

[1]张悦泽,刘牧心,黄菲菲,等.碳关税全球化背景下碳捕集利用与封存技术的价值评估与未来展望[J/OL].洁净煤技术,1-13[2024-11-19].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3676.TD.20230818.0938.002.html>.

碳关税全球化背景下碳捕集利用与封存技术的价值评估与未来展望

张悦泽^{1,2}, 刘牧心^{3,4*}, 黄菲菲¹, 梁希⁵, 夏菖佑⁵, 王莉⁵

(1.广州城市理工学院经济学院, 广东 广州 510800; 2.北京市地质调查研究所, 北京 102206; 3.华南理工大学工商管理学院, 广东 广州 510641; 4.广东南方碳捕集与封存产业中心, 广东 广州 510440)

摘要:近年来,全球范围内多个发达国家均表示考虑制定类似欧洲碳边境调节机制(CBAM)的碳关税机制,该类机制的制定正在形成一种全球化的趋势,未来将严重影响我国高碳排放行业的国际贸易形势。碳捕集、利用与封存技术(CCUS)通过减少产品单位碳排放强度,有望在碳关税机制下迎来较大的应用空间。为评估CCUS项目的部署在应对碳关税机制过程中的价值与潜力,本文针对优先被纳入碳关税机制下的水泥、电力、化肥、钢铁和铝五大行业,通过调研分析各行业的对外出口总量和行业与CCUS技术的适配性,利用ARIMA模型、CCUS成本学习曲线,对重点行业未来产品出口趋势、各行业CCUS部署规模趋势和CCUS成本下降趋势进行预测。结果显示,水泥、钢铁和化肥行业具备通过CCUS技术应对碳关税机制的潜力,不同情境下可为上述行业节省32%-64%的出口成本。

关键词:碳边境调节机制;碳捕集、利用与封存;ARIMA模型;CCUS成本学习曲线

中图分类号: X196

文献标志码: A

Valuation and Future Perspectives of Carbon Capture, Utilization, and Storage in the Global Context of Carbon Border Tax

ZHANG Yueze^{1,2}, LIU Muxin^{3,4*}, HUANG Feifei¹, LIANG Xi⁴, XIA Changyou⁴, WANG Li⁴

(1. School of Economics, Guangzhou City University of Technology, Huadu District, Guangzhou 510800, China; 2. Beijing Institute of Geological Survey, Changping District, Beijing 102206, China; 3. School of Business Administration, South China University of Technology, Tianhe District, Guangzhou 510640, China; 4. Guangdong CCUS Centre, Huangpu District, Guangzhou 510440, China)

Abstract: several developed countries worldwide have considered implementing carbon border tax mechanisms like the European Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM). This trend is shaping a global movement that will significantly impact China's high-carbon emission industries in international trade. Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS) technology, reducing product carbon intensity, holds promising potential under carbon border tax mechanisms. To assess the value and potential of CCUS projects in addressing carbon border taxes, this study focuses on prioritized industries, including cement, power, fertilizer, steel, and aluminum. By analyzing export volumes and industry-CCUS compatibility, the study uses ARIMA models and CCUS cost learning curves to forecast product export trends, CCUS deployment, and cost reductions. Results show that the cement, steel, and fertilizer industries have the potential to address carbon border tax mechanisms through CCUS technology, allowing these industries to save 32% to 64% of export costs under different scenarios.

Key words: carbon border adjustment mechanism (CBAM); carbon capture, utilization and storage (CCUS);

0 引言

2023年2月9日, 欧洲议会环境委员会 (ENVI) 投票通过了碳边境调节机制 (Carbon Border Adjustment Mechanism, CBAM) 的协议文本, 并确定该机制将于2023年10月起正式进入实施阶段。在CBAM机制下, 欧盟将对进口的部分商品征收碳关税, 以期实现进口商品和欧盟商品相同的碳减排成本^[1]。CBAM机制的由来需要追溯到“碳关税”的概念, 是指在边境上对进口的高碳排放产品加征关税。广义的碳关税是指在《京都议定书》背景下提出的对碳税和碳排放权交易机制的“弥补性”措施, 该措施可以为采纳了碳定价制度的国家拉平进口产品与本国产品的生产成本; 狭义的碳关税特指欧盟即将实施的CBAM机制, 是广义碳关税概念中的一种具体形式。根据欧盟统计局和国家发改委经贸司的最新统计数据^[2,3], 中国于2020年首次成为了欧盟最大的贸易伙伴, 并实现了连续三年对欧出口贸易总额的高速增长, 分别为3835亿欧元、4720亿欧元、6260亿欧元, 因此CBAM机制将对中国的对外贸易产生较大冲击。与此同时, 除欧盟外, 美国、加拿大、日本、澳大利亚等国均在考虑制定类似CBAM的碳关税方案^[4]。

自CBAM机制提出以来, 许多学者认为CBAM是欧盟“借应对气候变化之名, 行贸易保护之实”, CBAM与《联合国气候变化公约》、自由贸易条款、WTO规则等均存在冲突, 单边的碳关税措施应当收到抵制^[5,6]。如果欧盟CBAM正式实施, 将严重冲击我国的对外贸易。根据测算, CBAM机制将使我国受影响部门的对欧出口总额降低11%-13%, 出口成本增加1-3.05亿美元^[7], 同时还会间接降低我国的国民福利、威胁中小企业生存、拖慢经济发展速度。在此背景下, 有学者认为未来发达国家在碳关税问题上将呈现合流之势, 进而冲击全球应对气候变化的基本框架, 新兴和发展中国家将面临更为严峻的减排形势^[8]。因此, 为了更好的应对碳关税全球化的趋势, 张晓云等^[9]建议加快完善国内碳

市场建设, 推动相关行业实现低碳转型。王一鸣等^[10]认为我国应积极应对即将到来的全球性碳关税变局, 企业需大力推进零碳能源技术、深度脱碳技术、能效提升技术创新, 扩大低碳产品的出口能力。晏清等^[11]建议鼓励重点企业瞄准世界先进水平, 加强减碳、零碳、负碳技术的合作创新与绿色低碳技术的引进。

综合来看, 在我国碳中和气候目标和未来碳关税机制越来越不可避免的双重背景下, 我国部分在国际贸易中占重要地位的高排放工业企业将面临巨大的减排压力, 尽快开展低碳技术创新、降低产品单位碳排放强度, 将成为该类企业未来能否实现对外贸易可持续发展的重点。碳捕集利用与封存技术 (Carbon Capture Utilization and Storage, CCUS) 是高排放工业企业在碳中和目标下实现大规模减排的关键技术之一, 该技术在多个行业已经实现了规模化验证^[12-15]。根据CBAM机制草案的规定, 对于未承担减排成本的进口商品, 将以欧盟碳市场的配额价格征收碳关税; 而如果进口商品在其生产国已经承担了一定的排放成本, 那么这部分成本在CBAM机制中将予以扣除。因此, CCUS技术在碳关税机制下将迎来较大的应用空间, 对于被纳入碳关税机制且具有较高CCUS应用潜力的企业而言, 尽早开展CCUS项目规划以应对即将到来的碳关税机制, 将使其产品在未来更加严峻的国际贸易环境下占得先机, 同时也是响应国家碳中和目标号召, 助力我国实现碳中和的具体实践。

本文针对优先被纳入CBAM机制下的水泥、电力、化肥、钢铁和铝五大行业, 通过调研分析各行业的对外出口总量和行业与CCUS技术的适配性, 筛选适合通过CCUS技术应对碳关税机制的行业。基于国家对外贸易统计数据和科技部关于我国CCUS发展规划, 利用优化的ARIMA模型预测各行业未来出口趋势和各行业CCUS发展趋势, 结合CCUS技术学习曲线预测CCUS成本下降趋势, 计算在全球实施碳关税机制情境下利用CCUS技术可以最终避免缴纳的碳关税, 评估CCUS技术发展与

碳关税之间的关系，为企业制定 CCUS 发展规划提供依据，为我国未来在 CCUS 技术的部署抉择上提供借鉴和参考。

1 碳关税机制下关键产品贸易情况

根据欧盟 CBAM 机制的实施计划，首先被纳入该机制的包括水泥、电力、化肥、钢铁和铝五个行业产品，其他产品的纳入尚未有明确的时间规划。因此，上述五个行业在未来全球范围内建立碳关税机制的情境下，也极有可能是被优先纳入征税范围内的行业。其中，我国目前电力供应依旧主要依靠煤电，虽然煤电装机占全国电力总装机容量 2020 年首次低于 50%，但全国仍有 10.8 亿千瓦煤电装机在运行，而且大多数燃煤电厂是在过去 15 年内投产运行的，距离煤电厂正常退役还有 20-30 年时间，因此电力行业的 CCUS 部署本身就是我国实现双碳目标必不可少的关键举措。同时，电力行业 CCUS 的

部署与其他行业产品单位碳排放存在复杂的间接影响关系，且考虑到中国电力属于自产自销，不存在直接的对外电力贸易，因此本研究中暂不考虑碳关税机制对电力行业的直接影响。

根据《中国统计年鉴——2022》数据显示^[16]，2021 年中国出口的水泥、化肥、钢铁和铝分别为 220 万吨、3298 万吨、6686 万吨和 562 万吨，对应的出口额分别为 117108 万元、7543667 万元、52811616 万元和 12571233 万元，总计占 2021 年中国对外贸易总额的 3.37%（表 1）。虽然这四个行业的出口额在对外贸易总额的占比较少，但根据目前各个行业官方公布的单位产品碳排放强度进行推算，出口的水泥、化肥、钢铁和铝对应的隐含碳排放分别为 149.16 万吨、5210.84 万吨、13752.58 万吨和 955.4 万吨。如果对这些隐含碳排放落实碳关税政策，将直接给相关企业带来巨大的经济压力。

表 1 中国水泥、化肥、钢铁和铝出口情况及隐含碳排放

Table.1 Exports of cement, fertilizer, steel and aluminum and their implied carbon emissions in China

| 产品类别 | 出口量 (万吨) | 出口额 (万元) | 出口额占比(%) | 单位产品碳排放强度(tCO ₂ /t) | 隐含碳排放(万吨) |
|------|-------------|-------------|----------|--------------------------------|-----------|
| 水泥 | 220 | 117108 | 0.005 | 0.678 ^[17] | 149.16 |
| 化肥 | 3298 | 7543667 | 0.35 | 1.58 ^[18] | 5210.84 |
| 钢铁 | 6686 | 52811616 | 2.43 | 2.03 ^[19] | 13752.58 |
| 铝 | 562 | 12571233 | 0.58 | 1.7 ^[20] | 955.4 |
| 电力 | / | / | / | / | / |

注：2021 年中国出口总额为 217 287.4 亿元；

隐含碳排放=单位产品碳排放强度*产品出口量；
中国无电力对外贸易。

从贸易总量来看，2021 年全球水泥贸易总量为 28952 万吨，中国水泥出口占 0.7%^[21]；全球化肥贸易总量为 27483 万吨，中国化肥出口占 12%^[22]；全球钢铁贸易总量为 45890 万吨，中国钢铁出口占 14.6%^[23]；全球铝贸易总量 6712.9 万吨，中国铝出口占 8.4%^[24]。因此，基于 2021 年的贸易数据来看，如果因碳关税机制实施的全球化导致中国相关产品的出口受到影响，将对化肥、钢铁和铝行业的全球贸易形势产生巨大冲击，甚至有可能影响整个国际贸易系统。

从我国的贸易关系来看，2021 年我国出口总额为 217287.4 亿元，其中对有制定碳关税机制计划的

国家，包括美国、日本、澳大利亚、加拿大，分别的出口额为 37221.8 亿元、10719.5 亿元、4290.2 亿元和 3328.5 亿元，再加上出口至欧洲的 45277.4 亿元，中国总计向有制定碳关税机制意向的国家的出口额占总出口额的比例达到了 46.4%。如果上述国家紧跟欧盟的步伐，在未来几年相继实施类似 CBAM 的碳关税机制，将严重影响我国的对外贸易形势。

综上所述，无论是考虑我国相关企业在未来国际贸易竞争中的可持续发展，亦或考虑中国对外贸易的发展前景，还是考虑全球相关行业国际贸易的稳定性，尽快开展水泥、化肥、钢铁、铝行业的低

碳转型已成为相关行业未来发展的必然选择，也是全球应对气候变化呼声高涨背景下各个行业的迫切需求。

2 在碳关税机制下部署 CCUS 的可行性分析

2.1 CBAM 机制分析

碳关税的提出是为了让某一区域内进口的产品承担和本土产品相同的碳排放成本。从碳足迹角度分析，CBAM 机制中对其征收的范围做出了明确定义，要求申报产品在生产加工过程中的碳排放量，不涉及产品的上下游，即并非是全生命周期碳足迹。CBAM 机制并非是唯一与产品碳足迹有关的管制办法，应全面关注欧洲相关法规的进展，且更重要的是，出口到欧盟的企业必须了解 CBAM 机制的设立是作为欧盟碳排放权交易体系的补充。

而目前国际上现行的碳排放权交易体系中，所有纳入履约的企业都获得了大量的免费配额。相关企业只有在用尽免费配额后，额外的碳排放才需要负担相应的成本。因此，如果对进口产品所产生的全部碳排放都征收相应的碳关税，就会使区域内的本土企业获得双重保护，这也有悖于 WTO 的非歧视原则。

为了解决这一问题，CBAM 机制中设立了税基调整机制（图 1），即在进口商应缴的 CBAM 电子凭证数量中，应扣除欧盟同类产品生产企业获得的免费配额。税基调整机制的确立从一定程度上削减了碳关税贸易壁垒的属性，虽然全球范围内各个国家或地区的碳交易市场发展水平和实施机制不尽相同，但可以预计的是未来其他国家或地区在推行碳关税机制时，均会考虑通过实施税基调整机制实现一定程度上的公平。

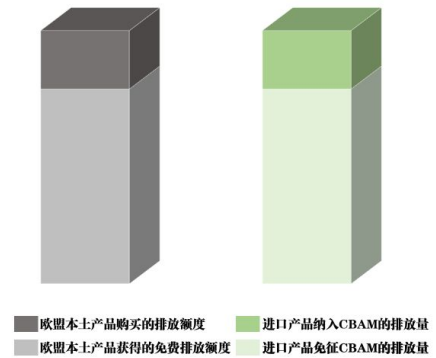


图 1 CBAM 机制下的税基调整机制

Fig.1 Tax base adjustment mechanism under CBAM

表 2 CBAM 机制下免费配额淘汰时间表

Table 2 Free quota elimination schedule under CBAM

| 年份 | 欧盟进口产品的缴纳比例 | 欧盟碳市场的免费配额比例 |
|------|-------------|--------------|
| 2026 | 2.5% | 97.5% |
| 2027 | 5% | 95% |
| 2028 | 10% | 90% |
| 2029 | 22.5% | 77.5% |
| 2030 | 48.5% | 51.5% |
| 2031 | 61% | 39% |
| 2032 | 73.5% | 26.5% |
| 2033 | 86% | 14% |
| 2034 | 100% | 0% |

根据最新的 CBAM 实施方案，欧洲议会和理事会就逐步取消 CBAM 涵盖行业的免费配额已达成明确的时间表（表 2）。其中规定了 CBAM 的生效速度与欧盟碳市场中免费配额的淘汰速度相同，最终到 2034 年实现碳关税与欧盟碳市场的全面对接。因此，对于直接与碳关税机制相关的企业而言，必须重视 2027-2034 年间出口产品的碳排放问题，尽快明确产品低碳生产的实施路线，有利于妥善应对 2034 年开始全面实施的碳关税机制。

2.2 我国 CCUS 在行业间的部署规划

2021 年 3 月，我国“十四五”规划中名且要求推进规模化 CCUS 技术的研发、示范和产业化应用。同年 7 月，生态环境部发布的《中国二氧化碳捕集利用与封存(CCUS)年度报告（2021）》（以下简称“报告”），中强调，CCUS 是我国化石能源低碳利用的唯一技术选择，保持电力系统灵活性的主要技术手段，而且是钢铁水泥等难减排行业的可行技术方案^[25]。《报告》还确定了在实现碳中和目标进程中，煤电、气电、钢铁、水泥、化工为重点部署

CCUS 技术的行业，并制定了不同时间节点（2025-2060）各行业 CCUS 项目理论上应实现的应用规模（表 3），为各行业的 CCUS 发展指明了方向。

表 3 2025-2060 年 CCUS 减排需求，亿吨/年^[25]

| 年份 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2050 | 2060 |
|----|------------|-----------|---------|---------|---------|---------|
| 煤电 | 0.06 | 0.2 | 0.5-1 | 2-5 | 2-5 | 2-5 |
| 气电 | 0.01 | 0.05 | 0.2-1 | 0.2-1 | 0.2-1 | 0.2-1 |
| 钢铁 | 0.01 | 0.02-0.05 | 0.1-0.2 | 0.2-0.3 | 0.5-0.7 | 0.9-1.1 |
| 水泥 | 0.001-0.17 | 0.1-0.52 | 0.2-0.8 | 0.3-1.5 | 0.8-1.8 | 1.9-2.1 |
| 化工 | 0.05 | 0.5 | 0.3 | 0 | 0 | 0 |

与碳关税机制有直接联系的是钢铁、水泥和化工（包含化肥），制铝行业由于生产工艺主要为电解熔融氧化铝的方式制备电解铝，再通过重熔提纯后进一步加工成各种铝材，其生产过程主要消耗的是电力，涉及的直接化石能源使用产生的排放较少。因此在制铝行业基本不存在直接使用 CCUS 技术的可行性，而是需要在电力供应端通过 CCUS 实现氧化铝电解过程的减排。然而电力行业应用 CCUS 技术实现的清洁电力，又无法保障其可以全部供应给制铝行业，因此目前阶段暂不考虑制铝行业 CCUS 的直接应用。

2021 年，我国粗钢产量为 10.3 亿吨，占全球粗钢总产量的 52.94%，全球排名第一，共计排放约 20.9 亿吨 CO₂。根据 IPCC 报告的数据^[26]，全球钢铁行业吨钢碳排放量平均水平为 1.82 吨 CO₂，目前我国吨钢排放量明显高于国际平均水平，造成该现象主要是由于我国粗钢生产工艺的结构性差异导致的。粗钢生产工艺分两种，其中长流程炼钢是通过烧结、球团、焦炉、高炉、转炉等一系列工艺炼制粗钢，而短流程炼钢是通过电炉直接炼制粗钢。长流程炼钢的吨钢排放量显著高于短流程炼钢的吨钢排放量。除中国外的其他国家长流程炼钢的产量平均占比为 51.8%，而我国约 90% 的粗钢生产是采用长流程炼钢，这一情况导致了我国吨钢碳排放量高于其他国家。而在长流程炼钢工艺中，高炉环节产生大量的直接 CO₂ 排放是 CCUS 技术应用的良好场景，具有极高的减排潜力。因此，在碳关税机制实施的背景下，开展钢铁行业的 CCUS 技术应用，将有利于钢铁行业应对未来严峻的国际贸易形式。

2021 年我国水泥产量为 23.63 亿吨，占全球水泥总产量的 53.7%，全球排名第一，共计排放约 16 亿吨 CO₂。由表 1 可知，虽然我国水泥产量位居全球第一，但绝大部分水泥均属于自产自销，出口量仅有 220 万吨，隐含碳排放仅为 149.16 万吨 CO₂。然而，我国水泥出口量并不是一直维持在一个较低的水平，例如在 2006 年和 2016 年，我国水泥出口量分别达到 3613 万吨和 1785 万吨。水泥出口量的大幅度波动主要是由于水泥原材料价格和水泥销售价格极大的影响了水泥生产商的出口意愿，往往在本地销售价格较高时企业不愿意进行出口，而本地销售价格降低时水泥出口量又会增加，这也导致了水泥出口量呈现了明显的周期性波动。而在水泥生产过程中的石灰石分解工艺，将产生大量的 CO₂，该部分 CO₂ 排放约占水泥生产总排放量的 60%，在该技术环节应用 CCUS 技术是水泥行业脱碳的必要技术手段。如果未来水泥出口量重回高位，针对水泥生产过程中石灰石分解工艺的 CCUS 技术应用，将有利于提升我国水泥产品在国际市场的竞争力。

化肥属于化学原料和化学制品制造业，是典型的化工行业。2021 年我国化肥产量 5446 万吨，占全球化肥总产量的 27%，共计排放约 0.86 亿吨 CO₂。化肥行业有很多高浓度 CO₂（烟气出口浓度高于 70%）排放源，相较于低浓度排放源，其捕集能耗低、投资成本与运行维护成本低，有显著的先行示范优势。因此，石化与化工领域高浓度排放源可为早期 CCUS 示范提供低成本机会，同时也是化肥行业应对碳关税机制的最佳低碳路径之一。

综上所述，在碳关税机制确定实施的背景下，我国水泥、钢铁、化肥行业完全具备通过 CCUS 技术实现单位碳排放产品强度下降的条件，同时也是我国 CCUS 项目规划中明确的行业。考虑到各类产品出口量并不是一个线性且稳定趋势（如水泥的周期性波动），且目前各行业通过 CCUS 进行碳减排的成本差异较大，因此有必要在基于各类产品出口量预测的基础上，结合生态环境部关于 CCUS 在各行业发展规模的建议，比较分析碳关税机制对于上述行业的影响以及通过实施 CCUS 技术能够避免缴纳的碳关税，对于上述行业明确 CCUS 技术定位及

确定低碳发展路径具有重要意义。

3 模型建立

3.1 模型假设

为了研究碳关税机制下，CCUS 技术的部署对我国关键行业的影响，需在模型建立和实施前确定部分模型假设，主要包括模型的模拟周期、模拟的行业范围、模拟的情景、CCUS 的应用规模及成本和碳关税定价。

3.1.1 模拟周期

根据欧盟 CBAM 机制的规定，2023 年 10 月至 2026 年底为 CBAM 机制的过渡期，过渡期内出口到欧盟商品仅需进行碳关税的申报，并不实际征收碳关税。此举主要目的是希望企业可以利用过渡期去适应 CBAM 规则和加快自身低碳转型的进度。自 2027 年开始，CBAM 将正式征收碳关税。因此，本文模型假设的起始时间为 2027 年，与欧盟已确定的时间保持一致。同时，CBAM 机制明确了将于 2034 年淘汰所有的免费配额并完全征收碳关税，因此对于有意向通过 CCUS 技术应对碳关税机制的企业而言，2027-2034 年将成为关键的 CCUS 技术应用窗口期。如果企业在 2034 年之后才开始启动 CCUS 项目的部署和规划，将很难在未来国际贸易中取得任何竞争优势。因此，模拟在 2027-2034 年间建设并运行的 CCUS 项目，量化评估其应对碳关税机制的潜力和价值，对企业而言才具有真正的参考价值。此外，根据近 20 年来全球 CCUS 技术发展轨迹来看，CCUS 项目的发展速度本身也具有较高的不确定性，关于其发展的预测准确度也会模拟时间的增加而下降。综上所述，本研究最终确定的模拟周期为 2027-2034 年。

3.1.2 模拟的行业范围

根据前文分析，由于制铝行业的技术特点并不适合直接开展 CCUS 技术的部署，因此最终模型将针对水泥、钢铁和化肥行业进行模拟。

3.1.3 模拟情景

据前文我国对外贸易关系的分析可知，2021 年我国出口贸易额已经有 46.4% 出口到了有制定碳关税机制计划的国家。虽然目前除欧盟外，其他国家尚未有明确的碳关税实施计划，但长期来看，我国

所有出口产品逐步被征收碳关税或将成为必须面对的现实问题。因此，为了研究相对极端情境下 CCUS 的关键作用，本模型中假设 2027 年中国出口的水泥、钢铁和化肥均被征收碳关税。同时模型中还兼顾考虑了在模拟周期内税基调整机制和免费配额淘汰计划对于进口产品的公平性安排，免费配额由 2027 年的 97.5% 逐步降低到 2034 年的 0%。

3.1.4 模拟情景 CCUS 应用规模和成本

根据生态环境部关于 CCUS 在各行业发展规模逐步扩大的建议^[25]（表 3），取每个时间节点上的上限值作为该年份理论上应实现的规模，同时假设各行业部署了 CCUS 设施后的生产的产品，均用于出口。该假设是为了最大程度计算 CCUS 技术能为企业节省的碳关税成本。

根据国外 CCUS 技术的发展经验，随着越来越多大规模 CCUS 项目的运行，新建项目的成本正在降低，这种成本的降低可能来自于技术溢出效应和学习效应^[27]。在本模型中，CCUS 技术各环节的学习效应导致的成本下降取值见表 4。

表 4 2025-2060 年间 CCUS 减排成本，亿吨/年^[25,28,29]

| Table 4 CCUS emission reduction costs, 2025-2060 | | | |
|--|----------|---------|---------|
| 年份 | 2025 | 2030 | 2035 |
| 捕集成本(元/t) | 230~310* | 190-280 | 160-220 |
| 运输成本(元/(t·km)) | 0.8 | 0.7 | 0.6 |
| 封存成本(元/t) | 55 | 45 | 35 |

注：本表中确定的捕集方法为最成熟的燃烧后捕集技术（胺溶液吸收法），该技术商业化程度最高。成本中的上下限是由该技术在不同行业的应用场景导致的，如水泥行业和钢铁行业的主要排放烟气中 CO₂ 浓度过低（<10%），导致捕集成本偏高；而化工行业烟气中 CO₂ 浓度很高（>75%），导致捕集成本偏低。

3.1.5 碳关税定价

根据世界银行发布的《2022 年碳定价现状与趋势》报告显示^[30]，2021 年全球共有 71 个碳定价机制（包括碳税和碳交易市场），覆盖了全球 23% 的温室气体排放量（约 83 亿吨 CO₂），全球碳定价收入约 840 亿美元。按照中国国家外汇交易中心的公开信息，2021 年人民币与美元的“平均汇率”为 1 美元：6.45 元人民币，可知 2021 年全球碳配额均价为 65.3 元/tCO₂。而根据欧盟碳市场最新数据，2021 年欧盟碳市场交易均价为 53 欧元，2021 年人民币与

欧元的“平均汇率”为 1 欧元：7.63 元人民币，即欧盟碳市场碳配额均价为 404.4 元/tCO₂。

如果全球实施碳关税机制均为了保护国际贸易中碳排放外部成本的公平性，碳配额价格均将与碳关税定价进行衔接。考虑到碳配额价格一般均受到减排控制目标影响的配额分配额度、配额分配方式、市场需求，以及环境规制的影响，未来的发展趋势难以预测。因此，在模型中针对碳关税的定价假设两个情景：

情景一：碳关税低定价情景，假设 2034 年前碳配额的价格为 65.3 元/tCO₂，即全球碳关税征收价格亦为 65.3 元/tCO₂。

情景二：碳关税高定价情景，假设 2034 年前碳配额的价格为 404.4 元/tCO₂，即全球碳关税征收价格亦为 404.4 元/tCO₂。

3.2 各行业出口量预测模型

行业出口量是一个非常难以预测的参数，其极易受到政策、汇率、外交、GDP 等因素的影响。为了研究碳关税实施背景下 CCUS 的应用潜力，动态的预测各行业出口量是必须开展的工作。ARIMA 模型是一种基于时间序列历史值和历史值上的预测误差来对当前和未来做出预测的模型，ARIMA 模型对于非稳态的时间序列历史数据具有较好的中短期预测效果^[31]。一方面，可以基于中国国家统计局详细且丰富的各行业出口量历史数据，对水泥、钢铁、化肥行业的出口量进行预测；另一方面，基于《中国二氧化碳捕集利用与封存(CCUS)年度报告(2021)》中明确的 2025-2060 年 CCUS 减排需求(表 3)，可以实现利用 ARIMA 模型对水泥、钢铁和化肥行业未来 CCUS 减排规模的拟合。

对水泥、钢铁和化肥行业的出口量预测方面，基于 ARIMA 模型，通过查阅《中国统计年鉴(1986-2022)》收集 1985-2021 年间各行业的出口量数据(化肥行业自 2002 年起纳入年鉴，化肥行业数据范围为 2002-2021)，利用 Stata 16 软件对各行业的出口量做出预测。



图 2 1985-2021 年中国水泥出口量

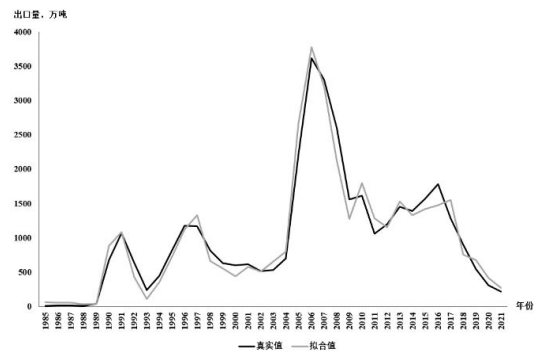
Fig.2 CCUS cement exports from 1985 to 2021

以水泥行业为例，我国 1985-2021 年水泥出口量趋势见图 2。由图可知，原始数据不是随机序列，含有周期性波动趋势。

首先对水泥行业出口量的原始数据取自然对数并进行 ADF (Augmented Dickey-Fuller) 检验以判断数据平稳性。结果显示出口量在 0 阶差分时的显著性 P 值为 0.027，水平上呈现显著性，拒绝原假设，该序列为平稳的时间序列，因此确定差分次数为 0。同时，对该序列进行白噪声检验，显示为非白噪声序列，因此可以进行建模。

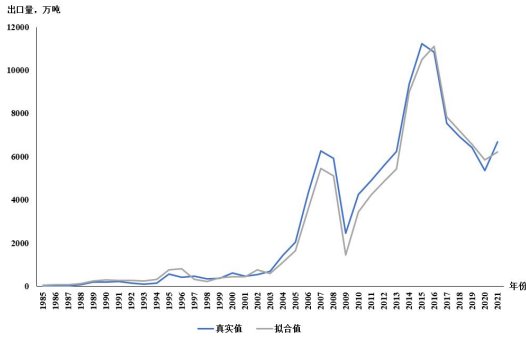
其次，进行相关性和偏相关性分析。初步确定自回归阶数 p 为 1，移动平均阶数 q 为 1、2、3。经过多次试验，当 q 取 2 时，ARIMA 模型的参数最优，确定模型为 ARIMA (1, 0, 2) 模型。

最后，通过拟合判断模型的有效性。对 ARIMA (1, 0, 2) 模型残差进行相关性和偏自相关检验，检验结果均不显著，残差为纯随机残差，模型拟合效果良好(图 3a)。



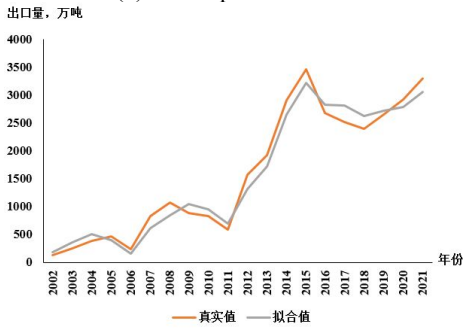
(a)水泥行业出口量拟合曲线

(a)Cement exports fitted curve



(b) 钢铁行业出口量拟合曲线

(b) Steel exports fitted curve



(c) 化肥行业出口量拟合曲线

(c) Fertilizer exports fitted curve

图 3 ARIMA 模型拟合结果

Fig. 3 ARIMA fitting results

进一步对钢铁和化肥行业按照上述方法进行 ARIMA 模型分析, 分析过程不再赘述, 模型拟合效果均良好 (图 3b, 图 3c)。然后根据 ARIMA 模型对三个行业的出口量进行预测, 预测结果见表 5。

表 5 基于 ARIMA 模型的水泥、钢铁和化肥出口量预测

Tab. 5 Forecast of cement, steel and fertilizer exports based on

| 年份 | ARIMA model | | | | | | | |
|----|-------------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 出口量 (万吨) | | | | | | | |
| 年份 | 2027 | 2028 | 2029 | 2030 | 2031 | 2032 | 2033 | 2034 |
| 水泥 | 869 | 897 | 908 | 914 | 918 | 920 | 922 | 922 |
| 钢铁 | 7639 | 7821 | 8002 | 8184 | 8366 | 8547 | 8729 | 8910 |
| 化肥 | 4297 | 4463 | 4630 | 4796 | 4963 | 5129 | 5296 | 5462 |

3.3 各行业 CCUS 减排规模拟合

对于水泥、钢铁和化肥行业的 CCUS 减排规模预测, 基于表 3 数据, 利用 ARIMA 模型对各行业未来 CCUS 减排规模进行拟合。拟合结果显示 (图 4), 水泥行业和钢铁行业的 CCUS 规模会持续增加, 该趋势进一步强调和肯定了 CCUS 技术在钢铁和水泥行业实现碳中和的关键作用。同时水泥行业未来的发展规模要明显大于钢铁行业, 也证明了水

泥行业通过非 CCUS 技术实现碳减排的难度要大于钢铁行业, CCUS 技术在水泥行业部署的重要性得到显现。化肥行业的 CCUS 部署将在 2030 前迅速增加, 并在 2030 年将达到最大规模, 随后开始缩减规模。造成该现象的主要原因主要是化肥行业的高浓度排放源可为早期 CCUS 示范提供低成本机会, 因此短期内大力发展化肥行业的 CCUS 部署成为重点, 随后由于化肥利用率提高、煤气化技术进步、燃料电气化等多种减排措施共同发力, CCUS 在化肥行业的减排贡献度将逐步降低。

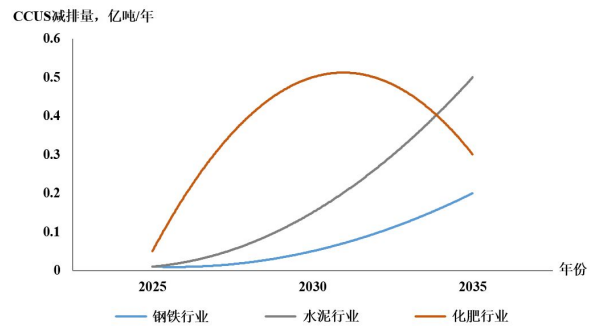


图 4 水泥、钢铁、化肥行业 CCUS 实施规模预测

Fig. 4 Forecast of CCUS scales in cement, steel and

fertilizer industries

3.4 学习曲线模型

CCUS 是典型的可以由技术积累和研发投入产生学习效应, 从而导致成本下降的技术。学习曲线是量化学习效应的典型方式, 学习曲线起源于飞机制造成本的研究, 是分析技术成本动态变化一般性规律的有效模型, 已在各领域得到广泛应用。传统学习曲线模型只为单一解释变量的单因素模型, 一般只技术积累和规模积累效应产生的成本下降。而 CCUS 目前同时得到了大量的研发投入, 因研发产生的学习效应也应当被纳入。因此, 为充分预测 CCUS 技术积累和研发投入产生的学习效应, CCUS 学习曲线选择双因素学习曲线模型, 公式为:

$$C = C_0 P^{-\alpha} R^{-\beta} \quad (1)$$

其中, C 为 CCUS 项目单位减排成本, 包括碳捕集、运输及封存三个环节的成本, 元/t; C_0 为初始减排成本, 初始值确定为 2025 年 CCUS 各环节的初始成本, 元/t; P 为 CCUS 累计规模, t; α 为技术投入弹性系数; β 为研发投入弹性系数。

如表 4 所述, 不同行业碳捕集成本有所区别,

因此 C_0 的取值根据行业类别而定。对钢铁行业 2025、2030、2035 的成本分别为 280、250、190(元/吨)；对水泥行业的取值分别为 310、280、220(元/吨)；对化肥行业的取值分别为 230、190、160(元/吨)。利用 Matlab 2021 软件，在确定的 2025、2030、2035 年各行业成本的基础上，对公式 (1) 进行绘图，最终得到各行业的学习曲线为图 5。

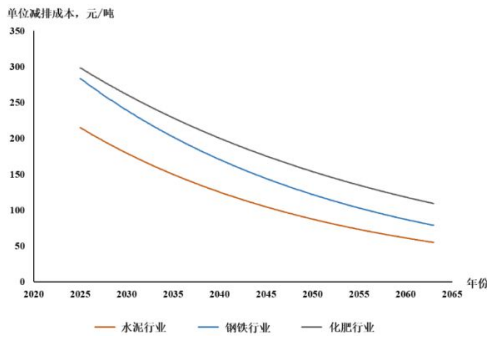


表 6 基于 ARIMA 模型的水泥、钢铁和化肥出口量预测

Table 6 Forecast of cement, steel and fertilizer exports based on ARIMA model

| 年份 | 2027 | 2028 | 2029 | 2030 | 2031 | 2032 | 2033 | 2034 | |
|---------|------------|------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|
| 需缴纳的百分比 | 5% | 10% | 22.5% | 48.5% | 61% | 73.5% | 86% | 100% | |
| 水泥 | 需缴纳碳关税的出口量 | 43 | 90 | 204 | 443 | 559 | 676 | 793 | 922 |
| | 隐含碳排放 | 30 | 61 | 139 | 300 | 379 | 458 | 538 | 625 |
| 钢铁 | 需缴纳碳关税的出口量 | 382 | 782 | 1801 | 3969 | 5103 | 6282 | 7507 | 8910 |
| | 隐含碳排放 | 775 | 1588 | 3655 | 8057 | 10360 | 12752 | 15239 | 18087 |
| 化肥 | 需缴纳碳关税的出口量 | 215 | 446 | 1042 | 2326 | 3027 | 3770 | 4555 | 5462 |
| | 隐含碳排放 | 339 | 705 | 1645 | 3675 | 4783 | 5956 | 7196 | 8629 |

按照生态环境部关于 CCUS 发展规模的指导建议，假设未来各行业 CCUS 的规模呈相对线性的增长模式，那么在 2027-2034 年间，各行业通过 CCUS 减少的二氧化碳排放量和需缴纳碳关税的排放量对比见图 6。

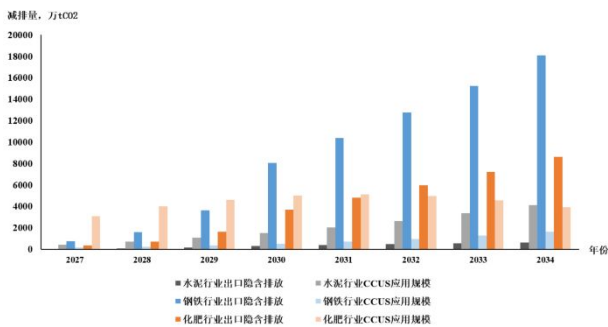


图 6 水泥、钢铁、化肥出口隐含碳排放及 CCUS 规模

图 5 水泥、钢铁、化肥行业 CCUS 成本下降学习曲线
Fig. 5 CCUS cost reduction learning curve of cement, steel, fertilizer industries

4 结果分析

根据免费配额淘汰时间表，2034 年前每年都有一定比例的出口货物免征碳关税。2027-2034 年各行业需缴纳碳关税的出口量及隐含碳排放见表 6。

Fig. 6 Export carbon emissions and CCUS application scale of cement, steel and fertilizer industries

在 2027-2034 年间，水泥行业出口产品的隐含碳排放远低于钢铁和化肥行业出口产品的隐含碳排放，一方面主要因为水泥产品的出口量目前处于波谷期，预计短期内将仍然维持一个较低水平的出口量；另一方面是由于水泥的单位产品碳排放强度要显著低于钢铁和化肥的单位产品碳排放强度。水泥行业的 CCUS 部署规模在各个时间点均远大于水泥产品出口所隐含的碳排放，因此未来仅需部分部署了 CCUS 项目的水泥产品用于出口，即可实现应对碳关税机制。综合来看，我国水泥行业的 CCUS 部署规划足以支撑水泥产品出口应对全球碳关税的需求。

钢铁行业出口产品的隐含碳排放在 2027-2034

年间将持续呈现高增长趋势，主要是由于我国钢铁出口量处于快速增长期，同时我国的炼钢技术以长流程炼钢为主，产品的单位碳排放强度处于行业高位。到 2034 年我国钢铁行业出口需要缴纳碳关税的排放总量达到了 18087 万吨，而 2034 年钢铁行业的 CCUS 规模计划将扩大到 1600 万吨，仅覆盖了 8.8% 的出口需要缴纳碳关税的排放总量。因此，我国钢铁行业的 CCUS 部署规划无法满足钢铁产品出口应对全球碳关税的需求。

化肥行业出口产品的隐含碳排放在 2027-2034 年间呈现持续增长趋势，但总量仅有钢铁行业的一半。我国化肥行业 CCUS 应用规模呈现了先增长后降低的趋势，主要原因是化肥行业高浓度排放源可为早期 CCUS 示范提供低成本机会，是 CCUS 技术验证和放大的优先选择，因此中短期内在化肥行业部署大规模 CCUS 项目具有现实意义。而随着化肥行业其他减排技术的发展，CCUS 在帮助化肥行业实现碳中和进程中的贡献度和重要程度将呈现明显的逐渐下降，长期来看，化肥行业的 CCUS 规模也将逐渐缩小。预计化肥行业 CCUS 应用规模将在 2032 年达到峰值，约 5100 万 t/CO₂/年。2027-2032 年间，化肥行业的 CCUS 应用规模要高于化肥行业出口需要缴纳碳关税的排放总量。自 2032 年开始，CCUS 应用规模开始无法支撑化肥产品出口应对全球碳关税的需求，到 2034 年，水泥行业出口需要缴纳碳关税的排放总量达到了 8629 万吨，而 2034 年水泥行业的 CCUS 规模计划约为 3900 万吨，可以覆盖 45.2% 的需要缴纳碳关税的排放总量。在碳关税低定价情景下（每吨 CO₂ 征收 65.3 元，图 7），2027-2034 年间水泥和化肥行业的 CCUS 部署成本均高于所出口产品需缴纳的碳关税，虽然钢铁行业 CCUS 部署成本始终低于出口产品所需缴纳的碳关税，但到 2034 年通过 CCUS 应用只能帮助钢铁减少 8.8% 的排放。因此在碳关税低定价情境下，短期内 CCUS 的部署和发展并不能帮助水泥、钢铁和化肥行业实现低成本应对碳关税机制。

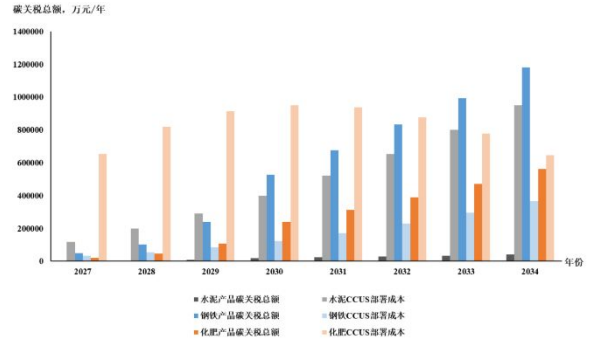


图 7 碳关税低定价情境下水泥、钢铁、化肥行业出口需缴纳碳关税总额及 CCUS 部署成本

Fig.7 Under the scenario of low carbon tariff pricing, the total carbon tariff and the deployment cost of CCUS of cement, steel and fertilizer industries

在碳关税高定价情境下（每吨 CO₂ 征收 404.4 元，图 8），水泥行业的 CCUS 部署成本高于所出口产品需缴纳的碳关税，主要由于水泥行业的 CCUS 部署规模在各个时间点均远大于水泥产品出口所隐含的碳排放。单从应对碳关税机制的视角来看，水泥行业 CCUS 部署规模相对过剩。钢铁行业由于 CCUS 部署规模远小于出口产品产生的碳排放，所以仍然呈现了 CCUS 部署成本始终低于出口产品所需缴纳的碳关税的趋势。化肥行业在 2027-2029 年间，CCUS 部署成本高于其所出口产品需缴纳的碳关税。自 2030 年开始，化肥产品出口所需缴纳的碳关税超过化肥行业部署 CCUS 的成本，尤其在 2030-2032 年间，化肥行业 CCUS 部署规模大于出口产品产生的碳排放同时还拥有更低的成本，成本平均节省 32%、56%、64%。因此，化肥行业是短期内最为适合通过 CCUS 技术部署应对碳关税的机制的行业。

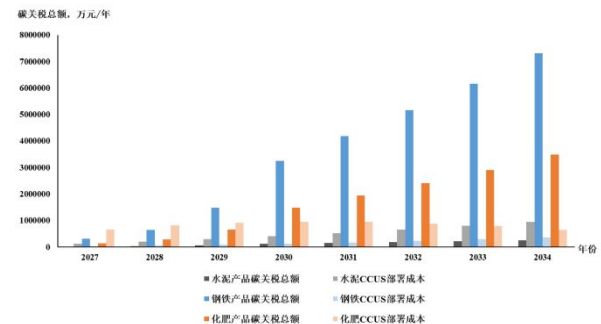


图 8 碳关税高定价情境下水泥、钢铁、化肥行业出口需缴纳碳关税总额及 CCUS 部署成本

Fig.8 Under the scenario of high carbon tariff pricing, the total carbon tariff and the deployment cost of CCUS of cement, steel and fertilizer industries

5 结论与建议

欧盟明确将于 2023 年 10 月正式实施碳关税机制，同时美国、加拿大、日本、澳大利亚等国也均表示正在考虑实施类似机制，以期实现进口商品和本地商品相同的碳减排成本。碳关税机制全球化的趋势将对我国未来的国际贸易造成巨大冲击。优先被纳入碳关税机制下的水泥、电力、化肥、钢铁和铝五大行业，必须考虑如何通过技术革新或采用负碳技术实现产品单位碳排放强度的下降，以减缓碳关税机制造成的冲击。CCUS 技术在助力企业实现碳中和进程中将发挥关键作用，也是企业应对碳关税机制的重要依托。本文通过调研水泥、电力、化肥、钢铁和铝行业的外贸易情况及其与 CCUS 技术的适配性，确定具有利用 CCUS 部署应对碳关税机制潜力的行业。利用 ARIMA 模型、CCUS 学习曲线，预测了各行业在 2034 年前的出口趋势、CCUS 应用规模趋势和 CCUS 成本下降趋势，通过比较分析，明确了 CCUS 技术发展与碳关税之间的关系。

1) 水泥、钢铁和化肥行业由于工艺流程中存在集中的 CO₂ 排放源，且在 2027-2034 年间对外出口量将持续上升，同时也是国家生态环境部规划的 CCUS 部署重点领域，因此均具有通过 CCUS 部署应对碳关税机制的潜力。电力行业不存在对外出口情况，因此无需讨论碳关税机制对其的影响。铝行业由于目前主流工艺为电解铝，几乎没有通过使用化石能源产生的直接碳排放。虽然碳关税机制下会考虑产品的间接排放，但考虑到无法保证 CCUS 产生的清洁电力可以全部用于铝生产，因此铝行业与 CCUS 技术间的关系暂不讨论。

2) 水泥行业出口量呈现明显的周期性波动，短期内属于触底后的上升期，出口产品的隐含排放量较少，到 2034 年仅为 625 万吨 CO₂。钢铁行业出口量将持续高速增长，出口产品的隐含碳排放量最大，到 2034 年将达到 18087 万吨 CO₂。化肥行业出口量将持续增长，出口产品隐含碳排放量到 2034 年将达到 8629 万吨 CO₂。三个行业隐含碳排放的差距

主要受出口量、单位产品碳排放强度及国际贸易形势的影响。

3) 化肥行业由于烟气中 CO₂ 浓度高，具有 CCUS 低成本示范优势，是短期内优先开展大规模 CCUS 项目部署的行业，其 2034 年前的 CCUS 部署规模可以覆盖化肥产品出口的隐含碳排放，化肥行业也是唯一可以通过 CCUS 应用完全应对碳关税机制的行业。2027-2032 年 CCUS 规模将达到捕集 5100 万吨 CO₂/年，随后由于该行业其他低碳创新技术的低成本应用，CCUS 规模将逐步缩减。水泥和钢铁行业在 2034 年前的 CCUS 部署规模均无法覆盖其产品出口隐含的碳排放。

4) 在碳关税低定价情景下（每吨 CO₂ 征收 65.3 元），水泥、钢铁和化肥行业的 CCUS 部署成本均高于所需缴纳的碳关税成本，即 2027-2037 年间，CCUS 的部署和发展并不能帮助水泥、钢铁和化肥行业实现低成本应对碳关税机制。在碳关税高定价情景下（每吨 CO₂ 征收 404.4 元），化肥产品出口所需缴纳的碳关税超过化肥行业部署 CCUS 的成本，尤其在 2030-2032 年间，化肥行业 CCUS 部署规模大于出口产品产生的碳排放同时还拥有更低的成本，因此，化肥行业是碳关税高定价情境下最适合通过 CCUS 技术部署应对碳关税机制的行业。

本文以明确公布细则的欧盟碳关税机制为制度参考，评估了碳关税机制全球化趋势下中国水泥、钢铁和化肥行业实施 CCUS 部署应对该机制的潜力。本文在模拟过程中围绕模型的模拟周期、行业范围、情景、CCUS 的应用规模及成本和碳关税定价进行了大量的假设，不可避免的存在一些局限性：

1) CCUS 的部署存在区域差异性，源汇匹配条件的影响。对于全链条的 CCUS 项目而言，特定项目的源汇匹配条件将直接影响其单位减排成本，对于两个处于同一行业、同一技术路径、同一减排规模的 CCUS 项目而言，也很有可能由于运输方式、封存地距离、封存方式等因素导致它们的单位减排成本产生很大差异。

2) 技术路径的差异性。模型中为水泥、钢铁和化肥行业确定的碳捕集技术为当前相对最成熟的燃

烧后捕集技术（胺溶液吸收法），该技术商业化程度最高。然而根据不同排放源的烟气组成，不同行业间或不同企业可能存在不同的最佳技术方案。

3) 低碳技术间的协同作用。在双碳目标的驱动下，除 CCUS 技术外，企业也在对许多其它低碳路径进行探索，如钢铁行业的氢气直接还原炼钢、产能替换、电炉+废钢、原辅料优化等技术，在未来一段时间内企业单位产品碳排放强度的降低是多种低碳技术共同驱动完成的，低碳技术间的协同作用会有助于应对碳关税全球化的趋势。

4) 国际形势和不同国家低碳政策对碳关税机制的影响。碳关税机制的基础是碳定价，文中讨论了两个极端碳定价情境下 CCUS 的价值，但是不同国家的碳定价极易受到国际形势和国内低碳政策力度的影响，也会直接对碳关税机制的实施产生影响。

随着未来更多国家披露其碳关税机制细则和我国 CCUS 部署愈加完善，建议 CCUS 和碳关税机制衔接的研究可以关注以下三方面：

1) 我国未来 CCUS 的发展极易受到环境规制、能力建设水平、经济发展水平等多方面因素的影响。虽然目前我国正在探索和完善 CCUS 相关的监管、激励和示范政策，但未来 CCUS 的部署规模和成本下降潜力趋势仍具有一定的不确定性。因此，未来更规范化和系统化管理机制下的 CCUS 项目，有望为应对碳关税机制实现更大的贡献。

2) 目前全球碳市场的发展水平并不均衡，碳配额的定价差别较大，欧盟最高碳配额价格曾超过 100 欧元/吨 CO₂，而部分区域碳市场的碳配额价格却长期低于 1 欧元。因此对于未来全球碳关税机制实施趋势下的碳定价是一个较难预测的问题。未来随着全球碳市场和各个碳市场间衔接机制的完善，将有助于更加清晰地评估 CCUS 与碳关税机制的关系。

3) CCUS 技术与碳市场的衔接。虽然 CBAM 机制中规定了如果进口商品在其生产国已经承担了一定的排放成本，那么这部分成本在 CBAM 机制中将予以扣除，但是目前公布的法案细则中没有给出可豁免的技术清单，低碳技术可认证的标准极有可

能是与自愿核证减排量系统衔接，因此对于 CCUS 技术而言，如何通过将 CCUS 技术纳入自愿核证减排体系，也是未来研究的重点之一。

3) 目前全球范围内仅欧盟明确了实施碳关税机制的安排并公布了细则，虽然许多发达国家也公开表示有制定碳关税机制的规划，但未来碳关税真正全球化的时间节点尚未明确。即使全球众多国家都开始实施碳关税机制，在具体实施细则上应该是不尽相同，因此未来我国高碳排放行业可能面临的是一个更加复杂、严峻、动态化的国际贸易环境。

参考文献(References)：

[1] European Commission. Impact assessment report accompanying the document proposal for a regulation of the European Parliament and of the council establishing a carbon border adjustment mechanism[R]. Brussels: European Commission, 2021.

[2]Eurostat. Quality report on European statistics on international trade in goods - 2018-2021 data - 2022 edition[R]. Brussels: Eurostat, 2022.

[3]国家发改委经贸司. 中国外经贸统计年鉴——2022[R]. 北京: 国家发改委, 2022.

Department of Economic and Trade Affairs. China Foreign Trade Statistical Yearbook - 2022 [R]. Beijing: National Development and Reform Commission, 2022.

[4]姚颖, 刘侃, 费成博, 等. 美国碳边境调节机制工作进展及思考[J]. 环境保护, 2021, 49(10): 69-74.

YAO Ying, LIU Kan, FEI Chengbo, et al. The Progress and Thinking on US carbon border adjustment mechanism[J]. Environmental Protection, 2021, 49(10): 69-74.

[5]王谋, 吉治璇, 康文梅, 等. 欧盟“碳边境调节机制”要点、影响及应对[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(12): 45-52.

WANG Mou, GU Zhixuan, KANG Wenmei, et al. Key points and impact of EU's 'carbon border adjustment mechanism' and China's responses[J]. China population, resources and environment, 2021, 31(12): 45-52.

[6]刘夏青, 杨本晓, 丁晓涵. 新绿色贸易壁垒: 欧盟碳边境调节机制对中国纺织服装行业发展的影响[J]. 价格月刊, 2023, 550(03): 23-31.

LIU Xiaqing, YANG Benxiao, DING Xiaohan. New green trade barriers: the impact of EU carbon border adjustment mechanism on the development of China's textile and garment industry[J]. Prices Monthly, 2023, 550(03): 23-31.

- [7]曾桢, 谭显春, 王毅等. 碳中和背景下欧盟碳边境调节机制对我国的影响及对策分析[J]. 中国环境管理, 2022, 14(01): 31-37.
- ZENG An, TAN Xianchun, WANG Yi, et al. Impact of EU carbon border adjustment mechanism on China in the context of carbon neutrality and its countermeasures[J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2022, 14(01): 31-37.
- [8]韩立群. 欧盟碳关税政策及其影响[J]. 现代国际关系, 2021, 379(05): 51-59+61.
- HAN Liqun. A European Union carbon border adjustment mechanism and its implications[J]. Contemporary International Relations, 2021, 379(05): 51-59+61.
- [9]张晓云, 俞文秀. 欧盟碳边境调节机制方案分析[J]. 国际税收, 2022, 109(07): 68-75.
- ZHANG Xiaoyun, YU Wenxiu. An analysis on the carbon border adjustment mechanism in EU[J]. International Taxation in China, 2022, 109(07): 68-75.
- [10]王一鸣, 木其坚. 全球碳关税变局的驱动因素、相关影响与应对[J]. 宏观经济管理, 2022, 463(05): 15-23.
- WANG Yiming, MU Qijian. Drivers, impacts, and responses to the changing landscape of global carbon border taxes[J]. Macroeconomic Management, 2022, 463(05): 15-23.
- [11]晏清, 杨丽玲. 欧盟碳边境调整机制(CBAM)对外贸的影响研判及应对策略——以江苏省无锡市为例[J]. 商业经济研究, 2022, 851(16): 161-164.
- YAN Qing, YANG Liling. Assessment of the impact of the European Union's carbon border adjustment mechanism on foreign trade and response strategies: a case study of Wuxi city, Jiangsu Province[J]. Journal of Commercial Economics, 2022, 851(16): 161-164.
- [12]刘牧心, 梁希, 林千果, 等. 碳中和驱动下 CCUS 项目衔接碳交易市场的关键问题和对策分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(14): 4731-4739.
- LIU Muxin, LIANG Xi, LIN Qianguo, et al. Key issues and countermeasures of CCUS projects linking carbon emission trading market under the target of carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(14): 4731-4739.
- [13]刘牧心, 梁希, 林千果. 碳中和背景下中国碳捕集、利用与封存项目经济效益和风险评估研究[J]. 热力发电, 2021, 50(09): 18-26.
- LIU Muxin, LIANG Xi, LIN Qianguo. Economic analysis and risk assessment for carbon capture, utilization and storage project under the background of carbon neutrality in China[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(09): 18-26.
- [14]徐冬, 张帅, 韩涛, 等. 煤电+CCUS 产业规模化发展政策激励[J]. 洁净煤技术, 2023, 29(04): 13-20.
- XU Dong, ZHANG Shuai, HAN Tao, et al. Policy incentives for the large-scale development of coal power +CCUS industry[J]. Clean Coal Technology, 2023, 29(04): 13-20.
- [15]顾永正, 王天堃, 黄艳, 等. 燃煤电厂二氧化碳捕集利用与封存技术及工程应用[J]. 洁净煤技术, 2023, 29(04): 98-108.
- GU Yongzheng, WANG Tiankun, HUANG Yan, et al. Carbon dioxide capture, utilization and storage technology and engineering application for coal-fire power plants[J]. Clean Coal Technology, 2023, 29(04): 98-108.
- [16]国家统计局. 中国统计年鉴——2022[R]. 北京: 国家统计局, 2023.
- National Bureau of Statistics. China Statistical Yearbook - 2022 [R]. Beijing: National Bureau of Statistics, 2023.
- [17]贺晋瑜, 何捷, 王郁涛, 等. 中国水泥行业二氧化碳排放达峰路径研究[J]. 环境科学研究, 2022, 35(02): 347-355.
- HE Jinyu, HE Jie, WANG Yutao, et al. Pathway of carbon emissions peak for cement industry in China[J]. Research of Environmental Sciences, 2022, 35(02): 347-355.
- [18]邓明君, 邓俊杰, 刘佳宇. 中国粮食作物化肥施用的碳排放时空演变与减排潜力[J]. 资源科学, 2016, 38(03): 534-544.
- DENG Mingjun, DENG Junjie, LIU Jiayu. On the space-time evolution of carbon emissions and reduction potential in Chinese grain crop fertilizer application[J]. Resources Science, 2016, 38(03): 534-544.
- [19]张琦, 沈佳林, 籍杨梅. 典型钢铁制造流程碳排放及碳中和实施路径[J]. 钢铁, 2023, 58(02): 173-187.
- ZHANG Qi, SHEN Jialin, JI Yangmei. Analysis of carbon emissions in typical iron-and steelmaking process and implementation path research of carbon neutrality[J]. Iron and Steel, 2023, 58(02): 173-187.
- [20]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 (03): 47-52.
- LI Chunhuan, CAO Alin. Carbon emission accounting methods for aluminum electrolysis industry[J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy), 2023 (03): 47-52.
- [21]GCCA. Cement and concrete industry roadmap for net zero concrete[R]. London: GCCA, 2022.
- [22]IFA. Estimating & reporting fertilizer-related greenhouse gas emissions[R]. Moscow: IFA, 2022.
- [23]World Steel Association. Sustainable Development

Indicators Report 2022. Beijing: World Steel Association, 2023.

[24]WBMS. Metal balance report[R]. Beijing: WBMS, 2022.

[25]生态环境部. 中国二氧化碳捕集利用与封存(CCUS)年度报告(2021)[R]. 北京, 生态环境部, 2022.

Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China. China CCUS roadmap 2022[R]. Beijing: Science Press, 2012.

[26]IPCC. Sixth Assessment Report. New York: IPCC, 2022.

[27]IEA. Energy Technology Perspective 2020. Paris: IEA, 2021.

[28]魏宁, 姜大霖, 刘胜男, 等. 国家能源集团燃煤电厂CCUS改造的成本竞争力分析[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(04): 1258-1265+1416.

WEI Ning, JIANG Dalin, LIU Shengnan, et al. Cost competitiveness analysis of retrofitting CCUS to coal-fired power plants[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(04): 1258-1265+1416.

[29]姜大霖, 杨琳, 魏宁, 等. 燃煤电厂实施CCUS改造适宜性评估: 以原神华集团电厂为例[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(19): 5835-5842.

JIANG Dalin, YANG Lin, WEI Ning, et al. Suitability of retrofitting CCUS to existing coal-fired power plants: a case study of former Shenhua Group[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(19): 5835-5842.

[30]World Bank. State and Trends of Carbon Pricing 2022. Washington: World Bank, 2023.

[31] G.Peter Zhang. Time series forecasting using a hybrid ARIMA and neural network model[J]. Neurocomputing, 2003, 50: 159-175.