

中国粮食生产空间演变及其影响因素

邵阳^{1,2}, 杨忍^{1,2,3,4*}, 安悦^{1,2}

(1. 中山大学地理科学与规划学院, 广州 510006; 2. 中山大学乡村振兴联合研究院, 广州 510275;
3. 中山大学中国式现代化广东实践研究院, 广州 510275; 4. 中山大学土地研究中心, 广州 510275)

摘要: 探究不同农业区粮食生产空间演化过程及其关键影响因素, 有利于粮食生产空间布局和农业资源要素配置的优化调整, 并为保障粮食安全及差异化政策制定提供科学依据。研究利用粮食作物种植面积变化率、空间统计分析与热点探测揭示中国粮食生产空间演变的区域分异特征, 在此基础上构建多尺度地理加权回归模型, 定量识别粮食生产空间演变区域分异的影响因素。结果表明: 1) 2000—2019年, 三大粮食产区主粮单产与种植均呈增长态势, 其中主产区单产最高, 而产销平衡区有近40%的最大增幅。水稻种植占比最大, 主要分布于南部农业区; 小麦、玉米与玉米—小麦种植则集中于北部农业区, 玉米种植增幅最大达68.16%, 小麦与玉米—小麦种植则分别出现长期缩减与扩张。2) 粮食生产空间内部转换以黄淮海平原区小麦向玉米—小麦种植转变为主导; 外部转换的主要特征是东部粮食主产区和南部产销平衡区其他耕地、森林与草地向粮食用地的大规模转入导致粮食生产空间扩张; 西部粮食产销平衡区的转换程度持续较低, 而东部粮食主产区和南部产销平衡区的转换程度均处于较高状态。3) 农民人均非农收入、非农产业占比、土地城镇化率、劳均农业机械动力、坡度和年均气温是中国粮食生产空间演变区域分异的主导因素, 农产品价格、乡村非农劳动力、土壤侵蚀度和年均日照时长是重要因素。4) 政策制度的引导与空间保护、产业与劳动力非农化以及地形气候与生态环境的复合约束是粮食生产空间演变区域分异的主要影响机制。中国粮食生产空间演变的区域分异特征明显, 未来应通过农业技术、管理模式创新与差异化政策优化调整粮食生产的资源配置与空间布局, 促进粮食高质量生产与农业可持续发展。

关键词: 粮食生产; 空间转换; 多尺度地理加权回归; 区域分异; 可持续发展

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202504045

中图分类号: F323

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2025)-15-0265-13

邵阳, 杨忍, 安悦. 中国粮食生产空间演变及其影响因素[J]. 农业工程学报, 2025, 41(15): 265-277. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202504045 <http://www.tcsae.org>

SHAO Yang, YANG Ren, AN Yue. Grain production spatial evolution and its influencing factors in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2025, 41(15): 265-277. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202504045 <http://www.tcsae.org>

0 引言

粮食安全是国家社会经济可持续发展的基石与关键民生问题^[1-2]。粮食生产系统的演变过程指生产方式、结构与组织模式随时间发生的系统性、渐进性调整, 其核心在于适应发展需求并保障国家粮食安全^[3-4]。21世纪以来, 城镇化和全球化加速导致耕地资源锐减^[5], 农业劳动力结构性短缺与撂荒加剧^[6], 耕地“非粮化”和“非农化”现象严重^[7-8], 兼之气候异常变化导致的全球范围粮食减产^[9-10], 持续影响耕地的数量、质量和生态^[11]。促使世界各国积极调整农业生产结构以应对粮食安全挑战^[12]。

中国作为全球最大的粮食生产与消费国, 其玉米、

水稻和小麦三大主粮作物生产空间格局的长期演变趋势, 直接关系国家粮食安全战略的实施效能^[13-14]。在新型城镇化与农业现代化背景下, 主粮生产呈现显著的差异化演变特征: 水稻种植面临结构性调整^[15], 小麦生产遭遇资源环境的多重约束^[16], 玉米种植则展现出明显的空间扩张态势^[17]。现有研究多聚焦粮食主产区的单一粮食作物或优势作物的种植格局和结构演变^[15, 17-18], 区域主粮作物种植制度变化^[19]以及全国粮食生产能力空间重构^[20]等, 缺乏多主粮转型的系统比较及多维驱动机制解析。气候变化、政策革新与技术进步的叠加效应亟需深化, 系统揭示三大主粮生产转型的区域差异与作用机制, 已成为优化区域性粮食安全保障体系的重大课题。

研究方法方面, 国外研究侧重从粮食系统整体出发, 运用遥感监测^[21]手段识别全球或国家尺度上粮食生产空间分异规律, 基于结构方程建模^[22], 系统动力学模型^[23]等方法揭示社会经济与自然气候变化下的粮食系统演化机制, 并构建了粮食系统的可持续发展评估框架^[24]。国内研究经历了3个时期变化, 早期基于粮食生产面板数据, 以粮食产量变化表征, 利用空间统计方法分析粮食生产格局及演化过程^[25], 并建立空间计量模型探究相关驱动机制^[2, 26]。中期转向数据包络分析方法(Super-SBM模型)^[27]与空间杜宾模型^[28]下的粮食生产效率、增产

收稿日期: 2025-04-04 修订日期: 2025-07-07

基金项目: 教育部哲学社会科学重大课题攻关项目(23JZD008); 国家自然科学基金面上项目(42171193); 广东省社科规划“落实二十届三中全会精神”专项研究重点项目(GD24ES013); 中山大学高校基本科研业务费交叉学科团队培育项目(24wkjc11)

作者简介: 邵阳, 博士生, 研究方向为城乡发展转型与农业地理。

Email: shaoy25@mail2.sysu.edu.cn

*通信作者: 杨忍, 教授, 博士生导师, 广东省习近平新时代中国特色社会主义思想研究中心特约研究员, 研究方向为乡村地理、城乡发展与土地利用。Email: yangren0514@163.com

空间溢出效应,以及基于社会生态系统概念模型(Green Loop-Red Loop)解构城乡发展互馈引发的粮食生产转型机理(指系统结构重组引发的功能性转变)^[3]。近年来,国家不断加大耕地保护力度,学者们开始采用遥感制图与空间分析^[1,6-7]、敏感度模型^[29]、生态位模型^[30]和耦合协调度模型^[31]探讨国家、省域(粮食主产区)、县域等多个尺度下耕地利用方式转换对粮食生产空间的影响。此外,有学者从空间治理的理论视角出发^[14],分析传统农区粮食生产转型机制及其安全效应。

总体来看,粮食安全与生产转型始终是国际关注的核心议题,但已有研究仍存在3个方面局限:一是侧重产量波动与耕地数量变化,对主粮作物空间分布格局的动态转换机理揭示不足;二是部分研究使用行政单元统计数据,无法捕捉更精细空间尺度上的作物转换动态;三是现有数学模型尚未能将社会、经济等人文视域关键性影响指标与资源环境、气候变化等自然视域研究有效结合。鉴于此,本文基于2000—2019年中国水稻、小麦和玉米种植分布的栅格数据,应用空间统计分析、冷热点探测等方法识别不同阶段粮食生产政策下的粮食生产空间演变过程,探讨粮食生产空间“内—外”转换特征;基于多尺度地理加权回归模型,整合社会经济、自然环境等多维驱动要素,揭示该时期中国粮食生产空间演变的主要影响因素,并深入剖析粮食生产空间演变区域分异的驱动机制,以期为中国粮食生产空间布局提供参考,为农业可持续发展的差异化政策的制定提供依据,以确保实现国家和区域粮食安全。

1 理论分析框架

人地关系地域系统理论认为乡村地域和城市地域两个子系统共同构成了人地关系地域系统,其中乡村人地关系地域系统的生长演化受内核系统和外部环境的共同驱动^[32]。粮食生产作为乡村地域系统的主要农业生产活动,伴随乡村地域系统的演进发生空间演变。因此,粮食生产空间演变成为乡村地域系统演化的重要表征,其动态演化可解构为外部系统驱动和内部系统调整的双重过程:前者以种植面积动态变化为空间显性响应,反映城乡要素流动下的规模扩张或收缩;后者以种植结构转换为效率内核,体现主粮作物间竞争替代与功能互补的逻辑^[3,18](图1)。

粮食生产空间演变是外部系统驱动与内部系统优化协同作用的结果。外部转换表现为城乡要素流动与自然环境约束下的空间格局重塑。城乡要素流动驱动生产重心向资源禀赋优越区域迁移,如东北黑土区与黄淮海平原,通过单产优势强化主产区地位并引发区域性种植扩张^[18,28];生态脆弱区则因政策限制或机会成本上升触发种植收缩^[33]。市场波动与气候变化对区域种植意愿与作物适生区的持续影响,重塑了粮食生产的地域格局^[11,26]。在此过程中,农业技术创新突破资源约束^[1],耕地保护政策则进一步释放单产潜力^[30],二者协同降低对规模扩张的依赖,使种植面积变化成为外部转换的空间显性响应,既包含优势区的集聚扩张,也体现边缘区功能让渡。内部转换则聚焦于系统内生效率提升,以种植结构调整与空间布局优化为核心路径。市场需求与政策引导下,

粮食作物内部竞争推动结构转换,如高产的玉米、水稻替代低效品种,通过单产提升间接缩减总种植需求^[34],进而形成粮食种植的差异化布局。同时,技术嵌入与组织创新通过提升生产效率与优化要素配置,使空间格局优化反哺单产增长^[35]。最终,外部潜力释放缓解空间扩张压力,内部效率提升增强资源承载能力,二者协同驱动粮食生产规模与空间效能的动态平衡。

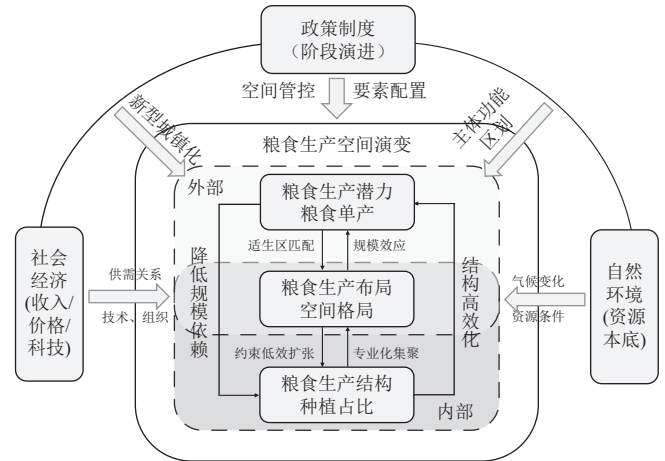


图1 粮食生产空间演变理论分析框架

Fig.1 Theoretical analysis framework of grain production spatial evolution

鉴于此,本文建构了粮食生产空间演变的三重影响要素分析框架,从粮食生产潜力、粮食生产布局与粮食生产结构3个维度出发,探究政策制度、社会经济与自然环境对粮食生产空间内外部转换的交互作用机制^[2,28](图1)。

其中政策制度通过空间管控与要素配置发挥核心调控力。城乡土地制度变革与农业支持政策形成双重推力。新型城镇化推动耕地保护从数量管控向空间优化转变,促使粮食生产向优势区集聚^[36];农业结构调整通过主体功能区划引导粮食生产布局,提升边际土地产能^[37],并打破城乡要素流动壁垒,驱动粮食生产从分散经营向规模经营转型。社会经济要素通过技术创新与市场机制触发效率变革。农业机械化与设施农业普及大幅提升单产^[35];消费结构升级与农产品价格波动则通过市场供需变化引导生产要素向高收益区域或品种流动,促使生产结构优化^[34];非农业产业发展在提升农民非农收入的同时,引发的劳动力非农化转移推动经营主体更替与生产规模化、集约化,空间形态向资本技术密集型转变^[11]。此外,城镇化进程也深刻改变着区域间的空间比较优势。自然环境要素通过刚性约束与弹性适应调控演变阈值。资源本底条件通过自然承载力约束空间演变阈值。土地要素中地形与土壤条件对粮食生产的土地利用构成空间适配的刚性边界^[38];水热资源时空分异形成弹性约束,气候变化引发的积温带北移与降水格局改变推动生产重心迁移,极端气候则强化种植结构适应性调整^[26]。粮食生产空间演变既是人地关系地域系统动态平衡的结果,也是“政策—经济—自然”复杂系统耦合作用的空间投影。

该框架突破单一分析局限,构建“效率—规模—结构”三重调控路径:外部扩张收缩决定空间规模弹性,内部结构优化提升系统效率,自然约束框定演变阈值。

通过揭示“空间竞争—效率互补”的演变逻辑，为统筹粮食安全与国土空间治理提供系统性分析框架。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

本研究中使用的数据包括主要粮食作物空间分布数据、社会经济统计数据、土地利用数据、气候数据和地形数据。因考虑三大主粮作物空间分布数据的准确度、精度与覆盖范围的一致性，同时受限于全国范围各类数据的可获得性与准确性，研究期为 2000—2019 年，港澳台地区因数据暂缺不在本文研究范围内。其中，全国三大粮食作物 1 km 种植分布数据来源于国家生态科学数据中心^[39]，该数据集根据每种作物定义的 3 个关键物候期能同时提取出来的条件确定作物种植格点，并结合高分辨率土地利用数据区分水田与旱地，辅助识别水稻与其他旱地作物（小麦、玉米），充分考虑和覆盖了不同品种、区域和熟制的种植期差异，与县域粮食种植统计面积进行交叉验证，整体识别精度和准确度 ($R^2 > 0.82$) 能够充分支持本文中混合作物种植划分和种植结构变化等空间演变研究。县域社会经济数据主要来自《中国县域统计年鉴》，包括地区生产总值、农民人均可支配收入、各产业从业人数、农作物总播种面积、设施农业占地面积和农业机械总动力等，农产品生产者价格指数与省域农作物产量、耕地面积统计数据来自《中国统计年鉴》。中国逐年土地利用数据来源于武汉大学公开的 30 m 高精度数据集^[40]，并重采样至 1 km 空间分辨率。自然气象数据来自国家地球系统科学数据中心 (<http://www.geodata.cn>)，包括年均降水量、年均气温、年均日照时长、年 NDVI (normalized difference vegetation index) 最大值。其中受灾耕地面积基于 NDVI 年最大值测算而来，即年 NDVI 最大值低于历史平均 70% 的耕地面积^[41]。地形坡度数据来源于中国科学院地理空间数据云 (<http://www.csd.cn/>)，土壤侵蚀数据来源于欧洲土壤数据中心的土壤侵蚀数据集 (<https://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/global-soil-erosion>)，受限于多期数据的可获得性，数据时间统一为 2000 年。依据《国家粮食安全中长期规划纲要 (2008—2020)》和已有文献^[6, 30]，绘制了中国主要粮食产区和九大农业区划 (图 2)。

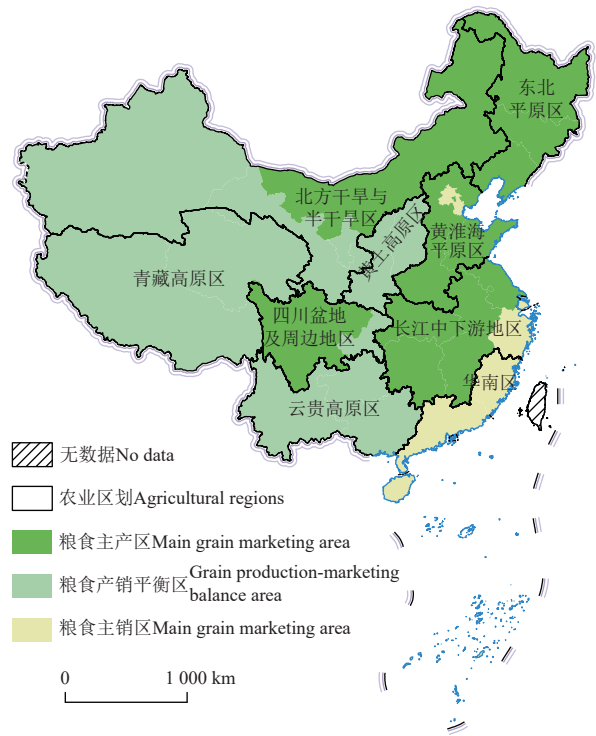
2.2 研究方法

2.2.1 研究阶段划分

中国粮食生产政策演进的阶段性特征，深刻反映了城乡关系转型对粮食生产系统的多维度塑造。2000—2004 年，中国粮食生产处于市场化改革转型期，常住人口城镇化率由 36.2% 升至 41.8%，城乡人口流动加速加剧农村劳动力流失，政策以破解城乡二元矛盾为核心，通过税费改革减负与提高粮食流通市场化程度稳定粮食生产^[36]。2004 年中央一号文件提出“粮食直补”和“四项补贴”政策措施与 2006 年农业税全面取消^[3]，同时通过深化耕地“占补平衡”制度，划定永久基本农田与启动高标准农田建设强化耕地保护^[30]，以应对城镇化对耕地资源的不断侵占，标志着政策重心转向生产激励与耕地保护并重。但与此同时，农村老龄化与耕地撂荒的加剧迫使粮食生产进入侧重质量安全与可持续发展的转型期^[6, 42]。

2013 年后，城镇化率过半与农村老龄化加剧推动政策向“质量安全”与“可持续性”转型，国家粮食安全新战略从“保产量”向“提质量”升级^[37]，强调粮食基本自给，“藏粮于地、藏粮于技”成为核心，并建立粮食生产功能区和重要农产品生产保护区优化粮食生产布局。2019 年起政策向法治化、制度性保障转型，进一步提升乡村振兴的战略高度^[36]，统筹城乡粮食安全，推动城乡融合发展，并完善耕地“占补平衡”制度^[30]，2023 年出台《中华人民共和国粮食安全保障法》以强化制度性保障，通过立法与跨区域协同破解城镇化高质量发展阶段的粮食安全系统性风险，粮食生产也迈入城乡融合转型期。

本文基于粮食生产政策演进脉络，将 2000—2019 年划分为 2000—2004 年市场化改革期、2004—2013 年结构优化期、2013—2019 年可持续发展期与 2019—2023 年城乡融合期 4 个研究时段，系统解析粮食生产空间演变的阶段性特征。为揭示城乡融合深化期粮食安全与可持续发展的协同路径提供时序分析基础，对于当前城乡融合转型期的农业可持续发展的差异化政策的制定以及国家和区域粮食安全具有一定的现实意义和科学参考价值。



注：基于国家地理信息公共服务平台（天地图）审图号为 GS (2024) 0650 号的标准地图制作，底图边界无修改，港澳台数据暂缺，下同。
Note: Based on the standard map of the National Platform for Common GeoSpatial Information Services (Map World) review number GS (2024) 0650, the boundary of the base map has not been modified, the data of Hongkong, Macao and Taiwan are temporarily unavailable, same as below.

图 2 中国农业区划与粮食产区

Fig. 2 Agricultural regions and grain-producing areas in China

2.2.2 粮食生产空间转换程度

目前学术界针对粮食生产空间转换程度进行定量程度的研究较少，结合粮食生产空间演变的概念内涵，参考城乡发展空间演化过程测度方式^[43]，本研究采用粮食作物种植面积变化率 (change rate of grain crop acreage, CGA) 表征粮食生产空间转换的速度与方向，以此分析粮

食生产空间演变的区域分异特征。小麦、水稻和玉米是中国的主要粮食作物，国家统计局 2019 年与 2023 年最新的粮食生产报告均指出，水稻、小麦和玉米的种植面积占全国粮食作物总种植面积的 81% 以上，3 种作物的产量占粮食总产量的 90% 以上，由此反映出水稻、小麦和玉米在中国粮食生产体系中的根本性地位。此外，其他作物种植面积较小，高精度的时空分布数据难以获得，因此本文以水稻、小麦和玉米的种植面积表征粮食作物的种植情况。粮食生产空间转换程度的具体计算式如下：

$$C_{CGA} = \frac{S_a - S_b}{\Delta T S_i} \times 100\% \quad (1)$$

式中 C_{CGA} 表示第 i 个空间单元或县域的粮食总种植面积变化率 (%)； S_a 代表 a 时期单个空间单元的粮食种植总面积 (hm^2)； ΔT 表示 a 和 b 时期的时间跨度 (a)； S_i 是空间单元 i 的面积 (hm^2)。

2.2.3 粮食生产空间转换热点探测

热点分析常用于探测地理要素的空间聚类情况。通过统计每个要素的 Getis-Ord G_i^* 指数，并标准化处理后计算相应的 Z 得分和统计显著性 (P 值)，进而识别要素的空间高值或低值的聚类分布。本研究借助空间统计中的热点分析方法，定量分析并识别中国粮食生产空间转换的冷热点区域，计算式如下^[43]：

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n w_{ij} x_j - \bar{X} \sum_{j=1}^n w_{ij}}{S \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n w_{ij}^2 - (\sum_{j=1}^n w_{ij})^2}{n-1}}} \quad (2)$$

$$\bar{X} = \frac{\sum_{j=1}^n x_j}{n} \quad (3)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n x_j^2}{n} - (\bar{X})^2} \quad (4)$$

式中 G_i^* 是空间单元 i 处的 Z 得分， x_j 表示粮食生产空间转换程度， w_{ij} 是 i 和 j 之间的空间权重， S 是标准差， n 是空间单元总数。若具有统计显著性的 Z 得分为正，分值越高，表明该位置属于粮食生产空间转换的热点区域（高值空间聚类）。若得分为负，且分值越低，则该位置为城乡空间转换的冷点区域（低值空间聚类）。依据统计显著水平高低，空间集聚程度分为极显著 (P 值 < 0.01)，显著 (P 值 < 0.05) 与一般 (P 值 < 0.1)。

2.2.4 多尺度地理加权回归模型

粮食生产空间演变过程中涉及多类型的空间变量，因此研究采用考虑空间距离权重的地理加权回归模型 (geographically weighted regression, GWR)。传统的 GWR 模型在评估因变量和解释变量之间的相关性时，往往使用同一固定带宽，无法测度不同变量在不同空间尺度上的影响。研究通过创建多尺度地理加权回归模型 (multi-scale geographically weighted regression, MGWR) 来克服这一局限性。MGWR 模型对每个解释变量使用多个带宽进行局部回归，同样引入空间距离权重，从而评估不同影响因素在不同空间尺度上对粮食生产转换的影响程度^[44]。MGWR 模型构建公式如下：

$$y_i = \sum_{k=1}^n \beta_{bwk} (\mu_i, \nu_i) x_{ik} + \varepsilon_i \quad (5)$$

式中 y_i 为第 i 个空间单元的粮食生产空间转换程度， β_{bwk} 为第 k 个解释变量在第 i 个空间单元的回归系数， n 表示变量个数， bwk 为第 k 个变量回归系数所使用的带宽， (μ_i, ν_i) 为第 i 个空间单元的坐标， x_{ik} 是第 i 个空间单元的第 k 个解释变量， ε_i 为随机误差项。根据理论分析框架，并参考已有研究^[8, 20, 45]，本文从社会经济和自然环境两个方面选取 15 个指标构建粮食生产空间转换的影响因素指标体系，主要涉及社会经济发展情况、自然资源条件以及环境气候等多维方面，并利用其变化值作为自变量（坡度与土壤侵蚀度除外），具体指标见表 1。

表 1 粮食生产空间演变影响因素指标体系

Table 1 Index system of factors influencing the grain production spatial evolution

因素 Factors	变量 Variables	单位 Unit	变量解释 Explanation of variables
社会经济 Social and Economic	农民人均非农收入	元	农民人均可支配收入×(非农从业人口/乡村从业人口)
	非农产业占比	%	1 - (农业总产值/地区生产总值)
	土地城镇化率	%	建设用地面积比例
	农产品价格	—	农产品生产者价格指数
	人口城镇化率	%	城镇人口比例
	乡村非农劳动力	人	乡村从业人口 - 农林牧渔业从业人口
	劳均耕地面积	hm^2	耕地面积/农林牧渔业从业人口
	劳均设施农业面积	hm^2	设施农业占地面积/农林牧渔业从业人口
	劳均农业机械动力	kW	农业机械总动力/农林牧渔业从业人口
自然环境 Natural environment	坡度	—	—
	土壤侵蚀度	$\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$	单位面积和时间损失的土壤质量
	年均降水量	mm	—
	年均气温	$^{\circ}\text{C}$	—
	农作物受灾程度	%	受灾耕地面积/耕地总面积
	年均日照时长	h	—

3 结果与分析

3.1 主粮单产动态变化分析

2000—2004 年粮食主产区和产销平衡区的主粮单产均有不同幅度的波动增长 (图 3)，验证了政策实施对核心产区的激励效应，而粮食主销区的下降趋势反映出城镇化初期发达地区劳动力流失对粮食生产的冲击。2004—2013 年间，主产区主粮单产年均增速跃至 1.25%，于 2011 年突破 $6\ 000\ \text{kg}/\text{hm}^2$ ，产销平衡区单产增幅达 15.1%，以及主销区单产增速趋缓映射出政策激励对粮食生产的促进与耕地保护政策对非农用地约束的强化。随着 2013 年主销区单产较主产区差距扩大至 6.83%，城镇扩张与粮食生产的空间矛盾逐渐凸显。2013—2019 年主产区单产增速放缓至年均 1.01%，但产销平衡区单产提升 4.91%，体现“藏粮于技”战略的技术扩散效应；2019 年主销区单产跃升 8.31%，与空间优化政策形成时空协同。同年城镇化率突破 60%，三大产区单产波动率收窄至 2.63% 以内，折射出高标准农田建设对产能稳定性的制度贡献。2019 年后主产区单产年均增速降至 0.5%，而产销平衡区突破 $5\ 800\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 阈值，较 2000 年有近 40% 的增幅，凸显耕地“占补平衡”制度对产能结构的优化效能；主销区单产则维持 $6\ 200\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 高位，表明城镇化深化期政策重心由规模扩张转向制度性适配，城乡融合与粮食安

全的深度协同成为高质量发展阶段的核心逻辑。

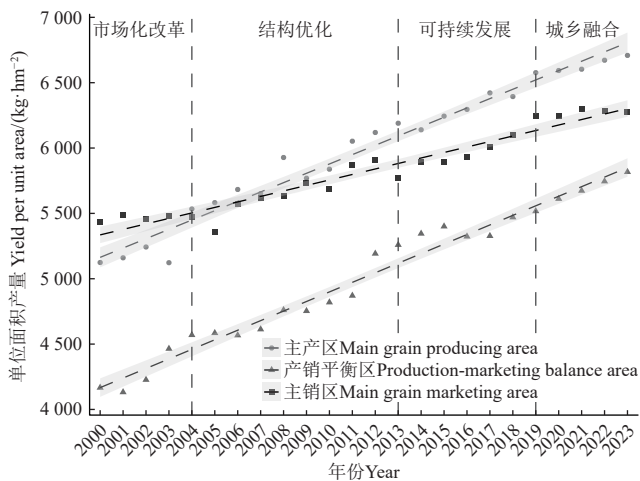


图 3 2000—2023 年中国不同粮食产区主粮单产动态变化
Fig.3 Changes of yield per unit area of staple grain in different grain producing areas in China during 2000-2023

3.2 粮食生产空间的分布特征

研究期内，1 km×1 km 空间单元内识别出水稻、玉米、小麦、水稻—小麦、玉米—小麦、水稻—玉米和水稻—小麦—玉米共 7 种植类型。2000—2019 年中国三大粮食作物种植格局呈现显著时空异质性（图 4）。从数量演变特征来看（表 2），种植总面积呈现先降后升的“V”型变化趋势，整体增幅达 24.61%（ $1.63 \times 10^7 \text{ hm}^2$ ）。其中水稻种植虽保持主导地位（占比超过 37%），但经历先下降后上升的波动过程；小麦种植比例持续缩减，尤以 2000—2004 年（降低 4.44 个百分点）与 2004—2013 年（降低 3.81 个百分点）两个时期降幅明显；玉米种植比例显著提升，从 21.17% 跃升至 35.60%，增幅达 68.16%，构成最显著的变化特征；玉米—小麦种植比例整体上由 12.13% 缓增至 13.28%；水稻—小麦、水稻—玉米和水稻—小麦—玉米的种植比例均不足 1%，难以把握其种植比例的变化特征。

表 2 2000—2019 年中国主要粮食作物种植面积统计

Table 2 Statistics on major grain crops acreage in China during 2000-2019

年份 Year	主要粮食作物种植占比 Planting proportion of main grain crops/%				总面积 Total area/ ($\times 10^7 \text{ hm}^2$)
	水稻 Rice	小麦 Wheat	玉米 Maize	玉米—小麦 Maize-wheat	
2000	41.35	24.07	21.17	12.13	6.63
2004	41.07	19.63	25.94	12.43	6.45
2013	37.22	15.82	32.56	13.79	7.68
2019	37.66	12.71	35.60	13.28	8.26

注：仅统计种植比例大于 1% 的粮食作物。

Note: Only grain crops with a planting proportion greater than 1% were counted.

从空间分布特征看，水稻种植主要集中分布于四川盆地及周边地区、长江中下游地区、华南区、云贵高原和东北平原等区域；小麦、玉米以及玉米—小麦种植则分布于北方的黄土高原区、黄淮海与东北平原区、干旱与半干旱区以及西南的四川盆地及周边地区和云贵高原区，3 种植类型的空间演化差异明显。小麦种植于 2000—2004 年和 2004—2013 年在北方干旱与半干旱区南部、黄土高原区与黄淮海平原区经历两次大范围缩减；玉米的种植分布呈持续扩张趋势且范围较大，除黄土高

原区与黄淮海平原区外，在东北平原区与北方干旱与半干旱区也有明显的种植分布增加；玉米—小麦种植在 2004—2013 年与 2013—2019 年的持续扩张均主要发生在黄淮海平原区；水稻—小麦、水稻—玉米和水稻—小麦—玉米的种植面积过小，无法把握其空间分布特征。

三大粮食作物种植类型 Planting types of three major grain crops

- 水稻 Rice
- 小麦 Wheat
- 玉米 Maize
- 水稻-玉米 Rice-Maize
- 水稻-小麦 Rice-Wheat
- 玉米-小麦 Maize-Wheat
- 水稻-小麦-玉米 Rice-Wheat-Maize
- 无数据 No data
- 无种植 No planting

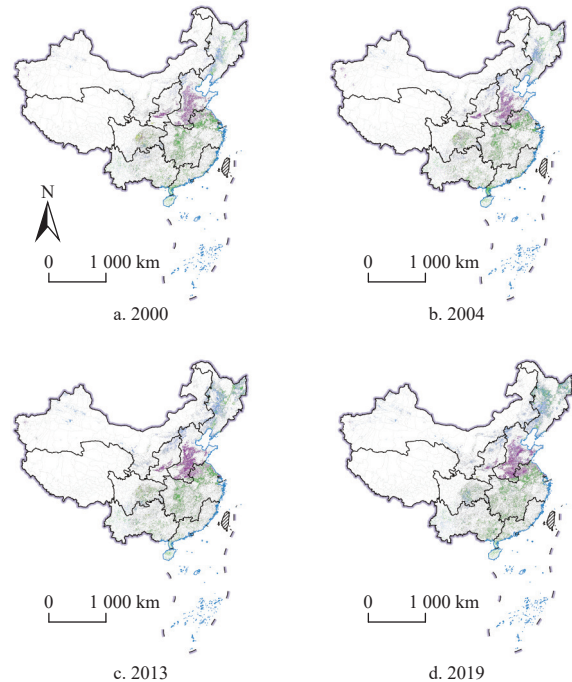


图 4 2000—2019 年中国三大粮食作物种植的时空格局
Fig.4 Spatiotemporal pattern of three major grain crops planting in China during 2000-2019

3.3 粮食生产空间演变的特征

3.3.1 粮食生产空间的内部转换

在分析 2000—2019 年中国三大粮食作物种植比例变化及空间分布特征基础上，对种植面积占比超过 1% 的水稻、小麦、玉米以及玉米—小麦 4 种粮食种植类型的相互转换进行空间分析，以此反映研究期内粮食生产空间的内部转换特征（图 5）。2000—2019 年，4 种粮食种植类型的内部转换规模为 $8.79 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 。空间分布呈现“一核两带”的格局，黄淮海平原区形成高强度转换核心区，长江中下游北部与黄土高原中部构成次生转换带。其中小麦向玉米—小麦（转换比例占 41.40%，转换面积为 $3.64 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ）种植的转变主导了空间转换过程；其次是玉米—小麦转向小麦（转换比例占 20.24%，转换面积为 $1.78 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ）；小麦转向玉米（转换比例占 12.66%，转换面积为 $1.11 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ）的规模也相对较大。三类转换的分布范围与中国传统粮食产区高度重合，反映出主粮作物种植结构调整与区域资源禀赋的深度关联。

从时序演变来看，3 个时期内部转换的空间特征差异较小。4 种粮食种植类型的内部转换呈现持续增强态势，转换规模从 2000—2004 年的 $7.55 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 增长至 2013—2019 年的 $9.38 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ，增幅达 24.2%。玉米—小麦和小麦的相互转换是 4 个时期粮食生产空间的内部转换的主要特征，转换规模占比均大于 59.76%。此外，

2000—2004 年小麦向玉米转换与 2004—2013 年玉米向玉米—小麦转换的规模占比分别为 10.83% 和 10.68%，同样是各时期粮食空间内部转换的重要特征。综合而言，小麦和玉米的种植变化是中国粮食生产内部转换的主要

原因，在黄淮海平原区最为突出；值得注意的是，2013—2019 年，玉米转向水稻的面积占比达到 11.40%，成为该时期显著区别于其他区域的转换特征，主要分布于东北平原区。

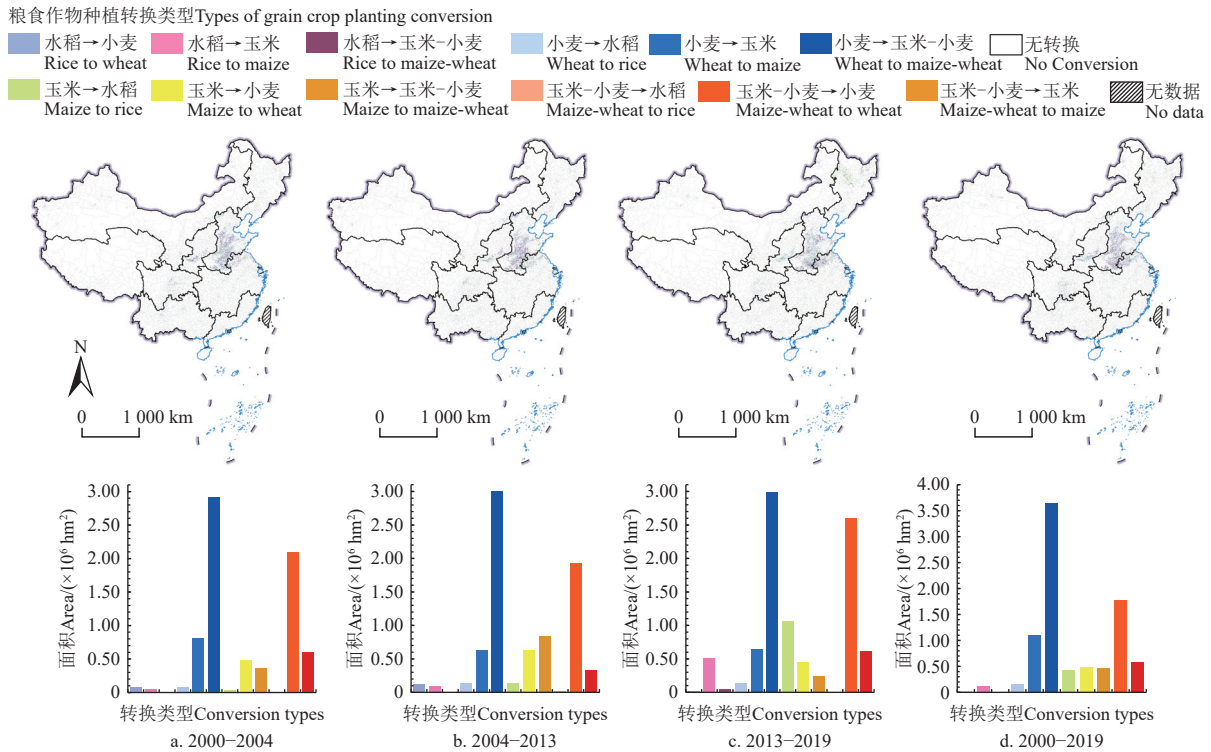


图 5 2000—2019 年中国粮食生产空间内部转换格局

Fig.5 Internal conversion pattern of grain production space in China, 2000-2019

3.3.2 粮食生产空间的外部转换

为进一步识别中国粮食生产空间的外部转换特征，从粮食种植用地与其他用地转换的数量规模与空间分布两个方面进行分析（图 6 和图 7），将用于粮食种植的耕地定义为粮食用地，将非粮食种植的耕地定义为其耕地。为准确把握粮食生产空间外部转换的地域特征，文中仅分析粮食用地转换面积占比大于 1% 的地类（其他耕地、森林、草地和建设用地）。2000—2019 年，粮食用地转出规模为 $3.18 \times 10^7 \text{ hm}^2$ ，粮食用地的转入规模为 $4.81 \times 10^7 \text{ hm}^2$ ，粮食用地整体呈增加状态，说明 21 世纪以来中国扩大粮食种植规模取得较好成效。

研究期内全国粮食用地净增 $1.63 \times 10^7 \text{ hm}^2$ ，其中其他耕地贡献了 $3.17 \times 10^7 \text{ hm}^2$ 的转入量，成为粮食种植面积扩增的主要驱动力，这一转换过程在东北平原区西部与东北部、黄淮海平原区及长江中下游北部尤为显著。森林与草地向粮食用地的转化规模分别达 1.05×10^7 和 $3.37 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ，其空间分布呈现明显的区域分异，森林转换集中于长江中下游西南部，而草地转换则主要出现在北方干旱与半干旱区和黄淮海平原区与黄土高原区的交界区域，且两大类地的转化规模随时间呈持续增长趋势，反映出生态用地向生产性用地转换的潜在风险。

在粮食用地逆向转换方面，研究结果揭示出耕地“非农化”的双重压力。 $6.28 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 粮食用地转化为森林的现象集中分布于长江中下游西南部与云贵高原东部，这与 21 世纪以来中国开展的退耕还林、人工林行动存在

空间关联性；而 $2.72 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 粮食用地转为建设用地的过程，则主要位于黄淮海平原区与长江中下游沿海地区，直观反映了快速城镇化对农业生产空间的挤压效应。特别值得关注的是，尽管其他土地向粮食用地的转化仅 $1.43 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ，但粮食用地向其他土地逆向转换达 $1.63 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ，凸显出耕地“非农化”治理的迫切性与质量维护面临的严峻挑战。

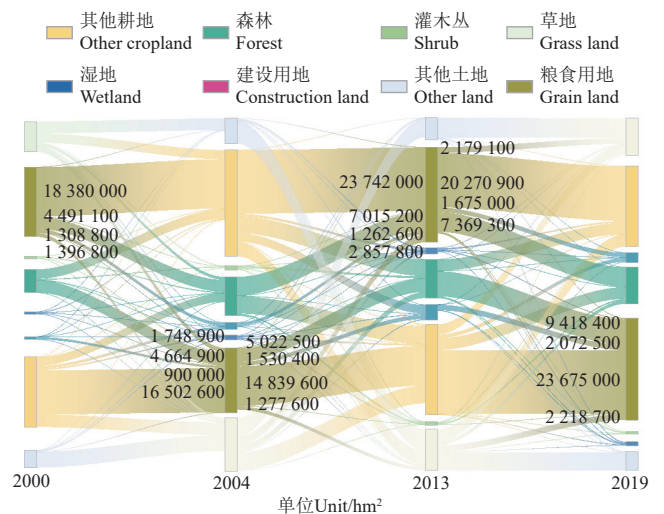


图 6 2000—2019 年中国粮食种植用地与其他用地转换桑基图
Fig.6 Sankey diagram of conversion between grain planting land and other land in China, 2000—2019

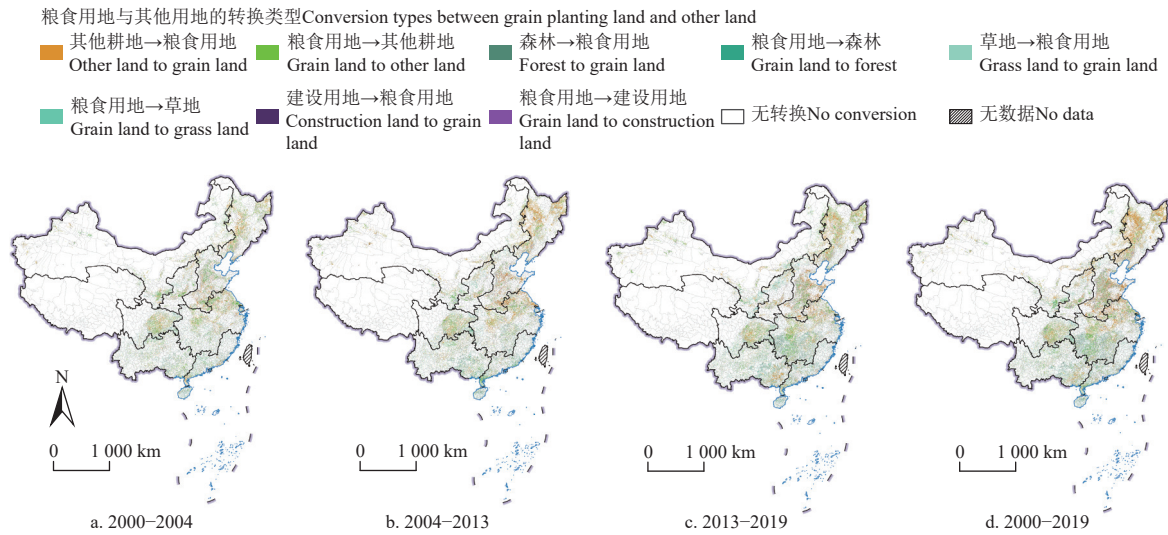


图 7 2000—2019 年中国粮食种植用地与其他用地转换的空间格局

Fig.7 Spatial pattern of conversion between grain planting land and other land in China, 2000-2019

3.3.3 粮食生产空间转换的整体特征

2000—2019 年三大粮食作物的总种植面积变化率空间分布如图 8 所示，北方干旱与半干旱区、青藏高原区和四川盆地及周边地区西部由于粮食种植规模较小，大部分地区粮食种植面积变化率为 0（图 8d），粮食生产空间转换

程度较低；而东北平原地区西部、云贵高原区东部、长江中下游地区的东北部和南部、黄淮海平原区的中部及南部的大部分县域面积变化率均大于 0，且长江中下游东北部与黄淮海平原中部部分县域变化率突破 3%，这些地区的粮食生产空间转换过程将进一步改善中国粮食生产状况。

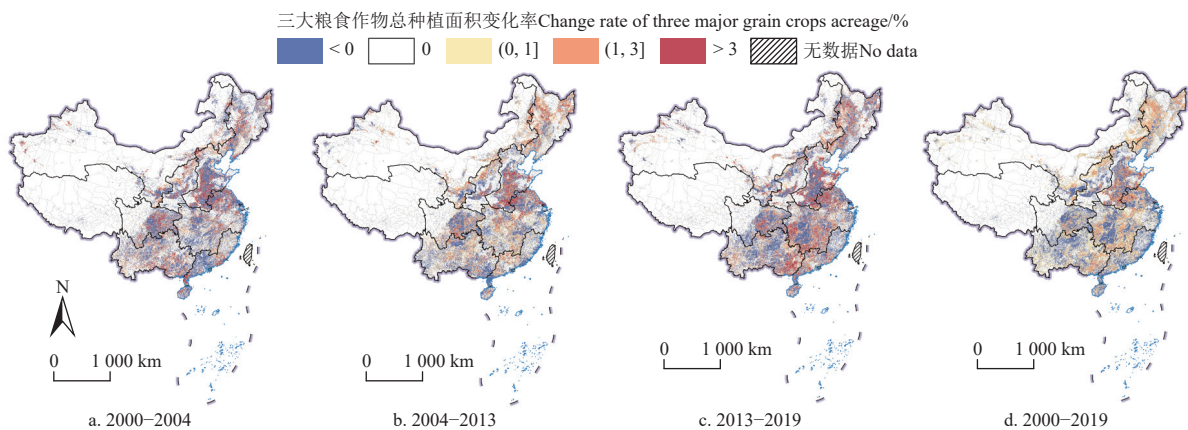


图 8 2000—2019 年中国三大粮食作物总种植面积变化率的时空格局

Fig.8 Spatiotemporal pattern of change rate of three major grain crops acreage in China, 2000-2019

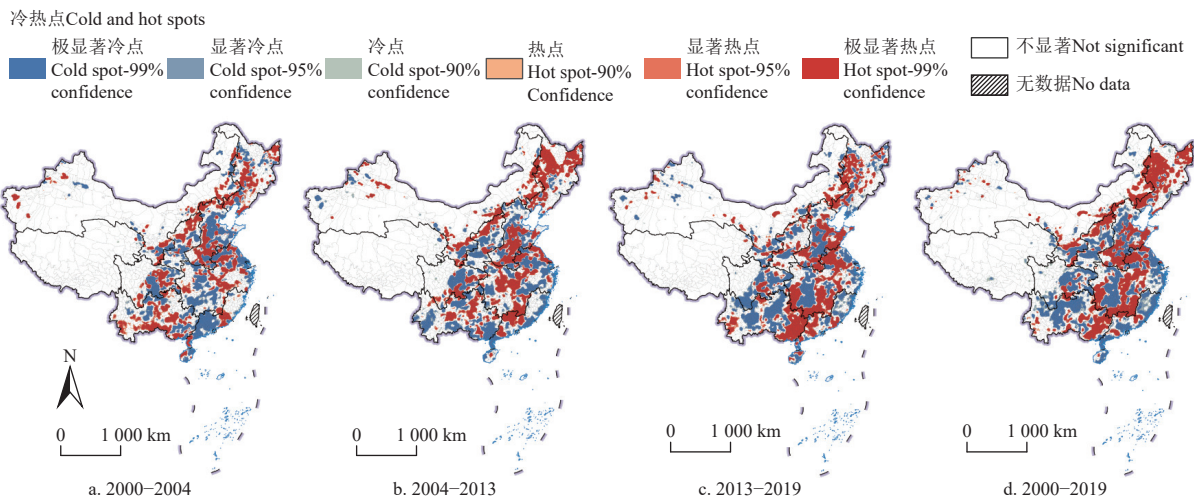


图 9 2000—2019 年中国三大粮食作物总种植面积变化冷热点探测

Fig.9 Detection of cold and hot spots in the change of three major grain crops acreage in China, 2000-2019

与之形成鲜明对比的是,华南区与长江中下游沿海县域的面积变化率均小于0,其粮食生产空间收缩加速了区域粮食主销区格局的形成。空间集聚特征分析显示(图9d),极显著冷点与显著冷点的空间分布与种植面积变化率小于0的区域基本相同,而极显著热点与显著热点的空间分布与种植面积变化率大于0的区域趋于一致。

这一集聚特征映射出国家粮食安全战略的区域响应差异,即位于粮食主产区的热点区通过持续扩大种植规模履行粮食安全保障职能,沿海地域的冷点区则因城镇化加速导致农业生产空间持续让位。

时序演变分析进一步揭示转换过程的动态复杂性,粮食生产空间转换呈现“北扩南进”的双向演化模式。

2004—2013年东北平原、黄淮海平原与长江中下游地区的粮食种植面积增加明显,部分县域变化率由负转正并突破3%,而同期四川盆地及周边地区东部与云贵高原区南部则逆势收缩;至2013—2019年,显著热点向华南区的西南部、云贵高原区的东部、长江中下游地区的西南部和北部以及四川盆地及周边地区的东南部扩展,但东北平原东北部与黄淮海平原中南部的变化率出现显著回落,部分县域甚至骤降转负。对比而言,九大农业区中黄淮海平原、长江中下游等粮食主产区的转换程度始终处于较高状态,其转换方向在2013年后出现显著分化,黄淮海平原中南部由热点区转为冷点区,而长江中下游北部则维持正向转换。北方干旱区与半干旱区、青藏高原区和华南区等产销平衡区和主销区的转换程度则持续较低。这种空间异质性深刻反映了区域资源约束与政策调控的交互作用。

3.4 粮食生产空间演变的影响机制

3.4.1 主要影响因素定量识别

粮食生产空间演变是自然地理环境和社会经济发展等因素共同作用的结果。考虑到部分社会经济指标难以进行栅格化处理,且县域是中国经济发展和社会治理的基本单元,本研究以县域为研究尺度定量识别粮食生产

空间转换的主要影响因素,并统计了与影响因素显著相关($P \leq 0.05$)、显著正相关和显著负相关的县域比例(表3)。多尺度地理加权回归的调整 R^2 为0.57,表明研究选取的影响因素对2000—2019年粮食生产空间转换程度的区域分异有较好的解释力。从社会经济方面看,农民人均非农收入、非农产业占比、土地城镇化率、乡村非农劳动力均与粮食生产空间转换程度整体呈负相关,表明农民非农收入增加、非农产业发展、县域城镇化推进以及劳动力非农化制约了粮食生产空间转换;相反,仅农产品价格、劳均农业机械动力与粮食生产空间转换程度呈正相关,表明农产品价格和农业机械化水平的提高会加快粮食生产空间转换。自然环境方面,年均降水量、农作物受灾程度与粮食生产空间转换程度无显著相关关系;坡度呈负相关关系,表明坡度越大的地区,粮食生产空间转换难度越大。而年均气温与年均日照时长均呈正相关,表明地区整体热量和光照增加情况下会促进地区粮食生产空间转换,改变地区粮食种植结构与规模;土壤侵蚀度呈正相关,表明县域土壤侵蚀程度的变化趋势与粮食生产空间转换存在一致性。

社会经济与自然环境变化对粮食生产空间转换的影响具有明显的空间异质性(表3)。2000—2019年,随着中国社会经济发展加快,农民人均非农收入、土地城镇化率和非农产业占比分别与36.52%、31.67%和29.43%的县域粮食生产空间转换程度呈显著负相关。其中,农民人均非农收入的影响范围最广,主要分布于南部农业区,土地城镇化率的相关性则最高;农产品价格和乡村非农劳动力分别在17.12%和9.93%的县域表现出负相关,均主要位于粮食主产区;此外,农产品价格、土地城镇化率和乡村非农劳动力还分别在17.94%、3.25%和2.66%的县域呈显著正相关,仅农产品价格影响主销区;而劳均农业机械动力表现出较强的显著正相关性,涵盖三大产区59.36%的县域,表明粮食产区农业机械化水平的普遍提升有效提高了粮食生产空间转换程度。

表3 2000—2019年粮食生产空间转换的多尺度地理加权回归结果

Table 3 MGWR results of grain production spatial conversion, 2000-2019

变量 Variables	回归系数 Regression coefficients			t-test 显著性检验中 $P \leq 0.05$ 的县域占比 Proportion of counties by significance (95% Level) of t-test/%		
	均值 Mean	最小值 Min	最大值 Max	$P \leq 0.05$ 县域 Counties with $P \leq 0.05$	正相关县域 Counties with positive correlation	负相关县域 Counties with negative correlation
农民人均非农收入	-0.07	-0.14	0.03	36.52	<0.01	100.00 (南部农业区)
非农产业占比	-0.06	-0.26	0.06	29.43	<0.01	100.00 (东南部主产区与主销区)
农产品价格	0.04	-2.45	4.99	35.06	51.17 (东部农业区)	48.83 (南部主产区与产销平衡区)
土地城镇化率	-0.20	-1.01	0.66	34.92	9.31 (东北部农业区)	90.69 (东部与西南农业区)
人口城镇化率	-0.02	-0.05	0.02	<0.01	<0.01	<0.01
乡村非农劳动力	-0.03	-0.71	0.41	12.59	21.09 (东北部主产区与产销平衡区)	78.91 (东北与西南部主产区)
劳均耕地面积	-0.13	-0.19	0.00	<0.01	<0.01	<0.01
劳均设施农业面积	-0.02	-0.02	-0.02	<0.01	<0.01	<0.01
劳均农业机械动力	0.11	0.09	0.11	59.36	100.00 (三大产区)	<0.01
坡度	-0.27	-2.81	1.29	28.51	20.22 (东南主产区)	79.78 (东北部主产区)
土壤侵蚀度	0.01	-0.13	0.15	17.67	79.02 (北部主产区与产销平衡区)	20.98 (西南部主产区与产销平衡区)
年均降水量	0.00	-0.01	0.01	<0.01	<0.01	<0.01
年均气温	0.04	-0.46	0.65	34.00	36.47 (西南部主产区与产销平衡区)	63.53 (东北部主产区)
农作物受灾程度	0.00	0.00	0.00	<0.01	<0.01	<0.01
年均日照时长	0.09	0.09	0.10	79.91	100.00 (三大产区)	<0.01
R^2	0.64					
Adj. R^2	0.57					

注: 括号内区域为正相关/负相关县域的主要空间分布区域。

Note: The regions in parentheses are the main spatial distribution areas of counties with positive/negative correlations.

自然环境变化影响下，粮食生产空间转换程度与坡度和年均气温分别在 22.75% 和 21.60% 的县域呈负相关，均位于东北部粮食主产区，说明这些县域中坡度较低的土地更有利于扩大粮食种植规模，而气温上升则导致粮食种植规模缩减；土壤侵蚀度仅在 3.71% 的县域表现出较弱的负相关，位于西南部粮食主产区与产销平衡区，表明这些县域因土壤侵蚀缩减了粮食种植规模或土壤侵蚀程度低有利于粮食种植扩张；与年均日照时长呈正相关的县域高达 79.91%，包含三大粮食产区，表明光照时长的增加改变了这些地区的粮食种植结构并扩大了粮食种植规模，但整体相关性较弱；而坡度、土壤侵蚀度和年均气温分别在 5.76%、13.96% 与 12.40% 的县域表现出正相关，主要分布在粮食主产区和产销平衡区。这反映出气温上升有利于这些县域提高粮食种植规模，但同时也伴随着坡耕地利用增加和土壤侵蚀加剧的现象。

3.4.2 影响机制解析

基于多尺度地理加权回归的定量识别结果与各因素影响粮食生产空间转换的空间异质性特征，归纳总结出影响中国粮食生产空间演变地域分异的主导因素与重要因素，结合不同政策时期中国粮食生产空间演化的阶段性特征，从政策制度演进、社会经济和自然环境要素变化 3 个维度进一步解析粮食生产空间演变区域分异的影响机制（图 10）。

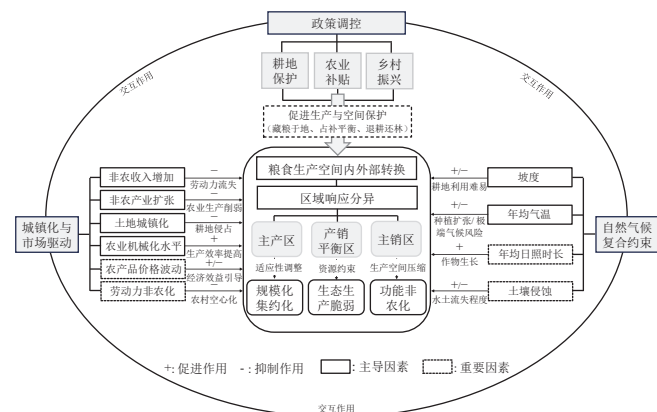


图 10 中国粮食生产空间演变区域分异的影响机制

Fig.10 Regional differentiation influencing mechanism of grain production spatial evolution in China

政策制度的引导与空间保护机制是塑造粮食生产区域分异的核心动力。粮食主产区依托耕地保护政策与农业补贴，强化“藏粮于地”战略，推动规模化集约化布局，成为转换热点区^[36, 37]，又基于乡村振兴背景下的基础设施完善与产业融合，持续优化空间利用效率；产销平衡区侧重生态与生产协同，通过“退耕还林还草”提升耕地质量与种植结构适应性调整减少资源约束^[33]；粮食主销区因城市扩张面临功能非农化与生产空间压缩，耕地“占补平衡”政策缓解耕地总量压力的同时促使粮食生产向边缘区域迁移^[7]，加剧了主产区与主销区之间的空间分异。总体而言，政策制度通过差异化的资源配置与空间管控，深刻重塑了不同粮食产区的生产格局。

城镇化与市场需求驱动形成非农产业扩张与劳动力流失的双向压力。沿海粮食主销区至西部产销平衡区面临耕地“非粮化”与优质耕地流失，非农产业占比提升

显著提高了农民的非农收入，促使乡村劳动力向二、三产业转移，加剧农村空心化，并直接削弱了传统粮食种植的基础。在市场需求升级和高经济效益的驱动下，经济作物种植比例持续上升，不断挤压粮食种植空间^[31]。反观粮食主产区，在快速城镇化带来的粮食需求压力下，生产布局逐步向北部集中。同时农业机械化程度的显著提高有效克服了劳动力短缺瓶颈，极大地提升了耕作效率，支撑了规模化种植与产能扩增。但过度追求增产不仅驱动了部分生态脆弱的产销平衡区耕地对森林和草地等自然土地的侵占式扩张^[28, 33]，更伴随着城镇化过程中平原地区建设用地对优质耕地的持续侵占。这种平原耕地的流失迫使部分生产活动向山地转移，催生出“耕地上山”等非常规布局调整^[45]。而农产品价格增长在提高农民收入与种粮意愿的同时，也会引导生产资源向预期收益更高的产区或品种流动，造成区域粮食种植的显著差异^[28, 35]，进一步凸显出城镇化进程中粮食生产的区域不均衡性。总体来看，农业技术的普及促进了生产效率的显著提高，但耕地“非农化”、劳动力流失的负面影响更为突出。

地形气候与生态环境的复合约束构成空间分异的自然基底。粮食主产区依托平原优势扩张种植，年均气温上升致使水稻、小麦等传统作物种植北界扩展，并促使玉米等高耐旱作物持续增长^[17]与小麦向玉米转换。然而在东北部分主产区，年均气温的持续升高导致极端高温事件频率增加、干旱风险上升，致使粮食减产与种植规模缩减。产销平衡区与主销区受到地形条件的自然约束。坡度较高的区域土地利用难度大，坡度平缓区又大量转为建设用地，加剧了生产空间碎片化^[38]。此外，日照时长的变化直接影响作物生长，进而影响粮食种植规模。而土壤侵蚀度与粮食生产形成正向反馈，主产区为增产过度垦殖加剧水土流失，产销平衡区生态脆弱性进一步放大，从而驱动种植模式向资源节约型转变^[31, 33]。由此可见，自然条件通过直接限制与间接胁迫，与人文因素交织作用，最终塑造了粮食生产空间演变的复杂地域格局。

4 讨论

研究基于高精度栅格数据解析了 2000—2019 年中国三大主粮生产空间转换的时空特征，但受限于其他粮食作物高分辨率数据的缺失，以水稻、小麦和玉米的种植面积表征整体粮食种植格局，可能弱化其他作物对演化过程的贡献。同时受限于社会经济数据的空间分辨率，县域尺度识别驱动因子可能无法捕捉更精细单元的异质性影响。另外，政策与气候要素的量化不足，亦需未来研究补充政策文本挖掘与气候因子动态模拟。尽管如此，本文印证森林、草地是粮食用地增加的重要来源^[45]，耕地“非农化”情况仍较为严重^[31]等相关结论。并在 3 个方面实现突破：一是发现土地城镇化与“非农化”对大部分粮食产区县域粮食生产空间转换的阻碍性；二是发现东部粮食主产区明显的“耕地上坡”趋势对平原农业区粮食生产空间转换的制约性^[38]；三是发现气候变暖对东北部粮食主产区县域粮食生产空间转换刚性约束作用，凸显区域适配性政策的紧迫性。

本文试图为不同粮食产区的农业差异化政策制定提

供参考: 1) 东部粮食主产区应推进农业强化集约增效与韧性提升。严格保护耕地, 整合优化农业补贴与生态补偿机制, 平衡农民收益与粮食安全目标。大力推广保护性耕作、精准施肥/施药、水肥一体化技术防控水土流失。建立极端气候预警系统, 发展适应性品种与种植制度。在保障主粮前提下, 探索科学适度的种植多元化, 缓解资源压力, 抑制“非粮化”; 2) 西部的产销平衡区应聚焦生态协同与结构优化。遏制生态脆弱区耕地扩张, 主动调整种植结构适应气候变化, 大力推广抗旱节水农作物品种。通过土地整治、土壤改良、保护性耕作集成技术重点提升现有中低产田产能。发展林粮间作等生态复合模式, 实现生态效益与经济效益协同; 3) 经济发达的主销区应通过创新驱动高效生态转型。严格执行耕地“占补平衡”且占补质量对等, 坚决遏制平原优质耕地流失。探索发展高科技都市农业和智慧农业, 最大化有限空间效率与应对劳动力短缺, 实现高质高效生产。推动循环农业、有机农业等生态化转型。建立完善跨区域粮食主产区利益补偿机制, 明确主销区经济责任, 缓解区域分异。从国家粮食安全角度出发, 应着重优化生产布局与强化技术支撑。基于资源禀赋、生态约束与城镇化趋势, 科学评估并动态优化粮食生产功能区划, 形成优势互补、风险分散布局。加强抗逆新品种、智能农机、资源高效技术、数字农业研发推广。持续投入农田水利、仓储物流等基础设施, 提升全链条抗灾稳供能力。关键是通过整合政策(补贴、补偿、价格)与产业发展切实提升务农收益, 缓解劳动力流失。

5 结论

本文对 2000—2019 年中国粮食生产空间“内—外”转换特征及区域分异的多维驱动机制进行了深入探究。主要结论如下:

1) 2000—2019 年, 三大粮食产区主粮单产总体呈增长态势, 其中主产区单产最高, 产销平衡区增幅最大近 40%, 主销区后期则维持在高位。这一动态变化与粮食生产政策演进呈阶段性耦合。三大粮食作物种植面积整体呈“V”型变化趋势, 时空分异特征显著。水稻种植虽保持主导地位但经历先降后升的波动过程, 主要分布于四川盆地及周边地区、长江中下游地区、华南区、云贵高原和东北平原等区域; 小麦、玉米和玉米—小麦种植主要分布在黄土高原区、黄淮海平原区与东北平原区、干旱与半干旱区以及四川盆地及周边地区和云贵高原区, 其中玉米和玉米—小麦种植比例持续增加且玉米增幅最高达 68.16%, 小麦种植比例则持续减少。小麦种植规模大范围缩减与玉米—小麦种植扩张均发生于黄土高原区与黄淮海平原区。

2) 中国粮食生产空间演变的区域特征差异明显。研究期内粮食生产空间内部转换形成“一核两带”的格局。黄淮海平原区成为高强度转换核心区, 长江中下游北部与黄土高原中部则构成次生转换带。粮食种植结构发生显著转换, 以小麦向玉米—小麦种植转变为主导, 其次是玉米—小麦转向小麦和小麦转向玉米。2013—2019 年东北平原区玉米转向水稻成为该时期显著区别于其他区域的转换特征。粮食生产空间外部转换主要分布在东北

平原区、黄土高原区、黄淮海平原区、长江中下游地区以及云贵高原区, 其他耕地、森林与草地向粮食用地的大规模转入导致粮食生产空间扩张。

3) 粮食生产空间转换整体呈现“北扩南进”的双向演化模式。北方干旱区与半干旱区、青藏高原区和四川盆地及周边地区西部的转换程度持续较低, 而黄淮海平原区、长江中下游地区、云贵高原区、东北平原区的西部和四川盆地及周边地区东部的转换程度均处于较高状态, 在不同时期粮食生产空间转换方向存在显著差异。粮食主产区的热点区通过持续扩大种植规模履行粮食安全保障职能, 沿海地域的冷点区则因城镇化加速导致农业生产空间持续让位。

4) 农民人均非农收入、非农产业占比、土地城镇化率、劳均农业机械动力、坡度与年均气温是中国粮食生产空间演变区域分异的主导因素, 农产品价格、乡村非农劳动力、土壤侵蚀度和年均日照时长是中国粮食生产空间演变区域分异的重要因素。因不同农业区的粮食生产结构、粮食生产潜力以及粮食生产布局受到政策制度的引导与空间保护、非农产业扩张与劳动力流失以及地形气候与生态环境复合约束的方向、程度和范围各异, 从而出现粮食生产空间演变的区域分异特征。

[参 考 文 献]

- [1] ZHONG H M, LIU Z J, WANG J Y. Understanding impacts of cropland pattern dynamics on grain production in China: An integrated analysis by fusing statistical data and satellite-observed data[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 313: 114988.
- [2] 刘杰, 杨青山, 江孝君, 等. 东北地区粮食生产与经济发展的关系类型与地域格局[J]. *经济地理*, 2021, 41(3): 39-48, 57.
LIU Jie, YANG Qingshan, JIANG Xiaojun, et al. Relationship type and regional pattern between grain production and economic development in Northeast China[J]. *Economic Geography*, 2021, 41(3): 39-48, 57. (in Chinese with English abstract)
- [3] 戈大专, 龙花楼, 乔伟峰. 改革开放以来我国粮食生产转型分析及展望[J]. *自然资源学报*, 2019, 34(3): 658-670.
GE Dazhuan, LONG Hualou, QIAO Weifeng. The transformation of China's grain production since reform and opening-up and its prospects[J]. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(3): 658-670. (in Chinese with English abstract)
- [4] 戈大专, 龙花楼, 李裕瑞, 等. 城镇化进程中我国粮食生产系统多功能转型时空格局研究——以黄淮海地区为例[J]. *经济地理*, 2018, 38(4): 147-156, 182.
GE Dazhuan, LONG Hualou, LI Yurui. The spatio-temporal pattern of multifunctional transformation of China's grain production system in the process of urbanization: The case of Huang-Huai-Hai Plain[J]. *Economic Geography*, 2018, 38(4): 147-156, 182. (in Chinese with English abstract)
- [5] FINCH T. Restoring farmlands for food and nature[J]. *One Earth*, 2020, 3(6): 665-668.
- [6] 李雨凌, 马雯秋, 姜广辉, 等. 中国粮食主产区耕地撂荒程度及其对粮食产量的影响[J]. *自然资源学报*, 2021, 36(6): 1439-1454.
LI Yuling, MA Wenqiu, JIANG Guanghui, et al. The degree of cultivated land abandonment and its influence on grain yield in

- main grain producing areas of China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(6): 1439-1454. (in Chinese with English abstract)
- [7] 苏越, 朱峻琿, 朱从谋, 等. 浙江平原地区耕地非粮化时空演变特征及碳排放效应分析[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(24): 278-286.
SU Yue, ZHU Junhui, ZHU Congmou, et al. Spatiotemporal evolution and carbon emission on non-grain production of cultivated land in the Northern Plains of Zhejiang Province, China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2023, 39(24): 278-286. (in Chinese with English abstract)
- [8] 王如如, 张郁, 房艳刚, 等. 农业生产转型视角的东北三省农业碳排放格局特征与作用机制[J]. *地理研究*, 2023, 42(8): 2264-2282.
WANG Ruru, ZHANG Yu, FANG Yangang, et al. The pattern characteristics and mechanisms of agriculture carbon emissions from the perspective of agricultural production transition in Northeast China[J]. *Geographical Research*, 2023, 42(8): 2264-2282. (in Chinese with English abstract)
- [9] QIU B W, JIAN Z Y, YANG P, et al. Unveiling grain production patterns in China (2005–2020) towards targeted sustainable intensification[J]. *Agricultural Systems*, 2024, 216: 103878.
- [10] CHEN X X, WANG L C, NIU Z G, et al. The effects of projected climate change and extreme climate on maize and rice in the Yangtze River Basin, China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2020, 282: 107867.
- [11] LIU X, CHU B, TANG R, et al. Air quality improvements can strengthen China's food security[J]. *Nature Food*, 2024, 5(2): 158-170.
- [12] STEPHENS E C, JONES A D, PARSONS D. Agricultural systems research and global food security in the 21st century: An overview and roadmap for future opportunities[J]. *Agricultural Systems*, 2018, 163: 1-6.
- [13] 陈秧分, 王介勇. 对外开放背景下中国粮食安全形势研判与战略选择[J]. *自然资源学报*, 2021, 36(6): 1616-1630.
CHEN Yangfen, WANG Jieyong. China's food security situation and strategy under the background of opening-up[J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(6): 1616-1630. (in Chinese with English abstract)
- [14] 戈大专, 孙攀, 周贵鹏, 等. 传统农区粮食生产转型机制及其安全效应——基于乡村空间治理视角[J]. *自然资源学报*, 2021, 36(6): 1588-1601.
GE Dazhuan, SUN Pan, ZHOU Guipeng, et al. Grain production transformation mechanism and the security effects in traditional farming areas: The perspective of rural spatial governance[J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(6): 1588-1601. (in Chinese with English abstract)
- [15] 米胜渊, 谭雪兰, 谭杰扬, 等. 近 30 年来洞庭湖地区水稻种植面积演变的影响因素分析[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(10): 2499-2510.
MI Shengyuan, TAN Xuelan, TAN Jieyang, et al. Analysis of influencing factors of rice planting area evolution in Dongting Lake Area during 1987-2017[J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(10): 2499-2510. (in Chinese with English abstract)
- [16] 阳君, 肖作林, 刘睿, 等. 水足迹视角下四川省主要粮食作物种植结构优化及用水效率分析[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(12): 117-127.
YANG Jun, XIAO Zuolin, LIU Rui, et al. Optimizing major grain crop planting structure and analysis of water use efficiency in the Sichuan Province from the perspective of water footprint[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2024, 40(12): 117-127. (in Chinese with English abstract)
- [17] 杜国明, 马梦琪, 张瑞, 等. 2000—2020 年东北地区玉米大豆种植格局演变及其气候驱动机理[J]. *资源科学*, 2024, 46(11): 2251-2262.
DU Guoming, MA Mengqi, ZHANG Rui, et al. Change of maize-soybean cropping patterns and its link with climate warming in Northeast China between 2000 and 2020[J]. *Resources Science*, 2024, 46(11): 2251-2262. (in Chinese with English abstract)
- [18] 任频频, 李保国, 黄峰. 农作物种植结构演变下的黄淮海旱作区小麦玉米生产时空格局[J]. *资源科学*, 2022, 44(3): 436-449.
REN Pinpin, LI Baoguo, HUANG Feng. Spatiotemporal patterns of wheat and maize production under the evolution of crop planting structures in the Huang-Huai-Hai dry farmland, China[J]. *Resources Sciences*, 2022, 44(3): 436-449. (in Chinese with English abstract)
- [19] 蒋敏, 李秀彬, 辛良杰, 等. 南方水稻复种指数变化对国家粮食产能的影响及其政策启示[J]. *地理学报*, 2019, 74(1): 32-43.
JIANG Min, LI Xiubin, XIN Liangjie, et al. The impact of paddy rice multiple cropping index changes in Southern China on national grain production capacity and its policy implications[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(1): 32-43. (in Chinese with English abstract)
- [20] 常晓东, 王士君, 杨志鹏, 等. 21 世纪以来中国粮食生产能力空间重构过程与驱动机制[J]. *自然资源学报*, 2025, 40(3): 728-749.
CHANG Xiaodong, WANG Shijun, YANG Zhipeng, et al. The spatial reconstruction process and driving mechanism of China's grain production capacity since the 21st century[J]. *Journal of Natural Resources*, 2025, 40(3): 728-749. (in Chinese with English abstract)
- [21] BANERJEE A, ARIZ D, TURYSINGURA B, et al. Long-term climate change and anthropogenic activities together with regional water resources and agricultural productivity in Uganda using Google Earth Engine[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2024, 134: 103545.
- [22] MOVAHEDI R, JAWANMARDI S, AZADI H, et al. Why do farmers abandon agricultural lands? The case of Western Iran[J]. *Land Use Policy*, 2021, 108: 105588.
- [23] KOPAINSKY B, HUBER R, PEDERCINI M. Food provision and environmental goals in the Swiss agri-food system: System dynamics and the social-ecological systems framework[J]. *Systems Research and Behavioral Science*, 2015, 32(4): 414-432.
- [24] BISWAS A, MADDOCKS I, DHAR T, et al. Guiding sustainable transformations in food systems[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2024, 5(9): 607-608.
- [25] 张锦宗, 朱瑜馨, 赵飞, 等. 我国粮食生产格局演变及增产贡献研究[J]. *中国农业资源与区划*, 2017, 38(7): 10-16, 35.
ZHANG Jinzong, ZHU Yuxin, ZHAO Fei, et al. Spatial-temporal evolution of Chinese grain production pattern and arable land production capacity[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2017, 38(7): 10-16, 35. (in Chinese with English abstract)
- [26] LI T, LONG H, ZHANG Y, et al. Analysis of the spatial

- mismatch of grain production and farmland resources in China based on the potential crop rotation system[J]. *Land Use Policy*, 2017, 60: 26-36.
- [27] SHEN W C, HU Q Y, ZHANG Z F. Impacts of in situ urbanisation on grain production: Evidence from the Yangtze River Delta, China[J]. *Habitat International*, 2024, 143: 102989.
- [28] 邵喜武, 周杨, 吴佩蓉. 基于空间溢出效应的粮食主产区粮食增产与农业生态污染关系研究[J]. *地理科学*, 2022, 42(5): 831-840.
SHAO Xiwu, ZHOU Yang, WU Peirong. Relation of grain increase and agricultural ecological pollution based on spatial spillover effects in major grain producing areas[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2022, 42(5): 831-840. (in Chinese with English abstract)
- [29] 高佳, 赵荣荣, 王盼盼. 耕地多功能对粮食生产能力变化的敏感度研究[J]. *自然资源学报*, 2024, 39(6): 1434-1449.
GAO Jia, ZHAO Rongrong, WANG Panpan. Study on the sensitivity of cultivated land multifunction to the changes of grain productivity capacity[J]. *Journal of Natural Resources*, 2024, 39(6): 1434-1449. (in Chinese with English abstract)
- [30] 黄海潮, 温良友, 孔祥斌, 等. 中国耕地空间格局演化对耕地适宜性的影响及政策启示[J]. *中国土地科学*, 2021, 35(2): 61-70.
HUANG Haichao, WEN Liangyou, KONG Xiangbin, et al. The impact of spatial pattern evolution of cultivated land on cultivated land suitability in China and its policy implication[J]. *China Land Science*, 2021, 35(2): 61-70. (in Chinese with English abstract)
- [31] 崔家兴, 靳涵, 罗滢渊, 等. 县域耕地非农化、非粮化与乡村人口空心化的耦合协调关系——以长江经济带为例[J]. *生态学报*, 2024, 44(5): 1822-1836.
CUI Jiaxing, JIN Han, LUO Yingyuan, et al. Non-agricultural transformation and non-grain production and their coordinated relationships with rural population hollowing: A case study of Yangtze River Economic Belt[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(5): 1822-1836. (in Chinese with English abstract)
- [32] 吴传钧. 论地理学的研究核心——人地关系地域系统[J]. *经济地理*, 1991(3): 1-6.
WU Chuanjun. The core of study of geography: Man-land relationship areal system[J]. *Economic Geography*, 1991(3): 1-6. (in Chinese) (in Chinese with English abstract)
- [33] 杨海娟, 孙来玓, 周美君, 等. 黄土高原粮食生产空间重构过程中的生态系统服务权衡——以陕北榆林市为例[J]. *干旱区地理*, 2022, 45(1): 226-236.
YANG Haijuan, SUN Laiding, ZHOU Meijun, et al. Trade-off analyses of ecosystem services during the reconstruction of grain production space in Loess Plateau: A case of Yulin City[J]. *Arid Land Geography*, 2022, 45(1): 226-236. (in Chinese with English abstract)
- [34] 刘正佳, 钟会民, 李裕瑞, 等. 近 20 年中国粮食生产变化特征及其对区域粮食供需格局的影响[J]. *自然资源学报*, 2021, 36(6): 1413-1425.
LIU Zhengjia, ZHONG Huimin, LI Yurui, et al. Change in grain production in China and its impacts on spatial supply and demand distributions in recent two decades[J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(6): 1413-1425. (in Chinese with English abstract)
- [35] 王薇, 张淑雯, 田旭. 三大主粮增产原因及潜力分析——基于单产增长的内部贡献分解[J]. *农林经济管理学报*, 2019, 18(4): 441-452.
WANG Wei, ZHANG Shuwen, TIAN Xu. Growth potential of three staple grains in China: From the perspective of yield growth decomposition[J]. *Journal of Agro-Forestry Economics and Management*, 2019, 18(4): 441-452. (in Chinese with English abstract)
- [36] 周国华, 龙花楼, 林万龙, 等. 新时代“三农”问题和乡村振兴的理论思考与实践发展[J]. *自然资源学报*, 2023, 38(8): 1919-1940.
ZHOU Guohua, LONG Hualou, LIN Wanlong, et al. Theoretical debates and practical development of the "three rural Issues" and rural revitalization in the New Era[J]. *Journal of Natural Resources*, 2023, 38(8): 1919-1940. (in Chinese with English abstract)
- [37] 钟钰, 巴雪真, 陈萌山. 新时代国家粮食安全的理论构建与治理进路[J]. *中国农村经济*, 2024(2): 2-19.
ZHONG Yu, BA Xuezheng, CHEN Mengshan. Theoretical construction and governance approaches for national food security in the New Era[J]. *Chinese Rural Economy*, 2024(2): 2-19. (in Chinese with English abstract)
- [38] HE T T, LI J H, ZHANG M X, et al. Uphill cropland and stability assessment of gained cropland in China over the preceding 30 years[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2024, 34(4): 699-721.
- [39] 骆玉川, 张朝. 2000-2019 年全国三大粮食作物 1km 种植分布数据集[DB/OL]. 国家生态科学数据中心, 2020-06-27[2021-09-30]. <https://cstr.cn/15732.11.nesdc.ecodb.rs.2022.016>.
- [40] YANG J, HUANG X. The 30 m annual land cover datasets and its dynamics in China from 1985 to 2023[DB/OL]. *Earth System Science Data*, 2021-01-05[2024-08-01]. <https://doi.org/10.5281/zenodo.12779975>.
- [41] 泉涛, 章成果, 冯颖, 等. “23·7”特大暴雨对河北平原玉米产量的影响研究[J]. *中国生态农业学报 (中英文)*, 2024, 32(6): 1023-1032.
QUAN Tao, ZHANG Chengguo, FENG Ying, et al. Impact of the "23·7" extreme heavy precipitation on maize yield in the Hebei Plain[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2024, 32(6): 1023-1032. (in Chinese with English abstract)
- [42] 刘彦随. 中国新时代城乡融合与乡村振兴[J]. *地理学报*, 2018, 73(4): 637-650.
LIU Yansui. Research on the urban-rural integration and rural revitalization in the new era in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(4): 637-650. (in Chinese with English abstract)
- [43] YANG R, ZHANG J, XU Q, et al. Urban-rural spatial transformation process and influences from the perspective of land use: A case study of the Pearl River Delta Region[J]. *Habitat International*, 2020, 104: 102234.
- [44] FOTHERINGHAM A S, YANG W, KANG W. Multiscale geographically weighted regression (MGWR)[J]. *Annals of the American Association of Geographers*, 2017, 107(6): 1247-1265.
- [45] 陈浮, 刘俊娜, 郭维红, 等. 近 20 年国耕地转入时空格局变化及影响因素[J]. *长江流域资源与环境*, 2024, 33(8): 1793-1804.
CHEN Fu, LIU Junna, GUO Weihong, et al. Spatio-temporal pattern changes and interfering factors of transferred farmland in China in the past 20 years[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2024, 33(8): 1793-1804. (in Chinese with English abstract)

Grain production spatial evolution and its influencing factors in China

SHAO Yang^{1,2}, YANG Ren^{1,2,3,4*}, AN Yue^{1,2}

(1. School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China; 2. United Research Institute for Rural Revitalization, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 3. Institute of Guangdong Province Practice of Chinese Modernization, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 4. Land Research Center of Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Spatial evolution of the grain production can greatly contribute to the optimization and allocation of the resource elements in the different agricultural zones. Its key influencing factors can also be explored to adjust the spatial layout of grain production. This study aims to divide the distinct stages of the spatial evolution according to the evolutionary context of grain production. The change rate of the grain crops acreage was employed to characterize the speed and direction of the spatial evolution. The "internal-external" conversion features of grain production spaces were then examined to integrate the spatial hotspot detection. A systematic investigation was also made on the spatial evolution and regional differentiation of grain production over the different phases. Finally, a multi-scale geographically weighted regression (MGWR) model was utilized to synthesize the multidimensional driving factors. The socioeconomic and natural environmental elements were also considered to reveal the primary influences on the spatial evolution of the grain production. Furthermore, the driving mechanisms were determined to underlie the regional differentiation of the spatial evolution during grain production. The results showed that: 1) An increasing trend was found in the yield per unit area and acreage of three major grain crops in the three major grain-producing areas from 2000 to 2019. Among them, the main producing areas shared the highest yield per unit area. While the production-marketing balance areas exhibited the largest increase of nearly 40%. Rice was maintained on the largest proportion of the planting areas, and predominantly distributed in the southern regions. Wheat, maize, and maize-wheat planting areas were concentrated in the northern regions. Specifically, the maize planting areas showed the maximum increase (68.16%). While the wheat and maize-wheat planting areas experienced a long-term reduction and expansion, respectively. 2) The internal spatial conversion was dominated by the shift from the wheat to the maize-wheat planting in the Huang-Huai-Hai Plain. The main feature of the external conversion was the spatial expansion of the grain production space. Particularly, the large-scale croplands, forests, and grasslands were converted into the grain planting land in the eastern main grain-producing and the southern production-marketing balance regions. There was a persistently low conversion degree in the western grain production-marketing balance areas. While a high level of the conversion degree was observed in the eastern main grain-producing and the southern production-marketing balance areas. 3) Per farmer non-agricultural income, the proportion of the non-agricultural industries, land urbanization rate, agricultural machinery power per labor force, slope, and annual average temperature were identified as dominant factors of spatial differentiation in grain production conversion. Agricultural producer prices, rural non-agricultural labor force, soil erosion intensity, and annual average sunshine duration were recognized as the significant factors. 4) The regional differentiation was primarily governed by the decision-making and spatial protection, industrial and labor force non-agricultural transition, as well as the composite constraints from topography, climate, and ecological environment. The socio-economic factors interacted with the natural conditions that were subjected to direct constraints and indirect coercion. Ultimately, there was a complex geographic pattern of the spatial evolution. As such, the regional differentiation was also pronounced in the spatial evolution of the grain production. Therefore, the future strategies should optimize the resource allocation and spatial layout using technological innovation, model improvements, and differentiated adjustments. The finding can also provide a scientific basis for food security and differentiated formulation, in order to promote high-quality grain production and sustainable agriculture.

Keywords: grain production; spatial conversion; multi-scale geographically weighted regression; regional differentiation; sustainable development