

交通运输碳排放核算方法综述与 煤炭行业案例研究

杨肖飞¹, 梁杰¹, 刘天文¹, 兰锦辉², 刘鹏³, 郑越⁴, 王兹尧⁵, 汤效平⁵, 孙新宇⁶

(1. 华电煤业集团有限公司, 北京 100035; 2. 华电煤业集团数智技术有限公司, 北京 102400;

3. 新疆昌吉英格玛煤电投资有限责任公司, 昌吉 831800; 4. 华北电力大学, 北京 102206;

5. 华电电力科学研究院有限公司, 北京 100089; 6. 西安交通大学, 西安 710049)

【摘要】本文系统综述了国内外交通运输碳排放核算方法, 深入分析了不同运输方式碳排放核算的特点, 并对未来研究方向进行了探讨。文章首先梳理了国际和国内碳排放核算标准体系, 包括 IPCC 指南、物流排放核算与汇报框架等, 并详细介绍了中国在企业层面的碳排放核算方法。针对公路、铁路、水路和航空四种主要运输方式, 本文总结了各自的碳排放核算方法及其特点, 并以煤炭行业为例, 详细计算了交通运输碳排放总量。计算结果表明, 运输 78 万吨煤炭, 共产生约 1700 吨二氧化碳。最后, 文章强调未来研究应着重更新排放因子、研究复杂运输场景以及优化物流管理, 以准确评估交通碳排放并推动行业绿色发展。

【关键词】碳排放; 交通运输; 煤炭行业; 案例研究

中图分类号: X511; X822.3 文献标识码: A 文章编号: 1673-288X(2025)03-0041-06 DOI: 10.19758/j.cnki.issn1673-288x.202503041

1 引言

全球能源需求高度依赖化石燃料, 而燃料燃烧产生的 CO₂ 是加剧全球变暖的主要原因之一。交通运输行业作为主要碳排放源之一, 占据全球温室气体排放的 24%, 且排放量预计将持续上升。随着中国经济的高速发展, 交通运输部门的碳排放量预计将保持较快的增长趋势, 这将给我国带来更大的碳减排压力。

作为国民经济的支柱和第二大碳排放源, 交通运输成为国家节能减排战略中的重中之重。实现“双碳”目标的前提在于建立和完善碳排放核算体系。2022 年 4 月, 国家发展改革委、国家统计局和生态环境部联合发布《关于加快建立统一规范的碳排放统计核算体系实施方案》。该方案标志着我国碳排放核算工作进入了新的阶段。然而, 交通运输领域的碳排放统计数据仍然相对薄弱。目前, 国内尚未建立

起一套全面支持交通碳排放核算的统计体系。交通运输行业碳排放核算复杂, 不同排放源和运输方式的核算方法各异, 增加了核算的复杂性。因此, 要准确核算交通碳排放量, 需不断完善核算方法, 并加强排放源监测与管理。

本文旨在通过综述国内外交通运输碳排放核算方法, 为交通运输碳排放核算理论与实践的发展提供支撑。首先, 全面梳理国内外交通领域碳排放核算体系的发展现状。其次, 探讨不同运输方式的碳排放核算方法及其特性。最后, 结合当前交通领域碳排放核算相关问题, 提出未来研究方向, 为国内外碳排放相关研究和应用提供借鉴。

2 国内外交通领域碳排放核算体系

2.1 国际碳核算标准体系蓝本

上世纪 90 年代起, 国际机构致力于制定不同层级的碳排放核算标准, 以应对全球气候问题。

作者简介: 杨肖飞 (1987-), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为煤炭工程, E-mail: chd006@126.com。

通讯作者: 王兹尧 (1978-), 男, 硕士, 正高级工程师, 研究方向为化学工程, E-mail: ziyao-wang@chder.com。

标准的制定涵盖核算边界的界定、排放活动的分类、数据来源的选择、参数的确定以及报告规范等内容,以确保碳排放核算的准确性和可靠性。

2.1.1 《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》

《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》(以下简称“《2006 IPCC 指南》”)涵盖了与燃料燃烧相关的各种运输活动,包括民用航空、道路运输、铁路、水运和其他运输方式^[1]。为确保交通碳排放核算的准确性,《2006 IPCC 指南》提供了多种核算方法,并针对不同运输活动推荐了适用的核算方法。各国可以根据自身数据的可得性和核算需求,灵活选择合适的核算方法。指南详细阐述了三种层级(Tiers)的方法:

方法 1: 基于燃料数据和缺省排放因子的核算;

方法 2: 采用特定国家/地区排放因子的核算;

方法 3: 结合特定国家/地区排放因子和详细的活动测量数据的核算。

方法 1 通过估算的销售燃料量与缺省 CO₂ 排放因子相乘来计算 CO₂ 排放。而方法 2 与方法 1 类似,但采用了道路运输中销售燃料的特定国家含碳量进行计算。这两种方法的计算公式如下所示:

$$\text{排放量} = \sum_a (\text{燃料}_a \cdot EF_a)$$

式中: 排放量为 CO₂ 的排放(kg); 燃料_a 为销售燃料(TJ); EF_a 为排放因子(kg/TJ), 等同于燃料含碳量乘以 44/12; a 为燃料类型(如汽油、柴油、天然气等)。

对于道路运输碳排放核算,方法 3 的应用效果往往不如方法 2。尽管如此,方法 3 仍然为特定情境下的碳排放核算提供了参考。以非道路车辆排放估算为例,方法 3 的计算公式如下:

$$\text{排放量} = \sum_{ij} (N_{ij} \cdot H_{ij} \cdot P_{ij} \cdot LF_{ij} \cdot EF_{ij})$$

式中: 排放量为排放量(kg); N_{ij} 为源总数; H_{ij} 为年车辆 i 使用小时(h); P_{ij} 为车辆 i 平均额定功率(kW); LF_{ij} 为车辆 i 的一般负荷因子(0 到 1 间比例); EF_{ij} 为车辆燃料 j 使用的平均排

放因子(kg/kWh); i 为非道路车辆类型; j 为燃料类型。

2.1.2 物流排放核算与汇报框架

2019 年,国际智慧货运中心(Smart Freight Centre, SFC)发布全球物流业排放委员会(Global Logistics Emissions Council, GLEC)框架。GLEC 框架是首个全球公认的计算和报告多模式物流供应链温室气体排放的方法框架,该框架可用于计算公路、铁路、内河水运、航空、海运和物流中心的温室气体排放。

在 GLEC 框架 v3.0 版本中,明确了三种关键的排放类型: 能源供应排放(WTT(well-to-tank) 排放)、运输操作活动排放(TTW(tank-to-wake) 排放)以及运输链总排放(WTW(well-to-wake) 排放)。WTT 排放关注的是从运输燃料的生产到燃料供应这一整个过程中所产生的能源消耗和温室气体排放。而 TTW 排放,不仅涵盖运输操作活动排放,还包括枢纽操作活动排放。WTW 排放则是 WTT 排放和 TTW 排放的总和,二者共同构成了运输链的总排放。

$$WTW = TTW_{TA} + TTW_{HOA} + WTT_{TA} + WTT_{HOA}$$

式中: WTW 为运输链总排放; TTW_{TA} 为运输链中所有运输活动的温室气体排放; TTW_{HOA} 为运输链中所有枢纽运行活动的温室气体排放; WTT_{TA} 为运输链中为运输活动供应能源产生的温室气体排放; WTT_{HOA} 为运输链中为枢纽运行活动供应能源产生的温室气体排放。

2.1.3 ISO 温室气体排放核算标准

国际标准化组织(International Organization for Standardization, ISO)颁布的 ISO 14060 标准体系,已成为全球企业和产品层面温室气体核算和报告的国际标准之一。2023 年 3 月,物流温室气体排放核算与报告标准(ISO 14083 标准)正式发布^[2]。相较于现有的欧洲标准 EN 16258, ISO 14083 标准不仅覆盖范围更广,并且更具有国际通用性。ISO 14083 标准在原则和方法上遵循并符合 GLEC 框架,进一步凸显了 GLEC 框架作为多模式物流供应链排放核算和

报告的行业指南的重要地位。

ISO 14083 标准涵盖了所有运输方式,包括公路、铁路、水路(含海运)和民航,同时也适用于各类运输工具,如船舶、车辆或管道等。此外,该标准还涉及了转运中心的运营,并充分考虑了运输过程中客运和货运的空驶情况。因此,ISO14083 标准适用于整个运输链的所有阶段,为物流行业提供了全面、统一的温室气体排放核算框架。

2.2 国内碳核算标准体系建设

为更精准地评估碳排放情况,建立健全中国本土碳核算标准体系成为一项重要任务。2023年4月,国家发展改革委等多部门联合发布《碳达峰碳中和标准体系建设指南》,旨在构建一个全面且完善的标准体系,以助力实现碳达峰碳中和目标。在交通运输领域,该指南强调加快制修订企业碳排放核算和报告标准以及数据质量相关标准规范的重要性。

2.2.1 企业温室气体排放核算方法与报告指南

随着碳交易市场的发展,企业层面的碳排放量化方法显得愈发重要。国家发展和改革委员会在2013年至2015年间先后分三批编制公布了针对24个行业的企业温室气体排放核算方法与报告指南,为开展企业层面温室气体核算提供技术支持^[3]。其中,与交通运输密切相关的指南是陆上交通运输指南。

2015年7月,国家发展改革委发布《中国陆上交通运输企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)》^[4],旨在指导公路旅客运输、道路货物运输、城市客运等多个领域的企业进行温室气体排放的核算与报告。陆上交通运输企业的温室气体排放总量等于企业运营边界内所有化石燃料燃烧排放量、尾气净化过程排放量以及企业净购入电力和热力隐含的温室气体排放量之和。

2.2.2 《物流企业温室气体排放核算与报告要求》

物流行业作为碳排放的重要源头,其温室

气体排放的核算与报告显得尤为重要。据测算,货物运输及配送活动、装卸搬运及仓储活动、辅助物流活动是物流行业碳排放的三大来源,其中货物运输及配送碳排放占比高达85%左右。为了规范并降低物流行业的碳排放,我国已推出了一系列相关标准与核算方法。

为了进一步提高物流行业的绿色发展水平,2023年8月,《物流企业温室气体排放核算与报告要求》(WB/T 1135—2023)^[5]开始实施。该标准详细规定了物流企业温室气体排放的核算与报告要求,详细列举了温室气体排放的核算种类,包括化石燃料燃烧排放、尾气净化使用尿素的排放、净购入电力及热力的排放、制冷剂泄漏的排放,以及包装材料使用的排放。其中,运输及配送活动产生的温室气体主要来源于前四种。核算主体的运输及配送活动涉及的主要排放源为各类运输和配送车辆,以及火车、轮船、航空飞机、管道等。

2.2.3 《大气污染物与温室气体融合排放清单编制技术指南(试行)》

为协同推进降碳与减污工作,生态环境部办公厅于2024年1月发布了《大气污染物与温室气体融合排放清单编制技术指南(试行)》^[6]。该指南充分衔接现有排放量核算体系,细化了排放源分类分级体系,并明确了大气污染物与温室气体融合排放清单的编制程序和技术方法。其核算范畴涵盖了同源排放的大气污染物、二氧化碳、甲烷、氧化亚氮以及氢氟碳化物。在移动源分类方面,该指南细分为四个级别:第一级包括机动车、非道路移动机械、船舶、铁路内燃机车和民航飞机等;第二级进一步细化为车辆类型、机械类型和船舶类型等;第三级基于燃料种类、功率段和发动机种类进行分类;第四级包括排放标准和油耗标准。

以机动车二氧化碳排放量的计算为例,可采用在线监控法、交通量法和保有量法。对于纳入排放远程在线监控的重型车,其CO₂排放量应优先考虑使用在线监控法进行计算。为了

更准确地评估路网在不同时段的排放量,可结合交通流特征数据计算分时段的路网排放量。通过统计和分析特定区域内机动车的保有量,可以估算出该区域的总体排放量。

3 不同运输方式碳排放核算特点

在碳排放核算领域,不同运输方式呈现出

各自的核算特点。尽管各种运输方式的碳排放量都与能源消耗量密切相关,但受到不同因素的影响,其核算过程与结果呈现出差异性。

表 1 详细总结了不同运输方式的碳排放核算特点及所需主要参数。通过对比分析各种运输方式的核算特点,我们可以更深入地理解碳排放核算的复杂性和多样性。

表 1 不同运输方式的碳排放核算特点

运输方式	碳排放核算特点	碳排放核算所需主要参数
公路	可能受到气候条件、交通拥堵等因素制约,导致碳排放量有所波动。	车辆: 车辆类型、排放标准 运输: 行驶里程、运输物品质量 燃料: 燃料类型、燃料消耗量 电动车: 净购入电力使用量 制冷剂: 使用制冷剂类型及使用量 尾气净化: 尾气净化使用尿素等还原剂的质量及还原剂中尿素的质量比例
铁路	运输轨迹和能源消耗量相对固定,碳排放核算结果相对稳定。	内燃车: 内燃车柴油消耗量、内燃车行驶里程数 电车: 电车消耗电量
水路	往往涉及长距离国际运输,核算过程相对复杂。	自营: 燃料类型、行驶里程 外包: 船舶类型、行驶里程、运输物品质量
航空	运输活动容易受到气候条件、交通管制等因素的制约,导致碳排放量有所变化。	自营: 燃料类型、行驶里程、生物质混合燃料消耗量 外包: 飞机类型、行驶里程、运输物品质量
管道	运输轨迹完全固定,碳排放非常稳定且计算简单	燃料: 燃料类型、燃料消耗量 运输: 行驶里程、运输物品质量

4 案例分析

以某煤矿的煤炭运输线路为例,该煤炭运输线路包含公路运输、铁路运输、水路运输和管道运输四种运输方式,其中铁路运输包含中转点一个。

某煤矿每月生产煤炭 78 万吨,煤炭在被开采出来以后,需要通过不同的运输方式运往不同的目的地,其中公路运输 5.3 万吨,铁路运输

53.5 万吨,管道运输 19.2 万吨,随后又涉及不同运输方式的转换,如铁路运输转水路运输等,具体运输流程图见图 1。公路运输和管道运输直接运输到下游工厂,铁路运输分为两部分,其中 41 万吨直接运输到下游工厂,12.5 万吨运输到港口中转点之后经水路运输到下游工厂。港口中转点需要将铁路运输车厢中的煤炭经过卸车、搬运、装船等操作装入轮船中。

公路运输里程 24 公里,铁路直达下游工厂

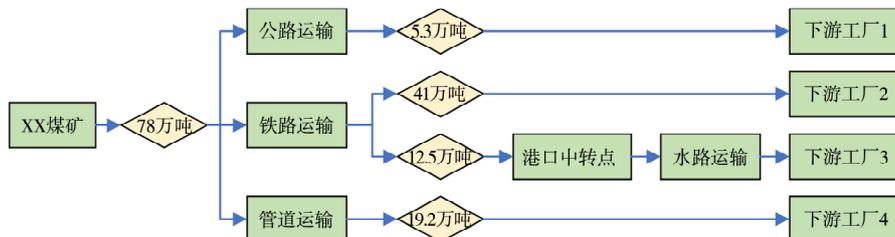


图 1 某煤矿煤炭运输路线图

运输里程 32 公里, 铁路到达港口中转点运输里程 78 公里, 水路运输里程 143 公里, 管道运输里程 29 公里。公路运输车辆使用柴油车, 每月消耗柴油共计 10.7 吨, 消耗尿素添加剂共计 670 千克, 其中尿素占比 32%。铁路运输使用电车车头, 直达下游工厂每月耗电共计 135.53 万度电, 运输往港口的每月耗电量未知。水路

运输使用重油。管道运输使用电力驱动, 每月耗电共计 54.6 万度。港口中转点包含多个固定设施和移动设施, 用于卸车、搬运和装船, 使用柴油驱动, 每月固定设施消耗柴油共计 2.35 吨, 移动设施消耗柴油共计 4.19 吨, 使用塑料薄膜包装袋 3.25 吨, 运单 0.12 吨, 封套 1.09 吨, 无辅助物流活动碳排放相关数据。

表 2 某煤矿煤炭运输消耗能源汇总表

运输方式	目的地	距离	消耗能源类型	能源消耗量	备注
公路运输	下游工厂	24km	柴油	10.7 吨	
			尿素添加剂	670 千克	尿素占比 32%
铁路运输	下游工厂	32km	电力	135.53 万度	
	港口中转点	78km	电力	无数据	
水路运输	下游工厂	143km	重油	无数据	
管道运输	下游工厂	29km	电力	54.6 万度	
物流节点	无	无	柴油	2.35 吨	固定设施
			柴油	4.19 吨	移动设施
			塑料薄膜包装袋	3.25 吨	
			运单	0.12 吨	
			封套	1.09 吨	

将以上数据输入煤炭运输环节碳排放核算模型, 得到最终的碳排放核算结果。某煤矿的每月碳排放总量为 1664.9 吨 CO₂, 单位碳排放量为 0.000035 吨 CO₂ / (吨煤炭 * 千米)。运输活动碳排放量为 1631.14 吨, 物流节点碳排放量为 33.76 吨。公路、铁路、水路、管道四种

运输方式的碳排放量分别为 33.28 吨、841.18 吨、445.30 吨、311.38 吨。物流节点中装卸、搬运及储存活动碳排放量为 20.25 吨, 包装材料碳排放量为 13.51 吨。详见表 3。

5 总结

本文全面综述了国内外交通运输碳排放核算方法, 并深入剖析了其在不同运输方式中的应用与特点。通过对相关文献的系统梳理, 文章旨在为交通运输行业的绿色发展提供理论支撑和实践指导。

文章系统梳理了中国交通运输领域的碳排放核算标准, 为国内交通运输碳排放核算提供了理论参考。目前, 我国交通运输行业主要依据中国交通运输行业企业温室气体排放核算方法与报告指南进行碳排放核算。该指南针对不同类型的交通运输企业, 如陆上交通运输企业和民用航空企业, 提供了具体的核算方法和报告要求。

表 3 某煤矿运输路线碳排放计算结果

类型	碳排放量	单位
运输活动	1631.14	吨 (t)
物流节点	33.76	
一、运输活动碳排放计算		
公路运输	33.28	吨 (t)
铁路运输	841.18	
水路运输	445.3	
航空运输	0	
管道运输	311.38	
二、物流节点碳排放计算		
装卸、搬运及储存活动	20.25	吨 (t)
辅助物流活动	0	
包装材料	13.51	

针对公路、铁路、水路和航空等不同运输方式,文章详细探讨了碳排放核算方法的共性与差异。共性在于,碳排放量均与能源消耗量密切相关,并受到运输距离、载重量等基本因素的直接影响。差异则体现在具体的核算方法、参数选择以及影响因素上。未来研究应着重更新和修正排放因子,深入研究复杂运输场景(如多式联运、中途倒运等),以识别碳排放的主要来源并采取针对性减排措施。此外,研究物流节点的碳排放测算,有助于优化物流管理,降低整个物流系统的碳排放量。

参考文献:

- [1] IPCC.National Greenhouse Gas Inventories Programme Technical Support Unit.2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventory[EB/OL].2006.https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html.
- [2] International Organization for Standardization.ISO 14083.Greenhouse gases-Quantification and reporting of greenhouse gas emissions arising from transport chain operations[S].Geneva:International Organization for Standardization,2023.
- [3] 中华人民共和国国家发展和改革委员会.国家发展改革委办公厅关于印发第三批10个行业企业温室气体核算方法与报告指南(试行)的通知[EB/OL].(2015-07-06).https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201511/t20151111_963496.html.
- [4] International Organization for Standardization.ISO 14068-1:2023.Climate change management Transition to net zero Part 1:Carbon neutrality[S].Geneva:International Organization for Standardization,2023.
- [5] 国家发展和改革委员会.WB/T 1135—2023.物流企业温室气体排放核算与报告要求[S].北京:国家发展和改革委员会,2023.
- [6] 中华人民共和国生态环境部.生态环境部办公厅关于印发《大气污染物与温室气体融合排放清单编制技术指南(试行)》的通知[EB/OL].(2024-01-19).https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk06/202401/t20240130_1065242.html.

Review of Transportation Carbon Emission Accounting Methods with a Case Study on the Coal Industry

YANG Xiaofei¹, LIANG Jie¹, LIU Tianwen¹, LAN Jinhui², LIU Peng³, ZHENG Yue⁴,
WANG Ziyao^{*5}, TANG Xiaoping⁵, SUN Xinyu⁶

(1.Huadian Coal Industry Group Co., Ltd., Beijing 10035, China; 2.Huadian Coal Industry Group Digital Technology Co., Ltd., Beijing 102400, China; 3.Xinjiang Changji Yinggema Coal and Power Investment Co., Ltd., Changji 831800, China; 4.North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 5.Huadian Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100089, China; 6.Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: This paper systematically reviews the carbon emission accounting methods of transportation both domestically and internationally, deeply analyzes the characteristics of carbon emission accounting for different transport modes, and explores future research directions. The article first combs through the international and domestic carbon emission accounting standard systems, including the IPCC guidelines, the Logistics Emission Accounting and Reporting Framework, and so on, and provides a detailed introduction to China's carbon emission accounting methods at the enterprise level. Focusing on the four main transport modes of road, rail, water, and air, this paper summarizes their respective carbon emission accounting methods and characteristics. Taking the coal industry as an example, the total transportation carbon emissions are calculated in detail. The calculation results show that transporting 780000 tons of coal generates approximately 1,700 tons of carbon dioxide. Finally, the paper emphasizes that future research should focus on updating emission factors, studying complex transport scenarios, and optimizing logistics management to accurately assess transportation carbon emissions and promote the green development of the industry.

Keywords: carbon emissions; transportation; coal industry; case study

(责任编辑 安祺)