

工业部门低碳化驱动因素与脱钩路径分析

——以安徽省为例¹

沈叶¹ 刘中侠¹ 邓翠翠¹ 王迪^{2*}

(1. 铜陵学院财税与公共管理学院, 安徽 铜陵 244000;

2. 中国矿业大学管理学院, 江苏 徐州 221116)

【摘要】: 减少工业部门碳排放是实现中国碳达峰、碳中和目标的关键路径之一。为识别工业碳排放的影响因素及其减排贡献, 厘清工业部门碳排放与经济发展间的脱钩路径, 以 2006 ~ 2019 年安徽省工业碳排放为例, 集成 C-D 生产函数、LMDI 模型与 Tapio 解耦模型量化评估了工业部门的低碳化驱动因素及其脱钩路径。结果表明: (1) 考察期内安徽省工业部门碳排放累计净增 1 076. 70 万 t, 碳排放总量呈阶段性变化并在 2013 与 2016 ~ 2018 年实现了减排效果。(2) 工业部门投资与工业技术水平导致了安徽省工业部门碳排放的快速增长, 而能源强度的减排作用最为显著, 能源结构、经济结构和劳动力投入在一定程度上抑制了工业 CO₂ 排放, 特别是劳动力投入呈现先促进后抑制的变化趋势。(3) 安徽省工业 CO₂ 排放与经济发展间的脱钩状态有 4 种: 弱解耦(2008 ~ 2012 和 2014 ~ 2015 年)、强解耦(2013 和 2016 ~ 2018 年)、扩张耦合(2006 ~ 2007 年)和扩张负解耦(2019 年); 抑制脱钩因素有技术水平和资本投入; 促进脱钩因素有能源强度和经济结构; 其中能源结构和劳动力逐渐由抑制脱钩转变为促进脱钩, 且劳动力投入因素变化最为显著。实现安徽省工业 CO₂ 减排, 建议进一步优化能耗结构与经济结构, 提升能源强度和劳动力投入水平, 并逐步转变安徽省工业经济发展模式, 提高工业技术水平及其资本利用效率。

【关键词】: 工业 CO₂ 排放; C-D 生产函数; LMDI 模型; Tapio 解耦模型

【中图分类号】: F299. 27; F592. 7 **【文献标识码】**: A **【文章编号】**: 1004- 8227(2022)12- 2597- 11

【DOI】: 10. 11870 / cjlyzyyhj202212004

经济发展与环境保护是满足人民美好生活的需要, 两者相辅相成, 缺一不可。改革开放以来, 工业经济凭借其在全面建设小康社会和现代化强国等方面不可替代的作用, 占据了我国国民经济发展的关键地位。然而随着工业经济的快速发展, 以 CO₂ 为主体的温室气体排放问题日益严峻, 环境容量资源开始出现“入不敷出”的前兆^[1], 以煤为主的能源结构和重工业化的产业结构是造成这一现象的主要原因^[2]。据《BP 世界能源统计年鉴》, 2019 年我国碳排放量达到 98. 3 亿 t, 占全球碳排放量的 28. 8%,

¹ **【收稿日期】**: 2022- 01- 05; **【修回日期】**: 2022- 05- 16

【基金项目】: 国家社会科学基金后期资助项目(19FGLB057); 国家自然科学基金项目(71974191); 中国矿业大学研究生教学改革项目(2021YJSJG059); 安徽省质量工程项目(2020wyxm161); 铜陵学院校级科研项目(2021tlyx11)

【作者简介】: 沈叶(1995 ~), 女, 助教, 主要研究方向为环境与生态管理. E- mail: msshene@163. com

* 通讯作者 E- mail: wangdi9605@163. com

其中工业生产排放 CO₂ 量达到 41 亿 t，占比为 39%^[3]。为应对这一现象，我国于 2020 年正式提出“2030 年实现碳达峰，2060 年实现碳中和”目标，然而我国目前仍处于工业发展阶段，CO₂ 减排对我国工业发展是一项严峻的挑战^[4]。因此，在工业可持续发展与双碳目标双重要求叠加的背景下，深入探究工业 CO₂ 减排的影响因素以及工业 CO₂ 排放与经济发展间的耦合效应，对实现经济发展与环境保护协调发展至关重要。

CO₂ 减排是促进人与自然和谐共生，推动构建人类命运共同体的迫切需求，但碳排放具有较强的空间聚集效应和溢出特征，因而实现减排目标并非是一个省市、一个国家，甚至是发展中国家的责任，而是全球各国的共同责任^[5, 6, 7, 8, 9]。由于发达国家在经济发展中走了“先污染后治理”的道路，因而在气候治理中有着不可推卸的责任^[10]。中国作为发展中国家，虽未被强制赋予减排义务，但习近平总书记指出，要加快构建“双碳”政策体系，积极参与气候变化谈判，展现了负责任大国担当。对此，我国从顶层设计和全局层面相继出台了各项减污降碳政策，注重综合治理、系统治理和源头治理，并将其落实到地方，各省市也相继颁布各具特色的减排政策，并不断探索区域协同及各省份间帮扶减排路径^[11, 12, 13]。

识别 CO₂ 排放关键影响因素是实现 CO₂ 有效减排的前提，诸多学者主要运用 Kaya 恒等式及 LMDI 模型对 CO₂ 排放影响因素进行分解分析，影响因素大体可分为人口^[14]、人均 GDP^[15]、经济增长^[16, 17]、能源强度^[18]、能源结构^[19]、产业结构^[20, 21]、碳排放强度^[22, 23]、技术水平^[24]等因素。虽然不同学者对影响 CO₂ 排放的因素持有不同的见解，但共识性的观点认为，能源强度、产业结构是 CO₂ 减排的关键因素，而经济增长则是导致 CO₂ 排放增加的主要因素^[25, 26]。对此，多数学者选取人均 GDP 或国民生产总值等经济指标，考察了区域经济增长对碳排放的促增作用。而事实上，经济增长是工业技术水平、人力资本、固定资产投资等生产要素投入和优化配置的结果，相关投入要素对碳排放的影响及其减排贡献需要予以进一步量化评估。为此，本文利用 C-D 生产函数对碳排放的 LMDI 模型予以拓展，并重点考察工业技术水平、资本投入和劳动力等要素投入对碳排放的影响效应。

高质量的经济增长不能再完全依赖于能源消耗和环境破坏，提高经济效益与有效控制 CO₂ 排放齐头并进，对实现工业可持续、低碳发展具有重要指导意义^[27]。目前关于 CO₂ 排放脱钩的研究已形成一定规模。不同学者对各影响因素对 CO₂ 排放与经济发展间的脱钩效应有不同的见解，例如：Shuai 等^[28]调查了 133 个国家经济增长与碳排放的脱钩情况，认为提高收入水平可以促进绝对脱钩；Wang 等^[29]针对我国东部、中部和西部三个地区展开研究，结果表明能源强度在脱钩工作中效果最弱；Zhu 等^[30]认为能源结构在促进运输业脱钩过程中效果最优，经济增长和人口规模则在一定程度上抑制其脱钩；Zhou^[31]指出减排技术水平对脱钩作用效果有限，应重点放在能源结构调整和产业升级上；Kan 等^[32]研究发现不同能源与 GDP 的脱钩程度不同，且部分能源受能源需求结构的影响。由上分析发现，提高收入水平、能源结构、产业升级等因素促进脱钩，而能源强度和减排技术水平对脱钩的作用有限，本文在此基础上，引入技术水平、投资投入、劳动力投入因素，针对能源大省安徽省工业部门 CO₂ 排放与经济发展间脱钩关系展开相关研究，识别促进工业 CO₂ 排放与经济发展脱钩的关键因素，为实现“双碳”目标提供针对性减排路径。

长江三角洲作为我国经济发展最为活跃的地区之一，近年来省市间发展不平衡、环境污染加剧等问题逐渐显露，在“双碳”目标和经济发展双重目标下，维持长江三角洲区域优势，实现其绿色发展、高质量发展一体化迫在眉睫^[33]。安徽省地处长江中下游，作为最后一个加入长江三角洲的省份，在三省一市中承担着承接东西的重要作用^[34]。作为能源大省，目前安徽省传统产业、重工业仍占据重要地位，以煤为主的化石能源消耗也造成了大量温室气体排放。据统计，2021 年安徽省工业能源消耗量达到 9 089.8 万 t 标准煤，造成了大量 CO₂ 排放，这为安徽省实现“双碳”目标带来了严峻挑战。因此本文以安徽省为研究对象，探究其工业 CO₂ 减排影响因素及工业 CO₂ 减排与经济发展间的脱钩关系对长江三角洲实现区域协同发展和治理环境污染具有重要意义。

1 研究方法数据来源

1.1 研究方法

1.1.1 C-D 生产函数

柯布-道格拉斯(C-D)生产函数理论被广泛运用于探讨投入产出关系^[35],为分析安徽省工业CO₂排放生产投入与产出间的函数关系,参考Liu等^[36]的做法,构建如下模型:

$$Y = AK^\alpha L^\beta \quad (1)$$

$$A_t = \frac{EVA_t}{K_t^\alpha L_t^{1-\alpha}} \quad (2)$$

式中:Y表示产出;A表示技术水平;K表示资本投入;L表示劳动力投入;EVA表示工业增加值;t表示年份; α 、 β 分别表示资本投入弹性系数和劳动力投入弹性系数,其中, $\alpha + \beta = 1$ 。

1.1.2 LMDI 模型

工业CO₂排放影响因素涉及生产生活的各方面,判断并评估CO₂排放环节的关键影响因素对实现了CO₂减排目标具有关键性作用。鉴于LMDI模型简单易操作,且能够消除分解过程中残差影响的优点^[37],参考Ang等^[38]和Dong等^[39]的做法,将C-D生产函数与LMDI模型结合,其数学表达式如下所示:

$$\begin{aligned} C_t &= \sum_i C_t^i \\ &= \sum_i \frac{C_t^i}{E_t^i} \cdot \frac{E_t^i}{E_t} \cdot \frac{E_t}{I_t} \cdot \frac{I_t}{EVA_t} \cdot EVA_t \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} C_t &= \sum_i C_t^i \\ &= \sum_i \frac{C_t^i}{E_t^i} \cdot \frac{E_t^i}{E_t} \cdot \frac{E_t}{I_t} \cdot \frac{I_t}{EVA_t} \cdot \frac{EVA_t}{K_t^\alpha L_t^{1-\alpha}} \cdot K_t^\alpha \cdot L_t^{1-\alpha} \\ &= \sum_i EE_t^i \cdot ES_t^i \cdot EI_t \cdot IS_t \cdot A_t \cdot K_t^\alpha \cdot L_t^{1-\alpha} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \Delta C_t &= C_t - C_{t-1} \\ &= \Delta EE_t^i + \Delta ES_t^i + \Delta EI_t + \Delta IS_t + \Delta A_t + \Delta K_t^\alpha + \Delta L_t^{1-\alpha} \end{aligned} \quad (5)$$

式中:t表示年份;C表示工业CO₂排放量;E_{it}表示工业部门i种能源的消耗量;E、I、EVA、A、K、L分别表示工业部门能源总消耗量、工业主营业务收入、工业增加值、技术水平、资本投入和劳动力投入;EE_{it}、ES_{it}、EI_t、IS_t分别表示碳排放因子、能源结构、能源强度、经济结构; ΔC_t 表示相邻两期工业CO₂排放量的变化差值; ΔEE_{it} 、 ΔES_{it} 、 ΔEI_t 、 ΔIS_t 、 ΔA_t 、 ΔK_t^α 、 $\Delta L_t^{1-\alpha}$ 分别表示碳排放因子、能源结构、能源强度、经济结构、技术水平、资本投入和劳动

力投入的减排效应。

其中：

$$\Delta EE_t^i = \sum_i \frac{C_t - C_{t-1}}{\ln C_t - \ln C_{t-1}} \times (\ln EE_t^i - \ln EE_{t-1}^i) \quad (6)$$

$$\Delta ES_t^i = \sum_i \frac{C_t - C_{t-1}}{\ln C_t - \ln C_{t-1}} \times (\ln \Delta ES_t^i - \ln \Delta ES_{t-1}^i) \quad (7)$$

$$\Delta EI_t = \sum_i \frac{C_t - C_{t-1}}{\ln C_t - \ln C_{t-1}} \times (\ln \Delta EI_t - \ln \Delta EI_{t-1}) \quad (8)$$

$$\Delta IS_t = \sum_i \frac{C_t - C_{t-1}}{\ln C_t - \ln C_{t-1}} \times (\ln \Delta IS_t - \ln \Delta IS_{t-1}) \quad (9)$$

$$\Delta A_t = \sum_i \frac{C_t - C_{t-1}}{\ln C_t - \ln C_{t-1}} \times (\ln \Delta A_t - \ln \Delta A_{t-1}) \quad (10)$$

$$\Delta K_t^\alpha = \sum_i \frac{C_t - C_{t-1}}{\ln C_t - \ln C_{t-1}} \times (\ln \Delta K_t^\alpha - \ln \Delta K_{t-1}^\alpha) \quad (11)$$

$$\Delta L_t^{1-\alpha} = \sum_i \frac{C_t - C_{t-1}}{\ln C_t - \ln C_{t-1}} \times (\ln \Delta L_t^{1-\alpha} - \ln \Delta L_{t-1}^{1-\alpha}) \quad (12)$$

由于各类能源碳排放因子在实际应用中一般恒等于 0, 通常不将其作为考虑的因素 [40]。即碳排放只受到能源结构、能源强度、经济结构、技术水平、资本投入和劳动力投入因素的影响, 即:

$$\begin{aligned}\Delta C_t &= C_t - C_{t-1} \\ &= \Delta ES_t^i + \Delta EI_t + \Delta IS_t + \Delta A_t + \Delta K_t^\alpha + \Delta L_t^{1-\alpha} \quad (13)\end{aligned}$$

1.1.3 Tapio 解耦模型

解耦概念是经济合作与发展组织于 2002 年核查各国经济发展与环境污染关系时提出的，而 Tapio 解耦模型是在解耦模型基础上进一步完善，由原有的二种解耦状态发展为 8 种^[41]，如表 1 所示。

表 1 解耦状态分类

解耦状态		ΔC	ΔGDP	Dt
去耦状态	强解耦	<0	>0	Dt<0
	弱解耦	>0	>0	0≤Dt<0.8
	隐形解耦	<0	<0	Dt>1.2
耦合状态	扩张解耦	>0	>0	0.8≤Dt≤1.2
	隐形耦合	<0	<0	0.8≤Dt≤1.2
负解耦状态	扩张负解耦	>0	>0	Dt>1.2
	强负解耦	>0	<0	Dt<0
	弱负解耦	<0	<0	0≤Dt<0.8

本文在 LMDI 模型基础上，结合 Tapio 解耦模型分析安徽省工业 CO₂ 排放与经济发展间的脱钩关系，进一步分析各影响因素对其脱钩关系的影响。参考 Zha 等^[42]的做法，具体计算公式如下所示：

$$D_t = \frac{\Delta C/C_0}{\Delta EVA/EVA_0} = \frac{EVA_0}{C_0} \times \frac{\Delta C}{\Delta EVA}$$

$$= \frac{EVA_0}{C_0} \times \frac{C_t - C_{t-1}}{EVA_t - EVA_{t-1}} \quad (14)$$

$$D_t = \frac{\Delta C/C_0}{\Delta EVA/EVA_0} = \frac{EVA_0}{C_0} \times \frac{\Delta C}{\Delta EVA}$$

$$= \frac{EVA_0}{C_0} \times \frac{\Delta ES_t^i + \Delta EI_t + \Delta IS_t + \Delta A_t + \Delta K_t^\alpha + \Delta L_t^{1-\alpha}}{\Delta EVA}$$

$$= \frac{EVA_0}{C_0} \times \frac{\Delta ES_t^i}{\Delta EVA} + \frac{EVA_0}{C_0} \times \frac{\Delta EI_t}{\Delta EVA} + \frac{EVA_0}{C_0} \times \frac{\Delta IS_t}{\Delta EVA} +$$

$$\frac{EVA_0}{C_0} \times \frac{\Delta A_t}{\Delta EVA} + \frac{EVA_0}{C_0} \times \frac{\Delta K_t^\alpha}{\Delta EVA} + \frac{EVA_0}{C_0} \times \frac{\Delta L_t^{1-\alpha}}{\Delta EVA}$$

$$= d_t^1 + d_t^2 + d_t^3 + d_t^4 + d_t^5 + d_t^6 \quad (15)$$

式中：C0、EVA0 分别代表基年 CO2 排放量和工业增加值；d1tt1、d2tt2、d3tt3、d4tt4、d5tt5 和 d6tt6 分别代表能源结构、能源强度、经济结构、技术水平、资本投入和劳动力投入对解耦弹性的贡献率。

1.2 数据来源

本文以 2006~2019 年安徽省工业 CO2 排放为研究对象，分品种工业能源消耗数据来源于 2006~2019 年《中国能源统计年鉴》；分品种工业 CO2 排放量是通过工业能源消耗量与碳排放因子核算得出(表 2)。工业增加值、工业主营业务收入、资本投入和劳动力投入等相关数据来源于 2006~2019 年《安徽统计年鉴》，其中，工业增加值、工业主营业务收入均以 2006 年年不变价格计算。

表 2 各种能源碳排放因子^[43](t/tce)

能源品种	原煤	洗精煤	其他洗煤	焦炭	焦炉煤气	其他煤气	其他焦化产品
碳排放因子	0.755 9	0.755 9	0.755 9	0.855 0	0.354 8	0.354 8	0.644 9
能源品种	原油	汽油	煤油	柴油	燃料油	液化石油气	天然气
碳排放因子	0.5857	0.553 8	0.571 4	0.592 1	0.618 5	0.504 2	0.448 3

2 分析与讨论

2.1 安徽省工业 CO₂ 排放量分析

工业发展在国民经济发展中占主导地位，图 1 展示了安徽省工业增加值由 2006 年的 1 885.64 亿元上涨到 2019 年的 10 655.72 亿元，年平均上涨率达到 14.25%。然而工业发展必然伴随着能源消耗和污染气体的排放，研究期间各种能源消耗所产生的 CO₂ 排放量整体上呈现逐年增加趋势，由 2006 年的 2 413.78 万 t 增长到 2019 年的 3 084.90 万 t，年增长率达到 1.90%。这主要是因为安徽省定位的转变，由“农业大省”转变为“工业大省”。

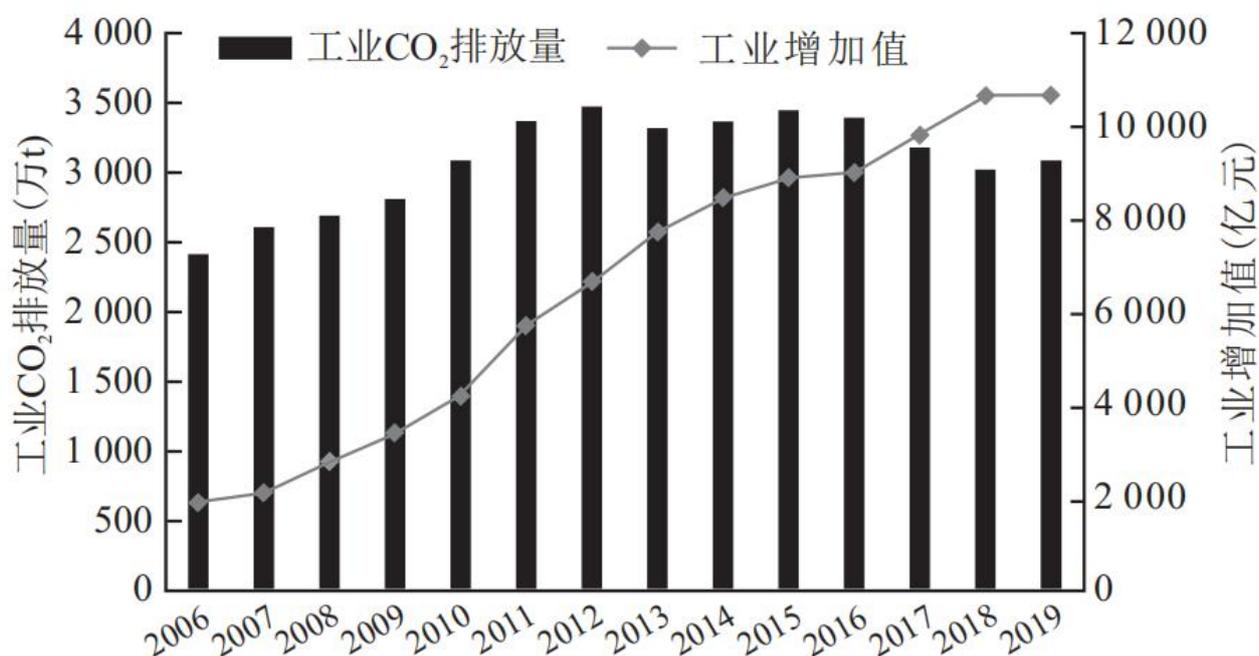


图 1 安徽省工业 CO₂ 排放和工业增加值变化

Fig. 1 Change of added value and CO₂ emission of Anhui's industrial sector

结合图 1 和表 3 可知，在 2006~2019 年，工业 CO₂ 排放量逐年增加，不同类型能源所产生的 CO₂ 量呈现较大差异。其中，原煤(27 580.12 万 t)、焦炭(11 401.60 万 t)和其他洗煤(1 168.62 万 t)所造成的 CO₂ 排放量最多，主要源于煤炭被广泛用于生产生活中，例如发电、建材、一般工业锅炉等；其次为焦炉煤气、天然气、型煤、洗精煤和柴油；最后是其他煤气、炼厂干气、燃料油、焦化产品、汽油、液化石油气、原油和煤油。目前，洁净环保的天然气已逐步走进人们的生产生活中，但在一次能源消费中所占比重仅为 6%左右，远低于世界能源消费结构所规定的 24%，因此要加快能源结构调整，大力发展天然气等清洁能源的使用。

2.2 安徽省工业 CO₂ 因素分解分析

本文以上一年为基准，运用 C-D 函数和 LMDI 完全分解模型对 2006~2019 年安徽省工业 CO₂ 排放影响因子进行分解分析，分解结果如表 4 所示。

在研究期间，各种因素对工业 CO₂ 排放的影响各有差异。整体看来，2006~2019 年安徽省能源结构、经济结构、技术水平、资本投入和劳动力投入均对工业 CO₂ 排放起到了正向促进作用。其中资本投入对工业 CO₂ 排放的促增作用最大，累计排放达到 2 448.14 万 t，占比为 35.67%；这主要由于安徽省于 2007 年指出：建设工业强省，努力走出具有安徽省特色的新型工业化道路，这导致政府加大资本投入，然而技术水平相对落后及政府并未重视工业与环境协调发展是导致工业 CO₂ 大量排放的重要原因。其次为技术水平、能源结构和劳动力投入，占比分别为 29.70%、15.69%和 15.49%，技术水平跟不上工业发展水平，能源基础设施的不完善是生产技术无法广泛应用的重要原因之一，另一方面，缺少对于脱碳技术的研发和创新。目前，学者们提出可通过碳捕获、碳转移等方法减少 CO₂ 排放^[44]。值得注意的是，劳动力投入对工业 CO₂ 排放的影响由促增作用逐渐转变为促减作用，这主要是由于随着节能减排教育的普及，劳动力有了相关层面的意识，这促进了在生产过程中进行有效减排。最后为经济结构，占比分别为 3.46%，这与 Wen 等^[45]认为能源结构和经济结构促进工业 CO₂ 排放的结论一致。安徽省作为能源大省，能源生产结构仍以煤炭为主，结合目前发展现状仍很难较大程度减少煤炭在低碳能源中的使用占比，同时资本的大量涌入虽然带来了经济增长，但也是促进工业 CO₂ 排放的关键因素。仅能源强度在很大程度上抑制了工业 CO₂ 排放，累计减排达到 4 733.09 万 t，说明安徽省传统工艺不断转型升级，由原有的高能耗、低技术逐步向低能耗、高技术方向发展，能源利用率得到高效、集约发展，工业经济质量和效益均有所提升，这与 Yang^[46]和胡怀敏^[47]指出的能源强度对减少全国 CO₂ 排放量贡献最大结论保持一致。加快能源结构转型，调整工业结构在一定程度上能够促进工业 CO₂ 减排。

表 3 安徽省工业各种能源消耗产生的 CO₂ 排放量(104t) 导出到 EXCEL

年份	原煤	洗精煤	其他洗煤	焦炭	焦炉煤气	其他煤气	焦化产品	原油
2006	1 597.36	72.02	125.31	496.28	29.13	0.21	22.78	0.11
2007	1 586.21	31.45	187.89	672.50	39.88	0.20	27.41	3.00
2008	1 578.99	53.17	238.77	706.98	34.38	0.63	7.97	2.28
2009	1 603.14	58.83	297.87	711.18	41.18	0.19	9.74	1.32
2010	2 031.84	58.46	94.36	755.94	35.55	7.14	10.07	0.79
2011	2 262.83	70.06	98.32	787.46	37.36	8.48	5.98	1.35
2012	2 383.52	85.44	9.95	827.59	38.30	8.01	7.18	0.79
2013	2 160.69	91.92	10.15	871.58	41.22	7.78	8.41	0.74
2014	2 171.23	113.47	8.69	884.31	41.44	7.90	7.89	1.02
2015	2 183.73	98.77	6.84	967.40	41.38	7.21	6.56	1.07
2016	2 192.32	0.00	27.60	967.29	43.77	6.26	9.15	0.67
2017	2 089.79	0.00	21.78	871.19	33.86	6.04	10.12	0.85
2018	1 870.04	0.00	20.76	917.29	46.39	3.27	10.58	0.74
2019	1 868.44	0.00	20.32	964.62	56.64	2.91	8.90	0.66

总量	27 580.12	72.02	1 168.62	11 401.60	560.47	66.22	152.75	15.40
年份	汽油	煤油	柴油	燃料油	液化石油气	天然气	总量	
2006	7.15	0.47	36.47	19.09	1.31	6.10	2 413.78	
2007	5.85	0.43	27.26	11.70	1.44	11.54	2 606.74	
2008	6.92	0.33	30.95	10.25	1.32	14.81	2 687.74	
2009	6.35	0.78	37.19	11.86	1.58	24.93	2 806.15	
2010	6.50	0.56	35.99	9.52	2.29	35.76	3 084.78	
2011	6.98	0.45	40.69	9.07	2.26	36.09	3 367.37	
2012	7.77	0.37	49.67	6.13	0.99	44.53	3 470.24	
2013	7.72	0.29	53.22	5.03	0.90	55.31	3 314.97	
2014	7.42	0.25	51.06	4.76	0.73	62.98	3 363.14	
2015	6.81	0.25	48.79	6.66	0.63	66.41	3 442.52	
2016	6.55	0.27	49.31	12.63	1.10	74.36	3 391.27	
2017	6.29	0.24	47.31	9.70	0.88	79.31	3 177.37	
2018	4.72	0.21	46.45	4.51	1.37	93.36	3 019.67	
2019	3.61	0.45	47.11	3.53	1.21	106.48	3 084.90	
总量	90.65	5.36	601.47	124.44	18.00	711.97	43 230.65	

表 4 安徽省工业 CO2 排放因子分解(104t) 导出到 EXCEL

年份	能源结构	能源强度	经济结构	技术水平	资本投入	劳动力投入	综合效应
2006	308.06	-237.10	494.32	-193.49	144.03	94.63	610.45
2007	192.96	-92.94	-302.30	139.20	308.48	136.70	382.10
2008	81.00	-662.53	60.50	118.74	234.40	310.73	142.83
2009	118.41	-423.11	150.46	-17.32	237.65	184.63	250.72
2010	278.63	-290.00	-103.74	166.20	270.24	269.88	591.22
2011	282.60	-714.00	88.53	765.56	118.47	29.52	570.67
2012	102.87	-419.31	-28.33	125.67	161.93	259.87	202.68

2013	-155.28	-642.41	91.83	86.74	197.69	126.39	-295.05
2014	48.18	-247.26	23.77	94.14	149.62	39.99	108.44
2015	80.70	-102.28	196.86	-142.64	149.53	-35.46	146.72
2016	44.93	-86.09	-166.25	136.56	80.86	-13.30	-3.28
2017	-213.90	-492.60	-9.66	307.11	112.15	-123.67	-420.58
2018	-157.70	-396.14	1.69	174.50	198.24	-119.15	-298.55
2019	65.23	72.68	-259.97	277.40	84.84	-97.52	142.67
合计	1 076.70	-4 733.09	237.71	2 038.36	2 448.14	1 063.24	1 076.70

从时间维度，结合表 4 和图 2 可知：除了 2013 年(-295.05 万 t)、2016 年(-3.28 万 t)、2017 年(-420.58 万 t)和 2018 年(-298.55 万 t)达到了减排效果，其余各年均未实现。在此期间，能源强度对各年工业 CO₂ 排放均起到了抑制作用。就 2013 年而言，能源结构和能源强度均抑制工业 CO₂ 排放，贡献率分别为 -155.28 万 t 和 -642.41 万 t，这主要由于《安徽省商务厅关于做好 2013 年度节能减排工作的通知》中指出要高度重视流通领域节能减排工作，转变经济发展方式。就 2016~2018 年而言，能源强度和劳动力投入均抑制其排放，各年累计贡献率占比分别为 -30.28%、-1.47% 和 -1.73%，而经济结构在 2016 年(-66.25 万 t)和 2017 年(-13.30 万 t)抑制其排放，占比分别为 -50.65% 和 -0.02%；能源结构在 2017 年(-213.90 万 t)和 2018 年(-157.70 万 t)抑制其排放，占比分别为 -0.51% 和 -0.53%。这主要由于“十三五”规划强调要推动绿色低碳循环发展，全面完成节能减排约束型目标。

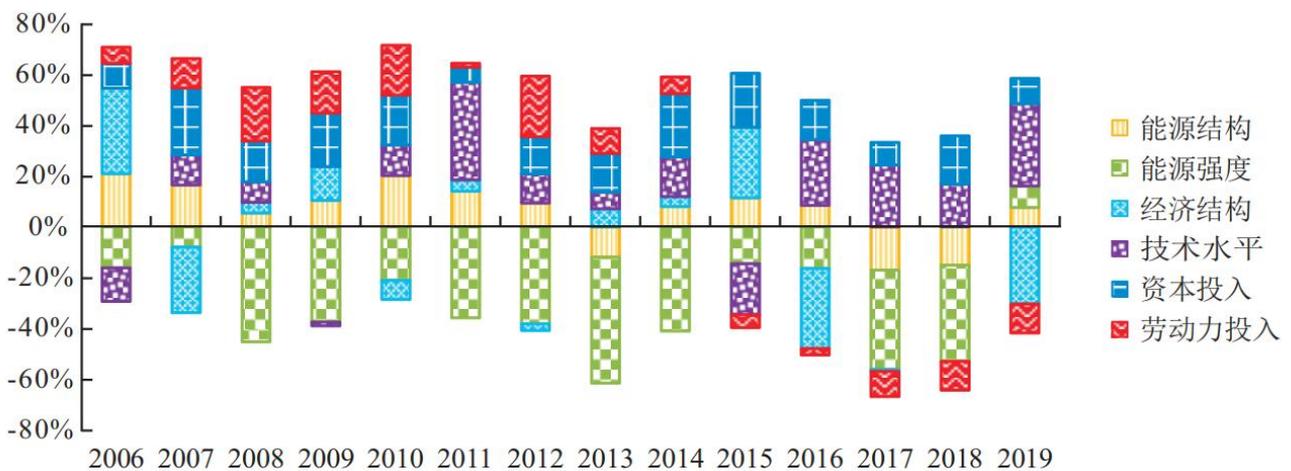


图 2 安徽省工业 CO₂ 排放影响因素减排贡献率占比

Fig. 2 Contribution rate of CO₂ emission of Anhui's industrial sector

在考察期间，工业 CO₂ 排放效应在三个五年期间呈现先减后增变化趋势，十一五期间(2006~2010 年)，工业 CO₂ 排放综合效应变化的下降率和增长率分别为 76.60%和 75.84%，主要是能源强度、经济结构和技术水平抑制工业 CO₂ 排放，其余各因素均促进其排放，这主要是由于安徽省逐渐重视工业生产，以此带动经济发展，在一定程度忽视了对环境的保护。十二五期间(2011~

2015年):在此期间的下降率和增长率分别为151.70%和149.73%,增长率低于下降率,主要是由于除能源强度外,其余各因素基本上呈现促进排放效应。十三五期间(2015~2019年),下降率和增长率分别为99.23%和394.79%,增长远远大于下降率,这主要是因为2019年仅有经济结构和劳动力投入抑制工业CO₂排放。这主要由于前期安徽省大力发展工业项目,推动城市基础设施建设,加快融入长江三角洲的脚步,在实现经济增长的同时忽略了工业行业的绿色发展,而后期安徽省工业行业逐步向绿色、集约型行业发展,实现经济与环境协调发展。

结合表4和图3可知:在2006~2019年,能源强度在每年工业CO₂减排起到了举足轻重的作用,最大减排力度为2011年,贡献率达到-15.09%。工业能源消耗量呈现先增后减,再增再减的变化趋势,在2006~2012、2013~2015及2018~2019年呈现上涨趋势,年均增长率分别为:6.26%、1.82%和2.59%;在2012~2013及2015~2018年呈现下降趋势,年均下降趋势分别为:-4.29%和-4.01%。在此期间,工业增加值呈现逐年上涨趋势,年均增长率为14.25%。这主要由于安徽省工业行业由前期的快速发展向后期的高质量、健康发展转变,加快能源结构转变,大力倡导清洁能源使用对实现“双碳”目标具有重要意义。

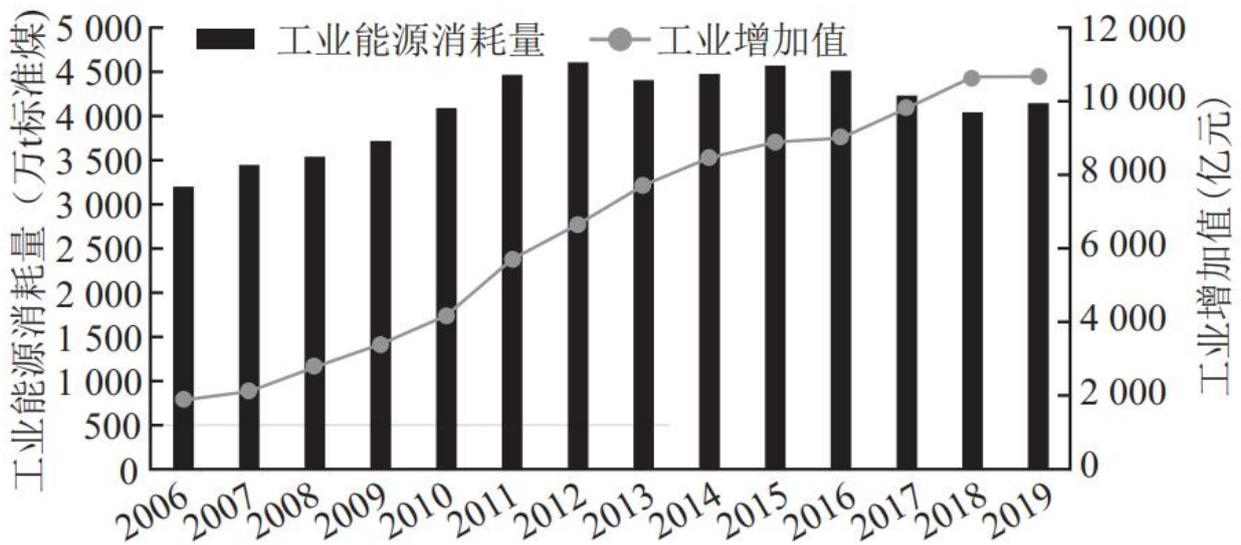


图3 安徽省工业增加值和能源消耗变化

Fig. 3 Change of added value and energy consumption of Anhui's industrial sector

2.3 安徽省工业CO₂排放解耦分析

解耦模型被用来计算2006~2019年工业CO₂排放与工业增加值的相关系数,整体来看,安徽省工业CO₂排放和工业经济增长间呈现脱钩状态,而不同年份的解耦状态呈现以下4种状态:弱解耦、强解耦、扩张耦合和扩张负解耦(图4)。2006~2012、2014~2015和2019年安徽省工业CO₂排放和工业增加值的变化均为正值,说明随着经济产出的增加CO₂排放也随之增加,其中2006~2007年呈现扩张耦合状态,主要原因2007年安徽省的工作会议指出要加快亿吨级煤炭基地建设,打造“工业强省”战略规划,经济增长主要源于工业建设,化石能源的大量消耗导致CO₂排放增加。2008~2012和2014~2015年呈现弱解耦状态,此时工业CO₂排放随着经济增长而缓慢增加,这个时间安徽省颁布节能减排低碳发展,全面实施“12345”节能行动计划,优化能源消费结构及配置,实现能源消费强度和总量“双控”目标任务,企业正逐步进行技术优化和产业结构调整,力争实现“十二

五”减排总目标。2013 和 2016~2018 年呈现强解耦状态，此时工业 CO₂ 排放随着经济增长而减少，此时进入“十三五”发展阶段，安徽省加大了节能减排政策的执行力度，关闭排污不达标企业，更新生产技术，转变能源结构。然而迈入 2019 年，则呈现扩张负解耦状态，此时经济增长缓慢，但污染大幅度增加，这主要源于种经济发展影响安徽省人民群众的健康安全，不利于可持续发展。这主要源于单位工业增加值所消耗的能源量高于 2018 年，政府及相关企业正不断探索技术革新以期减少工业生产过程中的 CO₂ 排放量。

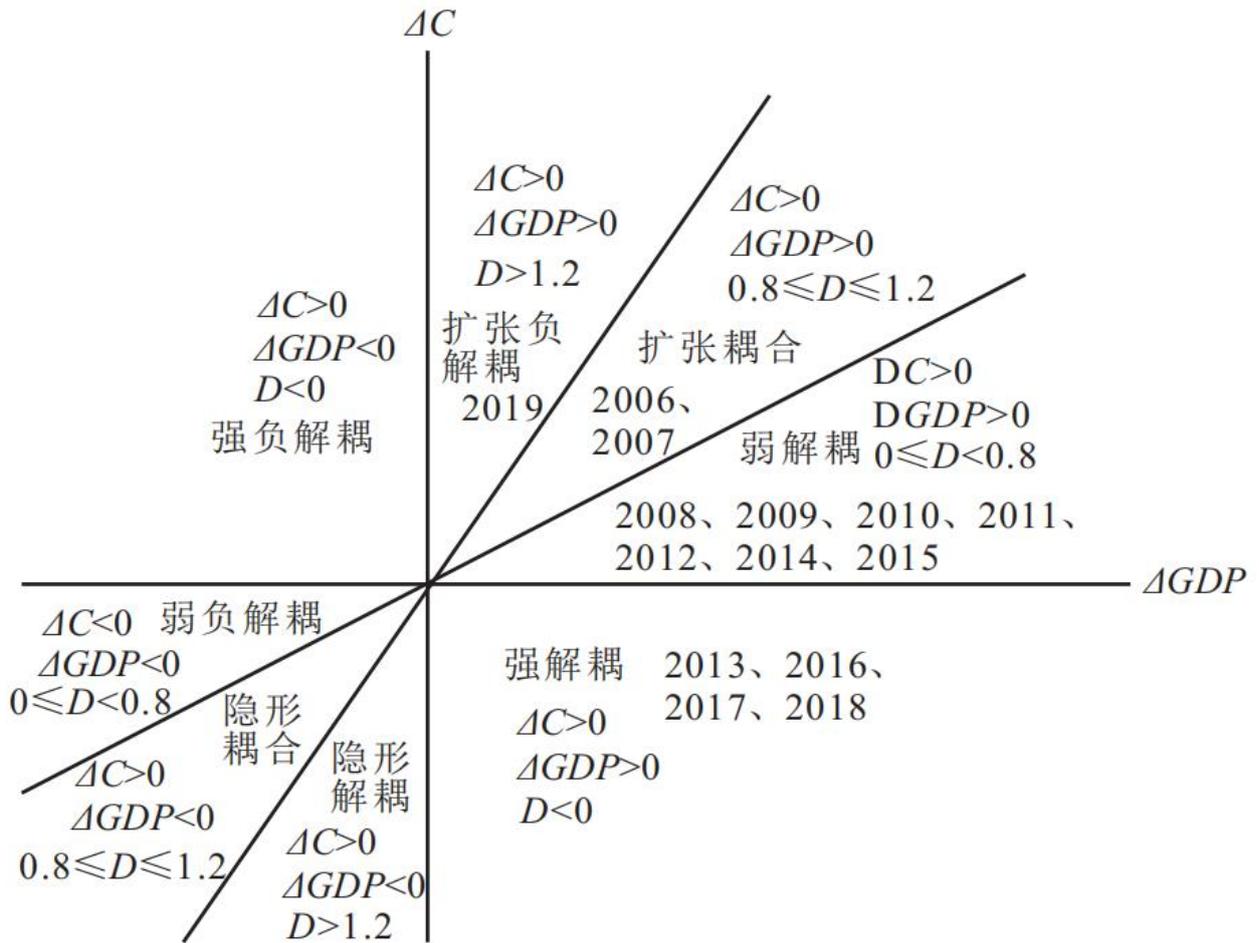


图 4 安徽省工业 CO₂ 排放和工业增加值解耦状态

Fig. 4 Decoupling state of CO₂ emission and added

运用 LMDI 分解技术量化评估分析导致安徽省工业 CO₂ 排放与增加值脱钩的影响因素，其结果如表 5 所示。整体看来，能源强度和经济结构促进安徽省工业 CO₂ 排放与工业经济脱钩；能源结构和劳动力逐渐由抑制脱钩转变为促进脱钩，其中劳动力投入因素变化最为显著，总贡献率达到 -2.79%，主要是近年来加大了对技术人员教育培养的力，重视技术人员思维和技术创新，另外，国家和政府加快能源结构调整，推广清洁能源的广泛使用，优化产业结构。而技术水平和资本投入在研究期间对脱钩过程产生了抑制作用，主要源于安徽省乃至全国仍以化石能源为主要能源，清洁能源的开发和推广仍面临巨大的挑战，同时能源消耗过程中脱碳技术的相对落后是造成 CO₂ 大量排放的主要原因。因此，要想减少安徽省工业 CO₂ 排放，实现“双碳目标”，就应该寻求稳定的投资方法，稳步优化劳动力，加快技术革新，Jeffrey 等[48]也指出工业完全脱碳对于实现“双碳”目标，应对温室效应至关重要。

表 5 安徽省工业 CO2 排放因子对解耦弹性的贡献

年份	能源结构 (d1)	能源强度 (d2)	经济结构 (d3)	技术水平 (d4)	资本投入 (d5)	劳动力投入 (d6)	综合效应 (D)
2006	0.54	-0.42	0.87	-0.34	0.25	0.17	1.07
2007	0.60	-0.29	-0.95	0.44	0.96	0.43	1.19
2008	0.09	-0.70	0.06	0.13	0.25	0.33	0.15
2009	0.13	-0.48	0.17	-0.02	0.27	0.21	0.28
2010	0.25	-0.26	-0.09	0.15	0.24	0.24	0.53
2011	0.13	-0.33	0.04	0.35	0.05	0.01	0.26
2012	0.08	-0.31	-0.02	0.09	0.12	0.19	0.15
2013	-0.10	-0.43	0.06	0.06	0.13	0.08	-0.20
2014	0.05	-0.23	0.02	0.09	0.14	0.04	0.10
2015	0.13	-0.17	0.32	-0.23	0.25	-0.06	0.24
2016	0.31	-0.60	-1.16	0.96	0.57	-0.09	-0.02
2017	-0.18	-0.42	-0.01	0.26	0.10	-0.11	-0.36
2018	-0.13	-0.33	0.00	0.15	0.17	-0.10	-0.25
2019	2.77	3.09	-11.03	11.77	3.60	-4.14	6.06
2006-2019	4.66	-1.89	-11.72	13.85	7.10	-2.79	9.22

3 结论与建议

安徽省作为最后一个加入长江三角洲的省份，在三省一市中承担着承接东西的重要作用，因此本文综合运用 C-D 生产函数和 LMDI 模型对 2006~2019 年安徽省工业 CO2 排放影响因素进行分解，将生产技术水平、资本投入和技术投入因素纳入考虑范畴，考察排放强度、能源结构、能源强度、经济结构、生产技术水平、资本投入和劳动力投入对安徽省工业 CO2 减排的影响效应；并运用 Tapio 解耦模型量化评估各影响因素对工业 CO2 排放与工业经济间脱钩弹性的贡献，研究发现：

(1) 工业经济发展必然导致工业 CO2 排放增加，2006~2019 年，工业 CO2 排放量由 2 413.78 万 t 增长到 3 084.90 万 t，年增长率达到 1.90%。能源消耗是造成这一现象的主要原因，其中由原煤、焦炭和其他洗煤所造成的 CO2 量最多，总占比达到 94%。

(2) 安徽省工业 CO2 排放影响因素的减排贡献存在差异。整体看来，能源强度抑制工业 CO2 排放，累计减排效应达到 4 733.09 万 t，于 2011 年减排力度最大，贡献率占比达到 -15.09%；技术水平、资本投入均促进工业 CO2 排放；而能源结构、经济结构和劳动力投入在一定程度上抑制了工业 CO2 排放，特别是劳动力投入呈现先促增后促减的变化趋势。从时间维度来看，除了 2013 和 2017~2018 年达到了减排效果，其余各年均未实现。

(3)量化安徽省工业 CO₂ 排放与工业经济间的脱钩弹性，得到四种脱钩状态：弱解耦(2008~2012 和 2014~2015 年)、强解耦(2013 和 2016~2018 年)、扩张耦合(2006~2007 年)和扩张负解耦(2019 年)。抑制脱钩因素有技术水平和资本投入；促进脱钩因素有能源强度和经济结构；其中能源结构和劳动力投入逐渐由抑制脱钩转变为促进脱钩，其中劳动力投入因素变化最为显著。

通过以上研究分析，本文提出促进安徽省工业 CO₂ 减排及实现工业行业与环境协调发展的建议：

(1)优化能源消费结构及配置，坚持能源消费强度和 CO₂ 排放总量“双控”目标。安徽省政府应建立健全企业 CO₂ 排放监督机制；完善能源减排基础设施建设；优化企业资金配置，加大技术人员投资，提高节能减排技术研发与创新，增强技术人员节能减排意识；加快企业技术优化和产业结构调整，在经济快速发展的同时产生较少的 CO₂ 排放。

(2)转变工业经济发展模式，逐步向绿色、集约型产业发展。重视供给侧改革，加快传统工艺的转变，淘汰落后产能、高消耗设备；优化经济结构，加快能源转型，加大对使用清洁能源的宣传力度；进一步优化投资结构，遏制盲目投资和低水平重复建设，不断调整工业投资内部结构。

需要指出的是，本文通过识别安徽省工业 CO₂ 减排影响因素，探究安徽省工业 CO₂ 排放与工业经济间的解耦状态及其影响因素，可为区域在经济发展与环境保护双重要求下实现“双碳”目标提供科学参考。但同时仍存在以下不足之处：(1)未考虑安徽省工业 CO₂ 排放存在的空间溢出效应，因此不能揭示各区域间工业 CO₂ 减排的协同治理路径，未来需对其进行更深入的研究；(2)由于数据可获取性的制约，未考虑到安徽省城市、县级层面的工业 CO₂ 排放，未来可构建空间多层次模型。

参考文献

[1] 倪受彬. 碳排放权权利属性论——兼谈中国碳市场交易规则的完善[J]. 政治与法律, 2022(2):2-14. NI S B. On the right attribute of carbon emission right: Also on the improvement of carbon market trading rules of China[J]. Political Science and Law, 2022(2):2-14.

[2] 王迪, 沈叶, 聂锐, 等. 城市大气污染排放区域差异与减排路径研究——以安徽省工业 SO₂ 排放为例[J]. 安全与环境学报, 2019, 19(4):1367-1374. WANG D, SHEN Y, NIE R, et al. Regional differences in urban air pollution and its reduction pathways: Evidence from industrial SO₂ emissions in Anhui Province[J]. Journal of Safety and Environment, 2019, 19(4):1367-1374.

[3] BP 公司. BP 世界能源统计年鉴[R]. 北京: BP 公司, 2020. BP COMPANY. BP: Statistical review of world energy[J]. Beijing: BP company, 2020.

[4] KHEZRI M, HESHMATI A, KHODAEI M. Environmental implications of economic complexity and its role in determining how renewable energies affect CO₂ emissions[J]. Applied Energy, 2022, 306:117948.

[5] OZGUR O, YILANCI V, KONGKUAH M. Nuclear energy consumption and CO₂ emissions in India: Evidence from fourier ARDL bounds test approach[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2021, 54(5):1657-1663.

[6] HASANZADEH SARAY M, BAUBEKOVA A, GOHARI A, et al. Optimization of Water-Energy-Food nexus considering CO₂ emissions from cropland: A case study in northwest Iran[J]. Applied Energy, 2022, 307:118236.

-
- [7] LOVCHA Y, PEREZ-LABORDA A, SIKORA I. The determinants of CO₂ prices in the EU emission trading system[J]. *Applied Energy*, 2022, 305:117903.
- [8] ABBASI K R, ADEDOYIN F F, ABBAS J, et al. The impact of energy depletion and renewable energy on CO₂ emissions in Thailand: Fresh evidence from the novel dynamic ARDL simulation[J]. *Renewable Energy*, 2021, 180:1439–1450.
- [9] MIURA T, TAMAKI T, KII M, et al. Efficiency by sectors in areas considering CO₂ emissions: The case of Japan[J]. *Economic Analysis and Policy*, 2021, 70:514–528.
- [10] 杨博文. 习近平新发展理念下碳达峰、碳中和目标战略实现的系统思维、经济理路与科学路径[J]. *经济学家*, 2021(9):5–12. YANG B W. The systematic thinking, economic logic and scientific path for the realization of carbon summit and carbon neutral target strategy under Xi Jinping' s new development concept[J]. *Economist*, 2021(9):5–12.
- [11] XU H T, PAN X F, GUO S C, et al. Forecasting Chinese CO₂ emission using a non-linear multi-agent intertemporal optimization model and scenario analysis[J]. *Energy*, 2021, 228:120514.
- [12] WEI W, ZHANG X Y, ZHOU L, et al. How does spatiotemporal variations and impact factors in CO₂ emissions differ across cities in China? Investigation on grid scale and geographic detection method[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 321:128933.
- [13] YX H, LIANG Z F, FAN J J, et al. Spatial decomposition of city-level CO₂ emission changes in Beijing-Tianjin-Hebei[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 296:126613.
- [14] ACHOUR H, BELLOUMI M. Decomposing the influencing factors of energy consumption in Tunisian transportation sector using the LMDI method[J]. *Transport Policy*, 2016, 52:64–71.
- [15] CHEN J D, WANG P, CUI L B, et al. Decomposition and decoupling analysis of CO₂ emissions in OECD[J]. *Applied Energy*, 2018, 231:937–950.
- [16] REN 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] SHAO S, YANG L L, GAN C H, et al. Using an extended LM-DI model to explore techno-economic drivers of energy-related industrial CO₂ emission changes: A case study for Shanghai (China) [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 55:516–536.
- [18] FERREIRA A, PINHEIRO M D, BRITO J, et al. Combined carbon and energy intensity benchmarks for sustainable retail stores[J]. *Energy*, 2018, 165:877–889.
- [19] ZHANG W, WANG N. Decomposition of energy intensity in Chinese industries using an extended LMDI method of production element endowment[J]. *Energy*, 2021, 221:119846.
- [20] LÖSCHEL A, POTHEN F, SCHYMURA M. Peeling the onion: Analyzing aggregate, national and sectoral energy

intensity in the European Union[J]. *Energy Economics*, 2015, 52:S63-S75.

[21] VUJOVIĆ T, PETKOVIĆ Z, PAVLOVIĆ M, et al. Economic growth based in carbon dioxide emission intensity[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2018, 506:179-185.

[22] PRETIS F, ROSER M. Carbon dioxide emission-intensity in climate projections: Comparing the observational record to socio-economic scenarios[J]. *Energy*, 2017, 135:718-725.

[23] XIE X, LIN B Q. Understanding the energy intensity change in China's food industry: A comprehensive decomposition method[J]. *Energy Policy*, 2019, 129:53-68.

[24] LIU M Z, ZHANG X X, ZHANG M Y, et al. Influencing factors of carbon emissions in transportation industry based on CDF function and LMDI decomposition model: China as an example[J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2021, 90:106623.

[25] CHEN L, YANG Z. A spatio-temporal decomposition analysis of energy-related CO₂ emission growth in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 103:49-60.

[26] 王迪, 和维, 聂锐. 中国 2030 年 CO₂ 排放情景预测与减排潜力分析[J]. *系统工程学报*, 2019, 34(6):721-735. WANG D, HE W, NIE R. China's CO₂ emission scenario prediction and emission reduction potential analysis in 2030[J]. *Journal of Systems Engineering*, 2019, 34(6):721-735.

[27] 张纯. 安徽工业经济增长与能源碳排放脱钩研究[J]. *河南科技大学学报(社会科学版)*, 2022, 40(1):52-59. ZHANG C. Research on decoupling between industrial economic growth and energy carbon emission in Anhui Province[J]. *Journal of Henan University of Science & Technology (Social Science)*, 2022, 40(1):52-59.

[28] SHUAI C Y, CHEN X, WU Y, et al. A three-step strategy for decoupling economic growth from carbon emission: Empirical evidences from 133 countries[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 646:524-543.

[29] WANG Q, WANG S S. A comparison of decomposition the decoupling carbon emissions from economic growth in transport sector of selected provinces in eastern, central and Western China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 229:570-581.

[30] ZHU X P, LI R R. An analysis of decoupling and influencing factors of carbon emissions from the transportation sector in the Beijing-Tianjin-Hebei area, China[J]. *Sustainability*, 2017, 9(5):722.

[31] ZHOU X, ZHANG M, ZHOU M H, et al. A comparative study on decoupling relationship and influence factors between China's regional economic development and industrial energy-related carbon emissions[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 142:783-800.

[32] KAN S Y, CHEN B, CHEN G Q. Worldwide energy use across global supply chains: Decoupled from economic

growth?[J]. *Applied Energy*, 2019, 250:1235-1245.

[33] 方大春, 裴梦迪. 安徽融入长江三角洲高质量一体化测度与提升路径[J]. *区域经济评论*, 2020(3):35-43. FANG D C, PEI M D. Measurement and lifting path of Anhui's intergration into Yangtze River high quality integration[J]. *Regional Economic Review*, 2020(3):35-43.

[34] 陈芳, 张书勤. 安徽融入长三角绿色发展效果评估及机制创新[J]. *内江师范学院学报*, 2021, 36(8):83-91. CHEN F, ZHANG S Q. Evaluation and mechanism innovation of Anhui's integration into the green development of the Yangtze River Delta[J]. *Journal of Neijiang Normal University*, 2021, 36(8):83-91.

[35] WANG Q, JIANG R, ZHAN L N. Is decoupling economic growth from fuel consumption possible in developing countries? A comparison of China and India[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 229:806-817.

[36] LIU M Z, ZHANG X X, ZHANG M Y, et al. Influencing factors of carbon emissions in transportation industry based on CD function and LMDI decomposition model: China as an example[J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2021, 90:106623.

[37] SHANG Y Z, LU S B, SHANG L, et al. Decomposition methods for analyzing changes of industrial water use[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 543:808-817.

[38] ANG B W. Decomposition analysis for policymaking in energy[J]. *Energy Policy*, 2004, 32(9):1131-1139.

[39] DONG B, ZHANG M, MU H L, et al. Study on decoupling analysis between energy consumption and economic growth in Liaoning Province[J]. *Energy Policy*, 2016, 97:414-420.

[40] 王迪, 聂锐. 中国制造业碳排放的演变特征与影响因素分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2012, 26(9):132-136. WANG D, NIE R. Empirical study of Chinese manufacturing industry's carbon emission status and its influence factors[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2012, 26(9):132-136.

[41] TAPIO P. Towards a theory of decoupling: Degrees of decoupling in the EU and the case of road traffic in Finland between 1970 and 2001[J]. *Transport Policy*, 2005, 12(2):137-151.

[42] ZHA J P, DAI J Q, MA S Q, et al. How to decouple tourism growth from carbon emissions? A case study of Chengdu, China[J]. *Tourism Management Perspectives*, 2021, 39:100849.

[43] 向书江, 杨春梅, 谢雨琦, 等. 近 20 年重庆市主城区碳排放的时空动态演进及其重心迁移[J]. *环境科学*: 1-18. DOI:10.13227/j.hj.kx.202203174 XIANG S J, YANG C M, XIE Y Q, et al. Spatiotemporal dynamic evolution and gravity center migration of carbon emissions in the main urban area of Chongqing in the past 20 years[J]. *Environmental Science*: 1-18. DOI:10.13227/j.hj.kx.202203174.

[44] XU X X, XU P Y, ZHU J J, et al. Bamboo construction materials: Carbon storage and potential to reduce associated CO₂ emissions[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 814:152697.

[45] WEN L, LI Z K. Provincial-level industrial CO₂ emission drivers and emission reduction strategies in China: Combining twolayer LMDI method with spectral clustering[J]. Science of the Total Environment, 2020, 700: 134374.

[46] YANG L, YANG Y T, ZHANG X, et al. Whether China's industrial sectors make efforts to reduce CO₂ emissions from production? A decomposed decoupling analysis[J]. Energy, 2018, 160: 796-809.

[47] 胡怀敏, 左薇, 徐士元. 长江经济带交通能源碳排放脱钩效应及驱动因素研究[J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31(4): 862-877. HU H M, ZUO W, XU S Y. Decoupling effect and driving factors of transportation energy carbon emission in Yangtze River economic belt[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022, 31(4): 862-877.

[48] RISSMAN J, BATAILLE C, MASANET E, et al. Technologies and policies to decarbonize global industry: Review and assessment of mitigation drivers through 2070[J]. Applied Energy, 2020, 266: 114848.