

基于LMDI的长三角地区碳排放影响因素研究

刘斌

南京信息工程大学数学与统计学院，江苏 南京

收稿日期：2024年10月29日；录用日期：2024年12月6日；发布日期：2024年12月13日

摘要

本文通过构建对数平均迪氏指数分解模型，选取规模、结构和技术三个效应下的六个主要影响因素，对2005~2019年长三角地区各部门二氧化碳排放量进行量化驱动力分解。主要结论包括：1) 经济产出水平效应是促成CO₂排放量正向增多的最明显影响因素。经济产出水平的提高使CO₂排放量累增 1.27×10^9 t，对正向促成二氧化碳排放贡献度高达113.5%；人口规模的上升使二氧化碳排放量累增 1.29×10^8 t，对正向促成二氧化碳排放贡献度达11.5%。2) 能源结构效应是减缓CO₂排放量增多的最明显影响因素。能源结构的调整使得二氧化碳排放量累计减少 1.35×10^8 t，对减缓二氧化碳排放贡献度达12.1%；能源强度的下降使得二氧化碳排放量累计减少 6.19×10^7 t，对减缓二氧化碳排放贡献度达5.5%；产业结构的优化使得二氧化碳排放量累计减少 8.34×10^7 t，对减缓二氧化碳排放贡献度达7.4%。3) 上海市、江苏省、浙江省和安徽省四个地区的经济产出水平效应对促成各地区二氧化碳排放贡献度分别是124%、113%、81%、130%；人口规模效应对促成各地区二氧化碳排放贡献度分别是27.6%、10.2%、12.9%、6.1%；能源结构效应对减缓各地区二氧化碳排放贡献度分别是13.2%、10.3%、15.7%、8.2%。

关键词

碳排放，LMDI，因素分解

Decomposition Analysis of Carbon Emission Factors in Yangtze River Delta Region Based on LMDI

Bin Liu

School of Mathematics and Statistics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing Jiangsu

Received: Oct. 29th, 2024; accepted: Dec. 6th, 2024; published: Dec. 13th, 2024

Abstract

By constructing an LMDI model, this paper decomposes the quantitative driving forces of CO₂

文章引用: 刘斌. 基于 LMDI 的长三角地区碳排放影响因素研究[J]. 运筹与模糊学, 2024, 14(6): 495-507.
DOI: [10.12677/orf.2024.146551](https://doi.org/10.12677/orf.2024.146551)

emissions in various sectors in the Yangtze River Delta region from 2005 to 2019 based on a selection of six main influencing factors under the three effects of size, structure and technology. The main findings include: 1) Economic output is the main factor promoting the growth of CO₂ emissions, and the increase in economic output level has increased CO₂ emissions by 1.27×10^9 t, contributing 113.5% to promoting carbon dioxide emissions; The increase in population size has led to a cumulative increase of 1.29×10^8 tons of CO₂ emissions, contributing 11.5% to the promotion of CO₂ emissions. 2) The energy structure effect is the main factor inhibiting the growth of CO₂ emissions, and the improvement of energy structure has reduced CO₂ emissions by 1.35×10^8 t, contributing 12.1% to the suppression of CO₂ emissions; The decrease in energy intensity reduced CO₂ emissions by 6.19×10^7 t, contributing 5.5% to the suppression of CO₂ emissions. The improvement of the industrial structure has reduced CO₂ emissions by 8.34×10^7 tons, contributing 7.4% to the suppression of CO₂ emissions. 3) The contribution of economic output effects to the promotion of CO₂ emissions in Shanghai, Jiangsu Province, Zhejiang Province and Anhui Province is 124%, 113%, 81% and 130% respectively. The contribution of population size effect to the promotion of CO₂ emissions in each region is 27.6%, 10.2%, 12.9% and 6.1%, respectively. The contribution of energy structure effect to the suppression of CO₂ emissions in each region is 13.2%, 10.3%, 15.7% and 8.2%, respectively.

Keywords

Carbon Emissions, LMDI, Factor Decomposition

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

二氧化碳等温室气体排放引起的全球气候变化问题愈加严重，我国作为碳排放大国积极参与到减排工作中。长三角地区作为全国经济最活跃的区域之一，在实现全国碳减排和碳达峰中做到高效减少碳排放量是至关重要的。2022年发布的《长三角生态绿色一体化发展示范区碳达峰实施方案》提出了目标，力争到2025年在能耗和碳排放方面实现大幅改进，即示范区的能耗强度要较2020年下降15%左右，而碳排放强度则要减少20%以上。长三角地区既是能源消耗的主要城市群体，也是节能减排的重点地区。长三角地区是全国高水平一体化发展的先进地区，也是实现碳减排和碳达峰目标的示范地区。郭艺等[1]提出长三角地区实施一体化政策明显降低了城市碳排放。长三角地区作为能源重地，其能源消耗量大且能源结构偏重，导致清洁能源发展受阻。长三角地区面临着实现能源高质量转型和二氧化碳排放达到峰值的巨大压力。因此，调整产业结构、合理优化能源结构以及发展绿色清洁能源产业对长三角地区意义重大。长三角地区一体化有利于推动各地区的互相合作，优劣互补，各地区因地制宜根据自身的资源结构、地理环境和已有科技水平，加强地区产业合作，形成一体化产业合作机制，为碳减排发力。长三角地区要探索产业结构优化途径，加快发展现代服务业等第三产业，推进电子信息化与轻重工业化结合，建设长三角地区成为绿色节能产业集群地带，打造先进产业品牌。近几年长三角地区有效调整产业结构，高效优化能源结构，明显提升重工业高能耗行业能源利用效率，进一步削减煤炭消费总量，增大太阳能、电力等非化石能源使用率。长三角地区正在加快建立绿色、清洁、低碳、安全的现代能源和电力系统，并加强研发创新，推广应用绿色低碳技术。绿色生产生活方式被更多人使用，基本形成可持续性发展社会，初步建立绿色低碳循环发展政策体系有利于保障碳减排方法的实施。实施绿色低碳能源创新行动、重能耗产业节能降碳行动、交

通出行乘坐电力公交行动、经济高质量发展助力减排行动、科技创新推动绿色减排行动、全民参与绿色减排行动。陈诗一[2]提出为了促成经济向绿色低碳转型，近年来中国采取了基于市场机制和经济激励的环境政策，取得了明显成效。长三角各地区在人口规模、人均地区生产总值、产业结构、能源结构和能源强度等方面都存在一定差异，从区域差异角度，深入研究二氧化碳排放量的影响因素具有关键现实意义。

长三角地区的二氧化碳数据所采用的估算方法源于《IPCC 国家温室气体清单指南》。计算八种一次能源的综合能源消耗量时，各种能源应折算为标准煤。

$$C = \sum_{j=1}^3 C_j = \sum_{j=1}^3 E_j \times EF_j \quad (1)$$

$$EF_j = NCF_j \times CEF_j \times COF_j \times 44/12 \quad (2)$$

其中 E_j 为第 j 种能源终端能源消费量。 EF_j 为第 j 种能源二氧化碳排放系数。 NCF_j 为第 j 种能源平均低位发热量。 CEF_j 为第 j 种能源碳排放系数。 COF_j 为第 j 种能源碳氧化率。44 和 12 分别表示 CO_2 与 C 的分子量。一次能源的排放因子见表 1。

Table 1. Primary energy emission factor

表 1. 一次能源排放因子

能源名称	平均低位发热量(kJ/kg)	折标准煤系数发热量(kJ/kg)	单位热值含碳量(t-C/TJ)	碳氧化率(%)
原煤	20,908	0.7143	26.37	0.94
焦炭	28,470	0.9714	29.5	0.93
原油	41,868	1.4286	20.8	0.98
汽油	43,124	1.4714	18.9	0.98
煤油	43,124	1.4714	19.6	0.98
柴油	42,705	1.4571	20.2	0.98
燃料油	41,868	1.4286	21.1	0.98
天然气	38,979	1.33	15.32	0.99

从微观上分解二氧化碳排放量，可以为未来几年减排路径的设计提供科学方向和科学依据。本文其余部分安排如下：第二部分是对现有文献的评述；第三部分是数据来源和模型构建。其中，数据来源包括长三角地区能源消耗量和各项指标数据；第四部分是结论与讨论。

2. 文献综述

由于科学量化二氧化碳排放量的影响因素具有重要的理论价值和现实意义，已有很多学者关注这一问题并提出解决方法。从现有研究来看，分解二氧化碳排放量主要可以分为 2 类：结构分解和指数分解。

关于结构分解分析这一方法的使用，多数学者结合投入产出框架进行分解。廖明球等[3]利用部门联系平衡表和相关的结构分解方法，发现能源消耗结构效应可以导致二氧化碳排放总量的减少。郭朝先[4]利用双层嵌套结构式分解方法，结果表明我国在降低碳排放量的过程中，主要依靠能源消耗密度的影响。张聪等[5]通过对广东以及其特定行业的碳排放情况进行结构分解分析，发现能源消费强度效应是减少碳排放总量的主要原因，而最终需求影响会促成碳排放总量的增加。刘云枫等[6]利用结构分解分析方法，发现从总体上看碳排放强度降低对于减缓二氧化碳排放的贡献最大。蔡慧敏[7]利用方差分解方法，发现农业碳排放地区间的差距主要在于地方性秸秆焚烧。Lei Yao 等[8]使用结构分解方法测算了子部门间的环境影响，发现各部门行业碳排放强度的降低对嵌入碳有减缓作用。

关于指数分解分析这一方法的使用，多数学者结合使用因素分解方法进行分解。邵帅等[9]使用广义迪氏指数分解法对我国制造业碳排放变化的驱动因素进行分解，发现制造业的碳排放增加主要是由于投资规模过大，然而降低碳排放的关键在于控制投资投资的碳排放量与所产出的产品之间的排放量比率和产出的产品的碳排放量。孟彦菊等[10]使用对数平均迪氏指数分解法对不同时期碳排放量变化的影响因素进行分解，发现云南省二氧化碳排放量增长的主要驱动力是人均地区生产总值增长，而减少能耗强度是阻止碳排放增长的主要手段。

研究碳排放的影响因素，通常可以采用因素分解法来分析碳排放变化的深层原因。董莹等[11]基于甘肃省 2000~2015 年能源消费二氧化碳排放量排放的数据，发现经济产出水平扩张对 CO₂ 排放增长起主要促成作用，能源强度下降对减缓 CO₂ 排放增长起关键作用。韩钰铃等[12]基于江苏省 2002~2015 年能源消费碳排放量排放数据，发现能源强度对减少碳排放发挥了关键作用，优化调整产业结构和经济产出水平扩张对碳排放量增长起主要作用。胡振等[13]基于日本 2001~2011 年能源消费碳排放量排放数据，发现日本户均碳排放的上升得益于日本经济发展水平的提高、日本户均能源结构的改变，而能源强度则对其排放量产生了减缓作用。杨绍华等[14]基于 2000~2019 年长江一带地区 11 个省、市的数据，发现经济规模持续扩张是长江经济带交通运输业碳排放增长的第一主导因素，其次是人口规模。

常用的因素分解法主要是迪氏指数分解方法(Divisia Index Decomposition)和拉氏指数分解法(Laspeyres Index Decomposition)[15]。而迪氏指数分解方法中的对数平均因素分解法(Log Mean Divisia Index, LMDI)[16]近些年来被广泛用于分析 CO₂ 排放的影响因素。臧萌萌等[17]运用改进的拉氏指数分解模型对中国 2005~2018 年产业部门的碳排放变化量进行分解，发现在促成碳排放的过程中，投入总量效应扮演着关键的角色。李修东[18]运用 LMDI 模型对内蒙古碳排放的因素进行指数分解，经济增长是造成内蒙古碳排放量上升的最主要原因。王健夫[19]运用 LMDI 模型对 2010~2017 年的历史碳排放数据，发现经济规模、化石能源消费和人口增长分别对总碳排放量的 37%、55.6% 和 7.4% 做出了正向贡献，而能源强度下降和产业结构优化各自对减缓碳排放的贡献率为 82.5% 和 17.5%。Jiandong Chen 等[20]提出四种拓展年度 LMDI 方法来更加准确地分析研究时段中间的波动以及外部处境变化引起的驱动力因素变化。

通过对现有文献的综合分析，发现长三角地区二氧化碳排放量因素分解的研究还有改进空间。部分文献研究范围主要是国家层面和城市层面[21]，还没有长三角区域与长三角内三省一市的二氧化碳排放量影响因素进行有效对比。

本文结合长三角地区三省一市情况，基于各个地区 2005~2019 年能源消耗碳排放数据，构建适用各个地区的 LMDI 模型进行碳排放影响因素分解分析。本文将各地区能源的终端消费碳排放的影响分解为六个主要因素：人口规模、经济产出水平、产业结构、能源强度、能源结构、碳排放率。

3. 数据来源和模型构建

1) 数据来源

先整理上海市、江苏省、浙江省和安徽省的描述性数据，包括能源消耗量、地区生产总值与增速、常住人口与户籍人口、产业结构和综合指标数等数据。再整合长三角地区的数据。

上海市、江苏省、浙江省和安徽省地区的一次能源终端消费数据均来自《中国能源统计年鉴》。选取上海市 2005~2019 年能源消耗量数据，再乘折标煤系数，得到能源消耗量标准量。本表中某些数据可能是缺乏详细数据或者没有相应的数据可供呈现，用“0”表示，下同。

本文为了数据统一，均以 2005 年的三次产业划分为标准进行分析。从产业结构来看，上海市产业结构调整呈现积极变化：上海市服务业、交通运输、仓储及邮电通信业、批发和零售贸易、餐饮业和生活消费等第三产业比重呈增长趋势。上海市工业产业等第二产业较快增长，但比重相对下降。自 2011 年以

来，上海第三产业增速一直领先于第一、二产业，第三产业占比由 2005 年的 52.1% 上升到 2019 的 72.9%，整体上呈增长趋势。在第三产业中，金融业是第三产业中占比较高的行业，其次是批发零售和房地产。上海市的产业结构中第三产业和第二产业两者比重由 2015 年的 1.11 上升为 2.72，说明上海市在加强生产性服务业的发展方面投入了相当大的关注和精力。从产业结构来看，江苏省经济结构调整呈现积极变化：农业等第一产业生产能力增强，比重逐渐下降。先进制造业和工业等第二产业得到高质量发展，2019 年江苏省高技术产业、轻工业和重工业增加值比上年增长 6% 以上。江苏省第三产业增加值占比最高，但仍需鼓足干劲，大力发展战略第三产业。支持城市里污染大的产业转变为服务业等第三产业，鼓励乡镇、私企、个人发展第三产业。全省经济结构战略性调整和转型升级加快推进，三次产业发展协调性明显增强。第二、三产业从业人员比重稳步提高。尽管江苏制造业区域在创新方面处于领先地位，但在实际产业和研究理论结合方面还存在不足，生产性服务业的扩展空间受到限制。江苏应整合资源，发挥制造业优势，加快省内经济循环，扩大服务业等第三产业需求。从产业结构来看，浙江省的产业结构不断优化。其中，服务业比重逐步增加，而工业仍然是占比最大的第二产业。在工业里面，内部结构持续改进升级。浙江省以发展先进制造业为主要目标，不断推进产业转型与升级。在规模以上的工业中，科学创新和高端制造业的增加值比例有所提升。金融业、房地产业和信息传输等其他现代服务业增加值增速较高。同时，浙江省的网络数字经济也在飞速发展。从产业结构来看，安徽省经济结构持续调整，农业和畜牧业稳定增长，工业生产较快增长，新兴服务业发展迅速。安徽省的第二产业比重先上升再下降，说明安徽在基础发展中逐渐转变工业为主的第二产业。安徽省的工业发展总体上看是比较好的，但是工业的整体水平还比较低，工业的结构也比较不合理。安徽应集中资源加大科学技术创新，提升产业技术水平。

上海市生产总值、人口数量、产业结构与地区生产总值指数等数据来自《上海统计年鉴》(2020 年)，城镇化率来自《中国统计年鉴》。上海市的人均生产总值在不断增长，从 2005 年的 4.86 万元上升到 2019 年的 12 万元。上海市城镇化率较高，近十多年都保持在 87% 以上。上海市生产总值以 2005 年不变价格折算。上海市不变价地区生产总值、常住人口、城镇化率以及三次产业比重见表 2。

Table 2. Number of indicators in Shanghai
表 2. 上海市指标数

年份	不变价 GDP/(亿元)	人口/(万人)	城镇化率/%	第一产业/%	第二产业/%	第三产业/%
2005	9197.13	1890.26	89.09	1	46.9	52.1
2006	10374.19	1964.11	88.7	0.9	46.5	52.6
2007	11951.22	2063.58	88.7	0.8	44.1	55.1
2008	13110.29	2140.65	88.6	0.7	42.8	56.5
2009	14211.23	2210.28	88.6	0.7	39.3	60
2010	15660.93	2302.66	89.29	0.6	41.5	57.9
2011	16960.47	2347.46	89.3	0.6	40.8	58.6
2012	18233.03	2380.43	89.3	0.6	38.4	61
2013	19673.04	2415.15	89.6	0.6	35.7	63.7
2014	21070.15	2425.68	89.6	0.5	34.2	65.3
2015	22544.77	2415.27	87.6	0.4	31.3	68.3
2016	24100.34	2419.7	87.9	0.4	28.7	70.9
2017	25787.39	2418.33	87.7	0.4	28.9	70.7
2018	27540.88	2423.78	88.1	0.3	28.8	70.9
2019	29193.33	2428.14	88.3	0.3	26.8	72.9

江苏省生产总值、人口数量、城镇化率、产业结构与地区生产总值指数等数据来自《江苏省统计年鉴》。江苏省的人均生产总值从 2005 年的 2.38 万元上升到 2019 年的 8.34 万元。江苏省城镇化率近十年稳步增长。浙江省生产总值、人口数量、城镇化率、产业结构与地区生产总值指数等数据来自《浙江省统计年鉴》。浙江省的人均生产总值在不断增长，从 2005 年的 2.6 万元上升到 2019 年的 7.7 万元。浙江省城镇化率近十年稳步增长。江苏和浙江要协同发力，共同加快地区建设，提高城镇化率，提高城市综合水平。安徽省生产总值、人口数量、城镇化率、产业结构与地区生产总值指数等数据来自《安徽省统计年鉴》。安徽省的人均生产总值在不断增长，从 2005 年的 0.9 万元上升到 2019 年的 3.78 万元。安徽省城镇化率近十年稳步增长。安徽省整体水平上在长三角地区排名靠后，表现在人均生产总值、城镇率、第三产业比重较低。

2) 基于 LMDI 模型的长三角地区碳排放影响因素

本文基于 LMDI 加法模型对长三角地区二氧化碳排放量进行因素分解。先将长三角地区的四个地区独立考虑，使用 LMDI 加法模型分别对长三角地区三省一市的二氧化碳排放量进行因素分解，再将长三角地区整体考虑，使用 LMDI 加法模型对长三角地区的二氧化碳排放量进行因素分解。

下文以江苏省为例，将江苏省的 3 次产业部门($i=1,2,3$ 分别代表第一产业、第二产业和第三产业)，8 种一次能源($j=1,2,3,4,5,6,7,8$ 分别代表煤炭、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油和天然气)进行分解。采用 B.W.Ang 等[22]提出的对数平均迪氏指数分解法对江苏省碳排放因素进行分解。

$$C = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^8 C_{ij} = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^8 P \times \frac{Q}{P} \times \frac{Q_i}{Q} \times \frac{E_i}{Q_i} \times \frac{E_{ij}}{E_i} \times \frac{C_{ij}}{E_{ij}} \quad (3)$$

其中， C 为江苏省二氧化碳排放量； C_{ij} 为江苏省第 i 产业部门的第 j 种能源的二氧化碳排放量； P 为江苏省居民总人数； Q 表示江苏省区域生产总值； Q_i 表示江苏省第 i 产业部门生产总值； E_i 表示江苏省第 i 产业部门能源的终端消费量； E_{ij} 表示江苏省第 i 产业部门的第 j 种能源的终端消费量。作如下替换：

$$\begin{aligned} G &= \frac{Q}{P}; I_i &= \frac{Q_i}{Q}; S_i &= \frac{E_i}{Q_i}; M_{ij} &= \frac{E_{ij}}{E_i}; R_{ij} &= \frac{C_{ij}}{E_{ij}} \\ C &= \sum_i \sum_j PGI_i S_i M_{ij} R_{ij} \end{aligned} \quad (4)$$

其中， P 代表人口规模， G 表示江苏省人均生产总值，代表经济产出水平， I_i 表示江苏省第 i 产业部门生产增加值占总比重，代表产业结构， S_i 表示江苏省第 i 产业部门单位生产增加值能源消耗比重，代表能源强度， M_{ij} 表示第 i 产业部门的第 j 种能源的终端消费占总能源的终端消费比例，代表能源结构， R_{ij} 表示江苏省第 i 产业部门的第 j 种能源单位能源消耗量产生的二氧化碳排放量，代表碳排放系数。

从因素分类角度讲，人口规模与经济产出水平是规模效应，产业结构与能源结构是结构效应，能源强度与碳排放率是技术效应。人口规模效应是指人口尺度的改变对 CO₂ 排放的影响，而人口规模是指人口尺度的改变对区域内 CO₂ 排放量的影响。经济产出效应是指经济产出水平因素的变动对 CO₂ 排放的影响，而经济产出水平是指经济输出对区域经济发展的影响。产业结构效应代表的是产业结构因素变化对二氧化碳排放量变化的影响，产业结构以地区生产总值的三种产业占比表示，代表各部门各行业产生的经济数量关系。能源强度效应代表能源强度因素变化对 CO₂ 量变化的影响，能源强度以单位生产增加值能源消耗比重表示，代表该地区绿色发展环保水平，数值越大说明能耗越大。能源结构效应代表能源结构变化对二氧化碳排放量变化的影响，能源结构以八种一次能源消耗量标准量的比重表示，代表该能源在能源消耗方面的比重，数值越大说明使用该能源量越大。

由于能源变化缓慢，假设能源的碳排放系数是不变的，将能源碳排放因子变化对 CO₂ 排放量的影响

设定为 0，即 $\Delta C_{ROT} = 0$ 。设定相邻两年的前一年为基准年，后一年为目标年。第一次选取 2005 年为基准年，2006 为目标年，依此类推。

虽然 LMDI 加法模型已有结果，但缺少相应的理解。下文对 LMDI 加法模型结果给出合理的推导与理解：

在 $[0, T]$ 这段时间内，二氧化碳排放量由 C^0 到 C^T ，由 LMDI-I 加法模型，有公式(5)。

$$\Delta C_{TOT} = C^T - C^0 = \Delta C_{P0T} + \Delta C_{G0T} + \Delta C_{I0T} + \Delta C_{S0T} + \Delta C_{M0T} + \Delta C_{R0T} \quad (5)$$

对公式(4)两边取对数，有公式(6)。从基准年到目标年，有公式(7)。

$$\ln(C) = \sum_i \sum_j (\ln(P) + \ln(G) + \ln(I_i) + \ln(S_i) + \ln(M_{ij}) + \ln(R_{ij})) \quad (6)$$

$$\begin{cases} \ln(C^T) = \sum_i \sum_j (\ln(P^T) + \ln(G^T) + \ln(I_i^T) + \ln(S_i^T) + \ln(M_{ij}^T) + \ln(R_{ij}^T)) \\ \ln(C^0) = \sum_i \sum_j (\ln(P^0) + \ln(G^0) + \ln(I_i^0) + \ln(S_i^0) + \ln(M_{ij}^0) + \ln(R_{ij}^0)) \end{cases} \quad (7)$$

公式(7)里两个公式相减，有公式(8)。

$$\ln\left(\frac{C^T}{C^0}\right) = \sum_i \sum_j \left(\ln\left(\frac{P^T}{P^0}\right) + \ln\left(\frac{G^T}{G^0}\right) + \ln\left(\frac{I_i^T}{I_i^0}\right) + \ln\left(\frac{S_i^T}{S_i^0}\right) + \ln\left(\frac{M_{ij}^T}{M_{ij}^0}\right) + \ln\left(\frac{R_{ij}^T}{R_{ij}^0}\right) \right) \quad (8)$$

由于公式结果里面权重与实际意义不同，主要有以下两个权重：

令 $L(x, y) = \frac{(x-y)}{\ln x - \ln y}$ 且 $x \neq y$ ，LMDI-I 的权重为

$$w_{ii} = L(C_i^T, C_i^0) \quad (9)$$

公式(8)两边分别乘以系数 $(C^T - C^0) / \left(\ln\left(\frac{C^T}{C^0}\right) \right)$ ，有公式(10)。

$$\Delta C_{TOT} = \frac{C^T - C^0}{\ln\left(\frac{C^T}{C^0}\right)} \left(\sum_i \sum_j \left(\ln\left(\frac{P^T}{P^0}\right) + \ln\left(\frac{G^T}{G^0}\right) + \ln\left(\frac{I_i^T}{I_i^0}\right) + \ln\left(\frac{S_i^T}{S_i^0}\right) + \ln\left(\frac{M_{ij}^T}{M_{ij}^0}\right) + \ln\left(\frac{R_{ij}^T}{R_{ij}^0}\right) \right) \right) \quad (10)$$

这样就可以得到区域内每一个单因素变化对碳排放总量变化的影响，见公式(11)：

$$\begin{cases} \Delta C_{P0T} = \sum_i w_i (\ln P_i^T - \ln P_i^0) \\ \Delta C_{G0T} = \sum_i w_i (\ln G_i^T - \ln G_i^0) \\ \Delta C_{I0T} = \sum_i w_i (\ln I_i^T - \ln I_i^0) \\ \Delta C_{S0T} = \sum_i w_i (\ln S_i^T - \ln S_i^0) \\ \Delta C_{M0T} = \sum_i \sum_j w_{ij} (\ln M_{ij}^T - \ln M_{ij}^0) \\ \Delta C_{R0T} = \sum_i w_i (\ln R_i^T - \ln R_i^0) \end{cases} \quad (11)$$

下面给出 LMDI-I 权重的理解，以 ΔC_{P0T} 为例，我们选取时间相近的两年，当 $x \rightarrow 0, \ln(1+x) \approx x$ ，

$$\begin{cases} (C_i^T - C_i^0) \rightarrow 0, \ln C_i^T - \ln C_i^0 = \ln \frac{C_i^T}{C_i^0} = \ln \left(1 + \frac{C_i^T - C_i^0}{C_i^0} \right) \approx \frac{C_i^T - C_i^0}{C_i^0} \\ (P_i^T - P_i^0) \rightarrow 0, \ln P_i^T - \ln P_i^0 = \ln \frac{P_i^T}{P_i^0} = \ln \left(1 + \frac{P_i^T - P_i^0}{P_i^0} \right) \approx \frac{P_i^T - P_i^0}{P_i^0} \\ \Delta C_{P0T} = \sum_i \frac{(C_i^T - C_i^0)}{\ln C_i^T - \ln C_i^0} (\ln P_i^T - \ln P_i^0) \approx \sum_i C_i^0 \left(\frac{P_i^T - P_i^0}{P_i^0} \right) \end{cases} \quad (12)$$

相隔 T 年变化的二氧化碳排放量约等于基准年的各产业部门二氧化碳排放量与对应分解因素各产业部门的增长率乘积之和。

令 $L(x, y) = \frac{(x-y)}{\ln x - \ln y}$ 且 $x \neq y$ ，LMDI-II 的权重为

$$w_{i2} = \frac{L\left(\frac{C_i^T}{C^T}, \frac{C_i^0}{C^0}\right)}{\sum_i L\left(\frac{C_i^T}{C^T}, \frac{C_i^0}{C^0}\right)} L(C^T, C^0) \quad (13)$$

公式(8)两边分别乘以系数 $\frac{\left(\frac{C_i^T}{C^T} - \frac{C_i^0}{C^0}\right) / \left(\ln\left(\frac{C_i^T/C^T}{C_i^0/C^0}\right)\right)}{\sum_i \left(\frac{C_i^T}{C^T} - \frac{C_i^0}{C^0}\right) / \left(\ln\left(\frac{C_i^T/C^T}{C_i^0/C^0}\right)\right)}$ $(C^T - C^0) / \left(\ln\left(\frac{C^T}{C^0}\right)\right)$ ，有公式(14)。

$$\Delta C_{T0T} = w_{i2} \left(\sum_i \sum_j \left(\ln\left(\frac{P_i^T}{P_i^0}\right) + \ln\left(\frac{G_i^T}{G_i^0}\right) + \ln\left(\frac{I_i^T}{I_i^0}\right) + \ln\left(\frac{S_i^T}{S_i^0}\right) + \ln\left(\frac{M_{ij}^T}{M_{ij}^0}\right) + \ln\left(\frac{R_{ij}^T}{R_{ij}^0}\right) \right) \right) \quad (14)$$

这样就可以得到区域内每一个单因素变化对碳排放总量变化的影响，见公式(11)。

LMDI 加法模型优点是为了解释影响因素对目标变量的影响，我们需要考虑所有时段的因素。值得注意的是，分解结果中不应包含任何残差项，且该结果是独一无二的。LMDI 加法模型缺点是 LMDI-I 不满足比例检验，即每一个子类别的余项不是比例分配的；LMDI-II 不满足加法检验，即每一个子类别的余项不为零，但所有子类别误差总和为 0。

4. 结果和讨论

1) 结果

2005~2019 年上海市、江苏省、浙江省、安徽省、长三角地区的 CO₂ 排放变化 LMDI-I 分解结果分别见表 3、表 4、表 5、表 6、表 7。值得一提的是，由于本文选取的影响因素较少，LMDI-I 和 LMDI-II 的数据结果很相近。本文只分析 LMDI-I 的数据结果，数据中负号表示减缓二氧化碳排放量增加，正号表示促成二氧化碳排放量增加；数值表示某效应在对应年期间对二氧化碳排放量的影响大小。

Table 3. LMDI-I decomposition of CO₂ emissions in Shanghai from 2005 to 2019

表 3. 2005~2019 年上海市 CO₂ 排放变化 LMDI-I 分解(单位：万吨)

年份	人口规模效应	经济产出效应	产业结构效应	能源强度效应	能源结构效应
2005~2006	564.1	1189.77	-11.15	680.27	-216.42

续表

2006~2007	814.31	1519.84	-17.63	-1067.28	21.82
2007~2008	645.2	975.35	-11.09	-458.13	-229.84
2008~2009	594.3	917.4	-42.15	-388.49	-83.29
2009~2010	839.02	1146.43	72.05	1214.53	-311.89
2010~2011	443.83	1412.34	-43.31	595.68	-313.34
2011~2012	344.28	1426.1	-212.13	-107.15	-262.64
2012~2013	380.16	1627.87	-315.46	641.23	-369.66
2013~2014	119.63	1764.11	-223.96	-1082.28	-63.38
2014~2015	-122.34	2021.4	-503.91	182.1	-211.79
2015~2016	53.4	1903.94	-498.86	-1505.29	53.93
2016~2017	-16.74	2007.79	37.01	-1150.8	-47.86
2017~2018	67.62	1910.48	-34.6	-1546.71	-293.67
2018~2019	54.91	1725.5	-466.15	-437.71	34.31

Table 4. LMDI-I decomposition of CO₂ emissions in Jiangsu Province from 2005 to 2019**表 4.** 2005~2019 年江苏省 CO₂ 排放变化 LMDI-I 分解(单位: 万吨)

年份	人口规模效应	经济产出效应	产业结构效应	能源强度效应	能源结构效应
2005~2006	192.81	2819.23	10.79	-466.76	-269.26
2006~2007	216.39	3225.03	-208.68	513.8	-308.44
2007~2008	144.69	3210.03	-240.04	1581.04	-518.34
2009~2010	251.36	3737.7	-561.48	-738.82	-84.31
2010~2011	722.94	3217.12	-540.25	2562	-384.49
2011~2012	498.75	3537.09	-513.8	-264.56	-534.29
2012~2013	388.23	3574.18	-843.37	-1474.74	-389.96
2013~2014	488.93	3291.02	-708.29	-433.64	-198.93
2014~2015	199.25	3809.19	-631.9	1059.81	-447.99
2015~2016	406.95	3426.95	-1111.48	-1651.98	24.46
2016~2017	259.78	3398.39	201.31	-3331.22	-113.41
2017~2018	146.93	3354.67	-322.82	2736.74	-854.64
2018~2019	161.74	3241.75	-934.21	2798.08	-119.79

Table 5. Changes in CO₂ emissions in Zhejiang Province from 2005 to 2019, LMDI-I decomposition**表 5.** 2005~2019 年浙江省 CO₂ 排放变化 LMDI-I 分解(单位: 万吨)

年份	人口规模效应	经济产出效应	产业结构效应	能源强度效应	能源结构效应
2005~2006	227.68	1637.58	23.24	-533.33	-130.13
2006~2007	255.43	1869.04	-38.18	142.3	-283.18
2007~2008	190.27	4895.63	-29.59	-4082.66	-74.14
2008~2009	214.33	-2245.57	-185.48	2712.91	-88.36

续表

2009~2010	593.83	1478.86	-44.53	-502.78	-280.57
2010~2011	60.42	1647.41	-38.38	-30.29	-172.24
2011~2012	54.71	1584.16	-122.7	18.96	-251.68
2012~2013	87	1741.13	-145.12	-13.25	-240.98
2013~2014	46.42	1862.08	42.91	3125.95	-721.52
2014~2015	164.06	2081.72	-179.08	1155.16	-256.4
2015~2016	281.74	1949.29	-314.14	-1575.7	-328.35
2016~2017	385.61	2070.12	-188.17	1737.49	-662.02
2017~2018	521.16	2029.06	-201.35	4898.68	-874.2
2018~2019	818.88	1903.53	-301.62	1183.65	-375.92

Table 6. LMDI-I decomposition of CO₂ emission changes in Anhui Province from 2005 to 2019**表 6.** 2005~2019 年安徽省 CO₂ 排放变化 LMDI-I 分解(单位: 万吨)

年份	人口规模效应	经济产出效应	产业结构效应	能源强度效应	能源结构效应
2005~2006	-18.94	1405.71	406.64	-552.82	-60.76
2006~2007	16.95	1621.2	367.73	-397.34	-87.92
2007~2008	40.15	1717.69	306.29	-424.87	-156.91
2008~2009	-10.4	1904.28	279.91	-601.87	-125.42
2009~2010	-494.95	2828.01	584.11	-1763.09	-133.85
2010~2011	35.66	2444.79	346.84	971.5	-233.39
2011~2012	73.97	2285.51	81.11	-434.81	-28.65
2012~2013	165.41	2120.7	16.14	-1195.67	-35.84
2013~2014	221.5	1986.26	24.95	188.44	-217.85
2014~2015	267.15	1948.08	-201.07	-1418.31	42.76
2015~2016	232.08	2226.44	-91.17	-1419.89	-56.91
2016~2017	269.58	1956.36	32.99	-1080.15	-207.38
2017~2018	339.72	1920.69	66.1	-197.35	-317.64
2018~2019	197.17	2178.61	-32.37	39.69	-180.15

由表 7 可知对 2005~2019 年每年的长三角地区二氧化碳排放量的影响因素分解情况。经济产出效应由每年 7468.22 万吨上升至 12615.23 万吨后下降至 8868.49 万吨, 在 2005~2019 年间整体上促成二氧化碳排放 127166.29 万吨, 对二氧化碳排放量的增长起主要促成作用, 经济产出效应的促成作用逐渐平缓; 人口规模效应由每年 650.05 万吨上升至 1293.82 万吨, 在 2005~2019 年间整体上促成二氧化碳排放 12896.48 万吨, 对二氧化碳排放量的增长起促成作用, 人口规模效应的促成作用在增强; 能源强度效应由每年 -598.28 万吨下降至 -6025.4 万吨后上升至 3428.74 万吨, 在 2005~2019 年间整体上减缓二氧化碳排放 6191.02 万吨, 对二氧化碳排放量的增长起减缓作用, 能源强度效应波动较大; 产业结构效应由每年 23.24 万吨下降至 -301.62 万吨, 在 2005~2019 年间整体上减缓二氧化碳排放 1722.19 万吨, 对二氧化碳排放量的增长起减缓作用; 能源结构效应由每年 -737.99 万吨下降至 -1576.67 万吨后上升至 -669.17 万吨,

在 2005~2019 年间整体上减缓二氧化碳排放 13536.34 万吨，对二氧化碳排放量的增长起主要减缓作用。

Table 7. Changes in CO₂ emissions in the Yangtze River Delta from 2005 to 2019, LMDI-I decomposition
表 7. 2005~2019 年长三角 CO₂ 排放变化 LMDI-I 分解(单位：万吨)

年份	人口规模效应	经济产出效应	产业结构效应	能源强度效应	能源结构效应
2005~2006	650.05	7468.22	1270.93	-598.28	-737.99
2006~2007	879.16	9025.3	-817.48	-299.65	-720.67
2007~2008	719.94	12615.23	0	-3902.69	-1128.82
2008~2009	713.4	2786.25	60.21	2185.77	-377.58
2009~2010	640.44	10147.12	-441.52	-1228.16	-980.44
2010~2011	1078.08	8982.17	-1364.47	4543.93	-1319.91
2011~2012	852.83	9099.43	142.7	-395.84	-1176.78
2012~2013	936.6	9703.92	-721.89	-1356.69	-1310.35
2013~2014	946.09	9360.73	-743.6	1447.39	-1141.64
2014~2015	721.26	10129.34	-1671.71	1074.74	-861.29
2015~2016	1126.65	9876.17	-1914.29	-6025.4	-371.02
2016~2017	1105.13	9532.73	461.98	-3453.29	-1164.01
2017~2018	1233.03	9571.19	-1171.99	-1611.59	-1576.67
2018~2019	1293.82	8868.49	-1429.56	3428.74	-669.17

2) 讨论

本文使用 LMDI-I 加法模型对 2005~2019 年 CO₂ 排放量的变化进行了因素分解，得到长三角各地区和整体区域内的二氧化碳排放量的影响因素分解结果。

经济产出效应是促成二氧化碳排放量增长的最明显因素，经济产出水平的提高使得二氧化碳排放量累计增加 1.27×10^9 t，对促成二氧化碳排放贡献度达 113.5%。上海市、江苏省、浙江省和安徽省四个地区的经济产出效应对促成二氧化碳排放贡献度分别是 124%、113%、81%、130%。长三角地区经济由高速发展转向高质量发展，经济高速增长拉动了相关产业的快速发展，拉动了很多未经严格科学减排的产业。

人口规模效应是促成二氧化碳排放量增长的关键因素，人口规模的提高使得二氧化碳排放量累计增加 1.29×10^8 t，对促成二氧化碳排放贡献度达 11.5%。上海市、江苏省、浙江省和安徽省四个地区的人口规模效应对促成二氧化碳排放贡献度分别是 27.6%、10.2%、12.9%、6.1%。

能源强度效应是减缓二氧化碳排放量增长的关键因素，能源强度的合理下降使得二氧化碳排放量累计减少 6.19×10^7 t，对减缓二氧化碳排放贡献度达 5.5%。上海市和安徽省两个地区的能源强度效应对减缓二氧化碳排放贡献度分别是 25.5%、37.7%。而江苏省和浙江省两个地区的能源强度效应对促成二氧化碳排放贡献度分别是 2.7%、27.3%。

产业结构效应是减缓二氧化碳排放量增长的关键因素，产业结构的有效优化使得二氧化碳排放量累计减少 8.34×10^7 t，对减缓二氧化碳排放贡献度达 7.4%。上海市、江苏省、浙江省三个地区的产业结构效应对减缓二氧化碳排放贡献度分别是 13.1%、16.1%、5.7%。而安徽省地区的产业结构效应对促成二氧化碳排放贡献度是 10%。

能源结构效应是减缓二氧化碳排放量增长的最明显因素，能源结构的积极调整使得二氧化碳排放量

累计减少 1.35×10^8 t, 对减缓二氧化碳排放贡献度达 12.1%。上海市、江苏省、浙江省和安徽省四个地区的能源结构效应对减缓二氧化碳排放贡献度分别是 13.2%、10.3%、15.7%、8.2%。

本文从微观角度在长三角地区二氧化碳排放量的分解结果基础上, 给出一些分析: 经济产出效应是促成二氧化碳排放量增长的主要因素, 在确保经济稳步增长的同时减少二氧化碳排放量, 需要持续推进经济高质量发展。人口规模效应是促成二氧化碳排放量增长的关键因素, 宣传组织植树造林、盆栽花草等绿色活动, 发挥人口优势。在缓解二氧化碳排放量增长的过程中, 能源密度效应和产业结构效应都是至关重要的, 亟需加大力度调整能源结构和产业结构, 减少煤炭等能源比重, 增加服务业等第三产业绿色产业比重。

最后本文为减少长三角地区二氧化碳排放量提出一些想法: 1) 推动经济高质量发展, 实现增长与发展的统一、增长方式与发展模式的统一。2) 保持长三角地区人口总量适度增长的基础上, 优化人口结构和质量, 扩大基础教育范围, 提高素质教育质量, 实现人口素质的全面提高, 公众自觉选择绿色生活方式, 大力实施绿色低碳循环发展政策。3) 长三角地区应不断减轻第二产业比重, 增加第三产业比重, 第二产业能源消费结构仍然以煤为主, 要大力发展绿色能源, 对煤炭和焦炭等能源的消耗量进行严格批示和审核, 逐步减少煤炭消费, 提高科技创新力, 研发低耗能绿色型新产品, 加快建立清洁低碳安全高效的能源体系, 形成重点领域低碳发展模式, 进一步提高非化石能源消费比重。

参考文献

- [1] 郭艺, 曹贤忠, 魏文栋, 曾刚. 长三角区域一体化对城市碳排放的影响研究[J]. 地理研究, 2022, 41(1): 181-192.
- [2] 陈诗一. 低碳经济[J]. 经济研究, 2022, 57(6): 12-18.
- [3] 廖明球, 许雷鸣. 二氧化碳排放的 IO-SDA 模型及其实证研究[J]. 统计研究, 2017, 34(7): 62-70.
- [4] 郭朝先. 中国二氧化碳排放增长因素分析——基于 SDA 分解技术[J]. 中国工业经济, 2010(12): 47-56.
- [5] 张聪, 汪鹏, 赵黛青, 林泽伟, 董耿林. 基于结构分解的碳排放驱动因素及行业影响分析——以广东为例[J]. 科技管理研究, 2022, 42(16): 204-217.
- [6] 刘云枫, 冯姝婷, 葛志远. 基于结构分解分析的 1980~2013 年中国二氧化碳排放分析[J]. 软科学, 2018, 32(6): 53-57.
- [7] 蔡慧敏. 中国农业碳排放地区差距的结构分解[J]. 低碳世界, 2021, 11(1): 219-220.
- [8] Yao, L. and Shang, T. (2021) Analysis of Influence Factors of Embedded Carbon in China's Textile and Garment Export Based on SDA Model. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **675**, Article ID: 012132. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/675/1/012132>
- [9] 邵帅, 张曦, 赵兴荣. 中国制造业碳排放的经验分解与达峰路径——广义迪氏指数分解和动态情景分析[J]. 中国工业经济, 2017(3): 44-63.
- [10] 孟彦菊, 成蓉华, 黑韶敏. 碳排放的结构影响与效应分解[J]. 统计研究, 2013, 30(4): 76-83.
- [11] 董莹, 许宝荣, 华中, 邹松兵, 吕斌, 陆志翔, 毛鸿宁, 李芳. 基于 LMDI 的甘肃省碳排放影响因素分解研究[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2020, 56(5): 606-614.
- [12] 韩钰铃, 刘益平. 基于 LMDI 的江苏省工业碳排放影响因素研究[J]. 环境科学与技术, 2018, 41(12): 278-284.
- [13] 胡振, 何晶晶, 王玥. 基于 IPAT-LMDI 扩展模型的日本家庭碳排放因素分析及启示[J]. 资源学, 2018, 40(9): 1831-1842.
- [14] 杨绍华, 张宇泉, 耿涌. 基于 LMDI 的长江经济带交通碳排放变化分析[J]. 中国环境科学, 2022, 42(10): 4817-4826.
- [15] Ang, B.W., Huang, H.C. and Mu, A.R. (2009) Properties and Linkages of Some Index Decomposition Analysis Methods. *Energy Policy*, **37**, 4624-4632. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.06.017>
- [16] Shan, Y., Liu, J., Liu, Z., Xu, X., Shao, S., Wang, P., et al. (2016) New Provincial CO₂ Emission Inventories in China Based on Apparent Energy Consumption Data and Updated Emission Factors. *Applied Energy*, **184**, 742-750. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.03.073>

-
- [17] 袁萌萌, 吴娟. 碳排放影响因素解析--基于改进的拉氏指数分解模型[J]. 科技管理研究, 2021, 41(6): 179-184.
 - [18] 李修东. 基于 LMDI 的内蒙古碳排放影响因素研究[J]. 煤炭经济研究, 2019, 39(4): 55-59.
 - [19] 王健夫. 武汉市 CO₂ 排放峰值目标下工业部门减排路径研究[D]: [博士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
 - [20] Chen, J., Gao, M., Li, D., Song, M., Xie, Q. and Zhou, J. (2020) Extended Yearly LMDI Approaches: A Case Study of Energy Consumption. *Mathematical Problems in Engineering*, **2020**, Article ID: 9207896.
<https://doi.org/10.1155/2020/9207896>
 - [21] Zhang, W., Li, K., Zhou, D., Zhang, W. and Gao, H. (2016) Decomposition of Intensity of Energy-Related CO₂ Emission in Chinese Provinces Using the LMDI Method. *Energy Policy*, **92**, 369-381.
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.02.026>
 - [22] Ang, B.W. (2015) LMDI Decomposition Approach: A Guide for Implementation. *Energy Policy*, **86**, 233-238.
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.07.007>