

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.

气候适宜指数在早稻产量动态预报上的应用^{*}

易 雪¹ 王建林² 宋迎波²

1 南京信息工程大学, 南京 210044

2 国家气象中心, 北京 100081

提 要: 结合早稻生理特性和前人研究成果, 分别构建了早稻温度、降水及日照适宜度模型, 在此基础上, 为反映多因子对早稻产量的协同效应, 建立了早稻气候适宜度模型。根据不同时段的早稻气候适宜度, 利用加权法, 构建了早稻气候适宜指数。基于气候适宜指数与早稻产量的关系, 建立了早稻气候适宜指标。并利用历年不同时段的气候适宜指数和早稻产量建立了早稻产量动态预报模型。结果表明, 模型回代检验和预报检验的丰歉趋势正确率、实际预报准确率均较高, 能够满足业务服务的需要。

关键词: 气候适宜度, 气候适宜指数, 早稻产量, 气候适宜指标, 动态预报

Application of Climatic Suitability Index to Dynamical Prediction of Early Rice Yield

YI Xue¹ WANG Jianlin² SONG Yingbo²

1 Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

2 National Meteorology Center, Beijing 100081

Abstract: On the basis of physiological characteristics of early rice and the research results of predecessors, the suitability models about temperature, precipitation and sunshine of early rice are constructed. In order to express synergetic effect of meteorological factors and yield, climatic suitability model of early rice is established. According to different periods of climate suitability of early rice, the climatic suitability index of early rice is constructed by using weighted method. Based on the relation between climatic suitability index and early rice yield, a climatic suitability indicator is set up. And dynamical prediction models of early rice are created by using climatic suitability index at different stages and early rice yield. The results indicate that the method has high prediction accuracy of the bumper or poor harvest trend and the actual yield on both model test and forecasting test and can satisfy the needs of operational services.

Key words: climatic suitability, climatic suitability index, early rice yield, climatic suitability indicator, dynamical prediction

引 言

早稻是我国主要的粮食作物之一, 其生长发育和产量形成是一个与气象条件密切相关的动态过程, 随时跟踪气象条件的变化, 动态掌握气象条件对早稻生长发育和产量形成的影响, 是现代气象为农业服务的一个重要方面。湖南省是农业大省, 稻谷是湖南粮食的主体, 也是湖南农业的支柱产业之一。

湖南早稻近 10 年平均种植面积和总产量均居全国首位, 在保障国家粮食安全方面发挥了重要作用。

早稻产量预报业务在我国已有 20 多年的历史, 预报方法多为统计回归, 预报时效一般在早稻收获前 1~2 个月^[1]。但是, 随着全球变暖和我国经济发展, 传统的早稻产量预报方法已经不能满足国家防灾减灾、粮食安全预警和农业生产者的需要。郑昌玲等^[1]利用作物产量历史丰歉气象影响指数对早稻产量进行动态预测, 预报效果较好, 但这种方法没有

* 中国气象局业务建设项目“粮食(水稻)安全气象保障业务系统建设”资助

2009 年 8 月 3 日收稿; 2009 年 11 月 27 日收修定稿

第一作者: 易雪, 主要从事农业气象产量预报等方面研究工作. Email: 378139784@163.com

考虑气象因子量值的变化,从而影响了预报的稳定性。近年来,利用作物生长模拟模型开展作物产量动态预报的方法已在业务上初步应用,帅细强等^[2]利用水稻生长模型对江南双季稻产量进行动态预测,预报的效果也比较好,但作物模拟模型中部分所需实时数据在业务中难以获得,参数调整也较为困难,大范围应用效果不够理想。刘伟昌等^[3]利用气候适宜度指数对冬小麦产量进行动态预报,但所建立的降水和日照适宜度模型参数较难获得,很难在业务上推广应用。本文拟在前人的研究基础上,以气候适宜度为基础,结合早稻的生长特性,重新构建降水和日照适宜度模型,在此基础上建立早稻气候适宜指数和气候适宜指标,并将早稻气候适宜指标和气候适宜指数应用于早稻气候适宜程度诊断和动态产量预报。

1 资料与方法

1.1 资料来源

文中所用产量资料为湖南省 1960—2008 年的早稻单产($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),来自于湖南省统计局和国家统计局;根据湖南早稻种植分布、生长特点选取 15 个分布基本均匀、代表性较好的气象站点(石门、南县、岳阳、沅陵、常德、安化、沅江、平江、邵阳、双峰、武冈、零陵、衡阳、道县、郴州),气象资料为 15 个代表站点 1961—2008 年早稻生长季逐日最高气温($^{\circ}\text{C}$)、最低气温($^{\circ}\text{C}$)、降水量(mm)和日照时数(h),来自湖南省气象局。

表 1 早稻各发育期的最低温度(t_1)、最高温度(t_2)和适宜温度(t_0)值
Table 1 The base temperature (t_1), maximum temperature (t_2) and optimum temperature (t_0) of different growth stages of early rice

发育期	播种期	出苗期	移栽返青期	分蘖期	孕穗期	抽穗期	乳熟期
$t_1/^{\circ}\text{C}$	10	14	15	17	17	18	13
$t_0/^{\circ}\text{C}$	18	20	28	25	25	25	23
$t_2/^{\circ}\text{C}$	40	40	35	33	40	35	35

根据湖南早稻各站逐日温度适宜度,利用式(2)、(4)分别计算单站逐旬温度适宜度和区域平均旬温度适宜度:

$$\tilde{T}(t_{ik}) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \tilde{T}(t_{ij}) \quad (3)$$

$$\tilde{T}(t_k) = \frac{1}{15} \sum_{i=1}^{15} \tilde{T}(t_{ik}) \quad (4)$$

式中 $\tilde{T}(t_{ik})$ 为第 i 站 k 旬温度适宜度, $\tilde{T}(t_{ij})$ 为第 i 站第 j 日温度适宜度, $n=10$ 或 11 , $\tilde{T}(t_k)$ 为第 k 旬区域旬温度适宜度。

1.2 资料处理

1.2.1 产量资料处理

相关研究表明,相邻两年作物单产的变化主要是由相邻两年气象条件的差异引起的^[4-5],为此,对早稻单产进行如下处理:

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

式(1)中, i 代表第 i 年, $i-1$ 为第 i 年的上一年。 ΔY_i 为第 i 年与第 $i-1$ 年的湖南早稻单产的丰歉值, Y_i 和 Y_{i-1} 分别为第 i 年与第 $i-1$ 年湖南早稻单产。

1.2.2 发育期资料处理

由于气象资料年代较长,而早稻发育期只是到 20 世纪 90 年代后才有观测资料,为此本文早稻发育期资料统一采用 2002—2004 年 3 年的平均发育期值。主要用来判断某日早稻所处的发育阶段,根据该发育阶段的生理指标计算当天的温度适宜度。

2 气候适宜度模型的建立

2.1 区域旬温度适宜度模型

根据前人^[3,6]建立的作物温度适宜度模型,通过确定模型中早稻各生长发育期所需的最低温度 t_1 、最高温度 t_2 和适宜温度 t_0 ^[7-8](表 1)。建立了早稻温度适宜度模型:

$$\tilde{T}(t_{ij}) = \frac{(t_{ij} - t_1)(t_2 - t_{ij})^B}{(t_0 - t_1)(t_2 - t_0)^B}, B = \frac{t_2 - t_0}{t_0 - t_1} \quad (2)$$

式(2)中 $\tilde{T}(t_{ij})$ 为第 i 站第 j 日温度适宜度, t_{ij} 是第 i 站第 j 日日平均气温。

2.2 区域旬降水适宜度模型

考虑到早稻是水田作物,一般在生长期水分调控较为容易,且湖南降水丰沛,早稻生育期内降水量能够满足早稻生长发育对水分的需求。但罗伯良等^[9]研究指出 5 月上中旬和 6 月中下旬是湖南极端强降水主要集中发生时段,而 6 月中下旬正是湖南早稻孕穗抽穗期,强降水会对早稻抽穗扬花产生较大影响,从而影响早稻产量形成,因此,早稻降水适宜度模型为:

$$\tilde{R}(r) = \begin{cases} 1 & \text{区域旬降水距平百分率} \leq 30\% \\ R_0/R & \text{区域旬降水距平百分率} > 30\% \end{cases} \quad (5)$$

(孕穗抽穗期)

$$\tilde{R}(r) = 1 \quad (\text{除孕穗抽穗期})$$

式(5)中, $\tilde{R}(r)$ 为区域旬降水适宜度, R 表示区域某旬降水量; R_0 为多年(1961—2008 年)区域旬平均降水量。

2.3 区域旬日照适宜度模型

本文以多年(1961—2008 年)区域旬平均日照时数为临界值, 当旬日照时数超过区域旬多年平均日照时数时, 早稻对光照条件的反应即达到适宜状态。因此, 日照适宜度模型为:

$$\tilde{S}(s) = \begin{cases} 1 & S \geq S_0 \\ S/S_0 & S < S_0 \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中, $\tilde{S}(s)$ 表示区域旬日照适宜度, S 表示区域某旬实际日照时数(小时), S_0 表示多年(1961—2008 年)区域旬平均日照时数。

2.4 区域旬气候适宜度模型

为了综合反映温度、降水、日照三个因素对早稻适宜性的影响, 本文建立了湖南早稻气候适宜度模型^[10]:

$$S_m = \sqrt[3]{\tilde{T}_m(t) \times \tilde{R}_m(r) \times \tilde{S}_m(s)} \quad (7)$$

S_m 为第 m 旬的区域气候适宜度, $\tilde{T}_m(t)$ 、 $\tilde{R}_m(r)$ 、 $\tilde{S}_m(s)$ 分别为第 m 旬的区域温度、降水、日照适宜度。

3 气候适宜指数

3.1 气候适宜指数计算

早稻生育期内从播种至某一时段的逐旬适宜度的加权集成构成了不同时段适宜指数。通过计算各旬温度、降水、日照和气候适宜度与 ΔY_i 的相关系数, 相关显著旬的权重系数取其相关系数(所有相关显著旬的相关系数之和应小于 1; 如果大于 1, 则把相关系数相对较小的旬等同于非显著旬); 其余旬的权重系数用下式计算:

$$b = (1 - \sum_{i=1}^x a_i) / (n - x) \quad (8)$$

a_i 为相关显著旬的相关系数, x 为相关显著旬的旬数, n 为早稻全生育期的旬数, b 为非显著旬的权重系数。

3.2 适宜指数年际变化

利用 1961—2008 年实际气象资料, 分别计算了湖南省早稻历年全生育期温度、降水、日照及气候适

宜指数(图 1)。

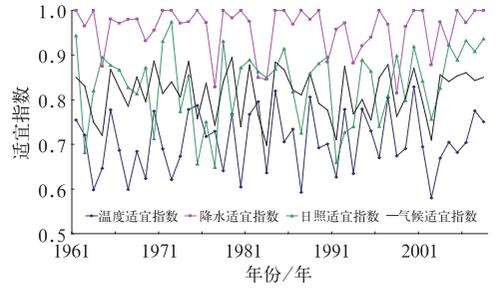


图 1 湖南省早稻全生育期适宜指数年际变化
Fig 1 Interannual variation of suitability index during the whole growth period of early rice in Hunan

由图 1 可以看出湖南省降水适宜指数最高, 在 0.8~1 之间, 这是由于湖南省降水量充沛, 可以满足早稻生长发育对水分条件的需求; 温度适宜指数最低, 在 0.579~0.829 之间, 说明温度条件是早稻产量形成的限制因素; 日照适宜指数波动最大, 最小值为 0.649, 最大值为 0.974。湖南早稻气候适宜指数变化可以分为三个阶段, 20 世纪 60 年代初期到 70 年代中期, 早稻全生育期气候适宜指数变化幅度较小, 70 年代末期到 90 年代末期波动较大, 并有略微的下降趋势, 21 世纪初波动平稳。

3.3 气候适宜指数与产量的关系

将湖南早稻全生育期气候适宜指数与 ΔY_i 作相关分析, 结果表明, 两者相关系数达到 0.54, 通过了显著性水平为 0.001 的检验, 表明全生育期气候适宜指数和 ΔY_i 的年际变化有很好的一致性(图 2), 说明本文建立的湖南早稻气候适宜指数能够客观反映湖南省早稻的气候适宜性水平及动态变化。

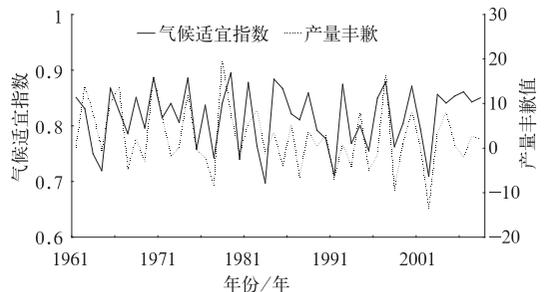


图 2 湖南省早稻全生育期气候适宜指数和气候产量的年际变化

Fig. 2 Interannual variation of climatic suitability index during the whole growth period and climatic yield of early rice in Hunan

4 早稻气候适宜度诊断

基于湖南早稻全生育期的气候适宜指数和 ΔY_i 的 年际变化具有很好的相关性,利用 1961—2008 年湖南早稻全生育期的气候适宜指数 x 和 ΔY 构建如下模型:

$$\Delta Y = 71.34x - 56.06 \quad (9)$$

对其进行检验, F 值为 17.92, 通过显著性水平为

0.005 的检验。

假定 $\Delta Y = 1\%$ 和 $\Delta Y = -1\%$ 时对应的气候适宜指数分别为湖南早稻种植的气候适宜指标和不适宜指标的临界值,则湖南早稻全生育期的气候适宜指标临界值为 0.797, 不适宜指标为 0.768。说明当气候适宜指数大于 0.797 时,气候条件适宜早稻生产;当气候适宜指数小于 0.768 时,气候条件不适宜早稻生产。参考农业部门的产量丰歉指标,本文将气候适宜指标分为 5 级,分级指标见表 2。

表 2 气候适宜指标分级

Table 2 Classification of climatic suitability indicator

等级	非常适宜 $\Delta Y > 5\%$	适宜 $1\% < \Delta Y \leq 5\%$	基本适宜 $-1\% \leq \Delta Y \leq 1\%$	不适宜 $-5\% \leq \Delta Y < -1\%$	非常不适宜 $\Delta Y < -5\%$
气候适宜指标	> 0.855	$0.797 \sim 0.855$	$0.768 \sim 0.797$	$0.711 \sim 0.768$	< 0.711

利用上述气候适宜指标和全生育期的气候适宜指数,对 1961—2008 年湖南早稻产量丰歉情况进行检验表明(表 3),实际产量丰歉情况与气候适宜指标判断相比,48 年中,18 年完全一致,21 年差一个级别,

9 年差两个或两个以上级别,则基本一致(完全一致与差一个级别正确之和)可达 81.3%。说明本文建立的气候适宜指标合理,根据某年的气候适宜指数,可以诊断早稻气候适宜程度,预测早稻产量前景。

表 3 1961—2008 年湖南早稻气候适宜指标检验

Table 3 The test of climatic suitability indicator of early rice in Hunan from 1961 to 2008

等级	$\Delta Y > 5\%$	$1\% < \Delta Y \leq 5\%$	$-1\% \leq \Delta Y \leq 1\%$	$-5\% \leq \Delta Y < -1\%$	$\Delta Y < -5\%$	总数
实际年数/年	16	7	9	11	5	48
实际与指标判断完全一致的年数/年	7	4	3	2	2	18
实际与指标判断差一个级别的年数/年	7	3	5	4	2	21
完全一致的正确率/%	43.8	57.1	33.3	18.2	40	37.5
差一个级别的正确率/%	43.8	42.9	55.6	36.4	40	43.8
基本一致的正确率/%	87.6	100	88.9	54.6	80	81.3

5 产量动态预报模型

5.1 动态预报模型的建立

利用 1961—2005 年的 ΔY 和不同时段的气候适宜指数 x , 分别建立从播种到 4 月下旬、5 月下旬、6 月下旬的湖南早稻产量动态预报模型(见表 4)。

表 4 湖南早稻产量动态预报模型及检验
Table 4 The dynamical prediction models of early rice and test in Hunan

预报时间	预报模型	F	F 临界值
4 月下旬	$\Delta Y = 70.40x - 32.92$	11.41	8.83
5 月下旬	$\Delta Y = 72.80x - 36.89$	12.38	8.83
6 月下旬	$\Delta Y = 73.55x - 55.81$	18.93	8.83

注:通过 $\alpha = 0.005$ 的显著性水平检验

5.2 动态预报模型回代检验

利用上述预报模型,对 1961—2005 年早稻产量

进行了动态预报回代检验,如果预报 ΔY 与实际 ΔY 符号一致,即判定丰歉趋势为正确;根据 ΔY 的结果,利用式(10)对湖南早稻实际单产进行了回代检验,则 45 年丰歉趋势平均正确率及实际单产平均准确率,结果见表 5。

$$Y_i = Y_{i-1} (1 + \Delta Y) \quad (10)$$

式(10)中各变量意义与式(1)同。

表 5 1961—2005 年湖南省早稻单产丰歉趋势和产量回代检验平均准确率(%)

Table 5 The average accuracy of return test for early rice of the bumper or poor harvest trend and the actual yield in Hunan (unit: %)

预报时间	4 月下旬	5 月下旬	6 月下旬
产量丰歉趋势平均正确率	82.2	82.2	75.6
产量回代检验平均准确率	95.1	95.2	95.1

注:准确率 = $(1 - |\frac{Y_{预报} - Y_{实际}}{Y_{实际}}|) \times 100\%$; 其中, $Y_{预报}$ 为预报值, $Y_{实际}$ 为实际产量

从表 5 可以看出,由各个时段气候适宜指数所建立的动态预报模型在丰歉趋势正确率上均达到 75%

以上,产量检验准确率超过了95%,说明本文所建立的早稻产量动态预报模型能够满足业务服务的需要。

5.3 预报检验

用上述产量动态预报模型,对2006年、2007年

和2008年湖南省早稻产量进行逐月动态预报检验,结果见表6。

从表6可以看出,2006—2008年的4月下旬、5月下旬、6月下旬的预报结果中,平均准确率分别为96.5%、96.1%、95.6%,达到了业务工作中早稻

表6 2006—2008年湖南早稻单产动态预报检验结果

Table 6 The test results of dynamical prediction for early rice yield in Hunan from 2006 to 2008

年	$\Delta Y/\%$	ΔY 预报/ $\%$			实际产量值 /kg·hm ⁻²	4月下旬		5月下旬		6月下旬	
		4月 下旬	5月 下旬	6月 下旬		预测值 /kg·hm ⁻²	准确率 /%	预测值 /kg·hm ⁻²	准确率 /%	预测值 /kg·hm ⁻²	准确率 /%
		2006	-2.2	4.3		4.6	6.0	5621.3	5991.4	93.4	6011.3
2007	2.6	3.9	4.3	4.5	5769.8	5842.9	98.7	5865.0	98.3	5876.6	98.1
2008	2.1	4.8	5.2	5.0	5892.5	6047.8	97.4	6068.9	97.0	6061.1	97.1

收获前一个月的预测水平,能够满足动态预报产量的业务需要。但2006年的趋势预测出现错误,分析原因主要是由于2006年7月14—17日受热带风暴碧利斯影响^[11-12],突发的暴雨洪涝灾害严重影响了早稻成熟收获,使得早稻最终减产。

6 结论与讨论

本文结合早稻生理特性和前人研究成果分别构建了早稻温度、降水及日照适宜度模型,在此基础上,为反应多因子对早稻产量的协同效应,建立了早稻气候适宜度模型。利用所建立的气候适宜度模型计算了1961—2008年湖南早稻不同时段的气候适宜指数,且全生育期的气候适宜指数与产量丰歉值相关显著,说明本文所建立的早稻气候适宜指数能够较为客观地反映早稻的气候适宜性水平及动态变化。

利用湖南早稻全生育期的气候适宜指数和产量丰歉值的年际变化具有很好的相关性,确定了湖南早稻种植的气候适宜指标,并利用气候适宜指标对1961—2008年产量丰歉情况进行回代检验,准确率可达81.2%,指标检验效果较好,说明本文建立的气候适宜指标可诊断湖南早稻气候适宜程度。

利用湖南早稻播种至4月下旬、5月下旬、6月下旬的气候适宜指数,建立了湖南早稻产量动态预报模型,分别对2006、2007、2008年的早稻产量进行了预报检验,结果表明,除2006年在收获时遭遇台风致使早稻丰歉趋势出现错误,导致预报准确率较低外,其余时段趋势均正确,且4月、5月、6月三年实际单产预报平均准确率都在95%以上,总体上所

建立的预报模型预报效果较好。

但是,由于本文未考虑生产措施和重大气象灾害对早稻的影响,特别是成熟收获阶段气象灾害的影响,从而影响了模型预测的稳定性,因此,在实际业务应用中,还需要借鉴其他模型或方法的结果,进行适当订正。

参考文献

- [1] 郑昌玲,杨霏云,王建林,等.早稻产量动态预报模型[J].中国农业气象,2007,28(4):412-416.
- [2] 帅细强,王石立,马玉平,等.基于水稻生长模型的气象影响评价和产量动态预测[J].应用气象学报,2008,19(1):71-81.
- [3] 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,2008,31(2):21-24.
- [4] 王建林,赵四强.全国棉花产量预报模式[J].气象,1990,16(5):26-30.
- [5] 宋迎波,王建林,陈晖,等.中国油菜产量动态预报方法研究[J].气象,2008,34(3):93-99.
- [6] 马树庆.吉林省农业气候研究[M].北京:气象出版社,1994:33.
- [7] 宋迎波,王建林,杨霏云.粮食安全气象服务[M].北京:气象出版社,2006:20-25.
- [8] 俞芬,千怀遂,段海来.淮河流域水稻的气候适宜度及其变化趋势分析[J].地理科学,2008,28(4):537-542.
- [9] 罗伯良,张超,林浩.近40年湖南省极端强降水气候变化趋势与突变特征[J].气象,2008,34(1):80-85.
- [10] 赵峰,千怀遂,焦士兴.农作物气候适宜度模型研究[J].资源科学,2003,25(6):75-82.
- [11] 黎用朝,刘三雄,曾翔,等.湖南水稻生产概况、发展趋势及对策探讨[J].湖南农业科学,2008(2):129-133.
- [12] 潘志祥,叶成志,刘志雄,等.“圣帕”、“碧利斯”影响湖南的对比分析[J].气象,2008,34(7):41-50.