

DOI:10.16788/j.hddz.32-1865/P.2019.03.008

引用格式: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.

# 城市地下空间探测与安全利用战略构想

程光华<sup>1</sup>,苏晶文<sup>1</sup>,李 采<sup>2</sup>,杨 洋<sup>1</sup>,赵牧华<sup>1</sup>,王 睿<sup>1</sup>

(1. 中国地质调查局南京地质调查中心, 南京 210016; 2. 中国地质科学院, 北京 100037)

**摘要:**城市地下空间开发利用是经济社会发展到一定阶段的必然选择。通过梳理和分析我国城市地下空间开发利用理论、技术发展现状及未来发展趋势,围绕城市地下空间探测与安全利用面临的关键科学问题和技术难题,提出了“全要素”精细探测、“全资源”整体评价、“全空间”协同规划与“全环境”监测预警的城市地下空间探测与安全利用战略构想,构建了城市地下系统平衡和扰动再平衡、地下全空间资源评价、地下空间区划与协同规划三大理论体系和城市地下空间精细探测—资源评价、城市地下空间区划—协同规划、地下空间勘察—施工建造、地下空间监测—预警四大技术体系,为推动我国建立城市立体开发新模式提供理论和技术支撑。

**关键词:**城市地下空间;城市地下空间资源;探测;安全利用;全要素;协同规划

**中图分类号:**TU 984.11<sup>+</sup>3

**文献标识码:**A

**文章编号:**2096-1871(2019)03-226-08

向太空、向海洋、向地下“要空间、要资源、要安全”是人类发展到一定阶段的必然选择,我国已经全面部署“深空、深海、深地”国家战略,“深空、深海”战略已全面启动并取得突破性进展,“深地”战略已列为国家科技战略重点领域。我国地下空间需求大、发展快,已成为世界城市地下空间建设规模和速度第一大国,在地下空间开发工程技术方面居领先地位,但在城市地下空间探测、评价、规划和监测等方面的理论水平和技术水平相对较弱。完善城市地下空间理论体系和技术体系,是科学开发、安全利用城市地下空间资源的必然选择,可为城市立体发展提供理论和技术支撑。

## 1 我国地下空间开发利用现状

历史上,伴随人类的聚居、城市的形成和发展,地下空间不断被利用和开发。1863年建成使用的伦敦地铁是第一次工业革命后西欧城市化进程的产物,成为近代地下空间开发的重要标志。此后,

19—20世纪,西欧和美国城市化和大型中心城市建设中,掀起了地下空间建设的第一次高潮,伦敦、巴黎、纽约的地下空间各具特色,在促进城市交通及市政功能中发挥了重要作用<sup>[1]</sup>。20世纪后期是亚洲城市崛起阶段,日本、韩国、新加坡等亚洲国家城市化进展飞速<sup>[2-3]</sup>,地铁、地下综合管廊、深隧调蓄系统得到了高速发展。

### 1.1 发展现状

与世界发达国家相比,我国城市地下空间资源开发利用起步较晚,但发展迅速。21世纪,我国已成为世界城市和地下空间建设的中心,在建设速度和建设规模方面均达到较高水平。虽然不同地区、不同城市发展地下空间的主要目的和驱动因素不同,但在城市化不断发展,人口、资源聚集的过程中,地下空间发展趋势具有较高的相似性。按照轨道交通发展阶段并结合未来发展趋势,我国城市地下空间开发利用可分为初始化、规模化、初始网络化、规模网络化和生态城5个阶段(表1)。

\* 收稿日期:2019-04-10 修订日期:2019-06-09 编辑:叶海敏

**基金项目:**中国地质调查局“皖江经济带安庆—马鞍山沿江段1:5万环境地质调查(编号:DD20160247)”和“皖江城市群综合地质调查(编号:DD20190261)”项目联合资助。

**第一作者简介:**程光华,1962年生,男,教授级高级工程师,主要从事城市地质、区域地质调查和地下空间探测评价研究工作。

表 1 我国城市地下空间开发利用发展阶段

Table 1 Development and utilization stages of urban underground space in China

发展阶段	重点功能	发展特征	布局形态	开发深度	代表城市/地区
初始化	地下停车、人防	单体建设、功能单一、规模较小	散点分布	10 m 以内	一般地级城市
规模化	轨道交通	沿轨道交通呈线状开发	据点扩展	15~20 m	哈尔滨、福州、青岛、宁波、太原、厦门
初始网络化	轨道交通节点及综合体	地铁线路交叉出现重点利用节点,地下综合体	初始网络	30 m	广州、深圳、南京、杭州、重庆、天津
规模网络化	各种公共设施	以地铁系统为网络,综合开发商业、交通、市政等地下设施	网络延伸	50 m	上海、北京
生态城			未来发展方向		

目前,我国城市地下空间开发以地铁建设为主,需求大、发展快,总规模已居世界第一位。近年来,以综合管廊为代表的地下市政基础设施开始兴起,东部大城市以交通枢纽建设的地下综合体为重点。“十二五”以来,我国城市地下空间建设量显著增长,年均增速达 20% 以上,约 60% 的现有地下空间为“十二五”期间建设完成。据不完全统计,地下空间与同期地面建筑的面积比例逐渐增加,尤其在人口密集和经济活动高度发达的大城市,在轨道交通和地上地下综合建设带动下,城市地下空间开发规模增长迅速。

伴随着城市地下空间开发利用的普遍开展,我国制定了“十三五”地下空间开发利用规划。各城市规划建设公开信息显示,截至 2015 年底,我国已有北京、上海、重庆、南京、杭州、深圳、青岛、沈阳、昆明、武汉等几十个城市编制完成了地下空间总体层面规划。一些城市,特别是特大、超大城市中心区,结合旧城改造和新区建设,已编制或正在编制地下空间详细规划。

## 1.2 发展趋势

(1)地质调查先行支撑。地下地质情况复杂,位于不同地质地貌单元的城市地质结构和资源禀赋各不相同,加之地下空间系统涉及面广,多种地质要素相互交织,互馈作用复杂,对环境变化和工程扰动响应敏感。因此,在城市地下空间开发利用规划阶段,首先要系统开展地下空间资源调查和评估,为区划和整体规划提供地质依据。在地质调查中,对城市地上地下地质条件、资源、环境、空间、灾害等进行全面调查,构建城市三维地质结构模型,综合评估城市地下空间资源和地下空间开发适宜性,城市地下空间资源调查与评估必须作为城市地下空间规划的前置刚性约束。

(2)分层化与网络化规划布局。目前,我国处于城市地下空间规模化开发阶段,规划指导作用尤为凸显。在城市总体规划层面上,根据城市未来经济条件和发展需求,结合当地地质特点与城市延伸方向,合理布局和分层规划是城市地下空间未来发展的必然趋势。

(3)地下资源协同开发利用。城市地下除了可利用空间,还赋存地下水、地热能、地质矿产等多种宝贵的地质资源,每种资源的开发将会对其它资源产生扰动和影响,严重时会产生灾害。因此,在开发地下空间时,识别和评价与其共生的其它地下资源的特征和互相作用模式,是未来安全开发地下空间的趋势<sup>[4]</sup>。广义上,地下空间的协同化发展包括地上设施与地下空间的一体化协同、地下不同层位之间的功能布局协同、不同开发类型地下空间的功能配合协同,以及地下空间开发过程中探测、评价、规划、施工、监测、监督管理的全链条协同。

(4)管理数字化、智能化。城市地下空间规划、设计、建造、运营维护与防灾安全管理均离不开全面了解和准确掌握城市地下空间基础数据。采用数字化、智能化方式对城市地下空间数据进行管理是必然的发展趋势,即在地下空间探测—规划—建设全过程中对地下空间的所有数据实行信息化管理,为城市地下空间合理规划、建设和决策,城市防灾和应急处置提供依据。

## 2 我国地下空间开发面临的问题

### 2.1 地下地质情况不明

要高效、安全、充分利用地下空间,必须首先查清楚地下空间的地质情况<sup>[5]</sup>。地下地质系统包含岩、土、水、气等各种物质,是温度场、应力场、电磁场、化学场、能量场等相互作用的复杂平衡系统,是经过漫

长地质历史演化形成的,是不同时期、不同阶段内、外动力地质作用形成的共生组合体。目前,虽然城市地质调查工作在城市规划布局中发挥了重要作用,但工作精度、深度和广度不足以支撑城市地下空间开发利用,对制约城市地下空间开发利用的地层结构及物理力学特征、地下水特征、活动断层、特殊岩土、地下岩溶等关键工程地质要素的调查不足,支撑地下空间规划开发利用的关键数据和信息不全,导致地下工程施工、运营中对可能发生的重特大事故或生态环境破坏无法进行及时有效的预测和防治。

城市地下空间开发初期关注的重点是区位和通达性等社会经济因素,对地下地质条件的考虑较少。随着城市发展的需要,基础工程的迅猛增加,人类工程活动对地质环境的影响与改造前所未有,地下空间开发过程中常伴有地面沉降、地裂缝和滑坡等地质灾害发生,而对这些地质灾害机理的认识还远没有像对台风掌握的清楚。究其原因,是对与地下空间开发利用相关地质灾害的孕育、发生和发展规律还没有完全掌握,对城市地下空间开发扰动地下水、诱发地层移动与损伤变形等演化与灾变机理不明确。此外,大部分城市对地下空间资源属性及其已开发利用的基本现状掌握不足,已有地下空间利用或占用情况不明,如不同时期建设的各类地下管线、地下室、地下通道、建筑物基桩分布等情况不清楚。对后期工程施工造成的安全隐患或不利影响为:造成工程报废、为了规避导致工程造价提高、改造后又影响下一个工程等等。

因此,全面掌握城市地下地质情况和已有地下空间开发利用现状,分析城市地下空间开发与地质环境的相互作用规律,评价工程扰动下地质结构的变形破坏规律及其对工程结构物的影响,是减少地下空间开发对地质环境影响、保障城市地下空间安全利用和地下工程安全的关键。

## 2.2 城市复杂环境下地质探测技术存在瓶颈

1980年,我国开始开展地下空间探测与调查工作,在100多个大中城市使用航磁、重力、电阻率法和放射性法等物探手段开展了1:5万—1:1万综合区域物探工作,基本探明大区域尺度的构造及其稳定性。但针对城市区域的地下空间探测工作始于2003年,以北京、上海、天津、广州、南京、杭州为城市地质调查试点地区<sup>[6]</sup>,开展了城市尺度的地下地质探测,综合采用了钻探及高精度重磁、电磁法勘

查、地震纵横波勘探、测井、井中物探等地球物理探测方法或方法技术组合。地球物理探测方法和技术在国外地下空间探测中基本用于工程物探勘察,日本主要使用面波、浅层地震反射勘探;加拿大主要使用地质雷达、高密度电阻率成像、浅层地震;新加坡主要使用电阻率成像、浅层地震、测井及井中物探。对于系统性的城市地下空间探测,案例还较少。

城市地区开展地质探测,除了要解决浅层探测的分辨率问题,还要面临城市复杂环境下的干扰问题。现有地球物理探测技术在解译浅部地层(0~200 m)信息的精度还不够,无法克服城市高干扰问题。此外,目前国内钻探测试技术尚不成熟,测试要素较少,获取天然状态下岩土体信息不足。

## 2.3 地下空间资源评价与协同规划理论不成熟

我国对地下空间资源的评价和研究起步较晚。1990年,北京最早使用遥感技术进行浅层地下空间资源调查,进行了二环内10 m以上浅层的既有地下设施调查和地下空间可供开发资源评价,开始尝试大城市中心城区和重点地区地下空间资源调查评估<sup>[7]</sup>。2000年,香港进行了地下空间开发适宜性评价和岩体质量评级,并结合开发难度、开发适宜性和政策需求开展了地下空间综合质量评级<sup>[8]</sup>。目前,地下空间资源评价通常基于地形、地质条件、水文条件、社会经济需求等多因子加权打分的“地下空间开发适宜性评价”<sup>[9-11]</sup>,然而这种评价对地下空间的资源属性表达不充分,没有把地下空间作为资源来评价其质、量等蕴藏的禀赋特征。缺乏对地下空间资源属性的认识和评估,可能对于国内城市,尤其是开发力度大的城市,在地下空间开发过程中的可持续开发能力造成影响。

我国地下空间规划始于2001年北京市政府组织编写的《北京市中心地区地下空间开发利用规划大纲》。21世纪以来,随着我国经济快速发展,我国大中城市地下空间规划工作陆续展开,截止2015年,已有三分之一以上的城市编制了城市地下空间专项规划。《城市地下空间开发利用“十三五”规划》<sup>[12]</sup>提出,力争到2020年不低于50%的城市完成地下空间开发利用规划编制和审批工作,促使更多的城市推进地下空间探测和评价工作。从全国整体看,当前地下空间规划实际编制与评审过程中与地质调查部门衔接不紧密,导致对地质信息的获取和解读严重不足,

使已查明的地质信息无法充分运用在地下空间规划中。此外,在未摸清地下地质结构的前提下,对地下空间分层利用、深层市政设施进行布局和规划,其科学性和安全性将大打折扣。

### 3 战略构想

#### 3.1 “地下空间”内涵

狭义上,“地下空间”是地表以下自然形成或人工开发形成的空间,自然地下空间是地质作用形成的洞穴、孔隙、裂隙等地下空间,可以开发为地下工厂、地下仓库、地下电站、地下停车场、地下防空洞。广义上,“地下空间”泛指地表以下的空间,包括地表以下的地质体、天然形成的各种洞穴以及人类建造的地下建筑体。本文的研究对象是指广义上的地下空间,包括地下空间工程与地质环境的相互影响作用。

“地下空间资源”是可供人类开发利用并可开发形成地下空间的岩土体。1982年,联合国自然资源委员会正式将地下空间列为“潜在和丰富的自然资源”,并被认为是与宇宙、海洋并列的、未来最具有开拓价值的领域<sup>[13-15]</sup>。

#### 3.2 地下空间探测与安全利用新理念

##### 3.2.1 地下空间“全要素”精细探测

地下空间开发利用是在地下地质体中进行,因此,探明城市地下“土岩水气”属性特征和演化规律、摸清地下地质情况、识别地下空间开发关键地质环境要素,是地下空间安全开发利用的关键。

针对城市地下岩土地质结构特征,按地质条件,将城市划分为单一地质结构和复合地质结构两大类型。单一地质结构指 200 m 以上浅部松散层或某一类基岩为主的地质结构类型,如上海等平原城市以松散层地层为主、青岛以花岗岩为主、桂林以碳酸盐岩为主。复合地质结构型是 200 m 以下浅松散层与基岩组合发育的地质结构类型,包括二元复合结构和多元复合结构,二元复合结构主要为 2 种岩土类型组合,如上部为松散层,下伏基岩,岩性和结构相对单一;多元复合结构主要为 3 种及以上岩土类型组合,如上部松散层下伏多种基岩组合。

围绕城市地下空间安全开发和利用,根据不同地质条件类型的城市对地下空间开发利用的控制因素,明确探测对象和探测重点,筛选全要素指标,建立城市地下空间全要素探测指标体系(表 2)。

表 2 不同地质结构类型探测重点  
Table 2 Key detection points for different geological structure types

地质结构类型		探测重点
单一地质结构	一般松散层区	地层分层、活动断裂、地裂缝、地面沉降,获取岩土物理力学参数、地下水流量、温度场、地球化学场等属性参数
	黄土区	黄土覆盖层厚度、黄土结构、基底地质构造、活动断裂、地裂缝、地面沉降等
	碳酸盐岩区	隐伏岩溶(溶洞、土洞)的规模、分布及埋深,探测岩溶地下水(暗河走向、地下水补径排泄量)
	砂泥岩区	硬质层和软弱层分布范围、厚度、埋深及结构构造,探测不同岩层分界线
	花岗岩区	岩体完整性及裂隙空间分布,岩体与周边地层接触面,岩体风化壳范围、厚度及埋深、地应力、岩体物理力学性质、地下空间热力场等属性参数
复合地质结构	二元结构型区	浅部松散层物理力学性质、松散层地层压缩性、下伏基岩结构、隐伏断裂、风化层特征等
	多元地质结构型区	各类地质体接触关系、下伏基岩结构、覆盖层下隐伏断裂三维空间展布、应力在松散层传递规律、松散层下基岩风化层厚度及空间展布、区域构造、断裂、地下水活动规律等

除了针对地下地质情况进行基础地质探测外,既有地下空间的探测也是重要的组成部分。针对城市建成区既有地下空间和天然空洞,探明地下空洞三维形态,实现 360°实时扫描,准确显示地下空洞的三维形态。

##### 3.2.2 地下空间“全资源”整体评价

传统的地下空间评价,仅从工程条件的适宜性开展地下空间开发利用适宜性评价,未考虑城市地下空间开发过程对矿产、地下水、地温、地质材料等资源的利用和影响。本文建立地下空间“全资源”评价理念,统筹考虑各类资源,是新时代地下空间开发利用的发展方向。

要开展地下空间“全资源”评价,首先需要开展地质构造、岩土地层、地下水、地温场等资源与地下空间工程耦合作用下城市地下空间系统的分区分层特征研究,全面分析地下空间资源类型(包括地下空间、矿产、地下水、地温能、地质材料、岩土材料

等)、品质、容量及开发强度,识别各类资源禀赋的量化参数及其区位差异;其次是确立单一、复合两大类地质结构条件下评价要素选取与量化方法,建立地下空间全资源整体评价的指标体系与评价模型;最后,提出地下空间资源不同类型子系统划分规则,实现城市地下空间全资源、多尺度动态评价。

地下空间开发后对地质环境条件和地质资源的影响是需要密切关注的问题,坚持可持续发展,在“全空间资源”评价的基础上,开展研究全球变化背景下,地质环境扰动及地下空间开发利用对城市地下空间资源的反馈影响研究,开展城市地下空间全资源动态分析,揭示城市地下空间开发和利用过程中地下空间资源及其他资源的质量与容量变化特征及其规律,研究地下空间资源环境演化模拟方法,以确保城市地下资源可持续利用,保障地质环境安全和城市安全。

### 3.2.3 地下空间“全空间”协同规划

城市地下空间规划包括平面布局与竖向深度规划控制。城市地下空间功能需求与潜在价值的不同,城市地质环境及各种保护要求,共同决定城市地下空间开发的适宜性,并成为地下空间功能区划与规划控导的主要影响因素。因此,在现有城市规划理论的基础上,开展城市地下空间资源规划原理与方法研究,实现城市地下空间“全空间”协同规划。

不同发展阶段、不同类型的城市,对城市地下空间开发利用需求也不同。以开展面向未来的城市地下空间功能需求及其预测方法研究为前提,分析不同类型的城市需求,开展不同功能、不同规划期地下空间开发研究,进行潜在价值与经济、环境、生态等多目标社会和环境效益分析,从而获得地下空间开发难度与潜在价值预测,为协同规划提供依据。

城市地下空间协同规划,需要从整体角度统筹考虑地下空间开发内在需求与潜在价值、资源环境保护以及地上地下统一规划,在现有城市规划理论的基础上,基于地下空间功能需求及资源利用与保护、环境影响与控制、经济成本与效益、韧性城市恢复力等,开展地下空间协同规划理论与方法创新,确立城市地下空间规划的控导方法,建立地下空间平面区划方法及不同功能分层开发模式,并形成地下空间重点、优化、限制、禁止与开发的原理与评价指标体系,实现城市地下“全空间”协同规划。

针对目前地下空间开发引发的环境问题,了解

规划在城市地下空间可持续发展中的职责,开展规划后评估研究。一是研究地下空间开发利用对城市大环境的影响机制(包括正面影响和负面影响),建立城市地下空间规划环境影响评价指标体系和相应的方法,保证地下空间开发利用的环境效益最大化发挥。二是提出城市地下空间规划对于城市地下“全空间资源”,包括空间资源、地热资源、地下水资源、矿产资源等的协调利用水平和未来资源可持续利用的影响。

### 3.2.4 地下空间“全环境”监测预警

地下空间开发过程中出现的各类地质灾害和环境演变值得关注,因此,掌握城市地下空间开发与地质环境的相互作用规律,通过对地下工程和地下水、土、气等地质环境开展监测,评价工程扰动下地质结构的变形破坏规律及其对工程结构物的影响,从而减少地下空间开发对地质环境影响,保障地下工程安全和城市整体安全,保证经济社会和地质环境可持续发展。

我国城市地下空间的发展潜力巨大,监测任务艰巨。首先,要开展地下空间监测理论与方法研究,解决监测指标选取、精度控制、监测分析模型和方法选定、数据平滑去噪、模式识别、数据挖掘、温度补偿等难题。其次,加大研发新型地下空间传感器和解调系统,解决网络集成、数据存储传输、数据库系统、监测数据可视化、供电方案等问题。

在理论研究的基础上,结合城市地下空间开发利用和地质环境特点,选择合适的监测点网布设和监测方法,在线实时获得城市地下空间开发利用全过程的地质环境变化和灾变分布信息,如地面沉降与塌陷、滑坡、地裂缝、城市水污染、海(咸)水入侵、岩土化学污染等灾害信息,地温场升高及其引起的灾害效应,地下古河道系统破坏等。另一方面,通过数值模拟和模型试验等信息技术,掌握地质岩性与构造、水文地质与工程地质条件、含水层与古河道分布等地质环境监测信息变化规律,掌握既有城市地下设施,如水、电、气管道(廊),地铁等地下通道,建筑基础,储存库、防空洞、地下硐室等的监测信息变化规律。

通过对监测原则、技术以及监测资料汇总整理分析,建立用于地下空间开发风险评估和地质灾害预警的人工智能预测预报模型、非线性预测预报模型和基于 GIS 技术的信息模型。

### 3.3 地下空间探测与安全利用理论与技术新体系

以地球系统理论为指导,融合地质、规划、工程、建筑、经济管理等多学科理论,在系统开展“全要素”精细探测、“全资源”整体评价、“全空间”协同规划、“全环境”监测预警的基础上,创新地下空间

探测与安全利用理论,构建精细探测—资源评价、区划—协同规划、勘察设计—施工建设、监测预警—应急处置四大技术体系,服务地下空间开发利用全过程,支撑地下空间安全利用和科学管理,为相关法律法规制定提供支撑(图1)。

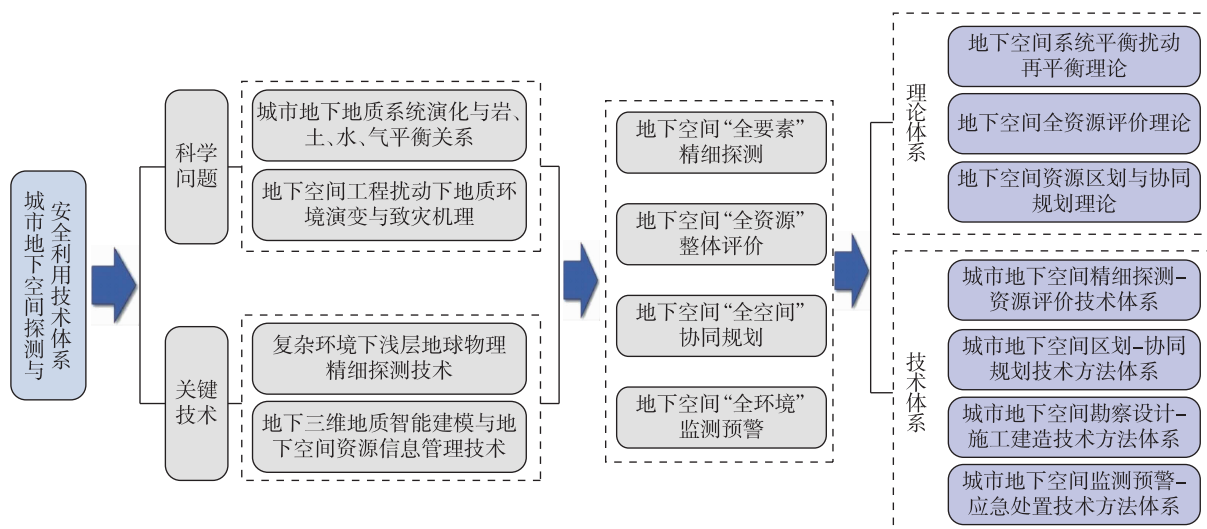


图1 城市地下空间精细探测与安全利用技术体系

Fig. 1 Fine detection and safe utilization technology system of urban underground space

#### 3.3.1 理论体系

与传统地下空间开发利用强国相比,我国在地下空间资源评价和区划规划等理论方面存在明显差距和不足,必须从地下空间资源与协同可持续发展角度出发,考虑城市地质环境与地下空间协同、地上设施与地下空间协同、地下空间不同层次之间协同、地下空间不同开发类型协同,城市地下空间与地质资源综合利用协同等方面,创新城市地下空间理论体系。

(1)地下空间系统平衡与扰动再平衡理论。城市地下岩、土、水、气是经过漫长地质历史演化形成的相对稳定的地下动态平衡系统,是由不同时期、不同阶段内、外动力地质作用形成的共生组合体。目前,缺少城市地下地质系统平衡和扰动后再平衡的理论基础,地质平衡系统形成与演变过程、变化规律、驱动因素对地下空间资源控制不清楚,传统的水文、工程、环境学科理论难以为城市地下全要素探测、全空间资源评价提供理论支撑,以至于地下空间探测要素不齐全,探测目标不明确,立体表达的单元与系统划分不统一,影响动态地质平衡关键因素、关键参数、关键区域的识别。因此,需要创新城市地下地质系统平衡和扰动再平衡理论,指导城市地下空间探测与评价。通

过地下空间全要素探测,划分相对稳定的动态平衡系统,探明系统内部物质组成、边界,建立应力场、温度场、化学场、地下水流场、力学参数等系列参数档案,评价各系统的自平衡状态,系统边界的稳定性,以及不同系统之间的关系。

(2)地下空间资源评价理论。地下空间资源受制于地下构造展布、地层结构、岩土属性及地下水系统等地质环境要素,地下多种资源类型(包括地下空间、矿产、地下水、地温能、地质材料等)并存,从全空间资源角度,建立城市地下全空间资源、多尺度动态评价新理论。

(3)地下空间区划与协同规划理论。城市地下空间区划和规划是个复杂的体系,地下空间资源是有限的,科学、安全开发利用城市地下空间资源必须首先进行地上地下一体化的统一、协同顶层规划,这一顶层规划必须是科学、缜密、综合的长远规划,必须是全面考虑地质、经济、安全、环境,进行多因素、全功能、全深度、全资源区划和协同规划。

#### 3.3.2 技术体系

为促进我国地下空间安全利用,在攻关关键技术的基础上,形成保障地下空间科学利用和安全运



行全过程的整套技术体系。

(1)城市地下空间精细探测—资源评价技术体系。城市地下空间重点探测0~200 m地下空间开发利用层,同时兼顾人类影响层(0~500 m)和区域地质构造控制层(0~1 000 m),针对我国不同区域城市地下空间开发现状与地质环境具体特点,确定探测深度。一是研发适用于探测地下0~1 000 m以内不同深度、不同精度岩、土、水、气组成、结构、参数、指标、储存、显示、分析、表达所需要的定位测量技术、物探技术、钻探技术、测井技术、测试技术、监测技术、数据集成技术、三维建模技术;二是研究城市地下空间资源禀赋、安全资源量、资源品质、资源经济价值、环境影响等及地下空间分层功能适用性。形成地下空间资源整体评价指标、模型和技术方法。通过关键技术攻关和技术方法集成,形成城市地下空间精细探测—资源评价技术体系。

(2)城市地下空间区划—协同规划方法体系。建立地下空间协同区划—协同规划技术体系是地下空间安全利用的必由之路。研究不同功能地下设施埋深适宜性、协同演化机理、空间布局要求;研究城市地下全资源(地下空间、地下水、地热能、地质材料)开发相互影响的识别评价方法,包括模式识别、表征指标体系、系统动力学模型与模拟方法等;提出城市地下多种资源协同开发的原理、优先级及避让保护方法、开发边界与规划控导方法、协同规划与管控方法等技术。

(3)地下空间勘察—施工建造技术体系。研究考虑岩土介质、地下结构以及多种界面影响的城市既有地下空间的探测理论和技术,基于地下结构的服役规律,建立城市既有地下空间服役性、使用性、结构安全性的评估模型及既有空间改造的可行性分析方法;研究既有结构与新结构的长期协同机理,分析改扩建工程的环境扰动影响,形成城市既有地下空间改造工程的设计方法、施工关键技术,并研发配套施工装备。建立不同深度岩土体结构模型,研究多场环境下地下工程扰动—平衡机理,形成深层地下空间多场、多尺度地层—结构—环境耦合理论和计算模型,建立深层地下结构全寿命的安全评估方法以及其对地下水、地质环境、浅层地下结构和区域地表沉降的影响分析方法;研究复杂地质环境、场地环境下的地下工程响应和扰动规律,形成地下工程建造关键技术体系;研发适合深层地下空间的新型结构形式、施工工艺和设备,建

立深层地下空间施工的微扰动施工控制体系,构建基于风险管控的建设、运维安全体系,实现深层地下空间的绿色、友好、开放、安全建设。

(4)地下空间监测—预警技术体系。主要包括与地下深部大变形相适配的传感器设计,高压、高温环境下应力、应变传感器研发,深部钻孔传感器的植入及保护技术以及地下神经网络功能集成与自适应技术;多参量传感器数据整合融合和智能处理技术;深部岩体和地质环境全面、完整的动态信息获取技术;地下空间地质环境演变与地下工程安全预测预警模型。通过监测—预警技术体系的信息获取和模型厚茧,利用动态监测信息,实现地下空间地质环境演变与地下工程安全状况的态势分析、超前预测和安全预警。

## 4 结 论

(1)向地下要空间,科学开发、安全利用城市地下空间资源,是转变城市发展方式、突破城市发展瓶颈、破解城市发展困境的必然选择。

(2)围绕我国地下空间探测与开发利用的现状,提出了地下空间“全要素”精细探测、“全资源”整体评价、“全空间”协同规划和“全环境”监测预警新理念,围绕地下空间开发利用中面临的重要科学问题和关键技术问题,构建了城市地下空间探测与安全利用新的理论体系和技术体系。

(3)上述新理念、新理论、新技术的提出,旨在促进我国城市地下空间探测、开发、安全利用和科学管理,丰富和完善地下空间学科的理论体系。

**致谢:**本文是在中国地质调查局和中国地质科学院地球深部探测中心的支持下,是城市地下空间探测与安全利用领域专家、学者的集体智慧结晶,探测技术方法方面专家有:戴春森、石显新、邓晓红、夏江海、谭卓英、罗水余、贾军、宋殿兰等;地质调查、资源评价和协同规划方面的专家有:徐锡伟、李晓昭、吴立新、廖云平、史玉金、张光辉等;监测预警方面的专家有:施斌、张丹、朱鸿鹄等;信息系统方面的专家有:李超岭、花卫华、李丰丹等;特殊地下空间利用专家有:邓建辉、高明忠、李旭峰等。本文编写过程中,董树文研究员、高锐院士、王成善院士、王复明院士、彭建兵教授、朱合华教授、陈志龙教授给予了高屋建瓴的指导,南京大学、中南大学、

同济大学、解放军陆军工程大学、四川大学、北京科技大学、中国科学院地质与地球物理研究所、中国地震局等有关高校和科研院所给予了大力支持,在此一并表示感谢!

## 参考文献

- [1] 崔曙平. 国外地下空间开发利用的现状和趋势[J]. 城乡建设, 2007(6): 68-71.
- [2] 李地元, 莫秋喆. 新加坡城市地下空间开发利用现状及启示[J]. 科技导报, 2015, 33(6): 115-119.
- [3] 李小春, 蒋宇静. 日本的地下空间利用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(Z): 4770-4777.
- [4] 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: 59-66.
- [5] 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.
- [6] 程光华, 翟刚毅, 庄育勋, 等. 中国城市地质调查成果与应用: 北京、上海、天津、杭州、南京、广州试点调查[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 5.
- [7] 黄玉田, 张钦喜, 孙家乐. 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.
- [8] HO J. Feasibility study of vertical greening for underground space in Hong Kong[D/DB]. 2015. [http://dx.doi.org/10.5353/th\\_b5673742](http://dx.doi.org/10.5353/th_b5673742).
- [9] 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.
- [10] 方寅琛, 龚日祥, 李三凤, 等. 基于三维地质模型的地下空间开发适宜性评价——以嘉兴城市地质调查工作为例[J]. 上海国土资源, 2017, 38(2): 43-45.
- [11] 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.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 住房城乡建设部关于印发城市地下空间开发利用“十三五”规划的通知[EB/OL]. 2016-05-25[2016-06-27]. [http://www.mohurd.gov.cn/wjfb/201606/t20160622\\_227841.html](http://www.mohurd.gov.cn/wjfb/201606/t20160622_227841.html).
- [13] 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, 18(2): 69-74.
- [14] 钱七虎. 中国城市地下空间开发利用的现状评价和前景展望[J]. 民防苑, 2006(Z): 1-5.
- [15] 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.

## Strategic thinking of urban underground space exploration and safe utilization

CHENG Guang-hua<sup>1</sup>, SU Jing-wen<sup>1</sup>, LI Cai<sup>2</sup>, YANG Yang<sup>1</sup>, ZHAO Mu-hua<sup>1</sup>, WANG Rui<sup>1</sup>

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

2. Chinese Academy of Geological Science, Beijing 100037, China)

**Abstract:** The development and utilization of urban underground space is an inevitable choice when an economic society develops to a certain stage. This study analyzed the current situation and future change trend of theories and technologies of urban underground space development and utilization. With emphasis on key scientific problems and technological difficulties occurring in urban space detection and safe utilization, a strategic thinking was proposed, consisting of “total factor” fine exploration, “total resource” overall evaluation, “total space” collaborative planning and “total environment” monitoring and warning. Three theoretical systems, which are the balance and disturbance re-balance of urban underground system, resources evaluation system of underground total space, and underground space division and planning system were also established. The three systems, along with other four technological systems, such as urban underground space fine detection-resource evaluation, urban underground space division and planning, underground space exploration and construction, underground space monitoring and warning system, will provide theoretical and technological support for promoting the establishment of urban 3D development model in China.

**Key words:** underground space; underground space resources; exploration; safe utilization; total factor; collaborative planning