

江西双季早稻气候适宜度小波分析

田俊¹, 黄淑娥^{1*}, 祝必琴¹, 崔海健²

(江西省气象科学研究所, 江西 南昌 330046; 2. 南昌工学院, 江西 南昌 330108)

摘要: 利用江西省 12 个水稻观测站逐日温度、光照、降水资料, 运用 Morlet 小波函数, 研究近 50 年来江西省双季早稻降水、温度、日照适宜度的年际变化特征和未来趋势, 为早稻气候年景预测提供新方法, 为水稻安全生产和粮食期货提供科学依据。结果表明: 近 50 年来, 江西省双季早稻降水适宜度较低, 且近 15 年来表现得不稳定, 年际变化幅度加大; 温度、日照适宜度较高, 且温度适宜度年际变化表现出阶段性的波动, 而日照适宜度近 35 年的波动较前 15 年明显为小。研究还表明, 降水适宜度存在准 26 年和准 15 年的周期振荡, 从 20 世纪 90 年代中期开始, 出现了一个准 7 年周期, 加大了降水适宜度波动, 并使降水适宜度偏小的年份增多。温度适宜度的准 26 年周期和日照适宜度的准 34 年周期在整个分析的时间段内均表现得非常稳定, 信号较强。预计, 2011—2014 年江西省双季早稻生长季降水、温度、日照适宜度将处于偏小期。

关键词: 双季早稻; 气候适宜度; 小波分析; 江西省

中图分类号: S615 文献标志码: A 文章编号: 1000-2286(2012)04-0646-06

Wavelet Analysis of Climate Suitability for Double-Cropping Early Rice in Jiangxi Province

TIAN Jun¹, HUANG Shu-e^{1*}, ZHU Bi-qin¹, CUI Hai-jian²

(1. Meteorological Research Institute of Jiangxi Province, Nanchang 330046, China; 2. Nanchang Institute of Science and Technology, Nanchang 330108, China)

Abstract: Based on the daily temperature, sunshine and precipitation data from 12 rice observation stations in Jiangxi Province, interannual variation and future trend of precipitation, temperature and sunshine suitability in the recent 50 years were analyzed by using Morlet wavelet, which provides a new method for forecasting the early rice climate years and provides a scientific basis for rice production safety and food futures. The results indicated that: over the past 50 years, the precipitation suitability for double cropping early rice in Jiangxi was low, and was instable in the recent 15 years, inter-annual variation rate increased; the temperature and sunshine suitability were relative high. The inter-annual changes of temperature suitability showed a stage fluctuations, and the sunshine fitness fluctuation in the past 35 years compared with that in the previous 15 years was significantly smaller. The research results also showed that quasi-26a and quasi-15a cycles existed in the precipitation suitability and from the mid-1990s, there was a quasi-seven-year cycle which increased the fluctuation of precipitation suitability and small precipitation suitability. The temperature suitability of the quasi-26 year cycle and sunshine suitability of the 34-year cycle throughout the analysis period appeared very

收稿日期: 2012-03-24 修回日期: 2012-06-08

基金项目: 科技部公益性行业科研专项(GYHY200906021)

作者简介: 田俊(1981—), 女, 助理工程师, 硕士, 主要从事农业气象研究, E-mail: tianjun75356122@163.com; * 通

讯作者: 黄淑娥, 研究员, E-mail: huangshue@gmail.com。

stable, and the signal was strong. It is estimated that the precipitation, temperature and sunlight suitability for early rice in Jiangxi Province will be in a weak period in 2011 – 2014. It is expected that the fitness of the precipitation, temperature, sunshine suitability for double-cropping early rice during its growing season in Jiangxi Province will be small in 2011 – 2014.

Key words: double-cropping early rice; climate suitability; wavelet analysis; Jiangxi Province

江西省是我国水稻主产区之一,其中水稻种植面积和总产均位于全国第二。由于气候的波动和温、光、水季节变化及季节的分配不均,使得双季早稻生长季气象与农业气象灾害发生频繁。特别是近30年,在全球气候变化的大背景下,江西省双季早稻生长季内气候发生了明显变化,主要表现为降水集中度增加,强降水事件增加^[1]。据分析江西省重度以上洪涝灾害出现频率为3年一遇,造成江西双季早稻欠收的几率达67%^[2]。极端天气与气候事件增多,旱、涝、低温和高温等事件呈多发趋势,强度增强,气候的变化严重影响水稻的生产,使水稻生产成本增加,产量波动加大。

不少学者对作物生长发育期间的气候适宜性进行了研究。马树庆^[3]引进了作物生长气候适宜度评价模型,开展了东北农作物生长的气候适宜性评价。近年来该模型分别用于评价玉米、小麦、油菜等主要农作物气候适宜程度^[4-6],有关研究表明,各地气候适宜度存在明显差异。目前,在长江中下游双季稻区,也开始了双季水稻生产气候适宜度评价研究,江西省气象科学研究所根据全省10余个水稻观测站有关双季水稻生长季气象资料,对双季水稻生产气候适宜度进行了评价分析,研究出影响双季水稻生产的关键气候因子和关键生育期,并评价出双季水稻各生育期降水、温度、日照等气候适宜状况。小波分析法已广泛用于各学科的研究中^[7-11],但是将小波分析法应用于农业气候时间尺度的分析报道较少。

为了科学评估气候变化对江西省双季早稻生长发育适宜程度的影响,本文在分析江西省双季早稻生长期间气候特征的基础上,引进建立了双季早稻气温、日照、降水适宜度模型,并运用小波分析方法对江西省双季早稻生长季的降水、温度、日照适宜度年际变化的时间序列进行研究,旨在揭示江西省双季早稻温、光、水适宜度多时间尺度的变化特征和趋势,预测评估未来气候条件对双季早稻生长发育可能造成的影响,为科学指导早稻生产,趋利避害,并针对性地进行田间管理提供依据,有关研究对防御气象灾害对双季早稻生产的影响具有重要的现实意义。

1 资料与方法

1.1 数据来源及处理

选用1961—2010年江西省湖口、宜丰、樟树、南昌、余干、余江、广丰、吉安、泰和、宁都、南康和龙南12个双季水稻气象观测站逐日降水、日照时数、日照百分率、气温资料。在Morlet连续小波变换前,先对有关数据进行了处理。首先,求取有关降水、温度、日照等适宜度时间序列的距平值。其次,延长两端点的数据,由于实际应用时数据长度有限,为避免小波函数在数据的起端和终端越出数据之外,通常采用数据周期循环或把数据反折等方法来增加原有数据的长度。本文采用数据反折法来增加数据的长度^[12]。

设原始资料为 $f(1), f(2), \dots, f(n)$, 则向前延伸 n 个点:

$$f(-i) = f(i+1) \quad i=0, 1, 2, \dots, n-1$$

向后延伸 n 个点:

$$f(i+n) = f(n+1-i) \quad i=1, 2, \dots, n$$

增加前后两端资料后,数据序列由 n 个延伸为 $3n$ 个,具体如下:

$$f(-n+1), f(-n+2), \dots, f(-1), f(0), f(1), \dots, f(n), f(n+1), \dots, f(2n)$$

当小波变换完成后,去掉两端的小波变换系数,只保留原有数据的小波变换系数。采用数据反折法使边界部分的性质不产生歪曲现象,并更加符合真实情况,更为科学。

1.2 水稻温、光、水适宜度模型

温度适宜度模型可用下式来计算^[3,13]:

$$S(T) = (T - T_{\min}) (T_{\max} - T)^B / (T_0 - T_{\min}) (T_{\max} - T_0)^B \quad (1)$$

其中: $B = (T_{\max} - T_0) / (T_0 - T_{\min})$

(1) 式中 $S(T)$ 为水稻生育期间温度适宜度; T 为水稻生育期旬平均气温; T_{\min} 、 T_{\max} 、 T_0 分别为水稻在某生育期所需的下限温度、上限温度和最适温度, 本文中双季水稻各生育期有关临界温度值来源于文献 [13 - 14]。

降水适宜度可表示为 [13, 15]:

$$S(R) = \begin{cases} R/R_0 & R < R_0 \\ R_0/R & R \geq R_0 \end{cases} \quad (2)$$

(2) 式中 $S(R)$ 水稻生育期间降水适宜度; R 水稻生育期旬累积降水量; R_0 为水稻在某个生育期的生理需水量。本文中双季水稻大田各生育期生理需水量 R_0 值来源于文献 [16]。

双季早稻秧苗期生理需水量采用如下公式进行计算 [16]:

$$R_{me} = 1.629 + 0.149M^2 \quad (3)$$

(3) 式中 E_{me} 为早稻秧苗期生理需水强度 (mm/d) M 为秧苗全生育期内日平均日照时数 (h/d)。

日照适宜度采用下式计算 [13, 15]:

$$S(S) = \begin{cases} e^{-[(S-S_0)/b]^2} & S < S_0 \\ 1 & S \geq S_0 \end{cases} \quad (4)$$

(4) 式中 $S(S)$ 为水稻生育期间日照适宜度; S 为水稻生育期旬日照时数; S_0 为水稻某生育期光照条件达到适宜状态的日照时数; b 为日照适宜度参数。

黄璜 [17]、魏瑞江 [5] 研究认为, 当日照百分率达 70% 时, 作物生长发育处于适宜状态。本文研究认为, 在南方双季稻区, 早稻品种的感光性钝感或无感, 日照百分率达 70% 时的日照时数作为双季水稻光照条件达适宜状态的日照时数 (S_0) 标准过高。本研究根据江西省 12 个农业气象观测站 1961—2010 年日照资料分析, 在双季早稻生长季, 日照百分率达 70% 的记录, 多数年份的部分月日照百分率高于 70% 的天数为 0, 对此, 本文在双季早稻光照适宜度模型参数确定中, 采用早稻各生育期日照百分率达多年平均状况的光照条件为适宜的光照状态, 其对应的日照时数为 S_0 。根据江西省 12 个农业气象观测站 1961—2010 年日照观测资料, 可分析计算出双季水稻各生育期适宜状态的日照时数。

根据近 10 年来江西省双季早稻播种至成熟期生长季时间统计, 采用 3 月下旬—7 月中旬作为早稻平均生长季时间, 以此时段逐旬对历年早稻降水、温度、光照适宜度进行计算分析, 历年早稻全生育期内降水、温度、光照适宜度分别采用各气候要素的各旬适宜度的平均值来表示。

2 结果分析

2.1 年际变化特征

根据 1961—2010 年江西省双季早稻全生育期逐年降水、温度、日照适宜度计算, 绘制了近 50 年江西省早稻降水、温度、日照适宜度年际变化趋势图 (图 1)。

由降水适宜度年际变化趋势图可知 (图 1a), 近 50 年来, 江西省早稻降水适宜度整体偏低, 其多年平均值为 0.47, 历年基本在多年平均值线上下波动, 其中最大值为 0.64, 出现在 2004 年, 最小值为 0.33, 出现在 2006 年, 大、小年极差为 0.31。和降水适宜度多年平均值相比, 进入 20 世纪 90 年代中期以后, 历年降水适宜度的波动幅度明显加大, 尤其进入 2000 年以后, 降水适宜度的波动更大, 近 50 年来降水适宜度的最大值和最小值均出现 2005 年的前后, 说明 2000 年以后降水对江西双季早稻生产的影响明显加大。

由温度适宜度年际变化趋势图可知 (图 1b), 近 50 年来, 江西省早稻温度适宜度较降水、日照适宜度偏高, 其多年平均值为 0.76, 其中最大值为 0.83, 出现在 2002 年, 最小值为 0.67, 出现在 1988 年, 大、小年极差为 0.16。早稻生长季温度适宜度年际变化表现为阶段式的波动变化, 阶段波动主要分为 3 个, 一是在 1961—1976 年, 该阶段温度适宜度较高, 基本在多年平均值线以上波动, 阶段多年平均值为 0.77, 该阶段温度对双季早稻生产较为有利; 二是 1977—1992 年, 此阶段温度适宜度为近 50 年中的最低, 阶段多年平均值为 0.74, 该阶段温度条件对双季早稻的生产较为不利; 三是 1993—2009 年, 该阶段

温度适宜度又较高,其阶段平均值为 0.78,基本在多年平均值线以上波动,此阶段温度条件较适宜于双季早稻的生产。

由日照适宜度年际变化趋势图可知(图 1c)近 50 年来,江西省双季早稻日照适宜度多年平均值为 0.66,其中最大值为 0.90,出现在 1962 年,最小值为 0.43,出现在 1972 年,大、小年极差为 0.47。在 20 世纪 60 年代至 70 年代

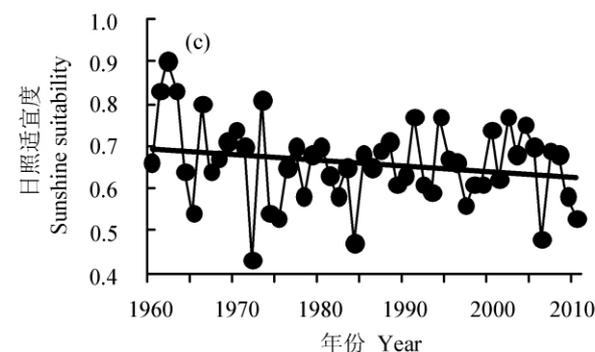
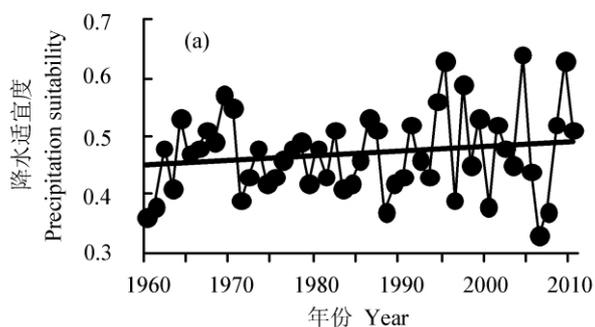
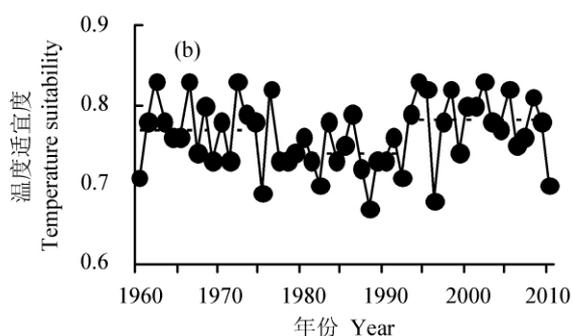


图 1 早稻全生育期降水 (a)、温度 (b)、日照 (c) 适宜度年际变化

Fig. 1 Interannual variation of precipitation (a), temperature (b), sunlight (c) suitability of early rice during growing season

中前期,日照适宜度波动较大,近 50 年的最高值和最低值均出现在此阶段,进入 70 年代中后期以后,日照适宜度变化不大,基本在多年平均值线上下波动。总的来看,除 1972、1984 和 2006 年日照适宜度偏小外,其余年份均在 0.5 以上,日照对双季早稻生长发育的影响相对稳定。

2.2 小波变换特征

小波分析方法能够反映时间序列的局部变化特征,可较好地对信号进行多尺度细化分析^[18-19],通常分析的是年代际和年际变化周期,年代际变化周期是指 10 年及以上周期的变化,年际变化周期是 10 年以下周期的变化。

图 2 (a、b、c) 分别是江西省双季早稻降水、温度、日照适宜度的 Morlet 小波变换系数等值线图,等值线为正的用实线表示,代表着降水、

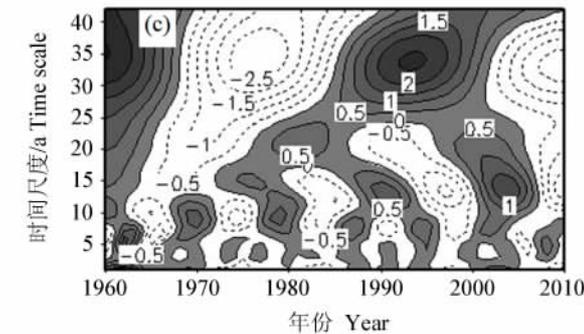
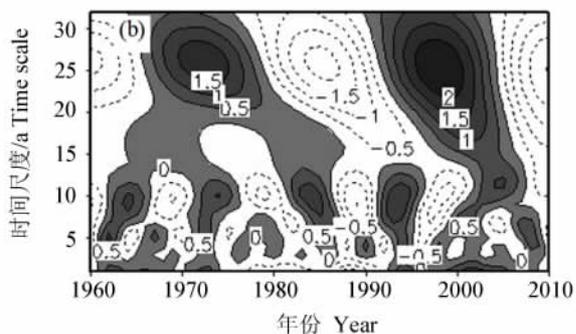
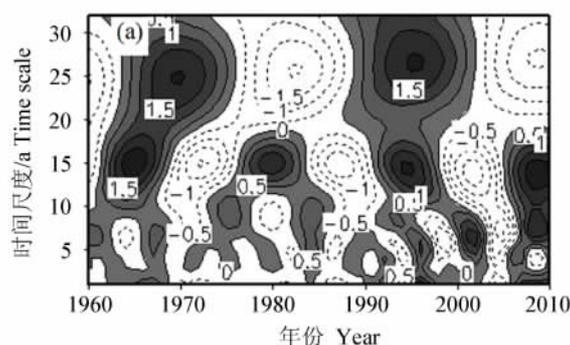


图 2 早稻全生育期降水 (a)、温度 (b)、日照 (c) 适宜度 Morlet 小波变换系数

Fig. 2 Wavelet transform coefficients of precipitation (a), temperature (b), sunlight (c) suitability of early rice during growing season

温度或日照适宜度偏大;等值线为负的用虚线表示,代表降水、温度、日照适宜度偏小,小波系数为零则对应着转折点。偏大或偏小是相对于平均值而言。

图 2a 为降水适宜度小波变换系数等值线图,由图可知,江西省早稻降水适宜度存在着明显的年代际尺度的周期性变化,在准 26 年和准 15 年的时间尺度上周期振荡非常显著,它们在整个分析的时段内均表现得非常稳定,信号较强,且中心周期几乎未发生偏移。年际变化周期不明显,从 20 世纪 90 年代末开始,出现了一个 5~10 年的周期,随着时间的推移,中心周期逐渐上移至 7 年左右,它嵌套在年代际周期之内,使降水适宜度周期结构更复杂,年际变化幅度加大。

图 2b 为温度适宜度小波变换系数等值线图,由图可知,温度适宜度年代际变化也非常明显,其中 26 年的时间尺度在整个分析时段中非常稳定且信号较强,其中心周期几乎未发生偏移。年际变化周期有 10 年、5 年和 2 年左右,它们在近期信号均较弱。

由日照适宜度小波变换系数等值线图可以看出(图 2c),日照适宜度年代际变化和温度、降水适宜度一样也非常明显,其中 34 年左右的时间尺度在整个分析时段表现得非常稳定,信号较强,且中心周期几乎未发生偏移;14 年左右的时间尺度出现在 20 世纪 90 年代至今,近期更为强烈。年际变化周期不明显,其中 6~10 年左右的周期只出现在 20 世纪 80 年代以前。

2.3 气候适宜度主要周期分析

小波方差图反映了能量随尺度的分布,可以确定一个时间序列中各种尺度扰动的相对强度,对应峰值处尺度称为该系列的主要周期时间尺度,研究中利用小波方差公式^[20]分别计算早稻降水、温度、日照适宜度各时间尺度对应的小波方差,并据此确定江西省早稻气候适宜度时间序列的主要周期。

从降水适宜度小波方差图中(图 3a)可以看出,降水适宜度第一和第二主周期分别为 15 年和 26

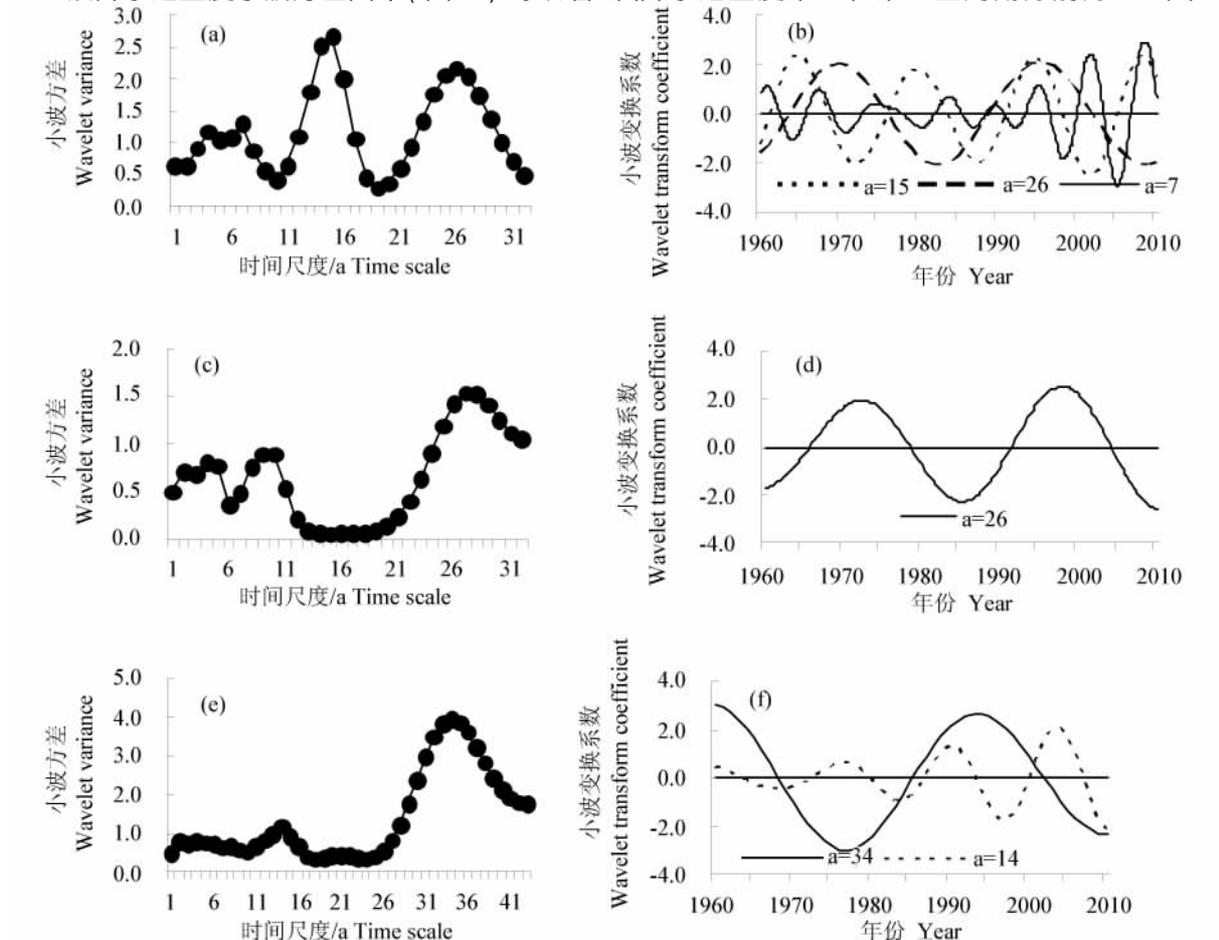


图 3 早稻全生育期降水 (a、b)、温度(c、d)、日照(e、f) 适宜度小波方差和主周期 a 小波变换系数

Fig.3 Wavelet variance and main cycle a Wavelet transform coefficients of precipitation (a、b), temperature (c、d), sunlight (e、f) suitability of double - cropping early rice during growing season

年,第三主周期为7年,结合图2a可知,7年左右周期近期有增强的趋势,其它周期方差明显偏小。

从温度适宜度小波方差图中可以看出(图3c),温度适宜度最明显的周期是26年,其次是10年,结合图2b可知,10年周期近期信号较弱。

从日照适宜度小波方差图中可以看出(图3e),日照适宜度最显著的周期是34年,其次为14年。

2.4 气候适宜度趋势预测

根据小波方差法分析确定的主要周期,选取近期影响江西省早稻降水、温度、日照适宜度的主要周期,绘出该尺度下的小波系数图,如图3(b、d、f)。

由图3b可知,降水适宜度小波变换系数准15年周期函数预计在2011—2012年处于偏强期,降水适宜度将偏大于多年平均状况,但进入2013—2019年周期函数将处于偏弱阶段,降水适宜度偏小多年平均状况;降水适宜度小波变换系数准26年周期函数在2011—2015年预计将处于偏弱期,2016—2028年将处于偏强阶段;降水适宜度小波变换系数准7年周期函数将在2011—2012年处于偏弱期,2014—2017年将处于偏强阶段。

为分析3个小波变换系数主要周期函数对降水适宜度的综合影响,研究中将降水适宜度小波变换系数的3个主要周期函数进行数学叠加,并且只考虑预测年份小波变换系数预测值的算术平均,根据算术平均值与多年平均值的比较来确定预测年份降水适宜度小波变换系数信号的强弱。综合分析结果表明,预计2011—2014年双季早稻降水适宜度小波变换系数将处于偏弱期,江西早稻生长季降水的适宜度偏低,降水对早稻生产将产生不利影响;2015—2017年降水适宜度小波变换系数将处于偏强期,江西双季早稻生长季降水适宜度较高,降水对早稻生产较为有利。

由图3d可知,温度适宜度小波变换系数准26年周期函数预计在2011年以后一段时间内还将处于偏弱期,一般持续到2017年,温度适宜度将偏小于多年平均状况,对早稻的生长产生不利的影响,但进入2018—2030年周期函数将处于偏强阶段,温度适宜度将偏大于多年平均状况,有利于早稻的生长发育。

图3f表明,日照适宜度小波变换系数准34年周期函数在2011—2018年将处于偏弱阶段,日照适宜度将偏小于多年平均状况;准14年周期函数在2011—2014年也将处于偏弱阶段,日照适宜度将偏小于多年平均状况。综合分析结果表明,预计2011—2014年双季早稻日照适宜度小波系数将处于偏弱期,日照对江西双季早稻生产将产生不利影响。

3 结论

(1)近50年来,江西省双季早稻温度与日照适宜度平均状况均较高,温度适宜度年际变化表现为3个阶段的波动,近15年温度适宜度基本在多年平均值线以上波动,温度基本适宜双季早稻生长,但2010年温度适宜度急剧降低,对早稻生产不利。日照适宜度前15年波动较前35年为明显,波动振幅偏大,日照适宜度对早稻生产的适宜性影响波动大,近10年来江西早稻日照适宜度基本在多年平均值线以上波动,对早稻生长基本有利。江西早稻降水适宜度近15年波动较前35年为明显,降水对江西早稻生产的有利和不利的波动影响加大。

(2)降水适宜度存在准26年和准15年的周期振荡,从20世纪90年代中期开始,出现了一个准7年的周期,它嵌套在年代际周期之内,致使降水适宜度异常年份偏多。温度适宜度的准26年周期和日照适宜度的准34年周期在整个分析的时间域内均表现得非常稳定,信号较强。

(3)根据预测,2011—2014年,降水、温度、日照适宜度基本表现为一致趋势,各要素适宜度均将处于偏小时期,降水、温度、日照等气候条件对江西双季早稻生产将产生不利影响,气候适宜性可能变差。因而,未来在江西双季早稻生产过程中,应有针对性地采取一些双季早稻农业气象灾害防御措施,趋利避害,确保早稻稳产高产,保证粮食安全。

(4)本文中采用的模型和相应的参数,需在今后的实践中进一步修正。

参考文献:

- [1]杨爱萍,杜筱玲.江西省降水集中程度的变化特征[J].中国农业气象,2010,31(4):512-516.
- [2]魏丽,陆叔鸣.江西省主要农业气象灾害预测和决策服务系统的研究及应用[J].中国农业气象,1997,18(2):48-53.

(下转第670页)

- [16]曹春信,袁名安,刘新华.油菜对镉胁迫的响应及其产地环境安全临界值[J].江西农业学报,2011,23(2):24-26.
- [17]许嘉琳,杨居荣.陆地生态系统中的重金属[M].北京:中国环境科学出版社,1995:123-132.
- [18]周炎,罗安程.土壤和植物中镉的污染及防治[J].环境污染与防治,1996,18(6):19-21.
- [19]金美芳,林明凤,施翔.镉胁迫对油菜种子萌发和根系生长的影响[J].种子,2011,30(10):70-73.
- [20]金玲.小白菜水培营养液配方筛选[J].河南农业科学,2007(9):82-85.
- [21]邹琦.植物生理生化实验指导[M].北京:中国农业出版社,1995:94-96.
- [22]赵世杰.植物组织中丙二醛测定方法的改进[J].植物生理学通讯,1994,30(3):207-210.
- [23]邹琦.植物生理学实验指导[M].北京:中国农业出版社,2000:78-80,167-168.
- [24]张志良.植物生理学实验指导[M].3版.北京:高等教育出版社,2003:123-124.
- [25]常福辰,陆长梅,沙莎.植物生物学实验[M].南京:南京师范大学出版社,2007:126-127.
- [26]沈文颺,徐良菜.抗坏血酸过氧化物酶活性测定的探讨[J].植物生理学通讯,1996,32(3):203-205.
- [27]张义贤,李晓科.镉、铅及其复合污染对大麦幼苗部分生理指标的影响[J].植物研究,2008,28(1):43-46,53.
- [28]陈菲.低温胁迫对矮斗菜脯氨酸和可溶性蛋白含量的影响[J].北方园艺,2011,5:29-31.
- [29]Radotic K, Ducic T, Mutavdzic D. Changes in peroxidase activity and isoenzymes in spruce needles after exposure to different concentrations of cadmium[J]. Environmental and Experimental Botany, 2000, 44(2):105-113.

(上接第651页)

- [3]马树庆.吉林农业气候研究[M].北京:北京气象出版社,1994:33.
- [4]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.
- [5]魏瑞江,张文宗,李二杰.河北省冬小麦生育期气象条件定量评价模型[J].中国农业气象,2007,28(4):367-370.
- [6]吴利红,娄伟平,柳苗,等.油菜花期降水适宜度变化趋势及风险评估[J].中国农业科学,2011,44(3):620-626.
- [7]傅军栋,刘遵雄,张德运.使用小波多孔算法提高网络业务流自相似参数求解精度[J].江西农业大学学报,2005,27(6):920-924.
- [8]Farge M. Wavelet transforms and their applications to turbulence[J]. Annu Rev Fluid Mech, 1992, 24:395-457.
- [9]White M A, Schmidt J C, Topping D J. Application of wavelet analysis for monitoring the hydrological effects of dam operation: Glen Canyon dam and the Colorado River at Lees Ferry, Arizona[J]. River Research and Applications, 2005, 21(5):551-565.
- [10]Lange I A, Steel E A. Using wavelet analysis to detect changes in water temperature regimes at multiple scales effects of multi-purpose dams in the Willamette River basin[J]. River Research and Applications, 2007, 23(4):351-359.
- [11]李春强,杜毅光,李保国.1965—2005年河北省降水量变化的小波分析[J].地理科学进展,2010,29(11):1340-1344.
- [12]黄强,赵雪花.河川径流时间序列分析预测理论与方法[M].郑州:黄河水利出版社,2008:127-142.
- [13]赖纯佳,千怀遂,段海来,等.淮河流域双季稻气候适宜度及其变化趋势[J].生态学杂志,2009,28(11):2339-2346.
- [14]刁操铨.作物栽培学各论(南方本)[M].北京:中国农业出版社,2002:82-83.
- [15]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):77-82.
- [16]陈玉民,郭国双,王广兴,等.中国主要作物需水量与灌溉[M].北京:水利电力出版社,1995:109,122.
- [17]黄璜.中国红黄壤地区作物生产的气候生态适宜性研究[J].自然资源学报,1996,11(4):341-345.
- [18]Ippolitov I I, Kabanov M V, Loginov S V. Wavelet analysis of hidden periodicities in some indexes of solar activity[J]. Russian Physics Journal, 2002, 45(11):1086-1092.
- [19]Mi X C, Ren H B, Ouyang Z S, et al. The use of the Mexican hat and the Morlet wavelets for detection of ecological patterns[J]. Plant Ecology, 2005, 179(1):1-19.
- [20]黄晓清,唐叔乙,罗布次仁,等.近47年雅鲁藏布江中游地区汛期降水的小波分析[J].气象,2010,36(12):68-73.