

分类号：
学号：20212210066

密级：
单位代码：10759

石河子大学

硕士学位论文



基于 LCA 的城市轨道交通物化阶段 碳减排策略研究

学位申请人	赵晓明
指导教师	王蕾 教授
	路强 高级工程师
申请学位类别	专业硕士
专业名称	土木水利
研究领域	土木工程
所在学院	水利建筑工程学院

中国·新疆·石河子
2026年5月

分类号：
学号：20212210066

密级：
单位代码：10759

石河子大学

硕士学位论文



基于 LCA 的城市轨道交通物化阶段 碳减排策略研究

学位申请人	赵晓明
指导教师	王蕾 教授
	路强 高级工程师
申请学位类别	专业硕士
专业名称	土木水利
研究领域	土木工程
所在学院	水利建筑工程学院

中国·新疆·石河子
2026年5月

**Study on Carbon Emission Reduction Strategies in the Materialization
Stage of Urban Rail Transit Based on LCA**

A Dissertation Submitted to

Shihezi University

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Professional Master

By

Zhao Xiao-ming

(Civil Engineering)

Dissertation Supervisor: Prof. Wang Lei

Senior Engineer. Lu Qiang

May, 2026

石河子大学学位论文独创性声明及使用授权声明

学位论文独创性声明

本人所提交的学位论文是在我导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明并表示谢意。

研究生签名：赵晓明

时间：2026年5月15日

使用授权声明

本人完全了解石河子大学有关保留、使用学位论文的规定，学校有权保留学位论文并向国家主管部门或指定机构送交论文的电子版和纸质版。有权将学位论文在学校图书馆保存并允许被查阅。有权自行或许可他人将学位论文编入有关数据库提供检索服务。有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

研究生签名：赵晓明

时间：2026年5月15日

导师签名：王雷

时间：2026年5月15日

摘要

在“双碳”目标背景下，以绿色、低碳、循环为导向的高质量发展已成为我国基础设施建设转型的重要方向。城市轨道交通作为支撑新型城镇化和绿色出行的重要公共基础设施，在其建设过程中需要投入大量建材与能源，其物化阶段产生了较为集中的碳排放。因此，系统开展城市轨道交通物化阶段碳排放核算及减排策略研究，对于推动轨道交通工程绿色低碳建设具有重要意义。

本文以城市轨道交通工程物化阶段为研究对象，基于生命周期评价（LCA）理论构建碳排放计量模型，并选取典型盾构区间与明挖车站作为案例工程，对物化阶段碳排放进行系统核算与结构分析。在识别关键碳排放来源的基础上，提出多维度碳减排策略，并引入情景分析方法构建基准情景（BS）、稳健减排情景（S1）和强化减排情景（S2），对不同技术路径组合下的碳减排潜力进行模拟分析。同时结合技术经济分析，对减排措施的经济可行性进行评估，并进一步探讨减排情景在工程实践中的应用适配与管理实施机制。

本文主要结论有：

（1）物化阶段碳排放结构特征。研究表明，城市轨道交通物化阶段碳排放主要集中在建材及预制构件生产环节，占总碳排放比例超过 70%，其中混凝土与钢材生产是最主要的碳排放来源；材料运输与施工建造阶段碳排放占比较低，但仍具有一定减排潜力。

（2）多情景减排潜力分析。情景模拟结果表明，在稳健减排情景（S1）下，通过常态化低碳建材替代与适度装配式建造，可实现约 14.3%的综合减排；在强化减排情景（S2）下，通过高比例预制装配、运输优化及施工设备电动化等措施，综合减排率可提升至 29.3%，表明多策略协同实施能够显著提升减排效果。

（3）减排措施技术经济特征。技术经济分析表明，低碳建材替代具有“低成本—高减排”的优势，是当前较具推广价值的减排路径；施工机械电动化及高比例装配式建造虽具有较高减排潜力，但在现阶段仍面临一定成本压力，需要结合工程全生命周期进行综合决策。

（4）工程应用与实施路径。在减排潜力与经济性分析基础上，进一步构建了减排情景的工程应用适配机制，并提出融合情景指标的招投标管理机制及低碳供应链协同管理路径，为城市轨道交通工程低碳建造提供可操作性的管理思路。

关键词：城市轨道交通；物化阶段；生命周期评价；碳排放；情景分析

Abstract

Under the background of the “dual-carbon” goals, high-quality development oriented toward green, low-carbon, and circular development has become an important direction for the transformation of China’s infrastructure construction. As an essential public infrastructure supporting new urbanization and green mobility, urban rail transit requires substantial inputs of construction materials and energy during its development, resulting in concentrated carbon emissions during the embodied stage. Therefore, systematically conducting carbon emission accounting and exploring emission reduction strategies for the embodied stage of urban rail transit is of great significance for promoting low-carbon construction in rail transit projects.

This study takes the embodied stage of urban rail transit projects as the research object. Based on the Life Cycle Assessment (LCA) framework, a carbon emission accounting model is established. A typical shield tunnel section and an open-cut station are selected as case studies to quantify and analyze the carbon emission structure during the embodied stage. After identifying the key sources of carbon emissions, a set of carbon reduction strategies is proposed. Scenario analysis is further introduced to construct three emission-reduction scenarios: the Baseline Scenario (BS), the Moderate Reduction Scenario (S1), and the Enhanced Reduction Scenario (S2). The carbon reduction potential under different combinations of technical pathways is then simulated. In addition, a techno-economic analysis is conducted to evaluate the economic feasibility of different mitigation measures, and the application mechanisms and management implementation approaches of emission reduction scenarios in engineering practice are further discussed.

The main conclusions are as follows:

(1) Carbon emission structure of the embodied stage. The results indicate that carbon emissions in the embodied stage of urban rail transit projects are mainly concentrated in the production of construction materials and prefabricated components, accounting for more than 70% of the total emissions. Among them, the production of concrete and steel constitutes the dominant emission sources. Although the emissions from material transportation and construction processes are relatively smaller, they still present certain emission reduction potential.

(2) Emission reduction potential under multiple scenarios. Scenario simulation results show that significant emission reductions can be achieved through different mitigation strategies. Under the Moderate Reduction Scenario (S1), approximately 14.3% of total emissions can be reduced through the routine application of low-carbon materials and moderate prefabricated construction. Under the Enhanced Reduction Scenario (S2), the comprehensive emission reduction rate can reach 29.3% by adopting high prefabrication rates, optimized transportation, and electrification of construction equipment. This

demonstrates that the coordinated implementation of multiple strategies can significantly improve emission reduction performance.

(3) Techno-economic characteristics of mitigation measures. The techno-economic analysis indicates that the substitution of low-carbon construction materials exhibits the advantage of “low cost and high emission reduction potential,” making it a practical and promotable mitigation pathway. Although the electrification of construction machinery and high-level prefabricated construction have considerable emission reduction potential, they still face certain cost constraints at the current stage and require comprehensive decision-making based on the project life cycle.

(4) Engineering application and implementation pathways. Based on the analysis of emission reduction potential and economic feasibility, an engineering application mechanism for emission reduction scenarios is further developed. In addition, a bidding management mechanism integrating carbon emission indicators and a low-carbon supply chain coordination framework are proposed, providing practical management approaches for implementing low-carbon construction in urban rail transit projects.

Key words:Urban Rail Transit; Embodied Stage; Life Cycle Assessment (LCA); Carbon Emissions; Scenario Analysis

目录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究目的与意义	3
1.2.1 研究目的	3
1.2.2 研究意义	4
1.3 国内外研究现状	4
1.3.1 国外研究现状	5
1.3.2 国内研究现状	8
1.3.3 国内外研究述评	12
1.4 研究内容及技术路线	13
1.4.1 研究内容	13
1.4.2 技术路线	14
1.5 研究方法与创新点	16
1.5.1 研究方法	16
1.5.2 创新点	17
1.6 本章小结	17
第 2 章 概念界定及理论基础	18
2.1 相关概念界定	18
2.1.1 城市轨道交通	18
2.1.2 碳排放	20
2.2 理论基础	20
2.2.1 生命周期评价理论 (LCA)	20
2.2.2 碳排放计量方法	23
2.2.3 情景分析法理论	24
2.2.4 低碳经济理论	25
2.3 本章小结	25
第 3 章 城市轨道交通物化阶段碳排放计量模型	26
3.1 城市轨道交通物化阶段碳排放研究目的与范围	26
3.1.1 研究目的	26
3.1.2 研究范围与系统边界	26

3.2	清单分析	29
3.3	碳排放计算方法	29
3.3.1	建材和预制构件生产阶段碳排放量	30
3.3.2	建材和预制构件运输阶段碳排放量	30
3.3.3	施工阶段碳排放量	30
3.4	碳排放因子	32
3.4.1	能源碳排放因子	32
3.4.2	电力碳排放因子	34
3.4.3	建材及预制构件碳排放因子	35
3.4.4	运输碳排放因子	36
3.4.5	施工机械碳排放因子	37
3.5	本章小结	40
第 4 章	城市轨道交通物化阶段碳排放实例分析	42
4.1	盾构区间物化阶段碳排放计量分析	42
4.1.1	案例概况	42
4.1.2	盾构区间建材生产阶段碳排放计量分析	43
4.1.3	盾构区间建材运输阶段碳排放计量分析	44
4.1.4	盾构区间施工阶段碳排放计量分析	46
4.2	明挖车站物化阶段碳排放计量分析	50
4.2.1	案例概况	50
4.2.2	明挖车站建材生产阶段碳排放计量分析	52
4.2.3	明挖车站建材运输阶段碳排放计量分析	53
4.2.4	明挖车站施工阶段碳排放计量分析	56
4.3	结果分析	62
4.4	本章小结	63
第 5 章	城市轨道交通物化阶段碳减排策略研究	65
5.1	减排策略制定原则与总体思路	65
5.1.1	减排策略制定原则	65
5.1.2	总体思路框架	66
5.2	建材及预制构件生产阶段碳减排策略	66
5.2.1	低碳混凝土	66
5.2.2	低碳钢材	67
5.3	建材及预制构件运输阶段碳减排策略	68

5.3.1 使用清洁运输工具	69
5.3.2 优化运输方案	69
5.4 施工阶段碳减排策略	69
5.4.1 电动化施工机械	69
5.4.2 预制装配式技术	70
5.5 碳减排潜力情景分析	72
5.5.1 情景参数设定原则及取值依据	72
5.5.2 减排潜力测算依据与结果	75
5.5.3 结果讨论与经济性分析	78
5.5.4 减排情景的工程应用适配与管理实施机制	80
5.6 本章小结	82
结论与展望	83
6.1 结论	83
6.2 展望	84
参考文献	85

第1章 绪论

1.1 研究背景

在全球气候变暖持续加剧与我国“双碳”战略深入推进的宏观背景下，城市轨道交通作为城市基础设施体系的重要组成部分，其物化阶段碳减排问题亟需系统开展研究。伴随着工业化与城市化的进一步发展，发展中国家对于能源方面的生产和需求仍在进一步增长，以二氧化碳为主的温室气体排放量与日俱增，导致了全球环境和气候变化的一系列问题，全球气候异常、极端天气频发等全球气候变暖带来的问题威胁着人类的生存安全。为了应对2020年之后气候变化带来的不利影响，各国签署了《巴黎协定》，要将全球平均气温较前工业化时期上升幅度控制在 2°C 以内，并努力将温升控制在 1.5°C 以内，形成全球气候治理格局。

当前，应对全球气候变化的关键在于控制以 CO_2 为主的温室气体排放。根据国际能源署（IEA）对各行业碳排放情况的统计结果，建筑业、工业及交通运输业为碳排放量占比较高的三大领域。其中，欧洲建筑师协会研究表明，建筑业及其相关产业消耗了约50%的能源，产生约50%的空气污染，并贡献了约42%的温室气体排放。因此，将建筑领域作为低碳发展的重点研究对象具有重要意义，推进建筑业减排对实现全球碳减排目标具有显著的现实价值。

作为全球化石能源消费量和温室气体排放量位居前列的国家，中国面临着较大的国际减排压力，部分国家碳排放量如图1-1所示。自我国在1998年5月签订，并于2002年8月核准全球第一个具有法律约束的温室气体减排条约《京都议定书(Kyoto Protocol)》开始，一直致力于积极应对气候的变化，分别在“十一五（2006-2010年）”，“十二五（2011-2015年）”，“十三五（2016-2020年）”规划期间提出了国家级应对气候变化的方案，如2007年6月政府发布的《我国应对气候变化国家方案》和《节能减排综合性工作方案》^[1]；2009年11月国务院印发了《“十二五”节能减排综合性工作方案》^[2]；2016年10月国务院印发了《“十三五”控制温室气体排放工作方案》^[3]。在2020年第75届联大大会上，我国第一次提出国家层面的碳中和目标：“二氧化碳将力争在2030年前达到排放峰值，并力争在2060年前达到碳中和”。“双碳”目标的提出，体现了我国在应对全球气候变化问题上的积极态度，以及深度参与全球气候治理的责任意识与行动决心。

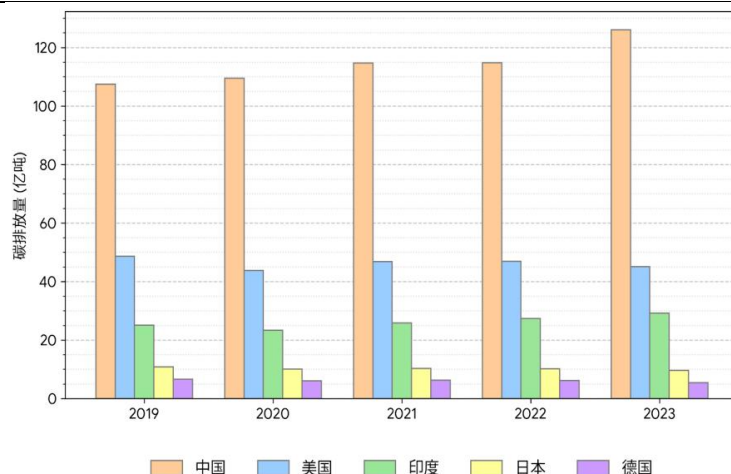


图 1-1 部分国家近年碳排放量

Fig.1-1 Carbon Emissions of Selected Countries in Recent Years

(数据来源: 国际能源署 IEA)

为有效缓解城市交通拥堵压力,建设和发展城市轨道交通已成为全球许多国家的重要发展方向。相比传统交通方式,城市轨道交通在运量、运行效率、环境影响以及土地利用等方面具有明显优势,同时在安全性与舒适性方面也表现突出,因此逐渐成为城市公共交通体系的重要支撑。随着“绿色出行”理念在社会中的不断普及,地铁等轨道交通方式正被越来越多的居民所接受并作为主要出行方式。近年来,我国城市轨道交通建设进入快速发展阶段,线路规模持续扩大,整体发展水平处于国际领先地位,运营里程和客流规模均长期保持世界第一。据中国城市轨道交通协会统计,截至 2024 年 12 月 31 日,我国大陆地区(不含港澳台)共有 58 个城市开通城市轨道交通,投运线路总长度 12160.77 km^[4]。其中,地铁线路长度 9306.09 km,占比 76.53%。我国城轨建设持续保持高质量发展态势,“十四五”规划指标已提前完成,运营总里程稳居世界第一。

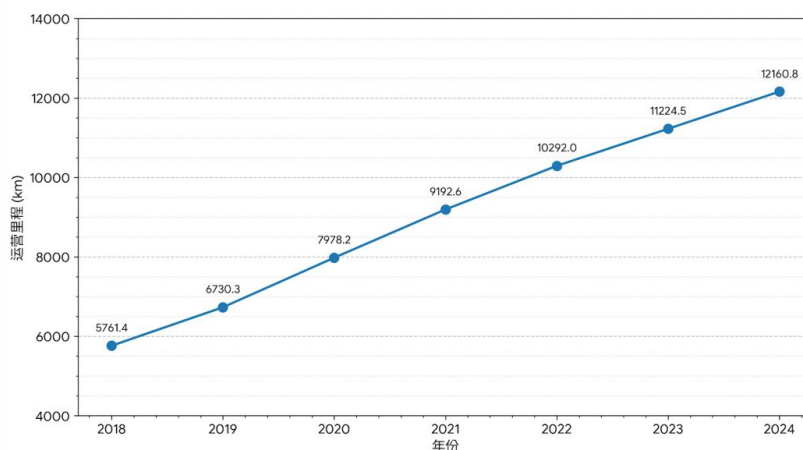


图 1-2 2018—2024 年我国轨道交通运营里程

Fig.1-2 China's Rail Transit Operating Mileage, 2018-2024

(数据来源: 中国城市轨道交通协会)

城市轨道交通作为典型的大型基础设施工程，其建设过程中往往需要投入大量建材、预制构件及能源。随着我国城市轨道交通网络规模的持续扩张，未来较长时期内仍将保持较高强度的建设需求。在工程建设的物化阶段，建材生产、物流运输及现场施工等环节伴随着大量能源消耗与温室气体排放。随着城轨建设规模的扩大，亟需对该阶段开展系统的量化分析与减排研究。然而，当前国内外相关研究多聚焦于运营期能耗，且对物化阶段的碳减排策略研究深度相对不足。鉴于此，构建城市轨道交通物化阶段碳排放模型，揭示其总体排放水平、结构特征及关键影响因素，并提出针对性的低碳优化路径，不仅有助于完善相关理论研究体系，也可为政府制定低碳政策及企业推进绿色建造提供具有可操作性的决策参考。

综上所述，在“双碳”目标持续推进以及基础设施绿色低碳转型的背景下，城市轨道交通建设过程中的碳排放问题日益受到关注。相比运营阶段，物化阶段涉及建材生产、材料运输及施工建造等多个环节，其碳排放规模大、来源复杂，是轨道交通工程碳排放的重要组成部分，也是挖掘工程建设领域减排潜力的重要环节。因此，有必要对城市轨道交通物化阶段的碳排放特征开展系统分析，并在此基础上探索科学合理的碳减排路径，以为城市轨道交通工程绿色低碳建设提供理论依据与实践参考。

1.2 研究目的与意义

在“双碳”目标导向下，城市轨道交通承载着引领基础设施绿色低碳转型的战略使命。本节通过系统阐释研究目标的理论价值与实践意义，深入解析基于 LCA 的轨道交通物化阶段碳排放构成特征及其减排潜力，旨在为推进行业精细化碳治理及构建系统化低碳建造策略提供科学依据。

1.2.1 研究目的

本文旨在构建城市轨道交通物化阶段的碳排放计量模型，通过量化分析方法识别关键排放来源，从而为行业低碳转型路径的制定提供科学依据与数据支撑。本文以城市轨道交通物化阶段碳排放为主要研究对象，以生命周期评价（LCA）理论为指导，构建适用于该阶段的碳排放计量模型。通过典型工程案例的实证测算，旨在揭示物化阶段碳排放的总体水平、结构特征及其关键影响因素，在此基础上提出具有针对性的低碳优化路径，并对其减排潜力进行定量评估，为我国城市轨道交通建设领域的绿色低碳转型提供理论支撑与数据依据。

1.2.2 研究意义

在“双碳”目标持续推进以及基础设施绿色低碳转型背景下，系统开展城市轨道交通物化阶段碳排放核算与减排策略研究具有重要意义。本文以城市轨道交通工程物化阶段为研究对象，从碳排放计量模型构建、案例碳排放测算以及减排策略分析等方面展开系统研究，在丰富相关理论研究的同时，也为工程实践中的低碳建设与碳排放管理提供参考。本文的研究意义主要体现在以下两个方面。

(1) 理论意义

本文针对城市轨道交通物化阶段碳排放研究不足的问题，通过构建碳排放计量模型并开展实证测算，拓展了轨道交通建设阶段碳排放核算的研究框架。当前针对城市轨道交通碳排放研究尚显不足，且极少有学者对物化阶段的碳排放深入分析。鉴于此，本文特构建碳排放计量模型，并依托典型案例展开详尽的碳排放计算与结果剖析，进而探索碳减排的优化策略，并量化评估其减排成效。本文的研究成果将为丰富和完善我国轨道交通物化阶段碳排放数据库提供基础性数据支持，同时为制定轨道交通物化阶段的碳减排举措提供坚实的理论依据。

(2) 实践意义

1) 有利于推动工程建设领域碳排放精细化管理

本文基于生命周期评价方法，对城市轨道交通物化阶段碳排放进行系统核算，识别建材生产、材料运输及施工建造等关键排放环节，为工程建设阶段碳排放管理提供量化依据，对促进基础设施建设领域绿色低碳发展具有一定参考价值。

2) 有利于推动我国城市轨道交通绿色低碳发展，助力“双碳”目标实现

本文提出城市轨道交通物化阶段碳减排策略，并通过情景分析评估其减排潜力，同时结合技术经济分析探讨其实施可行性。研究成果可为城轨工程建设阶段节能减排及低碳建造提供参考。

综上所述，对城市轨道交通物化阶段碳排放开展系统研究具有重要意义。本文从碳排放核算与减排策略角度开展研究，为城轨工程绿色低碳建设提供了一定的理论依据与实践参考。

1.3 国内外研究现状

随着“双碳”目标的提出以及绿色低碳发展理念的不断深化，建筑及基础设施领域碳排放问题逐渐成为学术界关注的热点。为明确城市轨道交通工程碳排放研究的发展现状与研究不足，有必要对国内外相关研究成果进行系统梳理。基于此，本文从碳排放核算方法及城市轨道交通碳排放研究等方面，对国内外研究现状进行综述与分析。

1.3.1 国外研究现状

随着全球经济的持续增长,人类活动向大气排放了大量温室气体(以二氧化碳为主),由此引发了气候变化及各类异常气候现象。气温上升对生态系统稳定、粮食供给以及水资源保障等方面构成了严峻挑战。在这一背景下,低碳发展逐渐成为各国关注的重点。早在2003年,英国在《能源白皮书》中首次提出“低碳经济”概念,此后该理念迅速引起国内外学界的广泛关注,围绕碳排放问题的研究也逐步成为热点方向。

生命周期评价(LCA)始于20世纪70年代初,最初被称为资源与环境状况分析。历经多年规范化、标准化的过程,LCA方法作为一种科学的环境管理工具和量化的决策工具,被广泛应用于清洁生产评估、产品设计和优化、政策制定等领域^[5-6]。随着可持续发展理念的不断推进,生命周期评价逐渐成为评估环境影响的重要工具,各国政府及相关组织已相继开展研究,并建立了相应的标准化方法与评价体系。例如美国世界资源研究所(WRI)的全球第一个核算标准——《温室气体议定书》,联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)的《IPCC国家温室气体清单指南》,以及英国的PAS 2050:2011《商品和服务在寿命周期内的温室气体排放评价规范》等^[7-8]。

(1) 建筑碳排放相关研究

对建筑能耗的研究国外从20世纪90年代陆续开展,涉及到建筑材料生产、建筑设计、建筑建设、建筑使用和建筑全生命周期等各方面内容,经过多年的发展和更新,国外对于建筑的碳排放研究已经比较成熟。

1) 建筑碳排放边界和计量方法的研究

对于建筑碳排放的核算边界,可以从生命周期的各个阶段的角度开展研究,部分学者在碳排放核算的过程将生命周期划分为了不同的阶段。Cuellar-Franca^[9]等人将英国常见的住宅划分为3个主要阶段:房屋建造、使用、和废弃物管理等三个主要阶段,其中房屋建造包括建筑材料和燃料的提取、制造、运输,以及房屋的建造过程,使用阶段包括水消耗、水加热、烹饪、照明、家庭电器、维修、翻新等。Wang^[10]等对建筑生命周期碳排放进行系统综述,从材料生产与运输、建造施工、运营使用、拆除与再利用等完整生命周期阶段出发,指出现有文献普遍采用包括材料生产、建造、运行和拆除在内的分阶段分析框架,对不同阶段的排放贡献和影响因素进行比较探讨,为生命周期排放识别与减排策略提供理论支持。Satola^[11]在对比国际净零能耗建筑(NZEB)评价体系时强调,系统边界的设定直接决定了减排策略的有效性,建议在“从摇篮到大门”的基础上,必须纳入使用阶段及生命终点的拆除处理。Pan^[12]指出,建筑LCA的系统边界需在时间、空间、功能和方法四个维度上加以说明,并以“从摇篮到闸门”为阶段划分原则,包括原材料获取、运输与制造、预制与建造、运营维护与翻新,以及拆除后的回收或填埋等阶段。

目前碳排放的计量方法主要是碳排放因子法、投入产出法、质量平衡法和实测法。Rodriguez^[13]等基于生命周期评价(LCA)理论框架,采用碳排放因子法,对隧道施工过程中采用常规施工方法穿越中低强度岩体各阶段的二氧化碳排放量进行了系统核算,并对其总排放水平进行了量化分析。Itoh^[14]运用碳排放因子法对日本桥梁工程的碳排放开展了相关研究,从建材生产、施工及加固维护三个阶段进行了系统分析。结果表明,在各阶段中,建材生产阶段的碳排放量最高。Kotthaus^[15]采用实测法以英国伦敦市中心两个典型点位为研究对象,分析高度城市化环境下微尺度人为排放对地气间热量、水分及二氧化碳交换的影响机制。部分学者在碳排放计量的基础上,用情景分析法对碳排放的各类影响因素进行了定量研究。Huo^[16]等人结合情景分析法与蒙特卡洛模拟方法,探索城市住宅建筑部门可能的排放峰值及其出现时间,同时考虑影响因子的不确定性,运用集成的SD-LEAP模型对重庆这一典型城市进行了分析,结果显示,重庆市住宅建筑部门排放量很可能在2042年达到峰值。

2) 建筑碳排放核算结果的研究

从建筑材料或不同构件对碳排放的影响上看。Jaehun Sim^[17]等基于生命周期评价方法,对韩国某公寓建筑全生命周期内七类空气污染物的排放情况进行了分析。研究结果表明,建材生产阶段是废气排放的主要来源,其中混凝土和钢材对污染物排放的贡献最为显著。Chapagain^[18]发现使用CLT结构与传统的木结构房屋相比,生命周期的碳排放大幅度降低。Alhumayani^[19]等在研究中发现,在所分析的三类墙体中,传统混凝土墙的综合生态影响程度最高。与之相对,3D打印混凝土墙在所有七个相关影响维度上,较传统混凝土墙实现了24%的显著改善;但在碳排放方面,3D打印混凝土的表现比传统混凝土低27.2%。Myin^[20]对缅甸仰光市的一栋建筑进行研究,发现采用低碳材料可显著减少碳排放,材料隐含碳排放减少40%,运输碳排放减少39%。然而,采用低碳材料会带来约6.7%的总成本适度增加。

从不同阶段碳排放占比上看。Wang^[21]系统分析了建筑生命周期各阶段的碳排放,包括材料生产、运输、施工、运营、拆除与材料回收等环节。发现运营阶段通常是最大贡献者,而施工和材料生产阶段也是碳排放的重要部分。Rosa M^[22]对英国三种最常见的房屋类型全生命周期的全球变暖潜能值(GWP)进行研究:独立式、半独立式和梯田式。指出在整个生命周期中,使用阶段对大多数环境影响的贡献最大。Ma^[23]等人通过监测芝加哥一座混凝土-钢复合结构高层建筑全生命周期方法对其碳排放进行了记录和测算,发现产品生产阶段(A1-A3)和施工阶段(A4-A5)对环境影响占比最高,尤其是混凝土作为主要材料(约91%结构质量)贡献了约74%的碳排放。

部分学者对建筑碳排放影响因素进行了研究,Seungtaek等^[24]对美国住宅与商业建筑的碳排放量与能源消耗、能源价格之间的因果关系进行了探讨,并研究能源消耗和价