

行业视点

中国钢铁产业碳排放脱钩弹性及驱动因素 ——基于 Tapio 脱钩模型与 LMDI 分析

李汝晴

(烟台大学 经济管理学院, 山东 烟台 264003)

[摘要] 新发展阶段,明晰钢铁碳排放与产业增长的关联,厘清钢铁碳减排路径,将助力实现钢铁产业高质量发展,推动钢铁领域“双碳”进程。基于2000—2019年中国钢铁碳排放测算数据,运用 Tapio 脱钩模型分析中国钢铁产业碳排放与产业增长的关系,采用对数平均迪氏指数(LMDI)对碳排放驱动因素进行分解。研究表明,2000—2019年中国钢铁产业碳排放与产业增长的脱钩状态较为稳定,基本上呈现弱脱钩状态。生产规模效应和资源效率效应是碳排放量增加的主要驱动因素,能源结构强度效应和能源消耗强度效应对碳排放具有抑制作用。建议从大幅增加钢铁行业研发投入、调整钢铁行业能源结构、创新工艺流程、制定科学合理的发展规模等方面开展钢铁产业碳减排工作,助力低碳钢铁产业高质量发展。

[关键词] 钢铁产业;碳排放; Tapio 脱钩模型; LMDI 模型; 驱动因素

[中图分类号] X322; TF521

[文献标志码] A

[文章编号] 2097-2423(2024)03-0001-08

DOI: 10.19610/j.cnki.cn10-1873/tf.2024.03.001

0 前言

气候变化与碳减排一直是全球学术及国际环境中的热点议题。人类的社会经济活动导致全球温度上升,碳排放是全球变暖的关键因素。2020年,中国确立了“双碳”目标,致力于在2030年实现碳达峰,在2060年达成碳中和。作为全球第二大经济体和碳排放国,中国降低产业碳排放既是实现社会经济高品质发展的内在要求,也是提升产业全球竞争

力及规避国际贸易碳壁垒的必要路径。

在全球范围内,钢铁行业的二氧化碳排放量位居首位。据世界钢铁协会统计,中国2022年的粗钢产量已经达到了10.13亿t,占全球的53.93%,是全球钢铁生产的领军者,同时中国钢铁产业碳排放量占全国碳排放总量的15%左右^[2]。由此可见,钢铁产业实现低碳转型发展是落实中国生态文明建设目标的主要途径,也是实现“双碳”目标的重要支撑^[3-4]。

本文探讨中国钢铁产业低碳发展的三个主要问题:钢铁产业碳排放与经济的关系,钢铁产业碳排放的驱动因素及应对这些驱动因素的低碳发展路径。通过 Tapio 脱钩模型和 LMDI 分解法,研究了2000—2019年钢铁产业的碳排放趋势、驱动因素,并提出了低碳化发展建议。此研究可为钢铁等制造业的低碳发展以及经济的转型和可持续发展提供参考。

1 研究现状

目前,有关碳排放与经济增长的脱钩关系及其驱动因素的研究主要集中于国家层面、区域层面和

[收稿日期] 2024-04-09

[基金项目] 山东省重点研发计划(软科学)一般项目“山东数实融合对经济增长的驱动机理、门槛效应及深化路径(2023RKY01016)”。

[作者简介] 李汝晴(1997—),女,山东潍坊人,硕士,主要从事制造业经济研究。

[引用格式] 李汝晴. 中国钢铁产业碳排放脱钩弹性及驱动因素——基于 Tapio 脱钩模型与 LMDI 分析[J]. 绿色矿冶, 2024, 40(3): 1-8, 14.

LI Ruqing. The decoupling elasticity and driving factors of carbon emissions from China's steel industry—based on Tapio decoupling model and LMDI decomposition method[J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2024, 40(3): 1-8, 14.

产业层面。

1) 国家层面。王杰等^[5]对金砖国家进行宏观分析,运用 Tapio 脱钩和 LMDI 模型发现这些国家的经济发展与碳排放关系由负脱钩向弱脱钩转变,终至强脱钩;经济增长和人口动态主导碳排放趋势,而能源效率提升则有效遏制碳排放的扩张。KOILAK-OU 等^[6]的研究表明,2000—2017 年,美国和德国的脱钩状况经历了由强脱钩向弱脱钩的过渡,LMDI 模型显示能源强度的下降是两国碳减排的主导因素,德国的能源结构效应对碳减排的影响比美国更显著,而美国的收入效应对碳减排的影响大于德国。Yasmeen 等^[7]利用 LMDI 模型分析揭示,国家经济发展进程是推动巴基斯坦碳排放增长的核心因素,而能源结构的改进及能源效率的提高则扮演了抑制角色。同样地,陈涛等^[8]的研究也采用 LMDI 模型,显示经济增长对中国碳排放的上升有显著推动作用,然而,能源结构优化与能源利用率的提高则有效缓解了碳排放压力。

2) 区域层面。侯丽朋等^[9]运用 Tapio 脱钩模型和 LMDI 模型方法研究闽三角地区的碳排放脱钩状态及驱动机制,结果表明闽三角地区的脱钩状态都得到了改善,但强脱钩出现频次较低,人均 GDP 和人口规模是闽三角地区碳排放主要驱动因素,能源结构和能源强度是碳排放的主要抑制因素。陈四瑜等^[10]利用 Tapio 脱钩及 LMDI 模型探索郑州经济技术开发区的经济发展与碳排放间的联系,结果表明该区域在 2011—2016 年处于增长连结状态,而在 2016—2020 年则转为弱脱钩状态;在诸多影响碳排放脱钩的因素中,经济规模和能源效率分别起到主要的压制和推动作用。

3) 产业层面。Isik 等^[11]利用 LMDI 模型对土耳其交通领域的碳排放进行探究,研究发现其碳排放受到经济扩张、人口变动和排放密度的主要推动,而交通运输密度效应对其碳排放起到显著的制约作用。Hossain 等^[12]运用 Tapio 脱钩模型和 LMDI 分解法得出,在 1990—2017 年的大部分时间里,孟加拉国的农业部门碳排放与农业部门发展呈现强脱钩和弱脱钩关系,人口、农业能源强度和农业经济活动是促进碳排放的主要因素,农业经济结构、农业能源结构对碳排放有抑制作用。通过采用 LMDI 模型,刘小丽等^[13]发现中国制造业的经济增益以及产业结构的变化是碳排放的重要推力,而能源效率的提升则产生一定的制约作用,然而,能源结构的改进和

碳排放系数的减小对碳减排的影响则表现得相对微弱。翁钢民等^[14]采用 Tapio 脱钩模型并结合 ESDA 和 LMDI 方法的研究结果显示,中国旅游行业大体处在弱脱钩阶段,其中,技术进步以及游客数量的控制是主要的碳排放解耦促进和抑制因素,同时,在有限的时间段内,能源结构效应对碳排放表现为早期抑制后期促进的双面角色,而经济影响相对较小。

综上所述,碳排放与经济增长的脱钩关系及其驱动因素在不同国家、区域和行业之间存在显著差异。尽管目前在碳排放、经济增长及其驱动因素之间的相关性方面有较为丰富的研究,但存在两方面局限:①已有的研究大部分探究国家、区域碳排放脱钩关系,从产业的角度探究产业经济发展与碳排放脱钩关系的研究相对较少;②碳排放驱动因素的分解研究较多,但聚焦于中国钢铁产业碳排放驱动因素的研究较少。

本文运用 Tapio 脱钩模型分析钢铁产业与碳排放的脱钩类型及其变化特征,运用 LMDI 分解方法揭示 2000—2019 年中国钢铁产业碳排放的特征和驱动因素,并研究各因素对碳排放的驱动影响,进而提出钢铁产业低碳化发展建议。

2 研究方法和数据来源

2.1 研究方法

2.1.1 脱钩模型

脱钩理论是评估发展模式是否满足低碳要求的关键工具^[15-16],该概念源于 20 世纪 60 年代物理学领域,指相互联系的变量之间的响应性减弱或完全消失。在 20 世纪末期,经济合作与发展组织(OECD)首次将脱钩理论应用于农业政策,随后该理论在经济与环境的相互作用领域获得更广泛的应用。脱钩分析提供了一种框架,用于理解经济增长与生态环境保护、能源消耗之间的动态关系^[17]。研究发达国家的工业化过程发现,初始阶段能源消费与经济呈现同步增长;然而,随着经济的进一步发展,能源消耗的增速逐渐低于经济增速,甚至出现反向趋势,这一现象被视为经济增长与能源消耗的“脱钩”。

OECD 和 Tapio 构建的脱钩模型是两种较常见的模型^[18]。Tapio 模型利用弹性分析手段展现了不同变量之间的解耦关系。相较于 OECD 模型在起始基准年的选择上存在问题,Tapio 模型提供了一种改进。此外,Tapio 模型对特定年份的详尽分析,使得

追踪脱钩状况的历史变化更为明晰。因此,本研究使用 Tapio 脱钩模型分析钢铁行业及其碳排放的脱钩状态。

根据 Tapio 脱钩理论,定义钢铁行业的脱钩计算公式见式(1)。

$$e = \frac{\Delta C/C}{\Delta G/G} \quad (1)$$

式中: e 是脱钩弹性指数,即中国钢铁产业碳排放对钢铁产业增长的脱钩弹性系数,表示钢铁产业碳排放量相对于钢铁产业增长(粗钢产量)的变化

所呈现的变化趋势; C 是基期钢铁产业的碳排放量; G 是基期粗钢产量; ΔC 是当期相对于基期碳排放的变化量; ΔG 是当期相对于基期粗钢产量的变化量。

参照 Tapio 脱钩指标体系,可将钢铁产业碳排放量与经济增长的关系界定为三种状态:脱钩状态、连接状态、负脱钩状态。脱钩状态指碳排放量与产业增长之间的相关性比较小;连接状态指碳排放量与经济增长之间存在正相关关系;其余状态为负脱钩状态。Tapio 脱钩状态判别见表 1。

表 1 Tapio 脱钩状态判别

状态	$\Delta C/C$	$\Delta G/G$	脱钩弹性指数 e	含义	
负脱钩	弱负脱钩	<0	<0	$0 \leq e < 0.8$	经济衰退,碳排放缓慢下降
	强负脱钩	>0	<0	$e < 0$	经济衰退,碳排放却上升
	扩张负钩	>0	>0	$e > 1.2$	经济增长,碳排放大幅上升
脱钩	衰退脱钩	<0	<0	$e > 1.2$	经济衰退,碳排放却大幅升
	强脱钩	<0	>0	$e < 0$	经济增长,碳排放却下降
	弱脱钩	>0	>0	$0 \leq e < 0.8$	经济增长,碳排放也缓慢升
连接	衰退连接	<0	<0	$0.8 \leq e \leq 1.2$	经济衰退,碳排放中速下降
	扩张连接	>0	>0	$0.8 \leq e \leq 1.2$	经济增长,碳排放中速上升

如表 1 所示,钢铁产业持续增长的情况下,对应碳排放的增长弹性越小,表现出更明显的脱钩现象,即脱钩程度更高。理想的状态是强脱钩状态,即产业增长伴随碳排放下降,并具有较小的脱钩弹性系数;反之,最不理想的情况是负脱钩状态,即碳排放增加与产业衰退并存。

2.1.2 LMDI 分解法

关于碳排放的核心因子分析,主要方法为结构分解分析(SDA)和指数分解分析(IDA)。SDA 往往基于投入产出表,但由于此表格只在逢 2 和逢 7 年发布,其年度连续性无法保证,对分析的连续性与完整性带来制约。与 SDA 不同,IDA 展现更高的适应能力,其综合考虑了不同的产业和能源种类数据,因此其应用领域更广泛。在多种指数中,Divisia 指数与 Laspeyres 指数被视为首选。对数平均迪式分解指数法(LMDI)是 Divisia 指数的对数版本,有效解决了其他方法中残差项的问题,并避免了伪回归,特别适用于连续性数据研究,因此 LMDI 在驱动效应分析领域享有重要地位。

钢铁产业是典型的资源、能源依赖型产业,资源对于钢铁产业产量提升有着强烈影响。在钢铁产业

碳排放的驱动效应分析中,借鉴 Yang 等^[19] 扩展的 Kaya 恒等式,结合 LMDI 方法,我国钢铁产业碳排放量分解为公式(2)。

$$C = \sum C = \sum \frac{C}{E} \frac{E}{Q} \frac{Q}{I} I = \sum SMUI \quad (2)$$

式中: C 为钢铁产业碳排放量; E 为钢铁产业的能源总消耗; Q 为粗钢产量; I 为铁矿石投入量; S 为能源结构强度,表示单位能源消耗产生的碳排放(C/E); M 为能源消耗强度,表示单位钢铁产量的能源消耗(E/Q); U 为资源效率,表示单位铁矿石的钢铁产量(Q/I)。

采用 Ang^[20] 提出的 LMDI 模型的加法形式,碳排放总量从第 0 年到第 t 年的变化 ΔC 可以分解为四个因素的总和,即能源结构强度效应(ΔS)、能源消耗强度效应(ΔM)、资源效率效应(ΔU) 和生产规模效应(ΔP)。碳排放量分解式见式(3)。

$$\Delta C = C_t - C_0 = \Delta S + \Delta M + \Delta U + \Delta P \quad (3)$$

式中:能源结构强度效应(ΔS)表示能源结构改革对碳排放的驱动作用;能源消耗强度效应(ΔM)表示能源消耗变化对碳排放的驱动作用;资源效率效应(ΔU)表示资源效率的变化对碳排放的驱动作用;

生产规模效应(ΔP)表示生产规模的变化对碳排放的驱动作用; C_t 为末期碳排放总量; C_0 为基期碳排放总量。式(3)中各效应的计算见式(4)~(7)。

$$\Delta S = \sum \frac{C_t - C_0}{\ln C_t - \ln C_0} \ln \left(\frac{S_t}{S_0} \right) \quad (4)$$

$$\Delta M = \sum \frac{C_t - C_0}{\ln C_t - \ln C_0} \ln \left(\frac{M_t}{M_0} \right) \quad (5)$$

$$\Delta U = \sum \frac{C_t - C_0}{\ln C_t - \ln C_0} \ln \left(\frac{U_t}{U_0} \right) \quad (6)$$

$$\Delta P = \sum \frac{C_t - C_0}{\ln C_t - \ln C_0} \ln \left(\frac{I_t}{I_0} \right) \quad (7)$$

式中: S_t 为末期能源结构强度; S_0 为基期能源结构强度; M_t 为末期能源消耗强度; M_0 为基期能源消耗强度; U_t 为末期资源效率; U_0 为基期资源效率; I_t 为末期铁矿石投入量; I_0 为基期铁矿石投入量。

2.2 数据来源

在中国碳核算数据库(CEADs)中,2019年是钢铁产业碳排放量数据可获取的最新年份,鉴于数据的可获得性和分析的全面性,本文以2000年至2019年为研究区间,20年的研究周期有利于从长期反映钢铁产业与碳排放的脱钩关系,对碳排放的驱动因素分析也更加具有说服力。

其中,钢铁产业碳排放量(C)来自中国碳核算数据库(CEADs),钢铁产业的能源总消耗(E)由吨钢综合能耗乘以粗钢产量(Q)得到,其数据来自《中国钢铁工业年鉴》和《中国统计年鉴》;考虑到中国铁矿石和进口铁矿石含铁量分别为33%和64.5%,所以铁矿石投入量(I)为国内铁矿石含铁量和进口铁矿石含铁量的合计,国内铁矿石数量来自《中国钢铁工业年鉴》,进口铁矿石数量来自《中国统计年鉴》。

3 中国钢铁产业碳排放与经济增长脱钩关系

3.1 中国钢铁产业碳排放量和粗钢产量

2000—2019年中国钢铁产业碳排放量和粗钢产量如图1所示。由图1可清晰看出,中国钢铁产业碳排放量和粗钢产量总体呈现先增后降再增的趋势,两者趋势大致相同。

2000—2014年,中国钢铁产业碳排放量和粗钢产量呈现同步增长趋势,该时期中国钢铁产业碳排放量逐年上升,并于2014年达到峰值1802.84百万t二氧化碳,2014年碳排放量是2000年的4.6倍;同

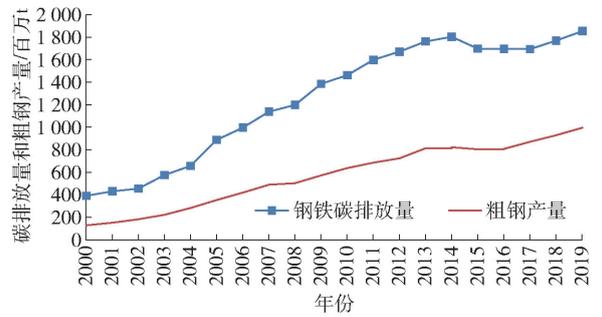


图1 2000—2019年中国钢铁产业碳排放量和粗钢产量

时期粗钢产量也逐年上升,并于2014年达到峰值822.31百万t,2014年粗钢产量是2000年的6.4倍。这充分反映出钢铁产业是能源密集型产业,随着经济的快速增长,中国钢铁产业也蓬勃发展,其碳排放量也随之增加。

2015—2017年,中国钢铁产业碳排放量和粗钢产量均出现回落。2015年中国钢铁产业碳排放量为1697.99百万t二氧化碳,较2014年减少5.82%;2015年粗钢产量为803.83百万t,较2014年减少2.25%。这可能是因为2015年“史上最严”的《环境保护法》正式施行,迫于环保压力,粗钢产量出现下降,碳排放也相应减少。

2018年后,中国钢铁产业的碳排放量和粗钢产量均有所上升,2018年中国钢铁产业碳排放量为1769.59百万t二氧化碳,较2017年增加4.48%,2018年粗钢产量为929.04百万t,较2017年增加6.70%。这是因为2018年中国房地产及制造业等投资增长,钢铁需求拉动粗钢产量再创历史新高,碳排放量也随之上升。

3.2 中国钢铁产业碳排放与产业增长的脱钩状态

2000—2019年中国钢铁产业碳排放与产业增长脱钩状态见表2。由表2可知,2000—2019年,中国钢铁产业碳排放与产业增长的脱钩状态较为稳定,除了2006年至2010年(“十一五”时期)呈现扩张连接状态,其他阶段皆呈现弱脱钩状态。总体来看,钢铁产业发展的增速超过钢铁产业碳排放量的增速,这说明中国钢铁产业碳减排取得一定成效。

2001—2005年(“十五”时期),中国钢铁产业碳排放与产业增长呈现弱脱钩状态,即随着钢铁产业的发展,钢铁产业的碳排放量也增加,且钢铁产业发展的增速超过钢铁产业碳排放量的增速,其原因可能是“十五”时期,我国钢铁产业规模不断扩大,能源利用效率、资源利用效率和技术装备水平都有

表2 2000至2019年中国钢铁产业碳排放与产业增长脱钩状态

年份	$\Delta C/C$	$\Delta G/G$	脱钩指数 e	脱钩状态
2001—2005年(“十五”时期)	1.06	1.33	0.80	弱脱钩
2006—2010年(“十一五”时期)	0.47	0.52	0.90	扩张连接
2011—2015年(“十二五”时期)	0.06	0.17	0.36	弱脱钩
2016—2019年(“十三五”时期)	0.09	0.23	0.39	弱脱钩

注:中国钢铁产业碳排放量的数据来源于中国碳核算数据库(CEADs);中国粗钢产量数据来源于国家统计局。

提高,传统企业的转型升级加强,碳排放量增速放缓^[21]。

2006—2010年(“十一五”时期),中国钢铁产业碳排放与产业增长呈现扩张连接状态,即随着钢铁产业的发展,钢铁产业的碳排放量也增加,但钢铁产业发展的增速低于钢铁产业碳排放量的增速,这说明该阶段的钢铁产业经济发展是以碳排放量的较快增长为代价的。主要原因是在2009年,国家颁布《钢铁产业调整振兴规划》以缓解经济危机带来的负面效应,这促进了钢铁产业的发展,而钢铁产业的高耗能、高污染特性,导致了碳排放量的增加^[22]。

2011—2015年(“十二五”时期),中国钢铁业的碳排放及产业增长呈弱脱钩状况,具体脱钩指数 e 为0.36。这归因于一方面该阶段工业化和城镇化的深入推进,以及保障性住房、水利和交通设施等大型建设项目对钢材需求的推动,刺激了粗钢产量增长;另一方面,随着中国经济发展方式的转变和钢铁产业升级,显著的节能减排效果降低了碳排放增速,从而使脱钩指数较小^[23]。

2016—2019年(“十三五”时期),中国钢铁产业碳排放与产业增长呈现弱脱钩状态,脱钩指数 e 为0.39,较“十二五”时期稍微有所上升,这是因为我国钢铁产业深入推进供给侧结构性改革,化解过剩产能取得显著成效,产业结构更加合理,粗钢产能利用率大幅上升,一系列大规模的兼并重组使得钢铁产业的规模经济明显,碳排放量增速放缓^[24]。

4 钢铁产业碳排放驱动因素的 LMDI 分解

4.1 驱动因素的 LMDI 分解

依据公式(4)~(7),2000—2019年我国钢铁产业碳排放的加法 LMDI 分解结果见表3和图2。

4.2 四个驱动因素的效应分解

4.2.1 能源结构强度效应

能源结构强度效应对碳排放的影响呈现波动的

表3 中国钢铁产业碳排放的加法 LMDI 分解结果

年份	总效应 ΔC	能源结构	能源消耗	资源效	生产规
		强度效应 ΔS	强度效应 ΔM	率效应 ΔU	模效应 ΔP
2000—2001	40.32	-6.71	-20.91	26.56	41.38
2001—2002	23.83	-33.57	-24.31	26.19	55.51
2002—2003	120.97	43.17	-23.83	-2.77	104.40
2003—2004	80.96	-53.69	-13.59	-13.26	161.51
2004—2005	231.12	131.60	-70.64	-51.21	221.37
2005—2006	108.39	16.32	-68.90	-77.47	238.45
2006—2007	141.90	-1.28	-21.70	-10.77	175.64
2007—2008	60.01	33.15	-5.56	-111.49	143.90
2008—2009	187.72	52.80	-31.13	-154.34	320.39
2009—2010	76.09	-43.16	-34.02	38.25	115.03
2010—2011	136.65	24.20	1.27	-127.50	238.67
2011—2012	72.98	-17.96	1.36	26.84	62.74
2012—2013	90.10	-88.16	-21.28	0.26	199.29
2013—2014	41.20	36.22	-15.00	-104.49	124.47
2014—2015	-104.85	-25.86	-39.20	16.28	-56.06
2015—2016	-0.77	-39.34	30.60	-7.48	15.45
2016—2017	-3.55	-86.78	-44.38	98.38	29.23
2017—2018	75.92	48.91	-85.20	385.80	-273.60
2018—2019	83.51	-64.87	23.39	68.64	56.34
2000—2019	1462.52	-75.02	-463.00	26.44	1974.10

趋势,2005年为最高值,能源结构强度效应的碳排放为131.6百万t。这是由于从2000年开始,受城市化进程加快的影响,房地产产业飞速发展,导致所需钢材原料增加,钢铁产业的二氧化碳排放量递增。2012年后,受产业结构调整的影响,钢铁产业发展趋势由高速发展逐步转向中高速发展,因此,2012—2019年能源结构强度的碳排放量总体呈现减少的

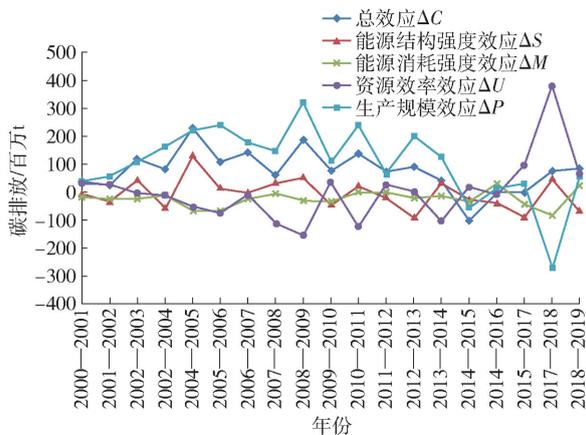


图2 中国钢铁产业碳排放的加法LMDI分解结果

趋势,其中2013年碳减排的幅度最大,减少了88.1百万t。

4.2.2 能源消耗强度效应

能源消耗强度效应对碳排放的影响整体呈现减弱趋势,是促进碳减排的主要因素。2018年,其碳排放减少量达到峰值,为85.2百万t二氧化碳。主要原因是2018年钢铁产业技术水平提高显著,钢铁产量大幅度增加,较上一年增加58.3百万t,而粗钢的能源总消耗较上一年仅增加0.08百万t。能源消耗强度效应对碳减排的贡献度为31.7%,随着我国科技水平的提高以及生产设备的改善,能源消耗强度对碳减排的贡献还有更大的上升空间。

4.2.3 资源效率效应

资源效率效应对碳排放的贡献呈现波动的趋势,资源效率效应采用单位铁矿石的产钢量衡量,其对碳排放的贡献可分为三个阶段:

1)2000—2002年资源效率效应对碳排放的贡献是正向。2001年中国加入世界贸易组织,钢铁产业发展迅速,铁矿石投入量由2001年的131.15百万t增加到2002年的148.68百万t;与此同时,粗钢的产量由2001年的151.63百万t增加到2002年的182.37百万t。因此,单位铁矿石的产钢量由1.16百万t上升至1.22百万t,资源效率效应提升。

2)2003—2016年资源效率效应对碳排放的贡献整体是负向。铁矿石投入量由2003年的182.24百万t上升至2016年的1080.12百万t;同时,粗钢产量由222.34百万t上升至807.61百万t。因此,单位铁矿石的产量由1.22百万t降至0.75百万t,资源效率效应下降。

3)2017—2019年资源效率效应对碳排放的贡

献又恢复为正向。铁矿石的投入量由2017年的1098.9百万t减少到2019年的967.92百万t;同时,粗钢产量从870.74百万t增加到995.42百万t。因此,单位铁矿石的产量由0.79百万t上升至1.03百万t,资源效率效应上升。

4.2.4 生产规模效应

生产规模效应对碳排放的贡献整体呈现正向,只有2015年和2018年是负向的。铁矿石的投入量整体呈现逐年递增的趋势,2017年达到最高值为1098.9百万t。生产规模效应对碳排放的贡献最大,贡献值高达1.35。2015年,由于国内钢铁消费进入平台期,铁矿石需求放缓,导致钢铁企业的利润水平降低,生产难以增长。加之国内钢铁产能过剩,市场供应超过需求,钢价不断走低,因此2015年生产规模效应与碳排放表现出负相关性。随着钢铁生产增长乏力,企业盈利能力减弱,各钢铁企业实行严格的成本控制,根据生产进度采购铁矿石,并保持低库存水平。在2017至2018年间,铁矿石的用量从1098.9百万t减少至938.27百万t,降低了160.6百万t。

4.3 钢铁行业碳减排建议

通过上述利用LMDI全分解模型,将我国钢铁行业的碳排放划分为能源结构强度效应、能源消耗强度效应、资源效率效应及生产规模效应,并对2000—2019年钢铁行业碳排放与驱动因素进行了详尽探究,从而得出以下建议:

1)加大钢铁产业的科研投入,减少能源总消耗。首先,钢铁企业在推进“双碳”的过程中要关注、参与开发和应用技术创新成果^[25],淘汰落后的生产设备,以提高钢铁产业的能源使用效率,降低钢铁产业的总体能耗水平。同时,引进先进节能环保技术,推广先进清洁生产技术,推动行业节能水平的提高^[26],从而提高能源的利用率。

2)针对钢铁产业进行能源结构的调整,以实现效能的提升和节能化。首要的策略是深化能源消费结构的优化^[27],降低煤炭使用率,增强可再生能源技术的应用,并推动能源结构的低碳化发展^[28]。其次,应促进替代能源的开发,使用清洁和高效的能源以降低对传统能源的依赖,并构建多元能源供应系统^[29],以优化能源结构^[30],并推动其向清洁化和低碳化方向发展。

3)创新工艺流程,促进钢铁产业低碳生产。首先,要把节能降碳作为源头治理的“牛鼻子”^[31],改

进转炉工艺操作,减少补吹和冷却调整操作量。同时,采用更高端的冶炼技术,有序引导电炉短流程发展^[32],最终提高资源效率效应,优化产业结构和产业层次,实现在铁矿石投入不变的情况下增大粗钢产量的目标。

4) 制定科学合理的发展规模,以兼顾经济发展与环境保护^[33]。粗钢产量是决定我国钢铁行业碳排放达峰的关键因素^[34]。首先,具有前瞻性的钢铁产业规划与布局至关重要。同时,钢铁产业发展矛盾需要由规模扩张转向提升能源效率和产品质量^[35],以更有效地推动低碳发展以及实现经济增长与碳排放的脱钩。

5 结论

本文旨在研究钢铁产业碳排放与经济发展的一致性及其碳排放的影响因素。分析了2000—2019年钢铁产业碳排放的情况,并采用Tapio脱钩模型对经济增长与碳排放之间的关联进行了深入探讨。同时,借助LMDI模型探究了钢铁产业碳排放的驱动要素,为我国钢铁产业的碳减排提供了科学的理论支持。主要结论如下:

1) 中国钢铁产业碳排放量逐年增加,增幅显著降低。中国钢铁产业发展和碳排放整体上呈弱脱钩关系,即随着钢铁产业的发展,其碳排放量也逐年增加,但碳排放量增长速度低于钢铁产业经济增长速度,但在2006—2010年(“十一五”时期)呈扩张连接关系。

2) 生产规模效应与资源效率效应是碳排放的正向驱动因素。其中,生产规模效应的正向推动力度是资源效率效应的74.7倍。生产规模效应成为主导碳排放上升的重要因素,对碳排放的增幅提供了正向贡献,其具体贡献指数达到了1.35。同样,资源效率效应也是催化碳排放上升的决定性因素,对碳排放的增长同样产生了正向的影响。然而,相对来说,资源效率效应对碳排放的影响相对较小,其贡献指数仅为0.02。

3) 能源消耗强度效应和能源结构强度效应均为碳排放增长的负向影响因素,其中能源消耗强度效应的负驱动程度约为能源结构强度效应的6倍。能源消耗强度效应对减碳贡献显著,其对碳排放增加的贡献率为负,贡献值达到-0.32。能源结构强度效应对碳排放亦有负向贡献,数值为-0.05。

[参考文献]

- [1] 王灿,张雅欣. 碳中和愿景的实现路径与政策体系[J]. 中国环境理,2020,12(6):58-64.
- [2] 冶金工业规划研究院. 中国钢铁工业节能低碳发展报告[EB/OL]. https://search.scsstl.org/lid3_33/29092502_405027607501.shtml.
- [3] 聂海亮. 关于推进钢铁行业绿色高质量发展的建议[J]. 中国能源,2021,43(1):39-41.
- [4] 赵志龙. 绿色低碳氢冶金技术进展及前景展望[J]. 绿色矿冶,2023,39(5):1-8.
- [5] 王杰,李治国,谷继建. 金砖国家碳排放与经济增长脱钩弹性及驱动因素——基于Tapio脱钩和LMDI模型的分析[J]. 世界地理研究,2021,30(03):501-508.
- [6] KOILAKOU E, HATZIGEORGIOU E, BITHAS K. Carbon and Energy Intensity of the USA and Germany. A LMDI Decomposition Approach and Decoupling Analysis[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023,30(5):12412-12427.
- [7] YASMEEN H, WANG Y, ZAMEER H, et al. Decomposing factors affecting CO₂ emissions in Pakistan: insights from LMDI decomposition approach[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(9).
- [8] 陈涛,李晓阳,陈斌. 中国碳排放影响因素分解及峰值预测研究[J]. 安全与环境学报,2024,24(1):396-406.
- [9] 侯丽朋,王琳,钱瑶,等. “双碳”目标下闽三角碳排放脱钩状态及驱动机制分析[J]. 生态学报,2022,42(23):9663-9676.
- [10] 陈四瑜,刘晶茹,孙光明. 基于脱钩指数的工业园区碳排放与经济发展关系[J]. 环境科学,2023,44(11):6412-6420.
- [11] ISIK M, SARICA K, ARI I. Driving forces of Turkey's transportation sector CO₂ emissions: An LMDI approach[J]. Transport Policy, 2020,97:210-219.
- [12] HOSSAIN M A, CHEN S. The decoupling study of agricultural energy-driven CO₂ emissions from agricultural sector development[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2021(C).
- [13] 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.
- [14] 翁钢民,李聪慧,潘越,等. 中国旅游业碳排放脱钩效

- 应及影响因素研究[J]. 地理与地理信息科学, 2021, 37(2): 114 - 120.
- [15] LIU L L, DING D H, HE J. Fiscal Decentralization, Economic Growth, and Haze Pollution Decoupling Effects: A Simple Model and Evidence from China[J]. Computational Economics, 2019, 54(4): 1423 - 1441.
- [16] SHI Y B, ZHAO X X, JIANG C L. Decoupling effect between economic development and environmental pollution: A spatial-temporal investigation using 31 provinces in China [J]. Energy & Environment, 2019, 30(5): 755 - 775.
- [17] 薛建春, 曹力博. 基于脱钩指数和 LMDI 模型的黄河流域能源低碳发展研究[J]. 前沿, 2023(1): 70 - 79.
- [18] 杨浩, 卢新海, 匡兵, 等. 城市紧凑度与碳排放强度的时空互动关系及驱动因素——以长株潭城市群为例[J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30(11): 2618 - 2629.
- [19] YANG J, CAI W, MA M, et al. Driving Forces of China's CO₂ Emissions From Energy Consumption Based on Kaya-LMDI Methods[J]. Science of Total Environment, 2020(711).
- [20] ANG B W. The LMDI approach to decomposition analysis: a practical guide[J]. Energy Policy, 2005, 33(7).
- [21] 张攀路, 都沁军, 张凯旋, 等. 中国钢铁行业碳排放: 达峰情景与中和路径 [J/OL]. 环境科学, 1 - 15 [2024 - 05 - 17]. <https://doi.org/10.13227/j.hjxk.202311110>.
- [22] 陈浩, 胡静茹, 王寿兵, 等. 基于 ARIMA-LEAP 模型的中国钢铁行业二氧化碳排放特征和减排路径研究 [J/OL]. 中国环境科学, 1 - 16 [2024 - 05 - 17]. <https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20240024.004>.
- [23] 中国财科院“企业成本”调研“环保成本”专题组, 邢丽, 许文, 等. 绿色低碳发展下的企业环保成本状况及变化趋势研究[J]. 财政科学, 2023, (12): 21 - 32.
- [24] 上官方钦, 殷瑞钰, 崔志峰, 等. 钢铁工业低碳化发展[J]. 钢铁, 2023, 58(11): 120 - 131.
- [25] 朱晓波. 范铁军: 中国钢铁正加速推进绿色低碳转型 [N]. 中国冶金报, 2023 - 03 - 30(002).
- [26] WANG X, LU C, SHI B, et al. Decomposition analysis, decoupling status, and future trends of energy consumption in China's iron and steel industry[J]. Environment, Development and Sustainability, 2022, 26(1): 885 - 908.
- [27] 任继球. “双碳”目标下钢铁产业压力挑战与发展建议[J]. 宏观经济管理, 2023(3): 27 - 34.
- [28] 张琦, 沈佳林, 许立松. 中国钢铁工业碳达峰及低碳转型路径[J]. 钢铁, 2021, 56(10): 152 - 163.
- [29] ZHANG J, SHEN J, XU L, et al. The CO₂ emission reduction path towards carbon neutrality in the Chinese steel industry: A review[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2023, 99: 107017.
- [30] 苏步新, 苏长永, 林严. 优化钢铁产业布局 助力高质量发展[J]. 中国冶金, 2022, 32(8): 1 - 6, 24.
- [31] 曲余玲, 狄嫣, 邢娜. 碳达峰、碳中和对钢铁行业的影响及路径分析[J]. 冶金经济与管理, 2021(4): 36 - 38.
- [32] 上官方钦, 崔志峰, 周继程, 等. 双碳背景下中国电炉流程发展战略研究[J]. 钢铁, 2024, 59(1): 12 - 21.
- [33] 吕为建, 王龙, 张浩, 等. 钢铁冶金尘泥提锌工艺的研究进展[J]. 钢铁, 2024, 59(1): 157 - 167.
- [34] 汪旭颖, 李冰, 吕晨, 等. 中国钢铁行业二氧化碳排放达峰路径研究[J]. 环境科学研究, 2022, 35(2): 339 - 346.
- [35] 上官方钦, 刘正东, 殷瑞钰. 钢铁行业“碳达峰”“碳中和”实施路径研究[J]. 中国冶金, 2021, 31(9): 15 - 20.

(下转第 14 页)

establishment of green factories not only helps to reduce environmental pollution and improve resource utilization efficiency, but also enhances the green image and reputation of enterprises, thereby boosting their competitiveness. This article summarized the key progress made in China's green factory construction in recent years, analyzed the major challenges facing future green factory development, and finally put forward relevant countermeasures and suggestions in areas such as strengthening the research and application of green and low-carbon technologies, further improving relevant policy systems, increasing promotion and coordination, and strengthening international cooperation.

Key words: carbon peak; carbon neutrality; green development manufacturing; green factory

(上接第 8 页)

The Decoupling Elasticity and Driving Factors of Carbon Emissions from China's Steel Industry

——Based on Tapio Decoupling Model and LMDI Decomposition Method

LI Ruqing

(School of Economics and Management, Yantai University, Yantai 264003, China)

Abstract: In this new developmental phase, it is of vital importance to elucidate the nexus between carbon emissions and growth in the steel industry, and delineate the carbon reduction pathway. This elucidation can catalyze high-quality development in the steel sector and advance the “Dual Carbon” objectives within this realm. By utilizing carbon emissions data from China's steel industry for the period 2000—2019, the Tapio decoupling model was deployed to scrutinize the relationship between carbon emissions and industry growth. The Logarithmic Mean Divisia Index (LMDI) method was adopted for the decomposition of carbon emission drivers. The study indicates that from 2000 to 2019, the decoupling state between carbon emissions and industry growth in China's steel industry was primarily weak, demonstrating relative stability. The production scale effect and resource efficiency effect are the chief propellants of rising carbon emissions, whereas the energy structure and consumption intensity effects serve to restrain emissions. To facilitate a reduction in carbon emissions in the steel industry and foster high-quality development under low carbon emissions, it is recommended to significantly augment research investment in the steel industry, adjust the industry's energy structure, innovate process flows, and envisage an evidence-based development scale.

Key words: steel industry; carbon emissions; Tapio decoupling model; Logarithmic Mean Divisia Index (LMDI) model; driving factors