

基于 WOFOST 模型的冬小麦产量动态预报方法

郑昌玲,张 蕾,侯英雨,宋迎波

(国家气象中心,北京 100081)

摘要:为了确定基于 WOFOST 作物模型的冬小麦产量动态预报方法及产量预报业务应用效果,利用全国冬小麦主产区 174 个农业气象站冬小麦生育期、叶面积指数和土壤湿度等观测资料以及 15 个农业气象试验站冬小麦生物量观测资料,完成 WOFOST 冬小麦模型参数本地化和区域化。利用全国冬小麦主产区约 1 200 个气象观测站起报日前的逐日气象资料及起报日后 30 a 平均气候值组成的冬小麦全生育期气象数据驱动模型,模拟得到冬小麦地上总生物量和穗干重,站点和县级尺度的冬小麦单产直接采用穗干重来进行产量预报,省级和全国区域冬小麦平均单产根据模拟值 2 a 间的变化幅度进行产量预报。根据不同空间尺度的历史年预报冬小麦单产与实际产量数据的对比,进行基于 WOFOST 模型的冬小麦产量预报方法效果检验。结果表明:(1)2014—2019 年期间 295 个农业气象站次冬小麦产量估测平均准确率为 81.8%,220 个次县冬小麦单产估测平均准确率为 84.3%,预报结果具有可用性;(2)12 个主产省(市、区)冬小麦单产 2003—2019 年平均预报准确率为 88.2%~96.4%,全国冬小麦单产预报准确率为 93.9%~95.9%,总体预报准确率较高,说明基于 WOFOST 模型的冬小麦产量动态预报方法具有可行性;(3)基于 WOFOST 模型与统计方法的冬小麦平均单产估产结果准确率略偏低,但预报的时效性和动态性具有更好的优势,能满足作物产量预报业务需求。基于 WOFOST 模型的不同空间尺度冬小麦单产动态产量估测的准确率验证,说明 WOFOST 在作物产量预报业务应用具有可行性;利用作物模型进行基于站点尺度的产量预报能够提高作物产量预报时空精细化能力,也能扩展到大尺度区域应用以达到对农业决策和宏观调控的目的。

关键词:冬小麦;产量;动态预报;准确率;WOFOST 模型

中图分类号:S512.1;S165 **文献标志码:**A

Dynamic prediction method for winter wheat yield based on WOFOST model

ZHENG Changling, ZHANG Lei, HOU Yingyu, SONG Yingbo

(National Meteorological Center, Beijing 100081, China)

Abstract: To determine the dynamic prediction method of winter wheat yield based on WOFOST winter wheat model and the application effect of yield prediction, the measured data of winter wheat growth period, leaf area index, soil moisture and winter wheat biomass data from agricultural meteorological stations in China were utilized to complete localization and regionalization of the parameters WOFOST-winter wheat model. According to the meteorological data of the whole growth period of winter wheat driving model, which was composed of the daily meteorological data of about 1200 meteorological observation stations and the average climate value of 30 years, total aboveground production and dry weight of organs of winter wheat were obtained. The unit yield of winter wheat at the station and county levels was directly predicted by dry weight of organs. The average unit yield of winter wheat at the provincial level and the national region was predicted according to the variation range of the simulated value between two years. Based on the comparison between the predicted yield and the measured data, the prediction results of unit yield in different spatial scales were tested. The results showed that: (1) The average accuracy of winter wheat yield estimation of 295 agrometeorological stations and times was 81.8%, and the average accuracy of av-

erage unit yield estimation of 220 counties and times was 84.3% during 2014–2019. The result was acceptable in business work. (2) The average accuracy of winter wheat yield estimation in 12 main producing provinces was 88.2%~96.4%, and that of nationwide was 93.9%~95.9% from 2003 to 2019. The overall forecast accuracy was high. (3) Through the average accuracy of forecasted per unit yield winter wheat based on WOFOST model was slightly lower than the results in the statistical method, it had more advantages in timeliness and dynamics of forecast and met the needs of agrometeorological operational service. The accuracy of dynamic yield estimation of winter wheat per unit yield at different spatial scales based on WOFOST model showed that WOFOST was feasible in business application. Using crop model for yield prediction not only improved the spatio-temporal refinement ability at site scale, but also achieved the purpose of agricultural decision-making and macro-control by expanding to large-scale regional application.

Keywords: winter wheat; yield; dynamic prediction; forecast accuracy; WOFOST model

准确、及时、可靠的作物产量信息是国家社会经济的基础信息,对于确保国家粮食安全、制定农产品进出口计划、指导和调控宏观种植业结构均具有重要意义,历来受到各国政府的高度重视。我国农业气象工作者自 20 世纪 80 年代就开展了作物产量预报的研究和业务工作,制作发布的作物产量预报产品成为各级政府制定粮食调控计划所需的重要信息^[1-2]。随着业务发展的需要,目前作物产量预报方法主要为农学模型^[3]、统计模型^[4-5]、遥感估产模型^[6]和作物生长模型^[7-11]等几大类。农学预报方法在作物临界成熟时开展,预报时效性差;遥感技术在大范围的作物估产中有较大优势,但遥感数据的质量受天气条件影响较大,在业务应用中受限。统计预报方法所用资料较易获取,方法相对灵活,预报准确率较高,是目前在国家级和省级气象部门农业气象业务服务中应用最为广泛的方法。近年来,随着气象部门农业气象业务发展的需要,提出了基于气候适宜指数、关键气象因子影响指数、产量历史丰歉气象影响指数等农业气象产量动态预报方法^[12-16],具有较高的预报准确率和较长的预报时效;而不足之处是统计模型中的预报因子生物学意义有待完善,且主要应用于大尺度的省级或国家级业务中,小尺度相关性差,难以建立统计方程,动态预报尺度受气象因子影响,不能灵活变动。相比之下,作物生长模型综合考虑气候、土壤、品种、管理措施等因素对作物生长发育的影响,动态、定量地模拟作物生长发育和产量形成,被欧美国家广泛应用于作物产量动态预报。如欧盟委员会联合研究中心很早就将作物模型应用于作物监测和产量预报,在农业遥感监测项目中建立了专门的作物生长监测系统,定时发布基于作物模型的产量月报^[17];美国、澳大利亚、印度、巴西等农业大国也都较早开展了基于作物模型的产量预报^[11,18-19]。国

内不少学者利用作物模型开展本地化校验、修正、改进与应用,在单点作物、地区及省级范围初步开展了 WOFOST、DSSAT、Oryza2000 及 CERES-Maize 等模型在作物产量预报中的应用研究^[7-11,20]。但作物模型在区域上的升尺度应用受到初始化参数难以获取、模型的适用性和准确性不确定及后期气象数据的获取问题等因素的影响,模型的区域模拟精度较难满足实际应用需求,在较大范围和国家级的作物产量预报应用比较少。

为了解决作物模型区域应用难题、实现作物模型在国家级农业气象业务中应用,国家气象中心开发了基于作物模型的中国作物生长模拟监测系统(Crop Growth Simulating and Monitoring System in China, CGMS - China),将 WOFOST、Oryza2000、WheatSM、ChinaAgroys 等国内外模型嵌入到系统之中,针对冬小麦、玉米和水稻 3 大粮食作物,通过划分不同农业气候生态区,分区对模型参数进行标定,实现作物模型在全国主要农作物主产区大范围尺度应用,可以提供作物长势监测与评估、作物产量预报和农业气象灾害影响评估等农业气象业务产品^[21-22]。

冬小麦是我国主要粮食作物之一,其种植面积占全国粮食作物总面积的 18%~24%。本研究以冬小麦为主要研究对象,利用 CGMS-China 系统,基于 WOFOST 模型主要输出要素——地上生物量(Total above ground production, TAGP)和穗干重(Dry weight of living organs, WSO)模拟结果,开展站点、县级尺度、主产省(市、区)和国家级尺度的冬小麦产量动态预报方法研究并进行历史预报效果检验,确定 WOFOST 模型在作物产量预报业务应用中的可行性,为 WOFOST 模型在不同尺度特别是区域尺度进行作物产量预报工作的应用提供可靠依据。根据检验效果反馈,改进和优化 CGMS-China 系统,

提升农业气象业务服务的科技支撑能力。

1 资料和方法

1.1 研究资料

研究区域为我国冬小麦主要种植区域^[23],包括新疆、河北、北京、天津、山西、河南、山东、江苏、安徽、湖北、四川、贵州、云南、陕西、甘肃等省(市、自治区)。研究区域内共包括中国气象局约 1200 个基准气象站和 174 个农业气象站点,其中有 15 个农业气象试验站点(简称农试站),数据用于 WOFOST 模型参数的确定和驱动模型运行。WOFOST 模型主要输入气象数据为 2001—2019 年逐日气象资料,包括日最高气温、日最低气温、降水量、2 m 高度平均风速、水汽压、日太阳总辐射量;其中日太阳辐射数据由日照时数计算,2 m 高度平均风速由 10 m 高度风速转化,其它气象要素均为气象观测站直接获取^[23-24]。播种至出苗、出苗至开花、开花至成熟阶段的有效积温、比叶面积、地上干物质中叶、茎、穗的分配系数等作物参数输入数据来源于农业气象站 2009—2019 年冬小麦生育期观测数据以及农试站冬小麦茎、叶、穗的干物质质量和叶面积指数等观测数据^[25];土壤参数输入数据来源于中国气象局土壤水分自动观测站和中国科学院南京土壤研究所制作的 10 km 分辨率中国土壤数据库^[21,25];地级市、主产省(市、自治区)和全国冬小麦平均单产实测值、种植面积均来源于 2003—2019 年国家统计局官网统计数据查询中的粮食产量查询(<http://data.stats.gov.cn/>);用于站点冬小麦单产预报检验的实测产量和站点所在县平均单产资料来源于 2014—2019 年农业气象站观测资料^[21,25]。

1.2 WOFOST 模型介绍

WOFOST 作物模型由世界粮食研究中心和瓦赫宁根农业大学共同研发,具有较强的机理性,在世界各地得到了广泛应用,具有较好的普适性^[26-27]。WOFOST 模型是一个动态解释模型,以逐日气象数据为驱动,模拟 1 a 生作物从播种到成熟的生长过程,包括作物光合作用、呼吸作用、蒸腾作用、干物质分配等作物基本生理过程的模拟,能够对作物进行潜在、水分和营养限制条件下的三种水平的产量模拟,计算过程主要通过气候、作物、土壤 3 个模块完成。我国众多学者对 WOFOST 进行了参数标定、适用性和应用等研究^[28-30],WOFOST 模型在我国部分省份或地区适用性良好^[24-27]。为了实现 WOFOST 模型在冬小麦产量预报业务上的应用,

根据冬小麦主产区地级市和直辖市产量数据,并结合冬小麦生长积温分布特征、地形地貌等信息,将全国冬小麦主要产区共分成 34 个小区(见表 1),根据各分区内的气象资料、冬小麦发育期资料、冬小麦生物量和产量要素等观测资料,确定各区域模型参数,基于中国作物生长模拟监测系统(CGMS-China),已完成 WOFOST 模型在冬小麦主产区的参数本地化和适应性评估,进行了较完整的参数校正及验证,并利用实时观测的土壤湿度同化 WOFOST 模型的土壤水分模拟,显著提高了模型模拟效果^[21,25];CGMS-China 还对 WOFOST 模型的输出结果文件进行处理,可实现对模型输出参数分站点、分省统计。

1.3 基于 WOFOST 模型的冬小麦产量预报方法建立

1.3.1 气象资料处理 运行 WOFOST 冬小麦模型所需的土壤、品质、田间管理信息及播种(出苗)至起报日的气象资料采用预收集和实时观测输入,起报日至成熟期气象资料采用 1981—2010 年 30 a 平均值处理获取。

1.3.2 基于 WOFOST 模型的冬小麦产量动态预报方法 在农业科技水平、农业投入、土壤性状及作物品种特性等保持相对稳定的情况下,气象条件是直接影响作物生长发育及产量形成的主要因素。以气象数据为驱动,利用 WOFOST 作物模型模拟冬小麦成熟时的 TAGP 和 WSO,站点和县级小尺度范围选择 WSO 作为冬小麦单产预报参数,省(市、自治区)级和国家级大尺度范围选择 2 种作为冬小麦单产预报参数,根据历史预报检验的产量预报准确率确定效果最好的方法。

(1)直接模拟作物产量。在冬小麦成熟前,确定一个日期作为冬小麦平均单产的预报起报日。WOFOST 模型需要输入全生育期的完整气象资料才能模拟得到最终的产量结果。利用起报日期前实时气象资料和后期 30 a(1981—2010 年)气候平均值组成全生育期完整的气象数据,运行 WOFOST 冬小麦模型,在不同时间段动态模拟,得到冬小麦成熟时的 WSO,即为预测的作物产量。冬小麦农业气象站和站点所在县的冬小麦单产直接用 WOFOST 模型模拟的站点冬小麦成熟日 WSO 作为产量预报结果。但由于穗干重值高于作物产量(粒重),且模型对穗重的模拟存在一定误差,可能会造成预报准确率偏低。

续表 1:

分区代号 Region code	行政区域 Administrative division				
2203	汉中 Hanzhong	安康 Ankang	商洛 Shangluo		
2301	兰州 Lanzhou	临夏 Linxia	金昌 Jinchang	武威 Wuwei	
2302	陇南 Longnan	庆阳 Qingyang	平凉 Pingliang	天水 Tianshui	定西 Dingxi
2401	固原 Guyuan				
2501	昌吉 Changji	伊犁 Yili	乌鲁木齐 Urumqi		
2502	阿克苏 Akesu	和田 Hetian	喀什 Kashgar		

(2) 相对产量预报方法。为了减小 WOFOST 模型模拟精度对冬小麦产量预报结果的影响, 提高产量预报准确率, 采用相对比值法预报冬小麦单产。具体做法是: 运行 WOFOST 模型分别模拟得到预报年和上一年冬小麦成熟时生物量, 以 2 a 间生物量的差值百分比作为产量增减幅度, 结合上一年冬小麦的实际产量得到本年的冬小麦产量预报值, 见式(1)和式(2)。

$$Y_{fi} = Y_{r(i-1)} \times (1 + \Delta D) \quad (1)$$

$$\Delta D = (W_i - W_{i-1}) / W_{i-1} \quad (2)$$

式中, Y_{fi} 为某年的冬小麦单产预报值, $Y_{r(i-1)}$ 为上一年实际单产, ΔD 为模型模拟的产量增减幅度, W_i 和 W_{i-1} 分别为预报年和上一年的模型模拟的地上部分总干物质质量 (TAGP) 或穗干重 (WSO)。

相对产量预报方法主要应用于省(市、自治区)级和全国尺度。受县级产量资料限制, 基于 WOFOST 模型模拟结果的主产省(市、自治区)单产由省(市、自治区)内站点成熟时 WSO 对应 2007—2011 年县级冬小麦面积占比为权重集成。全国平均单产由主产省(市、自治区)单产根据预报年前 3 a 面积占比为权重进行集成(式 3)。

$$H = \sum_{i=1}^{12} r_i \times H_i \quad (3)$$

式中, r_i 为第 i 个主产省(市、自治区)在预报年的前 3 a 平均面积在 12 个省(市、自治区)面积之和中的比重。

(3) 冬小麦单产动态预报方法确定。针对驱动模型所需的冬小麦全生育期气象资料, 预报年度的气象资料采取实时资料和 30 a (1981—2010 年) 气候平均值组合, 上一年度的气象资料采取全生育期均为观测气象资料或观测资料与 30 a 气候平均值组合的两种方式, 考虑无水分胁迫 (PPS) 和有水分胁迫 (WPS) 的两种方式下的 TAGP 和 WSO 模拟结果, 可得到 8 种处理方法, 具体见表 2。以 3 月 1 日

表 2 气象资料组合和 WOFOST 模型
输出生物量处理方法设置

Table 2 Deferent treatments of meteorological data
combination and WOFOST output biomass processing

处理方法 Treatment	上年度气象资料处理 Treatment of meteorological data of the previous year	生物量参数 Biomass parameter	水分胁迫处理 Water stress treatment
F1	实际气象资料 Measured meteorological data	TAGP	PPS
F2	实际气象资料 Measured meteorological data	TAGP	WPS
F3	实际气象资料 Measured meteorological data	WSO	PPS
F4	实际气象资料 Measured meteorological data	WSO	WPS
F5	实际气象资料和气候平均资料 Measured meteorological data and average climate data	TAGP	PPS
F6	实际和气候平均资料 Measured meteorological data and average climate data	TAGP	WPS
F7	实际和气候平均资料 Measured meteorological data and average climate data	WSO	PPS
F8	实际和气候平均资料 Measured meteorological data and average climate data	WSO	WPS

(主产区冬小麦返青)、4 月 1 日(主产区冬小麦拔节)、5 月 1 日(主产区冬小麦灌浆)为预报起报日, 对各种处理的主产省(市、自治区)和全国冬小麦单产模拟结果进行检验, 以确定最优的冬小麦产量动态预报方法。

2 基于 WOFOST 模型的冬小麦产量 动态预报结果检验

2.1 直接预报方法模拟效果检验

以对站点和县级模拟检验为主, 2014—2019 年全国农业气象站中具有站点产量资料的共 295 个站次资料, 具有站点所在县平均单产共 220 个站次资料。利用 5 月 1 日作为起报日时, WOFOST 模型模

拟的冬小麦成熟时 WSO 与站点观测产量进行比较,平均准确率为 81.1%,准确率 $\geq 80\%$ 的比例为 54.9%;与站点所在县平均单产对比,平均准确率为 84.3%,准确率 $\geq 80\%$ 的比例为 64.8%;站点和县级冬小麦单产波动幅度大^[31],站点和县级冬小麦单产平均预报准确率在业务应用中可接受。总体上,县平均单产估测效果要略好于站点产量估测效果,与模型参数本地化时是以各分区为对象,考虑区域整体模拟效果有关,模型模拟结果更接近于县平均产量;预报准确率明显偏低的站点,则说明存在模型参数不准确等问题,需要根据实际观测数据进行调整和优化。

2.2 相对预报法逐月产量动态预报试验和检验

目前,气象部门每年进行两次冬小麦产量预报业务工作,其中省级预报业务完成时间为 4 月上旬和 5 月上旬,国家级为 4 月中旬和 5 月中旬,为了对省级和国家级产量预报业务提供数据支撑,以 4 月 1 日和 5 月 1 日为起报日,对历史预报准确率进行检验,选择预报准确率高的处理,在冬小麦产量预报业务中进行应用。对各主产省(市、自治区)和全国 2003—2019 年 4 月 1 日和 5 月 1 日起报的冬小麦单产预报平均准确率进行比较(图 1),结果显示, F5 处理的冬小麦单产平均准确率分别为 92.2% 和 91.7%,为所有结果最高值和次高值,各区域平均准确率标准差分别为 2.5 和 2.7,为最低值和第 3 低值,说明 F5 处理预报准确率高、预报稳定性较好,因此确定 F5 为最优的产量预报方法。

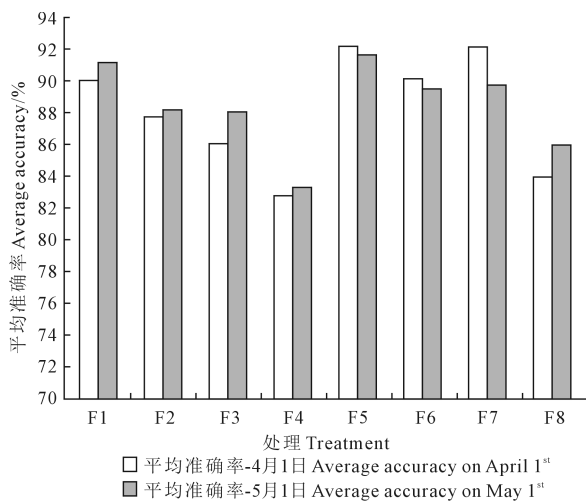


图 1 各主产省(市、自治区)2003—2019 年 4 月 1 日和 5 月 1 日起报的平均冬小麦产量预报准确率及其标准差

Fig.1 The accuracy and standard deviation of average winter wheat forecast yield of main provinces on April 1st and May 1st from 2003 to 2019

F5 处理预报方法的预报效果检验中,2003—2019 年 3 月 1 日、4 月 1 日和 5 月 1 日分别作为起报日,基于 WOFOST 模型的各主产省(市、自治区)和全国冬小麦产量预报结果与实际产量数据对比,准确率在 90% 以上的比例为 76.6%,具体见表 3。

不同起报日的 2003—2019 年各主产省(市、自治区)和全国集成冬小麦平均单产历史预报结果的平均准确率见表 4,各主产省(市、自治区)平均预报准确率为 88.2%~96.4%,全国平均单产预报准确率为 93.9%~95.9%,预报效果较好,可在业务中进行应用。其中,主产省中,河北、山东、河南、四川、云南的预报准确率相对较高,上述省份具有冬小麦农试站,在前期基础工作中,可利用冬小麦生物量、叶面积指数等观测资料进行参数本地化调整,使得 WOFOST 模型模拟结果更接近观测值。从逐月平均预报准确率变化来看, F5 处理结果中预报年和上一年均采用实际观测气象资料和 30 a 平均气候值的组合,因此起报日越早, 2 a 重复的气象数据时段越长, 2 a 间生物量模拟值增减幅度越小;随着后期更多实时监测数据的带入, 2 a 间气象资料的变化增大,生物量模拟值的增减幅度也会变大。随着现代农业技术发展和作物品种改进,冬小麦平均单产呈稳步增加的趋势,在出现灾害的年份,通过防灾减灾措施,减轻灾害损失,保障粮食产量稳定,在气象条件适宜时,充分利用气象资源,则利于冬小麦产量提高,总体上冬小麦平均单产持续保持较高的水平,波动幅度呈逐渐下降的趋势;因此 F5 处理结果中,前期的预报准确率要略高于后期预报准确率。

利用目前国家气象中心业务服务所用的统计方法“基于历史产量丰歉影响指数”(简称“产量丰歉指数”)中的大概率法和加权法^[3-4,15]对冬小麦主产省(市、自治区)及全国集成冬小麦平均单产进行同时段历史预报结果检验,与基于 WOFOST 模型的预报准确率进行对比;结果显示基于 WOFOST 模型的全国集成和大部分省(市、自治区)的产量预报准确率比基于产量丰歉指数方法的准确率略偏低,而山西、陕西、安徽则略高,云南、贵州比基于产量丰歉

表 3 不同预报准确率(T)级别比重

Table 3 Proportion of different forecast accuracy levels

等级 Grade	比重 Proportion/%
$T < 85\%$	11.5
$85\% \leq T < 90\%$	11.9
$90\% \leq T < 95\%$	31.2
$95\% \leq T < 100\%$	45.4

指数的两种方法均偏高(图 2)。以冬小麦产量受气象条件影响较大的河北和山西两省为例,对 3 月 31 日起报的冬小麦单产预报准确率历史检验结果分析,两个省份基于 WOFOST 模型预报准确率均呈上升趋势,但两种方法的逐年准确率都存在一定波动性和不稳定性(图 3),其中山西省在 2011 年以前准

确率波动非常明显,特别是 2005 年和 2009 年基于产量丰歉指数方法的准确率不到 70%,在实际业务中不具有应用价值;这与近年来冬小麦产量波动变小也有一定关系,气象条件的差异导致产量发生变化,根据历史相似年产量变化的产量丰歉影响指数方法可能出现了较大的误判。

表 4 主产省(市,自治区)及全国不同起报日冬小麦单产预报平均准确率
Table 4 Average predicting accuracy of production forecast in major provinces (municipality, autonomous region) and nationwide in different starting days

预报区域 Region	预报准确率 Predicting accuracy/%			预报区域 Region	预报准确率 Predicting accuracy/%		
	3月1日 March 1 st	4月1日 April 1 st	5月1日 May 1 st		3月1日 March 1 st	4月1日 April 1 st	5月1日 May 1 st
新疆 Xinjiang	96.4	95.1	90.6	河南 Henan	95.8	93.7	94.3
甘肃 Gansu	91.4	89.7	88.2	江苏 Jiangsu	92.7	90.4	90.3
河北 Hebei	97.4	96.0	95.7	安徽 Anhui	92.1	90.7	90.9
北京 Beijing	95.6	95.6	94.9	四川 Sichuan	95.1	95.1	94.4
山西 Shanxi	90.3	89.4	89.2	湖北 Hubei	90.2	90.1	90.1
天津 Tianjin	96.2	94.9	94.4	云南 Yunnan	94.0	94.1	94.3
陕西 Shaanxi	93.6	93.0	92.5	贵州 Guizhou	88.4	89.6	88.9
山东 Shandong	96.7	96.1	96.4	全国 Nationwide	95.9	95.0	93.9

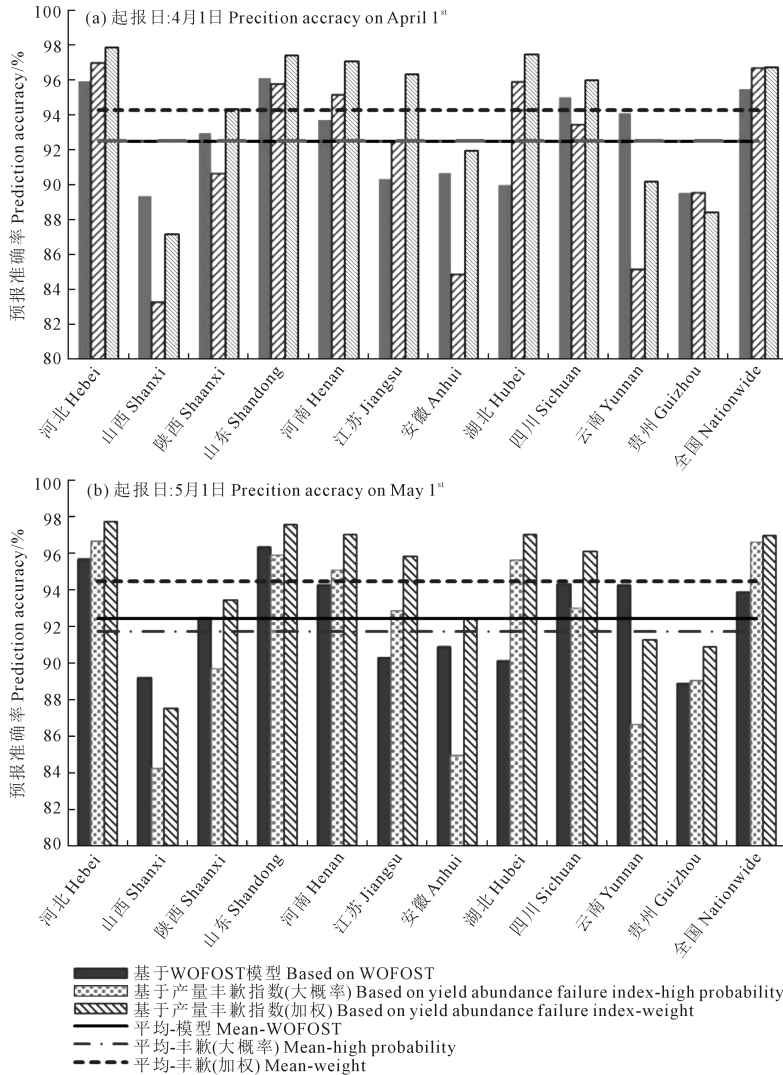


图 2 基于 WOFOST 模型与统计方法的平均冬小麦产量预报准确率比较

Fig. 2 Comparison of average prediction accuracy of winter wheat yield based on WOFOST model and statistical method

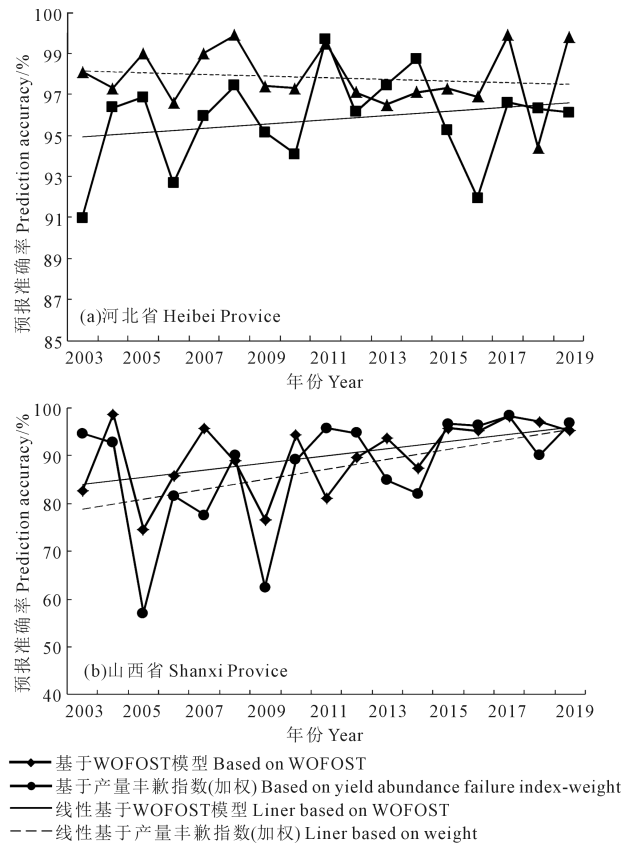


图3 河北省和山西省基于 WOFOST 模型与统计方法的逐年冬小麦产量预报准确率

Fig.3 The accuracy of winter wheat prediction yield based on WOFOST model and statistical method from 2003 to 2019 in Hebei and Shanxi Province

3 讨论

中国作物生长模拟监测系统 (CGMS-China) 实现 WOFOST 等模型区域化升尺度应用,以应用在省(市、自治区)级和全国尺度;但由于农试站数量有限,观测资料历史序列比较短,针对全国范围,部分站点的产量模拟结果与实测值误差较大、准确率偏低,还需要更多基础资料以及遥感同化资料的应用来进一步优先参数,提高站点整体的模拟精确度和准确性,也更好地适应较大尺度和区域性的应用。

WOFOST 作物模型可以实现以日为步长的冬小麦产量动态预报,在空间尺度、动态时效性上比统计模型具有优势。但作物模型模拟作物生长需要完整描述整个生育期的气象数据,缺乏预报期气象驱动数据是制约作物模型应用于产量预报的主要瓶颈,前期有学者利用历史气象数据集合、相似年数据、近 10 a 或 20 a 等历史气候数据来替代预报日之后的逐日数据^[9-11],为了提高预报精度,未来研究中将借鉴这些方法来解决预报时间节点后的气

象资料替代问题,确定既能满足业务应用计算快捷、操作简单的需求又能提高预报准确率的资料替代方法。

基于数理统计模型和作物模型的作物产量预报方法都有一定局限性。统计预报方法建立的产量预报模型对作物的生长机理考虑较少,且目前主要应用在省级、主产区及全国范围等大尺度上;而作物模型机理性强,且以站点为基础,可以实现各种空间尺度的应用;但部分参数获取较难,需做大量的田间试验,且总体预报准确率略低于统计模型。对于未来的作物产量预报方法和工作,需要将目前建立的多种产量预报方法进行组合和集成,充分发挥各自的优势,从而建立一套集合预报方法。另外,虽然对于省级和全国尺度冬小麦的产量呈稳定高产的趋势,但近年来高温、大风、冰雹、局地强降水等极端天气事件频繁发生,对于一定区域的农作物造成严重影响,气象灾害对冬小麦产量影响的模拟仍需要更深入的研究,在未来作物模型应用与农业气象业务过程中,需要深入考虑极端天气及减灾措施对产量的影响,进一步完善和改进预报方法。

4 结论

本文探讨了利用 WOFOST 作物模型进行冬小麦产量动态预测的方法,检验不同空间尺度预报效果。对于站点和县级尺度,直接利用 WOFOST 模型模拟的单位面积冬小麦穗干重作为冬小麦单产的预测值;对于省级和全国范围的冬小麦单产,采用 2 a 间模拟生物量对比的相对方法进行动态产量预测。冬小麦平均单产历史预报结果准确率检验中,295 个站次冬小麦单产平均准确率为 81.1%,220 个站次县级冬小麦单产平均准确率为 84.3%,不同站点间冬小麦产量预报准确率差别较大,准确率低的站点需要进一步对 WOFOST 模型初始化参数进行校正和优化。2003—2019 年主产省(市、自治区)和全国尺度冬小麦单产准确率分别为 88.2%~96.4% 和 93.9%~95.9%,准确率较高,且比统计方法稳定性更好,可在冬小麦产量预报业务中进行应用。利用 WOFOST 模型进行基于站点尺度的产量预测能够提高冬小麦产量预报时空精细化能力,也能扩展到大尺度区域应用以达到对农业决策和宏观调控的目的,促进作物产量预报在空间和时间尺度上精细化、动态化的发展。

参考文献:

- [1] 钱拴,王建林. 农业气象作物产量预报的特点与思考[J]. 气象科技, 2003, 31(5): 257-261.

- QIAN S, WANG J L. Special aspects of agrometeorological crop yields forecast and discussion[J]. *Meteorological Science and Technology*, 2003, 31(5): 257-261.
- [2] 侯英雨, 张蕾, 吴门新, 等. 国家级现代农业气象业务发展技术进步[J]. *应用气象学报*, 2018, 29(6): 641-656.
- HOU Y Y, ZHANG L, WU M X, et al. Advances of modern agrometeorological service and technology in China[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2018, 29(6): 641-656.
- [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] 唐余学, 罗擎擎, 范莉, 等. 基于关键气象因子的中稻单产动态预报[J]. *中国农业气象*, 2011, 32(增刊1): 140-143.
- TANG Y X, LUO Z Z, FAN L, et al. The dynamic prediction of mid-season rice yield based on key meteorological factors[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2011, 32(S1): 140-143.
- [5] 杨霏云, 朱玉祥, 李文科, 等. 统计方法在中国农业气象中的应用进展[J]. *气象与环境科学*, 2016, 39(3): 121-129.
- YANG F Y, ZHU Y X, LI W K, et al. Application progress of statistical methods in Chinese agrometeorology[J]. *Meteorological and Environmental Sciences*, 2016, 39(3): 121-129.
- [6] 钱永兰, 侯英雨, 延昊, 等. 基于遥感的国外作物长势监测与产量趋势估计[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(13): 166-171.
- QIAN Y L, HOU Y Y, YAN H, et al. Global crop growth condition monitoring and yield trend prediction with remote sensing[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(13): 166-171.
- [7] 杜春英, 李秀芬, 王晨轶, 等. 基于 WOFOST 模型的黑龙江省水稻产量动态预报研究[J]. *安徽农业科学*, 2011, 39(24): 15093-15095.
- DU C Y, LI X F, WANG C Y, et al. Study on dynamic yield forecasting of rice based on WOFOST model in Heilongjiang Province[J]. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 2011, 39(24): 15093-15095.
- [8] 陈思宁, 赵艳霞, 申双和, 等. 基于 PyWOFOST 作物模型的东北玉米估产及精度评估[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(14): 2880-2893.
- CHEN S N, ZHAO Y X, SHEN S H, et al. Study on maize yield estimation and accuracy assessment based on PyWOFOST crop model in Northeast China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(14): 2880-2893.
- [9] 王雪姣, 潘学标, 王森, 等. 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*, 2017, 33(8): 160-165.
- WANG X J, PAN X B, WANG S, et al. Dynamic prediction method for cotton yield based on COSIM model in Xinjiang[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(8): 160-165.
- [10] 秦鹏程, 刘敏, 万素琴, 等. 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*, 2016, 27(4): 407-416.
- QIN P C, LIU M, WAN S Q, et al. Methods for yield forecast based on crop model with incomplete weather observations[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2016, 27(4): 407-416.
- [11] 马鸿元, 黄健熙, 黄海, 等. 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*, 2018, 49(9): 257-266.
- MA H Y, HUANG J X, HUANG H, et al. Ensemble forecasting of regional yield of winter wheat based on WOFOST model using historical meteorological dataset[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(9): 257-266.
- [12] 代立芹, 李春强, 康西言, 等. 基于气候和土壤水分综合适宜度指数的冬小麦产量动态预报模型[J]. *中国农业气象*, 2012, 33(4): 519-526.
- DAI L Q, LI C Q, KANG X Y, et al. Dynamic forecast model of winter wheat yield based on climate and soil moisture suitability[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2012, 33(4): 519-526.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 邱美娟, 刘布春, 刘园, 等. 春玉米产量动态预报技术的改进方法探索[J]. *气象与环境科学*, 2020, 43(1): 1-8.
- QIU M J, LIU B C, LIU Y, et al. Exploration of an improved method for yield dynamic prediction of spring maize[J]. *Meteorological and Environmental Sciences*, 2020, 43(1): 1-8.
- [16] 刘维, 宋迎波. 基于不同空间尺度的作物产量集成预报——以江苏一季稻为例[J]. *气象科学*, 2021, 41(6): 828-834.
- LIU W, SONG Y B. Comparative analysis of different regional scales integration yield prediction——a case study of single rice in Jiangsu[J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2021, 41(6): 828-834.
- [17] DE WIT A J W, VAN DIEPEN C A. Crop model data assimilation with the Ensemble Kalman filter for improving regional crop yield forecasts[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 146(1/2): 38-56.
- [18] 王文佳, 冯浩, 宋献方. 基于 DSSAT 模型陕西杨凌不同降水年型冬小麦灌溉制度研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2013, 31(4): 1-10.
- WANG W J, FENG H, SONG X F. Determination of irrigation schedule of winter wheat in different hydrological years in Yangling, Shaanxi Province based on DSSAT model[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2013, 31(4): 1-10.
- [19] 赵彦茜, 齐永青, 朱骥, 等. APSIM 模型的研究进展及其在中国的应用[J]. *中国农学通报*, 2017, 33(18): 1-6.
- ZHAO Y X, QI Y Q, ZHU J, et al. Research progress of APSIM model and its application in China[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2017, 33(18): 1-6.
- [20] 王伟, 黄义德, 黄文江, 等. 作物生长模型的适用性评价及冬小麦产量预测[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(3): 233-237.
- WANG W, HUANG Y D, HUANG W J, et al. Applicability evaluation of CERES-Wheat model and yield prediction of winter wheat[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(3): 233-237.
- [21] 侯英雨, 何亮, 靳宁, 等. 中国作物生长模拟监测系统构建及应用[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(21): 165-175.
- HOU Y Y, HE L, JIN N, et al. Establishment and application of crop growth simulating and monitoring system in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(21): 165-175.