



袁世一, 李干琼, 杨淼. 基于四位协同视角的粮食系统发展水平测度与动态演进[J]. 中国农业大学学报, 2025, 30(01): 250-263.

YUAN Shiyi, LI Ganqiong, YANG Miao. Measurement and dynamic evolution of the development level of food system based on four-part collaborative perspective[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(01): 250-263.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.01.22

基于四位协同视角的粮食系统发展水平测度与动态演进

袁世一¹ 李干琼¹ 杨淼^{2*}

(1. 中国农业科学院 农业信息研究所, 北京 100081;

2. 北京工商大学 商学院, 北京 100048)

摘 要 为保障我国粮食系统的稳定供应、高效利用和长期可持续发展, 基于四位协同视角, 构建“结构合理化—技术高度化—政策服务化—治理生态化”的粮食系统框架, 通过PVAR模型识别其敏感因素指标, 采用序排列多边形面积法测度粮食系统的发展水平, 并运用马尔科夫链分析其动态演进特征。结果表明: 筛选后确定粮食系统的发展评价指标包括: 粮食生产结构、粮食综合利用率、粮食净进出口率、劳动节约型技术、技术进步程度、粮食领域发明专利数、政府支持力度、保险渗透率、政府投入规模、环境规制、碳排放率和受灾面积占比共12项; 2005—2021年粮食系统持续增长, 子系统间的差异性逐步扩大, “异质性”特征明显; 我国粮食系统呈现“辐射带动”趋势, 以东北、华北优先发展, 引领全国粮食系统发展水平共同提升, 形成了以东北和华北为“双核心”粮食系统发展格局; 此外, Markov链结果表明现阶段粮食系统发展状态较稳定, 存在集群效应; 保持现有发展水平概率逐渐下降, 向更高发展水平演进概率增大, 可能存在突破式发展。建议优化资源与要素间的整合, 扩大优势地区的溢出效应, 建立多层次粮食系统的保障和运行机制, 推进粮食系统的可持续性发展。

关键词 粮食系统; 四位协同; 结构合理化; 技术高度化; 政策服务化; 治理生态化

中图分类号 F326.11

文章编号 1007-4333(2025)01-0250-14

文献标志码 A

Measurement and dynamic evolution of the development level of food system based on four-part collaborative perspective

YUAN Shiyi¹, LI Ganqiong¹, YANG Miao^{2*}

(1. Institute of Agricultural Information, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;

2. Business School, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China)

Abstract To ensure the stable supply, efficient utilization and long-term sustainable development of the food system in China, one food system framework is constructed from four-dimensional synergistic perspective, which encompasses structural rationalization, technological sophistication, policy service orientation, and governance ecologicalization. Sensitive factor indicators are identified through the PVAR model, and the development level of the food system is measured by using the ordered polygon area method. The dynamic evolution characteristics are analyzed using Markov chain analysis. The results show that the selected twelve development evaluation indicators for the grain system include: grain production structure, the comprehensive utilization rate of grain, the net import and export rate of grain, labor-saving technology, the degree of technological progress, the number of grain-related invention patents, government support intensity, insurance penetration rate, government investment scale, environmental

收稿日期: 2024-01-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(62103418); 中国农业科学院农业信息研究所基本科研业务费(JBYW-AII-2024-30)

第一作者: 袁世一(ORCID:0009-0008-2036-0587), 助理研究员, 主要从事粮食安全监测预警研究, E-mail:yuanshiyi@caas.cn

通讯作者: 杨淼(ORCID:0009-0007-5149-5065), 讲师, 主要从事创新管理研究, E-mail:yangmiaokuale@qq.com

regulation, carbon emission rate and the proportion of disaster-affected area¹²; From 2005 to 2021, the grain system has continued to grow with the differences between subsystems gradually widening, showing a clear “heterogeneity” characteristic; China’s grain system displays a “radiating” trend, with the Northeast and North China taking the lead in development, driving the overall improvement of the national grain system level, which forms a “dual-core” development pattern of the grain system centered on the Northeast and North China; In addition, the Markov chain results indicate that the current development state of the grain system is relatively stable with a clustering effect; The probability of maintaining the current development level is gradually decreasing, while the probability of evolving to a higher development level is increasing, which suggests the possibility of breakthrough development. It is recommended to optimize the integration of resources and factors, expand the spillover effect of advantageous regions, establish a multi-level grain system security and operation mechanism, and promote the sustainable development of the grain system.

Keywords grain system; four-way synergy; structural rationalization; technological sophistication; policy service-oriented; governance ecologicalization

粮食系统是粮食安全治理的基础框架和关键要素,粮食系统的核心在于确保粮食的稳定供应、高效利用以及可持续发展。粮食系统的维护与创新,日益成为全球关注的焦点^[1]。粮食系统的效率提升一直被作为提高粮食生产效率和满足人口增长需求的重要手段,但这种环境损耗式的集约化生产模式不仅破坏了生态平衡并且没有彻底解决粮食的安全与质量问题。根据联合国粮农组织2023年发布的《世界粮食安全和营养状况》报告显示,全球仍有7.35亿人面临饥饿。中国政府高度重视粮食安全的保护与治理,经过近50年的不断发展与完善,中国已形成了适合自身情况的多环节、多层次粮食安全治理体系,满足国内外市场需求的基础上,保障国家社会发展与经济稳定。随着国际贸易保护主义抬头、地缘政治冲突频发以及航运阻塞等问题,全球粮食系统面临新旧风险共存叠加,粮食系统的可持续生产与运营成本出现刚性上涨,这对粮食系统的长远发展提出了新的挑战。因此,准确把握粮食系统的内涵,平衡粮食系统的核心要素具有重要理论价值与实践意义。

自20世纪90年代以来,学者们开始对粮食系统进行深入的研究。在研究内容上,主要探讨了粮食系统的协调性、韧性和可持续性。刘晓琳等^[2]通过构建粮食生产系统的可持续性综合指标,综合分析了黄土高原粮食生产系统的可持续性。张琳琛等^[3]从粮食生产集中化视角探讨了粮食系统的可持续性。在研究尺度上,包含有微观、中观和宏观。罗光强等^[4]从粮食经济的微观主体、中观产业和区域总体等多维度构建区域粮食经济高质量发展的

系统框架与评价指标体系。木合塔尔·艾买提等^[5]将熵值法和耗散结构理论相结合,对粮食生产系统进行了评价。在研究视角上,刘木子云等^[6]提出了“粮食生产空间系统”的概念,界定了粮食生产空间内涵、功能和运行机制。樊胜根^[7]大食物观视角为粮食安全赋予了新的内涵,农食系统的转型升级提出了新的对策意见。居辉等^[8]根据IPCC AR6在深化阐述粮食生产能力、种植布局、病虫害影响的基础上,分析了人类活动对粮食系统产生的负面影响,及全链条气候变化影响。在研究方法上,粮食系统研究呈现出定量研究为主要特征探讨粮食系统的作用机制和优化路径。杨月锋等^[9]通过构建粮食物流系统的动力学理论模型,对不同方案的粮食物流系统进行优化。罗海平等^[10]采用动态化的Costanza修正模型分析了生态系统服务价值与生态效率之间的差异。朱美连等^[11]提出了基于多Agent模型的宁东基地水-能源-粮食系统模拟模型。董玥等^[12]采用CRITIC-TOPSIS法定量评价不同类型农户生计韧性,揭示农业系统韧性与农户生计韧性的关联机制。曾涛等^[13]采用TPM与主成分分析法相结合的方式对全球的粮食系统问题进行了评价。

现有研究多局限于对粮食系统的协调性与韧性的考察,缺少对粮食系统全局要素的把握,忽视粮食系统内部各要素间的协同机制。本研究在诠释粮食系统内涵的基础上,将协同理论引入到粮食系统的研究中,以我国粮食系统的发展现实问题为切入点,融入建设农业强国的深刻论述,在四位协同视角上实证分析粮食系统的“需求”与“效率”,融合农学、经济学、系统学的理论基础,探讨多元化因

素对粮食系统的影响效果,为构建具有中国特色的粮食系统理论提供借鉴。

1 理论基础与评价体系

1.1 粮食系统的内涵

粮食系统作为粮食安全的治理的客体,其本身具有一套完整的结构和运作机制,涵盖范围从粮食生产、加工,消费到储藏、分配和销售的完整供应链。粮食系统的效率和可持续性不仅关系到国家和地区的食品供给安全,还涉及经济发展、社会稳定以及环境保护,从根本上确保粮食安全可负担性。经过多年的技术进步和产业革新,粮食系统已逐步演变成为一个高度集成化、规模化、组织化和自动化的产业生态^[14]。这些特征共同推动了粮食系统的现代化,保障了粮食安全,提高了粮食产业的国际竞争力。构建和完善粮食系统的安全性与可持续性、提高粮食系统的韧性和效率在提高粮食安全治理水平、提高粮食产业竞争力、积极应对价格波动等方面显得尤为重要^[15]。参考现有关于粮食安全与粮食系统的相关理论,将粮食系统定义为以粮食生产为核心,以产业化、市场化为方向,以技术创新和信息化为支撑的可持续发展的系统。粮

食系统的优化旨在实现资源高效利用、环境友好型生产、社会经济协调增长的目标。参考高培勇等^[16]关于现代经济体系的研究框架,将矛盾发展、要素转换与产业发展的复杂关系与粮食系统进行深入分析和有效整合,建立灵活和高效的作用机制,从而促进粮食系统的全面升级与可持续发展。

传统粮食系统向现代粮食系统转化主要具有4个特征。1)向多样化的社会需求转变。粮食系统的社会的需求变得更加多样化,不再局限于数量,而是向关心粮食的质量、营养价值以及生产过程的环境影响的更高层次的需求转变。2)向科技和效率的提升转变。粮食生产的重心已经从单纯解决温饱问题,转向提升粮食生产的科技含量、加工和配送效率及质量。3)向市场引导下的生产行为转变。从政府的直接控制转向更多地依靠政策引导、市场机制和消费者需求来激励和规范生产行为。通过市场机制来确保食品安全和公平分配,同时激发生产者和消费者之间的积极互动。4)向可持续性发展转变。粮食生产模式正在从追求单一的生产速度和数量,转向注重生产的可持续性。不仅涉及到减少粮食生产对环境的影响,同时确保生产效率和效益,以适应人口增长和资源限制的双重压力(表1)。

表1 传统粮食系统与现代粮食系统的区别
Table 1 Differences between traditional and modern food systems

项目 Item	传统粮食系统 Traditional food system	现代化粮食系统 Modernized food system
主要需求 Main demand	总量性需求:物质需求与数量保证	结构性需求:质量优化与营养均衡
技术水平 Technical level	以低端技术为主	以中高端技术为主
宏观调控 Macro-control	以宏观调控为主	注重市场需求和服务
生态环境 Ecological environment	低效率、低质量增长模式,粗放型发展	强调可持续性,追求高质量发展

1.2 四位协同理论内涵及机制

协同理论揭示了系统结构形成的普遍规律,强调不同系统内部元素间的互动。这些互动推动系统由失衡走向稳定,由无序变有序,达到整体优于部分之和的效果。协同理论的2个核心是:元素间的互相作用和系统状态的转变。这一理念广泛应

用于多学科,如物理、化学、医学和经济学等,为复杂事物发展的研究提供了新视角。在这一理论框架下,粮食系统不再仅仅被看作是一系列孤立的生产、加工、储存和消费环节,而是一个高度互联互动的复杂系统。每个环节都与其他环节相互作用,共同影响着系统的稳定性和效率。首先,协同理论强

调系统内部元素间的互动。这意味着从农田管理到市场供应链的每一步都不是孤立的。其次,通过识别和优化粮食系统的子系统的结构、功能和行为,增强子系统间的整体性和协调性,可以使粮食系统由失衡走向稳定,由无序变有序。

粮食系统是一个相互作用的有机整体,在现代粮食系统内部以技术创新、产业升级、人力资本要素向粮食系统不断汇集、各类高端要素优化配置向粮食生产汇聚,最终形成系统要素相互流动、协同发展的高效机制。粮食系统的4个机制不是孤立的,而是相

互关联和相互促进的。机制1的主要需求的改变促使了机制2技术水平的转变,这又推动了粮食系统的升级和发展方式的转变。机制2的技术水平的升级又决定了机制3的宏观调控的重点。机制3的宏观调控的重点又与机制4的生态环境的发展阶段相一致。机制4的内生转化促进了技术体系的创新和升级,而技术体系的进步又能够更好地满足产业结构升级的需求,这样又会影响到资源配置方式的选择和调整。机制1~4的相互作用形成了一个良性循环,推动了整个粮食系统的持续发展和转型升级(图1)。

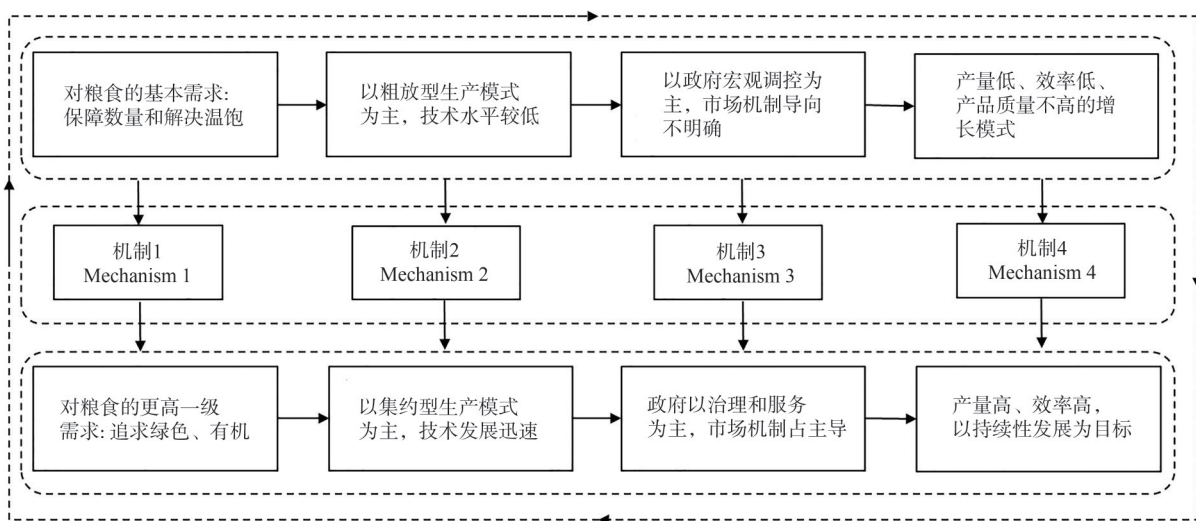


图1 粮食系统的运行机制与内生转化

Fig. 1 Operation mechanism and endogenous transformation of food system

2 材料与方法

2.1 四位协同评价法

参考高培勇等^[16]的研究思路,在已有研究基础上,将粮食体系的4个内涵与4个机制进行系统梳理和综合分析。为了更好地对粮食系统进行评价与测定,将上述内涵和机制分别整合为结构合理化、技术高度化、政策服务化和治理生态化的四位一体协同视角,对粮食系统的发展情况进行测算和评估。

在结构合理化方面参考了肖新成等^[17]关于作物种植比例的计算方法,对公式优化结果如下:

$$\sum_{n=1}^k h_i X_i \geq \lambda Y_g \quad (1)$$

式中: k 为区域个数, i 为种植省份, g 为人口数; h_i 为 i 省份粮食作物的单产; X_i 为 i 省份粮食作物的种植面积; λ 为粮食自给水平; Y_g 为粮食的需求量。

在技术高度化方面参考了康建军等^[18]关于农业技术效率(EFF)的测算方法,计算公式如下:

$$EFF'_i = \exp(-\mu_{ii}), 0 \leq \exp(-\mu_{ii}) \leq 1 \quad (2)$$

式中: EFF 为 t 时期各省市 i 的农业技术效率; μ_{ii} 为技术非效率项。

在政策服务化方面参考李庆雪等^[19]DEA-Tobit两阶段法测算政策的服务化水平,计算公式如下:

$$Y_i = \begin{cases} Y_i^*, & \text{if } Y_i^* > 0 \\ 0, & \text{if } Y_i^* \leq 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $Y_i^* = \beta X_i + \epsilon_i$; Y_i 为因变量; Y_i^* 为潜在变量; X_i 为自变量向量; β 为相关系数向量; ϵ_i 为残差。

在治理生态化方面参考袁世一等^[20]的测算方法,计算公式如下:

$$S_i = 1 - \sum v_i / v_i \quad (4)$$

式中: v_i 为地区粮食产值; v_i 为地区总产值。

2.2 指标体系构建

粮食系统存在着严谨的内在联系,依照现代粮食系统的阶段性特征,结合粮食系统的内涵与机

制,与当前研究成果和统计资料,充分考虑影响覆盖全面、高频指标不缺失等方面因素,构建四位协同粮食系统敏感因素指标候选集(表2)。

表2 粮食系统指标体系
Table 2 Index system of food system

维度 Dimensionality	指标 Index	内涵 Connotation	符号 Symbol
结构合理化 lnE Structure rationalization	粮食生产占比	粮食作物播种面积/农作物播种面积	lnE ₁
	粮食综合利用率	(粮食总消费量-粮食损失量)/粮食总产量×100%	lnE ₂
	粮食的净出口量占比	(粮食出口量-粮食进口量)/国内粮食总产量	lnE ₃
	非农兼业水平	(非农民经营性收入/农民可支配总收入)×100%	lnE ₄
技术高度化 lnT Advanced technology	劳动节约型技术	机械总动力/农村第一产业从业人数	lnT ₁
	个体技术水平	农村劳动力的平均受教育年限	lnT ₂
	技术进步程度	农业科技进步率	lnT ₃
	粮食领域发明专利数	IPC中A01类中的发明专利的总数	lnT ₄
政策服务化 lnP Policy servitization	政府支持力度	表征政府的资源配置能力	lnP ₁
	投资效率	GDP增加值/固定资产投资	lnP ₂
	保险渗透率	农业保费收入/GDP	lnP ₃
	政府投入规模	农林水事务支出/地方一般预算支出	lnP ₄
治理生态化 lnD Ecological governance	环境规制	农业治理完成额/农业增加值	lnD ₁
	能源消耗强度	能源消费量/农业总产值	lnD ₂
	碳排放率	农业二氧化碳排放量/农业总产值	lnD ₃
	受灾面积占比	受灾面积/播种面积	lnD ₄

2.3 面板向量自回归模型

面板向量自回归模型(Panel vector autoregression model, PVAR)是基于统计学、计量经济学和时间序列分析的模型,是在VAR模型基础上的改进和优化,能有效地处理面板数据的动态关系,捕捉变量之间的相互影响和反馈^[21]。将PVAR模型运用到粮食体系研究中,对粮食体系等敏感因素进行深入的探讨和定量分析,动态地揭示这些因素之间的相互影响和影响路径,揭示粮食体系的运行机制和变化规律。

2.4 序排列多边形面积法

序排列多边形面积法是一种基于几何学的测度方法,通过计算各个变量构成的多边形的面积,衡量多维度发展的综合水平。计算公式如下:

$$G = \frac{1}{2} \sin \alpha \left(\frac{1}{4} a_A \times \frac{1}{4} a_B + \frac{1}{4} a_B \times \frac{1}{4} a_C + \frac{1}{4} a_C \times \frac{1}{4} a_D + \frac{1}{4} a_D \times \frac{1}{4} a_A \right) \quad (5)$$

式中:A、B、C和D分别为结构合理化、技术高度化、政策服务化和治理生态化;a_A、a_B、a_C和a_D为标准值;由于设置的多边形为四边形,1/4为4个维度的权重,所以α为90°。

2.5 马尔可夫链(Markovchain)

参考陈培阳等^[22]构建马尔可夫转移概率矩阵,将连续的粮食系统发展综合评价离散化为若干状态类型。通过计算状态类型的概率分布及其随时间的变化,分析粮食系统发展的稳定性和长期趋势。计算公式如下:

$$M_{ij} = n_{ij} / n_i \quad (6)$$

式中： M_{ij} 为 t 年份属于类型 i 的空间单元在 $t+1$ 年份转变为 j 类型的概率值； n_{ij} 为研究时段内，由 t 年份 i 类型转变为 $t+1$ 年份 j 类型的空间单元数量总和； n_i 为研究时段所有年份 i 类型空间单元数量总和^[21]。

2.6 数据来源

鉴于数据的可获得性，本研究区域为中国 31 省（市、自治区）（统计数据未含港澳台地区，下同），原始数据来源于 2006—2022 年《中国统计年鉴》^[23]《中国农村统计年鉴》^[24]《中国粮食和物资储备年鉴》^[25]《中国科技统计年鉴》^[26]及国家统计局等相关资料。缺少数据采用均值平滑法补充。

3 结果与分析

3.1 粮食系统敏感因素识别

通过对数据集的稳定性检测结果显示，所有指标均通过了一阶单位根检验和协整检验，说明数据可以用于后续的 PVAR 模型分析。其次，通过对比 AIC、BIC 和 HQIC 的统计值，确定模型的最佳滞后阶数为 2 期。采用 GMM 方法，识别关键因素与多维度的指标之间的作用关系。通过计算动态脉冲

响应函数（IRF），分析这些关键因素对不同维度指标的作用强度及其影响路径。

由表 3 可知，虽然各变量在初始阶段的脉冲响应波动较大，但随着时间的推移，变量的波动性呈现出不同的趋势。具体来看，结构合理化（ $\ln E$ ）在滞后一期对因变量有较强的正向影响，系数为 0.311，在 5% 的显著性水平上显著；而到了滞后二期，其影响减弱，系数降至 0.268，在 10% 的显著性水平上显著。技术高度化（ $\ln T$ ）的影响则呈现相反的趋势，滞后一期的系数为 0.139，在 5% 的显著性水平上显著；滞后二期的系数增至 0.200，在 10% 的显著性水平上显著，表明其正向影响随时间增强。政策服务化（ $\ln P$ ）在滞后一期的正向影响最为显著，系数为 0.490，在 5% 的显著性水平上显著；但到了滞后二期，其系数减少至 0.134，在 10% 的显著性水平上显著，说明其正向影响减弱。治理生态化（ $\ln D$ ）在滞后一期的系数为 0.127，未通过显著性检验，而滞后二期的系数为 0.238，在 1% 的显著性水平上显著，表明其对因变量有显著的正向影响。此外，粮食净进出口率（ $\ln E3$ ）和受灾面积（ $\ln D4$ ）的负向影响在特定滞后期显著，且影响为负。

表 3 敏感因素对表征指标的影响估计结果

Table 3 Estimated results of the influence of sensitive factors on the representation indicators

变量 Variable	结构合理化 g_dlnE	变量 Variable	技术高度化 g_dlnT	变量 Variable	政策服务化 g_dlnP	变量 Variable	治理生态化 g_dlnD
L1. g_dlnE	0.311**	L1. g_dlnT	0.139**	L1. g_dlnP	0.490**	L1. g_dlnD	0.127
L1. g_dlnE ₁	0.012	L1. g_dlnT ₁	-0.013	L1. g_dlnP ₁	0.016	L1. g_dlnD ₁	-0.000
L1. g_dlnE ₂	0.019	L1. g_dlnT ₂	0.001	L1. g_dlnP ₂	0.005	L1. g_dlnD ₂	0.005
L1. g_dlnE ₃	-0.018***	L1. g_dlnT ₃	0.187	L1. g_dlnP ₃	0.062	L1. g_dlnD ₃	-0.017
L1. g_dlnE ₄	-0.025	L1. g_dlnT ₄	0.044	L1. g_dlnP ₄	-0.019	L1. g_dlnD ₄	-0.015
L2. g_dlnE	0.268*	L2. g_dlnT	0.200*	L2. g_dlnP	0.134*	L2. g_dlnD	0.238***
L2. g_dlnE ₁	0.004	L2. g_dlnT ₁	-0.012	L2. g_dlnP ₁	0.021	L2. g_dlnD ₁	-0.006
L2. g_dlnE ₂	0.025	L2. g_dlnT ₂	0.002	L2. g_dlnP ₂	0.117	L2. g_dlnD ₂	0.014
L2. g_dlnE ₃	-0.022	L2. g_dlnT ₃	0.298	L2. g_dlnP ₃	0.078	L2. g_dlnD ₃	-0.093
L2. g_dlnE ₄	-0.031	L2. g_dlnT ₄	0.056	L2. g_dlnP ₄	-0.008	L2. g_dlnD ₄	-0.029*

注：*、**和***分别表示达到 10%、5% 及 1% 的显著性水平，下同。L1、L2 分别表示滞后 1 期和滞后 2 期。

Note: *, ** and *** mean 10%, 5% and 1% significance levels, respectively. The same below. L1. and L2. indicate the lag period 1 and lag period 2, respectively.

3.2 粮食系统发展评价

为进一步揭示不同维度敏感指标对粮食系统发展影响,对各敏感因素指标的脉冲响应强度进行方差分解(图2)。结果显示,结构合理化、技术高度化、政策服务化和治理生态化的内在波动对粮食系统的发展起到了主导作用。除政府服务化维度外,结构合理化、技术高度化和治理生态化的主导指标贡献度随时间推移不断减弱的趋势。同时,敏感因素指标随时间推移不断增强,综合考虑各指标以第4期数据为基础分析各敏感指标对粮食系统的影响。

通过对粮食系统发展的敏感因素的方差贡献程度排列,筛选出影响较大和较优的指标,确定了粮食系统发展评价体系:结构合理化维度中选取粮食生产占比、粮食综合利用率和粮食净进出口量占比;技术高度化维度中选取劳动节约型技术、技术进步程度和粮食领域发明专利数;政策服务化维度中选取政府支持力度、保险渗透率和政府投入规模;治理生态化维度中选取环境规制、碳排放率和受灾面积占比共12项,上述指标可为粮食系统发展水平测度提供科学依据。

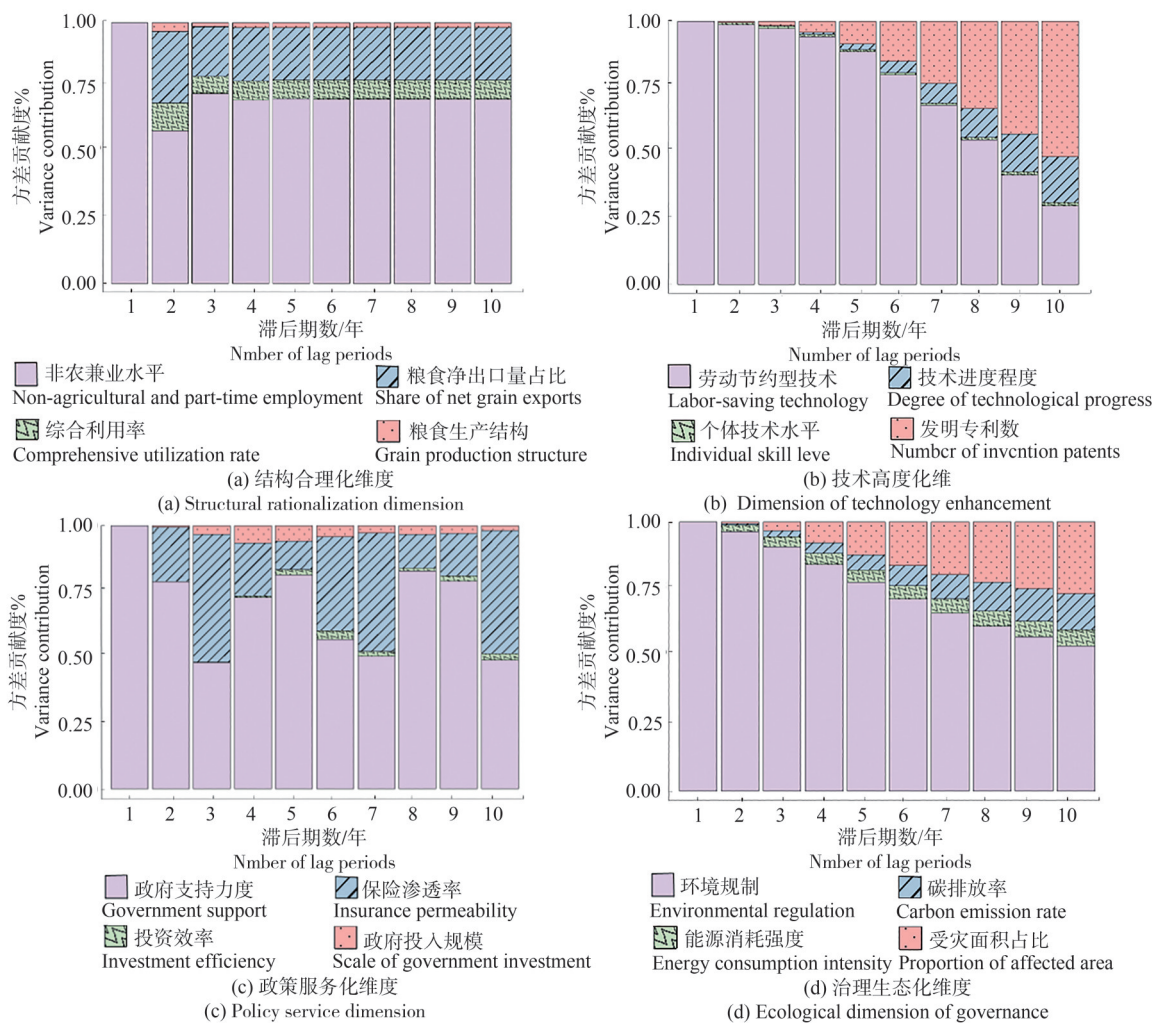


图2 指标方差分解结果

Fig. 2 Results of index variance decomposition

3.3 粮食系统发展水平测度

3.3.1 单维度结果分析

测算2005—2021年粮食系统发展水平的4个维度,使用序列多边形面积法测算综合评价值,选

择2007、2014和2021年的31个省份的截面数据,绘制4个维度的分组条形图来展示4个维度的发展情况。总体来看,粮食系统呈现持续增长趋势,多元化的构成要素在不同的发展阶段表现出各异的作

用力度。随着时间的推移,这些子系统间的差异性逐步扩大,表现出更加显著“异质性”特征(图3)。

2007年,全国机构合理化的平均值为1.78,黑龙江、吉林和河南位居全国前三。东北地区和东部沿海的结构合理化程度普遍高于全国平均水平,这与粮食的生产布局,区域资源优势密切相关。技术高度化的均值为0.43,相对较低,从全国范围来看,粮食系统研发投入相对较少、粮食科技人员经验不足,是导致其落后于其他维度的主要原因。政策服务化的均值为1.66,仅次于结构合理化,对粮食系统起到了积极的支撑和促进作用。治理生态化的均值只有0.17,是4项指标中最低的,主要是受到快速工业化带来的环境压力、忽视了粮食系统在生态环境治理方面的重要性。

2014年,粮食系统发展水平有了一定提高,全国结构合理化的平均值达到了2.22。其中,河南省超越吉林省,位列全国第二。这主要归功于河南省对粮食系统结构的持续优化,提升了粮食系统的生产效率、稳定性和持续性。与其他省份的上升趋势不同,北京和上海市的合理化水平出现了不同程度的下降。这主要是由于这两个城市的特殊定位和高度城市化进程,影响了粮食系统的合理化水平。技术高度化的均值为0.79,长三角和京津冀的技术高度化水提升最快,这主要是因为“十二五”规划期间,国家全面实施科教兴国战略和人才强国战略核心城市出现人才聚集,提高粮食科技成果转化应用率,促进了技术高度化的提升,成为现代粮食系统发展的重要“推力”。政策服务化的均值为1.89,比2007年增加了0.23,这一数据的持续增强说明政府对粮食系统的管理和维护给予了高度重视,不仅体现在政策的制定和实施上,更体现在对农业生产者的实际帮扶上,为粮食系统的高效运行提供了有力的支持。治理生态化的均值虽有提升,仍在低水平徘徊,只有0.45,说明我国在粮食生产的生态环境保护方面还有很大的提升空间。其中,北京市的治理生态化水平最高,为1.16,这主要是因为北京市在粮食生产中注重环保,实施了调控措施政策,有效地保护了生态环境。

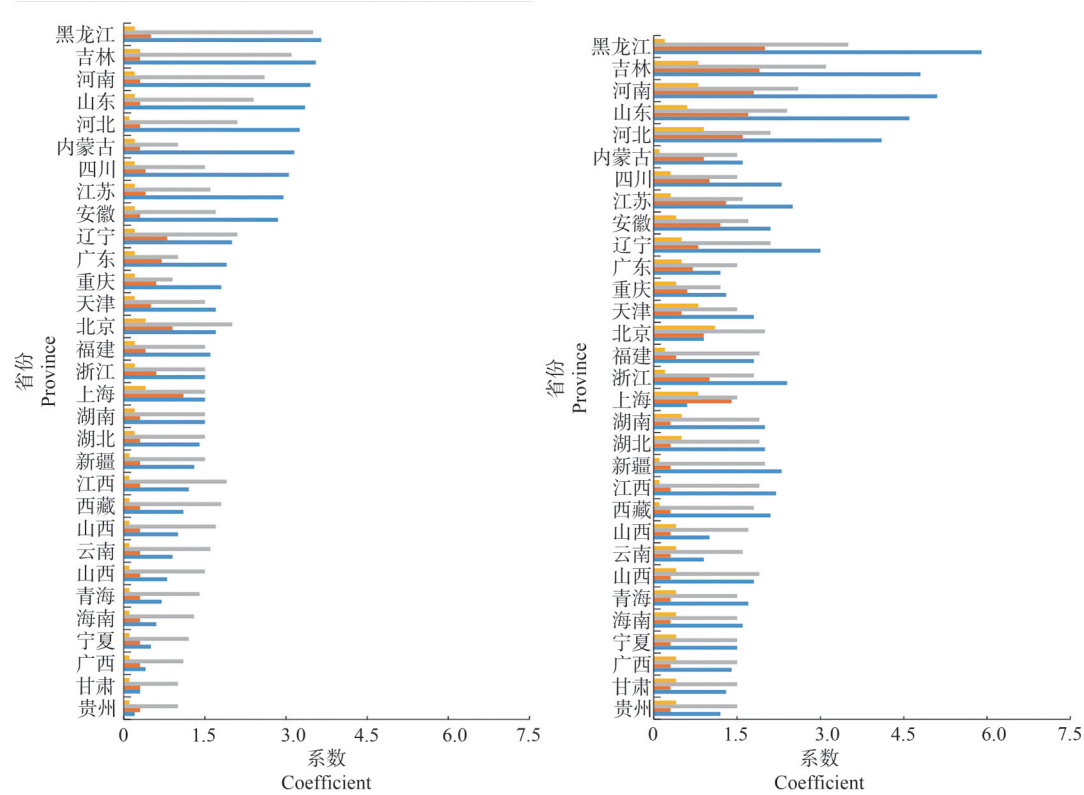
2021年,粮食系统的实力显著增强。全国结构合理化的平均值达到3.13,除西南地区外,大部分省市粮食系统已达到较高水平,黑龙江达到7.51为

全国最高。政策服务化的均值为1.72,仅次于结构合理化,规模化效益和投资效率在粮食系统中的服务功能逐渐突出,使得政府加大了对粮食系统的投资和扶持。技术高度化的均值为1.72,与研究初期相比得到显著提升。黑龙江、河南、山东省等重点粮食生产地区,积极推进科技创新和技术应用,提高了农业生产效率,还增强了作物的抗逆性。治理生态化的均值为1.19,上涨速度最快,主要是“十三五”期间,国家坚持“绿水青山就是金山银山”的理念,坚定不移走生态优先、绿色发展之路。这一时期,政府加大了对生态环境保护的投入和政策支持,成为推动可持续发展的重要力量。

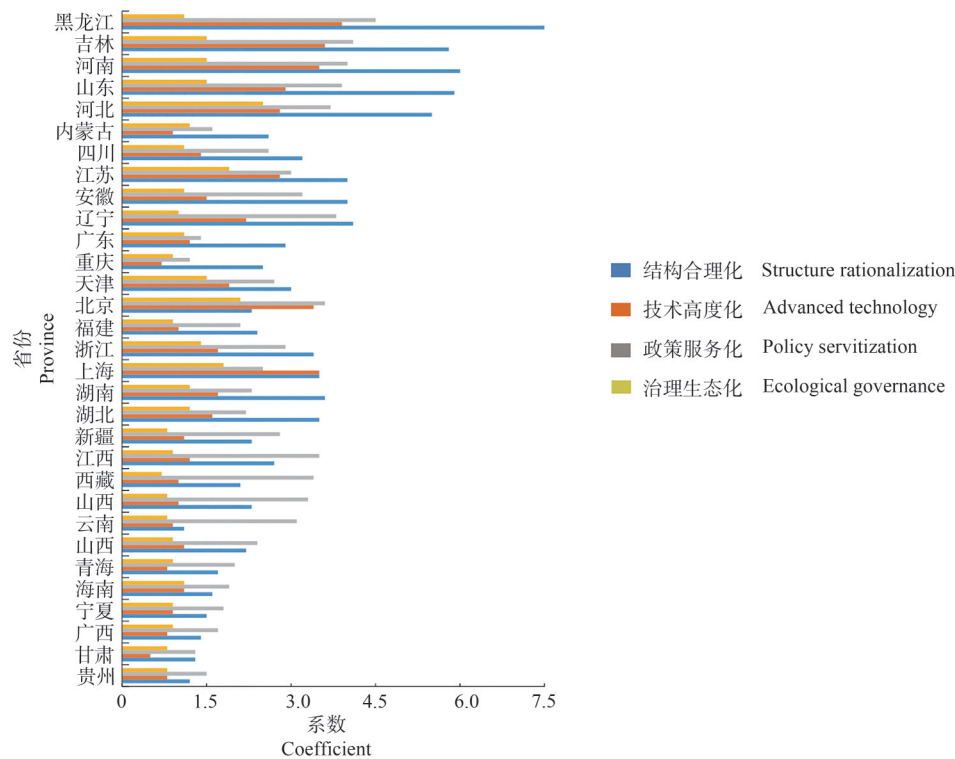
3.3.2 综合结果分析

由式(5)测算得到2005—2021年各省份粮食系统发展水平综合评价。研究期间粮食系统发展水平综合评价总体增长幅度为16.15%,年均增长率为25.44%,整体呈上升趋势;西南地区 and 个别内陆省份粮食系统尚处于较低发展水平,幅度相对缓慢,年均增长率为5.35%;东北和华北地区位居全国发展前列,增长幅度较大,年增长率为22.78%。总体来看,我国粮食系统呈现“辐射带动”趋势,以东北、华北优先发展,引领全国粮食系统发展水平共同提升,形成了以东北和华北为“双核心”粮食系统发展格局(表4)。

具体来看,黑龙江、吉林、河南省的粮食系统发展水平位居全国前三,而广西、甘肃和贵州省(自治区)的发展水平则相对较低,位于全国后列。在2005—2007年、2013—2015年和2017—2019年这3个时间区间,粮食系统的发展势头较为强劲,这主要是受到需求的结构调整和政策扶持的带动作用。然而2007—2009年和2019—2021年,粮食系统的发展出现了两次波动。这主要是因为2008年全球性的金融危机和2019年底席卷全国的新冠肺炎疫情,均对各省市的粮食系统造成了不同程度的冲击,导致了评价值的下降。分区域来看,东北地区作为我国主要的粮食产区,结构合理化方面取得了显著成效。积极推广规模化技术,形成了集约化和现代化的生产模式。华北地区的河南、河北和山东省,凭借得天独厚的地理位置和地形优势,丰富的自然资源禀赋,完善的基础设施以及较强的粮食生产能力,形成了均衡且高效的粮食系统。江苏、浙



(a) Results of single-dimensional food system measurements 2007 (b) Results of single-dimensional food system measurements 2014



(c) Results of single-dimensional food system measurements 2021

图3 2007、2014和2021年粮食系统单维度测度结果

Fig. 3 Single-dimensional measurement results of food system in 2007, 2014 and 2021

表 4 我国 2005—2021 年粮食系统发展水平综合评价值

Table 4 Comprehensive evaluation value of China's food system development level from 2005 to 2021

省份 Province	2005 年	2007 年	2009 年	2011 年	2013 年	2015 年	2017 年	2019 年	2021 年
黑龙江 Heilongjiang	6.11	7.49	7.05	8.02	8.54	8.88	9.05	9.58	9.77
吉林 Jilin	5.06	6.05	7.03	7.41	8.00	8.72	9.35	9.51	9.69
河南 Henan	6.13	7.14	6.12	7.12	7.17	8.08	8.11	9.19	9.27
山东 Shandong	4.07	5.36	4.55	6.35	7.08	7.14	7.17	8.25	9.01
河北 Hebei	5.22	6.11	6.07	7.05	7.06	8.08	8.10	8.15	8.76
内蒙古 Inner Mongolia	3.09	3.36	2.42	3.31	4.21	5.12	6.34	7.84	8.37
江苏 Jiangsu	2.08	3.65	3.17	4.64	5.25	5.79	5.21	6.27	8.87
四川 Sichuan	4.16	5.65	4.33	5.35	6.13	6.78	6.75	7.17	7.99
安徽 Anhui	3.18	4.05	3.23	4.23	4.31	6.01	6.93	6.65	6.92
上海 Shanghai	1.53	1.92	0.84	0.86	1.23	1.66	2.54	5.83	6.89
浙江 Zhejiang	2.64	3.34	2.55	2.95	3.32	4.83	5.79	6.54	6.82
北京 Beijing	0.68	0.57	0.73	0.71	0.88	1.33	1.98	6.07	6.68
辽宁 Liaoning	4.01	4.01	2.99	4.25	4.66	4.31	5.03	5.71	6.51
广东 Guangdong	4.03	3.55	2.11	3.31	3.53	4.36	4.22	4.78	5.05
重庆 Chongqing	2.15	2.08	2.05	3.07	3.69	4.47	5.29	5.64	5.92
天津 Tianjin	3.38	3.52	2.41	2.33	3.32	3.30	4.62	4.98	5.76
福建 Fujian	2.03	2.72	2.21	2.35	2.66	3.21	3.53	5.17	5.75
湖南 Hunan	2.59	3.16	2.25	3.02	4.12	3.73	3.04	4.97	5.64
湖北 Hubei	2.76	3.02	2.41	3.11	4.17	3.52	3.79	4.96	5.58
新疆 Xinjiang	0.09	1.07	0.42	1.01	2.58	2.08	3.21	4.91	5.43
江西 Jiangxi	0.17	0.74	0.31	1.39	2.44	2.83	3.18	4.51	5.32
西藏 Xizang	1.56	2.59	1.18	3.95	3.62	4.40	4.28	4.27	5.27
山西 Shanxi	0.75	0.93	0.91	1.11	1.52	2.15	2.68	4.31	5.01
云南 Yunnan	0.59	0.93	0.22	0.62	1.31	0.87	2.51	4.02	4.74
陕西 Shaanxi	1.04	1.32	0.98	2.05	2.34	2.75	3.03	3.54	4.11
青海 Qinghai	2.41	3.27	2.68	2.27	3.16	3.11	3.08	4.11	4.08
海南 Hainan	0.92	0.20	0.71	0.92	0.96	1.08	1.11	3.16	5.65
宁夏 Ningxia	0.55	0.64	0.35	0.12	1.16	1.74	1.08	2.67	5.37
广西 Guangxi	0.13	0.07	0.03	0.42	1.02	1.26	2.38	2.53	3.14
甘肃 Gansu	0.22	0.43	0.14	1.73	1.91	1.65	1.54	2.04	3.07
贵州 Guizhou	0.24	0.35	0.15	1.04	1.62	1.93	1.99	2.01	3.02

江和安徽等省份凭借着优越的区位优势和经济条件,在2008年经济危机之后,借助长三角区域战略的实施以及周边地区的辐射带动作用,粮食系统呈现出较强的增长态势。受数字化、信息化和智能化等现代科技因素的推动,上海市的粮食系统更加精准和高效,已经逐渐成为超大城市粮食系统的示范区。辽宁省和天津市受粮食资源错配、生产效率较低和市场竞争力不足等因素制约,粮食系统发展水平呈下降趋势;广西、云南、宁夏、甘肃、贵州等省份受地形和气候环境影响,粮食系统发展较为缓慢,处于相对弱势地位,但近年来在特色农产品领域具有独特优势和发展潜力。

整体来看,我国粮食系统的综合实力得到显著提升,各省市之间粮食系统的发展水平差距呈扩大趋势。部分区域粮食系统呈现出明显的集群效应,产生了一定的规模经济和协同效益。区域间的差

异未出现明显变化,粮食系统的非均衡化发展现象尚未得到显著改善。

3.4 粮食系统的动态演进

3.4.1 马尔科夫链的空间转换

通过对比表5中 t 与 $t+1$ 时期数据发现,其对角线上的值均大于非对角线上的值,说明我国粮食系统发展水平阶段表现出稳定性,各省市粮食系统保持当前水平的概率更大。存在4个阶段的“集群”效应,其中高水平的“集群”效应最为明显,概率达到82.45%。当粮食系统发展水平进入最高水平阶段时将达到“自我增强”的状态,形成了良好的系统结构。这种集聚效应能够吸引更多的资源和人才,进一步推动技术创新和产业升级,形成正向的反馈循环。在转移方向上,粮食系统发展水平类型转移大多发生于相近阶段之间,由中等水平向高水平类型转移的概率最大,不存在从最高水平向下转移的情况。

表5 粮食系统马尔科夫链转移概率矩阵
Table 5 Markov chain transfer probability matrix of food system

状态转换概率 State transition probability	I	II	III	IV
I	0.624 7	0.242 6	0.132 7	0
II	0.051 5	0.740 7	0.207 8	0
III	0	0.011 2	0.824 5	0.164 3
IV	0	0	0	1

注:I、II、III、IV分别代表低、中、高、最高水平阶段,表6同。
Note:I, II, III and IV represent the low, middle, high and highest level stage, respectively. The same in Table 6.

3.4.2 粮食系统发展水平动态预测

为了全面和深入理解我国粮食系统的发展阶段和规律,以2021年为基期,预测了2026和2031年的粮食系统水平阶段变化。到2026年,位于较低发展水平的省市保持原有状态的概率为22.73%,向中等水平、较高水平状态演进的概率为23.17%和24.59%。到2031年,位于较低发展水平的省市保持原有状态的概率下降了6.67%,向中等、较高水平状态演进的概率为35.05%和37.35%。2026年,位于中等发展水平的省市保持原有状态的概率为25.22%,向较高水平、高水平阶段演进的概率为29.48%和28.63%。到2031年,位于中等发展水

平的省市保持原有状态的概率下降5.93%,向较高水平和高水平状态演进的概率分别为43.61%和35.35%。2025年,位于较高发展水平的省市保持原有状态的概率为33.45%,向高水平发展的概率为66.55%。到2031年,位于较高发展水平的省份保持原有状态的概率下降3.69%,向高水平发展的概率上涨至70.24%。预测结果显示,各省份粮食系统存在显著的区域性差异,保持原有发展水平的正在逐年缩小,向更高阶段发展的可能性不断增加。各省份的粮食系统可能存在“突破式”发展,随着时间的推移,这种趋势将更为明显(表6)。

表 6 2026 和 2031 年粮食系统预测结果
Table 6 Food system forecast results for 2026 and 2031

状态转换概率 State transition probability	预测年份 Forecast year	I	II	III	IV
I	2026	0.227 3	0.231 7	0.245 9	0.295 1
	2031	0.160 6	0.350 5	0.373 5	0.115 4
II	2026	0.166 7	0.252 2	0.294 8	0.286 3
	2031	0.017 5	0.192 9	0.436 1	0.353 5
III	2026	0	0	0.334 5	0.665 5
	2031	0	0	0.297 6	0.702 4
IV	2026	0	0	0	1
	2031	0	0	0	1

4 结论与建议

本研究在分析传统粮食系统和现代粮食系统的基础上,将协同理论引入到粮食系统的研究中,拓展和阐述粮食系统的内涵,提出了“结构合理化—技术高度化—政策服务化—治理生态化”的四位协同复合维度,采用PVAR模型识别并遴选其敏感因素指标,运用序列多边形面积法测度粮食系统发展水平,并运用马尔科夫链分析现代粮食系统发展动态演进特征,主要结论如下:

1)在所有备选指标中,筛选出了四个相对影响较弱的指标,包括非农兼业水平、个体技术水平、投资效率和能源消耗强度。其余的12项指标与粮食系统的发展密切相关,能够科学地测度粮食系统的发展水平。2)总体来看,2005—2021年粮食系统各维度发展水平呈现明显提升趋势,多元化的构成要素在不同的发展阶段表现出各异的作用力度。随时间的推移,这些子系统间的差异性逐步扩大,呈现显著的“异质性”特征。3)我国粮食系统呈现“辐射带动”趋势,以东北、华北优先发展,引领全国粮食系统发展水平共同提升,形成了以东北和华北为“双核心”粮食系统发展格局。4)Markov链预测结果显示,我国粮食系统发展水平阶段表现出稳定性,各省市粮食系统保持当前水平的概率更大。存在4个阶段的“集群”效应,这种集聚效应能够吸引更多的资源和人才,进一步推动技术创新和产业升级,形成正向的反馈循环。此外,各省市的粮食系

统可能存在“突破式”发展,随着时间的推移,这种趋势将更为明显。

针对以上结论,提出3点政策建议如下:

1)优化资源与要素间的整合。我国各省市自然条件迥异,粮食系统的发展应遵循灵活性、差别性、适应性原则,汇聚地方特色资源,促进粮食系统的可持续发展。一方面,通过促进粮食生产的绿色优质发展,优化粮食系统的内部空间布局,推动种植结构和技术模式增产提效,加快构建系统内多层次粮食安全保障体系,实现资源利用与环境保护协调发展。另一方面,加快粮食与数字技术的深度融合,推进粮食系统的科技化、信息化,着力抓好智慧农场、电子物流、数字仓储等发展方向,积极推动粮食系统向高端化、智能化、集聚化发展。

2)扩大优势地区的溢出效应。针对东北、华北等粮食系统发展快速地区,充分发挥其生产优势,积极探索建立跨区域粮食生产、流通、储备联动、技术合作等交流平台,构筑粮食系统建设利益共同体。山东、浙江、江苏应充分发挥自身区位优势与经济发展条件,强化与国际接轨的科技创新平台的建设,通过高新技术科技赋能粮食系统优化与发展;北京、上海作为国际化大都市,进一步合理配置粮食资源,促进科技创新成果有效转化,提升粮食产业链的附加值;广西、云南、贵州作为粮食系统发展水平相对落后地区,应针对自身发展短板,吸取发达地区成功发展经验,加强农业基础设施建设,强化粮食技术研发和人才培养,争取国家政策扶

持,缩小与其他地区差距,增强区域粮食系统发展活力和竞争力。

3)建立多层次粮食系统的保障和运行机制。应优化健全粮食政策体系建设,完善不同地区粮食系统保障体系和运行策略,从政策层面拉动粮食产业发展。建立“东部沿海区域—中西部地区—省内各市县”的多级政策空间尺度体系,制定和实施差异化政策,有序实现粮食系统高级化、可持续协调发展;在国际上积极推进“一带一路”绿色农业伙伴关系建设,通过打造国际粮食安全合作圈等举措,深化粮食生产、贸易、技术国际交流合作。

参考文献 References

- [1] Pérez-Escamilla R, Guberta M B, Rogers B. Food security measurement and governance: assessment of the usefulness of diverse food insecurity indicators for policy makers[J]. *Global Food Security*, 2017, 14: 96-104
- [2] 刘晓琳,卢晓妍,秦张璇,李飞. 退耕还林还草背景下黄土高原粮食生产系统可持续性的时空演变[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(10): 249-257
Liu X L, Lu X Y, Qin Z X, Li F. Spatial and temporal evolution of grain production system sustainability in the Loess Plateau under the background of returning farmland to forest and grassland [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(10): 249-257 (in Chinese)
- [3] 张琳琛,王悦,董银果. 全球粮食生产集中化对粮食系统可持续性的影响[J]. *经济学家*, 2022(11): 117-128
Zhang L C, Wang Y, Dong Y G. The impact of global food production centralization on the sustainability of food systems[J]. *Economist*, 2022 (11): 117-128 (in Chinese)
- [4] 罗光强,宋新宇. 区域粮食经济高质量发展的系统评价比较与合作战略:以湘粤为例[J]. *湖南农业大学学报:社会科学版*, 2023, 24(5): 27-35
Luo G Q, Song X Y. Systematic evaluation, comparison and Cooperation Strategy of high-quality development of regional grain economy: A case study of Hunan Province[J]. *Journal of Hunan Agricultural University: Social Sciences Edition*, 2023, 24(5): 27-35 (in Chinese)
- [5] 木合塔尔·艾买提,肖鹏南,徐涛. 基于耗散结构理论的粮食生产系统发展状态分析[J]. *江苏农业学报*, 2021, 37(4): 1043-1050
Muhetal A, Xiao P N, Xu T. Development state analysis of grain production system based on dissipative structure theory [J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2021, 37(4): 1043-1050 (in Chinese)
- [6] 刘木子云,刘辉. 粮食生产空间系统的运行机制及演化逻辑[J]. *农业经济*, 2022(10): 9-11
Liu M Z Y, Liu H. Operation mechanism and evolution logic of spatial system of grain production[J]. *Journal of Agricultural Economics*, 2022 (10): 9-11 (in Chinese)
- [7] 樊胜根. 大食物观引领农食系统转型全方位夯实粮食安全根基[J]. *农村. 农业. 农民(B版)*, 2023(2): 10-12
Fan S G. Big Food concept leads the transformation of agricultural food system and strengthens the foundation of food security in all aspects[J]. *Rural. Agriculture. Farmers (B Ed.)*, 2023(2): 10-12 (in Chinese)
- [8] 居辉,袁佳双,张馨月,刘忠伟,王建东. IPCC AR6粮食系统的影响与适应的新认知和新趋势[J]. *大气科学学报*, 2022, 45(4): 481-488
Ju H, Yuan J S, Zhang X Y, Liu Z W, Wang J D. IPCC AR6: New understandings and trends in impacts and adaptation of food systems[J]. *Journal of atmospheric sciences*, 2022, 45(4): 481-488 (in Chinese)
- [9] 杨月锋,张园园,潘静静. 基于系统动力学的福建粮食物流系统优化研究[J]. *中国物流与采购*, 2019(22): 74-80
Yang Y F, Zhang Y Y, Pan J J. Fujian grain logistics system based on system dynamics optimization study [J]. *Journal of China Logistics and Purchasing*, 2019(22): 74-80 (in Chinese)
- [10] 罗海平,朱勤勤,潘柳欣,宋焱. 粮食主产区农田生态系统服务价值动态演化与空间分异[J]. *统计与决策*, 2020, 36(4): 49-52
Luo H P, Zhu Q Q, Pan L X, Song Y. Major grain-producing areas of farmland ecosystem service value of dynamic evolution and spatial differentiation[J]. *Journal of statistics and decision*, 2020, 36(4): 49-52 (in Chinese)
- [11] 朱美连,杨丽,降亚楠,王小军. 基于多Agent模型的宁东基地水-能源-粮食系统协同演化研究[J]. *中国农村水利水电*, 2023(12): 7-16
Zhu M L, Yang G L, Jian Y N, Wang X J. Study on the co-evolution of water-energy-food system in Ningdong Base based on multi-agent model [J]. *China Rural Water Resources and Hydropower*, 2023(12): 7-16 (in Chinese)
- [12] 董玥,杨忍,邓颖贤,林元城. 粮食主产区典型镇域的农业系统变化与农户生计韧性评价:以河南省高杨店镇为例[J]. *农业资源与环境学报*, 2023, 40(5): 1208-1222
Dong Y, Yang R, Deng Y X, Lin Y C. Changes in agricultural system and assessment of farmers' livelihood resilience in typical towns in major grain producing areas: A case study of Gaoyangdian Town, Henan Province[J]. *Journal of agricultural resources and environment*, 2023, 40(5): 1208-1222 (in Chinese)
- [13] 曾涛,周文慧,陈婷. 基于主成分分析法的全球粮食系统评价[J]. *农业技术与装备*, 2021(7): 70-71
Zeng T, Zhou W H, Chen T. Global food system evaluation based on principal component analysis [J]. *Journal of Agricultural Technology and Equipment*, 2021(7): 70-71 (in Chinese)
- [14] 董刚,王艺璇,王珂,姜世成,邵长亮. 2018—2020年松嫩平原长岭盐碱稻田碳水通量观测数据集[J]. *中国科学数据:中英文网络版*, 2023, 8(3): 7-21
Dong G, Wang Y X, Wang K, Jiang S C, Shao C L. Data set of carbon and water flux observation in saline-alkali paddy field of Changling, Songnen Plain, 2018-2020[J]. *Scientific Data in China*, 2023, 8(3): 7-21 (in Chinese)
- [15] 王盛威,张永恩,邱佳颖. 全球高温干旱对粮食生产和市场的影响分析与展望[J]. *农业展望*, 2023, 19(6): 3-6
Wang S W, Zhang Y E, Di J Y. Impact of global high temperature and drought on grain production and market [J]. *Agricultural Outlook*, 2023, 19(6): 3-6 (in Chinese)
- [16] 高培勇,杜创,刘霞辉,袁富华,汤铎铎. 高质量发展背景下的现代化经济体系建设:一个逻辑框架[J]. *经济研究*, 2019, 54(4): 4-17
GAO P Y, Du C, Liu X H, Yuan F H, Tang D D. Construction of Modern economic system under the background of high-quality development: a logical framework[J]. *Economic Research*, 2019, 54(4): 4-17 (in Chinese)
- [17] 肖新成,谢德体,何丙辉,魏朝富,倪九派. 基于农业面源污染控制的三峡库区种植业结构优化[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(20): 219-227
XIAO X C, Xie D T, He B H, Wei C F, Ni J P. Optimization of planting structure in Three Gorges Reservoir area based on agricultural non-point source pollution control [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(20): 219-227 (in Chinese)
- [18] 唐建军,龚教伟,宋清华. 数字普惠金融与农业全要素生产率:基于要素流动与技术扩散的视角[J]. *中国农村经济*, 2022(7): 81-102

- Tang J J, Gong J W, Song Q H. Digital financial inclusion and agricultural Total factor productivity: From the perspective of factor flow and technology diffusion[J]. *Chinese Rural Economy*, 2022(7): 81-102 (in Chinese)
- [19] 李庆雪, 蔡良群, 于金闯. 装备制造业服务化科技政策效率及其影响因素研究: 基于 DEA-Tobit 的实证分析[J]. 商业研究, 2020(7): 46-53
LI Q X, Qi L Q, YU J C. Research on policy efficiency of servitization technology and its influencing factors in equipment manufacturing industry: An empirical analysis based on DEA-Tobit [J]. *Business research*, 2020(7): 46-53 (in Chinese)
- [20] 袁世一, 李永武, 陈维国, 谢启伟. 产业生态化与空间集聚效应研究: 来自中国31个省、市、自治区的面板数据[J]. 管理评论, 2020, 32(6): 72-81
Yuan S Y, Li Y W, Chen W G, Xie Q W. Study on industrial ecology and Spatial Agglomeration effect: Panel data from 31 provinces, municipalities and autonomous regions in China [J]. *Management Review*, 2020, 32(6): 72-81 (in Chinese)
- [21] 王柯文, 马海涛. 天山北坡经济带城镇化与资源环境系统的关系研究进展: 基于文献计量分析[J]. 生态学报, 2023, 43(18): 7807-7819
Wang K W, Ma H T. Research progress on the relationship between urbanization and resources and environment system in the economic belt on the north slope of Tianshan Mountains[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(18): 7807-7819 (in Chinese)
- [22] 陈培阳, 朱喜钢. 中国区域经济趋同: 基于县级尺度的空间马尔可夫链分析[J]. 地理科学, 2013, 33(11): 1302-1308
Chen P Y, Zhu X G. Regional economic convergence in China: Spatial Markov chain analysis based on county scale[J]. *Geographical Science*, 2013, 33(11): 1302-1308 (in Chinese)
- [23] 中国统计年鉴编委会. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2007—2023
Editorial Board of China Statistical Yearbook. *China Statistical Yearbook* [M]. Beijing: China Statistics Press, 2007-2023 (in Chinese)
- [24] 国家统计局农村社会经济调查司. 中国农村统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2007—2023
Department of Rural Socio-Economic Survey, National Bureau of Statistics. *China Rural Statistical Yearbook* [M]. Beijing: China Statistics Press, 2007-2023 (in Chinese)
- [25] 国家粮食和物资储备局. 中国粮食和物资储备年鉴[M]. 北京: 人民出版社, 2007—2023
National Food and Strategic Reserves Administration. *China's Grain and Material Reserves Year* [M]. Beijing: People's Publishing House, 2007-2023 (in Chinese)
- [26] 国家统计局社会科技和文化产业统计司, 科学技术部战略规划司. 中国科技统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2007—2023
Statistics Department of Social Science, Technology and Cultural Industries, National Bureau of Statistics, Department of Strategic Planning, Ministry of Science and Technology. *China Statistical Yearbook of Science and Technology* [M]. Beijing: China Statistics Press, 2007-2023 (in Chinese)

责任编辑: 王岩



第一作者简介: 袁世一, 助理研究员, 经济学博士, 主要从事粮食安全监测预警研究。先后主持和参与国家自然科学基金, 国家重点研发计划子课题、中国农业科学院创新工程等10余项。发表学术论文20余篇, 出版专著1部, 参与专著2部, 授权发明专利1件。



通讯作者简介: 杨森, 讲师, 管理学博士, 北京工商大学商学院组织管理学系副主任、工商管理专业负责人, 中国技术经济学会技术创新与创业分会理事。现主要从事企业科技向善行为与新兴数字技术治理、多维绩效反馈与企业响应式战略决策行为的研究工作。已在《科研管理》《科学学研究》《管理学报》《经济学家》《经济纵横》《中国科技论坛》《科技进步与对策》《技术经济》等国内经管类CSSCI期刊和北大核心期刊上公开发表论文10余篇, 出版专著1部。