

基于景观指数的长三角地区耕地细碎化对 耕地利用生态效率的影响

王可钰^{1,2,3,4}, 危小建^{1,2,3,4}, 程朋根^{1,2,3,4}, 贾沐霖^{1,2,3,4}, 潘菀莹^{1,2,3,4}

(1. 东华理工大学 江西省流域生态过程与信息重点实验室, 南昌 330013;

2. 东华理工大学 南昌市景观过程与国土空间生态修复重点实验室, 南昌 330013;

3. 东华理工大学 测绘与空间信息工程学院, 南昌 330013;

4. 东华理工大学 自然资源部环鄱阳湖区域矿山环境监测与治理重点实验室, 南昌 330013)

摘要: [目的] 探究耕地细碎化对耕地利用生态效率的影响, 明晰其作用机制, 为优化土地利用格局并促进耕地高效利用提供理论依据。[方法] 以长三角地区为研究对象, 分别运用超效率SBM模型和熵权法评估2000—2020年该地区的耕地利用生态效率与细碎化程度, 基于动态空间杜宾模型和门槛模型的实证结果深入剖析二者间的内在联系。[结果] (1) 研究期间长三角地区耕地利用生态效率值整体略有下降, 但始终稳定处于中高水平, 空间上高效率区主要集中在中部各省交界处。(2) 整个区域耕地细碎化程度较低, 表现出“南高北低”的空间差异。(3) 耕地细碎化对本地耕地利用生态效率产生显著的正向影响, 对周边地区存在负向的空间溢出效应, 这两种效应均只在短期内明显。(4) 细碎化对耕地利用生态效率的影响存在以人均耕地面积为门槛的倒“U”型特征, 其作用方向随该门槛由正转负。[结论] 耕地细碎化对生态效率影响具有多重性, 存在空间溢出与门槛效应。未来该区域农业发展应树立科学正确的细碎化治理理念, 最大化其正向积极作用, 并将耕地规模与耕地细碎化有机结合制定差异化种植方案。

关键词: 耕地细碎化; 耕地利用生态效率; 动态空间杜宾模型; 门槛效应; 长三角地区

中图分类号: F323.211; X322

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)03-0344-11

Impact of cultivated land fragmentation on eco-efficiency of cultivated land use in Yangtze River Delta region based on landscape indices

Wang Keyu^{1,2,3,4}, Wei Xiaojian^{1,2,3,4}, Cheng Penggen^{1,2,3,4}, Jia Mulin^{1,2,3,4}, Pan Wanying^{1,2,3,4}

(1. Jiangxi Key Laboratory of Watershed Ecological Process and Information, East China University of Technology, Nanchang 330013, China; 2. Nanchang Key Laboratory of Landscape Process and Territorial Spatial Ecological Restoration, East China University of Technology, Nanchang 330013, China; 3. School of Surveying and Geoinformation Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China; 4. Key Laboratory of Mine Environmental Monitoring and Improving around Poyang Lake of Ministry of Natural Resources, East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

Abstract: [Objective] This study explores the impact of cultivated land fragmentation on the eco-efficiency of cultivated land use (ECLU) and clarifies its influence mechanisms, aiming to provide a theoretical basis for optimizing the land-use patterns and promoting the efficient utilization of cultivated land. [Methods] Taking the Yangtze River Delta region as the research object, the slack-based measure (SBM) model of super-efficiency and the entropy weight method were applied to evaluate ECLU and the fragmentation degree (2000—2020). Based on the empirical results of the dynamic spatial Durbin model and the threshold model, the intrinsic connection

收稿日期: 2025-07-22

修回日期: 2025-08-07

接受日期: 2025-08-22

资助项目: 国家自然科学基金项目(52168010); 东华理工大学研究生创新专项(DHYC-2025020)

第一作者: 王可钰(2002—), 女, 江西景德镇人, 硕士研究生, 主要方向为土地利用规划、评价。E-mail: 2024110418@ecut.edu.cn

通信作者: 危小建(1988—), 男, 江西南昌人, 硕士研究生导师, 主要研究方向为土地利用规划、评价和土地资源可持续发展研究。E-mail: 631000872@qq.com

<https://stbeyj.publish.founderss.cn>

between the two was further analyzed. **[Results]** (1) During the research period, the ECLU values in the Yangtze River Delta region decreased slightly overall but remained stable at a medium to high level. Spatially, high-efficiency areas were mainly concentrated along the borders of the central provinces. (2) The degree of cultivated land fragmentation in the entire region was relatively low, showing a spatial pattern of higher in the south and lower in the north. (3) Cultivated land fragmentation had a significant positive impact on the local ECLU but had a negative spatial spillover effect on the surrounding areas. Both effects were obvious only in the short term. (4) The impact of fragmentation on ECLU showed an inverted U-shaped pattern with per capita cultivated land area as the threshold, and its effect changed from positive to negative when the threshold was crossed. **[Conclusion]** The impact of cultivated land fragmentation on eco-efficiency is multifaceted, showing both spatial spillover and threshold characteristics. Future agricultural development in this region should adopt a scientific and grounded approach to fragmentation management, maximize its positive effects, and organically combine cultivated land scale with fragmentation patterns to formulate differentiated planting schemes.

Keywords: cultivated land fragmentation; eco-efficiency of cultivated land use; dynamic spatial Durbin model; threshold effect; Yangtze River Delta region

耕地作为区域高质量发展的基础资源,肩负着粮食安全与农业可持续发展的重任。然而,我国耕地数量因人口迅速扩张而不断减少且质量逐渐退化。所以在当前耕地资源约束趋紧的时代背景下,如何高效利用耕地以获取更大的社会经济效益成为一个亟待解决的问题。随着城市化进程的加速,耕地细碎化成为热议话题之一。耕地细碎化是指耕地斑块由整体趋于分散的过程,表现为权属和景观格局细碎^[1]。研究表明,耕地细碎化会对耕地利用生态效率产生一定程度的作用^[2],而这种作用会因地域条件、资源禀赋等因素而存在差异。鉴于此,探析两者内在联系与影响机制,进而通过科学治理细碎化以提升农业生产效率,是推动农业现代化进程行之有效的方法。

生态效率最早源于由世界可持续发展工商理事会(World Business Council for Sustainable Development, WBSCD)于20世纪90年代提出的Eco-efficiency一词,后在土地利用领域中,耕地利用生态效率(Eco-efficiency of Cultivated Land Use, ECLU)被用于衡量资源投入与环境代价的协调性^[3]。目前学术界主要围绕其概念界定、指标选取、测算方法及影响因素4个方面展开研究^[4]。在概念界定方面,其核心在于衡量一定的耕地投入要素下期望产出与非期望产出的比值关系,强调以最少的资源利用与最低的污染产出获取最高的效益^[5-6]。指标选取基于“多投入多产出”的构建框架^[7],涵盖农作物产量和碳汇等期望产出以及碳排放和面源污染等非期望产出。测算方法主要包括生态足迹法^[8]、随机前沿模型(Stochastic Frontier Analysis, SFA)^[9]、数据包络分析法(Data Envelopment Analysis, DEA)^[10]等,其中

由DEA衍生的SBM(Slack-Based Measure)模型最为常见。影响因素方面,学者从城镇化^[11]、农村就业^[3]与耕地规模特征等^[12]多个视角,采用Tobit模型^[13]、地理加权回归^[14]或空间收敛模型等^[5]方法指出其受社会经济、农业资源禀赋与政策等多重因素影响^[15]。

我国耕地细碎化现象持续存在且逐渐加剧,对农业发展的影响愈加凸显。国内外学者围绕其对耕地利用生态效率的影响进行诸多探索,较为一致的观点是这种影响效应具有双重性^[16-17]:既可能降低机械化效率和增加生产成本^[18],也可能通过种植多样性提升生态效益^[19]。尽管已有研究为二者间的联系提供参考,但仍存在以下几点局限性:一方面,上述研究多采用固定模型、Tobit模型等传统回归方法,鲜少关注耕地利用生态效率的空间外部效应以及耕地细碎化的空间外部性对生态效率的影响,忽略了两个变量间的空间效应。另一方面,探讨二者关系的研究多集中在线性层面,较少考虑到不同耕地规模背景下这种关系的复杂性和动态变化。因此,本文以长江三角洲为研究对象,运用超效率SBM模型测算研究区2000—2020年的耕地利用生态效率,选取景观指数并采用熵权法计算综合细碎化指数,结合动态空间杜宾模型与门槛模型探究二者的影响机制与非线性关系。研究旨在为优化耕地利用格局进而提高利用效率提供理论支撑。

1 理论分析

1.1 耕地细碎化对耕地利用生态效率的影响及空间效应

细碎化是我国耕地利用的显著特征,其形成机制复杂多元,导致其对耕地利用生态效率的影响具

有双重性,正负外部性并存^[20]。在种植过程中,细碎化不仅对农户个体行为如生产要素配置、决策判断等方面产生驱动作用,同时也对资源利用效率、农田生态环境、农业投入成本等产生影响^[1]。例如,在市场完善、人口稠密的地区,较为分散的耕地斑块为种植多样化提供条件,多元化种植结构又进一步调整劳动力在不同作物间的分配^[21],进而规避或降低因某一自然或市场突发风险带来的产量或收益波动。同时,地块差异促使农户进行精细化管理,根据土壤、作物需求精准调控农药化肥投入,提升资源利用效率^[22]。相反,在人口密度较低的地区,耕地细碎化会增加农户在不同地块的通勤时间,不仅降低劳动力的边际生产力^[23],还会引发撂荒与劳动力非农转移,加剧农业劳动力的分化。此外,细碎化显著加剧也会阻碍大型农业机械的使用,降低机械化水平与生产效率。

耕地细碎化对耕地利用生态效率的影响是多重和复杂的,因此,本文提出以下竞争性假设: H_{1a} : 长三角耕地细碎化对耕地利用生态效率的综合影响呈正向促进效应。 H_{1b} : 长三角耕地细碎化对耕地利用生态效率的综合影响呈负向抑制效应。

空间溢出效应是指某一区域内的主体行为对周边区域产生的影响,存在正向的“扩散效应”与负向的“虹吸效应”。毗邻地区具有地理距离上的优势和相似的资源禀赋特征,在耕地细碎化背景下,更加有利于精细化管理技术、多样化种植知识和各项要素资源在空间上的传播和普及,能够激发农户的学习兴趣和个体的效仿行为,促进生产效率的互赢。此为正向的扩散效应。虹吸效应是指当某地在细碎化背景下依然实现耕地高效率利用,则会吸引周边地区农业劳动力、资金等资源向此地迁移流动,引起本地耕地利用生态效率的提高而邻近地区效率值有所降低,这就是负向的空间溢出效应。综上,提出研究假设 H_2 : 耕地细碎化存在显著的空间溢出效应,但影响方向有待考究。

1.2 耕地规模的门槛效应

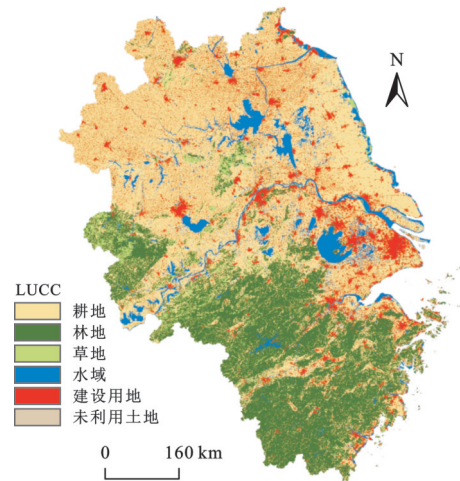
耕地规模在耕地细碎化对耕地利用生态效率的影响效应中发挥的作用不可忽视,当耕地规模处于不同水平时,耕地细碎化与耕地利用生态效率可能存在非线性关系,影响方向也可能发生变化。理论上,当耕地规模处于较低水平时,农户往往会忽视自身所付出的劳动成本,愿意用大量劳动力来代替其他资本的投入。同时,小规模农户为保证收益稳定,更倾向于多元化种植,以分散单一种植水稻的灾害风险^[12],从而提高耕地利用生态效率。而大规模的耕地利用背景下,细碎化会阻碍耕地利用生态效率的升高。面

对大面积且零散的耕地,农户需采用大型机械设备代替劳动力投入以节约时间,过程中会导致非期望产出碳排放量的增加,对生态效率产生负向影响。因此,本文提出以下假说 H_3 : 耕地细碎化对耕地利用生态效率的影响存在耕地规模的门槛效应。

2 研究设计

2.1 研究区概况

长江三角洲位于中国长江的下游地区,东临东海和黄海,地域范围囊括上海市、浙江省、江苏省和安徽省(图1),其总面积达35.8万 km^2 ,占全国国土面积的3.7%。长江三角洲地区属亚热带季风气候类型,四季分明,降水充沛,同时地处长江中下游平原,境内地形平坦,土壤肥沃,河网密集,这些优厚的农业资源条件以及充分的社会资源奠定该区域在我国农业发展总格局中无可替代的关键地位。依据《全国农业可持续发展规划(2015—2030年)》,长三角涵盖的三省一市均被划入优化发展区,其中江苏省和安徽省继续发挥农业大省的示范和引领作用。然而,由于该地城市扩张引发的耕地细碎化现象愈发明显,叠加农业多元功能需求,使细碎化对耕地利用效率的影响机制复杂难测。聚焦长三角地区展开研究,可为该地高效率利用耕地提供思路与方案。



注:基于标准地图服务系统下载的标准地图号GS(2024)0650号的标准地图制作,底图未做修改,下同。

图1 长三角地区区位

Fig. 1 Location map of Yangtze River Delta region

2.2 数据来源与变量选择

本研究在构建耕地利用生态效率体系中所使用的的数据以及控制变量数据均源于2000—2021年长江三角洲地区各省市农村统计年鉴、《中国城市统计年鉴》以及国家统计局数据库(<https://data.stats.gov.cn>),借助线性插值法对部分年份或地区的缺失数据补充完整。土地利用数据来源于武汉大学杨杰和黄

昕团队利用 Landsat 数据制作的中国年度土地覆盖数据集,空间分辨率为 30 m。

主要变量选取如下:(1)耕地利用生态效率(ECLU)为此次研究的被解释变量。指标体系由投入、期望产出与非期望产出3个方面构成。投入方面选取耕地、劳动力、化肥、农药、农膜、灌溉、农用柴油7个指标,选取农业总产值及粮食产量作为期望产出

部分,碳排放的测算参考 WEST 的碳排放系数法。(2)核心变量为耕地细碎化指数(CLFI)。(3)控制变量上,参考已有研究并依据数据的可得性,本文从社会经济、农业生产技术、资源禀赋三方面选取农村居民人均可支配收入、人均GDP、灌溉指数、农业机械总动力、第一产业从业人员占比、人均耕地面积6个指标作为控制变量。具体指标说明详见表1。

表1 变量的描述性统计分析
Table 1 Descriptive statistical analysis of variables

指标	变量	变量释义	变量	变量释义
投入指标	耕地投入	农作物播种总面积/10 ³ hm ²	被解释变量	耕地利用生态效率(ECLU)
	劳动力投入	(第一产业从业人数×(农业总产值/农林牧渔总产值))/万人		核心解释变量
	化肥投入	农用化肥投入(折纯量)/t	控制变量	农村居民人均可支配收入(PCDIRR)/10 ⁴ 元
	农药投入	农药使用量/t		人均GDP/10 ⁴ 元
	农膜投入	农用塑料薄膜使用量/t		灌溉指数(IRR)/%
	农用柴油投入	农用柴油使用量/kg		农业机械总动力(TPAM)/10 ⁴ kW
	灌溉投入	有效灌溉面积/10 ³ hm ²		第一产业从业人员占比/%
期望产出指标	农业总产值	农业总产值/10 ⁸ 元	人均耕地面积/hm ²	
	粮食总产量	粮食总产量/10 ⁴ t		
非期望产出指标	碳排放	耕地利用碳排放总量/t		

2.3 研究方法

2.3.1 超效率SBM模型 本文采用超效率SBM模型测算长三角地区耕地利用生态效率。相较于传统DEA模型,超效率SBM模型充分考虑松弛变量以及非期望产出问题,有效消除径向缺陷和角度差异等干扰^[24],并且能够进一步分解效率值大于1的决策单元进行比较,从而得到更为准确的耕地利用生态效率结果,计算公式如下:

$$\rho = \min \frac{1 + \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{s_i^x}{x_{i0}}}{1 - \frac{1}{s_1 + s_2} \left(\sum_{k=1}^{s_1} \frac{s_k^y}{y_{k0}} + \sum_{l=1}^{s_2} \frac{s_l^z}{z_{l0}} \right)}$$

$$s.t. x_{i0} \geq \sum_{j=1, \neq 0}^n \lambda_j x_j - s_i^x, \forall i;$$

$$y_{k0} \leq \sum_{j=1, \neq 0}^n \lambda_j y_j + s_k^y, \forall k;$$

$$z_{l0} \geq \sum_{j=1, \neq 0}^n \lambda_j z_j - s_l^z, \forall l;$$

$$1 - \frac{1}{s_1 + s_2} \left(\sum_{k=1}^{s_1} \frac{s_k^y}{y_{k0}} + \sum_{l=1}^{s_2} \frac{s_l^z}{z_{l0}} \right) > 0;$$

$$s_i^x \geq 0, s_k^y \geq 0, s_l^z \geq 0, \lambda_j \geq 0, \forall i, j, k, l;$$

式中:ρ表示决策单元的效率值;s^x∈R^m,s^z∈R^{s₂}分别表示投入和非期望产出的过剩量;s^y∈R^{s₁}则代表期望产

出的短缺量;n为决策单元总数。ρ值越大,ECLU越高,ρ≥1时,ECLU处于最优状态。

2.3.2 耕地细碎化指数的计算 景观指数能够高度浓缩景观格局信息,有效地将耕地细碎化现象具象化^[25]。参考现有文献^[26]选取斑块总面积(TA)、斑块密度(PD)、边缘密度(ED)、最大斑块指数(LPI)、平均斑块形状指数(SHAPE_MN)和集聚指数(AI)6个指标,利用Fragstats 4.2识别研究区内景观结构特征,并进一步采用熵权法计算各指标权重以构建综合细碎化指数。熵权法具体格式如下:

$$\text{正向指标: } y_{ij} = \frac{x_{ij} - \min x_{ij}}{\max x_{ij} - \min x_{ij}}$$

$$\text{负向指标: } y_{ij} = \frac{\max x_{ij} - x_{ij}}{\max x_{ij} - \min x_{ij}} \quad (2)$$

$$e_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m y_{ij} \ln y_{ij} \quad (3)$$

$$d_j = 1 - e_j \quad (4)$$

$$W_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j} \quad (5)$$

$$F = \sum W_j y_{ij} \quad (6)$$

式中:x_{ij}为第i个地级市第j个景观格局指标的原始值;y_{ij}为x_{ij}经过无量纲处理后的数值;e_j表示第j个景观格局指标的指标信息熵值;d_j为第j个景观格局指

标信息效用值; W_j 为第 j 个景观格局指标的权重; F 为综合细碎化指数。

2.3.3 空间相关性分析 莫兰指数是用来判断变量是否存在空间依赖性和空间相关性的指标。考虑到各地耕地细碎化与耕地利用生态效率在经济距离上均具有一定的空间联系,本研究建立经济距离权重矩阵来计算二者的全局莫兰指数,探究其在空间上的关联特征。具体计算公式如下:

$$\text{Global-Moran's } I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} \times \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})} \quad (7)$$

式中: n 表示研究区内地级市的数量; x_i 和 x_j 分别表示 i 市和 j 市的耕地利用生态效率或耕地细碎化指数; w_{ij} 是空间权重矩阵。

2.3.4 动态 SDM 模型 本研究选用动态空间杜宾模型探析耕地细碎化和耕地利用生态效率的影响效应。空间杜宾模型(SDM)同时引入被解释变量和解释变量的空间滞后项,而动态 SDM 模型则在此基础上进一步考虑到内生性和时滞性,因此本文将耕地利用生态效率的一阶滞后项引入方程,其具体公式如下:

$$\text{ECLU}_{it} = \alpha \text{ECLU}_{it-1} + \lambda \sum_{j=1}^n W_{ij} \text{ECLU}_{jt} + \beta_1 \text{CLFI}_{it} + \beta_2 x_{it} + u_i + e_{it} \quad (8)$$

式中: i 和 j 表示第 i 和 j 个市; t 表示时间; ECLU_{it} 表示被解释变量(耕地利用生态效率); α 为 ECLU 的时滞效应; W_{ij} 为空间权重矩阵; CLFI_{it} 表示核心解释变量(耕地细碎化指数); x_{it} 表示控制变量; λ 、 β_1 和 β_2 均表示空间回归系数; u_i 表示时间效应; e_{it} 表示随机误差项。

2.3.5 门槛回归模型 先前的研究多关注于两个变量的线性关系,忽略在不同耕地面积条件下两者可能存在的非线性关系。因此,依据相关文献^[27],本研究以人均耕地面积(Land)为门槛变量对这一关系进行检验,面板门槛模型设定如下:

$$\text{ECLU}_{it} = \alpha + \beta_1 \text{CLFI}_{it} I(\text{Land}_{it} \leq \rho) + \beta_2 \text{CLFI}_{it} I(\text{Land}_{it} > \rho) + \beta x_{it} + e_{it} \quad (9)$$

式中: α 表示常数项; Land_{it} 为门槛变量,表示人均耕地面积; $I(\text{Land}_{it})$ 表示指标函数; β_1 和 β_2 表示对应门槛下的估计系数; ρ 表示门槛值; β 表示各控制变量的估计系数。

3 结果与分析

3.1 耕地利用生态效率与耕地细碎化的时空特征

3.1.1 耕地利用生态效率时空演化分析 图2显示

研究期间长三角地区耕地利用生态效率的时间变化。总体上,耕地利用生态效率平均值为0.861,各年份数值在0.7~1.0波动,但波动幅度较小,稳定处于中高水平。从时间变化来看,生态效率值在2004年达到峰值0.939,后下降至2017年达到谷值0.721,又逐渐增加至2020年的0.784,整体有所降低。分区域来看,上海市的耕地利用生态效率平均值最高,为0.968,其余依次为江苏省(0.961)、浙江省(0.768)和安徽省(0.747)。从变化程度上看,上海市的效率值波动较为明显,在2015年前稳定在1.0以上,后一直呈现下降趋势,至2020年为0.643,研究期间下跌38.02%。江苏省各年份的效率值最为稳定,集中分布于0.9附近。安徽省耕地利用生态效率值在2019年为0.851,达到峰值,其余年份在0.6~0.85间波动;浙江省的耕地效率值在2008年之后持续下滑,于2017年达到最小值0.530。

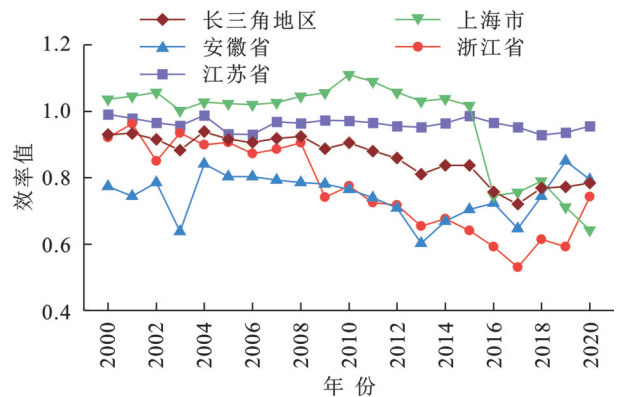


图2 耕地利用生态效率时间演变特征

Fig. 2 Temporal evolution characteristics of eco-efficiency of cultivated land use

本文借鉴以往文献^[7]将生态效率分为四组:低效率(0, 0.6)、中低效率[0.6, 0.8)、中高效[0.8, 1.0)和高效率[1.0, ∞)。由图3可知,长三角地区耕地利用生态效率内部差异明显。2000年中高值区主要集中在江苏省的大部、安徽省的北部如亳州市、浙江省的北部地区如杭州市以及上海市等。该年安徽省境内低值区占比较大,如安庆市、蚌埠市、铜陵市等地生态效率值低下。2010年处于中高水平的地级市沿三省交界地带集中分布。低值区在浙江省南部如金华市、衢州市、温州市等扩散,南京市由中低效率转化为高效率。2020年中高值区除中部交界处,主要分布在安徽省西北部如六安市、阜阳市与浙江省北部如湖州市、绍兴市等地扩散,而低值区在沿海城市如苏州市、南通市与上海市进一步扩大。

3.1.2 耕地细碎化时空特征分析 图4显示,20年间,长三角地区平均耕地细碎化数值为0.384,细碎化程度较低,无明显起伏变化。安徽省与江苏省两地

细碎化程度在0.2~0.4波动,变化平缓。而浙江省和上海市细碎化较为严重。浙江省各年耕地细碎化均大于0.5,在2004年达到峰值0.773,后呈现出波动下

降趋势,至2020年细碎化值为0.660。上海市细碎化变化较为明显,2004年之前起伏上升,达到峰值,为0.593,后整体下滑,数值稳定在0.4附近。

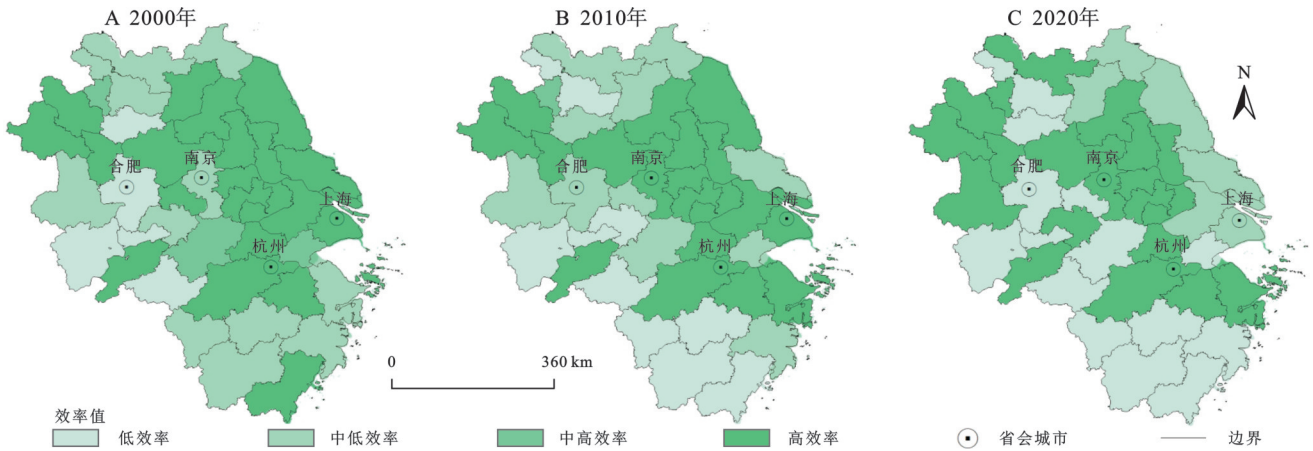


图3 耕地利用生态效率的空间演变特征

Fig. 3 Spatial evolution characteristics of eco-efficiency of cultivated land use

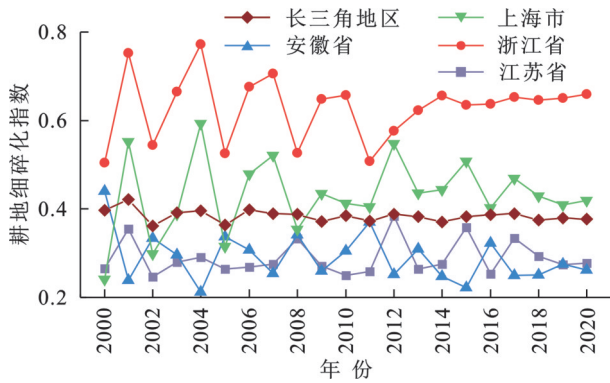


图4 耕地细碎化的时间演变特征

Fig. 4 Temporal evolution characteristics of cultivated land fragmentation

以2000年长三角地区耕地细碎化指数为基础,使用自然断点法将细碎化指数划分为4个等级(图5)。研究区耕地细碎化在空间分布上存在明显的差异性,整体呈现为“南高北低”的分布态势。2000—2010年浙江省中南部如杭州市、绍兴市、金华市等地境内耕地细碎程度愈加严重,后十年间金华市与衢州市有所改善,但仍显著高于安徽省和江苏省各市。安徽省与江苏省在研究期间细碎化程度逐渐好转,大面积低值区集中在两省境内,高值区主要分布在南部与浙江省邻接处;上海市2020年的耕地细碎化程度较2000年有所增加,但仍处于较低状态。

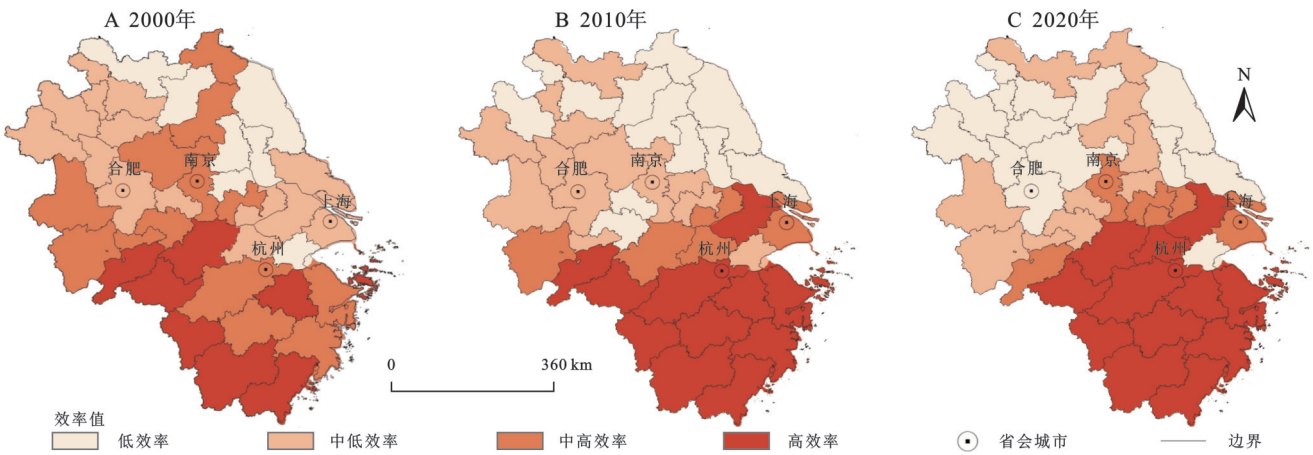


图5 耕地细碎化的空间演变特征

Fig. 5 Spatial evolution characteristics of cultivated land fragmentation

3.2 耕地细碎化对耕地利用生态效率的影响分析

3.2.1 空间自相关检验 表2为基于经济距离权重矩阵的空间自相关检验结果。研究期间,耕地细碎化与耕地利用生态效率的全局莫兰指数均显著为正,表明二者具有显著的空间正相关性,呈现出“高一

高、低—低”聚集的特征。且莫兰指数总体波动上升,在空间上的集聚效应呈现出波动强化的趋势。由此可见,空间计量模型适用于两者空间效应的研究。

3.2.2 动态空间杜宾模型结果与分析 在计量分析前,本研究通过LM检验、LR检验、Wald检验以及

Hausman 检验来选取探究耕地细碎化对耕地利用生态效率影响效应的最佳估计模型。LM-Lag 和 LM-Error 检验均在 1% 的水平下显著,表明杜宾模型具有一定适用性;其次,LR 检验和 Wald 检验也在 1% 的水平下拒绝原假设,说明空间杜宾模型不能简化为空间误差模型和空间滞后模型;最后,Hausman 检验表明时间固定效应为最佳选择。同时考虑到耕地细碎化对耕地利用生态效率的影响具有滞后性,因此本研究最终选择时间固定效应的动态空间杜宾模型。

表 2 全局莫兰指数的检验结果
Table 2 Test results of global Moran's I

年份	CLFI	ECLU	年份	CLFI	ECLU
2000	0.299***	0.142**	2011	0.232***	0.281***
2001	0.428***	0.139**	2012	0.467***	0.292***
2002	0.361***	0.143**	2013	0.377***	0.236***
2003	0.426***	0.134**	2014	0.444***	0.283***
2004	0.439***	0.204***	2015	0.468***	0.278***
2005	0.323***	0.180***	2016	0.404***	0.250***
2006	0.413***	0.200***	2017	0.450***	0.198***
2007	0.483***	0.194***	2018	0.442***	0.194***
2008	0.302***	-0.018	2019	0.429***	0.164***
2009	0.444***	0.250***	2020	0.448***	0.144***
2010	0.412***	0.280***			

注:*,**,***分别表示在 10%,5%,1% 水平下显著,下同。

回归结果如表 3 所示。模型 1 为固定效应的普通面板回归,模型 2 和模型 3 分别是在经济距离权重

矩阵下的静态 SDM 模型和动态 SDM 模型。由表中数据可得,模型 3 的 R^2 大于模型 2 的 R^2 ,拟合效果更佳,且回归系数小于模型 1 和模型 2,说明在分析影响效应过程中空间效应和时间效应均不可忽视,因此本文主要对动态杜宾模型结果进行分析。模型 3 中,耕地细碎化达到 5% 的显著性,系数为 0.064,说明其对耕地利用生态效率具有显著的促进作用,但程度较低,假说 H_{1a} 得到验证。可能的解释是该地区农业结构复杂,细碎并具有差异化的耕地斑块有利于促进农户对该地的多元化种植^[28],也促进对农业劳动力的需求,充分利用并合理分配劳动力使得耕地效率得到提升^[29]。细碎化空间滞后项在 10% 的水平下显著,系数为 -0.129,证明其对耕地利用生态效率的影响具有负向的空间溢出,假说 H_2 中的虹吸效应得到验证。可能的原因是,农户为提升小块土地产出而增大对农药化肥的投入,造成的农业面源污染在河网密布的条件下易通过水体扩散^[30],耕地的分散施肥可能加剧周围区域生态恶化,产生生态负外部性与连锁反应,抑制耕地高效利用。

长三角地区耕地利用生态效率的空间自回归系数显著为正,表明其在经济关联密切的城市群间表现出显著的空间集聚特征。同时耕地利用生态效率的一阶滞后项在 1% 的水平下显著为正,即生态效率存在时间维度上的依赖性,上一期的效率值会促进本期效率值提升,具有时间上的累计效应。

表 3 耕地细碎化对耕地利用生态效率的影响效应
Table 3 Effects of cultivated land fragmentation on eco-efficiency of cultivated land use

变量	模型 1:固定效应		模型 2:静态 SDM		模型 3:动态 SDM	
	系数	标准误	系数	标准误	系数	标准误
L. ECLU	—	—	—	—	0.924***	0.019
CLFI	0.093*	0.050	0.372***	0.053	0.064**	0.031
PCDIRR	-0.227***	0.044	-0.225***	0.048	-0.033	0.027
GDP	0.045***	0.004	0.021***	0.005	0.002	0.003
IRR	-0.069	0.064	-0.188***	0.058	-0.041	0.034
Labor	-0.675***	0.086	-0.463***	0.107	-0.036	0.062
Land	0.195***	0.043	0.091**	0.043	-0.001	0.025
lnTPAM	0.061***	0.015	0.049***	0.016	-0.007	0.009
$W \times CLFI$	—	—	-0.862***	0.114	-0.129*	0.069
$W \times PCDIRR$	—	—	-0.165*	0.085	0.030	0.049
$W \times GDP$	—	—	0.053***	0.011	-0.002	0.006
$W \times IRR$	—	—	0.069	0.132	-0.004	0.077
$W \times Labor$	—	—	-0.565***	0.193	-0.010	0.114
$W \times Land$	—	—	-0.021	0.096	0.022	0.059
$W \times \ln TPAM$	—	—	0.032	0.032	-0.007	0.019
ρ	—	—	0.131*	0.071	0.138***	0.047
R^2	0.257		0.234		0.788	
N	861		861		820	

通过偏微分方法将耕地细碎化对耕地利用生态效率的空间效应分解为直接效应和间接效应。由于动态SDM模型引入时间维度上的动态效应,因此又可以进一步分为短期效应和长期效应,具体成果见表4。直接效应层面上,短期内耕地细碎化对耕地利用生态效率具有显著的正向影响,而长期效应则未通过显著性检验。即细碎化的上升能短暂促进本区域耕地高效利用。从间接效应来看,短期效应的估计系数为-0.131并通过10%的显著性检验,表明本地细碎化程度的提升会在短时间内对邻近地区耕地利用生态效率产生负向效应,同样长期效应也不显著,因此本文侧重对短期效应的讨论。

表4 时间维度上影响效应分解结果

Table 4 Decomposition results of effect in temporal dimension

变量	直接效应		间接效应	
	短期效应	长期效应	短期效应	长期效应
CLFI	0.061** (0.030)	0.733 (1.081)	-0.131* (0.077)	-0.806 (19.010)
PCDIRR	-0.030 (0.026)	-0.359 (0.708)	0.028 (0.054)	1.316 (13.060)
GDP	0.002 (0.003)	0.030 (0.075)	-0.003 (0.007)	-0.142 (1.379)
IRR	-0.040 (0.033)	-0.512 (1.052)	-0.002 (0.092)	0.998 (14.750)
Labor	-0.032 (0.062)	-0.301 (1.806)	-0.023 (0.119)	2.356 (22.590)
Land	-0.001 (0.026)	-0.079 (0.939)	0.032 (0.066)	-0.525 (9.378)
lnTPAM	-0.00747 (0.009)	-0.0502 (0.448)	-0.0109 (0.021)	-0.100 (10.480)

注:括号内数据为系数标准误。

3.2.3 稳健性检验 为证明试验结果的可靠性,本研究进一步变换空间邻接矩阵进行稳健性检验,结果如表5所示。数据显示,将经济距离权重矩阵替换成空间邻接矩阵的动态SDM模型仍具有较强的解释力度,且核心解释变量耕地细碎化的回归系数均显著为正,空间上均表现为负向的溢出效应,说明本试验成果具有较好的稳健性。

3.2.4 门槛模型结果 以人均耕地面积为门槛变量,利用Stata17.0软件采用自举法(Bootstrap)反复抽样300次,逐步进行单门槛与双门槛检验,结果显示单门槛检验F值为43.21,且通过5%的显著性检验,门槛值为0.043,而双门槛检验F值为13.57,未通过显著性检验,说明耕地细碎化的影响存在单一门槛效应,假说H₃得到验证。

从门槛回归结果来看,当人均耕地面积小于或等

于0.043 hm²时,细碎化的系数为0.177且通过1%的显著性检验,表明耕地细碎化能够促进耕地利用生态效率的提升。当人均耕地面积超过0.043 hm²时,细碎化虽通过10%的显著性检验,但系数由正转负,此类情况下细碎化程度的加重会降低耕地的利用生态效率。可能的解释是当人均耕地面积处于较低水平时,小规模的经营与细碎的耕地格局较为契合,农户可以通过精细管理来提高单位面积的产出和生态效益。而当人均耕地规模扩大时,农户为减少耕作时间的同时保证粮食产量而增加农业机械和农药化肥的投入,导致碳排放量的增加,阻碍耕地的高效利用。

表5 稳健性检验

Table 5 Robustness test

变量	主效应		空间效应	
	系数	标准误	系数	标准误
L. ECLU	0.926***	0.020	—	—
CLFI	0.054*	0.033	-0.095*	(0.049)
ρ	0.069*	0.038	—	—
控制变量	控制		控制	
R ²			0.785	
N			820	

4 讨论与结论

4.1 讨论

该研究通过对长三角地区耕地利用生态效率与耕地细碎化时空特征及影响机制的分析,以揭示该区域耕地利用规律。由生态效率的演变特征可知,高值区不断向中部省界交界集聚,而上海等发达地区效率值有所下降,这表明高强度城市化对耕地生态功能具有挤压效应。耕地细碎化呈现出“南高北低”的空间格局,主要源于浙江南部多属于丘陵山地地区,受自然地形分割阻碍难以集中连片耕种,而苏北等北部地区以平原为主,地形平坦为土地规整与规模化经营创造有利条件,因此细碎化程度相对较低。计量模型结果进一步证实,耕地细碎化与耕地利用生态效率存在着复杂的非线性关系,前者对后者的影响效应并非绝对,而是与区域耕地资源禀赋密切相关,印证“细碎化治理需因地制宜”的治理理念。

此外,本研究还存在一些不足之处。第一,数据时效性有待提升。受限于农业统计数据的公开周期,本研究的耕地利用生态效率评估数据仅更新至2020年,未能纳入近三年(2021—2023年)的最新变化。未来研究可通过融合高频遥感数据与政府开放平台,实现耕地生态效率的实时监测。第二,受限于农业生产数据获取难度较大,构建耕地利用生态效率的指标体系与选取控制变量的过程中可能存在部

分遗漏变量,今后的研究可以通过大数据挖掘或实地调查等方式收集更加全面的数据。第三,本研究是基于市级尺度探索长三角地区耕地细碎化的影响效应,未来可重点聚焦于县域尺度,抑或是从农户微观视角讨论耕地细碎化、耕地利用规模与耕地利用生态效率三者的关系,为推进农业现代化研究和耕地高效利用提供参考依据。

4.2 结论

(1) 20年间长三角地区整体耕地利用效率值稳中有降,变化起伏较小;空间分布上高值区逐渐向各省交界处集中,低值区分布在安徽省与浙江省境内。

(2) 长三角地区耕地细碎化程度稳定处于较低水平,空间上表现出由南向北倾斜的状态。

(3) 耕地细碎化与耕地利用生态效率表现出正向空间自相关性。实证结果进一步表明,生态效率表现为显著的时间累积性,且短期内适当的细碎化有利于本地效率值的上升,但对周边地区生态效率具有抑制作用。由此可见,细碎化并非都阻碍农业生产的发展,其作用方向与强度具有显著的时空异质性与情境依赖性,深刻揭示其“双刃剑”效应。

(4) 耕地细碎化与耕地利用生态效率存在着以人均耕地面积为门槛的非线性关系。当人均耕地面积超过门槛值(0.043 hm^2)时,细碎化对耕地利用生态效率的影响由正向促进转变为负向抑制。非线性关系的揭示可为适当规模经营和因地制宜制定政策提供理论依据。

4.3 政策建议

(1) 理性看待细碎化,树立科学的治理理念,增强其对生态效率的正向促进作用。传统理念多忽略不同地区地理条件、社会经济、农业资源等背景的差异而单一聚焦于如何“去细碎化”,未真正理解细碎化治理的本质。耕地细碎化治理的核心在于强化其对农业生产的积极作用,消除其负面影响。因此,在决定是否“去除”或“保留”细碎化状态时需要综合考量多方面因素,探寻与当地自然环境、社会背景高度契合的科学治理路径,以实现生态保护与农业发展的协同共进。同时需要加强长三角地区各省市间的合作交流,搭建区域耕地利用效率提升的协作平台,共享耕地高效利用的成功经验与先进技术,促进区域资源互补与协同发展,以实现影响效应的积极外溢。

(2) 结合适当规模经营的理念,综合考虑耕地利用规模与耕地细碎化,制定差异化的种植策略。当耕地规模较大时,应降低耕地细碎程度,平整规则的地块和集中连片的格局更有利于高效率种植;而在小规模耕地条件下,过度追求连片,可能导致整治成

本过高,超出资源承载能力,反而不利于耕地的长期有效经营与发展。应根据实际情况灵活调整种植方式,以实现适度规模经营与可持续发展的平衡。

参考文献(References):

- [1] 刘晶,金晓斌,徐伟义,等.耕地细碎化对可持续集约利用的影响机理与治理框架[J].地理学报,2022,77(11):2703-2720.
Liu J, Jin X B, Xu W Y, et al. Influence mechanism of cultivated land fragmentation on sustainable intensification and its governance framework[J]. Acta Geographica Sinica, 2022,77(11):2703-2720.
- [2] 陈万旭,段斌俏,曾杰.1980—2020年中国耕地景观细碎化空间分异性与影响因素分析[J].农业工程学报,2024,40(21):221-231.
Chen W X, Duan B Q, Zeng J. Spatial differentiation and influencing factors of cultivated landscape fragmentation in China from 1980 to 2020[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(21):221-231.
- [3] 邹秀清,谢美辉,于少康,等.农村劳动力转移对耕地利用生态效率的空间溢出效应[J].中国土地科学,2023,37(1):59-69.
Zou X Q, Xie M H, Yu S K, et al. The spatial spillover effect of rural labor transfer on ecological efficiency of cultivated land use[J]. China Land Science, 2023,37(1):59-69.
- [4] 汪亚琴,姚顺波,侯孟阳,等.基于地理探测器的中国农业生态效率时空分异及其影响因素[J].应用生态学报,2021,32(11):4039-4049.
Wang Y Q, Yao S B, Hou M Y, et al. Spatial-temporal differentiation and its influencing factors of agricultural eco-efficiency in China based on geographic detector[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(11):4039-4049.
- [5] 刘蒙雯,张安录,文高辉.长江中下游粮食主产区耕地利用生态效率区域差异与空间收敛[J].自然资源学报,2022,37(2):477-493.
Liu M B, Zhang A L, Wen G H. Regional differences and spatial convergence in the ecological efficiency of cultivated land use in the main grain producing areas in the Yangtze Region[J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(2):477-493.
- [6] Yang B, Wang Z Q, Zou L, et al. Exploring the eco-efficiency of cultivated land utilization and its influencing factors in China's Yangtze River Economic Belt, 2001—2018[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 294:112939.
- [7] Cao W, Zhou W, Wu T, et al. Spatial-temporal characteristics of cultivated land use eco-efficiency under carbon constraints and its relationship with landscape pattern dynamics[J]. Ecological Indicators, 2022, 141:109140.
- [8] 李姣,周翠烟,张灿明,等.基于生态足迹的湖南省洞庭湖

- 生态经济区全要素生态效率研究[J]. 经济地理, 2019, 39(2):199-206.
- Li J, Zhou C Y, Zhang C M, et al. Total-factor ecological efficiency of Dongting Lake ecological and economic zone in Hunan Province on the basis of ecological footprint[J]. *Economic Geography*, 2019, 39(2):199-206.
- [9] 徐清华, 张广胜. 农村劳动力转移对县域农业生产效率的空间溢出效应: 基于1832个县的面板数据[J]. 农业现代化研究, 2020, 41(3):407-416.
- Xu Q H, Zhang G S. The spatial spillover effects of rural labor migration on the agricultural production efficiency of counties: an empirical analysis based on a panel data of 1832 counties [J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2020, 41(3):407-416.
- [10] Zhang C Z, Su Y Y, Yang G Q, et al. Spatial-temporal characteristics of cultivated land use efficiency in major function-oriented zones: a case study of Zhejiang Province, China[J]. *Land*, 2020, 9(4):114.
- [11] 杨欣, 杜梦晴, 肖豪立, 等. 湖北省县域新型城镇化与耕地利用生态效率时空耦合关系研究[J]. 长江流域资源与环境, 2024, 33(10):2180-2190.
- Yang X, Du M Q, Xiao H L, et al. Coupling relationship between new-type urbanization and farmland utilization eco-efficiency at county-level in Hubei Province [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2024, 33(10):2180-2190.
- [12] 胡贤辉, 蔺思琪, 何庆, 等. 耕地细碎化、耕地经营规模对农户耕地利用生态效率的影响: 以常德市为例[J]. 中国土地科学, 2023, 37(4):95-106.
- Hu X H, Lin S Q, He Q, et al. Effects of cultivated land fragmentation and cultivated land operation scale on ecological efficiency of famers' cultivated land use: a case study of Changde City [J]. *China Land Science*, 2023, 37(4):95-106.
- [13] 吴冬林, 何伟, 李政, 等. 基于DEA-ESDA的四川省耕地利用效率时空分异及影响因素研究[J]. 四川师范大学学报: 自然科学版, 2020, 43(2):270-276.
- Wu D L, He W, Li Z, et al. Spatial-temporal difference and influencing factors of cultivated land use efficiency of Sichuan Province based on DEA-ESDA [J]. *Journal of Sichuan Normal University: Natural Science*, 2020, 43(2):270-276.
- [14] 姜晗, 杨皓然, 吴群. 东部沿海经济区耕地利用效率的时空格局分异及影响因素研究[J]. 农业现代化研究, 2020, 41(2):321-330.
- Jiang H, Yang H R, Wu Q. The spatial and temporal differentiation of the farmland utilization efficiency in the Eastern Coastal Economic Zone [J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2020, 41(2):321-330.
- [15] Yu Y H, Lin J K, Zhou P X, et al. Cultivated land input behavior of different types of rural households and its impact on cultivated land-use efficiency: a case study of the Yimeng Mountain area, China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(22):14870.
- [16] Wang Y H, Zang L Z, Araral E. The impacts of land fragmentation on irrigation collective action: empirical test of the social-ecological system framework in China [J]. *Journal of Rural Studies*, 2020, 78:234-244.
- [17] 李赛博, 徐丽萍, 方曼曼, 等. 玛河流域耕地景观细碎化与利用效率的关联性探析[J]. 水土保持研究, 2017, 24(1):311-316.
- Li S B, Xu L P, Fang M M, et al. Analysis of correlation between farmland landscape fragmentation and utilization efficiency in manas river basin, Xinjiang uygur autonomous region [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2017, 24(1):311-316.
- [18] Lu H, Xie H L, He Y F, et al. Assessing the impacts of land fragmentation and plot size on yields and costs: a translog production model and cost function approach [J]. *Agricultural Systems*, 2018, 161:81-88.
- [19] Qiu L F, Zhu J X, Pan Y, et al. The positive impacts of landscape fragmentation on the diversification of agricultural production in Zhejiang Province, China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 251:119722.
- [20] Yu P H, Fennell S, Chen Y Y, et al. Positive impacts of farmland fragmentation on agricultural production efficiency in Qilu Lake watershed: implications for appropriate scale management [J]. *Land Use Policy*, 2022, 117:106108.
- [21] 卢华, 胡浩. 土地细碎化、种植多样化对农业生产利润和效率的影响分析: 基于江苏农户的微观调查[J]. 农业技术经济, 2015(7):4-15.
- Lu H, Hu H. Analysis of the impact of land fragmentation and planting diversification on agricultural production profits and efficiency: based on a micro-survey of farmers in Jiangsu Province [J]. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2015(7):4-15.
- [22] 蔡啸宇, 张俊飏, 王璇. 耕地细碎化、耕地质量认知与化肥施用效率: 基于湖北省水稻种植户的调查数据[J]. 农业现代化研究, 2021, 42(5):869-879.
- Cai X Y, Zhang J B, Wang X. Land fragmentation, cognition of land quality, and efficiency of fertilizer application: based on a survey data of rice growers in Hubei Province [J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2021, 42(5):869-879.
- [23] 张超正, 陈丹玲, 张旭鹏. 耕地细碎化和劳动力老龄化对水稻化肥施用强度的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2023, 39(3):344-352.
- Zhang C Z, Chen D L, Zhang X P. Impact of cultivated land fragmentation and labor force aging on rice fertilizers application intensity [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2023, 39(3):344-352.
- [24] Tone K. A slacks-based measure of efficiency in data

- envelopment analysis [J]. *European Journal of Operational Research*, 2001, 130(3):498-509.
- [25] 奥勇,张亦恒,王晓峰,等.基于景观指数的关中地区耕地细碎化程度的时空变迁及其驱动因素[J].*水土保持研究*,2024,31(3):401-411.
Ao Y, Zhang Y H, Wang X F, et al. Spatiotemporal changes and driving factors of cultivated land fragmentation in Guanzhong Region based on landscape index[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024, 31(3): 401-411.
- [26] 文博,徐聪,孟霖,等.苏南地区生态用地破碎度时空演变及其对建设用地扩张的响应:基于环境库兹涅茨曲线视角[J].*资源科学*,2023,45(8):1676-1691.
Wen B, Xu C, Meng L, et al. Spatiotemporal evolution of ecological land fragmentation and its response to construction land expansion in southern Jiangsu Province: an environmental Kuznets curve perspective [J]. *Resources Science*, 2023, 45(8):1676-1691.
- [27] 黄佟,曲艺,舒帮荣,等.耕地利用规模对耕地生态效率的影响研究:以黄淮海地区为例[J].*农业现代化研究*, 2023,44(6):1070-1081.
Huang T, Qu Y, Shu B R, et al. The impacts of farm-land operational scale on farmland ecological efficiency: a case study of the Huang-Huai-Hai plain [J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2023, 44(6):1070-1081.
- [28] 张睿思,叶思菁,任书义.基于MGWR模型的江苏省耕地细碎度空间格局与驱动因素分析[J].*农业工程学报*,2024,40(16):229-239.
Zhang R S, Ye S J, Ren S Y. Spatial pattern and driving factors of cultivated land fragmentation in Jiangsu Province using MGWR model [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2024, 40(16):229-239.
- [29] Ntihinyurwa D P, Vries D T W, Chigbu E U, et al. The positive impacts of farm land fragmentation in Rwanda [J]. *Land Use Policy*, 2019, 81:565-581.
- [30] 周敏,吕宏宇,柯楠.农业生产要素配置与耕地绿色利用效率的空间相关与溢出效应[J].*农林经济管理学报*,2024,23(1):41-50.
Zhou M, Lyu H Y, Ke N. Spatial correlation and spill-over effects of allocation of agricultural production factors and green use efficiency of cultivated land [J]. *Journal of Agro-Forestry Economics and Management*, 2024, 23(01): 41-50.
-
- (上接第343页)
- [21] 张博文,唐相龙,崔婕心.西安市生态韧性与土地利用强度时空关系[J].*环境科学*,2025,46(4):2463-2474.
Zhang B W, Tang X L, Cui J X. Temporal and spatial relationship between ecological resilience and land use intensity in the Xi'an City [J]. *Environmental Science*, 2025, 46(4):2463-2474.
- [22] Peng Y L, Cheng W Y, Xu X X, et al. Analysis and prediction of the spatiotemporal characteristics of land-use ecological risk and carbon storage in Wuhan metropolitan area [J]. *Ecological Indicators*, 2024, 158:111432.
- [23] 黄智洵,王飞飞,曹文志.耦合生态系统服务供求关系的生态安全格局动态分析:以闽三角城市群为例[J].*生态学报*,2018,38(12):4327-4340.
Huang Z X, Wang F F, Cao W Z. Dynamic analysis of an ecological security pattern relying on the relationship between ecosystem service supply and demand: a case study on the Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou city cluster [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(12):4327-4340.
- [24] 谢高地,张彩霞,张雷明,等.基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J].*自然资源学报*,2015,30(8):1243-1254.
Xie G D, Zhang C X, Zhang L M, et al. Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on per unit area [J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(8):1243-1254.
- [25] 李志英,汪琳,薛梦柯,等.滇中城市群景观格局及生态环境效应研究[J].*科学技术与工程*,2023,23(14):6176-6189.
Li Z Y, Wang L, Xue M K, et al. The landscape pattern and ecological environment effects in central Yunnan urban agglomeration [J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(14):6176-6189.
- [26] Peng J, Liu Y X, Wu J S, et al. Linking ecosystem services and landscape patterns to assess urban ecosystem health: a case study in Shenzhen City, China [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2015, 143:56-68.
- [27] 徐勇,孙晓一,汤青.陆地表层人类活动强度:概念、方法及应用[J].*地理学报*,2015,70(7):1068-1079.
Xu Y, Sun X Y, Tang Q. Human activity intensity of land surface: concept, method and application in China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(7):1068-1079.
- [28] 赵璐,赵作权.基于特征椭圆的中国经济空间分异研究[J].*地理科学*,2014,34(8):979-986.
Zhao L, Zhao Z Q. Projecting the spatial variation of economic based on the specific ellipses in China [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2014, 34(8):979-986.
- [29] 王硕,盛艳,范淑花,等.基于InVEST模型的窟野河流域碳储量变化对土地利用格局的响应[J].*水土保持研究*,2025,32(3):149-158.
Wang S, Sheng Y, Fan S H, et al. Response of carbon storage changes to land use pattern in Kuye River Basin based on InVEST model [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2025, 32(3):149-158.