

徐敏, 吴洪颜, 张佩, 等, 2018. 基于气候适宜度的江苏水稻气候年景预测方法[J]. 气象, 44(9): 1200-1207.

基于气候适宜度的江苏水稻气候年景预测方法^{*}

徐 敏¹ 吴洪颜¹ 张 佩¹ 高 苹¹ 徐经纬²

¹ 江苏省气象局, 南京 210008

² 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室, 气候与环境变化国际合作联合实验室,
气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 资料同化研究与应用中心, 南京 210044

提 要: 在改进气候适宜度模型参数的基础上, 利用 1961—2016 年 70 个站的气象观测资料和农业资料, 应用统计方法, 确定了温度、日照、降水适宜度对水稻气象产量的影响权重, 由此构建了年景综合指数及其预测模型。结果表明: 日照适宜度和降水适宜度与相对气象产量之间存在显著的相关关系, 影响权重分别为 0.460 和 0.428, 由于热量资源充足, 温度适宜度对气象产量的影响权重偏小(0.112); 基于气候适宜度构建的年景综合指数与相对气象产量的相关系数达 0.411, 说明该指数能较好地表征气候条件对产量形成的综合影响; 基于大气环流特征量和太平洋海温等大尺度预报因子, 采用最优相关和逐步回归等方法, 建立了水稻年景综合指数的预测模型, 经过历史拟合和试报检验后效果理想, 可投入业务应用, 该方法的预测结果将为水稻产量分析预测提供科学依据。

关键词: 水稻, 气候适宜度, 农业气候年景预测

中图分类号: P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2018.09.008

Long-Term Prediction Method of Rice Annual Agricultural Climate Status in Jiangsu Province Based on Climatic Suitability

XU Min¹ WU Hongyan¹ ZHANG Pei¹ GAO Ping¹ XU Jingwei²

¹ Jiangsu Meteorological Service, Nanjing 210008

² Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education/Joint International Research
Laboratory of Climate and Environment Change/Collaborative Innovation Center on Forecast
and Evaluation of Meteorological Disasters/Center for Data Assimilation Research and
Application, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

Abstract: The impacts of temperature, sunshine and precipitation climatic suitabilities on rice meteorological output are determined based on the meteorological data and agricultural data from 1961 to 2016 by using the statistical analysis and the climate suitability model, whose parameters have been improved. The comprehensive index of annual agricultural climate status and its prediction model are constructed. The results show that there is a significant correlation between sunshine and precipitation suitabilities and relative meteorological output. The influence weights about sunshine and precipitation suitabilities are 0.460 and 0.428, respectively. Due to sufficient heat resources, the temperature suitability has a small influence on meteorological output (0.112). The correlation coefficient of the composite index of annual agricultural climate status and relative meteorological output based on climate suitability is 0.411, which indicates that the index can better characterize the comprehensive effect of climatic conditions on yield formation. Prediction model of composite index of annual agricultural climate is established by large-scale predictors such as

^{*} 江苏省气象局科研基金(KM201707)和公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306035)共同资助

2018 年 1 月 21 日收稿; 2018 年 7 月 24 日收修定稿

第一作者: 徐敏, 主要从事农业气象研究. Email: amin0506@163.com

通信作者: 吴洪颜, 主要从事应用气象领域科研、业务和服务工作. Email: jsqx_zqzb@126.com

atmospheric circulation characteristics and Pacific SST using optimal correlation and stepwise regression. Through historic matching and trying test, the effect of prediction model is ideal and can be put into operation. The prediction results would provide scientific basis for the analysis and prediction of rice yield.

Key words: rice, climatic suitability, annual agricultural climate status

引言

农业气候年景是指在农作物生长发育和产量形成期间影响最终粮食产量的综合气候条件,年景好坏不仅关系产量的高低,而且对品质优劣也具有影响。水稻是江苏省第一大粮食作物,常年种植面积为220万 hm^2 ,占全省粮食面积的40%,单产稳居全国第一,总产占全省粮食产量的60%。在全球气候变暖背景下,农业气象灾害趋频趋强,据统计分析:20世纪90年代以来,江淮流域水稻高温热害发生面积在扩大,强度在增强(谢志清等,2013);进入21世纪,江苏水稻障碍型低温冷害强度显著增强,且发生几率高(徐敏等,2015);同时随着气候变暖,水稻病虫害的发生面积也在扩大、危害程度也在加剧(李伟君等,2010)。据灾情记录,2013年江苏水稻在关键发育期遭遇罕见的高温热害,强度为1961年以来历史同期第一,严重影响水稻穗粒数和结实率,减产3.4亿斤(1斤=0.5kg);2014年8—9月江苏全省出现的持续阴雨寡照天气,使得作物生育进程延缓,加重了水稻气象型病害的发生,减产0.4亿斤;2016年梅雨季极端强降水导致省内不少农田被淹,水稻没顶,损失严重。因此,开展客观、定量的水稻年景预测已经迫在眉睫。

农业气候年景预测方法主要有两大类(汪铎和张谭,1989;李翠金和马巧英,1998;孙家明和黄朝迎,2005):一是通过气候背景分析,建立作物年景的概念模型;二是利用干旱、洪涝等气候异常指数建立统计预测模型。前者是基于大气环流背景进行预测,后者是基于气象条件影响指数进行预测,为了将两种方法进行有效结合,本文以江苏稻区为研究范围,首先通过改进适宜度模型参数,将旬尺度适宜度提升为日尺度,更精细地刻画出短期天气变化对作物生长发育的影响;其次是利用适宜度与气象产量的相关性,确定光温水适宜度的权重,建立年景综合指数;最后利用大气环流特征量与太平洋海温建立年景综合指数的预测模型,以此定量预测水稻的农业气候年景,可为产量分析预测提供科学依据。农

业气候年景预测对政府决策部门制定宏观调控政策和趋利避害稳定粮食生产具有重要意义。

1 数据资料与研究方法

1.1 数据资料

(1)生育期观测资料:来自江苏19个农业气象观测站,1984—2016年水稻逐年生育期观测资料,具体指:播种期、出苗期、返青期、分蘖期、拔节期、孕穗期、抽穗期、成熟期的普通观测期,用于确定水稻各生育期的平均发育期时段;(2)气象观测资料:来自江苏70个气象观测站,1961—2017年逐日平均气温、最高气温、最低气温、降水量、日照时数、日照百分率,用于计算温度适宜度、降水适宜度和日照适宜度;(3)水稻产量资料:来自江苏省统计局,1961—2016年全省水稻逐年单产。(4)大气环流指数:来自国家气候中心最新的88项环流指数包括副热带高压指数、极涡指数、经纬向环流指数、东亚槽指数等,用于建立基于环流指数的农业气候年景预测模型;(5)太平洋海温资料:来自美国国家大气海洋管理局的海温再分析资料(<https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/tables/sst.html>),海区范围是(10°S~50°N,120°E~80°W),水平分辨率 $1^\circ \times 1^\circ$,取1961—2017年月平均值用于建立基于海温的农业气候年景预测模型。

1.2 研究方法

1.2.1 气候适宜度模型

已有研究表明(马树庆,1994):利用模糊数学原理,通过 β 函数能较好地反映出作物生长与温度的非线性关系,即气温在最适温度之上和最适温度之下的反应不同,其数值范围在0~1,该函数具有普适性。温度适宜度算法如下:

$$S_T = [(T - T_1)(T_2 - T)^B] / [(T_0 - T_1)(T_2 - T_0)^B], (T_1 < T < T_2) \quad (1)$$

$$B = (T_2 - T_0) / (T_0 - T_1) \quad (2)$$

式中, S_T 表示温度为 T 时的适宜度; B 为温度参数

的函数; T_0 是生长发育的最适宜温度, 随着时间的变化最适宜发育温度也在变化(单位: $^{\circ}\text{C}$); T_1 和 T_2 分别为作物发育的生理下限温度和上限温度(单位: $^{\circ}\text{C}$), 当 $T \leq T_1$ 或 $T \geq T_2$ 时, 停止发育, 即 $S_T = 0$ 。

研究表明(赵峰等, 2003; 赖纯佳等, 2009): 作物在生长过程中, 日照时数达到可照时数的 70% (日照百分率) 是临界点, 当日照时数超过该临界点, 作物对光照的反应达到适宜状态, 适宜度值为 1; 否则光照适宜度随日照时数的增加呈现 e 指数增加。日照适宜度算法如下:

$$S_s = \begin{cases} e^{-[\frac{S-S_0}{b}]^2} & S < S_0 \\ 1 & S \geq S_0 \end{cases} \quad (3)$$

式中, S_s 为日照时数适宜度; S 为实际日照时数(单位: h); S_0 为日照百分比 70% 的日照时数(单位: h); b 为经验常数, 随着发育期的变化而变化。

降水是作物水分和土壤水分的主要来源, 降水

对作物生长的满足程度由降水的收入和支出比表示, 收入主要是自然降水和人工灌溉, 支出主要是用来满足作物自身的生理和生态需水的蒸散。在不考虑人工灌溉的条件下, 降水适宜度算法如下:

$$S_p = \begin{cases} P/P_0 & P < P_0 \\ P_0/P & P \geq P_0 \end{cases} \quad (4)$$

式中, S_p 为旬降水适宜度, P_0 为作物旬生理需水量(单位: mm), P 为旬降水量(单位: mm)。

1.2.2 气候适宜度模型参数的改进

依据研究成果(毛留喜和魏丽, 2015; 谭孟祥等, 2016; 黄维等, 2017), 并结合江苏地区水稻生长实际情况, 收集整理气候适宜度模型中的指标和参数值(表 1), 可见水稻某个生育阶段所对应的作物生长气象指标或参数是固定值, 在不同发育期之间存在“跳跃”现象, 这不符合作物生长发育规律, 因为作物生长发育对气象条件的响应应该是连续变化的。为了解决这一问题, 首先利用近 30 年的一季稻生育期资料, 确定播种—苗期、返青期、分蘖期、拔节—孕

表 1 水稻气候适宜度模型中的参数

Table 1 Parameters of rice climatic suitability model

生育期	$T_1/^{\circ}\text{C}$	$T_0/^{\circ}\text{C}$	$T_2/^{\circ}\text{C}$	P_0/mm	S_0/h	b
播种—苗期	10	20	30	38	9.53	5.14
返青期	15	25	37	38	9.53	5.14
分蘖期	17	27	38	45	9.35	5.04
拔节—孕穗期	18	28	40	66	8.95	4.83
抽穗—开花期	20	30	35	64	8.35	4.5
灌浆成熟期	15	22	32	29	7.61	4.1

注: T_1 为下限温度, T_0 为适宜温度, T_2 为上限温度; P_0 为作物生理需水量; S_0 为日照百分比 70% 的日照时数; b 为经验常数; 这些参数随发育期的变化而变化。

Note: T_1 : lower temperature; T_0 : suitable; T_2 : ceiling temperature; P_0 : plant physiological water requirements; S_0 : sunshine hours when the percentage of sunshine is 70%; b : experience constant. These parameters vary with the period of development.

穗期、孕穗—抽穗开花期、灌浆成熟期的平均时间段, 分别为 5 月下旬至 6 月上旬、6 月中旬、6 月下旬至 7 月中旬、7 月下旬至 8 月上旬、8 月中旬至 9 月上旬、9 月中旬至 10 月下旬, 然后通过多项式拟合技术, 将温度指标和 b 参数拟合到了每一天, 建立了动态变化曲线(图 1), 上限温度、适宜温度、下限温度和参数 b 的拟合方程建式(5)~式(8)。

$$T_2 = 10^{-5} X^3 - 0.0042 X^2 + 0.4026 X + 27.768 \quad (5)$$

$$T_0 = 7 \times 10^{-8} X^4 - 2 \times 10^{-5} X^3 + 0.0003 X^2 + 0.1952 X + 18.915 \quad (6)$$

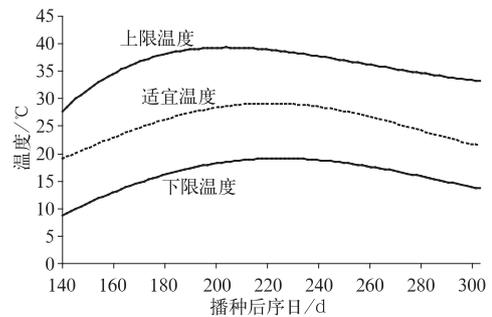


图 1 江苏省水稻全生育期内“三基点”温度变化曲线

Fig. 1 Temperature curve for three fundamental points during the whole period of rice production in Jiangsu Province

$$T_1 = 3 \times 10^{-8} X^4 - 7 \times 10^{-6} X^3 - 0.0009 X^2 + 0.2306 X + 8.587 \quad (7)$$

$$b = 2 \times 10^{-7} X^3 - 9 \times 10^{-5} X^2 + 0.0023 X + 5.1233 \quad (8)$$

1.2.3 最优化方法

由于农业气候年景预测属于长期预测,因此依据气候学预测理论,必须利用大尺度因子进行建模,为此文中利用大气环流指数和太平洋海温进行年景预测模型的构建,为使建立的模型具有较好的稳定性和可靠性且具备一定的准确率,文中采用最优化技术对大尺度预报因子进行了处理,详见徐敏等(2017;2016a)的处理方法。

2 结果与分析

2.1 气候适宜度与相对气象产量的相关性

影响粮食产量的因素很多,其中社会经济生产水平和气象条件是影响产量波动的最主要因素,因此为了揭示气象条件对水稻产量的影响,通过 5 年滑动平均将其分离成趋势产量和气象产量,并为了消除历年社会经济生产水平对气象产量的影响,使得年与年之间的气象产量具有可比性,计算气象产量与趋势产量的比值,即相对气象产量。从 1961—2014 年水稻相对气象产量的年际变化来看(图 2),20 世纪 80 年代中期之前的相对气象产量年际波动明显大于 80 年代中期之后,相对气象产量极端最小值和最大值,分别出现在 1962 年(-11.3%)和 1978 年(9.9%),进入 21 世纪,相对气象产量变化幅度明显减小,尤其是 2007 年以来,相对气象产量

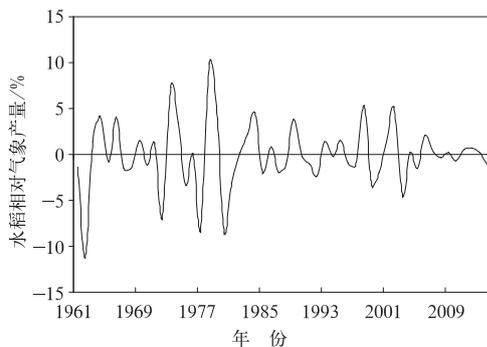


图 2 1961—2014 年江苏省水稻相对气象产量

Fig. 2 Rice relative meteorological output in Jiangsu Province from 1961 to 2014

均在-1%~1%。相对气象产量变幅的显著减小,可能是由于随着农业科技水平的提升和农业生产投入的增加,农业生产对不利气候条件的脆弱性下降所致。

利用式(1)~式(4),并将改进后的参数代入,分别计算出水稻播种—灌浆成熟期逐日的温度适宜度、日照适宜度,考虑到降水对水稻影响的特殊性,仍采用旬降水量进行计算。1961—2016 年,温度适宜度、日照适宜度和降水适宜度的多年平均分别为 0.80、0.61 和 0.41,说明温度适宜度最大、降水适宜度最小,这主要是因为在水稻的生长过程中,江苏 $\geq 10^\circ\text{C}$ 的活动积温不仅可以满足其热量需求而且比较充裕(徐敏等,2016b),江苏水稻生长季是处于 5—10 月,江苏省 6 月是梅雨季,7—8 月易出现暴雨,降水强度和范围不均匀性强,因此降水适宜度明显小于温度适宜度。从年际变化来看(图 3),随着气候变暖,2000 年以来温度适宜度总体呈上升趋势;日照适宜度呈现出明显的下降趋势 $[-0.02 \cdot (10 \text{ a})^{-1}]$,这主要是由于日照时数近 50 年来处于下降趋势,并且整个江淮流域夏半年的日照时数都表现出显著的下降趋势(曹琦萍等,2014),日照时数的下降可能与气溶胶增加有关;降水适宜度存在年际波动,但没有明显的变化趋势。

为了找寻气候适宜度与相对气象产量之间的相关性,计算了 1961—2014 年水稻全生育期内温度适宜度、日照适宜度、降水适宜度与相对气象产量的相关系数,分别为 0.120、0.357、-0.332,由此可见,日照适宜度与相对气象产量之间存在显著的正相

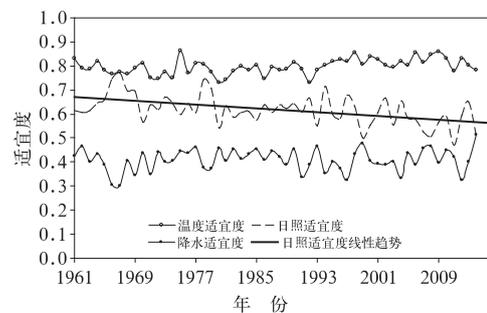


图 3 1961—2014 年江苏省水稻全生育期内温度、日照、降水的气候适宜度

Fig. 3 Climatic suitabilities of temperature, sunshine and precipitation during the whole period of rice production in Jiangsu Province from 1961 to 2014

关,相关系数通过了 0.01 的显著性水平检验,说明日照适宜性越强,相对气象产量越高;降水适宜度与相对气象产量之间存在反相关,因为降水过多易导致水稻被淹,特别是梅雨季节,若强降水频发易致灾,在产量形成关键期,若遇持续阴雨天气,会影响生育进程和产量结构;由于水稻生育期内热量资源充

足,所以温度适宜度与相对气象产量的相关性较弱。为了使得气候适宜度与相对气象产量的时间变化以及变幅具有可比性,将两者均进行了归一化处理,由图 4 可见,日照适宜度与相对气象产量的波动特征总体一致,而且 2000 年以前两者变幅也较为相近;降水适宜度与相对气象产量的波动特征总体相反。

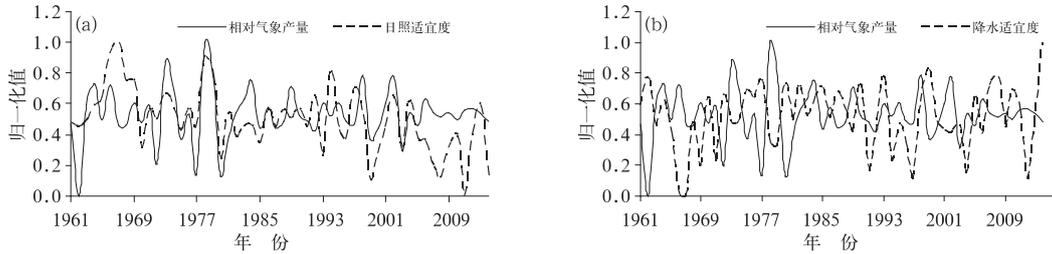


图 4 1961—2014 年江苏省归一化后的水稻相对气象产量与日照适宜度(a)和降水适宜度(b)的年际变化

Fig. 4 Interannual variability of normalized rice relative meteorological output and normalized climatic suitabilities of sunshine (a) and precipitation (b) in Jiangsu Province from 1961 to 2014

2.2 基于气候适宜度的水稻年景综合指数的构建

气候适宜度将温度、光照、降水等气候要素对作物生长发育、产量形成的影响程度进行了量化,并且以上分析结果也证实了气候适宜度与相对气象产量之间存在较好的相关性,说明利用气候适宜度建立年景综合指数是可行的。具体构建公式如下:

$$Z = \frac{r_1}{r_1 + r_2 + |r_3|} T + \frac{r_2}{r_1 + r_2 + |r_3|} S - \frac{|r_3|}{r_1 + r_2 + |r_3|} P \quad (9)$$

式中, Z 是历年水稻农业气候年景综合指数; r_1, r_2, r_3 分别为温度适宜度、日照适宜度、降水适宜度与相对气象产量的相关系数, $\frac{r_1}{r_1 + r_2 + |r_3|}$, $\frac{r_2}{r_1 + r_2 + |r_3|}$, $\frac{|r_3|}{r_1 + r_2 + |r_3|}$ 分别是温度、日照时数、降水量对相对气象产量的影响权重,分别为 0.112, 0.460, 0.428; T, S, P 分别为归一化后的历年温度适宜度、日照适宜度和降水适宜度。

利用式(9)计算了 1961—2014 年逐年水稻年景综合指数,并与逐年相对气象产量进行对比(图 5),分析发现两者的年际波动特征总体一致,近 54 年来年景综合指数与相对气象产量的相关系数达 0.411,

通过了 0.002 的显著性水平检验,说明通过年景综合指数来预测农业气候年景是可行的。由于年景综合指数与相对气象产量之间并不是完全一一对应,为了使预测出的年景综合指数具有更好的指示意义,按照世界气象组织推荐的百分位数法确定农业气候年景的阈值,将 1961—2014 年的相对气象产量以百分位法计算 20% 和 75% 对应的百分位数,分别是 -2.0% (对应归一化值 0.43)、1.5% (对应归一化值 0.60),相对气象产量低于 -2.0% 为歉年,高于 1.5% 为丰年,介于两者之间为平年,年景综合指数 20% 和 75% 对应的百分位数分别是 -0.06 和 0.15。

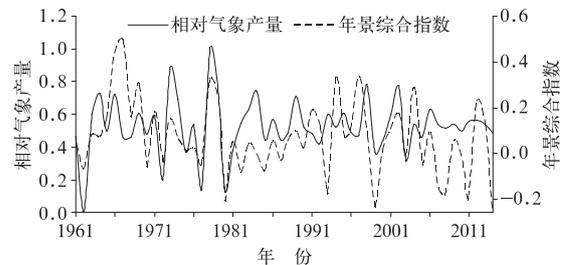


图 5 1961—2014 年江苏省水稻年景综合指数与相对气象产量的年际变化

Fig. 5 Interannual variability of normalized rice relative meteorological output and comprehensive index of rice in Jiangsu Province from 1961 to 2014

2.3 年景综合指数预测模型的构建

江苏位于长江、淮河下游,属于中纬度东亚季风气候,大气环流在不同纬度、海陆之间进行水汽和能量的交换与输送,从而影响着天气、气候状况。目前,表征 500 hPa 大气环流变化特征的物理量共有 88 个,其中对江苏具有重要影响的物理量主要有副热带高压、极涡和经纬向环流等(江苏省气象局,2017),其不同区域的面积、强度等变化会对天气气候产生不同的影响,并且由于大气环流特征量属于大尺度天气系统,对局地气候的影响存在滞后性,因此存在可预报性。江苏水稻平均播种期是从 5 月开始,因此年景预测时间可定在 4 月,充分利用大气环

流对局地气候影响的滞后性,在寻找年景综合指数的高相关环流预报因子时,选取大气环流特征量的时间段是从前一年 1 月开始至当年 3 月结束。

通过最优化方法进行预报因子的寻找,即对各大气环流特征量进行膨化处理,并通过相关分析、逐步回归以及稳定性和独立性检验,筛选出对年景综合指数预报性最强的因子。基于大气环流特征量的年景综合指数预测模型如下:

$$Z = 0.27C_1 + 0.96C_2 - 0.16C_3 + 1.1C_4 - 0.52C_5 - 0.29C_6 - 1.37 \quad (10)$$

式中, Z 为年景综合指数, C_1, \dots, C_6 分别为 500 hPa 大气环流预报因子,具体各预报因子计算方法见表 2。

表 2 大气环流特征量预报因子

Table 2 Characteristic predictors of atmospheric circulation

预报因子	膨化公式	大气环流特征量	特征量所处时间段
C_1	$(h_1 - 7.9 /18 + 0.5)^{-3}$	北非副高面积指数 (20°W~60°E)	前一年 5 月
C_2	$(h_2 - 17.3 /18 + 0.5)^{-1.2}$	大西洋副高强度指数 (25°~55°W)	前一年 9 月
C_3	$(h_3 - 26 /2 + 0.5)^{-3}$	北非副高脊线 (5°~60°E)	前一年 1—2 月
C_4	$(h_4 - 155.4 /23.4 + 0.5)^{2.5}$	亚洲区极涡面积指数 (1 区 60°~150°E)	当年 1—2 月
C_5	$(h_5 - 32.3 /7.8 + 0.5)^3$	太平洋区极涡强度指数 (2 区 150°E~120°W)	前一年 10 月
C_6	$(h_6 - 150 /30.6 + 0.5)^{-2.5}$	欧亚纬向环流指数 (0°~150°E)	当年 2—3 月

注: h_1, \dots, h_6 分别对应不同的大气环流特征量。

Note: h_1, \dots, h_6 represent different atmospheric circulation indexes, respectively.

已有研究表明(彭加毅和孙照渤,2001;顾薇,2016):赤道东太平洋海温异常不仅对东亚大气环流春季季节变化有影响,而且此影响可持续到夏季;当太平洋海温冷、暖不同时,海温的分布会呈现出不同的特征,从而对东亚副热带大气产生不同的影响,最终导致我国东部汛期降水出现异常分布。由此可见,太平洋海温对年景综合指数同样存在可预报性。

由于太平洋海温是一个场,首先对每个海温格点进行相关性普查,为了确保因子之间的独立性,将成片的且通过显著性水平检验的海温格点进行平均,将其作为一个预报因子,然后将最终筛选出的多个高相关预报因子进行逐步回归建立预测模型。基于太平洋海温的年景综合指数预测模型如下:

$$Z = 0.21S_1 - 0.78S_2 - 0.36S_3 - 0.31S_4 + 0.42S_5 + 0.59 \quad (11)$$

式中, Z 为年景综合指数, S_1, \dots, S_5 为太平洋海温预报因子,各预报因子的计算方法见表 3。

表 3 太平洋海温预报因子

Table 3 Pacific Ocean surface temperature predictors

预报因子	膨化公式	海温影响时段	高相关海区格点数
S_1	$(y_1 - 266.5 /19 + 0.5)^{-3.7}$	前一年 4 月	6
S_2	$(y_2 - 123.1 /33.4 + 0.5)^{-1.4}$	前一年 6 月	7
S_3	$(y_3 - 273.8 /14.5 + 0.5)^{-2.8}$	前一年 6 月	4
S_4	$(y_4 - 275.9 /13.4 + 0.5)^{4.1}$	前一年 12 月	5
S_5	$(y_5 - 188.8 /17.5 + 0.5)^{-3.4}$	前一年 1 月	6

注: y_1, \dots, y_5 分别对应太平洋不同海区内海温格点的平均值。

Note: y_1, \dots, y_5 represent the average value of sea temperature gridpoint in different sea area in Pacific.

2.4 年景综合指数预测模型的检验

利用建立的两种年景综合指数预测模型式(10)

和(11)模拟 1985—2014 年的年景综合指数,并与实际的年景综合指数进行对比。从图 6 可见,无论是海温模型还是环流模型,模拟的年景综合指数与实际年景综合指数的年际变化一致,波动幅度大致呈现准 10 年的振荡期,即 20 世纪 80 年代中后期至 90 年代初期为波动变化较小期,90 年代初期至 21 世纪初为波动变化较大期,21 世纪 00 年代又进入缓和期,21 世纪 10 年代开始又转为波动较大期。两种模型都较为准确地模拟出了年景综合指数的数值,环流模型和海温模型的模拟值与实际值的相关系数分别高达 0.944 和 0.89,通过了 0.001 的显著性水平检验,30 年的残差平方和分别只有 8.2、16.0,其中对于极端年份,环流模型的效果更好一些。由此可见,两种预测模型的模拟效果好。

为了进一步检验模型的预测性能,利用 2015—2016 年的资料进行了试报检验,将环流和海温预报因子分别代入两种预测模型,环流模型预测出的 2015—2016 年年景综合指数分别是 0.059(平年)、-0.049(平年),海温模型预测出的 2015—2016 年年景综合指数分别是 0.027(平年)、-0.129(歉年),2015—2016 年的实际年景综合指数分别是 0.005(平年)、-0.004(平年)。由此可见,两种模型均准确预报出了 2015 年的年景等级,2016 年海温模型虽然准确预测出了年景综合指数的符号,但数值有偏差,因此在业务应用中,需要综合考虑两种预测模型的预测结果。

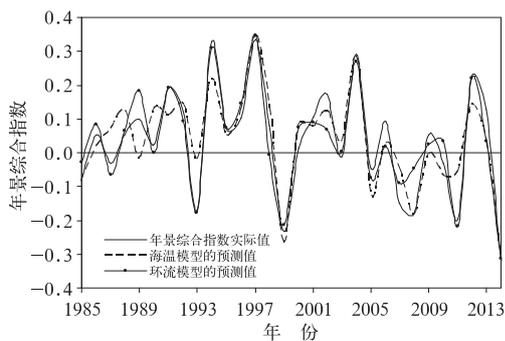


图 6 1985—2014 年江苏省基于气候适宜度的两种水稻年景综合指数预测模型的拟合对比

Fig. 6 Fitting comparison of the two prediction models for sea surface temperature and atmospheric circulation predictors based on climate suitability in Jiangsu Province from 1985 to 2014

3 结论与讨论

本文基于气候适宜度,综合考虑温度、日照、降水等气候要素对水稻产量的影响,建立了水稻年景综合指数,根据中长期气候预测原理,利用大气环流指数特征量和太平洋海温对局地气候影响的滞后性,建立了年景综合指数的预测模型。得出以下结论:

(1) 改进气候适宜度模型的参数,使得温度、日照、降水等气候要素对水稻的生长发育和产量形成的影响程度量化更准确,1961—2016 年,在江苏水稻全生育期内,光温水三要素的适宜性强度排序为:温度适宜度>日照适宜度>降水适宜度;在气候变暖的背景下,自 2000 年以来温度适宜度出现了上升趋势;近 56 年日照适宜度出现了显著下降趋势,线性下降速率达 $0.02 \cdot (10 \text{ a})^{-1}$;日照适宜度和降水适宜度与相对气象产量之间存在显著的相关关系。

(2) 通过温度适宜度、日照适宜度和降水适宜度与相对气象产量之间的相关性大小,确定各自的影响权重,分别为 0.112、0.460 和 0.428,在此基础上,构建了水稻年景综合指数,该指数对产量具有直接的对应关系,因此能较好表征气候条件对产量形成的综合影响。

(3) 基于大气环流特征量和太平洋海温,分别建立了年景综合指数的预测模型,经过历史拟合和试报检验,模型稳定、预测效果好,可以在水稻播种前(即 4 月)开展当年的水稻年景预测,预测结果可为产量分析预测和政府决策提供科学依据。

虽然构建的预测模型能够较准确地预测出年景综合指数,但仍存在较大的不确定性,因为年景综合指数与相对气象产量之间并非完全一一对应。在确定年景综合指数中温度、日照、降水的影响权重时,是通过各要素全生育期的适宜度与相对气象产量的相关系数来确定的,但不同的生育阶段,气象条件对产量结构的影响权重是不同的,因此,可考虑不同生育阶段对年景综合指数的影响,提高年景综合指数与相对气象产量之间的对应关系,从而减小水稻气候年景预测的不确定性。随着社会生产力的不断发展,农技措施在不断提升,农业对气候条件的脆弱性有所减小,另外,作物生长发育及最终产量的形成与周围生态环境之间的关系错综复杂,受生态环境因子组合变化的影响很大,一个因子或几个因子对作

物生长的正效应可能被其他因子加强,也有可能被削弱,甚至被完全抵消,这两方面均易导致年景预测的不确定性。

参考文献

- 曹琦萍,王传辉,周建平,等,2014.江淮流域夏半年日照时数气候特征及趋势分析[J].气象,40(5):549-554.
- 顾薇,2016.夏季热带西太平洋海温对厄尔尼诺发展阶段我国东部汛期降水的影响分析[J].气象,42(5):548-556.
- 黄维,杨沈斌,陈德,等,2017.苏皖鄂地区一季稻气候适宜度模型的构建[J].江苏农业科学,45(2):232-238.
- 江苏省气象局,2017.江苏省天气预报技术手册[M].北京:气象出版社:22-52.
- 赖纯佳,千怀遂,段海来,等,2009.淮河流域双季稻气候适宜度及其变化趋势[J].生态学杂志,28(11):2339-2346.
- 李翠金,马巧英,1998.长江中下游地区旱涝气候年景和评定方法的研究[J].灾害学,13(1):72-77.
- 李祎君,王春乙,赵蓓,等,2010.气候变化对中国农业气象灾害与病虫害的影响[J].农业工程学报,26(S1):263-271.
- 马树庆,1994.吉林省农业气候研究[M].北京:气象出版社:33.
- 毛留喜,魏丽,2015.大宗作物气象服务手册[M].北京:气象出版社:23.
- 彭加毅,孙照渤,2001.春季赤道东太平洋海温异常对东亚大气环流春夏季节演变的影响[J].热带气象学报,17(4):398-404.
- 孙家明,黄朝迎,2005.中国农业气候年景的评估及预测[J].应用气象学报,16(S1):111-115.
- 谭孟祥,景元书,曹海宁,2016.江苏省一季稻生长季气候适宜度及其变化趋势分析[J].江苏农业科学,44(1):349-353.
- 汪铎,张镡,1989.“环流-天气气候-农业年景”系统模式探讨[J].大气科学,13(2):178-184.
- 谢志清,曾燕,杜银,等,2013.江淮流域水稻高温热害灾损变化及应对策略[J].气象,39(6):774-781.
- 徐敏,徐经纬,高苹,等,2015.江苏水稻障碍型冷害时空变化特征及敏感性分析[J].气象,41(11):1367-1373.
- 徐敏,徐经纬,高苹,等,2016a.基于海温和大气环流特征量的农业气候年景预测[J].江苏农业科学,44(9):435-438,439.
- 徐敏,徐经纬,徐乐,等,2016b.水稻农业气候资源变化特征及影响分析——以江苏稻区为例[J].中国农学通报,32(18):142-150.
- 徐敏,徐经纬,高苹,等,2017.基于大尺度因子的江苏稻区稻瘟病气象等级长期预测[J].植物保护,43(4):36-41.
- 赵峰,千怀遂,焦士兴,2003.农作物气候适宜度模型研究——以河南省冬小麦为例[J].资源科学,25(6):77-82.