

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



Pre-pub. on line: www.
geojournals.cn/georev

邢怀学¹⁾, 窦帆帆²⁾, 葛伟亚¹⁾, 华健¹⁾, 常晓军¹⁾, 蔡小虎¹⁾

1) 中国地质调查局南京地质调查中心, 南京, 210016; 2) 合肥工业大学资源与环境工程学院, 合肥, 230009

内容提要: 地下空间开发地质适宜性三维评价是合理进行地下空间立体化开发、降低开发地质风险的重要手段,也是当前研究热点。作为地质适宜性三维评价全过程的重要一环,科学合理地建立三维评价指标体系是其能否正确开展的前提基础。通过结合杭州城市地下空间开发面临的地质问题,在系统分析各评价指标对地下空间开发建设影响的特征基础上,以三维视角从地层三维结构等多个方面构建完成了一套具有多层次结构的三维评价指标体系,并采用层次分析方法对评价指标进行了目标权重的计算、一致性检验、排序和分析。该指标体系可划分为5个准则层21个指标层,相较于二维评价指标体系,通过融合三维地质模型和三维空间分析方法,使评价过程中能够考虑更多的评价因子,更好地描绘地下复杂的三维地质环境,丰富了三维评价结果的内涵。基于模糊综合评价方法的杭州钱江新城二期的三维评价应用成果表明,该指标体系为三维地质模型和三维空间分析方法之间的整合提供了有力的指导,为提升三维尺度下的地下空间开发地质适宜性评价精度和准确性提供了有力的支持。

关键词: 地下空间开发利用;地质适宜性评价;三维指标体系;钱江新城二期

随着我国社会经济的飞速发展以及城市化水平的不断提升,城市用地紧缺、交通拥堵、生态环境恶化等问题日趋严重,向地下要空间、要资源已成为现代化城市发展的必然趋势(徐永健等,2000;程光平等,2019;钱七虎,2019)。地下空间是一种新型的国土资源,地质环境作为地下空间开发利用的载体,是制约地下空间开发利用的最基本因素,只有正确认识地质环境对地下空间开发影响,才能避免地下空间利用中产生的各种不利后果。因此开展城市地下空间开发利用地质适宜性评价,对科学合理地开发利用城市地下空间,保障城市安全具有重要作用(王慧军等,2019;黄敬军等,2020)。

有关地质适宜性评价国内外众多学者已取得了较多的成果(柳昆等,2011;邢怀学等,2019;王强茂等,2019;颜翠翠等,2021;Zhou Dankun et al., 2019),但以往适宜性评价研究主要基于二维视角,不能表达水文地质、工程地质等多元地质信息的三维特征,评价结果不能满足对地下空间分层开发精准服务。随着3D-GIS、三维地质动态建模技术以及物探手段的不断进步(王鹏等,2020;田福金等,

2020;梁盛军等,2021),已有学者开始探索城市地下空间开发地质适宜性三维评价(吴立新等,2007;Rienzo et al., 2009;田毅等,2012;Hou Weishen et al., 2016),但三维指标体系构建研究相对薄弱,尚未建立一套有效的三维评价指标体系,同时,地下空间开发地质适宜性三维评价指标体系的合理性,直接影响评价结果的准确性,对于三维评价指标研究尤其重要。

本文基于三维视角,在系统分析影响杭州城市地下空间开发地质要素基础上,构建了多层次结构特征的杭州市地下空间开发地质适宜性三维评价指标体系。基于此指标体系,结合三维地质模型和三维空间分析技术,定量表征了影响研究区地下空间开发的评价因子特征,丰富了区内地下空间开发地质适宜性的评价内容,为钱江新城二期地下空间规划建设提供更加精细的结果和更为科学依据。

1 三维评价指标体系构建过程与方法

基于地质属性三维空间特征,结合以往评价指标体系构建相关研究成果(姜云等,2005;陈凯杰

注:本文为中国地质调查局“杭州多要素城市地质调查”项目(编号:DD20190281)的成果。

收稿日期:2021-08-17;改回日期:2022-01-17;网络首发:2022-02-20;责任编辑:刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2022.02.011

作者简介:邢怀学,男,1981年生,硕士,高级工程师,主要从事城市地质调查研究工作;Email:57670204@qq.com。

等,2011;黄卫平等,2018;李红昌等,2020),本文将三维评价指标体系构建方法具体分为以下5个部分:①确定评价空间域;②评价指标识别与机理分析;③构建评价指标体系;④评价指标量化分级;⑤确定指标权重。

1.1 确定评价空间域

根据杭州地下空间规划需求及地下空间开发利用工程建设经验,评价空间域主要分为3个层次:浅层空间域,开发深度为地下0~10 m范围内,为当前最广泛利用的空间域,也是民用建筑与地下服务设施主要利用的空间域;中层空间域,开发深度为地下10~30 m范围内,为地铁及主要大型地下设施利用空间域;深层空间域,开发深度为地下30 m以下,为地下物流、地下空间战略储备区。

1.2 评价指标识别与机理分析

影响地下空间开发的地质要素通常非常复杂,因此,在确定评价指标体系之前,需要对影响地下空间开发的地质环境要素进行全面研究,综合分析地质要素对地下空间规划、建设和运行造成的影响。本文在梳理大量文献的基础上,结合杭州区域地质背景和实际地下工程建设经验,筛选出对地下空间开发利用有显著影响的三维评价因子,并将其归纳为地形地貌、岩土体工程地质特征、水文地质、不良地质作用以及地层三维结构等5类三维评价因子类别。

1.2.1 地形与地貌

(1)地面高程:地面高程较低的区域,其地表排水能力较弱、防汛抗洪难度较大,地下空间入口和开放部位容易倒灌,在雨洪危险较大的城市尤为明显。

(2)地面坡度:在地形坡度过大的区域进行地下空间开发,将增加土石方开采的工程量,附加更多的劳动成本和建设投资。

(3)地貌类型:城市的发展及地下空间开发受地貌影响,城市所处地貌的类型对城市未来的地下空间开发和平面空间布局产生重大影响。常见城市内地貌类型包括低山、丘陵、平原,平原又分为冲积平原、湖积平原、海积平原等。通常在平原区进行地下空间开发的难度相对较小,在残坡积等工程地质条件良好地层开发地下空间地质安全风险和建设成本较低。

1.2.2 岩土体工程地质特征

(1)软土层:软土的存在将导致地下空间开发过程中地基的失稳和不均匀变形,处理不当会引起构筑物下沉、倾斜、失稳等一系列工程问题等。

(2)基岩风化程度:基岩的风化程度将影响岩体的岩土力学强度,并容易导致地下工程施工过程中出现岩石崩解等现象,增加了开发的难度。

(3)基岩风化厚度:基岩风化层常引起建筑物地基不均匀沉降、建筑物沿基岩面或某软弱面的滑动等问题,其越厚越不利于地下空间开发建设。

(4)地基承载力:地基承载力关系到在土体中暗挖施工时地下空间成型的难易程度及对地表扰动变形影响的敏感程度。当土体的地基承载力值较大时,施工成本较低,且开发导致的地表移动和变形的大小和分布也容易控制。

1.2.3 水文地质

(1)地表水系:地表水系主要影响水系下方及周边区域进行地下工程开挖的安全和施工难度。距离地表水系越近,施工难度越大,更容易降低地下工程建设的安全性。

(2)潜水埋深:潜水对地下空间开发的影响主要表现在对地下构筑物的结构具有一定的托浮作用,抗浮措施处理不当可能会导致地下结构的破坏。

(3)承压水埋深:随着地下工程的施工深度的增加,将逐渐减少含水层上覆的不透水层厚度,当其减少量超过其承受范围时,基坑下部承压水的水头压力随之冲破不透水层,从而引发突涌、流砂等地质灾害问题。

(4)地下水富水性:地下水富水性作为岩土体中地下水补给能力或富水程度的度量指标,直接关系到地下空间开发的建设成本和维护费用。

(5)地下水腐蚀性:具有过量腐蚀性离子介质(例如 Cl^- 、 HSO_2^- 等)的地下水,对钢筋混凝土会产生比较强的腐蚀,从而降低建筑构件的强度,进而影响结构的安全性和耐久性。

1.2.4 不良地质作用

(1)活动断裂影响范围:当断裂活动时,一旦地震灾害发生,将对地上建筑和地下空间的结构物产生巨大破坏作用,越接近地震中心的地下空间的设施,受损程度越大。

(2)饱和砂土液化指数:液化是饱和砂土、粉土在动荷载作用下发生的不良地质现象,容易使地基、建(构)筑物产生较大变形甚至破坏。通常可以饱和砂土液化指数定量表征液化程度。

(3)岩溶影响范围:岩溶发育导致的岩溶塌陷对地下构筑物的地基和施工条件有着显著影响,可能使已有地下工程地基突然失稳,丧失承载能力,甚至破坏隔水层,导致地下水涌出,增加施工难度,塌

表1 城市地下空间地质适宜性三维评价指标体系

Table 1 3D evaluation index system of geological suitability for urban underground space

目标层(A)	准则层(B)	指标层(C)	三维空间分析方法
城市地下空间开发利用地质适宜性评价三维指标体系(A1)	地形与地貌(B1)	高程(C1)	三维空间拓展分析
		坡度(C2)	三维曲面分析/三维空间拓展分析
		地貌类型(C3)	三维空间拓展分析
	岩土体工程地质特征(B2)	软土(C4)	三维距离场分析
		地基承载力(C5)	三维空间插值分析
		基岩风化程度(C6)	三维空间拓展分析
		基岩风化厚度(C7)	三维厚度分析/三维空间拓展分析
	水文地质(B3)	地表水系(C8)	三维距离场分析
		潜水顶板埋深(C9)	三维高度统计分析/三维空间拓展分析
		承压水顶板埋深(C10)	三维高度统计分析/三维空间拓展分析
		地下水富水性(C11)	三维空间插值分析
		地下水腐蚀性(C12)	三维空间插值分析
	不良地质作用(B4)	活动断裂影响范围(C13)	三维距离场分析
		饱和砂土液化指数(C14)	三维距离场分析
		岩溶影响范围(C15)	三维距离场分析
		浅层气影响范围(C16)	三维距离场分析
	地层三维结构(B5)	地质层组复杂度(C17)	三维复杂度分析/三维空间拓展分析
		下伏软土层厚度(C18)	三维厚度分析/三维空间拓展分析
		上软下硬工程地质层组界面(C19)	三维标志面分析/三维空间拓展分析
		基岩面埋深(C20)	三维高度统计分析/三维空间拓展分析
		基岩面起伏程度(C21)	三维曲面分析/三维空间拓展分析

盾构机偏移或卡机等严重的施工问题,在不及时注浆的情况下还易导致地面沉降甚至坍塌、隧道管片破碎以及盾构机损坏等多种地质和工程问题。

(4)基岩面埋深:在进行地下空间开发时,由于岩石相对土基对于建筑工程具有更好的支撑性,因此基岩可以作为一种较好的持力层使用。若基岩层较浅,则可充分利用岩体自稳,降低地下工程的施工难度。

(5)基岩面起伏程度:基岩面起伏程度对地铁及车站等地下工程沉降具有一定影响作用。岩面的起伏过大会造成地下工程底板分别坐落于不同强度的地层,甚至造成有的底板坐

陷对场地、地基可能造成的危害不容忽视。

(4)浅层气影响范围:地下浅层沼气的存在,将对地下工程(如盾构、基坑、桩基等)施工构成突涌、流砂等安全隐患,现场施工人员遇沼气发生中毒,若遇明火甲烷发生爆炸火灾等现象,因此需要对其进行必要勘探并进行有效处理。

1.2.5 地层三维结构

(1)地质层组复杂度:通常来说,地下空间的施工难度会随所处地下工程浅部及深部的地质层组的复杂程度的升高而提高。地下空间开发时如遇到两种或多种地层交互出现,地质均一性差,道壁受力不均匀,基床系数变异大,给工程带来较大设计难度和运营风险。地质层组复杂度可有效反映多种地层交互出现的情况,地质层组复杂度值越大代表该层位出现的不同种类地层越多,开发难度越大。

(2)下伏软土层厚度:由于地下工程建设多有支护,上伏软土对在其下开展的地下空间施工影响不大,但却会导致在其上部建设的地下工程产生失稳和不均匀变形,下伏软土层越厚,其开发施工越不利。

(3)上软下硬工程地质层组界面:上软下硬的地质结构对于采用盾构机施工的地下层组具有较为严重的影响。在这种地层结构附近掘进,容易引起

落于砂层、软土层,有的底板坐落于岩层。这种巨大的差异会造成同一埋深范围内岩土体强度和刚度不一,使得主体结构纵向沉降差异显著增大,严重影响地下工程的正常运行。

1.3 三维评价指标体系的构建

相比传统的二维指标体系,三维评价指标体系优点是能充分反映地下空间中复杂地质环境的三维空间结构特征和属性特征,如土体的结构、下伏土体的工程地质特征等。

在对杭州地质环境条件进行综合分析基础上,结合研究区数据收集情况,按分级、分序、抓主、放次的原则,将影响地下空间开发的地质条件划分为目标层、准则层、指标层3级,构建了地下空间开发地质适宜性三维评价指标体系(表1)。

其中,目标层为地下空间开发地质条件适宜性;准则层为影响地下空间开发的5个主要三维评价要素类别:地形地貌、岩土体工程地质特征、水文地质、不良地质作用、地层三维结构;指标层为准则层因素的21个三维评价要素,包括:高程、坡度、地貌类型、软土、地基承载力、基岩风化程度、基岩风化厚度、地表水系、潜水顶板埋深、承压水顶板埋深、地下水富水性、地下水腐蚀性、活动断裂影响范围、饱和砂土液化、岩溶影响范围、浅层气影响范围、地质层组复

表2 城市地下空间开发利用三维评价因子量化分级

Table 2 Quantitative classification of 3D evaluation factors for UUS development and utilization

指标层(C)	分级			
	适宜	较适宜	较不适宜	不适宜
高程(m)	>7.94	5.1~7.94	4.23~5.1	<4.23
坡度(°)	0.3~2	2~10	10~25	>25
地貌类型	冲积平原	湖积/ 海积平原	丘陵	低山
软土层厚度(m)	0~5	5~10	10~20	>20
地基承载力(kPa)	>250	200~250	150~200	60~150
基岩风化程度	微风化	弱风化	强风化	全风化
基岩风化厚度(m)	<1	1~2	2~4	>4
地表水影响(m)	>100	30~100	10~30	0~10
潜水顶板埋深(m)	>6	4~6	2~4	0~2
承压水顶板埋深(m)	>30	10~30	5~10	0~5
地下水富水性(m ³ /d)	<100	100~1000	1000~3000	>3000
地下水腐蚀性(mg/L)	<250	250~750	750~1000	>1000
活动断裂影响范围(m)	>250	150~250	100~150	0~100
饱和砂土液化指数	0	0~6	6~18	>18
岩溶影响范围(m)	>25	15~25	10~15	0~10
浅层气影响范围(m)	>25	5~25	10~15	0~10
地质层组复杂度	0~0.25	0.25~0.5	0.5~0.75	0.75~1.0
下伏软土层厚度(m)	0~4	4~15	15~20	>20
上软下硬工程地质层组界面(m)	>20	10~20	5~10	0~5
基岩面埋深(m)	0~10	10~30	30~40	>40
基岩面起伏程度(°)	<2	2~10	10~25	>50

杂度、下伏软土层厚度、上软下硬工程地质层组界面、基岩面埋深、基岩面起伏程度。每个准则层因素评价因子通过三维地质属性模型,采用不同的三维空间分析方法进行分析提取。

以杭州重点区块为实例,基于三维视角构建的评价指标体系具有一定的普遍性和典型性,不同的地区可根据其地质背景条件,尤其是存在的不良地质作用适当拓展,形成适用于本地区的三维评价指标体系,更有针对性的评价地下空间开发地质适宜性。

1.4 评价因子量化分级

针对地质要素三维空间分布特征及其对地下空间开发利用的影响,结合现有国家和浙江省岩土工程相关规范标准、多名长期在杭州市当地从事岩土工程、工程勘察、地下工程设计等相关行业的高级工程师的实际工程经验并参考周边城市地下空间相关研究成果(赵团芝等,2016;张明阳等,2020;王一鸣等,2021),将杭州地下空间地质环境适宜性划分成适宜、较适宜、较不适宜、不适宜4个等级(表2)。

1.5 评价指标权重的确定

确定权重的方法很多,主要包括主成分分析法、

层次分析法、熵权法等。其中,层次分析法由于具有准确性较好、所需数据量较少、评分时间短、计算量小等特点,因而得到了广泛的运用。层次分析法,简称AHP,是指将与决策问题的有关元素分解成目标、准则、方案等层次,用一定标度对人的主观判断进行客观量化,在此基础上进行定性和定量分析的一种决策方法。其主要由5个步骤组成:①建立层次结构模型;②两两比较,建立判断矩阵,求解权重向量;③层次单排序及其一致性检验;④层次总排序及其一致性检验;⑤计算权重结果并进行相应决策(Satty, 2008)。

在建立专家问卷调查的基础上,邀请杭州地区长期从事水文地质、工程地质、岩土工程等相关专家,运用1~9标度法对评价指标建立指标重要性程度的判断矩阵,得到基于专家经验的综合判断矩阵。依据以上AHP计算步骤,进一步得到判断矩阵一致性比率 $CR=0.0632<0.1$,表明该判断矩阵满足一致性条件。计算得到的因子综合权重如表3所示,因子权重的大小表明该因子对地下空间开发的影响程度。在已构建的地下空间开发地质适宜性评价三维指标体系中,B3(水文地质)对开发适宜性影响最大,其中又以C10(承压水顶板埋深)影响最为显著,符合多个专家实际经验,也证明了专家打分法与AHP方法有效性。

2 研究实例

2.1 研究区概况

钱江新城二期位于杭州市江干区钱塘江北岸,东至九田路—和睦港,南至钱塘江北岸,西至杭甬铁路,北至艮山东路,面积约为5.8 km²。钱江新城二期规划的总体结构为“一带五心,三轴五廊五片”,规划将依托地铁九号线,通过“连堡丰城”一轴三廊工程,打造“隐形的城市2.0版”,结合轨道交通和新城建设进行地下空间立体化、复合化、特色化开发的重点区域。钱江新城二期地下空间开发利用主要集中在中浅层区域(地下0~30 m),深层区域(地下30 m以深)以控制为主,为远景发展留有余地。

研究区属冲海积平原区,基岩埋深约60~80 m,除北西向萧山—球川断裂从外围通过外,局部存在软土、饱和砂土等不良土体,工程场地内无重大地质问题,地下空间开发利用条件总体良好。潜水水位埋深0.3~2 m,地下水位随季节变化1~3 m,承压水

表3 三维评价因子权重

Table 3 The weight of 3D evaluation factors

指标层	B1	B2	B3	B4	B5	指标综合权重 w_{Ci}
	$w_{B1}=0.097$	$w_{B2}=0.182$	$w_{B3}=0.346$	$w_{B4}=0.214$	$w_{B5}=0.161$	
C1	0.311					0.030
C2	0.196					0.019
C3	0.493					0.048
C4		0.455				0.083
C5		0.263				0.048
C6		0.141				0.026
C7		0.141				0.026
C8			0.125			0.043
C9			0.187			0.065
C10			0.394			0.136
C11			0.200			0.069
C12			0.094			0.033
C13				0.417		0.090
C14				0.121		0.026
C15				0.271		0.058
C16				0.191		0.041
C17					0.185	0.030
C18					0.323	0.052
C19					0.245	0.038
C20					0.141	0.023
C21					0.106	0.016

含水层 15~20 m, 水位埋深约 9 m, 单孔涌水量大于 3000 m³/d, 为地下空间开发主要影响因素。

2.2 评价过程与结果

基于自主开发的地下空间地质适宜性三维评价系统(UUSE3D)和已归纳的地下空间开发三维地质适宜性评价流程(Dou Fanfan et al., 2021), 首先建立研究区高精度三维地质模型, 结合上文构建的地下空间开发地质适宜性三维评价指标体系和区内地质环境特征, 利用三维空间分析方法进行指标体系中三维评价要素评价信息提取(表4), 构建三维评价数据集, 最后基于三维评价数据集采用模糊综合评价方法进行地下空间地质适宜性三维评价得到研究区 50 m 以浅地下空间整体评价结果。评价结果

表4 部分三维评价因子与三维空间分析方法对应表

Table 4 The weight of 3D evaluation factors

评价因子	三维空间分析方法	数据来源
高程	三维曲面特征	三维地质结构模型
坡度	三维曲面特征	三维地质结构模型
软土层厚度	三维空间统计	三维地质结构模型
承压水顶板埋深	三维空间统计	三维地质结构模型
地下水富水性	三维空间插值	三维地质属性模型
地质层组复杂度	三维空间统计	三维地质结构模型
基岩面埋深	三维曲面特征	三维地质结构模型
基岩面起伏程度	三维曲面特征	三维地质结构模型

(图1)显示:钱江新城二期地下空间(地下0~50 m)开发利用条件总体较好, 不适宜区面积约占规划区面积 5%。结合该区地下空间开发分层规划, 将地下 0~10 m 列为浅层开发区, 地下 10~30 m 列为中层开发区, 地下 30~50 m 列为深层开发区, 分别进行分析地下空间开发利用的地质适宜性。

(1)浅层地下空间西部较差, 东部较好, 受地表水系发育、高程低、软土厚度大、工程地质层组复杂等影响, 适宜性较差, 在进行地下空间开发利用尤其是基坑开挖时注意软土形变及城市内涝等。

(2)中层地下空间整体开发适宜性优于浅层, 除地铁六堡站及周边、六堡社区、七堡社区开发适宜性较差外, 其余地区开发适宜性良好。地下 10~20 m 适宜性比 20~30 m 差。造成适宜性差原因主要是受软土和饱和砂土影响。

(3)深层地下空间开发适宜性良好, 但 30~40 m 处于承压水含水层位置, 且该含水层富水性大, 如进行基坑开挖需高度重视承压水压力引起的基底突涌问题, 同时也要注意保护地下水径流条件, 减少因地下空间开发利用造成的地下水上升, 危及地下空间安全。40~50 m 范围内深层开发适宜性则受基岩条件特别是基岩风化程度及基岩面起伏影响较大, 以盾构形势进行地下空间开发尽量避开软硬界面, 降低地下空间开发的难度与成本。

3 结论

(1)本文基于地质数据具有的三维属性, 从三维视角结合杭州的地质环境特点, 建立了杭州城市地下空间开发地质适宜性三维评价的指标体系, 也为其他城市建立相应的评价指标体系提供思路。

(2)该指标体系包含 5 类三维评价因子类别, 21 个三维评价因子。采用层次分析法对其进行权重计算表明, 承压水顶板埋深及富水性、岩溶、砂土液化、浅层气以及软土层厚度为杭州地区地下空间开发地质适宜性的主要的控制性评价指标。

(3)以钱江二期为研究实例, 基于所建立的三维评价指标体系, 依托地下空间开发地质适宜性三维评价方法流程, 完成了研究区地下空间开发地质适宜性评价结果的计算。结果分析表明, 提出的三

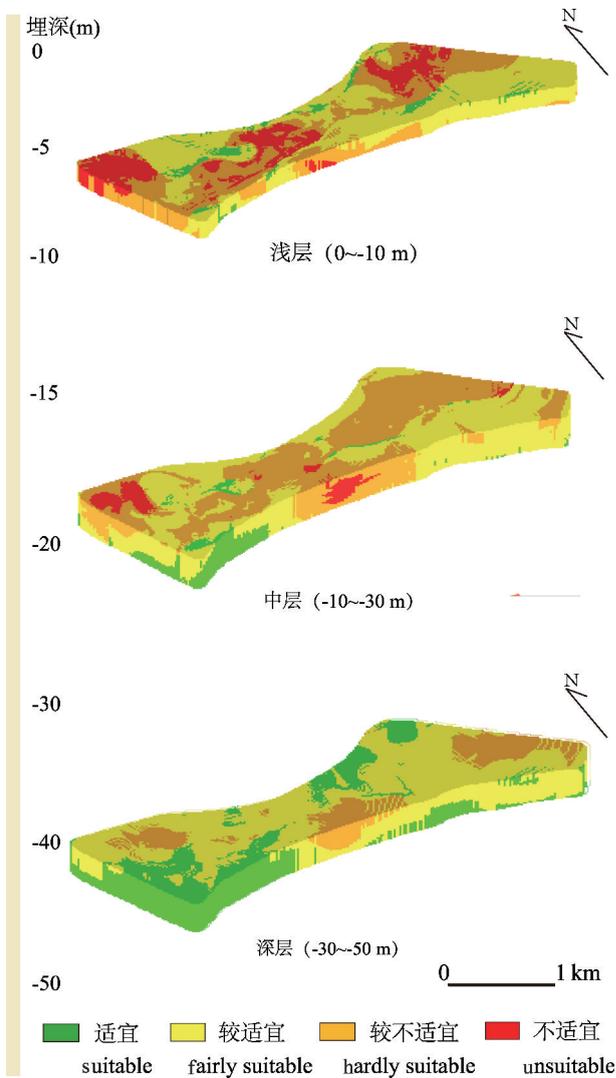


图1 钱江新城二期地下空间开发地质适宜性三维评价结果(地下0~50 m)

Fig. 1 The 3D evaluation results of geological suitability for urban underground space development in Qianjiang new town (0~50 m)

维评价指标体系能有效地整合三维地质模型和三维空间分析方法,丰富地质适宜性评价结果的内涵,为钱江新城二期地下空间精细规划及安全利用提供有力地质支撑。

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

陈凯杰, 赵建军, 郑伟锋. 2011. 深圳宝安区地下空间评估的指标体系研究——从地质环境的角度. 广东建材, 27(4): 151~154.

程光华, 王睿, 赵牧华. 2019. 国内城市地下空间开发利用现状与

发展趋势. 地学前缘, 26(3): 39~47.

黄敬军, 赵增玉, 姜素, 杨磊, 高立, 许书刚. 2020. 自然资源管理视角下江苏城市地质调查工作新思考. 地质论评, 66(6): 1609~1618.

黄卫平, 顾明光, 余国春, 林钟扬, 荣一萍. 2018. 嘉兴城市地下空间资源开发利用影响因素探讨. 地下空间与工程学报, 14(S2): 500~505.

姜云, 吴立新, 杜立群. 2005. 城市地下空间开发利用容量评估指标体系的研究. 城市发展研究, 12(5): 47~51, 75.

李红昌, 查甫生, 康博. 2020. 城市地下空间评估指标体系——以南通市为例. 合肥工业大学学报(社会科学版), 34(5): 113~120.

梁盛军, 李兆亮, 何怡原, 王明, 余学中. 2021. 时间域航空电磁法在地下空间探测中应用. 地质论评, 67(S1): 215~216.

柳昆, 彭建, 彭芳乐. 2011. 地下空间资源开发利用适宜性评价模型. 地下空间与工程学报, 7(2): 219~231.

钱七虎. 2019. 利用地下空间助力发展绿色建筑与绿色城市. 隧道建设, 39(11): 1737~1747.

田福金, 贾军元, 田中纺, 雷廷, 马青山. 2020. 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. 地质论评, 66(S1): 167~168.

田毅, 陈建平, 王丽梅. 2012. 北京市中心城区地下空间潜在资源量三维评价. 中国土地科学, 26(11): 40~44.

王慧军, 张晓波, 李海龙, 葛伟亚, 陈尚斌. 2019. 中国城市地质发展历程与特点——兼谈惠州城市地质发展前景. 地质论评, 65(5): 1229~1239.

王鹏, 宋越. 2020. 城市地质建模技术突破之地学动态建模. 地质论评, 66(S1): 169~170.

王强茂, 李海龙, 李廷栋, 尹启航, 王逸文, 范艳霞. 2019. 基于震害统计的城市地下空间地震安全性评价. 地质论评, 65(6): 1397~1408.

王一鸣, 袁静, 仓飞, 黄冀. 2021. 河口海湾型城市工程地质分区探索——以温州都市区为例. 地质论评, 67(S1): 22~24.

吴立新, 姜云, 车德福. 2007. 城市地下空间资源质量模糊综合评估与3D可视化. 中国矿业大学学报, 36(1): 97~102.

邢怀学, 葛伟亚, 李亮, 余成, 常晓军, 贾军元, 田福金, 雷廷. 2019. 基于GIS的丹阳城镇工程建设适宜性评价. 华东地质, 40(1): 59~66.

徐永健, 阎小培. 2000. 城市地下空间利用的成功实例——加拿大蒙特利尔市地下城的规划与建设. 城市问题, 98(6): 56~58.

颜翠翠, 康凤新, 韩建江, 杨询昌. 2021. 德州市地下空间开发地质环境适宜性评价. 地质论评, 67(S1): 43~44.

张明阳, 王一鸣, 叶文荣, 黄冀. 2020. 温州市规划区地下空间开发地质环境适宜性评价. 土木工程学报, 53(S1): 378~384.

赵团芝, 侯艳声, 胡新锋. 2016. 宁波市地下空间开发利用地质环境适宜性评价. 城市地质, 11(4): 88~93.

Chen Kaijie, Zhao Jianjun, Zheng Weifeng. 2011. Research on the index system of underground space evaluation in Baoan district, Shenzhen——From the perspective of geological environment. Guangdong Building Materials, 27(4): 151~154.

Cheng Guanghua, Wang Rui, Zhao Muhua. 2019. Present situation and developmental trend of urban underground space development and utilization in China. Earth Science Frontiers, 26(3): 39~47.

Dou Fanfan, Li Xiaohui, Xing Huaixue, Yuan Feng, Ge Weiya. 2021. 3D geological suitability evaluation for urban underground space development——A case study of Qianjiang Newtown in Hangzhou, Eastern China. Tunnelling and Underground Space Technology, 115(1): 1~12.

- De Rienzo F, Oreste P, Pelizza S. 2009. 3D GIS supporting underground urbanisation in the city of Turin Italy. *Geotechnical and Geological Engineering*, 27(4): 539~547.
- Hou Weisheng, Yang Liang, Deng Dongcheng, Ye Jing, Clarke K, Yang Zhijun, Zhuang Wenming, Liu Jianxiang, Huang Jichun. 2016. Assessing quality of urban underground spaces by coupling 3D geological models: The case study of Foshan city, South China. *Computers and Geosciences*, 89(1): 1~11.
- Huang Jingjun, Zhao Zengyu, Jiang Su, Yang Lei, Gao Li, Xu Shugang. 2020. New thoughts on urban geological survey concerning natural resource management in Jiangsu Province. *Geological Review*, 66(6): 1609~1618.
- Huang Weiping, Gu Mingguang, Yu Guochun, Lin Zhongyang, Rong Yiping. 2018. Discussion on affecting factors of urban underground space development and utilization in Jiaxing, Zhejiang Province. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 14(S2): 500~505.
- Jiang Yun, Wu Lixing, Du Liqun. 2005. On the index system for city underground space developing—utilization capacity evaluation. *Urban Studies*, 12(5): 47~51, 75.
- Li Hongchang, Zha Fusheng, Kang Bo. 2020. Evaluation index system of urban underground space: A case study of Nantong city. *Journal of Hefei University of Technique (Social Science)*, 34(5): 113~120.
- Liang Shengjun, Li Zhaoliang, Wang Ming, He Yiyuan, Yu Xuezhong. 2021. Application of ATEM on underground space investigation. *Geological Review*, 67(S1): 215~216.
- Liu Kun, Peng Jian, Peng Fangle. 2011. Evaluation Model for the Suitability of Underground Space Resources Exploitation and Utilization. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 7(2): 219~231.
- Qian Qihu. 2019. Underground Space Utilization Helps Develop Green Buildings and Green Cities. *Tunnel Construction*, 39(11): 1737~1747.
- Saaty T L. 2008. Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, 1(1): 83~98.
- Tian Fujin, Jia Junyuan, Tian Zhongfang, Lei Ting, Ma Qingshan. 2020. Combination of a variety of geophysical methods in the analysis of the effectiveness of Nanchang urban underground space exploration. *Geological Review*, 66(S1): 167~168.
- Tian Yi, Chen Jianping, Wang Limei. 2012. 3D quantitative evaluation for the underground space resources in urban Beijing. *China Land Sciences*, 26(11): 40~44.
- Wang Huijun, Zhang Xiaobo, Li Hailong, Ge Weiya, Chen Shangbin. 2019. The development course and characteristics of urban geology in China—Discussion on the prospect of urban geological development in Huizhou, Guangdong. *Geological Review*, 65(5): 1229~1239.
- Wang Peng, Song Yue. Geoscience dynamic modeling of urban geological modeling technology breakthrough. 2020. *Geological Review*, 66(S1): 169~170.
- Wang Qiangmao, Li Hailong, Li Tingdong, Yin Qihang, Wang Yiwen, Fan Yanxia. 2019. Seismic hazard assessment of urban underground space based on seismic hazard statistics. *Geological Review*, 65(6): 1397~1408.
- Wang Yiming, Yuan Jing, Cang Fei, Huang Ji. 2021. Exploration on engineering geological zoning of the city in estuary and gulf—A case study in Wenzhou urban zone. *Geological Review*, 67(S1): 22~24.
- Wu Lixin, Jiang Yun, Che Defu. 2007. Fuzzy synthesis evaluation and 3D visualization for resource quality of urban underground space. *Journal of China University of Mining & Technology*, 36(1): 97~102.
- Xing Huaixue, Ge Weiya, Li Liang, Yu Cheng, Chang Xiaojun, Jia Junyuan, Tian Fujin, Lei Ting. 2019. GIS-based suitability evaluation on constructive lands in the city of Danyang. *East China Geology*, 40(1): 59~66.
- Xu Yongjian, Yan Xiaopei. 2000. A successful example of urban underground space utilization—planning and construction of underground city in Montreal, Canada. *City Problem*, 98(6): 56~58.
- Yan Cuicui, Kang Fengxin, Han Jianjiang, Yang Xunchang. 2021. Suitability evaluation of geological environment for underground space development in Dezhou City. *Geological Review*, 67(S1): 43~44.
- Zhang Mingyang, Wang Yiming, Ye Wenrong, Huang Yi. 2020. Geological environment suitability evaluation of underground space development in Wenzhou planning area. *China Civil Engineering Journal*, 53(S1): 378~384.
- Zhao Tuazhi, Hou Yansheng, Hu Xinfeng. 2016. Urban geology. geological environment suitability assessment of underground space development in Ningbo City. *Urban City*, 11(4): 88~93.
- Zhou Dankun, Li Xiaozhao, Wang Qi, Wang Rui, Wang Tianding, Gu Qian, Xin Yuanxiao. 2019. GIS-based urban underground space resources evaluation toward three-dimensional land planning: A case study in Nantong, China. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 84(1): 1~10.

The research on 3D evaluation index system of geological suitability for urban underground space development and utilization

XING Huaixue¹⁾, DOU Fanfan²⁾, GE Weiya¹⁾, HUA Jian¹⁾, CHANG Xiaojun¹⁾, CAI Xiaohu¹⁾

1) Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing, 210016;

2) Hefei University of Technology, Hefei, 230009

Objectives: 3D geological suitability evaluation for urban underground space (UUS) is an important method for the rational development of UUS and reducing the geological risk of development, and it is also a current research hotspot. As an important part of the whole process of 3D geological suitability evaluation, scientific and

reasonable establishment of 3D evaluation index system is the premise basis for this.

Methods: By combining with the geological problems faced by the development of UUS in Hangzhou, based on the systematic analysis for the characteristics of the impact of each evaluation index on the development and construction of UUS, a 3D evaluation index system with multi-level structure is constructed in three dimension from the 3D structure of the stratum and other aspects. The analytic hierarchy process (AHP) is used to calculate the object weight, consistency test, sort and analysis of the evaluation index.

Results: The 3D evaluation index system can be divided into 5 criterion layers and 21 index layers. Compared with the 2D evaluation index system, more evaluation factors can be considered in the evaluation process by integrating 3D geological model and 3D spatial analysis method. The complex 3D geological environment can be better described, which enriches the connotation of 3D evaluation results.

Conclusions: The application results of 3D geological evaluation for Qianjiang New Town in Hangzhou based on fuzzy comprehensive evaluation method show that the 3D evaluation index system provides strong guidance for the integration of 3D geological model and 3D spatial analysis method. It also provides strong support for improving the precision and accuracy of UUS geological suitability evaluation in three dimension.

Keywords: underground space development and utilization; geological suitability evaluation; 3D evaluation index system; Qianjiang new town

Acknowledgements: This article was supported by the Project of the China Geological Survey (No. DD20190281)

First author: XING Huaixue, male, born in 1981, Senior engineer, mainly engaged in urban geological survey research; Email: 57670204@qq.com

Manuscript received on: 2021-08-17; Accepted on: 2022-01-17; Network published on: 2022-02-20

Doi: 10. 16509/j. georeview. 2022. 02. 011

Edited by: LIU Zhiqiang

