

· 热带作物 ·

DOI: 10.15886/j.cnki.rdswwb.20240178



主持人: 张洪亮, 徐 冉

海南岛春季两系杂交水稻安全制种时空分布研究

吕晓琴^{1,2#}, 陈小敏^{3,4*}, 潘志华², 吕 润^{3,4}

(1. 甘肃省人工影响天气办公室, 甘肃 兰州 730020 中国; 2. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193 中国; 3. 海南省气候中心, 海南 海口 570203 中国; 4. 海南省南海气象防灾减灾重点实验室, 海南 海口 570203 中国)

摘 要: 为了探明气候变化影响下海南岛水稻春季安全制种的适宜时段, 以两系杂交水稻制种为研究对象, 利用海南岛 18 个市县 1961—2020 年 2—8 月的逐日气象数据, 分析了两系杂交稻制种关键发育期主要气象灾害时空分布特征。结果表明, 南部地区是海南岛春季两系杂交水稻制种的首选地区, 应选择育性敏感期起点温度较低的品种; 南部地区春季两系杂交安全制种的时间, 育性敏感期宜安排在 5 月初, 扬花授粉期宜安排在 5 月, 成熟收获期应在 6 月中旬前。

关键词: 两系杂交水稻; 制种风险; 气候诊断模型; 适宜时段; 海南

中图分类号: S16 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-7054(2025)04-0519-09

吕晓琴, 陈小敏, 潘志华, 等. 海南岛春季两系杂交水稻安全制种时空分布研究 [J]. 热带生物学报, 2025, 16(4): 519-527. doi: 10.15886/j.cnki.rdswwb.20240178

两系杂交水稻是一种具有不受恢保关系制约、组配自由、可利用籼粳亚种间优势等特点的水稻培育方法^[1]。两系法杂交水稻的发展为中国的粮食安全起到了关键性的作用。海南岛地处热带北缘, 全年暖热、光温较充足、雨量较充沛, 具备得天独厚的制种环境优势^[2]。海南岛南繁育制种基地已成为中国农业科研、种子供给的主战场, 是水稻杂交优势利用的主要试验区。由于两系法杂交水稻制种母本光温敏核不育系具有在特定的光温条件下产生育性转换的特性, 两系杂交水稻制种在种子生产过程中对气象条件有着严格要求, 其制种气候条件制约着杂交种子的纯度。为降低水稻制种风险, 中国学者对水稻制种进行了诸多研究。汪扩军等^[3]探明了气候环境条件对两系杂交水稻制种的具体影响, 解释了重点关注两系杂交水稻制种的 2 段气候生态安全期原因, 并据此建立了诊断评估两段安全期的方法, 提出分别以连续

3 d 日平均温度平均值大于育性转换起点温度及连续 3 d 最高气温 ≤ 23.5 °C、连续 3 d 最高气温 ≥ 36 °C、连续 3 d 均为阴雨天等指标作为育性转换期和扬花授粉期气候诊断指标。吕润等^[4]通过数学方法建立了海南岛南部地区气候要素值与地理之间的关系模型, 根据汪扩军等^[3]的水稻制种气候风险等级指标, 进行小网格推算和区划分析, 该研究结果为降低海南岛南部地区两系杂交水稻制种气候风险提供科学依据。谢建华等^[5]通过大田实验及气象站同步观测的气象数据进行对比和统计分析, 得到了湖南省永州市两系杂交水稻制种抽穗扬花、育性转换两个时期的最佳制种时段, 以此来降低该地区制种时因气候条件造成的种子纯度不高, 产量低的风险。苏荣瑞等^[6]基于两系杂交水稻制种气候适宜性分区等级标准, 采用多层复合方法, 开展基于 GIS 福建省两系杂交水稻制种安全高产精细气候适宜性区划。

收稿日期: 2024-11-26

修回日期: 2025-02-10

基金项目: 海南省自然科学基金项目(422MS149); 海南省南海气象防灾减灾重点实验室开放基金项目(SCSF202207); 中国气象局创新发展专项(CXFZ2022J052)

*第一作者: 吕晓琴(2000—)女, 硕士, 助理工程师。研究方向: 农业气候资源分析与利用。E-mail: 593607324@qq.com

*通信作者: 陈小敏(1983—)女, 硕士, 正高级工程师。研究方向: 热带农业气候资源分析与利用。E-mail: xiaominc2002@163.com

本研究深入分析了海南岛 18 个市县近 60 年气候特征,探究 2—8 月海南不同区域两系杂交稻制种“三个安全期”的主要气象灾害风险指标,根据两系杂交稻制种相应气象灾害指标,分析两系杂交水稻制种“三个安全期”的主要气象灾害风险时间演变特征与规律,确定不同区域两系杂交水稻安全制种适宜的时段,旨在为海南岛两系杂交水稻安全制种生产提供科学参考。

1 研究数据与方法

1.1 研究数据 海南岛 18 个市县国家气象观测站 1961—2020 年 2—8 月气象资料,主要气象要素包括逐日平均气温、日最高气温、日最低气温、日降水量等,来源于海南省气象信息中心。

1.2 海南春季两系杂交水稻关键发育期气象灾害指标研究 两系杂交稻制种基地与生产时段的确定主要考虑“3 个安全期”的气候风险,第 1 个是育性转换安全期,第 2 个是扬花授粉安全期(即抽穗扬花授粉安全期),第 3 个是成熟收获安全期^[7-9]。第 1 安全期是为确定两系杂交稻安全制种的地点和时间,在选择育性安全的制种地域时间的基础上,再兼顾考虑扬花授粉期与安全成熟收获期时期安全,从中挑选最适宜的制种区域和抽穗开花期^[10]。

1.2.1 育性转换期温度指标 育性转换期指水稻不育系幼穗分化的第 4 期到第 6 期^[1],即水稻雌蕊和雄蕊的形成期到水稻花粉母细胞减数分裂期。制种母本不育系群体的育性转换时间约 20 d。目前,中国两系制种用的不育系大部分为籼型温度敏感型不育系,其可育性转换主要受温度影响,故选择连续 3 d 日平均温度平均值大于育性转换起点温度作为制种育性安全期的指标。目前,生产上应用的两用不育系育性转换起点温度大多在 23.0~24.0 °C 之间^[11],但同时存在育性转换起点温度较高(24.0~24.5 °C)或较低(22.5~23.0 °C)的不育系^[12-13]。因此,结合田间试验数据对水稻制种育性转换期气象分析结果,确定连续 3 d 日平均温度平均值小于育性转换起点温度作为育性转换期的指标,针对不同起点温度的不育系指标,设计 22.0~25.0 °C 区间,按 0.5 °C 间隔进行育性风险诊断分析。

1.2.2 扬花授粉期灾害指标 杂交稻制种扬花授

粉期约为 10 d,这段时期主要制种气象灾害是连阴雨、异常低温或高温等。连续 3 d 以上连阴雨会使花粉遭受破坏,导致授精发育不良、不结实,种子空秕率增加;遭受低温时,父本不能正常开花散粉,即使开花花粉不能正常散出传播至母本柱头而结实,从而导致授粉失败,最终种子数量减少;遭遇 35 °C 以上连续高温时,会降低父本花粉活力和母本柱头活力,影响母本结实,导致水稻花器生长发育不完全,花粉发育受阻,花粉败育,产生空壳^[14]。因此,确定连续 3 d 日最高气温 ≤ 23.5 °C、连续 3 d 最高温气温 ≥ 36 °C、连续 3 d 均为阴雨天为海南岛春季两系杂交水稻制种扬花授粉时期的主要气象灾害指标。

1.2.3 成熟收获期灾害指标 制种母本从扬花授粉受精到成熟总共分为 4 个时期,其中在第 4 个时期水稻谷壳变黄,米粒水分减少,籽粒变硬,不易破碎,此期是成熟收获期。杂交稻成熟收获期一般为 10 d,其主要气象灾害是降雨等。降雨极易导致水稻穗上发芽、霉变和腐烂,成熟期 3 d 以上的降水,降低种子发芽率和活力。故确定连续 3 d 降雨天气作为海南岛春季两系杂交水稻制种成熟收获时期的主要气象灾害指标。

1.3 两系杂交水稻关键发育期气象风险计算方法

1.3.1 育性转换敏感期低温灾害发生频率 育性转换安全期气象风险采用天气灾害发生频率表示,其计算方法如下:

$$P = \frac{N}{L} \times 100\%, \quad (1)$$

式中, P 为不育系育性转换敏感期间出现低于临界温度指标气象事件概率(%); N 为不育系育性转换敏感期间出现低于临界温度指标气象事件的年数; L 为气候资料总年数,取值为 60 年。

大部分不育系水稻的育性转换时间在 20 d 以内,因此,以 20 d 为 1 个安全期的天数,同年的相同安全期内出现多次低温灾害时只统计 1 次,计算该低温灾害出现的年度概率。

1.3.2 扬花授粉安全期天气综合危害指数计算

扬花授粉安全期与成熟收获期气象风险采用天气综合危害指数表示,其计算方法如下:

$$F = \frac{1}{L} \left(\sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^M F_{ij} \right), \quad (2)$$

式中, F 为天气综合危害指数; L 为气候资料总年

数; i 为第 i 个年份 ($i=1, 2, \dots, L$); M 为气象灾害种类的总数; j 为第 j 种气象灾害 ($j=1, 2, \dots, M$); F_{ij} 为第 i 年第 j 种气象灾害出现强度。

在安全期内, 第 i 年第 j 种灾害指标出现的持续时间不足 3 d 时, 该灾害没有发生, 记灾害强度值 $F_{ij}=0$; 当持续时间刚好为 3 d 时, 灾害已经发生, 记 $F_{ij}=1$; 当持续时间超过 3 d 时, 每超过 1 d 则强度值加上 1; 如该时段内灾害多次发生, 则先分别用上述办法统计各自的强度值, 然后累加求得 F_{ij} 值。

1.3.3 成熟收获期连阴雨灾害发生频率 成熟收获期气象风险采用天气灾害发生频率表示, 其计算方法如下:

$$P = \frac{N}{L} \times 100\%, \quad (3)$$

式中, P 为成熟收获期间出现达到连阴雨指标的气象事件概率(%); N 为成熟收获期间出现达到连阴

雨指标气象事件的年数; L 为气候资料总年数, 取值为 60 年。

2 结果与分析

2.1 不育系育性转换期低温灾害时空变化特征

利用海南岛 18 个气象站 1961—2020 年 2—6 月的逐日气象资料, 对连续 3 d 平均气温小于 22.0、22.5、23.0、23.5、24.0 和 24.5 °C 等 6 个等级的低温灾害分别进行统计和分析, 取其算术平均值, 形成不同临界温度出现低温灾害频率表(以三亚为例)。表 1 为三亚 1961—2020 年不同临界温度的不育系育性转换期低温灾害出现的频率, 从中可见, 6 个不同临界温度指标的育性转换敏感期低温灾害风险, 灾害频率最低时段出现在 5 月之后; 育性转换临界温度指标越低, 出现灾害频率越低, 低温寒害风险越小。

表 1 三亚 1961—2020 年不同临界温度的不育系低温灾害出现的频率

Tab. 1 Frequency of occurrence of low temperature disasters in male sterile lines at different critical temperatures in Sanya from 1961 to 2020

临界温度/°C Critical temperatures/°C	02-01— 02-20	02-11— 03-02	02-21— 03-12	03-03— 03-22	03-13— 04-01	03-23— 04-11	04-02— 04-21	04-12— 05-01	04-22— 05-11	05-02— 05-21	05-12— 05-31	05-22— 06-10	06-01— 06-20	06-11— 06-30	SD
22.0	96.9	95.1	89.4	82.0	59.6	57.5	31.0	18.0	4.9	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	38.61
22.5	98.4	97.0	92.8	86.2	67.2	64.4	38.9	25.3	8.4	2.5	0.2	0.1	0.0	0.0	39.54
23.0	99.6	98.6	95.6	90.5	73.5	71.1	46.9	34.7	14.2	5.0	0.6	0.3	0.0	0.0	40.23
23.5	99.9	99.7	97.6	95.4	80.4	77.5	56.5	44.1	20.0	8.8	2.3	1.4	0.2	0.1	40.73
24.0	100.0	99.9	99.3	97.9	88.0	84.6	66.0	52.8	28.8	15.0	4.3	2.7	0.8	0.6	40.85
24.5	100.0	99.9	99.6	99.4	93.1	89.8	73.5	62.2	38.5	22.7	10	7.7	2.6	1.9	39.76

注: 日期02-01—02-20表示2月1日至2月20日, 以此类推。下同。

Note: 02-01—02-20 indicates February 1 to February 20, and so on. Similarly hereinafter.

表 2 是以育性转换起点温度指标 23.5 °C 为例, 进行育性转换安全期诊断。结果可见, 海南岛各地低温灾害风险频率低于 5% 的时段, 中部地区为 6 月初, 北部地区为 5 月下旬, 东部和西部为 5 月中旬, 南部为 5 月初。

因此, 从不育系育性转换安全的角度考虑, 在海南进行两系杂交稻春季制种, 宜选择育性转换期起点温度较低的品种, 育性转换期宜安排在 5 月之后; 生产优先选择海南岛南部, 该地区低温灾害风险较低, 制种相对安全, 其次是西部和东部

地区, 尽量避免选择北部和中部地区, 该区域制种风险较大。

2.2 扬花授粉期主要气象灾害指标时空变化特征

水稻开花期一般历时 12 d, 因此, 使用 5 日滑动平均统计方法, 对不同区域杂交稻制种扬花授粉期危害指数进行分析。其中, 海南岛北半部地区选取海口、儋州、临高、澄迈、安定、琼海、屯昌、文昌 8 个站点, 中部地区白沙、琼中、五指山 3 个站点, 南半部地区选取东方、昌江、乐东、保亭、三亚、万宁、陵水 7 个站点。

表 2 海南 18 个市(县)不育系育性转换期低温(<23.5 °C)灾害风险概率

Tab. 2 Probability of low temperature (<23.5 °C) disaster risk during the fertility transition period of sterile lines in 18 cities(counties) in Hainan

地区 Area	02-01- 02-20	02-11- 03-02	02-21- 03-12	03-03- 03-22	03-13- 04-01	03-23- 04-11	04-02- 04-21	04-12- 05-01	04-22- 05-11	05-02- 05-21	05-12- 05-31	05-22- 06-10	06-01- 06-20	06-11- 06-30	%
北部	海口	100	100	98.4	100	93.4	90.2	77.0	59.0	29.5	11.5	0	0	0	0
	临高	100	100	100	100	88.3	93.3	80.0	66.7	26.7	10.0	1.7	0	0	0
	澄迈	100	100	100	98.4	86.9	90.2	68.9	55.7	23.0	9.8	1.6	0	0	0
	儋州	100	100	100	98.3	86.7	91.7	73.3	58.3	30.0	15.0	6.7	3.3	0	0
	屯昌	100	100	100	98.4	93.4	90.2	67.2	57.4	27.9	16.4	6.6	3.3	0	0
	定安	100	100	98.3	98.3	89.8	86.4	66.1	52.5	22.0	11.9	1.7	0	0	0
东部	文昌	100	100	98.3	96.7	91.7	85.0	61.7	53.3	20.0	6.7	1.7	0	0	0
	琼海	100	100	100	98.4	86.9	80.3	57.4	41.0	16.4	4.9	0	0	0	0
	万宁	100	100	96.7	93.4	82.0	70.5	49.2	36.1	14.8	3.3	0	0	0	0
中部	白沙	100	100	100	100	86.9	90.2	68.9	57.4	34.4	24.6	9.8	8.2	0	0
	琼中	100	100	100	100	93.4	91.8	72.1	70.5	42.6	23.0	8.2	8.2	0	0
	五指山	100	100	100	100	96.7	86.9	68.9	52.5	27.9	13.1	3.3	1.6	0	0
西部	东方	100	100	98.4	95.1	77.0	77.0	50.8	34.4	6.6	1.6	0	0	0	0
	昌江	100	100	96.4	94.6	73.2	69.6	53.6	35.7	16.1	3.6	0	0	0	0
南部	乐东	100	100	96.7	90.0	56.7	55.0	30.0	16.7	5.0	0	0	0	0	0
	保亭	100	100	98.2	89.3	62.5	55.4	30.4	17.9	3.6	0	0	0	0	0
	三亚	98.4	95.1	83.6	78.7	42.6	42.6	23.0	16.4	11.5	3.3	0	0	0	0
	陵水	100	100	91.7	86.7	58.3	48.3	18.3	11.7	1.7	0	0	0	0	0

扬花授粉综合危害指数在 2 月中旬以后呈下降态势,北部大部分地区在 5 月中旬之后仍维持在 4.0~9.0(表 3),北半部地区扬花授粉期在气候上存在轻度风险-中度风险;中部地区 6 月下旬之后扬花授粉天气综合危害指数达到最低(表 4),但最小值为 8.2,中部山区气候风险等级为中度风险至重度风险;南部昌江、乐东和保亭指数 5 月后维持在 4.0~9.0(表 5),存在轻度风险至中度风险,而东方、三亚、万宁和陵水 4 月中旬之后低于 4.0 为风险较低。因此,海南岛南部地区在 4 月中旬后开始进入扬花授粉安全时期。

综上所述,从地域上,海南岛春季杂交水稻制种扬花授粉期天气综合灾害以中部山区风险最高,气候风险等级为中度-重度风险,北半部为轻度-中度风险,南半部的三亚、陵水、东方、万宁为

较低风险。从时间上,北半部大部分地区在 5 月之后风险降低明显,中部为 6 月下旬,而南半部 4 月下旬后开始降低至较安全期,认为南部地区开始进入扬花授粉较安全时期。因此,在制种地域选择上,海南岛南半部优于北半部,北半部优于中部。从经济效益角度而言,北半部和中部地区不建议进行两系杂交稻制种生产。从生产管理上,建议开花期初始日不宜安排过早,始花期越早,风险越高,盛花期宜安排在 5 月之后。

2.3 成熟收获期主要气象灾害指标时空变化特征

目前海南岛实际种植中,北半部和中部地区两系杂交稻制种占比较少,成熟收获期仅选取南部东方、昌江、乐东、保亭、三亚、万宁、陵水 7 个市(县)进行分析。如表 6 所示,南部地区成熟收获期危害指数大多数时间段在 5.0 以内,6 月中旬后,

表3 海南岛北半部地区扬花授粉天气综合危害指数

Tab. 3 Comprehensive hazard index of flowering and pollination weather in the half area of the North of Hainan Island

日期 Date	海口 Haikou	临高 Lingao	澄迈 Chengmai	儋州 Danzhou	定安 Dingan	屯昌 Tunchang	琼海 Qionghai	文昌 Wenchang
02-06—02-17	13.7	13.3	13.7	13.3	13.8	14.2	13.5	13.7
02-11—02-22	13.3	12.9	13.4	13.0	13.4	13.9	13.6	13.5
02-16—02-27	14	13.8	14.2	13.6	14.1	14.6	14.3	14.0
02-21—03-04	14.1	13.7	14.1	13.3	13.9	14.3	13.9	13.9
02-26—03-09	13.5	13.5	14.1	13.0	13.2	13.6	13.3	13.4
03-03—03-14	13.3	13.2	13.7	13.0	13.1	13.4	13.0	13.0
03-08—03-19	13.2	13.1	13.6	12.5	12.9	13.5	13.1	13.0
03-13—03-24	12.8	13.0	13.6	12.3	12.5	13.1	12.3	12.1
03-18—03-29	12	13.0	13.1	12.2	12	12.8	11.5	11.4
03-23—04-03	11.4	12.9	13.2	12.1	11.7	12.9	10.5	10.5
03-28—04-08	10.5	12.5	13.0	12.0	10.8	12.5	9.5	9.4
04-02—04-13	9.8	11.9	13.1	11.3	9.8	12.3	8.9	8.1
04-07—04-18	9.5	11.2	13.0	11.4	10	12.3	8.8	7.8
04-12—04-23	7.6	9.7	11.6	10.6	8.3	11.0	6.9	6.2
04-17—04-28	6.5	8.4	11.6	10.4	7.6	10.5	6.3	5.5
04-22—05-03	6.1	7.6	11.1	10.9	7.1	10.4	5.8	5.2
04-27—05-08	6.0	7.2	11.2	11.4	7.6	10.8	5.5	5.1
05-02—05-13	5.4	6.4	10.5	11.1	7.2	10.1	4.7	4.8
05-07—05-18	4.2	4.8	7.7	9.1	5.7	8.2	3.5	3.7
05-12—05-23	4.6	4.4	7.6	9.1	6.2	9.0	4.3	4.4
05-17—05-28	4.0	3.8	7.2	8.4	6.4	8.9	4.6	4.4
05-22—06-02	4.5	4.2	7.9	8.1	7.2	9.3	5.5	4.7
05-27—06-07	4.9	4.6	7.9	7.8	6.7	8.6	4.9	4.1
06-01—06-12	5.5	4.6	7.6	7.5	6.2	7.9	5.1	4.2
06-06—06-17	4.7	4.1	6.7	6.6	5.5	6.8	4.6	3.8
06-11—06-22	3.6	3.6	5.6	5.3	4.5	5.3	3.1	2.5
06-16—06-27	4.1	4.1	6.3	5.4	4.9	5.4	2.8	2.3
07-01—07-12	3.8	3.6	6.3	5.9	5.0	5.5	2.3	1.6
07-06—07-17	3.5	3.1	6.4	7.0	4.7	5.2	2.8	2.1

危害指数呈上升趋势。因此,成熟收获期宜安排在6月中旬前,晾晒遭遇连阴雨灾害概率相对小。

2.4 三个安全期最佳组合时段 从“三个安全期”在不同地区的安全可靠最佳组合时段来看,南

部地区生产成功率较高,是海南春季两系杂交水稻制种首选地区,北半部和中部地区由于育性转换和扬花授粉期受气象条件的制约,不适宜两系杂交水稻的制种。南部地区春季两系法杂交水稻制种育性敏感期宜安排在5月之后,扬花授

表 4 海南岛中部地区扬花授粉天气综合危害指数

Tab. 4 Comprehensive hazard index of flowering and pollination weather in the central area of Hainan Island

日期 Date	白沙 Baisha	琼中 Qiongzong	五指山 Wuzhishan
02-06-02-17	13.3	14.3	12.8
02-11-02-22	13.0	14.1	12.5
02-16-02-27	13.4	14.4	12.6
02-21-03-04	13.2	14.1	12.6
02-26-03-09	12.7	14.1	12.5
03-03-03-14	12.5	13.6	12.5
03-08-03-19	12.7	13.5	12.4
03-13-03-24	12.2	13.4	12.5
03-18-03-29	12.0	13.2	12.5
03-23-04-03	12.5	13.7	12.6
03-28-04-08	12.3	13.5	12.5
04-02-04-13	12.2	13.7	12.3
04-07-04-18	12.7	14.2	12.7
04-12-04-23	12.9	13.7	12.6
04-17-04-28	13.6	13.8	12.8
04-22-05-03	13.4	14.2	12.9
04-27-05-08	13.0	14.6	12.6
05-02-05-13	13.0	14.3	12.4
05-07-05-18	12.6	13.6	12.4
05-12-05-23	12.8	13.8	12.9
05-17-05-28	12.0	13.9	12.5
05-22-06-02	12.1	14.6	13.4
05-27-06-07	11.7	14.1	13.0
06-01-06-12	10.7	12.6	13.1
06-06-06-17	9.3	11.9	12.8
06-11-06-22	8.3	10.9	11.9
06-16-06-27	9.0	9.9	11.4
07-01-07-12	10.4	11.5	12.3
07-06-07-17	11.2	11.9	12.4

粉期宜安排在 5 月, 成熟收获期宜安排在 6 月中旬前。

2.5 海南岛春季两系杂交水稻主要市县制种最佳播期 选取常用临界温度 23.5 °C, 小于 30 年一遇, 播始历期 80 d 的两系杂交水稻母本品种, 在海

南 4 个主要制种市(县), 进行春季制种生产, 最佳播期安排如表 7 所示, 可见不育系育性转换期安排在 4 月底至 5 月初保证率均在 96.7% 以上, 开花期和收获期危害指数在 4 以下, 属于基本安全期(乐东县除外)。其中, 东方市育性转换期雄性不育保证率大于 97% 为较安全区、扬花授粉期与成熟收获期天气危害指数 0.97, 为无风险区, 故东方市为最适宜制种市县。而乐东县虽育性转换期雄性不育保证率高达 100% 为无风险区, 成熟收获期天气危害指数小于 4 为较安全区, 但由于乐东县城抱由镇, 地处山区, 其扬花授粉时期低温连阴雨等概率较高, 导致天气危害指数在 7.95, 为有风险区, 故乐东山区附近制种风险相对高。

3 讨论

相较于以往相关研究, 本研究深入研究海南岛两系杂交稻制种物候数据, 增加成熟收获安全期作为水稻关键发育期, 创新建立成熟收获安全期气候灾害指标与计算方法; 首次对海南岛全岛范围内 18 个市(县) 进行精确时段的两系杂交水稻安全制种时空分布研究, 能够为海南岛南繁制种时间、空间安排提供较为准确科学依据。

目前, 两系杂交稻制种主要集中在海南岛南部的三亚市、陵水县、乐东县西南沿海地区、东方市等市县, 与本研究结果一致, 基本处于气候极低风险区或较低风险区范围内。另外, 水稻制种低风险区还包括万宁市东部、琼海南部、保亭东部和南部的部分区域、昌江部分区域, 建议结合当地经济适当发展水稻制种, 但谨防避开连阴雨较多时段。本研究的农业气候适宜性区划在宏观上对海南岛水稻制种提出时间和空间上的相关建议, 但海南岛的地形地况繁杂, 山地气候、滨海气候等可能与实际有差异, 降雨和风速的多变, 导致研究结果与当地的实际情况可能出现不一致。例如乐东县抱由镇与乐东县南部或沿海地区的九所镇、长流镇等地的天气气候存在较大差异, 而制种区域主要分布在乐东南部或沿海地区; 东方市站点临海太近, 站点最高温度与相对内陆一些的板桥镇等高温天气出现的强度也有一定差异, 下一步工作还需将乡镇小气候站与县城区域站点进行气象要素对比分析, 得到更加细致的分析结果。因此建议规模化两系杂交稻制种之前, 先进行小范围

表5 海南岛南部地区扬花授粉天气综合危害指数

Tab. 5 Comprehensive hazard index of flowering and pollination weather in the south area of Hainan Island

日期 Date	东方 Dongfang	昌江 Changjiang	乐东 Ledong	保亭 baoting	三亚 Sanya	万宁 Wanning	陵水 Lingshui
02-06—02-17	12.2	11.9	12.6	13.1	12.1	12.9	12.2
02-11—02-22	11.9	11.7	12.4	12.7	11.7	12.6	12.0
02-16—02-27	12.0	11.8	12.5	12.6	11.7	12.5	11.9
02-21—03-04	11.7	11.8	12.5	12.8	11.5	12.3	11.8
02-26—03-09	11.1	11.6	12.4	12.6	11.0	11.9	11.2
03-03—03-14	11.2	11.6	12.2	12.6	10.7	11.6	11.2
03-08—03-19	10.8	11.7	12.0	12.5	9.8	10.9	11.2
03-13—03-24	10.1	11.6	11.9	12.1	8.3	10.0	10.2
03-18—03-29	9.6	11.5	11.8	11.8	7.5	9.5	9.5
03-23—04-03	9.1	11.4	11.8	11.4	6.7	9.1	9.1
03-28—04-08	8.7	11.3	12.0	11.2	6.0	7.6	8.5
04-02—04-13	7.1	10.6	11.7	10.0	5.1	6.4	7.2
04-07—04-18	6.5	10.8	11.8	10.2	4.5	6.2	6.8
04-12—04-23	4.7	9.8	11.1	9.8	3.8	5.0	5.4
04-17—04-28	3.3	9.3	10.9	8.9	3.6	3.9	4.3
04-22—05-03	2.8	8.8	10.7	8.4	3.2	3.5	3.4
04-27—05-08	1.8	9.6	9.9	7.6	2.3	3.3	2.8
05-02—05-13	1.5	9.3	9.3	7.3	1.9	3.0	3.1
05-07—05-18	1.0	8.0	8.2	7.2	1.7	2.5	2.8
05-12—05-23	1.0	8.0	8.0	7.9	1.7	2.8	2.7
05-17—05-28	0.7	6.5	6.9	7.3	1.5	2.6	2.7
05-22—06-02	0.6	6.0	6.3	7.7	1.8	2.8	2.6
05-27—06-07	0.7	5.1	5.6	7.2	1.9	3.0	3.1
06-01—06-12	0.9	4.7	6.1	7.2	1.9	3.4	3.8
06-06—06-17	0.8	4.8	6.5	7.1	2.2	3.0	3.7
06-11—06-22	0.9	5.1	5.5	6.0	2.2	2.3	3.1
06-16—06-27	1.1	5.7	4.8	6.1	2.7	2.6	3.8
07-01—07-12	0.8	6.2	5.3	7.2	2.7	2.1	2.9
07-06—07-17	0.9	6.2	5.3	7.4	2.7	2.1	2.8

的引种试种试验,摸清局地小气候的气象灾害,再决定是否深入开展规模化的制种生产。

本研究对海南岛 1961—2020 年两系杂交水稻制种的气候适宜性、风险灾害等进行了分析,探讨了海南岛两系杂交水稻制种的关键时段和最佳区域,对于水稻制种时间以及水稻制种基地的选择提供了参考。本研究将气候和地理两大因子作为主要考虑,然而并未对水稻品种、种植技术、土壤条件等因素进行探究;研究只考虑了过去的气

候条件,在宏观上对海南岛水稻制种提出相关建议,没有考虑未来的气候变化对适宜性的影响;研究是基于统计数据和经验建立的,与实际情况可能存在偏差,其应用具有一定的不确定性。在全球气候变化的大背景下,海南岛气候变暖、气象灾害频发重发是不争的事实^[15-17],未来的研究方向可在本研究的基础上,深入探讨海南岛水稻制种气候适宜性的相关研究,为中国农业绿色高质量发展可持续发展提供更准确的参考。

表 6 海南岛南部地区成熟收获期天气危害指数

Tab. 6 Weather hazard index during the mature harvest period in the south area of Hainan Island

日期 Date	东方 Dongfang	昌江 Changjiang	乐东 Ledong	保亭 baoting	三亚 Sanya	万宁 Wanning	陵水 Lingshui
05-07—05-16	0.4	3.3	2.3	2.9	0.7	1.3	1.6
05-12—05-21	0.6	4.2	2.9	3.4	1.0	1.6	1.9
05-17—05-26	0.3	4.2	2.8	4.0	1.1	1.8	1.8
05-22—05-31	0.4	3.9	3.0	4.8	1.2	2.0	2.1
05-27—06-05	0.5	3.3	3.0	4.8	1.4	2.0	2.3
06-01—06-10	0.6	3.7	3.3	4.6	1.6	2.7	3.0
06-06—06-15	0.6	3.0	3.5	4.2	1.4	2.2	2.7
06-11—06-25	0.7	3.8	3.8	4.9	1.8	2.1	2.5
06-21—06-30	0.8	4.0	3.0	4.4	1.9	2.1	2.9
06-26—07-05	0.9	4.5	3.0	4.4	2.1	2.4	3.3
07-01—07-10	0.8	4.1	3.0	4.8	2.1	2.3	2.9
07-06—07-15	0.7	4.3	3.0	4.9	1.9	1.8	2.5
07-11—07-20	0.6	4.0	2.4	4.9	1.7	1.5	2.0
07-16—07-25	0.9	4.6	3.0	4.8	2.1	1.9	2.4
07-21—07-30	1.1	4.1	3.1	4.6	2.0	1.8	2.2
07-26—08-04	1.3	4.0	3.4	4.8	2.2	2.0	2.3
08-01—08-10	1.1	3.4	3.1	4.5	2.2	2.0	2.2
07-01—07-10	0.8	4.1	3.0	4.8	2.1	2.3	2.9

表 7 海南岛南部市(县)春季杂交水稻制种生产最佳播期

Tab. 7 Best sowing time for hybrid rice seed production in southern cities/counties of Hainan Island in spring

地区 Area	播种期 Sowing period	育性转 换期 Sexual transition period	始穗期 Start of earring	扬花终止期 Flowering termination period	成熟开始期 Maturity onset	成熟收获期 Maturity harvest period	播种至扬花 开始天数/d Number of days from sowing to flowering	育性转换期至 扬花开始 天数/d Number of days from sex change to flowering	扬花结束 期至成熟开 始天数/d Number of days from the end of flowering to the beginning of maturity	不育保证率/% Male sterility assurance rate during sex change period	扬花授粉期 天气危害指数 Weather hazard index during flowering and pollination	成熟收获期 天气危害指数 Weather hazard index during maturity harvest
陵水	02-11	04-22	05-01	05-12	05-31	06-09	80	10	20	98.3	3.05	3.02
乐东	02-21	05-02	05-11	05-22	06-10	06-19	80	10	20	100.0	7.95	3.83
东方	02-21	05-02	05-11	05-22	06-10	06-19	80	10	20	98.4	0.97	0.72

4 结论

(1)从不育系育性转换安全的角度考虑,在海南进行两系杂交稻春季制种,宜选择育性转换期起点温度较低的品种,育性转换期宜安排在5月之后;生产优先选择海南岛南部,该地区低温灾害风险较低,制种相对安全,其次是西部和东部地区,尽量避免选择北部和中部地区,该区域制种风险较大。

(2)分析水稻扬花授粉期安全角度上,在制种地域选择,也是海南岛南半部优于北半部,北半部

优于中部。建议开花期初始日不宜安排过早,始花期越早,风险越高,盛花期宜安排在5月之后。

(3)分析南部地区成熟收获期连阴雨灾害可见,6月中旬后,危害指数呈上升趋势,因此建议收获期安排在6月中旬前,晾晒遭遇连阴雨灾害概率相对小。

(4)选取常用的两系杂交水稻母本品种在4个主要市县进行春季制种生产,最佳播期安排如下,不育系育性转换期安排在4月底至5月初保证率均在96.7%以上,开花期和收获期危害指数在4以下,属于制种极低风险区。分析发现东方市制

种风险最小,而乐东县制种存在一定风险,原因是选取的乐东站点地址处于乐东抱由镇,地处山区,扬花授粉期间的低温阴雨天气概率较大,导致制种风险概率增加。

参考文献:

- [1] 陈立云. 两系法杂交水稻的理论与技术[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2001: 43-75.
- [2] 王春乙. 海南气候[M]. 北京: 气象出版社, 2014: 3-18.
- [3] 汪扩军, 帅细强, 刘家清, 等. 两系杂交稻制种生产的气候生态诊断技术[J]. *应用气象学报*, 2003, 14(1): 93-100.
- [4] 吕润, 车秀芬, 吴慧, 等. 海南两系杂交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.
- [5] 谢建华, 黄培斌, 黄培劲, 等. 两系杂交稻早秋制农田与气象站气象因子比较研究[J]. *杂交水稻*, 2001, 16(3): 32-35.
- [6] 苏荣瑞, 林瑞坤, 孙朝锋, 等. 福建两系杂交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.
- [7] 许格希, 郭泉水, 牛树奎, 等. 近 50a 来海南岛不同气候区气候变化特征研究[J]. *自然资源学报*, 2013, 28(5): 799-810.
- [8] 汪扩军, 李玉祥, 张茂哲, 等. 培两优组合制种的气象问题研究[J]. *湖南农业大学学报*, 1996(6): 29-33.
- [9] 李训贞, 周广洽. 光长和温度对光温敏核不育水稻育性转换的互作效应研究[J]. *湖南师范大学自然科学学报*, 1993(2): 175-179.
- [10] 帅细强, 汪扩军, 周玉, 等. 超级杂交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.
- [11] 汪扩军, 帅细强. 两系法超级杂交稻制种时空择优气候诊断技术及其应用[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2019: 25.
- [12] 陈良碧, 徐孟亮, 周广洽. 临界温度双低两用不育水稻的筛选研究[J]. *杂交水稻*, 1999, 14(4): 3-4.
- [13] 徐孟亮, 吴厚雄, 陈良碧, 等. 用人工冷水池鉴定水稻光温敏核不育系雄性不育起点温度的研究[J]. *杂交水稻*, 2002, 17(5): 51-53.
- [14] 夏永华. 高温对杂交水稻制种扬花授粉的影响及应对措施[J]. *杂交水稻*, 1999, 14(增刊 1): 17-18.
- [15] 邹海平, 张京红, 陈小敏, 等. 海南岛农业气候资源的时空变化特征[J]. *中国农业气象*, 2015, 36(4): 417-427.
- [16] 王斌, 陈小敏, 钟曼茜, 等. 海南水稻生育期的时空变化特征及对气候变暖的响应[J]. *热带作物学报*, 2017, 38(3): 415-420.
- [17] 佟金鹤, 钱昆, 田光辉, 等. 1977—2017 年海南极端气候事件变化时空差异分析[J]. *中国农学通报*, 2019, 35(12): 89-94.

Spatiotemporal distribution of safe seed production for two-line hybrid rice in spring in Hainan Island

LYU Xiaoqin^{1,2#}, CHEN Xiaomin^{3,4*}, PAN Zhihua², LYU Run^{3,4}

(1. Gansu Provincial Office of Artificial Weather Modification, Lanzhou, Gansu 730020, China; 2. School of Resources and Environment, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

3. Hainan Provincial Climate Center, Haikou, Hainan 570203, China; 4. Hainan Key Laboratory for Prevention and Mitigation of South China Sea Meteorological Disaster, Haikou, Hainan 570203, China)

Abstract: In order to explore the suitable period for safe production of rice seeds in spring in Hainan Island under the influence of climate change, daily meteorological data on two-line hybrid rice seed production from 18 cities/counties in Hainan Island from February 1961 to August 2020 were used to analyze the spatiotemporal distribution characteristics of major meteorological disasters during the key development period for two-line hybrid rice seed production. The results indicate that the south area is the preferred area for two-line hybrid rice seed production in spring in Hainan Island, and that rice varieties with lower threshold temperatures during the sensitive period of fertility should be selected; For the safe time of two-line hybrid seed production in spring in the south area, the sensitive period for fertility should be arranged in early May, the flowering and pollination period should be arranged in May, and the mature harvesting period should be before mid-June.

Keywords: two line hybrid rice; seed production risks; climate diagnostic model; suitable time period; Hainan

(责任编辑:潘学峰)