

doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2024.08.008

# 全国碳市场扩围下的电解铝行业低碳发展路径研究——以云南省为例

陈远翔<sup>1,2</sup>, 刘奕伶<sup>1</sup>, 李润<sup>1</sup>, 瞿广飞<sup>2</sup>

(1. 云南省生态环境科学研究院 低碳技术研究中心, 昆明 650034;  
2. 昆明理工大学 环境科学与工程学院, 昆明 650051)

**摘要:** 电解铝作为碳排放的重点行业, 其碳达峰和深度降碳任务意义重大。在全国碳市场即将纳入电解铝行业的背景下, 基于分析电解铝生产排放特征, 梳理国际国内电解铝企业碳排放核算方法和碳配额分配方法, 以云南省为例, 分析了当下面临的电力碳排放重复计算、绿电优势未体现、电力供给能力不足、产品出口受“碳关税”影响等挑战。未来, 尚需从政策制度、市场机制、技术创新等多维度发力, 深化电解铝行业绿色低碳发展, 锻造新的竞争优势。

**关键词:** 电解铝; 全国碳市场; 碳核算; 碳配额; 可再生能源电力; 碳足迹

**中图分类号:** TF821 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-7545(2024)08-0062-10

## Research on Low Carbon Development Path of Electrolytic Aluminum Industry under the Expansion of National Carbon Market: Taking Yunnan Province as an Example

CHEN Yuanxiang<sup>1,2</sup>, LIU Yiling<sup>1</sup>, LI Run<sup>1</sup>, QU Guangfei<sup>2</sup>

(1. Low Carbon Technology Research Center, Yunnan Academy of Ecological and Environmental Sciences, Kunming 650034, China;  
2. Faculty of Environmental Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650051, China)

**Abstract:** As the key industry in CO<sub>2</sub> emission, electrolytic aluminum is of great significance in its carbon peak and deep carbon reduction tasks. Under the background that the electrolytic aluminum industry will soon be included in China's national carbon market, based on the analysis of emission characteristics of electrolytic aluminum production, the carbon emission accounting methods and carbon quota allocation methods of domestic and international electrolytic aluminum enterprises were sorted out. Taking Yunnan province as an example, the current challenges such as double-counting of CO<sub>2</sub> emissions from electricity, failure to reflect the advantages of green power, insufficient power supply capacity, and impact of carbon tariff on product exports were analyzed. In the future, it is still necessary to make efforts from multiple aspects such as policy systems, market mechanisms, and technological innovation to deepen the green and low-carbon development of the electrolytic aluminum industry and forge new competitive advantages.

**Key words:** electrolytic aluminium; national carbon market; CO<sub>2</sub> emission accounting; carbon quota; renewable energy electricity; carbon footprint

收稿日期: 2024-03-09

基金项目: 云南省生态环境科学研究院科研资金资助项目(2022530101000584); 云南省哲学社会科学规划智库项目(ZK2023YB05)

作者简介: 陈远翔(1987-), 男, 博士生, 高级工程师; 通信作者: 刘奕伶(1991-), 女, 硕士, 工程师

铝工业是支撑经济社会发展的重要支柱产业,但作为高载能、高排放行业,其温室气体(GHG)排放不容忽视。根据国际铝业协会(IAI)统计,2022 年全球铝工业 GHG 排放量为 11.12 亿 t CO<sub>2</sub>e,其中电解铝环节排放占比达到 71%<sup>[1]</sup>。为推动铝工业的低碳发展,国际铝业协会于 2021 年 3 月发布《2050 年铝业温室气体减排路径》,提出了铝工业低碳发展的主要路径;我国作为全球最大的电解铝生产国和消费国,在 2020 年 9 月碳达峰碳中和目标提出后,国家于 2022 年 11 月印发实施《有色金属行业碳达峰实施方案》,其中明确提出了电解铝等行业的低碳发展要求。

在诸多低碳政策中,碳排放权交易作为一项利用市场机制将 GHG 控排责任压实到企业的政策工具,通过配额管理制度,充分发挥市场配置资源的作用,为处理好行业企业发展与 GHG 减排关系提供

了有效途径。自 2011 年起在国内 8 个省市区相继开展试点碳市场建设后,全国碳市场已于 2021 年 7 月正式启动,首批纳入发电行业,随后,水泥、电解铝、钢铁等行业有望于第二批纳入<sup>[2]</sup>。

在全国碳市场持续扩围背景下,本文基于对电解铝生产 GHG 排放特征、企业碳排放量核算及碳配额分配方法的分析,以云南省为例,剖析电解铝企业面临的挑战,并提出了低碳发展路径建议。

## 1 电解铝生产 GHG 排放特征

铝工业生产主要包括铝土矿开采、氧化铝精炼、炭阳极生产、铝电解、铸造和加工等环节,各环节 GHG 排放量及排放结构如表 1 所示<sup>[1]</sup>。全球范围内,电解铝工序 GHG 排放量占原铝生产总排放量的 71%,是铝生产企业主要的 GHG 排放来源,其中,因电力消耗对应的排放量就占到了总排放量的 60%以上。

表 1 2022 年全球铝工业温室气体排放情况<sup>[1]</sup>

名称	铝土矿开采	氧化铝精炼	炭阳极生产	铝电解	铸造和加工
电力消耗	0.3	22	2	616	23
PFCs(CO <sub>2</sub> e)				52	
过程排放			8	103	
辅助材料		30	45	5	
热能	2.6	114	6		54
运输		16		13	
合计	2.9	182	61	789	77

国内电解铝工序普遍采用以冰晶石和氧化铝为原料的霍尔-埃鲁法生产原铝,如图 1 所示,工艺过程中的 GHG 排放主要包括 3 个部分<sup>[3]</sup>:1)阳极炭块

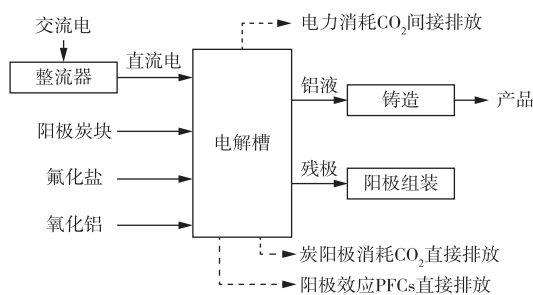


图 1 电解铝工序温室气体排放示意图

Fig. 1 Schematic diagram of greenhouse gas emissions from aluminum electrolysis process

与熔融在电解质中的氧化铝发生电化学反应,产生二氧化碳(CO<sub>2</sub>)直接排放;2)电解槽中氧化铝浓度偏低时阳极附近电压升高出现阳极效应,产生四氟化碳(CF<sub>4</sub>)、六氟乙烷(C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>)等全氟化碳(Perfluorocarbons, PFCs)直接排放;3)电解过程消耗的电力对应的上游火力发电过程,造成 CO<sub>2</sub>间接排放。

## 2 电解铝企业 GHG 排放核算方法分析

### 2.1 国际国内碳排放核算方法

现行的国际国内电解铝行业 GHG 排放核算方法在核算边界、计算公式、参数选择等均有所差异,主要核算方法及特点见表 2。

表 2 国内外电解铝行业温室气体排放核算方法比较  
Table 2 Comparison of greenhouse gas (GHG) emission accounting methods in electrolytic aluminum industry at home and abroad

机构	主要方法	更新年份	核算边界	核算内容		特点
				CO <sub>2</sub> 直接排放	电力间接排放	
联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)	IPCC 国家温室气体清单指南第 3 卷工业过程和制造业使用第 4 章金属工业排放	2023	企业法人	核算 2 部分: 1) 预焙槽排放(包括惰性阳极消耗排放、沥青烟燃烧排放、焙烧炉真空焦炭排放); 2) 自焙槽排放	核算高压阳极效应 CF <sub>4</sub> /C <sub>2</sub> F <sub>6</sub> 排放, 低压阳极效应 CF <sub>4</sub> 排放、电解槽启动 CF <sub>4</sub> /C <sub>2</sub> F <sub>6</sub> 排放量	IPCC 指南提供了 4 种技术类型的铝电解槽计算公式和非排放因子, 提出了 5 种针对高压阳极效应 PFCs 的核算方法, 因电力对应的 CO <sub>2</sub> 排放, 在生产端已进行核算, 在使用电力的电解槽企业端未做核算
国际标准化组织(ISO)	ISO 19694-4 固定源排放, 能源密集型工业中温室气体排放的测定, 第 4 部分: 铝工业	2023	企业法人	核算 2 部分: 1) 预焙槽工艺排放(预焙阳极消耗排放); 2) 焙烧炉排放(包括化石燃料燃烧排放、挥发性物质燃烧排放、焦炭填充料燃烧排放、自焙槽工艺排放)	采取“阳极效应 CF <sub>4</sub> /C <sub>2</sub> F <sub>6</sub> 排放因子 × 原铝年产量 × CF <sub>4</sub> /C <sub>2</sub> F <sub>6</sub> 全球变暖潜势”的计算方式	ISO 19694-4 对 CO <sub>2</sub> 排放的核算方法与 IPCC 指南基本一致, 对 PFCs 的核算按照相对简化的方式进行计算, 未核算电解槽企业使用电力排放的部分
中国国家标准化管理委员会(SAC)	GB/T 32151.4—2015 温室气体排放核算与报告要求 第 4 部分: 铝冶炼企业	2015	企业法人	核算 3 部分: 1) 燃料燃烧排放; 2) 能源作为原材料用途的排放; 3) 过程排放(包括碳酸盐分解排放、CO <sub>2</sub> 回收利用)	采取“阳极效应 CF <sub>4</sub> /C <sub>2</sub> F <sub>6</sub> 排放因子 × 原铝年产量 × CF <sub>4</sub> /C <sub>2</sub> F <sub>6</sub> 全球变暖潜势”的计算方式	GB/T 32151.4—2015 在 IPCC、ISO 等国际核算方法基础上增加了对碳酸盐分解的 CO <sub>2</sub> 排放核算, 增加了电解槽企业使用电力的 CO <sub>2</sub> 排放核算, 核算时采用了区域电网年平均供电排放因子
中华人民共和国生态环境部(MEE)	企业温室气体排放核算与报告填报说明 铝冶炼	2023	企业层级  电解铝工序	核算 3 部分: 1) 化石燃料燃烧; 2) 能源作为原材料用途; 3) 碳酸盐分解排放	采取“[(购入总量 - 购入非化石电量) - (输出非化石电量)] × 电网排放因子”的计算方式  采取“(电解铝工序交流电耗 - 购入非化石电量 - 自发自用非化石电力) × 消耗电力排放因子”的计算方式	该填报说明将核算边界分为企业层级和电解铝工序 2 类, 在 GB/T 32151.4—2015 基础上, 在电解槽企业使用电力的 CO <sub>2</sub> 排放核算中, 对购入非化石电量、自发自用非化石电量按 0 计算, 电力排放因子统一采用生态环境部最新发布的数值

应用层面。国际上核算电解铝行业 GHG 排放主要沿用或参考 IPCC 发布的《国家温室气体排放清单指南》中原铝生产的核算方法,其针对预焙槽、自焙槽技术 CO<sub>2</sub>排放和阳极效应 PFCs 排放提出了多种核算方式,电力消耗对应的 CO<sub>2</sub>排放是在供给端的火力发电部分已进行核算,因此未再次计算<sup>[4]</sup>; ISO 发布了 19694 系列标准用于指导钢铁、水泥、铝等工业行业 GHG 排放核算,在通则性 ISO 19694-1 中明确要求计算电力消耗的 CO<sub>2</sub>排放,并提出排放因子可采用专线、地方、区域或国家电网平均排放因子,针对铝工业的 ISO 19694-4 核算方法与 IPCC 指南基本保持一致<sup>[5-6]</sup>。中国自 2013 年起陆续发布了包括电解铝在内的 3 批次共计 24 项重点行业的 GHG 核算指南,主要采用了碳排放系数法或碳平衡法,对企业生产直接排放及能源消耗间接排放的 GHG 进行核算<sup>[7]</sup>,其中,针对铝冶炼的核算方法于 2015 年以国标 GB/T 32151.4—2015 的形式发布实施<sup>[8]</sup>;生态环境部于 2023 年发布了铝冶炼的 GHG 排放核算与报告填报说明,提出了企业层级和电解铝工序 2 个核算边界,企业层级的核算结果用于铝冶炼企业 GHG 排放数据的定期报告,电解铝工序的核算结果用于支撑全国碳市场建设<sup>[9]</sup>。

研究层面。国际上主要关注基于生命周期分析(LCA)的原铝产品碳足迹研究,MUTHU 等<sup>[10]</sup>认为,碳足迹是对与产品及其供应链相关的 CO<sub>2</sub>和其他 GHG 排放总量的核算,并列举了世界资源研究所(WRI)与世界企业可持续发展协会(WBCSD)发布的《温室气体核算体系:企业核算与报告标准(修订版)》(GHG Protocol)、国际标准化组织(ISO)发布的 ISO 14064 和 ISO 14067、英国标准协会(BSI)发布的《商品和服务在生命周期内的温室气体排放评价规范》(PAS2050)等适用于原铝碳足迹评估的国际通用标准或方法指南;KVANDE 等<sup>[11]</sup>通过分析原铝生产的直接和间接 GHG 排放,认为与核算原铝生产企业的 GHG 排放量相比,对原铝产品碳足迹的评估结果更具有代表性;美国铝业协会对北美生产的原铝产品进行了碳足迹评估,结果表明:由于生产技术进步、落后工艺淘汰、可再生能源电力占

比提高等多因素驱动,2016 年原铝产品碳足迹较 1991 年下降了 49%<sup>[12]</sup>。中国的研究则聚焦于企业或生产工序的 GHG 排放,陈喜平等<sup>[13]</sup>较早开展了电解铝行业 GHG 排放研究,在生产工艺环节明确了炭阳极消耗、阳极效应 PFCs、以及氧化铝生产(石灰石分解)和炭阳极生产(石油焦煅烧、焙烧炉填充焦氧化损失、沥青焦挥发分氧化损失)的核算范围;佟庆等<sup>[14]</sup>结合实际案例分析了全国碳市场建设初期的电解铝企业 GHG 排放核算方法;李春焕等<sup>[15]</sup>提出了包括过程排放(焙烧启动、正常电解、阳极效应)和间接排放(火电消耗)的核算方法。

## 2.2 碳排放核算关键问题分析

确定核算边界是电解铝行业参与全国碳市场的基础性问题。全国碳市场第一个履约周期已于 2021 年底完成交易和履约,首批纳入了发电行业,参考第一个履约周期内的发电企业核算边界为用于生产的发电设施,电解铝行业纳入全国碳市场后的企业核算边界也将框定在电解铝工序<sup>[16]</sup>,即包括炭阳极消耗 CO<sub>2</sub>直接排放、阳极效应 PFCs 排放和消耗交流电对应的 CO<sub>2</sub>排放 3 个部分。

电力消耗对应的 CO<sub>2</sub>排放是电解铝企业 GHG 排放的主要来源,因此电力消耗对应碳排放因子的选择也非常重要。国内各省区之间由于可再生能源禀赋的差异性,省级电网碳排放因子的差距能达到近 10 倍,利用全国因子和省级因子测算的全国电解铝行业 CO<sub>2</sub>排放总量最大相差约为 2 400 万 t<sup>[17]</sup>,考虑到促进企业自身的节能降耗以及区域发展公平性,全国碳市场下电解铝行业的电力消耗核算仍将采用全国统一的电网排放因子。

## 3 电解铝企业碳配额分配方式研判

国际国内各类型碳市场的碳配额分配方法,包括按照行业单位产品碳排放量整体水平划定一条基准线的基准法、考虑企业单位产品碳排放量下降率的历史强度法、考虑企业碳排放量下降率的历史排放量法等,其中涉及电解铝行业的主要采用了基准法,具体见表 3。

表3 国内外电解铝行业碳配额分配方法

Table 3 Carbon quota allocation methods for electrolytic aluminum industry at home and abroad

经济体或地区	启动时间	配额分配方式	参数设置	覆盖气体种类
欧盟	2005年	基准法	基准值:1.541 tCO <sub>2</sub> e/t	直接排放:CO <sub>2</sub> 、PFCs
美国加州	2012年	基准法	基准值:0.371 tCO <sub>2</sub> e/t	直接排放:CO <sub>2</sub> 、PFCs
重庆市	2014年	基准法	基准值:7.755 7 tCO <sub>2</sub> e/t	间接排放:CO <sub>2</sub>
湖北省	2014年	历史法	控排系数:0.953 2 市场调节因子:0.983 6	间接排放:CO <sub>2</sub>
福建省	2016年	基准法	基准值:8.15 tCO <sub>2</sub> e/t	间接排放:CO <sub>2</sub>

从国际碳市场看,欧盟、美国加州等主要碳市场的配额分配均采用了“产品产量×碳排放强度行业基准值”的基准法,由于仅覆盖电解铝生产的CO<sub>2</sub>和PFCs直接排放,基准值均偏小<sup>[18]</sup>。从中国国内碳市场试点省区市看,重庆市、福建省均采用了基准法,因覆盖范围为铝电解工序交流电耗的间接排放,基准值均偏大<sup>[19-20]</sup>;湖北省采用了“历史排放基数×行业控排系数×市场调节因子÷365×正常生产天数”的历史法<sup>[21]</sup>。综合来看,基准法是对整体行业的平均生产水平提出碳减排要求,有利于激励技术水平高、碳排放强度低的先进企业,对企业个体的碳减排要求有一定的弹性空间;历史法则是对企业个体提出了逐年下降的较为刚性的碳减排要求。

目前的全国碳市场正处于初期运行阶段,总体上是一个基于强度的碳市场,碳配额分配取决于行业碳排放基准和企业实际生产水平,由于碳配额量与实际产出相关,形成的是一个较灵活的总量机制<sup>[22]</sup>。按此方法,在基准线水平以上的企业,其实际产量越高,对应的配额盈余量也越高,在碳市场中能够获益;在基准线水平以下的企业,若是多生产,则会带来更大的配额赤字压力。结合国际碳市场和国内碳市场试点的电解铝行业配额分配多采用基准法、以及全国碳市场中发电行业已采用基准法的分配经验,未来全国碳市场在电解铝行业的碳配额分配宜采用基准法。

## 4 云南电解铝行业碳排放现状及面临挑战

### 4.1 云南电解铝行业碳排放现状

云南省依托可再生能源资源优势持续发展可再生能源与制造业相融合的“绿色铝”产业,同时,环保、高效的大型预焙阳极电解槽已成为电解铝生产的主要工艺。根据对全省电解铝企业碳排放情况调研,截至2022年底,省内电解铝企业有11家、生产线

16条,其中,400 kA及以上槽型电解铝产能占比达68.8%,500 kA及以上占比37.5%,建成600 kA生产线一条。

如图2所示,由于省内电解铝企业现用工艺技术在能效提升方面的潜力较为有限,加之交流电耗CO<sub>2</sub>间接排放的核算采用全国统一的电网排放因子,2016—2021年省内各企业间电解工序的吨铝产品碳强度(包括炭阳极消耗CO<sub>2</sub>直接排放、阳极效应PFCs直接排放、交流电耗CO<sub>2</sub>间接排放)在9.2~10.4 tCO<sub>2</sub>e,年度各企业间差距较小,2022年由于600 kA大型预焙槽投产、电力供应趋紧、能耗双控政策趋严等多重因素交织,导致当年度企业间吨铝产品碳强度最大差距拉大至1.4 tCO<sub>2</sub>e。如图3所示,2016—2021年全省电解铝企业的产品碳强度平均值变化幅度较小,吨铝产品碳强度在9.5~9.9 tCO<sub>2</sub>e,整体优于全球平均水平(数据引自 IAD),2022年全省电解铝产品碳强度不降反升,已接近全球平均水平。

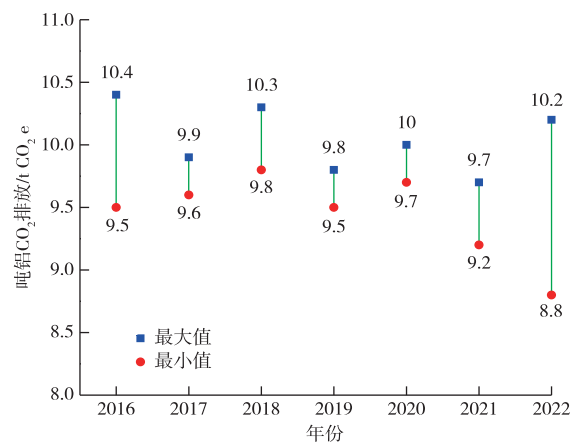


图2 2016—2022年云南省电解铝企业产品碳强度范围  
Fig. 2 Carbon intensity range of products of aluminum electrolysis enterprises in Yunnan province from 2016 to 2022

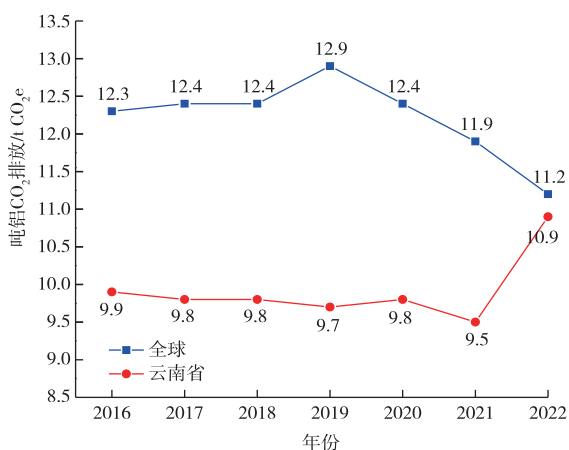


图3 2016—2022年云南省电解铝产品碳强度与全球平均水平比较

Fig. 3 Comparison of carbon intensity of electrolytic aluminum products in Yunnan province and global average level from 2016 to 2022

## 4.2 面临挑战

### 4.2.1 电力CO<sub>2</sub>排放存在重复计算问题

因国家层面考虑到碳价在现行电力市场运行管理机制下向产品市场转移成本的能力有限,同时为挖掘电力消费侧的重要减碳潜力,全国碳市场将企业使用电力对应的间接排放纳入了核算范围<sup>[22]</sup>。但火电对应的碳排放在生产端和消费端被重复计算的问题依然需要研究解决,按照全国碳市场第一个履约周期发电行业约45亿t的CO<sub>2</sub>排放量估算,未来随着水泥、铝、钢铁等非电工业行业相继启动交易,因使用电力重复核算的CO<sub>2</sub>间接排放量也将达到数十亿t,对于包括云南省在内的发电企业和非电工业企业,未来将面临电力在生产端和消费端“双向付费”的问题。

### 4.2.2 云南可再生能源电力优势未能在全国碳市场中体现

客观来看,电解铝作为高耗电行业,使用水、风、光等可再生能源电力能够大幅降低企业的实际CO<sub>2</sub>排放量,这也是近年来电解铝新增产能逐渐向可再生能源富集地区转移的重要因素<sup>[23]</sup>。云南可再生能源资源丰富,省级电网CO<sub>2</sub>排放因子仅是山东、新疆等省区的1/5<sup>[24]</sup>,但由于全国碳市场在核算企业碳排放时采用全国统一的电网排放因子,布局于云南等可再生能源富集省份的电解铝企业未来进入全国碳市场后,无法体现使用可再生能源电力方面获得抵扣相应排放量的优势。

### 4.2.3 电力供应稳定性一定程度影响铝企业可持续发展

气候变化与可再生能源供给密切相关,近年来

水电资源富集的西南省份受高温干旱的极端气候影响,出现了水电出力不足导致电力供应趋紧的情况<sup>[25]</sup>,加之节能政策等多重因素叠加,出现了限电限产的情况,对电解铝企业的可持续发展产生了一定程度的影响<sup>[26]</sup>。电解铝生产具有连续性特点,如因电力供给等问题停槽,电解槽重启不仅会增加经济成本,重启后的非正常期内还存在能耗水平下降、污染排放增加等情况<sup>[27]</sup>。

### 4.2.4 铝产品出口面临欧盟碳边境调节机制(CBAM)的挑战

欧盟CBAM已于2023年10月正式生效,覆盖范围包括了原铝生产主要环节的初级、中间和下游的14类产品,尽管目前针对铝产品只核算直接排放,但欧盟CBAM如在下一阶段将铝产品的电力间接排放纳入核算范围,将大幅增加国内铝及铝制品出口至欧盟的成本<sup>[28-29]</sup>。尽管欧盟CBAM将对已实施碳定价机制和碳市场建设的国家设置相应的抵扣政策,但由于目前国内以全国碳市场为主要形式的碳定价机制尚不成熟,导致国内出口欧盟的铝产品短期内还无法享受部分抵扣的政策。此外,铝产品的电力间接排放占比大,由于绿色电力消费与电力碳排放核算的链接机制尚未捋清,使得以云南为代表的可再生能源富集省份在核算电解铝等工业产品碳足迹时难以体现可再生能源电力“零排放”的特征。

## 5 电解铝绿色低碳发展的路径建议

尽管云南省内电解铝企业的生产水平正不断提高,但在全国碳市场碳配额总量逐年紧缩的背景下,企业碳减排压力依然存在,同时,可再生能源电力价值难以体现、电力持续稳定供给能力不足、产品出口受CBAM波及等问题正逐渐显现。针对以上问题,提出以下建议。

#### 1) 企业碳配额分配时考虑绿电激励系数

风、光、水等可再生能源电力支撑电解铝企业的绿色低碳发展是客观事实,国家于2023年7月印发的关于健全完善可再生能源绿色电力证书制度的政策文件中,已明确了包括水电在内的可再生能源电力的绿色属性<sup>[30]</sup>。为体现可再生能源电力的CO<sub>2</sub>零排放属性,同时兼顾碳市场交易的公平性,参考发电行业配额分配时引入修正系数的方法<sup>[31]</sup>,可以在分配电解铝企业碳配额时增加一个0.01~0.05的绿电激励系数,在各省能源资源禀赋基础上分别提出差异化的各省区市可再生能源消纳权重<sup>[32]</sup>,当企业的绿电消费比例超过所在省区市既定的可再生能源消

纳比例时,按超出的部分确定绿电激励系数。以此适当增加碳配额的方式,能够激励电解铝企业更多使用可再生能源电力。

#### 2) 系统开展原铝及其上下游产品碳足迹研究

产品碳足迹是对供应链上下游 CO<sub>2</sub> 排放的完整刻画和科学评价,依托可再生能源优势深化铝产品碳足迹研究能够有助于积极应对 CBAM 带来的负面影响。研究表明,将生产用能从化石能源电力转向可再生能源电力是大幅降低铝产品碳足迹的有效手段<sup>[33]</sup>,以澳大利亚的铁合金产品碳足迹评价为例,以水电资源富集的企业所在地电力 CO<sub>2</sub> 排放因子替代全国平均因子,产品 CO<sub>2</sub> 排放量能够下降 42%~67%<sup>[34]</sup>。由于目前国内产品碳足迹体系建设尚处于起步阶段,因此有必要针对原铝及其上下游产品,系统分析供应链碳减排关键点、绿色产业链与绿色供应链协同点,构建行业产品碳足迹背景数据库,形成体现高绿色电力占比等地方特点的重点产品生命周期碳足迹基准,科学客观体现铝产品的低碳特征。

#### 3) 依托产品探索碳减排价值实现机制

探索打造低 CO<sub>2</sub> 排放的铝产品,有利于为企业塑造绿色形象、提升核心竞争力提供有力支撑。当前,国外的海德鲁铝业、美铝、俄铝等众多企业纷纷推出多项低碳铝产品,而国内低碳铝产品仅有两种<sup>[35]</sup>,因此有必要进一步强化低碳品牌建设和品牌价值提升。同时,以低碳铝产品打造等为切入点,探索一条碳减排价值实现的路径,通过可再生能源电力碳减排价值实现,更好反哺到本地区的可再生能源行业持续发展,进而强化对电解铝等工业企业的电力供给能力,围绕碳减排价值实现形成“价值转化、效益反哺、能源保供”的良性循环,强化对电解铝企业可持续发展的保障能力。

#### 4) 谋划推动工艺技术体系改进及革新

电解铝生产普遍采用的霍尔-埃鲁法已经过 100 多年的工艺优化,通过提高生产效率减少 CO<sub>2</sub> 排放的潜力已极为有限<sup>[36]</sup>,需要以对现有工艺技术体系进行改进、甚至变革的方式实现碳减排目标。从改进方面,应探索能够降低槽电压和提高电流效率的铝电解槽结构优化技术,以及针对电解槽槽壳散热及高温烟气的余热利用技术<sup>[37]</sup>;从变革方面,应探索 CO<sub>2</sub> 和 PFCs 趋近零排放的惰性阳极铝电解技术、较低电耗的低温铝电解技术、以及铝电解烟气 CO<sub>2</sub> 捕集利用技术<sup>[38-39]</sup>。通过对电解铝生产工艺技术的改进及革新,加之在用能前端实施可再生能源

替代和火电脱碳,合力打造零碳铝企业。

## 6 结束语

电解铝是铝工业 GHG 排放的主要环节,在全国碳市场即将纳入电解铝行业、铝产品出口面临 CBAM 等“碳关税”不利影响的背景下,有必要进一步推动电解铝行业企业的绿色低碳发展。在不断完善全国碳市场交易制度设计的基础上,充分发挥电解铝企业所在区域可再生能源资源禀赋、产业链条完整性和规模化等优势特点,谋划推动生产工艺技术体系改进和革新,从政策制度、市场机制、技术创新等多维度发力,深化电解铝行业企业的绿色低碳发展水平,在落实国家碳达峰碳中和目标任务中锻造新的行业企业竞争优势。

### 参考文献

- [1] International Aluminium Institute. Statistics: Greenhouse Gas Emissions-Aluminium Sector[EB/OL]. [2024-02-08]. <https://international-aluminium.org/statistics/greenhouse-gas-emissions-aluminium-sector/>.
- [2] 王科,吕晨. 中国碳市场建设成效与展望(2024)[J/OL]. 北京理工大学学报(社会科学版);1-15[2024-02-08]. <https://doi.org/10.15918/j.jbitss1009-3370.2024.7182>. WANG K,LYU C. Achievements and prospect of China's national carbon market construction (2024)[J/OL]. Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition); 1-15[2024-02-08]. <https://doi.org/10.15918/j.jbitss1009-3370.2024.7182>.
- [3] WANG J Y,ZHAO Q F, NING P, et al. Greenhouse gas contribution and emission reduction potential prediction of China's aluminum industry[J]. Energy, 2024,290:130183. DOI:10.1016/j.energy.2023.130183.
- [4] Intergovernmental Panel on Climate Change. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories[EB/OL]. [2024-02-08]. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/index.html>.
- [5] International Organization for Standardization. Stationary source emissions: determination of greenhouse gas emissions in energy-intensive industries-part 1: general aspects: ISO 19694-1-2021[S]. Switzerland: International Organization for Standardization,2021.
- [6] International Organization for Standardization. Stationary source emissions: determination of greenhouse gas emissions in energy-intensive industries-part 4: aluminium industry:ISO 19694-4-2023[S]. Switzerland: International Organization for Standardization,2023.

- [7] 刘强,陈亮,段茂盛,等.中国制定企业温室气体核算指南的对策建议[J].气候变化研究进展,2016,12(3):236-242.  
LIU Q, CHEN L, DUAN M S, et al. Policy suggestions for establishing GHG emission accounting guideline at the enterprise level in China[J]. Climate Change Research, 2016, 12(3): 236-242.
- [8] 全国碳排放管理标准化技术委员会.温室气体排放核算与报告要求 第4部分:铝冶炼企业:GB/T 32151.4—2015[S].北京:中国标准出版社,2015.  
National Carbon Emission Management Standardization Technical Committee. Requirements of the greenhouse gas emission accounting and reporting part 4: aluminum smelting production enterprise: GB/T 32151. 4—2015 [S]. Beijing: China Standards Press, 2015.
- [9] 生态环境部办公厅.关于做好2023—2025年部分重点行业企业温室气体排放报告与核查工作的通知[EB/OL]. [2024-02-08]. [https://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk06/202310/t20231018\\_1043427.html](https://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk06/202310/t20231018_1043427.html).  
General Office of the Ministry of Ecology and Environment. Notice on the report and verification of greenhouse gas emissions of enterprises in some key industries from 2023 to 2025 [EB/OL]. [2024-02-08]. [https://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk06/202310/t20231018\\_1043427.html](https://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk06/202310/t20231018_1043427.html).
- [10] MUTHU S S. Environmental carbon footprints: industrial case studies[M]//GAUTAM M, PANDEY B, AGRAWAL M. Chapter 8: carbon footprint of aluminum production: emissions and mitigation. Amsterdam: Elsevier, 2017: 197-228.
- [11] KVANDE H, SAEVARSDOTTIR G, WELCH B J. Direct and indirect CO<sub>2</sub> equivalent emissions from primary aluminium production[C]//Light Metals 2022. Switzerland: Springer Cham, 2022: 998-1003.
- [12] The Aluminum Association. The environmental footprint of semi-fabricated aluminum products in North America: a life cycle assessment report [R/OL]. [2024-02-08]. <https://www.aluminum.org/aluminum-carbon-footprint-cut-half-over-30-years>.
- [13] 陈喜平,李旺兴,邱仕麟.电解铝行业二氧化碳排放研究[J].轻金属,2012(7):33-36.  
CHEN X P, LI W X, QIU S L. Studying on carbon dioxide emission from primary aluminium industry[J]. Light Metals, 2012(7): 33-36.
- [14] 佟庆,姜冬梅,魏欣旸.全国碳市场电解铝企业温室气体核算方法与案例解析[J].生态经济,2019,35(3):23-26.  
TONG Q, JIANG D M, WEI X Y. Greenhouse gas accounting method and case analysis of electrolytic aluminum enterprises covered by China carbonmarket[J]. Ecological Economy, 2019, 35(3): 23-26.
- [15] 李春焕,曹阿林.铝电解工业碳排放核算方法[J].有色金属(冶炼部分),2023(3):47-52.  
LI C H, CAO A L. Carbon emission accounting methods for aluminum electrolysis industry [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2023(3): 47-52.
- [16] 生态环境部.全国碳排放权交易市场第一个履约周期报告[R/OL]. [2024-02-08]. <https://www.mee.gov.cn/ywgz/ydqhbh/wsqtz/202212/P020221230799532329594.pdf>.  
Ministry of Ecological Environment. Report on the first compliance cycle of the national carbon emission trading market [R/OL]. [2024-02-08]. <https://www.mee.gov.cn/ywgz/ydqhbh/wsqtz/202212/P020221230799532329594.pdf>.
- [17] 邱忠涛,金艳鸣,徐沈智.全国碳市场扩容下电力平均排放因子选择对高耗能产业的影响分析[J].中国电力,2023,56(12):1-7.  
QIU Z T, JIN Y M, XU S Z. Impacts of electricity emission factor selection on high energy-consuming industries with the expanded national carbonmarket[J]. Electric Power, 2023, 56(12): 1-7.
- [18] 惠婧璇,朱松丽.全国碳排放权交易市场下电解铝行业基准线法研究[J].气候变化研究进展,2022,18(3):366-372.  
HUI J X, ZHU S L. Study on the benchmark method of China's electrolytic aluminum sector under national carbon emission trading market [J]. Climate Change Research, 2022, 18(3): 366-372.
- [19] 重庆市生态环境局办公室.关于做好重庆碳市场2021和2022年度配额分配及清缴相关工作的通知[EB/OL]. [2024-02-08]. [https://sthjj.cq.gov.cn/zwgk\\_249/zfxxgkml/zcwj/qtwj/202311/t20231121\\_12586841.html](https://sthjj.cq.gov.cn/zwgk_249/zfxxgkml/zcwj/qtwj/202311/t20231121_12586841.html).  
Chongqing Ecological Environment Bureau Office. Notice on the allocation and settlement of quotas for Chongqing carbon market in 2021 and 2022 [EB/OL]. [2024-02-08]. [https://sthjj.cq.gov.cn/zwgk\\_249/zfxxgkml/zcwj/qtwj/202311/t20231121\\_12586841.html](https://sthjj.cq.gov.cn/zwgk_249/zfxxgkml/zcwj/qtwj/202311/t20231121_12586841.html).
- [20] 福建省生态环境厅.关于印发福建省2021年度碳排放配额分配实施方案的通知[EB/OL]. [2024-02-08]. [https://sthjt.fujian.gov.cn/zwgk/zfxxgkzl/zfxxgkml/mlwrfz/202212/t20221201\\_6068935.htm?eqid=c10151db000a4b4300000066437f6a7](https://sthjt.fujian.gov.cn/zwgk/zfxxgkzl/zfxxgkml/mlwrfz/202212/t20221201_6068935.htm?eqid=c10151db000a4b4300000066437f6a7).  
Fujian Provincial Department of Ecology and Environment. Notice on the issuance of Fujian province 2021 carbon emission quota allocation implementation plan [EB/OL].

- [2024-02-08]. [https://sthjt.fujian.gov.cn/zwgk/zfxxgkzl/zfxxgkml/mlwrfz/202212/t20221201\\_6068935.htm?eqid=c10151db000a4b43000000066437f6a7](https://sthjt.fujian.gov.cn/zwgk/zfxxgkzl/zfxxgkml/mlwrfz/202212/t20221201_6068935.htm?eqid=c10151db000a4b43000000066437f6a7).
- [21] 湖北省生态环境厅. 关于印发《湖北省 2022 年度碳排放权配额分配方案》的通知[EB/OL]. [2024-02-08]. [https://sthjt.hubei.gov.cn/fbjd/zc/zcwj/sthjt/ehh/202311/t20231107\\_4929757.shtml](https://sthjt.hubei.gov.cn/fbjd/zc/zcwj/sthjt/ehh/202311/t20231107_4929757.shtml). Hubei Provincial Department of Ecology and Environment. Notice on the issuance of the Hubei 2022 carbon emission rights quota allocation plan [EB/OL]. [2024-02-08]. [https://sthjt.hubei.gov.cn/fbjd/zc/zcwj/sthjt/ehh/202311/t20231107\\_4929757.shtml](https://sthjt.hubei.gov.cn/fbjd/zc/zcwj/sthjt/ehh/202311/t20231107_4929757.shtml).
- [22] 张希良,张达,余润心. 中国特色全国碳市场设计理论与实践[J]. 管理世界,2021,37(8):80-95. ZHANG X L, ZHANG D, YU R X. Theory and practice of China's national carbon emissions trading system [J]. Journal of Management World, 2021, 37(8):80-95.
- [23] 刘亚德. 碳中和愿景下的国内电解铝布局趋势分析[J]. 轻金属,2021(4):1-4. LIU Y D. Analysis on the layout trend of domestic electrolytic aluminum under the vision of carbonneutralization[J]. Light Metals,2021(4):1-4.
- [24] 生态环境部环境规划院. 中国区域电网二氧化碳排放因子研究(2023)[R/OL]. [2024-02-08]. [https://www.caep.org.cn/sy/tdftzhyjzx/zxdt/202310/t20231027\\_1044179.shtml](https://www.caep.org.cn/sy/tdftzhyjzx/zxdt/202310/t20231027_1044179.shtml). Chinese Academy of Environmental Planning. China regional power grids carbon dioxide emission factors (2023) [R/OL]. [2024-02-08]. [https://www.caep.org.cn/sy/tdftzhyjzx/zxdt/202310/t20231027\\_1044179.shtml](https://www.caep.org.cn/sy/tdftzhyjzx/zxdt/202310/t20231027_1044179.shtml).
- [25] 周业荣,毛玉鑫,胡杨,等. 2022 年夏季极端天气对四川电力影响与启示[J]. 水力发电学报,2023,42(6):23-29. ZHOU Y R, MAO Y X, HU Y, et al. Impacts of extreme weather on Sichuan power in summer of 2022 and its enlightenment [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2023, 42(6):23-29.
- [26] 李相白,李建春. 碳足迹下云南绿色铝产业发展研究[J]. 云南科技管理,2022,35(2):10-12. LI X B, LI J C. Study on the development of green aluminum industry in Yunnan under carbon footprint[J]. Yunnan Science and Technology Management, 2022, 35(2):10-12.
- [27] CHENG K, ZHANG J Y, YI P, et al. Exploring the emission characteristics and reduction potential of air pollutants from Chinese aluminum industry:2005—2025[J]. Earth Future,2020,8(11):1-15.
- [28] European Commission. Carbon border adjustment mechanism[EB/OL]. [2024-02-08]. [https://taxation-customs.ec.europa.eu/carbon-border-adjustment-mechanism\\_en#cbam](https://taxation-customs.ec.europa.eu/carbon-border-adjustment-mechanism_en#cbam).
- [29] 段茂盛,李莉娜,陶玉洁. 欧盟碳边境调节机制:浅析欧盟委员会的立法提案及其对中国的潜在影响[R/OL]. [2024-02-08]. <http://www.3e.tsinghua.edu.cn/cn/article/116>. DUAN M S, LI L N, TAO Y J. European Commission carbon border adjustment mechanism: a brief analysis of the European Commission's legislative proposal and its potential impact on China[R/OL]. [2024-02-28]. <http://www.3e.tsinghua.edu.cn/cn/article/116>.
- [30] 国家发展和改革委员会. 关于做好可再生能源绿色电力证书全覆盖工作促进可再生能源电力消费的通知[EB/OL]. [2024-02-08]. [https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202308/t20230803\\_1359093.html](https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202308/t20230803_1359093.html). National Development and Reform Commission. Notice on the promotion of renewable energy electricity consumption through full coverage of renewable energy green electricity certificates [EB/OL]. [2024-02-08]. [https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202308/t20230803\\_1359093.html](https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202308/t20230803_1359093.html).
- [31] 生态环境部. 关于做好 2021、2022 年度全国碳排放权交易配额分配相关工作的通知[EB/OL]. [2024-02-08]. [https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2023-03/16/content\\_5747106.htm](https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2023-03/16/content_5747106.htm). Ministry of Ecological Environment. Notice on the allocation of national carbon emission rights trading quotas in 2021 and 2022[EB/OL]. 2023-3-13[2024-02-08]. [https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2023-03/16/content\\_5747106.htm](https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2023-03/16/content_5747106.htm).
- [32] 黄国日,尚楠,梁梓杨,等. 绿色电力消费与碳交易市场的链接机制研究[J]. 电网技术,2024,48(2):668-678. HUANG G R, SHANG N, LIANG Z Y, et al. Research on the linkage mechanism between green power consumption and the carbon market[J]. Power System Technology, 2024, 48(2):668-678.
- [33] SAEVARSDOTTIR G, MAGNUSSON T, KVANDÉ H. Reducing the carbon footprint: primary production of aluminum and silicon with changing energy systems[J]. Journal of Sustainable Metallurgy, 2021, 7(3):848-857.
- [34] HAQUE N, NORGATE T. Estimation of greenhouse gas emissions from ferroalloy production using life cycle assessment with particular reference to Australia[J]. Journal of Cleaner Production, 2013, 39:220-230.

- [35] 丁宁,郭廷宏,王祝堂.世界低碳绿色铝及铝产品概览[J].铝加工,2023(3):3-11.  
DING N, GUO T H, WANG Z T. Overview of the world's low-carbon green aluminium and aluminium products[J]. Aluminium Fabrication, 2023(3):3-11.
- [36] 王威,吴晶晶,葛亚平,等.双碳背景下碳排放核算法及策略分析:以铜铝行业为例[J].有色金属(冶炼部分),2022(4):1-11.  
WANG W, WU J J, GE Y P, et al. Carbon emission accounting method and strategy analysis under the background of double carbon: taking copper and aluminum industry as an example [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2022(4):1-11.
- [37] 郑诗礼,叶树峰,王倩,等.有色金属工业低碳技术分析  
与思考[J].过程工程学报,2022,22(10):1333-1348.  
ZHENG S L, YE S F, WANG Q, et al. Analysis and thinking of low-carbon technology in non-ferrous metal industry [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2022, 22(10):1333-1348.
- [38] SAEVARSDOTTIR G, PADAMATA S K, VELASQUEZ B N, et al. The way towards zero carbon emissions in aluminum electrolysis [C]//Light Metals 2023. Switzerland: Springer Cham, 2023:637-645.
- [39] SHEN A X, ZHANG J H. Technologies for CO<sub>2</sub> emission reduction and low-carbon development in primary aluminum industry in China: a review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2024, 189:113965. DOI:10.1016/j.rser.2023.113965.

(上接第 61 页)

- [12] 马珍.盐湖锂资源高效分离提取技术研究进展[J].无机盐工业,2022,54(10):22-29.  
MA Z. Progress of efficient separation and extraction technology of lithium resources from salt lake [J]. Inorganic Salt Industry, 2022, 54(10):22-29.
- [13] 于潇,孙淑英,于建国.层状吸附剂提锂过程研究[J].无机盐工业,2017,49(12):23-26,49.  
YU X, SUN S Y, YU J G. Study on the process of lithium extraction by layered adsorbent [J]. Inorganic Salt Industry, 2017, 49(12):23-26, 49.
- [14] BI Q Y, ZHANG Z Q, ZHAO C Y, et al. Study on the recovery of lithium from high Mg<sup>2+</sup>/Li<sup>+</sup> ratio brine by nanofiltration [J]. Water Science and Technology, 2014, 70(10):1690-1694.
- [15] 康为清,时历杰,赵有璟,等.纳滤法用于盐湖卤水镁锂分离的初步实验[J].无机盐工业,2014,46(12):22-24.  
KANG W Q, SHI L J, ZHAO Y J, et al. Preliminary experiments of nanofiltration for magnesium-lithium separation from brine in a salt lake [J]. Inorganic Salt Industry, 2014, 46(12):22-24.
- [16] 温现明.荷电膜在盐湖卤水中的传递性质研究[D].西宁:中国科学院研究生院(青海盐湖研究所),2006.  
WEN X M. Study on the transfer properties of charged membranes in salt lake brine [D]. Xi'ning: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Qinghai Salt Lake Research Institute), 2006.