

· 繁殖制种 · Multiplication & seed production

福建三明两系杂交水稻安全高效制种时空分析

康海滨^{1,2}, 江艳芳², 许庆文², 李仁忠^{1,2*}

(1. 福建省灾害天气重点实验室, 福建 福州 350000; 2. 福建省三明市气象局, 福建 三明 365000)

摘要: 为找出福建三明两系杂交水稻制种育性敏感期和抽穗扬花期适宜时段和区域, 利用 23 个国家气象站近 50 a 6—9 月逐日气象数据, 统计育性敏感期风险率和抽穗扬花期保证率, 确定不育系不育起点温度 23.0、23.5、24.0 °C 的安全育性敏感期时空分布。结果表明, 育性敏感期低风险时段最早初日在 6 月中旬, 最晚终日在 9 月中旬; 随着不育起点温度提高, 低风险时段大于 80.0 d 的区域明显减小; 低风险时段天数随海拔高度增加而减少。抽穗扬花期旬最低保证率在 7 月上旬—9 月上旬主要来自高温, 在 9 月中旬—下旬主要来自低温。使两个关键期的气象条件都得到满足的安全育性敏感期的始期在 6 月下旬—8 月下旬, 终期在 8 月中旬—9 月中旬; 不育起点温度 23.0、23.5、24.0 °C 的安全期达 60.0 d 的区域占比分别是 67.2%、46.2%、18.0%; 安全期大于 45.0 d 的区域主要分布在海拔高度 300 ~ 600 m。建宁县、泰宁县、宁化县、清流县、明溪县、大田县可以开展两系杂交水稻夏制和秋制, 沙县区、尤溪县、将乐县、三元区、永安市的两系杂交水稻制种宜选择秋制。制种中选用的不育系不育起点温度不宜偏高。

关键词: 三明市; 两系杂交水稻; 制种; 育性敏感期; 抽穗扬花期

中图分类号: S511.03; S339 **文献标识码:** B **文章编号:** 1005-3956(2025)03-0053-08

DOI: 10.16267/j.cnki.1005-3956.20240805.184

两系法杂交水稻由环境敏感型雄性不育系和恢复系组成, 制种不受恢保关系限制, 自由配组选育出强优势组合的概率更大, 应用前景广阔^[1]。目前, 两系杂交水稻技术已在全国 16 个省(市、自治区)推广^[2], 截至 2024 年 3 月, 有 36 个两系杂交水稻品种被农业农村部确认为超级稻品种^[3], 为保障我国粮食安全发挥了重要作用。育性敏感期和抽穗扬花期是两系杂交水稻制种的两个关键期。温敏雄性不育系的不育起点温度是指雄性育性从可育转变为不育的临界温度。当日平均温度连续 3.0 d 低于不育起点温度时, 不育系会发生育性波动甚至转可育, 导致杂交制种失败。不育系不育起点温度偏高和漂移、耐受低温时间短、制种基地和时段选择不当、气候条件异常是两系杂交水稻制种不安全的主要原因^[4]。在计算母本育性敏感期的气候风险时, 要充分考虑紧随其后的抽穗扬花期的气候风险^[5]。在抽穗扬花期, 亲本易受到高温、低温、干燥和连阴雨等不利气象条件影响, 花粉活力低, 授粉失败, 结实率下降, 影响制种产量和质量^[6-7]。如果抽穗扬花期风险指数小、时段长, 有利于满足不育系育性敏感期的安排^[8]。汪扩军等^[9]以育性安全性等级和扬花危害指数为核心指标, 构建了湖南省两系制种安全性与适宜性分区等级标准。殷剑敏等^[10]通过计算网格点气象要素值对江西省两系杂交水稻制种失败气候风险和减产气候风险进行了区划。吕润等^[11]在海南省两系杂交水稻制

种关键发育期气候风险区划中利用反距离权重法将气候风险指数进行空间插值计算。雷东阳等^[12]发现江苏盐城地区不育起点温度高于 23 °C 的不育系制种风险大, 提出两系杂交水稻制种可以安排在广西、福建等安全适宜区域。左钦月等^[13]基于气象决策方案在四川仁寿开展两系杂交水稻制种应用试验, 并获得成功。苏荣瑞等^[14]研究发现, 福建两系杂交水稻制种的育性敏感期在 7 月上旬—8 月下旬, 适宜区主要在福建北部和西南部海拔约 400 m 以下区域。已有文献讨论了水稻制种关键期敏感气象条件和灾害的时空分布, 以及合理安排播期匹配适宜气象条件或避开不利气象条件的影响。本文以福建省三明市为研究区域, 在兼顾抽穗扬花期灾害性气候低风险率的前提下, 确定 3 个不育起点温度不育系制种的安全育性敏感期, 开展精细化两系杂交水稻制种安全区划, 为水稻制种基地布局、播期安排和产业健康发展提供技术参考。

1 资料与方法

1.1 研究区域与数据来源

三明市地处福建省中北部, 总面积约

收稿日期: 2024-08-05 网络出版日期: 2025-04-07

基金项目: 三明市科技计划引导性项目 (2023-S-46)

作者简介: 康海滨 (1989—), 男, 福建龙岩人, 工程师, 硕士。

电话: 0598-8299871; E-mail: 1205247115@qq.com。

* 通信作者。电话: 0598-8288667; E-mail: 64929567@qq.com。

230 万 hm^2 ，下辖 11 个县（市、区）。地形以中低山丘陵和沟谷平原为主，主要河流有流经泰宁、将乐等县的金溪，流经宁化、清流、永安、三元、沙县等县市区的沙溪，流经大田、尤溪等县的尤溪，总体地势为东南部高、西北部低。三明是全国杂交水稻制种第一大城市，11 个县（市、区）均有制种区。2023 年全市制种面积 2.3 万 hm^2 ，其中两系杂交水稻制种面积占到 60% 以上。三明市两系制种基本无春制，夏制育性敏感期一般在 7 月 5 日—8 月 15 日，秋制（烟后制）育性敏感期一般在 8 月 10 日—9 月 10 日。本文采用数据包括三明市及周边共计 23 个国家气象观测站 1973—2022 年 6—9 月的逐日平均气温、最高气温、最低气温、降水量、日照时数、平均相对湿度以及福建省数字高程模型（DEM）、三明市行政区划图等。

1.2 统计方法

1.2.1 育性敏感期低风险时段

连续 3 d 日平均温度低于不育起点温度时，

水稻光温敏核不育系会出现育性波动或转可育，种子纯度低于标准，导致杂交制种失败。风险率计算公式为：

$$C = n/N \times 100\% \quad (1)$$

其中， C 是逐日育性敏感期风险率，要求不超过 5%； n 是当天及前 2 d 出现育性敏感期低温的年份数； N 是年份总数（本文 N 为 50）。分别以 23.0、23.5、24.0 $^{\circ}\text{C}$ 为不育起点温度来计算，参考两系杂交水稻种子生产体系技术规范（GB/T 29371.4—2012），统计逐日育性敏感期风险率 $\leq 5\%$ 且连续日数不小于 20 d 的时段。将 6 月 1 日的日序定为 1，结合 23 个气象观测站的地理坐标，建立育性敏感期低风险时段初日日序、低风险时段天数的地理推算模型（表 1），终日日序由初日日序和天数算得，利用 ArcMap 10.2 软件的渔网和栅格计算器工具绘制低风险时段初日、终日和天数的 1 km \times 1 km 细网格分布图^[15]。

表 1 育性敏感期低风险时段地理推算模型

Table 1 Geographical prediction model of low risk period in fertility sensitive period

不育起点温度 / $^{\circ}\text{C}$	低风险时段	推算模型	R^2	F
23.0	初日日序	$-131.437+5.430y+0.023h$	0.583	16.383**
	天数	$326.536-0.052h-8.555y$	0.667	23.078**
23.5	初日日序	$-405.363+0.035h+4.234y+2.596x$	0.605	12.254**
	天数	$284.659-0.057h-7.085y$	0.641	20.600**
24.0	初日日序	$-608.898+0.042h+7.682y+3.568x$	0.647	14.425**
	天数	$383.618-0.080h-10.921y$	0.697	26.357**

注： R^2 表示回归模型的决定系数； F 表示决定系数的变化量； x 表示经度（ $^{\circ}$ ）； y 表示纬度（ $^{\circ}$ ）； h 表示海拔高度（m）。** 表示通过 0.01 水平的显著性检验。下同。

1.2.2 抽穗扬花期保证率

若连续 3.0 d 出现连阴雨、高温、低温、干燥等不利气象条件，会影响杂交水稻抽穗扬花授粉，导致制种减产。抽穗扬花期保证率计算公式为：

$$R'_i = D'_i / N \times 100\% \quad (2)$$

$$R_i = D_i / N \times 100\% \quad (3)$$

其中， R'_i 、 R_i 分别是逐旬、逐日不出现某一不利气象的保证率， $i=1, 2, 3, 4$ ，分别代表连阴雨、高温、低温、干燥。本文连阴雨指当天及前 2 d 均有降雨，其中至少 2 d 的降雨量不低于 5 mm，且当天及前 2 d 的日照时数不超过 2 h；高温指当天及前 2 d 的最高温度均大于 35 $^{\circ}\text{C}$ ；低温指当天及前 2 d 的最低温度均小于 21 $^{\circ}\text{C}$ ；干燥指当天及前 2 d 的平均相对湿度均小于 70%^[13-14]。 D'_i 、 D_i 分别是当旬、当日不出现某一不利气象的年份数， N 是年份总数。对三明市境内 11 个气象观测站的 R'_i 进行分析。以逐日最低保证率 78%

为阈值统计出的抽穗扬花期较符合三明水稻制种实际情况，因此，从 R_i 中选出日最低保证率，统计最低保证率 $\geq 78\%$ 且连续日数不小于 10 d 的时段，作为抽穗扬花期较高保证率时段。

1.2.3 安全育性敏感期

统计逐日育性敏感期风险率 $\leq 5\%$ 、连续日数不小于 20 d，且紧随其后连续不小于 10 d，满足日最低保证率 $\geq 78\%$ 的时段，定义该时段为两系杂交水稻安全育性敏感期（简称安全期）。参考周世怀等^[16]的方法，若低风险时段终日与较高保证率时段终日相差 10 d 及以上时，则低风险时段终日作为安全期终期；若两个终日相差小于 10 d 时，则较高保证率时段终日向前第 10 天作为安全期终期；安全期始期则是较高保证率时段初日向前第 20 天或更早，但不能早于低风险时段。建立安全期始期日序、终期日序的地理推算模型（表 2），计算统计值与模型拟合值之差，利用

空间插值的方法获取残差趋势面^[17]，将残差趋势面与拟合值趋势面的叠加值作为最终值。安全期

天数由始期日序与终期日序计算得出。绘制安全期始期、终期和天数的 1 km × 1 km 细网格分布图。

表 2 安全育性敏感期地理推算模型

Table 2 Geographical prediction model of the safe fertility sensitive period

不育起点温度 /℃	安全育性敏感期	推算模型	R ²	F
23.0	始期	-1 154.049+10.449x-0.116h	0.643	19.039**
	终期	-114.752+2.616x-3.245y-0.034h	0.786	25.488**
23.5	始期	-1 062.332+9.647x-0.095h	0.548	13.136**
	终期	-109.756+2.579x-3.274y-0.034h	0.788	25.777**
24.0	始期	-950.827+8.701x-0.085h	0.604	16.255**
	终期	218.521-4.174y-0.043h	0.686	22.861**

2 结果与分析

2.1 不育系育性敏感期低风险时段

当不育起点温度为 23.0 ℃（简称 T_{23℃}）时，育性敏感期低风险时段最早的初日在 6 月中旬（图 1），集中在沙溪、尤溪以及金溪将乐段的河谷及周边地区，海拔在 550 m 以下；最迟的初日在 7 月下旬，初日在 7 月的区域为闽江源、武夷山、龙栖山、天斗岩、戴云山等中、低海拔山脉，海拔在 630 m 以上；最早的终日在 7 月下旬，分布在中、低海拔山脉；最迟的终日在 9 月中旬，分布在主要河流河谷及周边地区；低风险时段长 4.0 ~ 99.0 d，中、低海拔山脉的低风险天数普遍小于 50.0 d。当不育起点温度为 23.5 ℃（简称 T_{23.5℃}）时，低风险时段初日在 6 月中旬—8 月中旬；终日在 8 月中旬—9 月中旬；低风险时段长 0 ~ 96.0 d，其中小于 50.0 d 的区域比 T_{23℃} 时扩大，80.0 d 以上的区域比 T_{23℃} 时缩小。当不育起点温度为 24.0 ℃（简称 T_{24℃}）时，低风险时段初日在 6 月中旬—8 月下旬；终日在 8 月上旬—9 月中旬，相比 T_{23℃}，T_{24℃} 最迟的初日延后约 30.0 d；低风险时段长 0 ~ 93.0 d，相比前 2 个不育起点温度，T_{24℃} 时小于 50.0 d 的区域明显扩大，50.0 ~ 79.9 d 的区域更加零散，80.0 d 以上的区域明显缩小。结果表明，从 T_{23℃} 到 T_{24℃}，两系杂交水稻制种育性敏感期受到的时间和地域限制明显增加，育种风险增大。

2.2 抽穗扬花期逐旬保证率

2.2.1 不出现连阴雨的逐旬保证率

三明市两系杂交水稻制种的抽穗扬花期在 7—9 月，属于当地夏季。统计全市 11 个国家气象观测站历史数据计算抽穗扬花期逐旬保证率发现，不出现连阴雨的旬保证率均在 74% 及以上（表 3）。在 7 月上旬，西北部的宁化、

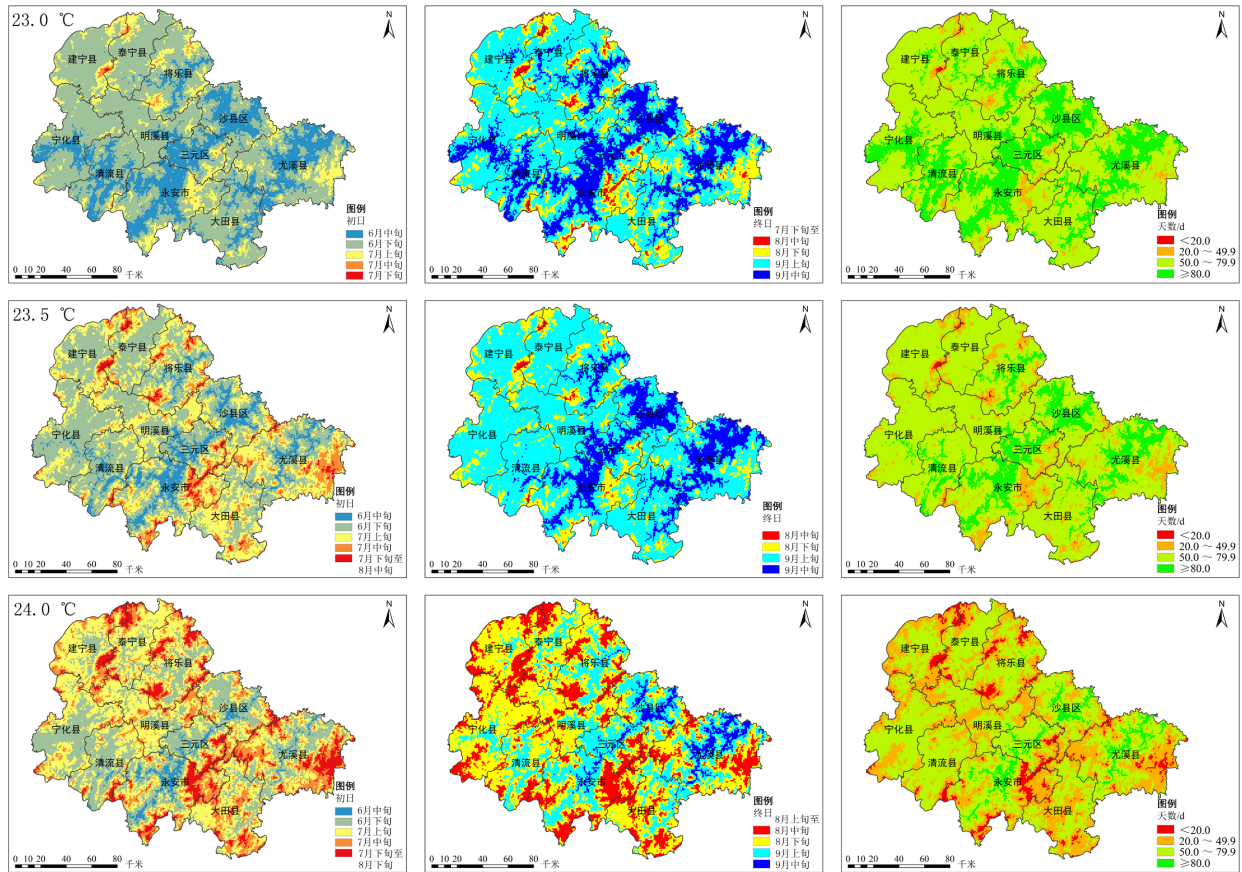
清流、明溪、将乐、建宁、泰宁的保证率为 76% ~ 82%，低于东南部的三元、沙县、永安、尤溪、大田。7 月中旬—8 月下旬，绝大部分地区的保证率大于 82%，特别是 7 月下旬—8 月中旬，大部分地区的保证率超过 90%。在 9 月上旬和下旬，全市保证率均低于 90%。9 月上旬全市平均旬保证率在 7—9 月中最低。由此可知，7、8 月之交连阴雨出现较少，9 月初连阴雨增多，连阴雨的发生与地形条件和天气气候背景等因素有关^[18]。

2.2.2 不出现高温的逐旬保证率

7—8 月，三明市各地不出现高温的保证率差异明显（表 3）。中南部高温频繁，高温天气出现时间早、持续时间长，形成了以将乐、三元、沙县、永安、尤溪等东南部偏北地区为主的高温中心，即高温保证率低值中心。尤其是 7 月上旬—8 月上旬，沙县、尤溪等地的保证率持续低于 25%。保证率大于 60% 的区域主要分布在西北部。在 7 月上旬、8 月中旬—下旬，建宁、泰宁、宁化、明溪、清流等西北部县的保证率大于 60%，其中宁化保证率超过 80%。从 9 月上旬开始，保证率大于 80% 的区域自西北和东南两个方向朝将乐、沙县、尤溪等地扩张，至 9 月下旬，全市保证率都在 84% 及以上。三明市春制、夏制杂交水稻集中在西北部，东南部以秋制和烟后制为主的制式分布特征受高温影响较大。

2.2.3 不出现低温的逐旬保证率

低温冷害影响水稻抽穗、开花、授粉，进而影响产量。7 月中旬—8 月中旬，11 个站点不出现低温的保证率均在 90% 及以上（表 3）。8 月下旬—9 月下旬，保证率自沙县、尤溪、三元、永安一带朝西北和东南两个方向快速下降，以建宁为例，保证率依次是 84%、52%、18%、4%。9 月中旬—下旬，保证率小于 30% 的区域包括建



注：行政区划图的审图号为 GS 京 (2022) 1061 号。下同。

图 1 三明市 3 个不育起点温度的育性敏感期低风险时段初日、终日和天数分布

Fig. 1 Distribution of the first day, the last day and the number of days in the low-risk period of fertility sensitive period of three critical sterility-inducing temperatures in Sanming City

宁、泰宁、宁化、明溪、清流，这些区域需要重点关注寒露风对制种抽穗扬花的不利影响。

2.2.4 不出现干燥的逐旬保证率

不出现干燥的保证率在永安、三元、沙县存在一个低值中心，7月的低值中心保证率为42%~76% (表3)，8月为56%~80%，9月为64%~88%。7—8月，干燥保证率低值区与高温保证率低值区有一定重合，永安、三元、沙县等地同期水稻抽穗扬花容易受到干热危害。7—9月，泰宁、明溪等地的保证率在88%及以上，在这些区域，干燥不是水稻抽穗扬花授粉的主要限制因素。

2.2.5 抽穗扬花期逐旬最低保证率

7月上旬—8月上旬，三元、沙县、尤溪、将乐、永安等地的最低保证率偏低；9月中旬—下旬，建宁、泰宁、宁化、明溪、清流等地的最低保证率偏低，均对制种抽穗扬花授粉不利。7月上旬—9月上旬，旬最低保证率主要来自高温；

9月中旬—下旬，最低保证率主要来自低温；7月上旬和9月上旬，部分最低保证率来自连阴雨。综上，在不同时段对水稻制种抽穗扬花授粉起主要限制作用的气象因素有所不同。

2.3 气象观测站尺度的安全育性敏感期

以 T₂₃ °C 为例 (表4)，西北部的明溪、宁化、清流以及东南部的大田安全育性敏感始期在6月17—18日，西北部的建宁、泰宁始期在6月25日；上述地点终期在8月30日—9月4日，安全期长为67.0~79.0 d；8月10日前可安排夏制的育性敏感期，之后可安排秋制的育性敏感期。东南部的永安安全育性敏感始期在7月27日，西北部的将乐和东南部的三元、尤溪、沙县始期在8月4—9日；上述地点终期在9月9—12日，安全期长为34.0~38.0 d；适合安排秋制的育性敏感期。此外，受抽穗扬花期日最低保证率小于78%出现时间和次数的影响，部分地点的安全期不连续，出现分段。

表3 三明市制种抽穗扬花期不出现灾害性气候的保证率

Table 3 The guarantee rate of no occurrence of disastrous climate during the heading and flowering period of hybrid rice seed production in Sanming City

		%								
不利气象条件	气象站点	7月上旬	7月中旬	7月下旬	8月上旬	8月中旬	8月下旬	9月上旬	9月中旬	9月下旬
连阴雨	宁化	82	80	90	90	96	84	78	92	84
	清流	82	90	90	92	96	86	74	96	86
	明溪	82	86	90	94	94	88	78	94	82
	将乐	80	90	88	88	94	82	82	90	86
	建宁	78	88	90	90	94	84	76	84	80
	泰宁	76	82	86	90	94	80	82	92	86
	三明	88	88	92	90	88	80	84	90	86
	沙县	88	94	92	92	92	84	78	88	86
	永安	88	96	90	90	90	88	82	92	84
	尤溪	88	92	90	84	84	82	80	84	78
	大田	90	84	88	80	78	76	80	88	84
高温	宁化	90	74	56	72	82	84	96	100	92
	清流	62	44	32	54	70	70	82	94	94
	明溪	62	40	38	50	64	72	84	94	94
	将乐	32	16	14	22	38	50	64	68	84
	建宁	64	48	36	48	66	70	76	86	90
	泰宁	70	50	38	58	70	78	82	86	96
	三明	28	20	20	30	46	50	72	76	90
	沙县	24	12	10	16	34	38	52	60	86
	永安	28	22	16	24	42	48	64	72	88
	尤溪	18	12	14	22	34	42	60	72	92
	大田	54	48	28	56	70	72	88	96	96
低温	宁化	92	98	96	94	94	84	64	22	6
	清流	94	98	96	94	96	88	78	28	8
	明溪	94	98	96	94	98	80	64	18	4
	将乐	100	100	100	100	100	94	90	46	30
	建宁	88	98	90	96	96	84	52	18	4
	泰宁	88	100	96	94	96	82	58	20	10
	三明	98	100	100	100	100	94	90	60	40
	沙县	98	100	100	100	100	98	94	56	34
	永安	98	100	100	100	98	94	94	54	28
	尤溪	96	100	100	100	98	96	86	46	24
	大田	96	98	100	98	100	94	72	36	16
干燥	宁化	90	80	84	90	92	94	98	86	92
	清流	90	80	84	90	94	92	98	90	92
	明溪	92	90	88	88	94	94	98	90	90
	将乐	86	86	84	88	90	90	96	90	82
	建宁	94	84	80	96	92	90	98	96	96
	泰宁	96	90	90	94	96	98	98	94	90
	三明	64	62	42	56	66	66	74	64	70
	沙县	76	74	64	68	74	80	88	80	84
	永安	56	44	48	74	70	80	84	70	78
	尤溪	92	84	82	92	92	92	96	96	94
	大田	70	72	76	92	86	90	98	86	86

注：三元区内的国家气象观测站名称为“三明国家气象观测站”。下同。

表 4 三明市国家气象观测站尺度的两系杂交水稻制种安全育性敏感期

Table 4 The safe fertility sensitive period of two-line hybrid rice seed production at the scale of national meteorological observation stations in Sanming City

气象站点	经度 /°	纬度 /°	海拔高度 /m	安全育性敏感期 (月 - 日)		
				23.0 °C	23.5 °C	24.0 °C
宁化	116.65	26.27	358.8	06-18—09-01	06-24—09-01	06-26—08-30
清流	116.79	26.19	363.2	06-17—07-12 07-07—09-01	06-18—07-12 07-07—09-01	07-07—09-01
明溪	117.21	26.36	357.3	06-18—07-14 07-11—09-01	06-25—07-14 07-11—09-01	07-11—08-30
将乐	117.49	26.71	286.6	08-04—09-09	08-04—09-09	08-04—09-09
建宁	116.84	26.83	342.5	06-25—07-14 07-15—08-30	07-15—08-30	07-15—08-25
泰宁	117.17	26.9	342.9	06-25—07-14 07-12—08-30	07-12—08-30	07-12—08-29
三明	117.64	26.27	210.3	08-06—09-12	08-06—09-12	08-06—09-10
沙县	117.81	26.39	120.7	08-09—09-12	08-09—09-12	08-09—09-12
永安	117.37	25.95	257.8	07-27—09-12	07-27—09-12	07-27—09-11
尤溪	118.15	26.16	204.7	08-07—09-09	08-07—09-09	08-07—09-09
大田	117.84	25.7	400.1	06-18—07-14 07-10—09-04	06-18—07-14 07-10—09-04	06-21—07-14 07-10—08-31

2.4 三明市精细化的安全育性敏感期

精细化区划结果显示 (图 2), $T_{23\text{ °C}}$ 、 $T_{23.5\text{ °C}}$ 、 $T_{24\text{ °C}}$ 最早的安全育性敏感期始期在 6 月下旬, 对应区域在 $T_{23\text{ °C}}$ 分布广泛, 在 $T_{24\text{ °C}}$ 缩小至宁化西部、大田北部等地。相比 $T_{23\text{ °C}}$, $T_{23.5\text{ °C}}$ 始期在 7 月上旬—中甸的区域新增了建宁大部、泰宁大部等地。相比 $T_{23.5\text{ °C}}$, $T_{24\text{ °C}}$ 始期在 7 月上旬—中甸的区域又新增了明溪大部、清流大部等地。始期在 8 月的区域集中分布在沙溪、金溪、尤溪河谷及周边地区。安全期终期在 8 月中旬—9 月中旬。终期在 9 月中旬的区域集中在上述主要河流河谷及周边地区。从 $T_{23\text{ °C}}$ 到 $T_{24\text{ °C}}$, 宁化中部终期从 9 月上旬提前至 8 月下旬, 建宁西部和尤溪东部等地终期从 8 月下旬提前至 8 月中旬。随着不育起点温度提高, 安全期天数为 45.0 ~ 59.9 d 和 30.0 ~ 44.9 d 的区域明显扩大, 安全期大于 60.0 d 的区域明显缩小, 至 $T_{24\text{ °C}}$ 安全期大于 60.0 d 的区域主要在宁化中西部和建宁北部等地。安全期小于等于 30.0 d 的区域主要分布在海拔高度 100 ~ 200 m 的地区, 安全期 30.0 ~ 45.0 d 的区域主要分布在海拔高度 200 ~ 300 m 的地区, $T_{23\text{ °C}}$ 安全期 45.0 ~ 60.0 d 的区域主要分布在海拔高度 300 ~ 400 m 的地区, $T_{23.5\text{ °C}}$ 、 $T_{24\text{ °C}}$ 安全期 45.0 ~ 60.0 d 的区域主要分布在海拔高度 400 ~ 500 m 的地区。 $T_{23\text{ °C}}$ 、 $T_{23.5\text{ °C}}$ 、 $T_{24\text{ °C}}$ 安全期大于等于 60.0 d 的区域各自占统计面积 (187.6 万 hm^2) 的 67.2%、46.2%、18.0%, 其中在海拔

高度 400 ~ 500 m 分布最广, 分别占统计面积的 21.6%、13.7%、5.7%。整体而言, 两系杂交水稻制种如果选用不育起点温度较高的不育系, 安全期将缩短, 制种风险增大。对日序推算模型结果显示的始期和终期超出三明市两系杂交水稻制种实际育性敏感期日期 (6—9 月) 的区域, 图 2 未做统计与分析。

3 讨论

杂交水稻制种区分布状况与制种历史、技术水平、产业政策等人文因素有关^[9], 也与气候、地形等自然因素关系密切。三明市西北部以低山丘陵为主, 地势低平, 耕地多; 东南部多山, 海拔差异大, 耕地少且多分布在河谷两岸。相比东南部, 7—8 月西北部的抽穗扬花期灾害性气候风险更低。2023 年全市制种面积 $\geq 666.7\text{ hm}^2$ 的乡镇全部分布在建宁、泰宁、宁化, 制种面积 200.0 ~ 666.7 hm^2 的乡镇分布在建宁、宁化、泰宁、明溪、将乐、沙县、尤溪。西北部的建宁、泰宁、宁化、明溪是主要制种区, 其 $T_{23\text{ °C}}$ 安全期普遍大于 60.0 d, 两系杂交水稻制种的气候条件较好, 可以开展夏制和秋制 (烟后制)。清流的安全期长, 现有制种面积小, 具有大幅增加制种面积的潜力。沙县、尤溪、将乐、永安也是主要制种区, 大部分区域的 $T_{23\text{ °C}}$ 安全期小于 60.0 d, 部分小于 45.0 d, 加上始期较迟, 可以开展两系杂交水稻制种, 但应以秋制为主, 扩大制种范围要

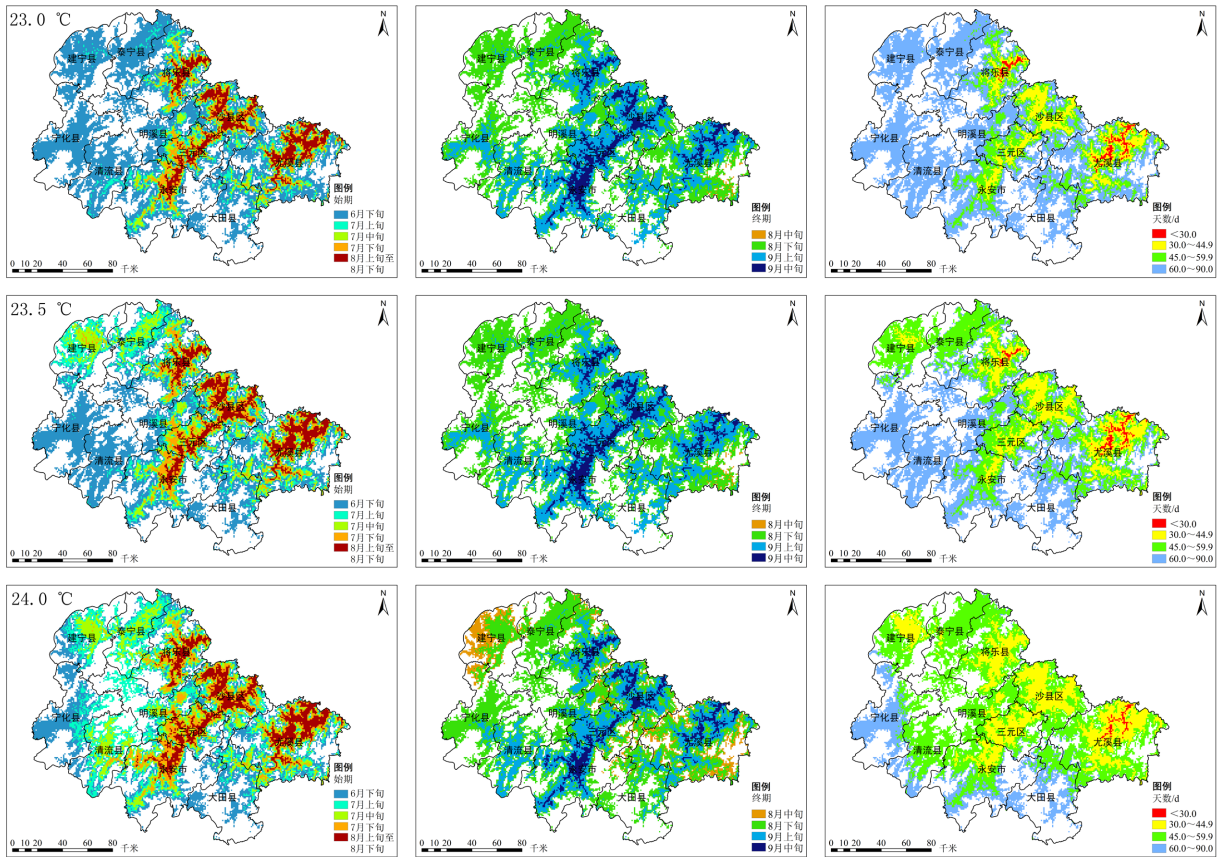


图2 三明市两系杂交水稻制种3个不育起点温度的安全育性敏感期始期、终期和天数分布

Fig. 2 Distribution of the beginning date, ending date and the number of days of the safe fertility sensitive period of three critical sterility-inducing temperatures in two-line hybrid rice seed production in Sanming City

提前做好气候适宜性评估。受地形和耕地限制，大田和三元的杂交制种面积少，不是主要的制种区。

图2未做分析的区域是海拔较高的丘陵和中低山，6—9月平均气温随海拔高度的递减率大约是 $(0.46 \sim 0.67) ^\circ\text{C}/100 \text{ m}^{[20]}$ 。两系杂交水稻制种关键期的气象灾害风险随海拔的增加呈先减小后增大的趋势。吕润等^[11]将海南省海拔大于400 m的地区划为水稻制种气候高风险区；康海滨等^[21]认为福建三明地区在150 ~ 550 m的海拔高度可以获得较长的育性安全期；苏荣瑞等^[14]提出福建省两系杂交水稻制种以200 ~ 400 m海拔地区为最佳；而本文区划结果显示 $T_{23^\circ\text{C}}$ 、 $T_{23.5^\circ\text{C}}$ 、 $T_{24^\circ\text{C}}$ 安全期大于45.0 d的区域主要分布在海拔高度300 ~ 600 m的地区，在100 ~ 300 m及600 ~ 900 m的地区还有少量分布，100 m和900 m是其分布下限和上限。这一研究结果可作为选择适宜制种区的参考依据之一。本研究未考虑局地小气候差异，光热水资源及其组合在山区存在较大的空间变异性^[22-23]。今后在制订年度

两系杂交水稻制种方案和安排种植计划时，还要参考当年长期气候预测，充分考虑局地小气候差异，调整制种范围，选择适宜的制种组合。

4 结论

三明市两系杂交水稻制种育性敏感期低风险时段在6月中旬—9月中旬，抽穗扬花期主要影响因子是高温和低温。在保证育性安全的前提下，兼顾之后抽穗扬花的气象要求，安全育性敏感期始期安排在6月下旬—8月下旬，终期安排在8月中旬—9月中旬。西北部丘陵区的始期早，终期较早，安全期天数以45.0 ~ 80.0 d居多；沙溪、尤溪、金溪河谷和东南部低山丘陵区的始期迟，终期迟，安全期天数以30.0 ~ 60.0 d居多。3个不育起点温度安全期大于45.0 d的区域主要分布在海拔高度300 ~ 600 m的地区。建宁县、泰宁县、宁化县、清流县、明溪县、大田县可安排两系杂交水稻制种的夏制和秋制，沙县区、尤溪县、将乐县、三元区、永安市的两系杂

交水稻制种宜开展秋制或烟后制。为保证两系杂交水稻制种的安全高效, 不宜选择不育起点温度偏高的不育系, 制种区海拔高度不宜低于 100 m 或高于 900 m。

参考文献:

- [1] 袁隆平. 我国两系法杂交水稻研究的形势、任务和发展前景 [J]. 农业现代化研究, 1997, 18(1):1-3.
- [2] 胡忠孝, 田妍, 徐秋生. 中国杂交水稻推广历程及现状分析 [J]. 杂交水稻, 2016, 31(2):1-8.
- [3] 全国农技中心. 全国农技中心关于发布 2024 年度超级稻确认品种的通知 [EB/OL]. (2024-03-26)[2025-01-19]. <https://www.natesc.org.cn/news/des?id=a5c92410-c9f4-4aaf-af1e-efcab88414e7>.
- [4] 雷东阳, 唐文帮, 解志坚, 等. 两系法杂交水稻制种不安全问题的解决途径 [J]. 作物学报, 2013, 39(9):1569-1575.
- [5] 马晓群, 徐敏, 张爱民, 等. 合肥市两系杂交水稻制种气候风险评估 [J]. 安徽农业科学, 2002, 30(2):182-184.
- [6] 缪文华, 袁昌洪, 郭祥圣. 气象灾害对杂交水稻制种生产的影响及对策 [J]. 杂交水稻, 2008, 23(5):19-21.
- [7] 张翊, 张水金, 夏淑英, 等. 影响福建杂交水稻种子生产的气象因素分析 [J]. 福建农业学报, 2010, 25(3):298-302.
- [8] 王芬, 亢强, 李辉, 等. 成都市两系杂交水稻制种气候适宜性区划 [J]. 中国农学通报, 2019, 35(1):95-103.
- [9] 汪扩军, 帅细强, 袁隆平. 湖南省两系杂交水稻制种的适宜区域与时段 [J]. 杂交水稻, 2000, 15(6):14-17.
- [10] 殷剑敏, 魏丽, 王怀清. 江西省两系杂交水稻制种基地气候风险区划的研究 [J]. 南京气象学院学报, 2001, 24(3):415-422.
- [11] 吕润, 车秀芬, 吴慧, 等. 海南两系杂交水稻制种关键发育期气候风险区划 [J]. 热带生物学报, 2023, 14(1):77-81.
- [12] 雷东阳, 陈立云. 江苏盐城两系杂交水稻制种气象安全分析与思考 [J]. 杂交水稻, 2015, 30(6):18-20.
- [13] 左钦月, 李辉, 王芬, 等. 基于气象决策的四川两系杂交水稻制种技术研究——以 Y58S/F1599 仁寿制种为例 [J]. 杂交水稻, 2017, 32(2):32-37.
- [14] 苏荣瑞, 林瑞坤, 孙朝锋, 等. 福建两系杂交水稻制种安全高产的精细气候适宜性区划 [J]. 中国农业气象, 2024, 45(1):45-57.
- [15] 金焱, 熊士斌, 刘琰琰, 等. 基于 GIS 的旺苍县红心猕猴桃生态适宜性区划 [J]. 西南农业学报, 2019, 32(9):2141-2149.
- [16] 周世怀, 植石群. 两系法水稻制种安全期气候分析 [J]. 中国农业气象, 2000, 21(4):23-28.
- [17] 鲁韦坤, 李湘, 余凌翔, 等. 云南省森林火险气象等级区划研究 [J]. 大气科学学报, 2011, 34(3):322-328.
- [18] 阮迪陈, 袁淑杰, 姜楠, 等. 四川省水稻孕穗—抽穗期低温连阴雨时空分布 [J]. 西南农业学报, 2022, 35(8):1938-1947.
- [19] 石彦琴, 李树君, 纪高洁, 等. 福建省三明市杂交水稻制种基地发展模式与提升途径研究 [J]. 杂交水稻, 2020, 35(6):9-14.
- [20] 帅细强, 汪扩军, 周玉, 等. 超级杂交水稻制种基地气候风险的细网格分析 [J]. 安徽农业科学, 2011, 39(2):984-986.
- [21] 康海滨, 李仁忠, 罗小清, 等. 三明市两系杂交水稻制种气候安全性分析 [J]. 杂交水稻, 2022, 37(6):76-82.
- [22] 张一平, 段泽新, 窦军霞. 岷江上游干暖河谷与元江干热河谷的气候特征比较研究 [J]. 长江流域资源与环境, 2005, 14(1):76-82.
- [23] 陈晓玲, 曾永年, 柳文杰. 亚热带山地丘陵区气象要素空间化方法分析 [J]. 测绘与空间地理信息, 2017, 40(12):51-56.

Spatial and Temporal Analysis of Safe and Efficient Seed Production of Two-line Hybrid Rice in Sanming City, Fujian Province

KANG Haibin^{1,2}, JIANG Yanfang², XU Qingwen², LI Renzhong^{1,2*}

(1. Fujian Key Laboratory of Severe Weather, Fuzhou, Fujian 350000, China; 2. Sanming Meteorological Bureau, Sanming, Fujian 365000, China)

Abstract: In order to find out the suitable time and area for the fertility sensitive period and heading and flowering period of two-line hybrid rice seed production in Sanming City, Fujian Province, the risk rate of fertility sensitive period and the guarantee rate of heading and flowering period were calculated based on the daily meteorological data of 23 national meteorological stations from June to September in the past 50 years. The spatial and temporal distribution of the safe fertility sensitivity period was determined for the male sterile lines with critical sterility-inducing temperature of 23.0, 23.5 and 24.0 °C. The results showed that the beginning date of low-risk period of fertility sensitive period was in the middle of June, and the ending date was in the middle of September. With the increase of critical sterility-inducing temperature, the area of low-risk period longer than 80.0 days was significantly reduced, and the days of low-risk period decreased with the increase of altitude. The minimum guarantee rate of heading and flowering period was mainly due to high temperature from early July to early September, and low temperature from mid-September to late September. The safe fertility sensitive period, which satisfied the meteorological conditions of both critical periods, began in late June to late August and ended in mid-August to mid-September. The proportion of areas with a safe period of 60.0 days or more at critical sterility-inducing temperature of 23.0, 23.5 and 24.0 °C was 67.2%, 46.2% and 18.0%, respectively. The areas with a safety period greater than 45.0 days were mainly distributed in the altitude of 300 ~ 600 m. Jianning, Taining, Ninghua, Qingliu, Mingxi, Datian counties can carry out both summer seed production and autumn seed production of two-line hybrid rice, while the autumn seed production is recommended for Shaxian District, Youxi County, Jiangle County, Sanyuan District and Yong'an City. The critical sterility-inducing temperature of the selected male sterile lines should not be high.

Key words: Sanming City; two-line hybrid rice; seed production; fertility sensitive period; heading and flowering period

(责任编辑: 廖伏明)