

DOI: 10.20103/j.stxb.202306131258

王奕淇, 黄涵祝. 中国碳排放脱钩效应、时空特征与驱动因素. 生态学报, 2024, 44(6): 2228-2243.

Wang Y Q, Huang H Z. Research on the decoupling effect, spatio-temporal characteristics, and driving factors of carbon emissions in China. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(6): 2228-2243.

中国碳排放脱钩效应、时空特征与驱动因素

王奕淇, 黄涵祝*

长安大学经济与管理学院, 西安 710064

摘要:“双碳”目标使中国面临巨大的碳减排压力, 寻求一条低碳转型之路已成为中国面临的挑战, 而揭示经济增长与碳排放之间的脱钩关系, 是中国寻求低碳经济发展的关键突破点。基于 IPCC 碳核算方法和 Tapio 脱钩模型, 对中国经济增长与碳排放的脱钩效应以及时空特征进行探讨, 并利用 IDA-PDA 综合分析法对碳排放脱钩效应的驱动因素进行分解。结果表明: ①2005—2019 年, 中国整体的碳排放脱钩指数呈波动下降趋势, 以“弱脱钩”为主, 脱钩状态良好。②中国东部和中部地区碳排放脱钩状态较好, 在 2015—2019 年达到强脱钩; 西部地区虽仍处于弱脱钩阶段, 但碳排放脱钩指数显著降低; 同时, 中国各省份间脱钩状态差别较大, 碳排放脱钩指数总体呈西北高、东南低的分布格局。③对于驱动因素的贡献度, 要素替代和技术进步是促进中国碳排放脱钩的关键因素, 经济水平是抑制中国碳排放脱钩最主要的因素。能源结构、效率变动、人口规模对中国碳排放脱钩主要表现为抑制作用。④对于地区的贡献度, 2005—2010 年, 东部地区对中国碳排放脱钩的抑制作用最强; 2010—2012 年, 东部地区对中国碳排放脱钩的抑制作用逐渐减小, 西部地区对中国碳排放脱钩的抑制作用逐渐增强; 2012—2019 年, 三大地区对中国碳排放脱钩的作用不稳定, 变化较大。

关键词: 碳排放脱钩; IDA-PDA 方法; 驱动因素; 时空特征

Research on the decoupling effect, spatio-temporal characteristics, and driving factors of carbon emissions in China

WANG Yiqi, HUANG Hanzhu*

School of Economics and Management, Chang'an University, Xi'an 710064, China

Abstract: The “dual carbon” goal puts China under tremendous pressure to reduce carbon emissions. Seeking a low-carbon transition has become a challenge for China. Revealing the decoupling relationship between economic growth and carbon emissions is a key breakthrough point for China to pursue the development of low-carbon economy. Based on the IPCC carbon accounting method and Tapio decoupling model, this paper explores the decoupling effect of China's economic growth and carbon emissions as well as the spatio-temporal characteristics, and decomposes the drivers of the decoupling effect of carbon emissions by using the IDA-PDA integrated analysis method. The results show that: ① From 2005 to 2019, the overall decoupling index of carbon emissions in China presented a fluctuating downward trend, mainly weak decoupling, and had a good decoupling status. ② The decoupling status of carbon emissions in the eastern and central regions of China was better, reaching strong decoupling in 2015—2019. The decoupling index of carbon emissions in the western region was significantly lower, although it was still in the weak decoupling stage. Besides, the decoupling status varied greatly among Chinese provinces, and the decoupling index of carbon emissions in general showed a distribution pattern of high in the northwest and low in the southeast. ③ For the contribution of drivers, factor substitution and technological progress are the

基金项目: 国家社会科学基金项目 (23BTJ029); 陕西省创新能力支撑计划软科学项目 (2023-CX-RKX-106); 中央高校基本科研业务费项目 (300102233604)

收稿日期: 2023-06-13; **网络出版日期:** 2023-12-22

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: huanghz02@126.com

key factors that promote the decoupling of China's carbon emissions, and economic level is the most important factor that inhibits the decoupling of China's carbon emissions. Energy structure, efficiency changes, and population size mainly show inhibitory effects on the decoupling of China's carbon emissions. ④ For the contribution of regions, from 2005 to 2010, the eastern region had the strongest inhibitory effect on China's carbon emissions decoupling. From 2010 to 2012, the inhibitory effect of eastern regions on China's carbon emission decoupling gradually decreased, and the inhibitory effect of western regions on China's carbon emission decoupling gradually increased. From 2012 to 2019, the roles of three major regions on China's carbon emission decoupling were unstable and changes considerably.

Key Words: carbon emissions decoupling; method of IDA-PDA; driving factors; spatio-temporal characteristics

自 1990 年联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第一次报告提出气候变化具有全球影响以来,全球各国对气候变化问题的研究不断深入^[1]。面对气候变化威胁和经济绿色发展问题,全球寻求绿色低碳转型已成为必然。中国作为世界第二大经济体,2019 年的碳排放量居全球首位^[2]。作为一个负责任的大国,中国在 2020 年的联合国大会上提出 2030 年碳达峰、2060 年碳中和的“双碳”目标^[3],这必将使中国面临巨大的碳减排压力,寻求一条低碳转型之路、实现碳减排目标已成为中国面临的挑战^[4]。而揭示经济增长与其碳排放之间的脱钩关系,是中国寻求低碳经济发展的关键突破点^[5]。因此,深入研究中国碳排放与经济脱钩关系、时空演变特征及其驱动因素,对引导中国差异化碳减排、实现“双碳”目标具有现实意义。

经济的快速发展使能源消耗和环境负荷加剧,碳排放量持续增加^[2],当碳排放和经济发展出现非同步变化的状态时,脱钩理论开始被引入用以反映二者耦合关系的破裂现象,并划分和识别其所处的阶段^[6]。脱钩理论是由经济合作与发展组织(OECD)^[7]提出的反映经济增长与资源消耗之间是否同步变化的基本理论。2005 年,Tapio 基于 OECD 的脱钩理论提出脱钩指数来描述脱钩状态^[8]。由于 Tapio 脱钩模型在消除基期选择的误差上更具优势^[9],国内外学者们开始广泛采用 Tapio 脱钩模型来探讨经济发展与碳排放的脱钩关系,一方面是对不同国家或地区的碳排放与经济脱钩现状进行研究,如全球^[10]、欧盟^[11]、中东地区^[12]、非洲^[13]、阿根廷^[14]、意大利^[15]、中国省份^[16]、中国县域^[2]、长江经济带^[17]、黄河流域^[18]、长三角城市群^[19];另一方面是对不同行业碳排放脱钩状态进行探讨,如制造业^[20]、建筑业^[21]、工业^[22]、交通运输业^[23]、旅游业^[24]、电力行业^[25]、农业^[26]。

部分学者在分析碳排放脱钩的基础上进一步分解其驱动因素,以 Kaya 恒等式和指数分解技术(index decomposition analysis, IDA)为基础,经历了从碳排放总量到碳排放强度、从行业到区域的发展^[27],其中 IDA 指数分解中的对数平均迪氏指数(Logarithmic Mean Divisa Index, LMDI)由于具有路径独立、无残值、完全分解等优点,逐渐成为研究碳排放驱动因素的主流方法^[28],如赵玉焕等^[29]、田华征和马丽^[30]、侯丽朋等^[31]利用 LMDI 分解模型考察不同区域或不同行业的碳排放驱动因素。然而,IDA 分解法作为一种经济核算方法,无法合理解释能源强度的变化^[32],因此, Wang^[33]首次提出了基于生产分解的分析方法(Production-theory decomposition analysis, PDA),孙作人等^[34]、范丹^[35]、Zhang 等^[36]利用 PDA 方法从行业、产业或区域等视角将碳排放变动分解为若干驱动因素。尽管 PDA 方法能够从能源强度变化和能源效率提高角度分析碳排放问题,但该方法对产业结构效应和能源消费结构效应的解释力弱于 IDA 方法^[32]。

综上,过往对中国碳排放脱钩的研究主要集中于碳排放脱钩的现状与时空特征,并多以 LMDI 分解法探讨其驱动因素,鲜有学者尝试将 IDA 和 PDA 方法的优点相结合,综合利用 IDA 和 PDA 方法分析碳排放脱钩的驱动因素,且对于驱动因素及地区贡献度的研究更是匮乏。鉴于此,本文在借助脱钩模型刻画中国各省碳排放与经济发展脱钩关系的基础上,将 IDA 和 PDA 分解方法相结合,进一步探讨碳排放脱钩的驱动因素及其贡献度。可能的边际贡献在于:一方面,将能源强度变化的综合分解模型扩展到碳排放脱钩变化分解的分析中,从更细致的维度分析不同驱动因素引致的碳排放脱钩变化,并进一步明确各驱动因素对碳排放脱钩的贡献度;另一方面,将中国碳排放脱钩模型与东中西三大地区碳排放变化相结合,从地理角度剖析东中西部地区

对中国碳排放脱钩的贡献度及其变化。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 研究方法

1.1.1 碳排放测算

参考《IPCC 国家温室气体清单指南》,选取原煤、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、天然气 8 种能源的终端消费量,核算二氧化碳排放量,公式为:

$$C = \sum_i E_i \times \alpha_i \times \beta_i \quad (1)$$

式中, C 为各类能源碳排放总量, E_i 表示第 i 种能源消费量(实物量), α_i 表示第 i 种能源折标准煤系数, β_i 表示第 i 种能源碳排放计算系数。具体能源相关系数见表 1。

表 1 碳排放计算参数

Table 1 Calculation parameters of carbon emissions

能源类型 Energy type	原煤 Raw coal	焦炭 Coke	原油 Crude oil	汽油 Gasoline	煤油 Kerosene	柴油 Diesel oil	燃料油 Fuel oil	天然气 Natural gas
折标准煤系数/(10^4 tce/ 10^4 t) Conversion coefficient of standard coal	0.7143	0.9714	1.4286	1.4714	1.4714	1.4571	1.4286	1.3300
CO ₂ 排放系数/(10^4 t-co ₂ / 10^4 t) Carbon emission coefficient	1.9003	2.8604	3.0202	2.9251	3.0179	3.0959	3.1705	2.1622

1.1.2 Tapio 脱钩模型

碳排放脱钩是经济增长与二氧化碳排放之间关系持续减弱直至消逝的理想过程,即碳排放量在经济增长的基础上逐渐减少^[2]。为考察更精准的脱钩关系,采用 Tapio 脱钩模型测算脱钩指数,方法如下:

$$D_t = \frac{\% \Delta C_t}{\% \Delta G_t} = \frac{(C_t - C_{t-1}) / C_{t-1}}{(G_t - G_{t-1}) / G_{t-1}} \quad (2)$$

式中, t 和 $t - 1$ 分别表示末期和基期, D_t 为末期相对于基期经济增长与碳排放的脱钩指数, ΔC_t 为碳排放增量, ΔG_t 为 GDP 增量。并借鉴宋旭等^[4]的研究,将碳排放脱钩状态分为八种类型,详见表 2。

表 2 脱钩状态与脱钩指数

Table 2 Decoupling state and decoupling index

脱钩状态 Decoupling state	脱钩类型 Decoupling type	环境压力增长率($\% \Delta C_t$) Environmental pressure growth rate ($\% \Delta C_t$)	经济驱动增长率($\% \Delta G_t$) Economic-driven growth rate ($\% \Delta G_t$)	脱钩指数(D_t) Decoupling index (D_t)
脱钩 Decoupling	强脱钩(SD)	<0	>0	$D_t < 0$
	弱脱钩(WD)	>0	>0	$0 \leq D_t < 0.8$
	衰退脱钩(RD)	<0	<0	$D_t > 1.2$
连结 Coupling	扩张连结(EC)	>0	>0	$0.8 \leq D_t \leq 1.2$
	衰退连结(RC)	<0	<0	$0.8 \leq D_t \leq 1.2$
负脱钩 Negative decoupling	强负脱钩(SND)	>0	<0	$D_t < 0$
	弱负脱钩(WND)	<0	<0	$0 \leq D_t < 0.8$
	扩张负脱钩(END)	>0	>0	$D_t > 1.2$

1.1.3 IDA 分解法

日本学者 Yoichi Kaya 在 IPCC 研讨会上提出的 kaya 恒等式,将二氧化碳排放量分解为排放强度、能源强度、人均 GDP 和总人口四部分,具有分解无残差、模型解释力强、数学形式简单等特点^[37]。扩展 kaya 恒等式,

将区域的碳排放量表示为:

$$C = \frac{C}{E} \times \sum_k \left(\frac{E_k}{Y_k} \times \frac{Y_k}{\sum_k Y_k} \right) \times \frac{Y}{P} \times P = CC \times \sum_k (EI_k \times YS_k) \times ED \times P \quad (3)$$

式中, k 为三次产业, CC 为能源综合排放系数, 由于各种能源的碳排放系数通常被假定不变, 因此可以反应能源结构变化。 EI 代表能源强度, YS 代表产业结构, ED 代表当地经济水平; P 代表人口规模。

对数平均迪氏分解法(LMDI)属于 IDA 分解法的一个分支, 具有全分解、无残差等优点^[37], 进一步利用 LMDI 方法将碳排放量分解为:

$$\Delta C = C^t - C^{t-1} = \Delta C_{CC} + \Delta C_{EI} + \Delta C_{YS} + \Delta C_{ED} + \Delta C_P \quad (4)$$

各因素的分解过程如下:

$$\Delta C_{CC} = \sum_k \frac{C_k^t - C_k^{t-1}}{\ln C_k^t - \ln C_k^{t-1}} \times \ln \left(\frac{CC_k^t}{CC_k^{t-1}} \right) \quad (5)$$

$$\Delta C_{EI} = \sum_k \frac{C_k^t - C_k^{t-1}}{\ln C_k^t - \ln C_k^{t-1}} \times \ln \left(\frac{EI_k^t}{EI_k^{t-1}} \right) \quad (6)$$

$$\Delta C_{YS} = \sum_k \frac{C_k^t - C_k^{t-1}}{\ln C_k^t - \ln C_k^{t-1}} \times \ln \left(\frac{YS_k^t}{YS_k^{t-1}} \right) \quad (7)$$

$$\Delta C_{ED} = \sum_k \frac{C_k^t - C_k^{t-1}}{\ln C_k^t - \ln C_k^{t-1}} \times \ln \left(\frac{ED_k^t}{ED_k^{t-1}} \right) \quad (8)$$

$$\Delta C_P = \sum_k \frac{C_k^t - C_k^{t-1}}{\ln C_k^t - \ln C_k^{t-1}} \times \ln \left(\frac{P_k^t}{P_k^{t-1}} \right) \quad (9)$$

1.1.4 PDA 分解法

PDA 分解法由 Wang^[33] 提出, 多用于对能源效率和能源强度的驱动因素进行分解, 具有更优的经济学解释和更多的政策含义等优点^[38]。目前对于中国碳排放与经济增长脱钩关系的研究中, 缺少对能源强度效应进一步的分解, 但实际上能源强度变动受到技术进步、投入要素替代和生产效率变动等因素的影响^[32]。由于技术进步、能源效率提升等因素对碳减排产生关键作用^[5, 32, 39], 本文利用 PDA 分解法对能源强度进行进一步分解, 扩展对中国碳排放脱钩驱动因素的研究。PDA 模型以 shepherd 产出距离函数为基础, 考虑到各产业部门之间存在生产技术异质性, 设定 t 时期产业部门 k 的产出距离函数基于以下生产技术集:

$$T_{k,t} = \{ (K_{k,t}, L_{k,t}, E_{k,t}; Y_{k,t}) : (K_{k,t}, L_{k,t}, E_{k,t}) \text{ 可生产 } Y_{k,t} \} \quad (10)$$

式中, 资本 K 、劳动力 L 和能源 E 为投入变量, $Y_{k,t}$ 为产出。资本、劳动力、能源和产出分别以固定资本存量、年末从业人数、能源消费量和 GDP 为指标。标准假设适用于生产技术集 T , 因此, 产业部门 k 在时期 t 的产出距离函数可表示为:

$$D_{k,t}(K_{k,t}, L_{k,t}, E_{k,t}; Y_{k,t}) = \inf \left\{ \theta : \left(K_{k,t}, L_{k,t}, E_{k,t}, \frac{Y_{k,t}}{\theta} \right) \in T_{k,t} \right\} \quad (11)$$

式中, $D_{k,t}(K_{k,t}, L_{k,t}, E_{k,t}; Y_{k,t})$ 表示在给定的投入 $(K_{k,t}, L_{k,t}, E_{k,t})$ 与技术水平 $(T_{k,t})$ 下所能观测到的实际生产行为与其生产边界的距离, 即给定投入后产出能够扩张的最大倍数的倒数。在弱处置性假设下, 当 $(K_{k,t}, L_{k,t}, E_{k,t}; Y_{k,t}) \in T_{k,t}$ 时, 有 $D_{k,t}(K_{k,t}, L_{k,t}, E_{k,t}; Y_{k,t}) \leq 1$, 且只有生产单元位于 $T_{k,t}$ 的前沿面上时等号成立。此时 $(K_{k,t}, L_{k,t}, E_{k,t}; Y_{k,t})$ 可以达到的最大产出为:

$$Y_{k,t, \max}(K_{k,t}, L_{k,t}, E_{k,t}; T_{k,t}) = Y_t / D_{k,t}(K_{k,t}, L_{k,t}, E_{k,t}; Y_{k,t}) \quad (12)$$

如果参考的是 $t-1$ 时期技术水平, 则投入 (K_t, L_t, E_t) 和产出 Y_t 相应的距离函数可以定义为:

$$D_{k,t-1}(K_{k,t}, L_{k,t}, E_{k,t}; Y_{k,t}) = \inf \left\{ \theta : \left(K_{k,t}, L_{k,t}, E_{k,t}, \frac{Y_{k,t}}{\theta} \right) \in T_{k,t-1} \right\} \quad (13)$$

此时 $(K_{k,t}, L_{k,t}, E_{k,t}; Y_{k,t})$ 可以达到的最大产出为:

$$Y_{k,t,\max}(K_{k,t}, L_{k,t}, E_{k,t}; T_{k,t-1}) = Y_t / D_{k,t-1}(K_{k,t}, L_{k,t}, E_{k,t}; Y_{k,t}) \quad (14)$$

同理,可以定义 $t-1$ 时期的投入 $(K_{k,t-1}, L_{k,t-1}, E_{k,t-1})$ 和产出 Y_{t-1} 对应于前沿面 $T_{k,t}$ 和 $T_{k,t-1}$ 的产出距离函数分别为:

$$D_{k,t}(K_{k,t-1}, L_{k,t-1}, E_{k,t-1}; Y_{k,t-1}) = \inf \left\{ \theta : \left(K_{k,t-1}, L_{k,t-1}, E_{k,t-1}, \frac{Y_{k,t-1}}{\theta} \right) \in T_{k,t} \right\} \quad (15)$$

$$D_{k,t-1}(K_{k,t-1}, L_{k,t-1}, E_{k,t-1}; Y_{k,t-1}) = \inf \left\{ \theta : \left(K_{k,t-1}, L_{k,t-1}, E_{k,t-1}, \frac{Y_{k,t-1}}{\theta} \right) \in T_{k,t-1} \right\} \quad (16)$$

相应的,可以达到的最大产出分别为:

$$Y_{k,t-1,\max}(K_{k,t-1}, L_{k,t-1}, E_{k,t-1}; T_{k,t}) = Y_{t-1} / D_{k,t}(K_{k,t-1}, L_{k,t-1}, E_{k,t-1}; Y_{k,t-1}) \quad (17)$$

$$Y_{k,t-1,\max}(K_{k,t-1}, L_{k,t-1}, E_{k,t-1}; T_{k,t-1}) = Y_{t-1} / D_{k,t-1}(K_{k,t-1}, L_{k,t-1}, E_{k,t-1}; Y_{k,t-1}) \quad (18)$$

参考孙广生等^[40]的办法,将 t 和 $t-1$ 时期的产出增长分解为:

$$\begin{aligned} \frac{Y_{k,t}}{Y_{k,t-1}} &= \left\{ \frac{Y_{k,t,\max}(K_{k,t}, L_{k,t}, E_{k,t}; T_{k,t-1})}{Y_{k,t-1,\max}(K_{k,t-1}, L_{k,t-1}, E_{k,t-1}; T_{k,t-1})} \times \frac{Y_{k,t,\max}(K_{k,t}, L_{k,t}, E_{k,t}; T_{k,t})}{Y_{k,t-1,\max}(K_{k,t-1}, L_{k,t-1}, E_{k,t-1}; T_{k,t})} \right\}^{\frac{1}{2}} \\ &\times \frac{D_{k,t}(K_{k,t}, L_{k,t}, E_{k,t}; Y_{k,t})}{D_{k,t-1}(K_{k,t-1}, L_{k,t-1}, E_{k,t-1}; Y_{k,t-1})} \\ &\times \left\{ \frac{D_{k,t-1}(K_{k,t-1}, L_{k,t-1}, E_{k,t-1}; Y_{k,t-1})}{D_{k,t}(K_{k,t-1}, L_{k,t-1}, E_{k,t-1}; Y_{k,t-1})} \times \frac{D_{k,t-1}(K_{k,t}, L_{k,t}, E_{k,t}; Y_{k,t})}{D_{k,t}(K_{k,t}, L_{k,t}, E_{k,t}; Y_{k,t})} \right\}^{\frac{1}{2}} \\ &\equiv SCA_k \times EFF_k \times TEC_k \end{aligned} \quad (19)$$

式(19)中,等号右边分别表示引起产出增长的投入规模变化 SCA_k 、效率变动 EFF_k 和技术进步 TEC_k 。投入规模变化 SCA_k 是以固定生产前沿面衡量的投入要素规模变动引起的产出增长,效率变动 EFF_k 是指现有技术水平下通过优化组织和管理等多方面因素所能达到的潜在效能;技术进步 TEC_k 衡量了因技术引进或创新形成的生产前沿面的移动,即最优产出水平的变化。

进一步参考杨莉莎等^[32]的方法,将 t 和 $t-1$ 时期的能源强度的变动分解成以下形式:

$$\begin{aligned} \frac{EI_{k,t}}{EI_{k,t-1}} &= \left\{ \frac{E_{k,t} / [Y_{k,t} / D_{k,t}(K_{k,t}, L_{k,t}, E_{k,t}; Y_{k,t})]}{E_{k,t-1} / [Y_{k,t-1} / D_{k,t}(K_{k,t-1}, L_{k,t-1}, E_{k,t-1}; Y_{k,t-1})]} \right. \\ &\times \left. \frac{E_{k,t} / [Y_{k,t} / D_{k,t-1}(K_{k,t}, L_{k,t}, E_{k,t}; Y_{k,t})]}{E_{k,t-1} / [Y_{k,t-1} / D_{k,t-1}(K_{k,t-1}, L_{k,t-1}, E_{k,t-1}; Y_{k,t-1})]} \right\}^{\frac{1}{2}} \\ &\times \left[\frac{D_{k,t}(K_{k,t}, L_{k,t}, E_{k,t}; Y_{k,t})}{D_{k,t-1}(K_{k,t-1}, L_{k,t-1}, E_{k,t-1}; Y_{k,t-1})} \right]^{-1} \\ &\times \left\{ \frac{D_{k,t-1}(K_{k,t-1}, L_{k,t-1}, E_{k,t-1}; Y_{k,t-1})}{D_{k,t}(K_{k,t-1}, L_{k,t-1}, E_{k,t-1}; Y_{k,t-1})} \times \frac{D_{k,t-1}(K_{k,t}, L_{k,t}, E_{k,t}; Y_{k,t})}{D_{k,t}(K_{k,t}, L_{k,t}, E_{k,t}; Y_{k,t})} \right\}^{-\frac{1}{2}} \\ &\equiv PEC_k \times \frac{1}{EFF_k} \times \frac{1}{TEC_k} \end{aligned} \quad (20)$$

式中, PEC_k 为第 k 产业的要素替代效应,为能源消费增长率与投入规模变化 SCA_k 的比值,表现为能源投入与非能源投入相对比重发生变化后能源强度的变动, PEC_k 的大小取决于资本—能源比和劳动—能源比。 $1/EFF_k$ 、 $1/TEC_k$ 分别表示效率变动和技术进步对 k 产业能源强度的影响,倒数说明能源强度与效率变动和技术进步呈反比。

此时,可将能源强度对碳排放的影响分解为:

$$\Delta C_{PEC} = \sum_k \frac{C_k^t - C_k^{t-1}}{\ln C_k^t - \ln C_k^{t-1}} \times \ln(PEC_k) \quad (21)$$

$$\Delta C_{\text{EFF}} = \sum_k \frac{C_k^t - C_k^{t-1}}{\ln C_k^t - \ln C_k^{t-1}} \times \ln \left(\frac{1}{\text{EFF}_k} \right) \quad (22)$$

$$\Delta C_{\text{TEC}} = \sum_k \frac{C_k^t - C_k^{t-1}}{\ln C_k^t - \ln C_k^{t-1}} \times \ln \left(\frac{1}{\text{TEC}_k} \right) \quad (23)$$

将公式(21)—(23)带入到公式(4)中,可以得到:

$$\Delta C = \Delta C_{\text{CC}} + \Delta C_{\text{PEC}} + \Delta C_{\text{EFF}} + \Delta C_{\text{TEC}} + \Delta C_{\text{YS}} + \Delta C_{\text{ED}} + \Delta C_P \quad (24)$$

据此,碳排放量被分解成能源结构(CC)、要素替代(PEC)、效率变动(EFF)、技术进步(TEC)、产业结构(YS)、经济水平(ED)人口规模(P)七个部分。

1.1.5 贡献度分解

由于中国碳排放脱钩指数的变化还会受到各地区所处地理位置的影响。因此借鉴 Yang 等^[5]的方法,基于公式(2)将中国碳排放脱钩驱动因素的贡献度进行分解,并进一步分解三大地区的贡献度,分解过程如下:

$$\begin{aligned} D_i &= \frac{\Delta C_i / C_{t-1}}{\Delta G_t / G_{t-1}} \\ &= \frac{\Delta C_{\text{CC}} / C_{t-1}}{\Delta G_t / G_{t-1}} + \frac{\Delta C_{\text{PEC}} / C_{t-1}}{\Delta G_t / G_{t-1}} + \frac{\Delta C_{\text{EFF}} / C_{t-1}}{\Delta G_t / G_{t-1}} + \frac{\Delta C_{\text{TEC}} / C_{t-1}}{\Delta G_t / G_{t-1}} + \frac{\Delta C_{\text{YS}} / C_{t-1}}{\Delta G_t / G_{t-1}} + \frac{\Delta C_{\text{ED}} / C_{t-1}}{\Delta G_t / G_{t-1}} + \frac{\Delta C_P / C_{t-1}}{\Delta G_t / G_{t-1}} \\ &= D_{\text{CC}} + D_{\text{PEC}} + D_{\text{EFF}} + D_{\text{TEC}} + D_{\text{YS}} + D_{\text{ED}} + D_P \end{aligned} \quad (25)$$

$$D_i = \frac{\Delta C_i / C_{t-1}}{\Delta G_t / G_{t-1}} = \frac{\Delta C_{\text{ER}} / C_{t-1}}{\Delta G_t / G_{t-1}} + \frac{\Delta C_{\text{CR}} / C_{t-1}}{\Delta G_t / G_{t-1}} + \frac{\Delta C_{\text{WR}} / C_{t-1}}{\Delta G_t / G_{t-1}} = D_{\text{ER}} + D_{\text{CR}} + D_{\text{WR}} \quad (26)$$

式中, $D_i (i = \text{CC}, \text{PEC}, \dots, P)$ 为公式(24)分解的七个驱动因素对中国碳排放脱钩指数的贡献值。式(26)中, $\Delta C_i (i = \text{ER}, \text{CR}, \text{WR})$ 分别代表中国东部、中部和西部地区的碳排放增长量,相应地, $D_i (i = \text{ER}, \text{CR}, \text{WR})$ 代表各个地区对中国碳排放脱钩指数的贡献值。其中,依据中国“七五”计划将全国划分为三大经济地带,并结合西部大开发战略划定的城市范围,将中国划分为东中西三大地区,其中东部地区包括天津、北京、河北、辽宁、上海、江苏、浙江、福建、山东、广东和海南 11 个省;中部地区包括内蒙古、山西、黑龙江、吉林、安徽、江西、河南、湖北、湖南 9 个省;西部地区包括广西、云南、贵州、四川、重庆、陕西、甘肃、青海、宁夏和新疆 10 个省。

1.2 数据来源

选取 2005—2019 年中国 30 个省、市、自治区的相关数据作为研究样本,由于香港、澳门、台湾和西藏等地区数据缺失较多,因此研究未涉及港澳台和西藏地区。各省三次产业各类终端能源消费数据和各类能源折标准煤系数来源于《中国能源统计年鉴》,二氧化碳排放系数来源于《省级温室气体清单编制指南》。固定资产投资总额以及固定资产投资价格指数来源于《中国固定资产投资统计年鉴》和《中国统计年鉴》。各省产出数据来源于各省统计年鉴,并将其转化成 2005 年的不变价格水平。由于需计算省际三次产业资本存量,考虑到数据的可得性,借鉴徐现祥等^[41]的方法进行三次产业投资缩减指数的计算,并结合宗振利和廖直东^[42]计算的各省折旧率和 2005 年资本存量数据,根据永续盘存法测得各省三次产业资本存量(2005 年价格)。

2 结果与分析

2.1 碳排放分析

图 1 描述了中国三大地区 2005—2019 年碳排放情况。在中国三大地区中,东部地区的平均碳排放量占全国碳排放量比重最大,为 47.32%,说明东部地区是中国主要碳排放来源地;其次是中部地区,为 31.75%;西部地区占比最小,为 20.92%。从动态角度看,东部地区比重呈下降趋势,由 2005 年的 50.11%下降至 2019 年的 47.32%;西部地区比重上升幅度最大,由 2005 年的 18.48%上升至 2019 年的 20.92%;中部地区有小幅上升,由 2005 年的 31.41%上升到 2019 年的 31.75%。这可能是缘于东部地区随着工业化和能源技术的发展,工业部门的碳排放效率提高,且人民生活水平的提高和产业结构转型升级降低了经济增长对能源的高度依赖,

促进了东部地区占比下降;中部地区经济增长和城市化水平的提高使中部地区碳排放量占比有所提高,但碳排放量占比总体稳定,说明中部地区加强碳排放管理,在经济发展的同时不断控制碳排放量,取得一定成效;而西部地区主要以提供高碳密集型和低附加值产品为主,这类商品和服务的生产会产生较多的二氧化碳排放,且由于西部大开发战略的推进,工业化水平、资本密集度、城市化程度提高,使碳排放量不断增加。结合各地区具体碳排放量的变化,发现 2012 年后各地区都有不同年份不同程度上碳排放量的减少,这与 2012 年党的“十八大”将生态文明建设首次提升到战略层面,各地区转变发展理念,深化节能体系改革有关。

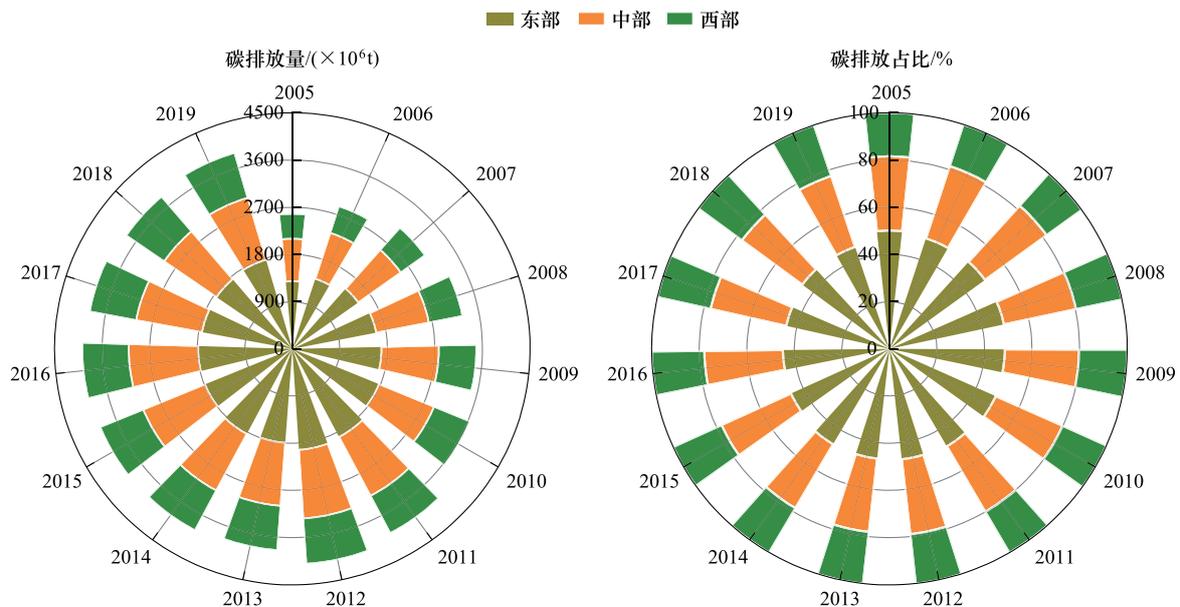


图 1 2005—2019 年中国三大地区碳排放情况

Fig.1 Carbon emissions of three major regions in China from 2005 to 2019

由图 2 可知,在省级层面,中西部地区碳排放分布较均匀,东部地区省份间碳排放差异较大。这主要是因为东部地区各省份产业结构差异大,北京、上海等地以先进制造业、现代服务业、高新技术产业为主,耗能较低;天津、浙江等地电子信息业、轻工业具有优势,耗能也相对较低;而河北、辽宁等地煤炭资源丰富,重工业发达且以火力发电为主,致使当地形成高碳排放量的局面。同时由于东部地区各省份的经济规模不同,使其碳排放量差异大,如江苏、山东、广东作为经济大省,大规模的经济活动形成高碳排放,而海南经济规模较小,碳排放量也较低。与东部地区相比,中部和西部地区各省份以第一、二产业为主,产业结构差异小,且区域内各省份经济规模相对较小,从而中西部地区各省份碳排放量分布较均匀。

2.2 碳排放脱钩分析

由图 3 可知,中国经济与碳排放基本上呈同步增长趋势。2005—2019 年中国碳排放量整体上呈现以 2012 年为分界的“先急后缓”的波动上升趋势,这主要是缘于“十二五”节能减排的目标对中国碳排放起到了明显的抑制作用,使中国碳排放增速明显放缓,特别是在 2013 年,中国碳排放量出现明显回落。2017 和 2018 年中国的碳排放量也有所下降,这是因为 2016 年 11 月 4 日《巴黎协定》生效,中国对碳排放采取了更严格的标准和管理。研究期内的碳排放脱钩是弱脱钩占主导地位,说明尽管中国的碳排放量有所增加,但是碳排放增长速度小于经济增长速度。中国的脱钩指数总体呈下降趋势,由 2005—2006 年的 0.79 下降到 2018—2019 年的 0.31,下降幅度明显,说明中国经济增长与碳排放的脱钩程度越来越高。可知中国的碳排放治理已取得初步成效,但仍需加强监管、积极推进治理工作,促进中国经济低碳发展。

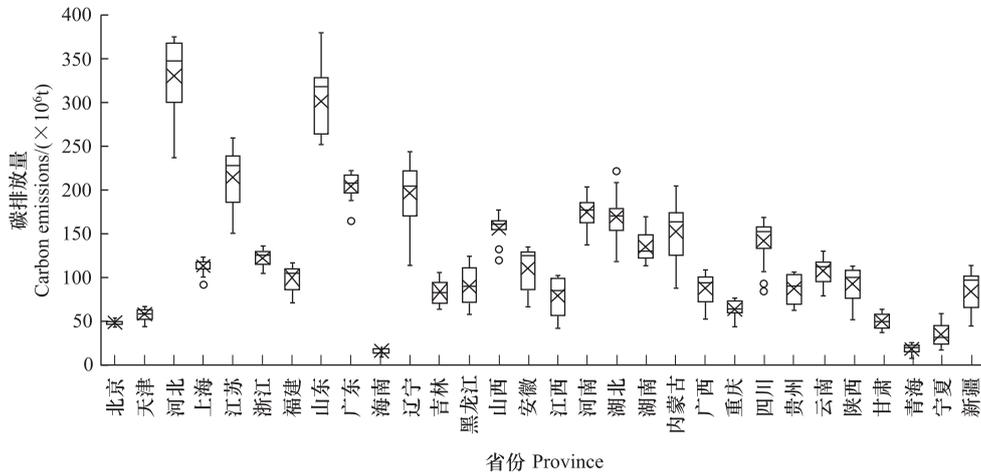


图 2 2005—2019 年中国各省份的碳排放情况
 Fig.2 Carbon emissions by provinces in China from 2005 to 2019

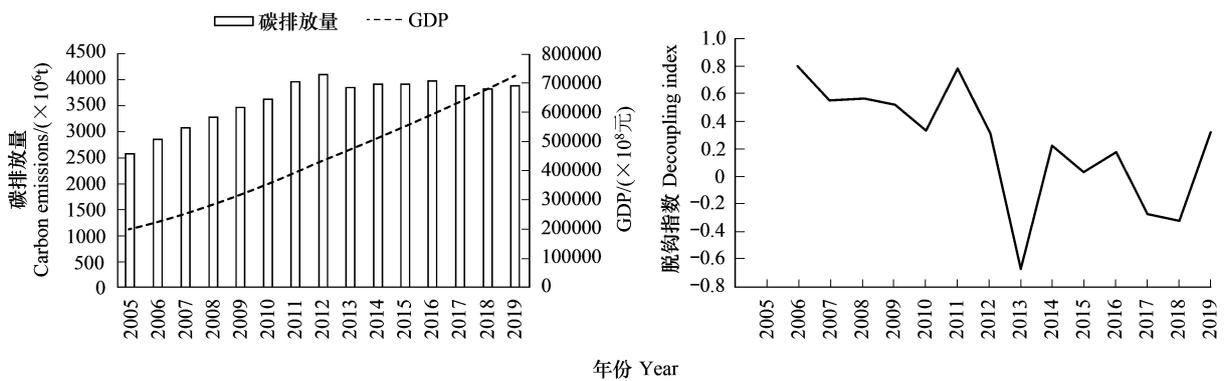


图 3 2005—2019 年中国经济增长与碳排放脱钩
 Fig.3 Decoupling of economic growth and carbon emissions for the period 2005—2019 in China

2.3 碳排放脱钩的时空特征

2.3.1 中国三大地区的碳排放脱钩

由图 4 可知,2005—2010 年,中国 GDP 以年增长率 10%左右的速度高速增长,三大地区均呈现出经济增长与碳排放的弱脱钩现象,主要是因为“十一五”期间国务院提出单位 GDP 能耗降低 20%左右的约束性指标,各地碳减排政策得到强有效的落实。其中,中部地区的脱钩指数最为理想,为 0.4848,这可能是因为中部地区以高耗能产业为主,减排空间大,脱钩状态在三大地区中最优;西部地区的碳排放脱钩状态最差,脱钩指数为 0.6576,这与西部地区技术水平低,依赖化石能源消费促进经济增长有关。2010—2015 年,中国经济增速放缓,碳排放量增长率得到控制,中国脱钩状态更为积极,三大地区的脱钩指数都明显降低,其中东部地区脱钩指数下降为 0.0137,降幅最大。2015—2019 年,抑制气候变暖、控制温室气体排放受到了全球空前重视,《“十三五”节能减排综合控制方案》要求到 2020 年,单位 GDP 二氧化碳排放量比 2005 年下降 18%。东部和中部地区总体上呈现强脱钩状态,西部地区仍然是弱脱钩但脱钩指数下降,中国整体上脱钩状态得到优化。总体而言,中国的碳排放脱钩取得初步成效,三大地区脱钩情况均比较乐观。

2.3.2 中国各省份的碳排放脱钩

由图5可知,2005—2019年中国大部分省份的脱钩指数下降,脱钩状态好转,脱钩指数总体呈西北高、

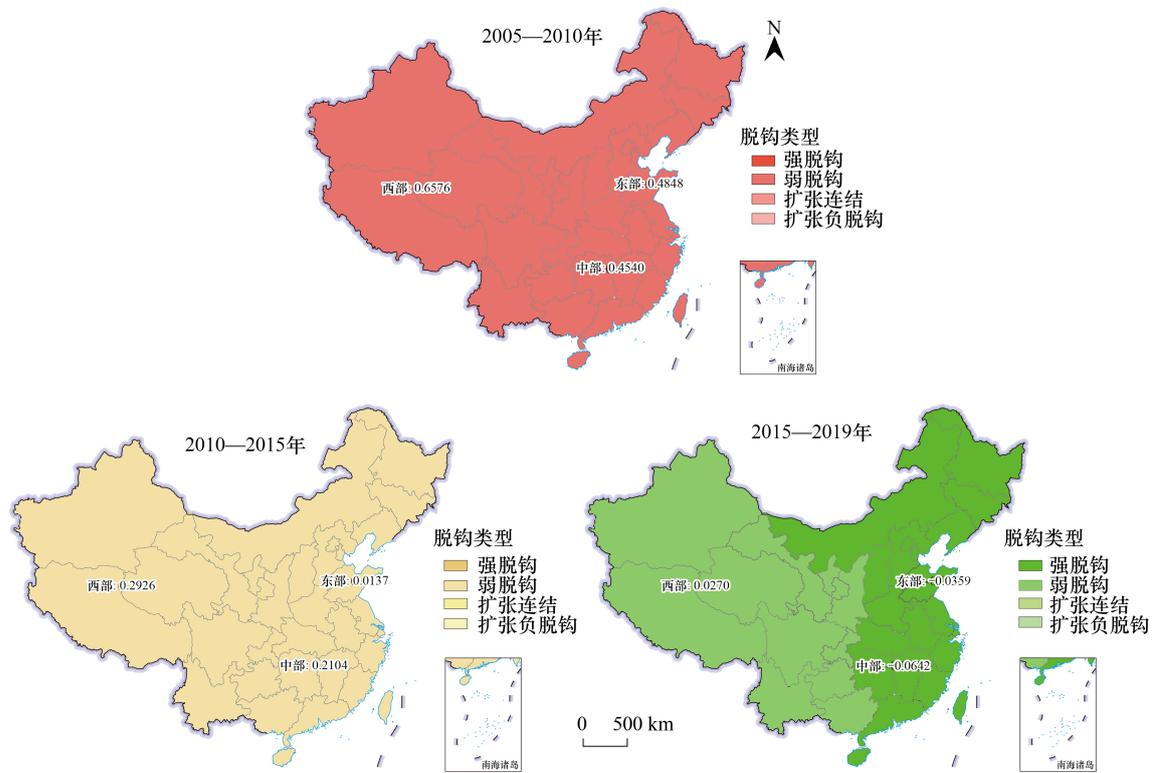


图 4 中国三大地区碳排放脱钩的时空特征

Fig.4 Temporal and spatial characteristics of carbon emission decoupling in three major regions of China

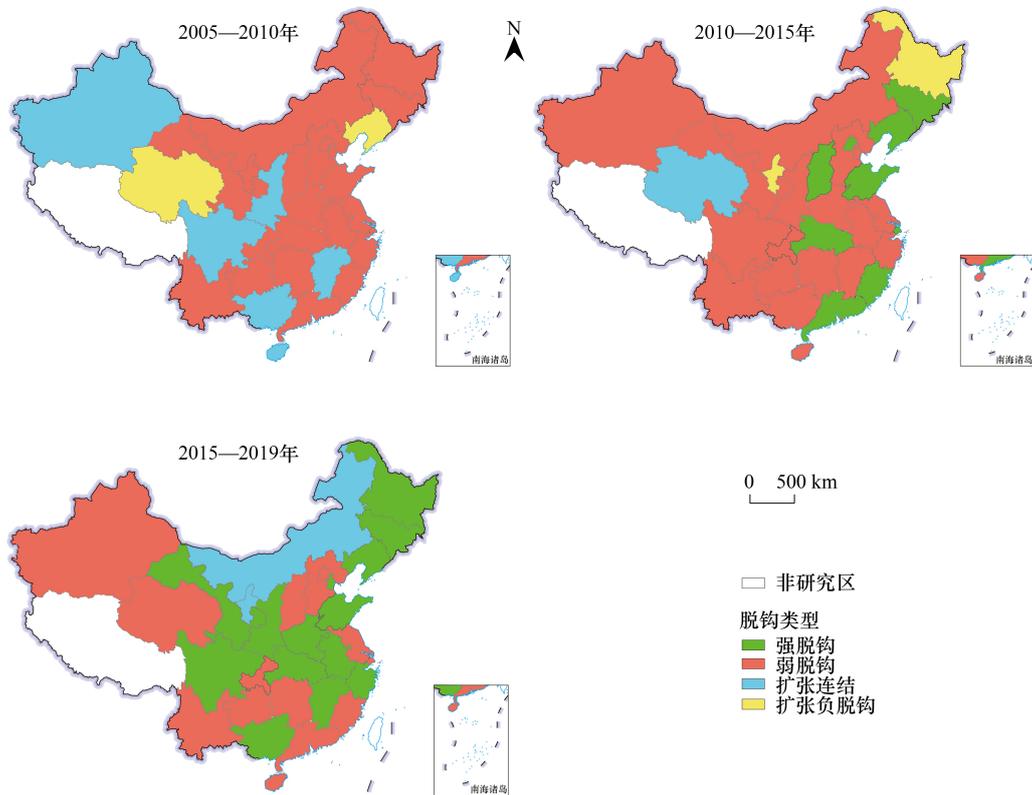


图 5 中国各省份碳排放脱钩的时空特征

Fig.5 Temporal and spatial characteristics of carbon emission decoupling in provinces of China

东南低的分布格局。2005—2010年,22个省份的脱钩状态为弱脱钩,6个为扩张连结,2个为扩张负脱钩。其中,青海脱钩指数最高,脱钩状态最差,处于扩张负脱钩阶段。这一时期青海经济快速发展,能源工业逐渐成为青海支柱行业,工业化的推进拉动了全省消费需求也带动能源消费的上升,但仍存在经济增长方式粗放、能源开发程度低、利用率差等问题,导致青海人均能源消费量远高于全国平均水平,使青海的碳排放脱钩受到制约。2010—2015年,9个省份为强脱钩状态,处于扩张连结状态的省份降低至1个,整体脱钩状态优化,各省份间脱钩差距拉大。其中,强脱钩省份主要集中在东部地区,这主要是因为这些省份处于中国经济较发达地区,产业结构合理、技术创新能力强、对外开放程度较高,经济增长对能源依赖程度减弱;而中部地区的黑龙江脱钩状态恶化,由弱脱钩转为扩张负脱钩,可能是因为该时期黑龙江产业结构调整力度较大,经济增长速度随着产业结构调整变缓,而能源结构和利用效率尚未改善,导致经济增长对能源的依赖程度增强。2015—2019年,处于强脱钩状态的省份增至14个,无扩张负脱钩省份。其中,西部地区省份在脱钩进程中追赶速度较快,广西、四川、陕西、甘肃均达到强脱钩状态,主要是因为这些省份基础设施相对完善,市场化程度较高,且西部大开发带动人力资本的转移、技术创新的增强、产业结构的优化和外资的引进,使当地能源利用效率显著提高;北京、山西、上海、广东、福建、重庆由强脱钩转为弱脱钩,脱钩状态变差,说明中国的碳排放脱钩状态较不稳定,碳排放量还处于波动上升阶段,因此亟需加强落实碳排放治理政策,进一步推动中国能源的碳排放脱钩。

2.4 碳排放脱钩的驱动因素分析

2.4.1 各地区碳排放脱钩状况及其驱动因素分析

利用公式(25),将碳排放脱钩指数分解成七个驱动因素的效应值,表3报告了中国30个省份碳排放脱钩指数的分解结果。由表3可知,研究期内中国东部地区的碳排放脱钩状态最好,平均脱钩指数为0.188,低于中部地区的0.240;西部地区脱钩状态相对较差,平均碳排放脱钩指数为0.449。从省级层面来看,大部分省份的碳排放脱钩状态以弱脱钩为主导,表明中国推动经济增长与碳排放脱钩有良好成效。其中,北京、天津、吉林、浙江和山东的平均碳排放脱钩指数达到负值,说明2005—2019年强脱钩在此四省占主导地位,而青海、宁夏的平均碳排放脱钩指数大于0.8,以扩张连结为主,碳排放的脱钩状况不够理想。

从各省的碳排放脱钩指数分解来看,要素替代效应和技术进步效应是各省碳排放脱钩指数下降的主要驱动力。技术进步效应在13个省份中是促进碳排放脱钩的最大贡献者,要素替代效应是其他17个省份碳排放脱钩的最大推动力。从三大地区的均值来看,发现在东部和中部地区,技术进步效应对当地碳排放脱钩产生的贡献大于要素替代效应;而在西部地区要素替代效应的贡献大于技术进步效应。具体而言,在技术进步效应方面,东部和中部地区技术进步的速度较高,平均技术进步碳排放脱钩指数分别为-0.533和-0.516;西部地区技术进步较缓慢,平均技术进步碳排放脱钩指数为-0.385。这与中国东中西地区的梯度发展现状相吻合。东部和中部地区作为中国较发达地区,技术水平高、创新能力强,集中了中国大部分技术密集型企业,技术进步推动东部和中部地区碳排放与经济增长的脱钩。在要素替代效应上,西部地区平均要素替代碳排放脱钩指数为-0.399,是西部地区促进碳排放脱钩的主要因素。这可能是由于中国先后启动“西部大开发”以及“一带一路”倡议等刺激了西部地区的投资建设,且东部地区产业结构调整进一步推动中西部地区承接东部产业转移,资本大量积累促进了资本对能源的替代,推动碳排放与经济增长的脱钩。另外由于西部地区能源储备充足而资本存量较低,资本投入的边际效应要相对高于东部地区,这也推动了要素替代效应对碳排放脱钩的促进作用。

能源结构、效率变动、产业结构、经济水平和人口规模对中国碳排放脱钩的作用以抑制为主。在能源结构效应方面,大部分省份的能源结构对碳排放脱钩产生较小抑制作用,这是因为中国大部分省份的能源结构调整不完全,以煤炭为主的能源消费结构未得到实质性改变,导致在大部分省份能源结构调整对碳排放脱钩的促进作用没有发挥出来。分地区来看,能源结构碳排放脱钩指数由小到大依次为西、中、东部地区,这主要与中西部地区近年来致力于降低对煤炭能源的依赖有关。而黑龙江、广东、海南、四川和云南等少数省份的能源

结构对碳排放脱钩有微弱的促进作用。这可能是由于黑龙江近年来大力转变和创新产业结构,开发利用新能源,使其能源结构效应对碳排放脱钩的促进作用相较于其他省份更显著;广东经济发达,在全国起示范引领作用,大范围推广天然气等清洁能源对煤炭、石油等能源的替代,能源结构调整力度大;海南工业比重低,能源需求稳定且拥有丰富的风能、光能资源,更便于能源结构的优化;四川、云南两省不断推进水能、光能和油气资源的勘探开发,促进两省能源结构的调整。

表3 中国各省碳排放脱钩指数分解结果

Table 3 Decomposition results of carbon emission decoupling index of 30 provinces in China

地区 Region	D_t	D_{CC}	D_{PEC}	D_{EEF}	D_{TEC}	D_{YS}	D_{ED}	D_P
北京 Beijing	-0.009	0.091	-0.304	-0.032	-0.728	0.003	0.713	0.249
天津 Tianjin	-0.006	0.097	-0.249	-0.059	-0.730	-0.022	0.750	0.206
河北 Hebei	0.266	0.059	-0.604	0.494	-0.607	-0.048	0.889	0.083
山西 Shanxi	0.273	0.011	-0.093	0.270	-0.812	-0.075	0.880	0.092
内蒙古 Inner Mongolia	0.515	0.000	0.169	0.005	-0.661	0.023	0.936	0.041
辽宁 Liaoning	0.429	0.044	0.280	-0.312	-0.600	0.034	0.972	0.010
吉林 Jilin	-0.321	0.161	-0.808	0.066	-0.737	0.046	0.978	-0.027
黑龙江 Heilongjiang	0.284	-0.108	-0.101	0.081	-0.606	0.039	1.011	-0.032
上海 Shanghai	0.199	0.001	-0.320	0.008	-0.514	0.053	0.786	0.185
江苏 Jiangsu	0.386	0.071	-0.285	0.215	-0.578	-0.008	0.929	0.042
浙江 Zhejiang	-0.099	0.009	-0.481	0.207	-0.745	-0.044	0.834	0.121
安徽 Anhui	0.381	0.036	-0.540	0.247	-0.439	0.105	0.933	0.039
福建 Fujian	0.284	0.031	-0.462	0.108	-0.394	0.037	0.887	0.077
江西 Jiangxi	0.557	0.006	-0.483	0.361	-0.386	0.078	0.926	0.055
山东 Shandong	-0.063	0.042	-0.662	0.056	-0.458	0.005	0.890	0.064
河南 Henan	0.072	0.035	-1.082	0.461	-0.366	0.065	0.934	0.025
湖北 Hubei	0.179	0.024	-0.711	0.172	-0.321	0.052	0.934	0.028
湖南 Hunan	0.221	0.015	-0.605	0.100	-0.317	0.069	0.899	0.061
广东 Guangdong	0.195	-0.024	-0.794	0.251	-0.228	0.024	0.791	0.175
广西 Guangxi	0.340	0.045	-0.666	0.244	-0.353	0.096	0.912	0.061
海南 Hainan	0.484	-0.015	-0.604	0.338	-0.284	0.069	0.870	0.111
重庆 Chongqing	0.239	0.005	-0.465	0.105	-0.422	0.054	0.887	0.074
四川 Sichuan	0.392	-0.004	-0.533	0.162	-0.293	0.090	0.947	0.024
贵州 Guizhou	0.331	0.034	-0.596	0.247	-0.363	0.045	0.977	-0.014
云南 Yunnan	0.326	-0.022	-0.543	0.206	-0.360	0.078	0.906	0.060
陕西 Shaanxi	0.333	0.017	-0.389	0.064	-0.359	0.028	0.934	0.037
甘肃 Gansu	0.028	0.018	-0.873	0.324	-0.412	0.004	0.924	0.043
青海 Qinghai	0.930	0.058	0.091	0.127	-0.408	0.063	0.913	0.086
宁夏 Ningxia	0.974	0.025	0.180	0.071	-0.381	0.084	0.877	0.118
新疆 Xinjiang	0.594	0.003	-0.191	0.276	-0.499	0.019	0.798	0.187
平均 Average	0.291	0.026	-0.424	0.162	-0.479	0.036	0.894	0.076
东部地区 East region	0.188	0.037	-0.408	0.116	-0.533	0.009	0.846	0.120
中部地区 Central region	0.240	0.020	-0.473	0.196	-0.516	0.045	0.937	0.031
西部地区 West region	0.449	0.018	-0.399	0.183	-0.385	0.056	0.908	0.068

* 基于数据可获取性,本文尚未统计到我国港澳台相关数据

在效率变动效应方面,除北京、天津和辽宁,其他省份的效率变动碳排放脱钩指数均大于0,表明中国大部分省份的生产技术效率较低,投入要素没有得到充分利用,使效率变动对碳排放脱钩呈抑制作用。与中西部地区相比,东部地区的效率变动碳排放脱钩指数较小,说明效率变动对东部地区产生的抑制效应较小。一

方面,东部地区作为中国率先发展起来的地区,劳动力素质和产业结构水平高且提升速度较快,促进了东部地区能源利用效率的提高;另一方面,尽管中西部地区承接了东部大量的人口和资本转移,但大多流向能源利用效率低的产业,且中西部地区的自主创新能力相对较弱,仍存在依靠投资和资源开发促进经济增长的现象,因此效率变动效应对中部与西部地区碳排放脱钩的抑制作用大于东部地区,且已成为中西部地区抑制碳排放脱钩的第二大因素。

在产业结构效应方面,大部分省份的产业结构变化阻碍了碳排放脱钩,这与中国现阶段仍处于“二三一”的产业结构水平有关。分地区来看,产业结构碳排放脱钩指数由小到大依次为东、中、西部地区。这与高耗能产业由东向西转移的现实产业调整情况相适应。少部分省份如天津、河北、山西、江苏、浙江的产业结构促进了碳排放的脱钩,说明这些省份在研究期内产业结构的优化政策发挥作用较好。

在经济水平效应方面,经济水平是各省抑制碳排放脱钩的最主要因素,其中经济水平对东部地区的抑制作用最小,西部地区次之,对中部地区的抑制作用最大。这是因为近年来东部地区首先进入高质量发展阶段,已处于较高的发展水平,而中西部地区处于快速发展阶段,经济发展动力强,经济的快速发展增大了能源消费的需求。

在人口规模效应方面,除吉林、黑龙江和贵州由于人口外流使人口规模对碳排放脱钩产生一定的积极影响外,人口规模总体上对中国各省的碳排放脱钩呈阻碍作用。其中东部地区的人口规模对碳排放脱钩的抑制作用最大,是东部地区抑制碳排放脱钩的第二大因素。中西部地区的人口规模对碳排放的脱钩的抑制作用相对东部地区来说较小。主要是由于随着中国经济的发展,人口逐渐从落后地区向发达地区集聚,中西部地区人口向东部转移,导致东部地区人口规模扩张,阻碍了碳排放脱钩。

2.4.2 中国碳排放脱钩的驱动因素贡献度分析

进一步对全国碳排放与经济增长的脱钩指数进行分解,得到结果如表 4 和图 6 所示。总体来看,要素替代和技术进步是促进中国碳排放脱钩的最大推动力,对中国碳排放脱钩指数的平均贡献度分别为-200.50%和-198.62%。2014 年前,碳排放脱钩主要依靠要素变动,2014 年后主要依靠技术进步,同时要素替代对碳排放脱钩的促进效果呈减弱趋势,技术进步的促进效果呈增强趋势。技术进步在 2010 年前对脱钩的促进作用不太明显,这是因为当时减排技术并未得到推广,且 2008 年金融危机后以恢复经济为第一要务,因此以增加产值和促进经济发展为重点。要素替代是影响中国碳排放脱钩指数变化最活跃、最主要的因素。2013 年碳

表 4 中国碳排放脱钩指数分解结果

Table 4 Decomposition results of carbon emission index in China

年份 Year	D_t	D_{CC}	D_{PEC}	D_{EEF}	D_{TEC}	D_{YS}	D_{ED}	D_P
2005—2006	0.791	0.032	-0.161	0.114	-0.266	0.094	0.911	0.067
2006—2007	0.553	0.043	-0.415	0.157	-0.283	0.083	0.905	0.062
2007—2008	0.561	-0.058	-0.352	0.183	-0.253	0.056	0.906	0.080
2008—2009	0.520	0.007	-0.631	0.159	-0.057	0.062	0.905	0.075
2009—2010	0.333	0.046	-0.661	0.325	-0.432	0.083	0.889	0.085
2010—2011	0.781	-0.021	-0.174	0.262	-0.390	0.077	0.978	0.049
2011—2012	0.325	-0.006	-0.523	0.099	-0.300	0.053	0.946	0.056
2012—2013	-0.657	0.088	-1.555	0.062	-0.226	0.037	0.879	0.057
2013—2014	0.225	0.040	-0.515	0.256	-0.517	0.005	0.891	0.066
2014—2015	0.032	-0.018	-0.496	0.394	-0.756	-0.030	0.865	0.073
2015—2016	0.174	0.006	-0.407	0.506	-0.842	-0.027	0.852	0.085
2016—2017	-0.269	0.041	-0.669	-0.190	-0.358	-0.038	0.866	0.080
2017—2018	-0.325	0.051	-0.473	0.056	-0.899	-0.021	0.884	0.078
2018—2019	0.320	0.069	0.289	0.086	-1.103	-0.016	0.919	0.076
各年均值 Average value	0.240	0.023	-0.482	0.176	-0.477	0.030	0.900	0.071
平均占比 Average percentage	100%	9.50%	-200.50%	73.36%	-198.62%	12.44%	374.44%	29.39%

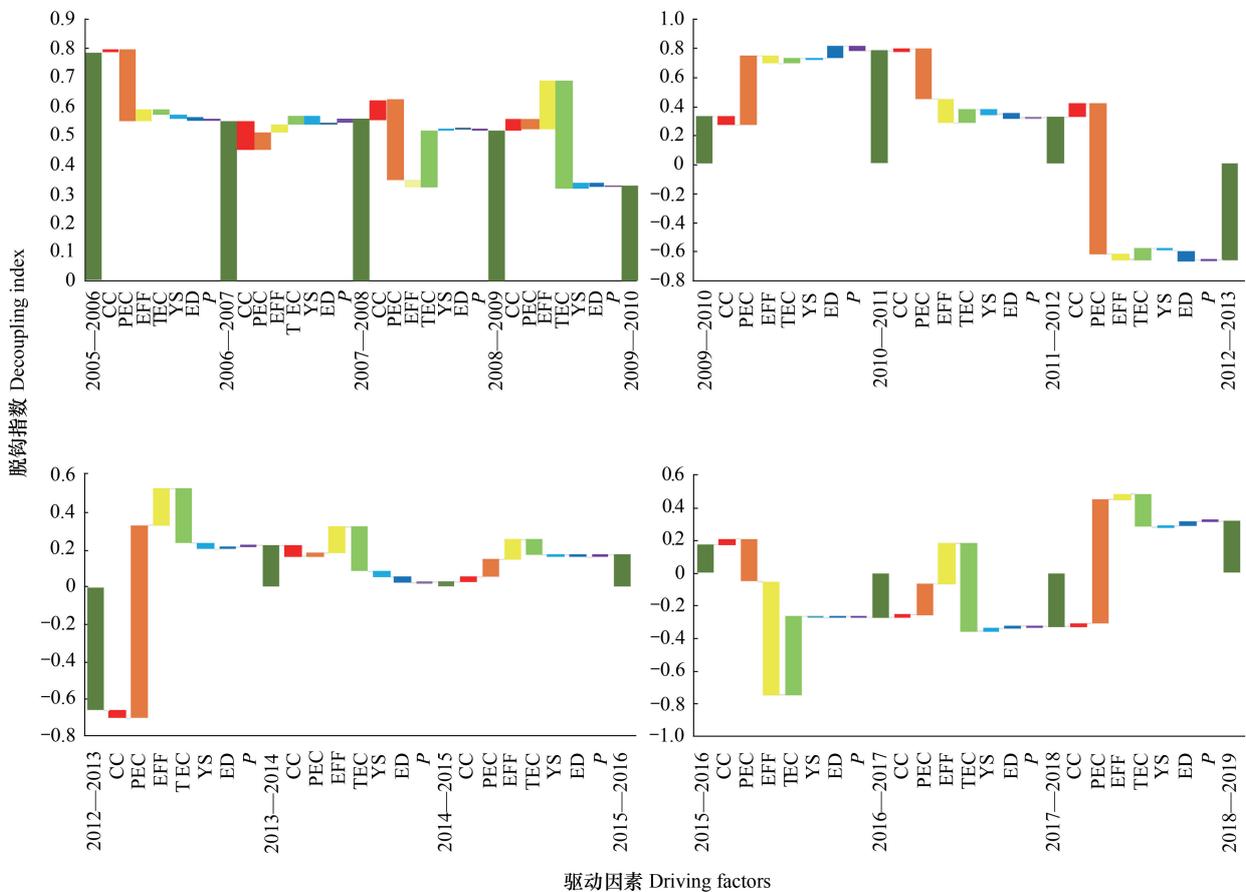


图6 中国碳排放脱钩指数变化及其分解

Fig.6 Changes and decomposition of the Chinese carbon emission decoupling index

CC: 能源结构, Energy structure; PEC: 要素替代, Factor substitution; EFF: 效率变动, Efficiency change; TEC: 技术进步, Technical progress; YS: 产业结构, Industrial structure; ED: 经济水平, Economic level; P: 人口规模, Population size

排放的显著下降主要是因为“十二五”规划进入投资项目集中建设阶段,大大增加了全国资本积累,使 2012—2013 年投入要素替代对碳排放脱钩的推动作用显著增强。2019 年中国碳排放脱钩状态的恶化可能是由于中美贸易摩擦叠加全球经济放缓,中国经济持续下行,经济效益走弱,全国投资缩减,资本对能源的替代作用减弱,导致碳排放增加。

经济水平是碳排放脱钩的最大不利因素,平均贡献度为 374.44%,这是由于工业化、城市化和交通运输的发展在推动经济增长的同时促进能源消费的增长,导致碳排放量攀升,对碳排放脱钩产生抑制作用。效率变动效应和人口规模效应是碳排放脱钩的另外两个阻碍因素。效率变动效应对碳排放脱钩指数的平均贡献度为 73.36%。2016 年以后效率变动的碳排放脱钩指数下降,技术效率变动向好,但仍处于不稳定状态。人口规模效应对碳排放脱钩指数的平均贡献度为 29.39%,是碳排放增加的主要驱动因素。绝对人口数量的增长拉动能源消费规模增大,同时为满足人民生存和发展需要,经济产出持续增长带动相应能源消费,且生态环境的破坏减少二氧化碳吸收,使人口数量与碳排放量之间存在正相关关系。中国人口增速总体呈下降趋势,人口增长放缓会减少碳排放,这将对我国碳减排和碳排放脱钩产生积极影响。

能源结构效应和产业结构效应对中国碳排放脱钩的影响较小且呈阻碍作用。尽管中国一直在致力于能源绿色低碳转型和产业结构优化升级,但测算发现 2005—2019 年,能源结构效应和产业结构效应对碳排放脱钩仍以抑制作用为主。一方面,研究期内能源结构效应对中国的碳排放脱钩指数的平均贡献度为 9.50%,有较弱的抑制作用,这是因为中国富煤贫油少气的能源禀赋形成了中国以煤炭为主的能源生产和消费结构。虽

然当前高碳能源占中国能源消费比重仍然较大,但是近年来中国煤炭消费占比呈下降趋势,清洁能源消费占比持续提升,这将导致能源结构效应对脱钩产生更积极的作用。另一方面,产业结构效应对碳排放脱钩指数的平均贡献度为 12.44%,抑制作用逐渐降低,且 2015 年后产业结构效应对脱钩转为积极作用,这主要是因为中国致力于淘汰落后产能,推动供给侧结构性改革,发展战略性新兴产业和服务业,使经济结构越来越朝着利于中国经济绿色发展的方向变化。然而,由于产业结构对中国碳排放脱钩指数变化的影响十分微弱,中国在致力于达成碳排放与经济增长脱钩目标时应注重技术进步和技术效率的提高。

2.4.3 中国碳排放脱钩的地区贡献度分析

通过式(26)测算出三大地区对中国碳排放脱钩指数的相对贡献度,详见图 7。2005—2010 年,三大地区均抑制了中国碳排放的脱钩,其中东部地区的抑制作用最强,对碳排放脱钩指数的贡献度保持在 35%以上,这与东部地区率先发展、经济规模大、总碳排放量大有关。同时由于产业部门由东向中西部地区大规模转移,中西部地区的资本投入量增大,推动资本对能源的替代,中西部地区碳排放增速相对于经济增速放缓,与东部地区相比,其对碳排放脱钩的抑制作用较弱。

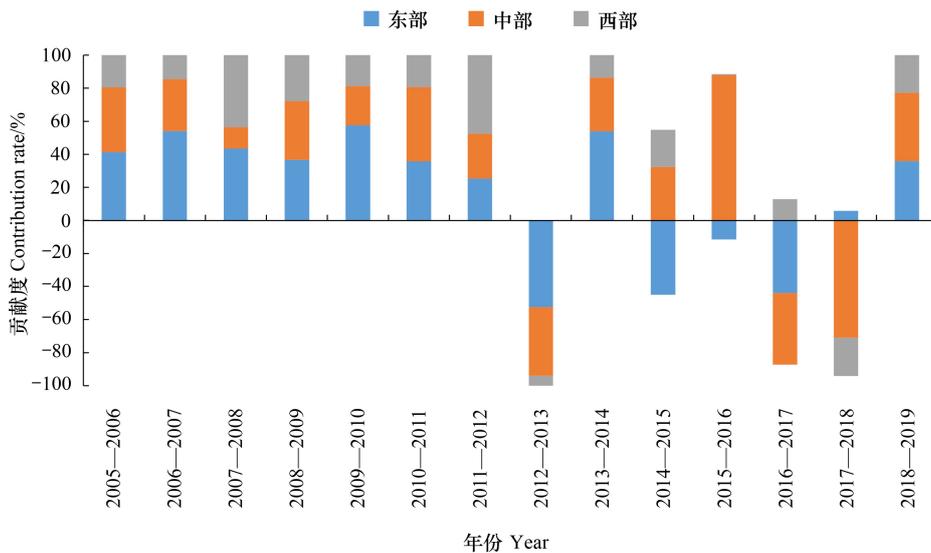


图 7 三大地区对中国脱钩指数的分解结果

Fig.7 Decomposition results of the decoupling index in three regions from 2005 to 2019 in China

2010—2012 年,东部地区对中国碳排放脱钩的抑制作用占三大地区整体的比重逐渐减小,对碳排放脱钩指数的贡献度由 57.62%下降到 25.25%。具体而言,北京、天津、辽宁、江苏、浙江等东部地区的省份由于生产技术的进步和资本投入的增强,脱钩指数有不同程度的下降,脱钩状态向好,促进东部地区对中国碳排放脱钩抑制作用的减小;同时西部地区对碳排放脱钩的抑制作用逐渐增强,缘于此时西部地区经历资本投入和技术提升强度的减弱,对中国碳排放脱钩的抑制作用增大。

2012—2019 年,东中西三大地区对中国碳排放脱钩的作用不稳定,变化较大,对中国碳排放脱钩发挥正向推进作用的年份分别为 4 年、3 年和 2 年,其中 2012—2013 年三大地区的要素替代效应对碳排放的脱钩作用显著增强,导致三大地区均对中国碳排放脱钩产生积极贡献,贡献度分别为 52.55%、41.49%和 5.96%,但由于中国能源消费规模大,碳排放脱钩指数容易出现反弹;2013—2019 年,三大地区生产技术水平都有不同程度的提高,产业结构效应对碳排放脱钩的作用开始由抑制转向促进,要素变动效应的推动作用减弱,导致各地区在不同年份对碳排放脱钩指数的贡献为正。

3 结论与建议

本文基于 IPCC 碳核算方法和 Tapio 脱钩模型,对中国经济增长与碳排放的脱钩效应以及时空特征进行探讨,并进一步将 IDA 和 PDA 分解法相结合,将中国碳排放脱钩的驱动因素分解为能源结构、要素替代、效率变动、技术进步、产业结构、经济水平和人口规模七个部分,得到以下结论:①2005—2019 年,中国碳排放总量呈现以 2012 年为分界的波动上升趋势,碳排放脱钩指数呈波动下降趋势,以“弱脱钩”为主,脱钩状态良好,说明中国的碳减排工作得到有效落实。②东部地区是中国碳排放的主要来源地,其次是西部地区,且西部地区碳排放占比上涨幅度较大;东部和中部地区碳排放脱钩状态较好,在 2015—2019 年达到强脱钩,西部地区虽仍处于弱脱钩阶段,但是碳排放脱钩指数显著降低,脱钩状态优化。同时,中国省域间脱钩状态差别较大,碳排放脱钩指数总体呈西北高、东南低的分布格局。③对于驱动因素的贡献度,要素替代和技术进步是促进中国碳排放脱钩的关键因素,经济水平是抑制中国碳排放脱钩最主要的因素,能源结构、效率变动、人口规模对中国脱钩主要表现为抑制作用,没有发挥降低碳排放量的潜力。④对于三大地区的贡献度,2005—2010 年,三大地区对中国碳排放脱钩指数的贡献度没有发生显著变化;2010—2012 年,东部地区对碳排放脱钩的抑制作用逐渐减小,西部地区对碳排放脱钩的抑制作用逐渐增强;2012—2019 年,三大地区对中国碳排放脱钩的作用不稳定,变化较大,其中东部地区对中国碳排放脱钩起促进作用的时间最长。

基于以上结论,结合中国现阶段碳排放与社会经济发展状况提出以下政策建议:

一是加强区域间交流合作,发挥经济发达、碳减排成效显著地区的带动作用。由于经济发展和技术水平的差异,西部地区在产业转移中承接了大量的高耗能高排放产业,碳排放脱钩状态较差。因此,需制定合理的区域间合作政策,加强东中部经济发达地区碳减排的空间溢出效应,带动西部地区在经济发展的同时,学习其他地区的碳减排经验,革新低碳技术,促进全国碳排放与经济增长的脱钩。

二是优化能源结构和投资结构,鼓励技术创新。对于当前大部分省份而言,能源结构对其脱钩的促进作用尚未显现,应进一步促进能源结构调整,根据各地资源禀赋增加光能、风能、氢能等清洁能源在能源消费中的比例,充分挖掘能源结构对碳排放脱钩的潜力。同时,由于要素替代和技术进步是现阶段中国碳排放脱钩的主要驱动力,应在增加投资的同时优化投资结构,重视对开发清洁能源、提高能源利用效率方面的投资。西部地区应抓住产业转移的机遇,进一步提高资本能源替代率;东中部地区要把握现有技术优势,加大科研支出,充分发挥技术进步对脱钩的促进作用。

三是完善碳排放治理政策,弥补各地区发展不足。虽然中国碳排放脱钩指数总体呈下降趋势,但波动性较大,且多个省份如北京、山西、上海等出现从强脱钩到弱脱钩的变化,碳排放脱钩状态不稳定。各省应借鉴先进省份的治理经验,完善碳减排政策,因地制宜、分类施策,弥补治理漏洞,巩固治理成果。例如,东部地区面对人口增长压力,可采取措施规范居民经济活动,倡导节能减排,降低人口规模对脱钩的抑制作用;河北、河南等中西部低效率地区可采取财政补贴等政策,引导能源使用效率的提升。同时各地区应寻找新的经济增长点,促进经济高质量发展,降低经济增长对能源消耗的依赖。

参考文献(References):

- [1] Sovacool B K. Who are the victims of low-carbon transitions? Towards a political ecology of climate change mitigation. *Energy Research & Social Science*, 2021, 73: 101916.
- [2] 张赫,黄雅哲,王睿,张建勋,彭竞仪. 中国县域碳排放脱钩关系及其时空特征演变. *资源科学*, 2022, 44(4): 744-755.
- [3] 林伯强. 碳中和进程中的中国经济高质量增长. *经济研究*, 2022, 57(1): 56-71.
- [4] 宋旭,贾俊松,陈春谔,陈皆红. 江西省能耗碳排放时空特征、脱钩关系及其驱动因素. *生态学报*, 2020, 40(20): 7451-7463.
- [5] Yang J, Hao Y, Feng C. A race between economic growth and carbon emissions: What play important roles towards global low-carbon development? *Energy Economics*, 2021, 100: 105327.
- [6] 武娜,沈镭,钟帅,张超. 晋陕蒙地区经济增长与碳排放时空耦合关系. *经济地理*, 2019, 39(9): 17-23.
- [7] Andersen M S. Do 'green' taxes work? Decoupling environmental pressures and economic growth. *Public Policy Research*, 2005, 12(2): 79-84.
- [8] 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. *Transport*

- Policy, 2005, 12(2): 137-151.
- [9] 吕靖烨, 李珏. 中国各省份碳排放脱钩效应、驱动因素及预测研究. 环境科学与技术, 2022, 45(2): 210-220.
- [10] Apeaning R W. Technological constraints to energy-related carbon emissions and economic growth decoupling: A retrospective and prospective analysis. Journal of Cleaner Production, 2021, 291: 125706.
- [11] Papież M, Śmiech S, Frodyma K. Does the European Union energy policy support progress in decoupling economic growth from emissions? Energy Policy, 2022, 170: 113247.
- [12] Rajabi K N. CO₂ emissions in the Middle East: Decoupling and decomposition analysis of carbon emissions, and projection of its future trajectory. Science of the Total Environment, 2022, 845: 157182.
- [13] Simbi C H, Lin J Y, Yang D W, Ndayishimiye J C, Liu Y, Li H M, Xu L X, Ma W J. Decomposition and decoupling analysis of carbon dioxide emissions in African countries during 1984-2014. Journal of Environmental Sciences, 2021, 102: 85-98.
- [14] Conte G M. Carbon emission targets and decoupling indicators. Ecological Indicators, 2016, 67: 649-656.
- [15] Andreoni V, Galmarini S. Decoupling economic growth from carbon dioxide emissions: A decomposition analysis of Italian energy consumption. Energy, 2012, 44(1): 682-691.
- [16] 张诗卉, 李明煜, 王灿, 安康欣, 周嘉欣, 蔡博峰. 中国省级碳排放趋势及差异化达峰路径. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(9): 45-54.
- [17] 罗芳, 郭艺, 魏文栋. 长江经济带碳排放与经济增长的脱钩关系——基于生产侧和消费侧视角. 中国环境科学, 2020, 40(3): 1364-1373.
- [18] 王良栋, 吴乐英, 陈玉龙, 马晓哲, 杜梦娜. 经济平稳增长下黄河流域相关省区碳达峰时间及峰值水平. 资源科学, 2021, 43(11): 2331-2341.
- [19] 舒心, 夏楚瑜, 李艳, 童菊儿, 史舟. 长三角城市群碳排放与城市用地增长及形态的关系. 生态学报, 2018, 38(17): 6302-6313.
- [20] 宋晓聪, 杜帅, 沈鹏, 谢明辉, 赵慈, 刘晓宇, 陈忱. 中国制造业 CO₂ 排放与经济脱钩关系解析. 环境科学与技术, 2022, 45(7): 201-208.
- [21] Wang M, Feng C. Exploring the driving forces of energy-related CO₂ emissions in China's construction industry by utilizing production-theoretical decomposition analysis. Journal of Cleaner Production, 2018, 202: 710-719.
- [22] 刘伟, 毛显强, 李巍, 成润禾. 黄河流域城市群工业增长与碳排放脱钩关系研究. 环境工程技术学报, 2023, 13(2): 849-856.
- [23] Raza M Y, Lin B Q. Decoupling and mitigation potential analysis of CO₂ emissions from Pakistan's transport sector. Science of the Total Environment, 2020, 730: 139000.
- [24] 查建平, 戴家权, 刘珂吉, 余乔, 周志坚. 旅游增长与碳排放脱钩状态及其驱动因素研究——一个新的脱钩分析框架. 旅游学刊, 2022, 37(4): 13-24.
- [25] Karmellos M, Kosmadakis V, Dimas P, Tsakanikas A, Fylaktos N, Taliotis C, Zachariadis T. A decomposition and decoupling analysis of carbon dioxide emissions from electricity generation: Evidence from the EU-27 and the UK. Energy, 2021, 231: 120861.
- [26] 陈柔, 何艳秋, 朱思宇, 徐杰. 我国农业碳排放双重性及其与经济协调性研究. 软科学, 2020, 34(1): 132-138.
- [27] Yang L S, Li Z. Technology advance and the carbon dioxide emission in China: Empirical research based on the rebound effect. Energy Policy, 2017, 101: 150-161.
- [28] 杜运苏, 孙辉煌. 中国出口贸易隐含碳排放增长因素分析: 基于 LMDI. 世界经济研究, 2012(11): 44-49, 88.
- [29] 赵玉焕, 李浩, 刘娅, 曹叶, 张中华, 王淦. 京津冀 CO₂ 排放的时空差异及影响因素研究. 资源科学, 2018, 40(1): 207-215.
- [30] 田华征, 马丽. 中国工业碳排放强度变化的结构因素解析. 自然资源学报, 2020, 35(3): 639-653.
- [31] 侯丽朋, 王琳, 钱瑶, 唐立娜. “双碳”目标下闽三角碳排放脱钩状态及驱动机制分析. 生态学报, 2022, 42(23): 9663-9676.
- [32] 杨莉莎, 朱俊鹏, 贾智杰. 中国碳减排实现的影响因素和当前挑战——基于技术进步的视角. 经济研究, 2019, 54(11): 118-132.
- [33] Wang C H. Decomposing energy productivity change: A distance function approach. Energy, 2007, 32(8): 1326-1333.
- [34] 孙作人, 周德群, 周鹏. 工业碳排放驱动因素研究: 一种生产分解分析新方法. 数量经济技术经济研究, 2012, 29(5): 63-74, 133.
- [35] 范丹. 中国能源消费碳排放变化的驱动因素研究——基于 LMDI-PDA 分解法. 中国环境科学, 2013, 33(9): 1705-1713.
- [36] Zhang W, Tang X, Yang G L, Zha D L. Decomposition of CO₂ emission intensity in Chinese MIs through a development mode extended LMDI method combined with a production-theoretical approach. Science of the Total Environment, 2020, 702: 134787.
- [37] 秦军, 唐慕尧. 基于 Kaya 恒等式的江苏省碳排放影响因素研究. 生态经济, 2014, 30(11): 53-56.
- [38] 林伯强, 杜克锐. 理解中国能源强度的变化: 一个综合的分解框架. 世界经济, 2014, 37(4): 69-87.
- [39] 郑新业, 吴施美, 郭伯威. 碳减排成本代际均等化: 理论与证据. 经济研究, 2023, 58(2): 107-123.
- [40] 孙广生, 黄祎, 田海峰, 王凤萍. 全要素生产率、投入替代与地区间的能源效率. 经济研究, 2012, 47(9): 99-112.
- [41] 徐现祥, 周吉梅, 舒元. 中国省区三次产业资本存量估计. 统计研究, 2007, 24(5): 6-13.
- [42] 宗振利, 廖直东. 中国省际三次产业资本存量再估算: 1978—2011. 贵州财经大学学报, 2014(3): 8-16.