张俊，田雅，方诗琪．碳中和目标下淮河生态经济带土地利用碳排放效率评价及影响因素［J］．山西农业大学学报（社会科学版），2025，24（4）：68-78.
ZHANG Jun，TIAN Ya，FANG Shiqi. Evaluation of carbon emission efficiency of land use and influencing factors in the Huaihe River Ecological Economic Belt under carbon neutrality target［J］. Journal of Shanxi Agricultural University（Social Science Edition），2025，24（4）：68-78.
DOI：10.13842/j.cnki.issn1671-816X.2025.04.007

碳中和目标下淮河生态经济带土地利用碳排放效率评价及影响因素

张俊，田雅，方诗琪
（安徽财经大学 经济学院，安徽 蚌埠 233030）

摘 要：探究淮河生态经济带土地利用碳排放效率影响因素，为加快淮河生态经济带土地利用绿色转型、助力实现碳中和目标提供理论参考。基于2011—2023年淮河生态经济带土地覆被数据，采用超效率SBM—GML模型以及STIRPAT模型考察其土地利用碳排放效率及影响因素。结果发现：淮河生态经济带碳汇量相对稳定，净碳排放量呈上升趋势，建设用地是主要碳源；土地利用碳排放效率总体水平较低，空间上呈东南—西北方向分散、东北—西南方向集聚态势，方向性有所增强，GML指数呈“升—降—升”趋势，分解情况显示技术效率是GML指数上升的主要原因；环境规制、经济发展、人口密度、绿色技术进步对土地利用碳排放效率具有显著提升作用，城镇化和产业结构具有显著负向影响。

关键词：土地利用；碳排放效率；淮河生态经济带；碳中和
中图分类号：F301.24 **文献标识码：**A 文章编号：1671-816X（2025）04-0068-11

一、研究背景

为应对全球气候变暖的严峻挑战，推进碳减排已经成为全球共识。土地作为承载人类活动的核心场所和空间，是维持生态系统碳平衡的重要资源。土地利用是造成二氧化碳等温室气体排放的主要人类活动之一[1]，土地利用变化通过改变原有的土地覆被类型及其所承载的社会经济活动，对陆地生态系统碳平衡产生重要影响[2]，土地利用的碳减排效应一直以来深受国内外学术界的广泛关注[3]，如何提升土地利用的碳排放效率进而实现土地利用的碳中和，是当前亟待解决的重大现实问题。作为全球最大的碳排放大国，中国积极参与和推动全球碳减排，宣布将“力争2030年前实现碳达峰、2060年前实现碳中和”，这既是中国对全球气候治理的承诺和担当，也是推动高质量发展的内在要求。党的二十大和二十届三中全会对“积极稳妥推进碳达峰碳中和”作出了重要部署，为优化土地利用实现增汇减排提供了行动指南。《国家适应气候变化战略2023》指出国土空间要适应气候变化，形成绿色低碳的国土空间开发保护新格局。因此，面向碳中和目标研判土地利用碳排放效率的现状特征及其影响因素，有助于揭示土地利用的碳排放效应，对于提高土地要素配置精准性和利用效率、形成绿色低碳的国土空间发展格局以及助力双碳目标的实现具有重要的理论和实践价值。

土地承载着自然空间和人类活动，是在不同的利用模式下承担着碳源、碳汇双重功能的重要角色。土地利用碳排放是指土地利用类型转变及

收稿日期：2024-12-04 **修回日期：**2025-01-03
基金项目：国家社科基金规划项目“农业绿色低碳转型与粮食安全融合发展机制及路径研究”（23BJY150）；安徽省哲学社会科学规划项目“双碳目标下安徽粮食生产生态效率评价及提升路径研究”（AHSKY2022D060）；安徽财经大学研究生科研创新基金项目“碳中和目标下淮河生态经济带土地利用碳排放效率提升研究”（ACYC2023232）
作者简介：张俊，研究方向：农村经济学，资源环境经济学。

作为经济发展载体过程中引起的直接或间接碳排放[1]，国内外众多学者针对土地利用碳排放展开研究，孙赫等采用直接碳排放系数法和间接碳排放估测法分别测算中国各省土地利用直接和间接碳排放量，研究发现建设用地是主要碳源，林地是主要碳汇[4]。吉雪强等从省际角度出发，将土地利用类型划分为农业用地和建设用地，分别测算其碳排放量，其中建设用地碳排放用能源碳排放取代[3]。苑韶峰等将土地覆被类型划分为碳源地和碳汇地，修正长江经济带上中下游的碳排放系数并测算土地利用碳排放量，结果显示研究区域存在显著区域差异[5]。Lin等测算中国30个省份的土地利用碳排放强度，结果显示，中国土地利用碳排放量持续增长，土地利用碳排放强度存在空间异质性[6]。

碳排放效率弥补了土地利用碳排放总量作为环境成本而对土地利用带来的经济社会收益考虑不足的弱点。为进一步丰富土地利用碳排放研究，众多学者围绕土地利用碳排放效率展开研究，游和远等采用效率评价模型测算省域土地利用碳排放效率，结果表明仅有四省土地利用碳排放效率有效[7]。范建双等将土地利用碳排放量作为非期望产出，通过DEA—HM模型测算南京土地利用碳排放效率增长，研究表明其呈现空间正相关且集聚[8]。Shi等采用非期望产出SBM模型衡量了中国275个地级市的城市土地利用效率，结果表明，中国城市土地利用效率总体呈波动性增长，但仍处于较低水平，东部、西部和中部地区的城市土地利用效率均值逐渐下降[9]。为了提升土地利用碳排放效率，国内外学者开始研究其影响因素。王良健等研究发现，人口密度、交通基础设施和工业用地占比等影响因素在各区域对城市土地利用效率的作用存在明显差异，有必要采取具有区域针对性的措施提升城市效率[10]。Luo等研究表明固定资产投资、对外开放以及经济发展对中国各省土地利用效率的提升呈现显著的正面效应，城镇化进程的加速对土地利用效率的提升虽具有微弱的正向推动作用并且仅在东部地域范围内呈现显著性[11]。

现有文献仍存在不足：一是现有文献对土地利用碳排放系数的空间差异缺乏考虑，鲜有文献构建调节因子对土地利用碳排放系数进行调整，从而造成土地利用碳排放量测算存在误差。二是现有文献多聚焦于土地利用碳排放量的测度及效率评价，鲜有文献考察土地利用碳排放效率的影响因素。三是现有文献多从省、市维度考察土地利用碳排放效率，对大河流域土地利用碳排放效率及其影响研究不足。论文的边际贡献在于：第一，利用净初级生产力数据（NPP）构建淮河生态经济带土地利用碳排放系数调节因子，更加准确地测算土地利用碳排放量。第二，采用超效率SBM—GML模型以及STIRPAT模型考察淮河生态经济带土地利用碳排放效率及影响因素。第三，选取淮河生态经济带作为研究区域。淮河生态经济带以淮河流域为主体，复合了流域经济和区域经济双重特征[12]，拥有丰富的土地资源，但缺乏统筹的国土空间格局成为制约淮河生态经济带土地利用绿色转型的现实困境，导致淮河生态经济带兴于土地，困于土地。因此，分析淮河生态经济带土地利用碳排放效率及其影响因素，能够弥补碳中和目标下淮河生态经济带土地利用研究的缺失，为淮河生态经济带大河流域土地利用绿色转型和国土空间布局优化提供数据参考与理论支撑。

二、研究设计

（一）土地利用碳排放测算模型

参考方林等[13]的研究，将建设用地和耕地划分为碳源地，林地、草地、水域和未利用地划分为碳汇地。表达式如下：

$$C_{净}=C_{碳源}-C_{碳汇} \tag{1}$$

$$\begin{aligned} C_{碳源}&=C_{建设}+C_{耕地}\\ &=C_{化石}+C_{电力}+C_{人口}\\ &=\sum E_{\mathrm{i}}\times b_i\times\theta_i+\sum E_{\mathrm{e}}\times b_{\mathrm{e}}\times\theta_{\mathrm{e}}\\ &\quad+P\times B\times 365+S_{耕地}\times V_{耕地} \end{aligned} \tag{2}$$

$$C_{碳汇}=\sum C_i=S_i\times V_i \tag{3}$$

式中，$C_{净}$、$C_{碳源}$、$C_{碳汇}$分别表示净碳排放量、碳源量和碳汇量；$C_{耕地}$、$S_{耕地}$、$V_{耕地}$分别代表耕地的碳排放量、面积和碳排放系数；$C_{建设}$表示建设用地碳排放量；$C_{化石}$、$C_{电力}$、$C_{人口}$分别表示化石能源消耗、电力消耗和人口呼吸的碳排放量；E_i、b_i、θ_i分别表示各类能源消费量、标准煤折算系数和碳排放系数；E_e、b_e、θ_e分别表示电力消费量、标准煤折算系数和碳排放系数；P、B分别表示人口数量和每人每天碳排放量，参考胡冉再琪

等[14]的研究，B按0.2445kg/天/人进行计算；C_i、S_i、V_i分别表示第i种碳汇地碳排放量、面积和碳排放系数。其中，各类能源的标准煤折算系数和碳排放系数参考胡冉再琪等[14]的研究；非建设用地碳排放系数借鉴方林等[13]的研究，对净初级生产力数据（NPP）采取均值/当期值的处理，构建碳排放系数调节因子，调整淮河生态经济带“三区”的非建设用地碳排放系数，结果如表1所示。

表1 淮河生态经济带非建设用地碳排放系数

土地类型	耕地	林地	草地	水域	未利用地
东部海江河湖联动区	0.489	−0.602	−0.020	−0.249	−0.005
北部淮海经济区	0.484	−0.596	−0.020	−0.246	−0.005
中西部内陆崛起区	0.475	−0.585	−0.020	−0.242	−0.005

（二）土地利用碳排放效率评价模型

由于超效率SBM函数考虑了投入和产出的松弛变量对效率值的影响，从而克服了传统径向距离函数在评估效率时存在的有偏性问题，而且还能够有效解决线性规划无可行解问题。模型设定如下：

$$Min\pi=\frac{\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}(\bar{x}/x_{ik})}{\frac{1}{r_1+r_2}(\sum_{s=1}^{r_1}\bar{y}^d/y_{sk}^d+\sum_{q=1}^{r_2}\bar{y}^u/y_{qk}^u)} \tag{4}$$

$$\begin{cases}\bar{x}\geqslant\sum_{j=1,\neq k}^{n}x_{ij}\lambda_j;\ \bar{y}^d\leqslant\sum_{j=1,\neq k}^{n}y_{sj}^d\lambda_j;\ \bar{y}^d\geqslant\sum_{j=1,\neq k}^{n}y_{qj}^d\lambda_j;\\ \bar{x}\geqslant x_k;\ \bar{y}^d\leqslant y_k^d;\ \bar{y}^u\geqslant y_k^u;\\ \lambda_j\geqslant 0, i=1,2,\cdots,m;\ j=1,2,\cdots,n, j\neq 0;\\ s=1,2,\cdots,r_1;\ q=1,2,\cdots,r_2;\end{cases} \tag{5}$$

式中，假设有n个决策单元DMU，π表示土地利用碳排放效率值，m、r_1、r_2分别表示投入、期望产出和非期望产出，x、y^d、y^u分别表示相应的投入矩阵、期望产出矩阵和非期望产出矩阵中的元素，λ为权重向量。为保证不同时期效率的可比性，避免出现“线性规划无解”的问题，采用全局参比构造生产可能性集合。

GML指数相较于ML指数具有更优的可传递和循环累加特性，论文采用GML指数及其分解进一步测算淮河生态经济带土地利用碳排放效率。表达式如下：

$$\mathrm{GML}^{t,t+1}\left(x^t,(y^g)^t,(y^b)^t,x^{t+1},(y^g)^{t+1},(y^b)^{t+1}\right)=\frac{1+D_G^t\left(x^t,(y^g)^t,(y^b)^t\right)}{1+D_G^{t+1}\left(x^{t+1},(y^g)^{t+1},(y^b)^{t+1}\right)} \tag{6}$$

GML指数可以进一步分解：

$$\mathrm{GTECH}^{t,t+1}=\frac{1+D_G^t\left(x^t,(y^g)^t,(y^b)^t\right)}{1+D_C^t\left(x^t,(y^g)^t,(y^b)^t\right)}\times\frac{1+D_C^{t+1}\left(x^{t+1},(y^g)^{t+1},(y^b)^{t+1}\right)}{1+D_G^{t+1}\left(x^{t+1},(y^g)^{t+1},(y^b)^{t+1}\right)} \tag{7}$$

$$\mathrm{GEFCH}^{t,t+1}=\frac{1+D_C^t\left(x^t,(y^g)^t,(y^b)^t\right)}{1+D_C^{t+1}\left(x^{t+1},(y^g)^{t+1},(y^b)^{t+1}\right)} \tag{8}$$

$\mathrm{GML}^{t,t+1}$为淮河生态经济带的土地利用碳排放效率变化指数，$\mathrm{GTECH}^{t,t+1}$为全局技术进步指数，$\mathrm{GEFCH}^{t,t+1}$为全局技术效率指数。GML指数大于1表明淮河生态经济带土地利用碳排放效率改进，GTECH大于1表明技术水平进步，GEFCH大于1表明技术效率提升，反之则表明对应效率恶化。

（三）标准差椭圆

标准差椭圆方法能够精确揭示地理要素的空间分布特征。借鉴张俊等[15]的研究，选取标准差椭圆方法，分析考察期内淮河生态经济带土地利用碳排放效率的重心变化轨迹及离散趋势，并揭示其时空特征。

（四）指标体系构建

参考包婷等[16]、刘康等[17]的研究，投入指标选取土地、劳动力、资本和技术，期望产出指标选取地区生产总值，非期望产出指标选取土地利用净碳排放量。其中，土地又被划分为碳源地和碳汇地。指标体系见表2。

（五）数据来源

根据《淮河生态经济带发展规划》，淮河生态经济带包括29个市县。考虑到市县层面的经济禀赋差异，论文保留了26个地级市作为研究区域。论文数据主要来自于三方面：（1）土地覆被

表2 淮河生态经济带土地利用碳排放效率评价指标体系

一级指标	二级指标	三级指标
投入	土地投入	碳汇：林地、草地、水域与未利用地 碳源：建设用地、耕地（面积/公顷）
	劳动力投入	从业人员数（人）
	资本投入	固定资产投资（万元）
	技术进步	R&D经费支出（万元）
期望产出	经济产出	地区生产总值（万元）
非期望产出	碳排放产出	土地利用净碳排放量（吨）

数据来自武汉大学发布的中国逐年土地覆盖数据集（CLCD），与现有的其他土地覆被专题产品相比，CLCD与全球森林变化、全球地表水和不透水面时序数据集表现出良好的一致性（Yang等）[18]。（2）净初级生产力数据（NPP）来自美国NASAEOS/MODIS2000—2020年的MOD17A3HGF数据，空间分辨率500m×500m。（3）其他社会经济数据来自于2012—2023年各市统计年鉴，缺失数据使用插值法补齐。考虑到不同城市通胀情况有所差异，以2011年CPI指数为基期对经济类指标进行平减。

三、淮河生态经济带土地利用碳排放测算结果分析

基于公式（1）（2）（3），测算淮河生态经济带不同土地利用类型的净碳排放量、碳源和碳汇。表3报告了主要年份淮河生态经济带土地利用净碳排放量，结果显示，淮河生态经济带土地利用净碳排放量总体呈现上升趋势，从2011年的98 706.57万吨上升至2022年的114 228.70万吨，年均增长1.36%。三大区域净碳排放量均呈现上升趋势，其中，东部海江河湖联动区净碳排放量最少，年均增长1.41%，北部淮海经济区和中西部内陆崛起区净碳排放量年均增长分别为1.38%和1.37%。这可能是由于受《“十二五”控制温室气体排放工作方案》影响，东部地区开始向外转移高能耗、高碳排放产业，中西部和北部地区承接东部地区的转移产业，导致中西部和北部净碳排放量较高。

表3 主要年份淮河生态经济带土地利用净碳排放量（万吨）

年份	淮河生态经济带	东部海江河湖联动区	北部淮海经济区	中西部内陆崛起区
2011	987 06.57	10 568.45	54 060.46	34 077.66
2016	102 225.49	11 110.36	55 053.55	36 061.58
2022	114 228.70	13 523.43	60 563.52	40 141.76

表4报告了主要年份淮河生态经济带土地利用碳源结果。淮河生态经济带土地利用碳源总体呈现上升趋势，从2011年的98 872.57万吨上升至2022年的114 396.43万吨，年均增长1.52%。其中，东部海江河湖联动区、北部淮海经济区和中西部内陆崛起区碳源均呈现上升趋势，年均增长率分别为2.68%、1.18%和1.71%。建设用地是淮河生态经济带主要碳源，其碳排放量在东部、北部和中西部区域碳源中占比分别为98.33%、99.39%和98.83%。

表4 主要年份淮河生态经济带土地利用碳源（万吨）

年份	淮河生态经济带	东部海江河湖联动区	北部淮海经济区	中西部内陆崛起区
2011	98 872.57	10 588.50	54 077.35	34 206.72
2016	102 394.77	11 130.82	55 070.89	36 193.06
2022	114 396.43	13 541.85	60 581.07	40 273.52

表5报告了主要年份淮河生态经济带土地利用碳汇结果。淮河生态经济带土地利用碳汇总体呈现先上升后下降的趋势，年均增长0.11%，碳汇量相对稳定。其中，东部区域碳汇从2011年的20.05万吨上升至2016年的20.46万吨，后下降至2022年的18.42万吨，年均增长−0.79%。北

部区域和中西部区域碳汇均呈现上升趋势，年均增长分别为0.39%和0.21%。

表5 主要年份淮河生态经济带土地利用碳汇（万吨）

年份	淮河生态经济带	东部海江河湖联动区	北部淮海经济区	中西部内陆崛起区
2011	166.00	20.05	16.89	129.06
2016	169.28	20.46	17.34	131.48
2022	167.73	18.42	17.55	131.76

四、淮河生态经济带土地利用碳排放效率评价结果分析

（一）淮河生态经济带土地利用碳排放效率的时序演变

基于表达式（4）（5），采用非径向、非角度和非导向且规模报酬可变的超效率SBM模型对淮河生态经济带土地利用碳排放效率进行测度，结果如图1显示：考察期内淮河生态经济带土地利用碳排放效率值在0.548~0.763之间浮动，效率均值为0.633，总体水平有待提高。

从时序变化来看，淮河生态经济带土地利用碳排放效率总体呈现先下降后上升趋势，2011—2015年，效率值呈现下降趋势，从2011年的0.702下降至2015年的0.572。这可能是由于这一时期，淮河生态经济带处于经济发展的关键时期，粗放型工业企业占比较大，土地利用结构不合理，碳排放效率有待进一步提升。2016—2021年效率值呈现上升趋势，并于2021年达到最大值0.763。这可能是因为在此期间，我国对于温室气体排放量的管控力度加强，2016年国务院发布的《“十三五”控制温室气体排放工作方案》要求下调单位GDP二氧化碳排放比，该方案敦促淮河生态经济带针对土地利用的碳排放量进行控制。

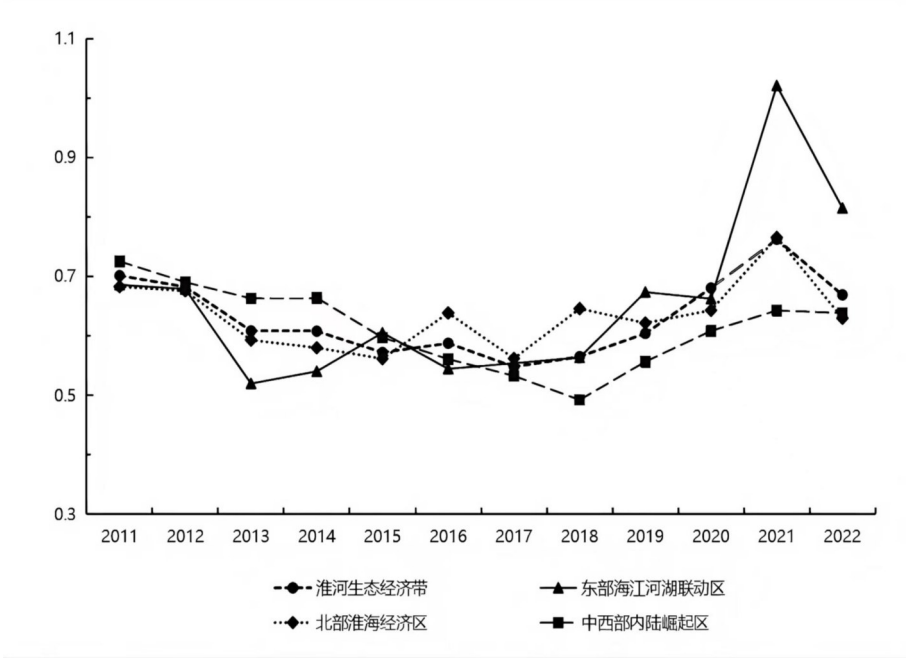


图1 2011—2022年淮河生态经济带土地利用碳排放效率变动趋势

从三大区域的测算结果来看，东部海江河湖联动区的土地利用碳排放效率值增幅最大，效率均值达到0.656。这可能是因为东部海江河湖联动区凭借优越的地理位置及经济基础带动减污降碳技术升级，对区域土地利用碳排放效率提升有促进作用。北部淮海经济区的土地利用碳排放效率值均值为0.634。这可能由于北部淮海经济区成熟的工业经济能带来先进的降碳技术，从而加

速工业绿色化转型，形成双向正反馈机制，带动区域内土地利用碳排放效率提升。中西部内陆崛起区的土地利用碳排放效率值增幅最小，效率均值低于淮河生态经济带总体均值，为0.615。这可能是因为中西部内陆崛起区仍处于粗放式经济增长模式，虽然区域内的土地利用碳排放效率有所提升，但是增速缓慢。

为进一步衡量淮河生态经济带土地利用碳排放效率的动态变化及其构成，基于公式（6）（7）（8）测算出GML指数，对效率进一步分析。表6报告了淮河生态经济带主要年份的GML指数及其分解。结果显示，考察期内淮河生态经济带土地利用碳排放效率的GML指数总体呈现“升—降—升”的趋势，年均增长－0.17%。进一步分解GML指数，技术效率呈现波动上升趋势，年均增长2.52%，技术进步呈现波动下降趋势，年均增长－1.64%。说明技术效率是GML指数上升的主要原因。

表7列出了淮河生态经济带三大地区主要年份的GML指数及其分解结果。其中，东部海江河湖联动区GML指数总体呈现上升趋势，年均增长1.78%，且大部分年份的GML指数大于1，表明该区域土地利用碳排放效率得到改善；中西部淮海经济区指数总体呈现上升趋势，波动幅度最小，年均增长率为0.27%；中西部内陆崛起区GML指数呈现波动上升的趋势，年均增长率2.25%。

表6 主要年份淮河生态经济带GML指数及其分解

年份	GML指数	技术效率变化	技术进步变化
2011－2012	0.968	0.957	1.048
2012－2013	0.903	1.080	0.891
2018－2019	1.117	0.976	1.148
2019－2020	1.147	0.990	1.157
2020－2021	1.193	1.102	1.112
2021－2022	0.884	1.159	0.824
均值	1.026	1.029	1.024

进一步分解三大区域的GML指数，结果显示：东部海江河湖联动区、北部淮海经济区和中西部内陆崛起区的技术效率年均增长率分别为0.76%、2.81%和1.45%，技术进步年均增长率分别为－7.47%、－11.35%以及－9.96%。其中，东部和中西部区域技术进步变化趋势与GML指数变化趋势一致，北部区域技术效率变化趋势与GML指数变化趋势一致，说明技术效率对北部区域GML指数的促进作用更显著。

表7 主要年份三大地区GML指数及其分解结果

年份	东部海江河湖联动区			北部淮海经济区			中西部内陆崛起区		
	GML指数	技术效率变化	技术进步变化	GML指数	技术效率变化	技术进步变化	GML指数	技术效率变化	技术进步变化
2011－2012	0.990	0.995	0.995	0.969	0.937	1.110	0.957	0.958	1.016
2012－2013	0.811	1.250	0.674	0.892	0.992	0.975	0.956	1.082	0.912
2018－2019	1.314	1.010	1.292	1.019	0.950	1.093	1.117	0.983	1.133
2019－2020	1.412	1.016	1.385	1.045	0.956	1.096	1.120	1.010	1.110
2020－2021	1.131	0.987	1.144	1.378	1.277	1.156	1.053	0.996	1.057
2021－2022	0.795	0.897	0.879	0.857	1.201	0.796	0.948	1.239	0.825
均值	1.049	1.023	1.036	1.050	1.045	1.039	0.993	1.017	1.004

（二）淮河生态经济带土地利用碳排放效率的空间分布

表8为淮河生态经济带2011—2022年土地利用碳排放效率标准差椭圆参数结果。从标准差椭圆的重心移动情况来看，2011—2022年淮河生态经济带土地利用碳排放效率的标准差椭圆重心坐标均位于安徽省。2011—2014年，标准差椭圆的重心坐标以0.04km/a的速度向西北方向移动了0.11km；2014—2018年，标准差椭圆重心坐标向东北方向移动，移动速度上升至0.08km/a，移动距离0.31km；2018—2022年，标准差椭圆的重心向东南方向移动，移动速度下降至0.05km/a，移动距离为0.19km。总体来看，标准差椭圆重心移动方向偏东北，移动距离和移动速度均呈现先

上升后下降的趋势。这可能是由于早期河南地区凭借农业大省的优势，注重耕地保护和利用，控制建设用地开发，土地利用碳排放效率得到改善，标准差椭圆中心坐标向西北方向偏移。党的十八大以来，绿色低碳建设力度加强，江苏地区凭借经济优势，加大绿色低碳技术研发投入，降低土地利用过程产生的碳排放，土地利用碳排放效率得到提升，标准差椭圆的重心向东北方向移动。

从标准差椭圆的分布范围来看，考察期内标准差椭圆长半轴长度呈现先下降后上升的趋势，短半轴长度呈现下降趋势。其中，2011—2014年，标准差椭圆长半轴长度由2.66km下降到2.59km，2014—2022年，标准差椭圆长半轴长度上升到2.83km；标准差椭圆短半轴长度由2011年的1.34km下降至2022年的1.20km。这表明淮河生态经济带土地利用碳排放效率具有东南—西北方向分散，东北—西南方向集聚的特征，与标准差椭圆的重心移动方向一致。

从标准差椭圆的形状指数来看，标准差椭圆形状指数在2011—2014年由0.33下降至0.32，后上升至2022年的0.40，数值稳定在0.35左右，这表明淮河生态经济带土地利用碳排放效率的方向性增强。从标准差椭圆的转角来看，2011—2022年标准差椭圆转角由92.24°上升至95.86°，上升幅度较小，这表明淮河生态经济带土地利用碳排放效率呈现稳定的东南—西北方向分散，东北—西南方向集聚格局。

表8 主要年份淮河生态经济带土地利用碳排放效率标准差椭圆参数

年份	重心坐标	移动方向	移动距离/（km）	移动速度/（km/a）	长半轴标准差/（km）	短半轴标准差/（km）	椭圆形状指数	转角θ/（°）
2011	116.72°E33.44°N	——	——	——	2.66	1.34	0.33	92.24
2014	116.61°E33.45°N	西北	0.11	0.04	2.59	1.33	0.32	90.18
2018	116.82°E33.68°N	东北	0.31	0.08	2.71	1.28	0.36	92.42
2022	116.98°E33.59°N	东南	0.19	0.05	2.83	1.20	0.40	95.86

五、淮河生态经济带土地利用碳排放效率的影响因素

（一）模型设定

参考Dietz等[19]的研究，选取STIRPAT模型分析淮河生态经济带土地利用碳排放效率的影响因素，模型设定如下：

$$\ln G_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 \ln Env_{it} + \alpha_2 \ln Urb_{it} + \alpha_3 \ln Eco_{it} + \alpha_4 \ln Ind_{it} + \alpha_5 \ln Pop_{it} + \alpha_6 \ln Tec_{it} + \varepsilon_{it} \quad (9)$$

式中，G_{it}表示淮河生态经济带土地利用碳排放动态效率指数（GMM），α_1、α_2、α_3、α_4、α_5和α_6分别表示环境规制Env_{it}、城镇化Urb_{it}、经济发展Eco_{it}、产业结构Ind_{it}、人口密度Pop_{it}和绿色技术进步Tec_{it}对于淮河生态经济带土地利用碳排放效率的弹性，α_0为常数项，ε_{it}为随机误差项。

（二）变量选取与描述性统计

被解释变量为淮河生态经济带土地利用碳排放动态效率指数（GMM），结果由GML指数累乘计算得出。在徐志雄等[20]、阳凯等[21]、马远等[22]、罗谷松等[23]、徐佳等[24]研究的基础上，解释变量选取环境规制、城镇化、经济发展、产业结构、人口密度和绿色技术进步。环境规制以政府环保投资额/GDP来衡量，城镇化以地区非农业人口/地区年末总人口来衡量；经济发展选取人均生产总值来衡量；产业结构以第二产业增加值占GDP比重来衡量；人口密度以地区常住人口/行政区面积来衡量；绿色技术进步以绿色专利申请数量来衡量。为消除伪回归和异方差影响，对经济发展、人口密度和绿色技术进步采取对数化处理。变量的描述性统计见表9。

（三）土地利用碳排放效率影响因素的估计结果

考虑到数据的自相关性、序列相关性和异方差性，选取混合回归POLS、FGLS、LSDV、TWFE和D－K模型进行估计，估计结果如表10所示。其中D－K双向固定模型模型拟合最优，且能同时控制自相关、序列相关和异方差问题对

表9 变量描述性统计

变量	均值	标准差	最小值	最大值
GMM指数	0.964	0.400	0.275	2.906
环境规制	0.012	0.004	0.005	0.028
城镇化	0.515	0.101	0.313	0.739
经济发展	10.603	0.515	9.219	11.952
产业结构	0.451	0.067	0.253	0.685
人口密度	6.530	0.303	5.623	7.146
绿色技术进步	5.487	1.116	1.792	8.003

回归结果的影响。下文将主要对D－K模型的回归结果进行分析。

1. 环境规制的估计系数在5%的水平上显著为正，且系数值最大，说明环境规制对土地利用碳排放效率具有显著正向作用。原因可能在于随着淮河生态经济带环境规制力度加大，一方面抑制了企业进行生产活动时产生的碳排放，另一方面驱动高碳排放企业迁移至环境规制宽松区域[3]，使淮河生态经济带土地利用碳排放效率得到提升。

2. 城镇化的估计系数在10%的水平上显著为负，说明城镇化率对土地利用碳排放效率有显著负向作用，这与曹周亮等[26]的结论相符。原因可能在于随着越来越多的农村人口进入城市，建设用地面积增加，能源消耗加大，导致碳排放效率降低。

3. 经济发展的估计系数在5%的水平上显著为正，说明经济发展水平对土地利用碳排放效率是正向作用，这一结论与罗谷松等[23]的结论相符。原因可能在于经济发展通常伴随着产业结构升级和技术水平提升，从而促进土地资源高效利用，提升土地利用碳排放效率。

4. 人口密度的估计系数在1%的水平上显著为正，说明人口密度对土地利用碳排放效率具有显著正向影响。原因可能在于人口集聚带来人力资本集聚，助推绿色低碳生产，提升土地配置效率，进而降低碳排放量，这与曹周亮等[25]的研究结论相符。

5. 产业结构的估计系数在10%的水平上显著为负，说明产业结构对于土地利用碳排放效率具有显著负向影响，这一结论与邓灵颖等[26]的研究相符。原因可能在于第二产业的发展在一定程度上会挤占碳汇地面积，建设用地开发带来大量化石能源消耗，导致碳排放量增加。

6. 绿色技术进步的估计系数在10%的水平上显著为正，说明绿色技术进步对土地利用碳排放

表10 土地利用碳排放效率的影响因素估计结果

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	POLS	FGLS	LSDV	TWFE	D－K
环境规制	15.135**	12.760**	16.097**	15.154*	20.835**
	(6.917)	(5.401)	(5.855)	(8.724)	(6.001)
城镇化	－0.391*	－0.215	－0.354*	－0.007*	－2.164*
	(0.485)	(0.885)	(0.666)	(1.441)	(1.799)
经济发展	0.097***	0.410**	0.231**	0.243**	0.655**
	(0.102)	(0.190)	(0.150)	(0.276)	(0.242)
人口密度	0.137	0.717**	0.137	1.605*	2.910***
	(0.090)	(0.298)	(0.180)	(0.827)	(0.297)
产业结构	－0.558*	－0.443*	－0.428*	－0.558*	－0.303*
	(0.421)	(0.247)	(0.371)	(0.428)	(0.202)
绿色技术进步	0.047	0.099*	0.051*	0.047**	0.082*
	(0.040)	(0.059)	(0.066)	(0.116)	(0.045)
时间固定	否	是	否	是	是
个体固定	否	是	是	是	是
常数	－1.358**	－2.397	－1.524*	－11.815*	－2.696**
	(1.058)	(3.661)	(1.983)	(6.828)	(3.204)
观测值	312	312	312	312	312
R^2－Adjusted	0.122	0.246	0.116	0.561	0.219

注：***、**、*分别表示系数在1%、5%和10%水平上显著，括号内数值为稳健标准误，下表同

效率提升具有正向作用。这可能是由于随着科研力度的加大，促进了绿色低碳技术的创新以及新型清洁能源的研发，从而带动淮河生态经济带土地利用碳排放效率提升。

（四）稳健性检验

论文选取更换被解释变量为土地利用碳排放效率、所有解释变量滞后一期和对被解释变量缩尾处理三种方法，对淮河生态经济带土地利用碳排放效率的影响因素进行稳健性检验，结果如表11所示。各变量的回归系数方向均未发生变化，回归结果与前文研究结论基本一致，研究结论具有可靠性。

六、研究结论与对策建议

（一）研究结论

论文基于碳中和背景，对淮河生态经济带土地利用碳排放效率进行测度并对其影响因素进行实证分析，研究结论如下：

1. 考察期内淮河生态经济带土地利用净碳排放量呈现上升趋势，碳汇量相对稳定。分区域来看，东部海江河湖联动区、北部淮海经济区和中西部内陆崛起区净碳排放量均呈现上升趋势，东部区域碳汇呈现先上升后下降趋势，北部和中西部区域碳汇呈现上升趋势。建设用地碳排放量在三大区域碳源占比中均达98%以上，是淮河生态经济带主要碳源。

2. 淮河生态经济带土地利用碳排放效率总体呈现先下降后上升趋势，上升幅度较小，效率均值为0.633。分区域来看，东部海江河湖联动区效率增幅最大且均值最高，均值为0.656；北部淮海经济区效率均值为0.634；中西部内陆崛起区效率增幅最小，均值为0.615。从GML指数分解情况来看，技术效率是其上升的主要原因。

3. 淮河生态经济带土地利用碳排放效率在东南—西北方向分散，东北—西南方向集聚。考察期内标准差椭圆的重心先向西北方向移动后向东北方向移动，重心移动距离和速度均呈现先上升后下降的变动趋势，方向性有所增强。

4. 环境规制、经济发展、人口密度和绿色技术进步对淮河生态经济带土地利用碳排放效率具有显著促进作用，而城镇化和产业结构对其具有负向影响。

（二）对策建议

针对研究结论，提出以下四点对策建议：

1. 缩小三区表距，加强区域协作联动。淮河生态经济带三大区域的土地利用碳排放效率存在明显差异，政府部门应当识别三大区域经济发展水平差异，考察其减碳增汇能力，深化区域协作机制，制定具有区域公平性的差异化国土空间优化路径。深化东部海江河湖联动区和淮海经济区

表11 稳健性检验结果

变量	更换被解释变量	解释变量滞后一期	缩尾处理
	D−K	D−K	D−K
环境规制	9.956***	13.691**	5.957**
	(2.050)	(6.177)	(3.987)
城镇化	−1.000	−0.402*	−0.204*
	(0.582)	(0.493)	(0.677)
经济发展	0.358**	0.016**	0.111*
	(0.131)	(0.162)	(0.185)
人口密度	2.135***	0.140**	0.629*
	(0.252)	(0.049)	(0.321)
产业结构	−0.213*	−0.057*	−0.253**
	(0.109)	(0.232)	(0.142)
绿色技术进步	0.066*	0.020*	0.077*
	(0.031)	(0.052)	(0.078)
常数	−2.156***	−4.005*	−1.696*
	(2.251)	(2.996)	(3.204)
观测值	312	311	312
R^2−Adjusted	0.215	0.151	0.164

的辐射带动作用，加快推动中西部内陆崛起区产业转型升级、生态修复及环境治理，推动淮河生态经济带土地利用绿色转型。

2. 优化国土空间布局，合理配置土地资源。根据淮河生态经济带资源环境特点，合理安排国土空间开发，确保碳源地和碳汇地协调发展。在碳源地开发方面，调整碳中和目标下新型城镇开发规划，控制城镇建设用地开发数量，实现碳源地集约高效利用，提升碳排放效率。在碳汇地保护方面，加大环境治理投资力度，严格保护耕地和永久基本农田，通过植树造林、退耕还林等方式，增强农业生态系统的碳捕捉和气候调节能力，显著提升碳汇能力。

3. 调整产业结构布局，创新绿色新技术。政府部门应当推动产业结构优化升级，提高第三产业比重，降低第二产业比重，严格控制高耗能高排放行业的数量。在第二产业内部，提升低耗能低排放产业的比重，推动传统制造业向绿色低碳转型，大力发展绿色科技创新产业和战略性新兴产业，推动绿色技术进步。政府部门还应当推进新能源开发利用，优化新能源和可再生能源供应通道和设施的用地布局，明确并严格落实清洁能源及可再生能源用地需求，从而减少产业结构变动过程中所产生的碳排放量，提升土地利用效率。

4. 加快新型城镇化建设，促进城乡融合发展。淮河生态经济带城市群应当进一步加快新型城镇化建设，推动以人为核心的城镇化，深化户籍制度改革，建立新增城镇建设用地指标配置和常住人口增加协调机制，合理配置城乡土地资源，促进城乡产业协同发展。

参 考 文 献

[1] 贾科利，李小雨，魏慧敏，等. 宁夏县域土地利用碳排放空间分异与风险研究[J]. 干旱区地理，2023，46(11)：1757-1767.

[2] 李缘缘，魏伟，周俊菊，等. 中国土地利用碳排放变化及协调分区[J]. 环境科学，2023，44（3）：1267-1276.

[3] 吉雪强，刘慧敏，张跃松. 中国省际土地利用碳排放空间关联网络结构演化及驱动因素[J]. 经济地理，2023，43(2)：190-200.

[4] 孙赫，梁红梅，常学礼，等. 中国土地利用碳排放及其空间关联[J]. 经济地理，2015，35（3）：154-162.

[5] 苑韶峰，唐奕钰. 低碳视角下长江经济带土地利用碳排放的空间分异[J]. 经济地理，2019，39（2）：190-198.

[6] Lin Q W，Zhang L，Qiu B K，et al. Spatiotemporal analysis of land use patterns on carbon emissions in China[J]. Land，2021，10(2)：141.

[7] 游和远，吴次芳. 土地利用的碳排放效率及其低碳优化——基于能源消耗的视角[J]. 自然资源学报，2010，25(11)：1875-1886.

[8] 范建双，虞晓芬，周琳. 南京市土地利用结构碳排放效率增长及其空间相关性[J]. 地理研究，2018，37(11)：2177-2192.

[9] Shi J Y，He Y F. Evolution characteristics of urban land use efficiency under environmental constraints in China[J]. Journal of Resources and Ecology，2021，12(2)：143-154..

[10] 王良健，李辉，石川. 中国城市土地利用效率及其溢出效应与影响因素[J]. 地理学报，2015，70(11)：1788-1799.

[11] Luo G S，Li T. Dynamic change and driving factors of land use efficiency differences affected by carbon emissions at the provincial level in China[J]. Acta Ecologica Sinica，2019，39(13)：4751-4760.

[12] 魏伟，赵浪，尹力，等. 1990—2020年淮河生态经济带国土空间格局时空演变特征及影响因素[J]. 地域研究与开发，2024，43(5)：12-19.

[13] 方林，李灿锋，李浩杰，等. 长江经济带土地利用碳排放时空效应及驱动力[J]. 草业科学，2022，39(12)：2539-2553.

[14] 胡冉再琪，孔雪松，文高辉，等. 武汉城市圈“三生”功能与土地利用碳排放耦合测度及协同分区[J]. 中国农业资源与区划，2024，45（5）：209-221.

[15] 张俊，汪辉，冯越珺. 农业生态系统服务价值评价及其驱动因素：基于动态调节当量的实证考察[J]. 财贸研究，2023，34(4)：33-46.

[16] 包婷，胡宝清. 桂西南喀斯特—北部湾土地利用碳排放效率时空特征及影响因素分析[J/OL]. 自然资源情报，1-9[2024-10-08]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1798.N.20240613.1302.006.html.

[17] 刘康，张寒，王玲，等. 新型城镇化对土地利用碳排放效率的影响机制研究——以黄土高原为例[J]. 中国土地科学，2024，38(7)：109-119.

[18] Yang J，Huang X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. Earth System Science Data，2021，13（8）：3907-3925.

[19] Dietz T, Rosa E. Rethinking the environmental impacts of population, affluence and technology[J]. Human Ecology Review, 1994, 1 (2): 277-300.
[20] 徐志雄，徐维祥，刘程军. 环境规制对土地绿色利用效率的影响[J]. 中国土地科学，2021，35（8）：87-95.
[21] 阳凯，王奕文，黄春华，等. 洞庭湖区域土地利用变化的碳排放效应研究[J]. 生态科学，2023，42（2）：193-201.
[22] 马远，刘真真. 黄河流域土地利用碳排放的时空演变及影响因素研究[J]. 生态经济，2021，37（7）：35-43.
[23] 罗谷松，李涛. 碳排放影响下的中国省域土地利用效率差异动态变化与影响因素[J]. 生态学报，2019，39（13）：4751-4760.
[24] 徐佳，崔静波. 低碳城市和企业绿色技术创新[J]. 中国工业经济，2020（12）：178-196.
[25] 曹周亮，张欣蓉，员学锋，等. 基于土地利用变化的陕西省县域碳排放时空变化及影响因素研究[J]. 水土保持通报，2022，42（5）：376-385
[26] 邓灵颖，李红波. 武汉城市圈土地利用碳排放时空演变及驱动因素[J]. 水土保持研究，2024，31（1）：345-353.

Evaluation of carbon emission efficiency of land use and influencing factors in the Huaihe River Ecological Economic Belt under carbon neutrality target

ZHANG Jun, TIAN Ya, FANG Shiqi

(*College of Economics, Anhui University of Finance & Economics, Bengbu* 233030, *China*)

Abstract: The purpose of this study is to explore the influencing factors of carbon emission efficiency of land use in the Huaihe Eco-economic Belt and provide theoretical reference and empirical evidence for accelerating the green transformation of land use in the Huaihe Eco-economic Belt and helping achieve the goal of carbon neutrality. The methods of literature research, Super efficient SBM-GML model and standard deviation ellipse were employed. The research findings show that: the carbon sink in the Huaihe Eco-economic Belt is relatively stable, while the net carbon emissions are on the rise, with the construction land being the main source of carbon emissions; the overall level of carbon emission efficiency from land use is relatively low, showing a trend of first decreasing and then increasing, spatially dispersed in southeast-northwest direction and concentrated in northeast-southwest direction, and the direction has increased, the GML index showed a "rise-fall-rise" trend, and the decomposition showed that technological efficiency is the main reason for the increase in GML index; Environmental regulations, economic development, population density, and green technological progress have a significant impact on improving the carbon emission efficiency of land use, while urbanization and industrial structure have a significant negative impact.

Keywords: Land use; Carbon emission efficiency; Huaihe River Ecological Economic Belt; Carbon neutrality

（编辑：赫雪侠）