

## 地铁建设期碳排放核算研究进展

张立国<sup>1\*</sup>, 穆心彤<sup>1</sup>, 程小乖<sup>2</sup>, 刘 蕾<sup>2</sup>

(1. 华南师范大学 环境学院 广东省城市排水管理与污水处理工程技术研究中心, 广东 广州 510006;

2. 东莞理工学院 生态环境与建筑工程学院, 广东 东莞 523808)

**摘要:** 全球变暖是人们高度关注的生态环境问题之一, 碳排放成为研究热点。交通运输行业会产生大量能耗, 地铁作为一种安全环保的交通方式正高速建设, 建筑行业又具有较大减排空间, 故对地铁建设期碳排放进行核算有助于预测碳排放趋势并为碳减排提供研究基础。本研究总结了地铁建设期碳排放核算在评估方法选择、系统边界划分、清单分析等方面的研究进展, 学者们多基于全生命周期理论, 使用排放因子法, 将碳排放来源划分为建材生产、材料运输和现场施工 3 个阶段开展碳排放研究。本研究就现有清单分析内容进行了对比分析, 发现建材生产阶段碳排放占比最大, 且钢筋、混凝土、水泥是主要的高碳建材, 依此提出了地铁建设期碳排放核算的基本研究方法及其减排思路。

**关键词:** 地铁建设期; 碳排放; 生命周期理论; 排放因子法; 清单分析

**中图分类号:** X322; U231 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-6830(2024)01-0017-09

**Research progress of carbon emission accounting in subway construction period.** ZHANG Li-guo<sup>1\*</sup>, MU Xin-tong<sup>1</sup>, CHENG Xiao-guai<sup>2</sup>, LIU Lei<sup>2</sup> (1. School of Environment, Guangdong Provincial Engineering Technology Research Center for Wastewater Management and Treatment, South China Normal University, Guangzhou 510006, China; 2. School of Environment and Civil Engineering, Dongguan University of Technology, Dongguan 523808, China). *Environmental Ecology*, 2024, 6(1), 17~25.

**Abstract:** Global warming is one of the ecological environment problems that people are highly concerned about, and carbon emissions have become a research hotspot. The transportation industry will generate a lot of energy consumption. As a safe and environmentally friendly mode of transportation, the subway is being built at a high speed, and the construction industry has a large space for emission reduction. Therefore, accounting for carbon emissions during subway construction will help to predict carbon emission trends and provide a research basis for carbon emission reduction. This study summarized the research progress of carbon emission accounting in subway construction period in terms of the choice of evaluation method, the division of system boundary and inventory analysis. Based on the whole life cycle theory, scholars use the emission factor method to divide the source of carbon emission into three stages: Building material production, material transportation and on-site construction to carry out carbon emission research. Based on the comparative analysis of the existing inventory analysis contents, it is found that the carbon emissions of building materials production stage account for the largest proportion, and steel bar, concrete and cement are the main high carbon emission building materials. Based on this, the basic research methods and emission reduction ideas of carbon emission accounting in subway construction are put forward.

**Key words:** Subway construction period; carbon emissions; life cycle theory; emission factor method; inventory analysis

随着人类社会的发展, 全球气候变暖已成为人们高度关注的生态环境问题之一。第六次 IPCC 评估报告中指出, 与 1850—1900 年的平均水平相比, 地球的全球表面温度升高了约 1.1 °C<sup>[1]</sup>。诱发全球气候变暖的主要原因是人类活动中自然资源和燃料能源消耗产生的大量温室气体 (Greenhouse Gases, GHG)<sup>[2]</sup>。中国是全球能源消耗及温室气体排放最大的国家<sup>[3]</sup>, 在碳达峰碳中和远景目标提出的背景下, 控制温室气体的排放量成为当今研究的热点问题<sup>[4]</sup>。根据《京都议定书》温室气体主要包

括二氧化碳 (CO<sub>2</sub>)、甲烷、氧化亚氮、氢氟化合物、全氟化碳及六氟化硫 6 种气体, 其中 CO<sub>2</sub> 对全球气候

收稿日期: 2023-08-14

基金项目: 国家自然科学基金 (51978290); 广东省重点领域研发计划项目 (2019B110209002); 广东省科技创新战略专项资金 (2021A0505020010) 资助。

作者简介: 张立国 (1978-), 男, 吉林松原人, 博士, 教授, 主要研究方向为污水污泥资源化、碳排放核算及碳减排技术, E-mail: zhanglg@scnu.edu.cn

变暖贡献率达 60%,故通常将其他温室气体通过比例折算为 CO<sub>2</sub> 当量进行评估,即“碳排放”研究分析<sup>[5]</sup>。碳排放核算是对碳排放量进行量化和计算,从而评估碳排放的规模趋势及影响因素,以提出相应的减排措施,推进碳达峰碳中和目标的实现。

世界各部门能源相关 CO<sub>2</sub> 排放量中,运输部门占了约 21%<sup>[6]</sup>。城市轨道交通系统因其更便捷、环保的特点已成为城市交通的主要发展方向。“十三五”时期,中国地铁共新增里程 3 623 km,年均新增里程 725 km<sup>[7,8]</sup>。地铁网络是一个复杂且大量消耗能源的系统,碳排放已成为衡量地铁可持续发展的重要指标<sup>[9,10]</sup>。根据建设部统计,每年新建建筑中高能耗建筑面积占了总建筑面积的 80% 以上<sup>[11]</sup>。建筑部门是 3 大耗能部门中减排潜能最大的<sup>[12]</sup>,是城市规划节能减排的重点,也是我国实现“双碳”目标的重点,这就意味着地铁建设期产生的温室气体对环境 and 气候的影响以及地铁建设过程中的减排降碳尤其值得关注。尽管许多研究已经就城市轨道交通减少温室气体排放的问题做出了努力,但与地铁建设相关的温室气体排放仍有待研究<sup>[13]</sup>。

地铁建设施工过程中,基础设施建设尤其是地铁线路、隧道建设中大量混凝土、钢材等能源密集型材料和重型建筑设备的使用会产生大量的碳排放,与其他地面交通建设相比,地铁建设会产生更多的排放,造成的环境负担是不可忽视的<sup>[14-17]</sup>。据统计,2020 年地铁建造阶段碳排放量为 1 860 万 t CO<sub>2</sub>,比 2019 年增长约 4%,并且持续稳定增长<sup>[18]</sup>。郭飞等<sup>[19]</sup>对北京地铁城市副中心站基坑施工进行碳排放量计算,02B 基坑施工阶段排放约 2.05 万 t CO<sub>2</sub>,坑中坑基坑施工阶段排放约 3.24 万 t CO<sub>2</sub>,共排放约 5.29 万 t CO<sub>2</sub>;粟月欢等<sup>[20]</sup>对深圳地铁车站、隧道建设过程中产生的碳排放量进行了量化分析,截至 2020 年,深圳已开通运营的地铁线站建设造成的碳排放量约累积达到 2 730 万 t CO<sub>2</sub>;王幼松等<sup>[21]</sup>计算了广州市某地铁线路站 A 至站 B 的盾构区间建设期碳排放,在全部使用原生材料的情况下,碳排放总量为 12.26 万 t CO<sub>2</sub>;陈政等<sup>[22]</sup>依托成都地铁 18 号线,采用 WOA-DELM 算法对 6 车站 7 区间地铁建设阶段碳排放进行计算,得到 6 个地铁车站每建筑平米碳排放平均值为 3.12 t CO<sub>2</sub>,7 个盾构区间每公里碳排放平均值为 3.42 万 t CO<sub>2</sub>。

总的来看,地铁建设行业能源密集,造成了大量直接或间接的温室气体排放。开展地铁建设期碳排放核算将有助于预测碳排放趋势并为碳减排路径的

制定提供重要基础。碳排放核算过程中核算方法的选择、核算边界的划分、清单分析的方法都将直接决定碳排放核算结果的可靠性。但目前对于地铁建设期碳排放的研究还较少,没有统一的标准。为了给地铁建设期碳排放的进一步研究提供参考,本研究通过调研近年地铁建设碳排放相关研究文献,比较归纳了现有研究中地铁建设期碳排放核算的方法选取、边界划分、清单分析过程,并依据碳排放核算及现有再生绿色建材<sup>[23]</sup>、低碳排施工工艺<sup>[24]</sup>等碳减排研究提出地铁建设碳减排建议,进一步助力“双碳”目标实现。

## 1 地铁建设碳排放评估方法

在现有研究中,学者们普遍采用生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA)方法为理论依据,对地铁碳排放展开研究。LCA 是一种识别和评价产品对象从原材料开采到最终处理处置全生命周期产生的环境影响的方法<sup>[25,26]</sup>,主要包括研究目标和范围的确定、清单分析、影响评估和解释几个方面。LCA 在城市轨道交通系统中的使用要比一般产品复杂很多,因为城市轨道交通系统不仅仅是一个产品,目前没有标准能够完全适合于城市轨道交通系统,且系统边界的定义、数据选择、模型参数化都会对最终的计算结果产生较大的影响<sup>[27]</sup>。在确定研究目标和范围时,主要需要划定生命周期、确定功能单位并划分系统边界。划定生命周期即确定研究阶段,划分系统边界即确定温室气体的主要来源,定义功能单位即用基准单位量化碳排放研究对象,为碳排放分析提供方向。例如粟月欢等<sup>[20]</sup>以盾构隧道单位建设里程和地下车站单位建筑面积为功能单位研究估算了地铁建设的碳排放量。Li 等<sup>[28]</sup>的研究中为了将上海地铁不同阶段的碳排放与世界其他研究案例进行比较,将结果标准化为每乘客行驶公里数(PKT)和每车辆行驶公里数(VKT)。通过上述发现,LCA 方法是进行碳排放核算的理论基础,且研究内容和范围为整个碳排放的研究提供了方向。同时,学者们大多选取全球增温潜势(Global Warming Potential, GWP)作为评价短期气候变化的指标,原因主要是 GWP 在全球范围内相较于其他指标可以无差别适用,且是基于 IPCC 第五次评估报告<sup>[29]</sup>所推荐使用的指标。

根据《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》,目前碳排放核算的方法主要有排放因子法、质量平衡法、实测法<sup>[30]</sup>。排放因子法是基于材料及能源消

耗量清单和碳排放因子的一种计算碳排放量的方法<sup>[31]</sup>,该方法是目前在碳排放核算中应用最为广泛的,也是在地铁建设期碳排放核算中普遍使用的方法,具有简便、快捷的优点。秦骛<sup>[32]</sup>、郭飞<sup>[19]</sup>、贺晓彤<sup>[33]</sup>等多位学者均在地铁建设期的碳排放研究中采用排放因子法针对不同地区地铁车站的建设施工过程进行碳排放核算。质量平衡法是依据系统输入输出质量守恒原理,分析碳排放来源及核算碳排放量的方法<sup>[34]</sup>。质量平衡法能够较为准确地计算某一具体工艺流程或设施的直接碳排放,但当中间排放过程较多时,对于数据的要求会更高且更易出现误差<sup>[35]</sup>,故有学者将质量平衡法用于污水污泥处理<sup>[36]</sup>、生活垃圾处理<sup>[37]</sup>等过程的碳排放研究,目前还没有运用到地铁建设期碳排放研究当中。实测法是通过标准实验仪器直接获取碳排放源碳排放数据的方法,最为真实可靠,但同时也会受到测量条件、地域、仪器设备等多方面因素的限制<sup>[38]</sup>。目前学者多用实测法进行特定过程如化石能源燃烧和化学反应等过程的碳排放监测,王明等<sup>[39]</sup>开发了一种火电机组 CO<sub>2</sub> 实时监测模型,探究火电机组燃煤碳排放量;曹元辉等<sup>[40]</sup>分析了 CO<sub>2</sub> 在线监测系统在我国工业领域的应用情况,但由于地铁建设期碳排放来源复杂,不仅涉及化石能源燃烧,故没有将实测法运用到核算地铁建设期碳排放的研究。

对于地铁建设期碳排放量的核算研究,学者们大都采用 LCA 理论和排放因子法。主要根据地铁建设生命周期中能源的消耗及能源碳排放因子分析地铁建设期碳排放量。LCA 理论因对数据采集要求高,故碳排放测算结果相对精准。排放因子法全面考虑了碳排放源,并直接提供相应的计算原理和方法,更加适用于对地铁建设期碳排放的研究。

## 2 地铁建设期碳排放研究系统边界的划分

在生命周期碳排放研究中,划分研究的系统边界即确定研究 CO<sub>2</sub> 来源和范围是尤为重要的,不同研究对象的系统边界是截然不同的。在地铁建设过程碳排放研究中,针对不同的研究目的和施工情况,学者们对于系统边界的划分也有所异同。

在国外学者们的研究中,De Andrade<sup>[41]</sup>以基础设施建设、列车制造、维护、基础设施运营和列车运营几方面为研究范围展开对里约热内卢地铁站的全生命周期能源消耗及碳排放的研究,其中对于施工阶段主要划分为建筑材料生产、运输、施工过程设备能源消耗 3 个阶段。Del Pero 等<sup>[42]</sup>从材料采购、制

造、使用和寿命终止 4 个阶段研究了罗马重型地铁列车的全生命周期评价。Jones 等<sup>[43]</sup>首次运用了生命周期评估方法在葡萄牙铁路系统中,系统边界包括了铁路轨道和列车的材料、施工和制造、运营和处置。Chester 等<sup>[44]</sup>以车辆、基础设施和燃料生产组件几部分的施工、使用、维护和报废为研究范围对加利福尼亚州高速铁路开展全生命周期研究。Saxe 等<sup>[45]</sup>对加拿大多伦多—谢泼德地铁线路的温室气体排放量研究时,将边界划分为材料生产、现场能耗和人员、材料及机械进出场产生的能耗。综上可知,国外学者多研究地铁建设、运营阶段的碳排放情况,针对建设过程将系统边界划分为材料制造、现场能耗(包括施工材料、机械、人员等能耗)和材料机械等进出场运输能耗。

在国内的研究中,学者们以不同地区不同地铁施工案例展开研究。粟月欢等<sup>[20]</sup>对深圳地铁建设的碳排放量开展研究,将整个施工过程划分为建材生产、建材运输和施工机械能耗 3 个阶段。郭飞等<sup>[19]</sup>分为上游材料生产、材料运输、基坑现场施工 3 个阶段对地铁深大基坑施工碳排放量进行研究。陈政等<sup>[22]</sup>对成都地铁建设碳排放量的研究从建筑材料生产产生、建筑材料运输产生和现场施工机械能耗产生的碳排放量入手。秦骛等<sup>[32]</sup>对成都 3 号线某地铁站进行全生命周期碳排放研究,不考虑碳排占比很小的设计规划及拆除回收阶段,对建材生产、建材运输、建筑施工及运营使用阶段碳排放展开研究。安东等<sup>[46]</sup>研究地铁站施工期碳排放时将系统边界划分为工人活动、材料生产和运输及施工机械使用 3 部分。樊婧<sup>[47]</sup>将隧道施工周期划分为材料生产、材料运输、机械设备运行、施工废弃物拆除回收 4 个阶段进行碳排放量计算。Liu 等<sup>[48]</sup>建立了基于配额的中国地铁站建设碳排放量化模型,将地铁站建设所有量化过程中碳排放来源分为了建筑材料的碳排放和建筑机械使用的碳排放 2 部分。贺晓彤<sup>[33]</sup>以生命周期环境影响评价体系为基础,建立了地铁明挖车站建设期碳排放计算模型,以人工、材料、机械、能源碳排放为边界,计算了北京某典型地铁明挖施工碳排放。赖长邈等<sup>[49]</sup>将成都地铁项目土建过程产生碳排放的排放源划分为直接排放源(即直接燃烧产生)、间接排放源(即外购电热产生)、其他间接排放源(即人工、材料机械运输等产生)3 部分。将上述国内学者研究中系统边界的划分汇总见表 1。从表中可以看出,国内学者们对于地铁建设过程碳排放研究的系统边界划分虽有所差

表 1 国内地铁建设碳排放研究系统边界划分对比

Table 1 Comparison of boundary division of carbon emission research system for subway construction in China

作者	主要研究内容	系统边界划分
粟月欢等 <sup>[20]</sup>	定量分析深圳市地铁建设过程的能源消耗并选取不同指标进行环境影响评估,构建地铁建设碳排放分析框架和测算方法	建材生产、建材运输和施工机械能耗
郭飞等 <sup>[19]</sup>	以北京城市副中心站综合交通枢纽工程 02B 基坑及坑中坑基坑施工过程为例进行碳排放研究	上游材料生产、材料运输、基坑现场施工
陈政等 <sup>[22]</sup>	以成都地铁 18 号线 6 车站 7 区间为研究对象,基于机器学习预测成都地铁建设过程中的碳排放	建筑材料生产产生、建筑材料运输产生和现场施工机械能耗
秦骛等 <sup>[32]</sup>	以成都地铁某车站建筑为例分析地铁站全生命周期碳排放量并分析碳排放规律及变化情况	建材生产、建材运输、建筑施工及运营使用阶段
安东等 <sup>[46]</sup>	以西安市地铁 4 号线为例,对站点建设期不同来源的碳排放量进行分析,通过回归模型发现影响站点碳排放的主要因素是站点的总建筑面积和出入口长度	工人活动、材料生产和运输及施工机械使用
樊婧 <sup>[47]</sup>	以上海北横通道隧道工程某标段为案例核算施工过程全生命周期碳排放量并建立测算模型	材料生产、材料运输、机械设备运行、施工废弃物拆除回收
Liu 等 <sup>[48]</sup>	提出基于配额的地铁站建设的温室气体排放量化模型并以北京某明挖车站为例进行分析	建筑材料的碳排放和建筑机械使用的碳排放
贺晓彤 <sup>[33]</sup>	建立地铁明挖车站建设期碳排放计算模型并计算了北京某典型地铁明挖施工碳排放	人工、材料、机械、能源
赖长逸等 <sup>[49]</sup>	对成都市地铁 2 号线建设项目碳排放源进行分类并明确不同碳排放源的特性	直接排放源(即直接燃烧产生)、间接排放源(即外购电产生)、其他间接排放源(即人工、材料机械运输等产生)

异,但都主要集中在建筑材料生产、建筑材料运输和现场施工阶段 3 部分。

在地铁建设碳排放核算研究中,根据 LCA 理论应考虑从材料生产到废弃拆除回收的碳排放来源,但由于废弃拆除产生的碳排放占比很小,大多数学者并未将拆除回收部分纳入研究范围。综合以上分析,将地铁建设碳排放核算系统边界划分为 3 个阶段:1) 建筑材料生产阶段,即在施工过程中涉及的所有建筑材料如钢筋、水泥、混凝土等生产所产生的碳排放;2) 材料运输阶段,即施工所需建材、设备、施工人员、产生的渣土等进出场运输车辆的油耗产生的碳排放;3) 现场施工阶段,即现场施工时机械设备耗电、耗油所产生的碳排放。在确定了核算的 CO<sub>2</sub> 来源后即可对研究对象进行清单分析。

### 3 地铁建设碳排放研究清单分析

对地铁建设生命周期的研究方法中,清单分析是指对整个生命周期输入的材料、能源等消耗和输出碳排放的量化分析。在使用排放因子法对地铁建设碳排放进行研究时,清单分析主要是指对核算对

象的基础数据分析,包括前景数据和背景数据,前景数据是指施工过程中消耗的建筑材料和能源的数据,背景数据则是指施工过程中消耗的建材、电能、柴油、汽油等所对应的碳排放因子,即消耗单位材料或能源向环境排放的 CO<sub>2</sub> 的量。

#### 3.1 前景数据的获取

前景数据的获取是对地铁建设过程开展碳排放核算的难点之一,对于真实有效数据的获取需要现场详细的施工记录,操作具有一定的难度。粟月欢等<sup>[20]</sup>的研究中,工程量清单主要来源于地铁公司统计整理,以及《建筑碳排放计算标准》《广东省城市轨道交通工程综合定额(2018)》和《广东省建设工程施工机具台班费用编制规则(2018)》作为建筑材料、能源消耗量等计算的依据。Li 等<sup>[28]</sup>对于上海地铁全生命周期碳排放量的研究中,材料能源消耗的数据主要来自政府部门完整的施工过程记录,详细记录了原材料数量及其工作日和能耗。Del Pero 等<sup>[42]</sup>对于罗马重型地铁列车的全生命周期评价中,数据主要来自于 GaBi 软件的数据库。郭春等<sup>[50]</sup>研究隧道建设碳排放时,材料及能源的消耗量主要来

源于施工方勘探资料、设计数据、技术手册和相关统计数据。

由此可知,前景数据的来源大多是根据能源消耗的工程量清单、施工概算表或勘探资料、设计手册及不同地区定额等数据推算出来的。由于现场监测数据的难度较大,少有学者的数据来源于施工方监测统计的工程量,但监测统计的工程量相较于定额和概算表计算的碳排放量更贴近实际碳排放,故地铁建设现场施工工程量的监测统计还需进一步运用到碳排放核算当中。

### 3.2 背景数据的获取

排放因子在碳排放核算过程中的选取针对不同的国家地区和不同的生产方式都存在着差异,同时针对不同研究团队和学者测算出来的碳排放因子也有所区别,故对于碳排放因子的选取需要考虑各方面因素,是地铁建设过程碳排放研究开展的另一难点。秦骞等<sup>[32]</sup>在计算成都地铁站碳排放量时,首先采用《建筑碳排放计算标准》和《中国区域电网基准线排放因子》的推荐值,对于未给定的选用我国学者测算值进行计算。Doll 等<sup>[51]</sup>研究德里地铁案例时,其温室气体排放因子来源于加拿大交通部计算的城市交通排放因子和摩托车全球环境基金数据。里约热内卢地铁新 4 号线主要建设以满足 2016 年奥运会交通需求,其中建设材料使用涉及中国、卢森堡和西班牙等国家,De Andrade 等<sup>[41]</sup>选择了各国家的标准排放因子进行计算。王幼松等<sup>[21]</sup>在研究盾构区间物化阶段碳排放量时,将建筑材料分为了原生建材和再生建材,参考各类文献综合考虑建材分类、期刊级别等因素,采用国内权威机构及专家学者的测定排放因子。

通过研究发现,对于建材和能源的碳排放因子选值,首先应遵从地域特点,使用研究对象地方政府的推荐值,其次选取国家标准的碳排放因子,对于没有标准碳排放因子的材料和能源,应考虑选取更加权威、被引用次数更多的专家学者测定的数据。目前对于材料的碳排放因子多来源于《建筑碳排放计算标准》《温室气体盘查议定书》和 IPCC 等数据库,能源的碳排放因子多取自《中国区域电网基准线排放因子》《国家温室气体 IPCC 指南》及地方区域性标准数据库。

### 3.3 案例分析

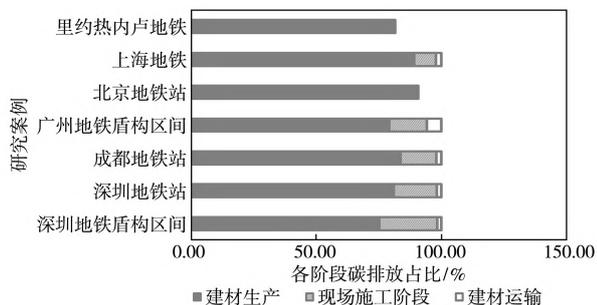
在确定合适的碳排放研究范围,获取适用的数据资料后,学者们采用排放因子法针对不同国家地区的地铁线路、地铁站等建设过程展开针对性的碳

排放研究。

栗月欢等<sup>[20]</sup>对包括隧道和地下地铁站建设在內的深圳地铁建设过程中产生的碳排放量进行量化分析后发现,截至 2020 年,深圳已开通运营的地铁线建设造成的碳排放量约累积达到 2 730 万 t CO<sub>2</sub>,其中地铁车站建设碳排放量占比约为 72%,地铁隧道建设碳排放量占比约为 28%。建设阶段单位里程盾构隧道碳排放为 1.3 万 t CO<sub>2</sub>/km,其中建材生产的碳排放为 9 971.8 t CO<sub>2</sub>/km,约占 75%,其次为施工建造阶段占 23%,建材运输阶段占比较小。单位面积车站碳排放约为 371 t CO<sub>2</sub>/100 m<sup>2</sup>,其中建材生产阶段的碳排放为 300.5 t CO<sub>2</sub>/100 m<sup>2</sup>,占比>80%,施工建造碳排放占比约 17%,建材运输阶段的碳排放最小(<2%)。秦骞等<sup>[32]</sup>以成都地铁 3 号线某典型地下双层岛式站台车站为例,研究了地铁车站全生命周期碳排放量,结果发现,使用年限为 50 年时车站单位建筑面积年平均碳排放量为 0.28 t CO<sub>2</sub>/(m<sup>2</sup>·a),其中运营阶段占 51%,地铁建设阶段占 49%(包括建材生产阶段 41%,建造施工阶段 7%,建材运输阶段 1%)。物化过程中主要的能源消耗为电力、柴油和汽油,由电力产生的碳排放占到 89.98%,柴油占 9.92%,汽油占 0.1%;主要产生碳排放的建材有钢材(50.73%)、混凝土(40.86%)和石灰(7.97%)。王幼松等<sup>[21]</sup>分为建材和预制构件生产阶段、运输阶段和施工安装阶段 3 个部分,以广州某典型地铁盾构区间为案例进行碳排放计量,得出全部建材使用原生材料时碳排放强度为 15.66 t CO<sub>2</sub>/m,建材和预制构件生产阶段始终是地铁盾构区间物化阶段碳排放最多的(79.2%~83.0%)。在建材中碳排放量最大的 4 种材料分别为管片、42.5#水泥、钢材和混凝土,占比分别是 42.1%~45.9%、26.7%~34.6%、8.2%~15.8%和 9.1%~11.8%。Liu 等<sup>[48]</sup>以明挖车站为研究对象,将明挖施工分为主体结构、通风系统、出入口 3 部分,再进一步将其分解为明挖土方、回填、支护等综合工序,最终建立了基于配额的中国地铁站建设碳排放量化模型。以北京地铁一个露天 2 层岛式平台地铁站为案例,运用基于配额的量化模型进行分析,得到该明挖车站的 GHG 排放总量为 5.51 万 t CO<sub>2</sub>,单位面积平均 GHG 排放量为 3.81 t CO<sub>2</sub>,其中主体结构建设温室气体排放占了 2/3,而主体结构建设中以建筑施工温室气体排放量为主,其中 90%以上归因于建筑材料的使用,主体结构施工中混凝土和钢筋是 2 种主要的高耗能建筑材料。

Li 等<sup>[28]</sup>对上海地铁全生命周期碳排放量进行了估算,结果得出上海地铁建设阶段总碳排放量为 268.14 万 t CO<sub>2</sub>,其中材料生产约占建设阶段的 91%。De Andrade<sup>[41]</sup>对里约热内卢地铁新 4 号线全生命周期碳排放量和能源消耗进行了研究,结果显示在里约热内卢地铁全生命周期中建筑阶段是碳排放水平最高的(约 49.84%),其次是列车运营(38.68%)。材料使用产生的碳排放量是基础设施建设过程中的主导(81.61%),对碳排放量影响最大的是水泥和钢铁的使用。

通过对上述碳排放核算案例的分析对比发现,在不同地区地铁建设过程碳排放中,建材生产阶段都是碳排放的主要来源,且在整个地铁建设期占比较高,其次是现场施工阶段能源消耗产生的碳排放,材料运输产生的碳排放占比较小(图 1)。在地铁建设期建材生产阶段,对于地铁盾构区间而言,管片、水泥是低碳排的材料(图 2);对于地铁站建设而言,钢筋、混凝土、钢材是最主要造成碳排放的材料(图 3)。Mao 等<sup>[52]</sup>研究发现,2020 年全球地铁长度达到 16 418 km,建筑材料库存达到 25 亿 t,产生碳排放量 5.6 亿 t CO<sub>2</sub>。综上,为实现地铁建设可持续



注:空白部分为文献未统计数据。

图 1 不同地区地铁建设碳排放主要来源对比

Fig.1 Comparison of the main sources of carbon emissions from subway construction in different regions

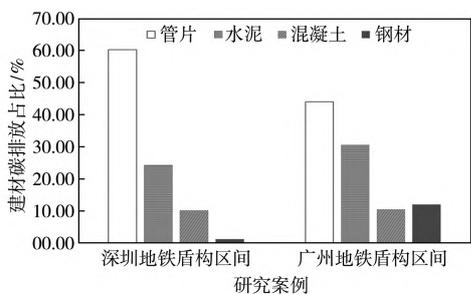
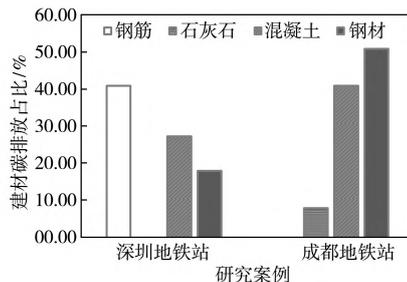


图 2 地铁盾构区间建设主要建材碳排放量占比

Fig.2 The proportion of carbon emissions of main building materials in subway shield interval construction



注:空白部分为文献未统计数据。

图 3 地铁站建设主要建材碳排放量占比

Fig.3 The proportion of carbon emissions of main building materials in subway station construction

低碳发展,可以采用绿色环保建材和再生材料等,并在施工设计时减少碳排较高建材的使用,以达到节能减排的效果。

#### 4 地铁建设期碳减排思路

通过上述对地铁建设过程中碳排放情况的分析发现,地铁建设期产生的碳排放量是不容忽视的,且地铁建设期碳排放最主要来源于建材生产和现场施工 2 个阶段,其中建材生产占比更高。此发现也为地铁建设期碳减排提供了思路,目前也有学者就地铁建设期碳减排进行研究,现结合现有研究提出以下几点地铁建设期碳减排思路:

(1)根据清单分析,在地铁建设期碳排放中,建材生产产生的碳排放占 80%以上,故考虑采用绿色低碳建材、可回收再生材料或减少混凝土等高碳排放材料的使用将有助于地铁建设期碳排放减量。

已有学者就钢材、混凝土 2 种高碳排放材料进行再生材料碳排放研究,黄旭辉<sup>[53]</sup>研究了再生钢材和铁在某地铁隧道和车站建设中的应用,发现采用社会水平再生钢材和铁,在某地铁隧道建设过程中,可减少碳排放 0.48 万 t CO<sub>2</sub>,减少碳排放强度 1.291 t CO<sub>2</sub>/m;在某地铁车站主体建设中,可减少碳排放 1.17 万 t CO<sub>2</sub>,减少碳排放强度 0.562 t CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>。再生钢材和铁在地铁建设中的使用能带来较好的减排效果,主要是因为再生钢材和铁的生产阶段碳排放比矿石制作钢材和铁要少。肖建庄等<sup>[54]</sup>对再生混凝土的使用展开了研究,发现对于上海地区来说,若将全年混凝土总产量的 10%由再生混凝土(通过废混凝土制作的再生粗骨料)替代,当年碳排放量将减少 12 万 t CO<sub>2</sub>。由此可见,再生材料的使用将有效减少地铁建设期的碳排放量。

(2)地铁建设期现场施工阶段产生的碳排放

整个建设期中占比较高,故在现场施工过程中,选择更加低碳排的施工工序、施工方法,将有助于减少地铁建设期的碳排放。

目前有学者就地铁施工不同施工方法产生的碳排放进行比较,为更加低碳排的地铁建设提供施工方法的选择。郭亚林等<sup>[55]</sup>对地铁隧道施工的不同工法进行了碳排放研究,以深圳地铁7号线12条区间段共31.516 km的施工过程为研究对象,其中有8条区间约13.514 km采用盾构法施工,4条区间约18.002 km采用钻爆法施工。计算得到钻爆法施工产生的平均碳排强度约为盾构法施工的2倍,盾构法比钻爆法施工更加低碳。Liu等<sup>[56]</sup>探究了北京地铁14号线一中间车站基础设施建设不同开挖方法对环境的影响,主要包含相同埋深55 m明挖(OE)段和197 m暗挖(UE)段,结果表明OE段碳排放量较UE段更低。皮膺海<sup>[57]</sup>以南昌轨道交通1号线盾构隧道施工为例,对地铁盾构施工碳排放展开了研究,并提出避免刀盘结泥饼的新施工工法:土压平衡盾构同步射流泥饼防治施工工法,以三十环管片环为例,利用泥饼防治的新工法,可以减少36.09 t CO<sub>2</sub>,证明了新工法的使用对碳减排有积极作用。

## 5 结论与展望

开展地铁建设期碳排放核算,有助于预测碳排放趋势,并为碳减排路径的制定提供重要基础,为了给地铁建设期碳排放的进一步研究提供参考,通过调研近年地铁建设碳排放相关研究文献,总结归纳了现有研究中地铁建设期碳排放核算方法选取、核算边界划分、清单分析的方法,并依据清单分析提供减排思路,现总结如下:

(1)对地铁建设期进行碳排放核算,多基于LCA理论选用排放因子法,以GWP作为评价指标,根据地铁建设期能源消耗量及对应能源的排放因子,计算出地铁建设期碳排放量。

(2)针对不同研究目的,对于碳排放研究的系统边界划分都有所差异。对于地铁建设期碳排放核算,学者们多将碳排放的来源划分为建材生产、材料运输和现场施工3个阶段,3个阶段之间有着必然的联系。

(3)在地铁建设期碳排放研究清单分析中需获得前景数据和背景数据,前景数据多来源于工程量清单、施工概算表等定额数据。背景数据多来源于政府数据库及专家学者的计算,对于排放因子的取值应多考虑地域特点及数据计算的权威性。通过对

现有研究清单分析内容总结发现,在地铁建设期建材生产、现场施工、材料运输3个阶段中,建材生产阶段产生的碳排放占比最高,超过了80%,其次是现场施工阶段,材料运输阶段碳排放最少。

(4)通过清单分析结果,地铁建设期碳排放大都来源于建材生产和现场施工,故提出相应的减排思路。对于建材生产阶段,发现再生钢材、混凝土的使用都能有效减少碳排放;对于现场施工阶段,可采取更加低碳排的地铁建设施工方法。二者都能有效减少地铁建设期碳排,有望做进一步探究,并应用在后续的地铁建设中。

目前对于地铁建设期碳排放核算还没有统一方法,未来还有待进一步研究地铁建设期的碳排放核算标准。同时,为更加有效地降低地铁建设期碳排放,针对建材生产阶段和现场施工阶段的减排还有很大的研究空间和潜力。综合分析,对于地铁建设期碳排放进行核算研究将成为发展绿色低碳型地铁建设的主流方向,推进地铁建设期碳排放核算及碳减排的深入研究,是降低地铁建设期能源消耗量及碳排放量的重要指导,将有助于我国“双碳”目标的达成。

## 参考文献

- [1] JEFF T. IPCC climate report: Earth is warmer than it's been in 125 000 years [J]. *Nature*, 2021, 596 ( 7871 ): 171-172.
- [2] 郭亚林, 郭春. 铁路隧道施工期碳排放计算模型研究 [J]. *交通节能与环保*, 2021, 17(6): 5-9.
- [3] SHAN Y, GUAN D, ZHENG H, et al. China CO<sub>2</sub> emission accounts 1997—2015 [J]. *Scientific Data*, 2018, 5: 170201.
- [4] SKEA J. IPCC2022: Climate Change 2022 Mitigation of Climate Change [R]. Cambridge: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022.
- [5] 郭春, 郭亚林, 陈政. 交通隧道工程碳排放核算及研究进展分析 [J]. *现代隧道技术*, 2023, 60(1): 1-10.
- [6] GRAZI F, VAN DEN BERGH J. Spatial organization, transport, and climate change: Comparing instruments of spatial planning and policy [J]. *Ecological Economics*, 2008, 67(4): 630-639.
- [7] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通 2020 年度统计和分析报告 [R]. 北京: 中国城市轨道交通协会, 2020.
- [8] 周鹏, 宋鹭, 杜蕴慧. 地铁施工期主要环境问题及管理控制 [J]. *环境影响评价*, 2015, 37(1): 41-43.
- [9] GUAN B, LIU X, ZHANG T, et al. Energy consumption of

- subway stations in China: Data and influencing factors [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2018, 43: 451-461.
- [10] 谢鸿宇, 王习祥, 杨木壮, 等. 深圳地铁碳排放量 [J]. *生态学报*, 2011, 31(12): 3551-3558.
- [11] 中国调研报告网. 2012 年建筑节能行业调研分析报告 [EB/OL]. (2012-02-23) [2023-05-15]. <https://jz.docin.com/p-603004005.html>.
- [12] 戴彦德, 田智宇, 朱跃中, 等. 重塑能源: 面向 2050 年的中国能源消费和生产革命路线图 [J]. *经济研究参考*, 2016(21): 3-14.
- [13] LIU M, JIA S, LIU X. Evaluation of mitigation potential of GHG emissions from the construction of prefabricated subway station [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 236: 117700.
- [14] LEDERER J, OTT C, BRUNNER P H, et al. The life cycle energy demand and greenhouse gas emissions of high-capacity urban transport systems: A case study from Vienna's subway line U2 [J]. *International Journal of Sustainable Transportation*, 2016, 10(2): 120-130.
- [15] WESTIN J, KAGESON P. Can high speed rail offset its embedded emissions? [J]. *Transportation Research Part D*, 2011, 17(1): 1-7.
- [16] 李磐. 基于建设规划的城市轨道交通工程建设期环境影响评价 [D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
- [17] 毛睿昌. 基于 LCA 的城市交通基础设施环境影分析研究 [D]. 深圳: 深圳大学, 2017.
- [18] 陈坤阳, 周鼎, 粟月欢, 等. 城市轨道交通生命周期碳排放强度与碳减排潜力研究 [J]. *铁道标准设*, 2022, 66(5): 1-7.
- [19] 郭飞, 孔恒, 孙凯悦, 等. 地铁深大基坑施工碳排放计算方法 [J]. *隧道建设*, 2022, 42(S2): 197-206.
- [20] 粟月欢, 张宇, 段华波, 等. 地铁建设环境影响评估及减排效益研究: 以深圳市为例 [J]. *环境工程*, 2022, 40(5): 184-192.
- [21] 王幼松, 黄旭辉, 闫辉. 地铁盾构区间物化阶段碳排放计量分析 [J]. *土木工程与管理学报*, 2019, 36(3): 12-18.
- [22] 陈政, 郭亚林, 郭春. 基于 WOA-DELM 的成都地铁建设阶段温室气体预测 [J]. *隧道建设*, 2022, 42(12): 2048-2063.
- [23] 薄文斐. 再生绿色建材对环境影响的成本分析 [D]. 青岛: 山东科技大学, 2019.
- [24] 郭亚林, 孙文昊, 许洪伟, 等. 地铁隧道盾构及钻爆法施工碳排放强度对比 [J]. *现代隧道技术*, 2023, 60(3): 14-23.
- [25] ISO (International Organization for Standardization). *Environmental management Life cycle assessment Principles and framework (ISO 14040—2006)* [S]. London: British Standards Institution, 2006.
- [26] 朱晓峰. 生命周期方法论 [J]. *科学学研究*, 2004(6): 566-571.
- [27] FINNVEDEN G. Methodological aspects of life cycle assessment of integrated solid waste management systems [J]. *Resources, Conservation & Recycling*, 1999, 26(3/4): 173-187.
- [28] LI Y, HE Q, LUO X, et al. Calculation of life-cycle greenhouse gas emissions of urban rail transit systems: A case study of Shanghai Metro [J]. *Resources, Conservation & Recycling*, 2018, 128: 451-457.
- [29] 沈永平, 王国亚. IPCC 第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点 [J]. *冰川冻土*, 2013(5): 10-18.
- [30] 李小冬, 朱辰. 我国建筑碳排放核算及影响因素研究综述 [J]. *安全与环境学报*, 2020, 20(1): 317-327.
- [31] XU J, GUO C, YU L. Factors influencing and methods of predicting greenhouse gas emissions from highway tunnel construction in Southwestern China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 229: 337-349.
- [32] 秦骞, 艳平, 蒋福建. 地铁站建筑全生命周期碳排放研究——以成都三号线某站为例 [J]. *建筑经济*, 2020, 41(S1): 329-334.
- [33] 贺晓彤. 城市轨道交通明挖车站建设碳排放计算及主要影响因素分析 [D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- [34] 建筑(编辑部). 城乡建设绿色低碳发展的思考——专访住房和城乡建设部标准定额司司长田国民 [J]. *建筑*, 2021(14): 14-19.
- [35] 刘昱良, 李姚旺, 周春雷, 等. 电力系统碳排放计量与分析方法综述 [J/OL]. *中国电机工程学报*: 1-16 [2024-01-15]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.223452>.
- [36] 郭恰, 马艳. 基于质量平衡法的污泥处理处置工艺碳减排量核算分析 [J]. *净水技术*, 2019, 38(10): 107-111.
- [37] 李颖, 武学, 孙成双, 等. 基于低碳发展的北京城市生活垃圾处理模式优化 [J]. *资源科学*, 2021, 43(8): 1574-1588.
- [38] 张孝存. 建筑碳排放量化分析计算与低碳建筑结构评价方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [39] 王明, 周志兴, 封明敏, 等. 火电机组实测法 CO<sub>2</sub> 排放监测模型及准确性验证 [J]. *煤化工*, 2022, 50(2): 18-21.
- [40] 曹元辉, 方群, 王勇, 等. 国内外工业二氧化碳排放在线监测概况及在我国水泥行业应用前景 [J]. *中国水泥*, 2022(6): 12-16.
- [41] DE ANDRADE C E S, D'AGOSTO M D. Energy use and carbon dioxide emissions assessment in the lifecycle of

- passenger rail systems: The case of the Rio de Janeiro Metro [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 126: 526-536.
- [42] DEL PERO F, DELOGU M, PIERINE M, et al. Life cycle assessment of a heavy metro train [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 87: 787-799.
- [43] JONES H, MOURA F, DOMINGOS T. Life cycle assessment of high-speed rail: A case study in Portugal [J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2017, 22 (3): 410-422.
- [44] CHESTER M, HORVATH A. Life-cycle assessment of high-speed rail: The case of California [J]. *Environmental Research Letters*, 2010, 5(1): 014003
- [45] SAXE S, MILLER E, GUTHRIE P. The net greenhouse gas impact of the Sheppard Subway Line [J]. *Transportation Research Part D*, 2017, 51: 261-275.
- [46] 安东, 李子惊, 孙念念. 地铁站点施工期碳排放预测模型研究 [J]. *居舍*, 2019(14): 139-140.
- [47] 樊婧. 地下交通基础设施施工周期内的碳排放核算分析 [J]. *建筑施工*, 2018, 40(10): 1818-1820.
- [48] LIU M, JIA S, HE X. A quota-based GHG emissions quantification model for the construction of subway stations in China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 198: 847-858.
- [49] 赖长逸, 吴勇, 艾晓燕, 等. 成都市地铁项目土建过程碳排放源分类研究 [J]. *环境科学导刊*, 2012, 31(4): 97-99.
- [50] 郭春, 徐建峰, 张佳鹏. 隧道建设碳排放计算方法及预测模型 [J]. *隧道建设*, 2020, 40(8): 1140-1146.
- [51] DOLL C N H, BALABAN O. A methodology for evaluating environmental co-benefits in the transport sector: Application to the Delhi metro [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2013, 58(SI): 61-73.
- [52] MAO R, BAO Y, DUAN H, et al. Global urban subway development, construction material stocks, and embodied carbon emission [J]. *Humanities & Social Sciences Communications*, 2021, 8: 83.
- [53] 黄旭辉. 地铁土建工程物化阶段碳排放计量与减排分析 [D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- [54] 肖建庄, 黎馨, 丁陶. 再生混凝土生命周期 CO<sub>2</sub> 排放评价 [J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2016, 46(5): 1088-1092.
- [55] 郭亚林, 孙文昊, 许洪伟, 等. 地铁隧道盾构及钻爆法施工碳排放强度对比 [J]. *现代隧道技术* 2023, 60(3): 14-23.
- [56] LIU M, JIA S, WANG X. Environmental impact analysis for the construction of subway stations: Comparison between open-excavation and underground-excavation scheme [J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2021, 91: 106644.
- [57] 皮膺海. 盾构隧道施工碳排放测评研究 [D]. 南昌: 南昌大学, 2016.

(上接第 16 页)

- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准 (JGJ 134—2010) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑碳排放计算标准 (GB/T 51366—2019) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [19] 陈露. 住宅建筑全生命周期碳排放测算及减碳策略研究 [D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2020.
- [20] 江苏省住房和城乡建设厅. 江苏省建筑与装饰工程计价定额 [M]. 南京: 江苏凤凰科学技术出版社, 2014.
- [21] World Resources Institute. CO<sub>2</sub> emissions (metric tons per capita)-China [EB/OL]. (2023-02-11) [2023-03-20]. <https://data.worldbank.org/indicator/EN.ATM.CO2E.PC?locations=CN>.
- [22] 中华人民共和国生态环境部. 2019 年度减排项目中国区域电网基准线排放因子 [R]. 业务工作, 2020.
- [23] 龚睿歆. 中国南方城镇住宅建筑碳排放影响因素及分区减排策略研究 [D]. 北京: 中国石油大学, 2021.
- [24] 赵红岩, 霍正刚, 查晓庭, 等. 建筑碳排放影响因素分析及情景预测 [J]. *扬州大学学报(自然科学版)*, 2022, 25(6): 65-70.
- [25] 吴熊秋尧. 城市建筑高度及其管控研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- [26] 李春昊. 基于 LCA 能耗理论的辽南居住建筑优化设计研究 [D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2017.
- [27] 赵秀秀. 绿色建筑全生命周期碳排放计算与减碳效益评价 [D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
- [28] 仲平. 建筑生命周期能源消耗及其环境影响研究 [D]. 成都: 四川大学, 2005.
- [29] 李静, 刘燕. 基于全生命周期的建筑工程碳排放计算模型 [J]. *工程管理学报*, 2015, 29(4): 12-16.