

doi:10.3969/j.issn.1000-6362.2016.03.008

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

孕穗期高温对水稻物质分配及产量结构的影响^{*}

骆宗强^{1,2}, 石春林^{2**}, 江敏^{1**}, 刘杨², 宣守丽², 金之庆²

(1.福建农林大学作物学院,福州 350002; 2.江苏省农业科学院农业经济与信息研究所,南京 210014)

摘要: 为探讨孕穗期高温对水稻物质分配及产量结构的影响,以南粳 45 与两优培九为供试品种,于孕穗期设置不同高温强度和不同持续天数处理,分析水稻光合速率、物质分配及产量结构等对不同强度和持续时间高温胁迫的响应特征。结果表明,孕穗期高温处理后,水稻光合速率和产量均出现不同程度的降低,且温度越高、持续时间越长,降低幅度越大。与 CK 相比,41℃高温处理 7d 时,两优培九、南粳 45 光合速率降幅分别为 44.6%、28.8%;减产率分别为 81.6%、87.7%。高温导致颖花结实率降低、颖花量减少,光合物质向穗部运移不畅,进而导致水稻经济系数降低。41℃高温处理 6d 时,两优培九和南粳 45 茎秆占植株生物量的比重均超过 70%。高温处理后水稻穗粒数、结实率和千粒重均呈减少趋势,其降低幅度与高温强度、持续时间有关。在 41℃高温处理 7d 时,两优培九穗粒数减少 41.9%,结实率降低 93.5%,千粒重降低 25.3%;南粳 45 穗粒数减少 50.1%,结实率降低 79.6%,千粒重降低 23.7%。由此可见,孕穗期高温对水稻产量构成要素中结实率影响最大,穗粒数次之,千粒重受其影响最小。

关键词: 水稻; 孕穗期; 高温; 物质分配; 产量结构

Effect of High Temperature on Rice Dry Matter Partition and Yield Component during Booting Stage

LUO Zong-qiang^{1,2}, SHI Chun-lin², JIANG Min¹, LIU Yang², XUAN Shou-li², JIN Zhi-qing²

(1. College of Crop Sciences, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2. Institute of Agricultural Economy and Information, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014)

Abstract: In order to explore the influence of dry matter partition and yield component to high temperature, a control experiment with different temperature levels and durations was conducted at booting stage with hybrid rice Liangyoupeijiu and conventional rice Nanjing45. The results showed that photosynthetic rate, harvest index and yield decreased with the increase of high temperature lever and duration. Compared with CK, the photosynthetic rate and yield of Liangyoupeijiu and Nanjing45 declined 44.6%, 81.6% and 28.8%, 87.7% respectively under high temperature treatment at 41℃ for 7 days. High temperature led to the decrease of seed-setting rate and the amount of spikelet, and hindered the movement of the photosynthetic material to the panicle, so the harvest index would be reduced. The stem biomass exceeded 70% of the total plant for Liangyoupeijiu and Nanjing45 under high temperature treatment at 41℃ for 6 days. High temperature resulted in the decrease of grain number per panicle, seed-setting rate and 1000-grain weight and the reducing extent related to high temperature strength and duration. Under heat treatment at 41℃ for 7 days, the grain number per panicle, seed-setting rate and 1000-grain weight of Liangyoupeijiu and Nanjing45 declined 41.9%, 93.5%, 25.3% and 50.1%, 79.6%, 23.7%, respectively. So the most sensitive factor to high temperature was seed-setting rate, and then grain number per panicle, 1000-grain weight.

Key words: Rice; Booting stage; High temperature; Dry matter partition; Yield component

* 收稿日期: 2015-10-23

** 通讯作者。E-mail: shicl@jaas.ac.cn; fjaujm@163.com

基金项目: 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306035); 江苏省农业科技自主创新基金项目[CX(14)2113]; 福建省自然科学基金(2014J01091)

作者简介: 骆宗强(1991-), 硕士生, 主要从事农业气象研究。E-mail: Luozongqiang@163.com

水稻是中国主要粮食作物之一，常年种植面积和总产量占粮食作物的27%和43%左右^[1]。水稻起源于低纬度的热带地区，形成了适应高温环境的特性，但如遇日均气温高于32℃，日最高气温高于35℃的天气情况，仍将导致水稻高温热害^[2]。2013年7月下旬-8月上旬江淮稻区出现异常持续高温，给水稻产量造成极大损失^[3-4]。

以往研究表明，水稻高温热害的敏感期主要是抽穗扬花期和孕穗期^[5-6]。国内外学者对抽穗开花期的高温影响机理、高温败育定量影响等进行了广泛研究^[6-13]，而对孕穗期高温的影响研究相对较少。曹云英等^[14-15]通过对不同耐热型籼稻品种的高温处理试验，分析了高温对水稻产量构成要素的影响及其生理机制。石春林等^[15-16]构建了减数分裂期高温对颖花结实率的定量影响模型。岳伟等^[17-19]通过播期试验研究表明，孕穗期高温对结实率、千粒重的主要影响因子是高温强度和高温持续时间。目前的研究报道中，对不同强度和不同持续时间高温的影响相对较少。本研究以两个不同类型的水稻品种为供试材料，于孕穗期利用人工气候箱设置不同强度和持续时间的高温处理，分析其对水稻叶片光合速率、经济系数及产量构成的影响，旨在为进一步的量化孕穗期高温对水稻产量构成要素的定量影响提供基础，为水稻生产及高温热害灾损评估提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于2014-2015年在江苏省农业科学院试验地进行。供试品种为两系籼型杂交稻两优培九和迟熟中粳稻南粳45。两年试验的播种和移栽时间一致，均于5月14日播种，6月12日移栽至塑料钵中，塑料钵高21cm，直径23cm，每钵中装入6.5kg常规水稻土，移栽时每钵施4g复合肥作基肥，其N、P、K含量均为15%。移栽时选取长势一致的秧苗，籼稻每钵2穴，粳稻每钵3穴，每穴单株苗，每个品种移栽50钵，共100钵。移栽7d后每钵施0.52g尿素（分蘖肥），倒4叶期施0.52g尿素（穗肥）。其它管理措施按南京地区水稻高产栽培方案进行。

本研究利用人工气候箱进行高温处理试验（2台RXZ500型、2台RXZ1000型智能多段编程人工气候箱）。试验设置3个温度梯度（35、38和41℃），2014年设置4个高温持续天数（1、3、5、7d），2015年3个高温持续天数（1、3、6d）。通过光学显微镜观测，当水稻幼穗分化时即判定为进入孕穗期，选取长势一致的植株放入气候箱进行高温处理，其中

2014年两优培九、南粳45的开始处理时间分别为8月5、9日；2015年两优培九、南粳45的处理时间分别为8月6、11日，每日高温处理5h，10:00将处理放入对应的气候箱中，湿度均设置为85%，光照均设置为H₁，即100%lx，15:00将其取出，每个处理2钵，以自然环境为对照。高温处理期内，自然环境平均最高温度分别为31.2℃（2014年）、31.7℃（2015年），无大于35℃的高温胁迫。

1.2 项目测定

1.2.1 光合速率测定

2014年高温处理结束第2日9:00-11:00，利用LICOR6400光合仪进行剑叶的光合速率测定。测定时设定测试光强为1000lx，测量面积设置为2cm×3cm，每个处理重复4次。

1.2.2 考种

2014年两优培九、南粳45的成熟时间分别为10月8日和17日；2015年的成熟时间分别为10月8日和18日，于水稻成熟期分别测定各处理及对照的产量、穗数、穗粒数、结实率（实粒数/总粒数×100%）、千粒重（g）、经济系数（经济产量与生物学产量之比）等指标。试验所有数据采用Excel2003和SPSS Statistics17.0软件进行统计分析。

1.2.3 植株茎叶考苗

水稻成熟期将水稻茎叶一同取回考苗，其中2015年为了测定孕穗期高温对物质分配的影响，在收获时将水稻茎、叶分开进行考苗。

2 结果与分析

2.1 孕穗期高温对水稻叶片光合速率的影响

孕穗期不同强度和持续时间高温对叶片光合速率的影响如表1。由表可见，与CK相比，2014年孕穗期不同程度高温处理结束后，水稻叶片的光合速率均出现不同程度的降低，同一高温处理下，7d处理的光合速率降低幅度显著大于3d、1d处理，表明孕穗期高温持续时间越长，光合速率降低幅度越大。当高温处理7d时，两优培九41℃处理的光合速率降幅（44.6%）大于35℃（20.8%）和38℃处理（21.5%）；南粳45也呈现类似规律，说明孕穗期高温导致水稻光合速率下降，且处理温度越高，光合速率降幅越大。高温对水稻光合速率的影响与高温强度、高温持续天数有关，且温度越高，持续时间越长，水稻光合速率降低幅度越大。在相同高温条件下两品种的降低幅度略有区别。具体来看，在正常（CK）条件下，两优培九（籼型杂交稻）的叶片光合速率小于南粳45（迟熟中粳稻）。从不同程度高温处理后叶

片光合速率比 CK 减少的百分率具体数值看,两优培九在 35℃ 和 38℃ 高温处理 1d 和 3d 后光合速率下降百分比均比南粳 45 小,说明此高温条件和持续时间对两优培九的影响不大,当高温处理超过 5d 以后,光合速率下降幅度明显加大,与南粳 45 的下降水平

相当。当温度达到 41℃ 并持续 7d 时,两优培九光合速率下降率达到最大 (44.6%),明显高于南粳 45 在同等条件下的下降百分比 (28.8%),此时两优培九耐受力低于南粳 45。说明水稻光合速率对高温的响应差异不仅与温度有关,与水稻品种也有关。

表 1 2014 年不同处理水稻叶片光合速率 (Pn) 的比较

Table 1 Comparison of photosynthetic rate(Pn) on rice leave among different treatments in 2014

处理 Treatment		两优培九 Liangyoupei jiu		南粳 45Nan jing45	
温度 T (℃)	持续天数 DT(d)	Pn ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	比 CK 减少 Decrease rate to CK(%)	Pn ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	比 CK 减少 Decrease rate to CK(%)
CK		20.55±2.85a	0.00	23.45±1.09a	0.00
35	1	19.68±0.46ab	4.23	20.63±0.86b	12.03
	3	18.63±0.39b	9.34	19.25±0.95b	17.91
	5	17.00±0.85c	17.27	19.03±2.80b	18.85
	7	16.28±1.02c	20.78	18.83±1.32b	19.70
38	1	18.15±0.58bc	11.68	19.85±1.54b	15.35
	3	17.23±0.76c	16.16	18.65±1.85b	20.47
	5	16.55±0.87c	19.46	18.65±1.05bc	20.47
	7	16.13±0.55c	21.51	17.58±0.66c	25.03
41	1	15.30±1.21c	25.55	18.50±0.55bc	21.11
	3	13.25±1.17d	35.52	18.40±0.49bc	21.54
	5	12.78±1.11de	37.81	17.90±0.36bc	23.67
	7	11.38±0.54e	44.62	16.70±0.50c	28.78

注: 同列小写字母表示处理间在 0.05 水平上的差异显著性。下同。

Note: Lowercase indicates the difference significance among treatments at 0.05 level. T is temperature, DT is duration of high temperature. The same as below.

2.2 孕穗期高温对水稻植株物质分配的影响

孕穗期高温对水稻植株物质分配的影响如表 2 和表 3。由表可见, 高温处理后两优培九和南粳 45 的单株生物量均出现不同程度的降低。35℃、38℃ 处理时, 随着高温持续时间的延长, 水稻单株生物量逐渐减小; 且同一持续时间下, 38℃ 处理的单株生物量均小于 35℃ 处理; 而在 41℃ 中, 处理持续天数较长时, 水稻单株生物量反而比 38℃ 处理时略大, 表明水稻植株物质积累量受孕穗期高温的影响, 在一定温度范围内, 随着温度升高、持续时间的延长, 水稻光合物质积累量越少。这与植株的光合速率降低密切相关, 高温胁迫越强, 水稻光合速率降低幅度越大, 光合作用所合成的物质越少; 而温度高, 一定程度上导致水稻植株本身的呼吸作用增强, 消耗的光合物质增加, 造成水稻物质积累量越少。但 41℃3d 与 41℃6d 处理时水稻物质积累量却比 38℃3d、38℃6d 处理时的稍大, 其原因可能是, 41℃ 处理时颖花退化量急增、结实率锐减, 导致水稻的“库”急剧减小, 光合物质向穗部运输过程受到阻碍,

只能积累在茎叶中, 在后期生长环境适宜时, 伸长节间和高位叶位会形成新的分蘖, 而这些新分蘖的光合能力相对较强, 后期合成光合物质增多, 导致水稻植株物质积累总量增加。与 CK 相比, 在 35℃ 1d 处理时, 两优培九和南粳 45 的物质积累总量降幅分别为 8.1%、17.0%, 而当温度为 38℃ 并持续 6d 时, 两优培九物质积累总量降幅达 20.7%, 明显低于南粳 45 在同等条件下的下降幅度 (31.4%), 表明孕穗期高温对南粳 45 的物质积累总量的影响大于两优培九。

高温导致水稻植株物质积累总量减少的同时, 植株的物质分配过程受到相应程度影响, 且南粳 45 与两优培九物质分配过程受高温影响的差异不大。由表 2、表 3 可见, 孕穗期高温导致穗占植株的比重均出现不同程度降低, 高温胁迫越强, 穗占植株的比重越小, 主要原因是高温胁迫导致水稻产量降低, 穗重降低, 穗占植株的比重减小。孕穗期高温胁迫导致茎占植株的比重增大, 41℃6d 处理时, 两个水稻品种的茎占植株的比重均超过 70%, 其中两优培九为 73.3%, 南粳 45 为 73.7%, 均显著高于对照 (两

优培九的 CK 为 38.5%、南粳 45 的 CK 为 36.5%)，且温度越高，持续时间越长，茎所占比重越大。叶占植株的比重受高温的影响较小，35℃、38℃处理时，不同持续天数的高温处理下，叶所占比重与对照(两优培九的 CK 为 12.2%、南粳 45 的 CK 为 14.4%)无显著差异，当处理温度为 41℃并持续 6d 时两优培九与南粳 45 叶占植株的比重分别为 17.0%、17.6%，

比其它处理略有增大，其原因可能是孕穗期高温导致水稻结实率降低，水稻生长后期叶片光合作用合成的物质主要在茎部积累，导致茎所占植株的比重增大；而 41℃处理下叶占植株比重增大，可能由于水稻生长后期形成新的分蘖长出新叶片，叶片数增加，叶片的生物量增加，而 41℃处理时植株总生物量减少，导致叶片占植株的比重增大。

表 2 2015 年不同处理两优培九物质分配的比较

Table 2 Comparison of dry matter distribution of Liangyoupeijiu among different treatments in 2015

处理 Treatment		总生物量	茎占比重	叶占比重	穗占比重
温度 T(℃)	持续天数 DT(d)	TB(g·hill ⁻¹)	STB(%)	LB(%)	SPB(%)
35	CK	108.88±8.90a	38.54±1.31e	12.24±0.80c	49.32±0.61a
	1	100.20±2.00a	39.53±1.50e	12.44±1.60c	48.01±2.21a
	3	98.83±7.99	41.72±3.60de	12.65±1.01c	45.73±2.15ab
	6	92.49±10.51a	44.64±0.41d	13.25±0.63c	42.23±0.65b
	1	98.52±8.27a	42.13±5.10de	12.12±1.90c	45.81±4.50ab
	3	90.42±8.27a	42.72±2.43de	14.21±0.70bc	43.12±2.14b
	6	86.38±7.88a	49.45±2.79c	14.03±1.03bc	36.58±2.12c
	1	93.42±11.82a	49.89±2.80c	15.12±0.19b	35.00±2.93c
	3	96.24±8.94a	56.81±5.73b	14.59±0.68bc	28.60±6.12d
	6	96.36±5.51a	73.31±2.70a	17.01±1.59a	9.74±1.45e

Note: TB is total biomass, STB is stem proportion of the total biomass, LB is leaf proportion of the total biomass, SPB is spike proportion of the total biomass. The same as below.

表 3 2015 年不同处理南粳 45 物质分配的比较

Table 3 Comparison of dry matter distribution of Nanjing45 among different treatments in 2015

处理 Treatment		总生物量	茎占比重	叶占比重	穗占比重
温度 T(℃)	持续天数 DT(d)	TB(g·hill ⁻¹)	STB(%)	LB(%)	SPB(%)
35	CK	83.50±9.11a	36.45±3.15d	14.41±1.33b	49.51±2.67a
	1	69.29±8.32b	38.62±3.22cd	13.41±2.69c	48.05±3.55a
	3	60.65±5.45bc	41.67±5.34c	15.08±1.87b	43.20±4.20b
	6	56.00±3.31c	42.81±5.01c	14.71±2.24b	42.51±6.18b
	1	60.72±6.79bc	40.15±3.14cd	15.80±0.74ab	44.10±2.45b
	3	58.26±5.47c	43.86±2.29c	16.13±0.52ab	40.00±2.50b
	6	57.31±7.33c	50.60±4.02b	16.05±1.66ab	33.42±5.07c
	1	56.75±12.49c	53.81±4.11b	17.48±0.68a	28.74±3.81d
	3	57.51±10.26c	64.04±2.24a	16.65±1.38a	19.40±2.92e
	6	58.26±6.96c	73.70±4.21a	17.59±2.75a	8.73±2.65e

2.3 孕穗期高温对水稻经济系数的影响

孕穗期高温胁迫对水稻经济系数的影响如表 4。从表中可见，孕穗期高温处理后，两个水稻品种的经济系数均低于 CK。在相同高温处理时，两年试验中两优培九的经济系数降幅均略小于南粳 45。在 2014 年试验中，两个水稻品种在 3 个温度

处理下均表现为，相同温度处理下，随着高温持续时间延长，经济系数逐渐减小，两优培九和南粳 45 在 38℃5d 处理下的经济系数分别为 0.38、0.35，均小于 38℃1d 的处理。相同高温持续时间下，随着高温强度的增加，经济系数呈显著减少趋势。当高温持续 7d 时，35℃、38℃处理的经济系数维持

在 0.3 左右,而 41℃处理下两个品种经济系数均不足 0.1,与 CK 相比,其降幅分别达 82.1%、87.6%。总的来说,水稻经济系数受高温影响程度与高温强度、持续时间有关,温度越高,持续时间越长,经

济系数越小。2015 年试验中水稻经济系数对高温的响应差异与 2014 年基本一致,但总体看来该年的水稻经济系数略低于 2014 年,可能由于两年中水稻长势的差异所致。

表 4 2014 和 2015 年不同处理水稻经济系数的比较

Table 4 Comparison of harvest index among different treatments in 2014 and 2015

处理 Treatment		2014		2015	
温度 T (°C)	持续天数 DT(d)	两优培九 Liangyoupeijiu	南粳 45 Nanjing45	两优培九 Liangyoupeijiu	南粳 45 Nanjing45
35	CK	0.51±0.04a	0.50±0.01a	0.47±0.01a	0.48±0.03a
	1	0.49±0.02ab	0.49±0.05a	0.46±0.02a	0.46±0.03ab
	3	0.44±0.04b	0.38±0.09b	0.43±0.03ab	0.41±0.04b
	5 (6)	0.41±0.04bc	0.37±0.06b	0.40±0.01b	0.40±0.06b
38	7	0.31±0.10c	0.30±0.04c		
	1	0.49±0.04ab	0.49±0.04a	0.44±0.04ab	0.42±0.02bc
	3	0.41±0.01bc	0.37±0.03b	0.41±0.02b	0.38±0.02c
	5 (6)	0.38±0.01bc	0.35±0.06bc	0.34±0.02c	0.31±0.05d
41	7	0.33±0.04c	0.26±0.04c		
	1	0.35±0.03c	0.35±0.09bc	0.32±0.03c	0.26±0.04e
	3	0.18±0.03d	0.24±0.07c	0.26±0.06d	0.17±0.06f
	5 (6)	0.10±0.01e	0.14±0.04d	0.07±0.01e	0.07±0.03g
	7	0.09±0.04e	0.06±0.03e		

注: 5(6)表示 2014 年为 5d 高温处理, 2015 年为 6d。

Note: 5(6) is corresponding to high temperature treatment 5 days in 2014, and 6 days in 2015.

2.4 孕穗期高温对水稻产量及产量结构的影响

由表 5-表 10 可见,孕穗期高温处理后,各处理水稻产量均低于 CK,且水稻减产程度与高温强度和持续时间有关。在处理 1d 时,35℃、38℃处理下水稻减产低于 5%,但 41℃处理的减产率却超过 30%,说明在相同高温持续时间内,温度越高,水稻减产越严重;且同一温度下,高温处理 7d 时,水稻产量明显低于 1d、3d、5d 处理时,两优培九和南粳 45 在 41℃1d 处理后水稻减产率分别为 31.6%、30.7%,而当处理 7d 时水稻产量降幅分别达到 81.6%、87.7%,表明孕穗期高温导致水稻减产程度与高温强度、持续时间均密切相关,且温度越高、持续时间越长,水稻减产越严重,产量越低。与 CK 相比,在 35℃处理 7d 时,两优培九水稻减产率为 27.5%,而南粳 45 的减产率达到 40.0%,且 41℃持续 7d 高温处理时,两优培九减产率也低于南粳 45,说明两优培九的耐热性在一定程度上强于南粳 45。

从表 5-表 10 还可以看出,受高温影响,水稻产量构成要素的变化呈现不同的特征。水稻穗数取决

于分蘖期和拔节期的生长条件和群体长势,至孕穗期时基本稳定,所以孕穗期高温对穗数基本无影响。对穗粒数而言,在 35℃和 38℃高温处理 1d 时两个品种穗粒数(穗总粒数)变化不大,但当高温持续时间延长时,穗粒数则呈明显减小趋势;而在 41℃高温胁迫处理 1d 时,水稻穗粒数则明显减少,且随着持续时间延长,穗粒数减少越来越明显,表明穗粒数减少量与高温强度和高温持续时间有关。在 41℃高温处理 7d 时,两优培九和南粳 45 的穗粒数与 CK 相比分别降低 41.9%、50.1%;此外,由表还可知,在相同高温处理条件下,南粳 45 的穗粒数受高温影响程度明显大于两优培九。

各处理水稻结实率的变化总体表现为,随着高温强度和持续时间的增加,结实率呈减少趋势。当 41℃高温持续 7d 时,两优培九和南粳 45 的结实率分别为 6.0%、19.2%,比对照分别下降 93.5%、79.6%。受高温影响千粒重的总体变化趋势亦为,随着高温强度和持续时间的增加,结实率呈减少趋势。但千粒重的减少程度相对较小,当 41℃高温持续 7d 时,

两优培九和南粳 45 的千粒重分别为 20.33、21.63g，受高温影响，产量构成要素中结实率减少幅度最大，比对照分别下降 25.3%、23.7%。由此可见，孕穗期其次为穗粒数，千粒重的减幅最小。

表 5 2014 年 35℃处理不同天数后水稻产量及产量结构的比较

Table 5 Comparison of rice yield and yield component under 35℃ for different treatments in 2014

品种 Variety	持续天数 DT(d)	产量 Y(g·hill ⁻¹)	穗数 NP	穗粒数 GP	结实率 SSR(%)	千粒重 SW(g)
两优培九 Liangyoupeijiu	CK	69.43±4.75a	16.3±1.7a	155.3±12.4a	93.61±1.44a	27.21±0.67a
	1	67.45±2.04ab	15.8±3.7a	146.8±14.4a	87.34±2.50a	26.26±0.47a
	3	60.30±5.25b	16.0±2.7a	140.0±13.9ab	87.12±3.34a	25.32±0.09b
	5	55.48±5.37bc	15.8±2.0a	124.9±16.1b	79.51±5.89b	24.27±0.60b
	7	50.31±13.42c	12.8±3.7a	123.6±10.2b	71.77±5.10c	23.85±0.13b
南粳 45Nanjing45	CK	36.08±0.62a	13.7±2.1a	84.0±10.4a	94.22±2.96a	28.34±1.65a
	1	35.89±3.29a	11.7±2.2a	77.9±10.1a	92.94±1.98a	28.06±1.80a
	3	27.70±6.42b	10.8±2.6a	74.8±10.9a	85.82±5.74a	28.29±0.49a
	5	26.89±4.44b	11.5±2.0a	66.5±5.6b	81.11±3.08a	28.15±0.46a
	7	21.65±2.56c	10.8±2.4a	63.3±8.4b	80.20±2.84a	26.71±0.67b

Note: Y is yield, NP is number of panicle, GP is grain numbers per panicle, SSR is seed setting rate, SW is 1000-grain weight. The same as below.

表 6 2014 年 38℃处理不同天数后水稻产量及产量结构的比较

Table 6 Comparison of rice yield and yield component under 38℃ for different treatments in 2014

品种 Variety	持续天数 DT(d)	产量 Y(g·hill ⁻¹)	穗数 NP	穗粒数 GP	结实率 SSR(%)	千粒重 SW(g)
两优培九 Liangyoupeijiu	CK	69.43±4.75a	16.3±1.7a	155.3±12.4a	93.61±1.44a	27.21±0.67a
	1	57.36±5.23ab	15.8±2.7a	147.9±14.4ab	79.92±10.11b	25.20±1.47b
	3	55.44±1.47bc	13.8±2.1a	136.4±13.9b	79.62±3.94b	24.46±1.09b
	5	52.42±0.48bc	14.3±3.3a	130.9±16.1b	78.24±4.11b	23.51±1.60bc
	7	45.21±5.99c	14.3±3.9a	106.0±10.2c	67.78±5.63c	22.34±1.13c
南粳 45Nanjing45	CK	36.08±0.62a	13.7±2.1a	84.0±10.4a	94.22±2.96a	28.34±1.65a
	1	35.13±2.76a	11.5±2.7a	86.9±6.3a	89.23±1.01a	27.26±1.03ab
	3	26.72±1.86b	11.1±3.1a	78.4±5.6ab	83.60±1.44ab	26.43±1.22b
	5	25.04±4.08bc	11.8±1.9a	65.4±10.8c	81.24±2.33ab	26.16±0.56b
	7	18.52±2.73c	11.2±2.2a	62.1±6.4ac	80.17±2.52b	26.04±0.36bc

表 7 2014 年 41℃处理不同天数后水稻产量及产量结构的比较

Table 7 Comparison of rice yield and yield component under 41℃ for different treatments in 2014

品种 Variety	持续天数 DT(d)	产量 Y(g·hill ⁻¹)	穗数 NP	穗粒数 GP	结实率 SSR(%)	千粒重 SW(g)
两优培九 Liangyoupeijiu	CK	69.43±4.75a	16.3±1.7a	155.3±12.4a	93.61±1.44a	27.21±0.67a
	1	47.44±3.49b	14.0±2.2a	131.5±17.6b	70.40±7.42b	24.90±0.82b
	3	25.00±3.57c	15.8±2.1a	101.6±12.9c	34.15±13.23c	24.83±0.25b
	5	13.38±1.39d	16.7±2.8a	93.0±12.1c	12.33±6.56d	21.86±1.09c
	7	12.79±5.72d	14.3±3.8a	90.2±7.3c	6.04±5.93d	20.33±1.14c
南粳 45Nanjing45	CK	36.08±0.62a	13.7±2.1a	84.0±10.4a	94.22±2.96a	28.34±1.65a
	1	25.01±6.31b	12.7±2.2a	71.6±10.3b	67.04±9.15b	27.24±0.49a
	3	17.61±5.25c	10.7±2.5a	70.6±7.5b	61.21±6.37b	26.25±0.22a
	5	10.36±2.62d	13.4±2.1a	46.4±9.5c	29.30±10.95c	24.91±0.11ab
	7	4.45±1.90e	12.8±2.2a	41.9±11.1c	19.24±12.63c	21.63±0.12b

表 8 2015 年 35℃处理不同天数后水稻产量及产量结构的比较

Table 8 Comparison of rice yield and yield component under 35℃ for different treatments in 2015

品种 Variety	持续天数 DT(d)	产量 Y(g·hill ⁻¹)	穗数 NP	穗粒数 GP	结实率 SSR(%)	千粒重 SW(g)
两优培九 Liangyoupeijiu	CK	53.68±4.05a	11.5±1.3a	152.43±12.58a	94.01±2.47a	29.86±1.72a
	1	48.14±2.90ab	12.0±0.8a	143.42±8.04a	88.80±5.25a	29.62±2.93a
	3	44.94±1.63b	11.8±0.5a	142.96±10.27a	85.71±2.23ab	28.77±0.81a
	6	39.00±4.24b	12.5±1.5a	133.23±15.34a	78.44±2.76b	28.47±2.84a
南粳 45Nanjing45	CK	41.31±4.99a	12.2±1.5a	95.0±15.2a	96.43±1.82a	32.11±1.19a
	1	33.33±5.20b	10.3±2.5a	89.8±14.8a	94.80±1.45a	32.06±2.98a
	3	26.34±4.50c	11.0±2.3a	81.9±16.1ab	91.03±1.62ab	31.37±1.84a
	6	23.72±3.36c	10.3±1.6a	78.9±12.6b	85.45±2.68b	31.07±2.18a

表 9 2015 年 38℃处理不同天数后水稻产量及产量结构的比较

Table 9 Comparison of rice yield and yield component under 38℃ for different treatments in 2015

品种 Variety	持续天数 DT(d)	产量 Y(g·hill ⁻¹)	穗数 NP	穗粒数 GP	结实率 SER(%)	千粒重 SW(g)
两优培九 Liangyoupeijiu	CK	53.68±4.05a	11.5±1.3a	152.43±12.6a	94.01±2.47a	29.86±1.72a
	1	45.48±9.12b	12.3±1.5a	139.4±14.7ab	86.70±3.46b	29.13±5.66a
	3	39.02±4.84bc	11.5±1.7a	135.9±10.0ab	78.21±4.25c	28.26±2.41ab
	6	35.05±9.21c	11.8±2.5a	125.2±16.0b	69.62±7.20d	27.38±2.17b
南粳 45Nanjing45	CK	41.31±4.99a	12.2±1.5a	95.0±15.2a	96.43±1.82a	32.11±1.19a
	1	27.46±1.39b	10.5±0.3a	88.8±11.6a	90.40±1.44ab	31.78±0.43a
	3	21.99±5.84bc	9.5±1.4a	80.6±10.5ab	85.91±1.47b	30.49±1.72ab
	6	18.89±6.89c	9.6±2.4a	75.3±5.2b	79.00±4.06b	29.94±1.86b

表 10 2015 年 41℃处理不同天数后水稻产量及产量结构的比较

Table 10 Comparison of rice yield and yield component under 41℃ for different treatments in 2015

品种 Variety	持续天数 DT(d)	产量 Y(g·hill ⁻¹)	穗数 NP	穗粒数 GP	结实率 SSR(%)	千粒重 SW(g)
两优培九 Liangyoupeijiu	CK	53.68±4.05a	11.5±1.3a	152.43±12.58a	94.01±2.47a	29.86±1.72a
	1	30.35±9.17b	10.3±2.8a	130.0±9.1b	72.14±2.97b	28.41±2.91ab
	3	25.65±8.32b	12.3±2.2a	114.1±16.3bc	49.60±10.41c	27.54±2.11ab
	6	9.25±7.34c	9.3±2.3a	94.7±13.9c	10.53±7.08d	26.57±3.43b
南粳 45Nanjing45	CK	41.31±4.99a	12.2±1.5a	95.0±15.2a	96.43±1.82a	32.11±1.19a
	1	13.42±7.47b	7.4±2.1b	83.9±8.0a	64.44±9.04b	30.13±3.71ab
	3	10.76±4.87b	7.6±2.5b	76.1±12.7ab	30.62±16.90c	29.24±2.05b
	6	4.25±1.46c	7.2±2.8b	65.0±10.8b	15.64±10.62d	28.75±3.34b

3 结论与讨论

3.1 结论

水稻品种两优培九和南粳 45 孕穗期高温处理后, 水稻叶片光合速率降低, 且降幅与高温强度、持续时间有关, 温度越高, 持续时间越长, 光合速率降幅越大。在物质分配和经济系数方面, 高温处理后, 水稻穗部所占植株生物量的比重明显减小,

导致经济系数下降, 亦即在高温胁迫条件下, 水稻植株中的光合物质和茎叶的贮存物质无法有效向穗部转移, 导致成熟期茎秆所占比重增加。在产量与产量构成要素方面, 孕穗期受高温胁迫后, 水稻产量下降, 结实率降低, 穗粒数和千粒重减少。这与石春林等^[16-18, 20]研究结论一致。在相同的高温胁迫下, 南粳 45 高温热害程度比两优培九更加严重, 说

明两优培九的耐热性强于南粳45。

3.2 讨论

IPCC 第五次评估报告^[21]指出, 未来全球气候变暖仍将持续, 与1986–2005年相比, 2016–2035年全球平均表面温度变化可能升高0.3~0.7℃。随着全球平均温度上升, 大部分陆地区域的极端暖事件将增多, 热浪发生的频率很可能更高, 时间更长。而高温热浪发生的时间一般在7月中下旬–8月上旬, 而这个时间往往是长江中下游单季稻中稻生长的孕穗开花期^[22-23], 因此, 加强高温对孕穗期水稻产量影响的研究在现在和将来都具有重要意义。

农业气象灾害的定量评估是气象灾害研究的主要内容之一。目前在高温对水稻生长的定量影响研究方面, 一些学者建立了开花期和减数分裂期高温对颖花结实率的定量影响模型^[15,20,24], 但还不能表达高温对水稻生长的综合影响。无论是开花期还是孕穗期高温, 都会影响产量构成的多个因子, 亦即高温对水稻源库流均会产生影响, 可见, 仅根据高温对结实率的定量影响还不能全面体现高温的综合影响。从本文结果看, 孕穗期高温对穗粒数、结实率、千粒重均有不同程度的影响, 因此, 尚需进一步建立孕穗期高温对穗粒数、千粒重的影响模型, 以丰富和完善孕穗期高温的定量影响。

参考文献 References

- [1]程式华,李建.现代中国水稻[M].北京:金盾出版社,2007:112-125.
Cheng S H,Li J.Modern Chinese rice[M].Beijing:Shield Press,2007:112-125.(in Chinese)
- [2]Tian X,Huang Y,Matsui T.Characterizing the rice field climatic factors under high temperature stress at anthesis[J].International Crop Science,2008,16(4):19-27.
- [3]罗艳,伍晓玲,周建平,等.2013 年极端高温对合肥一季稻的影响分析[J].中国农学通报,2015,31(21):244-248.
Luo Y,Wu X L,Zhou J P,et al.Effects analysis of extreme high-temperature in 2013 on the single cropping rice in Hefei[J].Chinese Agricultural Science Bulletin,2015,31(21):244-248.(in Chinese)
- [4]张长海,汪向东,刘玲,等.2013 年桐城市杂交中粳高温热害表现与成因分析[J].杂交水稻,2015,30(1):42-47.
Zhang C H,Wang X D,Liu L,et al.Analysis on high temperature damage and its causes of medium *Indica* hybrid rice at Tongcheng in 2013[J].Hybrid Rice,2015,30(1):42-47.(in Chinese)
- [5]姚萍,杨炳玉,陈菲菲,等.水稻高温热害研究进展[J].农业灾害研究,2012,2(4):23-25,38.

- Yao P,Yang B Y,Chen F F,et al.Research progress on high temperature hot damages of rice[J].Journal of Agricultural Catastrophology,2012,2(4):23-25,38.(in Chinese)
- [6]Shah F,Huang J,Cui K,et al.Impact of high-temperature stress on rice plant and its traits related to tolerance[J].Journal of Agricultural Science,2011,149:545-556.
- [7]谢晓金,申双和,李秉柏,等.抽穗期高温胁迫对水稻开花结实的影响[J].中国农业气象,2009,30(2):252-256.
Xie X J,Shen S H,Li B B,et al.Influences of high temperature stress on blooming and seed setting of rice during heading stage[J].Chinese Journal of Agrometeorology,2009,30(2):252-256.(in Chinese)
- [8]张桂莲,陈立云,张顺堂,等.高温胁迫对水稻花器官和产量构成要素及稻米品质的影响[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2007,33(2):132-136.
Zhang G L,Chen L Y,Zhang S T,et al.Effects of high temperature stress on rice flower organ and yield components and grain quality[J].Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences),2007,33(2):132-136.(in Chinese)
- [9]隗滨,王光明,陈国惠,等.盛花期高温对两系杂交稻两优培九结实率的影响研究[J].杂交水稻,2002,17(1):51-53.
Wei M,Wang G M,Chen G H,et al.Effect of high temperature at full flowering stage on seed setting percentage of two-line hybrid rice Liangyoupei jiu[J].Hybrid Rice,2002,17(1):51-53.(in Chinese)
- [10]Satake T,Yoshida S.High temperature Induced sterility in *Indica* rices at flowering[J].Japanese Journal of Crop Science,1978,47(1):6-17.
- [11]Yao Y,Yamamoto Y,Yoshida T,et al.Response of differentiated and degenerated spikelets to top-dressing, shading and day/night temperature treatments in rice cultivars with larger panicles[J].Soil Science and Plant Nutrition,2000,46(3):631-641
- [12]杨军,陈小荣,朱昌兰,等.氮肥和孕穗后期高温对两个早稻品种产量和生理特性的影响[J].中国水稻科学,2014,28(5):523-533.
Yang J,Chen X R,Zhu C L,et al.Effects of nitrogen level and high temperature at late booting stage on yield and physiological characteristics of two early rice cultivars[J].Rice Science,2014,28(5):523-533.(in Chinese)
- [13]Das S,Krishnan P,Monalisa N,et al.High temperature stress effects on pollens of rice(*Oryza sativa* L) genotypes[J].Environmental and Experimental Botany,2014,101:36-46.
- [14]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.(in Chinese)
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)
- [15] 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)
- [16] 石春林, 金之庆, 汤日圣, 等. 水稻颖花结实率对减数分裂期和开花期高温的响应差异[J]. *江苏农业学报*, 2010, 26(6): 1139-1142.
- Shi C L, Jin Z Q, Tang R S, et al. Response difference of seed setting rate of rice florets at the meiosis and anthesis stages to high temperature[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2010, 26(6): 1139-1142. (in Chinese)
- [17] 岳伟, 马晓群. 高温对安徽省水稻汕优 63 结实率, 千粒重的影响分析[J]. *中国农学通报*, 2009, 25(18): 399-402.
- Yue W, Ma X Q. The response of seed setting rate and 1000-grain weight of Shanyou63 by high-temperature in Anhui province[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25 (18): 399-402. (in Chinese)
- [18] 娄伟平, 孙永飞, 吴利红, 等. 孕穗期气象条件对水稻每穗总粒数和结实率的影响[J]. *中国农业气象*, 2007, 28(3): 296-299.
- Lou W P, Sun Y F, Wu L H, et al. Influence of meteorological conditions during spike formation stage on number of grain per spike and setting percent age of rice[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2007, 28(3): 296-299. (in Chinese)
- [19] 娄伟平, 孙永飞, 张寒, 等. 气温对水稻每穗颖花数的影响[J]. *浙江农业学报*, 2005, 17(2): 101-105.
- Lou W P, Sun Y F, Zhang H, et al. Effects of temperatures on spikelets per panicle of rice[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2005, 17(2): 101-105. (in Chinese)
- [20] 石春林, 金之庆, 汤日圣, 等. 水稻高温败育模拟模型[J]. *中国水稻科学*, 2007, 21(2): 220-222.
- Shi C L, Jin Z Q, Tang R S, et al. A model to simulate high temperature-induced sterility of rice[J]. *Chinese Rice*, 2007, 21(2): 220-222. (in Chinese)
- [21] 秦大河, Thomas Stocker, 沈永平, 等. IPCC 第五次评估报告第一工作组报告的亮点结论[J]. *气候变化研究进展*, 2014, 10(1): 1-6.
- Qin D H, Thomas S, Shen Y P, et al. Highlights of the IPCC working group I fifth assessment report[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2014, 10(1): 1-6. (in Chinese)
- [22] 褚荣浩, 申双和, 李萌, 等. 安徽省中季稻生育期高温热害发生规律分析[J]. *中国农业气象*, 2015, 36(4): 506-512.
- Chu R H, Shen S H, Li M, et al. Regularity of heat injury during whole growth season of middle rice in Anhui province[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2015, 36(4): 506-512. (in Chinese)
- [23] 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]. 北京: 气象出版社, 2009: 73-105.
- 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]. Beijing: China Meteorology Press, 2009: 73-105. (in Chinese)
- [24] 王连喜, 任景全, 李琪. 未来气候变化情景下江苏水稻高温热害模拟研究 II: 孕穗-抽穗期水稻对高温热害的适应性分析[J]. *中国农业气象*, 2014, 35(2): 206-213.
- Wang L X, Ren J Q, Li Q. Simulation of the heat injury on rice production in Jiangsu province under the climate change scenarios II: adaptability analysis of the rice to heat injury from booting to heading stage[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2014, 35(2): 206-213. (in Chinese)