



农产品监测预警模型集群构建理论方法与应用

许世卫, 邸佳颖, 李千琼, 庄家煜

(中国农业科学院农业信息研究所/农业农村部农业信息服务技术重点实验室/北京市农业监测预警工程技术研究中心, 北京 100081)

摘要:【目的】农产品供给与需求的准确分析测定, 是农业监测预警能力提升的重要表现。构建产品多品种多环节模型集群理论方法, 可高效解决单一环节或单一模型难以解决的分析技术难题。【方法】在农产品供需的重要要素即生产量、消费量、贸易量、价格等分析预测过程中, 针对农产品品种间关联性强, 自然、社会、经济诸多影响因素纠缠, 模型多变量强耦合、非线性、参数时变的特点, 提出多品种农产品“因素分类解耦、参数转用适配”方法, 以构建多时空维度的监测预警模型集群。【结果】利用“因素分类解耦、参数转用适配”技术方法, 研究构建了不同农产品的生产类、消费类、贸易类、价格类的模型集群。这些模型集群可用于对不同时空维度的水稻、玉米、小麦、肉类等主要农产品供需的长中短期的分析预测, 支撑形成了农业展望中的主要农产品平衡表, 其中主要农产品全国年度生产量6年平均预测精度高于97%。【结论】研究提出的农产品监测预警模型集群构建理论及其方法, 有效提升了农产品多品种模型集群的求解效率和准确率, 增强了农产品供需分析预测的系统性与智能性, 为系统揭示农产品复杂的时空供需变化特征、促进农产品市场调控科学性和可预见性, 提供了新技术方法。

关键词: 农产品; 多品种; 供需预测; 因素分类解耦; 参数转用适配; 模型集群

The Methodology and Application of Agricultural Monitoring and Early Warning Model Cluster

XU ShiWei, DI JiaYing, LI GanQiong, ZHUANG JiaYu

(Agricultural Information Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Agri-Informatics, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Beijing Engineering Research Center of Agricultural Monitoring and Early Warning, Beijing 100081)

Abstract: 【Objective】The accurate prediction and evaluation of agricultural product supply and demand is an important manifestation for the improvement of agricultural monitoring and early warning capabilities. A multi-variety multi-link model cluster to construct that can efficiently solve analytical technical problems which are difficult to solve with single links or single models. 【Method】The methodology characterized by "factor classification decoupling, parameter conversion adaptation" for multi-variety agricultural products was proposed to build a multi-temporal dimension monitoring and early warning model cluster, which took into account the important factors of agricultural products supply and demand, namely production, consumption, trade volume, price, etc., the strong linkage among commodities, the entangled complex natural, social and economic factors, and the multivariate strong coupling, non-linear, time-varying characteristics of parameters in the model development. 【Result】The model clusters were developed covering production, consumption, trade and price for different agricultural products, based on the "factor classification decoupling, parameter conversion adaptation" methodology. These model clusters could be used to analyze and

收稿日期: 2020-06-03; 接受日期: 2020-07-14

基金项目: 农业部农业信息预警专项“中国农产品信息监测与预警模型系统”、中国农业科学院科技创新工程项目

联系方式: 许世卫, E-mail: xushiwei@caas.cn

project the supply and demand situation of major agricultural products including rice, corn, wheat and meat in different spatial and temporal dimensions, and to support the generation of major agricultural products balance sheets in the China Agricultural Outlook Report. The 6-year average forecast accuracy was higher than 97%. **【Conclusion】** The methodology of agricultural monitoring and early warning model cluster proposed in the paper has effectively improved the solution efficiency and accuracy of agricultural product multi-variety model clusters, enhanced the systematic and intelligent analysis and projection of agricultural supply and demand. The research provided a new technical method for systematically revealing the complex characteristics of supply and demand of agricultural products in time and space, and promoting the scientific and predictable regulation of agricultural products market.

Key words: agricultural products; multi varieties; supply and demand forecast; factor classification decoupling; parameter conversion and adaptation; model cluster

0 引言

【研究意义】建立粮食和主要农产品监测预警体系是国家食物安全的重要保障,而农产品生产、消费、贸易、价格等主要环节的精准量化分析预测是监测预警的关键^[1-2]。面临人口、资源、环境、气候及国内外复杂形势,研究构建农产品监测预警模型集群,高效全面分析预测农产品供需走势,将为国家农产品生产、储备、贸易等管理和调控提供重要参考依据,对保障农产品有效供给以及市场稳定均具有重要科学意义。**【前人研究进展】**农产品的产量、消费量、贸易量、价格等分析预测一直是国内外学术界关注的焦点,其预测方法已有广泛研究。部分学者分别对农产品的生产、消费、价格等单要素环节的影响因素分析,构建预测模型^[3-13]。作物生产,尤其是粮食产量分析预测对国家粮食安全具有重大意义,其研究较早、方法较多^[3-11],应用较早的方法主要有气象产量预测法、遥感技术预测法和统计动力学生长模拟法。陈锡康等^[4]研究提出了全国粮食产量的系统综合因素预测法,该方法利用了投入占用产出技术、考虑边际报酬递减的非线性预测方程和最小绝对和方法,预测提前期长(一般在半年以上),预测平均误差为产量的1.6%,预测精度高。在消费量预测上,针对单品种的预测较多,如猪肉消费量预测,影响我国猪肉消费量的主要因素有猪肉产量、餐饮业发展水平、牛羊肉价格指数等14个因素^[12]。通用类消费分析预测模型一般有4种:AIDS(近完美消费模型)、LES(线性支出模型)、Rotterdam模型、Double Log模型。价格预测上,影响农产品价格波动的因素(总供给与总需求角度)是多方面的,主要有生产因素、消费因素、政策因素、偶发因素等^[12-13],农产品的价格预测模型方法主要有时间序列模型、随机波动率模型、最小二乘

向量机模型等^[13-14]。针对农产品供需走势的预测,部分学者利用时间序列模型和灰色预测模型进行了分析和预测^[15-17]。例如,陈艳红等^[15]运用ARIMA模型对2012—2017年中国粮食供需预测,结果表明2012—2017年中国国内粮食供给将持续稳定增长,国内粮食需求波动增长。吕新业等^[16]利用移动平均法得出2020年中国稻谷、小麦和玉米产量和需求量。另外,一些学者和机构利用一般均衡模型和局部均衡模型对农产品供需进行了分析和预测^[18-25]。例如,黄季焜等^[18]采用全球贸易分析模型(GTAP)和中国农业政策分析与预测模型(CAPSim),设置不同情景对2020年中国粮食供需状况和粮食安全水平进行了预测。韩一军^[21]采用了基于产业形势的经验判断和动态一般均衡模型相结合的研究方法,对未来中国小麦供求和贸易形势进行预测。陆文聪等^[22-23]考虑了多品种关联以及区域因素的影响,构建了中国—世界农业区域市场均衡模型(CWARMEM),该模型是一个多市场多区域、以中国粮食问题为重点研究对象的全球农业市场政策分析模型,以此模型为基础研究得出中国的城市化对粮食自给的负面影响较小^[24]。国际上,一些发达国家主要研究机构和政府决策部门,均建立了较为成熟的农业政策分析模型。如美国农业部开发的Baseline模型(多国商品联结模型),可以分国家、分品种对农产品生产、消费、贸易和价格进行预测;OECD-FAO运用动态回归和局部均衡理论,联合研发了独具特色的AGLINK-COSIMO模型^[25],该模型系统涵盖50多个国家(地区)模型,对粮食、肉类、奶类、禽蛋、水产品及生物燃料等20多种主要农产品的生产、消费、价格和贸易等进行中长期(10年)基期预测和展望,并模拟、分析多种政策或其他外部冲击对各国及全球农产品市场的影响,该模型在引导全球农产品市场方面产生了较大的影响力。尽管这些模型研究定

量预判了中国未来主要农产品供求与贸易形势,但由于中国农产品供求问题的复杂性以及影响因素的可计量程度的差异,国际机构对中国农产品供需预测结果也往往存在一定的差异。【本研究切入点】农产品品种多、影响因素复杂、品种间关联性强,如何高效辨识分析农产品生产、消费、价格等的主导影响因素,并根据不同农产品模型参数的异同性高效构建预测模型,由此构建多品种分析模型集群,是我国多品种农产品生产、消费、贸易、价格等监测预警面临的难题。模型分析中,单品种或单因素建模,对于全面实现不同维度多品种农产品供需形势的分析预测仍具有局限性,综合考虑农产品品种、区域、时间尺度的影响因素复杂性、模型构建过程中的参数多样性与时变性,汇聚农产品多维影响因素,辨析不同农产品主导影响因素及关联因素,分析不同农产品影响因素的异同性,提升模型预测精准度和效率,是构建农产品生产量、消费量、贸易量、价格等一体化监测预警模型集群的重要研究方向。【拟解决的关键问题】本研究围绕农产品生产消费等供需分析预测过程中缺乏多品种、多因素、多模型汇聚技术,针对农产品多品种影响因素关联缺失、纠缠解析不清、模型参数时变性强等技术难题,通过模型集群构建方法的创新,提升对农业复杂系统预测分析的协同性与时效性,为提高农产品有效供给、实现农产品供需精准量化分析预测提供有效的技术方法。

1 材料与方法

1.1 研究对象

本研究涉及的农产品品类,主要包括水稻、玉米、小麦、大豆、蔬菜、水果、肉类等多种种植类和养殖类的产品^[2],在区域上包括全国及分省、县,在时间上包括短期、中期、长期。由于农产品供需影响因素复杂,本研究在构建农产品多品类、多区域、多时段的监测预警模型集群过程中,主要针对影响农产品生产、消费、价格、贸易等不同因素,解析模型外生变量复杂因素的纠缠关系,高效求解建模过程中不同应用场景的模型参数,以全面精准分析多品种多应用场景的农产品未来供需走势。

1.2 研究理论与方法

构建具有动态的、多市场和开放的多品种农产品生产、消费等监测预警模型,需应用经济学、农学、气象学及计算机等多学科知识。在构建和求解模型各

变量时,应充分考虑同一农产品供需之间关系和不同农产品供需之间关系的影响因素,以及不同品种模型参数在时空上的差异性。本研究主要应用“多因素分类解耦、多参数转用适配”技术方法,运用多元线性回归、套索回归(Lasso 回归)、岭回归及弹性网等算法,构建农产品多品种监测预警模型集群。

1.2.1 多因素分类解耦技术 本研究中,模型集群构建的前提是系统考虑各因素(x_i)对农产品供给或需求的影响。由于农业系统的复杂性,在模型集群构建过程中综合考虑了多种自然因素和社会因素的影响(表1)。针对农业过程复杂因素具有的多变量强耦合、非线性、参数时变特点,基于常规解耦控制技术的控制系统无法解决的问题,本研究应用“多因素分类解耦”方法,在模型的求解过程中反复多次采用校正输出、输入之间的关系,减弱甚至消除各个平衡方程的组成模型之间的相互关联,从而使系统简化为多个单输入单输出系统,用于解决模型集群构建中的复杂因素纠缠难题,并根据农产品不同品种影响因素的异同性,高效建立不同品种模型集群。

1.2.2 多参数转用适配方法 本研究所要构建的模型集群的应用场景和对象范围十分广泛,多参数转用适配技术使得多品种多维度的模型集群保持灵活性与简单易用性。该技术基于农产品模型中涉及的品种参数(α_i)、时间参数(β_i)、区域参数(γ_i),根据不同应用场景,灵活选择并确定参数及适用模型,显著提升了模型集群分析计算的精准度和广适性,通过计算机迭代算法确立的状态转移矩阵,实现模型集群中可调参数的智能转换,如在不同品种间(作物类、畜禽类)、区域尺度(国家级到省级、县级)、时间尺度(月度、年度、多年度)模型求解的高效转换适用。

1.3 数据来源

构建模型集群所需的基础数据,主要来自中国农产品监测预警系统(CAMES)数据资源库,包括国家相关部门发布的统计数据、市场监测数据和国际机构数等,主要来自中国国家统计局、农业农村部、商务部、自然资源部、海关总署、气象局等国内相关部门,也包括FAO、OECD、IFPRI、AMIS等国外机构数据。从时间维度看,数据包括了日度、月度、季度和年度数据;从种类上,数据包括宏观经济数据、生产数据、消费数据、价格数据、进出口贸易数据、资源和环境数据等;从品种上看,数据库包括

表 1 农产品监测预警模型集群构建需考虑的主要影响因素

Table 1 Main influencing factors to be considered in the construction of agricultural product monitoring and early warning model cluster

| 模型变量 Model variable f(x) | | 影响因素 Influence factor(x _i) |
|------------------------------------|----------|---|
| 生产量 Production quantity (QP) | 作物单产 | 气象单产 |
| | | 温度、日照时数、降水量等 |
| | | 投入单产 |
| | | 成本收益情况、费用和用工情况、化肥种子投入、科技等 |
| | | Input yield |
| | | Cost-benefit situation, expenses and employment situation, fertilizer and seed input, technology, etc. |
| | | 管理单产 |
| | | 投入政策、支持政策、保护政策、科技政策等 |
| | | Management yield |
| | | Input policy, support policy, protection policy, science and technology policy, etc. |
| 收获面积 Harvested area | 价格竞争面积 | 上一期投入产出效益、其他竞争农产品上一期投入产出效益、上一期种植面积等 |
| | | Price competition area |
| | | Input-output benefits of the previous period, input-output benefits of the previous period of other competitive agricultural products, planting area of the previous period, etc. |
| | 调查面积 | 调查问卷等 |
| | | Survey area |
| | | Questionnaire, etc. |
| | 遥感面积 | NVDI 植被指数、物候期等 |
| | | Remote sensing area |
| | | NVDI vegetation index, phenology, etc. |
| | 畜禽产量 | 生育期因素、效益成本、管理因素、调查因素等 |
| 消费量 Consumption quantity (QC) | | Livestock production |
| | | Fertility factors, benefit costs, management factors, survey factors, etc. |
| | 食用（口粮）消费 | 人口数、人均收入、均衡价格等 |
| | | Food use consumption |
| | | Population, per capita income, equilibrium price, etc. |
| | 工业消费 | 生产价格、人均国民生产总值和工业增长率等 |
| | | Industrial consumption |
| | | Production prices, GDP per capita, industrial growth rate, etc. |
| | 饲用消费 | 畜产品产量、料肉比、饲料价格、投入品和产出品价格 |
| | | Feed consumption |
| 贸易量 Trade (T) | | Production of livestock products, feed-to-meat ratio, feed prices, prices of inputs and outputs |
| | 种用消费 | 播种面积、每亩种子用量 |
| | | Seed consumption |
| | | Seeded area, seed per mu |
| | 损耗 | 产量、损耗系数 |
| | | Wastage |
| | | Production, wastage factor |
| | 进出口量 | 国内外价差、关税、进出口配额、产需缺口和汇率等 |
| | | Import and export |
| | | Domestic and foreign price differences, tariffs, import and export quotas, production and demand gaps, exchange rates, etc. |
| 价格 Price (P) | 均衡价格指数 | 生产因素、消费因素、政策因素、偶发因素等 |
| | | Equilibrium price index |
| | | Production factors, consumption factors, policy factors, incidental factors, etc. |

了粮食类、油料类、糖料类、蔬菜类、水果类、畜禽及肉类、蛋类、奶类、水产品、棉麻类和其他农产品类数据^[26]。

1.4 数据处理与模型验证

利用因素分类解耦方法，明确农产品生产、消费、贸易、价格等的主要影响因素。因农产品供给端和需求端的数据来源众多、数据量庞大、模型类型多样，数据处理及分析采用了较多统计方法。基准数据处理上，因录入错误或系统故障产生的问题数据、因数据源不完整造成的数据缺失等情况，在进行统计分析之前需要进行标准化、完备性和可靠

性处理，以避免因原始数据异常导致的分析预测结果误差。为了消除指标之间的量纲影响，对不同评价指标所具有不同的量纲和量纲单位的情况进行数据标准化处理，以解决数据指标之间的可比性。对不完整的数据集进行处理，以保证分析结果的可靠性，分别采取均值、热卡、k 最近邻、回归等方法进行填充，采用比例、趋势等技术对数据拆分或合并。对异常数据进行判定和处理，主要包括拉依达准则（3δ）、肖维勒准则（Chauvenet）、狄克逊准则（Dixon）、罗马诺夫斯基准则（t 检验）和格拉布斯准则（Grubbs）等。

表 2 模型集群生产、消费、价格和贸易通用模型形式及变量说明

Table 2 Cluster model production, consumption, price and trade general model form and variable description

| 模型形式 | 主要变量 | | 主要参数 |
|-------------------------------------|---|---|---|
| Model form | Main variable | | Main parameter |
| 生产量 Production quantity (QP) | $QP_{crop}=f(Y_m, Y_i, Y_{ma}, HA)$ | QP_{crop} : 作物产量; Y_m : 气象单产; Y_i : 投入单产; Y_{ma} : 管理单产; A_s : 收获面积 QP_{crop} : Production quantity of crop; Y_m : Meteorological yield; Y_i : Input yield; Y_{ma} : Management yield; HA : Harvested area | |
| | $Y_m=\delta(T, S, P)$ | T : 温度; S : 日照时间; P : 降水量 T : Temperature; S : Sunshine duration; P : Precipitation. | δ : 气象因子系数 δ : Meteorological factor coefficient |
| | $Y_i=\theta(CE, FE, FI)$ | CE : 成本收益因子; FE : 费用和用工因素; FI : 肥料投入因素 CE : Cost-benefit factors; FE : Cost and employment factors; FI : Fertilizer input factors | θ : 投入因子弹性系数 θ : Input factor elastic coefficient |
| | $Y_{ma}=\mu(Pol, Man)$ | Pol : 政策指数; Man : 政策因素 Pol : Policy indexes; Man : Policy factors | μ : 政策系数 μ : Policy coefficient |
| | $HA=\varepsilon(P, P_{subs})$ | P : 作物价格指数; P_{subs} : 竞争作物价格指数 P : Crop price index; P_{subs} : Competitive crop price index | ε : 竞品价格指数系数 ε : Competitive price index coefficient |
| | $QP_{animal}=f(YLD \times SL \times CR)$ | YLD : 单只动物出栏活重; SL : 动物出栏数量; CR : 动物出栏率 YLD : Single animal slaughter live weight; SL : Number of animals slaughtered; CR : Animal slaughter rate | 畜禽产量系数 Livestock production coefficient |
| 消费量 Consumption quantity (QC) | $QC=g(FC, IC, FEC, SEC, W)$ | FC : 食用(口粮)消费; IC : 工业消费; FEC : 饲用消费; SEC : 各消费细项系数 种用消费; W : 损耗 FC : Food use consumption; IC : Industrial consumption; FEC : Feed items use consumption; SEC : Seed use consumption; W : Wastage | Coefficients of various consumption |
| 贸易量 Trade (T) | $IM=h(QP, QC)$ $EX=f(QP, QC)$ | QP : 产量; QC : 消费量 QP : Production quantity; QC : Consumption quantity | 产量、消费量、价格影响系数 Coefficient of influence of production, consumption, prices |
| 价格 Price (P) | $\{\bar{P} \forall S_i(\bar{P})-D_i(\bar{P})=0\}$ | \bar{P} : 均衡价格向量; S_i : 供给端价格向量; D_i : 需求端价格向量 \bar{P} : Equilibrium price vector; S_i : Supply price vector; D_i : Demand price vector | 多产品均衡价格指数 Multi-product equilibrium price Index |

模型集群的验证，将历史数据最新的 1—3 年作为验证，之前的数据用于建模训练，可以将真实值和模型预测值做对比验证。在短期预测中，要求模型的预测效果至少要比原始序列平移后的进度要高，原始序列的平移后结果可以作为模型的一个基准参考标准。模型集群构建过程中，所涉及的线性模型预测结果评价主要包含 4 种指标，分别为均方误差（MSE）、平均绝对值误差（MAE）、可释方差（EV）和决定系数（R²），如多元线性回归的气象模型中，这 4 个指标都会用到，主要用于相似模型之间的效果对比。在非线性回归模型中，主要采用平均绝对百分偏差率（MAPE）指标用于判断模型的效果，其值越小越好。具体指标计算如下：

（1）均方误差

$$MSE(y, \hat{y}) = \frac{1}{n_{samples}} \sum_{i=0}^{n_{samples}-1} |y_i - \hat{y}_i|^2$$

（2）平均绝对值误差

$$MAE(y, \hat{y}) = \frac{1}{n_{samples}} \sum_{i=0}^{n_{samples}-1} |y_i - \hat{y}_i|$$

（3）解释方差，当有多个变量时，分析单个变量与总方差的方差比为变量的解释方差。

$$EV = 1 - \frac{Var\{y - \hat{y}\}}{Var\{y\}}$$

（4）决定系数（R²，拟合优度），表征回归方程在多大程度上解释了因变量的变化，或者说方程对观测值的拟合程度如何。单纯用残差平方和会受到因变量和自变量绝对值大小的影响，不利于在不同模型之间进行相对比较，用决定系数可以解决这一问题。

$$R^2(y, \hat{y}) = 1 - \frac{\sum_{i=0}^{n_{samples}-1} |y_i - \hat{y}_i|^2}{\sum_{i=0}^{n_{samples}-1} |y_i - \bar{y}|^2}$$

(5) 平均绝对百分偏差率 (*MAPE*), 是评价模型拟合度的重要指标。当 *MAPE* 在正负 15% 范围内, 可认为是能够接受的预测结果。

$$MAPE = \left(\sum_{i=1}^n \left(\frac{|y_i - \hat{y}_i|}{y_i} \right) \right) \times 100\% / N$$

2 结果

2.1 模型集群的构成

农产品监测预警模型集群, 主要围绕生产量、消费量、贸易量和价格要素构建 (表 2—3)。其中, 农产品生产量模型集群围绕生产量的影响因素, 构建了基于气象类模型、投入类模型和管理类模型的农作物单产预测模型, 和基于价格竞争面积、调查面积和遥感面积预测的农作物面积预测模型, 以及畜禽类农产品的生产量模型。消费量模型集群根据不同农产品的消费构成以及影响因素的不同 (如小麦分为口粮消费、工业消费、饲用消费、种用消费、损耗), 在消费上实现了精细化的消费构成分析, 在预测口粮消费量时, 因城镇和农村的食物消费不同, 需求模型中口粮消费分为城镇消费量和农村消费量, 且二者消费量需要分别计算, 在消费量的预测中充分考虑了人口、收入、GDP 等影响因素, 以及收入弹性、价格弹性对消费量的影响, 尽量少的考虑人为的变化率、增长率的设定, 使得模型预测结果具有较强的客观性。进出口预测主要是通过不同农产品的国内外价差、进出口配额、产需缺口和汇率等因素计算得到。价格模型是隐含在供给、需求的模型之中, 通过多品种多市场的均衡模型方程的迭代方式解出。

因农产品监测预警模型集群的构建涉及农产品品种多, 本文中以小麦为例, 介绍其构建过程。小麦模型集群包括供需总的平衡方程, 即总供给等于总需求, 总需求包括生产量、进口量和期初库存, 总供给包括消费量、出口量和期末库存, 因涉及变量较多, 每个变量影响因素复杂, 需逐项分解进行模型构建 (表 3)。首先建立小麦当期的供需平衡方程, 再建立总供给和总需求的各分解项方程, 最后对其中的生产量、进口量和消费量、出口量, 在充分考虑其影响因素多样性基础上, 建立不同变量的预测模型。参照小麦模型集群的构建原则, 可建立其他作物类或畜禽类农产品的模型集群。

2.2 模型集群的求解

本研究模型集群的构建是在一定的宏观经济条

件假设和农业生产条件假设基础上, 对农产品的生产、消费、贸易进行预测。这些假设条件作为模型的外生变量, 主要包括国内外经济发展和人口变化、城镇化率、城乡居民收入和消费、国际原油价格和人民币汇率等宏观经济条件假设, 农业劳动力、耕地资源、水资源、气象条件、科技进步和政策变化等农业生产条件假设, 同时还包括畜产品与饲用粮之间的转换关系, 农产品之间的交叉替代关系等^[26]。

模型集群的求解需要确定模型所有的参数, 即大量回归方程的系数。参数的确定, 一部分是通过大量历史数据, 根据确定的回归方程进行计算得出, 如不同品种城镇和农村的消费量分离计算, 先预测出总消费量, 再用历史上城镇和农村的消费量比例进行分离 (最近 5 年占比的移动平均); 还有一部分参数, 如进出口量通过历史趋势、当前国际形势和对未来的预估, 可综合各品种研究领域的专家调查给出的预测值得出 (表 4)。

在模型集群构建与求解过程中, 一方面充分考虑农业与非农业、农业内部之间的各产业联系, 包括生产和消费的联系。另一方面充分考虑了品种间的竞争和替代关系, 如在构建生产量模型集群中的面积预测模型时, 水稻、玉米、大豆一定条件下存在互相竞争关系, 在这几个分品种面积预测模型构建时, 与竞争品进行了耦合; 预测出栏量时, 猪、牛、羊、禽类互相竞争, 在这几个分品种出栏量预测模型构建时, 与竞争品进行了耦合。在构建消费量模型集群时, 小麦、水稻、玉米相互替代, 蔬菜、水果相互替代, 猪、牛、羊、禽肉相互替代, 均在各自品种的食用消费预测时, 与替代品进行了关联耦合求解。另外, 生猪的生产量与玉米的饲用消费也有关联。具体在小麦的模型集群中 (表 3), 除了需要求解的小麦平衡价格外, 还有其他关联品种的均衡价格, 如大豆、玉米、水稻、猪肉、牛肉、羊肉、禽肉。在品种间, 多参数转用适配技术主要体现在先解出猪肉、牛肉、羊肉、禽肉几个肉类品种的联合平衡表方程, 再将预测的肉量作为输入数据代入大豆、玉米、水稻几个农作物品种的联合平衡表方程, 解出有种植或养殖竞争、消费替代的农产品。在模型求解上, 在单产预测中使用 Lasso 回归模型, 该模型是一个用于估计稀疏参数的线性模型, 适用于参数数目缩减^[27]。因模型集群存在大量的非线性方程组并且模型变量耦合度高, 使得计算量是传统的线性方程组的指数倍,

表 3 利用多因素分类解耦技术构建的小麦监测预警模型集群方程形式

Table 3 Cluster equation form of wheat monitoring and early warning model constructed by multi-factor classification decoupling technology

| 预测变量 Predicted variable | 模型方程形式 Model equation form | 变量说明 Variable description |
|---|---|--|
| 供需平衡 Supply- demand balance | $S_{WT,t} = D_{WT,t}$ | S_{WT} : 小麦总供给量 The total supply of wheat in the current period D_{WT} : 小麦总需求量 The total demand of wheat in the current period |
| 总供给 Supply (S) | $S_{WT,t} = QP_{WT,t} + IM_{WT,t} + OS_{WT,t}$ | QP_{WT} : 小麦生产量 Current production of wheat IM_{WT} : 小麦进口量 Current import of wheat OS_{WT} : 小麦期初库存 Opening stock of wheat |
| 生产量 Production quantity (QP) | $QP_{WT,t} = YLD_{WT,t} \times HA_{WT,t}$ | YLD_{WT} : 小麦单产 Wheat yield HA_{WT} : 小麦收获面积 Wheat harvested area |
| 单产 Yield (YLD) | $YLD_{WT,t} = w_1 Y_{m, WT, t} + w_2 Y_{i, WT, t} + w_3 Y_{ma, WT, t}$ | $Y_{m, WT}, Y_{i, WT}, Y_{ma, WT}$: 小麦气象单产、投入单产和管理单产 Current wheat meteorological yield, input yield and management yield w_1, w_2, w_3 : 小麦 Y_m, Y_i, Y_{ma} 单产对应的赋值系数 Corresponding value coefficients of Y_m, Y_i, Y_{ma} of wheat |
| 气象单产 Meteorological yield (Y_m) | $Y_{m, WT, t} = w_1 Y_{m, WT, t}^T + w_2 Y_{m, WT, t}^S + w_3 Y_{m, WT, t}^P$ | $Y_{m, WT, t}^T, w_2 Y_{m, WT, t}^S, w_3 Y_{m, WT, t}^P$: 小麦温度单因素气象单产、日照单因素气象单产以及降水量单因素气象单产 Current wheat temperature single factor meteorological yield, sunshine single factor meteorological yield and precipitation single factor meteorological yield w_1, w_2, w_3 : 小麦 3 个气象单因素模型对应的赋值系数 Corresponding value coefficients of each meteorological yield model |
| 投入单产 Input yield (Y_i) | $Y_{i, WT, t} = \log(\alpha^{Y_i} + \beta_1^Y \ln P_{t-1} + \beta_2^Y \times \ln CE_t^e + \beta_3^Y \ln FE_t^e + \beta_4^Y \ln FF_t^e)$ | P_{t-1} : 小麦上一期价格 Wheat price in the previous year CE_t^e : 成本收益情况因素向量 Cost-benefit factor vector FE_t^e : 费用和用工情况因素向量 Cost and employment factor vector FF_t^e : 肥料投入因素向量 Fertilizer input factor vector |
| 管理单产 Management yield (Y_{ma}) | $Y_{ma, WT, t} = (1 + \gamma_t) \times YLD'_{WT, t}$ | YLD'_{WT} : 小麦基础单产 Wheat basic yield γ : 管理因子赋值系数 Management factor assignment coefficient |
| 面积 Harvested area (HA) | $HA_{WT, t} = (w_1 HA_{competition, t} + w_2 HA_{survey, t} + w_3 HA_{rs, t}) - k AD_t$ | $HA_{competition}$: 小麦价格竞争面积 Price competition area of wheat HA_{survey} : 小麦调查面积 Survey area of wheat HA_{rs} : 小麦遥感面积 Remote sensing area of wheat w_1, w_2, w_3 : 小麦三种预测面积对应的权重系数 Corresponding value coefficients of each harvested area model AD : 小麦的成灾面积 Disaster area of current wheat k : 灾情指数, 在 0—1 之间的一个数值, 越大表示灾情越严重 Disaster index, a value between 0—1, the greater the severity of the disaster |
| 价格竞争面积 Price competition area($HA_{competition}$) | $\ln HA_{competition, t} = \alpha + \beta_1 \ln HA_{competition, t-1} + \beta_2 \ln P_{t-1} + \beta_3 \ln P_{subs, t-1}$ | $HA_{competition, t-1}$: 小麦上一期播种面积 Wheat harvested area in the previous year P_{t-1} : 小麦上一期价格 Wheat price in the previous year $P_{subs, t-1}$: 竞争相关性作物的上一期价格 Price of competitively related crops in the previous year |
| 调查面积 Survey area (HA_{survey}) | $HA_{survey, t} = (\sum_{i=1}^n w_i \times HA_{i, survey, t}) \times k \times \frac{1}{r}$ | HA_{survey} : 调查得出的某地区小麦面积 Surveyed area of wheat in a certain area $HA_{i, survey}$: 某地区第 i 个村的小麦调查面积 Surveyed area of wheat in the i-th village in a certain area w_i : 第 i 个村的权重 Weight of the i-th village k : 某地区调查县所有村数量与抽样框包含的所有村数量的比值 The ratio of the number of all villages in a survey county to the number of all villages included in the sampling frame in a certain area r : 国家调查县小麦面积占全省所有县小麦面积的比率 The ratio of the area of counties under national survey to the area of all counties in the province |

续表 3 Continued table 3

| 预测变量 | 模型方程形式 | 变量说明 |
|------------------------------|---|--|
| Predicted variable | Model equation form | Variable description |
| 进口量 | $\ln IM_{WT,t} = \alpha^{WT,IM} + \beta_1^{WT,IM} \ln QP_{WT,t} +$ | IM_{WT} : 小麦进口量 Wheat import |
| Import | $\beta_2^{WT,IM} \ln P_{WT,IM,t} + \beta_3^{WT,IM} \ln XR_t$ | QP_{WT} : 小麦生产总量 Total wheat production |
| (IM) | | $P_{WT,IM}$: 以当地货币计价的小麦进口价格 Import prices of wheat in local currency |
| | | XR : 人民币对美元汇率 RMB against the U.S. dollar |
| | | $\alpha_{WT,IM}$: 小麦进口量误差项 Errors of wheat import |
| 期初库存 | $OS_{WT,t} = ES_{WT,t-1}$ | $ES_{WT,t-1}$: 上一期小麦期末库存 The ending stock of wheat in the previous period |
| Opening stock (OS) | | |
| 总需求 | $D_{WT,t} = QC_{WT,t} + EX_{WT,t} + ES_{WT,t}$ | QC_{WT} : 小麦消费量 Wheat consumption |
| Demand (D) | | EX_{WT} : 小麦出口量 Wheat export |
| | | ES_{WT} : 小麦期末库存 Ending stock of wheat |
| 消费量 Consumption | $QC_{WT,t} = FC_{WT,t} + IC_{WT,t} + FEC_{WT,t} +$ | FC_{WT} : 小麦口量消费量 Food use consumption of wheat |
| quantity(QC) | $SEC_{WT,t} + W_{WT,t}$ | IC_{WT} : 小麦工业消费量 Industrial consumption of wheat |
| | | FEC_{WT} : 小麦饲用消费量 Feed use consumption of wheat |
| | | SEC_{WT} : 小麦种用消费量 Seed use consumption of wheat |
| | | W_{WT} : 小麦损耗 Wastage of wheat |
| 口粮消费量 | $FC_{WT,t} = PC_{WT,rural,t} \times POP_{WT,rural,t} +$ | $PC_{WT,rural}$: 农村人均小麦口量消费量 Rural per capita FC of wheat |
| Food use consumption | $PC_{WT,urban,t} \times POP_{WT,urban,t}$ | $POP_{WT,rural}$: 农村总人口数 Total rural population |
| (FC) | | $PC_{WT,urban}$: 城镇人均口量消费量 Urban per capita FC of wheat |
| | | $POP_{WT,urban}$: 城镇总人口数 Total urban population |
| 农村人均口粮消费量 | $PC_{WT,rural,t} = \exp(\alpha_1 \ln DPI_{WT,rural,t} +$ | $DPI_{WT,rural}$: 农村人均可支配收入 Rural per capita disposable income |
| Rural per capita | $\alpha_2 \ln P_{RT,t} + \alpha_3 \ln P_{WT,t} + \alpha_4 \ln P_{MA,t} +$ | P_{RT} : 稻米均衡价格 Rice equilibrium price |
| consumption (PC_{rural}) | $\alpha_5 \ln P_{SB,t} + b)$ | P_{WT} : 小麦均衡价格 Wheat equilibrium price |
| | | P_{MA} : 玉米均衡价格 Corn equilibrium price |
| | | P_{SB} : 大豆均衡价格 Soybean equilibrium price |
| 城市人均口粮消费量 | $PC_{WT,urban,t} = \exp(\alpha_1 \ln DPI_{WT,urban,t} +$ | $DPI_{WT,urban}$: 城镇人均可支配收入 Urban disposable income per capita |
| Urban per capita | $\alpha_2 \ln P_{RT,t} + \alpha_3 \ln P_{WT,t} + \alpha_4 \ln P_{MA,t} +$ | |
| consumption (PC_{urban}) | $\alpha_5 \ln P_{SB,t} + b)$ | |
| 饲用消费量 | $FEC_{WT,t} = FER_{WT,1} \times (QP_{PK,t} + QP_{BV,t}$ | QP_{PK} : 猪肉产量 Pork production |
| Feed use consumption | $+ QP_{MU,t}) + FER_{WT,2} \times QP_{PT,t} + b$ | QP_{BV} : 牛肉产量 Beef production |
| (FEC) | | QP_{MU} : 羊肉产量 Mutton production |
| | | QP_{PC} : 禽肉产量 Poultry production |
| 工业消费量 | $IC_{WT,t} = \exp(a \ln GDP + b)$ | GDP : 国内生产总值 Gross Domestic Product |
| Industrial consumption | | |
| (IC) | | |
| 种用消费量 | $SEC_{WT,t} = SPM_{WT,t} \times HA_{WT,t}$ | SPM_{WT} : 每亩小麦种子用量 Wheat seed dosage per acre |
| Seed use consumption | | |
| (SEC) | | |
| 损耗 | $W_{WT,t} = KLW_{WT,t} \times QP_{WT,t}$ | KLW_{WT} : 小麦损耗率 Wheat loss rate |
| Wastage (W) | | |
| 出口量 | $\ln EX_{CHN,WT,t} = \alpha_I^{WT,EX} + \beta_1^{WT,EX} \times$ | $EX_{CHN,WT,t}$: 全国小麦出口量 National wheat export |
| Export (EX) | $\ln EX_{CHN,WT,t-1} + \beta_2^{WT,EX} \times$ | $EX_{CHN,WT,t-1}$: 上一期全国小麦出口量 National wheat exports in the previous period |
| | $\ln FOB_{CHN,WT,t}$ | $FOB_{CHN,WT,t}$: 以当地货币计价的小麦离岸价格 FOB price of wheat in local currency |

在变量说明中，未标注下标时间的变量都表示当期，时间均为 t
In the variable description, the variables without the subscript time indicate the current amount, that is, the time is t

表 4 模型集群的主要变量参数及求解
Table 4 Main variable parameters of model cluster and its solution

| 模型主要变量 | | | 模型方程变量系数的求解方法 |
|--|----------------------------------|-----------------------------------|--|
| Model variable f(x) | | | Method for solving variable coefficients of model equation |
| 产量 Production quantity (QP) | 作物单产 Yield | 气象单产 Meteorological yield | 历史数据建立回归方程求解各系数 Use historical data to establish regression equations to solve coefficients |
| | | 投入单产 Input yield | 历史数据建立回归方程求解各系数 Use historical data to establish regression equations to solve coefficients |
| | | 管理单产 Management yield | 历史数据、专家经验确定各系数 Historical data and expert experience determine the coefficients |
| | | 综合单产 Comprehensive yield | 专家人工设置和智能训练赋值各单产权重 Expert manual setting and intelligent training assign the weight of each yield |
| | | 收获面积 Harvested area | 历史数据建立回归方程求解各系数 Use historical data to establish regression equations to solve coefficients |
| | | 价格竞争面积 Price competition area | 调查数据 survey data |
| | | 调查面积 Survey area | 调查数据 survey data |
| | | 遥感面积 Remote sensing area | 监测数据 Monitoring data |
| | | 综合面积 Comprehensive area | 专家人工设置和智能训练赋值各面积权重 Expert manual setting and intelligent training assign the weight of each area |
| | | 畜禽产量 Livestock production | 历史数据建立回归方程求解各系数 Use historical data to establish regression equations to solve coefficients |
| 消费量 Consumption quantity (QC) | 食用（口粮）消费 Food use consumption | 工业消费 Industrial consumption | 历史数据建立回归方程求解各系数 Use historical data to establish regression equations to solve coefficients |
| | | 饲用消费 Feed use consumption | 历史数据建立回归方程求解各系数 Use historical data to establish regression equations to solve coefficients |
| | | 种用消费 Seed use consumption | 历史数据建立回归方程求解各系数 Use historical data to establish regression equations to solve coefficients |
| | | 损耗 Loss | 历史数据建立回归方程求解各系数 Use historical data to establish regression equations to solve coefficients |
| | | 进出口量 Import and export | 历史数据及专家预测 Historical data and expert forecasts |
| | | 均衡价格指数 Equilibrium price index | 局部均衡模型求解 Local equilibrium model solution |

利用先离散线性化后数值迭代求解的算法，保证了模型系统能够高效运转，显著提升了模型集群分析计算的精准度和广适性。分省模型求解和全国模型思路基本一致，将全国模型求解出的每年均衡价格代入到分省模型中，分别建立分省的模型，再求解出分省的供需平衡方程中的各分项后，人工调节修正参数，使得分省农产品供需关系达到平衡，进而利用“因素分类解耦、参数转用适配”技术，可高效求解分省模型集群。

2.3 技术方法及模型集群的应用

2.3.1 县域尺度农产品产量气象影响因素分类解耦解析 根据 34 年 2 481 个气象站点日度数据和全国 31 省市自治区 2 000 多个行政县区农作物产量数据，

利用对气象因素的分类解耦，分别明确了主要农作物生长各个阶段气象要素与产量的关系，揭示了中国农作物生产过程中产量形成和气象要素的时间、空间分布规律，并通过量化的形式得到各项指标的影响系数^[28]。

2.3.2 技术支撑农业展望报告及平衡表发布 综合模型集群基线预测和有关专家经验分析判断，从 2014 年起，已对我国水稻、小麦、玉米、肉类等 18 类主要农产品未来 10 年重要时间节点的生产量、消费量、进出口量走势等进行了展望，并支撑发布未来供需平衡表^[26, 29]。在 2014—2019 年期间，年初（每年 4 月份）预测值与国家统计局最终年报数对比，主要农产品产量 6 年预测平均准确率高于 97%。

3 讨论

农业系统复杂,涉农信息变化常以指数层级增长,对其进行分析涉及多个方面。影响因素的分析判断,是预测模型构建的重要基础。全国粮食产量的系统综合因素预测法^[4],在预测方程中综合反映了影响农业复杂系统的四大因素,即政策管理因素、经济技术因素、自然因素和其他因素,因此对当年粮食产量的预测精度较高。“因素分类解耦”的方法理念,用于多品种农产品监测预警模型集群构建,结果表明,在全面考虑自然因素、社会因素影响的基础上,基于主导因素决定原则、主次因素变动原则和结果关联原则,能有效判定不同时空维度农产品供需要素的主要影响因素,并逐一对农产品的影响因素解耦建立模型方程组,解决了多品种因素关联纠缠、品种关联替代的难题。本研究在粮食产量的短期预测中,充分考虑了气象因素的影响。气象因素不仅对作物产量有重要影响,而且对作物产量的影响存在明显差异性^[28,30-33],同样,自然因素、水肥等生产投入因素、人口政策等社会因素以及国际因素等这些复杂的影响因素,因农产品品种、区域尺度、时间周期上的不同,对农产品影响的主导因素及其影响程度也会存在差异性。因此,本研究在构建模型时充分考虑了品种间影响因素在不同时空维度的异同,实现了模型集群的高效建立;与美国、FAO-OECD 等开发的 Baseline 模型、AGLINK-COSIMO 模型和 FAPRI 模型比较,模型集群所利用的数据来源维度更广泛、数据使用效率提升,模型整体的耦合度、智能化程度更高。

模型的有效应用依赖于参数的快速、准确估算^[34],如庄嘉祥等^[35]研究指出,智能优化算法应用到作物模型参数估算中,如利用个体优势遗传算法优化水稻生育期模型参数,实现了模型参数的自动率定,提高了调参效率。本研究在模型集群构建过程中,运用“参数转用适配”技术,应用多元线性回归、Lasso 回归、岭回归及弹性网等算法,实现了多时空维度不同农产品模型方程组的高效建立与求解。在同一时空尺度,可以根据某一种农产品的模型集群,通过参数智能调配建立另一种农产品的模型集群;对同一农产品,可通过参数智能调配建立不同时空尺度的模型集群。

用单一模型方法分析农产品供需单要素的未来走势,往往较难理清其他相关因子信息,且存在预测精

度不稳定、预测误差偏大的问题。因此,运用多种模型方法综合分析,已成为农产品生产、消费、价格等分析预测的有效工具。如在粮食生产量预测中,郑莉^[36]将线性及非线性多元回归模型、固定效应模型和时间序列模型综合集成预测的黄淮海地区粮食、夏粮、秋粮总产,相对单个模型的预测精度明显提高。消费量预测中,郑莉等^[37]通过综合集成 ARIMA、VAR (向量自回归模型)和 VEC (向量误差修正模型)3 种模型,对 2009—2011 年我国猪肉消费需求量进行了预测,结果表明集成预测精度更高更稳定。价格预测上,徐雅卿等^[38]建立了指数平滑模型、ARIMA 模型及基于二者的组合预测模型,依据所建立的 3 个模型对未来短期胡萝卜价格进行预测分析,结果显示组合模型比单个预测模型预测精度更高,是一种有效的农产品价格预测模型。本研究在多因素分类解耦构建模型的基础上,对作物单产、面积、畜禽产量等采用专家判断和智能权重赋值法进行最终结果的确定,智能预测赋值系数采用简单线性模型或机器学习的方法确定。

本研究在构建模型集群时融入了大数据分析的方法,主要基于 Python 语言开发,更高效便捷。CWARMEM 模型^[22]利用 GAMS 的 MCP 算法,以及传统计量统计模型利用一般开发语言。本研究模型所需原始数据(包括历史数据和实时监测数据)全部存储在 Oracle 数据库中,中间文件或指定的特殊文件通过 Python 命令写入 xls 文件中,方便使用。模型集群求解时利用牛顿迭代方法对多品种形成的非线性方程组进行计算,并利用服务器的并行运算能力对模型的求解进行加速。特别是在进行气象产量预测时,由于获取的各省气象站点的气象数据数据量非常大,为了突破数据处理时间上的性能瓶颈,本研究采用 Map-Reduce 计算框架设计和实现了多站点输入数据分割的并行化执行模块;设计了基于 Rest Web Service 的算法访问接口,以快速实现数据预处理和多元回归的算法执行。在农产品供需均衡方程组的求解中,CWARMEM 模型^[22]采取逐年递归的方式以及基期动态移动的机制,使各年基于上年模型内生决定的均衡解作为基期并导入当年的外生变量值,最终生成所有年份的均衡解。本研究模型集群更多考虑了品种间的竞争、替代关系,均衡解是用每年关联农产品品种的平衡方程迭代求出,求解效率和精准度提高。

农产品多品种供需预测模型集群的构建,在未来

还需进一步考虑国际大环境变化对我国农产品供需关系各方面的影响,在省级尺度预测时应考虑不同省份间的农产品流转数量;另外,还要实现更多品种供需预测。

4 结论

本研究创建的“因素分类解耦、参数转用适配”模型集群构建技术,通过挖掘不同农产品复杂原始数据间的关联关系,分别建立生产量、消费量、贸易、价格模型集群,并通过多智能算法求解众联立方程组,解析复杂因素关系,建立了适用于多品种农产品供需预测模型集群。模型集群在计量等式上是单品种的数百倍,是一般多品种供需预测模型的数十倍,预测的农产品品种较为全面,使得求解效率和准确率提升,解决了多品种多维时空尺度复杂因素纠缠解析、模型集群智能化应用难题,为防范农业风险、增强农产品供需预判提供了有效技术方法。

References

- [1] 许世卫. 农产品数量安全智能分析与预警的关键技术及平台研究. 北京: 中国农业出版社, 2013.
XU S W. *Research on Key Technologies and Platform of Intelligent-Analysis and Early-Warning for Security of Agricultural Products*. Beijing: China Agriculture Press, 2013. (in Chinese)
- [2] 许世卫. 农业监测预警中的科学与技术问题. 科技导报, 2018, 36(11): 32-44.
XU S W. Scientific and technical issues in agricultural monitoring and early warning. *Science & Technology Review*, 2018, 36(11): 32-44. (in Chinese)
- [3] 高亮之. 农业模型学. 北京: 气象出版社, 2019.
GAO L Z. *Agricultural Modeling Science*. Beijing: China Meteorological Press, 2019. (in Chinese)
- [4] 陈锡康, 杨翠红. 农业复杂巨系统的特点与全国粮食产量预测研究. 系统工程理论与实践, 2002(6): 108-112.
CHEN X K, YANG C H. Characteristic of agricultural complex giant system and national grain output prediction. *System Engineering Theory and Practice*, 2002(6): 108-112. (in Chinese)
- [5] 刘忠, 黄峰, 李保国. 基于经验模态分解的中国粮食单产波动特征及影响因素. 农业工程学报, 2015, 31(2): 7-13.
LIU Z, HUANG F, LI B G. Analysis on characteristics and influential factors of grain yield fluctuation in China based on empirical mode decomposition. *Transaction of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(2): 7-13. (in Chinese)
- [6] 王桂芝, 胡慧, 陈纪波, 吴先华. 基于 BP 滤波的 Fourier 模型在粮食产量预测中的应用. 中国农业气象, 2015, 36(4): 472-478.
WANG G Z, HU H, CHEN J B, WU X H. Application of Fourier model based on BP filter in crops yield prediction. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2015, 36(4): 472-478. (in Chinese)
- [7] 陈纪波, 胡慧, 陈克垚, 王桂芝. 基于非线性 PLSR 模型的气候变化对粮食产量的影响分析. 中国农业气象, 2016, 37(6): 674-681.
CHEN J B, HU H, CHEN K Y, WANG G Z. Effects of climate change on the grain yield based on nonlinear PLSR model. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2016, 37(6): 674-681. (in Chinese)
- [8] 王亚飞, 廖顺宝. 气候变化对粮食产量影响的研究方法综述. 中国农业资源与区划, 2018, 39(12): 54-63.
WANG Y F, LIAO S B. Impact of climate change on grain yield: A review of research methods. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2018, 39(12): 54-63. (in Chinese)
- [9] 郑建安. 主成分和 BP 神经网络在粮食产量预测中的组合应用. 计算机系统应用, 2016, 25(11): 274-278.
ZHENG J A. Application of PCA and BP neural networks in grain production prediction. *Computer Systems & Applications*, 2016, 25(11): 274-278. (in Chinese)
- [10] 向昌盛, 张林峰. 灰色理论和马尔可夫相融合的粮食产量预测模型. 计算机科学, 2013, 40(2): 245-248.
XIANG C S, ZHANG L F. Grain yield prediction model based on Gray theory and Markov. *Computer Science*, 2013, 40(2): 245-248. (in Chinese)
- [11] 周庆元. 基于灰色马尔可夫模型的粮食产量预测方法. 统计与决策, 2012(17): 64-68.
ZHOU Q Y. Grain output prediction method based on grey Markov model. *Statistics & Decision*, 2012(17): 64-68. (in Chinese)
- [12] 李国祥. 从主要经济因素分析我国农产品价格走势. 农业展望, 2010(8): 49-53.
LI G X. Analyze the price trend of my country's agricultural products from the main economic factors. *Agricultural Outlook*, 2010(8): 49-53. (in Chinese)
- [13] 王盛威. 主要农产品价格波动分析及调控措施研究. 北京: 中国农业大学出版社, 2019.
WANG S W. *Study on Price Fluctuations of Major Agricultural Products and Proposed Interventions*. Beijing: China Agricultural University Press, 2019. (in Chinese)
- [14] LI G Q, XU S W, LI Z M, SUN Y G, DONG X X. Using quantile regression approach to analyze price movements of agricultural products in China. *Journal of Integrative Agriculture*, 2012, 11(4): 674-683. (in Chinese)

- [15] 陈艳红, 胡胜德, 申倩. 基于 ARIMA 模型的中国粮食供求平衡及预测. *广东农业科学*, 2013(5): 230-233.
- CHEN Y H, HU S D, SHEN Q. Balance and forecast on supply and demand of China's grain with ARIMA model. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2013(5): 230-233. (in Chinese)
- [16] 吕新业, 胡非凡. 2020 年我国粮食供需预测分析. *农业经济问题*, 2012(10): 11-18.
- LÜ X Y, HU F F. Forecasting and countermeasure on 2020 China grain supply and demand. *Issues in Agricultural Economy*, 2012(10): 11-18. (in Chinese)
- [17] 赵杭莉, 孙印法. 基于灰色预测模型的中国大豆市场供求分析. *商业研究*, 2015(3): 58-63.
- ZHAO H L, SUN Y F. An analysis of China's soybean market supply and demand based on Grey prediction model. *Commercial Research*, 2015, 03: 58-63. (in Chinese)
- [18] 黄季焜, 杨军, 仇焕广. 新时期国家粮食安全战略和政策的思考. *农业经济问题*, 2012(3): 4-8.
- HUANG J K, YANG J, QIU H G. Thinking of national food security strategies and policies in the new period. *Issues in Agricultural Economy*, 2012(3): 4-8. (in Chinese)
- [19] 杨春, 王国刚, 王明利. 基于局部均衡模型的我国牛肉供求变化趋势分析. *统计与决策*, 2015(18): 98-100.
- YANG C, WANG G G, WANG M L. Analysis of the trend of my country's beef supply and demand based on local equilibrium model. *Statistics & Decision*, 2015(18): 98-100. (in Chinese)
- [20] 曹宝明, 赵霞. 基于局部均衡理论的中国大豆及其制品供需变化预测. *中国农村经济*, 2011(9): 23-36, 48.
- CAO B M, ZHAO X. Forecast of supply and demand changes of Chinese soybean and its products based on partial equilibrium theory. *Chinese Rural Economy*, 2011(9): 23-36, 48. (in Chinese)
- [21] 韩一军. 中国小麦中长期供求预测及政策选择—基于动态一般均衡模型分析. *中国农村经济*, 2014(5): 13-19, 61.
- HAN Y J. Forecast of medium and long-term supply and demand of wheat in China and policy choices based on dynamic general equilibrium model analysis. *Chinese Rural Economy*, 2014(5): 13-19, 61. (in Chinese)
- [22] 陆文聪, 李元龙, 祁慧博. 全球化背景下中国粮食供求区域均衡: 对国家粮食安全的启示. *农业经济问题*, 2011(4): 16-26.
- LU W C, LI Y L, QI H B. Regional equilibrium of Chinese grain supply and demand under globalization: Implications for national grain security. *Issues in Agricultural Economy*, 2011(4): 16-26. (in Chinese)
- [23] 陆文聪, 祁慧博, 李元龙. 中国世界农业区域市场均衡模型及其应用. *系统科学与数学*, 2013, 33(1): 20-35.
- LU W C, QI H B, LI Y L. Chinese world agricultural regional market equilibrium model and its application. *Journal of System Science and Mathematical Science*, 2013, 33(1): 20-35. (in Chinese)
- [24] LU W C, CHEN N L, QIAN W X. Modeling the effects of urbanization on grain production and consumption in China. *Journal of Integrative Agriculture*, 2017, 16(6): 1393-1405.
- [25] Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) and the Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations. *OECD-FAO Agricultural Outlook 2019-2028*. OECD Publishing, Paris/FAO, Rome, 2019.
- [26] 农业农村部市场预警专家委员会. 中国农业展望报告(2020-2029). 北京: 中国农业科学技术出版社, 2020.
- Market Early Warning Expert Committee of Ministry of Agriculture and Rural Affairs. *China Agricultural Outlook Report 2020-2029*. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2020. (in Chinese)
- [27] HASTIE T, TIBSHIRANI R, FRIEDMAN J. *The Elements of Statistical Learning (2nd edition)*. Springer-Verlag, 2009.
- [28] ZHUANG J Y, XU S W, LI G Q, ZHANG Y E, WU J Z, LIU J J. The influence of meteorological factors on wheat and rice yields in China. *Crop Science*, 2018, 58(2): 837-852.
- [29] XU S W, LI G Q, LI Z M. China agricultural outlook for 2015-2024 based on China Agricultural Monitoring and Early-warning System (CAMES). *Journal of Integrative Agriculture*, 2015, 14(9): 1889-1902.
- [30] GRASSINI P, ESKRIDGE K M, CASSMAN K G. Distinguishing between yield advances and yield plateaus in historical crop production trends. *Nature Communications*, 2013, 4: 2918.
- [31] RAY D K, GERBER J S, MACDONALD G K, WEST P C. Climate variation explains a third of global crop yield variability. *Nature Communications*, 2015, 6: 5989.
- [32] TAO F L, ZHANG Z, SHI W J, LIU Y J, XIAO D P, ZHANG S, ZHU Z, WANG M, LIU F S. Single rice growth period was prolonged by cultivars shifts but yield was damaged by climate change during 1981-2009 in China, and late rice was just opposite. *Global Change Biology*, 2013, 19: 3200-3209.
- [33] CHEN C, BAETHGEN W E, ROBERTSON A. Contributions of individual variation in temperature, solar radiation and precipitation to

- crop yield in the North China Plain, 1961–2003. *Climate Change*, 2013, 116: 767-788.
- [34] 聂志刚, 李广, 王钧, 马维伟, 雒翠萍, 董莉霞, 逯玉兰. 基于 APSIM 模型旱地小麦叶面积指数相关参数的优化. *中国农业科学*, 2019, 52(12): 2056-2068.
- NIE Z G, LI G, WANG J, MA W W, LUO C P, DONG L X, LU Y L. Parameter optimization for the simulation of leaf area index of dryland wheat with the APSIM model. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(12): 2056-2068. (in Chinese)
- [35] 庄嘉祥, 姜海燕, 刘蕾蕾, 王芳芳, 汤亮, 朱艳, 曹卫星. 基于个体优势遗传算法的水稻生育期模型参数优化. *中国农业科学*, 2013, 46(11): 2220-2231.
- ZHUANG J X, JIANG H Y, LIU L L, WANG F F, TANG L, ZHU Y, CAO W X. Parameters optimization of rice development stages model based on individual advantages genetic algorithm. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(11): 2220-2231. (in Chinese)
- [36] 郑莉. 我国主要农产品产量、消费量预测模型构建及实证研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
- ZHENG L. Study on the prediction models of output and consumption of main agricultural products in China[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013. (in Chinese)
- [37] 郑莉, 段冬梅, 陆凤彬, 许伟, 杨翠红, 汪寿阳. 我国猪肉消费需求集成预测—基于 ARIMA、VAR 和 VEC 模型的实证. *系统工程理论与实践*, 2013, 33(4): 918-925.
- ZHENG L, DUAN D M, LU F B, XU W, YANG C H, WANG S Y. Integration forecast of Chinese pork consumption demand—empirical based on ARIMA, VAR and VEC models. *System Engineering Theory and Practice*, 2013, 33(4): 918-925. (in Chinese)
- [38] 徐雅卿, 魏铁华, 李旭刚. 农产品价格预测模型的构建. *统计与决策*, 2017(12): 75-77.
- XU Y Q, WEI Y H, LI X G. Establishment of agricultural products, price prediction. *Statistics & Decision*, 2017(12): 75-77. (in Chinese)

(责任编辑 杨鑫浩)