



王火根, 胡梦婷, 刘小春. 基于机器学习和SHAP算法的我国粮食安全水平测度重构及可解释性分析[J]. 中国农业大学学报, 2025, 30(07): 264-274.
WANG Huogen, HU Mengting, LIU Xiaochun. Reconstruction and interpretability analysis of China's food security level based on machine learning and SHAP algorithm[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(07): 264-274.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.07.22

基于机器学习和SHAP算法的我国粮食安全水平测度重构及可解释性分析

王火根 胡梦婷 刘小春
(江西农业大学 经济管理学院, 南昌 330045)

摘要 为探讨“大食物观”对中国粮食安全赋予的新内涵,基于2010—2022年中国省级层面数据,从生产安全、质量安全、经济安全、消费安全和流通安全5个维度构建中国粮食安全评价指标体系,在熵值法测算基础上,利用机器学习和SHAP算法重新识别不同影响变量对粮食安全的重要性。结果表明:1)从整体演进趋势来看,2010—2022年中国粮食安全水平总体呈先下降后上升的态势,于2012—2015年和2018—2019年增长迅速;2)从各维度评价得分来看,生产安全对粮食安全贡献度最高,经济安全 and 质量安全呈上升趋势,消费安全和流通安全是粮食安全体系中的薄弱环节;3)从粮食安全的关联因素来看,影响中国粮食安全水平的关键因素包括肉类总产量、粮食总产量、水产品总产量、铁路货运量、财政涉农支出、森林覆盖率和城乡收入差距。基于此,从推动畜牧业可持续发展,提高粮食生产效率,加强水产养殖发展,加大财政涉农支出等4个方面提出政策建议。

关键词 大食物观; XGBoost; SHAP; 粮食安全; 食物安全

中图分类号 F323.3

文章编号 1007-4333(2025)07-0264-11

文献标志码 A

Reconstruction and interpretability analysis of China's food security level based on machine learning and SHAP algorithm

WANG Huogen, HU Mengting, LIU Xiaochun

(School of Economics and Management, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China)

Abstract To explore the new connotations of China's food security under the concept of the “Big Food Perspective”, this study constructs a food security evaluation index system based on the provincial-level data from 2010 to 2022. The framework covers five dimensions, including production security, quality security, economic security, consumption security, and circulation security. Using the entropy method for index calculation and leveraging machine learning and SHAP algorithms, the study re-identifies the importance of various influencing variables on food security. The results reveal that: 1) From the perspective of overall evolution trend, China's food security level exhibited a first decreasing and then increasing trend, and there were a rapid growth in 2012-2015 and 2018-2019; 2) From the perspective of the evaluation scores of various dimensions, the production security contributed the most to food security, while the economic and quality security showed upward trends. However, the consumption security and circulation security remained the weak links in the food security system; 3) From the perspective of factors related to food security, the critical determinants of China's food security include total meat production, total grain production, total aquatic product output, railway freight volume, agricultural fiscal expenditure, forest

收稿日期: 2024-08-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(71963018)

第一作者: 王火根(ORCID: 0009-0005-3732-8194), 教授, 主要从事粮食安全及农业资源与环境研究, E-mail: 412163218@qq.com

coverage rate, and the urban-rural income gap. Based on the above findings, the study proposed policy recommendations in promoting the sustainable development of animal husbandry, improving grain production efficiency, strengthening aquaculture development, and increasing agricultural fiscal spending.

Keywords Big Food Perspective; XGBoost; SHAP; grain security; food security

民为国基,粮为民纲。随着居民粮食消费从“吃不饱”到“吃得饱”,再到“吃得好”的历史性转变,粮食安全的内涵已从单一的产量导向拓展为包含营养与健康的多重目标^[1]。提升粮食安全综合保障能力、加快构建多元化食物供给体系,已成为“三农”工作的核心政策导向^[2]。在国内食物供需失衡、农业生产可持续性挑战、消费结构升级等新形势下,科学测度粮食安全水平并系统分析其关键影响因素,具有明确的战略意义^[3]。

粮食安全概念层次多样,其最早源于1974年联合国粮农组织在世界粮食首脑会议上的定义:“任何人在任何时候都能获得足够的食物”。此时,粮食安全主要关注粮食供给量。1996年世界粮食峰会将其内涵扩展至物质、社会和经济维度,提出任何人在任何条件下都能获取充足、安全、营养的食物以维持健康生活^[4]。由此,粮食安全逐渐从单一的供给指标演变为多维的综合表征体系。2015年,中央农村工作会议首次提出“大食物观”理念;2024年中央一号文件再提“大农业观”和“大食物观”,推动拓展多渠道食物供给。随着粮食安全概念的不断丰富,学界开始从更加全面的维度重新审视粮食安全问题。

现有研究多聚焦于生产、消费、流通和生态等维度,常用层次分析法、熵值法等加权方法进行指标测算^[5-11]。随着机器学习的广泛应用及“大食物观”理念的提出,亟需重新审视我国粮食安全评价体系,进一步挖掘深层次影响因素并量化各变量对粮食安全的影响程度。在此背景下,本研究基于“大食物观”新内涵重构中国粮食安全评价指标体系,运用机器学习方法及SHAP算法识别关键影响因素,为科学制定粮食安全政策、提升国家粮食安全水平提供有效决策支持。

1 方法选取与模型构建

1.1 XGBoost算法

XGBoost是一种基于决策的集成算法,通过串行训练多个弱分类器并组合成一个强分类器,以提高预测性能。作为GBDT算法的高效实现,XGBoost在代价函数中加入正则项用于控制模型

的复杂度,有效降低了模型方差防止过拟合,具有较强的泛化能力,并在损失函数中对误差部分进行了二阶泰勒展开,得到更加准确的一阶和二阶导数,通过引入并行运算,使各个特征的增益计算可以多线程进行,极大提升运行效率。XGBoost算法模型如下:

$$\hat{y} = \sum_{k=1}^n f_k(x_i), f_k \in F \quad (1)$$

式中: $\hat{y}$ 为预测值; n 为树的数量; F 为所有分类与回归树的集合; f_k 为具体回归中的1棵树; k 为回归树数量。XGBoost模型的目标函数式如下:

$$X_{\text{obj}} = \sum_{i=1}^n l(y, \hat{y}) + \sum_{k=1}^k \gamma T + \frac{1}{2} \lambda \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^T w_j^2 \quad (2)$$

式中: $\sum_{i=1}^n l(y, \hat{y})$ 用以衡量预测值与真实值的差距; T 为决策树的叶子节点数; w_j 为第 j 个叶子节点的分数; γ 为叶子节点的深度控制参数; λ 为叶子节点的权重控制参数。为求解叶子节点上的最优权重 w_j ,对目标函数在 $f_i = 0$ 处进行二阶泰勒展开,此时目标函数近似为:

$$X_{\text{obj}} \approx \sum_{j=1}^T [(\sum_{i \in I_j} g_i) w_j + \frac{1}{2} (\sum_{i \in I_j} h_i + \lambda) w_j^2] + \lambda T \quad (3)$$

式中: X_{obj} 为目标函数; $g_i = \partial \hat{y}^{t-1} l(y_i, \hat{y}^{t-1})$ 为 $f_k(x_i)$ 的一阶导数(梯度); $h_i = \partial^2 \hat{y}^{t-1} l(y_i, \hat{y}^{t-1})$ 为 $f_k(x_i)$ 的二阶导数; $I_j = \{i | q(x_i) = j\}$ 为决策树叶子 j 上的样本组。将式(4)带入式(3)中,求解所得的最优 w_j 和最优目标值分别如下述公式所示:

$$w_j^* = \frac{G_j}{H_j + \lambda} \quad (4)$$

$$X_{\text{obj}} = -\frac{1}{2} \sum_{j=1}^T \frac{G_j}{H_j + \lambda} + \lambda T \quad (5)$$

式中: $G_j = \sum_{i \in I_j} g_i$ 为第 j 个叶子节点的梯度之和; $H_j = \sum_{i \in I_j} h_i$ 为第 j 个叶子节点的二阶导数之和。对叶子节点划分子树,每次分裂均从信息增益最大的节点开始,叶子节点信息增益计算公式如下:

$$G = \frac{1}{2} \left[\frac{G_L^2}{H_L + \lambda} + \frac{G_R^2}{H_R + \lambda} - \frac{(G_L + G_R)^2}{H_L + H_R + \lambda} \right] - \gamma \quad (6)$$

1.2 SHAP可解释性分析

SHAP(Shapley additive explanations)模型用于解释机器学习模型的预测,其核心思想是通过计算各影响因素加入模型时的平均边际贡献,来衡量它们对模型预测结果的贡献程度。相较于其他测度变量重要性的方法,SHAP方法有两大优点:一是提供统一框架来对影响因素重要性进行排序;二是在进行贡献度评价时满足了一致性条件。第*i*个影响因素的SHAP值计算公式如下:

$$\Phi_i = \sum_{S \subseteq N \setminus \{i\}} \frac{|S|!(|N|-|S|-1)!}{|N|!} (\nu(S \cup \{i\}) - \nu(S))$$

(7)

式中:*N*为所有特征的集合;*S*为不包含第*i*个影响

因素的集合;|*S*|为集合*S*中的特征数; $\nu(S)$ 为集合*S*对模型预测输出的贡献; $\nu(S \cup \{i\})$ 为包含第*i*个影响因素的集合*S*∪{*i*}对模型预测输出的贡献。

2 指标体系与数据说明

2.1 指标体系

基于已有研究成果,结合“大食物观”为中国粮食安全赋予的新内涵,遵循系统性、科学性、客观性、可比性和可操作性原则,从生产安全、质量安全、经济安全、消费安全、流通安全5个维度构建综合性粮食安全水平评价指标体系,系统评价“大食物观”意蕴下中国粮食安全水平。构建指标体系如表1。

表1 中国粮食安全水平评价指标体系
Table1 China's food security level evaluation index system

维度 Dimension	要素指标 Factor index	单位 Unit	性质 Property	权重 Weight
生产安全 Production- security	粮食总产量 Total grain output	万 t	正指标	0.077
	肉类总产量 Total meat production	万 t	正指标	0.068
	果蔬类总产量 Total output of melons and fruits	万 t	正指标	0.123
	水产品总产量 Total aquatic product	万 t	正指标	0.158
质量安全 Quality- security	森林覆盖率 Forest coverage rate		正指标	0.050
	单位面积农药使用量 Pesticide use per unit area	t/万 hm ²	负指标	0.005
	单位面积化肥施用量 Fertilizer application per unit area	t/万 hm ²	负指标	0.008
	单位面积农膜使用量 Agricultural film use per unit area	t/万 hm ²	负指标	0.008
经济安全 Economic- security	农产品生产价格指数 Agricultural production price index		正指标	0.014
	国有粮企主要粮食收购量 Quantity of main grain purchased by state-owned grain enterprises	万 t	正指标	0.166
	农林水支出占比 Expenditure on agriculture, forestry and water resources	%	正指标	0.026
	财政涉农支出 Fiscal expenditure on agriculture	亿元	正指标	0.042
消费安全 Consumption- security	蛋白质供应 Protein supply	g	正指标	0.072
	城乡收入差距 Urban-rural income gap		负指标	0.013
	农村恩格尔系数 Rural Engel coefficient		负指标	0.013
流通安全 Circulation- security	道路密度 Road density	km/km ²	正指标	0.019
	铁路货运量 Railway freight volume	万 t	正指标	0.138

2.1.1 生产安全

生产安全为基础。作为粮食安全的源头,生产安全即是确保粮食供给的基本数量和质量。“大食物观”要求不仅涵盖稻米、小麦等主食作物,也包括肉类、蛋类、奶制品、水产品 and 果蔬类等多样化的食物资源,以满足人们对食物充足性和多样性的需求^[12]。农业农村部数据显示,中国居民每天需要消耗70万t粮、23万t肉、192万t菜和9.8万t油。这些数据表明,保障粮食安全的关键在于稳定和提升粮食生产能力,以应对不断变化的消费需求与市场环境。本研究从食物系统的整体视角出发,顺应消费者对食物结构优化的趋势,综合考量不同类别食物的供给情况。为此,选取粮食总产量、肉类总产量、水产品总产量及果蔬类总产量等关键指标,用于评估食物供给的充足性和多样性。

2.1.2 质量安全

质量安全为保障。粮食质量安全在粮食安全体系中承担着保障居民健康与安全的重要职能,直接关系到消费者的健康水平及粮食的可持续消费。随着农业生产向高产量目标迈进,必须谨慎应对农药、化肥等化学投入品的过度使用,避免对生态环境和人体健康造成潜在危害。为科学评估农业生产的环境友好性,本研究选取了单位面积农药使用量、化肥施用量及农膜使用量等关键指标,以衡量粮食生产过程中的质量安全水平。此外,林粮、林果、林药等森林生态产品作为主粮供应的重要组成部分,能够有效满足人民对高品质生活的需求^[13]。然而,部分研究虽从农业生产方式角度探讨了生态安全,但往往忽略了森林资源价值与“大食物观”之间的有机联系。因此,本研究引入森林覆盖率作为指标,以全面发挥森林生态系统在“大食物观”框架下的多重价值。

2.1.3 经济安全

经济安全为调节。经济安全在粮食系统中发挥着连接生产与消费的关键作用,主要通过粮食价格形成机制、农业支持保护政策、国有粮食企业改革等举措,有效提高农民抵御市场风险和自然风险的能力^[14]。因此采用农产品生产价格指数、国有粮企主要粮食收购量、农林水支出占比和财政涉农支出指标衡量粮食经济安全的多维度表现。

2.1.4 消费安全

消费安全为目标。“大食物观”提倡满足居民多样化的食物需求,向动植物微生物要热量、要蛋白,确保

所有居民都能享用健康营养的食物。鉴于城乡收入差距的扩大和农业生产规模化的趋势可能加剧城乡居民收入分配的结构失衡,削弱消费者的食物购买能力^[15]。为进一步丰富消费安全的内涵,选取平均蛋白质供应、城乡收入差距和农村恩格尔系数等指标,来考察粮食消费的安全和公平性。其中平均蛋白质供应指标中各类食物中的蛋白质含量参考罗洁霞等^[16]的研究进行计算。

2.1.5 流通安全

流通安全为支撑。完善的流通体系是确保粮食从生产到消费各环节畅通无阻的关键因素。“大食物观”将视野扩展至整个食物供应链,强调粮食的可获得性和可利用性^[17]。粮食流通作为连接生产和消费的桥梁,其安全性至关重要。供应链、产业链、仓储链的完善可以减少运输成本和时间,降低粮食损耗与营养流失,从而提高粮食安全水平^[18]。已有研究多涉及粮食流通成本,关于流通基础设施的指标衡量较少,考虑到粮食作为大宗商品的特性,采用道路密度和铁路货运量来衡量粮食流通的效率和安全性,其中道路密度以道路网里程与该区域面积的比值量化。

2.2 数据来源

选取2010—2022年中国31个省(自治区、直辖市)作为研究对象(统计数据未含港澳台地区,下同),所使用的数据来源于《中国统计年鉴》^[19]、《中国农村统计年鉴》^[20]、国家统计局、EPS数据库等统计年鉴及公开数据平台。采用熵值法进行赋权测算中国粮食安全水平评价指标的权重系数见表1。

3 结果与分析

3.1 描述性统计分析

2010—2022年31个省份的粮食安全水平情况如表2。第一,中国粮食安全水平总体上呈现增长态势,自2010年的0.214增长至2022年的0.260,提高21个百分点,表明近年来随着人们生活水平日益改善,粮食安全水平也不断提升;第二,2022年,中国粮食安全水平排名靠前的省份有山东(0.587)、河南(0.443)、黑龙江(0.388)、江苏(0.385)、广东(0.377)、湖北(0.337)、内蒙古(0.335)、辽宁(0.333)、湖南(0.326)和安徽(0.319),成为加快建设农业强国的强力支撑。其中,2015年,粮食大省黑龙江的粮食安全水平创下其历史高峰,可能在于

当年国家政策性粮食收购工作高标准完成,政策性粮收购量增幅达25%,极大提升农民增收成效;第三,在2012—2015年和2018—2019年2个时间阶段,粮食安全水平增长明显。2015年份粮食安全水平显著提高,原因在于国家宏观战略的坚实支撑。

2012年1月,国务院印发《全国现代农业发展规划(2011—2015年)》,从定性定量两方面阐述了现代农业建设的阶段目标,实行差别化扶持政策统筹农业现代化建设,粮食安全水平从2012年的0.225增至2015年的0.250,增长幅度达11.11%。

表2 中国2010—2022年粮食安全水平评价
Table 2 Evaluation of food security in China from 2010 to 2022

省份 Province	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	2021 年	2022 年
安徽 Anhui	0.277	0.284	0.291	0.301	0.314	0.321	0.293	0.296	0.293	0.309	0.309	0.314	0.319
北京 Beijing	0.099	0.102	0.097	0.100	0.099	0.101	0.099	0.108	0.118	0.119	0.118	0.125	0.139
福建 Fujian	0.244	0.250	0.255	0.267	0.277	0.290	0.288	0.284	0.292	0.301	0.306	0.309	0.312
甘肃 Gansu	0.113	0.112	0.123	0.127	0.127	0.135	0.131	0.134	0.145	0.152	0.158	0.163	0.170
广东 Guangdong	0.313	0.325	0.331	0.335	0.338	0.349	0.346	0.337	0.353	0.360	0.366	0.374	0.377
广西 Guangxi	0.238	0.248	0.249	0.259	0.265	0.274	0.278	0.272	0.279	0.288	0.299	0.293	0.298
贵州 Guizhou	0.141	0.137	0.141	0.144	0.151	0.159	0.167	0.162	0.165	0.189	0.197	0.173	0.177
海南 Hainan	0.131	0.135	0.135	0.140	0.146	0.145	0.147	0.142	0.157	0.158	0.160	0.155	0.157
河北 Hebei	0.271	0.283	0.289	0.303	0.307	0.312	0.301	0.298	0.304	0.318	0.319	0.318	0.317
河南 Henan	0.435	0.416	0.430	0.433	0.454	0.463	0.466	0.462	0.448	0.467	0.445	0.430	0.443
黑龙江 Heilongjiang	0.303	0.314	0.322	0.365	0.382	0.461	0.394	0.393	0.382	0.379	0.397	0.396	0.388
湖北 Hubei	0.272	0.277	0.285	0.302	0.310	0.319	0.321	0.321	0.324	0.324	0.321	0.328	0.337
湖南 Hunan	0.264	0.274	0.277	0.293	0.301	0.310	0.308	0.301	0.308	0.310	0.314	0.317	0.326
吉林 Jilin	0.214	0.217	0.219	0.255	0.267	0.291	0.300	0.253	0.242	0.255	0.258	0.254	0.252
江苏 Jiangsu	0.331	0.338	0.351	0.366	0.373	0.373	0.377	0.373	0.367	0.374	0.374	0.379	0.385
江西 Jiangxi	0.231	0.242	0.248	0.259	0.263	0.266	0.269	0.266	0.265	0.267	0.270	0.274	0.277
辽宁 Liaoning	0.293	0.307	0.316	0.342	0.339	0.344	0.343	0.319	0.310	0.320	0.330	0.332	0.333
内蒙古 Inner Mongolia	0.237	0.264	0.264	0.283	0.290	0.311	0.295	0.309	0.321	0.329	0.320	0.333	0.335
宁夏 Ningxia	0.104	0.101	0.104	0.108	0.105	0.102	0.104	0.108	0.109	0.111	0.119	0.119	0.116
青海 Qinghai	0.067	0.070	0.071	0.078	0.077	0.075	0.082	0.077	0.079	0.087	0.086	0.079	0.077
山东 Shandong	0.517	0.525	0.546	0.555	0.560	0.578	0.559	0.560	0.555	0.549	0.558	0.570	0.587
山西 Shanxi	0.192	0.202	0.209	0.217	0.223	0.216	0.209	0.225	0.249	0.261	0.260	0.268	0.273
陕西 Shaanxi	0.182	0.187	0.190	0.202	0.209	0.206	0.210	0.215	0.225	0.235	0.245	0.225	0.236
上海 Shanghai	0.067	0.066	0.067	0.066	0.066	0.069	0.073	0.075	0.077	0.081	0.077	0.077	0.073
四川 Sichuan	0.246	0.263	0.266	0.277	0.283	0.288	0.290	0.286	0.304	0.299	0.305	0.305	0.310

表 2（续）													
省份 Province	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	2021 年	2022 年
天津 Tianjin	0.076	0.083	0.084	0.089	0.092	0.092	0.090	0.088	0.095	0.094	0.097	0.096	0.090
西藏 Tibet	0.069	0.073	0.069	0.068	0.073	0.072	0.076	0.080	0.093	0.096	0.091	0.088	0.087
新疆 Xinjiang	0.154	0.149	0.159	0.169	0.174	0.185	0.199	0.179	0.190	0.206	0.220	0.210	0.208
云南 Yunnan	0.171	0.179	0.185	0.191	0.202	0.206	0.207	0.206	0.221	0.237	0.240	0.233	0.239
浙江 Zhejiang	0.253	0.263	0.264	0.272	0.274	0.287	0.284	0.276	0.276	0.275	0.277	0.279	0.284
重庆 Chongqing	0.124	0.131	0.133	0.140	0.142	0.146	0.150	0.141	0.147	0.149	0.151	0.150	0.150
均值 Average value	0.214	0.220	0.225	0.236	0.242	0.250	0.247	0.243	0.248	0.255	0.258	0.257	0.260

2010—2022年中国生产安全、质量安全、经济安全、消费安全和流通安全5个子系统综合评价得分的演进趋势如图1。

生产安全在5个子系统中得分最高,印证了生产安全作为粮食安全的基础支撑保持着较高水平。经济安全增幅较大,这主要得益于国家积极实施保费补贴等财政政策有力支持农业经济发展。质量安全得分变化较为平缓,但总体呈缓慢上升态势,表明在追求产量提高的同时中国也在逐步加强食物安全和质量监管,并计划到2025年实现对中国土壤全面普查,推进高标准农田建设确保粮食质量安全。消费安全和流通安全的较低水平状态反映了中国粮食安全体系中的薄弱环节。2015—2018年农村微观经济数据显示,中国农村低收入家庭的

卡路里摄入与微量营养素吸收远低于高收入群体^[21]。一方面,城乡收入差距限制了农村居民对多样化、营养丰富食物的获取。另一方面,随着农业生产向专业化、规模化转型,主产区与主销区的跨区域流通压力凸显^[22]。物流基础设施建设尚存在改进空间,特别是在农村和偏远地区,需要抓好粮食生产储备运输体系建设,促进城乡食物资源的有效分配。因此,提高农村居民收入水平、改善物流基础设施、优化供应链管理对于提升粮食安全水平意义重大。

3.2 基于不同方法的模型预测效果评价

将2010—2022年各省份粮食安全数据集按照2:8的比例划分为测试集和训练集,采取网格搜索结合五折交叉验证方法优化参数。在进行参数调优后,8种机器

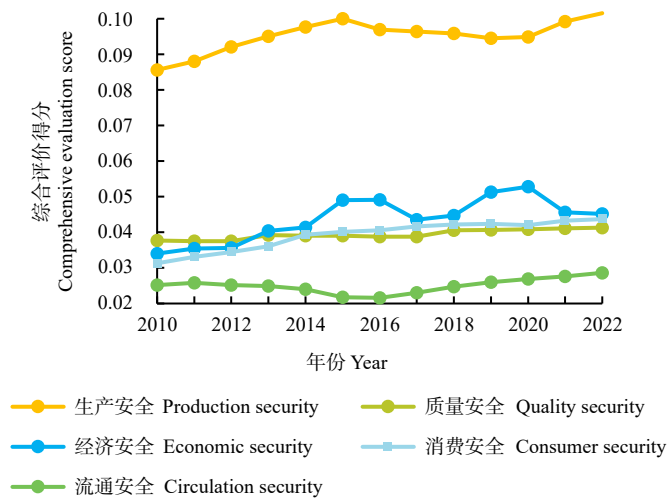


图 1 2010-2022年中国粮食安全子系统评价得分演进趋势

Fig.1 Evolution trend of China's food security subsystem evaluation score from 2010 to 2022

学习模型的性能显著提高,预测效果如表3。XGBoost的 R^2 为0.983接近于1, RMSE和MAE分别为0.012和0.008数值最小,预测效果较为理想。因此,本研究将选择使用XGBoost模型作为主要分析工具。

3.3 基于SHAP的可解释性分析

为解决机器学习的黑箱问题,量化评估多因素对于中国粮食安全水平的影响,利用SHAP值对变量重要性进行排序。图2反映不同变量对模型预测

表3 机器学习模型预测效果评价

Table3 Evaluation of machine learning model prediction effect

机器学习方法 Machine learning method	决定系数 R^2	均方根 误差 RMSE	平均决定 误差 MAE	机器学习方法 Machine learning method	决定系数 R^2	均方根 误差 RMSE	平均决定 误差 MAE
决策树 Decision tree	0.980	0.014	0.009	极限梯度提升 XGBoost	0.983	0.012	0.008
随机森林 Random forest	0.979	0.015	0.009	轻量级梯度提升 LightGBM	0.987	0.011	0.007
梯度提升决策树 GBDT	0.986	0.012	0.008	支持向量回归 SVR	0.673	0.057	0.045
自适应提升 AdaBoost	0.982	0.013	0.009	K近邻算法 KNN	0.980	0.014	0.010

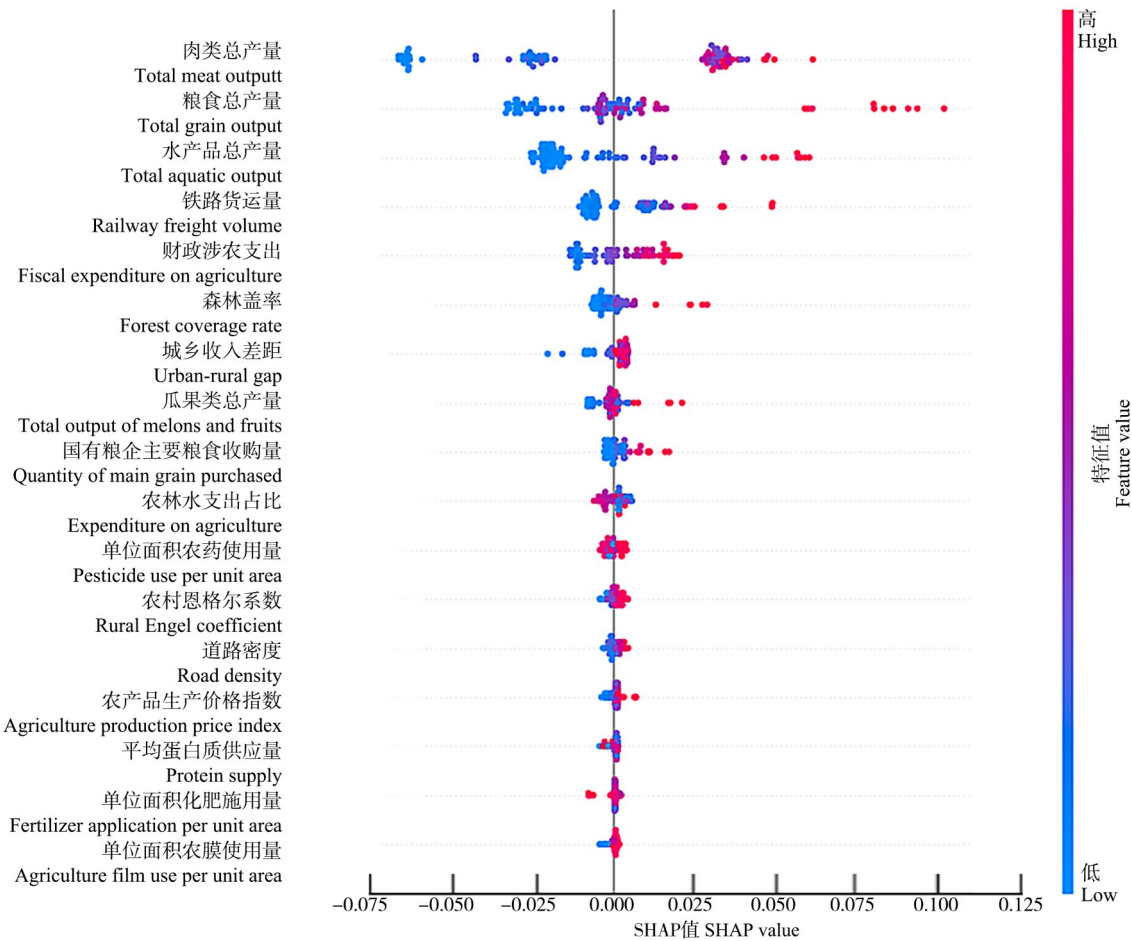


图2 SHAP特征分析概要图

Fig. 2 SHAP feature analysis summary diagram

值的重要性。肉类总产量、粮食总产量、水产品总产量、铁路货运量和财政涉农支出等因素对粮食安全水平提供正向贡献,表明这些变量对提升中国粮食安全水平产生显著积极作用。城乡收入差距、单位面积农药使用量和农村恩格尔系数等因素与负SHAP值关联,表明城乡收入差距可能削弱粮食安全。FAO数据显示,中国在2021年约有10.9%人口无法负担2.983美元/天/人的健康膳食成本。较大的收入差距限制了低收入群体对食品的获取能力,从而对粮食安全产生负面影响^[23]。其次,农药、化肥等化学合成物的过量施用会对环境和人类健康造成长期影响,制约农业和粮食生产的可持续发展^[24]。此外,恩格尔系数是衡量食品支出在总消费中所占比重的指标。在农村地区,较高的恩格尔系

数表明居民将较大比例的收入用于食品消费,这限制了其对多样化食品的获取,从而影响营养均衡和粮食安全^[25]。

3.4 基于XGBoost重构的中国粮食安全水平评价

通过XGBoost计算的权重对中国粮食安全水平进行重新评估,结果如表4所示。2022年,中国粮食安全水平排名靠前的省份有山东(0.682)、河南(0.519)、四川(0.433)、广东(0.416)、湖南(0.406)、安徽(0.369)、湖北(0.359)、辽宁(0.359)、黑龙江(0.359)和河北(0.348)。与传统的多元线性回归相比,通过XGBoost重构的中国粮食安全水平演变趋势更为合理,可以更清晰地认识到中国各省份在粮食安全方面的动态变化,为未来的政策制定和资源配置提供重要参考依据。

表4 基于XGBoost重构的中国粮食安全水平评价

Table4 Evaluation of food security in China based on XGBoost reconstruction

省份 Province	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	2021 年	2022 年
安徽 Anhui	0.297	0.300	0.315	0.321	0.331	0.339	0.319	0.332	0.337	0.332	0.331	0.359	0.369
北京 Beijing	0.044	0.044	0.043	0.045	0.043	0.042	0.039	0.038	0.039	0.034	0.032	0.033	0.033
福建 Fujian	0.223	0.227	0.239	0.250	0.258	0.266	0.272	0.282	0.285	0.290	0.295	0.309	0.315
甘肃 Gansu	0.072	0.072	0.079	0.082	0.085	0.087	0.086	0.087	0.091	0.092	0.099	0.111	0.117
广东 Guangdong	0.364	0.369	0.378	0.379	0.380	0.383	0.381	0.384	0.390	0.380	0.378	0.404	0.416
广西 Guangxi	0.280	0.285	0.298	0.307	0.311	0.313	0.313	0.308	0.315	0.297	0.300	0.326	0.334
贵州 Guizhou	0.125	0.120	0.130	0.137	0.142	0.145	0.145	0.148	0.151	0.151	0.153	0.160	0.165
海南 Hainan	0.091	0.094	0.100	0.105	0.106	0.107	0.107	0.102	0.104	0.099	0.095	0.099	0.101
河北 Hebei	0.295	0.302	0.317	0.326	0.336	0.335	0.329	0.341	0.337	0.324	0.321	0.341	0.348
河南 Henan	0.472	0.476	0.497	0.512	0.522	0.530	0.522	0.514	0.522	0.480	0.473	0.506	0.519
黑龙江 Heilongjiang	0.243	0.256	0.268	0.278	0.286	0.290	0.286	0.327	0.323	0.319	0.328	0.355	0.359
湖北 Hubei	0.300	0.304	0.323	0.340	0.350	0.354	0.349	0.359	0.358	0.323	0.306	0.359	0.369
湖南 Hunan	0.343	0.344	0.361	0.366	0.382	0.383	0.377	0.382	0.384	0.350	0.350	0.398	0.406
吉林 Jilin	0.199	0.209	0.220	0.228	0.227	0.230	0.230	0.237	0.227	0.228	0.224	0.245	0.253
江苏 Jiangsu	0.327	0.336	0.351	0.353	0.356	0.355	0.347	0.343	0.337	0.315	0.314	0.331	0.339
江西 Jiangxi	0.242	0.248	0.260	0.267	0.278	0.278	0.277	0.274	0.274	0.263	0.259	0.286	0.294
辽宁 Liaoning	0.313	0.324	0.335	0.346	0.342	0.348	0.352	0.327	0.316	0.319	0.324	0.355	0.359
内蒙古 Inner Mongolia	0.186	0.195	0.202	0.209	0.213	0.211	0.216	0.233	0.241	0.243	0.242	0.251	0.255
宁夏 Ningxia	0.035	0.036	0.037	0.040	0.041	0.041	0.041	0.042	0.043	0.043	0.044	0.046	0.047
青海 Qinghai	0.018	0.019	0.020	0.022	0.023	0.024	0.025	0.025	0.026	0.027	0.026	0.027	0.028
山东 Shandong	0.579	0.590	0.621	0.630	0.637	0.649	0.641	0.681	0.673	0.605	0.620	0.664	0.682
山西 Shanxi	0.084	0.087	0.093	0.100	0.104	0.100	0.099	0.106	0.112	0.113	0.119	0.135	0.140

表4(续)

省份 Province	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	2021 年	2022 年
陕西 Shaanxi	0.108	0.110	0.115	0.122	0.125	0.125	0.123	0.124	0.128	0.127	0.129	0.133	0.138
上海 Shanghai	0.027	0.027	0.027	0.026	0.026	0.025	0.023	0.024	0.024	0.024	0.022	0.022	0.021
四川 Sichuan	0.393	0.395	0.406	0.418	0.430	0.429	0.427	0.410	0.420	0.376	0.394	0.424	0.433
天津 Tianjin	0.030	0.036	0.037	0.040	0.040	0.040	0.040	0.035	0.036	0.034	0.034	0.035	0.035
西藏 Tibet	0.021	0.022	0.022	0.023	0.023	0.023	0.024	0.026	0.026	0.027	0.027	0.025	0.026
新疆 Xinjiang	0.100	0.101	0.111	0.118	0.126	0.133	0.137	0.132	0.132	0.141	0.145	0.156	0.161
云南 Yunnan	0.207	0.213	0.226	0.235	0.246	0.249	0.250	0.264	0.272	0.266	0.272	0.302	0.318
浙江 Zhejiang	0.212	0.220	0.225	0.225	0.221	0.216	0.211	0.204	0.200	0.193	0.194	0.201	0.206
重庆 Chongqing	0.133	0.135	0.139	0.145	0.149	0.150	0.150	0.135	0.139	0.131	0.131	0.146	0.149
均值 Average value	0.205	0.210	0.219	0.226	0.230	0.232	0.230	0.233	0.234	0.224	0.225	0.243	0.249

4 稳健性检验

为确保实证结果的稳健性,本研究将分别基于XGBoost和SHAP算法排名前10的特征重要

性进行对比分析,结果如表5所示。肉类总产量、粮食总产量和水产品总产量排在前3位的预测结果仍然成立,可见本研究的实证结果较为稳健。

表5 XGBoost和SHAP算法的特征重要性对比
Table5 Comparison of the importance of XGBoost and SHAP features

排序 Rank	XGBoost模型 XGBoost model		SHAP算法 SHAP algorithm		熵值法 Entropy method	
	特征 Feature	值 Value	特征 Feature	值 Value	特征 Feature	权重 Weight
1	肉类总产量	0.501	肉类总产量	0.037	国有粮企主要粮食收购量	0.166
2	粮食总产量	0.214	粮食总产量	0.024	水产品总产量	0.158
3	水产品总产量	0.088	水产品总产量	0.022	铁路货运量	0.138
4	森林覆盖率	0.067	铁路货运量	0.010	果蔬类总产量	0.123
5	果蔬类总产量	0.045	财政涉农支出	0.009	粮食总产量	0.077
6	财政涉农支出	0.020	森林覆盖率	0.004	蛋白质供应	0.072
7	城乡收入差距	0.019	城乡收入差距	0.004	肉类总产量	0.068
8	铁路货运量	0.018	果蔬类总产量	0.003	森林覆盖率	0.050
9	农林水支出占比	0.013	国有粮企主要粮食收购量	0.002	财政涉农支出	0.042
10	单位面积农药使用量	0.003	农林水支出占比	0.002	农林水支出占比	0.026

5 结论与建议

5.1 结论

基于熵值法构建“大食物观”下2010—2022年

中国粮食安全水平评价指标体系,选取XGBoost算法与SVR、GBDT、KNN等7种机器学习模型进行综合比较,得到XGBoost模型预测效果更为理想。进一步地,为深入探究粮食安全水平各影响因素的

具体作用,采用SHAP方法进行剖析,结论如下:

1)通过熵值法测算,2010—2022年中国粮食安全水平总体上呈先下降后上升的态势。截至2022年,粮食安全水平排名靠前的省份有山东、河南、黑龙江、江苏、广东、内蒙古、湖北、辽宁、湖南和安徽;从阶段性演进视角看,粮食安全水平在2012—2015年和2018—2019年2个时间阶段增长明显,增长率分别为11.11%和2.82%。

2)采用XGBoost模型测算后的中国各省份粮食水平排名显示动态变化,靠前的省份有山东、河南、四川、广东、湖南、安徽、湖北、辽宁、黑龙江和河北。东北地区排名整体下降,反映保障粮食安全除关注粮食产量外,需要更加重视大食物观下的肉类和水产品等农产品供给。

3)从SHAP贡献值来看,肉类总产量对粮食安全的影响最大,其次是粮食总产量和水产品总产量。随着人们饮食结构变化,肉类和其他食品的消费比例上升,提升肉类产量可有效提高人们的营养水平和食品多样性,粮食本身的直接消费可能有所减少,但依然保持基础地位,水产品则为人们提供了其他重要的蛋白质来源。

4)从粮食安全的关联因素来看,影响中国粮食安全水平的关键因素依次为肉类总产量、粮食总产量、水产品总产量、铁路货运量、财政涉农支出、森林覆盖率、城乡收入差距、果蔬类总产量、国有粮企主粮收购量和农林水支出占比,其中肉类总产量、粮食总产量和水产品总产量始终排名前3位,肉类总产量是“大食物观”下影响中国粮食安全水平的最重要因素。

5.2 政策建议

1)推动畜牧业可持续发展,保障肉类总产量。应通过政策引导,加大资源投入,加强科技创新与技术推广,鼓励研发和应用智能化养殖、动物营养优化等先进技术,以提升畜禽生产效率,降低资源消耗和环境负荷,从而实现畜牧业的高效、绿色发展。

2)提高粮食生产效率,稳定粮食总产量。应进一步推进土地保护与耕地质量提升,出台保护耕地的相关政策防止过度开发和土地退化。推广多元化粮食种植,鼓励种植杂粮、豆类等非主粮作物,以提升整体食物生产的多样性。同时,推广生态农业和绿色农业,减少化肥和农药的使用,从而提升粮

食质量和保障农业生态环境可持续性发展。

3)加强水产养殖发展,提升水产品总产量。应大力推广智能水产养殖技术,优化水域资源利用,提高养殖效率。同时,通过科技创新降低疾病风险 and 环境污染,推动水产养殖的绿色发展。提升冷链物流能力,完善从生产到消费的供应链体系,确保各地水产品的稳定供应。

4)加大财政涉农支出,支持粮食安全保障。优化财政资金的使用结构,重点支持现代农业技术推广、粮食储备和流通基础设施建设,确保资金投向粮食安全的关键环节。同时,扩大涉农信贷和保险支持,推动农户信贷和农业保险体系建设,帮助农民应对自然灾害和市场波动等风险,保障农业生产的连续性与稳定性。

参考文献 References

- [1] 武舜臣,赵策,胡凌啸. 转变中的粮食安全观:理论期待与新粮食安全观的构建[J]. 农业经济问题,2022(3):17-28
Wu S C, Zhao C, Hu L X. Food security concept in transition: Theoretical expectation and construction of new food security concept [J]. *Issues in Agricultural Economy*, 2022(3): 17-28 (in Chinese)
- [2] 毛瑞男,邢浩特. 大食物观下我国粮食安全保障路径研究[J]. 学习与探索, 2024(2):127-135
Mao R N, Xing H T. Research on the path of food security in China from the perspective of big food concept[J]. *Study & Exploration*, 2024(2): 127-135 (in Chinese)
- [3] 康丽娜. 新形势下中亚粮食安全问题:现状、成因与路径选择[J]. 中国农业大学学报,2024,29(1):258-270
Kang L N. Food security in central Asia under the new situation: Current situation, causes and path selection [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(1): 258-270 (in Chinese)
- [4] Shakeel A. Food security: Theorizing the evolution and involution of the concept[J]. *Arab World Geographer*, 2018,21(1):58-82
- [5] Ashby S, Kleve S, McKechnie R, Palermo C. Measurement of the dimensions of food insecurity in developed countries: A systematic literature review[J]. *Public Health Nutrition*, 2016,19(16): 2887-2896
- [6] Masih J, Sharma A, Patel L, Gade S. Indicators of food security in various economies of world[J]. *Journal of Agricultural Science*, 2017,9 (3):254-262
- [7] 雷勋平, Robin QIU. 基于熵权TOPSIS模型的中国粮食安全评价及障碍因子诊断[J]. 中国农业大学学报,2022,27(12):1-14
LEI X P, Robin QIU. Evaluation of food security in China based on entropy TOPSIS model and the diagnosis of its obstacle factors[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2022, 27(12): 1-14 (in Chinese)
- [8] 崔明明,聂常虹. 基于指标评价体系的我国粮食安全演变研究[J]. 中国科学院院刊,2019,34(8):910-919
Cui M M, Nie C H. Study on food security in China based on evaluation index system [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2019, 34(8): 910-919 (in Chinese)
- [9] 杨川,卢新海,许进龙. 基于“大食物观”的中国粮食安全水平评价与动态演

- 进[J]. 经济地理, 2024, 44(2): 166-174
- Yang C, Lu X H, Xu J L. Evaluation and dynamic evolution of food security level based on big food concept[J]. *Economic Geography*, 2019, 44(2): 166-174 (in Chinese)
- [10] 荣志杰, 姜启军, 牛亮, 周然. 大食物观下中国省级粮食安全评价研究[J]. 价格理论与实践, 2023(7): 35-41, 110
- Rong Z J, Jiang Q J, Niu L, Zhou R. A study on evaluation of provincial food security in China under the perspective of "All-encompassing approach to Food"[J]. *Price: Theory & Practice*, 2023(7): 35-41, 110 (in Chinese)
- [11] 张小允, 鲍洁, 许世卫. 基于熵权TOPSIS模型的中国粮食安全评价研究[J]. 中国农业资源与区划, 2023, 44(4): 35-44
- Zhang X Y, Bao J, Xu S W. Research on the evaluation of China's food security on entropy weight TOPSIS model [J]. *China Agricultural Resources and Regional Planning*, 2019, 44(4): 35-44 (in Chinese)
- [12] 周立, 罗建章, 方平. 21世纪中国的食物安全与食物主权[J]. 中国农村经济, 2022(10): 2-23
- Zhou L, Luo J Z, Fang P. China's food security and food sovereignty in the 21st century[J]. *China Rural Economy*, 2022(10): 2-23 (in Chinese)
- [13] 吴琳敏, 林以恒, 郑焜, 范水生, 毛丽玉, 魏秀林. 大食物观视角下森林生态产品价值实现路径研究[J]. 林业经济问题, 2023, 43(6): 586-595
- Wu L M, Lin Y H, Zheng K, Fan S S, Mao L Y, Wei X L. The path of value realization of forest ecological products from the perspective of big food view [J]. *Issues of Forestry Economics*, 2023, 43(6): 586-595. (in Chinese)
- [14] 郭玲, 迟舒桐. 财政支农、乡村产业发展与乡村减贫[J]. 南开经济研究, 2023(5): 111-132
- Guo L, Chi S T. Fiscal expenditure on agriculture, rural industrial development and poverty reduction[J]. *Nankai Economic Research*, 2023 (5): 111-132 (in Chinese)
- [15] 孔凡斌, 阮华, 徐彩瑶. 粮食生产对城乡收入差距的影响[J]. 管理学报, 2023, 36(2): 1-9
- Kong F B, Ruan H, Xu C Y. Impact of grain production on urban-rural income gap[J]. *Journal of Management*, 2019, 36(2): 1-9 (in Chinese)
- [16] 罗洁霞, 许世卫. 中国居民蛋白质摄入量状况分析[J]. 农业展望, 2017, 13(10): 71-76
- Luo J X, Xu S W. Study on protein intake in China's residents [J]. *Agricultural Outlook*, 2017, 13(10): 71-76 (in Chinese)
- [17] 樊胜根, 张玉梅. 践行大食物观促进全民营养健康和可持续发展的战略选择[J]. 农业经济问题, 2023(5): 11-21
- Fan S G, Zhang Y M. The strategic option of implementing the greater food approach for national nutrition and health sustainable development [J]. *Issues in Agricultural Economy*, 2023(5): 11-21 (in Chinese)
- [18] 阮海波. 大食物观下种粮小农户迈向共同富裕的路径探赜: 基于优势视角的分析[J]. 当代经济管理, 2024, 46(3): 46-54
- Ruan H B. An exploration of the path of small grain farmers towards common prosperity under the perspective of big food concept: Analysis based on strength perspective [J]. *Contemporary Economic Management*, 2018, 46(3): 46-54 (in Chinese)
- [19] 国家统计局. 中国统计年鉴, 2023[M]. 北京: 中国统计出版社, 2023
- National Bureau of Statistics. *China Statistical Yearbook*, 2023 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2023 (in Chinese)
- [20] 国家统计局农村社会经济调查司. 中国农村统计年鉴, 2023[M]. 北京: 中国统计出版社, 2023
- Department of Rural Socio-economic Survey, National Bureau of Statistics. *China Rural Statistics Yearbook*, 2023 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2023 (in Chinese)
- [21] 高杨, 郑志浩. 不同补贴方式对中国农村低收入家庭食物安全改善效果比较[J]. 资源科学, 2021, 43(10): 1990-2002
- Gao Y, Zheng Z H. Comparison of the effects of different subsidy forms on food security of low-income rural households in China [J]. *Resources Science*, 21, 43(10): 1990-2002 (in Chinese)
- [22] 朱晶, 李天祥. 中国式现代化下的粮食安全: 目标任务、转型挑战与实现路径[J]. 学海, 2024(2): 85-97
- Zhu J, Li T X. Food security under Chinese-style modernization: Goals, challenges and paths [J]. *Academia Bimestris*, 2024(2): 85-97 (in Chinese)
- [23] 张谋贵. 要高度重视粮农收益下降问题[J]. 农村经济, 2020(9): 83-92
- Zhang M G. Highly focusing on the problems of declining income from gain growing farmers [J]. *Rural Economy*, 2020(9): 83-92 (in Chinese)
- [24] 魏后凯, 叶兴庆, 杜志雄, 樊胜根, 罗必良, 刘守英, 黄承伟. 加快构建新发展格局, 着力推动农业农村高质量发展: 权威专家深度解读党的二十大精神[J]. 中国农村经济, 2022(12): 2-34
- Wei H K, Ye X Q, Du Z X, Fan S G, Luo B L, Liu S Y, Huang C W. Accelerating the construction of a new development pattern and Promoting high-quality development of agriculture and rural areas: An in-depth interpretation by authoritative experts of the 20th national congress of the communist party of China [J]. *Chinese Rural Economy*, 2022(12): 2-34 (in Chinese)
- [25] 中国社会科学院农村发展研究所课题组, 魏后凯, 崔凯, 芦千文, 胡凌啸, 苏岚岚. 农业农村现代化: 重点、难点与推进路径[J]. 中国农村经济, 2024(5): 2-20
- Research Group of Rural Development Institute, Chinese Academy of Social Sciences, Wei H K, Cui K, Lu Q W, Hu L X, Su L. The modernization of agriculture and rural areas: Key points, difficulties, and promotion paths [J]. *Chinese Rural Economy*, 2024(5): 2-20 (in Chinese)

责任编辑: 王岩



第一作者简介: 王火根, 博士, 教授, 博士生导师, 江西农业大学经济管理学院教师, 主要研究方向为农业经济和粮食安全。主持完成国家自然科学基金项目3项(71263024, 71663030和71963018)。在《数量经济技术经济研究》《资源科学》《自然资源学报》《农业技术经济》《中国环境科学》等学术刊物发表论文50余篇。