



# 轨道交通装备碳足迹核算方法 及降碳路径研究

何慧雅, 张开来, 张东旭

(中车株洲电力机车研究所有限公司, 湖南 株洲 412001)

**摘要:** 轨道交通装备制造是轨道交通行业碳排放的关键环节, 深入探索其降碳路径对推动全行业绿色低碳转型具有重要意义。文章基于生命周期评估(LCA)框架, 构建了轨道交通装备产品碳足迹的评价方法体系, 依托“时代碳行”生命周期评价平台, 对10类典型轨道交通装备产品开展碳足迹量化分析, 系统梳理其碳排放结构特征并提出降碳路径。研究表明, 在“从摇篮到大门”及分销阶段, 原材料获取阶段与产品生产阶段是轨道交通装备碳排放的主要来源。在此基础上, 文章提出了层次化的降碳路径: 应以供应链协同为核心, 优先推动原材料端的绿色采购与生态设计; 以生产环节为重点, 实施清洁生产与能源结构优化; 并辅助以物流运输的结构性改善。该路径体系为轨道交通装备制造行业提供了系统性、可操作的节能降碳行动方案。

**关键词:** 轨道交通装备; 生命周期评价; 产品碳足迹; 降碳路径

**中图分类号:** U26

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-128X(2025)06-0133-06

## 0 引言

在全球气候变化与可持续发展议题日益紧迫的背景下, 推进碳减排已成为国际共识与各国政策的核心共识。我国于2020年正式提出碳达峰碳中和目标, 并在后续政策体系中持续强化重点行业绿色低碳转型的相关要求。生态环境部等15部门于2024年6月印发《关于建立碳足迹管理体系的实施方案》, 以构建碳足迹管理体系为抓手, 推动绿色低碳转型与新质生产力发展, 支撑“双碳”目标实现。国际能源署发布的《2023年二氧化碳排放量报告》显示, 2023年我国的温室气体排放量约为126亿吨二氧化碳当量, 较2022年增长近4个百分点<sup>[1]</sup>。其中, 交通运输行业作为碳排放的重要来源, 其排放量占总排放量的10%。因此, 轨道交通装备制造环节的碳排放控制对全行业减排具有重要意义。

目前, 国内外学者围绕碳足迹核算开展了广泛研

究, 生命周期评价(life cycle assessment, LCA)成为主流方法框架, 并已在建筑、汽车、电子、机械等行业得到应用<sup>[2]</sup>。在轨道交通领域, 现有研究多集中于运营阶段的能耗与排放分析<sup>[3]</sup>。然而, 针对轨道交通装备制造全品类、全链条的系统性碳足迹研究仍较为缺乏, 尤其是在“从摇篮到大门”及产品分销环节的碳排放结构分析、关键排放源识别、降碳路径整合等方面存在明显空白。此外, 既有研究在核心术语界定、系统边界设定、基础数据来源与核算标准选取等方面存在不一致, 导致结果可比性与实践指导性大幅受限。

为此, 本文依托LCA碳足迹核算统一框架, 基于“时代碳行”生命周期评价平台对10类典型轨道交通装备产品开展碳足迹核算分析, 系统揭示其碳排放结构特征, 并针对性提出覆盖原材料获取、生产流程、能源结构与运输方式的降碳路径, 旨在助力行业节能降碳与绿色转型, 同时为政策制定与产业链协同减排提供数据支撑和理论依据。

**通信作者:** 张开来, 男, 硕士, 主要从事“双碳”技术方面的研究; E-mail: zhangkl1@csrzc.com

**引用格式:** 何慧雅, 张开来, 张东旭. 轨道交通装备碳足迹核算方法及降碳路径研究[J]. 机车电传动, 2025(6): 133-138.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.06.201.

**Citation:** HE Huiya, ZHANG Kailai, ZHANG Dongxu. Research on carbon footprint accounting methods and carbon reduction pathways for rail transit equipment[J]. Electric drive for locomotives, 2025(6): 133-138.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.06.201.

## 1 产品碳足迹核算标准概述

### 1.1 产品碳足迹定义

产品碳足迹 (carbon footprint of products, CFP) 是指产品在生命周期各阶段七大类温室气体的综合排放量, 具体包括二氧化碳 ( $\text{CO}_2$ )、甲烷 ( $\text{CH}_4$ )、氧化亚氮 ( $\text{N}_2\text{O}$ )、氢氟碳化物 (HFCs)、全氟化碳 (PFCs)、六氟化硫 ( $\text{SF}_6$ ) 和三氟化氮 ( $\text{NF}_3$ ), 结果以二氧化碳排放当量 ( $\text{CO}_2\text{eq}$ ) 表示<sup>[4]</sup>。产品碳足迹的核算范围, 主要可分为“从摇篮到坟墓”与“从摇篮到大门”。

目前, 许多国际大公司已要求其供应链各环节进行产品碳足迹核算, 且部分法规已明确规定必须计算产品碳足迹, 并要求其控制在一定阈值范围内。因此, 掌握轨道交通装备产品碳足迹核算方法, 开展碳足迹核算并提出减碳路径, 对于轨道交通装备企业而言至关重要。

### 1.2 国际标准

目前, 轨道交通装备产品碳足迹核算主要依据以下国际标准: ISO 14040 系列, ISO 14067:2018《温室气体—产品碳足迹—量化要求及指南》<sup>[5]</sup>。

#### 1.2.1 ISO 14040 系列

ISO 14040 系列包括 ISO 14040:2006《环境管理—生命周期评估—原则与框架》<sup>[6]</sup>及 ISO 14044:2006《环境管理—生命周期评估—要求与指南》<sup>[7]</sup>, 共同构成了生命周期评价 (LCA) 的通用方法论基础。它们规定了 LCA 研究的 4 个基本阶段: 目的与范围确定、清单分析、影响评价、结果解释, 确保了整个评价过程在结构上的严谨性与透明度。在本研究中, ISO 14040 系列提供了顶层方法论指导, 是后续所有碳足迹核算工作必须遵循的根本原则。

#### 1.2.2 ISO 14067:2018《温室气体—产品碳足迹—量化要求及指南》

2018 年 8 月, 国际标准化组织 (ISO) 发布《ISO 14067:2018 温室气体—产品碳足迹—量化要求及指南》。该标准是在 LCA 框架下, 专门针对产品碳足迹这一特定环境影响的专项量化与报告标准, 明确量化了产品从生产到最终处置过程中的温室气体排放量, 确保计算方法的标准化、透明性和一致性。

### 1.3 国家标准

#### 1.3.1 GB/T 24067—2024《温室气体 产品碳足迹 量化要求和指南》<sup>[8]</sup>

我国于 2024 年发布了该推荐性国家标准, 在技术上其与 ISO 14067 等效, 丰富了内容并增强了可操作性, 增加了制定具体产品标准所需的参考框架和数据地理边界建议。本研究将该标准与 ISO 14067 标准作为

碳足迹量化的核心执行依据, 以确保计算过程的标准化和结果的权威性。

### 1.4 轨道交通行业 PCR 准则

#### 1.4.1 PCR 2009 Rolling Stock and Parts Thereof<sup>[9]</sup>

PCR 2009 Rolling Stock and Parts Thereof 是针对轨道交通行业的产品类别规则 (product category rules, 简称 PCR), 用于规范和指导轨道车辆及其零部件的生命周期评估 (LCA) 和碳足迹核算。该 PCR 由国际生命周期协会 (ILCD) 等组织发布, 为轨道交通行业提供了一种标准化的环境影响评估方法, 特别是在碳排放的计算、数据采集、报告和认证等方面。

本研究将依据此 PCR 准则, 为明确系统边界、规定数据取舍准则、统一功能单位等具体操作提供了行业共识的规范性约束, 是连接通用标准与轨道交通装备产品具体实践的关键桥梁。

综上所述, 本研究的核算方法设计遵循“通用框架—核心依据—行业准则”的层级化标准逻辑。首先以 ISO 14040 系列为根本方法论; 其次严格依照 ISO 14067、GB/T 24067 进行碳足迹的专项量化与报告; 最后, 优先遵从 PCR 2009 Rolling Stock and Parts Thereof 的行业细则, 确保了研究方法的完整性、合规性与行业针对性, 为轨道交通装备碳足迹核算方法的研究奠定了理论基础。

## 2 轨道交通装备碳足迹核算方法研究

本章基于前述标准框架, 构建针对轨道交通装备产品碳足迹核算方法。该方法旨在系统核算轨道交通装备产品碳足迹, 识别关键减排环节。研究通过明确功能单位与系统边界、制定数据策略与取舍规则、选定核算平台等措施, 形成完整的技术路径, 确保过程规范、结果可比。

### 2.1 研究目的与系统边界

为精准识别轨道交通装备各阶段的核心排放源, 系统边界限定为“从摇篮到大门”, 并将分销阶段纳入核算范围。该范围涵盖原辅材料获取、运输、生产制造及分销阶段, 聚焦企业可控的产业链环节。使用阶段与生命末期阶段因受运行工况、退役政策等外部变量影响显著, 数据不确定性高, 故予以排除。

### 2.2 功能单位与核算范围

为科学量化轨道交通装备的碳排放并确保结果具备可比性, 需明确统一的功能单位。本研究的功能单位定义为“轨道交通车辆或其部件的一个完整生产单元”。该定义覆盖两大类产品: 一是完整的轨道交通车辆, 包括高铁、地铁及轻轨等整车产品; 二是其核心

部件, 如转向架、变流器等, 如“生产一台FXD1B型电力机车”。围绕此单位, 核算范围按生命周期模块分解为:

- ① 原、辅材料的生产与获取;
- ② 原、辅材料至工厂的运输;
- ③ 轨道交通装备的生产制造;
- ④ 成品分销至客户。

模块化分解有助于结构化解析各环节的碳排放贡献。

### 2.3 数据获取与质量评估策略

数据质量是核算可信度的基础。采用分级数据采集策略, 优先采用关键原材料及主要生产工序的一手清单数据, 如钢材、铝材; 其他优先采用Ecoinvent数据库等国际认可数据库中的次级数据。所有数据均需核算平台中进行数据质量评估, 从代表性、完整性、可靠性等方面进行系统性判断与记录。

### 2.4 核算平台与取舍规则

选用“时代碳行生命周期评价线上平台”作为核算工具, 该平台由中车株洲电力机车研究所有限公司自主研发, 内置Ecoinvent数据库, 且计算逻辑符合国内外标准, 能保证计算过程的规范性与可复现性。

为提升研究效率并聚焦主要排放源, 依据标准制定以下取舍规则:

① 质量取舍: 对于质量占比小于1%的物料, 其关联排放可忽略, 但所有忽略项的总碳排放贡献不得超过产品碳足迹的5%;

② 过程取舍: 生产线空调制冷剂逸散、设备故障修复、灭火器使用等在生产过程中“偶然”“微量”“难以监测”的排放予以排除。

该规则在简化模型复杂度的同时, 确保了对主要碳足迹的覆盖。

## 3 轨道交通装备生命周期影响评估研究

在量化轨道交通装备“从摇篮到大门”及分销阶段的温室气体排放时, 本文基于轨道交通装备各阶段的实景数据, 结合全球增温潜势的碳足迹因子, 计算排放的二氧化碳当量( $\text{CO}_2\text{e}$ ), 以评估其对气候变化的潜在影响。这一方法涵盖了从原材料获取、生产制造、运输到分销的各个阶段, 系统量化产品生命周期内的碳足迹。

### 3.1 影响评价

轨道交通装备“从摇篮到大门”及分销阶段的碳足迹为

$$CF_{\text{轨道交通装备产品}} = E_{\text{原辅料}} + E_{\text{原辅料运输}} + E_{\text{生产}} + E_{\text{分销}} \quad (1)$$

式中:  $E_{\text{原辅料}}$  表示轨道交通装备产品原辅料获取过程的温室气体排放总量;  $E_{\text{原辅料运输}}$  表示原辅料运输过程的温室气体排放总量;  $E_{\text{生产}}$  表示轨道交通装备产品部件生产过程的温室气体排放总量;  $E_{\text{分销}}$  表示轨道交通装备产品分销过程的温室气体排放总量; 以上物理量单位均为吨二氧化碳当量( $\text{tCO}_2\text{e}$ )。

#### 3.1.1 原辅料获取阶段

轨道交通装备产品原辅料获取过程的温室气体排放总量为

$$E_{\text{原辅料}} = \sum_{i=1}^m (Q_i \times C_i) \quad (2)$$

式中:  $Q_i$  表示第*i*类原辅料的消耗量, t;  $C_i$  表示第*i*类原辅料的碳足迹因子, 单位为吨二氧化碳当量/吨( $\text{tCO}_2\text{e/t}$ )。

#### 3.1.2 原辅料运输阶段

轨道交通装备产品原辅料运输过程的温室气体排放总量为

$$E_{\text{原辅料运输}} = \sum_{j=1}^m (Q_j \times D_j \times C_j) \quad (3)$$

式中:  $Q_j$  表示第*j*种运输方式运输的原辅材料的量, t;  $D_j$  表示第*j*种运输方式的运输距离, km;  $C_j$  表示第*j*种运输方式的温室气体碳足迹因子, 单位为吨二氧化碳当量/(吨·千米) [ $\text{tCO}_2\text{e}/(\text{t} \cdot \text{km})$ ]。

#### 3.1.3 产品生产制造阶段

轨道交通装备产品生产制造过程的温室气体排放总量为

$$E_{\text{生产}} = E_{\text{能耗}} + E_{\text{废弃}} + E_{\text{直接排放}} \quad (4)$$

式中:  $E_{\text{能耗}}$  表示轨道交通装备产品生产过程中能源消耗产生的温室气体排放总量;  $E_{\text{废弃}}$  表示产品生产过程中废弃材料处置、回收产生的温室气体排放量;  $E_{\text{直接排放}}$  表示产品生产过程中直接产生的温室气体排放总量; 以上物理量单位均为吨二氧化碳当量( $\text{tCO}_2\text{e}$ )。

#### 3.1.4 产品分销阶段

轨道交通装备产品分销过程的温室气体排放总量为

$$E_{\text{分销}} = \sum_{k=1}^l (Q_k \times D_k \times C_k) \quad (5)$$

式中:  $Q_k$  表示产品分销阶段第*k*种运输方式运输的产品量, t;  $D_k$  表示产品分销阶段第*k*种运输方式的运输距离, km;  $C_k$  表示产品分销阶段第*k*种运输方式的温室气体碳足迹因子, 单位为吨二氧化碳当量/(吨·千米) [ $\text{tCO}_2\text{e}/(\text{t} \cdot \text{km})$ ]。

### 3.2 结果分析

基于调研的轨道交通实景数据, 选取Ecoinvent数据库中具备代表性的碳足迹因子, 利用时代碳行生命周期评价线上平台对各阶段建模研究, 本文通过对动车组、货车、电力机车、内燃机车及城轨10款产品的碳足迹核算结果进行分析研究, 核算结果如表1所示。

分析表1可得出以下结论:

表1 轨道交通整车产品“从摇篮到大门”及分销阶段碳足迹结果分析

Table 1 Analysis of carbon footprint results of complete rail transit vehicles during cradle-to-gate and distribution stages

| 产品类型 | 具体型号         | 温室气体排放占比/% |       |       |      |
|------|--------------|------------|-------|-------|------|
|      |              | 原辅料获取      | 原辅料运输 | 生产制造  | 产品分销 |
| 电力机车 | FXD1B        | 89.70      | 2.48  | 7.46  | 0.36 |
|      | FXD2B        | 82.56      | 1.78  | 14.88 | 0.78 |
| 内燃机车 | FXN3C        | 70.66      | 16.23 | 11.62 | 1.49 |
|      | FXN5C        | 59.30      | 0.77  | 39.01 | 0.92 |
| 动车组  | CR400AF-Z    | 84.32      | 1.42  | 13.98 | 0.28 |
|      | CR400BF-Z    | 81.49      | 1.48  | 16.78 | 0.25 |
| 货车   | C70E型通用敞车    | 40.66      | 1.14  | 58.20 | 0.00 |
|      | BH1型铁路隔热保温车  | 94.83      | 1.25  | 3.91  | 0.01 |
| 城轨   | 80 km/h速度B型车 | 92.43      | 0.90  | 6.30  | 0.37 |
|      | 波尔图地铁列车      | 70.07      | 3.67  | 23.76 | 2.50 |

①原辅料获取阶段是绝对主导环节。除C70E型通用敞车外，其他车型排放占比最高的阶段均为原辅料获取阶段，占比普遍高于70%。表明轨道交通装备的碳足迹是典型的“材料主导型”，原辅料获取阶段是未来降碳的关键环节。

②生产制造阶段占比波动最大，是内部减排的关键阶段。生产制造阶段的占比在不同车型间差异显著，从3.91%到58.20%不等，这一现象表明该阶段是整车碳足迹中可变性最大、最不稳定的环节。

③原辅料运输与产品分销阶段占比极小，但FXN3C内燃机车是例外。FXN3C内燃机车运输阶段占比较高，主要原因是其原辅料平均运输距离大于其他产品。在原材料采购阶段需优化物流网络，减少长途运输。就近采购有利于降低产品碳足迹。

4 轨道交通装备降碳路径规划

基于10款轨道交通装备产品碳足迹核算结果，提出一套系统、可操作的降碳路径。研究发现，轨道交通装备的碳足迹呈现典型的“材料主导型”特征，原辅材料获取阶段是绝对主导环节，运输环节整体占比较小，而生产制造阶段的碳排放占比在不同产品间差异巨大，成为企业内部减排的关键变量。基于此，降碳路径的制定遵循“抓主因、分阶段、明责任”的总体思路：即优先部署针对高占比环节的供应链协同减排战略，系统规划企业内部生产过程的深度脱碳，并针对性优化物流结构。路径设计将从减排潜力、实施主体与时间跨度3个维度展开，确保战略的前瞻性与措施的可落地性。

4.1 总体思路

依据碳足迹量化结果确定行动优先级。根据表1所

示的碳排放结构，明确3个关键减排领域及其策略定位：

①原辅料获取阶段是决定性的减排主战场。核算数据显示，该阶段碳排放贡献率在多数产品中超过70%，构成了产品生命周期碳足迹的绝对主体，其减排责任必须向上游供应链延伸。因此，核心策略在于实施“绿色供应链管理”与“生态设计”，即通过链主企业的引领与约束，驱动全链条的低碳材料替代与生产工艺革新，从源头上削减产品的碳排放总量。

②生产制造阶段是差异化的关键控制点。不同产品在该阶段的碳排放占比存在数量级差异，例如C70E型通用敞车碳排放占比高达58.20%，而BH1保温车仅为3.91%。表明企业内部在能源利用效率、生产流程与能源结构上存在显著差距。对于此阶段的高排放产品降碳方法，其核心在于推行“清洁生产”与“能源结构转型”，通过技术创新与管理优化实现深度脱碳。

③运输环节是需要结构性优化的潜在领域。尽管该阶段碳排放总量平均占比较低，但在特殊运输环境下将成为突出的排放源，如航空运输。核心策略是通过“物流网络与运输方式优化”，系统性地规划更低碳的供应链物流方案，以实现可观的边际减排效益。

4.2 核心路径:深化绿色供应链协同与材料创新

为攻克占比超70%的原材料获取环节的排放，轨道交通装备及主机生产企业必须发挥链主引领作用，推动跨企业深度协同。该路径的减排潜力最大，是决定整体碳减排的关键。

①近期目标：应优先建立供应链碳核算与绿色采购体系。具体措施包括：将产品碳足迹核算要求延伸至一级供应商，重点针对钢铁、铝材、铜及IGBT模块等高影响原材料，强制要求其依据统一标准核算并披露碳足迹数据；同时，在采购评价标准中纳入碳足迹核心指标，实施供应商碳绩效分级管理，优先采购采用低碳工艺生产的金属材料，以及拥有环境产品声明（EPD）的核心部件。并行启动企业级低碳材料数据库建设，将核算积累的数据转化为设计选型的量化依据。

②中长期目标：战略重心转向前沿材料创新与全生命周期设计。联合材料供应商与科研机构，共建研发平台，推动高强度轻质合金、生物基复合材料等低碳新材料的应用验证与规模化替代；同时，将碳足迹作为刚性约束嵌入产品研发流程，推行生态设计，通过优化电气布局减少线缆用量、推广模块化与可维修设计，从源头降低产品的碳排放量。

4.3 重点路径:推进生产制造环节的能效革命与能源替代

生产制造阶段的减排是企业履行环境责任最直观体现，尤其对C70E型通用敞车、FXN5C内燃机车等生产阶段占比高的产品线具有决定性意义。

① 近期目标: 应聚焦于能效提升与能源结构优化。具体而言, 需针对焊接、涂装、热处理等高耗能工序开展专项能源审计, 对排放高占比产品线实施重点技术改造; 同时, 加快推进生产用能的清洁化替代, 建设厂房屋顶分布式光伏、采购绿色电力, 大幅提高生产用能电气化率; 淘汰高耗能落后设备, 提升整体生产能效。此外, 推广精益生产与节能技术应用, 如回收加工余热等。

② 中长期目标: 实现生产过程的数字化与智能化。通过应用物联网与数字孪生技术构建智慧能源管理系统, 实现对关键耗能设备的实时感知、预测性维护与动态优化调度, 从经验驱动转向数据驱动的精准节能。

#### 4.4 辅助路径: 优化物流网络与运输结构

尽管运输阶段对碳足迹排放贡献较低, 但改进措施较明确, 收效快。

① 近期目标: 优化高碳运输的采购策略与方式。对采用航空运输的极高碳足迹物料, 如IGBT模块, 未来可结合铁路、海运和内河航运等多种运输方式优化运输组合, 以降低整体碳足迹。

② 中长期目标: 积极推行运输工具的清洁化。推广低排放/零排放运输工具, 如电动汽车、氢燃料电池车辆, 以及采用生物燃料的燃油运输车辆, 进一步减少运输阶段的碳排放。

## 5 结束语

研究围绕轨道交通装备产品的碳足迹核算与降碳路径, 得出以下主要结论:

① 构建了符合国内外标准且贴合行业特点的轨道交通装备产品碳足迹核算方法框架。该框架以生命周期评价为基础, 整合了ISO 14067、GB/T 24067等通用量化标准与轨道交通行业特定产品类别规则, 明确了“从摇篮到大门”及分销阶段的系统边界, 为行业提供了一套标准化、可复用的核算方法。

② 完成了涵盖五大类共10款典型产品的碳足迹核算实证研究。结果表明, 轨道交通装备产品的碳排放结构呈现显著的“材料主导型”特征, 原辅料获取阶段的平均贡献率超过70%。生产制造阶段的碳排放占比在不同产品间差异显著, 揭示了企业内部能效与能源结构的优化潜力。

③ 依据量化核算结果, 提出了层次分明、责任主体明确的降碳路径体系。该路径以供应链协同降碳作为首要战略, 将企业内部的清洁生产与能源转型作为关键支撑, 并将物流结构优化作为辅助补充。该路径体系从减排潜力、实施主体与时间跨度3个维度进行了

系统设计, 为企业提供了从战略规划到具体措施的可操作性指引。

本研究的创新性在于首次构建了适用于中国轨道交通装备碳足迹核算方法体系, 完成了中国轨道交通装备多品类产品的系统性碳足迹核算与对比分析, 揭示了“材料主导”的共性规律与差异化的内部减排重点。研究成果可直接服务于企业的碳管理实践, 也为行业的碳足迹数据库建设、产品生态设计及绿色供应链标准制定提供数据基础与方法参考。

#### 参考文献:

- [1] International Energy Agency. CO<sub>2</sub> emissions in 2023[R]. Paris: International Energy Agency, 2024.
- [2] 周荣田, 司文静, 刘光, 等. 重型机床零部件生命周期评价研究[J]. 中国设备工程, 2026(2): 66-68.  
ZHOU Rongtian, SI Wenjing, LIU Guang, et al. Research on the life cycle assessment of heavy machine tool components[J]. China plant engineering, 2026(2): 66-68.
- [3] 黄亚唯, 陈霞, 闫雅斌, 等. 地铁全生命周期的碳排放强度研究: 以广州地铁21号线为例[J]. 铁道运输与经济, 2025, 47(6): 24-36.  
HUANG Yawei, CHEN Xia, YAN Yabin, et al. Full life-cycle carbon emission intensity of subway: a case study of Guangzhou metro line 21[J]. Railway transport and economy, 2025, 47(6): 24-36.
- [4] 计军平, 马晓明. 碳足迹的概念和核算方法研究进展[J]. 生态经济, 2011(4): 76-80.  
JI Junping, MA Xiaoming. Review of carbon footprint: definitions and accounting methods[J]. Ecological economy, 2011(4): 76-80.
- [5] Greenhouse gases - product carbon footprint - requirements and guidelines for quantification: ISO 14067: 2018[S/OL]. <https://www.iso.org/standard/71206.html>.
- [6] Environmental management - life cycle assessment - Principles and framework: ISO 14040: 2006[S/OL]. <https://www.iso.org/standard/37456.html>.
- [7] Environmental management - life cycle assessment-Requirements and guidelines: ISO 14044: 2006[S/OL]. <https://www.iso.org/standard/38498.html>.
- [8] 全国碳排放管理标准化技术委员会(SAC/TC 548). 温室气体 产品碳足迹 量化要求和指南: GB/T 24067—2024[S]. 北京: 中国标准出版社, 2024.  
National technical committee for standardization of carbon emission management(SAC/TC 548). Greenhouse gases - carbon footprint of products - requirements and guidelines for quantification: GB/T 24067—2024[S]. Beijing: Standards Press of China, 2024.
- [9] Rolling stock and parts thereof: PCR 2009: 05[S/OL]. <https://www.environdec.com/pcr-library/pcr2009-05>.

Research on carbon footprint accounting methods and carbon reduction pathways for rail transit equipment

HE Huiya, ZHANG Kailai, ZHANG Dongxu

(CRRC Zhuzhou Institute Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

**Abstract:** Rail transit equipment manufacturing is a major contributor to carbon emissions within the rail industry, so exploring carbon reduction pathways is of important significance for fostering green and low-carbon transformation across the sector. In this study, a product carbon footprint evaluation methodology was developed for rail transit equipment, based on a life-cycle assessment (LCA) framework. Using the "Carbon Keeper" LCA platform, ten typical types of rail transit equipment were quantitatively assessed for their carbon footprints. From an systematic analysis of structural characteristics in their carbon emissions, corresponding carbon reduction pathways were established. Study results show that raw material acquisition and product manufacturing are the primary sources of carbon emissions during the cradle-to-gate and distribution stages. On this basis, this paper proposes a hierarchical carbon reduction pathway framework: (1) prioritize green procurement and eco-design of raw materials, centering on supply chain collaboration; (2) focus on production improvements through clean processes and energy mix optimization; (3) implement structural improvements in logistics and transportation as supplementary measures. This framework provides a systematic and feasible action plan for energy conservation and carbon reduction in rail transit equipment manufacturing.

**Keywords:** rail transit equipment; life-cycle assessment; product carbon footprint; carbon reduction pathway