

双碳目标下基于 LMDI 的长江中下游 碳排放变化分析

董志超¹ 杨敏²

(1. 国网江苏省电力有限公司泰兴市供电分公司 泰兴 225400;

2. 泰州三新供电服务有限公司泰兴分公司 泰兴 225400)

【摘要】基于 LMDI 分解模型,选取 2012—2022 年长江中下游地区六省一市碳排放数据为研究对象,将人均碳排放量分解为碳排放系数、地区能源分布、产业能源结构、能源强度、产业结构、人均 GDP 六要素分析,设计“地区-产业-能源”三维模型并分析研究。结果表明,长江中下游地区的能耗分布和能源结构呈现区段内增减,2020 年以后均呈现负效应,能源强度和产业结构具备先进性,在人均碳排放变化中呈现普遍负效应,人均 GDP 在碳排放增长中呈现正效应且占据主导地位。最后对区域碳排放变化及其影响因素的时空分析,判断影响因素的正负效应和驱动力大小,并以此提出政策性建议。

【关键词】双碳目标; LMDI; 因素分解; 长江中下游地区

中图分类号: X24

文献标识码: A

文章编号: 1673-288X(2024)05-0057-09

DOI: 10.19758/j.cnki.issn1673-288x.202405057

党的二十大报告中对“推动绿色发展,促进人与自然和谐共生”作出重要部署,明确提出“统筹产业结构调整、污染治理、生态保护、应对气候变化,协同推进降碳、减污、扩绿、增长”的新要求。

经济发展必然伴随能源消耗,而能源消耗又必然引起碳排放增多。“碳达峰”通常认为是指二氧化碳排放量在某段时间内达到峰值后从维持平稳波动至开始下降的过程。当二氧化碳排放量经负碳技术的应用而达到增减平衡时,此平衡状态可被称为“碳中和”。

当前学术界对人均碳排放量影响因素的解析方法,以拉氏指数分解法和迪氏指数分解法为主。其中对数平均迪氏指数(Logarithmic Mean Divisia Index,简称“LMDI”)法能够有效处理残差问题^[1]。LMDI 分解模型的分解方式相较于其他分解方法,还具备结构稳定、数据精确、干扰因素少等优势^[2-3]。在此分解方法下,要素选取中主要考虑能源结构、能源强度、产业

结构、GDP 等^[4-9]。发现人口规模、产业发展等因素对碳排放具有正效应^[10-14],能源结构、能源强度等对碳排放具有负效应^[15-19]。

本文选取 2012—2022 年长江中下游地区六省一市碳排放数据为研究对象,创新性地将人均碳排放量分解为碳排放系数、地区能源分布、产业能源结构、能源强度、产业结构、人均 GDP 六要素分析。首推三维变量控制模型,同时考虑地区、产业、能源种类三重效应下进行 LMDI 分解,综合考虑时空结构下碳排放变化及其影响因素。

1 模型构建与数据处理

1.1 碳排放量测算方法

选取长江中下游地区湖北省、湖南省、江西省、安徽省、江苏省、浙江省、上海市六省一市为研究对象,以原煤、原油、天然气三类初级能源为能源消费总量,将能源消费分为农林牧渔业、工业、建筑业、服务业及生活消费四类行业,采

作者简介:董志超(1995-),男,工程师,硕士,主要从事新能源规划、碳排放管理研究,E-mail: 15052404877@163.com。

用碳排放计算公式^[20]:

$$C = \sum_{ijk} E_{ijk} \times A_k \quad (1)$$

式中: C 为二氧化碳排放总量; $\sum_{ijk} E_{ijk}$ 为 i 地区 j 产业第 k 种能源消费总量; A_k 为第 k 种能源的碳排放系数, 具体取值见表 1。

表 1 各类能源折标准煤系数及碳排放系数

Table 1 The coefficient of conversion of various energy sources to standard coal and carbon emission coefficient

能源种类	折标准煤系数	碳排放系数 A_k
原煤(煤炭)	0.7143	0.7476
原油(石油)	1.4286	0.5854
天然气	1.333	0.4479

1.2 LMDI 模型建立

通过对数平均迪氏指数(Logarithmic Mean Divisia Index, LMDI) 分解法, 将影响长江中下游地区碳排放的各个因素分为碳排放系数变化、能耗分布变化、能源结构变化、能源强度变化、产业结构变化、人均 GDP 变化六个关键控制因素, 并研究各控制因素的控制力和逐年的变化程度。

根据 Kaya 恒等式^[21]:

$$I = \frac{C}{P} = \sum_{ijk} \frac{C_{ijk} E_{ijk} E_{jk} E_j G_j G}{E_{ijk} E_{jk} E_j G_j GP} \quad (2)$$

式中: I 为人均碳排放量 (t/人); C 为碳排放量 (万 t); P 为地区人口总数 (人); i 为地区; j 为产业; k 为能源种类; C_{ijk} 为 i 地区第 j 种产业消耗 k 种能源产生的碳排放量 (万 t); E_{ijk} 为第 i 地区的 j 种产业消耗 k 种能源总量 (万 t); E_{jk} 为第 j 种产业消耗 k 种能源总量 (万 t); E_j 为第 j 种产业消耗能源总量 (万 t); G_j 为第 j 种产业 GDP 总值 (万元); G 为 GDP 总值 (万元); P 为地区总人口 (人)。

式可写为:

$$I = \frac{C}{P} = \sum_{ijk} A_{ijk} D_{ijk} S_{jk} Q_j F_j R \quad (3)$$

其中:

$$A_{ijk} = \frac{C_{ijk}}{E_{ijk}} \quad (4)$$

$$D_{ijk} = \frac{E_{ijk}}{E_{jk}} \quad (5)$$

$$S_{jk} = \frac{E_{jk}}{E_j} \quad (6)$$

$$Q_j = \frac{E_j}{G_j} \quad (7)$$

$$F_j = \frac{G_j}{G} \quad (8)$$

$$R = \frac{G}{P} \quad (9)$$

式中: A_{ijk} 为各类能源碳排放系数; D_{ijk} 为能耗分布, 即 i 地区 j 类产业 k 类能源消耗综合占所有地区综合总耗能比例 (%); S_{jk} 为产业能源结构, 即 j 种产业 k 种能源消耗占 j 种产业总能耗比例 (%); Q_j 为能源强度, 即 j 种产业单位 GDP 耗能 (t/万元); F_j 为产业结构, 即 j 种产业 GDP 产值占 GDP 总产值比例, %; R 为人均 GDP (万元/人)。

LMDI 分解计算,

$$\Delta I = \Delta I_A + \Delta I_D + \Delta I_S + \Delta I_Q + \Delta I_F + \Delta I_R \quad (10)$$

其中:

$$\Delta I_A = \sum_{ijk} W_{ijk}^t \ln \frac{A_{ijk}^t}{A_{ijk}^{t-1}} \quad (11)$$

$$\Delta I_D = \sum_{ijk} W_{ijk}^t \ln \frac{D_{ijk}^t}{D_{ijk}^{t-1}} \quad (12)$$

$$\Delta I_S = \sum_{ijk} W_{ijk}^t \ln \frac{S_{jk}^t}{S_{jk}^{t-1}} \quad (13)$$

$$\Delta I_Q = \sum_{ijk} W_{ijk}^t \ln \frac{Q_j^t}{Q_j^{t-1}} \quad (14)$$

$$\Delta I_F = \sum_{ijk} W_{ijk}^t \ln \frac{F_j^t}{F_j^{t-1}} \quad (15)$$

$$\Delta I_R = \sum_{ijk} W_{ijk}^t \ln \frac{R^t}{R^{t-1}} \quad (16)$$

式(11) — (16) 中, 有:

$$\sum_{ijk} W_{ijk}^t = \frac{I_{ijk}^t - I_{ijk}^{t-1}}{\ln I_{ijk}^t - \ln I_{ijk}^{t-1}} \quad (17)$$

ΔI 为人均碳排放变化总量, ΔI_A 、 ΔI_D 、 ΔI_S 、 ΔI_Q 、 ΔI_F 、 ΔI_R 分别为碳排放系数变化、能源分布变化、产业能源结构变化、能源强度变化、产业结构变化、人均 GDP 变化对碳排放强度变化的贡献值, 其中环比下单类能源的碳排放系数视作不变, 即 $\Delta I_A = 0$ 。

1.3 数据来源及说明

文中折标准煤系数、碳排放系数、人口、GDP 数据来源为《中国能源统计年鉴》,折标煤能耗、碳排放统计数据来源为《中国碳核算数据库 CEADs》。

2 结果与分析

2.1 长江中下游地区碳排放时空差异分析

长江中下游地区经济贡献及碳排放区域比重最高,且在全国区域碳排放比重逐年增加。

故本文选取选取长江中下游地区湖北省、湖南省、江西省、安徽省、江苏省、浙江省、上海市六省一市为研究对象。将产业划分为农林牧渔业、工业、建筑业、服务业及生活消费四类,统计原煤、原油、天然气使用情况。设计“地区、产业、能源种类”三维变量模型,同时考虑地区、产业、能源种类对碳排放影响的三重效应,不仅分析长江中下游地区差异性碳排放效应,也对六省一市开展产业差异性分析。

由表 2 可知,2012 年至 2022 年期间,长江中下游地区人口及 GDP 稳步增长,总增长率分别为 5.52% 和 153.78%,总碳排放增长 18.45%。长江中下游六省一市中,农林牧渔

表 2 长江中下游地区人口、GDP、能耗、碳排放
Table 2 Population, GDP, energy consumption, and carbon emissions in the middle and lower reaches of the Yangtze River

年份	人口/ 万人	GDP/ 亿元	总能耗/ 万 tce	总碳排放/ 万 tce
2012	38335.48	140129.93	66861.81	47119.81
2013	38518.80	166930.10	73354.30	51940.53
2014	38687.27	183470.88	76346.03	53637.56
2015	38894.19	202381.13	74888.47	52268.88
2016	39072.04	219808.96	73455.78	50976.93
2017	39274.33	235308.13	76133.35	52410.86
2018	39504.01	259941.66	77263.58	53773.71
2019	39743.45	284676.37	81992.67	56170.74
2020	40012.19	309256.35	81410.34	55478.88
2021	40225.23	347590.49	82537.51	56061.68
2022	40450.91	355629.98	79196.47	53716.25

业、工业、建筑业、服务业及生活消费折标煤能耗及碳排放总量分别在 2021 年和 2019 年达到峰值。人均 GDP 年均增长率 14.05%,人均耗能折标煤年均增长率 12.25%,人均碳排放年均增长率 8.04%,人均折标煤能耗及人均碳排放量分别在 2019 年达到峰值。产业、经济、人口规模已经形成稳定机构,在保持人均 GDP 发展趋势的同时人均耗能及人均碳排放已到达拐点并逐年递减。

2.1.1 地区差异性分析

现在对湖北省等六省一市碳排放数据展开差异性分析,分别定义碳排放经济系数 J_i^t 和碳排放综合能耗系数 N_i^t 。

$$J_i^t = C_i^t / G_i^t \quad (18)$$

$$N_i^t = C_i^t / E_i^t \quad (19)$$

式中,碳排放经济系数 J_i^t 为单位 GDP 碳排放量(万 tce/亿元),体现地区经济 GDP 发展透支环境代价,碳排放综合能耗系数 N_i^t 为单位能耗碳排放量(万 tce/万 tce),体现碳排放目标下地区能源利用水平。

图 1 中,从时空分布来看,2012 年至 2022 年期间,长江中下游地区碳排放湖北、浙江、上海碳排放占比有缩减趋势,分别降低 1.29%、2.49%、2.3%,湖南省基本保持不变,江西、安徽、江苏碳排放占比呈现增长趋势,分别增长 2.21%、4.53%、1.56%。江苏省年均碳排放占比最高,超过 25%,上海市、江西省年均碳排放占比最低,均低于 10%。

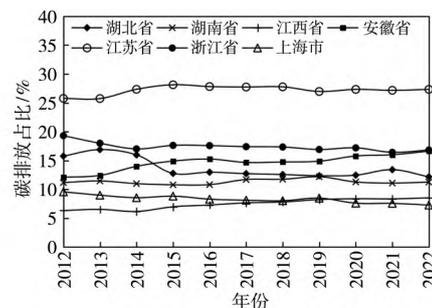


图 1 2012—2022 年长江中下游地区碳排放占比
Fig.1 Proportion of carbon emissions in the middle and lower reaches of the Yangtze River from 2012 to 2022

图2中,碳排放经济系数体现地区经济GDP发展透支环境代价和GDP发展先进性。六省一市整体趋势逐渐降低且降低幅度超过50%,说明长江中下游地区GDP发展对环境透支逐步降低。2022年安徽碳排放经济系数最高,上海最低,湖北等5省基本一致。

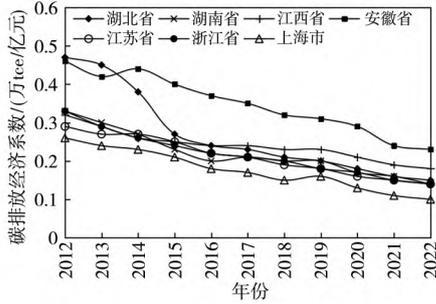


图2 2012—2022年长江中下游地区碳排放经济系数
Fig.2 Economic coefficients of carbon emissions in the middle and lower reaches of the Yangtze River from 2012 to 2022

图3中,碳排放综合能耗系数体现地区能源利用水平,上海地区均值0.65,低于其他六省均值0.70,且六省一市变化较低,故后期LMDI分解考虑单类能源的碳排放系数变化时视作0。

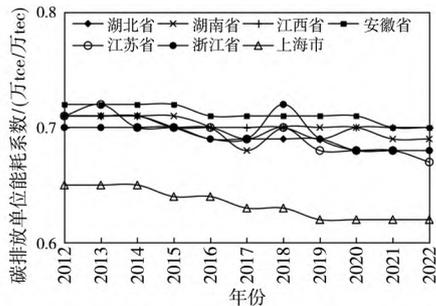


图3 2012—2022年长江中下游地区碳排放综合能耗系数
Fig.3 Comprehensive energy consumption coefficient of carbon emissions in the middle and lower reaches of the Yangtze River from 2012 to 2022

2. 1. 2 产业差异性分析

对长江中下游地区六省一市农林牧渔业、工业、建筑业服务业及生活消费四类产业分析GDP贡献率(%)、能耗折标准煤占比、碳排放占比。

图4~6可知,长江中下游地区六省一市四类产业的工业的碳排放占比远高于其他产业,2012—2022年期间均超过75%,服务业及生活

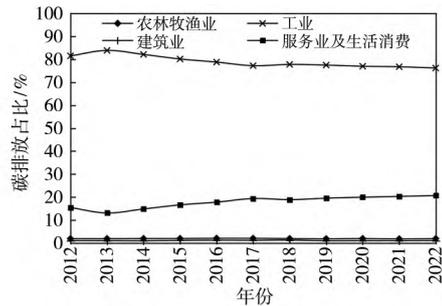


图4 2012—2022年长江中下游地区各类产业碳排放占比

Fig.4 Proportion of carbon emissions from various industries in the middle and lower reaches of the Yangtze River from 2012 to 2022

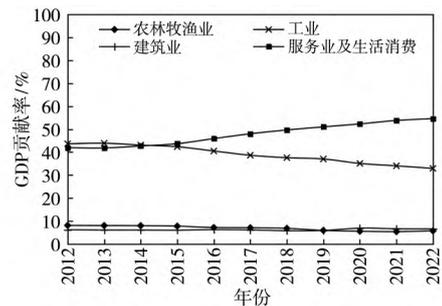


图5 2012—2022年长江中下游地区各类产业GDP贡献率

Fig.5 Contribution rate of GDP of various industries in the middle and lower reaches of the Yangtze River from 2012 to 2022

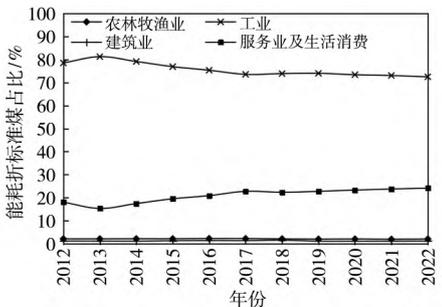


图6 2012—2022年长江中下游地区各类产业能耗折标准煤占比

Fig.6 Proportion of energy consumption of various industries in the middle and lower reaches of the Yangtze River from 2012 to 2022

消费碳排放占比逐年增加至 20.71%, 农林牧渔业和建筑业在 2% 范围内波动。

四类产业的能耗占比分布错落, 其中工业能耗占比最高且逐年降低至 72.46%, 服务业及生活消费能耗占比较低且逐年升高至 24.18%, 农林牧渔业能耗占比保持在 2.1% 附近, 建筑业能耗占比保持在 1.3% 附近波动变化。

工业和服务业及生活消费 GDP 贡献率占 80% 以上, 且工业占比逐年递减至 32.95%, 服务业及生活消费占比逐年递增至 54.61%。服务业及生活消费在保持 GDP 贡献利率的同时具备低能耗和低碳排放优势。

2.2 基于 LMDI 模型的长江中下游地区碳排放实证分析

2.2.1 2012—2022 年长江中下游地区碳排放强度分解结果

对 2013 年至 2022 年期间逐年人均碳排放变化 ΔI 分析, 人均碳排放变化趋势在 2014 年达到局部峰值, 在 2019 年达到全区段峰值, 并逐年递减。说明长江中下游六省一市在影响碳排放变化的多重效应下, 已经实现地区人均“碳达峰”, 且人均碳排放自 2019 年后呈现逐

表 3 2013—2020 年长江中下游地区碳排放强度

LMDI 分解结果

Table 3 LMDI decomposition results of carbon emission intensity in the middle and lower reaches of the Yangtze River from 2011 to 2020

	ΔI	ΔI_D	ΔI_S	ΔI_Q	ΔI_F	ΔI_R
2013	0.1228	-0.0057	-0.0011	-0.1228	0.0055	0.2469
2014	0.0746	0.0210	0.0001	-0.0617	-0.0173	0.1325
2015	-0.0344	0.0056	-0.0028	-0.1461	-0.0255	0.1344
2016	-0.0481	-0.0067	-0.0036	-0.1213	-0.0278	0.1113
2017	0.0261	-0.0038	-0.0067	-0.0097	-0.0444	0.0907
2018	0.0175	0.0007	0.0072	-0.0983	-0.0273	0.1352
2019	0.0879	0.0253	-0.0118	-0.0329	-0.0184	0.1256
2020	-0.0500	-0.0107	-0.0086	-0.0794	-0.0627	0.1115
2021	-0.0147	-0.0099	-0.0046	-0.1250	-0.0374	0.1622
2022	-0.0827	-0.0020	-0.0008	-0.0624	-0.0419	0.0245

年降低趋势。

其中, 长江中下游地区的能耗分布变化 ΔI_D 和能源结构变化 ΔI_S 呈现区段内增减, 2020 年以后均呈现负效应。能源强度和产业结构具备先进性, 能源强度变化 ΔI_Q 和产业结构变化 ΔI_F 在人均碳排放变化中呈现普遍负效应, 对节能减排贡献极大。人均 GDP 变化 ΔI_R 在碳排放增长中呈现正效应且占据主导地位, 在保持人均 GDP 逐年递增趋势下, 带来人均碳排放增加。未来发展趋势中, 人均 GDP 变化 ΔI_R 对减低碳排放总量和人均值具备潜力。

2.2.2 能耗分布因素变化影响分析

能耗分布, 即 i 地区 j 类产业 k 类能源消耗占所有地区该产业某类能源的能耗比例, 如湖北省农林牧渔业中原煤使用在长江中下游六省一市中农林牧渔业的原煤使用中占比。该数据体现双碳目标下地区产业发展在能源选择调整带来的人均碳排放变化。负效应体现为降碳作用, 正效应为增碳。

长江中下游地区六省一市中, 能耗分布变化对人均碳排放变化成负效应的最大值如表 4 所示。其中, 湖北省、湖南省、浙江省工业中原煤的能耗分布变化引起的负效应最明显, 江西省建筑业中天然气能源分布变化引起的负效应最明显, 安徽省、江苏省服务业及生活消费中原煤的能源分布变化引起的负效应最明显, 上海市农林牧渔业中原油变化引起的负效用最明显。

由表 5 可知, 湖北省工业中原油的能源分布变化引起的人均碳排放正效应最明显, 湖南省服务业及生活消费中原煤能源分布变化引起的正效应最明显, 江西省、安徽省工业中原煤的能源分布变化引起的正效应最明显, 江苏省服务业及生活消费中原油的能源分布变化引起的正效应最明显, 浙江省工业中天然气变化引起的正效应最明显, 上海市农林牧渔业中原煤变化引起的正效用最明显。

表4 2013—2022年长江中下游地区各省份、各产业、各能源人均碳排放变化负效应最高值

Table 4 The highest negative effect of per capita carbon emission changes in provinces industries , industries and energy sources in the middle and lower reaches of the Yangtze River from 2013 to 2022

省份	湖北省	湖南省	江西省	安徽省	江苏省	浙江省	上海市
产业	工业	工业	建筑业	服务业及生活消费	服务业及生活消费	工业	农林牧渔业
能源种类	原煤	原煤	天然气	原煤	原煤	原煤	原油
2013	0.0049	-0.0006	0.0000	-0.0020	-0.0009	-0.0176	0.0049
2014	-0.0061	-0.0033	0.0000	-0.0016	-0.0007	-0.0100	-0.0061
2015	-0.0344	-0.0113	0.0000	0.0040	0.0007	0.0096	-0.0344
2016	-0.0011	-0.0003	0.0000	-0.0011	-0.0003	0.0013	-0.0011
2017	0.0004	0.0001	0.0000	-0.0001	-0.0004	-0.0020	0.0004
2018	-0.0008	0.0068	0.0000	-0.0018	-0.0004	-0.0057	-0.0008
2019	0.0022	0.0081	0.0000	-0.0001	-0.0001	0.0004	0.0022
2020	-0.0038	-0.0149	0.0000	-0.0025	-0.0001	0.0053	-0.0038
2021	0.0116	-0.0033	0.0000	-0.0050	-0.0001	-0.0100	0.0116
2022	-0.0146	-0.0036	0.0000	-0.0008	-0.0006	0.0025	-0.0146

表5 2013—2022年长江中下游地区各省份、各产业、各能源人均碳排放变化正效应最高值

Table 5 The highest aggressive effect of per capita carbon emission changes in provinces industries , industries and energy sources in the middle and lower reaches of the Yangtze River from 2013 to 2022

省份	湖北省	湖南省	江西省	安徽省	江苏省	浙江省	上海市
产业	工业	服务业及生活消费	工业	工业	服务业及生活消	工业	农林牧渔业
能源种类	原油	原煤	原煤	原煤	原油	天然气	原煤
2013	0.0013	0.0010	0.0003	-0.0029	-0.0211	0.0009	0.0013
2014	0.0005	0.0014	-0.0037	0.0260	0.0617	-0.0010	0.0005
2015	-0.0001	0.0046	0.0090	0.0090	-0.0023	0.0010	-0.0001
2016	0.0004	0.0002	0.0043	0.0048	0.0013	0.0026	0.0004
2017	-0.0001	0.0009	0.0043	-0.0031	-0.0015	-0.0023	-0.0001
2018	-0.0001	0.0005	0.0000	-0.0002	-0.0026	-0.0097	-0.0001
2019	-0.0004	0.0009	0.0035	0.0029	0.0007	0.0309	-0.0004
2020	0.0003	0.0007	0.0019	0.0117	0.0019	0.0028	0.0003
2021	0.0002	0.0005	0.0005	0.0031	-0.0006	0.0001	0.0002
2022	-0.0002	0.0004	0.0036	0.0063	0.0017	0.0004	-0.0002

2.2.3 能源结构因素变化影响分析

能源结构将对人均碳排放变化影响分为农林牧渔业等4个产业,每个产业分原煤、原油、天然气三类能源共计12个变化影响因素。对能耗折标煤最高的工业、服务业及生活消费分析。

工业中原煤能耗占比由2012年93%降低

至2022年87.67% 降幅7%,天然气占比3.4%增加至7.4% 增幅度4个百分点,服务业及生活消费中主要能源消费为原油,占比由2022年78.07%减低至76%,变化幅度不大,原煤占比降低,石油占比增加,体现行业能源依赖单一性虽然降低但仍然存在。

现对产业内能源结构变化对人均碳排放变

表 6 2013—2022 年长江中下游地区工业、服务业及生活消费能源结构变化效应

Table 6 From 2013 to 2022 the effects of changes in the energy structure of industry service industry and domestic consumption in the middle and lower reaches of the Yangtze River

	工业			服务业及生活消费		
	原煤	原油	天然气	原煤	原油	天然气
2013	0.0009	-0.0067	0.0050	0.0072	-0.0136	0.0061
2014	-0.0067	-0.0026	0.0071	-0.0114	0.0152	-0.0015
2015	-0.0059	-0.0012	0.0049	-0.0028	-0.0001	0.0023
2016	-0.0059	-0.0017	0.0050	-0.0015	-0.0032	0.0038
2017	-0.0108	0.0003	0.0066	-0.0005	-0.0089	0.0066
2018	0.0163	-0.0027	-0.0070	-0.0035	0.0118	-0.0055
2019	-0.0346	-0.0058	0.0245	-0.0008	0.0003	0.0004
2020	-0.0086	-0.0043	0.0061	-0.0019	-0.0050	0.0051
2021	-0.0036	-0.0025	0.0026	-0.0041	0.0008	0.0021
2022	-0.0025	0.0005	0.0010	0.0000	0.0007	-0.0005

化的贡献值分析,能耗折标煤最高的工业、服务业及生活消费里,原煤在工业和服务业及生活消费中在能源结构变化对人均碳排放变化呈同样趋势,整体下降、局部上升,呈现普遍的负效应,体现传统行业工业和新兴行业对原煤依赖降低带来的减排效应。天然气占比的增高呈现普遍正效应,带来了人均碳排放的增加。

2.2.4 能源强度变化影响分析

表 7 表明,农林牧渔业等四类产业的能源强度对人均碳排放变化均呈现负效应,其中工业和建筑业的能源强度变化占主导地位,在能源强度效应中贡献率达 90%,农林牧渔业、服务业及生活消费贡献率较低,接近 10%。

2.2.5 产业结构变化

表 8 表明农林牧渔业、工业、建筑业、服务业及生活消费中工业和服务业及生活消费 GDP 贡献率占 80% 以上,且工业占比逐年递减,服务业及生活消费占比逐年递增。农林牧渔业的发展和工业技术升级、建筑业退热等综合效果使得产业结构对人均碳排放呈现负效应,第三产业在占比提高的同时也带来碳排放的增长。

表 7 2013—2022 年长江中下游地区工业、服务业及生活消费能源结构变化效应

Table 7 Effect of changes in the energy structure of industry service industry and domestic consumption in the middle and lower reaches of the Yangtze River from 2013 to 2022

	农林牧渔业	工业	建筑业	服务业及生活消费
2013	-0.0021	-0.0630	-0.0014	-0.0562
2014	-0.0010	-0.0725	-0.0016	0.0134
2015	-0.0025	-0.1387	0.0007	-0.0055
2016	0.0002	-0.0956	-0.0017	-0.0242
2017	-0.0008	-0.0103	-0.0008	0.0021
2018	-0.0029	-0.0590	0.0017	-0.0381
2019	0.0015	-0.0167	-0.0060	-0.0117
2020	0.0002	-0.0497	-0.0040	-0.0259
2021	-0.0039	-0.0878	-0.0010	-0.0322
2022	-0.0019	-0.0428	-0.0001	-0.0176

表 8 2013—2022 年长江中下游地区工业、服务业及生活消费产业结构变化效应

Table 8 From 2013 to 2022 the industrial structure of industry service industry and living consumption in the middle and lower reaches of the Yangtze River was changed

	农林牧渔业	工业	建筑业	服务业及生活消费
2013	0.0055	-0.0002	0.0065	-0.0003
2014	-0.0173	-0.0004	-0.0220	0.0000
2015	-0.0255	-0.0014	-0.0279	-0.0003
2016	-0.0278	-0.0035	-0.0404	0.0009
2017	-0.0444	-0.0040	-0.0525	-0.0004
2018	-0.0273	-0.0051	-0.0307	-0.0010
2019	-0.0184	-0.0091	-0.0174	0.0003
2020	-0.0627	-0.0111	-0.0611	0.0026
2021	-0.0374	-0.0116	-0.0335	-0.0007
2022	-0.0420	-0.0099	-0.0361	-0.0001

2.2.6 人均 GDP 因素分析变化

人均 GDP 在碳排放增长中呈现正效应且占据主导地位,在保持人均 GDP 逐年递增趋势下,对碳排放的正效应呈减少趋势。

表9 2013—2022年长江中下游地区人均GDP
因素分析变化效应

Table 9 Analysis of the change effect of
per capita GDP factors in the middle and lower reaches
of the Yangtze River from 2013 to 2022

	GDP/亿元	人口/万人	人均GDP/(万元/人)	ΔI_R
2013	0.0055	-0.0002	0.0065	0.2468
2014	-0.0173	-0.0004	-0.0220	0.1325
2015	-0.0255	-0.0014	-0.0279	0.1344
2016	-0.0278	-0.0035	-0.0404	0.1113
2017	-0.0444	-0.0040	-0.0525	0.0907
2018	-0.0273	-0.0051	-0.0307	0.1352
2019	-0.0184	-0.0091	-0.0174	0.1256
2020	-0.0627	-0.0111	-0.0611	0.1115
2021	-0.0374	-0.0116	-0.0335	0.1622
2022	-0.0420	-0.0099	-0.0361	0.0246

3 结论

3.1 地区整体性

长江中下游六省一市经济发展带来能耗增加和碳排放增多,也引起人口增加。地区经济发展具备先进性,2012—2022年期间,区域碳排放经济系数降低55.66%。地区碳排放能耗利用稳定,近10年变化不明显,碳排放综合能耗系数降低3.90%。

地区整体性分析,人均GDP变化 ΔI_R 在碳排放增长中呈现正效应且占据主导地位,能耗分布变化 ΔI_D 和能源结构变化 ΔI_S 呈现区段内增减,能源强度变化 ΔI_Q 和产业结构变化 ΔI_F ,在人均碳排放变化中呈现普遍负效应,对节能减排贡献极大。

3.2 产业差异性

农林牧渔业、工业、建筑业、服务业及生活消费中,产业差异性大,工业高耗能且低产出,工业占比逐年递减至32.95%。服务业及生活消费占比逐年递增至54.61%。服务业及生活消费在保持GDP贡献利率的同时具备低能耗和低碳排放优势。农林渔牧业和建筑业具备低耗能、低碳排放、低产值特点,可以补充区域经

济发展多样性。

在工业和服务业及生活消费中,原煤的能源结构变化因素对人均碳排放变化呈现普遍的负效应,说明相关行业对原煤依赖的降低,带来了人均碳排放的减少。天然气的能源结构变化因素呈现普遍正效应,带来了人均碳排放的增加。

工业和建筑业在能源强度变化负效应中占主导地位,贡献率达90%,农林牧渔业、服务业及生活消费贡献率较低,接近10%。

农林牧渔业的发展和工业技术升级、建筑业退热等综合效果使得产业结构对人均碳排放呈现负效应,第三产业占比的提高同时也带来碳排放的增长。

3.3 地区差异性

上海碳排放经济系数、碳排放综合能耗系数均为区域最低,经济发展具备先进性,透支环境低,近10年碳排放经济系数降幅达到61.63%。

安徽碳排放经济系数最高,2022年经济发展对环境透支度高,且因安徽省工业中原煤的过度使用,在能耗分布因素变化对长江中下游地区人均碳排放变化影响中,其工业中原煤正效应最高。

湖北碳排放经济系数降幅67.61%,地区发展调整显著,能耗分布因素变化对长江中下游地区他人均碳排放变化影响中,工业中原煤负效应最高,其工业正在逐步摆脱对传统化石能源的依赖。

3.4 综合性建议

从降碳、减污、扩绿、增长层面看,加快发展方式绿色转型,强调的是产业结构调整,核心是增长。长江中下游地区经济结构复杂,能源消耗纷杂,因地制宜发展能源产业,抑制高耗能产业,能提升生态系统多样性、稳定性、持续性。

参考文献:

[1] 蒋博雅,黄宝麟,张宏.基于LMDI模型的江苏省建筑业碳排放影响因素研究[J].环境科学与技术,2021,10:202-212.
[2] 杨绍华,张宇泉,耿涌.基于LMDI的长江经济带交通碳排放

- 放变化分析[J].中国环境科学,2022,10:4817-4826.
- [3] 刘茂辉,邓小文,刘胜楠,李婧,孙猛.基于 LMDI 法和 Tapio 脱钩模型的天津市碳排放分析[J].环境污染与防治,2022,10:1397-1401.
- [4] 李艳红,王安宇,杨东.基于 LMDI 与国际类比组合法的我国交通运输行业碳排放驱动因素及减排潜力[J].交通运输研究,2022,4:36-45.
- [5] 马颖,邵长秀.基于 LMDI 的北上津区域能源消费碳排放影响因素分析及脱钩效应研究[J].甘肃科学学报,2022,01:124-132.
- [6] 渠慎宁,史丹,杨丹辉.中国数字经济碳排放:总量测算与趋势展望.中国人口[J].资源与环境,2022,09:11-21.
- [7] YU M, WIEDMANN T, CRAWFORD R, et al. The carbon footprint of Australia's construction sector [J]. Procedia Engineering, 2017, 180: 211-220.
- [8] KIM R H. Current state of carbon dioxide emission in cement industry and proposal for the environment load reducing cement used inorganic construction wastes [J]. Magazine of RCR, 2019, 14: 22-28.
- [9] QU X, LEE L. Estimating a spatial autoregressive model with an endogenous spatial weight matrix [J]. Journal of Econometrics, 2015, 187(02): 209-232.
- [10] 张乘玮,王健新,李永峰.基于 LMDI 分解方法的连云港市电力碳排放研究[J].能源与节能,2022,12:76-79.
- [11] 盛谈健,马亚辉,邹风华.多重不确定性下基于 LMDI 的城市工业碳排放量影响因素分析及预测:以苏州市为例[J].综合智慧能源,2022,02:1-7.
- [12] WANG C, WOOD J, WANG Y, et al. CO₂ emission in transportation sector across 51 countries along the Belt and Road from 2000 to 2014 [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 266(09): 122000.
- [13] SUN H, GENG Y, HU L, et al. Measuring China's new energy vehicle patents: A social network analysis approach [J]. Energy, 2018, 153: 685-693.
- [14] 王郭玉杰,张一瑾,杨馥源,田雪沁,王海猷.基于 LMDI 模型的能源系统碳排放影响因素分析[J].分布式能源,2022,03:30-36.
- [15] EPA. U. S. national weighted average CO₂ marginal emission rate, year 2019 data [R]. 2020.
- [16] 王梦凯,白艳萍.基于 LMDI 模型的江苏省碳排放强度影响因素分解研究[J].宁夏大学学报(自然科学版),2022,01:109-114.
- [17] 张卓群,张涛,冯冬发.中国碳排放强度的区域差异、动态演进及收敛性研究[J].数量经济技术经济研究,2022,04:67-87.
- [18] BELKHIR L, ELMELIGI A. Assessing ICT global emissions footprint: trends to 2040 & recommendations [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 177: 448-463.
- [19] APPLE. product environmental report [R]. 2019.
- [20] 余志伟,樊亚平,罗浩.中国产业结构高级化对碳排放强度的影响研究[J].华东经济管理,2022,01:78-87.
- [21] YU C W, ZHANG S H, CHUNG T S, et al. Modeling and evaluation of interruptible load programs in electricity markets [J]. IEEE Proceeding Generation Transmission Distribution, 2005, 152(05): 581-588.
- [22] 苏婷,徐庆娟,姜春然.天津市工业“三废”排放的脱钩关系及影响因素研究——基于 Tapio 脱钩模型及 LMDI 分解法[J].环境科学导刊,2024,02:24-29.

Analysis of carbon emission changes in the middle and lower reaches of the Yangtze River based on LMDI under the dual carbon goals

DONG Zhichao¹, YANG Min²

(1. Operation and Maintenance Department of State Grid Taixing Power Supply Company, Taixing 225400, China;

2. Taizhou Sanxin Power Supply Service Co., Ltd., Taixing Branch, Taixing 225400, China)

Abstract: Based on the LMDI decomposition model, the carbon emission data of six provinces and one city in the middle and lower reaches of the Yangtze River from 2012 to 2022 were selected as the research object, and the per capita carbon emissions were decomposed into six factors: carbon emission coefficient, regional energy distribution, industrial energy structure, energy intensity, industrial structure, and per capita GDP. The results show that the distribution of energy consumption and energy structure in the middle and lower reaches of the Yangtze River show an increase or decrease within the region, and show a negative effect after 2020, the energy intensity and industrial structure have the first progress, and the per capita carbon emission change shows a general negative effect, and the per capita GDP shows a positive effect and occupies a dominant position in the growth of carbon emissions. Finally, the spatiotemporal analysis of regional carbon emission changes and their influencing factors is carried out to determine the positive and negative effects and driving forces of the influencing factors, and policy suggestions are put forward.

Keywords: dual carbon goals; LMDI; factor decomposition; the middle and lower reaches of the Yangtze River

(责任编辑 安祺)