DOI 10.15302/J-SSCAE-2026.06.030

绿色贸易壁垒下我国绿色环保产业安全研究

张婷婷[1]，周萧超[1]，齐硕[1]，苏玲彦[2]，谷绍午[1]，许嘉钰[3*]，任慕华[3]，郝吉明[3]

（1. 北京化工大学化学工程学院，北京 100029；2. 龙源（北京）碳资产管理技术有限公司，北京 100032；
3. 清华大学环境学院，北京 100084）

摘要：在全球绿色贸易壁垒重塑产业格局的背景下，碳核算体系已成为统筹我国产业安全与低碳转型的战略枢纽。本研究立足产业安全视角，剖析了国际碳治理标准的演进特征与多极化格局，重点分析了我国绿色环保产业的发展现状及在数据主权、市场准入、核算标准和关键技术方面面临的安全风险，并构建了产业安全发展战略路径，包括基础产业通过循环经济夯实稳健底线，传统产业采取防御策略实施系统降碳，新兴产业采取进取路径聚焦技术攻坚与海外输出。研究提出，应通过健全产业市场化转型与政策保障、优化绿色贸易应对与防御机制、完善碳核算标准与数据治理体系、突破绿色关键技术自主化瓶颈四大路径，提升产业链韧性与国际话语权，实现高质量发展与高水平安全的有机统一。

关键词：绿色贸易壁垒；碳核算；产业安全；降碳路径；数据主权

中图分类号：X22　　**文献标识码：**A

Security of China’s Green Environmental Industry Under Green Trade Barriers

Zhang Tingting[1], Zhou Xiaochao[1], Qi Shuo[1], Su Lingyan[2], Gu Shaowu[1], Xu Jiayu[3*], Ren Muhua[3], Hao Jiming[3]

(1. College of Chemical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China;
2. Longyuan (Beijing) Carbon Asset Management Technology Co., Ltd., Beijing 100032, China;
3. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Against the backdrop of global green trade barriers reshaping the industrial landscape, the carbon accounting system has emerged as a strategic hub for China’s industrial security and low-carbon transition. From the perspective of industrial security, this study examines the evolutionary characteristics and multipolar patterns of international carbon governance standards, with a focus on the development status of China’s green environmental industry. It identifies the security risks China faces regarding data sovereignty, market access, accounting standards, and key technologies. Furthermore, it constructs a synergy framework for industrial carbon reduction and security based on carbon accounting: basic industries consolidate their foundation through the implementation of a circular economy; traditional industries adopt defensive strategies toward systemic decarbonization; and emerging industries pursue proactive strategies focusing on technological breakthroughs and overseas expansion. To strengthen industrial chain resilience and international influence, the study proposes four pathways that focus on improving policy coordination mechanisms, optimizing systems for addressing green trade challenges, refining carbon accounting standards and data governance, and making breakthroughs in core technologies, thus to achieve the integration of high-quality development and high-level security.

收稿日期：2026-06-18；**修回日期：**2026-07-23

通讯作者：*许嘉钰，清华大学环境学院教授，研究方向为环境对策与评价；E-mail: jiayu-xu@tsinghua.edu.cn

资助项目：中国工程院咨询项目“提升新兴产业体系安全的若干重大问题研究”(2025-PP-11)

本刊网址：sscae.engineering.org.cn

Keywords: green trade barriers; carbon accounting; industrial security; decarbonization pathways; data sovereignty

一、前言

在全球气候治理共识下，以欧盟碳边境调节机制（CBAM）为代表的碳关税等工具，正将碳排放数据、碳成本及环境标准深度嵌入国际贸易规则，形成了新型绿色贸易壁垒。这一趋势深刻重塑全球产业格局，使碳数据成为关键的战略资源，碳定价权演变为经济博弈的工具，绿色标准政治化则构成壁垒的核心。由此，传统产业安全概念亟需扩展，涵盖“碳”衍生的数据风险、成本风险及市场准入风险；而绿色环保产业的内涵也从传统的节能、环保、资源循环利用延伸出碳减排与碳管理，并上升为大国博弈的战略核心。我国在推进“双碳”转型的过程中，同样面临绿色贸易壁垒对绿色环保产业安全带来的严峻挑战。尽管《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》《“十四五”现代能源体系规划》等政策已明确要求统筹低碳转型与产业安全，但碳核算体系的差异与不足仍是关键瓶颈。相较于欧盟排放交易体系（EU ETS）等国际成熟体系，我国在标准顶层设计、规则体系权威性、数据边界统一性以及碳标识立法保障与国际互认等方面仍存在明显差距[1-2]。这些问题直接制约了我国应对绿色贸易壁垒、保障绿色环保产业安全的能力。

更严峻的挑战在于，发达国家正利用碳核算规则进行国际博弈，对全球产业安全格局施加结构性外源风险。CBAM与美国《清洁竞争法案》（CCA）等政策工具，以应对“碳泄漏”为由，通过单边强制核算规则及气候规制手段影响全球产业链分工与重组。其中，CBAM要求采用《监测与报告条例》中的核算方法及默认排放因子，削弱了发展中国家本土碳强度认证体系的效力；美国CCA则以行业碳强度基准为核算锚点，影响他国产业适配美式核算口径以规避碳关税。二者均以核算边界差异征收碳关税，实质是将低碳转型成本跨境转移，形成了制度化成本转嫁。此类碳壁垒背离“共同但有区别的责任”原则，导致我国数据主权面临风险并扰乱了产业竞争秩序，以此重构发达国家主导的全球绿色秩序。未来碳核算规则话语权的争夺将重塑全球产业竞争逻辑，对我国绿色环保产业安全构成持久挑战。而绿色环保产业中的低碳赋能与绿色增效，已深度融入了应对国际绿色贸易壁垒和维护产业链安全的全局之中。故需将基础材料产业、传统高耗能产业与新兴产业纳入协同分析框架，在赋能三大产业的整体布局中系统考量绿色环保产业自身的安全与发展，从而形成具有前瞻性的系统性应对方略。

我国绿色环保产业面临的国际贸易壁垒，本质上是一种因碳排放核算规则在方法论、数据基础与国际互认上的差异性所引致的碳核算壁垒。作为一种新型技术性贸易壁垒，其具体表现为发达国家单边推行核算规则，以碳关税、碳数据主权让渡及绿色市场准入标准等手段限制产业进入国际市场。为深入探讨绿色贸易壁垒下我国绿色环保产业安全战略，本研究梳理国际碳核算壁垒的演进特征与政策工具，分析我国绿色环保产业在数据、市场、规则、技术方面面临的安全风险，进而构建产业降碳与安全协同框架，并针对不同阶段提出差异化应对路径，以期为我国应对全球绿色规则变革、保障绿色环保产业安全提供理论参考。

二、国际碳治理标准化发展现状

（一）碳核算标准体系与规则差异

全球碳排放核算方法学呈现显著的多极化格局。目前主流核算方法包括排放因子法、质量平衡法及实测法三种基础方法论，不同司法管辖区基于此发展出差异化核算体系[3]。我国当前主要采用排放因子法并探索在线监测技术的应用；欧盟允许企业自主选择核算方法或在线监测；美国能源信息署主要采用排放因子法，而电力企业普遍采用在线监测法[4]。这种核算标准的分化绝非单纯的技术选择，而是各国围绕数据主权、产业竞争及贸易规则主导权展开的战略博弈。

在此格局下，美国以温室气体核算体系（GHG Protocol）为依托构建规则输出体系。GHG Protocol由世界资源研究所与世界可持续发展工商理事会于1998年联合推出，已实际成为国际通用基准[5]。该体系将碳排放分为三个范围，其中范围三涵盖企业上下游供应链中的其他间接排放，这一分类方法深刻

影响了全球碳核算方法论。国际标准化组织（ISO）发布的ISO 14067系列标准聚焦产品碳足迹核算，为组织层面温室气体排放量化、报告与验证提供规范。欧盟则通过《维也纳协议》系统推动其区域标准向国际标准转化，实现规制合法性的层级跃迁[6]。

在区域与国家层面，核算体系的制度架构各有侧重。欧盟以EU ETS为基础建立了全球首个跨国碳排放交易体系，自2005年启动以来逐步发展出碳现货及衍生品市场[7]，并在此基础上发展出独有的监测与报告方法学体系。我国自2015年起发布覆盖发电、钢铁等24个重点行业的《温室气体排放核算与报告要求》国家标准，以及《温室气体自愿减排项目方法学》《产品碳足迹核算标准编制工作指引》等核心制度工具，初步确立企业碳核算方法论基准。

值得关注的是，碳标签制度自2007年由英国实施后，法国、德国、美国等国家相继跟进，各国通过签订协议、标准制定及出台法案等多种方式，推动区域性碳核算标准体系国际化，并使其逐渐政治化。然而，由于数据基础、核算方法与监管体系的深层差异，各体系之间的核算结果难以实现有效比较，国际互认机制长期缺失。当统一的多边互认机制难以建立时，利益趋同的发达国家转而构建以共同碳标准为基石的排他性“碳俱乐部”，例如，美欧绿色钢铝联盟，通过标准统一降低内部合规成本，借助绿色市场准入壁垒对外实施规则输出。

（二）绿色贸易壁垒与数据披露工具

基于核算体系的差异性与互认缺失，发达国家将碳核算标准从技术工具转化为具有规则效力的市场准入与数据披露工具[8]。欧盟于2019年首次提出碳边境调节机制，要求进口商采用欧盟认可的核算方法（如产品环境足迹规则），并按照EU ETS的监测与报告方法提交生产数据。2022年11月通过的《企业可持续发展报告指令》（CSRD）将披露主体扩展至约49 000家实体，要求在欧盟运营的第三国企业采用《欧洲可持续发展报告标准》（ESRS）[9]。2023年7月，欧盟发布《欧盟电池和废电池法规》，要求进入欧盟市场的工业电池和电动汽车电池必须公开披露电池从原材料开采、材料加工、使用到回收的全生命周期碳足迹，且核算方法必须符合欧盟制定的详细规则。

在借助市场力量实现制度绑定方面，美国形成了“以私代公”的独特治理路径。2022年11月，美国政府提出《联邦供应商气候风险和弹性规则》，要求主要联邦承包商采用GHG Protocol发布排放数据[10]；同年，美国证券交易委员会（SEC）提出气候相关信息披露规则草案，并于2024年3月正式通过最终版本，逐步推进上市公司披露气候相关风险及温室气体排放量[11]。备受关注的美国《清洁竞争法案》于2026年3月提交国会审议，若正式通过，将进一步实质性推高贸易壁垒。借助全球最大单一采购方的市场力量，美国构建了覆盖数万家企业的强制性标准网络。同时，贝莱德集团、先锋领航集团等美国大型资产管理公司将环境、社会与治理（ESG）作为核心投资标准，对碳足迹不透明、供应链管理不善的企业形成市场排斥效应。美国主导的《美国 – 墨西哥 – 加拿大协定》，相较于其前身《北美自由贸易协定》，在环境议题与争端解决方面更为全面和精细化[12]，为贸易协定中嵌入碳排放规则铺平道路。

在区域联盟层面，美国通过“跨大西洋绿色联盟”和“印太战略绿色联盟”，于2024年6月在印太经济框架下正式签署《清洁经济协议》，并于2024年10月11日生效，明确碳核算方法学趋同与互认条款，形成联盟式规则输出[13-14]。通过这些制度工具，以环境规制为表象，实质是发达国家在缺乏多边互认基础的背景下，通过规则输出抢占制度优势的战略布局。

（三）系统性风险与产业安全挑战

绿色贸易规则与数据披露要求的泛化对我国产业安全构成了系统性的风险挑战，其作用逻辑沿“规则差异 – 数据压力 – 成本上升 – 准入受限 – 产业链传导”链条展开。

CBAM进入正式实施阶段后，我国钢铁行业出口成本预计增加4%~6%[15-16]；《欧盟电池和废电池法规》对我国新能源汽车出口也带来严峻挑战[17]；碳标签制度则极易演变为限制我国纺织业出口的贸易保护手段[18]。发达国家利用碳核算规则差异施压，致使核算认证与减排成本转化为隐性准入壁垒，并沿产业链向中上游基础及传统产业传导。实证研究表明，CBAM等机制使中国等制造业国家面临贸易条件恶化的福利损失[19]。

美国的GHG Protocol范围三核算要求表明，美

国政府通过对本土“链主”企业的监管，将碳核算与数据披露要求间接延伸至全球供应链各环节。数据按统一标准生成后，美方企业、政府和评级机构可进行横向比较并识别“高碳排”供应商，从而掌握“绿色”与“高碳”的定义权。CBAM则要求进口商向其非欧盟的生产商、供应商索取详细的生产数据。上述机制迫使我国企业在范围三核算中提供核心工艺与能耗数据，增加合规成本并危及产业安全。

发达国家主导的数据库与排放因子预设性排斥我国优势绿色技术，迫使我国企业进行被动且高昂的技术路线替换。美国进一步将GHG Protocol核算体系塑造为全球企业、金融机构甚至其他政府自愿采用的“最佳实践”；欧盟则依托《维也纳协议》助推绿色壁垒合法化。面对上述压力，我国正加快自身碳市场建设与标准国际化探索。2021年正式启动的全国碳排放权交易市场展现出显著的市场活力，近年来交易规模持续扩容，2023年成交量已增至2.12×10^8 t、成交额达144.44亿元，2024年全年成交额进一步增长至180亿元[20]；同时将绿色发展纳入“一带一路”倡议核心议程，推动碳核算标准的渐进式扩散[21-22]。但相较于欧美成熟的规则输出机制，我国整体仍处于标准国际化能力建设阶段。碳核算标准在全球化背景下的异质化发展，已成为催化排他性“碳俱乐部”并强化发达国家规则主导权的关键动因，对我国在全球绿色治理中的话语权构成长期挑战。

三、我国绿色环保产业的发展现状

（一）产业链条协同发展

绿色环保产业链是为节约能源资源、发展循环经济、保护生态环境提供物质基础与技术保障的产业体系，涵盖高效节能、先进环保、资源循环利用三大领域，已形成上游基础材料与核心部件、中游装备制造与技术服务、下游应用治理与数据服务的清晰分工。产业链协同发展的核心在于上、中、下游之间的技术传递、成本联动与价值共享。

上游突破为全链协同奠定基础。上游主要包括钢铁、有色金属及传感器芯片等核心部件，其价格与技术水平直接影响中游成本与下游效率。以传感器芯片为例，国内企业通过收购海外公司、联合研发等方式突破紫外差分吸收光谱技术，进而促进传感器芯片的国产替代加速，推动烟气排放连续监测系统设备在钢铁行业的市场占有率逐步提升。同时，上游企业从单一设备销售向“设备+数据服务”转型，通过嵌入物联网模块实现预测性维护，与中游、下游形成数据协同。

中游制造与下游服务双向赋能。中游形成少数龙头与众多专业化企业并存格局。头部企业如隆基绿能科技股份有限公司，作为国内首批通过科学碳目标倡议组织审核的光伏企业，发布全面对标IFRS S2的气候行动白皮书，确立2050年全价值链净零排放目标，2024年运营碳排放已较峰值下降37%[23]；专业化企业在垃圾分类、挥发性有机化合物（VOCs）治理等细分领域通过模块化设计提升竞争力，如模块化湿地处理系统大幅度降低农村治污的成本及土地利用面积。下游从单一设备采购转向“设备+服务+数据”一体化解决方案，如中节能数字科技有限公司、北京英视睿达科技有限公司等企业转型“互联网+”，整合监测数据，实现环境数据的高效汇聚与智能应用。中游技术进步决定下游治理效率，下游需求反馈驱动中游迭代与上游选择。

资源循环利用贯通全链闭环。工业废弃物经中游回收再加工，转化为再生金属、再生建材等下游应用，实现“废弃物–再生资源–新产品”的循环协同。政府部门作为主要需求方，其产业政策引导上、中、下游围绕绿色标准、碳足迹核算及数据治理联动，构成产业链协同运行的内在机制。

（二）政策赋能产业升级

我国绿色环保产业经历了从“三废治理”到丰富产业体系的发展历程。20世纪60年代至2015年，依次经历了萌芽、初步发展、稳步发展和快速发展四个阶段，产业内涵不断丰富，逐步成为战略性新兴产业。2015年以来，产业进入高质量发展期。2024年7月，《中共中央 国务院关于加快经济社会发展全面绿色转型的意见》正式发布，明确提出加快产业结构绿色低碳转型，推动传统产业绿色低碳改造升级，大力发展绿色低碳产业。2025年5月，国务院常务会议审议通过《制造业绿色低碳发展行动方案（2025—2027年）》，明确以绿色科技创新为核心，推进传统产业深度绿色改造升级。

2026年4月，国务院印发《关于推进服务业扩能提质的意见》，首次在国家级服务业顶层文件中对节能环保服务业作出系统性部署。《关于推进服务业扩能提质的意见》将积极发展节能环保服务独立成节，涵盖节能降碳、环境治理、回收利用三大领域，并提出五大核心亮点：扩能提质双轮驱动、全链条覆盖生产性服务业、数智化等“四化”并举、碳金融工具密集布局、绿色服务升至战略高度。据测算，三大领域分别对应可观的增量市场空间，涉及节能降碳服务（含工业节能改造、建筑节能、碳市场服务），环境治理服务（含农业农村、海洋生态修复、环境监测与保险）以及回收利用服务（含再生资源回收、再制造、认证与碳足迹核算）。上述部署为绿色环保产业注入强劲政策动能，推动其向碳金融、认证互认等高端价值链延伸。

（三）产业规模稳步扩张

在国内生产总值增长逐步放缓的背景下，我国绿色环保产业市场规模仍保持强劲增长态势。2021年节能环保产业产值已超8万亿元，年增速达10%以上；2023年突破10万亿元；得益于政府投入加大与公众环保意识提升，《中共中央 国务院关于加快经济社会发展全面绿色转型的意见》中预计2030年总产值将突破15万亿元。在财政支持方面，国家设立绿色发展基金，通过补贴、税收优惠等激励企业加大环保投入。在金融政策方面，截至2024年年底，碳减排支持工具激励贷款发放超1.3万亿元，绿色信贷余额达36.6万亿元[24]，绿色债券、碳保险等创新产品不断丰富，我国已成为全球最大的绿色金融市场之一。在标准体系建设方面，《大气污染防治行动计划》《水污染防治行动计划》等明确了各行业环保要求，有效提高了环保产业的准入门槛，推动了产业的技术升级和结构优化。

我国积极参与全球环境治理，与美国、欧盟等签署多项环保合作协议，在清洁能源、气候变化等领域深入合作。在“一带一路”倡议下，我国与共建国家通过共建环保产业园、联合开展环保项目等方式，将先进环保技术和经验输出至海外，助力提升当地环保水平，同时深化了绿色领域的国际话语权与产业安全协同机制。

产业规模的持续扩张为绿色环保产业奠定了坚实基础，但规模优势主要源于制造端的产能与成本，并非安全能力的提升。产业安全的根基在于标准规则的话语权、核心技术的自主权以及关键要素的掌控力。若缺失此类主导权，产业体量规模越大，面对国际绿色贸易壁垒与技术封锁的系统脆弱性越突出。因此，我国绿色环保产业在数据主权、贸易壁垒、核算质量及关键技术四方面仍存在深层的安全隐患。

四、我国绿色环保产业体系安全面临的风险与挑战

（一）数据主权隐性流失

我国绿色环保产业中的碳核算、碳数据管理及ESG咨询服务等环节，高度依赖碳排放数据的采集、处理与跨境传输。当前，欧盟CBAM单方面强制要求我国出口企业报送全生命周期碳数据，同时碳信息披露项目（CDP）等全球环境信息披露平台也在广泛采集企业碳排放数据。在此过程中，由于国内外数据治理与核算标准的差异，我国企业面临数据隐性流失的严峻风险，具体表现在以下三个层面。

一是跨境合规风险。在面对欧盟CBAM等单方面要求及国外供应链“链主”的数据索要时，我国出口企业面临巨大的合规压力。若企业在向境外平台或服务器传输碳排放及相关活动水平数据时，未严格结合我国《数据出境安全评估办法》开展前置性的数据出境安全评估，极易在迎合国际贸易规则的同时触碰国内数据合规红线，从而陷入法律风险。

二是商业秘密泄露风险。在实践中，我国部分碳管理服务机构、ESG咨询企业等，为协助客户争取国际订单与绿色融资，往往鼓励或主导企业向CDP等总部与服务器均在境外的平台提交详尽数据。然而，碳数据往往深度绑定了企业的原辅材料消耗、工艺流程等核心机密。由于许多企业内部尚未建立严格的企业数据授权机制与脱敏分级标准，过度披露高颗粒度数据，客观上增加了企业核心商业秘密和供应链信息被境外竞争对手推演、获取的风险。

三是国家数据安全风险。尽管单体企业的碳数据有限，但当海量中资企业的微观碳数据、技术信息被境外机构长期、集中采集并交叉比对时，便具备了研判我国家底与产业脆弱性的可能，进而对我

国整体的碳达峰节奏及经济安全构成隐性威胁。目前，我国尚未建立针对境外ESG平台跨境数据流动的完善监管体系，在碳排放领域针对重要数据识别的目录界定尚需进一步明晰。若重要数据的识别与防御机制缺位，我国绿色环保产业的数据主权将在国际规则的博弈中持续处于相对被动的位置。

（二）绿色贸易被动受限

我国绿色贸易虽然规模持续扩大、结构不断优化，但仍面临因核算方法与结果不被国际认可而导致的贸易壁垒问题。根据商务部国际贸易经济合作研究院发布的《中国绿色贸易发展报告（2022）》，2021年中国绿色贸易额已达到11 610.9亿美元，同比增长10.3%，其中可再生能源产品（35%）与环保产品（30%）是出口的绝对主力，而生态农业产品与环境服务的出口额也呈现出显著增长态势。以上产品出口高度依赖碳核算国际互认，一旦被排除在标准体系之外，将直接削弱产业竞争力。

2024年，欧盟碳配额的平均价格约为65欧元/t，而同期中国碳市场成交均价仅约为95元/t（折合约12欧元/t），两者价差为5倍[25]。若相关出口企业未通过欧盟认证，需按欧盟行业平均碳排放水平（默认值）申报，可能虚增成本。对于我国绿色环保产业的重要下游客户，钢铁、铝、水泥、化肥、氢气等高排放行业而言，CBAM制度的落地意味着除了传统关税之外，还必须面对额外的碳合规成本、信息披露义务及潜在法律风险。

这种情况导致中国产品在国际市场上的竞争力受到削弱，出口企业面临着成本上升、市场份额下降等风险，同时对国内产业结构调整与能源转型形成压力。此外，碳税政策的累退性可能加剧不平等。由于能源消费在低收入家庭的支出中占比更大，碳成本上升对弱势群体影响更为显著。上述风险共同构成绿色环保产业在贸易领域面临的被动局面。

（三）核算体系质量欠缺

碳核算标准与监管规则是绿色环保产业运行的重要基础。当前，我国在碳排放核算规则体系建设与国际话语权博弈中面临国内基础不牢与国际话语权不足的双重挑战，直接制约了碳咨询、碳核查等绿色服务产业的公信力与体系安全。

一方面，国内基础核算规则尚待完善，数据造假监管存在漏洞。我国部分细分行业的核算方法统一度不高，底层规则设置仍显粗放。以全国碳市场电力企业为例，其碳排放核算需严格遵循《企业温室气体排放核算与报告指南 发电设施》（简称《指南》）。但部分基准规则仍不够精细，2022年修订后的《指南》虽已下调了燃煤元素碳含量默认值，但仍比烟煤、无烟煤、褐煤等常见煤种的实际值高出约10%~18%，客观上增加了企业的履约成本。同时，2022—2023年全国共查处碳排放数据造假行政处罚案件57起，其中涉煤样数据造假（如提供虚假煤样、篡改实测报告等）占比高达58%[26]，此类现象不仅扰乱碳市场，也损害了绿色环保产业中碳核查、碳咨询等第三方服务的专业信誉。

另一方面，国际底层核算规则受制于人，存在碳排放被系统性高估的风险。由于我国尚未建立起具备全球公信力的本土底层排放因子数据库，在国际绿色贸易与气候评价中，往往只能参照由国际能源署（IEA）、美国橡树岭国家实验室（CDIAC）等机构主导的全球碳排放核查体系。这些外部规则与数据库对我国现阶段真实的能源结构和工艺水平情况考虑不足，普遍高估我国实际碳排放量。这种“标准黑箱”与规则主导权差异，不仅增加了我国出口企业的潜在碳成本，更在宏观规则层面上影响了国际社会对我国减排成效的客观认知。

（四）关键技术自主缺失

绿色环保产业在发展过程中，照搬西方低碳标准，会在一定程度上脱离我国新能源、可再生能源产业的发展现状，影响我国产业政策的科学制定，不利于产业的低碳科技创新。

当前，我国在产业链上游的核心材料与关键零部件领域仍面临较高的外部依赖，这部分环节技术壁垒高、利润空间大，但整体自主化率仍偏低。具体来看，多个战略领域的高端产品国产化率普遍偏低，尤其在半导体、水处理、新材料等关键行业，部分品类国产化率甚至低于20%，个别仅在10%左右。例如，高端半导体光刻胶严重依赖日本企业；高性能膜材料在水处理应用中进口占比仍较高；大丝束碳纤维则由东丽株式会社、赫氏公司等外资企业主导全球约80%市场。尽管国内企业如中复神鹰碳纤维股份有限公司已在T700级碳纤维实现技术

突破，但在产能规模和产品稳定性方面仍与国外领先水平存在差距。

尽管我国在环保领域的专利申请数量巨大，位居世界前列，但其转化率和质量却备受质疑。一直以来，我国存在专利转化率偏低的现象，据国家知识产权局发布的《2020 年中国专利调查报告》显示，2020 年我国有效发明专利产业化率为 34.7%，其中企业为 44.9%，科研院所为 11.3%，高校仅为 3.8%。统计数据表明，大量的专利申请活动并未转化为真正的技术壁垒和市场竞争力，反映出我国在绿色技术创新体系方面仍存在深层次问题。

五、我国绿色环保产业安全发展的战略路径

（一）基础产业稳健发展

1. 再生链条夯实绿色根基

再生有色金属产业通过提升资源循环利用效率，显著降低碳排放强度，为碳核算体系提供了重要的减排量基础支撑。“十四五”以来，全球产业格局加速演变、贸易竞争加剧，国家高度重视该产业，将其作为保障战略性资源安全与实现碳中和的重要路径。2022 年，国务院发布的《有色金属行业碳达峰实施方案》明确要求，2025 年再生金属供应占比达 24% 以上；预计到 2030 年，再生有色金属产量将达 2.8×10^7 t，占总量比例将提升至 30%。当前，产业应用场景日益丰富，技术装备持续升级，结构不断优化，韧性增强，正成为绿色低碳发展的关键力量。

行业主体持续壮大，领军企业通过战略升级积极塑造发展新格局。截至 2025 年，我国涉及再生有色金属业务的上市公司已超过 100 家，其中跻身中国民营企业 500 强的企业超过 20 家。作为行业领军者，中国资源循环集团绿色投资有限公司（简称“中国资环”）正着力打造成为长江三角洲地区有色金属循环经济产业的重要增长极。中国资环在巩固基础业务的同时，重点拓展资源循环科创、绿色低碳示范基地等核心业务，并持续孵化创新资源循环项目，致力于构建完整的绿色低碳循环经济产业链。这一战略升级，不仅强化了企业自身的绿色竞争力，更以实践路径为行业提供了可量化的低碳发展范例，有力推动再生金属产业在出口竞争中形成差异化的绿色优势。

2. 循环枢纽提升资源效能

循环枢纽通过高效回收利用关键再生资源，直接减少原生资源开采与加工环节的碳排放，为碳核算提供了可量化、可追溯的减排量核心来源。废旧光伏板、风机叶片、动力电池作为高价值“城市矿藏”，其高效循环利用对提升企业资源自给能力、降低产品碳足迹具有重要价值。中国再生资源产业技术创新战略联盟指出，若实现对退役光伏组件的全量回收，至 2030 年，我国可回收包括 1.45×10^6 t 碳钢、1.1×10^6 t 玻璃、5.4×10^5 t 塑料、2.6×10^5 t 铝、1.7×10^5 t 铜、5×10^4 t 硅及 550 t 银等巨量再生资源。妥善解决退役组件回收问题，是推动我国新能源装机规模优势向循环经济产业优势转化的关键，将为“双碳”目标实现提供坚实保障。

国内企业已在关键回收技术上取得突破，实现资源高效再生与碳减排协同。英利集团在河北唐县建设的物理法回收产线，年处置能力达 4400 t 组件，年减排二氧化碳 2.9×10^4 t，相当于 4.97×10^6 棵树一年的二氧化碳吸收量；天合光能股份有限公司实现电池片提银回收率达 98.6%，回收硅可直接用于 N 型单晶拉制；中国节能环保集团有限公司的集装箱式示范线则可将铝和玻璃的纯度提炼至 99% 以上。这些企业的实践证明，聚焦光伏板、风机叶片、动力电池等关键产品的回收利用，构建“资源 – 产品 – 废弃 – 再生资源”的闭环模式，正成为企业获取减排收益、提升绿色竞争力的有效路径。

3. 治污协同控制末端碳排放

末端污染治理通过减污降碳协同技术路径，精准识别并削减伴随污染物排放产生的温室气体，为碳核算提供了涵盖末端环节且可测量的协同减排量。碳排放与二氧化硫、氮氧化物等污染物均主要来源于化石能源燃烧，企业在能源结构升级、能效提升和精准管控过程中，能够实现碳排放和污染排放的同步治理，即“减污降碳协同”[27]。中国工程院院士团队提出的园区级系统解决方案，集成清洁电力、储能、氢能及碳污资源化利用技术，为企业开展减污降碳协同治理提供了可参照的技术路径。

虽然污水处理行业的碳排放占比不高，但通过技术路径优化具备显著的减排潜力。该行业通过调整技术路线、优化运行模式并实施低碳改造，可在较小成本下实现较大减排效益。研究表明[28]，在现有技术路径下，污水行业温室气体排放强度至 2030 年、

2050年将分别降低4.6%与23.7%；而若推广低碳管理技术，结合能源脱碳与资源化工艺，行业有望在2044年实现碳中和。当前，热泵技术、高效厌氧消化等新兴技术正成为企业优化运行、降低碳排放的重要抓手。

（二）传统产业加强防御

对于高能耗、高排放的行业，如钢铁、电解铝、化肥、水泥，往往面临严苛的碳关税压力，同时出口依赖度高，国际竞争激烈。在此背景下，相关企业需将规避碳壁垒，守住出口市场为核心目标，采取防御型策略。目前钢铁冶炼技术主要有高炉–转炉长流程工艺、电炉短流程工艺以及氢冶金工艺，每生产1 t钢铁的碳排放量分别为1.8~2.2 t、0.4~0.8 t、0.1 t。高炉–转炉长流程工艺是目前钢铁生产的主要工艺，占全国钢铁产量的90%左右。2020—2023年，国内粗钢产量持续增加，但钢铁出口总量未呈现同步上升趋势（见图1）[29]，反映出企业在产量扩张背景下出口增长动力不足。值得关注的是，欧盟CBAM已于2023年生效并进入过渡期，虽尚未实际征收碳关税，但已对出口企业的合规预期与成本预期产生压力[30]。企业如果继续沿用高碳排的长流程工艺，未来在欧盟市场的竞争力将被严重削弱。为此，钢铁企业应主动对标行业降碳路径，从系统能效提升、资源循环利用、流程优化创新、冶炼工艺突破、产品迭代升级及碳捕集、封存与利用等方向入手，将低碳技术改造从被动合规转变为主动布局，以硬核的减排绩效构建出口产品的绿色竞争力[31]。

我国的铝产品碳排放主要来自电解铝生产，碳排放为9.42 tCO_2/t-Al，而欧盟过渡期的铝产品碳排放缺省值为10.35~12.16 tCO_2/t-Al，以碳排放为参考可以看出我国铝产品在欧盟市场具有一定的优势[32]。然而，我国的碳市场均价仍显著低于欧盟，在综合考量碳排放量和碳价后，我国铝产品依然面临较大的碳成本劣势。传统铝冶炼的能源结构中火电占比为75%，为扭转国产铝的高碳成本局面，应加快绿电替代进程。绿电的应用不仅可直接降低碳排放，还能驱动电解铝行业的节能环保改造（如采用高效节能电解槽技术）和污染控制（如减少火电带来的二氧化硫、氮氧化物及粉尘排放，同时降低电解过程中全氟化碳的产生强度）。通过对标国际碳核算标准，倒逼传统电解铝技术向绿电铝转变，并将铝冶炼行业纳入全国碳市场，可加速能源结构改革，构建低碳成本护城河，提高国产铝产品在国际市场中的竞争力。

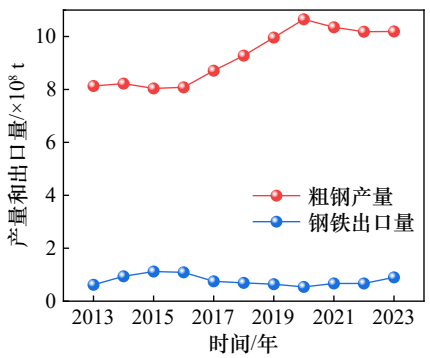

图1　2013—2023年我国粗钢产量和钢铁出口总量

注：数据来源于欧盟碳边境调节机制对钢铁行业的影响及对策建议。

农业碳排放占到全国碳排放总量的17%，其中化肥是农业碳排放的主要来源[33]。对于化肥生产企业而言，降碳的核心路径在于推进产品端的减量增效。农业降碳应从配方优化入手，提高肥料利用率，降低单位产品的碳排放强度；同时积极探索有机肥、生物肥等低碳替代产品的研发与推广，以低碳产品线应对未来市场的绿色门槛。

水泥行业作为碳减排重点领域，其碳排放量占全国碳排放总量的10%，同样面临产能结构调整。通过将水泥行业纳入全国碳市场，利用碳排放权交易机制激励企业采用节能降碳技术，倒逼企业改革，淘汰低效产能。

综合来看，面对日益严苛的国际碳壁垒，钢铁、电解铝、化肥、水泥等高碳行业应将低碳转型作为抵御外部冲击的核心防线。传统行业防御策略可聚焦三个层面：一是建立数据防线。构建企业内部精准的实测碳账本，以实际数据替代国际缺省值，避免碳排放被高估而承担额外碳成本。二是构筑技术防线。围绕能源结构优化、工艺流程升级等，实施全链条低碳化改造，以减排绩效突破外部贸易壁垒。三是推动升级防线。将绿色壁垒转化为产能筛选机制，加快淘汰高碳落后工艺，以产品低碳升级构筑出口竞争力。

（三）新兴产业积极进取

我国在光伏、新能源汽车、锂电池等绿色产业领域已确立全球市场的优势地位。我国的光伏组件

生产占据全球约 70% 的市场份额，单晶硅电池技术已经处于领先水平[34]；2023 年新能源汽车销量达到 949.5 万辆，占全球销量的 64.8%[35]；锂电池领域则依托丰富的锂矿储备、领先的加工精炼技术与完整的产业集群，形成了显著的规模效应与协同效应。但优势不等于胜势，国际绿色贸易规则正在深刻影响产业安全格局，上述优势产业应将战略重心从产能规模扩张转向核心技术攻坚与自身供应链韧性提升。

1. 以全生命周期碳管理巩固竞争优势

不同于传统高碳行业的防御型策略，优势绿色产业应从被动合规转向主动进取，将全生命周期碳足迹管理内化为产品核心竞争力。企业应利用数字化工具对自身及供应链碳足迹进行精准诊断，识别高碳排热点工序并开展靶向技术改造。例如，推动绿电在硅料生产中实现高比例应用、研发低温烧结等低能耗电池工艺、优化锂电池电极工艺以降低能耗。同时，建立“绿色供应链”准入机制，将产品碳足迹表现纳入核心采购标准，倒逼上下游伙伴协同减排，形成从龙头到配套的全产业链低碳化生态，将单个企业的碳优势转化为全链难以复制的系统优势。

2. 以核心技术布局掌握发展主导

掌握关键核心技术是新兴产业摆脱外部制约、确立全球绿色价值链竞争优势的根本路径。一方面，在新能源核心部件端，应前瞻布局固态电池、钠离子电池等下一代前沿技术，突破底层材料与制造装备瓶颈，提升产业链的自主可控能力与绿色制造水平。同时，针对光伏组件与动力电池即将迎来的大规模退役潮，绿色环保产业须切实发挥资源循环与价值重塑作用。环保企业应重点攻克退役组件的无损环保拆解、高值金属（如银、硅、锂等）的高效提纯与清洁再生等核心技术，着力破解当前回收成本倒挂与二次污染痛点。通过构建“先进智造+绿色回收”双轮驱动的行业闭环体系，推动技术优势向标准优势与市场优势转化，牢牢掌握资源循环与降碳发展的主导权。

3. 以“技术+项目”双出海模式拓展国际市场

新兴产业拓展国际市场，应从单一产品出口转向“技术、装备、资本与服务”一体化输出的出海模式，以产业链系统韧性降低贸易壁垒与风险。企业应因地制宜制定出海战略：在东南亚等市场机制成熟、增长潜力显著的区域，通过技术授权、合资建厂等方式深度参与新能源与储能项目，实现产能与运维的本地化闭环；在中亚等环保基建处于起步阶段的区域，则可依托多边合作机制，协同大型国企“抱团出海”，以设备供应和专业分包降低投资风险。在此进程中，绿色环保产业不仅是出海的独立市场主体，以固废资源化、水务运营、工业 VOCs 治理等系统解决方案参与国际竞争；也是新兴产业全球布局的配套保障，通过与光伏、锂电池等新能源产业链深度融合，同步输出减污降碳与资源循环服务，助力海外产能合规运营。两者协同，全面提升我国绿色产业链在国际市场中的综合竞争能力与抗风险能力。

综上所述，应以碳核算体系为战略纽带，统筹基础产业循环协同、传统产业绿色转型与新兴产业自主创新，在降碳增效中筑牢安全底线，在安全发展中实现绿色跃升（见图 2）。

六、我国绿色环保产业发展建议

（一）健全产业市场化转型与政策保障

健全绿色环保产业安全政策，核心在于理顺环境权益的定价与传导链条。在绿色低碳转型中，初期宜由国家主导，借助财政奖补、绿色信贷优先权等工具，分担企业绿色技术研发与设备更新的发展成本；随着碳市场逐步成熟，应逐步退出直接补贴，转为市场化引导，推动环评、排污许可与绿色金融有效衔接，加强重点区域碳排放权和排污权交易深度融合；同时，探索对未纳入碳市场的规模以上企业建立碳税制度。在行业推进上，碳市场与排污权联动优先覆盖电力、钢铁、建材等控排大户，碳税试点可先行在部分高耗能非控排制造业开展。政策工具的切换必须以碳市场配额成交均价为价格信号基准，避免过度扶持或过早退出，保障绿色环保产业稳健过渡。

（二）优化绿色贸易应对与防御机制

面对日益严苛的外部绿色贸易壁垒，需加快建立跨部门的应对体系与前置预警机制，优化国内绿色贸易措施组合。由国家牵头联合重点行业协会，组建常态化的多 / 双边绿色贸易谈判与协作框架。优先将钢铁、化肥、铝制品等欧盟 CBAM 重点监控行业，以及“新三样”等高出口暴露度行业纳入核

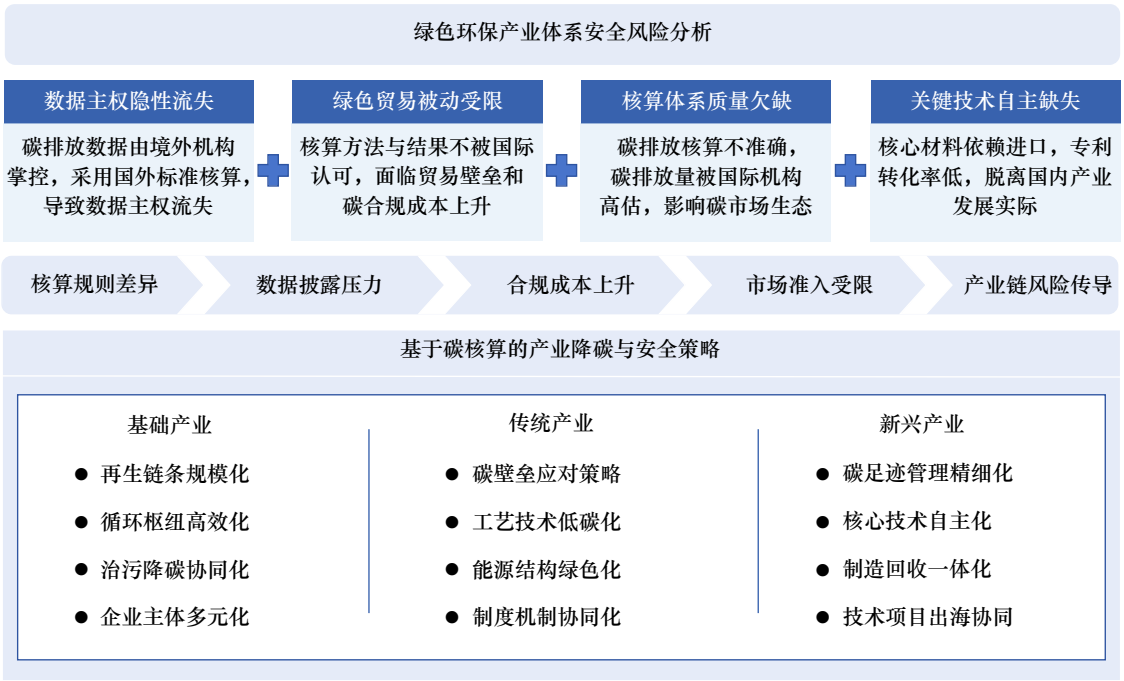

图2　基于碳核算机制的风险传导与绿色环保产业发展安全策略示意图

心防御对象。在推进策略上，依托大数据紧密跟踪重点国家的环境贸易措施，定期发布预警信息，将防范措施前置；进而在“一带一路”、亚太经济合作组织等框架下积极开展经贸外交，团结广大发展中国家参与规则制定。以我国控排企业在全国碳市场实际支付的配额清缴支出及环境税费为核心凭证，推动发达经济体认可我国企业的实际碳合规财务付出，争取在出口清关环节实现碳成本的有效抵扣与合理减免，切实降低企业出口的额外碳合规负担。

（三）完善碳核算标准与数据治理体系

打破发达国家在碳核算底层数据上的垄断，防范数据主权风险，是提升我国绿色环保产业国际话语权的基础工程。依托国家级碳计量中心及相关行业协会，优先在光伏、动力电池及高耗能出口行业部署基于物联网、区块链、大数据与人工智能技术的“动态监控 – 风险预警 – 精准监管”一体化碳计量网络，加快构建本土实测排放因子数据库；同时，对境外环境信息披露平台实施数据出境安全评估，筑牢数据安全防线。在此基础上，积极推动我国本土数据库与 IEA 等国际权威机构的数据互认。需强调的是，本土数据采集与产品全生命周期核算必须严格对标 ISO 14067 等产品碳足迹国际标准，严厉打击数据造假，确保核算结果的国际可比性与公信力，以数据治理的规范性支撑国际规则博弈的主动性。

（四）突破绿色关键技术自主化瓶颈

针对我国部分绿色技术受制于人的现状，需将战略性技术创新作为核心政策工具，驱动产业底层技术突破与企业绿色低碳转型。设立国家绿色关键技术重大专项，聚焦高端监测仪器、高性能膜材料等“卡脖子”环节及低能耗碳捕集等共性减碳技术。研发阶段以政府资金分担前沿探索成本，支持龙头企业与科研院所协同攻关，加速中试验证与产业化进程。推广阶段运用首台（套）重大技术装备保险补偿、绿色技术采购优先权及绿色设备加速折旧等政策工具，引导社会资本淘汰高污染产能，投向绿色装备更新。同时，推动绿色技术与数字化、智能化的深度融合，将节能减排特性融入生产、监测、维护全流程，重塑企业价值链，构建起“降本增效 – 绿色收益 – 再投资”的企业绿色转型自强化机制。

利益冲突声明

本文作者在此声明不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: June 18, 2026; **Revised date:** July 23, 2026

Corresponding author: Xu Jiayu is a professor from the School of Environment, Tsinghua University. Her major research fields include environmental countermeasures and evaluation. E-mail: jiayu-xu@tsinghua.edu.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Research on Several Major Issues for Enhancing the Security of Emerging Industrial Systems” (2025-PP-11)

参考文献

[1] 姜丽娜，高亚锋，江欣妍，等. 城市建设碳排放核算规则与数据质量管理策略[J]. 安全与环境学报，2025，25(11)：4480-4490.
Jiang L N，Gao Y F，Jiang X Y，et al. Carbon emission accounting rules and data quality management strategies for urban construction[J]. Journal of Safety and Environment，2025，25(11)：4480-4490.

[2] 李奇，宁立成. 我国碳标识制度建立的必要性、现实困境与对策研究[J]. 中南林业科技大学学报(社会科学版)，2025，19(6)：13-24.
Li Q，Ning L C. Research on the necessity，practical dilemmas，and countermeasures for establishing a carbon labeling system in China[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology (Social Sciences)，2025，19(6)：13-24.

[3] Pan H，Liu C，Pei Y Q，et al. An overview on carbon emission accounting systems and method at home and abroad[J]. E3S Web of Conferences，2024，528：03001.

[4] 张钦，张达，张希良. 在线监测应用于中国碳排放监测的相关问题和制度建议[J]. 环境经济研究，2021，6(3)：136-146.
Zhang Q，Zhang D，Zhang X L. Application of online monitoring to China’s carbon emission trading system：Key issues and policy recommendations[J]. Journal of Environmental Economics，2021，6(3)：136-146.

[5] Green J F. Private standards in the climate regime：The greenhouse gas protocol[J]. Business and Politics，2010，12(3)：1-37.

[6] 赵沐雨，杨宏. 国际标准化快速程序研究[J]. 中国标准化，2026(7)：259-268.
Zhao M Y，Yang H. Research on international standardization fast-track procedure[J]. China Standardization，2026(7)：259-268.

[7] Zhang Y J，Wei Y M. An overview of current research on EU ETS：Evidence from its operating mechanism and economic effect[J]. Applied Energy，2010，87(6)：1804-1814.

[8] 杨秀，闫娜，杨姗姗，等. 完善我国碳足迹因子数据库建设，积极应对国际绿色贸易壁垒[J]. 可持续发展经济导刊，2025(6)：37-42.
Yang X，Yan N，Yang S S，et al. Enhancing the development of China’s carbon footprint factor database to proactively address international green trade barriers[J]. China Sustainability Tribune，2025(6)：37-42.

[9] Baumüller J，Grbenic S O. Moving from non-financial to sustainability reporting：Analyzing the eu commission’s proposal for a corporate sustainability reporting directive (csrd)[J]. Facta Universitatis，Series：Economics and Organization，2021(1)：369.

[10] KPMG. Federal supplier climate risks and resilience proposed rule[EB/OL]. (2023)[2025-10-06]. https://kpmg.com/us/en/articles/2023/prepare-proposed-federal-supplier-climate-risks-resilience-rule.html.

[11] U.S. Securities and Exchange Commission. SEC proposes rules to enhance and standardize climate-related disclosures for investors[EB/OL]. (2022-03-21)[2025-10-06]. https://www.sec.gov/newsroom/press-releases/2022-46.

[12] 陈文慧.《美墨加协定》环境条款及其对中国的启示[D]. 济南：山东大学，2024：17-19.
Chen W H. Environmental provisions of *United States-Mexico-Canada agreement* and their implications for China[D]. Jinan：Shandong University，2024：17-19.

[13] 唐新华. 美国印太气候战略与绿色联盟构建——地区绿色发展、绿色规则与气候安全新变局[J]. 和平与发展，2022(5)：45-67，141.
Tang X H. The indo-Pacific green alliance building and new changes in climate security[J]. Peace and Development，2022(5)：45-67，141.

[14] Electronic Database of Investment Treaties. IPEF clean economy agreement[EB/OL]. (2024)[2025-10-06]. https://edit.wti.org/document/show/d8a4e4ac-4e22-4266-96d7-66a078ce535d.

[15] 赵达，唐凯. 碳边境调节机制下跨境供应链减排水平和定价决策研究[J/OL]. 海南大学学报(人文社会科学版)，1-11[2026-07-13]. https://doi.org/10.15886/j.cnki.hnus.202409.0589.
Zhao D，Tang K. Research on emission reduction levels and pricing decisions in cross-border supply chains under the carbon border adjustment mechanism[J/OL]. Journal of Hainan University (Humanities & Social Sciences) 1-11[2026-07-13]. https://doi.org/10.15886/j.cnki.hnus.202409.0589.

[16] 杨笑嫣. 欧美碳关税下中国新能源汽车出口：技术壁垒与标准破局[J]. 中国标准化，2025(7)：252-261.
Yang X Y. The export of China’s new energy vehicles under the carbon tariffs in Europe and the United States：Breaking through technical barriers by standards[J]. China Standardization，2025(7)：252-261.

[17] 刘文涛，明祥平. “碳壁垒”视域下我国新能源汽车动力电池回收的法律完善[J]. 山西省政法管理干部学院学报，2025，38(3)：53-58.
Liu W T，Ming X P. Legal improvement of power battery recycling for new energy vehicles in China under the view of “carbon barrier”[J]. Journal of Shanxi Politics and Law Institute for Administrators，2025，38(3)：53-58.

[18] 李舒言. 碳标签制度对我国纺织品贸易的经济效应研究[D]. 苏州：苏州大学，2015：27-30.
Li S Y. Study on economic effects of China’s textile trade of carbon label system[D]. Suzhou：Soochow University，2015：27-30.

[19] 张兵兵，余澜，蔡宏波. 碳关税冲击与中国碳市场扩容提价的“缓冲阀”效应评估[J]. 中国工业经济，2025(9)：5-22.
Zhang B B，Yu L，Cai H B. The assessment of the impact of carbon tariffs and the “buffer valve” effect of China’s carbon market expansion and price increase[J]. China Industrial Economics，2025(9)：5-22.

[20] 李德尚玉. 中国提出全经济减排目标 全国碳市场覆盖主要高排放行业[N]. 21世纪经济报道，2025-09-26(2).
Li D S Y. China sets nationwide emissions reduction targets，na-

tional carbon market covers major high-emission industries[N]. 21st Century Business Herald,2025-09-26(2).

[21] 仇邦楚,田刚,王道明. “一带一路”共建国家森林碳汇交易市场构建的协同逻辑与实现路径——以澜沧江–湄公河流域国家为例[J]. 国际贸易,2025(5):59-70.
Qiu B C,Tian G,Wang D M. Synergistic logic and implementation pathways for the construction of forest carbon sink trading market among the Belt and Road partner countries:Taking LMC countries as an example[J]. Intertrade,2025(5):59-70.

[22] 姜博艺,冯建江,高健,等. 绿色“一带一路”倡议实施成效、挑战及对策[J]. 环境工程技术学报,2025,15(6):2167-2174.
Jiang B Y,Feng J J,Gao J,et al. Implementation achievements,challenges and countermeasures of the Green Belt and Road Initiative[J]. Journal of Environmental Engineering Technology,2025,15(6):2167-2174.

[23] 隆基绿能科技股份有限公司. 2024—2025隆基绿能气候行动白皮书[R]. 西安:隆基绿能科技股份有限公司,2025:5-7.
LONGi Green Energy Technology Co.,Ltd. 2024—2025 LONGi green energy climate action white paper[R]. Xi’an:LONGi Green Energy Technology Co.,Ltd.,2025:5-7.

[24] 中央财经大学绿色金融国际研究院. 2024年绿色信贷进展报告[EB/OL]. (2025-08-02)[2026-07-20]. https://iigf.cufe.edu.cn/info/1012/10214.htm.
International Institute of Green Finance. Progress report on green credit 2024[EB/OL]. (2025-08-02)[2026-07-20]. https://iigf.cufe.edu.cn/info/1012/10214.htm.

[25] 田洪志,张熙,姚峰,等. 全国碳市场与地方试点碳市场价格间的动态因果关系研究[J]. 生态经济,2026,42(7):6-14.
Tian H Z,Zhang X,Yao F,et al. The research on the dynamic causal relationship between the national carbon market and local pilot carbon market prices[J]. Ecological Economy,2026,42(7):6-14.

[26] 孙佑海,杨帆. 论碳排放权市场交易监管中的声誉罚[J]. 吉首大学学报(社会科学版),2026,47(1):111-122.
Sun Y H,Yang F. Reputational sanctions in the regulatory oversight of carbon emission allowance markets[J]. Journal of Jishou University (Social Sciences),2026,47(1):111-122.

[27] Liu B,Qiu Z X,Hu L T,et al. How digital transformation facilitate synergy for pollution and carbon reduction:Evidence from China[J]. Environmental Research,2024,251:118639.

[28] Du W J,Lu J Y,Hu Y R,et al. Spatiotemporal pattern of greenhouse gas emissions in China’s wastewater sector and pathways towards carbon neutrality[J]. Nature Water,2023,1(2):166-175.

[29] 马莉,王雅新,叶琳琳,等. 欧盟碳边境调节机制对钢铁行业的影响及对策建议[J]. 冶金经济与管理,2024(4):13-17.
Ma L,Wang Y X,Ye L L,et al. Effect and recommendations of the eu carbon border adjustment mechanism on the iron and steel industry[J]. Yejin Jingji Yu Guanli,2024(4):13-17.

[30] 赵禹程,徐潜,周为,等. 中国钢铁出口受碳边境调节机制影响与对策[J]. 钢铁,2025,60(1):191-203.
Zhao Y C,Xu Q,Zhou W,et al. Impact of CBAM on China’s iron and steel exports and countermeasures[J]. Iron & Steel,2025,60(1):191-203.

[31] 孙时晴,万迎峰. 钢铁行业碳中和实施路径研究[J]. 工业安全与环保,2025,51(12):97-101.
Sun S Q,Wan Y F. Research on implementation pathways for carbon neutrality in the steel industry[J]. Industrial Safety and Environmental Protection,2025,51(12):97-101.

[32] 刘亚德. 欧盟碳边境调节机制(CBAM)对中国铝行业影响的分析[J]. 轻金属,2024(4):1-4,29.
Liu Y D. Analysis of the impact of the EU Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) on China’s aluminum industry[J]. Light Metals,2024(4):1-4,29.

[33] 邹金浪,刘陶红,姚冠荣,等. 中国化肥减量降碳效应评估[J]. 中国环境科学,2024,44(1):438-448.
Zou J L,Liu T H,Yao G R,et al. Assessing the carbon emissions from fertilizer use reduction in China[J]. China Environmental Science,2024,44(1):438-448.

[34] Wang Y X. Analysis of the energy trade game between major countries under the background of “carbon neutrality”:A case study of the photovoltaic industry in China and the United States[J]. SHS Web of Conferences,2024,188:03019.

[35] Zhao H C,Namjil D,Ochgerel B. Research on global market competition and activation impact of China’s new energy vehicles[J]. Frontiers in Business,Economics and Management,2024,15(2):111-115.