高苹,徐敏,徐经纬,等. 2015. 基于大尺度海温因子的江苏省水稻适宜移栽期预报模型研究. 气象,41(12):1538-1544.

基于大尺度海温因子的江苏省水稻适宜移栽期预报模型研究*

高 苹[1] 徐 敏[1] 徐经纬[2] 于庚康[1] 单 婵[1]

1 江苏省气象局,南京 210008

2 南京信息工程大学大气科学学院,南京 210044

提 要: 利用江苏有记录以来的农业气象资料,分析发现江苏水稻适宜移栽期与播栽期≥10℃有效积温间存在极显著的正相关关系,因此,可通过有效积温确定适宜移栽期。根据海气相互作用原理,基于遥相关方法,寻找有效积温的海温响应相关区,应用最优相关技术和空间拓扑分析法,筛选出高相关海温预报因子,并通过稳定性和独立性检验,确保海温预报因子的可靠性,最终建立水稻适宜移栽期的长期预报模型,经过历史拟合和试报检验,预报模型效果理想,至少可提前半个月预报出水稻适宜移栽的日期,预报结果对农业生产具有重要的实用价值。

关键词: 水稻, 适宜移栽期, 海温, 预报模型

中图分类号: P456 **文献标志码:** A **doi:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2015.12.012

Study on the Prediction Model of Suitable Transplanting Date of Rice in Jiangsu Based on Large-Scale Factors of Sea Surface Temperature

GAO Ping[1] XU Min[1] XU Jingwei[2] YU Gengkang[1] SHAN Chan[1]

1 Jiangsu Meteorological Bureau, Nanjing 210008

2 College of Atmospheric Science, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

Abstract: By using the agrometeorological data in Jiangsu Province, and the statistical analysis method, this research reveals that there is a significant positive correlation between the suitable transplanting date of rice and the effective accumulated temperature larger than 10 degrees celsius during the period of seeding and transplanting. This means that the suitable transplanting date of rice could be determined by the effective accumulated temperature. According to the principle of air-sea interaction, the concept of teleconnection and through seeking for the forecast factors of SST for the effective accumulated temperature, the high correlated SST predictors are selected by using the optimal relevant technique and spatial topologic analysis method. Then, the stability and independence test is carried out so as to ensure the reliability of the SST predictors. Moreover, the long-term prediction model of the suitable transplanting date of rice is established. Furthermore, through the historical fitting and forecast verification, the result of the prediction model is found reasonable. The suitable transplanting date can be predicted by the model at least two weeks in advance. So, the prediction results could give some guidance for agriculture.

Key words: rice, suitable transplanting date, sea surface temperature (SST), prediction model

---

* 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306035)和江苏省气象局青年科研基金项目(Q201517)共同资助

2015 年 4 月 30 日收稿; 2015 年 6 月 9 日收修定稿

第一作者:高苹,主要从事应用气象领域科研、业务和服务工作. Email:gaoping5268@126.com

引　言

水稻是江苏省第一大粮食作物，常年种植面积为 220 万 hm^2，种植面积和稻谷产量分别占全省粮食面积和总产量的 40%和 60%，分别约占全国水稻种植面积和水稻总产量的 7%和 10%，单产稳居全国第一。移栽是水稻种植的关键环节，水稻移栽秧龄长短对移栽后秧苗的生长发育和产量都有较大的影响，以适宜的叶龄移栽，易早生快发，形成有效穗多、产量高。因此，合理地安排水稻移栽日期是保证和提高水稻产量的基础。

影响水稻移栽的气象因子主要有温度、降水和日照，尤以温度的影响最大。联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第五次评估报告指出，全球地表持续升温，1880—2012 年，全球平均地表温度升高了 0.85℃(变化范围：0.65～1.06℃)，1951—2012 年全球地表温度的平均升温速率[0.12 ℃·$(10\ a)^{-1}$]几乎是 1880 年以来升温速率的两倍，极端气候事件频率增加(IPCC，2013)。近 50 年，江苏年平均气温升高了 1.38℃(江苏省气象局，2009)。在气候变暖的背景下，热量资源、种植制度和作物生育期等都受到影响(杨晓光等，2010；郭建平，2010；姜丽霞等，2015；曾凯等，2011)，1981—2007 年中国喜温作物生长期内≥10℃积温比 1961—1980 年增加了 125.9℃·d(杨晓光等，2011)。有效积温能反映水稻生育期间对热量的要求(薛大伟等，2004)，可用有效积温对水稻生育期进行预测(黄中雄等，1999)，由于水稻生育期间的有效积温年际差异较大(杨海光，2003)，所以若按照传统的水稻移栽期下限进行移栽，可能会造成热量资源的浪费以及秧龄过大，关于水稻适宜移栽期的预报研究鲜见报道。

已有研究表明，海温的变化对气温的影响非常重要，它是影响气候预测的关键因子(汤志成等，1996；贾小龙等，2011)。因此，根据中长期预报方法，本文以江苏为例，利用最优相关技术和空间拓扑分析(吴长彬等，2010)，筛选出对有效积温影响显著的海温预报因子，建立长期预报模型，并通过有效积温与适宜移栽期间的相关性，最终确定水稻适宜移栽的日期。通过研究，将为适龄移栽提供一定的科学理论依据和技术指导。

1　资料与方法

1.1　资料

农业资料来源于江苏 7 个农业气象观测站有记录以来的水稻移栽期资料(徐州 1986—2010 年、赣榆 1981—2010 年、淮安 1984—2010 年、兴化 1980—2010 年、镇江 1980—2010 年、宜兴 1980—2010 年和昆山 1980—2010 年)。气象资料来自于江苏省气象局以上 7 站 1980—2013 年日平均气温。海温资料来自 1980—2013 年国家气候中心的太平洋(10°S～50°N、120°E～80°W)海表面温度(Sea Surface Temperature，SST)月平均值，水平分辨率 5°×5°(共 286 个格点，按自西向东、自北向南的顺序标号)。

1.2　方法

1.2.1　有效积温的计算方法

水稻的有效积温是指对其生长发育起有效作用的温度累加值，即日平均气温(t_i)与对水稻生长无效的那部分下限温度(b_0)之差的累加值，计算公式如下：

$$T = \sum_{i=1}^{n}(t_i - b_0) \quad 当\ t_i \leqslant b_0, t_i - b_0 = 0 \quad (1)$$

文中统计的是水稻播种至移栽期≥10℃有效积温(以下简称有效积温)，故取 $b_0 = 10$℃，n 为播种至移栽的天数。

1.2.2　水稻适宜移栽期预报模型的建立思路

通过水稻适宜移栽期与有效积温的高相关性建立适宜移栽期的回归方程；然后利用遥相关寻找有效积温的太平洋海温预报因子，由于太平洋海温是一个场，首先对海温场进行相关普查，为了预报模型的可靠性和准确性，避免单相关的偶然性，根据相关分析原理(高苹等，2012)，剔除高相关格点≤3 个的海温区，通过空间拓扑原理(吴长彬等，2010)分析筛选出空间相连格点≥4 个的海区，计算此海区影响时段的海温平均值作为一个海温预报因子，再将所选因子进行最优化普查(高苹等，2012)，挑选出与有效积温相关最显著的海温因子，并进行稳定性和独立性检验(高苹等，2008；周浩等，2011；贾小龙等，2011；朱盛明等，1988)，剔除相关程度前好后差或波动变化大的因子及共线性因子，筛选出相关显著、稳

定且相对独立的因子，建立有效积温的预报方程，最终建立水稻适宜移栽期的预报模型。为了检验预报模型的效果，分别进行拟合检验和试报检验。

2 结果与分析

2.1 水稻适宜移栽期与播栽期有效积温的相关分析

从近 30 年江苏水稻适宜移栽期和有效积温的时间序列来看(图 1)，两者的年际变化基本同步，两者呈现显著的正相关，均通过了 0.001 的显著性水平检验，其中东北部、江淮之间、西南部和东南部的相关系数都在 0.8 以上。北部的移栽期进入 21 世纪后略有推迟，中部较为平稳，南部的移栽期有所提前，尤其是西南部，在 20 世纪 80 和 90 年代则呈现出显著提前的特征，线性趋势为 $-3\ \mathrm{d}\cdot(10\ \mathrm{a})^{-1}$(通过了 0.01 显著性水平检验)，进入 21 世纪后移栽期较为稳定，基本在第 168 天前后。由此可见，利用有效积温进行适宜移栽期的预报是可行的，但区域间存在较大差异，因此需要分区建立水稻移栽期的预报模型。

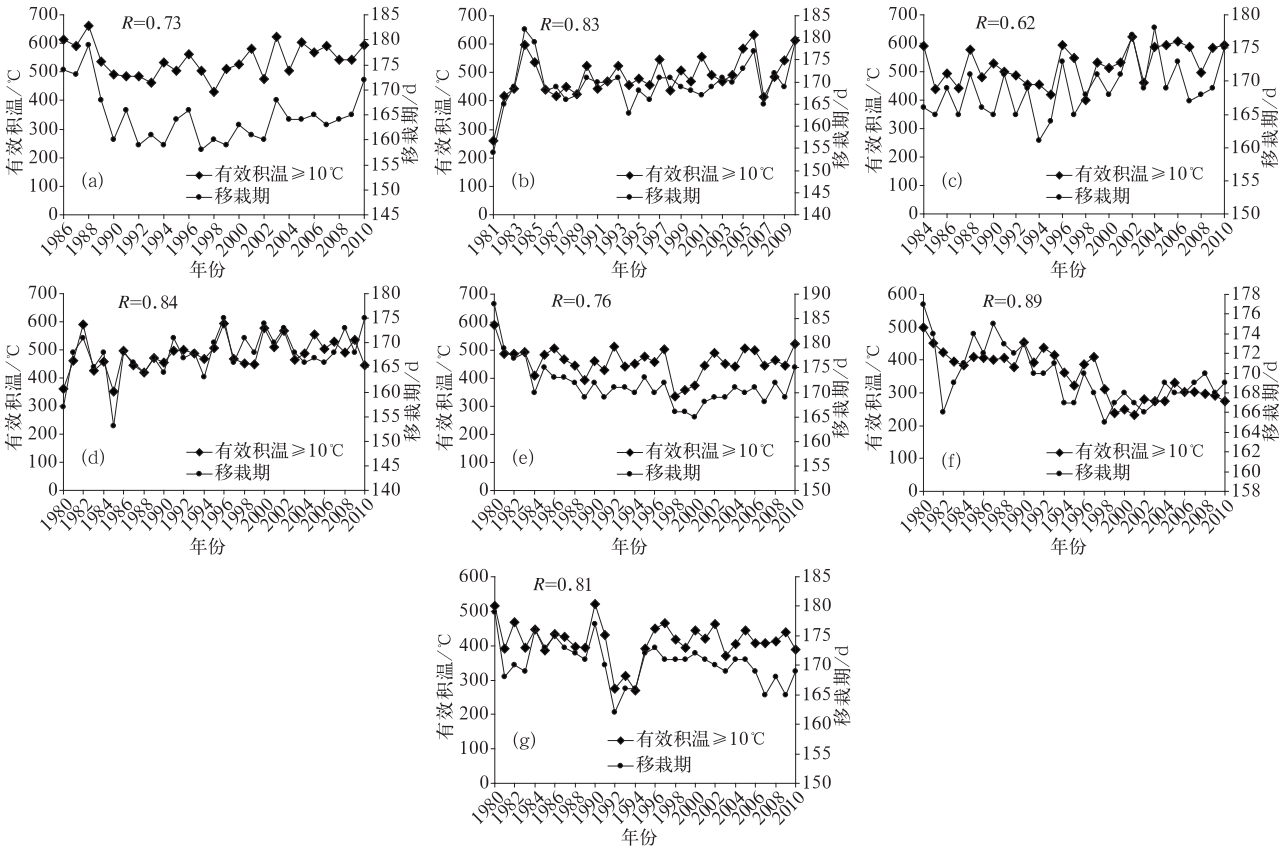

图 1 江苏各区域水稻有记录以来的移栽期和≥10℃有效积温(播种—移栽期)的时间变化曲线

(选取能代表江苏各区域代表站为例，R 为移栽期和有效积温的相关系数，移栽期进行了天数换算，视 1 月 1 日为第一天)

(a)西北部：徐州站，(b) 东北部：赣榆站，(c) 沿淮：淮安站，(d) 江淮之间：兴化站，

(e) 沿江：镇江站，(f) 西南部：宜兴站，(g) 东南部：昆山站

Fig. 1 Temporal variation of the rice paddy planting date and effective accumulated temperature (≥10℃) from rice sowing to paddy planting in Jiangsu since records began in 1980

[R means the correlation coefficient between effective accumulated temperature (≥10℃) and the rice paddy planting stage, the rice paddy planting stage is converted into the number of days]

(a) Northwest: Xuzhou, (b) Northeast: Ganyu, (c) along the Huai River: Huai'an,

(d) between Yangtze River and Huaihe River: Xinghua, (e) along Yangtze Rive: Zhenjiang,

(f) Southwest: Yixing, (g) Southeast: Kunshan

2.2　水稻播栽期有效积温与太平洋海温的相关分析

由于海洋对我国气候的影响不仅存在同期效应，还存在后延效应，有时这种后延效应还相当关键（陈烈庭，1983；Horel et al，1981；董婕等，2000），因此，分别计算了水稻有效积温与上年 1—12 月和当年 1—5 月太平洋海温的相关系数，受篇幅限制，文中以西北部、江淮之间和西南部的高相关系数图为例（图 2），详细分析这三个地区水稻播栽期有效积温与太平洋海温的相关性。西北部水稻有效积温与上年 12 月和当年 1—5 月太平洋海温均存在高相关区（指相关系数≥0.35 或≤－0.35，通过 0.05 显著性水平检验），上年 12 月至当年 2 月，在西太平洋 20°N 以南（以北）存在显著正（负）相关，高相关中心均在 0.45 以上，当年 3 月（图 2a）至当年 4 月，西太平洋的正相关区消失，但负相关区依旧存在，当年 5 月（图 2b），由于是同期相关，所以高相关区域明显增大、相关性增强，显著相关区域集中在三个海区，分别为（10°～15°N、130°～160°E）、（30°～35°N、140°～160°E）和（5°～10°S、80°～160°W），经过最优相关技术和独立性及稳定性检验，当年 1 月和当年 3—5 月的高相关海区可作为西北部有效积温的预报因子，其中当年 3 月的权重最大。对于江淮之间，上年 2 月（图 2c）有效积温和海温的高相关区域位于（10°～20°N、160°E～170°W），相关系数最高值达 0.53，上年 4—8 月，此高相关区域逐步向西移、相关性逐步减弱，从当年 2 月起，在西太平洋地区开始出现负相关区，当年 3—4 月该负相关区逐步扩大、相关性增强，其中 4 月（图 2d）的高相关中心达到－0.42，经过筛选，上年 2、4、7、11 月与当年 4 月的高相关海温区可作为江淮之间有效积温的预报因子，其中上年 2 月和当年 4 月的权重较大。对于西南部，上年 1 月至当年 5 月，相关系数空间分布较为一致，基本上都呈现“西负东正”的特征（西太平洋存在负相关区、东太平洋存在正相关区），其中上年 3 月（图 2e）和当年 4 月（图 2f）的负相关中心分别达到－0.56 和－0.73，正相关中心分别达到 0.47 和 0.63，经过筛选，上年 3 和 8 月、当年 2 和 4 月的高相关海温区可作为西南部有效积温的预报因子。由此可见，对于不同的水稻种植区，其海温影响关键区和影响时段均存在差异。

2.3　基于太平洋海温的水稻适宜移栽期预报模型的建立

首先，通过水稻适宜移栽期与有效积温的高相

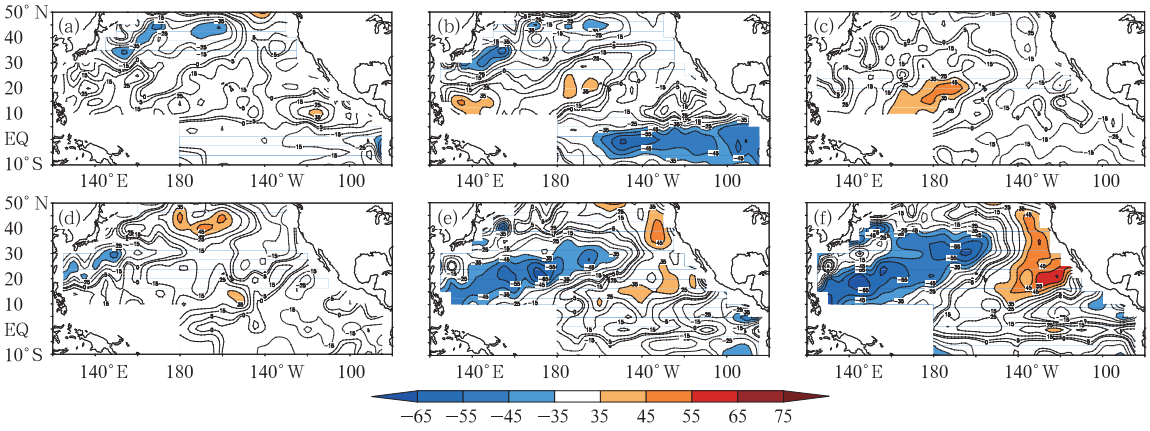

图 2　自有记录以来江苏水稻≥10℃有效积温（播种—移栽期）与太平洋海温的相关系数

（扩大 100 倍，填色区域指相关系数通过了 0.05 显著性水平检验）

（a）西北部当年 3 月，（b）西北部当年 5 月，（c）江淮之间上年 2 月，

（d）江淮之间当年 4 月，（e）西南部上年 3 月，（f）西南部当年 4 月

Fig. 2　Correlation coefficients between effective accumulated temperature (≥10℃) from rice sowing to paddy planting in Jiangsu since records began and northern Pacific SST

(Correlation coefficients have increased by 100 times and the color area has passed the significant test of 0.05)

(a) Northwest, March in this year, (b) northwest, May in this year, (c) between the Yangtze River and the Huaihe River, February in last year, (d) between the Yangtze River and the Huaihe River, April in this year, (e) southwest, March in last year, (f) southwest, April in this year

关性建立一元回归方程(表 1),由于区域间存在差异,所以分区建立了 7 个预报模型;然后利用太平洋海温因子分别建立各区的有效积温预报模型(表 2),受篇幅限制,以西北部为例,将海温进行线性和非线性化处理,具体计算说明见表 3。

2.4 水稻适宜移栽期和有效积温预报模型的效果检验

利用表 2 中的预报模型可由前期海温预报出当年的播栽期有效积温,然后利用表 1 的预报模型通过播栽期有效积温预报出当年的适宜移栽期。为了检验表 1 和表 2 中预报模型的拟合效果,将实际值和模拟值进行了对比(图3),以西北部、江淮之间和西南部为例,可以看出无论是有效积温还是适宜移栽期,模拟值都非常接近实际值,西北部、江淮之间和西南部适宜移栽期的平均相对误差分别是 1.84%、1.86%和 1.37%,有效积温的平均相对误差分别是 1.91%、5.01%和 5.59%,移栽期的模拟偏差主要是在 3 d 以内,所有模型都通过了 0.01 的显著性水平检验,拟合效果好。

利用 2011—2013 年资料进行试报检验,从表 4 可以看出,2011—2013 年各地有效积温预报值与实际值的误差基本上在 10℃以内,误差基本上在 3%

表 1 江苏水稻适宜移栽期与≥10℃有效积温(播种—移栽期)的回归方程

Table 1 Regression equation between the rice suitable paddy planting date (D, unit:d) and effective accumulated temperature (≥10℃; T, unit:℃) from rice sowing to paddy planting in Jiangsu

区域	回归过程
西北部	$D_1=0.068T_1+127.75$
东北部	$D_2=0.059T_2+141.16$
沿淮	$D_3=0.038T_3+148.82$
江淮之间	$D_4=0.059T_4+139.08$
沿江	$D_5=0.067T_5+140.87$
西南部	$D_6=0.028T_6+159.68$
东南部	$D_7=0.046T_7+151.45$

注:D 为移栽日期(单位:d),T 为播种至移栽≥10℃有效积温(单位:℃)

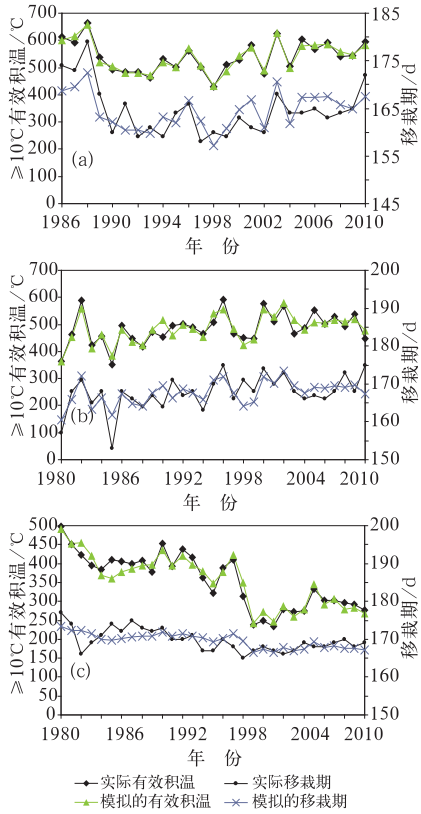

图 3 江苏水稻适宜移栽期和≥10℃有效积温预报模型的拟合检验

(a) 西北部,(b) 江淮之间,(c) 西南部

Fig. 3 Fitting test of the rice suitable paddy planting date and effective accumulated temperature (≥10℃)

(a) Northwest, (b) between Yangtze River and Huaihe River, (c) Southwest

表 2 利用海温因子建立江苏水稻≥10℃有效积温(播种—移栽期)的预报模型

Table 2 The prediction model of effective accumulated temperature (≥10℃) from rice sowing to paddy planting in Jiangsu using the Pacific SST

区域	预报模型
西北部	$T_1=-0.11H_{11}+7.67H_{12}+285.61H_{13}+0.18H_{14}+0.03H_{15}+91.53H_{16}+78.40H_{17}+4.98$
东北部	$T_2=-0.13H_{21}-6.53H_{22}+883.71H_{23}-2.55H_{24}-366.02$
沿淮	$T_3=-22.13H_{31}-27.74H_{32}+160.98H_{33}+421.35$
江淮之间	$T_4=76.97H_{41}+2.95H_{42}-10.53H_{43}-4.33H_{44}-27.26H_{45}+444.42$
沿江	$T_5=10.85H_{51}+7.38H_{52}-5.48H_{53}-57.63H_{54}+464.44$
西南部	$T_6=-45.65H_{61}+15.68H_{62}-41.42H_{63}-32.27H_{64}+1.72H_{65}+52.44H_{66}-64.30H_{67}+479.11$
东南部	$T_7=-58.78H_{71}+41.02H_{72}-2.98H_{73}-126.64H_{74}-12H_{75}+527.34$

注:T 为播种至移栽≥10℃有效积温(单位:℃),H 为经过处理后的海温因子(单位:℃)

以内,其中 2012 年的预报效果最好,误差已经达到 2%以内(东南部除外)。表 5 给出的是移栽期的试报检验结果,绝大部分地区的误差是在 1～2 d,其中 2013 年西北部预报误差偏大,这可能与当年播种期异常偏迟一周有关。

表 3　江苏西北部水稻≥10℃有效积温(播种—移栽期)预报模型中海温因子的计算说明

Table 3　Calculation statement of the SST predictor in the northwest prediction model of effective accumulated temperature (≥10℃) from rice sowing to paddy planting in Jiangsu

线性与非线性化处理函数表达式	高相关海温区与影响月份	R
$H_{11}=(\frac{\lvert SST_1-242.54\rvert}{12.96}+0.5)^{-8.4}$	SST_1 为上年 2 月(20°～55°N、170°°W～180)中 4 个网格点的海温平均值	−0.51
$H_{12}=(\frac{\lvert SST_2-114.91\rvert}{25.67}+0.5)^{3.98}$	SST_2 为当年 1 月(40°～45°N、165°E～160°W)中 21 个网格点的海温平均值	0.59
$H_{13}=(\frac{\lvert SST_3-103.27\rvert}{18.89}+0.5)^{0.17}$	SST_3 为当年 3 月(40°～45°N、165°°W～180)中 8 个网格点的海温平均值	0.48
$H_{14}=(\frac{\lvert SST_4-267.35\rvert}{21.75}+0.5)^{-8.58}$	SST_4 为当年 4 月(0°～5°S、115°～145°W)中 10 个网格点的海温平均值	0.59
$H_{15}=(\frac{\lvert SST_5-60.00\rvert}{26}+0.5)^{-10}$	SST_5 为当年 5 月(45°N、155°～175°W)中 5 个网格点的海温平均值	0.51
$H_{16}=(\frac{\lvert SST_6-200.00\rvert}{21.12}+0.5)^{-.85}$	SST_6 为当年 5 月(30°～35°N、140°～155°E)中 7 个网格点的海温平均值	0.64
$H_{17}=(\frac{\lvert SST_7-289.73\rvert}{9.36}+0.5)^{-0.70}$	SST_7 为当年 5 月(10°～15°N、130°～150°E)中 8 个网格点的海温平均值	0.61

注:R 为 SST 与 H 间的相关系数。

表 4　江苏水稻≥10℃有效积温预报模型的试报检验(预报值/实际值)

Table 4　Check of prediction model of rice effective accumulated temperature (≥10℃) (prediction/observation)

年份	西北部	东北部	沿淮	江淮之间	沿江	西南部	东南部
2011	546/556	492/495	588/600	524/526	450/458	284/264	389/374
2012	527/530	566/563	629/638	533/524	477/484	298/302	439/404
2013	407/427	499/472	511/499	492/485	451/446	240/246	413/419

表 5　水稻适宜移栽期预报模型的试报检验(预报值/实际值)

Table 5　Check of prediction model of rice suitable paddy planting date (prediction/observation)

年份	西北部	东北部	沿淮	江淮之间	沿江	西南部	东南部
2011	6.14/6.14	6.19/6.24	6.19/6.20	6.19/6.19	6.20/6.22	6.17/6.18	6.18/6.16
2012	6.13/6.14	6.22/6.20	6.21/6.18	6.19/6.19	6.21/6.20	6.16/6.17	6.20/6.15
2013	6.5/6.15	6.20/6.18	6.17/6.16	6.17/6.20	6.20/6.19	6.16/6.18	6.19/6.16

3　结论与讨论

(1) 江苏水稻适宜移栽期与≥10℃有效积温(播种—移栽)的关系研究表明,两者间关系为极显著的线性正相关,可利用有效积温建立适宜移栽期的预报模型,考虑到江苏南部跨度大,农业气候存在差异,并且近 30 年不同地区适宜移栽期的变化特征不同,因此分区建立了各地的预报模型。

(2) 根据中长期天气预报原理,海温是非常重要的预报因子,通过≥10℃有效积温与太平洋海温的遥相关分析,发现有效积温与关键海区存在显著的超前相关或同期相关,因此,利用海温预报有效积温是切实可行的。基于最优化相关技术,建立了两者间的非线性关系,提高了相关性,最终建立了基于大尺度海温因子的有效积温预报模型。

(3) 预报模型历史拟合效果好，3年试报结果理想，适宜移栽期的预报误差基本上在1～2 d，至少可提前半个月预测出播种至移栽的有效积温，从而预报出水稻适宜移栽的日期。预报模型可在业务中进行使用，预报结果对水稻种植具有重要的指导意义，可提升农业气象的专业服务能力。

虽然水稻的适宜移栽期除了受气温的直接影响外，还受降水和日照的影响，但在建立预测模型时选择的直接影响因子是温度、间接影响因子是海温，这主要是为了提高预报模型的稳定性和可靠性。然而，水稻的适宜移栽期除了受天气条件影响外，还与品种、水利设施和土壤特性等有关，若能综合考虑这些因素，将能进一步提升预报模型的准确性。因此，对水稻适宜移栽期的预报还需深入研究。

参考文献

陈烈庭. 1983. 太平洋海气相互作用时空变化. 气象学报，41：296-304.

董婕，刘丽敏. 2000. 赤道东太平洋海温与中国温度、降水的关系. 气象，26(2)：25-28.

高苹，武金岗，杨荣明，等. 2008. 江苏省稻纵卷叶螟迁入期虫情指标与西太平洋海温的遥相关及其长期预报模型的研究. 应用生态学报，19(8)：2056-2066.

高苹，张佩，谢小萍，等. 2012. 基于海温和环流特征量的江苏省小麦适播期预测. 气象，38(12)：1572-1578.

郭建平. 2010. 气候变化情景下中国农业气候资源演变趋势. 北京：气象出版社，1-2.

黄中雄，欧钊荣. 1999. 改进的当量积温法做水稻生育期预测. 广西农学报，(2)：44-47.

贾小龙，陈丽娟，龚振淞，等. 2011. 2010年海洋和大气环流异常及对中国气候的影响. 气象，37(4)：446-453.

姜丽霞，陈可心，刘丹，等. 2015. 2013年黑龙江省主汛期降水异常特征及其对作物产量影响的分析. 气象，41(1)：105-112.

江苏气象局. 2009. 江苏省气候图集. 北京：气象出版社，6-7.

汤志成，高苹. 1996. 作物产量预报系统. 中国农业气象，17(2)：49-52.

薛大伟，方茂庭，钱前. 2004. 有效积温在水稻生产中的应用. 中国稻米，10(4)：47-48.

吴长彬，闾国年. 2010. 空间拓扑关系若干问题研究现状的评析. 地球信息科学学报，12(4)：524-531.

杨海光. 2003. 江苏水稻安全生育与产量形成的温光生态特性及其应用的研究. 扬州：扬州大学，7-8.

杨晓光，李勇，代姝玮，等. 2011. 气候变化背景夏中国农业气候资源变化 IX. 中国农业气候资源时空变化特征. 应用生态学报，22(12)：3177-3188.

杨晓光，刘志娟，陈阜. 2010. 全球气候变暖对中国种植制度可能影响 Ⅰ. 气候变暖对中国种植制度北界和粮食产量可能影响的分析. 中国农业科学，43(2)：329-336.

曾凯，周玉，宋忠华. 2011. 气候变暖对江南双季稻灌浆期的影响及其观测规范探讨. 气象，37(4)：468-473.

周浩，程炳岩，罗孳孳. 2011. 重庆春播期间降水特征及其与北太平洋海温的关系. 气象，37(9)：1134-1139.

朱盛明，曲学实. 1988. 数值预报产品统计解释技术的进展. 北京：气象出版社，112-116.

Horel J D, Wallce J M. 1981. Planetary-Scale atmospheric phenomena associated with the southern oscillation. Mon Wea Rev, 109(4)：813-829.

IPCC. 2013. Climate change 2013: The physical science basis. Cambridge: Cambridge University Press, 3-4.