

# 自愿与强制碳减排市场协同机制研究

张一林, 刘鹏超, 郁芸君

**[摘要]** 允许参与强制减排市场的控排企业购买自愿减排市场的减排量用于清缴碳配额,即设立碳抵消机制,有助于缓解控排企业的履约压力,但会在一定程度上弱化控排企业的绿色转型激励。本文构建了信息不对称条件下包含政府和异质性控排企业的理论模型,根据社会福利最大化的原则,同时将碳抵消比例上限和碳配额数量内生化的方式,揭示了自愿减排市场与强制减排市场相辅相成的协同关系。研究发现,强制减排市场为企业使用碳抵消提供了激励,碳抵消机制的引入为政府收紧强制减排市场的配额创造了空间,存在最适宜碳抵消比例上限和最适宜碳配额的最优政策组合。随着单位碳排放的负外部性不断增加,政府应不断提高碳抵消比例上限并收紧强制减排市场的配额,且前者的提高幅度和后者的收紧幅度应保持协调。本文为中国积极稳妥发展自愿减排市场和全球各国积极携手开展碳抵消国际合作的必要性提供了理论依据。

**[关键词]** 碳抵消机制; 自愿减排市场; 强制减排市场; 政策协同

**[中图分类号]** F424 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1006-480X(2025)06-0043-19

## 一、引言

21世纪以来,全球平均气温不断上升,全球气候变暖及其对生态稳定、人身健康、经济发展等方面的危害引发广泛关注,如何有效减少以二氧化碳为代表的温室气体排放已成为世界各国亟待解决的关键问题。目前,已有多数国家通过加强国际合作、制定国家战略等方式逐步建立完善碳减排(也称“减碳”或“减排”)制度体系。例如,2016年全球178个国家和地区共同签署《巴黎协定》,承诺于21世纪下半叶实现温室气体净零排放。<sup>①</sup>再如,包括欧盟、英国等在内的150个国家和地区先后确立了碳中和等减排目标和时间节点,中国作为全球最大的发展中国家于2020年提出“二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和”的“双碳”目标。不论是全球性的行动倡议,还是区域内的战略部署,若要按期实现碳中和目标,首要任务是减少碳排放量,特别是

**[收稿日期]** 2024-09-08

**[基金项目]** 国家自然科学基金重点项目“国有资本并购重组理论、机制与模式研究”(批准号72132010);广东省自然科学基金杰出青年项目“广义碳泄漏风险下碳交易机制研究”(批准号2023B1515020068);广东省自然科学基金卓越青年团队项目“产业数字金融赋能实体经济的理论及其应用研究”(批准号2023B1515040001)。

**[作者简介]** 张一林,中山大学岭南学院、高级金融研究院教授,广东省习近平新时代中国特色社会主义思想研究中心特约研究员,博士生导师,经济学博士;刘鹏超,中山大学岭南学院博士研究生;郁芸君,中南财经政法大学文澜学院副教授,经济学博士。通讯作者:郁芸君,电子邮箱:yuyunjun@zuel.edu.cn。感谢匿名评审专家和编辑部的宝贵意见,文责自负。

<sup>①</sup> 净零排放是指排放到大气中的温室气体的量与通过各种方式从大气中吸收的温室气体的量相等。

完善健全减排政策工具,更好发挥社会减排潜力。

作为全球最主流的减排政策工具之一,强制性碳排放权交易市场(简称“强制减排市场”)以碳排放权的配额制度为核心,由政府确定减排目标并向控排企业发放一定数量的碳配额,同时允许控排企业在强制减排市场中交易碳配额,以出售碳配额的货币化收益进一步激励控排企业减碳(张希良等,2021)。基于此,若想在碳中和目标下加快推进碳减排,政府应不断收紧碳配额,严格落实控排企业的减排责任。但实践中,政府还须顾及企业对碳履约成本的承受能力,避免企业陷入碳履约成本超负荷、经营利润骤降的困境,由此导致碳配额的收紧幅度不及预期,延缓碳减排进度。<sup>①</sup>在此背景下,优化减碳政策设计,在加快推动碳减排和减少碳履约成本之间找到恰当的平衡,是高质量实现碳中和目标的关键所在。

为更好地兼顾碳减排效果与碳履约成本,一些国家和地区尝试在强制减排市场中引入碳抵消机制,如欧盟的清洁发展机制(Clean Development Mechanism, CDM)、中国的国家核证自愿减排量(China Certified Emission Reduction, CCER)。碳抵消机制是指,允许参与强制减排市场的控排企业购买自愿减排市场的碳减排量,用于抵消自身的减碳任务。<sup>②</sup>例如,林业碳汇吸收的温室气体经核证后,相应的减排量可以在自愿减排市场中交易流通,控排企业可以购买该部分减排量来抵消自身的碳排放。大量研究证实,碳抵消机制拓宽了碳履约渠道,能显著降低控排企业的碳履约成本(Wang and Wang, 2015; Li et al., 2019; Ye et al., 2021; Huang et al., 2022)。

然而,即便不少研究证实碳抵消机制具有缓解成本的作用,一些国家和地区政府对待碳抵消的态度仍摇摆不定,中断或者禁止使用碳抵消的情况屡见不鲜。例如,欧盟连年减少CDM的使用,先是在2008年规定控排企业每年对CDM的使用不超过欧盟总排放量的6%,接着宣布自2013年起只接受最不发达国家新注册的CDM项目,甚至在2020年后禁止控排企业以碳抵消的形式清缴碳配额。然而,欧盟近期发出重启碳抵消机制的倡议。<sup>③</sup>再如,CCER在中国的发展经历了诸多波折。自2012年启动后,CCER频频遇冷,在2017年被监管部门暂停,时隔七年后于2023年底重启,且严格限制企业对CCER的使用程度。<sup>④</sup>这不禁令人深思:为何各国政府没有积极推广碳抵消机制?政府对碳抵消机制使用程度的调控是妨碍了减碳工作的正常运转,还是提高减碳效率的必要手段?如若政府调控是碳抵消机制的必要设计,那么是否存在一个最适宜的调控力度?在不同阶段,政府的调控力度是否动态可变,调整的规则和依据为何?

给定政府发放给控排企业的碳配额,碳抵消机制的引入拓宽了控排企业的碳履约渠道,实现对碳履约成本的有效分摊(即“降本效应”)。此时,若政府任由控排企业自主决定碳抵消机制的使用程度,不仅减碳劣势企业因直接参与碳抵消而减少了对绿色低碳转型的投入力度,而且减碳优势企

① 在强制减排市场中,企业通过绿色生产、购买碳配额等各种方式,使得自身的碳排放等于拥有的碳配额,这构成了企业对政府的“碳履约”。在此过程中,企业付出的各种成本的总和构成企业的“碳履约成本”。

② 广义上,未被纳入强制减排市场或未被赋予政策性减碳任务的经济主体均处于自愿减排市场,该市场以自愿性减排为特征。

③ 2024年4月,欧盟委员会、欧盟强制减排市场部门副主管鲁本·维米尔伦(Ruben Vermeeren)表示,布鲁塞尔正在评估是否应在未来几年将碳减排信用重新纳入欧盟强制减排市场。

④ 2012年6月,国家发展和改革委员会印发实施《温室气体自愿减排交易管理暂行办法》,标志着CCER启动。2017年3月,国家发展和改革委员会发布公告,宣布暂停CCER项目报备。2023年10月,生态环境部、国家市场监督管理总局联合颁布的《温室气体自愿减排交易管理办法(暂行)》标志着CCER项目重启。另外,全国强制减排市场规定控排企业使用CCER的比例不得超过自身碳排放总量的5%。

业难以像过去那样通过出售盈余碳配额的方式赚取超额利润,其绿色低碳转型的积极性较碳抵消机制引入前下降,这不利于低碳战略的推进及先进绿色转型经验的复制与推广(即“挤出效应”)。鉴于碳抵消机制确实具有降低碳履约成本的降本效应,相比粗放式地摒弃使用碳抵消,政府应采取必要的手段合理使用碳抵消机制,以便在控制挤出效应的前提下尽可能发挥碳抵消机制的降本效应。为此,本文构建了一个包含政府和异质性企业的博弈模型,在政府难以准确分辨企业绿色生产成本的信息不对称条件下,探究政府如何优化碳抵消机制与碳配额的减碳政策组合以更好地平衡碳减排效果与碳履约的社会成本。

研究发现,给定碳抵消机制的降本和挤出效应,一个有为的政府应当引入碳抵消机制并规定碳抵消比例上限,即明确控排企业使用自愿减排市场的减碳量进行碳履约的最大限度。此时,控排企业可通过碳抵消的方式降低自身的碳履约成本,但要遵从政府的精准调控。这提升了控排企业的成本承受能力,同时也有效控制了碳抵消机制的挤出效应。得益于此,政府无须过分担心收紧碳配额对企业造成的成本压力,也不用顾虑碳抵消机制对企业绿色转型积极性的扭曲效应,因此可以收紧碳配额来加快碳减排进度。碳抵消机制的引入帮助政府更好平衡碳减排效果和碳履约成本,由此实现更高的社会福利,本文称之为强制减排市场和自愿减排市场的协同效应。<sup>①</sup>

进一步看,要充分发挥强制减排市场与自愿减排市场的协同效应,应确保碳抵消比例上限与碳配额数量之间始终相互匹配,并根据相关因素的变化对二者的数值进行动态调整。例如,当单位碳排放的负外部性升高时,应收紧碳配额并且适度上调碳抵消比例上限。这是由于,当单位碳排放的负外部性提高后,减排任务更加紧迫,即使碳抵消比例上限不发生变化,政府仍存在收紧碳配额的需求。而通过适度上调碳抵消比例上限,控排企业对减排任务的承受能力有所提升,这为政府提供了进一步收紧碳配额的空间,能够更好应对单位碳排放负外部性上升的挑战。这种“单位碳排放负外部性升高—收紧碳配额—上调碳抵消比例上限—进一步收紧碳配额”的调整,反映出强制减排市场与自愿减排市场的协同效应依赖于政府精心匹配不同政策工具的参数。

本文的研究发现解释了为何CCER在中国的发展“一波三折”。一般认为,中国于2017年暂停CCER的主要原因之一是其市场交易体量过小,<sup>②</sup>这反映出CCER市场的供需失衡。本文进一步指出,供需失衡的根本原因是碳抵消比例上限与碳配额数量之间没有形成有效的匹配。具体而言,过去CCER市场交易低迷主要是由于强制减排市场的初始碳配额发放较多,导致企业的碳履约压力不大,进而不需要借助碳抵消这一外力来完成减排任务。本文的研究发现也可以解释CCER在中国的重启。自“双碳”目标提出以来,政府在碳减排压力的影响下逐步收紧碳配额,这加大了控排企业的碳履约成本,从而增加了控排企业利用碳抵消机制缓解碳履约成本的需要。<sup>③</sup>为此,政府于2023年10月底重启CCER,以顺应控排企业对碳抵消的市场需求。

本文的边际贡献如下:一方面,现有关于碳抵消机制的文献大多在碳配额外生给定的前提下进行讨论,未将控排企业在强制减排市场的交易行为以及市场均衡(例如碳价)内生化,不能完整地揭

① 本文中,强制减排市场与自愿减排市场的协同效应体现在碳抵消比例上限和碳配额的协同调整能够实现社会福利的帕累托改进,因而两大减排市场的协同也可等价地理解为碳抵消机制与碳配额制度的协同。

② 2017年3月,国家发展和改革委员会发布公告,明确指出存在“温室气体自愿减排交易量少、个别项目不够规范等问题”(资料来源: [https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/gg/201703/t20170317\\_961176\\_ext.html](https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/gg/201703/t20170317_961176_ext.html))。

③ 生态环境部应对气候变化司相关负责人就《2023、2024年度全国碳排放权交易发电行业配额总量和分配方案》答记者问时,明确指出碳配额呈逐年收紧趋势。例如,“前两个履约周期中,碳配额分配基准值均按照年均下降0.5%设定”(资料来源: [https://www.mee.gov.cn/ywdt/zbft/202410/t20241021\\_1089827.shtml](https://www.mee.gov.cn/ywdt/zbft/202410/t20241021_1089827.shtml))。

示强制减排市场与自愿减排市场间的互动关系。不同于现有文献,本文将政府碳配额发放数量与碳抵消比例上限调控纳入统一决策框架,从理论上更清晰地证明了强制减排市场与自愿减排市场的协同关系及发挥协同效应的前提条件,也为预测和评估政府推动自愿减排市场过程中强制减排市场可能发生的变化提供了理论基础。另一方面,现有文献大多认为碳抵消机制的引入会弱化控排企业的绿色转型积极性并降低强制减排市场的交易活跃度,但本文的理论分析表明,若政府始终根据碳排放负外部性等因素的动态变化保持碳配额发放数量与碳抵消比例上限的双向动态匹配,则不仅不会出现企业绿色转型积极性和碳交易活跃度因碳抵消机制的引入而下降的问题,反而能通过引入碳抵消机制释放紧缩碳配额的空间,进而使得控排企业和参与碳抵消的非控排主体(如控排企业的上下游企业)的减碳潜力和积极性得到更加充分地发挥和调动。

## 二、文献评述

本文从碳减排效果与碳履约成本的角度探究碳抵消与碳配额的政策设计问题,属于兼顾减排与经济发 展的范畴。现有研究也普遍认识到兼顾减排与经济发展的重要性,但较少关注碳抵消的政策设计及其与碳配额的协同。从研究对象看,现有研究更多聚焦于强制减排市场(Cui et al., 2021; 吴茵茵等, 2021; 靳玮等, 2022; 胡珺等, 2023; 岳童和童健, 2024; 马广程等, 2024)、碳税(Acemoglu et al., 2012; 张晓娣和刘学悦, 2015)、排污权交易(任胜钢等, 2019; 史丹和李少林, 2020)、环境税(范庆泉等, 2016)、用能权交易(张宁和张维洁, 2019)、负碳技术补贴政策(段宏波和汪寿阳, 2024; 沈维萍等, 2024)等政策工具。从研究内容看,这些研究主要关注以下几个方面:①在行业层面对不同政策情景的碳减排路径和总产出水平进行预测分析,并依据减排成效最大化、减排成本最小化的原则进行政策比较,代表性研究是陈诗一(2010)、陈诗一等(2024);②着眼于发展阶段对碳减排政策设计的影响,建议根据经济发展阶段、技术水平等进行碳中和路径选择,以使社会福利最大化(王林辉等, 2020; 郑新业等, 2023)。

近年来,逐渐有学者认识到碳抵消机制的重要性,并就是否限制碳抵消机制的使用程度、碳抵消机制对碳配额分配方案的影响等问题展开讨论。就限制碳抵消比例的必要性看,现有研究基本达成共识,但给出的理由不尽相同。例如,部分研究从碳抵消机制的申报成本出发(包括核证减排项目所耗费的人力、物力等),认为若碳抵消比例过高,则碳抵消的申报数量会激增,由此产生的高昂申报成本会对冲掉碳抵消项目降低的减碳成本(Li et al., 2019; He et al., 2023)。还有研究指出碳抵消机制会对强制减排市场的减排效果产生负面影响,因此,建议限制碳抵消比例(Wang and Wang, 2015; Ye et al., 2021; Ji et al., 2021; Huang et al., 2022; Zhang and Lin, 2024)。本文同样认为需要限制碳抵消的使用程度,但本文强调政府对碳抵消机制的调控力度具有动态可变性,且碳抵消比例上限与碳配额发放数量的调整应保持协调。相较之下,已有研究未同时内生碳抵消比例上限和碳配额发放数量,难以刻画二者在不同阶段的协调搭配模式。例如, Rosendahl and Strand(2015)认为,碳配额的分配方案取决于外生给定的更新参数和企业层面不受政府控制的历史碳排放或历史产量,没有真正意义上从社会福利最大化的角度内生碳配额发放数量,更无法刻画出碳抵消比例上限和碳配额发放数量之间的双向影响。

还有一部分研究从碳排放责任视角讨论碳抵消机制对碳配额分配方案的影响。从研究对象看,这些研究通常在既定的减碳目标下,探究如何在区域、产业链等宏观层面进行碳减排责任分配。例如,关注碳汇资源对省际碳配额分配的影响(Guo et al., 2023);构建基于产业链投入产出关系的

碳排放责任共担框架,并将碳抵消机制视为减免碳排放责任的奖励措施(Gao et al., 2024)。不同于此,本文针对微观企业的减碳政策设计进行考察,且减碳量并非外生给定,而是内生于政府对碳减排效果和碳履约成本的权衡取舍。从信息结构看,这些研究均考虑的是信息对称的政策环境,如要求政府精确测算出各省份的碳减排能力(Guo et al., 2023),或者要求政府精准计量各行业的绿色创新效率(Gao et al., 2024),但本文则讨论了政府难以准确辨别企业绿色生产成本的信息不对称问题。从隐含假设看,尽管现有研究认识到碳抵消机制在碳排放责任分担中的作用,却尚未充分重视其潜在风险,即对绿色生产的挤出效应。本文强调,尽管碳抵消机制和绿色生产都具有减碳效果,但控排企业的绿色生产还能通过技术溢出、知识溢出等渠道产生正外部性,因此必须警惕碳抵消机制对绿色生产的挤出效应。

### 三、理论框架

考虑一个由政府、两家代表性企业组成的经济体,所有参与主体均为风险中性,企业内部不存在委托代理问题。<sup>①</sup>

#### 1. 企业的生产和减碳行为

(1) 产品生产。市场上有两家代表性企业H和L,二者在产品生产过程中均会排放以二氧化碳为代表的温室气体,对整个社会产生负外部性。为聚焦企业的减碳行为及政府的政策设计,本文简化产品市场的理论建模,不失一般性,将企业H和L的产能记为 $q$ ,同时将每单位产品的价格和生产成本标准化为1和0,即各家企业都能生产 $q$ 单位产品,这些产品售出后的总利润均为 $q$ 。<sup>②</sup>进一步地,本文将生产1单位产品的碳排放量标准化为1单位二氧化碳当量。同时,将1单位二氧化碳当量带来的负外部性记为 $d(d > 0)$ 。特别地,单位碳排放的负外部性 $d$ 不仅取决于碳排在客观上给居民健康、地区发展等造成了多大的危害,也取决于政府主观上对碳排放负外部性的认知和重视程度,因此能较好地反映碳减排的紧迫程度。

(2) 减碳方式。企业可以通过两种方式减碳,其区别在于真实减碳主体的不同,具体如下:一是以绿色生产的方式直接减少自身的碳排放量。这里的绿色生产涉及多个方面,包括但不限于:直接对生产环节进行绿色技术创新,用绿色技术替代高耗能、高污染的传统技术;通过更新生产设备,提高生产效率,降低能源损耗;采用绿色管理理念,避免不必要的资源浪费。本文将企业 $i$ 在上述绿色生产方面的努力程度统称为“绿色生产程度”,记为 $u_i(0 < u_i < 1)$ 。不难想象,企业对绿色生产的投入越多、努力程度越高,则减排效果越好。为此,本文假设当企业 $i$ 投入 $u_i$ 单位的绿色生产后,每单位生产的碳排放量将从1减少为 $1 - u_i$ 。相应地,企业 $i$ 生产 $q$ 单位产品的碳排放及其负外部性分别减少为 $(1 - u_i)q$ 和 $d(1 - u_i)q$ ,其中, $i \in \{H, L\}$ 。

企业不可避免地要为绿色生产付出成本,包括在人才引进、设备更新等方面的人财物力等。为刻画绿色生产成本具有边际递增的特性,本文借鉴 Cerqua et al. (2020) 的做法,将企业 $i$ 的绿色生产

① 宏观模型虽然可以定量刻画消费、投资等宏观变量在碳中和约束下的动态变化,但在分析经济机制方面有局限性,难以清晰刻画碳抵消与碳配额协同机制。本文关注参与者之间的微观博弈,探究控排企业的策略性行为对减碳政策设计的影响,因此采用微观博弈模型。

② 企业在产品市场的关系具有不确定性,存在竞争、合作或独立等多种可能。若将企业产量决策内生,则需要分类讨论企业在产品市场上的关系。这可能需要增添许多模型设定,甚至引入新的博弈参与者,以致偏离本文研究重心。为此,本文外生给定两家企业的产量,且不考虑企业在产品市场中的关系。

成本设为绿色生产程度  $u_i$  的二次函数,且该成本的大小与产能  $q$  正相关,即  $\frac{\theta_i}{2} u_i^2 q$ 。其中,  $\theta_i$  是企业  $i$  进行绿色生产的成本系数。在绿色生产程度与产量相同的情况下,  $\theta_i$  越小,企业  $i$  付出的绿色生产成本就越低。为刻画两家企业在成本系数上的显著差异,本文设  $\theta_H < \theta_L$ ,说明在实现相同的绿色生产程度及产量的条件下,企业 H 通过绿色生产方式的减碳成本低于企业 L。为便于表述,后文将企业 H、L 分别称为减碳优势企业和减碳劣势企业。二是投资其他碳排放源的碳减排项目(如自愿减排市场中的林业碳汇和可再生能源项目等),用这些项目的减碳量充当自身的碳减排,本文称之为“碳抵消”。<sup>①</sup> 注意到,正是因为企业以资金供给者而非执行者的身份参与此种减碳方式,该方式的成本取决于其他碳排放源的减碳成本系数  $\theta_s$  和减碳量  $E_s$ 。本文设当企业  $i$  试图通过投资其他减碳项目的方式使单位产品的碳排放减少  $\frac{E_s}{q}$  单位时,总计需要付出的成本是  $\frac{\theta_s}{2} \left( \frac{E_s}{q} \right)^2 q$ 。此外,为突出减碳优势企业的绿色生产能力,本文假设在减碳量相同的情况下,其他碳排放源的减碳成本高于减碳优势企业,即满足  $\theta_s > \theta_H$ 。<sup>②</sup>

除了达到减排降碳的效果外,以上两种减碳方式还将对整个社会的绿色转型产生正外部性。例如,当企业直接对产品生产环节进行绿色技术创新时,其在生产技术、生产模式等方面的创新会对整个行业的绿色低碳转型产生技术溢出。类似地,当企业以采购新型设备、优化绿色管理理念的方式进行绿色生产时,企业对新型设备的购置需求将激励生产商进行产品升级,先进的绿色管理理念会对同行业的其他企业产生知识溢出。进一步看,绿色生产的正外部性还具有规模效应,即同样再多投入 1 单位绿色生产,若企业原有的绿色生产程度越高,则其累积的绿色转型优势就越显著,相应地,这单位绿色生产对整个社会的正外部性就越强。不过,考虑到以林业碳汇为代表的替代性减碳项目较少涉及绿色生产,以可再生能源为代表的减碳项目因技术专用性高而缺乏通用性,因此,这些替代性减碳方式对企业所在行业的正外部性相对较低。基于此,本文将替代性减碳方式的正外部性标准化为零,将绿色生产的正外部性记为  $\frac{h}{2} u_i^2 q$ ,其中,  $h$  是衡量绿色生产正外部性的强度系数。这意味着,给定企业  $i$  的绿色生产程度  $u_i$ ,企业付出的成本为  $\frac{\theta_i}{2} u_i^2 q$ ,但社会层面的绿色生产成本仅为  $\frac{\theta_i - h}{2} u_i^2 q$ ,其中,  $0 < h < \theta_H$  说明绿色生产对整个社会是有成本的。

基于以上设定,为减少碳排放所引起的社会福利损失,政府总是希望企业采取减排措施。此外,尽管绿色生产和替代性减碳方式都能达到减碳效果,但在成本可控的范围内,政府为推动整个行业的绿色转型,更希望企业通过绿色生产的形式进行减碳。然而,从企业角度看,其利润水平会因减碳下滑,其结果是,在没有政府监管的情景下,企业既不愿意进行绿色生产,也不采取替代性减碳措施。因此,政府必须采取措施以督促企业减碳。

## 2. 政府的减碳政策及其信息约束

(1) 碳配额是限制碳排放的基础性政策工具。为督促企业的绿色生产,政府对控排企业的碳排放量进行限额管理,并以碳排放权  $E_c$  的形式分配给各家企业,一旦企业的碳排放量超出自身所拥

① 在本文的模型框架下,控排企业不仅可以使用本国的碳抵消项目,也可以使用国外的碳抵消项目。

② 本文设定  $\theta_s > \theta_H$  是为了突出企业 H 在减碳中的优势。不论  $\theta_s$  的大小,由于企业绿色生产成本的边际递增特性,控排企业的最优决策都是进行碳抵消,因为其可以分摊减碳任务,降低自身碳履约成本。

有的碳排放权,则将受到政府处罚。<sup>①</sup>理论上,政府应当根据企业从事绿色生产时的成本特性,“因企制宜”分配碳排放权。但政府受限于对企业信息的有限认识,难以准确辨别各家企业的成本系数,因此只能向两家企业授予相同的碳配额,然后建立起强制减排市场,由企业自行在强制减排市场上对碳排放权进行二次分配。对应到本文,如果减碳劣势企业L无力满足政府的限额管理,则其可以在强制减排市场上买入减碳优势企业H多余的碳配额。本文将强制减排市场的碳交易量和交易价格(碳价)记为 $\Delta$ 和 $p$ ,二者取决于强制减排市场的供需均衡。

(2)政府还可以考虑设立碳抵消机制,即允许控排企业在碳履约时使用从自愿减排市场中购得的减碳量。此时,企业可以排放的最大碳排放量等于政府下发的碳配额 $E_c$ 、企业在强制减排市场中发生的碳交易额 $\Delta$ 、碳抵消方式的减碳量 $E_s$ 三者之和。特别地,本文将碳抵消机制的减碳量 $E_s$ 与碳配额 $E_c$ 的比值定义为碳抵消比例 $s$ ,即 $s = \frac{E_s}{E_c}$ 。<sup>②</sup> $s$ 的数值越大,意味着控排企业更大程度地使用自愿减排市场的减碳量来抵消自身的减碳任务,对碳抵消机制的使用程度相应越高。后文讨论了企业自主决定碳抵消比例和政府规定碳抵消比例上限两种情景。

本文关注政府最适宜的减碳政策组合,因而就以下三种政策情景的福利效应进行对比分析,包括“不设立碳抵消机制”“企业自主决定碳抵消比例”以及“政府规定碳抵消比例上限”。

### 3. 博弈时序

本文在政府对绿色生产具有不对称信息的情形下,探究碳抵消的政策设计及其与碳配额的协同。本文的博弈过程分为两期:<sup>③</sup>在 $t=0$ 期,政府制定碳配额 $E_c$ ,并决定是否设立碳抵消机制。若设立碳抵消机制,则需决定是否规定碳抵消比例上限 $s^c$ 。在 $t=1$ 期,企业观察到政府制定的碳配额及碳抵消机制的存在性,决定绿色生产程度及在强制减排市场中的碳交易。若政府设立碳抵消机制,企业还需决定碳抵消比例 $s$ (若政府规定碳抵消比例上限,则需在政府约束下决定)。

## 四、基准情景：不设立碳抵消机制

作为后文分析的基础,本文首先关注不设立碳抵消机制的情景,并采用逆向归纳法求解均衡。当不设立碳抵消机制时,企业H和L不仅要决定自身的绿色生产程度,还需确定在强制减排市场的碳交易量。给定政府下发的碳配额 $E_c$ ,意味着政府将单位产品的碳排放限定在 $\frac{E_c}{q}$ 。如果企业H大力进行绿色生产,使单位产品碳排放量从 $\frac{E_c}{q}$ 减少为 $\frac{E_c - \Delta}{q}$ ,则其能将多余 $\Delta$ 单位的碳配额出售给企业L,并获取收益 $p\Delta$ 。也就是说,若企业H选择向企业L出售 $\Delta$ 单位碳配额,则其绿色生产程度需满足 $u_H = 1 - \frac{E_c - \Delta}{q}$ ,成本为 $\frac{\theta_H}{2} \left(1 - \frac{E_c - \Delta}{q}\right)^2 q$ 。类似地,如果企业L买入 $\Delta$ 单位碳配额,则其每单位生产的碳排放可以达到 $\frac{E_c + \Delta}{q}$ ,此时,企业L只需投入 $u_L = 1 - \frac{E_c + \Delta}{q}$ 的绿色生产程度,并付出

① 本文设政府对超额碳排放量的处罚力度足够大,以致企业不会出现超额排放的情况。

② 对于比例 $s$ 的定义,参照中国强制减排市场中对CCER的可抵消比例的规定。例如,北京的强制减排市场规定CCER的可抵消比例不超过发放给控排企业碳配额的5%。

③ 博弈时序图和模型主要变量的汇总表参见《中国工业经济》网站(ciejournal.ajcass.com)附件。

$\frac{\theta_L}{2} \left( 1 - \frac{E_G + \Delta}{q} \right)^2 q$  的成本, 便能满足政府的控排要求。二者的优化问题分别为:

$$\max_{\Delta} \pi_H = q - \frac{\theta_H}{2} \left( 1 - \frac{E_G^b - \Delta}{q} \right)^2 q + p\Delta \quad (1)$$

$$\max_{\Delta} \pi_L = q - \frac{\theta_L}{2} \left( 1 - \frac{E_G^b + \Delta}{q} \right)^2 q - p\Delta \quad (2)$$

求解(1)式、(2)式的一阶条件  $\frac{\partial \pi_H}{\partial \Delta} = 0$ 、 $\frac{\partial \pi_L}{\partial \Delta} = 0$ , 可得企业 H、L 对碳配额的供给量和需求量。

进一步根据供需相等的市场出清条件, 可得强制减排市场的均衡状态为:  $\frac{p^b}{\theta_H} - \left( 1 - \frac{E_G^b}{q} \right) = \left( 1 - \frac{E_G^b}{q} \right) - \frac{p^b}{\theta_L}$ 。此时, 碳价和碳交易量分别为:  $p^b = \frac{2\theta_H\theta_L}{\theta_H + \theta_L} \left( 1 - \frac{E_G^b}{q} \right)$  和  $\Delta^b = \frac{\theta_L - \theta_H}{\theta_H + \theta_L} \left( 1 - \frac{E_G^b}{q} \right) q$ 。相应地, 企业 H 和 L 的绿色生产程度分别为:  $u_H^b = \frac{2\theta_L}{\theta_H + \theta_L} \left( 1 - \frac{E_G^b}{q} \right)$  和  $u_L^b = \frac{2\theta_H}{\theta_H + \theta_L} \left( 1 - \frac{E_G^b}{q} \right)$ 。

政府可以理性预期到企业的绿色生产程度和碳交易情况, 从社会福利最大化的角度出发, 决定最适宜的碳配额  $E_G$ 。相应的最优化问题为:<sup>①</sup>

$$\max_{E_G} SW = \underbrace{2q - \frac{\theta_H}{2} (u_H)^2 q - \frac{\theta_L}{2} (u_L)^2 q}_{\text{企业利润}} - \underbrace{2dE_G}_{\text{碳排放的负外部性}} + \underbrace{\frac{h}{2} [(u_H)^2 q + (u_L)^2 q]}_{\text{绿色生产的正外部性}} \quad (3)$$

求解(3)式的一阶条件  $\frac{\partial SW}{\partial E_G} = 0$ , 可得最适宜的碳配额为:  $E_G^b = \left\{ 1 - \frac{d(\theta_H + \theta_L)^2}{2[\theta_H^2(\theta_L - h) + (\theta_H - h)\theta_L^2]} \right\} q$ 。<sup>②</sup>

## 五、设立碳抵消机制：企业自主决定碳抵消比例

本部分考察政府设立碳抵消机制但不规定碳抵消比例上限时的减碳政策设计。此时, 企业 H 的行为决策与第四部分相同, 企业 L 还需额外决定对碳抵消机制的使用程度, 即若企业 H 选择向企业 L 出售  $\Delta$  单位碳配额, 则其绿色生产程度需满足:  $u_H = 1 - \frac{E_G - \Delta}{q}$ , 相应的成本为:

$\frac{\theta_H}{2} \left( 1 - \frac{E_G - \Delta}{q} \right)^2 q$ 。此外, 若企业 L 选择买入  $\Delta$  单位碳配额, 同时决定以碳抵消的方式抵消  $sE_G$  单位的碳排放, 并为其付出成本  $\frac{\theta_L}{2} \left( \frac{sE_G}{q} \right)^2 q$ , 则只需投入  $u_L = 1 - \frac{E}{q}$  单位的绿色生产, 付出  $\frac{\theta_L}{2} \left( 1 - \frac{E}{q} \right)^2 q$

的绿色生产成本就能达到政府的控排要求, 其中,  $E = E_G + sE_G + \Delta$ 。二者的优化问题分别为:<sup>③</sup>

① 碳中和目标的实现需要碳排放总量控制, 为此借鉴姜春海等(2024)的方法, 引入碳排放总量的约束条件  $E_G \leq \overline{E_G}$ , 即政府发放给企业的碳排放权不能超过  $\overline{E_G}$ 。其中,  $\overline{E_G}$  代表碳排放量的总体性约束。该种建模方式与本文的建模方式具有逻辑一致性, 具体说明参见《中国工业经济》网站(ciejournal.ajcass.com)附件。

② 给定碳配额发放数量, 企业的均衡决策结果及各均衡结果对  $h$  的比较静态分析参见《中国工业经济》网站(ciejournal.ajcass.com)附件。

③ 此处暗含假设是企业 H 不参与碳抵消, 放松该假设并不影响本文的核心结论, 相关说明参见《中国工业经济》网站(ciejournal.ajcass.com)附件。

$$\max_{\Delta} \pi_H = q - \frac{\theta_H}{2} \left( 1 - \frac{E_G^f - \Delta}{q} \right)^2 q + p\Delta \quad (4)$$

$$\max_{\Delta, s} \pi_L = q - \frac{\theta_L}{2} \left( 1 - \frac{E}{q} \right)^2 q - \frac{\theta_s}{2} \left( \frac{sE_G^f}{q} \right)^2 q - p\Delta \quad (5)$$

企业 H 和 L 利润最大化的一阶条件为： $\frac{\partial \pi_H}{\partial \Delta} = 0$  和  $\frac{\partial \pi_L}{\partial \Delta} = \frac{\partial \pi_L}{\partial s} = 0$ 。强制减排市场出清条件为碳配额供需相等，由此可知，碳价为： $p^f = \frac{2\theta_H\theta_L\theta_s}{\theta_H\theta_L + \theta_H\theta_s + \theta_L\theta_s} \left( 1 - \frac{E_G^f}{q} \right)$ ，碳交易量为： $\Delta^f = \frac{-\theta_H\theta_L - \theta_H\theta_s + \theta_L\theta_s}{\theta_H\theta_L + \theta_H\theta_s + \theta_L\theta_s} \left( 1 - \frac{E_G^f}{q} \right) q$ 。企业 H 和 L 的绿色生产程度分别为： $u_H^f = \frac{2\theta_L\theta_s}{\theta_H\theta_L + \theta_H\theta_s + \theta_L\theta_s} \left( 1 - \frac{E_G^f}{q} \right)$  和  $u_L^f = \frac{2\theta_H\theta_s}{\theta_H\theta_L + \theta_H\theta_s + \theta_L\theta_s} \left( 1 - \frac{E_G^f}{q} \right)$ ，企业 L 的碳抵消比例为： $s^f = \min \left\{ \frac{2\theta_H\theta_L}{\theta_H\theta_L + \theta_H\theta_s + \theta_L\theta_s} \left( \frac{q}{E_G^f} - 1 \right), 1 \right\}$ 。

政府理性预期到企业的绿色生产行为、在强制减排市场中的交易行为及其对碳抵消机制的使用程度，选择调整碳配额，以最大化社会福利。社会福利为：

$$\max_{E_G} SW = \underbrace{2q - \frac{\theta_H}{2}(u_H)^2 q - \frac{\theta_L}{2}(u_L)^2 q - \frac{\theta_s}{2} \left( \frac{sE_G}{q} \right)^2 q}_{\text{企业利润}} - \underbrace{2dE_G}_{\text{碳排放的负外部性}} + \underbrace{\frac{h}{2} \left[ (u_H)^2 q + (u_L)^2 q \right]}_{\text{绿色生产的正外部性}} \quad (6)$$

上式的一阶条件为： $\frac{\partial SW}{\partial E_G} = 0$ 。当企业自主决定碳抵消比例时，最适宜碳配额为： $E_G^f = \left\{ 1 - \frac{(\theta_H\theta_L + \theta_H\theta_s + \theta_L\theta_s)^2 d}{2[\theta_H^2(\theta_L - h)\theta_s^2 + \theta_H^2\theta_L^2\theta_s + (\theta_H - h)\theta_L^2\theta_s^2]} \right\} q$ 。

## 六、设立碳抵消机制：政府规定碳抵消比例上限

这部分将探究当政府对碳抵消比例上限进行精准调控时的减碳政策设计。此时，企业 H 和 L 的决策方程与第五部分相同，但企业 L 对碳抵消机制的使用程度面临监管约束 ( $s \leq s^c$ )，二者的优化问题如下：

$$\max_{\Delta} \pi_H = q - \frac{\theta_H}{2} \left( 1 - \frac{E_G^c - \Delta}{q} \right)^2 q + p\Delta \quad (7)$$

$$\max_{\Delta, s} \pi_L = q - \frac{\theta_L}{2} \left( 1 - \frac{E}{q} \right)^2 q - \frac{\theta_s}{2} \left( \frac{sE_G^c}{q} \right)^2 q - p\Delta \quad (8)$$

s.t.  $s \leq s^c$

企业 H 和 L 利润最大化的一阶条件为  $\frac{\partial \pi_H}{\partial \Delta} = 0$  与  $\frac{\partial \pi_L}{\partial \Delta} = 0$ ， $s = s^c$ 。强制减排市场的出清条件为碳配额供求相等，由此可得碳价和碳交易量分别为： $p^c = \frac{-\theta_L\theta_H s^c}{\theta_L + \theta_H} + \frac{\theta_H\theta_L(2 + s^c)}{\theta_L + \theta_H} \left( 1 - \frac{E_G^c}{q} \right)$ ， $\Delta^c = \left[ \frac{-\theta_L s^c}{\theta_L + \theta_H} + \frac{\theta_L(1 + s^c) - \theta_H}{\theta_L + \theta_H} \left( 1 - \frac{E_G^c}{q} \right) \right] q$ 。企业 H 和 L 的绿色生产程度分别为： $u_H^c =$

$$\frac{\theta_L(2+s^c)}{\theta_H+\theta_L}\left(1-\frac{E_G^c}{q}\right)-\frac{\theta_L s^c}{\theta_H+\theta_L} \text{ 和 } u_L^c=\frac{-\theta_H s^c}{\theta_H+\theta_L}+\frac{\theta_H(2+s^c)}{\theta_L+\theta_H}\left(1-\frac{E_G^c}{q}\right)。$$

此时,政府调整碳配额  $E_G$  及碳抵消比例上限  $s^c$  的数值来最大化社会福利。社会福利可表示为:

$$\max_{E_G, s^c} SW = \underbrace{2q - \frac{\theta_L}{2}(u_L)^2 q - \frac{\theta_s}{2}\left(\frac{s^c E_G^c}{q}\right)^2 q - \frac{\theta_H}{2}(u_H)^2 q}_{\text{企业利润}} - \underbrace{2dE_G^c}_{\text{碳排放的负外部性}} + \underbrace{\frac{h}{2}[(u_L)^2 q + (u_H)^2 q]}_{\text{绿色生产的正外部性}} \quad (9)$$

政府社会福利最大化的一阶条件为:  $\frac{\partial SW}{\partial E_G} = \frac{\partial SW}{\partial s^c} = 0$ 。当政府规定碳抵消比例上限时,均衡的

$$\text{碳配额与碳抵消比例上限分别为: } E_G^c = \left[ 1 - \frac{\theta_s d(\theta_L + \theta_H)^2 + d[\theta_H^2(\theta_L - h) + \theta_L^2(\theta_H - h)]}{2[\theta_H^2(\theta_L - h) + \theta_L^2(\theta_H - h)]\theta_s} \right] q \text{ 和 } s^c = \frac{2d[\theta_H^2(\theta_L - h) + \theta_L^2(\theta_H - h)]}{2[\theta_H^2(\theta_L - h) + \theta_L^2(\theta_H - h)]\theta_s - \theta_s d(\theta_L + \theta_H)^2 - d[\theta_H^2(\theta_L - h) + \theta_L^2(\theta_H - h)]}。^{①}$$

## 七、最适宜减碳政策组合的设计

这部分将“不设立碳抵消机制”“企业自主决定碳抵消比例”和“政府规定碳抵消比例上限”这三种情景进行整体比较(简称三种不同政策情景),揭示政府规定碳抵消比例上限的必要性与合理性。在此基础上,本部分还将在碳中和目标日益临近的现实情境下,探究减碳政策在不同阶段的调整策略,即碳配额和碳抵消比例上限如何根据碳减排紧迫性的变化进行适应性调整。

### 1. 政府规定碳抵消比例上限时的减碳效果与福利效应

(1)碳抵消比例、碳配额发放与社会福利的比较。图1对比了三种不同政策情景下的减碳政策与社会福利,据此可得:

引理1:给定相同的碳配额,政府决定的碳抵消比例上限低于企业自主决定的碳抵消比例。

引理1说明,若政府决定设立碳抵消机制,则应精准调控企业对碳抵消机制的使用程度。这主要受两个因素的影响:①碳抵消机制存在一正一反的两种福利效应。一方面,碳抵消机制的引入拓宽了控排企业的碳履约渠道,实现对碳履约成本的有效分摊,因此能提高控排企业的利润水平,由此提升社会福利,此为“降本效应”。另一方面,碳抵消机制降低了减碳劣势企业L对碳配额的需求量,即使减碳优势企业H大力进行绿色生产并创造出大量盈余碳配额,也无法赚取更多收益,反而需付出高昂的成本。此时,不仅减碳劣势企业因直接参与碳抵消而降低绿色生产程度,减碳优势企业的转型积极性也较碳抵消机制设立前降低,最终导致社会福利因企业绿色转型滞缓、全行业绿色储备不足而产生损失,此为“挤出效应”。②企业与政府的决策目标不一致。企业以自身利润最大化为目标,只关注碳抵消机制的降本效应,不关注挤出效应。政府从最大化社会福利的角度出发,既要关注碳抵消机制的降本效应,又需警惕碳抵消机制的挤出效应。因此,政府设立碳抵消机制时的理性决策是精准调控碳抵消比例上限  $s^c$ ,以防企业过度使用碳抵消。

① 为保证均衡的碳配额与碳抵消比例上限具有经济含义,本文设定参数  $d < \frac{2[\theta_H^2(\theta_L - h) + \theta_L^2(\theta_H - h)]\theta_s}{3[\theta_H^2(\theta_L - h) + \theta_L^2(\theta_H - h)] + \theta_s(\theta_L + \theta_H)^2}$ ,详细说明参见《中国工业经济》网站(ciejournal.ajcass.com)附件。

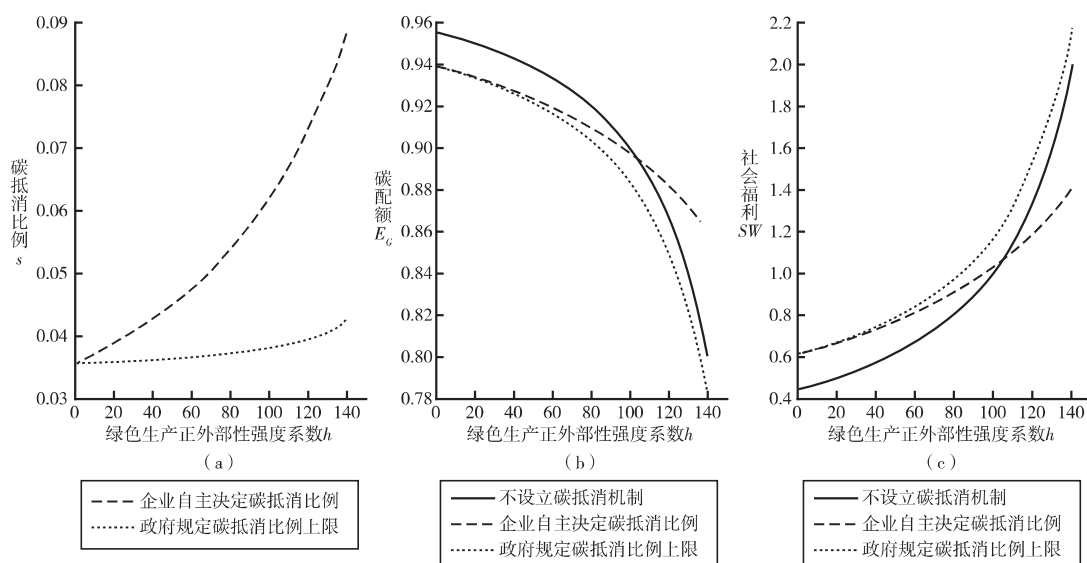


图1 三种不同政策情景下的减碳政策和社会福利

注:数值模拟中外生变量的参数设置为 $\theta_H = 150, \theta_L = 450, \theta_S = 300, d = 10, h \in [0, 140]$ ,以下各图同。

资料来源:参考国内外的代表性成果和中国全国强制减排市场的实际情况进行参数赋值。减碳成本系数的设定借鉴 Wang et al.(2022),单位碳排放的负外部性的设定借鉴靳玮等(2022),绿色生产正外部性强度系数的设定参照 Aghion et al.(2016)、郑新业等(2023)。参数设定的细节说明,以及本文核心结论不受参数设定影响的相关证明参见《中国工业经济》网站(ciejournal.ajcass.com)附件。

引理2:当政府规定碳抵消比例上限时,均衡碳配额低于企业自主决定碳抵消比例以及碳抵消机制设立前的水平,由此实现社会总福利的帕累托改进。

引理2进一步反映出政府设立碳抵消机制并精准调控碳抵消比例上限的必要性和重要性。若政府仅设立碳抵消机制,但将碳抵消比例的决策权下放给企业,则企业过度使用碳抵消机制的潜在风险可能导致碳减排效果较碳抵消机制设立前更差。当绿色生产正外部性的强度系数较大时,碳抵消机制主要通过挤出效应损害社会福利。此时,政府要想将净福利损失控制在一个可接受的范围内,不得不放松碳配额,用更温和的减排任务来抑制企业对碳抵消的使用。<sup>①</sup>当绿色生产正外部性的强度系数较小时,挤出效应对社会福利的损害程度有限,碳抵消机制主要通过降本效应提升社会福利。此时,政府可以较碳抵消机制设立前收紧碳配额,更好地督促企业进行绿色生产。<sup>②</sup>然而,为审慎控制企业对碳抵消机制的使用程度,政府对碳配额的收紧幅度相对有限。

相较之下,当政府规定碳抵消比例上限时,可以通过限额管理的方式针对性地调控企业对碳抵消机制的使用程度,使得企业只能适量使用碳抵消。这有效控制住了碳抵消机制的挤出效应,同时还保留其降本效应。得益于此,无论是与不设立碳抵消机制还是与企业自主决定碳抵消比例相比,政府都可以更好地平衡碳减排效果与碳履约成本,更大幅度地收紧碳配额。最终,社会福利因碳减排进度加快、碳履约成本整体可控而实现帕累托改进。据此,可得:

命题1:给定碳抵消机制的降本和挤出效应,政府最适宜的减碳政策是设立碳抵消机制并保

① 放松碳配额虽能在一定程度上控制碳抵消机制的挤出效应,但会弱化企业对绿色生产的积极性。

② 当不设立碳抵消机制时,政府为平衡不同企业的减碳能力,不得不制定较为宽松的碳配额。

持对碳抵消比例上限的精准调控,以便在控制其挤出效应的前提下,最大限度地发挥其降本效应。

(2)碳价和碳交易量的比较。图2显示,相比于不设立碳抵消机制,若政府设立碳抵消机制但未对企业的碳抵消比例做出硬性规定,强制减排市场会出现量价齐跌的现象。理论上,在碳配额不变的情景下,碳抵消机制的设立拓宽了控排企业的履约渠道,企业L不再局限于碳交易的方式来弥补碳配额的缺口,强制减排市场的交易需求相应发生萎缩。进一步看,当绿色生产正外部性的强度系数较大时,政府较碳抵消机制设立前放松了碳配额,此时,企业L能更好地完成控排要求,在强制减排市场上购买碳配额的需求进一步降低。当绿色生产正外部性的强度系数较小时,政府较碳抵消机制设立前收紧了碳配额,这看似会提升企业L对碳交易的需求,但由于企业L可以自主决定碳抵消的使用程度,再加上政府为防止企业滥用碳抵消,对碳配额的收紧幅度总是有限的。因此,收紧碳配额对碳交易的提升作用也总是小于碳抵消对碳交易的抑制作用。鉴于此,若企业自主决定碳抵消比例,则存在强制减排市场失活的隐患。

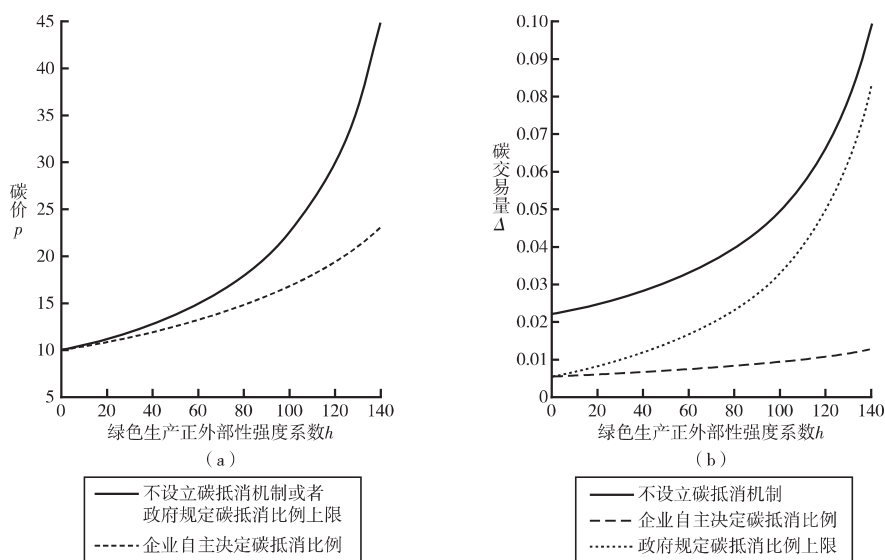


图2 三种不同政策情景下的碳价和碳交易量

如果政府设立碳抵消机制且保持对碳抵消比例上限的精准调控,则有助于重新激发强制减排市场的交易活力,碳价恢复至碳抵消机制设立前的水平,碳交易量虽低于碳抵消机制设立前的水平,但较企业自主决定碳抵消比例的情景明显上涨。原因在于,政府对碳抵消比例上限的精准调控使得减碳劣势企业难以大规模进行碳抵消,转而在强制减排市场上购买更多的碳配额。此外,政府在规定碳抵消比例上限的同时还将收紧碳配额,这同样也加大了减碳劣势企业对碳配额的交易需求,进一步推动强制减排市场交易量和碳交易价格的上涨。然而,碳抵消机制确实影响了减碳劣势企业L在强制减排市场的交易需求,致使碳交易量较碳抵消机制设立前有所下滑。

进一步看,政府规定碳抵消比例上限时的碳价与碳抵消机制设立前一致,原因如下:当政府对碳抵消比例上限进行精准调控时,控排企业对碳抵消机制的使用总量恰好等于碳配额相较于

碳抵消机制设立前的收紧总量。这表明,碳配额之所以能收紧,是因为政府通过巧妙设置碳抵消比例上限的方式,在不增加企业额外减排负担的前提下,充分调动了更多经济主体的减碳潜力。企业H和L的减碳潜力在碳抵消机制设立前已被充分挖掘,其绿色生产程度在碳抵消机制设立前后一致。碳价反映了企业绿色生产的边际成本,因此,碳抵消机制设立前后的碳价也相等。

(3)企业碳排放的比较。图3显示,当政府允许企业自主决定碳抵消比例时,企业H和L的碳排放均高于碳抵消机制设立前的水平,这是碳抵消机制挤出效应的直接结果。<sup>①</sup>特别是当绿色生产正外部性的强度系数较大时,政府通过放松碳配额的方式抑制企业对碳抵消机制的使用程度,这种做法只能将碳抵消机制的挤出效应控制在一个可接受的范围内,且宽松的控排要求本身也弱化了企业的绿色生产积极性,两种原因叠加导致企业碳排放上升。当绿色生产正外部性的强度系数较小时,政府虽然较碳抵消机制设立前收紧碳配额,但考虑到碳配额收紧幅度有限且减碳劣势企业始终可以通过碳抵消的方式转移减碳压力,收紧碳配额的碳减排激励始终弱于碳抵消机制的挤出效应,两家企业的碳排放仍高于碳抵消机制设立前。

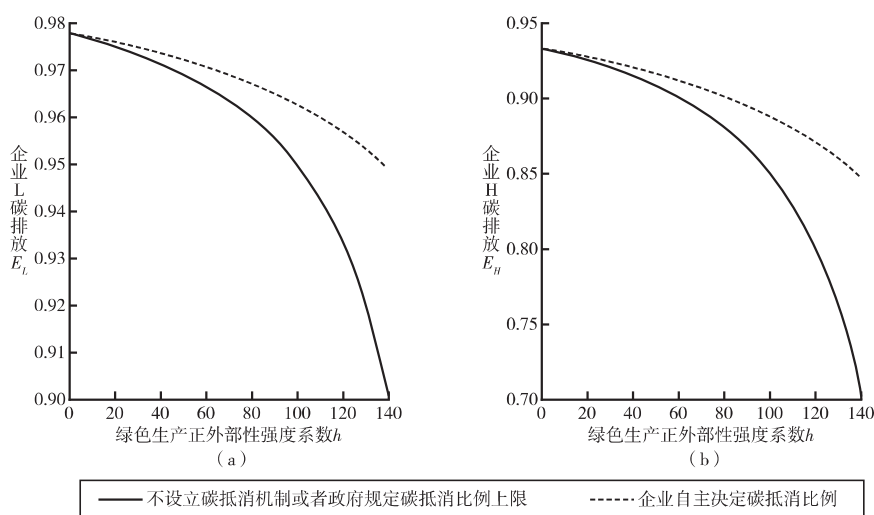


图3 三种不同政策情景下的企业碳排放量

相反,如果政府规定碳抵消比例上限,则两家企业的碳排放较企业自主决定碳抵消比例时下降,回落至碳抵消机制设立前的水平。企业碳排放之所以较企业自主决定碳抵消比例时下降,是因为政府对碳抵消比例的限制最大程度上克服了碳抵消机制的挤出效应,加之政府还收紧碳配额,形成碳减排的双重激励。企业碳排放之所以与碳抵消设立前相同,是得益于政府对碳抵消比例上限的精准调控,碳抵消机制本质是在不新增企业减排负担的前提下调动更多经济主体的减碳潜力。

(4)企业利润的比较。图4显示,相较于不设立碳抵消机制的情景,若政府允许企业自主决定碳抵消比例,则企业L的利润上升,企业H的利润仅在绿色生产正外部性的强度系数较大时增加。这是因为,不同于碳抵消机制通过降本效应提升企业L的利润,碳抵消机制对企业H的利润有两种

<sup>①</sup> 碳抵消机制设立后,减碳劣势企业拥有更多碳履约方式,因此会减少绿色生产。减碳优势企业的减碳积极性受抑制,是因为碳抵消削弱了劣势企业购买碳配额的需求,致使减碳优势企业无法赚取超额减排的利润。

截然相反的影响渠道：①碳抵消机制降低了企业L对碳配额的购买需求，导致企业H在强制减排市场上的收益下滑；②碳抵消机制挤出了企业H的绿色生产，碳履约成本相应降低。当绿色生产正外部性的强度系数较大时，政府选择放松碳配额，由此放大了第二种渠道对企业利润的正面影响，企业利润随之上升。当绿色生产正外部性的强度系数较小时，政府选择收紧碳配额，碳抵消机制主要通过第一种渠道抑制企业利润，企业利润随之下降。

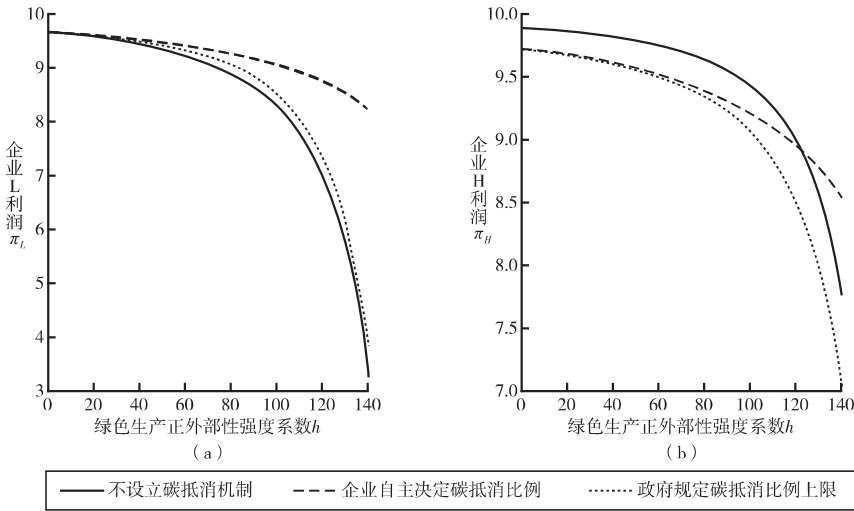


图4 三种不同政策情景下的企业利润

进一步地，若政府保持对碳抵消比例上限的精准调控，则两家企业的利润均较企业自主决定碳抵消比例时下降。对企业L而言，当政府限制企业对碳抵消机制的使用程度并进一步收紧碳配额后，其利润不可避免地因绿色生产成本上升、碳交易费用增多而下滑。不过，得益于碳抵消机制的降本效应，企业L的利润水平较碳抵消机制设立前仍有提升。企业H的利润变动受两种渠道的影响：①政府对碳抵消比例的限制有利于恢复碳交易活力，企业H能在强制减排市场上赚取更多收益（即“创收效应”）；②企业H因碳配额收紧而付出更多的绿色生产成本（即“成本效应”）。比较这两个效应的大小可知，政府对碳抵消比例上限的规定使其大幅收紧碳配额，成本效应强于创收效应，企业H的利润随之下滑，甚至低于碳抵消机制设立前的水平。

2. 最适宜减碳政策组合的适应性调整

上文已证实在强制减排市场中规定碳抵消比例上限是最优的，本部分在碳中和目标日益临近的现实情境下，探究该政策组合的调整策略，即如何动态调整碳配额和碳抵消比例上限。可以预期，随着时间推移，全球大气中二氧化碳含量会逐渐增多，生态环境对二氧化碳的承载力日益减弱。其结果是，增量碳排放对自然环境的危害性日渐严重，例如，极端天气更加频繁、全球气候变暖加快等。在单位碳排放对整个社会的负外部性逐渐上升的现实趋势下设计出最适宜的减碳政策工具组合具有前瞻性和现实意义。<sup>①</sup>

<sup>①</sup> 此外，随着时间推移，全社会的绿色生产水平会逐渐提高，使得企业的减碳成本系数逐渐降低。有关最适宜减碳政策组合对减碳成本系数变化的适应性调整，参见《中国工业经济》网站（[ciejournal.ajcass.com](http://ciejournal.ajcass.com)）附件。

可以从理论上证明,随着单位碳排放负外部性 $d$ 的逐渐提升,政府应持续收紧碳配额,同时上调碳抵消比例上限。原因是,单位碳排放的负外部性 $d$ 反映出治理碳排放的紧迫性,政府的理性选择是收紧碳配额,以加快推进碳减排。当政府收紧碳配额后,企业的碳履约压力加重,有必要通过放松碳抵消比例上限的方式为企业提成本管理的机会和空间。

为直观展现单位碳排放负外部性提升后,碳配额与碳抵消比例上限的动态调整过程,图5按“先收紧碳配额一再提高碳抵消比例上限一再收紧碳配额”的先后顺序分解调整过程。<sup>①</sup>

首先,分析政府碳配额发放的决策机制。政府在发放碳配额时,需要权衡收紧碳配额改善减碳效果的正面作用及加重碳履约成本的负面影响。均衡时收紧碳配额的边际收益等于边际成本,即:

$$\frac{\theta_H \theta_L (2 + s^c) M}{\theta_L + \theta_H} - \theta_s (s^c)^2 \frac{E_c}{q} + \frac{\theta_L \theta_H (2 + s^c) N}{\theta_L + \theta_H} = \frac{\theta_H h (2 + s^c) M}{\theta_L + \theta_H} + \frac{\theta_L h (2 + s^c) N}{\theta_L + \theta_H} + 2d \quad (10)$$

其中,  $M = \left[ \frac{2\theta_H}{\theta_L + \theta_H} - \frac{\theta_H (2 + s^c)}{\theta_L + \theta_H} \frac{E_c}{q} \right]$ ,  $N = \left[ \frac{2\theta_L}{\theta_L + \theta_H} - \frac{\theta_L (2 + s^c)}{\theta_L + \theta_H} \frac{E_c}{q} \right]$ 。等式左侧是收紧碳配额的

边际成本,即企业H和L的边际碳履约成本;等式右侧是收紧碳配额的边际收益,包括企业绿色生产的控排效果和对行业绿色发展的正外部性。为分解出碳配额的调整过程,先给定碳抵消比例上限保持不变,以此控制碳抵消比例上限对碳配额的影响。不难发现,当单位碳排放的负外部性 $d$ 提升(图5中体现为从 $d_L$ 增大到 $d_H$ )时,等式右侧增大,即收紧碳配额所带来的减碳收益上升,进而导致收紧碳配额的边际收益大于边际成本。此时,收紧碳配额带来的福利改进大于多承担的碳履约成本,政府的理性选择是收紧碳配额,即从图5中A点转变为B点。

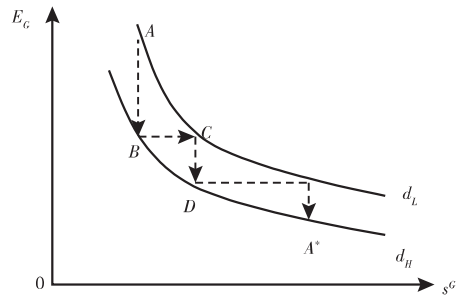


图5 碳配额与碳抵消比例上限的动态调整过程

其次,分析收紧碳配额对碳抵消比例上限的影响。当碳配额收紧后,控排企业的碳履约压力上升,需要通过提高碳抵消比例上限的方式对冲成本压力:

$$\frac{\theta_H \theta_L M}{\theta_L + \theta_H} - \theta_s s^c \frac{E_c}{q} + \frac{\theta_L \theta_H N}{\theta_L + \theta_H} = \frac{\theta_H h M}{\theta_L + \theta_H} + \frac{\theta_L h N}{\theta_L + \theta_H} \quad (11)$$

(11)式展示了均衡条件下,政府改变碳抵消比例上限 $s^c$ 的边际收益与边际成本。等式左侧为提高碳抵消比例上限的边际收益,即企业通过碳抵消所节省的边际碳履约成本;等式右侧为提高碳抵消比例上限的边际成本,即损失的企业绿色生产的边际正外部性。当碳配额 $E_c$ 收紧时,(11)式的左、右侧均变大,但左侧的增幅大于右侧,说明提高碳抵消比例上限的边际收益大于边际成本。此时,政府的理性选择是提高碳抵消比例上限,即从图5中B点转变为C点。

最后,分析碳抵消比例上限提高对碳配额的“反作用”。当碳抵消比例上限提升后,政府知晓控排企业的碳履约压力有所缓解,因而可以进一步收紧碳配额。这一点可以由(10)式得出,当碳抵消比例上限 $s^c$ 上升时,(10)式左、右两侧数值均有所减小,且左侧的缩减幅度大于右侧,收紧碳配额的边际收益大于边际成本,政府可以再次收紧碳配额。最终,碳配额与碳抵消比例上限经过多次的调整,达到新的均衡状态,即图5中 $A^*$ 点。

① 图5旨在直观展示政策调整方向的逻辑,但实际上碳配额与碳抵消比例上限同步调整,无先后之分。

由此可知,当政府精准灵活地规定碳抵消比例上限时,强制减排市场的碳配额政策与自愿减排市场的碳抵消机制具有协同效应,两者相辅相成、相互配合。具体而言,随着碳减排紧迫程度的增加,政府收紧碳配额的需求也会不断增加,但紧缩的碳配额会加剧控排企业的碳履约压力。此时,政府出于最小化社会减碳成本的压力,需要适当上调碳抵消比例上限。更为重要的是,碳抵消比例上限的上调不仅降低了控排企业的碳履约成本,也为政府创造出进一步收紧碳配额的空间。强制减排市场与自愿减排市场正是在这种“碳配额收紧—碳抵消比例上限上调—碳配额进一步收紧”的良性循环中,以更低的社会成本实现了更大幅度的碳减排。据此提出:

命题2:强制减排市场与自愿减排市场具有协同效应,二者相辅相成、相互配合。特别地,当政府迫切需要收紧碳配额时,应同时提高碳抵消比例上限。

## 八、结论与政策启示

如何以更低成本、更快的速度高质量做好减排降碳工作是大气治理的关键核心问题。通过在强制减排市场中引入碳抵消机制,可以提升控排企业对减碳任务的成本承受能力,但不恰当的规制方式也可能使碳抵消机制对强制性减排市场的政策效果构成反向干扰。在兼顾碳减排与社会成本的前提下,科学设计碳抵消与碳配额的搭配模式,是应对“双碳”目标挑战的关键所在。基于一个包含政府与异质性企业的委托代理模型,本文研究发现,若政府对碳抵消机制的使用程度不加以限制,则可能会出现政府为防止企业过度使用碳抵消而被迫放松碳配额的现象。反之,若政府限制控排企业对碳抵消机制的使用程度,同时关注碳抵消比例上限与碳配额的协调搭配,并根据经济发展阶段等的变化来适应性调整二者的具体大小,则能在不增添现有控排企业碳履约压力、不牺牲强制减排市场碳交易活跃程度的情况下,充分调动更多经济主体的减排潜力,从而以更低成本、更快的碳减排速度推进碳中和目标的实现。据此,本文提出以下政策启示:

(1)正确认识碳抵消的潜在利弊,加强政府对控排企业碳抵消使用程度的精准调控,同时适当扩大碳抵消项目方法学的覆盖范围,使碳抵消机制成为提升碳减排效能的有效工具。本文研究表明,碳抵消机制的引入有助于降低控排企业的碳履约成本,但会挤出控排企业的绿色生产程度。因此,为充分发挥碳抵消机制的降本效应,应合理使用碳抵消机制。一个可行的做法是,由政府规定碳抵消比例上限,同时根据社会减碳成本的变化对该上限进行精准灵活调整。本文还发现,碳抵消机制不仅提高了控排企业对减碳任务的承受能力,还充分地挖掘出整个社会系统中的减排潜力,因此能以更低的社会成本实现碳减排目标。鉴于此,应在保证各类碳抵消项目减排量的额外性与真实性的前提下适当扩大碳抵消项目方法学的覆盖范围,将目前未被强制减排市场覆盖的项目,尤其是将那些减排效果显著、技术争议小且兼具社会和生态效益的项目(如生物质发电、海洋碳汇等)逐步纳入碳抵消项目方法学范围。

(2)随着减碳任务的紧迫性提高,强制减排市场与自愿减排市场的协同发展为政府扩大强制减排市场的行业覆盖范围、收紧碳配额发放数量提供了可能。一方面,政府可以稳步扩大强制减排市场的行业覆盖范围,更大范围实现强制减排市场与自愿减排市场的良性循环。对于新纳入强制减排市场的企业而言,为了缓释政府监管带来的碳履约成本,其需要寻求碳抵消机制的帮助,由此推动自愿减排市场的发展,从而进一步降低社会减碳成本,为政府持续稳步推动强制减排市场覆盖范围扩大提供了额外的动力。另一方面,政府可以根据“双碳”目标的紧迫性逐步收紧碳配额的发放量,但前提是适当提高碳抵消机制的使用程度。当政府收紧碳配额时,陡然增加

的减碳难度使得控排企业借助其他碳排放源(例如碳抵消项目)分散自身减碳任务,这也推动了自愿减排市场的发展。若政府选择在此时适当提高控排企业对碳抵消机制的使用程度,不仅能提高企业对减碳任务的承受能力,也为再度收紧碳配额提供可能,从而更快、更好地实现“双碳”目标。

(3)实现碳中和已成为全球共同目标,亟须加快建立健全全球范围内与碳抵消相关的国际性合作减排体系,特别是依据不同国家和地区在减排成本、资源禀赋、技术能力等方面的差异,达成互利共赢的减碳合作。其中,发达国家在减碳技术与资金等方面具有比较优势,但国内进一步减排的边际成本较高,而发展中国家拥有广阔的碳减排空间,但缺乏资金和技术。通过建立有效的碳抵消合作机制,发达国家可以向发展中国家共享技术、人才和资金,帮助发展中国家改善减碳技术,更好地挖掘发展中国家的减碳潜力;同时,发达国家可以将合作项目取得的减碳成果用于抵消本国的减排任务。可以说,有效的全球碳抵消合作机制有助于将减排任务分配给拥有高减排潜力、低边际成本的国家,据此提高全球减排的边际效率,以更低的成本、更快的速度实现全球碳中和。因此,不同国家尤其是发达国家与发展中国家之间的碳抵消合作机制对于全球气候治理的可持续发展具有重要意义。

#### 〔参考文献〕

- 〔1〕陈诗一.节能减排与中国工业的双赢发展:2009—2049[J].经济研究,2010,(3):129-143.
- 〔2〕陈诗一,王畅,郭越.面向碳中和目标的中国工业部门减排路径与战略选择[J].管理科学学报,2024,(4):1-20.
- 〔3〕段宏波,汪寿阳.中国的碳中和:技术经济路径与政策选择[J].管理科学学报,2024,(2):1-17.
- 〔4〕范庆泉,周县华,张同斌.动态环境税外部性、污染累积路径与长期经济增长——兼论环境税的开征时点选择问题[J].经济研究,2016,(8):116-128.
- 〔5〕胡珺,方祺,龙文滨.碳排放规制、企业减排激励与全要素生产率——基于中国碳排放权交易机制的自然实验[J].经济研究,2023,(4):77-94.
- 〔6〕姜春海,闫振好,王敏.“双碳”目标约束下的能耗双控到碳排放双控:规制工具、效应模拟与政策评价[J].中国工业经济,2024,(11):5-23.
- 〔7〕靳玮,王弟海,张林.碳中和背景下的中国经济低碳转型:特征事实与机制分析[J].经济研究,2022,(12):87-103.
- 〔8〕马广程,曹建华,丁徐轶.非位似偏好、碳市场与异质性政策协调的减排效应[J].中国工业经济,2024,(2):42-60.
- 〔9〕任胜钢,郑晶晶,刘东华,陈晓红.排污权交易机制是否提高了企业全要素生产率——来自中国上市公司的证据[J].中国工业经济,2019,(5):5-23.
- 〔10〕沈维萍,夏克郁,陈迎.碳中和目标下负排放策略的综合效应——基于N-DSGE模型的数值模拟分析[J].中国人口·资源与环境,2024,(2):13-22.
- 〔11〕史丹,李少林.排污权交易制度与能源利用效率——对地级及以上城市的测度与实证[J].中国工业经济,2020,(9):5-23.
- 〔12〕王林辉,王辉,董直庆.经济增长和环境质量相容性政策条件——环境技术进步方向视角下的政策偏向效应检验[J].管理世界,2020,(3):39-60.
- 〔13〕吴茵茵,齐杰,鲜琴,陈建东.中国碳市场的碳减排效应研究——基于市场机制与行政干预的协同作用视角[J].中国工业经济,2021,(8):114-132.
- 〔14〕岳童,童健.碳定价机制与“双碳”约束下我国经济高质量发展——目标协同与作用机理[J].统计研究,2024,(7):48-63.
- 〔15〕张宁,张维洁.中国用能权交易可以获得经济红利与节能减排的双赢吗[J].经济研究,2019,(1):165-181.

- [16]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,(8): 80-95.
- [17]张晓娣,刘学悦.征收碳税和发展可再生能源研究——基于 OLG-CGE 模型的增长及福利效应分析[J].中国工业经济,2015,(3): 18-30.
- [18]郑新业,吴施美,郭伯威.碳减排成本代际均等化:理论与证据[J].经济研究,2023,(2): 107-123.
- [19]Acemoglu, D., P. Aghion, L. Bursztyn, and D. Hemous. The Environment and Directed Technical Change[J]. *American Economic Review*, 2012, 102(1): 131-166.
- [20]Aghion, P., A. Dechezleprêtre, D. Hemous, R. Martin, and J. Van Reenen. Carbon Taxes, Path Dependency, and Directed Technical Change: Evidence from the Auto Industry[J]. *Journal of Political Economy*, 2016, 124(1): 1-51.
- [21]Cerqua, A., G. Pellegrini, and O. Tarola. Quality Competition and Environmental Damage: Is There a Role for Network Preferences[J]. *Journal of Cleaner Production*, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121603>, 2020.
- [22]Cui, J., C. Wang, J. Zhang, and Y. Zheng. The Effectiveness of China's Regional Carbon Market Pilots in Reducing Firm Emissions[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, <https://doi.org/10.1073/pnas.2109912118>, 2021.
- [23]Gao, Y., G. Liu, F. Meng, Y. Hao, C. Chen, and M. Casazza. A Carbon Responsibility Allocation Approach with Incentives Mechanism Based on Carbon Emissions and Carbon Offsets Accounting[J]. *Journal of Cleaner Production*, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139814>, 2024.
- [24]Guo, A., J. Yang, and F. Zhong. Carbon Emission Quotas and a Reduction Incentive Scheme Integrating Carbon Sinks for China's Provinces: An Equity Perspective[J]. *Sustainable Production and Consumption*, 2023, 41: 213-227.
- [25]He, Y., R. Jiang, and N. Liao. How to Promote the Chinese Certified Emission Reduction Scheme in the Carbon Market? A Study Based on Tripartite Evolutionary Game Model [J]. *Energy*, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128723>, 2023.
- [26]Huang, W., Q. Wang, H. Li, H. Fan, Y. Qian, and J. J. Klemeš. Review of Recent Progress of Emission Trading Policy in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131480>, 2022.
- [27]Ji, C. J., Y. J. Hu, B. J. Tang, and S. Qu. Price Drivers in the Carbon Emissions Trading Scheme: Evidence from Chinese Emissions Trading Scheme Pilots[J]. *Journal of Cleaner Production*, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123469>, 2021.
- [28]Li, L., F. Ye, Y. Li, and C. T. Chang. How Will the Chinese Certified Emission Reduction Scheme Save Cost for the National Carbon Trading System[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 244: 99-109.
- [29]Rosendahl, K. E., and J. Strand. Emissions Trading with Offset Markets and Free Quota Allocations[J]. *Environmental and Resource Economics*, 2015, 61: 243-271.
- [30]Wang, B., W. A. Pizer, and C. Munnings. Price Limits in a Tradable Performance Standard[J]. *Journal of Environmental Economics and Management*, <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2022.102742>, 2022.
- [31]Wang, Z., and C. Wang. How Carbon Offsetting Scheme Impacts the Duopoly Output in Production and Abatement: Analysis in the Context of Carbon Cap-and-Trade[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 103: 715-723.
- [32]Ye, F., X. Xiong, L. Li, and Y. Li. Measuring the Effectiveness of the Chinese Certified Emission Reduction Scheme in Mitigating CO<sub>2</sub> Emissions: A System Dynamics Approach [J]. *Journal of Cleaner Production*, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125355>, 2021.
- [33]Zhang, C., and B. Lin. Impact of Introducing Chinese Certified Emission Reduction Scheme to the Carbon Market: Promoting Renewable Energy[J]. *Renewable Energy*, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119887>, 2024.

# The Synergy of Voluntary and Compliance Carbon Markets

ZHANG Yi-lin<sup>1,2</sup>, LIU Peng-chao<sup>1</sup>, YU Yun-jun<sup>3</sup>

(1. Lingnan College, Sun Yat-sen University;

2. Advanced Institute of Finance, Sun Yat-sen University;

3. Wenlan School of Business, Zhongnan University of Economics and Law)

**Abstract:** The carbon neutrality goal requires the government to continuously promote carbon reduction by tightening carbon quotas in the compliance carbon market. However, the continuous tightening of carbon quotas increases the compliance costs for regulated emitters. To better balance carbon reduction effects and compliance costs, the government allows these enterprises to purchase emission reductions from the voluntary carbon market for quota compliance through a carbon offset mechanism. While this alleviates compliance costs, it may crowd out green transformation by emission-controlled enterprises and weaken the policy effectiveness of the compliance carbon market. Based on a game-theoretic model with asymmetric information involving the government and heterogeneous enterprises, this paper examines the coordinated relationship between carbon offsets and carbon quotas as well as policy design under the premise of balancing carbon reduction effects and compliance costs.

The model endogenizes the quantity of carbon quotas and the upper limit of the carbon offset ratio. It finds that based on the principle of maximizing social welfare, the government should restrict the use of the carbon offset mechanism by emission-controlled enterprises. Otherwise, to prevent the misuse of carbon offsets, the government might loosen the constraints on carbon quotas, leading to a decrease in social welfare. Furthermore, this paper theoretically demonstrates the coordinated relationship between the compliance and voluntary carbon markets. The existence of the compliance carbon market provides incentives for enterprises to utilize carbon offsets, and the introduction of the carbon offset mechanism creates space for the government to tighten carbon quotas in the compliance carbon market.

Given the negative externality associated with each unit of carbon emissions, there exists an optimal policy mix of carbon quotas and the upper limit of the carbon offset ratio. In particular, as the negative externality per unit of carbon emissions increases, the government should tighten carbon quotas while moderately increasing the upper limit of the carbon offset ratio. The degree of tightening carbon quotas should always match the degree of increasing the upper limit of the carbon offset ratio to achieve the coordinated development of the compliance and voluntary carbon markets. This paper provides a theoretical basis for China to actively and steadily promote the development of the voluntary carbon market and its coordination with the compliance carbon market, and promote international cooperation on carbon offsets among various countries.

**Keywords:** carbon offset mechanism; compliance carbon market; voluntary carbon market; policy coordination

**JEL Classification:** Q54 Q58 D47

[责任编辑:李鹏]