

DOI:10.16788/j.hddz.32-1865/P.2022.02.012

引用格式:杨洋,王睿,赵牧华,等.城市地下空间资源探测评价技术体系研究[J].华东地质,2022,43(2):245-254.(YANG Y, WANG R, ZHAO M H, et al. Study on exploration and evaluation technology system of urban underground space resources [J]. East China Geology, 2022, 43(2):245-254.)

## 城市地下空间资源探测评价技术体系研究

杨洋<sup>1,2</sup>,王睿<sup>1,2</sup>,赵牧华<sup>1,2</sup>,邢怀学<sup>1,2</sup>,郑红军<sup>1,2</sup>,张庆<sup>1,2</sup>,  
陈春霞<sup>1,2</sup>,李云峰<sup>1,2</sup>,程光华<sup>1,2</sup>

(1.中国地质调查局南京地质调查中心,江苏南京 210016;

2.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:**城市地下空间资源开发利用在城市高质量发展中发挥着关键作用。通过梳理城市地下空间资源探测评价研究现状和面临的主要问题,提出建立城市地下空间资源探测评价技术体系的建议。突破传统地质工作理念,把城市地上、地面、地下一定深度国土空间作为整体,在立体、多维、多尺度、多介质空间下,认为城市地下空间资源全要素可分为全空间地理要素信息、全功能构筑物要素信息和全要素地质信息;通过空间地理测绘、钻探、地球物理探测、高光谱岩心扫描、分析测试等探测技术和三维动态建模技术,建立城市地下全空间地理信息数据库、全功能地下设施数据库和全要素地质信息数据库;通过城市地下空间资源要素评价和要素重要性评价,实现对城市地下多种地质资源协同开发评价和城市地下空间功能分层开发强度阈值评价。该文提出的全要素分类-全要素探测-全信息集成-全资源评价技术体系,可为城市地下空间资源开发利用全生命周期提供支撑。

**关键词:**城市地下空间资源;全要素;探测;评价;技术体系

**中图分类号:**TU984.11+3

**文献标识码:**A

**文章编号:**2096-1871(2022)02-245-10

党的“十九大”以来,我国进入生态文明建设和城市高质量发展的新时代。城市地下空间资源是城市地表以下可供城市发展的第二国土空间资源,开发利用城市地下空间资源不仅可以拓展城市发展空间、优化城市空间布局、提高土地利用效率及恢复地表生态环境,还可以防御自然灾害、改善居民生活条件、增强城市韧性、提升城市治理能力,在城市高质量发展中发挥着关键作用。但是,城市地下空间资源的大规模开发带来的负面效应也逐渐暴露,如地面塌陷、基坑突水、盾构机被埋、火灾等事故。此外,忽视地下地质结构的扰动、地下水流场和地下应力场的改变所诱发的生态环境问题,以及地面沉降等缓变地质灾害的滞后效应,将不可逆且不可恢复地影响城市整体安全。开展

城市地下空间资源探测评价是解决上述问题的重要基础,即查明城市地下地质条件、地下空间资源、既有地下空间开发现状,集成融合城市所有地下信息,形成地上、地面、地下立体透明城市,需要一套完整的城市地下空间资源探测评价技术体系支撑。

本文系统梳理了城市地下空间资源探测评价研究现状及面临的主要问题,提出全空间地理要素信息、全功能构筑物要素信息和全要素地质信息的城市地下空间资源全要素分类体系,构建城市地下空间资源全要素探测技术、信息集成技术和资源评价技术,为城市地下空间资源开发利用全生命周期提供探测评价技术体系支撑。

\* 收稿日期:2022-02-20 修订日期:2022-04-07 责任编辑:谭桂丽

**基金项目:**国家重点研发计划“城市地下空间精细探测技术与开发利用研究示范(编号:2019YFC0605100)”和江苏省地质矿产勘查局“基于地质环境要素的城市地下空间资源三维质量评价研究(编号:2019KY01)”项目联合资助。

**第一作者简介:**杨洋,1991年生,男,助理研究员,硕士,主要从事城市工程地质和地下空间评价研究工作。Email:yyang\_a@mail.cgs.gov.cn。

**通信作者简介:**程光华,1962年生,男,正高级工程师,学士,主要从事城市地下空间探测评价战略研究工作。Email:cgh7317@163.com。

## 1 城市地下空间资源探测评价技术研究现状

### 1.1 城市地下空间资源精细探测研究现状

城市地下空间资源精细探测是城市地下空间开发利用的基础,旨在查明城市地下空间地质信息和既有地下空间的开发利用情况等。目前,城市地下空间资源精细探测技术方法主要包括钻探和地球物理探测<sup>[1]</sup>。

钻探技术方面,根据地质调查任务分为基岩与松散层地质钻探、水文地质钻探、工程地质钻探和环境(灾害)地质钻探四类<sup>[2]</sup>,主要是揭示地层结构及其地质属性,支持建立三维地质结构模型<sup>[3]</sup>。其中最常使用的钻探技术包括回转钻探技术、潜孔锤钻探技术和反循环钻探技术。国际上,钻探技术朝着智能钻探与随钻测试方向发展,围绕钻探参数和岩石地层性质开展了大量理论与技术研究<sup>[4-6]</sup>。地球物理探测方面,主要采用高密度电法、浅层瞬变电磁法、探地雷达、浅层地震、微动、井间(地)层析成像等地球物理方法<sup>[7]</sup>。高密度电法主要应用于第四系结构和活动断裂等探测<sup>[8-9]</sup>;瞬变电磁法主要应用于探测地下管线、地下空间结构和城市岩溶等探测<sup>[10-12]</sup>;探地雷达主要应用于地下管线探测、不良地质体探测等方面<sup>[13-15]</sup>;浅层地震主要应用于提供地基基底的几何形状、地层结构(厚度和分界面位置)、断层位置与产状等有关信息<sup>[16]</sup>;微动方法主要应用于城市基岩破碎区等不良地质体探测和城市地下病害体探测<sup>[17-18]</sup>;井间(地)层析成像主要应用于城市破碎带、岩溶等探测<sup>[19-20]</sup>。国际上,日本、加拿大、新加坡等城市主要采用面波法、浅层地震反射法、地质雷达法、高密度电阻率成像法、测井及井中物探等地球物理探测方法开展城市地下空间资源探测<sup>[21]</sup>。在探测技术体系构建方面,程秀娟等<sup>[22]</sup>选取延安市作为黄土丘陵沟壑区的典型代表,建立了工程地质钻探、随钻监测、钻孔多参数地球物理测井的垂向地下空间探测技术方法体系;马岩等<sup>[8]</sup>在雄安新区核心区同一剖面上开展主动源面波法、微动探测法、浅层反射地震、高密度电阻率法、抗干扰电测深法、瞬变电磁法及多参数测井探测,提出了雄安新区开展城市地下空间探测的技术方法体系。

综上,国内外针对典型城市地下空间资源探测开展了探测技术方法优选、探测试验、示范,建立了相应的探测技术方法及技术方法组合,在一定程度上提高了城市地下空间资源探测能力与探测精度,对大规模的城市地下空间资源探测具有指导和借鉴意义。

### 1.2 城市地下空间资源评价研究现状

近年来,随着各大城市大规模开发利用地下空间,一些学者相继总结了城市地下空间资源评价研究工作<sup>[23-28]</sup>,主要聚焦评价的指标体系、权重赋值和数学模型 3 个方面。在评价指标方面,目前主要可分为地形地貌、建筑场地类别、不良岩土体条件、水文地质特征、地震地质灾害等要素指标,分别提出了城市地下空间资源质量、容量、适宜性、承载力、开发潜力和安全性等多种要素的评价指标<sup>[29-33]</sup>。在指标权重赋值方面,专家问卷调查法<sup>[29]</sup>、层次分析法(AHP)<sup>[30]</sup>、熵值法<sup>[34]</sup>等常被用于评价指标赋权。在评价数学模型方面,主要采用多目标线性加权函数<sup>[29]</sup>、模糊综合评判法<sup>[35]</sup>、多层次加权平均型模糊数学综合法<sup>[36]</sup>、可变模糊集组合法<sup>[37]</sup>等。近年来,越来越多的学者提出基于三维属性模型进行城市地下空间资源三维评价<sup>[38-41]</sup>,更直观地展示城市地下空间资源质量和分布情况。也有学者关注城市地下空间资源协同利用,提出基于系统动力学的城市地下空间资源协同利用评估方法<sup>[42]</sup>。国际上,对于城市地下空间资源评价还注重多资源耦合作用下的开发潜力<sup>[43]</sup>和经济价值评估<sup>[44]</sup>。

综上,国内外城市地下空间资源评价技术研究内容丰富,在城市地下空间资源开发利用适宜程度、经济价值、安全风险等方面均建立了相应的评价体系,为城市地下空间规划建设提供了一定的参考和依据。

## 2 城市地下空间资源探测评价面临的主要问题

### 2.1 探测技术领域面临的主要问题

目前,城市地下空间资源探测仍以钻探和地球物理探测为主,但城市复杂的环境和施工限制均制约了探测的精度和效率,现有的单一钻探和物探技术难以有效解决上述问题。虽然钻探取心工艺已

日渐成熟,但仍存在砾石层取心率较低、取心卡顿等问题,难以取得天然状态的高保真岩心。此外,浅层随钻测试技术尚不成熟,获取天然状态下的关键岩土体要素精度较低。现有地球物理探测技术在解译浅部地层信息的精度还不够,同时还面临城市复杂环境下的干扰问题(如城市不规则持续噪声、地下纵横交错的管网、密集的建筑及硬化路面等),这制约了地球物理探测工作的开展。城市地下空间资源探测迄今尚未建立统一的地上、地下一体化探测要素集和探测技术体系。因此,亟需开展城市地下空间资源探测技术体系研究,通过探测技术方法组合解决城市地下空间探测的难题。

## 2.2 评价技术领域面临的主要问题

目前,城市地下空间规划大多沿用地表空间规划方法体系,对城市地下空间资源评价成果的使用仍不充分。一方面,城市地下空间资源评价内涵多样,主要包括城市地下空间资源开发的适宜性评价、开发潜力评价、容量评价等,尚缺乏针对城市地下空间资源开发利用的协同评价和城市地下空间

功能分层开发强度阈值评价。另一方面,评价指标的确定存在随机性、主观性等问题,亦缺乏具有针对城市地下空间要素本身特性和要素重要性的评价。此外,现有的评价数学模型一般基于模糊理论对评价指标进行预先级别划分并赋予分段数值,导致评价结果出现阶梯状分段数值现象,无法对城市地下空间资源进行三维空间连续化表达,难以满足当前城市地下空间资源三维评价的新要求。为此,亟需开展城市地下空间资源评价技术体系研究,形成在评价内涵及应用、指标确定和数学模型方面统一的评价技术体系。

## 3 城市地下空间资源探测评价技术体系构建思路

针对城市地下空间资源探测评价面临的主要问题,本文提出城市地下空间资源全要素分类体系、城市地下空间资源全要素探测与信息集成技术和城市地下空间全资源评价方法技术,建立城市地下空间资源探测评价技术体系(图 1)。

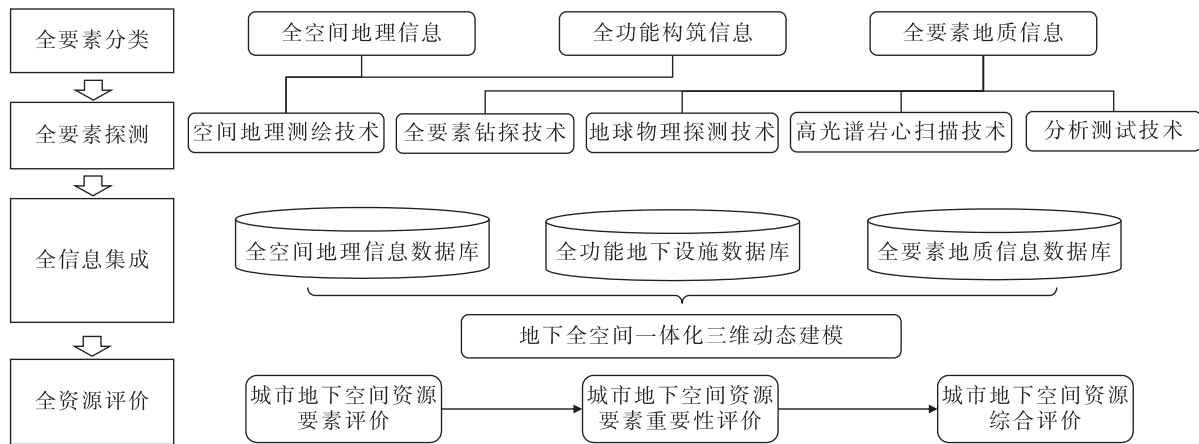


图 1 城市地下空间资源探测评价技术体系

Fig. 1 Exploration and evaluation technology system of urban underground space resources

## 3.1 城市地下空间资源全要素分类体系

城市地下空间资源作为新型国土空间资源,是城市地表空间向下延伸。根据城市地下空间资源开发利用所需的要素类别,可分为地上地下全空间地理信息、全功能构筑信息和全要素地质信息(表 1)。

表 1 城市地下空间资源全要素分类

Table 1 Full factors classification of urban underground space resources

全要素分类	主要内容
全空间地理信息	自然地形地貌、地表建筑空间形态、地下建筑空间形态等要素
全功能构筑信息	城市地下管网信息、地下建筑设施信息
全要素地质信息	物质成分要素、结构形态要素、属性特征要素

### 3.1.1 全空间地理信息

全空间地理信息是城市地下空间资源信息表达的空间载体,包括自然地形地貌、地表建筑空间形态和地下建筑空间形态等要素,是地表平面地理信息的三维拓展。

(1)自然地形地貌要素。自然地形地貌要素主要包括数字高程信息(DEM)和地表自然要素信息(如山体、水体等),根据地形多尺度描述,可划分为流域尺度(大尺度的跨行政单元主要河流及其支流范围)、自然景观尺度(中尺度的行政单元内单一或多种景观地貌组合)和工程场地尺度(小尺度的工程建设场地范围)。

(2)地表建筑空间形态要素。地表建筑空间形态要素主要包括地表基础设施、建筑物、道路和工程的位置坐标信息,主要依据城市行政区划管理(区、街道、社区)进行分类统计。

(3)地下建筑空间形态要素。地下建筑空间形态要素主要包括地下构筑物的三维坐标位置和地下建筑物面积等,地下构筑物界址点用三维坐标( $x, y, z$ )表示,地下建筑物面积以地下建筑物的建筑占地面积为准。

### 3.1.2 全功能构筑信息

全功能构筑信息是城市地下空间开发利用的各类工程建筑信息,包括地下管网信息、地下建筑设施信息。

(1)地下管网信息。地下管网信息主要包括城市地下通讯、电力、煤气、自来水等管网分布、性能、材质信息,具体包括管网种类、管网布局、管道材质、管径、年输送量以及权属、用途、建造时间等信息。

(2)地下建筑设施信息。地下建筑设施信息主要包括人防工程、地下立体交通工程、地下垃圾与污水处理设施以及地下商业、娱乐、体育、宗教等设施信息,具体包括这些地下建筑设施的分布、深度、材质、性能、大小等要素。

### 3.1.3 全要素地质信息

全要素地质信息是地质历史时期形成的与地下岩、土、水、气、生相关的物质成分要素、结构形态要素以及属性特征要素。

(1)物质成分要素。物质成分要素主要包括固相成分要素(岩土体)、液相成分要素(地下水)和气相成分要素(浅层气)。其中固相成分要素主要包括岩(土)体类型、矿物成分与定名,液相成分要素主要包括地下水类型、水化学成分(有机、无机),气

相成分要素主要包括气体类型、化学成分等。

(2)结构形态要素。结构形态要素既包含了对微小单元岩土体结构的描述,也包括对区域地质单元结构的描述。其中,岩土体结构形态要素主要描述矿物结晶程度、矿物颗粒大小、矿物形状以及它们之间的相互关系。具体包括沉积岩结构构造、岩浆岩结构构造、变质岩结构构造,土体矿物颗粒及颗粒集聚体的大小、形状、表面特征及其定量比例、组合排列和彼此之间的连结特征,岩土体孔隙、裂隙大小及孔隙比等。区域地质单元结构形态要素是由各岩土体微小单元组成的集合体,具体包括地层厚度、产状(走向、倾向、倾角)、构造(褶皱、断层等)形态(产状、节理裂隙宽度、长度等)。此外,还有一些天然洞穴(石灰岩溶洞、火山岩构造-差异风化洞、花岗岩崩塌堆叠洞、红层层(节)理洞和沿海的海蚀洞等)形态(三维立体尺寸)。

(3)属性特征要素。属性特征要素可分为物质本身属性特征要素和系统单元(场)属性要素。物质本身属性特征要素可分为基本物理参数、强度参数、变形参数以及黄土湿陷性参数、软土蠕变参数、膨胀土膨胀性参数、冻土冻融参数、热力学参数、电性参数、地震参数;系统单元(场)属性要素可分为地下渗流场要素(水位埋深、承压水头高度、地下水流速、地下水流向、单井涌水量等)、地下持力层要素(地层承载力特征值、桩端阻力)、地下温度场要素(地温、地温梯度)、地下磁场要素(磁场强度、磁场方向)、地下应力场要素(地应力大小、方向)等。

## 3.2 城市地下空间资源全要素探测与信息集成技术

在城市地下空间资源全要素分类的基础上,分别对应建立全要素探测技术和信息集成技术(表2)。

表2 城市地下空间资源全要素探测与信息集成技术表  
Table 2 Full factors exploration and information integration of urban underground space resources

体系	主要技术
全要素探测	空间地理测绘、钻探、地球物理探测、高光谱岩心扫描、分析测试技术
全要素信息集成	地质大数据原型知识库、地下全空间一体化三维动态建模技术

### 3.2.1 城市地下空间资源全要素探测技术体系

本文提出由空间地理测绘、钻探、地球物理探测、高光谱岩芯扫描及分析测试技术为一体的城市地下空间资源全要素探测技术体系。

(1)空间地理测绘。城市地下空间地理测绘主要通过三维激光扫描技术,快速获取既有地下空间表面的三维坐标数据,建立既有地下空间的三维实体模型。该技术是高分辨率的高速激光扫描测量方法,具有非接触性、快速性、主动性等特点,获取的数据具备高密度、高精度等特点。

(2)钻探。钻探技术是城市地下空间全要素获取最直接的手段,统筹第四纪地质钻探、水文地质钻探、工程地质钻探技术,融合为全要素钻探进行原位高保真取心钻探,同时为随钻测试、地球物理测井、井中物探、抽水试验及分析测试样品采集等提供便利条件。

(3)地球物理探测。地球物理探测技术是城市地下空间资源全要素获取的主要手段之一。该技术采用间接的手段获取地质结构要素,采用直接的手段获取电性、速度等属性及场要素。目前,主流的重力、磁法、电(电磁)法、地震及放射性等地球物理探测技术基本均能在城市地下空间资源要素探测中发挥作用,但针对城市施工条件受限、人文干扰严重等因素,需要优选方便、快捷、高效的地球物理探测方法或方法技术组合,创新施工方式,优化数据采集装置与参数,探索有效信号识别、提取、增强技术,拓展数据(联合)反演技术,提升城市地下空间资源要素探测分辨率和精度。

(4)高光谱岩心扫描。高光谱岩心扫描是城市地下空间资源全要素获取的新方法、新技术。开展钻探岩心、岩土体样品及新鲜断面等图像和光谱一体数字化采集,通过处理、分析、解释,可用于研究岩土体沉积特征及演变关系,也可用于分析研究岩土体矿物学信息、颗粒粒度、胶结物成分与类型等城市地下空间资源要素。

(5)分析测试技术。分析测试技术也是城市地下空间资源全要素获取的主要手段,在室内或野外现场采用多种技术手段测出与城市地下空间资源评价、规划、建设相关的岩土水气物质成分、物理性质、力学指标、动力参数、腐蚀性、水文地质、工程地质等要素。

### 3.2.2 城市地下空间资源全要素信息集成技术

城市地下空间资源全要素信息集成主要包括地质大数据原型知识库建设和地下全空间一体化三维动态建模,实现对时空数据、属性数据等多学科、多尺度资料的整合与三维表征。

(1)地质大数据原型知识库建设。以地下空间地质数据为核心内容,空间地理信息数据为基础,将城市地下空间资源探测的地理数据、地下设施数据与地质数据进行空间叠加,建立城市地下空间资

源全要素数据库,分为全空间地理信息数据库、全功能地下设施数据库和全要素地质信息数据库,直观反映地下空间资源的空间分布及属性特征,实现地下空间资源要素数据的综合集成,为城市地下空间地理地质建模、数值模拟、分类定量评价及多信息融合平台提供数据支撑。数据库建设遵循“安全性和分布式共享”的原则,充分考虑分级权限设定、数据保密等情况,设置分布式存储架构,严格控制数据访问权限,确保城市地下空间资源全要素数据库高效、安全、稳定地运行。

(2)地下全空间一体化三维动态建模。结合地表地理信息及地下构筑物信息,针对地上和地下空间从静态和动态两方面开展一体化三维地质建模,区别非地质营力因素和地质营力因素,分别采用GIS类建模方法和地质统计学建模方法。针对非地质营力因素的地面和地下人工构筑物等对象采用GIS类建模方法,即采用瓦片贴图方式的表面数理统计学标量插值及简单克里金插值的确定性建模。针对地质营力因素的地下地质体建模主要采用基于多源数据驱动的多尺度三维地质统计学随机静态建模,即物探-钻探-测井-实验等多源数据和分区、分层段、分沉积相类型、分属性参数等多尺度,包括单元体结构模型和单元体属性模型。从三维地质建模技术发展趋势和应用前景来看,应大力开展数据和模型双驱动的物探-钻探-测井-实验-地质统计学“五位一体”的地质单元体动态建模技术攻关,同时,需要考虑时间效应的多源多尺度地质单元体主控变量四维动态建模。

### 3.3 城市地下空间资源评价方法技术

城市地下空间资源评价,首先需要对其要素自身特性和要素重要性进行评价。在此基础上,针对城市地下多种地质资源协同利用和城市地下空间功能分层开发进行资源协同开发评价和强度阈值开发评价(表3)。

表 3 城市地下空间资源评价内容表

Table 3 Evaluation content of urban underground space resources

体系	主要内容
城市地下空间资源要素评价	地理基础条件、地质结构条件、工程地质和水文地质条件、地表空间利用现状评价
城市地下空间资源要素重要性评价	城市地下空间资源要素有利性、制约性与否决定性评价
城市地下空间资源综合评价	城市地下多种地质资源协同开发和城市地下空间功能分层开发强度阈值评价

### 3.3.1 城市地下空间资源要素评价

城市地下空间资源评价的基础是全要素信息,在城市地下空间资源要素探测的基础上,需要对各要素自身特性进行评价,包括地理基础条件、地质结构条件、工程地质和水文地质条件以及地表空间利用现状。

(1)地理基础条件评价。城市地下空间资源评价中的地理基础条件主要包括城市地形地貌和地表水体。地形地貌评价的内容需要包含城市地形起伏度评价、城市微地貌空间形态评价、城市特殊地形地貌评价等。地表水体评价包括地表河流水系及汇水评价,地面湖泊、水塘分布及汇水评价,地表水与地下水联系评价,地表水汇水面积评价及排泄条件评价,城市侵蚀基准面评价等。

(2)地质结构条件评价。地下岩土体的组成结构、基岩面深度对城市地下空间规划设计具有重要指导作用。地质结构条件评价可从城市不同地质单元的岩体发育程度评价、基岩埋深起伏程度评价、岩体地质特征评价、松散沉积物主要类型及厚度变化评价等方面进行。

(3)工程地质条件评价。有效利用优良工程地质层、回避或处理不利工程地质层,是保障地下空间经济、安全、高效开发的重要前提。除了传统的工程地质要素以外,当前城市地下空间开发中需要重点关注城市浅层填土及耕植土成分与厚度变化情况、城市工程地质持力层和特殊不良岩土体的三维空间分布。

(4)水文地质条件评价。城市地下空间资源开发的安全性水文地质条件密不可分。水文地质条件评价需要关注城市地下潜水面埋深及季节性变化规律、第一隔水层厚度及上面潜水与下面承压含水层连通性、承压含水层发育情况、城市古河道发育程度。

(5)地表空间利用现状评价。城市地下空间的开发利用需要与城市地表空间协同。地表空间的土地利用类型、开发情况直接或间接影响地下空间资源利用。地表空间利用现状评价主要考虑城市农业生产用地、城市生态用地、道路用地、重大工程用地的分布以及城市已利用地下空间与地面建筑设施位置关系。

### 3.3.2 要素重要性评价

(1)城市地下空间开发要素有利性评价。有利性要素主要是指对城市地下空间资源开发利用有正面促进作用的关键要素,包括有利地形地貌要素、区域地壳稳定要素、地下地质结构要素、地下水流场要素、地下地质资源要素、经济和区位要素等,

基于正向激励原则评价各要素的有利程度。

(2)城市地下空间开发要素制约性与否决性评价。制约性与否决性要素是指制约城市地下空间开发、影响工程建设需要避让和特殊处理的关键要素。其中在特定场景下,制约性要素可看作否决性要素,即原则上导致无法开发地下空间的要素。包括生态保护制约、水资源安全保护制约、地下文化资源保护制约、地形地貌制约、地质结构制约、活动断裂构造制约、地下岩溶发育因素制约、软土、孤石等特殊地质体制约、不同深度桩基等要素制约、地下有害气体要素制约、地下岩土层中放射性和有害要素制约、地下水渗流场制约、地下既有空间制约评价。

### 3.3.3 城市地下空间资源综合评价

(1)城市地下多种地质资源协同开发评价。在城市地下探测深度范围内涵盖了空间资源、地下水资源、地热资源、建筑材料资源和天然洞穴资源等城市地下多种地质资源。在城市地下空间资源评价、城市地下水资源可利用性评价、城市地热能资源综合利用评价、城市矿产资源潜力可开发性评价、城市矿山开采遗留空间可利用程度与开发潜力评价、城市地下岩土建筑材料分等定级评价的基础上,根据资源开发的空間冲突制约和协同开发效率,评价城市地下空间资源可协同开发性。

(2)城市地下空间功能分层开发强度阈值评价。根据城市地下空间不同开发功能,可将其分为上浅层、中浅层、下浅层、上深层和下深层。分层开发强度阈值评价主要根据不同层位地质环境要素对城市地下空间功能开发的制约关系,在保障城市整体安全前提下,确定城市地下空间资源开发深度、范围等边界。以第四系厚覆盖城市为例,城市地下空间不同功能层位对应考虑的地质环境要素和层位见表4。

表4 城市地下空间功能分层与地质层位对应关系

Table 4 Corresponding relation between functional stratification and geological horizon of urban underground space

分层	功能	地质层位
上浅层	城市管网、人行通道	潜水含水层、填土层、耕作层
中浅层	浅层交通、综合管廊、地面结建地下室、地下人防	地下隔水层、硬土层
下浅层	地下快速交通、物流功能、商业设施	第一承压含水层、砂砾石层
上深层	地下垃圾处理厂、污水处理厂、变电站	深层承压含水层、隔水层
下深层	特殊储备、战略设施	基岩层、风化层

## 4 结论

(1)城市地下空间资源全要素可分为地上地下全空间地理要素信息、全功能构筑物要素信息和全要素地质信息,通过城市地下空间资源全要素探测和信息集成,建立城市地下全空间地理信息数据库、全功能地下设施数据库和全要素地质信息数据库。

(2)城市地下空间资源评价首先要对资源要素自身特性进行评价,然后基于要素重要性评价,实现对城市地下多种地质资源协同开发评价和城市地下空间功能分层开发强度阈值评价。

(3)本文构建的城市地下空间资源全要素分类-全要素探测-全信息集成-全资源评价技术体系,可为城市地下空间开发利用全生命周期提供支撑。

## 参考文献

- [1] 杨洋,程光华,苏晶文.地下空间开发对城市地质调查的新要求[J].地下空间与工程学报,2019,15(2): 319-325.  
YANG Y, CHENG G H, SU J W. New requirements for the development of underground space in urban geological survey [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(2): 319-325.
- [2] 程光华,翟刚毅,庄育勋,等.中国城市地质调查技术方法[M].北京:科学出版社,2013:14.  
CHENG G H, ZHAI G Y, ZHUANG Y X, et al. Technical methods of urban geological survey in China [M]. Beijing: Science Press, 2013: 14.
- [3] 张茂省,王益民,张戈,等.干扰环境下城市地下空间组合探测与全要素数据集[J].中国地质,2019,46(增刊2):30-74.  
ZHANG M S, WANG Y M, ZHANG G, et al. All-element dataset of combined exploration of urban underground spaces with strong interference [J]. Geology in China, 2019, 46(S2): 30-74.
- [4] KOVALYSHEN Y. Self-excited axial vibrations of a drilling assembly: modeling and experimental investigation [C]//Proceedings of the 47th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. San Francisco: Curiran Associates Inc, 2013: 23-26.
- [5] AALIZAD S A, RASHIDINEJAD F. Prediction of penetration rate of rotary-percussive drilling using artificial neural networks-a case study[J]. Archives of Mining Science, 2012, 57(3): 715-728.
- [6] CHEN J, YUE Z Q. Ground characterization using breaking-action-based zoning analysis of rotary-percussive instrumented drilling[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2015, 75: 33-43.
- [7] 赵锴,姜杰,王秀荣.城市地下空间探测关键技术及发展趋势[J].中国煤炭地质,2017,29(9):61-66.  
ZHAO P, JIANG J, WANG X R. Urban underground space exploration key technologies and development trend [J]. Coal Geology of China, 2017, 29(9): 61-66.
- [8] 马岩,李洪强,张杰,等.雄安新区城市地下空间探测技术研究[J].地球学报,2020,41(4):535-542.  
MA Y, LI H Q, ZHANG J, et al. Geophysical Technology for Underground Space Exploration in Xiong'an New Area [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2020, 41(4): 535-542.
- [9] 李嘉瑞,马秀敏,姜自忠,等.高密度电法探测第四纪玄武岩覆盖区断裂及其活动性分析——以鸭绿江断裂带抚松段西支断裂为例[J].地质与勘探,2022,58(1): 118-128.  
LI J R, MA X M, JIANG Z Z, et al. Detecting active faults in Quaternary basalt areas by the high-density electrical method: An example of the west branch of the Fusong section of Yalujiang fault zone in northeast China [J]. Geology and Exploration, 2022, 58(1): 118-128.
- [10] 叶英,王晓亮,祁曦.瞬变电磁雷达探测不同材质地下管线[J].测绘通报,2019(增刊1):211-216.  
YE Y, WANG X L, QI M. Transient electromagnetic radar detection of different materials underground pipeline [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2019 (S1): 211-216.
- [11] 李文翰,刘斌,李术才,等.基于高性能瞬变电磁辐射源的城市地下空间多分辨成像方法研究[J].地球物理学报,2020,63(12):4553-4564.  
LI W H, LIU B, LI S C, et al. Study on multi resolution imaging method of urban underground space based on high performance transient electromagnetic source[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2020, 63(12): 4553-4564.
- [12] 王斌战,李成香,邱波,等.等值反磁通瞬变电磁法在城市岩溶精细探测中的应用研究[J].资源环境与工程,2021,35(5):727-732.  
WANG B Z, LI C X, QIU B, et al. Application of equivalent anti-magnetic flux transient electromagnetic method in fine detection of urban karst [J]. Resources Environment and Engineering, 2021, 35(5): 727-732.



- [13] 庞贵良,张发勇,张羽翀,等.探地雷达管道探测资料定性与定量解释方法研究及应用[J].工程勘察,2019,47(6):72-78.  
PANG G L, ZHANG F Y, ZHANG Y C, et al. Study and application of qualitative and quantitative interpretation methods for pipeline detection data from ground penetrating radar [J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 2019, 47(6): 72-78.
- [14] 刘宗辉,刘毛毛,周东,等.基于探地雷达属性分析的典型岩溶不良地质识别方法[J].岩土力学,2019,40(8):3282-3290.  
LIU Z H, LIU M M, ZHOU D, et al. Recognition method of typical anomalies in karst tunnel construction based on attribute analysis of ground penetrating radar[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(8): 3282-3290.
- [15] 周黎明,付代光,张杨,等.典型不良地质体地质雷达探测正演试验研究[J].现代隧道技术,2018,55(4):47-52.  
ZHOU L M, FU D G, ZHANG Y, et al. Forward test of GPR detection for typical adverse geological bodies [J]. Modern Tunnelling Technology, 2018, 55(4): 47-52.
- [16] 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.  
HE J, ZHENG G S, ZHOU Y X, et al. Research and application of detection methods for urban underground space resources [J]. Geological Bulletin of China, 2019, 38(9): 1571-1580.
- [17] 卓启亮,于强.微动探测方法在城市工程地质勘察中的应用[J].工程地球物理学报,2020,17(5):658-664.  
ZHUO Q L, YU Q. The application of microtremor survey method in urban engineering geological investigation [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2020, 17(5): 658-664.
- [18] 蔡祖华,刘宏岳,郑金秋,等.微动技术在城市地下病害体探测中的应用研究[J].工程地球物理学报,2021,18(6):893-902.  
CAI Z H, LIU H Y, ZHENG J Q, et al. Research and application of micromotion technology in the detection of urban underground disease body [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2021, 18(6): 893-902.
- [19] 吴茂林,胡富彭,胡雄武.城市地下空间地质异常体井间综合 CT 探查[J].工程地球物理学报,2018,15(6):812-816.  
WU M L, HU F P, HU X W. Integrated CT exploration of urban underground space geology anomaly [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2018, 15(6): 812-816.
- [20] 陶鹏飞,尹奇峰,赵红飞,等.井中地震波 CT 浅层城市地下空间成像[J].地下空间与工程学报,2019,15(增刊 2):687-693.  
TAO P F, YIN Q F, ZHAO H F, et al. Shallow surface urban underground space imaging using borehole seismic wave CT [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(S2): 687-693.
- [21] 刘铁华,刘铁,程光华,等.复杂城市环境下地球物理勘探技术研究进展[J].工程地球物理学报,2020,17(6):711-720.  
LIU T H, LIU T, CHENG G H, et al. Research progress of geophysical exploration technology in complex urban environment [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2020, 17(6): 711-720.
- [22] 程秀娟,孙萍萍,王晓勇,等.延安城市地下空间探测技术方法及应用研究[J].华东地质,2021,42(2):167-175.  
CHENG X J, SUN P P, WANG X Y, et al. Research and application of detection methods for urban underground space in Yan'an area [J]. East China Geology, 2021, 42(2): 167-175.
- [23] 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.  
CHENG G H, SU J W, LI C, et al. Strategic thinking of urban underground space exploration and safe utilization [J]. East China Geology, 2019, 40(3): 226-233.
- [24] 吴立新,刘帝旭,杨洋,等.论城市地下空间资源评价:现状与未来[J].地下空间与工程学报,2022,18(1):35-49.  
WU L X, LIU D X, YANG Y, et al. On the assessment of urban underground space resources: actuality and future [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2022, 18(1): 35-49.
- [25] 葛伟亚,王睿,张庆,等.城市地下空间资源综合利用评价工作构想[J].地质通报,2021,40(10):1601-1608.  
GE W Y, WANG R, ZHANG Q, et al. Conception of comprehensive utilization evaluation of urban underground space resources [J]. Geological Bulletin of China, 2021, 40(10): 1601-1608.
- [26] 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].地球科学,2021,46(5):1896-1908.  
TAN F, WANG J, JIAO Y Y, et al. Current situation



- and development of urban underground space suitability evaluation [J]. *Earth Science*, 2021, 46(5): 1896-1908.
- [27] 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.
- LI P Y, HAN H D, WANG D H, et al. Current situation and development trends of suitability evaluation of urban underground space resources [J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2021, 41(1): 121-128.
- [28] 田聪,苏晶文,倪俊勇,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.
- TIAN C, SU J W, NI H Y, et al. Progress and prospect of urban underground space resources evaluation [J]. *East China Geology*, 2021, 42(2): 147-156.
- [29] 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.
- GUO J M, ZHU W J. Potential value evaluation of underground space resource based on AHP method [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2005, 1(5): 655-659.
- [30] 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, 12(5): 47-51.
- JIANG Y, WU L X, DU L Q. On the index system for city underground space developing-utilization capacity evaluation [J]. *Urban Development Studies*, 2005, 12(5): 47-51.
- [31] 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.
- WANG X, HUANG X J, ZHEN F, et al. Evaluation on development potential of urban underground space resource: multi-level grey approach [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2009, 37(8): 1122-1127.
- [32] 张晓峰,吕良海,白永强,等.城市地下空间模糊综合评价方法研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2012, 8(1): 8-13.
- ZHANG X F, LÜ L H, BAI Y Q, et al. Research on the fuzzy comprehensive evaluation method of urban underground space [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2012, 8(1): 8-13.
- [33] 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.
- WANG Z Y, ZHU T Y, WANG X H. Study on suitability evaluation system of Changsha's urban underground space for development and utilization [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2019, 16(5): 1274-1281.
- [34] 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.
- WU W B, CAO L, LIU J, et al. Evaluation and analysis of geological environment for the development of underground space in Suzhou [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2013, 33(2): 131-139.
- [35] 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.
- WU L X, JIANG Y, CHE D F, et al. Fuzzy synthesis evaluation and 3D visualization for resource quality of urban underground space [J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2007, 36(1): 97-102.
- [36] 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.
- ZHAO X D, ZHANG P, CHEN Z L. Fuzzy Synthesis Evaluation for resource quality of underground space in historic and cultural blocks [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2014, 10(4): 739-744.
- [37] 叶菁,侯卫生,邓东成,等.基于可变模糊集的城市地下空间资源三维质量评价[J]. *资源科学*, 2016, 38(11): 2147-2156.
- YE J, HOU W S, DENG D C, et al. 3D quality assessment for urban underground space resources based on variable fuzzy set [J]. *Resources Science*, 2016, 38(11): 2147-2156.
- [38] HOU W S, YANG L, DENG D C, et al. Assessing quality of urban underground spaces by coupling 3D geological models: The case study of Foshan City, South China [J]. *Computers and Geosciences*, 2016, 89: 1-11.
- [39] XI Y, LI X J, ZHU H H, et al. Three-dimensional high-precision assessment of mountainous urban underground space resources: A case study in Chongqing, China [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2022, 123(104439): 1-12.
- [40] 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.
- HAO Y H, LI X H, CHEN Z L, et al. Study on 3d evaluation method of geological environment quality for urban underground space development: A case study of Binhu New District, Hefei City [J]. Geography and Geo-Information Science, 2021, 37(1): 11-16.
- [41] 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]. 地学前缘, 2021, 28(4): 373-382.
- XUE T, SHI Y J, ZHU X D, et al. Research on 3D modeling method for evaluation of urban underground space resources: A case study in Shanghai [J]. Earth Science Frontiers, 2021, 28(4): 373-382.
- [42] ZHAO P, LI X Z, ZHANG W, et al. System dynamics: A new approach for the evaluation of urban underground resource integrated development [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022, 119(104213): 1-14.
- [43] DOYLE M R. Mapping urban underground potential in Dakar, Senegal: From the analytic hierarchy process to self-organizing maps [J]. Underground Space, 2020, 5(3): 267-280.
- [44] MAVRIKOS A, KALIAMPAKOS D. An integrated methodology for estimating the value of underground space [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 109(103770): 1-9.

## Study on exploration and evaluation technology system of urban underground space resources

YANG Yang<sup>1,2</sup>, WANG Rui<sup>1,2</sup>, ZHAO Muhua<sup>1,2</sup>, XING Huaixue<sup>1,2</sup>, ZHENG Hongjun<sup>1,2</sup>,  
ZHANG Qing<sup>1,2</sup>, CHEN Chunxia<sup>1,2</sup>, LI Yunfeng<sup>1,2</sup>, CHENG Guanghua<sup>1,2</sup>

(1. *Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing, 210016, Jiangsu, China;*

2. *Engineering Innovation Center for Urban Underground Space Exploration and Evaluation, MNR, Nanjing, 210016, Jiangsu, China)*

**Abstract:** The exploitation and utilization of urban underground space resources (UUSR) have played a key role in urban high-quality development. The viewpoint of establishing the technical system of exploration and evaluation of UUSR is put forward based on the analyses on the current research situation and main problems emerged from both fine exploration and resource evaluation. Breaking through the traditional concept of geological work, the study takes the urban aboveground, ground space and the underground within a certain depth as a whole, and divides the full factors of UUSR into whole space geographic element information, full-function structure element information and full-element geological information from multi-dimensional, multi-scale and multi-media space. The database of each information above could be established through spatial geographic mapping, drilling, geophysical exploration, hyperspectral core scanning, testing and three-dimensional dynamic modeling technology. The evaluation on collaborative development of urban underground geological resources and the intensity threshold evaluation on layered development of urban underground space functions could be operated based on the evaluations of UUSR elements and the elements' importance. The technical system of full factors classification-full factors exploration-whole information integration-whole resources evaluation proposed in this paper can provide support for the whole life cycle of UUSR development and utilization.

**Key words:** urban underground space resource; full factors; exploration; evaluation; technology system