

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.09.030

基于历史气象资料和 WOFOST 模型的区域产量集合预报

马鸿元¹ 黄健熙^{1,2} 黄 海¹ 张晓东^{1,2} 朱德海^{1,2}

(1. 中国农业大学土地科学与技术学院, 北京 100083; 2. 农业部农业灾害遥感重点实验室, 北京 100083)

摘要: 针对基于作物生长模型进行产量预报时气象要素变化对作物生长的实时影响不能得到充分反映,产量预报缺乏量化不确定性信息的突出问题,选择河北省保定市和衡水市冬小麦主产区为研究对象,提出构建历史气象集合作为预报期气象数据输入驱动 WOFOST 模型的冬小麦生长模拟,并通过实时更新不断向前滚动预报,从传统单一数值的预报转向基于集合的概率预报。结果表明:基于历史气象资料可以进行作物模型的区域产量集合预报,抽穗期至灌浆期是预报精度最高的时期,预报集合中位数与实测产量的皮尔逊相关系数(PCC)最高为0.563,平均绝对误差(MAE)最低为458 kg/hm²。研究结果表明区域化产量集合预报具有较强的可行性,并为量化作物模拟系统不确定性、数值天气预报与作物模型的结合应用提供了参考。

关键词: 冬小麦; 作物模型; 产量预报; 集合预报

中图分类号: S126; S165+.27 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)09-0257-10

Ensemble Forecasting of Regional Yield of Winter Wheat Based on WOFOST Model Using Historical Metrological Dataset

MA Hongyuan¹ HUANG Jianxi^{1,2} HUANG Hai¹ ZHANG Xiaodong^{1,2} ZHU Dehai^{1,2}

(1. College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Key Laboratory of Remote Sensing for Agri-Hazards, Ministry of Agriculture, Beijing 100083, China)

Abstract: The crop growth model has distinct advantages of clear mechanism and dynamic serial simulation, and it has been widely used in regional crop production forecasting. The research focused on the major problem that the uncertainty of yield prediction with crop model can not be quantized and the issue that the real-time impact of meteorological driving factors on crop model was not timely reflected. Simulations in the main wheat production areas in Baoding and Hengshui of Hebei Province were conducted and a method was proposed to build a historical meteorological dataset as weather inputs to drive the WOFOST model to simulate wheat growth during the forecasting period. Then the yield was continuously forecasted through real-time updating. In this way, the traditional single-value forecasting of yield was changed to an ensemble-based probabilistic forecasting, and the regional yield ensemble forecast and event possibility forecast can be generated in everyday in the growing season. The validation results indicated that the WOFOST model with historical meteorological data was able to reflect the uncertainty of regional weather data. In the regional ensemble forecasting of wheat yield, the highest yield forecasting accuracy was achieved in the period from heading to grain filling stage. The correlation coefficient (PCC) between the ensemble mean and the measured yields was 0.563, while the minimum average absolute error (MAE) was 458 kg/hm², however, the improvement of yield forecasting accuracy along with forecasting date was slow, because simulation with homogeneous input parameters in potential level was a little coarse. It suggested that with the help of remote sensing data assimilation or medium weather numeric forecasting, yield prediction could achieve better accuracy. The results showed that the regional yield ensemble forecast had strong feasibility, and this research provided a reference for the application of numerical weather forecast and quantification of the uncertainty in crop simulation system.

Key words: winter wheat; crop model; yield forecast; ensemble forecast

收稿日期: 2018-03-21 修回日期: 2018-05-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(41671418)和国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目(61661136006)

作者简介: 马鸿元(1990—),男,博士生,主要从事作物模型模拟、遥感数据同化研究,E-mail: ma_hy@cau.edu.cn

通信作者: 黄健熙(1976—),男,副教授,博士生导师,主要从事农业定量遥感研究,E-mail: jxhuang@cau.edu.cn

0 引言

作物生长模型是采用数学模型方法描述作物光合、呼吸、蒸腾、营养等机理过程,以特定时间步长来动态模拟作物生长发育期间的生理生化参数的数学模型,能较为准确地描述光、温、水、肥等因子以及田间栽培和管理措施对作物生长和发育的影响^[1-2]。自 20 世纪 60 年代作物模型研究领域创始以来,作物模型逐渐成为农学、土壤学、植物生理学、气象学等学科的重要研究工具,尤其在作物产量模拟方面,作物模型能够动态、定量地模拟作物生长发育和产量形成,因此在产量预报^[3]、农业气象服务^[4]、产量的气候变化响应模式^[5]等领域发挥了重要作用。如欧盟委员会联合研究中心(JRC)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(MARS)中建立了专门的作物生长监测系统(CGMS),定时发布基于作物模型的产量月报^[6];美国^[7]、印度^[8]、巴西^[9]等农业大国也都很早开展了基于作物模型的产量预报,我国李振海^[10]、帅细强等^[11]、陈上等^[12]以预报或历史气象资料为基础初步开展了 DSSAT、Oryza2000 及 CERES - Maize 模型在作物产量预报中的应用研究。

随着应用领域的不断深入,目前作物模型已从最早的田间尺度模拟扩展到了大区域尺度的模拟^[13-14],在气候变化情景模拟和遥感数据同化方面应用尤为广泛,但由于作物模型大多按天积分运算,需要输入全生育期的完整气象要素才能模拟得到最终的产量结果。基于作物模型的产量预报方法主要还是受制于预报期内的气象资料的获取,因此根据不同的研究需要,形成了各种气象资料的获取方法。

在月度、季度预报中,一些研究直接利用区域气候模型生成的数据作为作物模型的输入,进而预测农作物产量^[15],由于生成的气象数据存在一定的误差,还需要对气候模型的输出进行纠偏和订正^[16-17],同时低分辨率的气候模型模拟的逐日天气数据与气象站点实测数据有较大的尺度差异,直接使用气候模型产生的逐日气象数据时不可避免地存在时间和空间尺度不匹配的问题^[18]。

为了实现气候模型与作物模型的高效耦合,必须将气候/天气模型的数据进行降尺度,常用的方法一是统计降尺度^[19]和随机天气发生器法等,其中天气发生器在作物模型中应用较广,多项研究通过天气生成器对各气候模型的月平均数据降尺度生成逐日气象要素,作为作物模型的驱动数据^[20-21];二是通过动力学模型降尺度^[22],该方法利用复杂的动力学方程把气候模型的模拟结果降尺度到更小的网格

和时间尺度上。动力降尺度模型考虑了局地的地形因子,从而能更好地反映出局地气候特征,对极端天气状况有较好的模拟效果,但此方法计算复杂费时,应用在区域化的作物模型中成本较高。

而在中短期预报中,数值天气模式则可以和作物模型相结合,BAIGORRIA 等^[16]使用 COAPS 的区域模型生成了 20 个数值天气预报集合成员,耦合陆面模型后输入到 CERES - Maize 模型,其中缺失的辐射量要素使用了天气发生器生成,最终使用主成分回归分析进行了产量预报。LEE 等^[23]则开发了一种气象数据服务端,利用站点观测数据和数值预报数据直接生成 ORYZA 2000 作物模型的气象驱动数据,大幅提高了作物模型的部署效率。DUMONT 等^[24-25]使用 STICS 作物模型进行了大量的预报气象驱动数据比较工作,验证了使用历史平均资料和天气发生器等不同气象驱动策略对当年小麦产量预报的影响,结果显示使用两种策略没有明显差异,使用天气发生器精度稍好,但使用历史平均资料的计算效率则更高。

我国大部地区为典型的季风气候,年际变率大,且季节分布不均^[26],因此,基于气象资料多年平均值作为预报期的驱动数据并不能很好地体现气象要素的波动性,而且灾害性的异常天气会被平滑,这对模拟潜在的产量损失十分不利;而如果将历史同期所有年份的气象要素都作为集合成员进行驱动模拟,则可以重现本地历史天气情景下的产量^[27],通过集合预报的技术手段得出产量预报的不确定性,将以往单一数值的预报提升为概率预报^[28-29]。

本文以多年气象资料为依托,以 Python 平台的 WOFOST 模型(Python crop simulation environment, PCSE)为基础,构建使用历史资料作为预报期气象驱动数据的系统框架,区域化分布式模拟研究区内多年冬小麦产量,并系统分析产量集合的统计特征,结合农业气象观测资料与产量统计分析历史集合预报方法的预报能力和精度,以期为区域化产量概率预报提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

选取河北省保定市、衡水市冬小麦主产区为研究区(图 1),该区地处黄淮海平原,属暖温带半湿润季风气候,多年平均气温 3 ~ 15℃,年降水量 500 ~ 800 mm,四季分明,日照充足。冬小麦在本区粮食组成中占有较大比重。研究获取了衡水市 2009 年 29 个观测点的冬小麦田间观测数据^[30],主要包括播种与收获日期、物候期、叶面积指数(Leaf area

index, LAI) 和产量等, 试验点的分布充分考虑了该地区冬小麦的生长分布状况, 具有很好的代表性。



图 1 研究区示意图
Fig. 1 Location of study region

1.2 气象资料

所用的气象驱动数据是中国科学院青藏高原研究所发布的中国区域高时空分辨率地面气象要素驱动数据集 (China meteorological forcing dataset) 01.06.0014 版本^[31-32], 该驱动数据集包括近地面气温、地表气压、近地面空气比湿、近地面全风速、降水率和向下长、短波辐射 7 个要素, 空间分辨率为 0.1°, 时间分辨率为 3 h。该数据集是以国际上现有的 Princeton 再分析资料、GLDAS 资料、GEWEX-SRB 辐射资料以及 TRMM 降水资料为背景场, 融合了中国气象局常规气象观测数据制作而成的。经过前期处理, 将这些要素转换为与作物模型量纲、格式一致的气象输入文件, 包括日照辐射量、日最高温、日最低温、清晨水汽压、风速和降水 6 个要素。

1.3 WOFOST 模型

WOFOST (World food studies) 模型是由荷兰瓦赫宁大学和世界粮食研究中心共同开发的一种机理性作物生长模型^[33], 该模型通过利用光截获量和 CO₂ 同化量作为生长驱动过程, 利用作物物候发育过程来描述作物生长, 模拟的生长过程主要包括作物的碳同化、呼吸、蒸腾、干物质的分配等。模型主要有两种应用模式, 潜在模式下作物生长仅仅由温度和太阳辐射决定, 没有考虑其他生长限制因素; 水分限制模式下作物生长受水分限制。WOFOST 模型是一种通用模型, 通过定制不同的参数可以模拟不

同种类的作物, 具有很强的适用性, 是大范围环境条件下的各种作物模拟的有利工具。模型最初由 Fortran 语言开发, 而今 WOFOST 研究组已经开发了适合 Python 平台的版本 PCSE, 通过配置丰富的第三方库, 大大加强了模型应用的灵活性。

1.4 产量预报框架

传统的作物模型运行过程只是输入数据到输出数据的单一映射, 无法提供模型模拟的不确定性信息, 但作物模型本身, 以及输入参数、气象驱动存在着不确定性。如果以集合的思想将作物模型放入一个外部框架内, 用不同年份的气象驱动模拟的结果作为集成员, 可以使模拟结果的集合代表其概率分布, 最终将单一数值的模拟输出转换为概率分布。基于上述考虑, 本文引入多年 (1979—2015 年) 历史气象资料, 开发出以从某一预报时刻模拟该年作物生长和产量状况的概率预报的集合预报框架。该框架以 Python 平台下 WOFOST (PCSE) 模型为基础, 作物品种参数和区域化由本课题组历史标定成果^[34-39] 确定, 通过外部程序框架的搭建, 完成多年气象输入文件生成、预报时刻气象集成员文件生成、分布式 PCSE 模拟、集合预报成员后处理等主要功能, 从而实现区域化集合预报作物长势和产量的主要功能 (图 2)。利用该预报框架开展产量集合预报时, 首先进行前期数据准备, 预先收集作物品种参数、田间管理信息及播种至预报时刻的气象资料, 然后根据预报时刻生成模型的气象输入文件集合, 该集合的每个成员文件由播种日至预报时刻的实际气象和预报时刻至成熟日的历史资料拼接而成, 利用该输入集合进行区域化的分布式模拟, 最终得到模

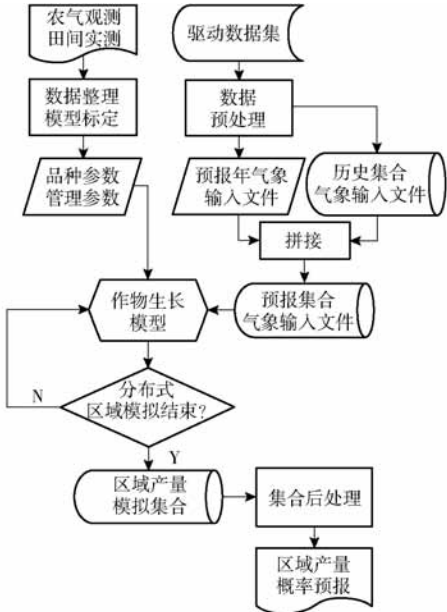


图 2 基于历史气象资料的作物模型产量集合预报技术流程
Fig. 2 Flow chart of research technology route

拟产量的集合并进行相应的后处理过程。

1.5 验证方法与误差分析

以 1979—2015 年气象资料为历史集合进行集合预报,以 2009 年 29 个观测站的田间实测产量为观测值,以 2009 年每月 1 日为预报起始时刻,同一日期下历史集合模拟结果的平均值作为预报值,观测值与预报值的差值即为预报误差。

集合预报给出的预报是一个概率分布或者是一个包含多个成员的集合,若需要对集合预报进行确定性验证,一般是对集合成员的平均值或集合中位数进行验证^[40]。集合成员的平均值计算公式为

$$\overline{M} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n M_i \tag{1}$$

式中 $\overline{M}$ ——集合平均值
 M_i ——集合成员值
 n ——集合成员数量

当有了成员集合后,还可进行某一产量水平的概率预报,假设集合中所有成员的权值相等,计算某一事件的成员数与集合成员总数的比例,即为该事件发生的概率,计算公式为

$$p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i \tag{2}$$

式中 p_i ——模拟结果中某一事件(如产量高于 7 000 kg/hm²)出现与否的标识,当该事件发生时 $p_i = 1$,否则为 0

平均差会由于差值的正负抵消,因此本文采用平均绝对误差(Mean absolute error, MAE)表示误差,另外还将均方根误差(Root mean square error, RMSE)与皮尔逊相关系数(Pearson correlation coefficient, PCC)作为精度评价指标,相关计算式为

$$M_{AE} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |F_i - O_i| \tag{3}$$

$$R_{MSE} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (F_i - O_i)^2} \tag{4}$$

$$P_{CC} = \frac{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m [(F_i - \overline{F})(O_i - \overline{O})]}{\sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (F_i - \overline{F})^2} \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (O_i - \overline{O})^2}} \tag{5}$$

式中 m ——验证样本数量
 i ——验证样本序号
 F_i ——第 i 实测点模型预报值
 $\overline{F}$ ——预报平均值
 O_i ——第 i 实测点观测值
 $\overline{O}$ ——观测平均值

其中,MAE 越小说明预报越精确,PCC 越接近

于 1 说明预报模型的预报能力越强。通过对每个观测点进行 1979—2008 年的集合模拟,对预报的误差进行分布拟合,最后统计 3 种指标作为预报能力。

2 结果分析

2.1 单点预报分析

图 3 为深州市 2009 年 3 月 1 日(图 3a)、4 月 1 日(图 3b)、5 月 1 日(图 3c)、6 月 1 日(图 3d)的叶面积与籽粒干物质质量预报结果,其中不同颜色的线条表示不同集合成员的全生育期模拟值,左上方蓝色直方图分别表示 6 月 1 日的 LAI 与最终产量的集合成员分布频率。红色虚线标记的是该点的实测产量(6 786 kg/hm²),蓝色竖线指示预报日期,该时刻之前的气象驱动资料为 2009 年实际气象数据,该天及之后的气象驱动为 1979—2008 年的历史集合成员。结果显示预报开始后集合成员的模拟结果逐渐出现分化,LAI 的集合分布在 5.0 ~ 6.5 之间,产量的集合分布在 6 000 ~ 8 300 kg/hm² 之间,不同年份的模拟结果有较大的差异,但随着预报时刻的不断更新,LAI 的集合成员模拟值变化幅度减小,而且基于历史气象的模拟集合其变化区间能够较好地涵盖实测值,说明历史气象数据的集合化表达可以用来部分表达模型模拟的不确定性,在小麦拔节后期即可得到对小麦长势、LAI 较为准确的集合预报。

模型模拟的产量即存贮器官干物质质量(Total dry weight of storage organs, TWSO)的集合平均值与实测值相差始终在 500 kg/hm² 左右,而直到 5 月初产量模拟结果仍有很大变异性(图 4),这是因为冬小麦生长前期是以营养生长为主,同化的干物质主要分配到叶、根、茎中;生育中期是小麦营养生长和生殖生长并进时期;在小麦生长后期同化物已停止向营养器官中分配,主要分配给贮藏器官;同时根、茎、叶等营养器官中的干物质会有部分转移到穗部形成产量,因此在抽穗后小麦籽粒开始形成、积累大量干物质并进行器官间的养分转移直至成熟,所以在冬小麦的产量形成中抽穗—灌浆的生殖生长阶段十分关键,这一时期作物遭受气象胁迫作用会十分明显地影响产量,这也说明在后续实际业务预报中,在冬小麦生长早期集合成员模拟的变异性较大,此时进行预报效果较差,而最终产量预报结果对抽穗—灌浆阶段的气象预报最为敏感,从生育后期即 5 月开始进行华北地区产量预报有一定的预报价值。这段时间气象数据的不确定性将决定产量预报结果的成败,因此在生长早期进行业务产量预报时还需要结合中长期的数值天气预报产品。

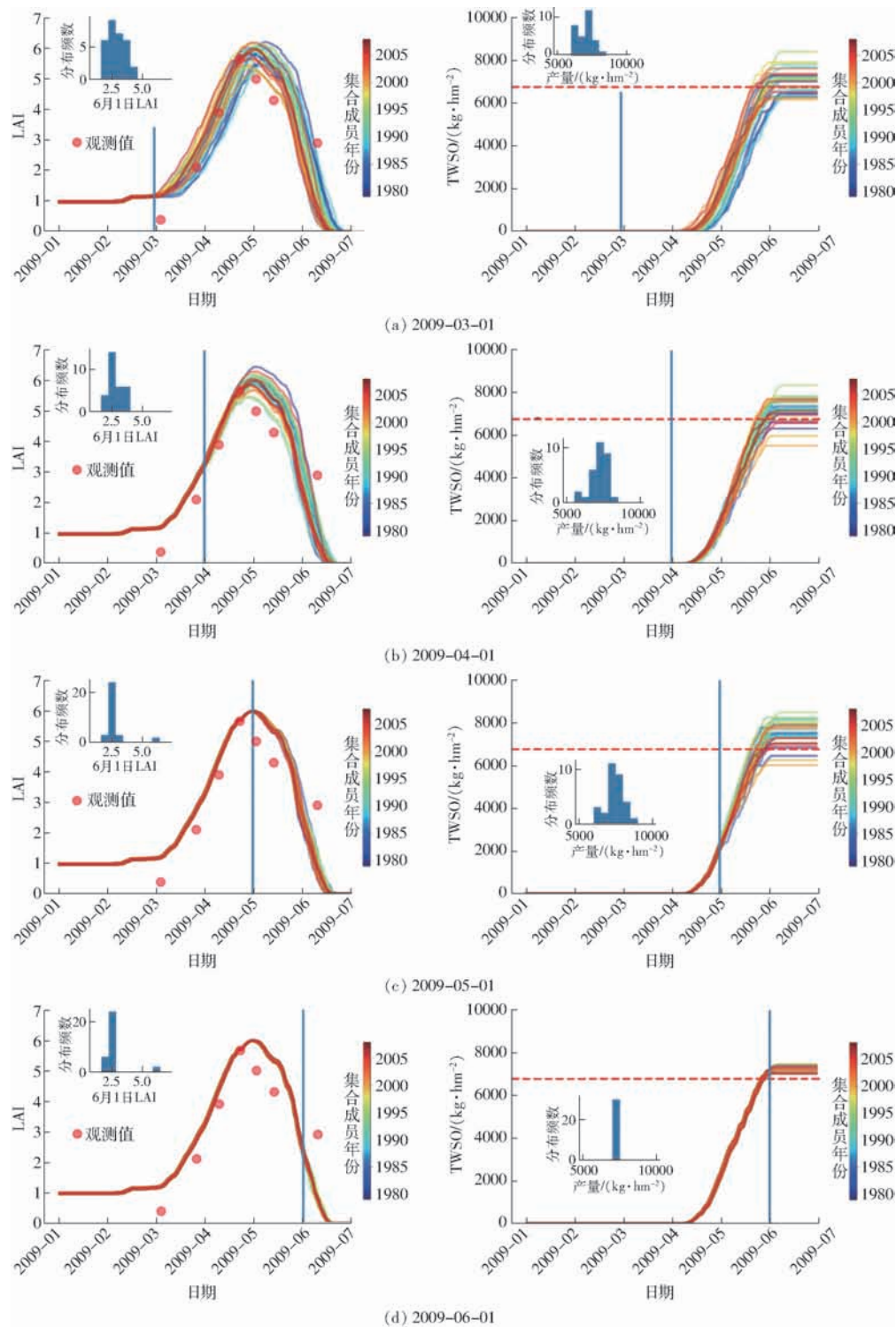


图3 深圳市观测点4个预报时期的 LAI 和 TWSO 集合模拟值与实测值对比

Fig. 3 Comparison of simulated and measured values of LAI and TWSO in four forecast periods of Shenzhen City

2.2 区域预报分析

通过分布式区域化模拟预报,得到研究区内区域化的产量集合预报结果。为了对产量预报结果进行验证,本文以预报的集合中值产量和实测点产量进行对比验证,可以看出随着预报日期的推进,研究区南部和北部的产量差异加大,南部预报的产量有所提高,北部产量逐渐降低,说明 2009 年该区域南部整体天气条件较好,实际产量优于历史条件下的

模拟(图 5),而北部区域天气条件差于历史同期。从该研究区产量大于 7 500 kg/hm² 的区域化概率预报(图 6),可以看出在 2 月初开始预报时,根据历史同期气象资料,大部分地区尤其是保定地区的产量高于 7 500 kg/hm² 的概率低于 50%,然而随着预报时刻的推进,绝大多数地区产量高于 7 500 kg/hm² 的概率大于 70%,说明 2009 年气象条件适宜冬小麦生长,天气条件优于历史同期。

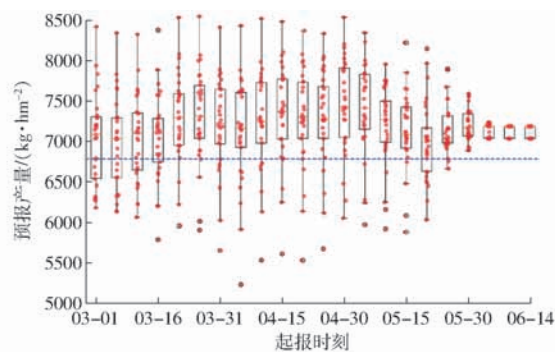


图 4 2009 年深圳市实测点不同起报时刻的冬小麦产量滚动集合预报及其箱形图

Fig. 4 Rolling ensemble forecasts of winter wheat yields in 2009 and their box plots at different forecasting times in Shenzhen City

2.3 预报性能定量分析

为了进一步评估集合预报的性能和误差,本文对所有田间实测点的产量集合预报进行了统计,根据实测点的实测产量计算 16 个预报时期集合中位数的验证指标 MAE、RMSE、PCC。16 个预报时期的 MAE 为 458 ~ 578 kg/hm², RMSE 在 598 ~ 758 kg/hm²之间,PCC 在 0.503 ~ 0.563 之间(图 7),

集合平均数的情况与之类似,但由于篇幅所限未列出。总体而言基于历史气象的集合预报对于本年的产量有一定的预报能力,相对误差在 6.6% 左右,集合中位数与实测值相关性也较好,说明历史气象集合的变异性很好地表达了气象输入参数的不确定性,有助于概率预报和数据等应用。但随着预报期的推进集合中位数的误差指标收敛较慢,直到 5 月中旬左右预报的性能达到最大值,说明气象数据的不确定性仍然不足以完全表现实际产量的不确定性,尤其是潜在模式下模型对于水分胁迫和土壤特性的影响没有得到表达,而且受制于气象驱动数据空间分辨率的限制,对于精细尺度的产量无法仅凭气象数据进行预报。

3 讨论

气象数据是作物模型的主要驱动数据,利用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,因而目前作物模型的应用主要局限于历史产量估测、单点模拟验证等,而作物模型机理明确、可扩展性强的优势没有得到发

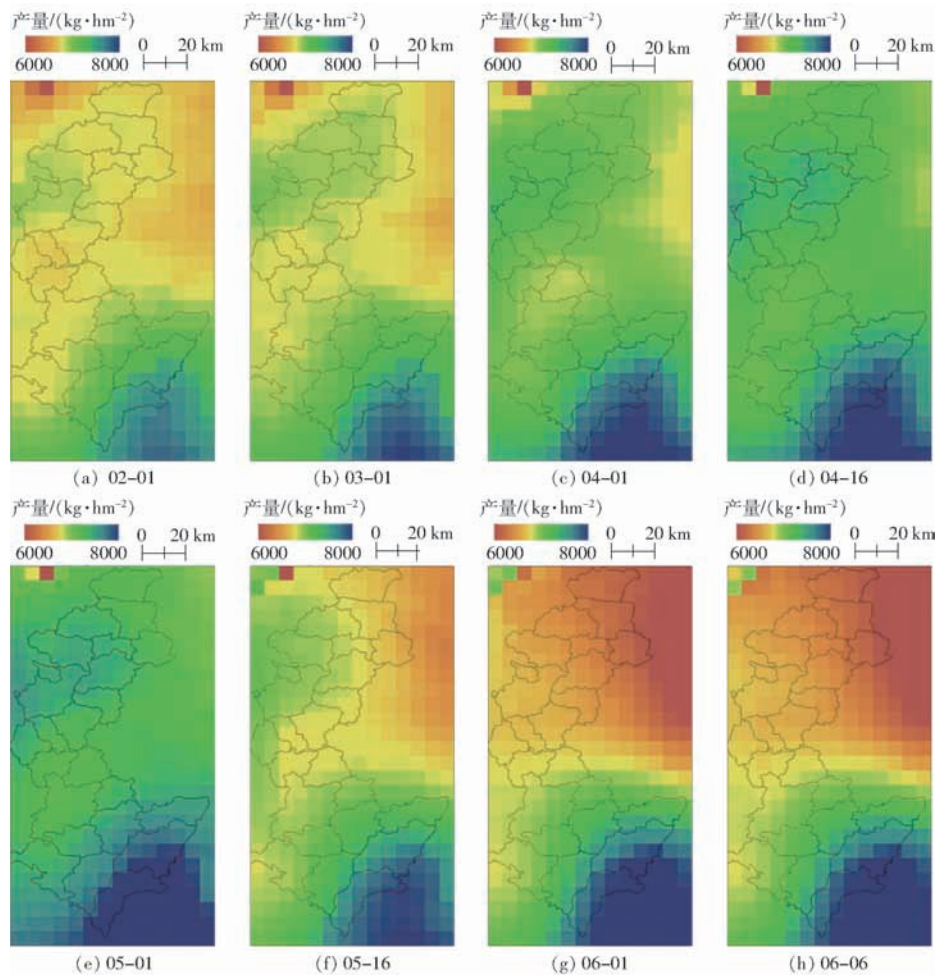


图 5 2009 年 8 个预报时期下区域化集合产量预报(集合中位数)

Fig. 5 Regionalized yield ensemble forecast (median of ensemble) for eight forecast periods in 2009

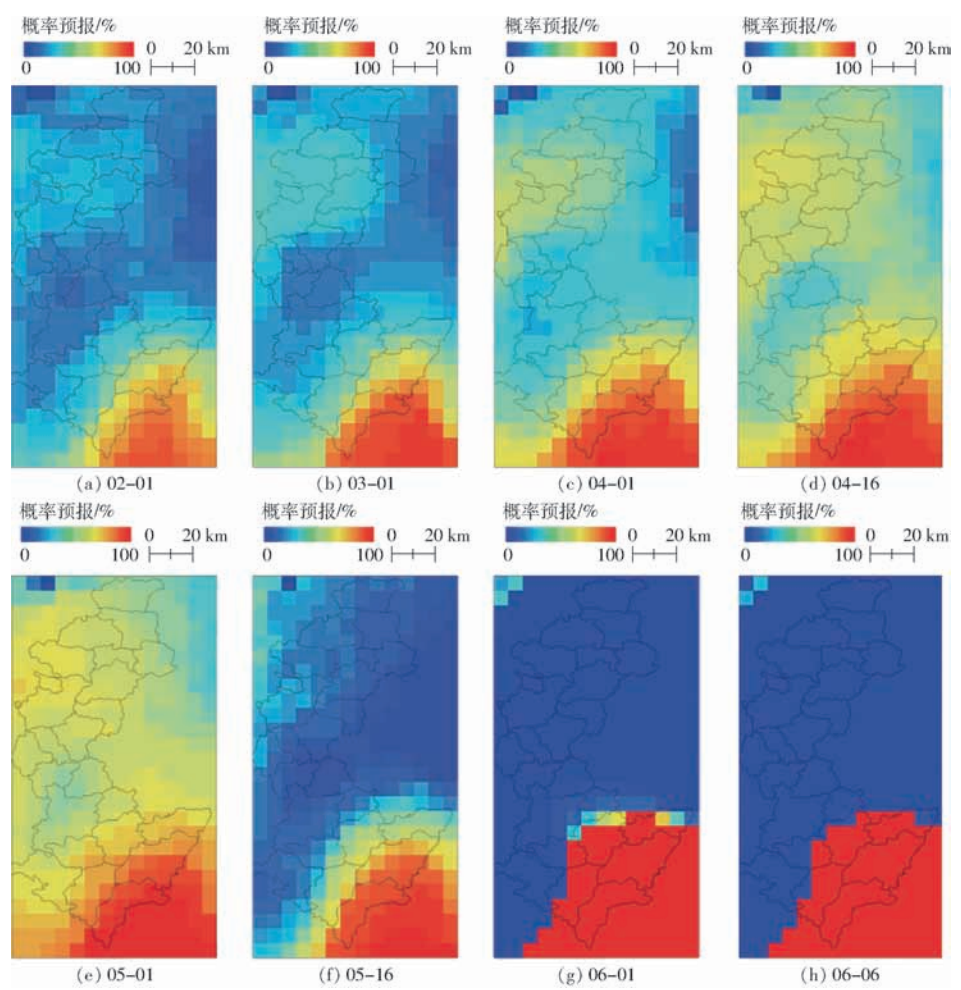


图6 2009 年 8 个预报时期下产量高于 7 500 kg/hm² 的概率预报

Fig.6 Probability forecast for event of production above 7 500 kg/hm² on eight forecast dates in 2009

挥。气象历史资料对于本地的气候模式和变异性有很好的描述能力,因此可以使用历史资料作为预报期的输入资料。本文采用潜在模式下的 WOFOST 模型作为预报模型,对 2009 年衡水保定地区的冬小麦产量进行了模拟预报,并使用集合预报的方法进行了后处理,结果发现基于历史气象的集合预报可以进行本年产量的预报,相对误差在 6.6% 左右,预报精度较好,表明该方法可以作为缺乏预报期气象资料时的补充手段,而且集合成员的分布可以表现产量的不确定性,可以根据集合成员提供产量水平的概率预报。

本文从 3 月开始进行滚动预报,3 月初模型即有一定预报能力(PCC 为 0.505, MAE 为 504 kg/hm²),说明在本地的历史多年气象资料集合可以代表当年的气象要素变率;而且预报误差在后期逐渐减小,说明随着气象输入数据不断被更新为实测值,气象数据的不确定在下降;但产量集合的收敛过程较慢,直到灌浆中后期达到最高预报精度,这可能与模型模拟的空间尺度较粗而且模型其他参数未能区域化有关,另外在潜在模式下作物生长的模拟未考虑水分等胁迫

作用的影响,区域上的产量差异仅仅来自于气象输入的差异,因而使得在空间上产量的分布梯度较不明显。

由于作物品种、土壤特性、管理措施对于产量的变异性有很强的影响,各种输入参数的变异性共同构成了产量的变异性,为了进一步提高产量区域化预报的精度,需要对敏感参数进行区域化,然而目前作物模型区域化调参受制于数据缺乏因而难度较大,将来借助农业气象观测、土壤数据库等数据进行参数区域化是进行模型产量预报的重要前期过程。另外卫星遥感数据是栅格类型的观测数据源,具有覆盖面积广、空间连续、周期观测、相对成本低的优势,通过遥感观测和作物模型的数据同化可以获得大区域范围的模型参数分布^[41],因此数据同化将会在模型产量预报方面有很大的潜力。

作物生长模型是一个非线性的复杂系统,通过模拟可以给出产量和其他生长参数的确定性模拟值,而集合预报的技术手段可以得到预报值不确定性信息,本文采用集合预报的思想进行了作物模型模拟,集合成员的生成方式是历史多年的气象输入,

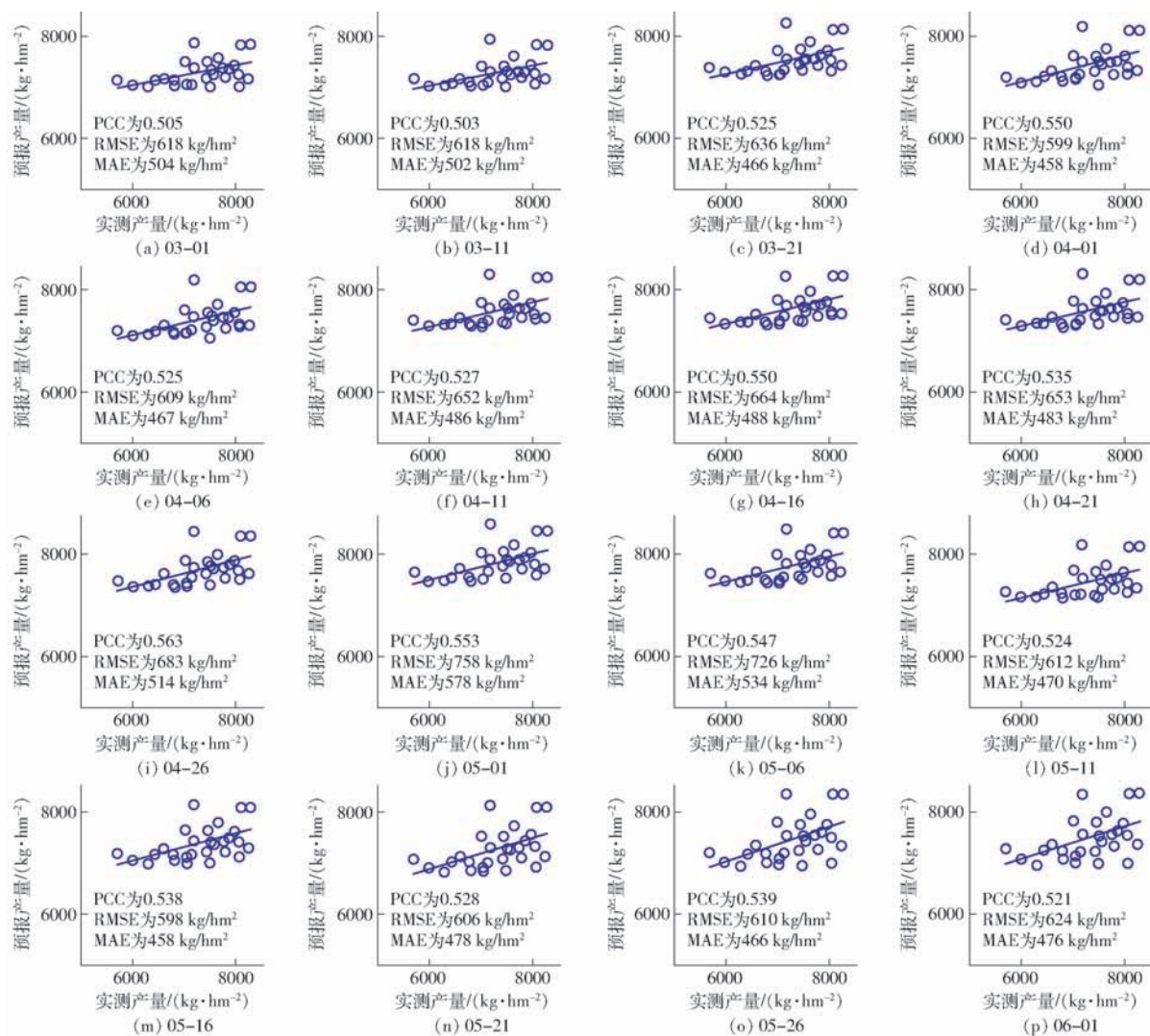


图7 衡水市实测点不同起报时刻下产量滚动预报的集合中位数验证结果

Fig. 7 Verification results of rolling ensemble forecast median of 29 observation points in Hengshui City at different forecasting times

而作物模型的不确定性来源除了气象输入外,还有模型本身、输入参数的不确定性,因此多模式的作物模型、作物参数扰动都可以用来生成预报集合^[42-43],这样的超级集合更有助于表达整个系统的不确定性,为提高模拟精度、概率预报和数据同化^[44]提供了一条很好的途径。和数值天气预报的技术发展历史相似,从单值的模拟拓展为概率预报是产量预报的发展方向,因此使用集合预报的思想进行作物模型模拟具有很好的应用前景。

本文初步探讨集合预报手段在作物模型模拟中的技术流程和应用前景,因此仅通过较小规模研究区一年的模拟预报对技术方案的可行性和误差进行了实验,而本文的技术方案还需要更多验证,多年大区域的验证实验还有待进行,而且解决预报期天气输入的根本方法在于结合数值天气预报,对于集合数值预报和作物模型的结合需要更深一步的研究。此外,在气候变化的大背景下,近年来的极端、异常

天气事件增多,需要采用其他方法得到预报期更高精度的气象输入集合,如历史相似年份替代、天气发生器等技术手段。

4 结论

(1)使用多年气象资料作为驱动建立预报集合,集合的平均值与实测产量 PCC 最高为 0.563, MAE 最低为 458 kg/hm²,表明历史气象集合对于本年度的作物产量具有一定的预报能力,能够作为预报期的气象数据补充手段,而集合的平均值或中位数能否代表当年实际气候变异下的模拟产量,取决于在历史气象集合中当年气象条件的一般性。

(2)抽穗至灌浆时期是作物产量形成的关键期,冬小麦产量对于这一阶段的气象条件十分敏感,在抽穗后开始产量预报有最高的预报精度。因此为进一步提高基于作物模型的产量预报精度,需要准确的抽穗至灌浆时期的气象参数,作物模型与中长

期数值预报结合是提高预报时效的必然要求。

(3) 现阶段研究在潜在模式下模拟预报, 产量的变异性只与气象数据中的温度和辐射量有关, 因此驱动数据的低空间分辨率和输入参数无区域差异是制约预报精度的关键因素, 使得模拟产量的空间梯度较小, 预报精度难以进一步提高, 为了解决输入参数的估计问题, 与遥感观测进行数据同化是可能的解决途径。

参 考 文 献

1 BOUMAN B A M, VAN KEULEN H, VAN LAAR H H, et al. The ‘School of de Wit’ crop growth simulation models: a pedigree and historical overview[J]. *Agricultural Systems*, 1996, 52(2-3): 171-198.

2 曹宏鑫, 赵锁劳, 葛道阔, 等. 作物模型发展探讨[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(17): 3520-3528.

CAO Hongxin, ZHAO Suolao, GE Daokuo, et al. Discussion on development of crop models[J]. *China Agriculture Science*, 2011, 44(17): 3520-3528. (in Chinese)

3 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.

4 杨霏云, 高学浩, 钟琦, 等. 作物模型, 遥感和地理信息系统在国外农业气象服务中的应用进展及启示[J]. *气象科技进展*, 2012, 2(3): 34-38.

YANG Feiyun, GAO Xuehao, ZHONG Qi, et al. The application advances of crop models, remote sensing and GIS technology in foreign agrometeorological service [J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2012, 2(3): 34-38. (in Chinese)

5 秦鹏程, 姚凤梅, 曹秀霞, 等. 利用作物模型研究气候变化对农业影响的发展过程[J]. *中国农业气象*, 2011, 32(2): 240-245.

QIN Pengcheng, YAO Fengmei, CAO Xiuxia, et al. Development process of modeling impacts of climate change on agricultural productivity based on crop models [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2011, 32(2): 240-245. (in Chinese)

6 BOUMAN B A M. Crop modelling and remote sensing for yield prediction[J]. *NJAS Wageningen Journal of Life Sciences*, 1995, 43(2): 143-161.

7 INES A V M, DAS N N, HANSEN J W, et al. Assimilation of remotely sensed soil moisture and vegetation with a crop simulation model for maize yield prediction[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 138: 149-164.

8 HUNDAL S S. Application of the CERES - Wheat model to yield predictions in the irrigated plains of the Indian Punjab[J]. *The Journal of Agricultural Science*, 1997, 129(1): 13-18.

9 GAISER T, DE BARROS I, SEREKE F, et al. Validation and reliability of the EPIC model to simulate maize production in small-holder farming systems in tropical sub-humid West Africa and semi-arid Brazil[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, 135(4): 318-327.

10 李振海. 基于遥感数据和气象预报数据的 DSSAT 模型冬小麦产量和品质预报[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.

LI Zhenhai. Predicting winter wheat yield and quality by integrating of remote-sensing data and the weather forecast data into the DSSAT model [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016. (in Chinese)

11 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 Xiqiang, LU Kuidong, HUANG Wanhua. 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. (in Chinese)

12 陈上, 窦子荷, 蒋腾聪, 等. 基于聚类法筛选历史相似气象数据的玉米产量 DSSAT - CERES - Maize 预测[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(19): 147-155.

CHEN Shang, DOU Zihe, JIANG Tengecong, et al. Maize yield forecast with DSSAT - CERES - Maize model driven by historical meteorological data of analogue years by clustering algorithm[J]. *Transactions of the CSAE*, 2017, 33(19): 147-155. (in Chinese)

13 解毅, 王鹏新, 张树誉, 等. 基于粒子滤波和多变量权重的冬小麦估产研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(10): 148-155. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20171018&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.10.018.

XIE Yi, WANG Pengxin, ZHANG Shuyu, et al. Winter wheat yield estimation based on particle filter algorithm and weights of multi-variables[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(10): 148-155. (in Chinese)

14 何亮, 侯英雨, 于强, 等. 不同空间分辨率驱动数据对作物模型区域模拟影响研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(2): 241-251. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180231&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.031.

HE Liang, HOU Yingyu, YU Qiang, et al. Influence of different resolutions data on regional simulation of crop model[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(2): 241-251. (in Chinese)

15 MARLETTO V, ZINONI F, CRISCUOLO L, et al. Evaluation of downscaled DEMETER multi-model ensemble seasonal hindcasts in a northern Italy location by means of a model of wheat growth and soil water balance [J]. *Tellus Series A—Dynamic Meteorology and Oceanography*, 2011, 57(3): 488-497.

16 BAIGORRIA G A, JONES J W, BRIEN J J O. Potential predictability of crop yield using an ensemble climate forecast by a regional circulation model [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148(8-9): 1353-1361.

17 BAKKER A M R, BESSEMBINDER J J E, DE WIT A J W, et al. Exploring the efficiency of bias corrections of regional climate model output for the assessment of future crop yields in Europe [J]. *Regional Environmental Change*, 2014, 14(3): 865-877.

18 BARON C, SULTAN B, BALME M, et al. From GCM grid cell to agricultural plot: scale issues affecting modelling of climate impact[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2005, 360(1463): 2095-2108.

19 刘昌明, 刘文彬, 傅国斌, 等. 气候影响评价中统计降尺度若干问题的探讨[J]. *水科学进展*, 2012, 23(3): 427-437.

- LIU Changming, LIU Wenbin, FU Guobin, et al. A discussion of some aspects of statistical downscaling in climate impacts assessment[J]. *Advances in Water Science*, 2012, 23(3):427–437. (in Chinese)
- 20 MARLETTO V, VENTURA F, FONTANA G, et al. Wheat growth simulation and yield prediction with seasonal forecasts and a numerical model[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 147(1–2): 71–79.
- 21 LV Z, LIU X, CAO W, et al. Climate change impacts on regional winter wheat production in main wheat production regions of China[J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2013, 171–172(3):234–248.
- 22 CAMMARANO D, STEFANOVA L, ORTIZ B V, et al. Evaluating the fidelity of downscaled climate data on simulated wheat and maize production in the southeastern US[J]. *Regional Environmental Change*, 2013, 13(1):101–110.
- 23 LEE C, KIM J, KIM K S. Development and application of a weather data service client for preparation of weather input files to a crop model[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2015, 114: 237–246.
- 24 DUMONT B, LEEMANS V, FERRANDIS S, et al. Assessing the potential of an algorithm based on mean climatic data to predict wheat yield[J]. *Precision Agriculture*, 2014, 15(3):255–272.
- 25 DUMONT B, BASSO B, LEEMANS V, et al. Systematic analysis of site-specific yield distributions resulting from nitrogen management and climatic variability interactions[J]. *Precision Agriculture*, 2015, 16(4):361–384.
- 26 韩湘玲. 农业气候的理论与实践[M]. 北京: 气象出版社, 2015.
- 27 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 Pengcheng, LIU Min, WAN Suqin, 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. (in Chinese)
- 28 杜钧, 邓国. 单一值预报向概率预报转变的基础: 谈谈集合预报及其带来的变革[J]. *气象*, 2010, 36(11): 1–11.
- DU Jun, DENG Guo. The utility of the transition from deterministic to probabilistic weather forecasts-verification and application of probabilistic forecasts[J]. *Meteorological Monthly*, 2010, 36(11): 1–11. (in Chinese)
- 29 赵琳娜, 吴昊, 田付友, 等. 基于 TIGGE 资料的流域概率性降水预报评估[J]. *气象*, 2010, 36(7): 133–142.
- ZHAO Linna, WU Hao, TIAN Fuyou, et al. Assessment of probabilistic precipitation forecasts for the Huaihe basin using TIGGE data[J]. *Meteorological Monthly*, 2010, 36(7):133–142. (in Chinese)
- 30 姜志伟. 区域冬小麦估产的遥感数据同化技术研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2012.
- JIANG Zhiwei. Study of the remote sensing data assimilation technology for regional winter wheat yield estimation [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2012. (in Chinese)
- 31 何杰, 阳坤. 中国区域高时空分辨率地面气象要素驱动数据集[EB/OL]. 兰州: 寒区旱区科学数据中心, 2011. DOI:10.3972/westdc.002.2014.db.
- HE Jie, YANG Kun. China meteorological forcing dataset [EB/OL]. Lanzhou: Cold and Arid Regions Science Data Center, 2011. DOI:10.3972/westdc.002.2014.db.
- 32 CHEN Y, YANG K, HE J, et al. Improving land surface temperature modeling for dry land of China[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2011, 116(D10): D20104.
- 33 DIEPEN C A, WOLF J, KEULEN H, et al. WOFOST: a simulation model of crop production[J]. *Soil Use and Management*, 1989, 5(1): 16–24.
- 34 黄健熙, 贾世灵, 马鸿元, 等. 基于 WOFOST 模型的中国主产区冬小麦生长过程动态模拟[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(10): 222–228.
- HUANG Jianxi, JIA Shiling, MA Hongyuan, et al. Dynamic simulation of growth process of winter wheat in main production areas of China based on WOFOST model[J]. *Transactions of the CSAE*, 2017, 33(10): 222–228. (in Chinese)
- 35 HUANG J, TIAN L, LIANG S, et al. Improving winter wheat yield estimation by assimilation of the leaf area index from Landsat TM and MODIS data into the WOFOST model[J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2015, 204:106–121.
- 36 HUANG J, SEDANO F, HUANG Y, et al. Assimilating a synthetic Kalman filter leaf area index series into the WOFOST model to improve regional winter wheat yield estimation[J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2016, 216:188–202.
- 37 HUANG J, MA H, SU W, et al. Jointly assimilating MODIS LAI and ET products into the SWAP model for winter wheat yield estimation[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing*, 2015, 8(8):4060–4071.
- 38 MA G, HUANG J, WU W, et al. Assimilation of MODIS–LAI into the WOFOST model for forecasting regional winter wheat yield[J]. *Mathematical and Computer Modelling*, 2013, 58(3–4):634–643.
- 39 MA H, HUANG J, ZHU D, et al. Estimating regional winter wheat yield by assimilation of time series of HJ–1 CCD NDVI into WOFOST–ACRM model with ensemble Kalman filter[J]. *Mathematical and Computer Modelling*, 2013, 58(3–4):753–764.
- 40 叶爱中, 段青云, 徐静. 水文集合预报概述及模型案例[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014.
- 41 黄健熙, 李昕璐, 刘帝佑, 等. 顺序同化不同时空分辨率 LAI 的冬小麦估产对比研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(1): 240–248. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150134&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.01.034.
- HUANG Jianxi, LI Xinlu, LIU Diyou, et al. Comparison of winter wheat yield estimation by sequential assimilation of different spatio temporal resolution remotely sensed LAI datasets[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(1):240–248. (in Chinese)
- 42 BATTISTI R, SENTELHAS P C, BOOTE K J. Inter-comparison of performance of soybean crop simulation models and their ensemble in southern Brazil[J]. *Field Crops Research*, 2017, 200:28–37.
- 43 TAO F, ZHANG Z, LIU J, et al. Modelling the impacts of weather and climate variability on crop productivity over a large area: a new super-ensemble-based probabilistic projection[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149(8): 1266–1278.
- 44 ZHANG Y, ZHAO Y, WANG C, et al. Using statistical model to simulate the impact of climate change on maize yield with climate and crop uncertainties[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2017, 130(3–4): 1065–1071.