戴燕燕,姚航宇,刘庚,等.汾河流域农业生态效率时空分异及影响因素[J].山西农业大学学报(自然科学版),2025,45(5):148-160.
Dai Y Y, Yao H Y, Liu G, et al.Spatiotemporal differentiation and influencing factors of agricultural eco-efficiency in the Fenhe River Basin[J].Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition), 2025,45(5):148-160.
doi: 10.13842/j.cnki.issn1671-8151.202506032

汾河流域农业生态效率时空分异及影响因素

戴燕燕[1,2],姚航宇[1],刘庚[1,2],钞锦龙[1,2],张蕾[2,3],张鹏飞[1,2*]

(1.太原师范学院 地理科学学院,山西 太原 030619;2.汾河流域地表过程与资源生态安全山西省重点实验室,山西 太原 030619;3.太原师范学院 经济与管理学院,山西 太原 030619)

摘　要:[目的]现有农业生态效率研究多聚焦全国或省域尺度,缺乏流域视角。本研究以黄河流域重要粮食产区汾河流域为对象,揭示其农业生态效率时空分异规律及驱动机制,为破解"效率提升与区域失衡并存"困境提供科学依据。[方法]本研究基于非期望非径向SE-SBM模型测度2011-2022年汾河流域县域尺度农业生态效率,同时应用差异系数、Dagum基尼系数、全局趋势分析和全局莫兰指数等方法探讨汾河流域农业生态效率时空分异特征及影响因素。[结果](1)汾河流域农业生态效率显著提升,但存在区域失衡现象。全流域效率均值增幅达110.9%,但基尼系数从0.299升至0.332,区域差距持续扩大。农业生态效率空间上呈现"中游>下游>上游",太原盆地形成高效极核,西部山区持续低效,"核心—边缘"分化加剧;(2)汾河流域农业生态效率驱动机制完成从"投入强度单核"(2011-2019年)向"经济—资源协同"(2019-2022年)的范式转型;(3)汾河流域农业生态效率存在空间关联性弱化现象,莫兰指数从2015年高集聚期降低至2022年的不显著水平。[结论]针对汾河流域农业生态效率区域失衡现象,未来需实施系统性干预,西部山区需建立"梯田改造—微型机械"适配体系破解地形锁困;构建"规模经营—增收反哺"闭环机制激活传统农区;通过数字流域平台监控生态要素流动,并设立区域互助基金增强系统韧性,为流域农业可持续发展提供实践范式。

关键词:农业生态效率; SE-SBM模型; 时空分异特征; 汾河流域
中图分类号:S17　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1671-8151(2025)05-0148-13

Spatiotemporal differentiation and influencing factors of agricultural eco-efficiency in the Fenhe River Basin

Dai Yanyan[1,2], Yao Hangyu[1], Liu Geng[1,2], Chao Jinlong[1,2], Zhang Lei[2,3], Zhang Pengfei[1,2*]

(*1.School of Geographical Sciences, Taiyuan Normal University, Taiyuan 030619, China; 2.Key Laboratory of Surface Processes and Resource Ecology in the Fenhe River Basin, Taiyuan 030619, China; 3.School of Economics and Management, Taiyuan Normal University, Taiyuan 030619, China*)

Abstract:[Objective]In response to the current focus of agricultural eco-efficiency studies mostly on national or provincial scales and the lack of a watershed perspective, this study took the Fenhe River Basin, an important grain-producing region within the Yellow River Basin, as its object. It aimed to reveal the spatiotemporal differentiation patterns and driving mechanisms of agricultural eco-efficiency there, providing a scientific basis for addressing the dilemma of concurrent efficiency enhancement and regional imbalances. [Methods]Agricultural eco-efficiency at the county scale in the Fenhe River Basin from 2011 to 2022 was measured using the undesirable non-radial SE-SBM model. The spatiotemporal differentiation characteristics and influencing

收稿日期:2025-06-22　　**修回日期**:2025-09-02
基金项目:山西省自然科学研究面上项目(202303021211186);山西省科技战略研究专项(202404030401145);山西省哲学社会科学规划课题(2023YY224);山西省留学人员科研资助项目(2023-159);山西省社科联2024年度重点项目(SSKLZDKT2024111)
作者简介:戴燕燕(ORCID:0000-0002-4337-1667),副教授,博士,研究方向:自然资源管理
*通信作者:张鹏飞,教授,硕士生导师,E-mail:zhangpf66@163.com

factors were analyzed using the coefficient of variation, Dagum Gini coefficient, global trend analysis, and Global Moran's *I*. [Results] (1) Agricultural eco-efficiency in the Fenhe River Basin improved significantly but exhibited regional disparities. While the basin-wide mean efficiency surged by 110.9%, the Gini coefficient increased from 0.299 to 0.332, indicating widening regional gaps. Spatially, agricultural eco-efficiency followed a "midstream>downstream>upstream" distribution pattern. The Taiyuan Basin formed a high-efficiency core, whereas the western mountainous areas remained persistently inefficient, intensifying the core-periphery divergence. (2) The driving mechanism of agricultural eco-efficiency in the Fenhe River Basin shifted from an 'input-intensive monocentric model' (2011-2019) to 'economic-resource coordinated optimization' (2019-2022). (3) The spatial correlation of agricultural eco-efficiency weakened substantially, declining from a highly clustered pattern (Moran's I=0.3226 in 2015, P<0.001) to statistical insignificance (Moran's I = 0.046 1 in 2022, P=0.503 4). [Conclusion] To address regional imbalances in agricultural eco-efficiency across the Fenhe River Basin, systematic interventions were imperative. These included implementing a 'terrace renovation-micro-machinery' adaptive system in western mountainous areas to mitigate terrain constraints, establishing a closed-loop 'scale operation-income feedback' mechanism to revitalize traditional agricultural regions, and leveraging a digital watershed platform to monitor ecological element flows while creating a regional mutual-aid fund to enhance systemic resilience. This framework provided theoretical insights and practical pathways for sustainable agricultural development in river basins.

Keywords: Agricultural eco-efficiency, SE-SBM model, Spatiotemporal differentiation characteristics, Fenhe River Basin

农业是人类生存和发展的基础产业,不仅为人类提供最基本的生产生活资料,还在维护生态平衡、保障国家粮食安全、促进农村经济发展等方面发挥着重要作用。中国是世界农业大国,农业在国民经济中地位非常重要。数据表明,2022年中国农业总产值突破10万亿元,占GDP的7%以上[1]。农业的稳健发展既维系国家粮食安全,又承载亿万农民生计与农村社会稳定。故此,推进农业可持续转型是达成乡村振兴和共同富裕的关键路径。然而,在农业快速发展中,化肥农药的大量施用引发严重面源污染和碳排放增加。数据显示,我国化肥用量占全球35%,单位面积用量达318 kg/hm^2(世界均值约120 kg/hm^2),但利用率仅35%左右;农药利用率不足40%,显著低于发达国家水平。此外,农业用水效率低下、农业废弃物资源化利用率低等问题也制约着农业的可持续发展[1]。在国家大力提倡农业生态绿色低碳发展的背景下,如何实现农业经济和生态协调的高质量发展,已成为当前农业发展面临的重要问题。

农业生态效率综合反映了农业生产过程中资源利用效率、环境影响和经济产出的协调程度[2],近年来逐渐成为学术界关注的热点领域。现有研究主要集中在农业生态效率的测度方法[3-4]、时空演变特征[5-6]、影响因素及提升路径[7-9]4个方面。在测度方法层面,学界发展出比值分析、生命周期评价、生态足迹分析、能值分析、随机前沿分析及数据包络分析(DEA)等多种方法。DEA凭借处理多输入多输出复杂系统的优势,成为主流方法之一[10]。在此基础上,学者们进一步提出了SBM模型和超效率DEA-SBM模型,显著提升了效率测算的准确性。例如朱瑗媛等[11]利用SE-SBM模型测算了我国西北地区农业生态效率,发现2010-2020年整体呈波动上升趋势。周玲芳等[12]使用投入导向型的超效率DEA-SBM模型测算南北过渡带农业生态效率,发现农业生态呈"倒N"型趋势,南部和中部农业生态效率高于北部。在时空演变特征方面,学者们主要基于国家、区域、省份及县域层面进行研究。李昊坤[13]测算了2007-2020年中国30个省级行政区的农业生态效率,发现各地区的农业生态效率呈西北、中部、东南区域递增的空间格局。刘婷婷等[14]从三大流域视角出发,分析了2012-2021年中国13个粮食主产区的农业生态效率空间分异特征,发现农业生态效率总体波动上升,三大流域呈现不均衡格局,农业生态效率为:松花江流域>长江流域>黄河流域。农业生态效率的影响因素及提升路径研究,主要聚焦农业资源禀赋、经济发展水平、技术条件、政策支持、产业结构与污染治理等维度。张艺等[15]研究发现,内蒙古地区农业生态效率与劳均耕地水平、化肥使用强度、农业产值比例、农村居民可支配收入关联性较高。魏建飞等[16]对2010-2020年河南省县域农业生态效率的影响因素进行研究,发现城镇化水平、产业结构和种植结构对农业生态效率具有正向效应,而灌溉指数和人口老龄化具有负

向效应。然而,现有研究多集中于全国或省域尺度,对流域尺度的农业生态效率研究相对不足,特别是对汾河流域的研究较少。

汾河流域系黄河流域关键区域,兼具重要粮食生产基地与生态屏障功能。然而该区面临水资源短缺、水土流失及农业面源污染三重挑战,其低效农业生态已成为可持续发展瓶颈。鉴于此,本研究整合2011-2022年流域数据,以农业生产总值为期望产出,农业碳排放为非期望产出,运用超效率模型测度生态效率,结合Tobit回归解析影响因素,系统分析汾河流域县域农业生态效率时空分异特征及影响因素,为山西省乃至黄河流域生态保护和高质量发展提供科学依据。

1 研究区概况

汾河流域地处山西中部,位于北纬35°20′~39°00′,东经110°30′~113°32′,发源于宁武县管涔山,自北向南流经忻州、太原、晋中、吕梁、临汾、运城6市,最终在万荣县汇入黄河(图1)。流域内地形复杂多样,上游为山区,中游为盆地,下游为平原,形成了独特的"山区-盆地-平原"地貌格局。汾河流域作为山西农业核心区,贡献全省45%的粮食产量与64%的农业总产值。2011-2022年汾河流域农业碳排放量均值为62.94万吨,其中绝大部分为种植业碳排放。

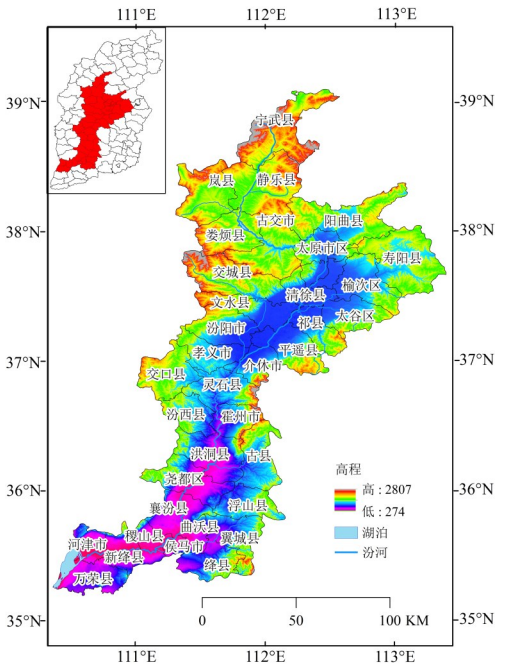


图1 研究区概况

Fig.1 Overview of study area

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

以汾河流域40个县(市、区)为研究对象,选取2011-2022年汾河流域农业生态效率相关数据,数据均来源于2012-2023年山西省及各市(忻州、吕梁、太原、晋中、临汾、运城)统计年鉴和水资源公报。缺失数据使用上级行政单元数据替代或用均值法补齐。

2.2 研究方法

2.2.1 指标体系构建

本文参考前人研究并结合汾河流域实际情况,同时根据数据的可获得性和统计口径的一致性[17]确定汾河流域农业投入产出指标体系,农业投入涵盖土地、劳动力、机械、化肥、农药及用水6个要素;期望产出设定为农业总产值,非期望产出则为农业碳排放,通过农药、化肥、农膜、灌溉、机械化与翻耕6类碳源测算。具体公式及碳源排放系数参考独孤昌慧[18]研究设定。

2.2.2 SE-SBM模型

SE-SBM模型是数据包络分析(DEA)框架中的高阶效率模型[19]。该模型核心作用在于识别和排序真正的"超效率"单元,为管理者提供更精细、更具操作性的效率信息,特别适用于需要对高效表现者进行比较和优选的场景。该模型广泛应用于经济、环境及组织效能等领域的效率比较[20]。本研究以汾河流域40个县在2011-2022年农业生态投入与产出为决策单元,运用全局超效率SE-SBM模型测算农业生态效率,具体计算公式为[11]:

$$\mathrm{Min}\rho=\frac{\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}\bar{x}/x_{ik}}{\frac{1}{s_1+s_2}\left(\sum_{r=1}^{s_1}\frac{\bar{y}}{y_{rk}}+\sum_{l=1}^{s_2}\frac{\bar{z}}{z_{lk}}\right)} \tag{1}$$

$$\text{s.y.}\begin{Bmatrix}\bar{x}\geqslant\sum_{j=1,j\neq k}^{n}\lambda_j x_{ij},\quad i=1,2,\cdots,m\\ \bar{y}\leqslant\sum_{j=1,j\neq k}^{n}\lambda_j y_{rj},\quad r=1,2,\cdots,s_1\\ \bar{z}\geqslant\sum_{j=1,j\neq k}^{n}\lambda_j z_{lj},\quad l=1,2,\cdots,s_2\\ \bar{x}\geqslant x_k,\bar{y}\leqslant y_k,\bar{z}\geqslant z_k,\lambda_j\geqslant 0,j=1,2,\cdots,n\end{Bmatrix} \tag{2}$$

表1　农业生态效率评价指标体系

Table 1　Agricultural eco-efficiency evaluation indicator system

指标类型 Indicator type	指标投入 Indicator input	指标说明 Indicator description
投入 Input	土地投入 Land input	农作物总播种面积/(10^4hm^2) Total sown area of crops
	劳动力投入 Labor input	农业从业人员/(10^4人) Agricultural labor input
	农业机械投入 Agricultural machinery input	农业机械总动力/(10^4kW) Total agricultural machinery power
	化肥投入 Fertilizer input	化肥使用量/(10^4t) Fertilizer usage
	农药投入 Pesticide input	农药使用量/(10^4t) Pesticide usage(10^4t)
	农业用水投入 Agricultural water input	农业用水量/(10^4m^3) Agricultural water consumption
期望产出 Desired output	农业总产值 Agricultural gross output	农业生产总值/(10^8元) Gross agricultural production value
非期望产出 Undesired output	农业碳排放 Agricultural carbon emissions	农药、化肥、农膜、农业机械、农业灌溉、农业翻耕的碳排放总和/(10^4t) Total carbon emissions from pesticides, fertilizers, agricultural film, agricultural machinery, irrigation, and tillage

式中:ρ为效率值;n为参与评价的决策单元总数;m、s_1、s_2分别为投入指标、期望产出指标和非期望产出指标的数量;x_{ik}、y_{rk}、z_{lk}和x_{ij}、y_{rj}、z_{lj}分别为第k个和j个决策单元的第i项投入、第r项期望产出和第l项非期望产出;x_k、y_k、z_k分别为第k个决策单元的投入、期望产出、非期望产出;$\bar{x}$、$\bar{y}$、$\bar{z}$分别为投入、期望产出、非期望产出的松弛变量;λ_j为第j个决策单元的权重系数。根据效率值ρ的区间划分:当$\rho\geqslant1.0$时,表示效率完全有效;$0.6\leqslant\rho<1.0$表示效率较高,接近最优水平;$0.4\leqslant\rho<0.6$属于中等效率;$0.2\leqslant\rho<0.4$表示效率较低;$\rho<0.2$则说明效率明显不足,存在较大改进空间[11]。

2.2.3　Dagum基尼系数

Dagum基尼系数及其分解方法是一种衡量区域差异程度的分析工具[21],它将差异划分为3个部分:区域内差异、区域间差异及超变密度[22]。本研究利用该分析工具测算汾河流域农业生态效率发展水平的基尼系数及其分解。计算公式为:

$$G=\frac{1}{2n^2\bar{D}}\sum_{j=1}^{k}\sum_{h=1}^{k}\sum_{i=1}^{n_j}\sum_{r=1}^{n_h}\left|D_{ji}-D_{hr}\right| \tag{3}$$

式中:G为整体基尼系数;$\bar{D}$为全样本农业生态效率均值;n为总样本量;k为区域分组数;n_j,n_h分别为第j组和第h组的样本量;D_{ji},D_{hr}分别为第j组第i个单元和第h组第r个单元的农业生态效率值[22]。

2.2.4　探索性空间数据分析

探索性空间数据分析(ESDA)是解译区域社会经济空间分异的核心工具,借助指标空间可视化揭示分布格局,进而量化辨识空间集聚或离散强度。在空间自相关分析中,莫兰指数(Moran's I)是常用的测度工具。其中,全局莫兰指数(Global Moran's I)用于判断属性值在整体空间上是否存在显著的集聚现象;而局部莫兰指数(Local Moran's I)则能进一步识别出属性值高值或低值的具体空间聚类区域[23]。通过计算汾河流域县级尺度农业生态效率的Global Moran's I和Local Moran's I,可探讨各区域农业生态效率的空间依赖性和差异性。计算公式为:

$$\text{Global Moran's } I=\frac{n\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}w_{ij}\left(x_i-\bar{x}\right)\left(x_j-\bar{x}\right)}{S_0\sum_{i=1}^{n}\left(x_i-\bar{x}\right)^2} \tag{4}$$

$$S_0=\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}w_{ij} \tag{5}$$

$$\text{Local Moran's } I=\frac{\left(x_i-\bar{x}\right)\sum_{j=1}^{n}w_{ij}\left(x_j-\bar{x}\right)}{S^2} \tag{6}$$

$$S^2=\frac{\sum_{j\neq i}\left(x_j-\bar{x}\right)^2}{n-1} \tag{7}$$

式中:n为研究区域内空间单元的总数量;x_i和x_j分别为第i个和第j个空间单元的农业生态效率值;$\bar{x}$为所有空间单元农业生态效率的平均值;w_{ij}为空间权重系数矩阵,表示区域i与j的邻近关系;S_0为

空间权重矩阵的总和；S^2为农业生态效率的样本方差。Global Moran's I的取值范围是[-1,1]，当I值大于0时，表示农业生态效率在空间上呈现显著的正相关，且I值越大，空间集聚特征越明显；当I值小于0时，说明存在空间负相关关系，I值越小表示空间差异性越大；当I值趋近于0时，则表明农业生态效率在空间上呈随机分布格局，不存在显著的空间依赖关系[23]。

2.2.5 地理探测器

本研究运用地理探测器方法体系内的分异及因子探测、交互作用探测模块，解析农业生态效率空间分异的影响因素与交互机制。其中分异及因子探测器用于探究农业生态效率的空间分异性，并量化各影响因素对空间分异的解释程度(以q值度量)，交互作用探测器用于揭示不同影响因素之间是否存在交互作用及其作用机制[24]。计算公式为：

$$q=1-\frac{\sum_{i=1}^{L}N_i\sigma_i^2}{N\sigma^2} \tag{8}$$

式中：L表示影响因素的分层类别；N_i表示第i层内的格点数量，N为研究区域内格点总数；σ_i^2和σ^2分别为第i层内和整体区域的因子方差水平[25]。q统计量的取值范围为[0,1]，当q值接近1时，说明自变量能够很好地解释因变量的空间分异特征；当q值趋近于0时，则表明自变量对因变量的解释作用较弱。

3 结果与分析

3.1 农业生态效率时序特征分析

2011-2022年汾河流域全流域、上游、中游及下游农业生态效率时空演变规律如表2所示，由表可见，研究期内全流域农业生态效率呈明显上升趋势，均值从2011年的0.274提升至2022年的0.578，增幅达110.9%。分时间段来看，2011-2016年增长平缓，2017年后增速明显加快，2020-2022年呈现跳跃式提升。分区域来看，总体上研究期内各区域农业生态效率均呈现明显上升趋势，其中上游由2011年的0.153升至2022年的0.575，增幅达275.8%，中游由2011年的0.309升至2022年的0.601，增幅达94.5%，下游由2011年的0.247升至2022年的0.517，增幅达109.3%，中游始终为上升效率最高区域(年均0.478)，显著高于下游(0.371)和上游(0.249)。

表2 2011—2022年汾河流域农业生态效率

Table 2 Agricultural eco-efficiency in the Fenhe River Basin from 2011 to 2022

年份 Year	上游 Upstream	中游 Midstream	下游 Downstream	全流域 Entire basin
2011	0.153±0.074b	0.309±0.189c	0.247±0.086d	0.274±0.156e
2012	0.180±0.070b	0.355±0.265bc	0.273±0.097cd	0.312±0.212de
2013	0.209±0.059b	0.398±0.290abc	0.292±0.105bcd	0.346±0.232cde
2014	0.195±0.063b	0.467±0.340abc	0.312±0.130bcd	0.389±0.280bcde
2015	0.173±0.052b	0.448±0.327abc	0.287±0.107bcd	0.368±0.269bcde
2016	0.175±0.077b	0.424±0.282abc	0.309±0.108bcd	0.361±0.234bcde
2017	0.214±0.053b	0.563±0.369ab	0.392±0.222abcd	0.471±0.323abc
2018	0.231±0.071b	0.532±0.342ab	0.450±0.277ab	0.475±0.311abc
2019	0.244±0.104b	0.481±0.332abc	0.426±0.235abc	0.441±0.289abcd
2020	0.296±0.115b	0.549±0.328ab	0.443±0.194ab	0.491±0.279ab
2021	0.341±0.137ab	0.609±0.343a	0.503±0.233a	0.548±0.301a
2022	0.575±0.611a	0.601±0.370a	0.517±0.254a	0.578±0.366a
均值 Average	0.249±0.208C	0.478±0.325A	0.371±0.199B	—

注：小写字母(列)表示区域内时序差异显著性，大写字母(行)表示区域间差异显著性(Duncan检验，$P<0.05$)。

Note: Lowercase letters within the same column indicated statistically significant temporal variations, while uppercase letters within the same raw represented significant differences between different regions (Duncan's test, $P<0.05$).

汾河流域2011-2022年农业生态效率的空间差异分析显示(表3)，基尼系数从0.299波动上升至0.332，整体呈扩大趋势，年均增长率为0.9%，表明区域不均衡性持续加剧。其中，2014-2015年

基尼系数显著攀升,可能与极端气候或政策调整引发的资源分配失衡有关,而2020年短暂回落(0.312)后于2022年反弹至0.332,提示近年区域协同机制仍存在结构性矛盾。从空间分异特征看,组内差异方面,中游地区表现尤为突出,其年均基尼系数达0.343,显著高于上游(0.193)和下游(0.224);而上游地区在2017年基尼系数骤降至0.118后,2022年激增至0.410,异常波动较为明显。组间差异方面,上游-中游差异长期居于高位(2017年达0.481),凸显流域梯度效应,而2022年上游-下游差异跃升至0.393,表明流域头尾两极分化加剧。贡献率结构演变揭示深层次机制:区域内差异始终为主要贡献源(40.57%～45.57%),反映县域资源禀赋与管理水平的内生作用;区域间差异贡献率从32.09%降至10.10%,体现跨区协同的初步成效;超变密度贡献率从24.23%跃升至49.34%,2022年成为主导因素,表明区域交互作用(如污染转移、生态要素流动)对差异的驱动显著增强。

表3　2011－2022年汾河流域农业生态效率的基尼系数及贡献率

Table 3　Dagum Gini coefficient and contribution rates of agricultural eco－efficiency in the Fenhe River Basin from 2011 to 2022

年份 Year	基尼系数 Gini coefficient							贡献率/% Contribution rate		
	总体	组内 Intra－group			组间 Inter－group			区域内	区域间	超变密度
		上游	中游	下游	上－中	上－下	中－下			
2011	0.299	0.235	0.317	0.191	0.395	0.292	0.282	43.68	32.09	24.23
2012	0.321	0.195	0.358	0.196	0.382	0.265	0.311	45.31	30.85	23.84
2013	0.323	0.139	0.361	0.197	0.367	0.234	0.321	45.57	32.24	22.18
2014	0.358	0.156	0.376	0.223	0.445	0.278	0.359	44.46	37.33	18.20
2015	0.363	0.152	0.379	0.204	0.468	0.286	0.365	44.22	39.94	15.84
2016	0.330	0.219	0.347	0.191	0.452	0.319	0.314	43.75	36.79	19.46
2017	0.362	0.118	0.354	0.267	0.481	0.337	0.364	42.72	36.78	20.50
2018	0.350	0.148	0.346	0.303	0.436	0.368	0.342	43.15	27.10	29.75
2019	0.343	0.205	0.358	0.275	0.401	0.333	0.335	43.91	22.50	33.59
2020	0.312	0.192	0.326	0.236	0.374	0.276	0.309	43.81	28.12	28.07
2021	0.304	0.185	0.305	0.245	0.369	0.278	0.307	42.57	26.63	30.80
2022	0.332	0.410	0.325	0.257	0.407	0.393	0.311	40.57	10.10	49.34
均值 Average	—	0.193 b	0.343 a	0.224 b	0.415 A	0.305 B	0.327 B	—	—	—

注:小写字母表示基尼系数组内差异显著性,大写字母表示基尼系数组间差异显著性(Duncan检验,$P<0.05$)。

Note: Lowercase letters indicated significant differences within intra-group of Gini coefficient groups, and uppercase letters indicated significant differences between inter-group of Gini coefficient groups (Duncan's test, $P<0.05$).

3.2　农业生态效率空间变化分析

基于汾河流域2011-2022年间典型年份县域农业生态效率数据分析,其空间格局呈现鲜明的梯度分异与动态演变特征(图2)。总体而言,全流域效率值呈上升趋势,农业生态效率处于完全有效状态的县域数量由2011年的0个逐步增加到2022年的9个,而效率较低和效率低2种类型的县域数量分别下降了650%和27%。但区域差异明显,可划分为3类梯度:上游整体效率最低且增长平缓,除岚县在2022年出现异常跃升(1.66)外,宁武、静乐、娄烦、古交等县效率值长期低于0.42,资源利用相对粗放;中游呈现剧烈极化现象,高效区与低效"洼地"并存,阳曲、尖草坪、迎泽、交口、太谷及后期跃升的万柏林、寿阳形成环绕太原盆地的外围高效带(如北部、西部吕梁山麓及东南部),而盆地核心区的小店、榆次、交城、文水、汾阳、孝义、介休、灵石、霍州等地效率值则长期处于0.50以下低位;下游效率整体居中趋升,多数县(洪洞、襄汾、尧都、翼城、侯马等)集中在0.20～0.70,虽不及中游高效县突出,但优于上游,且曲沃、新绛、古县等稳步提升,浮山(2022年1.07)、万荣(2019年1.01)等县出现显著跃升。

进一步对汾河流域2011-2022年间典型年份县域农业生态效率空间进行三维趋势分析。由图

3可见,其空间格局呈现以下特征与演变逻辑:在东西方向上,农业生态效率呈现由西向东递增的梯度特征。西部吕梁山区(如宁武、静乐)受生态脆弱性制约,长期处于低效水平(2011年普遍低于0.25),虽有个别县后期跃升(如岚县2022年达1.66),但整体稳定性较差;中部太原盆地及周边县域(如小店、太谷)依托城市辐射和集约化生产,形成显著的"效率脊梁",2011年即显现优势(迎泽区0.65),至2022年阳曲、尖草坪等多县效率突破1.00,形成连片高效区;东部临汾盆地(如洪洞、曲沃)效率值居中(多维持在0.20~0.50),部分县(如浮山2022年1.07)显示传统农区转型潜力。

在南北方向上,效率呈现"北高南低"与中部极化格局。北部太原市辖区及交城、寿阳构成持续性高效极核,凸显都市农业的扩散效应;中部榆次、祁县等平原区效率稳步上升,反映规模经营增效潜力;南部则梯度分化明显,汾西、霍州长期低迷(低于0.30),而河津、新绛显著提升。

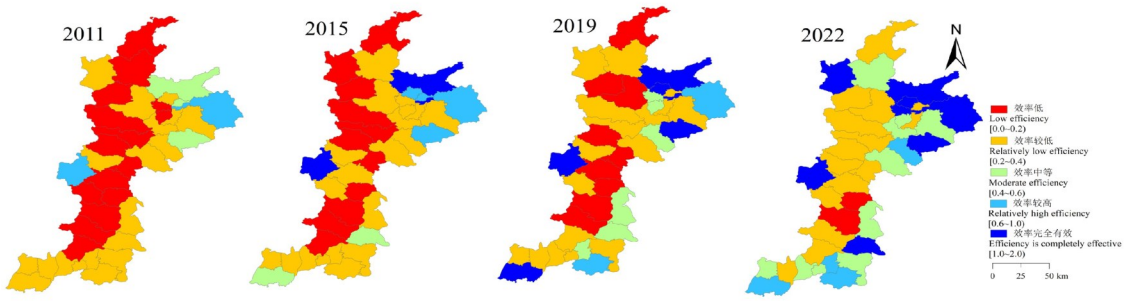
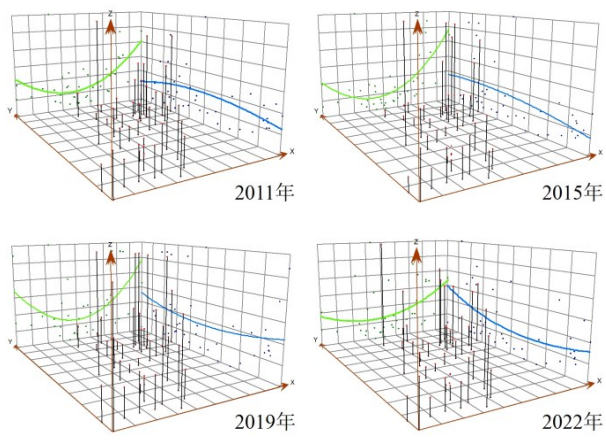


图2 汾河流域典型年份农业生态效率空间格局

Fig.2 Spatial patterns of agricultural eco-efficiency in typical years of the Fenhe River Basin



X轴和Y轴分别表示农业生态效率的东西向与南北向空间梯度,Z轴为农业生态效率值。

The X and Y axes represent the east-west and north-south spatial gradients of agricultural eco-efficiency, respectively, while the Z-axis indicates the agricultural eco-efficiency values.

图3 汾河流域典型年份农业生态效率全局趋势图

Fig.3 Global trend diagram of agricultural eco-efficiency in typical years of the Fenhe River Basin

3.3 农业生态效率空间相关性分析

基于汾河流域2011-2022年农业生态效率的全局莫兰指数分析(表4),其空间相关性呈现显著的阶段性波动与演化特征:全域空间正相关性总体显著(均值0.199,$P<0.05$),表明高效率县与低效率县分别呈现空间集聚格局,但关联强度呈现波动衰减趋势。具体表现为:在强化阶段(2014-2016、2020-2021),莫兰指数于2015年达峰值0.323($P<0.001$),而在衰减阶段(2017-2019、2022),其中2019年(0.072,$P=0.365$)和2022年(0.046,$P=0.503$)指数分别跌至不显著水平。基于汾河流域2011-2022年典型年份农业生态效率的LISA聚类图(图4)可见,汾河流域县域农业生态效率存在集聚效应,中游太原盆地及晋中盆地持续向好(高-高型),而吕梁山东麓及忻定盆地等生态脆弱区则陷入"低—低"效应,且有进一步扩大的趋势。

3.4 农业生态效率影响因素分析

农业生态效率受到多方面因素的影响,在已有研究基础上[11,24],综合考虑汾河流域农业发展的实际状况以及指标的可获取性,本研究选取的主要指标有:农业规模化生产能力表征农业资源禀赋因素;农业劳动生产率、农业机械密度与劳动投入度量农业投入强度;农民收入水平及城镇化水平测度经济发展水平(表5)。

表4　2011—2022年汾河流域农业生态效率全局莫兰指数

Table 4　Global Moran's *I* of agricultural eco-efficiency in the Fenhe River Basin from 2011 to 2022

年份 Year	Moran's *I*	*Z*值	*P*值
2011	0.204 3	2.202 0	0.027 7**
2012	0.153 6	1.774 3	0.076 0*
2013	0.201 5	2.206 2	0.027 4**
2014	0.312 0	3.171 6	0.001 5***
2015	0.322 6	3.287 8	0.001 0***
2016	0.214 5	2.283 2	0.022 4**
2017	0.148 4	1.602 3	0.109 1
2018	0.195 6	2.033 3	0.042 0**
2019	0.072 0	0.906 6	0.364 6
2020	0.213 6	2.209 8	0.027 1**
2021	0.301 7	2.983 8	0.002 8***
2022	0.046 1	0.669 1	0.503 4
均值 Average	0.198 8	—	—

注:*Z*值表示统计量;*P*值表示概率;***、**和*分别表示在1%、5%和10%水平上显著。

Note: *Z* represented the test statistic; *P* denoted the probability; ***, **, and * indicated statistical significance at the 1%, 5%, and 10% levels, respectively.

汾河流域2011-2022年典型年份农业生态效率空间分异因子探测结果(表6)显示,驱动机制呈现三维协同演化特征。在投入强度主导阶段(2011-2019年),农业劳动生产率一直居于首位,但受到农业机械密度与农业从业人口的制约;2019-2022年进入经济-资源协同阶段,该阶段城镇化水平跃居首位,农业规模化生产能力也从末位提升到第二位,二者形成新双核驱动。

基于汾河流域典型年份农业生态效率因子交互探测结果(图5),驱动机制呈现"双核协同演进、三元互馈分异"的复杂特征:城镇化水平与农业规模化生产能力的交互作用呈现跃迁式强化,形成了"城镇技术扩散-土地集约经营"的双核驱动。而农业从业人口与农业机械密度的持续弱交互,加剧了西部山区农业生态低效率。三元互馈机制表现为:城镇化水平、农业劳动生产率与农业规模化生产能力互相结合形成的"技术-人才-土地"密集的太原盆地高效区;农业机械密度与农业规模化生产能力不相匹配导致的机械冗余与地块碎片化叠加的西部山区低效区;农业规模化生产能力与农民收入水平交互增强,形成的"规模经营-增

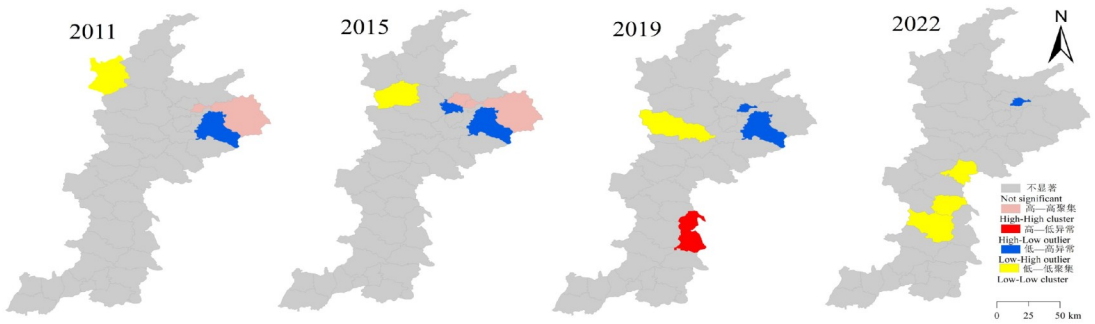


图4　汾河流域典型年份农业生态效率的LISA聚类图

Fig.4　LISA Cluster Map of agricultural eco-efficiency in typical years of the Fenhe River Basin

表5　汾河流域农业生态效率影响因素指标

Table 5　Indicators of influencing factors of agricultural eco-efficiency in the Fenhe River Basin

一级指标 First level indicator	二级指标 Second level indicator	指标解释 Indicator explanation
农业资源禀赋 Agricultural resource endowment	X_1农业规模化生产能力 Large-scale agricultural production capacity	农作物总播种面积/农业从业人员
农业投入强度 Agricultural input intensity	X_2农业劳动生产率 Agricultural labor productivity	农业总产值/农业从业人员
	X_3农业机械密度 Agricultural machinery density	农业机械总动力/农作物总播种面积
	X_4劳动投入 Labor input	农业从业人员
经济发展水平 Economic development level	X_5农民收入水平 Farmers' income level	农村居民人均可支配收入
	X_6城镇化水平 Urbanization level	城镇人口/总人口

收反哺”闭环的中部平原转型区。

表6 汾河流域典型年份农业生态效率空间分异因子探测结果

Table 6 Detection results of spatial differentiation factors for agricultural eco—efficiency in typical years of the Fenhe River Basin

探测因子	2011			2015			2019			2022		
Detection factor	q	P值	排序	q	P值	排序	q	P值	排序	q	P值	排序
农业规模化生产能力(X_1)	0.051	0.830	6	0.016	0.954	6	0.047	0.781	5	0.189	0.819	2
农业劳动生产率(X_2)	0.270	0.633	1	0.297	0.481	1	0.342	0.084	1	0.167	0.609	3
农业机械密度(X_3)	0.058	0.858	5	0.070	0.774	5	0.035	0.853	6	0.042	0.759	6
劳动投入(X_4)	0.076	0.423	4	0.120	0.211	4	0.066	0.481	4	0.079	0.398	5
农民收入水平(X_5)	0.131	0.260	3	0.121	0.380	3	0.091	0.363	3	0.080	0.477	4
城镇化水平(X_6)	0.155	0.265	2	0.201	0.240	2	0.163	0.785	2	0.215	0.085	1

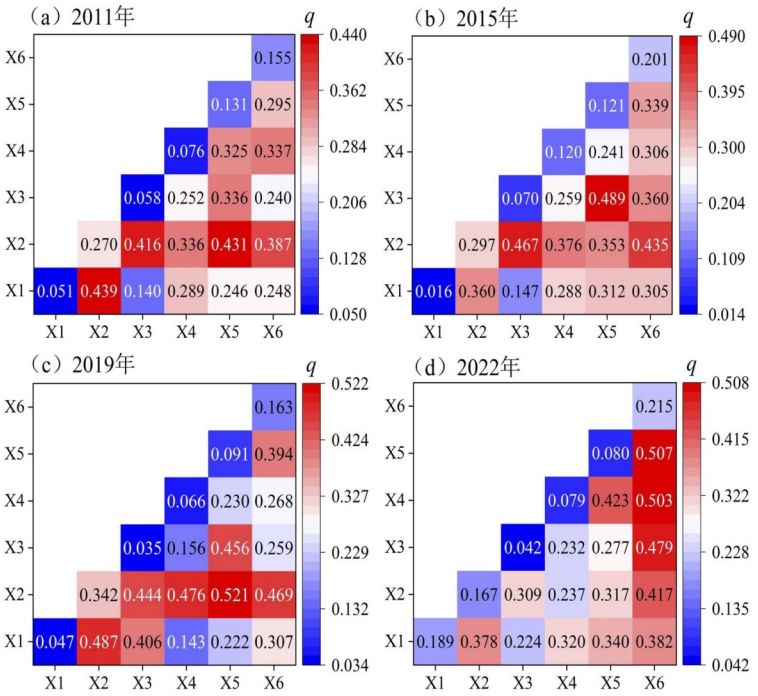


图5 汾河流域典型年份农业生态效率影响因子交互探测热力图

Fig.5 Heat map of interaction detection of agricultural eco-efficiency influencing factors in typical years of the Fenhe River Basin

4 讨论

4.1 农业生态效率时空分异的演化机制

汾河流域农业生态效率的时空演化呈现“效率提升与区域失衡并存”的复杂特征,其核心矛盾源于自然禀赋、发展政策与外部冲击的三维互馈作用。全流域效率均值增幅达110.9%(2011-2022年),主要受益于政策与技术扩散的双重红利。2017年后增速跃升,对应山西省农业集约化改革深化期;2020-2022年跳跃式增长则与数字农业技术推广及疫情催生的生产模式转型相关[26]。驱动机制完成从“投入强度单核”(2011-2019年)向“经济-资源协同”(2019-2022年)的范式转型。城镇化水平通过技术外溢激活土地规模效益,二者交互作用q值提升380%,推动中部平原连片增效(如祁县效率增至0.70),而传统劳动力驱动退居次位。刘琼等[27]的研究认为城镇化发展促进了

农业规模化生产,进一步显著促进了产业融合增收效应。区域失衡的结构性根源有自然禀赋约束、发展政策偏差和外部冲击放大失衡。其中自然禀赋约束表现为:西部山区受限于陡坡地形,规模化缺失与机械适配失效形成"资源-技术双锁困局",导致基尼系数异常波动(上游2022年激增至0.410)。刘成坤等[28]的研究也认为农业机械化通过粮食增收和农业生产性服务业增长2条途径对农业生态效率产生显著的积极影响。发展政策偏差表现为农业补贴长期聚焦收入提升但其边际效益递减(q值降幅39%),未能破解低效区系统矛盾。低效区农户对农业生产的依赖性较弱,农业补贴虽在一定程度上正向影响了农户的耕地利用效率,但由于补贴资金的有限,未能解决系统矛盾[29]。2014-2015年基尼系数攀升至0.363,反映政策资源过度倾向高效区(如太原盆地),加剧"核心-边缘"分化。外部冲击放大失衡表现为:疫情后复苏不均衡导致2022年空间关联断裂(莫兰指数0.046),西部山区劳动力流失(q值升至0.079)与城镇技术扩散脱钩,形成"低效锁定-要素外流"的恶性循环。尽管汾河流域在山西省农业生产中地位重要,但其主导产业始终是第二产业。2000年以来,流域单位粮食播种面积的用水量增长有限。与此同时,城市化进程加速导致农业劳动力人口减少(劳动力由边远山区向中心城市聚集),粮食作物播种面积占比随之下降[30]。

4.2　农业生态效率空间治理优化路径与韧性系统构建

为破解"效率提升而区域失衡加剧"的困局,需基于空间互馈机制设计靶向干预策略:

(1)重塑驱动范式:从单维刺激到三维协同

农业资源禀赋端:山西省是黄土高原坡耕地占比最大的省份,其坡耕地面积占耕地面积的52.6%,且在西部山区尤为突出[31]。针对汾河流域西部山区平地少且地块碎片化的问题,建立"梯田改造-微型机械"适配体系(如研发15°坡地适用农机),通过土地流转合作社提升规模经营能力,破解地形约束。经济发展水平端:山西省农业产业链韧性水平总体低于全国平均水平。在全国整体水平提升的背景下,其特优农业产业资源优势尚未充分转化为产业链韧性[32]。鉴于此,建议汾河流域各县区推行转型收入补贴政策,构建"规模经营—增收反哺"闭环,在太原盆地推广"城郊技术基站+订单农业"模式,将城镇化技术辐射嵌入产业链。农业投入强度端:针对汾河流域山区农业基础薄弱、自然禀赋较差等问题[33],亟需开展劳动力技能升级计划,重点培训山区留守人口掌握生态农业技术,阻断"低效-流失"衰退链。

(2)重构空间治理框架

汾河流域自然资源禀赋区域分布特征明显,总体上表现为上游地形起伏大且基础设施薄弱,中游地形平坦、种植模式集约化程度高以及水资源配置体系高效,下游自然条件优越,农业投入水平高[34]。针对以上分区特征建议汾河流域加强全流域尺度的协同作用:建立"数字流域平台",整合生态要素流动数据(如水资源调配、污染转移),抑制超变密度贡献率飙升(2022年达49.34%)。动态监测西部异常波动点(如岚县2022年1.66),识别其"政策-自然"耦合跃升机制。分区靶向调控:中游极化区以"效率补偿机制"平衡洼地(如霍州)与高地(阳曲),将太原盆地核心带耕地整合纳入生态补偿范畴;上游屏障区探索"碳汇农业-生态转移支付"路径,将生态保护成本转化为效率增益;下游转型区推广曲沃县"特色种植-加工链延伸"经验,激活传统农区潜力。

(3)韧性系统应对不确定性

山西省农业基础薄弱,高度依赖自然资源,极易受到旱灾、风雹等气象灾害的影响[35],且各区域致灾因子与受灾水平有一定的差异。基于此,建议汾河流域设立"区域互助基金",缓冲极端事件冲击(如2017年气候异常致基尼系数骤变)。基金由高效区(如太原盆地)按效率值比例注资,定向支援低效区抗风险能力建设。构建"政策-技术-市场"三重预警机制:通过遥感监测耕地利用效率、农产品价格波动指数、政策适配度模型,预判区域失衡风险。

5　结论

本文基于2011-2022年汾河流域40个县(市、区)的面板数据测算了农业生态效率时空分异特征及其驱动因素,得到结论:

(1)农业生态效率整体显著提升,但区域不均衡持续加剧

研究期内,汾河流域农业生态效率均值从

0.274提升至0.578,增幅达110.9%,呈现显著上升趋势,尤其在2017年后增速加快。然而,基尼系数由0.299上升至0.332,年均增长0.9%,显示区域差异持续扩大。中游地区始终为效率高地,上游地区虽增幅最大(275.8%),但波动剧烈,反映出资源禀赋、管理能力与政策落实的内生差异是制约协调发展的重要因素。

(2)空间格局呈现"东西递减、北高南低"的梯度分异与极化特征

农业生态效率在空间上表现出明显的梯度分异:东西方向由西向东递增,西部吕梁山区长期低效,中部太原盆地形成"效率脊梁";南北方向呈现"北高南低",北部都市农业区效率突出,南部部分县市虽有提升但仍存在低效洼地。中游地区高效区与低效区并存,极化现象显著,空间不平衡问题突出。

(3)空间集聚效应阶段性波动,高效与低效集聚区持续固化

全局莫兰指数均值达0.199,表明农业生态效率存在显著空间正相关,但关联强度呈波动衰减趋势,2022年已降至不显著水平。LISA聚类显示,太原盆地及晋中盆地持续为"高-高"集聚区,而吕梁山东麓与忻定盆地等生态脆弱区陷入"低-低"集聚并有扩大趋势,反映空间协同机制尚未有效形成。

(4)驱动机制由投入主导向"经济-资源"双核协同演进

影响因素分析揭示,2011-2019年农业生态效率主要由农业劳动生产率等投入要素驱动;2019年后,城镇化水平与农业规模化生产能力跃升为双核驱动力,形成"城镇技术扩散-土地集约经营"协同机制。交互作用进一步揭示"技术-人才-土地"三元互馈结构,推动高效区形成,而西部山区因机械与土地不匹配仍陷于低效困境。

参 考 文 献

[1]国家统计局. 2022年中国农业总产值统计报告[R]. 北京:国家统计局,2023.
National Bureau of Statistics. Statistical report on China's agricultural output value in 2022[R]. Beijing: National Bureau of Statistics, 2023.

[2]孙宇,黎新伍,黄静文. 干旱区农业生态效率与经济韧性协同权衡识别及其驱动因素[J/OL]. 水土保持通报,2025:1-14(2025-08-05)[2025-09-02]. https://doi.org/10.13961/j.cnki.stbctb.2025.05.035.
Sun Y, Li X W, Huang J W. Identification and driving factors of tradeoff and coordination between agricultural ecological efficiency and economic resilience in arid regions [J/OL]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025: 1-14 (2025-08-05) [2025-09-02]. https://doi. org/10.13961/j. cnki. stbctb.2025.05.035.

[3]郑德凤,郝帅,孙才志. 基于DEA-ESDA的农业生态效率评价及时空分异研究[J]. 地理科学,2018,38(3):419-427.
Zheng D F, Hao S, Sun C Z. Evaluation of agricultural ecological efficiency and its spatial-temporal differentiation based on DEA-ESDA[J]. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(3): 419-427.

[4]王永静,陈增增. 天山北坡经济带农业生态效率评价及提升路径研究——基于Super-SBM模型和Global-Malmquist指数[J]. 生态经济,2020,36(2):111-117.
Wang Y J, Chen Z Z. Study on agricultural ecology efficiency evaluation and improvement path of economic belt on the north slope of Tianshan Mountains: based on the super-SBM and global-malmquist index[J]. Ecological Economy, 2020, 36(2): 111-117.

[5]穆佳薇,乔保荣,余国新. 新疆塔里木河流域县域农业低碳生产率时空格局及影响效应研究[J]. 干旱区地理,2023,46(6):968-981.
Mu J W, Qiao B R, Yu G X. Spatial and temporal patterns of agricultural low-carbon productivity and its influence effects in the counties of Tarim River Basin, Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(6): 968-981.

[6]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.

[7]张展,廖小平,李春华,等. 湖南省县域农业生态效率的时空特征及其影响因素[J]. 经济地理,2022,42(2):181-189.
Zhang Z, Liao X P, Li C H, et al. Spatio-temporal characteristics of agricultural eco-efficiency and its determinants in Hunan Province[J]. Economic Geography, 2022, 42(2): 181-189.

[8]方永丽,曾小龙. 中国省际农业生态效率评价及其改进路径分析[J]. 农业资源与环境学报,2021,38(1):135-142.
Fang Y L, Zeng X L. Evaluation and improvement of agricultural eco-efficiency in China[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2021, 38(1): 135-142.

[9]邓远建,超博. 灰水足迹视角下我国省域农业生态效率及其影响因素[J]. 中国农业科学,2022,55(24):4879-4894.
Deng Y J, Chao B. Provincial agricultural ecological efficiency and its influencing factors in China from the perspective of grey water footprint[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2022, 55(24): 4879-4894.

[10]袁培,周颖. 黄河流域农业生态效率的时空演变及改善路径

研究[J]. 生态经济,2021,37(11):98-105.
Yuan P, Zhou Y. The spatio-temporal evolution and improvement path of agricultural eco-efficiency in the Yellow River Basin study[J]. Ecological Economy, 2021, 37(11): 98-105.

[11]朱瑗媛,殷颂葵,刘琼慧. 中国西北地区农业生态效率时空分异及影响因素研究[J]. 干旱区地理,2024,47(7):1210-1219.
Zhu A A, Yin S K, Liu Q H. Spatial and temporal differentiation and influencing factors of agricultural ecological efficiency in northwest China[J]. Arid Land Geography, 2024,47(7):1210-1219.

[12]周玲芳,张之秋,周友兵. 2001—2018年典型南北过渡带地区农业生态效率测度及时空特征分析[J]. 生态科学,2023,42(3):153-162.
Zhou L F, Zhang Z Q, Zhou Y B. Measurement and spatial-temporal characteristics of agricultural eco-efficiency in a typical North-South Transition Zone from 2001 to 2018[J]. Ecological Science,2023,42(3):153-162.

[13]李昊坤. 基于超效率SBM模型中国农业生态效率的测度及其影响因素分析[J]. 河北地质大学学报,2023,46(6):102-108.
Li H K. Measurement of agricultural eco-efficiency in China based on super-efficiency SBM model and analysis of its influencing factors[J]. Journal of Hebei GEO University, 2023,46(6):102-108.

[14]刘婷婷,秦会艳,黄颖利. 粮食主产区农业生态效率时空演变及驱动因素研究——基于三大流域视角[J]. 长江流域资源与环境,2024,33(11):2513-2524.
Liu T T, Qin H Y, Huang Y L. Spatial-temporal evolution and driving factors of agricultural ecological efficiency in major grain producing areas: based on the perspective of three major river basins[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2024,33(11):2513-2524.

[15]张艺,梁超."双碳"视域下内蒙古地区农业生态效率时空演进特征及影响因素研究[J]. 中国农业资源与区划,2025,46(6):90-99.
Zhang Y, Liang C. The spatiotemporal evolution characteristics and influencing factors of agricultural ecological efficiency in Inner Mongolia from the perspective of "dual carbon"[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning,2025,46(6):90-99.

[16]魏建飞,赵颢迪,李强,等. 河南省县域农业生态效率格局演进及影响机制[J]. 经济地理,2025,45(1):184-192.
Wei J F, Zhao H D, Li Q, et al. Evolution and impact mechanism of agricultural eco-efficiency in counties of Henan Province[J]. Economic Geography,2025,45(1):184-192.

[17]张莹娜,陈耀."双碳"背景下农业生态效率时空差异及影响因素研究——基于甘肃省县域面板数据分析[J]. 自然资源情报,2023(8):52-59.
Zhang Y N, Chen Y. Spatial and temporal differences and influencing factors of agricultural eco-efficiency under the background of double carbon: based on county panel data analysis in Gansu[J]. Natural Resources Information, 2023(8):52-59.

[18]独孤昌慧. 中国农地利用碳排放及影响因素研究:1990—2016年[J]. 生态经济,2020,36(5):19-23.
Dugu C H. A study on carbon emission and its influencing factors of agriculture land in China: 1990—2016[J]. Ecological Economy,2020,36(5):19-23.

[19]熊一惠,尚松浩. 基于SE-SBM模型和Tobit模型的云南省农业用水效率及影响因素分析[J]. 节水灌溉,2025(7):108-114,119.
Xiong Y H, Shang S H. Analysis of agricultural water use efficiency and influencing factors in Yunnan Province based on SE-SBM and Tobit models[J]. Water Saving Irrigation,2025(7):108-114,119.

[20]周敏,吴玉. 基于SE-SBM模型的中国先进制造业生态效率评价研究[J]. 生态经济,2020,36(10):63-69.
Zhou M, Wu Y. Research on eco-efficiency evaluation of advanced manufacturing industry in China based on SE-SBM model[J]. Ecological Economy,2020,36(10):63-69.

[21]Dagum C. A new approach to the decomposition of the Gini income inequality ratio[J]. Empirical Economics, 1997, 22(4):515-531.

[22]李星明,张鸿浩,周明闪,等. 中国文旅新质生产力发展水平评估及其区域差异分析[J]. 地理科学进展,2025,44(5):908-923.
Li X M, Zhang H H, Zhou M S, et al. Development level of new quality productivity of cultural and tourism industry in China and its regional differences[J]. Progress in Geography, 2025,44(5):908-923.

[23]刘昭玥,费杨,师华定,等. 基于UNMIX模型和莫兰指数的湖南省汝城县土壤重金属源解析[J]. 环境科学研究,2021,34(10):2446-2458.
Liu Z Y, Fei Y, Shi H D, et al. Source apportionment of soil heavy metals in Rucheng County of Hunan Province based on UNMIX model combined with moran index[J]. Research of Environmental Sciences,2021,34(10):2446-2458.

[24]刘继为,姜安隆."双碳"目标下河北省农业生态效率时空演进特征及影响因素[J]. 农业资源与环境学报,2025,42(3):792-803.
Liu J W, Jiang A L. Characteristics of spatial and temporal evolution of agriculture eco-efficiency and the influencing factors in Hebei Province under the goal of "carbon peaking and carbon neutrality"[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment,2025,42(3):792-803.

[25]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 J F, Xu C D. Geodetector: principle and prospective[J]. Acta Geographica Sinica,2017,72(1):116-134.

[26]张弼,庞爱萍,李春晖. 黄河流域农业农村氮流时空分布特征及演化规律研究[J]. 环境科学研究,2024,37(1):80-91.
Zhang B, Pang A P, Li C H. Spatiotemporal distribution characteristics and evolution pattern of nitrogen flow in agricultural and rural areas of the Yellow River Basin[J].

Research of Environmental Sciences,2024,37(1):80-91.

[27]刘琼,肖文海,卢华,等. 不同土地流转方式对农村产业融合的影响分析与政策建议[J]. 经济地理,2025,45(5):173-180.
Liu Q,Xiao W H,Lu H,et al. Effect of different land transfer modes on rural industrial integration and its policy recommendations[J]. Economic Geography,2025,45(5):173-180.

[28]刘成坤,汪乐,孟静静. 农业机械化影响农业生态效率的理论分析及实证检验[J]. 中国生态农业学报(中英文),2025,33(6):1219-1234.
Liu C K,Wang L,Meng J J. Theoretical analysis and empirical testing of the impact of agricultural mechanization on agricultural eco-efficiency[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture,2025,33(6):1219-1234.

[29]胡贤辉,何丽华,谭芬,等. 异质性农户耕地利用效率及其影响因素[J]. 水土保持研究,2025,32(5):352-362,383.
Hu X H,He L H,Tan F,et al. Cultivated land use efficiency and its influencing factors of heterogeneous farmers[J]. Research of Soil and Water Conservation,2025,32(5):352-362,383.

[30]张鹏飞,韩佳琦,赵振江,等. 汾河流域农业水贫困与粮食生产脆弱性耦合特征及影响因素[J]. 中国沙漠,2025,45(5):13-23.
Zhang P F,Han J Q,Zhao Z J,et al. Coupling characteristics and the driving factors of agricultural water poverty and food production vulnerability in Fenhe River basin,China[J]. Journal of Desert Research,2025,45(5):13-23.

[31]李东原,申楠,张风宝,等. 不同调控措施下黄土高原坡耕地氮磷流失特征研究[J]. 水土保持研究,2025,32(6):84-95.
Li D Y,Shen N,Zhang F B,et al. Study on characteristics of nitrogen and phosphorus loss in slope farmland on the Loess Plateau under different control measures[J]. Research of Soil and Water Conservation,2025,32(6):84-95.

[32]仇欢欢. 山西省农业产业链韧性水平测度及提升路径[J/OL]. 中国农业资源与区划,2025:1-12(2025-07-05)[2025-08-18]. https://link.cnki.net/urlid/11.3513.S.20250715.1101.008.
Qiu H H. Measurement and improvement path of resilience level of agricultural industry chain in Shanxi Province[J/OL]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning,2025:1-12(2025-07-15)[2025-08-18]. https://link.cnki.net/urlid/11.3513.S.20250715.1101.008.

[33]龙佩,王永生,卢雪. 黄土丘陵沟壑区农业地域功能分异特征及演化机制[J]. 资源科学,2025,47(5):1096-1109.
Long P,Wang Y S,Lu X. Differentiation characteristics and evolutionary mechanisms of agricultural regional functions in Loess Hilly and Gully Region[J]. Resources Science,2025,47(5):1096-1109.

[34]戴燕燕,姚航宇,韩佳琦,等. 汾河流域农业水资源利用效率与农业现代化耦合协调关系[J]. 中国农业气象,2025,46(7):954-966.
Dai Y Y,Yao H Y,Han J Q,et al. Coupling coordination relationship between agricultural water resources utilization efficiency and agricultural modernization across Fenhe River Basin[J]. Chinese Journal of Agrometeorology,2025,46(7):954-966.

[35]邢嘉程,王依诺,关颖慧,等. 1978—2020年中国农业气象灾害时空格局解析[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版),2025,55(6):9-20.
Xing J C,Wang Y N,Guan Y H,et al. Spatiotemporal variations of agricultural meteorological disasters in China during 1978—2020[J]. Periodical of Ocean University of China,2025,55(6):9-20.

(编辑:韩志强)