

宋忠华,解娜,2022. 双季籼稻安全生长期研究方法择优与应用——以长沙为例[J]. 气象,48(10):1333-1342. Song Z H, Xie N, 2022. Selection and application of research methods for safe growth period of double cropping indica rice: take Changsha as an example[J]. Meteor Mon, 48(10):1333-1342(in Chinese).

双季籼稻安全生长期研究方法择优与应用 ——以长沙为例*

宋忠华^{1,2} 解 娜¹

1 湖南长沙农业气象试验站,长沙 410125

2 气象防灾减灾湖南省重点实验室,长沙 410118

提 要: 利用长沙 1961—2020 年逐日日平均气温和 1996—2020 年双季稻发育期等观测资料,通过不同统计方法、不同界限温度等适用性对比分析,优选了双季籼稻安全生长期研究方法,并应用于长沙双季稻安全生长期研究。结果表明:界限温度日期统计采用连续统计法,以气温 8℃ 为早稻播种界限温度,以 22℃ 为晚稻齐穗界限温度,以气温连续 3 d \geq 8℃ 初日至连续 3 d \geq 22℃ 终日数为双季稻安全生长期,该结果适用于长沙双季稻安全生长期研究,或可适用于覆膜育秧的其他双季籼稻区;长沙地区, \geq 8℃ 的 80% 保证率日期是 3 月 21 日,界限温度 \geq 8℃ 播种期显著提前;晚稻安全齐穗 80% 保证率日期是 9 月 9 日,安全齐穗期推迟但不明显;双季稻安全生长 80% 保证率日数超过 179 d,安全生长期极显著增加。

关键词: 双季籼稻,安全生长期,播种,齐穗,界限温度

中图分类号: S165.P49

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2022.070102

Selection and Application of Research Methods for Safe Growth Period of Double Cropping Indica Rice: Take Changsha as an Example

SONG Zhonghua^{1,2} XIE Na¹

1 Changsha Agrometeorological Experimental Station of Hunan, Changsha 410125

2 Key Laboratory of Hunan Meteorological Disaster Prevention and Mitigation, Changsha 410118

Abstract: Based on the observation data of the daily average temperature in Changsha from 1961 to 2020 and the development period of double cropping rice from 1996 to 2020, through the comparative analysis of the applicability of different statistical methods and different boundary temperatures, this paper optimizes the research method of safe growth period of double cropping indica rice and applies it to the long-term study of safe growth period of double cropping rice in Changsha. The results show that the continuous statistical method is adopted for the boundary temperature statistics. The air temperature of 8℃ is used as the sowing boundary temperature of early rice, and 22℃ as the full panicle boundary temperature of late rice. The number of days from the first day of 3 consecutive days when the air temperature \geq 8℃ to the last day of 3 consecutive days when the air temperature \geq 22℃ is used as the safe growth period of double cropping rice. These indices are suitable for the study on the safe growth period of double cropping rice in Changsha or other double cropping indica rice areas covered with plastic film. In Changsha Area, 80%

* 中国气象局创新发展专项(CXFZ2021Z059)资助

2021 年 11 月 2 日收稿; 2022 年 8 月 12 日收修定稿

第一作者:宋忠华,主要从事农业气象服务及气候变化研究. E-mail:song4614815@163.com

of the guarantee rate $\geq 8^{\circ}\text{C}$ is on 21 March, and the sowing date with boundary temperature $\geq 8^{\circ}\text{C}$ is significantly ahead of schedule; the date of 80% guarantee rate of safe full heading of late rice is 9 September, and the safe full heading date is delayed but not obvious. The safe growth rate of double cropping rice is 80%, the number of days exceeded 179 d, and the safe growth period is prolonged significantly.

Key words: double cropping indica rice, safe growth period, sowing, full panicle, boundary temperature

引 言

双季稻为充分利用气候资源、增加水稻产量提供了有效途径,在粮食安全中占有重要地位。但生产上需要考虑其安全生长,尤其要科学安排早稻播种期和晚稻齐穗期(马国辉,2000;吕伟生等,2016)。早稻播种过早,容易遭遇低温,影响出苗,导致出苗时间延长或烂种、烂秧;过迟则会减少有效生长期。晚稻齐穗期安排过早,影响产量潜力;过迟则易遭遇寒露风,不利齐穗与成熟。为保障双季稻安全生产,有必要掌握双季稻安全生长期。

界限温度是表明某些重要物候现象或农业活动开始和终止的温度(冯秀藻和陶炳炎,1994),由合理的界限温度和界限温度日期统计方法所确定的界限温度日期、持续日数,在农业气候分析、作物可能生长期评价及指导农业生产中具有重要意义(韩湘玲和孔杨庄,1984;张运福等,2009;郭芬芬等,2016)。

在双季稻安全生长期研究方面,艾治勇等(2014)、吕伟生等(2016)、岳伟等(2019)以日平均气温 8°C 为早稻覆膜育秧界限温度,以日平均气温 12°C 为露天育秧安全播种界限温度,以日平均气温 22°C 或 23°C 为晚稻安全齐穗界限温度,以早稻安全播种期至晚稻安全成熟期日数作为双季稻安全生长期,分别研究了长江中游地区(湖南、湖北和江西)、江西、安徽双季早稻播种期、晚稻齐穗期及双季稻安全生长期;黄维等(2020)以日平均气温稳定通过 12°C 为早稻安全播种界限温度,以日平均气温稳定通过 22°C 为晚稻安全齐穗界限温度,以早稻安全播种期至晚稻安全齐穗期日数作为双季稻安全生长期,研究了广西双季早稻播种期、晚稻齐穗期及双季稻安全生长期;曹秀霞等(2014)以气温 10°C 为界限温度,研究了湖北省早稻适宜播种期;陆魁东等(2007)研究了湖南日平均气温分别稳定通过 8°C 和 10°C 初日至稳定通过 22°C 终日间的持续日数。目前,双季稻安全生长期研究存在界限温度不一致,安全生长期确定标准不统一,统计方法复杂等现象。

本文以双季籼稻主产区长沙为例,从统计方法、界限温度、安全生长期确定标准等方面,对双季稻安全生长期研究方法择优改良,以期为客观评价双季稻安全生长期,科学安排早稻播种期和晚稻齐穗期,规避早稻生长前期、晚稻生长后期等低温危害,保障双季稻安全生产提供更加科学的依据。

1 材料与方 法

1.1 数据来源

资料来源于长沙农业气象试验站,包括 1961—2020 年逐日日平均气温和 1996—2020 年双季稻发育期等。

1.2 界限温度日期和安全生长期统计

采用曲曼丽(1990)的五日滑动平均法(简称滑动统计法)和王树廷(1982)的三日连续偏低法(简称连续统计法)统计日平均气温(简称气温,本文所指温度均为气温,下同)为 8°C 、 10°C 、 12°C 等早稻播种界限温度初日和 20°C 、 22°C 等晚稻齐穗界限温度终日。其中,滑动统计法先对气温做五日滑动处理,以处理后的滑动平均值为分析依据,连续统计法不对气温做处理,以气温原始值为分析依据,统计上半年气温连续 3 d 及以上 $\geq 8^{\circ}\text{C}$ 且其后无连续 3 d 及以上 $< 8^{\circ}\text{C}$ 的初日日期(简称 8°C 初日),连续 3 d 及以上 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 且其后无连续 3 d 及以上 $< 10^{\circ}\text{C}$ 的初日日期(简称 10°C 初日),连续 3 d 及以上 $\geq 12^{\circ}\text{C}$ 且其后无连续 3 d 及以上 $< 12^{\circ}\text{C}$ 的初日日期(简称 12°C 初日);下半年第一次出现气温连续 3 d 及以上 $< 22^{\circ}\text{C}$ 的前一个 $\geq 22^{\circ}\text{C}$ 的日期为终日日期(气温连续 3 d 及以上 $\geq 22^{\circ}\text{C}$ 的终日日期,简称 22°C 终日),下半年第一次出现气温连续 3 d 及以上 $< 20^{\circ}\text{C}$ 的前一个 $\geq 20^{\circ}\text{C}$ 的日期为终日日期(气温连续 3 d 及以上 $\geq 20^{\circ}\text{C}$ 的终日日期,简称 20°C 终日)。以大于等于早稻播种界限温度初日日期为早稻界限温度播种期,以晚稻齐穗界限温度终日日期为晚稻安全齐穗

期,以早稻界限温度播种期至晚稻安全齐穗期日数为双季稻安全生长期。

1.3 保证率计算

安全生长期保证率计算采用经验频率法(曲曼丽,1990)。计算公式为:

$$P_m = m/(n+1) \times 100\%$$

式中: m 为初(终)日按日期迟早顺序排列的序号, n 为统计年数(即资料年数), P_m 为序号 m 的保证率,保证率 $\geq 80\%$ 的序号所对应的日期,为 80% 保证率日期。

1.4 气候变化率分析

采用最小二乘法(魏凤英,2007),将早稻播种界限温度初日日期、晚稻安全齐穗期、双季稻安全生长期等因变量随时间的变化趋势拟合成一元线性方程 $y=at+b$,式中: y 为因变量, a 表示因变量变化倾向率, b 为回归常数, t 为年份时间序列, $a \times 10$ 表示因变量每 10 年的气候变化率。

用 Microsoft Excel 2010 进行保证率计算和图

表绘制,用 DPS 数据处理系统 19.05 高级版进行气候变化倾向率等回归分析。

2 结果与分析

2.1 连续统计法与滑动统计法合理性验证

为了研究连续统计法与滑动统计法在界限温度日期统计中的合理性,本文以气温 8°C 、 10°C 、 12°C 为界限温度,分析了两种方法得出的界限温度初日差异。结果表明,以气温 8°C 为界限温度,初日平均日期相差 2 d, 80% 保证率日期相差 1 d;以气温 10°C 为界限温度,初日平均日期相差 2 d, 80% 保证率日期相差 0 d;以气温 12°C 为界限温度,初日平均日期相差 1 d, 80% 保证率日期相差 1 d(表 1)。说明连续统计法与滑动统计法得出的界限温度初日平均日期及 80% 保证率日期相差很小,都可用于界限温度日期统计。考虑连续统计法统计简便的优势(王树延,1982),除特别说明外,本文采用连续统计法统计界限温度日期。

表 1 1961—2020 年基于不同统计方法的长沙早稻界限温度初日日期
Table 1 Changsha boundary temperature first day date of early rice based on different statistical methods in Changsha from 1961 to 2020

统计项	$\geq 8^\circ\text{C}$ 界限温度			$\geq 10^\circ\text{C}$ 界限温度			$\geq 12^\circ\text{C}$ 界限温度		
	滑动统计法	连续统计法	差值/d	滑动统计法	连续统计法	差值/d	滑动统计法	连续统计法	差值/d
平均日期/月-日	3-11	3-9	2	3-20	3-22	2	3-29	3-30	1
80% 保证率日期/月-日	3-20	3-21	1	3-29	3-29	0	4-9	4-10	1

2.2 双季早稻播种界限温度及界限温度初日日期

2.2.1 不同播种界限温度初日平均日期和 80% 保证率日期

早稻播种大多以气温 8°C 或 10°C 为界限温度,也有以 12°C 为界限温度。研究表明,以气温 8°C 为播种界限温度, $\geq 8^\circ\text{C}$ 初日平均日期为 3 月 9 日, 80% 保证率日期为 3 月 21 日;以气温 10°C 为播种界限温度, $\geq 10^\circ\text{C}$ 初日平均日期为 3 月 22 日, 80% 保证率日期为 3 月 29 日;以气温 12°C 为播种界限温度, $\geq 12^\circ\text{C}$ 初日平均日期为 3 月 30 日, 80% 保证率日期为 4 月 10 日(表 1),以气温 8°C 为播种界限温度,其界限温度初日比 10°C 、 12°C 为界限温度早。说明以不同气温为播种界限温度,界限温度初日不同,界限温度提高,播种初日推迟。

2.2.2 不同播种界限温度及其初日日期适应性

准确的播种界限温度及其初日日期是安排播种的重要依据。为了研究早稻播种界限温度及其初日日期与早稻实际播种期的适应性,本文分析了 1996—2020 年逐年早稻覆膜育秧实际播种期与对应年份不同播种界限温度初日日期差异,差值由式(1)得出,同时引入式(2)计算得到适用度指标。

$$D = D_1 - D_2 \quad (1)$$

$$A = a/n \times 100\% \quad (2)$$

式中: D 为实际播种期(D_1)与初日日期(D_2)差值。 $D \geq 0$ d,实际播种在初日日期当天或之后,表示初日日期适用; $D < 0$ d,实际播种在初日日期之前,表示初日日期不适用。 A 为适用度, a 为适用次数, n 为样本量。

由表 2 可见,分别以气温 8°C 、 10°C 、 12°C 为播种界

限温度, 初日日期与实际播种期适用度依次降低, 以 10℃、12℃为播种界限温度, 其初日日期对覆膜育秧

早稻播种的指导作用不如以 8℃为界限温度的效果。

表 2 1996—2020 年长沙早稻实际播种期与不同播种界限温度初日日期差值

Table 2 The actual sowing date of early rice and first day date at different sowing boundary temperatures in Changsha from 1996 to 2020

年份	播种期/月-日			8℃界限温度差值			10℃界限温度差值			12℃界限温度差值		
	观测点	调查点 1	调查点 2	观测点	调查点 1	调查点 2	观测点	调查点 1	调查点 2	观测点	调查点 1	调查点 2
2020	3-25	3-15	3-20	35	25	30	-7	-17	-12	-8	-18	-13
2019	3-27	3-23	3-21	24	20	18	2	-2	-4	2	-2	-4
2018	3-31	3-23	3-23	36	28	28	9	1	1	9	1	1
2017	3-26	3-26	3-26	29	29	29	7	7	7	3	3	3
2016	3-27	3-18	3-28	14	5	15	13	4	14	11	2	12
2015	3-27	3-20	3-23	19	12	15	-14	-21	-18	-14	-21	-18
2014	3-22	3-20	3-20	12	10	10	11	9	9	-1	-3	-3
2013	3-21	3-20	3-22	25	24	26	17	16	18	16	15	17
2012	3-21	3-29	3-25	10	18	14	-2	6	2	-3	5	1
2011	3-25	3-27	3-19	19	21	13	1	3	-5	-1	1	-7
2010	3-26	3-26	3-24	15	15	13	14	14	12	-22	-22	-24
2009	3-22	3-26	3-25	15	19	18	7	11	10	-15	-11	-12
2008	3-27	3-24	3-25	27	24	25	26	23	24	-6	-9	-8
2007	3-27	3-26	3-25	56	55	54	7	6	5	6	5	4
2006	3-26	3-27	3-25	10	11	9	10	11	9	9	10	8
2005	3-25	3-23	3-28	10	8	13	9	7	12	8	6	11
2004	3-27	3-22	3-22	44	39	39	2	-3	-3	0	-5	-5
2003	3-29	3-18	3-22	8	-3	1	8	-3	1	5	-6	-2
2002	3-29	3-17	3-17	23	11	11	22	10	10	4	-8	-8
2001	3-28	3-22	3-23	27	21	22	9	3	4	8	2	3
2000	3-24	3-23	3-28	26	25	30	11	10	15	8	7	12
1999	4-1	3-26	4-4	8	2	11	1	-5	4	1	-5	4
1998	3-29	3-20	3-28	2	-7	1	1	-8	0	0	-9	-1
1997	3-28	4-1	3-20	37	41	29	7	11	-1	1	5	-7
1996	3-30	4-1	4-2	1	3	4	-5	-3	-2	-15	-13	-12
平均适用 次数/次				25	23	25	21	17	18	16	12	11
不同种植 地点适 用度/%				100.0	92.0	100.0	84.0	68.0	72.0	64.0	48.0	44.0
不同界限 温度适 用度/%					97.3			74.7			52.0	

为了进一步探究不同播种界限温度及其初日日期与早稻实际播种期的适应性, 按照生产上常用的早稻播种应在播种界限温度 80% 保证率日期当天或以后的要求, 分析了 1996—2020 年长沙逐年早稻实际播种期与对应年份大于等于不同播种界限温度 80% 保证率日期差异。其差值由式(3)得出。

$$d = d_1 - d_2 \quad (3)$$

式中: d 为实际播种期(d_1)与大于等于播种界限温度 80% 保证率日期(d_2)差值。 $d \geq 0$ d, 实际播种期在大于等于播种界限温度 80% 保证率日期当天或

之后; $d < 0$ d, 实际播种期在大于等于播种界限温度 80% 保证率日期之前。

分析表明, 全部实际播种期与 $\geq 8^\circ\text{C}$ 界限温度 80% 保证率日期(3 月 21 日)相比, $d \geq 0$ d 的有 62 次, 比例为 82.7%, $d < 0$ d 的有 13 次, 比例为 17.3%, 即 82.7% 的早稻在 80% 保证率日期当天或之后播种, 说明该 80% 保证率日期符合生产实际; 全部实际播种期与 $\geq 10^\circ\text{C}$ 界限温度 80% 保证率日期(3 月 29 日)相比, 差值 $d \geq 0$ d 的有 11 次, 比例为 14.7%, $d < 0$ d 的有 63 次, 比例为 85.3%, 即

14.7%的早稻在 80%保证率日期当天或之后播种,说明该 80%保证率日期不符合生产实际;全部实际播种期与 $\geq 12^{\circ}\text{C}$ 界限温度 80%保证率日期(4 月 10 日)相比, $d \geq 0$ d 的有 0 次,比例为 0.0%,即所有早稻在 80%保证率日期之前播种,说明该 80%保证率日期不符合生产实际。综上所述, $\geq 8^{\circ}\text{C}$ 的 80%保证率日期,比 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 及 $\geq 12^{\circ}\text{C}$ 的 80%保证率日期对覆膜育秧早稻播种的指导性更强,更符合生产实际需求。

2.3 不同界限温度安全齐穗期及双季稻安全生长期

2.3.1 不同界限温度晚稻安全齐穗期及适用性

气温 20°C 、 22°C 是晚稻安全齐穗界限温度(中国气象局,2008;2013)。研究表明,以气温 22°C 为安全齐穗界限温度,晚稻安全齐穗期(22°C 终日)最早日期为 9 月 2 日,最迟日期为 10 月 11 日,相差

39 d,平均日期为 9 月 19 日,80%保证率日期为 9 月 9 日;以 20°C 为安全齐穗界限温度,晚稻安全齐穗期(20°C 终日)最早日期为 9 月 2 日,最迟日期为 10 月 23 日,相差 51 d,平均日期为 10 月 2 日,80%保证率日期为 9 月 26 日。以 22°C 为齐穗界限温度,晚稻安全齐穗期比以 20°C 为齐穗界限温度早。

为比较 22°C 安全齐穗期和 20°C 安全齐穗期适用性。定义实际齐穗期早于或等于安全齐穗期,安全齐穗期适用,记为“T”,否则,安全齐穗期不适用,记为“F”,适用度由式(2)计算得出。分析表明,以 22°C 为安全齐穗界限温度,其安全齐穗期适用 17 次,适应度为 68%,以 20°C 为安全齐穗界限温度,其安全齐穗期适用 21 次,适应度为 84%(表 3)。但这不能说明以 20°C 为安全齐穗界限温度更适用籼稻,因为 20°C 是粳稻安全齐穗界限温度。

表 3 1996—2020 年长沙晚稻齐穗期和生长期及其适用性

Table 3 Full heading date, growth period and applicability of late rice in Changsha from 1996 to 2020

年份	齐穗期/月-日			安全齐穗期适用性		实际生长期/d	安全生长期/d			安全生长期适用性		
	实际齐穗期	安全齐穗期		22°C	20°C		8~ 22°C	10~ 22°C	12~ 22°C	8~ 22°C	10~ 22°C	12~ 22°C
		22°C	20°C									
2020	9-28	9-16	10-2	T	T	187	211	169	168	T	F	F
2019	9-15	10-5	10-5	T	T	172	217	195	195	T	T	T
2018	9-18	9-25	10-8	T	T	171	215	188	188	T	T	T
2017	9-17	10-2	10-3	T	T	175	220	198	194	T	T	T
2016	9-26	9-28	9-28	T	F	183	200	199	197	T	T	T
2015	9-11	9-29	10-3	T	T	168	206	173	173	T	T	T
2014	9-12	9-12	10-12	T	T	174	187	186	174	T	T	T
2013	9-13	9-2	9-2	F	F	176	191	183	182	T	T	T
2012	9-6	9-20	10-15	T	T	169	194	182	181	T	T	T
2011	9-13	9-17	9-17	T	T	172	196	178	176	T	T	T
2010	9-17	9-21	9-22	T	T	175	195	194	158	T	T	F
2009	9-14	10-8	10-17	T	T	176	216	208	186	T	T	T
2008	9-11	9-24	9-26	T	T	168	209	208	176	T	T	T
2007	9-11	10-7	10-11	T	T	168	251	202	201	T	T	T
2006	9-15	9-8	10-23	F	T	173	177	177	176	T	T	T
2005	9-7	9-3	10-2	F	T	166	173	172	171	T	T	T
2004	9-16	9-30	9-30	T	T	173	232	190	188	T	T	T
2003	9-8	10-1	10-1	T	T	163	195	195	192	T	T	T
2002	9-20	9-13	9-13	F	F	175	192	191	173	T	T	F
2001	9-9	10-2	10-6	F	T	165	216	198	197	T	T	T
2000	9-15	9-5	10-11	F	T	175	192	177	174	T	T	F
1999	9-20	9-18	10-2	F	T	172	179	172	172	T	T	T
1998	9-16	10-9	10-13	T	T	171	197	196	195	T	T	T
1997	9-18	9-12	9-13	F	F	174	206	176	170	T	T	F
1996	9-15	10-5	10-5	T	T	169	191	185	175	T	T	T
适用次数				17	21					25	24	20
适用度/%				68.0	84.0					100.0	96.0	80.0

注:T 表示适用,F 表示不适用。

Note: T indicates applicable, F indicates not applicable.

2.3.2 不同界限温度双季稻安全生长期及适用性

分析表明,以气温 8℃为早稻安全播种界限温度,以气温 22℃为晚稻安全齐穗界限温度,双季稻安全生长期(8℃初日至 22℃终日)最少有 164 d,最多为 251 d,相差 87 d,平均为 194.5 d,80%保证率日数 ≥ 179 d;以气温 10℃为早稻安全播种界限温度,以气温 22℃为晚稻安全齐穗界限温度,双季稻安全生长期(10℃初日至 22℃终日)最少有 152 d,最多为 212 d,相差 60 d,平均为 182.2 d,80%保证率日数 ≥ 170 d;以 12℃为安全播种界限温度,以 22℃为安全齐穗界限温度,双季稻安全生长期(12℃初日至 22℃终日)最少有 138 d,最多为 209 d,相差 71 d,平均为 173.6 d,80%保证率日数 ≥ 164 d(表 4)。从表 4 可以看出,界限温度标准不同,双季稻安全生长期不同,以气温 8℃为播种界限温度,双季稻安全生长期平均日数、80%保证率日数比以气

温 10℃、12℃为播种界限温度多,以 20℃为安全齐穗界限温度,双季稻安全生长期平均日数比以 22℃为安全齐穗界限温度多。

为比较不同界限温度安全生长期适用性。定义实际生长期少于或等于安全生长期,安全生长期适用,记为“T”;否则,安全生长期不适用,记为“F”。适用度由式(2)计算得出。分析表明,1996—2020年,以 22℃为安全齐穗界限温度,分别以 8、10、12℃为播种界限温度,其安全生长期适应次数依次为 25、24、20 次,适应度分别为 100.0%、96.0%、80.0%(表 3)。说明在安全齐穗界限温度相同的情况下,以 8℃为播种界限温度,安全生长期适用性比以 10℃、12℃为播种界限温度好。因实际生长期数据来自籼稻,本文未对以 20℃为安全齐穗界限温度的安全生长期做适用性分析。

表 4 1961—2020 年长沙不同界限温度双季稻安全生长期(单位:d)

Table 4 Safe growth period of double cropping rice at different boundary temperatures in Changsha from 1961 to 2020 (unit: d)

统计项	8℃		10℃		12℃	
	22℃	20℃	22℃	20℃	22℃	20℃
最少日数	164	182	152	172	138	159
最多日数	251	255	212	222	209	221
差值(最多日数-最少日数)	87	73	60	50	71	62
平均日数	194.5	206.4	182.2	194.1	173.6	185.5
80%保证率日数	≥ 179	≥ 193	≥ 170	≥ 183	≥ 164	≥ 174

2.4 长沙双季稻安全生长期

湖南是典型籼稻区(邓文等,2016),由上所述,本文以 8℃为早稻播种界限温度,以 22℃为安全齐穗界限温度,研究长沙双季稻安全生长期,下文进一步研究其气候变率及变化规律。

2.4.1 早稻播种界限温度 $\geq 8^\circ\text{C}$ 播种期气候变率及其规律

研究表明,1961—2020 年长沙早稻播种界限温度 $\geq 8^\circ\text{C}$ 的播种期总体呈提前趋势,气候变率为每 10 年提前约 2.2 d,且通过了 $P=0.05$ 显著性水平检验($P=0.0129$)。深入分析发现,早稻播种界限温度 $\geq 8^\circ\text{C}$ 播种期变化不是简单的直线趋势,变化趋势可用 $y_1 = -0.0096x_1^2 + 37.939x_1 + 6729.5$ 表示(图 1),式中: y_1 为播种界限温度 $\geq 8^\circ\text{C}$ 播种期, x_1 为年份,经显著性水平检验,曲线变化趋势显著

($P=0.0105$)。

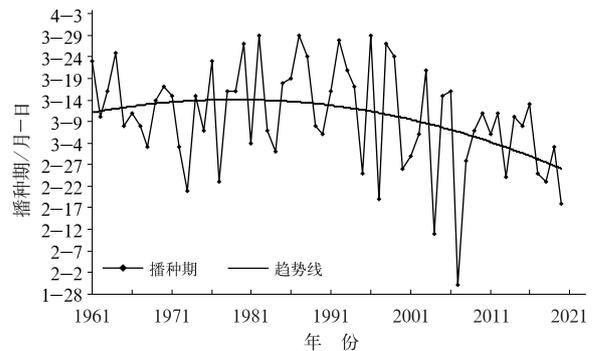


图 1 1961—2020 年长沙早稻播种界限温度 $\geq 8^\circ\text{C}$ 播种期变化

Fig. 1 Sowing date variation trend of sowing limit temperature $\geq 8^\circ\text{C}$ of early rice in Changsha from 1961 to 2020

2.4.2 晚稻安全齐穗期气候变率及其规律

研究表明,1961—2020 年以气温 22℃ 为长沙晚稻齐穗界限温度,晚稻安全齐穗期呈推迟趋势,气候变率为每 10 年推迟 1.2 d,但未通过显著性水平检验($P=0.1045$)。由图 2 可见,晚稻安全齐穗期变化规律可用曲线 $y_2=0.0046x_2^2-18.114x_2+62363$ 表示,式中: y_2 为安全齐穗日期, x_2 为年份,但趋势不明显($P=0.1727$)。

2.4.3 双季稻安全生长期气候变率及其规律

以气温 8℃ 为早稻安全播种界限温度,以气温 22℃ 为晚稻安全齐穗界限温度,长沙双季稻安全生长期呈增加趋势,气候变率为每 10 年增加 3.4 d,增加趋势达极显著水平($P=0.0047$)。进一步分析发现,双季稻安全生长期呈曲线变化(图 3),变化趋势可表达为 $y_3=0.0142x_3^2-56.053x_3+55634$,式中: y_3 为安全生长期, x_3 为年份,经显著性水平检验,曲线变化趋势极显著($P=0.0031$)。

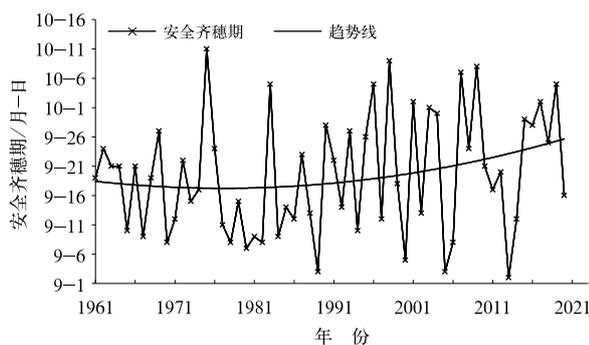


图 2 1961—2020 年长沙晚稻安全齐穗期变化趋势

Fig. 2 Variation trend of safe full heading stage of late rice in Changsha from 1961 to 2020

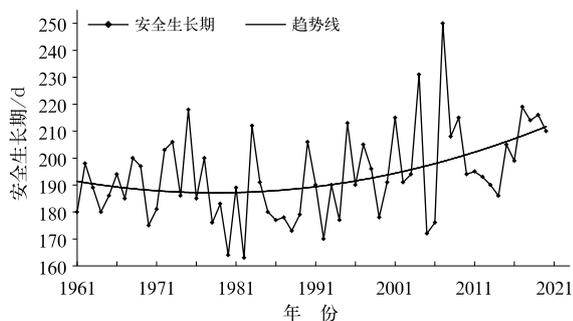


图 3 1961—2020 年长沙双季稻安全生长期变化趋势

Fig. 3 Variation trend of safe growth period of double cropping rice in Changsha from 1961 to 2020

3 结论与讨论

(1)不同的气象业务和研究,经常采用不同的统计方法(汪玲瑶等,2018;黄文彦等,2019)。农业界限温度日期统计方法有二倍偏差法、五日滑动平均法、三日连续偏低法、直方图法等,且各有所长(王树廷,1982;韩湘玲和孔杨庄,1984)。本研究表明,采用连续统计法(三日连续偏低法)得出的界限温度初日日期与滑动统计法(五日滑动平均法)得出的界限温度初日日期相差很小甚至相同,结论与王树廷(1982)一致。与三日连续偏低法相比,五日滑动平均法比较复杂,在气候分析中还会因五日平均值相差 0.1℃ 或 0.2℃,出现近百甚至几百摄氏度积累(积温)的舍弃(浪费)等不足(王树廷,1982)。综合来看,这两种统计方法都能较好地反映界限温度“稳定通过”的统计要求,但连续统计法具有统计简便的优势,在春播、寒露风等气象服务中也广泛被采用,可用于双季稻安全生长期研究。

(2)气温 10℃ 为喜温作物开始播种的临界温度(郭芬芬等,2016),也是长江中下游早稻露天育秧播种界限温度(王学林等,2021;段里成等,2021)。在热量资源丰富的广西,露天育秧播种界限温度为 12℃(黄维等,2020)。随着育秧技术的改良,中国南方双季稻主产区普遍使用薄膜育秧(叶清等,2013;段里成等,2021),如湖南 80% 左右的早稻采取薄膜育秧(包括工厂化育秧),由于薄膜覆盖的增温效应,这些地区将 8℃ 作为播种界限温度(刘敏等,2011;艾治勇等,2014;吕伟生等,2016;岳伟等,2019)。综合来看,播种界限温度跟地域和育秧方式有关,以气温 12℃ 为播种界限温度,适用于热量资源丰富、双季稻生长季节“富余”的华南双季稻区(梅方权等,1988)及其邻近双季稻区,可采用露天育秧和直播方式;以气温 10℃ 为播种界限温度,理论上适用于南方地区的露天育秧,但育秧期间有遭遇气温小于 12℃ 天气的风险,出现烂种烂秧(余学知等,2006),从降低风险出发,最好采用覆膜育秧;以 8℃ 为播种界限温度,适用于热量资源略显不足的双季稻区的覆膜育秧,而不适用于露天育秧。

(3)以不同界限温度为依据安排播种,各有利弊。长沙以气温 8℃ 为界限温度,播种早,双季稻安

全生长期长,气候资源利用率高,但播种后遭遇低温危害风险大。以气温 10℃或 12℃为界限温度,播种迟,可以降低播种后遭遇低温危害的风险,但双季稻安全生长期短,气候资源利用率降低。仅考虑早稻播种,以气温 10℃或 12℃为界限温度,比以气温 8℃为界限温度有利。从全年水稻生产和气候资源利用考虑,以气温 8℃为播种界限温度更有积极意义且符合生产实际。事实上,在长沙地区, $\geq 10^\circ\text{C}$ 的 80%保证率日期前播种的早稻,不仅比例超过 80%,且播种后生长正常,而且不存在 $\geq 12^\circ\text{C}$ 的 80%保证率日期之后播种的早稻。

(4)能否安全齐穗是衡量晚稻安全生产的一个重要标志。双季晚稻安全齐穗通常以气温 20℃或气温 22℃为界限温度,以气温 22℃为晚籼稻安全齐穗界限温度已得到普遍认可。本文以早稻播种界限温度初日日期至晚稻安全齐穗期日数为双季稻安全生长期,与梁平等(2007)、黄维等(2020)思路一致,也符合水稻安全生产要求。

(5)在气候变化大背景下,有些地区主要农业生长季气候资源变暖(黄中艳和朱勇,2009),对物候的影响颇为显著(蔡榕硕和付迪,2018),北半球生长季的开始日期提前、结束日期推迟(秦大河,2014;吴蓓蓓等,2021),中国不同地区代表性植物春季物候期呈提前趋势(中国气象局气候变化中心,2021),作物生长季增加,植被生长季有延长趋势(陈怀亮等,2011)。本研究表明,以 8℃为界限温度,早稻播种期呈提前趋势,以 22℃为界限温度,安全齐穗期呈推迟趋势,整个双季稻安全生长期增加,结论与刘敏等(2011)、谢远玉等(2016)相同,安全生长期等非直线变化结论,与叶清等(2013)结论一致。随着气候变暖,早稻播种期提前是一种趋势。但由于早稻播种期间天气复杂,播种应灵活掌握,春季温度回升早的年份,可适当提前,春季温度回升慢的年份,应相应推迟。

在科研和业务中,研究指标和方法择优一直受科研人员关注,并取得了较好效果(赵俊虎等,2018;程丛兰等,2019;陆静文等,2020)。本文采用的界限温度、界限温度日期统计方法、安全生长期确定标准等用于研究以覆膜育秧为主的长沙双季籼稻安全生长期,具有较高可信度和适用性,对其他双季籼稻区覆膜育秧有一定借鉴作用,但需进一步验证。

参考文献

- 艾治勇,郭夏宇,刘文祥,等,2014. 长江中游地区双季稻安全生产日期的变化[J]. 作物学报,40(7):1320-1329. Ai Z Y, Guo X Y, Liu W X, et al, 2014. Changes of safe production dates of double-season rice in the middle reaches of the Yangtze River[J]. Acta Agron Sin, 40(7):1320-1329(in Chinese).
- 蔡榕硕,付迪,2018. 全球变暖背景下中国东部气候变迁及其对物候的影响[J]. 大气科学,42(4):729-740. Cai R S, Fu D, 2018. The pace of climate change and its impacts on phenology in eastern China[J]. Chin J Atmos Sci, 42(4):729-740(in Chinese).
- 曹秀霞,万素琴,吴铭,2014. 湖北省早稻适宜播期及其气候风险[J]. 中国农业气象,35(4):429-433. Cao X X, Wan S Q, Wu M, 2014. Determination of optimum sowing date and analysis of climate risk for early-rice in Hubei Province[J]. Chin J Agrometeorol, 35(4):429-433(in Chinese).
- 陈怀亮,刘玉洁,杜子璇,等,2011. 黄淮海地区植被生长季变化及其气候变化响应[J]. 应用气象学报,22(4):437-444. Chen H L, Liu Y J, Du Z X, et al, 2011. The change of growing season of the vegetation in Huanghe-Huaihe-Haihe Region and its responses to climate changes[J]. J Appl Meteor Sci, 22(4):437-444(in Chinese).
- 程丛兰,陈敏,陈明轩,等,2019. 临近预报的两种高时空分辨率定量降水预报融合算法的对比试验[J]. 气象学报,77(4):701-714. Cheng C L, Chen M, Chen M X, et al, 2019. Comparative experiments on two high spatiotemporal resolution blending algorithms for quantitative precipitation nowcasting[J]. Acta Meteor Sin, 77(4):701-714(in Chinese).
- 邓文,谭杰扬,刘英,等,2016. 湖南双季稻生产重心移动轨迹及发展对策[J]. 湖南农业科学,(11):87-90. Deng W, Tan J Y, Liu Y, et al, 2016. The moving track of production center and development countermeasures of Hunan double cropping rice[J]. Hunan Agric Sci, (11):87-90(in Chinese).
- 段里成,郭瑞鹤,蔡哲,等,2021. 南方九省再生稻安全生长期及高温热害时空变化[J]. 中国生态农业学报(中英文),29(12):2061-2073. Duan L C, Guo R G, Cai Z, et al, 2021. Spatiotemporal changes in the characteristics of the safe growth period and high temperature damage of ratoon rice in nine southern provinces of South China[J]. Chin J Eco-Agric, 29(12):2061-2073(in Chinese).
- 冯秀藻,陶炳炎,1994. 农业气象学原理[M]. 北京:气象出版社:89-90. Feng X Z, Tao B Y, 1994. Principle of Agricultural Meteorology[M]. Beijing: China Meteorological Press: 89-90 (in Chinese).
- 郭芬芬,肖晶晶,张蕾,等,2016. 1961—2013年中国农业界限温度的时空变化特征[J]. 生态学杂志,35(2):489-498. Guo F F, Xiao J J, Zhang L, et al, 2016. Spatiotemporal variation of agriculture critical temperature of China from 1961 to 2013[J]. Chin J Ecol, 35(2):489-498(in Chinese).

- 韩湘玲,孔扬庄,1984.关于“界限温度”确定方法的讨论[J].农业气象,(3):55-57. Han X L, Kong Y Z, 1984. Discussion of the “boundary temperature” determination method [J]. Chin J Agrometeorol, (3):55-57(in Chinese).
- 黄维,吴炫柯,刘永裕,等,2020.气候变化对广西双季稻种植布局的影响[J].中国农业气象,41(9):539-551. Huang W, Wu X K, Liu Y Y, et al, 2020. Impact of climate change on layout of double cropping rice in Guangxi[J]. Chin J Agrometeorol, 41(9):539-551(in Chinese).
- 黄文彦,孙燕,卢楚翰,等,2019.近40年夏季江苏引发暴雨的江淮气旋统计分析[J].气象,45(6):843-853. Huang W Y, Sun Y, Lu C H, et al, 2019. Statistical analysis of Jianghuai cyclone causing Jiangsu regional heavy rain in summer nearly 40 years[J]. Meteor Mon, 45(6):843-853(in Chinese).
- 黄中艳,朱勇,2009.1954—2007年云南农业气候变化研究[J].气象,35(2):111-118. Huang Z Y, Zhu Y, 2009. Research on staple agro-climate changes for recent 54 years in Yunnan[J]. Meteor Mon, 35(2):111-118(in Chinese).
- 梁平,田楠,李承忠,2007.黔东南近40年水稻安全生长期的变化[J].气象科技,35(1):107-110. Liang P, Tian N, Li C Z, 2007. Variation of safe growth period for rice in recent 40 years in southeastern Guizhou[J]. Meteor Sci Technol, 35(1):107-110(in Chinese).
- 刘敏,刘安国,邓爱娟,等,2011.湖北省水稻生长季热量资源变化特征及其对水稻生产的影响[J].华中农业大学学报,30(6):746-752. Liu M, Liu A G, Deng A J, et al, 2011. Changing characteristics of heat resources of rice growing seasons in Hubei Province and its impacts on rice production[J]. J Huazhong Agric Univ, 30(6):746-752(in Chinese).
- 陆静文,周天军,黄昕,等,2020.表面气温内部变率估算方法的比较研究[J].大气科学,44(1):105-121. Lu J W, Zhou T J, Huang X, et al, 2020. A comparison of three methods for estimating internal variability of near-surface air temperature[J]. Chin J Atmos Sci, 44(1):105-121(in Chinese).
- 陆魁东,黄晚华,王勃,等,2007.湖南气候变化对农业生产影响的评估研究[J].安徽农学通报,13(3):38-40, 5. Lu K D, Huang W H, Wang B, et al, 2007. Evaluation about the effects of climate changes on agricultural production in Hunan Province[J]. Anhui Agric Sci Bull, 13(3):38-40, 5(in Chinese).
- 吕伟生,曾勇军,石庆华,等,2016.近30年江西双季稻安全生长期及温光资源变化[J].中国水稻科学,30(3):323-334. Lü W S, Zeng Y J, Shi Q H, et al, 2016. Changes in safe production dates and heat-light resources of double cropping rice in Jiangxi Province in recent 30 years[J]. Chin J Rice Sci, 30(3):323-334(in Chinese).
- 马国辉,2000.南方三熟稻区双季稻超高产栽培研究进展[J].中国农业科技导报,2(3):16-21. Ma G H, 2000. The research progress of the super high-yielding cultivation for double rice under tri-cropping system in southern China[J]. Rev China Agric Sci Technol, 2(3):16-21(in Chinese).
- 梅方权,吴宪章,姚长溪,等,1988.中国水稻种植区划[J].中国水稻科学,2(3):97-110. Mei F Q, Wu X Z, Yao C X, et al, 1988. Rice cropping regionalization in China[J]. Chin J Rice Sci, 2(3):97-110(in Chinese).
- 秦大河,2014.气候变化科学与人类可持续发展[J].地理科学进展,33(7):874-883. Qin D H, 2014. Climate change science and sustainable development[J]. Prog Geogr, 33(7):874-883(in Chinese).
- 曲曼丽,1990.农业气候实习指导[M].北京:北京农业大学出版社:1-8. Qu M L, 1990. Agroclimate Practice Instruction[M]. Beijing: Beijing Agricultural University Press:1-8(in Chinese).
- 汪玲瑶,谌芸,肖天贵,等,2018.夏季江南地区暖区暴雨的统计分析[J].气象,44(6):771-780. Wang L Y, Chen Y, Xiao T G, et al, 2018. Statistical analysis of warm-sector rainstorm characteristics over the southern of middle and lower reaches of the Yangtze River in summer[J]. Meteor Mon, 44(6):771-780(in Chinese).
- 王树廷,1982.关于日平均气温稳定通过各级界限温度初终日期的统计方法[J].气象,8(6):29-30. Wang S T, 1982. Statistical methods on average daily temperature stabilization through the beginning and end dates of temperature at all levels of the limits [J]. Meteor Mon, 8(6):29-30(in Chinese).
- 王学林,曾凯,柳军,等,2021.长江中下游地区双季稻生长季内热量资源的变化特征及温度适宜度分析[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),49(3):27-37. Wang X L, Zeng K, Liu J, et al, 2021. Variation characteristics of heat resources and temperature suitability for double cropping rice growing seasons in the middle and lower reaches of Yangtze River[J]. J Northwest A&F Univ (Nat Sci Ed), 49(3):27-37(in Chinese).
- 魏凤英,2007.现代气候统计诊断与预测技术:第2版[M].北京:气象出版社:40-67. Wei F Y, 2007. Modern Technology of Climate Statistical Diagnosis and Prediction[M]. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press:40-67(in Chinese).
- 吴蓓蕾,姜大膀,王晓欣,2021.1961~2018年中国生长季变化[J].大气科学,45(2):424-434. Wu B L, Jiang D B, Wang X X, 2021. Changes in the growing season across China during 1961-2018 [J]. Chin J Atmos Sci, 45(2):424-434(in Chinese).
- 谢远玉,黄淑娥,田俊,等,2016.长江中下游热量资源时空演变特征及其对双季稻种植的影响[J].应用生态学报,27(9):2950-2958. Xie Y Y, Huang S E, Tian J, et al, 2016. Spatial-temporal characteristics of thermal resources and its influence on the growth of double cropping rice in the middle and lower reaches of the Yangtze River, China[J]. Chin J Appl Ecol, 27(9):2950-2958(in Chinese).
- 叶清,杨晓光,解文娟,等,2013.气候变暖背景下中国南方水稻生长季可利用率变化趋势[J].中国农业科学,46(21):4399-4415. Ye Q, Yang X G, Xie W J, et al, 2013. Tendency of use efficiency of rice growth season in southern China under the background of global warming [J]. Sci Agric Sin, 46(21):4399-4415(in Chinese).

- Chinese).
- 余学知,易建佑,廖炎平等,2006.洞庭湖区低温、阴雨对直播早稻育秧的气象风险分析与决策[J].湖南农业科学,(6):42-44. Yu X Z, Yi J Y, Liao Y P, et al, 2006. Weather risk analysis and decision of low-temperature and overcast-rain in Dongting Lake Area to early rice direct seedling[J]. Hunan Agric Sci, (6):42-44 (in Chinese).
- 岳伟,阮新民,陈金华,等,2019.近50年安徽省双季稻安全生产期变化特征[J].长江流域资源与环境,28(9):2230-2238. Yue W, Ruan X M, Chen J H, et al, 2019. Changing characteristics of safe growth period of double-season rice in Anhui Province during recent 50 years[J]. Resour Environ Yangtze Basin, 28(9): 2230-2238 (in Chinese).
- 张运福,金巍,曲岩,2009.1951-2007年辽宁省农业界限温度变化及其成因探讨[J].气象,35(12):109-117. Zhang Y F, Jin W, Qu Y, 2009. Changes in accumulated temperature and days steadily above certain threshold in Liaoning Province from 1951 to 2007 [J]. Meteor Mon, 35(12):109-117 (in Chinese).
- 赵俊虎,陈丽娟,熊开国,2018.基于新监测指标的江南入梅早晚的气候特征及影响系统分析[J].气象学报,76(5):680-698. Zhao J H, Chen L J, Xiong K G, 2018. Climate characteristics and influential systems of Meiyu to the south of the Yangtze River based on the new monitoring rules[J]. Acta Meteor Sin, 76(5):680-698 (in Chinese).
- 中国气象局,2008.寒露风等级:QX/T 94—2008[S].北京:气象出版社:1-2. China Meteorological Administration, 2008. Grade of autumn low temperature: QX/T 94—2008[S]. Beijing: China Meteorological Press: 1-2 (in Chinese).
- 中国气象局,2013.水稻冷害评估技术规范:QX/T 182—2013[S].北京:气象出版社:1-5. China Meteorological Administration, 2013. Technical specifications for evaluation of rice cool damage: QX/T 182—2013[S]. Beijing: China Meteorological Press: 1-5 (in Chinese).
- 中国气象局气候变化中心,2021.中国气候变化蓝皮书(2021)[M].北京:科学出版社. CMA Climate Change Centre, 2021. Blue Book on Climate Change in China (2021)[M]. Beijing: Science Press (in Chinese).

(本文责编:何晓欢)