

干旱区地理
Arid Land Geography
ISSN 1000-6060, CN 65-1103/X

《干旱区地理》网络首发论文

题目：主产区粮食生产韧性的时空格局与非线性影响因素
作者：杨树果，施美伊，闫涵，李鼎
收稿日期：2026-06-29
网络首发日期：2026-09-18
引用格式：杨树果，施美伊，闫涵，李鼎. 主产区粮食生产韧性的时空格局与非线性影响因素[J/OL]. 干旱区地理.
<https://link.cnki.net/urlid/65.1103.X.20260917.1137.003>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

doi:10.12118/j.issn.1000 - 6060.2026461

CSTR:32274.14.ALG2026461

主产区粮食生产韧性的时空格局与非线性影响因素

杨树果¹, 施美伊¹, 闫涵², 李鼎³

(1. 黑龙江八一农垦大学经济与管理学院, 黑龙江 大庆 163319; 2. 南开大学商学院, 天津 300071; 3. 天津财经大学会计学院, 天津 300222)

摘要：保障粮食生产系统在多重风险冲击下稳定运行并持续供给，是提升粮食安全保障水平的重要基础。以 2011—2024 年中国 13 个粮食主产省区为研究对象，采用熵值法测算粮食生产韧性综合得分，结合核密度估计与 Dagum 基尼系数分解揭示其时空演变及区域差异特征，并构建多模型机器学习分析框架，基于随机森林（RF）和沙普利加性解释（SHAP）方法识别关键影响因素及其非线性关联特征。结果表明：（1）粮食生产韧性总体持续提升，但不同气候带的演变存在明显差异。寒温带内部差异总体扩大但后期有所回落，暖温带较为稳定，亚热带呈现先扩大、后收窄并在末期小幅回升的特征。（2）粮食生产韧性的分布集中程度总体下降，省际绝对差距有所扩大。2011 年区域差异主要来源于组间差异，2018 年后超变密度成为主要来源，2024 年其贡献率达到 66.04%，表明气候带内部分化与跨区域交叉重叠增强。（3）多模型比较显示，RF 预测性能最佳。RF-SHAP 分析表明，乡村人口老龄化率、农业保险深度、农业科研水平和极端高温天数是与粮食生产韧性关联较为密切的因素。（4）关键影响因素均呈现明显的非线性关联，其中乡村人口老龄化率表现出阶段性转换，农业保险深度和农业科研水平总体呈正向关联但高水平下增幅趋缓，极端高温天数则呈近似 U 形关联。研究结果可为不同气候区域粮食生产韧性提升及农业风险适应能力优化提供科学依据。

关键词：粮食生产韧性；时空演变；随机森林；粮食主产区；非线性驱动

“洪范八政，食为政首”。粮食生产是国家粮食安全的基础，也是经济社会稳定运行的重要支撑^[1]。党的二十大报告提出，要“全方位夯实粮食安全根基，确保中国人的饭碗牢牢端在自己手中”。2026 年中央一号文件进一步提出实施新一轮千亿斤粮食产能提升行动，推进粮油作物大面积单产提升，促进良田、良种、良机、良法深度融合，持续增强粮食等重要农产品供给保障能力。然而，随着全球气候变化加剧、资源环境约束趋紧以及农业生产要素结构的不断调整，极端天气、资源约束和要素波动对粮食生产的扰动日趋增强。因此，仅关注粮食产量、生产能力和投入产出效率，已难以全面反映粮食生产系统在不确定环境下的稳定运行能力^[2-3]。

韧性理论为理解这一转变提供了新的分析视角。“韧性”概念最早由 Holling^[4]引入生态系统研究，用以描述系统受到外部扰动后维持自身结构和功能的能力。此后，其内涵逐渐由强调抵御和恢复拓展至适应、调整和演化过程^[5]，并被广泛应用于社会-生态系统、区域发展和农业生产等领域^[6]。对于粮食生产而言，韧性既体现生产系统抵御自然灾害、资源约束等外部冲击的能力，也反映其在冲击后恢复生产、调整要素配置并维持持续发展的能力。已有研究围绕粮食安全脆弱性、农业生产系统韧性和气候风险响应等展开了有益探索^[7-8]，使粮食安全研究逐步由静态的生产结果评价转向对系统动态适应能力的考察。进一步而言，粮食生产韧性并非在不同区域均衡形成，其水平及演变往往受到自然条件、资源禀赋和农业发展基础的共同影响。

收稿日期：2026-06-29；**修订日期：**2026-07-28

基金项目：黑龙江省自然科学基金项目（LH2023G014）；国家粮食和物资储备局 2026 年度软科学课题（GLRKX2026080）资助

作者简介：杨树果（1977-），女，博士，教授，主要从事农业经济理论与政策的研究. E-mail: rhwysg@163.com

通讯作者：施美伊（2002-），女，硕士研究生，主要从事农业经济与管理的研究. E-mail: 13555113169@163.com

这种区域差异在粮食主产区表现得尤为突出。粮食主产区作为中国粮食生产和供给的核心空间载体,在维护国家粮食安全格局中发挥着“压舱石”作用^[2,9]。然而,粮食主产区并非均质空间,其自然地理条件、资源禀赋和农业发展基础存在显著差异。一方面,耕地资源约束、水资源供需矛盾以及农村劳动力结构变化等因素持续影响粮食生产要素配置和农业系统稳定性^[10]。另一方面,气候变化背景下极端高温、干旱、洪涝等事件发生频率增加,加剧了农业生产过程中的环境风险^[11]。尤其是在不同气候区域,温度条件、水分状况以及生态环境基础存在明显差异,使粮食生产系统面临的风险类型、承载能力和恢复路径呈现区域分化特征。因此,识别主产区粮食生产韧性的空间演变规律及其差异来源,对于理解区域农业系统适应能力具有重要意义。

围绕粮食生产韧性的水平测度、空间格局及驱动机制,国内外学者已开展了较为丰富的研究^[12-13]。首先,从研究对象来看,已有研究多基于全国或省域尺度展开分析^[14],或聚焦西北地区^[15]、黄河流域^[16]、长江经济带^[17]等特定区域,而对承担国家粮食供给保障功能、内部差异又较为显著的粮食主产区整体关注相对不足。其次,从空间格局来看,现有研究更多关注粮食生产韧性的总体水平变化及空间分布特征,而对不同自然地理背景下区域韧性差异及其形成机制稍有忽视^[18-19]。由于粮食主产区内部温度条件、水分状况和生态环境基础存在明显差异,不同气候区域粮食生产系统面临的风险类型及适应特征也可能存在较大差异,从气候分区视角考察粮食生产韧性的区域差异具有必要性。最后,从驱动机制来看,粮食生产韧性作为自然环境与人类活动共同作用形成的复杂系统,其演化过程受到自然、社会以及经济等多重因素的影响,并可能存在非线性关系和因素交互作用。已有研究多采用线性模型进行影响因素分析^[20-21],难以充分刻画不同因素作用过程中的复杂关系。为此,引入更具灵活性且能够刻画复杂关系的分析方法,将有助于更好地识别关键影响因素及其非线性关联特征。

基于此,本文以 2011—2024 年中国 13 个粮食主产省区为研究对象,基于“抵抗—恢复—更新”的韧性理论框架构建粮食生产韧性评价指标体系。首先,采用熵值法测算粮食生产韧性综合得分,并利用核密度估计分析其动态演变特征。其次,运用 Dagum 基尼系数分解识别区域差异及其来源,并根据气候条件将粮食主产区划分为寒温带、暖温带和亚热带,考察不同气候背景下粮食生产韧性的区域差异。然后,采用随机森林(RF)、梯度提升决策树(GBDT)、极端梯度提升(XGBoost)和支持向量回归(SVR)模型进行预测性能比较。最后,在优选模型的基础上,引入沙普利加性解释(SHAP)方法,识别粮食生产韧性的关键影响因素及其非线性关联特征。研究旨在揭示粮食主产区粮食生产韧性的时空演变、区域差异及主要影响因素,为不同气候区域粮食生产韧性提升和农业风险适应能力优化提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

2003 年财政部发布《关于改革和完善农业综合开发若干政策措施的意见》,对粮食主产区范围进行了初步界定。2004 年全国农业和粮食工作会议综合粮食产量、人均粮食占有量和商品粮库存等指标,进一步将河北、内蒙古、辽宁、吉林、黑龙江、江苏、安徽、江西、山东、河南、湖北、湖南和四川 13 个省区确定为粮食主产区。

1.2 数据来源

考虑到指标的完整性与年鉴数据的可获取性,本文以 2011—2024 年 13 个粮食主产省区为研究样本。数据主要来源于《中国统计年鉴》《中国农村统计年鉴》《中国科技统计年鉴》及各省份统计年鉴。此外,对个别年份的缺失值,本文采用线性插值法补齐。

1.3 指标体系构建

本文借鉴蒋辉等^[22]和刘威等^[23]的研究,从抵抗力、恢复力和更新力 3 个维度,构建粮食生产韧性评价指标体系(表 1),并利用熵值法测算其水平。其中,抵抗力是指粮食生产系统遭遇突发事件时抵御外界冲击并分散风险的能力,采用生产条件约束与经济基础条件进行衡量;恢复力是指粮食生产体系在受到风险冲击后恢复到原始状态的能力,包括生态治理能力与经济增长状况;更新力强调遭受冲击后的自我调整与更新持续能力,包括劳动力水平与技术进步力度。

表 1 粮食生产韧性评价指标体系

Tab. 1 Indicator system for evaluating grain production resilience

一级指标	二级指标	三级指标	指标计算方法
抵抗力	生产条件约束	平均耕地面积	耕地面积/第一产业从业人员数
		平均有效灌溉面积	有效灌溉面积/第一产业从业人员数
		复种指数	农作物播种面积/耕地面积
		单位播种面积农膜使用量	农用塑料薄膜量/粮食播种面积
		单位播种面积化肥使用量	农用化肥折纯量/粮食播种面积
	经济基础条件	人均粮食产量	粮食总产量/地区总人数
		生活水平	农村居民人均可支配收入
		经济发展水平	人均地区生产总值
		粮食产量水平	粮食总产量/粮食播种面积
		受灾程度	成灾面积/受灾面积
恢复力	生态治理能力	水土流失治理率	水土流失治理面积/该地区总面积
	经济增长状况	单位播种面积农药施用量	农药施用量/粮食播种面积
		粮食类居民消费价格指数	当期粮食价格/基期粮食价格
		农村居民消费支出增加值	本年农村居民消费支出-上年农村居民消费支出
		农业总产值增加值	本年农业总产值-上年农业总产值
		劳动力投入水平	第一产业从业人员数/地区总人数
更新力	劳动力水平	人力资本水平	农村人均受教育年限
	技术进步力度	机械化水平	农业机械总动力/粮食播种面积
		农业机械化从业人员占比	农业机械化作业人员数/第一产业从业人员数
		农业固定资产投资水平	农业固定资产投资额
		农业科研支出水平	地方财政科学技术支出×农业总产值/地区生产总值

1.4 研究方法

1.4.1 熵值法

熵值法依据指标信息熵的大小确定权重,能够规避主观赋权的偏差。具体步骤包括:对原始数据进行极差标准化处理,计算各指标信息熵和差异系数,进而确定客观权重,再以加权求和方式得到各样本的粮食生产韧性综合得分。

1.4.2 核密度估计

为考察粮食生产韧性的分布演变特征,本文采用核密度估计方法分析其分布位置、离散程度及形态变化。核密度估计是一种非参数统计方法,无需预设样本的具体分布形式,通过对观测数据进行平滑处理估计其概率密度分布。在此基础上,通过比较不同年份核密度曲线的位置、峰值、分布宽度及尾部变化,可以进一步判断粮食生产韧性总体水平的演变趋势,以及区域差异的收敛、分化和极化特征。

1.4.3 Dagum 基尼系数

为揭示粮食生产韧性区域差异的来源及其动态演变特征,本文采用 Dagum 基尼系数及其分解方法进行测度。相较于传统基尼系数,Dagum 基尼系数能够有效处理不同区域组之间分布交叉与样本重叠问题,从而更加准确地刻画总体差异及其来源。在此基础上,可将粮食生产韧性的总体区域差异分解为组内差异、组间差异和超变密度 3 部分。其中,组内

差异反映同一区域组内部粮食生产韧性的非均衡程度，组间差异反映不同区域组之间的相对差距，超变密度则用于刻画不同区域组分布交叉与重叠所产生的差异。

1.4.4 机器学习

传统计量方法通常基于线性假设分析变量间关系，对复杂非线性特征的识别存在一定局限^[24-25]。考虑到粮食生产韧性受到自然、社会、经济和政策等多重因素共同影响，各因素与粮食生产韧性之间可能存在复杂的非线性关系。本文引入机器学习方法进行影响因素分析。具体而言，本文选取 RF、GBDT、XGBoost 以及 SVR 模型进行预测性能比较，并采用决定系数 (R^2) 和均方根误差 (RMSE) 作为评价指标。其中， R^2 越高、RMSE 越低，表明模型预测性能越优。

在确定最优模型基础上，进一步引入 SHAP 解释框架，对模型预测结果进行可解释性分析。SHAP 基于博弈论思想，通过计算各解释变量对模型输出结果的边际贡献，能够量化不同因素的重要程度，并揭示其影响方向。同时，结合 SHAP 依赖图分析关键因素与粮食生产韧性之间的非线性响应关系，从而识别不同影响因素的作用特征。

2 结果与分析

2.1 粮食生产韧性水平演进与结构特征

2011—2024 年 13 个粮食主产省区粮食生产韧性综合得分均值由 0.2336 提高至 0.4112，增加 0.1776，累计增幅约为 76.0%，年均复合增长率约为 4.44%（图 1a）。分阶段看，2011—2018 年综合得分年均复合增长率 3.72%，2019—2024 年提高至 4.89%，说明后期提升速度有所加快。各省区 2024 年的粮食生产韧性综合得分均高于 2011 年，但不同省区的提升幅度存在差异，表明粮食生产韧性在整体改善的同时，省际演进并不同步。

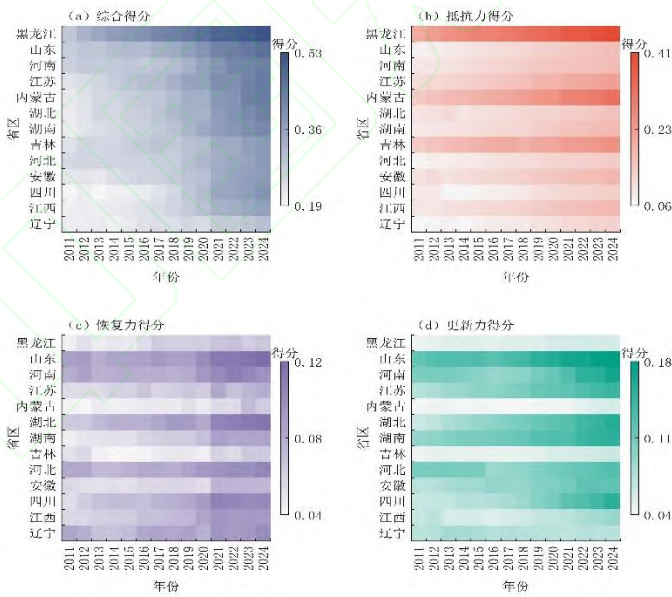


图 1 粮食主产区粮食生产韧性及各维度演变

Fig. 1 Evolution of grain production resilience and its dimensions in the major grain-producing area

分维度看，抵抗力得分由 0.1028 提高至 0.2052，累计增幅 99.6%，年均复合增长率 5.46%，其占综合得分的比重由 44.0%提高至 49.9%（图 1b）；恢复力得分由 0.0610 提高至 0.0914，累计增幅 49.8%，年均复合增长率 3.16%，其占综合得分的比重由 26.1%降至 22.2%（图 1c）；更新力得分由 0.0699 提高至 0.1147，累计增幅 64.1%，年均复合增长率 3.88%，其占综合得分的比重由 29.9%小幅降至 27.9%（图 1d）。总体而言，2011—2024 年粮食生产韧性水平在 3 个维度均有所提升，其中抵抗力维度增幅最大，恢复力维度提升相对缓慢，

表明粮食生产韧性在各维度的演进具有明显的非同步性。

以各省区 2011—2024 年抵抗力得分均值和更新力得分均值的中位数为界，将 13 个省区划分为 4 类（图 2）：高抵抗—低更新型，包括黑龙江、内蒙古、吉林和江西；低抵抗—高更新型，包括山东、河北、湖北和湖南；高抵抗—高更新型，包括安徽、江苏和河南，其抵抗力和更新力均高于相应分组阈值；低抵抗—低更新型，包括四川和辽宁，为 4 类中最低。需要说明的是，河南、安徽和江西的相应维度均值接近分组阈值，因此其类别划分对临界值设定较为敏感。上述结果表明，不同省区在抵抗力得分与更新力得分的组合结构上存在明显差异，粮食生产韧性的提升并未呈现一致的维度演进路径。

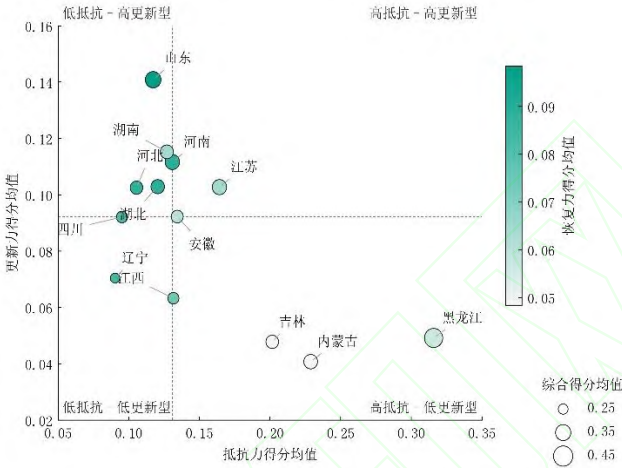


图 2 粮食主产区粮食生产韧性的维度结构类型划分

Fig. 2 Classification of dimensional structure types of grain production resilience in the major grain-producing area

2.2 粮食生产韧性分布动态与区域分异

2011—2024 年粮食生产韧性综合得分的核密度演变特征如图 3 所示。就主产区整体而言，核密度曲线主峰明显右移，主峰位置由 2011 年的 0.218 移至 2024 年的 0.394，表明粮食生产韧性综合得分整体呈上升趋势。同期主峰高度由 16.03 降至 6.56，观测值极差由 0.091 扩大至 0.230，表明省际分布的集中程度有所下降，粮食生产韧性综合得分的绝对差距有所扩大。从分布形态看，2022—2024 年核密度曲线虽存在一定波动，但未形成持续、明显的双峰分布，表明主产区粮食生产韧性尚未形成稳定的两极分化格局。

为进一步揭示不同气候背景下粮食生产韧性的区域差异特征，本文结合主要气候灾害类型与农业生产条件，将 13 个粮食主产省区划分为寒温带、暖温带和亚热带，并进一步考察不同气候带粮食生产韧性综合得分的分布演变。具体而言：寒温带主峰由 2011 年的 0.221 移至 2024 年的 0.399，峰值高度由 13.32 降至 3.39，观测值极差由 0.075 扩大至 0.230，主峰下降和分布范围扩张均较为明显，表明该区域粮食生产韧性提升的同时，省际差异亦有所扩大。暖温带主峰由 0.267 移至 0.379，观测值极差由 0.051 增至 0.093，增幅明显小于寒温带，整体分布仍较为集中，说明区域内部粮食生产韧性差异相对较小。2022—2024 年曲线出现局部双峰特征，反映出后期不同省区的提升幅度存在一定差异。亚热带主峰由 0.214 移至 0.421，右移幅度在 3 个气候带中最大，表明粮食生产韧性综合得分提升较为明显，观测值极差由 2011 年的 0.034 扩大至 2016 年的 0.090，随后降至 2022 年的 0.067，2024 年回升至 0.086，呈现出先扩大、后收窄并略有回升的阶段性变化。

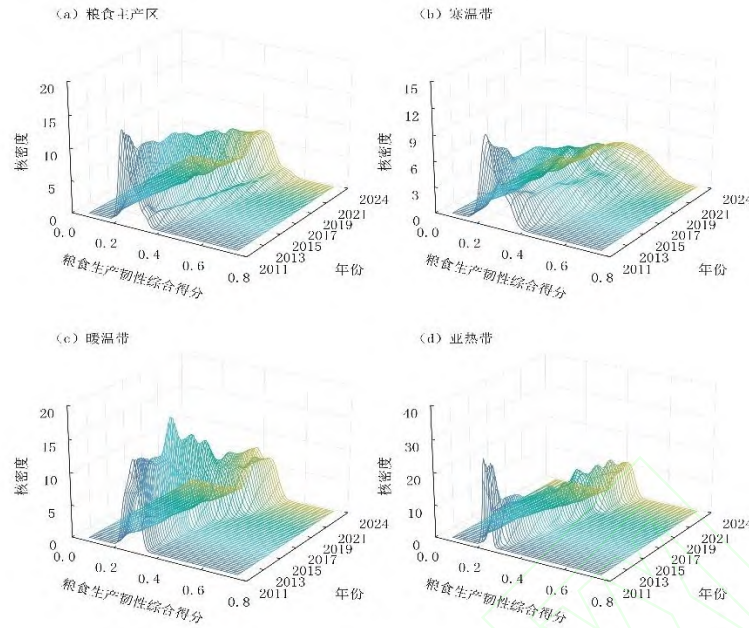


图 3 粮食主产区粮食生产韧性的核密度演变

Fig. 3 Evolution of kernel density of grain production resilience in the major grain-producing area

2.3 粮食生产韧性区域内部差异演变

核密度估计能够反映粮食生产韧性综合得分的分布形态，但难以量化区域内部差异的变化程度。为进一步考察主产区及不同气候带粮食生产韧性的相对差异，本文测算了2011—2024年的组内变异系数（图4）。

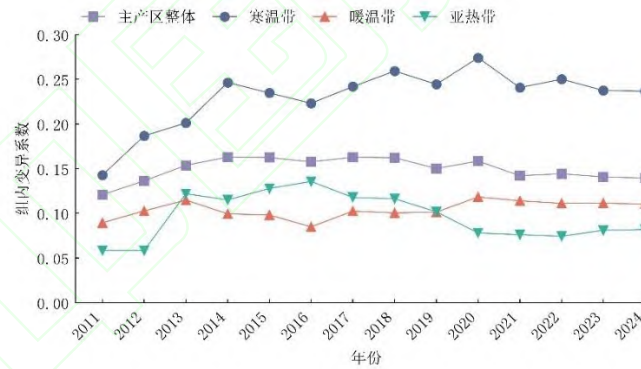


图 4 粮食主产区整体及各气候带粮食生产韧性的组内变异系数

Fig. 4 Intra-group variation coefficients of grain production resilience in the overall major grain-producing areas and each climate zone

从主产区整体看，变异系数由2011年的0.1208上升至2014年的0.1630，2015—2020年在0.1502~0.1627之间波动，2021年后总体回落，2024年降至0.1396，表明粮食生产韧性的省际相对差距呈现先扩大、后波动收窄的演变特征。分气候带看，各区域内部差异的演变路径存在明显差异。寒温带变异系数由2011年的0.1427总体上升至2020年的0.2741，随后虽有所回落，但2024年仍达到0.2367，且研究期内始终高于主产区整体水平，表明该区域内部差异总体扩大并维持在较高水平。暖温带变异系数始终处于0.0849~0.1183之间，2024年为0.1104，整体波动幅度较小，区域内部差异相对稳定。亚热带变异系数由2011年的0.0585上升至2013年的0.1219，并于2016年达到0.1357，此后便总体下降，2022年降

至 0.0744，2024 年小幅回升至 0.0819，呈现先扩大、后收窄并在末期略有回升的阶段特征。

总体来看，2011—2024 年主产区粮食生产韧性区域内部差异呈现先扩大、后波动收窄的总体趋势，但不同气候带的演变路径具有明显异质性。其中，寒温带内部差异扩大最为显著且长期维持高位，暖温带整体较为稳定，亚热带则表现为先扩大、后收窄并在末期小幅回升的阶段特征。

2.4 粮食生产韧性区域差异及来源分析

前文分析表明，粮食生产韧性的省际差异既表现为气候带内部的分化，也存在于不同气候带之间，但不同类型差异对总体差异的相对贡献尚不明确。为此，本文采用 Dagum 基尼系数将总体差异分解为组内差异、组间差异和超变密度，以进一步识别区域差异的主要来源及其演变特征。

从总体差异看（图 5a），2011—2024 年主产区粮食生产韧性总体基尼系数呈先上升、后波动回落的变化趋势。总体基尼系数由 2011 年的 0.0638 上升至 2015 年的 0.0827，此后总体回落，2024 年下降至 0.0736，表明省际粮食生产韧性差异在研究前期有所扩大，随后总体趋于收窄，与前文变异系数所反映的变化趋势基本一致。

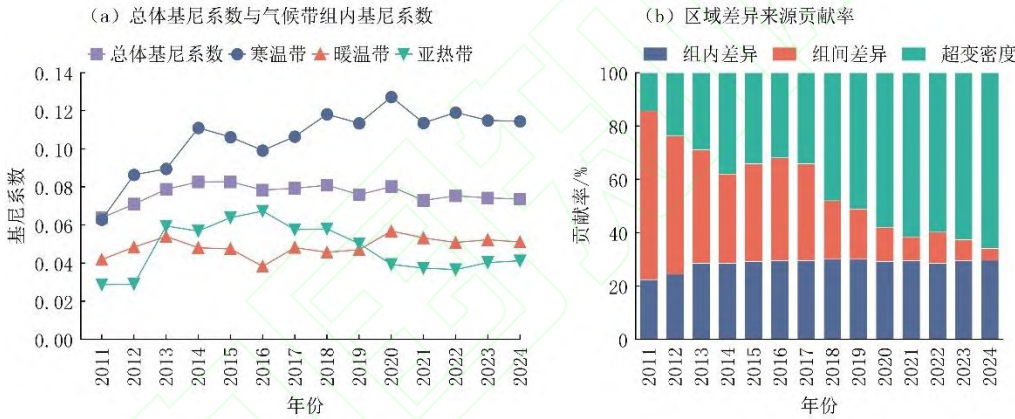


图 5 粮食生产韧性区域差异的来源分解

Fig. 5 Source decomposition of regional differences in grain production resilience

从组内和组间差异看（图 5a），不同气候带呈现出明显差异。寒温带组内基尼系数由 2011 年的 0.0629 上升至 2020 年的 0.1272，随后虽有所回落，但 2024 年仍为 0.1144，即内部差异总体扩大并维持在较高水平；暖温带组内基尼系数由 2011 年的 0.0419 上升至 2024 年的 0.0511，内部差异相对稳定；亚热带由 2011 年的 0.0287 上升至 2016 年的 0.0673，此后总体回落至 2024 年的 0.0412，呈现先扩大、后收窄的阶段变化。气候带间差异同样表现出分化特征，寒温带与暖温带、寒温带与亚热带的组间基尼系数分别由 2011 年的 0.0694 和 0.0626 上升至 2024 年的 0.0940 和 0.0927，而暖温带与亚热带的组间基尼系数则由 2011 年 0.0900 下降至 2024 年的 0.0509。此外，2024 年寒温带、暖温带和亚热带粮食生产韧性综合得分均值分别为 0.4137、0.4129 和 0.4080，说明研究后期气候带间差异已不主要表现为平均水平上的明显梯度，而更多体现为区域内部离散及分布交叉形成的结构性差异。

从区域差异来源看（图 5b），组内差异、组间差异和超变密度的相对贡献发生了明显转换。2011 年组间差异贡献率为 63.23%，为总体差异的主要来源，组内差异和超变密度贡献率分别为 22.37%和 14.40%；2018 年，超变密度贡献率上升至 48.04%，高于组内差异和

组间差异贡献率，并成为总体差异的主要来源，2024 进一步提高至 66.04%。尽管组间差异和超变密度贡献率在个别年份存在波动，但总体变化方向较为明确。由此可见，粮食生产韧性区域差异的主要来源已由研究初期的气候带间差异，逐步转向跨气候带分布交叉重叠及气候带内部差异，表明气候带划分对省际粮食生产韧性差异的解释能力有所减弱。

由此可见，粮食生产韧性区域差异的主要来源已由研究初期的气候带间差异，逐步转向跨气候带分布交叉重叠及气候带内部差异，表明气候带划分对省际粮食生产韧性差异的解释能力有所减弱。

2.5 粮食生产韧性影响因素分析

前述分析刻画了粮食生产韧性的水平演进、结构特征及区域差异，但尚未揭示其主要影响因素及作用特征。为此，本文借鉴贾亚娟等^[26]的研究，从自然、社会、经济和政策 4 个维度构建影响因素分析框架。具体而言，自然条件构成粮食生产的本底约束，社会结构影响农业生产要素的供给与配置，经济发展水平关系到农业生产投入能力和经营环境，政策供给则通过财政支持、科技支撑与风险保障等方式影响粮食生产系统的应对能力

在此基础上，自然因素选取年降水量^[26]、年均温^[27]和极端高温天数^[28]，以表征常态水热条件及极端气候暴露；社会因素选取城镇化率、人口密度和乡村人口老龄化率，以反映人口集聚、城乡转型及农业劳动力结构变化^[29]；经济因素选取第一产业占比、工业化水平和城乡收入差距，以表征产业结构及城乡经济发展特征；政策因素选取财政支农投入强度、农业科研水平^[30]和农业保险深度，分别反映财政支持、科技支撑和风险保障水平。具体变量定义及测算方法见表 2。

表 2 粮食生产韧性影响因素指标

Tab. 2 Indicators of influencing factors for grain production resilience

维度	变量名称	变量单位	计算方法
自然	年降水量	mm	年平均降水量
	年均温	℃	年平均气温
	极端高温天数	d	采用百分位法进行计算
社会	城镇化率	%	城镇人口占总人口比例
	人口密度	人·km ⁻²	人口数占区域面积比例
	乡村人口老龄化率	%	乡村 65 岁及以上人口占乡村人口比例
经济	第一产业占比	%	第一产业占地区生产总值比例
	工业化水平	%	第二产业占地区生产总值比例
	城乡收入差距	%	城镇与农村居民人均可支配收入之比
政策	财政支农投入强度	%	农林水支出占一般公共预算支出比例
	农业科研水平	项	三类专利之和
	农业保险深度	%	农业保险保费收入占第一产业增加值比例

2.5.1 模型比较与预测性能评估

考虑到粮食生产韧性受到自然、社会、经济和政策等多维因素共同影响，各影响因素与粮食生产韧性之间可能存在复杂的非线性关系。为提高模型对非线性特征的刻画能力，本文以粮食生产韧性综合得分为预测目标，以 12 个影响因素作为输入变量，在标准化处理的基础上，按照 70%和 30%的比例随机划分训练集和测试集，分别采用 RF、GBDT、XGBoost 和 SVR 进行预测，并以 R^2 和 RMSE 评价不同模型的预测性能。

不同模型的测试集预测结果如图 6 所示。RF 的预测性能最优， R^2 为 0.707，RMSE 为 0.040；GBDT 次之， R^2 为 0.685，RMSE 为 0.042；XGBoost 的 R^2 为 0.630，RMSE 为 0.045；SVR 的预测性能相对较弱， R^2 为 0.289，RMSE 为 0.062。综合比较各模型的解释度与预测误差，RF 在当前样本划分下表现最佳，因此本文选取 RF 作为后续解释模型，并结合 SHAP 方法分析各影响因素对模型预测结果的相对贡献及其非线性关联特征。

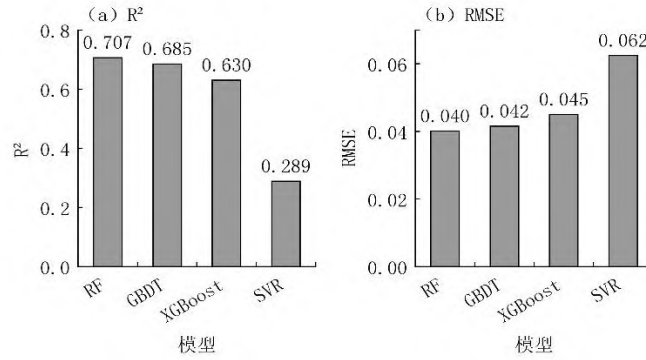


图 6 不同机器学习模型的预测性能比较

Fig. 6 Comparison of predictive performance of different machine learning models

2.5.2 基于 RF-SHAP 影响因素贡献分析

基于 RF 进一步采用 SHAP 方法分析不同因素对粮食生产韧性的相对贡献及关联方向。由平均绝对 SHAP 值（图 7a）可知，不同因素的贡献程度存在明显差异。其中，乡村人口老龄化率的平均绝对 SHAP 值最高，为 0.0356；农业保险深度、农业科研水平和极端高温天数依次为 0.0115、0.0088 和 0.0069，位列前四；人口密度和城镇化率的贡献次之，而年降水量和城乡收入差距的贡献相对较低。总体来看，人口结构、风险保障、科技支撑和极端气候暴露是 RF 识别出的与粮食生产韧性关联较为密切的因素。

进一步结合 SHAP 值分布特征（图 7b）可知，不同因素与粮食生产韧性的关联方向存在差异。乡村人口老龄化率、农业保险深度和农业科研水平的高值样本更多分布于正 SHAP 值一侧，低值样本则更多分布于负 SHAP 值一侧，表明这些因素的较高取值总体上与较高的粮食生产韧性预测值相联系。相比之下，极端高温天数的取值高低与 SHAP 值正负之间未呈现简单的对应关系，表明其关联方向可能随取值水平发生变化。总体而言，粮食生产韧性与人口结构、风险保障、科技支撑及气候暴露等多维因素密切相关，且不同因素在贡献程度和关联方向上表现出明显差异。

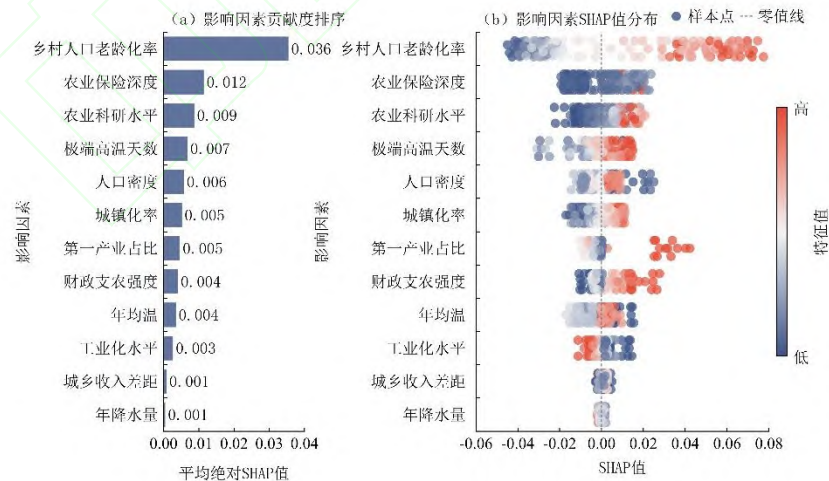


图 7 基于 RF-SHAP 的影响因素贡献及影响方向

Fig. 7 Contributions and effect directions of influencing factors based on RF-SHAP

2.5.3 关键影响因素的非线性响应分析

根据平均绝对 SHAP 值排序，进一步考察前 4 项关键影响因素与粮食生产韧性之间的非线性关联（图 8）。乡村人口老龄化率的 SHAP 值呈明显的阶段性变化，随着老龄化率提

高，其贡献由负值逐步转为正值，并在较高水平下趋于平缓（图 8a）。农业保险深度的 SHAP 值在低水平阶段先小幅下降，随后快速上升并由负转正，在较高水平下基本趋于稳定，表现出较为明显的阈值特征（图 8b）。农业科研水平的 SHAP 值总体随其提高而上升，低水平阶段增幅较快，随后增幅逐渐趋缓，呈现出边际贡献递减的特征（图 8c）。极端高温天数与 SHAP 值呈近似 U 形关系，其 SHAP 值先下降后回升，在中间区间总体为负，进入高值区间后逐渐转为正值（图 8d）。总体而言，4 项关键影响因素与粮食生产韧性之间均存在明显的非线性或阶段性关联，但人口结构、风险保障、科技支撑和气候暴露的关联形态存在明显差异。

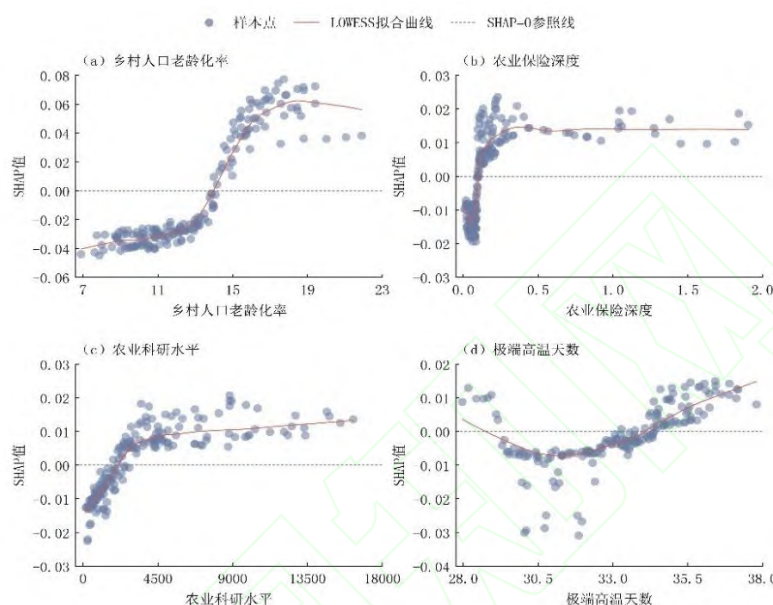


图 8 关键影响因素与粮食生产韧性的非线性关联

Fig. 8 Nonlinear relationships between key influencing factors and grain production resilience

3 讨论

在气候变化加剧、农业资源环境约束增强的背景下，本文考察粮食主产区生产韧性的时空演进及非线性驱动机制。首先，本文研究结果显示，2011—2024 年粮食生产韧性总体持续提升，与已有研究结论基本一致^[12-13]，但不同维度的增长并不同步，其中抵抗力提升较快，恢复力增长相对缓慢，说明综合韧性的提高并不意味着各维度同步改善。其次，区域差异方面，与已有研究主要从全国、省域或特定流域尺度分析粮食生产韧性空间差异不同^[14-19]，本文从气候分区视角识别了区域内部差异及其来源的演变，即寒温带内部差异总体扩大但后期有所回落，暖温带总体较为稳定，亚热带则呈现前期扩大、中后期收窄并在末期小幅回升的阶段特征。更重要的是，Dagum 基尼系数分解显示，区域差异的主要来源已由组间差异逐步转向超变密度，说明不同气候带之间的平均梯度逐渐弱化，粮食生产韧性差异更多表现为气候带内部分化与跨区域交叉重叠。此外，RF-SHAP 分析表明，乡村人口老龄化率、农业保险深度、农业科研水平和极端高温天数是关键影响因素，这与已有研究对劳动力结构、科技支撑、风险保障和气候条件的关注相呼应^[26-30]。但不同的是，本文进一步识别出各因素的非线性作用特征：乡村人口老龄化率表现出阶段性转换，农业保险深度和农业科研水平总体呈正向关联但在较高水平下增幅趋缓，极端高温天数则呈近似 U 形关联。总体而言，本文从气候分区、区域差异来源和非线性关联视角拓展了粮食生产韧性研究。但受数据可得性限制，研究主要基于省级数据，未来可结合市县和农户数据开展进一步检验。

4 结 论

(1) 2011—2024 年粮食主产区粮食生产韧性总体持续提升, 综合得分由 0.234 升至 0.411, 但不同维度的增长并不同步。其中, 抵抗力提升最为明显, 更新力稳步提高, 恢复力增长相对缓慢, 表明粮食生产韧性各维度的演进具有明显的非同步性。

(2) 不同气候带粮食生产韧性的区域内部差异呈现差异化演进特征。寒温带内部差异总体扩大, 后期虽有所回落但仍维持较高水平; 暖温带整体较为稳定; 亚热带则呈现前期扩大、中后期收窄并在末期小幅回升的阶段特征。Dagum 基尼系数分解进一步表明, 区域差异的主要来源由研究初期的组间差异逐步转向超变密度, 说明不同气候带之间的平均梯度逐渐弱化, 粮食生产韧性的省际差异更多表现为气候带内部分化与跨区域交叉重叠。

(3) RF 模型在本文样本上的拟合表现优于 GBDT、XGBoost 和 SVR 模型。RF-SHAP 分析表明, 乡村人口老龄化率、农业保险深度、农业科研水平和极端高温天数是与粮食生产韧性关联较为密切的因素。其中, 乡村人口老龄化率表现出由负向关联逐步转为正向关联的阶段特征, 农业保险深度和农业科研水平总体呈正向关联, 但在较高水平下增幅趋缓, 极端高温天数则呈现近似 U 形的非线性关联。

作者贡献

论文构思: 杨树果、施美伊; 数据管理: 杨树果; 规范分析: 施美伊、李鼎; 获取资助: 杨树果; 调查研究: 施美伊; 方法设计: 杨树果、闫涵、李鼎; 项目管理: 杨树果; 提供资源: 杨树果; 软件编程: 施美伊、李鼎; 监督指导: 杨树果; 验证复核: 杨树果、闫涵、李鼎; 可视化: 施美伊、李鼎、闫涵; 初稿撰写: 杨树果、施美伊; 修订编辑: 杨树果、施美伊、闫涵、李鼎。

参考文献 (References)

- [1] 王韦君, 牟成文. 习近平关于粮食安全的重要论述及其重大意义[J]. 福建师范大学学报(哲学社会科学版), 2025(5): 24–37, 168. [Wang Weijun, Mou Chengwen. Xi Jinping's important discourses on food security and their profound significance[J]. Journal of Fujian Normal University (Philosophy and Social Sciences Edition), 2025(5): 24–37, 168.]
- [2] 何筠, 桂俊练, 罗海平. 粮食主产区政策的粮食生产安全效应研究[J]. 农业经济与管理, 2025(1): 1–14. [He Yun, Gui Junlian, Luo Haiping. Study on the food production security impact of policies in major grain-producing areas[J]. Agricultural Economics and Management, 2025(1): 1–14.]
- [3] 刘汉成, 吴传清. 政策性农业保险对粮食生产的激励效应与提升路径研究[J]. 中国农业资源与区划, 2025, 46(4): 1–12. [Liu Hancheng, Wu Chuanqing. The incentive effect and enhancement path of policy-based agricultural insurance on grain production [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2025, 46(4): 1–12.]
- [4] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973, 4: 1–23.
- [5] Gunderson L H. Ecological resilience: In theory and application[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 2000, 31(1): 425–439.
- [6] Tendall E, Joerin F, Kopainsky B, et al. Food system resilience: Defining the concept[J]. Global Food Security, 2015, 6: 17–23.
- [7] 姚成胜, 殷伟, 李政通. 中国粮食安全系统脆弱性评价及其驱动机制分析[J]. 自然资源学报, 2019, 34(8): 1720–1734. [Yao Chengsheng, Yin Wei, Li Zhengtong. The vulnerability assessment and driving mechanism analysis of China's food security system[J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(8): 1720–1734.]
- [8] 陈有华, 卢欣雨, 张壮, 等. 农业生产社会-生态系统韧性: 维度与度量[J]. 生态学报, 2025, 45(9): 4548–4560. [Chen Youhua, Lu Xinyu, Zhang Zhuang, et al. Resilience of agricultural production systems: Dimensions and measurements[J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(9): 4548–4560.]
- [9] 张俊飏, 李红莉, 张露. 农业生产集聚能否实现增产减污?——基于粮食主产区设立的经验研究[J]. 农村经济, 2025(6): 173–182. [Zhang Junbiao, Li Hongli, Zhang Lu. Can agglomeration of agricultural production achieve increased production and pollution reduction? An empirical analysis based on establishing the major

- grain-producing areas[J]. *Rural Economy*, 2025(6): 173–182.]
- [10] 曾福生, 蔡林军. 劳动力转移影响粮食生产韧性的理论机制与实证检验[J]. 华南农业大学学报(社会科学版), 2024, 23(5): 84–94. [Zeng Fusheng, Cai Linjun. Theoretical mechanism and empirical verification of impact of labor transfer on the resilience of grain production[J]. *Journal of South China Agricultural University(Social Science Edition)*, 2024, 23(5): 84–94.]
- [11] 郭珊, 蒋博, 吉雪强. 极端气候对粮食生产的影响及其作用机制: 兼论农地流转的调节与门槛效应[J]. 生态学报, 2025, 45(7): 3169–3182. [Guo Shan, Jiang Bo, Ji Xueqiang. A study on the impact and mechanisms of extreme climate on grain production: the moderating and threshold effects of farmland transfer[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45(7): 3169–3182.]
- [12] 欧阳金琼, 周伟英, 魏德强. 智慧农业与粮食生产韧性: 影响机制与实证检验[J]. 长江流域资源与环境, 2026, 35(4): 1081–1092. [Ouyang Jinqiong, Zhou Weiying, Wei Deqiang. Smart agriculture and food production resilience: Impact mechanisms and empirical tests[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2026, 35(4): 1081–1092.]
- [13] Meng X, Liu L. Spatial-temporal evolution and influencing factors of food production security in China's major food-producing areas: Based on a resource constraint perspective[J]. *Ecological Indicators*, 2025, 171: 113224, doi: 10.1016/j.ecolind.2025.113224.
- [14] 彭长生, 刘阳, 钟钰. 高标准农田建设政策实施对粮食生产气候韧性的影响[J]. 中国农村经济, 2025(11): 42–62. [Peng Changsheng, Liu Yang, Zhong Yu. The impact of the policy of high-standard farmland construction on the climate resilience of grain production[J]. *Chinese Rural Economy*, 2025(11): 42–62.]
- [15] 董勤各, 何建强, 李毅, 等. 气候变化对西北地区粮食生产的影响及应对策略[J]. 中国科学院院刊, 2026, 41(4): 673–685. [Dong Qinge, He Jianqiang, Li Yi, et al. Impact and countermeasures of climate change on grain production in northwest China[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2026, 41(4): 673–685.]
- [16] 仲嘉维, 郑军, 张明月. 农业社会化服务如何影响粮食生态效率: 以黄河流域 71 个地级市为例[J]. 干旱区地理, 2025, 48(8): 1385–1395. [Zhong Jiawei, Zheng Jun, Zhang Mingyue. How does agricultural socialization service affect grain eco-efficiency: A case study of 71 prefecture-level cities in the Yellow River Basin[J]. *Arid Land Geography*, 2025, 48(8): 1385–1395.]
- [17] 董亚妮, 祁春节, 桂成. 粮食产业链韧性测度、区域差异及收敛性研究: 以长江经济带 108 个地级市为例[J]. 干旱区资源与环境, 2025, 39(8): 41–54. [Dong Yani, Qi Chunjie, Gui Cheng. Resilience measurement, regional differences and convergence of food industry chain: Case study of 108 cities in the Yangtze River Economic Belt[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2025, 39(8): 41–54.]
- [18] 王力, 丁莎莎, 周乾晨. 中国粮食体系韧性多维评估、时空演变及驱动机制研究[J]. 贵州财经大学学报, 2025(6): 21–31. [Wang Li, Ding Shasha, Zhou Qianchen. Multidimensional assessment, spatio-temporal evolution and driving mechanism of grain system resilience in China[J]. *Journal of Guizhou University of Finance and Economics*, 2025(6): 21–31.]
- [19] 周扬, 虞思佳, 俞紫嫣. 中国粮食主产区粮食生产、经济发展和生态保护的时空耦合[J]. 生态学报, 2025, 45(4): 1659–1673. [Zhou Yang, Yu Sijia, Yu Ziyang. Spatiotemporal coupling of grain production, economic development, and ecological protection in China's major grain-producing areas[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45(4): 1659–1673.]
- [20] 李少林, 马丽. 国家现代农业示范区建设影响粮食生产韧性的作用机制及政策效应[J]. 深圳大学学报(人文社会科学版), 2025, 42(3): 5–15. [Li Shaolin, Ma Li. The mechanism and policy effects of national modern agricultural demonstration zone construction on grain production resilience[J]. *Journal of Shenzhen University (Humanities & Social Sciences)*, 2025, 42(3): 5–15.]
- [21] Liu T, Yang X, Chen Y, et al. Impact of implementation of high-standard farmland construction policy on food production resilience: Evidence from China[J]. *China Agricultural Economic Review*, 2026, 18(2): 400–417.
- [22] 蒋辉, 陈瑶, 刘兆阳. 中国粮食生产韧性的时空格局及其影响因素[J]. 经济地理, 2023, 43(6): 126–134. [Jiang Hui, Chen Yao, Liu Zhaoyang. Spatiotemporal pattern and influencing factors of grain production resilience in China[J]. *Economic Geography*, 2023, 43(6): 126–134.]
- [23] 刘威, 吴芮, 郑雪丽, 等. 数字经济对粮食生产韧性的影响及作用机制检验[J]. 统计与决策, 2026, 42(2): 123–128. [Liu Wei, Wu Rui, Zheng Xueli, et al. Impact of the digital economy on grain production resilience and its mechanisms[J]. *Statistics & Decision*, 2026, 42(2): 123–128.]
- [24] Friedman J H. Greedy function approximation: A gradient boosting machine[J]. *Annals of Statistics*, 2001, 29(5): 1189–1232.
- [25] Villacis A H, Badruddoza S, Mishra A K. A machine learning-based exploration of resilience and food

- security[J]. *Applied Economic Perspectives and Policy*, 2024, 46(4): 1479–1505.
- [26] 贾亚娟, 高君, 张新奇. 关中平原耕地利用生态效率时空演化及驱动因素分析[J]. *干旱区地理*, 2026, 49(4): 830–840. [Jia Yajuan, Gao Jun, Zhang Xinqi. Spatiotemporal evolution and driving factors of ecological efficiency in cultivated land use in the Guanzhong Plain[J]. *Arid Land Geography*, 2026, 49(4): 830–840.]
- [27] 吕运灏, 崔民, 夏显力, 等. 陕南耕地“非粮化”时空演变及其驱动力[J]. *资源科学*, 2023, 45(8): 1531–1545. [Lü Yunhao, Cui Min, Xia Xianli, et al. The spatiotemporal evolution of non-grain conversion of cultivated land in southern Shaanxi Province and its driving factors[J]. *Resources Science*, 2023, 45(8): 1531–1545.]
- [28] 潘敏, 刘红艳, 程子帅. 极端气候对商业银行风险承担的影响: 来自中国地方性商业银行的经验证据[J]. *金融研究*, 2022(10): 39–57. [Pan Min, Liu Hongyan, Cheng Zishuai. The impact of extreme climate on commercial banks' risk-taking: Evidence from local commercial banks in China[J]. *Journal of Financial Research*, 2022(10): 39–57.]
- [29] 徐庆迪, 杨清. 黄河流域粮食生产韧性与水资源承载力时空耦合、演变轨迹及驱动因素[J]. *干旱区地理*, 2026, 49(11): 1940–1950. [Xu Qingdi, Yang Qing. Spatiotemporal coupling, evolutionary trajectories, and driving factors of grain production resilience and water resources carrying capacity in the Yellow River Basin[J]. *Arid Land Geography*, 2026, 49(11): 1940–1950.]
- [30] 张金鑫, 王红玲. 环境规制、农业技术创新与农业碳排放[J]. *湖北大学学报(哲学社会科学版)*, 2020, 47(4): 147–156. [Zhang Jinxin, Wang Hongling. Analysis on environmental planning, agricultural technological innovation and agricultural carbon emission[J]. *Journal of Hubei University (Philosophy and Social Science)*, 2020, 47(4): 147–156.]

Spatiotemporal patterns and nonlinear influencing factors of grain production resilience in major grain-producing areas

YANG Shuguo¹, SHI Meiyi¹, YAN Han², LI Ding³

(1. School of Economics and Management, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, Heilongjiang, China; 2. Business School, Nankai University, Tianjin 300071, China; 3. School of Accounting, Tianjin University of Finance and Economics, Tianjin 300222, China)

Abstract: Maintaining the stable operation and continuous supply of grain production systems under multiple risk shocks is fundamental to strengthening food security. This study examines 13 major grain-producing provinces (autonomous regions) in China from 2011 to 2024. The entropy method is employed to calculate the composite score of grain production resilience, while kernel density estimation and Dagum Gini coefficient decomposition are used to characterize its spatiotemporal evolution and regional disparities. A multi-model machine learning framework is further developed, with random forest (RF) and Shapley additive explanations (SHAP) used to identify key influencing factors and their nonlinear associations. The results show that: (1) Grain production resilience increased steadily overall, but its evolution differed markedly across climate zones. Within-region disparities in the cold-temperate zone generally widened before declining in the later period, those in the warm-temperate zone remained relatively stable, while the subtropical zone exhibited an initial widening, subsequent narrowing, and a slight rebound toward the end of the study period. (2) The distribution of grain production resilience became less concentrated overall, while absolute interprovincial disparities widened. In 2011, regional disparities were mainly attributable to inter-regional disparities. From 2018 onward, the intensity of transvariation became the dominant source, accounting for 66.04% of the overall disparity in 2024, indicating increasing differentiation within climate zones and greater overlap across regional distributions. (3) The multi-model comparison shows that RF achieves the best predictive performance. RF-SHAP analysis identifies the rural population aging rate, agricultural insurance depth, agricultural research level, and number of extreme heat days as factors closely associated with grain production resilience. (4) The key influencing factors exhibit pronounced nonlinear associations with grain production resilience. The rural population aging rate shows a stage-wise transition; agricultural insurance depth and agricultural research level are generally positively associated with grain production resilience, although the corresponding SHAP values increase more slowly at higher levels; and the number of extreme heat days exhibits an approximately U-shaped association. These findings provide a scientific basis for enhancing grain production resilience and agricultural risk adaptation capacity across different climate zones.

Keywords: grain production resilience; spatiotemporal evolution; random forest; major grain-producing areas; nonlinear drivers