“碳关税”倒逼效应下我国零碳园区建设逻辑与创新路径研究

冯宇希[1,2]，徐明[1]，柴国鸿[1]，刘华[3]，伍文虹[4]，何超[5]，陈梦华[6,7]*

［1.粤港碳中和科学与技术联合实验室，江门双碳实验室，广东江门 529199；2.香港科技大学（广州）碳中和与气候变化学域，广东广州 511458；3.广东财经大学经济学院，广东广州 510320；4.广东省节能减排标准化促进会，广东广州 510320；5.中国科学院武汉文献情报中心，湖北武汉 430071；6.桂林理工大学广西环境污染控制理论与技术重点实验室，广西桂林 541006；7.桂林理工大学流域保护与绿色发展广西高校工程研究中心，广西桂林 541006］

【摘　要】欧盟碳边境调节机制（CBAM）的全面实施标志着全球气候治理从国家自主贡献模式向跨境合规强制约束转型，显著推升了高碳产业对欧出口成本。本文系统解构CBAM规则的内核与核算机制，揭示其对我国工业园区形成的系统性挑战，深入剖析国内零碳园区研究发展、概念演进及建设实践中存在的问题，创新性提出“CBAM—零碳园区耦合分析框架”，提出融合国际规则与中国国情的零碳园区核心框架及动态评价体系。研究发现：现有零碳园区建设存在核算边界模糊、过度依赖碳抵消、绿电国际认可不足等问题，需以实质性降低碳排放为原则，通过技术革新实现深度脱碳、绿电直供保障物理溯源、区块链监测确保数据可信、碳资产预算引导资源优化四大子系统的协同联动，系统性破解CBAM的四重成本压力与数字降碳陷阱。研究为应对国际碳壁垒、推动工业园区实质性脱碳提供理论与实践支撑。

【关键词】碳关税；CBAM；零碳园区建设；零碳园区评价

【中图分类号】X32；F74；X5　　【文章编号】1674-6252（2025）05-0038-13

【文献标识码】A　　【DOI】10.16868/j.cnki.1674-6252.2025.05.038

引言

当前，全球气候变化形势紧迫，工业园区实现“双碳”目标面临严峻挑战。作为碳排放主要来源的工业园区（占全国能耗69%、碳排放31%）[1]，其深度减排面临关键技术瓶颈（如低成本清洁能源替代、碳捕集等）和高昂转型成本[2,3]；国外“碳关税”（Carbon Tariff）等政策的实施，倒逼我国企业加速低碳转型，导致国际绿色竞争压力加剧[4]。

“碳关税”是发达地区（或国家）对高耗能产品进口征收的二氧化碳（CO_2）排放特别关税，其中以欧盟为代表的碳边境调节机制（CBAM）最为出名[5]。2021年3月，欧洲议会正式通过了《建立符合世贸组织要求的欧盟碳边境调节机制》的决议。同年7月，欧盟委员会向立法机构提交了CBAM的具体提案，经过多轮磋商和调整，该机制的政策框架已基本成型，并于2023年启动过渡期，2026年全面实施碳关税征收制度。这意味着中国制造业出口首次直面大规模“碳成本硬约束”的生存考验。据测算，当欧盟、其条所有发达国家，以及我国其他贸易伙伴分别对工业产品出口贸易征收碳关税时，我国将缴纳上千亿欧元碳关税[6]。CBAM

资助项目：粤港澳联合实验室专项“粤港碳中和科学与技术联合实验室”（2023B1212120003）。

作者简介：冯宇希（1990—），男，博士，副研究员，硕士生导师，研究方向为全球气候变化与碳管理，E-mail: yu-xifeng@foxmail.com。

*** 责任作者：**陈梦华（1989—），女，硕士，高级工程师，研究方向为企业碳管理，E-mail：chanmenghua@163.com。

的实施标志着全球气候治理从自愿减排行动转向强制成本内部化，倒逼中国工业园区转向深度脱碳革命。

园区作为城市功能体系的核心构成，承载着城市 90% 以上的创新产出与 80% 以上的国内生产总值（GDP），是人口、产业和经济活动的主要空间载体 [7]。在“双碳”目标推进过程中，零碳园区因其在系统性减排中的关键作用，已成为全球碳中和行动的重要实践场所 [8]。其概念演进呈现出清晰的阶段性特征：从早期以资源循环为导向的绿色园区（Green Park）和基于工业生态学的生态工业园区（Eco-industrial Park），到聚焦温室气体减排的低碳园区（Low-carbon Industrial Park），最终发展为以碳排放趋零为目标的近零碳 / 零碳园区（Near-zero/Carbon-neutral Industrial Park），这一概念迭代反映了应对气候变化战略的持续深化和目标升级 [9]。然而，我国零碳园区建设仍面临概念界定模糊与系统性挑战并存的多重困境：宏观层面，产业脱碳既要维持经济增长目标，又要应对对化石能源的依赖 [10,11]，区域发展差异进一步加剧协调统筹难度 [12]；机制层面，跨区域政策框架碎片化、国内标准与国际规则存在错位（如欧盟 CBAM 对复杂产品供应链中前体物的核算要求），导致国内零碳园区难以有效支持企业满足 CBAM 合规需求和应对国际碳壁垒 [13,14]；技术层面，面临储能成本高、绿电直供能力不足，核心减排技术（如碳捕集、利用和封存，CCUS）产业化滞后，以及数字碳管理系统无法整合全流程运营数据等障碍 [15,16]。这些矛盾迫使零碳园区必须在经济增长与深度脱碳之间寻求系统性平衡。

综上所述，本文首先从 CBAM 重要规则入手，厘清其对传统工业园区转型的倒逼机制与影响路径，进而分析零碳园区研究发展与实践中的关键痛点与深层次矛盾；据此，创新性构建 CBAM—零碳园区耦合分析框架（TEDI 框架），提出融合国际规则与中国国情的零碳园区核心框架及动态评价体系；最终强调建设和评价必须彻底坚守以碳论碳原则，以系统性协同破解形式化困局，推动实质性深度脱碳。

1 CBAM 对工业园区的影响路径分析

欧盟 CBAM 作为全球首个“碳关税”制度（图 1），其政策框架围绕三大核心维度构建：行业覆盖范围、碳排放核算规则及实施时间表。行业覆盖范围方面，初期聚焦钢铁、铝、水泥、化肥、电力及氢六大高碳泄漏风险行业（尤其钢铁和铝制品直接影响中国对欧出口贸易结构：2022 年对欧出口额分别为 150 亿欧元和 45 亿欧元）[17]；2025 年后，覆盖范围将扩展至有机化学品、塑料等下游产品；2030 年前，实现对欧盟碳排放交易体系（ETS）所有行业的全覆盖。核算规则严格区分直接排放（生产中的燃料燃烧与工艺排放）和间接排放（外购电

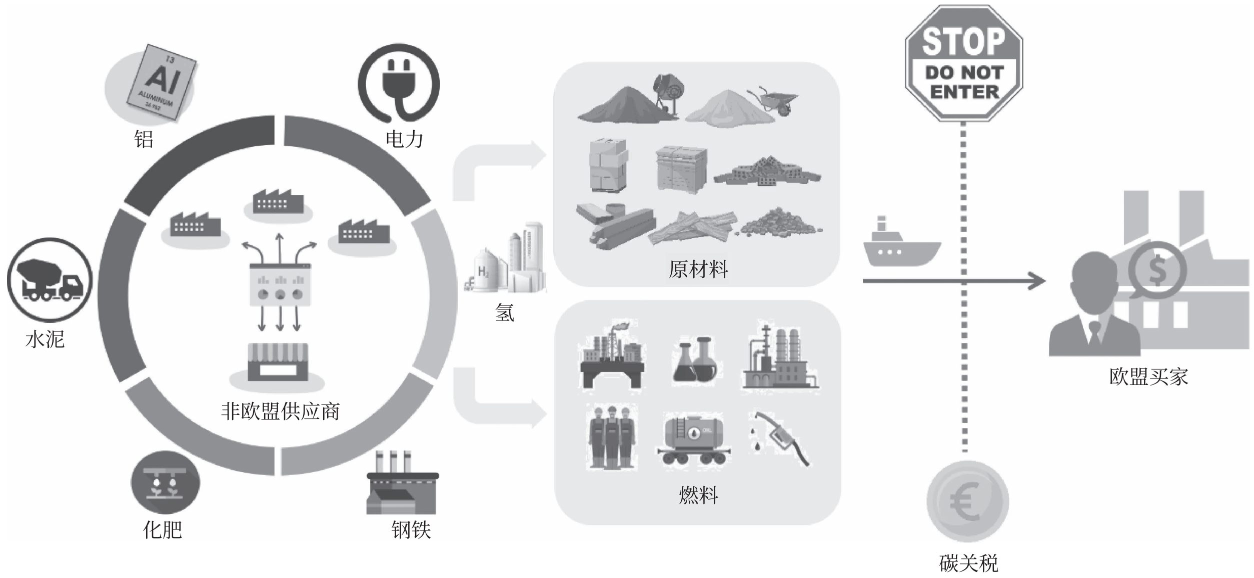

图 1　碳边境调节机制（CBAM）

力的隐含碳）。对钢铁等产业链较长的产品，强制要求追溯前体物（如粗钢）的隐含碳排放，形成全生命周期碳足迹管理。实施时间表上，2023—2025 年为过渡期，仅履行季度碳排放数据申报义务，无需支付费用；2026 年起为正式实施期，按年度购买 CBAM 证书，证书价格锚定欧盟 ETS 碳价周均价，同时逐步取消对欧盟生产商的免费配额；2034 年实现免费配额清零。值得注意的是，2025 年改革新增“50t/ 年进口量”豁免阈值，覆盖约 90% 的中小进口商，但通过排放量筛选锁定 99% 的碳排放来源，实质聚焦大型贸易主体。

CBAM 通过差异化碳定价公式向出口国产业链施加压力，其核心计算逻辑为：

应缴费用 =（单位商品隐含排放量 - 欧盟同类产品免费配额）× 进口总量 × 欧盟碳价 - 出口国已付碳税 [18,19]。

该公式中也蕴含了四重成本传导路径：①碳排放量差（直接传导路径）——中国出口产品单位碳排放量若高于欧盟同类产品免费配额标准，需承担额外碳成本。②欧盟碳价（杠杆放大器）——证书价格锚定欧盟 ETS 碳价（2024 年约 100 欧元 /t），与中国碳价存在约 10 倍价差。价差越大，中国出口商承担的显性成本越高。③免费配额递减（动态加压器）——欧盟免费配额在 2026—2034 年逐年减少，2034 年后取消。免费配额归零后，中国出口产品需全额承担碳排放成本。④已付碳成本抵扣（唯一对冲项）——仅认可显性碳价（如碳税、ETS 支出），中国碳市场虽已将钢铁、铝等行业纳入全国碳市场，但抵扣效力受限于国内碳定价水平，抵扣范围与核算标准仍需与欧盟规则适配。

除上述显性成本因素外，CBAM 机制还隐含多重深层影响因素，将通过产业链传导并显著地重构出口企业成本结构，加剧系统性挑战：①企业合规性成本（技术壁垒）：自 2026 年起，企业需依据欧盟标准方法学核算产品全生命周期碳排放，并接受欧盟认证机构第三方核查。该过程将衍生数据系统升级、核查费用及管理复杂度提升等隐性支出，实质上构成技术性贸易壁垒。②供应链间接压力与碳泄漏风险转移（产业传导）：CBAM 成本压力不仅作用于直接出口欧盟的终端制造商（A），更向其上游原材料供应商（B）、半成品加工商（C）逐级传递。由此，大量非直接对欧出口的上游企业被迫实施碳减排技术改造，以满足下游客户应对 CBAM 碳约束的需求，形成全链条的降碳倒逼机制。值得注意的是，这种压力可能导致欧盟本土高碳生产环节向第三方市场的转移（碳泄漏风险变形），反而背离其全球减排初衷。③规则动态性与国际协调风险（政策不确定性）：CBAM 的实施细则（涵盖报告要求、核算方法、机构认证等）具有高度动态性，存在频繁修订预期。其单边属性（国家单边行动）与多边贸易规则框架（如世界贸易组织，WTO）存在内生性冲突风险，可能引发贸易争端。企业需持续跟踪政策变动并动态调整合规策略，导致合规成本不断攀升。

由此可见，当工业企业面临欧盟碳价波动、免费配额递减等不可控外部约束时，园区与企业的最优策略聚焦于第一杠杆——通过技术改造和能源转型降低单位产品碳排放量，这是唯一能主动掌控的核心突破口。值得注意的是，“零碳园区 + 绿电直连”策略为企业应对欧盟规则下的系统性降碳要求和绿电消费认定受限挑战提供了解决方案，相关国家和地方政策正加速出台。

2 零碳园区概念解析与研究发展

近年来，我国出台一系列政策文件推动工业园区向绿色低碳转型。在此背景下，绿色园区、生态工业园区、低碳园区、近零碳园区以及零碳园区等创新园区模式相继涌现（表 1）[7,20]。随着国家“双碳”目标的深入推进，这些模式的概念内涵不断丰富，发展路径日益清晰，标准体系也逐步完善。

2025 年 6 月 30 日，国家发展改革委、工业和信息化部和国家能源局联合发布《关于开展零碳园区建设的通知》（发改环资〔2025〕910 号），之后多个省份相继发布省级零碳园区建设方案。这些方案对零碳园区作出了明确定义：零碳园区是指通过规划、设计、技术、管理等方式，使园区内生产、生活所产生的二氧化碳排放降至“近零”水平，并具备进一步达到“净零”条件的园区。然而，现有定义仍存在三点亟待深化的学理缺口：其一，方案以既有园区改造为主，核算边界集中于运营阶段，建设期（建材生产、运输与施工）及拆除阶段的隐含碳排放尚未纳入，可能导致园区全生命周期

碳排放核算结果显著低估；其二，当前口径仅聚焦 CO_2，未覆盖 CH_4、N_xO 等其他温室气体，与 ISO 14064 等多气体管控框架存在错位，易在国际互认中形成技术性壁垒；其三，“近零”与“净零”缺乏量化界定——前者未设定相对基准年的减排比例阈值，后者亦未对碳移除技术路径及外部抵消依赖度设定上限，从而削弱标准的可操作性与政策一致性。

基于中国知网（CNKI）数据库，本研究以“零碳园区”为标题关键词进行检索。对近五年相关文献的可视化图谱分析表明，该领域已累计发文 99 篇，且年度发文量呈显著增长趋势，反映出其日益提升的研究热度。其中，“零碳园区”主题以 22.86% 的占比显著领先“园区建设”“低碳发展”及“智慧园区”等衍生议题，反映出学术焦点正由概念扩散转向碳中和路径主体；学科分布上，环境科学与资源利用以 28.44% 的份额居首，工业经济、建筑科学与工程、电力工业构成次级支撑，呈现“技术—政策—产业”三元驱动格局，而经济管理、信息技术合计仅 13.34%，揭示跨学科融合仍显薄弱（图 2）。尤为关键的是，现有研究尚未系统回应零碳园区在未来“碳关税”情景下的合规挑战，相关缺口亟待填补。这反映了学术界对国际碳壁垒严峻性与复杂性的认知仍需深化，也凸显了本研究聚焦 CBAM—零碳园区耦合机制的必要性。

3 零碳园区建设过程中的问题

基于零碳园区实践中的核心争议，结合政策规范与国际规则，作者认为以下关键问题亟须澄清与思考。

3.1 零碳园区核算边界界定的复杂性

中国零碳园区建设普遍存在“运营阶段零碳”与“全生命周期零碳”的概念混淆。大多数园区仅关注运营期间的直接排放（如能源消耗），却忽视建设阶段的隐含碳排放（建材生产、施工等），导致碳核算完整性不足[21]。这种片面认知可能削弱零碳目标的科学性与可持续性。

3.2 碳减排与碳抵消的认可度存在差异

当前国际标准对零碳目标的界定存在显著分歧。以 CBAM 为代表的贸易规则体系仅认可生产

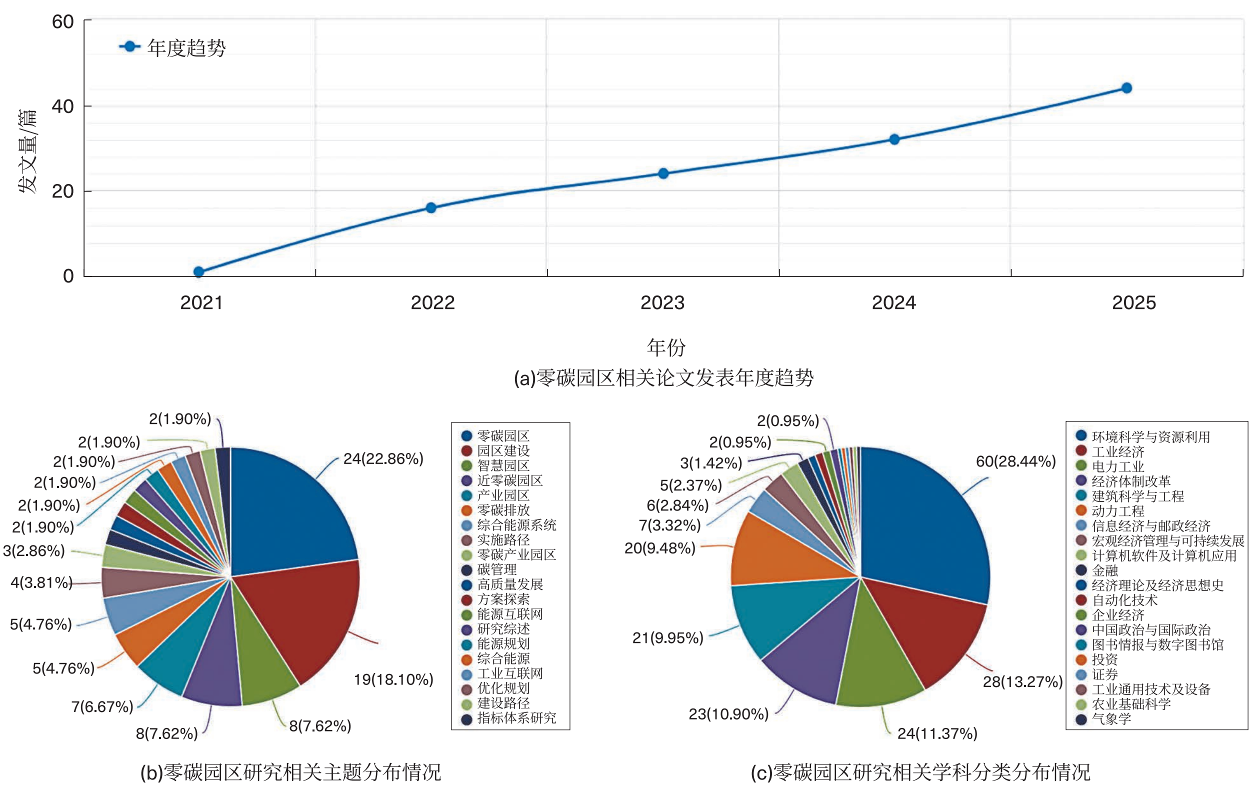

图 2 “零碳园区”文献计量学分析

过程中的直接碳减排，而明确拒绝接受末端碳抵消作为降低产品碳足迹的依据[22]。若园区高度依赖外部碳汇交易达成名义净零排放，而未从根本上降低单位产值碳排放强度，此类操作很可能被国际碳核算体系判定为“碳泄漏”，而非真正意义上的脱碳。这深刻揭示了脱离深度技术脱碳的抵消路径，本质上难以满足全球化低碳贸易规则对实质性减排的严格要求，也是造成数字降碳陷阱的主因之一。

3.3 园区价值链间接排放核算缺失与责任规避

园区价值链间接排放（范围 3）核算的必要性日益凸显。即便园区内企业实现了钢铁行业的零碳排放，但其原材料（如铁矿石）开采及运输过程仍属于高碳排放过程，则该产品的全生命周期碳足迹评估结果仍可能超标。欧盟产品环境足迹（PEF）等国际标准已明确要求范围 3 排放的核算。这意味着仅实现园区运营层面的零碳而无价值链的协同，极易陷入“漂绿”的质疑[23,24]。更严重的是，部分园区通过将碳密集型产业外移实现局部脱碳，这种空间错配的减排责任转移，使得园区层面宣称的零碳成就却可能在国际贸易中构成制度性碳泄漏——欧盟 CBAM 的最新规则，已开始要求披露部分关键上游排放数据（如钢铁生产中的直接排放及外购电力间接排放），正是对这一风险的响应。究其深层次原因，既有数据获取难度大的客观因素，更存在地方与企业对延伸碳责任的主动规避意愿。要破解这一困局，关键在于构建跨行政区域的碳责任追溯体系，将产业链各环节纳入动态碳预算管理，通过清晰的权责界定与数据联通，确保脱碳进程在环境效益与伦理责任上保持内在统一，最终实现减排成果的真实性与可信度。

3.4“零碳园区”绿电与绿证的国际认可困境

CBAM 对中国绿电及绿证（Green Certificates）的认可存在显著分歧，本质上是两种碳核算逻辑的碰撞：欧盟主张物理溯源优先（即绿电需直接供应生产环节），而中国现行绿证体系更倾向于环境权益分离（即绿证可独立交易，与物理电力脱钩）[25,26]。根据 CBAM 实施细则，欧盟目前仅承认两类绿电减排效力：一是发电设施与用电设施物理直连（如专用输电线路），确保绿电可实时追踪且未被电网混合；二是具备环境属性独占权（即绿证未被重复计算或转让）的长期购电协议（PPAs）[27]。这意味着，尽管中国绿证已获国际可再生能源倡议（RE100）等形式认可，但因其环境权益与物理电量分离的特性，CBAM 仍拒绝将其作为有效的碳足迹减排凭证。这一困境的根源在于两种碳核算逻辑（物理溯源 vs. 环境权益分离）的碰撞，也反映了国内现行绿证体系在应对严苛国际贸易规则时的适配性不足。

综上所述，零碳园区建设绝非单纯的技术堆砌或数据美化，而是融合产业生态、制度设计与国际规则适配的系统性改革。当前实践暴露的边界模糊、核算碎片化、碳泄漏等问题，本质上反映了局部优化与系统脱碳的深层矛盾。真正的零碳转型必须突破园区物理边界的局限，构建覆盖全生命周期、全产业链条、全要素流动的“三全”碳治理体系，在技术脱碳（如绿电直连）与制度创新（如跨行政区碳责任追溯）双轮驱动下，实现从数字零碳到实质零碳的跃升。

4 构建适应 CBAM 与中国国情的零碳园区核心框架与标准体系

4.1 国内现行零碳园区相关标准概况

通过对 2020—2025 年 22 项代表性标准的系统梳理（表 2），我国零碳园区标准体系的构建呈现地方先行探索、行业动态补充、体系动态演进的鲜明特征。这虽反映了地方政府在“双碳”目标下的实践主动性，但深层矛盾不容忽视：地方标准（如内蒙古 DB 15/T 2948—2023、雄安新区 DB 1331/T 069—2023）与行业团体标准（如中国工业节能与清洁生产协会 T/CIECCPA 031—2023）交叉重复，缺乏国家层面的统筹协调机制。这种多头制订模式源于碳治理权的条块分割——地方政府侧重区域发展目标与政绩考核，行业组织聚焦产业特性，导致标准在关键要素（核算边界、核心指标阈值）上存在显著差异且缺乏国家层面统筹协调。例如，福建省 DB35/T 2198—2024 未提及范围 3 排放核算，而上海市 T/SEESA 010—2022 仅作原则性要求。这种碎片化不仅直接增加了企业跨区域合规成本，更与欧盟 CBAM 全生命周期追溯的统一强制性规则形

表2　已发布的零碳园区相关标准

序号	标准类型	地区 / 组织	标准名称	标准号	发布日期
1	地方标准	内蒙古自治区	零碳产业园区建设规范	DB15/T 2948—2023	2023-03-28
2		雄安新区	雄安新区零碳园区评价标准第 1 部分：公共建筑园区	DB1331/T 069—2023	2023-12-22
3		福建省	工业园区低零碳创建评估准则	DB35/T 2198—2024	2024-07-03
4		盐城市	沿海（近）零碳产业园区建设规范	DB3209/T 1275—2024	2024-08-22
5	团体标准	中国科技产业化促进会	智慧零碳工业园区设计和评价技术指南	T/CSPSTC 51—2020	2020-08-18
6		上海市节能环保服务业协会	零碳园区创建与评价技术规范	T/SEESA 010—2022	2022-04-25
7		上海市节能环保服务业协会	零碳物流园区创建与评价技术规范	T/SEESA 014—2022	2022-11-18
8		北京节能环保促进会	产业园区零碳成熟度等级评价指南	T/BAEE 014—2023	2023-03-01
9		中国投资协会	零碳园区评价标准	T/AIAC 002—2023	2023-03-03
10		上海市检验检测认证协会	零碳园区智慧能源整合平台服务认证要求	T/STIC 120071—2023	2023-04-03
11		中国工业节能与清洁生产协会	零碳园区评价通则	T/CIECCPA 031—2023	2023-07-25
12		上海市节能环保服务业协会	零碳产业园区实施路径规划与评估	T/SEESA 18—2023	2023-09-15
13		安徽省零碳协会	零碳园区建设与评价技术规范	T/ACA 001—2023	2023-12-28
14		中国城市科学研究会	智慧零碳园区评价标准	T/CSUS 66—2023	2023-12-29
16		中国工程建设标准化协会	零碳产业园区技术规程	T/CECS 1600—2024	2024-05-08
17		山西省环境科学学会	零碳（近零碳）产业园区创建与评价规范	T/SXSES 04—2024	2024-05-15
		陕西省节能协会	低碳近零碳园区评价规范	T/SJNX 001—2024	2024-06-15
18		中国工业节能与清洁生产协会	零碳智慧园区创建与评价规范	T/CIECCPA 031—2024	2024-07-29
19		中国生物多样性保护与绿色发展基金会	零碳园区建设与评价技术规范	T/CGDF 00046—2024	2024-09-14
20		广东省低碳发展促进会	低碳 / 零碳园区评定规范	T/GDLC 019—2024	2024-12-01
21		中国节能协会	零碳园区评价技术规范	T/CECA-G 0344—2025	2025-03-18
22		中国建筑节能协会	零碳园区评价标准	T/CABEE 103—2025	2025-06-01

成尖锐冲突，暴露出国内标准体系在国际规则对接上的滞后与被动适应状态。

对 22 套零碳园区评价指标体系的统计分析（表 3），进一步定量揭示了当前标准体系存在显著的形式化倾向与实质性脱碳指标缺失背后的结构性成因。政绩导向下的指标选择偏差：高频指标中，绿化覆盖率（14 次）、低碳 / 零碳宣传（12 次）等易量化、易展示的象征性指标占比过高，这本质上是地方政府在"双碳"考核压力下的避重就轻策略体现——这类指标无需高额技术投入即可达标，却与实质性脱碳关联薄弱。技术经济性的现实制约："绿电直供电量""碳捕集利用与封存规模"等关键指标仅出现 1 次，这并非因其不重要，而是受制于配套基础设施短板（如绿电直供需微电网改造，单园区投入超千万元）和数据监测成本（区块链溯源系统年维护费用约 50 万元），中小企业难以承担，导致标准制订者被迫妥协于现实可行性。国际规则认知滞后：现有标准对 CBAM 核心要求的响应严重不足，例如"范围 3 排放核算""绿电物理溯源"等在 22 项

表 3　零碳园区高频指标和低频指标统计

序号	指标分类	出现频次	指标名称
1	高频指标	17	可再生能源使用比例
2		15	碳管理平台
3		14	绿化覆盖率
4		13	新能源车辆占比
5		13	工业固体废物综合利用率
6		12	低碳 / 零碳宣传
7		11	新建建筑中绿色建筑所占比重
8		11	温室气体排放管理体系
9		11	工业用水重复利用率
10		9	企业温室气体盘查比例
11	低频率指标	1	二氧化碳排放削减率、战略性新兴产业和高新技术企业数量占比、绿色工业园区、小微产废企业集中收运体系、冷热源机组能效系数、光储直柔建筑比例、产品单位产量增加值碳排放量降低率、单位建筑面积碳排放量降低率、碳减排目标完成情况、园区建筑环境健康度指标、高能效设备产品使用率、创建国家碳达峰试点园区、园区开展绿色用电溯源企业比例、园区绿色产业增加值占园区工业增加值比例、“两高”行业能效达到标杆水平的产能比例、规上企业环境信息披露率、省级以上绿色低碳相关创新平台、全绿电企业、企业能效水平达到行业标杆比例、绿色低碳技术研究与试验发展经费投入强度、参与“智改数转网联”诊断企业数量占比、“绿电直供”电量、园区内新型储能容量、通用型终端用能设备能耗、园区内电力需求响应能力、碳捕集利用与封存规模、智能管控平台对园区企业的覆盖范围

标准中均未被重点纳入，反映出国内对国际碳壁垒的认知仍停留在被动适应阶段，未形成主动对接的战略意识。

此外，评价方法的科学性缺陷同样源于深层矛盾。通过对 22 套零碳园区评价方法的统计分析，可将当前评价方法归纳为三类：加权计分法（3 项标准，通过设定单项指标阈值并赋予分值，累加总分判定达标水平）、指标参考法（6 项标准，要求园区满足预设全部 / 部分指标参考值）和等级划分法（13 项标准，根据各指标评价总得分，从而划定零碳园区等级）。这三类方法普遍存在科学基础薄弱的问题，具体表现为两个方面：第一，静态阈值与产业动态脱节。部分标准设定的碳排放强度阈值缺乏技术迭代与行业差异考量。如江苏省 (近) 零碳产业园建设指南规定零碳园区单位工业增加值碳排放≤0.1t/ 万元，而近零碳园区却放宽至≤0.6t/ 万元，两者 6 倍的差距违背环境库兹涅茨曲线的渐进降碳规律。这种固定阈值未考虑行业技术迭代周期与区域发展差异（如资源禀赋、产业结构），导致标准与产业现实严重错位，甚至可能阻碍必要的高碳产业转型升级进程。第二，核算盲区背后的责任规避。多数标准规避建造期隐含碳和范围 3 排放的核算，表面是数据获取困难，实则反映出地方与企业对碳责任的规避——这使得园区可能在实际碳排放增加的情况下仍获得较高评级。

4.2 构建适应 CBAM 与中国国情的零碳园区关键技术和评价指标分析

4.2.1 CBAM—零碳园区耦合分析框架

为系统性破解零碳园区建设面临的核心痛点，特别是 CBAM 规则带来的四重成本压力以及国内实践中的核算模糊、抵消依赖、规则错位问题，本研究创新构建了 CBAM—零碳园区耦合分析框架（图 3）。该框架的核心创新在于打破了单一技术或政策视角的局限，构建了技术（T）、能源（E）、数据（D）、制度（I）四大子系统的闭环协同矩阵，通过工艺革新、绿电直供、区块链监测、碳资产预算等优先序措施精准应对 CBAM 四重成本传导路径（排放量差、碳价杠杆、合规成本、配额递减），实现深度脱碳、规则适配与可信减排：①技术子系统：以工艺革新为优先路径，直接对冲排放量差（如氢冶金降低钢铁产品碳强度），但需依赖 D 的区块链碳足迹追溯实现减排量可核证——此为突破 CBAM 贸易壁垒的技术前提；②数据子系统：承担 CBAM 合规性成本化解枢纽，其碳监测能力支撑技术优化（如验证燃料替代减排贡献），同时通过生命周期数据库驱动 I 的碳资产预算制定；③制度子系统：以绿电 PPA 协议为核心纽带，锁定 E 的绿电直供资源，化解免费配额递减风险，并形成 PPA—区块链—碳资产的三角互锁机制；④能源子系统：需响应双路径：一方面提供绿电直供（直接降低碳价杠杆冲击），另一

方面需接入 D 的区块链溯源核证（满足 CBAM 物理关联要求），避免绿电环境权益“漂绿”。该框架强调子系统间深度耦合与协同，为园区系统性应对 CBAM 提供理论指导和操作路径。

4.2.2 零碳园区关键技术分析

零碳园区的建设需要自上而下的系统性架构，以引导多元化脱碳路径。这一蓝图框架以碳中和愿景为引领，以创新理念为驱动，通过构建数字化赋能体系实现经济—生态协同进阶（图 4）。在实施层面，园区应着重考虑以下几个方面。

（1）推进能源系统深度脱碳。以高比例绿色能源直供为核心，构建“源—网—荷—储”动态平衡体系。通过全域屋顶光伏覆盖、分布式风电就地消纳、增量配电网与智能微电网建设，实现高比例绿

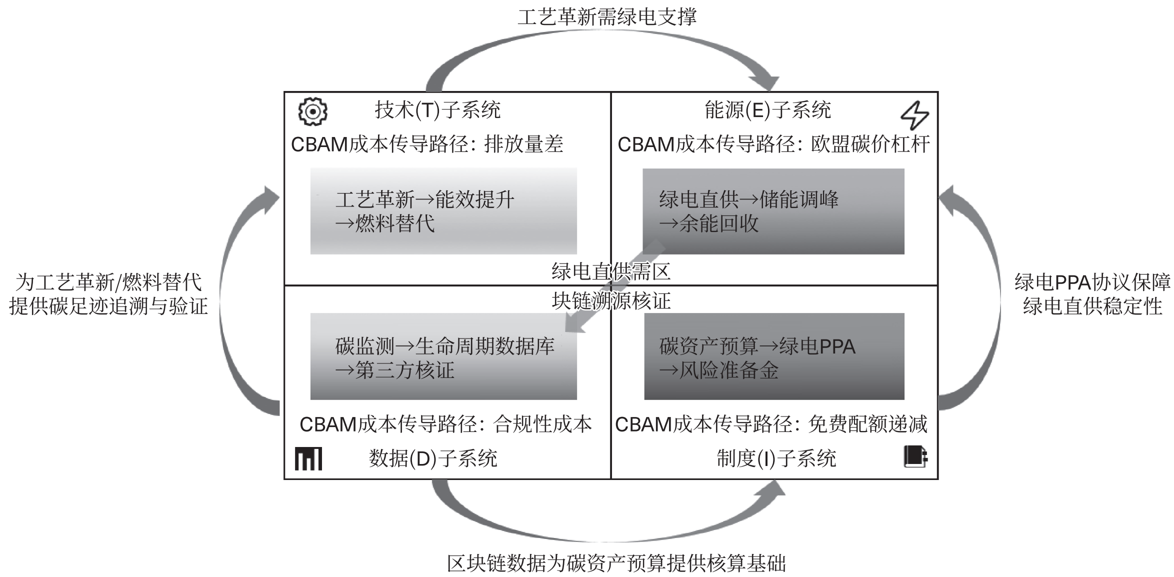

图 3 CBAM—零碳园区耦合分析框架

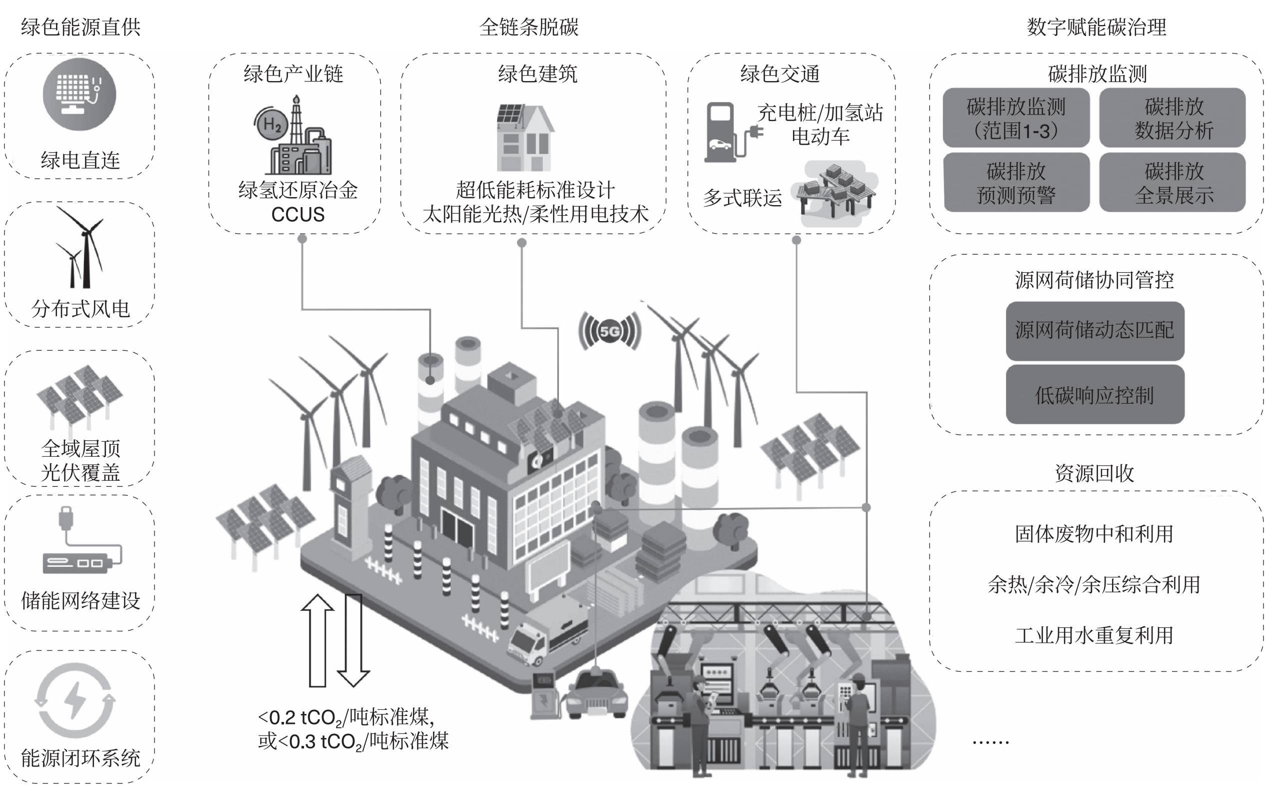

图 4 零碳园区关键技术系统性架构

电直连；配套锂电 / 氢能等短时储能与抽水蓄能 / 蓄冷蓄热等中长时调节设施，构建“分钟级响应—小时级调节—跨季节存储”的弹性储能网络，保障能源稳定性。集成“电—热—冷—氢”多能流（核能 / 生物质能供热、绿氢制备），推进工业余压、余热、余冷梯级利用，形成能源闭环系统；同步布局 CCUS 与生态碳汇区，实现负排放能力（表 4）。

（2）实现产业—建筑—交通全链脱碳。发展绿氢还原冶金等工艺替代技术，推动钢铁 / 化工等高载能行业深度脱碳；引导高附加值新兴产业向绿能富集区集聚，打造以绿制绿的产业链。新建建筑按超低能耗标准设计，既有建筑通过围护结构改造与光伏建筑一体化（BIPV）实现能源自洽；推广太阳能光热与柔性用电技术。电动 / 氢燃料重卡全覆盖，配套充电桩 / 加氢站网络；发展封闭式皮带廊道多式联运，降低运输环节碳排放（表 4）。

（3）建设数字赋能的碳治理体系。实时监测范围 1 至范围 3 的排放（含建造期隐含碳），通过区块链确权供应链碳数据。整合分布式电源、储能与可控负荷，参与电力市场交易，实现源网荷储动态匹配。强化负荷预测与多能调度能力，提升系统效率（表 4）。

（4）零碳园区作为战略枢纽，向上衔接城市级碳中和战略，向下贯通产业和民生需求。通过物理空间与数字空间的深度融合，构建“城市—园区—企业—个人”的多层次互动体系。这种融合不仅体现在基础设施的智能化改造上，更体现在通过数据要素的流动，实现能源系统、生产系统和消费系统的协同优化，最终达成经济发展与碳减排的双重目标。

表4　零碳园区关键技术

技术领域	关键技术	核心功能 / 应用场景	技术成熟度	对零碳目标的贡献
能源转型	光伏发电	利用太阳能发电，适用于园区屋顶、立面资源；自发自用，减少市电依赖	成熟（商业化应用）	直接替代化石能源，减少碳排放；提高可再生能源占比 [28]
	氢储能	存储不稳定能源（如风光电），通过电转氢—氢转电实现多能互补；用于交通、工业等领域	示范阶段	解决可再生能源波动性问题；实现深度脱碳 [29,30]
	微电网	整合分布式能源，实现“源—网—荷—储”协同优化；提升供电可靠性和能效	商业化初期	提高能源利用效率；降低电网碳排放强度 [31,32]
应用转型	氢还原冶金	用氢替代碳作为还原剂，生产钢铁等金属；减少工业过程碳排放	试点阶段	钢铁等高耗能行业脱碳关键路径 [33-35]
	CCUS	捕集工业排放的 CO_2 并封存或再利用；适用于水泥、化工等难减排行业 [36]	部分成熟（化工领域）	抵消难以避免的碳排放；实现负排放
	被动 / 主动建筑能效技术	通过围护结构优化、可再生能源集成等降低建筑能耗；覆盖设计、运行全周期	成熟（部分技术）	减少建筑运营碳排放 [39]
	充电桩与智能充电管理	支持电动汽车普及；优化充电负荷，平滑电网曲线	成熟（规模化应用）	推动交通电气化，减少燃油车碳排放 [37]
数字化转型	5G 与物联网	支撑海量设备互联、实时数据采集；赋能能源管理、交通优化等场景	成熟（快速推广）	提升系统效率，减少隐性碳排放；助力精准监测 [38]
	数字孪生	构建园区物理空间虚拟镜像，优化能源调度、设备运维等	示范阶段	实现碳排放全生命周期动态管理；辅助决策优化 [39,40]
	区块链碳核算与监测	确保碳排放数据真实可追溯；支持碳资产交易与监管	试点阶段	解决碳数据信任问题；促进碳市场透明化 [41]

4.2.3 零碳园区关键评价指标设计

针对现有零碳园区标准体系存在的碎片化、形式化、与国际规则脱节等深层次问题，并基于 TEDI 框架的系统性要求，本研究设计了一套融合国际规则与中国国情的零碳园区核心评价体系（表 5）。作者认为应该重点把握以下命题：设立核心合规层作为国际准入底线，确保满足 CBAM 等硬性要求；设置动态优化层兼顾发展现实，避免“一刀切”；技术创新层和制度保障层则引导长期突破与机制完善。所有层级均紧密围绕碳排放的实质削减展开。指标设计

具有二元兼容性：既主动嵌入欧盟 CBAM 对绿电溯源、全生命周期核算等技术性要求，又适配中国产业发展阶段差异，针对钢铁、化工等高碳行业设置差异化指标阈值（如对转型升级期园区允许单位产值碳强度阶段性放宽 20%～30%；实施路径体现动态渐进性：部分指标建立分阶段达标机制，为传统产业转型升级预留时间窗口）。认证体系注重国际互认，有效降低企业合规成本。通过这种系统性

表5　零碳园区核心评价指标分析

维度	核心指标	解释	指标依据
核心合规层（欧盟准入底线）	企业直接采购可再生电力的比例（如风光电站直供或购电协议）	在产业园区配套可再生能源发电 + 储能 + 绿氢制备一体化设施	欧盟《建立碳边境调节机制的法规（EU）2023/956》认可绿电的减排效果；中国《电力中长期交易基本规则——绿色电力交易专章》鼓励绿电购买协议；《关于有序推动绿电直连发展有关事项的通知》规定新能源年自发自用比例；《关于促进可再生能源绿色电力证书市场高质量发展的意见》《关于2025 年可再生能源电力消纳责任权重及有关事项的通知》明确绿电消费比例要求
	范围 3 核算覆盖率	对供应链碳排放（外购原料、物流等）的核算覆盖程度	ISO 14064-1：2018 规定供应链间接排放核算；欧盟产品环境足迹（PEF）要求覆盖供应链排放；ISSB《气候相关披露》（IFRS S2）、温室气体核算体系（GHG Protocol）将供应链排放纳入范围 3；中国《关于建立碳足迹管理体系的实施方案》鼓励供应链碳足迹评价
	显性碳价覆盖度	企业生产活动被纳入碳交易或碳税的比例	世界银行《2025 年碳定价现状与趋势》报告认可碳交易、碳税等显性碳价机制；中国《碳排放权交易管理办法（试行）》《碳排放权交易管理暂行条例》规定碳交易覆盖范围及企业参与规则
	建造期隐含碳披露	建筑物 / 工厂建设阶段原材料开采、运输等过程的碳排放披露	EN 15978：2019 建筑碳足迹标准：要求量化建材生产、运输、施工阶段碳排放；欧盟建筑产品法规（CPR）强制要求 EPD 认证
动态优化层（发展安全区）	单位国内生产总值（GDP）碳强度弹性区间	单位经济产出的碳排放波动允许范围（避免“一刀切”限产）	中国《2024—2025 年节能降碳行动方案》《碳排放权交易管理办法（试行）》《湖北省碳排放权交易管理暂行办法》考虑了企业的差异，避免了“一刀切”地限制碳排放
	绿氢替代率（高耗能产业）	钢铁、化工等高耗能行业中绿氢替代化石燃料的比例	中国《氢能产业发展中长期规划（2021—2035 年）》《加快工业领域清洁低碳氢应用实施方案》《关于加快推动制造业绿色化发展的指导意见》及相关行业文件《钢铁行业节能降碳专项行动计划》《炼油行业节能降碳专项行动计划》《合成氨行业节能降碳专项行动计划》鼓励绿氢替代；德国《国家氢能战略》、欧盟“新钢铁计划”（2025 年启动氢能炼钢专项）及 2023 年修订的《可再生能源和能源效率指令》提出工业领域清洁氢替代目标
	碳抵消依赖度	企业减排对碳汇（如林业碳汇）的依赖程度	科学碳目标倡议（SBTi）净零标准要求企业碳抵消依赖≤10%（避免过度依赖碳汇）；中国《碳排放权交易管理办法（试行）》及新加坡、日本碳税政策规定碳抵消比例上限
技术创新层（负排放突破）	CCUS 封存量	通过生物能源 + 碳捕集技术实现年封存 CO_2 的最低阈值	IPCC 第六次评估报告要求工业部门 2030 年封存≥5 亿 t/ 年；中国要求煤电、建材（水泥）行业 CCUS 项目年捕集量下限
	绿电制氢耦合度 /%	可再生能源制氢在氢能总产量中的占比	国际可再生能源机构（IRENA）《绿氢认证指南》定义绿氢为可再生能源制氢占比≥95%；欧盟可再生能源指令（RED III）要求交通用氢可再生属性为 70%
制度保障层（长效机制）	国际互认碳标签企业占比	产品碳足迹获欧盟等国际标准认证的企业比例	ISO 14067：2018 为全球互认基础；欧盟《电池与废电池法规》（2023 年生效）要求电池碳足迹披露；中国《关于加快建立产品碳足迹管理体系的意见》推动碳标识国际互认
	碳关税风险准备金	为应对欧盟 CBAM 计提的资金储备比例	
	低碳技术专利数 / 年	企业年度申请的低碳技术专利数量	世界知识产权组织（WIPO）绿色专利分类体系“IPC 绿色清单”涵盖约 200 个环境友好技术主题

设计，既能有效应对国际碳壁垒，又能护航国内产业高质量发展。

值得一提的是，2025 年 6 月 30 日，国家发展改革委、工业和信息化部和国家能源局正式发布关于开展零碳园区建设的通知，在这套建设方案中，提出了核心指标（年综合能源消费量 20 万~100 万吨标准煤的园区，≤0.2 tCO_2/ 吨标准煤；年综合能源消费量≥100 万吨标准煤的园区，≤0.3 tCO_2/ 吨标准煤）+ 引导指标的建设体系（如清洁能源占比、园区产出单位产品能耗、固体废物综合利用等）。这套方案提醒我们在构建零碳园区评价体系时，必须牢牢抓住碳排放这一核心指标，突破单一强度约束，建立总量约束—强度对标的双重管控机制。其核心思路在于：设定差异化碳强度基准，根据园区能级规模、产业特性，划定差异化的碳排放强度基准线，即产业成熟度高、减排条件优越的园区执行更严格的单位产出碳排放阈值，转型升级关键期的战略产业园区则设置阶梯式达标路径。这印证了“以碳论碳”原则的重要性，也提示未来国家标准的制定需在核心指标上进一步强化全生命周期覆盖、范围 3 核算要求，并明确与国际标准（如 CBAM 核算方法）的衔接机制。

上述评价指标体系与“CBAM—零碳园区耦合分析框架”（图 3）的四大子系统形成深度呼应与支撑：技术子系统（T）——CCUS 封存量、绿氢替代率、绿电制氢耦合度、低碳技术专利数 / 年等指标，直接支撑技术创新与应用，解决零碳转型的技术可行性问题；能源子系统（E）——企业直接采购可再生电力的比例、显性碳价覆盖度等指标，聚焦能源结构调整与碳成本内化，回应能源低碳化核心要求；发展子系统（D）——单位 GDP 排放量或碳强度弹性区间、范围 3 核算覆盖率等指标，平衡减排与发展的关系，适配不同阶段产业特性，体现发展可持续性；制度子系统（I）——国际互认碳标签企业占比、碳抵消依赖度、碳关税风险准备金等指标，对接国际规则并完善国内机制，保障零碳转型的制度适配性。通过这种多维度、分层化的指标设计，评价体系既实现了对耦合分析框架的具象化支撑，又为园区零碳转型提供了可操作、可追溯、可优化的路径指引。

5 结论与展望

本研究通过系统分析 CBAM 的规则内核、成本传导路径及其深层影响，揭示了其对我国工业园区的系统性挑战。研究深入剖析了国内零碳园区在概念演进、研究发展和建设实践中存在的核心痛点：核算边界模糊、减排路径偏移、绿电环境权益国际认可困境、标准体系碎片化且与国际规则严重错位。这些痛点导致现有零碳园区建设难以有效支持企业应对日益严峻的国际碳壁垒。研究发现，坚守“以碳论碳”是零碳园区建设的根本原则，任何脱离实质性减排的路径都难以持久应对全球碳约束。研究创新地构建了 CBAM—零碳园区耦合分析框架（TEDI 框架）：该框架通过技术、能源、数据、制度四大子系统的闭环协同，系统性地精准应对 CBAM 的四重成本压力，并弥合国际规则与国内发展阶段的鸿沟，从根本上避免数字降碳陷阱；提出了一套融合国际规则与中国国情的零碳园区动态评价体系：该体系以“以碳论碳”为核心原则，采用分层设计，强调二元兼容性、动态渐进性和国际互认导向，为核心痛点提供了可操作的解决方案。

基于研究结论，提出以下具体、可操作的政策建议与实践指导。对政府 / 监管机构：需制定国家统一的“零碳园区建设标准”，建议全生命周期碳排放核算（含建造期、拆除期），限定碳抵消依赖度≤10%，覆盖范围 3 排放核算，明确绿电物理溯源要求，深度对接 CBAM 并设置差异化指标；支持园区微电网与增量配电网建设，推广绿电长期购电协议机制；加快建设基于区块链的全国碳足迹监测平台，推动与国际机制互认；加大绿氢、CCUS、长时储能等技术投入，探索创新融资模式；在重点区域试点跨行政边界产业链碳责任协同机制。对园区管理方 / 企业：应优先推进实质性减排，聚焦生产工艺改造、绿电替代与能效提升，减少碳抵消依赖；全生命周期管理碳排放，覆盖建造期隐含碳及运营期范围 1 至范围 3 的排放；应用区块链技术确保数据可信，满足 CBAM 数据要求；主动参与绿电直供项目，对接国际碳核算规则；计提碳关税风险准备金，按零碳部件→零碳产品→零碳园区生态路径稳步推进。

本研究聚焦应对 CBAM 的分析框架与评价体

系，核心贡献在于理论思路与方案设计，但受研究性质及数据限制，大规模定量实证验证不足。未来研究可从五方面深化：在钢铁、化工等特定园区开展深度案例研究，实证优化 TEDI 框架与评价体系；构建零碳园区动态优化模型，精准响应技术、成本与政策变化；深入分析绿氢、CCUS 等技术的全生命周期成本效益与规模化路径；追踪 CBAM 细则更新及美、日等国碳壁垒政策，深化应对策略；研究园区内及产业链上下游碳成本分担与协同减排激励机制。面对全球碳约束常态化，坚守“以碳论碳”原则，通过系统性、创新性且具有国际视野的零碳园区建设，方能提升我国工业绿色竞争力，实现经济发展与气候目标共赢。

参考文献

[1] 郭扬 , 吕一铮 , 严坤 , 等 . 中国工业园区低碳发展路径研究 [J]. 中国环境管理 , 2021, 13(1): 49-58.

[2] ZACH B, PLUSKAL J, ŠOMPLÁK R, et al. Tool for optimization of energy consumption of membrane-based carbon capture[J]. Journal of environmental management, 2022, 320: 115913.

[3] YANG L, WEI N, LV H D, et al. Optimal deployment for carbon capture enables more than half of China’s coal-fired power plant to achieve low-carbon transformation[J]. iScience, 2022, 25(12): 105664.

[4] TANG Y Q, ZHANG Q F, FANG K. Does international trade reduce global carbon inequality? Evidence from a producer-consumer shared responsibility[J]. Journal of environmental management, 2024, 355: 120307.

[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.

[6] 任亚楠 , 田金平 , 陈吕军 . 中国工业产品出口贸易及碳关税影响研究 [J]. 中国环境管理 , 2022, 14(6): 100-109.

[7] 全国信标委智慧城市标准工作组 . 零碳智慧园区白皮书 (2022)[R]. 北京 : 新华三技术有限公司 , 中国电子技术标准化研究院 , 2022.

[8] LI K J, ZHOU Y, HUANG X H, et al. Low-carbon development pathways for resource-based cities in China under the carbon peaking and carbon neutrality goals[J]. Environmental science and pollution research, 2024, 31(7): 10213-10233.

[9] 杜真 , 陈吕军 , 田金平 . 我国工业园区生态化轨迹及政策变迁 [J]. 中国环境管理 , 2019, 11(6): 107-112.

[10] 吴晓莹 , 杨洲木 . 2030 年碳达峰刚性约束下的产业结构优化——基于多目标规划模型 [J]. 建模与仿真 , 2024, 13(1): 748-759.

[11] 周德群 , 邓海东 , 王义忠 , 等 . 传统工业园区实现“双碳”目标路径研究——以江北新材料科技园为例 [J]. 北京理工大学学报 (社会科学版), 2022, 24(4): 37-51.

[12] 王科 , 刘春婷 , 陈翔 , 等 . 工业园区碳中和的实现路径及价值创造——基于金风碳中和智慧园区的案例研究 [J]. 管理案例研究与评论 , 2025, 18(3): 295-308.

[13] QI S Z, XU Z Z, YANG Z X. China’s carbon allowance allocation strategy under the EU carbon border adjustment mechanism: an integrated non-parametric cost frontier approach[J]. Science of the total environment, 2022, 831: 154908.

[14] 张骐遥 , 朱振海 , 孙辉 , 等 . 碳边境调节机制下园区“双碳”平台建设与应用 [J]. 中国标准化 , 2025(2): 62-68.

[15] 杜昊明 , 胡俊杰 , 童宇轩 , 等 . 考虑电—证—碳机制协同的绿电工业园区分布式优化运行策略 [J/OL]. 电力系统自动化 . (2024-08-21). https://link.cnki.net/urlid/32.1180.TP.20240820.1451.006.

[16] 陈艳波 , 张宁 , 李嘉祺 , 等 . 零碳园区研究综述及展望 [J]. 中国电机工程学报 , 2024, 44(14): 5496-5516.

[17] 林伯强 . 欧盟碳边境调节税如何影响中国高碳行业 [EB/OL]. (2023-06-13). https://www.yicai.com/news/101782337.html.

[18] REN Y N, LIU G X, SHI L. The EU Carbon Border Adjustment Mechanism will exacerbate the economic-carbon inequality in the plastic trade[J]. Journal of environmental management, 2023, 332: 117302.

[19] 方云龙 . 欧盟碳边境调节机制 (CBAM): 核心要素、潜在风险与策略选择 [J]. 清华金融评论 , 2023(8): 106-108.

[20] 陈梅 , 黄言秋 , 孙建飞 , 等 . 长三角生态工业园区绿色低碳发展评价 [J]. 环境污染与防治 , 2024, 46(3): 360-366.

[21] 陈红敏 . 包含工业生产过程碳排放的产业部门隐含碳研究 [J]. 中国人口 · 资源与环境 , 2009, 19(3): 25-30.

[22] 李秀婷 , 曹静 , 王凯华 , 等 . 欧盟碳边境调节机制对中国出口贸易的影响及应对 [J]. 国际税收 , 2025(5): 66-74.

[23] KIM S, KOH S, LEE B. The unseen carbon: scope 3 emissions transform understanding of electricity generation in import-dependent nations[J]. iScience, 2025, 28(2): 111725.

[24] LI M, WIEDMANN T, HADJIKAKOU M. Enabling full supply chain corporate responsibility: scope 3 emissions targets for ambitious climate change mitigation[J]. Environmental science & technology, 2020, 54(1): 400-411.

[25] 黄珊 . 我国大力推进可再生能源绿证消费 [J]. 生态经济 , 2025, 41(5): 9-12.

[26] LAN T, TAO R. Research on the inhibitory effect of the EU’s Carbon Border Adjustment Mechanism on carbon leakage[J]. Sustainability, 2024, 16(17): 7429.

[27] 黄成 , 薛贵元 , 朱寰 , 等 . 全生命周期下光伏发电和煤电的碳排放及环境效益核算 [J/OL]. 环境化学 , (2025-05-22). https://link.cnki.net/urlid/11.1844.X.20250521.1616.002.

[28] ZHU W W, WEN S L, ZHAO Q, et al. Deep reinforcement learning based optimal operation of low-carbon island microgrid with high renewables and hybrid hydrogen–energy storage system[J]. Journal of marine science and engineering, 2025, 13(2): 225.

[29] 李星仪，沈小军，金钰. 基于氢储能的偏远地区零碳微能网构建及运行策略研究 [J]. 可再生能源，2024, 42(2): 223-232.

[30] LI B, SHAHZAD M, JAVED H, et al. Scheduling and sizing of campus microgrid considering demand response and economic analysis[J]. Sensors, 2022, 22(16): 6150.

[31] ZHANG Y, ZHOU Y K. Research on microgrid optimal dispatching based on a multi-strategy optimization of slime mould algorithm[J]. Biomimetics, 2024, 9(3): 138.

[32] 王晶，王朋. 国内外氢冶金技术研究进展 [J]. 河北冶金，2022(4): 1-5.

[33] 员晓，彭锋. 我国发展氢冶金对资源环境影响的综合分析 [J]. 中国钢铁业，2020(9): 37-40.

[34] 邢奕，崔永康，田京雷，等. 钢铁行业低碳技术应用现状与展望 [J]. 工程科学学报，2022, 44(4): 801-811.

[35] 刘罗茜，雷涯邻，支树洁，等. 中国水泥行业点源层面 CCUS 技术减排潜力与优化部署 [J]. 北京理工大学学报 (社会科学版), 2024, 26(4): 56-67.

[36] 许明超，朱继龙，李笑飞. 能效提升驱动下的园区能源和碳排放分析——以江苏金坛经济开发区为例 [J]. 中国能源，2024, 46(6): 70-77.

[37] 叶宇剑，袁泉，汤奕. 面向双碳目标的交通网 - 电网耦合网络中电动汽车负荷低碳优化方法 [J]. 中国电力，2023, 56(5): 72-79.

[38] GHAZAL M, BASMAJI T, YAGHI M, et al. Cloud-based monitoring of thermal anomalies in industrial environments using AI and the internet of robotic things[J]. Sensors, 2020, 20(21): 6348.

[39] 刘庆澳，张立秋，冀云卿，等. "双碳"目标下我国零碳工业园区建设的问题与对策 [J]. 环境保护，2023, 51(16): 48-53.

[40] 郝吉明，田金平，卢琬莹，等. 长江经济带工业园区绿色发展战略研究 [J]. 中国工程科学，2022, 24(1): 155-165.

[41] HONG Z X, XIAO K. Digital economy structuring for sustainable development: the role of blockchain and artificial intelligence in improving supply chain and reducing negative environmental impacts[J]. Scientific reports, 2024, 14(1): 3912.

The Logic and Innovation Pathways for China's Zero-Carbon Industrial Park Development Under the Forcing Effect of Carbon Border Taxes

FENG Yuxi[1,2], XU Ming[1*], CHAI Guohong[1], LIU Hua[3], WU Wenhong[4], HE Chao[5], CHEN Menghua[6,7*]

(1. Guangdong-Hong Kong Joint Laboratory for Carbon Neutrality, Jiangmen Laboratory of Carbon Science and Technology, Jiangmen 529199, China; 2. Carbon Neutrality and Climate Change Thrust, The Hong Kong University of Science and Technology (Guangzhou), Guangzhou 511453, China; 3. School of Economics, Guangdong University of Finance & Economics, Guangzhou 510320, China; 4. Guangdong Energy Conservation and Emission Reduction Standardization Promotion Association, Guangzhou 510320, China; 5. National Science Library (Wuhan), Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 6. Guangxi Key Laboratory of Environmental Pollution Control Theory and Technology, Guilin University of Technology, Guilin 541006, China; 7. Engineering Research Center of Watershed Protection and Green Development, University of Guangxi, Guilin University of Technology, Guilin 541006, China)

Abstract: The comprehensive implementation of the European Union's Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) signifies a shift in global climate governance from nationally determined contributions to cross-border mandatory compliance, significantly increasing export costs for high-carbon industries to Europe. This paper systematically deconstructs the core principles and accounting mechanisms of CBAM, revealing how it costs poses systemic challenges to China's industrial parks. It further analyzes the evolution of research, conceptual development and practical issues related to zero-carbon industrial parks in China. nnovatively, a "CBAM–Zero-Carbon Park Coupling Analysis Framework" is proposed, integrating international rules with China's national conditions to outline a core framework and dynamic evaluation system for zero-carbon industrial parks. The study identifies key issues in current zero-carbon industrial park development, including ambiguous accounting boundaries, excessive reliance on carbon offsets, and insufficient international recognition of green electricity. To address these challenges, the paper advocates for a principle of substantive carbon reduction, achieved through the coordinated operation of four key subsystems: technological innovation for deep decarbonization, direct green power supply with physical traceability, blockchain-based monitoring for data credibility, and carbon asset budgeting to optimize resource allocation, to systematically overcome the pitfalls of superficial "digital decarbonization." This research provides both theoretical and practical support for addressing international carbon barriers and driving substantive decarbonization in industrial parks.

Keywords: carbon border tax; CBAM; zero-carbon industrial park construction; zero-carbon industrial park evaluation