

# 迈向零碳未来：碳排放核算与管理研究综述

唐旭<sup>1,2,3\*</sup>, 李依霖<sup>3,1</sup>

1 中国石油大学(北京)经济管理学院, 北京 102249

2 中国石油大学(北京)中国油气产业发展研究中心, 北京 102249

3 中国石油大学(北京)碳中和未来技术学院, 北京 102249

\* 通信作者, tangxu2001@163.com

收稿日期: 2023-08-11

**摘要** 应对全球气候变化、实现可持续发展已成为人类共同的愿景。全球不断推进的碳中和议程更是使得对以二氧化碳为代表的温室气体进行核算与管理调控成为紧迫且重要的战略任务。然而, 目前针对全球碳排放核算体系和管理途径的系统性文献梳理和研究还很缺乏。本研究从方法与范围的视角分析了碳排放核算领域的研究发展历程, 并追踪了碳排放核算多维研究内容的演化趋势。在此基础上, 聚焦经济视角下的碳减排制度设计、先进碳减排技术路径的规划与部署两个关键的碳管理问题, 明确了国家层面碳管理的现有研究内容、关键瓶颈问题和重要研究屏障。最后, 基于全球碳排放核算与管理的研究现状评述, 本研究凝练总结出未来值得探索的几个重点研究方向, 以期在国家层面形成加速迈向零碳未来的管理政策体系及其理论基础和实践工具。

**关键词** 气候变化; 碳核算; 碳管理

## Towards a zero-carbon future: A literature review of carbon emission accounting and management

TANG Xu<sup>1,2,3</sup>, LI Yilin<sup>3,1</sup>

1 School of Economics and Management, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

2 Research Center for China Oil and Gas Industry, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

3 School of Carbon Neutrality Future Technologies, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

**Abstract** Coping with global climate change and achieving sustainable development have become shared visions among humanity. The relentless advancement of the global carbon neutrality agenda has made calculating, managing and regulating greenhouse gases, particularly carbon dioxide, a pressing and important task. Nevertheless, existing research lacks a systematic review of the literature pertaining to carbon emission accounting frameworks and carbon management means. Our study commences with a thorough analysis of the research development progress in carbon emission accounting, focusing on methods and scopes. Meanwhile, we track the evolutionary trends encompassing multidimensional research subjects within this field. Building on this foundation, our study homes in two crucial carbon management subjects: carbon emission reduction system design within economic perspectives, and strategic planning and implementation of advanced carbon emission reduction technologies. It unveils the prevailing themes, critical bottlenecks, and significant challenges of existing research into national-level carbon management. Finally, drawing on the review concerning the research status of global carbon emission accounting and management, our study highlights several key research directions that warrant exploration in the future, aiming to establish a comprehensive policy framework, theoretical foundation, and practical tools for expediting the attainment of a zero-carbon objective at the national level.

引用格式: 唐旭, 李依霖. 迈向零碳未来: 碳排放核算与管理研究综述. 石油科学通报, 2023, 04: 522-534

TANG Xu, LI Yilin. Towards a zero-carbon future: A literature review of carbon emission accounting and management. Petroleum Science Bulletin, 2023, 04: 522-534. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2023.04.040

**Keywords** climate change; carbon accounting; carbon management

**doi:** 10.3969/j.issn.2096-1693.2023.04.040

## 0 引言

气候变化是 21 世纪人类和地球面临的重大环境威胁。联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 第六次评估报告的数据显示, 自工业化以来, 地球平均气温已上升约  $1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[1]</sup>。这带来了前所未有的高频极端天气事件、海平面上升和海岸侵蚀、生物多样性丧失、粮食和水资源短缺以及社会经济不平等等一系列的问题<sup>[2]</sup>。因此, 对以二氧化碳为代表的温室气体进行管理和调控, 已成为全球应对气候变化、实现人类社会可持续发展的基本手段。在《京都议定书》《巴黎协定》等全球减排协议的统筹下, 各国政府采取了一系列措施来管控温室气体排放以减缓气候变化, 包括完善温室气体排放统计体系、优化能源系统、推行碳市场与碳税机制以及减排技术创新应用等。

多样化的温室气体管理措施已取得一定的效果。国际能源署 (IEA) 发布的报告显示, 2022 年全球能源相关的二氧化碳排放量增长了 0.9%, 增幅远小于 2021 年的 6%<sup>[3]</sup>。这一速度也低于全球经济增长速度, 表明全球经济增长与碳排放正在逐步“脱钩”。然而, 这种程度的碳减排仍旧不能支持整个社会走上预设中的可持续发展道路。目前, 各国仅仅完成《巴黎协定》规定的自主贡献, 并不能实现将全球升温限制在  $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  或低于  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$  的目标。如果维持现在的举措, 不加以进一步的管控, 2100 年全球平均气温仍将升高  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$  以上<sup>[4]</sup>。这些事实均证明, 未来应对气候变化的困难和挑战将比预期更加严峻。这就需要对未来设置更加严格的排放额度和减排目标。事实上, 许多国家都已做出在 20 世纪中叶前实现净零排放的承诺。与此同时, 全球不断推进的“碳中和”议程对温室气体排放核算的准确性与减排行动和政策的系统性和科学性提出了更高的要求。

在这样一个应对气候变化进程中承上启下的关键时间节点, 对现有的碳排放核算体系和管理措施的研究进行梳理和总结显得尤为必要。目前, 围绕碳排放量精准核算与统计、碳交易市场运行与评价、先进减排技术潜力评估与预测等关键议题的研究不断涌现, 丰富的研究结果也为未来致力于减少碳排放的管理措施制定提供了科学认知和理论基础。然而, 现有的研究仍旧受限于特定的历史时间和研究背景, 提供的信

息碎片化而缺乏系统性。因此, 本文通过研究综述的方式对现有的成果进行梳理总结, 旨在明确碳排放核算与管理过程中需要解决的关键科学问题和需要突破的重要研究屏障, 为形成高效而有针对性的减排策略和行动方案提供支撑。

## 1 碳排放核算方法及多维内容

### 1.1 碳排放核算的方法与范围

无论是对于宏观的国家、地区还是微观的技术、产品, 准确的碳排放核算是实施减排措施、制定减排战略和进行国际验证与评估的基础。因此, 政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 制定了一种基于含碳化石燃料能源消费的方法来估算国家二氧化碳排放量, 通过活动数据和相应的排放系数编制碳排放清单<sup>[5]</sup>。由于该核算方法是根据能源供应链生产端的初级能源数据进行碳排放核算 (考虑了初级能源转换、燃料洗涤过程中的能量损失以及燃料非能源利用等因素), 因此这类计算方法也被称为基于生产端的碳排放核算。目前, 基于生产端的核算方法已经成为许多主流机构数据统计与清单发布的重要依据, 在全球范围内被广泛应用, 形成了以排放因子法、质量平衡法和实测法为核心的碳排放核算方法学体系<sup>[6-8]</sup>。表 1 整理了针对不同尺度主体的机构或标准的核算范围。如表中数据所示, 在宏观层面, 任何类型的排放清单都是聚焦于排放源, 具有纯粹的领土性质, 至多包括从边界外部供应的电力使用。在微观层面, 为实施碳交易市场机制而对控排企业和减排项目进行的减排量核算也多从生产侧角度出发, 仅包含边界内的所有直接排放 (范围 1) 或同时包括边界内的直接排放 (范围 1) 与发生在边界外的与能源有关的间接排放 (范围 2)<sup>[9]</sup>。

伴随着国际和国内社会对碳排放责任分担精确度及透明度越来越高的要求, 以及对潜在“碳泄露”所引起减排责任转移的高度关注, 许多研究和协议的制定开始侧重于消费和使用活动所引起的碳排放, 而不仅仅只是遵循 IPCC 的基于源头的核算方法。通过将内部和跨界排放与使用活动联系起来, “足迹”的概念开始出现<sup>[10-11]</sup>。为了采用不同的核算视角来应对“边界挑战”, 基于消费端的碳核算方法也已经被广泛地采纳成为计算碳排放的有效方法。具体来说, 在国际标准

表1 不同主体的机构/标准的核算范围(基于生产端)

Table 1 The accounting scope for different entities or standards (based on the production side)

核算主体/对象	统计机构/规范标准	核算范围	核算视角	发布时间	数据来源
国家/区域	全球大气研究排放数据库	范围 1+2	生产端	1970	[12]
	国际能源署	范围 1	生产端	1990	[13]
	美国能源信息署	范围 1+2	生产端	1949	[14]
	世界银行	范围 1+2	生产端	1960	[15]
	联合国气候变化框架公约	范围 1+2	生产端	1990	[16]
	世界资源研究所	范围 1+2	生产端	1990	[17]
	IPCC全球温室气体清单编制指南	范围 1+2	生产端	2006	[5]
	UNFCCC温室气体清单编制指南	范围 1	生产端	1995	[18]
	欧盟监测、报告和验证(MRV)指南	范围 1+2	生产端	2013	[19]
	中国省级温室气体清单编制指南	范围 1+2	生产端	2007	[20]
控排企业/减排项目	CDM/CCER减排核算方法学	范围 1	生产端	2017	[21]
	ISO 14064-2(通则)	范围 1	生产端	2019	[22]
	中国企业温室气体核查与报告指南	范围 1+2	生产端	2021	[23]

表2 不同主体的机构/标准的核算范围(基于消费端)

Table 2 The accounting scope for different entities or standards (based on the consumption side)

核算主体/对象	统计机构/规范标准	核算范围	核算视角	发布时间	数据来源
产品/技术	ISO 14067	范围 1+2+3	消费端	2013	[28]
	WRI/WBCSD GHG Protocol	范围 1+2+3	消费端	2011	[29]
	PAS 2050	范围 1+2+3	消费端	2008	[30]
组织/企业	ISO 14064-1	范围 1+2+3	消费端	2006	[31]
	WRI/WBCSD GHG Protocol	范围 1+2+3	消费端	2004	[9]
	ISO 14069	范围 1+2+3	消费端	2013	[32]
	ISO 14072	范围 1+2+3	消费端	2014	[33]

化组织(ISO)及政策机构所公布的一系列标准和技术报告的推动下(表2),生命周期分析(LCA)迅速地发展成为一种得到公认的基于消费端的碳排放核算方法,被广泛地用于针对技术/产品或企业/组织等微观尺度的碳排放核算工作<sup>[24-25]</sup>。

通过构建产品生产过程中各个阶段的物料、能量投入清单,LCA具有很强的针对性,能够精准量化产品从“摇篮”到“坟墓”每一流程的碳排放足迹。然而,由于该方法是基于具体的清单进行分析,其核算结果不可避免地会受到截断误差的影响,因而更适用于微观尺度对计算详尽度有要求的研究。为了克服以上缺陷,投入产出分析(IOA)逐渐涌现成为另一种得到广泛应用的基于消费端的碳排放核算方法。通过将直观的数学表达形式与深刻复杂的经济内涵相结合,这种自上而下的方法主要被用来核算宏观层面社会经济各区域、部门的总体碳排放足迹<sup>[26-27]</sup>。

## 1.2 碳排放核算的多维内容

现有的碳排放核算研究成果从多个尺度刻画了碳排放现状与特征,揭示了减排的空间和潜力所在。具体来说,大多数的碳排放核算聚焦在国家尺度,尤其关注包括中国在内的发展中国家<sup>[34-35]</sup>。在城市尺度,考虑到特大城市人口密集、产业聚集、交通拥堵、经济活动频繁等重要特性,对典型特大城市和城市群碳排放总量及构成的核算工作也越来越多地涌现出来<sup>[36-37]</sup>。在行业尺度,早期阶段主要受到关注的是能源行业(石油、天然气等)和交通运输行业,随后逐渐转向更加强调电力行业的排放核算与减排控制<sup>[38-39]</sup>。这是因为这些传统的能源密集型行业一直是全球化石能源相关二氧化碳排放的最主要贡献者。随着时间的推移,迫切需要对全产业链的生产过程进行绿色升级,有关农业、建筑、化工行业和居民消费的碳排放核算成为了新的研究热点<sup>[40-42]</sup>。

除了碳排放核算的多维尺度外,学者们还关心碳排放的经济驱动因素。自经济合作与发展组织(OECD)在2002年提出“解耦”的概念后,一些研究人员将关注重点放在了使用解耦模型和分析方法探讨经济增长与碳排放解耦的驱动因素,识别可能的解耦机制<sup>[43]</sup>。现有研究主要是基于结构分解分析(SDA)、指数分解分析(IDA)和生产理论分解分析(PDA)三种分解技术,并采用OECD<sup>[44]</sup>和Tapio<sup>[45]</sup>提出的两套被广泛认可的解耦指标,分析了不同地区碳排放与经济发展之间已经实现的绝对解耦或者相对解耦的现象<sup>[46-47]</sup>,揭示了能源强度降低和清洁能源消费等驱动因素对经济与排放解耦的正向作用<sup>[48-50]</sup>。这些研究的结果为各国制定减碳政策和具体行动措施提供了有价值的参考。

## 2 碳管理的制度设计与运行

碳管理的概念起源于企业和组织自愿采取行动来降低碳排放和应对气候变化的需求。自《京都协议书》提出跨国减排的清洁发展机制(CDM)之后,早期企业的碳管理工作多围绕着CDM碳减排价值的开发来进行。近年来,受全球气候变化和可持续发展议程的推动,企业碳管理的内涵越来越丰富,从单纯的企业碳核算到碳资产管理,从一级市场的CDM开发到二级市场的碳交易,碳抵押、碳回购等金融业务也逐渐开展起来。总的来说,迄今为止国内外学者对于企业碳管理的定义是企业通过碳审计等措施来摸清企业本身的碳资产,通过一系列的减排措施来减少企业本身的碳排放,并根据企业本身的碳资产状况,进行碳交易以实现完成履约责任、获得收益等目的的管理机制<sup>[51-52]</sup>。企业碳管理领域在一段时间的发展中已形成一系列国际标准作为碳审计与盘查方面工作开展依据。例如,由世界资源研究所(WRI)和世界可持续发展企业理事会(WBCSD)所颁布的温室气体核算标准(GHG Protocol),国际标准化组织所发布的ISO14064系列标准,英国标准化协会采用BSI会议程式制定的PAS2050规范和PAS2060规范等。这些标准和规范规定了企业在碳盘查过程中需对商品和服务在全生命周期内的温室气体排放足迹进行统计。

不同于企业层面的碳管理侧重于指导操作性的微观实践,国家层面的碳管理致力于形成统筹性的顶层设计和制度安排。目前,国际上虽分别对国家和区域碳排放清单建立、国家减排目标设定以及国家碳交易管理体系有所讨论,但针对国家层面总体的碳管理尚未形成统一的定义。综合国内外学者针对国家碳管理

途径的现有定义<sup>[53-54]</sup>,本研究认为:国家层面的碳管理是指政府通过制定和实施一系列政策、法规和措施来管理和控制全国范围内温室气体的排放,是在国家范围内对碳减排、碳中和等目标的规划与实施,例如设立合理的碳排放目标和减排计划,建立健全碳减排市场调控机制等。

为了鼓励低成本减少温室气体排放,很多国家基于经济视角进行碳减排的制度设计。目前,关于经济视角下碳减排制度设计的相关研究主要可归类为数量型机制设计(碳市场)和价格型机制设计(碳税)。数量型机制利用排放权的产权界定并通过产权交易解决碳减排的外部性问题,价格型机制则通过征收碳税将外部成本内部化来达到控制和减少碳排放的目的。

### 2.1 碳市场的制度设计与运行

多伦多大学Dales John最早提出碳排放交易概念的<sup>[55]</sup>。之后,《京都协议书》第一次将碳排放权定义为一种商品,鼓励各国通过建立健全碳交易机制来实现减排<sup>[56]</sup>。目前,全球已经有25个碳排放权交易体系生效,覆盖了17%的温室气体排放<sup>[57]</sup>。其中,欧盟交易体系是全球运行最早、最大的多国家、多区域碳排放权交易体系。北美地区虽未形成国家层面的碳排放权交易体系,但也发展较为成熟。无论是美国的区域温室倡议还是加拿大的蒙特利尔气候交易所都是特色鲜明的地区级碳市场。相对于以上交易市场,亚洲地区的碳交易开启较晚,中国于2017年启动全国碳排放交易市场,逐步纳入8大行业,并于2020年最终建成全国碳排放交易市场。伴随着各国碳市场的设立与运行,国内外学者致力于研究碳市场的机制设计、运行调节以及管理效果。具体的研究可分为以下3类:第一类是针对碳交易覆盖范围、配额总量设置、分配原则与方案、交易成本等碳市场机制设计的前期分析<sup>[58-60]</sup>;第二类是针对交易控制与市场调节手段的研究<sup>[61-62]</sup>;第三类是对所实施的碳交易政策效果的后期评价<sup>[63-64]</sup>。

针对碳市场机制设计的前期分析是目前碳市场设计研究中的热点。具体来说,在配额总量设置方面,许多研究证实了总量控制原则在中长期相对于强度控制原则的优势,使得碳排放配额问题逐渐成为一种总量受控的资源配置问题<sup>[65]</sup>。在排放权配额初始分配方面,目前国际上常见的机制主要包括祖父原则、拍卖法、固定价格购买法以及混合式分配法。一些研究验证,作为全球大部分碳市场早期广泛应用的分配原则,祖父原则能够使排放主体以历史排放水平为基准获得

免费的配额量,大大降低排放权交易市场的进入壁垒、刺激市场主体的参与性<sup>[66-67]</sup>。但与此同时,由于存在对本国企业与现有配额持有者的保护,该原则也会诱发资源或权益重新分配受限、配额总量过剩、交易市场不活跃、碳交易价格长期处于低水平等问题<sup>[68-69]</sup>。拍卖法可以在一定程度上克服祖父分配原则在资源分配扭曲方面的缺陷,因此该分配原则被美国区域温室气体减排行动等区域碳市场广泛采纳<sup>[70]</sup>。拍卖发放配额的方式被证明可以有效揭示各地区、行业参与者碳排放权益的真实价值,提高市场效率,但在全行业应用时容易诱发不同行业间的不公平问题。综合考虑以上两种初始配额分配方法对达成碳排放减少目标的影响,固定价格购买法和混合式配额分配法逐渐受到后进入的国际碳交易市场主体青睐。已经有研究分析和揭示了这两种方法在稳定市场初期交易价格与行业间公平的碳排放权资源配置方面的作用<sup>[71]</sup>。除了围绕上述公认的几种初始配额分配原则进行研究外,一部分学者致力于探索最适合某特定区域或行业的新型配额分配方法。例如,钱浩祺等将中国各区域的碳排放效率融入碳排放权配额分配,构建了一套考虑到技术异质性的分配模型<sup>[72]</sup>。闽宁等测算了不同行业在不同程度碳排放强度约束条件下的碳排放权及减排量分配指标与分配系数,针对不同行业提出了分层级的碳减排量分配标准<sup>[73]</sup>。

在碳交易覆盖范围方面,许多研究证明了排放损害与排放位置点无关的事实,得出了排放权交易应尽可能覆盖多数的排放源以便降低管理和监督成本的结论<sup>[74]</sup>。在碳排放权交易定价方面,很多研究致力于定价的影响因素分析。其中,一部分学者通过一般均衡模型分析后提出碳排放权市场价格由边际减排成本决定的观点<sup>[75]</sup>。同时,为了进一步准确地考虑碳排放对环境、气候变化和社会福利所产生影响的边际价值,一部分学者引入影子价格衡量碳排放权的市场价格<sup>[76-77]</sup>。也有一部分学者尝试从供需关系的角度探究碳交易价格的决定机制,验证了影响供求关系的政治风险、燃油价格、气候变化、技术进步与经济发展等几种因素均间接决定着碳交易的市场价格<sup>[78-79]</sup>。除此以外,其他关注碳交易价格的学者重点分析了碳排放权价格与能源和气候等因素的关系,定量的研究结果证实了石油、天然气、煤炭和股票指数等价格都不同程度地造成了典型碳市场价格的波动<sup>[80]</sup>。在碳排放权交易成本方面,一部分学者认为交易成本的存在对碳排放权交易市场的运行有抑制作用,有可能抬高减排的总成本<sup>[81]</sup>。另一部分学者则证实了当碳排放权交

易价格下降到均衡价格时,交易成本接近于零,并证明了交易成本的作用会随着交易市场的逐渐成熟而减弱<sup>[82]</sup>。

从配额总量设置与分配原则、交易覆盖范围、交易价格以及交易成本等任何一个角度出发的碳市场机制设计分析,都对碳市场运行原理及规律的揭示提供了有价值的参考。然而,碳市场的真实运行仍需要各种控制和调节手段来维持稳定与高效,同时对市场机制实施后的减排、经济产出、技术激励等效果评估也同样重要。因此,一部分研究者致力于讨论合适的许可证存储、市场稳定储备、价格上限下限、配额调节与撤销等碳排放权交易市场的调控手段<sup>[61-62]</sup>。例如,欧盟碳交易市场通过引入市场稳定储备机制(MSR)以及碳配额拍卖二次分配促进了能源转型;加州碳市场和韩国碳排放权交易体系也通过控制碳价上下限建立起了一套区域碳市场的稳定机制<sup>[83]</sup>。同时,另外一部分研究者聚焦对所实施的碳交易政策效果的后期评价,以给碳排放交易市场机制的制定与调控运行提供有效的反馈。在减排效果后期评价方面,大量从不同角度对不同尺度对象进行分析的研究结果均证实了碳交易市场的大规模推广有利于区域碳排放总量的降低<sup>[84-85]</sup>。例如,孙睿等通过将碳交易模块纳入宏观经济CGE模型分析了碳价引入对宏观产业部门能源消费及碳排放的影响,揭示了碳价对煤炭、重工业、电力和轻工业部门碳减排的积极作用<sup>[64]</sup>。在经济产出效果后期评价方面,学者们对于碳交易机制的引入是否对政策实施地区的经济发展增速带来负面影响的问题尚未形成统一的认识。具体来说,一部分研究者基于国家层面的核算结果,佐证了碳排放交易制度对于经济发展具有良性促进作用的观点<sup>[86-87]</sup>。另外一部分主要从微观视角出发的研究者则发现,鉴于偏高的排放权价格对企业未来可支配的资金施加了更紧的约束,现有的碳排放权交易市场并没有对企业的利润、收入与就业带来显著的正向作用<sup>[88-89]</sup>。在技术激励效果后期评价方面,大部分研究者认同碳交易机制对低碳生产技术的推动作用,提出如何有效分配排放权是碳市场能否推动技术进步的关键<sup>[90]</sup>。通过计算与比较,证明了排放权拍卖制度相较于免费排放权分配制度更容易实现好的技术激励效果<sup>[91-92]</sup>。

## 2.2 碳税的制度设计与运行

碳税是在碳市场出现之前就被广泛采用的一种减排政策工具。最早的碳税主要集中在能源部门,通过燃料定价的间接方式实施,燃料的定价高低取决于其

中的碳含量。自1990年以来，北欧国家采用了碳税制度，并在不同时间进行了多次改革。2000年以来，全球对于实施碳税的兴趣不断增长。随着瑞士在2008年采纳碳税，其他一些欧洲国家和澳大利亚、日本等发达国家也开始制定和采用碳税。相较于作为数量型机制的碳市场，价格型机制碳税的实施不需要建立复杂的市场机制与监管机构，因此在机制设定和实施方面更为便捷。针对价格型(碳税)机制设计的研究可以大致分为以下两类：第一类是针对税收制度设计的前期分析<sup>[93]</sup>；第二类是针对碳税制度实施对经济、环境和社会所造成广泛影响的分析<sup>[94-96]</sup>。对碳税机制设计的前期分析与探讨多集中在征收依据与税率制定两个方面。从征收依据上来讲，现有研究充分强调了准确衡量征税对象碳含量的必要性，认为衡量进口商品碳含量时存在的偏差可能导致税收保护(例如碳关税)和国家间碳税收益不均衡等问题，从而削弱碳税机制的减排效益<sup>[93]</sup>。从税率制定上来讲，学术界的争论主要集中在如何选择政策实施的合适时间与风险的贴现值上。大量研究证明，当着重考虑政策成本的不确定性、二氧化碳存量外部性以及能源资源有限性时，最优税率的设计方案是不同的<sup>[97-98]</sup>。在过去几十年的大量研究中，绝大部分学者认同碳税是一项非常有效的减排手段<sup>[99]</sup>。因此，近年来针对碳税制度实施效果的后期评价逐渐转向于关注碳税实施对经济、环境和社会所造成的广泛影响<sup>[100-101]</sup>。例如，Uri和Boyd的研究通过可计算一般均衡模型证明提高墨西哥的能源税收价格将减少环境危害，增加政府的收入<sup>[102]</sup>；Oueslati发现环境税收对社会福利和经济增长长期效应正向但短期效应负向<sup>[103]</sup>；Wesseh等人揭示了碳税对低收入地区经济福利的负面影响和对高收入地区经济福利截然不同的积极影响<sup>[104]</sup>。这些不同视角切入的研究共同勾勒出了碳税制度实施效果的不同侧面，并呼吁未来的研究采用更实时的数据和更真实的模型实现进一步的探索。

碳市场与碳税这两种基于经济视角设计的碳减排制度在现实实施效果上存在明显的差异。研究发现，在实施成本层面，相较于碳税机制，碳市场机制拥有更低的信息成本，但需要付出更多的行政成本用于各部门的协调配合<sup>[105]</sup>。在减排激励效果方面，碳交易机制的有效性高于碳税。在碳市场机制中，一旦总排放配额确定，企业减排意愿与最终减排结果的达成是有保障的；而在碳税机制中，若因征收碳税而挤压了企业的利润空间，则会给企业碳减排总量带来不确定性<sup>[106]</sup>。因此，两种机制各有利弊，不同情况下可以相互补充使用。融合碳市场机制和碳税机制的双轨并行

机制能够显著提高减排效果与经济效益已成为学者们的共识<sup>[58, 107]</sup>。然而，如何合理设计这种双轨并行的机制仍是挑战。未来的政策制定应充分考虑不同主体的特征以及不同政策的推行时机来充分发挥双轨并行机制的优势。

### 3 碳管理的技术路径规划与部署

除了以经济手段为基础的碳管理工具，技术突破与创新同样是减少碳排放的重要工具手段。事实上，考虑到现有能源系统的发展惯性与路径依赖，关键技术路径与工艺流程管理始终是实现双碳目标的主要驱动力，也是碳减排的重要技术管理路径。

#### 3.1 先进碳减排技术路径与工艺流程

积极发展和部署可再生能源利用技术是实现双碳目标、加速一次能源有序减量替代、保障低碳时代能源安全的关键。现有研究主要集中在可再生能源利用技术、碳捕集利用与储存(CCUS)技术、储能技术、工艺改进与优化技术以及清洁生产技术等五个方面。其中，核能与氢能因具有清洁低碳、绿色环保等优点，被认为是实现碳中和目标的重要技术<sup>[108-109]</sup>；生物质能也因具有广泛的资源可用性、多样的应用领域和潜在的负碳效益成为能源结构调整的重要支撑<sup>[110-111]</sup>。考虑到CCUS技术迫切需要突破高成本与高捕集能耗的瓶颈才能实现大规模推广与应用，相较于传统的捕集与利用技术，化学链燃烧、多联产、多能互补等碳捕集技术成为新的研究热点<sup>[112-113]</sup>。此外，科学家正在寻求新的碳利用技术，以分解二氧化碳分子，生产有价值的碳基燃料、化学品和其他产品。通过新兴催化剂和生物基材料使得二氧化碳从污染物转变为资源，不仅有潜力减少碳排放和缓解温室效应，还可以产生重要的社会和经济价值<sup>[114-116]</sup>。在储能领域，对于长储能周期、高调频能力、分布式利用潜力、高资源获得性与高系统效率的需求使得液流电池、钠离子电池、锂离子电池、压缩空气储能、铅酸电池以及储热技术等储能技术格外受到研究者的讨论与关注<sup>[117-119]</sup>。由于能源节约和消费减少存在理论上的上限，因此针对传统高投资、高能耗、高温室气体排放的长工业过程所进行的工艺改进与优化技术也受到了广泛的关注。绿色制造手段如原料/燃料替代以及工艺流程再造等成为了工业领域的关注热点。前者的研究重点包括绿电/绿氢协助原油裂解产化学品技术、绿电/绿氢合成氨技术、电石渣生产水泥熟料技术等<sup>[120-122]</sup>。后者的研究

重点包括低能耗分离技术、煤油共炼技术等<sup>[123-125]</sup>。

### 3.2 技术经济与减排潜力的评价优化

确定关键技术路径与工艺流程是否低碳甚至零碳以及是否具有良好的经济竞争力是至关重要的管理问题。在经济效益评价方面,一部分学者聚焦在技术经济分析(TEA)上,通过净现值(NPV)、产品最终价格、资本和运营成本、回收期等一系列指标从关键盈利能力等角度评估将技术引入现有系统的经济影响<sup>[126-128]</sup>。技术经济分析结果在制定技术相关的研发支持与投资决策计划中具有关键的作用。例如, Brown等结合APEC软件对生物质快速热解和加氢处理技术进行了技术经济可行性分析,通过设备成本估算预估了项目的总投资,证明了该项技术的推广是具备盈利能力的<sup>[129]</sup>。另外一部分学者的侧重点有所不同,相较于收入与利润,他们更加关注技术生命周期内每一单元过程的实际或者潜在经济成本,采用生命周期成本评估(LCC)方法来评价技术的经济性能<sup>[130-132]</sup>。在减碳效益评价方面,研究者大多采用生命周期分析(LCA)评价方法,从潜在排放量、减排潜力、环境相关上游关键参数与工艺单元优化等角度出发来评估将技术引入现有生态系统的环境影响<sup>[121, 133]</sup>。对于成熟度较高的技术,研究者侧重于通过生命周期评价比较和筛选能够生产相同最终产品的最优化技术路径。例如, Rehl和Müller通过生命周期分析比较了用于沼气生产的七种不同的厌氧技术,并评估了它们对应的全球变暖潜势(GWP)、能源需求和物质输入/输出,为农业部门的决策制定者提供了支持<sup>[134]</sup>。对于成熟度较低的新兴技术,研究者侧重于开展前瞻性生命周期评价,为技术开发者提供不同设计选择对新兴技术未来性能影响的相关信息,优化新兴技术的不同设计参数来实现最小环境负担。例如, Li等通过前瞻性生命周期分析揭示了铂和镍等关键金属的终端资源回收效率改善在减轻燃料电池的生命周期环境排放方面起着重要作用<sup>[121]</sup>。除了对典型技术进行的单独的经济效益与减碳效益的评价外,一部分学者关注了技术所带来环境与经济效益之间的权衡。因此,他们采用多目标优化分析与多准则决策分析等方法将两方面的评估进行了整合,以找出在技术、经济和环境方面最有利的选项<sup>[135-137]</sup>。

随着气候变化对于系统谋划、统筹布局的迫切现实需求,许多学者开始关注到微观技术在宏观复合系统中的广泛影响,开始讨论如何在宏观社会经济系统中优化典型技术路径与工艺流程的管理和部署。一部分研究者开始使用综合评估模型(IAMs)来研究关键技

术对宏观经济系统的影响。基于能源成本和技术参数的假设来评价和比较关键技术实施方案,并与其他关键减排技术一起被纳入最佳组合中以评估社会经济系统的福利和损失的变化<sup>[138]</sup>。考虑到双碳目标的实现对经济-环境-社会-生态系统协同规划的要求,一部分研究者将关注重点放在了关键减碳技术的发展对自然资源的消耗及可能导致的二次风险上,例如其对生物多样性、土地利用和生态系统等造成的外部影响与威胁。他们利用地理信息分析、生命周期评估、物质流分析和其他模型方法,调查技术发展所需的外部资源的可用性及其对生态系统的外部影响<sup>[133, 139-141]</sup>。在研究技术与宏观系统的交互作用时,纳入综合评估模型中考虑的因素也越来越全面,逐渐从单一的成本因素转为技术传播,排放减少及有限资源等多重约束因素。例如, Wang等通过开发中国气候变化综合评估模型整合了技术创新、原材料结构调整、清洁能源利用等11项措施,分析了钢铁行业关键技术路径对能源消耗、碳减排、原材料使用和成本的综合影响,进一步提出了一套针对钢铁行业的最优化的碳中和技术路径<sup>[142]</sup>。

## 4 结论与展望

伴随着双碳目标对经济和社会系统管理提出的更高要求,研究者们充分利用管理科学工具,对复杂系统转型过程进行整体规划和布局,探讨如何以最低的社会成本和最快的速度实现碳减排目标。在此基础上,本文提出了未来碳排放核算与管理领域研究应重点关注的几个方向。

(1)重视行业差异性,统筹规划能源转型的路线图。现有的碳排放核算与管理目标设定分散在不同的行业或地区。鉴于当前社会对于关键行业率先实现双碳目标以及多行业多地区统筹布局、协同规划的迫切需求,未来的研究必须在统一框架和同一标准体系下对不同主体的碳排放量进行科学核算。同时,未来的研究应重视行业差异性,充分考虑特定地区和行业主体在资源禀赋、发展阶段和产业结构等方面的异质性,处理好长期与短期、减排与发展、局部与总体的协同关系,制定科学合理的排放管理目标。

(2)拓宽碳排放与经济增长脱钩机制的研究内涵。现有对低碳经济发展主要驱动因素的讨论主要局限在几个主要的因素上(包括人口规模、经济发展水平、能源强度和单位能源消耗碳排放等)。伴随着能源转型对社会经济系统结构优化提出的要求,未来的研究内涵应拓宽到对能源消费结构、产业结构、城市化、国

际贸易分工和颠覆性技术等越来越重要的驱动因素作用的探讨上。同时, 现有研究多通过解耦指标对各地区不同低碳转型阶段的进展进行静态描述与评估。为比较和判断不同时间和地点施加政策的实施效果、预测关键政策对未来低碳经济发展的影响, 未来的研究应更多关注碳排放与经济增长脱钩的动态机制, 以提高各个不同发展阶段所制定支持政策的有效性。

(3) 探讨本土化特征对碳减排市场机制实施效果的影响。现有文献大多数从配额总量设置与分配、碳价、交易成本、税率设定等技术指标表现来分析和推断碳减排市场机制的实施效果。然而, 碳减排市场机制在各地实施效果的深层次原因与本土化的特征息息相关。因此, 未来的研究应更多地结合各国的本土化特征(包括技术和资金支持、行业结构和能源对外依赖程度等)来探讨各项市场前期设计机制的实地实施效果。

(4) 研究混合型碳减排市场机制的运行机理与实施效果。现有研究多聚焦在对单纯的数量型机制(碳市场)或价格型机制(碳税)的前期机制设计、实施效果以及综合影响的分析, 对碳排放权交易与碳税双轨并行机制与其他混合型碳减排市场机制的研究仍旧很匮乏。出于提高未来碳减排市场机制的效能、灵活运用不同机制来降低未来碳减排市场管理的总成本、多元化政策组合互补来分散减排管理风险等目的, 混合型市场机制势必会被更普遍地纳入现有的政策体系中,

实现更广泛的减排效果。因此, 未来的研究应重视对混合型碳减排市场机制运行机理与实施效果的探讨。

(5) 考虑减碳技术路径与现有能源结构与基础设施的相容性。现有对关键技术路径与工艺流程的研究多围绕目前的热点领域, 如典型的负排放技术等, 而对减碳技术路径与现有能源结构、基础设施的相容性问题探讨不足。事实上, 一些以现有能源结构与基础设施为基础的其他新兴技术路径(例如化石能源的清洁化利用技术、多能互补技术等)往往能够在保持高经济竞争力的同时, 也能在能源转型过渡期内实现很好的碳减排效果。未来的研究应更多关注这些技术路径与集成方案的规划设计、减排潜力评价与部署策略制定, 在双碳背景下为现有化石能源主导的能源与工业系统提供充分的空间去衔接过去和开拓未来。

(6) 关注关键技术路径或工艺流程与宏观复合系统的交互作用机制。现有研究多是单方面关注关键技术自身的大规模部署能够为宏观系统带来的经济及环境效益, 而忽视了社会经济体系的福利和损失变化对技术部署带来的反馈与约束。未来应当进一步探讨这些关键的低碳转型技术路径与经济-能源-环境复合系统间的相互关联和作用机制, 探索在复合能源-经济-环境系统的区域需求、能源供给、政策和资源、市场渗透等多重约束条件反馈下得到最大收益的技术部署策略。

## 参考文献

- [1] IPCC. Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[R]. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021, Cambridge.
- [2] ARCHER D, RAHMSTORF S. The climate crisis: An introductory guide to climate change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.
- [3] IEA. CO<sub>2</sub> Emissions in 2022[R]. International Energy Agency, 2023, Paris.
- [4] ROGELJ J, DEN ELZEN M, HÖHNE N, et al. Paris Agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2°C[J]. Nature, 2016, 534(7609): 631-639.
- [5] EGGLESTON H, BUENDIA L, MIWA K, et al. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories[R]. The Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006, Japan.
- [6] SINGH P, KANSAL A, CARLIELL-MARQUET C. Energy and carbon footprints of sewage treatment methods[J]. Journal of Environmental Management, 2016, 165: 22-30.
- [7] CHEN Y, ZHI G, FENG Y, et al. Measurements of black and organic carbon emission factors for household coal combustion in China: Implication for emission reduction[J]. Environmental Science & Technology, 2009, 43(24): 9495-9500.
- [8] ZHENG X, WU Y, JIANG J, et al. Characteristics of on-road diesel vehicles: Black carbon emissions in Chinese cities based on portable emissions measurement[J]. Environmental Science & Technology, 2015, 49(22): 13492-13500.
- [9] WRI, WBCSD. The Greenhouse Gas Protocol: A corporate accounting and reporting standard[R]. World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development, 2004, Switzerland/Washington.
- [10] HERTWICH E G, PETERS G P. Carbon footprint of nations: A global, trade-linked analysis[J]. Environmental science & technology, 2009, 43(16): 6414-6420.
- [11] WIEDMANN T, MINX J. A definition of 'carbon footprint'[J]. Ecological economics research trends, 2008, 1(2008): 1-11.



- [12] European Commission. EDGAR – Emissions Database for Global Atmospheric Research[Z]. <https://edgar.jrc.ec.europa.eu/>.
- [13] IEA. International energy agency[Z]. <https://www.iea.org/>.
- [14] EIA. U. S. Energy information administration[Z]. <https://www.eia.gov/>.
- [15] World Bank. The world bank[Z]. <https://data.worldbank.org/>.
- [16] UNFCCC. United Nations framework convention on climate change[Z]. <https://unfccc.int/>.
- [17] WRI. World resources institute[Z]. <https://datasets.wri.org/>.
- [18] UNFCCC. Review of the implementation of commitments and of other provisions of the convention: UNFCCC guidelines on reporting and review. UNFCCC guidelines on reporting and review conference of the parties: Fifth session, Bonn, 25 October–5 November 1999[R]. United Nations Framework Convention on Climate Change, 2000, Bonn.
- [19] European Commission. Monitoring, reporting and verification of EU ETS emissions[R]. Brussels, 2019.
- [20] 国家发改委. 省级温室气体清单编制指南(试行)[R]. 北京, 2011. [NDRC. Provincial greenhouse gas inventory compilation guidelines (trial) [R]. Beijing, 2011.]
- [21] UNFCCC, CDM. CDM methodology booklet[R]. United Nations Framework Convention on Climate Change, Bonn, Germany, 2017.
- [22] ISO I. ISO 14064-2: Greenhouse gases—Part 2: Specification with guidance at the project level for quantification, monitoring and reporting of greenhouse gas emission reductions or removal enhancements[S]. Geneva, Switzerland, 2019.
- [23] 生态环境部. 企业温室气体排放报告核查指南(试行)[R]. 北京, 2011. [MEPC. Guidelines for verification of corporate greenhouse gas emission reports (trial) [R]. Beijing, 2011.]
- [24] HELLWEG S, BENETTO E, HUIJBREGTS M A, et al. Life-cycle assessment to guide solutions for the triple planetary crisis[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2023: 1–16.
- [25] HERTWICH E G, GIBON T, BOUMAN E A, et al. Integrated life-cycle assessment of electricity-supply scenarios confirms global environmental benefit of low-carbon technologies[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2015, 112(20): 6277–6282.
- [26] DAVIS S J, CALDEIRA K. Consumption-based accounting of CO<sub>2</sub> emissions[J]. *Proceedings of the national academy of sciences*, 2010, 107(12): 5687–5692.
- [27] FENG T T, YANG Y S, XIE S Y, et al. Economic drivers of greenhouse gas emissions in China[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 78: 996–1006.
- [28] ISO T. ISO/T 14067. Carbon footprint of products requirements and guidelines for quantification and communication[S]. Geneva, Switzerland, 2013.
- [29] WRI, WBCSD. The greenhouse gas protocol: Product life cycle accounting and reporting standard[R]. World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development, Switzerland/Washington, 2011.
- [30] BSI. PAS 2050—Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services[Z]. London; British Standards Institution, 2008.
- [31] ISO. ISO 14064 - 1: 2006—Greenhouse gases—Part 1: Specification with guidance at the organization level for quantification and reporting of greenhouse gas emissions and removals[S]. Geneva, Switzerland, 2006.
- [32] ISO. ISO/TR 14069: Greenhouse gases — Quantification and reporting of greenhouse gas emissions for organizations[S]. Geneva, Switzerland, 2013.
- [33] ISO. ISO/TS 14072: Environmental management—life cycle assessment—requirements and guidelines for Organizational Life Cycle Assessment[S]. Geneva, Switzerland, 2014.
- [34] YU S, ZHENG S, LI X, et al. China can peak its energy-related carbon emissions before 2025: Evidence from industry restructuring[J]. *Energy Economics*, 2018, 73: 91–107.
- [35] CALDEIRA K, DAVIS S J. Accounting for carbon dioxide emissions: A matter of time[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2011, 108(21): 8533–8534.
- [36] ZHOU Y, SHAN Y, LIU G, et al. Emissions and low-carbon development in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area cities and their surroundings[J]. *Applied energy*, 2018, 228: 1683–1692.
- [37] CHEN G, SHAN Y, HU Y, et al. Review on city-level carbon accounting[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53(10): 5545–5558.
- [38] YANG L, LIN B. Carbon dioxide-emission in China's power industry: Evidence and policy implications[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 60: 258–267.
- [39] HAO H, GENG Y, LI W, et al. Energy consumption and GHG emissions from China's freight transport sector: Scenarios through 2050[J]. *Energy Policy*, 2015, 85: 94–101.
- [40] LIPPIATT N, LING T C, PAN S Y. Towards carbon-neutral construction materials: Carbonation of cement-based materials and the future perspective[J]. *Journal of Building Engineering*, 2020, 28: 101062.
- [41] GABRIELLI P, GAZZANI M, MAZZOTTI M. The role of carbon capture and utilization, carbon capture and storage, and biomass to

- enable a net-zero-CO<sub>2</sub> emissions chemical industry[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2020, 59(15): 7033–7045.
- [42] YAN Y, ZHANG H, LONG Y, et al. A factor-based bottom-up approach for the long-term electricity consumption estimation in the Japanese residential sector[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 270: 110750.
- [43] WANG Q, SU M. Drivers of decoupling economic growth from carbon emission – an empirical analysis of 192 countries using decoupling model and decomposition method[J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2020, 81: 106356.
- [44] RUFFING K. Indicators to measure decoupling of environmental pressure from economic growth[J]. *Sustainability indicators: A scientific assessment*, 2007, 67: 211.
- [45] TAPIO P. Towards a theory of decoupling: degrees of decoupling in the EU and the case of road traffic in Finland between 1970 and 2001[J]. *Transport policy*, 2005, 12(2): 137–151.
- [46] DE FREITAS L C, KANEKO S. Decomposing the decoupling of CO<sub>2</sub> emissions and economic growth in Brazil[J]. *Ecological Economics*, 2011, 70(8): 1459–1469.
- [47] VAN CANEGHEM J, BLOCK C, VAN HOOSTE H, et al. Eco-efficiency trends of the Flemish industry: decoupling of environmental impact from economic growth[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2010, 18(14): 1349–1357.
- [48] ZHANG Y J, DA Y B. The decomposition of energy-related carbon emission and its decoupling with economic growth in China[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 41: 1255–1266.
- [49] ZHAO X, ZHANG X, LI N, et al. Decoupling economic growth from carbon dioxide emissions in China: A sectoral factor decomposition analysis[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 142: 3500–3516.
- [50] ANDREONI V, GALMARINI S. Decoupling economic growth from carbon dioxide emissions: A decomposition analysis of Italian energy consumption[J]. *Energy*, 2012, 44(1): 682–691.
- [51] KOLK A, PINKSE J. Business responses to climate change: Identifying emergent strategies[J]. *California Management Review*, 2005, 47(3): 6–20.
- [52] 祝福冬. 低碳经济时代企业碳管理探析[J]. *企业经济*, 2011, 30(07): 51–4. [ZHU F D. Analysis of corporate carbon management in the low-carbon economy era [J]. *Enterprise Economy*, 2011, 30(07): 51–54.]
- [53] WEI Y M, CHEN K Y, KANG J N, et al. Policy and management of carbon peaking and carbon neutrality: A literature review[J]. *Engineering*, 2022, 14: 52–63.
- [54] 孙振清, 何延昆, 林建衡. 低碳发展的重要保障——碳管理[J]. *环境保护*, 2011, (12): 40–1. [SUN Z Q, HE Y K, LIN J H. An important guarantee for low-carbon development – carbon management [J]. *Environmental Protection*, 2011, (12): 40–41.]
- [55] DALES J H. *Pollution, property & prices: An essay in policy-making and economics*[M]. Edward Elgar Publishing, 2002.
- [56] JIA Z, LIN B. Rethinking the choice of carbon tax and carbon trading in China[J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2020, 159: 120187.
- [57] ICAP. *Emissions Trading worldwide: ICAP status report 2021*[R]. Emissions Trading Worldwide, Berlin, 2021.
- [58] BRINK C, VOLLEBERGH H R, VAN DER WERF E. Carbon pricing in the EU: Evaluation of different EU ETS reform options[J]. *Energy Policy*, 2016, 97: 603–617.
- [59] CONG R G, WEI Y M. Experimental comparison of impact of auction format on carbon allowance market[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, 16(6): 4148–4156.
- [60] 张希良, 张达, 余润心. 中国特色全国碳市场设计理论与实践[J]. *管理世界*, 2021, 37(08): 80–95. [ZHANG X L, ZHANG D, YU R X. Design theory and practice of China’s distinctive national carbon market [J]. *Management World*, 2021, 37(08): 80–95.]
- [61] FAN J H, TODOROVA N. Dynamics of China’s carbon prices in the pilot trading phase[J]. *Applied Energy*, 2017, 208: 1452–1467.
- [62] HOLT C A, SHOBE W M. Reprint of: Price and quantity collars for stabilizing emission allowance prices: Laboratory experiments on the EU ETS market stability reserve[J]. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2016, 80: 69–86.
- [63] AN K, ZHANG S, HUANG H, et al. Socioeconomic impacts of household participation in emission trading scheme: A computable general equilibrium-based case study[J]. *Applied Energy*, 2021, 288: 116647.
- [64] 孙睿, 况丹, 常冬勤. 碳交易的“能源–经济–环境”影响及碳价合理区间测算[J]. *中国人口·资源与环境*, 2014, 07(24): 82–90. [SUN R, KUANG D, CHANG D Q. Carbon trading’s “energy-economy-environment” impacts and reasonable carbon price range estimation [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2014, 07(24): 82–90.]
- [65] 吴军, 李曼, 徐广妹, 等. 碳排放总量控制下行业间碳配额分配的博弈机制研究[J]. *北京化工大学学报(自然科学版)*, 2020, 47(06): 115–120. [WU J, LI M, XU G S, et al. Research on the game mechanism of carbon quota allocation among industries under carbon emission total control [J]. *Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science Edition)*, 2020, 47(06): 115–120.]
- [66] LEE C F, LIN S J, LEWIS C. Analysis of the impacts of combining carbon taxation and emission trading on different industry sectors[J]. *Energy Policy*, 2008, 36(2): 722–729.
- [67] CONG R G, WEI Y M. Potential impact of (CET) carbon emissions trading on China’s power sector: A perspective from different

- allowance allocation options[J]. *Energy*, 2010, 35(9): 3921–3931.
- [68] ELLERMAN A D, BUCHNER B K, CARRARO C. Allocation in the European emissions trading scheme: rights, rents and fairness[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [69] DE PERTHUIS C, TROTIGNON R. Governance of CO<sub>2</sub> markets: Lessons from the EU ETS[J]. *Energy Policy*, 2014, 75: 100–106.
- [70] EGENHOFER C. The making of the eu emissions trading scheme: Status, prospects and implications for business[J]. *European Management Journal*, 2007, 25(6): 453–463.
- [71] 宣晓伟, 张浩. 碳排放权配额分配的国际经验及启示[J]. *中国人口·资源与环境*, 2013, 23(12): 10–5. [XUAN X W, ZHANG H. International experience and enlightenment of carbon emission allowance allocation [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2013, 23(12): 10–15.]
- [72] 钱浩祺, 吴力波, 任飞州. 从“鞭打快牛”到效率驱动: 中国区域间碳排放权分配机制研究[J]. *经济研究*, 2019, 54(3): 17. [QIAN H Q, WU L B, REN F Z. From “whipping the fast ox” to efficiency-driven: research on the mechanism of carbon emission allowance allocation among Chinese regions [J]. *Economic Research*, 2019, 54(3): 17.]
- [73] 闵宁. 碳排放强度约束下中国各行业部门碳排放权及减排量配额研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017. [MIN N. Study on carbon emission allowances and emission reduction quotas for various industry sectors in China under carbon intensity constraint [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.]
- [74] HAHN R W. Market Power and transferable property rights[J]. *The Quarterly Journal of Economics*, 1984, 99(4): 753–765.
- [75] MONTGOMERY W D. Markets in licenses and efficient pollution control programs[J]. *Journal of economic theory*, 1972, 5(3): 395–418.
- [76] LIAO C N, ÖNAL H, CHEN M H. Average shadow price and equilibrium price: A case study of tradable pollution permit markets[J]. *European Journal of Operational Research*, 2009, 196(3): 1207–1213.
- [77] VAN SOEST D P, LIST J A, JEPPESEN T. Shadow prices, environmental stringency, and international competitiveness[J]. *European Economic Review*, 2006, 50(5): 1151–1167.
- [78] ALBEROLA E, CHEVALLIER J, CHÈZE B. The EU emissions trading scheme: The effects of industrial production and CO<sub>2</sub> emissions on carbon prices[J]. *Economie internationale*, 2008, (4): 93–125.
- [79] 罗智霞. 碳排放权交易定价研究综述[J]. *技术经济与管理研究*, 2014, (10): 77–81. [LUO Z X. Review of carbon emission trading pricing research [J]. *Technology Economics and Management Research*, 2014, (10): 77–81.]
- [80] RICKELS W, DUSCHA V, KELLER A, et al. The determinants of allowance prices in the European emissions trading scheme: Can we expect an efficient allowance market 2008?[R]. Kiel: Kiel Institute for the World Economy, 2007.
- [81] STAVINS R N. Transaction costs and tradeable permits[J]. *Journal of environmental economics and management*, 1995, 29(2): 133–148.
- [82] CASON T N, GANGADHARAN L. Transactions costs in tradable permit markets: an experimental study of pollution market designs[J]. *Journal of Regulatory Economics*, 2003, 23: 145–165.
- [83] 陈星星. 全球成熟碳排放权交易市场运行机制的经验启示[J]. *江汉学术*, 2022, 41(06): 24–32. [CHEN X X. Experience and enlightenment from the operation mechanism of mature global carbon emission trading markets [J]. *Jiangnan Academic*, 2022, 41(06): 24–32.]
- [84] BURNIAUX J M, MARTIN J P, NICOLETTI G, et al. GREEN a multi-sector, multi-region general equilibrium model for quantifying the costs of curbing CO<sub>2</sub> emissions[R]. Organisation for Economic Co-operation and Development, France, 1992.
- [85] ZHANG C, WANG Q, SHI D, et al. Scenario-based potential effects of carbon trading in China: An integrated approach[J]. *Applied Energy*, 2016, 182: 177–190.
- [86] GOTTINGER H W. Greenhouse gas economics and computable general equilibrium[J]. *Journal of policy modeling*, 1998, 20(5): 537–580.
- [87] 张健, 廖胡, 梁钦锋, 等. 碳税与碳排放权交易对中国各行业的影响[J]. *现代化工*, 2009, 29(06): 77–82. [ZHANG J, LIAO H, LIANG Q F, et al. Carbon tax and carbon emission trading’s impact on various industries in China [J]. *Modern Chemical Industry*, 2009, 29(06): 77–82.]
- [88] ANGER N, OBERNDORFER U. Firm performance and employment in the EU emissions trading scheme: An empirical assessment for Germany[J]. *Energy policy*, 2008, 36(1): 12–22.
- [89] BENZ E, TRÜCK S. Modeling the price dynamics of CO<sub>2</sub> emission allowances[J]. *Energy Economics*, 2009, 31(1): 4–15.
- [90] ROGGE K S, SCHNEIDER M, HOFFMANN V H. The innovation impact of the EU emission trading system—findings of company case studies in the German power sector[J]. *Ecological Economics*, 2011, 70(3): 513–523.
- [91] BORGHESI S, CAINELLI G, MAZZANTI M. Linking emission trading to environmental innovation: Evidence from the Italian manufacturing industry[J]. *Research Policy*, 2015, 44(3): 669–683.
- [92] 李寿德, 胡越峰, 顾孟迪, 等. 基于排污权交易的环境政策对厂商污染治理技术进步的激励分析[J]. *系统管理学报*, 2010, 19(05):

- 491–6. [LI S D, HU Y F, GU M D, et al. Incentive analysis of environmental policies based on pollution rights trading on firm's pollution control technology advancement [J]. *Journal of Systems & Management*, 2010, 19(05): 491–496.]
- [93] POTERBA J M. Global warming policy: A public finance perspective[J]. *Journal of Economic Perspectives*, 1993, 7(4): 47–63.
- [94] BARANZINI A, GOLDEMBERG J, SPECK S. A future for carbon taxes[J]. *Ecological economics*, 2000, 32(3): 395–412.
- [95] CHEN Z Y, NIE P Y. Effects of carbon tax on social welfare: A case study of China[J]. *Applied energy*, 2016, 183: 1607–1615.
- [96] GOULDER L H, SCHEIN A R. Carbon taxes versus cap and trade: A critical review[J]. *Climate Change Economics*, 2013, 4(03): 1350010.
- [97] ULPH A, ULPH D. The optimal time path of a carbon tax[J]. *Oxford Economic Papers*, 1994, 46(Supplement\_1): 857–868.
- [98] CLINE W R. The economics of global warming[J]. *Energy Studies Review*, 1992, 4: 307–308.
- [99] WEI Y M, MI Z F, HUANG Z M. Climate policy modeling: An online SCI-E and SSCI based literature review[J]. *Omega*, 2015, 57: 70–84.
- [100] WIER M, BIRR-PEDERSEN K, JACOBSEN H K, et al. Are CO<sub>2</sub> taxes regressive? Evidence from the Danish experience[J]. *Ecological economics*, 2005, 52(2): 239–251.
- [101] KHASTAR M, ASLANI A, NEJATI M. How does carbon tax affect social welfare and emission reduction in Finland?[J]. *Energy Reports*, 2020, 6: 736–744.
- [102] URI N D, BOYD R. An evaluation of the economic effects of higher energy prices in Mexico[J]. *Energy Policy*, 1997, 25(2): 205–215.
- [103] OUESLATI W. Short and long-term effects of environmental tax reform[J]. *FEEM Working Paper No 92013*, 2013.
- [104] WESSEH JR P K, LIN B, ATSAGLI P. Carbon taxes, industrial production, welfare and the environment[J]. *Energy*, 2017, 123: 305–313.
- [105] 史丹, 张成, 周波, 等. 碳排放权交易的实践效果及其影响因素: 一个文献综述 [J]. *城市与环境研究*, 2017, (04): 93–110. [SHI D, ZHANG C, ZHOU B, et al. Practical effects of carbon emissions trading and their influential factors: A literature review [J]. *Urban and Environmental Research*, 2017, (04): 93–110.]
- [106] KEOHANE N O. Cap-and-Trade, rehabilitated: Using tradable permits to control US greenhouse gases[J]. *Review of Environmental Economics and Policy*, 2009, 3(1): 42–62.
- [107] MANDELL S. Optimal mix of emissions taxes and cap-and-trade[J]. *Journal of environmental economics and management*, 2008, 56(2): 131–140.
- [108] WANG F, HARINDINTWALI J D, YUAN Z, et al. Technologies and perspectives for achieving carbon neutrality[J]. *The Innovation*, 2021, 2(4).
- [109] Ellabban O, Abu-Rub H, Blaabjerg F. Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology[J]. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2014, 39: 748–764.
- [110] ALPER K, TEKIN K, KARAGOZ S, et al. Sustainable energy and fuels from biomass: a review focusing on hydrothermal biomass processing[J]. *Sustainable Energy & Fuels*, 2020, 4(9): 4390–4414.
- [111] YANG Q, ZHOU H, BARTOCCI P, et al. Prospective contributions of biomass pyrolysis to China's 2050 carbon reduction and renewable energy goals[J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 1698.
- [112] LI S, GAO L, JIN H. Realizing low life cycle energy use and GHG emissions in coal based polygeneration with CO<sub>2</sub> capture[J]. *Applied Energy*, 2017, 194: 161–171.
- [113] JIN H, OKAMOTO T, ISHIDA M. Development of a novel chemical-looping combustion: Synthesis of a looping material with a double metal oxide of CoO-NiO[J]. *Energy & Fuels*, 1998, 12(6): 1272–1277.
- [114] KLANKERMAYER J, WESSELBAUM S, BEYDOUN K, et al. Selective catalytic synthesis using the combination of carbon dioxide and hydrogen: Catalytic chess at the interface of energy and chemistry[J]. *Angewandte Chemie-International Edition*, 2016, 55(26): 7296–7343.
- [115] LI Y, ZENG L, PANG G, et al. Direct conversion of carbon dioxide into liquid fuels and chemicals by coupling green hydrogen at high temperature[J]. *Applied Catalysis B-Environmental*, 2023: 324.
- [116] LANG X D, HE L N. Green catalytic process for cyclic carbonate synthesis from carbon dioxide under mild conditions[J]. *Chemical Record*, 2016, 16(3): 1337–1352.
- [117] ZHENG Q, JIANG L, XU Y, et al. Research progress and development suggestions of energy storage technology under background of carbon peak and carbon neutrality[J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2022, 37(4): 529–540.
- [118] DUNN B, KAMATH H, TARASCON J-M. Electrical energy storage for the grid: A battery of choices[J]. *Science*, 2011, 334(6058): 928–935.
- [119] WEBER A Z, MENCH M M, MEYERS J P, et al. Redox flow batteries: A review[J]. *Journal of Applied Electrochemistry*, 2011, 41(10): 1137–1164.
- [120] WANG M, KHAN M A, MOHSIN I, et al. Can sustainable ammonia synthesis pathways compete with fossil-fuel based Haber-Bosch

- processes?[J]. *Energy & Environmental Science*, 2021, 14(5): 2535–2548.
- [121] YANG F, JIA L, ZHOU Y, et al. Life cycle assessment shows that retrofitting coal-fired power plants with fuel cells will substantially reduce greenhouse gas emissions[J]. *One Earth*, 2022, 5(4): 392–402.
- [122] KYRIAKOU V, GARAGOUNIS I, VOURROS A, et al. An electrochemical haber-bosch process[J]. *Joule*, 2020, 4(1): 142–158.
- [123] YE M, ZHU W, XU S, et al. Coordinated development of coal chemical and petrochemical industries in China[J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2019, 34(4): 417–425.
- [124] MALEROD-FJELD H, CLARK D, YUSTE-TIRADOS I, et al. Thermo-electrochemical production of compressed hydrogen from methane with near-zero energy loss[J]. *Nature Energy*, 2017, 2(12): 923–931.
- [125] LING Y, WANG H, LIU M, et al. Sequential separation-driven solar methane reforming for H<sub>2</sub> derivation under mild conditions[J]. *Energy & Environmental Science*, 2022, 15(5): 1861–1871.
- [126] TIAN X, RICHARDSON R E, TESTER J W, et al. Retrofitting municipal wastewater treatment facilities toward a greener and circular economy by virtue of resource recovery: Techno-Economic analysis and life cycle assessment[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2020, 8(36): 13823–13837.
- [127] VLYSIDIS A, BINNS M, WEBB C, et al. A techno-economic analysis of biodiesel biorefineries: Assessment of integrated designs for the co-production of fuels and chemicals[J]. *Energy*, 2011, 36(8): 4671–4683.
- [128] HOUSE K Z, BACLIG A C, RANJAN M, et al. Economic and energetic analysis of capturing CO<sub>2</sub> from ambient air[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2011, 108(51): 20428–20433.
- [129] BROWN T R, THILAKARATNE R, BROWN R C, et al. Techno-economic analysis of biomass to transportation fuels and electricity via fast pyrolysis and hydroprocessing[J]. *Fuel*, 2013, 106: 463–469.
- [130] ZIMMERMANN A W, WUNDERLICH J, MÜLLER L, et al. Techno-economic assessment guidelines for CO<sub>2</sub> utilization[J]. *Frontiers in Energy Research*, 2020, 8: 5.
- [131] PRETEL R, SHOENER B D, FERRER J, et al. Navigating environmental, economic, and technological trade-offs in the design and operation of submerged anaerobic membrane bioreactors (AnMBRs)[J]. *Water Research*, 2015, 87: 531–541.
- [132] YANG B, WEI Y M, LIU L C, et al. Life cycle cost assessment of biomass co-firing power plants with CO<sub>2</sub> capture and storage considering multiple incentives[J]. *Energy Economics*, 2021, 96: 105173.
- [133] MELARA A J, SINGH U, COLOSI L M. Is aquatic bioenergy with carbon capture and storage a sustainable negative emission technology? Insights from a spatially explicit environmental life-cycle assessment[J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 224: 113300.
- [134] REHL T, MÜLLER J. Life cycle assessment of biogas digestate processing technologies[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2011, 56(1): 92–104.
- [135] BEAL C M, GERBER L N, SILLS D L, et al. Algal biofuel production for fuels and feed in a 100-ha facility: A comprehensive techno-economic analysis and life cycle assessment[J]. *Algal Research*, 2015, 10: 266–279.
- [136] PRETEL R, ROBLES A, RUANO M, et al. Economic and environmental sustainability of submerged anaerobic MBR-based (AnMBR-based) technology as compared to aerobic-based technologies for moderate-/high-loaded urban wastewater treatment[J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, 166: 45–54.
- [137] PARRA D, ZHANG X, BAUER C, et al. An integrated techno-economic and life cycle environmental assessment of power-to-gas systems[J]. *Applied Energy*, 2017, 193: 440–454.
- [138] FAJARDY M, MAC DOWELL N. Can BECCS deliver sustainable and resource efficient negative emissions?[J]. *Energy & Environmental Science*, 2017, 10(6): 1389–1426.
- [139] LI J, PENG K, WANG P, et al. Critical rare-earth elements mismatch global wind-power ambitions[J]. *One Earth*, 2020, 3(1): 116–125.
- [140] MISKIN C K, LI Y, PERNA A, et al. Sustainable co-production of food and solar power to relax land-use constraints[J]. *Nature Sustainability*, 2019, 2(10): 972–980.
- [141] LENNON A, LUNARDI M, HALLAM B, et al. The aluminium demand risk of terawatt photovoltaics for net zero emissions by 2050[J]. *Nature Sustainability*, 2022, 5(4): 357–363.
- [142] WANG X, YU B, AN R, et al. An integrated analysis of China's iron and steel industry towards carbon neutrality[J]. *Applied Energy*, 2022, 322: 119453.