

郭建峰,欧筱彤. 高质量发展视角下碳排放权交易政策对城市生态福利绩效的影响[J]. 地球科学与环境学报, 2023, 45(2): 373-384.  
GUO Jian-feng, OU Xiao-tong. Impact of Carbon Emission Trading Policy on Urban Ecological Well-being Performance from the Perspective of High-quality Development[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2023, 45(2): 373-384.

DOI:10.19814/j.jese.2022.11061

•《地球科学与环境学报》更名二十周年纪念专辑•

# 高质量发展视角下碳排放权交易政策对 城市生态福利绩效的影响

郭建峰, 欧筱彤

(西安邮电大学 经济与管理学院, 陕西 西安 710061)

**摘要:** 坚持生态优先, 推进环境规制, 对城市高质量发展具有重要意义。基于高质量发展理念, 构建城市生态福利绩效(UEWP)评价框架, 采用 Super-SBM 模型测度 2010~2019 年我国 253 个城市经济发展质量, 并采用双重差分模型构建中国碳排放权交易政策(CETP)的准自然实验, 测度碳排放权交易政策的实施对城市生态福利绩效的影响及作用机制。结果表明: 我国城市生态福利绩效呈现东部地区高、西部地区低、中部地区最低的分布格局, 并整体呈波动上升趋势; 碳排放权交易政策的实施可以有效提升城市生态福利绩效, 但存在城市类型和地理区位的异质性, 该推动作用主要存在于中心城市和中部地区城市; 此外, 碳排放权交易政策的实施能够显著推动产业结构优化, 并对城市生态福利绩效产生积极影响, 但未激发区域波特效应的产生。

**关键词:** 碳排放; 交易政策; 生态福利绩效; 双重差分模型; Super-SBM 模型; 高质量发展; 环境规制; 城市

中图分类号: F832.5; X24

文献标志码: A

文章编号: 1672-6561(2023)02-0373-12

## Impact of Carbon Emission Trading Policy on Urban Ecological Well-being Performance from the Perspective of High-quality Development

GUO Jian-feng, OU Xiao-tong

(College of Economics and Management, Xi'an University of Posts & Telecommunications,  
Xi'an 710061, Shaanxi, China)

**Abstract:** Promoting environmental regulation and the reduction of carbon emissions are the key path to guide the high-quality development. Based on the concept of high-quality development, a framework for evaluating the urban ecological well-being performance (UEWP) was constructed, the quality of economic development of 253 prefecture-level cities in China from 2010 to 2019 was measured using the Super-SBM model, and a quasi-natural experiment of China's carbon emissions trading policy (CETP) was constructed using differences-in-differences (DID) model, in order to measure the impact and effect mechanism of the implementation of CETP on the UEWP. The results show that the average values of UEWP in China show a distribution pattern of being higher in the eastern region, lower in the western region and lowest in the middle region; the overall trend of UEWP is fluctuating upward; CETP has significantly improved

UEWP; urban heterogeneity tests illustrate that CETP plays more significant role in promoting UEWP of cities in the middle region and the central cities. CETP can advance industrial structure upgrading, thereby promoting UEWP; however, there is no evidence that CETP can stimulate the regional Porter effect.

**Key words:** carbon emission; trading policy; ecological well-being performance; differences-in-differences model; Super-SBM model; high-quality development; environmental regulation; city

## 0 引言

新古典经济学认为自然资源是无限供应或可以被人为资本所替代的,因此不受限制的经济增长可以持续地带来人类福祉,实现人类社会的可持续发展<sup>[1]</sup>。但随着全球对环境变化和温室气体排放问题的关注日益提升,这一观点受到了学术界的质疑和批评。可持续发展经济学认为经济系统是生态系统的子系统,经济发展在提升人类福祉的过程中起着中介作用,而生态系统是人类美好生活的物质基础和保障。正如 Daly 所言,人类社会已经从自然资源相对丰富的“空的世界”过渡到了自然资源绝对匮乏的“满的世界”<sup>[2]</sup>。自然资源的稀缺已成为限制全人类发展的主要因素。在此背景下,党的十九大提出了“高质量发展”理念,从此高质量发展成为了我国进入新发展阶段、深入贯彻新发展理念、加快构建新发展格局的基本要求<sup>[3]</sup>。如何在经济发展、社会生活、生态环境三大体系有效融合的同时,走出一条高质量绿色发展道路,是人类社会共同面临的时代问题。

碳排放权交易市场的建立是我国以市场机制应对气候变化与环境污染,推动经济高质量发展的一项重大体制机制创新。其主要目标是通过市场机制对企业的碳排放份额进行分配,使碳排放成本内部化,从而推动经济低碳发展<sup>[4]</sup>。参考“欧盟碳排放交易体系”(EU Emissions Trading System, EU-ETS)的建立,我国于 2011 年也开始了碳排放权交易试点的筹备工作,在全国范围内确定了 7 个交易试点地区,涵盖 37 个城市,并于 2013 年 6 月起陆续启动交易。基于试点地区的经验,全国范围的碳排放权交易市场于 2017 年正式启动建立。经过数年的筹备与规划,我国首个覆盖发电行业的碳排放权交易市场于 2021 年 7 月 16 日开启上线交易,这也标志着我国在碳排放权交易方面取得了突破性成就。已有大量研究表明,碳排放权交易政策(Carbon Emission Trading Policy, CETP)的实施对试点地区的碳减排存在显著的正向影响<sup>[5]</sup>,但这是以经济活动放

缓作为代价还是经济效率提升的结果呢?显然后者才是我国向绿色经济转型,推动高质量发展的必然要求。因此,碳排放权交易政策的实施能否有效推动城市高质量发展?其背后的作用机制是什么?碳排放权交易政策的实施效果在不同区域、不同类型的城市中是否存在差异?对于这些问题的理论阐述和实证检验,对我国碳排放权交易市场的全面开展以及推动城市高质量发展无疑具有重要的理论与实践意义。

从现有研究来看,环境规制政策的实施对经济发展的影响是十分复杂的。不同样本、不同政策甚至是不同研究方法所产生的研究结论均有不同,甚至截然相反。部分学者认为,环境规制政策的实施会影响企业的生产经营,刺激企业进行技术创新<sup>[6]</sup>,提升产能利用效率<sup>[7]</sup>,促进产业实现转型升级<sup>[8]</sup>,最终实现环境保护和经济增长的双赢<sup>[9]</sup>。而也有学者持有相反观点,认为环境监管并不一定会刺激企业创新<sup>[10]</sup>,反而会给企业带来额外成本,挤占生产与研发投入,降低企业竞争力,抑制经济增长<sup>[11]</sup>。还有学者认为环境监管的实施效果会受到发展阶段<sup>[12]</sup>、环境规制类型<sup>[13]</sup>及强度<sup>[14]</sup>等各种因素的影响而出现不确定性。总之,现有文献对于环境规制如何影响经济发展尚未达成共识。而且环境规制的内容非常广泛,中国政府出台了大量的环境规制政策,主要包括碳排放权交易政策、SO<sub>2</sub> 排污权交易试点政策和“双控区”政策等,导致难以对其进行精准量化和构建测量模型。但在不断强调经济高质量发展的背景下,碳排放权交易政策作为利用市场机制控制和减少温室气体排放、推进绿色低碳发展的一项重大制度创新,以及实现“双碳”目标的重要手段,本文将其作为研究对象,分析其对于城市经济发展质量的影响,不仅具有重要的理论意义,同时也能为未来全国性碳市场的建设与完善提供重要的决策依据。

从高质量发展的内涵出发,对城市发展质量的衡量应从经济发展、生态环境和社会生活 3 个方面进行综合考虑<sup>[15]</sup>。基于此,诸大建 2008 年首次提

出了生态福利绩效(Ecological Well-being Performance, EWP)的概念,并将其定义为生态资源消耗与社会福利水平之间的转化效率,旨在反映当地生态环境与人类福祉之间的关系<sup>[16]</sup>。随着新旧动能的转变,我国社会经济进入高质量发展阶段,发展方式由高速向高质量转变,使用生态福利绩效来衡量一个地区的可持续发展程度及其可持续发展潜力,避免了单纯的GDP主义,更加符合高质量发展的内在要求。

基于此,为了实证检验碳排放权交易政策对城市高质量发展的影响,本文基于高质量发展理念,构建城市生态福利绩效评价框架,并对我国2010~2019年253个城市生态福利绩效(Urban Ecological Well-being Performance, UEWP)进行测量;同时将碳排放权交易政策的实施视为一个准自然实验,构建双重差分(DID)模型,研究这一市场导向型环境规制政策对城市生态福利绩效所表征的经济发展质量的影响及作用机制。

## 1 理论分析与假设提出

碳排放权交易政策是一项市场导向型的环境规制政策,旨在通过市场机制调节企业的生产经营行为,减少温室气体排放。随着碳排放权交易政策的实施,碳排放权成为在市场上公开交易的商品,试点企业需要承受更高的生产成本以购买碳排放份额。遵循利润最大化原则,碳排放权交易政策的实施会促使企业通过改进生产技术,提高能源利用率或选择使用清洁能源等方式减少碳排放,进而降低生产成本<sup>[17]</sup>。同时,碳排放权交易政策还可以通过促进产业结构调整,加速绿色低碳转型,实现区域整体的碳排放减少<sup>[18]</sup>。而对经济发展的影响方面,大多数研究表明,碳排放权交易政策在发挥碳减排效应的同时,并不会抑制区域经济发展<sup>[19]</sup>。碳排放权交易政策可以通过市场机制实现资源配置优化,降低经济系统整体的减排成本,扩大就业规模<sup>[20]</sup>,长期实现波特效应,促进经济发展<sup>[21]</sup>。因此,碳排放权交易政策的实施可以在抑制环境污染及温室气体排放的同时,促进企业进行技术创新,提高生产效率,推动产业结构转型升级,进而实现经济的高质量可持续发展。而经济增长将促使政府加大对公共基础设施的投入,完善教育、医疗、社会保险等公共服务体系,提升人民生活幸福感,促进城市生态福利绩效水平的提升。基于此,本文提出了3个假设:碳排放权交易政策可以显著促进城市生态福利绩效的提升

(H1);碳排放权交易政策可以通过推动企业绿色技术创新提升城市生态福利绩效(H2);碳排放权交易政策可以通过推动产业结构升级提升城市生态福利绩效(H3)。

第1个假设为碳排放权交易政策可以显著促进城市生态福利绩效的提升,那么碳排放权交易政策如何实现对城市生态福利绩效的促进作用?首先,有效的环境规制政策能够促进企业进行低碳技术创新<sup>[22]</sup>,而技术创新是实现经济绿色增长的基本要素<sup>[23]</sup>。波特假说认为环境规制并不会阻碍生产力的提高,设计良好的环境政策可以引发技术创新,从而部分甚至完全抵消合规成本<sup>[24]</sup>。从企业层面来看,监管压力将迫使企业调整现有的生产方式或者进行技术创新<sup>[25]</sup>,在保证产出的同时减少能源消耗和CO<sub>2</sub>排放,即提高能源利用效率。而且,这种创新不仅减少了污染治理支出,也降低了企业对于能源的需求和效用<sup>[26]</sup>。而从政府的角度出发,环境规制政策的实施往往伴随着一系列相应的配套政策,以激励控排企业进行技术创新,如对绿色技术创新的企业进行减税降费,或对其创新行为给予补贴等<sup>[27]</sup>。这些配套政策能在一定程度上降低企业进行技术创新的成本及风险,提高企业的创新积极性,进而助力经济的高质量可持续发展,提升城市生态福利绩效。因此,本文在此基础上提出了第2个假设,即碳排放权交易政策可以通过推动企业绿色技术创新提升城市生态福利绩效。

产业结构由污染密集型向绿色节约型进行转型升级,是我国推动经济高质量发展的必然要求<sup>[28]</sup>。那么碳排放权交易政策是如何促进产业结构升级来提升城市生态福利绩效?一方面,碳排放权交易政策的实施需要企业将部分产能由传统的生产用途转向用于减少企业污染<sup>[29]</sup>。同时,碳排放权交易政策的实施会促使资本从无法有效进行碳减排的企业中流出,进而导致高污染高耗能行业的萎缩<sup>[30]</sup>。因此,碳排放权交易政策可能会加速行业的结构调整,推动行业实现绿色低碳转型。另一方面,碳排放权交易政策的实施还会加大企业对于太阳能、风能等清洁能源的使用比重<sup>[31]</sup>,改变企业的投资结构,引导企业的相关生产过程向绿色低碳环保的方向转变,实现企业内部的转型升级。而产业结构升级将带动生产要素由低生产率产业向高生产率产业转移,提升社会整体产出水平,促进经济发展。综上所述,本文提出了第3个假设,即碳排放权交易政策可以通过推动产业结构升级提升城市生态福利绩效。

## 2 模型、变量与数据

### 2.1 模型设定

本文将碳排放权交易政策的实施视为一次准自然实验,并通过构建双重差分模型评估政策的实施对各城市生态福利绩效水平的影响。国家发展和改革委员会于 2011 年 11 月 29 日发布《关于开展碳排放权交易试点工作的通知》,确立北京市、天津市、上海市、重庆市、湖北省、广东省以及深圳市为碳排放权交易政策试点地区,并于 2013 年底至 2014 年初陆续完成 2 省 5 市的碳排放权交易政策试点启动工作。本文考虑到政策的实施存在时间滞后性,因此,以 2014 年作为政策发生时点,即 2014 年已实施碳排放权交易政策试点的 6 个省市区所辖 34 个城市作为实验组,其余 24 个省区所辖 219 个城市为对照组。具体模型设定为

$$P_{i,j}^{UEWP} = \beta_0 + \beta_1 did_{i,j} + \beta_2 X_{i,j} + u_i + v_j + \epsilon_{i,j} \quad (1)$$

式中: $P_{i,j}^{UEWP}$  是被解释变量,表示第  $i$  个城市第  $j$  个年份的城市生态福利绩效; $did_{i,j}$  为第  $i$  个城市第  $j$  个年份的碳排放权交易政策的虚拟变量,如果第  $i$  个城市是碳排放权交易试点城市,且  $j \geq 2014$  时, $did_{i,j} = 1$ ,否则为 0; $did_{i,j}$  的系数估计值  $\beta_1$  为碳排放权交易政策的实施对城市生态福利绩效产生的净效应,若  $\beta_1$  显著为正,则说明碳排放权交易政策的实施可以显著提升城市生态福利绩效水平; $u_i$  表示第  $i$  个城市第  $j$  个年份的城市固定效应; $v_j$  表示第  $j$  个年份固定效应; $\epsilon_{i,j}$  为第  $i$  个城市第  $j$  个年份的随机扰动项; $X_{i,j}$  为第  $i$  个城市第  $j$  个年份的一组控制变量。

### 2.2 变量选取

#### 2.2.1 被解释变量

本文选取城市生态福利绩效作为被解释变量。在选用 Tone 于 2002 年提出的 Super-SBM 模型<sup>[32]</sup>基础上,参考 Oh 的研究<sup>[33]</sup>,采用 Globe-Malmquist-Luenberger(GML)指数对城市生态福利绩效进行测算。本文借鉴龙亮军等的研究思路<sup>[34-35]</sup>,基于高质量发展理念及内在要求,选取多项投入指标和产出指标。

(1)投入指标:资本存量、劳动力存量、能源消耗、水资源消耗和土地资源消耗。其中,资本存量的计算参考张军等的研究<sup>[36]</sup>,在考虑资本折旧的基础上使用永续盘存法进行测度;劳动力存量由万人年末单位从业人数表示;能源消耗以各城市人均用电量表示;水资源消耗和土地资源消耗分别由人均用

水量和人均建成区面积表示。

(2)产出指标:期望产出指标的选取参考人类发展指数(HDI)的设计逻辑,在本文中体现为包含经济发展水平、教育发展水平和健康发展水平等 3 个方面。具体而言,以人均 GDP 代表城市经济发展水平;同时,考虑到城市层面的数据可得性,选取万人在校大学生数和万人有医生数分别代表教育发展水平和健康发展水平。而非期望产出指标则包括人均工业废水排放量、人均工业 SO<sub>2</sub> 排放量和人均工业烟尘排放量。

为获得可进行动态分析的生态福利绩效值,本文参考邱斌等的方法<sup>[37]</sup>,以 2010 年为基期,将各城市 2010 年的生态福利绩效均取值为 1,而 2011~2019 年各城市的生态福利绩效则以环比法连乘对应年份的 GML 指数得到。具体的指标选取情况如表 1 所示。

表 1 城市生态福利绩效指标变量

Table 1 Indicator Variables of Urban Ecological Well-being Performance				
指标类型	一级指标	二级指标	三级指标	单位
投入指标	资源消耗	能源消耗	人均用电量	kW · h · 人 <sup>-1</sup>
		水资源消耗	人均用水量	t · 人 <sup>-1</sup>
		土地资源消耗	人均建成区面积	km <sup>2</sup> · 万人 <sup>-1</sup>
	非资源消耗	劳动力存量	万人年末单位从业人数	人
		资本存量		元
产出指标	期望产出	经济发展水平	人均 GDP	元 · 人 <sup>-1</sup>
		教育发展水平	万人在校大学生数	人
		健康发展水平	万人有医生数	人
	非期望产出	废水排放	人均工业废水排放量	t · 人 <sup>-1</sup>
		废气排放	人均工业 SO <sub>2</sub> 排放量 人均工业烟尘排放量	t · 万人 <sup>-1</sup> t · 万人 <sup>-1</sup>

#### 2.2.2 核心解释变量

本文采用虚拟变量来表示该城市是否实施了碳排放权交易政策。根据《关于开展碳排放权交易试点工作的通知》中的实施碳排放权交易政策的省市名单,结合 2014 年作为统一政策实施时间进行赋值,得到核心解释变量——碳排放权交易政策的双重差分项,以  $did$  表示。

#### 2.2.3 中介变量

为了检验假设 H2 和 H3,本文设定绿色技术创新(Innovation)和产业结构升级(Industry)两个中间变量,构建中介效应模型验证碳排放权交易政策对城市生态福利绩效的影响机理。绿色技术创新是

企业技术创新在环境保护中的重要体现,是解决经济增长和生态环境之间矛盾的关键。本文选用上市公司绿色专利申请数衡量城市绿色技术创新水平。原因如下:一是绿色专利是企业绿色环保方面进行创新活动的集中体现,相对于企业研发投入而言,拥有更加明确的价值内涵细分<sup>[38]</sup>;二是专利申请审批时间较长,选用专利申请数而非专利授权数,在衡量碳排放权交易政策的实施对技术创新产生的影响时更具时效性<sup>[39]</sup>。而产业结构升级则选用徐德云提出的“产业结构指数”(  $I_{\text{Industry}}$  )<sup>[40]</sup>表示,具体算法为  $I_{\text{Industry}} = \sum_{n=1}^3 nI_n = I_1 + 2I_2 + 3I_3$ ,其中  $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$  表示各省份第一、二、三产业年产值的 GDP 占比。

2.2.4 控制变量

参考相关文献及对数据可得性的考虑,本文设置如下控制变量:经济发展水平(lnPGDP),采用以 2010 年为基期换算的人均实际 GDP 表示;对外开放程度(lnFDI),采用地区外商直接投资额,且以当年平均汇率折算为人民币表示;城市绿化水平(Green),采用建成区绿化覆盖率表示;产业结构(Sec),采用第二产业占地区生产总值的比重表示;政府干预程度(Gov),用财政支出占地区生产总值的比重表示;人口密度(lnPD),以单位行政区域面积的人口数表示。

2.3 数据说明

除去部分数据存在较大缺失的城市,本文选取我国大陆地区 253 个城市 2010~2019 年的平衡面板数据进行实证研究。除了部分缺失值采用插值法补齐外,原始数据均取自《中国城市统计年鉴》《中国城市建设统计年鉴》及各省市统计年鉴。本文为缩小数据间量纲差距,方便后续回归的计算以及回归系数的展示,对所有非比率变量进行了对数处理。各变量说明归纳如表 2 所示。

3 实证分析

3.1 城市生态福利绩效特征

3.1.1 空间差异特征

本文采用 Super-SBM 模型计算了 2010~2019 年间 253 个城市生态福利绩效值。如表 3 所示,我国城市生态福利绩效水平整体较低,平均值仅为 0.715,未实现数据包络分析(Data Envelopment Analysis,DEA)相对有效。253 个城市中,仅有 45 个城市实现了数据包络分析相对有效,占样本总量的 17.8%,其余 207 个城市均未实现数据包络分析有效,占总样本量的 81.8%,这表明我国大多数城

表 2 相关变量的描述性统计结果  
Table 2 Descriptive Statistical Results of the Variables of Interest

控制变量	统计项目	全样本	实验组	对照组
城市生态福利绩效	平均值	1.46	1.62	1.43
	标准差	1.05	1.39	0.98
经济发展水平	平均值	10.64	10.90	10.60
	标准差	0.70	0.91	0.65
对外开放程度	平均值	11.98	12.65	11.88
	标准差	1.82	1.90	1.79
城市绿化水平	平均值	0.40	0.43	0.40
	标准差	0.12	0.27	0.06
产业结构	平均值	0.48	0.47	0.48
	标准差	0.10	0.09	0.10
政府干预程度	平均值	0.22	0.18	0.23
	标准差	0.23	0.15	0.23
人口密度	平均值	5.82	6.33	5.74
	标准差	0.88	0.70	0.87
产业结构升级	平均值	2.30	2.39	2.28
	标准差	0.22	0.44	0.15
绿色技术创新	平均值	5.17	5.80	5.07
	标准差	1.67	2.03	1.59

注:全样本、实验组和对照组样本数分别为 2 530、340 和 2 190。

表 3 我国部分城市生态福利绩效值及排名

Table 3 Ecological Well-being Performance Values and Rankings of Selected Cities in China

城市	城市生态福利绩效值	排名	城市	城市生态福利绩效值	排名	城市	城市生态福利绩效值	排名
海口	1.705	1	石家庄	0.984	50	厦门	0.821	98
深圳	1.422	2	西安	0.980	52	南宁	0.802	106
阜阳	1.294	3	长春	0.965	55	杭州	0.753	112
长沙	1.169	7	昆明	0.959	57	宁波	0.747	115
北京	1.154	9	武汉	0.955	58	福州	0.713	127
广州	1.121	13	上海	0.928	66	合肥	0.686	134
呼和浩特	1.097	16	兰州	0.910	69	沈阳	0.680	137
太原	1.069	24	郑州	0.886	72	西宁	0.497	186
济南	1.060	27	天津	0.861	79	重庆	0.376	232
青岛	1.054	28	南京	0.855	81	防城港	0.244	251
河池	1.003	45	大连	0.853	83	石嘴山	0.242	252
南昌	0.989	46	成都	0.849	86	七台河	0.202	253
哈尔滨	0.988	47	乌鲁木齐	0.836	89			

注:受文章篇幅限制,仅对重点城市生态福利绩效值进行展示;全国 253 个城市生态福利绩效平均值为 0.715。

市在改善生态福祉方面的效率较低。从城市排名来看,海口、深圳和阜阳依次位列前三。

本文将 253 个城市根据生态福利绩效值等间隔

分为 5 类,分别为优秀城市(生态福利绩效值不低于 1.0)、良好城市(介于 0.8~1.0)、一般城市(介于 0.6~0.8)、较差城市(介于 0.4~0.6)和很差城市(介于 0.2~0.4);在此基础上,绘制了 253 个城市生态福利绩效值的空间分布,结果如图 1 所示。从图 1 可以看出:我国城市生态福利绩效平均值呈现东部地区高、西部地区低、中部地区最低的分布趋势。优秀城市主要分布在东部地区,如海口、深圳和北京。东部地区是经济发展的重点,借助外商投资以及早期政策推动,使得经济发展及产业结构都更为先进。然而,并非所有经济发达的城市都能获得较高的生态福利绩效值,如沿海城市惠州、日照等生态福利绩效水平均较差。因此,随着资源与环境双重约束的时代到来,粗放式的增长模式将严重限制城市高质量发展。而相较于东部地区,中部、西部地区城市生态福利绩效值处于较低水平。这可能是由于中部、西部地区承接了一些从东部地区转移过来的能源密集型和污染密集型产业,对中部、西部地区城市造成了生态环境压力。同时,中国许多西部城市难以获得资源、技术和人才,因此,中部、西部地区在缩小经济差距的追赶中,容易形成高污染、低资源利用效率的经济发展怪圈。

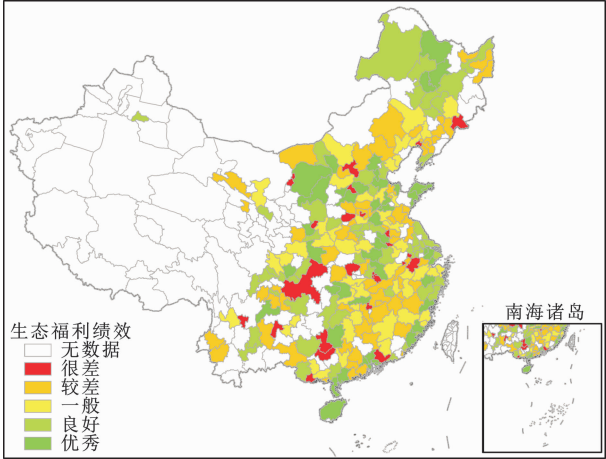


图 1 我国城市生态福利绩效空间分布

Fig. 1 Spatial Distribution of Urban Ecological Well-being Performance in China

3.1.2 时间演进特征

运用 DEA-Malmquist 指数分析法对 253 个城市 2010~2019 年生态福利绩效进行动态实证分析,运用 MaxDEA 软件得到城市生态福利绩效的 GML 指数及其分解项——技术效率(EC)指数和技术进步(TC)指数,结果如表 4 所示。从表 4 可以看出,整体上除少数年份外,我国城市生态福利绩效呈波动上升趋势(GML 指数大于 1)。这主要归功于自

党的十九大提出“高质量发展”以来,党和政府不断强调生态优先绿色发展的重要性和必要性,出台了大量环境规制政策,严格控制污染物排放,大力支持企业绿色技术创新,促进各城市由原先的“唯 GDP”发展模式不断向高质量发展模式转变,推动了我国城市生态福利绩效的提升。对 GML 指数做进一步分解可以看出,除 2013 年和 2019 年外,其他年份技术效率指数都大于 1,表明在样本期间,我国资源配置效率不断提升并为城市生态福利绩效的提高发挥了积极的推动作用;而从技术进步指数来看,自 2014 年后技术进步指数均略大于技术效率指数,且整体大于 1。这表明我国城市技术创新水平逐年提升,且近几年来技术进步对城市生态福利绩效的整体增长率贡献值更大,说明技术进步与创新已经成为未来促进城市高质量发展,提升城市生态福利绩效水平的重要手段。

东部、中部、西部地区城市生态福利绩效增长态势与整体演进态势相似,但存在一定的区域异质性。东部与中部地区城市生态福利绩效的增长率显著高于西部地区城市,说明虽然各地区城市生态福利绩效水平均在不断提高,但东部、中部地区的增长速度更快,这得力于良好的经济基础与基础设施建设。其中,东部地区城市的技术进步指数平均值为 1.10,显著高于其技术效率指数及全国平均水平,呈快速增长趋势;中部地区城市的技术效率指数与技术进步指数相近,均保持轻微增长的态势;而西部地区城市的技术进步指数略低于技术效率指数,说明推动西部地区城市生态福利绩效提升的主导力量是不断提升的技术利用效率,而非技术创新。

3.2 基准回归及异质性检验

为了检验碳排放权交易政策对城市生态福利绩效的影响,本文在双向固定效应的前提下,对式(1)进行回归估计。同时,考虑到各城市自身经济基础、产业结构以及自然条件的差异,其在我国实现“双碳”目标以及高质量发展的进程中所扮演的角色及地位势必存在差异,这也将导致试点政策对不同类型、不同区位的城市生态福利绩效的影响可能存在一定的异质性。为此,本文根据城市行政等级以及东部、中部、西部地区地理区位分别设置城市类型(Level)虚拟变量和地区(Area)虚拟变量,与 did 相乘进行回归,结果见表 5。表 5 显示,did 系数显著为正,说明碳排放权交易政策的实施显著促进了试点城市生态福利绩效的提升。相对于尚未进行碳排放权交易试点的城市,试点城市生态福利绩效提高



表 4 城市生态福利绩效的 GML 指数及其分解项

Table 4 GML Index and Its Decomposition Terms of Urban Ecological Well-being Performance

年份	不同地区城市生态福利绩效的 GML 指数及其分解项											
	东部地区城市			中部地区城市			西部地区城市			全国城市		
	GML 指数	EC 指数	TC 指数	GML 指数	EC 指数	TC 指数	GML 指数	EC 指数	TC 指数	GML 指数	EC 指数	TC 指数
2011	1.03	1.05	0.99	1.01	1.09	0.94	1.05	1.19	0.88	1.03	1.10	0.95
2012	1.12	1.05	1.07	1.11	1.07	1.04	1.15	1.16	0.99	1.12	1.08	1.05
2013	1.27	1.01	1.28	1.36	0.92	1.48	1.27	0.95	1.33	1.33	0.96	1.40
2014	0.94	1.06	0.90	0.89	1.17	0.76	0.92	1.24	0.74	0.92	1.14	0.81
2015	1.15	1.03	1.13	1.15	1.08	1.07	1.06	0.96	1.10	1.13	1.03	1.10
2016	1.20	0.98	1.25	1.37	1.07	1.27	1.12	0.99	1.13	1.27	1.02	1.27
2017	1.04	1.08	0.99	0.91	1.08	0.86	0.87	1.02	0.85	0.95	1.07	0.90
2018	1.16	1.06	1.11	1.16	1.09	1.10	1.10	1.04	1.06	1.15	1.07	1.10
2019	1.13	0.95	1.20	1.12	0.98	1.18	1.06	0.93	1.14	1.11	0.95	1.18
2011~2019	1.12	1.03	1.10	1.12	1.06	1.07	1.06	1.04	1.02	1.11	1.05	1.08

注:2011~2019 年的数据为平均值。

表 5 基准回归结果及异质性分析结果

Table 5 Baseline Regression and Heterogeneity Analysis Results

变量	全样本	城市等级	不同地区城市		
			东部地区	中部地区	西部地区
did	0.291*** (3.14)				
did*level		0.455** (2.38)			
did*area			0.237** (2.09)	0.375** (2.45)	-0.165 (-0.33)
控制变量	已控制	已控制	已控制	已控制	已控制
城市固定效应	已控制	已控制	已控制	已控制	已控制
年份固定效应	已控制	已控制	已控制	已控制	已控制
N	2 530	2 530	2 530	2 530	2 530
R <sup>2</sup>	0.114	0.112	0.112	0.113	0.110
F 统计值	37.109***	36.782***	36.678***	36.807***	36.34***

注:括号内数值为 t 统计量;level 为城市类型虚拟变量;area 为地区虚拟变量;N 为样本数;R<sup>2</sup> 为判定系数;\* 表示在  $p<0.1$  水平下显著;\*\* 表示在  $p<0.05$  水平下显著;\*\*\* 表示在  $p<0.01$  水平下显著。

了 29.1%。这说明国家推行碳排放权交易政策的绩效是明显的,能显著促进城市经济高质量发展,假设 H1 成立。而由表 5 还可以看出,碳排放权交易政策的实施对不同类型、不同区位的城市生态福利绩效的影响存在典型的异质性。

本文根据各城市的行政等级对试点城市进行了划分,分为中心城市和普通城市,其中中心城市指直辖市、省会城市和副省级城市。将中心城市赋值为 1 与 did 相乘进行回归,结果如表 5 所示。城市等级与碳排放权交易政策虚拟变量的交乘项系数在 5%

水平下显著为正,表明碳排放权交易政策的实施对中心城市生态福利绩效的推动作用更为明显。主要原因可能在于:相比于普通城市,中心城市本身的基础设施建设更加完善,产业结构更为合理且技术创新水平更高,在碳排放权交易政策实施的背景下更易形成活跃的碳排放权交易市场以及实现资源的重新配置,进而对城市高质量发展的推进力度更大。碳排放权交易政策的实施对于中部地区城市的高质量发展起到了最为显著的推动作用,而东部地区城市次之,对西部地区城市的影响不明显。产生这一现象的原因可能是:东部地区城市经历了早期一系列的政策支持,整体经济发展较为成熟,产业结构也逐步由资源消耗型转向技术节约型,自身的经济实力已处于较高水平,碳排放权交易政策的实施所带来的政策红利较小,对该地区城市高质量发展的推动作用相对有限;而中部地区城市凭借其要素禀赋优势和区位优势,承接东部地区转移的成熟产业和吸收东部地区城市的发展经验,因而能够更加有效地利用碳排放权交易政策带来的政策红利,助力城市高质量发展水平的提升;相比之下,西部地区城市的经济基础较为薄弱,产业结构相对失调,重工业比重过大,尚未具备高效利用政策红利的综合实力。

3.3 稳健性检验

为确保估计结果的可信度和稳定性,本文进行了平行趋势检验、替换被解释变量、安慰剂检验以及考虑其他政策影响等一系列稳健性检验。

3.3.1 平行趋势检验

通过平行趋势检验是使用双重差分模型的前提,即实验组和对照组在政策实施之前的变化趋势

应不存在显著的系统性差异。由表 6 可以看出,在碳排放权交易政策的实施时点之前,回归系数均不显著,说明实验组与对照组的城市在碳排放权交易政策实施前的变化趋势并无显著差异。但从 2014 年碳排放权交易政策正式启动后,其政策效应显著为正,且回归系数在波动中增加。由此可以推论,碳排放权交易政策的实施促进了城市生态福利绩效的增长,这也印证了本文的实证结果。

表 6 平行趋势检验结果

Table 6 Results of Parallel Trend Test

年份	回归系数	标准 误差	t 统计 量	$P> t $ 值	95%置信区间 $[a,b]$	
					$a$	$b$
2011	0.158	0.172	0.92	0.357	-0.178	0.495
2012	0.153	0.172	0.89	0.373	-0.184	0.490
2013	0.148	0.172	0.86	0.389	-0.189	0.485
2014	0.470**	0.171	2.74	0.006	0.134	0.806
2015	0.559**	0.172	3.27	0.001	0.223	0.895
2016	0.410*	0.172	2.39	0.017	0.073	0.746
2017	0.589**	0.173	3.41	0.001	0.250	0.928
2018	0.656***	0.171	3.83	0.000	0.320	0.992
cons	9.100*	3.512	2.59	0.010	2.213	15.988

注:cons 表示常数项; $P$  为不拒绝原假设的最大概率; $t$  为  $t$  统计量; $a$ 、 $b$  为 95%置信区间的最小值和最大值。

3.3.2 替换被解释变量

本文的被解释变量城市生态福利绩效,是基于高质量发展理念,综合考虑了“经济-环境-人类福祉”所构建的评价指标。为进行稳健性检验,本文引入现有文献中常用来衡量地区高质量发展水平的指标——绿色全要素生产率(GTFP)对原有被解释变量城市生态福利绩效进行替换。从表 7 可以看出,以绿色全要素生产率代表城市高质量发展水平时,did 的回归系数仍然在 1%水平下显著为正,假设 H1 得到了进一步验证。

3.3.3 安慰剂检验

为排除观测期内可能存在其他外生变量影响实验结果,导致碳排放权交易政策的实施效果出现被高估或者低估的情况,本文通过将政策实施时间提前 1 年和提前 2 年进行安慰剂检验。如果实验期确实存在其他外生因素的影响,did 系数应显著。但从表 7 可以看出,无论政策实施提前 1 年还是提前 2 年,did 系数均不显著,即城市生态福利绩效的变化应归功于碳排放权交易政策的实施。

3.3.4 考虑其他政策影响

观测期间若国家出台了碳减排的其他相关政策,也可能会对实验结果产生影响。2010 年国家发

表 7 3 种稳健性检验结果

Table 7 Results of Three Types of Robustness Tests

变量	替换被解释 变量	安慰剂检验		考虑其他 政策影响
	绿色全要 素生产率	政策实施时 间提前 1 年	政策实施时 间提前 2 年	低碳城市 试点政策
did	0.026*** (2.77)	0.175 (1.57)	0.176 (1.19)	0.281** (2.28)
控制变量	已控制	已控制	已控制	已控制
城市固定效应	已控制	已控制	已控制	已控制
年份固定效应	已控制	已控制	已控制	已控制
$N$	2 530	2 530	2 530	860
$R^2$	0.116	0.211	0.210	0.101
F 统计值	37.454***	46.452***	45.303***	12.375***

注:括号内数值为  $t$  统计量;\* 表示在  $p<0.05$  水平下显著;  
\*\*\* 表示在  $p<0.01$  水平下显著。

展和改革委员会发布了《关于开展低碳省区和低碳城市试点工作的通知》,截至目前已有 3 批省市开展低碳试点工作,包括 2010 年的 5 省 8 市、2012 年的 1 省 28 市以及 2017 年的 45 个城市<sup>[41]</sup>。低碳城市试点政策的实施能有效提升试点城市的碳排放效率,降低碳排放量<sup>[42]</sup>,提升全要素生产率<sup>[43]</sup>。由此可见,低碳城市试点政策与碳排放权交易政策具有相似的作用效果,目的都是减排降碳,促进城市经济高质量发展。因此,为排除低碳城市试点政策对城市高质量发展的作用,本文选取前两批次参与低碳试点的城市(共计 86 个)作为新的总体样本,将同时参与两项政策的城市(共计 34 个)作为实验组,仅参与低碳城市试点政策的城市(共计 52 个)作为对照组,重新进行双重差分实验。实验结果表明:did 系数在 5%水平下显著为正,说明在所有参与低碳试点的城市中,实施碳排放权交易政策的城市生态福利绩效依然得到了显著提升,本文结论的稳健性得到了进一步验证。

3.4 影响机制分析

基于理论分析,为了进一步验证假设 H2 和 H3,本文从绿色技术创新与产业结构升级两个方面选取中介变量,进一步探讨碳排放权交易政策对城市生态福利绩效的影响机理。回归结果如表 8 所示。

从表 8 可以看出:核心解释变量 did 到产业结构升级的传导效应显著为正,且产业结构升级到城市生态福利绩效的传导效应及 did 系数也均为正向且显著,这说明产业结构优化是碳排放权交易政策推动城市生态福利绩效提升的重要途径,假设 H3



表 8 影响机理检验结果

Table 8 Results of Mechanism of Action Tests

变量	实施碳排放权交易政策对产业结构升级的影响	产业结构升级对城市生态福利绩效的影响	实施碳排放权交易政策对绿色技术创新的影响	绿色技术创新对新对城市生态福利绩效的影响
did	0.076*** (4.17)	0.272*** (2.92)	0.019 (0.44)	0.294*** (3.16)
产业结构升级		0.261** (2.43)		
绿色技术创新				-0.114*** (-2.47)
控制变量	已控制	已控制	已控制	已控制
城市固定效应	已控制	已控制	已控制	已控制
时间固定效应	已控制	已控制	已控制	已控制
N	2 530	2 530	2 530	2 530
R <sup>2</sup>	0.146	0.116	0.116	0.116
F 统计值	43.877***	35.350***	35.362***	33.483***

注：括号内数值为 t 统计量；\* \* 表示在  $p<0.05$  水平下显著；\* \* \* 表示在  $p<0.01$  水平下显著。

得到验证；碳排放权交易政策并未通过促进企业技术创新推动城市生态福利绩效的提升，即中介效应不成立，拒绝假设 H2。碳排放权交易政策的实施并未在我国试点地区产生波特效应。造成这一失败的原因可能在于：根据污染天堂假说理论，在碳配额的约束下，高污染高耗能企业可能会选择直接转移到其他尚未实施碳排放权交易政策的地区<sup>[44]</sup>，而留在原地的企业为了实现减排目标，不可避免地增加了生产成本，挤压研发投入，扩大企业的融资约束<sup>[45]</sup>。不论是搬迁还是进行原地减排，过高的成本都会导致公司收益下降甚至破产。此外，在我国碳排放权交易试点阶段，碳排放权交易额度的总体分配相对宽松，相应的法律法规不够健全。而且由于市场规模小、市场有效性及活跃度低、价格波动大，7 个试点市场的总体成熟度均相对较低<sup>[46]</sup>，碳排放权交易的前景并不清晰，无法为市场参与者提供长期有效的政策指导。因此，企业对绿色技术创新往往采取观望甚至消极的态度，绿色技术创新的积极性不高<sup>[47]</sup>。

4 结论与启示

在倡导经济高质量发展的大背景下，本文基于高质量发展的内在要求，完善了城市生态福利绩效的测量指标体系，通过 Super-SBM 模型和 GML 指数测算 2010~2019 年 253 个城市生态福利绩效，并以其衡量城市发展质量。结果表明：在研究期间，我

国城市生态福利绩效整体呈震荡上升趋势。2014 年后，技术进步对于促进城市生态福利绩效的贡献大于技术效率提升，说明提升国家技术创新水平是推动经济高质量发展的必然要求。在此基础上，本文将碳排放权交易政策的实施视为一项准自然实验，并运用双重差分模型考察了碳排放权交易政策对试点城市生态福利绩效的影响。结果表明：碳排放权交易政策的实施能够显著提升试点城市生态福利绩效，且该结果通过了平行趋势检验、替换被解释变量、安慰剂检验、考虑其他政策影响等一系列稳健性检验。异质性检验发现：碳排放权交易政策的实施具有规模经济效应，对于中心城市的推动作用相较于普通城市而言更加显著；另一方面，从城市区位角度来看，碳排放权交易政策实施的带动效应在中部地区城市更为明显。而进一步分析碳排放权交易政策对城市高质量发展的影响机制时发现，碳排放权交易政策可以通过优化城市的产业结构释放其政策红利，进而提升城市生态福利绩效，推动城市高质量发展，但碳排放权交易政策的实施并未激发城市波特效应的产生。

本文可能存在的创新之处有：①现有文献主要集中于讨论碳排放权交易政策的减排效用，对技术创新的影响及碳排放权交易市场本身运行机制的研究设计等，但关于碳排放权交易政策与经济高质量发展的影响研究较少，而本文开展了这项研究。②生态福利绩效的概念本质上是高质量发展的延伸，为高质量发展的研究提供了一个新的研究视角和分析工具。随着高质量发展理念的提出，指标体系的构建应综合考虑高质量发展的理念和现实需求。因此，本文构建了新的生态福利绩效测量模型，将资本存量、劳动力存量等非资源型投入以及废水、废气排放作为非期望产出指标纳入测量模型，使得城市生态福利绩效的测算结果能够更加全面地反映经济发展质量。③本文的研究范围细化到了城市面板数据。城市在社会和经济活动中发挥着重要作用，评价城市的发展质量对于合理管理城市的人类活动具有重要意义。

本文为我国优化碳排放权交易市场，推动城市高质量发展提供了如下政策启示。首先，政府应当在总结试点地区经验的基础上，科学设计和建立统一、高效、规范、监管的碳排放权交易控制体系，扩大和提升全国碳排放权交易市场的覆盖范围和运行效率，尽快提供明确稳定的政策指导。其次，政府应进一步加强对中小企业、中西部地区企业的资金支持，

完善对企业的绿色技术创新激励机制,如环境补贴、退税制度、低碳融资体系等。同时,应完善配套的产业政策,与碳排放权交易政策协同发挥作用,加速推动重点减排行业的绿色低碳转型,实现城市的产业结构升级。最后,在实现经济高质量发展的过程中,地方政府应结合自身的经济基础、资源禀赋等现实情况,制定相应的配套政策,因地制宜地开展碳排放权交易,杜绝“一刀切”的情况。目前,全国统一碳排放权交易市场已经建成,必将对我国经济发展产生深远的影响,未来的研究可以进一步探索碳排放权交易长期的创新激励效应对经济发展质量的长期影响。本文的另一个局限性是,研究是基于城市层面展开的,但不同试点城市中参与碳排放权交易的企业数量及规模又存在较大差异,因此未对参与碳排放权交易的企业进行筛选,可能会使政策实施效果的评估不够细致准确。此外,碳排放权交易市场的核心问题是碳价格的形成,未来的研究有必要理解碳价格稳定机制、碳配额问题和经济发展质量、企业技术创新之间的关系。

《地球科学与环境学报》2022 年开设的“环境与可持续发展”栏目聚焦了环境科学领域的新兴前沿热点,特别是在人文地理、环境政策、土地资源管理等偏人文社科领域开展了有益的尝试,大大拓展了学报的报道范围,显著扩大了学报在人文社科领域的学术影响力! 2023 年,《地球科学与环境学报》将迎来更名二十周年,期待编辑部通过更优秀的选题策划,出版更多高质量专辑,使期刊的学术影响力再上新台阶!

参考文献:  
References:

[ 1 ] SOLOW R M. The Economics of Resources or the Resources of Economics[M]//GOPALAKRISHNAN C. Classic Papers in Natural Resource Economics. London:Palgrave Macmillan,2000:257-276.

[ 2 ] DALY H E. Economics in a Full World[J]. Scientific American,2005,293(3):100-107.

[ 3 ] 金 碚. 关于“高质量发展”的经济学研究[J]. 中国工业经济,2018(4):5-18.  
JIN Bei. Study on the “High-quality Development” Economics[J]. China Industrial Economics,2018(4):5-18.

[ 4 ] 陈 骁,张 明. 碳排放权交易市场:国际经验、中国特色与政策建议[J]. 上海金融,2022(9):22-33.  
CHEN Xiao,ZHANG Ming. Carbon Emissions Trading Market:International Experience,Chinese Charac-

teristics and Policy Recommendations[J]. Shanghai Finance,2022(9):22-33.

[ 5 ] 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(8):116-134.  
WU Yin-yin,QI Jie,XIAN Qin,et al. The Carbon Emission Reduction Effect of China’s Carbon Market: From the Perspective of the Coordination Between Market Mechanism and Administrative Intervention[J]. China Industrial Economics,2021(8):116-134.

[ 6 ] 王珍愚,曹 瑜,林善浪. 环境规制对企业绿色技术创新的影响特征与异质性:基于中国上市公司绿色专利数据[J]. 科学学研究,2021,39(5):909-919,929.  
WANG Zhen-yu,CAO Yu,LIN Shan-lang. The Characteristics and Heterogeneity of Environmental Regulation’s Impact on Enterprises’ Green Technology Innovation:Based on Green Patent Data of Listed Firms in China[J]. Studies in Science of Science,2021,39(5):909-919,929.

[ 7 ] HAN Z P,WANG L G,ZHAO F F. Can Emission Trading System Improve Capacity Utilization? A Quasi-natural Experiment in Chinese Listed Firms[J]. Journal of Cleaner Production,2023,385:135719.

[ 8 ] HE Y,ZHENG H. How Does Environmental Regulation Affect Industrial Structure Upgrading? Evidence from Prefecture-level Cities in China[J]. Journal of Environmental Management,2023,331:117267.

[ 9 ] WANG H,CHEN Z P,WU X Y,et al. Can a Carbon Trading System Promote the Transformation of a Low-carbon Economy Under the Framework of the Porter Hypothesis? Empirical Analysis Based on the PSM-DID Method[J]. Energy Policy,2019,129:930-938.

[10] LIU G X,SUN W,KONG Z Y,et al. Did the Pollution Charge System Promote or Inhibit Innovation? Evidence from Chinese Micro-enterprises[J]. Technological Forecasting and Social Change,2023,187:122207.

[11] ARJOMANDI A,GHOLIPOUR H F,TAHADDINI R,et al. Environmental Expenditure,Policy Stringency and Green Economic Growth:Evidence from OECD Countries[J]. Applied Economics,2023,55(8):869-884.

[12] DU K R,CHENG Y Y,YAO X. Environmental Regulation,Green Technology Innovation,and Industrial Structure Upgrading:The Road to the Green Transformation of Chinese Cities[J]. Energy Economics,2021,98:105247.

- [13] LI X,ZHANG G Y,QI Y. Differentiated Environmental Regulations and Enterprise Innovation: The Moderating Role of Government Subsidies and Executive Political Experience [J]. *Environment, Development and Sustainability*, 2023, DOI: 10. 1007/s10668-022-02851-0.
- [14] CHEN J, HU L Y. Does Environmental Regulation Drive Economic Growth through Technological Innovation: Application of Nonlinear and Spatial Spillover Effect[J]. *Sustainability*, 2022, 14(24): 16455.
- [15] SAISANA M, PHILIPPAS D. Sustainable Society Index(SSI): Taking Societies' Pulse Along Social, Environmental and Economic Issues [J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2012, 32: 94-106.
- [16] 诸大建. 生态经济学:可持续发展的经济学和管理学[J]. *中国科学院院刊*, 2008, 23(6): 520-530.  
ZHU Da-jian. Ecological Economics: Economics and Management of Sustainable Development[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2008, 23(6): 520-530.
- [17] HU Y C, REN S G, WANG Y J, et al. Can Carbon Emission Trading Scheme Achieve Energy Conservation and Emission Reduction? Evidence from the Industrial Sector in China[J]. *Energy Economics*, 2020, 85: 104590.
- [18] 薛飞,周民良. 中国碳交易市场规模的减排效应研究[J]. *华东经济管理*, 2021, 35(6): 11-21.  
XUE Fei, ZHOU Min-liang. Research on the Emission Reduction Effect of the Scale of China's Carbon Trading Market[J]. *East China Economic Management*, 2021, 35(6): 11-21.
- [19] ZHANG Y F, LI S, LUO T Y, et al. The Effect of Emission Trading Policy on Carbon Emission Reduction: Evidence from an Integrated Study of Pilot Regions in China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 265: 121843.
- [20] YANG X Y, JIANG P, PAN Y. Does China's Carbon Emission Trading Policy Have an Employment Double Dividend and a Porter Effect? [J]. *Energy Policy*, 2020, 142: 111492.
- [21] DING F, DAI Y J, ZHANG S N, et al. Can a Carbon Emission Trading Scheme Generate the Porter Effect? Evidence from Pilot Areas in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 653: 565-577.
- [22] MBANYELE W, WANG F R. Environmental Regulation and Technological Innovation: Evidence from China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(9): 12890-12910.
- [23] YAN Z M, ZOU B L, DU K R, et al. Do Renewable Energy Technology Innovations Promote China's Green Productivity Growth? Fresh Evidence from Partially Linear Functional-coefficient Models[J]. *Energy Economics*, 2020, 90: 104842.
- [24] PORTER M E, VAN DER LINDE C. Toward a New Conception of the Environment-competitiveness Relationship[J]. *Journal of Economic Perspectives*, 1995, 9(4): 97-118.
- [25] SONG M L, PENG L C, SHANG Y P, et al. Green Technology Progress and Total Factor Productivity of Resource-based Enterprises: A Perspective of Technical Compensation of Environmental Regulation [J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2022, 174: 121276.
- [26] ALBITAR K, BORGI H, KHAN M, et al. Business Environmental Innovation and CO<sub>2</sub> Emissions: The Moderating Role of Environmental Governance [J]. *Business Strategy and the Environment*, 2022, DOI: 10. 1002/bse. 3232.
- [27] 刘乐淋,杨毅柏. 宏观税负、研发补贴与创新驱动的长期经济增长[J]. *经济研究*, 2021, 56(5): 40-57.  
LIU Yue-lin, YANG Yi-bai. Aggregate Tax Burden, R&D Subsidies and Innovation-driven Long-term Economic Growth [J]. *Economic Research Journal*, 2021, 56(5): 40-57.
- [28] WU L F, SUN L W, QI P X, et al. Energy Endowment, Industrial Structure Upgrading, and CO<sub>2</sub> Emissions in China: Revisiting Resource Curse in the Context of Carbon Emissions [J]. *Resources Policy*, 2021, 74: 102329.
- [29] ALBRIZIO S, KOZLUK T, ZIPPERER V. Environmental Policies and Productivity Growth: Evidence Across Industries and Firms [J]. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2017, 81: 209-226.
- [30] YANG Z B, FAN M T, SHAO S, et al. Does Carbon Intensity Constraint Policy Improve Industrial Green Production Performance in China? A Quasi-DID Analysis [J]. *Energy Economics*, 2017, 68: 271-282.
- [31] LI Y P, HUANG G H, LI M W. An Integrated Optimization Modeling Approach for Planning Emission Trading and Clean-energy Development Under Uncertainty [J]. *Renewable Energy*, 2014, 62: 31-46.
- [32] TONE K. A Slacks-based Measure of Super-efficiency in Data Envelopment Analysis [J]. *European Journal of Operational Research*, 2002, 143(1): 32-41.
- [33] OH D H. A Global Malmquist-luenberger Productivity

- ty Index[J]. Journal of Productivity Analysis, 2010, 34(3):183-197.
- [34] 龙亮军,王 霞,郭 兵. 基于改进 DEA 模型的城市生态福利绩效评价研究:以我国 35 个大中城市为例[J]. 自然资源学报, 2017, 32(4):595-605.  
LONG Liang-jun, WANG Xia, GUO Bing. Evaluation of Urban Ecological Well-being Performance Based on Revised DEA Model: A Case Study of 35 Major Cities in China[J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(4):595-605.
- [35] BIAN J, ZHANG Y, SHUAI C Y, et al. Have Cities Effectively Improved Ecological Well-being Performance? Empirical Analysis of 278 Chinese Cities[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 245:118913.
- [36] 张 军,吴桂英,张吉鹏. 中国省际物质资本存量估算:1952~2000[J]. 经济研究, 2004, 39(10):35-44.  
ZHANG Jun, WU Gui-ying, ZHANG Ji-peng. The Estimation of China's Provincial Capital Stock, 1952-2000[J]. Economic Research Journal, 2004, 39(10):35-44.
- [37] 邱 斌,杨 帅,辛培江. FDI 技术溢出渠道与中国制造业生产率增长研究:基于面板数据的分析[J]. 世界经济, 2008, 31(8):20-31.  
QIU Bin, YANG Shuai, XIN Pei-jiang. A Study of FDI Technology Spillover Channel and Manufacturing Productivity Growth in China: An Analysis Based on Panel Data[J]. The Journal of World Economy, 2008, 31(8):20-31.
- [38] 徐 佳,崔静波. 低碳城市和企业绿色技术创新[J]. 中国工业经济, 2020(12):180-198.  
XU Jia, CUI Jing-bo. Low-carbon Cities and Firms' Green Technological Innovation[J]. China Industrial Economics, 2020(12):180-198.
- [39] 周 焯,程立茹,王 皓. 技术创新水平越高企业财务绩效越好吗? ——基于 16 年中国制药上市公司专利申请数据的实证研究[J]. 金融研究, 2012(8):166-179.  
ZHOU Xuan, CHENG Li-ru, WANG Hao. Is Higher the Level of Technological Innovation, Better the Financial Performance? —An Empirical Analysis of Patent Applications of the Listed Chinese Pharmaceutical Company[J]. Journal of Financial Research, 2012(8):166-179.
- [40] 徐德云. 产业结构升级形态决定、测度的一个理论解释及验证[J]. 财政研究, 2008(1):46-49.
- XU De-yun. A Theoretical Explanation and Verification of Industrial Structure Upgrading Pattern Determination and Measurement[J]. Public Finance Research, 2008(1):46-49.
- [41] 刘海英,郭文琪. 碳排放权交易政策试点与能源环境效率:来自中国 287 个地级市的实证检验[J]. 西安交通大学学报(社会科学版), 2022, 42(5):72-86.  
LIU Hai-ying, GUO Wen-qi. Carbon Emission Trading Policy Pilot and Energy-environmental Efficiency: An Empirical Study of 287 Prefecture-level Cities in China[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University(Social Sciences), 2022, 42(5):72-86.
- [42] 张 华. 低碳城市试点政策能够降低碳排放吗? ——来自准自然实验的证据[J]. 经济管理, 2020, 42(6):25-41.  
ZHANG Hua. Can Low-carbon City Construction Reduce Carbon Emissions? —Evidence from a Quasi-natural Experiment[J]. Business and Management Journal, 2020, 42(6):25-41.
- [43] 张兵兵,周君婷,闫志俊. 低碳城市试点政策与全要素能源效率提升:来自三批次试点政策实施的准自然实验[J]. 经济评论, 2021, 231(5):32-49.  
ZHANG Bing-bing, ZHOU Jun-ting, YAN Zhi-jun. Low-carbon City Pilot Policies and Total Factor Energy Efficiency Improvement: Quasi-natural Experiment from the Implementation of Three Batches of Pilot Policies[J]. Economic Review, 2021, 231(5):32-49.
- [44] COLE M A, ELLIOTT R J R. Determining the Trade-environment Composition Effect: The Role of Capital, Labor and Environmental Regulations[J]. Journal of Environmental Economics and Management, 2003, 46(3):363-383.
- [45] STOEVEER J, WECHE J P. Environmental Regulation and Sustainable Competitiveness: Evaluating the Role of Firm-level Green Investments in the Context of the Porter Hypothesis[J]. Environmental and Resource Economics, 2018, 70(2):429-455.
- [46] LIU X F, ZHOU X X, ZHU B Z, et al. Measuring the Maturity of Carbon Market in China: An Entropy-based TOPSIS Approach[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 229:94-103.
- [47] ANOULIES L. Heterogeneous Firms and the Environment: A Cap-and-trade Program[J]. Journal of Environmental Economics and Management, 2017, 84:84-101.