

引用格式: 张悦, 王晶晶, 程钰. 中国工业碳排放绩效时空特征及技术创新影响机制[J]. 资源科学, 2022, 44(7): 1435-1448.  
[Zhang Y, Wang J J, Cheng Y. Spatiotemporal characteristics of China's industrial carbon emission performance and influence mechanism of technological innovation[J]. Resources Science, 2022, 44(7): 1435-1448.] DOI: 10.18402/resci.2022.07.10

# 中国工业碳排放绩效时空特征及技术创新影响机制

张悦, 王晶晶, 程钰

(山东师范大学, 济南 250358)

**摘要:**从细分行业及区域视角切入, 运用 Super-SBM 及双固定效应模型等方法, 分析中国工业碳排放绩效的时空演变特征, 并明确技术创新对工业碳排放绩效的影响机制。结果表明: ①中国工业碳排放绩效在时序上整体呈现波动上升趋势, 但仍有较大提升空间, 行业及区域变化具有一定差异, 年均增长率分别为 11.38%、9.66%, 其中黑色金属冶炼和压延加工业、造纸和纸制品业等碳排放绩效较低, 计算机、通信和其他电子设备制造业碳排放绩效较高; ②中国工业碳排放绩效空间分异与关联特征明显, 大致由东部沿海向中西部递减, Moran's  $I$  由 1999 年 0.338 上升至 2019 年 0.509, 空间集聚类型逐渐转变为高高集聚。中国工业碳排放绩效划分为 14 种类型, “低低低低”类型占主导地位; ③R&D 经费内部支出、R&D 人员全时当量、专利申请数与工业碳排放绩效大致呈显著正相关, 主要通过能源替代、工艺优化、产品创新等路径促进产业结构优化、提高能源利用效率、推动碳排放绩效稳步提升。最后从创新投入、政策体系及区域协调等方面提出对策建议, 为中国区域及细分行业提高技术创新水平与促进工业绿色低碳发展等提供借鉴。

**关键词:** 碳排放绩效; 工业部门; 技术创新; 影响机制; Super-SBM 模型

DOI: 10.18402/resci.2022.07.10

## 1 引言

IPCC 第六次评估报告《气候变化 2021: 自然科学基础》指出, 受人类燃烧化石燃料获取能源的影响, 全球地表平均温度比工业化前高出 1.1℃, 未来 20 年则继续升温。为积极应对全球气候变化、保障人类可持续性发展, 进行合理的工业碳减排已成为各国共识, 英国、日本、美国等相继公布《绿色工业革命 10 点计划》《2050 年碳中和绿色增长战略》《零碳排放行动计划》等, 重点关注能源生产与消费行业。中国积极响应并承诺力争 2030 年前实现碳达峰、2060 年前实现碳中和。工业发展是经济快速增长的重要支柱, 也是能源消耗的最大部门与碳排放

的主要来源<sup>[1]</sup>, 2019 年工业碳排放量占全国碳排放总量的 63.06%<sup>①</sup>, 工业碳减排任务艰巨且意义重大。其中技术创新作为产业结构升级和能源效率提升的重要途径, 在推进工业低碳绿色化过程中发挥着重要作用, “十四五”规划指出深入实施创新驱动发展战略, 强化国家战略科技力量, 将“创新能力显著提升”列为经济社会发展的第一个主要目标。加快创新驱动, 推动工业部门低碳转型, 对实现“双碳”目标及绿色发展具有重要意义。

加大技术创新驱动, 持续提高工业碳排放绩效, 是实现经济发展与环境保护共赢的重要突破点, 国内外专家学者围绕工业碳排放的动态评估、

收稿日期: 2022-03-07 修订日期: 2022-06-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(41871121); 山东省高等学校青创科技支持计划项目(2019RWE014)。

作者简介: 张悦, 女, 山东济宁人, 硕士研究生, 研究方向为区域可持续发展。E-mail: 1425192242@qq.com

通讯作者: 程钰, 男, 山东潍坊人, 教授, 博士生导师, 研究方向为区域可持续发展。E-mail: 383617726@qq.com

① 笔者计算所得, 计算方法采用 IPCC 碳排放清单估算法, 能源种类选取煤炭、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、天然气 8 种, 碳排放因子和平均低位发热量参考《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》《中国能源统计年鉴(2020)》。

演变特征、驱动机制等开展研究。其中工业碳排放绩效测度逐渐从单要素转为全要素,单要素碳排放绩效为碳排放总量与某一经济、人口等指标的比值,如单位 GDP 碳排放量<sup>[2,3]</sup>、单位碳排放量经济产出<sup>[4]</sup>、人均碳排放量<sup>[5]</sup>、单位产品碳排放量<sup>[6]</sup>等,该方法易于理解与操作,但较少关注到碳排放是资本、劳动力等多投入要素共同作用的结果,故测算时应强调“全要素”特征。全要素指标分为参数法与非参数法<sup>[7]</sup>,常用方法为数据包络分析法(DEA),现阶段多使用相关综合改进模型,如非径向方向性距离函数<sup>[8]</sup>、二次型方向距离函数<sup>[9]</sup>、Context-dependent DEA<sup>[10]</sup>、Malmquist-DEA<sup>[11]</sup>、径向和非径向 DEA<sup>[12]</sup>、模糊 DEA<sup>[13]</sup>等。

工业碳排放绩效研究分为区域与行业视角,涉及全球、经济带、国家及城市等区域<sup>[14-17]</sup>,涵盖工业部门及制造业、采选业等细分行业<sup>[18-21]</sup>,兼具宏观、中观、微观尺度,相关研究表明特定区域与细分行业的工业碳排放绩效呈现一定的上升态势,但绩效水平较低,其空间分布格局差异显著。例如,蔺雪芹等<sup>[22]</sup>认为京津冀地区工业碳排放绩效不断提高,空间格局由“中心高,四周低”向“高值区带状集聚,低值区分散”转变;郝永勤等<sup>[23]</sup>认为中国工业碳排放绩效整体水平较低,呈现不稳定状态,低绩效行业占比较高;Wang 等<sup>[24]</sup>指出中国 18 家烟草企业碳排放绩效与世界水平差距较大,但差距正逐渐缩小。

工业碳排放绩效影响因素及识别是学术界关注的重点问题,识别与分析经济水平<sup>[25,26]</sup>、能源强度<sup>[27,28]</sup>、产业结构<sup>[29]</sup>、土地利用<sup>[30]</sup>、资源禀赋<sup>[31]</sup>、人口规模<sup>[32]</sup>、技术创新<sup>[33]</sup>等因素的作用,但多集中于对碳排放量、碳排放强度等单要素碳排放绩效的影响。其中,技术创新对碳排放影响存在双刃效应,一方面技术创新能够实现关键核心技术自主可控,推动能源结构优化、促进产业转型升级、加快转变经济发展方式,是碳减排的重要战略支撑<sup>[34,35]</sup>。另一方面,技术创新以追求效益效率为主,推动经济快速增长与碳排放总量大幅增加,如金培振等<sup>[36]</sup>、Acemoglu 等<sup>[37]</sup>认为技术创新会导致能源“回弹效应”,所带来的减排效应并不能抵消其推动经济增长所带来的碳排放量增长效应。此外,Ali<sup>[38]</sup>研究发现技术创新与二氧化碳排放之间存在双向因果关系。

综合来看,一方面,已有研究多集中于单个地

区与某个行业尺度,而从区域与行业相结合的视角分析工业碳排放绩效的研究较少。同时,空间视角下的工业碳排放绩效研究有待丰富,以准确把握其空间分布格局和集聚状态。另一方面,技术创新作为发展驱动力,有必要加强技术创新对工业碳排放绩效的影响研究,明确其作用强度与影响机理。基于此,本文从行业与区域相结合的视角切入,借助 IPCC 碳排放清单估算法与基于 Super-SBM 的投入产出模型测算工业碳排放绩效,分析其时空分异与集聚类型。进一步将技术创新作为关键因素,探究其对碳排放绩效的影响机理并提出针对性政策建议,为建立行业与区域技术创新体系、减污降碳协同增效、实现双碳目标提供借鉴。

## 2 研究方法 with 数据来源

### 2.1 研究方法

#### 2.1.1 工业碳排放绩效测度

Super-SBM 模型是一种基于松弛变量、非径向、非角度测度效率的方法,该模型通过加入非期望产出变量、修正松弛变量等,解决传统 DEA 模型存在的精确性弱与松弛性等问题,同时能够对效率值为 1 的多个决策单元进行区分和排序,模型的准确性与实际适用性较高。因此,选用 Super-SBM 模型来测算中国工业碳排放绩效,数学表达式为<sup>[39]</sup>:

$$\min \theta = \frac{\frac{m+1}{m} \sum_{p=1}^m \frac{N_p^-}{x_{pk}}}{\frac{n-1}{n} \sum_{q=1}^n \frac{N_q^+}{y_{qk}}} \quad (1)$$

式中: $\theta$ 为决策单元的相对效率值; $m$ 、 $n$ 表示决策单元投入指标和产出指标的个数; $x$ 、 $y$ 表示投入变量、产出变量; $N_p^-$ 、 $N_q^+$ 为投入松弛量、产出松弛量。

借鉴已有研究<sup>[40]</sup>,构建中国工业行业及区域碳排放绩效投入产出指标体系(表 1),其中能源消费量采用发电煤耗算法测算标准量。因易于计算、权威性高且应用广泛,依据 IPCC 碳排放清单测算能源消费产生的二氧化碳排放量,表达式为:

$$E_{CO_2} = \sum_{i=1}^8 E_i = \sum_{i=1}^8 C_i \times F_i \times LHV_i \quad (2)$$

式中: $E_{CO_2}$ 指二氧化碳排放总量; $i=1,2,\dots,8$ 分别表示研究选取的 8 种能源,即煤炭、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、天然气; $E_i$ 指  $i$  能源消费所排放

表1 中国工业部门碳排放绩效指标体系

Table 1 Indicator system of China's industrial carbon emission performance

指标类型	一级指标	二级指标	单位
投入指标	资本要素	规模以上工业企业实收资本	亿元
	劳动要素	规模以上工业企业平均用工人数	万人
	能源要素	规模以上工业企业能源消费量	万t标准煤
产出指标	期望产出	规模以上工业企业营业利润	亿元
	非期望产出	规模以上工业企业碳排放总量	万t

的二氧化碳量;  $C_i$ 、 $F_i$ 、 $LHV_i$  分别代表  $i$  能源消费量、碳排放因子、平均低位发热量。

### 2.1.2 双向固定效应模型

双向固定效应(Two-way FE)模型同时包含个体固定效应和时间固定效应,能够解决不随时间改变但随个体变化以及不随个体变化但随时间变化的遗漏变量问题,一定程度上缓解数据内生性问题。双向固定效应模型表达式为:

$$CEP_{jt} = \alpha_0 + \alpha_1 TIL_{jt} + \alpha_2 X_{jt} + \mu_j + \lambda_t + \varepsilon_{jt} \quad (3)$$

式中: $j$ 代表省(市、区), $t$ 代表年份; $CEP_{jt}$ 、 $TIL_{jt}$ 分别表示碳排放绩效与技术创新水平; $X_{jt}$ 为经济规模、能源结构、城镇化率、所有制结构、投资开放度、市场化水平等控制变量; $\alpha_0$ 为截距项; $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 为解释变量与控制变量相对应的系数参数; $\mu_j$ 、 $\lambda_t$ 用来控制个体固定效应与时间固定效应; $\varepsilon_{jt}$ 为误差项。

## 2.2 变量选取与数据来源

### 2.2.1 变量选取

结合工业行业及区域可持续发展现状,综合考

虑中国工业碳排放绩效影响因素(表2),研究利用研发投入( $INV$ )、创新产出( $TEC$ )、人才支撑( $TAL$ )表征技术创新水平,同时增加经济规模、能源结构、产业结构、所有制结构、市场化水平、投资开放度等作为控制变量来综合解释中国工业碳排放绩效。

### 2.2.2 数据检验

为避免“伪回归”现象以及异方差出现,对面板数据进行对数化处理和平稳性分析,即通过单位根来检验数据过程是否平稳。单位根检验的方法分为两大类,分别是针对同质面板假设的LLC、Breitung方法和针对异质面板假设的IPS、ADF-Fisher和PP-Fisher方法。为使检验结果具备较强的平稳性和科学性,选择LLC、IPS检验。结果显示各变量均在1%水平下显著,即拒绝“存在单位根”的原假设,数据为平稳状态(表3)。

### 2.2.3 数据来源

采用1999—2019年中国工业面板数据为实证研究样本,工业行业及区域的规模以上工业企业实收资本、平均用工人数、工业分行业终端能源消费

表2 中国工业碳排放绩效变量指标选取

Table 2 Variables of industrial carbon emission performance in China

指标属性	指标名称	指标解释	
		行业视角	区域视角
被解释变量	碳排放绩效( $CEP$ )	碳排放绩效值	碳排放绩效值
解释变量	研发投入( $INV$ )	R&D经费内部支出/亿元	R&D经费内部支出/亿元
	人才支撑( $TAL$ )	R&D人员全时当量/(人·年)	R&D人员全时当量/(人·年)
	创新产出( $TEC$ )	专利申请数/件	专利申请数/件
控制变量	经济规模( $ES$ )	资产总计/亿元	人均地区GDP/(元/人)
	能源结构( $EST$ )	煤炭消费量占能源消费总量比重/%	煤炭消费量占能源消费总量比重/%
	所有制结构( $TOS$ )	私营工业企业资产比重/国有控股工业企业资产比重/%	—
	市场化水平( $MDE$ )	—	外商直接投资额/亿美元
	投资开放度( $IOL$ )	外商资本占实收资本比重/%	—
	城镇化率( $UR$ )	—	城镇人口占总人口的比重/%



表3 面板数据的平稳性检验

Table 3 Stationary test of panel data

视角	变量值	LLC统计量	<i>P</i> 值	IPS统计量	<i>P</i> 值	结论
行业	lnCEP	-5.987	0.000	-4.514	0.000	平稳
	lnINV	-6.498	0.000	-5.649	0.000	平稳
	lnTEC	-6.037	0.000	-3.862	0.001	平稳
	lnTAL	-4.172	0.000	-6.249	0.000	平稳
	lnES	-5.667	0.000	-7.000	0.000	平稳
	lnEST	-4.872	0.000	-5.144	0.000	平稳
	lnTOS	-4.667	0.000	-10.344	0.000	平稳
	lnIOL	-6.479	0.000	-5.991	0.000	平稳
区域	lnCEP	-4.646	0.000	-6.201	0.000	平稳
	lnINV	-5.555	0.000	-5.578	0.000	平稳
	lnTEC	-5.047	0.000	-5.567	0.000	平稳
	lnTAL	-4.926	0.000	-3.877	0.000	平稳
	lnES	-5.657	0.000	-3.738	0.000	平稳
	lnEST	-2.769	0.000	-4.896	0.000	平稳
	lnMDE	-2.257	0.000	-2.236	0.013	平稳
	lnUR	-7.345	0.000	-3.673	0.000	平稳

量、R&D经费内部支出、R&D人员全时当量、专利申请数等数据来源于2000—2020年《中国能源统计年鉴》《中国工业统计年鉴》《中国科技统计年鉴》及各省份的统计年鉴等。碳排放因子和平均低位发热量参考《2006年IPCC国家温室气体清单指南》《中国能源统计年鉴(2020)》。

根据地域划分、行业发展变动和研究所需,全国工业部门划分为四大地区与三大行业。依据国家统计局划分方法<sup>[41]</sup>,区域划分为东部地区(北京、天津、河北、山东、江苏、浙江、上海、福建、广东、海南共10个省份)、中部地区(河南、山西、江西、安徽、湖北、湖南共6个省份)、西部地区(内蒙古、青海、甘肃、新疆、宁夏、陕西、广西、云南、重庆、四川、贵州共11个省份)、东北地区(黑龙江、吉林、辽宁3个省份),由于数据缺失,不含西藏及港澳台地区。按照《国民经济行业分类》标准,行业划分为采矿业(煤炭、石油和天然气,黑色金属矿,有色金属矿,非金属矿采选业共5个行业)、制造业(农副食品加工,食品制造,饮料制造,烟草制品,纺织业,服装服饰业,皮革毛皮羽毛及其制品和制鞋,木材加工和木竹藤棕草制品,家具制造,造纸和纸制品,印刷和记录媒介复制,文教体育等用品制造,石油加工炼焦和核

燃料加工,化学原料和化学制品制造,医药制造,化学纤维制造,橡胶和塑料制品,非金属矿物制品,黑色金属冶炼和压延加工,有色金属冶炼和压延加工,金属制品,通用设备及仪器仪表制造,专用设备制造,交通运输设备制造,电气机械和器材制造,计算机通信和其他电子设备制造,废弃资源综合利用共27个行业)、电力、热力、燃气及水生产和供应业(电力、热力生产和供应,燃气生产和供应,水的生产和供应业共3个行业),序号依次为1~35。

3 结果与分析

3.1 中国工业碳排放绩效时空演变特征

3.1.1 中国工业碳排放绩效时序演变特征

运用 Super-SBM 模型测算中国区域与行业工业碳排放绩效(图1、图2)。中国工业碳排放绩效总体呈现上升趋势,从1999年0.033上升至2019年0.205,主要分为两个阶段:第一阶段为持续上升阶段(1999—2011年),年均增长率为19.36%,国家持续关注环境保护与问题治理,公布工业大气污染物排放标准与监测技术规范,严格控制高耗能、高污染行业企业过快增长,有效减缓碳排放量增长速度,但此阶段正处于工业化发展的加速时期,高投入、高能耗、高排放为特征的粗放型经济增长方式

2022年7月

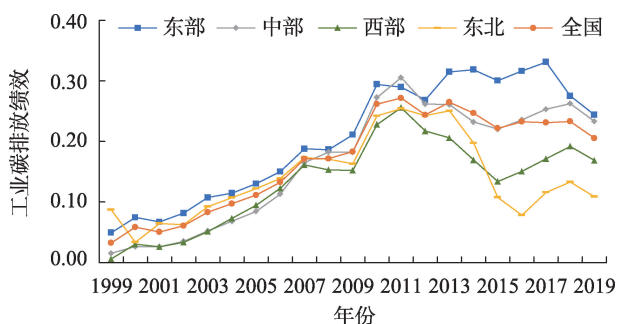


图1 1999—2019年中国区域工业碳排放绩效

Figure 1 Regional industrial carbon emission performance in China, 1999-2019

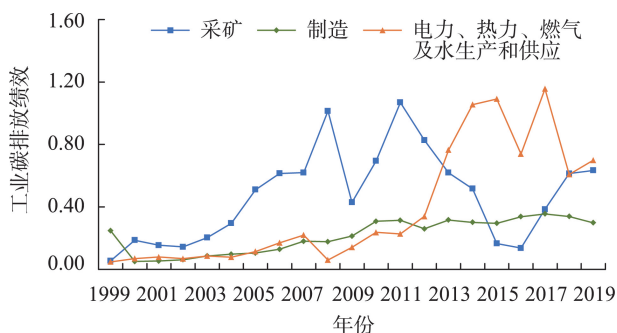


图2 1999—2019年中国工业行业碳排放绩效

Figure 2 Carbon emission performance of industrial sectors in China, 1999-2019

仍占主导,工业碳排放绩效普遍较低。第二阶段为波动变化阶段(2012—2019年),经济新常态背景下,发展方式逐渐由规模和速度型的高速增长向质量和效益提高的高质量发展转变,前期要素投入大幅增加,能源消耗与二氧化碳排放量增速较快,但随着能源结构优化与产业结构调整取得一定成效,2016年第三产业增加值占比超过50%,工业碳排放绩效有所提升。2019年受市场需求不足、工业品价格下降、成本上升等影响,其中工业企业每百元营业收入的成本比上年增加0.180元,利润总额同比下降3.30%<sup>[42]</sup>,碳排放总量增速仍较大,引起碳排放绩效有所回落。

从区域视角看,东部地区工业碳排放绩效整体呈现上升趋势,从1999年0.049上升至2019年0.244,东部地区不断推进非化石能源迭代发展,加快淘汰落后过剩产能,推动产业跃进与转型升级,逐步建设绿色低碳的工业制造体系。中部、西部与东北地区工业碳排放绩效波动基本一致,呈现出

“N”型变化趋势,转折点分别为2011年与2015年,2011—2015年间工业结构优化调整和重点行业节能降碳的速度加快,但要素投入的规模驱动力减弱,经济增长速度放缓,单位产值碳排放量持续增加,影响工业碳排放绩效不断下降。2015年国家出台《中国制造2025》等政策文件<sup>[43]</sup>,加强制造业核心技术研发与创新成果转化,传统产业转型升级取得一定成效,信息技术与制造业深度融合加快,生产方式逐步向低碳化、绿色化、清洁化方向转变,碳排放总量增速放缓,推动碳排放绩效有效提高。

从行业视角看,制造业碳排放绩效呈现出稳步上升态势,从1999年0.247上升至2019年0.298,其关键在于国家持续关注并推动制造业改造升级,积极构建清洁高效、低碳循环的绿色制造体系,逐步从“中国制造”迈向“中国智造”“中国质造”,促进碳排放绩效稳步提升。尽管制造业规模和整体水平不断提高,但对资源与能源的需求和消耗也日益增加,中低端产品过剩、中高端产品短缺的结构性矛盾仍在一定程度上存在,影响碳排放绩效持续低于0.40。此外,制造业行业数量占比为74.29%,较大程度上影响工业整体碳排放绩效变化。1999—2019年采矿业碳排放绩效整体水平较高,受产业性质、原料成本、附加值等因素影响,该行业利润保持较高增速,同时现代化绿色采矿工艺有所发展,其碳排放总量较少、增速较慢。其中,受经济环境和金融危机影响,2009年采矿业利润总额同比下降38.31%,碳排放总量未有效减少,影响该当年行业碳排放绩效同比降低57.65%。电力、热力、燃气及水生产和供应业碳排放绩效变化显著,1999—2007年间绩效值较低,2008—2015年间提升较快,年均增长率为51.13%,而后处于波动变化阶段。该行业碳排放绩效提升较大可能受能源发展规划与政府政策的影响,此阶段水电、核电与太阳能发电等清洁能源发展与使用较快,老旧高耗能设备改造升级取得一定成效,资源综合利用效率持续提高。

细分行业方面,工业各行业碳排放绩效总体呈上升趋势,但差异较大(图3),其中烟草制造业(序号9)绩效值从1999年0.108提升至2019年1.126,上升态势显著且远高于其他行业。电气机械和器材制造业(序号30)碳排放绩效持续提高,年均增长

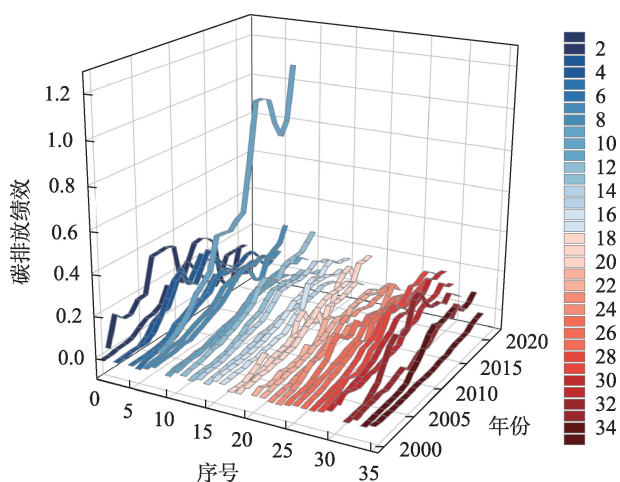


图3 1999—2019年中国工业部门细分行业碳排放绩效

Figure 3 Carbon emission performance of various industries in Chinese industrial sectors, 1999-2019

率为10.22%。黑色金属冶炼和压延加工业(序号24)受原料成本、生产工艺、能源消费、产业链及附加增值等因素影响,整体碳排放绩效较低且增长缓慢,2019年仅为0.089,有较大提升空间。此外,重

工业碳排放绩效普遍低于轻工业,原因在于其低端落后产业及重污染、高消耗项目占比较高,生产设备及工艺流程等方面能源消费量与碳排放量较大。

### 3.1.2 中国工业碳排放绩效空间演变特征

#### (1) 空间分异特征

计算中国工业区域碳排放绩效的基尼系数、变异系数和泰尔指数,发现其变化趋势保持一致,1999年皆为最大值而后波动下降,基尼系数从1999年的0.573下降至2019年的0.151,表明中国工业碳排放绩效存在较大的空间差异,但差异呈逐渐缩小态势,地区协调发展取得一定成效且未来协同减排降碳潜力仍较大。

依据自然断点法将工业碳排放绩效划分为5个等级(图4)。整体来看,中国工业碳排放绩效空间分异特征明显,大致呈现从东部沿海向中西部地区递减的格局。四大地区视角来看,工业碳排放绩效值呈现东部地区>中部地区>西部地区>东北地区的空间分异特征,2019年分别为0.244、0.233、

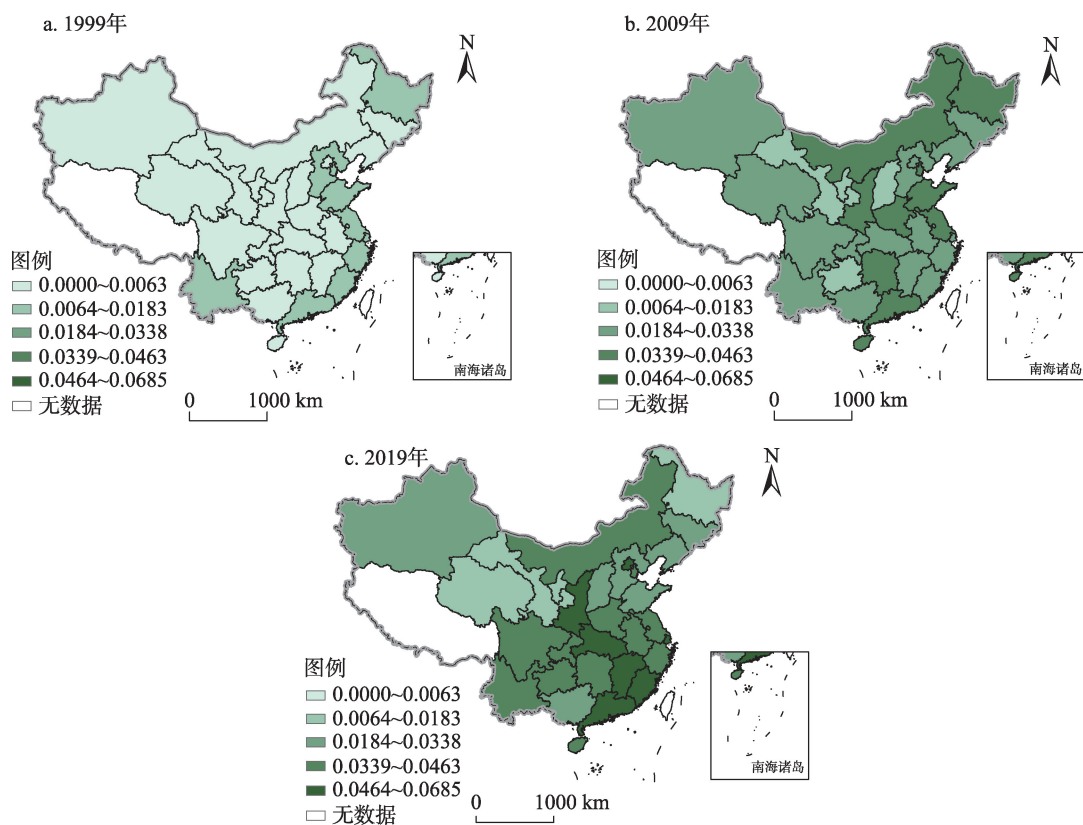


图4 中国工业碳排放绩效空间分布

Figure 4 Spatial distribution of industrial carbon emission performance in China

注:该图基于国家测绘地理信息局标准地图(审图号为GS(2019)1822号)绘制,底图无修改。



2022年7月

0.169、0.109。东部地区工业基础雄厚,依托区位、人才、资金等优势,从资源利用、能源消费、生产过程、产品供给、工业产业结构等逐步向绿色、低碳、循环的可持续发展方式转型,在建设绿色制造体系、构建高效低碳工业用能结构等方面成效显著,因而工业碳排放绩效水平较高且稳步提升。中西部地区受地理位置、产业结构偏重、研发投入相对不足、持续投入较大等因素影响,在节能技术引进、高耗能产业转型升级、产业链延伸和附加值提高等方面弱于东部沿海地区。东北地区作为中国制造业、电力、能源等重工业基地,受资源禀赋和工业主导的经济发展模式制约,能源结构优化调整与产业结构转型升级速度较缓、难度较大,工业碳排放绩效提升较慢。

为全面评价中国工业碳排放绩效分异特征,对投入产出数据进行标准化处理,利用主成分分析法赋予权重,以平均数为高低界线,以要素投入、经济效益、碳排放量为 $x$ 轴、 $y$ 轴、 $z$ 轴,数据点大小表示碳排放绩效高低,绘制基于投入-效益-排放-绩效的类型图(图5)。

整体来看,中国工业碳排放绩效划分为14种类型,且数量差异较大。细分行业方面,“低高低高”“高高低高”“高高高高”类型未出现,“低高高低”“高低低低”类型分布较少;“低低低低”类型分布最多并主要集中于资源开采及供应行业,包括有色金属矿采选业、非金属矿采选业、印刷和记录媒介复制业、燃气生产和供应业、水的生产和供应业等,上

述的行业初加工多、深加工少、产业链短、附加值低,煤炭、石油等化石能源消耗与碳排放量较少。区域方面,“低低高高”“低高高低”“高低低低”类型未出现;“低低低低”类型数量最多并主要分布于甘肃、青海、宁夏、广西、云南等西部地区,这些地区工业技术创新支撑不足、产业结构偏重,单位工业增加值能耗与碳排放量较高;“高高低低”类型分布最少,仅包括山东省,山东省是全国唯一拥有全部41个工业大类的省,工业资金力量雄厚、经济效益较高,但产业结构偏重型化问题突出<sup>[44]</sup>,重工业数量与资产占比分别为63.49%、77.76%,工业碳排放总量居全国首位,尽管山东省正处于新旧动能转换时期,但供给侧结构性改革、产业转型与结构调整速度与效益仍有待提高。

## (2)空间关联特征

为探究中国工业碳排放绩效空间关联特征,运用空间自相关模型,考虑到算法精确与易操作性,选择GeoDa软件测算全局与局部Moran's  $I$ 。测算结果显示全局Moran's  $I$ 均大于0,呈现波动上升趋势,由1999年的0.338上升至2019年的0.509,且均通过显著性检验,表明中国工业碳排放绩效具有显著的空间关联效应,关联性不断增加,反映出中国工业部门在加速从“灰色制造”向“绿色制造”转型,逐步建立并完善碳税、碳汇和碳交易协同减排机制,建立健全各区域与各行业低碳环保体系等方面成效显著。

以空间单位标准化后的数值和滞后值为纵横

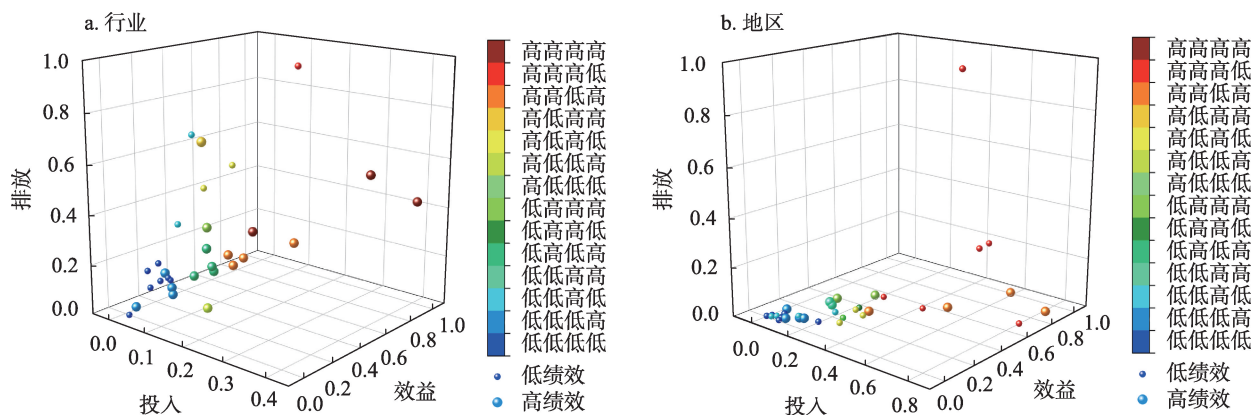


图5 中国工业碳排放绩效类型

Figure 5 Type of industrial carbon emission performance in China

坐标,绘制中国工业碳排放绩效Moran's *I*散点图并划分为4种演化模式<sup>[45]</sup>(图6、表4),包括高高集聚类型(HH)、高低集聚类型(HL)、低高集聚类型(LH)、低低集聚类型(LL),结果表明中国工业碳排放绩效空间集聚性不断增强,集聚效应主要发生在HH与LL。HH主要分布在东部经济发达地区且数量稳步增加,包括北京、天津、上海、浙江、广东等,1999—2019年间HH集聚类型中心逐步从京津冀地区向南方地区发生跃迁,位于HH集聚类型区的省份在自身快速发展的同时具有良好的辐射扩散效应,对周边地区工业碳排放绩效的带动促进作用较强。LL主要分布在中西部经济欠发达地区且数量逐渐减少,集聚中心逐步从中西部地区向东北与西北地区发生跃迁,其中湖北、湖南、安徽、江西等部分中部省份在东部地区带动下逐步进入HH集聚类型,西部省份特别是新疆、青海、甘肃等,受地理区位、保障机制、资金积累及高素质人力资源等因素影响,产业优化升级与能源结构调整较为困难,同时

所受到的辐射带动作用较弱,工业碳排放绩效提升较为缓慢,长期位于LL集聚类型。

3.2 技术创新对工业碳排放绩效的影响机制分析

3.2.1 拟合分析

对已选取变量进行散点图拟合(图7),研发投入(*INV*)、创新产出(*TEC*)、人才支撑(*TAL*)与工业碳排放绩效之间呈现相对明显的线性关系,为探究技术创新对工业碳排放绩效的影响,需进一步进行模型分析以明确其影响系数和方向。

3.2.2 影响机制分析

运用随机效应、固定效应模型进行回归分析,Hausman 检验结果显示固定效应模型优于随机效应模型。双固定效应模型结果(表5)表明,技术创新驱动工业碳排放绩效提升的作用十分显著。

技术创新要素即R&D经费内部支出、R&D人员全时当量、专利申请数对工业碳排放绩效具有正向效应。在行业方面,经费与人员投入每增加1%将分别促进工业碳排放绩效提升0.037%、0.032%,

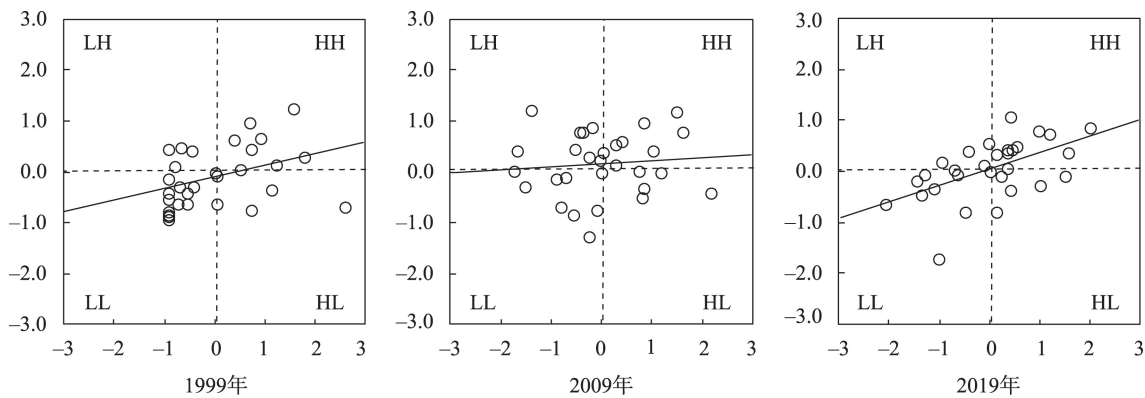


图6 中国工业碳排放绩效Moran's *I*散点图

Figure 6 Moran's *I* Scatter plot of industrial carbon emission performance in China

表4 中国工业碳排放绩效分类

Table 4 Classification of provincial industrial carbon emissions in China's mainland

年份	HH	HL	LH	LL
1999年	北京、天津、河北、山东、江苏、上海、浙江、福建、海南	河南、湖北、云南、广东、黑龙江	吉林、安徽、江西、广西	新疆、辽宁、甘肃、山西、陕西、青海、宁夏、四川、重庆、湖南、贵州、内蒙古
2009年	山东、河北、江苏、上海、福建、河南、广东、安徽、海南、黑龙江	天津、陕西、湖南、内蒙古	北京、浙江、湖北、吉林、江西、辽宁、甘肃、山西、宁夏	云南、广西、新疆、青海、四川、重庆、贵州
2019年	北京、江苏、上海、福建、广东、安徽、天津、湖南、浙江、湖北、江西、贵州、海南	河南、陕西、四川、内蒙古	山东、山西、云南、广西、重庆	河北、吉林、辽宁、甘肃、宁夏、新疆、青海、黑龙江



2022年7月

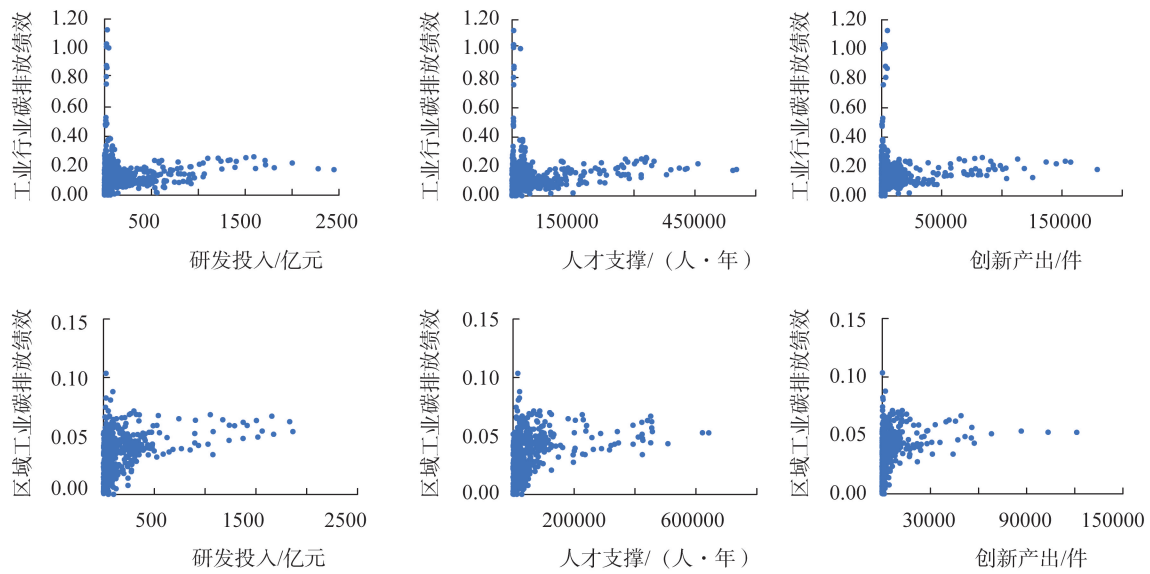


图7 变量拟合关系

Figure 7 Fitting relations of variables

表5 中国工业碳排放绩效影响因素面板回归结果

Table 5 Panel regression results of factors affecting industrial carbon emission performance in China

	行业				区域		
	INV	TAL	TEC		INV	TAL	TEC
TIL	0.037*** (7.60)	0.032*** (6.83)	0.005 (1.19)	TIL	0.008*** (5.13)	0.007*** (5.78)	0.006*** (5.24)
ES	-0.002 (-1.05)	-0.002 (-0.95)	-0.001 (-0.57)	ES	0.024*** (5.94)	0.027*** (7.14)	0.028*** (7.27)
EST	-0.107*** (-3.57)	-0.071** (-2.35)	-0.085*** (-2.70)	EST	-0.001** (-2.35)	-0.001** (-2.21)	-0.002*** (-2.93)
TOS	0.001** (2.46)	0.001** (2.20)	0.002*** (3.94)	UR	-0.001*** (-4.93)	-0.001*** (-3.92)	-0.006*** (-4.06)
IOL	-0.092*** (-4.90)	-0.090*** (-4.75)	-0.108*** (-5.47)	MDE	0.004** (2.39)	0.003** (2.23)	0.004*** (2.77)
_cons	-0.318*** (-5.37)	-0.210*** (-4.17)	0.07** (2.53)	_cons	-0.312*** (-7.12)	-0.323*** (-7.41)	-0.306*** (-6.96)
R <sup>2</sup>	0.763	0.758	0.738	R <sup>2</sup>	0.765	0.768	0.766
adj. R <sup>2</sup>	0.739	0.733	0.710	adj. R <sup>2</sup>	0.741	0.745	0.742

注:\*\*\*、\*\*、\*分别表示在1%、5%、10%显著水平上显著。下同。

在区域方面,R&D经费内部支出、R&D人员全时当量、专利申请数影响系数分别为0.008、0.007、0.006并均在1%置信水平下显著。R&D经费支出与R&D人员全时当量的增加为工业技术创新活动的开展提供必要的资金支持与人才支撑,引发较强的创新集聚与知识溢出效应,推进生产工艺突破、产

品迭代升级、资源效率提高。专利申请数是知识性成果的直接表示,在一定程度上反映行业与区域的创新能力与创新活力,1999—2019年中国规模以上工业企业专利申请数持续增加,年均增长率为20.33%,2019年达105.981万件,占全国专利申请数24.19%。专利申请量较多且增速较快,能够有效推

进生产技术和节能降耗技术迭代升级与突破式发展,进一步促进技术创新成果向社会生产力转化。从其他控制变量来看,行业视角上的所有制结构对工业碳排放绩效有明显促进作用,经济规模、能源结构、投资开放度则为负向影响。区域视角上的经济规模、市场化水平与工业碳排放绩效呈显著正相关,能源结构、城镇化率则为显著负相关。

综合来看,技术创新对工业碳排放绩效具有较强的驱动作用(图8),包括能源开发、原料替代、工艺升级、循环利用、捕集封存以及监测管理等路径,涵盖工业生产与消费全过程。新能源与新工艺等能够有效降低化石能源及高碳原料使用,推动清洁

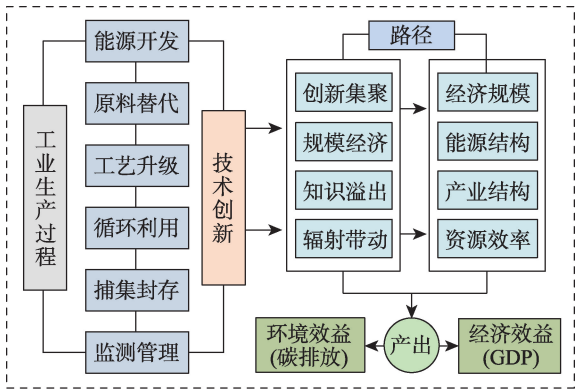


图8 技术创新影响机制

Figure 8 Mechanism of influence of technological innovation

能源大规模、高占比、市场化应用与发展,加速工业领域“灰色制造”向“绿色制造”转型。同时,碳捕集利用与封存技术可以实现二氧化碳资源化与化石能源利用的近零排放,抵消重点行业难减排的二氧化碳。监测管理技术的发展能够推动可观测、可控制数字化平台建设,加大资源能源的联合优化调度。进一步引发创新集聚效应、规模经济效应、知识溢出效应、辐射带动效应等,促进清洁低碳、安全高效的能源体系与用能模式构建,高效协同推进产业结构优化和资源配置利用,从而降低工业碳排放总量与增长速度,实现较高的经济效益与环境效益,有效驱动碳排放绩效提升。

3.2.3 稳健性检验

为防止内生性问题出现以及保证研究结果的稳健性,选择两阶段最小二乘法(2SLS)对行业与区域面板数据进行检验(表6),结果显示解释变量的影响性质和显著性水平与双固定效应模型结果保持基本一致,上述模型结果稳定可靠。

4 结论与建议

4.1 结论

本文采用IPCC碳排放清单估算法及Super-SBM模型测算中国工业碳排放绩效,计算基尼系数、莫兰指数等分析其时空演变规律,运用双固定

表6 稳健性检验结果

Table 6 Robustness test results

	行业				区域		
	INV	TAL	TEC		INV	TAL	TEC
TIL	0.011*** (8.04)	0.012*** (8.31)	0.013*** (9.71)	TIL	0.004*** (4.74)	0.002*** (2.65)	0.091*** (3.35)
ES	-0.001 (0.03)	-0.002 (0.08)	-0.008 (0.37)	ES	0.013*** (4.72)	0.017*** (6.27)	0.785*** (10.04)
EST	-0.008*** (-3.27)	-0.008*** (-3.16)	-0.004 (-1.47)	EST	-0.002* (-1.78)	-0.003 (-0.26)	-0.036 (-0.70)
TOS	0.008*** (6.09)	0.009*** (5.17)	0.006*** (3.86)	UR	-0.015*** (-3.12)	-0.019*** (-3.84)	-0.824*** (-4.74)
IOL	-0.025*** (-12.18)	-0.026*** (-10.74)	-0.026*** (-11.29)	MDE	0.003 (-0.60)	0.007 (1.41)	0.003 (0.16)
_cons	0.005 (0.19)	0.035 (1.58)	0.050*** (2.79)	_cons	-0.079*** (-5.40)	-0.088*** (-5.05)	-9.310*** (-17.18)
R <sup>2</sup>	0.260	0.257	0.297	R <sup>2</sup>	0.522	0.502	0.524
adj. R <sup>2</sup>	0.254	0.250	0.291	adj. R <sup>2</sup>	0.517	0.498	0.519

2022年7月

效应模型探究技术创新对中国工业碳排放绩效的影响。主要结论如下:

(1)中国工业碳排放绩效整体呈现波动上升趋势。区域视角来看,1999—2019年东部地区工业碳排放绩效整体呈现上升趋势,中部、西部与东北地区大致呈现“N”型变化趋势。行业视角来看,采矿业碳排放绩效整体较高,电力、热力、燃气及水生产和供应业碳排放绩效变化显著,在2008—2015年间有较大提升,制造业碳排放绩效与工业变化趋势基本一致,其中烟草制造业稳步上升态势显著。

(2)中国工业碳排放绩效具有显著空间差异与空间关联,呈现出东部地区>中部地区>西部地区>东北地区的分布格局。基于投入-产出-排放-绩效的类型分布差异明显,区域与行业视角中“低低低低”类型数量均最多。同时空间关联程度不断加大,主要集中于高高集聚类型、低低集聚类型。

(3)技术创新对工业碳排放绩效有显著正向效应,R&D经费内部支出、R&D人员全时当量对细分行业及区域工业碳排放绩效有较强促进作用,专利申请数对区域工业碳排放绩效提升作用显著。技术创新主要通过能源开发、原料替代、工艺升级、循环利用、捕集封存以及监测管理等路径推动碳排放绩效稳步提升。

## 4.2 对策建议

针对中国工业碳排放绩效的时空演变特征,以及技术创新对工业碳排放绩效的影响机制,提出对策建议:

(1)持续稳定加大创新投入,强化工业低碳技术研发。加大R&D经费与人员投入力度,以达到发达国家先进水平(如2019年奥地利与日本工业R&D经费占GDP比重为2.20%、2.54%,而中国仅为1.71%<sup>②</sup>)。优化经费投入结构和改进经费预算管理,不断向工业部门关键行业倾斜,鼓励工业企业设立低碳、固碳、脱碳技术开发研究经费。同时针对石油加工、金属冶炼等重点行业,引导骨干企业联合产业链上下游部署创新链,推动实现原料替代、低碳工艺、循环利用与碳捕获封存等绿色关键技术突破,加快高端生产装备发展和绿色产品设计,以满足行业节能降碳需求。

(2)构建降碳政策支持体系,优化技术创新发

展环境。强化工业低碳零碳负碳技术创新政策导向,重点完善碳达峰碳中和“1+N”政策体系,加强科技奖励对工业企业技术创新的引导激励。协同制定化工、电力等重点行业降碳提效实施方案,构建种类多样、主体多元、机制灵活、竞争有效的碳排放权交易市场,完善碳税制度与监测预警体系。持续完善专利共享和成果转化推广机制,搭建开放共享、协同高效的技术研发平台,内化绿色技术研发成果经济效益外部性。

(3)完善工业协同减排机制,加快形成区域创新系统。聚焦石油化工、金属冶炼及加工等重点行业,构建低碳技术发展全链条创新网络,建立多区域、多模式的工业技术创新联盟,统筹推进减碳、降污、扩绿、增长四位一体的协同机制。同时应加快建立区域创新集群与技术创新发展带,加大高低绩效区域间工业技术联系与合作,增强创新成果与产品流动性。东部地区应充分发挥低碳绿色技术的空间溢出与扩散效应,中西部地区应借助外部先进经验同化与内部技术创新追赶,推进工业部门由“局部高效”向“全局高效”转变。

## 参考文献(References):

- [1] 王亚平,任建兰.生态文明建设和人地系统优化的协同研究[M].北京:中国社会科学出版社,2021.[Wang Y P, Ren J L. Collaborative Research on Ecological Civilization Construction and Human-Earth System Optimization[M]. Beijing: China Social Sciences Press, 2021.]
- [2] 刘贤赵,高长春,张勇,等.中国省域碳强度空间依赖格局及其影响因素的空间异质性研究[J].地理科学,2018,38(5): 681-690.[Liu X Z, Gao C C, Zhang Y, et al. Spatial dependence pattern of carbon emission intensity in China's provinces and spatial heterogeneity of its influencing factors[J]. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(5): 681-690.]
- [3] 平新乔,郑梦圆,曹和平.中国碳排放强度变化趋势与“十四五”时期碳减排政策优化[J].改革,2020,33(11): 37-52.[Ping X Q, Zheng M Y, Cao H P. The change trend of carbon emission intensity in China and the policy optimization of carbon emission reduction during the 14th Five-Year Plan period[J]. Reform, 2020, 33(11): 37-52.]
- [4] 唐志鹏,刘卫东,宋涛.基于混合地理加权回归的中国省域碳生产率影响因素分析[J].资源科学,2017,39(12): 2223-2232.[Tang Z P, Liu W D, Song T. Factors affecting China's provincial carbon productivity based on mixed geographically weighted re-

② 数据来源于经济合作与发展组织(OECD)官方网站数据库,网址为:<https://data.oecd.org>。



- gression modeling[J]. *Resources Science*, 2017, 39(12): 2223–2232.]
- [5] Parker S, Bhatti M I. Dynamics and drivers of per capita CO<sub>2</sub> emissions in Asia[J]. *Energy Economics*, 2020, 89: 104798.
- [6] Li X J, Xie W J, Jim C Y, et al. Holistic LCA evaluation of the carbon footprint of prefabricated concrete stairs[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 329: 129621.
- [7] 康鹏. 经济效率研究的参数法与非参数法比较分析[J]. *经济论坛*, 2005, 19(19): 139–140. [Kang P. Comparative analysis of parametric method and non-parametric method in economic efficiency research[J]. *Economic Forum*, 2005, 19(19): 139–140.]
- [8] Cheng Z, Li L, Liu J, et al. Total-factor carbon emission efficiency of China's provincial industrial sector and its dynamic evolution [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 94: 330–339.
- [9] 张宁, 赵玉. 中国能顺利实现碳达峰和碳中和吗? 基于效率与减排成本视角的城市层面分析[J]. *兰州大学学报(社会科学版)*, 2021, 49(4): 13–22. [Zhang N, Zhao Y. Can China achieve peak carbon emissions and carbon neutrality? An analysis based on efficiency and emission reduction cost at the city level[J]. *Journal of Lanzhou University (Social Sciences)*, 2021, 49(4): 13–22.]
- [10] 朱卫未, 缪子阳, 涂贵生. 基于 Context-dependent DEA 方法的碳排放减额分配策略[J]. *资源科学*, 2020, 42(11): 2170–2183. [Zhu W W, Miao Z Y, Gan G S. Carbon emission reduction allocation strategy based on the context-dependent DEA method[J]. *Resources Science*, 2020, 42(11): 2170–2183.]
- [11] Li Y, Hou W, Zhu W, et al. Provincial carbon emission performance analysis in China based on a Malmquist data envelopment analysis approach with fixed-sum undesirable outputs[J]. *Annals of Operations Research*, 2021, 304: 233–261.
- [12] Demiral E E, Salam M. Eco-efficiency and eco-productivity assessments of the states in the United States: A two-stage non-parametric analysis[J]. *Applied Energy*, 2021, 303: 117649.
- [13] Güner S, Cebeci H I, Antunes J, et al. Sustainable efficiency drivers in Eurasian airports: Fuzzy NDEA approach based on Shannon's entropy[J]. *Journal of Air Transport Management*, 2021, DOI: 10.1016/j.jairtraman.2021.102039.
- [14] 王宪恩, 段志远, 王培博, 等. 1990–2014 年典型国家技术变革与结构调整的碳排放驱动效应测度[J]. *资源科学*, 2018, 40(11): 2317–2327. [Wang X E, Duan Z Y, Wang P B, et al. Study on measurement of carbon-driving effects from technological change and structural adjustment in typical countries from 1990 to 2014 [J]. *Resources Science*, 2018, 40(11): 2317–2327.]
- [15] 李焱, 李佳蔚, 王炜瀚, 等. 全球价值链嵌入对碳排放效率的影响机制[J]. *中国人口·资源与环境*, 2021, 31(7): 15–26. [Li Y, Li J W, Wang W H, et al. Effect and mechanism of global value chain embedding on carbon emission efficiency[J]. *China population, resources and environment*, 2021, 31(7): 15–26.]
- [16] 王少剑, 田莎莎, 蔡清楠, 等. 产业转移背景下广东省工业碳排放的驱动因素及碳转移分析[J]. *地理研究*, 2021, 40(9): 2606–2622. [Wang S J, Tian S S, Cai Q N, et al. Driving factors and carbon transfer of industrial carbon emissions in Guangdong Province under the background of industrial transfer[J]. *Geographical Research*, 2021, 40(9): 2606–2622.]
- [17] 丁明磊, 李宇翔, 赵荣钦, 等. 面向配额分配模拟的工业行业碳排放绩效: 以郑州市为例[J]. *自然资源学报*, 2019, 34(5): 1027–1040. [Ding M L, Li Y X, Zhao R Q, et al. Carbon emission performance of quota allocationsimulation-oriented industry: The case study of Zhengzhou[J]. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(5): 1027–1040.]
- [18] 屈秋实, 王礼茂, 王博, 等. 中国有色金属产业链碳排放及碳减排潜力省际差异[J]. *资源科学*, 2021, 43(4): 756–763. [Qu Q S, Wang L M, Wang B, et al. Carbon emissions of China's nonferrous metal industry from the view of industrial chain and provincial differences[J]. *Resources Science*, 2021, 43(4): 756–763.]
- [19] Wongsapai W, Daroon S. Estimation of greenhouse gas mitigation potential from carbon intensity and energy data analysis from Thai industrial sector[J]. *Energy Reports*, 2021, 7(S5): 930–936.
- [20] Kwakwa P A, Poku F A. The carbon dioxide emission effects of domestic credit and manufacturing indicators in South Africa[J]. *Management of Environmental Quality*, 2020, 31(6): 1531–1548.
- [21] Benjamin N I, Lin B. Quantile analysis of carbon emissions in China metallurgy industry[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 243: 118534.
- [22] 蔺雪芹, 边宇, 王岱. 京津冀地区工业碳排放效率时空演化特征及影响因素[J]. *经济地理*, 2021, 41(6): 187–195. [Lin X Q, Bian Y, Wang D. Spatiotemporal evolution characteristics and influencing factors of industrial carbon emission efficiency in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. *Economic Geography*, 2021, 41(6): 187–195.]
- [23] 郝永勤, 吉星. 我国工业行业碳排放效率实证研究: 考虑非期望产出 SBM 超效率模型与 DEA 视窗方法的应用[J]. *科技管理研究*, 2019, 39(17): 53–62. [Xi Y Q, Ji X. An empirical study on carbon emission efficiency of industrial industry in China: Considering the super efficiency model of unexpected output SBM and the application of DEA window method[J]. *Science and Technology Management Research*, 2019, 39(17): 53–62.]
- [24] Wang Q, Yuan Q Q. Energy-saving and emission reduction potential of the tobacco industry: A case study of China's 18 cigarette enterprises[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 244: 118429.
- [25] 付华, 李国平, 朱婷. 中国制造业行业碳排放: 行业差异与驱动因素分解[J]. *改革*, 2021, 34(5): 38–52. [Fu H, Li G P, Zhu T. Carbon emission of China's manufacturing industry: Industry differences and decomposition of driving factors[J]. *Reform*, 2021, 34(5): 38–52.]
- [26] Kopidou D, Diakoulaki D. Decomposing industrial CO<sub>2</sub> emissions of Southern European countries into production and consumption based driving factors[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 167:

2022年7月

- 1325-1334.
- [27] 田华征, 马丽. 中国工业碳排放强度变化的结构因素解析[J]. 自然资源学报, 2020, 35(3): 639-653. [Tian H Z, Ma L. Study on the change of China's industrial carbon emission intensity from the perspective of sector structure[J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(3): 639-653.]
- [28] 邵帅, 张曦, 赵兴荣. 中国制造业碳排放的经验分解与达峰路径: 广义迪氏指数分解和动态情景分析[J]. 中国工业经济, 2017, 35(3): 44-63. [Shao S, Zhang X, Zhao X R. Empirical decomposition and peaking pathway of carbon dioxide emissions of China's manufacturing sector: Generalized Divisia index method and dynamic scenario analysis[J]. China Industrial Economics, 2017, 35(3): 44-63.]
- [29] Yang Y, Yuan Z, Yang S. Difference in the drivers of industrial carbon emission costs determines the diverse policies in middle-income regions: A case of northwestern China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 155: 111942.
- [30] 陈前利, 马贤磊, 石晓平, 等. 工业用地供应行为影响工业能源碳排放吗? 基于供应规模、方式与价格三维度分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2019, 29(12): 57-67. [Chen Q L, Ma X L, Shi X P, et al. Does the supply of industrial land affect industrial energy carbon emissions?[J]. China Population, Resources and Environment, 2019, 29(12): 57-67.]
- [31] 王霞, 张丽君, 秦耀辰, 等. 中国高碳制造业碳排放时空演变及其驱动因素[J]. 资源科学, 2020, 42(2): 323-333. [Wang X, Zhang L J, Qin Y C, et al. Spatiotemporal changes of carbon emissions in high-carbon manufacturing industry in China and driving factors[J]. Resources Science, 2020, 42(2): 323-333.]
- [32] Abam F I, Ekwe E B, Diemuodeke O E, et al. Environmental sustainability of the Nigeria transport sector through decomposition and decoupling analysis with future framework for sustainable transport pathways[J]. Energy Reports, 2021, 7: 3238-3248.
- [33] 王兆峰, 杜瑶瑶. 基于SBM-DEA模型湖南省碳排放效率时空差异及影响因素分析[J]. 地理科学, 2019, 39(5): 797-806. [Wang Z F, Du Y Y. Spatial-temporal differences and influencing factors of carbon emission efficiency in Hunan Province based on SBM-DEA model[J]. Scientia Geographica Sinica, 2019, 39(5): 797-806.]
- [34] 卢娜, 王为东, 王森, 等. 突破性低碳技术创新与碳排放: 直接影响与空间溢出[J]. 中国人口·资源与环境, 2019, 29(5): 30-39. [Lu N, Wang W D, Wang M, et al. Breakthrough low-carbon technology innovation and carbon emissions: Direct and spatial spillover effect[J]. China Population, Resources and Environment, 2019, 29(5): 30-39.]
- [35] Khan Z, Ali S, Umar M, et al. Consumption-based carbon emissions and international trade in G7 countries: The role of environmental innovation and renewable energy[J]. Science of the Total Environment, 2020, 730: 138945.
- [36] 金培振, 张亚斌, 彭星. 技术进步在二氧化碳减排中的双刃效应: 基于中国工业35个行业的经验证据[J]. 科学学研究, 2014, 32(5): 706-716. [Jin P Z, Zhang Y B, Peng X. The double-edged effect of technological progress in carbon dioxide emissions reduction: Empirical evidence from 35 sub-industrial sectors in China[J]. Studies in Science of Science, 2014, 32(5): 706-716.]
- [37] Acemoglu D, Aghion P, Bursztyn L, et al. The environment and directed technical change[J]. American Economic Review, 2012, 102(1): 131-166.
- [38] Ali W, Abdullah A, Azam M. The dynamic linkage between technological innovation and carbon dioxide emissions in Malaysia: An autoregressive distributed lagged bound approach[J]. International Journal of Energy Economics and Policy, 2016: 389-400.
- [39] 孙艺璇, 程钰, 刘娜. 中国经济高质量发展时空演变及其科技创新驱动机制[J]. 资源科学, 2021, 43(1): 82-93. [Sun Y X, Cheng Y, Liu N. Spatiotemporal evolution of China's high quality economic development and its driving mechanism of scientific and technological innovation[J]. Resources Science, 2021, 43(1): 82-93.]
- [40] 王少剑, 高爽, 黄永源, 等. 基于超效率SBM模型的中国城市碳排放绩效时空演变格局及预测[J]. 地理学报, 2020, 75(6): 1316-1330. [Wang S J, Gao S, Huang Y Y, et al. Spatio-temporal evolution and trend prediction of urban carbon emission performance in China based on super-efficiency SBM model[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(6): 1316-1330.]
- [41] 中国国家统计局. 东西中部和东北地区划分方法[DB/OL]. (2011-06-13) [2022-05-20]. [http://www.stats.gov.cn/tjzc/zthd/sjtjr/dejtjkr/tjkr/201106/t20110613\\_71947.htm](http://www.stats.gov.cn/tjzc/zthd/sjtjr/dejtjkr/tjkr/201106/t20110613_71947.htm). [National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. East-west Central and Northeast Region Division Method[DB/OL]. (2011-06-13)[2022-05-20]. [http://www.stats.gov.cn/tjzc/zthd/sjtjr/dejtjkr/tjkr/201106/t20110613\\_71947.htm](http://www.stats.gov.cn/tjzc/zthd/sjtjr/dejtjkr/tjkr/201106/t20110613_71947.htm).]
- [42] 中国国家统计局. 国家统计局工业司高级统计师朱虹解读工业企业利润数据[DB/OL]. (2020-02-03) [2022-05-20]. [http://www.stats.gov.cn/xxgk/jd/sjrd2020/202002/t20200205\\_1764902.html](http://www.stats.gov.cn/xxgk/jd/sjrd2020/202002/t20200205_1764902.html). [National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. Zhu Hong, Senior Statistician of the Industrial Division of the National Bureau of Statistics, Interprets the Profit Data of Industrial Enterprises[DB/OL]. (2020-02-03) [2022-05-20]. [http://www.stats.gov.cn/xxgk/jd/sjrd2020/202002/t20200205\\_1764902.html](http://www.stats.gov.cn/xxgk/jd/sjrd2020/202002/t20200205_1764902.html).]
- [43] 中华人民共和国国务院. 国务院关于印发《中国制造2025》的通知[R/OL]. (2015-05-08) [2022-05-20]. [http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-05/19/content\\_9784.htm](http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-05/19/content_9784.htm). [State Council of the People's Republic of China. Circular of The State Council on the Issuance of Made in China 2025[R/OL]. (2015-05-08)[2022-05-20]. [http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-05/19/content\\_9784.htm](http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-05/19/content_9784.htm).]
- [44] 程钰. 人地系统演变与优化的理论和实证研究: 以山东省为例[M]. 北京: 中国社会科学出版社, 2020. [Cheng Y. A Theoretical and Empirical Study on the Evolution and Optimization of the Hu-

man-Earth System: A Case Study of Shandong Province[M]. Beijing: China Social Sciences Press, 2020.]

[45] 程钰, 王晶晶, 王亚平, 等. 中国绿色发展时空演变轨迹与影响机理研究[J]. 地理研究, 2019, 38(11): 2745–2765. [Cheng Y,

Wang J J, Wang Y P, et al. A comparative research of the spatial-temporal evolution track and influence mechanism of green development in China[J]. Geographical Research, 2019, 38(11): 2745–2765.]

## Spatiotemporal characteristics of China's industrial carbon emission performance and influence mechanism of technological innovation

ZHANG Yue, WANG Jingjing, CHENG Yu

(Shandong Normal University, Jinan 250358, China)

**Abstract:** From the perspective of subdivided industrial sectors and regions, this study explored the spatiotemporal evolution of China's industrial carbon emission performance and the mechanism of influence of technological innovation on industrial carbon emission performance by using the super-SBM (slacks-based measure) model and double fixed effect model, and draws the following conclusions: (1) China's industrial carbon emission performance showed a fluctuating upward trend, with a large space for improvement. There were certain differences in the changes of industries and regions, with an average annual growth rate of 11.38% and 9.66% respectively. The carbon emission performance of ferrous metal smelting and calendering industry and paper and paper products industry is low, while the computer, communication, and other electronic equipment industry is high. (2) China's industrial carbon emission performance shows obvious spatial differentiation and spatial association features, roughly decreasing from the eastern coastal areas to the central and western regions. Moran's I increased from 0.338 in 1999 to 0.509 in 2019, and the type of spatial agglomeration gradually changes to high-high type. China's industrial carbon emission performance can be divided into 14 types, of which the "low-low-low-low" type is most common. (3) There are significant positive correlations between the intramural expenditure on R&D, full-time equivalent of R&D personnel, and the number of patent applications and industrial carbon emission performance. Technological innovation mainly promotes the optimization of industrial structure, the improvement of energy utilization efficiency, and the steady improvement of carbon emission performance through energy substitution, process optimization, and product innovation. Finally, this study put forward some countermeasures and recommendations from the aspects of innovation input, policy system, and regional coordination, so as to provide a reference for improving the level of technological innovation and promoting green and low-carbon development in China's regions and industrial subsectors.

**Key words:** carbon emission performance; industrial sectors; technological innovation; influence mechanism; Super-SBM model