中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture
中文核心期刊
中国科技核心期刊
中国精品科技期刊
百种中国杰出学术期刊
中国科学引文数据库源刊

不同统计模型在冬小麦产量预报中的预报能力评估——以江苏麦区为例

徐敏，徐经纬，高苹，宋迎波

引用本文:
徐敏, 徐经纬, 高苹, 等. 不同统计模型在冬小麦产量预报中的预报能力评估——以江苏麦区为例[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(3): 438–447.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190814

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

主要生育期气候变化对河南省冬小麦生长及产量的影响

Effect of climate change on growth and yield of winter wheat in Henan Province

中国生态农业学报. 2017, 25(6): 931–940 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.161054

基于云模型的冬小麦气候适宜度评价方法*--以安徽省宿州市为例

Evaluation of climate suitability of winter wheat based on cloud model analysis– A case study of Suzhou, Anhui Province

中国生态农业学报. 2016, 24(7): 944–956 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.151317

近30年吴桥县冬小麦生育期水分亏缺变化趋势分析

Study on water deficit trend in the recent 30 years in Wuqiao County, Hebei Province

中国生态农业学报. 2015(4): 482–489 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.141212

甘肃省冬小麦水分盈亏指数的改进及其应用

Improvement and applicability of winter wheat water budget index in Gansu Province

中国生态农业学报. 2018, 26(4): 559–566 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.170817

基于AEZ模型的河南省冬小麦产量差时空特征分析

Spatio–temporal analysis of winter wheat yield gaps in Henan Province using AEZ model

中国生态农业学报. 2018, 26(4): 547–558 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.170843

中国生态农业学报(中英文) 2020 年 3 月 第 28 卷 第 3 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Mar. 2020, 28(3): 438−447

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.190814

徐敏, 徐经纬, 高苹, 宋迎波. 不同统计模型在冬小麦产量预报中的预报能力评估——以江苏麦区为例[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(3): 438−447

XU M, XU J W, GAO P, SONG Y B. Evaluation of winter wheat yield prediction ability of different statistical models — A case study of Jiangsu wheat-growing region[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(3): 438−447

不同统计模型在冬小麦产量预报中的预报能力评估*

——以江苏麦区为例

徐 敏[1], 徐经纬[2], 高 苹[1], 宋迎波[3]

(1. 江苏省气候中心 南京 210008; 2. 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室/南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心 南京 210044; 3. 国家气象中心 北京 100081)

摘 要: 在多类冬小麦单产统计预报模型中筛选出预报能力强的模型, 并对优选出的模型进行加权集成, 以此提高产量预报准确率, 对保障粮食安全具有重要意义。利用 1993—2018 年江苏省 69 个基本气象观测站逐日气象资料和冬小麦产量数据及生育期资料, 在 5 种气象产量分离方法(线性分离、差值百分率、5 年滑动平均、3 年滑动平均、二次曲线)的基础上, 采用准确率、标准差、相关系数、泰勒图等检验法, 评估分析了丰歉相似年法、关键气象因子法、气候适宜度法与集成预报法在江苏省冬小麦单产预报中的模拟效果。结果表明: 1)对于同一种预报方法, 不同的产量分离法对预报精度影响较大, 二次曲线分离法要好于其他 4 种方法; 丰歉相似年预报方法中加权法的预报精度高于大概率法。1993—2013 年丰歉相似年法、关键气象因子法、气候适宜度法平均准确率分别为 89.67%、94.86%和 94.96%。2)集成预报法近 5 年预报准确率在 96.33%以上, 高于丰歉加权模型、关键气象因子二次曲线分离模型、气候适宜度二次曲线分离模型等单个最优模型, 在一定程度上可以弥补单一预报方法预报结果稳定性差的不足。3)起报时间越接近成熟期, 预报因子信息越全面, 则预报模型准确率越高。研究结果可为江苏省冬小麦采用合理的单产预报模型提供科学依据, 同时模型筛选思路也可供外省借鉴。

关键词: 冬小麦; 产量预报; 丰歉相似年法; 关键气象因子法; 气候适宜度法; 产量分离方法; 最优模型集成

中图分类号: F062.2 开放科学码(资源服务)标识码(OSID):

Evaluation of winter wheat yield prediction ability of different statistical models — A case study of Jiangsu wheat-growing region*

XU Min[1], XU Jingwei[2], GAO Ping[1], SONG Yingbo[3]

(1. Climate Center of Jiangsu Province, Nanjing 210008, China; 2. Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education and Nanjing University of Information Sciences & Technology / Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Sciences & Technology, Nanjing 210044, China; 3. National Meteorological Center, Beijing 100081, China)

Abstract: We screened for the highest performance model among several winter wheat yield predicting models. The selected model

* 2019 年国内外作物产量气象预报专项、江苏省气象局面上科研基金(KM201906)和国家自然科学基金项目(41871053)资助
徐敏, 主要从事作物产量预报方法研究。E-mail: amin0506@163.com
收稿日期: 2019-11-19 接受日期: 2020-01-03

* This study was supported by the Special Found for Meteorological Forecast of Crop Yield in Domestic and Foreign in 2019, the Surface Scientific Research Fund of Jiangsu Meteorology Bureau (KM201906), and the National Natural Science Foundation of China (41871053).
Corresponding author, XU Min, E-mail: amin0506@163.com
Received Nov. 19, 2019; accepted Jan. 3, 2020

was weighted and integrated in order to improve the accuracy of prediction, as it plays a key role in ensuring food security. Daily meteorological observations, winter wheat yield data, and growth period observations were obtained from 69 basic meteorological stations in Jiangsu Province from 1993 to 2018. Then, five methods of meteorological yield and trend yield separation (linear separation, percentage difference, 5- or 3-year sliding average, and quadratic curve) were compared. On this base, by using the fitting test and hind-casting test, we evaluated and analyzed the simulation effects of yield prediction methods based on similar years with bumper or poor harvest, key meteorological factors and climate suitability, and integrated the methods for Jiangsu winter wheat yield prediction. The results revealed the following: 1) For the same yield prediction method, the yield separation methods had a greater effect on prediction accuracy. The quadratic curve method was the best among the linear separation, percentage difference, 5- or 3-year sliding average and quadratic curve methods. The prediction accuracy of the weighting method was higher than the large probability method in the similar years with bumper or poor harvest prediction method. From 1993 to 2013, the average accuracy of the methods of the similar years with bumper or poor harvest prediction, key meteorological factor, and climate suitability were 89.67%, 94.86%, and 94.96%, respectively. 2) The accuracy of the integrated prediction method was more than 96.33% in the past 5 years, and it was higher than that of the similar years with bumper or poor harvest-weighting model, key factor-quadratic curve model and climate suitability-quadratic curve model. This could probably overcome the less stability of prediction accuracy of a single prediction method. 3) The closer the predicted time to the maturity period and the more comprehensive the prediction factor information, the higher the accuracy of the prediction model. These results provide a scientific basis for selecting an optimized prediction model for winter wheat yield in Jiangsu, and the methodology of model screening can also be used in other provinces.

Keywords: Winter wheat; Yield prediction; The method of similar years with bumper or poor harvest; The method of key meteorological factors; The method of climate suitability; Separation method of meteorological yield and trend yield; Integration of optimal model result

产量预报一直备受农业部门、粮食部门和政府决策部门的关注[1]，准确的产量预报可大大提升国家战略决策服务的水平和质量，使决策部门能够及时了解和掌握作物产量动态，制定科学的宏观调控政策，合理安排调拨、贮运、进出口贸易及生产等，对保障国家粮食安全具有重要意义。另外，随着粮食贸易的发展和农业政策的调整，农业也逐渐受到资本市场的青睐，尤其农产品期货贸易、农作物保险等机构急需产量预报信息[2]。

从 20 世纪 70 年代开始，中国开始研究作物产量预报方法，经过 40 多年的研究，目前主要形成了 4 种方法：基于农学的产量预报方法[3]、基于统计学的产量预报方法[4]、遥感估产法[5]、基于作物生长模型的产量预报法[6]。其中农学方法具有直观、机理性强的优势，但农学模式需要穗数、穗粒数、千粒重，而这些要素的获取依赖人工观测，成本高且观测点偏少，在实际应用中具有较大的限制；遥感技术可以大范围地估产，但存在作物信息提取受云层覆盖影响大，以及作物种类识别精度有限等困难；作物模型对作物生长机理考虑较全，但参数校正难度大，业务成熟应用的调试时间长[7]。有些学者为了充分利用作物模型和遥感技术各自的优势，尝试将两种方法相结合进行产量预测，但同样存在业务成熟应用调试时间长的问题[8]。目前在气象部门应用较为成熟的主要还是基于统计学的产量预报法，作物产量的形成除了受品种、生产力水平等影响外，与外界生态环境因子有着密切关系，气象条件是外界生态环境中最主要的因素，因此充分应用近几十年气象条件与产量之间的关系，通过数理统计方法建立产量预测模型，具体为基于作物历史丰歉相似年、关键气象因子、气候适宜度的统计学预报方法，这些方法已应用于黑龙江[9]、吉林[10]、河南[11]等省的作物产量预报中。这 3 种方法具有不同的优缺点[12]，历史丰歉相似年法计算相对比较简单，能够客观定量地预报出气象条件对作物产量丰歉的影响，并且解决了传统统计方法在短时间内筛选因子困难的问题，缺点是没有考虑冬小麦生长发育过程中的生理生态过程，同时也很难找到真正相似的年份，所以预报结果有一定的局限性和不稳定性；关键气象因子法的优点是考虑了冬小麦生长发育期内关键时段气象因子对气象产量的影响，但也只考虑了温度、降水、日照的影响，并未考虑土壤水分等因子的影响；气候适宜度法充分考虑了冬小麦的生物学特性，从生长发育所需的上下限温度、最适温度、需光性、需水量等方面，建立气候适宜度与气象产量之间的关系模型，预报准确率普遍较高，但在趋势预报上具有一定的不稳定性。

在实际应用中发现，不同的预报方法对不同区域作物产量的预报结果存在差异，如何优选出适合本省的产量预报模型非常关键。邱美娟等[13]对丰歉相似年中加权法与大概率法在吉林春玉米(*Zea mays*)产量预报中的效果做了比较，研究表明加权法预报

效果好于大概率法；王贺然等[14]对关键气象因子和气候适宜度两种预报方法在辽宁大豆(*Glycine max*)产量预报中的预报效果进行了对比分析，结果表明进行大豆产量趋势预报时，可以优先考虑关键气象因子预报模型，在未出现重大气象灾害的正常年份，可以赋予气候适宜度预报模型更多权重。目前，对丰歉相似年中加权法和大概率法、关键气象因子法、气候适宜度法同时进行比较的研究还少见报道；另外，也未考虑不同气象产量分离方法对产量预报模型精度的影响。

为此，本研究以江苏省冬小麦(*Triticum aestivum*)为例，考虑线性分离、差值百分率、5 年滑动平均、3 年滑动平均、二次曲线等 5 种产量分离法，利用丰歉相似年法、关键气象因子法、气候适宜度法等 3 类产量预报方法，通过不同组合，建立不同的产量预报模型，计算各模型的模拟准确率、模拟单产与实际单产的相关系数，进行拟合检验和试报检验，筛选出 3 类方法中的最优模型，并通过最优模型加权集成，拟进一步提高预报准确率。研究结果可为江苏省小麦单产的动态、定量预报和模型优选提供科学依据。

1 资料与方法

1.1 研究区概况

江苏省地处长江三角洲地区，全省境内除北部边缘、西南边缘为丘陵山地，地势较高以外，其余则自北向南为黄淮平原、江淮平原、滨海平原和长江三角洲共同组成的平坦大平原，是经济大省，同时也是粮食大省。小麦是江苏省第二大粮食作物，仅次于水稻(*Oryza sativa*)，近 10 年江苏省小麦种植面积维持在 2.1×10^6 hm^2 左右，播种面积居全国第 4 位、产量排第 5 位，对中国小麦产业至关重要。江苏省处于北亚热带与暖温带的过渡气候带，具有明显的季风特征，四季分明、雨热同季、雨量集中、光照充足，其中江苏的沿江、沿海及丘陵地区，土壤以高沙土为主，气候湿润，在小麦灌浆期降雨偏多，土壤保肥能力差，有利于小麦低蛋白和弱筋形成。凭借独特的土壤、气候等生态条件，江苏被列为弱筋小麦优势产区，是全国最大的弱筋小麦主产省份，全国 50%以上优质弱筋小麦依赖于江苏，特别受广东、福建、浙江等南方加工企业的青睐。

1.2 数据资料

1)气象资料：选用 1993—2018 年江苏省 69 个基本气象观测站点逐日最高气温、最低气温、平均气温、降水量、日照时数、高温日数、低温日数、降雨日数、大雨日数、可照时数(根据各站点经纬度计算得出)、20 cm 土壤相对湿度，来自于江苏省气象局。用于寻找气象条件类似的相似年、确定影响气象产量的关键气象因子和构建综合气候适宜度。

2)小麦产量资料：选用 1993—2018 年江苏全省和 13 个地级市小麦单产、种植面积，来自于江苏省统计局。作为单产统计预报模型中的目标因子，产量资料用于模型的构建和验证。

3)小麦生育期资料：选用 1993—2018 年昆山、沭阳、大丰、如皋、兴化、淮安、盱眙、滨海、赣榆、徐州等 10 个农业气象观测站的小麦播种、出苗、三叶、分蘖、拔节、孕穗、抽穗、开花、成熟等生育期的普遍期，来自于江苏省气象局《作物生长发育状况记录年报表》。

1.3 研究方法

1.3.1 气象产量分离法

产量主要受社会因素和气象条件的影响，因此可分解为随生产力变化的趋势产量和随气象条件变化的气象产量。社会因素主要表现为农业技术的进步、生产资料的投入、惠农政策的实施、农药施肥灌溉方法的改进等，由生产力提升引起的小麦产量变化称之为趋势产量。气象条件存在年际差异且年内若出现明显的农业气象灾害则气象产量波动会比较大。文中为了比较不同产量分离方法对预报模型准确率的影响，采用了 5 种产量分离方法[15-17]：线性分离法(简称为 L)、差值百分率分离法(简称为 D)、5 年滑动平均分离法(简称为 M5)、3 年滑动平均分离法(简称为 M3)和二次曲线分离法(简称为 Q)。

1.3.2 单产预报方法

1)基于丰歉相似年的单产预报法：计算作物播种后的积温(≥0 ℃)、标准化降水量、累积日照时数，通过找寻预报年气象要素与历史年气象要素最相似的年份，预测预报年的单产变化情况。相似年的确定方法见公式(1)-(2)：

$$X_{ik}=\frac{r_{ik}}{d_{ik}}\times100\% \tag{1}$$

$$d_{ik}=\sqrt{\sum_{j=1}^{N}(x_{ij}-x_{kj})^2} \tag{2}$$

式中：r_{ik}、d_{ik} 分别为某气象要素预报年和历史上任意一年的相关系数与欧氏距离；k 为预报年，i 为历史上的任意年；X_{ik} 为判定相似年的指标，该值越大表明预报年与这一年的气象条件越相似，单产变化也越接近；x_{kj} 为预报年冬小麦播种至发布预报时的第 j 个气象要素；x_{ij} 为历史上任意一年同一时段同类

气象要素; j 为某气象要素序号, N 为样本长度。为了减小预报误差, 在积温、标准化降水量、累积日照时数 3 个因子中分别选取排在前 3 位的历史相似年, 共得到 9 个相似年, 分别采用大概率法和加权法[13]最终确定预报年的单产变化。

2)基于关键气象因子的单产预报法: 根据冬小麦生长期内各时段不同气象因子(归一化处理后的平均气温、日平均气温≥0 ℃的积温、日最高气温≥30 ℃的日数、日最低气温≤0 ℃的日数、降水量、降雨日数、日降水量为 25.0~49.9 mm 的大雨日数、可照时数)与气象产量(5 种分离方法下的气象产量)之间的相关系数, 并结合冬小麦的生物学特性, 确定影响产量形成的关键气象因子, 并将温度类、降水类、日照类 3 类因子进行加权综合, 通过综合关键气象因子与气象产量的关系, 建立线性回归模型。综合关键气象因子计算公式为:

$$M=\sum\left(R\times E\right) \tag{3}$$

式中: M 为选定时段内同类关键气象因子的综合值, R 为选定时段内某个关键气象因子与气象产量的相关系数, E 为选定时段内同类关键气象因子进行归一化后的要素值。

3)基于气候适宜度的单产预报法: 利用冬小麦生育期内气温、日照时数、降水量和 20 cm 土壤相对湿度, 从江苏省冬小麦生长发育的上限温度、最适温度、下限温度、需水量、需光性等生物学特性出发, 建立不同生育阶段的旬温度适宜度、降水适宜度、日照适宜度, 并将三者进行综合, 建立综合气候适宜度[18-19], 利用综合气候适宜度分别与 5 种分离方法下的气象产量之间的关系, 建立线性回归方程。综合气候适宜度的计算公式如下:

$$S=\sqrt[3]{S_{\mathrm{t}}\times S_{\mathrm{p}}\times S_{\mathrm{s}}} \tag{4}$$

式中: S 为旬综合气候适宜度, S_{t}、S_{p}、S_{s} 分别为温度适宜度、降水适宜度和日照适宜度, 具体计算公式见文献[20]。

1.3.3　不同单产预报模型模拟能力评估思路

首先利用 1993—2013 年的样本资料, 对 3 类单产预报模型进行拟合对比检验, 由于采用了 5 种产量分离方法以及丰歉相似年法中又分为加权法(W)和大概率法(A), 因此一共有 12 种预报模型, 分别为: 丰歉相似年加权法、丰歉相似年大概率法、关键气象因子-线性法(简称为关键 L, 以下同)、关键气象因子-差值百分率法(关键 D)、关键气象因子-5 年滑动平均法(关键 M5)、关键气象因子-3 年滑动平均法(关键 M3)、关键气象因子-二次曲线法(关键 Q)、气候适宜度-线性法(气候适宜 L)、气候适宜度-差值百分率法(气候适宜 D)、气候适宜度-5 年滑动平均法(气候适宜 M5)、气候适宜度-3 年滑动平均法(气候适宜 M3)、气候适宜度-二次曲线法(气候适宜 Q)。

通过对比这 12 种冬小麦单产预报模型模拟值的准确率、正确率及与实际单产的相关系数, 筛选出 3 类预报方法中 3 个相对最优预报模型; 其次按照预报性能确定这 3 个最优模型的权重, 按权重对 3 个最优模型的预报结果进行相加, 得到最终的最优模型综合集成预报结果; 最后利用 2014—2018 年的资料进行试报检验, 主要是对拟合检验中得出的 3 种最优预报模型和综合集成模型进行试报。另外, 所建立的统计预报模型均为动态预报模型, 因此为了比较不同起报时间对模型模拟性能的影响差异, 在拟合检验和试报检验时均选取了不同的起报时间, 考虑到江苏省冬小麦通常 5 月下旬开始收获, 因此选取 4 月 10 日和 5 月 10 日两种起报时间。

预报模型的平均准确率计算公式为:

$$\mathrm{AR}=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left[\left(1-\frac{\left|Y_i-Y_{i\mathrm{a}}\right|}{Y_{i\mathrm{a}}}\right)\times 100\%\right] \tag{5}$$

式中: AR 是平均准确率, Y_i 是某年的单产模拟值, $Y_{i\mathrm{a}}$ 是某年的单产实际值, i 为拟合年中的年份序号, N 为拟合检验的样本长度(1993—2013 年的样本长度为 21 年)。

预报模型的正确率是指预报年和上年实际单产的增减符号与实际单产和上年实际单产的增减符号一致, 则为正确, 反之错误。正确率计算公式为:

$$\mathrm{CR}=\frac{C}{N}\times 100\% \tag{6}$$

式中: CR 为正确率, C 为 1993—2013 年中预报年单产增减符号与实际单产增减符号一致的总次数, N 为 21。

综合模型(即最优模型集成)计算公式为:

$$Z=aY_1+bY_2+cY_3 \tag{7}$$

式中: Z 是综合集成模型某年单产预报值, Y_1、Y_2、Y_3 分别为基于丰歉相似年预报模型的最优预报值、基于关键气象因子预报模型的最优预报值和基于气候适宜度预报模型的最优预报值, a、b、c 分别为该 3 类模型最优预报值的权重, 权重通过准确率、正确率及与实际单产相关系数进行综合排序确定, 文中按照专家经验, 排在第 1 位权重赋值 0.5、第 2 位赋值 0.3、第 3 位赋值 0.2。

2　结果与分析

2.1　拟合检验与模型优选

12 种冬小麦单产预报模型拟合结果表明(图 1): 1993—2013 年 4 月 10 日和 5 月 10 日两种起报时间

下，12 种单产预报模型均模拟出江苏全省冬小麦单产的年际总体变化特征，2003 年之前单产呈波动变化，2003 年之后单产稳步上升。各预报模型的模拟值与实际值存在不同程度的数值差异，尤其对于异常高值年或低值年的模拟，各模型间的差异较大，1998 年为近 21 年单产最低值，除丰歉相似年加权和丰歉相似年大概率模型以外，其余 10 种模型均准确模拟出了 1997—1999 年间的“漏斗”型变化特征，而丰歉相似年加权和大概率模型模拟出的最低值年出现在 1999 年，2000 年为高值年，均比实际年份向后“漂移”了 1 年，这种误差与该预报方法本身有关。对比不同起报时间的模拟差异发现，4 月 10 日(图 1a)和 5 月 10 日(图 1b)起报的模拟值年际变化基本一致，仅变化幅度存在一定差异。

为筛选出丰歉相似年法、关键气象因子法、气候适宜度法中最优的预报模型，比较分析了各模型的准确率、正确率、相关系数。图 2a 为各模型的拟合准确率，1993—2013 年 4 月 10 日和 5 月 10 日两种起报时间下，丰歉相似年法 2 种预报模型的准确率范围为 87.83%~91.46%(平均 89.67%)，关键气象因子法 5 种预报模型的准确率范围为 94.07%~95.71%(平均 94.86%)，气候适宜度法 5 种预报模型的准确率范围为 93.06%~96.17%(平均 94.96%)。因此，拟合准确率总体排序为气候适宜度法>关键气象因子法>丰歉相似年法，关键气象因子法和气候适宜度法的 5 种预报模型准确率均明显高于丰歉相似年加权法和丰歉相似年大概率法的预报准确率；同类方法中不同预报模型进行比较，丰歉相似年法中加权模型准确率高于大概率模型，关键气象因子法和气候适宜度法中均是二次曲线分离模型准确率最高、线性分离模型准确率位列第二。对 12 种模型准确率全部进行比较，则是气候适宜度法中二次曲线分离模

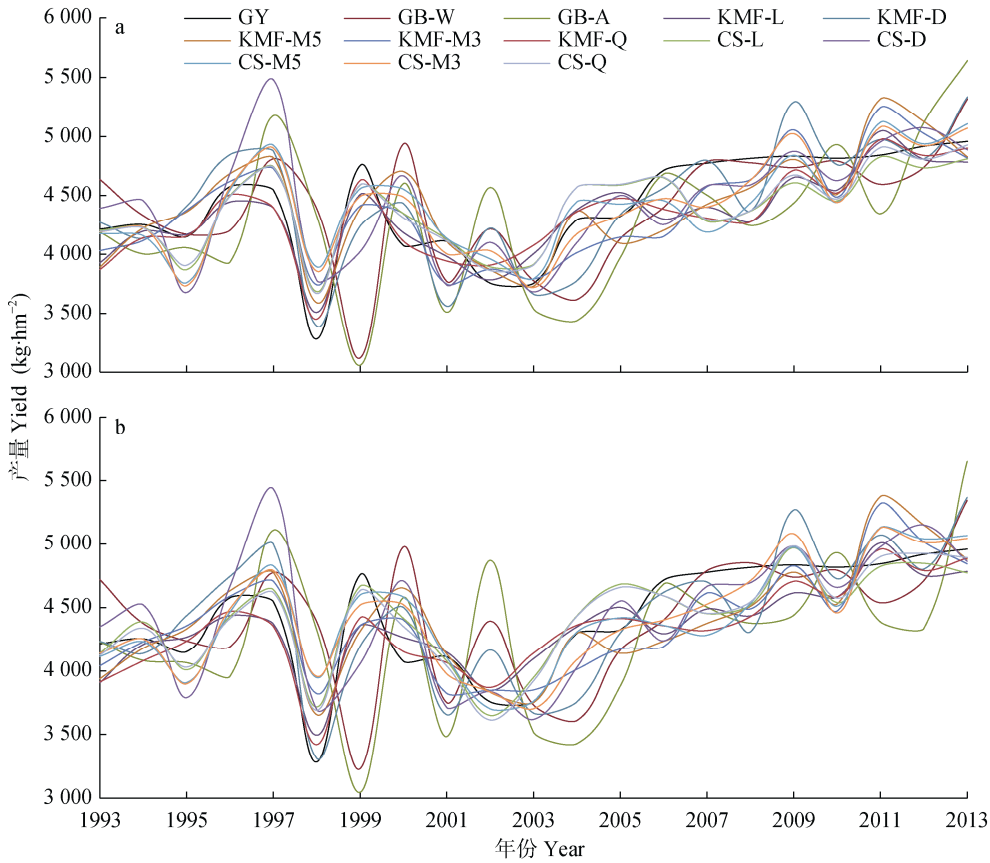

图 1 1993—2013 年江苏省 12 种冬小麦单产预报模型历史模拟值与实际值
(a: 起报时间 4 月 10 日; b: 起报时间 5 月 10 日)

Fig. 1 Winter wheat yield simulated by 12 yield prediction models and actual yield in Jiangsu Province from 1993 to 2013
(a: starting time is April 10; b: starting time is May 10)

GY 为单产实测值。GB-W 和 GB-A 分别表示丰歉相似年法中的加权法和大概率法。KMF 和 CS 分别表示基于关键气象因子和气候适宜度的单产预测方法。L、D、M5、M3 和 Q 分别表示线性分离法、差值百分率分离法、5 年滑动平均分离法、3 年滑动平均分离法和二次曲线分离法等产量分离方法。GY is the actual grain yield per unit area. GB-W and GB-A are bumper or poor harvest methods of weighting and approximate ratio. KMF and CS are yield prediction methods based on key meteorological factors and climate suitability. L, D, M5, M3 and Q are yield separation methods of linear separation, percentage difference, 5-year sliding average, 3-year sliding average separation, and quadratic curve.

型的准确率最高，丰歉相似年法大概率模型的准确率最低；4 月 10 日和 5 月 10 日起报的 12 种预报模型的平均准确率分别为 93.98%、94.09%，说明越接近冬小麦成熟期，预报因子信息越全面，预报模型准确率越高。

图 2b 为各模型的拟合正确率，1993—2013 年 4 月 10 日和 5 月 10 日两种起报时间下，丰歉相似年法预报模型的正确率范围为 28.57%~42.86%(平均 36.9%)，关键气象因子法 5 种预报模型的正确率范围是 47.62%~66.67%(平均 59.52%)，气候适宜度法 5 种预报模型的正确率范围是 57.14%~85.71%(平均 75.24%)，拟合正确率总体排序为气候适宜度法>关键气象因子法>丰歉相似年法，关键气象因子法和气候适宜度法的 5 种预报模型正确率均明显高于丰歉相似年加权法和丰歉相似年大概率法的预报正确率。同类方法中不同预报模型进行比较，丰歉相似年法中加权模型正确率高于大概率模型，关键气象因子法二次曲线分离模型正确率最高、线性分离模型正确率位列第二，气候适宜度法 5 年滑动平均模型正确率最高、二次曲线和线性分离模型正确率并列第二。12 种模型正确率全部进行比较，则是气候适宜度法中 5 年滑动平均分离模型的正确率最高，丰歉相似年法大概率模型的正确率最低。两种起报时间下的平均正确率均为 62.3%。正确率数值明显小于准确率数值，说明所建立的预报模型对单产的模拟精度还有待进一步改进。

泰勒图能够将实际值和模拟值的相关系数、标准差放在一张极坐标中，可直观且较全面地评估多个模型的模拟能力和差异[21]，当模拟值与实际值之间的距离越近时，代表该模型的模拟能力越强。图 3 给出了江苏省冬小麦单产的泰勒图，图中黑色五角星为实际单产，12 种不同颜色的圆点为 12 种预报模

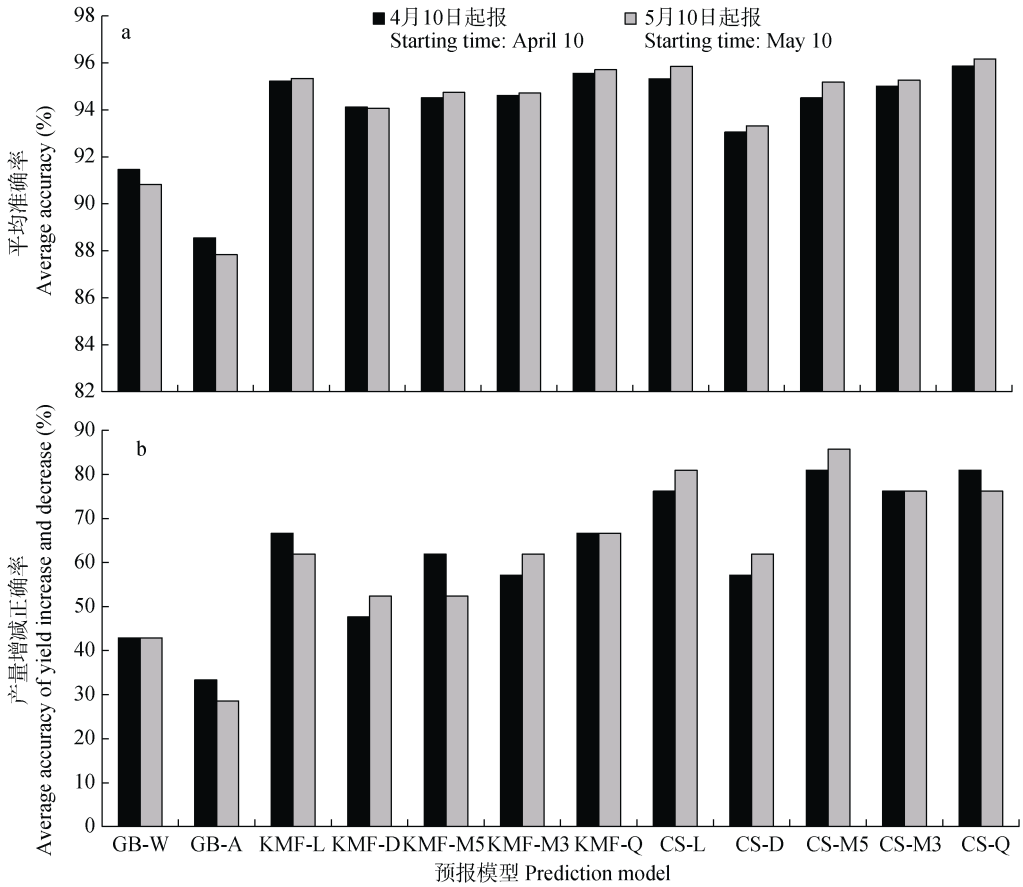

图 2　1993—2013 年江苏省冬小麦 12 种单产预报模型的历史拟合平均准确率(a)和单产增减正确率(b)

Fig. 2　Average accuracy of yield fitting (a) and average accuracy of yield increase and decrease (b) calculated by 12 yield prediction models in Jiangsu Province from 1993 to 2013

GB-W 和 GB-A 分别表示丰歉相似年法中的加权法和大概率法。KMF 和 CS 分别表示基于关键气象因子和气候适宜度的单产预测方法。L、D、M5、M3 和 Q 分别表示线性分离法、差值百分率分离法、5 年滑动平均分离法、3 年滑动平均分离法和二次曲线分离法等产量分离方法。GB-W and GB-A are bumper or poor harvest methods of weighting and approximate ratio. KMF and CS are yield prediction methods based on key meteorological factors and climate suitability. L, D, M5, M3 and Q are yield separation methods of linear separation, percentage difference, 5-year sliding average, 3-year sliding average separation, and quadratic curve.

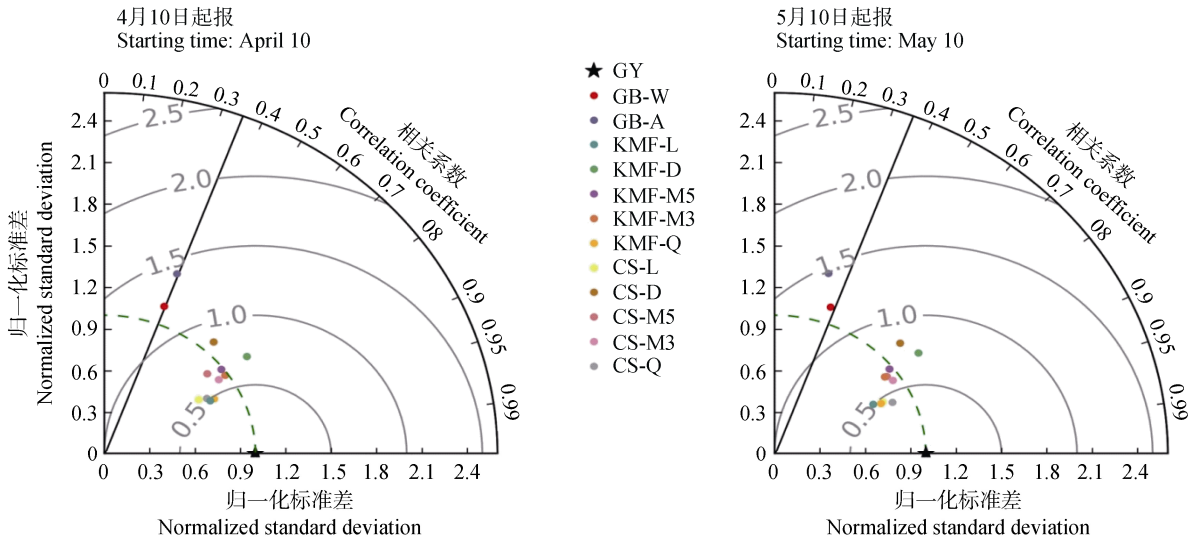

图 3 1993—2013 年江苏省冬小麦 12 种单产预报模型历史模拟值与实际值的泰勒图

Fig. 3 Taylor diagrams for wheat yield between the observations and simulation by 12 yield prediction models in Jiangsu Province from 1993 to 2013

GY 为单产实测值。GB-W 和 GB-A 分别表示丰歉相似年法中的加权法和大概率法。KMF 和 CS 分别表示基于关键气象因子和气候适宜度的单产预测方法。L、D、M5、M3 和 Q 分别表示线性分离法、差值百分率分离法、5 年滑动平均分离法、3 年滑动平均分离法和二次曲线分离法等产量分离方法。GY is the actual grain yield per unit area. GB-W and GB-A are bumper or poor harvest methods of weighting and approximate ratio. KMF and CS are yield prediction methods based on key meteorological factors and climate suitability. L, D, M5, M3 and Q are yield separation methods of linear separation, percentage difference, 5-year sliding average, 3-year sliding average separation, and quadratic curve.

型。1993—2013 年 4 月 10 日和 5 月 10 日两种起报时间下，除了丰歉相似年加权模型和大概率模型离实际值较远外，其余 10 个预报模型相对比较集中，与观测值的标准差为 0.5~0.9，其中气候适宜度和关键气象因子的二次曲线分离、线性分离法离实际值的距离最近，与观测值的标准差在 0.5 左右，说明这 4 种模型的模拟能力较强。从模拟值与观测值的相关系数来看，丰歉相似年法预报模型的相关系数范围是 0.263~0.348(平均 0.322)，关键气象因子法 5 种预报模型的相关系数范围是 0.778~0.887(平均 0.828)，气候适宜度法 5 种预报模型的相关系数范围是 0.666~0.901(平均 0.807)，关键气象因子法和气候适宜度法的 5 种预报模型模拟值与实际值的相关系数均通过了 $P<0.001$ 的显著性检验，明显高于丰歉相似年法 2 种预报模型的相关系数。关键气象因子法和气候适宜度法中均是二次曲线分离模型相关系数最高、线性分离模型位列第二；12 种模型正确率全部进行比较，则是气候适宜度法中二次曲线分离模型的相关系数最高，丰歉相似年法大概率模型的相关系数最低。比较 4 月 10 日和 5 月 10 日两种起报时间下的 12 种预报模型与实际值的距离总体相当，平均相关系数分别是 0.732、0.737，5 月 10 起报的模拟效果略好于 4 月 10 日起报的。

由此可见，经过 21 年的历史拟合检验，综合考虑准确率、正确率的排序与泰勒图，得到 3 类方法中最优预报模型分别是：丰歉加权模型、关键气象因子二次曲线分离模型和气候适宜度二次曲线分离模型。

2.2 最优模型集成与试报检验

利用 2014—2018 年的资料对 12 种预报模型进行试报检验，依旧发现丰歉相似法加权模型、关键气象因子二次曲线分离模型、气候适宜度二次曲线分离模型的准确率总体高于其他模型，正确率差异较小，因此采用这 3 种最优模型进行集成，目的是减小各模型的预报随机误差，增强预报值的稳定性。

由表 1 可知，4 月 10 日为起报时间，3 种模型中，2014 年和 2016 年气候适宜度二次曲线分离模型准确率排第一位，2017 年和 2018 年丰歉加权模型准确率排第一位，2015 年关键气象因子二次曲线分离模型准确率排第一位。5 月 10 日为起报时间，3 种模型中，2014—2016 年和 2018 年均是气候适宜度二次曲线分离模型准确率排第一位，2017 年丰歉加权模型准确率排第一位。两种起报时间下，按照权重进行最优模型集成后，预报准确率均得到提升，近 5 年平均准确率排序为：最优模型集成>气候适宜度二次曲线分离模型>丰歉相似年加权模型>关键气象因子二次曲线分离模型。

3 讨论与结论

3.1 讨论

关键气象因子和气候适宜度产量预报法都是基

表 1　2014—2018 年不同起报时间江苏省冬小麦最优模型和多模型集成单产预报值与实际值

Table 1　Winter wheat yield simulated by optimal yield forecasting models and multiple model integration for different forecast starting time and actual yield in Jiangsu Province from 2014 to 2018

起报时间 (月-日) Staring time (month-day)	年份 Year	实际单产 Actual yield ($kg \cdot hm^{-2}$)	GB-W		KMF-Q		CS-Q		最优模型集成 Integration of optimal model	
			预报单产 Predicted yield ($kg \cdot hm^{-2}$)	准确率 Accuracy (%)	预报单产 Predicted yield ($kg \cdot hm^{-2}$)	准确率 Accuracy (%)	预报单产 Predicted yield ($kg \cdot hm^{-2}$)	准确率 Accuracy (%)	预报单产 Predicted yield ($kg \cdot hm^{-2}$)	准确率 Accuracy (%)
04-10	2014	5 162	5 436	94.67	5 026	97.38	5 108	98.97	5 149	99.75
	2015	5 181	5 301	97.68	5 157	99.54	5 037	97.22	5 176	99.91
	2016	5 112	5 359	95.17	4 843	94.73	5 308	96.16	5 230	97.70
	2017	5 369	5 237	97.55	5 067	94.38	5 151	95.95	5 177	96.42
	2018	5 363	5 347	99.73	5 037	93.94	5 338	99.55	5 282	98.50
	平均 Average			96.96		95.99		97.57		98.46
05-10	2014	5 162	5 316	97.01	4 974	96.36	5 150	99.78	5 165	99.94
	2015	5 181	4 971	95.95	5 092	98.30	5 151	99.43	5 097	98.39
	2016	5 112	5 359	95.17	4 841	94.70	5 220	97.89	5 186	98.56
	2017	5 369	5 237	97.54	5 002	93.17	5 178	96.44	5 172	96.33
	2018	5 363	5 527	96.91	5 048	94.14	5 261	98.12	5 298	98.80
	平均 Average			96.52		95.33		98.33		98.41

GB-W 为丰歉相似年法中的加权法。KMF 和 CS 分别表示基于关键气象因子和气候适宜度的单产预测方法。Q 表示二次曲线产量分离法。GB-W is bumper or poor harvest methods of weighting. KMF and CS are yield prediction methods based on key meteorological factors and climate suitability. Q is yield separation method of quadratic curve.

于气象条件与产量之间的关系而建立，而准确掌握气象条件对冬小麦产量的影响必须以气象产量的准确获取为前提，因此选取合适的方法准确分离出趋势产量和气象产量对最终的预报结果准确与否非常关键。以往针对冬小麦产量预报的研究更注重预报方法差异对预报结果的影响[13-14,19]，忽略了产量分离方法的差异对预报结果的影响。线性分离、差值百分率、5 年滑动平均、3 年滑动平均、二次曲线等 5 种产量分离法是目前应用较为普遍的几种分离方法。赵东妮等[15]和李心怡等[17]对这几种方法的分离效果还专门进行过对比研究，结果表明这几种方法分离出的趋势产量与粮食产量总体增长特征相一致，且与实际生产力发展水平较为一致，分离出的气象产量总体能捕获出典型丰歉年中气象条件带来的产量变化。文中基于这 5 种产量分离法，分别建立了关键气象因子和气候适宜度产量预报模型，均是二次曲线分离模型预报准确率最高，准确率分别为 95.71%和 96.17%。

不同的预报方法表现出的预报性能差异与各方法的预报思路有关。丰歉相似年法是通过找历史相似年来进行单产的预报，但要通过气象条件找到与预报年真正相似的年份存在一定困难，因为历史样本有限，所以该方法历史拟合准确率低于关键气象因子法和气候适宜度法、且准确率年际变动幅度明显偏大，该方法历史拟合平均预报准确率为 89.67%。关键气象因子法是考虑了冬小麦生长发育时期内关键气象因子对产量的影响，筛选出的与单产相关性高的气象因子主要是累积降水量、积温、平均气温、累积日照时数。说明这 4 个因子对冬小麦单产具有关键影响作用，而且正负相关性与冬小麦生长过程中的生理需求比较吻合。单产与上年 10 月份旬动态累积降水量呈正相关，与上年 11 月—当年 5 月的动态累积降水量呈反相关，这与冬小麦生长过程中的水分需求是一致的，10 月份江苏省冬小麦处于播种期，适量的降水可以保证土壤墒情适宜，利于播种出苗，11 月后冬小麦需水量减少，雨量越多越不利于其生长；与累积日照时数始终呈正相关，在生长过程中光照越充足越利于其光合作用；与部分时段的积温或平均气温呈反相关，在冬小麦生长前期如果气温过高容易出现旺长苗，这对于后期产量的形成非常不利。单产与高温日数、低温日数、降雨日数、大雨日数等因子相关性不明显，该方法历史拟合平均预报准确率为 94.86%。气候适宜度法充分考虑了冬小麦生物学特性，利用冬小麦不同生育期

的上限温度、最适温度、下限温度、需水量、需光性等指标，采用模糊数学函数计算了气象条件的适宜程度，通过适宜度与单产之间的统计关系建立预报模型，而丰歉相似年法和关键气象因子法是从纯统计角度进行模型的构建，并未考虑冬小麦生长的特性，所以无论是拟合检验还是试报检验，总体上均为气候适宜度法的平均准确率更高，历史拟合平均预报准确率为 94.96%，这与已有结论[22-23]相一致，但该方法在丰歉趋势预报上具有一定的不稳定性。

经检验，单一产量预报方法的预报结果存在一定的不稳定性，这与邱美娟[12]研究得出的结论相一致。为了减小预报不确定性，文中确定了最优模型集成方法，即将丰歉相似年加权模型、关键气象因子二次曲线分离模型、气候适宜度二次曲线分离模型的预报结果进行加权集成，结果表明最优模型集成效果好于单一最优模型，更重要的是能减小各模型的预报随机误差，增强预报值的稳定性。

冬小麦单产预报模型的预报性能除了与预报方法本身有关以外，还与气象产量的分离精度有关，因为分离出的气象产量与实际情况越吻合，则越利于寻找气象条件与单产之间的关系，建立的预报模型准确率则越高。所以今后可以考虑通过提高产量分离精度的方式进一步提升单产预报模型的精度。另外，目前在进行最优模型集成计算时，对最优模型的权重赋值是基于经验而设定，今后可以考虑从预报准确率角度对权重系数进行科学设定。

3.2 结论

本研究在 5 种产量分离方法基础上，通过计算准确率、正确率、相关系数、标准差，经过拟合检验和试报检验，评估分析了丰歉相似年法、关键气象因子法、气候适宜度法及集成预报法在江苏冬小麦单产预报中的预报能力。得出如下结论:

1)4 月 10 日和 5 月 10 日两种起报时间下，丰歉相似年法、关键气象因子法、气候适宜度法 1993—2013 年历史拟合平均准确率分别为 89.67%、94.86%、94.96%；丰歉相似年加权法的预报准确率(历史拟合平均准确率 91.14%)高于丰歉相似年大概率法(历史拟合平均准确率 88.19%)；二次曲线分离法下的关键气象因子和气候适宜度预报模型的预报准确率分别为 95.63%、96.02%，均高于线性分离、差值百分率、5 年滑动平均、3 年滑动平均分离法下预报模型的预报准确率。

2)12 种单产预报模型均能较好地模拟出江苏全省冬小麦单产的年际总体变化特征；从 12 种单产预报模型中筛选出的 3 种最优模型分别是丰歉相似年加权模型、关键气象因子二次曲线分离模型、气候适宜度二次曲线分离模型，将 3 种最优模型的预报结果进行加权集成后的近 5 年预报准确率在 96.33%以上，预报效果好于单个最优模型。

3)不同起报时间，模型预报性能存在差异。对于拟合检验，5 月 10 日起报的准确率总体略高于 4 月 10 日起报的准确率，说明起报时间越接近冬小麦成熟期，预报因子信息越全面，则预报模型准确率越高。

本研究的对比分析结果，可为江苏省进行冬小麦单产预报时采用合理的预报模型提供科学依据，大幅减少模型筛选时间，通过最优模型集成可提高预报准确率，同时模型检验思路也可供外省借鉴。

参考文献 References

[1] 单琨，刘布春，李茂松，等. 基于花粉量的作物产量预测模型研究进展[J]. 中国农业气象, 2010, 31(2): 282–287
SHAN K, LIU B C, LI M S, et al. Research progress of pollen variable models for forecasting crop yield[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2010, 31(2): 282–287

[2] 池俊成，王兰君，刑树本，等. 作物产量预测技术在外贸决策中的应用[J]. 中国农业气象, 1997, 18(3): 45–46
CHI J C, WANG L J, XING S B, et al. Application of crops yield prediction method in foreign trade policy[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 1997, 18(3): 45–46

[3] 成林，刘荣花. 农学模式在冬小麦产量动态预报中的应用[J]. 气象与环境科学, 2017, 40(2): 28–32
CHENG L, LIU R H. Application of agronomic model in yield dynamic prediction of winter wheat[J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2017, 40(2): 28–32

[4] 邱美娟，宋迎波，王建林，等. 新型统计检验聚类方法在精细化农业气象产量预报中的应用[J]. 中国农业气象, 2014, 35(2): 187–194
QIU M J, SONG Y B, WANG J L, et al. Application of newly developed cluster analysis of statistical test in fine agro-meteorological yield prediction[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2014, 35(2): 187–194

[5] 陈艳玲，顾晓鹤，官阿都，等. 基于遥感信息和 WOFOST 模型参数同化的冬小麦单产估算方法研究[J]. 麦类作物学报, 2018, 38(9): 1127–1136
CHEN Y L, GU X H, GONG A D, et al. Estimation of winter wheat assimilation based on remote sensing information and WOFOST crop model[J]. Journal of Triticeae Crops, 2018, 38(9): 1127–1136

[6] 孙扬越，申双和. 作物生长模型的应用研究进展[J]. 中国农业气象, 2019, 40(7): 444–459
SUN Y Y, SHEN S H. Research progress in application of crop growth models[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2019, 40(7): 444–459

[7] 帅细强，陆魁东，黄晚华. 不同方法在湖南省早稻产量动态预报中的比较[J]. 应用气象学报, 2015, 26(1): 103–111
SHUAI X Q, LU K D, HUANG W H. A comparative study on

dynamic forecasting of early rice yield by using different methods in Hunan Province[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2015, 26(1): 103–111

[8] 黄健熙, 武思杰, 刘兴权, 等. 遥感信息与作物模型集合卡尔曼滤波同化的区域冬小麦产量预测[J]. 农业工程学报, 2012, 28(4): 142–148
HUANG J X, WU S J, LIU X Q, et al. Regional winter wheat yield forecasting based on assimilation of remote sensing data and crop growth model with Ensemble Kalman method[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(4): 142–148

[9] 杜春英, 李帅, 王晾晾, 等. 基于历史产量丰歉影响指数的黑龙江省水稻产量动态预报[J]. 中国农业气象, 2010, 31(3): 427–430
DU C Y, LI S, WANG L L, et al. Dynamic prediction method for rice yield based on influence index for bumper or poor harvest from historic yield in Heilongjiang Province[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2010, 31(3): 427–430

[10] 邱美娟, 郭春明, 王冬妮, 等. 基于气候适宜度指数的吉林省大豆单产动态预报研究[J]. 大豆科学, 2018, 37(3): 445–451
QIU M J, GUO C M, WANG D N, et al. Study of soybean yield forecast in Jilin Province based on climate suitability index method[J]. Soybean Science, 2018, 37(3): 445–451

[11] 李树岩, 刘伟昌. 基于气象关键气象因子的河南省夏玉米产量预报研究[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(5): 223–227
LI S Y, LIU W C. Research on the yield prediction of summer maize in Henan Province based on meteorological key factors[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, 32(5): 223–227

[12] 邱美娟. 基于动力与统计相结合的精细化冬小麦产量动态预报集成技术研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2014
QIU M J. Research on integrated technology of fine yield dynamic prediction of winter wheat based on the combination of impetus and statistics[D]. Beijing: China Academy of Meteorological Sciences, 2014

[13] 邱美娟, 刘布春, 刘园, 等. 两种不同产量历史丰歉气象影响指数确定方法在农业气象产量预报中的对比研究[J]. 气象与环境科学, 2019, 42(1): 41–46
QIU M J, LIU B C, LIU Y, et al. Comparative study of two different methods for determining meteorological impact index of historical yield in agrometeorological yield prediction[J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2019, 42(1): 41–46

[14] 王贺然, 张慧, 王莹, 等. 基于两种方法建立辽宁大豆产量丰歉预报模型对比[J]. 中国农业气象, 2018, 39(11): 725–738
WANG H R, ZHANG H, WANG Y, et al. A comparative study on forecast model for soybean yield by using different statistic methods in Liaoning Province[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2018, 39(11): 725–738

[15] 赵东妮, 王艳华, 任传友, 等. 3 种水稻趋势产量拟合方法的比较分析[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(3): 345–355
ZHAO D N, WANG Y H, REN C Y, et al. Comparative analysis of three fitting methods of rice trend yield[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(3): 345–355

[16] 房世波. 分离趋势产量和气候产量的方法探讨[J]. 自然灾害学报, 2011, 20(6): 13–18
FANG S B. Exploration of method for discrimination between trend crop yield and climatic fluctuant yield[J]. Journal of Natural Disasters, 2011, 20(6): 13–18

[17] 李心怡, 张祎, 赵艳霞, 等.主要作物产量分离方法比较[J]. 应用气象学报, 2020, 31(1): 74–82
LI X D, ZHANG Y, ZHAO Y X, et al. Comparative study on main crop yield separation methods[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2020, 31(1): 74–82

[18] 徐敏, 吴洪颜, 张佩, 等. 基于气候适宜度的江苏水稻气候年景预测方法[J]. 气象, 2018, 44(9): 1200–1207
XU M, WU H Y, ZHANG P, et al. Long-term prediction method of rice annual agricultural climate status in Jiangsu Province based on climatic suitability[J]. Meteorological Monthly, 2018, 44(9): 1200–1207

[19] 邱美娟, 宋迎波, 王建林, 等. 山东省冬小麦产量动态集成预报方法[J]. 应用气象学报, 2016, 27(2): 191–200
QIU M J, SONG Y B, WANG J L, et al. Integrated technology of yield dynamic prediction of winter wheat in Shandong Province[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2016, 27(2): 191–200

[20] 魏瑞江, 王鑫. 气候适宜度国内外研究进展及展望[J]. 地球科学进展, 2019, 34(6): 584–595
WEI R J, WANG X. Progress and prospects of research on climatic suitability at home and abroad[J]. Advances in Earth Science, 2019, 34(6): 584–595

[21] TAYLOR K E. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2001, 106(D7): 7183–7192

[22] LOBELL D B, ASNER G P. Climate and management contributions to recent trends in U. S. agricultural yields[J]. Science, 2003, 299(5609): 1032–1032

[23] ALMARAZ J J, MABOOD F, ZHOU X, et al. Climate change, weather variability and corn yield at a higher latitude locale: Southwestern Quebec[J]. Climatic Change, 2008, 88(2): 187–197