

抽穗期高温胁迫对水稻产量构成要素和品质的影响^{*}

谢晓金^{1,2}, 李秉柏^{1**}, 李映雪², 李昊宇², 赵小艳², 杨沈斌², 王志明¹

(1. 江苏省农业科学院资源与环境研究所, 南京 210014; 2. 南京信息工程大学应用气象学院, 南京 210044)

摘要:以扬稻6号与南粳43为试验材料,通过在人工气候箱中进行高温处理,研究抽穗期高温胁迫对水稻产量构成要素及稻米品质的影响,旨在深入探讨高温对水稻的伤害机理。研究表明:水稻抽穗期高温降低了水稻的每穗总粒数、结实率和千粒重,同时稻米的糙米率、精米率、整精米率、可溶性糖和蛋白质含量也呈下降趋势,而稻米的垩白率、垩白度和直链淀粉含量增加明显,随胁迫温度的提高和胁迫时间的延长,2个水稻品种的产量构成要素和稻米品质急剧下降。相同温度胁迫下,扬稻6号的热害指数(Index of heat sensitivity, HIS)稍低于南粳43,其中扬稻6号的产量构成要素和品质受高温的影响也稍低于南粳43,说明扬稻6号耐高温能力高于南粳43。研究结果为进一步了解高温对水稻结实和稻米品质的伤害机理,筛选耐热性强的水稻品种提供重要的理论依据。

关键词:水稻;抽穗期;高温胁迫;产量构成要素;稻米品质

Effects of High Temperature Stress on Yield Components and Grain Quality during Heading Stage

XIE Xiao-jin^{1, 2}, LI Bing-bai¹, LI Ying-xue², LI Hao-yu², ZHAO Xiao-yan², YANG Shen-bin², WANG Zhi-ming¹

(1. Institute of Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China;

2. College of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044)

Abstract: The effects of high temperature stress on yield components and grain quality of japonica rice Yangdao 6 and japonica rice Nanjing 43 in plant growth chamber with two temperature treatments during heading stage were studied. The results showed that brown rice rate, milled rice rate, head rice rate, number of grains per panicles, seed setting rate, kernel weight, soluble sugar content and protein content in two rice varieties were lower, chalkiness rate and chalkiness degree were higher. Moreover, the damage on yield components and grain quality in two rice varieties were more serious with elevation of stress temperature and elongation of stress time. Index of heat sensitivity (HIS) and the damage degree for Nanjing 43 was higher than that for Yangdao 6 under the same high temperature stress. So the capacity of high temperature tolerance of Yangdao 6 was higher than Nanjing 43. The results could provide important theoretical evidence for revealing the damage mechanism on yield components and grain quality, selecting stronger heat tolerance of rice cultivar.

Key words: Rice; Heading stage; High temperature stress; Yield components; Grain quality

在全球气候变暖大背景下,水稻遭遇高温热害的机率正日益增加^[1-2]。郑建初等^[3]研究发现,水稻抽穗期持续3d 35℃的高温,水稻花粉活力降至60.60%,结

实率降至69.10%。郑志广等^[4]研究发现,水稻抽穗开花期36℃高温,单穗籽粒产量和结实率均显著下降。以上研究均表明水稻抽穗开花期遭遇高温可造

* 收稿日期:2009-12-14 ** 通讯作者。E-mail: bbl88@163.com

基金项目:国家科技支撑计划子课题(2006BAD04B04);江苏省气象灾害重点实验室开放课题基金(KLME0705);国家自然科学基金青年科学基金项目(40901238)

作者简介:谢晓金(1979-),女,安徽安庆人,博士生,讲师,研究方向:农业遥感与植物生理生态。

E-mail: xxj_200210@tom.com

成花粉不育、易形成空秕,导致结实率降低,从而使产量严重下降。但关于水稻抽穗开花遭遇不同高温胁迫后稻米品质变化的研究相对较少^[5-6]。近年来,为适应优质水稻的种植和人们营养的需要,了解高温胁迫下稻米品质的变化是非常必要的。本文拟以长江流域地区大面积生产的扬稻 6 号与南粳 43 为试验材料,探讨抽穗期高温对水稻产量构成要素和品质的综合影响,旨在深入了解高温对不同水稻品种结实和稻米品质的伤害机理,为进一步采取有效措施减轻或避免高温危害、提高水稻产量和品质提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

试验于 2008 年在江苏省农业科学院进行,供试水稻品种为扬稻 6 号(常规籼稻,全生育期约 138d)与南粳 43(常规粳稻,全生育期约 160d)。5 月 15 日育秧,6 月 18 日移栽于塑料箱中(塑料箱的规格为:30cm×20cm×10cm),每个处理 2 箱,每箱 6 穴,每穴 2 株,共 20 箱。常规水肥管理。扬稻 6 号于 8 月 18 日开始抽穗,南粳 43 于 9 月 1 日开始抽穗。

1.2 高温处理

于始穗期选取生长一致的水稻移入 RXZ 型人工气候光照培养箱中,进行 35℃ 与 39℃ 高温处理(研究表明^[3],水稻在抽穗开花时遭遇 35℃ 以上的高温就会引起颖花高度不育,结实率降低,因此选择 35℃ 和 39℃ 作为高温处理的温度),箱内相对湿度设定为 75%,人工气候光照培养箱的温度误差为 ±0.5℃,每天处理 5h(09:00–14:00),之后放置室外,高温持续时间设定为 1d、3d、5d 和 7d,以自然环境条件下为对照(CK)。

1.3 测定项目

1.3.1 稻米产量

各处理水稻成熟后进行收获,考察并记录各处理

的每穗总粒数、结实率和千粒重。计算热害指数(Index of heat sensitivity, HIS)

$$\text{热害指数} = (\text{常温下的结实率} - \text{高温胁迫下的结实率}) / \text{常温下的结实率}$$

1.3.2 稻米加工品质和外观品质

各处理水稻成熟后进行考种,测定糙米率、精米率、整精米率、垩白率和垩白度^[7],稻谷放入碾米机,去除糠杂后称为糙米,糙米率为糙米重量占稻谷重量的百分率;将糙米再次放入碾米机,去除糠粉后称为精米,精米率为精米重量占稻谷重量的百分率;从碾磨好的精米中拣出整精米粒(米粒长度达到完整精米粒平均长度的 4/5 或以上者均为整精米粒),整精米率为整精米重量占稻谷重量的百分率;从整精米中随机取 100 粒,拣出有垩白的米粒,垩白率为垩白米粒数占总粒数的百分率;从垩白米粒中,随机取 10 粒(不足 10 粒者按实有数取),将米粒放平,正视观察,逐粒目测垩白面积占整个籽粒投影面积的百分率,求出垩白面积的平均值,其值为垩白大小,垩白度为垩白率与垩白大小的乘积。

1.3.3 稻米食用品质

稻米可溶性糖含量采用蒽酮法^[8],直链淀粉含量依照中华人民共和国农业部部颁标准(NY147–88)测定,采用凯氏定氮法测定全氮量,蛋白质含量通过全氮量乘以 5.95 进行折算。

2 结果与分析

2.1 抽穗期高温胁迫对水稻产量构成要素的影响

从表 1 可以看出,抽穗期高温胁迫降低了扬稻 6 号与南粳 43 的每穗总粒数、结实率和千粒重。相对于结实率,高温对每穗总粒数和千粒重的影响不明显,如胁迫温度为 35℃,处理时间为 3d 以上,与对照相比,2 个水稻品种的结实率差异均达到显著或极显著水平($p < 0.05$ 或 $p < 0.01$)。高温对 2 个水

表 1 不同处理水稻构成要素和热害指标比较

处理		扬稻 6 号				南粳 43			
		每穗总粒数(个)	千粒重(g)	结实率(%)	HIS	每穗总粒数(个)	千粒重(g)	结实率(%)	HIS
CK		180a	26.54aA	95.51aA		172a	24.48aA	95.40aA	
35℃	1d	176a	25.90aA	95.14aA	0.01a	169a	24.13aA	92.49aA	0.03a
	3d	169a	24.90bA	87.82bB	0.08a	166a	23.10aA	85.03bA	0.11a
	5d	151b	23.41bA	80.79bB	0.15a	162a	22.48aA	80.94bB	0.15a
	7d	151b	19.63bB	76.34cB	0.20a	137b	17.10cB	63.36dD	0.34b
39℃	1d	168a	24.58bA	81.52bB	0.15a	163a	22.51aA	81.40bA	0.15a
	3d	154b	18.07cB	68.14cC	0.28a	146b	19.49bB	74.50cC	0.22a
	5d	149b	17.17cB	50.06dD	0.48c	140b	15.71cC	49.05eE	0.49b
	7d	145b	10.16cC	19.78eE	0.79d	127c	4.34dD	13.40fF	0.86c

注:同一列中同一组合数据后带相同大小写字母分别表示在 0.01 和 0.05 水平上差异不显著。下同。

稻品种结实率的影响程度有一定差异,如扬稻 6 号在胁迫温度为 39℃、处理时间为 1、3、5 和 7d 时结实率分别下降了 13.99、27.37、45.45、75.73 个百分点,而南粳 43 在抽穗期遭遇胁迫温度为 39℃、处理时间为 1、3、5 和 7d 时,结实率分别下降 14.00、20.90、46.35、82.00 个百分点,总体上下降更多。此外,随着胁迫时间的延长和胁迫温度的增加,2 个水稻品种的每穗总粒数、结实率和千粒重均逐渐降低。从热害指数看,相同温度相同时间的高温胁迫条件下,南粳 43 的热害指数稍大于扬稻 6 号,说明南粳 43 的产量受高温影响的程度稍高于扬稻 6 号。

2.2 抽穗期高温胁迫对稻米加工品质和外观品质的影响

表 2 不同处理稻米的加工品质指标比较

处理	扬稻 6 号			南粳 43		
	糙米率(%)	精米率(%)	整精米率(%)	糙米率(%)	精米率(%)	整精米率(%)
CK	79.44	74.81	69.20	82.88	79.12	78.05
35℃	1d	78.38	73.61	67.87	82.74	79.02
	3d	76.85	72.26	67.20	82.37	78.83
	5d	76.53	71.86	65.52	79.75	76.07
	7d	74.76	70.29	64.92	74.90	71.43
39℃	1d	76.84	72.25	66.10	81.68	77.70
	3d	74.76	68.84	64.44	76.05	72.48
	5d	72.28	67.88	64.21	74.13	70.08
	7d	67.60	62.69	57.87	47.75	44.95

2.2.2 外观品质指标

高温对垩白的形成具有较大的影响。从图 1 可以看出,随着胁迫时间的延长和胁迫温度的增加,扬稻 6 号和南粳 43 的垩白率均表现为增加的趋势。对垩白度的影响与对垩白率的影响基本一致。在温度为 39℃、处理时间为 7d 时扬稻 6 号和南粳 43 的垩白率和垩白度分别可达到 45.00%、43.00% 和 40.50%、36.50%,但两品种各处理间差异均未达到

2.2.1 加工品质指标

抽穗期高温胁迫对扬稻 6 号和南粳 43 加工品质的影响表现为:35℃ 和 39℃ 温度胁迫下糙米率、精米率和整精米率与对照相比均呈下降趋势(见表 2)。随着胁迫时间的延长和胁迫温度的增加,两品种的糙米率、精米率和整精米率均逐渐降低,只不过两品种下降幅度有所不同,比如糙米率,扬稻 6 号在 35℃ 高温条件下、处理 5d 和 7d 时,分别比对照下降了 3.66% 和 5.89%,而南粳 43 在相同条件下比对照分别下降了 3.78% 和 9.62%。但是两品种各处理间的糙米率、精米率和整精米率差异均未达到显著水平。可见,抽穗期高温能够在一定程度上降低稻米的加工品质。

显著水平。

2.3 抽穗期高温胁迫对水稻食用品质的影响

由表 3 可见,总体上,扬稻 6 号的可溶性糖、直链淀粉和蛋白质含量均高于南粳 43(CK)。抽穗期高温处理后,两品种的可溶性糖和蛋白质含量均呈降低趋势,而直链淀粉含量呈增加趋势;并且随着胁迫温度的提高和胁迫时间的延长,两品种稻米中可溶性糖和蛋白质含量下降增多,而直链淀粉含量则上升增多。

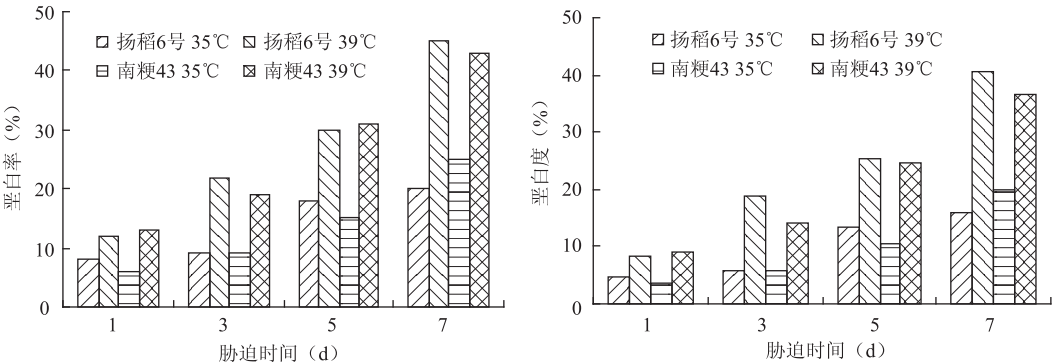


图 1 不同处理稻米外观品质指标比较

但是,相比较而言,抽穗期高温后两品种各项指标的变化幅度略有不同。比如温度为 35℃、处理 1d 时(胁迫最轻),扬稻 6 号的可溶性糖蛋白质含量分别比对照降低了 0.90 和 0.12 个百分点、直链淀粉含量增加了 0.67 个百分点,而南粳 43 的可溶性糖蛋白质含量分别比对照降低了 0.87 和 0.07 个百分点、直链淀粉含量增加了 0.89 个百分点;温度为 39℃、

处理 7d 时(胁迫最重),扬稻 6 号的可溶性糖蛋白质含量分别比对照降低了 6.40 和 0.32 个百分点、直链淀粉含量增加了 2.50 个百分点,而南粳 43 的可溶性糖蛋白质含量分别比对照降低了 3.76 和 0.25 个百分点、直链淀粉含量增加了 4.33 个百分点。可见,抽穗期高温在一定程度上也会降低稻米的食用品质。

表 3 不同处理水稻食用品质指标比较

处理	扬稻 6 号			南粳 43		
	可溶性糖含量(%)	直链淀粉含量(%)	蛋白质含量(%)	可溶性糖含量(%)	直链淀粉含量(%)	蛋白质含量(%)
CK	9.28a	18.08d	1.90a	6.42a	17.10c	1.70a
35℃	1d	8.38b	18.75c	1.78b	5.55b	17.99b
	3d	8.14b	19.42b	1.78b	4.95b	18.48b
	5d	7.90b	19.95b	1.70b	3.93c	18.84b
	7d	7.11c	20.02a	1.70b	3.21d	19.11b
39℃	1d	7.96b	19.78b	1.73b	4.46b	18.85b
	3d	6.13d	20.01a	1.68b	3.61c	20.44a
	5d	4.08e	20.31a	1.61b	3.20d	20.46a
	7d	2.88f	20.58a	1.58b	2.66e	21.43a

3 结论与讨论

试验表明:抽穗期高温胁迫降低了扬稻 6 号与南粳 43 的每穗总粒数、结实率、千粒重、糙米率、精米率和整精米率,增加了稻米的垩白率和垩白度。并随着胁迫温度的提高和胁迫时间的延长,两品种的产量、加工品质和外观品质急剧下降。相对于结实率,高温对每穗总粒数增减不明显,这可能是因为水稻抽穗开花期颖花总量已基本确定,高温并没有导致颖花显著退化,但导致了花粉败育,空秕粒增多,结实率降低。而食用品质方面,与对照相比,扬稻 6 号与南粳 43 的可溶性糖和蛋白质含量均呈下降趋势,而直链淀粉含量恰恰相反,呈上升趋势。并且随着胁迫温度的提高和时间的延长,2 个水稻品种的直链淀粉含量急剧上升,而前 2 个指标急剧下降。直链淀粉含量是决定蒸煮食味品质优劣的最重要的内在因素之一,已有的研究表明^[9-11]:直链淀粉含量高,米饭硬、黏性小、光泽差,并且直链淀粉含量高与米饭的弹力度、附着性、最高黏度、崩解值、消减值以及味度值呈显著或极显著负相关。目前降低稻米中的直链淀粉含量应是水稻品质育种的主要目标之一。因此抽穗期高温也影响了水稻的食用品质。

众所周知,长江流域是最重要的水稻种植带,由于其特殊的气候与地域条件,加上全球气候变暖的趋势日益加剧,该地区双季早稻与单季中籼稻在抽穗开花时遭遇高温越来越严重^[12-13]。现有的许多试验已

经证明^[14-16],水稻抽穗开花期遭遇高温将会引起颖花高度不育,结实率和产量明显下降,这与本文的研究结果基本一致。但是关于稻米品质,国内外学者主要集中研究灌浆结实期高温对其影响,灌浆前期气温与稻米加工品质和籽粒的灌浆充实过程密切相关,通常灌浆前期日均温在 26℃ 以上会使稻米的加工品质下降,但影响不同的水稻品种稻米品质的灌浆前期日均温以及持续时间也所差异^[17-19]。而抽穗开花期高温主要影响水稻花粉的发育,因此研究抽穗开花期高温对稻米品质影响的比较少。本研究发现抽穗开花期高温也明显降低扬稻 6 号与南粳 43 的稻米品质,并且随胁迫温度的提高与胁迫时间的延长,2 个稻米品质下降幅度加大,这与许多灌浆期高温胁迫的研究结果相似。

另外,由本研究结果可知,高温对于不同水稻品种的产量构成要素和品质的影响程度也有所差异。根据热害指数的大小,在相同温度胁迫下,扬稻 6 号的热害指数稍小于南粳 43,而扬稻 6 号的产量构成要素、加工品质、外观品质和食用品质受高温伤害的程度确实轻于南粳 43,表明扬稻 6 号的耐高温能力高于南粳 43。因此,加强耐热性水稻品种的选育,对促进长江流域水稻的安全生产和稳定发展有重要意义。

参考文献:

[1]陶龙兴,谈惠娟,王熹,等.超级杂交稻国稻 6 号对花期结实期高温热害的反应[J].中国水稻科学,2007,21(5):

- 518-524.
- [2] Yao F M, Xu Y L, Lin E D, et al. Assessing the impacts of climate change on rice yields in the main rice areas of China [J]. *Climatic Change*, 2007, 80(3):395-409.
- [3] 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.
- [4] 郑志广. 光温条件对水稻结实及干物质生产的影响[J]. *北京农学院学报*, 2003, 18(1):13-16.
- [5] 盛婧, 陶红娟, 陈留根. 灌浆结实期不同时段温度对水稻结实与稻米品质的影响[J]. *中国水稻科学*, 2007, 21(4):396-402.
- [6] 滕中华, 智丽, 宗学风, 等. 高温胁迫对水稻灌浆结实期叶绿素荧光、抗活性氧活力和稻米品质的影响[J]. *作物学报*, 2008, 34(9):1662-1666.
- [7] 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):132-135.
- [8] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京:高等教育出版社, 2000:134-261.
- [9] Reddy K R, Subramanian R, Zakiuddin S A, et al. Viscoelastic properties of rice-flour paste and their relationship to amylase content and rice quality[J]. *Cereal Chem.*, 1994, 71(6):548-552.
- [10] Varavinit S, Shobsngob S, Warunee V. Effect of amylase content on gelatinization, rerogradation and pasting properties of flours from different cultivars of Thai rice[J]. *Starch/Stärke*, 2003, 55(9):410-415.
- [11] 陆艳婷, 张小明, 叶胜海, 等. 密穗型和散穗型粳稻穗部不同部位直链淀粉含量的差异分析[J]. *中国水稻科学*, 2007, 21(4):391-395.
- [12] 李守华, 田小海, 黄永平, 等. 江汉平原近 50 年中稻花期危害高温发生的初步分析[J]. *中国农业气象*, 2007, 28(1):5-8.
- [13] 谢晓金, 李秉柏, 申双和, 等. 高温胁迫对扬稻 6 号剑叶生理特性的影响[J]. *中国农业气象*, 2009, 30(1):84-87.
- [14] 张彬, 芮雯奕, 郑建初, 等. 水稻开花期花粉活力和结实率对高温的响应特征[J]. *作物学报*, 2007, 33(7):1177-1181.
- [15] Matsui T, Omasa K, Horie T. High temperature at flowering inhibits swelling of pollen grains, a driving force for thecae dehiscence in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Plant Production Science*, 2000, (3):430-434.
- [16] 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.
- [17] 金正勋, 杨静, 钱春荣, 等. 灌浆成熟期温度对水稻籽粒淀粉合成关键酶活性及品质的影响[J]. *中国水稻科学*, 2005, 19(4):377-380.
- [18] 朱碧岩, 程方民. 稻米外观品质形成动态变化规律及结实期温度的影响[J]. *华南师范大学学报*, 2000, (3):75-80.
- [19] Toshio T. Relation between mean air temperature during ripening period of rice and amylographic characteristics or cooking quality[J]. *Japan Crop Science*, 1999, 68(1):45-49.

(上接第 410 页)

- [3] 李志伟, 王双喜, 高昌珍, 等. 以温度为主控参数的日光温室综合环境控制系统的研制与应用[J]. *农业工程学报*, 2002, 18(3):68-71.
- [4] 佟国红, 王铁良, 白义奎, 等. 日光温室节能墙体的选择[J]. *可再生能源*, 2003, (4):14-16.
- [5] 陈端生. 中国节能型日光温室建筑与环境研究进展[J]. *农业工程学报*, 1994, 10(1):123-129.
- [6] 孟力力, 杨其长, 宋明军. 北京地区日光温室温光及蓄热性能的试验研究[J]. *陕西农业学报*, 2008, 54(4):61-64.
- [7] 王斌, 杨永春. 不同天气下的温室环境日变化研究[J]. *安徽农业科学*, 2009, 37(21):10245-10246, 10249.
- [8] 章熙民, 任泽霏. 传热学[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2001:2-6.
- [9] 柴立龙, 马承伟, 籍秀红. 北京地区日光温室节能材料使用现状及性能分析[J]. *农机化研究*, 2007, (8):17-21.
- [10] 徐刚毅, 周长吉. 日光温室 PE 发泡自防水保温被的研制和性能测试[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(1):128-131.
- [11] 周长吉, 周新群, 桂金光. 几种日光温室复合保温被保温性能分析[J]. *农业工程学报*, 1999, 15(2):168-171.
- [12] 王铁良, 孟少春. 单坡温室设计与建造[M]. 沈阳:辽宁科技出版社, 2003:49-52.
- [13] 佟国红, David M. Christopher. 墙体材料对日光温室温度环境影响的 CFD 模拟[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(3):153-157.
- [14] 杨仁全, 马承伟, 刘水丽, 等. 日光温室墙体保温蓄热性能模拟分析[J]. *上海交通大学学报(农业科学版)*, 2008, 26(5):449-453.
- [15] 王宏丽, 任雷, 党永华, 等. 关中地区日光温室北面复合保温墙体的传热研究[J]. *北方园艺*, 2008, (7):113-115.
- [16] 马承伟, 卜云龙, 籍秀红, 等. 日光温室墙体夜间放热量计算与保温蓄热性评价方法的研究[J]. *上海交通大学学报(农业科学版)*, 2008, 26(5):411-415.
- [17] 张立芸, 徐刚毅, 马承伟, 等. 日光温室新型墙体结构性能分析[J]. *沈阳农业大学学报*, 2006, 37(3):459-462.