

CBAM背景下我国钢铁行业碳核算研究现状

谷建龙^{1*}, 尹玫月²

¹云南省科学技术院, 云南 昆明

²西南林业大学机械与交通学院, 云南 昆明

收稿日期: 2024年11月29日; 录用日期: 2024年12月27日; 发布日期: 2025年1月8日

摘要

欧盟碳边境调节机制(CBAM)作为补充和加强碳排放交易体系, 能够达到防止碳泄漏, 确保欧盟气候政策的有效性, 有助于全球脱碳以及欧盟2050年实现气候中和。在CBAM所管辖范围内, 钢铁行业作为占比极高的行业来看, 对未来各行业如何有效降低排放量具有重要意义。本文通过对钢铁行业的碳核算方法和相关已经出现的减排技术进行介绍, 以及对未来钢铁行业的四个发展方向(碳捕集利用与封存规模化、氢气直接还原炼钢试点、电炉 + 废钢的循环经济、关注过渡性技术)进行分析总结, 提出未来所要改进的趋势, 为后续我国钢铁产业在生产制造以及出口方面提供理论依据。

关键词

CBAM, 碳核算, 钢铁产业, 发展趋势

Research Status of Carbon Accounting in China's Iron and Steel Industry under the Background of CBAM

Jianlong Gu^{1*}, Meiyue Yin²

¹Yunnan Provincial Academy of Science and Technology, Kunming Yunnan

²College of Mechanical Engineering and Transportation, Southwest Forestry University, Kunming Yunnan

Received: Nov. 29th, 2024; accepted: Dec. 27th, 2024; published: Jan. 8th, 2025

Abstract

The EU Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM), as a complement and enhancement of the ETS, can prevent carbon leakage, ensure the effectiveness of the EU's climate policy, contribute to global decarbonization and the EU's climate neutrality by 2050. Within the jurisdiction of the CBAM,

*通讯作者。

the steel industry, as an industry with a very high proportion, is of great significance to how to effectively reduce emissions in various industries in the future. This paper introduces the carbon accounting methods of the steel industry and related emission reduction technologies that have emerged, and analyzes and summarizes the four development directions of the steel industry in the future (large-scale carbon capture, utilization and storage, hydrogen direct reduction steelmaking pilot, circular economy of electric furnace + scrap steel, and focus on transitional technologies), and puts forward the trend to be improved in the future, so as to provide a theoretical basis for the subsequent production and export of China's steel industry.

Keywords

CBAM, Carbon Accounting, Steel Industry, Development Trends

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

CBAM (碳边境调节机制)自 2006 年被提出以来至 2023 年最终修订完成, 历经接近二十年时间, 作为实现国际绿色贸易的主要政策之一, 对各国未来的经济贸易有着重大影响[1]。首先, CBAM 的征收碳关税过渡期为 2023~2026 年, 欧盟内部企业将获得全额免费分配的排放权; 所有进口到欧盟的受 CBAM 管制的产品, 不需要支付碳关税, 但需要申报进口产品的碳排放强度[2]。其次, 正式开征碳关税时间为 2027~2031 年, 欧盟对 CBAM 管制行业的内部企业的碳排放分配额逐年减少: 93%、84%、69%、50%、25%, 到 2032 年完全取消免费分配配额, 也将全面征收碳关税[3]-[5]。同时, 欧盟将设立一个集中监管机构负责碳关税的管理工作, 各成员国将设立国家层面的监管机构负责本国的碳关税工作。

而钢铁行业作为我国工业的支柱性行业, 约占我国 GDP 的 5% [6]。钢铁行业涉及面广、产业关联度高、消费拉动大, 在经济建设、社会发展、就业稳定等方面发挥着重要作用。我国钢铁行业在全球也举足轻重, 钢铁产量占全球总产量的半壁江山[7]。然而, 目前我国钢铁行业仍以碳排放强度高的长流程为主, 粗钢产能约占 90%。在碳中和承诺以及去产能的双重压力下, 我国钢铁行业面临严峻挑战[8]。

目前, 中国钢铁行业碳排放量约占中国碳排放总量的 15%, 是碳排放量最高的制造行业。全球每年生产和使用高达 18 亿吨钢铁, 其中将近 50% 的钢产于中国, 中国钢铁行业碳排放量也约占全球钢铁行业碳排放总量的 50% [9]。根据麦肯锡测算, 如果要实现本世纪末全球平均气温上升不超过 1.5℃ 的情景, 到 2050 年中国钢铁行业须减排近 100%, 这是极具挑战的目标, 需要从钢铁消费、生产、技术、供应等多个关联领域共同推进零碳转型。

2. CBAM 介绍

2.1. CBAM 的管控范围

CBAM 政策主要针对于碳密集型行业, 包括水泥、钢铁、铝、化肥和电力, 如表 1。要求欧盟进口商在进口产品时需要为其碳排放支付相应的费用。

除了表中所涵盖的范围之外, CBAM 法规管控范围在未来将到扩展至欧盟碳市场所覆盖的各类行业, 也就是说, 当前未纳入的有机化学品、聚合物等也或将受到 CBAM 管控。因此目前各企业有必要全方位做好碳核算预备工作。

Table 1. CBAM control scope**表 1.** CBAM 管控范围

受控产品	产品名称	管控气体
水泥	煅烧和其他高岭土(25,070,080)、水泥熟料(25,231,000)、白水泥(25,232,100)、硅酸盐水泥(25,232,900)、矾土水泥(25,233,000)、水凝水泥(25,239,000)	二氧化碳
电力	电力(27,160,000)	二氧化碳
化学品	氢气(280,410,000)	二氧化碳
化肥	硝酸及黄硝酸(28,080,000)、氨, 无水或水溶液(2814)、硝酸钾(28,342,100)、矿物氮肥(3102)、氮磷钾化肥(3105)、	二氧化碳、氧化亚氮
钢铁及制品	钢铁(72), 已烧结铁矿砂及其精矿(26,011,200)、钢铁板桩(7301), 铺轨用钢材(7302), 铸铁管(730,300), 无缝钢铁管(7304), 圆形钢管(7305), 其他钢铁管(7306), 钢铁管附件(7307), 钢铁结构体(7308), 大于 300 升的钢铁容器(730,900), 小于 300 升的钢铁容器(7310), 液化气用钢铁容器(731,100)、螺钉(7318)、其他钢铁制品(7326)	二氧化碳
铝及制品	未锻轧铝(7601), 铝粉(7603), 铝条(7604), 铝丝(7605), 铝板(7606), 铝箔(7607), 铝管(7608), 铝管附件(76,090,000)、铝结构及部件(7610)、铝制囤罐(76,110,000)、铝制小容器(7612)、压力铝容器(76,130,000)、铝制绞线缆(7614)、其他铝制品(7616)	二氧化碳、碳氟化合物

2.2. CBAM 的计算

CBAM 税费 = CBAM 税率 × 碳排放量 = (EU ETS 碳价 - 出口国碳价) × (产品碳排放量 - 欧盟同类产品企业获得的免费排放额度)

其中:

EU ETS 碳价: 上一周欧盟碳排放权拍卖的周平均结算价格;

碳排放量所包含的温室气体: 二氧化碳(CO₂)、一氧化二氮(N₂O)和全氟化物(PFCs);

碳排放量核算边界: 主要为直接排放(针对钢铁、铝、氢三大行业), 特定情况下还包含使用外购电力的间接排放(针对水泥、化肥、电力三大行业)。

除此之外, 可以使用直接碳排放量核算的方法: 简单商品(即直接以自然界中材料进行加工的产品), 碳排放量 = 生产过程中的直接排放总量; 复杂商品(即使用简单商品进行再加工的产品), 碳排放量 = 生产过程中的直接碳排放量 + 所使用的简单商品所隐含的直接碳排放量。

也有部分研究将建模引入到碳排放的计算中来。例如郑赛琴等[10]基于面板分位数回归探究了不同地区影响碳排放量的重要因素, 将碳排放量按照不同的分位点(0.3, 0.5, 0.7)分别分成低碳、中碳、高碳地区, 以了解变量在未来一段时期对不同地区碳排放量的影响。王飞飞等[11]对相关研究总结了经济水平、人口、能源消费结构、产业结构、外商投资、城市化等六个方面的碳排放影响因素。

3. 钢铁行业碳核算

钢铁行业是温室气体(GHG)排放的主要来源之一。钢铁产品作为被使用最为广泛的工业原材料之一, 其低碳转型对于制造业、建筑业等下游行业的气候目标实现也至关重要。在产品层面进行的碳足迹核算和报告, 将帮助钢铁及其下游企业掌握产品的碳排放水平, 并通过采取措施减少供应链中的碳排放, 加强上下游协同降碳; 而相关方法学的科学性和一致性, 也将为实现碳排放水平的透明和可比, 以及为钢铁及下游企业积极参与国际绿色贸易提供有力支撑[12]。目前的钢铁生产过于依赖化石燃料用于供能和还原铁矿石[13]。因此, 必须对生产方法进行根本性的改变, 以降低钢铁行业的碳排放。

2020 年, 钢铁生产直接导致了约 26 亿吨的二氧化碳排放, 占全球二氧化碳排放量的约 7%。此外, 钢铁行业用电产生约 10 亿吨的二氧化碳间接排放。2022 年, 以贸易额计, 欧盟进口的“CBAM 钢铁产

品”主要来自：中国大陆地区、土耳其、印度、俄罗斯、中国台湾地区、韩国、越南、瑞士、乌克兰、美国和日本。在上述 11 个产地中，瑞士因豁免于 CBAM 应予排除，剩下的就是欧盟进口“CBAM 钢铁产品”的十大来源。中国大陆地区排名第一，为 151 亿欧元，占欧盟从中国大陆地区进口总额的 2.4% [14]。如图 1。

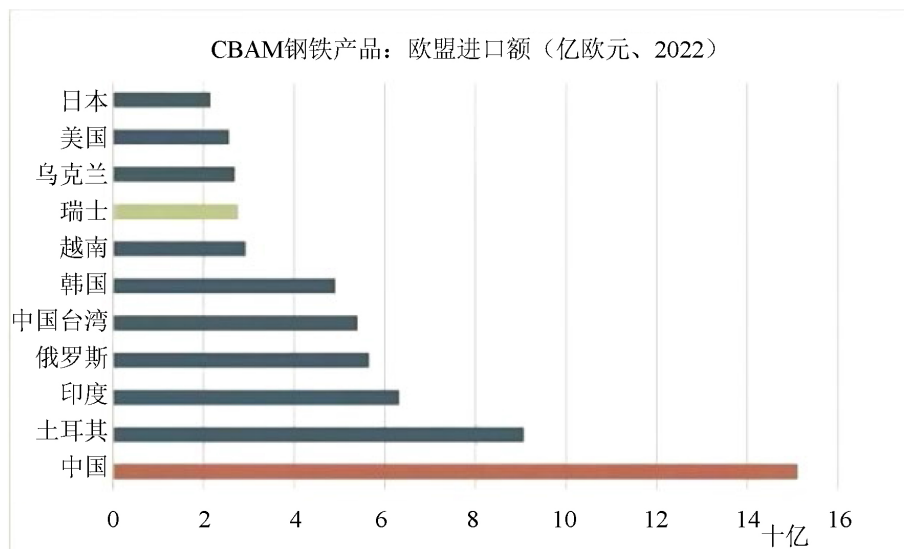


Figure 1. CBAM steel products: EU imports

图 1. CBAM 钢铁产品：欧盟进口额

3.1. 钢铁碳排放来源

钢铁产品通过各种成型和精加工步骤(包括：再加热、重熔、铸造、热轧、冷轧、锻造、酸洗、退火、电镀、涂层、镀锌、拉丝、切割、焊接、精加工)，对粗钢、半成品以及其他最终钢产品进行进一步加工而制成[15]。

首先，从钢铁制备环节来看，钢铁生产分为铁矿石(开采)和废钢(回收)为原料的两种生产路径。本质上看，铁矿石炼钢相比于废钢炼钢更加地耗能，因为需要从铁矿石中除去氧元素(这个过程称为还原)。目前，铁矿石炼钢路径主要使用煤炭作为能源和还原剂。高能耗过程和使用高碳能源导致钢铁行业 90%以上的直接碳排放来源于铁矿石炼钢。

大部分钢铁产品(>95%)是经过热轧工序，对大多数钢铁产品而言，热轧过程是最后一个相对常见且直接消耗大量燃料用于加热的过程。因此，可将热轧作为比较基准点。将热轧作为比较基准点还具有以下优势：如简化副产气体的碳收益核算(因为大多数副产煤气会在热轧过程中再利用)；纳入独立电弧炉(EAF)的直接燃料排放使用情况，并与许多钢铁产品(如热轧钢卷、型钢、钢筋等)的摇篮到大门边界相一致，从而减少了一些钢铁企业需要报告两个单独碳足迹的负担。将热轧作为比较基准点还意味着针对加热步骤的创新技术可以在基准碳足迹中得到体现，例如近终型连铸，而不仅仅在总的碳足迹中体现。

对钢铁制品的直接排放监测应包括：所有来自燃料燃烧的二氧化碳排放、来自烟气处理的过程排放，以及所有与设施中应用的生产步骤有关的二氧化碳排放，包括但不限于：再加热、再熔化、铸造、热轧、冷轧、锻造、酸洗、退火、电镀、涂层、镀锌、拉丝、切割，以及焊接和钢铁制品的精加工。

3.2. 钢铁碳足迹核算标准

在钢铁产品的碳足迹核算方面，全球已取得大量的研究成果。具体而言，世界钢铁协会(World Steel

Association)《生命周期清单方法》为计算钢铁从“摇篮”到“大门”的碳足迹提供了基础,而责任钢铁(Responsible Steel)《标准钢铁产品的温室气体(GHG) 2.0》为上游生产过程常见点的碳排放计算提供了额外的方法指导,用于对大多数钢铁产品进行基准碳绩效的评估[16]。

碳足迹核算需依据 ISO14044 和 ISO14067-2018 标准,ISO14044 标准提供了进行生命周期评价(LCA)的指导说明,其中包括定义细化的生命周期清单(LCI)。这种细化的过程和数据规范要求,为产品级排放计算奠定了基础。针对系统边界内定义的每个过程(例如焦化、烧结等),应按照 ISO14044:2006 的第 4.3 节制定清单。清单应尽可能地规范(即包括输入和输出的度量),以通过质量/能量平衡对数据进行验证检查(根据 ISO14044:2006 的第 4.3.3.2 节)。如不可行,则可以直接使用质量/能量平衡的方法来计算过程的输入/输出(例如根据输入碳的质量计算生产过程的二氧化碳输出)。在计算过程中,基于过程来编制生命周期清单,以便使用过程细分法来避免将排放分配给副产品或共生产品。

3.3. 钢铁减排技术

要想实现国家制定的碳达峰、碳中和目标,中国钢铁工业作为中国碳排放的主要贡献者,无论是从全生命周期的角度、高质量发展的角度,还是从更好地应对欧美国家碳边界税制度下的产品竞争角度,在未来碳排放过程中,都必须扮演好积极参与者和践行者的关键角色,并且承担着极其重要的碳减排责任。目前已经兴起多种减排技术能够为控制钢铁行业的碳排放量做出参考依据。如表 2。

钢铁在推动碳中和社会中具有无限可能,是经济社会碳减排的重要推动者。但是钢铁行业的碳减排没有一蹴而就的解决方案,需要不断探索各种脱碳技术的组合,并在适当的时间,根据区域的特点,选择合适的技术,支撑净零排放目标的实现。

Table 2. Carbon emission reduction technologies and definitions
表 2. 碳排放减排技术及定义

减排技术	定义
可再生能源	适用于可再生能源在炼铁或炼钢现场满足 50%以上电力需求的情况。可再生能源可以直接来自可再生资源,也可以通过电网结合项目特定的市场机制采购可再生能源(例如购电协议、公用电力绿色费率等)。
生物质	适用于生物质供应占铁矿石还原所需能量 20%以上的情况,或满足 50%以上热能需求在与铁还原无关的其他加热的工序以及现场炼钢过程(例如热轧、废钢熔化等)中。生物质与可持续生物能源证明绑定。例如,生物质原料对可持续土地利用的影响。
可再生氢	适用于可再生氢供应占铁矿石还原所需能量 20%以上的情况,或满足 50%以上热能需求在与铁还原无关的其他工序(如球团、热轧)的加热过程中。可再生氢定义为通过水电解产生的氢气,其中电解所用电力可以直接来自可再生资源。
碳捕捉和封存	适用于在炼铁或炼钢现场或在后续炼铁燃料生产现场(例如,通过蒸汽甲烷重整生产氢气)部署的碳捕捉系统,其设计应确保能够捕捉 50%以上的碳排放(基于点源)。由此产生的二氧化碳流必须永久储存在与石油生产无关的地质储层中。
碳捕捉和利用	适用于在炼铁或炼钢现场或在后续炼铁燃料生产现场(例如,通过蒸汽甲烷重整生产氢气)部署的碳捕捉系统,其设计应确保能够捕捉 50%以上的碳排放(基于点源)。由此产生的二氧化碳流用于制造含碳产品(例如,甲醇、使用二氧化碳固化的混凝土等),或用于替代现有的二氧化碳用途(例如,提高原油采收)。

4. 钢铁行业发展趋势

我国作为钢铁出口第一大国,必须不断完善对钢铁企业的管控与计划,未来我国钢铁行业可以向着

以下四个方面来发展:

碳捕集利用与封存规模化。代表地区为环渤海地区(东北、津冀、山东)。其有集中化的钢厂, 供应全国超过 40% 的钢铁产量, 同时还有火电、油气、水泥等其他高碳排放强度的工业, 有望实现碳捕集利用与封存规模化基础设施建设, 摊薄资本支出成本(如管道等)。且其靠近衰退期油田, 运输效率高, 还可通过油获实现额外收益。

氢气直接还原炼钢试点。代表地区为西南地区(四川、云南、重庆、贵州)。其拥有丰富的绿色电力和水资源, 可能实现低成本的绿氢生产, 经济性高。瑞典、德国、奥地利等国已有氢能炼钢项目投产, 国内宝武、河钢、酒钢等钢铁企业也开始了氢能炼钢探索试点。

电炉 + 废钢的循环经济。代表地区为沿海地区(浙江、福建、广东)。其特点是钢铁需求高, 废钢供应充足, 但区域长流程钢铁产能低, 目前供应主要靠区域外输入。未来, 废钢 - 电炉的循环经济模式可能成为区域钢铁供应的主要模式。在此基础上只要实现电力的低碳供应, 即可很好地实现碳中和转型。

关注过渡性技术。即不能实现钢铁碳中和但能显著降低碳排放强度的新技术, 例如炉顶煤气循环、高炉喷吹氢气、直接熔融还原等; 钢铁行业实现碳中和还需要 30 年的历程, 过渡技术能够补足一部分减排缺口, 给零碳钢铁技术的发展创造空间。

此外, 钢铁行业也在持续推动超低二氧化碳排放炼钢工艺(ULCOS)技术的发展, 包括生物质炼钢、新型直接还原工艺(ULCORED)、新型熔融还原工艺(HISarna)和电解铁矿石工艺(ULCOWIN/ULCOLYSIS)。这些探索距离工业化还有一定距离, 但随着技术不断发展成熟, 未来有可能更好地支持钢铁行业碳中和转型。

5. 总结

总而言之, 目前我国钢铁行业的碳排放统计以及碳足迹的跟踪等方面, 面临着重大挑战, 在 CBAM 正式落实之前, 我国需要及时出台相关政策办法以应对可能会出现的问题。大型钢铁企业碳管理信息化系统建设具有重要的现实意义和战略价值。

2024 年 10 月 23 日, 以“低碳钢铁, 绿色新未来”为主题的 2024 年全球低碳冶金创新论坛暨第九届宝钢学术年会在上海开启。来自全球钢铁行业的企业家、科学家聚焦钢铁行业低碳转型等热点问题, 碰撞思想火花、凝聚发展共识、共话技术创新、共担历史使命。可以看出中国钢铁行业积极开展冶金流程低碳路径和战略规划研究, 已经有一批低碳技术研发项目居全球领先水平并取得突破性成果。我国将鼓励钢铁及相关领域新材料、新产品、新技术、新工艺等的基础与应用基础研究, 在 CBAM 的背景下能够承担住社会所期望的碳减排任务。

基金项目

云南省重点研发计划“高碳排放产品全生命周期评价方法与示范”(202303AC100004)。

参考文献

- [1] 王慧英, 栾鹤. 碳边境调节机制下中国的能源转型: 制约与应对[J]. 河南社会科学, 2024, 32(10): 46-54.
- [2] 弓丽栋, 谢越韬, 吴蓁, 等. 欧盟碳边境调节机制及其对我国可再生能源产业的影响与对策建议[J]. 环境保护, 2024, 52(Z3): 79-83.
- [3] 魏圣香. 气候治理与国际贸易协调视角下欧盟碳边境调节机制的应对[J]. 上海大学学报(社会科学版), 2024, 41(5): 98-112.
- [4] 姜睿. 欧盟碳边境调节机制现状及影响分析[J]. 当代石油石化, 2024, 32(7): 26-30.
- [5] 王竹君. 欧盟碳边境调节机制的合规性与有效性评估[J]. 中外能源, 2024, 29(8): 16-23.

-
- [6] 王雅静. 欧盟碳边境调节机制对中国钢铁行业出口竞争力的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 石家庄: 河北经贸大学, 2024.
- [7] 马莉, 王雅新, 叶琳琳, 等. 欧盟碳边境调节机制对钢铁行业的影响及对策建议[J]. 冶金经济与管理, 2024(4): 13-17.
- [8] 陈瑜. 欧盟碳边境调节机制对我国钢铁及下游制品行业的影响与应对策略探讨[J]. 冶金财会, 2024, 43(4): 4-8.
- [9] 湛卓岚, 张永香, 陈峰. 碳边境调节机制最新进展及潜在影响[J]. 沙漠与绿洲气象, 2024, 18(2): 12-19.
- [10] 郑赛琴. “双碳”目标下我国碳排放影响因素探究[J]. 统计与应用, 2023, 12(6): 1628-1639.
- [11] 王飞飞, 徐露露, 王伟光. 碳排放影响因素研究综述[J]. 可持续发展, 2024, 14(1): 180-184.
- [12] 刘元玲. 美国碳边境调节机制: 动态发展及其对全球气候治理的影响[J]. 世界环境, 2023(5): 79-82.
- [13] 刘清梅, 张福明. 中国钢铁制造流程发展与关键问题[J]. 钢铁, 2024(1): 1-17.
- [14] 王文治, 姚佳伟. 欧盟碳边境调节机制对我国碳密集产品出口成本的影响评估——基于碳排放责任共担的视角[J]. 阅江学刊, 2024, 16(6): 66-77.
- [15] 杨凯, 钟绍良. 钢铁行业迈向碳中和氢能技术或成关键[N]. 中国冶金报, 2024-09-18(001).
- [16] 赵英淑, 滕继濮, 陈曦. 碳足迹: 促进产业绿色转型的新途径[N]. 科技日报, 2024-03-21(005).