

近 30 年江西双季稻安全生产期及温光资源变化

吕伟生 曾勇军* 石庆华 潘晓华 黄山 商庆银 谭雪明 李木英 胡水秀 曾研华

(江西农业大学/双季稻现代化生产协同创新中心/作物生理生态与遗传育种教育部重点实验室/江西省作物生理生态与遗传育种重点实验室, 南昌 330045; * 通讯联系人, E-mail: zengyj2002@163.com)

Changes in Safe Production Dates and Heat-light Resources of Double Cropping Rice in Jiangxi Province in Recent 30 Years

LÜ Wei-sheng, ZENG Yong-jun*, SHI Qing-hua, PAN Xiao-hua, HUANG Shan, SHANG Qing-yin, TAN Xue-ming, LI Mu-ying, HU Shui-xiu, ZENG Yan-hua

(Jiangxi Agricultural University/Collaborative Innovation Center for the Modernization Production of Double Cropping Rice/Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Genetic Breeding, Ministry of Education/Jiangxi Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Genetic Breeding, Nanchang 330045, China; * Corresponding author, E-mail: zengyj2002@163.com)

LÜ Weisheng, ZENG Yongjun, SHI Qinghua, et al. Changes in safe production dates and heat-light resources of double cropping rice in Jiangxi Province in recent 30 years. *Chin J Rice Sci*, 2016, 30(3): 323-334.

Abstract: Ascertaining the change rules of safe production dates and heat-light resources of rice is an important basis for high use efficiency of heat-light resources, and high and stable production. In this study, the daily mean temperatures and sunshine hours during the past 30 years (1984–2013) provided by 15 meteorological stations in different ecological regions in Jiangxi Province (Northern Jiangxi, Central Jiangxi and Southern Jiangxi) were analyzed. According to the critical temperature indices for rice safe production dates, the change rules of safe production dates and heat-light resources of double rice with 50% and 80% guarantee rates were provided. The results showed that the safe production dates and heat-light resources changed obviously between the first 15 years (1984–1998) and the second 15 years (1999–2013), and there were certain differences among different regions. Compared with the first 15-year period, the safe sowing dates of early rice seedlings with film-mulching in the second 15-year period were ten-day ahead of time (with the tendency of $-4.16 \text{ d } 10\text{a}^{-1}$, the same as below), and those of direct seedling shifted to four days earlier ($-3.17 \text{ d } 10\text{a}^{-1}$); the safe transplanting dates were two-day ahead of time ($-2.21 \text{ d } 10\text{a}^{-1}$). For late rice, the safe maturity dates were delayed by eight days ($3.56 \text{ d } 10\text{a}^{-1}$), while those of full heading delayed unobviously. The safe production season for the early rice with film-mulching and direct seedling extended by eighteen ($7.72 \text{ d } 10\text{a}^{-1}$) and eleven ($6.73 \text{ d } 10\text{a}^{-1}$) days, respectively. During the safe production season, daily mean temperature increased obviously, accumulated temperature added remarkably, and sunshine hours changed unobviously. Monitoring data showed that, practical production dates were different from the safe production dates, though the practical production dates were adjusted correspondingly in recent years. So the safe production dates under 80% guarantee rate over the past 30 years were obtained by each meteorological stations, which can be referred in production arrangement, planting patterns and varieties collocation for double rice in the regions nearby. Finally, according to the trends of climate changes, the possible adaptive strategies of agronomic measures were discussed.

Key words: Jiangxi Province; double rice; safe production date; heat-light resources

吕伟生, 曾勇军, 石庆华, 等. 近 30 年江西双季稻安全生产期及温光资源变化. 中国水稻科学, 2016, 30(3): 323-334.

摘 要: 明确水稻安全生产期及温光资源的变化规律, 是提高温光资源利用率和实现水稻高产稳产的重要基础。本研究分析了江西不同生态区(赣南、赣中、赣北)15 个气象站近 30 年(1984–2013)逐日日平均气温、日照时数等气象资料, 参照水稻生产中常用的安全生产临界温度指标, 研究了近 30 年来不同地区 50% 和 80% 保证率下双季稻安全生产期及温光资源的变化规律。结果表明, 1999–2013 年(前 15 年)各地安全生产期及温光资源较 1984–1998 年(后 15 年)发生明显变化, 且地区间存在一定的差异。早稻覆膜育秧安全播种期平均提前了 10 d(气候变化倾向率 $-4.16 \text{ d}/10\text{a}$, 下同), 早稻安全直播期

收稿日期: 2015-10-28; 修改稿收到日期: 2016-02-02。

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目(2011BAD16B04); 公益性行业科研专项(201303102); 国家农业科技成果转化资金资助项目(2013GB2C500244); 江西省高等学校科技落地计划资助项目(KJLD12003); 江西省水稻产业体系专项(JXARS-02-03); 江西省研究生创新专项资金资助项目(YC2014-B034); 中国农业科学院水稻高效栽培技术创新团队项目。

提前了4 d(-3.17 d/10a),早稻安全移栽期提前了2 d(-2.21 d/10a)。晚稻安全齐穗期延迟趋势不明显(1.16 d/10a),晚稻安全成熟期延迟了8 d(3.56 d/10a)。全年安全生产期天数在早稻覆膜育秧和直播条件下分别延长了18 d(7.72 d/10a)和11 d(6.73 d/10a)。安全生产期内温光资源总体呈温度明显升高、积温显著增加、日照时数无明显变化的特点。监测资料表明,近年来各地区实际生产日期作了相应的调整,但仍与安全生产日期存在较大偏差,因此,推算了近30年各站点80%保证率的安全生产日期,以就近指导各地稻作季节安排、种植方式选择及早晚稻品种搭配。最后,依据气候变化趋势,讨论了农艺措施的可能适应策略。

关键词: 江西;双季稻;安全生产期;温光资源

中图分类号: S162; S181.6

文献标识码: A

文章编号: 1001-7216(2016)03-0323-12

全球气候变暖已成为不容置疑的事实^[1-5]。近百年来全球平均气温上升了 0.85°C ($0.65\sim 1.06^{\circ}\text{C}$)^[5];我国年平均气温上升(0.78 ± 0.27) $^{\circ}\text{C}$ ^[6,7]。江西^[8]、湖南^[9]等双季稻区在近50年来,特别是自20世纪80年代后期开始,年平均气温和冬季平均气温均呈稳步上升的趋势,而夏季平均气温则略有下降,同时日照时数总体呈减少趋势。这种以气温上升为显著特征的气候变化,已对农业生态环境、农作物生产特别是水稻生产产生了一系列不可忽视的影响^[10],主要表现为多熟制界限北移^[11]、物候期变化明显^[12]、适宜生产日期相应变化^[12-15]、生长季节延长^[9,14-16]、稳产性变差^[17-20]、品质降低^[21]。

水稻是我国重要的粮食作物^[22-23]。江西是我国双季稻优势产区,双季稻种植面积占水稻种植面积的90%,是全国双季稻种植比例最高的省份,在保障国家粮食安全方面占有极其重要的地位^[24]。江西为亚热带温暖湿润季风气候,热量资源较为充沛,水稻生长季节较长,但太阳辐射强度相对较低,生产潜力受限。充分利用生长季节、适当延长光合时间是提高双季稻总产的有效途径^[25]。但是,同时还需从气象角度考虑水稻的安全生长,尤其是科学安排早稻播种期和晚稻齐穗期,二者过早或过迟均不利于周年的高产和稳产^[25-26]。因此,在当前气候变化背景下研究双季稻安全生产季节及温光资源的变化具有重要意义。

20世纪80年代以来,江西双季稻的种植方式随着经济社会发展及气候变暖发生了巨大变化,抛栽、直播和机插等轻简栽培方式相继得到发展,尤其是近年来,直播、机插发展迅速,鄱阳湖地区甚至还出现晚稻直播^[27,28]。与传统手栽、抛栽相比,直播因温度及茬口要求导致播期有所推迟^[13,27]。机插条件下,秧龄弹性小且容易导致生育期延迟,也加剧了双季稻的季节矛盾^[29]。这就使双季稻安全生产特别是早稻安全播种、移栽,晚稻安全齐穗、成熟,以及温光资源高效利用等问题更为突出^[13,15]。此外,

江西地形地貌独特,东西南部三面环山,中部丘陵起伏,南北跨越近6个纬度($24^{\circ}29'\sim 30^{\circ}04'$),赣南、赣中、赣北气候条件存在显著差异。加之气候变化在时空上存在较大的波动性和异质性,开展不同生态区双季稻安全生产季节及温光资源的变化研究更具针对性和现实指导意义。目前针对气候变化对江西双季稻区安全生产季节变化及温光资源特征的影响的研究还鲜有报道。因此,本研究基于江西不同地区(赣南、赣中、赣北)15个气象站1984—2013年的气象资料以及生产中大面积种植的双季稻品种实际生长期,将1984—2013年划分成前15年和后15年2个时段^[14-15],研究近30年江西不同区域双季稻安全生产日期变化及温光资源特征,以期为本地区稻作季节安排、种植方式选择及双季稻品种搭配提供参考。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本研究所用的气象资料(1984—2013年逐日日平均温度与日照时数)来自江西省气象局,包括赣北、赣中、赣南3个地区共计15个代表性气象站(表1)。各地区双季稻主体种植方式及大面积种植的双季稻品种实际生长期(20世纪80年代至今各年代早稻播种期、早稻移栽期、晚稻齐穗期、晚稻成熟期),由江西省农业厅农技推广总站及各气象站所在县的农业局农技推广中心提供。

1.2 计算方法

1.2.1 安全日期

参考水稻生产中常用的安全生产日期临界温度指标,采用5日滑动平均法对各点逐日日平均温度进行分析,确定大于某一界限温度的起始或终止日期,再以不连续出现3 d以上低于该界限温度的标准确定安全生产日期^[30]。早稻覆膜育秧与直播稻的播种界限温度分别为 8°C 与 12°C ,早稻移栽的界限温度为 15°C ,晚稻齐穗与成熟的界限温度分别为

表 1 江西省各气象站的地理位置

Table 1. Geographic locations of meteorological stations in Jiangxi Province.

地区 Region	经度 Latitude/°	纬度 Longitude/°
赣北 Northern Jiangxi		
九江 Jiujiang	116.00	29.70
修水 Xiushui	114.57	29.03
鄱阳 Poyang	116.67	29.00
玉山 Yushan	118.25	28.68
南昌 Nanchang	115.85	28.68
赣中 Central Jiangxi		
临川 Linchuan	116.29	27.95
新干 Xingan	115.40	27.77
南城 Nancheng	116.63	27.55
吉安 Ji'an	114.98	27.12
永新 Yongxin	114.23	26.95
赣南 Southern Jiangxi		
兴国 Xingguo	115.35	26.33
赣县 Ganxian	114.02	25.87
崇义 Chongyi	114.30	25.70
会昌 Huichang	115.78	25.60
信丰 Xinfeng	114.93	25.38

22℃与 15℃^[25,31-32]。

1.2.2 不同保证率的安全生产日期

根据上述标准和方法确定安全生产日期,分别统计近 30 年(1984—2013)、前 15 年(1984—1998)、后 15 年(1999—2013) 3 个时段 50%、80% 保证率的安全生产日期,不同保证率的安全生产日期采用经验频率法计算^[30],计算公式如下:

$$P_i = [m_i / (n + 1)] \times 100\%$$

其中, P_i 为经验频率(%); i 为年份; m 为安全生产日期按日期迟早顺序排列的序号; n 为统计年数。

1.2.3 双季安全生产季节天数

双季安全生产季节天数,即早稻安全播种期至晚稻安全成熟期的总天数^[32],分别以 50%、80% 保证率的早稻安全播种期到晚稻安全成熟期之间的天数表示。

1.2.4 气候变化倾向率

用最小二乘法计算安全生产日期(用日序表示)、温度、日照时数等农业气候因素与年份的线性回归系数 a ,使其变化可用一次线性方程表示^[15,33],方程如下:

$$y = ax + b;$$

式中, y 为相关气候要素, x 为年份, a 为回归系数, b 为回归截距。以 $a \times 10$ 为气候变化倾向率,表示相关气候要素平均每 10 年的变化速率;用时间 x

与变量 y 之间的相关系数检验变化趋势的显著性^[34]。

1.2.5 温光资源特征

水稻生育起始温度为 10℃^[12,35],因此,本研究根据确定的安全生产日期,分别统计早稻安全播种期至晚稻安全成熟期 $\geq 10^\circ\text{C}$ 的活动积温与日照时数等温光资源特征。

1.3 分析与统计方法

用 Microsoft Excel 2003 软件进行数据计算及制图,DPS 7.05 软件进行统计分析^[36]。

2 结果与分析

2.1 安全生产日期及其变化

2.1.1 早稻安全播种期

由表 2 可以看出,近 30 年来,早稻无论是覆膜育秧还是直播,安全播种期均呈提前的趋势,但未达显著水平,其中覆膜育秧安全播种期的提前幅度大于直播。覆膜育秧安全播种期变化倾向率,赣北、赣中、赣南依次为-4.30、-3.96、-4.24 d/10a,全省平均为-4.16 d/10a。安全直播期变化倾向率赣北、赣中、赣南依次为-2.62、-2.64、-4.24 d/10a,全省平均为-3.17 d/10a。总体而言,赣南安全播种期提前趋势较为明显,尤其是安全直播期。

表 3 显示,不同保证率的安全播种期均由北向南逐渐提前,后 15 年明显提前。覆膜育秧 50% 保证率的安全播种期在 3 月 7 日左右,与前 15 年相比,后 15 年提前了近 9 d;80% 保证率安全播种期在 3 月 22 日左右,后 15 年比前 15 年提前约 10 d。50% 和 80% 保证率下,安全直播期在 3 月 26 日和 4 月 5 日左右,前后分别提前了 6 d 和 4 d。直播提前天数小于覆膜育秧,可能与后 15 年春季气温稳定通过 8℃ 后迅速回暖,而在通过 12℃ 时波动较大有关。

2.1.2 早稻安全移栽期

与安全播种期类似,早稻安全移栽期也表现出提前的趋势,变化倾向率赣北、赣中、赣南依次为-2.40、-2.26、-1.96 d/10a,平均为-2.21 d/10a,即 30 年来全省早稻安全移栽期提前了 6~7 d(表 2)。而与安全播种期相反的是,安全移栽期变化趋势赣中北表现更为明显,30 年来提前了 7~8 d。由表 3 可知,50% 保证率的安全移栽期平均为 4 月 9 日,后 15 年较前 15 年提前 3 d 左右;80% 保证率的安全移栽期集中在 4 月 16 日,后 15 年比前 15 年提前了 1 d,其中赣南无明显变化(4 月 13 日)。

表 2 江西双季稻安全生产日期的年际变化趋势

Table 2. Trends in yearly changes of safe production date for double rice in Jiangxi Province.

安全生产期 Safe production date	地区 Region	线性方程 Linear equation	相关系数 Correlation coefficient	倾向率 Tendency /(d·10a ⁻¹)
早稻覆膜育秧安全播种期 SSDF	赣北 NJ	$y = -0.4301x + 930.3$	-0.3389	-4.30
	赣中 CJ	$y = -0.3935x + 855.7$	-0.3001	-3.94
	赣南 SJ	$y = -0.4241x + 909.9$	-0.2764	-4.24
	平均 Mean	$y = -0.4159x + 898.5$	-0.3339	-4.16
早稻安全直播期 SSDD	赣北 NJ	$y = -0.2624x + 614.3$	-0.2751	-2.62
	赣中 CJ	$y = -0.2643x + 616.1$	-0.2885	-2.64
	赣南 SJ	$y = -0.4238x + 930.1$	-0.3303	-4.24
	平均 Mean	$y = -0.3168x + 720.1$	-0.2978	-3.17
早稻安全移栽期 STDER	赣北 NJ	$y = -0.2398x + 583.2$	-0.2532	-2.40
	赣中 CJ	$y = -0.2259x + 522.9$	-0.2526	-2.26
	赣南 SJ	$y = -0.1964x + 487.5$	-0.2224	-1.97
	平均 Mean	$y = -0.2207x + 541.2$	-0.2802	-2.21
晚稻安全齐穗期 SFHLR	赣北 NJ	$y = 0.2937x - 321.0$	0.3632 [*]	2.94
	赣中 CJ	$y = 0.0304x + 205.4$	0.0332	0.30
	赣南 SJ	$y = 0.1597x - 48.01$	0.1597	1.60
	平均 Mean	$y = 0.1613x - 54.53$	0.0376	1.61
晚稻安全成熟期 SMDLR	赣北 NJ	$y = 0.3876x - 469.7$	0.4392 [*]	3.88
	赣中 CJ	$y = 0.3843x - 461.9$	0.4454 [*]	3.84
	赣南 SJ	$y = 0.2952x - 275.9$	0.3878 [*]	2.95
	平均 Mean	$y = 0.3557x - 402.5$	0.4668 ^{**}	3.56

SSDF—早稻覆膜育秧安全播种期；SSDD—早稻安全直播期；STDER—早稻安全移栽期；SFHLR—晚稻安全齐穗期；SMDLR—晚稻安全成熟期。^{*}和^{**}分别表示在 5%和 1%水平上显著相关。下同。

NJ, Northern Jiangxi; CJ, Central Jiangxi; SJ, Southern Jiangxi. SSDF, Safe sowing date of early rice seedling covered with film; SSDD, Safe sowing date of early rice under direct seedling; STDER, Safe transplanting date of early rice; SFHLR, Safe full heading date of late rice; SMDLR, Safe maturity date of late rice. ^{*} and ^{**} significantly correlated at 0.05 and 0.01 levels, respectively. The same as below.

2.1.3 晚稻安全齐穗期

近 30 年晚稻安全齐穗期总体呈延迟的趋势,变化倾向率为 1.61 d/10a,其中赣北延迟趋势显著,变化倾向率达 2.94 d/10a,赣南次之(1.59 d/10a,赣中最小,仅 0.83 d/10a(表 2)。从不同保证率的具体日期来看(表 3),晚稻安全齐穗期由北向南逐渐后移;50%保证率的安全齐穗期平均在 9 月 23 日,后 15 年较前 15 年推迟 1 d 左右,赣中则提前了 2 d;80%保证率的安全齐穗期为 9 月 15 日,前后 15 年并无明显变化,其中赣北延迟 3 d,而赣中、赣南分别提前了 2 d 和 1 d。

2.1.4 晚稻安全成熟期

30 年间晚稻安全成熟期呈显著延迟趋势,变化倾向率 2.95~3.88 d/10a,由北向南逐渐递减,平均为 3.56 d/10a,平均每 10 年延迟 3~4 d(表 2)。再从各保证率的安全日期来看(表 3),晚稻安全成熟期由北向南逐渐推迟,但变化天数逐渐减少;在

50%和 80%保证率下,晚稻安全成熟期分别在 11 月 3 日和 10 月 25 日左右,前后分别延迟了约 5 d 和 8 d。相比其他安全生产日期,晚稻安全成熟期变化趋势最为显著,这可能与近年来出现的暖冬现象有关。

2.2 双季稻安全生产季节及其变化

近 30 年来,由于早稻安全播种期不断提前,而晚稻安全成熟期显著延后,双季水稻安全生产季节呈显著或极显著延长的变化趋势(图 1)。在早稻覆膜育秧的栽培方式下,双季安全生产天数的变化倾向率在 6.49~7.19 d/10a 之间,其中赣南最大,全省平均为 6.73 d/10a,即平均每 10 年延长 6~7 d;在早稻直播的种植方式下,变化倾向率在 7.19~8.18 d/10a 之间,由北至南依次递减,平均为 7.72 d/10a,平均每 10 年延长约 8 d。

由表 4 可知,无论是早稻覆膜育秧还是早稻直播,不同保证率的安全生产季节均由北向南逐渐延

表 3 江西双季稻不同保证率安全生产日期及其变化

Table 3. Safe production dates with different guarantee rate and change of double rice in Jiangxi Province.

安全生产期与地区 Safe production date and region	50%保证率 50% guarantee rate				80%保证率 80% guarantee rate			
	30 年	前 15 年	后 15 年	变化天数	30 年	前 15 年	后 15 年	变化天数
	30 years	1st 15 years	2nd 15 years	Changed	30 years	1st 15 years	2nd 15 years	Changed
	/(M-D)	/(M-D)	/(M-D)	days/d	/(M-D)	/(M-D)	/(M-D)	days/d
早稻覆膜育秧安全播种期 SSDF								
赣北 NJ	03-10	03-14	03-06	—8	03-23	03-27	03-17	—10
赣中 CJ	03-09	03-13	03-05	—8	03-21	03-25	03-15	—10
赣南 SJ	03-01	03-07	02-25	—11	03-16	03-21	03-10	—11
平均 Mean	03-07	03-11	03-02	—9	03-20	03-24	03-14	—10
早稻安全直播期 SSDD								
赣北 NJ	03-29	04-01	03-27	—5	04-06	04-09	04-04	—5
赣中 CJ	03-27	03-30	03-25	—5	4-5	04-07	04-03	—4
赣南 SJ	03-23	03-27	03-20	—7	04-03	04-04	03-31	—4
平均 Mean	03-26	03-30	03-24	—6	04-05	04-06	04-02	—4
早稻安全移栽期 STDER								
赣北 NJ	04-13	04-14	04-11	—3	04-20	04-22	04-20	—2
赣中 CJ	04-10	04-11	04-09	—2	04-16	04-17	04-16	—1
赣南 SJ	04-03	04-05	04-02	—3	04-13	04-13	04-13	0
平均 Mean	04-09	04-10	04-07	—3	04-16	04-17	04-16	—1
晚稻安全齐穗期 SFHLR								
赣北 NJ	09-22	09-19	09-23	+4	09-14	09-11	09-14	+3
赣中 CJ	09-22	09-23	09-21	—2	09-15	09-16	09-14	—2
赣南 SJ	09-27	09-26	09-27	+1	09-18	09-18	09-17	—1
平均 Mean	09-23	09-23	09-24	+1	09-15	09-15	09-15	0
晚稻安全成熟期 SMDLR								
赣北 NJ	10-31	10-29	11-02	+4	10-22	10-16	10-25	+9
赣中 CJ	10-31	10-29	11-03	+5	10-23	10-20	10-29	+9
赣南 SJ	11-08	11-06	11-10	+5	10-31	10-29	11-03	+5
平均 Mean	11-03	11-01	11-05	+5	10-25	10-21	10-29	+8

“+”表示日期推迟，“—”表示日期提前，数字为推迟或提前的具体天数。
“+” or “—” mean delaying or advancing, and the number means changed days.

长,前后 15 年变化明显。早稻覆膜育秧条件下,50%保证率安全生产季节 235~252 d,平均约 241 d,后 15 年比前 15 年增加约 13 d;80%保证率安全生产季节 213~229 d,平均约 219 d,后 15 年比前 15 年延长约 18 d。在早稻直播条件下,50%和 80%保证率安全生产季节分别平均为 211 d 和 203 d,后 15 年较前 15 年延长约 11 d 左右。安全生产季节天数变幅表现为直播方式小于覆膜育秧,与二者安全播种期变化规律一致。

2.3 双季稻安全生产季节的温光资源及其变化

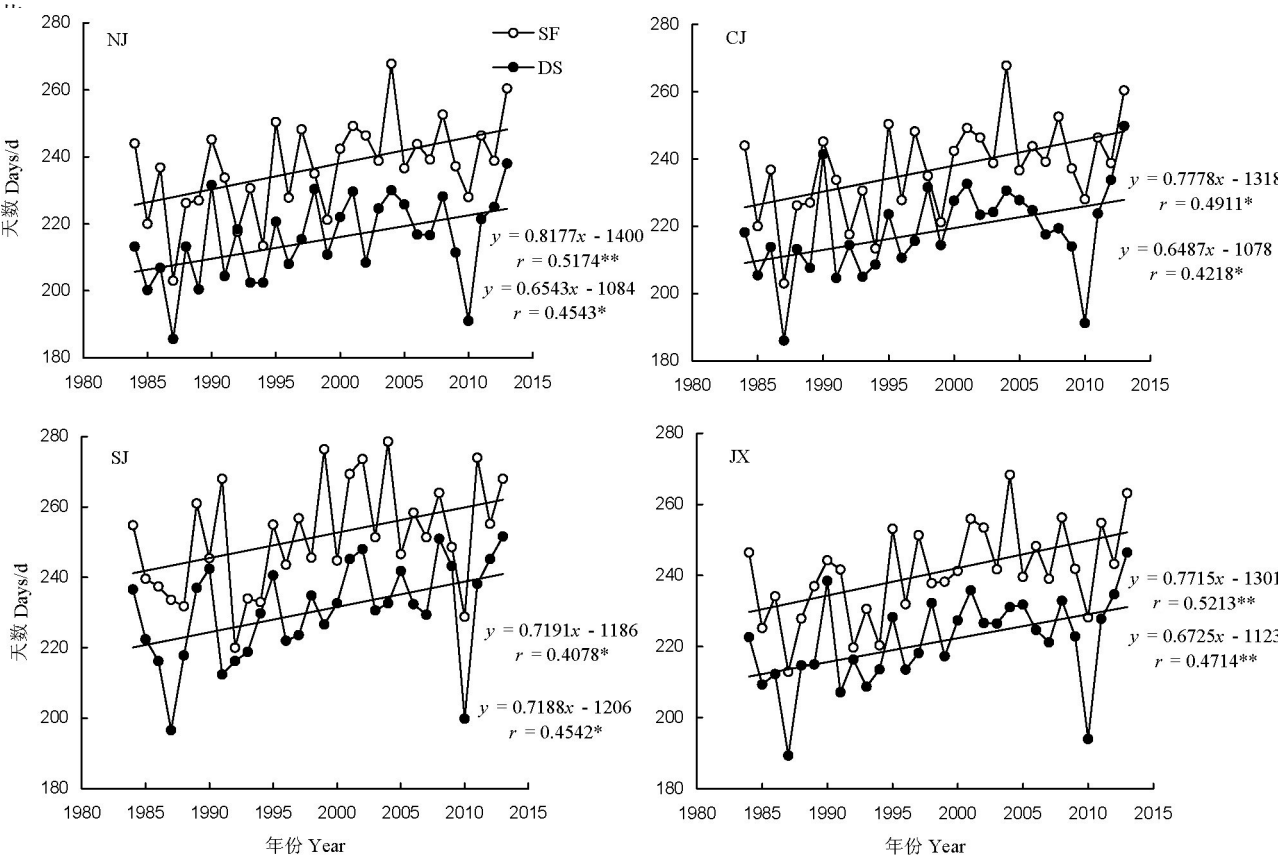
2.3.1 热量资源

由表 5 可以看出,无论在早稻覆膜育秧还是在早稻直播的条件下,30 年来安全生产季节内日均温度及≥10℃活动积温均呈极显著上升的趋势,且各时段均由北向南递增,其中赣北上升幅度相对较大。

在早稻覆膜育秧条件下,日均温度为 24.07℃,近 15 年为 24.46℃,较前 15 年上升了 0.76℃,平均气候变化倾向率 0.48℃/10a;≥10℃的活动积温平均为 5281.01℃,前后 15 年分别为 5197.26℃ 和 5364.76℃,后 15 年上升了 167.50℃,气候变化倾向率平均为 104.72℃/10a。在早稻直播条件下,日均温度略高于覆膜育秧,平均为 24.85℃,近 15 年为 24.55℃,较前 15 年上升约 0.61℃,平均气候变化倾向率为 0.40℃/10a;≥10℃的活动积温为 5056.91℃,比覆膜育秧低约 224℃,前后 15 年分别为 4995.23℃ 和 5118.60℃,后 15 年上升了 123.37℃,气候变化倾向率平均为 84.52℃/10a。

2.3.2 光照资源

与热量资源相比,30 年间双季稻安全生产季光照资源并无显著变化,且存在一定的地区差异,赣



SF—早稻覆膜育秧；DS—早稻直播；JX—江西。下同。
SF, Early rice seedling covered with film; DS, Direct seeding of early rice; SJ, Southern Jiangxi. The same as below.

图 1 江西双季稻安全生产天数的年际变化趋势
Fig. 1. Yearly changing trends of safe growth season for double cropping rice in Jiangxi Province.

表 4 江西双季稻不同保证率安全生产天数及其变化
Table 4. Days of safe growth season with different guarantee rate and its changes for double cropping rice in Jiangxi Province.

育秧方式与地区 Seedling method and region	50%保证率 50% guarantee rate				80%保证率 80% guarantee rate			
	30 年	前 15 年	后 15 年	变化天数	30 年	前 15 年	后 15 年	变化天数
	30 years	1st 15	2nd 15	Changed	30 years	1st 15	2nd 15	Changed
	years	years	years	days	years	years	years	days
早稻覆膜育秧 SF								
赣北 NJ	235	228	240	+12	213	205	224	+19
赣中 CJ	237	230	243	+13	216	209	228	+19
赣南 SJ	252	245	260	+15	229	221	238	+17
平均 Mean	241	235	248	+13	219	212	230	+18
早稻直播 DS								
赣北 NJ	215	211	220	+9	199	191	205	+14
赣中 CJ	218	213	224	+11	200	196	209	+13
赣南 SJ	230	224	235	+11	211	208	218	+10
平均 Mean	221	216	226	+10	203	198	210	+12

“+”表示天数延长,数字为延长的具体天数。
“+” means delaying, and the number means changed days.

表 5 江西双季稻安全生产季节热量资源及其变化

Table 5. Heat resources and its changes during safe growth season of double cropping rice in Jiangxi Province.

项目 Item	日均温度					≥10℃活动积温				
	Daily mean temperature					Active accumulated temperature ≥10℃				
	30 年	前 15 年	后 15 年	变化	倾向率	30 年	前 15 年	后 15 年	变化	倾向率
	30 years	1st 15	2nd 15	Change	Tendency	30 years	1st 15	2nd 15	Change	Tendency
	/℃	years/℃	years/℃	/℃	/(℃·10a ⁻¹)	/℃	years/℃	years/℃	/℃	/(℃·10a ⁻¹)
早稻覆膜育秧 SF										
赣北 NJ	23.83	23.42	24.24	+0.82	0.51**	5085.98	4998.67	5173.30	+174.63	109.74**
赣中 CJ	24.20	23.83	24.56	+0.73	0.47**	5221.79	5143.28	5300.30	+157.02	100.62**
赣南 SJ	24.19	23.82	24.57	+0.75	0.45**	5535.26	5449.84	5620.69	+170.85	103.79**
平均 Mean	24.07	23.69	24.46	+0.76	0.48**	5281.01	5197.26	5364.76	+167.50	104.72**
早稻直播 DS										
赣北 NJ	24.59	24.25	24.94	+0.69	0.46**	4893.82	4825.43	4962.21	+136.77	90.59**
赣中 CJ	25.01	24.72	25.30	+0.58	0.39**	5012.71	4954.67	5070.75	+116.08	78.46**
赣南 SJ	24.95	24.67	25.23	+0.56	0.35**	5264.21	5205.58	5322.84	+117.26	73.87**
平均 Mean	24.85	24.55	25.16	+0.61	0.40**	5056.91	4995.23	5118.60	+123.37	84.52**

“+”表示增加,数字表示增加的数量。
“+” means increasing, and the number means changed quantity.

表 6 江西双季稻安全生产季节光照资源及其变化

Table 6. Light resources and its changes during safe growth season of double cropping rice in Jiangxi Province.

项目 Item	日均日照时数 Mean daily sunshine hours					总日照时数 Total sunshine hours				
	30 年	前 15 年	后 15 年	变化	倾向率	30 年	前 15 年	后 15 年	变化	倾向率
	30 years	1st 15	2nd 15	Change	Tendency	30 years	1st 15	2nd 15	Change	Tendency
	/h	years/h	years/h	/h	/(h·10a ⁻¹)	/h	years/h	years/h	/h	/(h·10a ⁻¹)
早稻覆膜育秧 SF										
赣北 NJ	5.60	5.45	5.75	+0.30	0.14	1194.39	1162.77	1226.01	+63.23	29.04
赣中 CJ	5.16	5.17	5.15	-0.02	-0.02	1114.08	1116.28	1111.88	-4.40	-3.69
赣南 SJ	5.03	5.04	5.02	-0.02	-0.02	1151.61	1154.25	1148.98	-5.27	-5.04
平均 Mean	5.26	5.22	5.31	+0.09	0.03	1153.36	1144.43	1162.29	+17.86	6.77
早稻直播 DS										
赣北 NJ	5.76	5.67	5.85	+0.18	0.07	1146.62	1128.78	1164.46	+35.68	13.12
赣中 CJ	5.39	5.45	5.33	-0.12	-0.10	1080.09	1091.73	1068.46	-23.27	-19.85
赣南 SJ	5.29	5.33	5.25	-0.08	-0.08	1115.64	1124.54	1106.75	-17.79	-16.26
平均 Mean	5.48	5.48	5.47	-0.01	-0.04	1114.12	1115.02	1113.22	-1.79	-7.67

“+”、“-”分别表示增加、减少,数字表示增加或减少的数量。
“+” and “-” mean increasing and decreasing, respectively, and the number means changed quantity.

北呈增加趋势,赣中、赣南则逐渐减少(表 6)。早稻覆膜育秧条件下,日均日照时数略有增加(变化倾向率 0.03 h/10a,由北至南依次递减,平均为 5.26 h,近 15 年为 5.31 h,比前 15 年增加了 0.09 h;受日照时数与安全生产天数的双重影响,总日照时数总体表现为赣北>赣南>赣中,平均为 1153.36 h,前后 15 年变化 17.86 h,变化倾向率 6.77 h/10a。早稻直播方式下,日均日照时数略高于覆膜育秧,平均为 5.48 h,总体呈降低趋势(变化倾向率-0.04 h/10a,近 15 年为 5.47 h,较前 15 年减少约 0.01 h;总日照时数平均为 1114.12 h,较覆膜育秧少约 40 h,前后

15 年变化 1.79 h,变化倾向率-7.67 h/10a;光照资源在地区间的变化差异与覆膜育秧基本一致。

2.4 双季稻实际生产日期

实际上,为适应新的生产形势,江西各地主体种植方式及实际生产日期也出现了相应的调整(表 7)。20 世纪 80-90 年代各地主体种植方式均为传统手插秧,2000 年以来逐渐被抛秧取代,近年来机插和早稻直播发展迅速,尤其在赣北地区。实际生产日期年际间变化与上述安全生产日期变化趋势基本一致,具体变幅表现不一。早稻播种期与移栽期均提前,赣南地区 2000 年以来趋于稳定,播种期至

表 7 江西各地区双季稻主体种植方式及实际生产日期
Table 7. Main planting patterns and production dates of double rice in Jiangxi Province.

地区 Region	年代 Periods	主体种植方式 Main planting patterns		早稻播种期 SDER	早稻直播期 DSDER	早稻移栽期 TDER	晚稻齐穗期 FHDLR	晚稻成熟期 MDLR
		早稻 Early rice	晚稻 Late rice	(Month-Day)	(Month-Day)	(Month-Day)	(Month-Day)	(Month-Day)
赣北 NJ	1980s	手插	手插	03-25-30		04-25-30	09-13-18	10-13-23
	1990s	手插	手插	03-23-28		04-23-28	09-15-20	10-15-25
	2000s	手插、抛秧	手插	03-20-25		04-20-25	09-15-20	10-15-25
	现在 Nowdays	抛秧、机插、直播	手插、抛秧	03-20-25	04-01-05	04-15-20	09-15-20	10-15-25
赣中 CJ	1980s	手插	手插	03-23-28		04-23-28	09-15-20	10-15-25
	1990s	手插	手插	03-20-25		04-20-25	09-15-20	10-15-25
	2000s	手插、抛秧	手插、抛秧	03-18-23		04-18-23	09-15-20	10-15-25
	现在 Nowdays	抛秧、机插	抛秧	03-17-22		04-15-20	09-12-17	10-12-22
赣南 SJ	1980s	手插	手插	03-25-30		04-25-30	09-15-22	10-15-25
	1990s	手插	手插	03-20-25		04-20-25	09-15-20	10-15-25
	2000s	手插、抛秧	手插、抛秧	03-20-25		04-15-20	09-15-20	10-15-25
	现在 Nowdays	抛秧	抛秧	03-20-25		04-15-20	09-10-15	10-10-20

SDER—早稻播种期；DSDER—早稻直播期；TDER—早稻移栽期；FHDLR—晚稻齐穗期；MDLR—晚稻成熟期。下同。
SDER, Sowing date of early rice; DSDER, Direct seeding date of early rice; TDER, Transplanting date of early rice; FHDLR, Full heading date of late rice; MDLR, Maturity date of late rice. The same as below.

移栽期即秧龄 25~30 d;晚稻齐穗期与成熟期赣北地区 20 世纪 80—90 年代略有延迟,之后无明显变化,赣中、赣南 20 世纪 80 年代至 21 世纪初相对稳定,近年来则有所提前;齐穗至成熟期基本低于 35 d,未能充分利用后期的温光资源。

2.5 双季稻安全生产日期

近年来,尽管各地生产日期作了相应的调整,但与安全生产日期存在一定偏差(如赣南实际生产季节明显偏迟,赣北早稻直播偏早等),同时也受品种更新、种植方式转变的影响,再加上气候变化导致安全生产日期年际波动性大,因此,实际生产日期应进行更为科学合理的调整。以多年水稻安全生产的平均日期作为参考标准,其安全保证率仅为 50%,将可能有半数甚至更多年份遭遇冷害,这在农业生产上是不可取的。若保证率过高(>90%)则会使稻作季节明显缩短,不能充分利用温光资源。因此,从水稻安全生产与温光资源高效利用的现实意义考虑,本研究以 80%保证率为标准,计算出近 30 年江西各地区双季稻安全生产日期(表 8)。在 80%保证率下,各地早稻安全播种期至安全移栽期在 25 d 左右,晚稻安全齐穗至安全成熟期达 35 d 以上,且双季安全生产季节温光资源充沛(表 5、表 6),符合双季稻高产要求。在实际应用中,这 15 个地点之外的地区,可按照就近原则进行参考,以指导当地稻作季节安排、种植方式选择及双季品种搭配。

3 讨论

3.1 气候变化对双季稻安全生产季节及温光资源的影响

总体研究表明,近 30 年来早稻安全播种期和移栽期提前,晚稻安全齐穗期和成熟期推迟,双季安全生产季节延长,双季安全生产季节内温度升高、积温增加、日照时数无显著变化。这与艾治勇等^[15,37]对长江中游双季稻区近 50 年(1960—2009)的研究结果基本一致,但具体变幅有所差异。黄晚华等^[9]认为,湖南省 1961—2004 年早稻适宜播种期与晚稻安全齐穗期均呈提前趋势,热量条件总体无明显变化。本研究与前人研究结果存在的略微差异,如安全生产日期及温光资源的变幅、晚稻安全齐穗期变化趋势等,这可能与研究尺度在时间和空间上的差异有关。与其他稻区相比则差异更大,如江苏粳稻 20 世纪 80 年代以来安全齐穗期^[13]和安全成熟期^[14]均显著延迟。这也体现出气候变化的波动性和复杂性,开展安全生产季节及温光资源变化的区域化研究更具有针对性和现实指导意义。

同时本研究还发现,气候变化下江西省水稻安全生产期及温光资源的变化具有时间和空间的异质性。一是各安全生产日期变化程度不尽一致,如早稻安全播种期、直播期和移栽期均呈提前趋势,变化倾向率依次为秧田播种>直播>移栽,这主要与早

表 8 江西双季稻安全生产日期(80%保证率)

Table 8. Safe production dates with 80% guarantee rate of double cropping rice in Jiangxi Province.

地区 Region	早稻覆膜育秧 安全播种期 SSDF (Month-Day)	早稻安全 直播期 SSDD (Month-Day)	早稻安全 移栽期 STDER (Month-Day)	晚稻安全 齐穗期 SFHLR (Month-Day)	晚稻安全 成熟期 SMDLR (Month-Day)
赣北 NJ					
九江 Jiujiang	03-24	04-05	04-24	09-14	10-19
修水 Xiushui	03-21	04-05	04-23	09-12	10-18
鄱阳 Poyang	03-23	04-05	04-18	09-16	10-25
玉山 Yushan	03-24	04-10	04-22	09-13	10-25
南昌 Nanchang	03-23	04-07	04-17	09-15	10-25
平均 Mean	03-23	04-06	04-20	09-14	10-22
赣中 CJ					
临川 Linchuan	03-21	04-07	04-17	09-16	10-25
新干 Xingan	03-23	04-07	04-17	09-16	10-24
南城 Nancheng	03-21	04-04	04-16	09-14	10-24
吉安 Ji'an	03-23	04-05	04-17	09-15	10-27
永新 Yongxin	03-21	04-06	04-17	09-14	10-25
平均 Mean	03-21	04-05	04-16	09-15	10-25
赣南 SJ					
兴国 Xingguo	03-19	04-04	04-16	09-15	10-27
赣县 Ganxian	03-15	04-03	04-14	09-18	11-02
崇义 Chongyi	03-17	04-03	04-15	09-18	10-28
会昌 Huichang	03-15	04-03	04-13	09-19	10-31
信丰 Xinfeng	03-16	04-04	04-11	09-20	11-06
平均 Mean	03-16	04-03	04-13	09-18	10-31

春气温波动性大的气候特征有关^[12,38],从而造成稳定通过各临界温度的初始日期年际差异较大;晚稻安全齐穗期与成熟期总体表现延迟,其中,安全齐穗期变化并不明显,而安全成熟期则极显著延迟,其主要原因是 5—9 月的气温年际变化较小,而 10 月到 4 月变化较大^[38],同时也可能与江西 9 月份寒露风“十年九遇”的发生规律^[34]以及 20 世纪 90 年代以来出现的“暖冬现象”有关^[8]。总体来看,各地区均以早稻覆膜育秧安全播期和晚稻安全成熟期变化最大,后 15 年分别平均提前了 10d 和延迟了 8d。因此,对春秋季节逐旬平均温度做了进一步分析,结果发现,后 15 年 3 月中下旬和 10 月下旬气温上升最为明显,较前 15 年分别升高了 9.82%和 5.66%。二是安全生产季节及温光资源特征变化存在地区差异,如安全播种期赣南提前趋势更为明显,安全移栽期赣中、赣北变化较为明显,晚稻安全齐穗期赣北显著延迟,而赣中、赣南延迟迹象不明显,晚稻安全成熟期延迟幅度由北向南逐渐减小;相应地,安全生产季节天数延迟幅度由北向南逐渐减小;光温资源赣北上升幅度相对较大,其中日照时数赣中、赣南呈降低趋势。这些地区间差异可能是受纬度和地形等方面的综合影响所致^[39],同时也与 20 世纪 90 年代以来温度增幅赣北>赣中>赣南^[8]、10℃初日 3 月 20 日

分界线逐步北移^[12]、9 月份寒露风发生频率赣中高于赣北和赣南的区域分布规律吻合^[34]。但本研究相关指标存在较大的变幅,仅反映了所分析的 30 年内的情况,且气候复杂多变,故不能外延推论。

3.2 晚稻安全齐穗临界温度

本研究显示,近 15 年来晚稻安全齐穗期总体无显著变化,但赣北地区呈推迟趋势,赣中、赣南近 15 年来甚至还提前了 1~2 d。该变化规律在黄晚华^[9]、艾治勇^[15]等的研究中也得到了佐证,这似乎与气候变暖的总体趋势不相吻合。同时,我们对比各地区晚稻安全齐穗期(表 3、表 8)和对应的实际齐穗期(表 7)发现,实际齐穗期普遍迟于安全齐穗期(赣北最为明显),且同样可以保证正常抽穗结实。这可能与 9 月份平均日最低温度逐年升高,使晚稻幼穗发育及抽穗扬花受寒露风的影响减轻有关^[38]。除了与气候变化的时空差异有关外,这也可能是由于水稻品种耐寒性增强或者品种间差异较大,使现行的安全齐穗的温度指标不完全适用于现用品种^[13,15]。一般而言,杂交稻开花期耐寒性略弱于常规稻,生产中总结出常规籼稻 22℃、杂交籼稻 23℃的安全齐穗临界温度指标^[15,24]。本研究确定的安全齐穗期是统一参考高亮之先生 30 多年前提出的且至今一直沿用的广适性临界温度指标(籼稻

22℃)^[25,32],并未区分常规稻和杂交稻。如果参考杂交籼稻 23℃的界定标准,那么杂交稻的安全齐穗期将大幅提前,与当前生产实际出入更大。30多年来双季晚稻品种更新换代,品种特性发生了巨大变化。与30多年前的老品种相比,现用品种抽穗扬花期的耐寒性是否发生了变化,均有待深入探讨,以提出新时期晚稻安全齐穗的温度指标(如兼顾日最低温度等指标)。

3.3 气候变化对双季稻轻型种植方式的意义

近年来,随着城镇化建设的不断推进,农村劳动力大量转移,传统的手栽、抛秧等栽培方式已很难适应生产的发展,直播、机插等省工高效的轻型种植方式正越来越受到重视^[27-29]。轻型稻作方式的迅速发展,除了与上述经济社会因素有关,同时也受全球气候变暖的趋势导向的影响,如近年来鄱阳湖区早稻安全直播期(基本在3月中下旬)明显提前是其直播面积不断扩大的重要原因之一。与移栽稻相比,直播稻播期推迟、成熟期偏晚、全生育期缩短,这既制约了高产品种的产量潜力,也影响了晚稻安全齐穗和安全成熟。研究表明,早稻安全直播期4月5日左右(其中2010年是4月17日),前后只提前了4d,双季安全生产季节约203d(2010年只有194d),对应的温光资源也远低于移栽稻。可见直播稻存在一定的风险,不能充分利用有限的温光资源,尤其是双季直播。因此,在当前气候条件下,江西双季稻区不宜盲目大面积发展直播稻,鄱阳湖区、赣南、赣中等温光资源相对充足的平原地区可适度发展早稻直播。根据安全生产季节,同时考虑到晚稻适宜秧龄及双抢农耗天数,得出早稻直播条件下赣北、赣中、赣南地区双季适宜生育期约210d、215d和220d,以指导早、晚稻品种优化搭配。

与直播相比,水稻机插具有省时省工、丰产高效等特点。近年来,随着农机农艺技术的改进、集中育秧及农村专业合作社的发展,双季机插稻的发展正呈快速发展之势^[27]。然而,双季机插稻生产中仍存在秧苗瘦弱、栽后返青慢、秧龄弹性小、生育期推迟、双季茬口紧等问题^[27,29],其安全高效生产问题则更不能忽视。过去由于育、插秧技术滞后,生产上往往通过推迟晚稻播种期的方法缓解秧龄弹性小、茬口紧张的矛盾,当然这也与气候变暖的认知导向有关。研究表明,晚稻安全成熟期明显推迟,但安全齐穗期除赣北地区外变化并不明显,赣中、赣南近15年来还提前了1~2d。由此可见,推迟晚稻播种在一

定程度上增加了生产风险,同时也浪费了宝贵的温光资源。本研究还发现,早稻安全播种、移栽期均有提前趋势,而且各地早稻安全播种至移栽期约25d,满足早稻秧龄需求,因此可根据当年天气预报,抓住冷尾暖头,适当提前早稻播种和栽插(同时培育适龄壮秧以提高抗逆性)。晚稻播种应首先考虑安全齐穗,同时兼顾茬口、品种生育期等因素。根据晚籼稻齐穗至成熟约35d的基本生育特性,晚稻适宜播种期=安全齐穗期+35-品种生育期^[24]。根据本研究得出的安全生产季节,同时考虑到晚稻机插适宜秧龄及双抢农耗天数,赣北、赣中、赣南地区双季适宜生育期约225、230、235d,以指导早、晚稻品种合理搭配。晚稻在安全齐穗期变化不大,而安全成熟期明显延后的趋势下,亦可因地制宜地选用大穗型品种、粳稻等灌浆期更长的品种,以充分高效地利用后期的温光资源^[40-43]。在保证安全生产的基础上,采用最新的机插高产栽培技术^[44-45],同步利用温光资源,从而促进双季稻机械化、规模化与现代化生产。

近30年(1984—2013)来,早稻安全播种期和移栽期提前、晚稻安全齐穗期延迟不明显、成熟期显著推迟,双季安全生产季节显著延长,安全生产季节内温度明显升高、积温显著增加、日照时数无显著变化;安全生产季节及温光资源变化在地区间存在一定的差异;通过分析各地区的实际生产日期变化及合理性,提出了近30年各站点80%保证率的安全生产日期,以就近指导各地稻作季节安排、种植方式选择及早晚稻品种搭配。从生产的安全性和温光利用的高效性来看,当前气候条件变化总体有利于江西双季机插稻的发展,而直播稻不宜盲目地大面积推广。

参考文献:

- [1] Crowley T J. Causes of climate change over the past 1000 years. *Science*, 2000, 289: 270-277.
- [2] Cox P M, Betts R A, Jones C D, et al. Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. *Nature*, 2000, 408: 184-187.
- [3] IPCC. Climate Change 2007: Synthesis Report. Intergovernmental Panel on Climate Change. UK: Cambridge University Press, 2007: 237-241.
- [4] Oreskes N. The scientific consensus on climate change. *Science*, 2004, 306: 1686.
- [5] IPCC. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core

- Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 2014. <http://www.ipcc.ch>.
- [6] 高晓获, 江志红, 杨金虎. 全球变暖情景下中国气温分区的未来变化. 气象与环境学报, 2009, 25(5): 1-6.
- Gao X H, Jiang Z H, Yang J H. Future changes of air temperature division in China under global warming. *J Meteorol Environ*, 2009, 25(5): 1-6. (in Chinese with English abstract)
- [7] 唐国利, 丁一汇, 王绍武, 等. 中国近百年温度曲线的对比分析. 气候变化研究进展, 2009, 5(2): 71-78.
- Tang G L, Ding Y H, Wang S W, et al. Comparative analysis of the time series of surface air temperature over China for the last 100 years. *Adv Climate Change Res*, 2009, 5(2): 71-78. (in Chinese with English abstract)
- [8] 卢冬梅, 罗倩仪, 刘文英, 等. 江西近 40 年温度变化及对农业生产的影响. 江西农业大学学报, 2003, 25: 5357.
- Lu D M, Luo Q Y, Liu W Y, et al. Variance of temperature and its influence on farming production in the past 40 years in Jiangxi Province. *Acta Agric Univ Jiangxiensis*, 2003, 25: 53-57. (in Chinese with English abstract)
- [9] 黄晚华, 刘晓波, 邓伟. 湖南农业气象要素变化及对主要农作物的影响. 湖南农业科学, 2009, (1): 61-64.
- Huang W H, Liu X B, Deng W. Meteorological elements change and its effect to main crop in Hunan Province. *Hunan Agric Sci*, 2009(1): 61-64. (in Chinese with English abstract)
- [10] 刘颖杰, 林而达. 气候变暖对中国不同地区农业的影响. 气候变化研究进展, 2007, 3(4): 229-233.
- Liu Y J, Lin E D. Effects of climate change on agriculture in different regions of China. *Adv Climate Change Res*, 2007, 3(4): 229-233. (in Chinese with English abstract)
- [11] 杨晓光, 刘志娟, 陈阜. 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, 2010, 43: 329-336.
- Yang X G, Liu Z J, Chen F. The possible effects of global warming on Cropping Systems in China; I. The possible effects of climate warming on northern limits of cropping systems and crop yields in China. *Sci Agric Sin*, 2010, 43: 329-336. (in Chinese with English abstract)
- [12] 郭瑞鸽, 刘寿东, 杜筱玲. 江西气温稳定通过 10℃ 初日变化及其对双季早稻物候期的影响. 中国农业气象, 2011, 32(1): 12-16.
- Guo R G, Liu S D, Du X L. Daily variation of beginning date of 10℃ and its impacts on phenological period of double-season early rice in Jiangxi. *Chin J Agrom*, 2011, 32(1): 12-16. (in Chinese with English abstract)
- [13] 张祖建, 张洪熙, 杨建昌, 等. 江苏近 50 年粳稻安全齐穗期的变化. 作物学报, 2011, 37: 146-151.
- Zhang Z J, Zhang H X, Yang J C, et al. Changes of safe dates for full heading in japonica rice over past 50 years in Jiangsu Province. *Acta Agron Sin*, 2011, 37: 146-151. (in Chinese with English abstract)
- [14] 徐晶晶, 黎泉, 李刚华, 等. 江苏水稻安全成熟期的时空演变研究. 南京农业大学学报, 2013, 36(4): 1-6.
- Xu J J, Li Q, Li G H, et al. The study of spatial and temporal characteristics of safe maturity dates of rice in Jiangsu Province. *J Nanjing Agric Univ*, 2013, 36(4): 1-6. (in Chinese with English abstract)
- [15] 艾治勇, 郭夏宇, 刘文祥, 等. 长江中游地区双季稻安全生产日期的变化. 作物学报, 2014, 40(7): 1320-1329.
- Ai Z Y, Guo X Y, LIU W X, et al. Changes of safe production dates of double-season rice in the middle reaches of the Yangtze River. *Acta Agron Sin*, 2014, 40(7): 1320-1329. (in Chinese with English abstract)
- [16] Song Y L, Linderholm H W, Chen D L, et al. Trends of the thermal growing season in China, 1951-2007. *Inter J Climatol*, 2010, 30: 3-43.
- [17] 葛道阔, 金之庆. 气候及其变率变化对长江中下游稻区水稻生产的影响. 中国水稻科学, 2009, 23: 57-64.
- Ge D K, Jin Z Q. Impacts of climate change and its variability on rice production in the middle and lower valley of the Yangtze River, China. *Chin J Rice Sci*, 2009, 23: 57-64. (in Chinese with English abstract)
- [18] 郭建平, 高素华, 刘玲. 气象条件对作物品质和产量影响的试验研究. 气候与环境研究, 2001, 6: 361-367.
- Guo J P, Gao S H, Liu L. An experimental study of the impacts of meteorological condition on crops qualities and yield. *Climatic Environ Res*, 2001, 6: 361-367. (in Chinese with English abstract)
- [19] Peng S, Huang J L, Sheehy J E, et al. Rice yield decline with higher night temperature from global warming. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2004, 101: 9971-9975.
- [20] Tao F L, Yokozawa M, Xu Y L, et al. Climate changes and trends in phenology and yields of field crops in China, 1981-2000. *Agric Forest Meteorol*, 2006, 138: 82-92.
- [21] 张国发, 王绍华, 尤娟, 等. 结实期不同时段高温对稻米品质的影响. 作物学报, 2006, 32(2): 283-287.
- Zhang G F, Wang S H, You J, et al. Effect of higher temperature in different filling stages on rice qualities. *Acta Agron Sin*, 2006, 32(2): 283-287. (in Chinese with English abstract)
- [22] 杨建昌, 杜永, 刘辉. 长江下游稻麦周年超高产栽培途径与技术. 中国农业科学, 2008, 41(6): 1611-1621.
- Yang J C, Du Y, Liu H. Cultivation approaches and techniques for annual super-high-yielding of rice and wheat in the lower reaches of Yangtze River. *Sci Agric Sin*, 2008, 41(6): 1611-1621. (in Chinese with English abstract)
- [23] Yu Y, Huang Y, Zhang W. Changes in rice yields in China since 1980 associated with cultivar improvement, climate and crop management. *Field Crops Res*, 2012, 136: 65-75.
- [24] 石庆华, 潘晓华. 双季水稻生产技术问答. 南昌: 江西科学技术出版社, 2010: 1-46.
- Shi Q H, Pan X H. Question Answering of Production Technique of Double Rice. Nanchang: Jiangxi Science and Technology Press, 2010: 1-46. (in Chinese with English abstract)
- [25] 高亮之, 郭鹏, 张立中, 林武. 中国水稻的光温资源与生产力. 中国农业科学, 1984, 17(1): 17-23.
- Gao L Z, Guo P, Zhang L Z, et al. Light and resources and potential productive of rice in China. *Sci Agric Sin*, 1984, 17(1): 17-23. (in Chinese with English abstract)
- [26] 马国辉. 南方三熟稻区双季稻超高产栽培研究进展. 中国农业科技导报, 2000, 2(3): 16-21.
- Ma G H. The research progress of the super high-yield cultivation

- tion for double rice under tri-cropping system in Southern China. *Rev China Agric Sci Technol*, 2000, 2(3): 16-21. (in Chinese with English abstract)
- [27] 潘晓华, 李木英, 曾勇军, 等. 江西双季稻主要种植方式及其配套栽培对策. *江西农业大学学报*, 2013, 35(1): 1-6.
Pan X H, Li M Y, Zeng Y J, et al. Main planting patterns and their relevant cultivation practices for the double rice in Jiangxi Province. *Acta Agric Univ Jiangxiensis*, 2013, 35(1): 1-6. (in Chinese with English abstract)
- [28] 李木英, 石庆华, 潘晓华. 江西省直播稻发展趋势与存在的问题及对策. *现代农业科技*, 2005, 21: 236-238.
Li M Y, Shi Q H, Pan X H. Trends, problems and strategies of direct-seeded rice development in Jiangxi Province. *Modern Agric Sci and Technol*, 2005, 21: 236-238. (in Chinese)
- [29] 朱德峰, 陈惠哲, 徐一成, 等. 我国双季稻生产机械化制约因子与发展对策. *中国稻米*, 2013, 19(4): 1-4.
Zhu D F, Chen H Z, Xu Y C, et al. The countermeasures for development and constricting factors of mechanization of double rice planting in China. *China Rice*, 2013, 19(4): 1-4. (in Chinese)
- [30] 曲曼丽. 农业气候实习指导. 北京: 北京农业大学出版社, 1990: 1-8.
Qu M L. Agroclimate Practice Instruction. Beijing: Beijing Agricultural University Publishers, 1990: 1-8. (in Chinese)
- [31] 涂方旭. 广西水稻主要生育期气候条件分析. *广西农业科学*, 2006, 37(4): 370-373.
Tu F X. Analysis on climate conditions in main rice growth and development stages in Guangxi. *Guangxi Agric Sci*, 2006, 37(4): 370-373. (in Chinese with English abstract)
- [32] 高亮之, 李林, 金之庆. 中国水稻的气候资源与气候生态研究. *农业科技通讯*, 1986, (4): 5-8.
Gao L Z, Li L, Jing Z Q. Climatic resources and climatic ecology research of Chinese rice. *Bull Agric Sci Technol*, 1986, (4): 5-8. (in Chinese)
- [33] 赵锦, 杨晓光, 刘志娟, 等. 全球气候变暖对中国种植制度可能影响: II. 南方地区气候要素变化特征及对种植制度界限可能影响. *中国农业科学*, 2010, 43: 1860-1867.
Zhao J, Yang X G, Liu Z J, et al. The possible effect of global climate changes on cropping systems boundary in China; II. The characteristics of climatic variables and the possible effect on northern limits of cropping systems in South China. *Sci Agric Sin*, 2010, 43: 1860-1867. (in Chinese with English abstract)
- [34] 刘文英, 张显真, 简海燕. 江西近50年寒露风演变趋势及其对双季晚稻的影响. *气象与减灾研究*, 2009, 32(4): 67-71.
Liu Wen Y, Zhang X Z, Jian H Y. Evolution trend of cold-dew wind in recent 50 years in Jiangxi province and its influence on late double-harvest rice. *Meteorol Dis Red Res*, 2009, 32(4): 67-71. (in Chinese with English abstract)
- [35] 薛大伟, 方茂庭, 钱前. 有效积温在水稻生产中的应用. *中国稻米*, 2004(4): 47-48.
Xue D W, Fang M T, Qian Q. The utilization of effective accumulated temperature in rice production. *China Rice*, 2004(4): 47-48. (in Chinese)
- [36] 冯明, 刘可群, 毛飞. 湖北省气候变化与主要农业气象灾害的响应. *中国农业科学*, 2007, 40: 1646-1653.
Feng M, Liu K Q, Mao F. Climate change and main response to agrometeorological disasters in Hubei Province. *Sci Agric Sin*, 2007, 40: 1646-1653. (in Chinese with English abstract)
- [37] 艾治勇, 郭夏宇, 刘文祥, 等. 农业气候资源变化对双季稻生产的可能影响分析. *自然资源学报*, 2014, 29(12): 2089-2102.
Ai Z Y, Guo X Y, Liu W X, et al. Analysis on possible influences of agricultural climate resources change on double-season rice production. *J Nat Resour*, 2014, 29(12): 2089-2102. (in Chinese with English abstract)
- [38] 魏金连, 潘晓华. 鄱阳湖区近40年来双季稻生长期间的气温变化趋势. *安徽农业科学*, 2009, 37(27): 12995-12997, 13017.
Wei J L, Pan X H. Changing trend of air temprature during the growth period of double cropping rice in Poyang lake region in the recent 40 years. *J Anhui Agric Sci*, 2009, 37(27): 12995-12997, 13017. (in Chinese with English abstract)
- [39] 蔡哲, 刘冬梅, 辜晓青, 等. 基于GIS的江西省农业气候资源小网格推算研究. *江西农业大学学报*, 2010, 32(4): 842-846.
Cai Z, Liu D M, Gu X Q, et al. Simulation of agricultural climate resources based on GIS in Jiangxi Province. *Acta Agric Univ Jiangxiensis*, 2010, 32(4): 842-846. (in Chinese with English abstract)
- [40] 程飞虎, 周培建. 江西适度发展粳稻的探索与思考. *中国农技推广*, 2012, 28(1): 8-9.
Cheng F H, Zhou P J. The exploration and reflection about developing japonica rice in Jiangxi Province. *China Agric Technol Exten*, 2012, 28(1): 8-9. (in Chinese)
- [41] 黄山, 何虎, 张卫星, 等. 不同粳稻品种在江西不同生态区的农学表现. *江西农业大学学报*, 2013, 35(1): 25-32.
Huang S, He H, Zhang W X, et al. Agronomic performance of different japonica rice varieties in different eco-regions in Jiangxi Province. *Acta Agric Univ Jiangxiensis*, 2013, 35(1): 25-32. (in Chinese with English abstract)
- [42] 黄大山, 曹开蔚, 程飞虎. 一季粳稻作双季晚稻高产栽培技术. *中国稻米*, 2010, 16(4): 40-42.
Huang D S, Cao K W, Chen F H. High-yield cultivation technique of single japonica rice using for late rice. *China Rice*, 2010, 16(4): 40-42. (in Chinese)
- [43] 张洪程, 许轲, 张军, 等. 双季晚粳生产力及相关生理生态特征. *作物学报*, 2014, 40(2): 283-300.
Zhang H C, Xu K, Zhang J, et al. Productivity and eco-physiological characteristics of late japonica rice in double-cropping system. *Acta Agron Sin*, 2014, 40(2): 283-300. (in Chinese with English abstract)
- [44] 石庆华. 江西双季早稻机插高产栽培技术规程. *南方农机*, 2015, 02: 26-28.
Shi Q H. High-yield cultivation technique regulation of machine-transplanted early rice in Jiangxi Province. *South Agric Machin*, 2015, 02: 26-28. (in Chinese)
- [45] 石庆华. 江西双季晚稻机插高产栽培技术规程. *南方农机*, 2015, 03: 8-9, 18.
Shi Q H. High-yield cultivation technique regulation of machine-transplanted late rice in Jiangxi Province. *South Agric Machin*, 2015, 03: 8-9, 18. (in Chinese)