

农业新质生产力与农业全要素碳生产率耦合协调关系及影响因素分析

熊豪, 诸葛立伟, 薛铖凯

(河南科技大学 商学院, 河南 洛阳 471023)

摘要: 为探究农业新质生产力与农业全要素碳生产率的耦合协调关系及时空特征, 基于2015至2023年我国31个省份数据, 采用熵权法、耦合协调模型及空间计量模型实证分析。结果表明, 1) 两项指标显著提升, 耦合协调度从初级协调过渡至中级协调, 协同性增强; 2) 耦合协调度呈稳定空间集聚, 东部沿海“高-高”集聚、中西部“低-低”集聚; 3) 经济发展水平等5项为核心影响因素, 经济发展水平与地形起伏度正向影响, 城乡收入差距与自然保护力度负向影响。

关键词: 农业新质生产力; 农业全要素碳生产率; 耦合协调关系; 时空分析; 主导影响因素

中图分类号: F329.9

文献标志码: A

文章编号: 1000-2367(2026)05-0039-08

当前我国农业进入高质量发展关键阶段, “绿色转型”与“效率升级”成为核心任务。习近平总书记指出“发展新质生产力是推动高质量发展的内在要求和着力点”“绿色发展是高质量发展的底色, 新质生产力本身就是绿色生产力”。2025年中央一号文件更加明确“以科技创新引领先进生产要素集聚, 因地制宜发展农业新质生产力”——这意味着, 农业新质生产力与农业全要素碳生产率的协同发展, 已成为推动农业低碳转型、建设农业强国的关键路径。现有研究已覆盖两大核心概念的基础探索: 农业新质生产力领域, 学者们完成全国及粮食主产区水平测算^[1-2], 识别出数字化、产业集群、地权整合等影响因素^[3-5], 证实其对生态价值实现、碳减排等的积极作用^[6-7]; 农业全要素碳生产率领域, 财政支农、农村数字化等被证实为关键驱动因素^[8-9]。但现有成果局限于单一指标独立研究, 未揭示“技术支撑-目标驱动”互动机制, 缺乏耦合协调关系时空演变及区域差异的系统性分析, 难以形成针对性协同策略。

基于此, 本研究选取2015至2023年我国31个省份面板数据, 通过熵权法精准测算农业新质生产力与农业全要素碳生产率水平、耦合协调模型量化二者协同发展程度、空间计量模型揭示耦合协调度空间特征与溢出效应、CatBoost模型识别主导影响因素, 既解决单一指标测算片面性等研究问题, 又在理论上构建二者协同分析框架以填补耦合关系研究空白, 在实践中为制定区域差异化农业低碳发展政策、推动农业高质量发展提供实证支撑。

1 机理分析

农业新质生产力与农业全要素碳生产率的协同耦合, 是农业绿色转型与高质量发展的关键路径。农业全要素碳生产率聚焦生产全生命周期碳排放效率, 通过低碳技术革新、碳汇建设与碳交易机制完善, 量化农业系

收稿日期: 2025-07-05; 修回日期: 2025-11-26.

基金项目: 国家社会科学基金(20BJL069).

作者简介(通信作者): 熊豪(1978—), 男, 河南信阳人, 河南科技大学副教授, 研究方向为国际经济. E-mail: xionghao@haust.edu.cn.

引用本文: 熊豪, 诸葛立伟, 薛铖凯. 农业新质生产力与农业全要素碳生产率耦合协调关系及影响因素分析[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2026, 54(5): 39-46. (Xiong Hao, Zhuge Liwei, Xue Chengkai. The coupling and coordination relationship between agricultural new-quality productive forces and total-factor carbon productivity, and their influencing factors[J]. Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition), 2026, 54(5): 39-46. DOI:10.16366/j.cnki.1000-2367.2025.07.05.0001.)

统气候适应性及减碳贡献,是传统生产力向绿色生产力转变成效的核心指标,而绿色生产力本质隶属于农业新质生产力范畴;农业新质生产力以科技创新为核心驱动,通过生物技术、数字技术与智能装备深度应用重构农业生产函数,实现要素配置效率与产出效能跨越式提升,为农业全要素碳生产率提升提供技术支撑,二者相互促进、协同发展(图 1),在动态耦合中形成“创新-减排-增效”良性循环。

农业新质生产力从三方面支撑农业全要素碳生产率:技术层面,依托物联网、智能机器人等数字技术推行精准农业,减少资源浪费与碳排放^[10];产业层面,催生农业电商等新业态,优化资源配置并降碳;政策层面,通过科技创新、人才培养及环保法规筑牢协同支撑.农业全要素碳生产率则通过三方面促进农业新质生产力创新:生态压力倒逼低碳技术研发,环境规制激发创新动力,低碳消费激励绿色转型.二者协同共生,技术支撑与目标动力形成闭环,推动农业高质量低碳发展。

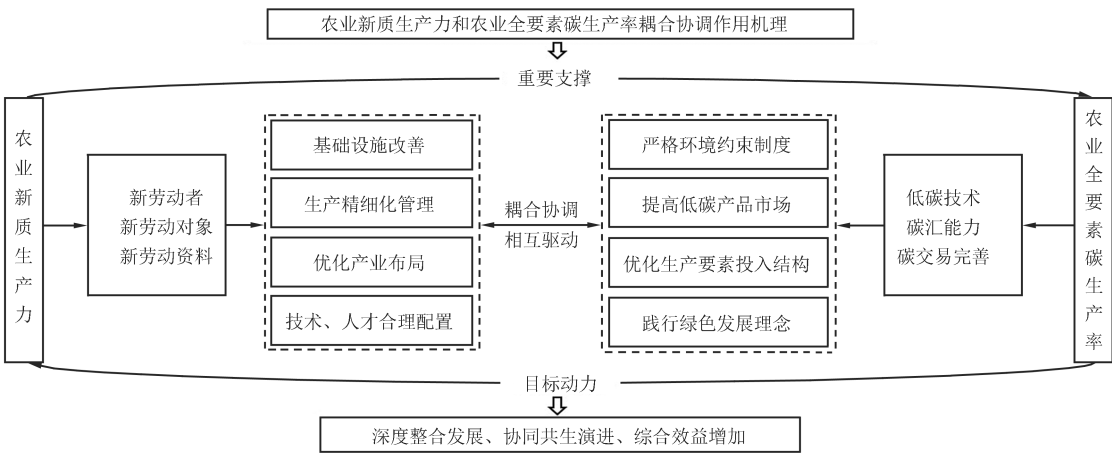


图1 农业新质生产力和农业全要素碳生产率耦合协调作用机理图

Fig.1 Mechanism diagram of coupling coordination between new quality agricultural productivity and agricultural total-factor carbon productivity

2 研究设计

2.1 指标体系构建

2.1.1 农业新质生产力指标体系构建

基于生产力三大基本要素(劳动者、劳动对象、劳动资料),借鉴现有研究测度方法^[11]构建农业新质生产力评价指标体系(见附录表 S1),采用熵值法测算 31 个省份水平.熵值法测算步骤:1)原始数据标准化(加 0.001 消除零值影响,不影响精度),消除指标量纲差异^[12];2)计算指标熵值与熵权;3)加权求和得农业新质生产力水平.核心公式见附录表 S2 公式(1)~(7).

2.1.2 农业全要素碳生产率指标体系构建

本文参考前人研究方法,从劳动、资本、能源三维度设定农业全要素碳生产率投入指标^[13-14],以农业总产值为期望产出、农业碳排放量为非期望产出(详细指标体系见附录表 S3),采用 SBM(slacks-based measure)指数法测算各省份农业全要素碳生产率.碳排放核算参考已有研究^[15],涵盖了化肥与农药使用、农膜应用、柴油消耗、土地翻耕及灌溉活动等碳源,通过对应碳排放系数量化各碳源排放量,最终依据附录表 S2 公式(8)计算得出具体碳排放数值。

2.2 研究方法

耦合协调度模型.耦合协调度模型能够衡量两系统协调发展水平.模型构建见附录表 S2 公式(9)~(11).该文参考相关研究划分依据^[16],将耦合协调等级划分为 4 种类型,具体分类见附录表 S4.

空间自相关性.莫兰指数能够衡量数据的空间自相关性,分为能够检测整个研究观测值空间自相关性的全局莫兰指数,以及能够衡量特定区域及邻域空间自相关性的局部莫兰指数.全局自相关的计算公式见附录表 S2 公式(12).局部自相关计算公式见附录表 S2 公式(13).

空间溢出效应.为进一步检验影响因素的空间交互作用,采用空间杜宾模型进行分析,选择地理邻接权重矩阵,模型设定见附录表 S2 公式(14).

影响因素分析.采用 CatBoost 模型识别主导影响因素,该模型基于梯度提升决策树(GBDT)框架,在类别特征处理、抗噪声干扰方面优势显著^[17-18],选取 8 个影响因子具体包括经济发展水平、产业二元化水平等,衡量方式见附录表 S5,计算公式见附录表 S2 公式(15).

2.3 数据来源

该文基于数据可获得性选取了 2015 至 2023 年作为实证研究的考察区间.该文中所有原始数据主要来源于官网公开发布可供下载的《中国农村统计年鉴》《中国统计年鉴》、各省统计年鉴及统计公报,以及 Python 对各政府公开发布的文件进行文本爬取.对于原始数据中存在个别缺失值的指标,采用线性插值法进行补充.实证分析软件分工遵循研究逻辑:首先基于 Python 软件构建 CatBoost 模型,完成主导影响因素识别;后续耦合协调度测算、空间自相关性检验、空间杜宾模型估计及基准回归、工具变量回归等计量分析,均采用 Stata 软件完成.

3 实证分析

3.1 农业新质生产力与农业全要素碳生产率水平测度结果

2015 至 2023 年 31 个省份 2 项指标均显著提升(见附录表 S6).农业新质生产力:2015 年 8 省份低于 0.1,2023 年该区间省份清零,江苏(0.528 9)、广东(0.449 7)居前,青海(119.88%)、安徽(100.81%)增长率最高.农业全要素碳生产率:2015 年仅 3 省份超 0.5,2023 年 23 省份超 0.5,15 省份超 0.8.指标提升印证了农业技术进步、资源优化及绿色低碳转型成效.

3.2 耦合协调度驱动因素分析

耦合协调关系是一种复杂且动态发展的关系,受到多种因素的共同作用和影响.基于已有的研究成果,该文构建了农业新质生产力与农业全要素碳生产率耦合协调度的影响因素指标体系,并从中筛选出 5 个关键因素进行深入分析.且多重共线性检验发现各变量之间不存在显著的多重共线性问题,符合进一步分析的统计要求.

3.2.1 模型训练与验证

采用 CatBoost 模型识别主导影响因素,参数经网格搜索确定:最大树数 100、树深 10、学习率 0.1、正则项 1(平衡拟合度与过拟合);采用 5 折交叉验证(31 省份面板数据随机分组,重复 5 次取均值),验证结果为 $MAE(\text{mean squared error})=0.032$ 、 $MSE(\text{mean absolute error})=0.001\ 5$ 、 $R^2=0.89$,模型拟合良好.具体参数选择依据网格搜索法遍历参数组合优化,搜索空间设定为:最大树数 50~200、树深 4~12、学习率 0.01~0.2、正则项(L2 正则化)1~5.其中最大树数 100 对应训练集与验证集误差差距最小(规避过拟合);树深 10 时验证集平均绝对误差(MAE)低至 0.032(超 10 则 MAE 升至 0.045);学习率 0.1 兼顾收敛效率与模型稳定性;正则项 1 可抑制过拟合且避免约束过强导致欠拟合.结果显示(完整结果见附录表 S7),经济发展水平(28.99%)为核心影响因素,自然保护力度(17.30%)、城乡收入差距(14.46%)次之.

3.2.2 主影响因素回归分析

对主导影响因素的偏效应分析及回归检验结果如表 1 所示,所有影响因素的回归系数均通过统计显著性检验,表明各因素对农业新质生产力与农业全要素碳生产率耦合协调度的影响具有稳健性.具体来看,经济社会维度中,经济发展水平通过为绿色技术创新与应用提供资金支持和市场激励,对耦合协调度呈显著正向效应,既优化资源配置效率、降低碳排放强度,又推动农业生产绿色转型;而城乡收入差距扩大引发资源配置扭曲与农村人力资本积累不足,对耦合协调度产生显著负向冲击.政府支持维度下,财政支农力度回归系数显著为负,过度财政补贴可能导致农业经营主体形成路径依赖,削弱自主创新动力与内生发展能力,抑制耦合协调关系演进.自然资源禀赋维度中,地形起伏度通过推动差异化特色产业发展、减少机械化带来的能源消耗与碳排放,对耦合协调度呈显著正向影响;自然保护力度则因严格约束农业生产活动、叠加资源利用效率偏低与生态脆弱等特征,表现为显著负向效应.

经济发展水平、自然保护力度、城乡收入差距、地形起伏度及财政支农力度是影响二者耦合协调度的关键因素,分别从经济基础、政策干预、资源禀赋维度构建了耦合协调关系的形成与演进机制.实证表明,通过提升区域经济发展质量、缩小城乡收入差距、优化财政支农政策精准性、因地制宜发挥自然资源比较优势,可有效推动农业新质生产力与农业全要素碳生产率的协同发展.

表 1 主导影响因素回归结果

Tab. 1 Regression results of dominant influencing factors

解释变量	经济发展水平	城乡收入差距	财政支农力度	地形起伏度	自然保护力度
耦合协调度	0.018*** (7.65)	−0.061** (−2.35)	−0.234*** (−2.96)	0.061*** (5.21)	−0.010* (−1.90)

注:***、**和* 分别表示在 1%、5%和 10%水平下显著,括号内为对应回归系数的 *t* 统计量,用于检验变量影响的统计稳健性,下同.

3.2.3 内生性缓解策略

鉴于农业新质生产力与农业全要素碳生产率均通过熵值法测算,可能因变量间相互影响产生内生性偏误,本文采用工具变量法缓解该问题.工具变量选取遵循相关性与外生性原则:以工业机器人密度作为农业新质生产力的工具变量,其反映生产智能化水平、与核心变量高度相关,且由前期产业基础等外生因素决定;以地理标志农产品数量作为农业全要素碳生产率的工具变量,其认证标准倒逼绿色生产、契合低碳目标,且由自然历史条件决定,二者均满足工具变量核心条件,可有效剥离内生性.表 2 工具变量回归结果显示,两个工具变量系数均显著为正,Wald *F* 统计量拒绝弱工具变量假设,验证了工具变量有效性;表 3 剔除内生性后的回归结果表明,经济发展水平、地形起伏度仍显著正向影响耦合协调度,城乡收入差距、财政支农力度、自然保护力度仍显著负向影响,与基准回归结论一致,证实基准回归结果具备稳健性.

3.3 耦合协调度的时空分析

2015 至 2023 年我国 31 个省份农业新质生产力与农业全要素碳生产率的平均耦合协调度变化如图 2(a)所示,其线性趋势显示二者耦合协调度整体稳步上升,从 2015 年的 0.45 增至 2023 年的 0.63,标志着协调性显著增强,且已由初级协调阶段过渡至中级协调阶段,反映出二者相互协调持续优化、发展趋于同步.

表 2 工具变量回归结果

Tab. 2 Results of instrumental variable regression

解释变量	工业机器人密度	地理标志农产品数量
农业新质生产力水平	0.013***	
农业全要素碳生产率		0.035***
弱工具变量检验(<i>F</i> 值)	111.232	72.899

表 3 剔除内生性回归结果

Tab. 3 Regression results after eliminating endogeneity

解释变量	经济发展水平	城乡收入差距	财政支农力度	地形起伏度	自然保护力度
耦合协调度 1	0.060*** (8.64)	−0.017*** (−3.93)	−0.333*** (−4.98)	0.036*** (4.77)	−0.038* (−1.73)

3.3.1 省域比较

2015 至 2023 年各省耦合协调度均显著提升(见附录表 S8).2023 年江苏以 0.858 9 居首,广东、浙江等前 5 省份耦合协调度超 0.76;福建(69.36%)、浙江(69.03%)增幅最大,河北、湖南等 6 省份增幅超 50%,协调发展成效显著.

3.3.2 空间演变趋势

通过绘制农业新质生产力与农业全要素碳生产率耦合协调度三维透视图(见图 2(b))分析其空间分布特征,图中 *X* 轴、*Y* 轴分别对应经度、纬度,直观呈现不同经纬度区域的耦合协调度分布格局.从时间演变来看,2023 年(蓝色曲面)耦合协调度整体显著高于 2015 年(棕色曲面),表明 2015 至 2023 年研究区域耦合协调水平普遍提升,系统协调发展能力持续改善;从空间异质性来看,尽管不同经纬度区域耦合协调度存在差异,但 2023 年高耦合协调度区域覆盖范围更广,且部分经纬度交汇区的耦合协调度峰值更为突出,反映这些区域系统协同性提升更为显著.综上,2015 至 2023 年研究区域耦合协调度既呈现时间维度的整体上升趋势,又具备空间维度的区域协同优化特征,系统间协调发展状况随时间推进全面改善.

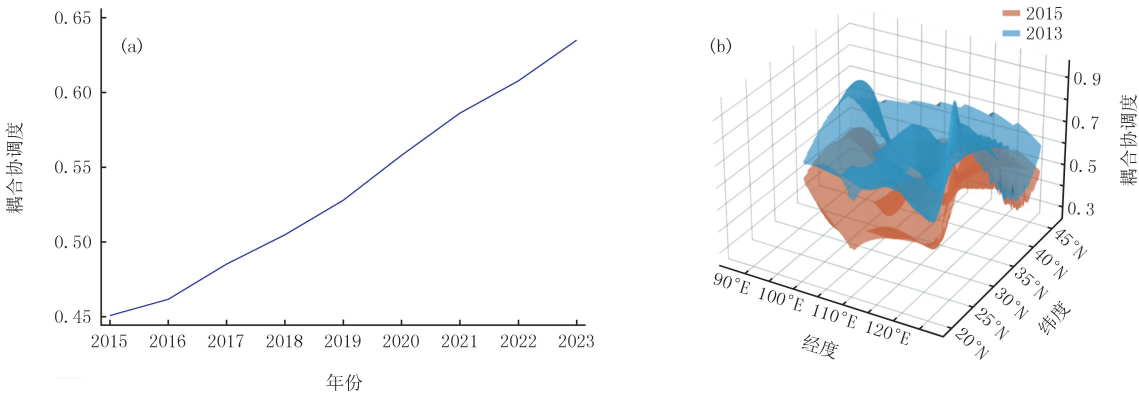


图2 耦合协调度时序演变图(a) 和三维透视图(b)

Fig.2 Time evolution diagram(a) and 3D perspective view(b) of coupling coordination degree

3.3.3 空间依赖性

2015 至 2023 年,农业新质生产力与农业全要素碳生产率耦合协调度的全局莫兰指数显著为正(表 4),表明二者具有显著且稳定的空间集聚特征.具体来看,2015 至 2019 年莫兰指数从 0.134 稳步升至 0.235,增幅达 75%,反映空间相关性逐步增强;2020 年该指数骤降至 0.199,推测与新冠疫情突发性冲击对空间格局的扰动相关,而 2021 至 2023 年持续回升,表明疫情后期影响得到有效缓解,空间集聚特征再度强化.整体而言,研究期内耦合协调度空间分布虽存在动态波动,但显著的空间集聚性始终保持.

表 4 全局莫兰指数结果表

Tab. 4 Global moran index results table

年份	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
莫兰指数	0.134	0.162	0.196	0.235	0.235	0.199	0.246	0.256	0.248
Z 统计值	1.409	1.654	1.925	2.290	2.256	1.939	2.329	2.413	2.337
P 值	0.159	0.098	0.054	0.022	0.024	0.052	0.020	0.016	0.019

3.3.4 空间异质性

本文测量了 2015 年、2018 年、2020 年及 2023 年农业新质生产力与农业全要素碳生产率耦合协调度的局部莫兰指数,并通过图 3 局部莫兰散点图呈现其空间异质性特征.结果显示,观察期内“高-高”与“低-低”类型省份占比极高且数量基本稳定,表明耦合协调度具有显著局部空间集聚特性——东部沿海省份以“高-高”集聚为主,耦合协调度较高;中西部省份长期处于“低-低”集聚状态,低值聚集特征明显,这种区域空间分异格局在研究期内稳定性较强.

东中西部差异形成机制:经济基础,2023 年东部人均 GDP 均值(9.2 万元)是中西部(4.8 万元)的1.9 倍,农业研发投入占比(35%)远超中西部(18%),高经济水平支撑耦合协调度;技术渗透,东部农业数字技术使用率(52%)高于中西部(28%),导致农业全要素碳生产率年均增速差异(东部 8.5%、中西部 5.2%);政策环境上,东部碳交易市场成熟,中西部试点少,政策激励不足抑制协同效应;要素配置,中西部农业劳动力平均受教育年限比东部低 2.3 年,高素质劳动力流失削弱技术落地能力.

3.3.5 空间溢出效应

传统实证模型未考虑变量空间自相关性易产生偏差,故本文采用空间计量模型.通过拉格朗日乘子(LM)检验、豪斯曼检验及似然比(LR)检验初步筛选出双向固定效应空间模型,进一步经 Wald 长方检验与 LR 检验验证空间滞后项和空间误差项均显著,最终确定双向固定效应空间杜宾模型为最优模型.分析结果见附录表 S9.空间自回归系数为 0.312 且显著为正,表明耦合协调度存在显著正向空间依赖性,某省份协调度提升会带动邻省协同改善.直接效应显示,经济发展水平(系数 0.019, $P<0.01$)、地形起伏度(系数 0.059, $P<0.01$)对本地耦合协调度呈显著正向影响,城乡收入差距、财政支农力度、自然保护力度呈显著负向影响,与主导影响因素分析结论一致;在空间溢出效应方面,经济发展水平间接效应显著为正(0.023, $P<0.05$),体现东部高经济水平省份对邻省的正向带动作用,城乡收入差距间接效应显著为负(-0.031, $P<$

0.1),反映中西部收入差距扩大可能对周边省份产生“拖累效应”。

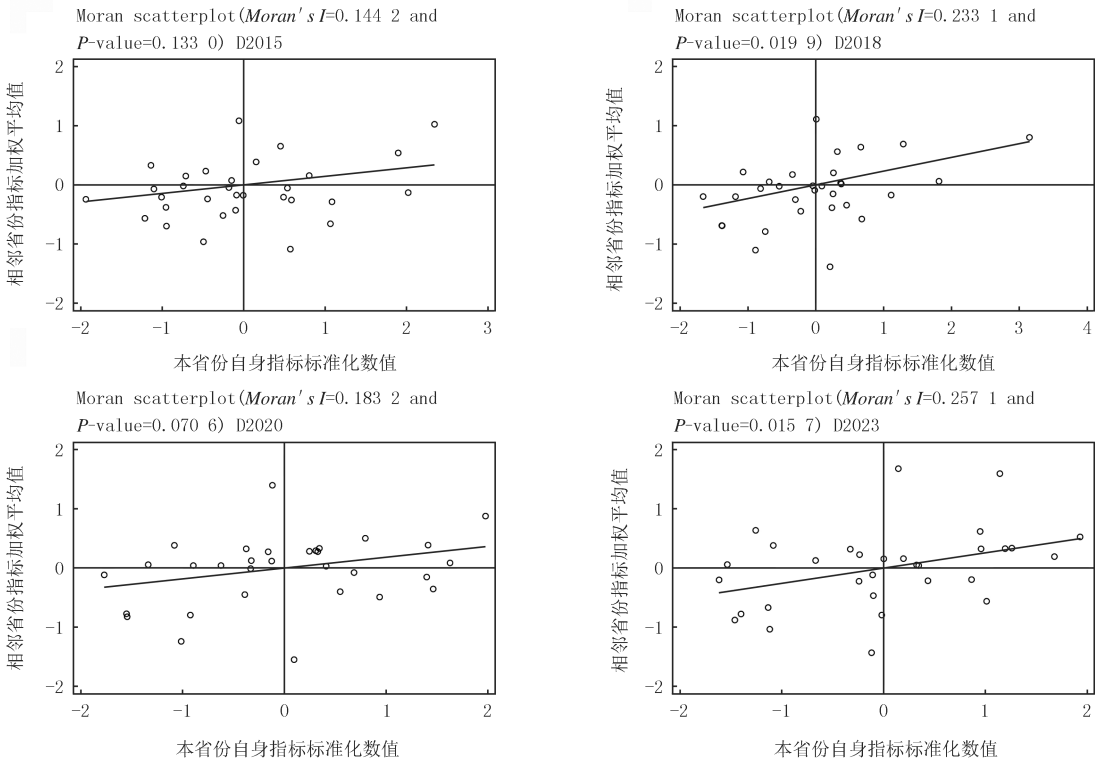


图3 局部莫兰散点图
Fig.3 Local moran scatter plot

4 结论与建议

4.1 结论

通过测度 2015 至 2023 年我国 31 省份农业新质生产力与农业全要素碳生产率,分析二者耦合协调关系及时空演变特征,核心发现如下:1)2 项指标均显著增长,彰显农业高质量低碳转型趋势;2)耦合协调度稳步提升,从初级协调迈向中级协调,协同性显著增强;3)耦合协调度存在稳定空间集聚特征,东部以“高-高”集聚为主、中西部以“低-低”集聚为主,区域差异明显;4)CatBoost 模型显示,经济发展水平、自然保护力度等 5 项为核心驱动因素,其中经济发展水平与地形起伏度呈正向影响,其余 3 项呈负向影响。

4.2 政策建议

1)强化东部“高-高”集聚区绿色创新引领:搭建区域绿色农业技术研发平台,鼓励企业投身智能化、低碳技术研发与应用;完善绿色金融机制,配套税收优惠、补贴等财税激励政策,引导社会资本投向绿色农业项目,充分发挥东部在全国农业低碳化、绿色转型中的示范带动作用。

2)优化中西部“低-低”集聚区发展支撑:依托东西部协作平台,促进先进农业技术、设备与管理经验跨区域共享;加大财政投入力度,重点支持节水低碳技术推广、农机设备现代化升级;强化农民技能培训,提升农业劳动者技术应用能力,进而提高中西部农业生产效率与全要素碳生产率,缩小区域发展差距。

3)推进绿色财政支农绩效导向改革:建立以碳减排成效、绿色技术应用、资源利用效率为核心的“绿色绩效评估”机制,将财政支农资金与农业经营主体的碳减排效果直接挂钩;对低碳技术创新、生态友好型农业项目给予政策倾斜,扭转传统财政支持的路径依赖,通过精准激励推动农业全要素碳生产率提升,构建绿色农业长效发展机制。

4)构建区域差异化生态-收入平衡机制:在中西部及生态脆弱地区,加大生态补偿力度,建立保护区绿色农业激励政策,引导农民参与生态友好型农业;通过跨区域扶贫协作缩小城乡收入差距,助力中西部农民依托绿色农业增收;鼓励地方结合特色制定灵活政策,避免过度依赖传统农业,实现生态保护与农业发展双赢。

附录见电子版(DOI:10.16366/j.cnki.1000-2367.2025.07.05.0001).

参 考 文 献

[1] 朱迪,叶林祥.中国农业新质生产力:水平测度与动态演变[J].统计与决策,2024,40(9):24-30.
Zhu D,Ye L X.Agricultural new quality productive force in China:level measurement and dynamic evolution[J].Statistics & Decision, 2024,40(9):24-30.

[2] 姜彦坤.粮食主产区农业新质生产力:水平测度、区域差异及障碍诊断[J].湖北社会科学,2024(5):97-106.
Jiang Y K.Agricultural new quality productivity in main grain producing areas:level measurement,regional difference and obstacle diagnosis[J].Hubei Social Sciences,2024(5):97-106.

[3] 李盛竹,薛枫,姜金贵.农业数字化对中国粮食新质生产力的影响效应研究[J].农林经济管理学报,2024,23(4):435-445.
Li S Z,Xue F,Jiang J G.Effect of agricultural digitization on new productive forces of food in China[J].Journal of Agro-Forestry Economics and Management,2024,23(4):435-445.

[4] 李哈冰,王志涛,李董林.创新注意力、产业集群与发展农业新质生产力:以“寿光模式”为例[J].农业经济与管理,2024(3):11-26.
Li H B,Wang Z T,Li D L.Innovation attention,industrial clustering,and the development of new quality agricultural productive forces: a case study of the "Shouguang model"[J].Agricultural Economics and Management,2024(3):11-26.

[5] 王岩,李静爽,王贺.地权整合对农业新质生产力培育的影响研究[J].农业经济与管理,2024(6):48-62.
Wang Y,Li J S,Wang H.Research on influence of integration of land rights on cultivation of new quality agricultural productive forces[J]. Agricultural Economics and Management,2024(6):48-62.

[6] 蒋永穆,杜婵.以农业新质生产力助推乡村生态产品价值实现[J].农村经济,2024(6):1-10.
Jiang Y M,Du C.New-quality agricultural productive force boosts the realization of the value of rural ecological products[J].Rural Economy,2024(6):1-10.

[7] 乔均,台德进,邱玉琢.农业新质生产力赋能农业碳减排的机理与效应[J].当代经济管理,2024,46(12):42-55.
Qiao J,Tai D J,Qiu Y Z.Research on the mechanism and effect of agricultural new quality productive forces empowering agricultural carbon emission reduction[J].Contemporary Economic Management,2024,46(12):42-55.

[8] 黄伟华,祁春节,黄炎忠,等.财政支农投入提升了农业碳生产率吗:基于种植结构与机械化水平的中介效应[J].长江流域资源与环境, 2022,31(10):2318-2332.
Huang W H,Qi C J,Huang Y Z,et al.Does financial support for agriculture improve agricultural carbon productivity:analysis on the mediating effects of planting structure and mechanization level[J].Resources and Environment in the Yangtze Basin,2022,31(10): 2318-2332.

[9] 王凤婷,王浩,孔凡斌.农村数字化发展对农业全要素碳生产率的提升效应[J].中国人口·资源与环境,2024,34(3):79-90.
Wang F T,Wang H,Kong F B.Enhancement effect of rural digital development on agricultural total factor carbon productivity[J].China Population Resources and Environment,2024,34(3):79-90.

[10] 李勇斌,刘殿国.农业保险促进农业新质生产力发展的作用机制研究[J].金融与经济,2024(7):38-49.
Li Y B,Liu D G.Research on the mechanism of agricultural insurance to promote the development of new agricultural productivity[J]. Finance and Economy,2024(7):38-49.

[11] 罗光强,宋新宇.中国农业新质生产力:生成机理、时空特征与区域差异[J].中国农业资源与区划,2025,46(6):138-150.
Luo G Q,Song X Y.The production mechanisms,spatial and temporal characteristics,and regional differences of agricultural new quality productivity in China[J].Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning,2025,46(6):138-150.

[12] 路智涵.数字经济发展水平测度及其驱动因素研究[J].现代商业,2025(2):132-135.
Lu Z H.Research on the measurement of digital economy development level and its driving factors[J].Modern Business,2025(2): 132-135.

[13] 杜建军,章友德,刘博敏,等.数字乡村对农业绿色全要素生产率的影响及其作用机制[J].中国人口·资源与环境,2023,33(2):165-175.
Du J J,Zhang Y D,Liu B M,et al.Impact of digital village construction on agricultural green total factor productivity and its mechanisms [J].China Population Resources and Environment,2023,33(2):165-175.

[14] 刘煦,陈彦彤.黄河流域农业绿色全要素生产率的时空差异及收敛性分析[J].科学决策,2024(2):122-131.
Liu X,Chen Y T.Analysis of spatiotemporal differences and convergence of agricultural green total factor productivity in the Yellow River Basin[J].Scientific Decision Making,2024(2):122-131.

[15] 李波,张俊飏,李海鹏.中国农业碳排放时空特征及影响因素分解[J].中国人口·资源与环境,2011,21(8):80-86.
Li B,Zhang J B,Li H P.Research on spatial-temporal characteristics and affecting factors decomposition of agricultural carbon emission in China[J].China Population Resources and Environment,2011,21(8):80-86.

[16] 尹恣昊.新型城镇化与农业碳生产率的耦合协调测度[J].统计与决策,2024,40(21):69-74.
Yin (M /W)H.Coupling coordination measure of new urbanization and agricultural carbon productivity[J].Statistics & Decision,2024,40(21):69-74.

[17] 柴树山,周志强,周高祥,等.多源数据视角下的国省道平交路口交通事故预防思路及实践探索[J].道路交通管理,2022(11):16-19.

[18] 王誉翔,马社强,赵丹,等.基于 SMOTE-CatBoost 的国省道机动车死亡交通事故特征研究[J].交通工程,2024,24(12):40-46.
Wang Y X, Ma S Q, Zhao D, et al. Research on the characteristics of motor vehicle death traffic accidents on national and provincial highways based on SMOTE CatBoost[J]. Journal of Transportation Engineering, 2024, 24(12): 40-46.

The coupling and coordination relationship between agricultural new-quality productive forces and total-factor carbon productivity, and their influencing factors

Xiong Hao, Zhuge Liwei, Xue Chengkai

(School of Business, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China)

Abstract: This study explores the coupling coordination relationship and spatio-temporal characteristics between new quality productivity in agriculture and agricultural total factor carbon productivity. Based on panel data of 31 provincial-level regions in China from 2015 to 2023, empirical analyses are conducted using the entropy weight method, coupling coordination model and spatial econometric model. The results show that: 1) Both indicators have increased remarkably, with the coupling coordination degree evolving from primary coordination to intermediate coordination and presenting growing synergies; 2) The coupling coordination degree exhibits steady spatial agglomeration, featuring high-high agglomeration in eastern coastal areas and low-low agglomeration in central and western regions; 3) Five factors including economic development level serve as core influencing factors. Economic development level and terrain relief exert positive effects, while urban-rural income gap and nature conservation intensity produce negative effects.

Keywords: agricultural new-quality productive forces; total-factor carbon productivity; coupling coordination relationship; spatiotemporal analysis; dominant influencing factors

[责任编辑 刘洋 赵晓华]

附 录

表 S1 农业新质生产力指标体系

Tab. S1 Indicator system for new quality agricultural productivity

一级指标	二级指标	三级指标	指标说明
劳动者	劳动者素质	文化程度	农村居民平均受教育年限(年),反映农业劳动者基础文化水平.
		教育培训	农村居民教育文化娱乐消费支出(元/人),衡量农业劳动者技能提升投入.
	劳动者能力	经济效率	农村家庭总收入/农村总人口(元/人),反映农业生产的经济产出效率.
		经济收入	农村居民可支配收入(元/人),直接体现劳动者收入水平.
	劳动者潜能	劳动效率	农业总产值/农业从业人数(万元/人),衡量单位劳动力的农业产出能力.
		知识潜能	农业院校本科及以上在校学生数(人),储备未来高知识农业劳动者.
		创新精神	农业研发人员数(人),直接反映农业技术创新活动的参与规模.
		创业活跃度	第一产业法人单位数(个),体现农业创业从“意识”到“实践”的转化.
劳动对象	产业优化	产业价值化	农产品加工总产值/农林牧渔业总产值(%),衡量农业产业链延伸程度.
		产业合理化	(农业牧渔—农业)/农林牧渔(%),反映农林牧渔产业结构均衡性.
	产业融合	产业多功能	休闲农业收入/农林牧渔业总产值(%),体现农业“生产+服务”功能拓展.
		产业共享化	农林牧渔专业及辅助性活动产值/农林牧渔业总产值(%),衡量农业生产服务专业化水平.
	生态安全	自然资源保护	水土流失治理面积(10 hm ²),反映农业生态保护实践成效.
	市场安全	产品质量安全	绿色食品认证数量(个),体现农产品质量安全管理水平.
		国际竞争力	农产品国际贸易竞争力指数=(出口额—进口额)/(出口额+进口额),衡量农产品国际市场优势.
劳动资料	有形劳动资料	传统型基础设施	农村公路里程数(10 ⁴ km),保障农业生产物资运输效率.
		数智型基础设施	光缆线路总长度(10 ⁴ km),支撑农业数字技术传输.
			互联网宽带接入端口数量(万个),衡量农业数字化基础覆盖.
			农村宽带用户数(万户),反映农业主体数字化使用能力.
	无形劳动资料	科技研发	农业研发投入水平(亿元),直接支撑农业技术创新.
			高等学校农业科研经费投入水平(亿元),体现科研机构对农业创新的支撑.
		科技成果	农作物新品种授权数量(个),反映农业技术创新的落地转化.
			全国技术市场农业技术合同成交额(亿元),衡量农业技术的市场价值转化.

表 S2 本研究公式
Tab. S2 The formula of this study

序号	公式	说明
(1)	正向指标: $X_{ij} = \frac{V_{ij} - V_{j\min}}{V_{j\max} - V_{j\min}} + 0.001$	X_{ij} 为 i 省 j 项指标标准化后的数值, V_{ij} 为原始数据, $V_{j\max}$ 和 $V_{j\min}$ 分别为 j 项原始数据的最大值和最小值, S_{ij} 为 i 省 j 项指标的权重, H_j 为 j 项指标的熵值, G_j 为 j 项指标的变异系数, W_{ij} 为 j 项指标的熵权, U_i 为农业新质生产力水平。
(2)	负向指标: $X_{ij} = \frac{V_{j\max} - V_{ij}}{V_{j\max} - V_{j\min}} + 0.001$	
(3)	熵值计算公式: $S_{ij} = \frac{X_{ij}}{\sum_{i=1}^n X_{ij}}$	
(4)	熵值计算公式: $H_j = \frac{1}{\ln(n) \sum_{i=1}^n S_{ij} \ln S_{ij}}$	
(5)	熵值计算公式: $G_j = 1 - H_j$	
(6)	熵权计算公式: $W_{ij} = \frac{G_j}{\sum_{j=1}^m G_j}$	
(7)	农业新质生产力水平: $U_i = \sum_{j=1}^m W_{ij} X_{ij}$	
(8)	碳排放数值: $T = \sum C_i = \sum A_i \gamma_i$	T 为农业碳排放总量, C_i 为农业碳源的碳排放量, A_i 为农业各碳排放源的量, γ_i 为各碳排放源的碳排放系数。
(9)	$C = \sqrt{\frac{M_1 \times M_2}{(M_1 + M_2)^2}}$	M_1 和 M_2 分别为标准化处理后的新质生产力水平以及农业全要素碳生产率, 通过公式(9) 计算二者的耦合度 C ; α 和 β 是两个系统的权重系数, 新质生产力水平和农业全要素碳生产率水平具有同等重要性, 因此该文取 $\alpha = \beta = 0.5$, 并通过公式(10) 计算新质生产力水平以及农业全要素碳生产率二者协调度 T ; 公式(11) 计算了二者耦合协调度 D 。
(10)	$T = \alpha M_1 + \beta M_2$	
(11)	$D = \sqrt{C \times T}$	
(12)	全局自相关计算: $Moran's I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (X_i - \bar{X})(X_j - \bar{X})}{S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}}$	n 是省份的总数, X_i 和 X_j 分别代表第 i 省份和第 j 省份的值, $\bar{X}$ 是均值, S^2 是样本方差, W_{ij} 是空间权重矩阵元, 在该文中采用地理邻接矩阵, I_i 为局部莫兰指数。
(13)	局部自相关计算: $I_i = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (X_i - \bar{X})(X_j - \bar{X})}{S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}}$	
(14)	$D_{it} = \rho \sum_{j=1}^N W_{ij} D_{it} + X_{it} \beta + \sum_{j=1}^N W_{ij} X_{jt} \gamma + \mu_i + \delta_t + \nu_{it}$	D_{it} 为被解释变量耦合协调度, ρ 为空间滞后效应系数, W_{ij} 为空间权重矩阵元, $\rho \sum_{j=1}^N W_{ij} D_{it}$ 为被解释变量的空间滞后项, $\sum_{j=1}^N W_{ij} X_{jt} \gamma$ 为解释变量的空间滞后项, μ_i 和 δ_t 分别为空间和时间的固定效应, ν_{it} 为随机扰动项。
(15)	$X_{\sigma_p, k} = \frac{\sum_{p=1}^{j=1} [X_{\sigma_j, k} = X_{\sigma_p, k}] Y_{\sigma_j} + \alpha \times p}{\sum_{p=1}^{j=1} [X_{\sigma_j, k} = X_{\sigma_p, k}] Y_{\sigma_j} + \alpha}$	$X_{\sigma_p, k}$ 表示经有序目标统计量编码后, 第 p 个样本在第 k 个类别特征上的数值化结果; σ 为训练样本的随机排列序列, 用于构建无偏的类别特征编码, 消除目标泄露风险; p 为当前样本在随机序列中的位置索引; k 为类别特征的维度索引; $X_{\sigma_j, k}$ 为随机序列中第 j 个样本在第 k 个类别特征上的原始取值; Y_{σ_j} 为随机序列中第 j 个样本的被解释变量观测值; $[X_{\sigma_j, k} = X_{\sigma_p, k}]$ 为指示函数, 当第 j 个样本与第 p 个样本在第 k 个特征上的类别取值相同时取 1, 否则取 0; α 为平滑参数, 用于缓解稀有类别特征的编码方差问题; $\bar{y}$ 被解释变量的全局均值, 作为平滑项的基准修正值;

表 S3 农业全要素碳生产率指标体系				
Tab. S3 Agricultural total factor carbon productivity index system				
一级指标	二级指标	三级指标	指标说明	碳排放系数
投入指标	劳动投入	劳动力投入	农林牧渔从业人数(万人),反映农业生产的人力投入规模.	
	资本投入	土地投入	农作物播种面积(10^3 hm^2),衡量农业生产的土地资源投入.	
		机械投入	农业机械总动力(10^4 kW),反映农业机械化水平.	
		化肥投入	农业化肥折纯施用量(万 t),农业主要碳源之一.	0.895 6 kg C/kg
		农药投入	农药施用量(10^4 t),农业化学投入碳源.	4.934 1 kg C/kg
		农膜投入	农膜使用量(10^4 t),农业塑料污染相关碳源.	5.185 6 kg C/kg
	能源投入	农业用水投入	农业灌溉面积(10^3 hm^2),灌溉能耗相关碳源.	20.47 kg C/hm ²
		农业用电投入	农业用电量($10^9\text{ kW}\cdot\text{h}$),农业能源消耗碳源.	0.610 0 kg C/(kW $\cdot\text{h}$)
产出指标	期望产出	农业总产值	农林牧渔总产值(亿元),反映农业经济产出.	
	非期望产出	农业碳排放	农业碳排放量(万 t),综合上述 6 类碳源测算.	

表 S4 耦合协调度阶段划分表		
Tab. S4 Phase division table of coupling coordination degree		
类别	耦合协调度区间	耦合协调阶段
1	$0<D\leq0.5$	濒临失调
2	$0.5<D\leq0.6$	初级协调
3	$0.6<D\leq0.8$	中级协调
4	$0.8<D\leq1.0$	高级协调

表 S5 影响因子选取与说明		
Tab. S5 Selection and explanation of influencing factors		
影响因子	符号	衡量方式
经济发展水平	X1	人均 GDP
产业二元化水平	X2	(第二、三产业产值/第二、三产业从业人员数)/(第一产业产值/第一产业从业人员数)
城乡收入差距	X3	城镇居民人均可支配收入/农村居民人均可支配收入
城镇化率	X4	城镇常住人口 / 总常住人口
财政支农力度	X5	农业财政支出/财政总支出
地形起伏度	X6	$[(\text{区域内最高海拔}-\text{最低海拔})\times(1-(\text{区域内平地面积}/\text{总面积}))]/500\text{ m}$
环境规制强度	X7	Python 对政府文件文本爬取
自然保护力度	X8	自然保护面积/省市自治区面积

表 S6 农业新质生产力与农业全要素碳生产率水平测度结果

Tab. S6 Measurement results of agricultural new quality productivity and agricultural total factor carbon productivity level						
省份	农业新质生产力			农业全要素碳生产率		
	2015 年	2023 年	变化率 1/%	2015 年	2023 年	变化率 2/%
北京	0.190 1	0.239 3	25.88	0.680 1	1.000 0	47.04
天津	0.153 6	0.210 6	37.11	0.357 7	1.000 0	179.56
河北	0.125 7	0.201 5	60.30	0.200 4	0.516 6	157.78
山西	0.090 8	0.130 1	43.28	0.205 5	0.330 0	60.58
内蒙古	0.081 5	0.119 8	46.99	0.209 3	0.333 3	59.25
辽宁	0.128 7	0.152 2	18.26	0.229 1	0.395 8	72.76
吉林	0.111 2	0.136 0	22.30	0.188 5	0.278 9	47.96
黑龙江	0.123 6	0.150 6	21.84	0.478 1	0.853 2	78.46
上海	0.316 7	0.329 0	3.88	0.477 2	1.000 0	109.56
江苏	0.372 9	0.528 9	41.83	0.326 3	0.8317	154.89
浙江	0.190 0	0.351 7	85.11	0.239 9	0.767 4	219.88
安徽	0.098 8	0.198 4	100.81	0.183 4	0.276 3	50.65
福建	0.154 2	0.294 7	91.12	0.242 8	0.636 5	162.15
江西	0.101 0	0.191 5	89.60	0.198 8	0.325 4	63.68
山东	0.196 6	0.293 8	49.44	0.344 5	0.852 6	147.49
河南	0.170 1	0.276 1	62.32	0.350 3	1.000 0	185.47
湖北	0.107 6	0.207 7	93.03	0.284 1	0.600 3	111.30
湖南	0.107 1	0.199 8	86.55	0.230 1	0.493 9	114.65
广东	0.268 5	0.449 7	67.49	0.295 4	0.827 9	180.26
广西	0.191 5	0.324 8	69.61	0.302 0	0.656 8	117.48
海南	0.101 0	0.173 9	72.18	0.393 5	0.791 9	101.25
重庆	0.111 2	0.158 4	42.45	0.329 2	0.864 8	162.70
四川	0.126 0	0.216 2	71.59	0.326 5	0.868 5	166.00
贵州	0.093 8	0.134 5	43.39	0.415 7	1.000 0	140.56
云南	0.138 3	0.190 8	37.96	0.217 6	0.548 5	152.07
西藏	0.064 8	0.112 6	73.77	0.866 9	1.000 0	15.35
陕西	0.195 8	0.302 6	54.55	0.400 7	0.859 0	114.37
甘肃	0.062 2	0.105 1	68.97	0.144 6	0.339 1	134.51
青海	0.066 4	0.146 0	119.88	0.582 5	0.903 7	55.14
宁夏	0.059 6	0.115 1	93.12	0.353 3	0.495 5	40.25
新疆	0.124 7	0.156 3	31.61	0.279 6	0.872 7	212.12

注：变化率 1 为农业新质生产力的变化率，变化率 2 为农业全要素碳生产率的变化率。

表 S7 主导影响因素识别结果

Tab. S7 Identification results of dominant influencing factors								%
特征名称	经济发展水平	产业二元化水平	城乡收入差距	城镇化率	财政支农力度	地形起伏度	环境规制力度	自然保护力度
特征重要性	28.99	6.34	14.46	8.05	8.28	11.59	5.00	17.30

表 S8 耦合协调度评价结果

Tab. S8 Evaluation results of coupled coordination degree

省份	2015 年			2023 年			增幅/%
	排序	耦合协调度	类别	排序	耦合协调度	类别	
北京	2	0.599 7	2	11	0.675 0	3	12.56
天津	11	0.484 2	1	12	0.672 6	3	38.91
河北	23	0.398 4	1	21	0.607 0	3	52.36
山西	28	0.369 6	1	30	0.456 9	1	23.62
内蒙古	30	0.361 4	1	28	0.472 6	1	30.77
辽宁	22	0.414 4	1	25	0.505 3	2	21.94
吉林	26	0.380 5	1	29	0.465 5	1	22.34
黑龙江	8	0.493 0	1	19	0.621 3	3	26.02
上海	1	0.623 5	3	5	0.767 5	3	23.10
江苏	3	0.590 6	2	1	0.858 9	4	45.43
浙江	12	0.462 1	1	3	0.781 1	3	69.03
安徽	29	0.366 9	1	27	0.489 3	1	33.36
福建	17	0.439 9	1	8	0.745 0	3	69.36
江西	27	0.376 5	1	24	0.509 3	2	35.27
山东	6	0.510 1	2	7	0.746 0	3	46.25
河南	7	0.494 0	1	9	0.735 2	3	48.83
湖北	20	0.418 1	1	18	0.622 5	3	48.89
湖南	24	0.396 2	1	20	0.607 6	3	53.36
广东	4	0.530 7	2	2	0.829 6	4	56.32
广西	9	0.490 4	1	4	0.773 5	3	57.73
海南	14	0.446 5	1	14	0.651 8	3	45.98
重庆	18	0.437 4	1	15	0.635 2	3	45.22
四川	13	0.450 4	1	10	0.685 5	3	52.20
贵州	15	0.444 3	1	22	0.597 0	2	34.37
云南	21	0.416 5	1	13	0.657 6	3	57.89
西藏	10	0.486 8	1	23	0.557 5	2	14.52
陕西	5	0.529 3	2	6	0.752 4	3	42.15
甘肃	31	0.308 0	1	31	0.447 6	1	45.32
青海	16	0.443 5	1	17	0.623 3	3	40.54
宁夏	25	0.380 9	1	26	0.503 5	2	32.19
新疆	19	0.432 1	1	16	0.632 9	3	46.47

表 S9 空间杜宾模型估计结果

Tab. S9 Estimation results of the spatial durbin model

解释变量	经济发展水平	城乡收入差距	财政支农力度	地形起伏度	自然保护力度	空间自回归系数
直接效应	0.019*** (6.82)	−0.058** (−2.28)	−0.229*** (−2.91)	0.059*** (5.18)	−0.011* (−1.92)	
间接效应	0.023** (2.15)	−0.031* (−1.89)	−0.185* (−1.76)	0.035* (1.92)	−0.008* (−1.85)	0.312*** (3.25)
总效应	0.042*** (7.51)	−0.089*** (−3.02)	−0.414*** (−3.55)	0.094*** (5.87)	−0.019* (−1.88)	