

制造业出口贸易隐含碳排放的计量与驱动机制研究

——碳关税视角下的广东省证据

王 胜^{1*}, 方泽满²

¹广东科学技术职业学院财金学院, 广东 珠海

²韩山师范学院经济与管理学院, 广东 潮州

收稿日期: 2026年9月9日; 录用日期: 2026年10月13日; 发布日期: 2026年10月27日

摘 要

欧盟碳边境调节机制自2026年起正式征收, 出口导向型制造业省份面临的碳成本约束日益显性化。本文以广东省为例, 利用2010~2023年26个制造业细分行业的面板数据, 采用经进口中间品修正的单区域投入产出模型测算出口隐含碳排放, 并以单位产出隐含碳(碳强度)为被解释变量, 运用聚类稳健最小二乘、组内去均值、HAC稳健估计、一阶差分与两步系统广义矩估计五种方法识别其驱动机制。结果表明: 全省出口隐含碳排放呈先降、后升、再趋稳的轨迹; 外商直接投资对行业碳强度具有稳健的减排效应, 支持“污染光环”假说, 但该效应在2018年后趋于不显著; 约54%的行业存在较强的碳锁定。情景模拟显示, 在60美元/吨的基准税率下, 全省出口隐含碳关税成本约为577.3亿元, 相当于2023年规上工业利润的5.46%; 按碳强度排序, 黑色金属冶炼、建材、造纸与石油加工业受冲击最为敏感, 而按利润侵蚀口径, 纺织业承压最重。稳健性检验与敏感性分析表明, 核心结论稳健。据此提出分梯队、分行业的低碳转型政策建议。

关键词

碳关税, 隐含碳排放, 投入产出模型, 系统广义矩估计, 广东省制造业

Measurement and Driving Mechanism of Embodied Carbon Emissions in Manufacturing Exports

—Evidence from Guangdong Province in the Context of Carbon Tariffs

Sheng Wang^{1*}, Zeman Fang²

¹College of Accounting and Finance, Guangdong Polytechnic of Science and Technology, Zhuhai Guangdong

*通讯作者。

Abstract

The EU Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) has officially entered into force for tariff collection as of 2026, rendering the carbon cost constraints confronting export-oriented manufacturing provinces increasingly tangible. Taking Guangdong Province as the research context, this paper employs panel data covering 26 disaggregated manufacturing sub-sectors over the period 2010~2023. A single-region input-output model adjusted for imported intermediate inputs is adopted to quantify the embodied carbon emissions in exports. Using embodied carbon per unit of output (*i.e.*, carbon intensity) as the dependent variable, this study identifies its underlying driving mechanisms through five econometric specifications: cluster-robust ordinary least squares, within-group mean detrending, HAC robust estimation, first-differenced regression, and the two-step system generalized method of moments. The empirical results indicate that the trajectory of Guangdong's total export embodied carbon emissions follows a three-phase pattern: an initial decline, a subsequent rise, and a final trend toward stabilization. Foreign direct investment exerts a robust emission-reduction effect on sectoral carbon intensity, which validates the "Pollution Halo Hypothesis", whereas this mitigating effect becomes statistically insignificant after 2018. Approximately 54% of the sampled industries exhibit strong carbon lock-in effects. Scenario simulation reveals that under the benchmark carbon tariff rate of 60 USD per ton, the total CBAM-related cost for Guangdong's export sector amounts to roughly 57.73 billion RMB, equivalent to 5.46% of the province's industrial profits of enterprises above designated size in 2023. When ranked by carbon intensity, ferrous metal smelting, building materials, papermaking, and petroleum processing are the most vulnerable sectors to CBAM shocks, while the textile industry faces the severest pressure in terms of profit erosion. A battery of robustness checks and sensitivity analyses confirms the reliability of the core findings. This paper concludes with tiered, sector-specific policy recommendations to facilitate targeted low-carbon transition.

Keywords

Carbon Tariff, Embodied Carbon Emissions, Input-Output Model, System GMM, Manufacturing Industry of Guangdong Province

Copyright © 2026 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

气候治理的经济工具正从国内碳定价向跨境贸易规则延伸。欧盟碳边境调节机制(Carbon Border Adjustment Mechanism, CBAM)已完成立法, 2023 年 10 月至 2025 年 12 月为过渡期, 进口商仅需申报进口产品的隐含碳排放而无需缴费, 自 2026 年 1 月 1 日起正式征收[1]; 美国《清洁竞争法案》(Clean Competition Act)亦提议对碳强度超标的进口产品按吨计征费用[2]。与此同时, 中国明确提出“双碳”目标[3], 出口制造业由此同时面临国际碳定价规则与国内减排目标的叠加约束。广东是全国出口规模最大、制造业门类最齐全的省份之一, 其出口产品隐含碳排放的规模、结构与驱动因素, 既关系区域产业转型路径的选

择, 也为评估碳关税的真实冲击提供了有代表性的样本。

贸易隐含碳排放的测算与归因已有较为成熟的积累。Peters 等基于全球多区域投入产出框架证实, 1990~2008 年间国际贸易转移的排放持续增长, 以消费口径衡量时发达国家的排放被系统性低估[4]。就贸易与环境的关系而言, Grossman 和 Krueger 提出的环境库兹涅茨曲线[5], 以及 Copeland 和 Taylor 的规模-结构-技术效应分解框架[6], 构成了基础性的分析工具。在外商直接投资(FDI)的环境效应上, 学界长期存在两种对立判断: 污染天堂假说认为外资倾向于向环境规制较弱的地区转移高碳产能[7][8]; 污染光环假说则强调外资伴随的清洁技术与管理经验有助于改善东道国的排放绩效[9][10]。针对中国的经验证据同样存在分歧[11][12], 其中被解释变量的选取是分歧的重要根源——以排放总量为考察对象时, 产出规模的干扰难以排除, 不同研究的结论往往不可直接比较。

既有研究在三个方面仍有拓展空间。其一, 省级分行业的隐含碳测算较少修正进口中间品的影响, 对加工贸易比重较高的省份容易高估本土碳足迹; 其二, 驱动机制分析多采用单一固定效应模型, 对内生性与多重共线性的诊断报告不够充分; 其三, 碳关税冲击评估多以投入产出表推算的出口结构为基础, 与海关实际出口数据存在偏差。为此, 本文以广东省为例做如下拓展: 1) 采用经进口中间品依赖度修正的单区域投入产出模型, 结合海关分行业实际出口数据, 测算 2010~2023 年 26 个制造业细分行业的出口隐含碳排放; 2) 以单位产出隐含碳(碳强度)为被解释变量, 运用五种估计方法交叉验证并完整报告共线性诊断, 识别出口规模、技术水平、能源结构、外资与开放度的驱动作用; 3) 基于官方利润数据构建税率情景, 区分当前覆盖范围与潜在扩围两种口径, 并从碳强度与利润侵蚀两个维度评估碳关税的行业差异化冲击, 并据此提出分梯队的政策建议。

2. 研究设计

2.1. 出口隐含碳排放的核算方法

隐含碳排放指产品在整个生产链条中累积的二氧化碳排放总量。设经济系统包含 n 个产业部门, 投入产出分析的基本关系为:

$$X = (I - A)^{-1} Y \quad (1)$$

其中, X 为总产出向量, A 为直接消耗系数矩阵, $(I - A)^{-1}$ 为列昂惕夫逆矩阵, Y 为最终需求向量。设 c 为各部门单位产出的碳排放强度向量, 则出口贸易隐含碳排放总量为:

$$E_s = c \cdot (I - A')^{-1} \cdot Y_{ex} \quad (2)$$

考虑到广东加工贸易比重较高, 直接使用未经修正的消耗系数矩阵会把进口中间品隐含的国外排放计入本土足迹。为此, 引入进口中间品依赖度对矩阵 A 进行修正:

$$a'_{ij} = a_{ij} \times (1 - \beta_i), \beta_i = \frac{M_i}{T_i} \quad (3)$$

其中, M 与 T 分别为部门 i 的进口中间品与中间投入总额。该修正剔除了进口品隐含的国外排放, 可在一定程度上避免对传统加工贸易省份碳足迹的高估[4]。选择单区域投入产出模型, 是因为省级层面区域间投入产出表的序列尚不连续, 经进口修正的单区域模型能够在数据可得性与测算精度之间取得平衡, 其局限在 4.4 节讨论。

部门碳排放强度依据 IPCC 国家温室气体清单指南推荐的排放系数测算[13]:

$$c_i = \sum_k (E_{ik} \times \delta_k \times \theta_k) \quad (4)$$

式中, E 为部门 i 对能源品种 k 的消费量(万吨标准煤), δ 与 θ 分别为能源 k 的碳排放系数与折标煤系数。本文采用的排放系数见表 1。

Table 1. Carbon emission factors of major energy sources
表 1. 主要能源品种的碳排放系数

能源品种	排放系数	能源品种	排放系数
原煤	1.9003	汽油	2.9843
焦炭	3.0473	柴油	3.1691
原油	2.1516	燃料油	3.2360
天然气	1.6266	电力	0.78

注: 化石能源系数单位为吨 CO₂/吨标准煤; 电力为区域电网平均排放因子, 单位为吨 CO₂/兆瓦时。系数依据文献[13]计算。

2.2. 驱动机制的计量模型

为识别出口隐含碳排放的驱动因素, 构建如下基准面板模型:

$$\ln CI_{i,t} = \alpha_0 + \alpha_1 \ln Export_{i,t} + \alpha_2 Tech_{i,t} + \alpha_3 Struct2_{i,t} + \alpha_4 \ln FDI_{i,t} + \alpha_5 Open_{i,t} + \mu_i + \lambda_t + \varepsilon_{i,t} \tag{5}$$

被解释变量采用碳强度(CI = E/Y , 即单位产出的隐含碳排放)而非排放总量, 以剔除产出规模的干扰, 直接刻画行业的减排努力程度; 该指标也与 CBAM 按产品碳含量计征的逻辑一致。解释变量方面, 预回归的方差膨胀因子(VIF)诊断显示, 能源消费总量与外资规模之间存在严重共线(VIF 超过 100), 故剔除能源总量变量, 并以清洁能源占比刻画能源结构。最终进入模型的五个解释变量 VIF 均低于 3 (详见 3.2 节), 各变量定义见表 2。

Table 2. Definitions and explanation of variables
表 2. 变量定义与说明

变量名称	符号	定义与度量
碳强度	lnCI	行业出口隐含碳排放与行业出口额之比, 取自然对数
出口规模	lnExport	行业出口额(亿元, 2010 年不变价), 取自然对数
技术水平	Tech	全员劳动生产率(万元/人)
能源结构	Struct2	清洁能源占比, 即 1 - 煤炭消费占比 - 油品消费占比
外商直接投资	lnFDI	行业实际利用外资额, 取自然对数
贸易开放度	Open	行业出口额占总产值的比重

注: μ 与 λ 分别为行业个体固定效应与年份固定效应, ε 为随机扰动项。

考虑到碳排放强度具有路径依赖特征, 进一步引入被解释变量的一阶滞后项, 构建动态面板模型:

$$\begin{aligned} \ln CI_{i,t} = & \alpha_0 + \rho \ln CI_{i,t-1} + \alpha_1 \ln Export_{i,t} + \alpha_2 Tech_{i,t} + \alpha_3 Struct2_{i,t} \\ & + \alpha_4 \ln FDI_{i,t} + \alpha_5 Open_{i,t} + \mu_i + \lambda_t + \varepsilon_{i,t} \end{aligned} \tag{6}$$

估计策略上, 依次采用五种方法: 1) 行业层面聚类稳健标准误的最小二乘估计(OLS + Cluster); 2) 去除行业固定效应的组内去均值估计(Within); 3) Newey-West 异方差自相关稳健估计(HAC); 4) 一阶差分

估计,以同时消除个体效应与时间趋势;5) Blundell 和 Bond 提出的两步系统广义矩估计(系统 GMM) [14], 以二至四阶滞后项作为工具变量处理动态面板的内生性,并以 Hansen J 检验评估工具变量的整体有效性。多方法交叉验证可降低单一设定带来的结论偏误。

2.3. 碳关税冲击的情景设定

需要说明的是, CBAM 自 2026 年 1 月 1 日起才正式征收, 过渡期内进口商仅履行申报义务, 因此下文关于 2023~2025 年的全部冲击测算均为情景模拟, 而非已经发生的实际成本。模拟以 2023 年分行业出口隐含碳排放为基础, 设置三档税率: 低税率 30 美元/吨 CO₂, 对应 CBAM 过渡期欧盟碳市场的碳价区间; 中税率 60 美元/吨 CO₂, 作为全面征收后的预期基准; 高税率 75 美元/吨 CO₂, 对应美国《清洁竞争法案》的提议水平 [1] [2]。汇率取 2023 年人民币兑美元年均值 7.08。行业 i 在税率 τ 下的碳成本增加额为:

$$\Delta \text{Cost}_i = E_i \times \tau \times \rho \quad (7)$$

其中, E 为行业出口隐含碳排放量(吨 CO₂), ρ 为汇率。在此基础上构造两个冲击指标: 出口成本率 = ΔCost /行业出口额, 反映碳成本对出口价格的抬升幅度; 利润侵蚀率 = ΔCost /利润基准, 反映碳成本对盈利空间的压缩程度。利润基准采用两种口径: 一是全省规上工业利润总额(官方公布的完整口径); 二是分行业估算利润, 由《广东统计年鉴》分行业成本费用利润率乘以行业工业总产值, 再按全省营收利润率与成本费用利润率之比(0.9385)折算。需要指出, 官方统计未公布细分行业利润数据, 分行业利润为估算值, 相关结果主要用于行业间的相对比较。

2.4. 数据来源与处理

样本覆盖 2010~2023 年广东省制造业 26 个细分行业, 行业分类依据《国民经济行业分类》(GB/T 4754-2017) [15]。投入产出数据来自历年《广东省投入产出表》, 缺失年份以线性插值补充; 能源消费数据取自《中国能源统计年鉴》与《广东统计年鉴》 [16] [17]; 分行业出口数据取自海关总署广东分署的规上工业统计; 宏观数据来自国家统计局与广东省统计局 [18]。受分行业数据可得性限制, 并剔除 2010 年劳动生产率的 8 个极端观测后, 最终获得 298 个行业 - 年份有效观测。所有价值量指标均按 2010 年不变价平减, 能源消费统一折算为万吨标准煤; 分行业油品消费缺乏公开数据, 以全省终端油品消费(汽油、柴油与燃料油合计)乘以行业产值占比估算。

利润基准采用官方公布数据: 2023 年广东省规上工业利润总额 10575.2 亿元(同比增长 11.78%, 为全国唯一突破万亿元的省份), 营业收入 185803.6 亿元, 利润率 5.69%; 2024 年利润总额 10367.2 亿元, 营业收入 194052.1 亿元, 利润率 5.34% [18]。除非特别说明, 整体冲击测算以 2023 年利润为基准。

3. 实证结果与分析

3.1. 出口隐含碳排放的规模与结构

2010~2023 年, 广东制造业出口隐含碳排放呈“先降 - 后升 - 趋稳”的轨迹: 2011~2015 年由 1.24 亿吨降至 1.03 亿吨, 累计下降约 17%; 2016~2017 年在 1.00 亿吨附近的低位徘徊; 2018~2022 年回升至 1.40 亿~1.54 亿吨的平台区间; 2023 年为 1.36 亿吨(13,589 万吨), 较 2022 年小幅回落。排放总量随出口扩张经历下行、回升再到趋稳的过程, 与环境库兹涅茨曲线刻画阶段性特征大体相符 [5]。

行业层面, 排放高度集中。2023 年排放规模前五位的行业依次为: 纺织业(C17, 4410 万吨, 占 32.4%)、计算机、通信和其他电子设备制造业(C39, 4143 万吨, 占 30.5%)、非金属矿物制品业(C30, 663 万吨, 占 4.9%)、化学原料和化学制品制造业(C26, 629 万吨, 占 4.6%)以及文教、工美、体育和娱乐用品制造

业(C24, 606 万吨, 占 4.5%)。仅纺织与电子两个行业即贡献了全省出口隐含碳的 62.9%。需要强调的是, 排放规模由“碳强度 $\times$ 出口额”共同决定, 总量领先并不意味着单位产出的碳含量高, 二者在政策含义上应加以区分(详见 3.5 节)。

3.2. 多重共线性诊断与基准估计

表 3 报告五个解释变量的方差膨胀因子。所有变量的 VIF 均低于 3, 远低于通常采用的 10 的警戒水平, 表明模型不存在严重的多重共线性, 各方法之间的估计结果具有可比性。

Table 3. Multicollinearity diagnosis of explanatory variables
表 3. 解释变量的多重共线性诊断

变量	VIF	容忍度
lnExport	1.9	0.526
Tech	1.0	1.000
Struct2	1.1	0.909
lnFDI	2.7	0.370
Open	1.6	0.625

表 4 给出五种方法的估计结果。无论采用何种设定, lnFDI 的系数均显著为负, 取值介于-0.77 与 -0.04 之间, 即外资规模每扩大 1%, 行业碳强度下降约 0.04%~0.77%。五种方法结论方向一致, 为污染光环假说提供了稳健的省级层面证据[9] [10]: 外资进入伴随的清洁技术与管理经验外溢, 降低了广东制造业单位产出的隐含碳。以两步系统 GMM 为基准, 出口规模的系数同样显著为负, 说明在控制排放的动态持续性后, 出口竞争压力反而促使企业降低单位产出碳含量, 这与技术升级和市场筛选机制相符。

Table 4. Estimation results of five methods of the carbon intensity driving mechanism (dependent variable: lnCI)
表 4. 碳强度驱动机制的五种估计结果(被解释变量: lnCI)

估计方法	N	R ²	lnFDI 系数	标准误	t 值	显著性
OLS + Cluster	298	0.879	-0.7650	0.0951	-8.05	***
Within (组内去均值)	298	0.875	-0.4208	0.1513	-2.78	**
HAC (Newey-West)	298	0.879	-0.7650	0.0951	-8.05	***
一阶差分	65	0.794	-0.4143	0.1275	-3.25	**
两步系统 GMM	194	0.925	-0.0371	0.0032	-11.72	***

注: **、*分别表示在 1%、5%水平上显著; 一阶差分与系统 GMM 的样本量因滞后构造而减少。

3.3. 动态面板估计结果

表 5 报告两步系统 GMM 的完整结果。滞后项系数为 0.9512 且在 1%水平上显著, 表明碳强度具有很强的惯性, 上一年度的排放水平基本决定本年度水平, 印证制造业减排面临明显的路径依赖。Hansen J 统计量为 4.89 (自由度 6, $p = 0.56$), 不能拒绝工具变量整体有效的原假设。

Table 5. Two-step system GMM estimation results (dependent variable: lnCI)
表 5. 两步系统 GMM 估计结果(被解释变量: lnCI)

变量	系数	标准误	t 值	p 值
lnCI 滞后项	0.9512	0.0039	246.16	0.000
Tech	0.0860	0.0179	4.82	0.000
Struct2	0.3901	0.0200	19.53	0.000
lnFDI	-0.0371	0.0032	-11.72	0.000
lnExport	-0.0201	0.0034	-5.86	0.000
Open	0.1269	0.0069	18.29	0.000

注：Hansen J = 4.89 (df = 6, p = 0.56)；所有系数均在 1%水平上显著。

其余变量的符号提供了进一步信息。劳动生产率的系数显著为正，说明样本期内生产率较高的行业往往同时是装备与能源密集度较高的行业，“技术进步”尚未充分转化为“低碳进步”；清洁能源占比的系数为正，可能受燃气、电力密集型行业产出附加值核算口径的影响，也提示能源结构调整的减排红利存在时滞，对该系数的经济解释应保持谨慎；开放度系数为正，反映外向型程度高的行业整体能耗强度偏高。上述结果共同表明，广东制造业的减排约束是结构性的，而非单纯由外资或出口规模驱动。

3.4. 异质性分析

先看时间维度(表 6)。分时段估计显示，FDI 的减排效应持续衰减：2010~2013 年为-1.33，2014~2017 年降至-0.70，2018~2023 年仅为-0.01 且不再显著。2020 年“双碳”目标提出后，国内规制的减排约束明显强化，外资的边际减排空间逐步收窄，FDI 的环境效应随之弱化。这意味着新阶段的减排动力主要来自国内政策体系，而非外资渠道。

Table 6. Time heterogeneity of the FDI emission-reduction effect
表 6. FDI 减排效应的时间异质性

时期	N	lnFDI 系数	显著性	含义
2010~2013 年	68	-1.33	***	FDI 显著抑制碳强度
2014~2017 年	84	-0.70	***	抑制作用持续但减弱
2018~2023 年	146	-0.01	不显著	FDI 效应基本消失

注：***表示在 1%水平上显著。

再看行业维度(表 7)。按行业碳排放水平分组估计，FDI 的减排效应集中于高碳行业(-0.50，10%水平显著)，中碳行业不显著(-0.05)，低碳行业因样本量不足未予估计。外资的清洁技术外溢恰恰作用于减排空间最大的部门，与污染光环假说的作用机理一致。

Table 7. Sectoral heterogeneity of the FDI emission-reduction effect
表 7. FDI 减排效应的行业异质性

行业组	行业构成	行业数	N	lnFDI 系数	显著性
高碳组	C17, C19~C20, C22, C25~C35, C38	15	184	-0.50	*
中碳组	C13~C16, C21, C23~C24, C39	8	91	-0.05	不显著
低碳组	其余行业	3	23	-	样本不足

注：*表示在 10%水平上显著。

最后是碳锁定特征。动态面板框架下单行业滞后项的估计显示，26 个行业中有 14 个(占 54%)的滞后系数超过 0.7，电气机械(C38, 0.98)、烟草(C16, 0.94)、农副食品(C13, 0.91)、金属制品(C33, 0.91)、造纸(C22, 0.89)等行业的碳强度几乎完全由历史水平决定。资产专用性与沉没成本使得这些行业的排放结构难以在短期内改变，政策引导需要更长的作用周期。

3.5. 碳关税冲击的情景模拟

先看整体冲击。以 2023 年全省出口隐含碳排放 13,589 万吨为基数，三档税率下全省碳关税成本分别为 288.6 亿元(30 美元/吨)、577.3 亿元(60 美元/吨)与 721.6 亿元(75 美元/吨)，相当于 2023 年规上工业利润总额的 2.73%、5.46%与 6.82%，占 26 个行业出口总额(33,607 亿元)的 0.86%~2.15% (表 8)。由于模拟假设碳成本无法转嫁且企业不作任何调整，上述数字应理解为冲击的上界。

Table 8. Overall impacts of carbon tariffs under three tariff scenarios (2023)
表 8. 三档税率情景下碳关税的整体冲击(2023 年)

情景	税率	总碳成本(亿元)	利润侵蚀率	出口成本率
低税率	30 美元/吨 CO ₂	288.6	2.73%	0.86%
中税率	60 美元/吨 CO ₂	577.3	5.46%	1.72%
高税率	75 美元/吨 CO ₂	721.6	6.82%	2.15%

注：利润侵蚀率以 2023 年全省规上工业利润总额 10575.2 亿元为分母；出口成本率以 26 个行业出口总额 33,607 亿元为分母。

需要区分两类情景口径。当前 CBAM 仅覆盖钢铁、铝、水泥、化肥、电力与氢等品类[1]，对应本文行业口径中的 C31 黑色金属、C30 建材与 C32 有色金属。按当前覆盖范围测算，三行业 2023 年出口隐含碳合计 1094 万吨(约占全省 8.0%)，30、60、75 美元/吨税率下的碳成本分别为 23.2 亿元、46.5 亿元与 58.1 亿元，相当于规上工业利润的 0.22%、0.44%与 0.55%，且因 CBAM 现阶段仅适用于对欧出口，该结果仍为当前范围下冲击的上界。表 8 的全行业结果对应未来潜在扩围情景。两类情景对比表明：短期影响集中于少数高碳行业、全省层面温和；一旦扩围至纺织、电子设备等广东优势行业，冲击规模将上升一个数量级，需前瞻性应对。

再看行业冲击的碳强度维度。表 9 按碳强度(吨 CO₂/万元出口)对数据较完整的 23 个行业排序。碳强度最高的五个行业依次为黑色金属(C31, 2.18)、建材(C30, 1.92)、造纸(C22, 1.82)、石油加工(C25, 1.51)与化工(C26, 1.32)，60 美元/吨情景下其出口成本率均超过 5.6%，其中 C31 高达 9.27%，受冲击最敏感。值得注意的是碳强度与排放规模的错位：纺织业(C17)碳强度仅 1.02，但凭借 4321 亿元的出口规模，碳成本达 187.3 亿元，居各行业之首；电子设备(C39)碳强度仅 0.22，但因出口额高达 18,691 亿元，碳成本达 176.0 亿元，居第二位。规模与强度的不同组合决定了差异化的政策含义(详见 4.2 节)。

Table 9. Carbon intensity and carbon tariff impacts of major sectors (60 USD/t scenario, 2023)
表 9. 主要行业的碳强度与碳关税冲击(60 美元/吨情景，2023 年)

排名	行业	排放(万吨)	出口(亿元)	碳强度	碳成本(亿元)	出口成本率
1	C31 黑色金属	283	130	2.18	12.0	9.27%
2	C30 建材	663	346	1.92	28.2	8.15%
3	C22 造纸	327	180	1.82	13.9	7.72%

续表

4	C25 石油加工	314	207	1.51	13.3	6.43%
5	C26 化工	629	476	1.32	26.7	5.62%
6	C17 纺织业	4410	4321	1.02	187.3	4.34%
7	C28 化纤	27	31	0.88	1.2	3.73%
8	C32 有色金属	147	188	0.79	6.3	3.34%
9	C29 橡塑	590	1071	0.55	25.0	2.34%
10	C24 文教用品	606	1212	0.50	25.7	2.12%
16	C39 电子设备	4143	18,691	0.22	176.0	0.94%

注：碳强度单位为吨 CO₂/万元出口；碳成本按 60 美元/吨、汇率 7.08 折算。本表仅列示碳强度最高的前 10 个行业及排放规模最大的电子设备制造业(C39)，行业名称采用简称。

最后看行业冲击的利润侵蚀维度。表 10 的测算显示，冲击分布比碳强度排序更为集中：纺织业(C17)利润率仅 4.12%，60 美元/吨情景下碳成本相当于其估算利润的 214.6%，承压最重；木材加工(C20, 37.0%)、造纸(C22, 27.6%)、文教用品(C24, 27.5%)、黑色金属(C31, 26.3%)与石油加工(C25, 24.0%)构成第二梯队；有色金属(C32, 13.7%)与建材(C30, 13.3%)位于第三梯队；其余行业侵蚀率均在 10% 以下。八个重点行业合计侵蚀率 13.87%，远高于全省 5.46% 的平均水平。

Table 10. Profit erosion rates of eight key sectors (60 USD/t scenario)
表 10. 八个重点行业的利润侵蚀率(60 美元/吨情景)

行业	成本费用利润率	估算利润(亿元)	碳成本(亿元)	利润侵蚀率
C17 纺织业	4.12%	87.3	187.3	214.6%
C22 造纸	2.03%	50.3	13.9	27.6%
C31 黑色金属	1.06%	45.7	12.0	26.3%
C25 石油加工	1.08%	55.7	13.3	24.0%
C30 建材	3.55%	211.6	28.2	13.3%
C28 化纤	6.88%	12.4	1.2	9.4%
C26 化工	4.51%	312.6	26.7	8.6%
C39 电子设备	5.72%	2532.1	176.0	7.0%
八行业合计	-	3307.4	458.7	13.87%

注：估算利润 = 行业工业总产值 × 成本费用利润率 × 0.9385；成本费用利润率取自《广东统计年鉴》分行业效益指标。

上述测算均假设碳成本完全无法转嫁。表 11 报告 60 美元/吨情景下成本转嫁率 0%、25%、50%、75% 对应的利润侵蚀水平：转嫁率每提高 25 个百分点，侵蚀率相对下降 25%。纺织业即使转嫁 75% 的成本，侵蚀率仍达 53.7%。转嫁能力取决于行业议价能力，出口代工行业转嫁空间有限，受冲击更深。

Table 11. Profit erosion rates under alternative cost pass-through rates (60 USD/t scenario, 2023)
表 11. 不同成本转嫁率下的利润侵蚀率(60 美元/吨情景，2023 年)

指标	0% (完全不转嫁)	25%	50%	75%
全省利润侵蚀率	5.46%	4.10%	2.73%	1.37%
八个重点行业合计	13.87%	10.40%	6.94%	3.47%
纺织业(最高)	214.6%	161.0%	107.3%	53.7%
全行业区间	0.1%~214.6%	0.1%~161.0%	0.1%~107.3%	<0.1%~53.7%

注：利润侵蚀率 = $(1 - \text{转嫁率}) \times \text{碳成本/利润基准}$ ；全行业区间接 26 个行业估算利润的最小值与最大值给出。

企业动态调整行为将进一步改变长期冲击格局，简要体现为三方面：技术改造与绿电替代压缩应税基数，等效于部分对冲碳成本；绿色竞争力改善提升议价能力，实际侵蚀率向表 11 的高转嫁率列移动；部分订单向未开征碳关税的市场转移。本文静态模拟未纳入上述调整，所得冲击应视为短期上界；约 54% 行业的高碳锁定意味着转型存在时滞，政策支持宜提前布局。

3.6. 稳健性检验

本文从电力排放因子、利润基准与中间年份插值三方面对关键估算数据进行稳健性检验。基准测算采用 0.78 吨 CO₂/兆瓦时的固定电力排放因子；官方发布的因子序列显示，南方区域电力平均 CO₂ 排放因子 2021~2023 年分别为 0.4326、0.3869、0.4042 吨 CO₂/兆瓦时，广东省分别为 0.4715、0.4403、0.4419 [19]-[21]，均显著低于基准取值。设外购电力间接排放占比为 s (约 0.4)，按 $E_{\text{adj}} = E \times [1 - s + s \times (f/0.78)]$ 换算，表 12 显示，改用官方因子后全省排放由 1.36 亿吨降至 1.10~1.12 亿吨，60 美元/吨情景下利润侵蚀率降至 4.41%~4.51%；同一年份内所有行业适用同一因子，行业间相对排序不变，纺织业侵蚀率下限仍达 173%。

Table 12. Sensitivity to electricity emission factors ($s = 0.4$, 2023)
表 12. 电力排放因子取值的敏感性($s = 0.4$ ，2023 年)

电力排放因子(吨 CO ₂ /兆瓦时)	全省排放(亿吨)	碳成本(亿元)	利润侵蚀率
0.78 (基准)	1.36	577.3	5.46%
0.4419 (广东省，2023 年)	1.12	477.2	4.51%
0.4042 (南方区域，2023 年)	1.10	466.0	4.41%

注： $s = 0.4$ ； s 取 0.3 与 0.5 时，官方因子情景下利润侵蚀率介于 4.14%~4.75%。

利润基准方面，估算利润已将成本费用利润率按全省口径折算为营收利润率($0.9385 = 5.34\% \div 5.69\%$)；若不做该折算，26 个行业估算利润均高出 6.6%，八行业合计侵蚀率由 13.87% 降至 13.0%，纺织业由 214.6% 降至 201.4%，排名不变。插值方法方面，2015 年排放低点与 2020~2022 年排放平台均落在编表年份上，不依赖插值假设，结构演变的主要特征保持稳健。

4. 讨论

4.1. 碳关税冲击的传导机制

碳关税冲击通过价格传导、竞争力重塑与贸易转移三条路径形成系统性影响。其一是价格传导：碳关税体现为单位出口货值的成本加成，60 美元/吨情景下，黑色金属每万元出口约增加 926 元成本(约占

货值 9.3%)，建材约 816 元(8.2%)，电子设备仅约 93 元(0.9%)，高碳行业的价格劣势将被直接放大。其二是竞争力重塑：进口商可能转向碳强度更低的供应商，率先完成低碳转型的供给方将获得绿色先发优势。其三是贸易转移与转型窗口：54%的行业存在较强碳锁定，短期减排空间有限，2026 年正式征收前的窗口期具有特殊政策价值。

4.2. 重点行业排放来源与减排关键点

本节对排放规模最大的四个行业——纺织(C17)、电子(C39)、建材(C30)与化工(C26)——进行案例剖析。四行业合计占 2023 年全省出口隐含碳的 72.4%，排放结构与受冲击机制差异显著(表 13)。

Table 13. Emission sources and reduction priorities of key industries (2023)

表 13. 重点行业排放来源与减排关键点(2023 年)

行业	排放(万吨)	强度	侵蚀率	主要排放来源	减排关键点
纺织(C17)	4410	1.02	214.6%	印染整理环节燃煤热力与外购电力	低温染色、锅炉电气化、余热回收、再生纤维
电子(C39)	4143	0.22	7.0%	洁净厂房恒温恒湿外购电力	绿电交易与分布式光伏、能效管理、碳足迹认证
建材(C30)	663	1.92	13.3%	水泥煅烧工艺排放与燃煤窑炉	生物质与固废燃料替代、余热发电、低碳水泥
化工(C26)	629	1.32	8.6%	原料煤与燃料煤投入、外购蒸汽热力	电气化改造、绿氢替代、园区循环耦合

上述差异意味着政策工具不可“一刀切”。纺织业“排放规模大、利润薄”，风险敞口最大，减排关键在于印染环节热力脱碳，政策重点是成本缓释与绿色技改支持；电子业强度最低，减排等同于电力脱碳，绿电供给与碳足迹认证可直接转化为出口竞争力；建材与化工工艺过程排放占比高，减排依赖深度工艺改造与原料替代，需要更长的政策周期。

4.3. 与既有研究的对话

本文关于 FDI 的结论与污染天堂假说的部分经验证据形成对照[7] [8]，但与针对发展中国家的多项研究一致[9]-[11]。结论分歧的一个重要来源在于被解释变量的设定：以排放总量为对象时，外资的规模效应与技术效应相互混杂；改用碳强度后，规模渠道被剔除，FDI 的技术外溢效应得以清晰识别，这解释了为何同一区域在不同设定下可能得出符号相反的结论。时间异质性的结果则提示，外资的环境效应并非恒定参数，而是随国内规制强度变化的内生变量——当国内减排约束收紧，外资的边际作用趋于消失，与 Copeland 和 Taylor 关于贸易环境效应的判断相呼应[6]。

4.4. 研究局限

本文尚存以下局限。第一，单区域模型无法刻画省际与国外的反馈效应，未来可拓展至多区域投入产出框架。第二，分行业油品消费与利润数据为估算口径，行业间比较的意义大于绝对水平。第三，情景模拟以静态测算为主，虽已通过成本转嫁率敏感性分析(表 11)部分放松了完全无法转嫁的假设，但企业的技术改造、市场转移等动态调整行为未被完全纳入，测算结果仍应视为短期冲击的上界。第四，本文已单独报告当前 CBAM 覆盖范围的情景，但未来扩围的具体节奏与品类顺序存在不确定性，潜在扩围情景的精细动态模拟有待后续研究。

5. 结论与政策建议

本文以广东省为例,测算 2010~2023 年制造业出口隐含碳排放,识别其驱动机制并模拟碳关税冲击,主要结论与政策建议如下。

1) 出口隐含碳排放呈先降、后升、再趋稳的态势,经测算 2023 年全省为 1.36 亿吨;纺织业与电子设备制造业合计占 62.9%,行业集中度较高。

2) FDI 对行业碳强度具有稳健的减排效应,五种估计方法结论一致,支持污染光环假说;该效应集中于高碳行业,且 2018 年后该效应趋于不显著。新阶段的减排应由依赖外资外溢转向国内政策驱动,同时保持对高质量清洁外资的开放。

3) 约 54% 的行业存在较强的碳锁定,上一期碳强度基本决定本期水平,减排具有长期性,政策设计需保持连续性与耐心。

4) 碳关税冲击呈显著的行业分化。基准情景(60 美元/吨)下全省碳成本 577.3 亿元,相当于 2023 年规上工业利润的 5.46%;30 美元与 75 美元情景下分别为 288.6 亿元(2.73%)与 721.6 亿元(6.82%)。按碳强度排序,黑色金属、建材、造纸与石油加工最为敏感;按利润侵蚀口径,纺织业(214.6%)承压最重,八个重点行业自身利润侵蚀率达 13.87%。区分情景口径后,当前 CBAM 覆盖范围下 60 美元/吨税率的碳成本约 46.5 亿元、占利润的 0.44%,短期影响温和,577.3 亿元对应潜在扩围情景;转嫁率每提高 25 个百分点,侵蚀率相对下降 25%。鉴于 CBAM 于 2026 年才正式征收,上述数字均为模拟预测而非已发生的成本。

5) 政策建议按梯队展开:对纺织业设立低碳转型专项基金,推广低温染色、废纤维循环利用与碳足迹认证;对造纸、黑色金属、石油加工等第二梯队行业同步推进低碳改造与行业重组;对有色金属、建材稳妥推进天然气替代与余热回收;对电子设备、电气机械等低强度行业巩固技术领先优势,以其出口扩张优化整体贸易碳结构。上述梯队与 4.2 节排放源剖析一一对应:纺织在印染热力脱碳与转型缓冲,电子在绿电与碳足迹认证,建材、化工在燃料替代与工艺改造。

6) 碳关税与可持续发展目标存在多维关联:产业低碳转型直接服务于气候行动(SDG 13),并间接促进 SDG 7、SDG 9 与 SDG 12;高碳行业就业压力可能波及 SDG 8 与 SDG 10,应通过公正转型机制保障减排收益的社会共享。

基金项目

广东省哲学社会科学规划 2023 年度一般项目“碳关税对广东制造业全球价值嵌入的影响及应对策略研究”(GD23CYJ12)。

参考文献

- [1] European Commission (2023) Regulation (EU) 2023/956 Establishing a Carbon Border Adjustment Mechanism. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/956/oj>
- [2] U.S. Senate (2022) Clean Competition Act (S. 4355, 117th Congress). <https://www.congress.gov/bills/117/congress/senate/bills/4355>
- [3] 中共中央 国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见[EB/OL]. http://www.gov.cn/zhengce/2021-10/24/content_5644613.htm, 2021-10-24.
- [4] Peters, G.P., Minx, J.C., Weber, C.L. and Edenhofer, O. (2011) Growth in Emission Transfers via International Trade from 1990 to 2008. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **108**, 8903-8908. <https://doi.org/10.1073/pnas.1006388108>
- [5] Grossman, G.M. and Krueger, A.B. (1995) Economic Growth and the Environment. *The Quarterly Journal of Economics*, **110**, 353-377. <https://doi.org/10.2307/2118443>

-
- [6] Copeland, B.R. and Taylor, M.S. (2004) Trade, Growth, and the Environment. *Journal of Economic Literature*, **42**, 7-71. <https://doi.org/10.1257/42.1.7>
- [7] Eskeland, G.S. and Harrison, A.E. (2003) Moving to Greener Pastures? Multinationals and the Pollution Haven Hypothesis. *Journal of Development Economics*, **70**, 1-23. [https://doi.org/10.1016/s0304-3878\(02\)00084-6](https://doi.org/10.1016/s0304-3878(02)00084-6)
- [8] Cole, M.A. and Elliott, R.J.R. (2005) FDI and the Capital Intensity of “Dirty” Sectors: A Missing Piece of the Pollution Haven Puzzle. *Review of Development Economics*, **9**, 530-548. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9361.2005.00292.x>
- [9] Birdsall, N. and Wheeler, D. (1993) Trade Policy and Industrial Pollution in Latin America: Where Are the Pollution Havens? *The Journal of Environment & Development*, **2**, 137-149. <https://doi.org/10.1177/107049659300200107>
- [10] Wang, H. and Jin, Y. (2006) Industrial Ownership and Environmental Performance: Evidence from China. *Environmental and Resource Economics*, **36**, 255-273. <https://doi.org/10.1007/s10640-006-9027-x>
- [11] 许和连, 邓玉萍. 外商直接投资导致了中国的环境污染吗?——基于中国省际面板数据的空间计量研究[J]. 管理世界, 2012, 28(2): 30-43.
- [12] 王少剑, 田莎莎, 蔡清楠, 等. 产业转移背景下广东省工业碳排放的驱动因素及碳转移分析[J]. 地理研究, 2021, 40(9): 2606-2622.
- [13] IPCC (2019) 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. IPCC.
- [14] Blundell, R. and Bond, S. (1998) Initial Conditions and Moment Restrictions in Dynamic Panel Data Models. *Journal of Econometrics*, **87**, 115-143. [https://doi.org/10.1016/s0304-4076\(98\)00009-8](https://doi.org/10.1016/s0304-4076(98)00009-8)
- [15] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 4754-2017 国民经济行业分类[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [16] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴 2023 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2024.
- [17] 广东省统计局, 国家统计局广东调查总队. 广东统计年鉴 2024 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2024.
- [18] 2024 年广东规模以上工业企业效益简况[EB/OL]. http://stats.gd.gov.cn/tjcx185/content/post_4663698.html, 2025-02-05.
- [19] 生态环境部、国家统计局关于发布 2021 年电力二氧化碳排放因子的公告[EB/OL]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk01/202404/t20240412_1070565.html, 2024-04-12.
- [20] 关于发布 2022 年电力二氧化碳排放因子的公告[EB/OL]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk01/202412/t20241226_1099413.html, 2024-12-26.
- [21] 关于发布 2023 年电力二氧化碳排放因子的公告[EB/OL]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk01/202512/t20251231_1139517.html, 2025-12-31.