

新发展阶段城市地下空间开发利用发展战略研究

彭芳乐^{1,2}, 乔永康^{1,2*}, 董蕴豪^{1,2}, 闫治国^{1,2}, 朱合华^{1,2}

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学地下空间研究中心, 上海 200092)

摘要: 作为城市建设和国土空间资源的重要组成部分, 城市地下空间开发利用在新发展阶段的地位和作用愈显突出。本文通过剖析新发展阶段的新需求和新问题, 提出了城市地下空间开发利用的新发展策略。基于国土空间规划新体系, 绿色、低碳、韧性新理念以及土地存量更新的新模式等新发展阶段的特征和要求, 分析了城市高质量发展对地下空间开发利用的战略需求; 提出了新发展阶段城市地下空间开发利用需要解决的一系列新生问题, 包括国土空间资源禀赋调查评价不足、承载能力概念不清, 城市地下空间的绿色低碳韧性挖潜不充分, 城市地下基础设施资源配置不均衡、发展机理机制不明确等。在此基础上, 从治理体系建设、资源智慧管理、规划理论方法、数据驱动范式、深层空间利用、存量空间重构、新区一体化开发及地铁域控制等8个方面阐释了新发展阶段城市地下空间开发利用的重点任务和发展建议, 以期为实现城市地下空间的立法为本、规划引领、建设有序和智慧管理提供有益借鉴。

关键词: 城市地下空间; 国土空间规划; 低碳韧性; 存量更新; 智能规划

中图分类号: TU28 **文献标识码:** A

Development Strategy for Urban Underground Space in the New Development Stage

Peng Fangle^{1,2}, Qiao Yongkang^{1,2*}, Dong Yunhao^{1,2}, Yan Zhiguo^{1,2}, Zhu Hehua^{1,2}

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Research Center for Underground Space, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: As a crucial component of urban development and territorial space resources, the urban underground space plays an increasingly important role in the new development stage. This study analyzes the new demand and challenges in the new development stage and proposes development strategies of the urban underground space accordingly. Based on the characteristics and requirements of the new development stage, this study analyzes the strategic demand for urban underground space utilization from the perspectives of territorial space planning system, green and low-carbon resilience concepts, and urban renewal modes. Subsequently, it proposes a series of new challenges to be addressed for urban underground space development in the new development stage. These challenges include the deficiency in territorial resource investigation and assessment, ambiguity in underground bearing capacity, deficiency in exploiting the low-carbon and resilient potentials of the urban underground space, and imbalance in resource allocation and ambiguity in development mechanism of the infrastructure. Furthermore, eight priority tasks and corresponding development suggestions are proposed from the aspects of legal and administrative system development, smart management of resources, planning theories and methods, data-driven paradigm, deep space utilization, spatial reconfiguration of built space, integral development of new areas, and regulation of metro-led space. This study is expected to provide insights for the legislation, planning, construction, and management of

收稿日期: 2024-01-10; 修回日期: 2024-03-11

通讯作者: *乔永康, 同济大学地下空间研究中心助理教授, 研究方向为城市地下空间开发利用规划; E-mail: qiaoyongkang@tongji.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“新时期城市地下空间发展战略研究”(2022-XZ-51); 国家自然科学基金项目(42071251, 42201284, 42301289)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

the urban underground space.

Keywords: urban underground space; territorial spatial planning; low-carbon resilience; urban renewal; intelligent planning

一、前言

作为城市国土空间资源的重要组成部分,城市地下空间在不同时期、不同发展阶段都发挥着至关重要但不尽相同的作用。20世纪50—80年代,城市地下空间服务于国家人防建设;改革开放以来,城市地下空间开发利用逐渐从以人防建设为主的平战结合阶段过渡至以服务城市建设、提高城市发展综合效益为主要目标的有序发展阶段;进入21世纪后,在房地产市场和轨道交通建设蓬勃发展的驱动下,我国城市地下空间开发利用获得了快速发展^[1],在解决“城市病”、改善城市生态环境、优化城市空间结构、提高城市韧性等方面发挥了重要作用。

目前,我国进入全面建设社会主义现代化国家、向第二个百年奋斗目标进军的新发展阶段。“十四五”规划纲要指出,在新发展阶段,我国经济社会发展面临极其错综复杂的形势,也蕴含前所未有的机遇和挑战。随着我国经济由高速增长阶段转向高质量发展阶段,新发展阶段对城市空间及其承载功能的需求和要求发生变化,城市空间开发利用需要基于新的发展特征作出变革响应,推动空间再生产、再创造、再优化、再塑造,更好推进以人为核心的新型城镇化^[2]。作为城市空间不可分割的重要组成部分,城市地下空间在新发展阶段仍面临诸多机遇与挑战。一方面,新发展阶段呈现的国土空间规划新体系,绿色、低碳、韧性新理念,土地存量更新的新模式等发展特征都与城市地下空间息息相关,为城市地下空间发展带来新的驱动力和增长点。另一方面,新发展阶段的上述发展特征也对城市地下空间发展提出了更高的要求,而传统城市地下空间开发利用的底层逻辑和技术方法难以满足城市高质量发展要求,亟待突破和创新。当前,对地下空间资源性资产及其可持续发展价值的认识尚有不足^[3,4];地下空间开发方式多以简单粗放为主,难以与城市其他地上、地下系统共同支撑特大城市的安全运行^[5];地下空间规划技术体系与国土空间规划体系脱节^[6];城市存量更新背景下的地下空间规划理论亟待完善。同时,随着智慧城市、智慧社区

建设的不断推进,以韧性、智能、绿色、人文为发展目标的智慧基础设施、基础理论和顶层设计方兴未艾^[7],而智慧地下空间的发展范式和实现路径尚不明确。

为科学合理地推进城市地下空间开发利用,本文基于国土空间规划新体系,绿色、低碳、韧性新理念以及土地存量更新的新模式等特征和要求,分析新发展阶段对城市地下空间开发利用的战略需求,总结城市地下空间开发利用亟需解决的新生问题,提出新发展阶段城市地下空间开发利用的重点任务和发展建议。

二、新发展阶段我国城市地下空间开发利用的战略需求

(一) 国土空间规划新体系下的城市地下空间战略需求

在《中共中央 国务院关于建立国土空间规划体系并监督实施的若干意见》(2019年)的指导下,我国已初步形成了国土空间规划体系的整体框架。城市地下空间是国土空间资源的重要组成部分,在开发利用过程中仍存在相关规划不一致的问题。例如,在地下空间规划的过程中,经常出现地面建设用地权利人与地下建设用地权利人的权属纠纷、非建设用地中的生态用地以及文物保护单位的核心保护区地下空间开发受阻、规划地下空间设施与人防设施的空间配置指标冲突等问题^[8],亟需统筹地上空间和地下空间的综合利用。在国土空间规划的新体系下,城市地下空间规划作为市级国土空间总体规划的专项规划,需要同时兼顾地下空间资源的保护与开发,强调规划的宏观引领和对地下空间资源的集约化利用。

在新的空间管控逻辑下,国土空间规划由关注建设用地向全要素统筹协调转变^[9]。这一管控逻辑同样适用且应当应用于城市地下空间规划。需要强调的是,城市地下空间作为国土空间资源的重要组成部分,其内涵在学术研究和规划实践中易被“狭义化”“空洞化”而等价于地下建(构)筑空间。从“空间”的本质来看,城市地下空间是位于城市

地表以下由岩石、土、水、空气等介质构成的半无限空间。从城市可持续发展的价值角度来看，城市地下空间则是城市发展所必需的资源性资产，是多种资源和资产的共同载体，如物理空间（地下室、地下隧道、下沉式广场等）、矿物、历史遗产、水、地热、地下生物群落及空间连续介质体等资源性资产要素^[9,10]。实现国土空间规划新体系下的城市地下空间可持续利用，亟需推动城市地下空间内涵从地下建（构）筑物向地下空间资源性资产进行认知转变。

（二）绿色、低碳、韧性新理念下的城市地下空间战略需求

随着城镇化水平的不断提高，我国城市能源消耗量已达全球消耗总量的60%~80%，而城市中以二氧化碳为主的温室气体排放量达到全球排放总量的75%^[11]。城镇化建设是推动绿色、低碳、高质量发展的重要载体，而地下空间是我国城镇化建设的重要内容。《2023中国城市地下空间发展蓝皮书》的统计数据显示^[12]，截至2022年年底，我国城市地下空间建筑面积累计达 $2.962 \times 10^9 \text{ m}^2$ ，当年新增地下空间建筑面积（含轨道交通）约占同期城市建筑竣工面积的23%。城市地下空间具有相对恒定的地温状态和高效的三维空间组织等特性，其开发利用可以在交通组织优化、土地集约利用、建筑节能减排、绿地碳汇增加、可再生地热能利用等方面发挥作用，减少地区碳排放量并增加碳汇容量，有效降低城市发展对生态环境的负面影响^[13]。以上海虹桥商务区核心区一期项目为例，经测算，该项目地下空间利用每年可实现的碳减排量为 $2.78 \times 10^5 \text{ t}$ ，成为低碳商务区的示范项目^[14]。

韧性是城市可持续发展的重要指标之一。在百年未有之大变局下，突发事件、战争风险、气候变化引发的自然灾害等多重风险并存。岩土体介质可以在很大程度上减少由地震、爆炸等引起的地层振动，为城市地下空间提供了韧性潜能，使城市地下空间成为空袭、飓风、洪水、外部火灾、外部辐射等灾难性事件发生时人员和物品的理想避难所，提高了城市应对多情景灾害的防灾减灾能力^[15,16]。此外，地下调蓄池、地下隧道可以作为洪水泛滥时的调蓄空间和泄洪渠道，提升了城市防灾韧性，具有代表性的有马来西亚吉隆坡雨水管理和道路隧道、日本

东京都外郭放水路项目以及上海、深圳等城市在建的深隧项目。

（三）土地存量更新新模式下的城市地下空间战略需求

2023年，我国平均城镇化率已达到66.16%^[17]，新增建设用地外延扩张式的发展模式因带来了诸多城市问题而难以为继。“十四五”规划纲要提出，以建设用地存量或减量发展为特征的“城市更新行动”将是新时期我国城镇化建设的重点内容。土地存量更新模式是在保持城市建设用地总规模不改变、城镇开发边界不外扩的前提下，通过存量用地及建筑空间更新升级，实现城市空间提质增效的城镇化发展模式。

在土地存量更新的新模式下，城市地下空间既是实现用地潜力挖掘和城市更新的重要空间承载体，也是城市建筑存量更新的重要对象。开展地下空间资源利用能够在满足城市建设用地不扩张的约束条件下，有效拓展城市空间资源、实现土地复合化利用、提升城市基础设施服务水平，现已成为重塑城市建成区存量空间结构、实现存量用地发展的必要手段。土地存量更新中的地下空间发展视角需要从简单的增量转变为更深层次的重构。以上海为例，存量更新地区的地下空间重构既包括存量用地城市地下空间的增量拓展（如五角场下沉式广场、“海上第一名园”张园改造），也涉及既有地面设施的地下重置（如新建外滩隧道并缩减地面道路用地）、存量地下设施功能的适用性改造（如徐家汇港汇大厦地下车库改造为9号线车站）、既有地下设施空间秩序的整合重组（如陆家嘴核心区、南京西路-静安寺商圈以及娄山关路站地下空间连通整合）等^[18]。

国内外类似经验均表明，在城市更新中积极、有效地重构地下空间，有利于完善基础设施和公共服务设施、挖潜商务区发展动能、平衡历史文化遗产的开发与保护、改造和升级老旧街区、改善环境质量和提高城市韧性等，推进可持续的人民城市建设^[18]。为此，北京、上海、广州、深圳等特大城市在最新一轮城市总体规划或国土空间总体规划中均强调，地下空间综合开发是保障城市存量转型发展的重要基础。例如，《北京城市总体规划（2016—2035年）》提出，坚持“先地下后地上、地上地下

相协调”的理念，地下空间开发规模从2016年的人均4 m²提高至2035年的人均8 m²。

三、新发展阶段我国城市地下空间开发利用面临的新问题

我国城市地下空间开发利用机遇与挑战并存。我国城市地下空间开发利用既有已存在相当长时间但尚未解决的老问题，又面临新形势下应运而生的新问题，二者并无主次之分。对于法律法规、统筹规划、数据管理、地质调查、施工技术、综合效益等城市地下空间开发利用问题^[19]，本文不再赘述，将聚焦在新发展阶段中与新战略需求相伴而生的诸多问题进行阐述。

（一）城市地下空间资源禀赋调查评价不足、承载能力概念不清

在国土空间规划体系新的空间管控逻辑下，全空间、全要素的统筹协调成为国土空间开发利用的重中之重。城市地下空间开发利用亟需解决的问题有：城市地下空间的全要素范围、各类要素的资源禀赋调查和评价，全域范围要素开发利用的统筹协调等。从目前的研究现状看，城市地下空间要素至少包含地下建（构）筑物、地下矿藏、地质材料、地热能、地下水、地下连续介质体、地下历史文化遗产、地下生物资源等。尽管这些要素的覆盖面可能仍不全面，但目前对上述城市地下空间要素的资源禀赋调查评价仍明显不足。由于城市地下空间的所有要素均依附于岩土体介质而存在，任何地下空间的开发行为都会对系统内部的岩、土、水、气以及地热场、应力场、地球化学场、地下水流场的相对平衡状态产生扰动，进而影响其他地下空间资源要素的开发潜力。从这个意义上讲，城市地下空间各类要素的资源禀赋或开发潜力应基于全要素系统视角的调查评价。因此，完善城市地下空间信息资源的共建共享机制，在国土空间规划新体系下统筹城市地下空间的全域、全要素协同开发利用成为目前亟待解决的问题。

此外，在国土空间规划新体系下，城镇建设的最大合理规模及其适宜空间需要依据资源环境承载能力和国土空间开发的适宜性评价予以确定，但我国相关技术体系并未提及地下空间的相关内容，尤

其是对地下空间承载能力的概念和内涵未作明确界定。地下空间承载能力缺失全域、全要素的评估，可能导致地下空间生态环境不可持续、城市运行安全难以保障等问题。

（二）城市地下空间的绿色、低碳、韧性潜能有待进一步挖掘

城市地下建筑具备绿色建筑在节能减排方面的天然优势，但其规划设计长期缺乏对构建人本环境的重视，导致存量地下空间的人因工程品质普遍不高，存在一系列导致使用人群产生健康障碍和负面情绪的环境问题，地下空间的社会与经济活力还没有被完全激活。

在城市地下基础设施的低碳发展方面，相关研究聚焦于运行维护阶段的低碳效应评价，但在规划、建造等全生命周期的低碳评价方法和路径尚不明确。在总体规划、详细规划等阶段，地下空间规划方案的低碳效应评价方法未能全面考虑地下空间地质服务系统及地下空间外部性服务的低碳贡献，难以实现规划层面的低碳效益最优化。在建造阶段，较少将建筑材料生产端的碳排放纳入地下基础设施全生命周期碳排放清单，且建造及设计理论方法未能完全发挥岩土体介质的承载能力，施工过程的智能建造和工业化水平较低^[20]。在运行维护阶段，城市地下空间基础设施的采光、通风、除湿、消防等环节的低碳运维技术有待加强。此外，地下空间在清洁能源供给，能源储存，碳捕集、封存和利用技术等方面的潜能尚待挖掘^[20]，碳交易市场制度、政策体系等有待建设。

在韧性城市建设方面，地下空间开发利用具有两面性。城市地下空间在提高城市应对多情景灾害防灾减灾能力的同时，地下空间设施也因其人员分布密集、空间环境封闭、建筑标高相对较低等原因成为水灾、火灾、爆炸等灾害事故的易发地。尤其是近年来极端暴雨天气导致的水灾事件频发，致使一些地下空间项目因潜在的防灾问题被迫搁置。然而，地下空间水灾事件的发生其实只是城市防灾系统崩溃时末端爆发点的基本事实。诚然，地下空间内部防灾存在一定的局限性和挑战性，但新加坡、日本等国的发展经验表明，通过更加科学合理地制定城市地下空间开发利用规划，可以在降低地下受灾的可能性、克服设施本身的局限性的同时，最大

化地发挥地下空间对城市可持续发展的积极作用。在科学规划方面，城市地下空间的水灾防控不能仅局限于地下空间设施本身，更重要的是要做好整个城市的防洪体系，如在平时做好“海绵城市”建设、疏通河道、加固堤防、增加蓄洪容量等。在地下空间设施建设方面，要在建设之前结合当地气象条件、降水量、地面高程、地表流域分析等充分做好灾害风险评估。对于风险较高地区的地下空间项目，要充分论证可行性和风险管理水平，审慎规划建设；对于确有建设必要性但受灾风险较高的地区，应提出相应的配套措施及应急机制（如口部抬高或止水处理、地下集水井及地下河川等排水设施）来减少灾时损失。

（三）城市地下基础设施资源配置不均衡、发展机理机制不明确

当前，现有城市地下空间规划的有效性不足，存在地下基础设施资源配给不均衡、地下空间开发建设滞后于城市立体化发展需求的现实问题。地下空间发展较快的区域多为城市新区、新城，实际上地下空间开发利用需求最为迫切的区域通常是“城市病”集中体现的老城区。以青岛市市南区为例，2000年以后发展起来的市南中东部片区地下空间开发规模约占市南区总量的75%，而西部老城区则仅占25%。一些旨在缓解交通问题的地下空间基础设施建设项目因施工或运营难度大等原因将实施对象选在城市新区，将运营时间选在交通平峰时段，从而无法从实质上解决老城区的发展问题。此外，我国城市地下空间开发利用普遍存在系统性和整合性缺乏问题，无法发挥地下空间在空间整合、交通组织等方面的综合效益。

在竖向空间配置方面，各大城市的近地地下空间，即浅层（0~15 m）和次浅层（-15~-30 m）地下空间，最具有开发利用价值，但由于缺少前瞻、科学的综合规划，地面大规模建设以及道路下方市政管线的无序敷设对近地地下空间的开发利用产生了严重影响。随着房地产项目和轨道交通项目的广泛开展，大城市的浅层地下空间接近饱和，较大城市地下空间开发利用的重心逐渐向次浅层转移，特大城市开始谋划深层地下空间（-50~-100 m）规划建设的可行性。

应对上述问题，需要更加重视土地存量更新模

式下的地下空间重构发展。目前，虽然地下空间新建、更新改造、整合重组等案例在我国城市更新中日渐增多，但受诸多因素影响，地下空间重构项目的治理效能参差不齐。一方面，既有地下空间规划理论与方法无法从微观层面提供存量更新背景下地下空间的重构模式机理，如存量用地靶向选址、新建和改造空间的功能定位、存量空间整合的连通效率等问题，因而无法有效指导城市更新中存量土地资源的精细化利用，更无法实现社会资本的最大化产出。另一方面，在复杂建成环境下，地下空间建设存在技术难度高、投资成本高、直接收益不显著以及城市更新中地下空间重构项目面临多元利益主体的投资和收益分配协调、使用权和运营权管理等问题，导致既定的规划方案在落地实施时举步维艰，甚至项目搁浅。

我国尚未明确地面建筑及地下建筑的地下空间使用权范围界定方法，也未全面规范和开展地下空间使用权登记工作，导致一些城市更新地区穿越出让地块或设置在公共地块的地下设施项目因产权纠纷而无法实施，影响了社会资本投资地下空间项目的积极性；地下空间项目之间未实现互联互通，降低了城市地下空间的开发效益。

四、新发展阶段我国城市地下空间开发利用的重点任务与发展建议

为应对新发展阶段我国城市地下空间开发利用面临的一系列问题，更好地满足城市未来发展对城市地下空间开发利用的新需求，本研究针对性地提出新发展阶段我国城市地下空间开发利用的重点任务及相应发展建议。需要指出的是，我国城市地下空间开发利用面临的发展问题中存在共性的底层逻辑，因此，主要从以下方面阐述解决问题的重点任务和发展建议：健全法律法规建设、全面开展资源调查、完善城市地下空间规划体系以及构建大数据驱动的地下空间规划新范式等用以解决我国城市地下空间开发利用的普遍共性问题，积极探索全要素及深层地下空间利用以重点解决地下空间绿色、低碳、韧性发展问题，重构存量建成地区地下空间结构、统筹规划建设城市新区的地上地下空间、加强地铁域地下空间的规划控制用以解决存量更新模式下的地下空间资源配置不均衡、重点不明确的问题。

（一）在国家层面尽快健全有关城市地下空间的法律法规，形成法制化、制度化、规范化的城市地下空间开发利用治理体系

在健全法律体系方面，建议制定以《中华人民共和国民法典》为基础、以综合性立法为核心、以专项立法为骨干、以配套立法为支撑的地下空间开发利用法律体系，并尽快在高位阶法律中明确地下空间权属的概念、性质、权利限制、责任内容，空间范围界定，取得登记取消制度、期限、转让、相邻关系等基本权责关系和处置原则^[21,22]，以推动地方立法和规划、建设、运维等技术管理规范工作。在管理体制和机制方面，由于地下空间管理涉及众多部门，需从法律层面明确地下空间的管理主体以及规划、人防、建设、环境保护等其他相关部门的法律职责，建立和完善综合管理机制。此外，还应尽快建立以三维地籍管理系统为基础的土地使用权出让配套保障^[23]。

（二）全面开展城市地下空间资源调查评估，推动全要素、全周期、全方位智慧化管理

一是开展城市地下空间资源调查评价。开展地下建筑、地下基础设施、地下人防设施、地下矿藏、地热能、地下水、地下历史文化遗产等地下空间资产的全要素勘测调查，对既有地下空间设施的安全性进行评估；开展城市地下空间资源环境承载能力和开发适宜性专项评价，明确各类资源的数量、规模、空间分布、利用现状等，并将其纳入国土空间规划“一张图”。

二是推动全要素、全周期、全方位的智慧化管理。推进重点地区地下设施与地下空间的全方位感知网络建设，提高对地下空间的实时监测与应急处置能力。深化大数据、人工智能、移动互联网、云计算、物联网、区块链等前沿技术在地下资源开发领域的融合应用，构建地下空间“感-联-智-用-融”的智慧管理体系。推动地下空间开发利用相关的地质探测、建设现状、规划方案和运营维护数据以及手机信令、兴趣点、交通流量等时空大数据的共享平台建设，建立健全数据标准规范体系和数据共享机制；推动地下空间规划、设计、建造、维护、运行管理的全生命周期数字化和智慧化管理转型，发挥大数据在城市地下空间规划、建设和管理中的作用，提高城市地下空间因地制宜、因深度

制宜、因地下功能制宜的精细化管理水平以及治理能力的现代化水平^[24]。

（三）尽快完善城市地下空间规划体系，深化规划理论和方法研究

一是健全地下空间规划管理制度和标准体系。涉及地下空间的建设项目，在规划条件、规划许可、规划核实时，应当依据控制性详细规划提出地下空间开发利用的控制要求。明确总体规划层面城市地下空间开发利用规划的重点内容和关键指标体系，明确控制性详细规划法定图则中必须包含地下空间规划要求的地区和建议包含地下空间规划要求的地区，并完善地下空间控制性详细规划的技术准则与编制规范^[25]。

二是实现空间协同规划。在国土空间规划“一张图”的信息平台基础上，将城市地下空间规划与人防工程、市政设施、交通设施、公共服务设施等专项规划在地面以下的空间相协调，合理安排城市地下空间的竖向开发布局。在条件允许的情况下，应建立城市地下空间规划的三维信息平台。

三是探明地下空间的资源环境承载力。鉴于地下空间的资源禀赋特征、开发不可逆性和外部影响性较大等特点，建议开展城市地下空间资源环境承载能力和开发适宜性专项评价，以城市可持续发展为价值导向，全面评估地下空间开发利用对城市发展的外部效应（包括正外部性^[26]和负外部性^[27]）；明确城市地下空间设施的最大合理开发规模和适宜空间，明确不同国土空间用地分类与分区情况下的地下空间设施功能开发适用性，并提出地下水资源、地热资源、地下历史文化资源等的保护范围、控制要求以及与地下空间设施协同开发的模式^[6]。

（四）构建大数据驱动的地下空间规划新范式，实现精细化、动态化科学决策

就多源时空大数据特征而言，城市地下空间规划的智能化研究有其自身限域。一般来说，针对城市地下空间规划的多源时空数据多为非抽样采集的数据，具有高密度、有偏性、高精度等特征，需要在实际应用中结合传统规划数据进行合理利用，并采用不同技术手段与统计学方法以提高数据分析的质量。此外，城市地下空间规划涉及的多源时空数据规模可能无法达到标准意义下的大数据体量，但

又超越了传统意义上的规划数据。另外，新兴的多源时空数据也展现了传统规划数据难以捕捉的时空行为特征，可以作为既有规划数据的补充与延展，从全新视角推进城市地下空间规划设计的数字化转型。

在多源时空数据与传统规划数据并存的新数据环境下，构建以数据为驱动要素的规划研究范式成为可能，进而为城市地下空间的规划管理智能化转型提供支撑^[24]。在规划编制层面，建议将多源时空数据应用和服务于城市地下空间规划的主体内容。在前期研究阶段，多源时空数据可用于城市地下空间利用的知识挖掘与规律认知，帮助规划设计人员明确地下空间的调控和引导方向^[28]。在规划编制阶段，多源时空数据助力城市地下空间规划方法创新，通过量化分析、情境分析与推演预测以协助决策^[29]。将多源时空数据应用于城市地下空间的交通评价、功能布局、绩效评估、规划管理等环节，是对既有规划技术体系及管理模式的深度优化。

（五）积极探索全要素及深层地下空间利用，提升城市韧性和空间承载力

面向韧性城市建设，地下空间资源管理需要从物理空间的单一要素向多资源的全要素范式变革。根据地下空间所承载的资源性资产要素属性和相互关系，提出每种资源开发的优先级以及每种资源开发利用的分区、分层管制方法。从可再生、不可再生的资源性资产角度和地质系统服务等全要素视角出发对地下空间资源进行分类，并在城市总体规划中提出地下多种资源利用的三维空间规划，从而实现城市的韧性可持续发展。在利用地下空间实现绿色低碳城市的技术路径方面，建议从定性到定量角度揭示城市地下空间对韧性城市建设的贡献机制（包括气候变化、碳中和、防灾减灾以及战时保护和疏散），并将这种机制转化为城市地下空间资源规划与管理的理论框架和智能方法。

在利用地下空间完善城市防灾体系方面，积极拓展现有和规划建设的公园、绿地、体育场等场地的地下空间，建立布局合理的避难场所体系；完善“灰绿结合”的排水系统以应对日常降雨，在特大城市利用深层地下空间建设大型地下调蓄设施、深层隧道等设施以应对洪涝风险，形成由点、线、网交融的地下河川系统。积极拓展深层地下空间，为

市政、交通、物流等大型城市基础设施提供更加合理的容纳场所。

（六）重构存量建成地区的地下空间结构，推进和实施“城市更新行动”

一般而言，对城市建成环境的更新更为复杂，除地上建筑外，大量的地下建（构）筑物也与快速城镇化相伴而生，是耗费大量社会资本营建而成的宝贵空间资源。特别是分布广泛的人防工程现被大量闲置，理应在城市更新地区地下空间重构发展中发挥应有的作用^[30]。为此，需要深入研究存量更新地区复杂建成环境下的地下空间重构规划理论与方法、结构设计与施工方法以及相应的法律配套和激励政策，做到规划科学、建造安全、经济可行、机制明确。

在规划方面，充分、全面地评估城市更新地区的社会人文、经济活力、生态环境等发展需求，结合既有地上地下基础设施在动/静态交通、公共空间、邻避设施、商业活力和空间效率等方面的供给能力，从微观层面揭示存量更新背景下地下空间重构模式（包括存量用地城市地下空间的增量拓展、既有地面设施的地下重置、存量地下设施功能的适用性改造、既有地下设施空间秩序的整合重组）的决策机制，进而结合多目标优化算法确定重构后的地下空间规划布局方案。在结构设计和施工方法方面，重点研究既有地下建（构）筑物现状安全风险及改扩建适宜性评估鉴定的方法与标准，改扩建结构设计方法，顶升、平移、托换、改建等建造技术与设备装置，尽量降低地下空间重构开发对地上地下建成环境及结构安全的扰动。在法律配套及政策激励方面，对于涉及的地下空间产权划分、出让管理以及建筑红线等各类问题，相关管理部门应制定并出台配套法律法规，重点优化建设用地上、地表和地下垂直空间的使用权分层设计和出让金补缴等法规，结合成本效益分析、外部性价值分析等制定容积率奖励、产权奖励等激励政策。

（七）统筹规划建设城市新区的地上地下空间，打造宜居宜业的立体化新城

在新发展阶段，城市新区的地下空间开发利用，需要以提高土地综合利用效率和最大程度地释放地面空间用于人的活动为出发点，全方位打开新

城立体发展格局。在开发策略方面,遵循分区、分层、分类的发展原则,结合功能属性和空间属性的分异性特征,对城市新区不同区位、不同深度和不同类型的地下空间及地下基础设施提出针对性的规划建设管控引导。在核心区应合理规模化开发地下空间,适当促进公共设施地下化,通过地上、地下空间的整体开发和完整连续的功能界面,加强步行与商业、文娱等服务功能的空间融合,提高地下空间品质,打造充满活力的地下步行网络,实现地上地下空间一体化发展;分层、分类利用地下空间,系统整合公共活动、基础设施、地下交通、市政、物流等各类功能,推进市政基础设施的地下化建设;针对中远期的地下空间资源开发,在开发利用时要进行合理的预留和控制,对地下空间开发的时序、空间布局、类型、规模以及范围等要有一定的预见性与动态可调整性。

(八) 加强地铁域地下空间的规划控制,提高空间系统性和整合性

随着我国各大城市地铁网络的不断建设,地铁沿线站域地下空间发展模式逐步向功能要素高度集成的综合化、规模化利用方向发展^[21]。现阶段,地铁沿线站域地下空间这一核心概念在空间领域及空间功能层面均得到深度拓展,与地铁车站物理空间紧邻、功能联系密切的地下空间都可以被视作广义的地铁沿线站域地下空间^[22]。地铁沿线站域地下空间的开发利用将有效适应我国城市的高密度人居环境。立足新发展阶段和城市高质量发展的建设背景,可以将地铁沿线站域地下空间建设成为兼具功能、文化与生活属性的重要城市空间以及各类地下空间与地下设施的工程融合体。此外,对地铁沿线站域地下空间的规模化开发利用,能够突破土地资源存量规划模式下的空间资源匮乏困境,推动区域集约化利用与高效能发展,增进市民的空间便利与生活福祉,从而落实“人民城市”的建设理念。

近年来,成都、深圳、济南、青岛、杭州等城市相继开展了重点地区地铁沿线站域地下空间的控制性详细规划编制工作,依托以公共交通为导向的发展理念对地下空间进行规划设计,以实现高密度、高强度、多功能的紧凑型地下空间,取得了显著的节地效益、社会效益与经济效益。为更好地挖掘地铁沿线站域地下空间开发潜力,建议加快制定地铁

沿线站域地下空间规划的相关控制指标体系、控制标准以及开发原则,将之建设为各城市经济社会发展的新空间引擎。进一步明确地铁沿线站域地下空间规划与地下空间总体规划、地下空间控制性详细规划、地下空间修建性详细规划、地下空间分系统专项规划之间的逻辑层次与衔接关系,落实规划实施、规划编制、规划监督的全过程管理。

五、结语

长期以来,城市地下空间开发利用在我国城市发展中发挥着至关重要的作用。进入新发展阶段,国土空间规划的新体系,绿色、低碳、韧性的新理念和土地存量更新的新模式对城市地下空间及其承载功能提出了新的需求和要求,城市地下空间开发利用也需要基于新的发展特征积极变革响应。为此,本文在战略需求和问题分析的基础上,提出了新发展阶段城市地下空间开发利用的8个发展任务及建议,包括法律法规与治理体系建设、全要素资源调查评估与智慧化管理、规划体系与理论方法、大数据驱动的地下空间发展新范式、城市低碳韧性和深层空间承载力、存量更新地区地下空间重构、城市新区统筹规划建设、地铁域地下空间规划控制等方面,以期为我国新发展阶段城市地下空间事业的健康、有序、可持续发展提供有益借鉴。

可以预见,要实现上述任务并满足新发展阶段的战略需求,城市地下空间开发利用仍有较大的发展空间。新发展阶段的地下空间开发利用发展战略涉及立法、规划、建设、运行维护、管理等全行业领域,需要紧紧围绕韧性、智能、绿色、人文的发展目标,从理念、理论到方法、技术的全方位变革,不断在研究和实践中守正创新,加速城市地下空间发展的智慧化转型,助力中国式现代化背景下的新型城市高质量发展。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: January 10, 2024; **Revised date:** March 11, 2024

Corresponding author: Qiao Yongkang is an assistant professor from the Research Center for Underground Space, Tongji University. His major research field is urban underground space planning. E-mail: qiaoyongkang@tongji.edu.cn.

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Strategic Research on the Development of Urban Underground Space in the New

Era” (2022-XZ-51); National Natural Science Fund Project (42071251, 42201284, 42301289)

参考文献

- [1] 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.
Zhu H H, Luo X, Peng F L, et al. Development strategy on urban underground space planning in China [J]. Strategic Study of CAE, 2017, 19(6): 12–17.
- [2] 周岚, 丁志刚. 新发展阶段中国城市空间治理的策略思考——兼议城市规划设计行业的变革 [J]. 城市规划, 2021, 45(11): 9–14.
Zhou L, Ding Z G. Strategies for urban space governance in China’s new development stage: Discussion on the reform of urban planning and design industry [J]. City Planning Review, 2021, 45(11): 9–14.
- [3] 彭芳乐, 乔永康, 程光华, 等. 我国城市地下空间规划现状、问题与对策 [J]. 地学前缘, 2019, 26(3): 57–68.
Peng F L, Qiao Y K, Cheng G H, et al. Current situation and existing problems of and coping strategies for urban underground space planning in China [J]. Earth Science Frontiers, 2019, 26(3): 57–68.
- [4] Qiao Y K, Peng F L, Luan Y P, et al. Rethinking underground land value and pricing: A sustainability perspective [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022, 127: 104573.
- [5] Qiao Y K, Peng F L. Lessons learnt from urban underground space use in Shanghai—From Lujiazui Business District to Hongqiao Central Business District [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 55: 308–319.
- [6] Peng F L, Qiao Y K, Sabri S, et al. A collaborative approach for urban underground space development toward sustainable development goals: Critical dimensions and future directions [J]. Frontiers of Structural and Civil Engineering, 2021, 15(1): 20–45.
- [7] 朱合华. 肩负时代重任 努力推动智慧基础设施蓬勃发展 [J]. 中国科技产业, 2022 (11): 12–14.
Zhu H H. Shoulder the heavy responsibility of the times and strive to promote the vigorous development of smart infrastructure [J]. Science & Technology Industry of China, 2022 (11): 12–14.
- [8] 张尚武, 司马晓, 石晓冬, 等. “国土空间详细规划编制探索与创新实践”学术笔谈 [J]. 城市规划学刊, 2023 (2): 1–11.
Zhang S W, Sima X, Shi X D, et al. Academic writing on “exploration and innovative practice of detailed planning of land and space” [J]. Urban Planning Forum, 2023 (2): 1–11.
- [9] 乔永康, 彭芳乐, 栾勇鹏, 等. 面向可持续发展的城市地下空间开发外部性价值评估及应用 [J]. 中国土地科学, 2022, 36(5): 91–101.
Qiao Y K, Peng F L, Luan Y P, et al. Sustainability-oriented external value appraisal and application for urban underground space development [J]. China Land Science, 2022, 36(5): 91–101.
- [10] Qiao Y K, Peng F L, Sabri S, et al. Socio-environmental costs of underground space use for urban sustainability [J]. Sustainable Cities and Society, 2019, 51: 101757.
- [11] United Nations. Goal 11: Make cities inclusive, safe, resilient and sustainable [EB/OL]. [2024-01-10]. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/cities/>.
- [12] 中国工程院战略咨询中心, 中国岩石力学与工程学会地下空间分会, 中国城市规划学会. 2023 中国城市地下空间发展蓝皮书 [R]. 北京: 中国工程院战略咨询中心, 中国岩石力学与工程学会地下空间分会, 中国城市规划学会, 2024.
Centre for Strategic Studies of the Chinese Academy of Engineering, Sub-Society for Underground Space of Chinese Society for Rock Mechanics & Engineering, Urban Planning Society of China. Blue book of urban underground space development in China 2023 [R]. Beijing: Centre for Strategic Studies of the Chinese Academy of Engineering, Sub-Society for Underground Space of Chinese Society for Rock Mechanics & Engineering, Urban Planning Society of China, 2024.
- [13] Qiao Y K, Peng F L, Sabri S, et al. Low carbon effects of urban underground space [J]. Sustainable Cities and Society, 2019, 45: 451–459.
- [14] Peng F L, Qiao Y K, Zhao J W, et al. Planning and implementation of underground space in Chinese central business district (CBD): A case of Shanghai Hongqiao CBD [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 95: 103176.
- [15] 陈志龙, 陈家运, 郭东军, 等. 地下空间利用与城市防灾研究若干新进展与思考 [J]. 中国工程科学, 2013, 15(5): 65–70.
Chen Z L, Chen J Y, Guo D J, et al. Development and its thoughts on research of underground space and urban anti-disaster [J]. Strategic Study of CAE, 2013, 15(5): 65–70.
- [16] Liu S C, Peng F L, Qiao Y K, et al. Evaluating disaster prevention benefits of underground space from the perspective of urban resilience [J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2021, 58: 102206.
- [17] 国家统计局. 中华人民共和国 2023 年国民经济和社会发展统计公报 [R]. 北京: 国家统计局, 2024.
National Bureau of Statistics. Statistical communiqué of the People’s Republic of China on the 2023 national economic and social development [R]. Beijing: National Bureau of Statistics, 2024.
- [18] 李子玉, 乔永康, 吴晓雷, 等. 城市更新地区地下空间开发利用规划策略研究 [J]. 现代隧道技术, 2022, 59(S1): 143–151.
Li Z Y, Qiao Y K, Wu X L, et al. Study on planning strategy of underground space development and utilization in urban renewal area [J]. Modern Tunnelling Technology, 2022, 59(S1): 143–151.
- [19] 杨华勇, 江媛, 李喆, 等. 地下空间开发综合治理发展战略研究 [J]. 中国工程科学, 2021, 23(4): 126–136.
Yang H Y, Jiang Y, Li Z, et al. Comprehensive management strategy of underground space development in China [J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(4): 126–136.
- [20] 王国盛, 季港澳, 路德春, 等. 城市地下基础设施低碳发展策略研究 [J]. 中国工程科学, 2023, 25(1): 30–37.
Wang G S, Ji G A, Lu D C, et al. Low-carbon development strategy of urban underground infrastructure [J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(1): 30–37.
- [21] 刘春彦, 宋希超. 地下空间使用权性质及立法思考 [J]. 同济大学学报(社会科学版), 2007, 18(3): 111–119.
Liu C Y, Song X C. Study on underground space rights concept and law-making [J]. Journal of Tongji University (Social Science Section), 2007, 18(3): 111–119.
- [22] 韩宇娜. 地下空间权制度立法研究 [D]. 天津: 天津工业大学

- (硕士学位论文), 2017.
- Han Y N. Research on legislation of underground space right system [D]. Tianjin: Tianjin Polytechnic University (Master's thesis), 2017.
- [23] 乔永康, 彭芳乐. 城市地下空间三维地籍研究进展及建设思考 [J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19(2): 359–367, 409.
- Qiao Y K, Peng F L. Advances and development thoughts on three-dimensional urban underground cadastre [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2023, 19(2): 359–367, 409.
- [24] Peng F L, Dong Y H, Wang W X, et al. The next frontier: Data-driven urban underground space planning orienting multiple development concepts [J]. Smart Construction and Sustainable Cities, 2023, 1(1): 3.
- [25] 彭芳乐, 赵景伟, 柳昆, 等. 基于控规层面下的CBD地下空间开发控制探讨——以上海虹桥商务核心区一期为例 [J]. 城市规划学刊, 2013 (1): 78–84.
- Peng F L, Zhao J W, Liu K, et al. Underground development control in CBD based on the regulatory plan: The case of phase I of Shanghai Hongqiao CBD [J]. Urban Planning Forum, 2013 (1): 78–84.
- [26] Qiao Y K, Peng F L, Wu X L, et al. Visualization and spatial analysis of socio-environmental externalities of urban underground space use: Part 1 positive externalities [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022, 121: 104325.
- [27] Qiao Y K, Peng F L, Wu X L, et al. Visualization and spatial analysis of socio-environmental externalities of urban underground space use: Part 2 negative externalities [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022, 121: 104326.
- [28] Dong Y H, Peng F L, Bao Z H, et al. Identification of the spatial distribution pattern and driving forces of underground parking space based on multi-source data: A case study of Fuzhou City in China [J]. Sustainable Cities and Society, 2021, 72: 103084.
- [29] Dong Y H, Peng F L, Zha B H, et al. An intelligent layout planning model for underground space surrounding metro stations based on NSGA-II [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022, 128: 104648.
- [30] Qiao Y K, Peng F L, Dong Y H, et al. Planning an adaptive reuse development of underutilized urban underground infrastructures: A case study of Qingdao, China [J]. Underground Space, 2024, 14: 18–33.
- [31] Ma C X, Peng F L, Qiao Y K, et al. Evaluation of spatial performance of metro-led urban underground public space: A case study in Shanghai [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022, 124: 104484.
- [32] Dong Y H, Peng F L, Guo T F. Quantitative assessment method on urban vitality of metro-led underground space based on multi-source data: A case study of Shanghai Inner Ring area [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2021, 116: 104108.