

长江经济带制造业碳排放效率的时空演变及影响因素研究¹

黄德春^{1, 2, 3} 沈雪梅^{1, 3} 竺运^{1, 3}

(1. 河海大学商学院, 江苏 南京 211100;

2. 江苏省“世界水谷”与水生态文明协同创新中心, 江苏 南京 211100;

3. 河海大学产业经济研究所, 江苏 南京 211100)

【摘要】：随着双碳目标的提出，推动长江经济带高质量发展需要提高制造业碳排放效率，促进行业绿色低碳转型。采用 2006 ~ 2019 年长江经济带各省市制造业以及高碳制造行业相关数据，通过超效率 SBM 模型计算长江经济带制造业碳排放效率，分析其时间、空间变化特征，并通过面板固定效应模型对其影响因素进行研究，结果发现：(1) 2006 ~ 2019 年制造业碳排放效率不断提高；碳排放效率呈“下中上游”递减的空间分布格局，空间差异整体呈缩小趋势。(2) 高碳制造行业碳排放效率差异显著，不同高碳制造行业碳排放效率空间分布差异大。(3) 行业成长能力、行业能源利用效率、行业规模、人均 GDP 水平、城镇化率对长江经济带制造业碳排放效率产生正向影响，行业 FDI、工业化水平对其产生负向影响；因素对上中下游地区的影响效果具有差异性。因此，需促进长江经济带上中下游地区绿色协调发展，积极推进城镇化建设，提升和完善制造业外商直接投资的效率与结构，加快对传统制造业的转型升级，引导制造业能源利用效率的提升，推动制造业高质量绿色发展。

【关键词】：制造业碳排放效率；长江经济带；超效率 SBM 模型

【中图分类号】：X322; F427 **【文献标识码】：**A **【文章编号】：**1004-8227(2023) 06-1113-14

【DOI】：10. 11870 /cjlyzyyhj202306001

进入 21 世纪以来，全球经济快速发展，工业化水平不断提升，能源供应成为工业化社会发展的重要条件。随着能源需求的日益增长，碳排放强度逐渐增大，中国为应对全球气候问题，于 2014 年发布《国家应对气候变化规划(2014-2020 年)》，制定有关碳排放强度的规划目标，指出相较 2005、2020 年碳强度需要下降 40%~45%。2020 年 12 月中央经济工作会议将“碳达峰，碳中和”工作列为目前重要任务之一。制造业作为长江经济带乃至中国实体经济的重要支柱，也是温室气体排放的主要行业，其温室气体排放量占总排放量一半以上。随着制造业的快速发展，能源消耗、碳排放量的增加，行业低碳转型成为目前重要任务之一。因此，“中国制造 2025”提出成为制造强国，必须构建绿色制造体系。此外，2020 年，在全面推动长江经济带发展座

¹ **【收稿日期】：**2022-07-21; **【修回日期】：**2022-09-19

【基金项目】：国家社科基金重大项目(19ZDA084); 河海大学中央高校基本科研业务费项目(B220203040); 河海大学中央高校基本科研业务费项目(B200207010)

【作者简介】：黄德春(1966 ~)，男，教授，主要研究方向为资源环境经济、绿色发展。E-mail: huangdechun@hhu.edu.cn

谈会上, 习近平指出要加强长江经济带的生态保护与绿色发展, 引领经济高质量发展。长江经济带作为制造业主要集中区域之一, 推动制造业转型升级、实现绿色制造是地区高质量发展的重要条件。

碳排放效率作为衡量绿色低碳高效发展的重要指标, 现有文献主要分为对其测算以及影响因素的研究。在碳排放效率测算方面, 测算方法主要分为单要素和全要素测算。从单要素测算来看, Kaya 等^[1]将碳排放效率定义为单位国内生产总值所消耗的碳排放量。从全要素测算来看, 碳排放效率的测度应同时包含碳排放量、经济发展和能源消耗, 而不仅仅是探究两者之间的关系^[2]。全要素测算所采用的方法多为随机前沿分析法(Stochastic Frontier Analysis)、数据包络分析法(Data Envelopment Analysis)等。例如, Zaim 等^[3]提出碳排放综合效率, 基于投入产出方法对效率进行综合测度。在研究视角上, 现有研究主要分为区域和行业视角。从区域视角看, 现有文献多从宏观角度出发测算中国的碳排放效率^[4], 或者以流域^[5]、东西部^[6]等中观视角、或细化至省级^[7]、城市^[8]等微观视角测算碳排放效率。随着研究的深化, 视角逐渐聚焦于行业, 即从地区的某个行业切入来测算碳排放效率。例如, 胡剑波等^[9]测算了中国各产业部门的碳排放效率, 有些学者进一步细化行业, 从农业^[10, 11]、工业^[12]、制造业^[13]、旅游业^[14]等方面测算碳排放效率。

在区域碳排放效率的时间以及空间变化方面, 王少剑等^[15]通过测算中国各城市碳排放效率发现效率虽整体水平较低但存在波动上升趋势, 空间上呈现“南高北低”格局。徐英启等^[8]将视角落在中国低碳试点城市, 研究发现 2003~2018 年碳排放效率呈现上升趋势, 空间的分布特征为东中西部地区低碳试点城市碳排放效率递减。其次, 在行业碳排放效率方面, 其时间与空间变化特征因行业不同而不同。蔺雪芹等^[12]研究发现 2000~2018 年京津冀地区工业碳排放效率不断提高, 不同工业行业的碳排放效率空间格局具有明显的差异。郭四代等^[16]则从农业角度出发, 发现 2006~2015 年西部地区农业碳排放效率整体为上升趋势, 且存在 β 绝对收敛性和 β 条件收敛性。张广泰等^[17]通过测算 2004~2017 年中国建筑行业碳排放效率, 发现效率呈现 M 型走势, 空间差异明显, 并且与地区经济水平联系紧密。邵海琴等^[18]测算了 2001~2016 年长江经济带地区旅游业碳排放效率, 发现效率整体上呈上升态势, 但波动性较大, 且效率水平不高, 空间差异明显。

在研究碳排放效率的影响因素方面, 主要选用固定效应模型^[8]、向量自回归模型^[19]、双重差分模型^[20]等方法。学术界多集中于研究环境政策、产业结构、科技创新、FDI、经济发展水平、城镇化等对碳排放效率的影响。例如, 低碳试点政策是影响碳排放效率的重要影响因素之一^[21]。其次, 刘志华等^[19]研究发现科技创新、产业结构升级能够对碳排放效率产生推动作用。周杰琦等^[22]认为 FDI 对工业碳排放效率具有负向作用。徐英启等^[8]认为经济发展水平的提高有利于推动碳排放效率。

综上所述, 现有研究对碳排放效率测度、时间与空间变化的动态特征以及影响因素等方面成果颇丰。然而研究对象很少同时兼顾空间尺度与行业精度, 例如多数学者从区域层面出发, 研究中国各省份, 或细化城市的碳排放效率, 或从行业整体层面出发, 研究中国或各省农业、工业碳排放效率等, 但较少有文献将行业进一步细分深入剖析, 基于此, 本文从行业层面细化至制造业及其细分行业, 空间上以长江经济带 11 个省市为研究对象, 采用超效率 SBM 模型对制造业碳排放效率进行测度, 探究其时间、空间变化特征及影响因素。研究对长江经济带地区制造业绿色低碳转型、推动高质量发展具有重要意义。

1 研究方法数据来源

1.1 超效率 SBM 模型

DEA 模型通过投入和产出得出同类型决策单元(DMU)的相对效率值, 是国内外学者测算效率的一种非参数分析方法。但传统 DEA 模型无法测算出有效 DMU 的效率值, 而超效率 DEA 模型则可以很好地解决其局限性。然而, DEA 模型都是基于径向方法, 并未考虑投入和产出的松弛性, 而超效率 SBM 模型采用非径向方法测算效率, 可以解决由于径向以及角度选择的不同使得结论出现偏差的问题^[23]。因此, 本文选用超效率 SBM 模型对效率进行测度, 模型见公式(1)所示。

$$\left\{ \begin{array}{l} \min \rho = \frac{1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m s_i^- / x_{ik}}{1 + \frac{1}{q_1 + q_2} \left(\sum_{r=1}^{q_1} s_r^g / y_{rk}^g + \sum_{r=1}^{q_2} s_r^b / y_{rk}^b \right)} \\ s. t. X\lambda + s^- = x_k \\ Y^g \lambda - s^g = y_k^g \\ Y^b \lambda + s^b = y_k^b \\ s^-, s^g, s^b, \lambda \geq 0 \end{array} \right. \quad (1)$$

式中：ρ 为制造业碳排放效率值，当效率值达到 1 时，表明效率达到了最优前沿面。ρ 越大，则效率越高；n 表示决策单元总数；其中 m、q1、q2 表示每个决策单元中存在的投入、期望产出与非期望产出要素数量；x_{ik}、y_{grkrkg}、y_{brkrkb} 分别代表 DMU 的投入向量、期望和非期望产出向量；X、Y_g、Y_b 分别为投入、期望产出与非期望产出矩阵；λ 为列向量；s⁻、s^g、s^b 分别为投入、期望产出与非期望产出的松弛变量。

1.2 面板固定效应模型

参考现有研究，选取行业成长能力(CA)、行业规模(SC)、行业能源利用效率(EN)、行业外商直接投资(FDI)、人均地区生产总值(PGDP)、工业化水平(IN)、城镇化率(URB)作为影响碳排放效率的主要因素。构建面板固定效应回归模型，检验上述因素对制造业碳排放效率的影响，设定模型如(2)所示：

$$\begin{aligned} TFP_{i,t} = & \beta_0 + \beta_1 CA_{i,t} + \beta_2 SC_{i,t} + \beta_3 EN_{i,t} + \beta_4 FDI_{i,t} + \\ & \beta_5 PGDP_{i,t} + \beta_6 IN_{i,t} + \beta_7 URB_{i,t} + \theta_i + \\ & \varphi_t + \varepsilon_{i,t} \end{aligned} \quad (2)$$

式中：TFP_{i,t} 为碳排放效率，表示 t 年份 i 省市的制造业碳排放效率；θ_i、φ_t 分别代表个体、时间固定效应；β₁~β₇ 为各个影响因素对碳排放效率产生影响的回归系数。

1.3 变量选择

1.3.1 投入变量

在工业生产过程中，资本、劳动、能源三大投入要素对生产起到重要作用。现有文献中，资本、劳动力、能源成为测算碳

排放效率的投入指标。一是资本投入变量，本文选择制造业固定资产投资净值表示，并以 2005 年作为基期，对其进行平减。二是劳动投入变量，选择制造业平均用工人数表示。三是能源投入变量，选择制造业能源消费总量表示。

1.3.2 产出变量

产出变量对于测算碳排放效率起到重要作用。本文将主营业务收入作为测算碳排放效率的期望产出变量，碳排放量作为测算碳排放效率的非期望产出变量。在投入相同生产要素的情况下，行业主营业务收入越高，碳排放量越低，则意味碳排放效率越高。

1.3.3 影响因素变量

行业成长能力(CA)采用主营业务收入/总资产表示。行业成长能力在一定程度上代表了该行业的未来发展趋势与前景。行业成长能力越强，则越可能有效推动行业技术进步，促进行业低碳高质量发展，推动碳排放效率的提升。

行业规模(SC)采用总资产/企业单位数表示。对于多数行业来说，规模扩大使得多数行业可以通过规模效应以及技术创新效应来推动生产效率的提升^[24]，从而可能降低能源消耗以及碳排放量，提高碳排放效率。

行业能源利用效率(EN)采用总产值/能源消费总量表示。行业能源利用效率的提高使得行业在生产过程中不仅减少了能源消耗与碳排放，并降低了一定的生产成本，有利于碳排放效率的提升。

行业外商直接投资(FDI)采用外商与港澳台资本/实收资本表示。一方面，外商投资将污染性产业转移国内，在污染环境、提高碳排放的同时促使行业竞争压力加剧，不利于碳排放效率的提升。另一方面，外商直接投资可以通过促进行业技术进步进而降低碳排放量^[25]，促进行业生产效率提升，提高碳排放效率。

人均生产总值(PGDP)采用地区生产总值/地区总人口量表示。地区经济发展水平的越高，则政府会更加重视地区高质量可持续发展，加大对技术创新的研发投入，降低碳排放强度^[26]，提升碳排放效率。

工业化水平(STR)采用第二产业生产总值/总生产总值表示。在工业化进程中，往往伴随着大量的能源消耗与碳排放，不利于行业碳排放效率的提升。但当工业的信息化、生态化发展水平越高，则有利于降低能源消耗以及污染排放，推动碳排放效率提高^[12]。

城镇化率(URB)采用城市人口/总人口表示。一方面，地区城镇化的快速发展意味着工业、交通等大量聚集，提高碳排放量，不利于碳排放效率的提升^[27, 28]。另一方面，城镇化发展通过高素质人才的流入以及产业聚集有利于拉动地区工业经济的发展，技术创新水平以及资源利用效率的提升，因此可能对碳排放效率产生有利影响^[29]。

1.4 数据来源

本文研究对象为长江经济带 11 个省市制造行业，制造业及制造细分行业能源消费数据、碳排放量数据均来自中国碳核算(CEADs)数据库，该数据库中对于制造业碳排放量的测算包含了 17 种化石能源消耗以及生产水泥相关过程中的碳排放。行业主营业务收入、行业总资产、行业总产值、行业港澳台资本、行业实收资本数据来源于《中国工业经济统计年鉴》《中国经济普查年鉴》以及各省份统计年鉴，人均生产总值、第二产业生产总值、城镇化率相关数据来源于各省份统计年鉴，部分缺失数据采用插值法进行处理。

2 长江经济带制造业及高碳制造行业碳排放效率时空演变特征

2.1 长江经济带制造业碳排放效率时空演变特征

本文利用超效率 SBM 模型对 2006~2019 年长江经济带地区的制造业碳排放效率进行了测算,其结果如图 1 所示。整体上看,长江经济带制造业碳排放效率缓慢上升,2006~2019 年从 0.28 上升到 0.74,年均增速为 8.4%。期间,制造业碳排放效率空间差异性逐渐收敛,长江经济带下游地区制造业碳排放效率最高,其次为中游地区,而上游地区最低。

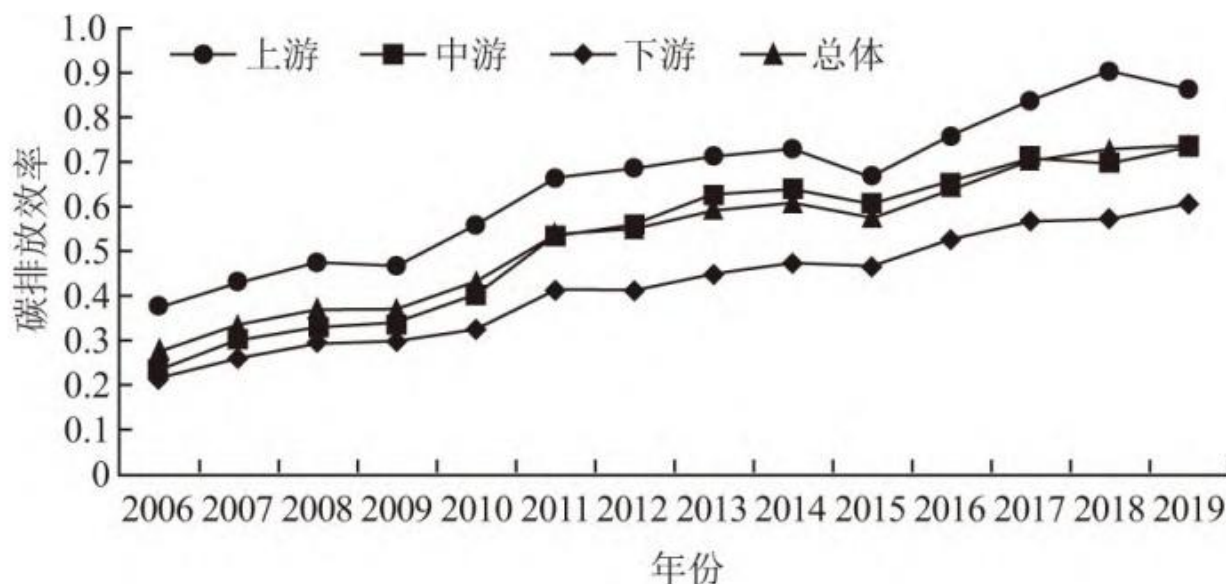


图 1 2006~2019 年长江经济带地区制造业碳排放效率

Fig. 1 Carbon emission efficiency of manufacturing industry in Yangtze River Economic Belt from 2006 to 2019

2.1.1 时间演变特征

在研究期间内,可将碳排放效率时间演变分为以下 4 个阶段:第一阶段(2006~2009 年)为慢速增长阶段,长江经济带地区碳排放效率慢速提高,效率值从 0.28 提升至 0.37,年均增速达 9.9%。此阶段中国正经历工业经济的快速发展,但依然存在产能落后、能源依赖性过高等问题。受 2008 年经济危机的影响,工业经济运行形势严峻,工业碳排强度有所下降,碳排放效率未有明显提升。第二阶段(2009~2011 年)为快速发展阶段,碳排放效率从 0.37 提升至 0.54,年均增长率为 20.4%。此阶段,虽未完全摆脱经济危机给中国工业经济带来的影响,但经济逐渐从回升向好转为稳定低速增长,产业升级成为工业增长的主要动力。此外,随着经济复苏,以及保护生态环境的呼声逐渐高涨,中国不断向发达国家引进先进低碳技术并推动可再生能源技术的发展,碳排放效率明显提高。第三阶段(2011~2015 年)为平稳发展阶段,碳排放效率从 0.54 提升至 0.58,年均增长率为 1.9%。这一时期,中国工业经济增速放缓,处于经济转型探索与过渡期间,制造业碳排放效率水平保持平稳。第四阶段(2015~2019 年)为冲刺发展期,碳排放效率从 0.58 提升至 0.74,年均增长率达 6.2%。该阶段,中国经济逐渐从高速发展转向高质量发展,工业

发展更加集约化、可持续。随着绿色发展理念的不断深入，绿色经济已从理念转向实践，绿色清洁技术不断进步、能源消费结构不断完善，在此期间碳排放效率突破 0.7。综上可知，长江经济带地区制造业碳排放效率值尚未到达最优前沿面，仍然有上升的空间，应继续提高技术创新水平，推动绿色低碳转型，促进碳排放效率水平的提高。

2.1.2 空间演变特征

为检验长江经济带上中下游制造业碳排放效率是否具有差异性，采用单因素方差分析进行比较。从表 1 的检验结果可见，S-W 检验、K-S 检验不显著，说明长江经济带制造业碳排放效率数据为正态分布。其次，方差齐性检验不显著，即表明不同流域样本数据的波动性一致，可使用方差分析。从方差分析结果来看，不同流域样本对于碳排放效率呈现显著性，表明长江经济带上中下游制造业碳排放效率具有差异性。

图 2 为 2006~2019 年长江经济带制造业碳排放效率区域差异测度指数。三大指数整体上均为下降趋势，变异系数、基尼系数、泰尔指数分别从 0.321 2、0.166 3、0.049 4 下降至 0.199 8、0.104 8、0.019 1。可知，长江经济带不同省市地区的制造业碳排放效率具有差异性，但差异正在逐渐收敛。2016~2018 年，三大指数均有所上升，长江经济带制造业碳排放效率空间差异性在此期间逐渐扩大。由于“十一五”、“十二五”规划均提出需推动我国区域协调发展，区域经济优势互补，在此期间，长江经济带制造业碳排放效率区域差异不断缩小。但由于各省市的资源禀赋、经济发展水平、环境规制强度不同，低碳发展是一个循序渐进的过程，政府采用试点政策进行探索，鼓励试点地区率先碳达峰，随着我国低碳省区、低碳试点城市试点工作的启动与深入，碳排放效率空间差异性会逐渐扩大，但从长期来看，随着双碳目标的提出，差异将会持续收敛。

表 1 单要素方差分析结果

	流域碳排放效率(平均值±标准差)		F		P
方差分析	上游 (n=14)	下游 (n=14)	中游 (n=14)	7.903	0.001**
	0.42±0.13	0.65±0.17	0.53±0.17		
Kolmogorov-Smirnov 检验	/	/	/	/	0.698
Shapro-Wilk 检验	/	/	/	/	0.499
方差齐性检验	/	/	/	1.151	0.327

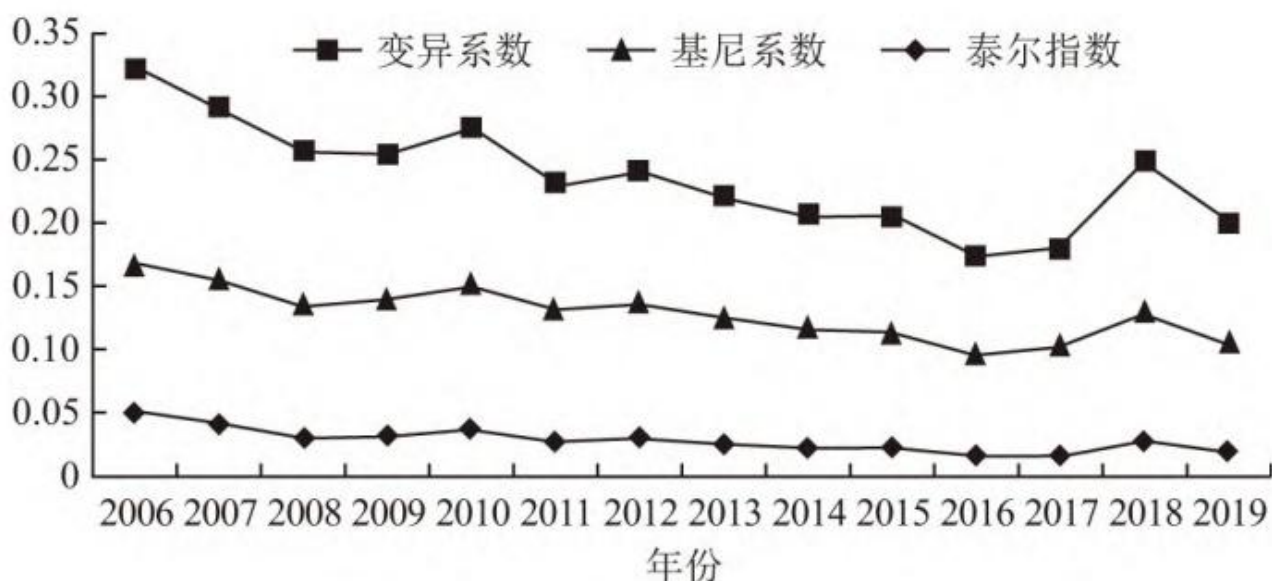


图 2 2006~2019 年长江经济带制造业碳排放效率区域差异测度指数

Fig. 2 Regional difference measurement index of carbon emission efficiency of manufacturing industry in Yangtze River Economic Belt from 2006 to 2019

图 3 为 2006、2010、2015、2019 年长江经济带制造业碳排放效率空间分布情况。整体上看，碳排放效率呈现“下中上”游依次递减的空间分布格局。上海、浙江、江苏为制造业碳排放效率高水平区，年均制造业碳排放效率值分别为 0.71、0.69、0.65，江西、安徽位于中高效率水平区，年均制造业碳排放效率分别为 0.56、0.53。上游制造业碳排放效率较低，例如贵州、云南的年均制造业碳排放效率为 0.36、0.38。从 2006~2019 年，浙江、上海、湖北的制造业碳排放效率上升幅度排名前三，其中浙江增长幅度最大，从 0.42 上升至 1.03。而贵州、云南、重庆的制造业碳排放效率上升幅度小，其中贵州制造业碳排放效率上升幅度最小，从 0.15 上升至 0.53。

综上可知，长江经济带上、中、下游制造业碳排放效率均处于上升趋势，且下游制造业碳排放效率较高，高于长江经济带整体平均水平。原因在于下游省市处于东部沿海地区，经济发展水平高，拥有较高的能源利用效率以及绿色技术创新水平，有利于碳排放效率的提升。上游地区碳排放水平低于整体平均水平，其原因在于上游省市工业化水平较低，传统型、资源依赖型工业较多，仍处于高碳排放量、高能源消耗、低收入水平阶段，导致碳排放效率低下，增长较慢。因此上游地区应加快转变制造业粗放型发展模式，提高清洁能源利用率以及绿色技术水平，促进制造业低碳高效发展。十三五期间，江西积极高效实施绿色发展规划，紧抓传统制造业改造，大力推动绿色制造、先进制造产业，推动制造业绿色高效发展，使得江西成为中游地区碳排放效率最高的省份。

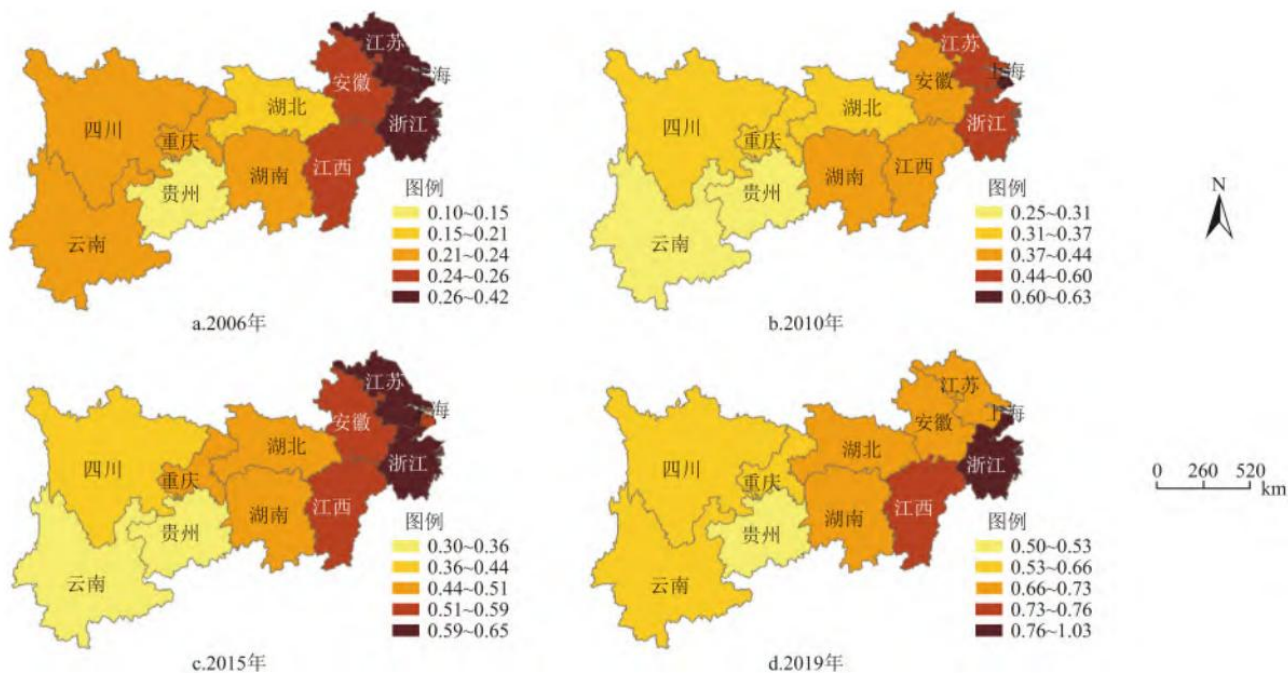


图3 2006~2019年长江经济带制造业碳排放效率的区域分布图

Fig. 3 Regional distribution map of carbon emission efficiency of manufacturing industry in Yangtze River Economic Belt from 2006 to 2019

2.2 长江经济带高碳制造业碳排放效率时空演变特征

选择长江经济带制造业细分行业年均碳排放量排名前八的行业,分析2006~2019年八大高碳制造业碳排放效率的时空演变特征(图4)。分析可知,八大高碳制造业碳排放效率不断提升,不同行业的时间、空间演变特征差异较大。

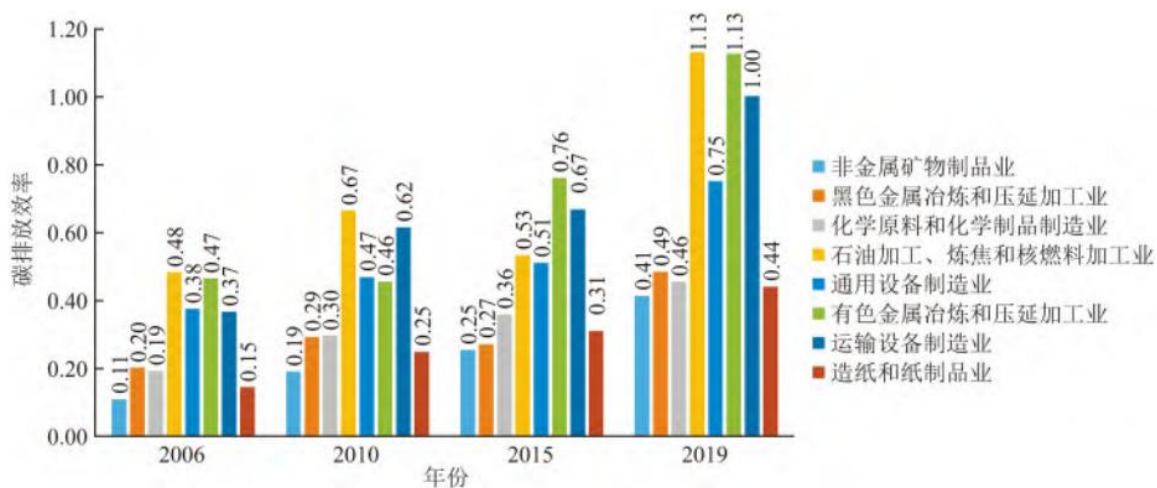


图4 2006~2019年长江经济带高碳制造业碳排放效率

Fig. 4 Carbon emission efficiency of high carbon manufacturing industry in Yangtze River Economic Belt from 2006 to 2019

2.2.1 时间演变特征

整体来看，八大高碳制造行业研究期间内碳排放效率均有所提升。2019 年，石油、有色金属、运输设备三大细分行业碳排放效率达到最优前沿面，分别从 2006 年的 0.48、0.47、0.37 上升至 2019 年的 1.13、1.13、1.00。2019 年，通用设备制造业碳排放效率处于中高水平，效率值超过 0.7，将来有望突破效率最优面。而非金属、化学原料以及造纸等制造行业碳排放效率虽有所提升，但为碳排放低效阶段。其中，非金属矿物制造业碳排放效率在研究期间内从 0.11 提升至 0.41，位于八大高碳制造行业最低水平。

通过对比八大高碳制造行业，可见行业碳排放效率与行业自身属性、行业发展水平存在紧密联系。其中制造行业碳排放效率值偏低的行业，例如非金属矿物、化学原料以及纸制品等制造业均对能源或原料的依赖性高，污染性强。随着工业转型升级，石油、有色金属、运输设备制造业碳排放效率到达最优前沿面，原因在于这些行业应用范围广，行业发展水平不断提升，绿色技术水平以及生产经营水平较为先进，产品附加值高，碳排放效率高。

2.2.2 空间演变特征

区域发展水平、资源禀赋等对高碳制造行业碳排放效率至关重要，在不同地区，行业碳排放效率存在显著差异。图 5~图 12 分别为长江经济带八大高碳制造行业 2006、2010、2015、2019 年碳排放效率空间分布图。

由图 5 可知，通用设备制造业高效率水平区域由下游(上海)转向中游(江西、湖南)。2006 年，高效率水平中心依托上海向长三角地区辐射，江苏、浙江成为中高效率水平区域，而中上游部分地区为低效率水平区域。2019 年，高效率水平及中高效率水平区域呈带状分布，高效率水平区域依托江西、湖南呈横向带状分布，中高效率水平区域依托安徽、浙江呈纵向带状分布，低效率水平区域聚集于上游各省以及中游(湖北)。

由图 6 可知，石油加工、炼焦和核燃料加工业由高效率水平区域分散稀少，低效率水平区域聚集转变为高效率水平区域聚集，低效率水平区域聚集的空间分布格局。2006 年，浙江、湖北碳排放效率位于较高层次，江苏、安徽、上海次之，其余省市均处于低效率水平区域。2015 年，江苏后来居上，与湖北同位于高效率水平区域。2019 年，高效率水平区域依托中游(湖北)、下游(上海、江苏、安徽)形成倒“V”型格局，石油化工作为湖北的重要支柱产业，其碳排放效率始终位于各省市前列。低效率水平区域聚集于上游地区，其中云南碳排放效率最低。

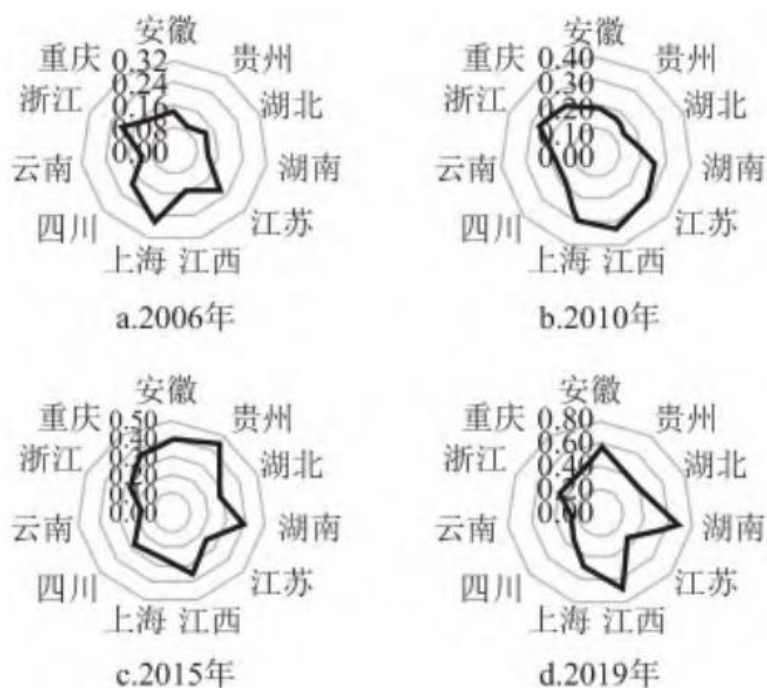


图 5 通用设备制造业
Fig. 5 Ordinary machinery

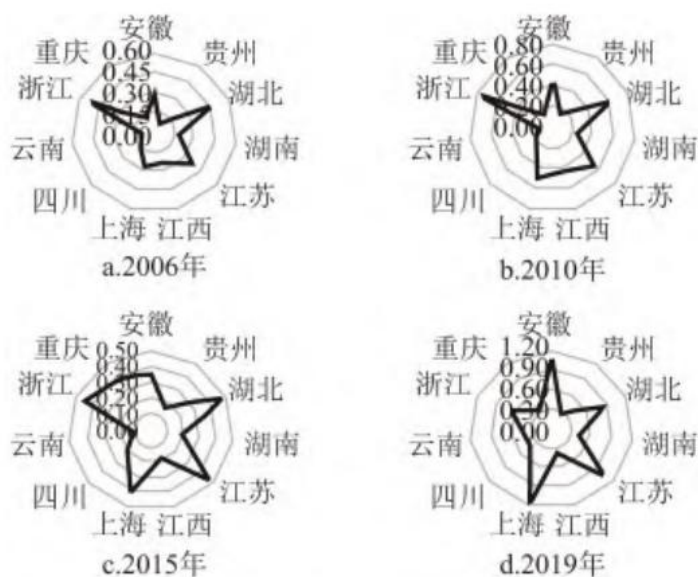


图 6 石油加工、炼焦和核燃料加工业
Fig. 6 Petroleum processing and coking

由图 7 可知，黑色金属冶炼和压延加工业高效率水平区域从下游向中上游扩散。2006~2010 年，上海、江苏、浙江为高效率水平区域，2015 年后，贵州、江西、云南等省在有效推动行业技术革新、改造低端行业的背景下，碳排放效率有所提升，跻

身至中高效率水平区域。其他省市如重庆、湖北等仍处于低效率水平区域。

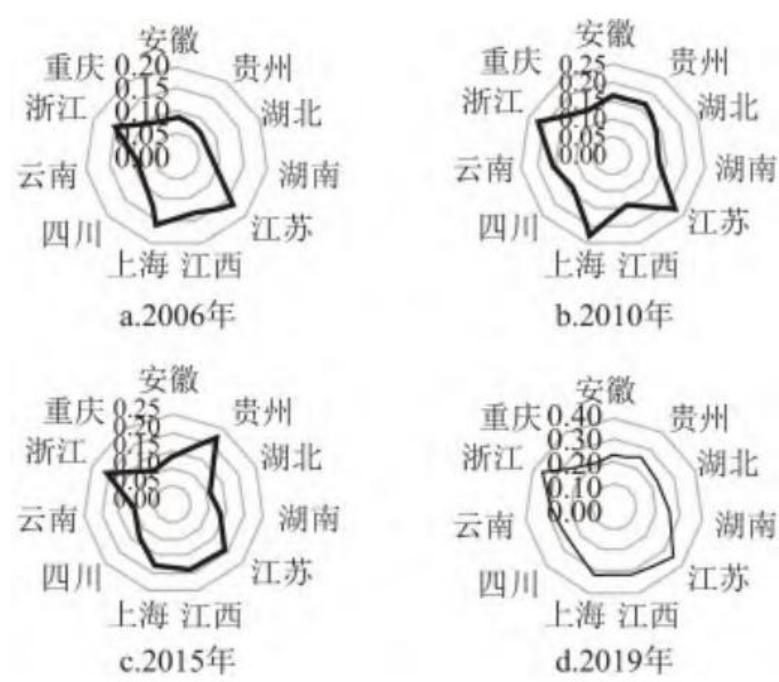


图 7 黑色金属冶炼和压延加工业

Fig. 7 Smelting and pressing of ferrous metals

由图 8 可知，运输设备制造业碳排放效率空间差异较大，高效率水平中心从下游(江苏)逐渐向上游(云南)转移。2006 年，碳排放效率高水平区域为江苏、浙江，上海、安徽次之。中上游省市为低效率水平区域。2019 年，碳排放效率高水平中心转向上游，云南碳排放效率位居第一，上海、湖北等地次之，四川、贵州等上游地区始终处于低效率水平区域。

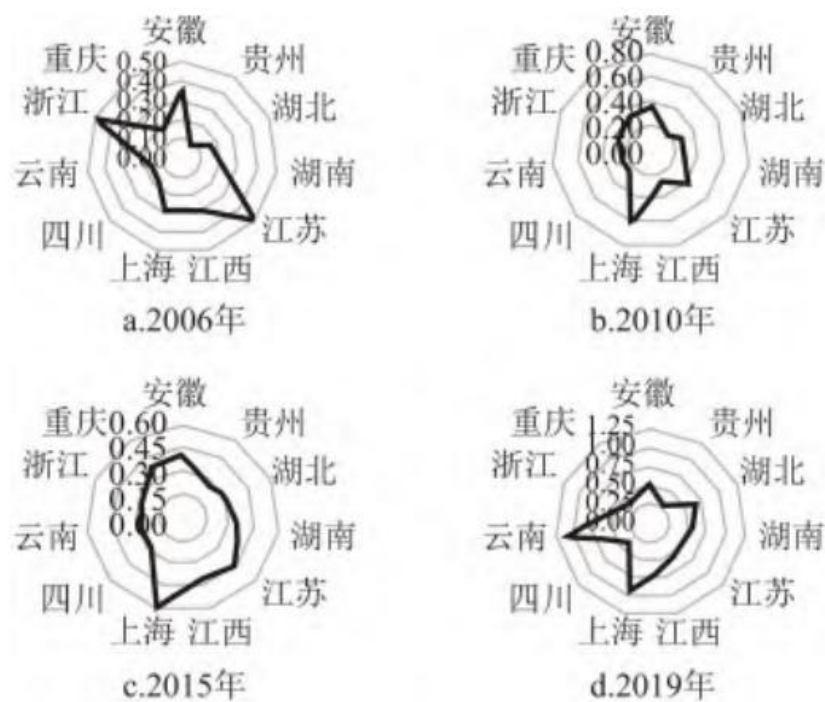


图 8 运输设备制造业

Fig. 8 Transportation equipment

由图 9 可知,造纸和纸制品业高效率水平区域由分散转向聚集。2006 年,碳排放效率高水平区域分散于下游(上海)、上游(重庆),2010 年,下游(上海)、中游(江西)成为高效率水平区域,四川、上海、江苏、湖北等地处于中高效率水平区域。2019 年,碳排放效率高水平区域聚集于下游(上海),湖北、安徽、浙江次之,云南位于低效率水平区域,碳排放效率水平最低。

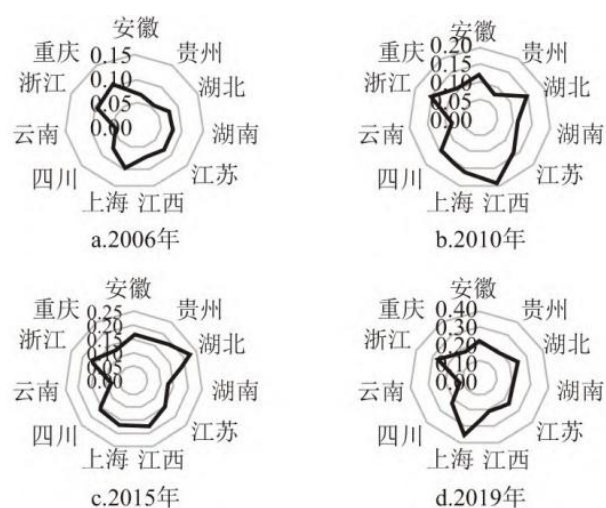


图 9 造纸和纸制品业

Fig. 9 Papermaking and paper products

由图 10 可知，有色金属冶炼和压延加工业高效率水平区域由下游(浙江、江苏)向中游(江西)扩散。2006 年，浙江、江苏碳排放效率较高，安徽次之，其余中上游多数省市处于低效率水平区域。2019 年，安徽碳排放效率跃居第一，与浙江同处于碳排放效率高水平区域。中高水平区域依托江苏、江西、上海环绕高效率水平区域，中上游部分省市位于低效率水平区域。

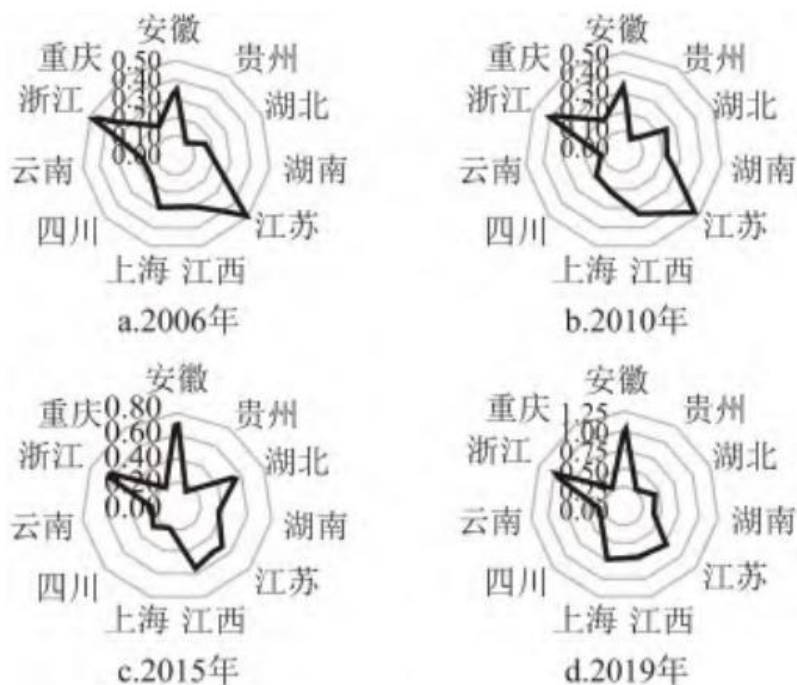


图 10 有色金属冶炼和压延加工业
Fig. 10 Smelting and pressing of nonferrous metals

由图 11 可知，非金属矿物制品业碳排放效率空间分布格局由高效率水平区域集聚、低效率水平区域分散转变为高效率水平区域分散，低效率水平区域聚集。2006 年，高效率水平区域集聚于下游的上海、江苏、浙江，而低效率水平区域分散在上游的云南、贵州、重庆，中游的江西等省市。2019 年，高效率水平区域在中下游均有分布，分散于上海、浙江、江苏、湖北，低效率水平区域聚集于上游地区。

由图 12 可知，化学原料和化学制品制造业高效率水平区域从下游(上海、江苏、浙江)向中游(江西)扩散。2006 年，下游长三角地区碳排放效率较高。2015 年，江西依托长三角地区工业辐射，推动黑色金属冶炼和压延加工业的发展，碳排放效率大幅提升，跻身碳排放效率高水平区域。上游省市如贵州、重庆等地始终位于低效率水平区域。

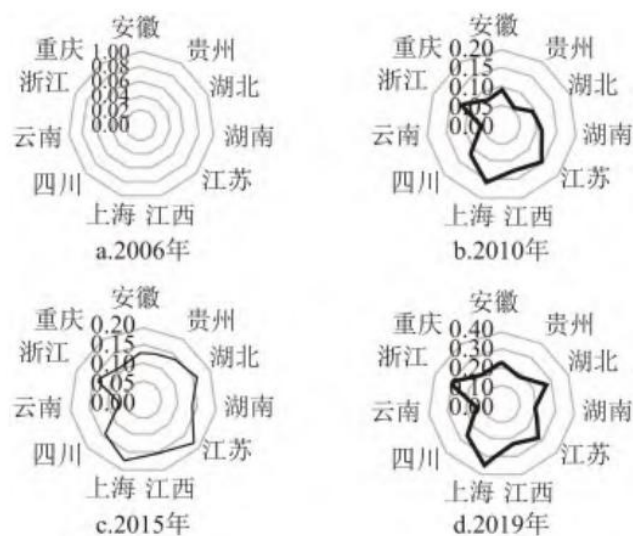


图 11 非金属矿物制品业

Fig. 11 Nonmetal mineral products

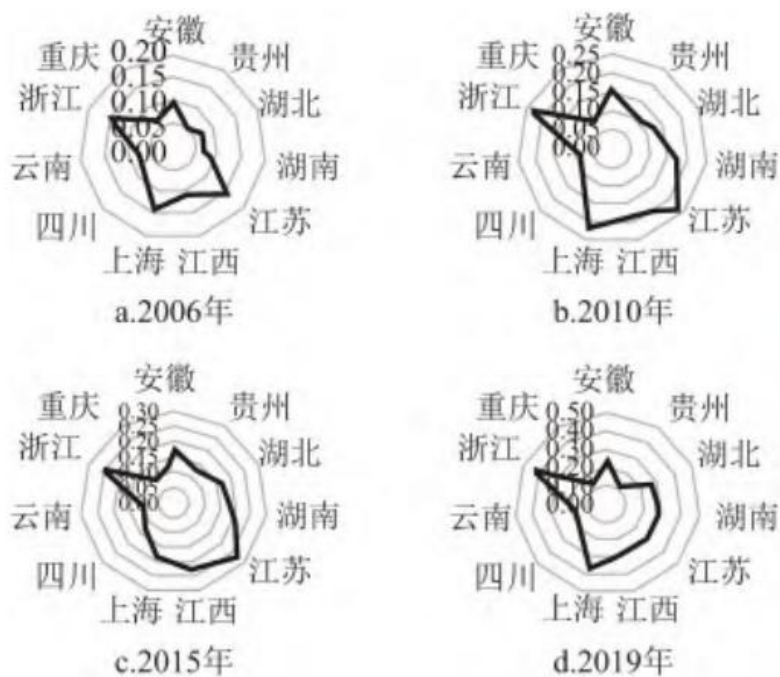


图 12 化学原料和化学制品制造业

Fig. 12 Raw chemical materials and chemical products

各高碳制造行业碳排放效率所占比重一定程度上可以代表该地区对各高碳制造行业绿色低碳发展的重视程度。图 13 为长江经济带高碳制造行业碳排放效率空间分布图，其中饼图代表各省市不同高碳制造行业碳排放效率占比。

从整体上看, 各省市的造纸、化学原料、非金属、黑色金属制造业碳排放效率占总高碳制造行业碳排放效率比重较低。可知, 相比其他高碳制造行业, 此类行业碳排放效率低, 绿色低碳发展水平低。而交通运输设备、有色金属、石油等制造业碳排放效率水平在多数省市均占有较高的比重, 与其他高碳制造行业相比, 此类行业碳排放效率较高, 绿色低碳发展水平高。

2006 年, 上游一些省市八大高碳制造行业的碳排放效率权重占比较为均衡, 但效率值均处于较低水平, 而中下游多数省市八大高碳制造行业的碳排放效率比重差异性较大, 侧重于石油、有色金属等制造业的绿色低碳发展, 这些行业碳排放效率比重大, 共约占比 50%。2019 年, 上游省市除云南以外其余省市八大高碳制造行业的碳排放效率占比较为均衡, 云南的运输设备制造业碳排放效率得到显著提升, 占比近 50%, 中下游多数省市高碳制造行业的碳排放效率比重的差异性降低, 如湖北、浙江的石油、有色金属等制造业碳排放效率比重显著下降, 碳排放效率占比偏低的行业比重有所上升。表明中下游多数省市开始兼顾不同高碳行业的绿色低碳发展, 推动各行业碳排放效率均衡提高。

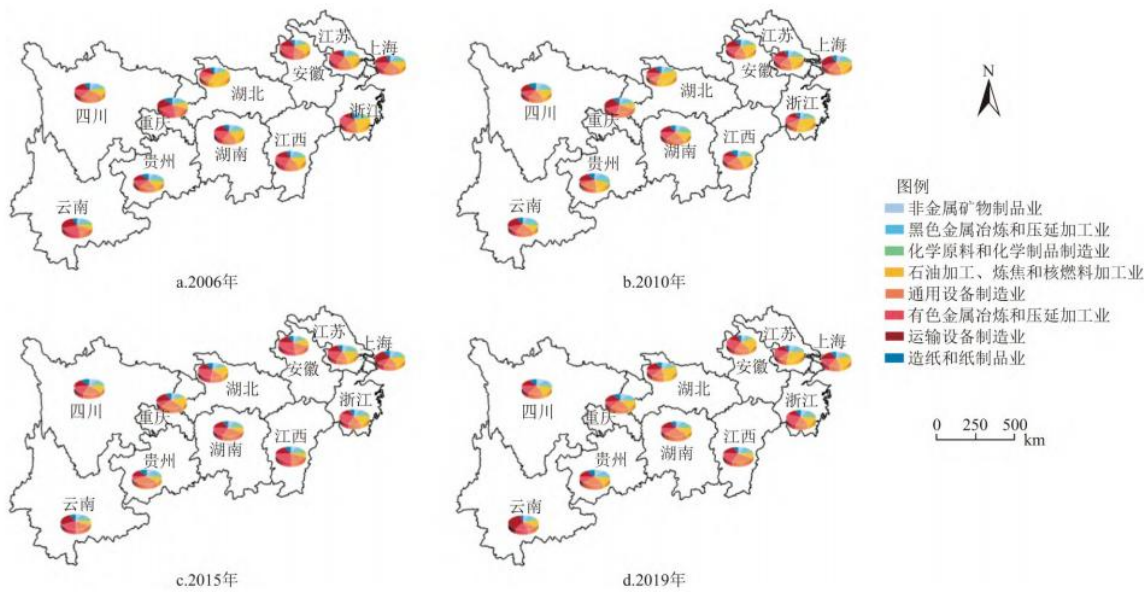


图 13 2006~2019 年长江经济带高碳制造行业碳排放效率空间分布图

Fig. 13 Spatial distribution map of carbon emission efficiency of high carbon manufacturing industry in Yangtze River Economic Belt from 2006 to 2019

3 长江经济带制造业碳排放效率的影响因素研究

3.1 全样本回归

表 2 为通过随机效应(RE)和固定效应模型(FE)检验影响长江经济带制造业碳排放效率因素的结果, 通过 Hausman 检验, 选择 FE。从回归结果可以看出: 成长能力、行业规模与碳排放效率的回归系数分别为 0.315 9、0.005 3, 在 1%显著水平下通过检验。可知长江经济带制造业成长能力和规模能够推动碳排放效率的提高。一方面, 行业成长能力越强、规模越大, 代表行业的生产力水平越高, 具有规模效应, 能够促进资源合理高效配置, 带动高排放高耗能产业转型, 提升碳排放效率。

能源利用效率与碳排放效率为显著正向关系, 回归系数为 0.005 5, 可见提升制造业能源利用效率可以有效推动碳排放效率的提升。能源消耗是碳排放的主要因素, 长江经济带制造业能源利用效率的提升得益于绿色技术水平的提高, 通过资金、人才、技术的投入推动了制造业绿色生产技术研发, 促进能源资源的高效利用, 提升碳排放效率。

外商直接投资与碳排放效率呈现显著负向关系, 回归系数为 -0.555 1, 说明“污染天堂”假说在长江经济带地区得到验证。

由于外商直接投资未充足展现其技术溢出效应，而多是将企业中高碳排放、高能耗的产业链部分进行转移，导致环境污染，降低碳排放效率，可见需进一步提升和完善长江经济带外商直接投资的效率与结构。

表 2 基准回归结果

变量	(1)	(2)
	TFP	TFP
CA	0.204 8***	0.315 9***
	(0.025 3)	(0.029 8)
EN	0.012 7***	0.005 5***
	(0.000 9)	(0.001 3)
SC	0.005 9***	0.005 3***
	(0.001 4)	(0.001 2)
FDI	-0.468 8***	-0.555 1***
	(0.081 4)	(0.172 4)
PGDP	0.021 6***	0.046 9***
	(0.005 7)	(0.006 2)
IN	-0.003 1*	-0.002 7*
	(0.001 6)	(0.001 4)
URB	0.004 2***	0.006 3***
	(0.001 0)	(0.001 1)

Constant	0.000 3	0.249 7***
	(0.078 7)	(0.082 3)
Observations	154	154
R-squared	0.905 2	0.937 7
hausman 检验	Prob>chi2 =0.000 0	
备注	RE	FE

注：括号内为标准差，***p<0.01， ** p<0.05， * p<0.1。

人均 GDP 水平与碳排放效率呈现显著正向关系，回归系数为 0.046 9,表明长江经济带地区人均 GDP 提升有利于推动制造业碳排放效率提高。地区经济水平越高，则有利于该地区转变经济增长模式，由要素转为创新驱动，从而推动地区制造业产业结构转型升级。另一方面，经济发展水平高的地区，政府对该地区有关绿色发展的资金投入量可能越大，对地区新型制造业提供资金支持，激励制造行业利用技术创新降低能耗、碳排放，减少环境污染，提高经济效益。

工业化发展水平与碳排放效率呈现显著负向关系，回归系数为 -0.002 7,说明地区工业化程度的提高不利于提升碳排放效率。区域内工业化发展导致能源资源大量消耗、高污染排放，降低了行业碳排放效率。可见长江经济带地区仍需进一步转变工业发展模式，推动新型工业化发展，降低能源消耗、污染排放，推动碳排放效率提高。

城镇化水平与碳排放效率为显著正向关系，回归系数为 0.006 3。意味着地区城镇化水平越高，则该地区制造业碳排放效率越高。地区城镇化水平的提高有利于高知识水平、高素质人才向该地区的流入，为该地区制造业发展注入创新的血液，推动制造业高质量发展。其次，随着新型城镇化的转型，地区越来越注重低碳绿色发展，地区治理模式的低碳转型促进制造业能源消费结构低碳化、生产技术低碳化，推动碳排放效率提升。

3.2 异质性分析

对长江经济带上、中、下游地区制造业碳排放效率影响因素进行回归分析，通过 hausman 检验得出在中、下游地区选取固定效应模型 (FE),上游地区选取随机效应模型 (RE)。表 3 为长江经济带上、中、下游地区制造业碳排放效率影响因素回归结果。

表 3 异质性回归结果

变量	下游	中游	上游	城镇化高水平地区	城镇化中水平地区	城镇化低水平地区
	TFP (1)	TFP (2)	TFP (3)	TFP (5)	TFP (6)	TFP (7)

CA	0.585 0***	0.262 3***	0.213 7***	0.483 8***	0.266 3***	0.220 8***
	(0.064 0)	(0.030 7)	(0.041 4)	(0.069 1)	(0.028 3)	(0.054 3)
EN	0.014 7***	0.000 9***	0.001 1	0.005 1**	0.010 0***	-0.004 6
	(0.001 1)	(0.002 5)	(0.003 9)	(0.001 9)	(0.002 4)	(0.005 3)
SC	0.004 2**	-0.012 7*	0.002 1	0.005 4***	-0.011 6*	0.013 4***
	(0.001 7)	(0.006 5)	(0.005 0)	(0.001 8)	(0.005 7)	(0.004 9)
FDI	-0.360 1	-0.261 3	-0.496 3*	-0.885 4***	-0.410 6	-0.598 7
	(0.279 2)	(0.300 2)	(0.278 5)	(0.269 2)	(0.283 1)	(0.512 3)
PGDP	0.061 9***	0.020 3**	0.069 5***	0.050 3***	0.018 5*	0.064 5
	(0.010 9)	(0.009 8)	(0.016 7)	(0.011 2)	(0.009 5)	(0.042 4)
IN	-0.007 0**	-0.005 0**	0.000 1	-0.002 6	-0.004 5**	-0.001 1
	(0.002 7)	(0.002 3)	(0.001 8)	(0.003 3)	(0.001 7)	(0.002 1)
URB	0.010 3***	0.015 9***	0.000 6	0.004 8**	0.015 2***	0.003 9
	(0.002 4)	(0.002 9)	(0.001 8)	(0.002 2)	(0.002 7)	(0.005 0)
Constant	-0.688 3***	-0.518 9***	-0.050 3	-0.264 7	-0.480 8***	-0.064 6
	(0.228 5)	(0.173 2)	(0.070 5)	(0.190 8)	(0.147 1)	(0.132 9)
Observations	56	42	56	56	56	42

R-squared	0.955 7	0.981 6	0.921 0	0.937 2	0.980 2	0.918 3
备注	FE	FE	RE	FE	FE	RE

注：括号内为标准差，***p<0.01， **p<0.05， *p<0.1。

从回归结果可知，行业成长能力、人均 GDP 水平对长江经济带中、下游制造业碳排放效率均具有显著促进作用。行业能源利用效率对长江经济带中、下游制造业碳排放效率起到显著促进作用，而上游地区工业化水平较低，多以传统高能耗产业为主，能源利用效率在上游地区效果并不显著。行业规模的扩大有利于长江经济带下游地区制造业碳排放效率的提升，而在长江经济带中游地区产生负向影响，在上游地区未产生明显作用。中游地区作为产业转移的重要承接地，正处于工业发展阶段，行业发展盲目追求规模的扩张而不考虑绿色技术创新与进步，反而会降低碳排放效率，而下游地区工业发展水平较高，行业通过创新驱动制造业高质量发展，行业规模越大，越能够推动碳排放效率的提升。行业外商直接投资对长江经济带上游制造业碳排放效率具有显著负向影响，而对于中下游地区来说，随着工业经济水平不断提升，政府更加注重企业对生态环境的影响并逐渐提高引资的标准，从而削弱了外商直接投资对制造业碳排放效率的负向影响，作用效果不显著。工业化水平提高对中、下游制造业碳排放效率造成显著负面影响，而相较于中下游地区，上游的工业化水平较低，能源资源的消耗量以及碳排放量相对较少，因此工业化水平在该地区的负面效果并不显著。城镇化率的提高有利于中下游制造业碳排放效率提升，而在上游地区未产生显著效果。中下游地区城镇化水平较高，有利于拉动地区工业经济发展，促进制造业技术创新水平以及资源利用效率的提升，对制造业碳排放效率产生显著促进作用。对于长江经济带上游地区来说，城镇化处于低水平阶段，在一定程度上也反映了区域内工业发展水平较低，未能够对制造业碳排放效率产生显著影响。

为检验影响因素对上中下游地区碳排放效率影响效果具有差异性的结论，本文以影响因素城镇化率为例，进一步分析城镇化率的不同水平与其对上中下游地区碳排放效率影响之间的关系。通过计算 2006~2019 年长江经济带各省城镇化率年平均水平，使用分位数法划分城镇化率高、中、低水平地区。从表 4 第(5)至(7)列可见，当地区城镇化率处于低水平阶段，则城镇化率未对制造业碳排放效率产生显著正向作用，当地区城镇化率处于中高水平阶段，则城镇化率的提高有利于制造业碳排放效率的提升。这也验证了上文关于城镇化率对上中下游制造业碳排放效率存在不同影响的分析。

4 结论与建议

通过测算长江经济带制造业及八大高碳制造行业碳排放效率，分析其时间、空间变化特征，并探究其影响因素，得出结论如下：(1)2006~2019 年长江经济带制造业碳排放效率不断提升；长江经济带制造业碳排放效率空间差异性逐渐缩小，下游地区制造业碳排放效率高于中上游以及长江经济带整体平均水平，上游地区效率水平最低。(2)2006~2019 年长江经济带八大高碳制造行业碳排放效率不断提升，但行业间差异显著，石油、有色金属、运输设备制造业现已到达碳排放效率最优前沿面，而非金属、化学原料以及造纸等对原料依赖性高，能源消耗量大，污染性高的制造业未达到效率最优前沿面，且不同高碳制造行业的空间分布差异显著。(3)行业成长能力、行业能源利用效率、行业规模、人均 GDP 水平、城镇化率对长江经济带制造业碳排放效率产生正向效应，行业外商直接投资、工业化水平对其产生负向效应；影响因素在上、中、下游地区的效果存在不同。

针对长江经济带地区制造业低碳发展，第一，需要坚持长江经济带上、中、下游地区协调发展，推动绿色发展一体化。一方面，上游地区如云南、贵州等地制造业碳排放效率始终处于较低水平，因此对于能源消耗大、污染性高的传统制造业应鼓励其淘汰落后产能，进行低碳、绿色生产，对高碳制造行业需要提升其准入门槛，督促行业绿色转型升级。另一方面，建立长江经济带不同区域间的协同减排机制，如通过建立上、中、下游跨区域绿色技术联盟，加大对绿色核心技术的研发与转移，拉动上游地区的协同减排。第二，积极推进城镇化建设。城镇化发展一定程度上有利于推动地区工业发展以及资源利用效率的提升，对制造业碳排放效率产生积极影响，因此对于城镇化发展缓慢的地区可以适当给予政策方面的倾斜，助推城镇化建设的有效进

行。第三，提升和完善制造业外商直接投资的效率与结构。外商直接投资对长江经济带制造业碳排放效率产生负面效应，需要提升外商直接投资的质量，并通过提高投资效率、完善投资结构，激发其技术溢出效应，推动地区制造业高质量绿色发展。第四，推动地区新型工业化发展，通过引导制造业进行绿色技术创新，提升能源利用效率。一方面，制造业作为能源消耗、温室气体排放的主要行业，能源利用效率的提升能有效推动制造业低碳高效发展，政府需要加大对制造业绿色技术创新的支持力度，改善劳动资本结构，促进能源利用效率提升。

参考文献

- [1] KAYA Y, YOKOBORI K. Global environment, energy, and economic development held at the united nations university[R]. Tokyo, 1993. 10:25-27.
- [2] RAMANATHAN R. Combining indicators of energy consumption and CO₂ emissions: A cross-country comparison[J]. International Journal of Global Energy Issues, 2002, 17(3):214-227.
- [3] ZAIM O, TASKIN F. Environmental efficiency in carbon dioxide emissions in the OECD: A non-parametric approach[J]. Journal of Environmental Management, 2000, 58(2):95-107.
- [4] 周迪, 王雪芹. 中国碳排放效率与产业结构升级的耦合度及耦合路径[J]. 自然资源学报, 2019, 34(11):2305-2316. ZHOU D, WANG X Q. Research on coupling degree and coupling path between China's carbon emission efficiency and industrial structure upgrade[J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(11):2305-2316.
- [5] 何伟军, 李闻钦, 邓明亮. 人力资本、绿色科技创新与长江经济带全要素碳排放效率[J]. 科技进步与对策, 2022, 39(9):23-32. HE W J, LI W Q, DENG M L. Human capital, green technology innovation, and total factor carbon emission efficiency in the Yangtze River economic belt[J]. Science & Technology Progress and Policy, 2022, 39(9):23-32.
- [6] 孙秀梅, 张慧, 綦振法, 等. 我国东西地区的碳排放效率对比及科技减排路径研究——基于三阶段 DEA 和超效率 SBM 模型的分析[J]. 华东经济管理, 2016, 30(4):74-79. SUN X M, ZHANG H, QI Z F, et al. A study on the comparison of carbon emissions efficiency in China's eastern and western regions and the science and technology path of carbon emissions reduction: An analysis based on three-stage DEA model and super efficiency SBM model[J]. East China Economic Management, 2016, 30(4):74-79.
- [7] 金娜, 仇方道, 袁荷. 江苏省碳排放效率时空格局及驱动因素[J]. 地域研究与开发, 2018, 37(4):144-149. JIN N, QIU F D, YUAN H. Spatial pattern and influencing factors of carbon dioxide emissions efficiency in Jiangsu Province[J]. Areal Research and Development, 2018, 37(4):144-149.
- [8] 徐英启, 程钰, 王晶晶, 等. 中国低碳试点城市碳排放效率时空演变与影响因素[J]. 自然资源学报, 2022, 37(5):1261-1276. XU Y Q, CHENG Y, WANG J J, et al. Spatio-temporal evolution and influencing factors of carbon emission efficiency in low carbon city of China[J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(5):1261-1276.
- [9] 胡剑波, 闫烁, 韩君. 中国产业部门隐含碳排放效率研究——基于三阶段 DEA 模型与非竞争型 I-O 模型的实证分析[J]. 统计研究, 2021, 38(6):30-43. HU J B, YAN S, HAN J. Study on the carbon emissions efficiency embodied in China's industrial sector: Empirical analysis based on three-stage DEA model and non-competitive I-O model[J]. Statistical Research, 2021, 38(6):30-43.

-
- [10] 田云,王梦晨.湖北省农业碳排放效率时空差异及影响因素[J].中国农业科学,2020,53(24):5063-5072.TIAN Y,WANG M C.Research on spatial and temporal difference of agricultural carbon emission efficiency and its influencing factors in Hubei Province[J].Scientia Agricultura Sinica,2020,53(24):5063-5072.
- [11] WANG R,FENG Y.Research on China's agricultural carbon emission efficiency evaluation and regional differentiation based on DEA and Theil models[J].International Journal of Environmental Science and Technology,2021,18(6):1453-1464.
- [12] 蔺雪芹,边宇,王岱.京津冀地区工业碳排放效率时空演化特征及影响因素[J].经济地理,2021,41(6):187-195.LIN X Q,BIAN Y,WANG D.Spatiotemporal evolution characteristics and influencing factors of industrial carbon emission efficiency in Beijing-Tianjin-Hebei region[J].Economic Geography,2021,41(6):187-195.
- [13] 李焱,李佳蔚,王炜瀚,等.全球价值链嵌入对碳排放效率的影响机制——“一带一路”沿线国家制造业的证据与启示[J].中国人口·资源与环境,2021,31(7):15-26.LI Y,LI J W,WANG W H,et al.Effect and mechanism of global value chain embedding on carbon emission efficiency:Evidence and implications from the manufacturing industries in the Belt and Road countries[J].China Population Resources and Environment,2021,31(7):15-26.
- [14] 王梓瑛,王兆峰.碳排放约束下长江经济带旅游产业效率的时空演化及影响因素研究[J].长江流域资源与环境,2021,30(2):280-289.WANG Z Y,WANG Z F.Spatial-temporal evolution and influencing factors of tourism industry efficiency under the constraints of carbon emission in the Yangtze River economic zone[J].Resources and Environment in the Yangtze Basin,2021,30(2):280-289.
- [15] 王少剑,高爽,黄永源,等.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[J].地理学报,2020,75(6):1316-1330.WANG S J,GAO S,HUANG Y Y,et al.Spatio-temporal evolution and trend prediction of urban carbon emission performance in China based on super-efficiency SBM model[J].Acta Geographica Sinica,2020,75(6):1316-1330.
- [16] 郭四代,钱昱冰,赵锐.西部地区农业碳排放效率及收敛性分析——基于SBM-Undesirable模型[J].农村经济,2018(11):80-87.GUO S D,QIAN Y B,Zhao R.Analysis of agricultural carbon emission efficiency and convergence in Western China:Based on SBM-undesirable model[J].Rural Economy,2018(11):80-87.
- [17] 张广泰,贾楠.中国建筑业碳排放效率测度与空间关联特征[J].科技管理研究,2019,39(21):236-242.ZHANG G T,JIA N.Measurement and spatial correlation characteristics of carbon emission efficiency in China's construction industry[J].Science and Technology Management Research,2019,39(21):236-242.
- [18] 邵海琴,王兆峰.长江经济带旅游业碳排放效率的综合测度与时空分异[J].长江流域资源与环境,2020,29(8):1685-1693.SHAO H Q,WANG Z F.Comprehensive measurement of carbon emissions efficiency of tourism and its spatio-temporal differentiation in the Yangtze River economic belt[J].Resources and Environment in the Yangtze Basin,2020,29(8):1685-1693.
- [19] 刘志华,徐军委,张彩虹.科技创新、产业结构升级与碳排放效率——基于省际面板数据的PVAR分析[J].自然资源学报,2022,37(2):508-520.LIU Z H,XU J W,ZHANG C H.Technological innovation, industrial structure upgrading and carbon emissions efficiency:An analysis based on PVAR model of panel data at provincial level[J].Journal of Natural Resources,2022,37(2):508-520.

-
- [20] 王喜平, 王素静. 碳交易政策对我国钢铁行业碳排放效率的影响[J]. 科技管理研究, 2022, 42(1):171-176. WANG X P, WANG S J. Impact of carbon trading policy on carbon emission efficiency of China' s steel industry[J]. Science and Technology Management Research, 2022, 42(1):171-176.
- [21] 郭沛, 梁栋. 低碳试点政策是否提高了城市碳排放效率——基于低碳试点城市的准自然实验研究[J]. 自然资源学报, 2022, 37(7):1876-1892. GUO P, LIANG D. Does the low-carbon pilot policy improve the efficiency of urban carbon emissions: Quasi-natural experimental research based on low-carbon pilot cities[J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(7):1876-1892.
- [22] 周杰琦, 韩颖, 林洪. FDI 对中国工业碳排放效率的影响机理及其效应——理论构建与经验分析[J]. 软科学, 2016, 30(1):76-80. ZHOU J Q, HAN Y, LIN H. The effects and mechanisms of FDI on industrial carbon efficiency of China: Theory and empirical research[J]. Soft Science, 2016, 30(1):76-80.
- [23] TONE K. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis[J]. European Journal of Operational Research, 2001, 130(3):498-509.
- [24] 孙晓华, 王昀. 企业规模对生产率及其差异的影响——来自工业企业微观数据的实证研究[J]. 中国工业经济, 2014(5):57-69. SUN X H, WANG Y. The influence of firm size on productivity and its difference—Based on the empirical test of industrial firms in China[J]. China Industrial Economics, 2014(5):57-69.
- [25] 代迪尔, 李子豪. 外商直接投资的碳排放效应——基于中国工业行业数据的研究[J]. 国际经贸探索, 2011, 27(5):60-67. DAI D E, LI Z H. Study of effects of FDI on carbon emissions based on the data of Chinese industries[J]. International Economics and Trade Research, 2011, 27(5):60-67.
- [26] 陈继勇, 彭巍, 胡艺. 中国碳强度的影响因素——基于各省市面板数据的实证研究[J]. 经济管理, 2011, 33(5):1-6. CHEN J Y, PENG W, HU Y. Study on the influence factors of China' s carbon intensity: Based on provincial panel data[J]. Business Management Journal, 2011, 33(5):1-6.
- [27] 刘希雅, 王宇飞, 宋祺佼, 等. 城镇化过程中的碳排放来源[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(1):61-66. LIU X Y, WANG Y F, SONG Q J, et al. Study on carbon emissions sources in China' s urbanization process[J]. China Population Resources and Environment, 2015, 25(1):61-66.
- [28] 王鑫静, 程钰. 城镇化对碳排放效率的影响机制研究——基于全球 118 个国家面板数据的实证分析[J]. 世界地理研究, 2020, 29(3):503-511. WANG X J, CHENG Y. Research on the influencing mechanism of urbanization on carbon emission efficiency: Based on an empirical study of 118 countries[J]. World Regional Studies, 2020, 29(3):503-511.
- [29] 李建豹, 黄贤金, 揣小伟, 等. 长三角地区碳排放效率时空特征及影响因素分析[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(7):1486-1496. LI J B, HUANG X J, CHUAI X W, et al. Spatio-temporal characteristics and influencing factors of carbon emissions efficiency in the Yangtze River Delta region[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020, 29(7):1486-1496.