



港口碳排放核算体系研究及应用

梁军波¹, 陈睿²

(1. 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032;
2. 中船第九设计研究院工程有限公司, 上海 200090)

摘要: 碳排放统计核算是贯彻落实“碳达峰”、“碳中和”目标的重要基础。针对港区缺少统一的核算体系, 依据《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)》和《建筑碳排放计算标准》, 明确港口碳排放的核算范围和核算内容, 将燃料、电力、热力、自来水和空调制冷剂以及绿地作为港区碳排放的核算内容, 计算和归纳核算内容的碳排放因子。以某集装箱码头为例对碳排放核算体系进行应用, 并依据碳排放核算结果提出降碳路径。结果表明, 该方法计算快速, 可为港区碳排放核算提供科学的依据。

关键词: 港口; 碳排放; 核算体系; 降碳路径

中图分类号: U65; X823

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)07-0051-05

Research and application of port carbon emission accounting system

LIANG Junbo¹, CHEN Rui²

(1. CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China;
2. China Shipbuilding NDRI Engineering Co., Ltd., Shanghai 200090, China)

Abstract: Carbon emission accounting is an important foundation for implementing the “carbon peak” and “carbon neutrality” goals. In response to the lack of a unified accounting system in port areas, based on *Accounting Methods and Reporting Guidelines for Greenhouse Gas Emissions from Land Transport Enterprises (Trial)* and *Standard for Building Carbon Emission Calculation*, we confirm the scope and content of port carbon emission accounting, take fuel, electricity, heat, water, air conditioning refrigerant and green space as the accounting content of the port area carbon emission, and calculate and summarize the carbon emission factors for the accounting content. Then we take a container terminal as an example to apply the carbon emission accounting system, and propose a carbon reduction path based on the carbon emission accounting results. The results show that the method has the characteristics of quick calculation, and can provide a scientific basis for the carbon emission accounting of the port area.

Keywords: port; carbon emission; accounting system; carbon reduction path

碳排放统计核算是贯彻落实“碳达峰”、“碳中和”目标的重要基础, 为进一步规范核算办法, 国家发展改革委、国家统计局、生态环境部于2022年4月公布了《关于加快建立统一规范的碳排放统计核算体系实施方案》^[1], 该方案提出: 到2025年

进一步统一、完善、规范碳排放统计核算体系, 为碳达峰碳中和工作提供全面、科学、可靠数据支持。为此目前很多行业对其核算体系进行迭代简化, 如《企业温室气体排放核算与报告指南发电设施》(环办气候函[2022]485号)^[2]简化和规范了

收稿日期: 2023-11-03

作者简介: 梁军波(1980—), 男, 硕士, 正高级工程师, 从事给排水、消防、环保等设计与研究。

发电企业碳排放核算体系和碳排放量的计算方法。

港口是社会经济发展的重要基础设施,也是碳排放的重要场景之一。我国港口在绿色、智慧、降碳和减污方面取得了重大成就,涌现出了许多低碳港口,但是由于缺少统一的核算体系,各企业选取的碳排放核算边界不同,其计算的碳排放量存在较大的差异,为此很难得到各方面认可,为此探索一种公众认可、科学简易的碳排放核算体系十分必要。

1 港口碳排放核算范围

1.1 核算方法的选取

碳排放量的核算结果以 CO₂ 当量(CO₂-eq)为单位,主要有3种方法:排放因子法、质量平衡法、实测法。港口作业(除液化码头泄露挥发性有机物外)活动较为固定,且排放源相对稳定,碳排放均以能源消耗的形式发生,无论建设阶段还是运行阶段,可较方便地获取相关能源数据,为此港口碳排量计算宜采用排放因子法,公式为:

$$G_{\text{HC}} = A_{\text{D}} F_{\text{E}} \quad (1)$$

式中: G_{HC} 为温室气体排放量, t; A_{D} 为导致温室气体排放的生产或消费活动的数量,如燃料的消耗量和净购入的电量等, t 或万 kW·h; F_{E} 为碳排放因子, t/t 或 t/(万 kW·h)。

1.2 核算范围的界定

实现港口碳排放核算结果的准确性和代表性,关键在于确定核算系统的边界,核算边界包括多个维度,其中时间周期、系统和自然的交互边界是最基本的两个维度,也是港口碳排放核算的两个基本边界范畴。

1.2.1 核算周期确定

工程项目碳排放周期分为规划建设阶段、运营阶段和资产拆除阶段,本文碳排放核算体系主要研究运营阶段的碳排放核算体系。

1.2.2 核算范围界定

为便于描述直接与间接排放源,提高透明度,温室气体核算体系针对温室气体核算与报告设定了3个范围:范围1为直接温室气体排放,范围2为

电力产生的间接温室气体排放,范围3为其他间接温室气体排放。3个范围均指工程红线范围内的活动。

1.2.3 港口核算范围确定

1) 范围1指港口企业自身活动直接燃烧产生的温室气体排放,分为固定燃烧、移动燃烧、无组织排放和工艺生产排放4个领域。固定燃烧指港口燃料锅炉的和发电机(日常用电)等设备的运行,常见的燃料是天然气、液化石油气、柴油等;移动燃烧指港作机械、拖轮和车辆的排放,既含汽油、柴油驱动也包括替代燃料如液化天然气驱动的港口作业的机械和车辆;无组织排放指有意或无意的泄漏,如液体化工品泊位输送过程中的油气泄漏,同时依据 GB/T 51366—2019《建筑碳排放计算标准》^[3]将空调设备运营过程中制冷剂的泄露也纳入港区核算范围;过程排放指油气化工码头油气回收装置排放的达标尾气。

2) 范围2指购买的电力、蒸汽、冷/热源等能源产生的温室气体排放,为加强港口节水意识,将市政自来水也纳入能源范围,对其产生的温室气体排放也纳入范围2的核算范围,为此港口范围2核算内容为电力、热力和自来水。

3) 范围3指活动主体导致但在其核算边界外的间接温室气体排放,ISO 14064-1:2018^[4]定义了范围3的上下游运输、员工通勤、购买服务和运营产生的废弃物等15个类别,但实际执行中该部分存在较多争议,为此本文依据《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)》^[5]的核算原则,未对范围3的相关内容进行核算。

2 排放因子的确定

2.1 核算范围1的排放因子

2.1.1 燃料的排放因子

含固定燃烧和移动燃烧的燃料碳排放量,通过港区燃料消耗量和燃料排放因子计算,燃料排放因子计算公式为^[6]:

$$F_{\text{E}} = R_{\text{Z}} C_{\text{C}} \alpha \rho \quad (2)$$

式中: F_{E} 为燃料的排放因子, tCO₂/t(固体或液体

燃料)或 tCO_2/m^3 (气体燃料); R_z 为燃料的平均低位热值, TJ/t 或 TJ/m^3 ; C_c 为燃料的单位热值含碳量, tC/GJ ; α 为燃料的碳氧化率, %; ρ 为二氧化碳

与碳的分子量之比, 取 3.67。

根据式(2)计算港区常用燃料的 CO_2 排放因子, 其值见表 1。

表 1 港区常用燃料的碳排放因子

燃料类型	单位热值含碳量 $C_c/(\text{tC}\cdot\text{TJ}^{-1})$	碳的氧化率 $\alpha/\%$	低位热值 $R_z/(\text{TJ}\cdot\text{t}^{-1}$ 或 $\text{TJ}\cdot\text{m}^{-3})$	碳排放因子 $F_E/(\text{tCO}_2\cdot\text{t}^{-1})$
柴油	20.2	98	43.330×10^{-3}	3.145 1
汽油	18.9	98	44.800×10^{-3}	3.042 5
天然气	15.3	99	38.930×10^{-6}	0.002 2
液化天然气	17.2	98	41.868×10^{-6}	0.002 6

注:单位热值含碳量、碳的氧化率选自 GB/T 51366—2019《建筑碳排放计算标准》,低位热值选自《公共建筑运营企业温室气体排放核算方法和报告指南(试行)》。

2.1.2 空调制冷剂的碳排放因子

空调制冷剂的碳排放核算存在一定争议,许多厂家认为制冷剂使用中不会发生逃逸,不应计算其碳排放量,但 GB/T 51366—2019《建筑碳排放计算标准》已将其纳入碳排放核算范围内,为此港区碳排放也将其纳入其中。

空调制冷剂的碳排放量计算公式为:

$$C_r = \frac{m_r G_{WP}}{1\ 000 y_e} \quad (3)$$

式中: C_r 为建筑使用制冷剂 r 产生的碳排放量,

tCO_2/a ; m_r 为设备的制冷剂 r 充注量, $\text{kg}/\text{台}$; y_e 为设备使用寿命, 取 15 a; G_{WP} 为制冷剂的全球变暖潜值, kgCO_2/kg 。

针对已建港口,碳排放核算时可依据空调数量和单台空调的制冷剂添加量依据式(3)进行计算;针对新建港口设计阶段很难确定空调品牌和制冷剂量的情况,本文引用了某厂家提供的建筑面积、空调功率、空调匹数、制冷剂量的线性关系建模得到表 2,供缺少资料时引用参考。

表 2 空调制冷剂碳排放因子

冷媒	建筑面积/ m^2	空调功率/ kW	制冷剂量/ kg	制冷剂的全球变暖潜值/ ($\text{kgCO}_2\cdot\text{kg}^{-1}$)	设计寿命/ a	建筑年碳排放因子/ ($\text{kgCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)
R410	1	0.18	0.045	2 100	15	140

2.2 核算范围 2 的排放因子

2.2.1 外购电力的碳排放因子

港区外购电力的碳排放因子,应依据当地环保部门发布的温室气体排放因子数值确定,伴随碳排放因子各地绿色电力的开发,排放因子也会逐年下调,如缺少相关数据时可参考:全国用电的碳排放因子取 $5.703 \text{ tCO}_2/(\text{万 kW}\cdot\text{h})^{[7]}$,上海用电的碳排放因子取 $4.200 \text{ tCO}_2/(\text{万 kW}\cdot\text{h})^{[8]}$ 。

2.2.2 外购热力的碳排放因子

港区外购热力的碳排放因子也应依据当地环保部门发布的温室气体排放因子确定,如缺少相关数据时可参考:全国用热的碳排放因子取 $0.11 \text{ tCO}_2/\text{GJ}$,上海用热的碳排放因子取 $0.06 \text{ tCO}_2/\text{GJ}$ 。

2.2.3 自来水的碳排放因子

自来水的碳排放因子取 $0.91 \text{ kgCO}_2/\text{m}^3^{[9]}$ 。碳排放核算时,用水量指港口生活用水量和生产用水量,不含船舶加水量。

2.3 绿地碳汇因子

绿地是港区直接增汇、间接减排的要素,港区绿地建设有利于区域碳汇量的提升。绿地单位面积碳汇量与绿植的种类关系较大,考虑港区绿植以灌木丛和草地为主,为此港区绿地碳排放系数可参考当地绿地的碳汇因子确定,如缺少相关数据时可参考表 3 选取^[10-13],表中将北京和雄安新区的绿地碳汇因子均值作为北方港区的碳汇因子,将上海和福州的绿地碳汇因子均值作为南方

港区的绿地碳汇因子。

表 3 港区绿地碳汇因子

地区	北京	雄安新区	上海	福州	北方	南方
绿地的碳汇因子/ (kgCO ₂ ·m ⁻² ·a ⁻¹)	1.70	2.62	7.23	3.97	2.16	5.60

2.4 碳排放核算汇总

综上，对港区碳排放核算范围的核算内容和排放因子进行汇总。在进行港区碳排放核算时，将燃料、用电量、用水量 and 建筑面积以及绿地面积输入即可确定港区碳排放量。

3 港口碳排放核算应用

3.1 工程概况

南方某专业化集装箱泊位工程，可同时靠泊 3 艘 20 万吨级、1 艘 7 万吨级和 1 艘 1 万吨级集装箱船，码头年设计通过能力 426 万 TEU。陆域平

面主要功能包括码头前沿作业区、自动化重箱堆场区、空箱堆场区、危险货物集装箱和超限箱堆场区、闸口区、查验区以及生产生活辅助区、机修区等，占地面积 167.89 万 m²。码头前沿船舶装卸作业选用双小车岸桥，水平运输设备采用智能导引运输车(IGV)，自动化堆场装卸设备选用自动化轨道式龙门起重机(ARMG)，IGV 能源供应方式可采用电力驱动+充电方式。码头前沿 2 座变电所内分别设置码头岸电系统，所内岸基电源可独立运行，分别为泊位停靠船舶供电。

3.2 碳排放核算

根据工程可行性研究报告，港口用电量 6 768 万 kW·h/a，柴油量 28 t/a，安装空调建筑面积 4.145 万 m²，港口自来水 11.534 万 m³/a，排放污水 2.496 6 万 m³/a，产生垃圾 13.87 t/a，绿地面积 2.614 万 m²，其碳排量核算结果见表 4。

表 4 港口碳排放核算结果

类型	核算范围	核算内容	碳排放因子(碳汇因子)	耗量	碳排放量/(t·a ⁻¹)	比例/%
碳排放	范围 1	柴油	3.145 t tCO ₂ /t	28 t/a	88.06	0.23
		空调系统	140 kgCO ₂ /m ²	4.145 万 m ²	211.40	0.54
	范围 2	电力	5.703 tCO ₂ /(万 kW·h)	6 768 万 kW·h/a	38 597.90	98.96
		自来水	0.91 kgCO ₂ /m ³	11.534 万 m ³ /a	104.96	0.27
碳汇	-	港口绿地	5.60 kgCO ₂ /(m ² ·a)	2.614 万 m ²	-146.38	-
合计	-	-	-	-	38 855.94	-

由表 4 可知，港口碳排放主要由港口用电产生，用电产生的碳排放占总碳排放的 99.0%，为此港口降碳措施应以节能、减排和提高绿电为主，本工程绿化率 1.5%，绿地碳汇量占港口碳排量的 0.4%，具有较好的降碳作用。

3.3 减污降碳措施建议

3.3.1 加大光伏发电开发

本工程港作机械和车辆采用电动驱动，用油量较少，港口降碳以节能减污和增加绿电供应量为主要方向。

为了落实港口成为零碳港口基础设施的建设目标，综合政策背景、建设成本、可操作性以及技术成熟度等各方面原因，建设分布式港口光伏(微电网)技术，并通过与地区大电网的耦合，为港口构建清洁低碳、安全高效的能源体系。

3.3.2 开发风力发电

结合工程的总体布置以及周边环境条件情况，建议沿港口西侧护岸布置，可安装 2 座风机。通过风电助力，港口清洁能源发电量在能源消费结构中占比可大幅提升。

3.3.3 引入氢动力 AGV

根据碳排放核算指电动驱动的车辆仍会产生碳排放量，并非零排放，为此建议试点引入零排放的氢燃料电池 AGV，通过减少港口用电量，达到降碳目标，实现港口零碳排放。

3.3.4 加大绿化面积和提高雨水利用率

加大港口绿化面积，增大碳汇容量；同时引入海绵城市，力争实现当地径流总量控制率要求，提高年径流污染控制率港口径流雨水量，提高雨水回用率。

3.3.5 节能节电

强化资源集约节约利用。设计时推广应用绿色照明、码头智能装卸、变频控制等节能新技术,降低港口生产综合能源单耗和用电量,主要措施如下。

1) 采用电网谐波污染治理技术和电网无功补偿技术。集装箱装卸桥、轨道式龙门起重机等大型装卸机械设无功补偿和谐波滤波装置,做到就地补偿及滤波。岸边集装箱起重机、轨道式集装箱门式起重机采用高压供电,选用高效的电机和传动装置,提高传动效率和功率因数,同时配置电能回馈装置。

2) 采用节能型变压器和灯具。主变压器选用封有载调压电力变压器,变压器选用低损耗的新型节能变压器。照明灯具均选用高效、节能光源发光二极管(LED)。

3) 室外照明采用智能化控制技术。采用智能照明控制系统,根据作业照明要求进行分象限、分区域控制。

4) 优化装卸工艺系统配置及流程。利用物联网、云计算、大数据等信息技术,优化全场设备资源调度工艺,实现港作设备运行路线优化,在保证安全的前提下减少无效运动路径,降低作业能耗。

4 结论

1) 针对港口碳排放特点,选用了排放因子法作为港口碳排放核算的方法,核算体系以 ISO 14064-1:2018 和《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)》为基准,借鉴 GB/T 51366—2019《建筑碳排放计算标准》,引入了空调制冷剂、自来水和绿地 3 个核算内容,完善了港区碳排放核算体系。

2) 查询相关资料确定了港口碳排放核算内容的各排放因子,为港口碳排放核算提供了科学依据和快速的计算方法。

3) 针对集装箱港口的应用场景,其碳排放核算成果显示港区碳排放主要来自于电能消耗,提出港口降碳应以节能、减排、提高绿电和增加绿化碳汇措施为主攻方向。

4) 为鼓励港区降碳和减污协同推进,建议相关碳排放政策研究时将核算范围 3 的运营废弃物

纳入港区核算内容中。

参考文献:

- [1] 国家发展改革委,国家统计局,生态环境部. 关于加快建立统一规范的碳排放统计核算体系实施方案[A]. 北京: 国家发展改革委, 2022.
- [2] 生态环境部. 企业温室气体排放核算与报告指南发电设施: 环办气候函[2022]485号[A]. 北京: 生态环境部, 2022.
- [3] 中国建筑科学院有限公司, 中国建筑标准设计研究院有限公司. 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.
- [4] Technical Committee ISO/TC 207. Greenhouse gases-part 1: specification with guidance at the organization level for quantification and reporting of greenhouse gas emissions and removals: ISO 14064-1: 2018 [S]. Brussels: ISO, 2018.
- [5] 国家应对气候变化战略研究和国际合作中心. 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)[S]. 北京: 国家发展改革委办公厅, 2015.
- [6] 清华大学能源环境经济研究所. 公共建筑运营企业温室气体排放核算方法和报告指南(试行)[S]. 北京: 国家发展改革委办公厅, 2015.
- [7] 生态环境部. 关于做好 2023—2025 年发电行业企业温室气体排放报告管理有关工作的通知: 环办气候函[2023]43号[A]. 北京: 生态环境部, 2023.
- [8] 上海市生态环境局. 上海市生态环境局关于调整本市温室气体排放核算指南相关排放因子数值的通知: 沪环气[2023]34号[A]. 上海: 上海市生态环境局, 2023.
- [9] 将低碳生活进行到底“为碳排放买单”悄然兴起. 中国气候变化信息网[EB/OL]. (2010-02-21)[2023-06-03]. <https://www.ccchina.org.cn/Detail.aspx?newsId=12743&Tid=57>.
- [10] 王迪生. 基于生物量计测的北京城区园林绿地净碳储量研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2009.
- [11] 张青云, 吕伟娅, 徐炳乾. 华北地区城市绿地固碳能力测算研究[J]. 环境保护科学, 2021, 47(1): 41-48.
- [12] 王敏, 石乔莎. 城市高密度地区绿色碳汇效能评价指标体系及实证研究: 以上海市黄浦区为例[J]. 中国园林, 2016, 32(8): 18-24.
- [13] 李熙波. 福州城市片林与草坪碳吸存比较研究[D]. 福州: 福建师范大学, 2012.

(本文编辑 王璁)