

·供应链与区块链·

供应链减排运作决策研究现状与发展趋势



□刘名武 林 强 王晓斐

[重庆交通大学 重庆 400074]

[摘要] **【目的/意义】** 供应链减排是世界经济领域应对全球气候变化、实现碳中和或净零排放目标的重要一环,也是满足低碳市场需求、提升供应链可持续竞争力的重要战略。在贯彻绿色发展理念并落实“双碳”目标背景下,研究供应链减排运作决策具有十分重要的现实意义。**【设计/方法】** 从政府政策强制减排、供应链企业间合作减排以及企业数字化技术赋能供应链减排三个方面梳理了现有相关文献,总结供应链外部压力(政府政策规制)、供应链伙伴合作以及新技术运用对供应链减排决策的影响。**【结论/发现】** 从供应链自主减排、数字化技术赋能以及供应链净零排放视角提出供应链减排决策的未来研究趋势。

[关键词] 供应链减排; 运作决策; 数字化赋能; 净零排放

[中图分类号] F224.32

[文献标识码] A

[DOI] 10.14071/j.1008-8105(2022)-1001

Status and Trends of Operational Decision-Making of Supply Chain Emission Reduction

LIU Ming-wu LIN Qiang WANG Xiao-fei

(Chongqing Jiaotong University Chongqing 400074 China)

Abstract [Purpose/Significance] Supply chain emission reduction is an important part of the world economy to deal with global climate change and achieve carbon neutrality or net-zero emissions. It is also an important strategy to meet the demand of low-carbon market and improve the sustainable competitiveness of supply chain. In the context of implementing green development strategy and “dual carbon policy” objectives, it is of great practical significance to study supply chain emission reduction decision-making. [Design/Methodology] This paper focuses on the existing relevant literature from three aspects of mandatory emission reduction by government policies, emission reduction by cooperation between supply chain members and emission reduction by digital technology, and summarizes the influence of external pressure (government policy regulation), internal cooperation and new technology application on supply chain emission reduction decision-making. [Conclusions/Findings] From the perspective of supply chain members’ independent emission reduction, digital technology empowerment and supply chain net-zero emissions, the trends of supply chain emission reduction-making decision is proposed.

Key words supply chain emission reduction; operational decision-making; digital empowerment; net zero emissions

[收稿日期] 2021-12-03

[基金项目] 国家社科基金后期资助项目(21FGLB052)。

[作者简介] 刘名武(1979-)男,重庆交通大学经济与管理学院教授、博士生导师;林强(1988-)男,重庆交通大学经济与管理学院博士研究生;王晓斐(1996-)女,重庆交通大学经济与管理学院硕士研究生。

引言

近年来,全球气候变化加剧、极端气候事件频发,给人类生存和发展带来的挑战日益严峻^[1]。2016年4月,联合国178个成员国签署《巴黎协定》,其核心目标是把全球气温上升控制在工业化前水平之上2℃以内,力争1.5℃以内。联合国政府间气候变化专门委员会将1.5℃的气温上升标准确定为一个关键的临界点,超过这个临界点,极端干旱、野火、洪水和粮食短缺的风险将急剧增加^[2]。但美国国家海洋和大气管理局的数据显示,2020年1月成为全球自1880年有气象记录以来的最热1月,全球气温仍在加速上升。2021年5月27日,世界气象组织官网声称,到2025年,全球平均气温比工业化前高出1.5℃的可能性约有40%。二氧化碳排放是全球气温升高的主要原因,碳排放问题已成为全球政产学研界关注的焦点。为了共同应对全球气候变化和进一步阻止气候变暖,2021年10月31日,二十国集团领导人第十六次峰会就致力于将全球平均气温上升幅度控制在1.5℃以内达成一致。世界主要国家均已实施低碳发展战略,广泛采用碳交易、碳税、碳配额等措施限制碳排放^[3]。目前,中国、美国、欧盟、英国、加拿大、印度等国家及主要经济体均宣布碳中和或净零排放目标。低碳发展引领的绿色可持续发展已成为国际共识和共同选择。2020年9月,中国在第75届联合国大会上郑重承诺“双碳”目标,即实现碳达峰、碳中和,为全球低碳发展注入强大信心和动力。2021年9月,中共中央、国务院印发《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》,明确提出“双碳”目标的总体要求、主要目标和路径。2021年7月,全国碳排放权交易市场正式运行,为推进企业减排提供市场机制,有效激励企业低碳创新发展,促进企业高质量转型和绿色经济增长^[4]。

供应链减排是世界经济领域应对全球气候变化、实现碳中和或净零排放目标的重要一环,也是满足低碳市场需求、提升供应链可持续竞争力的重要战略。企业低碳发展不仅能够减轻全球气候恶化问题,而且能够重塑企业良好社会责任形象,成为企业获取竞争优势和实现高质量发展的关键^[5-6]。例如,研究中国装备制造业发现,低碳技术创新对装备制造企业绩效有显著的正向效应^[7]。又如对438家中国制造企业进行实证研究,发现低碳技术创新显著正向影响中国制造企业绩效^[8]。碳中和

(净零排放)目标必然引起我国企业低碳发展与创新实践的深刻变化。低碳减排势必成为我国企业运作决策中不可忽视的重要因素^[9],而供应链减排自然成为企业落实低碳发展战略的重要抓手^[10]。据公开报道,不少跨国企业已开始采取供应链净零排放战略,以实际行动履行环境和社会责任。诸如日立、德莎、雀巢、保洁等跨国企业均宣称在2050年或之前实现全供应链净零排放。但是,企业减排甚至达到净零排放不仅增加供应链企业生产和运作成本,也会影响供应链组织运行模式,成为供应链践行低碳发展和实现净零排放的主要障碍。

虽然企业面临较大的减排成本压力,但也存在成功转型的市场基础和技术条件。一是供应链企业间合作有利于缓解单个企业减排成本压力,促进企业改善经营。研究发现,供应链企业间合作是企业低碳转型成功的重要因素,也是获取低碳竞争优势的关键^[11]。供应链企业间低碳运作的边际成本和碳排放权边际效益存在差异,创造了企业间低碳合作空间,有利于供应链资源优化配置,促进企业低碳实践^[12]。供应链企业通过减排合作决策,可以使整个供应链绩效得到改善且又能减少碳排放,使得企业低碳发展战略从单个企业层面转向整个供应链层面,进一步开发单个企业的自身减排潜力,从而更具有应对来自政府和利益相关者群体压力的能力,形成更具竞争力的市场能力。二是消费者逐渐增长的低碳意识和低碳偏好,有利于促进低碳产品市场需求,为企业生产低碳产品注入市场动力。产品的低碳程度将成为消费者价值感知的一部分,成为企业产品差异化竞争的一种措施,进而改变供应链企业的成本结构和盈利模式,也必将对供应链企业的生产方式、运营策略以及企业间竞争与合作策略等方面产生显著影响。三是数字化技术的发展为促进供应链企业减排提供了强大的技术支撑。近年来,包括物联网、大数据分析、云计算、人工智能、区块链等一系列新兴的数字化技术促使供应链业务流程和运作模式发生积极的变革^[13]。数字化技术在改善供应链企业经济绩效的同时,也改善了环保绩效和社会绩效^[14],尤其是在促进供应链减排方面发挥了重要作用^[15]。

学者们在上述背景下开展了低碳供应链管理问题研究。一是研究供应链管理的功能和操作流程问题,如采购、生产和计划、分销、网络设计等,通过各功能、环节的优化降低供应链总的碳排放量^[16]。二是从供应链主体间竞合博弈视角研究供应链运作决策及供应链协调机制等问题^[17]。三是从实证角度

研究低碳供应商的选择、低碳供应链管理的障碍、低碳供应链风险评估以及低碳供应链绩效评价等方面的问题^[18]。其中,低碳供应链运作决策优化与协调既是研究的热点也是未来需要深入研究的方向^[19]。现有研究成果丰硕,涉及问题广泛。但是,从供应链减排的外部压力、供应链内部合作机制以及新技术赋能等方面,现有研究缺乏系统性梳理,尤其是对供应链减排运作决策研究总结不足。因此,本文基于供应链企业间竞争博弈视角,重点关注政策干预、供应链企业合作以及数字化技术融合下的供应链企业减排运作决策问题,围绕以下三个方面进行综述分析:(1)政府政策干预如何影响供应链企业减排运作决策和企业绩效?不同政策措施对企业减排决策影响如何?(2)供应链企业间合作如何影响企业减排运作决策和企业绩效?不同的合作模式对企业减排的影响有何差异?(3)数字化技术融合对供应链企业减排运作决策有何影响?在梳理总结现有相关文献的基础上,从供应链企业自主减排、数字化赋能供应链减排以及供应链净零排放等视角提出供应链减排运作决策问题的未来研究趋势。

一、政策干预下的供应链减排决策

为促进企业减排和经济低碳发展,各国政府广泛采用碳交易、碳税、减排成本补贴或混合政策引导企业减排。

(一) 碳交易制度下的供应链减排决策

碳交易制度是现行减排政策中实施范围最广、减排效果最明显、成本效率最高的减排措施^[2]。碳交易制度下供应链减排决策与供应链优化问题受到学界的广泛关注。政府设置合理的碳排放上限能有效促进供应链企业减少碳排放量^[20]。尤其是在消费者低碳偏好较高的情景下,碳交易政策能够鼓励制造商努力减排并实现社会福利最大化^[21]。郭军华等研究指出,只有当政府制定的碳限额小于一定的边界条件时,碳交易政策才能有效促进企业碳减排^[22]。刘名武等将产品的碳排放细分为生产环节的碳排放和使用环节的碳排放,供应商分别采取生产环节低碳技术和使用环节低碳技术减少产品两个环节的排放,基于微分博弈模型研究表明,将生产和使用两个环节排放同时纳入碳交易更有利于激励生产制造企业减排^[23]。针对同时参与制造与再制造的垄断制造商,Chai等研究表明,再制造产品的低碳排放特性使制造商在碳交易政策下能够获得更好的效益^[24]。Liu等研究了碳交易制度下供应链减排模式选择问

题,指出当企业的减排成本系数较小时,企业更倾向于单一减排模式;当企业的减排成本系数较大时,企业更倾向于联合减排模式^[25]。学者们还基于不同的供应链场景研究了碳交易政策下订单型供应链的生产与减排决策问题^[26]、生鲜食品供应链的碳减排决策问题^[27]、双渠道供应链的碳减排决策问题^[28]以及闭环供应链的碳减排决策问题^[29-30]。

(二) 碳税政策下的供应链减排决策

相较于碳交易政策,碳税政策相对简单、易于管理,能够增加政府财政收入,但灵活性较差,且激励效果存在不确定性,尤其是无法解决全球碳减排问题^[31]。相关研究表明,政府征收碳税能够促进制造商选择低碳技术^[32],从而激励企业降低碳排放水平并增加社会福利^[33-34],但政府征收碳税也并非越高越好,碳税税率应该设置在一个合理范围内,才能够充分调动低碳制造商减排的积极性^[35]。熊中楷等基于制造商主导的Stackelberg博弈模型研究表明,碳税的增加能够降低清洁型制造商的单位碳排放量,但对污染型制造商起到反作用^[36]。碳税政策也对具有不同边际减排成本企业的减排激励效果具有差异性。碳税政策能够提升减排成本较低企业的减排投资积极性,但对减排成本较高企业是把双刃剑,可能抑制企业减排投资^[37]。针对供应链的不同权力结构以及制造商初始碳排放水平具有差异性的现实情景,黄帝等研究表明,无论是制造商主导供应链还是零售商主导,提高低排放制造商碳税能够促进供应链减排;提高高排放制造商碳税反而会导致供应链减排水平下降^[38]。也有学者基于其他情景研究表明,碳税政策不一定能够激励企业加大碳减排努力^[39]。

(三) 补贴政策下的供应链减排决策

政府补贴能够直接降低企业生产成本和消费者购买成本,促进生产企业加大减排投资和消费者绿色低碳消费行为。常见的政府补贴模式有补贴企业一部分减排投资成本、按单位减排量对企业进行补贴和补贴消费者。Montero指出,政府对企业碳减排进行补贴,可以激励企业加大碳减排的投入,降低产品碳排放^[40]。曹细玉等指出,为了达到最有效的碳减排效果,政府应根据供应链碳减排的效果选择不同的补贴模式并确定合适的补贴比例^[41]。贺勇等指出,当制造商自主减排时,政府补贴制造商减排研发成本比补贴单位产品减排量所产生的减排效果更好^[42]。王道平等在制造商主导且分担零售商促销努力成本情景下基于微分博弈模型研究表明,政府对制造商的补贴系数是对零售商补贴系数的两

倍,表明政府对供应链成员的补贴大小与博弈结构有关,政府补贴对供应链企业的利润分配起到了良好的调节作用^[43]。魏守道等从政府补贴消费者角度探讨了供应链企业间减排研发合作策略对制造商减排的影响^[44]。

(四) 混合政策下的供应链减排决策

鉴于许多国家采取混合政策激励企业减少碳排放,学者们充分研究了混合政策下的供应链减排决策问题,并对比分析不同政策工具激励效果的差异。针对碳税与碳交易混合政策效应问题,刁心薇等研究了混合碳政策下制造商低碳转型的技术选择问题,同时分析了低碳产品最优减排率和碳配额与碳税之间的关系,研究表明,政府可以通过增加碳配额促进低碳产品减排率的提升,但提高碳税对低碳产品减排率的影响与减排相对成本有关^[45]。Sun等研究了两个销售同质替代品的制造商竞争情景下的减排决策问题,研究表明,当制造商提高减排效率时,与碳税政策相比,碳交易政策能更有效地抑制碳排放^[46]。针对补贴与碳交易混合政策效应问题,Li等研究了碳交易制度下不同补贴政策对低碳供应链绿色决策的影响,研究表明,政府应对发展成熟的高排放产业采用绿色技术投资成本补贴的方式^[47],而对新兴产业采用基于减排量的补贴方式。李新军等研究了汽车制造企业实施低碳供应链管理的决策问题^[48]。王喜平等研究了发电商投资碳捕获与封存技术的时机问题^[49]。针对碳税与补贴混合政策效应问题,曹细玉等基于报童模型研究表明,单位碳排放的碳税越高,政府对制造商的碳减排技术创新投入补贴的比例越小^[50]。孟卫军等研究了政府向终端产品征收碳税政策下,不同补贴模式对企业合作减排决策的影响^[51]。夏西强等对比分析补贴和碳税政策对低碳供应链产品策略的影响。也有学者将碳税、碳交易与补贴政策三者进行对比研究^[52]。孟凡生等建立了政府与企业间的演化博弈模型,分析了碳税、碳排放创新技术补贴、碳交易三种环境规制工具对企业减排决策的影响^[53]。王垒等探讨了复合碳政策组合对异质双渠道供应链的减排决策的影响^[54]。

碳交易和碳税政策属于政府强制减排政策,企业在该政策下不得不进行减排投资,而补贴政策下企业可以自愿开展减排活动。除了政府强制政策以及补贴政策之外,学者们还讨论了供应链自主减排决策问题。例如,鉴于供应链自主减排决策往往受到决策者行为心理因素的影响,学者们分别研究了低碳供应链成员的公平偏好^[55]、利他偏好^[56]和损失

厌恶偏好^[57]对低碳供应链减排与定价策略的影响。郭炜恒等研究了低碳供应链合作自主减排决策问题^[58]。张维月等在供应链自主承诺一定减排量下研究了减排量分配方式和渠道权力结构对分配决策和供应链成员利润的影响^[59]。但是,相对于政府强制政策下的供应链减排决策研究,供应链自主减排决策问题仍有较宽广的研究空间。后文从信息不对称、不确定市场环境、多阶段复杂供应链网络以及供应链协调运作、网络优化等视角对供应链自主减排决策研究进行了展望。

二、供应链企业间合作减排决策

供应链上下游企业间合作能够优化企业减排决策,有效改善企业绩效。供应链上下游企业间合作减排主要有纵向合作减排模式和横向合作减排模式。

(一) 供应链纵向合作减排决策

常见的供应链企业间纵向合作模式包括成本分担、收益共享、交叉持股以及联合决策等。供应链企业间减排成本分担或收益共享是两种比较常见的合作减排模式,特别是下游零售商分担制造商减排成本和共享收益行为能够显著影响制造商减排决策、供应链定价决策及企业绩效^[60]。针对供应链上下游企业均投资减排情形,Wang等在碳交易制度下对比分析了单向成本分担契约与双向成本分担契约对低碳供应链减排决策及绩效的影响^[61]。Yang等在碳税政策下探讨了收益共享契约和企业先发优势对制造商减排和企业绩效的影响^[62]。刘振等在碳交易制度下,发现当产品销售价格达到一定条件时,收益共享契约能够实现最大程度的减排效果^[63]。Li等在制造商主导情形下研究表明,零售商提供的成本分担和收益共享契约能够有效激励制造商减排^[64]。Liu等从不同权力结构视角进一步拓展了成本分担和收益共享契约下供应链减排决策问题,发现在零售商主导下,成本分担契约下的产品绿色度高于收益共享契约;而在制造商主导下,收益共享契约的产品绿色度高于成本分担契约^[65]。Yang等在碳税政策下以及王兴棠在补贴政策下进一步研究了成本分担和收益共享契约对制造商减排和企业盈利的差异化影响^[66-67]。在零售商分担制造商减排成本且制造商分担零售商促销努力成本情形下,Zhou等研究表明,合作促销与减排成本分担相结合的契约能够在一定条件下实现供应链协调,且对供应链双方均有利^[68]。徐春秋等研究表明,当制造商的边际收益足够大时,制造商越有动力利用成本分担契约激励零

售商进行低碳宣传^[69]。

供应链成员交叉持股战略能够缓解企业之间的“搭便车”现象,增强供应链合作,促进供应链减排和利润优化。刘名武等在碳交易制度下研究表明,当零售商持股比例满足一定条件时,零售商持股制造商减排投资战略能够减少碳排放且实现制造商和零售商利润的帕累托改进^[70]。夏良杰等同样在碳交易制度下研究表明,制造商与零售商交叉持股能够促进供应链减排^[71]。针对有节能服务公司参与的供应链减排问题,樊文平等研究表明,当制造商单独持股节能服务公司时,增加持股比例能够促进减排并提高低碳产品市场价格;当制造商和零售商同时持股节能服务公司时,能够进一步优化企业决策和利润,但也会导致企业决策和利润的协调难度^[72]。Xia等进一步研究了不同供应链权力结构下交叉持股对绿色供应链减排与绩效的影响^[73]。

(二) 供应链横向合作减排决策

供应链上游企业之间或下游企业之间的横向合作行为将带来更大的供应链权力,也将对供应链减排决策产生显著影响。Yang等研究表明,供应链企业纵向合作可以提高碳减排率,降低零售价格;但制造商之间的横向合作会损害零售商的利润和消费者福利^[74]。零售商提供的收益共享契约能有效地促进制造商放弃横向合作,不仅有助于零售商和制造商实现双赢,而且还能以较高的减排率使环境受益。Li等基于一个制造商和两个零售商组成的低碳闭环供应链,比较分析了纵向合作与横向合作模式下的定价、碳减排以及回收策略等问题^[75]。Yu针对由一个供应商和多个零售商组成的供应链,对比分析了碳税政策下纵向合作减排与横向合作减排博弈问题,研究表明,纵向与横向均合作始终是供应链的主导策略^[76]。

三、数字化技术赋能下的供应链减排决策

在数字化技术赋能下的供应链减排决策研究中,大数据分析和区块链技术的融合引起了学者们的积极关注。

(一) 基于大数据分析技术的供应链减排决策

大数据分析是将先进的分析技术应用于非常大的数据集,以提取隐藏在海量数据中未知的、有用的关系、模式和信息,从而帮助企业进行科学决策与管理^[77]。近年来,越来越多的个人和组织关注大数据,研究者和实践者尝试利用大数据分析技术优化运营和供应链管理^[78]。大数据分析技术在帮助组

织实现社会和经济效益的同时,在减少环境影响方面也具有积极的影响^[79]。以医院供应链为例,基于168家法国医院的样本数据,Benzidia等通过实证分析研究表明,大数据和人工智能技术对环境过程集成和绿色供应链协作具有显著影响^[80]。

大数据主要被应用于定向营销广告业务,从而增加低碳产品市场需求。针对消费者绿色偏好和大数据定向广告对低碳产品市场需求的影响,Liu研究了不同成本分担模式下低碳供应链的定价策略和收益共享契约^[81]。李春发等建立手机制造商和零售商之间绿色营销演化博弈模型,研究表明,当消费者具有绿色偏好且制造商分担零售商大数据定向广告成本时,绿色营销是低碳供应链的演化稳定策略^[82]。在制造商投资绿色技术情形下,Liu进一步对比分析了不同成本分担模式下基于大数据的消费者偏好信息获取成本和绿色技术投资成本对低碳供应链决策的影响^[83]。王婷婷等在传统两级低碳供应链模型中引入大数据服务商开展营销努力,研究了三级低碳供应链联合减排问题,并设计双边成本分担契约以协调供应链^[84]。

(二) 基于区块链技术的供应链减排决策

供应链的全球化使得管理和运作变得更加困难。区块链作为一种分布式去中心化创新技术,能够有效解决多主体、双边信息共享问题,且具有数据不可篡改、可溯源、建立信任、降低交易成本、智能执行等优势^[85],为缓解全球供应链管理问题创造了技术条件。区块链能够有效提高供应链透明度^[86]、增强供应链弹性^[87]、降低交易成本^[88]以及促进供应链可持续^[89]。区块链既可以作为一种战略管理方法以加强供应链整合,减少碳排放;也能够作为一种操作工具,用于跟踪碳足迹、简化流程和提高碳管理的科学性,以最小化供应链中的总体碳排放量^[90]。利用区块链追踪和计量碳足迹,能够促进碳资产开发与交易,助力政府科学制定碳排放配额和碳税^[91]。

区块链技术能够保证企业真实的减排信息在供应链企业间的共享以及提高消费者对低碳产品的信任度。学者们将区块链的技术效应特征嵌入低碳供应链决策模型,研究供应链企业实施区块链的条件以及区块链对供应链减排决策和效果的影响。李剑等针对消费者隐藏低碳偏好信息导致供应链协同减排效率损失问题,设计了基于区块链技术的供应链协同减排信息共享机制^[92]。Xu等基于全渠道背景,研究了区块链对制造商减排和供应链协调的影响,研究表明,制造商实施区块链不仅能够增加产品绿

色度,也能够促进供应链协调^[93]。Xu等^[94]在碳交易制度下进一步拓展了Xu等^[93]的研究。张令荣等研究了政府投资区块链技术平台,供应链企业有偿使用区块链技术情景下政府对低碳供应链的最优补贴策略问题^[95]。林强等针对消费者不完全信任绿色产品及供应链高交易成本问题,从不同价值目标角度探讨了供应链实施区块链的充分条件以及区块链对供应链减排的影响^[96]。

虽然区块链技术在减少碳排放和供应链可持续发展方面有着巨大的潜力,但区块链技术全面应用于低碳供应链管理领域也面临不少障碍。Öztürk等从技术与安全、资金与人力资源、组织与个人以及社会环境方面,全面分析了区块链应用于供应链管理领域存在的障碍^[97]。Queiroz等以新兴经济体国家为例,通过实证研究表明,基础设施条件、信任、社会影响和努力期望构成了运作与供应链管理领域采用区块链的主要影响因素^[98]。Kouhizadeh等认为,在可持续供应链领域应用区块链将面临技术、组织以及供应链内外部环境障碍,其中供应链内部和技术障碍是主要的障碍^[99]。

四、研究展望

近年来,低碳供应链管理得到学者们的积极关注。其中,基于博弈论方法的低碳供应链运作决策研究已成为低碳供应链管理研究的重要主题。Agi等从决策主题、目标函数、需求特征、竞争环境、供应链结构、政府干预、博弈类型以及供应链协调等方面,对基于博弈论方法的低碳供应链运作决策研究文献进行了系统性的梳理^[17]。本文也重点分析基于博弈论方法的低碳供应链决策研究成果,但与文献^[17]不同的是,本文侧重梳理供应链减排运作决策研究,聚焦政策干预、供应链企业合作以及数字化技术赋能下的供应链减排运作决策研究。为了进一步促进供应链减排运作决策研究,对接“双碳”目标,本文提出以下几个方面的重点研究方向。

(一) 供应链自主减排运作决策研究

对于碳排放较高的电力、化工、钢铁等控排行业企业,政府强制减排是企业投资减排技术的主要动力来源。但随着消费者低碳意识的提高,企业自主减排有助于扩大产品市场份额并获取长期竞争优势^[100]。因此,企业自主减排已成为强制控排企业和其他非强制控排企业的必然趋势。现有相关文献侧重在确定性的市场环境、信息对称条件以及两级

低碳供应链结构研究供应链减排与定价,研究深度与广度还不够。供应链自主减排决策研究可以从以下几个方面进行拓展。

一是信息不对称或不确定市场环境下供应链企业自主减排决策问题。供应链上下游企业间既合作又竞争,企业核心信息难以实现完全共享,信息不对称是常态,这可能导致减排决策偏离最优结果。当制造商的减排信息不对称时,也将影响零售商参与合作减排的积极性。而近些年世界经济发展滞后和市场环境波动较大,贸易摩擦、新冠肺炎疫情等突发事件严重影响供应链的稳定性、安全性以及企业盈利状况,将对供应链企业自主减排决策产生影响。在信息不对称或不确定市场环境下,供应链企业是否愿意积极开展自主减排、如何优化减排决策以及如何选择减排路径值得进一步研究。

二是由多个供应商、多个制造商或多个零售商构成的多阶段复杂供应链系统自主减排决策问题。现有相关文献多针对“一对一”的两级低碳供应链,供应链结构相对较简单。供应链结构越复杂,供应链信息交互更加复杂,企业决策需要考虑的因素也就越多,决策结果也就越具有现实针对性。未来的研究可以对供应链结构进行纵向和横向拓展,研究多阶段复杂供应链系统的自主减排决策问题。

三是自主减排供应链的产品设计、生产决策、库存管理、运输规划、协调运作与网络优化问题等。现有供应链减排决策大多建立在减排技术投入基础上,研究所得到的最优减排策略比较抽象和单一,很难与企业实际的生产和经营活动进行有效对接。供应链减排不仅仅是生产环节低碳技术的投入问题,也是供应链各环节如何优化运作与协同协调的问题。因此,有必要从最小碳排放角度,结合优化理论与博弈论,研究自主减排供应链各环节优化与网络整体优化问题。

(二) 数字化技术赋能下的供应链减排运作决策研究

一是加强区块链技术环境下的供应链减排决策研究。区块链技术有望颠覆现有的供应链管理决策模式,并在促进碳交易和供应链减排方面发挥重要作用。在碳达峰、碳中和目标背景下,基于区块链技术的供应链减排问题将成为新的理论与实践探索的热点。目前,相关领域的研究才刚刚开始,还有大量的研究空白。Xu等基于全渠道背景研究了区块链技术对供应链减排决策的影响,但他们忽略了区块链的应用成本^[93]。供应链企业实施区块链

将产生额外的区块链应用成本,成为供应链企业实施区块链的重要考量因素之一^[89]。因此有必要从成本以及区块链技术效应综合平衡的角度进一步分析企业利用区块链技术赋能减排的条件。林强等从不同价值目标角度探讨了绿色供应链实施区块链的条件,但他们仅考虑了制造商主导下单一产品供应链情景^[96]。不同供应链结构与运作模式下区块链对供应链减排决策的影响也具有差异性,有必要从不同权力结构、竞争环境、政府参与等情景分别进行研究。二是多种数字化技术融合视角下供应链合作减排策略研究。现有文献大多考虑某一种数字化技术对供应链减排决策的影响,缺乏从多种数字化技术融合视角研究数字化技术的融合与协同效应对供应链减排决策以及利润的影响。比如,供应链主体在利用大数据技术进行精准营销的同时,也可以利用区块链技术消除供应链企业间、企业与消费者之间的信息不对称。多种数字化技术融合更有利于加强供应链合作、提高供应链整合能力,进而优化供应链合作减排的效率和效益。

(三) 供应链净零排放目标下的减排运作决策研究

无论是中国的碳中和目标,还是英国、美国、欧盟、日本等国家的“净零战略”,世界主要经济体都做出了于21世纪下半叶平衡温室气体排放的承诺。就企业而言,某一个地区单个企业的减排行为很难实现平衡温室气体排放的目标。因此,实现全供应链净零排放就成为企业应对危险气候变化的必由之路。供应链净零排放对企业减排提出了更高的目标要求,将激励企业更加关注低碳合作伙伴、低碳技术创新、清洁能源和材料使用、全球清洁发展机制以及碳排放权交易等方面。这就要求企业,特别是担任供应链减排领导者角色的企业,重新审视供应链的设计和运作,从而促使整个供应链承担更多的环境和社会责任,进而获取新的可持续的竞争优势。

净零排放不仅涉及温室气体排放减少问题,也包括消除或抵消的问题^[101]。因此,实现供应链净零排放并非仅仅依靠减排技术创新这一条路径。供应链企业投资减排技术可以减少碳排放,而企业购买碳排放权、绿色电力证书或参与植树造林等公益活动可以抵消碳排放。从供应链整体最优角度,企业应该如何进行减少或抵消碳排放决策?在供应链净零排放目标或约束下,单个企业如何制定生产以及运营策略、如何平衡环境绩效与经济绩效之间的关系?供应链企业间又如何平衡减排责任和分配供

应链利润?供应链净零排放约束下的企业决策问题既是优化问题、也是竞合博弈问题,需要将二者结合起来进行量化分析。尤其是在碳交易、碳税、补贴以及绿证交易等政策环境下,供应链净零排放目标下企业减排运作决策问题值得未来深入研究。

参考文献

- [1] NABER S K, DE REE D A, SPLIET R, et al. Allocating CO₂ emission to customers on a distribution route[J]. *Omega*, 2015, 54: 191-199.
- [2] 李平, 饶泽炜. 碳交易主要问题研究现状[J]. 电子科技大学学报(社科版), 2021, 23(5): 12-23.
- [3] ZHOU X Y, WEI X Y, LIN J, et al. Supply chain management under carbon taxes: a review and bibliometric analysis[J]. *Omega*, 2021, 98: 102295.
- [4] 廖文龙, 董新凯, 翁鸣, 等. 市场型环境规制的经济效应: 碳排放交易、绿色创新与绿色经济增长[J]. *中国软科学*, 2020(6): 159-173.
- [5] 刘和旺, 刘池, 郑世林. 《环境空气质量标准(2012)》的实施能否助推中国企业高质量发展?[J]. *中国软科学*, 2020(10): 45-55.
- [6] 郭彩霞. 中国低碳经济发展的协同效应研究[J]. *管理世界*, 2021, 37(8): 105-117.
- [7] 徐建中, 贾大风, 李奉书, 等. 装备制造业低碳技术创新对企业绩效的影响研究[J]. *管理评论*, 2018, 30(3): 82-94.
- [8] LI F S, XU X L, LI Z W, et al. Can low-carbon technological innovation truly improve enterprise performance? the case of Chinese manufacturing companies[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 293: 125949.
- [9] WANG T, WATSON J. Scenario analysis of China's emissions pathways in the 21st century for low carbon transition[J]. *Energy Policy*, 2010, 38(7): 3537-3546.
- [10] JABBOUR C J C, NETO A S, GOBBO J J A, et al. Eco-innovations in more sustainable supply chains for a low-carbon economy: a multiple case study of human critical success factors in Brazilian leading companies[J]. *International Journal of Production Economics*, 2015, 164: 245-257.
- [11] 刘名武, 吴开兰, 付红, 等. 消费者低碳偏好下零售商主导供应链减排合作与协调[J]. *系统工程理论与实践*, 2017, 37(12): 3109-3117.
- [12] 赵道致, 吕金鑫. 考虑碳排放权限制与交易的供应链整体低碳化策略[J]. *工业工程与管理*, 2012, 17(5): 65-71.
- [13] BÜYÜKÖZKAN G, GÖCER F. Digital supply chain: literature review and a proposed framework for future research[J]. *Computers in Industry*, 2018, 97: 157-177.
- [14] DEMARTINI M, EVANS S, TONELLI F. Digitalization technologies for industrial sustainability[J]. *Procedia Manufacturing*, 2019, 33: 264-271.
- [15] ANSER M K, AHMAD M, KHAN M A, et al. The

- role of information and communication technologies in mitigating carbon emissions: evidence from panel quantile regression[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(17): 21065-21084.
- [16] SHAHARUDIN M S, FERNANDO Y, JABBOUR C J C, et al. Past, present, and future low carbon supply chain management: a content review using social network analysis[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 218: 629-643.
- [17] AGI M A N, FARAMARZI-OGHANI S, HAZIR Ö. Game theory-based models in green supply chain management: a review of the literature[J]. *International Journal of Production Research*, 2021, 59(15): 4736-4755.
- [18] BHATIA M S, GANGWANI K K. Green supply chain management: scientometric review and analysis of empirical research[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 284: 124722.
- [19] 陈剑. 低碳供应链管理研究[J]. *系统管理学报*, 2012, 21(6): 721-728.
- [20] 骆瑞玲, 范体军, 夏海洋. 碳排放交易政策下供应链碳减排技术投资的博弈分析[J]. *中国管理科学*, 2014, 22(11): 44-53.
- [21] LI G, ZHENG H, JI X, et al. Game theoretical analysis of firms' operational low-carbon strategy under various cap-and-trade mechanisms[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 197(1): 124-133.
- [22] 郭军华, 孙林洋, 张诚, 等. 碳限额交易政策下双寡头企业碳减排决策的演化博弈分析[J]. *软科学*, 2019, 33(3): 54-60.
- [23] 刘名武, 万谧宇, 付红. 碳交易和低碳偏好下供应链低碳技术选择研究[J]. *中国管理科学*, 2018, 26(1): 152-162.
- [24] CHAI Q F, XIAO Z D, LAI K H, et al. Can carbon cap and trade mechanism be beneficial for remanufacturing?[J]. *International Journal of Production Economics*, 2018, 203: 311-321.
- [25] LIU H, KOU X F, XU G Y, et al. Which emission reduction mode is the best under the carbon cap-and-trade mechanism?[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021: 128053.
- [26] XU X P, ZHANG W, HE P, et al. Production and pricing problems in make-to-order supply chain with cap-and-trade regulation[J]. *Omega*, 2017, 66: 248-257.
- [27] WANG M, ZHAO L D, HERTY M. Modelling carbon trading and refrigerated logistics services within a fresh food supply chain under carbon cap-and-trade regulation[J]. *International Journal of Production Research*, 2018, 56(12): 4207-4225.
- [28] GHOSH S K, SEIKH M R, CHAKRABORTTY M. Analyzing a stochastic dual-channel supply chain under consumers' low carbon preferences and cap-and-trade regulation[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2020, 149: 106765.
- [29] YANG L, HU Y J, HUANG L J. Collecting mode selection in a remanufacturing supply chain under cap-and-trade regulation[J]. *European Journal of Operational Research*, 2020, 287(2): 480-496.
- [30] 张令荣, 杨子凡, 程春琪. 碳配额交易政策下闭环供应链的减排策略选择[J]. *管理工程学报*, 2021, 36(1): 172-180.
- [31] 管清友, 伍艳艳, 许博男. 中国减碳之路的选择: 碳交易还是碳税?[J]. *中国经济评论*, 2021(5): 16-17.
- [32] 吕宝龙, 张桂涛, 刘阳, 等. 考虑碳税和产品绿色度的闭环供应链网络Nash博弈均衡模型[J]. *中国人口·资源与环境*, 2019, 29(1): 59-69.
- [33] 周艳菊, 胡凤英, 周正龙, 等. 最优碳税税率对供应链结构和社会福利的影响[J]. *系统工程理论与实践*, 2017, 37(4): 886-900.
- [34] HALAT K, HAFEZALKOTOB A, SAYADI M K. Cooperative inventory games in multi-echelon supply chains under carbon tax policy: vertical or horizontal?[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2021, 99: 166-203.
- [35] 姜跃, 韩水华, 赵洋. 低碳经济下碳税对供应链减排及合作策略的影响分析[J]. *电子科技大学学报(社科版)*, 2019, 21(2): 92-101.
- [36] 熊中楷, 张盼, 郭年. 供应链中碳税和消费者环保意识对碳排放影响[J]. *系统工程理论与实践*, 2014, 34(9): 2245-2252.
- [37] 王明喜, 胡毅, 郭冬梅, 等. 碳税视角下最优排放实施与企业减排投资竞争[J]. *管理评论*, 2021, 33(8): 17-28.
- [38] 黄帝, 张菊亮. 不同权力结构下碳税对供应链减排水平的影响[J]. *中国管理科学*, 2021, 29(7): 57-70.
- [39] DING J F, CHEN W D, WANG W B. Production and carbon emission reduction decisions for remanufacturing firms under carbon tax and take-back legislation[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2020, 143: 106419.
- [40] MONTERO J P. A note on environmental policy and innovation when governments cannot commit[J]. *Energy Economics*, 2011, 33(1): 13-19.
- [41] 曹细玉, 覃艳华, 张杰芳. 基于政府不同补贴模式下的供应链碳减排策略与协调[J]. *华中师范大学学报(自然科学版)*, 2017, 51(1): 93-99.
- [42] 贺勇, 陈志豪, 廖诺. 政府补贴方式对绿色供应链制造商减排决策的影响机制[J/OL]. (2020-10-16). *中国管理科学*. <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2019.1854>.
- [43] 王道平, 王婷婷. 政府补贴下供应链合作减排与促销的动态优化[J]. *系统管理学报*, 2021, 30(1): 14-27.
- [44] 魏守道, 孙铭. 消费者补贴下供应链间减排研发策略研究[J/OL]. (2021-01-22). *计算机集成制造系统*. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.tp.20210122.0945.008.html>.
- [45] 刁心薇, 曾珍香, 孙丞. 混合碳政策下制造商低碳转型的技术选择策略[J]. *控制与决策*, 2021, 36(7): 1763-1770.
- [46] SUN H X, YANG J. Optimal decisions for

competitive manufacturers under carbon tax and cap-and-trade policies[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2021, 156: 107244.

[47] Li Z M, Pan Y C, Yang W, et al. Effects of government subsidies on green technology investment and green marketing coordination of supply chain under the cap-and-trade mechanism[J]. *Energy Economics*, 2021, 101: 105426.

[48] 李新军, 陈美娜, 达庆利. 碳交易视角下政府管制的汽车制造企业闭环供应链优化决策[J]. *管理评论*, 2020, 32(5): 269-279.

[49] 王喜平, 郝少媛. 碳交易机制下供应链CCS投资时机研究[J]. *管理工程学报*, 2020, 34(2): 124-130.

[50] 曹细玉, 张杰芳. 碳减排补贴与碳税下的供应链碳减排决策优化与协调[J]. *运筹与管理*, 2018, 27(4): 57-61.

[51] 孟卫军, 姚雨, 申成然. 基于碳税的供应链合作减排补贴策略研究[J]. *科技管理研究*, 2018, 38(9): 247-254.

[52] 夏西强, 徐春秋. 政府碳税与补贴政策对低碳供应链影响的对比研究[J]. *运筹与管理*, 2020, 29(11): 112-120.

[53] 孟凡生, 韩冰. 政府环境规制对企业低碳技术创新行为的影响机制研究[J]. *预测*, 2017, 36(1): 74-80.

[54] 王垒, 王苗, 蔺康康. 不同复合碳政策组合对异质性供应链决策的影响分析[J]. *工业工程与管理*, 2020, 25(1): 60-68.

[55] 石松, 颜波, 石平. 考虑公平关切的自主减排低碳供应链决策研究[J]. *系统工程理论与实践*, 2016, 36(12): 3079-3091.

[56] 王冬冬, 刘勇. 考虑利他偏好和碳减排努力绩效的供应链决策[J]. *工业工程与管理*, 2020, 25(6): 116-125.

[57] 冯中伟, 刘邓威. 基于损失厌恶的自主减排供应链减排策略[J/OL]. (2021-09-13). 计算机集成制造系统. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20210913.1120.005.html>.

[58] 郭炜恒, 梁樑. 供应链碳减排成本分摊的合作博弈研究[J]. *预测*, 2021(2): 83-89.

[59] 张维月, 刘晨光, 李琳, 等. 两阶段供应链碳排放目标减排量分配研究[J]. *中国管理科学*, 2021, 29(9): 90-101.

[60] 李友东, 谢鑫鹏, 营刚. 两种分成契约下供应链企业合作减排决策机制研究[J]. *中国管理科学*, 2016, 24(3): 61-70.

[61] WANG Z R, BROWNLEE A E I, WU Q H. Production and joint emission reduction decisions based on two-way cost-sharing contract under cap-and-trade regulation[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2020, 146: 106549.

[62] YANG H X, LUO J W, WANG H J. The role of revenue sharing and first-mover advantage in emission abatement with carbon tax and consumer environmental awareness[J]. *International Journal of Production Economics*, 2017, 193: 691-702.

[63] 刘振, 宋寒, 代应, 等. 碳交易与消费者低碳偏好下低碳服务供应链收益共享契约[J]. *计算机集成制造系统*,

2022, 8(1): 294-306.

[64] LI T, ZHANG R, ZHAO S L, et al. Low carbon strategy analysis under revenue-sharing and cost-sharing contracts[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 212: 1462-1477.

[65] LIU G W, YANG H F, DAI R. Which contract is more effective in improving product greenness under different power structures: revenue sharing or cost sharing?[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2020, 148: 106701.

[66] YANG H X, CHEN W B. Retailer-driven carbon emission abatement with consumer environmental awareness and carbon tax: revenue-sharing versus cost-sharing[J]. *Omega*, 2018, 78: 179-191.

[67] 王兴荣. 绿色研发补贴、成本分担契约与收益共享契约研究[J/OL]. (2020-09-10). 中国管理科学. <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2019.1869>.

[68] ZHOU Y J, BAO M J, CHEN X H, et al. Co-op advertising and emission reduction cost sharing contract and coordination in low-carbon supply chain based on fairness concerns[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 133: 402-413.

[69] 徐春秋, 赵道致, 原白云, 等. 上下游联合减排与低碳宣传的微分博弈模型[J]. *管理科学学报*, 2016, 19(2): 53-65.

[70] 刘名武, 樊文平, 许以撒. 碳交易政策下零售商持股制造商减排投资决策[J]. *工业工程与管理*, 2017, 22(4): 40-48.

[71] 夏良杰, 孔清逸, 李友东, 等. 考虑交叉持股的低碳供应链减排与定价决策研究[J]. *中国管理科学*, 2021, 29(4): 70-81.

[72] 樊文平, 王旭坪, 刘名武, 等. 不同减排合同下企业间纵向持股对供应链决策的影响[J]. *管理工程学报*, 2021, 35(1): 189-199.

[73] XIA Q, ZHI B D, WANG X J. The role of cross-shareholding in the green supply chain: green contribution, power structure and coordination[J]. *International Journal of Production Economics*, 2021, 234: 108037.

[74] YANG L, ZHANG Q, JI J N. Pricing and carbon emission reduction decisions in supply chains with vertical and horizontal cooperation[J]. *International Journal of Production Economics*, 2017, 191: 286-297.

[75] LI H, WANG C X, SHANG M, et al. Pricing, carbon emission reduction, low-carbon promotion and returning decision in a closed-loop supply chain under vertical and horizontal cooperation[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2017, 14(11): 1332.

[76] YU L E. Supply chain vertical and horizontal cooperation for carbon emission reduction considering bullwhip effect under the carbon tax scheme[J]. *Ekoloji*, 2019, 28(107): 813-828.

[77] RUSSOM P. Big data analytics[J]. *TDWI best*

practices report(fourth quarter), 2011, 19(4): 1-34.

[78] LAMBA K, SINGH S P. Big data in operations and supply chain management: current trends and future perspectives[J]. *Production Planning & Control*, 2017, 28(11-12): 877-890.

[79] RAUT R D, MANGLA S K, NARWANE V S, et al. Linking big data analytics and operational sustainability practices for sustainable business management[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 224: 10-24.

[80] BENZIDIA S, MAKAOUI N, BENTAHAR O. The impact of big data analytics and artificial intelligence on green supply chain process integration and hospital environmental performance[J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2021, 165: 120557.

[81] LIU P. Pricing policies and coordination of low-carbon supply chain considering targeted advertisement and carbon emission reduction costs in the big data environment[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 210: 343-357.

[82] 李春发, 胡培培, 刘焕星. 消费者绿色偏好、大数据定向广告与手机绿色营销策略演化[J/OL]. (2021-07-26). 计算机集成制造系统.<https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.tp.20210723.1708.006.html>.

[83] LIU P. Pricing rules of green supply chain considering Big Data information inputs and cost-sharing model[J]. *Soft Computing*, 2021, 25(13): 8515-8531.

[84] 王婷婷, 王道平, 赵超. 大数据服务商参与下供应链联合减排的动态协调策略[J]. *控制与决策*, 2021, 36(8): 2013-2022.

[85] POURNADER M, SHI Y, SEURING S, et al. Blockchain applications in supply chains, transport and logistics: a systematic review of the literature[J]. *International Journal of Production Research*, 2020, 58(7): 2063-2081.

[86] FRANCISCO K, SWANSON D. The supply chain has no clothes: technology adoption of blockchain for supply chain transparency[J]. *Logistics*, 2018, 2(1): 1-13.

[87] MIN H. Blockchain technology for enhancing supply chain resilience[J]. *Business Horizons*, 2019, 62(1): 35-45.

[88] SCHMIDT C G, WAGNER S M. Blockchain and supply chain relations: a transaction cost theory perspective[J]. *Journal of Purchasing and Supply Management*, 2019, 25(4): 100552.

[89] SABERI S, KOUHIZADEH M, SAEKIS J, et al. Blockchain technology and its relationships to sustainable supply chain management[J]. *International Journal of Production Research*, 2019, 57(7): 2117-2135.

[90] WANG M, WANG B, ABARESHI A. Blockchain technology and its role in enhancing supply chain integration

capability and reducing carbon emission: a conceptual framework[J]. *Sustainability*, 2020, 12(24): 10550.

[91] DE SOUSA JABBOUR A B L, CHIAPPETTA JABBOUR C J, SARKIS J, et al. Decarbonisation of operations management—looking back, moving forward: a review and implications for the production research community[J]. *International Journal of Production Research*, 2019, 57(15-16): 4743-4765.

[92] 李剑, 易兰, 肖瑶. 信息不对称下基于区块链驱动的供应链减排信息共享机制研究[J]. *中国管理科学*, 2021, 29(10): 131-139.

[93] XU X P, ZHANG M Y, DOU G W, et al. Coordination of a supply chain with an online platform considering green technology in the blockchain era[J]. *International Journal of Production Research*, 2021(3): 1-18.

[94] XU X P, CHOI T M. Supply chain operations with online platforms under the cap-and-trade regulation: impacts of using blockchain technology[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2021, 155: 102491.

[95] 张令荣, 彭博, 程春琪. 基于区块链技术的低碳供应链政府补贴政策研究[J/OL]. (2021-09-26). *中国管理科学*.<https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2835.G3.20210926.1324.002.html>.

[96] 林强, 刘名武, 王晓斐. 嵌入区块链信息传递功能的绿色供应链决策[J/OL]. (2021-10-08). 计算机集成制造系统.<https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.tp.20211006.1222.006.html>.

[97] ÖZTÜRK C, YILDIZBASI A. Barriers to implementation of blockchain into supply chain management using an integrated multi-criteria decision-making method: a numerical example[J]. *Soft Computing*, 2020, 24(19): 14771-14789.

[98] QUEIROZ M M, FOSSO WAMBA S, DE BOURMONT M, et al. Blockchain adoption in operations and supply chain management: empirical evidence from an emerging economy[J]. *International Journal of Production Research*, 2020: 1-17.

[99] KOUHIZADEH M, SABERI S, SARKIS J. Blockchain technology and the sustainable supply chain: theoretically exploring adoption barriers[J]. *International Journal of Production Economics*, 2021, 231: 107831.

[100] PLAMBECK E L. Reducing greenhouse gas emissions through operations and supply chain management[J]. *Energy Economics*, 2012, 34: S64-S74.

[101] ROGELJ J, GEDEN O, COWIE A, et al. Three ways to improve net-zero emissions targets[J]. *Nature*, 2021, 591(7850): 365-368.

编辑 何婧