



基于演化博弈模型的跨产业联盟减碳优化路径与策略研究

张炳佳^{1,2}, 宋晓华^{1,2*}

1. 华北电力大学 经济与管理学院, 北京 102206;

2. 新能源电力与低碳发展研究北京市重点实验室 (华北电力大学), 北京 102206

摘要: 跨产业联盟不仅是破解“高碳锁定”难题的必然选择, 更是激活产业内生发展动力、重塑低碳竞争优势的策略优化路径, 对完善产业上下游生态网链建设与优化减碳路径具有非常积极的促进作用。因此, 本文以煤炭、发电、钢铁产业为研究对象, 通过分析其跨产业联盟的减碳作用机理, 构建联盟减碳动态 Stackelberg 博弈模型, 引入联盟运行程度、减碳技术投入、产业 CCER 参与度等影响变量, 对联盟减碳效果进行量化分析, 并就其减碳优化路径提出科学合理的策略建议。结果表明, 煤炭-发电-钢铁产业联盟减碳的持续增效, 依赖于组织者、投资者与各运营商的动态协同和相互合作, 通过构建高效产业联盟, 实现多主体协同, 完善系统化机制设计, 能够有效推动产业低碳转型。研究旨在通过跨产业联盟在减碳技术协同、资源循环利用与政策联动等方面的决策行动, 推动构建近零排放的跨产业生态圈, 为全球气候治理贡献“中国方案”。

关键词: “双碳”目标; 演化博弈; 跨产业联盟; 减碳路径; 策略选择

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1674-4969(2025)06-0718-16

引言

随着全球气候治理进程的加速推进, 国际社会对减碳合作的共识不断深化。与此同时, 中国“双碳”目标的实施, 也为全球低碳转型注入了强劲动力。煤

炭、发电、钢铁三大产业作为我国工业体系的重要组成部分, 其高能耗、高排放的产业特征, 已成为制约高质量可持续发展的突出因素。据国家发展和改革委员会数据显示: 2023 年钢铁行业碳排放量占全国总排放量的 15% 以上, 燃煤发电贡献了电力行业约

收稿日期: 2025-06-10; **修回日期:** 2025-07-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目: 新配额制下可再生能源电力多尺度耦合交易体系及协同优化机制研究 (72074074)

作者简介: 张炳佳 (1991—), 男, 博士研究生, 研究方向为能源减碳管理。E-mail: ZCX0079sina@163.com

*宋晓华 (1971—), 女, 教授, 研究方向为能源经济管理。E-mail: sxh@ncepu.edu.cn (通讯作者)

引用格式: 张炳佳, 宋晓华. 基于演化博弈模型的跨产业联盟减碳优化路径与策略研究[J]. 工程研究——跨学科视野中的工程, 2025, 17(6): 718-733. DOI: 10.3724/j.issn.1674-4969.20250084. CSTR: 32282.14.JES.20250084

ZHANG B J, SONG X H. Research on Optimization Path and Strategy of Cross Industry Alliance Carbon Reduction Based on Evolutionary Game Model[J]. Journal of Engineering Studies, 2025, 17(6): 718-733. DOI: 10.3724/j.issn.1674-4969.20250084. CSTR: 32282.14.JES.20250084

60%的碳排放, 煤炭开采与洗选过程中的甲烷逸散则进一步加剧了温室效应^[1-3]。

在此背景下, 传统“单点突破”式减碳策略已难以适配产业系统更高层次的减排需求。加之产业间存在错综复杂的碳减排关联, 能源结构、产业结构、工艺流程、技术水平等方面的异质性, 使得不同产业面临的减碳压力与潜力差异显著, 故其减碳优化路径研究已成为典型的环境不确定性复杂博弈问题。研究跨产业联盟协同发展对碳排放的作用机制与影响方向, 对于及时调整国家工业战略布局、协同地方多主体合作、构建新型减碳优化路径、推动环境绿色可持续发展具有重要意义。目前, 关于产业联盟减碳路径的研究, 主要可归纳为以下3个方面^[4-7]。

在产业联盟减碳的概念框架、边界、社会因素等理论问题研究方面: 曹贤忠等^[8]基于上海市产业联盟数据和发明专利授权数据, 运用社会网络分析方法刻画了上海产业联盟创新网络时空演化特征, 并通过双重差分模型探讨了产业联盟创新网络的创新效应。李冰等^[9]采用三方演化博弈方法, 研究“链长”“链主”和其他盟员三方互动下集成电路产业联盟创新行为的稳定性发展规律, 并借助数值仿真分析论证了模型的有效性。Zhang等^[10]提出了一种多核价值网异常自适应调整(MVNEAA)模型, 重点考量了产业联盟内多任务并行场景下跨节点边界的异常调整机制。

在产业联盟减碳效果的量化研究方面: Zhang等^[11]采用分段确定性动态模型来刻画U-I联盟GTI活动中的信任关系和GTI水平, 考察了产学研联盟中信任危机对绿色创新的损害过程, 包括瞬时冲击、对GTI水平的间接影响以及最终对绿色创新盈利能力的侵蚀。贺舒琪等^[12]基于中国工商企业注册数据库和CEADs碳排放数据库, 实证分析了中国区域产业联盟动态演变产生的碳排放效应。Zhao等^[13]结合社会网络分析方法和负二项回归模型, 对中国新能源产业联盟绿色可持续发展创新进行了量化测度。

在产业联盟减碳效果的实现路径研究方面: 武建龙等^[14]选取农业装备产业联盟、闪联产业联盟和TD产业联盟开展多案例研究, 探究了不同升级情境下产业联盟创新生态系统的升级路径。董明等^[15]依照降碳潜力核算方法, 推演了某有色金属联盟企业未来10年在能源结

构调整、产业转型升级、工艺节能挖潜、电气化水平提升和资源综合利用等节能降碳路径下的减碳趋势。

通过对已有文献的分析梳理可以发现, 当下针对多产业、跨产业联盟的形成模式, 以及各参与主体决策行为对碳排放效果的影响与量化等方面的研究, 相对较少。此外, 关于联盟各参与主体有限理性的考量源于在经典博弈理论中, 参与者通常被假设为具备完全理性, 能够完全预测并应对所有可能的情况。然而, 在实际情形中, 这种完全理性状态是难以实现的。减碳关联因素的不确定性、主体认知能力的异质性、时间成本限制等诸多因素, 均会导致信息不完全, 使得参与者无法在完全理性假设下全面分析各类策略的利弊, 难以作出最优决策, 仅能依据有限信息作出相对合理的判断。在有限理性条件下, 联盟参与者可能需要在不完全了解对手策略的情况下作出反应, 或在不确定环境中持续调整自身策略。因此, 对该条件下博弈决策行为的分析, 不仅能够模拟参与者在面对不确定性和信息限制时的决策过程, 而且更有助于揭示博弈过程和结果的影响机制^[16-17]。

鉴于此, 本文以煤炭、发电、钢铁产业为研究对象, 聚焦其跨产业联盟协同减碳问题, 在充分考虑联盟各参与主体有限理性的前提下, 构建基于跨产业联盟的Stackelberg演化博弈模型, 建立跨产业多主体协同减碳联盟, 通过物质-能量-信息流的深度耦合, 实现联盟内各产业全链条减碳, 并引入联盟运行程度、减碳技术投入、产业中国核证自愿减排量(CCER)参与度等影响变量, 进一步量化联盟减碳效果, 从而为提出科学合理的跨产业联盟减碳优化路径策略建议奠定基础。

1 跨产业联盟减碳作用机理

1.1 产业联盟各参与主体相互作用

煤炭、发电、钢铁各产业间存在着物质循环、能量流动、信息共享以及政策协同等多维度的协同属性, 结合煤炭-发电-钢铁产业联盟的不同构成维度, 可在复杂协同网络中通过多维度物质-能量-信息耦合机制, 构建非线性联盟共生系统, 进而梳理减碳联盟中各参与主体之间的关系。如图1所示。

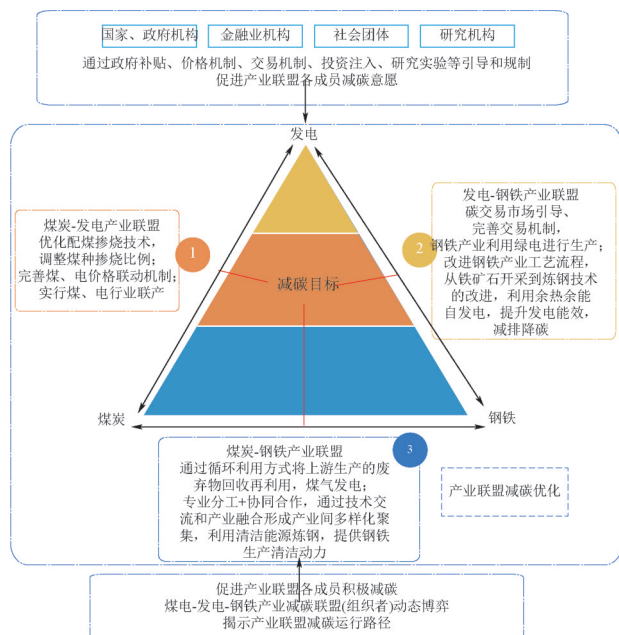


图1 煤炭-发电-钢铁产业联盟减碳作用机理

Figure 1 Carbon reduction mechanism of coal-power-steel industry alliance

通过图1可以将煤炭-发电-钢铁产业减碳联盟中各产业参与主体所构建的复杂物质流-能量流-信息流耦合协同网络互动逻辑解构为以下4个层级：一是资源供给与能源转换的纵向协同联盟，主要体现为煤炭、发电、钢铁产业之间的相互作用；二是各产业生产副产品、废弃物循环与余热共享的横向耦合协同联盟，主要体现为煤炭、发电、钢铁产业副产品及废弃物间的相互作用；三是数据驱动的各参与主体智能协同联盟，主要体现为煤炭、发电、钢铁产业与各参与主体间的数据作用；四是政策与市场作用协同联盟，主要体现为煤炭、发电、钢铁产业与市场组织主体、政策制定主体之间的相互作用^[18-19]。

总体而言，基于煤炭-发电-钢铁产业构建的复杂协同网络减碳联盟，通过技术-经济-制度间的深度嵌套，将离散的产业单元转化为有机的减碳共同体，其核心价值在于破解了“保供”与“减碳”的二元对立，为煤炭、发电、钢铁等高碳产业集群的低碳转型提供了可复制、可扩展的系统性解决方案。

1.2 产业联盟驱动模式与治理主体

从煤炭-发电-钢铁产业联盟的整个驱动模式来

看，其初期形成多依赖政府层面的主导与规划，随后随着市场参与调节的不断深入与产业间融合交叉的持续推进，逐步向各产业依靠市场作用自发形成协同联盟转变，主要分为顶层政策主导规划模式、产业间自组织模式和市场促进模式3大类^[20]。这三种产业联盟驱动模式各具优缺点，它们在产业协同联盟复杂网络的形成规律、市场-政府-产业间复杂作用关系等方面产生的影响存在显著差异，所以根据具体情况选择合适的产业联盟驱动模式就显得非常重要，而这一点在以往的研究中鲜少涉及，成为本文构建产业联盟博弈模型与分析减碳优化路径时需要重点考虑的因素。

从煤炭-发电-钢铁产业联盟的治理主体视角来看，当前针对工业领域二氧化碳以及相关副废物的治理，普遍遵循“谁排放谁治理”的基本原则。然而，多数研究表明，该原则的长期应用不一定会实现联盟内各产业间的社会经济效益或社会福利的最大化^[21]。产业联盟的经济效率与社会福利仍存在帕累托改进的可能性，但将该治理模式融入产业联盟减碳路径实现过程的研究却少有。综上，本文将治理主体作为产业联盟博弈模型构建与减碳优化路径分析的另一重要因素，结合联盟中煤炭、发电、钢铁各产业的具体生产情况，在考虑联盟各参与主体经济效益最大化的基础条件下，尽可能选择减碳治理成本相对较低的一方。

2 跨产业联盟博弈模型构建

2.1 产业联盟主体界定

产业减碳联盟主体界定的完备性直接关系到模型的解释力，其界定需满足博弈论中参与人独立性、策略完备性及函数可测性3大公理要求，以此避免因角色重叠而产生多重均衡困境。故本文将产业联盟主体界定为以下3部分，如图2所示。

联盟组织者作为煤炭-发电-钢铁产业联盟的发起方，其利益诉求主要包括追求经济利益最大化、推动产业减碳联盟商业化与规模化运营、提升社会效益与环境效益3方面。为提高联盟运行效率，组织者们会筛选优质的煤炭、发电、钢铁产业运营商与机构投资者加入联盟，为其提供必要的技术及资金支持，并促进联盟成员

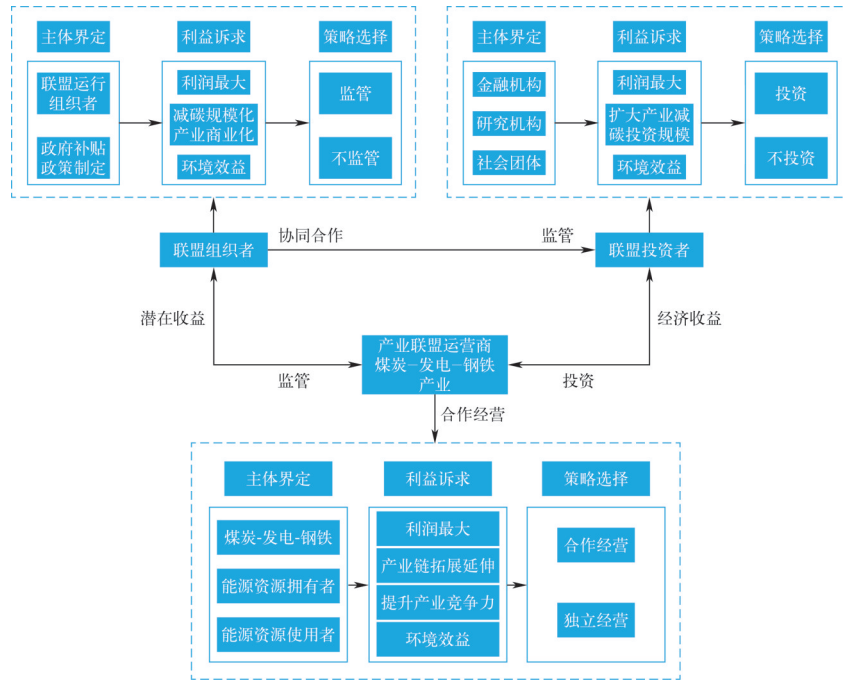


图2 产业联盟参与主体合作概念框架

Figure 2 Conceptual framework for cooperation among industry alliance participants

间的沟通协作,其策略选择为[监管,不监管]。

机构投资者以金融机构、企业、社会团体等为代表主体,虽共同以经济利益最大化为目标,但不同类型投资者的利益诉求存在差异。如,基础设施投资银行在减碳技术项目中更注重项目规模与环境效益^[22],而商业银行则更倾向于扩大投资领域,同时关注减碳技术项目经济效益,其策略选择为[投资,不投资]。

产业运营商既是能源资源的拥有者,也是能源资源的使用者。业务横跨煤炭、发电、钢铁等多个产业领域。其利益诉求表现在延伸产业链以增加经济效益、学习减碳及碳捕集技术、提升产业减碳能力以及自身竞争力3个方面。产业运营商可充分借助联盟提供的减碳技术、资金等优势,有效提高减碳及碳捕集效率,增强产业融资能力,扩展产品销售渠道,从而以最低成本获取最大收益,其策略选择为[合作,不合作]。

2.2 基本假设与参数设置

为得出相对合理的研究结论,确保产业减碳联盟的顺利建设与运营,本文基于对联盟内各参与主体的分析,对复杂博弈模型进行简单化处理,提出以下前提

假设。

假设1:减碳联盟内各参与主体在有合作意向的基础上制定博弈策略,且任意地域范围内包含了有且仅有1个政府组织者,以及多个同类型、产品无差异化且采用相同生产工艺技术的煤炭、发电、钢铁产业运营商^[23]。

假设2:在减碳联盟的推动下,政府会与联盟组织者合作,为煤炭、发电、钢铁产业运营商提供政策补贴(B_i),以鼓励产业参与减碳项目,从而扩大产业联盟的减碳规模。这类补贴既包括联盟内各产业运营商主动参与减碳、加大技术投入以淘汰落后产能、开展产业链上下游协作、进行产能重组等重大活动的直接补贴,也涵盖产业联盟协同减碳所产生的间接收益。其构成政府补贴、产业运营商淘汰重组以及总产量之间的函数关系,即 $B_i = F_i E_i$,其中, F_i 为政策产生的平均补贴率; E_i 为产业运营商的淘汰重组概率^[24-25]。

假设3:联盟组织者在监管煤炭、发电、钢铁产业运营商促成合作的过程中会产生潜在收益。这是由于组织者在监管时会积极沟通、协调各主体共同参与减碳项目,确保各参与主体的合法权益,进而吸引更多

多成员加入联盟, 由此带来更高的收益。

假设4: 联盟组织者的监管行为也会为煤炭、发电、钢铁产业运营商带来潜在收益。组织者选择监管策略时, 会采取接受投诉、定期公布存在重大损失或其他减碳失信行为的产业运营商名单等举措。这会导致失信名单上的产业运营商丧失商业机会; 反之, 会获得更多客户, 从而产生潜在收益。

假设5: 多方利益相关者均为有限理性参与主体, 彼此间进行非对称博弈, 且各主体均有两种策略可供选择。联盟参与主体选择策略时均存在一定的概率, 具体设定如下: 联盟组织者选择监管策略的概率设置为 X , 则不监管运营商概率为 $1-X$; 机构投资者选择投资的概率为 Y , 则不投资的概率为 $1-Y$; 煤炭、发电、钢铁产业运营商选择合作经营的概率为 Z , 则不合作(即独立经营)的概率为 $1-Z$ 。其中, 合作经营指运营商接受多方投资并与其他运营商开展合作, 独立经营则指产业运营商独立进行项目的投资与管理。

基于上述假设, 产业联盟博弈模型的参数具体如表1所示:

2.3 演化博弈模型构建

首先, 在产业联盟博弈模型上述假设的基础上,

构建各参与主体的博弈收益矩阵。该矩阵中, 从上至下依次对应联盟组织者、机构投资者、煤炭、发电、钢铁各产业运营商在不同策略选择下的收益函数。以策略组合(联盟组织者监管, 机构投资者投资, 煤炭、发电、钢铁各产业运营商合作经营)为例: 联盟组织者的收益函数为 $P_2(I_{AO}-C_{AO})$; 机构投资者的收益函数为 $(R_{IC}-C_{RI})I_X$; 煤炭、发电、钢铁各产业运营商的收益函数为 $[(R_{CRB}+I_{Ci}+C_{RI}I_X)-(C_i+C_{Di}+E_iS+R_{IC}I_X)+(F_iC_{tech}E_i)]P_1$ 。各参与主体其余策略组合收益函数如表2所示:

其次, 设定 E_{mn} 为煤炭-发电-钢铁产业联盟内第 m 参与者采取策略 n 时的期望收益。其中 $m=A, B, C$, 分别对应联盟组织者、机构投资者及各产业运营商; $n=1, 2$, 分别对应联盟组织者的监管与不监管策略、机构投资者的投资与不投资策略、煤炭、发电、钢铁各产业运营商的合作经营与独立经营策略。

由此, 联盟组织者选择对成员进行监管、不监管的期望收益及平均收益分别如式(1)所示:

$$\begin{aligned} E_{A1} &= YZ(I_{AO}-C_{AO})P_2 + Y(1-Z)(I_{AO}-C_{AO}) + \\ &\quad (1-Y)Z(I_{AO}-C_{AO})P_2 + (1-Y)(1-Z)(I_{AO}-C_{AO}) = \\ &\quad (1-Z-Z \times P_2)(I_{AO}-C_{AO}) \quad (1) \\ E_{A2} &= I_{AO} \\ \therefore E_A &= XE_{A1} + (1-X)E_{A2} \end{aligned}$$

表1 产业联盟博弈模型参数设置

Table 1 Parameter setting for industry alliance game model

参与主体	参数	参数解释
联盟组织者决策参数	C_{AO}, I_{AO}	联盟运营成本、联盟运行收益(万元)
	P_1	通过监管给运营商增加潜在收益的比例
	P_2	通过监管促成各产业合作增加潜在收益的比例
	X, Y, Z	监管概率、投资概率、合作经营概率
机构投资者决策参数	C_{RI}, R_{IC}	投资总成本、投资收益(万元)
	I_X, i	投资比例、银行利率
	N_{CRI}	不投资决策的机会成本(万元)
各产业运营商决策参数	C_{tech}	减碳技术项目投资总成本(万元)
	Q	某一区域范围内联盟产业产品生产总量(万吨)
	P, M, N	价格、市场规模、价格需求弹性
	K_i, P_{tech}	单位产品联盟减碳水平、减碳技术成熟度概率
	B_i, F_i, E_i, S	政府补贴、政府补贴率、淘汰重组概率、淘汰重组损失
	I_{Ci}, R_{CRB}	产业运营商总收入、合作减碳收益(万元)
	C_i, C_{Di}	生产总成本(万元)、合作减碳总成本(万元)

表2 产业联盟各参与主体决策行为博弈收益矩阵

Table 2 Principal game income matrix

主体决策		收益函数
监管	联盟组织者	$(I_{AO} - C_{AO})P_2$
投资	机构投资者	$(R_{IC} - C_{RI})I_X$
合作经营	产业运营商	$[(R_{CRB} + I_{Ci} + C_{RI}I_X) - (C_i + C_{Di} + E_iS + R_{IC}I_X) + F_r C_{tech} E_i]P_1$
监管	联盟组织者	$I_{AO} - C_{AO}$
投资	机构投资者	0
独立经营	产业运营商	$(I_{Ci} + C_{RI}I_X) - (C_i + E_iS + R_{IC}I_X)$
监管	联盟组织者	$(I_{AO} - C_{AO})P_2$
不投资	机构投资者	N_{CRI}
合作经营	产业运营商	$[(R_{CRB} + I_{Ci}) - (C_i + C_{Di} + E_iS) + F_r C_{tech} E_i]P_1$
监管	联盟组织者	$I_{AO} - C_{AO}$
不投资	机构投资者	N_{CRI}
独立经营	产业运营商	$(I_{Ci} + C_{RI}I_X) - (C_i + E_iS + R_{IC}I_X)$
不监管	联盟组织者	I_{AO}
投资	机构投资者	$(R_{IC} - C_{RI})I_X$
合作经营	产业运营商	$(R_{CRB} + I_{Ci} + C_{RI}I_X) - (C_i + C_{Di} + E_iS + R_{IC}I_X) + F_r C_{tech} E_i$
不监管	联盟组织者	I_{AO}
投资	机构投资者	0
独立经营	产业运营商	$(I_{Ci} + C_{RI}I_X) - (C_i + E_iS + R_{IC}I_X)$
不监管	联盟组织者	I_{AO}
不投资	机构投资者	N_{CRI}
合作经营	产业运营商	$(R_{CRB} + I_{Ci}) - (C_i + C_{Di} + E_iS) + F_r C_{tech} E_i$
不监管	联盟组织者	I_{AO}
不投资	机构投资者	N_{CRI}
独立经营	产业运营商	$(I_{Ci} + C_{RI}I_X) - (C_i + E_iS + R_{IC}I_X)$

同理, 机构投资者选择对成员进行投资、不投资的期望收益及平均收益分别如式(2)所示:

$$E_{B1} = XZ(R_{IC} - C_{RI})I_X + X(1-Z) \times 0 + (1-X)Z(R_{IC} - C_{RI})I_X + (1-X)(1-Z) \times 0 = Z(R_{IC} - C_{RI})I_X \quad (2)$$

$$E_{B2} = N_{CRI}$$

$$\therefore E_B = YE_{B1} + (1-Y)E_{B2}$$

煤炭、发电、钢铁各产业运营商选择对成员间进行合作经营、独立经营的期望收益及平均收益分别如式(3)所示:

$$E_{C1} = XY[(R_{CRB} + I_{Ci} + C_{RI}I_X) - (C_i + C_{Di} + E_iS + R_{IC}I_X) + F_r C_{tech} E_i]P_1 + X(1-Y)[(R_{CRB} + I_{Ci}) - (C_i + C_{Di} + E_iS) + F_r C_{tech} E_i]P_1 + (1-X)Y[(R_{CRB} + I_{Ci} + C_{RI}I_X) - (C_i + C_{Di} + E_iS + R_{IC}I_X) + F_r C_{tech} E_i] + (1-X)(1-Y)[(R_{CRB} + I_{Ci}) - (C_i + C_{Di} + E_iS) + F_r C_{tech} E_i] \quad (3)$$

将上式(3)化简后可以得出式(4)和式(5):

$$E_{C1} = (XP_1 - X)[(R_{CRB} + I_{Ci}) - (C_i + C_{Di} + E_iS) + F_r C_{tech} E_i] + (XYP_1 + Y - XY)[(R_{CRB} + I_{Ci} + C_{RI}I_X) - (C_i + C_{Di} + E_iS + R_{IC}I_X) + F_r C_{tech} E_i] \quad (4)$$

$$E_{C2} = XY[(I_{Ci} + C_{RI}I_X) - (C_i + C_{Di} + E_iS + R_{IC}I_X)] + X(1-Y)[(I_{Ci} + C_{RI}I_X) - (C_i + C_{Di} + E_iS + R_{IC}I_X)] + (1-X)Y[(I_{Ci} + C_{RI}I_X) - (C_i + C_{Di} + E_iS + R_{IC}I_X)] + (1-X)(1-Y)[(I_{Ci} + C_{RI}I_X) - (C_i + C_{Di} + E_iS + R_{IC}I_X)] \quad (5)$$

$$= (I_{Ci} + C_{RI}I_X) - (C_i + C_{Di} + E_iS + R_{IC}I_X)$$

$$\therefore E_C = ZE_C1 + (1-Z)E_{C2}$$

最后, 推出煤炭-发电-钢铁产业联盟中组织者、机构投资者、各产业运营商的复制动态方程, 分别如式(6)所示:

$$\begin{aligned}
F(X) &= X(1-X)[(Z-ZP_2-1)C_{AO}+(ZP_2-Z)I_{AO}] \\
F(Y) &= Y(1-Y)[Z(R_{IC}-C_{RI})I_X-N_{CRI}] \\
F(Z) &= Z(1-Z)\{(XP_1-X)[(R_{CRB}+I_{Ci})-(C_i+C_{Di}+E_iS)+ \\
&\quad F_r C_{tech} E_i]+(XYP_1+Y-XY) \\
&\quad [(R_{CRB}+I_{Ci}+C_{RI}I_X)-(C_i+C_{Di}+E_iS+R_{IC}I_X)+ \\
&\quad F_r C_{tech} E_i]-(I_{Ci}+C_{RI}I_X)- \\
&\quad (C_i+C_{Di}+E_iS+R_{IC}I_X)\}
\end{aligned} \quad (6)$$

2.4 演化博弈均衡分析

明确煤炭-发电-钢铁产业联盟动态博弈分析的研究目标,其主要内容是通过支付函数求解,获取博弈双方的纳什均衡。因此,结合上节联盟中各参与主体复制动态方程构造雅可比矩阵,令 $F(E)=0$, $E=X,Y,Z$,求解得出联盟系统的局部均衡点分别为: $E_1=(0,0,0)$, $E_2=(1,0,0)$, $E_3=(0,1,0)$, $E_4=(0,0,1)$, $E_5=(1,1,0)$, $E_6=(1,0,1)$, $E_7=(0,1,1)$, $E_8=(1,1,1)$ 。基于三个动态方程,分别对 X 、 Y 、 Z 求偏导得出三维动态的雅可比矩阵:

$$K = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{bmatrix}$$

其中, $K_{11} \sim K_{33}$ 的表达式见表3。

将求出的局部均衡点代入雅可比矩阵求解对应的矩阵行列式 $\det(J)$ 以及矩阵的迹 $\text{tr}(J)$,如表4所示。从表中求解结果可以明显看出,煤炭-发电-钢铁产业减碳联盟的运行受到了诸多因素的影响,且这些因素也同时影响着各均衡点的稳定性。具体展开来看,当均衡点中有且仅有一个要素取值为1时,除 E_3 之外的其余三点均无法获得联盟组织者提供的减碳补贴。这

说明在联盟组织者是否监管与各产业经营商是否合作均面临不确定性时,来自机构的投资就成为是否能够获得补贴收益的必要条件。

当均衡点中有且有两个要素取值为1时,除 E_6 之外的其余三点均能够获得联盟组织者提供的减碳补贴,而均衡点 E_6 恰好为机构投资者取值为0的特殊情况。这表明,在联盟组织者统一监管的背景下,只有当联盟中的各产业运营具备相互合作的意愿且展现出较高的合作经营度时,才能够获得联盟中第三方主体的投资意愿,进而使来自政府监管主体的减碳技术补贴真正发挥作用。

为进一步验证产业联盟减碳博弈模型所实现的纳什均衡,使煤炭、发电、钢铁各产业运营商的支付效用函数达到最优取值,接下来将针对2.2节假设中所述的各产业运营商在合作减碳过程中,技术投入成本、补贴率等因素间的函数关系进行更细致的分析与证明。分别提取产业联盟各运营商与组织者的支付效用函数,如式(7)所示:

$$\begin{aligned}
T_{BI} &= IC_i - C_i - C_{Di} - S_i + B_i \\
T_{BG} &= \sum_{i=1}^n (IC_i - C_i) - C_{Di} \\
C_i + C_{Di} &\leq C, \frac{C_{Di}}{C_i} \geq \omega
\end{aligned} \quad (7)$$

式(7)中,当联盟内煤炭、发电、钢铁各产业运营商在能源资源有限的前提下,投入最多的资金来维护产品的正常生产时,同时也保障了其合作减碳技术方面的资金投入。 I_{Ci} 代表各产业运营商的总收入; C_i

表3 产业联盟雅可比矩阵表达式

Table 3 Union Jacobian matrix expression

参数	表达式
K_{11}	$(1-2X)[(Z-ZP_2-1)C_{AO}+(ZP_2-Z)I_{AO}]$
K_{12}	0
K_{13}	$X(1-X)[(1-P_2)C_{AO}+(P_2-1)I_{AO}]$
K_{21}	0
K_{22}	$(1-2Y)[Z(R_{IC}-C_{RI})I_X-N_{CRI}]$
K_{23}	$Y(1-Y)[(R_{IC}-C_{RI})I_X]$
K_{31}	$Z(1-Z)\{(P_1-1)[(R_{CRB}+I_{Ci})-(C_i+C_{Di}+E_iS)+F_r C_{tech} E_i]+Y(P_1-1)[(R_{CRB}+I_{Ci}+C_{RI}I_X)-(C_i+C_{Di}+E_iS+R_{IC}I_X)+F_r C_{tech} E_i]\}$
K_{32}	$Z(1-Z)\{(XP_1-X)[(R_{CRB}+I_{Ci})-(C_i+C_{Di}+E_iS)+F_r C_{tech} E_i]+(XP_1+1-X)[(R_{CRB}+I_{Ci}+C_{RI}I_X)-(C_i+C_{Di}+E_iS+R_{IC}I_X)+F_r C_{tech} E_i]\}$
K_{33}	$(1-2Z)\{(XP_1-X)[(R_{CRB}+I_{Ci})-(C_i+C_{Di}+E_iS)+F_r C_{tech} E_i]+(XYP_1+Y-XY)[(R_{CRB}+I_{Ci}+C_{RI}I_X)-(C_i+C_{Di}+E_iS+R_{IC}I_X)+F_r C_{tech} E_i]-(I_{Ci}+C_{RI}I_X)-(C_i+E_iS+R_{IC}I_X)\}$

表4 均衡点矩阵行列式与迹求解

Table 4 Solution of equilibrium point matrix

均衡点	矩阵行列式 $\det(J)$	矩阵的迹 $\text{tr}(J)$
$E_1=(0,0,0)$	$C_{AO}N_{CRI}[(I_{Ci}+C_{RI}I_X)-(C_i+E_iS+R_{IC}I_X)]$	$-C_{AO}-N_{CRI}-[(I_{Ci}+C_{RI}I_X)-(C_i+E_iS+R_{IC}I_X)]$
$E_2=(1,0,0)$	$-C_{AO}N_{CRI}[(I_{Ci}+C_{RI}I_X)-(C_i+E_iS+R_{IC}I_X)]$	$-C_{AO}+N_{CRI}-[(I_{Ci}+C_{RI}I_X)-(C_i+E_iS+R_{IC}I_X)]$
$E_3=(0,1,0)$	$-C_{AO}N_{CRI}[(R_{CRB}+I_{Ci}+C_{RI}I_X)-(C_i+C_{Di}+E_iS+R_{IC}I_X)+F_rC_{tech}E_i] \times [(I_{Ci}+C_{RI}I_X)-(C_i+E_iS+R_{IC}I_X)]$	$-C_{AO}+N_{CRI}-[(R_{CRB}+I_{Ci}+C_{RI}I_X)-(C_i+C_{Di}+E_iS+R_{IC}I_X)+F_rC_{tech}E_i]-[(I_{Ci}+C_{RI}I_X)-(C_i+E_iS+R_{IC}I_X)]$
$E_4=(0,0,1)$	$-C_{AO}N_{CRI}[(I_{Ci}+C_{RI}I_X)-(C_i+E_iS+R_{IC}I_X)]$	$-C_{AO}+N_{CRI}+[(I_{Ci}+C_{RI}I_X)-(C_i+E_iS+R_{IC}I_X)]$
$E_5=(1,1,0)$	$C_{AO}N_{CRI}\{P_i[(R_{CRB}+I_{Ci}+C_{RI}I_X)-(C_i+C_{Di}+E_iS+R_{IC}I_X)+F_rC_{tech}E_i] \times [(I_{Ci}+C_{RI}I_X)-(C_i+E_iS+R_{IC}I_X)]\}$	$C_{AO}-N_{CRI}-\{P_i[(R_{CRB}+I_{Ci}+C_{RI}I_X)-(C_i+C_{Di}+E_iS+R_{IC}I_X)+F_rC_{tech}E_i]-[(I_{Ci}+C_{RI}I_X)-(C_i+E_iS+R_{IC}I_X)]\}$
$E_6=(1,0,1)$	$C_{AO}N_{CRI}[(I_{Ci}+C_{RI}I_X)-(C_i+E_iS+R_{IC}I_X)]$	$-C_{AO}-N_{CRI}-[(I_{Ci}+C_{RI}I_X)-(C_i+E_iS+R_{IC}I_X)]$
$E_7=(0,1,1)$	$-C_{AO}N_{CRI}[(R_{CRB}+I_{Ci}+C_{RI}I_X)-(C_i+C_{Di}+E_iS+R_{IC}I_X)+F_rC_{tech}E_i] \times [(I_{Ci}+C_{RI}I_X)-(C_i+E_iS+R_{IC}I_X)]$	$-C_{AO}+N_{CRI}-[(R_{CRB}+I_{Ci}+C_{RI}I_X)-(C_i+C_{Di}+E_iS+R_{IC}I_X)+F_rC_{tech}E_i]-[(I_{Ci}+C_{RI}I_X)-(C_i+E_iS+R_{IC}I_X)]$
$E_8=(1,1,1)$	$C_{AO}N_{CRI}\{P_i[(R_{CRB}+I_{Ci}+C_{RI}I_X)-(C_i+C_{Di}+E_iS+R_{IC}I_X)+F_rC_{tech}E_i] \times [(I_{Ci}+C_{RI}I_X)-(C_i+E_iS+R_{IC}I_X)]\}$	$C_{AO}-N_{CRI}-\{P_i[(R_{CRB}+I_{Ci}+C_{RI}I_X)-(C_i+C_{Di}+E_iS+R_{IC}I_X)+F_rC_{tech}E_i]-[(I_{Ci}+C_{RI}I_X)-(C_i+E_iS+R_{IC}I_X)]\}$

代表各产业运营商生产总成本； C_{Di} 代表联盟各产业运营商减碳总成本； S_i 代表各产业运营商淘汰重组损失； B_i 代表联盟组织者给与各产业运营商的减碳补贴； ω 代表联盟组织者规定的各产业运营商所投入的减碳成本与市场价格之比的最小值。煤炭、发电、钢铁各产业运营商的经营收益和联盟组织者的社会效益，均遵守边际收益递减规律，将该支付函数形式分别取对数并代入式(7)如下：

$$T_{BI} = \ln[P_i Q_i - (F_{Ci} + V_{Ci} Q_i) - K_i Q_i - (S - F_r) E_i] \quad (8)$$

$$T_{BG} = \sum_{i=1}^n \ln[P_i Q_i - (F_{Ci} + V_{Ci} Q_i)] - \sum_{i=1}^n \ln(K_i Q_i) \quad (9)$$

$$(F_{Ci} + V_{Ci} Q_i) + K_i Q_i \leq C, \frac{K_i Q_i}{F_{Ci} + V_{Ci} Q_i} \geq \omega$$

式(8)、式(9)中，当联盟各产业供应商生产总量 Q_i 与其在减碳中投入的技术、设备人员费用 j 存在极值时，煤炭、发电、钢铁各产业运营商的支付效用函数可达到一阶最优，进而实现产业联盟的纳什均衡。由此根据最优化一阶条件，分别对式(8)~式(9)中 Q_i 、 K_i 求一阶偏导，并分别令 $\frac{\partial T_{BI}}{\partial Q_i} = 0$ ， $\frac{\partial T_{BG}}{\partial K_i} = 0$ ，经过运算后可得式(10)~式(11)：

$$Q_i = \frac{\sum_{P_{tech} \neq i} P_i - V_{Ci}}{P_i} \quad (10)$$

$$K_i = \frac{P_i \left(\sqrt{P_{tech} (S - BT_i) E_i} - P_{tech} \right)}{\sum_{P_{tech} \neq i} P_i - V_{Ci}} \quad (11)$$

再将前文假设中 $K_i = \alpha - \beta/j$ 代入式(10)与式(11)中，得出式(12)：

$$j = \frac{\beta}{\alpha - \frac{P_i \left(\sqrt{P_{tech} (S - BT_i) E_i} - P_{tech} \right)}{\sum_{P_{tech} \neq i} P_i - V_{Ci}}} \quad (12)$$

联盟中煤炭、发电、钢铁各产业运营商在单位产品生产的合作协同减碳过程中针对技术科研设备、人员投入的成本费用，其压力与影响因素多来自因产业减碳技术更新带来的淘汰重组损失 S 、联盟组织者给予的减碳补贴 B_i ，以及各产业减碳技术成熟度 P_{tech} 。除此之外，将式(11)~式(12)代入联盟组织者支付效用函数式(9)中，再将得到带有约束条件的组织者支付效用目标式构造 Lagrange 函数，并对函数 L 中的参数 B_i 、 β 、 γ 求二阶偏导，最终可得参数 B_i 的极大值取值式(13)：

$$B_i = \frac{SE_i - (C - F_{Ci} - V_{Ci} Q_i + P_{tech})^2 / P_{tech}}{\alpha} \quad (13)$$

$$B_i = \frac{SE_i - [\omega(F_{Ci} + V_{Ci} Q_i) + P_{tech}]^2 / P_{tech}}{\alpha}$$

结果证明，当煤炭-发电-钢铁产业联盟开展合作减碳时，对主动采取合作减碳行动决策、加大技术投入的产业给予一定补贴，能有效提升其合作减碳的意愿。但该补贴率并非越高越好。盲目提高补贴率虽会吸引更多企业加入联盟参与合作减碳，但会导致各产业运营商实际得到的平均补贴量大幅下降，长此以

往, 将削弱产业运营商参与联盟合作减碳的意愿, 进而降低联盟的减碳效果。

综上, 联盟中煤炭、发电、钢铁各产业运营商开展协同合作减碳, 极大地提升了三大产业自身对联盟协同合作减碳的重视程度。与此同时, 联盟的运行确实对产业碳排放产生了重要且显著的影响。基于此, 煤炭-发电-钢铁产业依托联盟实现减碳的优化路径, 需要各级政府、各产业及企业之间共同协作推进。

3 跨产业联盟运行对减碳效果的影响分析

3.1 基于改进的STIRPAT模型构建

本文以STIRPAT经典模型框架为基础, 将以煤炭-发电-钢铁产业联盟的碳排放作为因变量。在保留能源强度、产业结构传统影响因素的同时, 从多维度对STIRPAT模型进行改进与扩展, 引入产业联盟运行程度、减碳技术投入、产业CCER购买比重3个自变量因素, 以此充分体现联盟中各参与主体协同减碳的特征。这一改进在一定程度上完善和升级了原模型框架存在的技术响应滞后、政策传导机制不显著等问题, 并假设联盟运行程度、能源强度、产业结构、减碳技术投入、产业参与CCER碳交易等因素, 均会对产业联盟的碳排放效果产生影响。改进与拓展后的STIRPAT模型方程如式(14):

$$CE_i = \alpha + \beta_0 AOD_i + \beta_1 EI_i + \beta_2 IS_i + \beta_3 CRTI_i + \beta_4 CCER_i + \varepsilon_i \quad (14)$$

式(14)中, CE_i 代表某一区域范围内煤炭-发电-钢铁产业联盟的碳排放量; AOD_i 为产业联盟运行程度, 反映联盟组织者、机构投资者、煤炭、发电、钢铁各产业运营商等参与主体在联盟中相互配合、协同减碳的程度; EI_i 为联盟中各产业的能源消费强度, 体现产业对能源资源的利用效率; IS_i 为联盟中各产业链结构, 即各产业GDP占行业总产值的比重; $CRTI_i$ 为联盟中机构投资者与各产业运营商为协同减碳所作的技术投入, 包括减碳共同技术投资、减碳技术设备等相关资金投入; $CCER_i$ 为联盟中产业购买碳配额的比

重, 表示在中国境内实施的减碳项目, 经国家主管部门核证后所获得的减排量, 这些减排量可以在碳市场中进行交易, 用于抵销产业、企业的碳排放配额。

3.2 变量选取与数据处理

本文选取煤炭、发电、钢铁产业碳排放量(CE_i)作为模型的因变量, 统计了2010—2022年全国所有省份/自治区/直辖市煤炭、发电、钢铁产业碳排放量^①。通过收集我国官方发布的能源活动和排放因子数据, 编制了3大产业和9种能源类型的碳排放清单, 在编制过程中特别参考了中国碳核算数据库(CEADs)中针对三大产业及其各区域范围内的碳核算数据^[26-28], 并对所有统计数据均进行了规范化预处理, 如异常值的修正与剔除、统一数据单位口径等, 以最大程度保证了数据测度的准确性与可靠性。在选取的自变量中, 煤炭-发电-钢铁产业减碳联盟运行程度通过区位熵指数刻画联盟中三大产业间的协同聚集特点, 并进一步将其解构为运行质量与运行深度的部分之和。联盟运行程度越高, 说明各产业间协同集聚质量越高、深度越广, 联盟运行的显著性也就越强^[29-32]。具体选取的变量与含义见表5。

通过对所选取的面板数据进行回归统计预处理可以发现, 模型中所有自变量因素与因变量(联盟产业

表5 模型变量选取与解释

Table 5 Variable selection and interpretation

变量选取	变量解释
CE	联盟各产业碳排放量(万吨标准煤)
AOD	联盟运行程度
OQIA	联盟运行质量
ODIA	联盟运行深度
X	联盟各产业区位熵指数
E	产业就业人数(万人)
EI	联盟产业能源强度(tce/万RMB)
IS	联盟产业结构
CRTI	联盟各参与主体减碳技术投入(万RMB)
CCER	联盟各产业参与CCER交易

① 本统计数据不含港澳台地区, 另由于国家统计数据中西藏自治区三大产业相关基础数据缺失较多, 且该地区工业碳排放对全国影响较微弱, 因此也未包含在本文统计范围中。

碳排放)之间的相关性接近0.9, 调整后的多重判定系数 R^2 等于0.7866, 表明在对样本量与模型中自变量个数进行调整后, 因变量的总变异中被多个自变量共同解释的比例达到78.66%, 说明方程的拟合程度较好。同时, 标准误差为0.4215, 意味着5个自变量对因变量(联盟产业碳排放)的预测误差也较小。此外, 对面板数据的异方差性检验及序列相关性检验结果显示, 模型存在明显的异方差性, 但不存在序列相关性。变量数据的描述性统计如表6所示。

3.3 实证分析

将上述处理完成的煤炭-发电-钢铁联盟运行模型相关数据进行回归分析, 结果如表7所示。

在联盟运行程度方面, 能源煤炭与原油消费在三大产业中仍处于主导地位。这在满足国内能源需求的同时, 也带来了相应产品加工能力过剩的问题。而二氧化碳的提前释放, 对绿色可持续发展以及减碳终极

目标的实现产生了一定的负面影响。进一步将联盟运行程度影响因素分解为联盟质量与联盟深度的双重表现, 以此衡量各产业及上下游产业链之间的联系紧密度与范围。值得注意的是, 随着产业间以及上下游产业链联盟协同范围的逐步扩大, 范围内集聚的产业与企业数量就有可能增多, 这在某一时刻有可能会促进碳排放水平的增长。因此, 要真正推动多产业联盟减碳优化路径的实现, 就必须严格把控产业联盟的质量与深度, 明确各产业在联盟产业链中的角色分工, 配合适宜的区域产业联盟政策, 统筹兼顾各产业的减碳工艺流程与技术环节, 缩小联盟内产业间的发展差距与水平, 从而有效控制联盟产业的碳排放量。

在减碳技术投入方面, 其作用机理体现为多重减碳技术的经济效应。实证结果显示, 技术投入的边际减碳效益呈现先递增后递减的“倒U形”特征, 最优投资强度应控制在主营业务收入的4.5%~6.8%区间, 此时, 减碳技术的协同乘数可达到最优值, 这也验证

表6 描述性统计
Table 6 Descriptive statistics

变量名称	Average	Se	Median	Sd	Region	Max	Min	No.
lnCE	9.9394	0.1516	9.9082	0.8301	3.2237	11.215	7.991	30
AOD	1.9934	0.0467	2.0315	0.2560	1.1078	2.4031	1.2953	30
OQIA	1.7569	0.0454	1.8236	0.2489	1.0561	1.9985	0.9424	30
ODIA	0.2365	0.0133	0.2353	0.0729	0.3151	0.4064	0.0912	30
X	0.0788	0.0093	0.0354	0.0881	0.3926	0.3927	0.0001	30
E	566.58	76.53	464.15	419.17	2018.9	2085.3	66.4	30
EI	0.5683	0.0848	0.35	0.4343	1.73	1.88	0.15	30
IS	0.2127	0.0085	0.22	0.0468	0.19	0.27	0.08	30
lnCRTI	15.6958	0.1485	15.6038	0.8132	3.9512	17.074	13.122	30
CCER	0.0927	0.0066	0.1	0.0362	0.14	0.15	0.01	30

表7 模型回归结果
Table 7 Model regression results

变量名称	Coefficients	Se	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%
Intercept	0.136	1.8565	0.0732	0.9421	-3.6956	3.9677
AOD	-574.04	0.4128	-1.3905	0.0771	-1.4260	0.2779
EI	-324.95	0.2246	-1.4467	0.0608	-0.7885	0.1386
IS	760.16	2.1389	3.6280	0.0013	3.3456	12.1746
CRTI	-637.16	0.1233	-5.1643	2.74×10^{-5}	-0.3825	0.8917
CCER	-598.21	2.3182	-2.4148	0.0237	-10.3829	-0.8135

了煤炭-发电-钢铁多产业、跨产业的技术整合对联盟碳排放的抑制作用。

在各产业参与 CCER 碳交易方面, 研究发现 CCER 交易参与度与联盟碳排放呈现显著负相关, 其中市场与减碳技术的协同效应较为明显。在发电环节, CCER 交易使燃煤电厂的单位发电碳排放成本逐渐提升, 倒逼企业加速超超临界机组改造。分析数据表明: 减碳技术改造投资每增加 1 亿 RMB 时, 碳捕集系统装机容量可提升 7.3%; 在钢铁产业, 通过出售富余配额获得的收益中, 有近 1/3 被再次投入到短流程电炉炼钢工艺中, 使吨钢碳排放量从 2.1 t 降至 1.4 t; 煤炭企业则将 CCER 收益的 30% 用于煤层气回收技术升级, 促使瓦斯抽采率从 35% 提升至 58%, 每年可减少碳排放量达 120 万 t。当联盟内 CCER 交易占比超过 15% 时, 碳价信号对减碳技术革新的边际激励效应达到峰值, 此时驱动系统碳排放弹性系数下降, 这验证了市场机制与减碳技术创新耦合所产生的减碳倍增效应。

3.4 稳健性检验

在稳健性检验过程中, 将联盟运行程度变量替换为其另一种解构形式, 即产业联盟运行梯度。该新变量为联盟运行质量与运行深度(煤炭、发电、钢铁产业区位熵指数)的差值。作为联盟运行程度的另一解构形式, 运行梯度的衡量侧重点在于: 因协同减碳目标而促使联盟中产业运营商不断加入的过程, 其更多反映了产业联盟的规模程度。将 5 个变量重新进行回归分析, 得到的新回归分析结果如表 8 所示。

由于联盟运行梯度的介入, 整个产业联盟碳排放量的变化范围较之前显著下降。这主要是因为运行梯

度更多关注产业联盟减碳的规模与范围, 却未加深协同度的控制。当联盟内产业因减碳目标不断增加时, 很可能会打破原有产业之间的链式协同, 且不同产业生产工艺流程的异质性, 也会对其在联盟中的减碳角色与分工产生一定的影响, 这都有可能导致产业联盟碳排放的增加。

因此, 要确保多产业联盟减碳优化路径的顺利实现, 就必须同时严格把控产业联盟的运行质量与深度, 实现产业联盟运行程度的最大化, 而非单纯追求运行梯度升级。要明确各产业在联盟产业链中的角色分工, 配合适宜的区域产业联盟政策, 统筹兼顾各产业的减碳工艺流程与技术环节, 缩小联盟内产业间的发展差距与水平, 控制产业减碳联盟的最佳规模与范围, 进而最大限度地抑制联盟产业的碳排放量。此外, 其余因素对碳排放的影响也有所降低, 这进一步证明, 联盟运行程度作为影响煤炭-发电-钢铁产业联盟减碳效果的核心变量, 其质量与深度缺一不可, 必须同时发挥最大效用, 才能够对联盟减碳优化路径的实现产生积极的促进与推动作用。

4 跨产业联盟减碳优化路径策略

4.1 联盟组织者决策思路

作为煤炭-发电-钢铁产业联盟生态系统的核心治理主体, 联盟组织者需构建多维政策工具包, 通过规制、激励与信息手段的协同作用, 引导各产业形成内生性减碳动力。

第一, 发挥联盟组织者的主导作用。当组织者选择监管策略时, 能够激发各产业成员共同参与减碳项

表 8 替换变量后模型回归结果

Table 8 Regression results after variable replacement

变量名称	Coefficients	Se	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%
Intercept	0.0859	1.9736	0.0435	0.9656	-3.9873	4.1592
AOG	-426.74	0.3980	-1.0723	0.0942	-1.2481	0.3946
EI	-274.53	0.2235	-1.2281	0.1313	-0.7359	0.1868
IS	664.05	2.1628	3.0703	0.0052	2.1767	11.1043
CRTI	-621.97	0.1262	-4.9280	4.99×10^{-5}	0.3615	0.8825
CCER	-557.12	2.3539	-2.3668	0.0264	-10.4295	-0.7130

目的意愿, 推动联盟运行快速达到均衡状态。同时, 组织者在监管过程中, 既要关注单一变量对主体策略选择的影响, 也要重视联盟整体框架下多个主体、因素间的组合与互动。

第二, 完善与产业联盟建设相关的激励政策和法律法规体系。政府应与联盟协同, 针对不同主体合理制定激励政策, 提供优质的科技创新政策支持, 提升减碳共性技术的成熟度、经济性与安全性, 同时, 制定行业规范框架与技术标准体系, 为联盟的长期稳定发展提供良好的政策环境、技术支持与法律法规保障。

第三, 形成技术扩散的阶梯式补贴机制。针对不同成熟度的减碳技术设计差异化扶持方案: 对余热发电、高炉煤气回收等成熟技术, 推行“装机容量+减排绩效”双重补贴, 按设备投资额的一定比例提供一次性补助, 并依据实际碳减排量给予3~5 a的运营奖励; 对碳捕集封存(CCUS)、氢基直接还原等示范性技术, 实施“风险共担+收益共享”模式, 由组织者承担部分研发风险, 同时约定技术商业化后的专利收益按比例回馈联盟; 对微波炼钢、化学链燃烧等前瞻性技术, 设立专项孵化基金, 通过竞争性招标筛选技术路线, 优先支持具有跨产业协同潜力的创新项目。

第四, 搭建跨产业资源协同平台。构建覆盖煤炭-发电-钢铁全产业链的能源-物料耦合网络, 打通联盟产业协同路径。建立焦炉煤气多级利用体系, 开发余热余压区域共享平台, 组建产业技术联合研究机构, 聚焦减碳共同技术难题开展协同攻关; 对联盟内企业实行技术使用费减免政策, 对外部机构实施差别化授权策略, 以获取技术扩散收益。

4.2 机构投资者决策思路

机构投资者作为资本的供给方, 需重构传统投资决策范式, 将环境风险因子纳入资产定价模型, 并通过金融工具创新与投资组合优化, 实现联盟减碳效益的资本化转化。

第一, 完善煤炭-发电-钢铁产业联盟投资运行机制。在投资过程中, 要不断扩大主体范围、拓宽融资渠道; 涵盖煤炭、发电、钢铁等各高碳产业运营商、金融机构、科研机构等多个主体, 打造具备资金融通、技术培训、经验分享等多重优势的商业化合作投

资联盟, 推动投资向规模化与商业化方向发展。

第二, 采取以技术成熟度导向的分层投资策略。建立基于技术成熟度的评估体系, 对减碳技术实施分级投资管理: 对成熟技术采用资产证券化模式, 以未来碳减排收益为底层资产发行绿色债券, 并锚定优先级份额收益率; 对较成熟的示范技术设计可转换优先股架构, 允许投资者在技术商业化后按预设比例转换为项目公司股权; 对成熟度相对较低的实验室技术设立风险投资基金, 采用“母基金+直投”的混合模式分散风险, 并要求被投资企业承诺技术成果优先在联盟内转化应用。

第三, 创新应用碳金融衍生工具。开发碳收益权期货、碳配额期权等风险管理工具, 构建多维度对冲策略。针对碳价波动风险, 购买亚式障碍期权合约, 当碳价突破阈值时自动锁定收益; 针对技术替代风险, 运用交叉货币掉期工具对冲不同技术路线的汇率与利率敞口; 针对政策不确定性, 配置碳强度挂钩债券, 将票面利率与产业实际减碳进度动态关联。同时, 探索碳减排量的资产化路径, 通过区块链技术实现减排量的数字化确权与拆分交易, 为投资者提供高流动性的绿色资产配置选项。

第四, 打造环境-财务双重绩效评估机制。构建融合碳减排贡献度的投资评价指标体系, 在传统内部报酬率(IRR)、投资回报率(ROIC)等指标基础上, 新增单位投资碳减排量、技术协同乘数等环境绩效指标。对基金管理人实施“环境、社会及管治”(ESG)捆绑激励机制, 将部分业绩提成与所投项目的碳强度下降率相挂钩。同时, 建立投后管理的碳足迹追踪系统, 运用生命周期评价(LCA)方法动态监测技术应用的真实减碳效果, 对未达预期的项目启动强制技术干预条款。

4.3 产业运营商决策思路

作为联盟减碳执行的执行主体, 煤炭、发电、钢铁各运营商须突破传统生产边界, 通过技术创新、流程再造与数据赋能, 实现跨产业价值共创。

第一, 推进生产工艺流程的深度脱碳改造。煤炭产业重点实施精准开采与清洁转化: 开发地质导向钻井技术以提升煤层气采收率, 配套建设分布式液化装

置实现甲烷就地转化; 推广煤基化学品多联产工艺, 减少无效碳排放。发电产业加速能源结构转型: 对现役亚临界机组进行超超临界改造, 将供电煤耗降至较低水平; 布局储热光热电站, 通过热电联供模式替代燃煤锅炉供汽, 推动厂区供热碳强度下降。钢铁产业继续大力推进短流程变革: 扩建电弧炉产能, 试点富氢焦炉煤气喷吹工艺, 促使吨钢碳排放量显著降低。

第二, 实现能源-物料共享网络的智能化运营。搭建煤炭-发电-钢铁多产业、跨产业能源互联网平台: 构建煤气动态平衡模型, 利用强化学习算法预测各节点的煤气产耗波动, 自动生成最优输配方案; 建立余热分级利用体系, 对 $\geq 400^{\circ}\text{C}$ 的高温余热优先用于驱动蒸汽轮机发电, 中温余热($150\sim 400^{\circ}\text{C}$)用于区域供热, 低温余热($<150^{\circ}\text{C}$)接入吸收式制冷系统, 形成“温度对口、梯级利用”的能效优化模式; 开发物料循环认证系统, 对钢渣、粉煤灰等固体废弃物进行成分分析与资源化潜力评估, 自动匹配水泥、建材等下游利用场景, 使工业固废综合利用率突破95%。

第三, 形成以数据驱动为主的精细化碳管控体系。部署产业碳排放在线监测与预警平台, 集成三大核心模块: 实时监测层, 采用激光气体分析仪与物料衡算模型, 实现工序级碳排放的分级动态核算; 智能诊断层, 运用随机森林算法识别异常排放源, 自动生成设备维护与工艺优化建议; 决策支持层, 构建数字孪生系统, 模拟不同生产计划下的碳排放轨迹, 推荐

成本最优的减碳方案。同时, 建立联盟产业碳资产管理中心, 统筹参与碳市场交易、CCER项目开发与绿证认购, 通过跨市场套利策略持续提升碳资产收益。

5 结论

本文基于演化博弈模型对跨产业联盟减碳路径与策略展开研究, 通过分析跨产业联盟的减碳作用机理, 构建联盟减碳动态Stackelberg博弈模型, 引入联盟运行程度、减碳技术投入、产业中国核证自愿减排量(CCER)参与度等影响变量, 对联盟减碳效果进行量化分析, 主要得出以下结论: (1)煤炭-发电-钢铁产业联盟减碳的持续增效, 依赖于组织者、投资者与各运营商的动态协同和相互合作, 需不断完善三者间的衔接机制; (2)建立政策-资本-技术对接平台, 定期发布技术需求清单与投资指南, 以缩短创新成果转化周期; (3)构建跨主体信息共享机制, 通过数据脱敏技术与收益分成模型破除信息壁垒; (4)设立联盟协同度评价指标, 将物质循环率、能源耦合度与碳减排协同效应纳入考核体系, 并将其作为政策扶持与资本配置的重要依据。展望未来, 本文研究提出的决策框架有望推动煤炭、发电、钢铁产业实现从被动应对减碳约束到主动创造减碳效益的战略转型。这不仅为我国重工业领域的低碳转型提供了可推广、可复制的示范路径, 也为跨产业协同减碳的演化博弈理论研究贡献了新的实践视角。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 国家统计年鉴[EB/OL]. 2024-04-30. <http://www.stats.gov.cn/>.
National Bureau of statistics of the People's Republic of China. National Statistical Yearbook[EB/OL]. 2024-04-30. <http://www.stats.gov.cn/>.
- [2] 中华人民共和国国家能源局. 能源统计年鉴[EB/OL]. 2024-04-30. <http://www.nea.gov.cn/>.
National energy of the people's Republic of China. Energy statistics yearbook[EB/OL]. 2024-04-30. <http://www.nea.gov.cn/>.
- [3] CEADs. 新兴经济体二氧化碳排放报告2023[EB/OL]. [2023-05-10]. <https://www.ceads.net.cn/>.
CEADs. Emerging economies' carbon dioxide emissions Report. 2023[EB/OL]. [2023-05-10]. <https://www.ceads.net.cn/>.
- [4] 王克, 刘芳名, 尹明健, 等. 1.5 $^{\circ}\text{C}$ 温升目标下中国碳排放路径研究[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(1): 7-17.
Wang K, Liu F M, Yin M J, et al. Research on China's carbon emissions pathway under the 1.5 $^{\circ}\text{C}$ target[J]. Climate Change Research, 2021, 17(1): 7-17.
- [5] 刘俊伶, 夏侯沁蕊, 王克, 等. 中国工业部门中长期低碳发展路径研究[J]. 中国软科学, 2019(11): 31-41, 54.
Liu J L, Xiahou Q R, Wang K, et al. Study on mid- and long-term low carbon development pathway of China's industry sector[J]. China Soft Science, 2019(11): 31-41, 54.
- [6] 温宗国, 李会芳. 中国工业节能减碳潜力与路线图[J]. 财经智库, 2018, 3(6): 93-106, 143-144.
Wen Z G, Li H F. Potential and roadmap of China's industrial energy saving and carbon reduction[J]. Financial Minds, 2018, 3(6): 93-106,

- 143-144.
- [7] 张小丽, 刘俊伶, 王克, 等. 中国电力部门中长期低碳发展路径研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(4): 68-77.
Zhang X L, Liu J L, Wang K, et al. Study on medium and long-term low-carbon development pathway of China's power sector[J]. China Population, Resources and Environment, 2018, 28(4): 68-77.
 - [8] 曹贤忠, 陈波, 马聪, 等. 上海产业联盟创新网络结构时空演化特征及创新效应研究[J]. 地理研究, 2025, 44(5): 1300-1326.
Cao X Z, Chen B, Ma C, et al. Spatio-temporal evolution and innovation effect of Shanghai Industry Alliance Innovation Network[J]. Geographical Research, 2025, 44(5): 1300-1326.
 - [9] 李冰, 马翠康. "链长制"下集成电路产业联盟创新行为模式研究[J]. 技术经济与管理研究, 2024(5): 24-31.
Li B, Ma C L. Research on the innovation behavior model of integrated circuit industry alliance under "the chain length system"[J]. Journal of Technical Economics & Management, 2024(5): 24-31.
 - [10] Zhang J X, Guo B, Ding X F, et al. A self-adaptive exception adjustment approach of multi-core value nets in industry alliance[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2024, 72: 163-179.
 - [11] Zhang Q, Yi H Y. How do university-industry alliances respond to the trust crisis in green technology innovation activities[J]. Nankai Business Review International, 2024, 15(2): 269-299.
 - [12] 贺舒琪, 穆恩怡, 戴晓冕, 等. "鸟起巢中, 水出源头": 区域产业动态的碳排放效应[J]. 地理研究, 2024, 43(3): 535-557.
He S Q, Mu E Y, Dai X M, et al. Tracing the origin: Carbon emission effects of regional industrial dynamics[J]. Geographical Research, 2024, 43(3): 535-557.
 - [13] Zhao Y, Qi N N, Li L Y, et al. How do knowledge diversity and ego-network structures affect firms' sustainable innovation: Evidence from alliance innovation networks of China's new energy industries[J]. Journal of Knowledge Management, 2023, 27(1): 178-196.
 - [14] 武建龙, 鲍萌萌, 陈劲, 等. 产业联盟创新生态系统升级路径研究[J]. 科研管理, 2022, 43(9): 20-31.
Wu J L, Bao M M, Chen J, et al. The upgrading paths of the innovation ecosystem of industry alliances[J]. Science Research Management, 2022, 43(9): 20-31.
 - [15] 董明, 梁红娟. 有色金属联合企业碳排放情景分析与碳达峰路径探讨[J]. 中国矿业, 2023, 32(10): 40-46.
Dong M, Liang H J. Analysis of carbon emission scenarios and discussion on carbon peak path for non-ferrous metal joint enterprises[J]. China Mining Magazine, 2023, 32(10): 40-46.
 - [16] 杨璐赫, 刘志坚, 张连众. 匿名公共物品演化博弈中的有限理性研究[J]. 南开大学学报(自然科学版), 2024, 57(5): 80-88.
Yang L H, Liu Z J, Zhang L Z. Study on the bounded rationality in anonymous public goods game[J]. Journal of Nankai University (Natural Science), 2024, 57(5): 80-88.
 - [17] 李停. 有限维演化博弈模型的经济学应用范式探究[J]. 统计与决策, 2020, 36(20): 19-23.
Li T. Research on economic application paradigm of finite dimension evolutionary game model[J]. Statistics & Decision, 2020, 36(20): 19-23.
 - [18] 黄昱杰, 刘贵贤, 薄宇, 等. 京津冀协同推进碳达峰碳中和路径研究[J]. 中国工程科学, 2023, 25(2): 160-172.
Huang Y J, Liu G X, Bo Y, et al. Beijing-Tianjin-Hebei coordinated development toward the carbon peaking and carbon neutrality goals[J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(2): 160-172.
 - [19] 耿蕊. 京津冀区域产业协同发展的减排效应研究[D]. 沈阳: 辽宁大学, 2020.
Geng R. Study on the emission reduction effect of the coordinated development of regional industries in Beijing, Tianjin and Hebei[D]. Shenyang: Liaoning University, 2020.
 - [20] 袁省之, 唐旭, 王睿智, 等. 基于演化博弈的上下游企业产业共生形成模式选择[J]. 科技管理研究, 2020, 40(2): 141-153.
Yuan X Z, Tang X, Wang R Z, et al. The formation mode selection of industrial symbiosis between upstream and downstream enterprises based on evolutionary game[J]. Science and Technology Management Research, 2020, 40(2): 141-153.
 - [21] 范荣华. 产业链上企业协同减排收益分配机制研究[J]. 会计与经济研究, 2016, 30(2): 120-128.
Fan R H. The profit allocation mechanism of collaborative emission reduction in the industrial chains[J]. Journal of Accounting and Economics, 2016, 30(2): 120-128.
 - [22] 戈泽琦. 不同商业模式下火电企业CCUS项目投资决策研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2024.
Ge Z Q. Research on investment decision of CCUS project in thermal power enterprises under different business models[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2024.
 - [23] 朱源. 山东省石油加工产业链协同减排路径研究[D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2021.
Zhu Y. Research on the path of collaborative emission reduction of Shandong oil processing industry chain[D]. Dongying: China University of Petroleum(Huadong), 2021.
 - [24] Zhang S, Liu L L, Zhang L, et al. An optimization model for carbon capture utilization and storage supply chain: A case study in Northeastern China[J]. Applied Energy, 2018, 231: 194-206.
 - [25] Liu C. What does this have to do with the game: Further discussion on evolutionary game theory[J]. Commun, Dialectics, Nat., 2021, 43 (12): 22-32.

- [26] Xu J H, Guan Y R, Oldfield J, et al. China carbon emission accounts 2020—2021[J]. *Applied Energy*, 2024, 360: 122837.
- [27] Guan Y R, Shan Y L, Huang Q, et al. Assessment to China's recent emission pattern shifts[J]. *Earth's Future*, 2021, 9(11): e2021EF002241.
- [28] CEADs. 中国碳核算数据库[EB/OL]. [2023-05-10]. <https://www.ceads.net.cn/>.
CEADs. China carbon accounting database[EB/OL]. [2023-05-10]. <https://www.ceads.net.cn/>.
- [29] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 国家重点节能低碳技术推广目录(节能部分)[EB/OL]. [2019-11-10]. <https://www.ndrc.gov.cn/>.
The national development and Reform Commission of the people's Republic of China. National key energy saving and low carbon technology promotion directory (Energy saving part) [EB/OL]. [2019-11-10]. <https://www.ndrc.gov.cn/>.
- [30] 中华人民共和国科学技术部. 节能减排与低碳技术成果转化推广清单(第二批)[EB/OL]. [2019-11-10]. <https://www.most.gov.cn/>.
Ministry of science and technology of the people's Republic of China. List of energy conservation and emission reduction and transformation and promotion of low carbon technology achievements (The second batch) [EB/OL]. [2019-11-10]. <https://www.most.gov.cn/>.
- [31] 中华人民共和国工业和信息化部. 工业固体废物综合利用先进适用技术目录(第一批)[EB/OL]. [2019-11-10]. <https://www.miit.gov.cn/>.
Ministry of industry and information technology of the people's Republic of China. Catalogue of advanced and applicable technologies for comprehensive utilization of industrial solid waste (The first batch) [EB/OL]. [2019-11-10]. <https://www.miit.gov.cn/>.
- [32] 中华人民共和国工业和信息化部. 产业关键共性技术发展指南[EB/OL]. [2019-11-10]. <https://www.miit.gov.cn/>.
Ministry of industry and information technology of the people's Republic of China. Development Guide for key generic technologies in industry[EB/OL]. [2019-11-10]. <https://www.miit.gov.cn/>.

Research on Optimization Path and Strategy of Cross Industry Alliance Carbon Reduction Based on Evolutionary Game Model

ZHANG Bingjia^{1,2}, SONG Xiaohua^{1,2*}

1. School of economics and management, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. Beijing Key Laboratory of new energy power and low carbon development (North China Electric Power University, Beijing 102206, China

Highlights

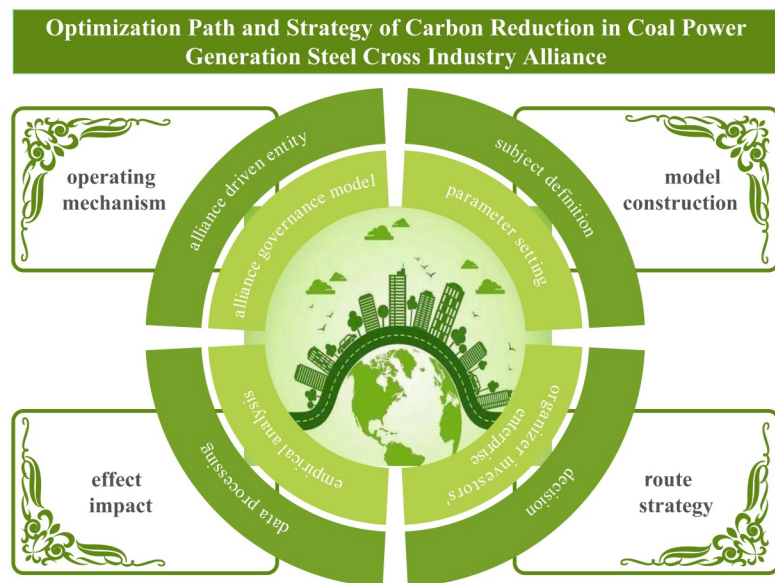
Take the Coal, Power generation and Steel industries as the objects, build a dynamic Stackelberg game model for carbon reduction in industrial alliance.

The impact variables such as alliance operation degree, carbon reduction technology investment and industrial CCER participation are introduced to further quantify the carbon reduction effect of alliance dynamic system.

Through the decision-making behavior of cross industry alliance, such as carbon reduction technology collaboration, resource circulation and policy linkage, puts forward scientific and reasonable strategic suggestions for the optimization path of dynamic system carbon reduction.

Build a cross industry ecosystem with near zero emissions and contribute to the “China plan” for Climate Governance.

Graphical Abstract



Abstract: With the continuous progress of social industrialization, excessive carbon emissions from industrial industries have

caused serious pollution problems, which has greatly affected the green and sustainable development of the environment. Among them, the coal, power generation and steel industries are the backbone of China's industrial output and "major carbon emitters". The traditional "single point breakthrough" carbon reduction strategy has been unable to meet the higher carbon reduction goals and strategic needs of the industrial system. In order to solve the above problems, the cross industry alliance formed by coal, power generation, steel and other entities is not only a strategic choice to crack the high carbon lock-in and achieve the dual carbon goal, but also a core engine to promote the transformation of the industrial system to green, intelligent and high-end.

Therefore, this paper takes the coal, power generation and steel industries as the object, analyzes the mechanism of carbon reduction in the cross industry alliance, constructs the dynamic Stackelberg game model of carbon reduction in the industrial alliance, and introduces the influencing variables such as the operation degree of the alliance, the investment in carbon reduction technology, and the participation of industrial CCER, so as to further quantify the carbon reduction effect of the alliance.

The operation of the alliance does have an important and very significant impact on industrial carbon emissions. The optimization path of carbon reduction in the coal power generation steel industry based on the industrial alliance is a process that requires the cooperation of governments at all levels, industries and enterprises. At the same time, the operation degree of the alliance, as the core variable affecting the carbon reduction effect of the coal power generation steel industry alliance, its quality and depth are indispensable, and it must play the maximum utility at the same time to produce a positive promotion and driving force for the realization of the optimal path of carbon reduction of the alliance.

Finally, the paper puts forward scientific and reasonable strategic suggestions for its carbon reduction optimization path, in order to build a near zero emission cross industry ecosystem through the decision-making behavior of cross industry alliance, such as carbon reduction technology collaboration, resource circulation and policy linkage, and contribute to the "China plan" for Climate Governance.

Keywords: double carbon target; evolutionary game; cross industry alliance; carbon reduction path; strategy selection