

武 强, 韩 旭, 唐余学, 等. 2 种基于历史丰歉气象影响指数的茎瘤芥产量动态预报方法比较[J]. 江苏农业学报, 2021, 37(6): 1443-1450.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2021.06.011

2 种基于历史丰歉气象影响指数的茎瘤芥产量动态预报方法比较

武 强^{1,2,3}, 韩 旭³, 唐余学^{1,2,3}, 徐倩倩⁴, 阳园燕^{1,2,3}

(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. 合肥市气象局, 安徽 合肥 230041)

摘要: 以涪陵茎瘤芥为例, 基于历史丰歉气象影响指数, 综合诊断筛选气象要素相似年型, 采用大概率法与加权平均分析法建立茎瘤芥产量预报模型, 并验证不同方法的茎瘤芥产量动态预报准确性。结果表明: 同一年份不同起报时间的气象条件相似年型差异主要发生在热量条件的相似年, 其次是光照条件相似年, 而水分条件相似年在同一年份不同起报时间无变化。但同一起报时间不同年份的气象条件相似年, 无明显的重复性, 即年际间的气象条件具有差异性, 能够综合反映气象条件对茎瘤芥产量丰歉的决定性。比较大概率法与加权平均分析法的茎瘤芥产量预报结果, 在产量丰歉趋势预报方面, 大概率法在较早的起报时间易出现较大的偏差, 但是随着起报时间推后, 产量丰歉趋势趋于正确; 加权平均分析法在大多数年份的产量丰歉趋势预报准确性较高, 但是个别年份会出现不同起报时间的持续性预报偏差。在单产预报准确率方面, 加权平均分析法预报结果明显优于大概率法, 但 2 种方法均在 1 月 1 日起报时间表现出最高的预报准确率, 大概率法 1 月 1 日起报的单产预报准确率平均值为 89.5%, 加权平均分析法 1 月 1 日为起报时间单产预报准确率平均值为 98.9%。在进入 2 月份也即茎瘤芥瘤茎膨大后期, 预报准确率降低。

关键词: 产量预报; 大概率法; 加权平均分析法; 气象条件相似年; 茎瘤芥

中图分类号: S165+.27 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2021)06-1443-08

Comparison of two methods for yield prediction of *Brassica juncea* var. *tumida* Tsen & Lee based on meteorological influence index of historical yield

WU Qiang^{1,2,3}, HAN Xu³, TANG Yu-xue^{1,2,3}, XU Qian-qian⁴, YANG Yuan-yan^{1,2,3}

(1. Chongqing Institute of Meteorological Sciences, Chongqing 401147, China; 2. Chongqing Engineering Research Center of Agrometeorology and Satellite Remote Sensing, Chongqing 401147, China; 3. Jiangjin Modern Agrometeorology Experimental Station, Chongqing 402260, China; 4. Hefei Meteorological Bureau, Hefei 230041, China)

Abstract: Based on the meteorological influence index of historical yield, the similarity year of meteorological conditions was selected by integrated diagnosis. The large probability method and weighted average method were used to establish the yield prediction model of *Brassica juncea* var. *tumida* Tsen & Lee, and the accuracy of different methods was verified. The results showed that the difference of similarity year of meteorological conditions with different starting times in the same year

收稿日期: 2021-03-03

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(cstc2020jscx-msxmX0111); 中国气象局创新发展专项项目(CXFZ2021J068, 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, 山西河曲人, 硕士, 工程师, 主要从事农田小气候与气象仪器研究。(E-mail) theodorus@yeah.net

通讯作者: 唐余学, (E-mail) cqtangyx@foxmail.com

mainly occurred in the heat condition. Secondly, the similarity year of light conditions was different in some years, while the water conditions had no change in different starting times. However, there was no obvious repeatability in the similarity years of meteorological conditions with the same starting time, that was, the meteorological conditions were different among years, which could comprehensively reflect the decisive effect of meteorological conditions on the yield of *Brassica juncea* var. *tumida* Tsen & Lee. Comparing

with the results of the large probability method and the weighted average method, the large probability method was prone to large deviation in the early starting time, the yield trend tended to be correct with the delay of reporting time. The accuracy of the weighted average method was high, but the persistent forecasting deviation with different starting time could occur in some years. In terms of the prediction accuracy of unit yield, the prediction result of weighted average method was obviously better than that of large probability method, both methods showed the highest forecast accuracy on the starting time of January 1, the highest forecast accuracy of large probability method and weighted average method were 89.5% and 98.9%. In February, the late period of stem enlargement of *Brassica juncea* var. *tumida* Tsen & Lee, the accuracy of prediction decreased.

Key words: yield prediction; large probability method; weighted average method; similarity year of meteorological conditions; *Brassica juncea* var. *tumida* Tsen & Lee

茎瘤芥(*Brassica juncea* var. *tumida* Tsen & Lee)是重庆最具特色的经济作物之一,属于茎用芥菜的变种^[1],其膨大肉质茎是榨菜加工的主要原料。涪陵区是茎瘤芥的核心产区,除东南部武陵山系高海拔地区外,全区都有种植,截至 2019 年,种植面积稳定在 $4.8 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 以上。科学、准确地开展茎瘤芥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^[2]。

关于作物产量动态预报方法已有较多的研究和应用^[3-5],传统的农学预报方法应用简单,但预报结果偏差较大^[6-7]。作物生长模拟模型是目前较新的作物产量预报研究方向,但需要较为完备的科学理论基础,并获取土壤、生育期、生物量等数据信息^[8-11],对于小宗特色经济作物在生育期气象条件影响机理研究不是十分完善的情况下,则有一定应用局限性。遥感技术在作物产量预报中也有应用,复杂地形条件、天气条件影响以及分辨率精度较低等是重要的限制因素^[12-14]。因此,目前仍以统计预报方法的应用最为广泛,主要是通过构建各类气象要素中关键气象影响因子与作物生长发育以及产量形成的相关关系^[15-16],建立动态预报模型^[17-19],并在水稻、小麦、玉米等粮食作物的产量预报中取得较好应用效果^[20-22]。本研究以涪陵茎瘤芥为例,基于历史丰歉气象影响指数,综合诊断筛选气象要素相似年型,采用大概率法与加权平均分析法建立茎瘤芥产量预报模型,以期寻求实现茎瘤芥产量预报的切实方案,为茎瘤芥产量预报以及其他特色经济作物的产量预报提供科学依据与方法参考。

1 资料与方法

1.1 研究区域概况

茎瘤芥核心产区重庆市涪陵区($29^{\circ}21'-30^{\circ}01'$

N, $106^{\circ}56'-107^{\circ}43'E$, 海拔 138~1 977 m), 全区除东南部靠近武陵山系的高海拔地区外均有茎瘤芥种植。地处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 $6\ 127.5^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$, 年降水量 $1\ 098.8 \text{ mm}$, 无霜期 317 d, 年日照时数 $1\ 095.6 \text{ h}$ 。

1.2 数据来源

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。计算得到茎瘤芥苗期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。

茎瘤芥产量数据来自涪陵区统计局, 由总产和种植面积计算得到单产。对茎瘤芥瘤茎产量进行处理得到瘤茎产量气象影响指数^[23-24]。

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

式中, ΔY_i 为产量气象影响指数, Y_i 、 Y_{i-1} 为第 i 年、第 $i-1$ 年瘤茎单产。产量气象影响指数 ΔY_i 正、负值分别代表产量丰和歉。

按照涪陵区茎瘤芥生育期多年观测结果, 确定幼苗期为 9–10 月, 瘤茎膨大期为 11 月–2 月中旬^[1]。

1.3 气象条件相似年

相邻年份间产量变化可认为主要由气象条件的不同导致, 同一地区的同一作物, 2 个历史年份的气象要素变化相近或者相似, 则该作物产量变化也应该相似。2 个气象条件相似年可以由基于欧氏距离与相关系数的综合诊断指标判断确定^[25-26]。

$$C_{ik} = \frac{r_{ik}}{d_{ik}} \times 100\% \quad (2)$$

$$r_{ik} = \frac{\sum_{j=1}^n (\Delta X_{ij} - \Delta \bar{X}_i) (\Delta X_{kj} - \Delta \bar{X}_k)}{\sqrt{\sum_{j=1}^n (\Delta X_{ij} - \Delta \bar{X}_i)^2 \sum_{j=1}^n (\Delta X_{kj} - \Delta \bar{X}_k)^2}} \quad (3)$$

$$d_{ik} = \sqrt{\sum_{j=1}^n (\Delta X_{ij} - \Delta \bar{X}_{kj})^2} \quad (4)$$

$$\Delta X_i = X_i - X_{i-1} \quad (5)$$

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} 为预报年 (k 年) 和任一历史年 (i 年) 的气象条件相似年综合诊断指标, 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 为相邻两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 个气象要素平均值, X_i 、 X_{i-1} 为第 i 年和 $i-1$ 年的气象要素值。

选取热量、水分、光照 3 类气象要素, 包括日平均气温、最高气温、最低气温、降水量、日照时数、茎瘤芥苗期至产量预报起报日 ≥ 0 °C 积温、累积降水量、标准化降水量、累积日照时数等, 分别作为参与计算的 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, 并在热量、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, 作为预报年产量丰歉气象影响指数的预报数据集。

1.4 大概率法历史丰歉气象影响指数产量预报模型

大概率法是根据气象条件相似年综合诊断指标, 筛选出预报年与历史年份的 9 个历史气象要素相似年, 计算产量丰歉频率大小, 选取频率较大的丰歉年型作为产量预报值。该方法统计多年历史年份相似年的产量丰或歉发生频率, 得到理想条件丰歉概率, 即该气候特点条件的年份实际可能的产量丰歉情况。并以之为代表性历史年份, 作进一步类比分析。

$$\Delta Y_k = \begin{cases} \frac{\sum \Delta Y_{i(+)}}{l} & l > m \\ \frac{\sum \Delta Y_{i(-)}}{m} & l < m \end{cases} \quad (6)$$

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。

1.5 加权平均分析法历史丰歉气象影响指数产量预报模型

加权平均分析法是根据气象条件相似年综合诊断指标, 筛选出预报年与历史年份的 9 个历史气象要素相似年, 以丰歉年型频率大小, 综合计算得到单产丰歉预报值。该方法将计算得到的历史气象要素相似年产量丰歉的可能性, 进行无差别综合考虑, 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。

$$\Delta Y_k = \frac{\sum \Delta Y_{i(+)} \times a_{(+)}}{l} + \frac{\sum \Delta Y_{i(-)} \times a_{(-)}}{m} \quad (7)$$

$$a_{(+)} = \frac{l}{9}, a_{(-)} = \frac{m}{9} \quad (8)$$

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。 $a_{(+)}$ 、 $a_{(-)}$ 为预报试验结果为正值、负值的概率。

1.6 产量预报准确率判断

丰歉趋势准确率用预报值与实际值的产量气象影响指数 ΔY_i 正负符号判断, 符号一致则丰歉趋势准确, 否则不准确。

单产预报准确率由单产预报值与实际值计算得到。

$$\text{单产预报准确率} = \left[1 - \frac{Y_1 - Y_0}{Y_0} \right] \times 100\% \quad (9)$$

式中, Y_1 、 Y_0 分别为单产预报值和单产实际值。

2 结果与分析

2.1 气象因子相似年型筛选结果

利用欧氏距离与相关系数的综合诊断指标, 判断 2015–2019 年不同起报时间的气象条件相似年, 经计算得到, 热量条件相似年中相似程度较高的热量指标主要是 ≥ 0 °C 积温, 水分条件相似年中相似程度最高的降水指标为标准化降水量, 光照条件相似年中相似程度较高的光照条件主要为累积日照时数。2015–2019 年不同起报时间的气象条件筛选结果见表 1, 同一年份的不同起报时间, 气象条件相似年有一定的重复性。比较同一年份不同起报时间的热量条件、水分条件、光照条件的相似年型, 可见随着起报时间的延后, 影响气象条件相似年的筛选与

判定的气象因素主要是热量条件,即统计时间段热量条件的差异导致了相似年份筛选结果的不同。光照条件造成的相似年份判定结果差异较小,而水分条件未体现出对相似年份判定的影响。反映出热量条件是影响茎瘤芥产量形成以及预报准确性的主要原因,而水分条件在茎瘤芥的瘤茎膨大期的表现则较为稳定。主要是因为茎瘤芥的瘤茎膨大期一般为 11 月上旬-2 月中旬,而重庆地区冬季以阴到多云天气为主,且降水较少,统计多年平均月降雨量,11 月为 55.7 mm,12 月为 23.6 mm,1 月为 18.5 mm,2 月

为 21.2 mm,说明在 11 月以后,进入冬季降雨水量迅速减少,且维持着每月降水 20 mm 左右的稳定状态,加之冬季阴天低温,地表蒸发及作物蒸腾量极小,故水分条件基本处于较为稳定的动态平衡状态,1980-2020 年大多数年份上一年 12 至次年 2 月标准化降水量稳定在 2.5~3.5 mm,无明显波动变化。比较同一起报时间不同年份的气象条件相似年,无明显的重复性,说明年际间的气象条件具有差异性,能够综合反映气象条件对茎瘤芥产量丰歉的决定性。

表 1 2015-2019 年不同起报时间气象条件的相似年

Table 1 Similarity year of meteorological conditions with different starting times from 2015 to 2019

起报日期 (月-日)	气象条件	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年
12-01	热量	1984, 1988, 2012	1983, 1991, 2007	1991, 1993, 2004	1988, 1991, 2004	1991, 1997, 2014
	水分	1981, 1991, 2012	1992, 1993, 2011	1982, 1991, 2013	1992, 1998, 2013	1982, 2004, 2009
	光照	1989, 1994, 1997	1987, 1998, 2007	2000, 2004, 2011	1993, 1995, 2009	1996, 1999, 2003
01-01	热量	1984, 1988, 2012	1986, 1988, 2007	1993, 2004, 2014	1988, 2004, 2012	1992, 1997, 2012
	水分	1981, 1991, 2012	1992, 1993, 2011	1982, 1991, 2013	1992, 1998, 2013	1982, 2004, 2009
	光照	1989, 1994, 1997	1987, 1998, 2007	2000, 2004, 2011	1993, 1995, 2009	1996, 1999, 2003
02-01	热量	1988, 1997, 2011	1986, 1996, 2008	1993, 2004, 2014	1991, 2004, 2012	1996, 1997, 2014
	水分	1981, 1991, 2012	1992, 1993, 2011	1982, 1991, 2013	1992, 1998, 2013	1982, 2004, 2009
	光照	1989, 1994, 1997	1987, 1998, 2007	2000, 2004, 2011	1993, 1995, 1997	1980, 1996, 2003
02-21	热量	1988, 1999, 2011	1986, 1996, 2000	1983, 1993, 2004	1991, 2004, 2012	1987, 1996, 1997
	水分	1981, 1991, 2012	1992, 1993, 2011	1982, 1991, 2013	1992, 1998, 2013	1982, 2004, 2009
	光照	1989, 1994, 1997	1991, 1998, 2007	1983, 2000, 2011	1993, 1995, 2009	1996, 1999, 2003

2.2 大概率法茎瘤芥产量预报结果

利用大概率法对 2015-2019 年涪陵区茎瘤芥单产以及丰歉趋势进行动态预报,如果预报值 ΔY 与实际 ΔY 符号一致则预报趋势正确,否则不正确,单产预报准确率由公式(9)计算得到。结果(表 2)显示,12 月 1 日起报,在 2015 年与 2018 年丰歉趋势预报不正确,1 月 1 日起报,2015 年丰歉趋势预报不正确,2 月 1 日、2 月 21 日起报的丰歉趋势在 2015-2019 年均正确。说明大概率法在较早的起报时间可能发生丰歉趋势的预报误差,随着起报时间的推后,丰歉趋势准确率提升。由 2015-2019 年不同起报时间单产预报准确率可见,以 12 月 1 日起报的单产预报准确率平均值最低,为 87.2%;1 月 1 日起报的单产预报准确率平均值最高,为 89.5%。2 月 1 日、2 月 21 日起报的单产准确率降低。说明 12 月

是茎瘤芥产量形成气象条件影响的关键期,进入 1 月瘤茎基本形成,且膨大后期对于不利气象条件的抗性提高,气象条件对茎瘤芥产量形成的影响较前期减小。

2.3 加权平均分析法茎瘤芥产量预报结果

利用加权平均分析法对 2015-2019 年涪陵区茎瘤芥单产以及丰歉趋势进行动态预报,结果(表 3)显示 2018 年丰歉趋势预报在不同起报时间均不正确,其余年份的丰歉趋势除 2016 年 2 月 1 日起报结果外,均预报正确。2018 年预报值 ΔY 不同起报时间的平均值为 1.879, ΔY 实际值为 -0.024,丰歉趋势不正确,但丰歉趋势气象影响指数偏差较小。说明加权平均分析法对于所有相似年的整体平均可能导致整体气候影响趋势的误判,产量丰歉趋势预报结果不如大概率法。由 2015-2019 年不同起报时间

的单产预报准确率可见,不同起报时间预报准确率均处于 95% 以上的较高水平,比较而言,1 月 1 日为起报时间的单产预报准确率最高,为 98.9%,2 月 1

日为起报时间的单产预报准确率最低,平均为 95.7%。表现出 12 月气象条件对茎瘤芥产量形成的关键作用。

表 2 2015–2019 年大概率法茎瘤芥产量动态预报结果

Table 2 The dynamic prediction results of *Brassica juncea* var. *tumida* yield by large probability method from 2015 to 2019

起报日期 (月-日)	预报值 (ΔY)					准确率(%)					
	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	平均值
12-01	-20.323	10.224	11.397	15.342	13.288	79.6	90.4	94.6	84.6	87.0	87.2
01-01	-20.323	6.169	8.886	-10.422	13.540	79.6	94.5	97.0	89.6	86.8	89.5
02-01	22.064	6.536	8.886	-10.422	11.856	78.0	94.1	97.0	89.6	88.4	89.4
02-21	21.803	10.396	12.669	-10.422	12.835	78.3	90.3	93.4	89.6	87.5	87.8
平均值	0.805	8.331	10.460	-3.981	12.880						
实际 ΔY	0.077	0.614	5.683	-0.024	0.263						

表 3 2015–2019 年加权平均分析法茎瘤芥产量动态预报结果

Table 3 The dynamic prediction results of *Brassica juncea* var. *tumida* yield by weighted average method from 2015 to 2019

起报日期 (月-日)	预报值 (ΔY)					准确率(%)					
	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	平均值
12-01	0.344	3.914	5.953	4.705	7.765	99.7	96.7	99.7	95.3	92.5	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
02-01	11.102	-0.863	3.999	1.136	6.674	89.0	98.5	98.4	98.8	93.6	95.7
02-21	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	5.046	1.784	5.223	1.879	6.134						
实际 ΔY	0.077	0.614	5.683	-0.024	0.263						

2.4 两种茎瘤芥产量预报方法计算结果比较

比较大概率法与加权平均分析法的茎瘤芥产量预报结果(表 2、表 3)可以发现,在产量丰歉趋势预报方面,两种方法各有其优势,大概率法在较早的起报时间易出现较大的偏差,但是随着起报时间推后,产量丰歉趋势趋于正确,且较为稳定;加权平均分析法在大多数年份的产量丰歉趋势预报准确性较高,但是个别年份会出现不同起报时间的持续性预报偏差。其原因可能是个别相似年型的预判不准确,而在大概率法中,产量丰歉估算相反的气象条件相似年被舍去不参与运算,而加权平均分析法则将这一类气象相似年当作无差别贡献引入计算,导致了最终的预报偏差。

比较单产预报准确率(表 2、表 3)可以发现,加权平均分析法预报结果较大概率法有明显提升,但两种方法均表现出以 1 月 1 日为起报时间预报准确

率最高的共同特点。大概率法的预报产量与实际产量比较结果(图 1a)表明,以 1 月 1 日为起报时间各年份预报单产与实际单产的吻合度最高。以 12 月 1 日、1 月 1 日、2 月 1 日、2 月 21 日为起报时间的预报单产与实际单产进行线性拟合(图 1b~图 1e),可见拟合效果较为离散,其中仅以 12 月 1 日为起报时间的预报单产与实际单产拟合结果较好,决定系数为 0.616 6 ($n=5$, 通过 $\alpha=0.05$ 显著性检验),其余起报时间预报单产与实际单产拟合结果未通过显著性检验。由图 1a 可以看出主要是在 2015 和 2018 年,各起报时间的预报单产均有较大偏差。比较加权平均分析法的预报产量与实际产量(图 2a)发现,以 1 月 1 日为起报时间各年份预报单产与实际单产的吻合度最高。以 12 月 1 日、1 月 1 日、2 月 1 日、2 月 21 日为起报时间的预报单产与实际单产进行线性拟合(图 2b~图 2e),可以发现加权平均分析法拟合

效果优于大概率法,其中以12月1日为起报时间的预报单产与实际单产拟合结果的决定系数为0.745 3($n=5$,通过 $\alpha=0.05$ 显著性检验),以1月1日为起报时间的预报单产与实际单产拟合结果的决定系数为0.834 4($n=5$,通过 $\alpha=0.05$ 显著性检验),1月1日为起报时间的预报单产与实际单产的一致性更好,2月1日和2月21日为起报时间的预报单产与实际单产拟合结果未通过 $\alpha=0.05$ 显著性检验。主要是因为1月份以后,决定茎瘤芥产量的瘤茎部分基本稳定形成,且瘤茎抗逆性较苗期增强,该时段发生一定范围内的不利气象条件,对最终产量的影响较为有限。经计算得到在热量条件相似年中,相似程度最高的热量指标是 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温,而瘤茎形成以后的1月至2月中旬,冬季的低温条件以及不同年份可能发生的显著降温过程在参与历史气象

要素相似年的诊断筛选时,会有明显的影响,导致 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温值的偏低,进而在历史气象要素相似年的判断中,与产量丰歉的实际情况发生一定偏差,因而预报准确率有所降低。

综上所述,在产量丰歉趋势预报准确率方面,大概率法与加权平均分析法表现出各自的优势,大概率法随着起报时间推后产量丰歉趋势预报准确率提高,加权平均分析法可在较早的起报时间准确预报产量丰歉趋势,但是在个别年份会出现不同起报时间的持续性误判。在单产预报准确率方面,加权平均分析法预报结果明显优于大概率法,但两种方法均在1月1日起报时间表现出最高的预报准确率,在进入2月也即茎瘤芥瘤茎膨大后期,预报准确率降低。

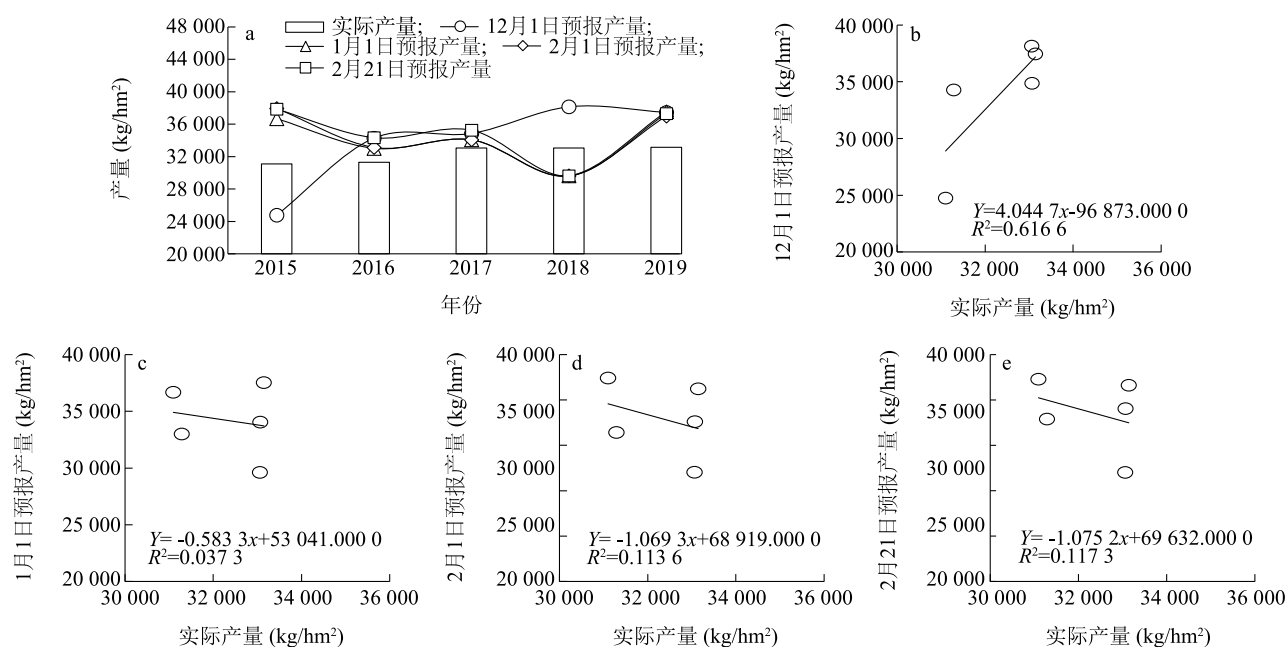


图1 大概率法单产预报结果与实际单产的比较

Fig.1 Comparison between yield predicted by large probability method and actual yield

3 讨论

本研究以涪陵茎瘤芥为例,基于历史丰歉气象影响指数,综合诊断筛选气象要素相似年型,采用大概率法与加权平均分析法建立茎瘤芥产量预报模型,并验证不同方法的茎瘤芥产量预报准确性。

比较同一年份不同起报时间的气象条件相似年型,发现影响气候条件相似年的筛选与判定的气象

因素主要是热量条件,其次是部分年份的光照条件。而水分条件相似年在同一年份不同起报时间无变化。但同一起报时间不同年份的气象条件相似年无明显的重复性,即年际间的气象条件具有差异性,能够综合反映气象条件对茎瘤芥产量丰歉的决定性。

比较大概率法与加权平均分析法的茎瘤芥产量预报结果,在产量丰歉趋势预报方面,两种方法各有其优势,大概率法在较早的起报时间易出现较大的

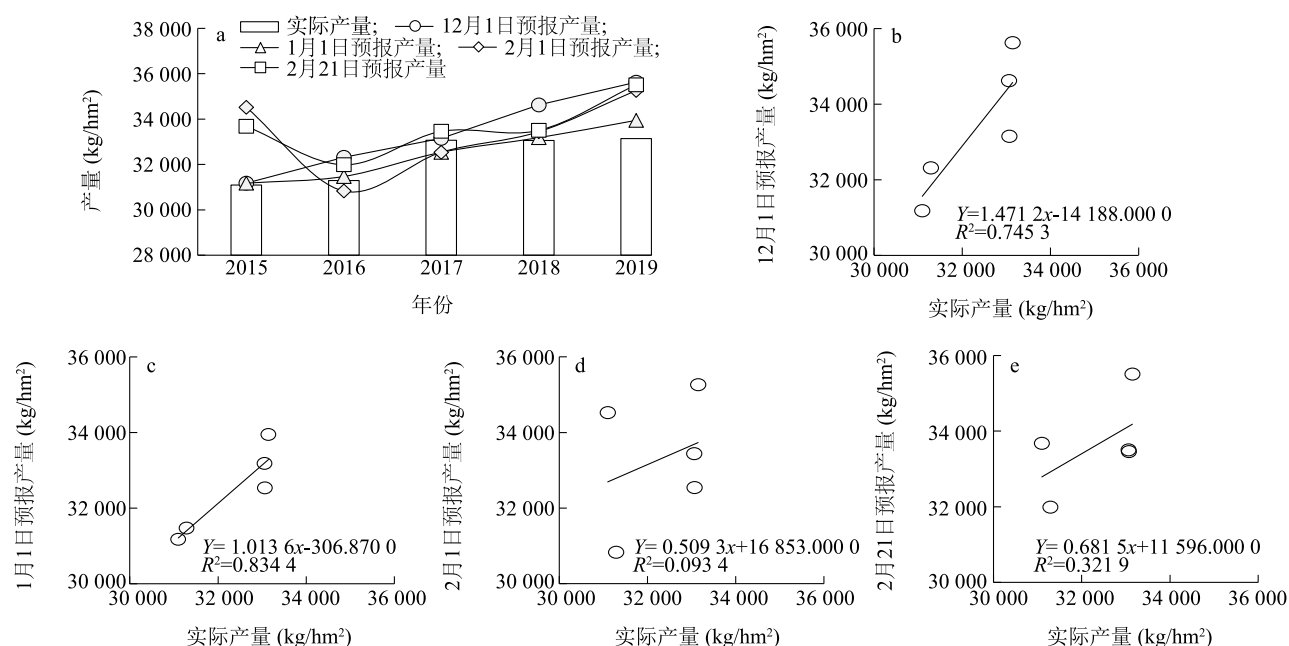


图2 加权平均分析法单产预报结果与实际单产的比较

Fig.2 Comparison between yield predicted by weighted average method and actual yield

偏差,但是随着起报时间推后,产量丰歉趋势预报趋于正确,且较为稳定;加权平均分析法在大多数年份的产量丰歉趋势预报准确性较高,但是个别年份会出现不同起报时间的持续性预报偏差。单产预报准确率方面,加权平均分析法预报结果明显优于大概率法,但两种方法均在1月1日起报时间表现出最高的预报准确率,在进入2月也即茎瘤芥瘤茎膨大后期,预报准确率降低。大概率法1月1日起报时间的单产预报准确率平均值为89.5%。加权平均分析法1月1日起报时间的单产预报准确率平均值为98.9%。主要是由于在茎瘤芥瘤茎形成前期,即1月1日左右,植株抗逆性较差,瘤茎膨大对于气象环境条件较为敏感,从而气象环境条件影响产量形成。而茎瘤芥瘤茎形成后期,直至进入2月,瘤茎已经稳定生成,抗逆性较强,该时期气象环境条件对最终瘤茎产量的形成影响较小,因而在2月以后作为起报时间,茎瘤芥产量预报准确率降低。为进一步提高茎瘤芥产量预报的准确率,可以茎瘤芥瘤茎形成的气象适宜条件作为切入点,深入研究瘤茎形成的生理生化特点,得到更加准确的茎瘤芥产量预报起报时间。

参考文献:

- [1] 刘佩英. 中国芥菜[M]. 北京: 中国农业出版社, 1996: 77-120.
- [2] 罗梦森, 景元书, 熊世为. 基于遗传优化BP神经网络的水稻气象产量预报模型[J]. 气象科学, 2012, 32(6): 665-670.
- [3] 郭亚菲, 樊超, 闫洪涛. 基于主成分分析和粒子群优化神经网络的粮食产量预测[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(19): 241-245.
- [4] 唐俊, 赵成萍, 周新志, 等. 基于EVI-RBF的玉米长势监测及产量预测[J]. 江苏农业学报, 2020, 36(3): 577-583.
- [5] 李环, 孙素芬, 罗长寿. 基于NARX神经网络的粮食产量预测模型[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(22): 228-232.
- [6] 刘树泽, 张宏铭, 蓝鸿第. 作物产量预报方法[M]. 北京: 气象出版社, 1987: 11-35.
- [7] 王书裕. 作物产量的预报方法[J]. 气象学报, 1984, 42(3): 349-355.
- [8] 李明星, 刘建栋, 王馥棠, 等. 分布式水文模型在陕西省冬小麦产量模拟中的应用[J]. 水土保持通报, 2008(5): 148-154.
- [9] 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.
- [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, HUANG J, WU W, 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] 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.
- [14] 邓坤枚,孙九林,陈鹏飞,等. 利用国产环境减灾卫星遥感信息估测春小麦产量——以内蒙古陈巴尔虎旗地区为例[J].自然资源学报,2011,26(11):1942-1952.
- [15] 单璐璐,谭丽静,白 华,等. 低温阴雨对丹东地区粮食作物产量的影响[J].气象科技,2017,45(4):745-749.
- [16] 肖 卉,沈 琪,刘 杰,等. 连云港水稻产量的气象影响因子分析[J].气象科学,2011(S1):81-86.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 武文辉,吴战平,袁淑杰,等. 贵州夏旱对水稻、玉米产量影响评估方法研究[J].气象科学,2008(2):232-236.
- [23] 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.
- [24] 宋迎波,王建林,杨霏云,等. 粮食安全气象服务[M].北京:气象出版社,2006:182-196.
- [25] 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.
- [26] 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.

(责任编辑:张震林)