安徽省城市土地绿色利用效率时空分异及其影响因素

马 明[1,2], 毛理虎[1,2], 刘宇戈[1,2], 李久林[1,2], 姚晓洁[1]

(1.安徽建筑大学 建筑与规划学院, 安徽 合肥 230601; 2.安徽省城镇化建设协同创新中心, 安徽 合肥 230601)

摘　要: [目的] 探究城市土地绿色利用效率时空分异及影响因素,为优化国土空间开发保护格局、推动城市土地可持续发展提供科学依据。[方法] 运用 SBM 方向性距离函数(SBM-DDF)模型测度安徽省 2008—2022 年城市土地绿色利用效率值,选取核密度分析和重心迁移模型分析时空分异特征,联合地理探测器和地理时空加权回归(GTWR)模型研究其影响因素。[结果] ①2008—2022 年内安徽省城市土地绿色利用效率均值为 0.77,整体分为 2008—2014 年直线下降和 2015—2022 年波动上升两个阶段。②区域内存在两极分化现象,中低值区城市有所增加、高值区城市较为稳定,地区差距逐渐扩大;全省效率值重心轨迹先向东南再向西北迁移,西北较东南地区改善更为明显,但仍为"南高北低"非均衡空间特征。③主导因素依次为环保投入、城乡结构、城市绿化、环境规制和产业结构,其中产业结构和环保投入交互作用最强,q 值为 0.82;各因素空间异质性显著,城市绿化对所有城市均影响为正,城乡结构、环境规制、环保投入对中部和南部地区影响为正、对北部地区影响为负,产业结构对资源型城市负向影响突出。[结论] 应通过严格土地用途管制,促进产业结构升级,加大生态环保力度,强化整体协作发展,制定差异发展路径,助推安徽省城市土地绿色利用效率全面提升。

关键词: 城市土地绿色利用效率; 时空分异; 影响因素; 安徽省

文献标识码: A　　**文章编号:** 1000-288X(2025)01-0306-11　　**中图分类号:** F301.24, X321

文献参数: 马明, 毛理虎, 刘宇戈, 等.安徽省城市土地绿色利用效率时空分异及其影响因素[J].水土保持通报,2025,45(1):306-316. Ma Ming, Mao Lihu, Liu Yuge, et al. Spatiotemporal differentiation and influencing factors of urban land green utilization efficiency in Anhui Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025,45(1):306-316. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2025.01.032; CSTR:32312.14.stbctb.2025.01.032.

Spatiotemporal differentiation and influencing factors of urban land green utilization efficiency in Anhui Province

Ma Ming[1,2], Mao Lihu[1,2], Liu Yuge[1,2], Li Jiulin[1,2], Yao Xiaojie[1]

(1.*College of Architecture and Planning*, *Anhui University of Architecture*, *Hefei*, *Anhui* 230601, *China*; 2.*Anhui Collaborative Innovation Center for Urbanization Construction*, *Hefei*, *Anhui* 230601, *China*)

Abstract: [Objective] The spatial and temporal variations in urban land green utilization efficiency and the influencing factors were investigated to provide a scientific basis for optimizing the development and protection patterns of national land space and promoting the sustainable development of urban land. [Methods] The slack-based measure-directional distance function (SBM-DDF) model was used to measure the land green utilization efficiency of urban land in Anhui Province from 2008 to 2022. Kernel density analysis and center of gravity migration models were selected to analyze the spatial and temporal variations, while the geodetector and geographic time weighted regression (GTWR) models were combined to study the factors influencing urban land utilization efficiency. [Results] ① The average value of green land utilization efficiency of urban land in Anhui Province from 2008 to 2022 was 0.77 and was divided into two phases: a straight-line decline from 2008 to 2014 and a fluctuating increase from 2015 to 2022. ② Polarization phenomena were observed in the region, with the low value of the city increasing, the high value being more

收稿日期: 2024-08-11　　**修回日期:** 2024-11-05　　**采用日期:** 2024-11-05

资助项目: 安徽省自然科学基金项目"'碳中和'目标下皖北地区城市公园绿地生态效益评价及价值估算研究"(2308085ME183); 安徽省高校省级人文社会科学研究优秀青年项目(2022AH030030); 安徽省建筑大学校科研平台开放课题(XTCX2024ZR01)

第一作者: 马明(1979—)男(汉族),安徽省临泉县人,硕士,副教授,主要从事国土空间规划技术与方法方面的研究。Email:ahjzu_mam@163.com。

stable, and the regional gap gradually expanding. The gravity center trajectory of efficiency value of the whole province moved first to southeast and then to northwest, and the improvement was more obvious in northwest than in southeast. Although it remained high in the south and low in the north, indicating unbalanced spatial characteristics. ③ The leading factors were environmental protection inputs, urban and rural structures, urban greening, environmental regulation, and industrial structure, the interaction between industrial structure and environmental protection inputs was the strongest, with a q-value of 0.82. The spatial heterogeneity of the leading factors was significant: urban greening influenced all cities positively; urban and rural structure, environmental regulation, and environmental protection inputs influenced the central and southern regions positively and the northern region negatively; and the industrial structure influenced the resource cities negatively. Industrial structure has a significant negative influence on resource-oriented cities. [Conclusion] Strict land use control, promotion of industrial structure upgrading, increasing ecological and environmental protection, strengthening overall collaborative development, and formulating differentiated development paths should be used to promote the overall improvement of green land use efficiency in the urban areas of Anhui Province.

Keywords: urban land green utilization efficiency; spatio-temporal differentiation; influencing factors; Anhui Province

土地作为不可再生资源,是人类从事各种生产活动的重要载体。绿色利用强调绿色发展理念,实现经济、社会、生态效益的协调统一,提高土地绿色利用效率是解决国土空间利用中各种矛盾、推进经济社会转型和城市可持续发展的关键所在[1]。2022 年 10 月,党的二十大强调要加快发展方式绿色转型,实施全面节约战略,推进各类资源节约集约利用。2024 年 7 月,党的二十届三中全会文件明确提到,要深化土地制度改革,健全同宏观政策和区域发展高效衔接的土地管理制度。因此,在土地资源趋紧、发展方式转变和生态风险严峻的背景下,进行城市土地绿色利用效率(urban land green use efficiency, ULGUE)评价,探究时空分异特征及其影响因素,对践行生态文明理念,实现高质量发展目标以及城市土地绿色利用具有重要意义。

ULGUE 是由城市土地利用效率扩展而来,国外学者研究起步较早,主要围绕城市土地利用效率评价及影响机制展开[2-3]。近年来,随着生态文明和绿色发展理念的普及,国内学者对 ULGUE 的研究开始增多,主要集中在内涵界定、效率评价、时空分异及影响因素等方面。关于内涵界定尚未统一,但普遍认为其本质是在追求综合效益最大化和环境污染最小化基础上,所反映城市生产要素投入系统与产出系统的空间比例关系。效率评价上,多选取经济、社会、生态不同维度和环境污染等方面指标来表征 ULGUE[4],主要以随机前沿分析(SFA)为代表的参数分析法和以数据包络分析(DEA)为代表的非参数分析法进行效率测度,后者形式更加灵活且能客观处理多投入产出关系,由此衍生的基于松弛度测算(SBM)系列模型逐渐成为主流测算方法[5],可依旧存在效率值偏差问题,建立 SBM 方向性距离函数(slack based measure-directional distance function, SBM-DDF)模型,则能更加真实测算效率值。时空分异上,多以 Malquist 指数、核密度估计揭示 ULGUE 时序演进特征,以重心迁移模型、空间自相关刻画空间分异现象。影响因素研究分为两类,一是从新型城镇化[6]、低碳试点政策[7]、铁路网联系[8]等单一视角切入,二是构建经济、社会、生态多维指标综合探究对 ULGUE 的影响,常见方法多为双重差分模型、中介效应模型和受限因变量(Tobit)模型等非空间模型[9],仅能诠释作用力大小无法探索空间效应,而地理探测器联合地理时空加权回归(geographically and temporally weighted regression, GTWR)模型,可基于定量分析进一步揭示空间异质性。研究范围上,分为全国[10]、典型流域[11]、城市群[12]和省[13]等不同研究区,但多聚焦于宏观区域或经济发达地区,对中西部关注较少。安徽省同时作为国家中部崛起战略要地和长三角一体化发展的重要成员,是近年来我国发展速度最快的地区之一,在快速城镇化、工业化进程中,土地与资源开发利用面临结构失调、模式粗放、生态破坏和环境污染等现实问题,严重制约经济社会高质量发展,亟需进行土地绿色利用转型。鉴于此,本研究以安徽省为研究区,使用 SBM-DDF 模型测算 2008—2022 年 ULGUE 值,通过核密度分析和重心迁移模型分析其时空动态分异特征,借助地理探测器和 GTWR 模型识别 ULGUE 影响因素及各因素空间异质性,以期为安徽省制定差异化土地绿色利用措施、优化区域国土空间开发保护格局、高质量推进城市可持续发展提供科学依据与决策支持。

1 研究区域与数据来源

1.1 研究区概况

安徽省地处 114°54′—119°37′E,29°41′—34°38′N,位于中国中部地区,总面积约为 1.40×10^5 km^2,下辖 16 个地级市(图 1)。2022 年该省常住人口为 6 127 万人,GDP 总量为 4.50×10^{12} 元,以占全国 4.34%的常住人口和 1.45%的土地资源,承载了 3.72%的国内生产总值。

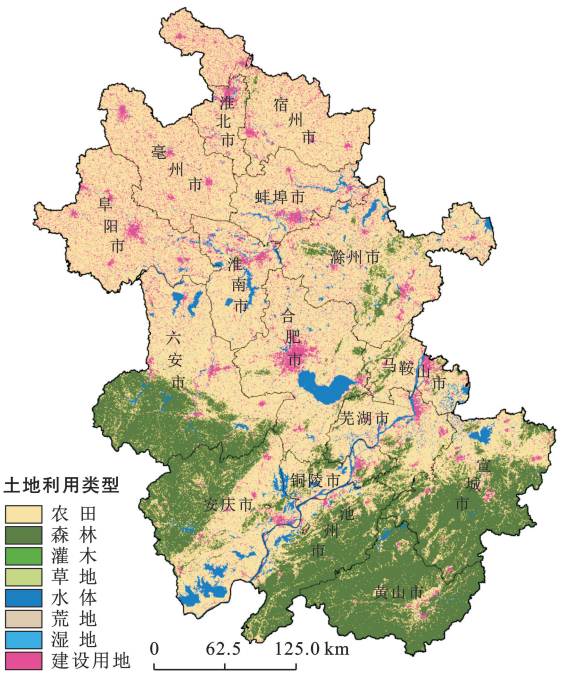

图 1 安徽省土地利用现状图

Fig.1 Land use status of Anhui Province

地理空间上南高北低,地形以平原、丘陵和山区为主,根据第 3 次全国国土调查数据显示,安徽省耕地、园地、林地、草地、湿地、城镇及工矿用地、交通运输用地、水域及水利设施用地面积分别为 5.55×10^4 km^2,3 700 km^2,4.09×10^4 km^2,500 km^2,1.76×10^4 km^2,3 100 km^2,1.73×10^4 km^2;与第 2 次全国国土调查数据相比,城镇村及工矿用地上涨了 13.17%,耕地、草地和水域及水利设施用地则分别下降了 6.10%,40.68%和 7.05%。

1.2 数据来源

研究数据主要包括安徽省城市行政区划、社会经济及土地利用数据。其中,行政区划数据来自中国科学院资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn);社会经济数据均来自 2009—2023 年《中国城市统计年鉴》《安徽统计年鉴》及各地级市统计年鉴;土地利用数据来自中国年度土地覆盖数据集(CLCD)(http://doi.org/10.5281/zenodo.4417810),分辨率为 30 m。关于部分年份缺失数据,采用线性插值法和整体均值法对其补齐。研究期内安徽省进行多次行政区划调整,为保证数据一致性和完整性,按照 2022 年行政区划,把调整前地区相关数据合并入调整后的地区,具体将 2011 年前庐江县、巢湖市区归入合肥市,含山县、和县归入马鞍山,无为县归入芜湖市;将 2015 年前寿县归入淮南市,2016 年前枞阳县归入铜陵市。

2 研究方法与指标选取

2.1 研究方法

2.1.1 SBM 方向性距离函数模型 SBM-DDF 模型是一种改进的非参数分析法,它考虑了传统 DEA 模型忽略的松弛变量和环境变量,解决了 SBM 模型不能同时兼顾投入产出关系非比例调整的问题,让效率值测算结果更加准确[14]。借助 Matlab 2022 a 测算 ULGUE,作为时空分异和影响因素研究基础,计算公式[15]为:

$$\rho=S_v^t(x_i^t,y_i^t,b_i^t,g^x,g^y,g^b)=\frac{1}{3}\max\left[\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}\frac{s_n^x}{g_n^x}+\frac{1}{M}\sum_{m=1}^{M}\frac{s_m^y}{g_m^y}+\frac{1}{K}\sum_{k=1}^{K}\frac{s_k^b}{g_k^b}\right] \tag{1}$$

$$s.t.\lambda Y-s_m^y=y_{im}^t;\quad \lambda B+s_k^b=b_{ik}^t;\quad \lambda B+s_n^x=x_{in}^t$$

$$\lambda\geqslant0,\ \lambda l=1;\quad S_n^x\geqslant0,\ s_m^y\geqslant0,\ s_k^b\geqslant0$$

式中:ρ 为 ULGUE 测度值,当 $\rho=1$ 时,表明效率达到最高效的效率前沿,$\rho<1$ 时,即效率存在损失。将每个地级市视为一个决策单元(DMU),每个 DMU 中存在 N 种投入、M 种期望产出和 K 种非期望产出指标,具体表示为 $x=(x_1,x_2\cdots x_N)\in R_N^+$,$y=(y_1,y_2\cdots y_M)\in R_M^+$,$b=(b_1,b_2\cdots b_K)\in R_K^+$;则 (x_i^t,y_i^t,b_i^t) 为第 i 个城市第 t 年的投入产出变量;(g^x,g^y,g^b) 分别为投入缩减、期望产出增加和非期望产出减少的方向变量;(s_n^x,s_m^y,s_k^b) 分别为投入冗余、期望产出不足和非期望产出过剩的松弛变量,其值越大表明效率越低;Y,B,X 分别为期望产出、非期望产出和投入矩阵;λ 为权重向量。

2.1.2 核密度估计 核密度估计是非参数的样本概率密度统计法,通过客观预设函数准确捕捉要素演进状态的差异性[16]。使用 Matlab 2022a 和 Eviews 10.0 绘制核密度曲线,分析 ULGUE 时序动态演化,计算公式[17]为:

$$f(x)=\frac{1}{nh}\sum_{i=1}^{n}K\left[\frac{(x_i-\bar{x})}{h}\right] \tag{2}$$

式中:$f(x)$ 为核密度估计值;n 为城市数量;h 为大

于 0 的带宽,是反映曲线平滑和精准度的参数;$K(\cdot)$为核函数,选用精度较高的高斯核函数;$x_i-\bar{x}$ 为第 i 个城市效率值 x_i 到效率均值 $\bar{x}$ 的距离。

2.1.3　重心迁移模型　重心迁移模型是反映区域单元空间变迁的工具,通过偏移轨迹揭示空间动态变化[18]。在 ArcGIS 10.8 中使用平均中心计算效率重心坐标并连成轨迹,探究 ULGUE 空间格局变化,计算公式[19]为:

$$X_t=\frac{\sum_{i=1}^{n}m_{ti}x_i}{\sum_{i=1}^{n}m_{ti}},\quad Y_t=\frac{\sum_{i=1}^{n}m_{ti}y_i}{\sum_{i=1}^{n}m_{ti}} \tag{3}$$

$$D=R\times\sqrt{(Y_{t+1}-Y_t)^2+(X_{t+1}-X_t)^2} \tag{4}$$

式中:X_t,Y_t 分别为第 t 年效率值重心横、纵坐标;m_{ti}为第 t 年第 i 个城市效率值;x_i,y_i 为第 i 个城市空间横、纵坐标;D 表示效率值重心移动距离;R 为常数取值 111.11 km;t 为年份;n 为城市数量。

2.1.4　地理探测器模型　地理探测器是研究地理要素空间差异性形成机理的模型,能更好处理变量并揭示不同因素间交互关系[20]。在 SPSS 中用 K-均值聚类分析将数据分为 5 级变量导入地理探测器,定量探究影响因素 X 对效率值 Y 作用大小,计算公式[21]为:

$$q=1-\frac{\sum_{i=1}^{k}n_i\sigma_i^2}{n\sigma^2} \tag{5}$$

式中:q 为影响因素作用大小,介于[0,1],值越大表明 X 对 Y 解释力越强;k 为变量 X 和 Y 的分层;n,σ^2 分别为全区总单元和效率值总方差;n_i,σ_i^2 分别为第 i 层单元数和效率值层内方差。

2.1.5　地理时空加权回归模型　GTWR 是对传统地理加权回归(GWR)进行扩展的多元线性回归模型,在研究变量空间异质性时综合考虑时间非平稳性,能更有效地估计因子参数[22]。在 ArcGIS 10.8 中用 GTWR 插件进行回归分析,进一步探究影响因素空间异质性,计算公式[23]为:

$$Y_i=\beta_0(u_i,v_i,t_i)+\sum_{k=1}^{P}\beta_k(u_i,v_i,t_i)X_{ik}+\varepsilon_i \tag{6}$$

式中:Y_i 为第 i 个城市效率值;(u_i,v_i,t_i)为第 i 个城市经度、纬度和时间坐标;$\beta_0(u_i,v_i,t_i)$为第 i 个城市回归截距;P 为影响因素个数;$\beta_k(u_i,v_i,t_i)$为第 k 个因素在第 i 个城市回归参数;X_{ik} 为第 k 个因素在第 i 个城市影响力;ε_i 为第 i 个城市残差。

2.2　指标选取

2.2.1　评价指标选取　依据其内涵本质及已有研究[4,10,24],参考土地经济学“投入—产出”理论,构建 ULGUE 评价指标体系(表 1)。投入视角上,土地、资本、劳动力作为基础性生产要素,土地是进行城市生产建设的空间载体,选取体现城市扩张的城市建成区面积表征土地投入,劳动力和资本要素配置决定土地上各项活动能否有序高效运行,选取从事城市支柱产业的二、三产业从业人数表征劳动力投入,选取反映城市综合资本投入的固定资产投资额表征资本投入;科技是影响土地利用过程中绿色集约水平的重要要素,选取体现科技创新的研究与试验发展经费支出进行表征。产出视角上,分为期望产出和非期望产出,期望产出包括经济、社会和生态综合效益,经济效益直观反映土地利用经济水平,社会效益体现城市化中居民分配所得,生态效益体现土地利用环境友好程度,分别用二、三产业产值、在岗职工平均工资、建成区绿化覆盖率进行表征。非期望产出考虑城市土地工业污染排放,选取工业废水、废气以及固体废弃物进行表征。为消除价格影响,所有经济数据均以 2008 年为基期进行换算处理。

表 1　土地绿色利用效率评价指标

Table 1　Evaluation indicators of urban land green use efficiency

指标类型	一级指标	二级指标
投入指标	土地投入	城市建成区面积/km^2
	资本投入	固定资产投资/万元
	劳动力投入	二、三产业从业人数/万人
	科技投入	研究与试验发展经费支出/亿元
期望产出指标	经济效益	二、三产业产值/亿元
	社会效益	在岗职工平均工资/万元
	生态效益	建成区绿化覆盖率/%
非期望产出指标	环境污染	工业废水/10^8 t
		工业废气/10^8 m^3
		工业固体废弃物/10^4 t

2.2.2　影响因素指标选取　城市土地绿色利用受复杂活动影响,借鉴现有研究成果[1,25-26],从“经济—社会—生态”不同维度遴选 9 个因素(表 2)。经济维度是城市土地绿色利用的物质基础,经济水平高低影响单位土地资源开发强度与利用水平,对外开放影响土地利用资金和技术要素配置,政府控制影响土地利用政策与开发方式,选取人均 GDP、实际利用外资、地方财政一般支出进行表征;社会维度是城市土地绿色利用的重要保障,城乡结构调整影响土地利用功能与结构,产业结构特征影响土地绿色利用产出效益,基础设施建设影响土地绿色利用外部发展条件,选取城市化率和二、三产业比值以及人均道路面积进行表征;生态维度是城市土地绿色利用的核心体现,城市绿化影响土地污染降解和生态空间分布,环境规制影响土地污染排放标准与规模,环保投入影响土地绿色利用保护

与治理，选取建成区绿化覆盖率、工业固体废弃物利用率、环保支出比重进行表征。为消除各因素指标间量纲不同的影响，在模型计算前对数据进行归一化处理。

表 2 城市土地绿色利用效率影响因素指标

Table 2 Impact factors indicators of urban land green use efficiency

指标类型	一级指标	二级指标/单位
经济维度	经济水平	人均 GDP/万元
	对外开放	实际利用外资/万元
	政府控制	地方财政一般支出/亿元
社会维度	城乡结构	城市化率/%
	产业结构	二、三产业比值
	基础设施	人均道路面积/m^2
生态维度	城市绿化	建成区绿化覆盖率/%
	环境规制	工业固体废弃物利用率/%
	环保投入	环保支出比重/%

3 结果与分析

3.1 城市土地绿色利用效率结果及时空分异特征

3.1.1 效率测度结果 使用 SBM-DDF 模型测算 ULGUE 结果，参考相关研究[27]，将效率值分为低水平(0.00～0.60)、较低水平(0.61～0.70)、中等水平(0.71～0.80)、较高水平(0.81～0.99)、效率前沿(效率值=1.00)等 5 个等级(图 2)。安徽省整体层面，ULGUE 均值由 2008 年的 0.78 上升至 2022 年的 0.85，增幅为 8.97%，整体均值为 0.77，处于中等水平，仍有较大提升空间。2008—2014 年效率值连续下降，降幅为 4.39%；2015—2022 年波动上升，由 2015 年的 0.74 上升至 2022 年的 0.85，增幅达 14.86%。各城市层面，除安庆市一直处于较低水平，黄山市、池州市一直处于效率前沿外，其余城市效率值等级变动明显。六安市、宿州市、淮南市、芜湖市、宣城市稳步上升，淮北市、阜阳市、合肥市、滁州市波动上升，其中合肥市、滁州市增幅最大，从 2008 年低水平提升至 2022 年的效率前沿；蚌埠市、铜陵市波动下降，铜陵市由 2008 年效率前沿下降至 2022 年较高水平，降幅最大；马鞍山市、亳州市基本不变，2022 年与 2008 年等级保持一致。

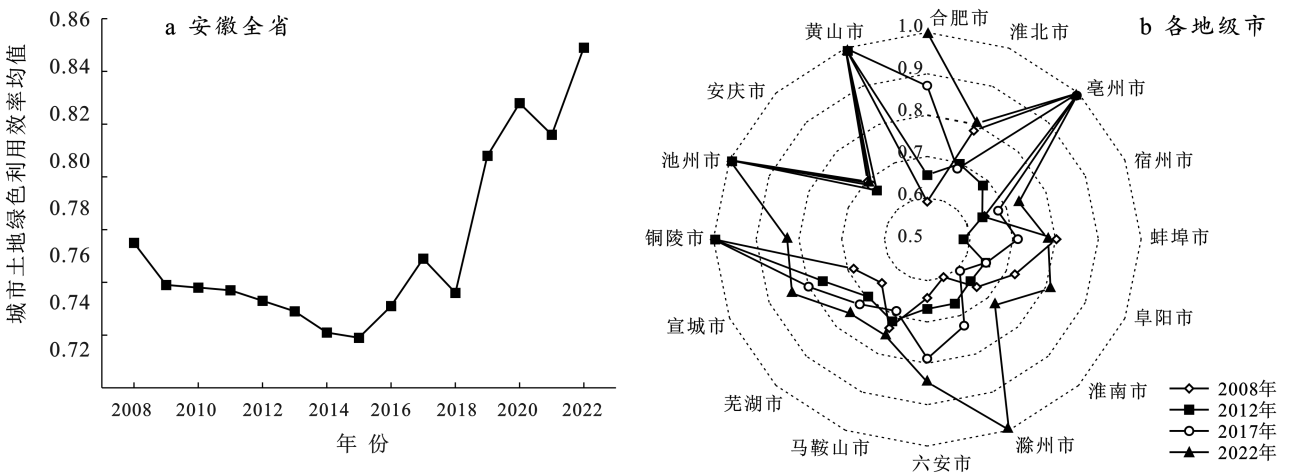

图 2 安徽省 2008—2022 年城市土地绿色利用效率测度结果

Fig.2 Measurement results urban land green use efficiency for Anhui Province during 2008—2022

3.1.2 时序演进特征 结合三维和二维核密度曲线，揭示 ULGUE 时序动态演进特征(图 3)。波峰重心上，2008—2014 年，低值重心向左偏移，高值重心略微向右偏移，但低值区比重更大；2015—2022 年，低值和高值重心整体向右偏移，表明研究期内效率发展趋势为先降后升，与上文测算结果相符。波峰数量上，2008—2014 年，整体表现为双峰并存态势，两极分化格局突出；但 2015—2022 年，曲线波峰不再明显，极化特征有所减弱。波峰高度和形状上，主、次峰高度趋于降低，整体形状由“尖峰”向“宽峰”转变，2022 年主峰明显由陡峭变为平缓，次峰也有所变缓，表明城市间差异在扩大。曲线拖尾性上，研究期内左侧拖尾长于右侧，左侧拖尾不断缩短变薄，主峰重心位置逐渐右移，低值区城市比重略微减少，中值区城市比重有所增加；右侧拖尾先缩短后加长，高值区城市所占比例较为稳定。

3.1.3 空间格局特征 通过标准差椭圆及重心迁移路线，探究 ULGUE 空间变化趋势(图 4)。标准差椭圆重心变化幅度较小，一直停留在合肥市，整体相对平稳。根据长短轴、扁率、旋转角度变化来看，不同时期生成的椭圆基本呈东南—西北走向，说明区域内东南、西北部城市的效率值变化居主导地位。2008—2016 年，芜湖市、宣城市效率值不断增长，由较低水平上升到中等水平，南部地区总体 ULGUE 水平

较高,重心坐标向东南方向迁移 12.62 km;2017—2022 年,西北地区 ULGUE 水平不断跨越提升,2022 年所有城市均在中等水平以上,其中亳州市达到效率前沿,重心坐标转而向西北方向偏移,总迁移距离为13.90 km。整体来看,重心轨迹向西北移动距离大于东南,说明西北地区 ULGUE 水平较于东南地区改善更明显,但北部整体效率水平低于南方,依旧呈现"南高北低"空间格局。

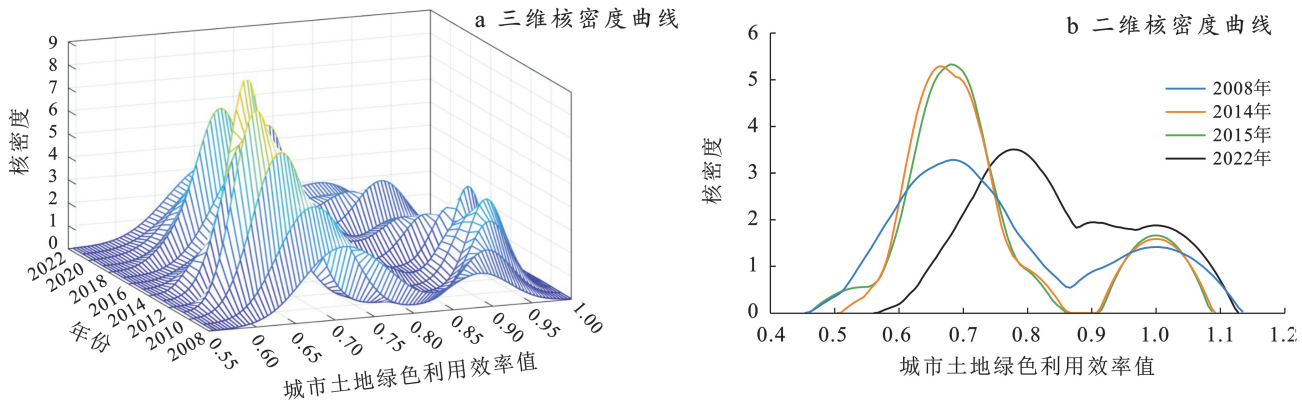

图 3　安徽省 2008—2022 年城市土地绿色利用效率核密度估计

Fig.3　Kernel density estimates of urban land green use efficiency in Anhui Province during 2008—2022

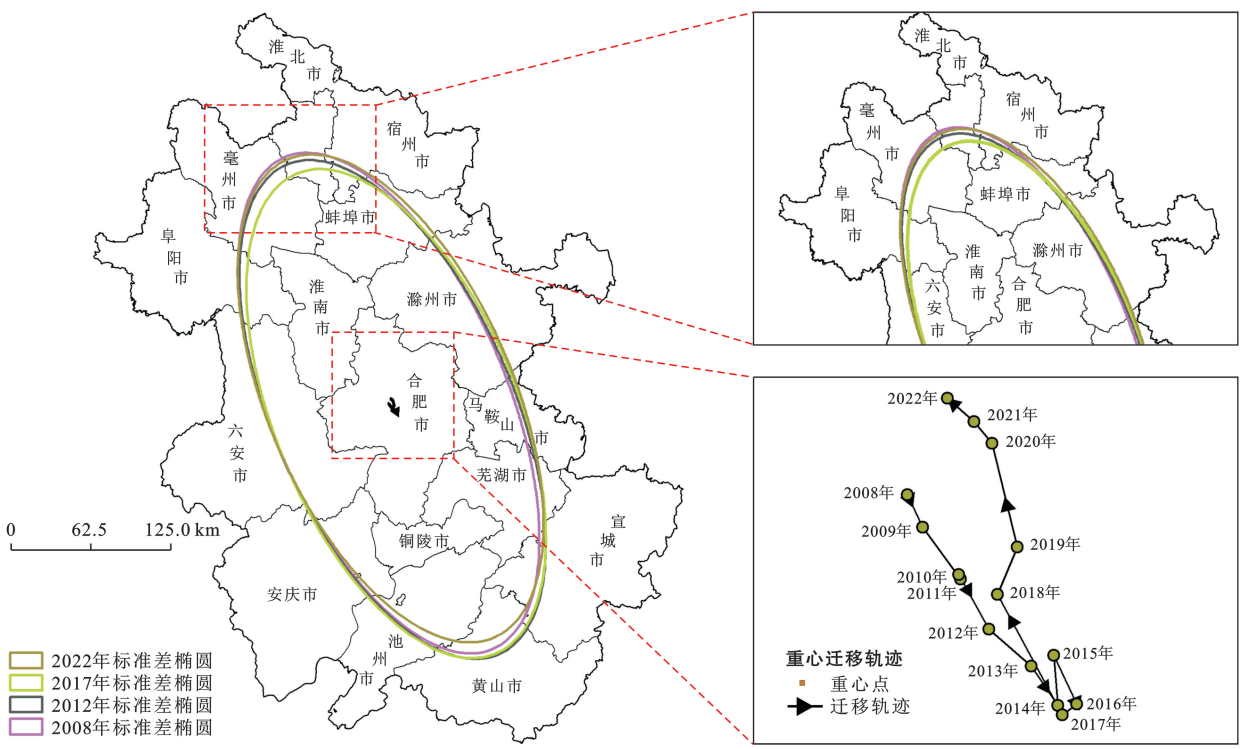

图 4　安徽省 2008—2022 年城市土地绿色利用效率重心迁移

Fig.4　Migration of gravity centers of urban land green use efficiency in Anhui Province during 2008—2022

3.2　城市土地绿色利用效率影响因素研究

3.2.1　主导因素识别　选取 2008,2012,2017 和 2022 年 4 个截面,对探测所得 q 值进行排序分析,均通过 5%显著性检验。结果显示(表 3),研究期内环保投入、城乡结构、城市绿化、环境规制、产业结构平均 q 值均大于 0.30,其余因素仅介于 0.20～0.28,故将以上 5 个因素视为主导因素。其中,环保投入综合影响力最大,其 q 值在 2012 和 2017 年均排名第 1,分别为 0.56 和 0.90,在 2022 年有所下降,但仍排名第 3,说明其对 ULGUE 的影响具有长期性和显著性;产业结构攀升最快,其 q 值由 2008 年排名第 8 的 0.15 上升至 2022 年排名第 1 的 0.60,是重要潜在因素。值得注意的是,政府控制影响力在 2008 年为排名第 1 的 0.53,但其综合影响力却不高,它在特定时期具有重要影响力,但作用随时间演化而衰减,逐渐被环保投入和产业结构所取代。

表 3 安徽省 2008—2022 年城市土地绿色利用效率主导因素探测结果

Table 3 Detection results of urban land green use efficiency dominant factors in Anhui Province from during 2008—2022

因 子	2008 年		2012 年		2017 年		2022 年		平均值	
	q	排名	q	排名	q	排名	q	排名	q	排名
经济水平(X_1)	0.14	9	0.38	4	0.25	6	0.19	9	0.24	9
对外开放(X_2)	0.33	4	0.18	7	0.18	8	0.29	5	0.25	8
政府控制(X_3)	0.53	1	0.13	9	0.25	7	0.21	7	0.28	6
城乡结构(X_4)	0.33	3	0.40	3	0.49	2	0.23	6	0.36	2
产业结构(X_5)	0.15	8	0.13	8	0.34	3	0.60	1	0.30	5
基础设施(X_6)	0.22	6	0.37	5	0.28	5	0.21	8	0.27	7
城市绿化(X_7)	0.49	2	0.30	6	0.33	4	0.31	4	0.36	3
环境规制(X_8)	0.30	5	0.48	2	0.09	9	0.40	2	0.32	4
环保投入(X_9)	0.20	7	0.56	1	0.90	1	0.32	3	0.51	1

3.2.2 主导因素交互作用 各主导因素并非独立作用,进而探测彼此联合效应。由表 4 结果可以看出,非线性增强和双因子增强所占比例分别为 60%和 40%,前者表示不同因素交互 q 值大于 q 值之和,后者效果弱于前者,但交互 q 值也均大于各自单独 q 值,即不同因素交互作用存在增强效应,能够协作提升对 ULGUE 的影响。

其中,产业结构和其余因素交互作用均为非线性增强,增强效应最为明显,与环保投入的交互组合排名第 1,q 值达到了 0.82,表明环保投入和产业结构是影响 ULGUE 的重要因素。而双因子增强主要在生态同维度因素的交互作用中,增强效应不理想,最好仅为排名第 6 的 0.77,由此反映出不同维度因素差异化组合十分重要。

表 4 安徽省城市绿色利用效率主导因素交互探测结果

Table 4 Dominant factor interaction detection results of urban land green use efficiency in Anhui Province

$q=A\cap B$	$A+B$	结果对比	交互类型	交互排名
$X_4\cap X_5=0.82$	$X_4(0.359)+X_5(0.304)=0.66$	$q>A+B$	非线性增强	2
$X_4\cap X_7=0.77$	$X_4(0.359)+X_7(0.358)=0.72$	$q>A+B$	非线性增强	7
$X_4\cap X_8=0.80$	$X_4(0.359)+X_8(0.316)=0.68$	$q>A+B$	非线性增强	5
$X_4\cap X_9=0.80$	$X_4(0.359)+X_9(0.505)=0.90$	$A+B>q>A,B$	双因子增强	4
$X_5\cap X_7=0.81$	$X_5(0.304)+X_7(0.358)=0.66$	$q>A+B$	非线性增强	3
$X_5\cap X_8=0.71$	$X_5(0.304)+X_8(0.316)=0.62$	$q>A+B$	非线性增强	9
$X_5\cap X_9=0.82$	$X_5(0.304)+X_9(0.505)=0.81$	$q>A+B$	非线性增强	1
$X_7\cap X_8=0.64$	$X_7(0.358)+X_8(0.316)=0.67$	$A+B>q>A,B$	双因子增强	10
$X_7\cap X_9=0.77$	$X_7(0.358)+X_9(0.505)=0.86$	$A+B>q>A,B$	双因子增强	6
$X_8\cap X_9=0.74$	$X_8(0.316)+X_9(0.505)=0.82$	$A+B>q>A,B$	双因子增强	8

注:以上均为保留两位小数后的数值,排序按照实际数值大小。

3.2.3 主导因素空间异质性 进一步引入 GTWR 模型,分析各主导因素的空间作用强度和方向,所有方差膨胀因子(VIF)均小于 5,不存在伪回归现象,满足模型构建要求。整体上看(图 5),各因素呈现明显点状、片状空间分异特征,在中部、南部地区多为正向作用,而在北部地区负向作用明显。城乡结构效应空间变化较小,数值由北向南梯度递增,对安庆市、池州市、黄山市、宣城市等南部片区具有正向反馈,但对阜阳市、亳州市、宿州市、淮北市等北部城市抑制突出,反映出城镇化发展过程中,不同路径方式对土地绿色利用影响差异显著。产业结构效应空间异质性最强,数值梯度特征不明显,对合肥市、黄山市等科技、文旅第三产业发达的城市正向作用显著,而对马鞍山市、淮南市、淮北市和铜陵市等资源依赖型城市约束明显,反映出单位土地投入伴随低污染、高效益要求,更容易实现土地绿色利用。城市绿化效应空间波动较大,对所有城市均影响为正,显著区域集中在黄山市、宣城市、池州市等南部山区城市,对宿州市、蚌埠市、淮南市等北部平原地区影响稍弱,说明生态资源禀赋优良的城市,对促进土地绿色利用具有天然优势。环境规制效应空间波动有限,数值呈现“西北—东南”片状分异,对中部和南部地区影响正,对北部地区影响为负,说明污染处理设备完善且排放管控严格的地区,对土地绿色利用更为友好。环保投入效应空间波

动较大,数值呈现“东北—西南”片状分异,对中部、南部大片地区影响为正,而对宿州市等北部城市影响为负,表明经济较发达且环保意识高的地区,能给予土地绿色利用更多资金支持。

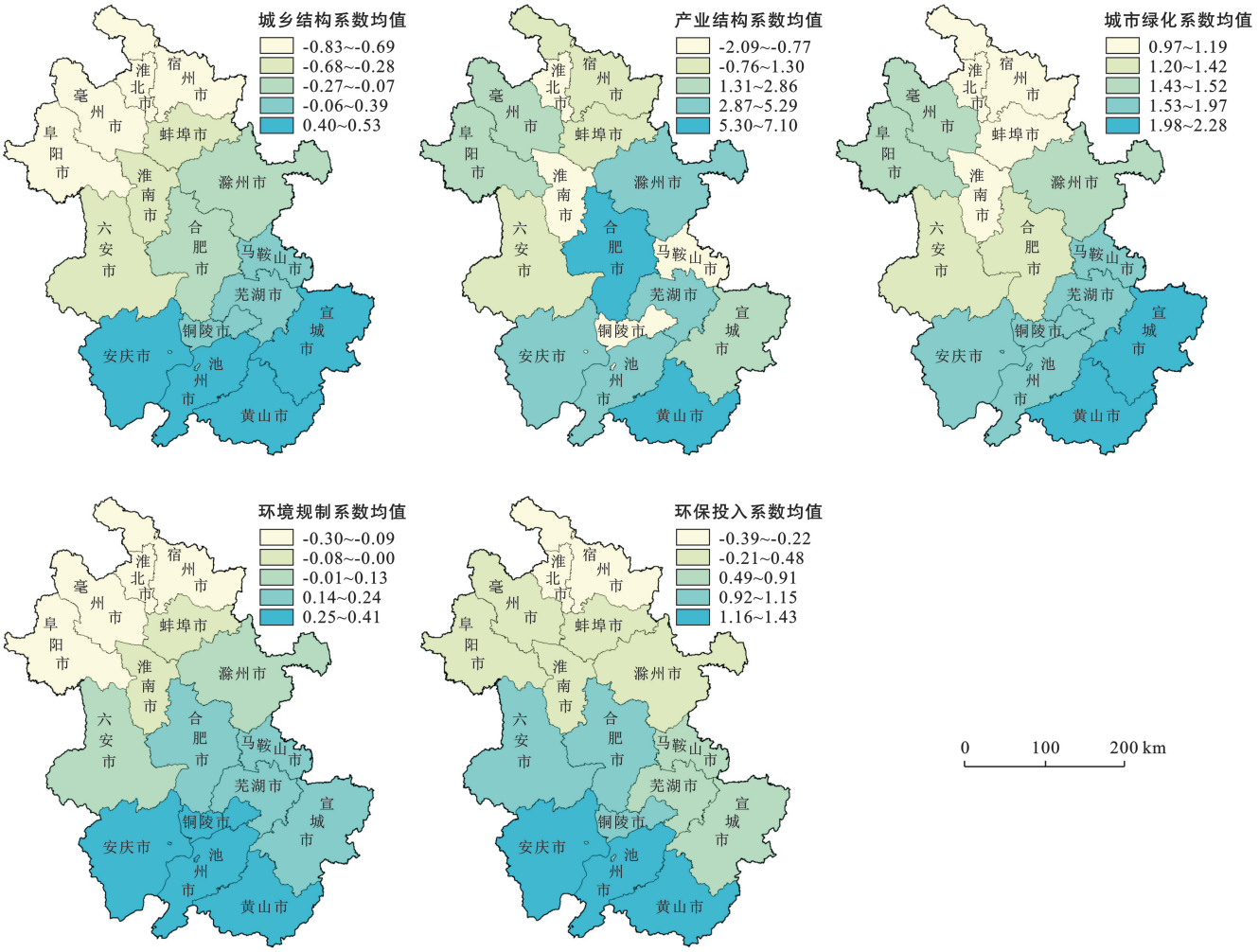

图 5　安徽省城市土地绿色利用效率主导因素均值系数空间分布

Fig.5　Spatial distribution of dominant factor mean coefficients of urban land green use efficiency in Anhui Province

4　讨 论

绿色发展是协调经济增长和环境保护的有效方式,城市土地绿色利用效率是评价城市土地要素配置合理性和经济社会绿色发展程度的重要指标。研究选取快速发展进程中的安徽省,实证结果显示,ULGUE 总体均值水平不高,远低于相关学者 Ma 等[28]关于安徽省传统城市土地利用效率测度结果,因传统测度未纳入环境污染等非期望产出,割裂了经济、社会和生态系统的统一性,所以存在“虚高”现象。换言之,若在城市土地利用过程中控制生态环境负效应,土地利用水平将会进一步提升,也从侧面证明城市土地绿色发展重要性。研究期内 ULGUE 先直线下降、再波动上升,与相关研究中演变趋势基本一致[29],ULGUE 整体趋于上升发展,折射出土地利用投入产出要素配置由无序向和谐转变,由于国家外部政策及社会重大公共卫生事件影响,演进趋势具有一定波动性,省内经济水平、地理区位及自然生态等现实差异,造成效率水平呈现“南高北低”非均衡空间特征。ULGUE 受阶段性因素制约,由政府控制向环保投入和产业结构转变,过去经济发展作为衡量官员政绩与土地利用的重要指标,地方政府为实现突破式增长,容易出现过度投资和重复建设,长此以往产业同构和资源浪费现象凸显,最终导致土地利用效率低下。随着生态文明理念和高质量发展战略提出,传统依靠“土地财政”的发展模式逐渐被替代,加大环保投入成为重要支撑,产业结构升级将是发展导向。同时,土地利用是承担各种要素流交互协作的复杂系统,不同因素交互作用具有增强效应,产业结构和环保投入作为最强交互组合,未来土地绿色利用要注重二者协同发展。各主导因素空间异质性显著,相较于北部地区负向效应突出,中东部、南部地区多为正向

效应，区域间经济发展水平和资源禀赋条件差异是造成分异格局的根本原因。

为实现城市土地绿色利用提质增效与区域协调高质量发展，提出相关政策建议：①优化国土空间格局，严格土地用途管制。考虑区域资源环境承载力条件及发展目标，严格落实“三区三线”管控，构建国土空间开发保护新格局；严控建设用地增量发展，制定差异化土地用途管制制度，全面提高资源集约利用水平。②促进产业转型升级，加大生态环保力度。地方政府要增强自主创新能力，打造战略性新兴产业，推动产业结构绿色转型；同时要切实履行国家环保政策，加强法律监管和资金扶持，推动国土空间生态修复和环境治理。③强化整体协作思维，因地制宜差异施策。皖中地区应积极发挥合肥都市圈辐射效应，加强与周边地区交通廊道建设，实现整体土地绿色利用增值；城市发展需要减少增量、挖掘存量用地，给未来发展预留空间；加快提升自身创新能力，应用云数据、人工智能等新业态，为产业结构绿色升级赋能。皖南和皖西地区应鼓励引进生态友好型项目，探索旅游、观光、文化、康养为一体的绿色发展路径，促进经济发展和环境保护协调共生。皖北地区应科学进行国土空间规划，严格落实耕地红线管控，推进新型城镇化建设；重点发展新材料、新能源和绿色食品等优势产业，逐渐淘汰落后产能，改进生产工艺与处理设备，从源头上降低生态负效应。

ULGUE具有复杂性和动态性，本研究尚有不足有待改进。指标构建上，非期望产出只考虑工业“三废”未纳入CO_2排放量，无法彰显绿色低碳理念；影响因素仅从经济、社会、生态等维度进行遴选，未考虑自然环境和外部政策。时空视角上，土地利用是一个长期过程，2008—2022年这15 a期限跨度较短，无法长期观测时空演变特征和把握质变关键节点。此外，由于数据获取受限，基于“市域”尺度进行分析，没能从“县域”单元展开精细化研究。因此，深化全指标、长时间、小尺度的ULGUE研究将是今后探讨方向。

5 结论

（1）测度结果上，2008—2022年内安徽省ULGUE趋于上升发展，由0.78上升到0.85，整体均值为0.77，仍很大提升空间。效率演进存在阶段性特征，在2008—2014年直线下降、后于2015—2022年波动上升。各城市效率值等级变动明显，合肥市和滁州市增幅最大，铜陵市降幅最大。

（2）时空分异上，核密度曲线整体为双峰并存态势，但在波峰高度、形状及拖尾性上具有不同演进特征，区域内存在两极分化现象，且地区差距逐渐扩大，低值区城市向中低值区移动，高值区城市较为稳定；效率值空间重心相对平稳，一直停留在合肥市，轨迹路线先向东南迁移12.62 km、再向西北迁移13.90 km，西北地区效率改善较东南部地区更为明显，但整体水平仍落后南部地区。

（3）影响因素上，主导因素中环保投入综合影响力最高，其次为城乡结构、城市绿化、环境规制和产业结构。不同因素交互探测类型主要为非线性和双因子增强，其中环保投入与产业结构二者交互解释力最高，达到0.82；各因素在空间上呈现点状、片状分布，整体表现为“南高北低、南正北负”异质特征，城市绿化对所有城市均具有正向作用，城乡结构、环境规制、环保投入对中部和南部地区具有正向作用，对北部地区具有负向作用，而产业结构对资源依赖型城市负向影响显著。

参考文献（References）

[1] 卢新海，李佳，刘超，等.中国城市土地绿色利用效率驱动因素及空间分异[J].地理科学，2022，42(4)：611-621.
Lu Xinhai, Li Jia, Liu Chao, et al. Driving factors and spatial differentiation of the urban land green use efficiency in China [J]. Scientia Geographica Sinica, 2022, 42(4)：611-621.

[2] Xue Dan, Yue Li, Ahmad F, et al. Empirical investigation of urban land use efficiency and influencing factors of the Yellow River basin Chinese cities [J]. Land Use Policy, 2022，117：106117.

[3] Zhang Ling, Zhang Lei, Xu Yan, et al. Evaluating urban land use efficiency with interacting criteria: An empirical study of cities in Jiangsu China [J]. Land Use Policy, 2020，90：104292.

[4] 梁流涛，雍雅君，袁晨光.城市土地绿色利用效率测度及其空间分异特征：基于284个地级以上城市的实证研究[J].中国土地科学，2019，33(6)：80-87.
Liang Liutao, Yong Yajun, Yuan Chenguang. Measurement of urban land green use efficiency and its spatial differentiation characteristics: An empirical study based on 284 cities [J]. China Land Science, 2019，33(6)：80-87.

[5] 黄珂，张婷，刘江宜，等.高质量发展理念下湖北省城市土地利用绿色效率测度及优化[J].生态经济，2023，39(1)：109-114.
Huang Ke, Zhang Ting, Liu Jiangyi, et al. Measurement and optimization of the urban land use green efficiency of Hubei Province under the concept of high-quality development [J]. Ecological Economy, 2023，39(1)：

109-114.

[6] 张东玲,王艳霞,刘敏.新型城镇化对城市土地绿色利用效率的政策驱动效应:基于 280 个地级市的实证检验[J].城市问题,2022(4):45-54.
Zhang Dongling, Wang Yanxia, Liu Min. The policy-driven effect of new urbanization on the efficiency of green use of urban land: Based on the empirical test of 280 prefecture-level cities [J]. Urban Problems, 2022(4):45-54.

[7] 姜旭,侯娇,卢新海.低碳试点政策对城市土地绿色利用的影响:基于双重差分模型的实证研究[J].中国土地科学,2023,37(3):80-89.
Jiang Xu, Hou Jiao, Lu Xinhai. Research on the effects of low-carbon pilot policies on green urban land use: An empirical study based on the DID model [J]. China Land Science, 2023,37(3):80-89.

[8] 严思齐,吴群.铁路网络联系对城市土地绿色利用效率的影响研究:以长三角地区为例[J].中国土地科学,2024,38(4):65-77.
Yan Siqi, Wu Qun. Impact of railway network connections on urban land green use efficiency: A case study of the Yangtze River delta region [J]. China Land Science, 2024,38(4):65-77.

[9] 柯楠,卢新海,匡兵.中国城市土地绿色低碳利用时空演化及影响因素:基于碳中和目标的实证研究[J].城市问题,2021(7):33-40.
Ke Nan, Lu Xinhai, Kuang Bing. Spatio-temporal evolution and influencing factors of urban land green and low-carbon utilization under the goal of carbon neutrality in China [J]. Urban Problems, 2021(7):33-40.

[10] 卢新海,杨喜,陈泽秀.中国城市土地绿色利用效率测度及其时空演变特征[J].中国人口·资源与环境,2020,30(8):83-91.
Lu Xinhai, Yang Xi, Chen Zexiu. Measurement and temporal-spatial evolution characteristics of urban land green use efficiency in China [J]. China Population, Resources and Environment, 2020, 30(8):83-91.

[11] 葛堃,邹珊,卢新海,等.区域一体化背景下城市土地绿色利用效率空间收敛分析:以长江经济带为例[J].华东经济管理,2021,35(3):31-41.
Ge Kun, Zou Shan, Lu Xinhai, et al. Spatial convergence of urban land green utilization efficiency under the background of regional integration: Take the Yangtze River economic belt as an example [J]. East China Economic Management, 2021,35(3):31-41.

[12] 王德起,庞晓庆.京津冀城市群绿色土地利用效率研究[J].中国人口·资源与环境,2019,29(4):68-76.
Wang Deqi, Pang Xiaoqing. Research on green land-use efficiency of Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration [J]. China Population, Resources and Environment, 2019,29(4):68-76.

[13] 冯雨豪,童文,李子杰,等.高质量发展视角下江苏省城市土地绿色利用效率时空分异与影响因素研究[J].水土保持通报,2022,42(6):351-360.
Feng Yuhao, Tong Wen, Li Zijie, et al. Spatiotemporal differentiation and influencing factors of urban land green use efficiency in Jiangsu Province from perspective of high-quality development [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022,42(6):351-360.

[14] Fukuyama H, Weber W L. A directional slacks-based measure of technical inefficiency [J]. Socio-Economic Planning Sciences,2009,43(4):274-287.

[15] 何吾洁,梁小红,陈含桦.绿色税收对制造业绿色转型的效应分析:基于 SBM-DDF 模型和 Luenberger 指数测算[J].生态经济,2020,36(9):58-66.
He Wujie, Liang Xiaohong, Chen Hanhua. Analysis of the effect of green tax on green transformation of manufacturing industry: Based on SBM-DDF model and Luenberger index [J]. Ecological Economy, 2020,36(9):58-66.

[16] Qin Chaoyong, Liang Yizheng, Cao Yun. Spatial characteristics and dynamic differences of power industry's low carbon transition efficiency [J]. Scientific Reports, 2024,14:18873.

[17] Tan Shukui, Hu Bixia, Kuang Bing, et al. Regional differences and dynamic evolution of urban land green use efficiency within the Yangtze River delta, China [J]. Land Use Policy, 2021,106:105449.

[18] Deng Bowen, Liu Chenli, Zhang Enwei, et al. Satellite observations reveal northward vegetation greenness shifts in the greater Mekong subregion over the past 23 years [J]. Remote Sensing, 2024,16(17):3302.

[19] 解铭威,周慧荻,陈耸,等.2000—2020 年山西省吕梁市土地利用时空变化及其驱动因素[J].水土保持通报,2024,44(3):296-306.
Xie Mingwei, Zhou Huidi, Chen Song, et al. Spatio-temporal evolution of land use and its driving forces in Lüliang City of Shanxi Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024,44(3):296-306.

[20] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134.
Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and prospective [J]. Acta Geographica Sinica, 2017,72(1):116-134.

[21] 赵丹丹,金声甜,鲍丙飞,等.基于地理探测器的中国中部城市土地绿色利用效率时空演变及影响因素研究

[J].地球信息科学学报,2020,22(12):2358-2370.
Zhao Dandan, Jin Shengtian, Bao Bingfei, et al. Analysis of spatial-temporal evolution and influencing factors of green land use efficiency in Central China based on geographic detector [J]. Journal of Geo-Information Science, 2020,22(12):2358-2370.

[22] Huang Bo, Wu Bo, Barry M. Geographically and temporally weighted regression for modeling spatio-temporal variation in house prices [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2010,24(3):383-401.

[23] 丁一,郭青霞,秦明星.黄河流域资源型城市土地绿色利用效率时空演变及影响因素[J].农业工程学报,2021,37(19):250-259.
Ding Yi, Guo Qingxia, Qin Mingxing. Temporal-spatial evolution and influencing factors of land green use efficiency of resource-based cities in the Yellow River Basin, China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021,37(19):250-259.

[24] Liu Shuchang, Xiao Wu, Li Linlin, et al. Urban land use efficiency and improvement potential in China: A stochastic frontier analysis [J]. Land Use Policy, 2020,99:105046.

[25] Li Weiming, Cai Zhaoyang, Jin Leshan. Urban green land use efficiency of resource-based cities in China: Multidimensional measurements, spatial-temporal changes, and driving factors [J]. Sustainable Cities and Society, 2024,104:105299.

[26] 胡碧霞,李菁,匡兵.绿色发展理念下城市土地利用效率差异的演进特征及影响因素[J].经济地理,2018,38(12):183-189.
Hu Bixia, Li Jing, Kuang Bing. Evolution characteristics and influencing factors of urban land use efficiency difference under the concept of green development [J]. Economic Geography, 2018,38(12):183-189.

[27] 温柔,李洪义,吴儒练,等.基于多源数据的江西省县域土地绿色利用效率时空分异及影响因素分析[J].地域研究与开发,2023,42(4):136-142.
Wen Rou, Li Hongyi, Wu Rulian, et al. Temporal and spatial differentiation and influencing factors analysis of land green use efficiency at county scale in Jiangxi Province based on multi-source data [J]. Areal Research and Development, 2023,42(4):136-142.

[28] Ma Ming, Liu Yuge, Wang Bingyi, et al. Spatial-temporal evolution and driving mechanism of urban land use efficiency based on T-DEA model: A case study of Anhui Province, China [J]. Sustainability, 2023,15(13):10087.

[29] 陈红梅,张彩莉,李建豹.长三角地区新型城镇化对城市土地绿色利用效率的影响及空间效应[J].长江流域资源与环境,2024,33(7):1382-1396.
Chen Hongmei, Zhang Caili, Li Jianbao. Research on influence and spatial effect of new-type urbanization on urban land green use efficiency in the Yangtze River delta region [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2024,33(7):1382-1396.

(上接第 295 页)

[24] 彭大力,张斌,吴林蓬,等.龙川江流域近 20 年土壤侵蚀时空变化及驱动因素分析[J].水土保持学报,2024,38(4):29-37.
Peng Dali, Zhang Bin, Wu Linpeng, et al. Analysis of spatial and temporal changes and driving factors of soil erosion in Longchuan River basin in recent 20 years [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024,38(4):29-37.

[25] Wen Ying. Preliminary discussion on the method of quantitative assessment of human activity intensity [J]. Impact of Science on Society, 1998,4:55-61.

[26] 胡志斌,何兴元,李月辉,等.岷江上游地区人类活动强度及其特征[J].生态学杂志,2007,26(4):539-543.
Hu Zhibin, He Xingyuan, Li Yuehui, et al. Human activity intensity and its spatial distribution pattern in upper reach of Minjiang River [J]. Chinese Journal of Ecology, 2007,26(4):539-543.