

doi:10.3969/j.issn.1000-6362.2017.02.007

郭建茂,吴越,杨沈斌,等.典型高温年不同播期一季稻产量差异及其原因分析[J].中国农业气象,2017,38(2):121-130

典型高温年不同播期一季稻产量差异及其原因分析*

郭建茂^{1,2}, 吴越², 杨沈斌^{1,2}, 江晓东², 谢晓燕², 王锦杰², 申双和¹

(南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心/江苏省农业气象重点实验室, 南京 210044; 2. 南京信息工程大学应用气象学院, 南京 210044)

摘要: 为研究自然高温对水稻产量的影响,以南粳 45 为试材,于 2013 年在南京信息工程大学农业气象试验站进行 3 个播期的分期播种试验,分别为 4 月 30 日(第 1 播期, No.1)、5 月 15 日(第 2 播期, No.2)和 5 月 31 日(第 3 播期, No.3),并分析水稻产量及其性状、产量贡献因子、灌浆期茎和叶向穗的干物质转运及收获指数(Harvest index, HI)对高温的响应特征。结果表明:(1)在试验播期范围内,随着播期的延后水稻表现为增产的趋势,其中 No.1 与其它两个播期间产量差异达到显著性水平($P < 0.05$),相比 No.2 和 No.3, No.1 产量分别降低 $3495.08\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $6319.58\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;就产量性状来看, No.1 的结实率与其它两个播期达到显著性差异($P < 0.05$),而 3 个播期间千粒重和穗粒数的差异均达到显著性水平($P < 0.05$),总体上来看,高温主要表现为降低结实率和穗粒数;(2)抽穗末穗干重 P_0 、灌浆期同化的干物质质量 ΔW 、灌浆期茎和叶向穗转移的干物质质量 ΔT 这 3 个产量贡献因子的贡献量均随着播期的推迟逐渐增大;从贡献率来看,对 No.1 和 No.3 产量贡献率最大的是 ΔW ,而 No.2 是 ΔT ;(3)3 个播期中茎的干物质输出率(Dry matter export rate, DMER)和转化率(Dry matter transformation rate, DMTR)均超过叶的两倍(除 No.1 的 DMER),叶的 DMER 和 DMTR 均表现为 No.1 最大, No.3 最小,分别相差 4.37 和 7.35 个百分点,但 No.1 茎的 DMER 和 DMTR 均最小;(4)3 个播期 HI 大小趋势与产量一致,表现为 No.1 (28.84%) < No.2 (39.60%) < No.3 (46.92%)。由此可见,在 2013 年将播期调整至 5 月中下旬有助于缓解高温对水稻造成的危害,从而保证产量。

关键词: 水稻; 分期播种; 高温胁迫; 产量贡献因子; 干物质转运

Yield Differences and its Causes for One Season Rice Under Different Sowing Dates in Typical High Temperature Year

GUO Jian-mao^{1,2}, WU Yue², YANG Shen-bin^{1,2}, JIANG Xiao-dong², XIE Xiao-yan², WANG Jin-jie², SHEN Shuang-he¹

(Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disaster/Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology/Nanjing 210044, China; 2. College of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044)

Abstract: In order to reveal the impacts of high temperature on rice yield, an interval sowing experiment was conducted with Nanjing 45 as experiment material, at agro-meteorological experimental station in Nanjing University of Information Science & Technology in 2013. Three sowing dates were April 30 (the first sowing date, denoted as No.1), May 15 (the second sowing date, denoted as No.2) and May 31 (the third sowing date, denoted as No. 3)

* 收稿日期: 2016-07-25

基金项目: 科技部行业专项(GYHY201506018); 江苏省重点研发计划(现代农业)项目(BE2015365); 中国气象局预报预测核心业务发展专项(CMAHX20160311); 江苏省农业气象重点实验室基金(KYQ201304); 重庆市气象局开放基金课题(Kfj-201201); 重庆市博士后基金资助(RC2012002)

作者简介: 郭建茂(1968-), 博士, 副教授, 主要从事农业遥感和作物生长模拟研究。E-mail: guojianmao2004@163.com

respectively. During the experiment, the characteristics of rice yield and yield components, yield contribution factors, dry matter transportation from stem and leaf to panicle during grain filling stage, and harvest index (HI) to high temperature were analyzed. The results showed that: (1) the yield increased with sowing date postponing. Yield differences between No.1 and the other two reached 0.05 significant level and yield of No.1 was less than No.2 and No.3 by 3495.08 kg·ha⁻¹ and 6319.58 kg·ha⁻¹ respectively. As for yield components, seed setting rate difference between No.1 and the other two reached 0.05 significant level, and 1000-grain weight and grain number per panicle differences among the three reached 0.05 significant level. In general, the main performance of high temperature was to decrease seed setting rate and grain number per panicle. (2) The contribution amount of three contribution factors (dry weight of panicle at end of heading, P_0 ; newly assimilated dry matter during grain filling stage, ΔW ; dry matter transferred from stem and leaf to panicle during grain filling stage, ΔT) all increased with the sowing date postponing. The contribution rate of ΔW was the largest both in No.1 and No.3, while in No.2 contribution rate of ΔT was the largest. (3) The dry matter export rate (DMER) and transformation rate (DMTR) of stem were both twice more than that of leaf (except for the DMER in No.1). Among three sowing dates, the DMER and DMTR of leaf were the largest in No.1, but the smallest in No.3. The differences were 4.37% and 7.35% respectively. However, the DMER and DMTR of stem were both the smallest in No.1. (4) HI showed the same tendency as yield. With the sowing date postponing, the HI of No.3 showed the biggest (46.92%), then No.2 (39.60%), and No.1 showed the smallest (28.84%). So, choosing mid to late of May as the sowing date could help to alleviate the harm caused by high temperature and to ensure the yield of rice in 2013.

Key words: Rice; Interval sowing; High temperature stress; Yield contribution factors; Dry matter transportation

水稻是中国主要的粮食作物之一,其播种面积占粮食作物总面积的 1/4,产量接近粮食总产的 1/2^[1],而中国水稻由于种植面积广、生长季长,水稻生长发育过程中常受到各种气象灾害的不利影响^[2-4],其中,高温热害对水稻的影响在近年不断加剧。1880-2012 年,全球地表持续升温,平均温度已升高 0.85℃ (0.65~1.06℃),而地表均温的上升,意味着多数地区在平日与季节性的时间尺度下会出现更多高温日数^[5];此外,根据 IPCC 第五次报告对未来气温的预估,全球平均气温在 2016-2035 年期间相较于 1986-2005 年可能还将上升 0.3~0.7℃^[5],纵观上述,都预示着水稻遭受高温的危害将越来越严重。

在水稻生长过程中,不同时段的高温会对水稻造成不同的影响。骆宗强等^[6]研究表明,孕穗期高温会降低水稻的穗粒数、结实率和千粒重,从而造成水稻减产,这与高温导致颖花数减少,光合产物向穗转移受阻有关;郑建初等^[7-8]研究则指出,抽穗期高温会降低水稻的结实率,导致水稻干物质积累量、SPAD 值和净光合速率显著下降;而灌浆期高温则会加速籽粒灌浆,缩短灌浆时间,导致谷粒灌浆不充分,出现提前成熟或早衰等现象^[9]。由此可见,研究高温对水稻生长发育及产量的影响至关重要。当前

分期播种的方法已广泛运用于水稻^[10-11]、小麦^[12]、玉米^[13-14]等重要粮食作物,用以研究作物的生长特性及确定最适播期。分期播种的方法可以通过改变作物不同生育期内的气象条件^[13],实现同年内同一品种作物不同生长条件下的对比,是缩短研究周期,充分利用自然资源(如高温),降低土壤、农业措施等影响的有效方法。考虑到当前针对水稻高温热害的研究主要是通过人工气候箱、盆栽等人工恒温控制试验获得^[6,15-18],忽视了田间自然状态下各气象因子间的交互影响及时刻变动的特点,并且自然高温危害同时还受到灌溉、风速、大气湿度、辐射增温、冠层结构等因素的影响^[19-20],由此可见,人工控制试验很难真实反映自然状况下水稻高温热害的状况。因此,本研究利用 2013 年自然高温开展田间试验,采用分期播种的方法改变高温与水稻生育阶段的配置情况,并通过对不同播期引起水稻产量差异的因素进行比较,对高温危害造成水稻的损失及其原因进行探讨。

1 材料与方 法

1.1 试验设计

试验于 2013 年在南京信息工程大学农业气象试验站(32°12'24"N, 118°42'17"E)进行,供试品种为

南粳 45, 属迟熟中粳稻品种, 适宜在江苏省苏中及宁镇扬地区种植, 一般 5 月上中旬播种, 6 月上中旬移栽。试验采用随机区组设计, 在 2013 年设置 3 个播期, 分别为 4 月 30 日(第 1 播期, No.1)、5 月 15 日(第 2 播期, No.2)和 5 月 31 日(第 3 播期, No.3), 移栽密度为 46 穴·m⁻², 单株栽插。每个播期设置 4 个重复, 每个重复小区面积 4m×4m, 区组设计完全随机。水肥等田间管理按照常规高产田的要求进行。

试验过程中观测和记录 3 个播期不同生育阶段对应的日期, 包括播种 (Sowing, S)、移栽 (Transplanting, T)、幼穗分化 (Panicle initiation, PI)、抽穗期(中期)(Heading, H), 成熟期 (Maturity, M), 并根据抽穗期往前、往后各推三天作为抽穗始期 (Start of heading, SH) 和抽穗末期 (End of heading, EH)。试验过程中, 从移栽至成熟, 按每 7d (根据实际情况观测间隔略有调整) 在随机取样的基础上, 选取具有代表性的 2~5 穴水稻植株进行地上部分生物量的测定, 包括茎 (包括茎和叶鞘)、绿叶、枯叶和穗等, 并按照种植密度转化为单位面积的质量数。收获时, 选取 20 穴具有代表性的水稻植株计算总有效穗数, 并从中选取部分穗进行产量性状的测定, 包括穗粒数、千粒重和结实率 (实粒数/总粒数×100%) 等, 然后再将小样本穗的产量性状结合整个 20 穴的大样本, 反推求得单位面积产量。

试验期间的气象数据来自南京信息工程大学自动气象观测站 Watchdog 每 10min 一次的观测数据, 包括气温、太阳辐射、降水等。

1.2 数据处理

1.2.1 产量指数

水稻产量可以通过产量性状, 包括有效穗、穗粒数、结实率和千粒重计算得到; 另一方面, 水稻产量的形成是一个源、库、流三者相互作用的过程^[21], 根据产量形成的来源可以通过产量贡献因子对产量进行描述。由于水稻成熟时稻谷干重占穗干重的比值是一个相对稳定的数值 0.87^[22], 因此, 收获时的穗干重可以反映籽粒干重 (即产量) 的高低。本文在已有研究^[23-25]及 Katsura 等^[26]关于水稻产量贡献因子描述的基础上, 将收获时水稻穗干重分为 3 个部分, 并以此反应水稻产量形成的干物质来源, 即

$$P = P_0 + \Delta T + \Delta W \quad (1)$$

式中, P (Dry weight of panicle at maturity) 为成

熟期穗干重(kg·hm⁻²); P₀ (Dry weight of panicle at end of heading) 表示抽穗末穗干重 (kg·hm⁻²); ΔT (Dry matter transferred from stem and leaf to panicle during grain filling stage) 表示灌浆期茎和叶向穗转移的干物质质量 (kg·hm⁻²), 为灌浆期茎、叶最大干重与最小干重的差值之和; ΔW (Newly assimilated dry matter during grain filling stage) 表示灌浆期同化的干物质质量 (kg·hm⁻²), 由 P-ΔT-P₀ 得到。

根据文献[27], 本文将水稻茎、叶灌浆期 (抽穗末-成熟) 对穗干物质的贡献通过干物质输出率 (Dry matter export rate, DMER) 和转化率 (Dry matter transformation rate, DMTR) 来描述, DMER 和 DMTR 分别是抽穗末和成熟期茎 (或叶) 干重的差值与抽穗末茎 (或叶) 干重和成熟期穗干重的比值。试验观测发现, 水稻抽穗末不一定是水稻茎和叶干重累积达到最大的时刻, 并且茎和叶达到干重最大出现的时间也往往不一致, 鉴于此, 本文对水稻茎和叶灌浆期的 DMER 和 DMTR 的计算公式进行适当的调整, 修改后公式为

$$DMER = (DM_{\max} - DM_{\min}) / DM_{\max} \times 100\% \quad (2)$$

$$DMTR = (DM_{\max} - DM_{\min}) / P \times 100\% \quad (3)$$

式中, DMER 为干物质输出率 (%), DMTR 为干物质转化率 (%); DM_{max} (Maximum dry weight at grain filling stage) 和 DM_{min} (Minimum dry weight at grain filling stage) 分别表示灌浆期水稻茎 (或叶) 能达到的最大和最小干重 (kg·hm⁻²); P 为成熟期穗干重 (kg·hm⁻²)。收获指数 (Harvest index, HI) 反映了作物光合产物转化为经济产品的能力, 是作物品种高产基因型的一个重要指标^[28], 收获指数又叫经济系数, 是籽粒干重与地上部分总干重的比值。

1.2.2 热害分析方法

众多研究表明, 水稻孕穗期、抽穗开花期和灌浆期的致害温度为 35℃^[29-32], 吕厚荃^[33]通过对不同高温热害标准的分析比较也发现, 相比日均温 ≥ 30℃持续 3d 以上、日均温 ≥ 30℃且平均相对湿度 ≤ 70%持续 3d 以上、日最高气温 ≥ 35℃且平均相对湿度 ≤ 70%持续 3d 以上, 日最高气温 ≥ 35℃持续 3d 以上是一季稻对高温灾害反应最为敏感的指标, 因此, 本研究以日最高气温不低于 35℃作为水稻高温的致害指标, 并根据高温持续天数划分水稻的热害等级,

即 3~4d 为一次轻度高温热害; 5~7d 为一次中度高温热害; ≥8d 为一次重度高温热害^[34]。一般来说, 水稻植株在抽穗前后较短时期内遭遇 35℃ 以上的高温也会对植株造成高温危害^[35], 因此, 本文以抽穗始期前 3d 至抽穗末期后 3d 作为水稻高温热害的敏感阶段。在上述基础上, 对 3 个播期水稻抽穗开花期 (抽穗始-抽穗末)、灌浆期、高温敏感期的高温天数及高温热害等级进行统计, 同时对全生育期高温天数进行统计。

利用自动气象观测站每 10min 一次的温度数据, 对试验期间高温日 (即满足日最高气温 ≥35℃) 日最高气温、气温 ≥35℃ 最早出现时间、气温 ≥35℃ 累积出现时长进行统计分析。

1.2.3 数据统计分析方法

对各播期水稻产量及其性状进行单因素方差分析, 对通过方差齐次性检验的因子采用 SNK 法进行多重比较, 方差不齐的采用 Dunnett's T3 进行多重比较。统计分析通过 SPSS Statistics 20 完成; 其余数据处理通过 Microsoft Excel 97-2003 和 Matlab R2014a 完成。

2 结果与分析

2.1 不同播期产量及其性状的差异分析

2.1.1 产量性状

由表 1 可见, 3 个播期水稻产量存在一定差异, 其中, No.1 产量最低, 不足 No.3 的 50%, 其次是 No.2, 约为 No.3 的 3/4, No.3 的产量最高。方差分析显示, No.1 与其两个播期间的产量差异达到显著性水平 ($P < 0.05$), No.2 与 No.3 产量差异不显著。分析 4 个产量性状可见, 3 个播期有效穗数基本一致, 播期间并无显著差异; No.2 与 No.3 结实率的差异不显著, 但 No.1 显著小于其它两个播期; 穗粒数和千粒重在 3 个播期间的差异均达到显著性水平 ($P < 0.05$), 其中 No.3 的穗粒数最大, No.1 最小, 而千粒重表现为 No.2 最大, No.1 最小。综合来看, No.1 由于结实率、千粒重和穗粒数均小于其它两个播期, 从而导致最终产量显著小于其它两个播期, 而 No.2 和 No.3 产量统计差异不显著, 这与千粒重和穗粒数这两个因子在播期间的变化规律相反有关。

表 1 不同播期水稻产量及其性状的比较 (平均值±均方差)

Table 1 Comparison of grain yields and yield components of rice under different sowing dates (mean±SD)

| 播期 SD | 结实率 SSR(%) | 千粒重 SW (g) | 有效穗数 EP (No. of panicle·m ⁻²) | 穗粒数 GP (grains·panicle ⁻¹) | 产量 Y (kg·hm ⁻²) |
|----------|---------------|---------------|--|---|--------------------------------|
| No. 1 | 83.06±5.94b | 22.83±1.57c | 294.1±44.5a | 103.2±10.0c | 5695.62±588.98b |
| No.2 | 90.91±1.63a | 26.89±0.22a | 264.5±17.8a | 141.4±16.9b | 9190.70±1657.23a |
| No.3 | 91.32±3.47a | 25.09±0.88b | 310.5±69.0a | 170.7±15.5a | 12015.20±2106.71a |

注: 同列小写字母表示处理间在 0.05 水平上的差异显著性。

Note: Lowercase indicates the difference significance among sowing dates at 0.05 level. SD is sowing date; SSR is seed setting rate; SW is 1000-grain weight; EP is number of effective panicle; GP is grain numbers per panicle; Y is yield.

2.1.2 产量贡献因子

根据生育期观测的水稻各器官干重的结果, 利用式 (1) 将各播期收获期穗干重按照“源”进行分解, 并以此来反映产量来源的贡献因子 (P_0 为抽穗末穗干重, ΔW 为灌浆期同化的干物质量, ΔT 为灌浆期茎和叶向穗转移的干物质量)。分别计算 3 个因子对产量的贡献量和贡献率, 结果见图 1。由图 1a 可见, 3 个产量贡献因子的贡献量均表现为 No.3 > No.2 > No.1, 其中, No.1 和 No.3 中 ΔW 贡献量的差异达到 3445.68kg·hm⁻², 远大于 No.1 和 No.2 之间的差异 1530.85kg·hm⁻² 和 No.2 与 No.3 播期间的 1914.83kg·hm⁻²; 3 个播期间 ΔT 贡献

量的差异相对 P_0 较大, 其中 No.1 最小, 与 No.2 与 No.3 分别相差 1848.18 和 1873.38kg·hm⁻²; P_0 是 3 个因子中播期间差异最小的, No.3 分别比 No.1 和 No.2 大 492.25 和 360.21kg·hm⁻², No.1 与 No.2 仅相差 132.04kg·hm⁻²。综合来看, 造成 No.1 和 No.3 及 No.2 和 No.3 播期产量差异最主要的因子是 ΔW , 分别占 No.1 和 No.3 及 No.2 和 No.3 产量差异的 59.29% 和 83.24%, 而造成 No.1 和 No.2 播期产量差异最主要的因子是 ΔT , 占产量差异的 52.64%。从图 1b 中 3 个因子的贡献率来看, 3 个播期对产量贡献率最小的均是 P_0 , 分别为 20.87%、14.75% 和 14.93%, No.1 和

No.3 对产量贡献率最大的是 ΔW ，分别占 40.52%和 49.52%，而对 No.2 中贡献率最大的为 ΔT ，占 43.62%。

由此可见，在 3 个产量贡献因子中， ΔW 是决定产量最主要的因子，其次是 ΔT ， P_0 相对最小。

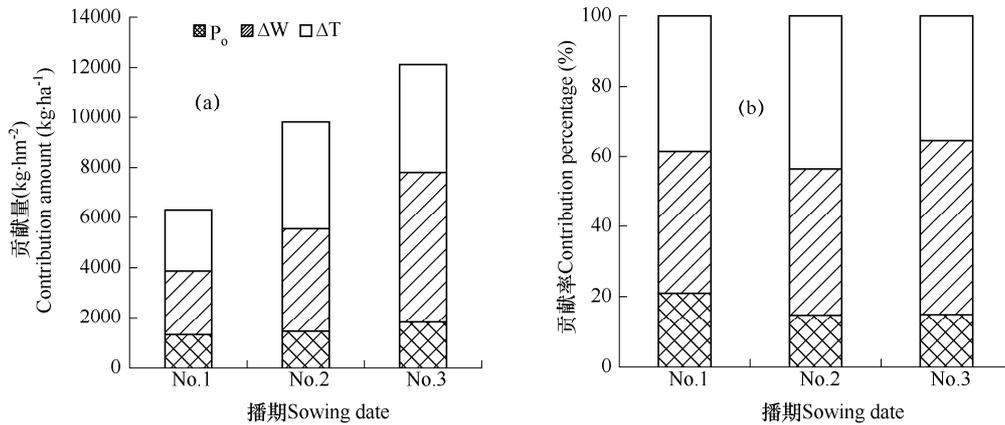


图 1 不同播期下 3 个产量贡献因子对水稻产量的贡献量 (a) 及其贡献率 (b)

Fig. 1 Amount (a) and percentage (b) of three yield contribution factors to yield under different sowing dates

注： P_0 表示抽穗末期的干重； ΔW 表示灌浆期同化的干物质量； ΔT 表示灌浆期茎和叶向穗转移的干物质量。三项之和表示成熟期穗的干重

Note: P_0 indicates the dry weight of panicle at end of heading stage; ΔW indicates the newly assimilated dry matter during the grain filling stage; ΔT indicates the dry matter transferred from stem and leaf to panicle during grain filling stage. The sum of these three factors is equal to the dry weight of panicle at maturity stage

2.1.3 灌浆期茎和叶向穗的干物质转运

产量贡献因子中茎和叶向穗的干物质转移部分 (ΔT) 是由茎转移量和叶转移量 (均来自茎和叶自身的干重而非光合产物) 共同完成的。3 个播期叶干物质对穗的输出量分别为 707.03、651.68、467.59 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，而茎的输出量分别为 1727.72、3631.26、3840.55 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。结合表 2 可知，3 个播期叶的干物质输出率 (DMER) 和转化率 (DMTR) 均小于茎，并且随着播期的推迟，叶的 DMER 和 DMTR 均逐渐减小，而茎的 DMER 逐渐增大，水稻茎、叶的 DMER 比值和 DMTR 比值也呈现增加的趋势，与产量变化一致，由此可见，在水稻产量形成过程中，茎干物质对

穗的输出贡献大于叶干物质，茎叶的且 DMER 和 DMTR 比值越大，产量相对越高，说明高温很可能通过抑制茎干物质的输出优势导致水稻减产。

2.1.4 收获指数

高温除影响茎和叶干物质的输出和转化外，还间接改变了地上部分干物质分配到籽粒的情况 (收获指数, HI)。由表 2 可见，随着播期的延后，收获指数逐渐增大。其中 No.1 的 HI 最小，No.3 最大，No.3 和 No.2 的 HI 分别比 No.1 提高 18.08%和 10.76%，说明相比 No.3 和 No.2，No.1 地上部分的干物质更多地转化为无效的秸秆。

表 2 不同播期水稻灌浆期茎、叶干物质输出率 (DMER) 和转化率 (DMTR) 及收获指数 (HI)

Table 2 Dry matter export rate (DMER), transformation rate (DMTR) of stem and leaf during grain filling stage and harvest index (HI) under different sowing dates

| 播期 Sowing date | 干物质输出率 DMER(%) | | | 干物质转化率 DMTR(%) | | | 收获指数 HI (%) |
|-------------------|----------------|--------|---------------|----------------|--------|---------------|----------------|
| | 叶 Leaf | 茎 Stem | 茎:叶 Stem:leaf | 叶 Leaf | 茎 Stem | 茎:叶 Stem:leaf | |
| No.1 | 15.62 | 20.92 | 1.34 | 11.21 | 27.39 | 2.44 | 28.84 |
| No.2 | 15.21 | 40.66 | 2.67 | 6.64 | 36.98 | 5.57 | 39.60 |
| No.3 | 11.25 | 44.20 | 3.93 | 3.86 | 31.69 | 8.21 | 46.92 |

Note: DMER is the dry matter export rate; DMTR is the dry matter transformation rate; HI is the harvest index.

2.2 不同播期水稻生育期内高温情况分析

2.2.1 水稻关键生育期高温情况比较

根据热害指标及热害等级的划分，统计水稻不同生育阶段的高温情况，结果见表3。从水稻的整个生育期来看，3个播期均出现35d高温，但各生育阶段高温情况表现不同。抽穗开花期3个播期高温发生天数分别为7d、2d和1d，按照热害标准仅No.1达到中度高温热害。从水稻高温敏感阶段（抽穗前

后各3d）来看，No.1出现1次重度高温热害，No.2出现1次中度高温热害，而No.3仅发生1d高温，未达到高温热害等级。由此可见，两种高温统计时段下，No.1发生高温天数均最多，随着播期延后，高温天数呈现减少的趋势，但界定高温危害时段的不同会造成3个播期遭遇热害等级判定的差异。从抽穗末至成熟期（灌浆期）来看，3个播期间高温天数的差异不大，且均未达到高温热害等级。

表 3 不同播期水稻遭遇高温天数及热害情况统计

Table 3 Statistical description of high temperature days and stress of rice under different sowing dates

| 生育时期 Growth stage | No.1 | | No.2 | | No.3 | |
|----------------------|-----------------|----------------------------------|-----------------|----------------------------------|-----------------|----------|
| | 高温天数 Day (d) | 热害等级 HDG | 高温天数 Day (d) | 热害等级 HDG | 高温天数 Day (d) | 热害等级 HDG |
| 抽穗开花期 SH-EH | 7 | 中度 1 次 (7d) One moderate (7d) | 2 | 无 None | 1 | 无 None |
| 抽穗末-成熟 EH-M | 2 | 无 None | 1 | 无 None | 0 | 无 None |
| 高温敏感阶段 HTSP | 11 | 重度 1 次 (11d) One severe (11d) | 5 | 中度 1 次 (5d) One moderate (5d) | 1 | 无 None |
| 全生育阶段 WDP | 35 | - | 35 | - | 35 | - |

Note: Day is high temperature days ($T_{max} \geq 35^\circ\text{C}$); HDG is heat damage grade (including the frequency and severity); SH-EH is the phase from start of heading to end of heading; EH-M is the phase from end of heading to maturity(or grain filling stage); HTSP is high temperature sensitive phase of rice (3 days before start of heading to 3 days after end of heading); WDP is the whole development phase of rice.

2.2.2 高温发生特点分析

水稻高温危害程度与高温强度、高温出现时间和持续时长有关。由图2a可见，2013年试验期间高温日

（日最高气温 $\geq 35^\circ\text{C}$ ）日最高气温与气温 $\geq 35^\circ\text{C}$ 最早出现时间之间具有很好的线性负相关关系，即高温日日最高气温越高，当日气温 $\geq 35^\circ\text{C}$ 出现时间相对

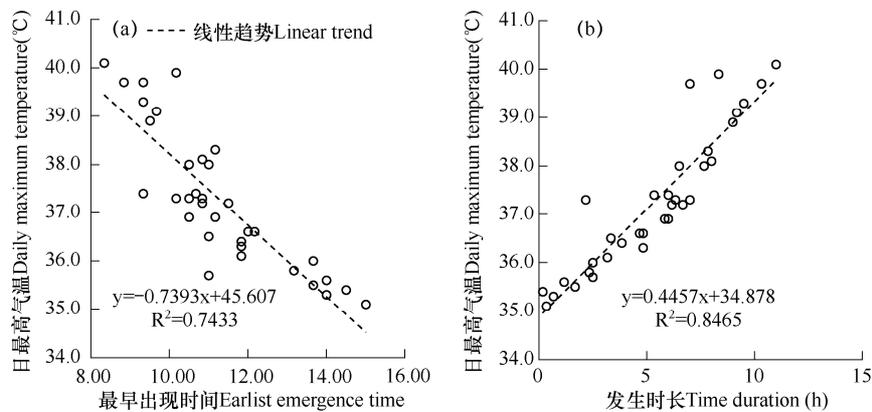


图 2 2013 年试验期间高温日 ($T_{max} \geq 35^\circ\text{C}$) 日最高气温与当日气温达到 35°C 最早出现时间 (a) 和日最高气温 $\geq 35^\circ\text{C}$ 累积时长 (b) 之间的关系

Fig. 2 Relationship between daily maximum temperature and the earliest emergence time of temperature of 35°C (a) and time duration of temperature no less than 35°C (b) in high temperature days($T_{max} \geq 35^\circ\text{C}$) during the tests in 2013

越早；由图 2b 可见，高温日日最高气温与当日气温 $\geq 35^{\circ}\text{C}$ 累积时长之间也符合很好的线性相关关系，表现为日最高气温越高，当日气温 $\geq 35^{\circ}\text{C}$ 累积出现时间越长。可见，2013 年高温日具有日最高气温越高，气温 $\geq 35^{\circ}\text{C}$ 出现时间相对越早，且气温 $\geq 35^{\circ}\text{C}$ 累积时间越长的特点。一般来说，水稻在 8:00–10:00 开花，10:00–12:00 为开花盛期，15:00 之后开花数量很少^[36]，因此，高温日这些特点的同时出现会加剧高温对水稻颖花开放的不利影响，加重危害。以 No.2 和 No.3 为例，No.2 抽穗开花期内两个高温日（8 月 17 日和 8 月 18 日）日最高气温分别为 38.0°C 和 36.9°C ，气温 $\geq 35^{\circ}\text{C}$ 最早出现时间为 11:00 和 10:30，持续时长为 7.7h 和 5.8h，而 No.3 抽穗开花期内高温日（8 月 28 日）日最高气温为 35.6°C ， $\geq 35^{\circ}\text{C}$ 最早出现时间为 14:00，持续时长仅为 1.2h，从 3 个高温日高温发生特点的比较可以推断，高温发生特点的不同也可能是造成 No.2 和 No.3 产量差异的一个原因。

3 结论与讨论

3.1 结论

在本试验设定的 3 个播期下，随着播期的推迟，水稻产量呈现增加的趋势，其中 No.1 与其它两个播期产量差异达到显著性水平，结合 3 个播期遭遇的高温情况，抽穗开花期高温是造成产量差异最主要的原因，而通过将播期延后至 5 月中下旬可以使高温敏感期避开高温，起到缓解甚至避免高温危害的作用。此外，抽穗开花期高温强度、高温出现时间的早晚和持续时间的长短也会造成播期间产量的差异，对于水稻抽穗开花期来说，仅以天为尺度衡量高温的危害很可能会造成低估。

在产量性状方面，播期主要影响千粒重和穗粒数，3 个播期间差异均达到显著性水平，而对于结实率，No.1 与其它两个播期间的差异显著。根据杨宏远等^[37]指出水稻理论上可以达到的最大产量（籽粒“库”容）主要由穗粒数和有效穗数决定。3 个播期有效穗差异不显著，但穗粒数随着播期的推迟逐渐增加，由此可见，高温影响穗粒数导致籽粒“库”容减小可能是造成减产的原因之一。

从产量贡献因子来看，高温敏感阶段出现高温，尤其是抽穗开花期的高温会降低 3 个产量因子的贡献量，从而降低产量；3 个因子中，灌浆期同化的干物质质量 (ΔW) 是决定产量最主要的因子，也是 No.1

和 No.3 对产量贡献率最大的因子，但对 No.2 贡献率最大的是灌浆期茎和叶向穗转移的干物质质量 (ΔT)；在灌浆期茎、叶干物质转化为籽粒的方面，叶的干物质输出率 (DMER) 和转化率 (DMTR) 均表现为随着播期的推迟逐渐减小，而茎的 DMER 表现出相反的趋势，但 3 个播期在干物质的输出和转化方面均表现为茎的优势大于叶。

综上所述，水稻受高温危害的程度不仅与高温强度、持续时间、出现特点等有关，也取决于高温是否出现在水稻的高温敏感阶段，而播期的调整通过改变高温与水稻生育阶段的配置起到缓解高温危害的作用，这也是造成三个播期最终产量和收获指数 (HI) 差异的原因。

3.2 讨论

当前，全球增温已毋庸置疑，随着高温热害对水稻影响的加剧，相关的研究也不断见诸报道。但纵观当前普遍采用的人工控温试验，虽然对水稻关键生育期内白天高温进行了很好的模拟和研究^[6,8,18]，但在对试验的设置上往往忽视了气象因子间的连续性及交互性。据 Coast 等^[38]指出，在实际全球增温情况下，水稻生育期内相对昼温的升高，夜间升温更明显。而夜温升高到一定数值时同样会对水稻开花特性、花粉萌发、结实率、产量相关参数等造成影响^[38-40]。此外，全球增温造成的相对湿度的变化也会影响高温对水稻的危害程度^[41-42]。由此可见，全球增温趋势下高温对水稻造成的影响是多种因素综合作用的结果，采用人工控制试验虽然在一定程度上可以反应高温对水稻的影响，但以此衡量全球增温趋势下水稻的发展情况则与实际有较大不同，所得结论在指导自然条件下实际大田生产上效果往往不好。本试验在 2013 年自然高温条件下，采用分期播种开展水稻不同生育阶段高温的试验研究，得出自然状况下，不同生育阶段高温对水稻产量的影响，同时验证了播期调整在缓解水稻高温热害，保证水稻产量稳定方面的可行性。当然，本文仍存在试验品种单一、试验时间不长等不足，还不能得到更多的普遍结论。因此，今后研究拟依据对高温的准确预报，开展自然条件下水稻高温热害的相关试验，扩展试验范围，包括水稻品种、播期及处理等，并进一步加强对水稻产量来源、结构、性状等的分析验证。

参考文献 References

- [1] 苏广达. 作物学[M]. 广州: 广东高等教育出版社, 2000: 72.
Su G D. Crop science[M]. Guangzhou: Guangdong Higher Education Press, 2000: 72. (in Chinese)
- [2] 殷剑敏, 孔萍, 李迎春. 我国南方早稻洪涝灾害指标试验研究[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(4): 1-5.
Yin J M, Kong P, Li Y C. Experimental research on flood disaster indicators of early rice in southern China[J]. Journal of Natural Disasters, 2009, 18(4): 1-5. (in Chinese)
- [3] 韩荣青, 陈丽娟, 李维, 等. 2-5 月我国低温连阴雨和南方冷害时空特征[J]. 应用气象学报, 2009, 20(3): 312-320.
Han R Q, Chen L J, Li W J, et al. The spatial temporal characteristics of china continuous cold rainy weather and south cold damage from February to May[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2009, 20(3): 312-320. (in Chinese)
- [4] 谢晓金, 李秉柏, 王琳, 等. 长江中下游地区高温时空分布及水稻花期的避害对策[J]. 中国农业气象, 2010, 31(1): 144-150.
Xie X J, Li B B, Wang L, et al. Spatial and temporal distribution of high temperature and strategies to rice florescence harm in the lower-middle reaches of Yangtze river[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2010, 31(1): 144-150. (in Chinese)
- [5] 沈永平, 王国亚. IPCC 第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点[J]. 冰川冻土, 2013, 35(5): 1068-1076.
Shen Y P, Wang G Y. Key findings and assessment results of IPCC WGI fifth assessment report[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(5): 1069-1076. (in Chinese)
- [6] 骆宗强, 石春林, 江敏, 等. 孕穗期高温对水稻物质分配及产量结构的影响[J]. 中国农业气象, 2016, 37(3): 326-334.
Luo Z Q, Shi C L, Jiang M, et al. Effect of high temperature on rice dry matter partition and yield component during booting stage[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2016, 37(3): 326-334. (in Chinese)
- [7] 郑建初, 张彬, 陈留根, 等. 抽穗期高温对水稻产量构成要素和稻米品质的影响及其基因型差异[J]. 江苏农业学报, 2005, 21(4): 249-254.
Zheng J C, Zhang B, Chen L G, et al. Genotypic differences in effects of high air temperature in field on rice yield components and grain quality during heading stage[J]. Jiangsu J. of Agr. Sci., 2005, 21(4): 249-254. (in Chinese)
- [8] 谢晓金, 李秉柏, 朱红霞, 等. 抽穗期高温对水稻叶片光合特性和干物质积累的影响[J]. 中国农业气象, 2012, 33(3): 457-461.
Xie X J, Li B B, Zhu H X, et al. Impact of high temperature at heading stage on rice photosynthetic characteristic and dry matter accumulation[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2012, 33(3): 457-461. (in Chinese)
- [9] 丁四兵, 朱碧岩, 吴冬云, 等. 温光对水稻抽穗后剑叶衰老和籽粒灌浆的影响[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2004, 1: 117-121, 128.
Ding S B, Zhu B Y, Wu D Y, et al. Effect of temperature and light on senescence of flag leaf and grain-filling after rice heading[J]. Journal of South China Normal University (Natural Science Edition), 2004, 1: 117-121, 128. (in Chinese)
- [10] 许轲, 孙圳, 霍中洋, 等. 播期、品种类型对水稻产量、生育期及温光利用的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(20): 4222-4233.
Xu K, Sun Z, Huo Z Y, et al. Effects of seeding date and variety type on yield, growth stage and utilization of temperature and sunshine in rice[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(20): 4222-4233. (in Chinese)
- [11] 赵庆勇, 朱镇, 张亚东. 播期和地点对不同生态类型粳稻稻米品质性状的影响[J]. 中国水稻科学, 2013, 27(3): 297-304.
Zhao Q Y, Zhu Z, Zhang Y D, et al. Effects of sowing date and site on grain quality of rice cultivars planted in different ecological types[J]. Chinese J Rice Sci, 2013, 27(3): 297-304. (in Chinese)
- [12] 张凯, 李巧珍, 王润元, 等. 播期对春小麦生长发育及产量的影响[J]. 生态学杂志, 2012, 31(2): 324-331.
Zhang K, Li Q Z, Wang R Y, et al. Effects of sowing date on the growth and yield of spring wheat[J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(2): 324-331. (in Chinese)
- [13] 明博, 朱金城, 陶洪斌, 等. 黑龙江流域玉米不同生育阶段气象因子对产量性状的影响[J]. 作物学报, 2013, 39(5): 919-927.
Ming B, Zhu J C, Tao H B, et al. Effects of meteorological factors at different growth stages on yield traits of maize (*Zea mays* L.) in Heilonggang basin[J]. Acta Agronomica Sinica, 2013, 39(5): 919-927. (in Chinese)
- [14] 刘明, 陶洪斌, 王璞, 等. 播期对春玉米生长发育与产量形成的影响[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(1): 18-23.
Liu M, Tao H B, Wang P, et al. Effect of sowing date on growth and yield of spring-maize[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2009, 17(1): 18-23. (in Chinese)

- [15]李健陵,张晓艳,杜尧东,等.高温对抽穗开花期至灌浆结实期水稻库源特性的影响[J].中国农业气象,2013,34(1):23-29.
Li J L,Zhang X Y,Du Y D,et al.Effects of high temperature on rice source-sink characteristics during heading stage to grain filling stage[J].Chinese Journal of Agrometeorology,2013,34(1):23-29.(in Chinese)
- [16]Lu G H,Wu Y F,Bai W B,et al.Influence of high temperature stress on net photosynthesis, dry matter partitioning and rice grain yield at flowering and grain filling stage[J].Journal of Integrative Agriculture,2013,12(4):603-609.
- [17]梁成刚,张青,李敬,等.水稻灌浆期高温对天冬氨酸代谢活性及其家族氨基酸含量的影响[J].中国水稻科学,2013,27(1):71-76.
Liang C G,Zhang Q,Li J,et al.Effect of high temperature on aspartate metabolism enzyme activities and aspartate-family amino acids contents at rice grain-filling stage[J].Chinese J Rice Sci,2013,27(1):71-76.(in Chinese)
- [18]石春林,金之庆,郑建初,等.减数分裂期高温对水稻颖花结实率影响的定量分析[J].作物学报,2008,34(4):627-631.
Shi C L,Jin Z Q,Zheng J C,et al.Quantitative analysis on the effects of high temperature at meiosis stage on seed-setting rate of rice florets[J].Acta Agronomica Sinica,2008,34(4):627-631.(in Chinese)
- [19]李贤勇,李顺武,何永歆,等.穗层自然高温对杂交水稻结实的影响[J].西南农业学报,2008,21(1):44-47.
Li X Y,Li S W,He Y X,et al.Effects of spikelets layer natural high temperature on seed setting of hybrid rice[J].Southwest China Journal of Agricultural Sciences,2008,21(1):44-47.(in Chinese)
- [20]顾忠良,顾品强.上海地区高温期间中稻穗部温度分布特征及对空壳率的影响[J].气象科技,2015,43(6):1181-1185.
Gu Z L,Gu P Q.Distribution characteristics of panicle temperature of middle-season rice during high temperature period in Shanghai and effect on unfilled grain percentages[J].Meteorological Science and Technology,2015,43(6):1181-1185.(in Chinese)
- [21]王丰,张国平,白朴.水稻源库关系评价体系研究进展与展望[J].中国水稻科学,2005,19(6):556-560.
Wang F,Zhang G P,Bai P.Achievement and prospects of research on evaluation of the relationship between source and sink in rice[J].Chinese J Rice Sci,2005,19(6):556-560.(in Chinese)
- [22]孟亚利,曹卫星,柳新伟,等.水稻地上部干物质分配动态模拟的初步研究[J].作物学报,2004,30(4):376-381.
Meng Y L,Cao W X,Liu X W,et al.A preliminary study of simulation on shoot dry matter partitioning in rice[J].Acta Agronomica Sinica,2004,30(4):376-381.(in Chinese)
- [23]李杰,张洪程,常勇,等.不同种植方式水稻高产栽培条件下的光合物质生产特征研究[J].作物学报,2011,37(7):1235-1248.
Li J,Zhang H C,Chang Y,et al.Characteristics of photosynthesis and matter production of rice with different planting methods under high-yielding cultivation condition[J].Acta Agronomica Sinica,2011,37(7):1235-1248.(in Chinese)
- [24]李义珍,黄育民,庄占龙,等.杂交稻高产群体干物质积累和运转 II.碳水化合物的积累转运[J].福建省农科院学报,1996,11(2):1-6.
Li Y Z,Huang Y M,Zhang Z L,et al.Storage carbohydrate accumulation and transportation pattern of high yielding colony of hybrid rice[J].Journal of Fujian Academy of Agricultural Sciences,1996,11(2):1-6.(in Chinese)
- [25]段宏章.水稻开花后干物质的累积和转运[J].植物学报 1956,5(2):177-194.
Duan H Z.Accumulation and redistribution of dry matter in rice after flowering[J].Chinese Bulletin of Botany,1956,5(2):177-194.(in Chinese)
- [26]Katsura K,Maeda S,Horie T,et al.Analysis of yield attributes and crop physiological traits of Liangyoupeijiu,a hybrid rice recently bred in China[J].Field Crops Research,2007,103:170-177.
- [27]刘奇华,孙召文,信彩云,等.孕穗期施硅对高温下扬花灌浆期水稻干物质转运及产量的影响[J].核农学报,2016,30(9):1833-1839.
Liu Q H,Sun Z W,Xin C Y,et al.Effects of silicon on dry matter remobilization, distribution and grain yield of rice under high air temperature[J].Journal of Nuclear Agricultural Science,2016,30(9):1833-1839.(in Chinese)
- [28]Donald C M.In Search of Yield[J].JAus Agri Sci,1962,28:171-179.
- [29]高素华,王培娟,万素琴,等.长江中下游高温热害及对水稻的影响[M].气象出版社,2009:140.
Gao S H,Wang P J,Wan S Q,et al.High temperature damage and effects on Rice in middle and lower reaches of Yangtze River[M].Benjing:China Meteorological Press,2009:140.(in Chinese)

- Chinese)
- [30]曹云英,段骅,杨立年,等.减数分裂期高温胁迫对耐热性不同水稻品种产量的影响及其生理原因[J].作物学报,2008,34(12):2134-2142.
Cao Y Y,Duan H,Yang L N,et al.Effect of heat-stress during meiosis on grain yield of rice cultivars differing in heat-tolerance and its physiological mechanism[J].Acta Agronomica Sinica,2008,34(12):2134-2142.(in Chinese)
- [31]Tian X,Matsui T,Li S,et al.Heat-induced floret sterility of hybrid rice(*Oryza sativa* L.)cultivars under humid and low wind conditions in the field of Jiangnan Basin[J],China.Plant Production Science,2010,13(3):243-251.
- [32] Kobata T,Uemuki N,Inamura T,et al.Shortage of assimilate supply to grain increases the proportion of milky white rice kernels under high temperatures[J].Japanese Journal of Crop Science,2004,73(3):315-322.
- [33]吕厚荃.中国主要农区重大农业气象灾害演变及其影响评估[M].北京:气象出版社,2011:181.
Lv H Q.Evolution and impact assessment of major agrometeorological disasters in main agricultural areas of China[M].Beijing:China Meteorological Press,2011:181.(in Chinese)
- [34]王春乙,赵艳霞,张雪芬.农业气象灾害影响评估与风险评估[M].北京:气象出版社,2010:222.
Wang C Y,Zhao Y X,Zhang X F.Impact assessment and risk evaluation of agrometeorological disasters[M].Beijing:China Meteorological Press,2010:222.(in Chinese)
- [35]田小海,松井勤,李守华,等.水稻花期高温胁迫研究进展与展望[J].应用生态学报,2007,18(11):2632-2636.
Tian X H,Song J Q,Li S H,et al.High temperature stress on rice anthesis:research progress and prospects[J].Chinese Journal of Applied Ecology,2007,18(11):2632-2636.(in Chinese)
- [36]霍治国,王石立,郭建平,等.农业和生物气象灾害[M].北京:气象出版社,2009:73.
Huo G Z,Wang S L,Guo J P,et al.Meteorological disasters of agriculture and boilogy[M].Beijing:China Meteorological Press,2009:75.(in Chinese)
- [37]杨弘远.水稻生殖生物学[M].杭州:浙江大学出版社,2005:159.
Yang H Y.Reproductive biology of rice[M].Hangzhou: Zhejiang University Press,2005:159.(in Chinese)
- [38]Coast O,Ellis R H,Murdoch A J,et al.High night temperature induces contrasting responses for spikelet fertility,spikelet tissue temperature,flowering characteristics and grain quality in rice[J].Functional Plant Biology,2014,42(2):149-161.
- [39]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.
- [40]Mohammed A R,Tarpley L.Effects of high night temperature and spikelet position on yield-related parameters of rice (*Oryza sativa* L.) plants[J].Europ. J. Agronomy,2010,33: 117-123.
- [41]Jung W S,Lee K J,Lee B W.Responses of spikelet fertility to air,spikelet,and panicle temperatures and vapor pressure deficit in rice[J].J.Crop Sci.Biotech.2015,18(4):209-218.
- [42]Weerakoon W M W,Maruyama A,Ohba K.Impact of Humidity on Temperature-Induced Grain Sterility in Rice (*Oryza sativa* L.)[J].J.Agronomy & Crop Science,2008, 194:135-140.