



ELSEVIER

Contents lists available at [ScienceDirect](https://www.sciencedirect.com)

Engineering

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/eng](http://www.elsevier.com/locate/eng)



Research  
Frontier Research on Carbon Neutrality—Article

## 城市地下空间开发在实现碳中和目标中的作用——以中国为例

王佳佳<sup>a,#</sup>, 段华波<sup>b,#</sup>, 陈坤阳<sup>c</sup>, Isabelle Y. S. Chan<sup>a</sup>, 薛帆<sup>a</sup>, 张宁<sup>d</sup>, 陈湘生<sup>c,\*</sup>, 左剑<sup>e,\*</sup>

<sup>a</sup> Department of Real Estate and Construction, Faculty of Architecture, The University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China

<sup>b</sup> School of Environmental Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430000, China

<sup>c</sup> State Key Laboratory of Intelligent Geotechnics and Tunneling, College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518000, China

<sup>d</sup> Leibniz Institute of Ecological Urban and Regional Development, Dresden 01217, Germany

<sup>e</sup> School of Architecture and Civil Engineering, The University of Adelaide, Adelaide, SA 5005, Australia

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 5 February 2024

Revised 18 June 2024

Accepted 22 July 2024

Available online 27 July 2024

#### 关键词

城市地下空间

碳排放

城市发展

建筑业

### 摘要

城市空间约束与建设活动产生的碳排放已成为制约可持续发展的关键瓶颈。作为缓解土地资源压力的有效途径,城市地下空间(urban underground space, UUS)开发在碳减排领域的系统研究仍显不足。本研究基于多源数据构建分析框架,采用宏观尺度简化生命周期评价(LCA)方法,定量解析UUS开发在碳中和进程中的作用机制,重点评估地下建筑、轨道交通及地热系统三类典型设施的碳排放强度与减排效能。实证研究表明:2020年我国地下建筑产生间接碳排放约5.47亿吨二氧化碳当量(CO<sub>2</sub>e),在UUS系统碳排放中占主导地位;而地热开发可实现减排1.7亿吨CO<sub>2</sub>e,是重要的碳汇源。研究证实UUS开发具有空间拓展与低碳转型的双重效益,建议通过低碳建造体系创新与开发模式优化,构建协同的地下空间可持续发展路径。

© 2024 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## 1. 引言

建筑业是经济发展的关键推动力,推动着世界的进步、繁荣和现代化[1–2]。然而,建造活动导致了不断增长的碳足迹,对实现碳中和目标提出了重大挑战。建筑和基础设施建设是我国主要能源消耗和二氧化碳(CO<sub>2</sub>)排放源[3]。根据《中国建筑能耗年度报告2022》[4],2020年,与建筑材料、施工和建筑运营相关的CO<sub>2</sub>排放分别占我国总能源相关CO<sub>2</sub>排放的28.2%、1.0%和21.7%,累计排放量达到58亿吨二氧化碳当量(CO<sub>2</sub>e)。尽管房地产开发有所减少,但基础设施建设仍然产生碳排放。因此,建筑业

在实现碳中和目标中发挥着至关重要的作用,建筑行业的低碳转型势在必行[5]。在实现碳中和的国家目标背景下,我国必须采取减排措施,引导建筑行业走向低碳发展模式。

城市发展除了需要关注碳排放,还面临另一个紧迫的问题:城市土地资源稀缺,即地上空间开发建设的局限性[6]。随着城市人口的增长和城镇化率的提高,传统的城市横向扩展变得越来越有限并且不可持续[7–8]。城市地下空间(urban underground space, UUS)发展的重要性在于它能提供广泛的机会来应对各种城市挑战,满足城市发展的增长需求。UUS是人类开发和利用的主要地下空间,是指城市规划区域范围内的地表以下空间[9–10]。它为交

\* Corresponding authors.

E-mail addresses: xschen@szu.edu.cn (X. Chen), jian.zuo@adelaide.edu.au (J. Zuo).

# These authors contributed equally to this work and should be considered co-first authors.

2095-8099/© 2024 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

英文原文: *Engineering* 2025, 45(2): 212–221

引用本文: Jijia Wang, Huabo Duan, Kunyang Chen, Isabelle Y.S. Chan, Fan Xue, Ning Zhang, Xiangsheng Chen, Jian Zuo. Role of Urban Underground-Space Development in Achieving Carbon Neutrality: A National-Level Analysis in China. *Engineering*, <https://doi.org/10.1016/j.eng.2024.07.012>

通、商业活动、存储、公共事业甚至清洁能源生产等各种用途提供了对地下空间的高效利用。有效开发和利用UUS可以缓解传统地面建筑带来的环境压力，并为密集人口区域克服空间限制提供新的思路。利用地下空间的能源可以帮助减少碳排放。例如，地热能是一种可再生能源，可以用于供暖和制冷，减少化石燃料的消耗。

近年来，我国作为快速发展的国家，经济发展是一个重要目标，这推动了UUS的快速增长[10–11]。截至2020年年底，我国在积极推动并在UUS发展方面取得了显著进展[12–15]。我国大陆累计的UUS面积已达到24亿平方米[16]。2020年，全国新增UUS面积约为2.59亿平方米，年增长率为0.78% [16]，当年新增的地下空间约占城市地区总竣工建筑面积的22% [16]。随着我国面临快速的城镇化和人口增长，推进UUS发展将是未来的重点[17–19]。在全球范围内，各大城市将地下空间视为应对城镇化挑战和优化土地利用的重要解决方案。例如，芬兰赫尔辛基拥有超过一千万立方米的地下空间，用于停车、体育设施、仓储和地铁系统[20–21]。赫尔辛基将UUS用于交通目的，与现有的交通基础设施相结合；例如，地铁系统可以与地下人行隧道无缝连接，使城市通行更加便捷高效。新加坡致力于到2030年将其地铁网络从180 km扩展至原长度的两倍，成为全球推广地下交通系统的典范[22–25]。在法国巴黎，由于地面条件良好，人口密度高达每平方公里927人，大量地下基础设施被用于交通、公用设施等多种功能[26]。这些案例凸显了UUS作为现代城市规划重要组成部分的事实，使城市能够最大限度地利用土地。

根据联合国的可持续发展目标，需要厘清UUS密集开发是否属于低碳活动，这对于我国的许多大型城市来说非常重要。值得注意的是，UUS的开发涉及大量资源和能源的投入，可能会产生间接的碳排放[27–30]。这种明显的负面影响值得进一步研究。例如，地铁在运营过程中具有节能表现，其作为一种低碳交通方式，替代了部分地面汽车交通[31–35]；然而，地铁隧道建设过程中产生的大量碳排放与地铁运营期间的减排潜力形成了矛盾。在实现碳中和这一共同目标的背景下，国家层面将UUS视为低碳开发方式的合理性必须得到充分论证。然而，现有研究主要集中于量化特定UUS项目的碳排放[36–37]。分析不足可归因于多种因素，包括复杂的系统边界、有限的的数据获取以及UUS开发的演变特性。

因此，本研究采用自上而下的方法，对过去二十年（2001–2020）来我国UUS发展及其隐含碳排放进行了综合评估。与以往聚焦于特定UUS类型（如地下轨道交通）的研究不同，本研究从整体上评估了多种UUS类型在全

国范围内的总体碳影响。通过考察近二十年来UUS开发与运营的累积效应，本研究旨在阐明可持续建设在减少碳排放中的作用。总体而言，本研究的目标是：① 通过统计数据和对我国2001–2020年典型UUS建设的评估，定量分析UUS在低碳可持续发展中的表现；② 分析与各类典型UUS碳排放表现相关的因素；③ 总结我国UUS开发在有效减少碳排放方面的积极成果；④ 提出面向我国及全球其他城市的UUS低碳发展路径。

## 2. 方法

### 2.1. 研究边界

本研究采用的主要方法是生命周期评估（LCA），这是一种评估产品在整个生命周期内环境影响的方法，适用于区域、国家和全球范围的可持续性评估（详见附录A中的附注S1）。就深入的文献综述而言，LCA方法更适合用于计算国家层面的UUS碳排放。

UUS包括多种类别，如建筑物、隧道、地库、停车场以及其他地下基础设施[38–39]。与碳排放相关的主要地下空间类别是本研究的重点，可以归纳为三种典型类型：商业和住宅地下空间的建设、地铁系统的开发以及地热能的利用[40–42]。这些UUS类型涉及建筑材料、能源或可再生能源资源的消耗。关于这三类之间的关系及其具体定义的更多细节，详见附录A中的附注S2。在本研究中，我们重点对UUS开发在这三个具体方面的碳减排进行定量分析（图1）。在城镇化的背景下，UUS对减缓碳排放具有重要贡献；然而，考虑到各个方面的复杂性，对其影响进行全面评估存在相当大的挑战。因此，为了简化研究并更深入地了解UUS对碳减排的影响，我们聚焦于这三个关键类型。

#### 2.1.1. 地下建筑

地下建筑是指商业和住宅建筑的地下层。研究采用了自上而下的方法来确定2001–2020年间我国建成的地下空间的累积面积。2001–2020年的年度建筑竣工总面积数据来源于《中国统计年鉴2020》（涵盖2002–2019年）[43]。根据《城市地下空间开发利用“十三五”规划》[44]和《中国城市地下空间发展蓝皮书2021》[16]，2001–2020年间，建筑竣工面积中地下面积的年度占比从10%增加至19%。这一比例包含了年度地铁竣工面积。因此，年度地铁竣工面积通过公式（1）进行计算，再通过公式（2）进行扣除。2001–2020年的地铁运营里程和在用车站的年度统计数据来源于《中国城市建设统计年鉴（2002–2020）》[45]以及中国城市轨道交通协会（2020年）。

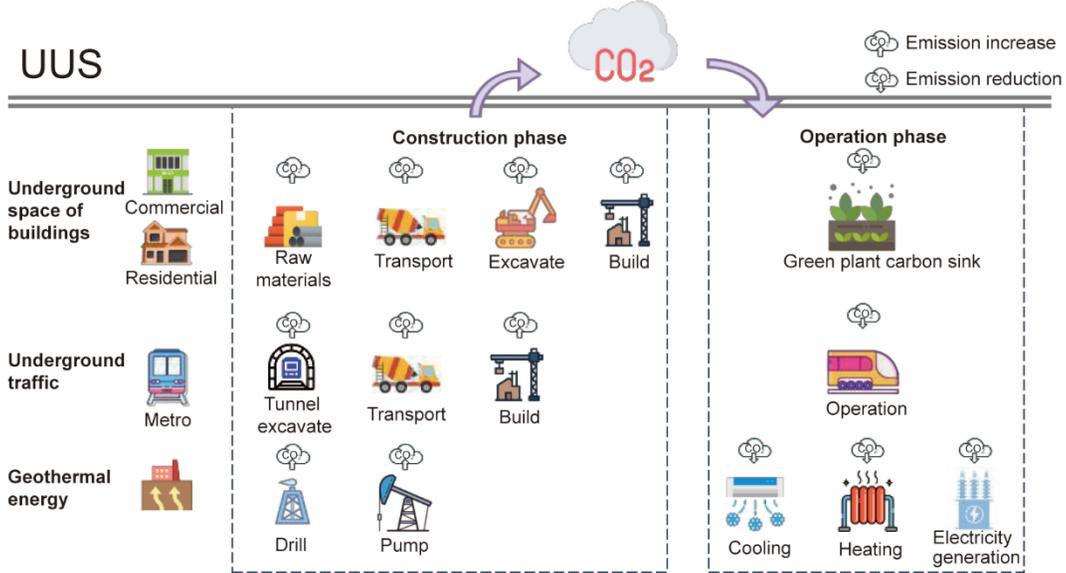


图1. UUS的碳减排量化边界。

$$S_{\text{sub}(i)} = L_{\text{tunnel}(i)} \times w_{\text{tunnel}} + \sum_{m=1}^{n(i)} h_m \times w_m \quad (1)$$

式中,  $S_{\text{sub}(i)}$  表示第  $i$  年新增的地铁建设面积 ( $\text{m}^2$ );  $L_{\text{tunnel}(i)}$  表示第  $i$  年新增的地铁运营里程 ( $\text{m}$ );  $w_{\text{tunnel}}$  为地铁隧道的宽度, 即盾构隧道的直径, 为  $6.98 \text{ m}$ ;  $n$  表示第  $i$  年新增的地铁站数量;  $h_m$  和  $w_m$  分别为新增地铁站 ( $m$ ) 的长度和宽度, 在本研究中, 这些值分别为  $240 \text{ m}$  和  $24 \text{ m}$  [46]。

地下建筑在施工阶段的  $\text{CO}_2$  排放量通过以下公式计算:

$$E_{\text{c-ug}(i)} = (S_{\text{com}(i)} \times d_{\text{com}(i)} - S_{\text{sub}(i)}) \times e_{\text{c-ug}} \quad (2)$$

式中,  $E_{\text{c-ug}(i)}$  表示第  $i$  年地下建筑在施工阶段的  $\text{CO}_2$  排放量 ( $\text{tCO}_2$ );  $S_{\text{com}(i)}$  表示第  $i$  年新竣工的建筑面积 ( $\times 10^4 \text{ m}^2$ ), 完整数据见附注 S2;  $d_{\text{com}(i)}$  是第  $i$  年地下面积占全年竣工建筑总面积的比例;  $e_{\text{c-ug}}$  为地下建筑在施工阶段的碳排放因子, 即  $0.72 \text{ tCO}_2 \cdot \text{m}^{-2}$  [47]。

绿化和植被同样有助于碳汇。假设等面积的地下建筑空间在地面上全部开发为绿化和植被, 则一年固定的  $\text{CO}_2$  量通过以下公式估算:

$$E_{\text{cs-ug}(i)} = (S_{\text{com}(i)} \times d_{\text{com}(i)} - S_{\text{sub}(i)}) \times e_g \times 3.67 \quad (3)$$

式中,  $E_{\text{cs-ug}(i)}$  表示第  $i$  年固定的  $\text{CO}_2$  量 ( $\text{tCO}_2$ );  $e_g$  为城市绿化的平均碳汇因子, 即  $2.16 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  [48]。

### 2.1.2. 地铁

在评估地铁的低碳效果时, 与施工阶段相关的  $\text{CO}_2$  排放量不可忽视。地铁施工可以分为两大类: 隧道和车站。在施工阶段, 总的  $\text{CO}_2$  排放量是两个部分排放量的总和, 如公式 (4) 所示:

$$E_{\text{c-sub}(i)} = L_{\text{tunnel}(i)} \times e_{\text{tunnel}} + \sum_{m=1}^{n(i)} h_m \times w_m \times e_{\text{station}} \quad (4)$$

式中,  $E_{\text{c-sub}(i)}$  表示第  $i$  年地铁施工阶段的  $\text{CO}_2$  排放量 ( $\text{tCO}_2$ );  $e_{\text{tunnel}}$  和  $e_{\text{station}}$  分别为与地铁隧道和车站施工相关的碳排放因子, 即  $10.192 \text{ tCO}_2 \cdot \text{m}^{-1}$  和  $3.924 \text{ tCO}_2 \cdot \text{m}^{-2}$  [49]。

除了地铁, 公共汽车和出租车是我国城市公共交通的主要类型。2001—2020 年每种车辆的年总客运量数据可在《中国城市建设统计年鉴 (2002—2020)》[45] 和《交通运输行业发展统计公报 (2009—2020)》[50] 中找到。j 将三种车辆的运营引起的  $\text{CO}_2$  排在宏观层面进行了比较, 这些排放量是通过公式 (5) 获得的:

$$E'_{\text{o-trans}(i)} = N'_i \times M'_i \quad (5)$$

式中,  $t$  指的是车辆类型, 即地铁、公共汽车或出租车;  $E'_{\text{o-trans}(i)}$  表示第  $i$  年类型  $t$  车辆的  $\text{CO}_2$  排放量 ( $\text{kgCO}_2$ );  $N'_i$  是第  $i$  年类型  $t$  车辆的总客运量 (乘客乘次);  $M'_i$  表示第  $i$  年类型  $t$  车辆每乘客乘次的  $\text{CO}_2$  排放量, 即地铁每乘客每次  $0.7 \text{ kgCO}_2$  [51]、公共汽车每乘客每次  $0.68 \text{ kgCO}_2$  [52]、出租车每乘客每次  $1.72 \text{ kgCO}_2$  [52]。公共汽车和出租车的排放因子考虑了汽油动力和电动车辆的综合排放指标。

### 2.1.3. 地热能

全球范围内, 热干岩地热资源的利用仍然有限。因此, 本研究仅关注浅层地热能和水热型地热能。浅层地热能的碳减排效果可以通过热泵数据定量确定[53], 如下所示:

$$E_{\text{geoth-s}(i)} = N_{\text{pump}(i)} \times J_{\text{ave}} \times e_{\text{tr}} \quad (6)$$

式中,  $E_{\text{geoth-s}(i)}$  表示第  $i$  年利用浅层地热能减少的  $\text{CO}_2$  量

( $\text{tCO}_2$ );  $N_{\text{pump}(i)}$  是第  $i$  年热泵的数量 (台);  $J_{\text{ave}}$  是每台热泵用于建筑取暖和空调的平均能量 ( $\text{J} \cdot \text{泵}^{-1}$ );  $e_{\text{tr}}$  是电力的碳排放因子 ( $\text{tCO}_2 \cdot \text{J}^{-1}$ )。

由于一吨标准煤的隐含能量是已知的, 因此地热能的数量通常以标准煤的特定数量表示。因此, 地热能的碳减排效果通过以下公式计算:

$$E_{\text{geoth}(i)} = N_{\text{coal}(i)} \times e_{\text{coal}} \quad (7)$$

式中,  $E_{\text{geoth}(i)}$  表示第  $i$  年利用地热能减少的  $\text{CO}_2$  量 ( $\text{tCO}_2$ );  $N_{\text{coal}(i)}$  是第  $i$  年等效的标准煤数量 (t);  $e_{\text{coal}}$  是标准煤的碳排放因子 ( $\text{tCO}_2 \cdot \text{t}^{-1}$ )。

## 2.2. 数据收集

从国家层面进行系统的长期分析对数据获取提出了重大挑战。本研究的主要数据来源为政府文件 (如《中国统计年鉴》) 以及行业报告 (如《城市地下空间开发利用“十三五”规划》和《中国城市地下空间发展蓝皮书 2021》[16])。政府和行业数据相对可靠且覆盖面广, 涵盖了 20 年的时间 (2001—2020)。例如, 《中国统计年鉴》提供了每年竣工建筑的建筑总面积。其他专业报告和年鉴也提供了有关地铁运营及公共交通 (如公共汽车和出租车) 的数据。如果某些参数或数据难以收集, 则假设其值, 但会考虑不确定性。结果的误差值是通过蒙特卡罗模拟获得的。

## 3. 结果和讨论

### 3.1. UUS 的整体碳排和减排现状

本研究全面分析揭示了 UUS 在可持续城市发展和减少碳排放方面的重要作用。城市和国家的发展与建设活动密切相关, 而这些活动不可避免地会导致碳排放[54]。因此, 追求低碳发展方式变得尤为重要。在这一背景下, 地下空间的发展成为缓解地面土地有限性约束并最小化碳排放的有效手段。

研究表明, 施工过程是 UUS 生命周期中碳排放的主要阶段。而建筑材料的生产和运输是碳排放的主要来源[55]。此外, 碳排放量随着时间的推移呈现持续上升的趋势。尽管在施工阶段会产生碳排放, 但运营期间的碳汇抵消使得 UUS 成为一种可持续的建设模式。从生命周期的角度来看, UUS 并不会导致更高的碳排放结果。同时, 经过合理规划, UUS 可以用于交通和商业设施, 从而减轻对地面空间开发的压力, 促进可持续城市发展。地面节省出的空间为绿色植物提供了生长机会, 而植物的碳汇作用有助于减少碳排放。

地热资源的利用为 UUS 提供了显著的碳汇能力。中国土地面积广阔, 自然资源丰富, 合理利用地热资源为 UUS 的低碳发展提供了强有力的支持。经济增长必须与基础设施建设相结合, 而 UUS 为中国等发展中国家提供了新的发展思路。此外, 地热能的利用与地下空间开发的结合提供了一种创新和可持续的模式。这种协同作用为低碳城市发展提供了新的方向。本研究的结果也证实, UUS 可以作为一种低碳建设方法, 这在其他发展中国家也得到了验证。除了分析 UUS 的排放历史数据外, 本研究还预测了不同情景下的未来趋势。研究结果展示了 2021—2035 年间在不同情景下碳排放和碳汇的潜在路径。这些情景分析对于理解当前减排措施的影响至关重要。

总体而言, UUS 的碳减排潜力明显。尽管地下建筑在施工过程中仍会产生排放, 但根据系统的整体评估, UUS 是一种低碳系统。城市规划部门可以利用 UUS 来增强规划和设计, 进一步减少排放。合理规划 UUS 的分布, 抓住由此带来的低碳建设机会是至关重要的。这些发现表明, 在考虑城市整体建设时, 迫切需要实施低碳战略, 并采取积极的碳管理措施。未来的 UUS 发展应探索先进的建筑材料、改进的能效系统以及创新的碳捕集与封存技术。通过与地热能利用的协同作用, 可以高效地实现碳减排。此外, 最大限度地增加绿地和采用智能通风系统等可持续设计原则, 能进一步促进碳减排。这些技术和方法对于中国的 UUS 具有重要意义, 并对城市发展产生影响。

此外, 在碳排放计算过程中所做的假设是有限的; 例如, 平均碳汇因子可能无法准确反映不同地区或生态系统的碳汇水平。此外, 我们的数据未考虑技术进步对排放因子的潜在影响, 这可能给结果带来不确定性。不过, 我们在建模结果中捕捉到了这些不确定性, 但是这些假设和局限性并未显著改变宏观分析中碳评估的总体趋势。实际上, 在一些极端假设情境中, 使用假设参数可以更直观地理解分析结果。未来的研究应改进这些假设并整合更精确的数据, 以进一步提高碳评估的准确性。

#### 3.1.1. 地下建筑

图 2 展示了与地下建筑各阶段相关的碳排放量, 以及相应地面区域的城市绿化和植被的碳汇潜力。2001—2020 年, 地下建筑施工的  $\text{CO}_2$  排放量持续增长, 从 7020 万吨增加到 5.47 亿吨; 20 年间的年均增长率为 11.4%。如图 2 所示, 前十年期间, 排放量的年增量相对稳定, 但 2010 年之后年排放增长变得更加显著。2011—2013 年间, 排放量明显增加; 2015 年年排放量首次超过 4 亿吨; 在“十三五”规划期间, 2018 年年排放量首次超过 5 亿吨, 并在 2020

年达到5.47亿吨的峰值。值得注意的是，2019—2020年的增长幅度较小，这可归因于2020年的新冠疫情。

图2显示地下建筑施工阶段的CO<sub>2</sub>排放量稳步增加，这主要是由建筑材料生产和运输阶段导致，尤其是水泥生产。水泥生产涉及多种化学反应，因此在施工过程中水泥生产所产生的碳排放值得关注。运输消耗了大量能源，估算结果验证了需要特别关注运输中的节能措施。值得一提的是，尽管这一部分的碳排放与地下建筑建设相关，但相应的地面建筑施工同样需要建筑材料的生产和运输，包括水泥的生产。因此，这部分碳排放并不仅仅与地下空间开发有关，而是所有建设过程固有的方面。这种认识有助于减轻将碳排放增加仅归因于地下空间建设的误解。

研究表明，植物碳汇并未带来显著的碳减排。如本研究假设的那样，地下建筑空间的开发释放了同等面积的地面空间，且所有这些地面空间都用于以绿植和植被形式进行碳汇。这两个假设的目的是评估城市中植物碳汇的作用。在这些假设下，我们计算了城市植物碳汇的趋势和重要性。同时，我们假设城市绿化的碳汇能力保持不变，即为2.16 tC·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>。即便在极端条件下，植物碳汇也未能带来数量级的碳减排。然而，地下空间的开发部分解决了地表土地问题，并为城市植物碳汇的发展提供了机会。本研究通过假设评估了城市碳汇的发展趋势。图2展示了在二十年期间通过这些方式固定的CO<sub>2</sub>量。固定的CO<sub>2</sub>量在这二十年期间持续快速增长，到2020年总量达到600万吨，并且年增长呈加速趋势。碳汇逐渐增加表明城市绿化在地下空间的可持续发展中起着辅助作用。

### 3.1.2. 地铁

图3总结了过去二十年（2001—2020年）地铁发展不同阶段的CO<sub>2</sub>排放情况。该图直观地展示了排放现状，凸显了地铁建设和运营的不同趋势。与地铁建设相关的碳排放（包括车站和隧道的建设）从2009年的280万吨急剧增加至2010年的1250万吨，这表明2010年之前和之后的时期存在显著分界。这一变化主要得益于政府对城市基础设施建设增加了投资，其中地铁建设是重要方面。政策支持促进了地铁建设的发展。随着城镇化进程的加快，城市人口不断增长，城市交通压力加大。作为一种高效快捷的交通方式，地铁可以有效缓解城市交通拥堵问题。因此，在城市化过程中，地铁建设迅速增长。在地铁运营方面，排放量在2001年至2009年间稳步增长。随后，排放量显著加速，直到2019年达到了1430万吨的峰值。值得注意的是，2020年新冠疫情导致总客流量大幅下降，对地铁运营的碳排放产生了显著影响。

图4（a）显示了2001年至2020年间三类主要公共交通工具相关的运营CO<sub>2</sub>排放情况。通过分析表明，在后十年中，公共汽车和出租车的CO<sub>2</sub>排放量比前十年有所增加，这一趋势与地铁的情况类似。值得注意的是，包括地铁、公共汽车和出租车在内的公共交通的整体排放量在2012年至2019年间始终超过1.2亿吨，并在2014年达到了峰值1.3亿吨。随着经济发展，人们的出行意愿增强，公共交通也在不断增长。同时，随着环保意识的提升，人们选择公共交通出行的比例也在增加。图4（a）展示了地铁与其他公共交通选项之间运营碳排放的区别。地铁的排放量始终低于公共汽车和出租车的排放量。地铁在整体公共交通中的年碳排放比例在1.05%~11.77%之间波动，

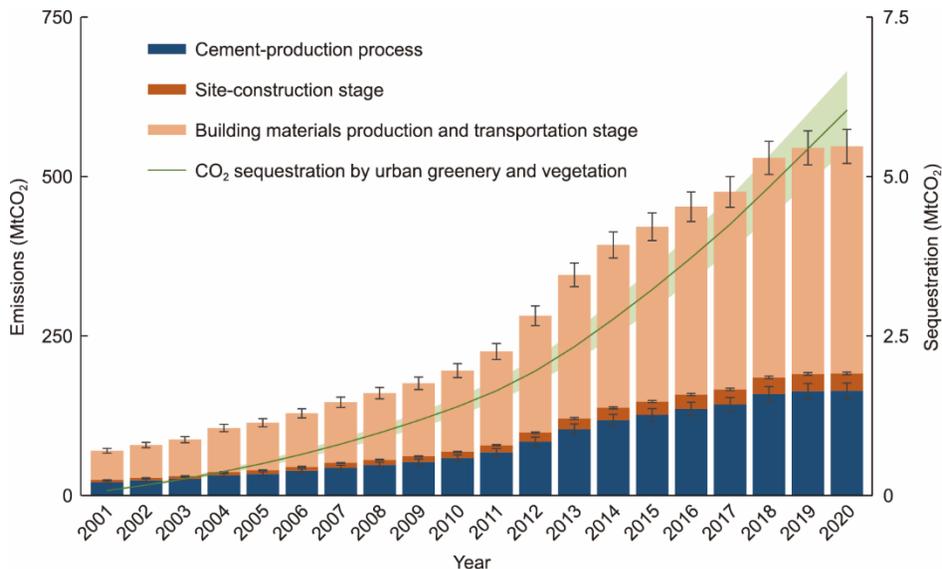


图2. 地下建筑施工中的碳排放与碳汇。

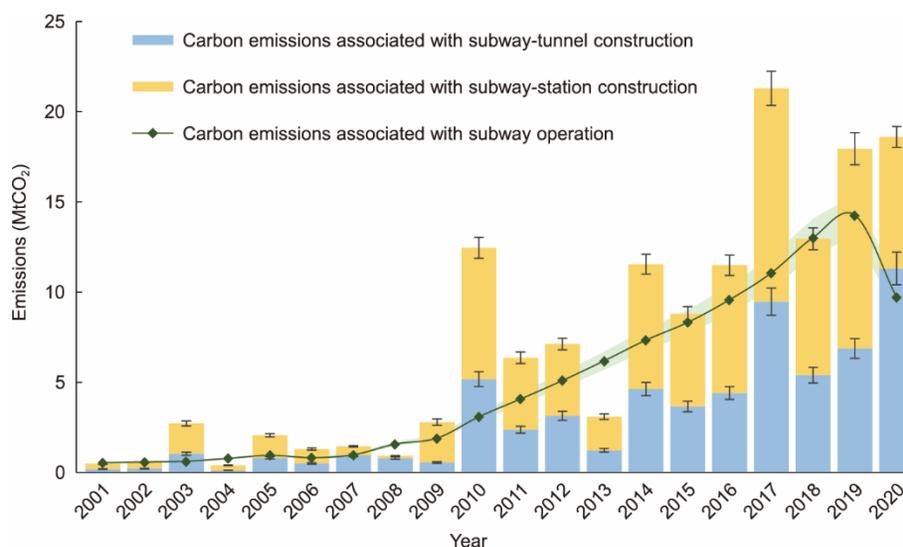


图3. 地铁建设和运营不同阶段的碳排放趋势。

二十年间的平均值为4.53%。交通方式容易受到外部因素的影响。新冠疫情后，交通的碳排放量显著减少。图中碳排放趋势的发展揭示了交通发展与碳排放之间的正相关关系。

通过情景分析深入探讨主要公共交通工具在CO<sub>2</sub>排放中的角色。该分析涉及将真实的年度总客流量分配给三类主要交通工具。图4 (b) 显示，其情景分析的结果与图4 (a) 中的结果相一致。情景分析显示，出租车的CO<sub>2</sub>排放显著高于实际情况；相比之下，地铁和公共汽车的排放量则明显低于实际数据；此外，地铁和公共汽车的假设碳排接近，地铁仅在公共汽车的数据之上。地铁在低碳表现方面持续表现良好，同时显著缓解了道路交通拥堵，有效提升了交通效率。这表明，在未来的城市交通发展中，地铁作为一种低碳运输模式的潜力仍然巨大，值得进一步投资与推广。

随着城市人口的增长和城市交通的日益拥堵，地面交通基础设施的扩展面临着有限物理空间的挑战。因此，地铁作为交通领域的关键角色，其重要性愈发凸显。地铁作为一种地下交通方式，不受地面限制的影响，有效利用了城市地下的未利用空间。除了缓解城市拥堵的能力，地铁固有的特性与低碳城市发展的目标高度一致。研究结果表明，地铁系统的排放量不高于其他公共交通选项。因此，地铁系统可以同时应对城市拥堵和碳排放这两个挑战。地铁提供了可靠、高效和低碳的交通选择，同时绕过了地面交通所带来的限制，显示了其在实现可持续交通方面的重要性。

### 3.1.3. 地热能

表1全面概述了利用地热资源的现状和潜在的碳减排能力。这一基于数据的分析凸显了地热能源在UUS发展

中的关键作用。一个显著的趋势是地热能应用的稳步扩展，特别是在浅层供热/制冷和水热地热供暖方面。这不仅有助于减少对传统化石燃料的依赖，还为城市提供了可持续的供热、制冷和发电替代方案。地下空间的开发可能会破坏地下地层的结构并影响地热资源的利用，如地热能的传导和提取。不过，这些影响通常是局部且可控的，通过适当的设计和管理可以减轻。因此，本研究未考虑地热资源的温度损失。地热能与太阳能、风能及其他清洁能源一样，是一种不可忽视的碳减排途径。中国丰富的自然地热资源为UUS的低碳发展甚至碳中和带来了希望。这一扩展标志着对地热能各个领域多样性利用的认可，极大地支撑了城市的碳减排目标。

此外，分析结果突出了地热资源替代化石燃料的巨大潜力。随着地热能应用的持续扩展，相应的化石燃料替代量逐年增加。预测显示，到2035年，地热资源可能替代相当于2.8亿吨标准煤的能源。这一预测意味着化石燃料的消耗将大幅减少，这对减少城市碳排放至关重要。从研究的角度来看，2025年和2035年数据点的重要性在于它们为现有国家规划奠定了基础。这些预测是基于成熟的战略和政策得出的，与国家的长期可持续发展目标协调一致。地热能资源在UUS发展中作为清洁能源来源，扮演着不可替代和至关重要的角色。

### 3.2. UUS未来碳排的情景分析

结果表明，UUS目前符合低碳可持续发展的理念，但是提高低碳效率仍然需要更多的策略。情景预测可以提供决策支持，并更好地了解未来可能出现的情景。基于本研究的结果，将这三种类型的排放汇总为历史数据，以预

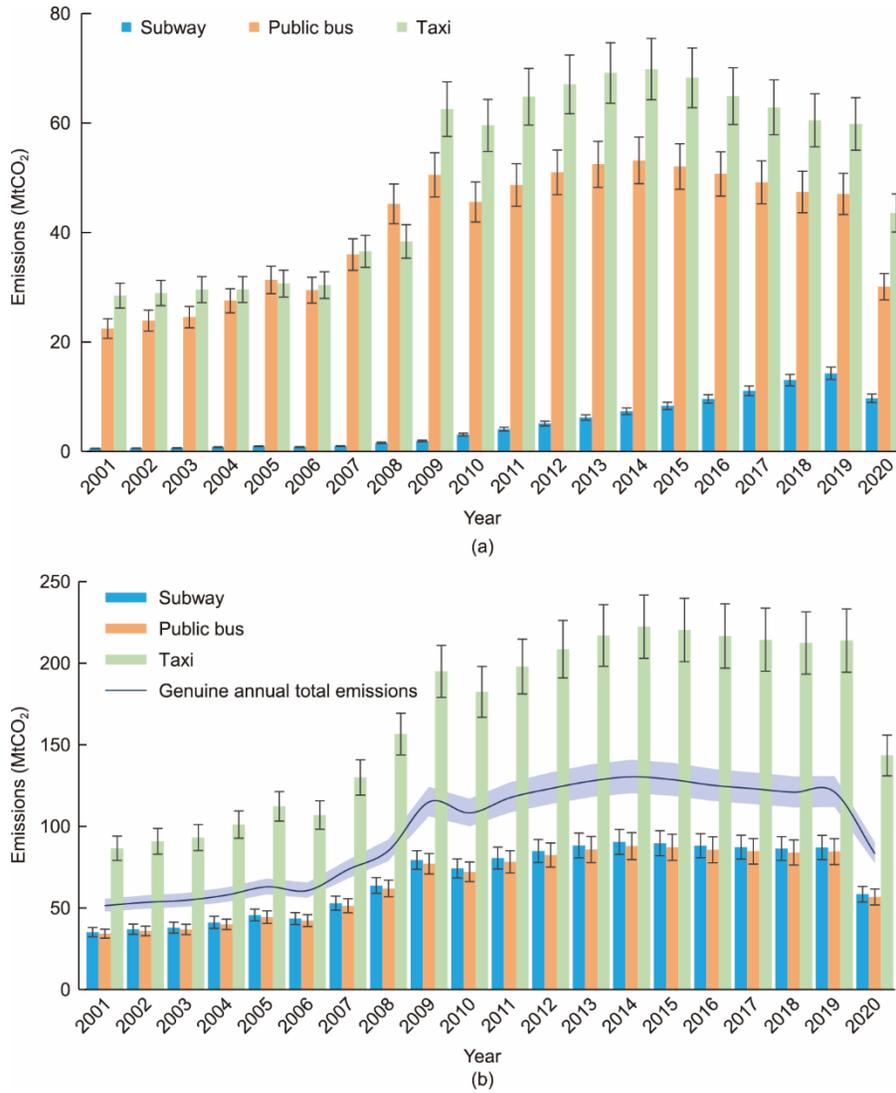


图4. 不同公共交通在实际乘客流量下 (a) 与平均乘客分布后 (b) 的碳排放趋势比较。

表1 地热资源的减碳现状和潜力

Year	Shallow geothermal heating/ cooling area( $\times 10^6 \text{ m}^2$ )	Hydro-geothermal heating area ( $\times 10^6 \text{ m}^2$ )	Installed power-generation capacity (MW)	Substitution of fossil energy (million tce)	Reduction in CO <sub>2</sub> emissions (Mt)
2015	392.0	102.1	27.28	20	48.6
2020	1118.5	502.1	527.28	70	170.0
2025	2237.0	1004.2	1054.60	140	340.0
2035	4474.0	2008.4	2109.20	280	680.0

Data were cited from the “13th Five-Year Plan” for developing and utilizing geothermal energy [41], and the future-development target data were derived from the National Energy Administration. tce: tonnes of coal equivalent.

测未来的排放趋势。因此，本研究根据经济发展目标和政策发展，提供了九种不同的情景，对2021年至2035年间UUS碳排放和碳汇的潜在轨迹进行了全面预测（图5）。这种预测有助于理解当下行动对未来环境的影响。该图的核心是描述了碳排放和碳汇的三条主要轨迹：预期的、增加的和减少的，每条轨迹分别象征着当前趋势的延续、活动的上升或下降。这些轨迹相互结合，形成了九种情景，

每一种情景都明确指出了排放和碳汇前景的独特汇合点（情景设置见附录A中的注释S3和表S1）。

值得注意的是，在最乐观的情景（S1）中，由于实施了有效的环境管理，将减少排放并增强碳汇。同样，最悲观的情景（S6）也值得关注，其特点是工业活动猖獗而碳捕获举措却不足。这些极端情景囊括了一系列可能性，鲜明地警示我们当前的选择将产生的不同结果。

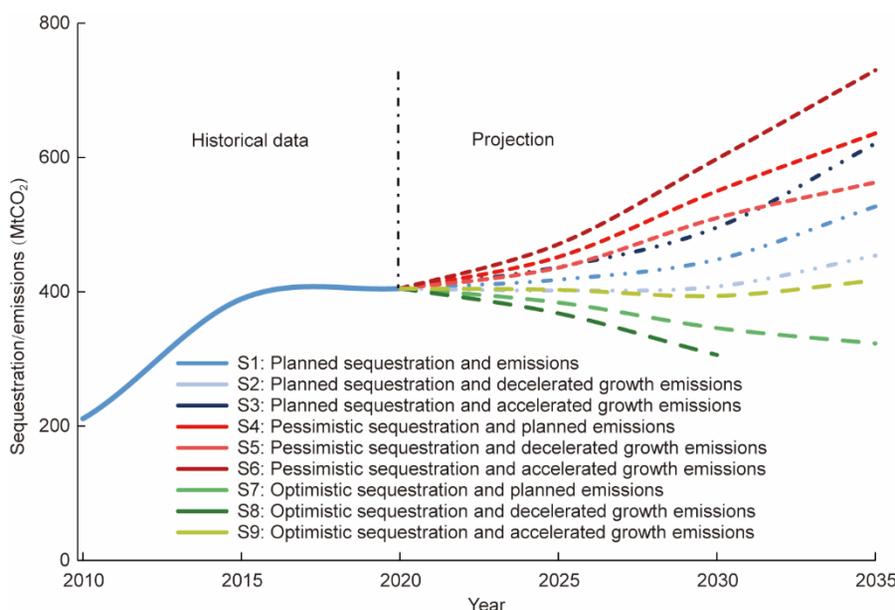


图5. 不同情景下的UUS碳排放与碳汇预测分析。

因此，即使是目前被评估为低碳的UUS，也不能不加选择地或不加限制地开发和建设。在基准情景（S1）中，仅靠地热能开发不足以抵消目前规划下UUS建设所产生的碳排放。因此，必须采取额外的碳固措施和新技术，以减少碳足迹。情景S7是基于UUS建设升级与城市发展需求相一致，辅以政策驱动的地热固碳增强措施，未来有望使碳汇抵消排放影响，从而使总体碳排放量稳步下降。

#### 4. 总结

建筑业一直是经济增长的推动力。然而，碳排放量的激增迫使我们采取行动来减少和缓解碳排放。UUS的发展提供了一种创新解决方案，缓解了地面空间的压力，并呈现出低碳建造模式。本研究全面分析了UUS各个方面的相互作用，如城市发展、能源消耗和碳减排。研究重点关注UUS运营阶段的重要作用，特别是在地铁网络中。地铁提供了低碳交通选项，同时减少了道路拥堵。

此外，本研究量化了地热能替代化石能源的能力，这与我国的可持续发展目标相一致，并且为全球气候变化缓解作出了贡献。同样，本研究分析了UUS碳排的未来趋势和可能性。通过情景分析，展示了2021年至2035年间碳排和碳汇的潜在轨迹。实际上，UUS的发展已成为一种实现可持续城市发展同时最小化碳足迹的战略方法。对于发展中国家而言，UUS的发展为土地资源限制提供了一种积极的解决方案。UUS为经济增长与环境保护之间的冲突提供了一种新的解决方案。从环境效益的角度来

看，UUS建设阶段的碳减排优势在短期内可能并不显著。但是从长远来看，地铁系统的运营和地热资源的利用都可以提供巨大的碳汇潜力，这有助于实现整体的碳减排目标。政策制定者应专注于用于UUS发展的新技术和新材料，以进一步推动低碳建设的发展。

本研究存在一定的局限性，如对地热能的分析存在不足。本研究主要关注浅层地热能和水热型地热能，而未将其他形式的地热资源（如热干岩地热资源）纳入考虑范围。由于涉及宏观计算，本研究对一些系数（如平均碳汇因子）的设定进行了假设。此外，本研究未考虑排放因子的未来发展。如前所述，UUS的开发用途不仅限于地下建筑、地铁和地热能源。未来的研究可以进一步扩展本研究的范围，以涵盖其他类型的UUS开发。此外，私家车也可以纳入乘客分配的考量中。

#### 致谢

本研究得到深圳市科技基础研究计划(JCYJ20190808123013260)资助。

#### Compliance with ethics guidelines

Jiajia Wang, Huabo Duan, Kunyang Chen, Isabelle Y. S. Chan, Fan Xue, Ning Zhang, Xiangsheng Chen, and Jian Zuo declare that they have no conflicts of interest or financial conflicts to disclose.

## Appendix A. Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online at <https://doi.org/10.1016/j.eng.2024.07.012>.

## References

- [1] Lo A, Howes M. Power and carbon sovereignty in a non-traditional capitalist state: discourses of carbon trading in China. *Glob Environ Polit* 2015;15(1):60–82.
- [2] Creamer E. The double-edged sword of grant funding: a study of community-led climate change initiatives in remote rural Scotland. *Local Environ* 2015;20(9):981–99.
- [3] Lu Y, Cui P, Li D. Carbon emissions and policies in China's building and construction industry: evidence from 1994 to 2012. *Build Environ* 2016;95:94–103.
- [4] China Association of Building Energy Efficiency. China building energy consumption annual report 2020. Report. Beijing: National Development and Reform Commission; 2020. Chinese.
- [5] Zhang P, Hu J, Zhao K, Chen H, Zhao S, Li W. Dynamics and decoupling analysis of carbon emissions from construction industry in China. *Buildings* 2022;12(3):257.
- [6] Myers A. A brief introduction to sustainable development goals created by the United Nations p.9. *Sustain Magazine* 2019;41(Fall/Winter 2020):9–11.
- [7] Jiang Y, Zevenbergen C, Ma Y. Urban pluvial flooding and stormwater management: a contemporary review of China's challenges and "sponge cities" strategy. *Environ Sci Policy* 2018;80:132–43.
- [8] Trimmer JT, Guest JS. Recirculation of human-derived nutrients from cities to agriculture across six continents. *Nat Sustain* 2018;1(8):427–35.
- [9] Broere W. Urban underground space: solving the problems of today's cities. *Tunn Undergr Space Technol* 2016;55:245–8.
- [10] Qiao Y, Peng FL, Wang Y. Monetary valuation of urban underground space: a critical issue for the decision-making of urban underground space development. *Land Use Policy* 2017;69:12–24.
- [11] Sterling R, Admiraal H, Bobylev N, Parker H, Godard JP, Vähäaho I, et al. Sustainability issues for underground space in urban areas. *Proc Inst Civ Eng* 2012;165(4):241–54.
- [12] Yu P, Liu H, Wang Z, Fu J, Zhang H, Wang J, et al. Development of urban underground space in coastal cities in China: a review. *Deep Undergr Sci Eng* 2023;2(2):148–72.
- [13] Lin D, Broere W, Cui J. Underground space utilisation and new town development: experiences, lessons and implications. *Tunn Undergr Space Technol* 2022;119:104204.
- [14] Chan H, Ip LC, Mansoor U, Chen A. Pedestrian route choice with respect to new lift-only entrances to underground space: case study of a metro station area in hilly terrain in Hong Kong. *Tunn Undergr Space Technol* 2022;129:104678.
- [15] Wang J, Teng Y, Chen Z, Bai J, Niu Y, Duan H. Assessment of carbon emissions of building interior decoration and renovation waste disposal in the fast-growing Greater Bay Area, China. *Sci Total Environ* 2021;798:149158.
- [16] China Urban Planning Association. The blue book on the development of urban underground space in China 2021. Beijing: Institute of Chinese Engineering Development Strategies; 2021. Chinese.
- [17] Addas A. The concept of smart cities: a sustainability aspect for future urban development based on different cities. *Front Environ Sci* 2023;11:1241593.
- [18] Xi Y, Li X, Zhu H, Zhang W, Zhao S, Xu W. Three-dimensional high-precision assessment of mountainous urban underground space resources: a case study in Chongqing, China. *Tunn Undergr Space Technol* 2022;123:104439.
- [19] Tan F, Wang J, Jiao Y, Ma B, He L. Suitability evaluation of underground space based on finite interval cloud model and genetic algorithm combination weighting. *Tunn Undergr Space Technol* 2021;108:103743.
- [20] Vähäaho I. An introduction to the development for urban underground space in Helsinki. *Tunn Undergr Space Technol* 2016;55:324–8.
- [21] Wang J, Huang Y, Teng Y, Yu B, Wang J, Zhang H, et al. Can buildings sector achieve the carbon mitigation ambitious goal: case study for a low-carbon demonstration city in China? *Environ Impact Assess Rev* 2021;90:106633.
- [22] Zhou Y, Zhao J. Assessment and planning of underground space use in Singapore. *Tunn Undergr Space Technol* 2016;55:249–56.
- [23] Wang X, Shen L, Shi S. Evaluation of underground space perception: a user-perspective investigation. *Tunn Undergr Space Technol* 2023;131:104822.
- [24] Zhao J, Peng FL, Wang TQ, Zhang X, Jiang B. Advances in master planning of urban underground space (UUS) in China. *Tunn Undergr Space Technol* 2016;55:290–307.
- [25] Geng J, Wang J, Huang J, Zhou D, Bai J, Wang J, et al. Quantification of the carbon emission of urban residential buildings: the case of the Greater Bay Area cities in China. *Environ Impact Assess Rev* 2022;95:106775.
- [26] Bobylev N. Mainstreaming sustainable development into a city's master plan: a case of urban underground space use. *Land Use Policy* 2009;26(4):1128–37.
- [27] Gielen D, Boshell F, Saygin D, Bazilian M, Wagner N, Gorini R. The role of renewable energy in the global energy transformation. *Energy Strateg Rev* 2019;24:38–50.
- [28] Karlsson I, Rootzén J, Johnsson F. Reaching net-zero carbon emissions in construction supply chains-analysis of a Swedish road construction project. *Renew Sustain Energy Rev* 2020;120:109651.
- [29] Huang L, Krigsvoll G, Johansen F, Liu Y, Zhang X. Carbon emission of global construction sector. *Renew Sustain Energy Rev* 2018;81:1906–16.
- [30] Chou J, Yeh KC. Life cycle carbon dioxide emissions simulation and environmental cost analysis for building construction. *J Clean Prod* 2015;101:137–47.
- [31] Derrible S, Kennedy C. The complexity and robustness of metro networks. *Physica A* 2010;389(17):3678–91.
- [32] Yu C. Greening design of urban semi-underground space. *E3S Web Conf* 2021;236(2021):03025.
- [33] Bian X, Gao Z, Zhao P, Li X. Quantitative analysis of low carbon effect of urban underground space in Xinjiekou District of Nanjing city, China. *Tunn Undergr Space Technol* 2024;143:105502.
- [34] Qin B, Li H, Wang Z, Jiang Y, Lu D, Du X, et al. New framework of low-carbon city development of China: underground space based integrated energy systems. *Underground Space* 2024;14:300–18.
- [35] Qiao Y, Peng FL, Sabri S, Rajabifard A. Low carbon effects of urban underground space. *Sustain Cities Soc* 2019;45:451–9.
- [36] Xia H, Lin C, Liu X, Liu Z. Urban underground space capacity demand forecasting based on sustainable concept: a review. *Energy Build* 2022;255:111656.
- [37] Debrock S, Van Acker M, Admiraal H. Design recommendations for sustainable urban underground spaces. *Tunn Undergr Space Technol* 2023;140:105332.
- [38] Hámor-Vidó M, Hámor T, Czirik L. Underground space, the legal governance of a critical resource in circular economy. *Resour Policy* 2021;73:102171.
- [39] Li X, Li C, Parriaux A, Wu W, Li H, Sun L, et al. Multiple resources and their sustainable development in urban underground space. *Tunn Undergr Space Technol* 2016;55:59–66.
- [40] Lund JW, Boyd TL. Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review. *Geothermics* 2016;60:66–93.
- [41] Limberger J, Boxem TAP, Pluymaekers M, Bruhn D, Manzella A, Calcagno P, et al. Geothermal energy in deep aquifers: a global assessment of the resource base for direct heat utilization. *Energy Procedia* 2018;82:961–75.
- [42] Barbier E. Geothermal energy technology and current status: an overview. *Renew Sustain Energy Rev* 2002;6(1–2):3–65.
- [43] National Bureau of Statistics of China. China statistical yearbook 2020 [Internet]. Beijing: National Bureau of Statistics; 2020 [cited 2024 Jul 19]. Available from: <https://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/>. Chinese.
- [44] Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. The 13th Five-Year Plan for the development and utilization of urban underground space [Internet]. Beijing: Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China; 2016 Jun 24 [cited 2024 Jul 20]. Available from: [https://www.gov.cn/xinwen/2016-06/24/content\\_5084966.htm](https://www.gov.cn/xinwen/2016-06/24/content_5084966.htm). Chinese.
- [45] Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. China urban construction statistical yearbook [Internet]. Beijing: Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China; 2021 Oct 12 [cited 2024 Jul 20]. Available from: <https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/fdzdgnr/sjfb/tjxx/jstjnj/index.html>. Chinese.
- [46] Zhang N. Research on estimation method and optimal management scheme of residual sludge production in metro engineering [dissertation]. Shenzhen: Shenzhen University; 2020. Chinese.
- [47] Hu S, Zhang Y, Yan D, Guo SY, Liu Y, Jiang Y. Definition and accounting of energy consumption and carbon emissions in China's building sector. *Build Sci* 2018;36(11):288–97. Chinese.
- [48] Chen WY. The role of urban green infrastructure in offsetting carbon emissions in 35 major Chinese cities: a nationwide estimate. *Cities* 2015;44:112–20.
- [49] Huang X. Carbon emission measurement and emission reduction analysis in physical and chemical stage of subway civil engineering [dissertation]. Guangzhou: South China University of Technology; 2019. Chinese.

- [50] Ministry of Transport of the People's Republic of China. Statistical bulletin on the development of the transportation industry [Internet]. Beijing: Ministry of Transport of the People's Republic of China; 2021 May 19 [cited 2024 Jul 20]. Available from: [https://www.gov.cn/xinwen/2021-05/19/content\\_5608523.htm](https://www.gov.cn/xinwen/2021-05/19/content_5608523.htm). Chinese.
- [51] Su Y. Research on resource energy intensity and environmental impact assessment of metro based on LCA—a case study of Shenzhen [dissertation]. Shenzhen: Shenzhen University; 2021. Chinese.
- [52] Wang X, Guo K. Research on carbon emission efficiency of public transportation in Beijing: based on super-efficiency SBM model and ML Index. *Syst Sci Math* 2018;38(4):456–67. Chinese.
- [53] China Geological Survey; National Energy Administration; Institutes of Science and Development, Chinese Academy of Sciences; The Development Research Center of the State Council. China geothermal energy development report. Report. Beijing: China Petrochemical Press; 2018 Aug. Chinese.
- [54] Agyeman J, Schlosberg D, Craven L, Matthews C. Trends and directions in environmental justice: from inequity to everyday life, community, and just sustainabilities. *Annu Rev Environ Resour* 2016;41(1):321–40.
- [55] Kammen DM, Sunter DA. City-integrated renewable energy for urban sustainability. *Science* 2016;352(6288):922–8.