

宁金花,陆魁东,宋忠华,等. 双季超级晚稻生育进程对气候条件的响应[J]. 江苏农业科学,2020,48(12):53-58.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2020.12.012

双季超级晚稻生育进程对气候条件的响应

宁金花^{1,4}, 陆魁东^{2,4}, 宋忠华¹, 解娜¹, 王庆龄³

(1. 湖南省长沙农业气象试验站, 湖南长沙 410125; 2. 湖南省气象科学研究所, 湖南长沙 410007;

3. 湖南省常德农业气象试验站, 湖南常德 415000; 4. 气象防灾减灾湖南省重点实验室, 湖南长沙 410007)

摘要:利用2011—2013年超级稻岳优6135的分期播种发育期长度资料,分析气候因子与超级晚稻发育进程的关系,并基于不同的温光因子组合,建立温光因子与不同发育进程之间的模型。结果表明,不同阶段发育进程与温光因子的关系均达到极显著水平。积温-日照与气温日较差累积-日照时数2个组合与播种至移栽生育期的长度关系极显著,积温780℃左右,气温日较差累积230℃左右,日照时数200h以上时,对该品种该阶段的生长较有益。移栽至拔节生育期的长度与日最高温度累积-日照时数及积温-日照时数2个组合的关系极显著,最佳的生育长度在29~33d之间,所需的积温约为880℃。气温日较差累积对移栽至抽穗阶段的影响较大,气温日较差累积达442.2℃,日照时数达374.0h时,该阶段的长度约为54d。日最低温度累积-日照时数对抽穗至成熟期阶段的影响最明显,日最低温度累积达805.8℃,总日照时数达262h时,该生育期模拟长度约为43d。本试验的研究结果可为长江中下游地区超级晚稻根据气候资源状况进行本地化推广提供依据。

关键词:双季超级晚稻;分期播种;气候因子;温光组合;生育期;发育进程;指标

中图分类号:S162.5⁺3 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2020)12-0053-06

针对水稻与气候条件,许多学者基于气候指标、种植措施、群体结构和生产水平等开展了相关的研究^[1-4]。超级稻产量与生育期温光因子的关系也得到了国内外很多专家的重视和研究^[5-6]。研究结果表明,农业气象条件是制约和影响超级杂交稻高产、稳产的关键因素,主要包括温度、光照、降水等^[7]。另外农业气象灾害如5月低温、倒春寒、高温热害等^[8-10]都会直接或间接影响超级杂交稻高产、稳产。但在农业气象条件与生育期长度的关系方面前人的研究较少涉及。

水稻生育期长度是气候条件、品种栽培等多种因素共同作用的结果。虽然一些学者就气候条件与水稻生育期之间的关系进行了研究,高孟霜等分析了东北地区水稻生育期的变化规律及其与气温变化、水稻品种调整的关系^[11],王斌等分析了气候变暖对海南水稻生育期的影响^[12],叶清等研究了气

候变暖背景下中国南方主要熟制水稻生长季可利用率的空间分布特征及演变趋势^[13];但更多是针对气候条件与产量和生长发育关系的研究^[14-20]。较少研究是针对气候因子与不同生育期长度之间关系的探讨和模拟,特别是温光组合与不同生育期组合之间的关系模型化研究更是少见报道。本研究基于超级晚稻品种岳优6135在湖南省长沙地区2011—2013年12期的分期播种数据,对播种、三叶、移栽、分蘖、拔节、孕穗、抽穗、乳熟、成熟等发育期进行合理组合,分析不同生育期的长度与该时间段温光因子的关系,以期明确不同生育期对温光因子的需求,准确把握品种的温光需求特性,为长江中下游地区超级稻生长发育、种植推广及有效适应气候变化的研究提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点

试验地点位于湖南省长沙市长沙县春华镇(113°05'E,28°12'N)海拔66.1m,属于亚热带季风性湿润气候。年平均气温为17.2℃,年均日照总时数为1600h,年平均降水量为1361mm,在超级杂交晚稻整个生育期内,温光资源基本能满足其生长发育的需要,但个别年份,温光条件不足,导致成熟

收稿日期:2019-07-15

基金项目:国家重点研发计划(编号:2016YFD0300101-05);中国气象局公益性行业专项(编号:GYHY201202020)。

作者简介:宁金花(1979—),女,江苏徐州人,硕士,高级工程师,研究方向为农业气象。E-mail:jinhua1981428@163.com。

通信作者:陆魁东,研究员,研究方向为作物气象与气象灾害预警。

E-mail:lukuidong@163.com。

受影响,主要气象灾害有播种至拔节期的高温干旱和抽穗开花期的寒露风。

1.2 试验设计

供试品种为超级稻岳优 6135,该品种属三系迟熟杂交晚粳组合,作双季晚稻栽培,全生育期 119 d 左右,株高 97 cm 左右,株型松紧适中,茎秆坚韧,耐肥抗倒,叶色淡绿,剑叶直立,叶鞘无色,后期落色好。于 2011—2013 年连续 3 年进行分期播种试验,播种期见表 1。每期试验设 4 个重复小区,每个小区的面积为 42 m² (7 m × 6 m)。试验小区病虫害防治和水肥等田间管理与当地稻区一致。

表 1 超级晚稻分期播种日期 月-日

年份	第 1 期		第 2 期		第 3 期	
	播种期	收获期	播种期	收获期	播种期	收获期
2011	06-14	10-13	06-27	10-28	07-21	11-21
2012	06-18	10-15	06-27	10-25	07-09	11-03
2013	06-15	10-15	06-21	10-22	07-08	10-31

1.3 测定项目及数据分析

1.3.1 观测项目 在供试品种整个生育期内进行发育期准确观测,所有发育期及其他项目观测方法均按照《农业气象观测规范》进行,所记录发育期日期均是普遍期。

1.3.2 数据处理 统计分析中使用的气象数据为 2011—2013 年超级稻播种至成熟期间的 57 679 条气象数据(马坡岭地面观测站数据),其中积温是日平均温度 ≥ 0 ℃ 的平均温度累积之和,日最高温度累积、日最低温度累积、气温日较差累积分别是晚

稻生长发育期间日最高温度、日最低温度、气温日较差(日最高温度与日最低温度的差)累积之和。试验数据的整理、分析以及简单图标绘制在 Excel 2010 中进行,三维绘图、模型建立在 DPS 数据处理系统中进行。

2 结果与分析

2.1 生育期进程与温光因子关系

2.1.1 生育期长度和温光因子的相关性 根据超级晚稻生育期特点,分为 8 个不同生育期,分别是播种至移栽、移栽至拔节、拔节至抽穗、抽穗至成熟、移栽至抽穗、移栽至孕穗、孕穗至成熟、全生育期。分别分析各生育期阶段长度与温光因子之间的相关性,分析结果(表 2)表明,各发育期长度与其阶段内温光因子之间的相关性因生育期的不同及温光因子的不同存在一定的差异,但无论哪个生育期,其长度与温光因子的相关性均达到显著水平($P < 0.05$)。其中积温、最高温度累积、最低温度累积与播种至移栽、移栽至拔节、移栽至抽穗、移栽至孕穗这 4 个生育期的长度呈极显著相关关系($P < 0.01$)。气温日较差累积与移栽至拔节、抽穗至成熟、移栽至抽穗、全生育期长度的相关性极显著($P < 0.01$)。日照时数与移栽至拔节、移栽至孕穗、孕穗至成熟、全生育期长度相关性最好。相关系数的大小反映同一生育期对不同温光因子的敏感性存在差异,相关系数越大,说明对该因子的敏感性越高,对该温光资源的要求越高。

表 2 不同生育期长度与温光因子之间的相关系数

生育期	相关系数				
	积温	日最高温度累积	日最低温度累积	气温日较差累积	日照时数
播种至移栽	0.916	0.920	0.938	0.788	0.737
移栽至拔节	0.971	0.981	0.979	0.939	0.874
拔节至抽穗	0.728	0.809	0.661	0.847	0.870
抽穗至成熟	0.845	0.680	0.597	0.894	0.790
移栽至抽穗	0.851	0.847	0.852	0.938	0.773
移栽至孕穗	0.865	0.907	0.934	0.721	0.906
孕穗至成熟	0.744	0.819	0.802	0.765	0.877
全生育期	0.812	0.797	0.963	0.955	0.904

2.1.2 不同生育期温光因子理论值 对 2011—2013 年超级晚稻不同生育期与温光因子进行相关性分析,建立曲线方程,并对方程求极值,结果见表 3。从表 3 中气象要素值的大小可知,不同生育期对温光的需求是不同的,且差异较大。如播种至移栽

期间,积温约达到 825.0 ℃ 时,比较有利于晚稻秧苗的生长发育。而抽穗至成熟期间的积温需要达到 1 065.0 ℃ 左右,才最有利于晚稻的灌浆成熟。对日照时数的需求也存在较大的差异,如播种至移栽期间需要的最佳日照条件是 390.5 h,抽穗至成熟期

间是 244.0 h, 全生育期是 1 073.8 h。需要特别指出的是, 在所分析的 8 个生育期中, 只有移栽至孕穗期间需要的 5 个气象要素值是最低值, 其他均是最大值。即在移栽至孕穗期间, 积温最低要在 1 189.0 °C 左右, 日照时数要在 274.8 h 左右, 才能

保证该生育期的作物正常生长。表中的数据都是模拟的理想数值, 且每个温光要素值单独分析, 而在实际的生产实践中温光要素与其他要素共同影响作物的生长发育, 且实际温光条件与模拟值存在一定差距。

表 3 不同生育期温光因子的理论值

生育期	积温 (°C)	日最高温度累积 (°C)	日最低温度累积 (°C)	气温日较差累积 (°C)	日照时数 (h)
播种至移栽	825.0	906.5	322.8	281.8	390.5
移栽至拔节	1 960.0	1 990.0	1 340.0	265.2	490.5
拔节至抽穗	902.3	916.0	629.0	277.4	267.3
抽穗至成熟	1 065.0	1 442.5	749.3	379.1	244.0
移栽至抽穗	1 804.5	2 076.7	1 280.3	473.4	345.0
移栽至孕穗	1 189.0	1 291.0	978.0	223.5	274.8
孕穗至成熟	1 013.3	1 217.6	882.9	413.7	272.9
全生育期	2 772.5	3 642.5	2 562.5	1 063.5	1 073.8

2.2 生育期长度与温光因子关系的综合模拟分析

“2.1”节中分别就温光因子与超级杂交稻不同生育期长度的相关性进行了单因子分析, 为探讨多因子与超级杂交稻不同生育期长度的关系, 本研究利用 DPS 数据处理系统, 通过逐步回归分析等多种数据分析方法对不同温光组合与生育期长度的关系进行综合量化分析。

2.2.1 播种至移栽 利用逐步回归分析方法, 将积温、日最高温度累积、日最低温度累积、气温日较差累积分别与日照时数进行组合, 分析不同温光组合与超级稻播种至移栽的生育期长度之间的关系。分析结果表明, 4 个温光组合只有积温 - 日照时数、气温日较差累积 - 日照时数 2 个组合和该生育期长度之间的关系通过了 0.01 水平的显著性检验。P 值分别是 0.000 7 和 0.005 6, 其中气温日较差累积 - 日照时数组合的模拟方程如下, 其他组合的模拟方程略。

$$y_1 = -3.649 \times 10^{-3} x_j^2 + 2.402 \times 10^{-3} x_j x_{s1} + 1.208 x_{sj} - 0.578 x_{s1} - 50.399 (P = 0.005 6 < 0.01)。$$

式中: y_1 为播种至移栽的生育期长度, d; x_{s1} 为日照时数, h; x_j 为气温日较差累积, °C。

模拟结果显示, 超级杂交晚稻在播种至移栽的生育期长度达最佳时, 各个因素组合见表 4。由表 4 可知, 超级晚稻品种岳优 6135 播种至移栽的最佳生育期长度是 29 d, 所需的积温为 780 °C 左右, 气温日较差累积为 230 °C 左右, 日照时数在 200 h 以上。

将气温日较差累积、日照时数、播种至移栽的

表 4 播种至移栽生育期的长度与温光组合值

温光组合	生育期长度 (d)	温度指标 (°C)	日照时数 (h)
积温 - 日照时数	29.6	778.7	298
气温日较差累积 - 日照时数	29.3	232.1	202

生育期长度三者之间的关系绘制成三维立体图形, 结果如图 1 所示。由图 1 可知, 三者之间的关系呈“斜坡”形状。结合模拟方程可知, 日照时数和气温日较差累积 2 因子的系数一正一负, 而 2 因子综合系数为正, 说明 2 因子在影响生育期长度时有一定的相互补偿作用, 但综合起来对该生育期是有利的。

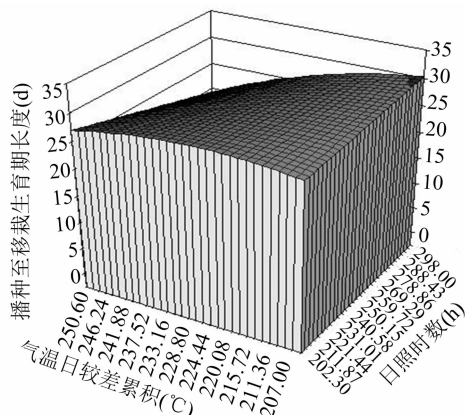


图 1 气温日较差累积、日照时数与播种至移栽的生育期长度之间的三维立体关系

2.2.2 移栽至拔节 利用逐步回归分析方法, 分别将积温、日最高温度累积、日最低温度累积、气温日较差累积与日照时数进行组合。分析不同温光组合与移栽至拔节生育期长短之间的关系, 结果发

现,4个温光组合只有气温日较差累积-日照时数组合和该阶段的长度关系不显著。其中日最低温度累积-日照时数组合与该阶段长度的相关性达到0.05显著水平,日最高温度累积-日照时数和积温-日照时数2个组合与该阶段长度的相关性通过0.01水平的显著性检验, P 值分别是0.023、0.0034和0.00048。其中日最高温度累积-日照时数回归分析模拟方程如下,其他模拟方程略。

$$y_2 = 2.726 \times 10^{-4} x_{\max}^2 + 4.959 \times 10^{-4} x_{s2}^2 - 2.678 \times 10^{-4} x_{\max} x_{s2} + 0.0375 (P=0.0034 < 0.01)$$

式中: y_2 为移栽至拔节的生育期长度,d; x_{s2} 为日照时数,h; x_{\max} 为日最高温累积, $^{\circ}\text{C}$ 。模拟结果显示,在超级杂交晚稻岳优6135移栽至拔节的生育期长度最佳时,各个因素组合见表5。由表5可知,该品种移栽至拔节的最佳生育长度在29~33d之间,所需积温为880 $^{\circ}\text{C}$ 左右。从温光组合的模拟结果可知,该生育期水稻生长过程中温光资源相互补偿,温度因子需求较少时,日照资源需求量较大。如在日最高温度累积-日照时数的组合中,日最高温度累积仅需要668.6 $^{\circ}\text{C}$,比另2个组合都低,但日照时数却是最多的,为340.4h。移入大田后的岳优6135,温光资源达到该范围时,进入拔节期。

表5 移栽至拔节的生育期长度与温光组合值

温光组合	生育期长度(d)	温度指标($^{\circ}\text{C}$)	日照时数(h)
积温-日照时数	31.1	874.1	137.8
日最高温度累积-日照时数	32.9	668.6	340.4
日最低温度累积-日照时数	28.7	715.2	266.4

将日最高温度累积、日照时数以及播种至移栽的生育期长度之间的关系绘制成三维立体图形,结果如图2所示。由图2可知,三者之间的关系呈“谷坡”形状,日最高温度累积较小、日照时数较大或者日最高温度累积较大、日照时数较小,都会形成“谷”,反之形成“坡”。“坡”代表该生育期时间较长,“谷”表示时间较短,但坡顶和谷底对应的都不是最佳的温光条件。由表5的模拟数据可知,日最高温度累积为668.6 $^{\circ}\text{C}$,日照时数为340.4h的时候,该生育期的模拟长度为32.9d。即达到这个温光条件时,该生育期长度较理想,晚稻开始进入拔节期。积温-日照时数及日最低温度累积-日照时数的三维立体图形分析略。

2.2.3 移栽至抽穗 利用同样的方法,分别分析日最高温度累积-日照时数、日最低温度累积-日照

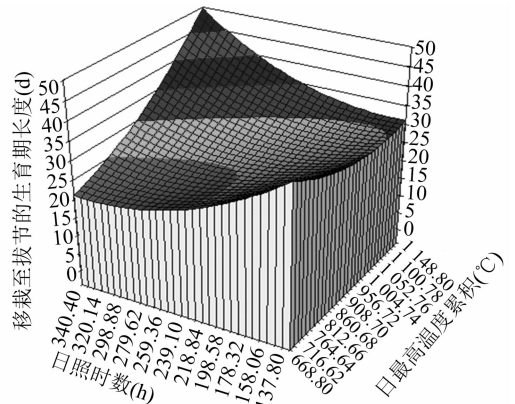


图2 日最高温度累积、日照时数与移栽至拔节的生育期长度之间的三维立体关系

时数、积温-日照时数、气温日较差累积-日照时数4个不同温光组合与超级稻移栽至抽穗生育期长度的关系。四个温光组合只有气温日较差累积-日照时数组合和该生育期的长度之间达到0.05显著相关水平, P 值为0.0203,其他组合均不显著,模拟方程如下:

$$y_3 = -1.401 \times 10^{-3} x_{ij}^2 + 3.334 x_{ij} x_{s3} - 1.530 x_{s3} + 350.813 (P=0.0203 < 0.05)$$

式中: y_3 为移栽至抽穗的生育期长度,d; x_{s3} 为日照时数累积,h; x_{ij} 为气温日较差累积, $^{\circ}\text{C}$ 。由模拟结果可知,超级杂交晚稻岳优6135在该时段日较差达442.2 $^{\circ}\text{C}$,总日照时数达374.0h时,生育期长度较理想为54d。

将气温日较差累积-日照时数与移栽至抽穗的生育期长度三者之间的关系绘制成三维立体图形,如图3所示。由图3可知,三者之间呈“缓坡”状关系。气温日较差累积较小、日照时数较小时是“谷”,随着两者增加,逐渐呈“坡”状,坡的顶端即该生育时段的最长时间,低于60d。较理想的组合是

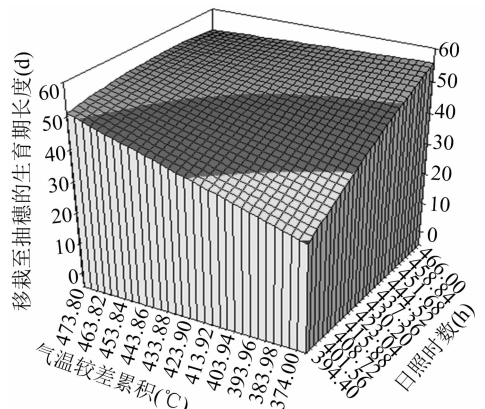


图3 气温日较差、日照与移栽至抽穗生育期长度之间的三维立体关系

气温日较差累积为 442.2 °C,日照时数达 374.0 h 时,生育期长度为 54 d。

2.2.4 抽穗至成熟 利用同样的方法,分别分析日最高温度累积-日照时数、日最低温度累积-日照时数、积温-日照时数、气温日较差累积-日照时数 4 个温光组合与超级杂交晚稻岳优 6135 抽穗至成熟阶段长度的关系。分析结果显示,4 个温光组合只有日最低温度累积-日照时数组合和该生育期的长度之间达到 0.05 显著相关水平, P 值为 0.043 9,其他温光组合均不显著。回归分析模拟方程如下:

$$y_4 = 2.806 \times 10^{-4} x_{s4}^2 + 1.192 \times 10^{-4} x_{\min} x_{s4} - 0.100 (P=0.043 9 < 0.05)。$$

式中: y_4 为抽穗至成熟的生育期长度,d; x_{s4} 为日照时数,h; x_{\min} 为日最低温度累积,°C。由模拟结果可知,该时段日最低温度累积达 805.8 °C,日照时数达 262 h 时,生育期长度为 43 d。从分析结果可知,灌浆期的超级晚稻对低温最敏感,该时段内如遇低温阴雨天气或寒露风天气,将对灌浆期的晚稻产量造成严重危害。

将日最低温度累积-日照时数与抽穗至成熟阶段长度之间的关系绘制成三维立体图形,如图 4 所示。其中 x 轴表示日照时数(h), y 轴表示日最低温度累积(°C), z 轴表示移栽至抽穗的生育期长度(d)。从三维立体图形可知,三者之间呈“坡”状关系,但坡度较小。该生育期的长度最大值不会超过 45 d,由模拟结果可知,超级杂交晚稻岳优 6135 日最低温度累积达 805.8 °C,日照时数达 262 h 时,生育期长度较理想,为 43 d。根据超级晚稻实际生长环境可知,长沙地区灌浆成熟期的寒露风、低温阴雨天气是影响该阶段长度的主要气候因子^[21],与本研究的分析结果吻合。

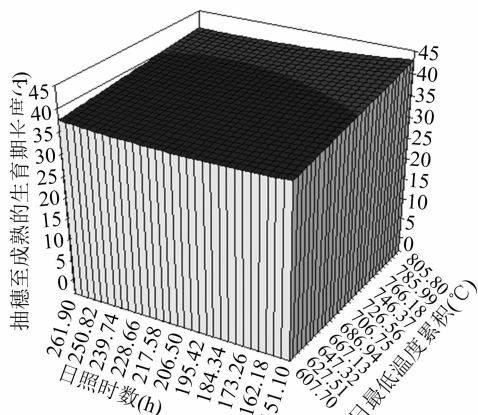


图4 日最低温度累积、日照时数与抽穗至成熟生育期长度之间的三维立体关系

3 结论与讨论

3.1 生育期长度与温光因子

薛昌颖等研究气候变暖对信阳地区水稻生育期的影响时指出,4—5 月温度的显著升高使水稻播种和移栽日期呈显著提前的变化趋势等^[22]。符冠富等的研究表明,有效积温、日照时数和生育期天数在播种至齐穗期和全生育期均随着播期的延长而逐渐下降^[23]。其他学者也做了气候变化与生育期关系的相关研究^[24-26],但并没有详细分析不同生育期与温光因子的关系,更没有对其进行量化分析。

本研究的分析结果表明,不同的生育期长度与温光因子之间的相关性因生育期的不同及温光因子的不同而存在一定的差异。生育期长度与温光因子的相关性均达到显著水平。同一生育期对不同的温光因子的敏感性也存在差异。另外通过分析 8 个生育期与 5 个气象要素值的关系可知,不同生育期对温光的需求是不同的,且差异较大,此外只有移栽至孕穗期间需要的气象要素值是最低值,其他阶段均是最大值。

3.2 生育期长度与温光因子之间关系的综合分析

本试验尝试将超级杂交晚稻岳优 6135 发育期分为了 8 个生育期,并利用逐步回归等分析方法分析不同的生育期与温光因子组合之间的数据模型关系。选择的 4 个温光因子组合分别是积温-日照时数、日最低温度累积-日照时数、日最高温度累积-日照时数、日较差累积-日照时数。本试验分析的播种-移栽、移栽-拔节、抽穗-成熟、移栽-抽穗 4 个生育期与温光组合之间存在显著或极显著的回归关系,且不同生育期之间又存在差异。

超级晚稻品种岳优 6135 播种至移栽生育期只有积温-日照时数与气温日较差累积-日照时数 2 个组合与其生育期长度呈极显著相关关系,积温 780 °C 左右,气温日较差累积 230 °C 左右,日照时数 200 h 以上时,对该品种该阶段的生长最有益,生育期长度约为 29 d。尹朝静等对生育期与气候变化之间的关系进行了研究,系统考察了气候因素对水稻单产的非线性及区域差异性影响程度^[27],但并没有对气候因子与生育期长度的关系进行深入探讨。

移栽至拔节生育期是水稻进入大田后的最初生长阶段,该生育期长度与日最低温度累积-日照时数组合关系显著,与日最高温度累积-日照时数及积温-日照时数 2 个组合的关系极显著,最佳的

生育长度在 29~33 d 之间,所需的积温为 880 ℃ 左右。该生育期温度因子和日照因子与水稻生长发育存在明显相互补偿关系。

气温日较差累积对移栽至抽穗阶段的影响较大,该阶段长度与气温日较差累积-日照时数组合之间的关系显著,与其他温光因子组合的关系不显著。最佳温光组合是气温日较差时数达 442.2 ℃,日照时数达 374.0 h 时,该阶段的长度约为 54 d。刘艳红等就潍坊市冬小麦生育期气候因子变化特征及其影响进行了分析研究^[28],但没有精确分析小麦各生育期长度与温光因子的关系。水稻方面的研究暂无人涉及。

日最低温度累积对抽穗至成熟期阶段的影响最明显,抽穗至成熟是晚稻生长的关键季节,该阶段气候因子的优劣直接影响晚稻成熟与收获,本研究结果表明,该时段日最低温度累积达 805.8 ℃,总日照时数达 262 h 时,该生育期长度约为 43 d,即 43 d 是超级晚稻品种岳优 6135 的较佳灌浆时间。

本研究利用超级晚稻品种岳优 6135 3 年的分期播种试验数据,分析不同生育期长度与温光因子的关系。透过分析可知,不同生育期长度与温光因子的关系不尽相同,各阶段的限制因子存在较大差异,而且不是所有的温光因子都与生育期的长短存在显著相关关系。结果表明,从播种至成熟的最佳生育期长度是 126 d,和品种介绍的 119 d 左右较吻合。值得注意的是,本研究只是考虑了温光因子,没有考虑其他气候因子和种植措施等,所以如果考虑多方面的因子,研究结果可以更深入、更准确。

参考文献:

[1] 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[J]. 中国农业科学,2010,43(2):329-336.

[2] 丁 颖. 中国水稻栽培学[M]. 北京:农业出版社,1961:101-180.

[3] 王夫玉,张洪程,赵新华,等. 温光对水稻籽粒充实度的影响[J]. 中国农业科学,2001,34(4):396-402.

[4] 周鸿凯,郭建夫,黎华寿,等. 光温因子与杂交水稻生态群体的产量和品质性状的典型相关分析[J]. 应用生态学报,2006,17(4):663-667.

[5] 曲辉辉,姜丽霞,朱海霞,等. 孕穗期低温对黑龙江省主栽水稻品种空壳率的影响[J]. 生态学杂志,2011,30(3):489-493.

[6] 龚金龙,张洪程,胡雅杰,等. 灌浆结实期温度对水稻产量和品质形成的影响[J]. 生态学杂志,2013,32(2):482-491.

[7] 罗丽华,陈桂华,胡 英,等. 气象因素与早稻产量因子的相关性分析[J]. 自然资源学报,2010,25(10):1718-1726.

[8] 陆魁东,帅细强,刘富来,等. 湖南气候与作物气象[M]. 长沙:湖南科学技术出版社,2015:147-154.

[9] 李健陵,张晓艳,杜尧东. 高温对抽穗开花期至灌浆结实期水稻源库特性的影响[J]. 中国农业气象,2013,34(1):23-29.

[10] 王尚明,胡逢喜,张崇华,等. 空气温湿度对水稻灌浆及空壳率的影响研究[J]. 中国农学通报,2006,22(9):158-162.

[11] 高孟霜,许吟隆,殷 红,等. 1992—2012 年东北水稻生育期变化分析[J]. 气候变化研究进展,2018,14(5):495-504.

[12] 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.

[13] 叶 清,杨晓光,解文娟,等. 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,2013,46(21):4399-4415.

[14] Mohammed A R, Tarpley L. High nighttime temperatures affect rice productivity through altered pollen germination and spikelet fertility[J]. Agricultural and Forest Meteorology,2009,149:999-1008.

[15] Nagarajan S, Jagadish S V K, Hari Prasad A S, et al. Local climate affects growth, yield and grain quality of aromatic and non-aromatic rice in northwestern India [J]. Agriculture Ecosystems and Environment,2010,138:274-281.

[16] 魏金莲,潘晓华,邓辉强. 不同生育期夜温升高对双季水稻产量的影响[J]. 应用生态学报,2010,21(2):331-337.

[17] 魏金莲,潘晓华,邓辉强. 夜间温度升高对双季早晚稻产量的影响[J]. 生态学报,2010,30(10):2793-2798.

[18] 朱 萍,杨世民,马 均,等. 遮光对杂交水稻组合生育后期光合特性和产量的影响[J]. 作物学报,2008,34(11):2003-2009.

[19] 李正金,李卫国,李 菁,等. 基于多因子分析的水稻种植适宜性研究[J]. 江苏农业科学,2018,46(16):271-275.

[20] 刘桃菊,殷新佑,戚昌瀚,等. 气候变化与水稻生长发育及产量形成关系的模拟研究[J]. 应用生态学报,2005,16(3):486-490.

[21] 彭莉莉,陆魁东,张 超,等. 基于寒露风时空特征的湖南双季晚稻抽穗扬花安全期分析[J]. 中国农业气象,2014,35(2):200-205.

[22] 薛昌颖,刘荣花,吴 骞. 气候变暖对信阳地区水稻生育期的影响[J]. 中国农业气象,2010,31(3):353-357.

[23] 符冠富,王丹英,李 华,等. 水稻不同生育期温光条件对籽粒充实和米质的影响[J]. 中国农业气象,2009,30(3):375-382.

[24] 侯雯嘉,耿 婷,陈 群,等. 近 20 年气候变暖对东北水稻生育期和产量的影响[J]. 应用生态学报,2015,26(1):249-259.

[25] 侯 伟,杨昌贤,官满元,等. 海口市气候变化对水稻生育期和产量的影响[J]. 广东农业科学,2017,44(8):145-150.

[26] 李琳琳,王贺然,李 晶,等. 基于小波分析的水稻生育期气象因子对产量的影响[J]. 麦与谷类科学,2018,35(2):42-53.

[27] 尹朝静,李谷成,范丽霞,等. 生育期气候变化对我国水稻主产区单产的影响——基于扩展 C-D 生产函数的实证分析[J]. 中国农业大学学报,2018,23(10):183-192.

[28] 刘艳红,袁 静,李晶晶,等. 潍坊市冬小麦生育期气候因子变化特征及其影响分析[J]. 中国农学通报,2013,29(33):62-66.