

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. 应用气象学报,2015,26(1):103-111.  
doi:10.11898/1001-7313.20150111

## 不同方法在湖南省早稻产量动态预报中的比较

帅细强<sup>1)2)</sup>\* 陆魁东<sup>1)2)</sup> 黄晚华<sup>1)2)</sup>

<sup>1)</sup>(湖南省气象科学研究所,长沙 410118)

<sup>2)</sup>(气象防灾减灾湖南省重点实验室,长沙 410118)

### 摘 要

为了提高产量趋势预报的准确性和定量预报的准确率,利用 1962—2002 年气象、早稻产量和田间观测资料,建立基于气候适宜度、关键气象因子、作物生长模型的湖南省早稻产量动态预报方法,进行回代检验;并利用 2003—2012 年资料进行预报检验。分析表明:3 种方法的预报准确率比较接近,平均在 93.8% 以上;基于气候适宜度预报方法的趋势预报准确性最高,较基于关键气象因子的预报方法高 4%~6%;基于作物生长模型预报方法的误差 5% 以内样本百分率最高,较基于气候适宜度的预报方法高 2%~20%。研究结果为湖南省早稻产量动态预报筛选出了较优的方法,即产量趋势预报选用基于气候适宜度的方法,定量预报选用基于作物生长模型的方法,同时可供我国其他早稻区的产量动态预报方法研究借鉴。

**关键词:** 气候适宜度; 关键气象因子; 作物生长模型; 产量预报方法

### 引 言

作物产量预报是根据农作物生长过程与气象条件的相互关系,通过数学模式估测未来农业生产的发展趋势和最终产量的一种专业性气象预报。通过研究影响作物产量的因素,运用合理的方法和模型可以较快、较精准地预测作物产量,并能从中分析出提高作物产量的方法,避免或减轻气象灾害的危害<sup>[1-4]</sup>。我国农业气象工作者自 20 世纪 70 年代末开始作物产量预报的研究和服务<sup>[5-7]</sup>,20 世纪 80 年代对粮食作物产量的气象预测预报方法进行了深入系统的研究,研制了一系列适合我国不同时空尺度的作物产量气象预报模式<sup>[6-8]</sup>。目前我国所研制和应用的作物产量气象预报模式,可归纳为三大类,即数理统计模型、动力生长模型和遥感估产模型。数理统计模型是在气象产量提取的基础上,建立气象条件与气象产量关系的统计模型。其优点是预报技术方法较成熟,预报模型简单实用,预报时效较长,

适用于距收获期较早时间的农业产量趋势预估;不足之处是统计模型中的预报因子生物学意义有待完善,进行动态预报时需建立许多预报方程,比较繁琐。动力生长模型是根据物理学和生物学规律,以动力学方法模拟作物的能量和物质转化过程,以天气为驱动变量,以光合速率、呼吸速率、发育速率等为速率变量,逐时(或逐日)模拟作物的光合作用、呼吸作用、干物质分配、叶面积增长、分蘖或分枝等生长发育过程和产量形成过程。其用于作物产量预报是基于作物产量形成为生物量不断积累的过程,同时气象条件的影响具有一定的连续性,可以根据生长中后期累积的干物质与最终产量的关系进行动态预报。动力生长模型作为新的研究方法和技术,是未来农业气象的发展方向,其优点是机理性和动态性较强,不足之处是模型中的部分参数较难获取,且需进行大量的田间试验,另外,模型对极端气象灾害的模拟精度也有待提高。遥感估产模型是应用遥感信息和遥感方法估算作物产量的模型,通过光谱来获取作物的生长信息,建立作物光谱与产量之间的

2014-05-13 收到,2014-09-22 收到再改稿。

资助项目:公益性行业(气象)科研专项(GYHY201206022,GYHY201206020),湖南省气象局重大项目“现代农业气象业务服务综合平台研究”

\* email: nqsxq@163.com

联系。遥感估产的优点是可获取大范围数据资料,获取信息的速度快、周期短,不足之处是空间分辨率低,作物信息提取受云层覆盖的影响较大。目前业务上应用最为广泛的是各种统计预报方法,大都编制为计算机软件应用服务系统。人们利用作物产量历史丰歉气象影响指数的方法先后建立了中国棉花、油菜、晚稻、早稻和大豆产量的动态预报模型<sup>[9-16]</sup>,利用气候适宜度的方法先后建立了河北玉米、河南冬小麦、山东冬小麦、四川水稻产量的动态预报模型<sup>[17-20]</sup>,钱锦霞等<sup>[21]</sup>利用关键气象因子建立了郑州地区冬小麦产量构成要素的回归模型。近20年来,我国已经成功建立了水稻、小麦、玉米、棉花等作物的生长模拟模型,基于作物生长模型的产量动态预报方法也逐渐在作物产量动态预报中应用<sup>[22-31]</sup>。

早稻是我国主要的粮食作物之一,其生长发育和产量形成过程与气象条件密切相关。早稻产量预报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,湖南省早稻近10年来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。根据天气气候条件的变化,客观、定量、动态地预报作物产量,对保障国家粮食安全具有十分重要的现实意义。为了进一步提高湖南省早稻产量趋势预报的准确性和定量预报的准确率,开展产量动态预报方法在湖南省的适应性研究,为择优选取趋势预报和定量预报模型提供依据,从而进一步提升作物产量预报的科技水平。

## 1 资料处理

早稻气象和生育期资料来自湖南省气象局。考虑区域的代表性,选取1962—2012年石门、南县、岳阳、沅陵、常德、安化、沅江、平江、邵阳、双峰、武冈、永州、衡阳、道县、郴州15个气象站的日平均温度、最高温度、最低温度、降水量、日照时数、风速、水汽压等资料,以及常德、南县、平江、衡阳、武冈、澧县、赫山、资兴、双峰、邵东、冷水滩、江华12个农业气象站早稻资料进行分析研究。

1961—2012年湖南省早稻产量资料来自湖南省统计局。

### 1.1 产量资料处理

影响相邻两年作物产量波动的诸多因素中,作物品种和肥力影响相对稳定,相邻两年作物产量的变化基本上由气象条件变化引起<sup>[11-13]</sup>。因此,采用

式(1)对湖南省早稻产量资料进行处理:

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

式(1)中, $\Delta Y_i$ 为第*i*年湖南早稻产量丰歉值, $Y_i$ 和 $Y_{i-1}$ 分别为第*i*年和第(*i*-1)年湖南早稻产量,*i*代表第*i*年,(*i*-1)为第*i*年的上一年。

### 1.2 生育期资料处理

南县、常德、平江、双峰、武冈、永州、衡阳7个气象站用本站早稻生育期资料,石门、岳阳、沅陵、安化、沅江、邵阳、道县、郴州8个气象站由于未开展早稻生育期观测,因此用相邻农业气象站观测资料代替(分别为澧县、平江、常德、赫山、南县、邵东、江华、资兴)。由于同一站点早稻播种期年际相差不大,因此早稻生育期资料采用2000—2009年的平均值。

### 1.3 气象资料处理

早稻播种至预报时间的气象资料使用日观测资料。基于气候适宜度的产量动态预报方法中平均温度使用日值,降水量和日照时数使用旬值;基于关键气象因子的产量动态预报方法中平均温度、降水量和日照时数均使用旬值;基于作物生长模型的产量动态预报方法中最低温度、最高温度、降水、日照时数、风速、水汽压使用日值。

## 2 动态预报模型及方法建立

根据湖南省早稻生长特点,构建气象要素与湖南省早稻产量数据集,采用关联规则发现等方法<sup>[32-34]</sup>,挖掘影响因子,建立预报模型。选取1962—2002年数据,分别建立基于气候适宜度、关键气象因子、作物生长模型的湖南省早稻产量丰歉值动态预报方法。

### 2.1 基于气候适宜度的早稻产量动态预报方法

首先借鉴作物温度适宜度模型<sup>[16-18]</sup>,建立湖南省早稻温度适宜度模型。结合当地田间试验数据,分析确定模型中早稻各生育期所需的最低温度、最高温度和适宜温度(表1)。在计算湖南早稻各站逐日温度适宜度的基础上,采用算术平均的方法分别计算单站逐旬温度适宜度和区域逐旬温度适宜度。考虑到湖南省早稻抽穗扬花期降水过多会造成大雨洗花现象,影响早稻结实率和最终产量,而其他生育期早稻水分供应充足。根据水分供应特征,分段建立湖南省早稻降水适宜度模型。采用算术平均的方法,对15个站的旬降水量进行处理,求得区域旬降水量(区域旬日照时数处理方法类似)。当抽穗开花

期区域旬降水距平百分率超过 30% 时,区域旬降水适宜度的值为 1971—2000 年区域旬平均降水量与区域旬降水量的比值;其他情况下区域旬降水适宜度的值为 1。当区域旬日照时数不小于区域旬平均日照时数时,早稻对光照的需求已满足,区域旬日照适宜度的值为 1;当区域旬日照时数小于区域旬平均日照时数时,区域日照适宜度的值为区域旬日照时数与区域旬平均日照时数的比值。为了综合反映温光水气象因素对早稻适宜性的影响,采用几何平均值的方法,对区域旬温度适宜度、区域旬降水适宜度、区域旬日照适宜度进行计算,得到湖南省早稻气

候适宜度<sup>[17-19]</sup>。用加权集成的方法,构建湖南省早稻从播种至任意时段的气候适宜指数计算模型。首先计算早稻生育期内每一旬气候适宜度与早稻产量丰歉值的相关系数,然后计算每一旬相关系数占早稻生育期内所有旬相关系数总和的比值,以此作为该旬的权重系数。利用 1962—2002 年早稻生育期内逐日温光水气象资料,计算不同时段早稻气候适宜指数,分析早稻气候适宜指数与早稻产量丰歉值的关系,建立早稻产量丰歉值动态预报模型(表 2)。所建动态预报模型均达到 0.02 的显著性水平,且随着早稻由营养生长期向生殖生长期的推进,显著性

表 1 湖南省早稻各生育期的最低温度、最高温度和适宜温度(单位:℃)  
Table 1 The minimum, maximum and optimum temperatures at different growth stages of early rice in Hunan Province(unit:℃)

生育期	最低温度	最高温度	适宜温度
播种期	10	40	18
出苗期	14	40	20
移栽、返青期	15	35	28
分蘖期	17	33	25
孕穗期	17	40	25
抽穗期	18	35	25
乳熟、成熟期	13	35	23

表 2 基于气候适宜度的湖南省早稻产量丰歉值动态预报模型  
Table 2 Dynamic forecasting models for bumper or poor harvest of early rice yield based on climatic suitability in Hunan Province

预报时间	预报模型	显著性水平
04-30	$\Delta Y = (34.2f - 0.60) \times 100\%$	未达到 0.10 显著性水平
05-10	$\Delta Y = (34.4f - 10.70) \times 100\%$	0.02
05-20	$\Delta Y = (38.3f - 18.68) \times 100\%$	0.01
05-31	$\Delta Y = (38.2f - 16.99) \times 100\%$	0.01
06-10	$\Delta Y = (37.0f - 7.64) \times 100\%$	0.01
06-20	$\Delta Y = (37.8f - 17.60) \times 100\%$	0.01
06-30	$\Delta Y = (37.9f - 17.07) \times 100\%$	0.001
07-10	$\Delta Y = (36.7f - 26.39) \times 100\%$	0.001
07-20	$\Delta Y = (35.9f - 18.98) \times 100\%$	0.001

注:ΔY 表示湖南省早稻产量丰歉值预报,f 表示从播种到预报时间止的早稻气候适宜指数。

水平从 0.02 逐步上升到 0.001,表明越接近生长后期,早稻气候适宜指数与产量的关系越密切。

## 2.2 基于关键气象因子的产量动态预报方法

首先分析湖南省早稻生长期内 1962—2002 年各旬平均温度、旬降水量、旬日照时数与早稻产量丰歉值的相关性,计算区域各旬气候要素与早稻产量丰歉值的相关系数(表 3);然后选取相关系数较大且机理性较强的 5 月上旬日照时数(返青分蘖期,影响分蘖速率)、5 月中旬平均气温(分蘖期,影响有效

穗)、5 月下旬降水量(分蘖末期至孕穗期,影响幼穗分化)、6 月上旬平均气温(孕穗期,影响花粉形成)、6 月中旬降水量(抽穗扬花期,影响结实)、6 月下旬平均气温(乳熟期,影响灌浆速率)、7 月上旬降水量(乳熟期,影响千粒重)、7 月中旬平均气温(成熟期,影响收获)等关键气象因子,利用 1962—2002 年数据建立旬动态预报模型(表 4),并进行显著性检验。除 4 月 30 日预报模型未达到 0.10 显著性水平外,其他时段预报模型均达到 0.02 的显著性水平。

表3 各旬气候要素与湖南省早稻产量丰歉值的相关系数

Table 3 Correlation coefficients between ten-day climate factors and bumper or poor harvest of early rice yield in Hunan Province

时间	相关系数		
	平均温度	降水量	日照时数
3月下旬	0.1034	-0.0557	0.1356
4月上旬	-0.1861	0.0020	-0.2122
4月中旬	0.0694	0.0172	0.0150
4月下旬	-0.1519	-0.1392	0.0606
5月上旬	0.2481	-0.1633	0.3845
5月中旬	0.1655	-0.1668	0.1368
5月下旬	0.0326	0.1756	-0.0387
6月上旬	-0.2882	0.0052	-0.1673
6月中旬	-0.1820	-0.3055	0.1947
6月下旬	-0.1389	-0.0346	-0.0284
7月上旬	0.1567	-0.2169	0.1942
7月中旬	-0.0906	0.0058	-0.0592

表4 基于关键气象因子的湖南省早稻产量丰歉值动态预报模型

Table 4 Dynamic forecasting models for bumper or poor harvest of early rice yield based on key meteorological factors in Hunan Province

预报时间	预报模型	显著性水平
04-30	$\Delta Y = (0.075x_M - 0.043x_A + 2.91) \times 100\%$	未达到0.10显著性水平
05-10	$\Delta Y = (0.171x_1 - 4.58) \times 100\%$	0.02
05-20	$\Delta Y = (0.163x_1 + 0.46x_2 - 14.56) \times 100\%$	0.01
05-31	$\Delta Y = (0.15x_1 + 0.55x_2 + 0.031x_3 - 18.11) \times 100\%$	0.01
06-10	$\Delta Y = (0.12x_1 + 0.60x_2 + 0.037x_3 - 1.40x_4 + 16.92) \times 100\%$	0.01
06-20	$\Delta Y = (0.11x_1 + 0.45x_2 + 0.034x_3 - 1.425x_4 - 0.049x_5 + 25.09) \times 100\%$	0.001
06-30	$\Delta Y = (0.12x_1 + 0.64x_2 + 0.041x_3 - 1.38x_4 - 0.057x_5 - 1.6x_6 + 62.01) \times 100\%$	0.001
07-10	$\Delta Y = (0.11x_1 + 0.83x_2 + 0.029x_3 - 1.38x_4 - 0.063x_5 - 1.76x_6 - 0.054x_7 + 66.79) \times 100\%$	0.001
07-20	$\Delta Y = (0.11x_1 + 0.79x_2 + 0.028x_3 - 1.36x_4 - 0.060x_5 - 1.71x_6 - 0.057x_7 - 0.39x_8 + 76.70) \times 100\%$	0.001

注： $\Delta Y$ 表示湖南省早稻产量丰歉值预报， $x_M$ 表示3月下旬日照时数， $x_A$ 表示4月下旬降水量， $x_1$ 表示5月上旬日照时数， $x_2$ 表示5月中旬平均气温， $x_3$ 表示5月下旬降水量， $x_4$ 表示6月上旬平均气温， $x_5$ 表示6月中旬降水量， $x_6$ 表示6月下旬平均气温， $x_7$ 表示7月上旬降水量， $x_8$ 表示7月中旬平均气温。

### 2.3 基于作物生长模型的产量动态预报方法

作物模型选用 ORYZA2000。该模型可描述潜在、水分胁迫和氮素胁迫等3种生产水平上水稻的生长、发育及产量形成过程，采用量纲为1的模拟发育进程，将水稻出苗、幼穗分化、开花和生理成熟时的发育阶段分别定义为0.0, 0.65, 1.0和2.0<sup>[34-37]</sup>。ORYZA2000根据水稻不同发育阶段的发育速率常数、热量单位日增量和光周期来计算发育速率<sup>[38]</sup>，考虑了移栽对早稻发育进程造成的影响。ORYZA2000对水稻生长诸过程有深入的定量描述，并已经在一些地区进行了检验和应用<sup>[22,26,35]</sup>，对高温、水分胁迫等也有一定的考虑。ORYZA2000生长参数包括比叶面积、同化物分配系数、叶片相对生长速率、叶片死亡速率、茎同化物向穗转移系数、最大粒重等。在对模型参数单点校准的基础上，对各站点

数值进行分析，结合地形、气候、水稻熟性分布和当地生产实际对参数进行区域化。除主要生长发育参数外，还依据田间试验及当地农业生产实际情况，将ORYZA2000模型中水分胁迫部分参数进行本地化订正，包括田间持水量、作物最大扎根深度、最小地下水水位、最大地下水水位、田间水分固定渗透速率、早稻初始泥浆水深、灌溉模式等。本地化的ORYZA2000模型检验结果表明<sup>[26]</sup>，江西、湖南地区1981—2004年31个农业气象站的早稻开花期、成熟期的平均误差为3~6d，早稻成熟期地上生物总干重、成熟期穗重模拟值与实测值的平均相对误差分别为12%~20%。

根据文献<sup>[26]</sup>的结果，建立基于ORYZA2000的湖南早稻产量逐旬动态预报方法。首先根据预报时间对最高温度、最低温度、降水量、日照时数、风

速、水汽压等气象资料进行处理,早稻播种至预报时间的气象资料采用观测值,预报时间之后的气象资料采用 1971—2000 年平均值;然后利用本地化的 ORYZA2000 作物模型,对 15 个代表站 1962—2012 年早稻进行逐日生长模拟,用 15 个代表站的模拟产量加权生成湖南省早稻模拟产量(权重为代表站所在区域早稻面积占湖南省早稻面积的比值)。产量丰歉值预报采用当年湖南早稻模拟产量与上一年模拟产量的差值除以上一年模拟产量的百分比表示。由于 ORYZA2000 作物模型模拟以日为时间步长单位,因此理论上可实现湖南省早稻产量的日动态预报。本文选择预报时间为 4 月 30 日、5 月 10 日、5 月 20 日、5 月 31 日、6 月 10 日、6 月 20 日、6 月 30 日、7 月 10 日、7 月 20 日的早稻产量动态预报结果进行分析。

### 3 不同动态预报方法的检验及比较

利用 1962—2012 年资料,从趋势预报准确性、预报准确率、误差 5% 以内的样本百分率、误差 7% 以内的样本百分率等方面对不同动态预报方法进行

回代检验和预报检验。趋势是指当年值减去上一年值的变化:结果为正值时,表示增趋势;结果为负值时,表示减趋势。趋势预报准确性是指预报值与实测值增减趋势一致的年数占总预报年数的百分比。误差 5% 以内的样本百分率是指预报准确率在 95% 以上的年数占总预报年数的百分比。误差 7% 以内的样本百分率是指预报准确率在 93% 以上的年数占总预报年数的百分比。预报准确率为

$$P = (1 - |(L - S)/S|) \times 100\% \quad (2)$$

式(2)中, $P$  表示预报准确率, $L$  表示预报产量, $S$  表示实测产量(这里为统计产量)。

#### 3.1 回代检验

回代检验(1962—2002 年)结果表明:基于气候适宜度的早稻产量动态预报方法趋势预报准确性不低于 66%(表 5),平均为 70%;预报准确率不低于 94.3%,平均为 94.6%;其中误差 5% 以内的样本百分率不低于 51%,平均为 55%;误差 7% 以内的样本百分率不低于 66%,平均为 68%。且随着早稻发育进程的推进,模型趋势预报准确性和预报准确率有上升趋势。

表 5 1962—2002 年基于气候适宜度的早稻产量动态预报方法回代检验  
Table 5 Fitting test for dynamic forecasting method of early rice yield based on climatic suitability from 1962 to 2002

预报时间	趋势预报准确性/%	预报准确率/%	误差 5% 以内样本百分率/%	误差 7% 以内样本百分率/%
05-10	66	94.5	54	68
05-20	71	94.6	56	73
05-31	68	94.6	59	68
06-10	66	94.3	51	66
06-20	73	94.5	51	66
06-30	73	94.5	54	66
07-10	71	94.7	61	68
07-20	71	94.7	56	68

基于关键气象因子的早稻产量动态预报方法的趋势预报准确性不低于 54%(表 6),平均为 64%,比基于气候适宜度的产量动态预报方法低 6%;预报准确率不低于 94.3%,平均为 94.7%,比基于气候适宜度的产量动态预报方法高 0.1%;误差 5% 以内的样本百分率不低于 51%,平均为 55%,与基于气候适宜度的产量动态预报方法相同;误差 7% 以内的样本百分率不低于 63%,平均为 67%,比基于气候适宜度的产量动态预报方法低 1%。随着早稻发育进程的推进,模型趋势预报准确性、预报准确

率和误差 5% 以内样本百分率均呈上升趋势。

基于作物生长模型的早稻产量动态预报方法趋势预报准确性不低于 54%(表 7),平均为 60%,比基于气候适宜度的产量动态预报方法低 10%,比基于关键气象因子的产量动态预报方法低 4%;预报准确率不低于 93.6%,平均为 93.8%,比基于气候适宜度的产量动态预报方法低 0.8%,比基于关键气象因子的产量动态预报方法低 0.9%;误差 5% 以内的样本百分率不低于 46%,平均为 57%,均比基于气候适宜度和关键气象因子的产量动态预报方法

高2%；误差7%以内的样本百分率不低于59%，平均为66%，比基于气候适宜度的产量动态预报方法低2%，比基于关键气象因子的产量动态预报方法低1%。

表6 1962—2002年基于关键气象因子的早稻产量动态预报方法回代检验  
Table 6 Fitting test for dynamic forecasting method of early rice yield based on key meteorological factors from 1962 to 2002

预报时间	趋势预报准确性/%	预报准确率/%	误差5%以内样本百分率/%	误差7%以内样本百分率/%
05-10	54	94.3	54	66
05-20	63	94.4	54	69
05-31	59	94.4	51	66
06-10	61	94.4	54	66
06-20	68	94.5	49	63
06-30	71	95.2	56	63
07-10	71	95.2	59	73
07-20	68	95.2	61	73

表7 1962—2002年基于作物生长模型的早稻产量动态预报方法回代检验  
Table 7 Fitting test for dynamic forecasting method of early rice yield based on crop growth simulation model from 1962 to 2002

预报时间	趋势预报准确性/%	预报准确率/%	误差5%以内样本百分率/%	误差7%以内样本百分率/%
04-30	66	93.6	59	63
05-10	54	93.6	51	63
05-20	59	94.1	56	63
05-31	54	93.9	59	76
06-10	54	93.6	46	59
06-20	59	93.8	56	63
06-30	59	94.0	59	61
07-10	66	93.8	66	73
07-20	66	93.9	59	71

### 3.2 预报检验

预报检验(2003—2012年)结果表明:基于气候适宜度的早稻产量动态预报方法趋势预报准确性不低于50%(表8),平均为58%;预报准确率不低于95.5%,平均为96.3%;误差5%以内的样本百分率不低于30%,平均为51%;误差7%以内的样本百分率不低于70%,平均为83%。

基于关键气象因子的早稻产量动态预报方法趋

势预报准确性不低于40%(表9),平均为54%,比基于气候适宜度的产量动态预报方法低4%;预报准确率不低于95.2%,平均为95.8%,比基于气候适宜度的产量动态预报方法低0.5%;误差5%以内的样本百分率不低于50%,平均为59%,比基于气候适宜度的产量动态预报方法高8%;误差7%以内的样本百分率不低于60%,平均为84%,比基于气候适宜度的产量动态预报方法高1%。

表8 2003—2012年基于气候适宜度的早稻产量动态预报方法预报检验  
Table 8 Extrapolation test for dynamic forecasting method of early rice yield based on climatic suitability from 2003 to 2012

预报时间	趋势预报准确性/%	预报准确率/%	误差5%以内样本百分率/%	误差7%以内样本百分率/%
05-10	50	96.5	60	100
05-20	60	97.0	70	90
05-31	60	96.0	60	80
06-10	50	95.5	30	70
06-20	60	96.5	50	80
06-30	60	96.6	50	80
07-10	60	96.2	40	80
07-20	60	96.1	50	80

表 9 2003—2012 年基于关键气象因子的早稻产量动态预报方法预报检验  
Table 9 Extrapolation test for dynamic forecasting method of early rice yield  
based on key meteorological factors from 2003 to 2012

预报时间	趋势预报准确性/%	预报准确率/%	误差 5%以内样本百分率/%	误差 7%以内样本百分率/%
05-10	60	95.9	50	90
05-20	50	95.8	50	90
05-31	50	95.6	60	90
06-10	40	95.5	60	90
06-20	50	95.2	50	60
06-30	50	96.0	60	90
07-10	70	95.9	70	80
07-20	60	96.2	70	80

基于作物生长模型的产量动态预报方法趋势预报准确性不低于 40%(表 10),平均为 50%,比基于气候适宜度的产量动态预报方法低 8%,比基于关键气象因子的产量动态预报方法低 4%;预报准确

率不低于 94.1%,平均为 95.8%,比基于气候适宜度的产量动态预报方法低 0.5%,与基于关键气象因子的产量动态预报方法相同;误差 5%以内的样本百分率不低于 50%,平均为 71%,比基于气候适

表 10 2003—2012 年基于作物生长模型的早稻产量动态预报方法预报检验  
Table 10 Extrapolation test for dynamic forecasting method of early rice yield  
based on crop growth simulation model from 2003 to 2012

预报时间	趋势预报准确性/%	预报准确率/%	误差 5%以内样本百分率/%	误差 7%以内样本百分率/%
04-30	60	97.0	80	90
05-10	50	96.8	90	90
05-20	50	96.7	90	90
05-31	50	96.7	80	90
06-10	50	96.4	70	90
06-20	40	94.7	50	70
06-30	50	94.1	60	70
07-10	50	94.7	60	60
07-20	50	95.3	60	60

宜度的产量动态预报方法高 20%,比基于关键气象因子的产量动态预报方法高 12%;误差 7%以内的样本百分率不低于 60%,平均为 79%,比基于气候适宜度的产量动态预报方法低 4%,比基于关键气象因子的产量动态预报方法低 5%。

#### 4 小 结

分析表明:

1) 基于气候适宜度、关键气候因子、作物生长模型的湖南省早稻产量动态预报方法的预报准确率比较接近,平均在 93.8% 以上。定量预报以基于作物生长模型的动态预报方法最优,预报误差 5%以内的样本百分率最高。基于气候适宜度和基于关键气象因子的动态预报方法,除早稻移栽返青期(4 月 30 日)预报模型未达到 0.10 显著性水平外,其他时段预报模型均达到 0.02 的显著性水平,其中分蘖普

遍期至拔节期的预报模型达到 0.01 的显著性水平,生殖生长期预报模型达到 0.001 的显著性水平。

2) 趋势预报准确性以基于气候适宜度的动态预报方法最高,基于关键气象因子的动态预报方法次之,3 种方法的预报效果均表现出生殖生长期优于营养生长期。这主要因为 3 种方法均假定预报日期以后的气候条件正常,而实际可能会出现各种不可预知的情况。

每一种产量预报方法都有一定局限性。统计预报方法建立的产量预报模型对作物的生长机理考虑较少,而作物模型中的部分参数获取较难,且需做大量的田间试验。如何将目前建立的多种产量预报方法进行组合和集成,充分发挥各自的优势,从而建立一套集合预报方法,有待今后进一步研究。另外,本研究结果反映了不同预报方法及模型之间在原理和特点上的差异,但不同预报方法的趋势预报准确性和预报准确率与地区、作物以及所建立的模型有关。

对于作物产量年际变化较大、受多种不利气候条件影响较大的地区和作物,还需具体研究。

### 参考文献

- [1] 莫喆,刘中秋,吴永常.国内外农业生产监测及产量预报系统的现状与分析.农业信息科学,2008,24(5):434-437.
- [2] Douglas K B,Mark A F. Forecasting crop yield using remotely sensed vegetation indices and crop phenology metrics. *Agricultural and Forest Meteorology*,2013,173:74-84.
- [3] Juraj B, van der Velde M, Erwin S, et al. Pan-European crop modelling with EPIC: Implementation, up-scaling and regional crop yield validation. *Agricultural Systems*,2013,120:61-75.
- [4] Yannick C, de Wit A, Gregory D, et al. Potential performances of remotely sensed LAI assimilation in WOFOST model based on an OSS Experiment. *Agricultural and Forest Meteorology*,2011,151:1843-1855.
- [5] 兰洪第,段运怀,章庆辰,等.东北地区粮豆产量预报.科学通报,1982,27(6):383.
- [6] 赵四强.应用海温预报粮食产量的初步探讨.科学通报,1982,27(20):126-127.
- [7] 钱拴,王建林.农业气象作物产量预报的特点与思考.气象科技,2003,31(5):33-38.
- [8] 王石立,马玉平,刘文泉,等.面向 Internet 的农业气象产量动态预报.气象,2004,30(4):42-46.
- [9] 王建林,宋迎波.棉花产量动态预测方法研究.中国棉花,2002,29(9):5-7.
- [10] 王建林,杨霏云,宋迎波.西北地区玉米产量动态业务预报方法探讨.应用气象学报,2004,15(1):51-57.
- [11] 宋迎波,王建林,陈晖,等.中国油菜产量动态预报方法研究.气象,2008,34(3):93-99.
- [12] 宋迎波,王建林,杨霏云.粮食安全气象服务.北京:气象出版社,2006:188-195.
- [13] 杨霏云,王建林.晚稻单产动态预测方法研究.气象科技,2005,33(5):433-436.
- [14] 郑昌玲,杨霏云,王建林,等.早稻产量动态预报模型.中国农业气象,2007,28(4):412-416.
- [15] 郑昌玲,王建林,宋迎波,等.大豆产量动态预报模型研究.大豆科学,2008,27(6):943-948.
- [16] 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.中国农业气象,2010,31(3):427-430.
- [17] 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.应用气象学报,2009,20(5):622-626.
- [18] 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.气象与环境科学,2008,31(2):21-24.
- [19] 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.中国农学通报,2012,28(12):291-295.
- [20] 游超,蔡元刚,张玉芳.基于气象适宜指数的四川盆地水稻气象产量动态预报技术研究.高原山地气象研究,2011,31(1):51-55.
- [21] 钱锦霞,郭建平.郑州地区冬小麦产量构成要素的回归模型.应用气象学报,2012,23(4):500-504.
- [22] 刘布春,王石立,马玉平.国外作物模型区域应用研究进展.气象科技,2002,30(4):194-203.
- [23] 高永刚,王育光,殷世平,等.世界粮食研究模型在黑龙江省作物产量预报中的应用.中国农业气象,2006,27(1):27-30.
- [24] 高永刚,顾红,姬菊枝,等.近43年来黑龙江气候变化对农作物产量影响的模拟研究.应用气象学报,2007,18(4):532-538.
- [25] 袁东敏,尹志聪,郭建平. SRES B2 气候情景下东北玉米产量变化数值模拟.应用气象学报,2014,25(3):284-292.
- [26] 帅细强,王石立,马玉平.基于水稻生长模型的气象影响评价和产量动态预测.应用气象学报,2008,19(1):71-81.
- [27] 高亮之.农业模型学基础.上海:天马图书有限公司,2004:186-206.
- [28] 潘学标.作物模型原理.北京:气象出版社,2003:273-303.
- [29] 马玉平,王石立,王馥棠.作物模拟模型在农业气象业务应用中的研究初探.应用气象学报,2005,16(3):293-303.
- [30] 刘春,张春辉,郭萨萨.基于能量模型的水稻生长模型.应用气象学报,2013,24(2):240-247.
- [31] 薛昌颖,杨晓光, Bam B, 等. ORYZA2000 模型模拟北京地区旱稻的适应性初探.作物学报,2005,31(12):1567-1571.
- [32] 韩家炜,堪博.数据挖掘:概念与技术.北京:机械工业出版社,2007:8-21.
- [33] 王海峰,张健,黄晓亚.数据挖掘技术及其在渔情预报中的应用.计算机时代,2007(11):52-53.
- [34] 石扬,张燕平,赵姝,等.基于商空间的气象时间序列数据挖掘研究.计算机工程与应用,2007,43(1):201-203.
- [35] Kropff M J, van Laar H H, Ten B H F M. ORYZA1: A Basic Model for Irrigated Lowland Rice Production. Wageningen: Centre for Agrobiological Research, 1993:76-83.
- [36] Kropff M J, van Laar H H, Matthews R. ORAZA1, An Ecophysiological Model for Irrigation Rice Production. SARP Research Proceedings, 1994:110.
- [37] Bouman B A M, van Keulen, van Laar H H, et al. The school of de Wit crop growth simulation models: A pedigree and historical overview. *Agricultural Systems*, 1996, 52:171-198.
- [38] Matthews R B, Hunt L A. A model describing the growth of cassava. *Field Crops Res*, 1994, 36:69-84.

## A Comparative Study on Dynamic Forecasting of Early Rice Yield by Using Different Methods in Hunan Province

Shuai Xiqiang<sup>1)2)</sup> Lu Kuidong<sup>1)2)</sup> Huang Wanhua<sup>1)2)</sup>

<sup>1)</sup> (*Meteorological Science Institute of Hunan Province, Changsha 410118*)

<sup>2)</sup> (*Key Lab of Hunan Province for Meteorological Disaster Prevention and Mitigation, Changsha 410118*)

### Abstract

The crop yield forecasting is one of the most important aspects of meteorological services for agricultural production. In order to improve the prediction accuracy, different forecasting methods are compared, and dynamic forecasting models of early rice yield are established based on climatic suitability, key meteorological factors and crop growth simulation model. Daily mean, maximum and minimum temperatures, precipitation, sunshine duration, wind velocity and vapor pressure data of 15 representative meteorological stations are used, as well as the early rice growth and yield data of 12 representative agricultural meteorological stations in Hunan Province from 1962 to 2002. Fitting test is performed by constraining the margin of error less than 5%. Extrapolation test is performed using data from 2003 to 2012, showing the accuracy of three methods are similar, all higher than 93.8%, and the dynamic forecasting models practically pass the test of 0.02 level, except for failing the test of 0.10 level on 30 April. Forecasting models from ripeness tiller to elongating stage pass the test of 0.01 level, and forecasting models at reproductive stage pass the test of 0.001 level too. The method based on climatic suitability improves the accuracy by 4%–6% comparing to that based on key meteorological factors and is 8%–10% more accurate than that based on crop growth simulation model. In quantitative forecast, the method based on crop growth simulation model is optimum, leading to obviously more samples whose margin of error is less than 5%. According to the analysis, the better method of early rice yield forecasting is screened out for Hunan Province. The method based on climatic suitability is chosen to carry out trend prediction of early rice yield, and the method based on crop growth simulation model is used to make quantitative forecast. It also provides reference for dynamic forecasting method research of early rice yield in other areas of China.

**Key words:** climatic suitability; key meteorological factor; crop growth simulation model; yield forecasting method