

皮修平, 唐俊杰, 周榕基. 新世纪中国水稻生产格局时空演变及驱动因素分析[J]. 沈阳农业大学学报, 2026, 57(3): 000-000.

PI X P, TANG J J, ZHOU R J. Spatiotemporal evolution and driving factors of rice production patterns in China in the new century[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2026, 57(3): 000-000.

新世纪中国水稻生产格局时空演变及驱动因素分析

皮修平^{1,2}, 唐俊杰¹, 周榕基^{1,2}

(1. 衡阳师范学院 经济与管理学院, 湖南 衡阳 421002; 2. 湖南省乡村产业振兴研究中心, 湖南 衡阳 421002)

摘要: [目的] 系统研究我国水稻生产的时空演变特征及其多维驱动机制, 旨在为优化水稻生产格局和确保国家粮食安全提供决策支持。 [方法] 基于2000-2022年我国31个省市自治区面板数据, 采用集中度指数、重心标准差椭圆、空间自相关分析和核密度估计等方法, 全面揭示水稻生产格局的时空变化规律, 并结合空间杜宾模型, 深入探讨自然条件、社会经济、要素投入和技术创新等多维驱动机制的综合作用及其空间溢出效应。 [结果] 2000-2022年间, 中国水稻生产呈“先降后波动上升”趋势, 生产格局表现出“南缩北扩”的特征, 生产重心整体向东北方向迁移; 水稻生产格局存在显著的空间正相关性, 以高-高集聚和低-低集聚为主, 但空间集聚性逐渐减弱; 水稻生产呈现显著的空间溢出效应, 自然条件(种植面积)、社会经济(经济发展水平、非农就业机会、城镇化率)、要素投入(有效灌溉面积)和技术创新(水稻单产)对水稻生产集中度呈显著正相关, 而与要素投入(化肥投入、农村劳动力)则呈显著负相关。邻近省份的有效灌溉面积、非农就业机会、化肥投入和城镇化率会影响本省的水稻生产集中度。 [结论] 优化水稻生产格局应关注区域间的空间关联性, 加强农业基础设施建设, 合理控制化肥使用, 推动城乡统筹发展, 以提升水稻生产效率, 保障国家粮食安全。

关键词: 水稻生产; 时空演变; 驱动因素; 粮食安全; 空间杜宾模型

中图分类号: F323.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-1700(2026)03-0000-00

Spatiotemporal Evolution and Driving Factors of Rice Production Patterns in China in the New Century

PI Xiuping^{1,2}, TANG Junjie¹, ZHOU Rongji^{1,2}

(1. School of Economics and Management, Hengyang Normal University, Hengyang Hunan 421002, China; 2. Hunan Provincial Rural Industry Revitalization Research Center, Hengyang Hunan 421002, China)

Abstract: [Objective] This study systematically investigates the spatiotemporal evolution characteristics and multidimensional driving mechanisms of rice production in China, aiming to provide decision-making support for optimizing the spatial pattern of rice production and ensuring national food security. [Methods] Based on panel data from 31 provinces (autonomous regions and municipalities) in China from 2000 to 2022, the study employs the concentration index, standard deviation ellipse, spatial autocorrelation analysis, and kernel density estimation to comprehensively reveal the spatiotemporal dynamics of rice production patterns. Furthermore, a Spatial Durbin Model (SDM) is applied to explore the comprehensive effects and spatial spillover mechanisms of multiple driving factors, including natural conditions, socioeconomic factors, input factors, and technological innovation. [Results] From 2000 to 2022, China's rice production exhibited a trend of "initial decline followed by fluctuating growth." The spatial pattern showed a "southward contraction and northward expansion," with the production gravity center shifting northeastward. Significant positive spatial autocorrelation was observed, characterized mainly by high-high and low-low clusters, though the degree of spatial

收稿日期(Received): 2025-06-17 修回日期(Revised): 2025-11-10 接受日期(Accepted): 2025-11-25

基金项目: 国家社会科学基金一般项目(21BJY257); 湖南省创新平台开放基金项目(2023HSKFJJ015)

第一作者: 皮修平(1963-), 男, 硕士, 教授, 从事农业经济学研究, E-mail: pixiuping2025@163.com

通信作者: 周榕基(1978-), 男, 博士, 教授, 从事农业经济学研究, E-mail: zhourongji@hynu.edu.cn

agglomeration gradually weakened. Rice production displayed significant spatial spillover effects: natural conditions (sown area), socioeconomic factors (economic development level, non-agricultural employment opportunities, urbanization rate), input factors (effective irrigation area), and technological innovation (rice yield per unit area) were positively associated with rice production concentration, whereas input factors such as fertilizer input and rural labor force exhibited significant negative correlations. The effective irrigation area, non-agricultural employment opportunities, fertilizer input, and urbanization rate in neighboring provinces also significantly affected local rice production concentration. **[Conclusion]** To optimize the spatial pattern of rice production, attention should be given to spatial linkages among regions. Strengthening agricultural infrastructure, rationally controlling fertilizer application, and promoting coordinated urban-rural development are essential strategies to improve rice production efficiency and safeguard national food security.

Key words: rice production; spatiotemporal evolution; driving factors; food security; spatial Durbin model

“五谷者,万民之命,国之重宝”,粮食安全事关经济发展、社会稳定、政治安全,是实现国家安全的重要基础^[1]。当前,我国农业发展面临复杂挑战。外部方面,国际地缘冲突加剧、全球粮食价格上涨与农业贸易逆差扩大等问题对粮食安全形成持续压力^[2];内部方面,种粮效益低、种植结构“去粮化”、供需矛盾加剧及自然灾害频发等问题也使粮食安全形势更加严峻^[3]。在此背景下,构建稳定、安全、优质的粮食供应体系已成为我国亟待解决的重要课题。水稻是我国第一大口粮作物,其生产水平直接关系到国家粮食安全,同时对生态环境^[4]、水资源利用^[5]、公共健康^[6]等有重要影响。因此,研究水稻生产格局的时空演变规律及其驱动因素,不仅有助于优化生产布局、提升水稻生产率,更为实现国家粮食安全战略目标提供了坚实支撑。

国内外关于农作物生产格局的研究取得了诸多成果。研究对象多聚焦水稻^[7]、小麦^[8]、玉米^[9]等主要粮食作物,也涉及水果^[10]、蔬菜^[11]等经济作物;方法上由定性为主转向定量为主,广泛采用比较优势指数、莫兰指数、GIS空间分析、地理探测器与空间计量模型等方法^[12-13];驱动因素研究既有聚焦耕地^[14]、机械投入^[15]、劳动力^[16]、气候^[17]等单因素影响,也有整合自然条件、社会经济与技术创新的综合框架^[3,7]。总体上,学界普遍认同我国粮食生产呈“南退北进”趋势^[18],生产重心向东北方向迁移^[19]。然而,现有研究仍存在两方面不足:其一,对多因素间交互作用与空间溢出效应关注不足;其二,缺少从空间经济学视角对生产格局演变机制的系统化解释,尺度上也多停留于宏观层面。

综上,本研究拟在3方面进行深化:(1)综合运用集中度指数、重心标准差椭圆、空间自相关分析与核密度估计等方法,从时空双维度系统刻画新世纪以来我国水稻生产格局的演变轨迹与集聚特征;(2)采用空间杜宾模型,同时识别自然条件、社会经济、要素投入与技术创新等驱动因素对水稻生产的直接效应与空间溢出效应,揭示空间异质性与溢出性;(3)以省域为研究单元,识别省域间空间关联与互动机制,为省级政策制定提供参考,并为后续县域尺度的精细化研究提供方法论框架。

1 材料与方法

1.1 数据来源

采用2000-2022年中国31个省市区的水稻面板数据进行分析。对于缺失值,采用线性插值法补充。所使用的数据来源于《中国统计年鉴》《中国农村统计年鉴》及各省市区的统计年鉴。中国行政边界、省级行政区划底图数据来自自然资源部标准地图服务系统(www.mnr.gov.cn)。

1.2 变量选取

水稻生产本质上是自然资源与经济结合的有机结合^[3],随着水稻生产逐步迈向规模化和市场化,其空间格局的驱动因素变得更加复杂。结合相关文献,将驱动因素归纳为4方面:(1)自然条件。水稻生产依赖适宜的环境,且易受自然灾害扰动,从而影响生产布局。选取水稻播种面积和成灾比例等指标衡量自然条件的影响。(2)社会经济。随着农村地区非农就业机会的增加,劳动力向非农产业的流动日益显著;城镇化进程的加速进一步推动农村劳动力外流^[12]。选取经济发展水平、非农就业机会和城镇化率指标衡量社会经济影响。(3)要素投入。化肥的合理投入能提高水稻单产水平,也能弥补自然条件的不足;农村劳动力数量则影响粮食生产分布与效率;有效灌溉面积反映了农业基础设施与人力投入水平^[20,24]。选取化肥投入、有效灌溉面积和农村劳动

力指标衡量要素投入影响。(4)技术创新。技术创新能够提高单产水平并削弱自然约束,水稻单产在一定程度上反映农业技术水平的高低。选取水稻单产作为衡量技术创新的指标。

表1 模型指标及变量说明

Table 1 Model indicators and variable descriptions

指标类别 Indicator class	指标 Indicator	符号 Symbol	变量说明 Variable description
被解释变量 Explained variable	水稻产量集中度 Rice yield concentration	Y	产量集中度/% Yield concentration
自然条件 Natural conditions	播种面积 Sown area	X_1	水稻播种面积/($\times 10^3$ hm ²) Rice sown area
	成灾比例 Disaster ratio	X_2	成灾面积/受灾面积/% Disaster area / Affected area
社会经济 Socioeconomic conditions	经济发展水平 Economic development level	X_3	人均GDP/(万元·人 ⁻¹) Per capita GDP
	非农就业机会 Non-agricultural employment opportunities	X_4	第三产业产值/国内生产总值/% Output value of secondary and tertiary industries
	城镇化率 Urbanization rate	X_5	城镇人口/常住人口/% Urban population / Permanent population
要素投入 Input factors	化肥投入 Fertilizer input	X_6	化肥投入量/万 t Amount of fertilizer input
	农村劳动力 Rural labor force	X_7	第一产业从业人员/个 Number of employees in the primary industry
技术创新 Technological innovation	有效灌溉面积 Effective irrigation area	X_8	有效灌溉面积/ $\times 10^3$ hm ² Effective irrigated area
	水稻单产 Rice yield per unit area	X_9	水稻总产量/水稻播种面积/(kg·hm ⁻²) Total rice yield /Rice sown area

为提高水稻数据的可比性与贴合度,对化肥投入与有效灌溉面积按各地区水稻播种面积占总播种面积的权重进行了加权修正。

1.3 集中度指数

采用产业集中度指数(CRn)衡量我国水稻生产的空间集聚程度。该指数源于产业组织理论,用于表征市场中前n家规模最大主体的市场份额集中度^[20],其计算公式为:

$$CRn(\%) = \sum_{i=1}^n Q_i / Q \times 100 \quad (1)$$

式中: Q_i 为水稻产量排名前n位的第i个省份的产量; Q 为全国水稻总产量; n 通常取4或8。CRn值越高,表明生产越向头部省份集中,其动态变化可直观反映生产格局的时空分异特征。

1.4 重心标准差椭圆

重心标准差椭圆方法主要是用于揭示社会经济、自然环境等要素空间格局特征的空间统计方法^[21]。通过标准差椭圆的重心、分布方向和形状等角度,描绘中国水稻生产格局时空演变特征。水稻生产重心计算公式为:

$$L_t = \sum_{i=1}^N M_{it} L_i / \sum_{i=1}^N M_{it} \quad (2)$$

$$B_t = \sum_{i=1}^N M_{it} B_i / \sum_{i=1}^N M_{it} \quad (3)$$

式中: L_t 、 B_t 分别为第t年水稻生产重心所在地理位置的经度值和纬度值; L_i 、 B_i 分别为i省省会所在地的经度值和纬度值; M_{it} 为i省第t年的水稻产量; N 为地区数量。水稻生产重心移动距离的计算公式为:

$$D = E \times \sqrt{(L_s - L_q)^2 + (B_s - B_q)^2} \quad (4)$$

式中: D 为水稻生产重心之间的距离。 E 为常数,是把地理坐标(以度为单位)转换为平面距离所对应的值,通常取111.111 km^[22]。 L_s 、 B_s 、 L_q 、 B_q 分别为第s年和第q年水稻生产重心的经度值和纬度值。

1.5 空间自相关分析

空间自相关包括全局 Moran's I 和局部 Moran's $I^{[23]}$ 。首先,通过全局 Moran's I ,检验中国各省市水稻产量的空间自相关特征;随后,利用局部 Moran's I 进一步分析中国水稻产量的局部空间分布特性。全局 Moran's I 的计算公式为:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}} \quad (5)$$

式中: $S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$ 为样本方差; w_{ij} 为空间权重矩阵的元素; x_i 和 x_j 分别为 i 和 j 地区的水稻产量; w_{ij} 为空间权重矩阵的 (i, j) 元素。本研究选择构建空间 0-1 矩阵,若地区相邻则取值为 1, 否则为 0。

局部 Moran's I 的计算公式为:

$$I_i = \frac{(X_i - \bar{X}) \sum_{j=1}^n W_{ij} (X_j - \bar{X})}{S^2} \quad (6)$$

若 I_i 大于 0,表示区域 i 的周围形成高-高集聚区(H-H)或低-低集聚区(L-L),说明考察区域与其周围区域的集聚情况相同;若 I_i 小于 0,此时形成高-低集聚区(H-L)或低-高集聚区(L-H),说明考察区域的取值和周围区域是相反的^[24]。

1.6 核密度估计

核密度估计(Kernel Density Estimation)是利用连续的密度曲线描述随机变量空间分布形态的一种非参数方法^[25]。该方法依据数据本身,能有效规避了人为设定条件的局限,计算公式为:

$$F(X) = \frac{1}{Nh} \sum_{i=1}^N \left(\frac{X_i - x}{h} \right) \quad (7)$$

式中: $F(X)$ 为核函数; N 为观测数量; K 为核密度; X_i 为独立同分布的观测值; x 为平均值; h 为带宽。

1.7 空间杜宾模型

空间杜宾模型(SDM)是空间滞后模型(SLM)和空间误差项模型(SEM)的结合形式,同时包含了因变量和自变量的空间滞后项,可以有效度量水稻生产格局演变的驱动因素以及空间溢出效应^[26]。SDM 的具体形式为:

$$Y_{it} = \rho W \cdot Y_{it} + \sum_{j=1}^9 \beta_j X_{j,it} + \sum_{k=1}^9 \theta_k W \cdot X_{k,it} + \mu_i + \lambda_t + \varepsilon_{it} \quad (8)$$

式中: i, t 分别为省份和年份; W 为空间权重矩阵; Y_{it} 为各省份水稻产量生产集中度; X_{it} 为解释变量; $W \cdot Y_{it}$ 为被解释变量的空间滞后项; $W \cdot X_{it}$ 为解释变量的空间滞后项; μ_i 和 λ_t 分别为地区效应和时间效应; ε_{it} 为随机误差项; ρ, β, θ 为待估参数。

2 中国水稻生产格局时空演变特征

2000-2022年间,我国水稻总产量与播种面积呈现出波动式增长的趋势,该变化趋势可分为3个阶段(图1)。第1阶段(2000-2003年)为下降期。随着工业化和城镇化的快速推进,农村劳动力结构发生了显著变化:农村青年劳动力外迁和从事农业种植活动的意愿较低,农村劳动力老龄化趋势突显^[12]。加上自然灾害频发,导致耕地面积减少,从而引发了水稻产量的持续下降。水稻产量由 18 790.77 万 t 降低至 16 065.56 万 t,为 2000 年以来的最低点。第2阶段(2004-2015年)为增长期,从 2004 年开始,中国逐步取消农业税,到 2006 年全面废止;同时通过增加良种补贴、种粮直接补贴、农机具购置补贴和农资综合补贴农业补贴等一系列惠农政策,减轻了农民负担,提高了种粮收益,推动了水稻产量回暖。此阶段水稻产量增幅达 24.3%。第3阶段(2016-2022年)为波动期,中国水稻产量总体保持稳定,略有波动,产量维持在 20 849.48 万 t 到 21 284.24 万 t 之间。2017 年后的产量阶段性下降,主因是国家推行“双季稻改单季稻”等结构性调整政策,主动压减了品质与单产较低的早、晚稻面积,优化了生产结构。

2.1 水稻产量集中度变化

通过计算生产集中度指数,可以更全面地了解水稻生产的空间格局的变化趋势。

这一指数反映了各地区水稻生产在全国中的地位 and 贡献变化。2000 年以来,中国的水稻生产集中度指数发生了显著变化(表 2)。首先,水稻产量逐渐向主产省份集聚。数据显示,2000 年水稻产量的 CR4 指数为

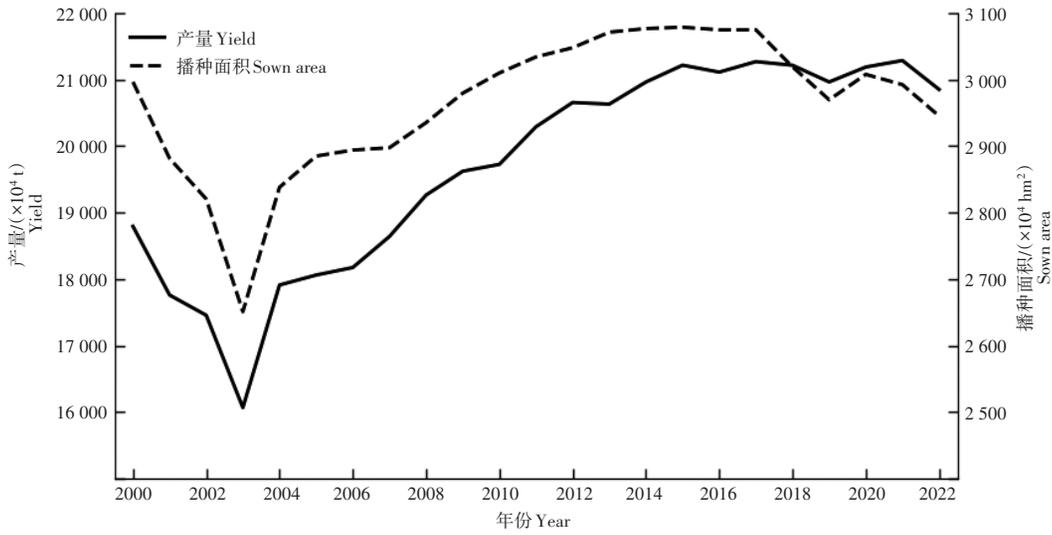


图1 2000-2022年中国水稻产量和播种面积变化趋势

Figure 1 Trends in rice yield and sown area in China from 2000 to 2022

表2 中国水稻产量集中度指数

Table 2 China's rice production concentration index

省份 Province	2000	2011	2022	省份 Province	2000	2011	2022
北京 Beijing	0.04(27)	0.00(30)	0.00(29)	湖北 Hubei	7.18(4)	7.96(5)	9.93(5)
天津 Tianjin	0.07(26)	0.06(26)	0.28(23)	湖南 Hunan	11.48(1)	12.98(1)	14.05(2)
河北 Hebei	0.32(23)	0.29(25)	0.26(24)	广东 Guangdong	6.83(6)	5.29(8)	5.90(8)
山西 Shanxi	0.02(29)	0.00(29)	0.01(27)	广西 Guangxi	5.88(7)	5.17(9)	5.47(9)
内蒙古 Inner Mongolia	0.35(22)	0.34(23)	0.48(19)	海南 Hainan	0.72(18)	0.67(18)	0.68(18)
辽宁 Liaoning	1.81(15)	2.27(15)	2.26(15)	重庆 Chongqing	2.56(13)	2.34(13)	2.58(11)
吉林 Jilin	1.80(16)	3.10(10)	3.62(10)	四川 Sichuan	7.84(3)	7.29(6)	7.78(7)
黑龙江 Heilongjiang	5.00(9)	12.02(2)	14.46(1)	贵州 Guizhou	2.29(14)	1.59(17)	2.10(17)
上海 Shanghai	0.66(19)	0.49(20)	0.44(21)	云南 Yunnan	2.73(12)	2.97(11)	2.47(13)
江苏 Jiangsu	8.64(2)	9.10(4)	10.60(4)	西藏 Tibet	0.00(30)	0.00(28)	0.00(30)
浙江 Zhejiang	4.75(10)	2.77(12)	2.46(14)	陕西 Shaanxi	0.45(21)	0.39(21)	0.39(22)
安徽 Anhui	5.86(8)	7.15(7)	8.43(6)	甘肃 Gansu	0.03(28)	0.00(27)	0.01(28)
福建 Fujian	3.04(11)	2.29(14)	2.10(16)	青海 Qinghai	0.00(31)	0.00(31)	0.00(31)
江西 Jiangxi	7.16(5)	9.99(3)	10.84(3)	宁夏 Ningxia	0.30(24)	0.35(22)	0.13(26)
山东 Shandong	0.53(20)	0.51(19)	0.48(20)	新疆 Xinjiang	0.29(25)	0.32(24)	0.18(25)
河南 Henan	1.53(17)	2.26(16)	2.55(12)				

注:括号内为水稻产量的集中度排名。

Note: Values in parentheses are the rice yield concentration rank.

35.13%, CR8 指数为 60.86%; 而到了 2022 年, 这两个指标分别上升至 49.95% 和 81.99%, 空间聚集特征明显。与此同时, 各省水稻产量集中度排名发生结构性调整: 黑龙江从 2000 年的第 9 位跃居 2022 年首位, 产量占比达 14.6%; 传统主产区湖南、江西等依托双季稻技术改良保持优势, 而四川、广东等省份因劳动力成本上升与种植结构调整, 排名发生显著后移。此外, 东北地区水稻产量贡献率从 2000 年的 28.4% 提升至 2022 年的 46.2%, 标志着“南缩北扩”格局进一步深化。

2.2 水稻生产重心变化

由表 3 可知, 水稻产量的重心从 2000 年的 113.88°E30.42°N 逐步向东北移动, 到 2022 年达到 115.39°E 32.30°N, 重心直线移动约 253 km。水稻播种面积的重心也从 2000 年的 113.87°E30.00°N 移动至 2022 年的 115.13°E31.75°N, 重心直线移动约 228 km。水稻生产重心呈现出明显的东北迁移趋势。

由图 2 和图 3 可知, 在政策支持和资源优化配置的推动下, 中国水稻生产逐步实现了从南方向北方的转移, 生产重心从湖北省迁移到河南省。这一过程不仅展现了水稻生产的集约化趋势, 还凸显了北方地区凭借

表3 重心标准差椭圆指标

Table 3 Standard deviational ellipse

指标 Indicator	年份 Year	重心坐标 Centroid coordinates	辅轴长度 Minor axis length	主轴长度 Major axis length	转角 θ Rotation angle θ
水稻产量 Rice yield	2000	113.88°E30.42°N	5.88	11.47	50.14
	2005	113.93°E30.74°N	5.68	11.92	49.28
	2010	114.97°E31.90°N	5.57	13.51	45.40
	2015	115.18°E32.17°N	13.75	5.38	44.69
	2022	115.39°E32.30°N	13.81	5.17	43.92
水稻面积 Rice area	2000	113.87°E30.00°N	5.75	11.35	48.24
	2005	113.81°E30.16°N	5.58	11.61	47.80
	2010	114.66°E31.21°N	13.16	5.41	44.33
	2015	115.00°E31.71°N	13.75	5.26	43.58
	2022	115.13°E31.75°N	13.59	5.09	43.10

耕地资源和生产技术上的优势,使其逐步发展成为水稻生产的重要区域。

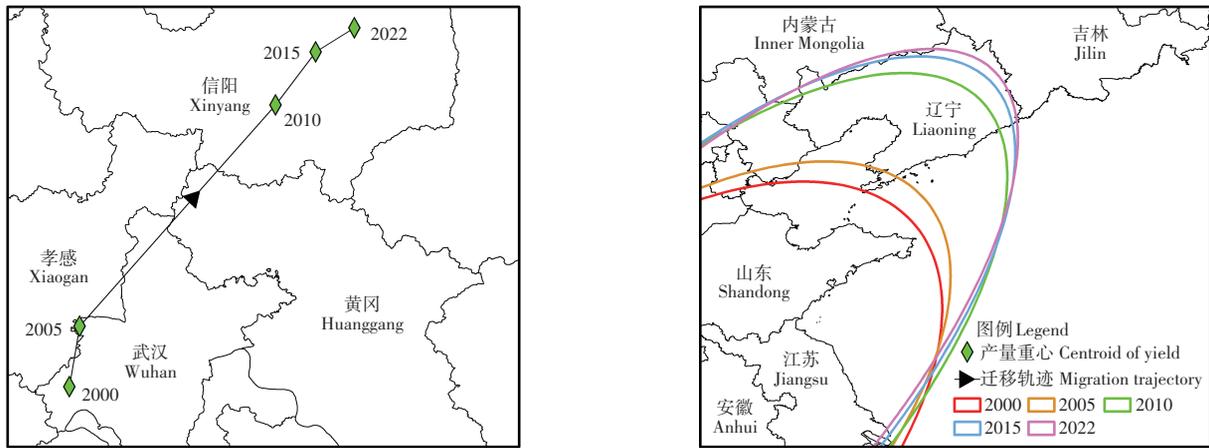
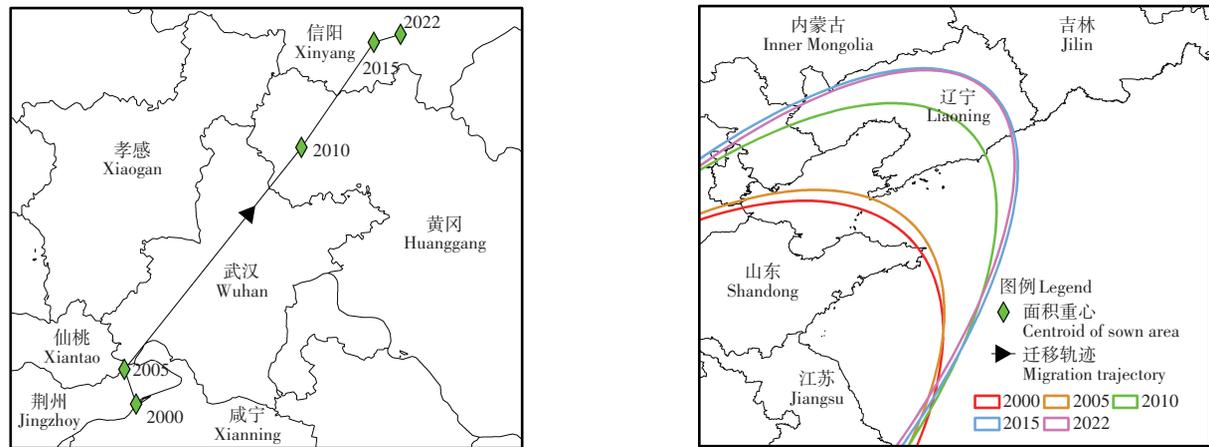


图2 中国水稻产量重心移动轨迹和标准差椭圆分布

Figure 2 Migration trajectory and standard deviational ellipse of China's rice production centroid



基于地理资源部标准地图服务网站GS(2024)0650号标准地图制作,底图边界无修改

The map is produced based on the standard map GS(2024)0650 provided by the Standard Map Service, Ministry of Natural Resources of China. The base map boundaries have not been modified

图3 中国水稻面积重心移动轨迹和标准差椭圆分布

Figure 3 Migration trajectory and standard deviational ellipse of China's rice sown area centroid

2.3 水稻生产空间相关性分析

由表 4 可知,2000-2022 年间,中国水稻产量的全局 Moran's I 均为正值,数值范围在 0.19~0.35,并且大多数

年份的 Z 值在 1% 或 5% 的显著性水平上显著。这表明,中国水稻生产格局整体呈现出显著的空间正相关性,即水稻种植在空间上并非相互独立变化,而是表现出明显的空间集聚特征,反映了水稻生产的相互依赖性。中国水稻生产的空间集聚性逐渐减弱(Moran's I 指数由 0.322 降至 0.208),主要影响因素:(1)政策趋同削弱传统产区优势。农业税取消后,南方部分主产区因成本上升推动种植结构调整,“非粮化”趋势显现。(2)技术扩散促进生产均衡。东北等地的节水灌溉等技术向其他区域推广,提升了传统弱势产区的单产水平。(3)气候风险推动布局分散。极端天气导致主产区减产,云南、贵州等边缘产区通过种植耐逆品种补充产能。(4)市场一体化降低地理依赖。交通与物流体系完善促进了生产要素与产品跨区域流动,减弱生产对本地资源的依赖。

表4 全局空间自相关检验结果

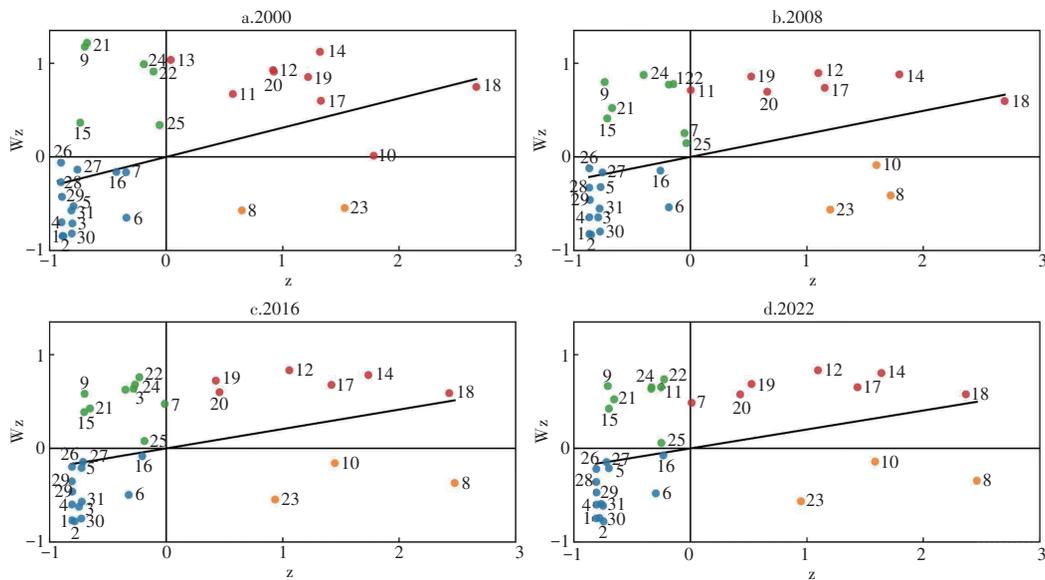
Table4 Results of global spatial autocorrelation test

年份 Year	Moran's I 指数值 Index	Z	年份 Year	Moran's I 指数值 Index	Z
2000	0.322	3.007***	2012	0.234	2.270**
2001	0.346	3.222***	2013	0.223	2.172**
2002	0.318	2.961***	2014	0.235	2.274**
2003	0.341	3.169***	2015	0.239	2.312**
2004	0.318	2.975***	2016	0.213	2.107**
2005	0.314	2.945***	2017	0.213	2.105**
2006	0.296	2.805***	2018	0.216	2.213**
2007	0.294	2.785***	2019	0.212	2.091**
2008	0.291	2.759***	2020	0.196	1.963*
2009	0.286	2.718***	2021	0.198	1.984**
2010	0.264	2.521**	2022	0.208	2.056**
2011	0.238	2.298**			

注:***、**、*表示 1%、5%、10% 的显著性水平。下同。

Note:***,**,*indicate significance at the 1%,5%,and 10%levels,respectively.The same below.

由图 4 可知,水稻生产主要呈现 H-H 集聚和 L-L 集聚的分布格局。H-H 集聚主要分布在长江中下游的农业基础较好的地区,尤其是湖南、湖北和江西,始终呈现出 H-H 集聚,表明这些地区水稻产量较高且邻近区域也维持较高产量。而 L-L 集聚出现在自然条件较差或农业资源匮乏的黄淮海平原区,这些区域水稻产量普遍



图中 1~31 数字依次表示我国 31 个省市区,即京、津、冀、晋、蒙、辽、吉、黑、沪、苏、浙、皖、闽、赣、鲁、豫、鄂、湘、粤、桂、琼、渝、川、贵、云、藏、陕、甘、青、宁、新
In the figure, the numbers 1 to 31 represent the 31 provinces, autonomous regions, and municipalities of China: Beijing, Tianjin, Hebei, Shanxi, Inner Mongolia, Liaoning, Jilin, Heilongjiang, Shanghai, Jiangsu, Zhejiang, Anhui, Fujian, Jiangxi, Shandong, Henan, Hubei, Hunan, Guangdong, Guangxi, Hainan, Chongqing, Sichuan, Guizhou, Yunnan, Tibet, Shaanxi, Gansu, Qinghai, Ningxia, Xinjiang

图4 局部空间自相关检验结果

Figure 4 Results of local spatial autocorrelation test

较低且邻接区域的产量差异较小。H-L集聚和L-H集聚现象则表明了产量较高或较低的区域与邻近区域之间的显著差异,反映了资源分布不均或农业技术差异。

2.4 水稻生产核密度分布

由图5可知,水稻产量与播种面积均表现出由离散向集中的动态演进特征。

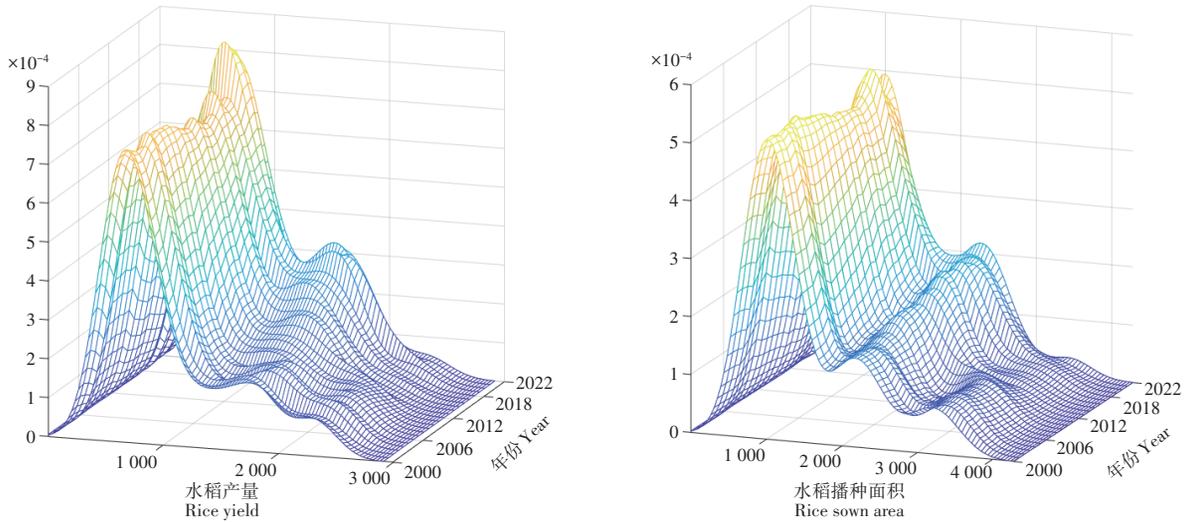


图5 中国水稻产量和播种面积核密度估计图

Figure 5 Kernel density estimation of rice yield and sown area in China

早期,两者的空间分布均呈现明显的双峰结构,表明各地区在生产规模与产出水平上存在显著分化。随着时间推移,至2012年,双峰特征逐步弱化,分布峰值趋于集中,反映出省域间水稻生产效率的差距逐渐缩小。进入2018年以后,产量与播种面积的核密度曲面均表现为单峰形态,显示出全国水稻生产格局的整体趋同。峰值位置整体右移且右侧尾部延展性增强,表明优势产区持续保持领先,空间格局呈现出“总体收敛、局部强化”的结构特征。总体而言,水稻生产格局演变是由分散到集聚、由极化到协调的过程。

3 水稻生产演变驱动因素分析

3.1 模型设定与选择

针对传统回归模型在空间效应分析中的局限性,选择构建空间计量模型进行实证检验。基于Anselin的模型选择框架^[27],首先通过LM检验对模型形式进行识别:LM-Error、LM-Lag及其稳健检验均显著,表明SDM更适合本研究的数据。进一步通过Wald检验和LR检验验证,确认了SDM较SLM与SEM具有更好的解释力。最终确定的SDM包含空间滞后项与被解释变量(水稻生产集中度)、解释变量的交互作用。该模型能够同时捕捉生产系统的直接效应与空间溢出效应^[25],既考虑了邻近区域生产集中度的相互影响,又纳入了解释变量的空间滞后项,为揭示水稻生产格局的空间关联机制提供了方法论支撑。检验结果见表5。

表5 空间计量模型检验结果

Table 5 Empirical test results for spatial econometric models

LM 检验 LM test	系数 Coef.	P	Wald 检验和 LR 检验 Wald test and LR test	系数 Coef.	P
LM-Error	64.024	0.000	Wald spatial error	70.95	0.000
LM-Lag	24.605	0.000	Wald spatial lag	52.88	0.000
LM-Error(Robust)	90.124	0.000	LR spatial error	67.47	0.000
LM-Lag(Robust)	50.705	0.000	LR spatial lag	51.09	0.000

3.2 模型估计结果分析

空间计量模型由于自变量的内生性,最小二乘法估计是有偏或不一致的,采用最大似然法对SDM进行参

数估计,同时对样本数据进行豪斯曼检验,结果显示在1%的水平上拒绝原假设,因此选择固定效应模型,同时控制时间效应和个体效应。

由表6可知,模型中1%水平上显著的空间自相关系数(ρ)和高 R^2 值表明水稻生产集中度在空间上存在显著的集聚效应,意味着水稻生产格局在区域之间具有一定的相互依赖性。这表明邻接省份水稻生产集中度存在显著的空间相关性,某一省份的水稻生产集中度的增加将会对邻接省份产生正向空间溢出效应,这也进一步验证了全局Moran's I 的结果。

表6 空间杜宾模型估计结果

Table 6 Estimation results of the SDM

变量 Variable	系数 Coef.	标准误 S.E.	变量 Variable	系数 Coef.	标准误 S.E.
X_1	0.003***	0.000	WX_1	-0.001**	0.000
X_2	-0.000	0.000	WX_2	0.000	0.001
X_3	0.069***	0.019	WX_3	0.034	0.039
X_4	0.028***	0.009	WX_4	0.061***	0.019
X_5	0.027***	0.006	WX_5	-0.026**	0.013
X_6	-0.007***	0.002	WX_6	-0.007*	0.004
X_7	-0.000***	0.000	WX_7	0.001***	0.000
X_8	0.003***	0.000	WX_8	0.002***	0.000
X_9	0.000***	0.000	WX_9	0.000	0.000
ρ	0.143***	42.732	R^2	0.877	

播种面积(X_1)有显著正向效应,但其空间滞后项为负,表示邻近地区可能存在土地资源竞争。成灾比例(X_2)负向影响但未达显著水平,这可能是由于自然灾害的破坏性与区域防灾协作的补偿性抵消所致。经济发展水平(X_3)对水稻生产具有显著的正向促进作用。非农就业(X_4)同时提升本地和周边区域生产集中度,体现了农村经济转型通过要素流动产生效益。与之相比,城镇化率(X_5)在本地推动生产集中度,却对周边区域产生抑制作用,这可能源于城镇化进程中资源向中心的集聚效应。要素投入方面,化肥投入(X_6)的影响均为负向,揭示了过量施肥不仅损害当地环境,还会产生跨省污染;农村劳动力(X_7)的影响较为特殊,在本地负向影响,却对周边有正向溢出,这可能与劳动力外流带来的资金与技术回流有关。有效灌溉面积(X_8)在本地和周边均正向影响,凸显出水利建设的重要性。此外,技术进步的直接效益体现于水稻单产(X_9),其仅对本地生产有显著促进作用,表明品种或技术的适应性存在地域限制。

3.3 空间效应分解分析

采用空间效应分解方法,将各影响因素对水稻生产格局的作用分为直接效应、间接效应和总效应,以系统揭示驱动因素作用的空间传导机制。其中,总效应表征特定解释变量发生单位变动时,其对全国各省份产生的综合影响均值;直接效应反映该变量变动对本省水稻生产的直接影响强度;间接效应则度量其对邻近地区产生的空间溢出效应。这种效应分解框架有效识别了要素作用的地理边界与空间关联特征^[28]。

由表7可知,各驱动因素对水稻生产的影响传导路径呈现显著异质性。播种面积(X_1)的显著正向作用,印证了耕地扩张与对水稻生产的基础性支撑。成灾比例(X_2)的影响未通过显著性检验,可能源于自然灾害威胁与防灾投入的双向作用削弱了成灾比例的影响。经济发展水平(X_3)与水稻生产存在强正相关,反映了经济增长带来的农业设施改善、新型农业技术进步以及市场条件的优化。非农就业机会(X_4)和城镇化率(X_5)也显示出显著的正向影响,表明随着农村经济的多元化,农民的生产积极性得到提升,从而推动水稻生产增长。化肥投入(X_6)在直接效应和总效应层面均呈显著负向影响揭示了传统生产模式带来的环境代价。农村劳动力(X_7)表现出直接效应与间接效应的方向背离,揭示了区域间劳动力要素的互补特征,周边地区的农村劳动力状况的改善能够正面影响本地区水稻生产。有效灌溉面积(X_8)表现出显著正向作用,说明水利设施完善的重要性。水稻单产(X_9)对本地水稻产能具有显著促进作用。值得注意的是,间接效应未通过显著性检验,提示单产增长的技术外溢存在空间局限性,可能受制于区域间气候条件的异质性。

表7 中国水稻生产演变影响因素的影响效应估计结果

Table 7 Estimation results of effects of driving factors on evolution of rice production in China

变量 Variable	直接效应 Direct effect		间接效应 Indirect effect		总效应 Total effect	
	系数 Coef.	标准误 S.E.	系数 Coef.	标准误 S.E.	系数 Coef.	标准误 S.E.
X_1	0.003***	0.000	-0.000	0.000	0.003***	0.000
X_2	-0.000	0.000	0.000	0.001	-0.000	0.001
X_3	0.071***	0.018	0.048	0.043	0.119***	0.040
X_4	0.028***	0.008	0.074***	0.020	0.102***	0.025
X_5	0.026***	0.006	-0.024**	0.012	0.002	0.013
X_6	-0.007***	0.002	-0.009**	0.003	-0.016***	0.003
X_7	-0.000***	0.000	0.000***	0.000	0.000	0.000
X_8	0.003***	0.000	0.002	0.000	0.006***	0.000
X_9	0.000***	0.000	0.000	0.000	0.000***	0.000

4 讨论与结论

本研究揭示出中国水稻生产空间格局呈显著“南缩北扩”特征,与杜蓉等^[3]关于粮食重心迁移、张强等^[7]对水稻格局的结论互证;生产重心持续向东北偏移,与刘大千等^[19,29]提出的“北进”现象空间耦合。由此,生产格局优化有必要构建南北差异化战略^[30]:东北主产区强化黑土地保护性耕作与规模化经营,南方依据《耕地恢复三年行动方案》完善“非粮化”防控,形成“北固产能—南守红线”的协同机制。投入层面,本研究发现粗放化学施用存在减产风险。以江苏“配方肥+无人机追施”为例,化肥利用率提升27.6%,显示智能施肥对“高投入—高污染”路径的替代价值。需以政策引导推广绿色技术、改善土壤与环境效率^[31]。技术方面,本研究发现创新是重塑格局的关键因素。2024年我国水稻单产达7 155kg·hm⁻²,创历史新高;建议实施分区技术优化策略^[32]:东北侧重耐寒粳稻与保护性耕作集成,南方双季稻区侧重节水灌溉与绿色防控,通过精准配置提升效率^[33]。

本研究结果表明,2000–2022年我国水稻生产呈“先降后波动上升”趋势,生产格局呈现出“南减北增”的发展趋势,水稻产量重心直线移动约253 km,水稻播种面积重心直线移动约228 km,生产重心整体向东北方向迁移。我国水稻生产格局存在显著的空间正相关性,以H–H集聚和L–L集聚为主,但空间集聚性逐渐减弱。水稻生产呈现显著的空间溢出效应,自然条件(种植面积)、社会经济(经济发展水平、非农就业机会、城镇化率)、要素投入(有效灌溉面积)和技术创新(水稻单产)对水稻生产集中度呈显著正相关,而与要素投入(化肥投入、农村劳动力)则呈显著负相关。邻近省份的有效灌溉面积、非农就业机会、化肥投入和城镇化率会影响当省水稻生产的集中度。

基于研究结论,未来应更加强调产区、要素和技术间的协同优化。一方面,立足“南缩北扩”格局趋势,优化生产布局,在缓解资源环境压力同时,巩固东北产能并稳定南方耕地。另一方面,推动技术与制度创新,推广智能绿色生产技术,畅通要素跨区流动,以实现增产增效与减少面源污染的目标。

参考文献:

- [1] 韩 杨.中国粮食安全战略的理论逻辑、历史逻辑与实践逻辑[J].改革,2022(1):43–56.
HAN Y.Theoretical logic,historical logic and practical logic of China's food security strategy[J].Reform,2022(1):43–56.
- [2] 徐媛媛,王传美.我国农产品期货市场流动性测量及“跨品种”动态溢出研究[J].农业技术经济,2021(11):62–77.
XU Y Y,WANG C M.Liquidity measurement and cross-variety dynamic spillover in the Chinese agricultural commodity futures market[J].Journal of Agrotechnical Economics,2021(11):62–77.
- [3] 杜 蓉,柳思维,蔡 荣.中国粮食空间生产格局演变特征及其驱动机制[J].经济问题,2023(8):92–102.
DU R,LIU S W,CAI R.The characteristics and driving mechanism of China's grain spatial production pattern evolution[J].On Economic Problems,2023(8):92–102.
- [4] 张艺馨,李 玥,朱振闯,等.未来气候变化对中国水稻产量的影响Meta回归分析[J].生态学报,2025,45(4):2011–2023.
ZHANG Y X,LI Y,ZHU Z C,et al.Meta-regression analysis of the impacts of future climate change on rice yield in China[J].Acta Ecologica Sinica,2025,45(4):2011–2023.

- [5] 胡永浩,胡南燕,武拉平.2022年中国粮食损失浪费的资源环境效应评估[J].干旱区资源与环境,2024,38(9):12-19.
HU Y H,HU N Y,WU L P.Assessment of the resource and environmental effects of China's grain loss and waste in 2022[J].
Journal of Arid Land Resources and Environment,2024,38(9):12-19.
- [6] WEBER A M,BAXTER B A,MCCLUNG A,et al.Arsenic speciation in rice bran:Agonomic practices,postharvest fermentation,
and human health risk assessment across the lifespan[J].Environmental Pollution,2021,290:117962.
- [7] 张强,张戈丽,朱道林,等.1980—2018年中国水稻生产变化的时空格局[J].资源科学,2022,44(4):687-700.
ZHANG Q,ZHANG G L,ZHU D L,et al.Spatiotemporal patterns of paddy rice production change in China during 1980-
2018[J].Resources Science,2022,44(4):687-700.
- [8] 白冰,杨雨豪,王小慧,等.基于农作制分区的1985—2015年中国小麦生产时空变化[J].作物学报,2019,45(10):1554-1564.
BAI B,YANG Y H,WANG X H,et al.Spatio-temporal changes of China's wheat production based on division of farming
system during 1985-2015[J].Acta Agronomica Sinica,2019,45(10):1554-1564.
- [9] 陈欢,王全忠,周宏.中国玉米生产布局的变迁分析[J].经济地理,2015,35(8):165-171.
CHEN H,WANG Q Z,ZHOU H.Empirical analysis of corn spatial distribution variation in China[J].Economic Geography,
2015,35(8):165-171.
- [10] 王伟新,向云,祁春节.中国水果产业地理集聚研究:时空特征与影响因素[J].经济地理,2013,33(8):97-103.
WANG W X, XIANG Y, QI C J. Study on geographic agglomeration of fruit industry in China: Spatial-temporal characteristics
and affecting factors[J]. Economic Geography, 2013, 33(8): 97-103.
- [11] 张军以,刘钰澜.中国省域蔬菜生产集聚格局演变及驱动因素研究[J].沈阳农业大学学报,2024,55(5):605-615.
ZHANG J Y, LIU Y L. Research on the evolution and driving factors of vegetable production agglomeration pattern in Chi-
na's provinces[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2024, 55(5): 605-615.
- [12] 王凤,刘艳芳,孔雪松,等.中国县域粮食产量时空演变及影响因素变化[J].经济地理,2018,38(5):142-151. WANG F, LIU Y F,
KONG X S, et al. Spatial and temporal variation of grain production and its influencing factors at the County Level in China
[J]. Economic Geography, 2018, 38(5): 142-151.
- [13] 李勇,何欢欢.主产区粮食产量时空格局演变与影响因素[J].中国农机化学报,2020,41(6):216-224.
LI Y, HE H H. Spatial and temporal pattern evolution and influencing factors of grain yield in major grain producing areas
[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(6): 216-224.
- [14] 刘颖,洪道远.要素投入、技术效率与水稻生产潜力研究:基于湖北省农村固定观察点的面板数据[J].华中农业大学学报(社
会科学版),2018(3):35-43.
LIU Y, HONG D Y. Study on factors investment, technical efficiency and potential of rice production: panel data based on
fixed observation points in Hubei Province[J]. Journal of Huazhong Agricultural University (Social Sciences Edition), 2018(3):
35-43.
- [15] 闵锐,谢雨濛,黄炜虹,等.中国粮食生产技术进步偏向与增长路径选择[J].统计与决策,2023,39(15):89-93.
MIN R, XIE Y M, HUANG W H, et al. Technical progress bias and growth path selection of grain production in China[J]. Sta-
tistics & Decision, 2023, 39(15): 89-93.
- [16] 田红宇,邓尚昆.农村劳动力转移影响粮食生产空间格局吗?——基于“异质性”劳动力的空间计量验证[J].开发性金融研究,
2019(5):73-89.
TIAN H Y, DENG S K. Does labor transfer affect the spatial pattern of grain production?—based on spatial econometric
analysis of transfer “heterogeneity” [J]. Development Finance Research, 2019(5): 73-89.
- [17] 庞艳梅,陈超,郭晓艺,等.1961—2015年西南区域单季稻生长季气候年型及其生产潜力分析[J].自然资源学报,2021,36(2):
476-489.
PANG Y M, CHEN C, GUO X Y, et al. Analysis of annual climate types and potential yield for single cropping rice in South-
west China during 1961-2015[J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(2): 476-489.
- [18] 张秋梦,杨方社,李飞.改革开放以来中国粮食生产空间重构[J].自然资源学报,2021,36(6):1426-1438.
ZHANG Q M, YANG F S, LI F. The grain production space reconstruction in China since the reform and opening up[J]. Jour-
nal of Natural Resources, 2021, 36(6): 1426-1438.
- [19] 刘大千,刘世薇,温鑫.东北地区粮食生产结构时空演变[J].经济地理,2019,39(5):163-170.
LIU D Q, LIU S W, WEN X. Spatial-temporal evolution of grain production structure in Northeast China[J]. Economic Geogra-
phy, 2019, 39(5): 163-170.

- [20] 刘芳,刘颖.我国水稻生产中不同类型技术要素投入的时空变化及门限效应分析[J].长江流域资源与环境,2021,30(8):2002-2014.
LIU F,LIU Y.Temporal and spatial changes and threshold effects of different types of technical inputs in rice production in China[J].Resources and Environment in the Yangtze Basin,2021,30(8):2002-2014.
- [21] 周镛基,刘璇,皮修平.外部性视阈下湖南省水稻生产净碳汇时空演替及驱动因素分析[J].环境科学,2025,46(8):4876-4887.
ZHOU R J,LIU X,PI X P.Spatiotemporal evolution and driving factors of net carbon sink in rice production in Hunan Province:An externality perspective[J].Environmental Science,2025,46(8):4876-4887.
- [22] 王泽宇,王焱熙,赵莉,等.中国制造业全要素生产率时空演变及影响因素[J].地理学报,2021,76(12):3061-3075.
WANG Z Y,WANG Y X,ZHAO L,et al.Spatio-temporal evolution and influencing factors of total factor productivity in China's manufacturing industry[J].Acta Geographica Sinica,2021,76(12):3061-3075.
- [23] 乔国通,黎寅慧,许晨,等.县域视角下皖北地区农业生产效率及其空间格局演变[J].沈阳农业大学学报,2024,55(4):503-512.
QIAO G T,LI Y H,XU C,et al.Agricultural productivity and its spatial pattern evolution in northern anhui province from the perspective of county[J].Journal of Shenyang Agricultural University,2024,55(4):503-512.
- [24] 周镛基,骆丽庄,吴思斌.水稻生产外部性价值时空演替及驱动力——以 2000—2021 年我国 30 个省市为例[J].生态学报,2024,44(21):9552-9566.
ZHOU R J,LUO L Z,WU S B.Spatiotemporal evolution and driving forces of the externality value in rice production:A study of 30 provinces in China from 2000-2021[J].Acta Ecologica Sinica,2024,44(21):9552-9566.
- [25] 孙斌,孙涛,薛建春.黄河流域城市群乡村振兴水平测度、动态演进及区域差异研究[J].沈阳农业大学学报,2025,56(1):166-176.
SUN B,SUN T,XUE J C.Level measurement, dynamic evolution and regional difference of rural revitalization in the Yellow River basin urban agglomeration[J].Journal of Shenyang Agricultural University,2025,56(1):166-176.
- [26] ANSELIN L.Exploring spatial data with GeoDaTM:A workbook[R].Center for Spatially Integrated Science,2005:201-223.
- [27] BEER C,RIEDL A.Modelling spatial externalities in panel data:The spatial durbin model revisited[J].Papers in Regional Science,2012,91(2):299-319.
- [28] LESAGE J P,PACE R K.Introduction to Spatial Econometrics[M].Boca Raton,FL:CRC Press,2009.
- [29] 徐春春,周锡跃,李凤博,等.中国水稻生产重心北移问题研究[J].农业经济问题,2013,34(7):35-40,111.
XU C C,ZHOU X Y,LI F B,et al.The research of rice production northward movement in China[J].Issues in Agricultural Economy,2013,34(7):35-40,111.
- [30] 李建平,李俊杰,李文娟,等.“十四五”期间我国水稻增产潜力与实现路径[J].农业经济问题,2021(7):25-37.
LI J P,LI J J,LI W J,et al.China's rice yield increase potential and realization path during the "14th Five-Year Plan" period[J].Issues in Agricultural Economy,2021(7):25-37.
- [31] 王萍萍,韩一军.我国粮食作物化肥施用技术效率的时空效应研究——基于小麦、水稻的实证分析[J].中国农业资源与区划,2020,41(6):34-45.
WANG P P,HAN Y J.Spatial correlation and time trend effect of chemical fertilizers' technical efficiency for crops in China[J].Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning,2020,41(6):34-45.
- [32] 徐静,熊世豪,张倩.资源环境约束下中国水稻生产效率及提升路径[J].资源科学,2024,46(7):1330-1345.
XU J,XIONG S H,ZHANG Q.Efficiency and improvement path of rice production in China under resource and environmental constraints[J].Resources Science,2024,46(7):1330-1345.
- [33] 李国景,杨亚东,刘洋,等.县域水稻生产区域差异与增产效应[J].中国农业大学学报,2024,29(10):60-71.
LI G J,YANG Y D,LIU Y,et al.Regional difference and yield increasing effect of rice production at county level[J].Journal of China Agricultural University,2024,29(10):60-71.