

鄱阳湖生态经济区土地利用碳强度与 生态系统服务时空变化

潘青青¹, 黄小兰¹, 罗力², 王博伟¹

(1. 东华理工大学地球科学学院, 南昌 330013; 2. 中南大学地球科学与信息物理学院, 长沙 410083)

摘要: [目的] “双碳”目标下, 探究土地利用碳强度与生态系统服务的时空变化特征及二者的时空互动相关性能够为区域内碳减排及生态-经济协同高质量发展提供决策参考。[方法] 以鄱阳湖生态经济区为研究对象, 分析 2000—2020 年县域尺度“地均-人均-经济”碳强度与生态系统服务时空变化, 借助脱钩指数测算碳强度与生态系统服务的互动关系, 以“三维魔方”模型综合评判各维度碳强度与生态系统服务的互动分区。[结果] 1) 2000—2020 年鄱阳湖生态经济区“地均-人均”碳强度呈现持续上升的趋势, 而“经济”碳强度逐渐下降。各项生态系统服务也存在不同程度下降现象。2) 碳强度与生态系统服务之间存在时空互动相关性, “地均”碳强度与生态系统服务由脱钩向负脱钩转变, 而“人均-经济”碳强度与生态系统服务经过负脱钩变化后已重回理想的脱钩状态。3) 现阶段以“地均”碳强度一维不理想互动区数量最多, 占 47.4%, 主要集中于南昌市、九江市。三维理想互动区与二维理想互动区的数量有小幅上升, 分别占 15.8%、2.6%, 衰退型脱钩为主要的理想互动关系。[结论] 研究结果揭示鄱阳湖生态经济区碳强度与生态系统的时空互动关系, 明确生态-经济协同发展的关键问题, 为区域经济发展与生态保护政策的制定提供科学依据。

关键词: 土地利用碳强度; 生态系统服务; 脱钩指数; 三维互动分区; 鄱阳湖生态经济区

中图分类号: X171.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)03-0235-12

Spatio-temporal Variations of Land Use Carbon Intensity and Ecosystem Services in the Poyang Lake Eco-Economic Zone

PAN Qingqing¹, HUANG Xiaolan¹, LUO Li², WANG Bowei¹

(1. School of Earth Sciences, East China University of Technology, Nanchang 330013, China;

2. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: [Objective] Under the "dual carbon" goals, exploring the spatio-temporal variations of land use carbon intensity and ecosystem services, as well as their spatio-temporal interactive correlations, can provide decision-making references for carbon emission reduction and high-quality coordinated development of ecology and economy in the region. [Methods] Taking the Poyang Lake Eco-Economic Zone as the study area, this study analyzed the spatio-temporal variations of "Land-Demographic-Economic" carbon intensity and ecosystem services at the county scale from 2000 to 2020. The decoupling index was used to calculate the interactive relationship between carbon intensity and ecosystem services, and the "3D magic cube" model was applied to comprehensively evaluate the interactive zoning of carbon intensity and ecosystem services across different dimensions. [Results] 1) From 2000 to 2020, the "Land-Demographic" carbon intensity in the Poyang Lake Eco-Economic Zone generally exhibited a continuous upward trend, while the "Economic" carbon intensity showed a declining trend. In addition, various ecosystem services also experienced varying degrees of decline. 2) There was a spatio-temporal

收稿日期: 2024-12-04

修回日期: 2025-02-08

录用日期: 2025-02-18

网络首发日期 (www.cnki.net): 2025-04-18

资助项目: 国家自然科学基金项目 (42061041, 41561002); 东华理工大学博士科研启动基金项目 (DHBK2019404)

第一作者: 潘青青 (2001—), 女, 硕士研究生, 主要从事土地资源管理研究。E-mail: q2632237816@163.com

通信作者: 黄小兰 (1968—), 女, 博士, 教授, 主要从事自然地理、土地资源管理研究。E-mail: huangxiaolanlan@163.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

interaction between carbon intensity and ecosystem services. The "Land" carbon intensity and ecosystem services shifted from decoupling to negative decoupling, while the "Demographic-Economic" carbon intensity and ecosystem services returned to an ideal decoupling state after undergoing negative decoupling. 3) At present, the largest proportion (47.4%) of interactive zones fell under the one-dimensional non-ideal category for "Land" carbon intensity, mainly concentrated in Nanchang and Jiujiang cities. The proportions of three-dimensional and two-dimensional ideal interactive zones increased slightly, accounting for 15.8% and 2.6% respectively, with recessive decoupling being the dominant ideal interactive relationship. [Conclusion] The findings reveal the spatio-temporal interactions between carbon intensity and ecosystem services in the Poyang Lake Eco-Economic Zone, clarify key issues in the coordinated development of economy and ecology, and provide a scientific foundation for the formulation of regional economic development and ecological conservation policies.

Keywords: land use carbon intensity; ecosystem services; decoupling index; three-dimensional interactive zoning; the Poyang Lake Eco-Economic Zone

Received: 2024-12-04

Revised: 2025-02-08

Accepted: 2025-02-18

Online(www.cnki.net): 2025-04-18

生态环境与经济社会的协调发展是实现区域可持续发展的必然要求。然而,随着我国经济的强劲增长,城镇无序扩张和人口加速聚集^[1],人类活动在推动经济社会发展的同时也对生态环境造成不可逆的负面影响,其中,日益加剧的土地利用碳排放问题^[2],正是自然环境向人类社会发出的重要“警示”。基于我国“碳达峰”“碳中和”^[3]目标的战略部署,以及经济社会可持续发展的迫切需求,深入探究蓬勃经济发展背后的土地利用碳排放及其与生态环境的相互作用,将为区域经济高质量发展提供重要的理论支撑。

生态系统服务是生态环境为人类提供的功能性惠益^[4],对维持人类生存和推动城市可持续发展具有至关重要的作用。近年来,众多学者已开始关注土地利用碳排放与生态系统服务之间的相关性。已有研究^[5-8]通过对长株潭城市群、山西省、南四湖流域、黄河流域等区域的实证分析,证实土地利用变化是影响碳排放量的关键因素,且土地利用碳排放与生态系统服务价值呈显著负相关,林地、草地等碳汇地类减少及建设用地扩张等不合理土地利用行为加剧碳排放,进而降低生态系统服务价值。部分学者^[9-11]引入经济碳强度概念(即单位 GDP 的二氧化碳排放量),从人口、经济、能源等驱动因素出发,揭示城市化水平、居民消费、能源结构等对碳强度的影响。综合梳理现有研究成果可以发现,相关研究^[12-14]大多基于生态系统服务价值视角,且主要针对单一维度碳排放展开^[15-17],较少考虑碳排放与经济发展、人口变化、土地利用的多重相关性,同时碳强度概念的应用尚未得到广泛推广。因此,基于经济碳强度概念,引入地均碳强度(单位面积土地碳排放)、人均碳强度(区域人均碳排放)概念^[18],构建“地均-人均-经济”综

合碳强度体系能够将碳排放与土地利用、人口变化的相关性纳入考量,进一步拓宽碳排放衡量体系。在此基础上,探究土地利用碳强度与生态系统服务功能的相关性,有助于丰富研究视角,弥补现有研究的不足。

鄱阳湖生态经济区起源于 20 世纪初江西省提出的“以工业化为核心,以大开放为主战略”的高效发展政策,并于 2009 年国务院正式批复《鄱阳湖生态经济区规划》后成立,为鄱阳湖周边区域的可持续发展提供政策保障。然而,区域重大发展战略的调整必将引起产业格局、土地利用的巨大改变,极易造成生态质量下降的恶性局面。因此,谋求经济与生态的协同向好发展,需要积极应对并解决经济社会发展与自然生态系统间的冲突与矛盾。基于此,本研究聚焦江西省鄱阳湖生态经济区,分析各县(区、市)在 2000—2020 年由土地利用变化引起的“地均-人均-经济”碳强度与生态系统服务的时空变化,借助脱钩指数测算碳强度与生态系统服务的互动关系,并以“三维魔方”模型可视化呈现各维度碳强度与生态系统服务的互动分区,综合评判各区县碳强度与生态系统服务的互动状态,以期为鄱阳湖生态经济区实现经济-生态协同高质量发展提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

鄱阳湖生态经济区(27°29′54″~30°04′50″N, 114°28′28″~117°28′20″E)位于江西省北部,长江中下游南岸(图 1)。该区域包括南昌、九江、景德镇 3 市以及鹰潭、新余、抚州、宜春、上饶、吉安市的部分县(区、市),共 38 个县(区、市)和鄱阳湖全部湖体在内,面积共计 5.12 万 km²^[19]。作为我国最大的淡水湖,鄱阳

湖承担涵养水源、净化水质、调节区域气候、保护生物多样性等重要生态功能。除优越的生态条件,该地位于长三角、珠三角、闽东南三大经济发达区的核心位

置,具有天然的经济发展地理优势。因此,实现生态环境与经济发展的平衡与协同向好是鄱阳湖生态经济区可持续发展的重要保障。

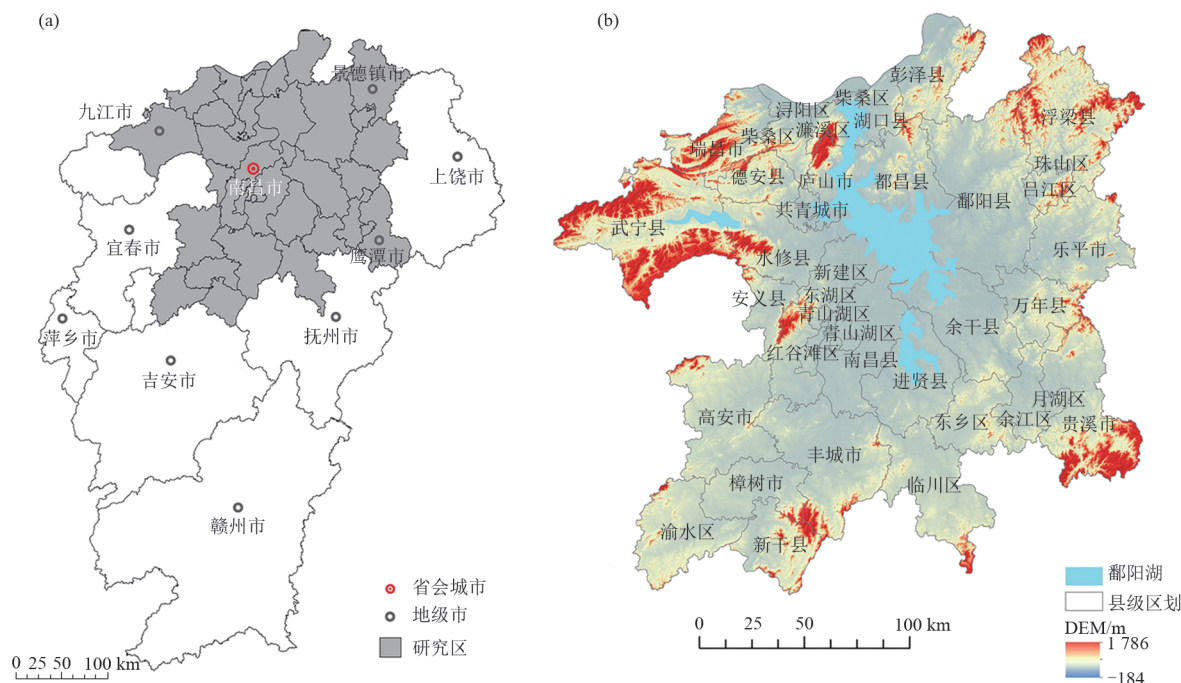


图1 鄱阳湖生态经济区概况

Fig. 1 Summary of the Poyang Lake Eco-Economic Zone

1.2 数据来源与预处理

土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>)的中国多时期土地利用遥感监测数据集(CNLUCC),空间分辨率为30 m×30 m,采用二级分类系统。本研究从中选取2000年、2005年、2010年、2015年、2020年共5期的土地利用数据,并将其重分类为耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地6个一级类。

所用夜间灯光数据为DMSP/OLS和NPP/VIIRS 2种夜光遥感影像数据,来源于NOAA(<https://www.ngdc.noaa.gov/>),空间分辨率为1 km×1 km。对数据依次进行降噪、修正、分析统计,得到研究区市县两级夜间灯光亮度值数据。

DEM数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>),空间分辨率为30 m×30 m。土壤数据取自世界土壤数据库(HWSD)的中国土壤数据集,来源于国家冰川冻土沙漠科学数据中心(<http://www.ncdc.ac.cn>)。降雨量和蒸散量数据均来源于国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn>)。能源、人口、经济等社会发展数据来源于相应年份《江西统计年鉴》^[20]、《中国县域统计年鉴》^[21]及各县(区、市)国民经济和社会发展统计公报,少量空缺数据统一采用插值法进行补齐或修正。(所有栅格数据统一采用GCS_Krasovsky_

1940地理坐标系,并以县域范围为最小单元分区统计。)

1.3 研究方法

1.3.1 土地利用碳排放核算 土地利用碳排放为直接碳排放和间接碳排放之和。其中,耕地、林地、草地、水域和未利用地的碳排放采用直接估算法进行测算,计算方法为各类型土地利用面积与相应地类碳排放系数相乘。

$$E_d = \sum e_i = \sum S_i \times a_i \quad (1)$$

式中: E_d 为土地利用直接碳排放量; t ; e_i 为各类型用地碳排放量; t ; S_i 为*i*类土地面积, hm^2 ; a_i 为*i*类土地碳排放系数, $t/(hm^2 \cdot a)$,参考与本研究区域存在高度相关性的相关研究^[22]并结合研究区实际确定。耕地、林地、草地、水域、未利用地碳排放系数分别为0.497、-0.581、-0.021、-0.253、-0.005 $t/(hm^2 \cdot a)$ 。

建设用地为主要碳源,其碳排放来源于各类能源消耗,需进行间接估算。综合考虑数据可获得性,本研究将模型反演法^[23]与单位GDP能耗推算法^[24]相结合测算研究区县域尺度建设用地碳排放量。模型反演法即利用夜间灯光影像数据估算市县碳排放量,已有研究^[23]证实,夜间灯光数据与能源消费碳排放存在高度相关性,能够弥补传统统计数据缺失,统计口径不一的问题,是一种较为科学的碳排放监测手段。单位GDP能耗推算法即通过

单位 GDP 能耗与第二、三产业产值之和的乘积来计算建设用地碳排放量。将由单位 GDP 能耗推算得到的市域建设用地碳排放量与市域灯光数据拟合,得到市域函数方程。利用已知县域灯光数据代入该县所在市域拟合方程,最终算得县域建设用地碳排放量。

$$E_i=(G_2+G_3)\times\frac{T}{GDP}\times K \tag{2}$$

$$E_i=\varphi(TDN) \tag{3}$$

$$E=E_d+E_i \tag{4}$$

式中: E_i 为市域建设用地碳排放量,t; G_2 、 G_3 分别为第

二、第三产业产值,万元; T 为市域能源消费总量,t标准煤; GDP 为市域 GDP 总量,万元; K 为煤炭消耗系数,值为 0.747 6 t/(以 C 计)^[25]; E_i 为县域建设用地碳排放量,t; φ 为市域建设用地碳排放量与市域灯光值的函数关系; TDN 为县域夜间灯光值; E 为县域总碳排放量,t。

1.3.2 “地均-人均-经济”碳强度指数构建 结合碳排放在土地利用、人口变化、经济发展 3 个方面的不同表现与特征,本研究选取“地均-人均-经济”3 个维度碳强度,并分别计算各维度的碳强度指数(CI),计算公式见表 1。

表 1 “地均-人均-经济”碳强度指数计算

Table 1 Calculation of the “Land-Demographic-Economic” carbon intensity index

指标	维度	计算公式	数值解释
碳强度指数(CI)	地均碳强度(LCI)	$LCI=\frac{\left(\frac{E}{A}\right)_i-\left(\frac{E}{A}\right)_{\min}}{\left(\frac{E}{A}\right)_{\max}-\left(\frac{E}{A}\right)_{\min}} \tag{5}$	E 为县域总碳排,t; A 为县域面积,km ² ; D 为县域人口数量; G 为县域生产总值,万元;下标 min 和 max 分别为总体最小和最大值
	人均碳强度(DCI)	$DCI=\frac{\left(\frac{E}{D}\right)_i-\left(\frac{E}{D}\right)_{\min}}{\left(\frac{E}{D}\right)_{\max}-\left(\frac{E}{D}\right)_{\min}} \tag{6}$	
	经济碳强度(ECI)	$ECI=\frac{\left(\frac{E}{G}\right)_i-\left(\frac{E}{G}\right)_{\min}}{\left(\frac{E}{G}\right)_{\max}-\left(\frac{E}{G}\right)_{\min}} \tag{7}$	

1.3.3 生态系统服务量化及综合指数构建

1) 生态系统服务量化

参照相关研究^[26]并结合研究区实际情况,本研究选取产水服务、土壤保持、碳储量、生境质量 4 项生态系统服务功能,运用 InVEST 模型中相应模块对其进行量化计算,计算公式见表 2。

2) 生态系统服务综合指数构建

为表征县域生态系统服务整体水平,将 4 项生态

系统功能量化值归一化后累加^[27],最终得到鄱阳湖生态经济区生态系统服务综合指数(ESI),计算公式为:

$$ESI=\sum_{i=1}^n\frac{ES_i-ES_{i\min}}{ES_{i\max}-ES_{i\min}} \tag{12}$$

式中:ESI 为生态系统服务综合指数; ES_i 为 i 类生态系统服务量化值; $ES_{i\min}$ 、 $ES_{i\max}$ 分别为 i 类生态系统服务总体最小和最大值; n 在本研究中为 4。

表 2 生态系统服务功能量化计算

Table 2 Quantitative calculation of ecosystem service functions

功能	计算公式	数值解释
产水服务(WY)	$WY_x=\left(1-\frac{AET_x}{P_x}\right)\times P_x^{[26]} \tag{8}$	WY_x 为栅格单元 x 的产水量,mm; AET_x 为栅格单元 x 的年平均降水量,mm; P_x 为栅格单元 x 的年均蒸散量,mm
土壤保持(SD)	$SD_x=R\times K\times LS\times(1-C\times P)^{[26]} \tag{9}$	SD_x 为栅格单元 x 的土壤保持量,t; R 为降雨侵蚀力; K 为土壤可蚀性; LS 为坡长坡度因子; C 为植被覆盖因子; P 为土壤保持措施因子
碳储量(CS)	$CS_x=\sum_{i=1}^n(C_{above}+C_{below}+C_{soil}+C_{dead})\times S_i^{[26]} \tag{10}$	CS_x 为栅格单元 x 上碳储量,t; i 为土地利用类型; n 为土地利用类别的数目; C_{above} 、 C_{below} 、 C_{soil} 、 C_{dead} 分别为 i 种土地利用类型地上、地下、土壤、死亡有机碳密度; S_i 为 i 种土地利用类型面积,km ²
生境质量(HQ)	$HQ_x=H_i\left[1-\left(\frac{D_j^z}{D_j^z+k^z}\right)\right]^{[26]} \tag{11}$	HQ_x 为栅格单元 x 的生境质量; H_j 为土地利用类型 j 的生境适宜度; D_j^z 为土地利用类型 j 的生境退化度; k^z 为半饱和参数

1.3.4 碳强度与生态系统服务脱钩互动及互动分区建立

1) 碳强度与生态系统服务脱钩互动

脱钩理论源于 20 世纪 60 年代,最初应用于物理学领域,后逐步扩展到环境经济学等学科,主要用于探究资源环境与经济发展的相关性^[28],当二者间的相关性随时间不断减弱甚至中断时,即可称为“脱钩”。本研究采用脱钩指数^[29]测算碳强度与生态系统服务之间的脱钩互动值(TI)。根据 TI 值,脱钩状态可划分为 8 种类型(图 2)^[30]。其中,强脱钩为最理想状态,表现为碳强度持续下降且生态系统服务不断提升,其次为弱脱钩与衰退型脱钩;增长连结与衰退连结表明二者呈现同向变化(同步上升或下降),可视为协同互动;强负脱钩为最不理想状态,表现为碳强度上升,从而影响生态系统服务下降,其次是弱负脱钩与扩张型负脱钩。

$$TI'_{t-a} = \frac{\Delta CI'_{t-a}/CI_{t-a}}{\Delta ESI'_{t-a}/ESI_{t-a}} \quad (13)$$

式中:TI'_{t-a}为 t-a~t 时间段内碳强度与生态系统服务的脱钩互动值;ΔCI'_{t-a}为 t-a~t 时间段内某一维度碳强度指数的变化值;CI_{t-a}为 t-a 年某一维度碳强度指数;ΔESI'_{t-a}为 t-a~t 时间段内生态系统服务综合指数的变化值;ESI_{t-a}为 t-a 年生态系统服务综合指数。

2) 脱钩互动分区

“三维魔方”模型是一种研判空间要素多功能

优势度分区的量化方法,具有较强的直观性和可操作性^[31]。本研究基于碳强度与生态系统服务的脱钩互动结果,在“三维魔方”模型的基础上加以改进,定量识别“地均-人均-经济”碳强度与生态系统服务的互动分区。首先根据“地均-人均-经济”碳强度与生态系统服务的脱钩互动指数,分别设计为魔方中的 X 轴、Y 轴和 Z 轴,各轴分别设置 3 个级别刻度(对应坐标 3、2、1),对应“理想互动、协同互动、不理想互动”3 种互动关系,从而进行分区识别(图 3)。

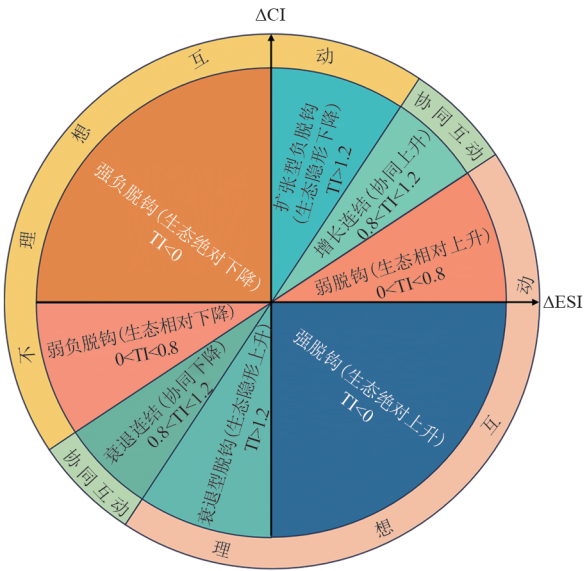


图 2 脱钩互动指数和脱钩互动关系
Fig. 2 Decoupling interaction indices and decoupling interactive relationships

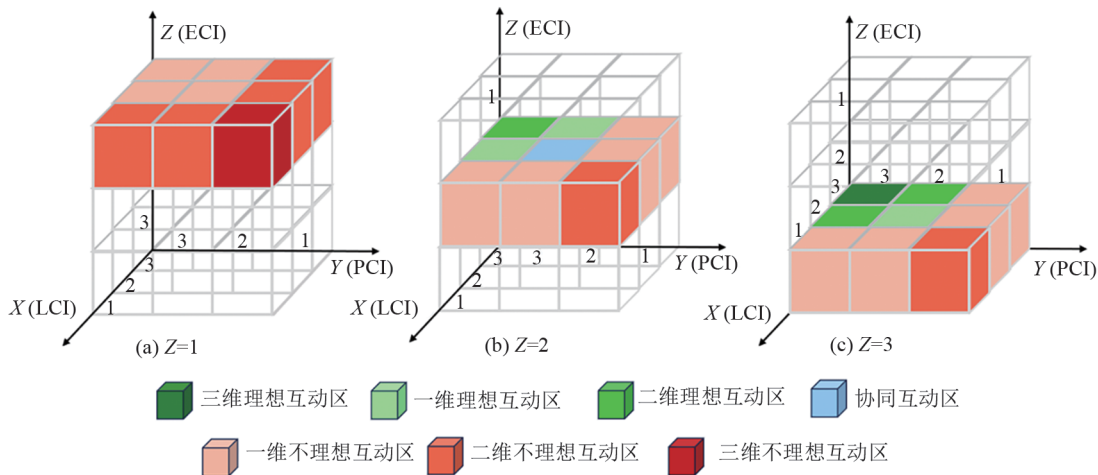


图 3 三维魔方评价模型
Fig. 3 3D magic cube evaluation model

2 结果与分析

2.1 土地利用碳强度时空变化特征

由图 4 可知,地均碳强度主要受土地利用类型和强度的影响,研究期内整体呈小幅上升趋势,高值区在九

江浔阳区、南昌东湖区、西湖区,多数区县能维持在 0.05 以下;人均碳强度与人口密度和消费水平相关,研究期内上升明显,2010—2020 年增幅更大,较高值主要分布在九江、南昌两市。但 2015 年后,南昌青山湖、青云谱等

区县出现明显下降;经济碳强度与经济产值、产业结构、能源效率相关,2000—2015年处于较高水平,高值主要

分布在九江市。2015年后整体有所回落,低值主要分布在宜春市,但南昌安义县、新余渝水区仍保持较高水平。

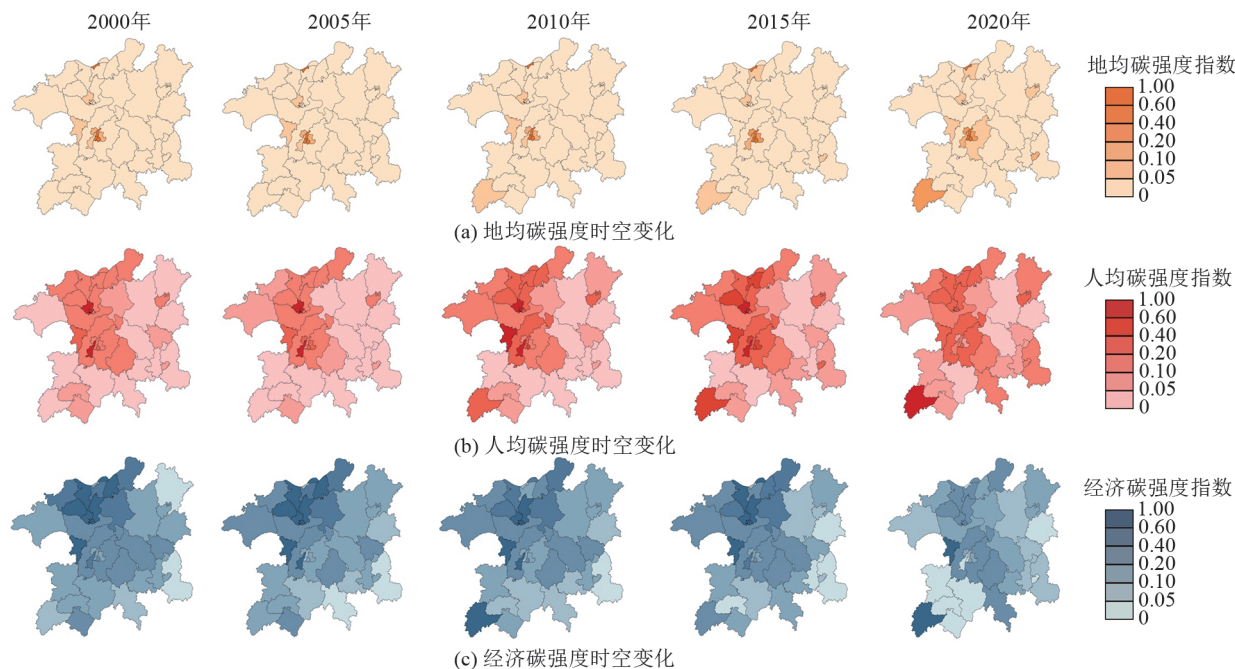


图4 “地均-人均-经济”碳强度时空变化

Fig. 4 Spatio-temporal variations of "Land-Demographic-Economic" carbon intensity

2.2 生态系统服务时空变化特征

由图5可知,产水服务受降雨等因素影响,空间差异显著,产水量整体呈现由西北向东南递增趋势。2010年产水量为研究期内峰值,新余渝水区最高达 $2\,495\,331.709\text{ mm/km}^2$,2010年后,产水量逐渐下降;2000—2010年,土壤保持服务呈上升变化,并在2010年达到研究期峰值,高值在鹰潭市、九江市、景德镇市。2010年后整体下降;碳储量整体呈下降变化,仅九江武宁、上饶余干有小幅上升,高值与较高值的分布与土壤保持服务较为相似;生境质量总体下降,但九江武宁县、永修县、德安县,鹰潭贵溪市生境质量较好(数值均在0.6以上),且研究期内无下降表现;生态系统服务综合指数(ESI)高值区在研究期内均维持在2.6以上,其中以武宁县最高。低值主要在南昌市及鹰潭月湖区,景德镇珠山区,九江浔阳区,均处于0.09以下的较低水平。南昌市ESI整体下降明显,超半数区县连续下降或持续处于较低水平。

研究期内,鄱阳湖生态经济区生态系统服务整体呈现“北高南低”的空间格局,九江、景德镇等市生态系统服务功能较强,南昌市生态系统服务功能较弱且持续退化。土壤保持、碳储量、生境质量整体呈下降趋势,产水量波动较大,生态系统服务综合指数高值区稳定,低值区退化明显,区域生态保护与修复需重点关注南昌及周边低值区。

2.3 碳强度与生态系统服务脱钩互动特征

由图6可知,地均碳强度与生态系统服务在研究期内由理想脱钩向不理想负脱钩变化。2000—2005年以理想互动为主,区县数量达28个,占比52.6%,多为强脱钩(生态绝对上升),主要集中在九江市、宜春市、抚州市等生态基础较好的区域;不理想互动区县占比18.4%,以强负脱钩(生态绝对下降)为主,集中在南昌市、鹰潭市等经济活跃区。2005—2020年,不理想互动区县数量持续上升,2015—2020年强负脱钩区县达23个,理想互动区县仅6个,且主要为衰退型脱钩;人均和经济碳强度与生态系统服务的互动关系变化相似,呈现“理想脱钩-不理想负脱钩-理想脱钩”的演变趋势。2000—2005年,人均碳强度与生态系统服务为理想互动的区县占比47.4%,多为强脱钩(生态绝对上升)。2005—2015年,负脱钩区县数量大幅上升,2005—2010年区县数量高达35个,占比92.1%,以强负脱钩为主。2015—2020年,理想互动区县数量回升,占比47.4%,以衰退型脱钩为主,集中在南昌、九江两市;经济碳强度与生态系统服务在2000—2005年以理想互动为主,呈现强脱钩关系的区县占比29.0%。2005—2015年,不理想互动区县数量明显上升,2010—2015年呈强负脱钩关系的区县占比36.8%。2015—2020年,理想互动区重回主导,其中衰退型脱钩区县占比52.6%,其次为强脱钩区县,占比26.3%,主要分布于南昌市、九江市、宜春市、上饶市。

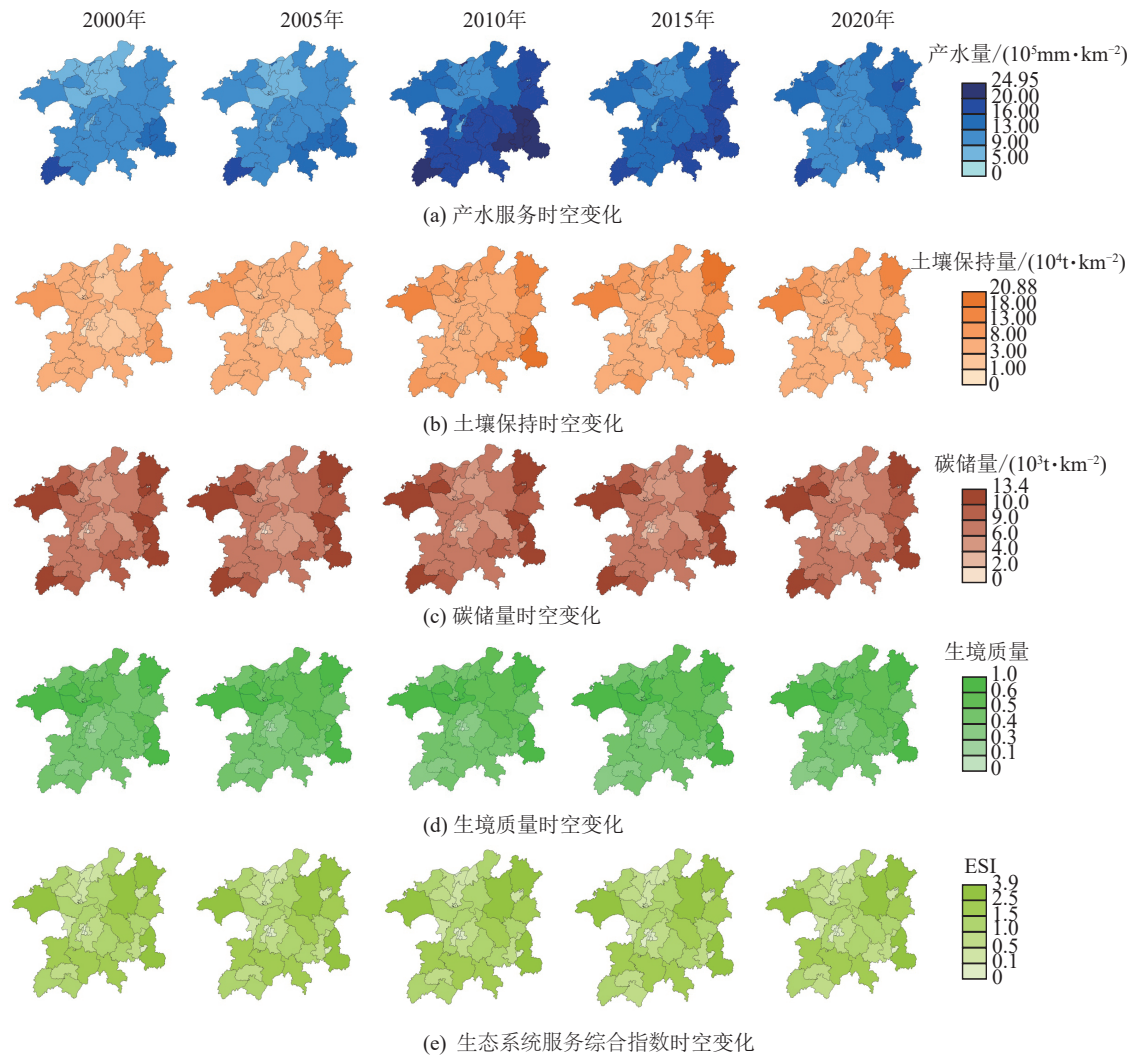


图 5 生态系统服务功能及综合指数时空变化

Fig. 5 Spatio-temporal variations of ecosystem service functions and composite index

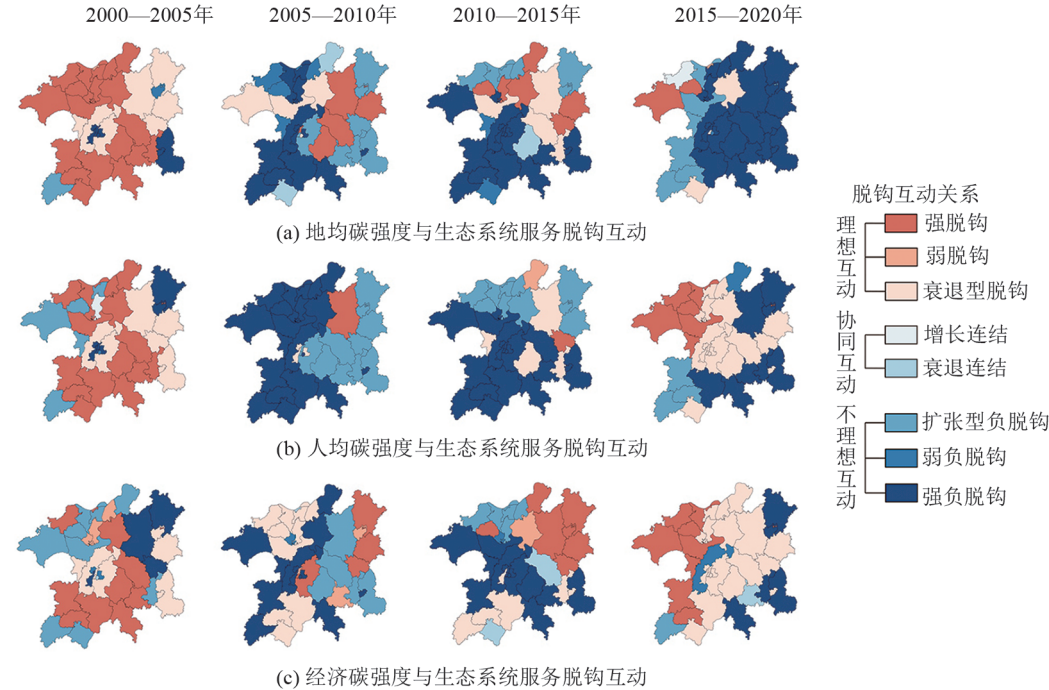


图 6 “地均-人均-经济”碳强度与生态系统服务脱钩互动

Fig. 6 Decoupling interaction between "Land-Demographic-Economic" carbon intensity and ecosystem services
<http://stbxb.alljournal.com.cn>

“地均-人均-经济”碳强度与生态系统服务的脱钩关系也体现土地、人口、经济与生态系统间复杂的时空互动关系。地均碳强度与生态系统服务的负脱钩关系表明,土地利用变化对碳排放的影响较大,且随着建设用地不断扩张,生态系统服务持续下降;人均碳强度与生态系统服务的负脱钩关系则表明,人口聚集和消费模式的变化加剧了碳排放,并对生态系统服务产生负面影响;经济碳强度与生态系统服务的脱钩关系则表明,随着产业结构调整 and 能源效率提升,碳排放效率有所提高,但生态系统服务仍面临较大压力。

2.4 三维互动分区

鄱阳湖生态经济区 2000—2020 年碳强度与生态系统服务三维互动区时空及数量变化见图 7。2000—2005 年研究区内三维理想互动区县数量最多,达 16 个,主要集中在研究区中部的抚州、宜春两市及九江市部分区县。一维不理想互动区为第二大互动区,占总数的 26.3%,主要表现为“经济”碳强度与生态系统服务的负脱钩。三维不理想互动区主要位于南昌青山湖区、红谷滩区,新余渝水区,主要表现为碳强度不断上升,而生态系统服务持续下降的强负脱钩关系。

2005—2010 年研究区仅有一维、二维、三维不理想互动区,其中呈二维不理想互动的区县最多,占比 60.5%,主要表现为“地均-人均”碳强度与生态系统服务的强负脱钩。三维不理想互动区与一维不理想互动区分别占 23.7%、15.8%。

2010—2015 年三维理想互动区有所回升,数量为 4 个,占比 10.5%,表现为这一理想互动的区县有九江彭泽县,上饶鄱阳县、万年县,鹰潭余江区,主要以衰退型脱钩关系为主。这一时期,三维不理想互动区仍是数量最多区域,占比 44.7%,主要集中于南昌市、九江市、抚州市,且以强负脱钩关系为主。

2015—2020 年三维不理想互动区数量显著减少,仅 6 个区县为该互动类型,分别为鹰潭贵溪市、余江区,景德镇昌江区、浮梁县,新余渝水区,抚州临川区;一维不理想互动区数量增多,其中南昌市、九江市占比较大,不理想互动关系主要表现为“地均”碳强度与生态系统服务的强负脱钩及“经济-人均”碳强度与生态系统服务的衰退型脱钩;三维理想互动区与二维理想互动区的数量有小幅上升,分别占 15.8%、2.6%,但仅有九江武宁县、浔阳区为强脱钩,其余区县均为衰退型脱钩。

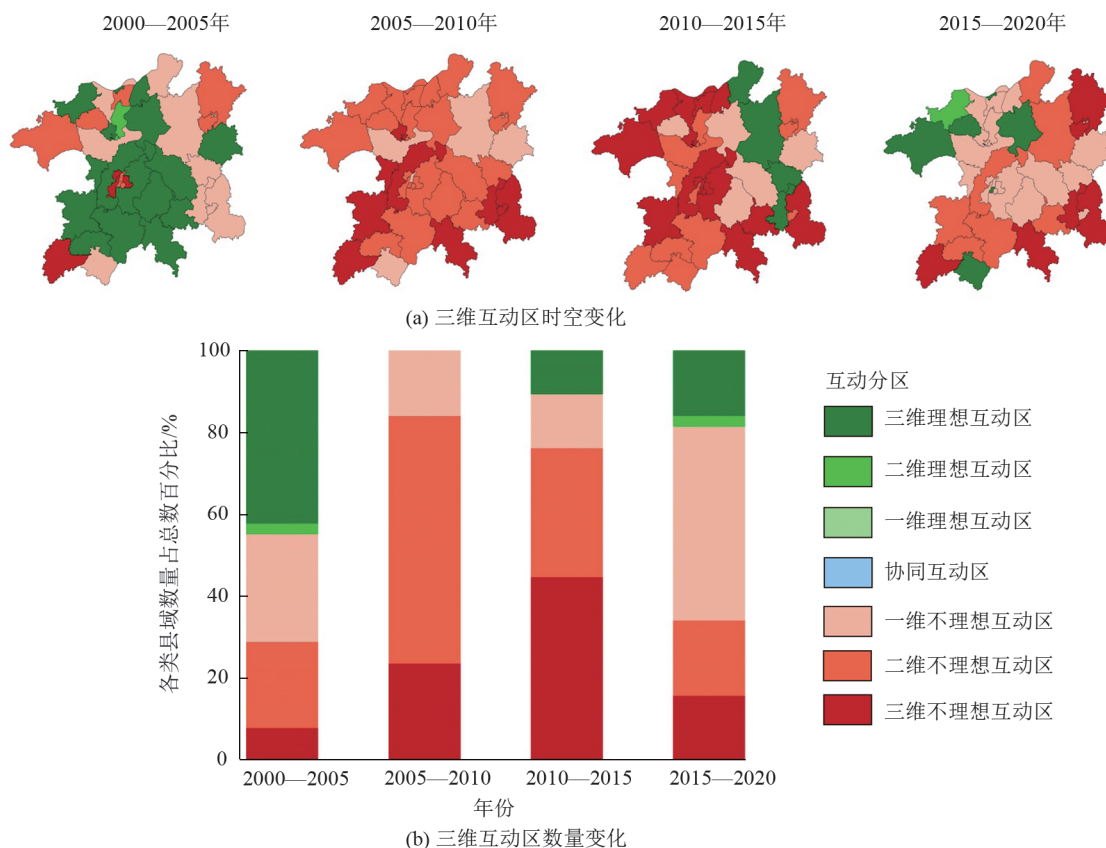


图 7 Spatio-temporal and quantitative variations of three-dimensional interactive zones

3 讨论

3.1 与相关研究的比较

鄱阳湖生态经济区作为江西省首个纳入国家级战略规划的区域,对全省及周边省市的经济发展有着较强的引领及示范作用。现有研究多围绕生态系统服务单一层面展开,陈竹安等^[32]研究发现,鄱阳湖生态经济区水源涵养功能在2000—2019年呈先上升后下降变化;车育婧等^[33]也指出,鄱阳湖生态经济区包括水源涵养内的各项生态系统服务功能价值均有不同程度减少,上述结论与本研究生态系统服务的时空分析结果相一致。赵先超等^[5]对长株潭城市群土地利用地均碳排放与生态系统服务价值的研究表明,地均碳排放与生态系统服务价值强度之间存在明显的负相关性;王丹等^[7]研究表明,南四湖流域土地利用碳强度与生态系统服务价值存在空间关联性,且空间关联规律在研究期内有较大的变化,以上结论与本研究中碳强度与生态系统服务的时空互动特征(以负脱钩关系及多维不理想互动区为主)相契合。在此基础上,本研究引入“地均-人均-经济”碳强度,综合考虑碳排放与土地利用、人口变化和发展的多重关系,更全面地揭示鄱阳湖生态经济区碳排放的时空变化特征及其驱动因素,为区域可持续发展提供更科学的依据。然而,由于学界对碳排放系数、煤炭消耗系数等尚未形成统一标准,研究仅能基于前人成果合理赋值,后续可重点关注其发展变化,以提升研究准确性。

3.2 三维互动区的“生态-经济”空间分异

鄱阳湖生态经济区三维互动区的空间变化充分体现该区域“生态-经济”的空间分异规律,也是多种因素共同作用的结果。从产业结构来看,南昌市作为区域核心城市,工业和服务业高度发达,建设用地扩张迅速(如青山湖区、青云谱区等),大量土地用于工业生产和城市建设,导致地均碳强度上升,同时对自然生态系统造成破坏,使得生态系统服务功能下降。而九江武宁等地以生态农业和生态旅游等绿色产业为主,产业结构较为合理,生态系统服务功能维持较好,在生态-经济关系上呈现出更理想的状态;能源结构差异也是重要影响因素。九江市部分区县(如柴桑区、庐山市等),曾经对煤炭等化石能源依赖度较高,能源利用效率较低,使得经济碳强度在2000—2015年处于较高水平,对生态环境造成较大压力。相比之下,一些积极推动清洁能源利用的区县,如宜春市部分地区,在后期经济碳强度有所下降,生态环境压力得到缓解,生态-经济关系逐渐改善;人口因素同样不可忽视。南昌、九江等城市人口

密集,人均碳排放量较高,人口聚集带来的能源消耗增加,使得人均碳强度上升。而人口相对稀疏的地区,如上饶市部分区县,人均碳强度较低,生态压力相对较小,生态-经济关系在人均维度上表现更优;政策方面,2009年国务院批复《鄱阳湖生态经济区规划》后,区域经济进入高速发展阶段。在发展初期,部分区县为追求经济增长,过度开发土地,忽视生态保护,导致碳强度与生态系统服务处于不理想互动状态。后期随着政策调整,对生态保护的重视程度提高,部分区县开始推动产业升级、优化能源结构等措施,生态-经济关系逐渐向好。

3.3 区域发展的对策与建议

区域的生态问题与经济发展往往能够通过相关政策的调整得到一定程度的改善。因此,基于2000—2020年鄱阳湖生态经济区“地均-人均-经济”碳强度与生态系统服务互动分区提出相应区域的发展对策及建议。

1)理想互动区与协同互动区应保持现有优势,补齐短板。三维理想互动区需加强对现有经济发展与良好生态环境成果的保护与管理,确保生态系统服务的持续性和稳定性;二维理想互动区和一维理想互动区在保持现有理想互动面优势的基础上,对协同互动面采取必要措施推动其向理想互动转变。如针对“地均-人均”二维理想互动区,需推动清洁能源的利用从而减少对化石能源的依赖,并积极优化产业结构,构建低耗能、高产出、高回报的环境友好型经济发展模式;针对“人均-经济”二维理想互动区,需要科学合理安排土地利用结构与布局,实现土地的低碳高效与节约集约利用,从而减少“地均”碳排放量。

2)不理想互动区是研究期内各区县数量最多的类型,说明当前区域碳排放与生态系统服务不平衡问题仍然突出,应当全面优化转型,大力提升生态系统服务水平。一维不理想互动区与二维不理想互动区应在保持已有理想与协同互动面的基础上,更大力度地改善不理想互动状态,如“地均-经济”二维不理想互动区除需要合理安排土地利用布局、优化产业结构等“软手段”之外,更应该以推动能耗高、污染大、转型贵的落后产业退出市场,严格各类土地用途转换审批标准与程序,促进政府主导的固碳增汇工程落地实施等“硬手段”,加速向理想互动的转型。三维不理想互动区是当前面临的重点与难点问题,需要用系统性的思维方式,综合考虑“地均-人均-经济”碳排放问题,将土地利用规划、产业高质量发展、生态保护与修复等方面的技术与方法融会贯通并加以运用,从而实现区域生态-经济稳步可持续发展。

4 结 论

1) 2000—2020 年鄱阳湖生态经济区“地均-人均”碳强度呈正向变化,“经济”碳强度为负向变化,各项生态系统服务有不同程度下降。

2) 碳强度与生态系统服务之间存在时空互动相关性,“地均”碳强度与生态系统服务由脱钩向负脱钩转变,而“人均-经济”碳强度与生态系统服务经过负脱钩变化后已重回理想的脱钩状态。

3) 现阶段以“地均”碳强度一维不理想互动区数量最多,占比 47.4%,主要集中于南昌、九江两市。三维理想互动区与二维理想互动区的数量有小幅上升,分别占 15.8%、2.6%,衰退型脱钩为主要的理想互动关系。

参考文献:

- [1] 洪蕾,孙杰,刘冬,等.长三角中心城市群生态环境与社会经济耦合协调发展及其影响因素研究[J].生态与农村环境学报,2024,40(9):1155-1166.
HONG L, SUN J, LIU D, et al. Research on the development of coupling coordinated relationship and the affecting factors of eco-environment and socio-economy in central urban agglomeration of Yangtze River Delta Region[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2024,40(9):1155-1166.
- [2] 冯国平,田国行.基于土地利用的驻马店市碳源/汇时空分布及预测[J].水土保持学报,2023,37(6):219-227.
FENG G P, TIAN G H. Spatio-temporal distribution and prediction of carbon source and sink based on land use in Zhumadian City[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023,37(6):219-227.
- [3] 张鹏岩,杨丹,刘宇,等.基于复合生态系统视角的土地利用变化碳源/汇效应研究进展[J].生态学报,2025,45(5):2058-2073.
ZHANG P Y, YANG D, LIU Y, et al. Carbon source/sink effects of land use change from the perspective of complex ecosystem: Progress and review[J]. Acta Ecologica Sinica, 2025,45(5):2058-2073.
- [4] WANG J X, LAI X W, ZHANG Z F, et al. Optimization of territorial ecological space under the constraint of ecosystem service externalities[J]. Ecological Indicators, 2024,168:e112752.
- [5] 赵先超,田一豆,张潇湘.长株潭城市群土地利用碳排放与生态系统服务价值时空关系分析[J].水土保持学报,2023,37(5):215-225.
ZHAO X C, TIAN Y D, ZHANG X X. Spatio-temporal relationship between land use carbon emissions and ecosystem service value in Changzhutan urban agglomeration[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023,

37(5):215-225.

- [6] 高熲佳,崔佳.基于LUCC的山西省碳排放和生态系统服务价值时空关系[J/OL].环境科学,2024.DOI: 10.13227/j.hjcx.202405102.
GAO M J, CUI J. Spatiotemporal relationship between carbon emissions and ecosystem service value in Shanxi province based on Land Use Change [J/OL]. Environmental Science, 2024. DOI: 10.13227/j.hjcx.202405102.
- [7] 王丹,荆延德,韩善梅,等.基于格网的南四湖流域土地利用碳排放与其生态系统服务价值时空关系分析[J].生态学报,2022,42(23):9604-9614.
WANG D, JING Y D, HAN S M, et al. Spatio-temporal relationship of land-use carbon emission and ecosystem service value in Nansi Lake basin based upon a grid square [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(23): 9604-9614.
- [8] 陈慧灵,蒋莉莎,王振波.黄河流域土地利用碳排放与生态系统服务价值时空耦合及影响因素[J/OL].环境科学,2024. DOI: 10.13227/j.hjcx.202404136.
CHEN H L, JIANG L S, WANG Z B. Spatial temporal coupling and influencing factors of land-use carbon emissions and ecosystem service value in the Yellow River basin [J/OL]. Environmental Science, 2024. DOI: 10.13227/j.hjcx.202404136.
- [9] MA S L, XU M X. Assessing the sustainability impact of land-use changes and carbon emission intensity in the Loess Plateau[J]. Sustainability, 2024,16(19):e8618.
- [10] 雷晓燕,张春峰,李昕,等.人口变化、消费结构与低碳转型[J].数量经济技术经济研究,2025,42(1):5-28.
LEI X Y, ZHANG C F, LI X, et al. Population change, consumption structure, and carbon emission reduction [J]. Journal of Quantitative and Technological Economics, 2025,42(1):5-28.
- [11] 岳婷,周静,龙如银,等.中国城市居民生活碳排放因素分解与减碳潜力分析[J].系统工程理论与实践,2024,44(12):3777-3792.
YUE T, ZHOU J, LONG R Y, et al. Decomposition of carbon emission factors and carbon reduction potential of urban residents in China [J]. Systems Engineering: Theory and Practice, 2024,44(12):3777-3792.
- [12] CLAY L, MOTALLEBI M, O'HALLORAN L T L. Quantifying ecosystem services to maximize co-benefits under market-based conservation solutions in the Edisto River basin, South Carolina [J]. Forests, 2024, 15(10): e1796.
- [13] 马超群,弋志强,员学锋,等.不同格网尺度下生态系统服务价值空间分异及影响因素分析:以秦岭西安段为例[J].水土保持研究,2025,32(1):389-399.
MA C Q, YI Z Q, YUAN X F, et al. Spatial difference of ecological services and its influencing factors under dif-

- ferent scales: Taking the Xi'an section of Qinling Mountains as an example[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(1): 389-399.
- [14] 赵祖伦, 罗军华, 李威, 等. 喀斯特山地城市群生态系统服务价值演变及影响因素[J]. 水土保持研究, 2024, 31(5): 410-420.
- ZHAO Z L, LUO J H, LI W, et al. Evolution of ecosystem service value and influencing factors in karst mountainous urban agglomeration [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(5): 410-420.
- [15] 李安佳, 尹旭, 魏慧. 京津冀区县土地利用碳排放时空演化及其驱动因子[J/OL]. 环境科学, 2024. DOI: 10.13227/j.hjcx.202407213.
- LI A J, YIN X, WEI H. Spatio-temporal evolution of carbon emission from land use and its driving factors in Beijing-Tianjin-Hebei districts and counties[J/OL]. Environmental Science, 2024. DOI: 10.13227/j.hjcx.202407213.
- [16] 张明辉, 李鹏, 许垚涛. 格网尺度下陕西省土地利用碳排放时空特征及其影响因素[J/OL]. 中国水土保持, 2025. <https://link.cnki.net/urlid/41.1144.TV.20240929.1621.002>
- ZHANG M H, LI P, XU Y T. Spatial-temporal characteristics and influencing factors of land use carbon emissions in Shaanxi Province at grid scale[J/OL]. Soil and Water Conservation in China, 2025. <https://link.cnki.net/urlid/41.1144.TV.20240929.1621.002>
- [17] 党牛, 林景曜, 王强, 等. 青藏高原地区能源碳排放时空格局及驱动因素[J]. 生态学报, 2024, 44(18): 8033-8046.
- DANG N, LIN J Y, WANG Q, et al. Spatio-temporal patterns and driving factors of energy CO₂ emission in the Qinghai-Tibet region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(18): 8033-8046.
- [18] 王之语, 路昌, 蔡雪芹, 等. 黄河流域山东段“空间-经济-人口”碳强度与生态系统服务的时空互动关系[J]. 环境科学, 2025, 46(3): 1573-1584.
- WANG Z Y, LU C, CAI X Q, et al. Spatio-temporal interactions between "spatial-economic-demographic" carbon strength and ecosystem services in the Shandong section of the Yellow River basin[J]. Environmental Science, 2025, 46(3): 1573-1584.
- [19] 翟晨阳, 王圣云. 基于系统动力学的鄱阳湖区多维福祉时空差异演变与情景模拟[J]. 生态学报, 2021, 41(8): 2954-2967.
- ZHAI C Y, WANG S Y. Spatio-temporal difference evolution and scenario simulation of multi-dimensional well-being in Poyang Lake area based on system dynamics[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(8): 2954-2967.
- [20] 江西省统计局, 国家统计局江西调查总队. 江西统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2001.
- Jiangxi Provincial Bureau of Statistics, National Bureau of Statistics Jiangxi Survey Team. Jiangxi Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2001.
- [21] 国家统计局, 国家统计局农村社会经济调查总队. 中国县(市)社会经济统计概要[M]. 北京: 中国统计出版社, 2000.
- National Bureau of Statistics of China, Rural Socioeconomic Survey Division. Statistical summary of county (city) socioeconomics in China[M]. Beijing: China Statistics Press, 2000.
- [22] 罗志军, 史想松, 韩林婕, 等. 鄱阳湖区土地利用变化的碳排放效应研究[J]. 江西农业大学学报, 2013, 35(5): 1074-1081.
- LUO Z J, SHI X S, HAN L J, et al. A study on carbon emission effects of changes in land use in Poyang Lake Region [J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2013, 35(5): 1074-1081.
- [23] 王正, 周侃, 樊杰, 等. 市—县尺度能源消费碳排放核算方法研究进展[J]. 地理科学进展, 2023, 42(7): 1406-1419.
- WANG Z, ZHOU K, FAN J, et al. Progress of research on energy-related carbon emission accounting methods at the prefectural and county levels[J]. Progress in Geography, 2023, 42(7): 1406-1419.
- [24] 魏俊超, 梅志雄, 马君杰, 等. 广州市土地利用碳排放时空演变及影响因素[J]. 水土保持研究, 2024, 31(4): 298-307.
- WEI J C, MEI Z X, MA J J, et al. Spatiotemporal evolution and influencing factors of land-use carbon emissions in Guangzhou[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(4): 298-307.
- [25] ZHAO C X, LIU Y L, YAN Z X. Effects of land-use change on carbon emission and its driving factors in Shaanxi Province from 2000 to 2020. [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2023, 30(26): 68313-68326.
- [26] 冯琳, 雷国平. 基于生态安全格局的东北典型黑土区生态保护红线划定与优化[J]. 自然资源学报, 2024, 39(2): 426-445.
- FENG L, LEI G P. Research on the delineation and optimization of ecological protection redline based on the perspective of ecological security pattern in typical black soil areas of northeast China [J]. Journal of Natural Resources, 2024, 39(2): 426-445.
- [27] 庞万隆, 冀鹏浩, 庞立东, 等. 内蒙古大兴安岭土地利用格局和生态系统服务功能的时空演变特征[J]. 水土保持通报, 2024, 44(4): 340-351.
- PANG W L, JI P H, PANG L D, et al. Spatial and temporal evolution of land use pattern and ecosystem service function in Daxinganling Mountains of Inner Mongolia[J].

- Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44 (4): 340-351.
- [28] LIU B, LÜ J. Spatiotemporal evolution and tapio decoupling analysis of energy-related carbon emissions using nighttime light data: A quantitative case study at the city scale in North-East China[J]. Energies, 2024, 17(19): e4795.
- [29] 郭文强, 于忠萍, 雷明, 等. 我国碳排放驱动因素分解及脱钩努力效应研究[J]. 环境科学研究, 2025, 38(2): 209-219.
- GUO W Q, YU Z P, LEI M, et al. Decomposition of carbon emission drivers and decoupling effort effects in China [J]. Research of Environmental Sciences, 2025, 38(2): 209-219.
- [30] 王永阳, 蔡宴朋, 张盼. 珠三角城市群净碳排放与经济发展脱钩效应及其驱动力[J]. 生态学报, 2025, 45(3): 1303-1314.
- WANG Y Y, CAI Y P, ZHANG P. Decoupling effect and driving factors of net carbon emissions and economic development in the Pearl River Delta urban agglomeration[J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(3): 1303-1314.
- [31] 陈霆, 徐伟铭, 吴升, 等. 国土空间规划视角下的城镇开发边界划定和空间管控体系构建[J]. 地球信息科学学报, 2022, 24(2): 263-279.
- CHEN T, XU W M, WU S, et al. Delimitation of urban development boundary and construction of space control system from the perspective of territorial spatial planning [J]. Journal of Geo-Information Science, 2022, 24(2): 263-279.
- [32] 陈竹安, 刘子强, 危小建, 等. 2000—2019年鄱阳湖生态经济区水源涵养时空变化[J]. 测绘通报, 2022(8): 1-6.
- CHEN Z A, LIU Z Q, WEI X J, et al. Spatio-temporal changes of water conservation in Poyang Lake ecological economic zone from 2000 to 2019[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2022(8): 1-6.
- [33] 车育婧, 蒋梅鑫, 钟业喜. 基于土地利用变化的鄱阳湖生态经济区生态系统服务价值时空变化研究[J]. 江西师范大学学报(自然科学版), 2018, 42(1): 45-51.
- CHE Y J, JIANG M X, ZHONG Y X. The study on temporal and spatial variation of ecosystem service value in Poyang Lake ecological economic zone based on the variation of land utilization[J]. Journal of Jiangxi Normal University (Natural Science Edition), 2018, 42 (1): 45-51.
- (上接第 234 页)
- [22] 刘顺鑫, 黄云. “三生空间”视角下万州区景观生态安全评价及其耦合特征分析[J]. 水土保持研究, 2020, 27(6): 308-316.
- LIU S X, HUANG Y. Evaluation and coupling coordination analysis of landscape ecological security of Wanzhou district from the perspective of production-life-ecological space[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(6): 308-316.
- [23] LIANG C, ZENG J, ZHANG R C, et al. Connecting urban area with rural hinterland: A stepwise ecological security network construction approach in the urban-rural fringe[J]. Ecological Indicators, 2022, 138: e108794.
- [24] 李倩茹, 贾彦龙, 王慧军, 等. 基于生态功能区的河北省生态系统服务权衡与协同分析[J]. 地理学报, 2023, 78(11): 2833-2849.
- LI Q R, JIA Y L, WANG H J, et al. Analysis of trade-off and synergy effects of ecosystem services in Hebei Province from the perspective of ecological function area [J]. Acta Geographica Sinica, 2023, 78(11): 2833-2849.
- [25] 聂艳, 李怡敏, 李鑫, 等. 耦合风险概率与生态损失的襄十随神区域生态风险评价研究[J]. 长江流域资源与环境, 2024, 33(4): 870-881.
- NIE Y, LI Y M, LI X, et al. Ecological risk assessment in "Xiangyang-Shiyan-Suizhou-Shennongjia" based on risk probability and ecological loss model[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2024, 33(4): 870-881.
- [26] 胥蕊, 朱大明, 王琳, 等. 云南省土地利用生态风险与碳储量时空关联分析与预测[J]. 水土保持学报, 2025, 39(1): 217-228.
- XU R, ZHU D M, WANG L, et al. Spatial and temporal correlation analysis and prediction of land use ecological risk and carbon stock in Yunnan Province [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(1): 217-228.
- [27] 杨文仙. 云南省生态系统服务功能重要区识别研究[D]. 昆明: 云南师范大学, 2022.
- YANG W X. Study on identification of important areas of ecosystem services in Yunnan Province [D]. Kunming: Yunnan Normal University, 2022.
- [28] 李子辉, 张亚, 巴永, 等. 云南省植被固碳能力与产水、土壤保持服务冷热点识别[J]. 中国环境科学, 2024, 44(2): 1007-1019.
- LI Z H, ZHANG Y, BA Y, et al. Cold and hot spots identification for carbon sequestration capacity, water yield and soil conservation services of vegetation in Yunnan Province [J]. China Environmental Science, 2024, 44(2): 1007-1019.