

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2008.02176

穗肥施量对水稻植株形态、群体生态及穗叶温度的影响

闫川 丁艳锋 王强盛 李刚华 刘正辉 缪小建 郑永美 魏广彬
王绍华*

(南京农业大学农业部作物生长调控重点开放实验室 / 江苏省信息农业高新技术研究重点实验室, 江苏南京 210095)

摘要: 以 2 个籼、粳稻品种为材料, 设置高、中、低 3 个穗肥处理, 以空白为对照, 构建不同的群体结构, 研究穗肥施量对植株形态和群体生态及穗叶温度的影响。结果表明, 穗肥施量对穗长、穗弯曲度、叶长和叶角有明显影响; 不同穗肥处理群体内部温度、湿度、光照强度和 CO₂ 浓度等微气象因子具有一定差异, 中肥处理具有良好的群体微气象环境; 此外, 中肥处理群体具有适宜的 LAI、净光合速率和蒸腾速率, 冠层温度较低; 施肥水平显著影响植株器官的温度, 穗叶的温度随穗肥施量的增加而降低, 中肥与高肥处理植株穗叶的温度差异不显著, 但与低肥和空白处理差异显著。研究结果说明通过优化田间管理如合理的施肥来构建良好的群体, 对降低植株穗叶和冠层温度以提高水稻抗热害能力效果显著。

关键词: 水稻; 穗肥; 形态; 群体生态; 穗叶温度

Effect of Panicle Fertilizer Application Rate on Morphological, Ecological Characteristics, and Organ Temperature of Rice

YAN Chuan, DING Yan-Feng, WANG Qiang-Sheng, LI Gang-Hua, LIU Zheng-Hui, MIAO Xiao-Jian, ZHENG Yong-Mei, WEI Guang-Bin, and WANG Shao-Hua*

(Key Laboratory of Crop Growth Regulation, Ministry of Agriculture / High-Tech Key Laboratory of Information Agriculture of Jiangsu Province, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, Jiangsu, China)

Abstract: Using two *japonica* and *indica* rice cultivars with three panicle fertilizer application rate treatments and a control, different populations of rice were constructed, and the effect of panicle fertilizer application rate (PFAR) on morphological, ecological characteristics and organ temperature of rice were studied. The results showed that PFAR had a significant effect on length of panicle, panicle camber, length of leaf and leaf angle. It was also observed that air temperature, humidity, light intensity and content of CO₂ were also affected by different PFAR treatments, medium PFAR was proved to be best for microclimate within rice population. Besides, there were felicitous leaf area index, length of second leaf, photosynthetic rate, transpiration and lower canopy temperature at medium PFAR. The temperature of plant organs was significantly affected by PFAR, the more the PFAR, the lower the temperature of panicle and leaf. The organ temperature was significantly different at the 0.05 level between medium PFAR and lower PFAR, control treatments, while not significantly between medium PFAR and higher PFAR. This study clearly showed that appropriate agronomic practices, such as PFAR, have a significant effect on the temperature of plant organs and canopy, and also enhance the resistance to heat stress.

Keywords: Rice; Panicle fertilizer; Morphological; Microclimate; Temperature of panicle and leaf

国内外有关研究表明, 到 21 世纪末全球气温将会上升 1.4~5.8℃, 种植业将面临高温挑战, 热害已

基金项目: 国家粮食丰产科技工程项目(2006BAD02A03); 国家自然科学基金项目(30471016)

作者简介: 闫川(1981–), 男, 安徽宿州人, 博士研究生, 主要从事作物生理生态研究。

*通讯作者(Corresponding author): 王绍华, 博士生导师, Tel: 025-84396475; E-mail: wangsh@njau.edu.cn

Received(收稿日期): 2008-03-06; Accepted(接受日期): 2008-05-03.

成为水稻生产的主要灾害性气候因素之一^[1-4]。关于高温胁迫与水稻生长发育及产量形成的关系,国内外学者做了很多研究^[5-9]。已有学者通过研究作物冠层特征、冠层温度以及两者的关系来揭示作物抗热避热的生态学机制。但现有的研究主要集中在小麦冠层温度及相关影响因子上,认为冠层温度的高低可较合理地反映土壤水分变化状况、作物水分亏缺以及受高温胁迫程度。Garrity 等^[10]发现高温胁迫下冠层温度与结实率呈显著负相关, Fischer 等^[11]指出不同基因型小麦以及同一品种不同施肥处理由于具有不同的群体结构,其穗部温度也不同。在水稻上, Tumer 等^[12]对水分胁迫程度、冠层温度、叶片卷曲度与生长的关系作了研究,发现随着土壤含水量的下降,冠气温差(冠温和气温的差值)增大,叶片卷曲度增加,干物质积累降低。Chauham 等^[13]研究表明,土壤含水量下降时,水稻冠层温度上升,胁迫较重时可提高 3~4℃,扬花期冠层温度与稻谷产量、结实率均呈显著负相关。国内对水稻器官温度与施肥等栽培措施关系的研究很少,且缺少这方面的直接证据。此外,在水稻研究上,很少涉及不同栽培管理措施下水稻群体特征对器官温度的影响及其原因。

本试验设置不同穗肥水平,在水稻抽穗期分别测定不同群体内部微气象因子、植株器官温度、冠层温度,及群体冠层红外热像图谱,分析穗肥施量对水稻群体构成、产量结构、植株器官温度及冠层温度的影响,以揭示水稻抗热避热的生态学机制,为抗热避热栽培技术应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试验设计

供试品种为 2401(V1, 常规粳稻)和 II 优 107(V2, 杂交籼稻)。

试验于 2006 年和 2007 年分别在江苏省南京市南京农业大学土桥和淳化试验站进行。粳稻在株行距为 13.3 cm × 30 cm, 基肥(基肥和分蘖肥的总量)为 67.5 kg N hm⁻² 不变的条件下, 设 N0, 0 kg N hm⁻²; N1, 67.5 kg N hm⁻²; N2, 135.0 kg N hm⁻²; N3, 202.5 kg N hm⁻² 4 个穗肥水平。籼稻在株行距为 13.3 cm × 30 cm, 基肥为 56.25 kg N hm⁻² 不变的条件下, 设 N0, 0 kg N hm⁻²; N1, 56.25 kg N hm⁻²; N2, 112.50 kg N hm⁻²; N3, 168.75 kg N hm⁻² 4 个穗肥处理。采用裂区设计, 品种为主区, 肥料处理为副区, 重复 3 次,

小区面积 50 m²。

试验地土壤为黏壤土, 含全氮 0.92 g kg⁻¹、碱解氮 123.3 mg kg⁻¹、有效磷 33.8 mg kg⁻¹、速效钾 109.6 mg kg⁻¹。播种期为 5 月 16 日, 栽插期为 6 月 16 日。大田期氮肥分基肥、蘖肥、促花肥和保花肥 4 次施用。其中基肥与蘖肥比例为 8 : 2, 基肥于移栽前整地时施用, 蘖肥于移栽后 1 周施用; 促花肥与保花肥比例为 5 : 5, 促花肥于倒 3.5 叶期施用; 保花肥于倒 1.5 叶期施用。基施 P₂O₅ 为 135 kg hm⁻²; 基施 K₂O 90 kg hm⁻², 倒 3.5 叶时施 K₂O 90 kg hm⁻²。水稻抽穗期保持田间 2 cm 的浅水层, 其他田间管理按高产栽培要求进行。

1.2 测定内容与方法

1.2.1 株型和群体结构 于齐穗期测定各处理植株的高度、穗长, 并分别测定剑叶、倒 2 叶的长和叶角(叶基角和叶开角)。叶基角为叶片基部与茎秆的夹角; 叶开角为叶耳和叶尖连线延长线与茎秆的夹角; 叶长指叶片完全伸展后的长度。水稻抽穗期考察每穴蘖数和叶面积指数(LAI)。

1.2.2 净光合速率和蒸腾速率 每小区随机选 5 株, 采用美国 LI-COR 公司生产的 LI-6400 型光合系统于抽穗期的 10:00—11:00 分别测定剑叶、倒 2 叶及倒 3 叶的净光合速率和蒸腾速率。

1.2.3 体-气温差 选择水稻抽穗期晴好的天气, 于 13:00—13:30 采用非接触式红外测温仪(Foodpro, Raytek, USA)测定穗、叶温。每小区随机定 5 株, 测定剑叶、倒 2 叶和倒 3 叶中部的温度, 表示叶温; 测定穗中部向阳面和背阳面的温度, 取平均值表示穗温。对 3 个重复处理测定时采用田间循环往复 3 次的方法。数据处理时先求取每处理 5 株的平均值, 再对 3 次重复的平均值进行比较。大气温度与穗、叶温的差值简称体-气温差。

1.2.4 冠层温度 选择抽穗期晴好的天气, 于 12:00—13:00 用美国产红外热像仪(Therma CAM, FLIR SYSTEMS, USA), 以仪器与水稻冠层呈 45°角测定各处理的冠层温度(冠温)。

1.2.5 冠层内微气象 于抽穗期测定行与行之间冠层中部(即倒 3 叶叶耳高度处)的光照强度、温度、湿度和 CO₂ 浓度。用杭州泽大仪器公司生产的微型温湿度自动记录仪(ZDR-20)测定温度、湿度, 利用计算机配套软件设定每 5 min 记录 1 次, 计算机自动读出记录数据; 用 LI-6400 型光合系统测定 CO₂ 浓度; 用冠层分析仪(PAR/LAI Ceptometer LP-80)于

12:00—13:00 之间测定光照强度。

1.2.6 产量结构 成熟期调查穗数, 取样测定穗粒数、结实率、千粒重; 每小区去掉边行后收获脱粒, 扬净晒干后称重, 并立即称 3 份 100 g 样品, 放在烘箱中烘至恒重, 测定籽粒含水量, 将籽粒水分校正到 13.5%(籼稻)和 14.5%(粳稻), 计算实产。

1.3 数据处理

在 Microsoft Excel 中进行数据整理, 采用 SPSS 11.5 软件进行统计分析。2006 年与 2007 年的试验结果趋势一致, 因此除图 1 和表 1(图 1 为 2007 年的测定结果, 表 1 为两年的测定结果)外, 本文均取各相同观察测定内容的平均值。

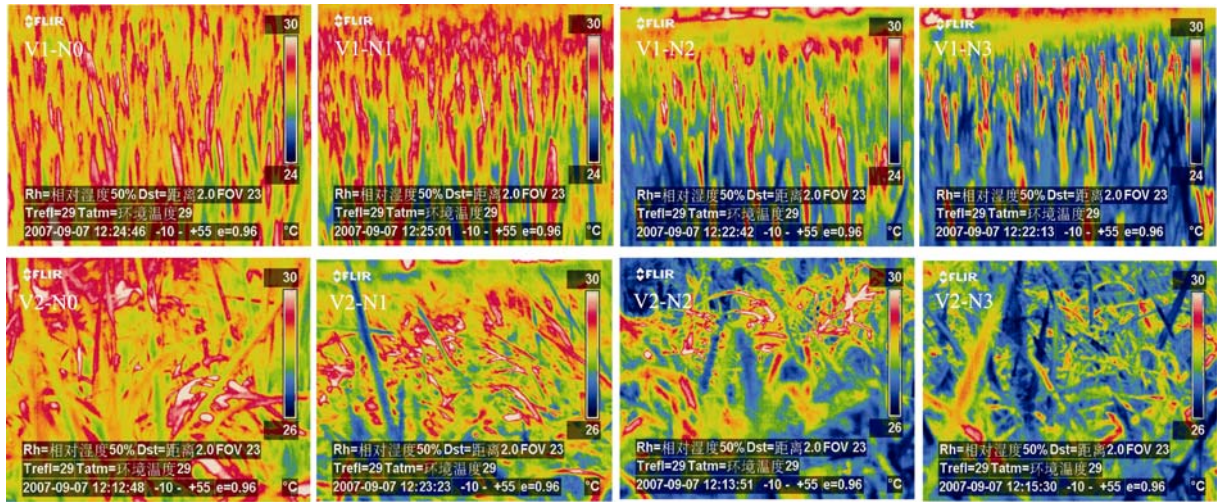


图 1 不同穗肥处理群体冠层红外热像图谱

Fig. 1 Infrared image of canopy in different panicle fertilizer treatments

表 1 不同穗肥处理的群体结构

Table 1 Effect of different panicle fertilizer application rates on canopy structure

品种 Cultivar	处理 Treatment	单穴穗数 Panicles per hill	叶面积指数 Leaf area index	株高 Plant height (cm)
2401	N0	6.5 c	3.73 c	91.8 c
	N1	10.0 b	5.89 b	103.4 b
	N2	11.2 a	6.28 b	106.8 ab
	N3	12.0 a	7.92 a	109.3 a
II 优 107 II you 107	N0	8.0 c	5.22 c	110.2 b
	N1	9.0 bc	6.94 b	117.7 ab
	N2	9.6 b	7.29 b	122.3 a
	N3	11.0 a	8.44 a	125.0 a

在相同品种的各处理间, 标以不同字母的值在 0.05 水平上差异显著。N0、N1、N2 和 N3 表示穗肥施用量处理(N0, 空白处理; 穗肥施用量大小顺序为 N0<N1<N2<N3)。

Values followed by a different letter within a column for the same cultivar are significantly different at 0.05 probability level. N0, N1, N2, and N3 were panicle fertilizer application rate treatment (N0: control treatment; panicle fertilizer application rate order was N0<N1<N2<N3).

2 结果与分析

2.1 穗肥施量对群体结构和产量的影响

不同穗肥施量对群体结构具有显著的影响。由表 1 可以看出, 水稻抽穗期单穴穗数受穗肥施量的影响显著, 随施氮水平的提高而增加, N3 单穴穗数最高, 如 2401 品种由 N0 的 6.5 个提高到 N3 的 12.0 个, N0、N1 和 N2 间差异显著($P<0.05$)。水稻叶面积

指数(LAI)与穗肥的施用量密切相关。LAI 随穗肥的施用量增加而迅速增大, N3 处理 LAI 最大, 而 N0 的 LAI 最小, 品种间变化趋势一致。株高也受施氮量的显著影响, 随施氮水平的提高而增高, 2401 品种高氮处理 N3 的株高达 109.3 cm, 而 N0 仅为 91.8 cm, 相差 17.5 cm, II 优 107 品种 N3 与 N0 处理的株高相差 14.8 cm。

方差分析表明, 不同穗肥处理的产量和产量结

构具有显著差异(表 2)。2401 和 II 优 107 的籽粒产量均以中等穗肥水平(N2)最高, 高肥(N3)次之, N0 最低, N2、N3 和 N0 三个穗肥水平的籽粒产量间差异均达显著水平($P<0.05$)。在产量结构方面, 两品种均表现为 N2 处理的每穗粒数最高; 穗数依施 N 水平

的增加而显著增加。以上结果说明基肥一定时, 中等穗肥施量有利于获得高产。因 2007 年籼稻灌浆后期江苏省南京地区遭受台风的危害, 籼稻倒伏造成 II 优 107 品种的理论产量与实际产量差异过大, 但试验结果趋势与粳稻相同。

表 2 2006 和 2007 年不同穗肥处理的产量结构
Table 2 Effect of different panicle fertilizer application rates on grain yield in 2006 and 2007

年份/品种 Year/Cultivar	处理 Treatment	穗数 The panicle ($\times 10^4 \text{ hm}^{-2}$)	穗粒数 Spikelets per panicle	结实率 Seed-setting rate (%)	千粒重 1000-grain weight (g)	产量 Yield (kg hm^{-2})
2006						
2401	N0	159.64 c	158.6 b	93.1 a	27.35 a	6136 d
	N1	246.56 b	161.0 b	91.4 b	27.12 a	8873 c
	N2	274.54 a	169.4 a	90.4 bc	26.36 b	9942 a
	N3	293.34 a	160.5 b	88.5 c	26.20 b	9302 b
II 优 107 II you 107	N0	197.30 d	198.5 c	84.4 a	27.50 a	8552 d
	N1	219.50 c	253.3 a	79.4 b	24.71 b	9344 c
	N2	234.65 b	270.7 a	78.7 b	26.52 ab	11798 a
	N3	269.56 a	228.6 b	74.1 c	25.40 b	10434 b
2007						
2401	N0	166.02 c	174.0 b	95.5 a	26.07 b	6860 d
	N1	254.44 b	175.6 b	89.2 b	26.94 a	8983 c
	N2	286.58 a	188.4 a	89.0 b	26.06 b	11 538 a
	N3	307.86 a	172.3 b	88.3 b	25.02 c	9596 b
II 优 107 II you 107	N0	203.50 c	203.9 c	80.0 a	25.50 a	6594 d
	N1	231.40 b	276.9 a	79.4 a	23.63 b	8232 c
	N2	246.31 b	283.1 a	77.5 b	25.40 a	10224 a
	N3	281.54 a	240.4 b	74.5 c	24.24 b	9002 b

在相同品种的各处理间, 标以不同字母的值在 0.05 水平上差异显著。N0, N1, N2 和 N3 表示穗肥施用量处理(N0, 空白处理; 穗肥施用量大小顺序为 $N0<N1<N2<N3$)。

Values followed by a different letter within a column for the same cultivar are significantly different at 0.05 probability level. N0, N1, N2, and N3 were panicle fertilizer application rate treatment (N0, control treatment; panicle fertilizer application rate order was $N0<N1<N2<N3$).

2.2 穗肥施量对植株形态和叶片光合特性的影响

由表 3 可以看出, 穗肥施量对穗长、穗弯曲度、叶长和叶角均有明显影响。2401 和 II 优 107 品种的穗长均以 N2 处理最大, 其次为 N1 和 N3, N0 最小, N2 与 N3 及 II 优 107 的 N1 与 N0 间差异均显著($P<0.05$); 两品种的穗弯曲度均表现为随着穗肥施量的增加而增大, N3 处理最大, N3 与 N2 和 N0 间均差异显著。对叶型的影响, 随着穗肥水平的提高, 剑叶长度呈增大趋势, N3 最大, 其次顺序为 N2、N1 和 N0, 其中, II 优 107 品种 4 个施肥水平的剑叶长度差异显著; 剑叶叶基角和叶开角均表现为随穗肥施量的增加而增大; 两品种倒 2 叶长度均表现为 N2 处理最大, 其次顺序为 N3、N1 和 N0, 即随穗肥水平的提高叶长

先增后减; 倒 2 叶叶基角和叶开角的趋势同剑叶, 均表现为随着穗肥水平的提高而增大。

穗肥水平对剑叶、倒 2 叶和倒 3 叶的净光合速率及蒸腾速率有明显影响(表 4)。两品种均随穗肥施量的增加, 叶片净光合速率呈增大趋势, N3 处理最大, 其次顺序为 N2、N1 和 N0, 其中, N3 与 N2 的差异不显著, N3 与 N1 和 N0 的差异显著。蒸腾速率均表现为 N3 处理最大, 其次顺序为 N2、N1 和 N0, 即高肥处理的蒸腾速率较大, 但 N3 与 N2 的差异不显著。由于叶片蒸腾会降低叶片的温度, 所以, 蒸腾速率较大的处理其叶片温度较低。因此, 中肥 N2 处理塑造的植株形态优良、叶片光合特性较强, 且穗叶的温度较低, 不仅具有较高的光合速率, 而且具有较高的抗高温胁迫能力, 利于高产和稳产的获得。

表 3 不同穗肥处理对植株形态性状的影响
Table 3 Effect of different panicle fertilizer application rates on morphological characteristics

品种 Cultivar	处理 Treat.	穗 Panicle		剑叶 Flag leaf			倒 2 叶 The second leaf		
		穗长	穗弯曲度	叶长	叶基角	叶开角	叶长	叶基角	叶开角
		LP (cm)	PC (°)	LL (cm)	LBA (°)	LDA (°)	LL (cm)	LBA (°)	LDA (°)
2401	N0	17.8 c	13.2 c	20.3 b	11.8 c	12.0 c	34.5 c	13.6 c	14.4 c
	N1	19.3 ab	17.0 b	25.8 a	15.0 b	16.0 b	38.8 b	17.0 b	17.0 bc
	N2	20.0 a	18.8 b	27.5 a	16.0 b	17.2 b	40.8 a	18.7 ab	19.0 ab
	N3	18.3 bc	21.4 a	28.1 a	18.6 a	21.2 a	40.1 ab	20.4 a	21.7 a
II 优 107	N0	27.6 c	88.4 c	42.3 d	16.0 c	34.2 c	54.6 c	19.2 c	37.2 c
II you 107	N1	29.2 b	99.2 b	50.1 c	19.0 b	57.8 b	64.4 b	21.2 bc	61.2 b
	N2	31.0 a	101.4 b	55.8 b	20.6 ab	62.6 b	73.4 a	22.4 ab	71.2 b
	N3	28.8 bc	111.6 a	61.6 a	22.8 a	78.8 a	70.8 a	23.8 a	81.4 a

在相同品种的各处理间, 标以不同字母的值在 0.05 水平上差异显著。N0、N1、N2 和 N3 表示穗肥施用量处理(N0, 空白处理; 穗肥施用量大小顺序为 N0<N1<N2<N3)。

Values followed by a different letter within a column for the same cultivar are significantly different at 0.05 probability level. LP: length of panicle; PC: panicle camber; LL: length of leaf; LBA: leaf basic angle; LDA: leaf drooping angle. N0, N1, N2, and N3 were panicle fertilizer application rate treatment (N0, control treatment; panicle fertilizer application rate order was N0<N1<N2<N3).

表 4 不同穗肥处理对叶片光合特性的影响
Table 4 Effect of different panicle fertilizer application rates on photosynthesis of leaf

品种 Cultivar	处理 Treat.	剑叶 Flag leaf		倒 2 叶 The second leaf		倒 3 叶 The third leaf	
		净光合速率	蒸腾速率	净光合速率	蒸腾速率	净光合速率	蒸腾速率
		PR($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	TR ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	PR ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	TR ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	PR ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	TR ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
2401	N0	23.9 c	13.7 b	22.0 b	12.2 c	11.5 c	10.1 c
	N1	26.4 b	14.9 ab	23.3 ab	13.5 bc	13.8 b	11.4 b
	N2	27.9 ab	15.1 ab	23.8 ab	14.4 ab	15.5 ab	13.2 a
	N3	29.1 a	16.0 a	24.8 a	15.3 a	16.1 a	13.3 a
II 优 107	N0	26.2 c	14.9 c	20.3 c	13.1 b	10.9 c	10.1 c
II you 107	N1	29.0 b	16.4 b	23.7 b	15.2 a	12.0 bc	12.1 b
	N2	30.3 ab	17.1 ab	25.1 ab	16.4 a	13.3 ab	13.9 ab
	N3	31.6 a	17.7 a	26.1 a	16.8 a	14.2 a	14.4 a

在相同品种的各处理间, 标以不同字母的值在 0.05 水平上差异显著。N0、N1、N2 和 N3 表示穗肥施用量处理(N0, 空白处理; 穗肥施用量大小顺序为 N0<N1<N2<N3)。

Values followed by a different letter within a column for the same cultivar are significantly different at 0.05 probability level. PR: photosynthetic rate; TR: transpiration rate. N0, N1, N2, and N3 were panicle fertilizer application rate treatment (N0, control treatment; panicle fertilizer application rate order was N0<N1<N2<N3).

2.3 穗肥施量对群体微气象因子的影响

不同穗肥水平群体内部温度、湿度、光照强度和 CO₂ 浓度等微气象因子具有一定差异(表 5)。不同穗肥处理群体内部温度水平表现为 N2 高于 N3, 但差异不显著, N2 低于 N1 和 N0, 差异显著; 各处理群体内部相对湿度随穗肥水平的增加而升高, 但 N2 处理群体的湿度与 N3 处理差异显著, 而与 N1 差异不显著; 群体内部光照强度水平表现为 N0>N1>N2>N3, 这主要与群体大小有密切关系; 群体内部 CO₂ 浓度随穗肥水平的增加而降低, 但 N2 处理群体 CO₂ 浓度与 N3 差异显著, 而与 N1 差异不显著。N3 处理群体过大, 造成

LAI 偏大、内部微气象条件恶化, 而 N2 处理具有适宜的群体结构和群体 LAI, 有利于水稻群体内部空气交换、增加 CO₂ 供应, 改善中下层叶片受光态势, 提高水稻生长中后期的群体光合能力。因此可以得出结论, N2 处理具有利于产量形成的良好群体微气象。

2.4 穗肥施量对植株体-气温差的影响

张文忠等^[14]2001—2004 年通过对水稻的连续观测, 认为中午 13:00 冠气温差能较好地反映水稻的水分亏缺状况, 是测定冠气温差的最好时间。本研究通过对抽穗期 10:00—15:00 时间段每隔 0.5 h 的连续观测, 得知 13:30 时植株穗叶的体-气温差最大, 因

此试验安排在 13:00—13:30 来测定各处理植株器官的温度。

穗肥水平对穗叶体-气温差影响的差异显著(表 6)。N3 处理器官的体-气温差最大, 其次顺序为 N2、N1 和 N0, 表示在相同环境下, 高、中肥(N3、N2)处理植株穗叶的温度较低, 而不施穗肥的 N0 处理植

株穗叶的温度最高, 即植株穗叶的温度随穗肥水平的增加而降低。此外, N3 处理植株穗叶的体-气温差与 N1 和 N0 的差异显著, 而与 N2 差异不显著, 说明了中等穗肥(N2)处理群体大小比较合适, 群体内环境优良, 植株器官温度较低, 有较高的抵抗外部高温胁迫的能力。

表 5 不同穗肥处理群体内部微气象因子比较

Table 5 Effects of panicle fertilizer application rates on the microclimate in rice population

品种 Cultivar	处理 Treatment	温度 Temperature (°C)	相对湿度 Relative humidity (%)	光照强度 Light intensity ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	CO ₂ 浓度 CO ₂ concentration ($\mu\text{mol mol}^{-1}$)
2401	N0	32.6 a	59.7 a	496.3 a	371.9 a
	N1	31.5 b	68.8 b	374.7 b	366.1 b
	N2	30.1 c	72.4 b	334.3 c	364.8 b
	N3	29.2 c	81.7 c	217.7 d	358.1 c
II 优 107 II you 107	N0	31.3 a	64.0 a	129.0 a	367.8 a
	N1	30.1 b	72.7 b	65.6 b	361.8 b
	N2	28.9 c	76.0 b	53.7 b	360.6 b
	N3	28.1 c	83.7 c	29.4 c	354.9 c

在相同品种的各处理间, 标以不同字母的值在 0.05 水平上差异显著。N0、N1、N2 和 N3 表示穗肥施用量处理(N0, 空白处理; 穗肥施用量大小顺序为 N0<N1<N2<N3)。

Values followed by a different letter within a column for the same cultivar are significantly different at 0.05 probability level. N0, N1, N2, and N3 were panicle fertilizer application rate treatment (N0, control treatment; panicle fertilizer application rate order was N0<N1<N2<N3).

表 6 穗肥施量对水稻穗叶体-气温差的影响

Table 6 Effects of panicle fertilizer application rate on temperature difference between air and panicle, leaf of rice

品种 Cultivar	处理 Treatment	体-气温差 Temperature difference between air and organ of rice (°C)			
		穗 Panicle	剑叶 Flag leaf	倒 2 叶 The second leaf	倒 3 叶 The third leaf
2401	N0	3.10 c	3.47 c	3.51 c	3.65 c
	N1	3.53 b	3.75 b	3.89 b	4.06 b
	N2	3.87 ab	3.88 ab	4.14 ab	4.20 ab
	N3	4.15 a	4.19 a	4.37 a	4.45 a
II 优 107 II you 107	N0	2.14 c	2.30 c	2.81 c	3.19 c
	N1	2.58 b	2.80 b	3.40 b	3.75 b
	N2	2.77 ab	3.21 a	3.80 a	4.00 ab
	N3	2.98 a	3.36 a	3.96 a	4.21 a

在相同品种的各处理间, 标以不同字母的值在 0.05 水平上差异显著。N0、N1、N2 和 N3 表示穗肥施用量处理(N0, 空白处理; 穗肥施用量大小顺序为 N0<N1<N2<N3)。

Values followed by a different letter within a column for the same cultivar are significantly different at 0.05 probability level. N0, N1, N2, and N3 were panicle fertilizer application rate treatment (N0: control treatment; panicle fertilizer application rate order was N0<N1<N2<N3).

2.5 穗肥施量对水稻冠层温度的影响

红外热像图谱中不同颜色表示冠层的温度具有差异, 蓝色表示温度较低, 红色表示温度较高。热像图谱中柱型温度图标指示的温度范围为 24~30°C(V1) 和 26~30°C(V2)。该图谱可以直观地反映出水稻冠温与施肥等栽培措施的关系。

由图 1 可知两品种在 4 个施肥处理下的冠温均

存在差异。两品种均表现为冠温随穗肥水平的增加而降低, 即 N0 > N1 > N2 > N3, 高肥处理的冠层温度最低, 不施穗肥处理的最高, 其差异最大可达 2°C 左右。说明营养胁迫越严重其冠层温度越高。中、高穗肥处理叶片光合能力强、蒸腾速率大, 从而降低穗叶温度和冠温, 对提高水稻抗热害能力具有一定的作用。

3 讨论

国内外已有学者通过研究作物冠层特征、冠层温度以及两者的关系来揭示作物抗热避热的生态学机制。Mackill 等^[15]发现在同一气温条件下,水稻穗部温度越低热害程度越小,许为钢等^[16]发现冠层温度越低其耐热性越强,Prasad 等^[17]认为不同水稻群体,其冠温具有差异,张彬等^[18]发现不同施肥水平下大气和水稻穗部温度差与叶面积指数、生物量和有效分蘖数呈极显著正相关,与穗部透光率呈极显著负相关。

穗形和叶形是影响水稻植株空间构型的重要因素,通过对本试验构建的不同群体进行研究发现,穗肥施量对穗长、穗弯曲度、叶长和叶角有明显影响,穗子长度和弯曲度以及叶片长度和叶角都随穗肥施量的增加而表现一定的规律。中等穗肥施量的穗子长度最大,同时穗粒数最多,利于高产的形成;倒2叶长度均表现为N2处理最大,依次为N3、N1和N0,即随着穗肥施量的增加而叶长先增后减,这与孙成明等^[19]研究的结论相同;叶基角和叶开角表现为随穗肥施量的增加而增大。不同植株空间构型的群体内部微气象因子差异明显,N2处理有利于水稻群体内部空气交换、增加CO₂供应,改善中下层叶片受光态势,提高水稻生长中后期的群体光合能力,有利于高产的获得,而高肥处理易造成群体内部较高的湿度,且光照强度小,不利于健壮植株的形成。此外,中、高肥处理叶片的光合速率及蒸腾速率较高,蒸腾速率较大则叶片温度较低。国内外较多的研究认为,高温环境下水稻穗叶的温度与颖花育性密切相关,穗叶温度低的基因型或处理,其颖花育性较高^[10,13,15-16]。因此,中肥处理塑造的植株形态优良、叶片光合特性较强,且穗叶的温度较低,不仅具有较高的光合速率,而且具有较高的抗高温胁迫能力。

研究发现穗肥水平越高水稻冠层温度越低,且植株器官温度也较低,其生态机理可能是较高的施肥量导致大群体的获得,从而总叶面积指数、穗上叶面积指数、有效分蘖数和株高等增大,使穗叶部透光率(穗叶部的光照强度占冠层上方光照强度的百分比)和接受的光能减小;另一方面,群体蒸腾、叶片遮挡、群体代谢加强、散热较快,导致穗叶和冠层的温度较低。不同穗肥施量的水稻冠温具有差异,这表明施肥措施在塑造不同水稻群体特征从而降低水稻穗叶温度和冠温,提高水稻抗热害能力上

具有一定的作用,但过高施肥显著增大群体,造成群体内部微气象恶化,植株质量差易倒伏,产量下降显著。通过本试验和其他研究得知,氮素后移和适当的增加穗肥施量,于倒3.5叶期和倒1.5叶期分两次施用穗肥,可以显著改善田间微生态,是增产的重要原因。本试验中,中等穗肥施量群体结构合理,群体内微气象环境良好,植株器官温度和冠温较低,因而籽粒产量最高。因此,通过科学合理地调控施肥水平等栽培措施,可以建立一个结构合理又抗热害的群体,利于水稻高产稳产的获得。

4 结论

穗肥施量对水稻穗叶形态和群体生态及穗叶温度有显著的调控作用。穗长、穗弯曲度、叶长和叶角明显受穗肥施量的影响。群体内部的温度随穗肥水平的提高而降低,但中肥群体内温度与高肥的差异不显著;群体内部的相对湿度随穗肥水平的提高而升高、光照强度随穗肥水平的提高而降低、CO₂浓度随穗肥水平的提高而降低,但中肥与高肥间的差异显著,因此中肥处理具有良好的群体微气象。此外,中肥处理群体具有较高的净光合速率和蒸腾速率,叶温和冠温较低。施肥水平显著影响植株穗叶的温度,穗叶的温度随穗肥施量的增加而降低,中肥与高肥处理植株穗叶温度的差异不显著,但与低肥和空白处理差异显著。说明通过合理的施肥可以降低水稻穗叶和冠层的温度以提高水稻抗热害的能力。

References

- [1] Houghton J T, Ding Y, Griggs D J. Climate Change 2001: Scientific Basis. New York: Cambridge University Press, 2001. pp 25-28
- [2] Peng S B, Huang J L, Sheehy J E. Rice yield decline with higher night temperature from global warming. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2004, 101: 9971-9975
- [3] IPCC. Climate Change 2001—the Scientific Basis. Cambridge, U K: Cambridge University, 2001. pp 101-125
- [4] Ge D-K(葛道阔), Jin Z-Q(金之庆), Shi C-L(石春林), Gao L-Z(高亮之). Gradual impacts of climate change on rice production and adaptation strategies in southern China. *Jiangsu J Agric Sci* (江苏农业学报), 2002, 18(1): 1-8(in Chinese with English abstract)
- [5] Krishnan P, Swain D K, Chandra Bhaskar B, Nayak S K, Dash R N. Impact of elevated CO₂ and temperature on rice yield and methods of adaptation as evaluated by crop simulation studies. *Agric Ecosyst Environ*, 2007, 122: 233-242

- [6] Yang H-C(杨惠成), Huang Z-Q(黄仲青), Jiang Z-Y(蒋之垠), Wang X-W(王相文). Effects of high temperature on yield and its defense technique of medium rice in 2003. *J Anhui Agric Sci* (安徽农业科学), 2004, 32(1): 3-4(in Chinese with English abstract)
- [7] Horie T, Matsui T, Nakagawa H. Effect of elevates CO₂ and global climate change on rice yield in Japan. In: Omasa K, Kai K, Toda H, eds. *Climate Change and Plants in East Asia*. Tokyo, Japan: Springer-Verlag, 1996. pp 39-56
- [8] Matsui T, Omasa K. Rice (*Oryza sativa* L.) cultivars tolerant to high temperature at flowering: anther characteristics. *Ann Bot*, 2002, 89: 683-687
- [9] 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.). *Plant Prod Sci*, 2000, 3: 430-434
- [10] Garrity D P, O'Toole J C. Selection for reproductive stage drought avoidance in rice, using infrared thermometry. *Agron J*, 1995, 87: 773-779
- [11] Fischer R A, Rees D, Sayre K D, Lu Z M, Condon A G. Wheat yield progress associated with a higher stomatal conductance and photosynthetic rate, and cooler canopies. *Crop Sci*, 1998, 38: 1467-1475
- [12] Tumer N C, O'Toole J C, Cruz R T. Response of seven diverse rice cultivars to water deficits: I. Stress development, canopy temperature, leaf rolling and growth. *Field Crops Res*, 1986, 13: 257-271
- [13] Chauham J S, Moya T B, Singh R K, Singh C V. Influence of soil moisture stress during reproductive stage on physiological parameters and grain yield in upland rice. *Oryza*, 1999, 36: 130-135
- [14] Zhang W-Z(张文忠), Han Y-D(韩亚东), Du H-J(杜宏娟), Huang R-D(黄瑞东), Chen W-F(陈温福). Relationship between canopy temperature and soil water content, yield components at flowering stage in rice. *Chin J Rice Sci* (中国水稻科学), 2007, 21(1): 99-102(in Chinese with English abstract)
- [15] Mackill D J, Coffman W R. Inheritance of high temperature tolerance and pollen shedding in a rice cross. *Z Pflanzenzucht*, 1983, 91: 61-69
- [16] Xu W-G(许为钢), Hu L(胡琳), Gai J-Y(盖钧镒). A study on heat tolerance of wheat cultivars. *Acta Agric Boreali-Sin* (华北农学报), 1999, 14(2): 1-5(in Chinese with English abstract)
- [17] Prasad P V V, Boote K J, Allen L H, Sheehy J E, Thomas J M G. Species, ecotype and cultivar differences in spikelet fertility and harvest index of rice in response to high temperature stress. *Field Crops Res*, 2006, 95: 398-411
- [18] Zhang B(张彬), Zheng J-C(郑建初), Yang F(杨飞), Tian Y-L(田云录), Peng L(彭兰), Li M-A(李明安), Bian X-M(卞新民), Zhang W-J(张卫建). Effects of fertilization level on panicle temperature at heading stage of rice. *Chin J Rice Sci* (中国水稻科学), 2007, 21(2): 191-196(in Chinese with English abstract)
- [19] Sun C-M(孙成明), Fu G-C(伏广成), Dong G-C(董桂春), Yan D-H(阎德湖), Wang Y-L(王余龙). Study on the relationship between rice leaf in heading stage and yield component. *Chin Agric Sci Bull* (中国农学通报), 2005, 21(10): 132-135(in Chinese with English abstract)