DOI 10.15302/J-SSCAE-2023.01.012

城市地下基础设施低碳发展策略研究

王国盛，季港澳，路德春，杜修力

（北京工业大学岩土与地下工程研究所，北京 100124）

摘要：在韧性城市、海绵城市与城市更新的背景下，城市地下基础设施作为城市建设的重要部分，其低碳、安全、协调发展对推动城市高质量发展，助力我国“双碳”目标实现具有重要作用。本文通过总结城市地下基础设施低碳发展的现状及存在的问题，提出了新建和既有城市地下基础设施低碳发展的实施路径与策略。研究认为，对于新建城市地下基础设施，以源头端、消费端、固碳端三端为抓手，提出了在规划设计、建造物化、运行维护阶段等全面考虑城市地下基础设施全生命周期的低碳发展策略；对于既有城市地下基础设施，提出了电气化、智能化和实用化的绿色改造策略以及新老交汇、和而不同的绿色扩建策略。为进一步推动我国城市地下基础设施低碳发展，从摸清城市地下基础设施温室气体排放家底、完善城市地下基础设施低碳发展顶层设计、加强城市地下基础设施低碳发展技术研发、加强城市地下基础设施低碳发展政策倾斜4个方面提出了对策建议。

关键词：城市地下基础设施；碳中和；全生命周期；源头端；消费端；固碳端

中图分类号：TU28　　**文献标识码：**A

Low-Carbon Development Strategy of Urban Underground Infrastructure

Wang Guosheng, Ji Gang’ao, Lu Dechun, Du Xiuli

(Institute of Geotechnical and Underground Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: The urban underground infrastructure is a vital part of urban construction. In the context of resilient city, sponge city, and urban renewal, the low-carbon, safe, and coordinated development of urban underground infrastructure is crucial for promoting the high-quality development of cities and helping China achieve its carbon reduction goals. This study summarizes the development status and problems of low-carbon development of urban underground infrastructure and proposes carbon development paths and strategies for new and existing urban underground infrastructures. For new urban underground infrastructure, a low-carbon development strategy that considers the whole lifecycle of the infrastructure is proposed from the perspective of the source, consumer, and carbon fixation sides. For existing urban underground infrastructure, a green transformation strategy that features electrification, intelligence, and practicality is proposed alongside with a green expansion principle of harmony in diversity. To further promote the low-carbon development of China’s urban underground infrastructure, the following measures are suggested: figuring out the greenhouse gas emission status, improving the top-level design, strengthening the research and development of low-carbon technologies, and promoting policy incentives.

Keywords: urban underground infrastructure; carbon neutralization; full lifecycle; source side; consumer side; carbon fixation side

收稿日期：2022-11-08；**修回日期：**2022-12-10

通讯作者：路德春，北京工业大学岩土与地下工程研究所教授，研究方向为岩土与城市地下工程；E-mail: dechun@bjut.edu.cn

资助项目：中国工程院咨询项目“城市地下基础设施低碳发展战略研究”(2022-XY-76)

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

一、前言

地下空间具有扩充基础设施容量、提高土地利用率、节省土地资源、缓解中心城市密度、防治交通阻塞、增加城市绿化面积等特点和优势。21 世纪以来，为了解决“大城市病”问题，提升大型城市的运行效率，越来越多的城市基础设施在地下建设，地下空间资源开发利用在世界许多国家和地区得到了快速发展[1]。日本通过建设地下综合管沟、地下道路、地下公共设施等城市地下基础设施，来解决有限土地资源和人口密集的问题[2]。加拿大蒙特利尔以地铁为核心，以人行通道为网络，形成长达 32 km 的地下城网络[3]。截至 2015 年，芬兰赫尔辛基已建设包含地下停车场、地铁、煤和石油储库、综合管廊等多种功能的地下基础设施近千万立方米[4,5]。我国积极开展城市地下空间开发利用，20 世纪 90 年代，钱七虎院士就提出“21 世纪是地下空间的世纪，地下空间将是城市发展的第二空间”的前瞻性观点[6]。《上海市城市地下空间专项规划》（2021 年）中提出，未来城市基础设施逐步改造地下化，新建市政管线设施优先采用地下形式建设，持续升级地下交通基础设施[7]；《郑州市城市总体规划（2018—2035 年）》（2018 年）中指出，要使智能化现代城市与地下设施协调发展，提高郑州市地下空间的多元高效利用[8]。在韧性城市、海绵城市与城市更新的背景下，《国务院关于加强城市基础设施建设的意见》（2013 年）也提出，在城市基础设施建设时要坚持“先规划、后建设，先地下、后地上”的原则；在《城市地下空间开发利用“十三五”规划》、“十四五”规划及各地方政府的规划中，均涉及到了大力发展城市地下空间。

城市地下基础设施低碳发展可着重从碳排放与碳固定两方面来实现，其中碳排放又包括源头端和消费端，因此城市地下基础设施低碳发展可从源头端、消费端和固碳端“三端”发力。当前，新建基础设施的地下化建设和既有基础设施的地下化改造发展势头良好，适应了城市更新中对地上功能补充的发展要求。城市地下基础设施能够直接或间接实现节能减排，如地下仓储设施与地上的相比，具有恒温恒湿特点，能够直接减少由于温度、湿度控制产生的 CO_2；将部分城市交通采用地下轨道交通，能够有效减少交通阻塞，提升交通运输效率，进而间接减少碳排放。在建筑与交通领域，为实现碳达峰、碳中和目标，迫切需要探索城市地下基础设施的低碳发展路径。

为推动城市地下基础设施低碳发展研究，本文总结城市地下基础设施在助力“双碳”目标的优势、城市地下基础设施的发展现状与存在的问题，提出城市地下基础设施低碳发展的理念、路径及减排技术，并给出相应的对策建议，以期为我国城市地下基础设施低碳发展提供参考。

二、城市地下基础设施助力实现“双碳”目标的优势

（一）直接减排的城市地下基础设施

利用地热资源开发城市地下基础设施（如地源热泵），能够达到直接减排效果。目前，我国地热资源直接利用量处于世界领先水平，逐步研发了地热资源梯级利用技术、地下含水层储能技术等[9]。我国 336 个地级以上城市规划区范围内浅层地热能资源年可开采量约为 7×10^8 tce[10]，建设城市地源热泵基础设施能够有效助力能源结构转型，提高可再生资源利用率，减少由于供暖和制冷产生的 CO_2。以北京大兴国际机场中的地源热泵系统为例，该系统每年提取的浅层地热能约为 5.636×10^{14} J，根据北京气候及项目用能特点，冬季供暖期通常为 123 天，夏季制冷期为 120 天，以日使用时间为 24 h 计，可满足 2.57×10^6 m^2 建筑的冬季供暖和夏季制冷需求，节省天然气约 1735.89 m^3，减少碳排放量超过了 3750 t[11]。此外，若将城市商务区的商场转至地下空间，对比地上同等规模的工程设施能够显著减少碳排放。例如，可以从建筑能耗、地热能源低碳效果、交通能耗 3 个方面来考量，将建筑面积为 71 630 m^2 的商业区碳排放与地下化后进行对比，采用地下基础设施的商业区建设可实现年碳减排 2.336 t CO_2[12]。

（二）间接减排的城市地下基础设施

一些城市地下基础设施虽然无法实现直接减排，但可以通过服务其他基础设施实现间接减排。例如，地下交通设施可以有效缓解交通阻塞问题，提升交通运输效率。据生态环境部统计，每年我国交通拥堵带来的经济损失高达 2500 亿元。交通行业碳排放量约占全国碳排放总量的 10.2%，其中道路交通在交通全行业碳排放中的占比约为 80%[13]。2020 年，成

都地铁累计客运量约为1.21×10^9乘次，全年日均客运量为3.311×10^6乘次，相当于每日减少7.86×10^5辆私家车出行，城市公共交通出行分担率超过50%，通过提升运客效率，间接减少碳排放约8.75×10^4 t[14]。

城市地下空间作为城市的重要组成部分，开发利用地下空间，可有效节省土地资源。例如，苏州森林公园南入口建设的地下筒仓式智能停车库，占地面积仅82.7 m^2，将原来停放3辆车的泊位，改造为可以提供48个车位，在缓解周边停车难问题的同时，有效节省了地面资源。“十三五”期间，全国地下空间开发直接投资总规模约为8万亿元、全国累计新增地下空间建筑面积达到1.07×10^9 m^2，极大地节省了土地资源[15]。

（三）城市地下基础设施的碳汇效益

城市绿化是城市生态文明建设的重要组成部分，也是体现城市文化和内涵的重要载体。利用地下空间的特点，将适宜建设在地下的基础设施地下化，有利于腾出地面空间，营造绿地生态环境，增加碳汇，如将轨道交通、商业、污水处理、垃圾处理及转运站和变电站等城市基础设施地下化。研究表明，每1 m^3林木的蓄积量大约可吸收约1.83 t CO_2，以上海市为例，居住用地为549.77 km^2，商业服务业设施用地为124.66 km^2，若均将其50%转入地下，可置换出约337.2 km^2的绿地面积，如用于营造城市园林，可获得约4.24×10^6 m^3的树木蓄积量，吸收约7.76×10^6 t CO_2[16]。

综上所述，城市地下基础设施在源头端、消费端和固碳端都具有减排增汇效益，可以有效助力“双碳”目标的实现。在源头端，地热资源可有效代替部分化石能源，为地下基础设施提供制冷、供热，提高清洁能源消费占比；利用地下空间的天然优势，部分地下基础设施运行会消耗更少的资源能源。在消费端，部分地下基础设施（如地铁、地下车库）能够提升城市运行效率，进而实现节能减排。在固碳端，地下空间本身具有封闭的特点，可以更好地完成碳捕集工作；此外，发展地下基础设施能够释放地面空间，营造绿地生态环境，增加自然生态系统的碳汇能力。

三、城市地下基础设施低碳发展的现状与存在问题

基于城市地下基础设施的内涵[17]，从地下基础设施全生命周期、“三端”系统规划及保障措施3个角度，分析其低碳发展的现状及存在的问题，为城市地下基础设施低碳发展研究提供参考。

（一）城市地下基础设施低碳发展的研究现状

21世纪以来，我国城市地下基础设施的发展规模和发展速度已位居世界前列，已成为世界城市地下空间开发利用的大国[18]。按照城市不同发展阶段的需求，发展城市地下基础设施可以分为3个阶段：以市政基础管线建设为主的市政功能需求阶段，以城市地下轨道交通为主的交通功能需求阶段和以地上地下基础设施融合提升环境与深化需求阶段。目前，我国中小城镇已经进入市政基础设施功能需求阶段，大中城市进入交通功能需求阶段，特大城市已经进入提升环境与深化需求阶段[19]。“十三五”以来，我国新增城市地下空间建筑面积的增长迅速，截至2020年年底，城市地下空间累计建设面积为2.4×10^9 m^2，其中2020年新增城市地下空间建筑面积为2.59×10^8 m^2，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22%[19]。当前，我国城市地下基础设施以地下交通设施和市政基础设施为主，尤其是城市轨道交通建设速度已位居世界前列，城市地下快速道路建设处在加速发展阶段。住房和城乡建设部指出，要加强城市地下空间利用和市政基础设施建设，要求在2023年年底之前，基本完成设施普查，建立综合管理信息平台覆盖，推动地下空间信息化、分层化、高效化利用。国务院办公厅在《关于推动城乡建设绿色发展的意见》中指出，提高城乡基础设施体系化水平，普查现有基础设施，统筹地下空间综合利用，建立功能完善的城市综合立体交通。从我国城市地下空间发展规模和国家出台的相关指导性政策来看，未来我国城市地下基础设施的发展潜力是巨大的。然而，目前对于城市地下基础设施碳排放及低碳发展路径的研究还鲜有报道。

（二）城市地下基础设施低碳发展存在的问题

1. 城市地下基础设施全生命周期低碳发展需要优化

从建筑全生命周期的碳足迹来看，运行维护阶段的碳排放量占总体排放量的80%以上[20]，对于城市地下基础设施而言，运行阶段的碳排放量同样也

占主导地位。由于规划与建造的前期设计，对运行阶段的碳排量影响比较显著，因此城市地下基础设施的低碳发展，要从全生命周期进行优化，重点关注运行维护阶段。① 在规划阶段，目前主要存在顶层设计不足，缺乏在城市尺度和地上地下一体化尺度上协调整个城市功能、地上与地下功能分区、长期的时空双尺度设计理念等；在地下基础设施自身设计中，没有开展碳排放的专门设计，造成资源与能源浪费比较严重。② 在建造阶段，较少采用新型绿色建材，没有发挥地下围岩自身特点，过多使用高排放材料（如混凝土）；施工过程中也很少采用智能建造和工业化施工技术，尤其是适用于地下结构建造的局部装配式技术和新型的碳封存地基固结技术等。③ 在运行维护阶段，早期的基础设施运维技术和管理理念比较落后，造成资源与能源的浪费，产生了大量温室气体；新建的基础设施也没有很好地将智能运维理念与地下空间自身属性相结合，未充分发挥电气化运行与智能控制管理相结合的优势。

2. 城市地下基础设施“三端”的系统规划不足

目前，关于城市地下基础设施碳排放统计尚未开展，更没有从“三端”角度对地下基础设施碳排量情况进行摸底。因此，我国城市地下基础设施的碳排放情况存在底数不清的问题，无法有针对性地进行节能减排优化。具体来看，① 在源头端，当前城市地下基础设施的规划设计在能源端仍以火电或其他化石燃料为主，清洁能源占比较小，这与我国的能源结构相关[21]。② 在消费端，既有地下基础设施设备陈旧，低能耗电气化设备使用较少，也没有形成智能化运行管理体系，导致运行过程中的直接碳排放量较大。③ 在固碳端，现有的碳捕集、封存和利用技术（CCUS）大部分仍处在研发示范阶段，还未达到商用推广程度。主要原因是捕集或储存CO_2的地下基础设施不完善，无法支撑CCUS技术的大面积推广应用，因此，需要摸清城市地下基础设施需要固定的CO_2量，同时加快建设碳捕集与封存（CCS）/CCUS技术的城市地下基础设施应用场景。

3. 缺乏保障城市地下基础设施低碳发展的措施

目前，城市地下基础设施在前期规划、政策法规、技术标准等方面仍存在问题，表现为现有地下基础设施功能复合、结构复杂、建设管理运营分散，建设标准缺乏，城市基础设施建设标准滞后等[4]。此外，我国尚未建立完善的城市地下基础设施碳交易市场制度，缺乏专门针对城市地下基础设施工程低碳建设的政策支持和资金补贴，存在部分地下基础设施建设融资困难的问题。

四、城市地下基础设施低碳发展的理念及策略

（一）城市地下基础设施低碳发展理念

城市地下基础设施作为城市建设的一部分，需要遵循城市发展建设要求，全面贯彻绿色发展理念，积极探索分层发展、分类发展和智能发展的发展理念。① 绿色发展理念，通过合理利用地下空间资源、能源和自身节能优势，防止环境污染和破坏，改善人居社会环境，协调人类与自然环境的关系，建设绿色低碳循环的城市地下基础设施。② 分层发展理念，科学合理确定城市地下空间的分层开发模式，使地下空间开发按照有序、有理、有利的原则进行，形成城市地下基础设施竖向分层立体建设格局，有利于提升城市地下基础设施的节能减排效益。③ 分类发展理念，根据城市地下基础设施的使用功能，科学建设交通、管网、公共服务、物流等不同类型基础设施相协调的高效城市地下基础设施系统，提高城市韧性水平，间接实现节能减排。④ 智能发展理念，利用现代信息技术，将建筑信息模型（BIM）平台、地理信息系统（GIS）技术与地下空间规划相结合，给出立体、真实表现地下基础工程的模型参数，建立城市地下基础设施规划、建造和运行模型，提升城市地下基础设施规划、设计、建造、运行的合理性和效率。

（二）城市地下基础设施低碳发展策略

地下空间不同于地上空间，其开发建设是不可逆的，必须要先规划后建设，以达到效益最大化[22]。在全生命周期内，城市地下基础设施的低碳发展主要包括新建基础设施的低碳建设和既有基础设施的低碳化改造两个方面。其中，新建城市地下基础设施包括规划设计、建造物化和运行维护3个阶段；既有城市地下基础设施改造主要有绿色改造和绿色扩建两种方式。

1. 新建城市地下基础设施低碳发展策略

在规划设计阶段，城市地下基础设施要根据层

次进行规划设计。在城市尺度方面，结合国土空间规划，协同城市做好顶层规划设计，统筹城市地下空间，通过分析城市整体发展战略，确定地下基础设施规模和功能，优化城市整体的能源消费结构。在地上地下一体化尺度方面，遵循上下功能互补的设计原则，考虑长期使用功能及空间布局，发挥地下空间的优势，节省能源消耗，同时满足城市更新过程中扩充原有设施功能的需求。在地下基础设施自身尺度方面，通过将建筑体量、功能等与碳排放量建立关系，采用碳排放设计流程，在能源接入端采用清洁能源，如地源热泵、太阳能和风能电力等；在能源消费端多采用节能减排设施；利用地下空间的封闭性，设计地下温室气体收集与回收系统，便于碳固定；利用建筑碳交易市场，规范和约束地下基础设施的低碳规划设计。

在建造物化阶段，城市地下基础设施的低碳化建造策略主要包括3个方面：① 加强绿色建材、储能建材的使用，发挥围岩自身性能，减少水泥用量，或者使用新型高性能绿色建材，降低在建筑材料生产源头端的碳排放量，提高基础设施的耐久性。② 推广智能建造和工业化施工技术，应用信息化管理平台，采用局部装配式建造技术，减少在建造过程消费端的碳排放量。③ 推进建造碳封存技术的研发，如使用CO_2对地基排水固结，实现CO_2的封存再利用。

在运行维护阶段，城市地下基础设施运行维护主要有3种策略。① 智能运行策略，利用地下空间恒温恒湿、隐蔽安全等特点，将城市“智能大脑”基础设施建于地下，形成城市智能运维基础设施体系，优化地上地下一体化运行效率，提升城市整体的节能减排水平。② 电气化运行策略，地下基础设施的运行采用绿电驱动，通过能源桩、能源隧道、地下电动车库等建立分布式储能系统，形成地下“虚拟电厂”，进行电力市场和电网运行的电源协调管理。③ 零碳运行策略，利用地下空间的封闭性，建设地下CCS/CCUS基础设施，利用深地封存技术、压缩气体储能技术等，将城市地下基础设施运行产生的温室气体进行封存。

2. 既有城市地下基础设施低碳改造策略

绿色改造策略。针对能耗高、碳排放量大的既有地下基础设施，需要进行绿色改造，包括电气化改造、智能化改造和功能性改造。电气化改造是将电力作为能源，供应地下基础设施中各种设备，因此需要将保障基础设施运行的各类设备更新为低能耗、高耐久的电气化设备，通过强化基础设施的运行效率，实现既有城市地下基础设施的节能减排。智能化改造是利用现代信息技术和多重功能的理念，结合电气化设备的智能控制功能，根据使用需求自动调节设备的运行和停运，避免对资源和能源的浪费。功能性改造是通过将既有闲置的城市地下基础设施空间进行功能改造，同时利用加固技术提升工程设施的耐久性，一方面加强这些工程设施在战时或应急时的功能需求，另一方面也能实现闲置利用，间接实现节能减排。

绿色扩建策略。针对原有城市地下基础设施规模无法满足当前使用需求的问题，可以进行绿色扩建。扩建部分与新建城市地下基础设施的策略类似，首先，要对扩建部分进行空间规划设计，既要尊重原有地下基础设施，不对其产生负面影响，又要与原有的基础设施相匹配，补充其功能，实现新老交汇，和而不同。其次，要保障新老连接的结构可靠性和功能可靠性，因为新老空间连接是结构整体的薄弱环节，需要在建造过程中优化连接部分的受力性能，提升整体结构耐久性；同时也要协调新老交界处使用功能的无障碍连通。

五、城市地下基础设施的低碳节能减排技术

为推动城市地下基础设施低碳发展，助力“双碳”目标实现，以城市地下基础设施的“三端”为切入点，积极发展城市地下基础设施分布式能源利用–传输–消费–存储一体化技术，如图1所示。在源头端，使用太阳能、风能、沼气能、氢能和地热能等清洁能源；在消费端，采用融入智能运维的地下输配电系统，为地下基础设施运行提供能量，同时利用地下分布式储能系统对电力进行调峰，优化输电和用电效率，提升消费端节能减排效益；在固碳端，采用地下CCS/CCUS进行碳汇，如地基固结碳封存、地下空气压缩基础设施等。

（一）在源头端发展清洁能源利用与地下储能技术

借助城市地下基础设施，研发地热能高效利用技术。针对不同深度的地热能源，配合相应深度处的地下基础设施类型，研发不同应用场景的地热能

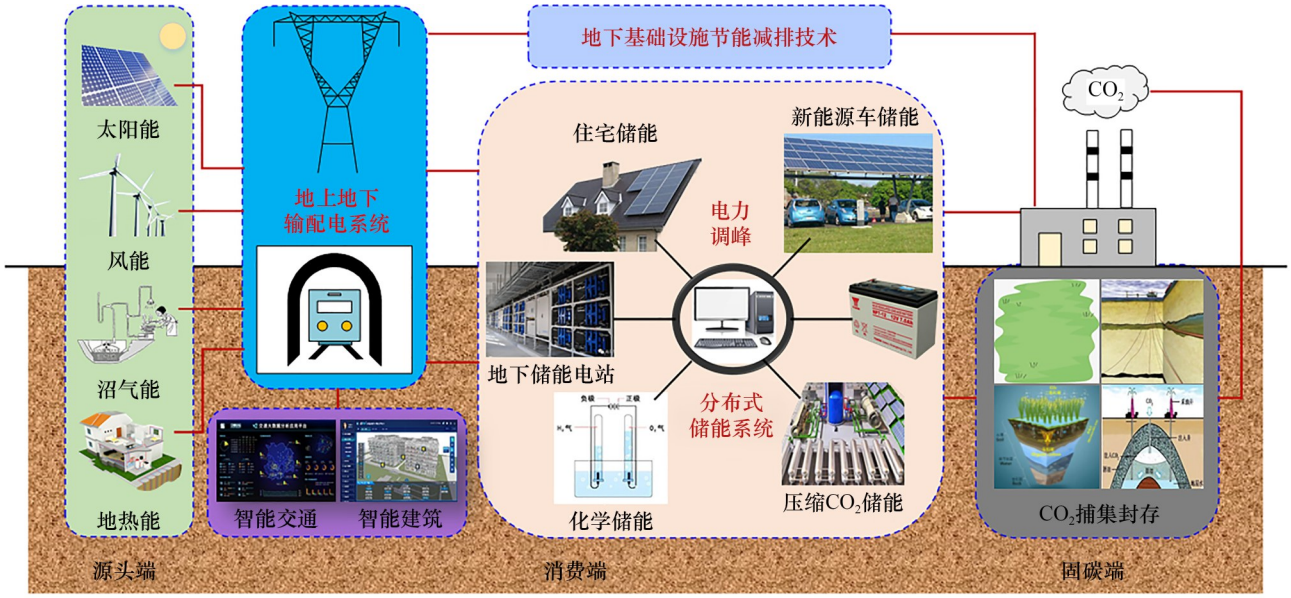

图1　地下分布式能源利用–输送–消费–存储一体化技术

源利用技术，避免深距离传输产生的碳排放与能源消耗；同时打通太阳能、风能、沼气能等清洁能源在地下基础设施中利用的通道，形成以地热能源为主、其他清洁能源为辅的城市地下基础设施能源供给体系。

发挥地下空间的优势，研发地下分布式储能技术。利用地下压缩空气储能、地下储能电站、地下水源热泵 – 沼气热电联产循环储能、地下储能车库、电解水制氢储能等，统筹形成地下分布式储能系统，参与电力调峰。在电力盈余时，通过分布式储能系统进行储能；在电力不足时，通过储能系统供电，进而在源头端实现节能减排。与分布式存储类似，分布式储能具有分散电力资源，提升储能能力，提升系统可靠性、可用性和存取效率等特点，同时分布式储能系统也易于扩展。例如，南京儿童医院深井式停车场设计方式，采用深井式停车场和汽车自动充电桩结合，有效解决了停车、充电和储能问题。

（二）在消费端发展智能运维与工业化建造技术

智能运维技术是城市地下基础设施低碳发展的核心突破口，运维管控环节的优化，在降低城市能耗的同时，可以提高对间歇性可再生能源的利用能力，实现节能与绿色用能。智能运维的核心是如何将数字孪生、人工智能、大数据、数值仿真等现代信息技术融入到城市地下基础设施全生命周期的决策分析中，形成低碳城市智能运维碳评价体系。智能运维技术的关键科学问题包括：① 实时、精准地获取城市地下基础设施能耗与碳排放数据信息，揭示全要素数据信息识别、分类、编码与传输机制，阐明多源、多维信息数据的映射与交互机理，实现对时空变化下信息数据的挖掘和处理。② 掌握智能化控制原理，建立合理有效的节能减排智能化人机合作模式与协同机制，完成城市负荷需求与能耗精细化管理、优化决策平台的搭建。③ 打通新旧地下基础设施信息数据传输通道，建立既有地下基础设施碳排放评估模型，实现对其数字化升级，完成对城市地下基础设施的低碳加固和节能改造。例如，对早期地下基础设施的照明系统进行更新，可以采用半导体发光二极管（LED）光源替代传统照明光源的方式，能耗节省超 50%；对于有调光要求的、可设置工作场景的地下基础设施，可以采用智能照明控制系统，即根据室内光环境条件、人员数量与分布、特殊工作场景等因素对室内灯光进行自动化、智能化控制与管理，实现照明灯光的智能启动与调节，用远程、遥控、定时、集中等多种控制方式实现智能、节能与环保照明。通过整体更换照明系统并采用智能控制系统，可实现照明能耗下降 70% 以上。

在建筑工业化大力推广的背景下，针对地下工

程的施工特点，可以研发局部装配式地下结构建造技术。地下结构的侧墙与底板可以采用现浇方式，其余构件（如顶板与中柱等）可以采用预制拼装。相较于现浇方式，装配式建筑可减少70%的建筑垃圾，节约55%的水泥砂浆，减少25%的水资源消耗。同时，利用BIM虚拟建造技术，可以实现对局部装配式工程的精细化管理。与全装配式建造方法相比，局部装配式方法可以使施工、防水难度降低，提升施工效率。此外，局部装配技术可以在提高地下结构建筑工业化水平的同时，将拱形预制顶板配合柔性装配式节点，极大提高地下结构的抗震能力。

（三）在固碳端研发地下基础设施碳捕集与封存技术

由于城市地下空间本身具有密闭特性，相对地上更加易于捕集CO_2。直接空气捕集（DAC）技术利用化学吸附材料和物理吸附材料等可实现对分布源排放的CO_2进行捕集。相较于地上空间，地下空间更加密闭，与空气直接接触流通的面积有限，且需要辅以通风设备进行室内外空气交换。通过在地下通风设施中增加碳捕集设备，如采用液体吸收、固体吸附和膜分离等碳捕集技术，完成对城市地下基础设施运维过程中产生温室气体的收集工作。加大对常温下物理吸附剂的吸附性效果提升研究，开展对高效低成本设备的开发，解决材料吸附效果好但成本高、吸附材料再生容易但吸附效果较差的问题。利用土壤本身的碳捕集能力，研发地基固碳封存技术，可以有效推进地下基础设施碳捕集与封存工作。

六、对策建议

（一）摸清城市地下基础设施温室气体排放家底

针对不同领域的城市地下基础设施，统筹协调相关部门工作，全面开展城市地下基础设施的普查统计工作，摸清城市地下基础设施家底，建立城市地下基础设施数据中心；参考联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）、国际标准和国家标准中给出的建筑全生命周期碳足迹评价方法，考虑地下基础设施的特点，统一城市地下基础设施碳排放强度指标和温室气体核算标准，发展全生命周期碳足迹评价方法和分析模型。利用碳足迹评价方法和分析模型，从“三端”系统规划或地下基础设施类别的角度，建立城市地下基础设施碳排放数据中心，摸清城市地下基础设施碳排放家底。

（二）完善城市地下基础设施低碳发展顶层设计

在规划阶段，针对不同城市的特点，制定适宜的地下基础设施未来发展规划，将其纳入城市设计与城市更新规划中。在设计阶段，加强新建地下基础设施与地面设施及周围既有地下设施之间的联系，考虑基础设施本身的功能可移植性和可发展性，避免资源浪费。在建设阶段，坚持先规划、后建设，先地下、后地上的原则，更新现行的地下基础设施建设标准规范，鼓励相关部门、企业等参与技术标准编制，开展先行先试工作。

（三）加强城市地下基础设施低碳发展的技术研发

在源头端，研发城市地下基础设施清洁能源高效利用技术与分布式储能技术，持续推进清洁能源电力占比；在消费端，推进城市地下基础设施电气化、智能化、低碳化运行体系，利用大数据、人工智能、数字孪生等现代信息技术，构建地下基础设施智能管理平台，提高能源利用效率，推广城市地下基础设施低碳工业化建造技术；在固碳端，针对地下基础设施中不得不排的CO_2，研发基于城市地下基础设施的CCS/CCUS技术应用场景。

（四）加强城市地下基础设施低碳发展的政策倾斜

制定城市地下基础设施碳交易政策，推动城市地下基础设施碳交易市场的建立，完善市场制度。建立绿色能源消费评价、认证体系，健全地下基础设施绿色能源消费机制，积极引导能源绿色消费。对城市基础设施地下化改造项目建立评价参考依据，并给予相关示范工程政策倾斜和资金补贴。

参考文献

[1] 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.
Cheng G H, Wang R, Zhao M H, et al. Present situation and developmental trend if urban underground space development and utilization in China [J]. Earth Science Frontiers, 2019, 26(3): 39–47.

[2] 贾建伟, 彭芳乐. 日本大深度地下空间利用状况及对我国的启示 [J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(S1): 1339–1343.
Jia J W, Peng F L. Utilization of deep underground space in Japan and its enlightenment for Chinese city [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering. 2012, 8(S1): 1339–1343.

[3] 陈志龙. 城市地上地下空间一体化规划的思考 [J]. 江苏城市规划, 2010 (1): 18–20, 39.
Chen Z L. Thoughts om the integrated planning of urban aboveground and underground space [J]. Jiangsu Urban Planning, 2010 (1): 18–20, 39.

[4] 曾国华, 汤志立. 城市地下空间一体化发展的内涵、路径及建议 [J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(3): 701–713.
Zeng G H, Tang Z L. Connotation, path and suggestion of integrated development of urban underground space [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2022, 18(3): 701–713.

[5] 李微, 陈志龙, 郭东军. 国外城市地下空间规划借鉴——以赫尔辛基为例 [J]. 国际城市规划, 2016, 31(3): 119–124.
Lei W, Chen Z L, Guo D J. Study on urban underground space plan abroad: The practice and experience of Helsinki [J]. Urban Planning International, 2016, 31(3): 119–124.

[6] 钱七虎. 迎接我国城市地下空间开发高潮 [J]. 岩土工程学报, 1998, 20(1): 112–113.
Qian Q H. Meeting the climax of urban underground space development in China [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(1): 112–113.

[7] 刘艺, 朱良成. 上海市城市地下空间发展现状与展望 [J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(7): 941–952.
Liu Y, Zhu L C. Current status and future perspectives of urban underground space development in Shanghai [J]. Tunnel Construction, 2020, 40(7): 941–952.

[8] 岳修鑫, 张峰. 郑州市地下空间建设现状与未来规划 [J]. 未来城市设计与运营, 2022 (4): 52–56.
Yue X X, Zhang F. Underground space construction status and future planning in Zhengzhou [J]. Future City Studies, 2022 (4): 52–56.

[9] 黄其励, 高虎, 赵勇强. 我国可再生能源中长期(2030、2050)发展战略目标与途径 [J]. 中国工程科学, 2011, 13(6): 88–94.
Huang Q L, Gao H, Zhao Y Q. The mid-long term(2030, 2050) development of renewable energy in China: Strategic target and roadmap [J]. Strategic Study of CAE, 2011, 13(6): 88–94.

[10] 王贵玲, 刘彦广, 朱喜, 等. 中国地热资源现状及发展趋势 [J]. 地学前缘, 2020, 27(1): 1–9.
Wang G L, Liu Y G, Zhu X, et al. The status and development trend of geothermal resources in China [J]. Earth Science Frontiers, 2020, 27(1): 1–9.

[11] 贺继超, 别舒, 易巍, 等. 地源热泵系统在北京大兴国际机场的应用 [J]. 暖通空调, 2022, 52(5): 90–95.
He J C, Bie S, Yi W, et al. Application of ground-source heat pump systems to Beijing Daxing Internationl Airport [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2022, 52(5): 90–95.

[12] 金磊, 柳昆, 李佳川, 等. 地下空间开发对城市向低碳型发展的效益评价 [C]//中国土木工程学会隧道及地下工程分会隧道及地下空间运营安全与节能环保专业委员会第一届学术研讨会论文集, 2010: 167–173.
Jin L, Liu K, Li J C, et al. Evaluation of the benefits of underground space development on the development of low-carbon cities[C]//Proceedings of the First Academic Seminar of the Tunnel and Underground Space Operation Safety Energy Conservation and Environmental Protection Professional Committee of China Civil Engineering Society Tunnel and Underground Engineering Branch, 2010: 167–173.

[13] 金昱. 国际大城市交通碳排放特征及减碳策略比较研究 [J]. 国际城市规划, 2022, 37(2): 25–33.
Jin Y. Comparative study on characteristic and planning strategies of transportation carbon emissions in global megacities [J]. Urban Planning International, 2022, 37(2): 25–33.

[14] 曾平利. 2020年中国城市地铁客运量报告 [J]. 城市轨道交通, 2021 (2): 51–54.
Zeng P L. China urban metro passenger traffic report 2020 [J]. China Metros, 2021 (2): 51–54.

[15] 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. 中国城市地下空间发展蓝皮书 [M]. 北京: 科学出版社, 2021.
Center for Strategic Studies of Chinese Academy of Engineering, Underground Space Branch of China Institute of Rock Mechanics and Engineering, Chinese Society of Urban Planning. 2021 blue book of urban underground space [M]. Beijing: Science Press, 2021.

[16] 住房和城乡建设部. 中国城市建设统计年鉴 [R]. 住房和城乡建设部, 2020.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Statistical yearbook of urban construction in China [R]. Beijing: Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, 2020.

[17] 潘柯良, 耿全强. 浅谈我国城市地下空间设施的分类研究 [J]. 上海标准化, 2010 (8): 28–33.
Pan K L, Geng Q Q. Study on classification of urban underground space facilities in China [J]. Shanghai Standardization, 2010 (8): 28–33.

[18] 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 (S1): 1–5.
Qian Q H. Evaluation of the present situation and prospect of the development and utilization of urban underground space in China [J]. Life and Disaster, 2006 (S1): 1–5.

[19] 住房和城乡建设部. 城市地下空间规划标准: GB/T 51358—2019 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2019: 5–8.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard of urban underground space planning: GB/T 51358—2019 [S]. Beijing: China Planning Press, 2019: 5–8.

[20] 李岳岩, 陈静. 建筑全生命周期的碳足迹 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020.
Li Y Y, Chen J. Carbon footprint of building life cycle [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2020.

[21] 国家能源局. 全国电力工业统计数据 [R]. 北京: 国家能源局, 2021.
National Energy Administration. Statistics of national electric power industry [R]. Beijing: National Energy Administration, 2021.

[22] 钱七虎, 陈志龙. 21世纪地下空间开发利用展望[C]//中国土木工程学会第八届年会论文集, 1998: 170–177.
Qian Q H, Chen Z L. Prospect of underground space development and utilization in 21st century [C]// Proceedings of the Eighth Annual Meeting of China Civil Engineering Society, 1998: 170–177.