

鹿晨昱,段庄慧,张劲松,等.黄河流域甘肃段农业绿色发展效率综合测度及影响因素[J].中国沙漠,2026,46(4):147-159.

黄河流域甘肃段农业绿色发展效率 综合测度及影响因素

鹿晨昱,段庄慧,张劲松,赵文婧

(兰州交通大学 建筑与城市规划学院,甘肃 兰州 730070)

摘要:在全球气候变化与资源约束下,推动农业绿色发展是保障粮食与生态安全的关键。针对黄河流域生态脆弱、水资源紧缺的挑战,本研究以黄河流域甘肃段57个县级行政区为对象,基于2005—2024年面板数据,运用Super-SBM模型、空间计量分析及最优参数地理探测器模型,探究农业绿色发展效率的时空演变特征与影响因素。结果表明:(1)时空演变方面,黄河流域甘肃段农业绿色发展效率整体呈上升趋势,且区域差异显著,高效率值集中在研究区中部和东部地区,低效率值则集中在西部和西北部地区;(2)空间格局方面,农业绿色发展效率存在显著的空间正相关性,呈现明显的集聚态势,2015年以后次热点区和热点区占据区域主导地位,次冷点区大幅缩小,区域内部分布差异逐步收敛;(3)影响因素方面,农民人均可支配收入是农业绿色发展效率的主要影响因素,且各影响因子间表现出双因子增强或非线性增强关系,其中经济与社会因素间的协同增效较为显著。本研究可为推动黄河流域高质量发展提供理论支撑和决策依据。

关键词:黄河流域甘肃段;农业绿色发展;空间计量分析;时空演变;影响因素

文章编号:1000-694X(2026)04-147-13

DOI:10.7522/j.issn.1000-694X.2026.00030

中图分类号:F205

文献标志码:A

0 引言

联合国《2030年可持续发展议程》为全球可持续发展领域提供了总体框架^[1],明确将农业可持续发展纳入人类发展、地球保护与全球繁荣的核心议题。中共中央、国务院印发的《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》明确将农业绿色发展纳入全流域发展布局,提出了强化农业面源污染治理、提升绿色科技创新支撑力和开展绿色循环农业试点等一系列举措^[2-3]。黄河流域甘肃段面临人均水资源占有量和耕地亩均占有量低、流域内水土流失严重和生态脆弱等问题,成为制约区域高质量发展的关键症结^[4-5]。甘肃段作为黄河上游核心水资源涵养区与生态安全屏障,是黄河流域农业绿色发展的重要节点,其农业绿色转型是落实黄河流域生态保护和高质量发展战略的核心抓手与关键路径^[6]。基于此,推进黄河流域甘肃段农业绿色发展,破解

区域农业资源瓶颈,提升农业绿色发展效率已成为统筹黄河上游生态保护与高质量发展的关键议题。

随着可持续发展战略与“双碳”目标的不断推进,国内外学者对农业绿色发展效率及其影响因素方面的研究也进行了积极探索与尝试,研究脉络呈现出从基础框架到前沿拓展的演进特征。(1)在空间尺度方面,研究多聚焦于国家^[7]、省域^[8]、流域^[9]以及跨区域^[10]等宏观层面,重点分析资源约束、生态保护政策^[11-12]对农业绿色发展效率的空间影响,用以揭示区域农业绿色转型的空间分异规律与政策适配性。(2)在指标体系构建方面,早期研究多聚焦于土地、劳动力等传统生产要素,指标体系单一且难以准确反映农业绿色发展的资源约束特征^[13-14]。随着研究逐渐深入,指标构建形成了生产要素、资源要素、环境要素结合的多维复合体系。在投入指标方面,研究在传统要素基础上,围绕效率测度考虑资源^[15]、能源^[16]以及环境^[17]方面的投入指标,将

收稿日期:2026-02-09; 改回日期:2026-03-02

资助项目:国家自然科学基金项目(42061054)

作者简介:鹿晨昱(1981—),男,甘肃兰州人,博士,副教授,博士生导师,主要从事人地关系与区域可持续发展研究。

E-mail: lcy19810507@163.com

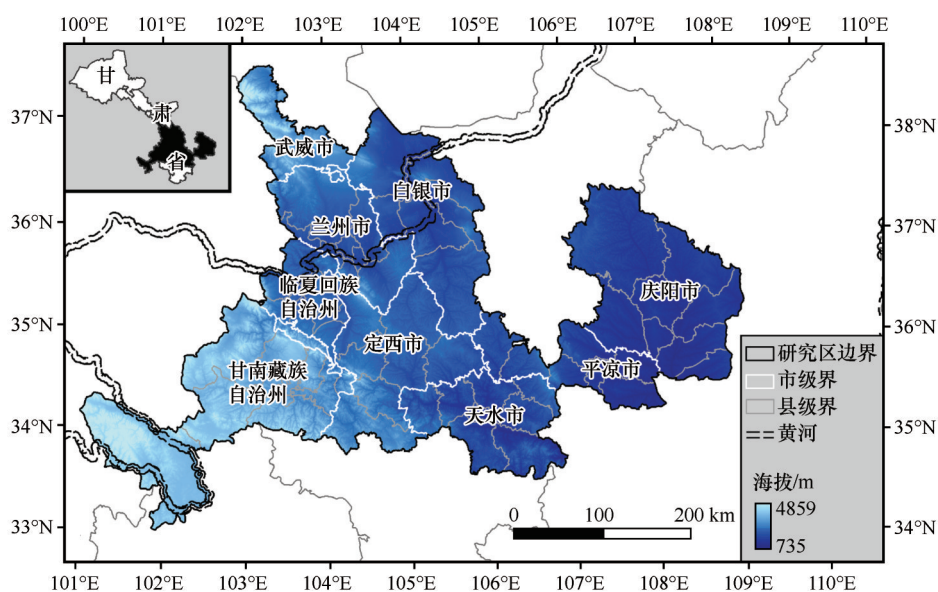
能源消耗量、畜禽养殖污染物产生量、碳排放相关投入要素等纳入综合指标体系,完善了低碳导向的投入指标框架。在产出指标方面,已有研究仅侧重农业产量与产值等直接要素在指标体系中的影响,而忽略农业面源污染、碳排放及碳汇量等指标的重要性^[18]。“双碳”目标提出后,农业全生命周期碳排放与农作物碳汇量等被广泛纳入,形成面源污染+碳收支的量化体系^[19]。(3)在效率测度方法方面,涵盖数据包络分析法(DEA)^[20]、随机前沿分析法(SFA)^[21]等主流技术,其中数据包络分析法因适配多投入多产出及非期望产出的测度需求,成为当前应用最广泛的核心方法^[22]。从早期基础阶段的DEA模型,到改进阶段的非径向、非角度SBM模型^[23],再到为区分有效决策单元效率差异而拓展的Super-SBM模型^[24],逐步实现了对资源环境约束下农业绿色发展效率的精准研究。(4)在影响因素解析方面,以往研究通常以经济水平、自然灾害和社会特征作为农业绿色发展效率的主要影响因素^[25-26],随着研究不断深入以及“双碳”目标的落地,政策因素与生产技术^[27]成为了研究热点,研究也转向了多维度、深层次的机制解构;研究方法选择上主要采用面板回归与空间计量模型^[28],包括Tobit回归^[29]、固定效应模型^[30]、空间杜宾模型^[31]等,通过控制个体异质性与空间相关性,揭示多因素交互作用下农业绿色发展效率的演化机制。

相关研究已取得大量成果,但仍然存在一些不

足之处。首先,在研究区域与尺度方面,尽管农业绿色发展效率研究已广泛开展,但聚焦于黄河流域,特别是其上游生态脆弱与过渡地带的研究仍显不足,且现有研究多聚焦于省市域尺度,对于县域等小尺度区域研究较为缺乏;其次,在研究视角与手段方面,现有研究多采用传统DEA模型测度农业绿色发展效率,无法处理非期望产出与投入松弛,即无法对效率值为1的有效决策单元进行进一步排序与区分;此外,现有研究多采用面板回归方法分析农业绿色发展效率的影响因素,虽能检验单因素的时序边际效应,但普遍忽视了因素间的交互关系,无法精准识别复合驱动机制。本研究以黄河流域甘肃段57个县级行政区为研究区域,构建农业绿色发展效率评价指标体系,采用Super-SBM模型、空间计量模型以及核密度方法,开展农业绿色发展效率测度及其时空演变分析,在此基础上使用最优参数地理探测器模型解析其影响因素。研究结果为推动黄河流域高质量发展提供理论支撑和决策依据。

1 研究区概况

本文选取黄河流域甘肃段作为研究区域(图1)。黄河在甘肃省两进两出,流经甘南藏族自治州、临夏回族自治州、兰州市和白银市。黄河流域甘肃段地处黄河上游,位于青藏高原-黄土高原、半湿润-半干旱地理和气候过渡带,全域覆盖甘肃



注:基于自然资源部标准地图服务网站审图号GS(2024)0650号标准地图制作,底图边界无修改。

图1 研究区域

Fig.1 Overview map of the study area

省兰州市、白银市、天水市、庆阳市等9个市州、57个县级行政区,流域面积约 $1.5\times 10^5\text{ km}^2$,占黄河流域总面积的近20%,是甘肃省农业生产的核心承载区。过渡性的自然地理条件深刻塑造了其独特的旱作农业与灌溉农业结合的生产格局。黄河流域甘肃段可划分为黄河上游水源涵养区、中部黄土丘陵沟壑区及陇中引黄灌区3个典型水文空间分区。各分区在水资源禀赋、土地利用及农业生产模式上差异明显,构成了农业绿色发展效率空间分异的自然地理基础。黄河流域甘肃段农业发展长期面临严峻的资源环境约束与绿色转型压力。作为典型的生态脆弱区与水资源紧缺区,农业发展呈现出旱作主导、资源趋紧、污染集中的显著特征。

2 数据与方法

2.1 数据来源与处理

2.1.1 数据来源

数据来源于历年的《甘肃年鉴》《甘肃农村年鉴》《甘肃省水资源公报》《甘肃省国民经济和社会发展统计公报》,以及各市、县、区的统计年鉴、国民经济和社会发展统计公报、政府依法公开的预算和决算报告、县区志等。

2.1.2 指标体系构建

结合黄河流域甘肃段旱作农业主导、资源约束趋紧、农业污染集中的农业发展特征,并遵循科学性、可持续性、与区域适配性原则^[32-33],基于投入产出的农业绿色发展效率分析框架,在综合考虑碳排放与碳吸收影响的基础上,构建黄河流域甘肃段农业绿色发展效率评价指标体系(表1)。其中,产出指标中农业碳汇量,通过农作物产量、经济系数、根冠比、碳吸收率、含水率来测算^[34];农业碳排放总量^[35]通过生产活动中的化肥折纯量、农膜使用量、有效灌溉面积、农作物播种面积以及农业机械总动力各类数据的碳排放系数进行测算;此外,参考第一次农业污染普查公布的农业面源系数,以化肥流失量和农膜残留量作为农业面源污染程度的表征指标^[36]。

2.1.3 影响因素选取

在影响因素选取方面,本文参考前人的研究成果^[37-39],结合黄河流域甘肃段区域特征及农业绿色发展的具体现状,按照科学性、客观性、可操作性原

表1 农业绿色发展效率评价指标体系
Table 1 Indicator system for evaluating the efficiency of agricultural green development

一级指标	二级指标	基础指标	计量单位
投入指标	化肥投入	化肥折纯量	t
	农膜投入	农膜使用量	t
	机械投入	农业机械总动力	W
	资源投入	农业用水量	m ³
		农作物播种面积	hm ²
	劳动力投入	农业从业人数	万人
产出指标	期望产出	农业总产值	万元
		农业碳汇量	t
	非期望产出	农业碳排放总量	t
		农业面源污染	t

则,考虑数据的可获取性,从经济要素、生产要素、生产方式、生产规模、科技投入和环境保护等多个方面着手,选取农业绿色发展效率的影响因素(表2)。

2.2 研究方法

2.2.1 Super-SBM模型

设有 n 个决策单元, $DMU_j(j=1,2,\cdots,n)$,投入为 $x_j=(x_{1j},x_{2j},\cdots,x_{mj})^T$,期望产出为 $y_j^g=(y_{1j}^g,y_{2j}^g,\cdots,y_{s1j}^g)^T$,非期望产出为 $y_j^b=(y_{1j}^b,y_{2j}^b,\cdots,y_{s2j}^b)^T$; m , $S1$ 和 $S2$ 分别为投入、期望产出和非期望产出指标数目^[40]。

$$\min \rho = \frac{1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{S_i^-}{e_{i0}}}{1 + \frac{1}{S_1 + S_2} \left(\sum_{r=1}^{S_1} \frac{S_r^+}{y_{r0}^g} + \sum_{k=1}^{S_2} \frac{S_k^-}{y_{k0}^b} \right)}$$

$$s.t. \begin{cases} \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} + S_i^- = x_{i0} \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj}^g + S_r^+ = y_{r0}^g \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j y_{kj}^b + S_k^- = y_{k0}^b \\ \lambda_j \geq 0, S_i^- \geq 0, S_r^+ \geq 0, S_k^- \geq 0 \\ j = 1, 2, \cdots, n; i = 1, 2, \cdots, m \\ r = 1, 2, \cdots, S1; k = 1, 2, \cdots, S2 \end{cases} \tag{1}$$

式中： ρ 是效率值； S_i^- 、 S_r^+ 、 S_k^- 分别表示投入、期望与非期望产出的松弛变量； λ_j 是权重向量。

表2 农业绿色发展效率影响因素指标体系

Table 2 Indicator system for influencing factors of the agricultural green development efficiency

代码	影响因素	指标描述
Y	农业绿色发展效率	绿色发展效率指数
X_1	农民人均可支配收入(元)	农村居民经济收入水平
X_2	农业机械化率($W \cdot \text{hm}^{-2}$)	农业机械总动力/农作物播种面积
X_3	农业生产结构(%)	农业产值/农林牧渔业总产值
X_4	城镇化水平(%)	城镇人口占总人口的比重
X_5	财政支农水平(%)	农林水事务支出/地方财政支出
X_6	土地规模化经营水平($\text{hm}^2 \cdot \text{人}^{-1}$)	农作物播种面积/农业从业人员数
X_7	有效灌溉水平(%)	有效灌溉面积/农作物播种面积
X_8	农村教育水平(%)	农村人口中高中及以上文化水平人数占比
X_9	科研经费投入(%)	农业科研经费支出/地区生产总值
X_{10}	环境保护投入(%)	环境保护支出占财政支出比重

2.2.2 空间计量分析

(1) 全局空间自相关(Global Moran's I)

莫兰指数用于评估全局空间集聚程度,取值为 $[-1, 1]$ ^[41]:

$$\text{Moran's } I = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}} \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

式中: w_{ij} 为空间权重矩阵,用以度量区域 i 与区域 j 之间的空间距离。

(2) 冷热点分析(Getis-Ord G_i^*)

Getis-Ord G_i^* 指数用于局部空间相关性分析,可以识别不同空间单元的集聚情况,反映空间依赖性和异质性^[42]:

$$G_i^*(d) = \frac{\sum \lambda_{ij} X_j}{\sum X_j} \quad (3)$$

式中: X_j 为空间单元 j 的效率值; d 为临界距离; λ_{ij} 为空间权重。对于 $G_i^*(d)$ 需进行 Z 检验, Z 显著为正,表示该空间单元是 high 集聚区,属于热点区,反之聚类值低,为冷点区。

2.2.3 核密度估计

通过将每个观测数据点周围的核函数加权平均来计算在每个点处的估计概率密度,描述观测数据的分布情况^[42]。随机变量在 x 的概率密度估计公式为:

$$f(x) = \frac{1}{Nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x_i - x}{h}\right) \quad (4)$$

式中: N 为样本总量; K 为随机核函数; h 为带宽,带

宽越大,密度估计越平滑,偏差越大。

2.2.4 最优参数地理探测器模型

基于R语言中Geographical Detector包的因子探测器与交互作用探测器量化分析各因子对农业绿色发展效率时空演变的影响机制。因子探测器通过计算 q 值,衡量各因子对农业绿色发展效率空间分异的独立解释力;交互作用探测器则评估多因子间的协同效应(表3),用于识别不同因素之间的交互作用对农业绿色发展效率的影响力,揭示其如何共同影响农业绿色发展效率的时空变化^[43]:

$$q = \left(N\sigma^2 - \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2 \right) / N\sigma^2 \quad (5)$$

式中: q 值在0到1之间, q 值越高表示该因子的解释力越强; L 为第 h 类影响因素的分类个数; N_h 和 N 分别为第 h 类影响因素和农业绿色发展效率密度值的单元数; σ_h^2 和 σ^2 分别为第 h 类影响因素和农业绿色发展效率密度值的方差。

表3 交互探测作用的类型

Table 3 Types of interactive detection effects

判断依据	交互作用
$q(X_1 \cap X_2) < \min(q(X_1), q(X_2))$	非线性减弱
$\min(q(X_1), q(X_2)) < q(X_1 \cap X_2) < \max(q(X_1), q(X_2))$	单因子非线性减弱
$q(X_1 \cap X_2) > \max(q(X_1), q(X_2))$	双因子增强
$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$	独立
$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$	非线性增强

3 结果与分析

3.1 农业绿色发展效率时空演变特征

3.1.1 时序演变

2005—2024年黄河流域甘肃段农业绿色发展效率均值由 0.414 提升至 0.629, 累计增幅 51.93%, 整体呈稳步上升趋势, 演变过程可分为 3 个阶段(表 4): 2005—2015 年为缓步提升期, 效率值增至 0.507, 年均增速约 2.05%; 2015—2020 年为增速放缓期, 效率值增至 0.556, 年均增速降至 1.86%; 2020—2024 年为加速增长期, 效率值跃升至 0.629, 年均增速提高至 3.13%。

表 4 农业绿色发展效率结果
Table 4 Results of agricultural green development efficiency

县级行政区	2005 年	2010 年	2015 年	2020 年	2024 年	均值
定西市安定区	0.768	0.834	0.818	0.741	0.863	0.805
兰州市安宁区	0.284	0.310	0.324	0.444	0.442	0.361
白银市白银区	0.199	0.188	0.183	0.282	0.382	0.247
兰州市城关区	0.279	0.330	0.313	0.365	0.425	0.343
崇信县	0.350	0.513	0.351	0.463	0.683	0.472
东乡族自治县	0.392	0.444	0.603	0.637	0.753	0.566
甘谷县	0.419	0.515	0.586	0.626	0.747	0.579
皋兰县	0.283	0.286	0.266	0.257	0.315	0.281
广河县	0.322	0.465	0.787	0.801	1.004	0.676
合水县	0.391	0.484	0.588	0.602	0.723	0.558
合作市	0.403	0.476	0.575	0.532	0.697	0.536
和政县	0.467	0.557	0.640	0.635	0.743	0.608
兰州市红古区	0.198	0.184	0.193	0.249	0.231	0.211
华池县	0.372	0.595	0.623	0.695	0.765	0.610
华亭市	0.480	0.532	0.589	0.623	0.743	0.594
环县	0.583	0.611	0.670	0.905	1.004	0.755
会宁县	0.613	0.823	0.693	0.919	1.009	0.811
积石山保安族东乡族撒拉族自治县	0.397	0.404	0.514	0.344	0.490	0.430
泾川县	0.461	0.504	0.434	0.583	0.763	0.549
景泰县	0.354	0.362	0.351	0.532	0.593	0.438
靖远县	0.206	0.225	0.218	0.292	0.342	0.257
静宁县	0.512	0.590	0.573	0.627	0.787	0.618
康乐县	0.480	0.544	0.633	0.643	0.780	0.616
平凉市崆峒区	0.394	0.518	0.576	0.513	0.621	0.524
临潭县	0.421	0.456	0.556	0.576	0.743	0.550
临洮县	0.377	0.386	0.331	0.402	0.517	0.403
临夏市	0.299	0.339	0.344	0.367	0.404	0.351
临夏县	0.649	0.508	0.818	0.848	0.899	0.744
灵台县	0.505	0.576	0.664	0.640	0.724	0.622
陇西县	0.390	0.510	0.579	0.630	0.655	0.553
碌曲县	0.343	0.398	0.402	0.381	0.384	0.382

续表 4

县级行政区	2005 年	2010 年	2015 年	2020 年	2024 年	均值
玛曲县	0.297	0.357	0.357	0.346	0.357	0.343
天水市麦积区	0.323	0.432	0.397	0.564	0.611	0.465
岷县	0.371	0.493	0.599	0.629	0.787	0.576
宁县	0.509	0.739	0.662	0.657	0.792	0.672
白银市平川区	0.238	0.372	0.300	0.423	0.436	0.354
兰州市七里河区	0.254	0.301	0.265	0.326	0.341	0.297
秦安县	0.473	0.519	0.585	0.632	0.790	0.600
天水市秦州区	0.532	0.658	0.752	0.821	0.890	0.731
清水县	0.598	0.750	0.811	0.702	0.766	0.726
庆城县	0.499	0.565	0.595	0.553	0.525	0.548
天祝藏族自治县	0.347	0.345	0.286	0.339	0.353	0.334
通渭县	0.709	1.008	1.000	1.070	0.904	0.938
渭源县	0.578	0.679	0.612	0.870	0.785	0.705
武山县	0.293	0.294	0.261	0.300	0.338	0.297
庆阳市西峰区	0.493	0.414	0.413	0.503	0.573	0.479
兰州市西固区	0.256	0.255	0.238	0.276	0.295	0.264
夏河县	0.422	0.505	0.580	0.611	0.753	0.574
永登县	0.479	0.597	0.476	0.486	0.478	0.503
永靖县	0.331	0.376	0.494	0.543	0.713	0.491
榆中县	0.242	0.309	0.270	0.286	0.362	0.294
张家川回族自治县	0.544	0.652	0.680	0.851	0.925	0.730
漳县	0.390	0.509	0.456	0.474	0.611	0.488
镇原县	0.522	0.603	0.730	0.860	0.796	0.702
正宁县	0.358	0.404	0.368	0.306	0.352	0.357
庄浪县	0.519	0.514	0.381	0.593	0.484	0.498
卓尼县	0.412	0.423	0.533	0.493	0.623	0.497
平均值	0.414	0.483	0.507	0.556	0.629	0.518

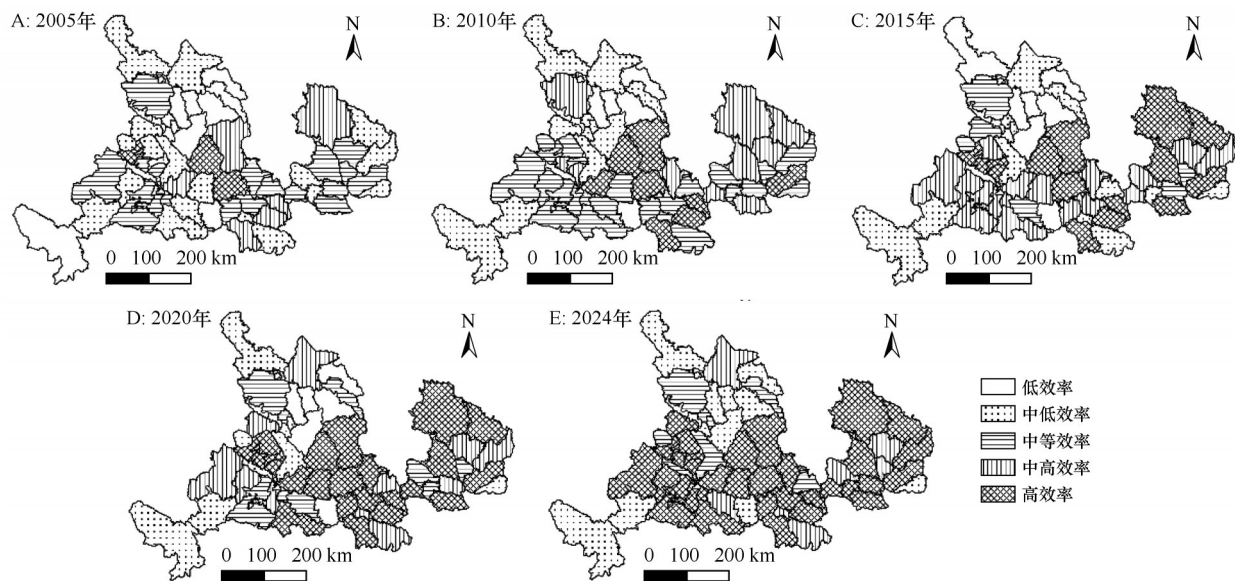
2015 年是重要转折点。此前 10 a 效率增长较慢,累计增幅 22.46%,主要因农业政策仍侧重粮食产量,绿色转型处于初步探索阶段^[44]。2015—2020 年,尽管绿色发展被纳入规划,但受资源约束与政策落实滞后等影响,增长仍较为平缓。2020 年后效率加速提升,得益于高标准农田建设、节水灌溉升级与智慧农业推广等措施的落地,农业绿色转型进入深化推进阶段^[45-46]。

3.1.2 空间演变

借助 ArcGIS10.8.2 软件,采用自然断点法将效率值划分为低、中低、中等、中高、高 5 个等级。这 5 个等级在空间上呈现显著的分布差异,高效率区县

与低效率区县两极分化明显。研究发现,该区域农业绿色发展效率的空间格局呈现显著动态演变。整体上,高效率区县集中于中东部,低效率区县则多分布在西部及西北部。研究期内,低效率与中低效率区间持续收缩,中高效率与高效率区间稳步扩展,显示农业绿色转型呈现从点状突破向片区协同深化的态势(图 2)。

从区域差异的演变过程来看,区域差异呈逐步收敛态势:2005 年呈现广域低效、点状高效的极端不均衡特征;2010—2015 年差异缩小,呈现高效率区向中部集聚、低效率区向边缘收缩的中心-外围分化特征;2020 年后差异进一步收敛,形成由中心



注：基于自然资源部标准地图服务网站审图号 GS(2024)0650 号标准地图制作，底图边界无修改。

图2 农业绿色发展效率空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of agricultural green development efficiency

向边缘递减的圈层结构。这表明区域差异已从两极分化转向梯度差异。

2005 年以低效率主导，空间均衡性差，呈现广域低效率、点状高效率的分散格局。2010 年初步分化，高效率区开始在中部集聚，低效率区收缩。2015 年在政策驱动下，高效率区连片崛起，空间集聚增强。2020 年高效率区县数量大幅增加，在中东部形成连片分布的高效率板块。2024 年空间格局趋于稳定，高效率区县形成广阔集群，覆盖中东部多数区域，低效率区县仅零星残留，整体呈现中东部高效率连片、外围效率递减的圈层结构。

综上所述，2005—2024 年该区域农业绿色发展效率的空间格局完成了从低效均衡到高效集聚的优化。这一过程不仅反映自然禀赋差异，更是政策引导、技术扩散与发展实践共同作用的结果，为后续推动全域绿色协同发展奠定了空间基础。

3.2 农业绿色发展效率空间格局

3.2.1 全局空间自相关分析

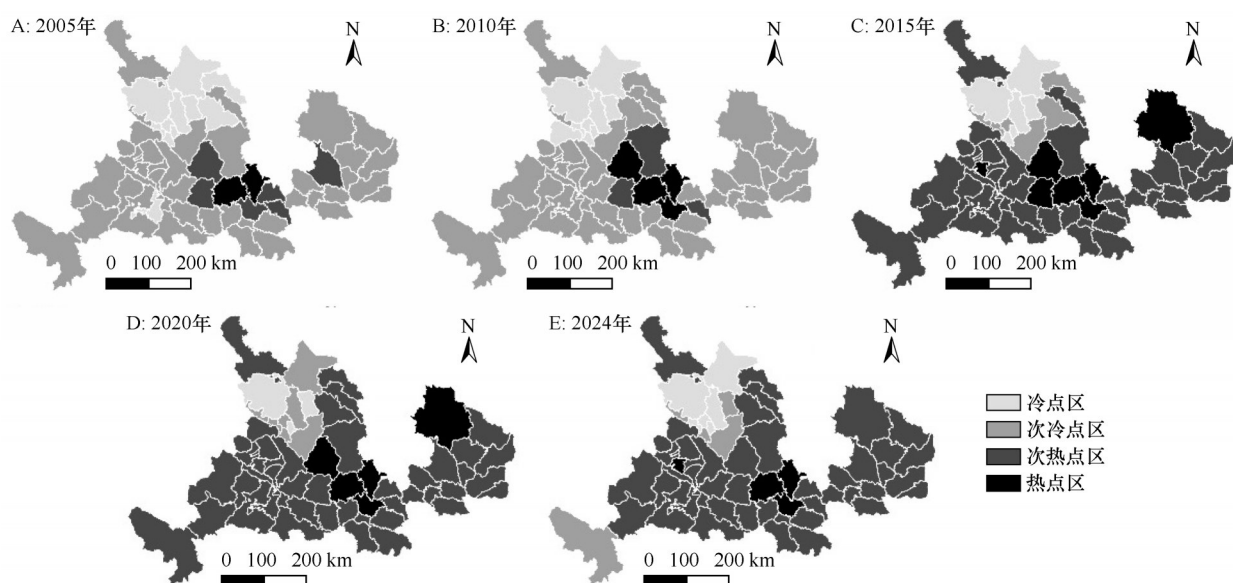
计算 2005—2024 年黄河流域甘肃段农业绿色发展效率的全局莫兰指数(Moran's *I*)。结果如表 5 所列，2005—2024 年各年份的 Moran's *I* 指数均为正值，且各年份的显著性水平均小于 0.05，*Z* 值均大于 1.96，表明研究期内黄河流域甘肃段农业绿色发展效率存在显著的空间正相关性，即效率值在空间上并非随机分布，而是呈现明显的集聚态势。具体而

表 5 农业绿色发展效率莫兰指数			
Table 5 Moran's <i>I</i> index of agricultural green development efficiency			
年份	Moran's <i>I</i>	标准差 <i>Z</i>	显著性水平 <i>P</i>
2005	0.1746	2.2844	0.014
2010	0.2603	3.2511	0.002
2015	0.2336	2.876	0.003
2020	0.2322	2.7947	0.007
2024	0.1967	2.4072	0.013

言，高效率县倾向于与高效率县相邻，低效率县则与低效率县相邻，形成了高-高集聚与低-低集聚并存的空间分异格局。这反映出农业绿色发展效率在黄河流域甘肃段内部存在明显的空间依赖性和扩散效应。

3.2.2 冷热点分析

为探究黄河流域甘肃段农业绿色发展效率的空间集聚特征，利用 ArcGIS 软件计算 Getis-Ord *G*_i^{*} 指数，并通过自然间断法将区域划分为热点区、次热点区、次冷点区与冷点区。整体上，冷热点区呈连片分布，空间格局呈现北冷南热的梯度特征，南北差异先扩大后趋于稳定，反映出明显的路径依赖与集聚演化趋势(图 3)。热点区主要集聚于中部，冷点区分布于西北部且范围逐步缩减，自 2015 年后次冷点区快速萎缩，次热点区快速扩张并成为主导类型。



注:基于自然资源部标准地图服务网站审图号:GS(2024)0650号标准地图制作,底图边界无修改。

图3 农业绿色发展效率局部冷热点

Fig.3 Localised hotspots and coldspots of agricultural green development efficiency

2005年冷点区主导,热点区稀少且呈点状分布,次冷点区分布范围最广,次热点区仅在热点区外围少量出现。2010年北部冷势略减,南部热势初显,热点区开始小范围集聚。2015年热点区集聚增强,冷点区萎缩,次冷点区快速萎缩,次热点区快速扩大,梯度格局形成。2020年热点区集聚达到高峰,冷点区几近消失,热势向东南扩散。2024年格局总体稳定,冷点区小幅回弹,但北冷南热的梯度结构未发生根本改变。

3.2.3 核密度分析

在分布位置方面,核密度曲线整体逐渐向右移动,2015年以后主峰整体呈现右移趋势,表明农业绿色发展整体效率随时间逐步提升;在分布形态方面,波峰高度呈先上升后分峰、再向高值端集聚的特征,同时曲线宽度则先收窄后拓宽、再向高值端收窄,说明区域内效率分化程度逐渐减弱,极化效应逐渐增强,这表明农业绿色发展效率实现了从低水平集聚到分化极化,最后达到“高水平收敛”的转变;在波峰数量方面,基本维持单峰状态,农业绿色发展效率分布较为集中,在2017—2019年出现短暂双峰状态,这表明存在短期的多极分化现象;在分布延展性方面,高值端的右拖尾逐渐拉长,且低端值的左拖尾渐渐收窄,表明低效区县数量明显减少,而高效区县的效率水平持续突破,成为分布延展性增强的绝对动力(图4)。总体来看,研究区农业绿色发展效率在波动中持续提升,区域内部差异逐步收敛,整体

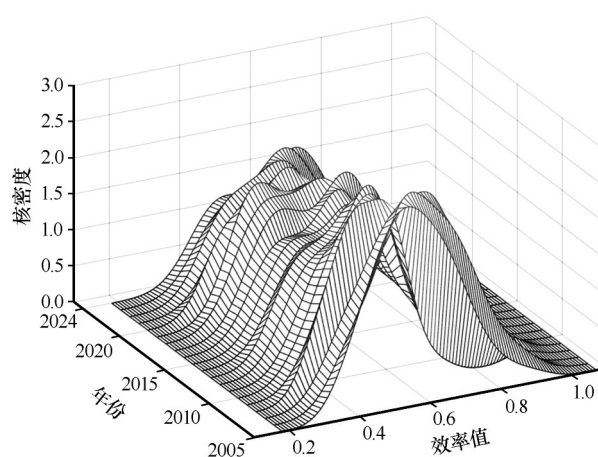


图4 农业绿色发展效率核密度估计

Fig.4 Kernel density estimation of agricultural green development efficiency

朝着更高效、更协调的方向演进。

3.3 农业绿色发展效率影响因素

3.3.1 农业绿色发展效率影响因子探测

基于最优参数地理探测器(OPGD)模型,对2005、2010、2015、2020、2024年5个典型年份的农业绿色发展效率进行因子探测,得到各因子的解释力(q 值)及其排序(表6)。农民人均可支配收入(X_1)始终为重要影响因子, q 值从2005年的0.4135持续上升至2024年的0.5738,并于2015年后稳居首位。农业机械化率(X_2)在2005—2010年解释力最强(q 值分别为0.5237、0.5509),之后显著下降,2020年

表 6 农业绿色发展效率单因子探测结果

Table 6 Single factor detection results of agricultural green development efficiency

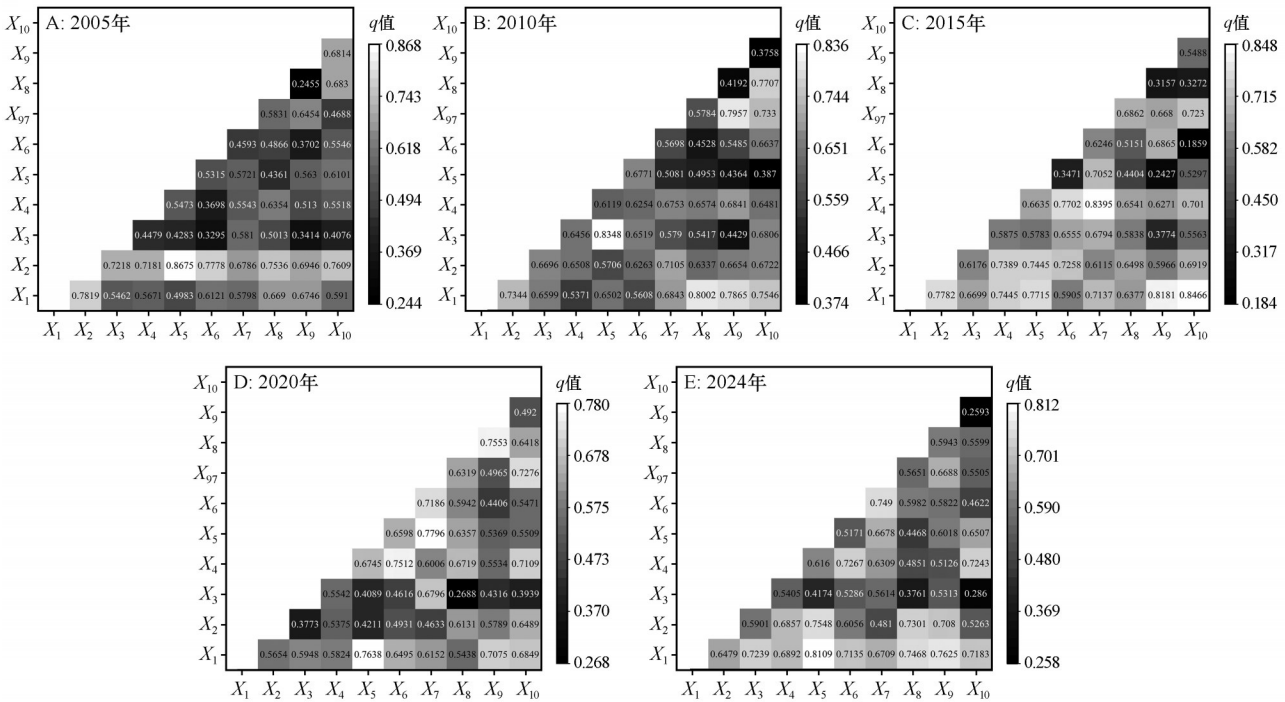
影响因子	2005		2010		2015		2020		2024	
	q 值	排名	q 值	排名	q 值	排名	q 值	排名	q 值	排名
X_1	0.4135	2	0.4848	3	0.5434	1	0.5002	1	0.5738	1
X_2	0.5237	1	0.5509	1	0.4109	3	0.2662	7	0.3533	4
X_3	0.1691	9	0.2470	7	0.1581	9	0.1330	10	0.1708	10
X_4	0.3433	4	0.3894	4	0.4995	2	0.4645	2	0.4646	2
X_5	0.3076	6	0.1631	9	0.1600	8	0.3324	4	0.2872	5
X_6	0.2924	7	0.3431	5	0.1116	10	0.2984	6	0.2796	6
X_7	0.3586	3	0.4896	2	0.3654	4	0.4059	3	0.3209	3
X_8	0.3306	5	0.2506	6	0.2265	5	0.1831	8	0.2112	7
X_9	0.1380	10	0.1374	10	0.1874	6	0.1334	9	0.1929	8
X_{10}	0.2572	8	0.2033	8	0.1648	7	0.3313	5	0.1874	9

注： X_1 为农民人均可支配收入(元)， X_2 为农业机械化率($W \cdot \text{hm}^{-2}$)， X_3 为农业生产结构(%)， X_4 为城镇化水平(%)， X_5 为财政支农水平(%)， X_6 为土地规模化经营水平($\text{hm}^2 \cdot \text{人}^{-1}$)， X_7 为有效灌溉水平(%)， X_8 为农村教育水平(%)， X_9 为科研经费投入(%)， X_{10} 为环境保护投入(%)。

降至0.2662。城镇化水平(X_4)与有效灌溉水平(X_7)解释力持续较强,尤其是2015年后两者q值均稳定在0.4左右。财政支农水平(X_5)与环境保护投入(X_{10})解释力在2020年后明显提升。农业生产结构(X_3)与科研经费投入(X_9)解释力整体偏低。

3.3.2 交互作用分析

交互作用分析结果显示,农业绿色发展效率的影响因子在两两交互后,多数表现为双因子增强或非线性增强关系,未出现独立效应,说明各因子间存在显著的协同效应(图5)。2005年交互探测中,



注： X_1 为农民人均可支配收入(元)， X_2 为农业机械化率($W \cdot \text{hm}^{-2}$)， X_3 为农业生产结构(%)， X_4 为城镇化水平(%)， X_5 为财政支农水平(%)， X_6 为土地规模化经营水平($\text{hm}^2 \cdot \text{人}^{-1}$)， X_7 为有效灌溉水平(%)， X_8 为农村教育水平(%)， X_9 为科研经费投入(%)， X_{10} 为环境保护投入(%)

图 5 农业绿色发展效率影响因子交互探测结果

Fig.5 Interaction detection results for influencing factors of agricultural green development efficiency

农业机械化率(X_2)与财政支农水平(X_5)的交互作用最强, q 值达0.8675,反映出早期农业现代化进程中,机械化程度与财政支农对效率提升的关键作用。2010年,农民人均可支配收入(X_1)与农村教育水平(X_8)的交互较显著($q=0.8002$),表明收入提升与人力资本积累共同推动绿色生产行为。2015年以后,随着绿色农业政策体系的完善,交互作用格局发生一定变化。农民人均可支配收入(X_1)与城镇化水平(X_4)的交互效应迅速增强($q=0.7445$),说明城乡发展与农户经济能力提升形成双向增强机制,共同促进农业绿色转型。2020年,财政支农水平(X_5)与有效灌溉水平(X_7)的交互作用最强($q=0.7796$),表明多个强影响因子间的相互作用随时间变化出现一定波动。2024年,农民人均可支配收入(X_1)与财政支农水平(X_5)的交互作用最强($q=0.8109$),表明收入提升与财政支农形成协同增强机制,共同推动农业绿色发展。城镇化水平(X_4)与环境保护投入(X_{10})的交互作用也达到较高水平($q=0.7243$),体现出城乡发展与生态环境保护在农业绿色发展中的叠加效应。相比之下,农业生产结构(X_3)与科研经费投入(X_9)的交互作用始终较弱, q 值长期以来总体上处于较低水平,反映出产业结构调整与科技研发之间尚未形成有效联动,制约了技术成果的产业化应用。

经济与社会因子间的交互增强效应显著,尤其收入、城镇化、政策投入等因子在协同中对农业绿色发展效率的解释力突出,而自然条件与生产结构类因子的交互作用相对有限,进一步验证了政策引导-经济驱动-社会协同已成为推动黄河流域甘肃段农业绿色发展的核心机制。

4 讨论

4.1 建议

本研究表明,黄河流域甘肃段农业绿色发展效率在时间上呈现波动上升趋势,空间上表现为低效区持续缩减、高效区稳步扩展,这与既有研究结论基本一致^[47-48]。这一时空演变规律,是宏观政策引导、绿色技术扩散与区域发展实践共同作用的结果。区别于传统地理探测器模型需主观设定参数、侧重于单因子独立分析的局限,本研究采用改进后的最优参数地理探测器,系统识别了农业绿色发展效率影响因子的交互作用,提升了空间异质性及影

响机制的解释精度。

基于研究结果,提出以下建议:(1)建立跨区域协同机制,发挥高效区县的示范带动作用,推广绿色低碳种植技术,依据区域资源禀赋实施差异化政策。(2)构建多维度赋能体系,持续增加财政支农投入,重点支持绿色技术、绿色生产方式与污染治理。(3)增强绿色农业生产稳定性,建立增效、减碳、提质协同体系,推动劣势转化与资源整合,提升系统抗风险能力。

4.2 不足与展望

首先,在评价指标体系方面,由于县域层面数据获取难度较大,未将农药使用量等相关指标纳入,可能导致测算结果存在一定偏差;其次,在影响因素解析方面,尽管通过最优参数的地理探测器模型分析了各因素的解释力及其交互作用,但未能揭示影响因子变化与效率值变动的定量响应关系。

未来将进一步优化农业绿色发展效率的评价指标体系构建,建立更加科学完善的评价指标体系,从而提高测算结果的精度。同时,在本研究基础上进一步建立影响因子与效率值的定量响应模型,以期实现影响因子与效率值变动之间关系的精准分析。

5 结论

2005—2024年,黄河流域甘肃段农业绿色发展效率总体呈上升趋势,尤其在2020年后增长速率明显加快,中高、高效率区县数量显著增加。农业绿色发展效率区域差异显著,高效率区县集中在研究区域的中部和东部地区,低效率区县则集中在西部和西北部地区。总体呈现从低效均衡到高效集聚的演变趋势,凸显了政策调控的局部有效性。

黄河流域甘肃段农业绿色发展效率存在显著的空间正相关性,呈现明显的集聚态势。其空间演化具有明显的路径依赖和集聚特征,2015年以后次热点区和热点区占据区域主导地位,次冷点区大幅缩小。农业绿色发展效率在波动中持续提升,区域内部差异逐步收敛,整体朝着更高效、更协调的方向演进。

黄河流域甘肃段农业绿色发展效率影响因子的解释力存在显著的差异性。通过影响因子探测发现,农民人均可支配收入是农业绿色发展效率的

主要影响因素,其解释力持续上升并于2015年后稳居首位,财政支农水平与城镇化水平对农业绿色发展效率的解释力呈上升趋势,农业生产结构的解释力则长期保持在相对较低水平。交互作用分析表明,影响因子在两两交互后,多数表现为双因子增强或非线性增强关系,未出现独立效应,说明各因子间存在显著的协同效应。农业绿色发展效率的提升,主要依赖于经济与社会因素间的协同增效,而自然条件和生产结构类因素虽具基础性影响,但彼此交互产生的“1+1>2”强化作用有限。

参考文献:

- [1] Viriato V, Bonfim G P F, Nunes R M. A sustainable development-driven framework: aligning agricultural environmental impact assessment with the 2030 agenda [J]. *Environmental management*, 2025, 76(1): 15.
- [2] 王方,陈海滨,邵砾群,等.黄河流域生态协同治理网络结构特征与形成机制:基于指数随机图模型[J]. *中国人口·资源与环境*, 2024, 34(6): 161-172.
- [3] Li E Z, Xu M H, Tang Y X. Study on the spatial coordination relationship between high quality development and ecological environmental protection in the Yellow River Basin under the perspective of ecosystem service value [J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2025, 16(5): 1366-1376.
- [4] 周文霞,王星星.黄河流域甘肃段高质量发展时空格局演变研究[J]. *人民黄河*, 2022, 44(4): 4-9.
- [5] 赵诚诚,潘竟虎.基于供需视角的黄河流域甘肃段生态安全格局识别与优化[J]. *生态学报*, 2022, 42(17): 6973-6984.
- [6] 羊丽,杨清.黄河流域甘肃段粮食生产全周期碳平衡测量与区划[J]. *水土保持通报*, 2025, 45(5): 167-176.
- [7] 田云,廖华.两阶段视角下中国农业绿色发展效率测度、演进特征及空间溢出效应[J]. *中国人口·资源与环境*, 2024, 34(10): 160-172.
- [8] 李垚,赵林,宋小语,等.降碳减污视角下山东省农业绿色发展效率的时空格局与影响因素分析[J]. *地理与地理信息科学*, 2024, 40(3): 104-112.
- [9] 刘帅,张航宇,蔡文静.黄河流域农业绿色全要素生产率的空间格局与动态演进[J]. *生态与农村环境学报*, 2022, 38(12): 1557-1566.
- [10] Gai M, Yang Q F. Synergistic study of the green efficiency and economic resilience of agriculture from a sustainable development perspective: evidence from Northeast China [J]. *Environmental science and pollution research international*, 2023, 30(31): 77568-77592.
- [11] Lei S H, Yang X, Qin J H. Does agricultural factor misallocation hinder agricultural green production efficiency? Evidence from China [J]. *The Science of the Total Environment*, 2023, 891164466-164466.
- [12] 张利国,谭笑,肖晴川,等.基于气候资源投入的中国农业生态效率测度与区域差异[J]. *经济地理*, 2023, 43(4): 154-163.
- [13] 李谷成.技术效率、技术进步与中国农业生产率增长[J]. *经济评论*, 2009(1): 60-68.
- [14] 周端明.技术进步、技术效率与中国农业生产率增长:基于DEA的实证分析[J]. *数量经济技术经济研究*, 2009, 26(12): 70-82.
- [15] 王晶晶,周发明,刘忠秀.农旅融合对农业绿色全要素生产率的影响:基于动态空间杜宾模型与门槛效应的检验[J]. *经济地理*, 2025, 45(6): 161-172.
- [16] Wang L, Qi Z R, Sun Y L, et al. Analysis on the agricultural green production efficiency and driving factors of urban agglomerations in the middle reaches of the Yangtze River [J]. *Sustainability*, 2020, 13(1): 97-97.
- [17] Shi Y, Lu W, Lin L, et al. Does environmental regulation affect China's agricultural green total factor productivity? Considering the role of technological innovation [J]. *Agriculture*, 2025, 15(6): 649-649.
- [18] Pan Z W, Tang D, Kong H, et al. An analysis of agricultural production efficiency of Yangtze River Economic Belt based on a three-stage DEA Malmquist model [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(2): 958-958.
- [19] 刘爽,刘畅.中国农业减污降碳协同效应及其影响机制研究[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2024, 32(7): 1109-1121.
- [20] Han G, Yang H, Xie H. Research on the efficiency and spatio-temporal evolution characteristics of agricultural green development in central cities of the Yangtze River Delta [J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2024, 12: 1502824.
- [21] Xiong H, Zhan J T, Lv Z X, et al. Challenges or drivers? Threshold effects of environmental regulation on China's agricultural green productivity [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 429: 139503.
- [22] 曹俊文,曾康.低碳视角下长江经济带农业生态效率及影响因素研究[J]. *生态经济*, 2019, 35(8): 115-119.
- [23] 田伟,杨璐嘉,姜静.低碳视角下中国农业环境效率的测算与分析:基于非期望产出的SBM模型[J]. *中国农村观察*, 2014(5): 59-71.
- [24] 侯孟阳,姚顺波.1978-2016年中国农业生态效率时空演变及趋势预测[J]. *地理学报*, 2018, 73(11): 2168-2183.
- [25] 成金华,孙琼,郭明晶,等.中国生态效率的区域差异及动态演化研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2014, 24(1): 47-54.
- [26] 潘丹,应瑞瑶.中国农业生态效率评价方法与实证:基于非期望产出的SBM模型分析[J]. *生态学报*, 2013, 33(12): 3837-3845.
- [27] Zhang Y, Wang H, Liu C. Greening agriculture as a response to climate change: a case study from China over 2000-2021 [J]. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 2024, 8: 1492883.

- [28] 刘应元,冯中朝,李鹏,等.中国生态农业绩效评价与区域差异[J].经济地理,2014,34(3):24-29.
- [29] Li G Z, Tang D C, Boamah V, et al. Evaluation and influencing factors of agricultural green efficiency in Jianghuai Ecological Economic Zone[J]. Sustainability, 2021, 14(1): 30-30.
- [30] 尹传斌,周璇,张晶莹.环境规制对农业碳全要素生产率的影响及作用机制[J].中国生态农业学报(中英文),2025,33(7): 1454-1466.
- [31] 宋瑞,胥英伟,史瑞应.黄河流域旅游产业效率评价与驱动力分析:基于DEA方法和空间杜宾模型的实证研究[J].中国软科学,2022(11):26-36.
- [32] 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.
- [33] 何眉,范巧,安琪.长江经济带与黄河流域农业生态效率差异及异质性来源[J/OL].中国农业资源与区划,1-18[2026-01-24].
- [34] 龚钰,陆建飞,罗云建,等.江苏省县域种植业碳源/汇测算与农业园区空间相关性分析[J].生态与农村环境学报,2023,39(8):963-972.
- [35] 陈文宣,陈钰,王生隆.黄河流域农业碳排放时空演化特征及其影响因素分析[J/OL].干旱区地理,1-18[2026-01-24].
- [36] 王宝义,张卫国.中国农业生态效率测度及时空差异研究[J].中国人口·资源与环境,2016,26(6):11-19.
- [37] 曾龙,尹璨,黎昭萱,等.长江经济带农村产业融合与农业绿色发展耦合协调演变特征及其影响因素[J/OL].经济地理,1-11[2026-02-04].
- [38] Liu Y P, Lu C P, Chen X P. Dynamic analysis of agricultural green development efficiency in China: spatiotemporal evolution and influencing factors[J]. Journal of Arid Land, 2023, 15(2): 127-144.
- [39] Pan F, Deng H, Chen M, et al. Spatial-temporal evolution and driving factors of agricultural green development in China: evidence from panel quantile approaches[J]. Sustainability, 2024, 16(15): 6345-6345.
- [40] 褚子昂,张家瑛,那晓红,等.基于灰水足迹视角的黄河流域农业绿色发展效率时空分异特征研究[J].环境生态学,2024,6(9):91-99.
- [41] 郑玲,马千然,江涛,等.四川省粮食生产时空演变格局及影响因素分析[J].智慧农业(中英文),2025,7(2):13-25.
- [42] 章胜勇,尹朝静,贺亚亚,等.中国农业碳排放的空间分异与动态演进:基于空间和非参数估计方法的实证研究[J].中国环境科学,2020,40(3):1356-1363.
- [43] 李晓健,马林兵.基于参数最优地理探测器的粤东北耕地非农化特征与影响因素研究[J].水土保持通报,2024,44(5): 100-112.
- [44] 齐巍巍.以新理念指引“三农”发展:2016年中央一号文件解读[J].农村金融研究,2016(2):4-5.
- [45] 邱娟,陈钦萍,王波,等.黄河流域技术创新与农业绿色高质量发展耦合协调及影响因素[J].中国沙漠,2024,44(4):275-283.
- [46] 张懿笃.扎根金色沃土勇担时代使命甘肃农垦推进农业现代化的实践与思考[J].甘肃农业,2025(11):1-9.
- [47] 李魁明,王晓燕,姚罗兰.黄河流域农业绿色发展水平区域差异及影响因素[J].中国沙漠,2022,42(3):85-94.
- [48] 王柱,程文仕,黄鑫,等.甘肃省农业绿色低碳转型的趋势预测、区域差异及组态路径研究[J/OL].中国生态农业学报(中英文),1-17[2026-02-04].

Comprehensive measurement and influencing factors of agricultural green development efficiency in Gansu section of the Yellow River Basin

Lu Chenyu, Duan Zhuanghui, Zhang Jinsong, Zhao Wenjing

(School of Architecture and Urban Planning, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Against the backdrop of global climate change and resource constraints, promoting green agricultural development has become a crucial pathway to ensure food and ecological security. This task is particularly urgent for the Yellow River Basin, an area characterized by ecological fragility and water scarcity. This study takes 57 county-level administrative regions in the Gansu section of the Yellow River Basin as the research object. Based on panel data from 2005 to 2024, and employing the Super-SBM model, spatial econometric analysis, kernel density estimation, and an optimal-parameter-based geographical detector model, this paper systematically analyzes the spatiotemporal evolution characteristics of agricultural green development efficiency and further explores its influencing factors. The results show that: (1) In terms of spatiotemporal evolution, the agricultural green development efficiency in the study area generally shows an upward trend with significant regional differences. High-efficiency values are mainly concentrated in the central and eastern parts of the study area, while low-efficiency values are concentrated in the western and northwestern regions. (2) Regarding the spatial pattern, agricultural green development efficiency exhibits a significant positive spatial correlation, demonstrating an obvious agglomeration trend. After 2015, sub-hotspot and hotspot areas became dominant in the region, sub-coldspot areas shrank considerably, and internal regional differences gradually converged. (3) Concerning the influencing factors, the per capita disposable income of farmers is the primary factor affecting agricultural green development efficiency. Furthermore, the interaction between any two factors shows either a bifactor enhancement or a nonlinear enhancement relationship, with a notably significant synergistic enhancement effect observed between economic and social factors. This study can provide theoretical support and a decision-making basis for promoting high-quality development in the Yellow River Basin.

Key words: Gansu section of the Yellow River Basin; agricultural green development; spatial econometric analysis; spatiotemporal evolution; influencing factors