

气候变化对江西省双季稻生产的影响

吴珊珊 王怀清 黄彩婷

(江西省气候中心,南昌 330046)

摘要 利用1961—2011年江西省81个常规气象观测站资料,双季稻产量资料和全球气候模式ECHAM5/MPI-OM在SRES A1B排放情景下2015—2100年逐日气温和降水资料,定量研究了气候变化对江西省双季稻生产的影响,结果表明:1)双季稻生长期光、温和水基本能满足水稻生长的需求,21世纪以来,生育期 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温以正距平为主,晚稻生长期日照时数自20世纪90年代以来呈明显下降趋势;2)分析极端气候事件对水稻生产的影响发现,随着气候变暖,高温逼熟的次数呈明显上升状态,寒露风出现的几率越来越小;3)建立了气候产量预测模式,并利用气候模式的预测结果模拟2015—2100年的气候产量,发现2060年以前,早稻气候产量基本以正值为主,2060年后气候产量呈正负波动状态,晚稻气候产量整体变化幅度较早稻气候产量小。

关键词 双季稻; 气候变化; 产量; 影响

中图分类号 S 162.5

文章编号 1007-4333(2014)02-0207-09

文献标志码 A

Influence of climate change on double-harvest rice yield in Jiangxi Province

WU Shan-shan, WANG Huai-qing, HUANG Cai-ting

(Jiangxi Climate Center, Nanchang 330046, China)

Abstract Climate change affected regional crop production. Jiangxi province was one of the most important rice-producing provinces in China. The rice production in Jiangxi played an important role in local and national food security. Using the data from 81 meteorological stations, double-harvest rice yield data of Jiangxi from 1961 to 2011, daily temperature and precipitation data from global climate model ECHAM5/MPI-OM, the link was investigated between the climate change and double-rice yield in Jiangxi. The results showed that sunshine, temperature and precipitation basically met the requirement for rice growth. The accumulated temperature of $\geq 10^{\circ}\text{C}$ was mainly at positive anomaly since the 21st century. Sunshine hours at late period of rice growth tended to decrease since the 1990s. The occurrences of the forced ripening by high temperature significantly increased, while the cold dew wind significantly decreased since the 21st century. The climate-yield model was established for predicting rice production from 2015 to 2100. It was found that the early rice meteorology yield was mainly positive value before 2060, but waving after that year. The change degree at late rice yield was smaller than that of the early rice.

Key words double-harvest rice; climate change; Guangxi; model

气候变化已成为全球关注的热点话题。近50年来,在全球气候变化的大背景下,江西省的气候也经历一系列的变化。根据观测结果显示,江西省从20世纪90年代末期以来增温非常明显,近50年来最暖的10个年份有8个都出现在90年代末期以后。由于气候变暖导致大气环流特征及要素变化,

气候变化幅度加大,导致极端气候灾害频繁发生和强度加剧,极端降水事件趋多趋强,暴雨洪涝事件频繁发生,其次是夏季的高温热浪也增多。根据全球气候模式在3种排放情景下(SRES高排放A2、中排放A1B、低排放B1)所做的21世纪前50年气候变化预估试验得到的数据,未来几十年鄱阳湖流域

收稿日期:2013-08-02

基金项目:公益性行业(气象)科研专项(GYHY201106003);江西省科技厅项目(20111BBG70031-1)

第一作者:吴珊珊,工程师,硕士,主要从事气候变化研究,E-mail:pilgrim_@163.com

(江西境内的鄱阳湖流域占江西省面积的 92.7%) 的气温在 3 种排放情景下都将迅速增加, A1B 情景下温度增加最明显, 平均温度变化达到 $1.62\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[1]。由于气候变化是人类活动与气候环境相互作用的过程, 具有极大的不确定性, 未来的气候变化和气象要素时空性变化及振荡性加剧, 都将对双季稻产生正面或负面的影响, 例如气温升高会使水稻发育速率加快, 生长期缩短, 产量下降^[2], 未来气候变暖有可能会加剧水循环过程, 从而使洪灾和旱灾的频率及强度增加^[3-5], 而 CO_2 浓度增加会增强水稻的光合速率, 增加水稻产量, 以上这些都需要因地和因时制宜地全方面应对。

气候变化对农业的影响主要表现在产量上, 对此众多学者都开展了研究, 主要方法有 2 种, 一是统计学方法分析, 根据气候因子和产量的统计相关建立数学模型, 运用回归分析、相关分析、周期分析、主成分分析、判别分析和方差分析等一种或多种方法的组合, 研究气候变化与产量的关系。史印山等^[6]利用回归分析、M-K 突变检验和 T 检验等统计分析方法, 分析了近 50 年河北省气候变化特征及其对冬小麦气候产量的影响, 认为河北省冬小麦气候产量与气温和降水显著相关, 当气温距平在 $-1.2\sim 1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 小麦气候产量为正值, 温度过低或过高都会使小麦减产, 高温使小麦减产更严重, 降水量和小麦气候产量呈正相关。邓环等^[7]利用回归分析和相关分析, 讨论了气候变化对 1981 年以来湖北省中稻生育期的影响, 认为气候变化导致中稻全生育期与营养生长期在湖北外围区域表现延长的趋势, 在江汉平原表现为缩短的趋势, 生殖生长期在不同地区则统一表现出延长的趋势。二是利用全球气候模式 (GCM) 构建的气候变化情景与作物生长模型结合, 模拟气候与粮食产量的关系的评估方法。该方法已有大量研究, 江敏等^[8]将 GCM Transient Run 的气候变化情景与 CERES-Rice 模型耦合, 定量评价了气候变化对福建省水稻生产的影响, 发现未来气候变化中, 福建省水稻稳产性将变差且水稻总产将随着温度的升高而减少。熊伟等^[9]利用中国随机天气模型将全球气候模式 HadCM2 和 ECHAM4 与作物模式 CERES-RICE3.5 相连接, 模拟了未来 4 种气候情景下我国主要水稻产区产量的变化趋势, 发现未来气候情景下, 水稻产量大多表现为不同程度的减产趋势, 其中早稻减产幅度最大, 按区域划分则东北地区减产幅度最大。由于 GCM 输出的气候数据网

格分辨率低, 不能反映区域气候特征, 且缺乏逐日资料估算的能力, 因此, 既能反映局地气候变化信息, 又具有较高时间分辨率的区域气候模式与作物生长模型结合, 这种评估方法已成为研究气候变化对农业生产影响的重要手段。姚凤梅等^[10]采用了 DSSAT 作物模式和区域气候模式相连接, 模拟分析了 A2 和 B2 气候变化情景对我国主要地区灌溉水稻产量的影响, 认为温度增加, 水稻产量呈下降趋势, 随着温度不断增加, 产量下降幅度增大, A2 和 B2 气候变化情景对水稻产量既有正面也有负面的影响, 视不同地点而异。杨沈斌等^[11]基于区域气候模式 PRECIS 构建的气候变化情景与水稻生长模型 ORYZA2000 结合, 分析了气候变化对长江中下游稻区水稻产量的影响, 发现在未来温度升高环境下, 水稻生育期缩短, 产量下降, 大气 CO_2 浓度升高对水稻产量具有一定的正效应, 相比单季稻和早稻, 大气 CO_2 浓度升高对晚稻的增产在一定程度上抵消了增温的不利影响。

江西省气候资源优越, 雨热同季, 适宜粮食作物生长, 但因受季风气候及地理位置, 地形地貌的影响, 水稻生产期间存在洪涝、干旱、夏季高温和秋季低温等气象灾害, 影响水稻的产量和品质^[12]。江西省是个农业大省, 水稻产量的变化对全省乃至全国的粮食安全都将产生很大影响, 研究未来气候变化情景下江西省水稻产量的变化具有重要意义。本研究利用江西省近 50 年的常规气象观测资料和双季稻产量资料, 分析气象因子与产量之间的关系, 并据此建立气象产量模型, 研究未来几十年 GCM 构建的气候变化情景下江西省双季稻可能的变化情况, 旨在为江西省水稻生产如何应对气候变化提供参考。

1 材料及方法

1.1 数据来源

本研究主要使用的数据来源于 1961—2011 年江西省 81 个常规气象观测站日平均气温、降水和日照等资料, 1961—2011 年双季稻产量资料来源于江西省统计年鉴^[13], 全球气候模式数据来源于德国汉堡马普气象研究所 (Max-Planck Institute for Meteorology) 提供的 ECHAM5/MPI-OM 模式输出数据, ECHAM 模式是 IPCC 历次评估报告采用的大气环流模式之一, 其中 ECHAM5 是为 2007 年第 4 次报告而改进的最新一代, 本研究采用 SRES

A1B(中等排放)排放情景下预估的 2015—2100 年逐日气温和降水资料,其水平分辨率为 $1.875^\circ \times 1.875^\circ$,垂直分 31 层。

1.2 研究方法

1.2.1 分离水稻趋势产量和气候产量的方法 Y

研究长时间序列的作物产量与气候因子关系时,一般把作物的产量分解为趋势产量 y_t 、气候产量 y_w 和随机误差 y_e 三部分

$$y = y_t + y_w + y_e$$

趋势产量是反映历史时期生产力发展水平的长周期产量分量,也被称为技术产量,气候产量是受气候要素为主的短周期变化因子(农业气象灾害为主)影响的波动产量分量^[14]。趋势产量模拟方法有很多种,主要以 3 和 5 年滑动平均和 Logistic 函数为主。由于趋势产量是由地理环境、水肥、品种和生产力水平等因素决定,随时间延续趋势产量逼近某条斜直线呈上升趋势,另外由于 3 年滑动平均很难反映社会发展的长期趋势,故本研究用 5 年直线滑动均值法模拟产量。这种方法是线性回归与滑动平均相结合的模拟,它将作物产量的时间序列在某个阶段内的变化看作线性函数,随着阶段的连续滑动,直线不断变换位置,后延滑动,从而反映产量历史演变趋势变化。依次建立各阶段内的直线回归模型,各时间点上的各直线滑动回归模拟值的平均即为趋势产量。这种方法的优点是不损失样本信息量,只要给定合适的滑动步长 k ,就可用最小二乘法建立各滑动时段的线性方程

$$y_i(t) = a_i + b_i t, i = 1, 2, \dots, n - k + 1 \quad (1)$$

式中: i 为各时段序号, t 为年序, n 为样本数。

当 $i = 1$ 时, $t = 1, 2, \dots, k$; 当 $i = 2$ 时, $t = 2, 3, \dots, k + 1, \dots$;

当 $i = n - k + 1$ 时, $t = n - k + 1, n - k + 2, \dots, n$ 。

若共有 m 个时段,即存在 m 个线性方程。在计算出任意年 t 在各个方程的函数值 $y_i(t)$ 后求出其平均值

$$\overline{y_i(t)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^m y_i(t) \quad (2)$$

可以认为这就是 t 年趋势产量。任何一年实际产量减去趋势产量就是气候产量

$$y_w = y - y_t \quad (3)$$

随机因素造成的产量,忽略不计。

1.2.2 江西省双季稻气象灾害指标 Y

《江西省双季稻气象灾害指标》^[15] (DB36/T

511—2007)规定了江西省双季稻洪涝、干旱、高温逼熟和寒露风等气象灾害的指标,适用于双季稻气象灾害的防灾减灾。洪涝指数是反映气候洪涝程度的指标,是以 4—7 月单站降水强度、范围、时间及总量计算单站洪涝指数的大小,并合成区域洪涝指数,区域性洪涝等级由单站洪涝指数之和 H 的大小划分, $H < 40$ 为局部洪涝, $40 \leq H < 100$ 为轻度洪涝, $100 \leq H < 230$ 为中等洪涝, $230 \leq H < 400$ 为全省性明显洪涝, $H > 400$ 为全省性严重洪涝。秋旱指数是指 8 月 21 日—10 月 10 日,由于持续无雨或者少雨,使晚稻生长期供水不足,造成减产或绝收,根据该段时间雨量大小与持续时间的长短产生的旱情来确定,以秋旱指数 Gq 划分等级, $20 \leq Gq < 40$ 为轻度秋旱, $40 \leq Gq < 85$ 为中度秋旱, $Gq \geq 85$ 为重度秋旱。高温逼熟指早稻灌浆成熟期间的持续高温少雨天气,使早稻成熟期提前,结实率和千粒重下降的一种灾害性天气,规定 6 月 21 日—7 月 20 日,出现日平均气温 $\geq 30^\circ\text{C}$ 、日最高气温 $\geq 35^\circ\text{C}$ 、日平均相对湿度 $\leq 70\%$,且持续 3 d 以上,称为一次轻度高温逼熟天气过程;若持续时间 7 d 以上称为一次重度高温逼熟天气过程。寒露风也是江西水稻的气象灾害之一,出现时一般正值双季晚稻抽穗扬花期间,是因低温造成抽穗扬花受阻和空壳率增加的一种灾害性天气,是影响晚稻生产的主要因素,规定 9 月 1 日—10 月 10 日,日平均气温 $\leq 22^\circ\text{C}$ 且持续 3 d 以上,或者日平均气温 $\leq 22^\circ\text{C}$,持续 2 d 且期间有一天最低气温 $\leq 16^\circ\text{C}$ 称为一次轻度寒露风天气过程;日平均气温 $\leq 20^\circ\text{C}$ 且持续 3 d 以上,或者日平均气温 $\leq 20^\circ\text{C}$,持续 2 d 且期间有一天最低气温 $\leq 16^\circ\text{C}$ 称为一次重度寒露风天气过程。

2 结果与分析

2.1 近 50 年来江西双季稻生产与气象因子的关系

根据江西双季稻实际单产量,根据式 2 计算出 1961—2011 年的早稻和晚稻趋势产量,然后根据式 3 计算气候产量(图 1)。分析其气象产量的年际与年代际变化规律发现,近 50 年来,无论是早稻还是晚稻的实际单产和趋势产量都呈现明显的上升趋势,20 世纪 60—90 年代,上升的趋势最大,早稻产量高于晚稻产量,20 世纪 90 年代后,上升的趋势放缓,早稻产量低于晚稻产量。总体来看,除了个别年份,早稻和晚稻的气候产量基本维持在一个相对较小的正负范围内。

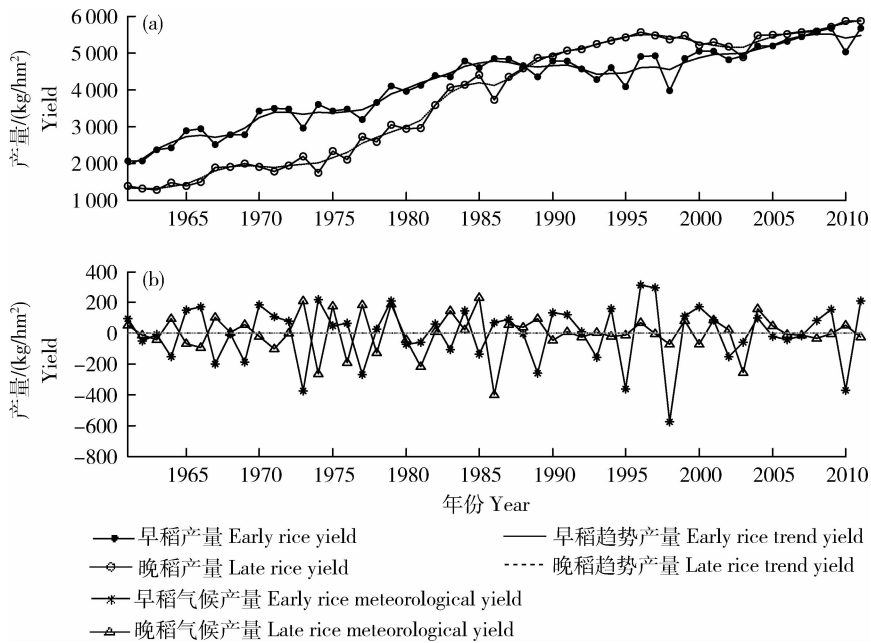


图1 1961—2011年早稻和晚稻产量及早稻和晚稻趋势产量历年变化图(a)和气候产量历年变化图(b)

Fig. 1 1961—2011 double-rice yields, trend yields (a) and rice meteorological yields (b)

2.2 近50年以来气象因子对双季稻的影响

光、温和水是水稻生产最重要的3种气象要素。江西省早稻生长期为3月中旬—7月下旬，晚稻生长期为6月下旬—11月上旬，下面具体分析这3种气象要素在双季稻生长期的影响。

2.2.1 降水量对双季稻的影响

江西省早稻生长期多年平均降水量为1 017 mm，近50年来早稻生长季总降水量具有明显的周期变化，在20世纪60年代中期—70年代后期为多雨期，70年代后期—80年代为少雨期，90年代为多水期，21世纪以来进入了少水时期，呈增加—减少—增加—减少的周期性变化特征(图2(b))。但进入21世纪以来，江西省部分地区暴雨站次和暴雨日数却明显增加(图略)，降水分布不均使旱涝灾害趋多和

趋重，降水异常导致的旱涝灾害是影响早稻稳产和增产的一个巨大隐患。晚稻生长期多年平均降水量为548 mm(图2(b))，降水量变化趋势与早稻生长期降水量相似，21世纪以来，晚稻生长期降水量基本都偏少，说明随着气候变化，晚稻生长期旱的影响在持续和加大，应更加关注旱灾对晚稻生产的影响。计算双季稻生长期降水量的均方差知道，各个年代(20世纪60—90年代及21世纪以来)早稻生长期降水量的均方差呈增加—减少—增加—减少的趋势，70年代的气候变率最大，而晚稻生长期降水量的均方差则变化不大，80年代气候变率最小，其余年代基本接近，这说明早稻生长期降水量的气候变率波动很大，而晚稻生长期降水量的气候变率比较稳定。

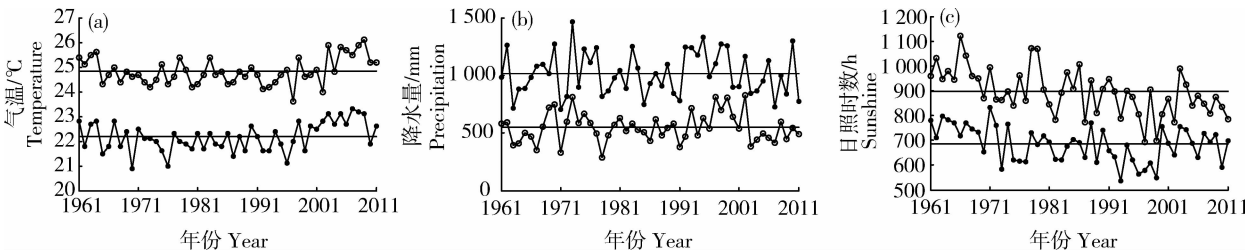


图2 1961—2011年早稻(实心圆)和晚稻(空心圆)生长期平均气温(a)、降水量(b)和日照时间(c)变化

Fig. 2 Average temperature (a), precipitation (b) and sunshine (c) of double-rice growth period of early rice (solid circles) and late rice (open circles) from 1961—2011

江西省气象灾害的种类多、频率高和分布广,每年都有不同程度的气象灾害发生,但旱涝灾害对农业生产威胁最大^[16]。据统计,1950—1989年全省年平均旱涝成灾面积50万 hm^2 。随着经济的发展和气候变化,旱涝灾害的影响加剧。1990年以来,年平均成灾面积达80.44万 hm^2 ,比前40年增加了60.9%^[17]。4—6月降水集中,易发生洪涝灾害,如1998年发生的重大洪涝灾害导致全省早稻单产较上年降低941 kg/hm^2 ,二季晚稻播面较上年减少11.6万 hm^2 ^[13],这严重制约了江西省的经济社会发展,并且给人民群众的生命财产安全带来威胁。雨季结束后常有干旱发生,如2003年发生的严重旱灾,导致全省因旱成灾面积152.14万 hm^2 ,导致二季晚稻总产比上一年减少105.3万t,减产率为16%^[13]。根据《江西省双季稻气象灾害指标》^[15](DB36/T 511—2007)定义的洪涝指数和干旱指数,计算了1961—2011年江西省的洪涝指数和秋旱指数。由图3可以看出,20世纪60年代中后期和90年代洪涝比较严重,大涝年有1998、1973和2010年,早稻的气候产量分别减产577.2、375.9和370.9 kg/hm^2 。水稻全生育期耗水量很大,近50年来秋旱较严重的时段为60年代,秋旱严重的年份有1974、1966和1986年,晚稻的气候产量分别减产为263.7、93.9和402.3 kg/hm^2 。

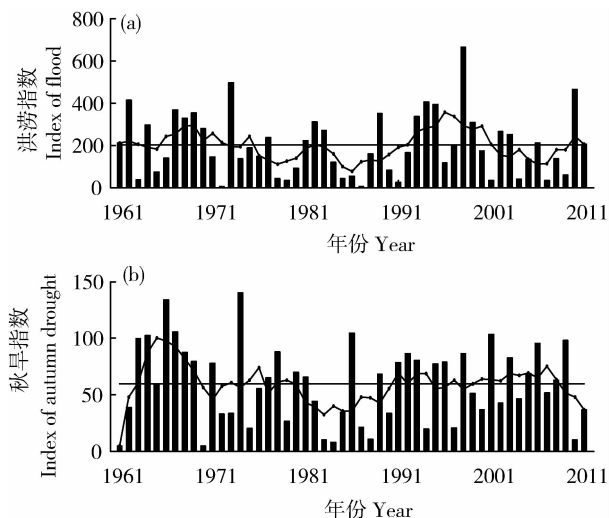


图3 江西省洪涝指数(a)和秋旱指数(b)历年变化图,直线表示平均值,曲线表示5年滑动平均

Fig. 3 Index of flood and autumn drought in Jiangxi from 1961 to 2011, straight line represents the average value and curve represents the five-year moving average

2.2.2 气温对双季稻的影响

近50年来江西省早稻生长期平均气温的变化表现出明显的阶段性特征,20世纪60—70年代中期,平均气温呈下降趋势,70年代中期—90年代中期在平均值附近摆动,90年代中期以后呈明显上升趋势,晚稻生长期平均气温的阶段性变化时间比早稻稍提前,60—70年代前期,平均气温呈下降趋势,70年代前期—90年代前期在平均值附近摆动,90年代前期以后呈明显上升趋势(图2(a))。气温升高会使水稻发育速率加快,生育期缩短^[2],冯敏玉等^[18]分析南昌县近20年来不同品种早稻的生育期发现,早稻的生育期有缩短的趋势,90年代中后期以来早稻生育期缩短为90~100d左右。计算双季稻生长期平均气温的均方差知道,60年代—21世纪以来,早稻生长期气温的均方差呈减少趋势,而晚稻生长期气温的均方差呈增加趋势(60年代为0.46,70年代为0.37,80年代为0.35,90年代为0.51,21世纪以来为0.62),这说明早稻生长期气温的气候变率在减小,而晚稻生长期气温的气候变率在加大。

水稻生长发育的起点温度要求在日平均气温 10°C 以上,而且当热量条件累积到一定程度后,才能完成其生育过程并获得产量。1961—2011年江西省早稻生育期和晚稻生育期间 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的活动积温变化趋势相似:20世纪60年代在平均值附近摆动,70—90年代以负距平为主,进入21世纪,以正距平为主,呈明显的增长趋势(图4)。这说明21世纪以来,江西省的双季稻生育的热量资源有明显的增加,这对水稻生产有利有弊,对于扩大多熟制面积、提高复种指数是一个有利条件^[19],并使得大部分地区早稻和晚稻的生育期提前,开镰早,安全齐穗终止日期延后,双季稻安全生长期有所延长,但由于热量条件增多也为双季稻病虫害及杂草繁衍提供了更为适宜的环境^[20]。

在一定的适宜温度范围内,水稻能正常生长和发育,如超过适宜温度范围,就会对水稻生长发育造成一定影响。高温逼熟指早稻灌浆成熟期间的持续高温少雨天气,使早稻成熟期提前,结实率和千粒重下降的一种灾害性天气。根据《江西省双季稻气象灾害指标》^[15](DB36/T 511—2007)定义的高温逼熟指标,计算了1961—2011年江西省的高温逼熟站次距平。通过对近50年资料的分析可见,2000年以前无论是轻度还是重度高温逼熟站次距平以负距平为主,说明早稻在抽穗开花至灌浆成熟期间遭受

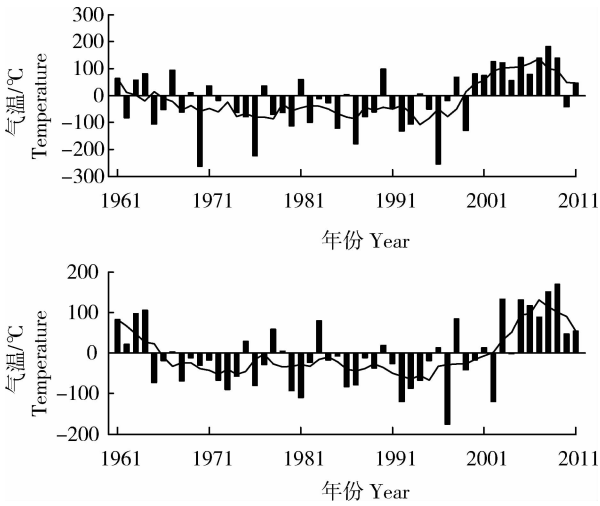


图 4 早稻(a)和晚稻(b)生育期间活动积温距平及其 5 年滑动平均的历年变化图

Fig. 4 Accumulated temperature anomalies of double-rice and its five-year moving average from 1961 to 2011

高温危害较小,21 世纪以来,高温逼熟,特别是轻度高温逼熟的次数呈明显上升状态(图 5),这说明随着气候变暖,夏季气温逐渐上升,极端高温事件频发,早稻受高温逼熟危害的几率逐渐增加。

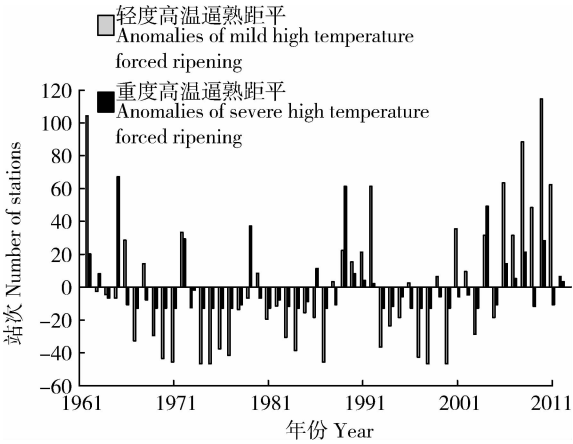


图 5 轻度和重度高温逼熟站次距平历年变化图

Fig. 5 Anomalies of mild and severe high temperature forced ripening from 1961 to 2011

寒露风也是江西水稻的气象灾害之一,出现时一般正值双季晚稻抽穗扬花期间,是影响晚稻生产的主要因素。根据《江西省双季稻气象灾害指标》^[15](DB36/T 511—2007)定义的寒露风指标,计算了 1961—2011 年江西省的寒露风站次距平。通过对近 50 年资料的分析可见,1998 年以前,轻度寒

露风站次距平总体以正距平较多,而重度寒露风站次距平变幅较大,正距平主要出现在 20 世纪 60 年代后期—70 年代前期、70 年代末 90 年代中期,对水稻抽穗扬花有一定的危害。1998 年以来,轻度和重度寒露风站次距平变化趋势较为一致,除了 2002 年、2004 年及 2011 年重度寒露风站次为正距平外,寒露风出现的站次基本都为负距平(图 6),这说明随着气候变暖,寒露风出现的几率越来越小,晚稻受寒露风灾害危害的几率也越来越小。

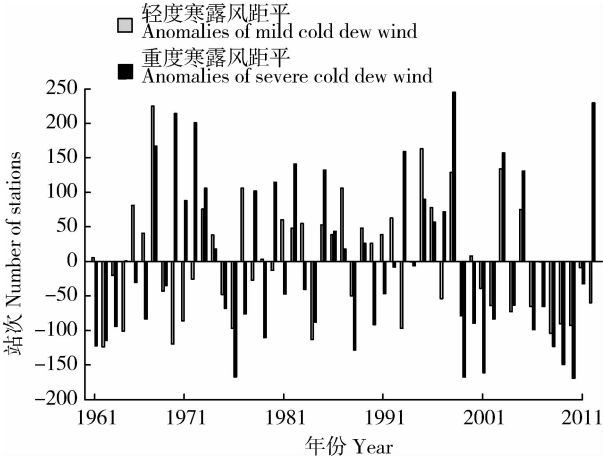


图 6 1961—2011 年轻度和重度寒露风站次距平

Fig. 6 Anomalies of mild and severe cold dew wind from 1961 to 2011

2.2.3 日照对双季稻的影响

由图 2(c)可以看出,近 50 年来江西省早稻生长期日照时间的变化表现为 20 世纪 60 年代日照时间较多,70—80 年代围绕平均值上下波动,90 年代日照时间较少,21 世纪以来又呈现为围绕平均值上下波动。晚稻生长期日照时间的变化表现出自 20 世纪 90 年代以来呈明显下降趋势,其中 90 年代日照时间最少,这表明晚稻获得的光照条件减少了。计算双季稻生长期平均气温的均方差知道,各个年代(20 世纪 60—90 年代及 21 世纪以来)早稻生长期日照的均方差呈增加-减少-增加-减少的趋势,70 年代均方差最大,而晚稻生长期日照的均方差表现为 70—90 年代最大,60 年代和 21 世纪以来偏小,这说明早稻生长期日照的气候变率波动很大,而晚稻生长期日照的气候变率目前比较小。

2.3 影响江西双季稻气候产量的主要气象因子

江西省的早稻的生育期(3 月中旬—7 月下旬)约为 14 旬,其间往往由于高温、洪涝和干旱等气象

灾害而危害水稻生产。计算江西省早稻生育期内逐旬平均温度、降水和日照时间与气候产量之间的相关系数(相关系数较高的见表 1),可知显著影响早稻气候产量的因素为:7 月中旬的气温,5 和 6 月的中旬和下旬及 7 月下旬的降水量,5 月中旬的日照时数。早稻气候产量与 7 月中旬气温呈负相关,表明高温对早稻灌浆成熟期产生不利影响,使早稻产量下降。早稻气候产量与 5 和 6 月的中旬和下旬及 7 月下旬的降水量之间的相关系数都是负值,说明降水量过多,不利于水稻的生长发育及产量形成。早稻气候产量与 5 月中旬的日照时间为正相关,说明在早稻分蘖期充足的日照有利于早稻产量的

增加。

江西省的晚稻的生育期(6 月下旬—11 月上旬)约为 14 旬,计算江西省晚稻生育期内逐旬平均温度、降水和日照时间与气候产量之间的相关系数(相关系数较高的见表 1),可知显著影响晚稻气候产量的因素为:10 月下旬的气温,8 月下旬、9 月中旬的降水量,10 月上旬的日照时间。晚稻气候产量与 10 月下旬的气温呈正相关,表明光温条件好有利于晚稻成熟、收晒。晚稻与 8 月下旬、9 月中旬的降水量之间的相关系数为正值,说明拔节孕穗期及抽穗扬花期水分充足,有利于晚稻生长与 10 月上旬的日照时间呈正相关,说明日照充沛对晚稻灌浆有利。

表 1 早晚稻的气候产量与其生长季每旬的平均温度 t 、降水量 r 和日照时间 s 的相关系数

早稻 Early rice		晚稻 Late rice	
各时间段的气象因子 Meteorology factors	相关系数 Correlation coefficient	各时间段的气象因子 Meteorology factors	相关系数 Correlation coefficient
7 月中旬 t Mid-July temperature	-0.34 *	10 月下旬 t Late in October temperature	0.30 *
5 月中旬 r Mid-May precipitation	-0.35 *	8 月下旬 r Late in August precipitation	0.29 *
月下旬 r Late in May precipitation	-0.36 *	9 月中旬 r Mid-September precipitation	0.28 *
6 月中旬 r Mid-June precipitation	-0.35 *	10 月上旬 s Early in October sunshine	0.27 *
6 月下旬 r Late in June precipitation	-0.55 *		
7 月下旬 r Late in July precipitation	-0.36 *		
5 月中旬 s Mid-May sunshine	0.37 *		

注: * 表示通过 0.05 显著性检验。
Note: * Means past the 0.05 significance test.

2.4 未来气候变化对江西双季稻生产的影响

2.4.1 江西双季稻气候产量预测模式

为了定量研究气象因子对产量影响的过程,预测气候变化对江西双季稻生产的影响,我们把对水稻生育期影响较大的因子提取出来,分别建立早稻和晚稻气候产量回归模型(表 2)。该模型既具有产

量预报功能,又可用于探求气候变化与气候变率不稳定对水稻气候产量影响的程度。从图 7 可以看出,回归模型模拟的气候产量基本可以反映气候产量对水稻的增减产趋势(回归模型通过 0.05 的信度检验)。根据表 2 模式,可知在温度逐渐升高的气候背景下,随着降水量增加,早稻会有不同程度的减

产,当7月中旬温度平均升高0.5、1和2℃时,早稻产量将减少16.7、33.3和66.6 kg/hm²。而7月下旬气温升高,晚稻产量会减少,但伏秋期降水增多会使晚稻增产。

表2 江西双季稻气候产量预测模型
Table 1 Forecast model of rice meteorology yield

回归模型 (通过 0.05 的信度检验) Regression models (Past the 0.05 significance test)		相关系数 Correlation coefficient	样本数 Number of samples
早稻 Early rice	$Y=1331.1-33.3T_{7中}-1.1R_{5中}-0.4R_{5下}-0.7R_{6中}-1.4R_{6下}-1.1R_{7下}$	0.58	51
晚稻 Late rice	$Y=344.9-26.2T_{7下}+20.7T_{10下}+0.8R_{8下}+2.2R_{9中}-1.5R_{10下}$	0.37	51

注:Y代表水稻气象产量(kg/hm²),T、R分别为温度、降水,下标为月份和旬。
Note:Y represents rice meteorological yields (kg/hm²),T represents temperature and R represents precipitation. Subscript represents the month and the period of ten days

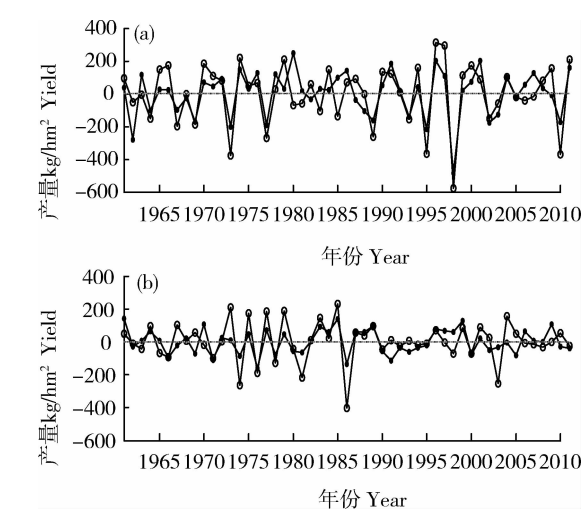


图7 早稻(a)和晚稻(b)气候产量和模拟气候产量历年变化图
Fig. 7 Meteorology yield of early rice (a) and late rice (b) from 1961 to 2011

2.4.2 未来气候变化对江西双季稻气象产量的影响
全球气候模式基于德国马普气象研究所提供的ECHAM5/MPI-OM模式SRES A1B排放情景(中排放,注重经济增长的全球共同发展情景)2015—2100年逐日气温、降水资料,并采用双线性插值法获取江西81个站点的逐日数据,根据表2双季稻气候产量预测模型模拟出2015—2100年气候产量。从图8(a)可以看出,2060年以前,早稻气候产量基本以正值为主,这说明这未来50年气候变化对早稻产量是一个有利的影响,其中2015—2030和2050—2060年早稻气候产量总体在100 kg/hm²以上,增幅明显,而2030—2050年早稻气候产量大都在100 kg/hm²以下,增幅较小。2060年后气候产

量呈正负波动状态,变化趋势不明显,表明2060年后气候变化对产量的影响大致是利弊参半。对于晚稻而言,气候产量的变化幅度整体较早稻气候产量小,2040年前,呈下降趋势,2040—2080年在平均值附近摆动,2080年后呈下降趋势,表明未来气候变化对晚稻产量的影响为弊大于利,总体呈减产趋势。

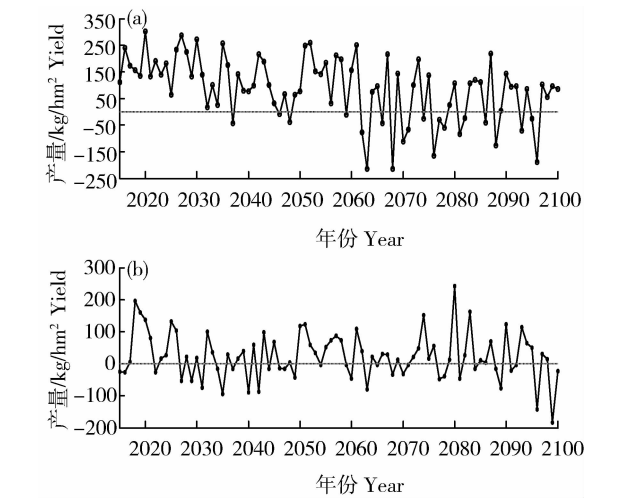


图8 ECHAM5模式SRES A1B排放情景下早稻(a)和晚稻(b)气候产量预测

Fig. 8 Meteorology yield prediction of early rice (open circles) and late (solid circles) rice by ECHAM5 model SRES A1B emissions scenario

3 结论与讨论

基于1961—2011年江西省81个常规气象观测站资料,双季稻产量资料和全球气候模式ECHAM5/MPI-OM在SRES A1B排放情景下2015—2100年逐日气温、降水资料,从双季稻生产期最重要的3要

素光、温和水入手探讨其变化特征及其与水稻产量之间的关系,并针对极端气候事件如旱涝、高温、寒露风对双季稻产量形成的影响进行了分析。

1)双季稻生长期的平均气温自20世纪90年代以后呈明显上升趋势,21世纪以来,双季稻生育期 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温以正距平为主。研究及观测事实表明,气温升高会使水稻发育速率加快,生育期缩短。21世纪以来,双季稻生长期的平均降水量偏少,但部分地区暴雨站次和暴雨日数却明显增加,降水异常导致的旱涝灾害是影响双季稻稳产和增产的一个巨大隐患。晚稻生长期日照时间自90年代以来呈明显下降趋势,这表明晚稻获得的光照条件减少了。随着城市化的不断发展,日益密集的工业生产活动以及急剧增加的人口带来的生活需求导致了江西省空气污染状况日趋加重,是致使日照时间持续下降的可能原因之一。总体而言,近50年来双季稻生长期光、温和水基本能满足水稻生长的需求。

2)分析极端气候事件对水稻生产的影响发现,随着气候变化,极端事件发生的频次在明显增加,比如江西省部分地区暴雨站次和暴雨日数明显增加,降水分布不均使旱涝灾害趋多、趋重,1990年以来,年平均成灾面积达80.44万 hm^2 ,比前40年增加了60.9%。随着气候变暖,高温时间明显增加,高温事件频频发生,高温逼熟的次数呈明显上升状态,这些都对水稻生长发育与产量形成不利。而有利的方面在于由于气候变暖,寒露风出现的几率越来越小,晚稻受寒露风灾害危害的几率也越来越小。

3)在农业生产应用中,以旬为时间段来分析气候变化对农业生产的影响是较为合理的,也是前人研究中比较少见的。本研究通过相关分析探讨了不同气象因子在双季稻生育期内逐旬的变化对水稻生产的作用。相关分析表明,显著影响早稻气候产量的因素为:7月中旬的气温,5月和6月的中旬和下旬及7月下旬的降水量,5月中旬的日照时间。显著影响晚稻气候产量的因素为:10月下旬的气温,8月下旬、9月中旬的降水量,10月上旬的日照时间。

4)根据相关分析的结果,建立气候产量预测模式,利用2015—2100年全球气候模式的预测结果,对江西双季稻2015—2100年的气候产量进行定量预测,发现2060年以前,早稻气候产量基本以正值为主,2060年后气候产量呈正负波动状态,晚稻气

候产量整体变化幅度较早稻气候产量小。这对江西省的双季稻生产起到一定的指导作用,为江西省双季稻生产如何应对气候变化提供参考。

参 考 文 献

- [1] 郭华,殷国强,姜彤.未来50年鄱阳湖流域气候变化预估[J].长江流域资源与环境,2008,17(1):73-78
- [2] 张宇,王馥蓉.气候变暖对我国水稻生产可能影响的数值模拟试验研究[J].应用气象学报,1995,6(增刊):19-25
- [3] Huntington T G. Evidence for intensification of the global water cycle: Review and synthesis [J]. Journal of Hydrology, 2005,319(1-4):83-95
- [4] Kundzewicz Z W, Scheffelnhuber H J. Floods in the IPCC TAR perspective[J]. Natural Hazards,2004,(31):111-128
- [5] Milly P C D, Wetherald R T, Dunne K A, et al. Increasing risk of great floods in a changing climate[J]. Nature, 2002, 415 (31):514-517
- [6] 史印山,王玉珍,池俊成,等.河北平原气候变化对冬小麦产量的影响[J].中国生态农业学报,2008,16(6):1444-1447
- [7] 邓环,万素琴,刘敏,等.气候变化对1981年以来湖北省中稻生育期的影响[J].华中农业大学学报,2013,32(2):84-89
- [8] 江敏,金之庆,石春林,等.气候变化对福建省水稻生产的阶段性影响[J].中国农学通报,2009,25(10):220-227
- [9] 熊伟,陶福禄,许吟隆,等.气候变化情景下我国水稻产量变化模拟[J].中国农业气象,2001,22(3):1-5
- [10] 姚凤梅,张佳华,孙白妮,等.气候变化对中国南方稻区水稻产量影响的模拟和分析[J].气候与环境研究,2007,12(5):659-666
- [11] 杨沈斌,申双和,赵小艳,等.气候变化对长江中下游稻区水稻产量的影响[J].作物学报,2010,36(9):1519-1528
- [12] 王保生,卢冬梅,刘文英,等.江西水稻产量波动的成因分析及对策[J].江西气象科技,2004,27(2):25-27
- [13] 江西省统计局.江西统计年鉴1989—2011年[M].北京:中国统计出版社
- [14] 房世波.分离趋势产量和气候产量的方法探讨[J].自然灾害学报,2011,20(6):13-18
- [15] DB36/T 511—2007,江西省双季稻气象灾害指标[S]
- [16] 陈双溪,黎健.气象与领导[M].北京:气象出版社,1999
- [17] 王保生,刘文英,黄淑娥.江西省旱涝灾害风险评估与农业可持续发展[J].气象与减灾研究,2006,29(2):43-47
- [18] 冯敏玉,官峰,张崇华,等.气候生态因子对南昌县水稻产量的影响[J].安徽农业科学,2008,36(18):7608-7609,7749
- [19] 张厚瑄,张翼.中国活动积温对气候变暖的响应[J].地理学报,1994,49(1):27-36
- [20] 张厚瑄.气候变暖对我国农业生态环境影响及其对策的研究[J].中国农业气象,1992,(3):20-33