中国油料作物学报
Chinese Journal of Oil Crop Sciences
2026,48(4):1-15
doi:10.19802/j.issn.1007-9084.2026010

中国油菜产业韧性测度、时空演化与政策驱动
——基于机器学习模型对16个主产省面板数据的解析

宋薇[1],翁贞林[1,2*],高雪萍[1,2],张予涵[1]
(1.江西农业大学经济管理学院,江西 南昌,330045;
2.江西省乡村振兴战略研究院,江西 南昌,330045)

摘要:提升国家油料自给率是建设农业强国的必然要求,系统评估油菜产业韧性及其时空演化具有重要现实意义。基于2000—2023年中国油菜主产省(市)面板数据,本文构建涵盖抵抗风险能力、适应调整能力与创新变革能力的油菜产业韧性评价指标体系,并运用XGBoost-SHAP可解释机器学习模型,系统分析油菜产业韧性的时空演化特征及驱动机理。研究发现:第一,研究期内我国油菜产业韧性整体呈稳步提升趋势,油菜产业韧性在空间上呈现明显的"核心—边缘"结构,高值区主要集聚于长江中下游及部分西南冬油菜优势产区,部分春油菜主产区长期处于中低水平;第二,经济基础和生产条件是影响油菜产业韧性的核心因素,其作用呈现显著的非线性与阈值特征;第三,政策工具对油菜产业韧性的影响具有显著差异,以油菜良种补贴为代表的生产性激励政策对产业韧性具有稳定的正向边际贡献,而以临时收储油菜籽收购为代表的"价格托底型"政策在长期内可能负向影响产业韧性的持续提升;此外,自然禀赋因素整体解释力相对有限,但其非线性和阈值效应不可忽视。据此,本文提出应以空间分异为导向构建油菜产业韧性区域协同提升机制,推动政策工具由"稳价格"向"强能力"的韧性导向型转变,围绕关键驱动因素持续改善生产条件与要素配置效率,夯实油菜产业韧性基础。

关键词:油菜;产业韧性;时空演化;极端梯度提升(XGBoost)算法;政策驱动
中图分类号:F326.12;S565.4　　**文献标识码:**A　　**文章编号:**1007-9084(2026)04-0001-15

Measuring resilience, spatiotemporal evolution, and policy drivers in China´s rapeseed industry: An analysis of panel data from 16 major producing provinces using machine learning models

SONG Wei[1], WENG Zhen-lin[1,2*], GAO Xue-ping[1,2], ZHANG Yu-han[1]
(1. *College of Economics and Management, Jiangxi Agricultural University, Nanchang* 330045, *China*; 2. *Jiangxi Provincial Institute for Rural Revitalization Strategy, Nanchang* 330045, *China*)

Abstract: Enhancing the national self-sufficiency rate of oilseeds is an essential requirement for building an agricultural powerhouse. Systematically assessing the resilience of rapeseed industry and its spatiotemporal evolution holds significant practical importance. Based on panel data from China′s major rapeseed-producing provinces (municipalities) from 2000 to 2023, this study constructs an evaluation index system for rapeseed industry resilience encompassing risk resistance capacity, adaptive adjustment capacity, and innovation transformation capacity. Utilizing the XGBoost-SHAP explainable machine learning model, it systematically analyzes the spatiotemporal evolution characteristics and driving mechanisms of rapeseed industry resilience. The findings reveal that, during the study period, the overall resilience of China′s rapeseed industry showed a steady upward trend. Spatially, the resilience exhibited a distinct "core-periphery" structure, with high-value areas primarily concentrated in the middle- and lower-reaches of the Yangtze River, and certain winter rapeseed-dominant regions in southwest China. Meanwhile, some spring rapeseed-producing areas remained at medium-to-low resilience levels over the long term. Economic foundations and production conditions are core factors influencing rapeseed industry resilience, exhibiting

收稿日期:2026-01-14
基金项目:国家自然科学基金面上项目(72273058);农业农村部科学技术司项目(019240088)
作者简介:宋薇(2000-),女,博士研究生,研究方向为油菜产业经济研究,E-mail: songw614@163.com
* 通讯作者:翁贞林(1964-),男,教授,主要从事农业经济理论政策研究,E-mail: wengzl@jxau.edu.cn

significant nonlinear and threshold characteristics in their effects. Policy instruments exert markedly divergent impacts on rapeseed industry resilience. The marginal contribution of production-oriented incentive policies, such as subsidies for high-quality rapeseed varieties, to the industry's resilience is significant. However, "price-support" policies, such as the temporary stockpiling of rapeseed, might have negative impact in the long term by hindering the industry's ability to continuously build resilience. Furthermore, while natural endowment factors exhibit relatively limited overall explanatory power, their nonlinear and threshold effects warrant attention. Accordingly, this paper proposes establishing a regional collaborative mechanism for enhancing rapeseed industry resilience, guided by spatial differentiation. This approach aims to shift policy tools from a "price stabilization" orientation toward a resilience-driven focus on "capacity strengthening." By continuously improving production conditions and the efficiency of factor allocation around key drivers, resilience foundation for rapeseed industry could become solid.

Key words: rapeseed; industrial resilience; spatiotemporal evolution; XGBoost algorithm; policy-driven

油菜作为我国最重要的油料作物之一,在保障居民食用植物油供给、提升国家油料自给率方面具有不可替代的战略地位[1]。长期以来,我国植物油对外依存度维持在较高水平[2],在国际市场波动[3]、地缘政治冲突[4]以及气候变化风险持续叠加的背景下,油料安全面临的外部不确定性显著上升,油菜主产区亦承受着更为突出的生产风险与冲击压力。与此同时,国内油菜产业自身仍存在一系列结构性约束,如种植收益波动较大、综合机械化水平偏低、优良品种推广空间有待拓展、加工产能相对过剩以及产业链纵向延伸不足等问题[5]。叠加极端天气事件频发、耕地资源约束趋紧和农村劳动力持续外流,油菜生产体系的稳定运行和产业在冲击情境下的恢复与调整能力正面临严峻考验,其可持续发展能力已成为影响国家油料安全的重要因素。

在此背景下,国家层面持续强化油料生产能力建设,将油菜产业发展提升至前所未有的战略高度。近年来连续发布的中央一号文件明确提出"挖掘油菜扩种潜力""深入推进大豆和油料产能提升工程"和"推行稻油轮作,大力开发利用冬闲田种植油菜",旨在增强国内油料供给保障能力与提升产业安全水平[6,7]。在新时代粮油安全战略框架下,油菜不仅是维护国家油料安全的关键资源,其产业发展的稳定性、适应性与可持续性也直接关系到相关产业链和供应链的整体安全。因此,从"产业韧性"视角对油菜产业开展系统研究,具有重要的理论价值与现实意义。

"韧性"(Resilience)一词源于拉丁文*Resilire*,原意为"反弹"或"回弹",最初被引入物理学领域,用以衡量不同材料在外力作用下的承载能力与恢复特性。20世纪70年代,Holling将韧性概念引入生态学研究,将其界定为系统在发生结构性转变之前所能承受的扰动幅度,由此奠定了韧性研究的理论基础[8]。随着研究范式的不断拓展,韧性逐步被引入社会—经济系统分析中,其内涵也由单一的"恢复能力"演进为涵盖抵御冲击、适应调整与结构转型等多维特征的系统属性[9]。联合国进一步从综合风险治理视角,将韧性界定为个体、家庭、社区、制度与社会系统在面对各类风险冲击时,进行预防、应对、适应与恢复的综合能力[10]。受此影响,相关研究普遍从动态演化视角理解产业韧性,强调产业系统在不同发展阶段通过要素重组、技术进步与制度调适,实现稳定与演化并存的发展过程[11,12]。在农业领域,产业韧性研究主要围绕粮食安全[13]、气候变化[10]与农业可持续发展[14,15]等议题展开,普遍认为农业产业韧性不仅体现为对生产波动的缓冲能力,更反映了农业系统在自然风险、市场波动与政策调整等多重冲击下维持供给稳定并实现长期发展的综合能力。现有研究普遍认为,产业韧性具有多维属性,并受到多重因素的共同驱动。在指标构建方面,多数研究遵循"冲击—响应—恢复"的分析逻辑,从抗风险能力、恢复调整能力和变革能力等维度对不同产业和区域的韧性水平及其差异进行了较为系统的测度与比较[16-18]。在研究方法上,不同文献在指标选取与权重设定方面存在较大差异,熵值法[19]、主成分分析法[20]等传统定量方法被广泛采用,部分研究进一步引入数据包络分析(DEA)[21]、多维韧性评价模型及系统动力学[22]等方法,以增强测度结果的系统性和解释力。

在此基础上,准确识别产业韧性演变的驱动机理,被视为提升产业韧性水平和实现精准政策干预的重要前提。聚焦于油菜产业细分领域,现有文献多侧重于宏观视角的增产潜力与供需安全格局探讨[1,2,4],或是围绕产业链特定环节的风险评估与空间

布局演变展开分析[23,24]。此外,部分研究深入评估了临时收储、良种补贴等宏观政策干预对油菜产业发展的结构性影响[5,25]。然而,面对日益复杂的气候变化与市场波动,现有研究多侧重于单一风险暴露或特定政策效果,鲜少从系统性"韧性"视角对油菜产业抵御多重冲击的综合能力进行动态测度。为弥补这一视角的缺失,科学构建油菜产业的韧性评价体系,需要将其置于更为宏观的农业产业韧性理论框架之下进行研究。基于可持续发展的系统理论,相较于工业产业,农业产业韧性更依赖自然禀赋条件、生产基础设施与政策支持之间的协同作用。围绕农业产业韧性的影响因素,既有研究主要从经济发展水平、生产条件、政策环境与自然禀赋等方面展开分析。相关研究表明,土地利用结构、交通条件和气候要素等因素对粮食产业链韧性具有显著影响[13],极端气候事件对农业产业韧性的作用往往呈现非线性特征[26]。在研究方法上,现有文献多采用地理加权回归(GWR)[13]、多元回归分析[17]及空间计量模型[19]等传统计量方法,对产业韧性的驱动因素进行实证检验。这类方法在识别平均效应和空间异质性方面具有一定优势,但通常需要预设函数形式,难以充分刻画多因素共同作用下的复杂非线性关系和阈值特征。相较于传统计量模型,机器学习预测建模方法不依赖于对函数形式和参数结构的事先设定,能够在高维、多变量情境下更充分地刻画因变量与多重影响因素之间的复杂关系,有助于识别潜在的非线性效应和交互机制[27]。然而,机器学习模型的内部运算过程通常缺乏直观的经济学解释,其预测结果往往呈现出"黑箱"特征,从而在一定程度上制约了研究结论的可解释性[28]。为缓解上述问题,将可解释性分析方法与机器学习模型相结合,逐渐成为相关研究的重要发展方向。其中,SHAP方法通过对特征变量边际贡献的量化分解,实现对模型预测结果的可解释表达,不仅能够对各影响因素的重要性进行排序,还可揭示不同取值区间下变量作用方向与强度的变化特征[29]。因此,SHAP方法在兼顾预测精度与解释能力方面具有明显优势,为弥补传统机器学习模型解释不足提供了有效工具。

鉴于此,本文从系统性、动态性与空间关联性视角出发,构建契合油菜产业特征的产业韧性评价指标体系,系统刻画我国16个油菜主产省(市)产业韧性的时空演化特征。进一步地,本文引入极端梯度提升(XGBoost)算法并结合Shapley加性解释(SHAP)方法,对油菜产业韧性的关键驱动因素进行多维识别,以揭示油菜产业韧性驱动机理在不同发展阶段和空间尺度上的作用差异。本文的边际贡献主要体现在以下三个方面:第一,从系统性视角构建符合油菜产业特征的韧性评价体系,丰富了油菜产业高质量发展的定量评估框架,弥补了该领域系统性测度指标的不足;第二,从时空维度系统分析油菜主产区产业韧性的演化特征,弥补现有研究在区域尺度和动态比较方面的不足;第三,基于XGBoost-SHAP模型对油菜产业韧性的驱动机理进行多维识别,提升了实证结果的科学性与解释力,为推动油菜产业韧性提升和优化区域差异化政策提供系统化的经验证据。

1 材料与研究方法

1.1 研究区域

本研究以我国油菜主产区为研究对象,选取冬油菜和春油菜两大生产区共16个油菜主产省(自治区、直辖市)作为样本区域,具体包括长江流域冬油菜产区的湖北、四川、安徽、湖南、贵州、江西、陕西、重庆、云南、江苏、河南和浙江,以及北方春油菜产区的青海、甘肃、新疆和内蒙古。上述地区在我国油菜播种面积和产量中占据主体地位,具有较强的代表性,能够较为全面地反映我国油菜产业发展的区域特征及其差异性[23]。

1.2 数据来源

为确保油菜生产空间分布界定的一致性,并兼顾相关数据的可获得性与统计口径的连续性,本文将研究时间范围设定为2000—2023年,采用我国16个油菜主产省(自治区、直辖市)的省级面板数据开展分析。研究所需的基础数据主要涵盖油菜籽产量、播种面积、经济基础、生产条件、政策支持以及生长季气候条件等多个方面。具体而言,油菜生产及经济社会相关数据主要来源于《中国统计年鉴(2001—2024)》《中国农村统计年鉴(2001—2024)》《中国城市统计年鉴(2001—2024)》《中国农产品成本收益汇编(2001—2024)》和《中国保险年鉴(2001—2024)》,并辅以国家统计局、国家知识产权局以及浙大卡特企研涉农数据库等官方网站和专业数据库的数据。需要说明的是,考虑到《农民专业合作社法》与中央一号文件出台前后的统计口径差异,本文在确保数据连贯性的前提下,对2007年前的农民合作社数量采用了相近的"农村合作经济组织"指标进行合理测算与平滑;而对于2013年前家

庭农场数量的零值或极低值,本文予以原貌保留,以契合我国农业组织化程度早期较低的客观制度演进事实。气候数据方面,油菜生长季月均气温和月均降水量来源于国家青藏高原科学数据中心[30,31],日照数据基于中国地面气候资料日值数据集(V3.0)整理生成[32];积温指标为油菜生育期内日均气温高于5℃阈值的累积值,其中冬油菜生长季界定为当年9月至次年5月,春油菜生长季为4—10月。政策环境变量主要反映国家油料支持政策的实施情况。其中,油菜良种补贴政策(又称"双低政策")始于2007年国务院办公厅发布的《关于促进油料生产发展的意见》,重点支持长江流域"双低"油菜优势区的生产,涵盖川、鄂、湘、赣、苏、皖等11个省(市)[33]。此外,油菜临时收储政策于2008年启动实施,其覆盖范围由最初的9个冬油菜产区及4个春油菜产区,逐步扩展至2009年的17个省(区、市);该政策作为特定阶段的价格支持手段,最终于2015年正式取消[25]。本文将上述政策设置为虚拟变量,对政策实施年份且属于政策覆盖省份的取值设为1,其余年份和省份取值为0。整体数据缺失比例为5.2%,对于中间年份的偶发缺失,我们采用了线性插值法;对于两端的极个别缺失,辅以趋势外推法进行处理。相关经济类指标均进行了消胀处理,均统一以2000年为基期,并根据变量性质分别采用各省的居民消费价格指数(CPI)进行了平减处理,确保了跨期数据的绝对可比,以保证数据的可比性和分析结果的稳健性。

1.3 油菜产业韧性指标构建

基于文献综述部分对产业韧性理论内涵的界定,本文进一步从抵抗风险能力、适应调整能力和创新变革能力三个维度,对油菜产业韧性进行可操作化测度。结合油菜产业生产特征与数据可得性,本文围绕风险承受、生产供给、生产保障、市场适应、生产调整、科技创新、转型变革与可持续发展等方面,构建油菜产业韧性测度指标体系,共设置16个具体指标(表1)。各维度指标的选取逻辑如下。

1.3.1 抵抗风险能力 该维度主要反映油菜产业在面对外部冲击时维持稳定运行的基础能力,具体包括风险承受能力、生产供给能力和生产保障能力三个方面。农业保险作为重要的风险管理工具,通过经济补偿机制缓冲自然灾害和市场波动对生产主体的冲击,有助于保障油菜生产的连续性与稳定性。因此,本文采用农业保险覆盖深度和覆盖广度作为风险承受能力的代理变量。围绕油菜产业的核心生产环节,选取油菜播种面积和油菜籽产量衡量各省油菜产业的供给能力。在生产保障能力方面,除生产规模外,生产效率与基础设施条件同样是支撑产业稳定运行的重要因素。为此,本文选取油菜单产水平表征生产效率,以路网密度反映交通基础设施条件,综合衡量油菜产业的生产保障能力[16,24]。

1.3.2 适应调整能力 该维度主要刻画油菜产业在冲击发生后,通过调整生产和市场行为实现恢复与再配置的能力,具体包括市场适应能力和生产调整能力两个方面。市场适应能力反映产业应对需求变化、价格波动及政策调控的灵活性。考虑到油菜种植面积往往随价格信号和政策环境变化而调整,本文选取油菜价格指数和播种面积变动情况作为衡量市场适应能力的核心指标。生产调整能力则强调产业在面对外部环境变化时,通过优化资源配置和调整生产组织方式实现快速响应的能力。家庭农场作为规模化、集约化的生产组织形式,通常具有较强的生产决策和调整能力;合作社则通过组织协作提升生产效率、降低交易成本并增强市场议价能力。基于此,本文选取生产集中化程度和组织化程度两个指标来刻画油菜产业的生产调整能力[34]。

1.3.3 创新变革能力 该维度主要反映油菜产业在长期发展过程中,通过技术进步、结构调整和绿色转型提升可持续竞争力的能力,具体包括科技创新能力、转型变革能力和可持续发展能力三个方面。在科技创新能力方面,考虑到技术进步对油菜产业提质增效的关键作用,本文选取农业创新能力和科学技术水平两个指标进行衡量。在转型变革能力方面,地方财政支持在改善油菜生产条件、推动产业结构升级过程中发挥着重要作用,而油菜收益则直接反映产业的经济绩效和市场反馈,是衡量产业转型成效的重要依据。因此,本文以相关财政支持指标和油菜收益水平反映转型变革能力。在可持续发展能力方面,本文从资源环境约束角度出发,参考既有研究,选取化肥使用强度和农药使用量作为衡量油菜产业绿色与可持续发展能力的代理指标[35,36]。

1.4 熵权法

熵权法(entropy weight method)是一种常用于多指标综合评价的客观赋权方法,广泛应用于经济、环境、社会、农业等领域。因此,本文借鉴前人的做法[19],采用熵权法测度中国油菜产业韧性水平,具体

表1 油菜主产区产业韧性评价指标体系及指标权重

Table 1 Indicator system and weighting for evaluating industrial resilience in major rapeseed production areas

一级指标 Primary indicator	二级指标 Secondary indicators	三级指标 Third-level indicator	计算方法 Calculation method	指标方向 Indicator direction	权重 Weight
抵抗风险能力 Risk resistance capability	风险承受能力 Risk tolerance	农业保险覆盖深度 Depth of agricultural insurance coverage	农业保险保费收入/农业生产总值 Agricultural insurance premium income / Gross agricultural output value /%	正 Positive	0.0885
		农业保险覆盖广度 Breadth of agricultural insurance coverage	农业保险保费收入/农村人口(元) Agricultural insurance premium income / Rural population /CNY	正 Positive	0.1203
	生产供给能力 Production capacity	油菜播种面积 Rapeseed seeding area	实际数据(千公顷) Actual data /($\times10^3$ hm^2)	正 Positive	0.0536
		油菜产量 Rapeseed production	实际数据(万吨) Actual data /($\times10^4$ t)	正 Positive	0.0612
	生产保障能力 Production guarantee capability	油菜单产水平 Rapeseed yield per unit area	油菜产量/播种面积 Rapeseed production / Seeding area /(kg/hm^2)	正 Positive	0.0116
		交通可达性 Traffic accessibility	路网密度 Road network density /(km/km^2)	正 Positive	0.1785
适应调整能力 Adaptability	市场适应能力 Market adaptability	油菜籽生产价格变动情况 Fluctuation of rapeseed producer price	油菜籽生产价格指数变动率 Change rate of rapeseed producer price index /%	负 Negative	0.0029
		播种面积变动情况 Fluctuation of seeding area	播种面积年变动率 Annual change rate of seeding area /%	负 Negative	0.0063
	生产调整能力 Production adjustment capability	农业生产集中化 Centralization of agricultural production	家庭农场数量 Number of family farms	正 Positive	0.1513
		组织化程度 Degree of organization	合作社数量 Number of cooperatives	正 Positive	0.0988
创新变革能力 Innovation and transformation capability	科技创新能力 Technological innovation capability	农业技术创新能力 Agricultural technology innovation capability	以农业专利来表征 Represented by agricultural patents	正 Positive	0.1153
		科学技术水平 Level of science and technology	科学技术支出/地方财政一般预算 Science and technology expenditure / Local general public budget /%	正 Positive	0.0650
	转型变革能力 Transformation capability	涉农财政支出 Agriculture-related financial expenditure	农林水利事务支出/一般公共预算支出(%) Expenditure on agriculture, forestry, and water affairs / General public budget expenditure /%	正 Positive	0.0286
		油菜收益 Rapeseed profit	油菜每亩净利润(元) Net profit per mu of rapeseed /CNY	正 Positive	0.0111
	可持续能力 Sustainability	化肥使用强度 Intensity of fertilizer use	每亩油菜生产化肥使用量(千克) Fertilizer usage per mu of rapeseed production /kg	负 Negative	0.0030
		农药使用量 Pesticide usage	每亩油菜生产农药使用金额(元) Pesticide cost per mu of rapeseed production /CNY	负 Negative	0.0038

的步骤和公式如下:

(1) 数据标准化 为消除油菜产业韧性指标体系中各指标量纲及数量级的差异,首先采用极差标准化方法对原始面板数据进行无量纲化处理。设x_{ijt}为第t年第i个省份的第j个指标的原始观测值(其中省份i = 1, 2, ... 16;年份t= 1, 2, ... 24;指标j = 1, 2, ... 16)。

正向指标计算公式如式(1)所示:

$$x'_{ijt} = \frac{x_{ijt} - \min(x_j)}{\max(x_j) - \min(x_j)} \tag{1}$$

负向指标计算公式如式(2)所示:

$$x'_{ijt}=\frac{\max(x_j)-x_{ijt}}{\max(x_j)-\min(x_j)} \tag{2}$$

式(2)中,x'_{ijt}表示标准化处理后的指标值,$\max(x_j)$和$\min(x_j)$分别表示研究期内所有年份、所有省份中第j个指标的全局最大值与最小值。

(2) 计算指标信息熵和权重 首先,计算第t年第i个省份在第j个指标下的比重p_{ijt}:

$$p_{ijt}=\frac{x'_{ijt}}{\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{n}x'_{ijt}} \tag{3}$$

根据信息论原理,对于第j个指标,其信息熵为:

$$e_j=-k\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{n}p_{ijt}\ln(p_{ijt}) \tag{4}$$

式(4)中$k=\frac{1}{\ln(T\times n)}$,$T$为总年份数,$n$为省份数。

计算第j项指标的熵值权重为w_j:

$$w_j=\frac{1-e_j}{\sum_{j=1}^{m}(1-e_j)} \tag{5}$$

式(5)中,$1-e_j$为第j个指标的信息效用价值(冗余度),m为指标总数。

(3) 计算油菜产业韧性指数

$$R_{it}=\sum_{j=1}^{m}w_j\cdot x'_{ijt} \tag{6}$$

式(6)中,R_{it}为第i个省份t年的油菜产业韧性值,w_j为第j个指标的熵值权重,x'_{ijt}为标准化后的指标值。

1.5 基于XGBoost的可解释机器学习方法

为识别油菜产业韧性驱动机理之间可能存在的非线性关系及其复杂交互效应,本文选用极端梯度提升(extreme gradient boosting,XGBoost)模型作为核心分析工具。XGBoost通过迭代构建加性回归树模型,在引入正则化约束的同时提升预测精度,能够有效处理高维特征和非线性关系,已在农业经济与区域发展研究中得到广泛应用。

在XGBoost框架下,模型通过叠加多棵回归树对目标变量进行预测,其整体优化目标为最小化包含正则化项的损失函数,可表示为:

$$\mathcal{L}(\phi)=\sum_{i=1}^{n}l\left(y_i,\hat{y}_i\right)+\sum_{k=1}^{K}\Omega\left(f_k\right) \tag{7}$$

式(7)中,y_i为样本i的实际观测值;$\hat{y}_i=\sum_{k=1}^{K}f_k(x_i)$为K棵回归树加总得到的预测值;$l$为训练损失函数;$\Omega\left(f_k\right)$为第K棵树的正则化项,用于约束模型复杂度,防止过拟合。模型通过梯度提升策略逐步逼近最优解,具体计算过程不再展开。

鉴于树模型结构较为复杂,难以直接解释各驱动因素对油菜产业韧性的作用机制,本文进一步引入Shapley加性解释(Shapley additive explanations,SHAP)方法,对模型预测结果进行分解。SHAP基于合作博弈论思想,将预测值表示为各特征边际贡献的加性组合,从而在全局与局部层面揭示不同因素对油菜产业韧性的影响方向和相对重要性[29]。基于SHAP方法,模型预测结果可表示为:

$$\phi_i=\sum_{S\subseteq F\setminus\{i\}}\frac{|S|!(|F|-|S|-1)!}{|F|!}\left[f_{S\cup\{i\}}(x_{S\cup\{i\}})-f_S(x_S)\right] \tag{8}$$

式(8)中,ϕ_i表示第i个特征的SHAP值,表示其对模型预测的总影响。F为全部特征集合,S为特征子集,$f_{S\cup\{i\}}(x_{S\cup\{i\}})$和$f_S(x_S)$分别表示具有和不具有第$i$个特征的模型结果。通过SHAP分析,本文期待能够系统识别油菜产业韧性的驱动机理及其非线性作用特征,为后续实证结果解释提供可靠依据。

2 结果与分析

2.1 中国油菜产业韧性时空演化特征

2.1.1 油菜产业韧性水平整体性分析 表2展示2000—2023年中国油菜主产区产业韧性的综合测算结果。总体来看,研究期内我国油菜产业韧性水平持续提升,且呈现出明显的阶段性演进特征。产业韧性综合指数由2000年的0.0486上升至2023年的0.2937,表明随着生产条件改善和产业体系逐步完善,油菜产业系统抵御外部冲击和系统恢复能力显著增强。

从时间演进特征来看,油菜产业韧性提升大致经历三个阶段:2000—2006年为低位缓慢增长阶段,产业韧性整体水平较低;2007—2014年进入稳步提升阶段,多数主产区韧性指数持续上升;2015年以来,产业韧性提升速度明显加快,尤其在2020年后整体水平进一步跃升,显示出产业结构优化及相关支撑体系完善对产业韧性的持续促进作用。

从空间格局来看,油菜产业韧性在省际层面呈现显著非均衡特征。湖北、湖南、四川、安徽、浙江等传统油菜优势产区的产业韧性指数长期处于较高水平,且提升趋势相对稳定;而甘肃、青海、新疆等地区产业韧性水平相对偏低,近年来虽有所改善,但整体提升幅度仍较为有限。从动态演化角度看,各主产区产业韧性整体呈同步上升态势,但不

同地区提升速度存在明显差异,部分优势产区提升更快,省际差距在一定时期内有所扩大,反映出油菜产业韧性演进过程中存在一定的路径依赖特征。总体而言,我国油菜产业韧性在持续增强的同时,其空间格局逐步由低水平均衡向梯度分化演进。

2.1.2 油菜产业韧性水平时空演化分析 为刻画2000—2023年我国油菜主产区产业韧性的空间分异及其动态演化特征,本文采用ArcGIS 10.7的自然断点法[37]将产业韧性水平划分为低、中、高三个等级,并选取2000、2005、2010、2015、2020和2023年进行分析(表3)。随着研究期内我国油菜产业韧性整体水平的显著跃升,历年自然断点的划分阈值也呈现出明显的逐年抬升趋势,这从分类基准动态演变的视角,进一步印证了全国油菜产业韧性整体增强的演进特征。

总体来看,油菜产业韧性空间格局呈现出由低位分散向核心集聚演进的特征。研究初期,各主产区产业韧性整体水平偏低,高值区分布零散,空间差异不明显。随着时间推移,中高韧性等级区域逐步扩展,空间分异特征开始显现,长江中下游及西南地区率先由低值等级向中高值等级跃升。进入中后期,高韧性区集聚态势进一步强化,并在以长江中游和西南地区为代表的冬油菜主产区形成相对稳定的核心区域。相比之下,春油菜主产区多处于中低韧性等级,其提升节奏相对缓慢。至2023年,油菜产业韧性空间格局趋于稳定,整体呈现出以冬油菜优势区为核心、春油菜区为外围的"核心—边缘"梯度结构。

进一步地,为提供空间演化的统计学支撑,本文计算了2000—2023年中国油菜产业韧性的全局莫兰指数(Global Moran′s I)。由于篇幅有限,指数详细结果未在正文中展示。测算结果表明,全局空

表2 2000–2023年中国油菜主产区产业韧性的综合测算

Table 2 Comprehensive assessment results of industrial resilience in China´s major rapeseed production areas in 2000–2023

年份 Year	内蒙古 Inner Mongolia	江苏 Jiangsu	浙江 Zhejiang	安徽 Anhui	江西 Jiangxi	河南 Henan	湖北 Hubei	湖南 Hunan	重庆 Chongqing	四川 Sichuan	贵州 Guizhou	云南 Yunnan	陕西 Shaanxi	甘肃 Gansu	青海 Qinghai	新疆 Xinjiang	总体 Overall
2000	0.0363	0.0772	0.0347	0.0786	0.0485	0.0323	0.0974	0.0637	0.0243	0.0705	0.0463	0.0339	0.0273	0.0260	0.0247	0.0552	0.0486
2001	0.0241	0.0730	0.0400	0.0830	0.0438	0.0357	0.0952	0.0623	0.0245	0.0698	0.0445	0.0334	0.0265	0.0235	0.0249	0.0523	0.0473
2002	0.0284	0.0692	0.0376	0.0782	0.0391	0.0387	0.0861	0.0571	0.0259	0.0722	0.0440	0.0313	0.0263	0.0247	0.0233	0.0495	0.0457
2003	0.0304	0.0755	0.0419	0.0827	0.0408	0.0472	0.0965	0.0622	0.0297	0.0792	0.0474	0.0347	0.0308	0.0283	0.0286	0.0503	0.0504
2004	0.0318	0.0803	0.0453	0.0917	0.0405	0.0497	0.1074	0.0665	0.0313	0.0811	0.0498	0.0335	0.0319	0.0288	0.0285	0.0455	0.0527
2005	0.0305	0.0787	0.0454	0.0888	0.0403	0.0526	0.1044	0.0675	0.0310	0.0829	0.0522	0.0349	0.0315	0.0290	0.0310	0.0400	0.0525
2006	0.0297	0.0776	0.0485	0.0816	0.0420	0.0535	0.0995	0.0702	0.0330	0.0832	0.0544	0.0355	0.0335	0.0301	0.0292	0.0422	0.0527
2007	0.0619	0.0974	0.0873	0.0875	0.0607	0.0759	0.1163	0.0925	0.0531	0.1066	0.0728	0.0524	0.0522	0.0537	0.0651	0.0974	0.0771
2008	0.0860	0.1121	0.0930	0.0995	0.0678	0.0878	0.1320	0.1074	0.0584	0.1163	0.0703	0.0497	0.0570	0.0522	0.0725	0.1196	0.0864
2009	0.1011	0.1339	0.1033	0.1316	0.0768	0.0971	0.1418	0.1275	0.0624	0.1270	0.0794	0.0651	0.0639	0.0564	0.0783	0.1259	0.0982
2010	0.1033	0.1477	0.1088	0.1373	0.0836	0.0979	0.1458	0.1325	0.0641	0.1329	0.0755	0.0678	0.0652	0.0606	0.0510	0.1121	0.0991
2011	0.1089	0.1605	0.1204	0.1378	0.0866	0.1008	0.1468	0.1553	0.0670	0.1485	0.0766	0.0832	0.0684	0.0667	0.0588	0.1146	0.1063
2012	0.1170	0.1895	0.1423	0.1575	0.0938	0.1164	0.1574	0.1458	0.0744	0.1644	0.0837	0.0873	0.0784	0.0820	0.0697	0.1221	0.1176
2013	0.1504	0.2193	0.1556	0.1721	0.1100	0.1428	0.1713	0.1586	0.0838	0.1742	0.0923	0.0925	0.0883	0.0964	0.0750	0.1454	0.1330
2014	0.1716	0.2303	0.1718	0.1895	0.1248	0.1562	0.1848	0.1738	0.0964	0.1856	0.1075	0.1012	0.0936	0.1099	0.0802	0.1563	0.1458
2015	0.1897	0.2387	0.1958	0.2155	0.1383	0.1789	0.1984	0.1925	0.1314	0.1995	0.1185	0.1126	0.0992	0.1246	0.0925	0.1676	0.1621
2016	0.1950	0.2558	0.2154	0.2573	0.1514	0.2070	0.2155	0.2090	0.1222	0.2179	0.1381	0.1235	0.1132	0.1521	0.1038	0.1742	0.1782
2017	0.2015	0.2625	0.2507	0.2662	0.1782	0.2314	0.2275	0.2346	0.1373	0.2649	0.1541	0.1254	0.1278	0.1570	0.1110	0.1821	0.1945
2018	0.2122	0.2678	0.2743	0.2843	0.1946	0.2582	0.2383	0.2614	0.1484	0.2636	0.1683	0.1325	0.1378	0.1756	0.1342	0.1934	0.2091
2019	0.2212	0.2824	0.2606	0.2483	0.2042	0.2603	0.2455	0.2741	0.1503	0.2466	0.1668	0.1383	0.1415	0.1843	0.1671	0.2303	0.2139
2020	0.2379	0.2956	0.2929	0.2785	0.2242	0.2853	0.2662	0.3032	0.1690	0.2611	0.1720	0.1447	0.1531	0.1980	0.1768	0.2567	0.2322
2021	0.2610	0.2704	0.2982	0.2876	0.2444	0.2927	0.2876	0.3024	0.1825	0.2798	0.1612	0.1414	0.1649	0.2019	0.1840	0.2347	0.2372
2022	0.3502	0.2729	0.3206	0.3297	0.2801	0.3480	0.3420	0.3328	0.2025	0.3102	0.1827	0.1698	0.1897	0.2346	0.1932	0.2697	0.2705
2023	0.3665	0.2581	0.3468	0.3376	0.3240	0.3639	0.3670	0.3514	0.2114	0.3133	0.3516	0.1709	0.2041	0.2370	0.2186	0.2777	0.2937
均值 Ave.	0.1394	0.1761	0.1555	0.1751	0.1224	0.1504	0.1779	0.1668	0.0923	0.1688	0.1087	0.0873	0.0878	0.1014	0.0884	0.1381	0.1335

表3 基于自然断点法的中国油菜产业韧性分级及其省域分布

Table 3 Classification and provincial distribution of rapeseed industrial resilience in China based on Jenks Natural Breaks

年份 Year	低韧性 Low resilience		中韧性 Medium resilience		高韧性 High resilience	
	阈值 Threshold	省份 Province	阈值 Threshold	省份 Province	阈值 Threshold	省份 Province
2000	0.0243–0.0363	浙江、云南、重庆、青海、甘肃、内蒙古、陕西、河南 Zhejiang, Yunnan, Chongqing, Qinghai, Gansu, Inner Mongolia, Shaanxi, Henan	0.0364–0.0637	贵州、新疆、湖南、江西 Guizhou, Xinjiang, Hunan, Jiangxi	0.0638–0.0974	四川、湖北、安徽、江苏 Sichuan, Hubei, Anhui, Jiangsu
2005	0.0290–0.0349	云南、重庆、青海、甘肃、内蒙古、陕西 Yunnan, Chongqing, Qinghai, Gansu, Inner Mongolia, Shaanxi	0.0350–0.0526	贵州、新疆、江西、浙江、河南 Guizhou, Xinjiang, Jiangxi, Zhejiang, Henan	0.0527–0.1044	四川、湖北、湖南、安徽、江苏 Sichuan, Hubei, Hunan, Anhui, Jiangsu
2010	0.0510–0.0836	云南、贵州、重庆、青海、甘肃、陕西、江西 Yunnan, Guizhou, Chongqing, Qinghai, Gansu, Shaanxi, Jiangxi	0.0837–0.1121	新疆、内蒙古、浙江、河南 Xinjiang, Inner Mongolia, Zhejiang, Henan	0.1122–0.1477	四川、湖北、湖南、安徽、江苏 Sichuan, Hubei, Hunan, Anhui, Jiangsu
2015	0.0925–0.1383	云南、贵州、重庆、青海、甘肃、陕西、江西 Yunnan, Guizhou, Chongqing, Qinghai, Gansu, Shaanxi, Jiangxi	0.1384–0.1995	新疆、内蒙古、四川、湖南、湖北、浙江、河南 Xinjiang, Inner Mongolia, Sichuan, Hunan, Hubei, Zhejiang, Henan	0.1996–0.2387	安徽、江苏 Anhui, Jiangsu
2020	0.1447–0.1980	云南、贵州、重庆、青海、甘肃、陕西 Yunnan, Guizhou, Chongqing, Qinghai, Gansu, Shaanxi	0.1981–0.2662	新疆、内蒙古、四川、湖北、江西 Xinjiang, Inner Mongolia, Sichuan, Hubei, Jiangxi	0.2663–0.3032	湖南、河南、安徽、江苏、浙江 Hunan, Henan, Anhui, Jiangsu, Zhejiang
2023	0.1709–0.2186	云南、重庆、青海、陕西 Yunnan, Chongqing, Qinghai, Shaanxi	0.2187–0.2777	新疆、甘肃、江苏 Xinjiang, Gansu, Jiangsu	0.2778–0.3670	湖南、湖北、河南、江西、安徽、浙江、四川、贵州、内蒙古 Hunan, Hubei, Henan, Jiangxi, Anhui, Zhejiang, Sichuan, Guizhou, Inner Mongolia

间自相关性并未表现出单一的线性特征,而是呈现出高度契合产业发展规律的“三阶段”演进态势:在2000—2012年,全局Moran′s I多未通过显著性检验,空间上呈随机分布;在2013—2021年,全局Moran′s I显著为正,证实了在政策引导与要素流动下,长江中下游等优势产区形成了强劲的“核心—边缘”集聚格局;在2022—2023年,伴随近年来国家“扩种油料”战略的深入实施,西北等外围春油菜产区的产业韧性实现了追赶。随着“边缘区”的油菜产业发展,全局空间差异显著缩小,Moran′s I指数回落。这一空间统计轨迹,展现了我国油菜产业韧性由“初期散点离散,到中期优势区集聚,再到近期全国整体跃升”的动态演化逻辑。从分布动态特征看,基于核密度估计绘制的山峦图结果(图1)显示,油菜产业韧性分布整体随时间明显右移,表明各主产区产业韧性水平持续提升。同时,分布曲线逐步展宽,右尾不断延伸,反映出部分地区率先实现较快提升,省际差异在一定阶段内有所扩大。总体而言,油菜产业韧性演化表现出“整体抬升”与“空间分化”并存的特征,与自然断点法刻画的空间格局变化相互印证。

2.2 中国油菜产业韧性的驱动机理

前文从时间演进、空间分异与分布动态等角度系统刻画了中国油菜主产区产业韧性的演化特征。结果表明,在整体持续提升的同时,不同区域油菜产业韧性水平及其演进路径存在显著差异。为进一步揭示上述空间分异格局形成的驱动机理,本文从多维度出发,对油菜主产区产业韧性的驱动因素进行系统识别与分析,以期为提升油菜产业韧性提供经验证据与政策参考。

2.2.1 指标体系选取 综合考虑油菜产业发展过程中经济基础、生产条件、政策支持与自然禀赋等方面的差异性,并在系统梳理相关研究的基础上[26,38,39],本文构建了油菜产业韧性影响因素指标体

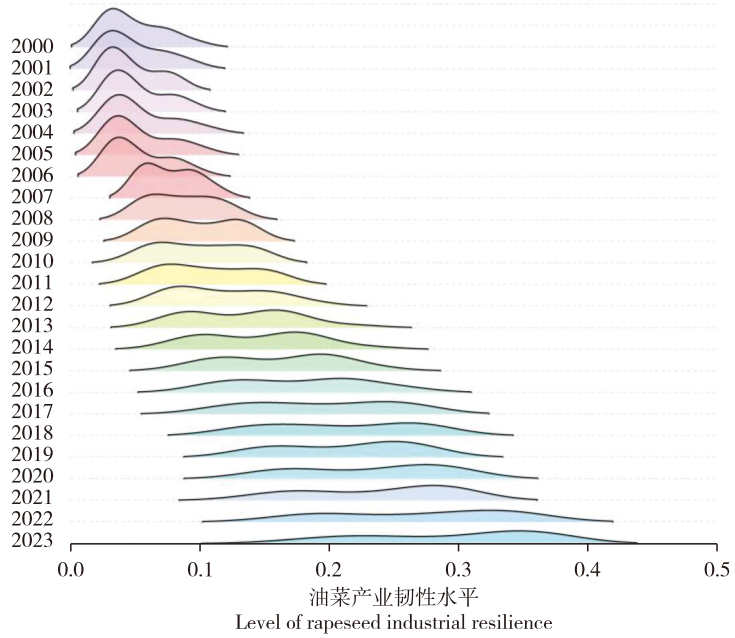


图1 基于核密度估计的油菜产业韧性水平山峦图

Fig. 1 Contour map of rapeseed industry resilience levels based on kernel density estimation

系(表4)。其中,经济基础维度主要反映区域整体发展水平与农业结构特征,选取农业产业结构、农业劳动力人口占比及人均GDP作为衡量指标。生产条件维度侧重反映油菜生产的资源禀赋与技术基础,选取人均耕地面积、农业机械化水平以及油菜有效灌溉面积等指标加以衡量。政策环境维度通过设置油菜良种补贴政策与临时收储油菜籽收购政策反映政府政策支持对油菜产业韧性的影响。此外,受限于我国农业微观统计数据的可得性,历年各省专门针对油菜籽的真实补贴发放额度与实际收储规模存在严重的统计缺失与口径不一。因此,本文未能采用连续强度的政策变量,而是采用虚拟变量进行替代。自然禀赋维度则结合油菜生育期特征,分别计算冬油菜(9月至次年5月)与春油菜(4—10月)主产区的生育期平均气温、累计降水量、平均日照时数及≥5℃有效积温,用以刻画不同气候条件对油菜产业韧性的影响差异。

2.2.2 *机器学习模型比较与选择* 为比较不同机器学习方法在识别油菜产业韧性驱动机理的适用性与稳健性,本文选取XGBoost、Gradient Boosting、Extra Trees、Random Forest以及Ridge回归五种模型,对12个驱动因素与油菜产业韧性水平之间的关系进行拟合分析,按8:2的比例划分训练集与验证集,并采用验证集上的均方根误差(RMSE)、平均绝对误差(MAE)和决定系数(R^2)作为模型性能评价指标(表5)。

验证结果表明,基于线性假设的Ridge回归模型拟合效果最弱,而基于树的集成学习模型整体表现优异。Gradient Boosting与XGBoost的拟合精度处于较高水平,显著优于Random Forest和Extra Trees模型。尽管Gradient Boosting的绝对拟合指标略优,但综合考量泛化能力和解释严谨性,本文最终选取XGBoost作为核心模型,主要基于以下优势:一是更强的防过拟合能力,面对小样本8:2划分的过拟合风险,XGBoost引入了L2正则化(reg_lambda = 1),并配合严格树深(max_depth= 6)、低学习率(learning_rate= 0.05)及双重子采样(subsample= 0.8; colsample_bytree= 0.8),从算法底层有效提升了模型的稳健性。二是更优的非线性捕捉精度,依托二阶泰勒展开与结构风险最小化原则,能更精准地刻画要素的复杂非线性边界与阈值效应。因此,本文最终选取XGBoost作为油菜产业韧性驱动机理分析的核心模型,用于进一步识别关键驱动因素及其作用强度。

2.2.3 *驱动因素重要性分析* 基于XGBoost模型并结合SHAP方法,本文对油菜产业韧性驱动因素的相对重要性及其非线性作用特征进行了系统分析。结果显示,不同因素在作用方向、贡献程度及作用模式上存在显著差异,整体呈现出“经济发展水平与生产条件占据主导、政策因素与自然禀赋发挥辅助调节作用”的结构特征。

从SHAP全局概要图(图2)可以看出,各驱动因

表4 油菜产业韧性影响因素指标体系

Table 4 Indicator system for factors affecting the resilience of the rapeseed industry

目标层 Target layer	指标层 Indicator layer	指标计算 Indicator calculation
经济基础 Economic base	X1. 农业产业结构 X1. Agricultural industrial structure /%	农业增加值占地区生产总值比重 Proportion of agricultural added value to regional gross domestic product
	X2. 农业劳动力人口占比(%) X2. Proportion of agricultural labor force /%	农业从业人员占全部从业人员比重 Proportion of agricultural personnel in total employment
	X3. 人均GDP(元) X3. Per capita GDP /CNY	采用不变价人均GDP(以2000年为基期进行平减) Using constant price per capita GDP (deflated with the year 2000 as the base period)
生产条件 Production conditions	X4. 人均耕地面积(公顷) X4. Per capita arable land area /hm^2	实际数值 Actual value
	X5. 农业机械化水平(万千瓦/公顷) X5. Level of agricultural mechanization /($\times10^4$ kW/hm^2)	单位耕地面积农业机械总动力 Total power of agricultural machinery per unit of arable land area
	X6. 油菜有效灌溉面积(千公顷) X6. Effective irrigated area of rapeseed /($\times10^3$ hm^2)	按油菜种植面积比例加权的有效灌溉面积 Effective irrigated area weighted by the proportion of rapeseed planting area
政策支持 Policy support	X7. 油菜良种补贴政策 X7. Rapeseed improved variety subsidy policy	实施年份区域为1,未实施年份区域为0 1 for regions in the implemented years, 0 for regions in the non-implemented years
	X8. 临时收储油菜籽收购政策 X8. Temporary storage and purchasing policy for rapeseed	
自然禀赋 Natural endowment	X9. 生育期平均气温(℃) X9. Average temperature during the growth period /℃	冬油菜产区为当年9月至次年5月,春油菜产区为当年4—10月 Winter rapeseed producing areas are from September in the current year to May in the next year; spring rapeseed producing areas are from April to October in the current year
	X10. 生育期月均降水量(毫米) X10. Average monthly precipitation during the growth period /mm	
	X11. 生育期平均日照时数(时) X11. Average sunshine hours during the growth period /h	
	X12. 生长季积温(℃) X12. Accumulated temperature during the growing season /℃	生育期≥5℃的有效积温 Effective accumulated temperature ≥5℃ during the growth period

表5 机器学习模型评价指标

Table 5 Machine learning model evaluation metrics

模型 Model	评价指标 Evaluation indicators		
	均方根误差 RMSE	平均绝对误差 MAE	决定系数 R^2
极端梯度提升 XGBoost	0.0158	0.0113	0.9660
梯度提升 Gradient boosting	0.0146	0.0109	0.9711
极端随机树 Extra trees	0.0179	0.0126	0.9563
随机森林 Random forest	0.0186	0.0147	0.9532
岭回归 Ridge	0.0308	0.0246	0.8717

素对油菜产业韧性的贡献程度及作用方向存在显著差异。按平均绝对SHAP值排序,人均GDP(X3)是解释力最强的核心变量,其高取值样本主要对应正向SHAP值,表明区域经济发展水平对增强油菜产业应对冲击和结构调整能力具有显著促进作用。其次为油菜有效灌溉面积(X6)和农业机械化水平(X5),两者整体呈现“高值对应正向贡献、低值贡献有限”的分布特征,说明生产基础条件改善是提升产业韧性的重要支撑,但其影响具有一定非线性特征。政策因素中,油菜良种补贴政策(X7)整体表现为稳定的正向贡献,而油菜临时收储政策(X8)高取值样本则更多分布于SHAP负值区间,表明以价格托底为导向的政策干预在长期尺度上可能弱化市场调节机制,从而对产业韧性的持续提升产生一定约束。农业劳动力占比(X2)对产业韧性产生了明显的负向约束作用,而农业产业结构(X1)则呈现复杂的非线性特征。相比之下,自然禀赋类变量(X9–X12)的整体重要性相对较低,其SHAP值多集中于零值附近,说明自然条件并非当前阶段油菜产业韧性空间差异的主导因素。

2.2.4 驱动因素非线性依赖性分析 鉴于多项关

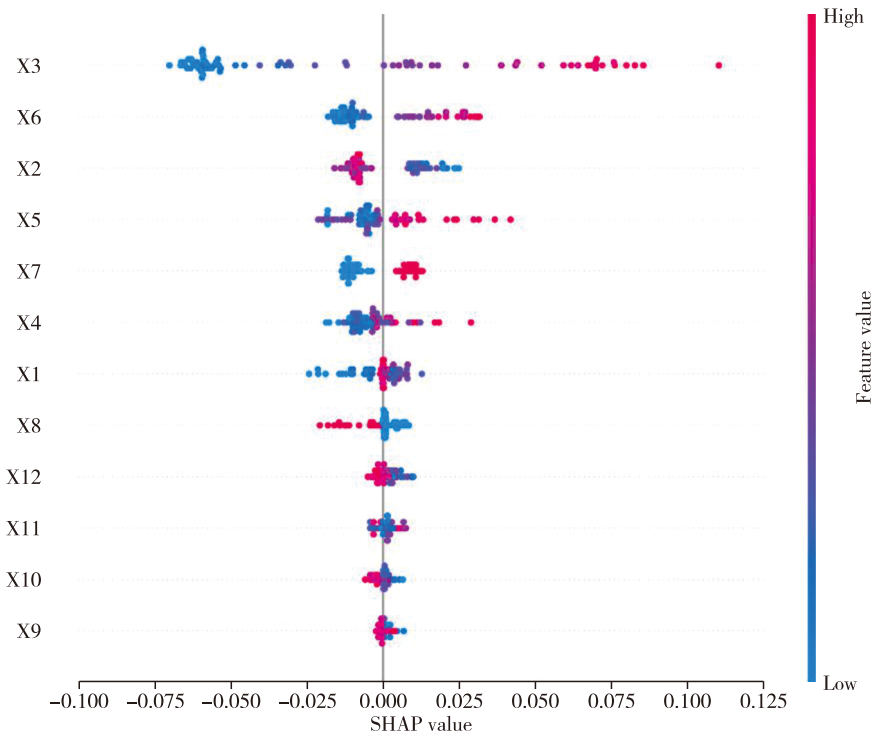


图2 油菜产业韧性水平影响因素的SHAP值结果

Fig. 2 SHAP value results for factors influencing the resilience level of the rapeseed industry

键变量呈现出显著的离散性和方向转化特征,本文进一步通过SHAP依赖图对其非线性驱动机理进行分析。选取贡献率排名前9位的影响因素,系统揭示其对油菜产业韧性水平的影响特征(图3)。

分析结果表明,油菜产业韧性的形成机制具有显著的非线性与阶段性特征。人均GDP(X3)对产业韧性呈现明显的单调递增关系,在人均GDP较低位阶段时,其SHAP值接近零甚至为负,随着经济水平跨越4万~5万元阈值后,对产业韧性的促进效应迅速增强并趋于平稳,表明区域经济基础是油菜产业由“被动适应”向“主动调整”转变的重要支撑条件。为验证该阈值识别的有效性,本文对人均GDP样本分布进行了核查。统计结果显示,人均GDP 4万~5万元恰好处于全部研究样本的50%~75%分位数区间内(即中位数以上的高密度集中区)。这表明,SHAP模型捕捉到的非线性拐点与边际效应跃升,并非极少数极端样本在稀疏区间产生的“视觉假象”,而是具有高度代表性和普遍性的统计规律。生产条件变量中,油菜有效灌溉面积(X6)与农业机械化水平(X5)均呈现“阈值—平台型”非线性特征,在灌溉面积和机械化水平较低阶段,其边际贡献有限甚至为负,只有当投入规模达到一定水平后,才能显著提升产业韧性,说明生产要素对产业稳定性的作用依赖于系统性配置,而非单一要素的线性扩张。

其次,政策因素对产业韧性的驱动存在显著差异,良种补贴政策(X7)表现为显著的正向效应。良种补贴是指对使用优良农作物品种的农户给予的资金补助,其目的在于降低生产成本,鼓励选用优良品种,提高单产[40]。该类政策的实质是降低了农户采纳优良品种的风险,通过“降本增效”提高农户收入,加速绿色技术的普及。这种赋能机制不仅直接提升了系统抵抗力,也有效增强了产业的内生适应韧性。相比之下,油菜临时收储政策(X8)则呈现负向影响。该政策的设计初衷是在面临市场价格大幅下跌时的临时性举措,防止油菜种植业因需求价格弹性小于供给价格弹性出现发散型蛛网而导致市场长期背离均衡[25]。依据市场信号传导理论,价格托底机制虽然在短期内保护农民基本收益和稳定市场价格等方面发挥了重要作用,但在长期极易引发“政策性扭曲”。这种扭曲阻断了供需真实市场信号,容易导致国有粮企改革动力减弱和收储企业易出现寻租等负面影响,进而削弱产业主动适应环境剧变、进行深度结构调整的长期变革能力。

最后,产业结构和自然禀赋存在明确的适度区间和转化条件。农业产业结构(X1)对韧性的影响呈现倒“U”型特征,在农业结构优化初期有助于提升产业韧性,但当农业比重过高时,其SHAP值逐步

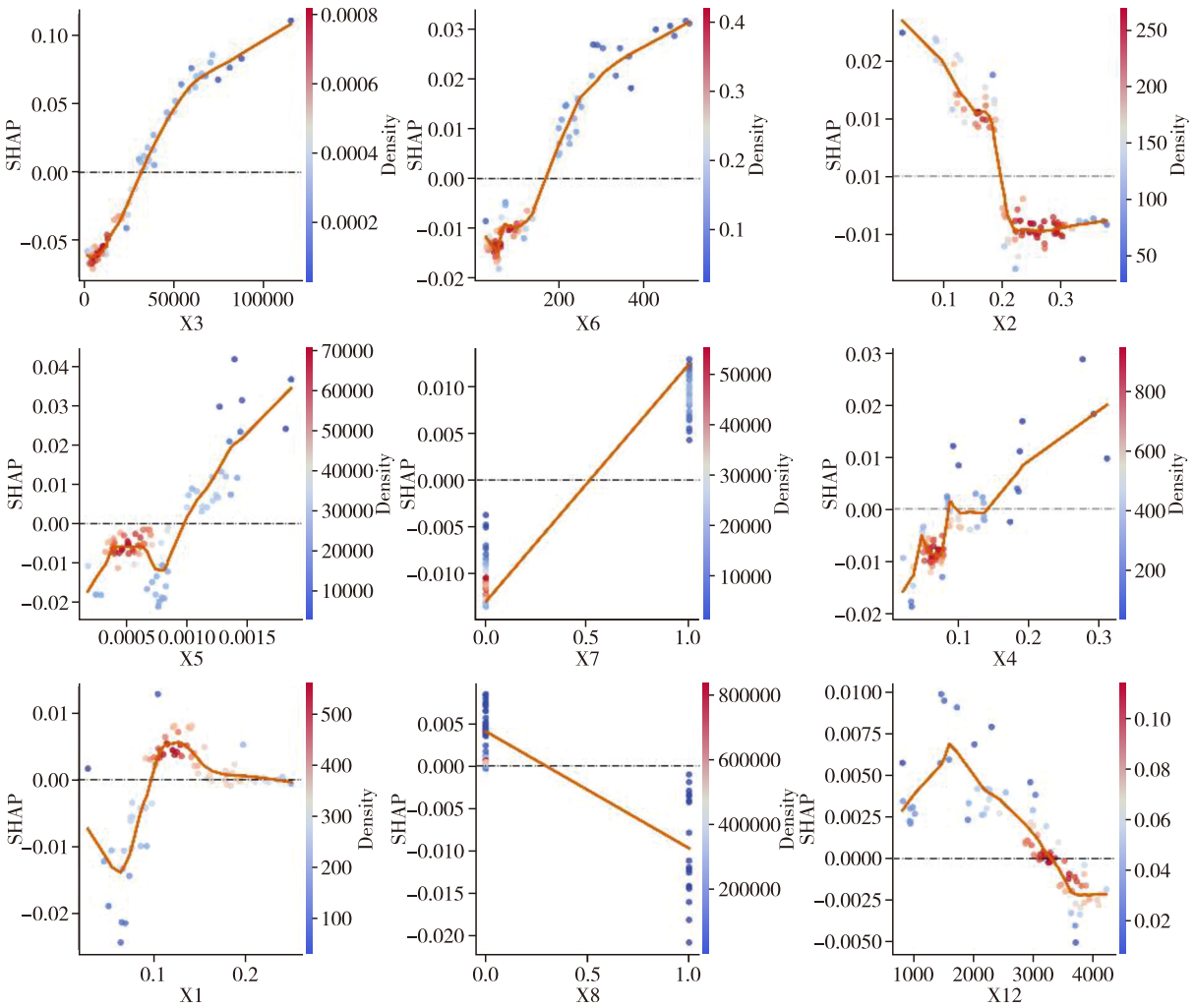


图3 油菜产业韧性关键影响因素与SHAP值之间的依赖关系

Fig. 3 Dependency relationship between key factors affecting rapeseed industry resilience and SHAP values

下降,表明产业韧性需要适度均衡的宏观结构作为支撑。农业劳动力占比(X2)对油菜产业韧性产生了明显的负向约束,农业劳动力占比过高可能与小农户分散经营、劳动力老龄化有关,会限制产业变革能力。人均耕地面积(X4)在较高区间内对产业韧性具有正向促进作用,在空间与经济逻辑上,人均耕地面积的扩大代表着区域具备发展适度规模经营的基础条件。而自然禀赋指标(X12)则呈现出“先升后降”的非线性关系,说明自然条件虽是产业发展的基础,但得益于现代农业科技的进步,并非决定油菜产业韧性差异的主导因素。

3 讨论与结论

提升油菜产业韧性既是保障国家油料安全的重要基础,也是推进农业强国建设的关键支撑。基于我国16个油菜主产省(市)2000—2023年的面板数据,本文构建了油菜产业韧性的多维评价指标体系,系统刻画了油菜产业韧性的时空演化特征,并识别其驱动机理,得到以下结论。

(1)我国油菜产业韧性整体呈现稳步提升的演化态势,且呈现阶段性“核心—边缘”空间分异特征。研究期内,长江流域冬油菜主产区凭借先发优势,长期稳居高韧性核心集聚区,并逐步形成正向的空间溢出效应;随着国家扩种油料战略的深入,西北等边缘产区在后期亦表现出强劲的追赶势头,带动全国油菜产业韧性实现由局部极化向整体跃升的跨越。

(2)经济基础和生产条件是影响油菜产业韧性的核心因素。经济发展水平对产业韧性存在显著的单调递增规律,当跨越特定高密度阈值区间(如人均GDP 4万~5万元)后,其促进效应显著增强。但随着经济水平持续提高,其边际促进作用逐步减弱,说明可能单纯依赖经济增长已难以持续推动产业韧性提升。与此同时,农业机械化水平和有效灌

溉面积等生产条件变量表现出明显的阈值特征,表明只有在达到一定规模阈值形成协同后,才能对产业韧性产生显著的正向促进作用。

(3)政策工具对油菜产业韧性影响呈现显著的方向分化。既有研究多从“政策支持强度”[41]或“财政投入规模”[42]视角,验证政策环境对粮油产业发展的促进作用,较少区分不同政策工具在产业韧性塑造中的功能差异。以油菜良种补贴为代表的生产性激励政策对产业韧性表现出稳定而显著的正向效应,有效激发了产业内生适应动力。而以临时收储油菜籽收购为代表的“价格托底型”政策机制,在模型解释中与产业韧性呈现负向关联。尽管在特定阶段有助于缓解价格波动风险,但其通过行政干预形成的价格扭曲,可能削弱市场信号对生产结构调整的引导作用,带有事后救济和反周期补贴的特征[25],从而在长期内对产业韧性提升产生潜在的负面效应。最后,本文主要依托XGBoost与SHAP架构探索了各驱动因素与油菜产业韧性间的复杂非线性关联。受限于机器学习方法在严格因果推断上的局限,本文对政策变量的探讨更多停留在“边际贡献与相关性”层面。未来研究可进一步引入双重差分法(DID)或断点回归等准自然实验设计,以期剥离出更为纯粹的政策因果净效应。

(4)自然禀赋发挥着基础性支撑作用,但其直接约束效应具有显著的非线性与“先升后降”的阈值特征。生育期气温、降水和日照等变量未呈现稳定的线性关系,说明在全国尺度和长期样本下,自然条件对油菜产业韧性的直接约束效应已在一定程度上被技术进步和生产条件改善所缓冲。然而,生长季积温仍表现出显著的阈值效应,在适宜区间内对产业韧性具有促进作用,超过阈值后则可能通过加剧高温胁迫而产生负面影响。这说明,在全球气候变化背景下,提升油菜产业韧性需更加重视品种改良与适应性技术的协同推进。

4 政策建议

第一,实施差异化的区域协同战略,构建油菜产业韧性的区域协同提升机制。对于长江中下游及西南冬油菜核心区,其主要任务是巩固“高—高”集聚优势,政策重点应转向全产业链价值提升与社会化服务体系建设,鼓励其在良种繁育、深加工等高附加值环节发力,并向周边发挥技术外溢效应。对于西北等春油菜边缘区,由于其正处于产业韧性追赶的关键期,优先任务是补齐基础的要素短板。应依托国家跨区域协同机制,通过定向的基础设施转移支付与农机跨区作业调度,引导春油菜主产区在品种布局上与核心区形成错位、差异化发展,逐步收敛区域间的系统韧性鸿沟。

第二,优化政策工具的精准度和触发机制,推动由“稳价格”向“强能力”转变。鉴于不同政策工具对油菜产业韧性产生的差异化影响,应适度弱化以价格干预为核心的临时性托底政策,避免其长期扭曲市场信号、抑制生产结构调整动力。相应地,应结合各省的禀赋,创新设计“分层分级补贴”与“达标触发式”政策工具。例如,在良种与技术推广方面,可设立“以奖代补”机制,对有效采纳绿色高产新品种的农户或新型经营主体给予达标阶梯奖励;在经济发达的地区,可将补贴重心由传统的生产资料直接补贴,转化为优质稻-油菜轮作(稻油轮作)、农业科技研发、农机社会化服务购买的间接支持,从而更精准地激发产业的内生适应能力。

第三,围绕关键驱动因素持续改善生产条件与要素配置效率,补齐要素“短板”。针对尚未跨越有效灌溉面积与农业机械化水平“起效阈值”的中低韧性地区,地方政府应发挥逆周期调节作用,集中财政资源进行农田水利与机耕道等“补短板”硬性投资,助推其快速跨越规模阈值,促成要素的系统性协同。此外,面对生长季积温等气候因素表现出的高温胁迫阈值效应,政策布局必须树立底线思维。在全球极端天气频发背景下,应设立专项基金加速耐热、抗旱型油菜及适合稻油轮作的短生育期农作物新品种的定向攻关,并将气候适应型防灾减灾技术纳入主推农业技术目录,用技术红利的确定性来对冲自然环境的不确定性。

参考文献:

[1] 方振,李谷成.我国油菜籽增产潜力与实现路径[J].中国油脂,2025,50(4):1-9.DOI:10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.230568.

[2] 严茂林,葛玮玮,张翔,等.我国油料产业形势分析与发展对策[J].中国油脂,2023,48(6):8-18.DOI:10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.220115.

[3] 王文亭,卫龙宝,王倩倩.大豆市场政策干预对大豆国际价格的影响[J].中国农村经济,2018(9):47-61.DOI:10.20077/j.cnki.11-1262/f.2018.09.004.

[4] 冯海棠,王汉中.新形势下的我国食用植物油供给安全对策[J].中国油料作物学报,2024,46(2):221-227.DOI:10.19802/j.issn.1007-9084.2024021.

[5] 李谷成,牛秋纯,冷博峰,等.新时代十年:我国油菜产业发展与路径选择[J].中国油料作物学报,2024,46(2):228-

235.DOI:10.19802/j.issn.1007-9084.2023248.
[6] 中共中央,国务院.关于进一步深化农村改革 扎实推进乡村全面振兴的意见[EB/OL].(2025-01-30)[2026-04-16]. https://www.gov.cn/zhengce/202502/content_7005158.htm.
[7] 中共中央,国务院.关于做好2023年全面推进乡村振兴重点工作的意见[EB/OL].(2023-02-13)[2026-04-16]. https://www.gov.cn/zhengce/2023-02/13/content_5741370.htm.
[8] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems[J]. Annu Rev Ecol Syst, 1973, 4: 1-23. DOI: 10.1146/annurev.es.04.110173.000245.
[9] Walker B, Holling C S, Carpenter S R, et al. Resilience, adaptability and transformability in social-ecological systems[J]. Ecol Soc, 2004, 9(2): art5. DOI: 10.5751/es-00650-090205.
[10] 张帅,于宏源.气候极端化背景下的全球粮食体系韧性治理及对中国的启示[J].上海交通大学学报(哲学社会科学版),2023,31(7):79-93.DOI:10.13806/j.cnki.issn1008-7095.2023.07.006.
[11] 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.DOI:10.13448/j.cnki.jalre.2025.131.
[12] 刘鑫鑫,韩先锋.中国制造业韧性的统计测度、地区差异及收敛特征[J].统计与决策,2025,41(15):98-103.DOI:10.13546/j.cnki.tjyjc.2025.15.017.
[13] 陈睿,王玉峰,张玲玲,等.中国粮食产业链韧性和安全水平:发展评估、时空分异及驱动机制[J/OL].系统工程理论与实践,1-20[2026-03-20].https://link.cnki.net/urlid/11.2267.N.20250904.1242.004.
[14] 肖化柱,阳星雨.数智赋能农业产业韧性:理论机制与实证检验[J].农业现代化研究,2025,46(6):1113-1123.DOI:10.13872/j.1000-0275.2025.0352.
[15] 运迪,贾则琴.新质生产力、农业产业链韧性与城乡共同富裕[J].统计与决策,2025,41(23):17-22.DOI:10.13546/j.cnki.tjyjc.2025.23.003.
[16] 蒋辉,张驰,蒋和平.中国农业经济韧性对农业高质量发展的影响效应与机制研究[J].农业经济与管理,2022(1):20-32.
[17] 张娇,苏洋,刘维忠,等.中国棉花产业链韧性评估及影响因素分析[J].棉花学报,2024,36(5):408-419.
[18] 赵建吉,张馨歆,王艳华,等.中国区域经济韧性的时空格局特征与影响因素[J].经济地理,2023,43(8):1-11.DOI:10.15957/j.cnki.jjdl.2023.08.001.
[19] 王瑞雪,陈建成,方宜亮,等.中国粮食主产区农业韧性的空间分异、演化特征与驱动力[J].农业经济与管理,2023(4):23-36.
[20] 王珊珊,高铭阳,吕杰.数字经济、产业融合、农业产业链韧性:指数测算与效应检验[J].统计与决策,2025,41(2):11-16.DOI:10.13546/j.cnki.tjyjc.2025.02.002.
[21] 王文举,钱新新.中国产业链韧性测度研究——基于外部冲击风险和效率驱动视角[J].数量经济技术经济研究,2025,42(5):115-135.DOI:10.13653/j.cnki.jqte.20250402.004.
[22] 王翠霞,危浪,李卫.韧性视角下新能源汽车产业链安全风险评估与调控研究[J].工业工程与管理,2025,30(5):167-178.DOI:10.19495/j.cnki.1007-5429.2025.05.015.
[23] 殷艳,廖星,余波,等.我国油菜生产区域布局演变和成因分析[J].中国油料作物学报,2010,32(1):147-151.
[24] Li F J, Guo K X, Liao X Y. Risk assessment of China rapeseed supply chain and policy suggestions[J]. Int J Environ Res Public Health, 2023, 20(1): 465. DOI: 10.3390/ijerph20010465.
[25] 冷博峰,李谷成,冯中朝.对国家油菜籽临时收储政策的几点思考——效果、问题及其取消后的影响[J].农业现代化研究,2017,38(4):632-639.DOI:10.13872/j.1000-0275.2017.0064.
[26] 覃朝晖,任磊,丁志国,等.极端气温对农业产业链韧性的影响研究[J].农林经济管理学报,2026,25(1):52-63.DOI:10.16195/j.cnki.cn36-1328/f.2026.01.06.
[27] 刘媛,熊柴,蔡继明.农民工进城落户的意愿为什么不高?——基于可解释机器学习方法的分析[J].中国农村经济,2025(4):20-41.DOI:10.20077/j.cnki.11-1262/f.2025.04.007.
[28] Zhao Q Y, Hastie T. Causal interpretations of black-box models[J]. J Bus Econ Stat, 2021, 39(1): 272-281. DOI:10.1080/07350015.2019.1624293.
[29] Lundberg S, Lee S I. A unified approach to interpreting model predictions[J]. NeurIPS, 2017. DOI: 10.48550/arXiv.1705.07874.
[30] 彭守璋.(2019).中国1km分辨率逐月平均气温数据集(1901-2024).国家青藏高原科学数据中心.https://doi.org/10.11888/Meteoro.tpdc.270961. https://cstr.cn/18406.11.Meteoro.tpdc.270961.
[31] 彭守璋.(2020).中国1km分辨率逐月降水量数据集(1901-2024).国家青藏高原科学数据中心.https://doi.org/10.5281/zenodo.3114194.
[32] 国家气象信息中心.国家气象科学数据中心数据资源库[DB/OL].[2026-04-16].https://data.cma.cn/
[33] 国务院办公厅.国务院办公厅关于促进油料生产发展的意见:国办发〔2007〕59号[EB/OL].(2007-09-22)[2026-04-16]. https://www.gov.cn/zhengce/content/2008-03/28/content_2929.htm.
[34] 张佳睿,孟维福.新质生产力赋能农业经济韧性提升:理论逻辑、现实挑战与实践路径[J].改革,2024(12):51-60.

[35] 左秀平,叶林祥.中国粮食体系韧性:水平测度及动态演进[J].华南农业大学学报(社会科学版),2024,23(1):88-101.

[36] 戴媛媛.中国粮食产业链供应链韧性分布动态与区域差距[J].统计与决策,2024,40(18):114-119.DOI:10.13546/j.cnki.tjyjc.2024.18.020.

[37] JENKS G F. The data model concept in statistical mapping [J]. International Yearbook of Cartography, 1967, 7: 186-190.

[38] 曾雄旺,张湘琦,左声亮,等.中国中部地区农业产业链韧性时空分异及其影响因素——基于2011—2022年80个地级区域数据[J].地理科学进展,2025,44(9):1807-1818.

[39] 毛海欧,杨楠楠,祁春节.中国柑橘产业空间演化特征及其影响因素[J].经济地理,2024,44(6):146-153.DOI:10.15957/j.cnki.jjdl.2024.06.015.

[40] 李谷成,李芳,冯中朝.良种补贴政策实施效果的分析与评价——对13省1486种植户的研究[J].中国农业大学学报,2014,19(4):206-217.

[41] 张淑娟.财税政策支持粮食产业高质量发展的现实挑战与优化路径[J].农业经济,2025(9):91-92.

[42] 包文静,肖海峰.粮食生产技术效率时空演变与财政支农投入驱动效应[J].中国农业大学学报,2025,30(10):336-348.

(责任编辑:郭学兰)