

引用格式:油建盛,董会忠,蒋兵,等.长江经济带能源生态效率及驱动因子时空非平稳性[J].资源科学,2022,44(11):2207-2221.[You J S, Dong H Z, Jiang B, et al. Spatiotemporal non-stationarity of energy ecological efficiency and its driving factors in the Yangtze River Economic Belt[J]. Resources Science, 2022, 44(11): 2207-2221.] DOI: 10.18402/resci.2022.11.04

# 长江经济带能源生态效率及驱动因子 时空非平稳性

油建盛<sup>1</sup>,董会忠<sup>1</sup>,蒋兵<sup>1</sup>,朱悦<sup>2</sup>,陶建格<sup>3</sup>

(1. 山东理工大学管理学院,淄博 255000;2. 南京大学商学院,南京 210093;3. 中原工学院系统与工业工程中心,郑州 451191)

**摘要:**加快绿色转型已成为长江经济带实现经济发展量质齐升的关键锚点。本文运用超效率SBM模型、探索性空间数据分析(ESDA)和时空地理加权回归模型(GTWR),深入探讨长江经济带108座城市2011—2020年能源生态效率演化特征、空间纹理和时空非平稳性。研究表明:①长江经济带能源生态效率发展趋势整体向好,先后经历“振荡期”与“提升期”两个阶段,并呈现自下游到上游再到中游依次递减的“梯度发展”特征;②研究区能源生态效率具有显著的空间非均衡特征,存在明显的高低分区,高值区主要沿江分布,低值区由西部向中部地区“扩散”;③研究区能源生态效率空间关联性明显,集聚效应从研究期初的H-H和L-L集聚向H-H和L-H集聚转变;④GTWR检验结果表明,政府干预在研究初期表现为促进,后期抑制能源生态效率提高;对外开放程度和科技投入对能源生态效率的驱动效果较好;产业结构和能源消费结构的抑制作用较严重;城镇化水平和环境规制主要表现为正向促进。提升长江经济带能源生态效率,应针上中下游地区特点分级分类施策,注重发挥不同驱动因子的作用特点,构建绿色可持续发展体系。

**关键词:**能源生态效率;超效率SBM;GTWR模型;时空非平稳性;长江经济带

DOI: 10.18402/resci.2022.11.04

## 1 引言

长江经济带作为中国经济增长最为活跃的区域,贡献了全国40%以上的GDP,同时也是生态优先发展的主战场,在畅通国际国内双循环、引领经济高质量发展进程中具有重要战略地位。工业在推动长江经济带经济发展过程中扮演了重要角色,而工业的快速发展使其对能源消费始终保持旺盛的增长需求。作为社会发展的基石,能源是统筹推进经济社会高质量发展和生态文明建设的重要交叉点,但长江经济带经济增长中过度依赖化石能源驱动,由此带来的产业升级滞后、生态环境破坏、要

素市场扭曲等一系列问题,严重影响经济发展提质增效步伐。能源生态效率具有兼顾能源利用与生态建设的双重特性,通过对经济、资源和环境的综合评价,协调经济发展与资源消耗,是绿色发展目标的集中体现。因此,推动长江经济带在新时期抢抓发展机遇,积极打造绿色发展示范区,以较少的能源消耗和环境污染,寻求经济增长、社会发展、生态改善的协调统一,实现由粗放型增长向集约型发展转变具有重要的现实意义。

## 2 文献梳理

生态效率概念自Schaltegger<sup>[1]</sup>提出以来,就被广

收稿日期:2022-05-19;修订日期:2022-08-16

基金项目:国家自然科学基金项目(41771173);国家社会科学基金项目(19BJY085);河南省高校哲学社会科学创新团队建设计划资助项目(2019-CXTD-10)。

作者简介:油建盛,男,山东菏泽人,硕士生,研究方向为能源经济。E-mail: 992724805@qq.com

通讯作者:董会忠,男,山东烟台人,教授,研究方向为环境系统工程。E-mail: sdutdhz@126.com

泛用于衡量经济活动与生态效益的协调发展水平,是社会可持续发展的集中体现。随后,国际经济合作与发展组织(OECD)和世界可持续发展工商联合会(WBCSD)先后对生态效率的内涵进行了完善,虽各有侧重,但其核心依旧是以低污染、低投入实现经济效益最大化<sup>[2,3]</sup>。此后,部分学者从城市<sup>[4]</sup>、旅游<sup>[5]</sup>和工业<sup>[6]</sup>等角度,对生态效率进行了深入研究。随着工业化进程加快,化石能源过量消耗和污染排放对经济社会和生态环境产生了巨大冲击,能源效率研究也成为学术界关注的又一重点领域<sup>[7]</sup>。早期对能源效率的研究多专注于单一经济产出的能源经济效率和经济产出与环境绩效兼顾的能源环境效率,近年来部分学者将体现生态文明的多维变量,如经济增长、环境影响和社会福祉等指标纳入能源效率体系,提出能源生态效率概念。本文结合Peng<sup>[8]</sup>、油建盛<sup>[9]</sup>、周敏<sup>[10]</sup>等的研究,将能源生态效率定义为一定的能源、资本、劳动力投入水平下所带来的经济增长、社会福利和环境保护等3个维度的最优产出。定义中将环境非期望产出和社会福利要素纳入到传统能源效率评价指标体系,其效率高可反映某一区域能源利用和生态建设的可持续性<sup>[10]</sup>。现有研究主要围绕三方面展开:①能源生态效率测度。采用非参数法和参数法对能源生态效率进行测度。由于非参数法存在最优比率集合难以确定以及赋权过程中存在主观判断等问题,导致能源生态效率结果较粗糙,而参数法借助客观赋权克服了非参数法的弊端,被多数学者所采用。目前对能源生态效率的测算方法有:DEA模型、SFA模型、EBM模型以及单位环境污染经济产出<sup>[9,11,12]</sup>,其中前两种模型应用最为广泛。DEA模型摆脱了构建生产函数和无量纲处理的束缚,在进行多指标投入和产出的效率评估时可提供综合评判,但忽略了变量松弛性,且无法测算不利产出,导致测算结果偏高<sup>[13]</sup>。SFA模型应事先确定生产函数形式,且要求产出为单一变量,这与客观事实不符<sup>[14]</sup>。针对上述不足,部分学者选择超效率SBM模型测度能源生态效率<sup>[15]</sup>,既考虑了经济活动中的非期望产出,又解决了松弛变量被忽略导致的技术效率高估问题,结果更加准确。②能源生态效率研究维度。能源生态效率评价主要从行业和区域两维度展开,行业维度上,研究聚焦在物流业<sup>[16]</sup>、制造业<sup>[17]</sup>和工业<sup>[18]</sup>范

畴,研究重点是行业能源生态效率值评价及其影响因素;区域维度的研究则涉及到全国<sup>[19]</sup>、省级<sup>[20]</sup>和地级市<sup>[21]</sup>等多角度,着重探讨能源生态效率的时序特征<sup>[22]</sup>、空间演化<sup>[23]</sup>、溢出效应<sup>[9]</sup>,为全面提升能源生态效率提供支持。③能源生态效率影响因素剖析。能源生态效率主要受技术进步、产业结构、产业集聚、经济发展和开放程度等因素联动影响,技术进步对能源生态效率助推效应明显<sup>[24]</sup>;产业结构对能源生态效率的影响受其发展水平的约束进而呈现多元特征<sup>[25]</sup>;产业集聚和产业转移对能源生态效率的作用呈“U”型<sup>[26]</sup>,经济发展与外商投资则对能源生态效率存在双向影响,即抑制与促进并存<sup>[27]</sup>。

综上所述,关于能源生态效率的研究颇丰,但仍有较大探索空间:①传统模型忽略了松弛变量的影响且非期望产出选取单一,无法对能源消费过程中产生的“三废一固”以及碳排放造成的环境破坏进行综合评价;②现有研究多集中在全国、省域和地级市等范畴,对能源生态效率的时序特征或空间格局进行探讨,较少涉及城市群范畴的研究,特别是针对长江经济带城市层面能源生态效率的研究尚处空白,也未考虑不同区域间能源生态效率异质性特征;③针对长江经济带生态效率的研究多从整体视角考察,忽略了不同城市经济活跃度以及区位优势差异导致的时空非平稳性。

鉴于此,本文采用超效率SBM模型、探索性空间数据分析(ESDA)和时空地理加权回归(GTWR)探究以下问题:①长江经济带能源生态效率时序变化特征;②能源生态效率在长江经济带表现出的空间分布格局;③不同时期影响长江经济带能源生态效率的驱动力大小。上述问题的有效解答,可为长江经济带提升能源生态效率,进行生态文明建设,打造绿色发展高地提出针对性的决策建议。

### 3 研究区概况、指标体系和研究方法

#### 3.1 研究区概况

长江经济带横跨三大地理板块,东起上海、西至四川省攀枝花市,涵盖上海、重庆两大直辖市以及浙江、江苏、江西、湖北、湖南、安徽、四川、贵州和云南等九省,涉及地域面积约205万km<sup>2</sup>(图1)。截至2020年,长江经济带GDP总值达47.2万亿元,占全国生产总值的46.4%,人口超6亿人,占全国总人



2022年11月

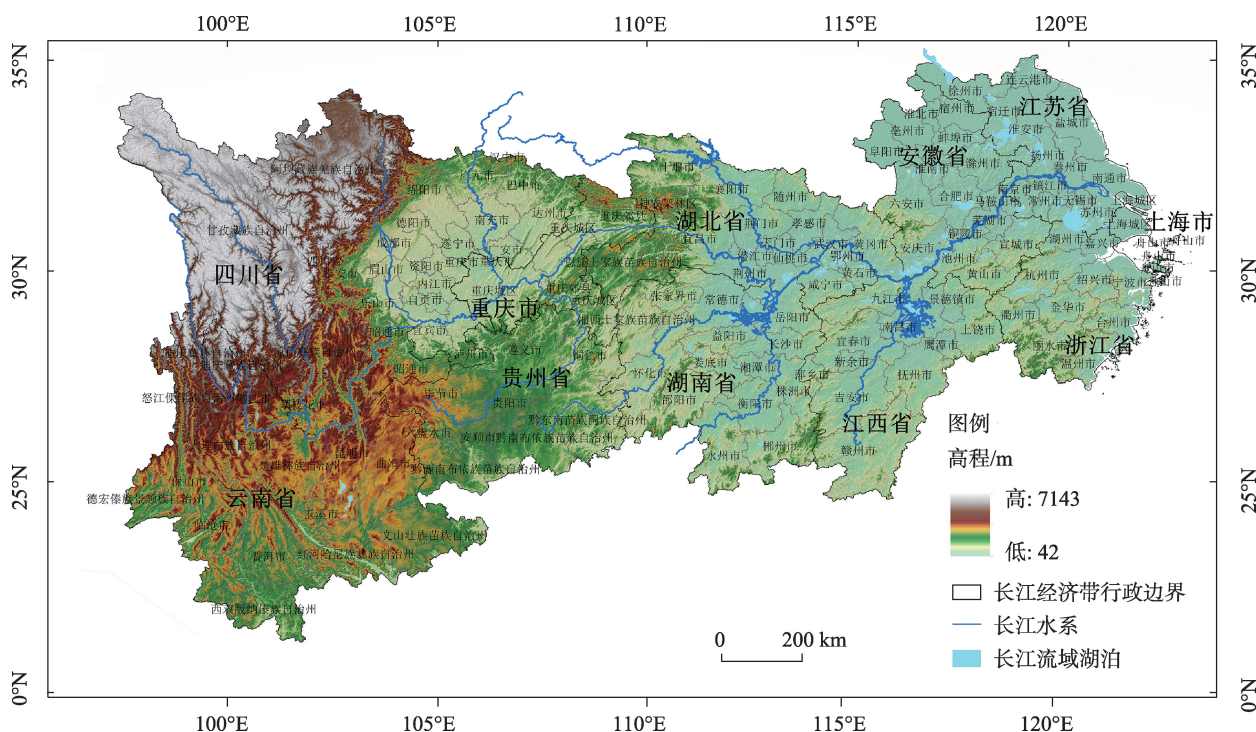


图1 研究区概况

Figure 1 Overview of the study area

注:基于自然资源部标准地图服务网站GS(2019)3266号标准地图制作,底图边界无修改。

口的43%。长江经济带拥有完备的自然生态系统和特有的生物多样性,流域内水资源和野生动植物资源丰富。长江经济带还蕴藏全国40%的淡水资源,是重要的战略水源地,湿地面积、自然保护区面积和森林覆盖率分别占全国的21.53%,39.67%和40.76%,也是中国珍惜濒危动植物集中分布区。

长江经济带工业布局、资源分布高度密集,虽有效推动经济社会快速发展,但研究期内长江经济带能源消费总量自2011年的15.402亿t提升到2020年的17.691亿t,涨幅达14.861%(图2),工业活动导致的环境污染和碳排放增多,导致生态文明建设与经济发展之间的矛盾愈发突出。当前,长江经济带正处于转型发展的关键节点,对能源生态效率发展现状及驱动因素进行系统分析,有助于打造具有全球影响力的内河经济带和生态文明示范区,对实现经济高质量发展目标具有重要意义。

### 3.2 指标体系构建与数据来源

合理构建长江经济带能源生态效率评价指标体系,需对能源生态效率内涵进行解读。其包含三重特性:①反映能源投入、经济产出、生态环境三者之间协调性;②体现环境约束下能源消耗对经济增

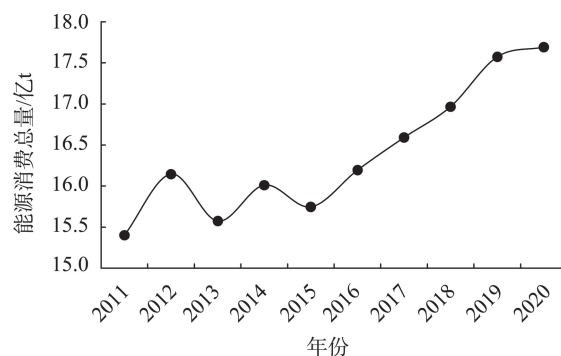


图2 2011—2020年长江经济带能源消费总量变化趋势

Figure 2 Trend of change of total energy consumption in the Yangtze River Economic Belt, 2011-2020

长、社会福利改善和生态提升的影响;③描述生态环境对经济发展及社会福利改善中能源消耗承载力。因此,在保证指标选取合理性、系统性和客观性等原则的基础上,参照相关研究<sup>[8,10]</sup>,构建长江经济带能源生态效率评价指标体系(表1)。

考虑到数据可得性,避免数据遗漏导致的测算偏差,选取长江经济带2011—2020年地级以上城市相关数据作为研究对象,由于毕节市和铜仁市数据缺失较大,最终确定研究样本为108个,并将长江经

表1 长江经济带能源生态效率指标体系

Table 1 Indicator system of energy ecological efficiency in the Yangtze River Economic Belt

目标层	准则层	指标层	单位
投入	资金投入	资本存量	亿元
	劳动力投入	年末第二产业从业人数	万人
产出	能源投入	能源消费总量	万t
	期望产出	各地区生产总值	万元
		社会消费品总额	亿元
		社会保障水平	%
		人均城市绿地面积	hm <sup>2</sup> /人
		空气质量达到及好于二级天数	天
	非期望产出	废水排放量	万t
		废气排放量	万t
		烟(粉)尘排放量	万t
		二氧化碳排放量	万t

经济带分为上、中、下游3个地区<sup>①</sup>。数据主要来源于2012—2021年国泰安数据库、《中国城市统计年鉴》、各省(市)统计年鉴、中国空气质量在线监测分析平台及统计公报,借助SPSS对数据中的异常值进行识别和剔除,缺失数据采用插值法进行补充。

### 3.3 研究方法

#### 3.3.1 考虑非期望的超效率SBM模型

相较于传统的CCR模型,Tone<sup>[28]</sup>提出的非径向、非导向性SBM模型在研究非零松弛变量以及非期望产出方面提供了可行方法,但本文在测算长江经济带能源生态效率时出现了多个决策单元为1的情况,难以甄别有效决策单元间的效率差异。因此,引入超效率SBM模型,将效率值为1的决策单元再分解,可更好地反映能源生态效率,计算公式如下<sup>[29]</sup>:

$$P = \min \frac{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left( \frac{\bar{X}}{X_{ik}} \right)}{\frac{1}{r_1 + r_2} \left( \frac{\sum_{s=1}^{r_1} \bar{y}^d}{y_{sk}^d} + \frac{\sum_{q=1}^{r_2} \bar{y}^u}{y_{sk}^u} \right)} \quad (1)$$

$$X_{ik} \geq \sum_{j=1, \neq k}^n X_{ij} \lambda_j; y_{sk}^d \leq \sum_{j=1, \neq k}^n y_{sj}^d \lambda_j; y_{sk}^u \geq \sum_{j=1, \neq k}^n y_{qj}^u \lambda_j$$

$$\bar{X} \geq X_k; \bar{y}^d \leq y_k^d; \bar{y}^u \geq y_k^u; \lambda \geq 0; i = 1, 2, \dots, m$$

$$j = 1, 2, \dots, n; s = 1, 2, \dots, r_1; q = 1, 2, \dots, r_2$$

式中: $P$ 为能源生态效率值; $m$ 、 $r_1$ 、 $r_2$ 分别表示投入、期望产出和非期望产出的数量; $k$ 表示决策单元数量; $\bar{X}$ 、 $\bar{y}^d$ 、 $\bar{y}^u$ 分别表示要素投入、期望产出与非期望产出的松弛量; $X_{ij}$ 、 $y_{sj}^d$ 、 $y_{qj}^u$ 分别表示第 $j$ 个决策单元的 $i$ 要素投入、 $S$ 要素的期望产出量、 $q$ 要素的非期望产出; $X_{ik}$ 、 $y_{sk}^d$ 、 $y_{qk}^u$ 分别表示经松弛变量改进后的第 $k$ 个决策单元中 $i$ 的最优要素投入、 $S$ 要素的期望产出量、 $q$ 要素的非期望产出; $\lambda_j$ 表示权重向量。

#### 3.3.2 探索性空间数据分析

探索性空间数据分析(ESDA)主要包含两种工具,涉及全局和局部两个方面,第一种是全局Moran's  $I$ 指数,对研究区域内是否存在空间相关性进行识别,反映某一地理单元与邻近地区属性值的相关程度,常用于研究区域整体的地理事物分布,具体如下:

$$\text{Moran's } I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (Y_i - \bar{Y})(Y_j - \bar{Y})}{S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}} \quad (2)$$

式中: $n$ 为城市数量; $w_{ij}$ 为研究城市 $i$ 和城市 $j$ 的空间邻接矩阵; $Y_i$ 和 $Y_j$ 分别为 $i$ 地区和 $j$ 地区的观测值; $\bar{Y}$ 为所有城市能源生态效率的算术平均值; $S^2$ 表示能源生态效率的方差。Moran's  $I$ 指数取值范围为 $[-1, 1]$ , $I > 0$ 表示空间正相关, $I = 0$ 表示空间无相关性; $I < 0$ 表示空间负相关。

第二种是局部自相关,引入LISA(Local Indications of Spatial Association, LISA)统计量以衡量不同样本在空间上的局部集聚特征,具体如下:

$$LISA = \frac{Y_i - \bar{Y}}{S^2} \sum_{j=1}^n [w_{ij} (Y_j - \bar{Y})] \quad (3)$$

#### 3.3.3 时空地理加权回归模型

时空地理加权回归(GTWR)模型在传统地理加权回归模型的基础上,引入时间维度,可借助面板数据进行空间回归,为处理区域“时-空”非平稳性提供了新的工具,计算公式如下:

$$Y_i = \beta_0(\mu_i, v_i, t_i) + \sum_k \beta_k(\mu_i, v_i, t_i) g_{ik} + \varepsilon_i \quad (4)$$

式中: $Y_i$ 为样本值; $\beta_0$ 表示模型中的常数项; $\mu_i$ 、 $v_i$ 分别表示第 $i$ 个样本点的经度和纬度, $t_i$ 表示时间

①上游地区包括重庆、四川、贵州、云南4个省(市),中游地区包括湖北、湖南和江西3个省份,下游地区则涵盖安徽、江苏、浙江和上海4个省(市)



2022年11月

序列,因此 $(\mu_i, v_i, t_i)$ 表示第 $i$ 个样本点的时空坐标; $g_{ik}$ 表示第 $k$ 个自变量在 $i$ 点的值; $\beta_k(\mu_i, v_i, t_i)$ 则表示自变量 $k$ 在第 $i$ 个样本点的回归参数; $\varepsilon_i$ 表示模型残差。

GTWR的重点是带宽和时空权重矩阵的选择。对于时空权重矩阵而言,具体做法是为每个样本 $i$ 和自变量 $k$ 提供 $\beta_k(\mu_i, v_i, t_i)$ 的回归参数,计算公式如下:

$$\hat{\beta}(u_i, v_i, t_i) = [Z^T w(u_i, v_i, t_i) Z]^{-1} Z^T w(u_i, v_i, t_i) K \quad (5)$$

式中: $\hat{\beta}(u_i, v_i, t_i)$ 表示 $\beta_0(u_i, v_i, t_i)$ 的估计值; $Z$ 表示自变量构成的矩阵; $Z^T$ 表示矩阵的转置; $K$ 表示样本点构成的矩阵; $w(u_i, v_i, t_i)$ 为时空权重矩阵。为避免数据离散造成测算误差,选择有限高斯函数作为时空权重矩阵,即bi-square空间权函数:

$$d_{ij} = \sqrt{[(u_i + u_j)^2 + (v_i + v_j)^2 + \mu(t_i + t_j)^2]} \quad (6)$$

式中: $d_{ij}$ 表示 $i$ 点与 $j$ 点的时空距离,带宽也会影响空间权重矩阵确立,因此本文选择AIC<sub>c</sub>准则,即自适应带宽。

### 3.3.4 驱动因子选择

能源生态效率受经济、社会、生态等因素综合影响,结合驱动因子选取应遵循的全面性、系统性、层级性原则,确定政府干预、产业结构、对外开放程度、科研投入、能源消费结构、城镇化水平和环境规制为本文驱动因子。①政府干预。地方政府对能源生态效率的干预既体现在提高企业准入门槛以限制污染企业进入,也体现在通过政策支持、财政拨款促进能源生态效率提高。选取当地年末财政支出占GDP比重作为政府干预的代理变量<sup>[30]</sup>。②产业结构。工业是污染排放的主要来源,长江经济带部分地区产业结构仍存在高污染、高耗能的“双高”特征。相较于工业结构,产业结构对能源生态效率的影响作用更为明显,使用工业产业占三次产业比重衡量产业结构<sup>[31]</sup>。③对外开放程度。由于“污染天堂”和技术扩散效应存在,对外开放程度也是影响能源生态效率的重要因素。伴随长江经济带对外开放程度提高,工业企业在全球价值链中竞争压力增大,对外开放会激励企业管理模式创新,进而提高能源利用效率。参照何伟怡等<sup>[17]</sup>的研究,选取各地区实际使用外资总额衡量对外开放程

度。④科研投入。根据内生增长理论,科研投入是技术进步和科技创新的关键,并对生产效率和绿色经济表现为促进。采用研究与实验发展经费支出衡量科研投入强度<sup>[32]</sup>。⑤能源消费结构。煤炭燃烧过程中会释放大量温室气体,不仅造成空气污染,还会阻碍能源生态效率提升。同时,工业企业作为煤炭消费“第一大户”,为体现能源消费结构对长江经济带能源生态效率的影响,选取各地区规模以上工业企业煤炭消费量与能源消费总量的比值作为代理变量<sup>[18]</sup>。⑥城镇化水平。城市规模的扩张会引致能源大量消耗,进而造成生态破坏。但当城镇化水平发展到一定程度,得益于新技术的广泛应用,低碳城市的发展模式会提高能源生态效率,故采用城镇人口占总人口比重衡量城镇化水平<sup>[33]</sup>。⑦环境规制。“波特假说”认为环境规制会刺激企业创新,从而获得“创新补偿”和“先发优势”,实现能源利用和环境保护双重促进。衡量环境规制强度主要有两类,第一类采用污染投资、排污收费占产值比重衡量,另一类利用环境治理投资或环境产出指标来构建综合指数。借鉴相关研究<sup>[34]</sup>,选取第二种方法,通过计算各类污染物(烟尘、废水、二氧化硫)综合排放指数衡量环境规制强度,具体做法如下:

将单位污染产出线性标准化处理:

$$CE_{ij}^s = (CE_{ij} - \min CE_j) / (\max CE_j - \min CE_j) \quad (7)$$

式中: $CE_{ij}$ 表示第 $i$ 个城市第 $j$ 种污染物实际排放量; $\min CE_j$ 和 $\max CE_j$ 分别表示各城市单位污染排放最大值和最小值; $CE_{ij}^s$ 表示标准化后的值。

借助调整系数对不同城市污染物排放比重和污染强度进行调整,使其明确反映不同城市污染差异:

$$W_j = CE_{ij} / \overline{CE_{ij}} \quad (8)$$

式中: $W_j$ 表示调整参数; $\overline{CE_{ij}}$ 表示研究期内第 $j$ 种污染物单位排放的城市平均水平。

环境规制强度计算模型构建如下:

$$ER_i = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 W_j CE_{ij}^s \quad (9)$$

式中: $ER_i$ 表示长江经济带环境规制强度。

为避免在GTWR回归时出现伪回归,借助SPSS进行多重共线性检验,结果显示VIF均小于3,变量间不存在共线性问题,满足回归要求,驱动因子体系与检验结果见表2。

表2 长江经济带能源生态效率驱动因子描述

Table 2 Description of driving factors of energy ecological efficiency in the Yangtze River Economic Belt

变量	指标	单位	代码	VIF
政府干预	年末财政支出占GDP比重	%	gov	1.67
产业结构	工业产业占三次产业比重	%	is	1.51
对外开放程度	实际使用外资总额	万美元	fdi	2.17
科技投入	研究与试验发展经费支出	万元	r&d	2.36
能源消费结构	规模以上工业企业煤炭消费占能源消费总量比重	%	es	2.34
城镇化水平	城镇人口占总人口比重	%	urb	1.84
环境规制	各类污染物综合排放指数	—	er	1.62

4 结果与分析

4.1 能源生态效率时空演变规律分析

4.1.1 能源生态效率的时序特征

根据式(1)并基于MaxDEA对长江经济带能源生态效率进行测算,同时绘制折线图对长江经济带整体和长江上、中、下游地区效率变动进行分析(图3)。

整体来看,长江经济带能源生态效率发展态势向好,并经历了“振荡期”与“提升期”两阶段:第一阶段(2011—2015年)为“振荡期”,此阶段效率值在0.653和0.681之间分布,且出现较大振幅,由于长江经济带长期执行以经济增长为主和追求工业体系快速构建的倾斜化发展政策,导致其对能源消费始终保持着旺盛的需求,大量非期望产出对长江经济带生态保护造成较大压力,经济发展与生态建设的平衡被打破,效率曲线“失稳”现象明显。第二阶段(2016—2020年)为“提升期”,自十八大提出大力推进生态文明建设以来,更严格的环境保护制度得到施行,且各级政府积极承担生态责任,在完善环境监管、公民环保意识养成等方面出台一系列针对性措施,并施行能源消费强度和消费总量“双控”监

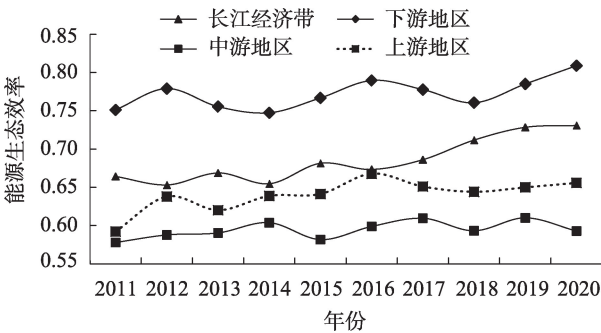


图3 2011—2020年长江经济带能源生态效率变化趋势

Figure 3 Trend of change of energy and ecological efficiency of the Yangtze River Economic Belt, 2011-2020

管,风能、核能、水电等清洁能源在此阶段得到广泛使用,减少了非期望产出,长江经济带整体能源生态效率得到提升。

分地区来看,图3显示下游地区最高,上游地区次之,中游地区最低,存在明显的“梯度发展”特征。以长三角城市群为核心的下游地区,得益于发达的经济水平,以及“一带一路”同长江经济带交汇的区位优势,在推动科技创新和绿色发展上具有充足的经济基础和技术支撑,通过加快打造创新平台,持续淘汰落后产能并广泛推广清洁能源等措施,积极响应生态建设要求,形成绿色发展新格局,能源生态效率得以健康发展;长江上游地区能源生态效率略低于长江经济带平均水平,“十二五”期间波动幅度最大,整体呈上升趋势,并于2016年达到峰值,原因在于上游地区积极探索绿色转型发展新路径,并大力发展水利水电工程,建设清洁能源主基地,分布式能源得到快速发展,依托天然气储量丰富的资源禀赋优势,在四川盆地建设“天然气大气区”,打造长江上游生态屏障;长江中游地区始终低于整体发展水平,由于过度依靠装备制造和能源供给拉动经济发展,部分城市重化工企业过多,同时作为下游地区的“污染避难所”,承接了大量落后产业转移,工业结构欠合理,经济发展过度依靠资源要素驱动,对生态环境造成巨大压力,导致能源生态效率持续低迷。此外,欠合理的产业结构致使当地自主创新能力较弱,加之地方政府间“锦标赛”竞争严重致使市场无法充分进行资源配置,生产要素和技术难以实现跨区域转移,绿色转型缓慢。

4.1.2 能源生态效率的空间分布格局

借助ArcGIS10.2中的自然间断点法对长江经济带2011年和2020年能源生态效率值空间分布进行渲染,并将其按照效率值高低划分为低效率区

2022年11月

域、较低效率区域、中等效率区域、较高效率区域以及高效率区域5个等级(图4),分别以数值区间表示。

结果显示,研究期内上海、苏州、无锡、合肥长期属于高效率城市,淮北、萍乡和鄂州长期属于低效率城市。相较于2011年,长江上游和下游地区多数城市进入高效率序列,整体来看,高效率 and 较高效率城市数量明显增多,较低和低效率城市数量显著降低。随着长江经济带上升为国家战略,绿色发展、生态优先的发展思路得到了贯彻执行,通过打造创新高地、出台人才政策和强化创新平台等政策措施,企业自主创新能力得到提高,可对传统技术进行改良和升级,能源生态效率整体发展态势较好。值得注意的是,武汉从2011年的较低效率区跃升到2020年的高效率区,表明以武汉为核心的武汉都市圈加大对绿色技术的研发投入,积极抢占绿色发展高地,推动当地能源生态效率的提高。部分地区则受限于较低的经济水平,科技发展和人才资本较差,产业结构转型升级缓慢,导致生态效率提升效果欠佳。

空间分布上,2011年长江经济带能源生态高效率 and 较高效率呈“分散型”格局,并分布在长江下游地区、湖南西部和重庆等地区。低效率和较低效率呈“集聚型”格局,主要集中在江西西部、湖北、四川和云南等地,总体呈自沿海向内陆递减的分布格局。环鄱阳湖城市群和武汉城市圈作为传统的工业生产基地,技术密集型产业占比较少,是主要的污染来源地,工业生产造成的生态破坏抵消了产业

集聚的正向效应,引致能源生态的低效。2020年,能源生态高效率区域明显增多,且呈“扩散”趋势,同时“极化”特征明显。高效率区主要分布在长三角城市群、重庆、湖南和云南等地并形成沿江分布的发展轴线;低效率集聚区局部空间稳定性较差,由西部向中部地区转移,在江西形成效率值的“塌陷”,不同城市群之间效率值差异愈发明显,有集中连片的趋势。

## 4.2 能源生态效率空间相关性分析

### 4.2.1 全局空间自相关

鉴于长江经济带能源生态效率的“区块状”特征明显,推测能源生态效率分布在空间上存在关联性。根据式(2),选用邻接矩阵并借助Moran's  $I$ 指数测算2011—2020年长江经济带能源生态效率的空间效应。结果(表3)表明,能源生态效率均满足1%和5%水平的显著性检验,可认为长江经济带能源生态效率整体存在空间关联性并正向集聚。

### 4.2.2 局部空间自相关

根据式(3)测算长江经济带空间自相关系数并绘制LISA聚集图以揭示长江经济带能源生态效率在子区域上的空间异质特征(图5)。2011年和2020年分别有11和26个城市呈空间正相关状态(H-H或L-L集聚),整体波动幅度较大,空间集聚效应明显。从时序维度看,2011—2020年,长江经济带能源生态效率研究期初表现为高高(H-H)和低低(L-L)集聚,研究期末表现为高高(H-H)和低高(L-H)集聚。

H-H集聚主要分布在长江下游地区,伴随时间

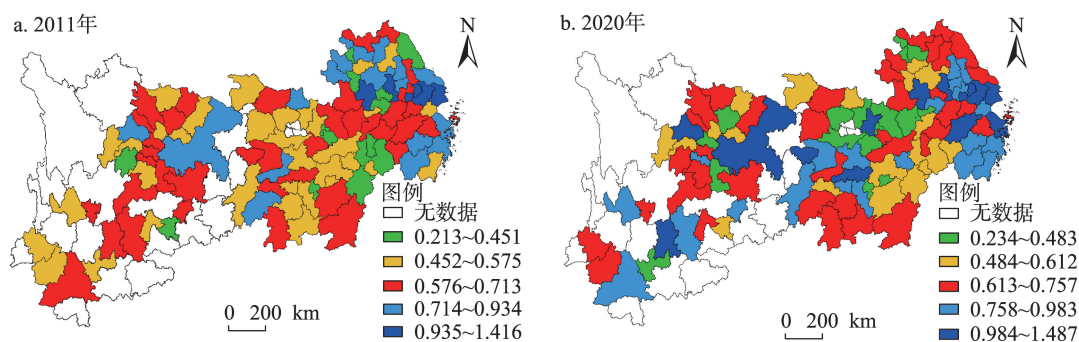


图4 2011年和2020年长江经济带能源生态效率空间分布图

Figure 4 Spatial distribution of energy and ecological efficiency of the Yangtze River Economic Belt, 2011 and 2020

注:基于自然资源部标准地图服务网站GS(2019)3266号标准地图制作,底图边界无修改。



表3 能源生态效率全局莫兰指数

Table 3 Global Moran's *I* of energy ecological efficiency

年份	Moran's <i>I</i>	<i>Z</i>	<i>P</i> -value	年份	Moran's <i>I</i>	<i>Z</i>	<i>P</i> -value
2011	0.238***	4.028	0.000	2016	0.140***	2.424	0.008
2012	0.227***	3.822	0.000	2017	0.148***	2.544	0.005
2013	0.218***	3.614	0.000	2018	0.106**	1.876	0.030
2014	0.213***	3.597	0.000	2019	0.095**	1.687	0.046
2015	0.203***	3.452	0.000	2020	0.351***	5.835	0.000

注:\*\*\*、\*\*、\*分别表示在1%、5%、10%的水平上显著。

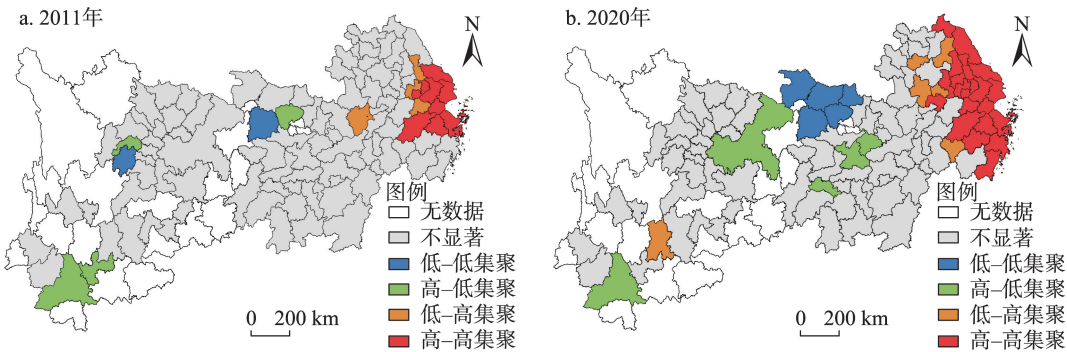


图5 2011年和2020年能源生态效率LISA图

Figure 5 Local indications of spatial association (LISA) chart of energy ecological efficiency, 2011 and 2020

注:基于自然资源部标准地图服务网站GS(2019)3266号标准地图制作,底图边界无修改。

的推移,能源生态效率高值区域在下游地区出现明显扩张,集聚效应愈发显著。下游地区由于工业发展起步较早,经济发展水平较高,且地处东部沿海对外交流广泛,在吸引外资涌入、高素质人才积累等方面占据优势,满足绿色技术研发的先决条件,传统产业转型升级较快,形成H-H集聚。

H-L集聚初期分布较为分散,多位于中上游地区,且处于此状态的城市数量也较少,2011年仅有荆门、眉山、玉溪和普洱4个市,2020年则增加到5个,且多分布在中游地区。普洱市长期属于H-L,说明其能源生态效率发展较好且周边地区效率变化平缓,同时荆门由H-L集聚转变为L-L集聚,存在“被扩散”趋势,其所在的湖北省出现能源生态效率的“低谷”。

L-H集聚区在研究初期主要分布在长三角地区,随着长三角一体化战略的深入实施,较为发达的经济基础,使得产业结构转型升级较快,传统的经济发展模式得到转变,能源生态效率得到了有效提升,L-H集聚数目在长三角周边地区明显增多。而中游地区由于能源生态效率的下降,成为能

源生态效率发展的“洼地”,具体表现为L-H集聚的空白。

L-L集聚区域在研究期初数目较少,仅有宜宾和乐山属于该集聚类型,研究期末L-L集聚则表现为中游地区的集中分布,与此同时,L-L集聚城市从研究初期的2个增加至研究末期的5个,呈明显的上升态势。中游地区作为传统的重工业基地,工业活动产生大量污染导致生态矛盾突出,导致能源生态效率较低,形成L-L集聚。

4.3 驱动因子时空非平稳性分析

4.3.1 数据检验与模型选取

利用ArcGIS10.2进行能源生态效率驱动因子时空地理加权回归分析。为增强模型选择的科学性,设定时空距离参数比值为1,自动优化设置带宽,分别进行普通最小二乘法回归和地理加权回归作为对照,并选取AICc准则和拟合优度 $R^2$ 作为模型选择的置信度评价指标,结果见表4。可以看到GTWR模型AICc准则为最低,拟合优度 $R^2$ 最高。因此GTWR模型具有更好的拟合效果,故选取该模型进行长江经济带能源生态效率局部估计。

2022年11月

表4 基于OLS、GWR和GTWR模型的整体拟合状况的比较

Table 4 Comparison of overall fitting conditions based on ordinary least squares (OLS), geographically weighted regression (GWR), and geographically and temporally weighted regression (GTWR) models

模型参数	OLS	GWR	GTWR
带宽	—	2.3412	1.9043
残差估计标准差	—	0.3105	0.1537
赤池信息量准则(AICc)	-397.3442	-1134.4386	-1573.4308
修正后 $R^2$	0.3185	0.3517	0.6003
$R^2$	0.3210	0.3536	0.6015

#### 4.3.2 驱动因子时间演化

对驱动因子运用GTWR模型进行回归分析,由此得到各驱动因子在不同时空位置上对能源生态效率的估计系数,以此为基础绘制箱线图进而探寻其时序演化规律(图6)。

政府干预(*gov*)在研究初期对长江经济带能源生态效率以正向驱动为主,政府增加财政支出,既

体现在提高企业准入门槛以限制污染企业进入,也体现在加大对科技创新的补贴力度,有效减少污染排放和能源消耗,推动长江经济带由“粗放型”向“集约型”发展模式转变。但伴随市场化改革进程加快,政府对经济发展的过多干预影响了市场在资源配置中的主体地位,因此,政府干预因子自2017年开始呈现明显的下降趋势,并在研究后期在多数地区表现为负相关。

产业结构(*is*)在研究期内对多数城市能源生态效率呈现抑制,且影响力度持续增强。以高投入、高污染为代表的工业企业,在推动经济增长过程中加剧能源消耗,致使“三废”和碳排放大量产出,能源生态效率下降。同时,产业结构系数研究期内呈波动变化且城市间差异先缩小后扩大,产业结构对能源生态效率的影响持续存在,存在扩散效应,工业活动负向产出阻碍能源生态效率提高。

对外开放程度(*fdi*)对长江经济带大多数城市

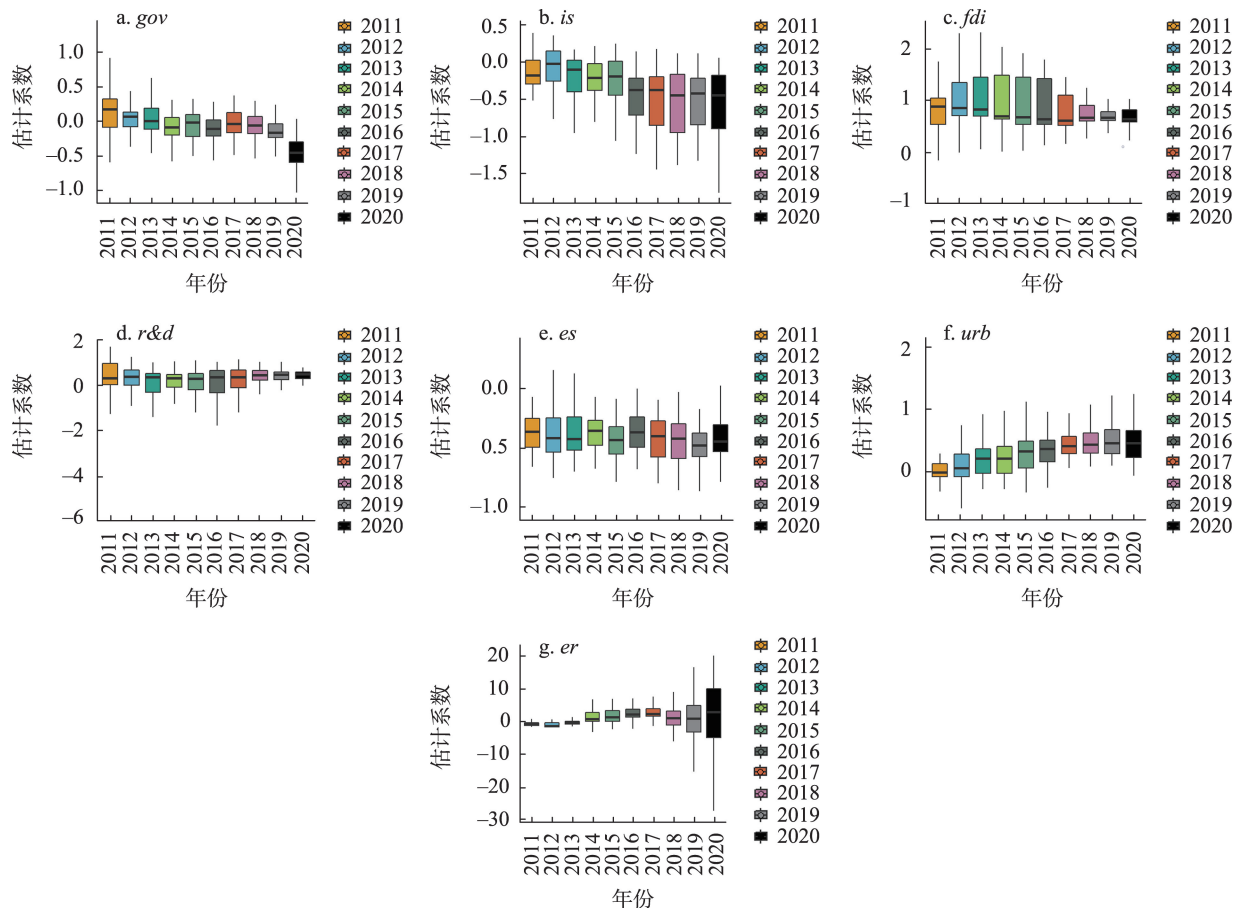


图6 2011—2020年驱动因子时序变化趋势

Figure 6 Temporal change trends of driving factors, 2011-2020

能源生态效率的驱动力持续为正,说明外商直接投资在促进经济增长时,也可提高能源生态效率。此外,外商直接投资的估计系数长期处于平稳状态,且离散程度先扩大后缩小,其效应在不同城市间也趋于一致,表明外商直接投资对长江经济带能源生态效率多数地区产生正向驱动,形成“污染光环”效应。

科技投入(*r&d*)在长江经济带大多数城市上表现为对能源生态效率的正向驱动,且驱动力伴随时间推移不断增强,表明科技进步是提高能源生态效率的重要因素。研究期内,长江经济带各城市通过增加科技投入,形成绿色技术、绿色产业和绿色投资的有效对接,并对传统重化工产业进行绿色改造,也使能源消耗和碳排放强度得到控制,推动能源生态效率进一步提升。

能源消费结构(*es*)在研究期内与能源生态效率在多数城市表现为负相关,正向驱动城市数量较少,同时,离散程度也显示非平稳变化,说明能源消费结构对能源生态效率的影响在不同城市间呈现异质。在工业体系较为完备,但生产工艺较为落后的地区,煤炭过量、低效投入阻碍当地能源生态效率提升。但部分地区由于煤炭需求较小,加之第三产业的快速发展,减少了污染排放,从而促进能源生态效率的提升。

城镇化水平(*urb*)估计系数在研究期内呈平稳上升态势,且在长江经济带多数地区表现为正相关,说明城市人口集聚有利于减少污染排放。城镇人口的快速增长不仅可加快形成“人口红利”,产生知识溢出、人力资本集聚等正外部效应,提高能源综合利用效率,还可以通过基础设施共用、减少排放成本等方式,为政府对环境污染进行集中治理提供保障。

环境规制(*er*)估计系数变化可分为“两阶段”。2011—2017年为第一阶段,地方政府通过加强环境规制强度促进能源生态效率的提升,印证“波特假说”的存在;2018—2020年为第二阶段,规制力度的加强抑制长江经济带能源生态效率提升,但结合离散程度分析,长江经济带部分城市能源生态效率得到了提高,应进一步加强规制力度,刺激企业进行创新或者采用新技术,推动绿色发展。

#### 4.3.3 驱动因子的空间非平稳演变

运用 ArcGIS10.2 对 GTWR 测算的回归系数进行可视化,得到估计系数的空间分布(图7)。

政府干预因子(*gov*)。高值区主要位于中上游,政府作为绿色发展、能耗管控、生态建设的重要主体,通过合理产业布局和控制经济流向,实现生产要素的有效配置,进而提高能源生态效率。低值区主要分布在浙江南部、江西东部和安徽北部地区,当前财税分权背景下,部分官员受政绩考核、任职期限等因素影响,通过减轻环境监管、放宽准入门槛和增加财政支出等方式换取经济快速增长,对当地能源生态效率产生抑制。

产业结构因子(*is*)。产业结构的中高值区位于上游和下游地区,低值区主要分布在中游地区,大致呈两边高中间低的“两级”格局。由于下游地区已摆脱粗放的发展模式,以创新驱动的绿色产业占据主导地位,利于能源生态效率提升;上游地区则发挥当地资源禀赋优势,积极发展水能、天然气等清洁能源,能源利用结构和水平得到提升,减少了环境破坏。中游地区由于重化工企业集聚程度较高,加之承接大量资源寻求型企业转移,污染排放增多抑制能源生态效率提升。

对外开放因子(*fdi*)在2011—2020年间的高值区集中在下游地区和云南省,低值区则分布在长江中游和成渝地区。下游地区得益于较好的经济基础、科技创新能力和人力资本水平,通过合理引进外资,带来先进的生产技术、管理理念和管理方式,利于构建五位一体的高质量发展体系,能源生态效率得到提高。中游地区和成渝地区作为传统的能源供给和工业基地,多数外资企业进入该地具有明显的资源寻求和污染转移目的,给当地生态环境产生较大冲击,对外开放对能源生态效率的提升作用微弱。

科技投入因子(*r&d*)。研究与试验发展经费投入整体上表现为对能源生态效率的促进,但作用力度存在区域差异。下游地区虽经济基础较雄厚,为技术研发提供了充足的资金支持,但由于产业结构转型完成度较好,技术进步对能源生态效率的提升有限。中游和上游地区由于能源生态效率水平较



2022年11月

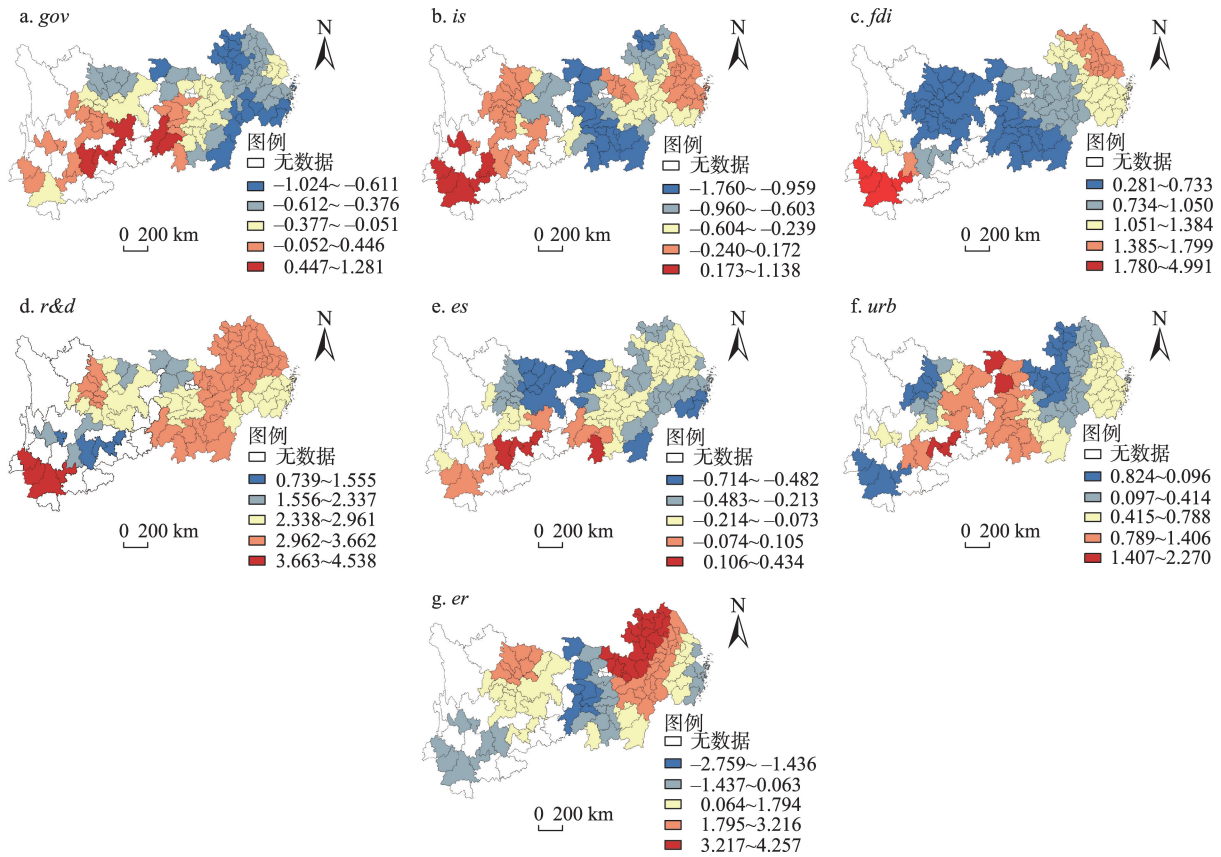


图7 能源生态效率驱动因子回归系数空间分布

Figure 7 Spatial distributions of regression coefficients of driving factors of energy ecological efficiency

注:基于自然资源部标准地图服务网站GS(2019)3266号标准地图制作,底图边界无修改。

低,科研经费的投入会加快能源消费结构转变及污染治理技术提高,对当地能源生态效率提升的促进作用更为明显。

从能源消费结构(*es*)来看,能源消费结构与能源生态效率大多表现为负相关。在浙江和江西南部、湖北和重庆等地区,由于工业生产中高投入、高污染和低效率等问题,粗放的经济发展模式并没有得到转变,估计系数偏低。高值区位于工业基础相对薄弱和水能较为充足的湘西和四川省多数地区,由于工业起步较晚,可更合理地对当地产业结构进行布局并充分利用水能资源,污染产出较少,加之较强的环境自净力,能源消费结构对能源生态效率表现为促进。

城镇化水平因子(*urb*)回归系数高值区主要位于湖北西部、湖南、四川东部和贵州等地区,上述地区及时把握人口回流机会,大力进行基础设施和配套设施建设,人口涌入形成的集聚效应,驱动能源

生态效率的提高。四川西部和云南大部分地区则表现为负相关,作为传统的人口流出区,工业发展所需的劳动要素难以满足,经济发展转型速度缓慢。湖北东部和安徽北部地区由于产业结构升级,劳动力密集型产业向欠发达地区转移,人口聚集效应减弱,要素间的拥挤效应凸显,城镇化对能源生态效率表现为负向。

环境规制因子(*er*)对能源生态效率空间表征大致呈“东北—西南”梯级递减格局。长江经济带东北部是主要的煤炭供应基地,以高耗能、高污染企业为主体的工业格局,使得规制工具在该地区成效明显。但“环境外部不经济性”导致的规制失灵,使其在浙江西部、中游地区以及四川省表现为抑制,但这种规制力度的“软化”是由策略博弈和约束性激励引发,因此不应否认环境规制对能源生态效率的正向作用,各级政府应以多元化的环境管理方式拉动能源生态效率提升。

## 5 结论与讨论

### 5.1 结论

采用超效率SBM模型测算长江经济带2011—2020年108座城市的能源生态效率,并借助探索性空间数据分析(ESDA)和时空地理加权回归模型(GTWR)对长江经济带能源生态效率时空特征和驱动因子进行考察,得到以下结论:

(1)时序演变上看,长江经济带能源生态效率整体变化先后呈“振荡期”和“提升期”两阶段,具体表现为2011—2015年效率值波动发展,2016—2020年效率值稳步提升。同时,研究期内长江经济带能源生态效率呈现自下游到上游再到中游依次递减的“梯度发展”特征。因此,长江经济带不同地区应根据当地能源生态效率发展现状,因地制宜、分级分类施策。

(2)从空间分布上看,研究期内长江经济带能源生态效率空间非均衡特征显著,存在明显的高低分区。能源生态高效率区域明显增多,且多以城市群为依托沿江东西横向发展,能源生态低效率区域由西部向中部地区转移,呈“扩散”趋势,同时伴随城市群内部区域协作的加强,效率值“极化”特征明显。故高效率地区应立足当地特色优势,形成具有辐射带动作用的核心区,并积极与中、低效率地区展开深层次、全方位的合作交流,逐步弱化空间异质性。

(3)从空间相关性上看,长江经济带能源生态效率全局Moran's  $I$ 始终为正并通过显著性检验,表明空间关联性持续存在。LISA聚集图显示,研究初期集聚效应表现为高高(H-H)和低低(L-L)集聚,随着时间的推移,部分城市产生了跃迁效应,形成高高(H-H)和低高(L-H)集聚。因此,在提高能源生态效率时应注重政策引导和区域协同。低效率集聚区应建立区域联动与污染共治机制,并提高低效率集聚区的能源利用和生态建设能力,加强其与高集聚地区的合作交流,摆脱低效率集聚效应,实现集约式发展。

(4)从驱动因子上看,GTWR估计结果显示,不同驱动因子在时空上表现为非平稳性,不同区域内驱动强度和方向也存在差异。政府干预的高值区

主要位于中上游地区,低值区主要分布在浙江南部、江西东部和安徽北部地区;产业结构对多数城市能源生态效率呈现抑制作用,对外开放程度则持续为正;科技投入的贡献度在整体上表现为正向促进,并随着时间的推移,该效应不断增强;能源消费结构在长江经济带多数城市表现为对能源生态效率的抑制;城镇化水平对能源生态效率影响持续提升;环境规制的贡献度在研究期内变化较大,空间上表现为“东北—西南”梯级递减格局。因此,不同地区应厘清影响当地能源生态效率的主要驱动因素,找准能源生态效率提升的政策发力点,推动各城市逐步实现能源利用经济效益、社会效益和生态效益最优化。

### 5.2 讨论

通过测算长江经济带能源生态效率,揭示了其时空演化特征及区域异质性,同时在地理加权回归基础上引入时间特征,从时空维度对影响能源生态效率的驱动因子进行回归,明晰了其作用强度和方向的“时-空”非平稳性,具有一定的创新性,也为不同地区提升能源生态效率提供了可行的政策发力点。未来可进一步深化的工作包括:①目前是从整体视角对能源生态效率的空间演变进行了阐述,下一步工作可以从局部视角对能源生态效率在不同区域的相对位置变动和动态趋势进行更深入的分析。②就长江经济带而言,作为生态优先发展的主战场和引领高质量发展的主力军,国家战略、地方政策都是影响其能源生态效率的重要因素,因此评估政策实施对能源生态效率的影响效果也是可拓展研究方向。

### 参考文献(References):

- [1] Schaltegger S, Sturm A. Ansatzpunkte zur Ausgestaltung von ökologischer orientierten management instrumenten[J]. Die Unternehmung, 1990, 44(4): 273–290.
- [2] World Business Council for Sustainable Development. Eco-efficient Leadership for Improved Economic and Environmental Performance[R]. Courtesy of World Business Council for Sustainable Development, 2000.
- [3] Organization for Economic Cooperation and Development. Eco-efficiency[R]. Paris: Organization for Economic Cooperation and De-

2022年11月

- velopment, 1998.
- [4] 杨勇, 邓祥征. 中国城市生态效率时空演变及影响因素的区域差异[J]. 地理科学, 2019, 39(7): 1111-1118. [Yang Y, Deng X Z. The spatio-temporal evolutionary characteristics and regional differences in affecting factors analysis of China's urban eco-efficiency[J]. Scientia Geographica Sinica, 2019, 39(7): 1111-1118.]
- [5] 王兆峰, 刘庆芳. 长江经济带旅游生态效率时空演变及其与旅游经济互动响应[J]. 自然资源学报, 2019, 34(9): 1945-1961. [Wang Z F, Liu Q F. The spatio-temporal evolution of tourism eco-efficiency in the Yangtze River Economic Belt and its interactive response with tourism economy[J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(9): 1945-1961]
- [6] 邓宗兵, 李莉萍, 王炬, 等. 技术异质性地中国工业生态效率地区差异及驱动因素[J]. 资源科学, 2022, 44(5): 1009-1021. [Deng Z B, Li L P, Wang J, et al. Regional differences and driving factors of China's industrial ecological efficiency: Based on technology heterogeneity[J]. Resources Science, 2022, 44(5): 1009-1021.]
- [7] 罗世华, 王栋. 碳交易政策对省域全要素能源效率的影响效应[J]. 经济地理, 2022, 42(7): 53-61. [Luo S H, Wang D. The effect of carbon trading policy on provincial total factor energy efficiency [J]. Economic Geography, 2022, 42(7): 53-61.]
- [8] Peng B H, Wang Y Y, Wei G. Energy eco-efficiency: Is there any spatial correlation between different regions?[J]. Energy Policy, 2020, DOI: 10.1016/j.enpol.2020.111404.
- [9] 油建盛, 蒋兵, 董会忠. 环境规制和工业集聚对能源生态效率的影响[J]. 统计与决策, 2022, 38(15): 82-87. [You J S, Jiang B, Dong H Z. Influence of environmental regulation and industrial agglomeration on energy ecological efficiency[J]. Statistics & Decision, 2022, 38(15): 82-87.]
- [10] 周敏, 王腾, 严良, 等. 财政分权、经济竞争对中国能源生态效率影响异质性研究[J]. 资源科学, 2019, 41(3): 532-545. [Zhou M, Wang T, Yan L, et al. Heterogeneity in the influence of fiscal decentralization and economic competition on China's energy ecological efficiency[J]. Resources Science, 2019, 41(3): 532-545.]
- [11] 孟凡生, 邹韵. 基于PP-SFA的能源生态效率动态评价: 以我国30个省市自治区为例[J]. 系统工程, 2018, 36(5): 47-56. [Meng F S, Zou Y. Dynamic evaluation of energy eco-efficiency eased on PP-SFA: Take the 30 autonomous regions of China as an example [J]. Systems Engineering, 2018, 36(5): 47-56.]
- [12] 李海鹏, 罗丽, 张雄, 等. 中国农业能源效率动态演变及其影响因素[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(12): 105-115. [Li H P, Luo L, Zhang X, et al. Dynamic change of agricultural energy efficiency and its influencing factors in China[J]. China Population, Resources and Environment, 2020, 30(12): 105-115.]
- [13] 黄杰. 中国能源环境效率的空间关联网络结构及其影响因素[J]. 资源科学, 2018, 40(4): 759-772. [Huang J. The spatial network structure of energy-environmental efficiency and its determinants in China[J]. Resources Science, 2018, 40(4): 759-772.]
- [14] 周江, 胡静锋, 王波. 中国能源产业效率测量及比较分析[J]. 经济问题, 2018, (8): 60-65. [Zhou J, Hu J F, Wang B. Comparative study on energy industry efficiency of China[J]. On Economic Problems, 2018, (8): 60-65.]
- [15] 张瑞, 胡彦勇, 郗晓彤. 中国物流业能源生态效率与其影响因素的动态响应研究[J]. 经济问题, 2021, (8): 9-17. [Zhang R, Hu Y Y, Qie X T. Research on dynamic response of energy eco-efficiency of China's logistics industry to influencing factors[J]. On Economic Problems, 2021, (8): 9-17.]
- [16] 李根, 刘家国, 李天琦. 考虑非期望产出的制造业能源生态效率地区差异研究: 基于SBM和Tobit模型的两阶段分析[J]. 中国管理科学, 2019, 27(11): 76-87. [Li G, Liu J G, Li T Q. Regional differences of energy eco-efficiency in manufacturing industry under consideration of undesirable outputs based on the SBM-Tobit two-stage model[J]. Chinese Journal of Management Science, 2019, 27(11): 76-87.]
- [17] 何伟怡, 马胜仑, 孙学珊. 中国装备制造业能源效率研究: 基于Bootstrap-DEA模型[J]. 华东经济管理, 2019, 33(1): 87-92. [He W Y, Ma S L, Sun X S. A study on energy efficiency of China's equipment manufacturing industry: Based on the Bootstrap-DEA model[J]. East China Economic Management, 2019, 33(1): 87-92.]
- [18] Liu W, Zhan J Y, Zhao F, et al. Exploring the coupling relationship between urbanization and energy eco-efficiency: A case study of 281 prefecture-level cities in China[J]. Sustainable Cities and Society, 2021, DOI: 10.1016/j.scs.2020.102563.
- [19] 俞超, 陆玉梅, 潘冬, 等. 环境规制对全要素能源效率的空间溢出效应研究[J]. 统计与决策, 2021, 37(20): 58-61. [Yu C, Lu Y M, Pan D, et al. Research on the spatial spillover effect of environmental regulation on total factor energy efficiency[J]. Statistics & Decision, 2021, 37(20): 58-61.]
- [20] 孙伟. 黄河流域城市能源生态效率的时空差异及其影响因素分析[J]. 安徽师范大学学报(人文社会科学版), 2020, 48(2): 149-157. [Sun W. Analysis on the spatial and temporal differences of urban energy eco-efficiency in the Yellow River Basin and its influencing factors[J]. Journal of Anhui Normal University, 2020, 48(2): 149-157.]
- [21] 郭一鸣, 蔺雪芹, 王岱. 中国城市能源效率空间演化特征及影响因素: 基于两阶段Super SBM的分析[J]. 地域研究与开发, 2020, 39(2): 8-13. [Guo Y M, Lin X Q, Wang D. Spatial evolution and influencing factors of energy efficiency in Chinese cities: Based on two-stage super efficiency SBM[J]. Areal Research and Development, 2020, 39(2): 8-13.]
- [22] Wu H, Hao Y, Ren S, et al. Does internet development improve green total factor energy efficiency? Evidence from China[J]. Ener-



- gy Policy, 2021, DOI: 10.1016/j.energy.2022.123395.
- [23] 李硕硕, 刘耀彬, 骆康. 环鄱阳湖县域新型城镇化对碳排放强度的空间溢出效应[J]. 资源科学, 2022, 44(7): 1449–1462. [Li S S, Liu Y B, Luo K. Spatial spillover effect of new-type urbanization on carbon emission intensity in counties around the Poyang Lake [J]. Resources Science, 2022, 44(7): 1449–1462.]
- [24] Yang L S, Li Z. Technology advance and the carbon dioxide emission in China: Empirical research based on the rebound effect[J]. Energy Policy, 2017, DOI: 10.1016/j.enpol.2016.11.020.
- [25] Han Y H, Zhang F, Huang L X, et al. Does industrial upgrading promote eco-efficiency: A panel space estimation based on Chinese evidence[J]. Energy Policy, 2021, DOI: 10.1016/j.enpol.2021.112286.
- [26] Shen N, Peng H. Can industrial agglomeration achieve the emission-reduction effect?[J]. Socio-Economic Planning Sciences, 2021, DOI: 10.1016/j.seps.2020.100867.
- [27] 范如国, 杨维国, 罗明, 等. 经济转型下FDI溢出及其对能源效率影响的门槛特征分析[J]. 南方经济, 2019, (1): 41–59. [Fan R G, Yang W G, Luo M, et al. Threshold characteristic analysis of regional energy efficiency influenced by FDI spillovers in the process of economic transition[J]. South China Journal of Economics, 2019, (1): 41–59.]
- [28] Tone K, Tsutsui M. An epsilon-based measure of efficiency in DEA: A third pole of technical efficiency[J]. European Journal of Operational Research, 2010, 207, (3): 1554–1563.
- [29] 张悦, 王晶晶, 程钰. 中国工业碳排放绩效时空特征及技术创新影响机制[J]. 资源科学, 2022, 44(7): 1435–1448. [Zhang Y, Wang J J, Cheng Y. Spatiotemporal characteristics of China's industrial carbon emission performance and influence mechanism of technological innovation[J]. Resources Science, 2022, 44(7): 1435–1448.]
- [30] 田成诗, 陈雨. 人口虹吸、集聚与城市能源效率: 以沪苏浙皖地区为例[J]. 统计研究, 2022, 39(5): 93–106. [Tian C S, Chen Y. Population siphoning, agglomeration and urban energy efficiency: Take the Shanghai–Jiangsu–Zhejiang–Anhui as an example[J]. Statistical Research, 2022, 39(5): 93–106.]
- [31] 师博, 沈坤荣. 政府干预、经济集聚与能源效率[J]. 管理世界, 2013, (10): 6–18. [Shi B, Shen K R. The government intervention, the economic agglomeration and the energy efficiency[J]. Journal of Management World, 2013, (10): 6–18.]
- [32] 汪东芳, 曹建华. 互联网发展对中国全要素能源效率的影响及网络效应研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2019, 29(1): 86–95. [Wang D F, Cao J H. The impact of internet development on China's total factor energy efficiency and its network effects[J]. China Population, Resources and Environment, 2019, 29(1): 86–95.]
- [33] 邵帅, 张可, 豆建民. 经济集聚的节能减排效应: 理论与中国经验[J]. 管理世界, 2019, 35(1): 36–60. [Shao S, Zhang K, Dou J M. Effects of economic agglomeration on energy saving and emission reduction: Theory and empirical evidence from China[J]. Journal of Management World, 2019, 35(1): 36–60.]
- [34] 董直庆, 王辉. 环境规制的“本地–邻地”绿色技术进步效应[J]. 中国工业经济, 2019, (1): 100–118. [Dong Z Q, Wang H. Local-neighborhood effect of green technology of environmental regulation[J]. China Industrial Economics, 2019, (1): 100–118.]

# Spatiotemporal non-stationarity of energy ecological efficiency and its driving factors in the Yangtze River Economic Belt

YOU Jiansheng<sup>1</sup>, DONG Huizhong<sup>1</sup>, JIANG Bing<sup>1</sup>, ZHU Yue<sup>2</sup>, TAO Jiange<sup>3</sup>

(1. School of Management, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China; 2. School of Business, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 3. Systems and Industrial Engineering Technology Research Center, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 451191, China)

**Abstract:** Accelerating the green transition has become the key anchor point for the Yangtze River Economic Belt to achieve high quality and quantity of economic development. In this study, super-slacks-based measure (super-SBM) model, exploratory spatial data analysis (ESDA), and geographically and temporally weighted regression (GTWR) model were used to examine the evolution characteristics, spatial texture, and spatiotemporal non-stationarity of energy ecological efficiency of 108 cities in the Yangtze River Economic Belt from 2011 to 2020. The results show that: (1) The development trend of energy ecological efficiency in the Yangtze River Economic Belt is generally positive, and has experienced two stages—the oscillation period and the enhancement period, and presents the characteristics of stepped development that decreases from the downstream to the upstream and then to the middle reaches; (2) The energy ecological efficiency in the study area has significant spatial imbalance characteristics, and there are obvious high and low areas. High value regions are mainly distributed along the river, while low value regions “diffuse” from the western to the central region; (3) The spatial correlation of energy ecological efficiency in the study area is obvious, and the agglomeration effect changes from High-High and Low-Low agglomeration at the beginning of the study period to High-High and Low-High agglomeration; (4) The results of the GTWR test show that government intervention promoted the improvement of energy ecological efficiency at the initial stage of the study, and inhibited the improvement of energy ecological efficiency at the later stage; The degree of opening up and investment in science and technology have a strong driving effect on energy ecological efficiency; The restraining effect of industrial structure and energy consumption structure is serious; The impact of urbanization and environmental regulation are mainly positive. Improving the energy ecological efficiency of the Yangtze River Economic Belt needs to implement policies according to the characteristics of the upstream, middle and downstream regions, and play the role of different driving factors to build a green and sustainable development system.

**Key words:** energy ecological efficiency; super-SBM; GTWR model; spatiotemporal non-stationarity; Yangtze River Economic Belt