

武 强,唐余学,闫梦玲,等. 2 种茎瘤芥产量丰歉动态预报方法的对比[J]. 江苏农业学报, 2022, 38(2): 486-494.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2022.02.024

2 种茎瘤芥产量丰歉动态预报方法的对比

武 强^{1,2,3}, 唐余学^{1,2,3}, 闫梦玲⁴, 张 悦^{1,2,3}, 孙恩虹³, 范 莉^{1,2,3}, 方 丽⁵

(1.重庆市气象科学研究所,重庆 401147; 2.重庆市农业气象与卫星遥感工程技术研究中心,重庆 401147; 3.重庆市江津现代农业气象试验站,重庆 402260; 4.重庆市永川区气象局,重庆 402181; 5.重庆市长寿区气象局,重庆 401220)

摘要: 旨在以涪陵茎瘤芥为例,基于气候适宜度指数与历史丰歉气象影响指数 2 种方法建立产量丰歉动态预报模型,比较 2 种茎瘤芥产量丰歉动态预报方法的准确性。结果显示,2 种方法均具有较高的单产预报准确率,在茎瘤芥产量的动态预报中,基于气候适宜度指数的茎瘤芥产量丰歉动态预报方法的最低单产预报准确率为 88.7%,最高单产预报准确率为 99.9%;基于历史丰歉气象影响指数的茎瘤芥产量丰歉动态预报方法的最低单产预报准确率为 88.9%,最高单产预报准确率为 99.7%,准确率极值差异较小。对比不同年份各起报日期的平均单产预报准确率可知,基于历史丰歉气象影响指数的茎瘤芥产量丰歉动态预报方法得出的单产预报准确率优于基于气候适宜度指数的茎瘤芥产量丰歉动态预报方法。对比同一年份不同起报日期的平均单产预报准确率可知,起报时间在 1 月 1 日及之前的预报准确率最高。在有限验证年份内,对比单产预报结果与历年实际单产发现,基于历史丰歉气象影响指数的茎瘤芥产量丰歉动态预报方法在产量趋势预报及大多数年份的单产预报准确率方面,均表现为优于基于气候适宜度指数的茎瘤芥产量丰歉动态预报方法的预报效果。

关键词: 茎瘤芥; 产量预报; 气候适宜度指数; 历史丰歉气象影响指数

中图分类号: S165+.27

文献标识码: A

文章编号: 1000-4440(2022)02-0486-09

Accuracy comparison of two methods for dynamic yield prediction of *Brassica juncea* var. *tumida*

WU Qiang^{1,2,3}, TANG Yu-xue^{1,2,3}, YAN Meng-ling⁴, ZHANG Yue^{1,2,3}, SUN En-hong³, FAN Li^{1,2,3}, FANG Li⁵

(1.Chongqing Institute of Meteorological Sciences, Chongqing 401147, China; 2.Chongqing Engineering Research Center of Agrometeorology and Satellite Remote Sensing, Chongqing 401147, China; 3.Chongqing Jiangjin Modern Agrometeorology Test Station, Chongqing 402260, China; 4.Yongchuan Meteorological Bureau, Chongqing 402181, China; 5.Changshou Meteorological Bureau, Chongqing 401220, China)

Abstract: In this study, the dynamic yield prediction models were established based on the climatic suitability index

收稿日期:2021-06-09

基金项目:国家自然科学基金面上项目(42175193);重庆市技术创新与应用发展专项项目(cstc2020jcsx-msxmX0111);中国气象局创新发展专项项目(CXFZ2021J073);重庆市气象部门智慧气象技术创新团队项目(ZHCXTD-202016);重庆市气象部门业务技术攻关项目(YWJSGG-201905);重庆市气象局科技计划项目(QNJ-201703)

作者简介:武 强(1989-),男,山西忻州人,硕士,工程师,主要从事农田小气候与气象仪器方面的研究。(E-mail) theodorus@yeah.net

通讯作者:方 丽,(E-mail)67833756@qq.com

and the meteorological influence index of historical yield, and the accuracy of the two yield prediction methods was compared. The two methods had high accuracy. In the dynamic prediction based on climatic suitability index, the lowest yield forecast accuracy was 88.7%, and the highest yield forecast accuracy was 99.9%. In the dynamic prediction based on the meteorological influence index of historical yield, the lowest yield forecast accuracy was 88.9%, and the highest yield forecast accuracy was 99.7%. By comparing the average yield per unit area in different years and starting dates, the accuracy of dynamic yield predic-

tion of *Brassica juncea* var. *tumida* based on meteorological influence index of historical yield was better than that based on climatic suitability index. By comparing the average yield per unit area in the same year with different starting dates, the accuracy was the highest on and before January 1. Comparing the forecast results of yield per unit area and the actual output value in the limited validation years, the dynamic forecast method of yield of *Brassica juncea* var. *tumida* based on the meteorological influence index of historical yield was better in the forecast of yield trend and the accurate forecast value of yield per unit area in most years.

Key words: *Brassica juncea* var. *tumida*; yield prediction; climatic suitability index; meteorological influence index of historical yield

作物产量的形成与气象条件密切相关^[1-3],科学、准确地开展产量预报工作对合理利用农业气候资源、充分发挥气象趋利避害作用、保障作物安全生产与经济效益具有重要意义^[4]。20 世纪 70 年代开始,作物产量预报的方法被提出并得到不断发展^[5-6],从农学预报方法、统计学模型预报方法逐渐发展到动力学作物生长模型预报方法、遥感技术预报方法等^[7-9]。不同产量预报方法在实际应用中具有不同适用性,如农学预报方法应用简单,但容易产生较大误差;动力学作物生长模型预报方法具有完备的科学理论基础,但是需要明确作物生育期气象条件的影响机制,并获取大量基础数据信息;遥感技术预报方法能够极大地减少模型对实测数据的依赖,可快速应用于不同空间尺度、不同种类作物的估产,但在复杂地形条件及多云雾天气场景下具有明显的应用局限性^[10-12]。统计学模型预报方法在历史资料充分的前提下具有应用对象广泛、预报准确率良好等应用优势^[13-15]。在统计模型中,历史丰歉气象影响指数方法根据相关系数和相似距离原理对作物生育期各类气象影响因子进行综合聚类分析,从而建立诊断指标,根据相似年作物产量气象影响指数确定预报年作物产量丰歉气象影响指数,实现产量预测^[16]。气候适宜度指数方法综合考虑光、温、水对作物不同生育期生理生化过程的影响,建立气候适宜度指数模型,基于气候适宜度指数与产量气象影响指数的相关关系建立茎瘤芥产量丰歉动态预测模型^[17-18]。目前,历史丰歉气象影响指数方法及气候适宜度指数方法在水稻、小麦、玉米等粮食作物的产量预报中已经取得了较好的预报效果^[19-21],但是在小宗特色经济作物的产量预报应用中,其适用性及准确性还需要进一步验证。

茎瘤芥(*Brassica juncea* var. *tumida* Tsen & Lee)是重庆市最具特色的经济作物之一,属于茎用芥菜的 3 个变种之一^[22],其膨大的肉质茎是榨菜加工的

主要原料。茎瘤芥的核心产区位于重庆市涪陵区,除东南部武陵山系高海拔地区外,全区都有种植,截至 2019 年,涪陵区茎瘤芥核心产区种植面积稳定在 $4.8 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 以上。前人对茎瘤芥的遗传育种、栽培技术甚至农产品深加工方面有较为深入的研究,基于茎瘤芥的植物生理特性,明确苗期高温是诱发茎瘤芥先期抽薹,从而导致减产的重要因素^[22]。但是除此之外,关于茎瘤芥产量形成的气象影响及茎瘤芥产量预报方法等的研究还较少。科学地利用气象资料分析手段准确预判茎瘤芥产量,可为茎瘤芥生产结构调整、初产品深加工能力储备及榨菜商品产值趋势预判等提供依据。本研究以茎瘤芥为研究对象,基于历史丰歉气象影响指数方法及气候适宜度指数方法开展茎瘤芥产量丰歉动态预报的比较研究,旨在为重庆市地方特色经济作物茎瘤芥产量的动态、定量、精细化预报提供科学支撑,也可为其他小宗作物的产量预报提供技术参考。

1 材料与方法

1.1 研究对象与资料来源

研究区域为茎瘤芥核心产区重庆市涪陵区(地理位置为 $29^{\circ}21' \sim 30^{\circ}01' \text{ N}$ 、 $106^{\circ}56' \sim 107^{\circ}43' \text{ E}$,海拔 $138 \sim 1\,977 \text{ m}$),地处四川盆地和盆边山地过渡地带,境内以低山丘陵为主,东南高,西北低;属中亚热带湿润季风气候区,常年平均气温 18.2°C , $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 活动积温 $6\,127.5^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$,年均降水量 $1\,098.8 \text{ mm}$,无霜期 317 d ,日照时数 $1\,095.6 \text{ h}$ 。

气象数据来自涪陵区国家基本气象站、茎瘤芥种植区区域气象站,包括 1979–2019 年逐日平均气温、最高气温、最低气温、降水量、日照时数。计算得到茎瘤芥出苗至产量预报起报日的 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温、累积降水量、标准化降水量、累积日照时数。

研究对象为茎瘤芥,在涪陵区其出苗到瘤茎成熟时间约为 $160 \sim 170 \text{ d}$,幼苗期为 9–10 月,瘤茎膨大

期为 11 月至次年 2 月中旬^[22]。茎瘤芥产量数据来自重庆市涪陵区统计局,对茎瘤芥瘤茎产量进行处理后,得到瘤茎产量气象影响指数^[23],计算公式:

$$\Delta Y_i = \frac{Y_i - Y_{i-1}}{Y_{i-1}} \times 100\% \quad (1)$$

式中, ΔY_i 为产量气象影响指数; Y_i 、 Y_{i-1} 分别为第 i 年、第 $(i-1)$ 年瘤茎单产 (kg/hm^2)。 ΔY_i 为正值代表产量丰, ΔY_i 为负值代表产量歉。

需要说明的是,由于茎瘤芥在重庆市涪陵区为跨年度种植作物,即当年 8-9 月播种,次年 2 月中旬砍收,所测单产判定为前一年的茎瘤芥产量,即 2020 年 2 月收获测产数值,实际为 2019 年的茎瘤芥单产。为实现茎瘤芥产量的动态预报,以进入瘤茎膨大期直至收获的每旬初始日为起报时间。茎瘤芥一般在每年 11 月上旬进入瘤茎膨大期,但遇到冬季偏暖年份,为避免先期抽薹而适当推迟播种,会导致瘤茎膨大期有所延后。为减少茎瘤芥进入瘤茎膨大期时间的年际差异对预测结果的影响,设定起报时间从每年 12 月 1 日开始,即将当年 12 月 1 日至次年 2 月 21 日每旬初始日作为动态预报的起报时间。

1.2 基于气候适宜度指数的茎瘤芥产量丰歉动态预报方法

利用逐年茎瘤芥瘤茎产量气象影响指数 (ΔY) 与不同起报时间点气候适宜度指数 (CSI) 建立一元线性方程,公式如下:

$$\Delta Y = a \cdot CSI + b \quad (2)$$

$$CSI = \sum [K_i \cdot P_i(y)] \quad (3)$$

$$P_i(y) = \sqrt[3]{P_T(y_i) \times P_R(y_i) \times P_S(y_i)} \quad (4)$$

$$K_i = \frac{R_i}{\sum_{i=1}^n R_i} \quad (5)$$

$$P_T = \frac{(T - T_1)(T_2 - T)^B}{(T_0 - T_1)(T_2 - T_0)^B}, \quad B = \frac{(T_2 - T_0)}{(T_0 - T_1)} \quad (6)$$

$$P_R = \begin{cases} \frac{P}{P_a}, & \frac{(P - P_a)}{P_a} \times 100\% < -30\% \\ 1, & -30\% \leq \frac{(P - P_a)}{P_a} \times 100\% \leq 30\% \\ \frac{P_a}{P}, & \frac{(P - P_a)}{P_a} \times 100\% > 30\% \end{cases} \quad (7)$$

$$P_S = \begin{cases} 1, & S \geq S_a \\ \frac{S}{S_a}, & S \leq S_a \end{cases} \quad (8)$$

式中, ΔY 为茎瘤芥瘤茎产量气象影响指数; CSI 为气候适宜度指数; a 为回归系数; b 为回归常数; $P_i(y)$ 为第 i 旬综合气候适宜度^[24-25]; $P_T(y_i)$ 、 $P_R(y_i)$ 、 $P_S(y_i)$ 分别为第 i 旬温度、水分、光照适宜度; K_i 为各旬权重系数; R_i 为第 i 旬综合气候适宜度与产量丰歉气象影响指数的相关系数; n 为生育期总旬数; P_T 为温度适宜度模型; P_R 为水分适宜度模型; P_S 为光照适宜度模型; $T(^{\circ}\text{C})$ 为日平均气温; T_1 、 T_2 、 T_0 分别为研究生育期内茎瘤芥生长所需的最低温度 ($^{\circ}\text{C}$)、最高温度 ($^{\circ}\text{C}$)、最适温度 ($^{\circ}\text{C}$),当 $T = T_1$ 或 $T = T_2$ 时, $P_T = 0$, 当 $T = T_0$ 时, $P_T = 1$; P 为旬降水量 (mm); P_a 为多年旬降水量的平均值 (mm); S 为旬日照时数 (h); S_a 为多年旬平均日照时数 (h)。

基于前人在茎瘤芥核心产区重庆市涪陵区多年的栽培试验研究发现,茎瘤芥的生长季节在秋冬季,幼苗期的气温如高于 25°C ,则容易诱发先期抽薹,从而导致产量损失。此外,川渝地区秋冬季多雾、寡日照的生态条件也使得茎瘤芥品种在对环境的适应和选育过程中形成了在较弱光照条件下仍能健壮生长以确保产量的生理学特性;相反,光照过强则易促进病毒病的发生,导致减产。川渝地区冬季的降水量较少,但是由于云雾寡照天气的蒸发量较小、水分散失量较少等原因,田间土壤相对湿度大多能维持在 60% 以上,可以满足茎瘤芥生长的水分供应,如偶有冬旱发生,适当的人工灌溉可以有效补充茎瘤芥对水分的需求,因此水分条件一般不构成茎瘤芥产量形成的限制因素^[22]。

结合前人研究得到的茎瘤芥幼苗期、瘤茎膨大期温度适宜指标以及茎瘤芥气候优势产区多年降水、光照特征,本研究制定了茎瘤芥气候适宜度指数的模型参数,具体设置如下:幼苗期, $T_1 = 10^{\circ}\text{C}$, $T_2 = 25^{\circ}\text{C}$, $T_0 = 20^{\circ}\text{C}$;瘤茎膨大期, $T_1 = 0^{\circ}\text{C}$, $T_2 = 15^{\circ}\text{C}$, $T_0 = 10^{\circ}\text{C}$ ^[22]。 P_a 、 S_a 分别以重庆市涪陵区多年旬平均降水量与日照时数作为参考表征。

1.3 基于历史丰歉气象影响指数的茎瘤芥产量丰歉动态预报方法

相邻年份间产量的变化可认为主要由气象条件的差异引起,那么如果同一地区的同一作物在 2 个历史年份的气象要素变化相近或者相似,则该作物产量的变化也应该相似。2 个气象条件相似年可以基于欧氏距离与相关系数的综合诊断指标来判断^[26-27],相关公式如下:

$$C_{ik} = \frac{r_{ik}}{d_{ik}} \times 100\% \quad (9)$$

$$r_{ik} = \frac{\sum_{j=1}^n (\Delta X_{ij} - \Delta \bar{X}_i) (\Delta X_{kj} - \Delta \bar{X}_k)}{\sqrt{\sum_{j=1}^n (\Delta X_{ij} - \Delta \bar{X}_i)^2 \sum_{j=1}^n (\Delta X_{kj} - \Delta \bar{X}_k)^2}} \quad (10)$$

$$d_{ik} = \sqrt{\sum_{j=1}^n (\Delta X_{ij} - \Delta \bar{X}_i)^2} \quad (11)$$

$$\Delta X_i = X_i - X_{i-1} \quad (12)$$

式中, k 为产量预报年; i 为任一历史年; j 为气象要素序号; n 为样本长度; C_{ik} 为任一历史年 (i 年) 能否判定为预报年 (k 年) 气象条件相似年的综合诊断指标, 其值越大, 相似程度越高; r_{ik} 为预报年 (k 年) 和任一历史年 (i 年) 某气象要素间的相关系数; d_{ik} 为预报年 (k 年) 和任一历史年 (i 年) 某气象要素间的欧氏距离; ΔX_i 为相邻 2 年某气象要素的差值; X_{ij} 为任一历史年 (i 年) 第 j 个气象要素值; X_{kj} 为预报年 (k 年) 第 j 个气象要素值; \bar{X}_k 、 \bar{X}_i 为预报年 (k 年) 或任一历史年 (i 年) n 个气象要素的平均值; X_i 、 X_{i-1} 为第 i 年、第 ($i-1$) 年的气象要素值, 包括日平均气温 ($^{\circ}\text{C}$)、最高气温 ($^{\circ}\text{C}$)、最低气温 ($^{\circ}\text{C}$)、降水量 (mm)、日照时数 (h)、茎瘤芥苗期至产量预报起报日的 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温 ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$)、累积降水量 (mm)、标准化降水量、累积日照时数 (h) 等。

选取热量、水分、光照等 3 类气象要素, 分别作为参与计算的气象要素 (X)。利用气象条件相似年综合诊断指标 (C_{ik}), 计算得到各气象要素相似程度最高的年型 (丰收年型/歉收年型), 并在根据热量、水分、光照 3 类气象要素得到的相似年中, 各筛选出 3 个相似程度最高的年型 (共 9 个相似年型), 以相似丰歉年型气象影响指数 (ΔY_i) 作为预报年产量丰歉情况的预报数据集。

根据气象条件相似年综合诊断指标, 在筛选出的预报年与历史年的 9 个历史气象要素相似年中, 根据丰歉年型频率综合计算得到单产丰歉预报值。对于计算得到的历史气象要素相似年产量丰歉的可能性进行无差别综合分析, 将 9 个历史气象要素相似年均作为代表性历史年份作进一步类比分析。相关公式如下:

$$\Delta Y_k = \frac{\sum \Delta Y_{i(+)} \times a_{(+)} + \sum \Delta Y_{i(-)} \times a_{(-)}}{l} \quad (13)$$

$$a_{(+)} = \frac{l}{9}, a_{(-)} = \frac{m}{9} \quad (14)$$

式中, ΔY_k 为单产丰歉预报值; $\Delta Y_{i(+)}$ 为 9 个历史气象要素相似年中, 产量丰收年型的产量气象影响指数; $\Delta Y_{i(-)}$ 为 9 个历史气象要素相似年中, 产量歉收年型的产量气象影响指数; l 为产量为丰的年型数量; m 为产量为歉的年型数量; $a_{(+)}$ 、 $a_{(-)}$ 分别为预报试验结果为正值、负值的概率。

1.4 预报产量的计算及产量预报准确率的判断

根据趋势预测结果计算预报产量, 公式如下:

$$Y_i = Y_{i-1} (1 + \Delta Y_i / 100\%) \quad (15)$$

产量预报模型的准确率利用丰歉趋势准确率和单产预报准确率 2 个指标进行判断。丰歉趋势准确率用预报值与实际值计算得到的产量气象影响指数 (ΔY_i) 的正负性来判断, 二者正负性一致表示丰歉趋势准确, 否则表示不准确。

单产预报准确率由单产预报值与实际值计算得到, 公式如下:

$$\text{单产预报准确率} = \left[1 - \frac{Y_1 - Y_0}{Y_0} \right] \times 100\% \quad (16)$$

式中, Y_1 、 Y_0 分别为预报单产 (kg/hm^2)、实际单产 (kg/hm^2)。

2 结果与分析

2.1 基于气候适宜度指数的茎瘤芥产量丰歉动态预报

以 1985–2015 年茎瘤芥幼苗期至瘤茎膨大期 (9 月上旬至次年 2 月中旬) 的气象数据作为参考数据集, 用预报日前所有生育周期的综合气候适宜度指数与产量气象影响指数建立一元回归方程, 得到茎瘤芥瘤茎产量丰歉动态预报模型, 并以进入瘤茎膨大期后的每旬初始日为起报时间。如表 1 所示, 在不同起报时间建立的预报模型方程均通过了 0.05 水平的有效性检验。

以 2015–2020 年的气象数据与茎瘤芥瘤茎实际产量作为验证数据集, 对表 1 建立的茎瘤芥瘤茎产量丰歉动态预报模型进行检验。由表 2 可以看出 2015–2019 年茎瘤芥产量预报准确率及丰歉趋势, 各起报时间的平均单产预报准确率维持在 93.0%~98.8% 的较高水平; 从不同起报时间上看, 12 月 1 日–次年 1 月 1 日的平均单产预报准确率维持在 96.0%~96.6% 的较高水平, 且随着起报时间延后, 单产预报准确率整体表现为逐渐提高的趋势; 1 月 1 日后起报的单产预报准确率整体较 1 月 1 日之前起报的有所降低。此

外还可以看出,单产预报准确率最低为 88.7% (2017 年 2 月 21 日起报),最高为 99.9% (2016 年 2 月 11 日、2020 年 1 月 1 日起报)。趋势预报准确性则呈现一定的不确定性,结果表现为 2016 年、2017 年茎瘤芥产量的预报单产对应的 ΔY 与实际单产对应的 ΔY 均为正值,说明产量丰歉的预报趋势准确,均为增产趋势。2015 年、2019 年茎瘤芥产量的实际单产对应的 ΔY 为正值,但绝对值较小,即单产表现为略增趋势,但预报值的趋势为略减,虽然预报的趋势不准确,但是与实际值间的绝对差异较小,且在动态预报后期(2 月 11 日、2 月 21 日),预报的单产趋势则开始偏向正确。在 2018 年,茎瘤芥产量的丰歉趋势预报在不同起报时间均有偏差,说明基于气候适宜度指数的茎瘤芥产量丰歉动态预报方法具有较高的单产预报准确率,且在进入瘤茎膨大期以后,1 月 1 日及以前的起报时间的预报准确率更高,反映在茎瘤芥瘤茎形成初期,气象条件对产量形成的决定作用更为明显,进入 1 月后,瘤茎已经稳定形成,对环境气象条件也有较

强的抗性,气象条件对产量形成的影响相对较小。而在趋势预报准确性方面,存在一定的不确定性,在有限预报年份的准确率较低。

表 1 基于气候适宜度指数的茎瘤芥产量丰歉动态预报模型

Table 1 Dynamic yield prediction model for *Brassica juncea* var. *tumida* based on the climatic suitability index

起报时间 (月-日)	预报模型	F 值	样本数量 (个)
12-01	$\Delta Y = 29.321CSI - 8.629$	13.511 **	30
12-11	$\Delta Y = 29.817CSI - 9.087$	13.114 **	30
12-21	$\Delta Y = 32.683CSI - 10.582$	13.663 **	30
01-01	$\Delta Y = 28.760CSI - 8.408$	14.225 **	30
01-11	$\Delta Y = 18.794CSI - 3.951$	12.516 **	30
01-21	$\Delta Y = 19.850CSI - 4.458$	12.558 **	30
01-01	$\Delta Y = 23.478CSI - 6.742$	12.452 **	30
02-11	$\Delta Y = 35.282CSI - 14.711$	18.938 **	30
02-21	$\Delta Y = 35.744CSI - 15.002$	19.064 **	30

ΔY : 茎瘤芥产量气象影响指数; CSI : 9 月上旬至预报日前的气候适宜度指数; *, ** 分别表示通过 0.05、0.01 水平的显著性检验。

表 2 2015–2019 年基于气候适宜度指数的瘤芥产量丰歉预报模型准确率

Table 2 Prediction accuracy of yield prediction model based on the climatic suitability index for *Brassica juncea* var. *tumida* from 2015 to 2019

起报日期 (月-日)	预报 ΔY					预报准确率 (%)					平均值
	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e	
12-01	-4.064	4.009	3.840	9.167	-1.185	95.9	96.6	98.3	90.5	98.6	96.0
12-11	-3.454	4.439	3.989	8.518	-1.387	96.5	96.2	98.4	91.5	98.4	96.2
12-21	-2.558	4.749	3.556	7.977	-0.667	97.4	95.9	98.0	92.0	99.1	96.5
01-01	-1.763	2.977	3.136	10.210	0.317	98.2	97.7	97.6	89.8	99.9	96.6
01-11	-3.871	5.819	0.472	6.514	-2.303	96.1	94.8	95.1	93.5	97.4	95.4
01-21	-3.994	6.349	0.985	7.037	-2.552	95.9	94.3	95.6	92.9	97.2	95.2
02-01	-4.298	6.967	-1.538	7.160	-0.471	95.6	93.7	93.2	92.8	99.3	94.9
02-11	0.218	11.902	-1.384	3.136	0.582	99.9	88.8	93.3	96.8	99.7	95.7
02-21	0.295	11.936	-1.428	3.125	0.669	99.8	88.7	93.3	96.8	99.6	95.6
平均值	-2.610	6.572	1.292	6.983	-0.777	97.3	94.1	95.9	93.0	98.8	
实际值	0.077	0.614	5.683	-0.024	0.263						

a: 2015–2016 年; b: 2016–2017 年; c: 2017–2018 年; d: 2018–2019 年; e: 2019–2020 年。 ΔY : 茎瘤芥产量气象影响指数。

2.2 基于历史丰歉气象影响指数的茎瘤芥产量丰歉动态预报

采用 1985–2015 年茎瘤芥幼苗期至瘤茎膨大期(9 月上旬至次年 2 月中旬)的气象数据与瘤茎产量数据作为气象要素相似年比较的样本集,利用历史丰歉气象影响指数加权平均分析法计算预报年产量。

以 2015–2020 年气象数据与茎瘤芥瘤茎实际产

量作为验证数据集。如表 3 所示,不同年份、不同起报时间的平均单产预报准确率维持在 94.1%~98.8% 的较高水平;起报时间为 12 月 1 日–次年 1 月 1 日的预报准确率维持在 96.8%~98.9% 的较高水平,其中 1 月 1 日起报的单产预报准确率最高,1 月 1 日以后单产预报准确率有所降低;单次预报准确率的最低值为 88.9% (2016 年 2 月 11 日起报),最高值为 99.7% (2015 年 12 月 1 日、2015 年 12 月 11 日、2015 年 12 月

21 日、2016 年 1 月 1 日、2017 年 12 月 1 日、2017 年 12 月 11 日起报)。由表 3 还可以看出,2018 年茎瘤芥产量的实际 ΔY 为负值,即单产趋势为略减,而预报单产趋势表现为略增,但 ΔY 绝对误差较小,其余年份除个别起报时间的预报值与实际值有一定偏差外,趋势预报均一致。说明基于历史丰歉气象影响指数的

茎瘤芥产量丰歉动态预报方法具有较高的单产预报准确率及趋势预报准确率。在进入瘤茎膨大期以后,1 月 1 日及以前起报的单产准确率更高,符合茎瘤芥生育特点与生育期条件的变化规律。总体上看,趋势预报准确率较高,个别单产接近平年的年份具有较小的预报偏差。

表 3 2015–2019 年基于历史丰歉气象影响指数的瘤芥产量丰歉预报模型准确率

Table 3 Prediction accuracy of yield prediction model based on the meteorological influence index for *Brassica juncea* var. *tumida* from 2015 to 2019

起报日期 (月-日)	预报 ΔY					预报准确率 (%)					平均值
	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e	
12-01	0.344	3.914	5.953	4.705	7.765	99.7	96.7	99.7	95.3	92.5	96.8
12-11	0.344	1.211	5.953	0.650	7.765	99.7	99.4	99.7	99.3	92.5	98.1
12-21	0.344	-0.116	3.293	7.566	5.363	99.7	99.3	97.7	92.4	94.9	96.8
01-01	0.344	1.211	3.999	0.350	2.685	99.7	99.4	98.4	99.6	97.6	98.9
01-11	3.482	1.211	3.999	-3.519	5.021	96.6	99.4	98.4	96.5	95.3	97.2
01-21	2.886	1.211	3.293	1.324	5.949	97.2	99.4	97.7	98.7	94.3	97.5
02-01	11.102	-0.863	3.999	1.136	6.674	89.0	98.5	98.4	98.8	93.6	95.7
02-11	11.102	1.958	6.628	1.136	6.673	88.9	99.0	99.1	98.8	93.6	95.9
02-21	8.394	2.873	6.942	1.324	7.412	91.7	97.8	98.8	98.7	92.9	96.0
平均值	4.260	1.401	4.895	1.163	6.145	95.8	98.8	98.7	97.7	94.1	
实际 ΔY	0.077	0.614	5.683	-0.024	0.263						

a:2015–2016 年;b:2016–2017 年;c:2017–2018 年;d:2018–2019 年;e:2019–2020 年。 ΔY :历史丰歉气象影响指数。

2.3 2 种预报方法的结果验证比较

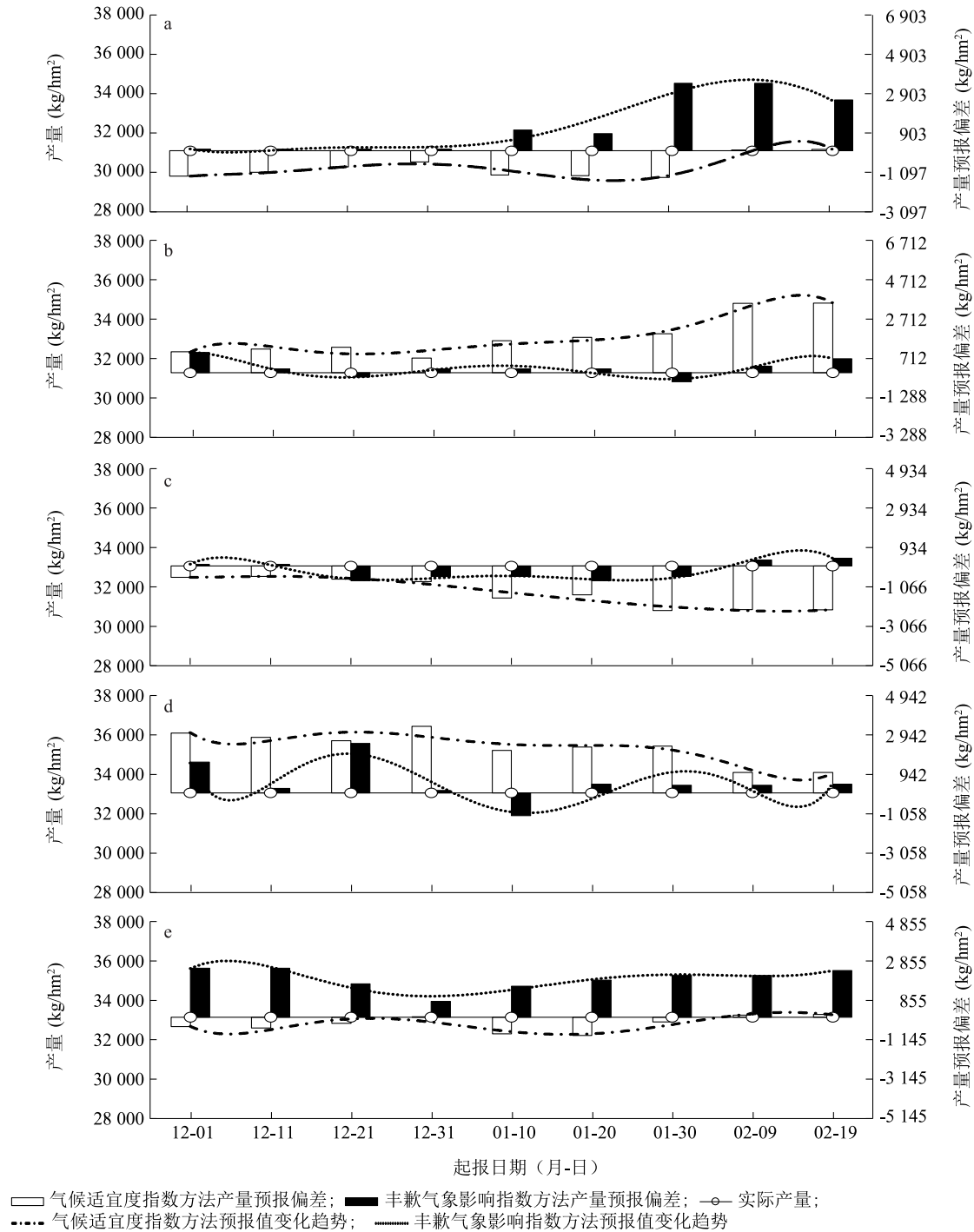
在上述研究结果的基础上,进一步比较基于气候适宜度指数与基于历史丰歉气象影响指数的茎瘤芥产量丰歉动态预报方法,由表 2、表 3 可以看出,2 种方法均具有较高的单产预报准确率,在动态预报中,基于气候适宜度指数的产量丰歉动态预报方法的最低单产预报准确率为 88.7%,最高单产预报准确率为 99.9%;基于历史丰歉气象影响指数的茎瘤芥产量丰歉动态预报方法的最低单产预报准确率为 88.9%,最高单产预报准确率为 99.7%,可见 2 种方法预报准确率极值差异较小。对比不同年份各起报日期的平均单产预报准确率可知,基于历史丰歉气象影响指数的茎瘤芥产量丰歉动态预报模型的单产预报准确率优于基于气候适宜度指数的方法。对比同一年份不同起报日期的平均单产准确率可知,在 5 个验证年份内,3 年历史丰歉气象影响指数方法的预报准确率更高,2 年气候适宜度指数方法的预报准确率更高。对比 2 种方法的丰歉趋势预报准确率

可知,基于历史丰歉气象影响指数的茎瘤芥产量丰歉动态预报方法准确率更高。

如图 1a 所示,基于历史丰歉气象影响指数的茎瘤芥产量丰歉动态预报方法于 2016 年 1 月 1 日前起报得到的 2015 年茎瘤芥产量预报值接近实际值,随着起报时间延后,预报结果偏差增大,较实际产量偏高,而基于气候适宜度指数的产量丰歉动态预报方法在 2016 年 2 月 1 日前起报得到的茎瘤产量均较实际值明显偏低。如图 1b 所示,在 2016 年,基于历史丰歉气象影响指数的茎瘤芥产量丰歉动态预报结果在各起报时间均接近实际值,而基于气候适宜度指数的产量丰歉动态预报结果在各起报时间均偏高。如图 1c 所示,在 2017 年的大多数起报时间,2 种方法的预报结果均较实际值偏低,但是基于历史丰歉气象影响指数的茎瘤芥产量丰歉动态预报方法的偏差更小。如图 1d 所示,在 2018 年,基于气候适宜度指数的产量丰歉动态预报结果较实际值持续偏高,基于历史丰歉气象影响指数的茎瘤芥产量丰歉动态预报结果与实际值存在一定偏差,并

在一定范围内随起报时间推后而有所波动,但偏差总体小于基于气候适宜度指数的产量丰歉动态预报方法。如图 1e 所示,在 2019 年,基于历史丰歉气象影响

指数的茎瘤芥产量丰歉动态预报结果在不同起报时间较实际产量偏高,而基于气候适宜度指数的产量丰歉动态预报结果在各起报时间的准确率较高。



综上所述,相较于基于气候适宜度指数的茎瘤芥产量丰歉动态预报法,基于历史丰歉气象影响指

数的茎瘤芥产量丰歉动态预报法在预报茎瘤芥产量趋势及预报大多数年份的单产准确率的效果均更好。

3 结论与讨论

作物产量预报工作的开展对农业生产、加工产能及政府决策等诸多方面都具有重要意义^[6-7]。而作物产量的形成除了受品种、生产力水平等影响外,与当年的气象条件有着密切关系。基于长期气象条件与作物产量之间的关系,通过数理统计方法建立的产量预测模型已经在水稻、玉米等大宗粮油的产量预报中有较为广泛的应用^[14-20]。而对于一些地方特色经济作物,由于历史资料匮乏或者种植规模有限等因素,关于其产量预报的研究还较少。涪陵茎瘤芥是川渝、江浙一带的特色经济作物,重庆市涪陵区更是茎瘤芥的核心优势产区,有悠久的种植历史。研究者从栽培学的角度对播期、育苗方式、土壤肥力等方面对茎瘤芥产量形成的影响已有较为深入的研究^[28-32],关于生态环境因素对茎瘤芥产量形成影响的研究多从病虫害发生、瘤茎空心、先期抽薹等不利因素对产量形成的影响方面进行定性讨论^[22,33-35],而基于气象条件特征的茎瘤芥产量定量、动态预报预测的研究尚显不足。

本研究以重庆市特色作物茎瘤芥为研究对象,统计分析茎瘤芥核心产区多年的气象资料与产量资料,基于气候适宜度指数与历史丰歉气象影响指数 2 种方法建立茎瘤芥产量的动态预报模型,通过对比 2 种方法的产量预报结果准确性得出,将基于气候适宜度指数与基于历史丰歉气象影响指数的产量丰歉动态预报方法应用于茎瘤芥产量预报中,均取得了较好的预报结果,且准确率的极值差异较小。通过比较得出,这 2 种方法均表现出进入瘤茎膨大期以后,1 月 1 日及之前起报时间的预报准确率更高,说明这段时期是茎瘤芥产量形成的关键期,受气象条件的影响较大。在不同年份,各起报日期的基于历史丰歉气象影响指数的茎瘤芥产量丰歉动态预报单产准确率优于基于气候适宜度指数的预报。在有限验证年份内,在产量趋势预报方面,基于历史丰歉气象影响指数的预报准确率更高;在单产预报准确率方面,大多数年份的基于历史丰歉气象影响指数的预报准确率更高。综合判断,基于历史丰歉气象影响指数的茎瘤芥产量丰歉动态预报方法

在实际应用中具有更好的准确性与适用性。

本研究对比分析了 2 种统计学建模方法对茎瘤芥产量预报的准确性,但是在预报模型的建立过程中,还存在一定不足。使用基于气候适宜度指数的作物产量丰歉动态预报方法时,作物生长相关气象指标的确定及在同一生育期不同阶段的细化尤为重要,随着茎瘤芥植物生理与栽培学方面研究的深入,不同生育期气象指标的细化可以使得基于气候适宜度指数的作物产量丰歉动态预报模型准确性得到提升。使用基于历史丰歉气象影响指数的产量丰歉动态预报方法时,不同的相似年判定方法也会影响预报结果,并且随着历史资料的积累,校正样本量增加,基于历史丰歉气象影响指数的产量丰歉动态预报方法的准确性也可得到进一步提升。

参考文献:

- [1] 刘少军,佟金鹤,张京红,等. 基于气候数据的橡胶树产胶能力评估模型[J]. 中国农业气象, 2020, 41(2): 113-120.
- [2] 刘峻明,和晓彤,王鹏新,等. 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, 2019, 35(6): 158-166.
- [3] 江梦圆,薛晓萍,杨再强,等. 开花期复水对受旱冬小麦叶片状态和产量结构的补偿效应[J]. 中国农业气象, 2020, 41(4): 253-262.
- [4] 余焰文,杨爱萍,蔡小琴,等. 三种油菜产量预测模型在江西的应用比较[J]. 气象科技, 2018, 46(5): 1032-1037.
- [5] 钱 栓,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.
- [6] 池俊成,王兰君,荆树本,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.
- [7] 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.
- [8] 熊 伟. CERES-Wheat 模型在我国小麦区的应用效果及误差来源[J]. 应用气象学报, 2009, 20(1): 88-94.
- [9] 李军玲,郭其乐,彭记永. 基于 MODIS 数据的河南省冬小麦产量遥感估算模型[J]. 生态环境学报, 2012, 21(10): 1665-1669.
- [10] BOOGAARD H, WOLF J, SUPIT I, et al. A regional implementation of WOFOST for calculating yield gaps of autumn-sown wheat across the European Union[J]. Field Crops Research, 2013, 143: 130-142.
- [11] MA G N, HUANG J X, WU W B, et al. Assimilation of MODIS-LAI into the WOFOST model for forecasting regional winter wheat yield[J]. Mathematical & Computer Modelling, 2013, 58(3/4): 634-643.
- [12] 王利民,姚保民,刘 佳,等. 基于 SWAP 模型同化遥感数据的黑龙江南部春玉米产量监测[J]. 农业工程学报, 2019, 35(22): 285-295.

- [13] 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.
- [14] 朱海霞,李东明,王铭,等. 基于积分回归法黑龙江省作物产量动态预报研究[J]. 气象与环境学报, 2018, 34(3): 86-92.
- [15] 易灵伟,杨爱萍,余焰文,等. 基于气候适宜指数的江西晚稻产量动态预报模型构建及应用[J]. 气象, 2016, 42(7): 885-891.
- [16] 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权重系数的确定方法[J]. 中国农业气象, 2018, 39(10): 664-673.
- [17] 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.
- [18] 柳芳,薛庆禹,黎贞发. 天津棉花气候适宜度变化特征及其产量动态预报[J]. 中国农业气象, 2014, 35(1): 48-54.
- [19] 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.
- [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.
- [21] 宋迎波,王建林,郑昌玲,等. 美国小麦产量业务预报方法研究[J]. 气象科技, 2009, 37(2): 186-189.
- [22] 刘佩英. 中国芥菜[M]. 北京: 中国农业出版社, 1996: 77-120.
- [23] 杜春英,李帅,王瞭瞭,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.
- [24] 李昊宇,王建林,郑昌玲,等. 气候适宜度在华北冬小麦发育期预报中的应用[J]. 气象, 2012, 38(12): 1554-1559.
- [25] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements [R]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998: 1-327.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 胡代文,张红,王旭祎,等. 品种、播期及育苗方式对第二季茎瘤芥(榨菜)生育期及产量的影响[J]. 中国农学通报, 2013, 29(9): 129-133.
- [29] 赵欢,李会合,吕慧峰,等. 茎瘤芥不同生长期植株营养特性及其与产量的关系[J]. 生态学报, 2013, 33(23): 7364-7372.
- [30] 赵欢,秦松,王正银,等. 涪陵茎瘤芥种植区土壤肥力与产量的关系[J]. 应用生态学报, 2013, 24(12): 3431-3438.
- [31] 徐茜,李保证,曾秀丽,等. 不同肥料处理对茎瘤芥主要性状及经济效益的比较分析[J]. 耕作与栽培, 2018(3): 15-17, 8.
- [32] 许明惠,李昌满,许秀蓉. 纳米长效复合肥对茎瘤芥产量和品质的影响[J]. 科学咨询(科技·管理), 2017(8): 65-67.
- [33] 刘义华,周光凡,范永红,等. 茎瘤芥(榨菜)产量生境敏感性的初步研究[J]. 植物遗传资源学报, 2004(4): 374-377.
- [34] 张先淑,谢朝怀,胡相云,等. 不同栽培条件下茎瘤芥(榨菜)瘤茎产量与空心的变化[J]. 西南农业学报, 2012, 25(5): 1606-1608.
- [35] 张红,张召荣,范永红,等. 播期、施氮量对茎瘤芥(榨菜)前期抽苔及腋芽抽生影响研究[J]. 耕作与栽培, 2011(2): 29-30, 60.

(责任编辑:徐艳)