

DOI: 10.5846/stxb202205291509

陈慧灵, 高子恒, 王振波. 省级尺度工业碳排放影响因素及碳转移格局. 生态学报, 2023, 43(14): 5816-5828.

Chen H L, Gao Z H, Wang Z B. Analysis on influencing factors of industrial carbon emission and carbon transfer pattern at provincial level. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(14): 5816-5828.

## 省级尺度工业碳排放影响因素及碳转移格局

陈慧灵<sup>1,2</sup>, 高子恒<sup>2</sup>, 王振波<sup>1,\*</sup>

1 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101

2 湖南工商大学公共管理与人文地理学院, 长沙 410205

**摘要:** 随着全球气候变暖以及区域间产业关联程度加深, 产业转型升级和产业转移所引起的碳排放空间重塑成为低碳研究的主要领域之一。利用碳排放清单法及环境效应分解模型, 估算中国工业碳排放量变化及其影响因素, 同时分析产业转移背景下省际间碳排放的转移格局, 以探讨区域节能减排与发展平衡的有效策略。研究表明: 2005—2019 年期间, 中国的工业碳排放量格局一直是环渤海地区为单核心, 邻近的山东、浙江、内蒙古逐渐增加; 省级尺度层面, 产业规模对工业产业发展引起的环境效应强度最大, 产业结构的作用相对较弱; 工业碳排放的空间转移主要呈现由沿海区域向内地转移, 转出高耗能产业碳排放量最多的省份是山西、山东、辽宁、上海, 而高耗能产业碳排放量转入最多的省份是新疆、安徽、山东; 碳排放的转入、转出并不与各省经济发展水平的位置完全等同, 经济发达省份也会因能源需求或国家战略政策的影响, 呈现某段时间内工业碳排放的转入。结论有助于为全局视角下区域间横向联合碳减排政策的制定提供决策依据。

**关键词:** 工业; 产业转移; 碳排放转移; 影响因素; 中国

## Analysis on influencing factors of industrial carbon emission and carbon transfer pattern at provincial level

CHEN Huiling<sup>1,2</sup>, GAO Ziheng<sup>2</sup>, WANG Zhenbo<sup>1,\*</sup>

1 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 School of Public Administration and Human Geography, Hunan University of Technology and Business, Changsha 410205, China

**Abstract:** With global warming and the deepening inter-regional industrial linkage, the spatial reshaping of carbon emissions caused by industrial transformation and upgrading and industrial transfer has become one of the main areas of low-carbon research field. Using the carbon emission inventory method and the environmental effect decomposition model, this paper estimates the changes in industrial carbon emissions and their influencing factors in various province in China. The inter-provincial carbon emission transfer pattern in the context of industrial transfer is also analyzed to explore effective strategies for regional energy conservation, carbon emission reduction and balanced regional development. Studies have shown that from 2005 to 2019, China's industrial carbon emission pattern has been based on the Bohai Rim region as the single core, and the neighboring Shandong, Zhejiang and Inner Mongolia gradually increased. At the provincial level, the intensity of the environmental effect caused by industrial scope on industrial development is the greatest, and the role of industrial structure is relatively weak; the spatial transfer of industrial carbon emissions is mainly from the coastal region to the interior, and the provinces with the largest output of carbon emissions from energy-intensive industries are Shanxi, Shandong, Liaoning, and Shanghai, while the provinces with the largest inflow of carbon emissions from energy-intensive

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(4210011454); 湖南省自然科学基金青年基金项目(2021JJ40155); 湖南省社科评审委项目(XSP21YBC275)

**收稿日期:** 2022-05-29; **网络出版日期:** 2022-11-16

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangzb@igsnr.ac.cn

# 本研究尚缺中国港、澳、台和西藏统计数据。

industries are Xinjiang, Anhui, and Shandong. The inflow and outflow of carbon emissions are not exactly equivalent to the position of each province's economic development level; economically developed provinces also present a transfer of industrial carbon emissions in a certain period of time due to energy demand or national strategic policies. This paper explored the role of provinces in the transfer of carbon emissions from domestic industry, and the efforts of carbon reduction in different provinces should match their positions in the supply chain. In recent years, the eastern region with high degree of industrialization, bearing the pressure of carbon emissions from other provinces, has been experiencing a large net outflow of carbon emissions from industries, which can moderately increase carbon sinks in the oceans and forests. For Anhui, Guizhou and other provinces with long-term net inflow of industrial carbon emissions, the transfer of energy-intensive industries should be planned in a reasonable and timely manner to avoid the administration after the contamination. For coal-rich provinces with carbon emissions outflow such as Nei Monggol and Shanxi, it is necessary to improve the access threshold for high-pollution industries and promote the timely transformation of high-carbon industries. The conclusion is helpful to provide decision-making basis for the formulation of inter regional horizontal joint carbon emission reduction policies under the global perspective.

**Key Words:** industry; industrial transfer; carbon emission transfer; influencing factors; China

碳排放导致的气候变暖是备受关注的环境问题,而中国是碳排放量最多的国家之一<sup>[1]</sup>。碳排放主要来源于人类生产生活,其中产业活动产生的碳排放占全社会总量的绝大比例<sup>[2]</sup>。随着双碳目标的提出,环境保护已成为转变经济发展方式的内在要求,政府积极谋划与投入绿色升级工程、节能改造和降碳固碳技术等低碳项目,关注产业碳排放特征及变化趋势则是其优化控制中的关键环节。改革开放以来,中国持续推进工业化进程,工业地理格局得到了重塑,沿海地区劳动密集型产业率先向内陆地区转移<sup>[3]</sup>。产业转移的规模和类型正在不断扩大,对转出地与承接地经济增长与环境都会产生影响,并带来产业规模、技术以及结构的变化<sup>[4]</sup>。由于区域之间产业基础的差异,产业转移对不同地区的影响差异显著,也可能是负面影响<sup>[5-7]</sup>。随着中国区域经济一体化程度的加深,产业的跨区域流动越发频繁<sup>[8]</sup>,因此探究产业转移对碳排放演变的影响及隐含的碳转移格局研究是推进区域可持续发展的重点课题之一。

国内碳排放研究始于上世纪 80 年代,话题集中在碳排放效率、碳排放交易、碳排放权的分配等等<sup>[9-10]</sup>。21 世纪以来,研究视角开始关注区域碳排放的差异、驱动因素及转移趋势模拟,研究尺度和技术方法都得到了进一步的深化与拓展<sup>[11-13]</sup>。已有研究针对区域碳排放的影响因素开展了大量实证分析,主要包括城市化率、区域经济发展水平、能源消费结构与强度、产业结构、人口规模等,产业结构被认为是起决定性的影响因素之一<sup>[14-15]</sup>。同时学者们利用运用面板模型、对数平均迪式指数法(LMDI)、多目标规划等各类方法度量产业结构对碳排放的影响方向与程度,测度指标以三产比例为主,发现工业产业对碳排放量和碳排放强度影响最显著,是主要的碳排放贡献部门。受工业产业能源消费等相关数据获取限制,研究尺度多基于宏观层面,少数学者已进行我国尺度工业产业的碳排放结构影响因素研究<sup>[16]</sup>,缺乏为什么不同省市工业产业比例变化差异会导致不同的碳排放变化差异的机理性分析。随着碳减排政策的制定以及任务的分配,区域间碳排放权及责任分担引起关注,产业转移过程中隐含碳问题成为焦点。目前产业转移对污染影响研究的关注点主要是“污染避难所”效应<sup>[17-18]</sup>,部分研究提出产业转移是为发达地区寻找“污染避难所”,转入地在承接产业转移时,也间接承接了环境污染<sup>[19-20]</sup>。产业转移过程隐含碳以及相关污染物的流动,会导致承接地碳排放的增加,也可能存在碳泄漏,邓荣荣等学者的研究结果验证了产业的转入或转出并不必然导致碳排放净转入或转出<sup>[21]</sup>。另一种观点则认为产业转移通过贸易发展、技术溢出等方式,提高承接地劳动生产率与技术水平,从而对碳排放的减少具有正向影响<sup>[22-23]</sup>。因而产业转移对环境的影响具有两面性,对碳排放的影响也存在不确定<sup>[24-25]</sup>,部分省份对高能耗项目盲目采取“一刀切”的减排策略,可能引致上下游行业的连锁反应<sup>[26]</sup>。而具体到省级尺度产业转移背景下碳排放量的研究中,学者们使用不同方法进行估算,方法的不同会导致碳排放

量估算结果出现差异性。较多学者利用投入产出方法计算包含中间投入碳排放的最终产品的隐含碳排放,如李艳梅、潘安等分别利于区域间投入产出表、世界投入产出表测度了城市群、国家内部以及国际的产业转移与碳排放转移,结果展示了不同地区引起的环境效应差异<sup>[27-28]</sup>;这类研究主要更多是针对全产业,以横截面分析模型为主,空间上变化的研究不多,而中国是每 5 年编制一次投入产出表,时间跨度较大,如果能找到替代的碳排放转移量估算方法构建空间面板数据模型就有助于扩大信息量、提高动态分析的可靠性,更好的表达产业结构、经济制度渐进性变化趋势,因而本文采用同样主流的碳排放清单编制方法估算各省市的工业碳排放量。

中国的东、中、西部地区之间经济梯度差异明显<sup>[29]</sup>。2010 年发布的《关于中西部地区承接产业转移的指导意义》,提出加速中西部地区工业化进程,引导沿海区域资源密集型与劳动力密集型产业转移到中西部地区。在国际产业高端化和国内产业转型升级的双重影响下,沿海地区向内陆地区产业转移渐成规模,各省之间围绕承接产业转移进程的利益也展开了激烈的竞争<sup>[30]</sup>。目前工业化仍未完成,尤其是工业化前期、中期阶段的省份亟需拓展规模与类型以更好推进工业化进程,因而大规模的产业转移主要发生于工业部门。工业产业在不同区域的生产活动对环境的影响是有区别的,中西部地区的能源与产业结构、技术水平都落后于沿海区域,碳排放系数都较高,在承接产业转移进程中是否也转入了碳排放?这种碳排放转移呈现怎样的产业与格局特征?这些问题对弄清区域间产业转移的生态利益得失具有重要的意义。本文以中国部分省为研究对象,在不考虑产业自身增长基础上,测算各省工业产业的能源消费量与碳排放量,基于此探讨产业转移进程中工业碳排放量演变的影响因素以及碳转移的区位特性,为区域间横向联合碳减排政策的合理制定提供建议。

## 1 研究方法数据来源

### 1.1 研究方法

#### 1.1.1 工业产业转移的估算

在一定时间范围内,区域工业的自身增长与地区内外工业的迁入迁出都会对工业产值的总变化量产生影响。产业转移表现为产业的空间流动,发达国家能通过企业区位迁移来精确测算产业转移的规模及方向<sup>[31]</sup>;而中国缺乏该类数据,大多是间接测度转移规模<sup>[32]</sup>,主要有四类:第一类是利用区域间投入产出表全面地定量测度区域间产业转移,该方法估算的产业转移量是区域中某地区最终需求(扣除自身需求)引起另一地区的产出增加量<sup>[27]</sup>。第二类方法是在专业化指数的基础上,通过产业集聚的变化来间接判断产业转移的相对值<sup>[18]</sup>。第三类是通过地区产业部门增加值占我国该部门总和的比重与前一年该数值的对比得到该转移量<sup>[27]</sup>。第四类方法是利用偏离份额模型计算区域间产业转移量<sup>[33]</sup>。这四种方法均存在一定局限性,本文基于已有成果,使用第三种方法估算工业产业转移量,假定我国是封闭的市场,没有进出口,各省对所有产品的需求等于产出;将产业转移定义为地区产业的实际增长与不发生转移前提下自身增长间的差距<sup>[4, 34]</sup>。

对于工业产值变化总量,设在  $t$  年,  $a$  省的  $k$  类工业的产值为  $P_{t,ak}$ 。同理得,在  $t-1$  年  $a$  省的  $k$  类工业产值为  $P_{t-1,ak}$ 。由此可推出从  $t-1$  时期到  $t$  时期,  $a$  省  $k$  类工业产值的变化量,设为:  $\Delta P_{(1)t,ak} = P_{t,ak} - P_{t-1,ak}$ 。

对于工业自身增长量,易知其与工业的生产率关系紧密,假设  $a$  省  $k$  类工业的生产率等于我国平均水平,即在一定时间内,地区工业增长率等于我国平均增长率设为  $S_{t,ak}$ 。由此推算出从  $t-1$  期到  $t$  期,在不发生产业转移的情况下工业自身增长量。

$$\Delta P_{(2)t,ak} = P_{t-1,ak} \times (1 - S_{t,ak})$$

综上所述,工业产业转移量设为:

$$\Delta P_{t,ak} = \Delta P_{(1)t,ak} - \Delta P_{(2)t,ak}$$

#### 1.1.2 工业产业碳排放的估算

本文主要是采用碳排放清单方法中“自上而下”的能源表现消费量参考方法估算工业产业碳排放,应用官方能源统计数据估算能源消费碳排放量,这种方法对数据要求简单,省级尺度的估算可消除统计口径而带来的差异性。通过各类能源的消耗量推算热值数值,再基于热值数值推算二氧化碳结合量,最后推算得到二

氧化碳排放量。

具体公式如下:

$$Q(\text{CO}_2) = \sum_k M_k \times \text{NCV} \times \text{CEF} \times \text{COF} \times 44/12$$

式中,  $Q(\text{CO}_2)$  代表工业碳排放的总量,  $k$  代表不同类型的能源;  $M$  代表不同类型能源的工业行业消费总量;  $\text{NCV}$  代表不同类型能源的平均低位发热量;  $\text{CEF}$  代表某一种类的能源单位热值当量所对应的碳排放因子;  $\text{COF}$  代表地球大气的碳氧化因子(化石燃料使用过程中, 其中被氧化的碳含量接近 100%, 故以 1 为近似值代入运算); 44 代表二氧化碳 ( $\text{CO}_2$ ) 的分子量, 12 代表碳 (C) 的分子量。

工业碳排放强度由工业碳排放量与工业产值的比值得到, 设为:

$$R_{t,ak} = Q_{t,ak}/P_{t,ak}$$

式中,  $Q_{t,ak}$  表示在  $t$  时期内,  $a$  省份  $k$  类工业行业的碳排放量。

### 1.1.3 工业产业碳排放转移的估算

本文工业碳排放转移量的估算思路为: 工业转移量乘工业碳排放强度得到工业碳排放转移量。碳排放强度与技术水平由密切联系, 假设各省碳排放强度与我国该产业的碳排放产生强度相等, 设为:  $R_{t,k}$

通过工业转移量与之相乘得到从  $t-1$  到  $t$  时期产业转移背景下,  $a$  省  $k$  类工业产业碳排放的转移量, 记为:

$$\Delta Q_{t,ak} = \Delta P_{t,ak} \times R_{t,k}$$

### 1.1.4 环境效应模型

产业转移带来碳的转移, 为了进一步分析碳转移产生的环境效应的驱动因素, 本文将进一步将其拆解。本文探讨产业转移背景下工业碳排放影响因素分解是基于 Grossman 等提出的规模、技术、结构是影响碳排放的三个关键因素这一理论基础<sup>[35]</sup>, 其中规模主要指工业产业产值, 技术主要指单位工业产值所消耗的碳排放(即碳排放强度), 结构主要代表工业各行业部门能源消费结构。因此, 最后反映出的碳排放强度的变化实际上是受到了产业结构、能源强度与能源消费结构三个因子的影响。

$$\Delta Q \approx (P_{t,k} - P_{t-1,k}) \sum_a R_{t,a} \times \frac{Q_{t,ak}}{Q_{t,k}} + Q_{t,k} \sum_a R_{t,a} \times \left( \frac{Q_{t,ak}}{Q_{t,k}} - \frac{Q_{t-1,ak}}{Q_{t-1,k}} \right) + Q_{t,a} \sum_a (R_{t,a} - R_{t-1,a}) \times \frac{Q_{t,ak}}{Q_{t,k}} = \Delta Q_t + \Delta Q_s + \Delta Q_{te}$$

规模效应指的是产业转移背景下工业规模增长对环境的影响; 结构效应指的是产业转移造成产业结构调整对环境的影响; 技术效应指的是产业转移推动技术变革对环境造成的影响。本文将根据规模效应系数  $\Delta Q_t/\Delta Q$ 、结构效应系数  $\Delta Q_s/\Delta Q$ 、技术效应系数  $\Delta Q_{te}/\Delta Q$ 、直观地分析不同驱动因素对环境的影响力度。

## 1.2 数据来源

本研究以我国 30 个主要省份为研究对象(暂缺少中国西藏、港澳台统计数据), 以 2005—2019 年为研究年份, 将我国划分为三个区域: 东部地区、中部地区、西部地区(图 1)。根据《国民经济行业分类(GB/T 4754—2017)》, 工业行业可分为 37 个部门; 根据各部门资源能源消耗及环境影响的研究<sup>[36—37]</sup>, 这些部门可分为高能耗、中能耗、低能耗三类, 其中高能耗行业包括石油加工、炼焦和核燃料加工业, 黑色金属冶炼和压延加工业, 非金属矿物制品业, 化学原料和化学制品制造

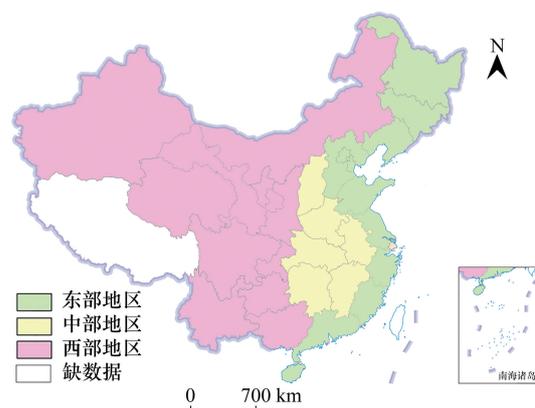


图 1 中国三大地区分布示意图

Fig.1 China's three major economic zones

业,有色金属冶炼和压延加工业,电力、热力生产和供应业。在本文当中,工业总产值、各类能源消费量以各省统计年鉴为依据,平均低位发热量(NCV)、碳排放因子(CEF)以《中国能源统计年鉴》为依据,折原煤系数(CORC)以《各种能源折标准煤参考系数》为依据。

## 2 结果分析

### 2.1 中国省域工业碳排放量的影响因素

#### 2.1.1 工业碳排放的时空演变特征

中国各区域工业碳排放量的测算结果表明(如图2),2005—2019年间东部与西部的工业碳排放总量是持续上升的,中部地区的工业碳排放量前期上升但2013年后开始呈缓慢下降趋势;东部地区工业碳排放总量远远高于其他两个区域,中部工业碳排放总量基本一直略高于西部地区,但经过多年的发展渐趋于接近,但2013年以后,西部地区与中部地区之间工业碳排放量差距逐渐缩小,直到2019年有反超趋势。2019年,东部地区与中西部地区的差额拉大到2.5倍左右。

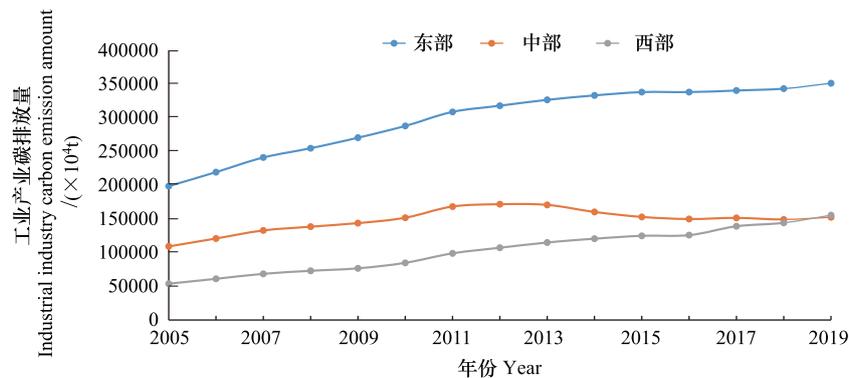


图2 中国三大区域工业产业碳排放量变化图

Fig.2 Change of industrial industry carbon emissions in China's three major economic zones

根据图3,整体呈现东部的环渤海地区、江苏、浙江与广东的工业碳排放总量远高于其余地区。东部地区中除北京外,各省工业碳排放总量均呈增加趋势;北京工业碳排放量持续降低与产业升级和转移战略相关。中部地区的湖北、河南是相对周边区域的工业碳排放高地,这是因为东部地区部分劳动密集型的高排放产业生产基地建在了中部地区,因而中部交通设施水平高、工业基础较好的省份(如湖北、河南)的工业碳排放总量较高。西部地区则以内蒙古、新疆两个省份的工业碳排放量较高;西部地区的内蒙古工业碳排放量较大且增长迅速,新疆的工业碳排放总量基数较小,但一直保持高速增长,到2019年这两个省份的碳排放总量已达前列。

#### 2.1.2 工业碳排放的影响因素分析

2005—2019年间,中国各省的工业碳排放量一直在增加,但2013年以后增加的速度明显放缓。本研究首先在不考虑产业转移前提下,测算2005—2019年间各省工业产值自身增长值及其引起的环境效应(表1)。

表1 中国各省工业产值增长值及产生的环境效应量

Table 1 The growth value of industrial output value in China's provinces and the corresponding environmental effects

省或市 Provinces or cities	产值 Industrial output value/亿元				环境效应 Environmental effects/万 t			
	2005—2009	2009—2013	2013—2016	2016—2019	2005—2009	2009—2013	2013—2016	2016—2019
山东	6097.40	7951.47	2045.09	5954.87	25334.19	27267.08	6562.67	17900.26
河南	1494.99	2401.99	784.73	2624.93	16125.42	16154.67	3231.65	7965.83
陕西	1281.00	2237.42	723.32	2135.58	4176.67	5145.54	1506.71	3980.84
河北	4296.32	6679.03	1829.42	5080.85	22127.98	26222.88	6289.98	17371.59
山西	1744.35	2474.99	546.84	1426.46	10944.10	10245.64	6289.98	17371.59
辽宁	2655.31	4453.93	1308.63	2443.73	9344.68	11098.80	3105.87	6914.01

续表

省或市 Provinces or cities	产值 Industrial output value/亿元				环境效应 Environmental effects/万 t			
	2005—2009	2009—2013	2013—2016	2016—2019	2005—2009	2009—2013	2013—2016	2016—2019
吉林	637.33	1040.63	300.01	861.41	2111.26	2231.94	453.93	985.81
黑龙江	1843.57	2020.36	431.44	885.98	6407.09	5791.73	1229.51	3092.95
内蒙古	908.97	1406.70	400.40	1240.06	10312.04	12276.93	3083.56	10458.14
宁夏	183.08	308.09	86.91	281.99	2520.80	3371.63	1008.18	3452.20
甘肃	557.00	788.09	201.51	523.39	4355.69	4452.50	1165.82	2780.12
新疆	774.84	1073.07	290.89	830.53	5326.64	6838.16	2546.86	6876.61
青海	457.01	700.17	221.84	696.53	1893.79	2349.80	674.83	1744.65
江苏	7054.80	9879.81	2734.84	8777.75	19599.05	21414.39	4853.79	12579.37
安徽	1769.63	3297.62	1065.06	3341.27	6684.67	6905.14	1748.01	4536.12
湖北	1903.74	3478.85	1103.50	3568.86	10233.02	11872.00	2111.85	5245.67
四川	2031.20	3580.19	1062.04	3043.66	10176.52	10295.70	2030.43	4085.14
浙江	4826.19	6275.49	1693.66	5301.10	2893.02	3178.20	796.38	2276.87
江西	1253.42	2183.26	683.60	2081.70	4109.44	4522.41	1220.65	3238.63
湖南	2024.45	3619.10	1185.91	3577.09	8580.53	9537.33	1911.56	4972.62
福建	2404.08	3934.31	1287.20	4318.13	6125.62	6783.15	1746.93	4614.28
广东	8573.04	11574.47	2784.53	9527.23	16206.55	17582.58	3813.80	9795.72
广西	1080.31	1872.08	559.28	1616.00	6151.51	7282.42	2059.64	5810.80
贵州	410.36	792.50	297.14	1006.27	3740.83	5252.52	1059.01	2723.66
云南	913.51	1349.88	401.48	1166.59	7941.46	6980.55	1476.59	3869.57
北京	1109.56	1301.59	343.49	1027.19	3013.97	2076.72	315.94	771.18
天津	1504.22	2338.54	710.44	1842.22	3528.99	4496.23	1221.47	2946.34
上海	2957.36	3419.70	791.49	2340.90	6446.02	5933.61	1230.39	2964.29
重庆	1008.79	1555.98	523.93	1632.77	2893.02	3178.20	796.38	2276.87
海南	1502.52	1977.04	567.68	1687.04	675.05	755.63	197.10	559.88

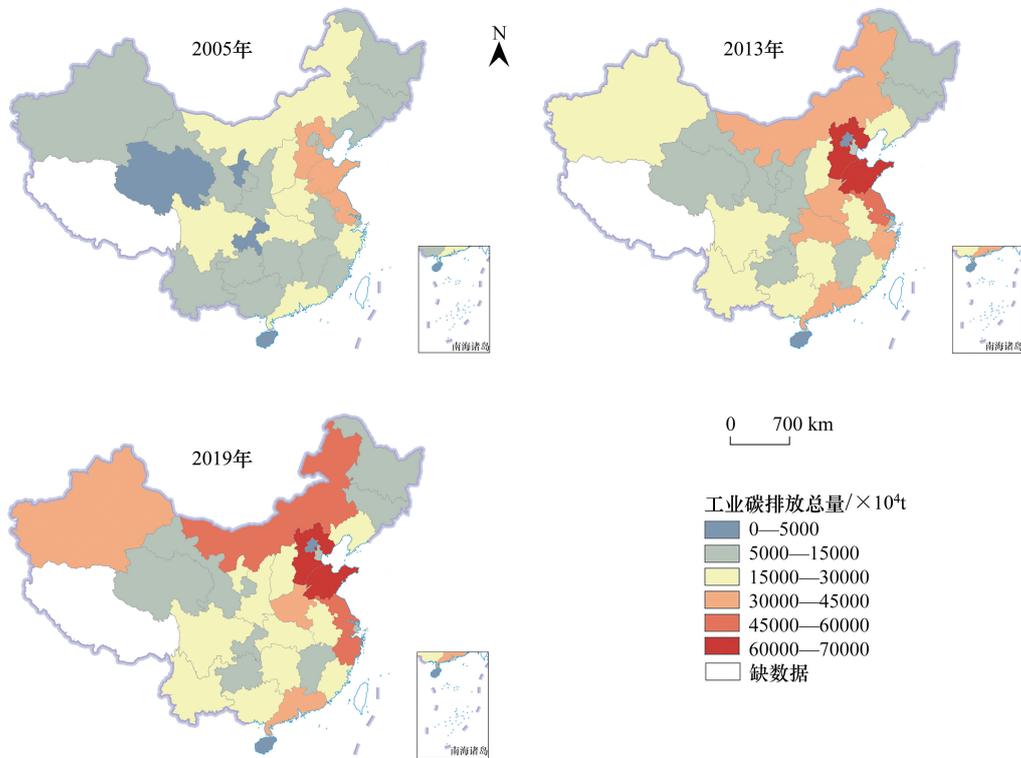


图3 中国各省工业碳排放总量

Fig.3 Total industrial carbon emissions by provinces in China

(1)工业自身增长的环境效应

根据表 1,在 2005—2009、2009—2013、2013—2016 及 2016—2019 年这些时段内,我国工业产值自身增长值的估算分别为 65285.33、95966.32、26966.31、80842.08 亿元,引起的环境效应分别为 239304、260738、65542、173601 万 t,各时间段内的碳排放强度为 3.66、2.71、2.43、2.14 万 t/亿元,碳排放强度是逐渐降低的,侧面印证工业的发展趋势从粗放转向精细。从时间演变来看,前些年份工业发展带来的生态环境污染更大,随着经济发展方式的逐渐转变和减排技术的进步,工业生产活动过程中劳动生产率、各类能源利用效率、碳排放效率在逐步提高。从空间差异来看,工业产值增速越快的省份产生的环境效应也越大,然而区域之间存在差异,东部地区的平均产值增速高于中部地区,但环境效应的变化趋势与却与此相悖,这是因为工业生产过程中技术水平、精细程度的不同;此外就单个地区而言,东部地区的内部差异明显,最高的山东与吉林、福建之间相差巨大。中国各省份处于工业化进程的不同阶段中,产业规模、产业结构和技术水平不同,都会对产值和环境造成影响的空间异质性。

(2)影响因素分析

从影响因素的分解结果来看(图 4),规模效应系数在几乎所有省份(除青海外)的表现上均大于结构和 技术效应系数,说明在省级尺度这一层面上,产业规模效应对工业碳排放量变化的影响同样也是最大的,且是显著的正向影响,与已有研究结论一致;意味着产业规模对省域工业碳排放量增加的影响最大,这是因为生产活动的基础是能源的消耗,工业产业规模总量的扩大意味着碳排放量的增多。技术效应对几乎所有省份(除甘肃和河南外)工业碳排放量变化为负向影响,本研究的结果说明技术效应在重庆、广西、山东等省份,系数达-1.01、-1.29 和-0.78,发挥出非常强的减排效果;技术效应综合了能源利用效率、能源强度、物理效率等各个方面,既通过提高能源利用效率与能源强度带来节能减排效应,又通过新的工业产业类型增加产生新的能源需求增多碳排放量。结构效应为正向效应和负向效应的省份数量差不多,本研究的结构效应指的是由于工业产业结构变化,对不同碳排放强度工业产业分布变化的影响,从而影响工业碳排放总量的变化,在省这一尺度层面上工业产业结构比产业规模、技术效应的影响程度要小,主要发挥间接作用。

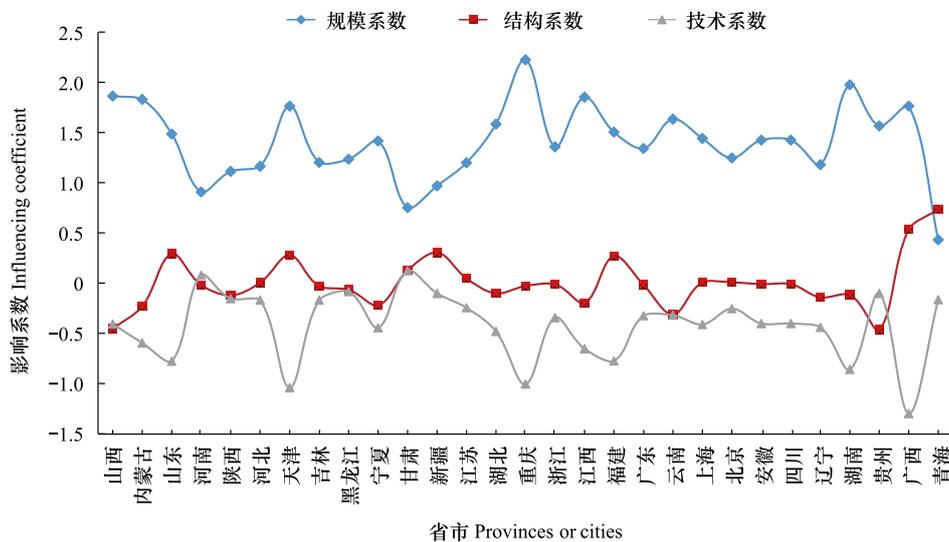


图 4 2005—2019 年我国部分省工业产业增长过程中的环境效应及影响系数

Fig.4 Environmental effect and influence coefficient in the process of industrial growth of provinces and cities in China from 2005 to 2019

2.2 省际间工业碳排放转移格局分析

2.2.1 碳转移时空变化格局

根据测算得到(图 5),2005—2013 年间中西部在工业碳排放转移部表现为转入,转入高值区主要分布在中部及西南地区。在 2005—2013 年间,广东、长江下游各省份作为中国经济发展水平较好的高梯度地区,由

于地租、劳动力等生产成本的逐渐上升,部分工业产业开始向经济发展水平相对落后、生产成本更低、政策优惠的低梯度地区转移。碳排放转移趋势符合由东向中西输出的状态。2013—2019年工业碳排放转入的省份主要集中于长江中下游省份及四川、福建以及广东。环渤海及东北开始发生大规模的碳排放转出,这两大地区一直是我国的重工业基地,在产业升级的迫切需求下,是主要的重化工业转出地,随着产业结构的优化以及对经济质量要求的进一步提高,这些省份工业碳排放转出量且不断扩大。西部大部分省份由大规模转入变为小规模转出。

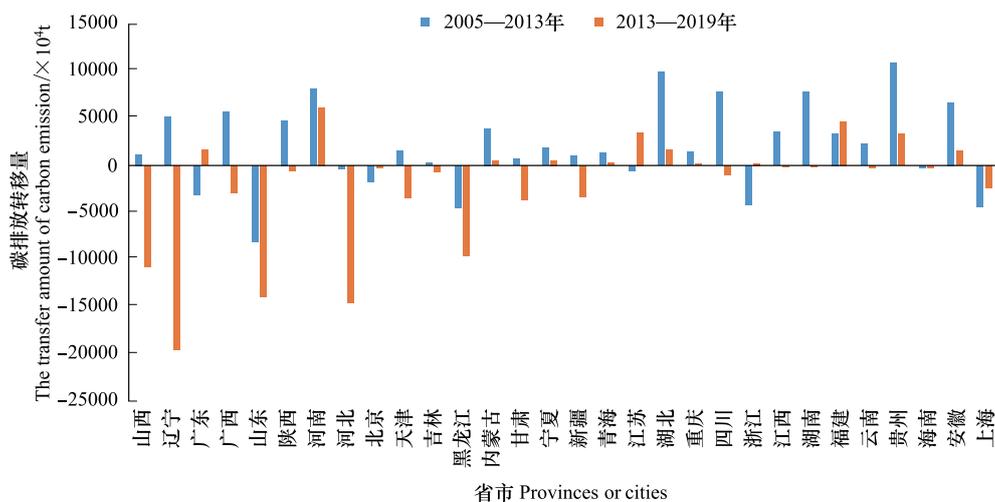


图5 2005—2019年部分省工业碳排放转移量

Fig.5 The amount of industrial carbon emission transfer of provinces and cities from 2005 to 2019

根据图6,在这两个时间间隔中,工业碳排放转移由承接地变为转出地的省份有:东部的天津、吉林、辽宁;西部的甘肃、陕西、新疆、广西、四川、云南及中部的山西、湖南、江西。其中,吉林、新疆、甘肃这些省产业结构经济效益提升慢、工业发展动力不足使得工业碳排放转移量的年度变化较小;湖南、江西、云南在自身工业碳排放量减弱或增长缓慢的情况下,呈现碳排放转出,说明其产业升级的成功,但也可能是工业产值增速降低的原因;山西呈现碳排放转出的原因可能是资源型行业的萎缩造成了工业产值的减少。工业碳排放转移由转出变为转入的省份有:江苏、浙江、广东,这些省份在2005—2013年间,因大规模的工业产业转移,呈现碳排放转出的特征,2013年后工业碳排放由转出变为转入。

### 2.2.2 高、中、低能耗工业碳转移变化

各省份之间由于产业基础及所处阶段的不同,2005—2019年各省间高、中、低能耗工业碳排放转出转入情况存在差异(如图7)。东部地区的吉林、辽宁、河北、山东、江苏、上海、浙江、海南,西部的内蒙古、重庆,中部的山西,这些地区高、中、低能耗工业碳排放均表现为转出。其中,辽宁、江苏、上海、山西的高能耗工业碳排放转出情况最为明显,主要与资源密集型企业的萎缩、高能耗企业的淘汰以及城市环境保护倡议有关。其中高能耗产业的省际差异最大,这是因为高能耗产业作为基础性产业,上下游关联产业多,前后向产业关联强。

东部的广东、福建,西部的广西、陕西、青海、四川、贵州,中部的河南、湖南和安徽,这些地区在2005—2019年间高、中、低能耗工业碳排放,均表现为转入,中西部地区转入的原因主要在于承接了环渤海、长三角各省份的工业产业转移。其余各省份不同类型能耗的工业碳排放既有转入也有转出,中西部基本以转入为主,东部以高、中能耗工业的转出为主,新疆为代表的西部省份高能耗工业碳排放转入量较高,原因在于自身资源的开发。

与以往研究类似,中国不同类型能耗的工业产业区域差异特征显著,这是由于不同的区域条件造成的。最重要的是,产业结构将影响能源密集型产业中能源消耗和碳排放的空间差异。在六大高能耗产业中,电力、

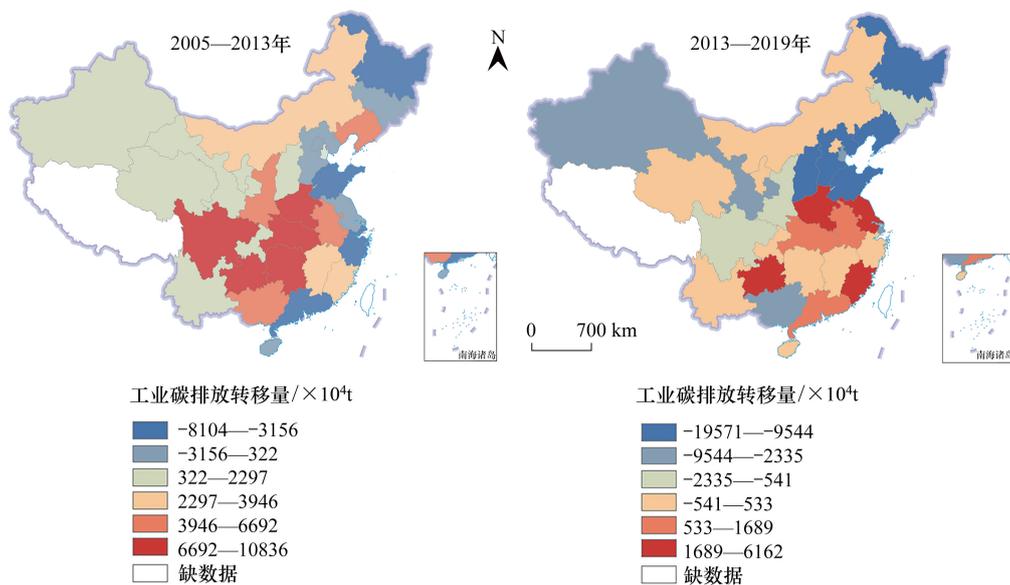


图 6 2005—2013 年及 2013—2019 年各省工业碳排放转移量空间格局

Fig.6 The spatial pattern of transfer amount of industrial carbon emission in each province from 2005 to 2013 and from 2013 to 2019

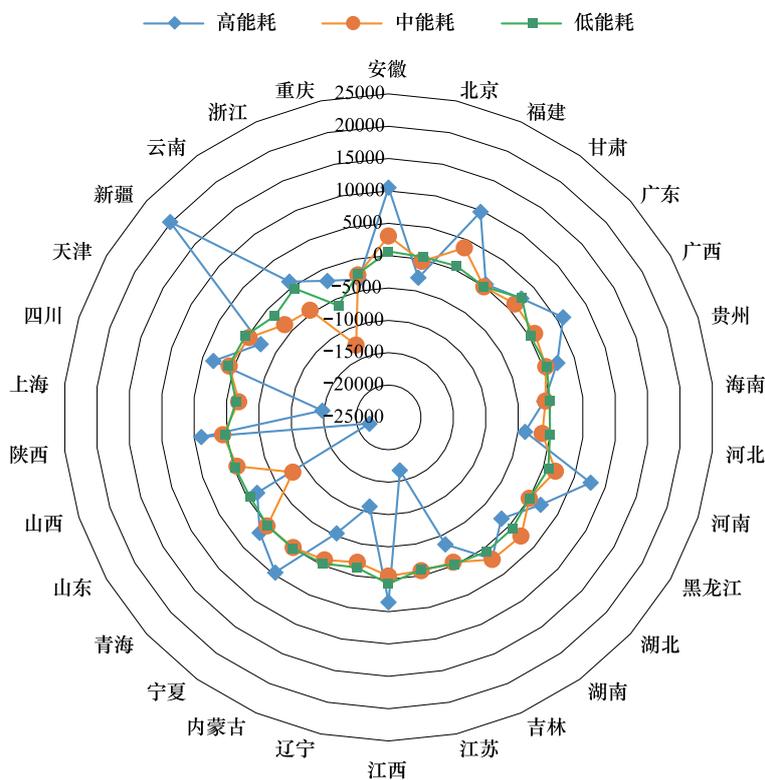


图 7 2005—2019 年中国部分省高中低能耗工业产业碳排放转移量/ $\times 10^4$  t

Fig.7 The transfer amount of carbon emission of high, middle and low energy consumption industries in provinces and cities of China from 2005 to 2019

热力的生产和供应业转移过程中伴随的隐含碳最多,电力、热力是居民生活和企业生产所必须的能源,并对清洁生产产生了负面影响。高能耗产业在空间布局上呈现出大规模省际转移,山东和江苏是主要产业转入地。

通过计算 2005—2019 年各省份高能耗产业碳排放量转入与转出的结果(如图 8、图 9),可以将 30 个省份划分为三种类型。第一种是高能耗产业碳排放量转入超过一万吨增长的省份,说明这期间这些省区的高能耗产业发展较快,是高能耗产业主要转入地,这一类省区有 3 个:新疆、安徽、山东,地理位置上看主要东中西部各一个。第二种是高能耗产业碳排放量转出超过一万吨增长的省份,这一类型的省份共有 3 个:山西、江苏和上海,共同点是均是经济非常发达地区或资源衰退型地区。第三种是高能耗产业碳排放量变化幅度都在一万吨区间内,说明这些省份的高能耗产业在十五年内没有发生太明显的变动。

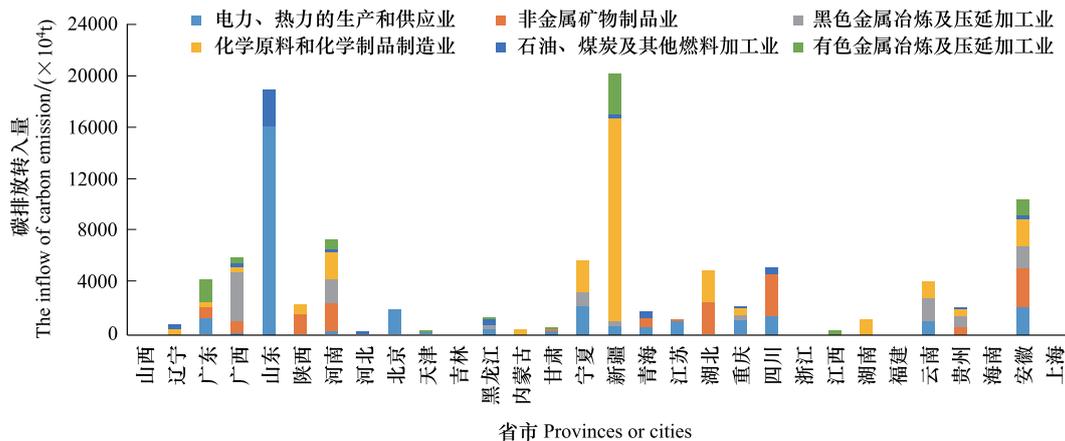


图 8 2005—2019 年中国部分省高能耗工业产业碳排放转入量

Fig.8 The inflow of carbon emission of high energy-intensive industries in provinces and cities of China from 2005 to 2019

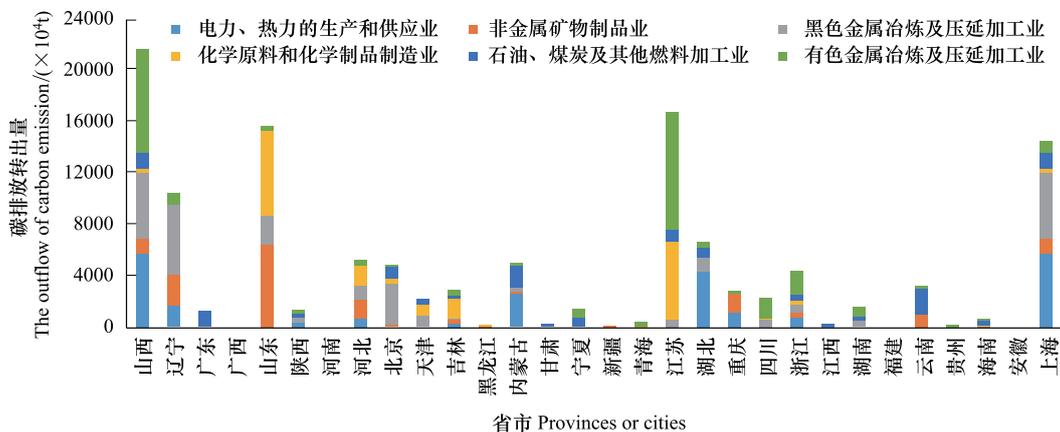


图 9 2005—2019 年中国部分省高能耗工业产业碳排放转出量

Fig.9 The outflow of carbon emission of high energy-intensive industries in provinces and cities of China from 2005 to 2019

### 2.2.3 典型产业的碳转移分析

各省碳排放转移较为复杂,考虑到区位、区域分布以及产业发展特殊性,本文选取中国六个代表省份(广东、浙江、安徽、河南、四川、新疆)的典型工业产业转移为例(见表 2)。高、中能耗工业产业是中西部地区转入的主要产业类型,造成的环境污染较大。中部地区省份主要转入包括金属加工、非金属矿物加工、化工业、纺织业等行业,西部地区省份主要转入能源开采、矿产开采、非金属矿物制品业等行业。沿海部分省份受原有产业结构影响,在转出化工业、非金属矿物制品及金属矿物制品业等高能耗工业的同时,也在转入电力、热力供应等能量型产业,以维持其庞大的重化工业体系的运行。东部沿海省份主要转入电子设备、计算机设备制造等高附加值产业,转出高中能耗产业与劳动密集型产业如纺织业,其中以长三角各省最为明显;而广东省在高

附加值制造业转入量上处于我国领先。中部地区的南方省份(如湖南)凭借其地理优势与工业基础,在转入金属加工业、纺织业的同时也在积极转入较高附加值的机械制造、通用设备制造等产业。西南地区的转入则以造纸、橡胶与塑料制品,外加传统的矿物加工业、化工产业。

表 2 2005—2019 年中国部分省工业产业碳排放转移情况

Table 2 Total industrial carbon emission transfer in China's provinces from 2005 to 2019

省份 Provinces	主要产业碳排放转入情况/ $10^4$ t Carbon emissions inflow of major industries	主要产业碳排放转出情况/ $10^4$ t Carbon emissions outflow of major industries
广东	计算机、通信和其他电子设备(+1653) 专用设备制造业(+273) 通用设备制造业(+529) 造纸及纸制品业(1037)	石油、煤炭及其他燃料加工业(-1288) 非金属矿物制品业(-269) 文教、工美、体育和娱(-514)
浙江	计算机、通信和其他电子设备(+268) 交通运输设备制造业(+315)	纺织业(-4735) 皮革、毛皮、羽毛及其制品(-1910) 通用设备制造业(-1760) 有色金属冶炼及压延加工业(-1140)
安徽	石油、煤炭及其他燃料加工业(+1744) 化学原料和化学制品制造业(+1231) 通用设备制造业(+733) 纺织业(+766) 电气机械及器材制造业(+335)	废弃资源综合利用业(-130) 煤炭开采和洗选业(-276)
河南	纺织业(+559) 化学原料和化学制品制造业(+2076) 黑色金属冶炼及压延加工业(+1859) 非金属矿物制品业(+2152)	废弃资源综合利用业(-142) 医药制造业(-138) 电力、热力生产和供应业(-272)
四川	非金属矿物制品业(+3242) 金属制品业(+711) 石油、煤炭及其他燃料加工业(+494) 橡胶和塑料制品业(+136)	专用设备制造业(-64) 仪器仪表制造业(-32)
新疆	化学原料和化学制品制造业(+5080) 有色金属冶炼及压延加工业(+3136) 电力、热力的生产和供应业(+703) 石油和天然气开采业(+566)	橡胶和塑料制品业(-1847) 农副食品加工业(-1046) 计算机、通信和其他电子(-1013)

本文从高中低能耗工业中各选一种产业以深入分析产业转移对工业碳排放的影响(见图 10)。黑色金属冶炼及压延加工业受供给侧影响较大,对产业链上下游的碳排放增长具有很强的拉动作用,产业链能源消耗对环境污染的影响程度较高,属于高能耗的产业,目前已大规模向中西部转入。纺织业属于传统轻工业,是中能耗的产业,在东部沿海省份土地租金、劳动力等生产成本大幅度增加的趋势下,不得不向外转移;由于东部地区交通运输、企业融资等成本较低,导致了要素和生产流动较快,纺织业的转移总体上锚定在中部地区工业基础较好且交通便利的省份如河南、安徽、湖北等中部地区,尚未大规模转入西部,但对这些优势省份的碳排放量转入作用较为明显,在 2009 年国家出台《纺织工业调整和振兴规划》也可以看出对该行业转移的支持力度。由于工业产业基础、集聚规模经济以及人才需求的影响,计算机、通信和其他电子设备这一低能耗、高附加值的新兴产业,主要转入长三角、广东这些经济发展水平比较高的东部沿海省份,近年来东部沿海省份逐步将该计算机、通信和其他电子设备行业中部分劳动力需求相对大的加工制造环节向中西部地区转移,自身则保留研发部门。广东省在向先进制造业转型的方面处于领先地位,对“中国制造 2025”等政策规划积极落实,但广东虽为发达省份,珠三角与非珠地区产业差异巨大,随着粤西部有色金属矿产的开发,配套矿产加工业的涌入,加之广东近年来对化工行业的大力发展,也使得其呈现部分年份碳排放量转入的重要原因。长三角地区陆地缺少油气资源,但广阔的东海海盆为长三角地区的提供十足的油气资源,近年来随着海上油气资源的不断开发,对长三角地区的碳排放转入起到了正向作用。同时沿海地区市场需求大,交通条件好,靠近国际市场和原料地等因素等都能够吸引国际产业布局,也会对这些地区的碳排放转入起到正向作用。

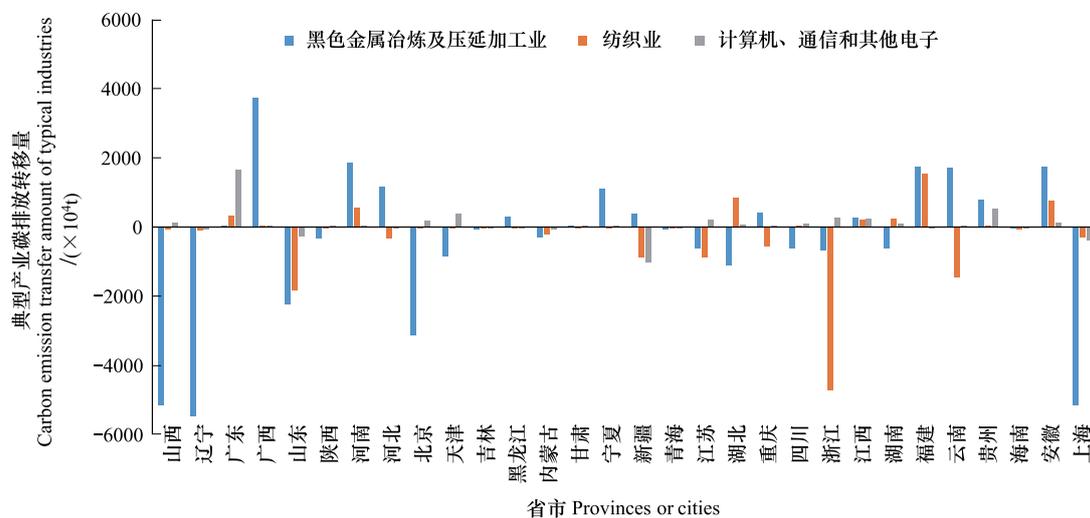


图 10 2005—2019 年中国部分省份典型产业碳排放转移量

Fig.10 Carbon emission transfer amount of typical industries in China's provinces from 2005 to 2019

### 3 结论与讨论

本文分析了 2005—2019 年工业碳排放的时空演变,从产业增长引发的环境、结构和技术效应三个方面进一步探讨碳排放变化的影响因素,并探讨区域间产业转移进程中的碳排放量转移格局与区位特性。得到以下结论:①2005—2019 年中国工业碳排放总量持续上升,且随着时间的推移,各区域之间工业碳排放量差异逐渐增大;各省的工业碳排放量分布格局一直是以环渤海地区为单核心,邻近的山东、浙江、内蒙古等省份的碳排放量也逐渐增加。②由于工业生产过程中的技术水平、精细程度的不同,东部省份的平均产值增速高于中部,但产生的环境效应的变化趋势却与此相悖;省级尺度层面,产业规模总体来说对工业产业发展引起的环境效应强度最大,产业结构的作用相对较弱,且只有少数欠发达的省份产业结构引起的环境效应相比技术水平的作用更强。③工业产业碳排放转移方面,2005—2013 年与 2013—2019 年两个时间段工业产业碳排放转移呈现不同的空间态势,转出量与转出类型存在明显差异。2005—2013 年间,环渤海、长三角、广东为三个主要转出地,碳排放转移趋势符合由东向中西输出的状态;2013—2019 年间,环渤海及东北作为我国重要的重工业基地,在产业升级的迫切需求下,是该时间段内的工业产业碳排放转出地。④工业产业碳排放量与产业转移有紧密联系,高能耗产业的省际差异最大,但工业产业碳排放的转入、转出并不与经济发展水平、所处产业链的位置完全等同,经济发达地区也会因能源需求或国家战略政策的影响,从而在某一时间段呈现碳排放的转入;同时对于省这一研究尺度而言,其内部经济状况的差异也会造成碳排放的转入与转出呈现相对的非典型特征。

本文深入探讨了各省市在国内工业产业碳排放转移中的角色,不同省市所作的碳减排努力应与其供应链中的地位相匹配。近年来,环渤海等工业化程度较高的东部地区,承担来自其他省市消费的碳排放压力,一直有大量工业产业碳排放净流出,可适度增加海洋和森林碳汇。对于安徽、贵州等长期的工业产业碳排放净流入的省份,高耗能工业产业的转入应合理规划承接规模及时序,避免先污染再治理。对于内蒙古、山西等中西部工业产业碳排放流出的煤炭大省,主要服务其他省市的消费,需提高高污染产业的准入门槛、推动高碳产业及时转型。由于技术对于减排的巨大作用,一方面,发达地区应持续提高可再生能源技术创新,并强化先进技术转移;另一方面,各省市都需鼓励低碳产业并改善消费结构,逐步推进产业结构的高级化。本研究结论有助于为区域经济发展关联视角下国家碳减排政策的制定提供一定的借鉴,避免产生不合理碳转移现象,进而影响整体的碳减排效果。本研究主要分析中国在省级尺度的工业碳排放流动,在结构模式预测及高碳产业深入

探讨方面仍有不足。

#### 参考文献(References):

- [ 1 ] Wang Q, Wang L L. The nonlinear effects of population aging, industrial structure, and urbanization on carbon emissions: a panel threshold regression analysis of 137 countries. *Journal of Cleaner Production*, 2021
- [ 2 ] 薛磊, 李琦, 刘帅. 北京城市产业碳排放的小尺度空间分布. *地理研究*, 2013, 32(7): 1188-1198.
- [ 3 ] Fan C C, Scott A J. Industrial agglomeration and development: a survey of spatial economic issues in east Asia and a statistical analysis of Chinese regions. *Economic Geography*, 2003, 79(3): 295-319.
- [ 4 ] 王少剑, 高爽, 黄永源, 史晨怡. 基于超效率 SBM 模型的中国城市碳排放绩效时空演变格局及预测. *地理学报*, 2020, 75(6): 1316-1330.
- [ 5 ] Rahman M M, Kashem M A. Carbon emissions, energy consumption and industrial growth in Bangladesh: empirical evidence from ARDL cointegration and Granger causality analysis. *Energy Policy*, 2017, 110: 600-608.
- [ 6 ] Abokyi E, Appiah-Konadu P, Abokyi F, Oteng-Abayie E F. Industrial growth and emissions of CO<sub>2</sub> in Ghana: the role of financial development and fossil fuel consumption. *Energy Reports*, 2019
- [ 7 ] Li W, Sun W, Li G M, Cui P F, Wu W, Jin B H. Temporal and spatial heterogeneity of carbon intensity in China's construction industry. *Resources, Conservation and Recycling*, 2017, 126: 162-173.
- [ 8 ] 杨骞, 刘华军. 中国二氧化碳排放的区域差异分解及影响因素——基于 1995—2009 年省际面板数据的研究. *数量经济技术经济研究*, 2012, 29(5): 36-49, 148.
- [ 9 ] 陈文颖, 吴宗鑫. 碳排放权分配与碳排放权交易. *清华大学学报: 自然科学版*, 1998, 38(12): 15-18, 22.
- [ 10 ] Cheng B B, Dai H C, Wang P, Xie Y, Chen L, Zhao D Q, Masui T. Impacts of low-carbon power policy on carbon mitigation in Guangdong Province, China. *Energy Policy*, 2016, 88: 515-527.
- [ 11 ] 王少剑, 莫惠斌, 方创琳. 珠江三角洲城市群城市碳排放动态模拟与碳达峰. *科学通报*, 2022, 67(7): 670-684.
- [ 12 ] 王勇, 许子易, 张亚新. 中国超大城市碳排放达峰的影响因素及组合情景预测——基于门限-STIRPAT 模型的研究. *环境科学学报*, 2019, 39(12): 4284-4292.
- [ 13 ] 刘凯, 吴怡, 陶雅萌, 王成新. 中国省域生态文明建设对碳排放强度的影响. *中国人口·资源与环境*, 2019, 29(7): 50-56.
- [ 14 ] 朱勤, 彭希哲, 陆志明, 吴开亚. 中国能源消费碳排放变化的因素分解及实证分析. *资源科学*, 2009, 31(12): 2072-2079.
- [ 15 ] 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(23): 1-14
- [ 16 ] 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.
- [ 17 ] Akbostanci E, Tunç G, Türüt-Aşık S. Pollution haven hypothesis and the role of dirty industries in Turkey's exports. *Environment and Development Economics*, 2007, 12: 297-322.
- [ 18 ] 豆建民, 沈艳兵. 产业转移对中国中部地区的环境影响研究. *中国人口·资源与环境*, 2014, 24(11): 96-102.
- [ 19 ] 马晶梅, 王新影, 贾红宇. 中日贸易隐含碳失衡研究. *资源科学*, 2016, 38(3): 523-533.
- [ 20 ] 韩梦瑶, 姚秋蕙, 劳浚铭, 唐志鹏, 刘卫东. 中国省域碳排放的国内外转移研究: 基于嵌套网络视角. *中国科学: 地球科学*, 2020, 50(6): 748-764.
- [ 21 ] 邓荣荣, 李亚芳. 中国中部区域承接国内产业转移进程中的碳排放转移测度. *产业经济评论*, 2019, 18(3): 114-133.
- [ 22 ] Zhang Z K, Guo J E, Hewings G J D. The effects of direct trade within China on regional and national CO<sub>2</sub> emissions. *Energy Economics*, 2014, 46: 161-175.
- [ 23 ] Javorcik B, Wei S. Pollution havens and foreign direct investment: dirty secret or popular myth? *Contributions in Economic Analysis & Policy*, 1999
- [ 24 ] 王少剑, 田莎莎, 蔡清楠, 伍慧清, 吴臻熹. 产业转移背景下广东省工业碳排放的驱动因素及碳转移分析. *地理研究*, 2021, 40(9): 2606-2622.
- [ 25 ] 魏燕茹, 陈松林. 福建省土地利用碳排放空间关联性与碳平衡分区. *生态学报*, 2021, 41(14): 5814-5824.
- [ 26 ] 韩梦瑶, 刘卫东, 杨茗月. 低碳转型下中国高耗能行业的碳风险传导解析: 基于隐含碳关联网络视角. *地理研究*, 2022, 41(1): 79-91.
- [ 27 ] 李艳梅, 孙丽云, 张红丽, 刘婷婷. 京津冀区域间产业转移对能源消费碳排放强度的影响. *资源科学*, 2017, 39(12): 2275-2286.
- [ 28 ] 潘安. 对外贸易、区域间贸易与碳排放转移——基于中国地区投入产出表的研究. *财经研究*, 2017, 43(11): 57-69.
- [ 29 ] 叶琪. 我国区域产业转移的态势与承接的竞争格局. *经济地理*, 2014, 34(3): 91-97.
- [ 30 ] 马涛, 李东, 杨建华, 翟相如. 地区分工差距的度量: 产业转移承接能力评价的视角. *管理世界*, 2009(9): 168-169.
- [ 31 ] van Dijk J, Pellenbarg P H. Firm relocation decisions in the Netherlands: an ordered logit approach. *Papers in Regional Science*, 2000, 79(2): 191-219.
- [ 32 ] 张公崑, 梁琦. 产业转移与资源的空间配置效应研究. *产业经济评论*, 2010, 9(3): 1-21.
- [ 33 ] 成艾华, 赵凡. 基于偏离份额分析的中国区域间产业转移与污染转移的定量测度. *中国人口·资源与环境*, 2018, 28(5): 49-57.
- [ 34 ] 贺灿飞, 周沂, 张腾. 中国产业转移及其环境效应研究. *城市与环境研究*, 2014, 1(1): 34-49.
- [ 35 ] Grossman G M, Krueger A B. Economic growth and the environment. *National Bureau of Economic Research Working Paper*. MA: Cambridge, 1994.
- [ 36 ] 龚健健, 沈可挺. 中国高耗能产业及其环境污染的区域分布——基于省际动态面板数据的分析. *数量经济技术经济研究*, 2011, 28(2): 20-36, 51.
- [ 37 ] Zhu R M, Zhao R Q, Sun J, Xiao L G, Jiao S X, Chuai X W, Zhang L J, Yang Q L. Temporospatial pattern of carbon emission efficiency of China's energy-intensive industries and its policy implications. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 286: 125507.