

农业气象观测站冬小麦观测产量资料在产量预报业务中的应用研究*

刘维, 宋迎波**

国家气象中心, 北京, 100081

摘要: 基于农业气象观测站冬小麦观测产量和观测站所在县统计部门公布产量, 通过冬小麦种植面积加权集成到省级和全国尺度的观测及公布产量, 对比分析两者产量序列差异, 结合气候适宜指数方法开展全国尺度冬小麦观测和公布产量预报并对预报准确率进行对比分析。结果表明: (1) 除新疆外, 各省观测产量和公布产量相关性较好, 且通过显著性检验; 全国尺度观测产量与公布产量相关系数达到 0.97, 观测产量可以反映公布产量的变化规律。(2) 全国尺度观测和公布产量的气象产量增减趋势一致性较好, 适宜开展产量预报业务; 省级尺度观测产量则不适宜开展产量预报业务。(3) 基于观测产量和公布产量序列开展自身序列单产预报时, 准确率均较高, 且公布产量预报准确率普遍高于观测产量; 利用观测产量对公布产量进行转换预报时, 准确率有所下降。综合来说, 由于观测产量实时性、客观性和代表性强, 因此, 开展基于观测产量序列的全国尺度冬小麦产量预报具有业务可行性, 可以为作物产量预报提供新的数据支撑。

关键词: 农业气象观测站观测产量, 冬小麦, 业务应用, 产量预报

中图分类号: S161

文献标识码: A

DOI:

Research on the operational application of observed yield of winter wheat from agrometeorological stations in yield prediction

Liu Wei, Song Yingbo

National Meteorological Center, Beijing, 100081

Abstract: The observed yield of winter wheat from 123 agrometeorological observation stations and the announced yield of winter wheat at county level where the observation station was located were used to integrate the observed yield and announced yield at province and national level by the proportion of winter wheat planting area. And the observed yield and announced yield sequences of winter wheat were compared and analyzed at province and national level. The observed and announced yield of winter wheat at national level were predicted based on the climate suitability index forecast method. The forecast accuracy of different yield sequences were compared and analyzed. The results showed that: (1) the observed yield was large than the announced yield at province level in all provinces, and the difference between the two yields differed markedly. The correlation coefficient between observed and announced yield was good in each province and the correlation passed the significant test except Xinjiang province. The correlation coefficient between observed yield and announced yield at national level reached 0.97, and the observed yield could reflect the characteristic of announced yield. (2) The percent of consistency statistics of trend meteorological yield of observed and announced yield remained good at national level, so it was suitable to carry out yield prediction. While it was unsuitable to carry out yield prediction at province level due to the low percent. (3) The accuracy of different yield sequences in forecasting their own sequences was high and the accuracy of announced yield was higher than the observed yield. The accuracy of the forecast conversion of the announced yield by using the observed yield would be reduced. Conclusively, it is feasible to carry out yield forecast at national level based on the observed yield series because of the real-time, objectivity and representative of the observed yield. At the same time, the new yield series could provide new data

* 国家气象中心预报员专项 (Y202117) 和中国气象局创新发展专项共同资助

作者简介: 刘维 (1986-), 主要从事作物产量预报和作物模型研究。E-mail: rainvswindvs@163.com

**通讯作者: 宋迎波 (1969-), 主要从事作物产量预报研究。E-mail: songyb@cma.gov.cn

support for yield forecast.

Key Words: observed yield from agrometeorological station, winter wheat, operational application, yield prediction

引言

农作物产量预报是现代农业气象服务的重要工作之一，是保障国家粮食安全的重要举措，当前气象部门作物产量预报主要是对作物的平均单产与种植面积进行预测，种植面积一是通过卫星遥感技术进行提取（钱永兰等，2007；黄健熙等，2017；杨珺雯等，2018），二是根据统计局提供的种植意向进行估算。而作物平均单产的预测方法较多，除了传统的数理统计（邱美娟等，2015；侯英雨等，2018；徐敏等，2020）方法以外，遥感模型估产（陈鹏飞等，2013；张东霞等，2014；谭昌伟等，2015）、作物生长模型模拟（秦鹏程等，2016；王雪姣等，2017；马鸿元等，2018）、机器学习（王海军等，2013；刘峻明等，2019；李颖和陈怀亮，2020）、多模式集成预报（Huang et al, 2015；Li et al, 2015；Yao et al, 2015）等新技术与新方法的不断应用也拓展了单产的预报思路。近年来国家气象中心不断发展与改进作物产量预报技术，全年粮食产量预报准确率不断提升，尤其是近 10 年全年粮食平均单产的预报准确率达 99.5%，冬小麦、玉米、水稻等主要作物平均单产预报准确率也均保持在较高水平。

开展作物产量预报除了需要相关预报技术方法以外，产量数据序列是建立各种算法模型的基础，但在作物产量预报中对产量数据序列的研究相对较少。目前应用的产量数据来源于统计局公布数据，存在一定的滞后性，尤其是县级尺度的产量资料获取难度更大。从上世纪 80 年代起农业气象观测业务开始恢复运行，2010 年之前农业气象观测站点的观测资料主要采取气象旬（月）报方式进行编报与传输；2010 年之后农业气象测报业务系统软件正式在全国农业气象观测站开展业务运行，作物生长发育信息、自然物候信息和畜牧气象信息等能及时上传。目前气象部门拥有 653 个农业气象观测站，各个站点都会按照观测规范定期监测作物生长状况，包括作物生育期、株高、干物质、叶面积指数等，当观测的作物成熟收获后会对单位面积产量进行实测，并将观测产量上报国家气象信息中心用以建立历史观测产量的数据库。

目前气象部门积累了大量的农业气象观测资料，这也成为气象部门开展为农服务业务的基础，但是当前对农业气象观测站作物观测数据尤其是观测产量的研究大多集中在农业气象灾害评估（曹雯等，2019；马青荣等，2020；姜丽霞等，2021）、气候变化影响（谭凯炎等，2017；李勤英等，2018）、作物模型模拟（李秀芬等，2016；张阳等，2018）等方面，而对观测产量本身的质量、稳定性及在产量预报业务应用的研究报道几乎没有。本文在利用前期观测产量与统计局公布产量对比分析的基础上（刘维等，2021），针对观测产量和公布产量数据序列，基于气候适宜指数预报方法开展全国尺度冬小麦产量预报，对不同产量序列预报准确率进行对比分析，以确定基于观测产量序列开展产量预报业务的可行性，为作物产量预报提供新的数据支撑。

1、材料和方法

1.1 研究区域

冬小麦观测产量台站主要集中河南、山东、安徽等 10 个省（区），2013-2017 年统计数据显示，上述地区冬小麦 5a 平均总产量全国占比超过 90%，尤其河南、山东、安徽、河北、江苏 5 省占比超过 82%，是当前全国最重要的冬小麦生产地；本文选择的经过数据质量控制

的 123 个农业气象试验站主要集中在上述 5 个省份（图 1）。

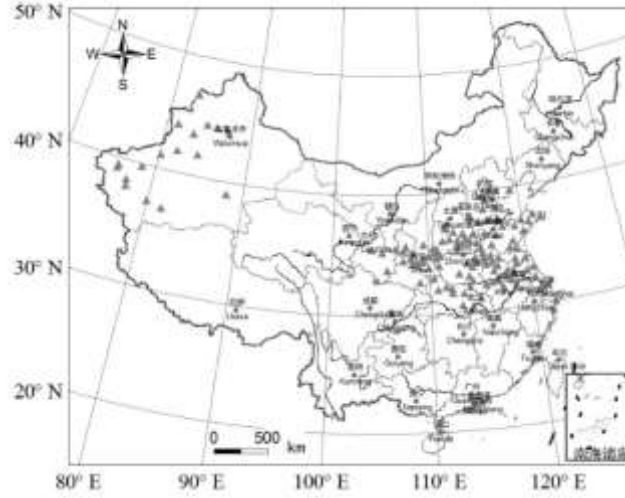


图 1 冬小麦观测产量站点分布图

Fig.1 The distribution of agrometeorological observation stations for winter wheat

1.2 研究方法

1.2.1 产量序列建立

冬小麦省级产量序列有两种，一是国家统计局公布的各省冬小麦单产，称为省公布产量；二是由省内各县观测产量加权集成求得，即以省内各观测站所在县的 2006–2010 年 5a 冬小麦平均种植面积占比（占省内所有观测站所在县种植面积之和）为权重，对各个观测站观测单产进行加权集成，由于获取的统计局公布县级产量数据时段为 1981–2010 年，导致无法使用逐年种植面积进行加权，故使用统计数据年限最新的 5a 平均面积进行加权集成，进而得到所在省的冬小麦平均单产（刘维等，2021），称为省观测产量。

全国尺度冬小麦单产序列有两种，一是国家统计局公布的全国冬小麦平均单产，称为全国公布产量；二是由各省（区）冬小麦观测产量集成求得，即由各省（区）冬小麦逐年种植面积占比（占 10 个省（区）种植面积之和）为权重，与逐年省级观测产量加权集成，得到全国冬小麦平均单产，称为全国观测产量。

1.2.2 气象产量

农作物产量与作物品种创新、农业技术管理水平提升、种植制度变更以及全球气候变化等因素息息相关，作物产量可以按照时间序列分解为趋势产量、气象产量和随机产量，一般情况下不考虑随机产量（Lobell et al, 2011; 刘维等，2018），因此作物产量可简单表示为：

$$Y = Y_t + Y_w \quad (1)$$

其中 Y 为作物实际产量， Y_t 为趋势产量， Y_w 为气象产量。

本文利用二次曲线分离方法模拟趋势产量。二次曲线分离是指利用预报年之前的实际产量和年份建立相关方程，由此计算趋势产量：

$$Y_t = aX^2 + bX + c \quad (2)$$

式中， X 为时间序列（即 1991, 1992, ..., 2017），其中 a 、 b 、 c 均为模拟系数，由最小二乘法计算得出（崔日鲜，2014），由此方程计算出预报年的 Y_t 即为预报年的趋势产量。

由于各地冬小麦种植品种、管理方式存在一定差异，采用相对气象产量来表征气象产量的差异性，使得不同产量分离方法下各省不同产量序列存在可比性，气象产量可表示为：

$$Y_i = Y_w / Y_t \times 100\% \quad (3)$$

式中， $Y_i < 0$ 表明当年气象条件不利于作物增产，即为减产年； $Y_i > 0$ 表明当年气象条件利于

作物增产，即为增产年。业务服务中将历年气象产量求和，得出的值越趋近于零，表明产量分离的效果越好：

$$SumY = \sum_1^j Y_i \quad (4)$$

式中， $SumY$ 为某地区历年气象产量之和， j 为参与计算的年份数。

1.2.3 产量预报方法

气候适宜指数预报方法是利用作物生育期内的光温水资料，结合不同发育期生物学特性，建立作物不同生育时段的温度、日照和水分适宜度及气候适宜度，利用逐句的气候适宜度加权构建作物播种至某一时段的气候适宜指数，利用气候适宜指数与气象产量构建作物产量动态预报模型（宋迎波等，2020）：

$$F(c_{\text{旬}}) = \sqrt[3]{F(t_{\text{旬}}) \times F(s_{\text{旬}}) \times F(p_{\text{旬}})} \quad (5)$$

$$F(c) = \sum_{i=1}^n K_i F_i(c_{\text{旬}}) \quad (6)$$

$$K_i = R_i / \sum_{i=1}^n R_i \quad (7)$$

$$Y_i = a \times F(c) + b \quad (8)$$

式中， $F(c_{\text{旬}})$ 为作物旬气候适宜度， $F(c)$ 为作物播种至某一句的气候适宜指数， K_i 为各旬气候适宜度对产量的影响系数， n 为播种至某旬的旬数， R_i 为区域某旬气候适宜度与气象产量的相关系数， Y_i 为作物气象产量， a 和 b 为模拟系数。本文利用气候适宜度的方法基于县气象站点的光温水适宜度，计算全国光温水适宜度和全国气候适宜度指数，并与全国尺度观测产量和公布产量分离后的气象产量进行建模，开展产量预报，并对全国尺度冬小麦观测产量和公布产量的预报结论进行对比分析。

2、结果与分析

2.1 产量对比

1991-2017年各省（区）观测产量与公布产量对比分析结果表明（表1），所有省（区）观测产量均大于公布产量，除河南、河北和新疆差异在 620 kg hm^{-2} 以下外，其余省都在 1000 kg hm^{-2} 以上，其中陕西和甘肃在 1500 kg hm^{-2} 以上。从省级观测产量与公布产量两者均方根误差来看，河南和新疆观测产量均方根误差小于公布产量，表明这两省的观测产量相对公布产量波动较小，产量水平相对稳定。10省（区）观测产量与公布产量相关系数分析结果表明，9省（区）均通过0.05信度的显著性检验，整体上相关性较好，其中，河南、山东、安徽、河北4省观测产量与公布产量间的相关系数高于0.90；仅新疆两者相关系数为0.10，且未通过显著性检验，表明新疆观测产量和公布产量不具有相关性，观测产量不能反映公布产量的变化情况。从10省（区）历年观测产量和公布产量对比图可以看出（图2），整体上观测产量与公布产量变化趋势较为接近，省级观测产量总体略大于公布产量，这也同站点尺度分析结果相吻合（刘维等，2021）。

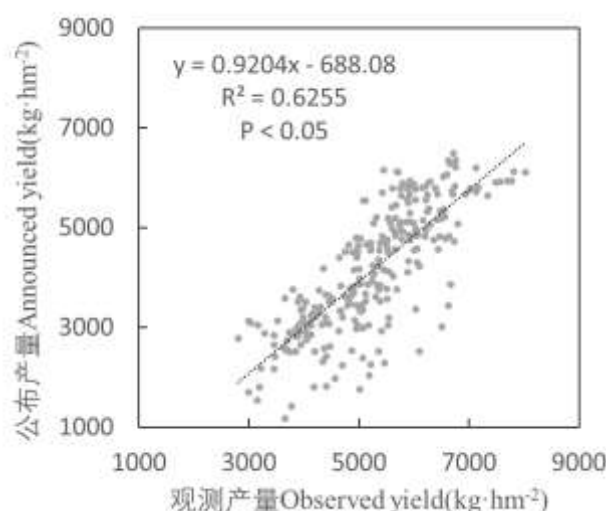


图2 省级冬小麦观测产量和公布产量对比

Fig.2 Comparison on observed yield and announced yield of winter wheat at province level

1991-2017 年全国观测产量和全国公布产量进行分析发现（表1），全国平均观测产量比公布产量高 1118 kg hm^{-2} ，观测产量均方根误差也高于公布产量；从两者逐年变化来看（图3左），观测产量各年均高于公布产量，偏高比例在 25% 上下，但两者拟合增减趋势基本上保持一致，公布产量的 R^2 略高于观测产量。从两者拟合上来看（图3右），全国观测产量与公布产量相关系数为 0.97，通过 0.05 信度的显著性检验，表明两者相关性较高，观测产量能够反映公布产量的变化情况。

表1 冬小麦观测产量和公布产量差值对比

Table 1 The yield average between observed yield and announced yield

省份 Province	观测与公布产量差值 (kg hm^{-2})	RMSE1 (kg hm^{-2})	RMSE2 (kg hm^{-2})	r
河南 Henan	494	807	932	0.95*
山东 Shandong	1013	948	513	0.93*
安徽 Anhui	1158	1108	1028	0.91*
河北 Hebei	617	913	780	0.92*
江苏 Jiangsu	1350	557	513	0.77*
新疆 Xinjiang	203	311	450	0.10
湖北 Hubei	1035	703	407	0.61*
陕西 Shaanxi	1566	918	524	0.77*
山西 Shanxi	1199	711	443	0.80*
甘肃 Gansu	2322	843	500	0.55*
全国 National	1118	791	688	0.97*

注：RMSE1 为观测产量的均方根误差，RMSE2 为的公布产量均方根误差，r 为观测产量与公布产量间相关系数，*表示通过 0.05 的显著性检验。Notes: RMSE1 means observed yield, RMSE2 means announced yield, r means the correlation coefficient between observed yield and announced yield, * means $P < 0.05$.

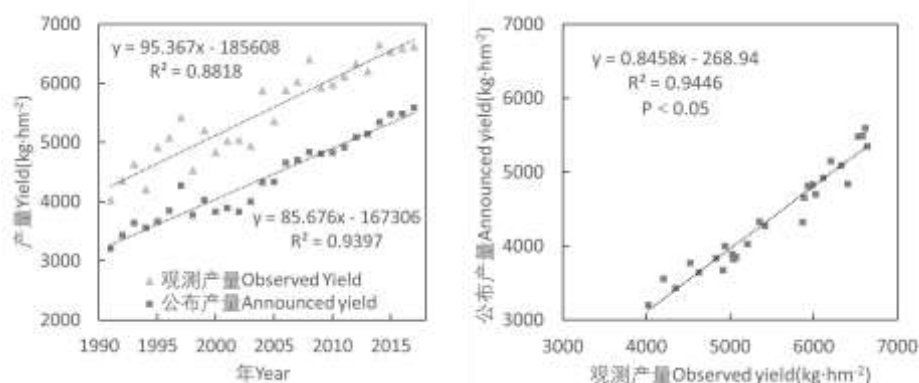


图3 全国冬小麦观测产量和公布产量时间变化（左）及两者拟合（右）

Fig.3 Temporal variation characteristics and fitting comparisons on observed yield and announced yield of winter wheat at national level

2.2 产量分离检验

对 1991-2017 年冬小麦不同产量序列分离的气象产量进行效果检验，从表 2 可以看出，各省观测产量和公布产量的历年气象产量之和 $SumY$ 均趋近于 0，尤其是山东省两者效果最好。针对观测产量来说，陕西、河北、安徽 3 省 $SumY$ 绝对值均大于 0.2；仅河北省 $SumY$ 为负值，表明 27a 之间总体上河北省气象条件不利于冬小麦产量增加。针对公布产量来说，甘肃、山西、湖北 3 省 $SumY$ 绝对值均大于 0.2；且甘肃、湖北、新疆、河南、江苏 5 省 $SumY$ 为负值，表明上述 5 省 27a 之间气象条件总体上不利于冬小麦产量增加，但由于农业生产管理水平持续改进、作物品种不断更新、病虫害防治能力大幅提高等原因，使得虽然气象产量为负值，但冬小麦实际产量仍总体保持增产的趋势。

从 1991-2017 年分离后的逐年气象产量增减趋势一致性百分比可以看出，除山西和山东两省一致性百分比高于 80% 外，其余 8 个省（区）均不足 80%，湖北不足 60%；表明对省级尺度来说，同一省份不同产量序列分离后的气象产量存在正负值差异的年份较多，即气象条件对观测产量和公布产量的贡献相反。对某一地区某一年份来说，气象条件对作物的影响基本固定，因此气象产量增减趋势一致性百分比偏低表明观测产量不适用于开展省级尺度产量预报，会导致基于气象产量构建的预报模型产生误差，从而降低作物产量预报准确率。

表 2 各省观测产量与公布产量 $SumY$ 对比和气象产量增减趋势一致性百分比

Table 2 Comparison on the $SumY$ and the percent of consistency statistics of trend meteorological yield of observed yield and announced yield in each province

省份	观测产量 Observed yield	公布产量 Announced yield	百分比%
河南 Henan	0.01	-0.06	74.1
山东 Shandong	0.01	0.00	81.5
安徽 Anhui	0.27	0.12	74.1
河北 Hebei	-0.52	0.10	74.1
江苏 Jiangsu	0.07	-0.03	69.6
新疆 Xinjiang	0.00	-0.14	60.9
湖北 Hubei	0.05	-0.23	55.6
陕西 Shaanxi	1.09	0.07	66.7
山西 Shanxi	0.07	0.36	88.9
甘肃 Gansu	0.14	-0.38	63.0
全国 National	0.00	0.02	88.9

对于全国尺度来说，观测产量和公布产量的历年气象产量之和 $\sum Y$ 均趋近于 0，表明二次曲线分离整体上适用于冬小麦产量分离，且分离效果较好。气象产量增减趋势一致性百分比为 88.9%，即 1991-2017 年 27a 中有 24a 的气象产量趋势一致，仅 1992、2009 和 2015 年增减趋势相反（图 4），表明总体上观测产量和公布产量的趋势一致，与图 3 右的结果相吻合，因此，可以用观测产量的变化来反映公布产量的变化。此外，2010 年之前两者气象产量波动均较大，2010 年之后波动趋势相对较小，这也同实际观测产量和公布产量在 2010 年后趋于稳定保持一致，与图 3 左 2010 年后的变化趋势相吻合。

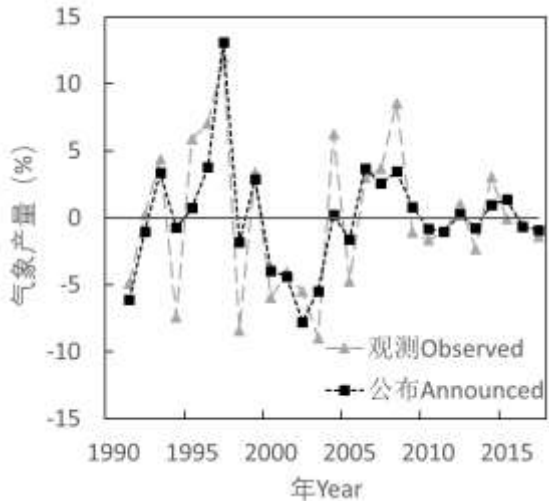


图 4 全国尺度冬小麦观测和公布产量的气象产量对比

Fig.4 Comparison on the meteorological yield of observed and announced yield of winter wheat at national level

2.3 全国冬小麦产量预报结果检验

利用 1991-2012 年、1991-2013 年、1991-2014 年、1991-2015 年、1991-2016 年全国冬小麦观测产量和公布产量的气象产量与播种至 5 月 20 日的气候适宜指数建立 2013-2017 年全国冬小麦单产预报模型，并对两者预报结果进行对比。结果表明（表 3），对于观测产量来说，除 2016 年预报准确率不足 96%以外，其余 4 年准确率均在 98.0%以上，其中 2017 年达 99.9%，5a 平均准确率为 98.5%。对于公布产量来说，5a 平均预报准确率高于观测产量，且各年准确率均高于 98.5%。利用观测产量和公布产量的拟合方程将预报的全国冬小麦观测产量换算为公布产量后发现，预报准确率普遍低于观测和公布产量预报准确率，其中 2016 年准确率仅为 92.0%，5a 平均准确率为 96.0%，仅 2014 年维持在较高水平；换算后的准确率降低主要是一方面由于观测产量序列经拟合转换为公布产量序列时，拟合统计方程存在系统性误差；另一方面，由于观测产量序列年际间波动较大，观测产量自身预报的准确率略偏低，上述两种因素叠加，一定程度上导致转换后的冬小麦产量预报准确率有所降低。

表 3 全国冬小麦 2013-2017 年单产预报准确率（%）

Table 3 Forecast accuracy of yield of winter wheat from 2013 to 2017

年份 Year	观测产量 Observed yield	公布产量 Announced yield	观测换算公布 Observed to announced
2013	99.4	99.2	96.2
2014	99.3	99.9	99.2
2015	98.4	99.4	97.5
2016	95.5	98.6	92.0
2017	99.9	99.4	95.3
5 年平均	98.5	99.3	96.0

注：灰色为预报准确率最高。Note: gray means the highest forecast accuracy.

从全国冬小麦观测和公布产量的预报准确率来看,不同产量序列在开展自身序列的单产预报时,准确率均较高;而利用观测产量对公布产量进行换算预报时,受观测产量自身预报准确率和转换模型系统误差影响,预报准确率有所降低。研究表明,由于观测产量实时性、客观性和代表性强,因此,基于观测产量序列开展全国尺度的冬小麦平均单产预报在产量预报中业务中具有较好的应用价值,既可以为产量预报提供新的数据来源,又可以把历史产量观测数据激活使用,提高观测资料的业务应用能力。

3、讨论与结论

当前农业气象观测站中作物发育期观测资料已经在农业气象业务中得到大量应用,支撑了农业气象业务的发展,但是作物观测产量数据却基本没有进行业务应用,主要存在以下几个问题:一是部分台站观测作物调整,导致观测产量序列缺失;二是部分台站观测资料缺测年份较多,观测产量数据不连续;三是台站同一作物观测产量年际间波动较大,导致数据可靠性下降;四是当前直接使用观测产量资料开展农业气象服务的业务基本不涉及。上述原因导致当前农业气象观测站观测产量数据一直没有得到有效充分的利用,且每年还有大量的观测产量新增进入数据库中。

由于部分省份冬小麦观测产量资料的缺失,文中仅利用10个主产省(区)面积权重加权集成全国尺度观测产量序列,会与实际产量存在一定误差。冬小麦不同空间尺度、不同产量序列对比结果表明,省级和全国尺度观测产量均高于公布产量,但两者存在较好的相关性,尤其是全国尺度两种产量数据相关系数达0.97,可以用观测产量来表征公布产量,从而为开展产量预报提供了新的数据基础。

由于农业气象观测站观测产量直接反映了各地气象条件对作物单产的影响,可实时获取,且受其他外在因素的影响小,因而更具实时性、客观性和代表性;但由于各省观测站数量远少于主产县个数,因此,目前基于观测产量开展县级尺度作物产量预报尚不具可行性。通过面积加权集成到省级尺度的冬小麦观测产量后,部分省份两种产量序列相关性尽管通过显著性检验但相关系数不高,且由于建立预报模型的气象产量与统计局公布的统计产量分离后的气象产量出现多数年份增减趋势不一致的情况,会导致省级尺度预报模型预报准确率降低,同时也不能正确反映气象条件对作物最终产量的影响,表明基于观测产量开展省级尺度作物产量预报也存在不足。从全国尺度预报结果看,利用各观测站观测产量结合面积权重构建升尺度全国的作物产量预报模型,其预报准确率基本可以维持在一个较高的水平,可以为产量预报提供新的数据支撑和参考预报,同时可对观测产量的自身可靠性与稳定性进行评估。本研究更重要的意义在于可以将整理后的县-省-全国尺度冬小麦观测产量数据应用到日常的农业气象服务中,由于台站观测产量跟气象条件密切相关,可结合作物观测产量三要素开展农业气象灾害评估、作物年景评估等农业气象业务,提升服务的科学性。

本文对比了由县尺度冬小麦观测产量进行加权集成后的省级、全国尺度观测产量序列和统计局公布的省级、全国尺度公布产量序列,并利用气候适宜指数方法开展全国尺度的冬小麦产量预报,对预报结果进行对比分析后,得到以下结论:

(1) 省级冬小麦观测产量值均高于公布产量,除新疆外,其余各省观测产量和公布产量相关性较好;全国尺度冬小麦观测产量和公布产量均方根误差较为接近,且两者拟合效果好,观测产量可以反映公布产量的变化规律。

(2) 由于省级尺度观测产量和公布产量气象产量增减趋势一致性百分比较低,因此省级尺度观测产量不适宜用于开展产量预报业务;而全国尺度下由于观测和公布产量的气象产量增减趋势一致性较好,可为全国区域冬小麦产量预报提供新的数据支持。

(3) 利用观测产量和公布产量序列开展冬小麦产量预报时,不同产量序列预报自身序列的单产准确率较高,且公布产量准确率普遍高于观测产量;基于观测产量预报结果对公布

产量进行转换预报时, 5a 中有 4a 预报准确率均存在不同程度下降。

(4) 由于观测产量资料实时性、客观性和代表性强, 基于农业气象观测站观测产量序列开展全国尺度冬小麦产量预报具有业务应用的可行性和参考性。

参考文献

- 曹雯, 成林, 杨太明, 等, 2019. 河南省冬小麦拔节-抽穗期干旱天气指数保险研究[J]. 气象, 45(2): 274-281. Cao W, Cheng L, Yang T M, et al, 2019. Study on weather index insurance of drought damage at jointing-heading stage of winter wheat in Henan Province[J]. Meteor Mon, 45(2): 274-281 (in Chinese).
- 陈鹏飞, 杨飞, 杜佳, 2013. 基于环境减灾卫星时序归一化植被指数的冬小麦产量估测[J]. 农业工程学报, 29(11): 124-131. Chen P F, Yang F, Du J, 2013. Yield forecasting for winter wheat using time series NDVI from HJ satellite[J]. Trans Chin Soc Agric Eng, 29(11): 124-131 (in Chinese).
- 崔日鲜, 2014. 山东省太阳总辐射的时空变化特征分析[J]. 自然资源学报, 29(10): 1780-1791. Cui R X, 2014. The analysis of spatiotemporal variation characteristics of global solar radiation in Shandong province[J]. J Nat Resour, 29(10): 1780-1791 (in Chinese).
- 侯英雨, 张蕾, 吴门新, 等, 2018. 国家级现代农业气象业务技术进展[J]. 应用气象学报, 29(6): 641-656. Hou Y Y, Zhang L, Wu M X, et al, 2018. Advances of modern agrometeorological service and technology in China[J]. J Appl Meteor Sci, 29(6): 641-656 (in Chinese).
- 黄健熙, 侯裔焯, 苏伟, 等, 2017. 基于 GF-1 WFV 数据的玉米与大豆种植面积提取方法[J]. 农业工程学报, 33(7): 164-170. Huang J X, Hou Y Z, Su W, et al, 2017. Mapping corn and soybean cropped area with GF-1 WFV data[J]. Trans Chin Soc Agric Eng, 33(7): 164-170 (in Chinese).
- 姜丽霞, 赵慧颖, 曲辉辉, 等, 2021. 黑龙江省玉米干旱与低温冷害复合逆境对产量的影响[J]. 气象, 47(1): 94-105. Jiang L X, Zhao H Y, Qu H H, et al, 2021. Effect of drought and cold damage cross-stress on maize yield in Heilongjiang Province[J]. Meteor Mon, 47(1): 94-105 (in Chinese).
- 李勤英, 姚凤梅, 张佳华, 等, 2018. 不同农艺措施对缩小冬小麦产量差和提高氮肥利用率的评价[J]. 中国农业气象, 39(6): 370-379. Li Q Y, Yao F M, Zhang J H, et al, 2018. Evaluation of different agronomic measures on narrowing the yield gap and improving nitrogen use efficiency of winter wheat[J]. Chin J Agrometeorol, 39(6): 370-379 (in Chinese).
- 李秀芬, 马树庆, 赵慧颖, 等, 2016. 基于WOFOST模型的内蒙河套灌区玉米低温冷害评价[J]. 中国农业气象, 37(3): 352-360. Li X F, Ma S Q, Zhao H Y, et al, 2016. Evaluation on maize chilling injury based on WOFOST model in Hetao irrigation region in Inner Mongolia[J]. Chin J Agrometeorol, 37(3): 352-360 (in Chinese).
- 李颖, 陈怀亮, 2020. 机器学习技术在现代农业气象中的应用[J]. 应用气象学报, 31(3): 257-266. Li Y, Chen H L, 2020. Review of machine learning approaches for modern agrometeorology[J]. J Appl Meteor Sci, 31(3): 257-266 (in Chinese).
- 刘峻明, 和晓彤, 王鹏新, 等, 2019. 长时间序列气象数据结合随机森林法早期预测冬小麦产量[J]. 农业工程学报, 35(6): 158-166. Liu J M, He X T, Wang P X, et al, 2019. Early prediction of winter wheat yield with long time series meteorological data and random forest method[J]. Transa Chin Soc Agric Eng, 35(6): 158-166 (in Chinese).

刘维, 李伟君, 何亮, 等, 2018. 基于 SPI 判定的东北春玉米生长季干旱对产量的影响[J]. 农业工程学报, 34(22): 121-127. Liu W, Li Y J, He L, et al, 2018. Effect of growing season drought on spring maize yields in Northeast China based on standardized precipitation index[J]. Trans Chin Soc Agric Eng, 34(22): 121-127 (in Chinese).

刘维, 孟翠丽, 宋迎波, 2021. 冬小麦观测产量与统计产量的差异性分析[J]. 中国农业气象, 42(2): 123-133. Liu W, Meng C L, Song Y B, 2021. Studies on the difference of observed yield and statistical yield of winter wheat[J]. Chin J Agrometeorol, 42(2): 123-133 (in Chinese).

马鸿元, 黄健熙, 黄海, 等, 2018. 基于历史气象资料和 WOFOST 模型的区域产量集合预报[J]. 农业机械学报, 49(9): 257-266. Ma H Y, Huang J X, Huang H, et al, 2018. Ensemble forecasting of regional yield of winter wheat based on WOFOST model using historical metrological dataset[J]. Trans Chin Soc Agric Mach, 49(9): 257-266 (in Chinese).

马青荣, 刘荣花, 胡程达, 等, 2020. 干旱及灌溉对冬小麦根系和产量的影响研究[J]. 气象, 46(7): 971-981. Ma Q R, Liu R H, Hu C D, et al, 2020. Impacts of drought and irrigation on root and yield of winter wheat[J]. Meteor Mon, 46(7): 971-981 (in Chinese).

钱永兰, 杨邦杰, 焦险峰, 2007. 基于遥感抽样的国家尺度农作物面积统计方法评估[J]. 农业工程学报, 23(11): 180-187. Qian Y L, Yang B J, Jiao X F, 2007. Accuracy assessment on the crop area estimating method based on RS sampling at national scale[J]. Transactions of the CSAE, 23(11): 180-187 (in Chinese).

秦鹏程, 刘敏, 万素琴, 等, 2016. 不完整气象资料下基于作物模型的产量预报方法[J]. 应用气象学报, 27(4): 407-416. Qin P C, Liu M, Wan S Q, et al, 2016. Methods for yield forecast based on crop model with incomplete weather observations[J]. J Appl Meteor Sci, 27(4): 407-416 (in Chinese).

邱美娟, 宋迎波, 王建林, 等, 2015. 耦合土壤墒情的气候适宜度指数在山东省冬小麦产量动态预报中的应用[J]. 中国农业气象, 36(2): 187-194. Qiu M J, Song Y B, Wang J L, et al, 2015. Application of climate suitability index coupling soil moisture in dynamic yield prediction of winter wheat in Shandong province[J]. Chin J Agrometeorol, 36(2): 187-194 (in Chinese).

宋迎波, 郑昌玲, 谭方颖, 等, 2020. 粮食增产气象保障技术之作物产量动态预报技术[M]. 北京: 气象出版社. Song Y B, Zheng C L, Tan F Y, et al, 2020. Meteorological Support Technology for Increasing Grain Production: Dynamic Forecasting Technology for Crop Yield[M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese).

谭昌伟, 罗明, 杨昕, 等, 2015. 运用 PLS 算法由 HJ-1A/1B 遥感影像估测区域小麦实际单产[J]. 农业工程学报, 31(15): 161-166. Tan C W, Luo M, Yang X, et al, 2015. Remote sensing estimation of wheat practical yield on regional scale using partial least squares regression algorithm based on HJ-1A/1B images[J]. Trans Chin Soc Agric Eng, 31(15): 161-166 (in Chinese).

谭凯炎, 邬定荣, 赵花荣, 2017. 气候变暖背景下华北平原冬小麦生育期温度条件变化趋势分析[J]. 中国农业气象, 38(6): 333-341. Tan K Y, Wu D R, Zhao H R, 2017. Trend analysis of temperature conditions over different growth periods of winter wheat under climate warming in North China Plain[J]. Chin J Agrometeorol, 38(6): 333-341 (in Chinese).

王海军, 柳敏燕, 高娟, 2013. 利用遗传算法和支持向量机测算农用地理论单产和可实现单产[J]. 农业工程学报, 29(19): 244-252. Wang H J, Liu M Y, Gao J, 2013. Calculation of theoretical and accessible yields of agricultural land based on genetic algorithm and support vector machine[J]. Trans Chin Soc Agric Eng, 29(19): 244-252 (in Chinese).

王雪姣, 潘学标, 王森, 等, 2017. 基于 COSIM 模型的新疆棉花产量动态预报方法[J]. 农业

工程学报, 33(8): 160-165. Wang X J, Pan X B, Wang S, et al, 2017. Dynamic prediction method for cotton yield based on COSIM model in Xinjiang[J]. Trans Chin Soc Agric Eng, 33(8): 160-165 (in Chinese).

徐敏, 徐经纬, 高苹, 等, 2020. 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), 28(3): 438-447. Xu M, Xu J W, Gao P, et al, 2020. Evaluation of winter wheat yield prediction ability of different statistical models—A case study of Jiangsu wheat-growing region[J]. Chin J Eco-Agric, 28(3): 438-447 (in Chinese).

杨珺雯, 张锦水, 潘耀忠, 等, 2018. 基于遥感识别误差校正面积的农作物种植面积抽样高效分层指标研究——以冬小麦为例[J]. 中国农业科学, 51(4): 675-687. Yang J W, Zhang J S, Pan Y Z, et al, 2018. An efficient hierarchical indicator based on the correction area of remote sensing identification error for planting acreage sampling—a case study of winter wheat[J]. Sci Agric Sin, 51(4): 675-687 (in Chinese).

张东霞, 张继贤, 常帆, 等, 2014. 遥感技术在主要粮食作物估产中的应用[J]. 测绘科学, 39(11): 95-98, 103. Zhang D X, Zhang J X, Chang F, et al, 2014. A review on application of remote sensing technology in main food crop yield estimation[J]. Sci Surv Mapp, 39(11): 95-98, 103 (in Chinese).

张阳, 王连喜, 李琪, 等, 2018. 基于WOFOST模型的吉林省中西部春玉米灌溉模拟[J]. 中国农业气象, 39(6): 411-420. Zhang Y, Wang L X, Li Q, et al, 2018. Irrigation simulation of spring maize in central and western of Jilin province based on WOFOST model[J]. Chin J Agrometeorol, 39(6): 411-420 (in Chinese).

Huang J X, Tian L Y, Ma H Y, et al, 2015. Improving winter wheat yield estimation by assimilation of the leaf area index from Landsat TM and MODIS data into the WOFOST model[J]. Agric For Meteorol, 204: 106-121.

Li Z H, Jin X L, Zhao C J, et al, 2015. Estimating wheat yield and quality by coupling the DSSAT-CERES model and proximal remote sensing[J]. Eur J Agron, 71: 53-62.

Lobell D B, Schlenker W, Costa-Roberts J, 2011. Climate trends and global crop production since 1980[J]. Science, 333(6042): 616-620.

Yao F M, Tang Y J, Wang P J, et al, 2015. Estimation of maize yield by using a process-based model and remote sensing data in the Northeast China Plain[J]. Phys Chem Earth, 87-88: 142-152.