

技术创新双重效应与重污染行业绿色转型升级

——基于碳排放的视角

吴卫红 蔡海波 刘佳 秦臻

内容提要: 本文将技术创新效应分解为环境效应和经济效应,运用对数平均迪氏指数法(LMDI)模型和塔皮奥(Tapio)脱钩模型,探究重污染行业如何实现“环境效益-技术创新-经济效益”协同发展的绿色转型升级。研究表明:2012—2019年重污染行业整体上呈现从弱脱钩到强脱钩的趋势,实现了一定程度的绿色转型升级,但部分细分行业绿色转型升级状态有所恶化;技术创新双重效应对重污染行业绿色转型升级的影响最大,双重效应的作用方向相反且作用大小不同导致行业间绿色转型升级效果存在差异;进一步分解重污染行业碳排放脱钩弹性状态的诱因,发现技术创新双重效应对碳排放的直接影响和交互影响作用方向不同。本文研究为重污染行业实现经济效益和环境效益协调发展提供了有益的政策启示,并为制定差异化重污染行业绿色转型升级政策指明了改进方向。

关键词: 绿色转型升级 技术创新双重效应 碳排放 重污染行业 LMDI模型 Tapio模型

中图分类号: F424 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7636(2023)11-0045-17

一、问题提出

党的二十大报告指出,推动经济社会发展绿色化、低碳化是实现高质量发展的关键环节。这既强调了《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》(以下简称“十四五”规划纲要)提出的“加快发展方式绿色转型”战略目标,又重申了2020年国家主席习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上提出的“双碳”目标。重污染行业作为推动经济社会发展的重要主体,绿色化、低碳化也是其新时期的发展方向^[1]。多年来,重污染行业因其粗放型发展模式造成的能耗过度和污染突出问题而备受关注^[2],又因其对传统能源的高度依赖而不可避免地产生大量碳排放^[3]。针对重污染行业发展过程中存在的问题,绿色转型升级成为其摆脱当前发展困境的重要举措。重污染行业绿色转型升级既是摆脱传统粗

收稿日期:2023-02-01;修回日期:2023-06-19

基金项目:北京市自然科学基金面上项目“基于环境-创新-效益共生演化的京津冀重污染行业绿色转型升级路径研究”(9212013)

作者简介:吴卫红 北京化工大学经济管理学院教授,北京,102202;

蔡海波 北京化工大学经济管理学院硕士研究生;

刘佳 首都经济贸易大学科研处助理研究员,城市经济与公共管理学院博士研究生,通信作者,北京,100070;

秦臻 北京化工大学经济管理学院硕士研究生。

作者感谢匿名审稿人的评审意见。

放型发展模式、实现经济效益与环境效益双赢的绿色发展,也是节能减排、助力“双碳”目标实现的低碳发展^[4]。因此,如何实现重污染行业的绿色转型升级,成为亟待解答的重要问题。

“十四五”规划纲要将技术创新视为实现绿色转型升级目标的重要支撑,提出要坚持创新驱动发展战略,坚决遏制高耗能、高排放项目盲目发展,推动绿色转型实现积极发展。但现有研究对于技术创新能否促进重污染行业绿色转型升级的问题尚未达成共识。部分学者基于绿色技术创新理论,认为技术创新通过提高重污染行业的资源利用效率,进而实现节能减排^[5]和绿色转型升级目标^[6]。但也有学者基于能源回弹理论,认为技术创新若是基于追求经济效益的目标^[7-8],则不可避免地产生能源回弹效应,造成能源消耗不降反增^[9],与绿色转型升级和“双碳”目标背道而驰。这些差异性结论为本文提供了研究契机。技术创新是影响重污染行业绿色转型升级的关键因素,厘清两者关系,探索出一条经济效益与环境效益协调发展的高质量发展道路,不仅关乎重污染行业的绿色转型升级效果,也深刻影响到“双碳”目标的实现水平。

针对上述关于技术创新作用的矛盾结论,本文利用因素分解模型将其分解为环境效应和经济效应,深入探究产生矛盾结论的原因,分析技术创新双重效应如何影响重污染行业绿色转型升级,并探讨技术创新双重效应对碳排放变化的影响。

本文的边际贡献为:首先,选取2011—2019年重污染行业20个细分行业的时间序列数据进行分析,运用联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)编制的《2006年IPCC国家温室气体清单指南》核算其碳排放量,构建塔皮奥(Tapio)脱钩模型,测度分析重污染行业20个细分行业的脱钩状态及差异,明晰重污染行业绿色转型升级的现实必要性;其次,结合Tapio脱钩模型和对数平均迪氏指数法(LMDI)模型,探究技术创新双重效应对不同绿色转型升级效果的重污染行业的差异性影响,厘清技术创新双重效应与重污染行业绿色转型升级的关系,对现有关于技术创新作用产生的矛盾结论提供了理论解释;最后,基于“双碳”目标的战略需求,综合考虑碳排放变化的诱因,将其分解为直接影响和交互影响,针对性探讨技术创新双重效应对碳排放变化的影响,对现有研究技术创新与碳排放的相关文献形成有益补充,为重污染行业绿色转型升级与“双碳”目标的实现提供理论支撑。

二、文献综述

绿色转型升级是工业化发展突破高能耗、高污染、低产能的发展模式,实现从物质经济、工业文明、高速发展到绿色经济、生态文明和可持续发展的转变^[10]。虽然已有学者借助脱钩理论,分析了工业绿色转型升级的本质是实现工业发展与资源环境的脱钩,即随着资源能源利用效率的提升,工业经济增长将不再依赖于资源环境投入的增加^[11-12],但研究往往仅基于资源消耗^[13]与环境污染^[14]的视角。随着“双碳”目标提出,越来越多的学者开始关注碳排放脱钩,并聚焦于某一区域^[15]或重点行业^[16],但围绕重污染行业的研究却十分有限。重污染行业因其高消耗、高排放的特点,是影响“双碳”目标进展的关键要素。因此,基于碳排放的视角去分析重污染行业绿色转型升级现状,其重要性不言而喻。

虽然学者们普遍认为技术创新是影响绿色转型升级的重要因素,但目前的研究主要以区域^[17]、制造业^[18]或工业^[19]为研究对象,从重污染行业中得到的证据较少。从仅有的相关文献中发现,当前关于技术创新与重污染行业绿色转型升级之间关系的研究主要集中在两个方面。其一,技术创新是否能够促进重污染行业绿色转型升级?一方面,依据绿色技术创新理论,技术创新的绿色属性是提高环境效益的关键,为重污染行业绿色转型升级提供了基本方向和发展思路^[20]。技术创新可以通过研发替代能源技术和改善现有能源技术来降低能耗强度、提高能源利用效率,实现绿色转型升级的目标^[21]。李焯等(2016)以贵

州省磷化工行业为例,发现技术创新是影响绿色转型升级效果的关键因素之一^[22]。另一方面,技术创新可能加快产业结构向“高耗能、高污染”转变。金培振等(2014)以轻、重工业为研究对象,发现技术进步通过能源效率改进带来的减排效应并不能抵消其推动经济增长带来的二氧化碳增长效应^[23]。就产业绿色转型而言,技术创新并不具有特定“指向”性,研究也证实技术创新抑制了工业结构绿色转型^[24]。其二,技术创新因何对重污染行业绿色转型升级产生差异性影响?部分学者基于能源回弹理论,将原因归结为技术创新的替代效应和产出效应,即在成本最小化和利润最大化驱动下,生产者倾向于加大利用效率高的能源投入并进一步提高产出水平^[25],以至于技术创新提高能源利用率的最终结果是高耗能和高排放。有学者用钢铁行业^[26]、石化行业^[27]等重污染行业的样本证明能源回弹效应最终导致技术创新不但没有节约行业能源消费,反而导致了更多消耗。还有学者认为技术创新与生俱来的经济效应和环境效应的矛盾,是产生差异性影响的原因^[7]。产品创新、工艺创新、组织变革等形式的技术创新会提高生产效率,在经济效益目标的指导下,生产者会进一步扩大生产规模,最终导致能源消耗与碳排放的增加^[28-29]。基于上述分析,本文认为技术创新兼具环境效应和经济效应两种属性。其中,技术创新环境效应是技术创新绿色属性对于节能减排和绿色转型升级的作用;技术创新经济效应则是在经济效益导向下,技术创新最终导致能耗与碳排放增加的作用。

从降低碳排放的视角来看,学者们对于影响碳排放的因素研究已取得了丰富的成果,但研究的侧重点不同。部分学者聚焦于探究数字经济^[30]、金融科技^[31]、技术创新^[32]等因素对碳排放的作用机制。此外,还有学者采用因素分解模型,将众多碳排放驱动影响因素纳入同一分析框架中。现有研究多将因素分解为能源强度、能源结构、经济结构、经济增长、人均财富和人口规模等常规指标^[33-35]。在此基础上,有部分学者对分解因素进行创新。如蔡栋梁等(2017)引入金融节能与金融发展指标,聚焦金融节能、金融发展对中国碳排放的差异性影响^[36]。总体来说,目前尚缺乏将技术创新引入到碳排放因素分解模型中的研究。有鉴于此,本文创新性地将技术创新因素引入到因素分解模型中,并将其分解为环境效应和经济效应,以探究其对降低碳排放和重污染行业绿色转型升级的影响。

综上所述,重污染行业绿色转型升级和碳排放问题已经引起学者的关注,虽取得了一些成果,但仍存在不足:第一,缺少基于碳排放视角分析重污染行业绿色转型升级现状方面的研究,不符合绿色化和低碳化的现实需求;第二,尚未厘清技术创新双重效应与重污染行业绿色转型升级的关系;第三,缺乏利用因素分解模型来探究技术创新与碳排放关系的研究。因此,本文将核算重污染行业碳排放量,构建 Tapio 脱钩模型,分析重污染行业绿色转型升级现状。在此基础上,结合 Tapio 脱钩模型和 LMDI 模型,探究技术创新双重效应对不同绿色转型升级效果的重污染行业的差异性影响,并针对性探讨技术创新双重效应对碳排放变化的影响,为实现技术创新、经济发展与生态环境多方共赢的良好发展格局提供理论支持。

三、研究方法 with 数据说明

(一) 碳排放量测算

《2006年IPCC国家温室气体清单指南》因其在碳排放计算上的科学性、完整性和准确性而被广泛使用,因此,本文依据其提供的方法,对重污染行业碳排放进行测算,即对各重污染行业25种主要能源消耗排放量进行计算汇总,得到重污染行业总体碳排放量。25种能源分别指原煤、洗精煤、其他洗煤、焦炭、焦炉煤气、高炉煤气、转炉煤气、其他煤气、其他焦化产品、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、石脑油、润滑

油、石蜡、溶剂油、石油沥青、石油焦、液化石油气、炼厂干气、其他石油制品、天然气、液化天然气。具体测算公式如下：

$$CO_2 = \sum_{i=1}^{25} CO_{2i} = \sum_{i=1}^{25} [E_i \cdot LCV_i \cdot CC_i \cdot COR_i \cdot \frac{44}{12}] \quad (1)$$

其中， CO_2 和 CO_{2i} 分别表示碳排放总量和第 i 种能源消耗产生的碳排放量； E_i 表示第 i 种能源消耗量； LCV_i 表示第 i 种能源的低位发热值； CC_i 表示第 i 种能源的含碳量； COR_i 表示第 i 种能源的碳氧化率； $44/12$ 表示二氧化碳和碳的分子比率。

(二) 脱钩弹性指数测算

脱钩指数计算方法包括经济合作与发展组织(OECD)提出的脱钩指数法、塔皮奥提出的脱钩弹性指数分析法等。Tapio 脱钩模型不受选定基期和统计量纲影响,脱钩指标体系构建更加完备^[37],因此本文选择该模型,基于碳排放的视角,对 2011—2019 年中国重污染行业碳排放量与主营业务收入之间的脱钩关系进行测度。其计算公式如下：

$$\varepsilon^{b,t} = \frac{\% \Delta CO_2}{\% \Delta MBI} = \frac{\Delta CO_2^{b,t} / CO_2^b}{\Delta MBI^{b,t} / MBI^b} \quad (2)$$

其中， $\varepsilon^{b,t}$ 为碳排放量与主营业务收入的脱钩弹性指数,用以衡量重污染行业绿色转型升级状态； $\% \Delta CO_2$ 、 $\% \Delta MBI$ 分别为报告期相对于基期的碳排放量变化率和主营业务收入变化率； CO_2^b 为基期的碳排放量； $\Delta CO_2^{b,t}$ 为报告期相对于基期的碳排放量变化值； MBI^b 为基期的主营业务收入； $\Delta MBI^{b,t}$ 为报告期相对于基期的主营业务收入变化量。

塔皮奥根据脱钩状态的优劣,将脱钩状态细分为 8 种状态^[37],根据这一标准,本文结合郭承龙和张智光(2013)^[38]及陆琳忆等(2020)^[39]对脱钩状态的赋值评估法,对重污染行业脱钩状态进行分类、评分和排序。具体分类标准及脱钩状态含义见表 1。赋值越小代表碳排放和主营业务收入脱钩越理想,也间接反映出资源环境与经济发展的协调状态。

表 1 脱钩状态及评分

脱钩状态 优劣排序	判别条件			含 义	评分
	$\Delta CO_2^{b,t}$	$\Delta MBI^{b,t}$	$\varepsilon^{b,t}$		
强脱钩	<0	>0	$\varepsilon^{b,t} < 0$	最好:主营业务收入增长,碳排放下降	1
弱脱钩	>0	>0	$0 < \varepsilon^{b,t} < 0.8$	好:主营业务收入增长,碳排放小幅增长	2
衰退脱钩	<0	<0	$\varepsilon^{b,t} > 1.2$	较好:主营业务收入小幅下降,碳排放大幅下降	3
增长连接	>0	>0	$0.8 < \varepsilon^{b,t} < 1.2$	一般:主营业务收入增长,碳排放同步增长	4
衰退连接	<0	<0	$0.8 < \varepsilon^{b,t} < 1.2$	较差:主营业务收入下降,碳排放同步下降	5
增长负脱钩	>0	>0	$\varepsilon^{b,t} > 1.2$	差:主营业务收入小幅增长,碳排放大幅增加	6
弱负脱钩	<0	<0	$0 < \varepsilon^{b,t} < 0.8$	很差:主营业务收入下降,碳排放小幅下降	7
强负脱钩	>0	<0	$\varepsilon^{b,t} < 0$	最差:主营业务收入下降,碳排放增加	8

资料来源:孙睿(2014)^[37]、郭承龙和张智光(2013)^[38]以及陆琳忆等(2020)^[39]对脱钩状态的赋值评估法。

(三) 脱钩弹性指数驱动因素分解

本文基于碳排放的视角研究重污染行业绿色转型升级的影响因素,在运用因素分解法探究碳排放变化驱动因素的基础上,结合 Tapio 脱钩模型进一步探究影响重污染行业绿色转型升级的因素。目前,涉及碳排放变化驱动因素的研究大多采用因素分解法,而 LMDI 模型因其数值性质和经济含义上的优越性而被广泛

采用。基于卡亚(Kaya)恒等式理论,借鉴前人研究的模型设定,将碳排放量分解为以下形式:

$$\begin{aligned}
 CO_2 &= \sum_{i=1}^n CO_{2i} \\
 &= \sum_{i=1}^n \frac{CO_{2i}}{E_i} \times \frac{E_i}{RN_i} \times \frac{RN_i}{MBI_i} \times \frac{MBI_i}{GDP} \times GDP \\
 &= \sum_{i=1}^n CE_i \times EnTI_i \times EcTI_i \times IED_i \times GDP
 \end{aligned} \quad (3)$$

其中, $CE_i = CO_{2i}/E_i$ 指 i 行业单位能耗的碳排放量,代表能源碳排放强度效应。此外,本文将技术创新效应分解为技术创新环境效应($EnTI_i$)和技术创新经济效应($EcTI_i$),并选取相应指标进行测度。 RN_i 为 i 行业新产品销售收入, $EnTI_i = E_i/RN_i$ 指能源消耗量与新产品销售收入之比,即单位技术创新水平下的能源消耗量,代表技术创新环境效应; $EcTI_i = RN_i/MBI_i$ 指新产品销售收入占行业主营业务收入比重,即技术创新产生的经济效益占总收入的比重,代表技术创新经济效应。 $IED_i = MBI_i/GDP$ 指 i 行业主营业务收入占国内生产总值(GDP)的比重,代表行业结构效应。

进一步,报告期(t)相对于基期(b)的碳排放变化量(ΔCO_2)如式(4)所示:

$$\Delta CO_2^{b,t} = CO_2^t - CO_2^b = \Delta CO_{2CE}^{b,t} + \Delta CO_{2EnTI}^{b,t} + \Delta CO_{2EcTI}^{b,t} + \Delta CO_{2IED}^{b,t} + \Delta CO_{2GDP}^{b,t} \quad (4)$$

最后,结合式(2)和式(4)可得到扩展的 Tapio 脱钩模型,用以分解重污染行业绿色转型升级的影响因素。

$$\begin{aligned}
 \varepsilon^{b,t} &= \Delta CO_2^{b,t} \times \frac{MBI^b}{CO_2^b \times \Delta MBI^{b,t}} \\
 &= (\Delta CO_{2CE}^{b,t} + \Delta CO_{2EnTI}^{b,t} + \Delta CO_{2EcTI}^{b,t} + \Delta CO_{2IED}^{b,t} + \Delta CO_{2GDP}^{b,t}) \times \frac{MBI^b}{CO_2^b \times \Delta MBI^{b,t}} \\
 &= \frac{\Delta CO_{2CE}^{b,t} \times MBI^b}{CO_2^b \times \Delta MBI^{b,t}} + \frac{\Delta CO_{2EnTI}^{b,t} \times MBI^b}{CO_2^b \times \Delta MBI^{b,t}} + \frac{\Delta CO_{2EcTI}^{b,t} \times MBI^b}{CO_2^b \times \Delta MBI^{b,t}} + \frac{\Delta CO_{2IED}^{b,t} \times MBI^b}{CO_2^b \times \Delta MBI^{b,t}} + \frac{\Delta CO_{2GDP}^{b,t} \times MBI^b}{CO_2^b \times \Delta MBI^{b,t}} \\
 &= \varepsilon_{CE}^{b,t} + \varepsilon_{EnTI}^{b,t} + \varepsilon_{EcTI}^{b,t} + \varepsilon_{IED}^{b,t} + \varepsilon_{GDP}^{b,t}
 \end{aligned} \quad (5)$$

其中, $\varepsilon_{CE}^{b,t}$ 、 $\varepsilon_{EnTI}^{b,t}$ 、 $\varepsilon_{EcTI}^{b,t}$ 、 $\varepsilon_{IED}^{b,t}$ 、 $\varepsilon_{GDP}^{b,t}$ 分别表示碳排放强度效应、技术创新环境效应、技术创新经济效应、行业结构效应和经济增长效应对重污染行业绿色转型升级的影响。

(四) 技术创新双重效应对碳排放变化的影响:弹性分解方法

重污染行业绿色转型升级需要同时考虑碳排放和经济效益两个维度。作为行业发展的首要目标,重污染行业往往会利用所有资源用以实现经济效益的提升,而如何降低碳排放,实现环境目标却是重污染行业常常忽视的问题。因此,从控制碳排放的角度实现重污染行业绿色转型升级,探究经济效益与环境效益协调发展的绿色发展道路十分必要。为此,本文进一步融合 LMDI 分解模型和 Tapio 脱钩弹性指数,在“双碳”目标指引下,综合考虑碳排放变化的诱因,探究技术创新双重效应的变化能带来多大幅度的碳排放的变化,以便于找到控制碳排放与实现重污染行业绿色转型的出路。综上,本文参考蔡栋梁等(2017)^[36]的方法,将技术创新双重效应与碳排放的脱钩弹性指数分别表示为:

$$\varepsilon_{CO_2,EnTI}^{b,t} = \frac{\Delta CO_2^{b,t}/CO_2^b}{\Delta CO_{2EnTI}^{b,t}/CO_{2EnTI}^b} \quad (6)$$

行业分类管理名录》和证监会 2012 年公布的《上市公司行业分类指引》(2012 年修订),具体见表 2。25 种能源消耗量 E 来自《中国能源统计年鉴》统计的分行业终端能源消费量。能源低位发热值 LCV_i 、能源含碳量 CC_i 及能源碳氧化率 COR_i 等数据主要来自《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》、国家发展改革委《温室气体排放核算方法与报告指南》(2011)和《中国能源统计年鉴》。行业新产品销售收入数据来源于《中国科技统计年鉴》;行业主营业务收入数据来源于国泰安数据库;国内生产总值数据来源于《中国统计年鉴》。

表 2 重污染行业名单

行业代码	行业名称	行业代码	行业名称
B06	煤炭开采和洗选业	C25	石油加工、炼焦和核燃料加工业
B07	石油和天然气开采业	C26	化学原料和化学制品制造业
B08	黑色金属矿采选业	C27	医药制造业
B09	有色金属矿采选业	C28	化学纤维制造业
B10	非金属矿采选业	C29	橡胶和塑料制品业
C13	农副食品加工业	C30	非金属矿物制品业
C15	酒、饮料和精制茶制造业	C31	黑色金属冶炼和压延加工业
C17	纺织业	C32	有色金属冶炼和压延加工业
C19	皮革、毛皮、羽毛及其制品和制鞋业	C33	金属制品业
C22	造纸和纸制品业	D44	电力、热力生产和供应业

四、实证结果及分析

(一) 行业脱钩特征及绿色转型升级状态分析

由于脱钩概念强调脱钩过程的趋势性和过程性,因此本文在评价重污染行业间脱钩特征及绿色转型升级状态差异时,将以 2011 年为基期计算的行业脱钩指数作为分析依据。本文根据表 1 的赋值评分方法,在运用式(1)计算碳排放量的基础上,搜集相关数据,利用式(2)对不同脱钩效果的重污染行业脱钩弹性指数进行计算。结果如表 3 所示。

表 3 2012—2019 年重污染行业脱钩弹性指数

行业	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年
B06	2	6	3	3	3	3	3	3
B07	5	7	7	7	7	5	5	3
B08	1	2	2	3	3	5	7	7
B09	1	1	1	1	1	1	3	3
B10	2	2	1	1	1	1	3	3
C13	1	1	1	1	1	1	1	1
C15	1	1	1	1	1	1	1	1
C17	3	1	1	1	1	1	3	3
C19	2	2	1	1	1	1	1	1
C22	1	1	1	1	1	1	1	1
C25	2	2	2	8	8	1	1	1
C26	2	2	1	4	2	1	2	2
C27	2	2	1	1	1	1	1	1

表3(续)

行业	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年
C28	6	2	4	1	1	1	2	2
C29	1	1	1	1	1	1	1	1
C30	1	1	1	1	1	1	1	1
C31	2	2	4	8	8	8	6	6
C32	1	1	1	1	1	1	1	1
C33	6	4	2	6	4	2	6	6
D44	1	1	1	1	1	1	1	1
整体	2	2	2	2	1	1	1	2

从行业脱钩时间演变特征来看,2012—2019年重污染行业绿色转型升级整体处于上升趋势,从“弱脱钩”向“强脱钩”状态发展。从细分行业来看,2012—2019年处于“强脱钩”“弱脱钩”“衰退性脱钩”状态的重污染行业总数始终在15个以上,占重污染行业数量的75%,说明该阶段重污染行业脱钩效果理想。

从重污染行业细分行业绿色转型升级状态变动情况来看,2012—2019年,B07、C19、C25、C27、C28绿色转型升级状态优化;B06、B08、B09、B10、C31绿色转型升级状态有所恶化;C13、C15、C22、C29、C30、C32、D44始终保持在“强脱钩”状态;C17和C26分别保持在“衰退性脱钩”和“弱脱钩”状态;C33保持在“扩张性负脱钩”状态。由此可见,重污染行业细分行业间脱钩差异明显,脱钩指数年度变动也有较大差异。限于篇幅,本文无法对20个重污染行业绿色转型升级效果及其变动的诱因进行详细阐述,因此,根据表1的脱钩状态评分规则,参考李萍等(2017)^[41]的方法,将重污染行业分为脱钩效果较好、一般和较差三种具有代表性的类型,具体如表4所示。在此基础上,结合Tapio脱钩模型和LMDI模型,将影响重污染行业绿色转型升级效果的因素分解,以量化不同脱钩效果类型的重污染行业各要素的影响程度以及年度间的变动情况。

表4 重污染行业脱钩效果划分

类别	脱钩评分均值	行业代码
脱钩效果较好	$\overline{Score} \leq 1.5$	B09、C13、C15、C19、C22、C27、C29、C30、C32、D44
脱钩效果一般	$1.5 < \overline{Score} \leq 3.2$	B10、C17、C25、C26、C28
脱钩效果较差	$\overline{Score} > 3.2$	B06、B07、B08、C31、C33

(二) 脱钩弹性指数的驱动因素分析

为识别导致重污染行业绿色转型升级效果呈现差异化特征的关键因素,本文基于重污染行业绿色转型升级分类结果,运用式(3)一式(5)探究各要素在不同脱钩效果的重污染行业中起到的差异化影响,具体结果如表5所示。

表5 不同脱钩效果重污染行业脱钩驱动因素分解

行业	年份	$\epsilon^{b,t}$	$\epsilon_{CE}^{b,t}$	$\epsilon_{EnTI}^{b,t}$	$\epsilon_{EcTI}^{b,t}$	$\epsilon_{IED}^{b,t}$	$\epsilon_{CDP}^{b,t}$	评分
整体	2012	0.067	-0.024	-1.577	0.716	0.102	0.851	2
	2013	0.215	0.016	-1.424	0.697	0.052	0.875	2
	2014	0.102	0.029	-1.437	0.616	-0.177	1.071	2
	2015	0.075	0.023	-1.721	0.871	-0.623	1.526	2

表5(续)

行业	年份	$\varepsilon^{b,t}$	$\varepsilon_{CE}^{b,t}$	$\varepsilon_{EnTI}^{b,t}$	$\varepsilon_{EcTI}^{b,t}$	$\varepsilon_{IED}^{b,t}$	$\varepsilon_{GDP}^{b,t}$	评分
较好	2016	-0.060	0.081	-2.134	1.117	-0.753	1.628	1
	2017	-0.139	0.076	-2.875	1.778	-1.433	2.315	1
	2018	-0.003	0.206	-4.699	3.561	-3.215	4.144	1
	2019	0.210	0.152	-4.489	3.607	-3.468	4.408	2
	2012	-0.295	-0.001	-1.829	0.617	0.256	0.662	1
	2013	-0.186	-0.032	-1.639	0.624	0.202	0.659	1
	2014	-0.174	-0.007	-1.462	0.474	0.063	0.757	1
	2015	-0.300	-0.139	-1.442	0.498	-0.057	0.841	1
	2016	-0.112	-0.154	-1.496	0.740	-0.145	0.943	1
	2017	-0.245	-0.052	-2.111	1.122	-0.511	1.308	1
一般	2018	-1.005	-0.004	-3.923	2.161	-1.308	2.069	1
	2019	-0.909	-0.020	-3.511	1.887	-1.224	1.958	1
	2012	0.023	-0.039	-2.287	1.384	-0.299	1.265	2
	2013	0.177	-0.044	-1.787	1.074	-0.108	1.042	2
	2014	0.001	-0.059	-1.724	0.891	-0.298	1.191	2
	2015	0.301	0.270	-2.245	1.342	-0.814	1.748	2
	2016	-0.653	0.268	-2.959	1.224	-0.806	1.619	1
	2017	-0.555	-0.084	-2.976	1.656	-1.565	2.414	1
	2018	0.277	-0.364	-3.506	3.193	-3.737	4.691	2
	2019	0.741	-1.346	-4.810	5.908	-7.805	8.795	2
较差	2012	0.361	-0.097	-1.075	0.562	0.005	0.966	2
	2013	0.679	0.040	-0.812	0.474	-0.280	1.258	2
	2014	0.633	0.106	-1.211	0.762	-1.156	2.132	2
	2015	-4.702	-0.203	4.012	-9.554	26.584	-25.542	8
	2016	-2.346	-0.748	4.910	-7.563	15.867	-14.814	8
	2017	-1.456	-1.380	14.523	-15.637	20.020	-18.982	8
	2018	-5.922	-4.267	24.562	-27.288	34.214	-33.143	8
	2019	-4.182	-2.338	14.243	-17.194	20.531	-19.424	8

从重污染行业总体来看,碳排放与主营业务收入的脱钩状态徘徊在“弱脱钩”和“强脱钩”状态之间。从作用大小来看,重污染行业的脱钩效果主要受到技术创新双重效应、行业结构效应和经济增长效应的影响,碳排放强度效应对重污染行业的脱钩效果影响较小。从作用方向来看,技术创新环境效应和行业结构效应为负,说明其促进了行业脱钩;技术创新经济效应和经济增长效应为正,说明其抑制了行业脱钩。虽然技术创新环境效应在所有驱动因素中影响最大,但由于技术创新经济效应抑制了行业脱钩,使得技术创新环境效应即使表现为促进行业脱钩,也无法抵消经济增长效应对行业脱钩的抑制作用。

从脱钩效果较好的重污染行业来看,碳排放与主营业务收入一直处于“强脱钩”状态。究其原因,在于技术创新环境效应为负,且数值远大于技术创新经济效应,这使得技术创新效应表现为促进行业脱钩。并且技术创新效应对于行业脱钩的促进作用在大多数年份都抵消了经济增长效应对行业脱钩的抑制作用。从脱钩效果一般的重污染行业来看,碳排放与主营业务收入以“弱脱钩”状态为主,虽然2014年为“强脱钩”,但其脱钩指数非常小。这是因为技术创新环境效应虽然促进了行业脱钩,但技术创新经济效应的抑制作用一直较大,这导致技术创新效应对行业脱钩的促进作用较小,无法抵消经济增长效应对行业脱钩的抑

制作用。甚至在2019年技术创新经济效应占据主导,技术创新效应表现为抑制了行业脱钩。从脱钩效果较差的重污染行业来看,2012—2014年碳排放与主营业务收入呈“弱脱钩”状态,2015—2019年碳排放与主营业务收入处于“强负脱钩”状态,分析其脱钩影响因素可以看出脱钩状态恶化的原因。2012—2014年,技术创新环境效应对行业脱钩的促进作用依然大于技术创新经济效应对行业脱钩的抑制作用,技术创新效应表现为促进行业脱钩。但经济增长效应对行业脱钩的抑制作用远大于各促进因素作用的总和,因此行业呈“弱脱钩”状态。2015—2019年,虽然技术创新环境效应促进了行业脱钩,但技术创新经济效应对行业脱钩的抑制作用更大,这使得技术创新效应表现为抑制了行业脱钩。

(三) 技术创新的双重效应与重污染行业碳排放变化的脱钩弹性及其诱因

1. 技术创新环境效应与重污染行业碳排放变化的脱钩弹性及其诱因

前文提出,技术创新双重效应是造成重污染行业间绿色转型升级效果差异的关键因素。而碳排放的减少是实现绿色转型升级的关键,也是实现“双碳”目标的关键。因此,有必要探究技术创新双重效应对碳排放的影响,理清技术创新双重效应对碳排放的作用机制,以协调好技术创新、经济效益与环境效益的关系,实现三者的协调发展。因此,本文通过式(6)和式(7)测算技术创新双重效应与碳排放的脱钩弹性指数,通过式(8)和式(9)探究技术创新双重效应对碳排放的直接影响和交互影响。

表6报告了技术创新环境效应与重污染行业碳排放变化的脱钩弹性以及五个分解因素对这一脱钩弹性的影响。

表6 技术创新环境效应与重污染行业碳排放脱钩弹性的驱动因素

行业	年份	脱钩弹性	直接影响		交互影响				评分
			技术创新环境效应	交互影响效应汇总	碳排放强度效应	技术创新经济效应	行业结构效应	经济增长效应	
整体	2012	0.334	-7.833	8.167	-0.120	3.557	0.505	4.226	2
	2013	1.208	-7.985	9.193	0.087	3.911	0.290	4.905	6
	2014	0.562	-7.916	8.478	0.162	3.391	-0.974	5.898	2
	2015	0.345	-7.877	8.221	0.104	3.988	-2.852	6.982	2
	2016	-0.217	-7.740	7.523	0.294	4.052	-2.730	5.906	1
	2017	-0.371	-7.675	7.304	0.202	4.746	-3.825	6.181	1
	2018	-0.006	-7.803	7.797	0.341	5.913	-5.338	6.881	1
	2019	0.371	-7.944	8.315	0.268	6.383	-6.138	7.801	2
	较好	2012	-1.286	-7.965	6.679	-0.005	2.686	1.113	2.885
2013		-0.899	-7.923	7.024	-0.156	3.016	0.978	3.186	1
2014		-0.937	-7.860	6.922	-0.036	2.551	0.338	4.070	1
2015		-1.582	-7.617	6.035	-0.735	2.630	-0.303	4.443	1
2016		-0.593	-7.916	7.323	-0.818	3.914	-0.765	4.992	1
2017		-0.895	-7.720	6.825	-0.191	4.103	-1.869	4.783	1
2018		-1.789	-6.982	5.193	-0.007	3.846	-2.328	3.683	1
2019		-1.782	-6.882	5.099	-0.039	3.699	-2.399	3.838	1
一般		2012	0.081	-7.992	8.073	-0.138	4.836	-1.045	4.420
	2013	0.802	-8.112	8.914	-0.199	4.874	-0.489	4.728	4
	2014	0.006	-7.987	7.993	-0.272	4.127	-1.379	5.516	2

表6(续)

行业	年份	脱钩弹性	直接影响		交互影响				评分
			技术创新环境效应	交互影响效应汇总	碳排放强度效应	技术创新经济效应	行业结构效应	经济增长效应	
较差	2015	1.107	-8.246	9.353	0.991	4.932	-2.991	6.422	4
	2016	-1.610	-7.298	5.688	0.661	3.020	-1.987	3.994	1
	2017	-1.397	-7.494	6.097	-0.212	4.170	-3.941	6.080	1
	2018	0.644	-8.139	8.783	-0.844	7.413	-8.675	10.890	2
	2019	1.270	-8.240	9.509	-2.306	10.120	-13.370	15.065	6
	2012	2.509	-7.467	9.977	-0.677	3.908	0.033	6.713	6
	2013	6.453	-7.717	14.170	0.378	4.504	-2.663	11.952	6
	2014	4.012	-7.671	11.683	0.672	4.827	-7.322	13.505	6
	2015	8.901	-7.595	16.496	0.384	18.086	-50.326	48.352	6
	2016	3.635	-7.608	11.244	1.158	11.718	-24.585	22.953	6
	2017	0.752	-7.498	8.250	0.712	8.073	-10.336	9.800	2
	2018	1.875	-7.777	9.652	1.351	8.640	-10.833	10.494	6
	2019	2.336	-7.955	10.291	1.306	9.603	-11.467	10.849	6

从重污染行业总体来看,技术创新环境效应与重污染行业碳排放变化的脱钩弹性主要呈“弱脱钩”和“强脱钩”两种状态(仅2012—2013年呈“扩张性负脱钩”状态)。究其原因,是因为技术创新环境效应自身显著地促进其与重污染行业碳排放之间的脱钩弹性状态,即技术创新环境效应越大,其能源消耗强度越低、节能效率越高,相应的脱钩弹性指数越小。除技术创新环境效应自身的影响外,技术创新经济效应和经济增长效应发挥着同等程度的抑制作用,行业结构效应一定程度上发挥着促进作用,碳排放强度效应的影响较为微弱。这表明,技术创新环境效应能够多大程度地影响重污染行业碳排放的变化,不仅取决于其自身,同样取决于其他因素。

进一步,将技术创新环境效应自身对碳排放的影响视为直接影响,而将碳排放强度效应、技术创新经济效应、行业结构效应和经济增长效应对碳排放的影响视为交互影响。如图1所示,直接影响和交互影响的作用方向恰好相反,其中前者起促进作用,后者起抑制作用。虽然技术创新环境效应自身的直接影响有助于推动其与重污染行业碳排放之间实现“强脱钩”,但由碳排放强度效应、技术创新经济效应、行业结构效应和经济增长效应构成的交互影响却会阻碍这一进程。

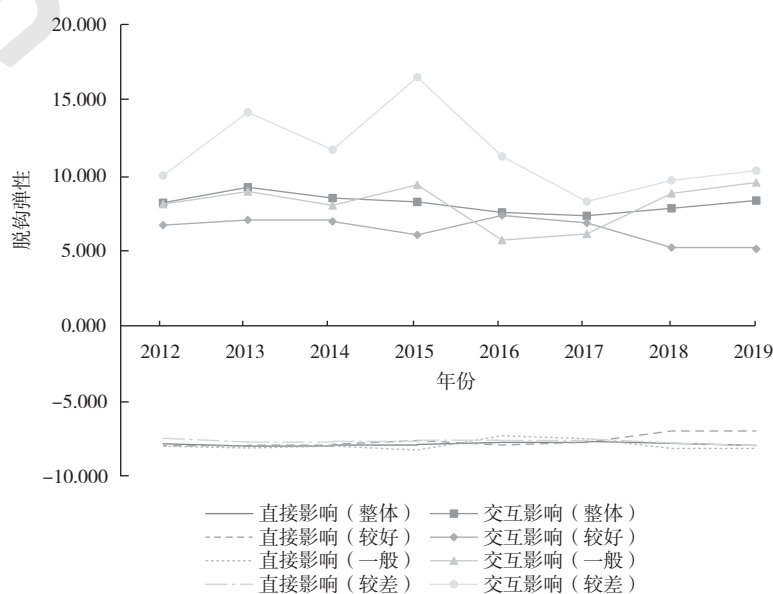


图1 技术创新环境效应与重污染行业碳排放脱钩弹性的分解:直接影响和交互影响

从不同脱钩效果的重污染行业来看,在脱钩效果较好的重污染行业中,直接影响大于交互影响,使得技术创新环境效应与重污染行业碳排放之间实现“强脱钩”;在脱钩效果一般的重污染行业中,交互影响总体略大于直接影响,而2016年和2017年交互影响小于直接影响,因此,技术创新环境效应与重污染行业碳排放之间总体维持在“弱脱钩”和“强脱钩”状态(仅2013年和2015年为“扩张性连接”状态,2019年为“扩张性负脱钩”状态);在脱钩效果较差的重污染行业中,交互影响大于直接影响,使得技术创新环境效应与重污染行业碳排放之间总体维持在“扩张性负脱钩”状态(仅2017年为“弱脱钩”状态)。这表明,脱钩效果较差的重污染行业提高技术创新环境效应的直接作用,降低碳排放强度效应、技术创新经济效应、行业结构效应和经济增长效应等因素的交互影响,是其减少碳排放规模,进而实现绿色转型升级的关键。

2. 技术创新经济效应与重污染行业碳排放变化的脱钩弹性及其诱因

表7报告了技术创新经济效应与重污染行业碳排放变化的脱钩弹性以及五个分解因素对这一脱钩弹性的影响。

表7 技术创新经济效应与重污染行业碳排放脱钩弹性的驱动因素

行业	年份	脱钩弹性	直接影响			交互影响			评分
			技术创新经济效应	交互影响效应汇总	碳排放强度效应	技术创新环境效应	行业结构效应	经济增长效应	
整体	2012	-0.255	-2.714	2.459	0.092	5.976	-0.385	-3.224	8
	2013	-0.855	-2.766	1.912	-0.061	5.648	-0.205	-3.470	8
	2014	-0.454	-2.742	2.288	-0.131	6.401	0.787	-4.769	8
	2015	-0.236	-2.729	2.493	-0.071	5.390	1.952	-4.777	8
	2016	0.144	-2.681	2.825	-0.195	5.121	1.806	-3.908	7
	2017	0.208	-2.659	2.867	-0.113	4.300	2.143	-3.462	7
	2018	0.003	-2.703	2.706	-0.156	3.567	2.440	-3.146	7
	2019	-0.160	-2.752	2.592	-0.116	3.424	2.646	-3.363	8
	较好	2012	1.363	-2.845	4.208	0.005	8.437	-1.179	-3.056
2013		0.844	-2.830	3.674	0.147	7.435	-0.918	-2.990	5
2014		1.032	-2.808	3.840	0.040	8.651	-0.372	-4.480	5
2015		1.637	-2.721	4.358	0.761	7.881	0.314	-4.598	3
2016		0.428	-2.828	3.256	0.591	5.719	0.553	-3.606	7
2017		0.602	-2.758	3.360	0.129	5.190	1.256	-3.215	7
2018		1.160	-2.494	3.655	0.005	4.528	1.510	-2.388	5
2019		1.185	-2.458	3.643	0.026	4.574	1.594	-2.551	5
一般		2012	-0.041	-2.444	2.403	0.070	4.039	0.528	-2.234
	2013	-0.408	-2.481	2.073	0.101	4.129	0.249	-2.407	8
	2014	-0.003	-2.442	2.439	0.161	4.727	0.816	-3.265	8
	2015	-0.566	-2.522	1.956	-0.507	4.217	1.530	-3.283	8
	2016	1.190	-2.232	3.422	-0.488	5.394	1.468	-2.952	5

表7(续)

行业	年份	脱钩弹性	直接影响		交互影响				评分
			技术创新经济效应	交互影响效应汇总	碳排放强度效应	技术创新环境效应	行业结构效应	经济增长效应	
较差	2017	0.767	-2.292	3.059	0.116	4.118	2.166	-3.341	7
	2018	-0.216	-2.489	2.273	0.283	2.733	2.913	-3.657	8
	2019	-0.316	-2.520	2.204	0.574	2.052	3.329	-3.751	8
	2012	-1.757	-2.736	0.979	0.474	5.229	-0.023	-4.701	8
	2013	-4.052	-2.828	-1.224	-0.238	4.846	1.672	-7.505	8
	2014	-2.336	-2.811	0.475	-0.391	4.467	4.264	-7.865	8
	2015	-1.370	-2.783	1.413	-0.059	1.169	7.745	-7.441	8
	2016	-0.865	-2.788	1.923	-0.276	1.810	5.850	-5.461	8
	2017	-0.256	-2.748	2.492	-0.242	2.552	3.518	-3.336	8
	2018	-0.618	-2.850	2.232	-0.446	2.565	3.573	-3.462	8
2019	-0.709	-2.915	2.206	-0.396	2.415	3.481	-3.293	8	

从重污染行业总体来看,技术创新经济效应与重污染行业碳排放变化的脱钩弹性主要呈“弱负脱钩”和“强负脱钩”两种状态。究其原因,是因为技术创新经济效应自身显著地抑制了其与重污染行业碳排放之间的脱钩弹性状态,即技术创新经济效应越大,其能源消耗强度越大、节能效率越低,相应的脱钩弹性指数越小。显然,技术创新经济效应自身同样不是唯一诱发其与重污染行业碳排放之间的脱钩弹性状态变化的原因,表7中的数据清晰地揭示了碳排放强度效应、技术创新环境效应、行业结构效应和经济增长效应对该脱钩弹性值的影响。在除技术创新经济效应之外的其他诱因中,技术创新环境效应、行业结构效应促进了重污染行业碳排放的脱钩,经济增长效应抑制了重污染行业碳排放的脱钩。相比之下,碳排放强度效应的影响程度较为微弱。这表明,技术创新经济效应可以多大程度地影响重污染行业碳排放变化同样取决于其他因素。

类似地,将技术创新经济效应自身视为直接引起技术创新经济效应与重污染行业碳排放之间脱钩弹性变动的因素,而将碳排放强度效应、技术创新环境效应、行业结构效应和经济增长效应对技术创新经济效应与重污染行业碳排放之间脱钩弹性的综合作用视为交互影响。如图2所示,直接影响和交互影响的作用方向恰好相反(仅脱钩效果较差的重污染行业2012—2013年两种影响保持同向),

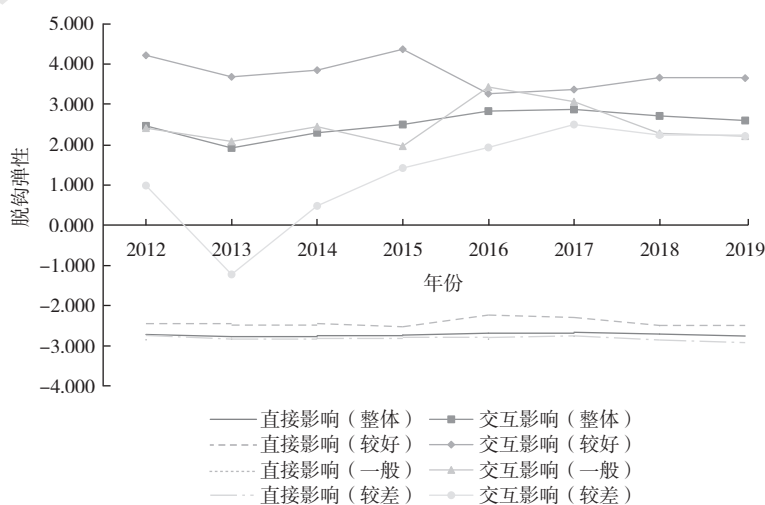


图2 技术创新经济效应与重污染行业碳排放脱钩弹性的分解:直接影响和交互影响

其中前者起抑制作用,后者起促进作用。这表明,技术创新经济效应与重污染行业碳排放之间脱钩弹性状态的变动同样取决于两类作用方向完全相反的影响因素。虽然技术创新经济效应越大,技术创新经济效应与重污染行业碳排放之间的“强负脱钩”状态越显著,越不利于两者的脱钩,但由碳排放强度效应、技术创新环境效应、行业结构效应和经济增长效应构成的交互影响始终起着相反的作用,推动着两者实现脱钩。

从不同脱钩效果的重污染行业来看,在脱钩效果较好的重污染行业中,直接影响小于交互影响,使得技术创新经济效应与重污染行业碳排放之间总体呈“衰退性连接”状态(仅2013年和2015年为“衰退性脱钩”状态,2016年和2017年为“弱负脱钩”状态);在脱钩效果一般和较差的重污染行业中,直接影响大于交互影响,使得技术创新经济效应与重污染行业碳排放之间总体呈“强负脱钩”状态。这表明,脱钩效果一般和较差的重污染行业要缩小碳排放规模、实现绿色转型升级的目标,需要提高交互影响的促进作用,削弱直接影响的抑制作用。

五、研究结论与政策启示

(一) 研究结论

本文利用通过IPCC核算方法估算的2011—2019年重污染行业碳排放量与同期主营业务收入数据,对重污染行业碳排放与主营业务收入间的脱钩关系进行判别,明确重污染行业绿色转型升级效果。在此基础上将LMDI模型引入到Tapio脱钩模型中,发现影响重污染行业绿色转型的因素有碳排放强度效应、技术创新环境效应、技术创新经济效应、行业结构效应与经济增长效应。最后,将这些诱因归结为直接影响和交互影响,进一步探究技术创新双重效应对碳排放变化的影响机理。研究结果表明:

首先,从时间演变特征来看,重污染行业绿色转型升级整体处于从“弱脱钩”向“强脱钩”发展的状态。从行业特征来看,各细分行业脱钩效果差距较大,B09、C13、C15、C19、C22、C27、C29、C30、C32、D44等行业脱钩效果较好;B10、C17、C25、C26、C28等行业脱钩效果一般;B06、B07、B08、C31、C33等行业脱钩效果较差。

其次,技术创新的双重效应是重污染行业绿色转型升级的重要因素。具体来说,技术创新环境效应和行业结构效应显著促进了重污染行业的绿色转型升级,技术创新经济效应和经济增长效应显著抑制了重污染行业的绿色转型升级,碳排放强度效应的影响较小。其中,技术创新双重效应作用方向相反,两者作用大小决定了技术创新效应对重污染行业绿色转型升级的作用方向。从重污染行业总体来看,技术创新环境效应对重污染行业绿色转型升级的促进作用始终超过技术创新经济效应所带来的抑制作用,因此技术创新效应始终表现为促进了重污染行业绿色转型升级。从不同脱钩状态的重污染行业来看,技术创新双重效应的差异性是导致重污染行业绿色转型升级效果呈现差异化特征的关键因素。

最后,通过分解诱发技术创新双重效应与重污染行业碳排放变化的脱钩弹性影响因素,发现技术创新环境效应显著促进其自身与重污染行业碳排放变化的脱钩,技术创新经济效应显著抑制其自身与重污染行业碳排放变化的脱钩。进一步,分别将技术创新双重效应视为与重污染行业碳排放变化的脱钩弹性变动因素的直接影响,将其他因素的综合效应视为交互影响,那么,不仅直接影响和交互影响的作用方向恰好相反,且两者的作用大小是导致技术创新双重效应与重污染行业碳排放变化的脱钩状态在不同绿色转型升级效果的重污染行业中存在差异化特征的原因。

(二) 政策启示

首先,在推进“双碳”目标和重污染行业绿色转型升级目标实现过程中,应强化绿色低碳技术创新,有效发挥技术创新环境效应。本文研究结论表明,技术创新环境效应有助于抑制碳排放,促进重污染行业的绿色转型升级。而发挥技术创新环境效应关键在于扶持低碳、零碳和负碳技术等绿色技术的创新,全面提升重污染行业能源利用效率,助力能源高效化、清洁化、可持续化发展。

其次,兼顾技术创新环境效应和经济效应协同发展。本文研究表明,虽然技术创新环境效应对于重污染行业的绿色转型升级具有重要作用,但与此同时,技术创新经济效应又不利于重污染行业的绿色转型升级。如何兼顾技术创新环境效应和经济效应,实现创新-环境-经济效益协同发展,需要社会、政府、市场共同发力。社会方面,加强绿色宣传,引导社会心理和消费者偏好,大力推进绿色消费,使绿色低碳技术创新成果不仅能改善环境,还能实现经济效益;政府方面,进一步强化政策引领,通过制定绿色低碳技术发展的政策体系,推进绿色低碳技术创新成果转化,实现环境效益与经济效益的协同发展;市场方面,进一步完善碳交易机制,通过碳价引导企业的生产决策,推动绿色低碳技术的创新。

最后,针对重污染行业脱钩状态差异,制定差异化绿色转型升级政策。本文研究结论表明,技术创新双重效应在不同绿色转型升级效果的重污染行业中具有显著的差异化影响,因此,重污染行业绿色转型升级政策的制定应考虑不同绿色转型升级效果的重污染行业。脱钩效果较好的重污染行业技术创新环境效应占主导地位,因此应在发挥其技术创新环境效应优势的同时,着力发挥技术创新经济效应,提高行业经济效益;脱钩效果一般的重污染行业,技术创新双重效应差距较小,因此在兼顾技术创新经济效应与环境效应的同时,应进一步提高行业技术创新水平,发挥技术创新效应对重污染行业绿色转型升级的作用;脱钩效果较差的重污染行业,技术创新经济效应占主导地位,因此,应着重提高绿色低碳技术的创新水平,发挥技术创新环境效应,实现绿色发展目标。

参考文献:

- [1]舒利敏,廖菁华.末端治理还是绿色转型?——绿色信贷对重污染行业企业环保投资的影响研究[J].国际金融研究,2022(4):12-22.
- [2]杨友才,牛晓童.碳中和背景下我国重污染行业碳排放效率的溢出效应研究[J].山东大学学报(哲学社会科学版),2022(5):165-175.
- [3]张继宏,程芳萍.“双碳”目标下中国制造业的碳减排责任分配[J].中国人口·资源与环境,2021,31(9):64-72.
- [4]陈晓珊,陈欣仪,李链娜,等.“双碳”背景下环保税对企业绿色转型影响实证研究[J].管理现代化,2022,42(6):121-128.
- [5]李兰冰,李焕杰.技术创新、节能减排与城市绿色发展[J].软科学,2021,35(11):46-51.
- [6]张小筠,刘戒骄,李斌.环境规制、技术创新与制造业绿色发展[J].广东财经大学学报,2020,35(5):48-57.
- [7]叶海涛.生态环境问题的技术化和经济学解决方案批判——以“杰文斯悖论”为中心[J].江苏行政学院学报,2015(6):26-30.
- [8]王文军.环境哲学的“尴尬”:技术与环境的悖论[J].陕西师范大学学报(哲学社会科学版),2017,46(5):34-41.
- [9]贾锐宁,邵帅,杜克锐,等.中国碳回弹效应的时空格局、动态演进及驱动因素——基于改进的碳排放随机前沿模型的实证考察[J].中国软科学,2022(12):23-34.
- [10]HARRISON D. Climate change, economic instruments and income distribution[R]. Paris: OECD, 1995.
- [11]SCHMITZ H. Green transformation: is there a fast track? [M]//SCOONES I, LEACH M, NEWELL P. The politics of green transformations. London: Routledge, 2015: 170-184.
- [12]HOU J, TEO T S H, ZHOU F L, et al. Does industrial green transformation successfully facilitate a decrease in carbon intensity in China? An

- environmental regulation perspective[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 184: 1060-1071.
- [13] 吴丹,李昂,张陈俊. 双控行动下京津冀经济发展与水资源利用脱钩评价[J]. *中国人口·资源与环境*,2021,31(3):150-160.
- [14] 夏勇,钟茂初. 经济发展与环境污染脱钩理论及EKC假说的关系——兼论中国地级城市的脱钩划分[J]. *中国人口·资源与环境*,2016,26(10):8-16.
- [15] OZDEMIR A C. Decomposition and decoupling analysis of carbon dioxide emissions in electricity generation by primary fossil fuels in Turkey[J]. *Energy*, 2023, 273: 127264.
- [16] REN S G, YIN H Y, CHEN X H. Using LMDI to analyze the decoupling of carbon dioxide emissions by China's manufacturing industry[J]. *Environmental Development*, 2014, 9: 61-75.
- [17] SU Y, FAN Q M. Renewable energy technology innovation, industrial structure upgrading and green development from the perspective of China's provinces[J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2022, 180: 121727.
- [18] 原毅军,陈喆. 环境规制、绿色技术创新与中国制造业转型升级[J]. *科学学研究*,2019,37(10):1902-1911.
- [19] DUAN L L, SHI D Y. Technological innovation, market proximity, and China's industrial green development[J]. *Chinese Journal of Population, Resources and Environment*, 2021, 19(1): 1-11.
- [20] 张倩,吴梦瑒. 煤炭产业绿色转型与绿色技术创新协同发展研究[J]. *煤炭经济研究*,2016,36(12):28-32.
- [21] 杨伊,谭宁,胡俊男. 全球价值链嵌入、技术创新与资源型产业绿色发展[J]. *统计与决策*,2022,38(15):71-76.
- [22] 李焯,潘伟恒,龙梦琦. 资源型产业绿色转型升级的驱动因素[J]. *技术经济*,2016,35(4):65-69,119.
- [23] 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.
- [24] 朱东波. 环境规制、技术创新与中国工业结构绿色转型[J]. *工业技术经济*,2020,39(10):57-64.
- [25] 查冬兰,陈倩,王伟群. 能源回弹效应最新研究进展:理论与方法[J]. *环境经济研究*,2021,6(1):179-200.
- [26] 陈凯,史红亮,闫波. 技术进步对能源消费回弹效应的影响——基于中国钢铁行业实证研究[J]. *工业技术经济*,2011,30(4):24-30.
- [27] 艾明晔,刘桂希,孙薇. 中国石化行业能耗为何持续增加? ——回弹效应及要素替代视角[J]. *北京理工大学学报(社会科学版)*,2017,19(5):1-9.
- [28] 黄贇琳,秦淑悦,张雨朦. 数字经济如何驱动制造业升级[J]. *经济管理*,2022,44(4):80-97.
- [29] 李治国,王杰,车帅. 碳达峰约束下中国工业增长与节能减排的双赢发展[J]. *环境经济研究*,2021,6(2):7-22.
- [30] 徐维祥,周建平,刘程军. 数字经济发展对城市碳排放影响的空间效应[J]. *地理研究*,2022,41(1):111-129.
- [31] CHENG X Q, YAO D J, QIAN Y Y, et al. How does fintech influence carbon emissions: evidence from China's prefecture-level cities[J]. *International Review of Financial Analysis*, 2023, 87: 102655.
- [32] 肖雁飞,廖双红,王湘韵. 技术创新对中国区域碳减排影响差异及对策研究[J]. *环境科学与技术*,2017,40(11):191-197.
- [33] QUAN C G, CHENG X J, YU S S, et al. Analysis on the influencing factors of carbon emission in China's logistics industry based on LMDI method[J]. *Science of The Total Environment*, 2020, 734: 138473.
- [34] HASAN M M, WU C B. Estimating energy-related CO₂ emission growth in Bangladesh: the LMDI decomposition method approach[J]. *Energy Strategy Reviews*, 2020, 32: 100565.
- [35] 刘小丽,王永利. 基于LMDI分解的中国制造业碳排放驱动因素分析[J]. *统计与决策*,2022,38(12):60-63.
- [36] 蔡栋梁,程树磊,陈建东. 金融节能、金融发展对碳排放变化的影响研究[J]. *中国人口·资源与环境*,2017,27(10):122-130.
- [37] 孙睿. Tapio脱钩指数测算方法的改进及其应用[J]. *技术经济与管理研究*,2014(8):7-11.
- [38] 郭承龙,张智光. 污染物排放量增长与经济增长脱钩状态评价研究[J]. *地域研究与开发*,2013,32(3):94-98,114.
- [39] 陆琳忆,胡森林,何金廖,等. 长三角城市群绿色发展与经济增长的关系——基于脱钩指数的分析[J]. *经济地理*,2020,40(7):40-48.
- [40] 龚国平. 技术创新对产业竞争力的作用机理[J]. *科技创业月刊*,2006(2):25-27.
- [41] 李萍,王军,杨秀华. 中国工业行业最优环境规制强度分析——一个分类评价的视角[J]. *河北经贸大学学报*,2017,38(3):80-87.

Dual Effects of Technological Innovation and Green Transformation and Upgrading of Heavily Polluting Industries

—From the Perspective of Carbon Emissions

WU Weihong¹, CAI Haibo¹, LIU Jia², QIN Zhen¹

(1. Beijing University of Chemical Technology, Beijing 102202;

2. Capital University of Economics and Business, Beijing 100070)

Abstract: Promoting green and low-carbon economic and social development is the key to achieving high-quality development. Given the notable impact of heavily polluting industries on economic and social development, greening and decarbonization are their primary objective and direction for achieving green transformation and upgrading in the new era.

This paper takes the green transformation and upgrading of heavily polluting industries and the realization of the strategic goals of carbon peaking and carbon neutrality (“dual carbon” goals) as the realistic demand orientation. It selects the time series data of 20 sub-sectors of heavily polluting industries from 2011 to 2019 to conduct an empirical analysis based on the green technology innovation theory and the energy rebound theory. Then, using the LMDI model and the Tapio decoupling model to decompose the effects of technological innovation into the environmental effect and the economic effect, it explores the synergistic green transformation and upgrading of environmental benefit—technological innovation—economic benefit in these industries.

The findings reveal that heavily polluting industries show a decoupling trend from weak to strong, achieving partial green transformation and upgrading. However, some sub-sectors still need to make more improvements. Furthermore, the dual effects of technological innovation have the greatest impact on the green transformation and upgrading of these industries. At the same time, the direction and size vary in the effect of green transformation and upgrading. After decomposing the causal factors of the decoupling elasticity state of carbon emissions in heavily polluting industries, it is found that the dual effects of technological innovation on carbon emissions have a direct and interactive impact in different directions. The conclusions may provide practical implications for heavily polluting industries to achieve coordination of economic and environmental benefits.

The contributions are as follows. (1) From the perspective of carbon emissions, this paper applies the Tapio decoupling model to analyze the decoupling state of 20 sub-sectors of heavily polluting industries and clarify the state of green transformation and upgrading. (2) The Tapio decoupling model and the LMDI model are employed to investigate the impacts of dual effects of technological innovation on heavily polluting industries with different green transformation and upgrading states, providing a theoretical explanation for the contradiction in the role of technological innovation. (3) Based on the strategic needs of the “dual carbon” goal, it decomposes the triggers of carbon emission change to explore the direct and interactive impact of the dual effects of technological innovation on carbon emission change. It puts forward theoretical support for realizing a win-win situation in the development pattern of technological innovation, economic development, and ecological environment.

Keywords: green transformation; dual effects of technological innovation; carbon emission; heavily polluting industry; LMDI model; Tapio decoupling model

责任编辑:姜 莱;周 斌