

DOI: 10.16788/j.hddz.32-1865/P.2021.02.003

引用格式:田聪,苏晶文,倪化勇,等.城市地下空间资源评价进展与展望[J].华东地质,2021,42(2):147-156.

## 城市地下空间资源评价进展与展望

田聪<sup>1,2,3</sup>,苏晶文<sup>3,4</sup>,倪化勇<sup>3,4</sup>,王睿<sup>3,4</sup>

- (1.中国地质科学院,北京 100037;2.中国地质大学(北京),北京 100083;  
3.中国地质调查局南京地质调查中心,江苏 南京 210016;  
4.自然资源部城市地下空间探测评价工程技术创新中心,江苏 南京 210016)

**摘要:**城市地下空间利用是拓展城市发展空间、优化城市空间布局、解决城市问题、提高城市治理能力及实现城市高质量发展的有效途径之一,对地下空间资源进行全面评价是保障地下空间安全利用的前提。文章系统分析了城市地下空间的资源属性及评价现状,梳理了目前主要的城市地下空间资源评价方法及其在不同城市的应用进展。当前,城市地下空间资源评价主要采用层次分析法和专家打分法对评价指标权重赋值,对地下空间资源开发利用的适宜性、资源容量、质量、价值及潜力进行评估,特点是评价目的多样、内容广泛、指标选取各具特色,存在的问题主要是权重赋值主观性强、评价模型不完善等。在对城市地下空间资源评价现状分析的基础上,从地下多种资源协同评价、全空间三维评价、地质环境响应评价三方面分析了城市地下空间资源评价的发展趋势,这对城市地下空间资源评价及开发利用具有一定的参考价值。

**关键词:**城市地下空间;地下空间资源;评价方法;研究进展;发展趋势

**中图分类号:** TU984.113

**文献标识码:** A

**文章编号:** 2096-1871(2021)02-147-10

地下空间是与领土、领空、领海并列的战略性地缘空间资源、经济资源和战备资源,是潜在丰富的自然资源<sup>[1-3]</sup>。21世纪是人类地下空间开发利用的年代<sup>[4]</sup>,城市发展空间由地面及其上部空间向地下空间延伸,是世界城市发展的趋势。随着我国城市化进程的加快,交通拥挤、环境污染、空间紧张等城市问题凸显,开发利用地下空间资源是提高城市容量、缓解城市交通、改善城市环境的重要途径<sup>[5-8]</sup>。地下空间开发进入快速发展时期,“十三五”期间,我国城市地下空间建筑面积达10.7亿m<sup>2</sup>。目前,城市地下空间开发利用缺少规划性控制和引导,出现了“先用先占、浅层挤满、开发无序、资源浪费”等

现象,使后续开发利用成本上升、风险增加<sup>[9-10]</sup>。

对地下空间资源进行全面评价是科学规划、有序开发利用地下空间资源的基础,是地下空间研究领域的热点。尽管一些学者结合城市特点及发展需求,探索并建立了城市地下空间资源开发利用适宜性、资源质量、开发潜力等方面的评价指标体系和评价模型,但总体上城市地下空间资源评价还处于探索和起步阶段。本文通过系统梳理国内外城市地下空间资源评价目的、内容、方法和城市地下空间资源的属性,分析了城市地下空间资源评价的研究进展和发展趋势,为城市地下空间资源评价及开发利用提供参考。

\* 收稿日期:2020-10-29 修订日期:2021-01-03 责任编辑:谭桂丽

**基金项目:**国家重点研发计划课题“城市地下全要素信息集成与智能建模技术(编号:2019YFC0605102)”、中国地质调查局“皖江城市群综合地质调查(编号:DD20190261)”和国家自然科学基金“城市地下空间资源多尺度三维动态评价的模型与方法研究(编号:42071256)”项目联合资助。

**第一作者简介:**田聪,1991年生,男,硕士研究生,主要从事城市地质调查及地下空间评价工作。Email:158790742@qq.com。

**通信作者简介:**苏晶文,1979年生,女,教授级高级工程师,主要从事环境地质调查、城市地质调查及地下空间探测评价工作。Email:sujw@mail.cgs.gov.cn。

## 1 城市地下空间资源属性

城市地下空间指城市行政区内地表以下自然形成或人工开发的空空间,是地面空间的延伸和补充<sup>[11]</sup>,一般以人防工程、轨道交通、地下综合体等为主。城市地下空间资源指城市区域内自然或人工开挖及未开拓的且在一定技术条件下可以开发利用的资源<sup>[1]</sup>。一些学者认为城市地下空间资源既包括空间和位置,也包括地下水、地热能、地质材料等<sup>[12]</sup>。程光华等<sup>[13]</sup>认为在开发地下空间时,识别、评价与其共生的其他

地下资源禀赋和相互作用模式、协同利用地下多种资源是未来地下空间开发的趋势。

与地上空间相比,地下空间资源既有地域性、稀缺性、多用性及价值属性等共性,也有密闭性、稳定性、非再生性和不可逆性等特性<sup>[12,14-15]</sup>(表1)。地质环境是地下空间开发利用的基础,决定地下空间开发利用的适宜性和约束性,同时地下空间开发利用也影响地质环境。因此,除了资源属性外,地下空间还具有环境属性,不合理的开发利用将导致严重的环境问题。

表1 城市地下空间资源属性统计结果

Table 1 Statistical results of urban underground space resource attributes

共性		特性	
稀缺性	资源总量及可开发利用量有限	不可逆性	地下空间一旦开发利用,则不可恢复原状
地域性	自然条件、社会经济条件不同,地下空间资源分布、储量及开发潜力不同	非再生性	浅层可再生性极差、深层不可再生性
多用性	多种开发方式、空间形式及利用功能	密闭性	空间和环境封闭,与自然景观隔绝
价值属性	具有与土地资源相似的价值属性	稳定性	温度、湿度方面稳定,抗灾能力强

## 2 研究进展

城市地下空间既有自然资源属性,也具有社会经济属性,因此,城市地下空间资源评价涉及面广、综合性强,是一个系统、综合的理论体系和调查研究过程,是在对水文地质条件、工程地质条件、环境地质条件等自然条件和区位、交通、GDP及地下空间开发利用现状等社会经济条件等分析和研究的基础上,对地下空间资源进行的总体判断。

### 2.1 评价内容

由国内外地下空间资源评价研究现状可知,根据服务城市规划、工程设计开发等不同目的,评价内容主要包括地下空间资源开发利用的适宜性、资源容量、质量、开发价值及开发潜力等。

童林旭等<sup>[16]</sup>建立了地下空间资源评估的内容和体系,将地下空间资源评价概括为地下空间资源容量、质量、开发潜力评估、开发利用适宜性以及效益评价等。地下空间资源的容量即空间资源占用的体积,包括地下空间资源的天然蕴藏量、可供合理开发的潜在蕴藏量、可有效利用的潜在蕴藏量。地下空间资源质量是评价地下空间资源开发利用工程难易程度和潜在开发价值的综合评价指标,包括地下空间资源开

发利用适宜性评价、潜在价值评价和综合质量评价。地下空间资源潜力是一个综合性评价,指地下空间资源潜在可供应容量和可开发价值的总和<sup>[17]</sup>。地下空间适宜性评价指对地质、水文、地形及地下空间开发利用现状等分析和研究的基础上,总体判断地下空间开发利用工程难度,并据此确定可开发资源的分布情况<sup>[18]</sup>。

国内很多城市开展了不同内容的地下空间资源评价(表2),王海刚等<sup>[19]</sup>、吴立新等<sup>[20]</sup>对北京市地下空间资源进行了综合质量评价,郭建民等<sup>[21]</sup>、汪侠等<sup>[22]</sup>分别对北京市、南京市地下空间资源开发利用的潜力进行了评价,张平等<sup>[23]</sup>构建了扬州老城区历史街区地下空间资源质量评价体系。地质适宜性评价服务于城市地下空间总体规划,是目前地下空间资源评价的重点。国外一些学者也高度关注城市地下空间资源评价,STERLING R L等<sup>[24]</sup>总结了美国明尼阿波利斯-圣保罗市可开发利用资源分布范围和适宜开发利用形式;ZHAO J等<sup>[25]</sup>对新加坡地下空间规划和选址进行了评价;BOBYLEV N<sup>[26]</sup>以德国柏林压力山大广场为例研究地下空间利用的指标量化问题;YOUSSEF A M等<sup>[27]</sup>等开展了地下空间资源开发利用工程地质条

件适宜性评价,识别潜在的工程地质灾害对地下工程的影响;NEZARAT H 等<sup>[28]</sup>以风险可能性、风险影响、风险应对能力为评价指标对伊朗伊斯法罕西北地

区地下隧道工程施工的风险等级进行评价;DOYLE M R<sup>[29]</sup>以德克萨斯州圣安东尼奥市为例对尚未开发的地下资源进行评估,得到各个资源潜力图。

表 2 国内主要城市地下空间资源评价内容、指标和方法

Table 2 Content, index and method of underground space resources evaluation of major cities in China

城市	内容	指标	定权方法	评价数学模型	参考文献
北京	综合质量评价	水文地质、工程地质、地质灾害、地形地貌、社会经济、特殊用地、现状利用等	层次分析法	多因素权重指标函数法	[19]
	潜在价值评价	人口、交通、市政设施、城市防灾、历史保护、城市空间状况	层次分析法	多目标线性加权函数法	[21]
	资源质量评价	工程地质、水文地质、岩土体条件、地上地下空间条件	层次分析法	模糊综合评判法	[20]
上海	适宜性评价	地形地貌、工程地质、水文地质、环境地质、地震地质、地下空间开发利用现状	层次分析法 专家打分法	多目标线性加权函数法	[30]
	开发价值评价	环境地质条件、地下空间条件、工程施工技术、地理位置、开发利用风险、经济效益、社会效益、环境效益、政策相容性	层次分析法	多目标线性加权函数法	[31]
	适宜性评价	地形地貌、工程地质、水文地质、场地稳定性、地下空间现状、地面空间现状	层次分析法	层次分析法	[18]
武汉	地质适宜性评价	地质构造、第四系地层、地下水、不良地质作用与特殊性岩土	层次分析法	灰色评估法	[32]
	地质适宜性评价	岩土工程性质、地质构造、地形地貌、水文地质、不良地质作用	梯形模糊数定权法	模糊综合评判法	[33]
南京	开发潜力评价	自然条件、地面及地下空间条件、地理位置、经济条件、开发效益、政策相容性	层次分析法	灰色评价法	[22]
	开发潜力评价	自然条件、地面及地下空间条件、地理位置、经济条件、开发效益	专家打分法	模糊综合评价法	[34]
哈尔滨	适宜性评价	工程地质(地形地貌、地质构造、岩土性质)、水文地质(水质、埋深)、开发深度	层次分析法	多因素权重指标函数法	[35]
济南	地质环境适宜性评价	水文及水文地质条件、工程地质条件、环境地质条件、地面及地下空间条件	层次分析法 专家打分法	模糊综合评判法	[36]
	地质适宜性评价	地形地貌、岩土体条件(软土、湿陷性黄土)、水文地质条件、构造地质条件、不良地质作用、敏感因子(泉)	层次分析法	线性多目标加权函数	[37]
郑州	开发潜力评价	工程水文地质条件、地域位置条件、已有地下空间资源、开发对 GDP 的影响、各区环境承载力与改善能力、政府投资强度与相关政策、公众参与性、企业技术水平	熵权法	可拓法	[38]
	地质适宜性评价	构造地质(地震震级、地震烈度等)、工程地质(岩性组合、软土厚度、基岩埋深等)、水文地质(地下水埋深、腐蚀性、富水性)、环境地质(地面沉降速率)	层次分析法	综合指数法	[39]
苏州	综合价值评价	工程地质条件、水文地质条件、地形地貌、环境因素(生态文物保护、已有地下建筑等)、社会经济条件(区位人口状况、交通状况、商业地价等)	层次分析法	多目标线性加权函数	[40]
	地质环境因素评价	地形地貌、建筑场地类型、不良岩土体条件、水文地质、地质灾害	层次分析法 专家打分法	多目标线性加权函数	[41]
	地质适宜性评价	地形地貌、不良岩土体、建筑场地类型、水文条件、地质灾害	层次分析法 专家打分法	多目标线性加权函数	[42]

续表 2

城市	内容	指标	定权方法	评价数学模型	参考文献
宁波	地质环境适宜性评价	水文地质条件(潜水位、含水层厚度、渗透性能)、工程地质条件(软土厚度、土质均匀性、地层组合等)、环境地质问题(地面沉降危险性、基坑突涌可能性)	层次分析法	模糊综合评判法	[43]
	地质环境适宜性评价	岩土体特征、水文地质、环境地质、经济技术	层次分析法	模糊综合评判法	[44]
南宁	地质适宜性评价	地质构造、地形地貌、岩土体特征、水文地质、地质灾害与环境地质	层次分析法	模糊综合评判法	[45]
	适宜性评价	岩土体特征、地下水、区域稳定性、灾害易发性、特殊地质条件、已开发地下空间	层次分析法	GIS 加权叠加	[46]
成都	潜力评价	工程地质、地质构造、水文地质、环境地质、地形地貌、人均 GDP、地下空间开发对 GDP 影响程度、基础设施建设改善水平、政府参与度、企业开发地下空间的技术水平、公众参与度	主成分分析法	可拓法	[47]
	地质适宜性评价	水文地质条件(地下水位、地下水污染指数、含水层渗透性)、岩土体特征(土体承载力、土体压缩系数、岩体承载力等)、不良地质作用(地面变形、边坡失稳等)	层次分析法	模糊综合评判法	[48]
天津	适宜性评价	构造稳定性、工程地质条件、水文地质条件、地面沉降、地面及地下空间条件	层次分析法 专家打分法	模糊综合评判法	[49]
	地质适宜性评价	地形地貌、水文、工程地质、水文地质、不良地质作用和地质灾害、活动断裂和地震效应	层次分析法	多因素权重 指标函数法	[50]
	适宜性评价	构造稳定性、工程地质条件、水文地质条件、地面沉降、地面及地下条件	专家打分法	模糊综合评判法	[51]
长沙	地质适宜性评价	不良地质作用、岩土体类型及组合特征、水文地质条件、地质构造、地形地貌	层次分析法	综合指数法	[52]
	适宜性评价	城市条件(区位、规模、人口)、自然条件(构造、地形地貌、水文地质、岩土体条件)、区位条件(地下空间现状、地面条件、交通条件)、经济技术条件	求和法	加权平均法	[53]
合肥	质量评价	岩土体特征、水文地质条件、地壳稳定性、地面空间及地下条件	层次分析法	模糊综合评判法	[54]
雄安新区	适宜性评价	地形地貌(地貌类型、自然高程)、水文地质条件(水位埋深、腐蚀性等)、敏感因子(活动断裂、滑坡地震)、地质构造条件(地基承载力、断层)、不良地质作用(砂土液化、地面沉降)	层次分析法	综合指数法	[55]

## 2.2 评价指标体系

城市地下空间资源评价指标体系是在对城市自然条件、社会经济条件充分掌握和分析的基础上建立的,不同的城市、不同的评价内容,其评价指标的选取存在着一定的差异。开发适宜性评价指标的选取,不仅要考虑地下自然条件和建筑条件的影响,还要考虑地面的建筑条件的影响。地下空间资源质量包含开发适宜性、工程难易程度、开发价值等,根据具体的评价内容,其评价指标的选取存在一定的差异性。城市地下空间开发潜力是一个综合指标,在全面考虑城市地下空间资源开发利用自然条件、社会经济条件的基础上,重点强调社会、经

济效益的影响。

### 2.2.1 适宜性评价指标体系

进行地下空间开发利用适宜性评价时,国内外学者大多从工程地质安全方面考虑,选取约束性要素建立地下空间开发利用适宜评价指标体系。STERLING R L 等<sup>[24]</sup>以地质条件、岩土层分布、水文地质条件、地形坡度、已建地下管线、地下建筑和地上建筑为评价指标,构建了明尼阿波利斯—圣保罗市地下空间适宜性评价体系;ZHAO J 等<sup>[25]</sup>将地质条件、水文地质条件、环境、心理、地面发展、社会、经济及政治因素作为评估指标,构建了新加坡地下建筑适宜性评价体系;官善友等<sup>[32]</sup>以地质构造、第四系、地下水、不良地质作用与特殊岩土体为

影响因素,对武汉市地下空间开发地质条件影响分区进行评价;江思义等<sup>[46]</sup>以岩土体特征、地下水情况、区域地壳稳定性、地质灾害易发性、特殊地质条件、地面建筑物及浅部已开发地下空间等为评价因素,构建了南宁市城市地下空间开发适宜性评价体系;张璐等<sup>[56]</sup>重点考虑地形地貌、地层岩性、工程地质、水文地质和地质构造等指标进行地下空间适宜性评价;谭飞等<sup>[57]</sup>强调了对地下结构类型和开挖方式的评价。

### 2.2.2 质量评价指标体系

学者们进行地下空间资源质量评价时,充分考虑了地下空间资源的自然、区位、经济、工程技术条件等因素。王海刚等<sup>[19]</sup>以工程地质、水文地质等为评价指标和土地利用、地铁站域等为评价指标分别对北京市房山区地下空间开发难易程度和潜在开发价值进行评估,并将评估结果综合后得到房山区地下空间资源综合质量;张平等<sup>[23]</sup>以文物保护、地面及地下空间、地域位置、工程地质、水文地质及工程技术条件为评价因素,构建了扬州老城区历史街区地下空间资源质量评价体系;陈吉祥等<sup>[31]</sup>考虑了经济、社会及环境效益以及政策相容性等评价指标对上海市地下空间开发价值进行了评价。

### 2.2.3 开发潜力评价指标体系

汪侠等<sup>[22]</sup>以自然条件、地面及地下空间条件、地理位置条件、经济条件、开发效益为评价因素,构建了南京市鼓楼区地下空间资源潜力评价体系;胡宁<sup>[38]</sup>以地质条件、区位条件、已开发地下空间、地下空间开发对 GDP 的影响、各区环境承载力与改善能力、政府投资强度与相关政策、公众参与性、企业技术水平等为评价因素,构建了郑州市地下空间资源开发潜力的评价指标体系;郑强<sup>[47]</sup>在对成都地下空间资源开发潜力评价中充分考虑了社会经济的影响,包括人均 GDP、地下空间开发对 GDP 的影响、基础设施建设水平、政府与公众的参与度、企业开发地下空间的技术水平等。

## 2.3 评价方法

祝文君等<sup>[58]</sup>完成的“北京旧城区浅层地下空间资源调查与利用现状研究”,建立了国内第一个地下空间资源调查的模型和基本概念体系。目前,已有数十个城市采用不同的评价方法,完成了地下空间资源容量、质量、价值、开发潜力以及适宜性等方面的科学评价(表 2)。

### 2.3.1 评价指标赋权

城市地下空间资源评价中,评价指标权重的科学、合理赋值对评价结果具有较大影响。目前,国内主要采用专家打分法和层次分析法(AHP)对城市地下空间资源评价指标进行权重赋值。由表 2 可知,近 80%的专家、学者采用层次分析法对指标权重赋值,例如,欧孝夺等<sup>[45]</sup>采用层次分析法对南宁市城市地下空间开发地质环境适宜性评价指标赋值;汪侠等<sup>[22]</sup>采用多层次灰色评价法对南京市鼓楼区 5 个街道的开发潜力评价指标进行赋值。近 20%的专家、学者通过专家打分法(或与层次分析法结合)确定评价指标的权重,例如,曹亮<sup>[59]</sup>采用专家打分法和改进的层次分析法对苏州市地形地貌、建筑场地类型、不良岩土体条件、水文地质条件、地质灾害等评价指标赋权重;郭建民等<sup>[21]</sup>通过最优传递矩阵对 AHP 法进行优化,实现了基于专家打分法的指标权重赋值;吴文博等<sup>[41]</sup>结合层次分析法的两两对比矩阵和专家打分法,对苏州地下空间资源质量的评价指标进行赋权。此外,一些学者采用熵权法、梯形模糊数学定权法、主成分分析法等对评价指标权重进行赋值,例如,姜云等<sup>[60]</sup>通过熵权法和可变模糊集组合确定城市地下空间资源质量评价指标权重;郑强<sup>[47]</sup>采用主成分分析法对评价指标进行赋权,进而对成都城市地下空间资源潜力进行评价。

### 2.3.2 评价数学模型

目前,多目标线性加权函数法、模糊综合评判法、灰色评估法、可拓法、多层次加权平均型模糊数学综合法、可变模糊集组合法等广泛应用于城市地下空间资源评价,其中采用多目标线性加权函数法、模糊综合评判法进行评价和建模较多,例如,一些专家<sup>[21,30,37,40,41-42]</sup>建立了基于多目标线性加权函数的评价数学模型,分别开展了北京、上海、济南、苏州等城市地下空间资源评价,评价内容涵盖北京和苏州等城市地下空间资源潜在价值、上海和济南等城市地下空间资源开发利用适宜性。另一些专家<sup>[20,33,36,43-45,48-49,51,54]</sup>采用模糊综合评判法构建评价指标隶属函数和评价模型分别评价了北京、南京、合肥等城市地下空间资源质量或潜力以及武汉、济南、宁波、南宁、成都、天津、无锡等城市地下空间资源开发利用适宜性。此外,胡宁<sup>[38]</sup>采用基于可拓法的评价模型对郑州市 USR 开发潜力进行初步评价;赵旭东等<sup>[61]</sup>采用多层次加权平均型模糊数学综

合评价方法构建了历史文化街区地下空间资源质量评价模型,实现了扬州古城区地下空间资源质量的模糊综合评价。

### 3 讨论

#### 3.1 评价目的

地下空间资源评价是城市空间规划的基础,其主旨是为国土空间规划、合理开发服务,科学编制城市地下空间开发利用规划,实现对地下空间的统一规划、系统开发和整体保护。地下空间资源评价的目的和目标各有不同,针对城市规划的不同阶段——城市总体规划、区域规划、详细规划和小范围局部地区规划,对城市总体范围内和局部地段地下空间资源适宜性、质量和潜力进行不同尺度的定性、定量评价。① 城市地下空间资源适宜性评价的目的是充分利用有利的地质环境条件,有效改造和规避不利的地质环境条件,保证地质环境良性发展,为城市规划部门进行地下空间开发利用总体布局及场地工程建设前期规划提供依据。② 城市地下空间资源质量评价是开发难易程度和开发价值的综合评价,评价指标包含自然因素和社会经济因素,着重强调地下空间开发工程技术问题,为地下工程选址和施工工艺的选择提供依据。③ 城市地下空间资源开发潜力评价是可利用资源量和潜在开发价值的综合评价,着重考虑各评价指标对地下空间的影响范围及城市未来经济发展情况,主要应用于城市地下空间开发的总体规划和远景规划。

#### 3.2 评价内容

城市地下空间资源评价已建立较完整、系统的评价内容,初步形成了评价框架体系。国内外城市地下空间资源评价内容主要存在3个问题:① 根据城市地下空间规划的不同阶段,地下空间资源评价的内容不同,总体规划或前期规划以地下工程适宜性评价为主,详细规划拓展为地下空间资源质量、潜力评价及环境效应评价。目前,城市地下空间资源评价内容以适宜性评价为主,对地下空间资源量、质量、潜力、价值等评价相对较少,评价结果不能更好地服务城市地下空间深度规划。② 根据上述地下空间资源属性特征,地下空间赋存多种自然资源,不同资源协同性评价及开发、保护优先性和时序性的评价很少涉及。③ 城市地下空间资源开发利用必将对地下水、岩土体、应力场等地质环境

产生影响,但目前评价多以地质条件对地下空间开发利用影响评价为主,对地下空间开发利用的地质环境效应评价较少。

#### 3.3 评价方法

结合不同城市的评价内容,针对城市地下空间资源评价指标的选取、赋权和模型等进行研究和实践,并具有一定的创造性。然而,评价指标体系和评价方法还存在以下问题:① 评价要素不全,难以满足选取评价指标的要求。② 地下空间资源评价指标体系错综复杂,没有达成统一标准,存在明显的区域差异性和人为主观性,评价指标选取时,不同指标相互影响及地下空间开发利用与地质环境之间相互影响考虑不足。③ 评价方法较单一,主观性强,主要采用层次分析法、专家打分法等主观赋权法确定评价指标权重,熵权法、主成分分析法、变异系数法<sup>[62]</sup>、粗糙集理论<sup>[63]</sup>等客观赋权法应用较少,评价数学模型所得结果不能实现城市地下空间资源多要素的量化评价。④ 赋权的区域差异性体现不突出。指标赋权时,除了考虑方法的合理性外,还应考虑不同分区、不同层位、不同对象等,不同地区、不同层位指标的影响或控制作用可能发生变化,如地下水和断层对地下空间开发利用影响具有明显的垂向差异。⑤ 地下空间三维评价模型较简单,地下流场、热场、应力场以及不同地质体、地质资源、地下工程等三维集成和科学展示以及属性建模、空间插值和自动动态更新等技术尚有不少问题未解决。

### 4 发展趋势

城市地下空间资源作为拓展城市发展空间、优化城市发展布局、提高城市质量的战略性资源,其开发利用必将迎来跨越式发展。综合城市地下空间资源评价现状、存在问题及地下空间资源开发利用需求,多参数表征、多方法验证、多维度展示、多模型评价、多资源协同将是城市地下空间资源评价的发展趋势。针对评价指标筛选与量化、指标赋权、评价模型及地层结构可视化等发展趋势,众多学者<sup>[20,57,60,64-66]</sup>进行了系统研究,本文重点分析地下多种资源协同评价、全空间三维评价、地质环境影响评价等发展趋势。

#### 4.1 地下多资源协同评价

城市地下空间地热资源、优质地下水资源、地

下文物古迹资源及关键矿产资源、材料资源等在优先保护及利用方面存在空间、时序方面的冲突,在地下空间规划和开发利用过程中,如果认识不清、评价不当,将导致资源的浪费或破坏,地下空间资源利用的效能难以实现最大化。因此,地下空间多资源协同开发利用将成为地下空间资源综合评价的重要内容。结合不同资源类型、资源量、空间分布、开发利用地质条件、潜在经济价值、生态环境效应和开发利用技术可行性,分区分层评价,提出优先开发或优先保护的资源,从而为城市地下空间资源开发利用的规划、实施提供全面技术支撑和决策依据。LI X Z 等<sup>[67]</sup>讨论了在城市发展中,不同地下资源之间开发利用存在的冲突模式,明确这些冲突是地下空间资源开发协调和协同的基础,对地下空间资源多样性进行识别和科学评价,可以推进城市可持续发展;王东辉等<sup>[68]</sup>对成都地下空间资源开展了探索性综合评价,对不同优质地下资源进行分区分层评价,提出了西部平原区 40~100 m 以下第四系含泥砂砾石层、东部台地区 50~80 m 以下夹关组厚砂岩层为优质含水层的认识,地下空间利用需统筹保护含水层顶底板以及郫都、犀浦一带和三圣乡—十陵镇一带锶、偏硅酸优质饮用天然矿泉水水源地保护,成都地下空间资源评价具有一定的启发性,呈现地下多资源评价与协同保护利用的思路、方法和意义。

#### 4.2 地下全空间三维评价

地下空间开发利用过程中,分散、孤立的地下工程容易将整体的地下空间资源分割,造成不同层位之间或不同地下工程之间地下空间资源碎片化、小型化,为进一步开发利用增加了难度,造成地下空间资源的极大浪费。上海陆家嘴地区由于早期缺乏统一规划,各地块地下空间开发各自为政,形成了诸多地下空间“孤岛”,导致地铁 2 号线陆家嘴地铁站未能与周边建筑建立地下联系,也没有为未来连通预留接口。因此,城市地下空间资源评价要尽可能做到全空间评价、多维度展示,评价深度要突破 30~60 m 深度,提高评价精度,充分利用计算机软件技术进行三维地质模型的建立和透明化表达,立体直观地展示地质界面和地质体的空间位置、形态、关系、岩土体的属性特征以及地下流场、热场、应力场的耦合关系,结合地下空间资源类型和开发利用方式最终实现地下百米深度范围内全

空间、多维度立体评价和透明可视化展示。薛涛等<sup>[69]</sup>对上海市地下空间进行适宜性评价,建立三维地质结构模型和属性模型,定性和定量分析地下空间开发利用适宜性,考虑桩基、地铁隧道、地下管网等因素,建立地下构筑物模型与地质模型相融合进行地下空间透明、立体式评价。

#### 4.3 地下空间开发与地质环境响应评价

目前,城市地下空间资源评价主要是评价地质条件对地下空间开发利用的影响,而城市地下空间资源开发利用必将对地质环境造成改变,产生影响甚至导致灾害发生。在人类活动和自然因素作用下,城市地下空间资源与地质环境的耦合关系呈动态变化。因此,地下空间开发与地质环境响应评价是模拟预测性评价,模拟某项功能开发后地质环境产生的变化规律和趋势,是智能动态过程。在地下空间开发过程中,掌握评价指标随地质环境变化规律和评价指标互不相同的属性特征,充分利用大数据、人工智能、机器深度学习等先进技术进行多模型相互融合,逐步破除三维动态评价与自适应多要素属性建模技术瓶颈,实现地下空间资源属性建模与四维时空演化动态刻画,全面反映地下空间开发利用与地下流场、热场、应力场的动态响应与演化,从而为地下空间资源科学规划、安全协同利用实时提供技术支撑和决策依据。

### 5 结论

(1)目前,采用层次分析法、模糊综合评判法和灰色评估法等从不同角度、不同尺度开展了城市地下空间资源评价工作,研究重点是评价指标的选取和赋权,取得了很大的成绩,但在整个评价体系中仍然存在目的不明确、权重赋值主观性强、评价模型不完善等问题。

(2)综合城市地下空间资源评价现状、存在的问题以及地下空间资源开发利用需求,多参数表征、多方法验证、多维度展示、多模型评价、多资源协同、智能动态评价等将成为城市地下空间资源评价的重要发展趋势。深化城市地质调查以及地下空间开发利用与地质环境响应研究,加强大数据、人工智能、机器深度学习等先进技术的应用和动态属性模型、评价系统研发,尽快编制出台相关技术

标准等是地下空间资源科学评价、规划和安全高效利用的基础与保障。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] 钱七虎.城市可持续发展与地下空间开发利用[J].地下空间与工程学报,1998,18(2):69-74.
- [3] 朱大明.“地下空间学”学科体系引论[J].地下空间与工程学报,2011,7(4):619-627.
- [4] 李寅君.鞍山市地下空间开发与利用的管理模式研究[D].沈阳:沈阳建筑大学,2012.
- [5] 朱合华,骆晓,彭芳乐,等.我国城市地下空间规划发展战略研究[J].中国工程科学,2017,19(6):12-17.
- [6] 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.
- [7] 油新华,何光尧,王强勋,等.我国城市地下空间利用现状及发展趋势[J].隧道建设,2019,39(2):173-188.
- [8] 张彬,徐能雄,戴春森.国际城市地下空间开发利用现状、趋势与启示[J].地学前缘,2019,26(3):48-56.
- [9] 刘俊,罗捷.城市地下空间开发利用存在的问题与对策研究[J].四川建筑,2015,35(5):10-11.
- [10] 朱合华,丁文其,乔亚飞,等.简析我国城市地下空间开发利用的问题与挑战[J].地学前缘,2019,26(3):22-31.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部.GB/T 51358—2019城市地下空间规划标准[S].北京:中国计划出版社,2017:1-21.
- [12] 黄莉,王直民,鲍海君,等.城市地下空间的资源属性与开发特性分析[J].上海国土资源,2018,39(2):37-40.
- [13] 程光华,王睿,赵牧华,等.国内城市地下空间开发利用现状与发展趋势[J].地学前缘,2019,26(3):39-47.
- [14] 郑桂森,王继明,何静,等.地下空间资源的属性特征[J].城市地质,2017,12(4):1-5.
- [15] 王波.城市地下空间开发利用问题的探索与实践[D].北京:中国地质大学(北京),2013.
- [16] 童林旭,祝文君.城市地下空间资源评估与开发利用规划[M].北京:中国建筑工业出版社,2009:8-9.
- [17] 赵景伟,张晓玮.现代城市地下空间开发:需求、控制、规划与设计[M].北京:清华大学出版社,2016:68-69.
- [18] 柳昆,彭建,彭芳乐.地下空间资源开发利用适宜性评价模型[J].地下空间与工程学报,2011,7(2):219-231.
- [19] 王海刚,贾三满,杨艳,等.基于GIS的城市地下空间资源综合质量评估研究[J].上海国土资源,2011,32(1):59-62.
- [20] 吴立新,姜云,车德福,等.城市地下空间资源质量模糊综合评估与3D可视化[J].中国矿业大学学报,2007,36(1):97-102.
- [21] 郭建民,祝文君.基于层次分析法的地下空间资源潜在价值评估[J].地下空间与工程学报,2005,1(5):655-659.
- [22] 汪侠,黄贤金,甄峰,等.城市地下空间资源开发潜力的多层次灰色评价[J].同济大学学报:自然科学版,2009,37(8):1122-1127.
- [23] 张平,陈志龙.历史街区地下空间资源质量评估——以扬州老城区为例[J].城市规划,2012,36(11):29-32.
- [24] STERLING R L, NELSON S. Planning the development of underground space [J]. Underground Space, 1982, 7(2):86-103.
- [25] ZHAO J, CHOA V. Construction and Utilization of Rock Caverns in Singapore Part C: Planning and Location Selection [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1996, 11(1):81-84.
- [26] BOBYLEV N. Underground space in the Alexanderplatz area, Berlin: Research into the quantification of urban underground space use [J]. Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research, 2010, 25(5):495-507.
- [27] YOUSSEF A M, PRADHAN B, TARABEES E. Integrated evaluation of urban development suitability based on remote sensing and GIS techniques: contribution from the analytic hierarchy process [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2011, 4(3):463-473.
- [28] NEZARAT H, SERESHK F, ATAEI M. Ranking of geological risks in mechanized tunneling by using Fuzzy Analytical Hierarchy Process (FAHP) [J]. Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research, 2015, 50(8):358-364.
- [29] DOYLE M R. From hydro/geology to the streetscape: Evaluating urban underground resource potential [J]. Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research, 2015, 55(5):83-95.
- [30] 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.
- [31] 陈吉祥,白云,刘志,等.上海市深层地下空间资源评估研究[J].现代隧道技术,2018,55(增刊):1243-1254.
- [32] 官善友,朱锐,高振宇.地质条件对武汉市地下空间开发的影响及分区评价[J].工程勘察,2008(9):6-10.
- [33] 潘朝,吴立,左清军,等.基于模糊数学的武汉市地下空间开发地质适宜性评价[J].安全与环境工程,2013,20

- (2):19-23.
- [34] 汪侠,黄贤金,汤晋. 城市地下空间资源开发潜力的模糊综合评价[J]. 北京工业大学学报,2010,36(2):213-218.
- [35] 张玉敏. 哈尔滨市核心城区三维工程地质结构及地下空间适宜性研究[D]. 长春:吉林大学,2012.
- [36] 徐军祥,秦品瑞,徐秋晓,等. 济南市地下空间资源开发地质环境适宜性评价[J]. 山东国土资源,2012,28(8):14-17.
- [37] 章梦霞. 三维视角下的城市地下空间开发地质适宜性评价研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2019.
- [38] 胡宁. 基于可拓法的城市地下空间开发利用潜力评价[D]. 成都:成都理工大学,2012.
- [39] 夏友,马传明. 郑州市地下空间资源开发利用地质适宜性评价[J]. 地下空间与工程学报,2014,10(3):493-497.
- [40] 周臻,吴文博,李晓昭. 基于 GIS 的苏州城市地下空间开发综合价值评价[J]. 中国水运,2013,13(12):86-88.
- [41] 吴文博,曹亮,刘健,等. 苏州地下空间开发地质环境因素的分析评价[J]. 防灾减灾工程学报,2013,33(2):131-139.
- [42] 刘健,魏永耀,高立,等. 苏州城市规划区地下空间开发适宜性评价[J]. 地质学刊,2014,38(1):94-97.
- [43] 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(增刊):16-21.
- [44] 胡学祥. 基于 ArcGIS 的宁波市地下空间地质环境评价及应用研究[D]. 宁波:宁波大学,2014.
- [45] 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.
- [46] 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.
- [47] 郑强. 城市地下空间开发潜力研究——以天府新区为例[D]. 成都:四川农业大学,2013.
- [48] 张晓彤. 成都市地下空间开发利用地质环境适宜性评价[D]. 北京:中国地质大学(北京),2016.
- [49] 王永立,沈健,齐波. 基于 GIS-Fuzzy 的地下空间资源评价[J]. 城市地质,2008,3(2):43-47.
- [50] 蒋旭,王婷婷,穆静. 地下空间开发利用适宜性与资源量的应用研究[J]. 地下空间与工程学报,2018,14(5):1145-1153.
- [51] 齐波,张一飞. 天津市中心城区地下空间资源开发利用适宜性评价探讨[J]. 城市地质,2010,5(2):1-5.
- [52] 徐定芳,何阳,范毅,等. 地下空间开发利用地质环境适宜性评价——以长株潭城市群核心区为例[J]. 矿业工程研究,2019,34(1):70-78.
- [53] 王振宇,朱太宜,王星华. 长沙城市地下空间开发利用的适宜性评价体系研究[J]. 铁道科学与工程学报,2019,16(5):1274-1281.
- [54] 杨大顺. 地下空间资源评价及基于 GIS 的可视化研究[D]. 邯郸:河北工程大学,2010.
- [55] 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.
- [56] 张璐,章广成,吴江鹏. 某城市地下空间开发利用适宜性评价[J]. 桂林理工大学学报,2014,34(3):488-494.
- [57] 谭飞,汪君,焦玉勇,等. 城市地下空间适宜性评价研究国内外现状及趋势[J/OL]. 地球科学,(2020-6-18)[2021-01-26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20200618.1440.006.html>.
- [58] 祝文君,童林旭. 北京旧城区浅层地下空间资源调查[C]//中国土木工程学会隧道与地下工程学会. 隧道及地下工程学会第七届年会暨北京西单地铁车站工程学术讨论会论文集. 北京:清华大学出版社,1992:377-382.
- [59] 曹亮. 城市地下空间开发的地质环境识别评价与建模研究[D]. 南京:南京大学,2012.
- [60] 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.
- [61] 赵旭东,张平,陈志龙. 历史文化街区地下空间资源质量模糊综合评估[J]. 地下空间与工程学报,2014,10(4):739-744.
- [62] 张运书,曾德凤,刘雅庆. 基于变异系数法的长江经济带绿色治理能力综合评价[J]. 山西师范大学学报:自然科学版,2019,33(4):56-60.
- [63] 陈舞,张国华,王浩,等. 基于粗糙集条件信息熵的山岭隧道坍塌风险评价[J]. 岩土力学,2019,40(9):3549-3558.
- [64] 周丹坤,李晓昭,常晓军,等. 基于 ArcGIS 的地下空间资源禀赋评价[J]. 城市地质,2019,14(3):14-20.
- [65] 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/OL]. 沉积与特提斯地质,(2020-11-20)[2021-01-26]. <https://doi.org/10.19826/j.cnki.1009-3850.2020.11004>.
- [66] 贾世平,李伍平. 城市地下空间资源评估研究综述[J]. 地下空间与工程学报,2008,4(3):397-401.
- [67] LI X Z, LI C C, AURELE, et al. Multiple resources and their sustainable development in Urban Underground Space[J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2016, 55(5):59-66.
- [68] 王东辉,倪化勇,李鹏岳,等. 城市地下空间资源综合利用实践——以成都市地质环境图集(2017)数据集为例[J]. 中国地质,2019,46(增刊):21-29.

[69] 薛涛,史玉金,朱小弟,等.城市地下空间资源评价三维建模方法研究与实践——以上海市为例[J/OL].地学

前缘,(2020-11-27)[2021-01-26].<https://doi.org/10.13745/j.esf.sf.2020.11.1>.

## Progress and prospect of urban underground space resources evaluation

TIAN Cong<sup>1,2,3</sup>,SU Jingwen<sup>3,4</sup>,NI Huayong<sup>3,4</sup>,WANG Rui<sup>3,4</sup>

(1. *Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China*; 2. *China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China*; 3. *Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, Jiangsu, China*; 4. *Urban Underground Space Exploration and Evaluation Engineering Technology Innovation Center, MNR, Nanjing 210016, Jiangsu, China*)

**Abstract:** Utilization of urban underground space resources (UUSR) is one of the most effective approaches to expand urban space, optimize urban structure, solve city problems, improve city management and achieve high-quality development. The comprehensive evaluation of underground space resources is the premise of ensuring the safety utilization of underground space. This paper systematically analyzes the resource attribute and evaluation status of UUSR, and sorts out the major evaluation methods of UUSR and the application progress in different cities. It shows that the current evaluation of UUSR mainly adopts analytic hierarchy process and expert scoring method to assign value to the evaluation indexes, and to evaluate the exploitation and utilization of suitability, resource capacity, quality, value and development potential of UUSR, which is characterized by various evaluation purposes, extensive content and distinctive indexes selection. However, there are also some problems, such as strong subjectivity of weight assignment, and imperfect evaluation model, etc. Based on the analysis of urban underground space resources evaluation, the trend of UUSR evaluation is analyzed from the perspectives of collaborative evaluation of various underground resources, three-dimensional evaluation of whole space, and response evaluation of geological environment, which could provide valuable reference for the UUSR evaluation and utilization.

**Key words:** urban underground space; underground space resources; evaluation method; research progress; development trend