

河北沧州夏玉米产量动态预报的多方法对比研究

秦俊灵¹, 王培娟², 王 琼³, 魏秀梅¹, 任妙春¹, 刘炳杰¹, 李 琛¹

(1. 河北省沧州市气象局, 河北 沧州 061000; 2. 中国气象科学研究院, 北京 100081; 3. 河北雄安新区气象局, 河北 雄安 062551)

摘要: 利用1987–2021年河北沧州气象资料和夏玉米产量数据, 采用丰歉指数法、关键气象因子法、气候适宜度法和权重线性集成法分别构建夏玉米产量动态预报模型, 利用预报准确率、正确率和标准差评估模型的预报效果。结果表明, 集成模型的预报效果和稳定性明显优于单模型, 且权重系数赋值时预报效果排序为相关系数>专家经验>预报准确率。单模型中关键气象因子法和气候适宜度法的预报效果和稳定性明显优于丰歉指数法。最优起报日期集成模型为9月1日, 气候适宜度法为8月21日, 关键气象因子法和丰歉指数法为8月1日。综合考虑, 在河北沧州夏玉米产量预报中, 按相关系数权重赋值建立3种单模型的集成模型预报效果最佳, 且9月1日可作为最优起报日期。

关键词: 夏玉米; 产量预报; 丰歉指数法; 关键气象因子法; 气候适宜度法; 权重线性集成法

中图分类号: S513.01

文献标识码: A

Comparative Study on Different Methods for Dynamically Forecasting Summer Maize Yield in Cangzhou, Hebei

QIN Jun-ling¹, WANG Pei-juan², WANG Qiong³, WEI Xiu-mei¹,

REN Miao-chun¹, LIU Bing-jie¹, LI Chen¹

(1. Hebei Cangzhou Meteorological Bureau, Cangzhou 061000;

2. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081;

3. Hebei Xiongan New Area Meteorological Service, Xiongan 062551, China)

Abstract: Based on the meteorological observations and yield of summer maize in Cangzhou City, Hebei Province from 1987 to 2021, the dynamic prediction models of summer maize yield were constructed using the abundance-loss index method, the key meteorological factors method, the climate suitability method, and the weighted linear ensemble method, respectively. The prediction accuracy, correct rate and standard deviation were used to evaluate the prediction effect of models. The results showed that the forecasting effect and stability of the integrated model were obviously better than that of the single model, and the order of forecasting effect is: correlation > expert experience > forecast accuracy. The forecast effect and stability of key meteorological factor method and climate suitability method in single model are obviously better than those of abundance index method. The optimal start date is September 1 for the integrated model, August 21 for the climate suitability method, August 1 for the key meteorological factors method and the abundance index method. Overall, in forecasting summer maize yield in Cangzhou, Hebei, the integrated model with weights assigned based on the correlation coefficient provided the best forecasting results, with September 1 being the optimal start date.

Key words: Summer maize; Yield forecast; Abundance-loss index method; Key meteorological factors method; Climate suitability method; Weight linear ensemble method

录用日期: 2023-11-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(32171916)、河北省科研项目(21ky23)

作者简介: 秦俊灵(1989-), 女, 河北沧州人, 工程师, 主要从事农业气象服务工作。E-mail: 1005647511@qq.com

王培娟和王 琼为本文通信作者。

E-mail: wangpj@cma.gov.cn E-mail: 534251708@qq.com

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]。准确的产量预报可以在很大程度上提升国家的战略决策服务水平和质量, 使决策部门能够及时掌握农作物的产量动态, 做出科学的宏观调控政策, 合理安排生产、贮运、调拨和进出口贸易等, 对保障国家粮食安全具有重要意义。

随着农业气象业务的发展,相关学者对作物产量动态预报技术有了较为深入的研究^[2-12]。杜春英^[13]、王贺然^[14]等基于相关系数和欧式(相似)距离等方法,分别建立东北地区粮食作物的产量丰歉趋势动态预报模型,预报准确率普遍达到85%以上,且发现水稻预报效果要好于旱田作物。李树岩^[15]等利用相关分析建立了河南省基于关键气象因子的产量动态预报模型,模型回代检验预报准确率全省达88%,试报准确率达95%,虽然预报效果较好但地域差异表现明显,南、北部差值达10%。魏瑞江^[16]等基于气候适宜度方法实现了河北省夏玉米产量的动态预报,预报检验和试报平均准确率分别为89%和97%。也有学者对比分析了其中两种或3种以及集成预报模型的预报情况^[17-21]。邱美娟^[22]等通过对山东省冬小麦分区进行多模式产量预报对比,发现单一产量预报方法在各区域各时段的预报准确率很不稳定,波动范围较大,因而根据单一方法的准确率占比作为权重系数,建立了集成预报方法,预报准确率普遍可达95%以上,预报效果和稳定性要更优良。徐敏^[23]等通过对江苏省冬小麦不同预报方法的对比分析,发现平均预报准确率由高到低分别为集成预报、气候适宜度法、关键气象因子法、丰歉相似年法,集成预报建立时采用按预报效果的综合排序权重赋值0.5、0.3、0.2,近5年预报准确率达96%以上。诸多学者的研究结果表明,3种预报模型方法都能较为准确对作物产量做出预报,但预报准确率和稳定性均不如集成预报模型,并且预报模型在不同地域和不同作物上的预报效果有明显差异,集成模型建立时按不同的权重系数预报效果也不同。

河北沧州位于冀中平原东部,有“渤海粮仓”之称,粮食播种面积达89.9万 hm^2 以上,总产量达466.0万t,其中,秋粮夏玉米播种面积高达52.9万 hm^2 ,产量达260.4万t,占总产量50%以上,是沧州最重要的粮食作物之一^[24]。夏玉米生长发育及产量形成受温度、降水、光照等气象条件的影响很大,在品种确定的前提下,气象条件是夏玉米丰歉的决定因素。因此,为了更及时准确地预报出沧州夏玉米的产量,本文在以往研究的基础上,采用作物丰歉指数法、关键气象因子法、气候适宜度法和权重线性集成法,结合沧州夏玉米的生长气象指标,分别构建沧州夏玉米产量动态预报模型,评估各预报模型的预报能力,按不同权重系数建立集成预报模型,最终遴选出预报效果最好集成预报模型,应用于沧州夏玉米产量气象预报业务中,为当地夏玉米生产减灾增效、保障粮食安全等提供重要的决策参考。

1 资料与方法

1.1 资料来源

气象资料来源于河北省沧州市气象局1987-2021年逐日地面气象观测资料,包括平均气温、最高气温、降水量、日照时数等,历史产量资料来源于河北省沧州市统计局。其中1987-2021年资料用于建模,2007-2021年资料用作回代检验。

1.2 分析方法

基于丰歉指数法的夏玉米产量动态预报模型需对夏玉米单产作如下处理:

$$\Delta Y_i = Y_i - Y_{i-1} \quad (1)$$

式中, Y_i 和 Y_{i-1} 分别为第*i*年和第*i-1*年夏玉米单产, ΔY_i 为第*i*年与第*i-1*年夏玉米单产的丰歉值。

基于关键气象因子、气候适宜度的玉米产量动态预报模型需对夏玉米单产进行产量分离,分解为趋势产量和气象产量,趋势产量采用二次曲线方法模拟。

$$Y_i = Y_{ti} + Y_{mi} \quad (2)$$

$$Y_{ti} = aI_i^2 + bI_i + c \quad (3)$$

式中, Y_{ti} 和 Y_{mi} 分别为第*i*年趋势产量和气象产量, I_i 为第*i*年在年份序列变换得到的时间序列中的第*i*个数值, a 、 b 为模拟系数, c 为模拟常数。

1.3 夏玉米单产预报模型

为了比较不同起报日期对模型预报性能的影响差异,在模型构建和回代检验时均选取了不同的起报日期,考虑到河北沧州夏玉米通常在6月上旬播种,9月下旬收获,因此,选取自8月1日至9月21日开展逐旬模型构建和回代检验。

1.3.1 基于丰歉指数法的夏玉米产量预报模型

计算作物播种后每旬的积温、标准化降水量、累积日照时数,利用欧氏距离和相关系数法计算预报年气象要素与历史年气象要素差异,建立丰歉指数综合诊断指标。

$$C_{ik} = \frac{r_{ik}}{d_{ik}} \times 100\% \quad (4)$$

$$r_{ik} = \frac{\sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_i)(x_{kj} - \bar{x}_k)}{\sqrt{\sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_i)^2 \sum_{j=1}^n (x_{kj} - \bar{x}_k)^2}} \quad (5)$$

$$d_{ik} = \sqrt{\sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_{ij})^2} \quad (6)$$

式中, i 为历史上的任意1年, k 为预报年, j 为夏玉米播种至发布预报前的任意旬, n 为旬数; x_{kj} 和 x_{ij} 分别为预报年和历史上任意1年夏玉米第*j*旬的气

象要素; \bar{x}_i 和 \bar{x}_i 分别为气象要素历年平均值和预报年各旬平均值; r_{ik} 、 d_{ik} 分别为预报年与历史上任意1年的相关系数和欧氏距离; C_{ik} 为预报年与历史上任意1年的丰歉指标, 该值越大表明预报年与这1年的相似程度越高。

为减少预报误差, 在积温、标准化降水量、累积日照时数中选取各要素丰歉指数的前3位作为历史相似年, 共得到9个相似年, 分别采用大概率法和加权法确定预报年的丰歉变化。

大概率法计算公式如下:

$$\Delta Y_i = \begin{cases} \frac{\sum \Delta Y_{i(+)}}{l} & (l > m) \\ \frac{\sum \Delta Y_{i(-)}}{m} & (l < m) \end{cases} \quad (7)$$

加权法计算公式如下:

$$\Delta Y_i = \frac{\sum \Delta Y_{i(+)} \times a_{(+)} + \sum \Delta Y_{i(-)} \times a_{(-)}}{l \times a_{(+)} + m \times a_{(-)}} \quad (8)$$

式中, $\sum \Delta Y_{i(+)}$ 和 $\sum \Delta Y_{i(-)}$ 分别为9个历史相似年中结果为正值和负值的累加, l 和 m 分别为预报结果为正值和负值的个数, $a_{(+)}$ 和 $a_{(-)}$ 分别为 l 和 m 在总个数中所占比例。

1.3.2 基于关键气象因子法的夏玉米产量预报模型

在前人研究成果基础上, 根据夏玉米生长期中每旬不同气象因子(归一化处理后的平均气温、积温、日最高气温 $\geq 35^\circ\text{C}$ 的日数、降水量、降水日数、大雨日数、日照时数)与气象产量之间的相关系数, 结合夏玉米的生物学特性, 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类因子分别进行加权综合, 建立夏玉米气象产量与关键气象因子的线性回归模型。

$$X_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{j,\min}}{x_{j,\max} - x_{j,\min}} \quad (9)$$

$$M = \sum (r_i \times X_i) \quad (10)$$

式中, X_{ij} 为归一化处理后的气象要素, x_{ij} 为历史上任一年第 j 旬气象要素值, $x_{j,\min}$ 和 $x_{j,\max}$ 分别为第 j 旬历史年中气象要素的最小值和最大值。 M 为选定时段内同类关键因子的加权组合, x_i 和 r_i 分别为选定时段内某个关键因子进行归一化后的要素值和该值与气象产量的相关系数。

1.3.3 基于气候适宜度的夏玉米产量预报模型

在前人建立的作物适宜度模型基础上, 以逐旬气象资料为基础, 根据夏玉米各生育期气象指标, 计算逐旬温度、降水、日照和气候适宜度。

$$F_{j(t)} = \frac{(t - t_l) \times (t_h - t)^p}{(t_o - t_l) \times (t_h - t_o)^p} \quad (11)$$

$$p = \frac{t_h - t_o}{t_o - t_l} \quad (12)$$

$$F_{j(t)} = \begin{cases} r\sqrt{r} & D_{(t)} < -30\% \\ 1 & -30\% \leq D_{(t)} \leq 30\% \\ \bar{r}/r & D_{(t)} > 30\% \end{cases} \quad (13)$$

$$D_{(t)} = (r - \bar{r}) / \bar{r} \times 100\% \quad (14)$$

$$F_{j(s)} = \begin{cases} 1 & s \geq \bar{s} \\ s/\bar{s} & s < \bar{s} \end{cases} \quad (15)$$

$$F_{j(c)} = \sqrt[3]{F_{j(t)} \times F_{j(r)} \times F_{j(s)}} \quad (16)$$

式中, $F_{j(t)}$ 、 $F_{j(r)}$ 、 $F_{j(s)}$ 、 $F_{j(c)}$ 分别为第 j 旬的温度、降水、日照和气候适宜度; t_l 、 t_h 、 t_o 分别为夏玉米各生长发育期所需的最低温度、最高温度、适宜温度(表1); t 、 r 、 s 分别为旬平均气温、旬标准化降水量、旬累积日照时数。 \bar{r} 、 \bar{s} 分别为旬历年平均标准化降水量、旬历年平均累积日照, $D_{(t)}$ 为旬降水距平百分率。

进而建立基于气候适宜度的夏玉米产量预报模型。

$$F_{(c)} = \sum_{j=1}^N K_j F_{j(c)} \quad (17)$$

$$K_j = R_j / \sum_{j=1}^N R_j \quad (18)$$

式中, R_j 为 j 旬气候适宜度与夏玉米气象产量的相关系数, K_j 为第 j 旬的权重系数, $F_{(c)}$ 为气候适宜度。

1.3.4 集成预报模型

采用权重线性集成方法建立单模型的集成预报模型, 建立时各单模型的权重系数分别按单模型预报准确率、单模型预报拟合产量与实际产量的相关系数和专家经验赋值3种方法来确定, 然后按权重对单模型的预报结果进行相加, 得到最终的综合集成预报结果。

$$w_g = \overline{AR}_g / \sum_{g=1}^q \overline{AR}_g \quad (19)$$

$$Y_{io} = \sum_{g=1}^q w_g \times Y_{ig} \quad (20)$$

式中, q 为预报方法的总个数, \overline{AR}_g 为第 g 个预报方法的预报准确率, w_g 为第 g 个预报方法的权重, Y_{ig} 和 Y_{io} 分别为第 i 年夏玉米的第 g 个预报方法和集成方法的预报产量。专家经验赋值是根据预报准确率、丰歉正准确率及标准差的综合排序, 按照专家经验, 将排在第1位权重赋值0.5、第2位赋值0.3、第3位赋值0.2。

1.3.5 预报性能评估

采用预报准确率、丰歉正准确率和标准差来评估预报模型的预报能力和稳定性。

$$AR_i = \left(1 - \frac{|Y_{ia} - Y_i|}{Y_i}\right) \times 100\% \quad (21)$$

$$CR = \frac{C}{N} \times 100\% \quad (22)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (AR_i - \overline{AR})^2}{N-1}} \quad (23)$$

式中, AR_i 、 CR 和 S 分别为预报准确率、丰歉正确率和标准差, i 为预报年中的任意1年, N 为回代的样本长度, Y_{ia} 为第 i 年夏玉米的单产预报值, \overline{AR} 为历年预报准确率均值, C 为回代年份中预报单产增减符号与实际单产增减符号一致的总次数。

表1 夏玉米各生长发育期所需的最低、最高和最适宜温度

Table 1 Minimum temperature, maximum temperature and suitable temperature required by summer maize at each growth and development stage

发育期 Developmental stage	时段 Date	t_l	t_h	t_o
播种期	6月上旬	17	35	25
	6月中旬	19	35	25
苗期	6月下旬	21	35	26
	7月上旬	21	35	26
拔节期	7月中旬	22	35	26
	7月下旬	23	35	26
抽雄期	8月上旬	22	34	26
	灌浆—成熟期	8月中旬	21	33
	8月下旬	20	33	24
	9月上旬	18	32	22
	9月中旬	15	30	20
	9月下旬	13	30	19

2 结果与分析

2.1 丰歉指数法产量动态预报

采用丰歉指数法计算出历年的综合诊断指标序列, 然后分别采用加权法和大概率法计算 2007—2021 年夏玉米的预报产量, 进而获得两者平均预报性能(图 1)。

由图 1 可知, 采用加权法和大概率法建立的丰歉指数法模型拟合值的趋势相近, 且大体上均模拟出了沧州夏玉米单产年际变化的总体特征, 如 2008—2013 年单产呈波动变化, 2015 年单产明显下降, 2016 年之后单产波动上升。但模型的模拟也存在明显误差, 对高值年或低值年的模拟与实际值差异较大, 如实际产量低值年出现在 2007、2015、

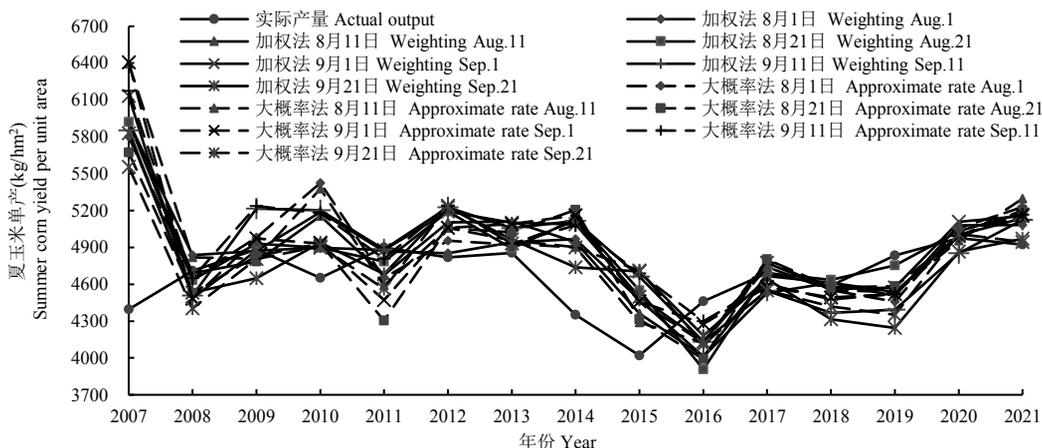


图1 2007—2021 年夏玉米在不同起报日期下基于丰歉指数法预报模型的拟合值与实际值年际变化
Fig.1 The interannual variation of fitting value and actual value of summer maize forecast model based on abundance-loss index method at different starting date from 2007 to 2021

2018年,而模型拟合值较实际年份明显向后“漂移”了1年,出现在2008、2016、2019年。

由表2可知,采用加权法和大概率法得到的河北沧州夏玉米产量的预报准确率分别为91.1%~93.1%和91.5%~92.5%,丰歉正确率分别为46.7%~60.0%和40.0%~60.0%,前者略大于后者。在标准差方面,加权法为8.1%~9.9%,小于大概率法7.0%~11.2%,加权法综合考虑了沧州夏玉米增、减产年份的平均水平,代表性略优于大概率法选取的

相似年均值,且数值波动较小,预报比较稳定。因此,在沧州夏玉米丰歉指数法产量预报中采用加权法效果要略好一些。此外,随着起报日期越来越接近成熟收获,加权法和大概率法在预报准确率、正确率和标准差上没有明显的差异,说明丰歉指数法预报产量的预报效果和稳定性并不会因为接近成熟期而有所提高。因此,8月1日可以作为沧州夏玉米丰歉指数法产量预报的最优预报日期。

表2 2007–2021年不同起报日期下河北沧州夏玉米基于丰歉指数法的产量预报评估结果

Table 2 Evaluation of forecasting yield for summer maize based on the abundance-loss index method at different onset dates from 2007 to 2021 in Cangzhou, Hebei

起报日期 Onset date	预报准确率 Accuracy		丰歉正确率 Precision		标准差 Standard deviation	
	加权法 Weighting method	大概率法 Approximate rate method	加权法 Weighting method	大概率法 Approximate rate method	加权法 Weighting method	大概率法 Approximate rate method
	8月1日	93.1	92.3	53.3	53.3	9.0
8月11日	92.8	91.9	46.7	46.7	8.1	7.0
8月21日	92.9	92.5	53.3	40.0	8.3	10.3
9月1日	92.4	91.5	53.3	46.7	9.9	11.2
9月11日	91.1	91.6	53.3	53.3	9.4	7.8
9月21日	92.2	92.5	60.0	60.0	8.7	11.2
均值	92.4	92.1	53.3	50.0	8.9	9.4

2.2 关键气象因子法产量动态预报

计算每旬不同气象因子(归一化处理)与气象

产量之间的相关系数,将通过显著性检验的因子作为影响夏玉米产量的关键气象因子(表3)。

表3 通过显著性检验的关键气象因子和其与夏玉米气象产量的相关系数

Table 3 Key meteorological factors passing the significance test and their correlation coefficients with meteorological yield of summer maize

种类 Species	关键气象因子 Key meteorological factor	时段 Date	相关系数 Correlation coefficient
温度类	平均气温	7月中旬	-0.508
		8月下旬	-0.470
	最高气温 ≥ 35 °C的天数	7月中旬	-0.665
		8月上旬	-0.440
		8月下旬	-0.344
		9月上旬	-0.429
降水类	累积降水	6月中旬	0.367
		6月下旬	0.423
		7月上旬	0.379
	大雨天数	6月中旬	0.374
		6月下旬	0.432
		7月中旬	0.353
日照类	累积日照	7月中旬	-0.339

筛选出的13个关键气象因子具有较明显的生物学意义,反映了夏玉米出苗、拔节、抽雄开花、灌浆期等正常生长对光温水等气象条件的需求。将13个关键气象因子分为温度类、降水类、日照类3类进行加权综合,再根据出现日期及综合因子与夏玉米气象产量的关系,分别建立了8月1日、11日和9月1日、11日4个起报日期的关键气象因子预报模型。以回代2007–2021年数据来检验模型的预报性能,得到单产拟合和预报评估结果。

由图2可知,关键气象因子法模型对沧州夏玉米单产年际变化的总体特征模拟效果较为准确,2007–2008年单产上升,2008–2013年单产呈波动变

化,2014年单产出现明显下降,2018年之后单产明显上升都做出了较为准确的模拟。但模型的模拟也存在明显误差,如将2015年的单产低值年模拟在2014年,将2017年高值年转折点模拟在2016年。

由表4可知,预报准确率、丰歉正确率及标准差随着预报日期的推迟变化不大,综合来看8月1日可以作为河北沧州夏玉米气象关键因子法产量预报的最优预报日期。从预报效果来看,气象关键因子法预报准确率在94.6%~94.8%,丰歉正确率为73.3%,标准差在3.4%~3.7%,在预报效果和稳定性上,明显优于丰歉指数法的预报结果。

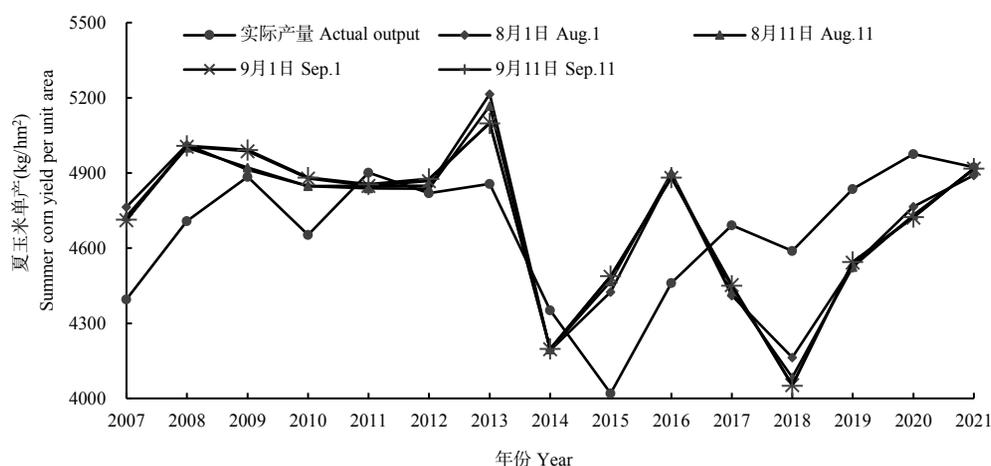


图2 2007–2021年夏玉米在不同起报日期下基于关键气象因子法预报模型的拟合值与实际值年际变化

Fig.2 The interannual variation of fitting value and actual value of summer maize forecast model based on key meteorological factor method at different onset date from 2007 to 2021

表4 2007–2021年不同起报日期下河北沧州夏玉米基于关键气象因子法的产量预报评估结果

Table 4 Evaluation of forecasting yield for summer maize based on key meteorological factor method at different onset dates from 2007 to 2021 in Cangzhou, Hebei

起报日期 Onset date	预报准确率 Accuracy	丰歉正确率 Precision	标准差 Standard deviation
8月1日	94.8	73.3	3.4
8月11日	94.7	73.3	3.7
9月1日	94.7	73.3	3.6
9月11日	94.6	73.3	3.6
均值	94.7	73.3	3.6

2.3 气候适宜度法产量动态预报

将2007–2021年气象数据代入气候适宜度法预报模型中,回代检验夏玉米的预报产量,得到基于气候适宜度法模型的夏玉米单产拟合值和其预报性能。

由图3可知,气候适宜度法模型对沧州夏玉米单产年际变化的总体特征模拟效果也较为准确,特

别是在2016年以前,模型拟合值几乎是“复刻”了实际单产的趋势变化。但模型的模拟也存在明显误差,如2016年后的单产低值年出现在2018年,拟合值模拟在2019年。

由表5可知,预报准确率和丰歉正确率均随着预报日期的推迟而提高,说明越接近夏玉米成熟期,预报因子信息越全面,基于气候适宜度方法建立的

预报模型预报效果越好,这与丰歉指数法和关键气象因子法有明显的不同。综合考虑预报准确率、丰歉正确率和标准差,8月21日可以作为河北沧州夏玉米气候适宜度法产量动态预报的最优日期,在预报效果和稳定性上,明显优于丰歉指数法的预报结果。气候适宜度法在8月1日和11日预报日期,预

报准确率、丰歉正确率、标准差分别为94.6%、66.7%、3.7%~3.8%,预报效果要略差于关键气象因子法;在9月1日和11日预报日期,预报准确率、丰歉正确率、标准差分别为95.0%、73.3%、3.4%~3.5%,预报效果要略优于关键气象因子法。

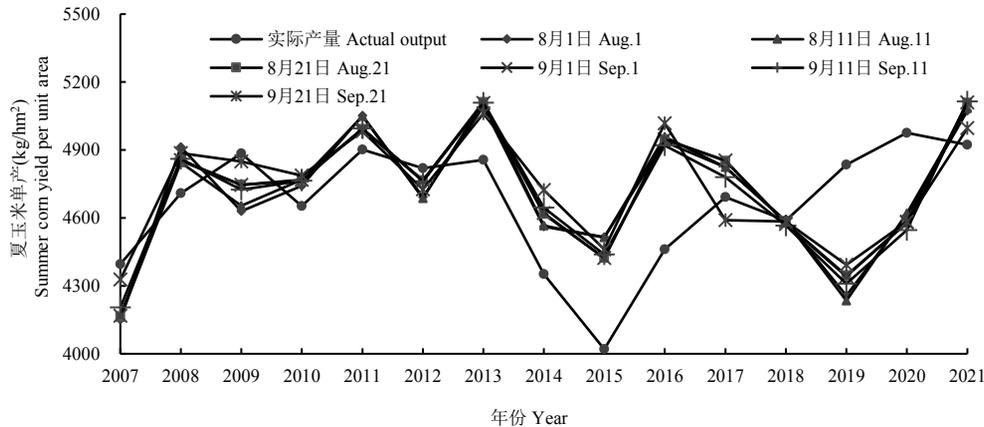


图3 2007–2021年夏玉米在不同起报日期下基于气候适宜度法预报模型的拟合值与实际值年际变化

Fig.3 The interannual variation of fitting value and actual value of summer maize forecast model based on climate suitability method at different onset date from 2007 to 2021

表5 2007–2021年不同起报日期下河北沧州夏玉米基于气候适宜度法的产量预报评估结果

Table 5 Evaluation of forecasting yield for summer maize based on climate suitability method at different onset dates from 2007 to 2021 in Cangzhou, Hebei

起报日期 Onset date	预报准确率 Accuracy	丰歉正确率 Precision	标准差 Standard deviation
8月1日	94.6	66.7	3.7
8月11日	94.6	66.7	3.8
8月21日	95.0	73.3	3.4
9月1日	95.0	73.3	3.4
9月11日	95.0	73.3	3.5
9月21日	95.4	73.3	4.0
均值	95.0	71.1	3.6

2.4 集成预报模型产量动态预报

为了减小单模型的预报随机误差,增强预报值的稳定性,对3种单模型进行集成。集成预报建模时,按照权重系数赋值方法,即单模型预报准确率、单模型预报拟合产量与实际产量的相关系数和专家经验赋值3种方法来确定权重系数,分别定义为综合集成模型A、B、C。将2007–2021年单模型产量预报结果代入,计算出综合预报模型的预报产量,得到综合预报模型的平均预报性能。

由图4可知,3种集成模型对夏玉米单产的总体变化特征的模拟较单模型更为准确。模拟最为准确的是模型B,对2007–2008年单产上升、2008–2013年

单产呈波动变化、2015年和2018年呈“双漏斗”特征都做出了较为准确的模拟;其次为模型C,误差出现在2018年的单产低值年模型拟合出现在2019年;最后是模型A,除了出现2018年单产低值年模型拟合在2019年外,在2007年也存在较大误差。

由表6可知,3种集成预报的平均准确率在95.3%~95.8%,丰歉正确率在73%~86.7%,高于单个预报模型;标准差在3.0%~3.3%,略低于关键气象因子法(3.4%~3.7%)和气候适宜度法(3.4%~4.0%),整体上集成预报的预报效果和稳定性均优于单模型。3种集成预报模型对比发现,在预报效果和稳定性上均表现为模型B>模型C>模型A,即集成

模型建立时,权重系数按相关系数(单模型预报拟合产量与实际产量)赋值效果最好,其次为专家经验赋值,最后为按单模型预报准确率赋值。从预报日期上来看,随着预报日期的推移,集成预报模型的预报准确率和正确率均有所提高,特别在9月1日,综合

模型预报准确率达 95.5% ~ 95.9%, 正确率达 73.3% ~ 86.7%, 均高于其他预报日期,因此,9月1日可以作为河北沧州夏玉米集成产量预报的最优预报日期。

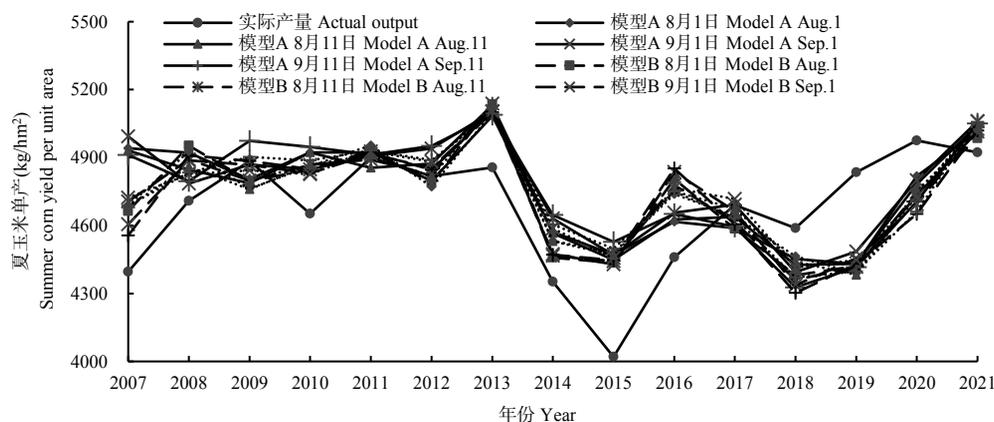


图4 2007-2021年夏玉米在不同起报日期下集成预报模型的拟合值与实际值年际变化

Fig.4 The interannual variation of the fitting value and the actual value of the integrated forecasting model for summer maize at different onset dates from 2007 to 2021

表6 2007-2021年集成预报模型与单模型的平均预报准确率、丰歉正确率和标准差

Table 6 The average forecast accuracy, abundance error accuracy and standard deviation of integrated forecast model and single model from 2007 to 2021

%

起报日期 Onset date	预报准确率 Accuracy			丰歉正确率 Precision			标准差 Standard deviation		
	模型A Model A	模型B Model B	模型C Model B	模型A Model A	模型B Model B	模型C Model C	模型A Model A	模型B Model B	模型C Model C
	8月1日	95.4	95.7	95.6	73.3	80.0	73.3	3.3	2.9
8月11日	95.4	95.8	95.7	73.3	80.0	80.0	3.3	3.1	3.1
9月1日	95.5	95.9	95.7	73.3	86.7	80.0	3.4	3.0	3.1
9月11日	94.8	95.6	95.3	73.3	80.0	73.3	3.3	3.1	3.3
均值	95.3	95.8	95.6	73.3	81.7	76.7	3.3	3.0	3.1

3 结论与讨论

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。丰歉指数法通过寻找历史相似年来进行单产预报,但历史样本有限,因此,通过气象条件找到的历史相似年与预报年仍可能存在一定程度的差异,并且丰歉指数法中未考虑夏玉米生长的特点,这可能是造成丰歉指数法在预报效果和稳定性上明显差于关键气象因子法和气候适宜度法的原因之一。关键气象因子法考虑了夏玉米生长发育时期内关键气象因子对产量的影响,筛选出与单产相关性高的累积降水、下雨天数、大雨天数、累积日照、平均气温、高温天数等气象因子。6-7月中旬,

夏玉米单产与降水类关键气象因子呈正相关,这与夏玉米生长发育中的水分需求一致;7月下旬沧州进入主汛期,降水增多,降水类因子不再是夏玉米产量形成的关键限制性因素;7-9月上旬,是夏玉米营养生长与生殖生长并进期,夏玉米单产与平均气温和高温呈负相关,此期高温不利于夏玉米开花授粉和灌浆,进而影响玉米产量。气候适宜度法充分考虑了夏玉米生物学特征,利用沧州夏玉米不同生育期所需的最高温度、最低温度、适宜温度、需水量、需光量等指标,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。在8月1日、11日起报日期,关键气象因子法预报效果要好于气候适宜度法;在9月1日、

11日,气候适宜度法预报效果要好于关键因子法。

各单模型模拟的单产拟合值大体上均模拟出了河北沧州夏玉米单产年际变化的总体趋势,但各单模型的模拟值与实际值之间也存在不同程度的数值差异。丰歉指数法由于预报方法的本身因素,导致模型拟合值的转折点年份较实际年份明显向后“漂移”了1年;关键气象因子法和气候适宜度法模型的拟合效果虽然较丰歉指数法有所提高,但也在不同年份出现了较为明显的误差,如关键气象因子法将2015年的单产低值年模拟在2014年,气候适宜度法将2018年的单产低值年模型模拟在2019年。建立集成预报模型的目的就是为了减少各模型的预报随机误差,增强预报值的稳定性。本研究结果表明,集成预报模型在模拟单产年际变化和预报性能及稳定性上确实要优于单模型。以往在集成建模时权重赋值方法比较单一,对多种赋值方法的对比研究较少。因此,本研究在集成模型建立时,分别按单模型预报准确率、单模型预报拟合产量与实际产量的相关系数和专家经验赋值3种方法来确定权重系数。研究发现,按不同权重赋值所得到的集成模型预报性能有所不同,预报效果排序按单模型预报拟合产量与实际产量的相关系数>按专家经验>按单模型预报准确率赋值。以往针对产量预报的研究更注重预报方法差异对预报结果的影响,忽略了集成建模时权重赋值的差异对预报结果的影响。今后可以考虑尝试多种集成模型权重赋值方法,对比分析不同权重赋值方法的精度,进一步提升单产预报模型的预报精度。

本文在丰歉指数法、关键气象因子法、气候适宜度法和权重线性集成法的基础上,通过计算回代检验的预报准确率、正确率、标准差,评估了4种方法在河北沧州夏玉米单产预报中的预报能力。研究表明,集成预报模型的预报效果和稳定性明显优于单模型,且按相关系数(单模型预报拟合产量与实际产量)赋值效果最好,其次为专家经验赋值,最后为按单模型预报准确率赋值。从单模型预报能力来看,关键气象因子法和气候适宜度法的预报准确率和稳定性明显优于丰歉指数法;基于丰歉指数法预报时,采用加权法得到预报效果和稳定性要略好于大概率法。

在夏玉米产量动态预报日期选择方面,集成预报法和气候适宜度法均随着成熟期的临近预报准确率和正确率有所提高,关键气象因子法则变化不大,丰歉指数法没有明显的变化趋势。集成预报模型最优预报日期为9月1日,平均准确率为95.5%~

95.9%,正确率为73.3%~86.7%;气候适宜度法最优预报日期为8月21日,平均准确率为95.0%,正确率为73.3%;关键气象因子法和丰歉指数加权法的最优预报日期均为8月1日,平均准确率分别为94.8%和93.1%,正确率为73.3%和53.3%。综合考虑,在河北沧州夏玉米产量预报中,权重系数按相关系数(单模型预报拟合产量与实际产量)赋值建立丰歉指数法、关键气象因子法和气候适宜度法3种单模型的集成预报模型预报效果最佳,且9月1日可以作为夏玉米产量预报的最优预报日期,平均准确率达95.9%,正确率达86.7%。本研究筛选出的最优集成模型及预报日期可以推广到其他夏玉米主产区,助力精细化夏玉米产量预报服务。

参考文献:

- [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. (in Chinese)
- [2] 赵 艺,邹雨伽,张玉芳.基于历史丰歉气象影响指数的四川盆地油菜产量动态预报[J].湖北农业科学,2020,59(23):77-80,121.
ZHAO Y, ZOU Y J, ZHANG Y F. The dynamic prediction for rapeseed yield based on influence index for bumper or poor harvest from historic meteorological yield in Sichuan Basin area[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2020, 59(23): 77-80, 121. (in Chinese)
- [3] 薛思嘉,魏瑞江,王朋朋,等.基于产量历史丰歉气象影响指数的河北省马铃薯产量预报[J].沙漠与绿洲气象,2021,15(3):137-143.
XUE S J, WEI R J, WANG P P, et al. A dynamic prediction method for potato yield based on influence index for bumper or poor harvest from historical yield in Hebei province[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2021, 15(3): 137-143. (in Chinese)
- [4] 薛思嘉,魏瑞江,王朋朋,等.基于关键气象因子的河北省马铃薯产量预报[J].干旱气象,2021,39(1):138-143.
XUE S J, WEI R J, WANG P P, et al. Potato yield forecast in Hebei province based on meteorological key factors[J]. Journal of Arid Meteorology, 2021, 39(1): 138-143. (in Chinese)
- [5] 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):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. (in Chinese)
- [6] 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. (in Chinese)
- [7] 刘伟昌,陈怀亮,余卫东,等.基于气候适宜度指数的冬小麦动态

- 产量预报技术研究[J]. 气象与环境科学, 2008(2): 21-24.
- LIU W C, CHEN H L, YU W D, et al. Dynamic output forecast research for winter wheat based on climatic suitability index[J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2008(2): 21-24. (in Chinese)
- [8] 易雪, 王建林, 宋迎波. 气候适宜指数在早稻产量动态预报上的应用[J]. 气象, 2010, 36(6): 85-89.
- YI X, WANG J L, SONG Y B. Application of climatic suitability index to dynamical prediction of early rice yield[J]. Meteorological Monthly, 2010, 36(6): 85-89. (in Chinese)
- [9] 李曼华, 薛晓萍, 李鸿怡. 基于气候适宜度指数的山东省冬小麦产量动态预报[J]. 中国农学通报, 2012, 28(12): 291-295.
- LI M H, XUE X P, LI H Y. Dynamic prediction method for wheat yield based on climatic suitability index in Shandong province[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(12): 291-295. (in Chinese)
- [10] 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 a annual agricultural climate status in Jiangsu province based on climatic suitability[J]. Meteorological Monthly, 2018, 44(9): 1200-1207. (in Chinese)
- [11] 金林雪, 李云鹏, 吴瑞芬, 等. 基于气候适宜度预报内蒙古大豆发育期及产量[J]. 中国油料作物学报, 2020, 42(5): 903-910.
- JIN L X, LI Y P, WU R F, et al. Forecast method of growth stage and yield of soybean based on climate suitability in Inner Mongolia [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2020, 42(5): 903-910. (in Chinese)
- [12] 邱美娟, 刘布春, 袁福香, 等. 基于气候适宜度指数预报玉米产量时句权重系数的确定方法[J]. 中国农业气象, 2018, 39(10): 664-673.
- QIU M J, LIU B C, YUAN F X, et al. Determination methods of weight coefficient in spring maize yield prediction based on climatic suitability index[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2018, 39(10): 664-673. (in Chinese)
- [13] 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. (in Chinese)
- [14] 王贺然, 张琪, 陈鹏狮, 等. 基于产量历史丰歉气象影响指数的辽宁省粮食作物产量动态预报[J]. 湖北农业科学, 2021, 60(22): 195-200.
- WANG H R, ZHANG Q, CHEN P S, et al. Dynamic forecast of cereals yield in Liaoning province based on influence index for bumper or poor harvest from historic yield[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2021, 60(22): 195-200. (in Chinese)
- [15] 李树岩, 刘伟昌. 基于气象关键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. (in Chinese)
- [16] 魏瑞江, 宋迎波, 王鑫. 基于气候适宜度的玉米产量动态预报方法[J]. 应用气象学报, 2009, 20(5): 622-627.
- WEI R J, SONG Y B, WANG X. Method for dynamic forecast of corn yield based on climatic suitability[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2009, 20(5): 622-627. (in Chinese)
- [17] 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. (in Chinese)
- [18] 艾劲松, 孙雨轩, 刘凯文. 荆州市冬小麦产量动态预报方法对比研究[J]. 气象科技进展, 2018, 8(5): 36-39.
- AI J S, SUN Y X, LIU K W. Comparison of winter wheat output forecast methods in Jingzhou[J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2018, 8(5): 36-39. (in Chinese)
- [19] 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. (in Chinese)
- [20] 易雪, 王建林, 宋迎波, 等. 早稻产量动态集成预报方法研究[J]. 中国水稻科学, 2011, 25(3): 307-313.
- YI X, WANG J L, SONG Y B, et al. Study on dynamic integrated prediction of early rice yield[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2011, 25(3): 307-313. (in Chinese)
- [21] 郑昌玲, 王建林, 宋迎波, 等. 大豆产量动态预报模型研究[J]. 大豆科学, 2008, 27(6): 943-948.
- ZHENG C L, WANG J L, SONG Y B, et al. Dynamic prediction model of soybean yield per unit[J]. Soybean Science, 2008, 27(6): 943-948. (in Chinese)
- [22] 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. (in Chinese)
- [23] 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.
- XU M, XU J W, GAO P, et al. 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. (in Chinese)
- [24] 沧州市统计局, 国家统计局沧州调查队. 沧州市2021年国民经济和社会发展统计公报[N]. 沧州日报, 2022-03-16(P04).

(责任编辑: 栾天宇)