doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2025.04.003

城市轨道交通车站-区间-线路建设阶段碳排放分析

施羲渊[1,2]，姚崇武[3]，林瑞敏[1,2]，田浩东[3]，蒲　静[1,2]，郭　茹[1,2]，蔡　辰[1,2]，黄翔峰[1,2]
（1. 同济大学环境科学与工程学院，上海 200092；2. 同济大学碳中和研究院，上海 200092；
3. 福州地铁集团有限公司，福州 350009）

摘　要：针对城市轨道交通快速发展引发的能源消耗和温室气体排放问题，提出一种基于预算定额的轨道交通碳排放核算方法，通过整合碳排放强度和经济强度指标，构建“车站-区间-线路”多层级碳排放分析体系。以福州地铁 6 号线一期工程及西延线工程为案例，定量分析轨道交通建设阶段的碳排放特征。研究结果表明：建材生产阶段是碳排放的主要来源，占总排放的 50%～79%，其中钢筋、混凝土(商品混凝土)和水泥是主要贡献因子。车站层面的碳排放强度为 1.67～3.40 tCO_2e/m^2，受车站规模和结构设计影响；单位经济强度为 1.54～3.40 tCO_2e/万元，主要受轨道交通低碳程度影响。区间层面的碳排放强度因施工方法不同呈现显著差异，其中采用明挖法施工的区间碳排放强度更高，最高达 36.5 tCO_2e/双延米，主要因其对钢材和混凝土的需求较高。本研究为城市轨道交通全生命周期低碳建设提供科学依据，对推进轨道交通绿色低碳转型具有重要的理论价值和实践指导意义。

关键词：城市轨道交通；建设阶段；碳排放核算；线路碳排放；减排潜力；碳排放经济强度
中图分类号：U231　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1672-6073(2025)04-0022-09

Analysis of Carbon Emissions During the Construction Phase of Urban Rail Transit Stations, Sections, and Lines

SHI Xiyuan[1,2], YAO Chongwu[3], LIN Ruimin[1,2], TIAN Haodong[3], PU Jing[1,2], GUO Ru[1,2], CAI Chen[1,2], HUANG Xiangfeng[1,2]
(1. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092; 2. Institute of Carbon Neutrality, Tongji University, Shanghai 200092; 3. Fuzhou Metro Group Co., Ltd., Fuzhou 350009)

Abstract: This study addresses the issues of energy consumption and greenhouse gas emissions caused by the rapid development of urban rail transit and proposes a budget quota-based carbon emission accounting method for rail transit. By integrating carbon emission intensity and economic intensity indicators, a multi-level carbon emission analysis framework—comprising “station-section-line”—is constructed. Using the Fuzhou Metro Line 6 Phase I and its western extension project as a case study, the carbon emission characteristics during the construction phase of rail transit are quantitatively analyzed. The results indicate that the production of construction materials is the primary source of carbon emissions, accounting for 50% to 79% of total emissions, with steel reinforcement, concrete, and cement being the major contributing factors. At the station level, the carbon emission intensity per unit area ranges from 1.67 to 3.40 tCO_2 e/m^2, influenced by station scale and structural design; the

收稿日期：2024-12-12　修回日期：2025-04-23
第一作者：施羲渊，女，硕士研究生，研究方向为碳排放核算，2331380@tongji.edu.cn
通信作者：郭茹，女，博士，教授，博士生导师，研究方向为碳中和与可持续性评估，ruguo@tongji.edu.cn
基金项目：国家自然科学基金项目(42371308)；福州轨道交通“双碳”发展战略、方法及路径研究项目(JSK-KY-2023-002)
引用格式：施羲渊，姚崇武，林瑞敏，等. 城市轨道交通车站-区间-线路建设阶段碳排放分析[J]. 都市快轨交通，2025，38(4)：22-30.
SHI Xiyuan, YAO Chongwu, LIN Ruimin, et al. Analysis of carbon emissions during the construction phase of urban rail transit stations, sections, and lines[J]. Urban rapid rail transit, 2025, 38(4): 22-30.

economic intensity ranges from 1.54 to 3.40 tCO_2 e per ten thousand yuan, mainly affected by the low-carbon level of rail transit technologies. At the section level, carbon emission intensity varies significantly with different construction methods. Sections using the cut-and-cover method exhibit higher carbon emissions, with the maximum reaching 36.5 tCO_2 e per double track meter, primarily due to higher demand for steel and concrete. This study provides a scientific basis for low-carbon construction throughout the lifecycle of urban rail transit, and holds significant theoretical and practical value for promoting the green and low-carbon transformation of the rail transit sector.

Keywords: urban rail transit; construction phase; carbon emission accounting; line-level carbon emissions; emission reduction potential; carbon emission economic intensity

随着全球气候变化问题的日益严重，碳排放控制已成为各国亟待解决的关键问题。交通领域作为温室气体排放的重要来源，其碳排放量占全国总碳排放量的 12.42%[1]，对能源消费、城市空气质量和碳排放增长具显著影响[2]。其中，地铁建设期间因大量使用混凝土、钢材等高耗能建材及重型设备，产生了显著碳排放，造成不可忽视的环境影响[3-4]。研究显示，建材生产过程是建设期碳排放的主要来源，占比可达 70%～80%[5-6]。

针对地铁建设阶段的碳排放核算，已有研究取得了一定进展。贺晓彤[7]构建模型核算地铁明挖车站建设的碳排放量；陈坤阳等[8]利用生命周期评价(LCA)方法分析地铁盾构隧道建设的碳排放及减排潜力；粟月欢等[9]量化深圳地铁车站与隧道建设的碳排放，估算累计排放量达 2 730 万 t CO_2；郭飞等[10]计算北京市地铁深基坑建设排放二氧化碳 5.29 万 t；王幼松等[11]研究发现，广州地铁某段建设中，建材及预制构件生产阶段的碳排放占比高达 79.2%～83.0%，其中管片(主要成分为钢材与混凝土)贡献最大。

然而，现有研究仍存在以下不足：首先，由于能源结构、建材工艺及交通运输条件的地域差异，难以精确反映实际排放[12-13]；其次，普遍缺乏与经济指标挂钩的分析方法。为此，本研究在传统预算定额方法基础上引入造价预算数据，通过计算经济碳排放强度，使碳排放核算更全面科学。本研究采用的“碳排放经济强度”指标，通过将碳排放量与工程投资成本相结合，反映了单位投资所产生的碳排放量。计算结果数值越小，代表单位投资所需二氧化碳量越小，表明研究对象正处于绿色低碳转型过程中。

基于此，本研究以福州地铁 6 号线(简称 6 号线)一期及西延线工程为案例，提出一种基于预算定额的碳排放计算方法，从“车站-区间-线路”多个维度分析轨道交通建设的碳排放构成，并引入经济指标探讨碳排放强度，为城市轨道交通绿色建设提供科学依据，助力交通领域“双碳”目标的实现。

1 建设阶段碳排放核算方法

碳排放核算是量化碳排放变化趋势、分析影响因素并设计减排路径的基础工具。目前，国内外广泛认可的碳排放核算方法主要包括排放因子法、质量平衡法和实测法等，这些方法已广泛应用于多种排放源的碳排放量估算。本研究选取二氧化碳当量(CO_2e)作为评价指标，采用生命周期评价(life cycle assessment，LCA)方法核算地铁建设阶段的碳排放。具体方法是统计地铁建设阶段建材、机械台班和能源消耗量，分别乘以对应的碳排放因子后累加求和，其中关键在于获取准确且适用的清单数据和碳排放因子。

核算以“车站-区间-线路”为对象。其中，车站是指供乘客上下车的场所，包括站台、出入口、售票处等基础设施，可为起点站、终点站或中间站；区间是指连接 2 个车站的轨道部分；线路则由多个区间组成，构成连接多个车站的轨道系统。通过对“车站-区间-线路”3 个层面的分析，可识别轨道交通系统的碳排放热点，为制定减排策略提供依据，推动轨道交通向绿色低碳方向发展。

1.1 碳排放核算边界

城市轨道交通建设阶段碳排放的系统边界包括时间边界和空间边界。其中，时间边界包含以下 3 个阶段：①建材生产阶段，即从原材料开采、运输、生产到形成最终建材制品的整个过程中，因资源、能源消耗和污染物排放所产生的直接或间接碳排放；②建材运输阶段，即将建材从生产地运送到施工现场的过程，交通运输工具因燃料消耗而产生的直接或间接碳排放；③工程建造阶段，即施工机械设备使用过程中能源(如汽油、柴油、电力)消耗所产生的碳排放(化石能源使用的直接排放、电力上游生产产生的间接排放)。空间边界则以城市轨道交通车站、区间和线路碳排放为核算单元。

1.2 碳排放计算方法

1.2.1 碳排放总量

1) 建设阶段碳排放主要包含建材生产碳排放、建

材运输碳排放以及建造阶段碳排放。城市轨道交通建设阶段碳排放根据公式(1)进行计算。

$$C_{\mathrm{js}} = C_{\mathrm{sc}} + C_{\mathrm{ys}} + C_{\mathrm{jz}} \tag{1}$$

式中，C_{js} 为建设阶段碳排放、$\mathrm{kgCO_2e}$；C_{sc} 为建材生产阶段碳排放，$\mathrm{kgCO_2e}$；C_{ys} 为建材运输阶段碳排放，$\mathrm{kgCO_2e}$；C_{jz} 为建造阶段碳排放，$\mathrm{kgCO_2e}$。

2) 建材生产阶段碳排放根据公式(2)计算。

$$C_{\mathrm{sc}} = \sum_{i=1}^{n} M_i \cdot F_i \tag{2}$$

式中，M_i 为第 i 种主要建材的消耗量；F_i 为第 i 种主要建材的碳排放因子。

3) 建材运输阶段碳排放根据公式(3)计算。

$$C_{\mathrm{ys}} = \sum_{i=1}^{n} M_i \cdot L_i \cdot T_{Fi} \tag{3}$$

式中，L_i 为在第 i 种建材平均运输距离，km；T_{Fi} 为在第 i 种建材的运输碳排放因子，$\mathrm{kgCO_2e/(t{\cdot}km)}$。

4) 建造阶段碳排放根据公式(4)计算。

$$C_{\mathrm{jz}} = C_{\mathrm{jRS}} + C_{\mathrm{jSGE}} = \sum_{i=1}^{n} J_i \cdot J_{Fi} \cdot R_{Fi} + E_{\mathrm{jsGh}} \cdot E_F \tag{4}$$

式中，C_{jRS} 为工程施工阶段直接碳排放量，$\mathrm{kgCO_2e}$；C_{jSGE} 为工程施工阶段电能消耗产生的间接碳排放量，$\mathrm{kgCO_2e}$。J_i 为第 i 种以汽油、柴油等燃料为动力的施工机械的消耗台班数，台班；J_{Fi} 为第 i 种以汽油、柴油等燃料为动力的施工机械单位台班能源消耗量，kg 燃料/台班；R_{Fi} 为第 i 种燃料燃烧的碳排放因子，$\mathrm{kgCO_2e/kg}$ 燃料。E_{jsGh} 为工程施工阶段总耗电量，kW·h；E_F 为电力排放因子，$\mathrm{kgCO_2e/kW{\cdot}h}$。

1.2.2 碳排放强度

城市轨道交通车站/区间/线路建设阶段建造单位面积的平均碳排放根据公式(5)计算。

$$C_{\mathrm{jsP}i} = \frac{C_{\mathrm{js}i}}{A_i} \tag{5}$$

式中，$C_{\mathrm{jsP}i}$ 为第 i 个车站/区间/线路建设阶段单位面积建筑产生的平均碳排放量；$C_{\mathrm{js}i}$ 为第 i 个车站/区间/线路建设阶段碳排放总量，$\mathrm{kgCO_2e}$；A_i 为第 i 个车站总面积或区间/线路总长度。

城市轨道交通车站/区间/线路建设阶段单位投资的平均碳排放根据公式(6)计算。

$$C_{\mathrm{jsP'}i} = \frac{C_{\mathrm{js}i}}{Q_i} \tag{6}$$

式中：$C_{\mathrm{jsP'}i}$ 为第 i 个车站/区间/线路建设阶段单位投资产生的平均碳排放量，$\mathrm{kgCO_2e}$/万元；$C_{\mathrm{js}i}$ 为第 i 个车站建设阶段碳排放总量，$\mathrm{kgCO_2e}$；Q_i 为第 i 个车站/区间/线路建设阶段的工程费用，万元。

2 案例概况与清单数据

2.1 工程介绍

建设阶段的核算对象主要包括 6 号线一期工程(简称一期工程)和 6 号线西延线工程(简称西延线工程) 2 条线路。一期工程全长约 31.3 km，共设 16 座车站，已建成。西延线工程是一期工程的延长线，线路全长约 13.6 km，共设 10 座车站，目前西延线工程处于建设施工阶段。其中，西延线工程均采用盾构法-土压的复合法施工，一期工程除 b05、b07、b08 采用明挖法，其余区间均采用盾构法施工。

2.2 清单来源

清单分析用于量化评估建设过程中材料和能源的消耗及其碳排放量，包括前景数据和背景数据。前景数据指建设阶段的建材与能源消耗信息，来源于勘察设计资料、技术手册或相关统计数据；背景数据则为材料和能源的碳排放因子，即每单位消耗对应的二氧化碳排放量。

2.2.1 前景数据

前景数据包括建筑材料种类、施工周期、运输方式与距离、台班使用类型及化石燃料消耗等数据，参考地铁集团提供的施工台账、工程造价清单、建材采购文件等；机械台班的能源消耗主要依据《2018 年全国统一施工机械台班费用定额》。

前景数据的获取基于工程设计资料中的工料机汇总，具体包括概预算设计中的建材消耗量及施工机械台班数据。为确保数据的代表性和全面性，本文对前景数据的筛选采用以下标准：①涵盖 6 号线一期工程及西延线工程所有建设材料及施工机械，累计收集 9 864 种不同建设材料清单数据和 1 383 种不同施工机械台班清单数据；②筛选覆盖整个建设阶段，包括建材生产、运输及工程建造过程，以确保数据能够反映不同施工环节的碳排放特征；③对材料及机械数据进行分类归集，确保各类工程施工方案的适用性，以提升数据的可靠性和代表性。

2.2.2 背景数据

本研究结合工程特点，参照国内外标准与文献，建立轨道交通建设阶段碳排放因子库。建材运输方式的碳排放因子主要依据《建筑碳排放计算标准》(GB/T

51366—2019)[14]和《IPCC 国家温室气体清单编制指南》[15]，其中建材及能源消耗的排放因子依据全国统一标准进行选取。本研究中碳排放因子以“摇篮到大门(cradle-to-gate)”为生命周期边界，即涵盖原料采集、运输、预处理、制造等过程，但不包含生产设施建造、设备运行维护等远上游排放以及报废处理等碳排放。

为提高数据的区域适用性和边界一致性，本文进一步针对福州地区进行了适配性修正与验证：①结合当地建材生产行业数据，对主要建材(如钢筋、混凝土、水泥等)的生产碳排放因子进行了比对，并参考福建省重点排放单位报告中的因子数据，增强其区域代表性；②针对施工阶段机械台班能耗，选取福建电网 2023 年最新区域排放因子(0.581 $kgCO_2/kWh$)，更符合福州市能源结构的实际情况。建材运输、施工机械台班及主要能源和材料的碳排放因子分别见表 1、表 2 和表 3。

表 1　建材运输碳排放因子

Table 1　Carbon Emission Factors for Construction Material Transportation

运输方式	运输工具	碳排放因子/[$kgCO_2e/(t·km)$]
公路运输	轻型汽油货车运输(载重 2 t)	0.334
	中型汽油货车运输(载重 8 t)	0.115
	重型汽油货车运输(载重 10 t、18 t)	0.104
	轻型柴油货车运输(载重 2 t)	0.286
	中型柴油货车运输(载重 8 t)	0.179
	重型柴油货车运输(载重 10 t)	0.162
	重型柴油货车运输(载重 18 t)	0.129
	重型柴油货车运输(载重 30 t)	0.078
	重型柴油货车运输(载重 46 t)	0.057
	电力机车运输	0.010
	内燃机车运输	0.011
铁路运输	铁路运输(中国市场平均)	0.010
水路运输	液货船运输(载重 2 000 t)	0.019
	干散货船运输(载重 2 500 t)	0.015
	集装箱船运输(载重 200 TEU)	0.012

表 2　主要施工机械台班碳排放因子

Table 2　Carbon Emission Factors for Major Construction Machinery per Work Shift

项目名称	碳排放因子/(kg CO_2e/台班)
自卸汽车 12 t	144.7
交流电焊机 30 kV·A	34.1
龙门式起重机 50 t	132.9

续表

项目名称	碳排放因子/(kg CO_2e/台班)
电动多级离心清水泵	1 191.8
轴流风机 100 kW	210.2
履带式起重机 25 t	132.8
履带式液压抓斗成槽机	144.7
载重汽车 4 t	74.8
泥浆制作循环设备	197.0
电动空气压缩机 10 m^3/min	157.7
内燃空气压缩机 3 m^3/min	144.7
履带式单斗挖掘机液压 0.6 m^3	429.6
履带式起重机 40 t	79.5
履带式单斗挖掘机液压 1.0 m^3	104.6

表 3　主要能源及材料碳排放因子

Table 3　Carbon Emission Factors for Major Energy Sources and Materials

类型	种类	单位	碳排放因子
能源	电	$kgCO_2e$/kwh	0.581
	柴油	$kgCO_2e$/kg	3.186
	汽油	$kgCO_2e$/kg	2.194
	煤	$kgCO_2e$/t	747
材料	钢筋	$kgCO_2e$/t	2 347
	水泥	$kgCO_2e$/t	742
	螺纹钢筋	$kgCO_2e$/t	3 000
	电焊条	$kgCO_2e$/t	20 500
	中粗砂	$kgCO_2e$/t	2.5
	泵送防水抗渗砼 C35	$kgCO_2e/m^3$	368

3　建设阶段碳排放核算结果分析

3.1　车站

3.1.1　碳排放总量

6 号线西延线工程和一期工程各车站的建材生产、建材运输、建造阶段的碳排放情况如图 1 所示。建材生产阶段碳排放是主要的建设碳排放来源，占总碳

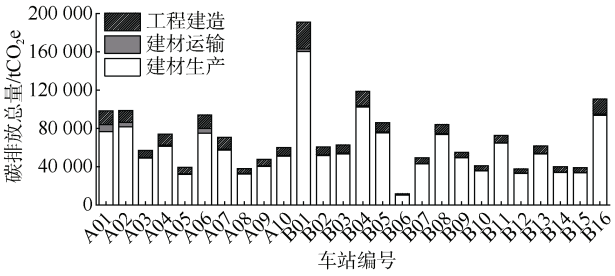


图 1　车站建材生产、运输和工程建造阶段的碳排放占比

Figure 1　Proportion of carbon emissions from material production, material transportation, and construction phases at stations

排放量的 78%～90%。其中，建设阶段碳排放总量最高的车站为 B01，其碳排放量达到了 19.1 万 tCO_2e，是碳排放量最小的车站 B06 的 16 倍。

车站各机械类型以及建材类型占车站总碳排放的比例如图 2 所示。车站建设阶段碳排放 35.9%来自钢筋，16.4%来自非泵送砼 C35，16%来自泵送砼 C35，5.9%来自泡沫塑料，其他建材包括电焊条、镀锌铁丝、角钢、板方材、扁钢、黏土等 106 种建材占比 25.8%。总体来看，西延线工程和一期工程车站的建材碳排放组成特征相似，其中钢筋、混凝土和水泥是 3 类主要的碳排放来源，其碳排放总和占比达到 80%；塑料的碳排放占比也超 5%。可见减排重点应放在钢筋的结构优化或改良其生产工艺上，以减少其碳排放[11]。

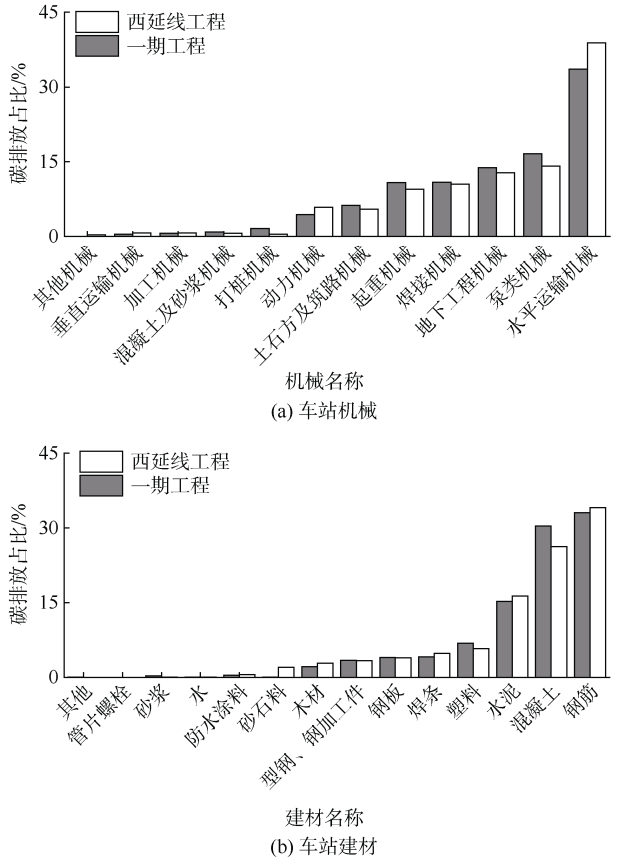


图 2　车站机械类型、建材类型碳排放占比

Figure 2　Proportion of carbon emissions by machinery type and material type at stations

从机械类别来看，水平运输机械是车站施工阶段碳排放最多的机械类别，占 33.6%～38.9%。该项目中，水平运输机械主要为载重汽车、平板拖车组、轨道平车等，均依靠汽油、柴油驱动，故而产生大量的温室气体排放。

3.1.2　碳排放强度

不同车站单位面积的建设碳排放存在显著差异。6 号线西延线和一期工程车站碳排放强度和碳排放经济强度如图 3 所示。在西延线工程中，A01 的碳排放强度最高，为 3.40 tCO_2e/m^2，而 A05 的碳排放强度最低，为 1.67 tCO_2e/m^2，两者相差 1.73 tCO_2e/m^2。相比之下，6 号线一期工程的平均碳排放强度较高。

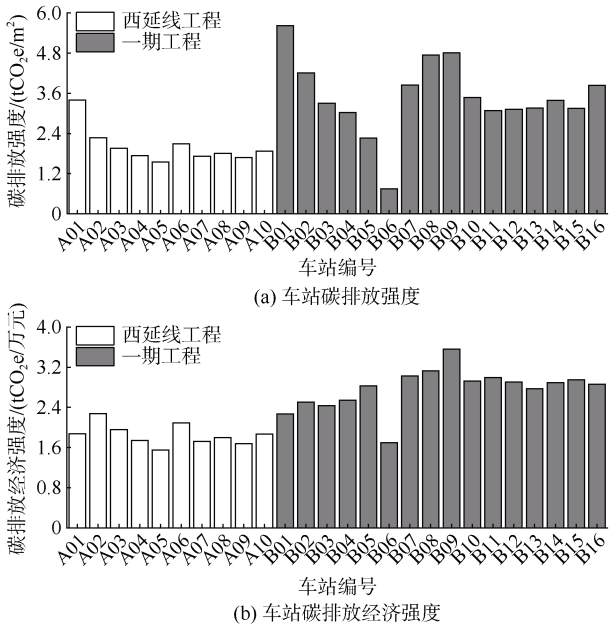


图 3　碳排放强度和碳排放经济强度

Figure 3　Comparison of carbon emission intensity and carbon emission economic intensity

在单位经济成本方面，不同车站的建设碳排放也表现出明显差异。在西延线工程中，A02 的碳排放经济强度最高，为 2.27 tCO_2e/万元，而 A05 的碳排放经济强度最低，为 1.54 tCO_2e/万元，两者相差 0.73 tCO_2e/万元。一期工程的车站建设阶段碳排放经济强度为 2.84 tCO_2e/万元，而西延线工程为 1.86 tCO_2e/万元，表明一期工程的车站碳排放经济强度显著高于西延线工程，且不同车站之间的碳排放经济强度波动较大。

3.2　区间

3.2.1　碳排放总量

6 号线西延线工程和一期工程区间的建材生产、建材运输、建造阶段的碳排放情况如图 4 所示。其中，建材生产阶段的碳排放占总碳排放量的 40%～80%，相较于车站施工建造阶段的占比提升。可见，施工阶段也有不小减排潜力。

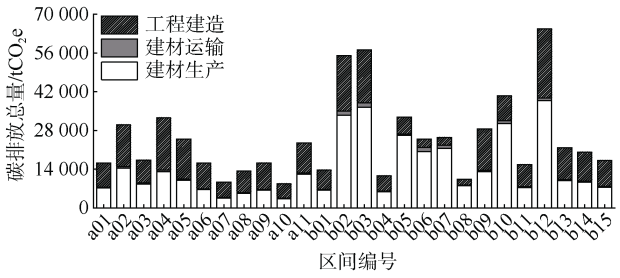


图 4　区间建材生产、建材运输和工程建造阶段的碳排放

Figure 4　Proportion of carbon emissions from material production, material transportation, and construction phases in intervals

西延线区间普遍采用盾构法-土压的复合施工方法，一期工程除 b05、b07、b08 区间采用明挖法外，其余区间均采用盾构法施工。总体来看，盾构法施工的碳排放强度相对较小，更具低碳施工的特点[16]。

考虑区间长度对碳排放总量的影响，本文选取长度相当的 b05 与 b11 区间进行对比分析，但 b05 区间采用明挖法施工，b11 区间采用更为低碳的盾构法施工，具有良好的可比性。该对比结果进一步验证了现有研究关于盾构法排放更低的观点[17]。

如图 5 所示，钢筋、水泥和混凝土仍然是 3 类主要的碳排放建材。其中，明挖法施工过程中，钢材的

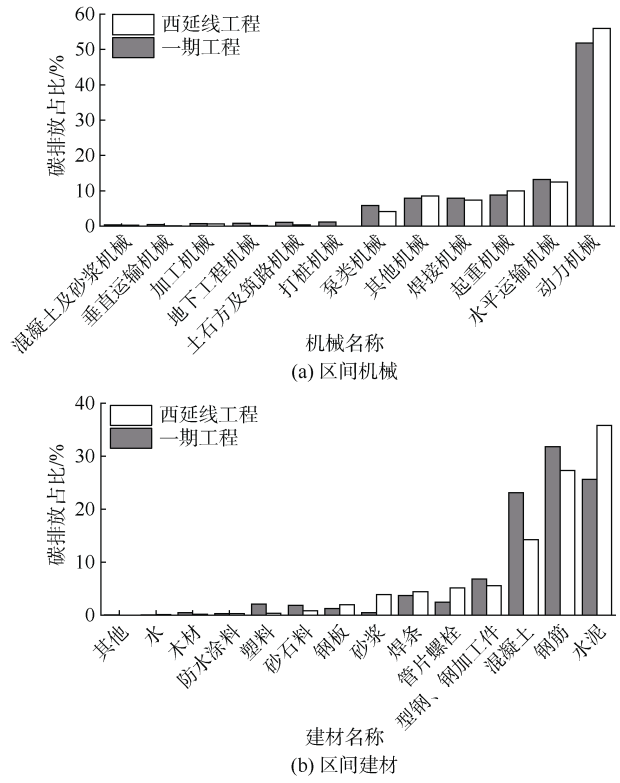


图 5　区间机械、建材碳排放占比

Figure 5　Proportion of carbon emissions by machinery type and material type in sections

碳排放量占比达 55%[18]，这也是一期工程中钢筋使用量更高的原因。盾构法中，为维持土仓压力稳定、实现土体改良，需大量使用水泥和混凝土，因此西延线中这两类建材的碳排放占比较高。因此，盾构法碳排放来源更偏重“浆体调配”类消耗，而明挖法则集中于结构支撑与基坑开挖等高强度作业。

从机械类别来看，动力机械是区间施工阶段的主要碳排放源，占 50%～58%，显示出施工能源结构对碳排放水平具有显著影响。该项目中，动力机械主要为电动空气压缩机、柴油发电机、内燃空气压缩机等，以电力、柴油为主要能源结构。

3.2.2　碳排放强度

6 号线西延线和一期工程区间碳排放强度对比和碳排放经济强度对比如图 6 所示，碳排放强度最高的区间为 b05，达到 36.5 tCO_2e/双延米。该区间采用明挖法，且区间长度较短，碳排放强度大，符合现有研究中盾构法施工碳排放强度较小的特征。b05、b07、b10 的碳排放经济强度较高，分别为 2.33、2.37 和 2.19 tCO_2e/万元，b16 碳排放经济强度最低，为 0.40 tCO_2e/万元，主要原因在于 b16 区间为机场接入段，长度较长，且承担连接机场与主线的枢纽功能，工程标准和配套系统要求较高，单位造价水平显著高于一般区间。虽然其碳排放总量较高，但在高投资背景下分摊至单位万元投资所对应的碳排放量相对较小，因而碳排放经济强度处于最低水平。

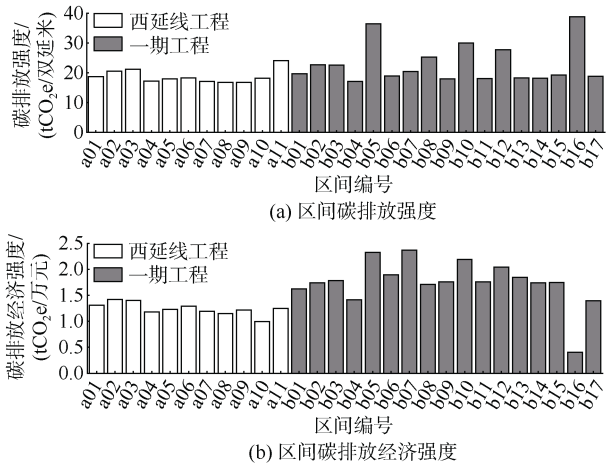


图 6　碳排放强度和碳排放经济强度对比

Figure 6　Comparison of carbon emission intensity and carbon emission economic intensity

b05 区间采用明挖法施工，碳排放强度为 36.5 tCO2e/双延米，而 b11 区间采用盾构法，碳排放强度为

18.1 tCO2e/双延米，差异达 18.4 tCO2e/双延米，明挖法碳排放高出盾构法约 101%。该结果与既有研究结论一致，验证了施工方法对碳排放强度的显著影响。

3.3 线路

3.3.1 碳排放总量

6 号线一期工程和西延线工程“车站-区间-线路”在建材生产、运输及工程建造阶段的碳排放总量及强度见表 4。其中，西延线碳排放总量为 88.6 万 tCO_2e，一期工程为 163.6 万 tCO_2e，总计 252.2 万 tCO_2e。从建筑主体来看，一期工程的车站和区间碳排放分别为 112.3 和 51.4 万 tCO_2e，而西延线则为 67.8 和 20.8 万 tCO_2e。西延线工程按照低碳示范线进行设计、建设，采用高效制冷设备、绿色建造技术，并对碳排放进行监测和统计管理，对于绿色低碳技术在轨道交通行业的应用和创新进行了许多有益探索和实践，因此碳排放总量、强度及经济强度均低于一期工程。

表 4 车站-区间-线路建设阶段碳排放总量与强度统计

Table 4 Total carbon emissions and emission intensities of stations, sections, and lines

指标		阶段	西延线工程	一期工程	合计
碳排放总量/(万 tCO_2e)	车站	建材生产阶段	55.7	96.7	152.4
		建材运输阶段	2.2	1.3	3.5
		工程建造阶段	9.9	14.3	24.2
		总碳排放量	67.8	112.3	180.1
	区间	建材生产阶段	9.1	32.5	41.5
		建材运输阶段	0.4	1.2	1.6
		工程建造阶段	11.4	17.7	29.0
		总碳排放量	20.8	51.4	72.2
	线路	建材生产阶段	64.8	129.2	193.9
		建材运输阶段	2.6	2.5	5.1
		工程建造阶段	21.2	32.0	53.2
		总碳排放量	88.6	163.6	252.2
碳排放强度	车站/(tCO_2e/m^2)		2.01	3.48	2.73
	区间/(tCO_2e/双延米)		18.8	21.05	20.35
	线路/(tCO_2e/km)		8.70	5.95	6.99
碳排放经济强度/(tCO_2e/万元)	车站		1.88	2.70	2.32
	区间		1.25	1.37	1.33
	线路		0.95	0.92	0.93

建设阶段碳排放主要来源于建材生产，占总碳排放的 49%～79%。一期工程使用了更多高碳排放因子的材料，如钢筋、水泥和泡沫塑料，其中泡沫塑料因生产过程中需大量合成树脂，而合成树脂的生产本身就是一个高能耗和高碳排放的过程[19]。这些因素导致一期工程碳排放总量高于西延线。建材生产与运输碳排放中，钢筋、混凝土和水泥分别占总排放的 32%、23%～28%和 20%～24%，共计 78%。虽然混凝土使用量约为钢筋的 14 倍，但因钢筋碳排放因子远高于混凝土(3 000 $kgCO_2e/t$ vs. 122～183 $kgCO_2e/t$)，钢筋成为碳排放的主要来源。

3.3.2 碳排放强度

按距离计算强度，一期工程、西延线工程总长分别为 31.261 km 和 13.555 km，一期工程碳排放强度为 5.95 万 tCO_2e/km，西延线工程碳排放强度为 8.70 万 tCO_2e/km，总碳排放强度为 6.99 万 t CO_2e/km。

按费用计算强度，根据一期工程、西延线工程的车站、区间预算计算，一期工程碳排放经济强度为 0.92 tCO_2e/万元，西延线工程碳排放强度为 0.95 t CO_2e/万元，总碳排放经济强度为 0.93 tCO_2e/万元。

对比北京和成都地铁线路的碳排放强度，北京某地铁新线路车站碳排放强度为 3.80 tCO_2e/m^2，区间为 1.41 万 tCO_2e/km[20]；成都地铁 18 号线车站和盾构区间碳排放强度分别为 3.12 万 tCO_2e/m^2 和 3.42 万 tCO_2e/km[21]。相比之下，地铁 6 号线西延线工程车站碳排放强度较低，得益于绿色技术的应用，但区间碳排放强度较高，这主要归因于该城市的地形特征，导致区间建设过程中采用明挖隧道的方式，其碳排放因子更高。

上述分析表明，地铁建设碳排放强度受地形、施工方法及技术应用等多因素影响。福州市在降低车站碳排放方面取得成效，但区间碳排放仍有较大改进空间。未来需进一步优化施工技术，减少区间建设的碳排放，以实现更绿色低碳的轨道交通发展。

4 结论与建议

4.1 结论

针对城市轨道交通快速发展引发的能源消耗和温室气体排放问题，本文以福州地铁 6 号线为案例，提出了一种基于预算定额的碳排放核算方法，对不同建设单元(车站、区间、线路)的碳排放总量和强度进行了量化分析。研究结果表明：

1) 大部分碳排放来源于建材生产，占建设阶段总排放的 50%～79%；建材运输占 1%～8%，施工建造占 9%～18%。钢筋、混凝土和水泥等建材生产与运输是碳排放的主要来源。

2) 6 号线一期工程建设碳排放为 163.6 万 t CO_2e，西延线工程建设碳排放为 88.6 万 tCO_2e，总计 252.2 万 tCO_2e。其中，车站、区间的排放占比不等，以车站碳排放为主，约占 57%。

3) 车站层面的单位面积碳排放强度为 1.67～3.40 tCO_2e/m^2，受车站规模和结构设计影响；单位经济强度为 1.54～2.27 tCO_2e/万元，主要受轨道交通低碳程度影响。区间碳排放强度为 16.7～36.5 tCO_2e/双延米，碳排放经济强度为 0.40～2.37 tCO_2e/万元，区间层面的碳排放强度因施工方法不同而呈现显著差异，其中明挖法施工的碳排放强度更高，达 36.5 tCO_2e/双延米，主要因其对钢材和混凝土的需求较高。

4) 通过“车站-区间-线路”碳排放强度和经济强度的量化分析发现，不同施工方法及建材选择显著影响碳排放。尤其在区间施工中，明挖法碳排放显著高于盾构法，因此西延线的碳排放强度以及碳排放经济强度低于一期工程，建议优先采用低碳施工技术。此外，优化施工流程和提高材料利用效率，有助于降低碳排放强度和经济成本。

4.2 建议

1) 针对建材生产阶段碳排放占比最高的特征，建议在设计阶段即引入低碳建材优选机制，优先采用已通过绿色建材认证的产品，如高掺合料混凝土、再生钢筋及装配式构件[22]，并推动建立轨道交通工程专用绿色建材目录。同时，应鼓励项目单位与本地建材企业协同开展碳减排协同改进，推动绿色供应链的构建，从源头降低碳强度。

2) 在施工建造阶段，应系统推广低碳施工技术和工法。包括但不限于盾构法、预制装配式施工、模块化施工平台等方式，减少湿作业与高能耗工序。同时应优化施工组织与调度，减少设备待机与无效台班作业时间，提升机械利用率；建议在大型项目中引入碳排放动态监测与反馈机制，利用 BIM 与 IoT 系统联动实现全过程碳排放追踪与管理，从而指导施工碳行为的调整。

3) 在能源使用方面，应探索建设阶段电力替代柴油的技术路线，如推进电动施工设备、绿色临建电源系统等低碳能源替代应用。同时，优先采购来自清洁电力或低碳电力结构的施工用电，在条件成熟地区可结合峰谷电价政策和分布式光伏部署，提升绿色能源比例，从系统层面降低施工能源碳足迹。

然而，本研究仍存在一定局限性。首先，预算定额方法基于历史工程数据，其适用性依赖于预算定额的更新频率，难以精准反映未来新材料、新工艺的影响。此外，本研究主要基于南方城市的地铁项目，未对山地城市、寒冷地区、能源结构不同的城市进行对比分析，未来会通过跨区域对比研究，进一步验证本方法的适用性和推广价值。

参考文献

[1] 田佩宁, 毛保华, 童瑞咏, 等. 我国交通运输行业及不同运输方式的碳排放水平和强度分析[J]. 气候变化研究进展, 2023, 19(3): 347-356.
TIAN Peining, MAO Baohua, TONG Ruiyong, et al. Analysis of carbon emission level and intensity of China's transportation industry and different transportation modes[J]. Climate change research, 2023, 19(3): 347-356.

[2] ZHANG Yuejun, JIANG Lin, SHI Wei. Exploring the growth-adjusted energy-emission efficiency of transportation industry in China[J]. Energy economics, 2020, 90: 104873.

[3] 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.

[4] WESTIN J, K\RAGESON P. Can high speed rail offset its embedded emissions?[J]. Transportation research part D: transport and environment, 2012, 17(1): 1-7.

[5] 王冬冬, 毕延哲, 王春胜, 等. 地铁施工物化阶段 TBM 区间碳排放核算与减排[J]. 建筑节能(中英文), 2024, 52(2): 136-142.
WANG Dongdong, BI Yanzhe, WANG Chunsheng, et al. Accounting and analysis of carbon emission in metro TBM tunnel: a case study of Qingdao metro[J]. Building energy efficiency, 2024, 52(2): 136-142.

[6] 毛睿昌. 基于 LCA 的城市交通基础设施环境影响分析研究: 以深圳为例[D]. 深圳: 深圳大学, 2017.
MAO Ruichang. Study on environmental impact analysis of urban transportation infrastructure based on LCA: a case study of Shenzhen[D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2017.

[7] 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.
HE Xiaotong. Calculation of carbon emission and analysis of main influencing factors in the construction of open-cut stations in urban rail transit[D]. Beijing: Beijing Jiaotong

University, 2015.

[8] 陈坤阳, 段华波, 张怡, 等. 广州地铁盾构隧道建设期碳排放强度与减排潜力研究[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(12): 2064-2072.
CHEN Kunyang, DUAN Huabo, ZHANG Yi, et al. Research on carbon emission intensity and reduction potential in Guangzhou metro shield tunnel construction phase[J]. Tunnel construction, 2022, 42(12): 2064-2072.

[9] 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.
SU Yuehuan, ZHANG Yu, DUAN Huabo, et al. Research on environmental impact assessment and emission reduction potential of metro construction: a case study in Shenzhen, China[J]. Environmental engineering, 2022, 40(5): 184-192.

[10] 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(中英文), 2022, 42(增刊 2): 197-206.
GUO Fei, KONG Heng, SUN Kaiyue, et al. Calculation method of carbon emission in metro deep and large foundation pit construction[J]. Tunnel construction, 2022, 42(S2): 197-206.

[11] 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.
WANG Yousong, HUANG Xuhui, YAN Hui. Quantitative analysis of embodied carbon emission in metro shield tunnel[J]. Journal of civil engineering and management, 2019, 36(3): 12-18.

[12] DE BORTOLI A, CHRISTOFOROU Z. Consequential LCA for territorial and multimodal transportation policies: method and application to the free-floating e-scooter disruption in Paris[J]. Journal of cleaner production, 2020, 273: 122898.

[13] 周琪, 梁肖, 黄俊生, 等. 城市轨道交通碳排放效率与影响因素研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2023, 23(1): 30-38.
ZHOU Qi, LIANG Xiao, HUANG Junsheng, et al. Carbon emission efficiency and influencing factors analysis of urban rail transits[J]. Journal of transportation systems engineering and information technology, 2023, 23(1): 30-38.

[14] 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.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for building carbon emission calculation: GB/T 51366—2019[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019.

[15] IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories[R]. Switzerland: intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2006.

[16] 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.
GUO Yalin, SUN Wenhao, XU Hongwei, et al. Comparison between shield method and drill and blast method regarding carbon emission intensity in subway tunnel construction[J]. Modern tunnelling technology, 2023, 60(3): 14-23.

[17] 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.
GUO Chun, GUO Yalin, CHEN Zheng. Carbon emission accounting and research progress analysis of traffic tunnel engineering[J]. Modern tunnelling technology, 2023, 60(1): 1-10.

[19] DAI Leilei, KARAKAS O, CHENG Yanling, et al. A review on carbon materials production from plastic wastes[J]. Chemical engineering journal, 2023, 453: 139725.

[20] 李晓锋, 王荔, 栾承志, 等. 基于实际地铁线路的全生命周期碳排放研究[J]. 都市快轨交通, 2024, 37(1): 82-87.
LI Xiaofeng, WANG Li, LUAN Chengzhi, et al. Whole life-cycle carbon emissions based on actual metro lines[J]. Urban rapid rail transit, 2024, 37(1): 82-87.

[21] 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(中英文), 2022, 42(12): 2048-2063.
CHEN Zheng, GUO Yalin, GUO Chun. Greenhouse gas prediction using whale optimization algorithm-deep extreme learning machine in Chengdu metro construction stage[J]. Tunnel construction, 2022, 42(12): 2048-2063.

[22] 肖建庄, 关湘烁, 王佃超, 等. 再生混凝土碳排放因子研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2023, 40(4): 1-11.
XIAO Jianzhuang, GUAN Xiangshuo, WANG Dianchao, et al. Researches on carbon emission factors of recycled concrete[J]. Journal of architecture and civil engineering, 2023, 40(4): 1-11.

（编辑：傅依萱）