

长江经济带碳解锁效率研究

——基于 SE-DEA-Malmquist 指数

张济建^{a, b} 刘清^a 丁绪辉^{a, b1}

(江苏大学 a. 财经学院; b. 产业经济研究院, 江苏 镇江 212013)

【摘要】: 文章从碳解锁效率角度出发客观评估长江经济带绿色发展绩效, 采用非期望超效率模型测算长江经济带 11 个省市 2000—2018 年碳解锁效率, 结合 Malmquist 指数模型进行效率分解及动态分析, 并借助 Tobit 面板模型探究碳解锁效率驱动因素。结果显示: 整体上, 长江经济带碳解锁效率呈现先下降后升高趋势, 各省市间的差异性先扩大后缩小并逐步趋于稳定, 上中下游省市碳解锁效率差异显著; 长江经济带总体碳解锁效率变化指数处于上升阶段, 依靠技术进步能够有效提高碳解锁效率水平; 地区经济发展、对外开放及城镇化水平与碳解锁效率呈现显著正相关, 产业结构和创新水平呈现负向效应。政府应充分考虑长江经济带区域差异性, 合理制定碳减排目标和碳减排政策, 优化产业结构、推动产业转型升级和提高绿色技术创新水平。

【关键词】: 碳解锁效率 SE-DEA-Malmquist 指数 Tobit 面板模型

【中图分类号】: F124.5; F205; F127 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1007-5097 (2021) 06-0001-10

一、引言及文献综述

作为具有全球影响力的内河经济带, 长江经济带所辖人口和地区经济总量分别占中国的 42.9% 和 46.2%, 绿色循环低碳发展已经成为长江经济带建设的必然要求。习近平总书记强调, 以共抓大保护、不搞大开发为导向推动长江经济带发展, 但长江经济带快速发展的同时也带来了生态环境压力。研究机构 Carbon Brief 推算得出 2018 年中国碳排放总量达 100 亿吨, 而长江经济带占据国土面积的 21.36%, 覆盖 9 省 2 市, 横跨东中西三大区域板块, 是我国碳排放的重点区域。一方面, 长江经济带作为改革开放以来中国经济保持 30 多年高速增长的重要支撑, 必定伴随着资源的高投入及环境的高污染; 另一方面, 周边产业仍受“先污染、后治理”“先破坏、后修复”的陈旧观念影响, 与不断恶化的区域生态承载力之间的矛盾不可调和。因此, 传统粗放的经济发展方式需要转变为更加环保、更加低耗能的可持续发展方式。长江黄金水道的综合效益需要统筹经济效益与环境效益之间的关系, 而碳解锁效率关键旨在保持长江经济带经济效益增加的同时, 降低地区碳排放强度以摆脱相应的碳锁定效应。基于此, 科学客观地评价长江经济带碳解锁效率, 分析其区域差异性以及影响碳解锁效率的驱动因素, 合理制定碳减排目标和积极执行碳减排政策以实现碳排放强度“负增长”, 对助力长江上中下游区域“一张图”协调发展和推进长江经济带生态文明建设有着重要的指导意义。

作者简介: 张济建 (1965-), 男, 江苏南通人, 教授, 博士生导师, 博士, 研究方向: 低碳经济与绿色发展;

刘清 (1996-), 女, 江苏盐城人, 硕士研究生, 研究方向: 低碳经济与绿色发展;

丁绪辉 (1987-), 男, 山东济宁人, 副教授, 硕士生导师, 博士, 研究方向: 区域发展与环境规划。

基金项目: 国家自然科学基金项目“‘技术—制度’双重解锁视角下高碳产业低碳转型动力机制及引导策略研究”(71673117); 国家自然科学基金项目“考虑碳排放转移影响的区域协同减排机理及效率提升研究”(71473107); 国家自然科学基金项目“碳规制下基于多重冲突均衡的供应链碳排放转移机理及优化策略研究”(71874071)

西班牙学者 Unruh G C 早在 2000 年就提出基于“技术—制度综合体”(Techno-Institutional Complex, TIC)演化形成的“碳锁定”的概念,他认为工业经济的发展桎梏于以化石能源为依赖的碳密集能源系统,技术与制度的共同演化阻碍工业发展进程中环境技术的广泛应用^[1-2];后续研究进一步扩充“碳锁定”的概念,有学者认为发展中国家特有的集权制和重污染产业的扩张效应最终导致技术锁定和路径依赖(Karlsson R, 2012)^[3];碳锁定是围绕主导碳基技术形成的超稳定结构的技术体制,会对经济社会产生不利影响(李宏伟等, 2018)^[4]。既有研究主要从宏观视角,通过研究碳锁定成因、碳锁定程度等探寻相关碳解锁路径。有学者认为碳锁定主要成因是技术、组织和社会制度等多方面的共同作用(谢海生、庄贵阳, 2016)^[5];也有学者基于碳超载率衡量锁定程度,认为技术和制度的改革成本阻碍现有技术的低碳化,从而导致锁定状态无解(汪中华、成鹏飞, 2016)^[6]。国内学者遵循碳锁定“技术—制度”共同演化的驱动机制,具体从碳基技术体制、技术进步、制度创新等角度进行碳解锁的相关研究。有学者从技术体制的角度得到外部环境与碳基技术体制适应能力共同作用能够“解锁”(李宏伟、杨梅锦, 2013)^[7];也有学者认为技术进步具有的能源偏向性不利于解锁碳排放锁定效应,同时又指出加强制度创新能够有效发挥绿色倒逼效应(刘备、董直庆, 2020)^[8]。之后研究进一步从区域锁定和产业锁定两个角度探究碳锁定和碳解锁。有学者采用实证模型计算得出湖北省内各城市的区域碳锁定状况(刘晓凤, 2019)^[9];利用西北五省相关碳排放量数据与其产业结构碳锁定程度进行灰色关联分析(郭卫香、孙慧, 2018)^[10]。国内学者从微观视角去探究区域碳解锁微观驱动机制,以基础动力、发展动力和调节动力三个子系统构成的“区域碳解锁”微观动力结构为基础,对系统内各微观主体的行为策略展开博弈分析,并进一步形成了碳解锁的微观驱动机制(梁中等, 2020)^[11]。

后续研究学者主要集中于如何“摆脱碳锁定”。Unruh G C 在《解除碳锁定》一文中指出,“逃脱碳锁定”需要外力因素介入,政府制定相关政策可对碳解锁有着直接作用和间接作用^[2]。国外学者认为技术政策能够有效减缓碳锁定效应(Sanden B A、AzaC, 2004)^[12];尤其是从制度视角认为对化石能源撤资能够有效摆脱碳锁定(Healy N、Barry J, 2017)^[13]。碳锁定不但会造成技术和制度的路径依赖问题,同时对低碳经济的发展有着负面影响。有学者指出碳锁定会造成对清洁能源投资的减少(Bento N, 2010)^[14];也有学者指出碳锁定造成的实际搁浅资产成本更高等(Unruh G C, 2019)^[15]。随着研究的深入,碳解锁问题逐渐具体化。大多学者致力于分情况研究各国碳锁定过程,诸如美国电力行业是否在一系列措施下“摆脱碳锁定”,加拿大自身碳锁定程度不断加深的过程以及认为某些激励政策干预能够引发低碳经济结构变化从而降低碳锁定出现的概率,并且认为开发出突破性清洁技术有利于打破发展中国家目前的碳锁定过程(Karlsson R, 2021;Carley S, 2011;Haley B, 2011;Mattauch L, et al., 2015)^[3, 16-18]。

通过文献梳理发现,学者偏好对碳锁定和碳解锁相关研究的量化分析,且碳锁定效应的测度方法主要包括测算替代效应和建立模型。国外学者通过研究渐进式技术创新的溢出效应与清洁部门和污染部门之间的替代效应的相互作用以评估碳锁定效应,碳税政策和加大清洁技术的补贴对碳解锁起到显著作用(Mattauch L, et al., 2015)^[18];也有学者研究荷兰化学工业中潜在的碳锁定效应,认为碳锁定的加剧是政府颁布的相关政策和低碳技术不兼容所导致的(Janipour Z, et al., 2020)^[19]。国内学者大多采用构建模型的方式对碳锁定状况进行测量,有学者运用投入产出法、空间自相关法以及通径分析模型,测度中国各省碳锁定系数并分析时空演变特征;有学者构建要素投入锁定效应模型,并对高碳产业转换成本锁定效应进行实证分析;还有学者利用碳排放量和碳汇量构建碳锁定系数模型,以测度中国 30 个省份的碳锁定程度(徐盈之等, 2015;蔡海亚等, 2016;张济建等, 2018;孙丽文等, 2020)^[20-23]。

综上,围绕对碳锁定和碳解锁的量化分析在国内外已有大量研究基础,但鲜有文献着眼于对长江经济带碳解锁效率的测度分析。据此,本文提出“碳解锁效率”的相关概念,认为碳解锁效率是指相关部门提供一定制度投入和技术投入后,碳锁定的“摆脱”程度。碳解锁效率的内涵是基于“投入—产出”的角度追求社会经济效益与生态环境效益之间的平衡,一方面需要通过生产经营活动中利用投入指标要素的效率,即获取期望产出的能力做出考量,同时也要对生产经营活动中获取的非期望产出,即获取期望产出而牺牲的生态环境效益做出考量。因此,本文通过 SE-DEA-Malmquist 指数模型分别构建碳解锁效率评价指标体系并测算出具体效率数值,分析碳解锁效率的动态影响机制。本文从碳解锁效率这一角度出发,考虑一个国家或一个地区的碳锁定存在明显的投入产出关系,因此以碳解锁效率投入指标和产出指标划分了评价指标的类型。本文首先利用非期望超效率模型测算长江经济带 11 个省市 2000—2018 年的碳解锁效率,并对省际差异进行比较;其次运用 Malmquist 指数模型测算碳

解锁效率时空动态变化；最后利用 Tobit 面板模型分析影响碳解锁效率差异的驱动因素。

二、研究方法 with 理论模型

(一) 效率测度模型

研究采用数据包络分析方法对长江经济带 11 个省市碳解锁效率进行测度，这是一种可以忽略函数形式以及数据标准化并能够对研究对象进行相对比较的方法。本文所提出的“碳解锁效率”需要考虑“社会经济—生态环境”双重效益，因此，研究选取非期望产出的 DEA 模型。关于处理非期望产出的具体应用，国内外学者主要应用方向距离函数或者径向模型以及 SBM 模型。国内学者在测度绿色生产效率等相关指标时，为有效解决非期望产出问题，即选择 SBM 模型，并基于非期望产出处置生产可能集（肖泽磊等，2012；李静、王姝兰，2020;）^[24-25]。再者，传统的 DEA 模型不能够进行对前沿面上有效决策单元的区分，伴随着研究的不断深入，1993 年 Andersen 和 Petersen 提出建立超效率模型^[26]。本文将碳解锁效率产出指标划分为经济发展水平和碳排放强度两方面，其中碳排放强度为“坏产出”，即为非期望产出，碳排放强度的意向符号为负。同时，长江经济带绿色低碳发展的理想状态是低投入、高产出、低排放，但在现实生活中，产出分为“好产出”和“坏产出”，GDP 的增长是“好产出”，但其所带来的副产品，诸如“三废”的增加就是“坏产出”。因此，Tone 进一步提出非期望产出的效率测度模型，综合考虑包含投入、期望产出、非期望产出三者关系。

本文参照 Tone 提出的 SBM 模型的解决方法，非期望产出的 SE-SBM 模型为：

$$\begin{aligned}
 \min p &= 1 + \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{s_i^-}{x_{ik}} \bigg/ \left(1 - \frac{1}{q_1 + q_2} \sum_{r=1}^{q_2} \frac{s_r^{b-}}{y_{rk}^b} \right) \\
 \text{s.t.} \quad &\sum_{j=1, j \neq k}^n x_{ij} \lambda_j - s_i^- \leq x_{ik} \\
 &\sum_{j=1, j \neq k}^n y_{rj} \lambda_j + s_r^{g+} \geq y_{rk}^g \\
 &\sum_{j=1, j \neq k}^n y_{rj}^b \lambda_j - s_r^{b-} \leq y_{rk}^b, \\
 &1 - \frac{1}{q_1 + q_2} \sum_{r=1}^{q_1} \frac{s_r^g}{y_{rk}^g} + \sum_{r=1}^{q_2} \frac{s_r^b}{y_{rk}^b} > 0 \\
 &s^- > 0, s^b > 0, s^g > 0, \lambda > 0 \\
 &i = 1, 2, \dots, m; r = 1, 2, \dots, q; \\
 &j = 1, 2, \dots, n; j \neq k
 \end{aligned} \tag{1}$$

首先假定整个生产系统有 n 个决策单元 DMU，每个 DMU 又可以区分为 m 种投入 x 、 s_1 种期望产出 y^g 以及 s_2 种期望产出 y^b ；其次定义矩阵 X 、 Y^g 、 Y^b 分别为 $X=[x_1, x_2, \dots, x_n]$ 、 $Y^g=[y_1^g, y_2^g, \dots, y_n^g]$ 、 $Y^b=[y_1^b, y_2^b, \dots, y_n^b]$ ，其中 x 、 y^g 、 y^b 均大于 0；最后不变规模报酬下的生产集合为 $P=\{(x, y^g, y^b) | x \geq X \lambda, y^g \leq Y^g \lambda, y^b \leq Y^b \lambda\}$ 。式 (1) 中， s 是松弛变量，目标函数 p 关于 s^- 、 s^g 、 s^b ，取值范围在 0~1 之间， x_{ij} 、 y_{rj} 分别为第 j 个 DMU 的 i 项投入和 j 项产出。当且仅当 s^- 、 s^g 、 s^b 相等时，该 DMU 有效；否则，该 DMU 无效。

(二) Malmquist 指数模型

需要明确的是，上文所提及的效率测度模型不能够直接观测到长江经济带碳解锁效率的动态变化情况，仅针对组内决策单元 DMU 之间的相对效率值进行比较。因此，为对长江经济带碳解锁效率进行效率分解以及动态影像机制分析，需要引入 Malmquist

指数模型。Malmquist 生产率指数由 Malmquist(1953) 提出, 由 Fare 等人进一步发展。Malmquist 指数的模型内涵是运用距离函数描述多个输入变量和输出变量的生产技术。Malmquist 生产率指数, 即 $M(x_{t+1}, y_{t+1}, x_t, y_t)$ 具体构造 t 期到 $t+1$ 期的用以衡量技术效率、技术和全要素三者之间的变动关系。具体到本文对长江经济带碳解锁效率的研究, 将 Malmquist 指数分解为技术效率变化 (effch) 和技术变化 (techch) 两部分, 技术效率变化 (effch) 又可进一步划分为纯技术效率变化 (pech) 和规模效率变化 (sech), 其公示如下:

$$M(x_{t+1}, y_{t+1}, x_t, y_t) = pech \times sech \times techch \quad (2)$$

式 (2) 表示, 若 Malmquist 生产率指数 $M(x_{t+1}, y_{t+1}, x_t, y_t) > 1$, 表示生产率水平提高。技术效率变化 (effch) 具体指相对技术效率的变化程度, 即技术效率变动指数, $effch > 1$ 表示 DMU 在 $t+1$ 期与其前沿面的距离相对近于 t 期与其前沿面, 相对效率提高。纯技术效率变化 (pech) 大于 1 意味着管理的改善促进效率提高, 规模效率变化 (sech) 大于 1 意味着 DMU 逐步趋于最优规模, 技术变化 (techch) 大于 1 表示技术进步。因此, 本文进一步选择 Malmquist 指数模型, 能够分析得到长江经济带碳解锁效率的动态影响机制。

(三) 面板回归模型

为进一步研究长江经济带碳解锁效率的影响因素, 并考虑效率测度模型测算出的碳解锁效率值是“截尾”数据, 因此, 本文选择 Tobit 面板回归模型。Tobin(1958) 认为被解释变量存在有上限、下限或者极值等问题, 后人将这类存在选择性行为、存在极值的模型统称为“Tobit”^[27]。Tobit 面板模型又被称为样本选择模型, 不同于离散模型或者连续变量模型, 其最大特点是被解释变量是受限变量。Tobit 面板模型由表示约束条件的选择方程和满足前者的连续变量选择方程构成, 一般表现形式为:

$$\begin{aligned} y^* &= \beta x_i + \mu_i \\ y_i^* &= y_i, y^* > 0; \\ y_i^* &= 0, y^* \leq 0 \end{aligned} \quad (3)$$

式 (3) 中, y^* 是潜在因变量, 潜变量大于 0 时被观察到, 取值为 y_i , 小于等于 0 时在 0 处截尾, 则 Tobit 面板模型中 y^* 的负值应用 0 来替代, 以此减少回归带来的偏差。由于效率测度模型得到的长江经济带碳解锁效率值除了受到已经考虑的投入指标、产出指标的影响, 还应受到其他因素的驱动, 且本文测算得出的碳解锁效率的超效率值是大于 0 的截尾数据, 若直接以效率值为被解释变量建立 OLS 模型进行回归, 参数的估计将出现较大偏差。因此, 研究长江经济带碳解锁效率适合应用 Tobit 面板模型对其驱动因素进行实证分析。

三、长江经济带碳解锁效率测度

(一) 指标选取

碳解锁效率指标内涵是追求社会效益和生态环境效益之间的平衡, 一方面需要通过对生产经营活动中利用投入指标要素的效率, 即获取期望产出的能力做出考量, 同时也要对生产经营活动中获取的非期望产出, 即获取期望产出而牺牲的生态环境效益做出考量。

本文构建长江经济带碳解锁效率所需投入与产出的指标体系。碳锁定本质上是工业国家经济发展过程中对化石能源的高度依赖性导致的“制度—技术”双重锁定, 且一个国家或一个地区的碳锁定存在明显的投入产出关系^[20], 因此本文以碳解锁效率

投入指标和产出指标划分评价指标的两种类型。结合以上研究内容,本文立足制度和技术两个视角,依据碳解锁最终目标是促进经济发展和保护生态环境,认为所需指标包括投入、期望产出和非期望产出三类。其中,投入指标包括制度和技术。在制度投入方面,环境规制水平是反映制度水平的指标之一,环境规制策略的选择基于地方政府治理环境的意愿,意愿不同导致地区环境治理强度存在差异^[28],用地区环境污染治理投资与地区生产总值之比来表示可以反映出政府治理环境的意愿;本文参考刘伟丽、刘宏楠(2020)^[29]的做法,用市场中介组织的发育和法治环境评分来表示制度质量水平。技术投入用技术经费和技术人才予以表征,其中,技术经费具体为地区规模以上工业企业 R&D 经费支出与总收入之比;技术人才具体为地区规模以上工业企业 R&D 人员全时当量与总收入之比。期望产出采用各省市地区人均实际 GDP 与中国人均实际 GDP 之比来表示,为消除通货膨胀的影响,以 2000 年为基期进行平减。关于非期望产出的选取,本文出于综合考量,用地区碳排放量与地区生产总值之比来表示碳排放强度,地区碳排放量数据根据《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》,并参考于向宇等(2019)^[30]的做法,采用碳排放系数法计算。

本文以长江经济带上海、江苏、浙江、安徽、江西、湖北、湖南、重庆、四川、贵州和云南 11 个省市作为决策单元,利用 2000—2018 年的数据测算长江经济带各省市碳解锁效率值。原始数据来源于《中国统计年鉴》《中国能源统计年鉴》《中国环境统计年鉴》《中国科技统计年鉴》以及《中国分省份市场化指数报告》,部分缺失数据由最近邻数据填补。

(二) 碳解锁效率估计结果

根据 MaxDEA 软件中的超效率模型,估算得到长江经济带 11 个省市历年碳解锁效率值。

(三) 碳解锁效率实证分析

第一,从整体时间演进来看,长江经济带 11 个省市的碳解锁效率总体呈现先下降后升高的状态,以 5 年为分界线,2000—2004 年各决策单元的碳解锁效率总体均值为 1.016,2005—2009 年各决策单元的碳解锁效率总体均值为 1.000,2010—2014 年各决策单元的碳解锁效率总体均值为 1.096,2015—2018 年各决策单元的碳解锁效率总体均值为 1.118,这充分表明长江经济带区域的碳解锁水平总体上较高且呈现出较为良好的发展势头。其中,2005—2009 年碳解锁效率整体水平下浮 1.6%,这种下降可能是重工产业的快速发展导致的高污染高排放,使得考虑非期望产出的碳解锁效率水平下降;2015—2019 年碳解锁效率整体水平上浮 2.0%,这种上升可能是政府部门积极实现低碳经济发展的良好转变。从长江经济带 11 个省市来看,地区间的效率值差异呈现先扩大后缩小的趋势,2000 年最高效率值的上海为 1.653,最低效率值的四川为 0.445,两者相差 1.208,这表明区域之间差异性明显;2013 年区域之间呈现出更大的差异性,最高效率值的上海与最低效率值的安徽相差 1.845,但 2014—2018 年各省市出现拐点,地区之间的差异性在逐步缩小并趋于稳定(见图 1),高效率地区主要为上海、江苏、浙江,低效率地区主要为四川、贵州、安徽。

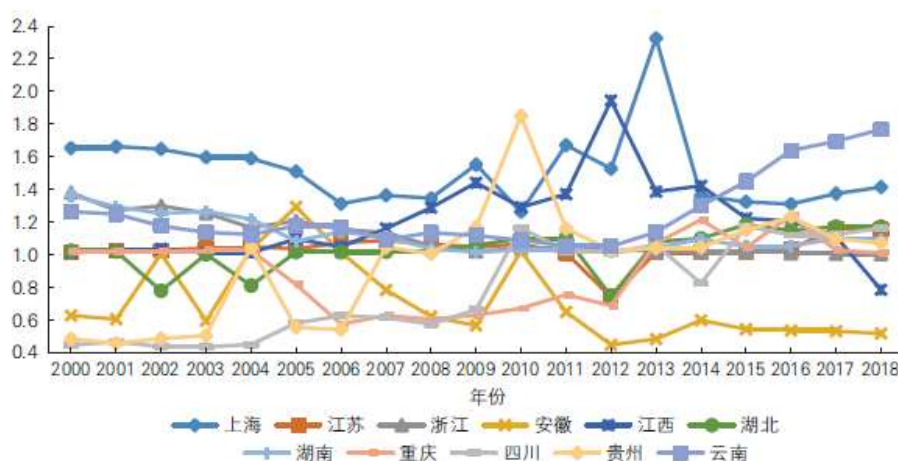


图 1 长江经济带各省市碳解锁效率趋势

第二，从长江经济带按上游、中游、下游三大区域划分来看，长江经济带上游、中游、下游碳解锁效率呈现出明显的区域性差异（见图 2）。长江经济带中游区域的碳解锁效率在 1.0~1.2 区间内波动式变化，没有较为明显的趋势，下游区域的碳解锁效率呈现出波动式下降的趋势，上游区域的碳解锁效率呈现出明显的波动式上升趋势，这表明 2000—2018 年长江经济带上中下游三大区域碳解锁效率的变化趋势不尽相同，可能与地区自身经济发展水平、生态环境容量以及相关法律法规政策有关。下游区域经济发展水平较高，并积极响应国家号召，促进产业低碳转型，碳解锁效率一开始高于上游区域和中游区域，之后却呈下降趋势，应进一步提高碳解锁效率；上游区域经济发展水平较低，但生态环境容量巨大，碳解锁效率虽起点低，但具有良好的发展势头，应积极扛起长江经济带“上游生态责任”，努力打造长江经济带生态环境机制。

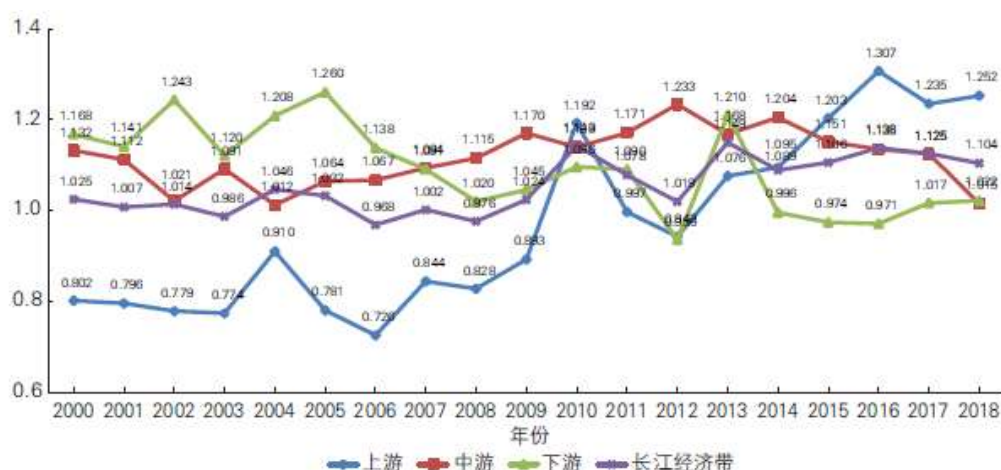


图 2 长江经济带及上游、中游、下游区域碳解锁效率趋势

第三，从省际差异来看，总体上呈现上游地区碳解锁效率低，下游地区碳解锁效率高的趋势，除却安徽，下游地区的上海、江苏、浙江的碳解锁效率较高，平均碳解锁效率值为 1.220 左右，大多年份为 DMU 有效值；安徽的平均碳解锁效率值为 0.707，DMU 有效值较少，碳解锁效率水平较低，这与其自身仍以重工产业为主，导致以碳排放量为非期望产出的总量增加有关。另外，从单个省份的碳解锁效率值来看，重庆、四川、贵州的平均碳解锁效率值分别为 0.898、0.786、0.944，这些省市都属于上游地区，与碳解锁效率水平较高地区仍有显著差距；但云南作为上游地区之一，其平均碳解锁效率值为 1.253，并且随着时间的推移，碳解锁效率水平呈现出逐年递增的趋势，截至 2018 年，其碳解锁效率值为 1.767，位列 11 省份第一。云南利用自身区位优势，把保护和修复长江生态环境摆在压倒性位置，形成长江经济带上下游优势互补、协同发展格局，建设东西双向、陆海统筹的对外开放新走廊，并积极推进清洁能源交易，这表明推进动能转换提速有利于提高碳解锁效率。

四、长江经济带碳解锁效率动态分析

（一）总体动态分析

为进一步分析碳解锁效率变化受哪个分解效率的影响，本文进一步引入 Malmquist 指数模型进行分析。在此之前，由上述估计结果得到长江经济带碳解锁效率在时间序列上的效率值变化，如图 3 所示。

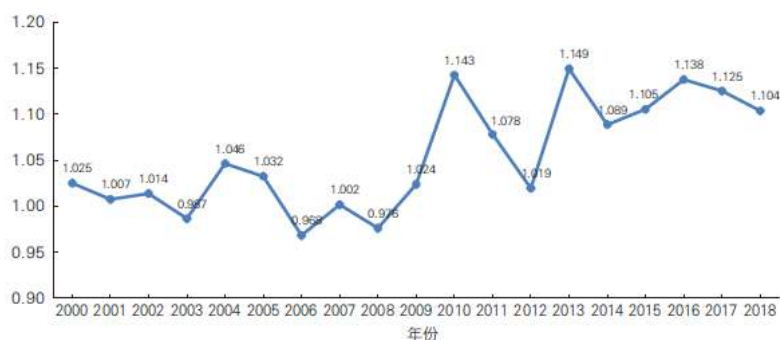


图3 长江经济带碳解锁效率历年均值

长江经济带碳解锁效率值大体呈现出“M”型变动趋势，总体都在0.9以上，一直处于高效率水平，说明长江经济带碳解锁效率处于良好的发展状态。2010年以前，碳解锁效率处于波动式上升趋势，这表明国家在注重经济发展的同时，也逐步开始注重保护长江生态环境；2010—2012年，碳解锁效率出现陡然下降，这是由于“十一五”末期及“十二五”初期，长江经济带经济增速持续走低，从经济增长动力来看，拉动经济增长的“三驾马车”增速均不同程度下滑，对经济增长的拉动力弱化，长江经济带产业处于转型初步阶段，随后带来能源消耗量过多、环境污染严重等问题，使得碳解锁效率值由2010年的1.143下降至2012年的1.019；随后碳解锁效率值于2013年达到峰值1.149，这是由于2012—2013年大力推动长江经济带发展战略、包括全面落实加快推进增强黄金水道能力、加快产业转型升级、推进新型城镇化、深化全方位对外开放、保护好长江生态环境、创新区域发展体制机制等六大任务；从2014年起，长江经济带碳解锁效率处于上升趋势，这是由于2014年9月国务院印发《关于依托黄金水道推动长江经济带发展的指导意见》，有利于形成上中下游优势互补、协作互动格局，缩小东中西部地区发展差距，在保护长江生态环境的基础上，进一步扩大经济优势和区域辐射；从2016年起，碳解锁效率出现小幅下降，这可能是由于随着《长江经济带发展规划纲要》正式印发，长江经济带地区吸引相关产业驻扎，从而能源需求总量扩大。

（二）Malmquist 指数实证分析

利用 Malmquist 指数模型可以分解出 2000—2018 年的技术进步效率和技术效率，其中，技术效率又可以进一步分解为纯技术效率和规模效率（图 4）。大部分碳解锁效率指数大于 1，这表明长江经济带总体碳解锁效率变化指数处于上升阶段，2000—2018 年 TFP 指数曾于 2006—2007 年达到峰值 1.970，但于 2005—2006 年出现陡然下降。技术效率指数可进一步分解得到的纯技术效率指数和规模效率指数，其变化幅度不大；技术进步指数变化趋势与 TFP 指数变化趋势保持相对一致，且均值大于 1，技术进步指数的变化直接影响到 TFP 指数的增长，这表明依靠技术进步能够有效提高碳解锁效率水平。

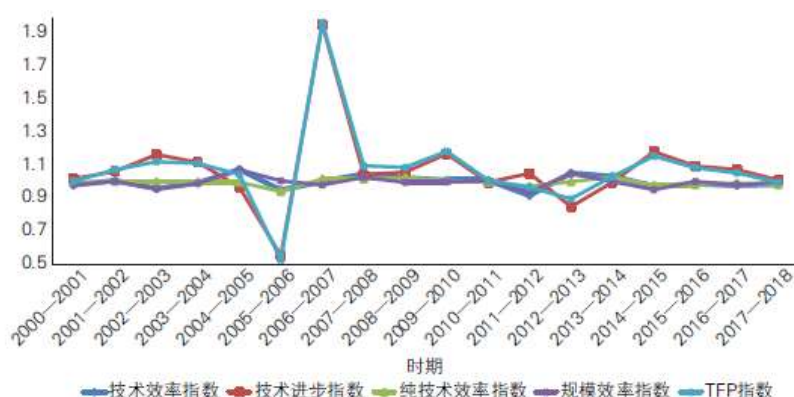


图 4 长江经济带碳解锁效率分解结果变化趋势

五、碳解锁效率驱动因素分析

长江经济带碳解锁效率的差异除了受到投入、产出指标的影响，还受到其他影响因素的驱动。为探讨影响碳解锁效率发展的因素，本文在得到长江经济带碳解锁超效率值的面板数据之后，以此作为解释变量，通过建立 Tobit 面板模型，分析其他因素对碳解锁效率的影响。

（一）变量选取及相关说明

被解释变量（ Y_{it} ）为考虑非期望产出的长江经济带碳解锁超效率值， i 、 t 分别表示不同时期不同地区的值。参考以往相关文献研究，考虑从地区经济发展水平、产业结构、创新水平、对外开放程度以及城镇化水平等方面作为解释变量。(1)地区经济发展水平（ X_1 ），本文选取地区人均生产总值与当年全国人均生产总值之比来表示；(2)产业结构（ X_2 ），本文选取高技术产业主营业务收入占工业主营业务收入的比重来衡量；(3)创新水平（ X_3 ），本文选取科技开发项目内部支出占工业总产值的比重来衡量；(4)对外开放程度（ X_4 ），一般认为，一个地区的出口开放程度可以通过该地区的进出口额高低来表示，但考虑数据的平稳性，本文选取实际利用外资占固定资产投资比重来度量；(5)城镇化水平（ X_5 ），本文选取城镇化水平作为指标之一，具体表现为城镇常住人口占总人口比重。所有数据均来源于《中国统计年鉴》《中国工业统计年鉴》《中国高技术产业统计年鉴》《中国环境统计年鉴》和《中国科技统计年鉴》等。

（二）模型构建及结果分析

根据以上变量选取，Tobit 面板模型构建如下：

$$Y_{it} = c + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \beta_3 X_{3i} + \beta_4 X_{4i} + \beta_5 X_{5i} + \varepsilon_{it} \quad (4)$$

其中： β_1 、 β_2 、 β_3 、 β_4 、 β_5 分别表示各变量的回归系数； ε_{it} 为随机误差项。

(1) 经济发展水平对碳解锁效率存在显著的正向影响，即经济发展水平的提高会促使碳解锁效率的提高，当经济发展水平每上升 1 个单位，碳解锁效率则提高 0.0879 个单位，这与理论上随着经济发展水平提高会使碳解锁效率提高相一致。具体来说，经济发展水平较高的地区，产业的集聚效应、技术水平较高，地区碳减排政策较为完善，对废气治理的投资相对较大，使得碳解锁效率水平较高；相反，经济发展水平较低的地区，第三产业占比较小，地区碳减排政策处于模仿阶段，对废气治理的投资相对较小，因而碳解锁效率水平较低。本文实证结果符合这一说法，具有传统理论意义。

(2) 产业结构与碳解锁效率之间存在显著的负相关性，这违背传统的理论设想，一般来说，产业结构较为优化的地区，其技术水平也较高，尤其以高技术产业为代表，这有利于碳解锁效率水平的提高。产业结构是影响碳解锁效率的重要因素，其回归系数为-0.8902，数值较小，说明产业结构对碳解锁效率的影响作用有限。之所以产业结构对碳解锁效率的影响与传统意义不符，一方面是因为我国大多数的工业是高耗能高排放的工业，二氧化碳的排放量大，碳减排技术处于需要进一步加强阶段，经营者的环境保护观念有待加强；另一方面是因为高技术产业处于快速发展阶段，其产品正在不断从创新成果转化为规模商品生产，高技术产业企业数量急剧增长，但其中只有一部分企业能够实现产业总值的迅速增长。

(3) 创新水平与碳解锁效率之间呈现负相关关系，这说明虽然对于科研开发项目的内部支出在逐年增加，但是带来的实际

效应并不高。对科技创新的投入大多集中于研发节能减排技术而并非实现研发与应用之间的过渡，从而并不能够实现经济效益与环保效益的双赢局面。一般来说，创新水平的提高有利于碳解锁效率的提升，本文研究结果与之相佐，是因为科技创新并未做到有针对性，以及技术成果没有得到进一步转化。

(4) 对外开放程度对碳解锁效率存在显著的正向影响，这充分表明经济开放程度是影响碳解锁效率的驱动因素，一个地区的对外开放程度越高，这个地区的碳解锁效率就越高。相关研究指出，外商直接投资通过规模效应和结构效应加剧二氧化碳的排放，但其带来的技术效应能够显著减少二氧化碳的排放，即外资的技术效应大于其规模效应和结构效应；并且，虽然近年来对外贸易依存度有所下降，但引进外资仍然能够带动经济效率的提升，从而带动地区碳解锁效率的提高。

(5) 城镇化水平与碳解锁效率之间呈现显著正相关，即城镇化水平越高，碳解锁效率越高，当城镇化水平每提高 1 个单位，碳解锁效率则提高 0.6833 个单位。相关研究表明，城镇化水平能够影响碳解锁效率，且具有明显的促进作用。这是由于城镇化的一个具体效益在于规模效益，城镇化初期阶段会促进二氧化碳的排放，但随着城镇化的进一步扩大则会抑制碳排放，因而城镇化是实现低碳发展的重要途径之一，低碳发展有利于提高碳解锁效率，所以城镇化水平与碳解锁效率之间正相关。

六、结论与建议

长江经济带在产业集聚与人口聚集的同时也面临着严峻的资源环境压力，要实现地区低碳发展、促进经济转型升级，必须全面推进节能减排。在积极响应“深入推动长江经济带发展”的号召下，要坚持低碳发展与生态优先，控制在经济发展过程中造成的资源浪费和环境污染，尤其要控制碳排放强度，提高碳解锁效率。本文通过非期望产出的超效率模型与 Malmquist 指数模型相结合，并以制度、技术为投入，以经济发展水平与碳排放强度为期望产出和非期望产出，测算长江经济带 11 个省市 2000—2018 年碳解锁效率，最后利用 Tobit 面板模型分析碳解锁效率差异的影响因素。长江经济带碳解锁效率评估结果显示，长江经济带 11 个省市的碳解锁效率总体呈现先下降后升高发展趋势，各省市间的差异性先扩大后缩小并逐步趋于稳定；但按上游、中游、下游的划分来看，碳解锁效率具有明显区域性差异的特征，下游地区除安徽外的上海、江苏和浙江的碳解锁效率较高。Malmquist 指数模型结果显示，大部分碳解锁效率指数大于 1，即长江经济带总体碳解锁效率变化指数处于上升阶段；分解结果显示技术进步指数的变化直接影响到 TFP 指数的增长，即依靠技术进步能够有效提高碳解锁效率水平。而关于影响碳解锁效率差异的因素中，地区经济发展水平、对外开放水平以及城镇化水平与碳解锁效率呈现显著的正相关，产业结构和创新水平对其呈负向影响。

为提升长江经济带碳解锁效率，应从以下方面采取措施：(1) 综合考虑长江经济带 11 个省市实际情况，注重利用自身发展优势，调整自身发展劣势，以取得碳解锁效率的进一步提升。长江经济带下游区域内的安徽应当注重经济生产活动与生态环境之间的平衡发展，做到在发展自身经济的同时，评估自身环境承载力，以实现环境的可持续发展。(2) 引导长江经济带的新型城镇化建设与工业化转型升级，减少城镇化盲目扩张的行为，控制高能耗、高污染的产业项目，淘汰低端落后产业链，构建长江经济带现代化产业体系。(3) 制定科学合理的外商直接投资利用政策，将外资优先用于发展绿色环保或高新技术产业，同时充分吸收外资企业的先进节能减排技术。(4) 加快在环境治理引导下进行科技创新，促进资源节约化和产业绿色化的实现，促使长江经济带向环境友好型的经济发展模式转变，抓紧科学研究和人才注入，重点加强对节能减排技术改造的实现和应用。(5) 做好长江经济带发展顶层设计，涉及跨部门、跨地区的问题要建立部际联系机制和全流域省际协调机制，依照区位建立长江经济带中上下游联系机制和专项碳解锁项目协调机制，推进经济带一体化发展。

参考文献:

- [1]UNRUH G C.Understanding Carbon Lock-in[J].Energy Policy,2000,28(12):817-830.
- [2]UNRUH G C.Escaping Carbon Lock-in[J].Energy Policy,2002,30(4):317-325.

-
- [3]KARLSSON R. Carbon Lock-in, Rebound Effects and China at the Limits of Statism[J]. Energy Policy, 2012, 51:939-945.
- [4]李宏伟, 谢楠, 赵丹. 行动者网络、规则体系与社会嵌入: “碳锁定”的制度化[J]. 生态经济, 2018, 34(10):40-46.
- [5]谢海生, 庄贵阳. 碳锁定效应的内涵、作用机制与解锁路径研究[J]. 生态经济, 2016, 32(1):38-42, 57.
- [6]汪中华, 成鹏飞. 中国碳超载下碳锁定与解锁路径实证研究[J]. 资源科学, 2016, 38(5):909-917.
- [7]李宏伟, 杨梅锦. 低碳经济中的“碳锁定”问题与“碳解锁”治理体系[J]. 科技进步与对策, 2013, 30(15):41-46.
- [8]刘备, 董直庆. 技术进步的能源偏向诱发“碳锁定效应”了吗[J]. 产经评论, 2020, 11(4):133-148.
- [9]刘晓凤. 湖北省区域碳锁定分布现状及立体化解锁对策[J]. 统计与决策, 2019, 35(6):66-69.
- [10]郭卫香, 孙慧. 西北 5 省碳排放与产业结构碳锁定的灰色关联分析[J]. 工业技术经济, 2018, 37(7):119-127.
- [11]梁中, 昂昊, 胡登峰. “区域碳解锁”的微观驱动机制研究[J]. 中国软科学, 2020(4):132-141.
- [12]SANDÉN B A, AZAR C. Near-term Technology Policies For Long-term Climate Targets-economy Wide Versus Technology Specific Approaches[J]. Energy Policy, 2004, 33(12):1557-1576.
- [13]HEALY N, BARRY J. Politicizing Energy Justice and Energy System Transitions:Fossil Fuel Divestment and a “Just Transition” [J]. Energy Policy, 2017, 108:451-459.
- [14]BENTO N. Is Carbon Lock-in Blocking Investments in the Hydrogen Economy?A Survey of Actors’ Strategies[J]. Energy Policy, 2010, 38(11):7189-7199.
- [15]UNRUH G C. The Real Stranded Assets of Carbon Lock-in[J]. One Earth, 2019, 1(4):399-401.
- [16]CARLEY S. Historical Analysis of U. S. Electricity Markets:Reassessing Carbon Lock-in[J]. Energy Policy, 2011, 39(2):720-732.
- [17]HALEY B. From Staples Trap to Carbon Trap:Canada’s Peculiar form of Carbon Lock-in[J]. Studies in Political Economy, 2011, 88(1):97-132.
- [18]MATTAUCH L, CREUTZIG F, EDENHOFER O. Avoiding Carbon Lock-in:Policy Options for Advancing Structural Change[J]. Economic Modelling, 2015, 50:49-63.
- [19]JANIPOUR Z, NOOIJ R, SCHOLTEN P, et al. Huijbregts, Heleen de Coninck. What are Sources of Carbon Lock-in in Energy-intensive Industry?A Case Study into Dutch Chemicals Production[J]. Energy Research&Social Science, 2020, 60:1-9.

-
- [20]徐盈之, 郭进, 刘仕萌. 低碳经济背景下我国碳锁定与碳解锁路径研究[J]. 软科学, 2015, 29(10):33-38.
- [21]蔡海亚, 徐盈之, 双家鹏. 区域碳锁定的时空演变特征与影响机理[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2016, 18(6):23-31.
- [22]张济建, 翟珮伶, 郭本海. 基于转换成本的高碳产业技术锁定效应分析[J]. 科技管理研究, 2018, 38(9):227-233.
- [23]孙丽文, 赵鹏, 任相伟, 等. 碳排放权交易减轻中国工业碳锁定了吗? ——基于 DID 及 SDID 方法的实证分析[J]. 科技管理研究, 2020, 40(9):205-211.
- [24]肖泽磊, 封思贤, 韩顺法. 我国高技术产业两阶段效率的测算及其提升路径分析——基于改进 SBM 方向性距离函数的实证[J]. 产业经济研究, 2012(4):10-18.
- [25]李静, 王姝兰. 基于偏向型技术进步的中国工业绿色生产率及分解——兼论偏向型技术的节水和减排效应[J]. 华东经济管理, 2020, 34(9):30-42.
- [26]孙鹏, 宋琳芳. 基于非期望超效率-Malmquist 面板模型中国海洋环境效率测算[J]. 中国人口·资源与环境, 2019, 29(2):43-51.
- [27]丁绪辉, 贺菊花, 王柳元. 考虑非合意产出的省际水资源利用率及驱动因素研究——基于 SE-SBM 与 Tobit 模型的考察[J]. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(1):157-164.
- [28]上官绪明, 葛斌华. 科技创新、环境规制与经济高质量发展——来自中国 278 个地级及以上城市的经验证据[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(6):95-104.
- [29]刘伟丽, 刘宏楠. 要素市场扭曲和制度质量对研发投入的影响——基于中国高技术产业的实证分析[J]. 财经问题研究, 2020(6):32-39.
- [30]于向宇, 李跃, 陈会英, 等. “资源诅咒”视角下环境规制、能源禀赋对区域碳排放的影响[J]. 中国人口·资源与环境, 2019, 29(5):52-60.