

城市地下空间资源综合利用评价工作构想

葛伟亚,王睿,张庆,邢怀学,周洁

GE Weiya, WANG Rui, ZHANG Qing, XING Huaixue, ZHOU Jie

中国地质调查局南京地质调查中心,江苏 南京 210016

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

摘要:实现地下空间的安全开发和管理是当前中国构建全域国土空间治理体系的重要组成部分。当前中国地下空间资源综合评价在运用地质成果、对接国土空间规划、数据共享服务方面面临不足与挑战,表现在地质调查缺少高精度的成果和足够的系统性,规划管理实施过程中没有实现对评价成果的充分利用,地质调查成果和空间利用信息的融合度急需提高,长期以来城市地下空间资源利用“无法可依”、“无据可依”、“有规划难执行”。针对这些不足,提出了地下空间资源调查与综合评价体系——地下空间规划管控体系的构想,即科学安全地开发利用城市地下空间资源,应以规划管控为导向,开展三维地质结构调查,构建地下空间资源三维地质结构模型;综合考虑地质条件、地下空间开发利用现状、地下应急水源地、地下文物保护等多种因素,系统评价地下空间资源潜力,构建地下空间多种资源综合协同开发利用的管控评价体系。开展地下空间资源综合利用评价研究,对拓展城镇化发展新空间、开辟城镇化建设新资源、构建全域国土空间治理体系、统筹国土空间资源规划管理意义重大。

关键词:城市地质;地下空间;资源评价;地下空间规划

中图分类号:TU984.11⁺3;P62 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2021)10-1601-08

Ge W Y, Wang R, Zhang Q, Xing H X, Zhou J. Conception of comprehensive utilization evaluation of urban underground space resources. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(10): 1601-1608

Abstract: To realize the safe development and management of underground space is an important part of China's overall territorial space governance system. Currently, the comprehensive evaluation of underground space resources in China is facing new challenges due to its shortcomings in the application of geological achievements, docking of territorial space planning and data sharing services. Problem lies in the lack of high precision of geological survey results and enough systematic, not implemented in the process of planning implementation management to make full use of the evaluation results, geological investigation results and space urgently needs to improve the use of information of alignment. As a result, the utilization of urban underground space resources is often “impossible to rely on”, “no evidence to rely on” and “difficult to implement planning” for a long time. In view of these shortcomings, the concept of underground space resources investigation and comprehensive evaluation system – underground space planning and control system is proposed, that is, to develop and utilize urban underground space resources in a scientific and safe manner, a three-dimensional geological structure investigation should be carried out with planning and control as the guide, and a three-dimensional geological structure model of underground space resources should be constructed. Through comprehensive consideration of geological conditions, development and utilization status of underground space, underground emergency water source, protection of underground cultural relics and other factors, the underground space resource potential is systematically evaluated, and the comprehensive coordinated development and utilization control and evaluation system of various underground space resources is constructed. The study on the comprehensive development and utilization of underground space resources is of great significance to the expansion of new space for urbanization

收稿日期:2020-06-07;修订日期:2021-03-15

资助项目:中国地质调查局项目《杭州多要素城市地质调查》(编号:DD20190281)

作者简介:葛伟亚(1976-),男,教授级高工,从事城市地质调查研究工作。E-mail:geweiya025@163.com

development, the opening up of new resources for urbanization construction, the construction of a territorial space governance system for the whole region, and the coordination of territorial space resource planning and management.

Key words: urban geology; underground space; evaluation of space resources; underground space planning

随着中国经济的快速发展,城市化水平提高,城市化进程不断加快,对城市空间容量的需求与城市土地资源紧缺的矛盾日益突出,许多城市面临着功能布局不尽合理、交通阻塞、环境污染等制约城市发展的问題。为了解决这些矛盾,实现城市的集约化和可持续发展,人们在向城市高空寻求空间的同时,也积极地开拓城市地下空间。地下空间是相对地上空间而言的,是地球表面以下天然或掘造形成的地下空间,地下空间建筑是指在自然形成的溶洞内或由人工挖掘后进行建造的建筑,泛指生产、生活、防护的地下建筑物和构筑物。在各国将可持续发展作为城市发展战略的背景下,如何有效地开发和利用地下空间,缓解城市发展中的多种矛盾,使地上、地下协调发展,是现代城市建设的主要发展方向,也是城市规划管理部门面临的重要课题。

国外对地下空间资源评价的探索起步较早,多从城市实际需求角度出发。服务城市整体地下空间开发战略的案例以芬兰赫尔辛基、新加坡为代表。赫尔辛基市利用20世纪90年代至21世纪初的地质调查资料,通过分析地质构造、基岩裂隙发育程度对于岩体工程质量的指示作用,综合评价了全市地下空间工程建设适宜性,并以此为依据对城市建设区地下空间规划做出指导^[1-3]。作为一个城市国家,新加坡对其地下空间的评价和规划已经纳入国家战略性高度^[4]。还有一些针对局部地区地下空间详细规划的研究,如Raymond等^[5]在美国明尼阿波利斯市-圣保罗市的地下空间规划,综合分析地质条件和已有地下空间开发情况,采用综合叠加法进行开发适宜性评价;Maurenbrecher等^[6]基于工程地质数据库分析了荷兰阿姆斯特丹的隧道地下空间建设适宜性。Bobylev^[7-8]于2009年通过分析和评价城市地下空间设施的质量、数量及地下基础设施的深度和功能,提出了将城市地下空间利用纳入城市总体规划中的建议。

中国早期地下空间资源利用评价工作由工程地质和规划学者率先展开,祝文君^[9]于1992完成了北京旧城区浅层地下空间资源的调查与利用研究,初步建立了地下空间资源调查评估模型和指标体

系;黄玉田等^[10]利用灰色评估法,从地质背景、地质分区、社会经济条件等方面对地下空间资源评估进行了初步探讨^[10]。随后,在北京、青岛等多个城市开展了以地下空间开发地质环境适宜性为主的评价工作^[11-14],起到一定示范作用。随着研究的进展,地下多种资源的协同开发评价^[15]、利用三维模型进行评价^[16]等新方法、新技术不断涌现,也丰富了地下空间资源评价的内涵。“十二五”以来,随着地下空间开发的重要性被更深入认识,城市地下空间规划从一线城市向其他城市广泛拓展^[17],城市地下空间评价的实践从单纯地下空间开发适宜性评价,逐渐转为面向地下空间资源的综合利用评价的探索。

进入21世纪以来,中国地下空间开发从“起步加速期”转入“高速建设期”,“十三五”以来,全国地下空间年均建设近 $3 \times 10^8 \text{ m}^2$,2018年全年中国城市地下空间与同期地面建筑竣工面积的比例达到19%^[18]。在不断探索 and 实践中,把地下空间作为一种宝贵的资源已经成为业界共识,其开发的科学性、合理性和规范性愈发受到重视^[19]。国务院在2017年政府工作报告中提出,要扎实推进新型城镇化,统筹城市地上地下建设,加强城市地质调查。2019年5月,自然资源部印发《关于全面开展国土空间规划工作的通知》,明确要求将地下空间作为市级国土空间总体规划内容。2020年1月,自然资源部印发《自然资源调查监测体系构建总体方案》,明确开展以城市为主要对象的地下空间资源调查。近年,国家和各省市系列政策与文件指明了地下空间资源调查、评价与规划工作对于城市地下空间科学开发、安全利用的重要性。

虽然中国部分城市地下空间开发利用进入迅速发展阶段,但是大多数城市地下空间开发利用面临建设发展需求旺盛,但系统性不足、地下空间现状调查及利用情况不清、管理体制和机制有待进一步完善、有关规划制订相对滞后等挑战。据此本研究基于中国地下空间发展需求,提出了以三维地质结构调查及模型构建为基础,多种影响因素相结合的地下空间多种资源综合协同开发利用管控评价

体系。

1 城市地下空间资源综合利用评价的意义

地下空间资源是城市空间资源的重要组成部分^[20],统筹考虑城市地上、地表与地下空间资源。建立统一规划、全域管控及依法治理的有效管控机制是保障城市可持续发展、践行习近平总书记有关推动城市治理体系和治理能力现代化要求的具体举措。开展地下空间资源综合开发利用评价研究,对拓展城镇化发展新空间、开辟城镇化建设新资源、构建全域国土空间治理体系、统筹国土空间资源规划管理等意义重大。

1.1 城市地下空间资源开发利用的重要性

地下空间作为国土空间的重要组成部分,是重要的自然资源,也是承载其他地下自然资源及地下人为工程的载体^[21]。城市地下空间资源是自然资源的有机组成部分,也有着不同于地表土地资源和其他自然资源的特殊属性^[22]。在城市地下空间资源开发利用过程中,既要考虑到排除软土、液化土等不利条件,也需要查明并统筹保护地下水、地热、地质材料等地下多种资源,在此前提下进行满足城市发展需求的开发。

1.2 城市地下空间资源开发利用的必要性

为实现中国新型城镇化,需要通过优化城市功能配置,城市内部存量土地资源的盘活和潜力挖掘,提高土地资源利用效率,拓展城市空间资源,从而扩大城市空间容量,增加城市综合承载能力,实现城市可持续发展。而地下空间的开发对于城市的作用正是通过市政设施、静态停车、轨道交通等功能的地下化来置换地表土地,从而解决土地资源短缺,缓解城市交通拥堵,改善城市环境,增强城市弹性,是实现城市可持续发展和集约化发展的重要途径^[23]。

1.3 城市地下空间资源开发利用的紧迫性

长期以来,由于中国的城市地下空间资源利用在管理主体、技术规范等方面缺乏国家层面的顶层设计^[24],城市地下空间资源利用往往“无法可依”、“无据可依”、“有规划难执行”。大多城市地下空间资源利用缺乏前瞻性规划引领和对战略性资源的预控措施,地下资源存量不明,浅层存量供给稀缺,中层地下空间资源虽有规划涉及,但管控要求和指标内容不足以指导城市地下空间快速增长的开发

建设要求,缺失城市深部地下空间资源探测与预控蓝图,往往导致轨道交通、综合管廊等重大项目或重点工程开发建设时机成熟时面临无资源可用的难题。此外,地下探测精度不够,“重建设轻管理”,对地下空间产生的环境效益、社会效益没有合理的量化方法,地下空间综合效益没有得到重视。以南京为例,“十三五”以来,南京市共发生地下空间灾害与事故20余起,其中,半数以上是由于地下空间不合理利用、对地质条件掌握不明、地下空间规划不协调造成的。因此,进行高精度的地下空间探测、多要素的地下空间资源评价及地下空间的协同规划,对地下空间安全和地质环境安全尤为重要^[25]。部分城市地下空间开发利用施工中,因对岩溶、饱水砂层、淤泥软土、断裂破碎带等地质条件认识不足,工程措施不当,常引发地面塌陷事故,危害城市安全,造成社会恐慌(表1)。

2 现阶段地下空间资源综合利用评价的问题与挑战

2.1 地下空间调查精度不足

地质调查工作是获取地下空间地质结构及资源环境属性的直接手段,是地下空间资源综合利用评价及地上、地下一体化规划的支撑。当前地质调查与地下空间相关的工作主要包括两部分:一是开展地下空间地质条件调查,查明地下空间开发的有利地质条件与制约因素,评估城市地下空间开发的潜在价值,为地下空间开发利用总体规划提供基础

表1 城市地下资源开发引起的典型灾害统计

Table 1 Statistics of typical disasters caused by urban underground resources development

灾害类型	年份	典型案例	伤亡人数/损失
地面塌陷	2020	西宁市南大街	10死17伤
	2019	广州地铁11号线施工区	3人死亡
	2019	青岛地铁4号线施工区	5人死亡
	2018	四川达州市	2死2失踪
	2008	杭州风情大道地铁施工区	17死24伤4失踪
涌砂涌水	2018	广东佛山市轨道交通2号线	12人死亡
	2015	西安地铁4号线试验段	地下管道、排污系统受损
	2014	武汉地铁4号线复兴路站	附近建筑开裂
	2012	广西南宁市地铁施工	公交车陷入陷阱

数据和科学支撑;二是开展三维地质结构信息化建设,搭建城市地质调查信息系统。一般情况下,基岩出露区以地面调查为主,松散层覆盖区以钻探为主,比例尺一般为1:5万;工程地质调查的中心城区和新城规划区比例尺为1:2.5万,重点工程建设区比例尺为1:1万;水文地质调查比例尺一般为1:5万至1:10万^[26]。当前的城市地质调查精度仅能支撑城市总体规划(通常比例尺为1:1万),而对于地下空间详细规划(1:2000及更精细)及重点地区地上、地下一体化规划支撑性不足。

2.2 地下空间管理不规范

目前,在规划和自然资源的审批管理中,对地下空间管控的要求仅在公共建筑地下空间功能、下沉式广场及轨道交通站点、公共地下空间连接通道预留的控制或引导上有少量体现。而对于地质要素对地下空间开发利用的规划控制要求较缺乏,造成了地下空间资源利用评价成果未能在实际管理工作中得到有效应用。在规划和自然资源审批管理涉及的各环节中,需进一步充分考虑基于地质情况等地下空间资源多要素的规划管理要求。例如,规划地块的地质情况应做详细勘测和地质评价,对地质保护区不可随意开采,应采取保护措施;存在地热资源的地块,应避免无节制开采并适当保护;工程建设应对地下水水质实施保护措施,避免污染;地块内土壤的重金属含量,在工程建设过程及使用过程中应加强监测并采取保护措施;距离江岸、河岸较近的工程,在规划设计和建设过程中需采取稳固措施,避免工程建设引起的堤岸坍塌;位于丘陵、丘岗地区的建设工程,在规划设计和建设过程中需采取措施,避免滑坡、崩塌、地面塌陷等问题。

2.3 地下空间数据使用不充分

由于建设时序、技术运用、主导部门、应用方式等的不同,导致地质结构与其他各类地下空间资源的数据融合、三维可视化展现及共享服务存在瓶颈。主要包括:①技术指标不统一,体现在数据格式不统一、数据坐标有差异、表现形式不相同、基础平台不一致。②管理归口不统一,主要体现在管理部门不相同、更新维护有区别、运行网络不统一、用户目标不一致。③国土空间用途管制缺乏适用的地质数据支撑。目前很多城市国土空间用途管制中的分区为允许建设区、有条件建设区、限制建设区、禁止建设区4种,而城市总体规划中将城市功能

区划分为禁止建设区、限制建成区、适宜建设区3种。虽然目前已提出“两规”与“两规融合”后的用地分类对接办法,但在缺乏地质数据支撑时,地质一张图与规划编制一张图、自然资源“一张图”等数据的融合问题较突出,亟需建立地上、地下二维和三维一体化数据库。

地质专业数据与国土空间规划、现状调查、自然资源管理及城市设计等各类数据缺乏系统融合,目前支撑城市总体规划的信息产品,大多还处在数据生成阶段,或者停留在服务特定市政工程、特定地下空间用途的层面,无法全面应对城市发展面临的主要问题,也不能满足城市规划的需求,迫切需要推进地质数据与规划、土地等各类数据的融合。由于地下空间信息的保密性及管理技术标准不统一,各自信息“自备自用”,不对外公开,相互间也不共享,难以支撑服务智慧城市的需求。因此,开展资源整合、打破部门、时间、空间壁垒,开展地下空间资源多要素数据融合十分必要。

3 城市地下空间资源综合利用评价方法

为科学安全地开发利用城市地下空间资源,本文提出以规划管控为导向,开展三维地质结构调查,构建地下空间资源三维地质结构模型;综合考虑地质条件、地下空间开发利用现状、地下应急水源地、地下文物保护等多种因素,系统评价地下空间资源潜力,构建地下空间多种资源综合协同开发利用的管控评价体系,其综合利用评价过程如图1所示。

3.1 城市地下空间资源调查、多源数据融合与三维模型构建

应充分收集工作区已有地质资料,综合运用地质调查、钻探、物探等多种调查研究方法,面向满足城市地下空间规划的深度范围,查明城市全区和重点地区地下空间资源三维地质结构,获取地下多尺度多要素的地质参数。在城市已开展的地下空间现状普查工作基础上,采用收集资料、大数据挖掘、实地调查的方法,查明城市已有的、在建的及规划中的地下空间现状分布特征,建立城市地下空间开发利用现状档案。

以南京江北新区地下空间资源为例(图2),分区、分精度地利用物探、钻探等多源数据,构建由全区到重点开发区、特殊地质区等不同尺度的三维地

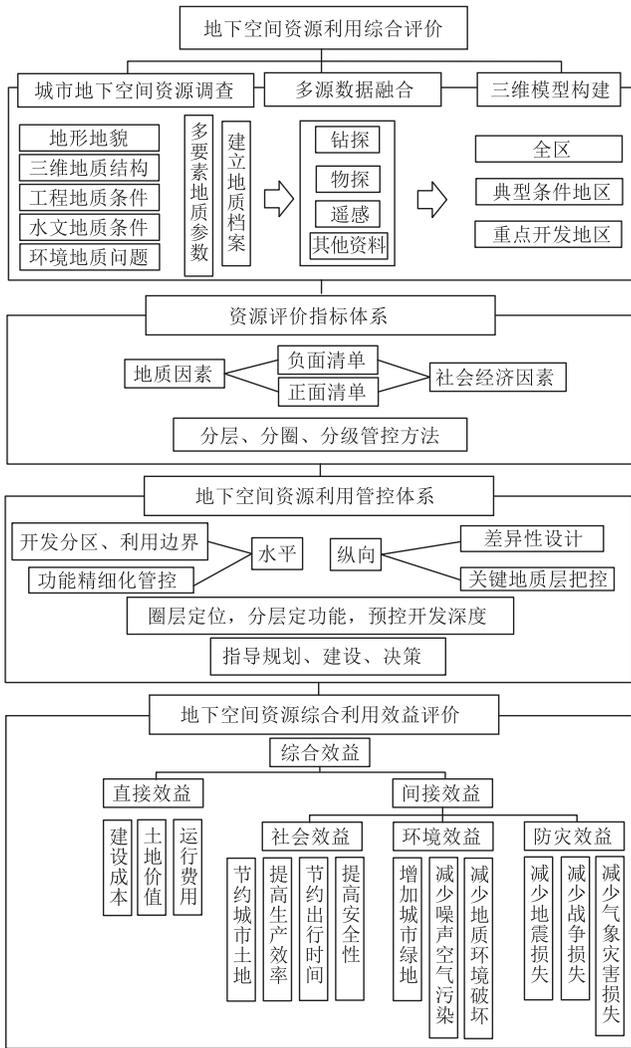


图 1 地下空间资源综合利用评价流程图

Fig. 1 Flow chart of the comprehensive utilization evaluation of underground space resources

质模型与地下空间资源模型。在此基础上,分析并明确城市地下空间发展的制约机理及因素,开展地质环境要素、城市环境制约因素信息集成,以 GIS 技术为载体,进行评价指标参数提取,并基于统一的划标准进行量化处理,为综合评价奠定基础。

具体方法包括,开展对复杂地质环境及城市环境制约条件等方面时间尺度、空间尺度、属性尺度的调查研究,重点查明各要素针对城市发展需求功能的制约机理,并获取各要素间共同作用行为对地下空间资源评价的影响,为进一步构建评价指标体系和评估模型提供参数。针对复杂地质环境,基于地下空间开发利用类型,重点分析工程地质、水文

地质等条件对地下空间开发利用的制约机理;针对城市环境制约条件,考虑周边环境的互馈影响,重点评价生态、文物、地下及地面设施等的合理保护。对于时间尺度,重点考虑年、季、月;对于空间尺度,重点考虑平面域、垂向域;对于属性尺度,重点考虑分类、分级。并对地下空间局部调查结果集成区域评价模型,以此实现对地下空间资源多尺度多要素的调查研究。

3.2 城市地下空间资源利用现状与潜力评价的指标体系构建

在三维空间,准确定位地质要素的分布及范围,确定已有地下空间利用现状、生态保护、地下文物理藏等因素的空间分布,定位工程建设桩基持力层与软弱层、地下含水层与隔水层的展布和空间变化特征,明确地下空间开发过程中需保护的资源和规避的问题,分类整理后,总结地下空间资源综合开发利用负面清单。综合考虑优良禀赋地下资源、地面建设发展驱动因素、地下空间利用现状、国土空间规划、经济条件、地价等因素,进行地下空间资源潜力评价。具体为,以 GIS 为载体,以地下空间资源评估理论模型及指标体系标准为支撑,对各评估指标进行数字化、标准化处理,基于 GIS 平台对属性与空间数据进行统一管理,对各评估要素的属性值进行综合评判、归类、叠加或数值计算,通过剖分的评估单元为载体,对地下空间资源评估的结果进行空间分布的表达,形成规划区地下空间资源利用现状的总体结果。

以城市地下空间资源开发潜力为目标层,分别选取主要影响因素作为准则层,将各因素中的若干影响因子作为指标层,采用层次分析法(AHP)对定性指标进行权重赋值,对无法定量的指标采用专家打分方法确定等级,以此建立地下空间资源分类评价指标体系。对不同功能需求的地下空间资源类型,基于地下空间资源复杂地质环境分类评价体系,确定资源潜力及开发难易程度模型;结合地下空间周边环境评价指标因子,基于机器学习结合大数据模式构建城市地下空间资源评价指标体系。

3.3 地上地下多种资源协同的地下空间资源利用管控体系构建

充分利用评价过后的地质信息,构建用于规划、建设与管理的地下空间资源管控关键参数指标体系,明确地下空间管控方向,将地下中深层资源

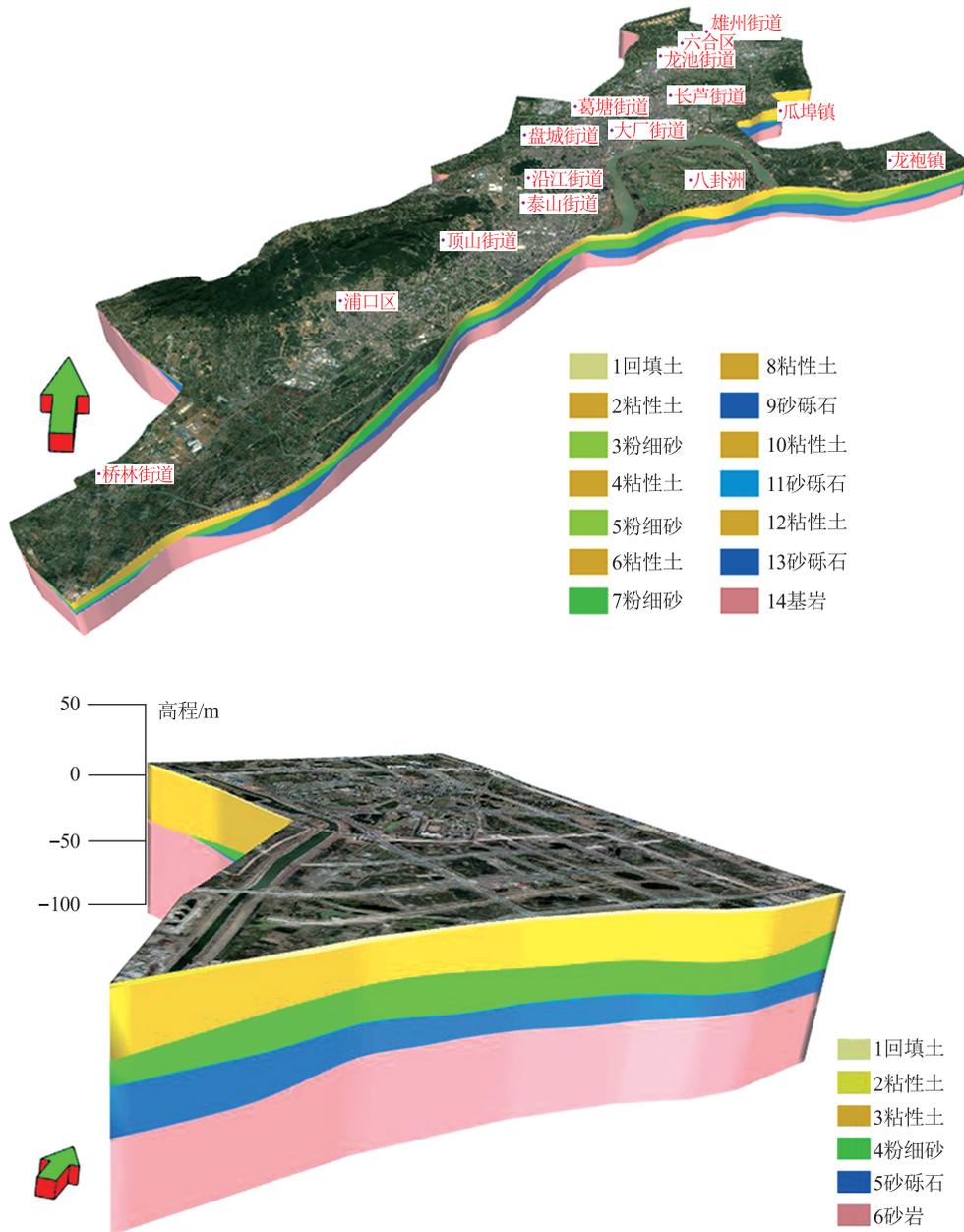


图2 南京市江北新区和核心区地下空间三维地质模型

Fig. 2 Three dimensional geological model of underground space in the Jiangbei new area, Nanjing

纳入地下空间资源管控体系,使城市地下空间资源利用从“无据可依”转变为“有据可依”。具体工作包括:①划界分区,明确城镇空间资源、农业、生态的利用边界;②明确管控落脚点,把握关键地质层位,在城镇空间内明确竖向的资源管控原则和基本对策,拟定差异性、前瞻性的设计;③圈层定位,分层确定主导功能,预控开发深度,为地下空间资源利用的实施与管理,提出科学的依据和监督标准,

并从专业领域对城市地下空间、人防规划提出前瞻性、战略性的构想;④综合管控,基于城市典型地质分区、规划管理中的核心功能的重要承载区、重要功能区的资源精细化利用等综合信息,对主城的地下空间资源再开发、副城和新城的地下空间资源开发等提出管控要求。具体可基于GIS空间分析功能开展对研究区全深度、全资源的综合质量评价,形成适合城市多功能需求的地下空间综合开发利用

网络化、分层化规划评估模型。将综合质量评价定量化和可视化,针对不同需求功能,明确发展商业、农业、工业等设施的适宜性,形成研究区地下空间资源综合开发利用可行性评估。

3.4 地下空间资源多要素数据融合及决策支持服务

构建国土空间基础信息平台,融合基础地理、地质调查数据、现状地上、地下建筑、国土空间规划等多源、多尺度城市空间信息,解决已有各类城市地质调查成果的格式转换、坐标转换、三维模型转换问题,重视地下空间资源多要素数据的统一存储、展示及管理,建立专业化、标准化的地下空间资源多要素信息数据库,实现多要素信息融合可视化与共享服务。开展地下空间资源管控规则与规划资源管理的衔接,实现地下空间资源评价的成果转化、决策支持应用和智慧管理利用,从而提升城市地下空间资源调查评价、规划和开发利用成果的应用水平,为政府、企事业单位和社会公众提供应用服务。

具体方法为,通过资料汇总及二次挖掘,数据库结构开发、管理运营、动态更新等,逐步建立研究区完善的地下空间资料动态管理体系,按照相关标准并以大型关系型数据库 Oracle 为平台,建设多要素全过程的地下空间数据库,建立资料汇交管理机制、地下空间资料服务及共享机制,实现地质资料收集全面化、整理标准化、录入格式化、管理常态化;建设地下空间实物资料库及数据维护中心,实现实物资料和电子资料动态管理维护;建立内网、外部专网等基础网络设施,依据不同的权限划分,向国土、规划、建设、城市管理等部门及公众提供地质信息数据,并按相关规定,提供咨询服务。

3.5 城市地下空间资源综合利用效益评价

地下空间资源综合利用评价将促进地下空间资源与规划自然资源主流程的长效融合,构建政府主导、多部门共同参与的城市地下空间资源服务模式。相较于传统开发模式,地下空间资源的综合利用模式可实现支撑地铁、隧道、管廊等选址选线;优化大型地下综合体及市政设施选址,规避工程建设中的不良地质问题,减少建设成本,保障地下空间全生命周期安全运营等诸多效益。具体来讲,地下空间资源综合利用所产生的效益主要分为直接效益(内部效益)和间接效益(外部效益)。

直接效益表现为相对于单纯地面开发或地下单体开发所降低的建设成本,地下空间综合利用所节约的土地价值及工程全生命周期内地下空间相对于地表建筑运营节约的能源要大。间接效益包括社会效益、环境效益、防灾效益三方面。社会效益包括通过地下空间资源综合利用额外节约的土地价值、合理规划为地区提升生产效率获得的价值、地下交通设施建设为市民节约的出行时间的价值、安全性的提高等方面。环境效益指地下空间综合利用后对于增加城市绿地,降低城市噪声和空气污染,以及减少对敏感地质环境扰动所带来的间接收益^[27]。对于地下空间综合利用的社会效益和环境的定量确定,可采用“有项目(地下方案)”情况和“无项目(地上方案)”情况对比的方法,简称“有无对比法”^[28]。即通过地下空间综合利用和不进行地下空间综合利用的模式进行对比,逐项分析其各项社会效益。地下空间资源综合利用对于防灾方面的效益,可以体现为对地震、战争和气象灾害损失的降低,通过考虑灾害发生的概率、强度及以往的资料及数据,对其破坏性及地下空间的防御效益进行定量计算^[29]。

4 结论和建议

(1)城市地下空间安全开发应高度关注地质条件,需融合多源数据准确构建由全区到重点开发区、特殊地质区等多尺度的三维地质模型与地下空间资源模型,在深入认识构造断裂带、岩溶洞穴、软土、液化砂土等不良工程地质条件和地下水埋藏分布特征的基础上,结合已有地下空间现状、生态保护、地下文物埋藏等因素,统筹考虑城市地下空间开发利用和保护。

(2)城市地下空间科学开发需要基于城市地下空间资源综合利用评价,秉持城市地上地下一个生命共同体、国土空间三维规划与立体开发理念,通过“GIS+数据”分析建立地下空间资源利用评价体系,补齐城市地下空间开发利用地质调查的工作短板,实现城市地下空间有序建设、合理开发、精准管理、高效运行。

(3)城市地下空间资源综合利用评价需要强化大数据技术支撑,调查城市地下空间资源禀赋、识别城市地下空间资源特征、分析城市地下空间资源潜力,综合评估地下空间资源环境承载能力,建立

系统完备的地下空间资源大数据系统,实现数据共享,充分发挥大数据在地下空间规划、建设和管理中的作用,提高地下空间因地制宜、因深度制宜、因地下功能制宜的精准利用和管理水平。

致谢:感谢南京大学李晓昭教授、河海大学骆祖江教授等专家学者对本次研究的支持与指导。

参考文献

- [1] Pajunen M, Airo M L, Elminen T, et al. Construction suitability of bedrock in the Helsinki area based on the tectonic structure of the Svecofennian crust of southern Finland [J]. Special Paper Geological Survey of Finland, 2008, 2008(47): 309-326.
- [2] Kimmo R, Jouko R, Kari R. Under-ground space in land use planning [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1998, 13(1): 39-49.
- [3] Malone A W. The use of underground space in Hong Kong [J]. Tunnelling & Underground Space Technology, 1996, 11(1): 57-64.
- [4] Zhou Y, Zhao J. Assessment and planning of underground space use in Singapore [J]. Tunnelling & Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research, 2016, 55(5): 249-256.
- [5] Raymond L S, Susan R N. Planning for underground space: a case study for Minneapolis, Minnesota [M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 1982: 21-40.
- [6] Maurenbrecher P M, Herbschleb J. The potential use of geotechnical information systems in the planning of tunnels for Amsterdam [J]. Tunnelling & Underground Space Technology, 1994, 9(2): 189-199.
- [7] Bobylev N. Underground space in the Alexanderplatz area, Berlin: Research into the quantification of urban underground space use [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2010, 25(5): 495-507.
- [8] Bobylev N. Mainstreaming sustainable development into a city's Master plan: A case of Urban Underground Space use [J]. Land Use Policy, 2009, 26(4): 1128-1137.
- [9] 祝文君. 北京旧城区浅层地下空间资源调查与利用研究 [D]. 清华大学硕士学位论文, 1994.
- [10] 黄玉田, 张钦喜. 北京市中心区地下空间资源评估探讨 [J]. 北京工业大学学报, 1995, 21(2): 93-99.
- [11] 林树枝, 黄建南, 耿家强. 地下空间工程适宜性探讨 [J]. 福建建设科技, 2009, (6): 4-7.
- [12] 彭苗枝, 包海玲, 刘道彬, 等. 地下空间工程地质适宜性灰色评估 [J]. 采矿技术, 2010, 10(3): 114-116.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Li X Z, Li C C, Parriaux A, et al. Multiple resources and their sustainable development in Urban Underground Space [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 55(5): 59-66.
- [16] 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.
- [17] Chen Z L, Chen J Y, Liu H, et al. Present status and development trends of underground space in Chinese cities: Evaluation and analysis [J]. Tunnelling & Underground Space Technology, 2018, 71: 253-270.
- [18] 陈志龙. 中国城市地下空间发展蓝皮书 2019 [EB/OL] (2019-10-01) [2020-08-09]. http://www.wisusp.com/?page_id=2199. 2020.
- [19] 王成善, 周成虎, 彭建兵, 等. 论新时代我国城市地下空间高质量开发和可持续利用 [J]. 地学前缘, 2019, (3): 1-8.
- [20] 束昱. 地下空间资源的开发与利用 [M]. 上海: 同济大学出版社, 2002.
- [21] 孙晓玲, 韦宝玺. 加强城市地下空间资源管理的思考 [J]. 中国国土资源经济, 2017, 30(4): 26-29.
- [22] 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, (2): 37-40.
- [23] 王直民, 鲍海君, 彭毅, 等. 中国城市地下空间研究范式的转移与扩张 [J]. 中国土地科学, 2017, (5): 62-69.
- [24] 张智峰, 刘宏, 陈志龙. 2016 年中国城市地下空间发展概览 [J]. 城乡建设, 2017, (3): 60-65.
- [25] 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): 4-10.
- [26] DZ/T 0306—2017 城市地质调查规范 [S]. 中华人民共和国国土资源部, 2017.
- [27] 王洋, 彭芳乐. 地下空间社会与环境效益的定量评价模型 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, 42(4): 659-664.
- [28] 姜轶, 陈志龙, 纪会. 地下空间建设项目综合效益经济评价方法 [J]. 地下空间与工程学报, 2004, (4): 470-474.
- [29] 王洋. 城市地下空间开发防灾效益量化评价研究 [C] // 运用安全与节能环保的隧道及地下空间暨交通基础设施建设学术研讨会, 2012.