

关中平原耕地利用生态效率时空演化及驱动因素分析

贾亚娟¹, 高君¹, 张新奇²

(1. 西安财经大学管理学院, 陕西 西安 710100; 2. 海南大学国际商学院, 海南 海口 570228)

摘要: 关中平原作为我国西部重要的粮食主产区, 其耕地利用生态效率研究对协调粮食安全与资源可持续利用之间的矛盾具有重要意义。基于2013—2022年县域面板数据, 采用非期望产出Super-SBM模型量化耕地利用生态效率, 并结合空间自相关分析与地理探测器方法, 系统探究其时空演化特征及其驱动因素。结果表明: (1) 2013—2022年关中平原生态效率整体呈“U”型演变, 空间上形成“中部高、西部次之、东部低”的梯度格局, 高效率区以西安、咸阳为核心向西扩散, 铜川、渭南等地则长期处于低效率状态。(2) 生态效率空间集聚特征显著, 高效率集区以乾县向南扩展, 低效率集区则稳定集聚于东部。(3) 自然、社会、经济和政策因子协同驱动效率空间分异, 其中年降水量、高程等因子影响强度随时间动态演变, 城镇化率与农民人均可支配收入促进作用持续增强, 且多维因子交互增强效应显著。

关键词: 关中平原; 耕地利用; 生态效率; Super-SBM模型; 地理探测器

文章编号: 1000-6060(2026)04-0830-11(0830~0840)

耕地资源作为农业生产的基础性要素, 其可持续利用不仅关乎国家粮食安全^[1], 更是维护生态系统平衡的重要战略支撑^[2]。《中共中央国务院关于进一步深化农村改革扎实推进乡村全面振兴的意见》明确提出要统筹推进粮食安全与生态环境保护^[3]。中央全面深化改革委员会第二十七次会议上进一步强调, 要提高土地资源利用效率, 加快资源利用方式的根本转变^[4]。然而, 目前我国耕地资源保护正面临着严峻挑战。自然资源部统计公报显示, 全国耕地净减少面积约 6.09×10^4 hm², 其中非农建设占用和生态退耕是构成耕地流失的主要原因^[5]。更为突出的是, 农业生产过程中环境污染问题日益严重, 化肥、农药等过度使用导致土壤氮磷含量升高, 而且土壤有机质下降、酸化及板结等问题持续加剧, 从而对耕地生态安全构成了严重威胁。究其根源, 传统农业“高投入、高消耗、高污染”的粗放生产模式是导致该问题的主要原因, 这种模式显著降低了耕地生态效率, 并且产生了资源浪费与环境污染

的双重压力^[6]。在此背景下, 系统探究提升耕地利用生态效率的有效路径, 实现经济、社会与生态效益的协同优化, 不仅具有重要的理论价值, 更能为相关政策制定和实践探索提供科学依据。

生态效率研究经历了从单一能效评估向经济-环境协同发展的范式转变, 其理论演进与研究方法呈现出明显的阶段性特征。在概念内涵方面, 孙儒泳^[7]最早从生态学视角提出能量流动的基本理论框架, 随后Schaltegger等^[8]将其明确定义为经济产出与环境影响的比值关系, 世界可持续发展工商理事会^[9]进一步凝练出“以更少资源创造更多福利”的核心原则。在农业领域应用时, 这一概念已拓展为包含粮食产出、资源利用与环境污染协同治理的综合分析框架^[10]。当前生态效率研究主要围绕4个方面展开: (1) 评估方法体系。主流研究方法呈现多元化特征, 包括数据包络法(DEA)^[11]、随机前沿分析法(SFA)^[12]、方向性距离函数(DDF)^[13]及非径向RAM模型^[14]等。其中, 非期望产出的Super-SBM模型因

收稿日期: 2025-06-30; 修订日期: 2025-07-28

基金项目: 国家社会科学基金一般项目(22BGL025); 陕西省自然科学基金基础研究项目(2025JC-YBMS-801); 西安财经大学研究生创新基金项目(23YC030)资助

作者简介: 贾亚娟(1978-), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事资源环境经济和农村区域可持续发展研究。E-mail: jia-ya-juan@163.com

通讯作者: 张新奇(1997-), 女, 博士研究生, 主要从事资源环境经济与企业绿色发展研究。E-mail: xin_qi_zhang@163.com

其独特优势而受到广泛关注：该方法不仅能够同时处理期望产出与非期望产出，通过考虑全部松弛变量，有效克服径向模型对改进空间估计不足的缺陷；更重要的是，该方法通过避免线性转换，显著提高了决策单元间的区分度，从而获得更精确的效率评估结果^[15]。(2) 指标体系构建。现有研究普遍采用“投入-产出”标准分析框架^[16-18]，其中投入指标主要包括土地、劳动力等核心生产要素，期望产出以经济产出和物质产出为主，非期望产出主要为各类环境污染物质^[19]，但是，当前非期望产出的测度难以全面反映实际污染物的多样性和复杂性。(3) 研究空间尺度。相关研究在空间维度上呈现多层次特征：行政单元层面涵盖省级^[20]、地市级^[18]和县域^[21]等不同层级；地理单元层面包括特定流域^[18]或功能区^[17]等。而针对我国西部地区，尤其是生态脆弱区与农业集约化区域交汇地带的研究仍显不足，亟待加强。(4) 影响因素分析。现有研究虽然已识别出自然条件、经济发展水平、社会因素等多维度的影响因子^[17,19]，但对这些因素的作用机理和交互效应的解析仍不够深入，需要进一步探索其内在作用机制。

本文以我国半干旱区高产农业典型代表关中平原为研究对象，系统测度该区域耕地利用生态效率水平，深入揭示其时空演化特征，并探讨其多因素驱动机制。这不仅可以为区域耕地资源可持续

发展与农业绿色发展提供理论支撑和实践指导，同时也可以为落实国家“藏粮于地、藏粮于技”战略部署提供科学依据和决策参考。

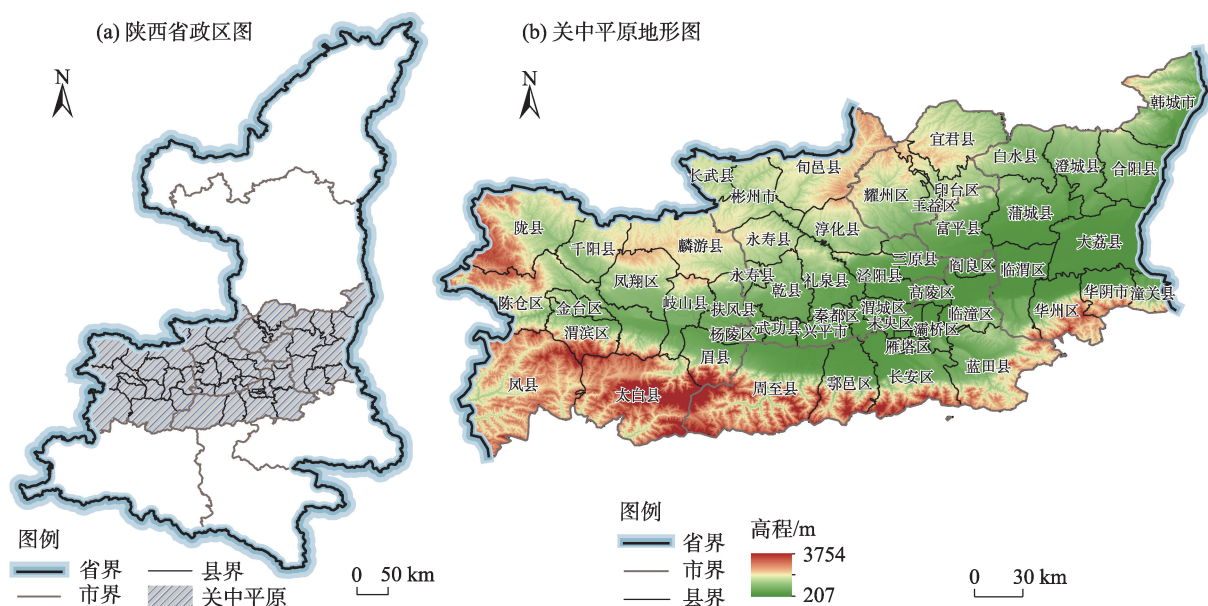
1 数据与方法

1.1 研究区概况

关中平原是我国西北农业核心区，呈东西狭长带状，面积达 $3.6 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，耕地占比35%以上。地形平坦，土壤肥沃，属半干旱气候区，实行“冬小麦-夏玉米”两年三熟制，粮食产量占全省总量的70%^[22]。涵盖西安、咸阳、宝鸡、渭南和铜川5个地级市，共48个县域行政单元(图1)。该区域不仅是陕西省城镇化发展的核心地带，更是全省最重要的农产品生产基地。作为汾渭平原农产品主产区的关键组成部分，当地已实施严格的耕地保护政策，通过划定永久基本农田、推广节水灌溉技术等措施，着力提升灌溉水效率，以保障区域农业可持续发展。

1.2 数据来源

本文数据主要来源于《陕西省统计年鉴》《铜川市统计年鉴》《渭南市统计年鉴》《咸阳市统计年鉴》《西安市统计年鉴》《宝鸡市统计年鉴》《中国区域统计年鉴》《中国农村统计年鉴》、陕西省各地市政府官方网站以及农业农村厅相关报告，其中高程和海



注：基于陕西省标准地图服务网站审图号为陕S(2024)022号的标准地图制作，底图边界无修改。下同。

图1 研究区示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the study area

拔数据来源于地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn>),部分缺失数据采用插值法进行补充。

1.3 研究方法

1.3.1 指标体系构建 本文遵循科学性、可操作性与数据可获取性原则,借鉴相关研究^[17-20],构建包含投入、期望产出和非期望产出三大维度的耕地利用生态效率评价指标体系(表1)。在投入维度,综合考虑生产要素差异,选取耕地、劳动力、农机、化肥、农药、柴油、农膜及水资源8个指标;在期望产出维度,以农业产值和粮食产量2个指标衡量经济产出效益;在非期望产出维度,选取碳排放和面源污染2个指标来反映农业活动环境所产生的负外部性。其中,碳排放主要包括化肥、农药、农用柴油、农膜和灌溉5类碳源,其碳排放系数参考崔徐锋等^[23]研究成果;面源污染计算参见吴海霞等^[19]研究。

为系统探究耕地利用生态效率的影响机制,本文在借鉴相关研究成果并结合研究区实际情况的基础上^[17,19],从自然、社会、经济和政策4个维度构建驱动因素分析框架(表2)。自然因素选取年降水量、高程和坡度3个指标,以体现气候条件与地形特征对耕地利用生态效率的潜在影响;社会因素主要考虑城镇化率和人口密度2个指标,以反映社会发展水平对耕地利用生态效率的作用;经济因素主要从农民人均可支配收入和第一产业占比2个角度切入,揭示经济发展对生态效率的影响路径;政策因素以财政支农投入强度进行衡量,评估政策支持对耕地利用生态效率的调控作用。具体指标见表2所示。

1.3.2 模型构建

(1) 非期望产出的 Super-SBM 模型

本研究借助非期望产出的 Super-SBM 模型评估关中平原耕地利用生态效率。假设有 n 个独立决策单元(DMU),每个DMU中含有 m 种投入, s_1 种期

表1 耕地利用生态效率评价指标体系

Tab. 1 Evaluation indicator system for ecological efficiency of cultivated land use

变量类型	指标名称	指标释义
投入	耕地	农作物播种总面积/ 10^3 hm^2
	劳动力	耕地生产从业人员/ 10^4 人
	农机	农业机械总动力/kW
	化肥	农用化肥施用折纯量/t
	农药	农药使用量/t
	柴油	农用柴油使用量/t
	农膜	农用塑料薄膜使用量/t
	水资源	有效灌溉面积/ 10^3 hm^2
期望产出	农业产值	农业总产值/ 10^4 元
	粮食产量	粮食总产量/t
非期望产出	碳排放	化肥、农药等碳排放量/t
	面源污染	氮磷农药等流失量/t

望产出, s_2 种非期望产出,假设生产系统处理规模报酬不变状态,依据成刚^[15]提出的将非期望产出纳入评价决策单元(x_0, y_0^g, y_0^b)的模型,如下:

$$\rho = \min \frac{1 + \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{s_i^-}{x_{i0}}}{1 - \frac{1}{s_1 + s_2} \left(\sum_{r=1}^{s_1} \frac{s_r^g}{y_{r0}^g} + \sum_{k=1}^{s_2} \frac{s_k^b}{y_{k0}^b} \right)} \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} x_{i0} \geq \sum_{j=1, j \neq 0}^n \lambda_j x_{ij} - s_i^-, & i = 1, 2, \dots, m \\ y_{r0}^g \leq \sum_{j=1, j \neq 0}^n \lambda_j y_{rj}^g + s_r^g, & r = 1, 2, \dots, s_1 \\ y_{k0}^b \geq \sum_{j=1, j \neq 0}^n \lambda_j y_{kj}^b - s_k^b, & k = 1, 2, \dots, s_2 \\ \lambda_j > 0, & j = 1, 2, \dots, n, j \neq 0; \\ s_i^- \geq 0, & i = 1, 2, \dots, m \\ s_r^g \geq 0, s_r^g \leq y_{r0}^g, & r = 1, 2, \dots, s_1 \\ s_k^b \geq 0, & k = 1, 2, \dots, s_2 \end{cases} \quad (2)$$

表2 耕地利用生态效率的驱动因子

Tab. 2 Driving factors of ecological efficiency in cultivated land use

类别	变量名称	变量单位	定义与计算方法
自然	年降水量(X_1)	mm	年平均降水量
	高程(X_2)	m	-
	坡度(X_3)	(°)	-
社会	城镇化率(X_4)	%	城镇人口占总人口比例
	人口密度(X_5)	人·km ⁻²	人口数占区域面积比例
经济	农民人均可支配收入(X_6)	元	农村居民人均可支配收入
	第一产业占比(X_7)	%	第一产业占地区生产总值比例
政策	财政支农投入强度(X_8)	%	农林水支出占一般公共预算支出

ChinaXiv:202604.00331v1

式中: ρ 为耕地利用生态效率; m 为投入要素的种类; s_1 和 s_2 为期望产出和非期望产出的种类数; x_{i0} 为 DMU_0 的第 i 种投入量; y_{r0}^g 为 DMU_0 第 r 种期望产出; y_{k0}^b 为第 k 种期望产出的原始值; λ_j 为第 j 种 DMU 权重; s_i^- 为第 i 种投入要素的松弛变量; s_r^g 为第 r 种期望产出的松弛变量; s_k^b 为第 k 种非期望产出的松弛变量; n 为决策单元总数; x_{ij} 为第 j 个 DMU 的第 i 种投入; y_{rj}^g 为第 j 个 DMU 的第 r 种期望产出; y_{kj}^b 为第 j 个 DMU 的第 k 种期望产出。

(2) 全局莫兰指数和局部莫兰指数

为定量分析关中平原县域耕地利用生态效率的空间关联性,通过计算莫兰指数刻画研究对象的空间分布特征。其中,全局莫兰指数用于测度研究区域内空间要素的整体关联程度,其计算公式如下:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (y_i - \bar{y})(y_j - \bar{y})}{\left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} \right) \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (3)$$

式中: I 为全局莫兰指数值; n 为样本总数; w_{ij} 为基于 Rook 邻接准则构建的空间权重矩阵; y_i 为第 i 个县域的耕地利用生态效率值; y_j 为第 j 个县域的耕地利用生态效率; \bar{y} 为关中平原所有县域耕地利用生态效率的平均值。

局部莫兰指数用于识别区域单元与其邻近单元之间的空间关联模式,有效揭示研究区内部空间异质性特征。该指数计算公式如下:

$$I_i = \frac{y_i - \bar{y}}{\frac{1}{n} \sum_{j \neq i} (y_j - \bar{y})^2} \sum_{j \neq i} w_{ij} (y_j - \bar{y}) \quad (4)$$

式中: I_i 为第 i 个县域的局部莫兰指数值; n 为研究区域内县域单元的总数。

(3) 地理探测器

地理探测器是基于“空间分层异质性”原理的空间统计分析工具,其核心功能在于解析地理要素的空间分析特征及其驱动机制。其中,因子探测器模块通过计算 q 值来系统评估特定影响因子对目标变量空间分异性的解释程度,其计算公式如下:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST} \quad (5)$$

式中: q 为解释力,取值区间为 0~1^[24]; h 为基于影

响因子 X 对研究区域进行的分层编号; L 为影响因子的分类数量; N_h 和 N 分别为第 h 层子区域与整个研究区域的空间单元数量; σ_h^2 和 σ^2 分别为第 h 层子区域与全区域因变量 Y 的离散程度; SSW 为层内离差之和; SST 为总离差平方和。

2 结果与分析

2.1 静态特征分析

2.1.1 时序特征 基于 2013—2022 年关中平原 48 个县域耕地利用生态效率的年度均值分析(图 2),该区域耕地利用生态效率呈现先降后升的“U”型演变特征。2013—2017 年为持续下降阶段,效率值由 0.844 降至 0.701; 2017—2022 年进入逐步回升阶段,效率值恢复至 0.833,但 2022 年效率值仍较 2013 年低 1.3%,且所有年份效率值均小于 1。主要原因是,在效率下降期,农业集约化扩张、化肥农药过量施用以及土壤有机质下降等因素导致生态负荷持续加重;而在效率回升期,生态补偿政策实施、节水灌溉技术推广和有机农业面积扩大等绿色发展措施促使生态系统逐步修复。

2.1.2 空间特征 关中平原耕地利用生态效率的空间格局演化具有显著的时空异质性特征(图 3)。从整体空间演化特征来看,关中平原耕地利用生态效率以西安-咸阳为核心,呈现“中心高、外围低”的圈层式分布格局,空间差异则表现出先扩大后缩小的趋势。从局部空间演化特征来看: (1) 2013—2022 年耕地利用生态效率大于 1 的县域数量先减少再增大。(2) 2013—2022 年耕地利用生态效率大于 1 的县域则以咸阳和西安为中心从东部向西部迁移。具体而言,高陵区、扶风县等耕地利用生态效率发展水平一直处于大于 1 的水平,说明这些地区能够

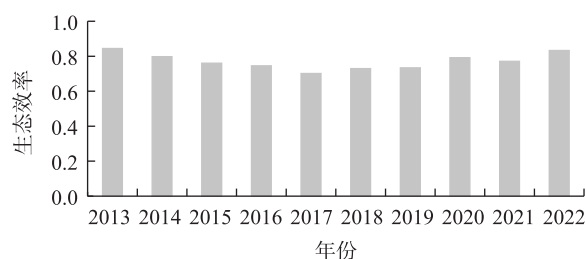


图2 耕地利用生态效率整体变化趋势

Fig. 2 Overall trend of ecological efficiency in cultivated land use

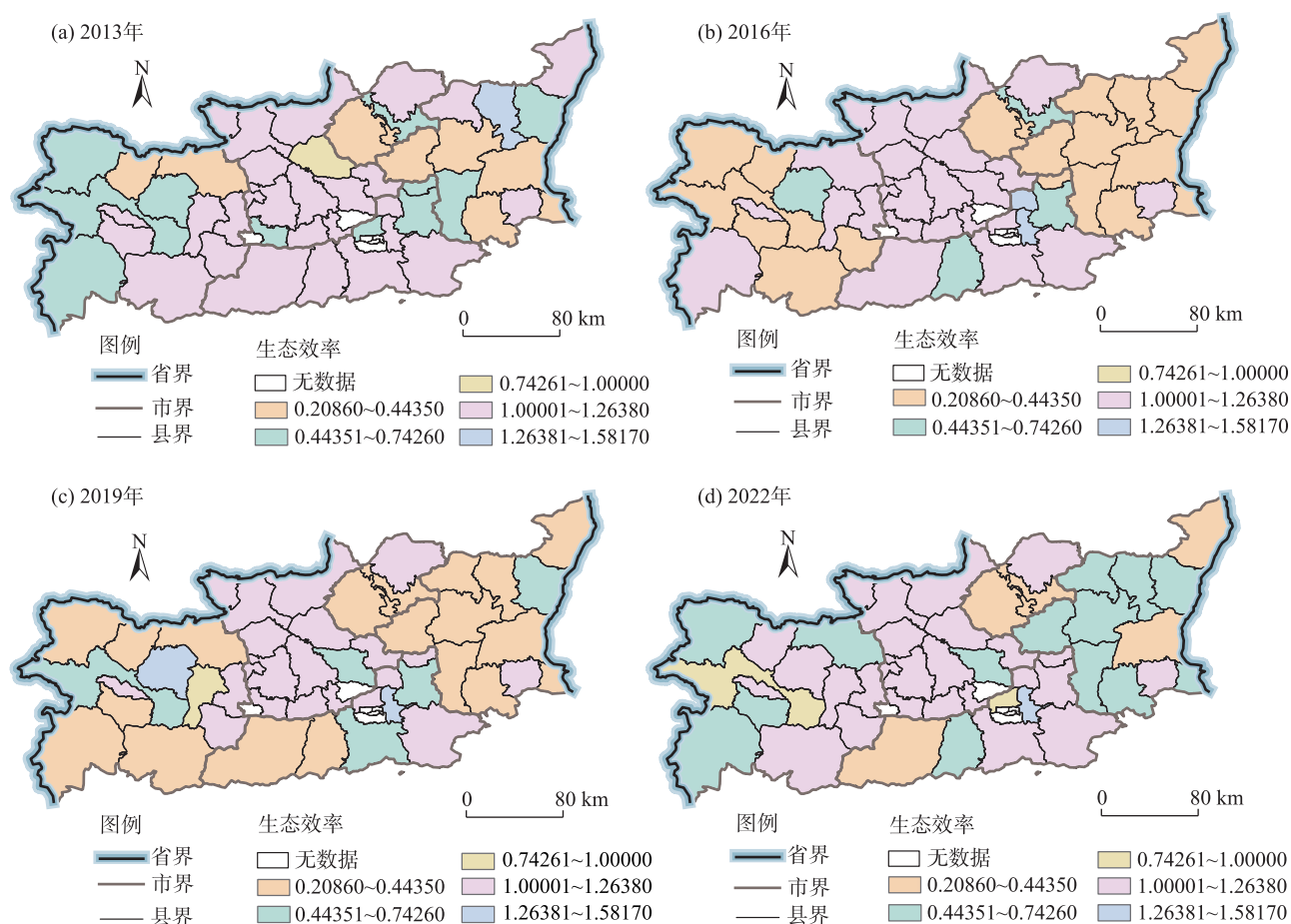


图3 耕地利用生态效率时空演化

Fig. 3 Spatio-temporal evolution of ecological efficiency in cultivated land use

以较少资源消耗和耕地污染实现较高产出。其中, 2013年耕地利用生态效率大于1的区域有27个, 主要集中于长安区、澄城县等地, 耕地利用生态效率较低的地区主要集中于渭南的大荔县、蒲城县等地; 2016年相较2013年耕地利用生态效率大于1的区域数量减少至25个, 但主要还是集中于灞桥区、永寿县等地, 同时还涉及到宝鸡凤县、扶风县等地, 耕地利用生态效率发展水平较低的地区则集中于渭南韩城市、合阳县等地和宝鸡太白县、岐山县等地; 2019年耕地利用生态效率大于1的区域减少至22个, 呈现出以咸阳市的三原县、淳化县等地为中心, 由东向西转移至宝鸡的凤翔区、陇县等地; 2022年生态效率大于1的县域增加至26个, 集中区域进一步向西转移, 耕地利用生态效率发展水平明显改善。依托区域生态本底优势, 通过技术创新和管理模式优化, 显著提升了耕地利用生态效率。特别是2016年实施的渭河流域生态补偿机制试点成效显

著: 既改善了宝鸡等重点区域生态环境, 又通过“污染者付费、保护者受益”的市场化机制, 为农业绿色转型提供了制度保障^[25-26], 为黄河流域农业高质量发展积累了经验。相比之下, 铜川因地处黄土高原丘陵沟壑区, 水土流失严重且长期依赖煤炭和粗放农业; 渭南东部地区面临的土地盐碱化、洪涝威胁以及高耗水农业和能源化工产生的化肥施用过量、面源污染严重等问题, 导致两地生态效率持续偏低。

2.2 空间相关性分析

2.2.1 全局莫兰指数 为揭示关中平原耕地利用生态效率空间关联特征的时序演变规律, 本研究基于空间邻接关系构建空间权重矩阵, 运用ArcGIS计算全局莫兰指数, 结果如表3所示。

2013—2022年全局莫兰指数均为正值(0.157~0.423), 除2013年通过10%显著性水平检验外, 其余年份均通过5%显著水平检验(表3)。具体而言,

研究区域呈现出稳定的空间集聚特征,即耕地利用生态效率较高的县域倾向于与高效率县域相邻,而低效率县域则倾向于与低效率县域相邻。这种正向空间依赖关系在研究期内保持相对稳定,说明区域内部存在持续的协同发展态势。

2.2.2 局部莫兰指数 基于空间邻近距离权重,利用 ArcGIS 软件,测算 2013、2016、2019 年和 2022 年的局部莫兰指数,绘制局部 LISA 集聚图(图4),以直观展示研究区域的时空分布格局及其演变特征。

研究结果表明,关中平原耕地利用生态效率具有显著的空间分异特征与动态演变趋势(图4)。高效率集聚区以乾县为核心形成“核心-外围”扩散模式,呈现“扩张-收缩”的周期性变化,而低效率集聚

区则稳定分布于东部蒲城县等区域,表现出较强的空间粘性。具体来看:2013年“高-高”集聚区为西安的鄠邑区,“高-低”集聚区也仅为渭南的潼关县,“低-高”集聚区零散分布于合阳县、武功县和未央区,“低-低”集聚区集中在王益区和富平县;2016年“高-高”集聚区集中于麟游县、彬州市、永寿县等13个县域,“高-低”集聚区零散分布于金台区、鄠邑区和华阴市,“低-低”集聚区主要集中在澄城县和蒲城县;2019年“高-高”集聚区分布在乾县、礼泉县、武功县等5个县域,“高-低”集聚区零散分布在宜君县和华阴市,“低-高”集聚区集中在麟游县、长安区、临潼区4个区域,“低-低”集聚区仅有渭南蒲城县;2022年“高-高”集聚区分布于蓝田县、临潼区、

表3 全局莫兰指数
Tab.3 Global Moran's index

统计结果	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年	2021年	2022年
Moran's I	0.157	0.423	0.368	0.401	0.348	0.194	0.185	0.294	0.217	0.233
z 得分	1.749	4.343	3.796	4.116	3.606	2.104	2.015	3.080	2.333	2.485
P 值	0.080	0.000	0.000	0.000	0.000	0.035	0.044	0.002	0.020	0.013

注: z 得分为标准偏差;P 值为显著性水平。

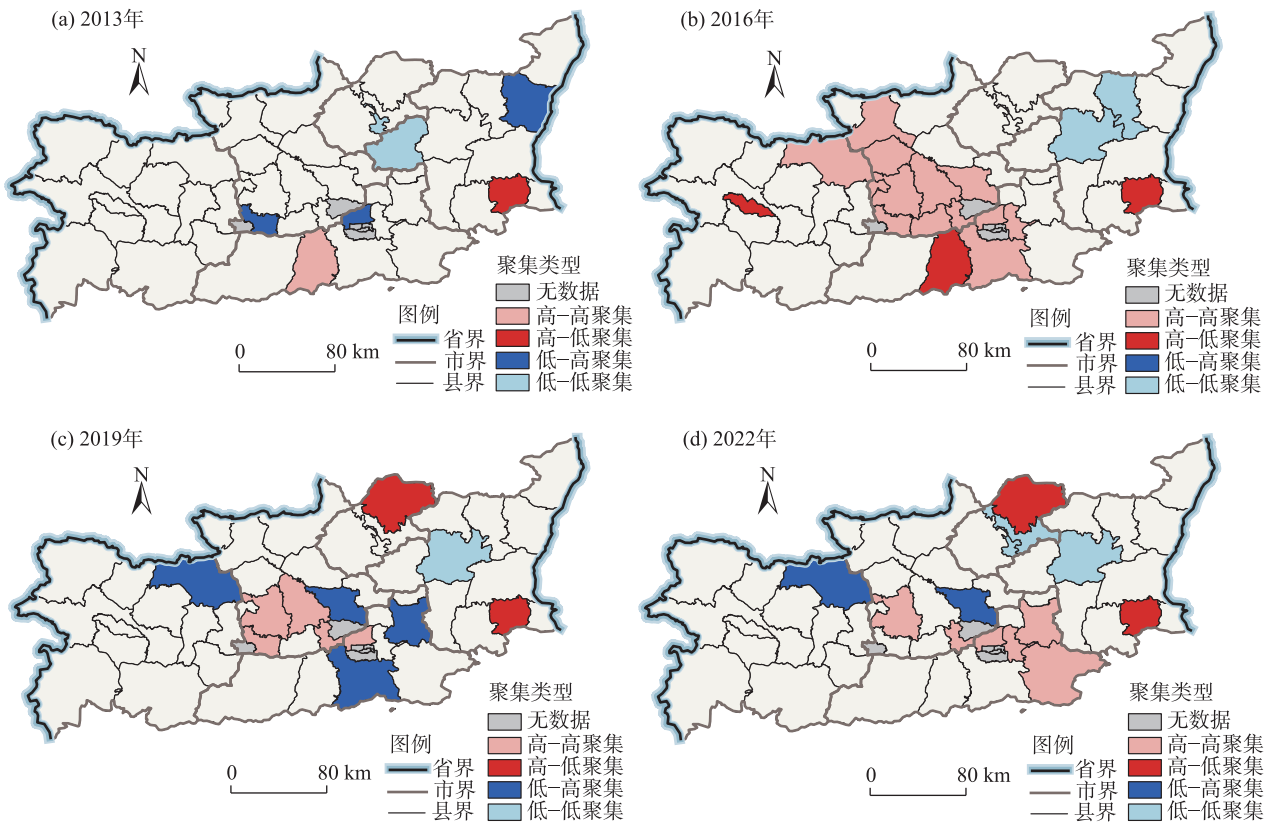


图4 关中平原耕地利用生态效率LISA 集聚

Fig. 4 LISA agglomeration of ecological efficiency of cultivated land use in the Guanzhong plain

灞桥区等6个区域,“高-低”集聚区分布于华阴市和宜君县,“低-高”集聚区主要分布于麟游县和泾阳县,“低-低”集聚区集中分布于蒲城县、印台区和王益区。整体来看,呈现出该空间格局是政策驱动、城镇化带动和技术溢出协同作用的结果:首先,生态文明建设中不断推广节水灌溉、有机种植等绿色生产技术,显著提升了核心区效率;其次,城乡要素流动促进了农业规模化经营和技术扩散,带动周边县域效率的显著提升;最后,农业科技创新成果的梯度扩散形成了效率提升的空间传导路径。

2.3 驱动机制分析

2.3.1 单因子探测 为了进一步探究关中平原耕地利用生态效率的影响因素,本研究基于地理探测器模型,从自然、社会、经济和政策4个维度构建指标体系,定量分析2013—2022年各驱动因子的作用强度及其变化趋势(表4)。结果显示,不同维度的驱动因子对耕地利用生态效率的解释力存在明显差异,且随时间推移呈现动态变化特征。

表4 驱动因子的解释力(q 值)

Tab. 4 The q -value of the driving factors

驱动因子	2013年		2022年	
	q 值	P 值	q 值	P 值
年降水量	0.412	0.000	0.267	0.000
高程	0.219	0.004	0.243	0.000
坡度	0.177	0.011	0.190	0.008
城镇化率	0.127	0.130	0.172	0.007
人口密度	0.109	0.219	0.096	0.886
农民人均可支配收入	0.104	0.582	0.169	0.046
第一产业占比	0.303	0.000	0.202	0.005
财政支农投入强度	0.157	0.024	0.143	0.082

自然因素方面,年降水量对耕地利用生态效率的解释力由0.412显著下降至0.267,表明其对生态效率的影响不断弱化。相比之下,高程和坡度的解释力分别从0.219升至0.243,0.177升至0.190,且均通过5%显著性检验。随着节水灌溉技术的普及和农田水利设施的完善,传统“雨养农业”对降水依赖程度明显降低。然而,地形因素作为不可改变的先天条件,其约束效应仍然显著,特别是随着水土流失等生态问题的加剧,高程和坡度对耕作方式和效率的制约作用更为凸显。

社会因素方面,城镇化率对耕地利用生态效率的解释力从0.127(2013年不显著)提升至0.172,而

人口密度的影响则从0.109微降至0.096(统计意义上不显著)。这表明快速城镇化率通过双重渠道影响耕地利用生态效率:一方面,城市扩张直接导致优质耕地资源流失;另一方面,农村劳动力外流改变了传统耕作模式,既可能因劳动力短缺降低精耕细作程度,也可能通过促进规模经营提升效率。

经济因素的作用呈现分化特征,农民人均可支配收入的解释力从0.104显著提升至0.169,而第一产业占比则从0.303下降至0.202。随着收入水平的提高,农户更有能力采用绿色生产技术,同时农业劳动力素质提升也促进了绿色生产理念的普及;而第一产业占比解释力的下降反映了经济结构转型,并未同步改善耕地利用方式。

政策因素方面,财政支农投入强度对耕地利用生态效率的解释力从0.157降至0.143,表明传统普惠式补贴的政策边际效益正在递减。这一现象与乡村振兴战略实施背景下农业生产方式的转型密切相关:当农业发展从追求产量转向注重质量效益和生态价值时,单纯增加资金投入若无配套的技术创新和制度变革,对生态效率的促进作用将被弱化。

综合分析,关中平原耕地利用生态效率的时空分异特征受多重因素的复合影响,且各驱动因子的作用强度呈现显著的时序演变特征。比较2013—2022年地理探测器结果发现:研究期内影响机制具有明显的路径依赖性,年降水量、高程、坡度与第一产业占比始终保持核心解释地位,共同构成影响耕地利用生态效率的基础性因素。然而,核心驱动因子的作用强度存在显著变化:自然因素中的地形因素约束效应持续强化,而气候因素的影响相对弱化;经济因素的解释力有所下降但仍维持着关键驱动地位。

2.3.2 交互探测 基于交互探测分析,进一步探究驱动因子交互作用对关中平原耕地利用生态效率的影响。研究表明,驱动机制具有双因子交互增强和非线性增强特征(图5)。各驱动因子的交互作用对效率的影响强度存在明显时空差异:2013年年降水量与第一产业占比的交互作用最具解释力($q=0.950$),表明气候条件通过调控农作物生长显著影响农业生产效率;2022年坡度与第一产业占比的交互作用跃居主导($q=0.925$),反映地形条件对现代农业发展的制约日益凸显。这种演变特征揭示了

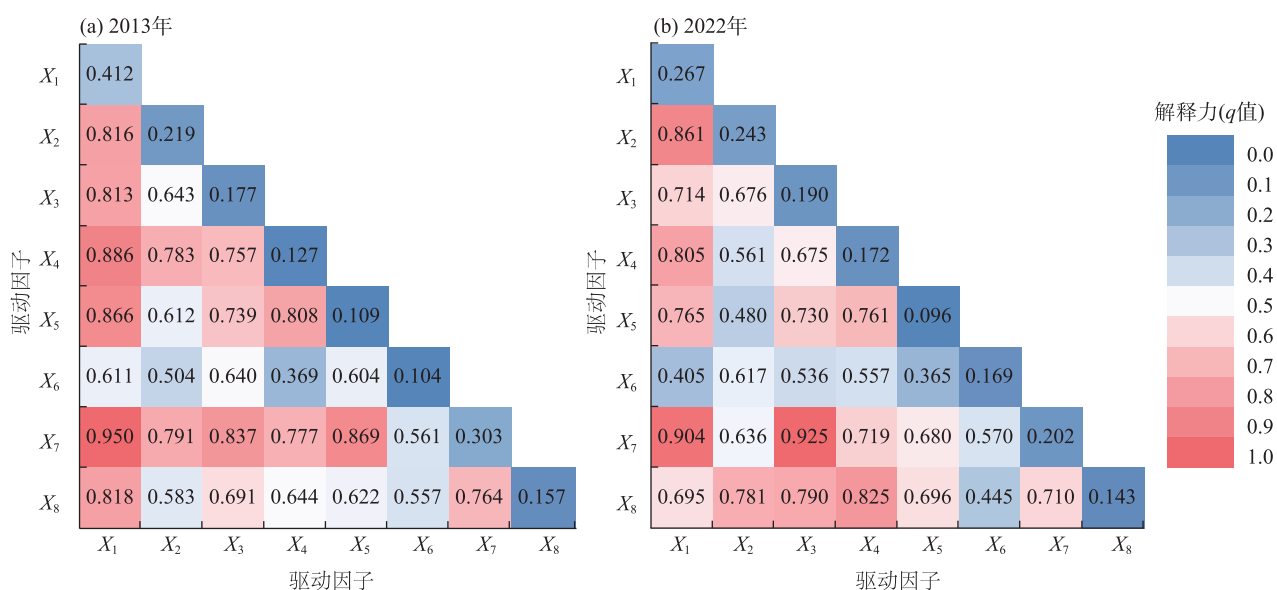


图5 交互作用因子探测分析

Fig. 5 Detection and analysis of interaction factors

耕地利用生态效率受自然-社会-经济要素协同作用的影响:一方面,降水等气候因子通过影响种植结构与作物产量形成基础性约束;另一方面,地形坡度等地理条件通过限制机械化程度和基础设施布局产生关键性制约。同时,各因子交互效应在效率梯度间呈现非线性变化,存在明显的阈值特征和边际效应递减规律。

3 讨论

基于关中平原耕地利用生态效率的时空演化特征及驱动因素分析,本文提出以下政策建议,以推动区域农业绿色转型与可持续发展:

第一,优化耕地资源管理,实施差异化生态补偿。针对铜川、渭南等生态脆弱区域,应加快推进水土保持工程、节水灌溉改造和土壤改良等项目,降低农业面源污染,提升资源利用效率。构建以耕地生态效率评估为核心的动态补偿机制,对采用绿色生产技术的农户给予差异化补贴,激励生态友好型耕作方式,提升耕地利用质量。

第二,强化农业科技创新与推广,推动高效率区域技术辐射。以西安、咸阳等高效率区为技术扩散核心,重点围绕节水灌溉、抗逆作物品种、低碳农机装备等关键领域,增强资源节约与环境友好水平。通过示范园区、农业合作社等载体,加强基层

农技推广体系建设,提高小农户对新技术的采纳率和应用能力,缩小区域间技术差距。

第三,推动农业规模化与集约化经营,优化产业结构。支持土地有序流转,发展家庭农场、农民合作社等规模经营主体,提升机械化与标准化水平,降低单位生产成本。在保障粮食安全的前提下,积极发展高附加值、低环境负荷的特色农业,减少对高耗水、高化肥作物的依赖,促进农业可持续发展。

第四,统筹城乡发展,缓解城镇化对耕地的压力。优化国土空间规划,遏制城镇无序扩张对优质耕地的侵占,确保农业用地数量稳定与质量提升。鼓励返乡创业,引导资本、技术和人才向农村回流,增强农业现代化发展动力。

第五,完善政策体系,强化制度保障。推动农业补贴由单一方式向“补贴+绩效考核”并重转变,优先支持绿色农业技术推广与生态修复类项目。构建耕地生态效率动态监测与评估平台,提升政策执行的精准性和有效性,保障各项治理措施落到实处。

关中平原耕地利用生态效率的提升,需要自然条件优化、技术进步、政策引导与制度创新的协同推进。未来应重点加强对低效率区域的系统治理,促进技术有效扩散,推进规模经营,健全生态补偿机制,以实现农业高质量发展与生态环境保护的协

同共赢。在自然条件约束难以根本改变的现实背景下,应依靠技术创新缓解地形等因素对效率的制约;针对城镇化带来的土地压力,应加快耕地流转市场建设,完善规模经营政策支持体系;经济激励政策应更多向绿色生产技术倾斜;财政支农政策也应从“重投入”逐步转向“重机制”,着力构建生态产品价值实现的长效制度体系。

4 结论

(1) 关中平原耕地利用生态效率呈现“U”型波动上升趋势,2017年达到谷底后逐步回升,但2022年仍未恢复至最优水平。空间分布上形成“中部高、西部次之、东部低”的格局特征,其中西安、咸阳等核心区保持高效态势,铜川、渭南等地则持续低效,高效率区域呈现以咸阳-西安为双核的向西扩散趋势。

(2) 耕地利用生态效率具有显著的正向空间依赖性。关中平原耕地利用生态效率存在高效率区与低效率区的空间集聚态势,其中高效率集区以乾县为核心形成向南扩展的辐射带,低效率集区在蒲城县等地呈现空间粘性,表现出“高-高协同提升,低-低锁定”的路径依赖特征。

(3) 自然、社会、经济与政策因素共同构建了耕地利用生态效率的空间差异格局,且各驱动因子的影响强度在时间维度上呈现出动态演变趋势。具体而言,年降水量、第一产业占比以及财政支农投入强度对生态效率的正向影响逐年减弱;而高程、坡度、城镇化率和农民人均可支配收入的促进作用则日益增强。其中,年降水量、高程、坡度与第一产业占比是影响耕地利用生态效率的关键因子;关中平原耕地利用生态效率的驱动机制呈现双因子交互增强和非线性增强特征,其中年降水量和坡度与第一产业占比的交互作用最具解释力。

(4) 关中平原耕地利用生态效率的提升,需统筹协调自然条件优化、技术创新与制度保障。建立差异化生态补偿机制,促进农业规模化集约化经营,强化国土空间规划管控,同时完善政策支持体系,推动农业高质量发展与生态环境保护协同发展。

参考文献(References)

[1] 杨人懿, 杨子生, 钟昌标, 等. 中国耕地-粮食丰裕度与居民收

入的关系研究[J]. 自然资源学报, 2024, 39(11): 2619-2638. [Yang Renyi, Yang Zisheng, Zhong Changbiao, et al. Study on the relationship between farmland & grain abundance and households' income in China[J]. Journal of Natural Resources, 2024, 39(11): 2619-2638.]

[2] 余森, 马恩朴, 季艺雯, 等. 中国北方典型样带耕地多功能时空演变及其区际耦合[J]. 自然资源学报, 2025, 40(2): 514-533. [Yu Sen, Ma Enpu, Ji Yiwen, et al. Multifunctional spatiotemporal evolution and its inter-regional coupling of cultivated land in a typical transect in northern China[J]. Journal of Natural Resources, 2025, 40(2): 514-533.]

[3] 新华社. 中共中央国务院关于进一步深化农村改革扎实推进乡村全面振兴的意见[EB/OL]. [2025-01-01]. https://m.cyol.com/gb/articles/2025-02/23/content_99a97xfa3M.html. [Xinhua News Agency. Opinions of the CPC central committee and the state council on further deepening rural reform and solidly advancing the comprehensive revitalization of rural areas[EB/OL]. [2025-01-01]. https://m.cyol.com/gb/articles/2025-02/23/content_99a97xfa3M.html.]

[4] 求是网. 习近平主持召开中央全面深化改革委员会第十九次会议[EB/OL]. [2021-05-21]. http://www.qstheory.cn/yaowen/2021-05/21/c_1127476538.htm. [Qishi. Xi Jinping chaired the 19th meeting of the commission for deepening overall reform of the CPC central committee[EB/OL]. [2021-05-21]. http://www.qstheory.cn/yaowen/2021-05/21/c_1127476538.htm.]

[5] 自然资源部. 2017 中国土地矿产海洋资源统计公报[EB/OL]. [2018-05-18]. https://gi.mnr.gov.cn/201805/t20180518_1776792.html. [Ministry of Natural Resources. Statistical bulletin of China's land, mineral and marine resources in 2017[EB/OL]. [2018-05-18]. https://gi.mnr.gov.cn/201805/t20180518_1776792.html.]

[6] 王博杰, 何思源, 闵庆文, 等. 守望农耕文明: 农户对传统农业系统的价值认知如何影响其传承意愿[J]. 中国农村经济, 2024 (11): 125-146. [Wang Bojie, He Siyuan, Min Qingwen, et al. Guarding the agricultural civilization: How does rural households' value perceptions of traditional agricultural systems affect their willingness to inherit?[J]. Chinese Rural Economy, 2024(11): 125-146.]

[7] 孙儒泳. 生态学简介(六)[J]. 生物学通报, 1982(1): 25-29. [Sun Ruyong. Introduction to ecology (VI)[J]. Bulletin of Biology, 1982 (1): 25-29.]

[8] Schaltegger S, Sturm A. Environmental rationality[J]. Die Unternehmung, 2001, 2(3): 288-289.

[9] WBCSD. Eco-efficiency learning module[EB/OL]. [2006-08-24]. <https://docs.wbcsd.org/2006/08/EfficiencyLearningModule.pdf>.

[10] Keating B A, Carberry P S, Bindraban P S, et al. Eco-efficient agriculture: Concepts, challenges, and opportunities[J]. Crop Science, 2010, 50(2): 109-119.

[11] 陈杰, 许朗. 基于面板三阶段 DEA-Malmquist 模型的中国农业绿色水资源利用效率研究[J]. 地理科学, 2023, 43(4): 709-718. [Chen Jie, Xu Lang. Utilization efficiency of Chinese agricultural

green water resources based on panel three-stage DEA-Malmquist model[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2023, 43(4): 709–718.]

- [12] 徐维祥, 徐志雄, 刘程军. 基于随机前沿分析的环境规制效率异质性研究[J]. *地理科学*, 2021, 41(11): 1959–1968. [Xu Weixiang, Xu Zhixiong, Liu Chengjun. Heterogeneity analysis of environmental regulation efficiency based on SFA[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2021, 41(11): 1959–1968.]
- [13] 肖琴, 罗其友, 周振亚, 等. 中国农业绿色生产效率的动态变迁与空间分异——基于DDF-Global Malmquist-Luenberger指数方法的分析[J]. *农林经济管理学报*, 2020, 19(5): 537–547. [Xiao Qin, Luo Qiyu, Zhou Zhenya, et al. Dynamic evolution and spatial differentiation of agricultural green production efficiency in China: An analysis based on DDF-Global Malmquist-Luenberger index[J]. *Journal of Agro-Forestry Economics and Management*, 2020, 19(5): 537–547.]
- [14] 武音茜. 贵州省经济发展中的能源利用效率与节能减排绩效研究——基于非径向DEA方法RAM模型[J]. *西南民族大学学报(人文社会科学版)*, 2014, 35(9): 109–113. [Wu Yinqian. Energy utilization efficiency and emission reduction performance in Guizhou's economic development: A non-radial DEA-RAM model approach[J]. *Journal of Southwest Minzu University (Humanities and Social Sciences Edition)*, 2014, 35(9): 109–113.]
- [15] 成刚. 数据包络分析方法与MaxDEA软件[M]. 北京: 知识产权出版社, 2014: 151–171. [Cheng Gang. Data envelopment analysis: methods and MaxDEA software[M]. Beijing: Intellectual Property Publishing House, 2014: 151–171.]
- [16] 程娟娟, 王倩, 余劲, 等. 基于LCA和SBM模型的苹果生产环境效率评价[J]. *干旱区资源与环境*, 2022, 36(3): 36–43. [Cheng Juanjuan, Wang Qian, Yu Jin, et al. Evaluation of environmental efficiency of apple production based on LCA and SBM models[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2022, 36(3): 36–43.]
- [17] 向慧, 彭保发, 伍铁牛, 等. 湖南武陵民族地区种植业生态效率的时空分异及驱动机理研究[J]. *地理科学*, 2025, 45(2): 349–363. [Xiang Hui, Peng Baofa, Wu Tieniu, et al. Spatio-temporal pattern and driving mechanism of agricultural ecological efficiency for planting industry in the Wuling ethnic area of Hunan[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2025, 45(2): 349–363.]
- [18] 朱红波, 丁未来, 周瑞彤. 长江经济带耕地利用生态效率评价与空间格局分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2025, 34(1): 87–99. [Zhu Hongbo, Ding Weilai, Zhou Ruitong. Evaluation of ecological efficiency and spatial pattern analysis of cultivated land utilization in the Yangtze River Economic Zone[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2025, 34(1): 87–99.]
- [19] 吴海霞, 郝含涛, 葛岩. 粮食主产区政策对农业环境全要素生产率的效应评估[J]. *资源科学*, 2022, 44(2): 334–349. [Wu Haixia, Hao Hantao, Ge Yan. Effect evaluation of the main grain producing area policy on agricultural environmental total factor productivity[J]. *Resources Science*, 2022, 44(2): 334–349.]
- [20] 马林燕, 张仁慧, 潘子纯, 等. 中国省际耕地利用生态效率时空格局演变及影响因素分析——基于2000—2019年面板数据[J]. *中国土地科学*, 2022, 36(3): 74–85. [Ma Linyan, Zhang Renhui, Pan Zichun, et al. Analysis of the evolution and influencing factors of temporal and spatial pattern of eco-efficiency of cultivated land use among provinces in China: Based on panel data from 2000 to 2019[J]. *China Land Science*, 2022, 36(3): 74–85.]
- [21] 朱文娟, 孙华. 江苏省县域耕地利用生态效率时空动态性及驱动机制[J]. *长江流域资源与环境*, 2024, 33(4): 784–798. [Zhu Wenjuan, Sun Hua. Spatio-temporal dynamics and driving mechanism of cultivated land use eco-efficiency at county scale in Jiangsu Province[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2024, 33(4): 784–798.]
- [22] 王建兴. 陕西省粮食生产变化及原因分析[J]. *新西部(理论版)*, 2015(23): 26–27. [Wang Jianxing. Analysis of grain production changes and driving factors in Shaanxi Province[J]. *New West*, 2015(23): 26–27.]
- [23] 崔许锋, 王雨菲, 张光宏. 面向低碳发展的农业生态效率测度与时空演变分析——基于SBM-ESDA模型[J]. *农业经济问题*, 2022(9): 47–61. [Cui Xufeng, Wang Yufei, Zhang Guanghong. Low-carbon oriented measurement and spatiotemporal evolution of agricultural eco-efficiency in China: Based on SBM-ESDA model[J]. *Issues in Agricultural Economy*, 2022(9): 47–61.]
- [24] 李松芮, 林秋平, 杨上广. 新疆物流企业空间布局多尺度演化特征及影响因素研究[J]. *干旱区地理*, 2025, 48(4): 739–752. [Li Songrui, Liu Qiuping, Yang Shangguang. Multi-scale evolution characteristics and influencing factors of spatial layout of logistics enterprises in Xinjiang[J]. *Arid Land Geography*, 2025, 48(4): 739–752.]
- [25] 侯彩霞, 张宇宙, 杨建平. 关中平原城市群水资源-社会-生态系统耦合协调及障碍因子分析[J]. *干旱区地理*, 2025, 48(4): 717–727. [Hou Caixia, Zhang Yuzhou, Yang Jianping. Coupling coordination and obstacle factors of water-society-ecosystem in the Guanzhong Plain urban agglomeration[J]. *Arid Land Geography*, 2025, 48(4): 717–727.]
- [26] 张婕, 孙洁, 朱明明. 渭河流域生态补偿政策效果评估研究[J]. *资源与产业*, 2022, 24(2): 64–75. [Zhang Jie, Sun Jie, Zhu Mingming. Policy effects evaluation of ecological compensation of Wei River stream[J]. *Resources & Industries*, 2022, 24(2): 64–75.]

Spatiotemporal evolution and driving factors of ecological efficiency in cultivated land use in the Guanzhong Plain

JIA Yajuan¹, GAO Jun¹, ZHANG Xinqi²

(1. School of Management, Xi'an University of Finance and Economics, Xi'an 710100, Shaanxi, China;

2. International Business School, Hainan University, Haikou 570228, Hainan, China)

Abstract: As a key grain-producing region in western China, the Guanzhong Plain requires a critical balance between preserving the nation's food security and sustainable land use. This study employed county-level panel data from 2013 to 2022 to evaluate the ecological efficiency of cultivated land use using the Super-SBM model incorporating undesirable outputs. Spatial autocorrelation analysis and the Geodetector method were applied to systematically investigate the spatiotemporal evolution of ecological efficiency and its underlying driving mechanisms. The results reveal a distinct "U-shaped" temporal trajectory in ecological efficiency, accompanied by a spatial gradient pattern characterized by higher efficiency in the central region, followed by the west. Meanwhile, the east saw lower efficiency. High-efficiency clusters were primarily concentrated in Xi'an and Xianyang and exhibited a trend of westward diffusion. Meanwhile, Tongchuan and Weinan remained in persistently low-efficiency states. Significant spatial agglomeration was also observed, with high-efficiency clusters expanding southward from Qian County and low-efficiency clusters consistently located in the eastern plain. This spatial heterogeneity of ecological efficiency has been shaped by a synergistic interplay of natural, socioeconomic, and policy-related factors. The influence of variables like annual precipitation and elevation demonstrated dynamic temporal variability, while the positive effects of urbanization rate and per capita disposable income of rural residents revealed a sustained upward trend. The interactions among these multidimensional factors yielded pronounced reinforcing effects on ecological efficiency.

Keywords: Guanzhong Plain; cultivated land use; ecological efficiency; Super-SBM model; geographic detector