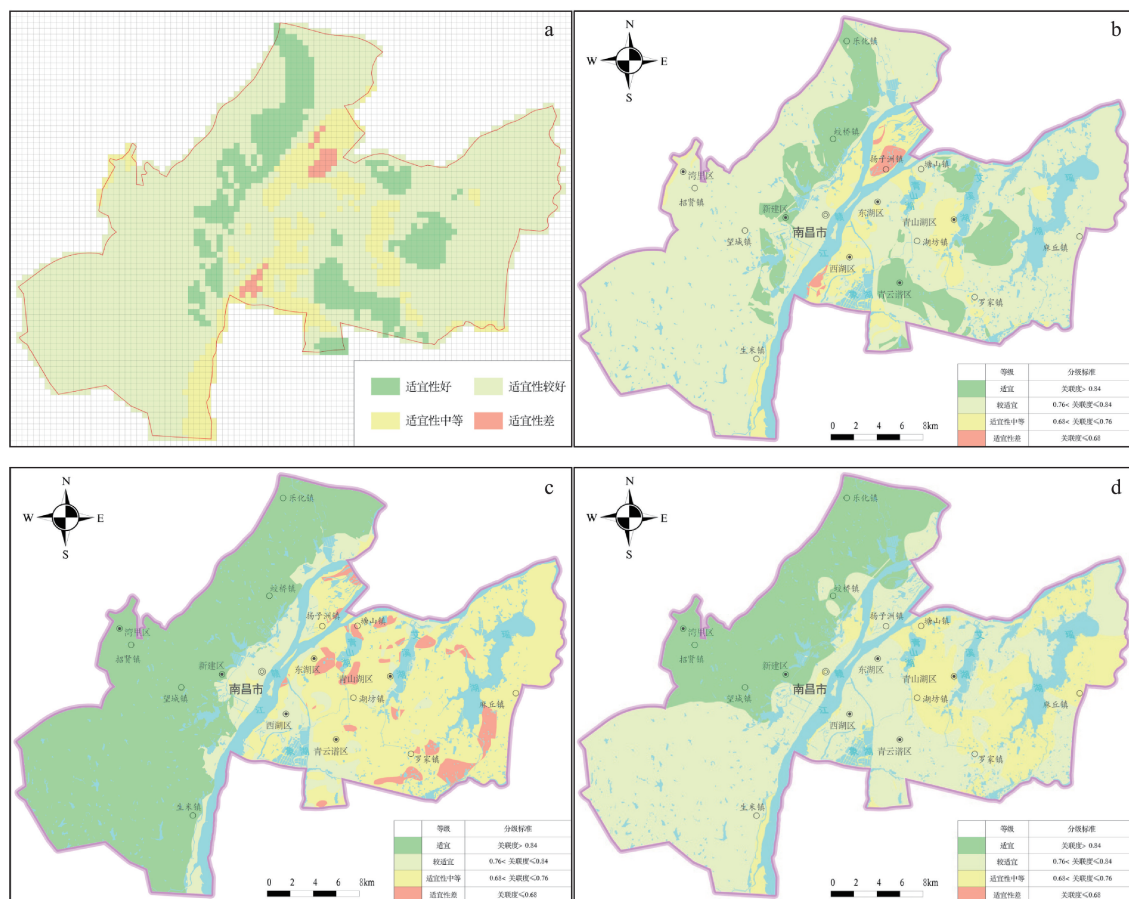


图 4 研究区地下空间开发地质适宜性综合评价结果

Fig. 4 Comprehensive evaluation results of geological suitability for underground space development

a—浅层(0~10 m)地下空间灰色关联度计算结果;b—浅层(0~10 m)地下空间地质适宜性评价分区;
c—中层(0~10 m)地下空间地质适宜性评价分区;d—深层(0~10 m)地下空间地质适宜性评价分区

涌水量超过 3000 t/d,富水砂砾石层一直是研究区较难处理的地质层位,基本都分布在中层地下空间,极不利于地下空间开发。研究区存在不同程度的环境地质问题,软土主要分布在赣江近岸地带,流砂管涌易发性最高的地方在扬子洲镇,这些区域不适宜进行开发。综合评价结果认为,中层地下空间西岸适合开发,东岸开发难度较大,主要制约因素是富水砂砾石层,不建议在扬子洲镇和赣江近岸地带进行开发。

(3)深层(30~60 m)地下空间地质适宜性评价结果见图 4-d,其中适宜开发的区域占总面积的 23.05%,较适宜的占 56.74%,适宜性中等的占 20.21%,无适宜性差的区域。深层地下空间总体适宜开发,西岸地层以风化程度较低的千枚岩、花岗岩、片麻岩为主,地层均一性好、稳定性较高;东岸由于基岩

埋深较深,存在部分土岩结合面,东岸基岩以中风化软质岩石为主,由于东岸水力条件较强,软质岩石遇水易发生崩解,所以对其进行安全降级处理。综合评价结果认为,深层地下空间总体适宜开发,主要制约因素是水力条件,进行开发时需采取防水控水及支护加固措施。

3.3 评价结果讨论

地下空间开发能够给研究区同等的中等发达城市带来新的发展机遇,但是由此也会引发许多问题。南昌市早期的地下空间开发主要致力于人防工程,2009 年才开始进行第一条地铁的修建,由于缺乏科学的规划指导且开发前对地质条件掌握程度不足,2016 年在修建南昌地铁 2 号线的过程中,多次发生流砂管涌险情,导致施工过程中突发涌水、涌砂、路面塌陷。造成事故的原因是多方面的,

进行地下空间开发势必会对地层造成扰动,事故段在连续降雨的情况下,水力梯度显著增大,在施工的扰动下突破了砂土的临界水力比降,发生流砂管涌破坏。诸如此类的事故是完全可以通过在开发前进行地质适宜性评价来降低事故风险的。

本次研究目的是推进南昌市地下空间的科学开发,同时支撑中心城区地下空间开发专项规划的编制,但是由于目前对于已使用地下空间的情况掌握程度不足,未能将地下空间占用情况加入评价指标体系中。本研究构建的评价方法体系,可为与研究区地质情况相近、水力条件复杂的平原地区地下空间开发提供参考,但是由于不同的地区地质环境条件差别较大,所以评价方法存在差异,同时目前的研究局限在二维静态评价,后续应进一步向三维动态评价发展。

4 结 论

(1)影响南昌市地下空间开发的地质因素有 16 个,其中地基承载力、软土厚度、岩土体综合特征、卵砾石层厚度、基岩埋深、地下水埋深、含水层厚度、含水层富水性 9 个指标为重要因子,影响程度较大;地貌类型、地形坡度、活动断裂、砂土液化、场地类别、土壤腐蚀性、地下水腐蚀性 7 个指标为一般因子,影响程度较小。

(2)评价结果显示,研究区浅层地下空间适宜和较适宜开发的面积占总面积的 87.09%,中层地下空间适宜和较适宜开发的面积占比 60.69%,深层地下空间适宜和较适宜开发的面积占比 79.79%,浅层和深层地下空间开发难度更小,中层地下空间地质条件复杂,该层位存在大范围土岩结合面,且富水性较强、卵砾石层厚度较大,开发存在一定难度。

(3)利用层次-灰色关联分析法对研究区地下空间开发地质适宜性进行分析评价,在本次研究中取得了较科学、准确的评价结果,为研究区地下空间开发专项规划的编制提供了参考,由于研究区对地下空间开发的研究起步较晚,数据精细程度尚有欠缺,未来可在地质适宜性评价的基础上叠加地下空间资源量评价与地下空间开发潜力评价,得到更全面的评价结果,助力地下空间开发。

参考文献

[1] 钱七虎.城市可持续发展与地下空间开发利用[J].地下空间,

- 1998,(2):3-5.
- [2] 钱七虎.迎接我国城市地下空间开发高潮[J].岩土工程学报,1998,(1):112-113.
- [3] 程光华,苏晶文,李采,等.城市地下空间探测与安全利用战略构想[J].华东地质,2019,40(3):226-233.
- [4] Li X Z, Li C C, Aurèle Parriaux, et al. Multiple resources and their sustainable development in Urban Underground Space[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 55(May): 59-66.
- [5] Peng J, Peng F L. A GIS-based evaluation method of underground space resources for urban spatial planning: Part 1 methodology [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 74(APR.): 82-95.
- [6] 彭俊婷,洪涛,解智强,等.基于模糊综合评价的城市地下空间开发适宜性评估[J].测绘通报,2015,(12):66-69,113.
- [7] 吴炳华,张水军,徐鹏雷,等.宁波市地下空间开发地质环境适宜性评价[J].地下空间与工程学报,2017,13(S1):16-21.
- [8] 张晶晶,马传明,匡恒,等.郑州市地下空间开发地质环境适宜性变权评价[J].水文地质工程地质,2016,43(2):118-125.
- [9] 辛福满,李晓昭,戴佳铃,等.城市地下空间开发分层体系的研究[J].地质前缘,2019,26(3):104-112.
- [10] 雷升祥,申艳军,肖清华,等.城市地下空间开发利用现状及未来发展理念[J].地下空间与工程学报,2019,15(4):965-979.
- [11] 何静,周圆心,郑桂森,等.北京市地下空间资源利用地质适宜性评价研究[J].地下空间与工程学报,2020,16(4):955-966.
- [12] 何静,郑桂森,周圆心,等.城市地下空间资源探测方法研究及应用[J].地质通报,2019,38(9):1571-1580.
- [13] 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(6):57-62.
- [14] 史玉金,张先林,陈大平.上海深层地下空间开发地质环境条件及适宜性评价[J].地质调查与研究,2016,39(2):130-135.
- [15] 彭建,柳昆,郑付涛,等.基于 AHP 的地下空间开发利用适宜性评价[J].地下空间与工程学报,2010,6(4):688-694.
- [16] 邓聚龙.灰色控制系统[J].华中工学院学报,1982,(3):9-18.
- [17] 谭学瑞,邓聚龙.灰色关联分析:多因素统计分析新方法[J].统计研究,1995,(3):46-48.
- [18] 宋铁军,万玉玉,张文强,等.基于灰色关联分析法的松辽盆地 CO₂地质储存适宜性评价[J].地质通报,2017,36(10):1874-1883.
- [19] 宋久鹏,董大伟,高国安.基于层次分析法和灰色关联度的方案决策模型研究[J].西南交通大学学报,2002,(4):463-466.
- [20] 唐鑫,刘健,瞿婧晶,等.江苏宜兴地下空间开发地质环境适宜性评价[J].地质学刊,2019,43(4):672-678.
- [21] 杨文采,田钢,夏江海,等.华南丘陵地区城市地下空间开发利用前景[J].中国地质,2019,46(3):447-454.
- [22] 邢怀学,葛伟亚,李亮,等.基于 GIS 的丹阳城镇工程建设适宜性评价[J].华东地质,2019,40(1):59-66.
- [23] 张茂省,李同录,程秀娟,等.山区城市地下空间资源评价与开发利用模式——以延安市为例[J].山地学报,2019,37(3):303-315.
- [24] 江思义,王启耀,李春玲,等.基于专家-层次分析法的地下空间适宜性评价[J].地下空间与工程学报,2019,15(5):1290-1299.
- [25] 田福金,贾军元,田中纺,等.多种物探方法组合在南昌城市地下空间探测中的有效性浅析[J].地质论评,2020,66(S1):167-168.
- [26] 周圆心,郑桂森,何静,等.北京平原区地下空间建设地质安全监测问题探讨[J].中国地质,2019,46(3):455-467.
- [27] 王鹏,刘静,张智慧,等.隐伏断层在强震砂土液化中的作用——以 2008 年汶川 Mw 7.9 地震为例[J].地质通报,2018,37(5):747-758.
- [28] 陈泉霖,葛晓明,陈文林,等.基于城市工程建设的福建莆田城区地质环境承载力评价[J].华东地质,2020,41(3):295-304.