

摘 要

经济、能源与环境三者的关系一直都是世界各国关注的重点。长江经济带是我国经济发展的重要支撑带，其发展规划战略已上升至全国战略。由于其显著的区位优势，集聚了大多处于中低端、重工化的工业产业，仍然处于“高能耗、高污染”的粗放型经济发展模式，面临着严重的能源危机与生态环境危机。如何打造长江经济带工业绿色发展新高地，有效提高长江经济带工业能源效率就显得尤为重要。因此，本文对长江经济带 11 个省市的工业能源效率及其影响因素进行研究。

本文基于长江经济带能源消费现状及相关学者的研究成果，主要开展了以下三方面研究。第一，构建合理的工业能源效率评价指标体系和测度模型，基于 2009-2020 年长江经济带 11 个省市的连续面板数据，运用考虑非期望产出的超效率 SBM-GML 模型对工业能源效率进行静态与动态评价、节能潜力分析。第二，由于测算结果显示不同省域、区域间存在效率差异，因此进一步采用泰尔指数、全局和局部 Moran's I 及收敛性分析探究工业能源效率的空间层面特征。第三，由全局莫兰指数的结果可知，工业能源效率存在正向的空间自相关性，因此本文采用时空双固定空间杜宾模型探究经济发展水平、市场集中度、环境规制、能源消费结构、政府干预与利用外资规模六个影响因素对工业能源效率的空间效应，发现不同影响因素对本地区与邻近地区产生的空间效应各有不同。

基于上述实证分析，本文提出针对区域发展、政府职能、外商引入、企业创新、优化能源结构、节能降耗和环境规制共七个方面的政策建议，以期为长江经济带提升工业能源效率、顺利实现工业绿色发展提供参考。

关键词：工业能源效率；超效率 SBM 模型；收敛性分析；空间杜宾模型

ABSTRACT

The relationship between economy, energy and environment has always been the focus of attention in the world. The Yangtze River Economic Belt is an important supporting belt of China's economic development, and its development planning strategy has been elevated to the national strategy. Due to its significant geographical advantages, it gathers most of the industrial industries in the middle and low end and heavy industry. It is still in the extensive economic development mode of "high energy consumption and high pollution" and faces serious energy crisis and ecological environment crisis. How to build a new industrial green development highland in the Yangtze River Economic Belt and effectively improve the industrial energy efficiency of the Yangtze River Economic Belt is particularly important. Therefore, this thesis studies the industrial energy efficiency and its spatial influencing factors in 11 provinces and cities along the Yangtze River Economic Belt.

Based on the current situation of energy consumption in the Yangtze River Economic Belt and the research results of relevant scholars, this thesis mainly carries out the following three studies. First, a reasonable evaluation index system and measurement model for industrial energy efficiency were constructed. Based on the continuous panel data of 11 provinces and cities in the Yangtze River Economic Belt from 2009 to 2020, a super efficiency SBM-GML model considering unexpected output was used to evaluate the static and dynamic industrial energy efficiency and analyze the energy saving potential. Second, since the measurement results show that there are efficiency differences among provinces and regions, Theil index, global and local Moran's I and convergence analysis are further used to explore the spatial characteristics of industrial energy efficiency. Thirdly, according to the results of the global Moran index, positive spatial autocorrelation exists in industrial energy efficiency. Therefore, this thesis adopts the spatio-temporal dual fixed space Dubin model to explore the spatial effects of six factors on industrial energy efficiency, including economic development level, market concentration, environmental

regulation, energy consumption structure, government intervention and foreign investment utilization scale. It is found that different influencing factors have different spatial effects in the region and neighboring areas.

Based on the above empirical analysis, this thesis puts forward policy suggestions in seven aspects, including regional development, government functions, foreign investment, enterprise innovation, optimization of energy structure, energy conservation and consumption reduction, and environmental regulation, in order to provide references for improving industrial energy efficiency and successfully realizing industrial green development in the Yangtze River Economic Belt.

Key Words: Industrial energy efficiency; Super-SBM model; Convergence analysis; SDM model

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.1.1 研究背景	1
1.1.2 研究意义	2
1.2 文献综述	3
1.2.1 工业能源效率指标体系相关研究	3
1.2.2 工业能源效率评价方法相关研究	4
1.2.3 工业能源效率影响因素相关研究	6
1.2.4 研究评述	8
1.3 研究内容与方法	9
1.3.1 研究内容	9
1.3.2 技术路线图	11
1.3.3 研究方法	12
1.4 主要创新点	12
第 2 章 相关概念与理论基础	13
2.1 能源效率的内涵	13
2.2 理论基础	14
2.2.1 经济增长理论	14
2.2.2 经济收敛性理论	15
2.2.3 空间经济学理论	15
2.3 本章小结	16
第 3 章 长江经济带工业能源效率评价	17
3.1 长江经济带各省市工业能源消费现状	17
3.1.1 长江经济带各省市工业能源投入现状	17
3.1.2 长江经济带各省市工业能源产出现状	19
3.2 模型构建与分析方法	22
3.2.1 超效率 SBM 模型	22

3.2.2 Global Malmquist—Luenberger (GML) 指数分解	23
3.2.3 核密度估计法	24
3.3 指标选取与数据说明	24
3.3.1 指标选取原则	24
3.3.2 指标选取与数据说明	25
3.4 长江经济带工业能源效率评价	27
3.4.1 长江经济带静态工业能源效率评价	27
3.4.2 长江经济带动态工业能源效率评价	34
3.5 长江经济带省际工业节能潜力分析	39
3.5.1 节能潜力模型	39
3.5.2 长江经济带工业节能潜力分析	40
3.6 本章小结	42
第 4 章 长江经济带工业能源效率空间集聚分析	44
4.1 空间不平衡分析	44
4.2 空间关联性特征分析	47
4.2.1 探索性数据分析方法	47
4.2.2 全局莫兰指数	49
4.2.3 局部莫兰指数	50
4.3 空间收敛性特征分析	52
4.3.1 收敛性分析方法	52
4.3.2 工业能源效率 σ 收敛	54
4.3.3 工业能源效率 β 收敛	56
4.4 本章小结	57
第 5 章 长江经济带工业能源效率影响因素分析	58
5.1 影响因素指标选取	58
5.2 数据说明	61
5.2.1 多重共线性	61
5.2.2 平稳性检验与协整检验	62
5.3 空间计量模型选择	63

5.4 空间模型回归结果	65
5.5 空间溢出效应与分解	68
5.6 本章小结	70
第 6 章 研究结论与政策建议	72
6.1 研究结论	72
6.2 政策建议	73
6.2.1 打破行政壁垒，完善政府职能	73
6.2.2 吸引外商投资，鼓励技术创新	75
6.2.3 优化能源结构，推动节能环保	76
6.3 研究不足与展望	77
致 谢	78
参考文献	79
攻读学位期间的研究成果	85

第1章 绪论

1.1 研究背景及意义

1.1.1 研究背景

能源作为人类赖以生存和经济社会发展的重要物资，其开发与利用代表着整个社会的经济发展水平。随着石油、天然气和煤炭等化石能源消耗的急剧增加，严重威胁着地球气候与生态环境，尤其是 CO_2 、 SO_2 及 NO_x 等气体的排放导致全球气候变化日益严峻，因此国际社会一直以来重点关注能源问题。目前我国作为世界第二的能源生产及消费大国，随着工业化、城镇化程度加深，我国能源需求持续攀升，而在能源价格持续上涨与能源储备日益严峻的背景下，我国必须积极地转变能源消费结构、提高能源利用效率。在“十一五”规划纲要中，我国确定了将节约资源作为基本国策以及节约能源这一约束性目标，坚决实施引领经济社会全面绿色转型和可持续发展的战略，低碳转型已经成为我国乃至全球未来发展的潮流。

长江经济带作为我国经济发展格局的重要战略“长廊”，地理条件优越、交通条件便捷、产业集中分布，聚集了我国大部分工业企业，是我国综合竞争力最强、经济发达水平最高的经济带，在推动区域均衡发展、建设生态文明的现代化强国中起到了举足轻重的战略地位。然而，改革开放以来经济快速增长，区域发展处于不平衡状态，沿江上中下游产业存在同质化现象，并且部分地区存在“行政壁垒”和“地方保护”等问题，资源要素流动不畅通、产业结构转型不流畅。同时，长江经济带产业规模较为庞大，大多是处于价值链中低端、重工化的产业，对于煤炭、石油等传统能源的依赖性较强，产业发展惯性较大，仍旧处于“高耗能、高污染”的粗放型经济发展模式，污染物排放对生态环境的影响日益严峻。

为了推动长江经济带的工业绿色发展，2016 年《长江经济带发展规划纲要》（以下简称《纲要》）正式提出要走生态优先绿色发展之路，在 2017 年《加强长江经济带工业绿色发展的指导意见》（以下简称《指导意见》）中明确规定优化工业布局、调整产业结构等五项具体要求。2018 年 11 月，中共中央提出“共抓大

保护、不搞大开发”，坚持生态优先、绿色发展。国家《“十四五”工业绿色发展规划》（以下简称《发展规划》）文件中指出持续优化能源消费结构，将以煤炭为主的化石能源转变为高效清洁能源，以达到能源低碳转型目标“力争 2030 年达到碳峰值，2060 年前实现碳中和”。

在此背景下，工业作为长江经济带能源利用的主要部门，通过了解长江经济带工业能源消耗现状，有效测度工业能源效率，扎实解决工业能源效率相关问题成为解决长江经济带能源、环境和经济问题的关键一环。因此，深入研究长江经济带工业能源效率对长江经济带实现经济可持续发展具有重要理论及现实意义。

1.1.2 研究意义

（1）理论意义

①本文为能源效率指标体系构建提供新思路。通过整理相关文献可以发现，目前国内外研究学者对能源效率的评价模型较为单一。另外，对于非期望产出指标的选取也较为片面，仅从 CO_2 排放量或工业三废中的单一指标考虑，因此本文将基于 2009-2020 年长江经济带 11 个省市的连续面板数据，运用考虑非期望产出的超效率 SBM-GML 模型，通过静与动结合的视角对工业能源效率进行全面分析。同时，本文选取了多个污染物排放量指标作为非期望产出，对产出指标考虑更为全面。本文的研究成果为工业能源效率指标体系的构建与评价提供新思路，进一步拓宽了能源效率相关理论与研究体系的边界。

②本文为能源效率的空间层面研究提供新依据。在现有文献中，对于能源效率的差异性研究大多为时空演变趋势分析，较少从空间层面进行分析，因此本文采用探索性空间数据分析方法及收敛性分析模型应用于长江经济带工业能源效率的空间集聚特征分析中。在分析影响因素研究中，大多学者广泛使用一般面板回归模型进行分析，较少考虑影响因素的地理外部性及空间依赖性，因此本文构建空间计量模型对工业能源效率的空间溢出效应进行分析，进一步完善了能源效率的研究框架，拓展了能源效率在空间计量方面的理论研究范围。

（2）现实意义

在“碳达峰”“碳中和”的社会背景下，长江经济带作为我国经济中心，低端、重工业企业集中分布，能源需求及依赖性较高，污染物过度排放问题造成了生态环境急剧恶化，严重阻碍了长江经济带工业绿色健康发展，因此提升长江经

经济带能源利用效率及降低能源消耗，对把握经济可持续发展与资源紧缩之间的关系有着重要意义，对节能减排有促进作用。本文运用空间计量模型，考虑经济发展水平、市场集中度、环境规制、能源消费结构、政府干预与利用外资规模这六个影响因素对工业能源效率的空间溢出效应，并提出关于提升长江经济带工业能源效率、加快工业绿色发展的针对性意见，为国家、各地区及行业能源部门的相关能源发展提供参考依据。

1.2 文献综述

1.2.1 工业能源效率指标体系相关研究

本文对工业能源效率指标体系进行梳理，如表 1.1 所示。

表 1.1 工业能源效率指标体系研究成果

作者	研究对象	投入指标	产出指标 (含非期望产出)
Amjadi 等 (2022) [1]	瑞典制造业能源效率	电力、煤炭和燃料等能源总和 除建筑投资外总投资金额 制造业行业雇员人数	制造业终端销售额 二氧化硫和氮氧化物排放量 工业总产值 参加养老保险人数
赵艳敏和董会忠 (2022) [2]	中国工业能源生态效率	地区能源消费总量 工业固定资产投资净值 工业行业从业人数	卫生技术人数 工业 CO ₂ 排放量 工业 SO ₂ 排放量 工业 COD 排放量
Huang 和 Wang (2022) [3]	中国物流业全要素能源效率	物流业能源消耗 物流业资产投资 物流业员工数量	物流业附加值 物流业货运周转率 物流业 CO ₂ 排放量 各行业工业总产值
曹建飞和韩延玲 (2022) [4]	新疆工业全要素能源效率	各行业能源消费总量 各行业固定资产净值年平均余额 各行业全部从业人员年平均人数	各行业 SO ₂ 、CO ₂ 、COD、烟尘和工业固体废物废弃物指标加权为污染物综合指标
李颖 (2022) [5]	中国全要素能源效率	工业能源消耗量 工业资本存量 各地区工业劳动力数量	各地区工业增加值 工业 CO ₂ 排放量

续表 1.1 工业能源效率指标体系研究成果

作者	研究对象	投入指标	产出指标 (含非期望产出)
张优智和张 珍珍 (2021) [6]	中国工业 全要素能 源效率	历年能源消耗量 电力、制造业和采矿业固定资产净 值之和 制造业和采矿业就业人数之和	各年工业增加值 工业 CO ₂ 排放量
林向义等 (2021) [7]	黑龙江省 工业企业 能源效率	规模以上工业企业综合能源消费量 工业企业固定资产投资 工业企业就业人数	工业企业增加值 废水排放量 空气污染物排放量
Chen 和 Xu (2019) [8]	环境约束 下中国能 源效率	各省能源消耗量 各省固定资产净值 各省员工人数	各省国内生产总值 工业 CO ₂ 排放量 工业 SO ₂ 排放量
黄光球和白 龙博 (2019) [9]	陕西省工 业能源效 率	各市区规模以上工业企业的综合能 源消费量 各市区规模以上工业企业资产 各市区规模以上工业企业从业人员 年均数	各市区规模以上工业企 业生产总值 六种环境污染排放指标 用熵权法计算出综合污 染物排放量指标
李根等 (2019) [10]	中国制造 业能源生 态效率	历年制造业能源消费总量 制造业全社会固定资产投资额 制造业城镇单位在岗职工年末人数	制造业增加值 工业废气排放量 工业废水排放量 工业固体废物排放量
王莉 (2019) [11]	中国工业 能源效率	工业能源投入 工业资本投入 工业劳动力投入 工业终端消费量与实际工业生产消 费量差值	工业 GDP 产出值 工业非合意产出 CO ₂ 排放量
杨恺钧等 (2018) [12]	中国工业 全要素能 源效率	国有及规模以上非国有工业企业的 固定资产净值 劳动力投入	各地区工业增加值 工业 CO ₂ 排放量 工业 SO ₂ 排放量 烟粉尘排放量

由表 1.1 可知, 研究学者多从不同区域(全国、省域)层面分析工业能源效率。从指标选取来看, 投入指标大多为工业部门运营所需的能源、资本和人员等资源要素, 产出指标多为期望产出指标和非期望产出指标, 非期望产出指标大多使用能源消耗造成的环境污染物排放量表示。

1.2.2 工业能源效率评价方法相关研究

在工业能源效率测算方法方面,学者们多考虑其多投入和多产出特征,因此往往采用生产前沿分析技术方法如随机前沿分析法(参数 SFA)和数据包络分析法(非参数 DEA)进行测度。李玉婷和史丹(2018)^[13]基于 1997-2015 年中国省际面板数据,采用随机前沿分析法测算工业能源利用效率鸿沟。Shen 和 Lin (2017)^[14]、侯建朝等(2020)^[15]构建了基于 Translog 距离函数和 SFA(随机前沿模型),测算了中国工业和交通运输业能源效率。Badunenko 和 C. Kumbhakar (2020)^[16]使用四分量随机前沿模型分析了 1960-2011 年美国制造业的能源利用效率。罗明等(2020)^[17]采用随机前沿模型对 2005-2017 年中国工业能源效率进行测算,并对其收敛特征进行分析。Yu 等(2022)^[18]运用扩展 SFA 模型测度中国地级市的工业能源效率。

但综合来看,由于 DEA 不需要设置具体的生产参数,还能灵活处理多个投入要素与非期望产出,因此国内外研究学者更常使用数据包络分析来评价能源效率。国外学者 Charnes 等^[19]在 1978 年首次提出数据包络分析(DEA)模型,此后 DEA 模型被广泛用于不同行业的效率评价。Hu 和 Wang(2006)^[20]使用 DEA 模型测算“全要素”框架下中国 29 个行政区的能源效率,通过对比多种投入的能源效率与单一投入的能源生产率,发现运用 DEA 模型测算的结果更符合现实情况。Vlontzos 等(2014)^[21]、Bigerna 等(2019)^[22]分别使用非径向 DEA 和空间两阶段 DEA 对欧盟成员国的能源环境效率进行评价。Camiot 等(2016)^[23]采用基于松弛变量的 DEA 模型测算了 BRICS 和 G7 等 12 个国家的能源效率,发现社会条件越好的国家拥有更高的能源效率。Bhat 等(2018)^[24]基于空间异质性与市场不完备性,运用 SBM-DEA 模型测算印度各造纸工业的能源效率及节能潜力。Zakari 等(2022)^[25]使用 DEA 模型测算 2000-2018 年 20 个亚洲及太平洋国家的能源效率。国内学者魏楚等(2010)^[26]、王喜平和姜晔(2012)^[27]、李双杰和李春琦(2018)^[28]将环境约束纳入全要素能源效率框架,运用 DEA 模型测算国家、省域及行业各层面的全要素能源效率。Guo 等(2018)^[29]基于“全要素”框架,采用数据包络分析模型(DEA)测算中国地区部分能源密集型子行业的煤炭消费效率。Yang 和 Wei (2019)^[30]运用博弈交叉效率 DEA 模型对环境约束下 2006-2016 年中国 26 个省级城市能源效率,测算结果指出考虑博弈竞争关系的城市能源效率低于传统 DEA 模型计算的城市能源效率。

Tone(2002)^[31]在 DEA 模型的基础上,提出了一种考虑非合意产出的 SBM 模型,纳入了松弛变量对测算效率值的影响,能够进一步区分效率值结果。涂正

革和刘磊珂(2011)^[32]、王燕和刘婷(2018)^[33]分别采用考虑非合意产出的SBM模型对不同研究时期我国省际物流业和工业能源效率进行测度。随着超效率和其他方法在DEA模型中引入,学术界开始拓展数据包络分析模型以研究能源效率。尹庆民和吴秀琳(2019)^[34]采用径向与非径向相结合的EBM模型测度考虑环境约束的长江经济带各省份工业能源环境效率,并利用核密度估计法分析其时序演变趋势。易其国等(2022)^[35]采用超效率SBM模型对中国产业部门能源效率进行测度。Guo等(2022)^[36]采用基于松弛变量的SBM-DEA模型计算了2000-2020年山西省地级市层面的能源消耗与碳排放效率。

另外,Malmquist指数是基于数据包络分析(DEA)的指数方法,主要对效率的时间动态趋势进行评价。Chung等(1997)^[37]构建了Malmquist-Luenberger(ML)指数,用于测算考虑非合意产出的全要素生产率。Oh(2010)^[38]进一步在ML指数上构建了Global Malmquist-Luenberger(GML)指数模型,能够克服ML指数存在的线性规划无解问题。Makridou等(2016)^[39]使用Malmquist指数测算2000-2009年间23个欧盟国家5个能源密集型产业的能源效率和技术变化之间的差异。国内学者范秋芳和王丽洋(2018)^[40]使用了ML指数对工业行业全要素能源效率的动态趋势进行分析。杨浩昌等(2021)^[41]采用超效率DEA-Malmquist方法测算2003-2015年中国省级制造业静态和动态能源效率。范秋芳和晏向星(2021)^[42]采用GML指数对中国绿色全要素能源效率进行动态评价。

1.2.3 工业能源效率影响因素相关研究

工业能源效率受到多种因素的影响,由于不同国家和地区存在经济特征异质性,因此研究能源效率的影响因素对于提高工业能源效率有非常大的意义。

部分学者对不同行业的工业能源效率的影响因素进行了研究。①工业部门:丁黄艳(2019)^[43]分析了中国35个工业行业能源效率的影响因素,研究发现工业行业的能源消费结构、企业规模和资本深化对工业行业能源效率起到正向促进作用,而所有制结构则抑制了工业行业能源效率的提升。Guo和Yuan(2020)^[44]运用考虑不良产出的超效率SBM模型测算2000-2017年中国省际层面的工业部门能源效率,并进一步采用动态面板回归模型探究不同管控程度下的环境规制对工业部门能源效率的异质效应。林伯强等(2021)^[45]实证发现环境规制会倒逼技术创新、增加污染终端治理成本,从而对中国工业企业能源效率产生积极影

响。Macharia 等（2022）^[46]采用基于子行业层面的 Translog 生产函数的 SFA 模型，测算了肯尼亚制造业电力、燃料及整体能源效率，并进一步探究这些效率的影响因素，研究表明劳动生产率不利于电力、燃料和整体能源效率，而企业规模、平均年龄的影响不显著。张弘媛和丁一兵（2022）^[47]通过研究发现全球价值链嵌入会带来生产转移、环境规制、规模效率和技术进步等效应，会增强深入嵌入对中国制造业绿色全要素能源效率的促进作用。靳婷婷等（2023）^[48]对江苏省地级市制造业能源效率进行测算，并深入探究产业结构高级度与制造业能源效率之间的耦合水平。②其他行业：Liu 和 Lin（2018）^[49]采用删失回归模型和截断回归模型分析影响中国省际交通部门能源效率的影响因素。Zhao 和 Lin（2020）^[50]使用 Tobit 模型的联立方程模型证明了纺织业的对外贸易与纺织业能源效率存在正向作用。黄超然和周国华（2022）^[51]通过 Super-SBM 模型测算碳排放约束下的物流行业能源效率，并进一步使用 QAP 回归法实证研究了中国各省物流业能源效率影响因素，研究发现城镇化、经济发展水平、环境建设投资和科研投入与物流业能源效率空间关联呈正相关关系。

还有部分学者对不同区域的工业能源效率影响因素展开研究。王景波等（2017）^[52]利用 SBM 和 GMM 动态回归模型对山东省 17 个地级市工业能源效率及其影响因素进行研究。马晓君等（2017）^[53]利用 Tobit 模型分别探究东北三省 35 个地级市的外部影响因素，发现第二产业比重、第三产业比重均阻碍东北三省城市能源效率的提升，而工业所有制结构对能源效率影响显著为正。黄光球和白龙博（2019）^[9]测算了陕西省 11 个地级市工业能源效率，研究结果显示社会发展水平抑制了山西省工业能源效率的提升，而产业结构、科技创新、能源消费结构等因素带动了陕西省工业能源效率的提升。

在影响因素的研究中，学者们采用不同的方法进行分析。Marques 和 Fuinhas（2019）^[54]基于 11 个欧盟国家 1997-2015 年工业部门的面板数据，借助非线性 ARDL 模型探究能源效率与经济增长之间的关系，结果发现经济增长正在推动各经济体提高工业部门能源效率。Ohene-Asare 等（2020）^[55]在三阶段框架内对 46 个非洲国家能源效率与经济发展水平的相互关系进行了分析，第一阶段基于松弛变量测算了能源效率，第二阶段采用自举截断回归法评估非洲能源效率的驱动因素，第三阶段采用两阶段最小二乘法（TSLS）检验能源效率与经济发展之间的关系。Cheng 等（2020）^[56]研究中国 30 个省份全要素能源效率的空间相关性及其空间收敛性，研究结果发现东中西三个区域能源效率存在绝对 β 收敛和

条件 β 收敛,但整体能源效率水平则不存在 β 收敛。张慧等(2022)^[57]采用随机前沿模型测算了中国188个地级市的能源效率,并利用分位数回归模型探究了城市能源效率的影响因素。孙鹏博和葛力铭(2023)^[58]基于三重差分法深入探究了增值税结构性减税政策对东北三省八大行业能源效率的影响机制。

还有学者们采用了空间计量方法。李玉婷和刘祥艳(2016)^[59]采用随机前沿分析法对1997-2012年中国工业能源效率进行测算和空间收敛性分析,发现各省工业全要素能源效率存在 σ 收敛,而不存在 β 收敛。赵春玲等(2019)^[60]利用空间动态面板模型,发现中国工业能源效率存在空间溢出效应。陶宇等(2019)^[61]运用空间计量模型分析中国30个省份的工业能源环境效率空间因素的作用机制,研究表明中国工业能源环境效率在1998-2014年存在空间正相关性,环境规制显著影响中国工业能源环境效率。王旭等(2020)^[62]运用空间杜宾模型与分位数回归模型探究了中国工业能源环境效率的空间溢出效应及影响分位等。王莉和白彦(2021)^[63]对中国工业能源效率的收敛性特征及空间关联性特征进行检验,并采用固定效应下的空间滞后模型(SEM)分析工业能源效率的影响因素作用机制,研究发现同样的影响因素在不同区域的作用轨迹不一致,存在明显的空间异质性。苏捷等(2022)^[64]基于中国省级面板数据研究了工业能源效率与市场分割之间的空间影响机制。Wang和Zhou(2022)^[65]将数据包络分析法与空间计量分析相结合,探究中国能源效率的影响因素。研究发现,技术进步、贸易开放与外商直接投资能够有效提高能源效率,但能源消费结构和产业结构调整不利于能源效率的提升,并且各影响因素的作用机制存在空间异质性。

1.2.4 研究评述

通过对工业能源效率指标体系、评价方法及影响因素等国内外研究成果的梳理,初步了解了工业能源效率方面的学术动态及发展。基于目前国内外的相关研究,总结为以下几点:

(1) 工业能源效率的指标体系方面。目前工业能源效率指标体系的发展较为完善,从多个方面选取“投入-产出”要素。但对于工业污染物这一指标,学者们在处理时大不相同,大部分学者仅考虑二氧化碳排放量或者某一污染物排放量作为单一的非期望产出指标,仅有部分学者综合考虑多种污染物作为非期望产出指标。

(2) 工业能源效率的评价方法方面。目前对于工业能源效率的评价方法并未统一标准,国内外研究学者大多采用 DEA 及其拓展模型进行研究,使用 SBM 及其拓展模型的并不多。SBM 模型能够避免径向和角度度量的偏差,还能够考虑生产过程中非期望产出的影响,使得效率评价更为全面、客观。超效率 SBM 则能够有效比较位于生产前沿面的效率值,提高不同年份效率的可比性。其次,国内外学者大多使用 Mamlquist 指数对能源效率的动态趋势进行研究,这容易导致动态评价结果偏离实际,而 GML 指数则克服了 Mamlquist 指数的局限性。

(3) 工业能源效率的研究区域方面。大多数研究学者从国家、省域或地级市等区域进行研究能源效率,较少针对长江经济带这一研究区域测度工业能源效率。因此,本文选择长江经济带 9 省 2 市作为研究对象。

(4) 工业能源效率的影响因素方面。研究学者们大多采用 Tobit 或者普通面板回归等模型研究其影响因素,而没有考虑到地区之间要素的流动性,各影响因素之间存在着一定程度的空间依赖性。因此,本文认为在研究各影响因素时,应当从空间经济视角进行理论分析和建模,结合空间计量模型研究影响因素对各地区工业能源效率的影响机制。

1.3 研究内容与方法

1.3.1 研究内容

本文研究分为三个阶段、五个步骤。

三个阶段:①研究准备阶段;②研究分析阶段;③研究总结阶段。

第一步:文献收集与分析。梳理国内外关于工业能源效率评价及影响因素研究的相关文献,形成研究理论体系。

第二步:建立研究框架。首先基于能源消耗的主要特征及关联因素,将能源消耗产生的污染物排放量增添进工业能源效率的测度体系中,从静态和动态视角构建工业能源效率评价指标,对其空间层面的特征进行分析,并基于空间计量模型对工业能源效率的影响因素进行研究。

第三步:选择研究样本以及收集数据。在《中国统计年鉴》、《中国工业经济统计年鉴》、《中国能源统计年鉴》以及各地区统计年鉴中收集本研究所需数据。

第四步:建立实证模型,开展实证研究。使用超效率 SBM-GML 模型测度

并分析长江经济带静态与动态工业能源效率、节能潜力，采用泰尔指数、全局和局部莫兰指数及收敛性分析法进一步探究工业能源效率的空间层面特征，并建立空间杜宾模型（SDM）来探究长江经济带省域工业能源效率的空间效应。

第五步：形成研究结论，提出政策建议。在对所有实证结果进行分析的基础上，进行合理的归纳，并形成论文的主要研究结论，提供针对性的政策建议。

1.3.2 技术路线图

本文可形成的研究技术路线如图 1.1 所示：

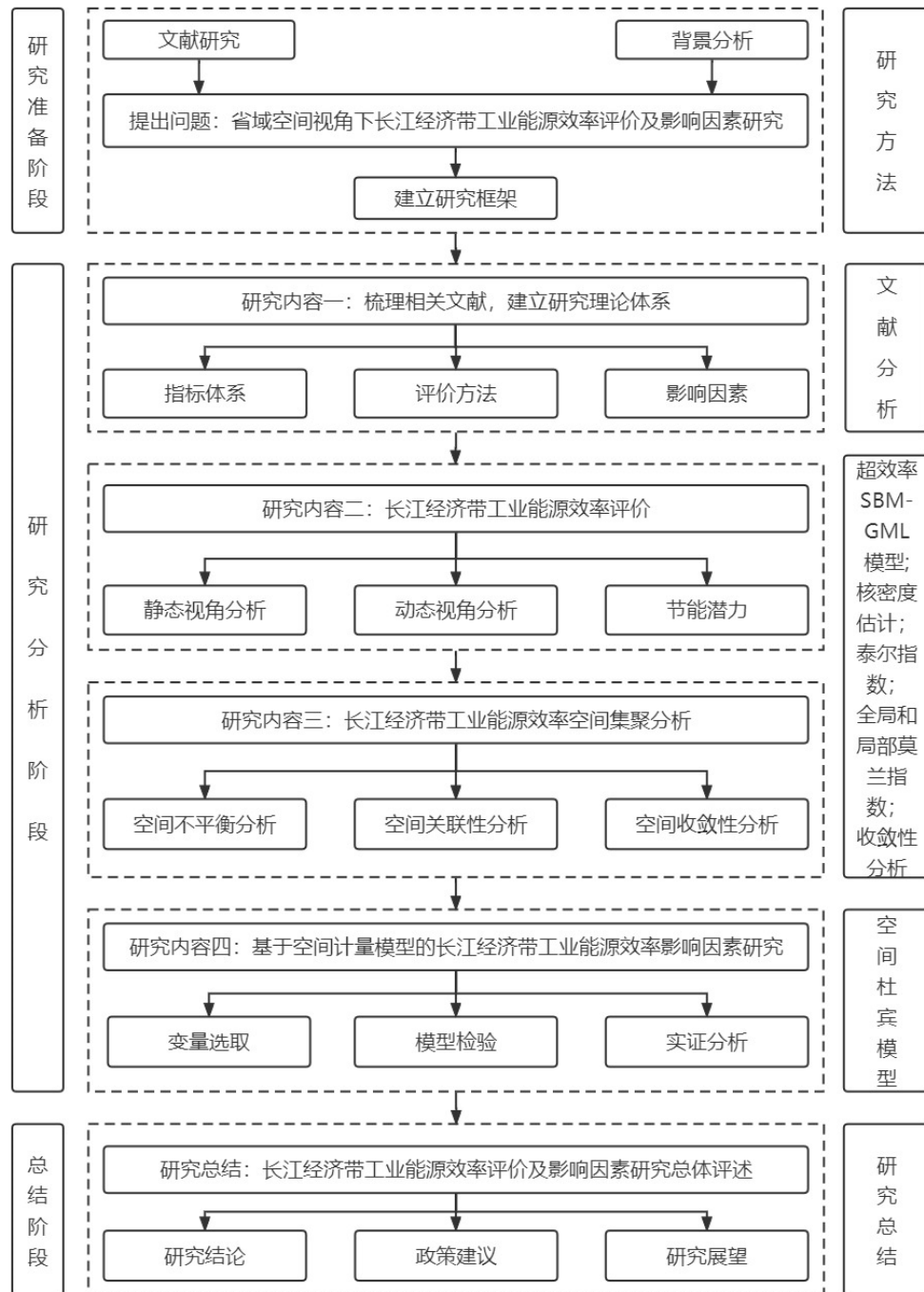


图 1.1 技术路线图

1.3.3 研究方法

(1) 文献研究法。通过对国内外与研究对象相关的文献进行梳理,对工业能源效率的相关文献从指标体系、测算方法与影响因素等方面进行梳理总结。通过对比之前学者的研究成果,确定了本文工业能源效率测算所需的要素指标和影响因素指标,为后续实证分析奠定基础。

(2) 动态和静态测算方法相结合。本文基于长江经济带 11 个省份的面板数据,通过超效率 SBM-GML 模型从动态和静态视角出发测算工业能源效率。静态效率值是用来分析长江经济带工业能源效率省际或地区之间的横向差异,而动态结果可以分析在时间上效率值的变化幅度,同时还能基于静态效率值分析长江经济带省际节能潜力与时空演变特征。

(3) 空间计量经济学建模。本文基于空间经济学理论和空间收敛性理论,从空间视角分析长江经济带工业能源效率的空间关联性、空间收敛性,并结合空间计量模型研究长江经济带工业能源效率的影响因素。

1.4 主要创新点

(1) 构建了更合理、全面的工业能源效率指标体系。

基于“全要素”框架下,增加了能源消耗造成的多种污染物排放量作为非期望产出指标,为了消除污染物之间的差异,使用熵权法计算得出工业环境污染综合指数,充分考虑了能源消耗的主要特征,指标也更加合理、全面。从静态和动态视角出发,选取长江经济带为研究区域,通过建立超效率 SBM-GML 模型,对工业能源效率从动、静视角分析,能够更加清晰地展示工业能源效率的变化。

(2) 从空间视角出发,对工业能源效率的区域内差异进行研究。

基于效率测算结果,综合运用泰尔指数、全局和局部莫兰指数和收敛性分析模型对长江经济带 11 个省市工业能源效率的空间集聚特征进行详细分析,能够更加清楚地展示长江经济带工业能源效率的空间差异变化。从地理外部性和空间依赖性视角考虑,构建时空双固定空间杜宾模型,对长江经济带工业能源效率的影响因素进行回归分析,在一定程度上拓宽了能源效率的研究视角。

第2章 相关概念与理论基础

2.1 能源效率的内涵

在1995年世界能源委员正式将“能源效率”定义为“在减少能源投入量时可获得相同能源服务产出量”。Patterson (1996)^[66]从学术角度精确定义了“能源效率”：当服务或产出不变时，投入消耗的能源更少，并将能源效率测算指标分为了物理热力学、经济热力学、热力学和经济学等指标类型，并借助多个指标量化其为生产进程中可用的产出量/服务量与能源投入值的比例。早期的文献多使用这四种指标衡量单要素能源效率。随后，Bosseboeuf 等 (1997)^[67]将能源效率扩展为能源效率和技术能源效率，能源效率是指通过使用同等甚至更少的能源以获取更多产出或更高服务质量，而技术能源效率侧重于由于管理完善、技术进步或生活方式改善等环境因素导致能源消耗减少。王庆一 (2003)^[68]提出能源效率可分为两类，①从经济层面考虑能源成本与经济产出关系的能源效率；②从物理层面考虑能源产品转换为热能的物理能源效率。

Hu 和 Wang (2006)^[20]首次将能源效率的计算方法进行分类：一是不考虑其他生产要素，仅从能源要素出发的单要素能源效率，主要指标是能源强度和能源生产率；二是从“新古典生产理论”视角综合考虑实际生产过程中存在的其他投入要素的全要素能源效率 (Total Factor Energy Efficiency,TFEE)，从省级层面利用 DEA 模型对数据分解并计算了基于“全要素生产率”框架下的能源效率。魏楚和沈满洪 (2007)^[69]指出能源生产率与能源强度互为倒数，能源生产率是指“能源产出与能源要素投入的比例”，而能源强度是“能源要素投入与能源产出的比例”。但杨红亮和史丹 (2008)^[70]指出能源强度、能源生产率等单要素能源效率指标存在一定的局限性，忽略了在实际情况下如劳动力、技术、资本等要素的产出与投入关系，只考虑了能源投入与产出之间的比例关系。

全要素能源效率来源于全要素生产率理论，对多样性的投入指标与生产经营过程中的经济产出指标进行着重分析，体现了一个地区资源禀赋对能源消耗的影响程度。魏楚和沈满洪 (2009)^[71]在传统“全要素”框架下，综合考虑多种投入要素以期实现生产过程中产出最大化、成本最小化。王兵等 (2011)^[72]指出

考虑多种投入要素的效率值可被称为能源效率、劳动效率或资本效率，但却忽略了实际生产过程中的非期望产出，如实际生产过程往往会伴随着工业废水、固体废物和工业废气等的排放。Watanabe 和 Tanaka (2007)^[73]、Wu 等 (2012)^[74]发现当忽略非合意产出时能源效率值的测算往往会存在偏差。张少华和蒋伟杰 (2016)^[75]指出将环境约束纳入 DEA 框架中，能够让能源效率测算结果兼顾经济增长、能源与环境三者关系。陈菁泉等 (2022)^[76]采用熵值法将合意产出与非合意产出计算得出综合指标纳入全要素能源效率指标体系中，既能够反映生产过程中的服务与价值，又能够体现在生产过程中对能源环境造成的影响。因此许多学者将能源消耗所造成的环境影响纳入能源效率中，以解决“环境污染内生化”问题，使能源效率研究更具有科学性和系统性。

2.2 理论基础

2.2.1 经济增长理论

经济增长理论是探究经济增长的内在机理和外生影响因素的理论，历经了古典增长理论、新古典增长理论与新经济增长理论（又称内生增长理论）等阶段。在古典增长理论发展时期，亚当斯密（Adam Smith）的理论以分工为核心展开，阐述了经济增长、财富积累的内在机理，他论证了增加生产性劳动、降低非生产性劳动也能够促进劳动生产率的提高，从而带动国民资本的积累。马尔萨斯（Malthus）认为若以几何级数增长的人口增速超过了以算术级数有限增长的生活资料增速，人口增长就会阻碍经济发展甚至导致经济衰退。古典增长理论更多地是考虑静态人口数量、生产资料以及劳动分工等因素对经济增长的影响，而忽略了技术进步与人口增长之间的关系。

1928年后经济增长理论进入成熟阶段，以经典拉姆齐（Frank P. Ramsey）模型的建立为标识，厘清了动态均衡模型中非货币消费与资本积累的基本原理，以此确定最优经济增长。1948年哈罗德（Harrod）和多玛（Domar）对经济增长的持续性与动态性进行深入分析，构建了以投资、存储与产出为中心的哈罗德-多玛经济增长模型，随后索洛（Solow）提出新古典增长理论将劳动力作为外生变量，考虑技术进步与经济增长之间的动因关系。在1960年舒尔茨（Schultz）提出人力资本是决定社会进步与经济发展的重要因素，为后来的内生经济增长理

论奠定了基础。

在内生增长理论中，罗默（Romer）和卢卡斯（Lucas）等人将技术进步内生化，并强调人力资本与知识要素的积累不仅能使经济增长，还会推动资源收益与规模效益递增，内生增长理论进一步扩大了经济增长的研究范围，同时从多方面研究了经济增长的影响机制，不仅包括了古典增长理论中的资本积累、劳动分工等要素，还强调了内生的技术进步、知识积累和外生的相关政策、人力资本积累等要素对全要素生产率的影响。

2.2.2 经济收敛性理论

经济收敛性理论是基于宏观经济学提出的一个理论假说，通常将经济增长的持续性与经济波动相联系。索洛（Solow）在新古典经济增长理论中提出不同国家、不同地区之间存在经济增长水平的差距，随着时间的变化差距逐渐缩小^[77]。就人均资本水平而言，经济落后国家低于经济发达国家，在经济特征如技术水平相同的情况下，落后国家的人均资本增速会大于发达国家，最终两国达到完全相同的均衡状态^[78]。若资本存在边际报酬递减的规律，那么由于发达国家资本水平更高，其资本的边际收益要低于落后国家，由于资本的逐利性会使得距离均衡状态较远的落后国家具备更快的经济增长速度，使得资本流向本国。因此，两国之间的经济发展水平差距会逐渐减小，最终趋于同一稳态，呈现收敛的趋势^[79]。

不同国家技术水平和经济运作能力并不互通，因此经济发展水平也存在差距。若发达国家不断提高人力资本水平，提高专业化水平，在知识经验与技术创新等方面储备量就会越大，从而能够保证该国经济可持续发展，经济发展水平会加快。相反，落后国家由于经济和技术水平不够，以至于其技术进步的外部性无法弥补资本投入带来的边际效应递减的影响，从而导致经济的长期发展越慢，逐渐拉开了国家之间的经济差距，从而不存在收敛特征。但如果国家之间紧密联系，知识经验与技术创新相互传播，落后国家会由于资本逐利性获得更快的经济发展速度，从而不同国家经济水平之间存在收敛趋势。

2.2.3 空间经济学理论

空间经济学源于经济地理学，以地理区位论为理论基础，主要是研究经济数据存在的自相关性和溢出性问题。因为人类的经济活动无法离开空间结构、分布

特性，Krugman（1991）年提出了“核心-边缘（C-P）”模型，指出各种经济特征的内生化会对空间上经济活动造成差异性影响，要素流动性和规模效益递增会引发经济结构在空间维度的动态演变^[80]，但传统经济学却忽略了空间维度的要素流动，从而导致数据结果出现偏差。Paelinck（1974）提出了空间计量经济学，并由 Anselin（1988）将经济地理学中的空间关联现象定义为空间效应，并形成了较完整的空间经济学体系。在此基础上，研究学者们基于传统经济学，从空间效应视角考虑不同经济体之间的空间异质、空间依赖和空间集聚。空间异质是由于区位结构、经济基础等差异导致经济体的非稳定状态，空间依赖是指由于要素流动、技术外溢等因素使得经济体之间存在密切联系^[81]。空间溢出效应是来源于经济体在空间上的经济互动产生的交互影响，以空间依赖性为理论基础，由此构建了考虑空间相关性、直接影响与溢出效应的计量模型^[82, 83]。因此本文从空间经济学视角探究工业能源效率在空间上的异质性及关联性，并进一步构建双固定空间杜宾模型探究工业能源效率的空间效应。

2.3 本章小结

本章首先归纳总结能源效率的理论内涵，然后从经济增长理论、经济收敛性理论与空间经济学理论进行阐述，为之后的工业能源效率测算及动态分解、影响因素的实证研究奠定基础。

第3章 长江经济带工业能源效率评价

本章首先介绍了长江经济带 2009-2020 年各省市工业能源消费现状,并阐述投入-产出要素的选取及数据来源,然后使用超效率 SBM-GML 模型对长江经济带工业能源效率进行了静态与动态分析,并测算了长江经济带各省市工业节能潜力。

3.1 长江经济带各省市工业能源消费现状

3.1.1 长江经济带各省市工业能源投入现状

煤炭、石油等传统能源的投入对于长江经济带工业企业生产运营起到了显著的促进作用。但由于发展基础与市场背景存在差异,长江经济带不同省份、不同区域之间经济发展水平不均衡,各省市、各区域间的能源消耗情况不尽相同。图 3.1 展示了 2009-2020 年长江经济带工业行业的能源消耗总量及增长率趋势,数据来源于 2010-2021 年各省市地区统计年鉴。

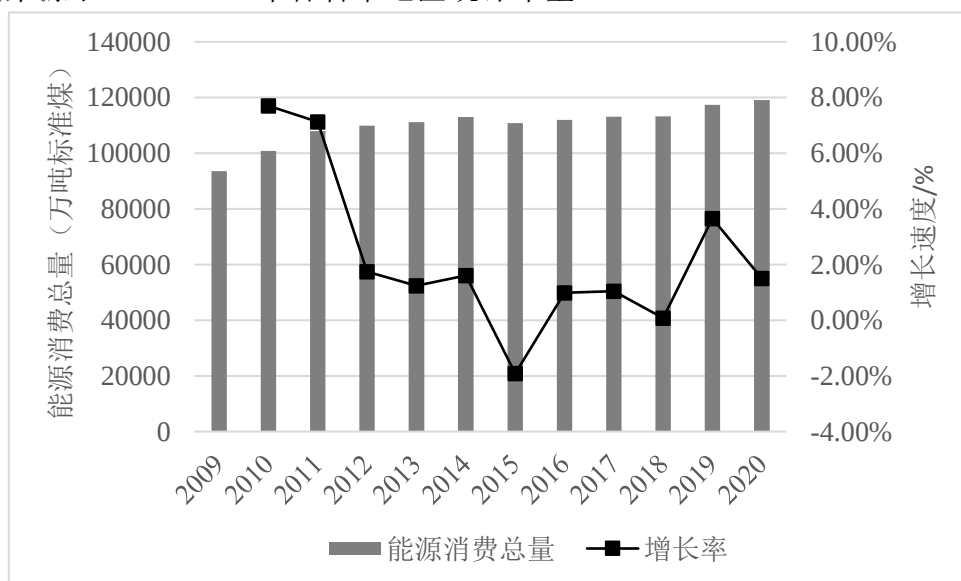


图 3.1 2009-2020 年长江经济带工业能源消费总量及增长率趋势图

由图 3.1 可知长江经济带工业行业的能源消费总量呈现上升趋势,但增速呈

现逐年递减的趋势。长江经济带 11 个省市能源消费总量从 2009 年的 93561.77 万吨标准煤上升至 2020 年能源消费总量为 1321701.96 万吨标准煤, 能源消费的增长速度在 2009-2020 年间均低于 8%。具体而言, 在 2009-2011 年由于我国处于十一五到十二五期间, 经济发展速度不断加快, 能源消费处于“快速增长阶段”, 工业行业能源消费总量增长 14392.75 万吨标准煤, 年均增速为 7.42%; 而到 2012-2020 年间由于全球经济持续疲软、贸易摩擦等外部因素, 我国从工业型经济转向服务型经济, 从而导致长江经济带能源消费增长变缓, 处于“低速平稳阶段”, 增量仅为 9234.92 万吨标准煤, 年均增速为 1.11%。值得注意的是, 工业能源消耗总量增速有所回落, 总体呈现下降趋势。这可能是自“十一五”以来, 随着环境约束的日益严格, 节能减排政策的推进对工业行业能源消费产生了一定程度的冲击作用。

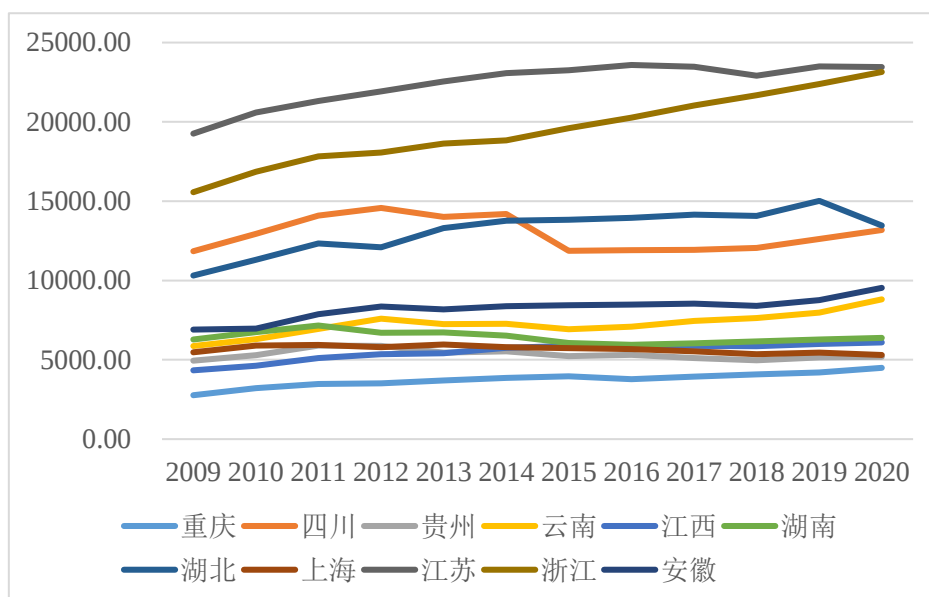


图 3.2 2009-2020 年长江经济带各省市工业能源消费总量

根据数据可获得性, 数据来源于 2010-2021 年各省市地区统计年鉴。由图 3.2 可知, 能源消费量最多的省份是江苏, 该省份能源消费总量从 2009 年的 19260.23 万吨标准煤增加到 2020 年的 23459.56 万吨标准煤, 这可能是由于江苏省的重工业化趋势加快、工业企业数量不断增多, 促使着该省工业经济能源消费总量持续增加。其次是浙江省, 能源消费总量从 2009 年的 15566.89 万吨标准煤增加到 23146.69 万吨标准煤, 这可能是由于浙江省经济快速发展, 高耗能产业在浙江省工业结构中占比较高, 纺织业作为浙江的首要产业, 其耗电量仅次于石油化工业,

因此造成了浙江省能源消费总量持续上升。而消费量最少的省份是重庆,该省份的能源消费总量一直低于 5000 万吨标准煤,这可能是由于重庆地处内陆西部,通过新型工业化战略进一步改善了能源消费结构,使得虽然各类能源总量丰富,但能源消费水平远低于长江经济带平均水平。值得注意的是,四川省在 2014-2015 年间能源消费总量存在明显下降,这可能是由于四川省在发布了《2014-2015 年四川省节能减排低碳发展行动方案》,严格把控传统能源消费总量,进一步推动了四川省工业行业节能减排降碳工程。

本文依据以往学者研究成果和传统划分方法将长江经济带 9 省 2 市划分为上游地区(重庆市、云南省、贵州省和四川省)、中游地区(湖北省、江西省、湖南省)和下游地区(上海市、浙江省、江苏省和安徽省)。从各地区来看,下游地区的工业能源消耗总量远高于上游和中游地区,增幅为 30%。除长江经济带上游出现了部分年份递减趋势,中游与下游地区能源消费总量均为递增趋势。由此可见,在推动长江经济带建设时,应当重点关注能源高投入问题,解决能源高投入、低利用率问题对提升工业能源效率具有重要意义。

3.1.2 长江经济带各省市工业能源产出现状

工业行业的发展伴随着能源消耗,在获得经济产出的同时也会排放大量的污染物加剧环境污染。当工业行业的污染物排放量与经济产出能够达到协调均衡的状态时,此时才能保证能源、资本等要素的高效使用率,从而实现经济发展与生态保护的和谐共存。因此,对长江经济带各省市的工业总产值与二氧化碳排放量进行现状描述,有利于把握长江经济带工业总产值与二氧化碳排放的变化情况,有益于后续实证研究。根据数据可获得性,本小节图表数据来源于 2010-2021 年各省市地区统计年鉴、《中国统计年鉴》、《中国能源统计年鉴》。

(1) 期望产出

长江经济带作为中国经济发展最重要的增长极,经济贡献率与经济总量占比已达半数。如图 3.3 所示,从长江经济带整体来看,工业总产值从 2009 年的 229458.18 亿元上升至 510242.58 亿元,增加了 1.22 倍,整体呈现上升趋势,但工业总产值增速随第三产业的发展而下降。具体来说,在 2009-2016 年间长江经济带工业总产值呈现稳步上升的趋势,而在 2017-2020 年间出现小幅度的先下降后上升趋势。这可能是受到了《纲要》施行的冲击,但随着政策落实到位,使得

工业生产恢复平稳并逐步上升，工业总产值又呈现上升趋势。从长江经济带 9 省 2 市的工业总产值情况来看，各省份的工业总产值呈现了不同程度的上升趋势。其中，江苏省的工业总产值一直保持最高水平，从 2009 年的 76890.798 亿元上升至 148369.81 亿元，平均增长率约为 93%；浙江省的工业总产值也保持较高水平，从 2009 年的 43240.56 亿元上升至 76986.56 亿元，平均增长率为 78%。

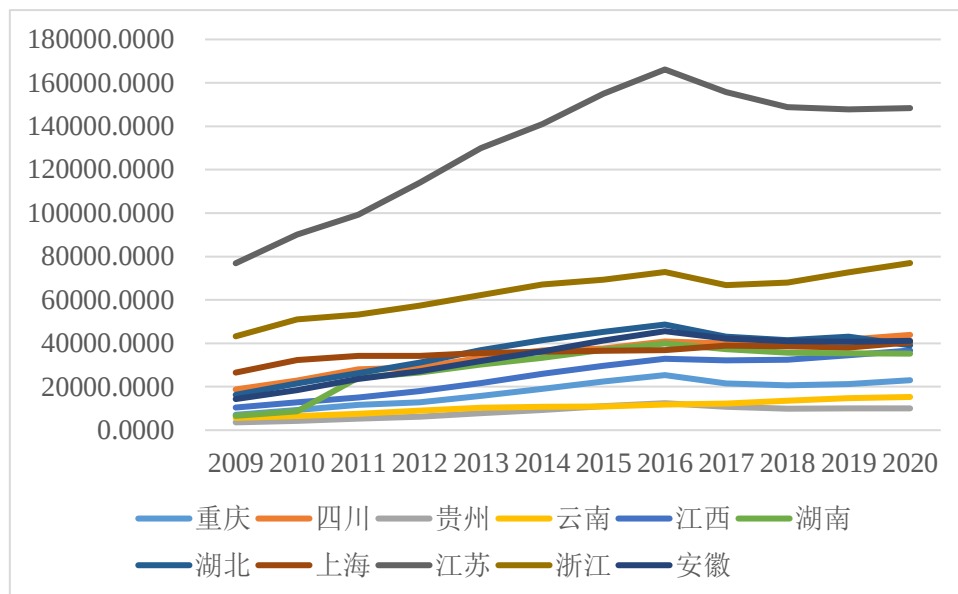


图 3.3 2009-2020 年长江经济带各省市工业总产值

(2) 二氧化碳排放现状

由于我国粗放的经济发展模式，使得我国环境污染较为严重，其中工业生产导致的碳排放是我国大气污染的第一排放端，长江经济带的二氧化碳排放水平随着工业总产值的变动而变动，由图 3.4 可看出二氧化碳排放量在 2009-2016 年呈现波动上升趋势，2016-2020 年呈现波动下降趋势。而 2012 年二氧化碳排放量达到峰值，这可能是由于在 2012 年煤炭价格低廉致使煤炭等能源用量猛增。

由图 3.5 所示，长江经济带下游地区工业二氧化碳排放量远高于上游和中游地区，这是由于长江经济带下游地区的工业化程度、城镇化程度都很高，吸引了大量的外商投资和政府政策的倾斜，促进了下游地区经济的发展，同时也吸引了高能耗企业在此“落地”，从而造成碳排放加剧。从 2009-2020 年各地区二氧化碳排放量变化图来看，均出现了递减趋势，这可能是由于各项经济绿色高质量发展政策的出台与施行，使得各类主要的大气污染物排放量得到了控制。但总体而言，长江经济带的二氧化碳排放量从 2009 年的 86377.97 万吨上升至 2020 年的

91451.05 万吨, 总量还是呈现上升趋势, 这表明长江经济带的工业化污染物排放需要进一步遏制, 推动能源结构与能源生产方式的变革仍旧迫在眉睫, 提升工业经济能源利用效率是长江经济带实现低碳发展的核心要求。

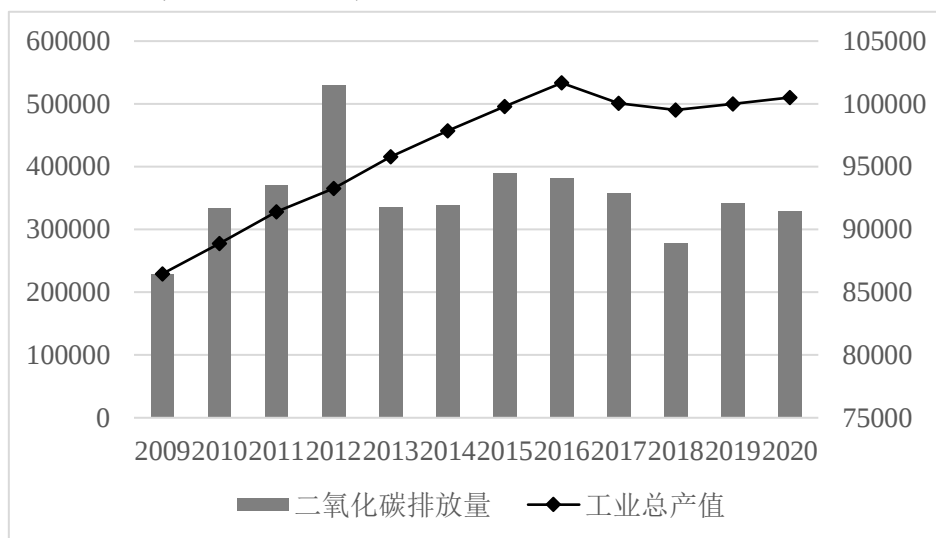


图 3.4 长江经济带工业总产值和二氧化碳排放总量

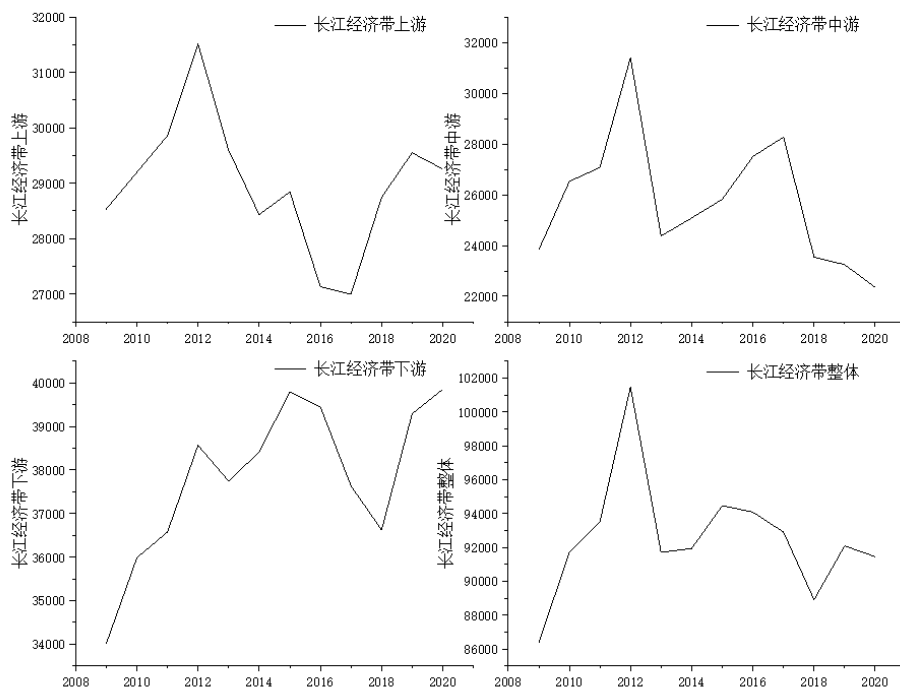


图 3.5 长江经济带各区域的二氧化碳排放总量

3.2 模型构建与分析方法

3.2.1 超效率 SBM 模型

数据包络分析 (DEA) 方法是效率测度中应用最广泛的分析方法, 本质上属于数学方法中的线性规划, 是以线性规划形式来代替同类决策单元的输入指标和输出指标, 并形成输入最小、产量最大的包络曲线来划定一个效率前沿。A.Charnes 和 W.W.Cooper 等学者最早于 1978 年提出 Charnes,Cooper,Rhodes (CCR) 模型, 由此数据包络分析方法广受众多学者的关注。DEA 模型是以省际、地区、行业层面、企业层面, 甚至于独立项目为决策单元, 具有一致的输入、输出变量, 从而划分出生产前沿面。生产前沿面是由观测到的 DMU 输入和输出数据的包络面的有效部分, 相对于生产可能集, 以投入最小、产出最大为目标的 Pareto 最优点所构成的面。以此为基础, 决策单元不位于生产前沿面上为无效 DMU, 决策单元落于生产前沿面上则为有效 DMU。转换为效率值来说, 即当 DMU 在前沿面上时, DMU 效率值 ≥ 1 时, 反之则 DMU 效率值在 (0,1) 之间。

传统的数据包络模型忽略了“投入-产出”问题中的“松弛变量”与环境污染问题中“非期望产出”, 在实际生产中可能出现产出不足或投入冗余等问题, 并且当多个决策单元的效率值为 1 时无法进一步区分, 因此测算结果会存在一定偏差。因此, 为了能够在决策单元的效率值为 1 时进一步比较, Tone 提出了一种考虑松弛变量与非期望产出的超效率 SBM 模型, 避免了传统 DEA 模型无法对有效 DMU 进行进一步分析的缺陷, 进一步提升了模型测量的准确性。在此基础上, 本文设定的包含非期望产出的超效率 SBM 模型如下:

$$\begin{aligned} \min \rho = & \frac{\frac{1}{r} \sum_{i=1}^r \frac{\bar{x}}{x_{ik}}}{\frac{1}{m_1 + m_2} \left(\sum_{q=1}^{m_1} \frac{y^v}{y_{qk}^v} + \sum_{s=1}^{m_2} \frac{y^u}{y_{sk}^u} \right)} \\ \text{s.t.} \quad & \bar{x} \geq \sum_{j=1, j \neq k}^n x_{ij} \lambda_j \quad (i=1, 2, \dots, r) \end{aligned} \quad (3.1)$$

$$\overline{y^v} \leq \sum_{j=1, j \neq k}^n y_{qj}^v \lambda_j$$

$$\overline{y^u} \geq \sum_{j=1, j \neq k}^n y_{sj}^u \lambda_j$$

$$\lambda_j > 0, j \neq k, j = 1, 2, \dots, n$$

$$\overline{x} \geq x_k, i = 1, 2, \dots, r$$

$$\overline{y^v} \geq y_{qk}^v, q = 1, 2, \dots, m_1$$

$$\overline{y^u} \geq y_{sk}^u, s = 1, 2, \dots, m_2$$

其中, ρ 表示工业能源效率, r 表示每个决策单元 DMU 的投入量, 有 n 个 DMU, x 为投入矩阵的元素, m_1 、 m_2 分别表示每个决策单元 DMU 中期望产出与非期望产出, 其中期望矩阵元素与非期望矩阵元素分别为 y^v 和 y^u 。

3.2.2 Global Malmquist—Luenberger (GML) 指数分解

数据包络分析方法是从静态视角对能源效率进行分析, 想要从动态视角进行分析则需要使用 Malmquist 指数。Chung 等 (1997) 基于 Malmquist 指数构建了考虑环境因素的 ML 指数, 并融入了方向性距离函数。与 Malmquist 指数相比, ML 指数的优势在于解决了 Malmquist 指数不考虑“投入-产出”中非期望产出的指标问题, 还进一步适应了期望产出越大、非期望产出越小的需求。但 ML 指数仍旧存在局限性, 最终测算结果会存在不连续性以及出现无解的情况。基于此, Oh 等 (2010) 基于 ML 指数构建了融入了全局生产技术的 GML 指数模型, 不仅能够克服 ML 指数存在的问题, 还能够对不同省份下不同时期的能源效率进行比较。因此本文将选用 GML 指数对长江经济带工业能源效率进行动态分析, 模型构造如下:

$$\begin{aligned} GML_i^{t,t+1}(x_i^t, y_i^t, b_i^t, x_i^{t+1}, y_i^{t+1}, b_i^{t+1}) &= \frac{1 + D^G(x_i^t, y_i^t, b_i^t)}{1 + D^G(x_i^{t+1}, y_i^{t+1}, b_i^{t+1})} \\ &= \frac{1 + D^t(x_i^t, y_i^t, b_i^t)}{1 + D^{t+1}(x_i^{t+1}, y_i^{t+1}, b_i^{t+1})} \times \left[\frac{1 + D^G(x_i^t, y_i^t, b_i^t)}{1 + D^t(x_i^t, y_i^t, b_i^t)} \times \frac{1 + D^{t+1}(x_i^{t+1}, y_i^{t+1}, b_i^{t+1})}{1 + D^G(x_i^{t+1}, y_i^{t+1}, b_i^{t+1})} \right] \quad (3.2) \\ &= EFCH_i^{t,t+1} \times TECH_i^{t,t+1} \end{aligned}$$

其中, $D^G(x_i, y_i, b_i)$ 为全局方向性距离函数, 依赖于全局生产可能性集合 $P^G(x_i)$;

$GML_i^{t,t+1}$ 代表相邻 t 到 $t+1$ 时期决策单元的工业能源效率变化, 若 $GML_i^{t,t+1} < 1$, 表示 t 到 $t+1$ 时期工业能源效率下降; 若 $GML_i^{t,t+1} > 1$, 表示 t 到 $t+1$ 时期工业能源效率上升; 若 $GML_i^{t,t+1}$ 等于 1, 表示 t 到 $t+1$ 时期工业能源效率不变。同时, GML 指数可分解为技术效率变化指数和技术进步变化指数。 $EFCH_i^{t,t+1}$ 代表每个决策单元 (DMU) 技术效率指数, $TECH_i^{t,t+1}$ 代表每个决策单元 (DMU) 技术进步指数。若 $EFCH_i^{t,t+1} > 1$, 表示技术效率提高, 反之则为降低; 若 $TECH_i^{t,t+1} > 1$, 表示技术进步, 否则为技术退步。

3.2.3 核密度估计法

核密度估计是用以描述数据动态分布的概率密度函数, 通过核密度曲线来捕捉区域内点密度的变化特征, 计算公式如下:

$$f_r(x) = \frac{1}{qk} \sum_{i=1}^q K\left(\frac{x-x_i}{k}\right) \quad (3.3)$$

其中, $f(x)$ 为核密度估计值; x 为变量; x_i 为标记点; q 为样本量; K 为核函数; k 为带宽。

3.3 指标选取与数据说明

3.3.1 指标选取原则

为了能够测度出更为准确的工业能源效率, 本文依据科学性、典型性、可得性三点原则构建了工业能源效率的评价指标体系。

(1) 科学性: 科学性原则要求指标体系的构建应当建立在科学、客观、真实、有效的基础之上, 并进一步明确指标要素的相关涵义。在构建指标体系时, 应当结合本文研究对象选取出具有科学依据的测算指标, 同时还应当规避指标之间的交叉性, 从而获得更加准确的结果, 为本文后续的空间特征分析、影响因素分析提供合理的数据支撑。

(2) 典型性: 典型性原则要求在指标选取上, 应当采取较为成熟的理论指标, 在选取测算指标时, 应当选取工业能源效率的典型指标要素, 涵盖工业领域的经济、资源、人员等多方面要素, 避免选择无价值的指标要素, 保证评价体系

的客观与合理。

(3) 可得性：可得性原则要求在构建指标体系时，应当充分考虑到指标来源的有效性和可获得性，也应当确保测算指标的数据真实有效，尽可能使用权威部门的数据，各个评价指标应当采用相应的计算方法，保证数据尽可能地规范与标准。

3.3.2 指标选取与数据说明

本文以 2009-2020 年长江经济带 11 个省份为研究对象，明确了工业能源效率测度所需的投入与产出指标，但由于工业经济发展过程中能源消耗也会对社会和环境产生负面影响，因而本文将进一步细化产出指标。针对数据中出现的缺失值，本文借助 Stata16 软件利用插值法进行处理。具体指标如表 3.1 所示。

表 3.1 工业能源效率测度指标

指标	类别	指标内容	单位	数据来源	指标来源
投入指标	劳动力投入	规模以上工业企业从业人员的年平均人数	万人	《中国工业经济统计年鉴》	Guo 和 Yuan (2020) [84] 曹建飞和韩延玲 (2022) [4]
	资本投入	规模以上工业固定资产投资净值	亿元	《中国统计年鉴》 《中国工业经济统计年鉴》	Chen 等 (2022) [85] 许光清等 (2020) [86]
	能源投入	规模以上工业能源消费总量	万吨标准煤	各地区统计年鉴	孙焱林等 (2016) [87] 曹建飞等 (2016) [88]
产出指标	期望产出	规模以上工业总产值	亿元	《中国统计年鉴》 各地区统计年鉴	陈宇峰等 (2021)
	非期望产出	工业二氧化碳排放量	万吨	《中国能源统计年鉴》 地区统计年鉴	赵艳敏和董会忠 (2022) [2]
		工业二氧化硫排放量	万吨		
		工业废水排放量	万吨		
		一般工业固体废弃物	万吨		Amjadi 等 (2022) [1]

上述指标中, 资本投入指标采用规模以上工业固定资产投资原值减去累计折旧后得到的固定资产投资净值作为资本投入的代理变量, 并以 2008 年为基期的固定资产投资价格指数对数据作平减处理, 用以消除价格因素的影响; 期望产出指标将各地区规模以上工业总产值作为产出指标, 并以 2008 年为基期的工业生产者出厂价格指数对数据进行平减处理。

针对非期望产出指标, 本文选择工业行业在生产经营过程中产生的污染物排放量, 如工业二氧化碳、工业二氧化硫、工业废水和一般工业固体废弃物等四种污染物排放量 (单位为万吨)。为避免由于非期望产出指标过多造成效率估算不准确以及消除不同污染物计量上的差异, 本文参考石华平和易敏利 (2019)^[89]研究成果, 将四种污染物指标作为工业环境污染综合指数指标, 使用熵权法进行测算, 并将其作为超效率 SBM 模型中非期望产出的指标。其中, 熵权法是通过综合考虑各指标所提供信息及变化程度, 从而确定指标权重并计算出综合指标, 以此反映整体特征。通过构造原始数据矩阵 $X = (a_{ij})_{n \times m}$ 计算各数据所占比重, 并进行标准化处理, 再计算每个指标的熵值 e 和差异系数 g (结果如表 3.2), 最后计算各污染物排放量指标权重 W 及工业环境污染综合指数 λ 。具体公式如下:

$$p_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum a_{ij}} \quad (3.4)$$

$$e_j = -\frac{1}{\ln n} \sum p_{ij} \times \ln p_{ij}$$

$$g_j = 1 - e_j$$

$$W_j = \frac{g_j}{\sum g_j}$$

$$\lambda_j = \sum W_j \times p_{ij}$$

表 3.2 各污染物熵值 e 和变异系数 g

	工业 CO ₂ 排放量 (万吨)	工业 SO ₂ 排放量 (万吨)	工业废水排放量 (万吨)	一般工业固体废弃物 (万吨)
熵值	0.941915984	0.951422898	0.929910818	0.943473895
差异系数	0.058084016	0.048577102	0.070089182	0.056526105

由于二氧化碳排放量在我国并没有官方数据，所以本文参考李健和刘恋（2019）^[90]研究成果，使用 IPCC 法对二氧化碳排放量进行估算，本文选择了柴油、原煤、汽油、原油、煤油、焦炭、燃料油和天然气八种能源的工业消耗量进行碳排放测算，测算公式如下：

$$C_{s,j} = \sum_{i=1}^8 E_{i,s,j} \times CF_i \times CE_i \quad (3.5)$$

其中 $C_{s,j}$ 表示第 s 个省份第 j 年能源消耗所造成的 CO_2 排放量； $E_{i,s,j}$ 表示第 i 种能源在第 s 个省份第 j 年消费量； CF_i 、 CE_i 分别表示第 i 类能源标准煤的折算系数及其碳排放系数，各种能源折标准煤参考系数来源于《中国能源统计年鉴》，碳折标准煤参考系数来源于 IPCC 法。具体转换系数如表 3.3 所示。

表 3.3 各类能源转换系数表

能源名称	能源折算标准煤系数	二氧化碳折算系数
柴油	1.4571 tec/t	3.0959kg-co2/kg
原煤	0.7143 tec/t	1.9003kg-co2/kg
汽油	1.4714 tec/t	2.9251kg-co2/kg
原油	1.4286 tec/t	3.0202kg-co2/kg
煤油	1.4714 tec/t	3.0179kg-co2/kg
焦炭	0.9714 tec/t	2.8604kg-co2/kg
燃料油	1.4286 tec/t	3.1705kg-co2/kg
天然气	13.3 tec/10 ⁴ m ³	2.1622kg-co2/kg

3.4 长江经济带工业能源效率评价

3.4.1 长江经济带静态工业能源效率评价

（1）长江经济带省际静态工业能源效率评价

长江经济带作为我国经济发展的重要战略支撑区域，具备较强的经济活力，经济的快速发展造成了沿线工业产业的能源需求越来越大，同时也加剧了生态环境的污染。为了了解长江经济带各省市工业能源效率情况，本文以 2009-2020 年长江经济带各省际投入、产出数据为数据样本，利用超效率 SBM 模型进行测

算，代入 MaxDEA 软件中，最终得到了考虑非期望产出下的长江经济带工业能源效率，具体结果表 3.4 和表 3.5 所示。根据表 3.4 和表 3.5 的测算结果，可以绘制出长江经济带各省市工业能源效率三维图，如图 3.6 所示。

表 3.4 2009-2014 年长江经济带省际工业能源效率测算值

省份	2009	2010	2011	2012	2013	2014
重庆	0.670	0.621	0.695	0.680	0.725	0.772
四川	0.613	0.532	0.546	0.508	0.536	0.554
贵州	0.386	0.342	0.369	0.391	0.443	0.467
云南	0.499	0.425	0.425	0.438	0.450	0.437
江西	0.730	0.675	0.659	0.711	0.758	0.801
湖南	0.704	0.664	0.712	0.750	0.779	0.816
湖北	0.525	0.559	0.604	0.657	0.673	0.698
上海	1.154	1.225	1.212	1.134	1.089	1.083
江苏	1.080	1.018	1.000	1.001	0.924	0.928
浙江	0.755	0.693	0.686	0.711	0.719	0.719
安徽	0.645	0.637	0.685	0.700	0.734	0.764
均值	0.706	0.672	0.690	0.698	0.712	0.731

表 3.5 2015-2020 年长江经济带省际工业能源效率测算值

省份	2015	2016	2017	2018	2019	2020
重庆	0.813	0.869	0.691	0.661	0.710	0.679
四川	0.586	0.602	0.562	0.569	0.585	0.544
贵州	0.531	0.550	0.457	0.423	0.446	0.414
云南	0.441	0.457	0.437	0.482	0.508	0.481
江西	0.817	0.837	0.772	0.784	0.850	0.815
湖南	1.010	1.019	0.806	0.757	0.758	0.701
湖北	0.746	0.780	0.642	0.615	0.642	0.589
上海	1.053	1.187	1.460	1.816	1.728	1.842
江苏	1.015	1.024	0.907	0.907	1.024	0.870
浙江	0.712	0.714	0.598	0.587	0.617	0.577
安徽	0.816	0.871	0.766	0.753	0.768	0.673
均值	0.776	0.810	0.736	0.759	0.785	0.744

由上表对 2009-2020 年长江经济带静态工业能源效率进行分析，可得出以下结论：

第一、长江经济带不同省份之间由于经济发展水平及技术创新能力不同，导致各省市工业能源效率存在较大差距。从省份来看，在 2009-2020 年间上海和江

苏基本上处于工业能源效率前沿面，效率值大于 1；其次是湖南、重庆、浙江、江西、安徽、湖北等省份，效率值在 0.6-0.85 之间，其中湖南的工业能源效率也曾在 2015、2016 年位于前沿面；而四川省、贵州省、云南省的能源效率值基本在 0.6 以下，远低于长江经济带整体平均水平。从数据结果来看，经济发展较好的地区在能源利用方面做的较好，比如上海和江苏，但像经济发展比较一般的地区如贵州、云南等省份在能源利用方面更弱，即各省的能源效率值大小与当地的经济发展水平存在一定的因果关系。

就上海和江苏两地来说。上海作为推动长江经济带发展的关键地区，自 2009 年发布《节约能源条例》，对电力、钢铁、装备制造业和化工等高耗能产业进行节能技术改造和优化能源结构，优先发展先进制造业、支持低耗能和高附加值产业，严格把控能源消耗总量，使得工业能源消费总量下降、工业总产值上升，因而上海市工业能源效率高。江苏作为长江经济带开放水平最高、经济最活跃的省份之一，十二五、十三五阶段江苏省处于工业化转型时期，苏北苏中工业化进程加快，资金与人才储备较为充盈，且研发资金投入经费在长江经济带稳居第一，因此在推动主导产业和传统产业发展时能够促进工业发展动力转向创新驱动，从而有效提高资源利用效率。

就湖南、重庆、四川三地来说。湖南作为制造强省，但在国内、国际市场环境的影响下，湖南省工业绿色转型发展的动力不足，绿色园区、绿色工厂等的建设比例较低，对传统能源的依赖性较强，造成湖南省工业能源效率不高。但在 2015 年和 2016 年，湖南省曾达到生产前沿面，这可能是因为 2014 年湖南省施行了《湖南省 2014-2015 年节能减排低碳发展行动方案》，加快发展低能耗、低排放产业，组织节能环保和资源循环利用的产业化工程，从而提高了湖南省工业能源效率。重庆市作为西部大开发战略的重要示范区，经济基础较好，由于成渝城市群建设的推动，促进了重庆市工业能源效率提升。四川省由于区位条件存在能源优势，但由于能源大多为不可再生能源，在使用时会产生较多环境污染，能源损耗较多，因此工业能源效率处于低位。

第二、长江经济带部分省份工业能源效率出现波动下降的情况，区域内部差异逐渐增大，两极分化明显。具体来说，从 2016-2020 年部分省份出现工业能源效率波动下降的情况来看，这可能是由于 2016 年《纲要》文件中明确了生态优先、绿色发展等战略目标，要求各省份重视生态环境，但由于中游地区集中了大量重工业企业，产业转型任务较为艰巨，在产业结构调整的同时一定程度上冲击

了工业行业的经济效益，并且传统不可再生能源依赖性强致使传统能源消耗、环境污染问题仍旧较为严峻，而上游地区由于工业化程度较弱，在产业结构调整较为缓慢，新能源、清洁能源的需求低于传统不可再生能源，同时也受限于本地区技术水平，因此可能造成上中游地区的部分省份出现工业能源效率值从2016年起波动下降。

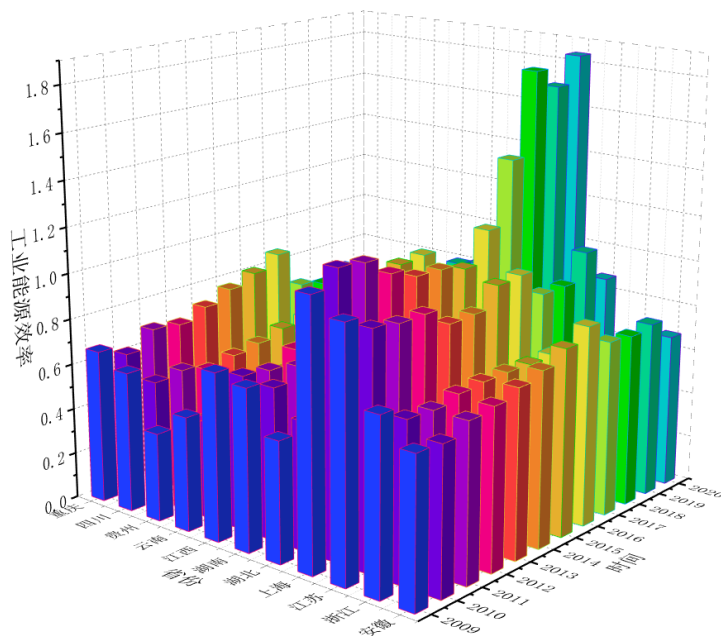


图 3.6 2009-2020 年长江经济带各省市工业能源效率三维图

(2) 长江经济带区域静态工业能源效率评价

根据前文所说的关于长江经济带上中下游的行政区域划分，位于同一地区的省份区位优势和经济特征类似，有助于分析不同区域的工业能源效率。为了进一步了解长江经济带不同地区之间的工业能源效率情况，本文对工业能源效率的测算结果进行分地区统计分析，并绘制长江经济带各区域工业能源效率趋势图。如表 3.6 和图 3.7 所示。

从整体来看。长江经济带整体工业能源效率范围在 0.6-0.81 之间，存在一定的节能降耗空间。具体来说，长江经济带整体效率值从 2009 年的 0.706 小幅度上升至 2020 年的 0.744，但整体效率值属于中等水平。2009-2016 年呈现波动上升趋势，该上升趋势的形成原因可能是“十二五”提出要创新驱动、节能减排，坚持绿色发展，这为长江经济带工业能源效率的提升带来了良好的契机，加大了政府对工业绿色发展的投资力度；2016-2020 年长江经济带整体工业能源效率呈

现小幅度下降趋势，这可能是由于“十三五”及《纲要》等战略的施行推动了长江经济带能源结构的调整，并伴随着其他的外部市场因素对长江经济带工业能源效率产生了不同程度的冲击。

从区域来看。长江经济带下游地区的平均值最高为 0.929，远高于长江经济带的省际平均水平；中游地区的平均值为 0.734，基本与省际平均水平持平；而上游地区的平均值最低，仅为 0.542，低于省际平均水平 0.735。从图 3.7 能直观看出，长江经济带下游工业能源效率呈现波动上升的趋势，而上游和中游效率值则呈现较为平稳的态势，波动变化不大。

表 3.6 2009-2020 年长江经济带区域工业能源效率测算值

年份	省际平均	上游均值	中游均值	下游均值
2009	0.706	0.542	0.653	0.908
2010	0.672	0.480	0.633	0.893
2011	0.690	0.509	0.658	0.896
2012	0.698	0.504	0.706	0.887
2013	0.712	0.539	0.737	0.867
2014	0.731	0.558	0.772	0.873
2015	0.776	0.593	0.858	0.899
2016	0.810	0.620	0.879	0.949
2017	0.736	0.537	0.740	0.933
2018	0.759	0.534	0.719	1.016
2019	0.785	0.562	0.750	1.034
2020	0.744	0.529	0.702	0.990
均值	0.735	0.542	0.734	0.929

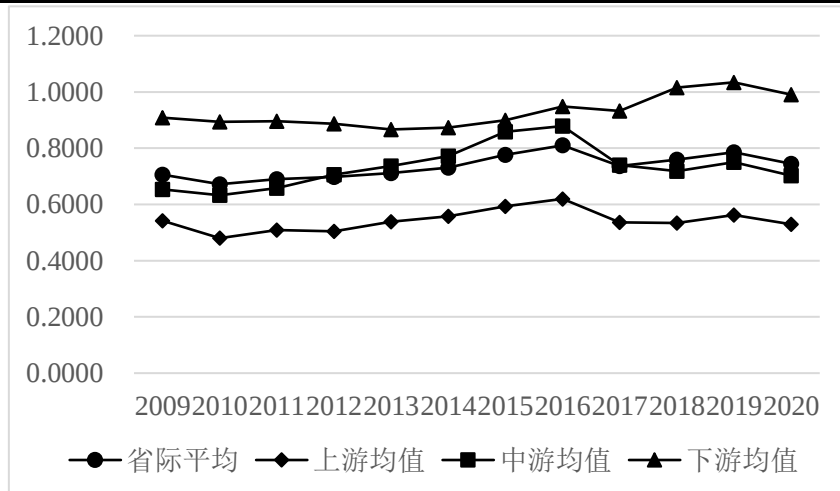


图 3.7 2009-2020 年长江经济带各区域工业能源效率趋势图

综合表 3.6 和图 3.7, 长江经济带三大区域呈现不同的效率趋势可能以下几点原因:

第一、上游地区能源效率值从 2009 年的 0.542 下降至 2020 年的 0.529, 整体均值为 0.542, 属于低效率地区。上游地区呈现波动下降的原因可能是: 上游地区如云南、贵州省份地理位置较差, 重工业产业转型缓慢, 高新技术企业相对较少, 技术较为落后、经济欠发达, 需要依赖能源来发展经济, 使得粗放型发展模式转变缓慢, 因此工业能源效率处于较低位置。

第二、中游地区能源效率值从 2009 年的 0.653 上升至 2020 年的 0.702, 大体呈现先上升后下降的趋势, 整体均值为 0.734。中游地区呈现波动上升的原因可能是: 中游地区的部分省份产业结构也开始转型, 部分以高能耗、高污染的大中型重工业为主导产业的城市通过调整传统能源消费模式, 以促进工业能源效率的提高, 但由于中游地区的部分城市是工业制造、能源供应的重点地区, 长期依赖高能耗资源, 造成环境污染严重, 因此中游地区的能源效率仍旧有较大的提升空间, 处于下游地区与上游地区的效率值之间。

第三、下游地区能源效率值从 2009 年的 0.908 上升至 2020 年的 0.99, 大体上呈现先上升后下降再上升的趋势, 整体均值为 0.929。下游地区出现波动上升的原因可能是: 下游地区包括上海和江苏这两个长期位于效率前沿面的省份, 产业结构逐渐向低污染、低能耗转型, 保留了大量高端制造业与高新技术产业, 经济转型之后较早进入后工业化阶段, 生态环境治理效果较为显著, 因此下游地区的效率值远高于省际平均水平。但由于浙江省在传统能源生产模式下属于能源消耗大省, 但在“十一五”和“十二五”期间, 能源短缺曾是浙江省经济发展的重要制约因素, 因此能源供需缺口制约了浙江省工业能源效率的提升。而安徽省从一个农业大省向工业强省转变, 工业能源需求逐渐增大, 高耗能、高排放的工业产业比重增加, 能源结构的不合理造成安徽省工业能源效率不高。综合安徽省和浙江省情况, 可能会造成下游地区工业能源效率的波动变化。

(3) 长江经济带工业能源效率时序演变

为了进一步考察长江经济带工业能源效率在一定时间段内总体演变情况, 本文采用核密度估计法绘制了 2009 年、2013 年、2017 年和 2020 年长江经济带 11 个省市工业能源效率演变规律趋势图, 如图 3.8 所示。通过观察核密度图波峰的分布形态, 能够清晰地反映工业能源效率的密集性和差异性, 波峰的数量则可以反映是否存在极化特征, 核密度曲线的分布延展性能够说明省份之间的差异

性，拖尾越长，表明省份之间差异越大。

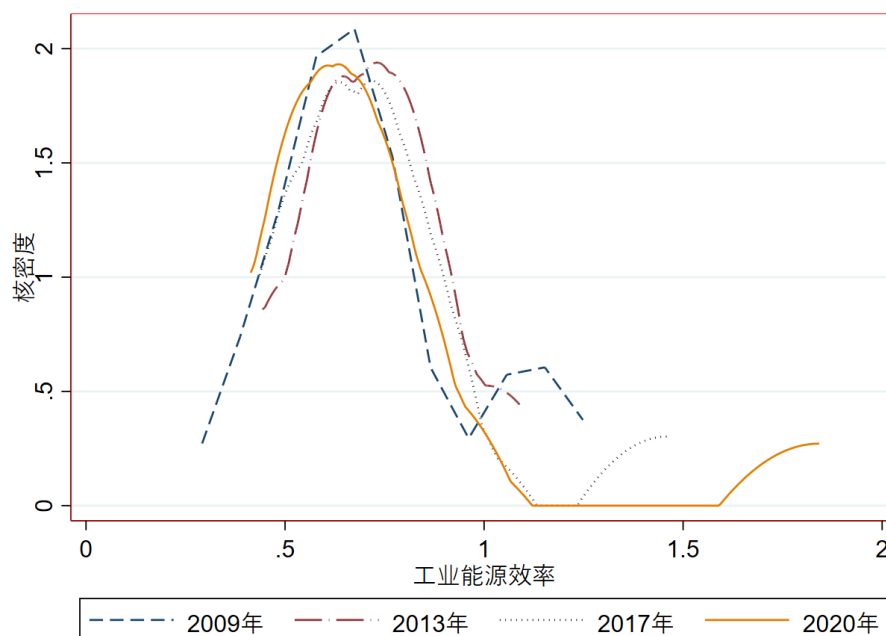


图 3.8 2009 年、2013 年、2017 年和 2020 年长江经济带工业能源效率核密度曲线

根据图 3.8 对长江经济带各省市 2009-2020 年工业能源效率进行核密度分析，可以发现以下结论。①分布位置：随时间变化，主峰位置呈现先右偏再左偏的趋势，但 2020 年的核密度曲线位置相较于 2009 年波动不大，无明显左移趋势，且分布范围呈现右偏趋势，并且曲线的起始点随时间的推移而逐步向内抬升，这表明在 2009-2020 年长江经济带部分省份的工业能源效率水平得到了有效提升，同时长江经济带内部存在低工业能源效率省份向高效率省份的“追赶效应”。②分布形态：2020 年曲线主峰峰值相较于 2009 年有所降低，曲线主峰宽度明显扩大，即 2020 年主峰分布不密集且峰值降低，这表明长江经济带各省市在提升工业能源效率的同时，区域内的离散程度呈增大趋势。③分布延展性：核密度曲线存在显著右拖尾现象，并且拖尾长度逐年拉长，这表明部分省份的工业能源效率水平较高，并高于平均水平，同时长江经济带区域内的空间差异增大，侧面反映各省份在工业能源效率的提升中存在不合理的现象，节能减排的潜力较大。④极化特征：长江经济带总体呈现较为稳定的双峰特征，表明长江经济带内部存在显著的两极分化现象。

3.4.2 长江经济带动态工业能源效率评价

(1) 长江经济带省际动态工业能源效率评价

本节在超效率 SBM 模型的测算结果基础上,采用了 GML 指数模型对 2009-2020 年长江经济带工业能源效率进行动态分解。GML 指数将工业能源效率分解为技术进步变化指数 (TECH) 和技术效率变化指数 (EFCH), 技术进步变化指数 (TECH) 反映在生产经营活动中技术进步速度与创新潜能的动态效率指数, 包括生产技术进步、服务技术进步及管理技术进步等方面, 通过技术创新与改进实现以最小资源投入获得最大产出和最少污染; 技术效率变化指数 (EFCH) 反映了每个 DMU 资源配置能力及使用效率等方面的综合评价, 在现有技术水平下优化生产要素配置, 从而提高各资源要素的利用率, 使得现有技术水平达到最佳水平。

技术效率变化指数可以进一步分解为纯技术效率指数和规模效率指数, 纯技术效率 (PECH) 主要反映企业受管理制度和技术创新水平的影响, 各生产要素是否发挥了其最大化生产潜力, 避免了要素浪费; 规模效率 (SECH) 主要描述在制度和管理水平不变的情况下是否选用了最优规模进行生产运营, 反映了生产经营过程中实际生产规模与最优生产规模的差距, 由此可以分析纯技术效率指数与规模效率指数对技术效率变化指数的影响。

为了进一步探究各省工业能源效率在研究时期内的动态变化情况, 深入探索影响工业能源效率的内生因素变动趋势, 本节将 11 个省市的投入-产出数据应用于超效率 SBM-GML 模型中, 运用 MaxDEA 软件中, 测算得到长江经济带各省份动态工业能源效率变化及分解指数, 如表 3.7 所示。

表 3.7 2009-2020 年长江经济带省域平均 GML 指数及其分解指数

省份	GML	TECH 技术进步	EFCH 技术效率	PECH 纯技术效率	SECH 规模效率
重庆	1.059	1.055	1.005	0.989	1.025
四川	1.046	1.058	0.991	0.986	1.005
贵州	1.070	1.061	1.011	1.016	0.997
云南	1.058	1.062	0.999	0.964	1.046
江西	1.066	1.056	1.012	1.003	1.017
湖南	1.057	1.058	1.005	0.997	1.007
湖北	1.073	1.059	1.014	1.004	1.009

续表 3.7 2009-2020 年长江经济带省域平均 GML 指数及其分解指数

省份	GML	TECH 技术进步	EFCH 技术效率	PECH 纯技术效率	SECH 规模效率
上海	1.064	1.023	1.048	0.983	1.070
江苏	1.046	1.066	0.984	1.020	0.967
浙江	1.029	1.055	0.978	0.984	0.993
安徽	1.063	1.057	1.006	0.993	1.013
长江经济带	1.057	1.055	1.005	0.994	1.014

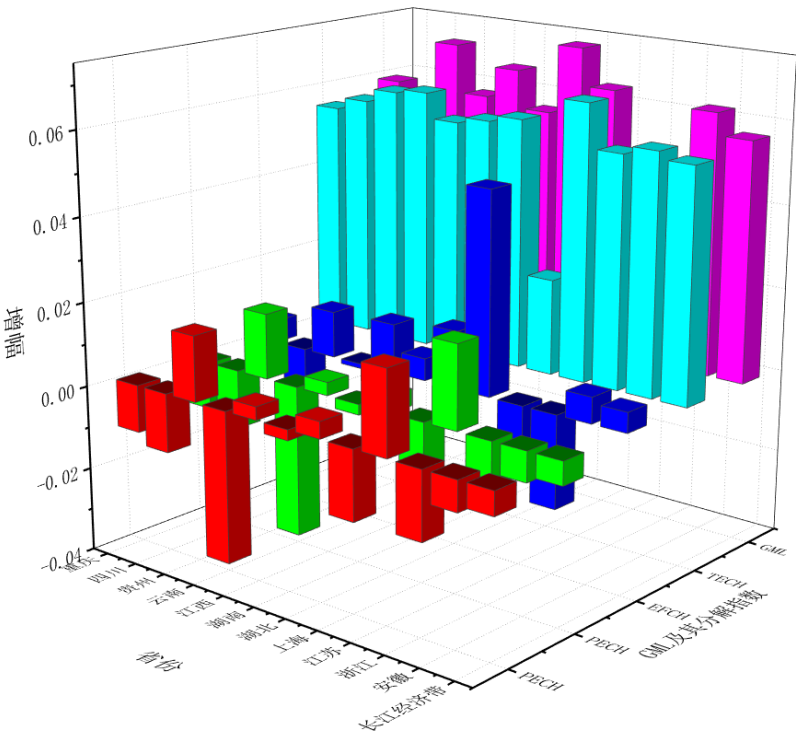


图 3.9 2009-2020 年长江经济带省域 GML 指数及其分解指数增幅三维图

根据表 3.7 的测算结果，绘制出长江经济带省域 GML 指数及其分解指数增幅三维图，如图 3.9 所示。由表 3.7 和图 3.9 可看出，长江经济带各省市 GML 平均值均大于 1，意味着在 2009-2020 年间每个省份的工业能源效率在产业结构转移之后都有一定的提升，但由于各省份的经济发展水平与工业化程度不同，所以能源效率变化存在差异性。由此可见，长江经济带的工业能源效率发展态势较好，一直处于稳步改善状态。其中涨幅较大的几个省份为湖北（1.073）、贵州（1.070）、江西（1.066）、上海（1.064）、安徽（1.063），上涨幅度分别为 7.3%、7%、6.6%、6.4%、6.3%，其中上海属于我国三大城市群，对外开放程度较高，具有优越的经

济发展条件,有利于吸引高新技术产业落地,促进技术进步,因而工业能源效率得以提升较快;而其他几个省份经济发展水平较为一般,工业化集聚程度较低,工业能源效率起点也较低,因此更容易出现增长趋势;另一方面,“长江经济带建设战略”的推动推动了区域协调发展、能源要素配置优化,使得沿江各省份工业能源效率提升得以实现。

从各省 GML 分解结果来看。长江经济带 11 个省市的技术进步变化指数平均值均大于 1,表明 2009-2020 年各省份的工业技术水平稳步上升,而技术效率指数平均值各省份存在不同程度的上升或下降的情况,其中技术效率很大程度上是制约工业能源效率发展的重点因素,技术进步对工业能源效率的提升起到了关键影响。综合来看,重庆、贵州、江西、湖南、湖北、上海、安徽七省是技术效率与技术进步共同促进了工业能源效率发展,说明各省正积极转变经济发展模式、持续调整产业结构,取得了显著成效,促进了工业能源效率的稳步增长。

(2) 长江经济带区域动态工业能源效率评价

由效率测算结果可知,长江经济带整体工业能源效率水平不高,存在较大的提升空间,因此有必要把握动态工业能源效率总体变化规律。因此,本节将进一步测算长江经济带动态工业能源效率总体变化及其分解指数,如下表 3.8 所示。

表 3.8 2009-2020 年长江经济带总体 GML 指数及其分解指数

年份	GML	TECH 技术进步	EFCH 技术效率	PECH 纯技术效率	SECH 规模效率
2009-2010	1.110	1.178	0.943	0.962	0.998
2010-2011	1.157	1.118	1.035	0.988	1.052
2011-2012	1.034	1.014	1.020	1.018	1.004
2012-2013	1.084	1.052	1.032	1.001	1.033
2013-2014	1.059	1.031	1.028	1.008	1.021
2014-2015	1.063	1.001	1.064	1.027	1.039
2015-2016	1.065	1.024	1.041	0.998	1.045
2016-2017	0.974	1.092	0.898	0.949	0.951
2017-2018	1.021	1.014	1.011	0.993	1.018
2018-2019	1.052	1.007	1.044	1.022	1.024
2019-2020	1.011	1.079	0.936	0.972	0.963
上游均值	1.058	1.059	1.002	0.988	1.018
中游均值	1.065	1.058	1.010	1.002	1.011
下游均值	1.051	1.050	1.004	0.995	1.011
长江均值	1.057	1.055	1.005	0.994	1.014

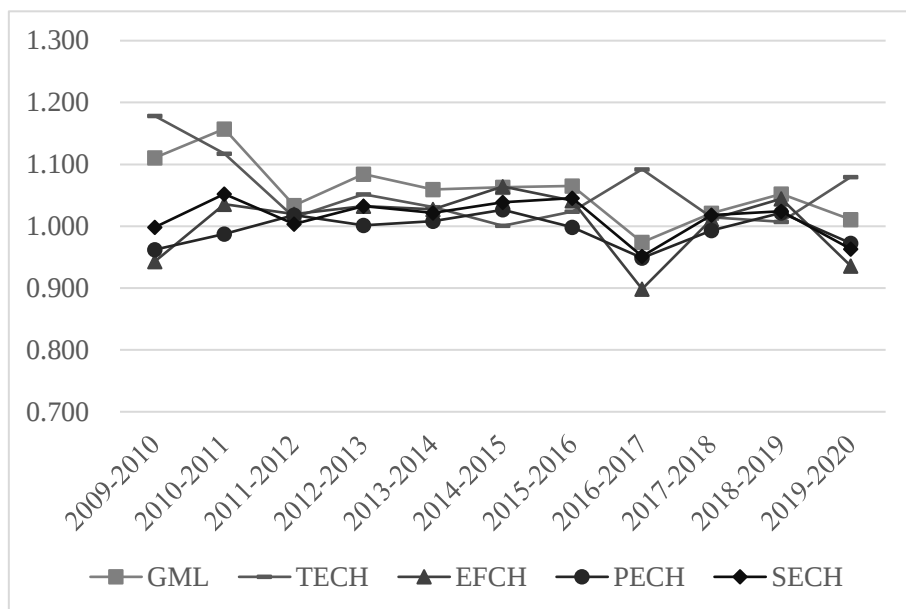


图 3.10 长江经济带总体 GML 指数及其分解指数趋势图

根据表 3.8 的测算结果，绘制出长江经济带总体 GML 指数及其分解指数趋势图，如图 3.10 所示。从表 3.8 和图 3.10 可以看出，在 2009-2020 年间长江经济带总体 GML 平均值为 1.057，大于 1，说明工业能源效率在这十二年间有一定的提升，平均提高了 5.7%，侧面说明国家及各地政府出台的相关政策与措施对工业能源效率起到了一定的提升作用；从 GML 分解结果来看，技术进步指数 TECH 和技术效率变动指数 EFCH 的年均值分别为 1.055 和 1.005，表明长江经济带工业能源效率提高了 5.7%，是技术进步提高了 5.5% 和技术效率提高了 0.5% 共同作用的结果，两者共同对工业能源效率产生正向促进作用。进一步将技术效率变动指数分解可得，规模效率年均值为 1.014，平均提高了 1.4%；而纯技术效率变动指数年均值为 0.994，平均下降了 0.6%，由于规模效率的增长快于纯技术效率的下降，进而推动了技术效率变动指数的提升，这表明技术效率变动指数的提高，主要源于规模效率的提高，这可能是因为工业企业缺乏先进、前沿的管理经验，或存在技术壁垒等原因导致各生产要素无法达到最优化，但在现有管理水平下，通过产业结构调整使得工业企业集群化程度提高，实际生产规模与最佳生产规模的差异程度明显缩小，使得生产规模效率进一步提升。

值得注意的是，在 2016-2017 年间出现了 GML 指数下降的现象，年平均值下降了 2.6%。技术进步指数上升了 9.2%，技术效率指数下降了 10.2%，进一步细分发现，纯技术效率与规模效率分别下降了 5.1%、4.9%，由此可知技术效率

指数的下降由纯技术效率与规模效率的共同下降导致，虽然生产技术的改进对工业能源效率起到了一定的促进作用，但技术效率指数的下降抑制了工业能源效率的提升。

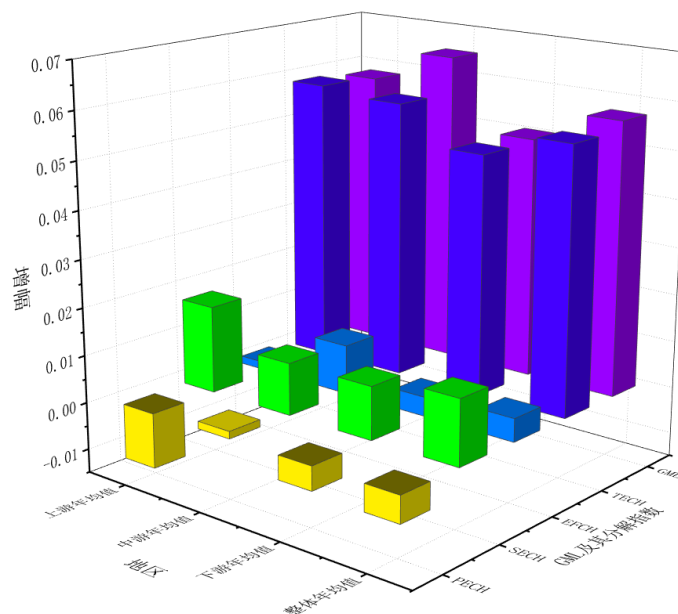


图 3.11 2009-2020 年长江经济带各区域 GML 指数及其分解指数增幅三维图

根据表 3.8 的测算结果，计算出长江经济带各区域 GML 指数及其分解指数的增幅，并绘制三维图，如图 3.11 所示。由表 3.8 和图 3.11 可知，从区域层面来看，2009-2020 年间中游地区的 GML 指数最高为 1.65，超过了长江经济带年平均水平 1.057；其次是上游地区的 GML 指数为 1.58，基本与长江经济带年平均水平持平；最后是下游地区的 GML 指数为 1.51，低于长江经济带年平均水平。这表明中游地区的工业能源效率增长率最高，上游地区次之，下游地区最低。从 GML 分解指数来看，上中下游地区的 TECH 和 EFCH 均大于 1，这就说明工业技术水平的进步与技术效率的提高共同促进了长江经济带各区域的工业能源效率的增长。而上游和下游的 PECH 均小于 1，这说明企业各要素配置与利用效率下降抑制了技术效率的提高，但由于规模效率的促进作用抵消了纯技术效率降低的阻碍作用，使得上游和下游技术效率的提升。侧面说明，当引进高新技术产业、优化要素资源配置会对中游地区和上游地区的能源效率有大幅提升；下游地区可能由于产业结构调整较早、技术创新速度快，使得该地区能源效率的增速低于上游和中游地区。综上所述，技术进步 TECH 对长江经济带各区域工业能源效率的增

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/206240023203010035>