

陆佳岚, 马 成, 陶明煊, 等. 不同光温条件对水稻 9311 产量及品质的影响[J]. 江苏农业学报, 2020, 36(3): 535-543.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2020.03.002

不同光温条件对水稻 9311 产量及品质的影响

陆佳岚^{1,2}, 马 成^{1,2}, 陶明煊², 曾彦达¹, 张亚东¹, 赵春芳¹, 方先文¹, 李 霞^{1,2,3}
(1.江苏省农业科学院/江苏省优质水稻工程技术研究中心/国家水稻改良中心南京分中心, 江苏 南京 210014; 2.南京师范大学食品与制药工程学院, 江苏 南京 210023; 3.江苏省粮食作物现代产业技术协同创新中心, 江苏 扬州 225009)

摘要: 为研究不同光温条件对水稻 9311 产量及品质的影响,本研究在大田条件下进行分期播种以及人工光温控制试验。分期播种试验结果表明,分期播种的光温差异对 9311 产量和品质产生影响,整个生长季较低的积温和日照时数有利于产量的提高,并可降低垩白、直链淀粉含量和糊化温度,获得较好的品质。苗期较高温度使直链淀粉含量和糊化温度降低,提高蒸煮品质,对产量影响不显著。遮光试验结果表明,适当的降低光照度可使籽粒总蛋白质含量增加,直链淀粉含量和胶稠度降低,垩白增加。因此,9311 在生育期维持适宜的温度和光照有利于获得高产和优良的品质。

关键词: 水稻; 气温; 光照度; 产量; 品质

中图分类号: S511 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2020)03-0535-09

Effects of light intensity and temperature on yield and quality of rice 9311

LU Jia-lan^{1,2}, MA Cheng^{1,2}, TAO Ming-xuan², ZENG Yan-da¹, ZHANG Ya-dong¹, ZHAO Chun-fang¹,
FANG Xian-wen¹, LI Xia^{1,2,3}

(1. Jiangsu Academy of Agricultural Sciences/Jiangsu Province Quality Rice Engineering Technology Research Center/Nanjing Branch of National Rice Improvement Center, Nanjing 210014, China; 2. College of Food and Pharmaceutical Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 3. Collaborative Innovation Center of Modern Industrial Technology for Food Crops in Jiangsu Province, Yangzhou 225009, China)

Abstract: In order to study the effects of light intensity and temperature on the yield and quality of rice 9311, the interval sowing and artificial light-temperature experiments were carried out under field conditions. The results showed that the differences of light and temperature in the interval sowing experiment had effects on the yield and quality of 9311, and the lower accumulated temperature and sunshine hours during the whole growing season were beneficial to the increase of yield and the reduction of chalky content, amylose content and gelatinization temperature. The higher temperature at seedling stage reduced amylose content and gelatinization temperature, improved cooking quality, but had no significant effect on yield. The results of shading experiment showed that the contents of total protein and chalkiness increased, amylose content and gel consistency reduced with the decrease of illumination. Therefore, maintaining suitable temperature and light during the growth period of rice 9311 is beneficial to obtain high yield and good quality.

Key words: rice; air temperature; light intensity; yield; quality

收稿日期: 2019-08-27

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0300501-03); 国家自然科学基金项目(31571585)

作者简介: 陆佳岚(1995-), 女, 江苏苏州人, 硕士研究生, 研究方向为水稻栽培生理。(E-mail) 1361620898@qq.com。马成和陶明煊为共同第一作者。

通讯作者: 李 霞, (E-mail) jspllx@jaas.ac.cn; 方先文, (E-mail) 2431240491@qq.com

水稻是中国重要的粮食作物,其种植面积居世界第二,水稻产量居世界第一,在中国粮食生产和国民经济建设中占有十分重要的地位^[1]。随着人民生活水平的提高,膳食结构和食用习惯发生了重大

改变,对稻米品质尤其是食味品质的要求越来越高。中国水稻生产发生重大变革,从数量型效益向质量型效益转变,从高产向优质、安全转变^[2]。研究水稻高产和优质兼具的特性是关系到国家粮食安全和满足人们对美好生活向往需求的关键科学问题。

水稻的产量和品质受遗传特性、生长环境条件和栽培方式的综合影响,并且主要由遗传特性控制。但在实际水稻品种的推广过程中,由于栽培方式和种植地域的不同,水稻的产量潜力和品质特征不一致,具有显著的基因和环境互作效应^[3]。本世纪初,中国的科学家已对水稻优质的气象适应特征进行了研究和总结,对当时优质水稻的布局和区划有重要的意义^[4]。但是,近十年的气象特征发生了变化,而且气候异常和气候灾害使农业面临产量不稳定和品质变差的问题^[5]。王端等^[6]分析了长江流域江苏、安徽、湖北、四川及重庆五省市2005–2016年国审水稻品种信息以及五省市相近纬度(29.61°~33.5°)的9个地区相应的气象数据与该地区水稻主产省市的国审水稻品种类型的产量以及品质特征的相互关系。结果表明:长江流域水稻主产区五省市近12年国审水稻产量逐年增加,稻米品质从东(江苏)到西(四川)品质变差,东部地区避开高温以及西部增加光照小时数均有利于该地区获得优良品质,该研究主要是通过收集统计数据获得,有关该地区大田条件下生育期实际遭遇的光温特点对稻米产量和品质的研究尚不多。因此,本研究选取目前推广面积最大的两系杂交水稻两优培九的亲本9311作为研究材料,通过分期播种、苗期人工控制温度和遮光试验,研究该材料在南京实际大田种植条件下光照度和温度对其产量和品质特性的影响,以期对长江流域广泛种植籼型中稻^[7]的高产和优质品种的选择、适当调整水稻的安全播种期以及优质栽培等方面提供重要依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点及供试材料

籼型水稻9311由江苏省里下河地区农业科学研究所培育而成,该品种目前在水稻生产中主要被用于两系杂交稻的父本,在生产上大面积推广应用的兩系杂交稻两优培九和广两优6号等品种都是以9311为父本培育的^[8]。9311生长前期分蘖强,长势旺,后期熟相较好,抗倒性较强,落粒性中等,

全生育期158 d左右,株高98 cm左右。试验在江苏省农业科学院实验大田进行,试验点位于东经119°11'12",北纬31°35'10",海拔126 m,土壤质地为黄棕壤土,有机质2.45%,全氮0.12%,速效氮85.1 mg/kg,有效磷13.0 mg/kg,有效钾91.6 mg/kg。播期见表1,待秧苗长到21 d,人工模拟机插,移栽至大田。株行距为17 cm×20 cm,每个小区4 m²,3次重复,随机区组排列,常规水肥管理。

9311播种期分3期,分别为:I期4月28日,II期5月28日,III期6月8日。

根据近十年(2008–2017年)该试验点3期播种试验中9311从播种到移栽的平均温度,设置3种秧苗培育温度,I期温度:21.1℃,II期温度:23.3℃,III期温度:25.6℃,分别在人工气候室培育21 d,然后在2018年6月8日模拟机插,人工统一栽秧,移栽至大田。

本研究设置了2种遮光处理,第一种是在抽穗期,设置了3个光照度梯度,分别是自然光照(T_1 ,不遮光)、25%遮光(T_2 ,用白色纱网覆盖)、50%遮光(T_3 ,用黑色遮阴网覆盖),遮光处理直至水稻收获;第二种遮光处理是设置不同生育期遮光,一个处理是移栽后遮光到开花期结束,而另一个处理是移苗后一直遮光至成熟,用黑色遮阴网遮光使光照度为自然光照度的50%。

1.2 产量及其构成因素测定

于成熟期普查每小区100穴,计算有效穗数,取有代表性的5穴调查每穗粒数、结实率和千粒质量,每个小区分别收割测定实际产量。

1.3 米质测定

1.3.1 品质测定 将测产的稻谷存放90 d后用于米质测定。测定前各处理统一用NP4350型风选机等风量风选,剔除空秕粒。参照中华人民共和国国家标准《GB/T17891–2017 优质稻谷》测定出糙率、精米率、整精米率、垩白米率、垩白大小、胶稠度、直链淀粉含量和蛋白质含量^[9]。

1.3.2 淀粉RVA测定 采用波通瑞华科学仪器有限公司生产的快速黏度分析仪(简称RVA仪)测定,并用TCW配套软件分析,得出RVA参数。

1.4 气相资料收集整理

根据王端等^[6]的方法,本研究中的气象数据源于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn>)。由南京农业大学陈长青老师通过种植地

点的经纬度,从该网获取逐日气象资料,然后分别绘制该年份水稻种植期间平均温度、最高温度、最低温度以及日照时数等图。

1.5 数据处理

使用 SPSS 19.0 软件对数据进行 One-Way ANOVA 分析,采用 Excel 2016 对数据进行描述和作图。

表 1 9311 不同处理下外界气温和光照的变化(南京,2018)

Table 1 Changes of temperature and sunshine hours in different treatments of rice 9311(Nanjing, 2018)

| 处 理 | 生育期 | | | | 生长季的指标值 | | | |
|-------|---------------|---------------|---------------|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------|
| | 播种日期 (月-日) | 移栽日期 (月-日) | 开花日期 (月-日) | 收获日期 (月-日) | 平均温度 积温 (°C) | 最高温度 积温 (°C) | 最低温度 积温 (°C) | 日照时数 (h) |
| I 期 | 04-28 | 05-18 | 08-04 | 09-10 | 3 602.1 | 4 180.4 | 3 118.8 | 916 |
| II 期 | 05-28 | 06-17 | 08-20 | 09-24 | 3 499.7 | 4 033.4 | 3 071.5 | 818 |
| III 期 | 06-08 | 06-28 | 09-10 | 10-23 | 3 568.2 | 4 160.1 | 3 095.1 | 938 |

I 期、II 期、III 期分别表示播种期为 4 月 28 日、5 月 28 日、6 月 8 日。

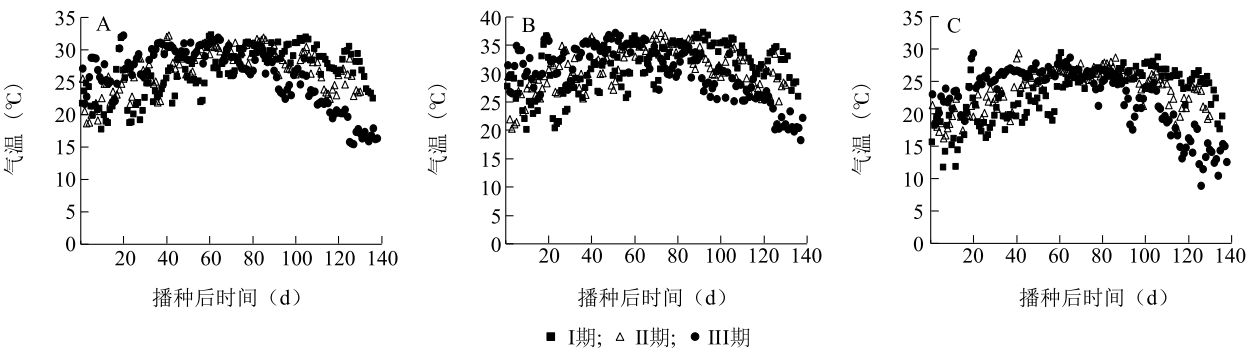
进一步分析分期播种处理 9311 生长季节以及开花后不同时间每天的温度状况,从图 1A 可以看出,9311 3 期处理日平均温度在 0~60 d 持续上升,种植的第 60~90 d 达到最高温度,90~140 d 持续下降。生长初期平均温度:III 期>II 期>I 期,生长后期平均温度:I 期>II 期>III 期,生长中期 3 期处理

2 结果分析

2.1 9311 生育期期间外界温度和光照特征

从表 1 可见,本研究设置 3 期分期播种处理对供试材料生长期的积温影响不大,其中生长季节的平均温度积温,表现为第 II 期最低,第 I 期最高;而对生长季节日照的累积时数:III 期>I 期>II 期。

平均温度接近。由图 1B 和图 1C 可以看出,9311 3 期处理最高温度与最低温度趋势一致,在 0~50 d 上升,50~100 d 维持相对稳定,100~140 d 下降。生长前期最高温度和最低温度均是 I 期最低,III 期最高;生长后期则是 I 期最高,III 期最低;生长中期 3 期处理最高温度和最低温度无太大差异。



I 期、II 期、III 期见表 1 注。A:平均温度;B:最高温度;C:最低温度。

图 1 分期播种后 9311 生育期的气温变化

Fig.1 Changes of air temperature during the growth period of rice 9311 after interval sowing

从图 2A 看出,9311 开花后 35 d 的平均温度:I 期>II 期>III 期,在开花后 0~5 d 3 期处理的平均温度呈现一定的梯度差异,随后梯度差异开始先减小后增大,I 期和 III 期平均温度始终有明显的差异。由图 2A 和图 2B 可以看出,9311 开花后最高温度和最低温度始终是 I 期最高,III 期最低。开花后 6~20 d I 期和 II 期的最高温度接近,比 III 期略高;开花后 21~35 d I 期和 III 期之间最高温度相差较大。在开花后 21~25 d 9311

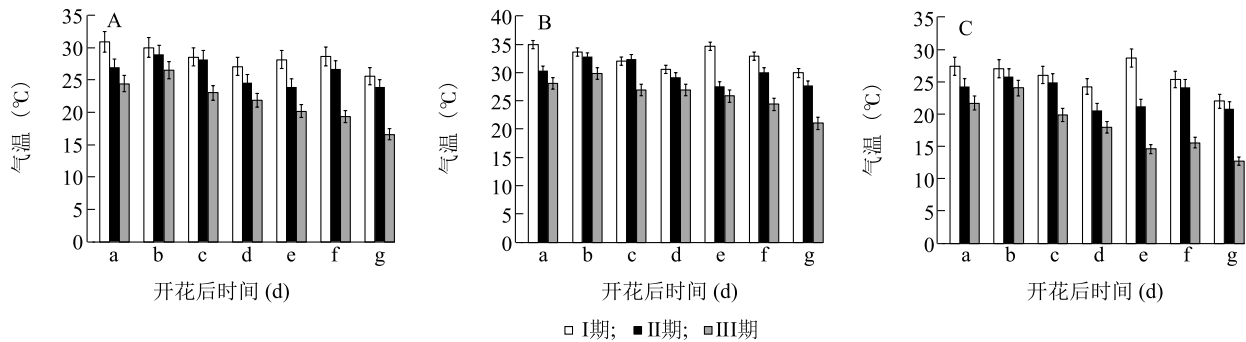
3 期最低温度相差显著,而开花后 25~35 d I 期和 II 期最低温度接近,与 III 期有明显差异。

2.2 大田自然光温差异对 9311 产量和稻米品质的影响

从表 2 看出,不同播期下光温条件对水稻的总分蘖数、有效穗数、每穗粒数和产量都会产生影响。9311 3 期处理的有效穗数:I 期>II 期,但 I 期与 III 期无明显差异;总分蘖数:I 期显著高于 II 期和 III

期;产量:Ⅱ期显著高于Ⅰ期和Ⅲ期。再结合表 1 同期的日照时数和气温的变化,9311 整个生长季节日照时数Ⅱ期最少,Ⅲ期略高于Ⅰ期,而且其同期的平均温度积温也是Ⅱ期最低。9311 3 期处理均在播种后第 90~100 d 开花,其中Ⅰ期在花后 35 d 内的平

均温度约为 30 ℃,Ⅱ期为 25~30 ℃,Ⅲ期则低于 25 ℃。值得关注的是Ⅰ期花后最高温度在 35 ℃左右,而Ⅲ期花后 15~35 d 的最低温度则低于 20 ℃,只有Ⅱ期花后 35 d 内的温度维持在 25~30 ℃,有利于产量的形成,所以Ⅱ期的产量均显著高于Ⅰ期和Ⅲ期。



Ⅰ期、Ⅱ期、Ⅲ期见表 1 注。A:平均温度;B:最高温度;C:最低温度。a:开花后 0~5 d;b:开花后 6~10 d;c:开花后 11~15 d;d:开花后 16~20 d;e:开花后 21~25 d;f:开花后 26~30 d;g:开花后 31~35 d。

图 2 大田条件下分期播种 9311 开花后不同天数的气温变化

Fig.2 Changes of air temperature in different days after flowering of rice 9311 under the field condition

表 2 不同播期 9311 产量构成因子

Table 2 Yield components of rice 9311 at different sowing dates

| 处理 | 株高 (cm) | 总分蘖 (每穴) | 有效穗数 (每穴) | 穗长 (cm) | 每穗实粒数 | 每穗总粒数 | 结实率 (%) | 千粒质量 (g) | 产量 (t/hm ²) |
|----|------------|-------------|--------------|------------|------------|------------|------------|-------------|----------------------------|
| Ⅰ期 | 134.2±6.2a | 9.4±0.5a | 8.5±0.4a | 23.5±1.2a | 135.7±6.8a | 146.6±7.3a | 80.1±4.0a | 30.6±1.5a | 7.27±0.4b |
| Ⅱ期 | 132.6±6.6a | 7.5±0.4b | 7.2±0.4b | 23.0±1.2ab | 133.2±6.7a | 154.6±7.7a | 88.0±4.4a | 29.6±1.5a | 8.83±0.4a |
| Ⅲ期 | 128.1±6.4a | 7.6±0.4b | 8.0±0.4ab | 21.1±1.1b | 138.2±6.9a | 157.9±7.9a | 87.6±4.4a | 31.9±1.6a | 7.25±0.4b |

Ⅰ期、Ⅱ期、Ⅲ期见表 1 注。

稻米的品质包括外观品质、加工品质、营养品质和蒸煮品质等,这些品质的好坏都会对水稻的整体品质产生影响,其中水稻籽粒的面积、周长、长宽比及垩白度和垩白粒率都会影响其外观品质。从表 3 中可以看出,9311 的 3 期处理的籽粒大小没有显著差异;籽粒垩白度:Ⅱ期显著低于Ⅰ期和Ⅲ期;垩白粒率:Ⅰ期和Ⅱ期没有显著差异,均显著低于Ⅲ期。开花后Ⅲ期的温度最低,减缓了籽粒灌浆速率,造成充实不紧密,因此低温增加籽粒垩白,降低了外观品质。稻米的糙米率、精米率和整精米率是影响其加工品质好坏的因素。水稻在抽穗至成熟期遇到高温会加速灌浆,缩短灌浆期,导致稻米糙米率、精米率和整精米率下降。本研究结果表明,在花后 35d,Ⅰ期齐穗后的温度(平均温度、最高温度以及最低温度)始终高于Ⅱ期(图 2),所以Ⅰ期的整精米率显著低于Ⅱ期,而Ⅲ期的糙米率和精米率与Ⅱ期无显著差异。3 期处理的稻米总蛋白质含量没有显著差

异,即 3 期处理的稻米营养品质没有显著差异。蒸煮品质主要包括直链淀粉含量、糊化温度、胶稠度和 RVA 谱特征值。9311 直链淀粉含量:Ⅲ期和Ⅰ期没有显著差异,Ⅱ期含量显著低于Ⅰ期和Ⅲ期,可见高温和低温均有利于直链淀粉的合成。温度是影响稻米糊化温度的主要因子,光照通过改变环境温度间接起作用^[10]。本研究Ⅲ期的糊化温度显著大于Ⅰ期和Ⅱ期,而Ⅰ期与Ⅱ期没有显著差异,推测与Ⅲ期的光照度大于Ⅰ期和Ⅱ期有关。稻米 RVA 谱称为淀粉黏滞谱,是指对稻米淀粉匀浆在加热、持续高温和冷却过程中黏度随之变化而形成的曲线。RVA 谱特征值可用峰值黏度、谷值黏度、崩解值、最终黏度和消碱值等特征值来描述。本研究 3 期处理的特征值表现为,崩解值:Ⅱ期>Ⅰ期>Ⅲ期,3 期处理间有显著差异;消碱值:Ⅲ期>Ⅱ期>Ⅰ期,3 期处理间也存在显著差异;而胶稠度、峰值黏度、谷值黏度和最终黏度 3 期处理间没有显著差异。

表 3 2018 年南京大田条件下中籼 9311 品质特征变化
Table 3 Changes in quality characteristics of rice 9311 under the field conditions in Nanjing in 2018

| 指 标 | I 期 | II 期 | III 期 |
|-----------------------|------------------|------------------|------------------|
| 面积 (mm ²) | 11.62±0.58a | 11.56±0.58a | 12.51±0.63a |
| 周长 (mm) | 15.58±0.78a | 15.79±0.79a | 16.06±0.80a |
| 长 (mm) | 6.45±0.32a | 6.61±0.33a | 6.68±0.33a |
| 宽 (mm) | 2.20±0.11a | 2.14±0.11a | 2.28±0.11a |
| 长/宽 | 2.95±0.15a | 3.11±0.16a | 2.94±0.15a |
| 垩白度 (%) | 0.65±0.03b | 0.44±0.02c | 1.30±0.07a |
| 垩白粒率 (%) | 1.48±0.07b | 1.42±0.07b | 4.30±0.22a |
| 糙米率 (%) | 77.00±3.85a | 80.40±4.02a | 80.60±4.03a |
| 精米率 (%) | 69.60±3.48a | 71.80±3.59a | 74.00±3.70a |
| 整精米率 (%) | 63.00±3.15b | 70.00±3.50a | 64.00±3.20ab |
| 总蛋白含量 (%) | 8.84±0.44a | 8.50±0.43a | 8.19±0.41a |
| 直链淀粉含量 (%) | 21.97±1.10a | 19.46±0.97b | 23.09±1.15a |
| 峰值黏度 | 2 287.50±114.38a | 2 346.00±117.30a | 2 135.00±106.75a |
| 谷值黏度 | 1 742.50±87.13a | 1 717.00±85.85a | 1 690.00±84.50a |
| 崩解值 | 545.00±27.25b | 629.00±31.45a | 445.00±22.25c |
| 最终黏度 | 2 608.00±130.40a | 2 789.00±139.45a | 2 657.00±138.85a |
| 消碱值 | 320.50±16.03c | 443.00±22.15b | 522.00±26.10a |
| 糊化温度 (℃) | 77.48±3.87b | 75.25±3.76b | 91.00±4.55a |
| 胶稠度 (cm) | 7.20±0.36a | 7.30±0.37a | 6.90±0.35a |

I期、II期、III期见表 1 注。同一行数据后不同小写字母表示差异显著。

将本研究 3 期分期播种的 9311 生育期气温的累积量和日照时数分别与其产量和品质指标进行相关性分析,从表 4 中可以看出 9311 整个生育期的日照时数分别与稻米直链淀粉含量和糊化温度呈极显著和显著正相关,而与产量呈负相关;整个生育期平均温度积温、最高温度积温和最低温度积温分别与稻米糙米率、精米率、总蛋白质含量以及胶稠度呈显著正相关。整个生育期平均温度积温、最高温度积温和日照时数分别与稻米直链淀粉含量呈显著正相关,显示了生育期光温对稻米产量和品质的重要影响。

2.3 苗期控温对 9311 稻米产量与品质的影响

从图 1 可以看出,分期播种造成 9311 基本营养期的不同,因此,本研究进一步设置了一个前期温度差异的试验,即对苗期进行控温培育试验。根据2008-2017 年该试验点 3 期分期播种后 21 d 的平均温度,将秧苗在 3 种温度下培养 21 d,然后根据第 3 期大田栽秧时间,同期栽秧,观察苗期不同温度处理对 9311 产量与品质的影响,结果(表 5)表明:I 期温度苗期控温处理与 II 期温度苗期控温处理相比总分蘖数和有效穗数有显著差异,II 期温度苗期控温处理和 III 期温度苗期控温处理在实粒数和每穗粒数上有显著差异,而小区的实际产量 3 个苗期控温处理间无显著差异,表明苗期温度对实际产量的影响很小。

表 4 中籼 9311 分期播种试验的平均温度和日照时数与其产量及品质的相关性分析

Table 4 Correlation analysis of air temperature and sunshine hours with yield and quality of rice 9311 in the interval sowing experiment

| 项 目 | 产量 | 垩白粒率 | 糙米率 | 精米率 | 总蛋白含量 | 直链淀粉含量 | 糊化温度 | 胶稠度 |
|---------------|--------|-------|----------|----------|----------|----------|---------|----------|
| 生育期平均温度积温 (℃) | 0.134 | 0.129 | 0.762 * | 0.770 * | 0.961 ** | 0.676 * | 0.493 | 0.769 * |
| 生育期最高温度积温 (℃) | 0.040 | 0.212 | 0.738 * | 0.771 * | 0.939 ** | 0.750 * | 0.565 | 0.697 * |
| 生育期最低温度积温 (℃) | 0.270 | 0.074 | 0.823 ** | 0.803 ** | 0.954 ** | 0.583 | 0.443 | 0.835 ** |
| 生育期日照时数 (h) | -0.519 | 0.578 | 0.398 | 0.561 | 0.637 | 0.990 ** | 0.791 * | 0.159 |

* 和 ** 分别表示相关性达到 0.05 和 0.01 显著水平。

表 5 苗期不同温度对 9311 产量构成因子的影响

Table 5 Effects of different temperature at seedling stage on yield components of 9311

| 温度 (℃) | 株高 (cm) | 总分蘖 (每穴) | 有效穗数 (每穴) | 穗长 (cm) | 每穗实粒数 | 每穗总粒数 | 结实率 (%) | 千粒质量 (g) | 产量 (t/hm ²) |
|---------------|------------|-----------|-----------|-----------|------------|-------------|-----------|-----------|-------------------------|
| 21.1(I 期温度) | 121.7±6.1a | 7.0±0.4a | 7.0±0.4a | 22.9±1.2a | 130.2±6.5a | 161.2±8.1ab | 80.7±4.0a | 32.0±1.6a | 7.87±0.4a |
| 23.3(II 期温度) | 125.6±6.3a | 6.2±0.3b | 6.0±0.3b | 21.6±1.1a | 119.3±6.0a | 165.1±8.4a | 76.1±3.8a | 30.7±1.5a | 7.95±0.4a |
| 25.6(III 期温度) | 120.0±6.0a | 6.4±0.3ab | 6.0±0.3b | 21.8±1.1a | 103.0±5.2b | 147.8±7.4b | 76.4±3.8a | 32.4±1.6a | 7.80±0.4a |

I 期、II 期、III 期见表 1 注。同一列数据后不同小写字母表示差异显著。

从表 6 中可以看出,9311 水稻籽粒的面积、周长和长宽比在苗期不同温度处理间无显著差异;籽粒垩

白度和垩白粒率;II 期温度处理显著高于 I 期温度处理和 III 期温度处理,I 期温度处理和 III 期温度处理间差异

不显著,说明Ⅱ期的苗期温度不利于稻米良好外观品质的形成。苗期不同温度处理间 9311 的稻米糙米率、精米率和整精米率均无显著差异。表明苗期温度对稻米的碾磨品质影响并不大。苗期不同温度处理对 9311 的稻米总蛋白质含量也影响不显著;直链淀粉的含量,Ⅱ期温度处理显著高于Ⅰ期和Ⅲ期,且Ⅰ期温度处理和Ⅲ期温度处理没有显著差异,表明较高或较低的苗期温度均不利于直链淀粉的累积;对于糊化温度,Ⅲ期温度处理显著低于Ⅰ期温度处理和Ⅱ期温度处理;胶稠度则苗期不同温度处理间无显著差异。峰值黏度、谷值黏度和最终黏度:Ⅲ期温度处理均显著高于Ⅰ期温度处理和Ⅱ期温度处理;崩解值:Ⅲ期温度处理显著高于Ⅰ期温度处理和Ⅱ期温度处理,Ⅰ期温度处理又显著高于Ⅱ期温度处理;消碱值:Ⅰ期温度处理显著高于Ⅲ期温度处理,可见,苗期温度对稻米品质的影响很复杂。

表 6 苗期不同温度对 9311 稻米品质的影响

Table 6 Effects of different temperature at seedling stage on quality of 9311

| 指标 | 21.1 °C (Ⅰ期温度) | 23.3 °C (Ⅱ期温度) | 25.6 °C (Ⅲ期温度) |
|----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 面积(mm ²) | 12.19±0.61a | 12.31±0.62a | 12.34±0.62a |
| 周长(mm) | 15.82±0.79a | 15.47±0.77a | 15.90±0.80a |
| 长(mm) | 6.54±0.33a | 6.39±0.32a | 6.56±0.33a |
| 宽(mm) | 2.26±0.11a | 2.30±0.12a | 2.30±0.12a |
| 长/宽 | 2.90±0.15a | 2.78±0.14a | 2.87±0.14a |
| 垩白度(%) | 0.54±0.03b | 1.90±0.10a | 0.66±0.03b |
| 垩白粒率(%) | 2.40±0.12b | 6.30±0.32a | 2.50±0.13b |
| 糙米率(%) | 79.00±3.95a | 80.50±4.03a | 79.40±3.97a |
| 精米率(%) | 73.20±3.66a | 75.00±3.75a | 73.20±3.66a |
| 整精米率(%) | 63.03±3.15a | 62.00±3.10a | 61.05±3.05a |
| 总蛋白含量(%) | 8.55±0.43a | 7.90±0.40a | 8.11±0.41a |
| 直链淀粉含量(%) | 19.45±0.97b | 23.00±1.15a | 20.65±1.03b |
| 峰值黏度 | 2 191.00±109.55b | 2 015.00±100.75b | 2 611.00±130.55a |
| 谷值黏度 | 1 682.00±84.10b | 1 564.00±78.20b | 1 942.00±97.10a |
| 崩解值 | 509.00±25.45b | 430.00±21.50c | 669.00±33.45a |
| 最终黏度 | 2 789.00±139.45b | 2 568.00±128.40b | 3 129.00±156.45a |
| 消减值 | 598.00±29.90a | 564.00±28.20ab | 518.00±25.90b |
| 糊化温度(°C) | 91.00±4.55a | 90.00±4.50a | 72.70±3.64b |
| 胶稠度(cm) | 6.75±0.34a | 6.90±0.35a | 7.13±0.36a |

同一行数据后不同小写字母表示差异显著。

2.4 光照度对稻米品质的影响

为了进一步验证光照对稻米品质的影响,本试验设置了光照度和遮光时间对稻米品质的影响 2 个试验。其中光照度设置 3 个梯度,即自然光照(T₁)、25%遮光处理(T₂)、50%遮光(T₃);与此同时设置了 2 个遮光时间处理,50%遮光条件下,遮光时间处理一:移栽后遮光至开花期,处理二:移栽后一直遮光至成熟。

从表 7 可以看出,遮光处理对 9311 产量的影响显著,遮光提高了株高,但是减少了分蘖数、有效穗数、结实率以及千粒质量,进而降低了产量,而且遮光越多,产量下降越显著,适当遮光(光照度为自然光的 75%),对产量影响不显著,当光照度为自然光的 50%时,则产量显著下降;营养期遮光对 9311 产量的影响小于移栽后一直遮光,但不同时期遮光处理的产量均比未遮光对照显著下降。

由表 8 可知,9311 在 3 种光照度下的籽粒面积、周长和长宽比无显著差异;其垩白度:T₃ 显著高于 T₁ 和 T₂,T₁ 和 T₂ 无显著差异;垩白粒率:T₃ 显著高于 T₂ 和 T₁,T₂ 又显著高于 T₁。3 种光照度下糙米率和精米率无显著差异,整精米率:T₂ 显著低于 T₁ 和 T₃。总蛋白含量,T₃ 含量显著高于 T₁,与 T₂ 无显著差异。直链淀粉含量:T₁ 显著高于 T₃;糊化温度、峰值黏度和最终黏度 3 种光照度下无显著差异;崩解值:T₂ 显著高于 T₃ 和 T₁,T₃ 又显著高于 T₁;谷值黏度:T₃ 显著大于 T₂;消碱值:T₂ 显著低于 T₁ 和 T₃;胶稠度:T₃ 显著低于 T₁ 和 T₂。50%遮光与不遮光对照相比,籽粒垩白度和垩白粒率上升,总蛋白质含量增加,直链淀粉含量和胶稠度降低,崩解值升高;25%遮光在垩白度、总蛋白质含量、直链淀粉含量、糊化温度和胶稠度上与不遮光对照无显著差异,会使整精米率降低,崩解值升高,消碱值降低。

不同时间遮光对 9311 品质也会产生影响,处理一 9311 籽粒与处理二相比在面积、周长和长宽比上均无显著差异,处理一的垩白度和垩白粒率比处理二显著降低,因此处理一的外观品质更好;处理一的糙米率和精米率与处理二无显著差异,而整精米率处理一显著低于处理二,所以处理二的碾磨品质更好;处理二总蛋白质含量、最终黏度和消减值均显著高于处理一,处理一的崩解值和胶稠度均显著高于处理二。灌浆结实期恢复正常光照可减少垩白的形成,提高崩解值和胶稠度。

表 7 遮光处理对 9311 产量构成因子的影响
Table 7 Yield components of rice 9311 after shading treatment

| 处理 | | 株高 (cm) | 总分蘖 (每穴) | 有效穗数 (每穴) | 穗长 (cm) | 每穗 总粒数 | 每穗 实粒数 | 结实率 (%) | 千粒质量 (g) | 产量 (t/hm ²) |
|------|----------------|-------------|-------------|--------------|------------|------------|------------|------------|-------------|----------------------------|
| 遮光程度 | T ₁ | 121.6±5.3c | 6.3±0.2a | 6.2±0.4a | 21.1±1.1b | 160.1±7.4a | 118.3±5.0a | 75.1±2.8a | 31.1±1.5a | 7.85±0.4a |
| | T ₂ | 129.9±3.1bc | 5.9±0.1b | 5.5±0.3b | 22.6±1.1ab | 155.5±5.0b | 110.1±2.9b | 71.0±2.0b | 30.1±2.1a | 7.56±0.5a |
| | T ₃ | 135.5±2.0a | 5.1±0.2d | 4.6±0.2c | 23.9±2.2a | 145.5±3.1c | 89.9±3.5c | 62.1±2.6c | 25.2±17b | 5.25±0.2c |
| 遮光时间 | 未遮光对照 | 125.6±6.3c | 6.2±0.3a | 6.0±0.3a | 21.6±1.1b | 165.1±8.4a | 119.3±6.0a | 76.1±3.8a | 30.7±1.5a | 7.95±0.4a |
| | 处理一 | 133.2±3.0b | 5.4±0.2c | 4.8±0.2c | 23.1±2.4ab | 140.6±4.2d | 85.6±3.1d | 61.1±2.3c | 26.9±1.4b | 6.38±0.4b |
| | 处理二 | 141.2±1.2a | 4.6±0.1e | 4.1±0.1d | 24.2±1.9a | 135.2±3.6e | 67.5±2.8e | 49.6±2.6d | 20.1±1.4c | 3.98±0.2d |

T₁:未遮光对照;T₂:光照度为自然光的 75%; T₃:光照度为自然光的 50%;处理一:移栽后 50%遮光至开花期;处理二:移栽后 50%遮光至成熟。同一列数据后不同字母表示差异达显著水平(P<0.05)。

表 8 遮光处理对 9311 稻米各种品质的影响
Table 8 Effects of shading treatments on quality of rice 9311

| 指 标 | 遮光程度 | | | 遮光时间 | | |
|----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------|------------------|-------------------|
| | 自然光对照(T ₁) | 25%遮光(T ₂) | 50%遮光(T ₃) | 自然光对照 | 处理一 | 处理二 |
| 面积(mm ²) | 11.59±0.58a | 11.28±0.56a | 10.91±0.54a | 11.40±0.57a | 10.96±0.55ab | 10.20±0.51b |
| 周长(mm) | 15.69±0.78a | 15.32±0.77a | 15.09±0.75a | 15.52±0.78a | 14.94±0.75a | 14.59±0.73a |
| 长(mm) | 6.41±0.32a | 6.31±0.32a | 6.10±0.31a | 6.47±0.32a | 6.19±0.31a | 6.10±0.31a |
| 宽(mm) | 2.11±0.11a | 2.13±0.11a | 2.04±0.10a | 2.15±0.11a | 2.15±0.11a | 2.02±0.10a |
| 长宽比 | 3.03±0.15a | 2.96±0.15a | 2.99±0.15a | 3.02±0.15a | 2.89±0.14a | 3.03±0.15a |
| 垩白度(%) | 0.55±0.03b | 0.61±0.03b | 1.00±0.05a | 0.40±0.02c | 0.66±0.03b | 1.35±0.07a |
| 垩白粒率(%) | 1.45±0.07c | 1.75±0.09b | 2.96±0.15a | 2.00±0.10b | 2.04±0.10b | 4.44±0.22a |
| 糙米率(%) | 78.70±3.94a | 78.95±3.95a | 77.97±3.90a | 80.20±4.01a | 79.20±3.96a | 78.95±3.95a |
| 精米率(%) | 70.70±3.54a | 70.22±3.51a | 70.47±3.52a | 72.20±3.61a | 69.74±3.49a | 71.35±3.57a |
| 整精米率(%) | 66.50±3.33a | 52.45±2.62b | 60.57±3.03a | 58.59±2.93a | 38.39±1.92b | 58.15±2.91a |
| 总蛋白质含量(%) | 8.67±0.43b | 9.45±0.47ab | 10.24±0.51a | 8.60±0.43c | 10.23±0.51b | 11.63±0.58a |
| 直链淀粉含量(%) | 20.72±1.04a | 19.65±0.98ab | 18.18±0.91b | 20.75±1.04a | 19.58±0.98ab | 18.38±0.92b |
| 峰值黏度 | 2 317.00±115.85a | 2 562.00±128.10a | 2 529.00±126.47a | 2 503.00±125.15b | 2 806.00±140.30a | 2 771.00±138.55ab |
| 谷值黏度 | 1 730.00±86.50ab | 1 657.00±82.85b | 1 884.00±94.20a | 1 709.00±85.45b | 1 583.00±79.15b | 2 026.00±101.30a |
| 崩解值 | 587.00±29.35c | 905.00±45.25a | 695.00±34.75b | 794.00±39.70b | 1 223.00±61.15a | 845.00±42.25b |
| 最终黏度 | 2 699.00±134.95a | 2 729.00±136.45a | 2 939.00±146.95a | 2 756.00±137.80b | 2 758.00±137.90b | 3 269.00±163.45a |
| 消碱值 | 382.00±19.10a | 299.00±14.95b | 410.00±20.50a | 253.00±12.65b | 216.00±10.80c | 498.00±24.90a |
| 糊化温度(℃) | 76.36±3.82a | 74.54±3.73a | 78.80±3.94a | 75.95±3.80a | 72.70±3.64a | 80.00±4.00a |
| 胶稠度(cm) | 7.43±0.37a | 7.33±0.37a | 6.45±0.32b | 7.48±0.37a | 7.42±0.37a | 6.00±0.30b |

处理一:移栽后 50%遮光至开花期;处理二:移栽后 50%遮光至成熟。

3 讨 论

目前对影响水稻产量和品质的气象因素的研究,主要集中在特定范围的气候环境,而且具有地域性,气温和光照度普遍被认为是影响水稻产量与品质的最关键的环境因子,尤其是日均温度,其次是光

照^[11]。已有研究结果表明:抽穗至成熟期高温会加速灌浆,缩短灌浆持续期,使籽粒的充实度受到影响,千粒质量下降,导致产量下降^[12]。本研究结果显示:9311 在分期播种试验中,Ⅱ期的产量最高,过高和过低的生育期积温均不利于其产量潜力的发挥,而苗期控温试验对供试水稻产量影响不大。温度的变化会影

响谷物籽粒的灌浆情况,影响其蛋白质和直链淀粉含量、千粒质量、垩白度等;光照度会影响水稻籽粒的垩白情况,使其垩白率发生改变^[13]。光照通过影响水稻光合作用以及改变温度影响物质合成和谷粒的灌浆充实,从而影响稻米品质^[14]。本研究结果显示,与Ⅱ期相比,Ⅲ期的垩白度、直链淀粉含量和糊化温度高,崩解值、整精米率低,但总的来说,大田条件下,Ⅱ期稻米外观品质最优,同时有着较优的加工品质和蒸煮品质。苗期温度试验对籽粒品质也有显著影响,苗期Ⅱ期温度处理的籽粒垩白度、垩白粒率和直链淀粉含量最高;糊化温度则是Ⅲ期温度处理的最高,而且Ⅲ期温度处理的峰值黏度、谷值黏度和最终黏度也最高,可见,9311 苗期Ⅰ期温度处理和Ⅲ期温度处理的外观品质较优,直链淀粉含量较低,米饭较软,而Ⅱ期温度处理则较差。对高温影响水稻产量和品质的研究很多,如抽穗至成熟期高温会加速灌浆,缩短灌浆持续期,使籽粒的充实度受到影响,稻米的糙米率、精米率和整精米率下降,其中整精米率下降幅度最大;高温会使发育过程提前,籽粒内物质分配不合理,引起光折射而呈白色不透明状,垩白增加,透明度降低^[12]。王守海^[15]和朱碧岩等^[16]的研究结果表明,结实期温度越高,碱解值越低,糊化温度越高,而温度越低,糊化温度也越低。本研究结果还显示,分期播种的Ⅰ期和Ⅲ期的生育期积温均高于Ⅱ期,品质测定的结果也显示Ⅱ期各种品质指标也相对较优,可见适当降低水稻生育期温度,尤其是齐穗后的温度,可以获得产量和品质俱佳的稻米。

光合作用是形成植物生物量最重要的生命过程,因此,光照度以及日照时数的多少也是影响稻米产量和品质的重要外界因子。水稻在生长发育过程中,不同生育期总会遇到光照弱的不良天气,特别是在几个重要发育时期,光合作用是水稻物质生产的根本基础,光能利用是水稻生产的关键^[17-18],光合作用的强弱与太阳辐射强度有着密切关系,而光照度变化因地域性和季节性而异,尤其是中国南方某些稻区,在水稻生长季节内多阴雨,日照百分率一般在 50% 以上^[19]。光照度对水稻产量的影响已有不少报道,如遮阴处理的光照主要是散射光,含蓝紫光的比例高,且处理后总叶绿素及叶绿素 b 含量相对提高^[20],利于吸收更多的蓝紫光。红光有利于碳水化合物的积累,蓝光则能促进蛋白质与非碳水化合物化合物的积累^[21],遮阴后植株体内碳、氮代谢失

调,茎叶及穗的全氮增加,运转到籽粒单位干物质中的氮素含量明显高于对照。相反,植株合成碳水化合物化合物的能力削弱,转移到籽粒中的碳水化合物量相应减少^[22]。而本研究的遮光试验结果表明:改变光照度和遮光时间均显著影响供试水稻的产量,且遮光越多,产量下降越显著,而且生育后期的遮光对产量影响更大。朱萍等^[23]的试验结果也显示在田间通过抽穗期遮光处理(80%遮光率) 15 d,及恢复自然光照 15 d 后,水稻的产量显著降低,其光合特性和抗氧化酶活性的高低是其内在的生理基础。水稻灌浆期进行遮光处理,使其处于弱光逆境,光合作用受到抑制,会导致糖源不足,造成直链淀粉含量以及总淀粉含量下降,糊化温度降低^[20,24-25]。任万军等^[20]的研究结果显示,随光照度的降低,直链淀粉含量显著降低,胶稠度较对照呈极显著下降。张丽丽等^[26]对不同穗型水稻群体进行遮光处理得出,各类型品种的蛋白质含量增加。任万军等^[20]的研究结果也证实,随光照度的降低,稻米的蛋白质含量极显著增加。本研究结果也显示,遮光的多少对稻米品质的影响显著,与不遮光的自然光照度对照相比,当部分遮光,即当光照度为自然光照度的 75% 时稻米的整精米率降低,崩解值升高,消碱值降低,而 50% 遮光则使籽粒垩白度和垩白粒率上升,稻米总蛋白质含量增加,直链淀粉含量和胶稠度降低,崩解值升高。而不同时间遮光试验结果进一步显示:与移栽后一直遮光相比,灌浆结实期恢复正常光照可减少垩白,提高崩解值和胶稠度。可见,不同遮光强度和遮光时间对稻米品质产生不同的效果,规律很复杂,还需深入研究。

综上所述,水稻生育期气温的高低以及光的强弱均会对稻米的产量和品质产生显著影响。其中苗期较高的温度,既不影响产量,又可提高稻米蒸煮品质,而生育后期适当避开强光可提高稻米的营养品质和碾磨品质。

参考文献:

- [1] 贺梅,宋冬明. 环境因素对稻米品质的影响[J]. 北方水稻, 2015, 45(5): 71-74.
- [2] 张建军. 播期与不同生育时期遮光对水稻生理特性及品质的影响[D]. 雅安:四川农业大学, 2005.
- [3] 周立宏. 稻田微气候及其对水稻产量和品质的影响[D]. 沈阳:沈阳农业大学, 2016.
- [4] 农业部种植业管理司. 中国稻米品质区划及优质栽培[M]. 北

- 京:中国农业出版社,2002.
- [5] 孙卫国,程炳岩,杨沈斌,等.区域气候变化对华东地区水稻产量的影响[J].中国农业气象,2011,32(2):227-234.
- [6] 王端,黄雅,朱晓妹,等.长江流域5省市近10年国家审定水稻品种产量和品质与其相应气候特性的分析[J].江西农业大学学报,2018,40(6):1207-1216.
- [7] 李晏军.中国杂交水稻技术发展研究(1964-2010)[D].南京:南京农业大学,2010.
- [8] 窦兰兰,肖璐,李建粤.重要籼型杂交稻亲本9311稻米食味品质的改良[J].上海师范大学学报(自然科学版),2014,43(3):245-250.
- [9] 国家质量技术监督局.中华人民共和国国家标准:优质稻谷:GB/T17891-2017[S].北京:中国标准出版社,2017.
- [10] 张国发,丁艳锋.温光因子对稻米品质影响的研究进展[J].中国稻米,2004(1):11-14.
- [11] 刘建.环境因子对稻米品质影响研究进展[J].湖北农学院学报,2002,22(6):550-554.
- [12] 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.
- [13] 李静.生态条件和栽培密度对水稻群体特征、产量和品质的影响[D].雅安:四川农业大学,2013.
- [14] 陈冬梅,林文雄,梁康迳.稻米品质形成的生理生态研究现状与展望[J].福建农业科技,2000(S1):81-82.
- [15] 王守海.灌浆期气候条件对稻米糊化温度的影响[J].安徽农业科学,1987(1):16-18.
- [16] 朱碧岩,吴永常,杨宝平.结实期环境温度对稻米糊化温度的影响[J].西北农业大学学报,1994,22(4):23-27.
- [17] 廖靖,胡月明,赵理,等.结合数据融合算法的光能利用率模型反演水稻地上部生物量[J].江苏农业学报,2019,35(3):594-601.
- [18] 刘璐,申双和,谢晓金.夜温升高对水稻光合生理特性及产量构成的影响[J].江苏农业科学,2019,47(11):86-89.
- [19] 丁颖.中国水稻栽培学[J].北京:农业出版社,1961:75-80.
- [20] 任万军,杨文钰,徐精文,等.弱光对水稻籽粒生长及品质的影响[J].作物学报,2003,29(5):785-790.
- [21] 李林,沙国栋,陆景淮.水稻灌浆期温光因子对稻米品质的影响[J].中国农业气象,1989,10(3):33-38.
- [22] 任万军,杨文钰,张国珍,等.弱光对杂交稻氮素积累、分配与子粒蛋白质含量的影响[J].植物营养与肥料学报,2003,9(3):288-293.
- [23] 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.
- [24] 王百灵,张文忠,于红卫,等.遮光对超级稻沈农014主要稻米品质的影响[J].北方水稻,2009,39(4):14-16.
- [25] 刘喜珍.影响稻米品质的因素[J].北京农业科学,2000,18(2):20-23.
- [26] 张丽丽,张文忠,韩亚东,等.不同穗型水稻群体遮光对品质的影响[J].辽宁农业科学,2007(2):18-21.

(责任编辑:陈海霞)