

碳排放权交易试点促进了工业低碳转型吗？——基于双重 机器学习的因果推断*

罗良文 孙立雪

内容摘要：碳排放权交易试点作为中国碳排放权交易体系的一大探索，其能否切实解决外部性问题，实现环境效益与经济效益的统一备受关注。本文利用 2005-2021 年中国 30 个省（市）面板数据，将研究视角聚焦于碳排放权交易试点的政策效果，运用 GML 指数测度各省（市）工业低碳转型效率，在此基础上，构建双重机器学习模型考察碳排放权交易试点对工业低碳转型的影响。研究发现：碳排放权交易试点显著促进工业低碳转型；进一步分解指数发现，碳排放交易试点对工业低碳转型的正向影响主要通过提高技术效率实现。异质性检验显示，中部地区和低工业化地区受碳排放权交易试点的促进影响最强，而东部地区和高工业化地区受到的促进作用相对较弱。进一步研究显示，碳排放权交易试点通过能源结构、技术创新和政府支持影响工业低碳转型；其中当技术发展程度越高、政府支持力度越大或煤炭消费量占能源消费总量越小时，碳排放权交易试点促进作用越显著。本文从工业低碳转型视角揭示了中国碳排放市场的现实状况，研究结论有助于推动中国碳市场机制设计朝着平衡减排目标与经济发展，具有一定现实意义。

关键词：碳排放权交易试点；工业低碳转型；双重机器学习模型；GML 指数

* 罗良文，中南财经政法大学经济学院教授，博士生导师，邮政编码：430073，电子信箱：llw@zuel.edu.cn。
孙立雪（通讯作者），中南财经政法大学经济学院博士生，邮政编码：430073，电子信箱：tsunlixue@126.com。

一、引言

21 世纪，全球气候变化已经成为人类发展的最大挑战和威胁之一。当前，中国经济发展面临着国际国内温室气体减排压力加剧、人口红利消失、增长减速换挡的现实挑战，迫切需要优化经济结构，转变经济发展方式。因此为了探索减排方式，也为建设中国碳排放权交易体系探索相关经验，2011 年国家发改委发布了《关于开展碳排放权交易试点工作的通知》批准上海、北京、广东、深圳、天津、湖北、重庆等七省市开展碳排放交易权试点，并于 2013 年正式启动碳交易试点。碳排放交易制度具有市场化、激励机制和灵活性等优点，是调整能源结构、治理环境污染的有效手段，是推进绿色转型发展的必然选择。尽管碳排放权交易制度在国际上已有成功的案例，但在引入全面政策之前，对于特定国家或地区而言，可能存在一些不确定性和风险。通过试点，政府可以在有限的范围内测试碳排放权交易制度的可行性和有效性，控制实施政策的范围和规模，减少潜在的负面影响，并逐步推进政策的范围和力度。经过近 4 年多的试点工作，中国在 2017 年 12 月正式启动了全国碳交易市场，这是当前中国最大规模的市场型减排政策工具的实践运用，对于推动全球的低碳转型和可持续发展具有深远的影响。

科斯（1960）曾提出，当产权能够被清晰界定，且市场交易成本为零时，市场能够自发调节并在均衡状态下实现资源的最优配置，即通过清晰的产权界定，包括污染排放的权利，并允许其进行市场交易，就能有效地解决外部性问题。然而，基于《京都议定书》框架设立的碳排放权交易市场虽有助于降低排放，但是在实际操作过程中，是以碳排放许可的形式完成的。二氧化碳为社会公共资源，通过排放权界定使其在企业间私有化，政府部门如何二次分配该私有化收益尤为重要，否则很容易导致社会福利失衡的问题。当前，国内碳排放权交易市场仍存在着市场受经验限制，无法大规模应用；碳交易覆盖面有限，交易频率偏低；核证减排量抵消比例低、程序难，较难调动市场积极性等问题，全面推进碳排放权交易市场的建设仍存在较大隐患。因而，仍需要将研究视线对准对碳排放权交易试点，借鉴过去的经验教训，减少操作风险与系统风险，有效建设碳排放权交易市场。基于此，为深入了解中国碳排放权交易试点的政策实施效果，探求其对工业低碳转型的具体影响，本文以中国 30 个省直辖市自治区为研究样本，运用 GML 指数测度各省（市）工业低碳转型效率，在此基础上，构建双重机器学习模型考察碳排放权交易试点对工业低碳转型的影响。研究结果显示，碳排放权交易试点能够提升促进工业低碳转型，主要作用于工业增加值；进一步分解指数发现，碳排放交易试点对工业低碳转型的正向影响主要通过提高技术效率实现。异质性检验显示，一方面，中部地区受碳排放权交易试点的促进影响最强，而东部地区则受到的促进作用相对较弱；另一方面，碳排放权交易试点对低工业化地区促进工业低碳转型的作用较高工业化地区更为明显。机制研究显示，碳排放权交易试点通过能源结构、技术创新和政府支持影响工业低碳转型；其中当技术发展程度越高、政府支持力度越大或煤炭消费量占能源消费总量越小时，碳排放权交易试点越能促进工业低碳转型。本文研究有利于更加深入了解中国碳排放市场的现实状况，推动生态文明建设，为中国在新常态背景下环境政策的制定提供理论支持。

本文可能有以下边际贡献：第一，当前研究较多使用双重差分或者三重差分模型研究政策试点的影响效应，而本文在此基础上运用双重机器学习模型分析碳排放权交易试点对工业低碳转型的影响。与双重差分模型相比，双重机器学习模型可以更有效地处理高维度的数据和复杂的非线性关系以自动处理变量选择和调整，减少估计结果中的偏差，并放宽了对数据的前提要求条件，因此结果更加稳健，具有一定实证价值。第二，中国的碳市场历经政策准备、地方试点及全国碳市场建设三大阶段，最终在 2021 年 7 月成功落地，并于 2021 年末完成首个履约期。因此，本文运用处理对照方法分析 2005—2021 年碳排放权交易试点的政策效果，为仍处于发展初期的中国碳市场提供理论支持，有助于推动中国碳市场机制设计朝着平衡减排目标与经济发展，具有一定现实意义。第三，更为准确地揭示了碳排放权交易机制的宏观减排效应。中国试点碳市场明确了履约的控排企业，但现有碳市场相关研究大都以企业为研究对象展开，从而忽略了其可能存在的整体影响。作为工业转型中的一个重要方面，工业低碳转型所受到的关注相对较少。由于工业绿色转型与低碳转型本质上都是在促进工业发展的同时实现节能减排，其区别主要在于所考察的污染物种类不同(周小亮和宋立, 2022)。因此，在充分考虑中国工业转型的多元特征后，本文通过进一步分解工业低碳转型效率指数，围绕技术效率和技术进步两个方面分析碳排放权交易试点并发现其对工业低碳转型确实起到了积极作用，主要通过能源结构、技术创新与政府支持发挥作用，这是对现有中国碳市场相关研究的一个重要补充。

二、文献综述

通过梳理国内外的相关文献，发现与本文相关的主要有以下两类：

第一，与碳交易相关的文献。首先，是碳排放权交易市场的设计机制研究。为转换经济发展动能，缓解环境污染问题，早在 20 世纪 60 年代，Dales (1968) 便将科斯定理运用于水污染的控制研究，提出了总量控制和交易制度的排放权交易机制，即利用排放许可制度首先界定企业的污染物排放的合法权利，然后允许企业对这种权力自由买卖，以此可低成本控制污染物排放总量。但是，有学者研究发现碳排放权交易市场的机制存在较大问题，如毕 Buchner 和 Ellerman (2008) 利用装置级数据对欧盟碳市场的排放量和配额分配进行了研究，证明了其初始配额分配显著过量；Parsons 等 (2009) 对欧盟碳市场碳价失灵的现象进行了研究，表明除碳配额总量过剩外，碳配额不可跨期借贷等因素同样加剧了碳价失灵。参考国外碳排放权交易市场相关经验，中国采取的是碳市场与区域试点市场同步发展的模式，力争从广度和深度上不断加强市场机制在温室气体减排方面的作用，以起到限制碳排放推进绿色低碳技术创新和技术投资的作用。也有人认为中国碳排放交易体系的执行机制仍然薄弱，惩罚措施并不能对违规行为起到强有力的震慑作用，再加上来自多部门的相关政策重叠，可能会降低碳排放权交易试点的政策有效性，从而无法对国家的能源使用和排放产生重大影响 (Da Zhang et al, 2014)。

其次，是碳排放权交易市场及试点实际运行效果研究。一方面，研究显示碳排放权交易市场及试点确实能够确实能降低碳排放 (Abrell et al, 2011)，对碳强度有显著抑制作用 (李

广明和张维洁, 2017), 作为环境治理手段产生了成本倒逼效应(余典范等, 2023), 能有效促进了区域的碳脱钩效应(尹应凯等, 2022), 具有一定的环境红利。然而, 另一方面, 一些学者观察到碳排放交易市场具有潜在的外部性影响, 对于在实现低碳和发展之间取得平衡, 实现环境与经济的同步可持续发展目标存在一定的争议(胡珺等, 2023), 需要进一步展开系统探讨。研究显示, 碳市场下的减排效应主要源于企业的减产行为(沈洪涛等, 2017), 减排效果主要是通过牺牲经济生产实现(Zhang et al, 2019), 碳排放权交易市场的运行还会对就业产生负面影响(Cui et al, 2021)。此外, 吴茵茵等(2021)还指出, 碳市场虽然取得了积极减排成效, 但主要还是依赖于政府的行政干预, 以碳价和市场流动性衡量的市场机制作用有限; 当企业在拥有排污权后, 会更倾向于为自身发展预留总量, 从而导致排污总量资源有价无市(王金南等, 2008), 碳排放权交易市场运行受到限制。

最后, 是碳交易市场经验教训的总结, 如 Newell 等(2013)研究认为碳市场的发展需要减少免费配额、更好地管理市场敏感信息, 以及调整交易系统。此外, 国家碳市场间的差异导致碳市场的跨境连接存在困难。Green(2017)则认为在当前环境下, 全球碳市场的连接会导致复杂性上升并损害减排效果。刘传明等(2019)认为各试点省市在制定减排政策时不能采取一刀切, 应因地制宜地进行碳交易试点的建设, 从而实现碳减排目标、促进经济的绿色发展。

第二, 与工业低碳转型相关的文献。研究显示, 我国当前以煤为主的能源消费结构对经济发展的环境负外部性发挥了“锁定”效应, 这主要就是来源于我国工业化和城市化进程的高能耗、高排放特征, 因此必须尽早实现工业低碳转型(邵帅等, 2022)。当前学术界关于工业转型的研究主要分成了三个方向: 工业经济转型、工业低碳转型与工业绿色转型(罗良文和孙立雪, 2023)。碳排放权交易试点的主要作用客体是碳排放, 因此本文重点关注工业低碳转型发展。有学者认为, 中国产业结构低碳化是经济低碳转型背景下实现量化减排目标的必然选择(张云等, 2015), 低碳转型具有重要社会效应(王锋和葛星, 2022), 可以在一定程度上化解传统工业化问题(史丹, 2018), 再加上当前中国产业结构中第三产业占比已达到接近 50%, 具备了转型的经济结构基础(马丽梅等, 2018), 因此应该尽快推进工业行业转型, 向着低碳化、绿色化方向发展。这就需要控制我国碳排放的宏观经济成本, 争取合理的经济发展所需碳排放空间, 协同推进降碳减污, 以应对气候变化、环境保护和提高经济效益的多赢局面。

基于以上分析发现, 尽管碳排放权交易试点的与工业低碳转型均是当前可持续绿色发展的重要内容, 但鲜有文献探讨二者之间的关系。当前中国大力发展绿色经济, 将节能减排、推行低碳经济作为国家发展的重要任务, 旨在培育以低能耗、低污染为基础、低碳排放为特征的新兴经济增长点。而碳排放权交易市场历经政策准备、地方试点及全国碳市场建设三大阶段也于 2021 年末完成首个履约期。因此, 深入研究碳排放权交易试点对工业低碳转型的影响及作用机制, 有助于科学评价政策, 为全国工业碳交易市场的推行提供合理的建议, 具有一定研究价值。

三、研究假设

随着气候变化日益严峻，碳排放造成的全球变暖不仅对人们的生存环境存在严重危害，并且造成了巨大的经济损失。气候变化本质上是经济发展所导致的环境外部性，解决这一外部性的有效手段之一便是将温室气体排放造成的外部成本内部化，而碳交易机制正是应对这一问题最基本的经济手段，并逐渐成为全球社会应对气候变化的主要方式之一。2011年10月，国家发改委下发《关于开展碳排放权交易试点工作的通知》，将北京、天津、上海、重庆、湖北、广东和深圳列为碳排放权交易试点。由于全面推进碳排放权交易政策可能涉及广泛的利益相关者，需要协调不同部门的合作和妥善处理各方的利益关切，而试点可以帮助政府在政治上准备和争取支持，减少潜在的阻力和反对声音。试点地区涵盖东中西部，覆盖范围广，以限制重点行业碳排放总量为目标，旨在用市场机制降低企业的减排成本，激励企业通过新技术新方法减排，通过在不同发展地区能够探索中国进行碳交易的制度、机制，为建立全国碳交易市场做准备。需要明确的是碳排放权交易试点与碳交易市场之间是局部与全部的关系，因此本文理论分析主要围绕碳排放权交易试点对工业低碳转型的具体影响和碳交易试点与非试点对工业低碳转型影响的特征展开。

第一，碳排放权交易试点对工业低碳转型的具体影响可以从积极影响与消极影响出发进行分析。（1）积极影响。首先，碳排放权交易试点能够激励减排创新，提高煤炭资源的利用效率，降低可再生能源的利用门槛，打破工业低碳转型的技术壁垒。碳排放权交易试点为企业设定了特定的碳排放限额，并允许公司之间进行碳排放权的交易，这为企业提供了经济激励，促使它们寻找降低碳排放的创新技术和措施。这是因为只要其污染治理成本低于排污权的出售价格，企业由此产生的排污权结余在市场上就会以相对较高的价格出售，这使企业有利可图，增加工业低碳转型的动力。其次，碳排放权交易试点能够促进资金流动，增加经济效益。碳排放权交易试点为企业提供了一个市场化的机制，使得碳减排成果可以通过交易而得到经济回报。企业能够将剩余的碳排放权出售给需要更多排放权的企业，从而获得收入。这可促进资金流动，提供额外的资源用于技术创新和设备升级，进一步推动工业低碳转型，并带来经济效益。最后，碳排放权交易试点的建立有助于实现了环境资源的高效优化配置。由于市场交易使排污权从污染治理成本低的企业流向污染治理成本高的企业，而且排污许可证的总量是固定不变的，即排向环境的整个污染物总量不会增加，结果是社会以最低成本实现了污染物的削减和环境资源的优化配置。

（2）消极影响。首先，碳排放权交易试点的设置可能会面临着碳排放权分配不均衡的问题。排污权初始分配存在障碍排污总量确定后，如何公平、公正地分配给企业是排污权交易过程中一个重要的环节。一些企业可能会面临额外的成本压力，尤其是那些碳密集型行业或落后地区的企业。这可能导致资源和收入的不平等分配，从而影响工业低碳转型的公平性和可持续性。此外，碳排放权交易试点的碳配额分配问题也阻碍着工业低碳转型发展。碳配额的计算方法主要有两种：基准法和历史法^①。其中，历史法本身存在着一定的不合理性，

^① 来源于碳交易网。历史法即按照控排单位的历史排放水平核定碳配额，适用于生产工艺产品特征复杂的行业；基准法即

例如，企业的突然增产或减产都会影响其历史排放数据，可能造成企业获得碳配额与实际产能不符，而一些粗放式生产的企业反而会比起前期节能减排工作出色的企业更占便宜。这可能扭曲市场竞争，阻碍了工业低碳转型的整体发展。其次，碳排放权交易试点需要建立健全的监管机制和执法体系，以确保企业的碳排放数据准确性和合规性，但由于我国碳排放权交易市场仍处在初期建设期，势必存在监管不严、执法不力的现象，可能导致一些企业逃避监管，操纵数据或违反规则。这将会大大削弱碳排放权交易试点运行的参考性，影响碳排放权交易市场的建立，影响工业低碳转型的进度。最后，碳排放权交易试点实行过程中出现的企业排污量测定与权力寻租问题都会影响工业低碳转型效果。目前，针对企业排污量的测定技术中，被广泛提倡且被认为能够准确计量企业排污量的先进技术包括在企业排污口安装“环保黑匣子”和污染物自动监测仪等。例如，深圳利用环保黑匣子治污^①，通过在线监测企业排污，实现对企业排放行为的实时监控。然而，政府失职和权力寻租问题仍然存在，很多重污染企业频繁出现偷排和暗排现象。这种情况的根源在于政府官员与其他经济参与者一样，追求特殊利益，而不是全民利益。特别是在我国碳排市场法治建设不完善的情况下，对重污染企业当地政府行政权力的行使缺乏有效的监督，无疑难以抑制寻租行为的发生，从而抑制工业低碳转型的发展。因此，提出如下待检验假设：

H1：碳排放权交易试点能够促进工业低碳转型。

H2：碳排放权交易试点会抑制工业低碳转型。

第二，碳排放权交易试点与非试点对工业低碳转型影响的特征不同，以下将从能源结构、技术创新、政府支持等方面进行分析。（1）能源结构。碳排放权交易试点通过鼓励企业采用更清洁的能源形式，刺激企业增加可再生能源的使用，减少对高碳能源的依赖，以减少碳排放并提高其竞争力从而改善能源结构并推动工业低碳转型。而在非试点地区，由于缺乏明确的碳市场和经济激励机制，企业可能较少受到能源结构调整的压力。依赖于高碳能源的情况可能会继续存在，从而限制了工业低碳转型的速度和范围。（2）技术创新。碳排放权交易试点通过市场机制能够促使企业探索并采用低碳技术和创新解决方案，推动技术创新的积累和进步，以降低碳排放并获得更多的碳排放权，进而促进工业低碳转型。而在非试点地区，由于缺乏明确的碳市场和经济激励机制，企业可能面临较小的创新动力，因此低碳技术和可再生能源的发展等可能需要依赖政府政策支持或市场需求推动，所以技术创新的速度和程度可能相对较低。（3）政府支持。碳排放权交易试点政策为试点地区企业提供了明确的指导和激励机制，鼓励低碳转型。构建碳排放权交易市场前期，政府扶持力度相对较大，这将会激活企业的积极性，加速工业低碳转型。而在非试点地区，政府可能缺乏特定的碳交易政策和相应的支持措施，资金支持与政策扶持的相对匮乏可能导致政策不连贯或不够明确，使得非试点地区企业对低碳转型缺乏明确的方向和激励，从而影响工业低碳转型的进程。因此，提出如下待检验假设：

H3：碳排放权交易试点与非试点对工业低碳转型影响的特征不同。

按行业基准排放强度核定碳配额，适用于生产流程及产品样式规模标准化的行业。

^① 来源于中国电镀网。

H4: 碳排放权交易试点主要通过技术创新、能源结构和政策支持影响工业低碳转型。

四、研究设计

(一) 研究方法

1. 模型设定

为识别碳排放权交易试点对工业低碳转型的作用效果, 本文参考张涛和李均超(2023)^①的研究, 采用针对关键变量进行统计推断的双重机器学习模型实证检验试点前后各地区工业低碳转型进程的变化差异, 将在2005—2021年期间内试点碳交易的省份作为处理组, 将在整个样本期间内未试点碳交易的省份作为控制组。双重机器学习模型是一种结合机器学习和计量经济学的方法。它结合了高维度机器学习技术和因果推断的优点, 可以有效地处理具有大量控制变量和高维度特征的数据, 通过建立两个机器学习子模型来分别处理预测和因果推断, 从而减少模型中的偏差和方差。这种方法具有灵活性, 并且可以处理更复杂的数据和非线性关系。构建部分线性的双重机器学习模型如下所示:

$$GML_{it+1} = \theta_0 CETPilot_{it} + g(X_{it}) + U_{it} \quad (1)$$

$$E(U_{it}|CETPilot_{it}, X_{it}) = 0 \quad (2)$$

其中, i 为省市; t 为年份; GML_{it+1} 表示被解释变量, 为工业低碳转型; $CETPilot_{it}$ 表示处置变量, 为碳排放权交易试点的政策变量, 设置试点后为1, 否则为0; θ_0 为本文重点关注的因果效应。 X_{it} 为高维控制变量集合, 需采用机器学习算法估计具体形式 $\hat{g}(X_{it})$, U_{it} 为误差项, 条件均值为0。直接对式(1)、式(2)进行估计, 可得处置系数估计量为:

$$\hat{\theta}_0 = \left(\frac{1}{n} \sum_{i \in I, t \in T} CETPilot_{it}^2 \right)^{-1} \frac{1}{n} \sum_{i \in I, t \in T} CETPilot_{it} (GML_{it+1} - \hat{g}(X_{it})) \quad (3)$$

其中, n 为样本容量。根据上述估计量, 可进一步考察其估计偏误:

$$\begin{aligned} \sqrt{n}(\hat{\theta}_0 - \theta_0) = & \left(\frac{1}{n} \sum_{i \in I, t \in T} CETPilot_{it}^2 \right)^{-1} \frac{1}{\sqrt{n}} \sum_{i \in I, t \in T} CETPilot_{it} U_{it} + \\ & \left(\frac{1}{n} \sum_{i \in I, t \in T} CETPilot_{it}^2 \right)^{-1} \frac{1}{\sqrt{n}} \sum_{i \in I, t \in T} CETPilot_{it} [g(X_{it}) - \hat{g}(X_{it})] \end{aligned} \quad (4)$$

其中, $a = \left(\frac{1}{n} \sum_{i \in I, t \in T} CETPilot_{it}^2 \right)^{-1} \frac{1}{\sqrt{n}} \sum_{i \in I, t \in T} CETPilot_{it}^2 U_{it}$, 服从均值为0的正态分布, 机器学习采用机器学习及其正则化算法估计具体函数形式 $\hat{g}(X_{it})$, 不可避免地引入“正则偏误”, 虽能防止估计量方差过大, 但也导致了其不具无偏性, 具体表现为 $\hat{g}(X_{it})$ 向 $g(X_{it})$ 的收敛速度较慢, $n^{-\varphi_g} > n^{-1/2}$, 因此, 随着 n 趋向于无穷大, b 也趋向于无穷大, $\hat{\theta}_0$ 难以收敛于 θ_0 。为了加快收敛速度, 使得处置系数估计量在小样本下满足无偏性, 构建辅助回归如下:

$$CETPilot_{it} = m(X_{it}) + V_{it} \quad (5)$$

$$E(V_{it}|X_{it}) = 0 \quad (6)$$

其中, $m(X_{it})$ 为处置变量对高维控制变量的回归函数, 同样需要采用机器学习算法估计其具体形式 $\hat{m}(X_{it})$, V_{it} 为误差项, 条件均值为0。计算过程如下所示: 首先, 采用机器学习算法估计辅助回归 $\hat{m}(X_{it})$, 取其残差 $\hat{V}_{it} = CETPilot_{it} - \hat{m}(X_{it})$; 其次, 同样采用机器学习算

^① 双重机器学习程序来自张涛李均超(2023), 参见在《中国工业经济》网站 (<http://ciejournal.ajcass.org>) 附件下载。

法估计 $\hat{g}(X_{it})$ ，将主回归形式改变为 $GML_{it+1} - \hat{g}(X_{it}) = \theta_0 CETPilot_{it} + U_{it}$ ；最后，将 \hat{V}_{it} 作为 $CETPilot_{it}$ 的工具变量进行回归，获得无偏的系数估计量如下：

$$\check{\theta}_0 = \left(\frac{1}{n} \sum_{i \in I, t \in T} \hat{V}_{it} CETPilot_{it} \right)^{-1} \frac{1}{n} \sum_{i \in I, t \in T} \hat{V}_{it} (GML_{it+1} - \hat{g}(X_{it})) \quad (7)$$

同理，式（7）又可近似表示为：

$$\begin{aligned} \sqrt{n}(\check{\theta}_0 - \theta_0) &= [E(V_{it}^2)]^{-1} \frac{1}{\sqrt{n}} \sum_{i \in I, t \in T} V_{it} U_{it} \\ &+ [E(V_{it}^2)]^{-1} \frac{1}{\sqrt{n}} \sum_{i \in I, t \in T} [m(X_{it}) - \hat{m}(X_{it})] [g(X_{it}) - \hat{g}(X_{it})] \end{aligned} \quad (8)$$

其中， $[E(V_{it}^2)]^{-1} \frac{1}{\sqrt{n}} \sum_{i \in I, t \in T} V_{it} U_{it}$ 服从均值为0的正态分布，由于使用了两次机器学习估计，因此， $[E(V_{it}^2)]^{-1} \frac{1}{\sqrt{n}} \sum_{i \in I, t \in T} [m(X_{it}) - \hat{m}(X_{it})] [g(X_{it}) - \hat{g}(X_{it})]$ 的整体收敛速度取决于 $\hat{m}(X_{it})$ 向 $m(X_{it})$ 以及 $\hat{g}(X_{it})$ 向 $g(X_{it})$ 的收敛速度，即 $n^{-(\varphi_g + \varphi_m)}$ ，相较于式（4）， $\sqrt{n}(\check{\theta}_0 - \theta_0)$ 向0收敛的速度更快，进而能够获得无偏的处置系数估计量。

2. 全局曼奎斯特—卢恩伯格（GML）指数

本文使用全局曼奎斯特—卢恩伯格指数（Global Malmquist-Luenberger，后文用GML指数代指）评价我国各省市工业低碳转型效率的动态变化情况，表达式如下：

$$GML_k(t, s) = \frac{(1 + D^G(x_k^t, y_k^t, y_k^{bt}, -y_k^{bt}))}{1 + D^G(x_k^s, y_k^s, y_k^{bs}, -y_k^{bs})} \quad (9)$$

其中， $D^G(x_k^t, y_k^t, y_k^{bt}, -y_k^{bt})$ ， $D^G(x_k^s, y_k^s, y_k^{bs}, -y_k^{bs})$ 表示研究样本期内所有投入产出值构成的生产可能集作为不同时期的共同参照技术集时的可能性集合， t 期和 s 期为决策单元的距离函数。为更好揭示工业低碳转型效率水平提高或下降的主要原因，本文进一步将GML指数分解为全局技术效率变化指数（TC）和全局技术进步变化指数（EC）。其中，全局技术效率变化指数反映的是工业低碳转型整合资本和劳动要素能力的变化，用以表示配置效率；全局技术进步变化指数刻画的是工业低碳转型促进内生经济增长即技术水平的变化。表达式如下所示：

$$TC_k(t, s) = \frac{1 + D^t(x_k^t, y_k^t, y_k^{bt}, -y_k^{bt})}{1 + D^s(x_k^s, y_k^s, y_k^{bs}, -y_k^{bs})} \quad (10)$$

$$EC_k(t, s) = \frac{(1 + D^G(x_k^t, y_k^t, y_k^{bt}, -y_k^{bt})) / (1 + D^t(x_k^t, y_k^t, y_k^{bt}, -y_k^{bt}))}{(1 + D^G(x_k^s, y_k^s, y_k^{bs}, -y_k^{bs})) / (1 + D^s(x_k^s, y_k^s, y_k^{bs}, -y_k^{bs}))} \quad (11)$$

（二）变量设置与选择

1. 被解释变量

中国工业发展方式的低碳转型被定义为通过节能减排、结构升级和技术进步来实现工业发展方式转变，从而实现产出增长与碳排放降低“双赢”目标的工业发展过程（周小亮和宋立，2022；史丹，2018）。基于此，本文选取固定资产投资、城镇单位年末就业人数、能源消费量作为资本投入、劳动投入、能源投入，选取工业增加值和二氧化碳排放量分别作为工

业低碳转型的期望产出指标和非期望产出指标^①，进行工业低碳转型指标的计算。

2.解释变量

碳排放权交易试点的政策虚拟变量（CETPilot），虽然国家发展改革委在2011年就发布了开展碳排放权交易试点的通知文件，但各试点地区公布控排标准和控排企业名单的时间基本集中在2012~2013年，碳排放权交易市场实际开市时间则集中在2013~2014年。参考相关文献（许文立和孙磊，2023），本文将2013年作为各试点地区受到政策冲击的时间。构建的CETPilot本质上是地区虚拟变量与时间虚拟变量的交互项，若某省份为碳排放权交易试点地区，则地区虚拟变量取1，否则为0；类似的，若时间在试点年份2013年之后，则时间虚拟变量取1，否则为0。

3.控制变量

本文在省份层面选择一系列控制变量，如下所示：用第二产业产值占比（Industry）和电力消费量（Ele）表示工业化水平；用企业个数（Com）表示经济发展水平；用工业二氧化硫排放量（SO2）和工业废水排放量（Sewage）表示地区政府管制，用国有及规模以上非国有工业企业利润总额（InCom1）和私营工业企业主营业务收入（InCom2）表示地区工业企业发展水平。对上述变量均进行对数化处理。

（三）数据处理与描述性统计

本文数据样本时间跨度为2005—2021年，空间跨度为除西藏和港澳台外的中国30个省、直辖市与自治区。在初始样本的基础上，针对部分缺失值采用了趋势插补方法进行插补。碳排放权交易试点数据主要来源于政府官网，省级数据主要来源于CSMAR数据库、中国碳排放核算数据库（CEADs）《中国工业统计年鉴》《中国城市统计年鉴》和《中国能源统计年鉴》等。模型回归主要采用Stata软件分析。各变量的描述性统计如表1所示。

表1 描述性统计

变量	样本量	平均值	标准误	最小值	中值	最大值
CETPilot	510	0.119	0.324	0.000	0.000	1.000
GML	510	0.947	0.070	0.733	0.958	1.317
SO2	510	3.559	1.146	-2.315	3.828	5.208
Sewage	510	10.688	1.003	6.304	10.680	12.599
Ele	510	7.180	0.772	4.402	7.180	8.970
Com	510	9.255	1.301	5.814	9.381	12.185

^① 期望产出，基于国家统计局披露的工业增加值，采用当年GDP平减指数消除物价影响。非期望产出，二氧化碳排放量来自中国碳排放核算数据库（CEADs）。由于中国碳排放核算数据库对行业分类的界定与《中国工业经济统计年鉴》有所区别，为了对二者进行合并，在此将橡胶制品业、塑料制品业统一归并为橡胶塑料制品业，将交通运输设备制造业、汽车制造业统一合并为交通运输设备制造业。资本投入，数据来自CSMAR数据库，采用固定资产投资作为资本投入。劳动投入，数据来自《中国工业统计年鉴》，采用城镇单位年末就业人数作为劳动投入。能源投入，数据来自中国碳排放核算数据库（CEADs），采用《中国能源统计年鉴》附录所提供的“折煤系数”将所有能源消费的单位转换为万吨标准煤。

InCom1	510	6.932	1.214	3.049	7.131	9.331
InCom2	510	8.142	1.639	3.438	8.247	11.134
Industry	510	5.851	0.345	4.201	5.952	6.291
期望产出	510	7495.121	7093.459	156.16	5421.35	39398.46
非期望产出	510	332.818	291.538	7.555	239.919	2265.379
资本投入	510	10297.94	8703.451	323.027	7786.344	43096.19
劳动投入	510	515.780	363.085	42.6	437.322	2344.828
能源投入	510	13780.24	8697.995	822.198	11270.24	43008

五、实证分析

（一）基准回归

本文采用双重机器学习模型估计了碳排放权交易试点对工业低碳转型的影响效应，其中，样本分割比例为 1：4，采用随机森林算法对主回归和辅助回归进行预测求解，回归结果见表 1。由于本文研究重点是省市工业低碳转型受碳排放权交易试点影响的差异，因此使用可以控制个体间的异质性，提供关于个体之间稳定差异的有用信息的个体固定效应模型进行回归，结果如表 2 所示。第（1）列在全样本区间内控制了个体固定效应和其他控制变量的一次项，可以发现碳排放权交易试点对工业低碳转型的影响效应的回归系数为正，且在 5%的水平上显著，说明碳排放权交易试点能够提升促进工业低碳转型，假设 H1 得到验证。第（2）（3）列为被解释变量 GML 指数分解为全局技术效率变化指数（TC）和全局技术进步变化指数（EC）后进行系统 GMM 模型回归结果，可以发现碳排放交易试点对工业低碳转型的正向影响主要通过提高技术效率实现。H1 得到验证。为进一步探究碳排放交易试点对工业低碳转型各维度的具体影响，第（4）至（8）列分别给出了碳排放交易试点对期望产出、非期望产出、资本投入、劳动投入、能源投入的回归系数。就影响效应而言，碳排放交易试点对期望产出和劳动投入的影响在 1%的水平上显著为正，且对后者的回归系数（0.217）大于对前者的回归系数（0.112）。这表明碳排放交易试点在促进工业低碳转型方面的有效性，并且劳动投入在这一过程中的发挥了关键作用。可能是因为碳排放交易试点提供了激励机制，推动企业在低碳转型方面增加劳动投入。企业可能采取培训员工、聘请专业人才或增加生产工人等措施来适应低碳转型的要求。随着劳动投入的增加，企业在低碳转型过程中实现了更高的工业增加值。

表 2

基准回归

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
--	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

变量	GML	TC	EC	期望产出	非期望产出	资本投入	劳动投入	能源投入
CETPilot	0.043** (0.011)	0.041*** (0.000)	-0.001 (0.942)	0.160*** (0.004)	-0.009 (0.892)	0.084* (0.094)	0.217*** (0.000)	0.003 (0.915)
Constant	-0.000 (0.964)	-0.001 (0.734)	0.001 (0.768)	-0.011 (0.177)	0.010 (0.277)	-0.000 (0.996)	0.001 (0.893)	0.007 (0.200)
控制变量	是	是	是	是	是	是	是	是
个体固定效应	是	是	是	是	是	是	是	是
N	30	30	30	30	30	30	30	30

注：括号里是 p 值，*、**和***表示 10%、5%和 1%的显著性水平，下表同。

（二）稳健性分析

1.考虑省份—时间交互固定效应

由于省份是中国政府治理结构中非常重要的行政节点，同一省份下的城市往往在政策环境、区位特征、历史文化等方面具有相似性，因此，本文在基准回归的基础上加入省份—时间交互固定效应，用以控制不同省份随时间变动的的影响。回归结果如表第 3（1）列所示。根据回归结果，考虑同一省份下不同城市特征间的关联影响后，碳排放权交易试点对工业低碳转型的影响仍在 1%的水平上显著为正，原结论依然成立。

2.重设双重机器学习模型

为避免双重机器学习模型设定偏误对结论产生影响，本文从以下几个方面入手验证结论的稳健性：首先，改变双重机器学习模型的样本分割比例，由先前的 1：4 改为 1：3 和 1：7，探究样本分割比例对本文结论的可能影响；其次，更换机器学习算法，将先前用作预测的随机森林算法更换为梯度提升，探究预测算法对本文结论的可能影响；再次，基准回归中基于双重机器学习构建了部分线性模型进行分析，模型形式设定存在一定的主观性，接下来，本文采用双重机器学习构建更为一般性的交互式模型，探究模型设定对本文结论的影响，用于分析的主回归和辅助回归变更如下：

$$GML_{it+1} = g(CETPilot_{it}, X_{it}) + U_{it} \quad (12)$$

$$CETPilot_{it} = m(X_{it}) + V_{it} \quad (13)$$

交互式模型获得处置效应的估计系数为：

$$\check{\theta}_1 = E[g(CETPilot_{it} = 1, X_{it}) - g(CETPilot_{it} = 0, X_{it})] \quad (14)$$

上述重设双重机器学习模型后获得的回归结果见表 3。显然，无论是双重机器学习模型的样本分割比例、用于预测的机器学习算法、模型估计形式以及内生性问题，均不影响碳排放权交易试点促进工业低碳转型的结论，仅在一定程度上改变政策效应的大小，足以说明原结论是稳健的。

表 3

稳健性检验

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
--	-----	-----	-----	-----	-----

变量	时间交互固定效应	1:7	1:3	梯度提升	交互式模型
	GML	GML	GML	GML	GML
CETPilot	0.027** (0.016)	0.039** (0.044)	0.035** (0.011)	0.056*** (0.000)	0.065*** (0.000)
Constant	0.003 (0.275)	-0.001 (0.766)	0.000 (0.881)	0.001 (0.824)	
控制变量	是	是	是	是	是
个体固定效应	是	是	是	是	是
N	30	30	30	30	30

3.安慰剂检验

为了检验碳排放权交易试点对工业低碳转型的影响不是由其他随机性因素导致的，本文采用安慰剂检验对碳排放权交易试点的偶然性加以识别。参考（胡洁等，2023）和 La Ferrara 等（2012）的做法，按照碳排放权交易试点的分布情况，随机抽样 500 次构建“伪政策虚拟变量”，并以双重差分模型重新回归估计，检验其系数和 P 值分布，结果如图 1 所示。碳排放权交易试点对“伪政策虚拟变量”回归系数的均值接近于 0，估计系数的分布接近正态分布，P 值大多大于 0.10，在 10% 的水平上并不显著。表明碳排放权交易试点对工业低碳转型的影响并非其他随机性因素导致，上文得到的结论可靠。

4.平行趋势检验

碳排放权交易试点前后地区工业低碳转型的差异，一定是试点政策本身造成的吗？碳排放权交易试点与非试点之间是否真的具有显著差异呢？参考相关文献（许文立和孙磊，2023），本文通过平行趋势检验进行分析，结果如图 2 所示。图 2 显示，碳排放权交易试点政策发生之前，工业低碳转型在试点地区和非试点地区之间并没有显著差异，而在碳排放权交易试点启动后，政策的带动效果逐渐显现，假设 H3 得到验证。政策启动当年，工业低碳转型进程显著加快，第二年受经验限制影响，市场积极性尚未充分调动，第三年开始，工业低碳进程便开始稳步发展。结果表明在试点实施前，处理组与控制组满足处理前趋势检验。

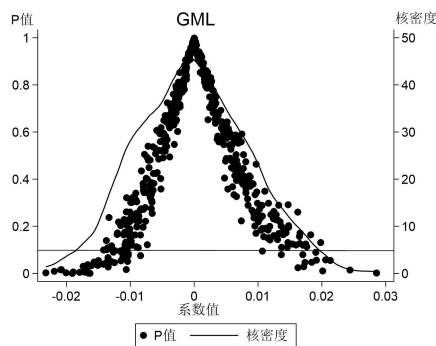


图 1 安慰剂检验

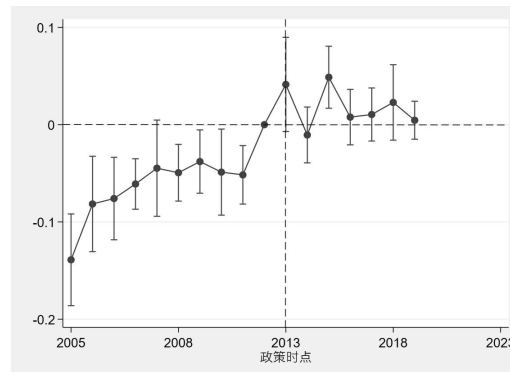


图 2 平行趋势检验

（三）异质性分析

1.地区异质性

碳排放权交易试点对工业低碳转型的影响存在地区异质性，主要是由于不同地区的经济结构、产业布局和环境治理现状所导致的成本和调整压力的差异。这些差异会影响工业低碳转型的动力和能力，从而导致碳排放权交易试点在不同地区的效果不同。基于此，本文根据地理位置与经济发展水平将样本分为东、中、西三个区域，进行实证检验，结果如表 4 所示。4 第（1）（2）（3 列）显示，东中西部的碳排放权交易试点都对工业低碳转型起到促进作用。然而，在不同地区之间存在差异，其中中部地区受到的促进影响最强，而东部地区则受到的促进作用相对较弱。可能原因如下：首先，中部地区的工业企业普遍较为集中，规模相对较大，因此在购买碳排放配额时所需成本较高，进而推动了这些企业更加积极地进行低碳转型，以降低成本并符合碳排放限制要求。其次，中部地区的经济结构与东部地区有所不同。经济发展势弱的中部地区在“双碳”目标背景下面临更大的调整压力，这种调整压力对中部地区形成了更为直接和强烈的促进作用，激发了工业低碳转型的需求。然而，东部地区的经济结构相对更加发达和多样化，已经更早地进行了产业结构调整和环境治理。因此，相对于中部地区，东部地区的工业企业普遍排放较少，已经采取了一些低碳措施，再加上由于其排放量较低，更容易满足碳排放限制要求，所以受碳排放权交易试点的促进作用较小。最后，西部地区的碳排放权交易试点主要体现在促进清洁能源开发利用、提升技术创新和节能减排措施应用、促进生态环境改善以及增强跨地区合作与经验分享。这些方面的积极影响有助于推动西部地区的工业向低碳转型并促进可持续发展。

总结起来，东中西部的碳排放权交易试点对工业低碳转型都有促进作用。中部地区由于工业集中、排放量大和调整压力大，受到的促进影响最强。而东部地区由于经济结构较为发达和排放量较低，受到的促进作用相对较弱。这种差异主要是由于不同地区的经济结构、产业布局和环境治理现状所决定的。

2.工业化水平异质性

为揭示产业结构对碳排放权交易试点政策效应的影响，参考相关文献（田淑英等，2022）本文按照 2012 年各地区工业产值占地区生产总值比重的数据，以 50 分位数为界线，把样本划分为高工业化水平组和低工业化水平组，将试点地区与两组样本中的非试点地区进行分组回归，结果如表 4 所示。表 4 第（4）（5）列显示，碳排放权交易试点对低工业化地区促进工业低碳转型的作用较高工业化地区更为明显，这主要是因为低工业化地区的起点较低、技术更新空间较大、依赖传统产业较少，同时具备更多的制度建设机会。因此，在实施碳排放权交易试点后，低工业化地区的企业更容易达到碳排放配额要求，转型成本相对较低，对工业低碳转型的促进作用更明显。

表 4 异质性分析

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
--	-----	-----	-----	-----	-----

	东部	中部	西部	高工业化	低工业化
变量	GML	GML	GML	GML	GML
CETPilot	0.032* (0.054)	0.105*** (0.001)	0.098** (0.039)	0.054*** (0.001)	0.092*** (0.000)
Constant	-0.000 (0.952)	-0.004 (0.356)	-0.001 (0.855)	-0.003 (0.412)	-0.000 (0.926)
控制变量	是	是	是	是	是
个体固定效应	是	是	是	是	是
N	12	10	8	15	15

六、进一步研究

碳排放权交易制度已然成为我国节能减排的重要环境规制手段之一，但其减排作用发挥的具体渠道和综合效果亦有待明晰（李治国和王杰，2021）。根据上文理论分析，本文将从能源结构、技术创新、政策支持三个角度进行机制研究，以具体化碳排放权交易试点对工业低碳转型的影响效应，为碳交易市场的全国性推广提供实证参考。构建模型如下所示：

$$\text{med}_{it} = \beta_0 + \beta_1 \text{CETPilo}_i + \beta_4 X_{it} + \delta_i + \lambda_t + \varepsilon_{it} \quad (15)$$

$$\text{GML}_{it} = \theta_0 + \theta_1 \text{CETPilo}_i + \theta_2 \text{CET}_i \times \text{med}_t + \theta_3 X_{it} + \delta_i + \lambda_t + \varepsilon_{it} \quad (16)$$

其中， $\text{CET}_i \times \text{med}_t$ 是机制变量与解释变量的交互项，其系数为机制检验的核心。 med_{it} 是机制变量，本文采用以下变量进行机制检验：（1）能源结构（Structure）。以煤炭消费量占能源消费总量的比重衡量能源结构（2）技术创新（Create）。用当地科学技术支出衡量科技创新。（3）政府支持（Cost）。用当地环境保护支出衡量政府支持力度。为了提高检验的可信程度，使用 Bootstrap 法进行机制检验，置信期间不包含 0 即为通过检验。

结果表明，碳排放权交易试点通过能源结构、技术创新和政府支持影响工业低碳转型；其中当技术发展程度越高、政府支持力度越大或煤炭消费量占能源消费总量越小时，碳排放权交易试点越能促进工业低碳转型，假设 H4 得到验证。可能原因如下：首先，高技术发展程度为工业低碳转型发展提供了更多低碳技术和解决方案。随着技术创新不断推进，新的低碳技术涌现，其成本逐渐降低，效果逐渐提升。这使得企业更有动力采纳和应用这些技术，实现碳排放的减少。较高的技术发展程度意味着更多创新机会和更适应碳排放权交易的能力，从而加速工业低碳转型。其次，政府支持力度的增加有助于降低企业参与碳市场的成本和风险。碳排放权交易试点为省级政府提供了激励和引导低碳发展的机制。省级政府可以通过设立碳排放配额和建立碳市场的方式，大力支持企业实行工业低碳转型，对碳排放实施监管和约束，推动企业采取低碳技术和措施，以达到碳排放减少的目标。这种市场机制能够促使企业实施低碳转型，减少碳排放，并为低碳经济转型提供动力和支持。最后，当煤炭消费占能源消费总量较低时，工业部门的碳排放量相对较少。煤炭在能源结构中占据过高比重，通常是一个经济体存在严重空气污染问题的重要原因（Yin 等，2023）。碳排放权交易试点要求企业购买排放配额，从而降低煤炭消费量，进而减少排放量，这意味着企业需要购买的额外

排放配额降低。因此，煤炭消费量较低的地区在碳排放权交易试点下能更加容易实现工业低碳转型目标。

综上所述，当技术发展程度越高、政府支持力度越大或煤炭消费占能源消费总量越低时，碳排放权交易试点对工业低碳转型的促进作用会更加明显。这些因素提供了先进技术、政策支持和减少碳排放压力的优势，为工业部门实施低碳转型创建了更有利的环境，并推动了可持续发展的实现。

表 5 机制性分析

变量	能源结构 (Structure)		技术创新 (Create)		政府支持 (Cost)	
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	CET*Structure	GML	CET*Create	GML	CET*Cost	GML
CETPilo	0.536*** (0.000)	-0.079*** (0.010)	5.289*** (0.000)	0.257*** (0.000)	5.114*** (0.000)	0.190*** (0.006)
CET*Structure		0.167*** (0.003)				
CET*Create				0.049*** (0.001)		
CET*Cost						0.038*** (0.001)
控制变量	是	是	是	是	是	是
个体固定效应	是	是	是	是	是	是
N	30	30	30	30	30	30
R ²	0.891	0.569	0.972	0.594	0.979	0.552
Bootstrap 检验						
置信区间	(-0.148 -0.028)		(0.149 0.388)		(0.090 0.312)	
机制效应	显著		显著		显著	

七、结论与启示

作为全球最大的碳排放国家，我国也是全球最大的碳排放权交易市场，因此为切实履行《联合国气候变化框架公约》《京都议定书》《巴黎协定》所作的减排承诺，我国任重道远。因而，为更加深入了解中国碳排放市场的现实状况，推动生态文明建设，为中国在新常态背景下环境政策的制定提供理论支持，本文以中国 30 个省及直辖市为研究样本，使用双重机器学习模型探究碳排放权交易试点与工业低碳转型之间的因果关系。研究结果显示：碳排放权交易试点能够提升促进工业低碳转型，主要作用于工业增加值；进一步分解指数发现，碳排放交易试点对工业低碳转型的正向影响主要通过提高技术效率实现。异质性检验显示，一方面，中部地区受碳排放权交易试点的促进影响最强，而东部地区则受到的促进作用相对

较弱；另一方面，碳排放权交易试点对低工业化地区促进工业低碳转型的作用较工业化地区更为明显。机制研究显示，碳排放权交易试点通过能源结构、技术创新和政府支持影响工业低碳转型；其中当技术发展程度越高、政府支持力度越大或煤炭消费量占能源消费总量越小时，碳排放权交易试点越能促进工业低碳转型。

基于研究结论，本文提出以下建议：第一，完善总量控制技术措施的建设，促进低碳技术创新发展。由于碳排放交易试点对工业低碳转型的正向影响主要通过提高技术效率实现。因此，政府和相关利益方可以致力于促进技术创新和技术合作，开展技术培训，促进科研合作和推动技术交流，提高市场参与者的碳排放成本内部化意识，激发其研发低碳生产技术、转变经营方式的积极性，从而增强碳排放权交易市场的活跃度和流动性，推动市场低碳发展。第二，健全排污权交易的法律制度，实行区域差异化策略。中国目前并存八个地区碳市场以及覆盖电力行业的全国统一碳市场，各碳市场在初始配额分配方式、核算方式等机制设计方面，都存在较大的差异。因此针对碳排放交易试点在中部地区和低工业化地区的促进影响最强，在东部地区和高工业化地区的促进效果相对较弱的情况，可以在原有基础上进一步采取差异化的政策措施，对地区的不同功能区域进行划分，在确定控制指标的前提下，确定总量控制的目标值，制订具有针对性的交易规则、配额管理办法及排污申报、审核、监测制度、配额跟踪体系等配套规则，运用差异化策略为不同地区的工业发展提供支持和激励，以加强东部地区的低碳转型进程。第三，设立碳市场监管机构，引入碳金融衍生品交易，发挥风险对冲及价格发现的作用。碳金融衍生品交易的建设可以帮助市场参与者管理碳排放风险，提供价格信息和市场预期，从而推动碳市场的稳定和有效运行。通过提供多样化的衍生品合约、引入有竞争力的市场参与者等措施，为市场参与者提供风险管理和投机的工具，增加市场的流动性，提高交易效率，最大程度发挥市场作用。

参考文献

- 胡洁,于宪荣,韩一鸣.ESG 评级能否促进企业绿色转型?——基于多时点双重差分法的验证[J].数量经济技术经济研究,2023,40(07):90-111.
- 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,2023,58(04):77-94.
- 李广明,张维洁.中国碳交易下的工业碳排放与减排机制研究[J].中国人口·资源与环境,2017,27(10):141-148.
- 李治国,王杰.中国碳排放权交易的空间减排效应:准自然实验与政策溢出[J].中国人口·资源与环境,2021,31(01):26-36.
- 刘传明,孙喆,张瑾.中国碳排放权交易试点的碳减排政策效应研究[J].中国人口·资源与环境,2019,29(11):49-58.
- 罗良文,孙立雪.可再生能源政策促进了工业低碳转型吗?[J].中南财经政法大学学报,2023(04):122-135.
- 马丽梅,史丹,裴庆冰.中国能源低碳转型(2015—2050):可再生能源发展与可行路径[J].中国人口·资源与环境,2018,28(02):8-18.
- 邵帅,范美婷,杨莉莉.经济结构调整、绿色技术进步与中国低碳转型发展——基于总体技术前沿和空间溢出效应视角的经验考察[J].管理世界,2022,38(02):46-69+4-10.
- 沈洪涛,黄楠,刘浪.碳排放权交易的微观效果及机制研究[J].厦门大学学报(哲学社会科学版),2017(01):13-22.
- 史丹.中国工业绿色发展的理论与实践——兼论十九大深化绿色发展的政策选择[J].当代财经,2018(01):3-11.
- 田淑英,孙磊,许文立等.绿色低碳发展目标下财政政策促进企业转型升级研究——来自“节能减排财政政策综合示范城市”试点的证据[J].财政研究,2022(08):79-96.
- 王锋,葛星.低碳转型冲击就业吗——来自低碳城市试点的经验证据[J].中国工业经济,2022(05):81-99.

- 王金南,董战峰,杨金田等.排污交易制度的最新实践与展望[J].环境经济,2008(10):31-45.
- 吴茵茵,齐杰,鲜琴等.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(08):114-132.
- 许文立,孙磊.市场激励型环境规制与能源消费结构转型——来自中国碳排放权交易试点的经验证据[J].数量经济技术经济研究,2023,40(07):133-155.
- 许文立,孙磊.市场激励型环境规制与能源消费结构转型——来自中国碳排放权交易试点的经验证据[J].数量经济技术经济研究,2023,40(07):133-155.
- 尹应凯,武祯妮,马鸿鑫.中国碳排放权交易试点政策对区域碳脱钩效应的影响研究[J].上海金融,2022(05):70-79.
- 余典范,蒋耀辉,张昭文.中国碳排放权交易试点政策的创新溢出效应——基于生产网络的视角[J].数量经济技术经济研究,2023,40(03):28-49.
- 张涛,李均超.网络基础设施、包容性绿色增长与地区差距——基于双重机器学习的因果推断[J].数量经济技术经济研究,2023,40(04):113-135.
- 张云,邓桂丰,李秀珍.经济新常态下中国产业结构低碳转型与成本测度[J].上海财经大学学报,2015,17(04):10-20.
- 周小亮,宋立.中国工业低碳转型:现实分析与政策思考[J].数量经济技术经济研究,2022(8):22-4
- 周肖肖,贾梦雨,赵鑫.绿色金融助推企业绿色技术创新的演化博弈动态分析和实证研究[J].中国工业经济,2023(06):43-61.
- Abrell, J, A Ndoye Faye and G Zachmann (2011). Assessing the impact of the EU ETS using firm level data. Bruegel Working Paper 2011/08.
- Chu, Yin, J. Scott Holladay, Yun Qiu, Xian-Liang Tian, and Maigeng Zhou. "Air pollution and mortality impacts of coal mining: Evidence from coalmine accidents in China." *Journal of Environmental Economics and Management*, 121 (2023): 102846.
- Da Zhang et al. Emissions trading in China: Progress and prospects[J]. *Energy Policy*, 2014, 75 : 9-16.
- Dales, J.H., 1968, Pollution Property and Prices: An Essay in Policy-Making and Economics, Toronto: University of Toronto Press.
- Ellerman D A, Buchner K B. Over-Allocation or Abatement? A Preliminary Analysis of the EU ETS Based on the 2005 - 06 Emissions Data[J]. *Environmental and Resource Economics*, 2008, 41(2).
- Ferrara L E, Chong A, Duryea S. Soap Operas and Fertility: Evidence from Brazil[J]. *American Economic Journal: Applied Economics*, 2012, 4(4).
- Green J F. Don't link carbon markets[J]. *Nature*, 2017, 543(7646):484-486
- Jingbo C, Chunhua W, Junjie Z, et al. The effectiveness of China's regional carbon market pilots in reducing firm emissions.[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2021, 118(52).
- M R B, A D K. The moderator-mediator variable distinction in social psychological research: conceptual, strategic, and statistical considerations.[J]. *Journal of personality and social psychology*, 1986, 51(6).
- Newell, Richard G, William A.P., Daniel R. Carbon Markets 15 Years after Kyoto: Lessons Learned, New Challenges[J]. *Journal of Economic Perspectives*. 2013. 27(1):123-46
- Parsons E J, Ellerman D A, Feilhauer S. Designing a U.S. Market for CO2[J]. *Journal of Applied Corporate Finance*, 2009, 21(1).
- R. H. Coase. The Problem of Social Cost.[J]. *Journal of Law and Economics*, 1960
- Zhang H, Duan M, Deng Z. Have China's pilot emissions trading schemes promoted carbon emission reductions?— the evidence from industrial sub-sectors at the provincial level[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 234.