

不同施氮量和栽插密度下三角形强化栽培杂交稻抗倒伏性与群体质量的关系

孙永健^{1,2} 陈宇^{1,2} 孙园园^{1,3} 徐徽^{1,2} 许远明⁴ 刘树金^{1,2} 马均^{1,2,*}

(¹四川农业大学 水稻研究所, 四川 温江 611130; ²农业部西南作物生理生态与耕作重点实验室 四川 温江 611130; ³四川省 农业气象中心, 四川 成都 610071; ⁴眉山市东坡区农业局, 四川 眉山 620032; * 通讯联系人, E-mail: majunp2002@163.com)

Relationship Between Culm Lodging Resistance and Population Quality of Hybrids under Triangle-Planted System of Rice Intensification at Different Nitrogen Application Rates and Planting Densities

SUN Yong-jian^{1,2}, CHEN Yu^{1,2}, SUN Yuan-yuan^{1,3}, XU Hui^{1,2}, XU Yuan-ming⁴, LIU Shu-jin^{1,2}, MA Jun^{1,2,*}

(¹Rice Research Institute, Sichuan Agricultural University, Wenjiang 611130, China; ²Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology, and Cultivation Southwest, Ministry of Agriculture, Wenjiang 611130, China ³Agrometeorological Center of Sichuan Meteorological Bureau, Chengdu 610071, China; ⁴Dongpo Agricultural Bureau, Meishan 620032, China; * Corresponding author, E-mail: majunp2002@163.com)

SUN Yongjian, CHEN Yu, SUN Yuanyuan, et al. Relationship between culm lodging resistance and population quality of hybrids under triangle-planted system of rice intensification at different nitrogen application rates and planting densities. *Chin J Rice Sci*, 2012, 26(2): 189-196.

Abstract: The effects of nitrogen (N) application rate and planting density on population quality and culm lodging resistance of rice were investigated with hybrid rice combination II you 498 as material under triangle-planted system of rice intensification (TSRI), and correlation of population quality with culm lodging resistance and grain yield was analyzed. There was an obvious regulatory effect of N application rate and planting density on grain yield, population quality, and lodging resistance of rice culm under TSRI. Compared with other treatments, 150 kg/hm² N application rate coupled with the suitable planting density (40 cm × 40 cm) improved leaf area index (LAI) and light transmission rate in rice population, coordinated bending moment and breaking resistance of basal internodes, alleviated contradiction of panicle and grain, and increased grain yield. At the nitrogen application rate of 225 kg/hm², planting density should be reduced to alleviate deterioration of population quality index and decreased lodging index. The suitable planting density was 50 cm × 50 cm. Correlation analysis indicated population quality was significantly correlated with internode lodging resistance and yield. Middle part light transmission rate in rice population at full heading and 30 days after full heading, and amount of sap flow of rice root at 30 days after full heading might be indicators for grain yield and culm lodging resistance.

Key words: rice; triangle-planted system of rice intensification (TSRI); N application rate; planting density; lodging resistance

孙永健, 陈宇, 孙园园, 等. 不同施氮量和栽插密度下三角形强化栽培杂交稻抗倒伏性与群体质量的关系. *中国水稻科学*, 2012, 26(2): 189-196.

摘 要: 以杂交水稻组合 II 优 498 为材料, 在三角形强化栽培(TSRI)条件下, 研究了施氮量和栽插密度对水稻群体质量及抗倒伏能力的影响, 并探讨了主要群体质量指标与茎秆抗倒伏性及产量间的关系。结果表明, TSRI 下, 施氮量及栽插密度对水稻产量、群体质量以及茎秆基部各节间抗倒伏能力均存在显著的调控作用。施氮量为 150 kg/hm² 与栽插规格 40 cm × 40 cm 配合可提高结实期叶面积指数(LAI)、群体透光率, 协调茎秆基部各节间弯曲力矩与抗折弯矩, 缓和高产栽培的穗粒矛盾, 显著提高籽粒产量; 而施氮量增加至 225 kg/hm², 应适当降低栽插密度, 来缓解群体质量指标的恶化, 降低倒伏指数, 栽插规格 50 cm × 50 cm 为宜。相关性分析表明, 不同施氮量和栽插密度下水稻群体质量指标与茎秆基部各节间抗倒伏能力显著或极显著相关; 结合产量表现, 尤以齐穗期、齐穗后 30 d 中部的群体透光率以及齐穗后 30 d 的根系伤流量对水稻产量及抗倒伏性影响显著。

关键词: 水稻; 三角形强化栽培; 施氮量; 栽插密度; 抗倒伏性

中图分类号: Q945.12; S318; S511.048

文献标识码: A

文章编号: 1001-7216(2012)02-0189-08

收稿日期: 2011-07-25; 修改稿收到日期: 2012-01-04。

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目(2011BAD16B05); 中国气象局西南区域气象中心 2010 年区域重大项目(2010-7); 四川省教育厅资助科研项目(10ZA047); 四川省育种攻关专项(2006YZgg-28)。

水稻要高产,必须以提高生物总产量和经济系数为基础^[1],然而在实现水稻高产、超高产的目标时,经常会遇到倒伏问题。倒伏是水稻高产、稳产、优质的重要限制因素之一。许多学者主要从品种间差异^[2-3]、栽培措施调控^[4-5]开展水稻抗倒伏形态^[2-6]、生理机制^[7-8]、分子生物学及遗传学^[9-10]等方面的研究,初步揭示了水稻抗倒伏能力与抗倒的形态及生理机制间的关系^[2-8]。然而已有的研究多偏重于个体及单茎抗倒效应。水稻生产过程是一个群体的生产过程,构建合理的群体,提高群体质量来实现水稻稳产高产的理论和技术研究受到广泛重视。但有关群体质量指标与水稻抗倒伏能力间关系的研究并不多见。水稻强化栽培(System of Rice Intensification- SRI)是在密度较低的条件下进行耕作,少本稀植,适当减少基本苗,走小群体、壮个体、高积累的栽培途径^[11-12];控制无效分蘖,改变中后期群体的光照条件,促进地上部高效叶生长^[12-14]。该栽培措施对于提高有效分蘖数和成穗率,实现水稻高产具有十分重要的意义。四川盆地稻作区湿度大、日照少、温差小的自然条件,影响和限制了该栽培技术的应用,我们结合实际对水稻强化栽培技术进行了相应改良。经过多年多点试验,提出了排行错窝、每行小正三角形移栽的三角形强化栽培(Triangle of SRI, TSRI),并形成了技术规程(DB51/T913-2009)。该技术在优化群体质量、提高产量方面均取得了显著的效果^[13, 16-21]。而在三角形强化栽培条件下,我们通过不同的栽培措施^[16-21]初步阐明了氮肥管理、栽植密度是影响水稻群体质量、产量、品质以及氮肥利用率两个重要因子,但不同施氮量和栽植密度对三角形强化栽培水稻抗倒伏性的影响,以及不同施氮量和栽植密度下三角形强化栽培水稻群体质量与抗倒伏能力间关系的研究鲜见报道。为此,本研究在三角形强化栽培条件下,设置不同的施氮量和栽植密度处理,旨在研究施氮量和栽植密度对三角形强化栽培水稻群体质量及抗倒伏性的影响,并探讨水稻群体质量指标与抗倒伏性间的关系,为强化栽培体系的拓展和更广泛应用提供理论和实践依据。

1 材料与与方法

1.1 试验设计

试验于2008—2009年四川农业大学水稻研究所试验农场进行。试验田土壤为砂壤土,有机质含

量19.2 g/kg,全氮2.08g/kg,速效氮104.1 mg/kg,速效磷28.2 mg/kg,速效钾47.13 mg/kg, pH6.45。以杂交稻组合Ⅱ优498为材料,4月11日湿润育秧。采用施氮量(N)×栽插密度(D)两因素试验,设2种施氮(尿素)水平: N_1 ,150 kg/hm²; N_2 ,225 kg/hm²;3种栽插规格: D_1 ,30 cm×30 cm; D_2 ,40 cm×40 cm; D_3 ,50 cm×50 cm,均采用三角形强化栽培^[20],即行间错窝,每穴等边三角形(株间距离10 cm)栽3株,裂区设计,施氮量为主区,栽插密度为副区。共6个处理,3次重复,小区面积18.75 m²。磷肥(过磷酸钙)施用量折合P₂O₅90 kg/hm²,钾肥(氯化钾)施用量折合K₂O180 kg/hm²,氮肥分4次施用, $m_{\text{底肥}}:m_{\text{分蘖肥}}:m_{\text{穗肥}}:m_{\text{粒肥}}=5:3:1:1$ ^[18],即分蘖肥在秧苗移栽后7d施用,穗肥在晒田复水后施用,粒肥在抽穗后10d施用。磷钾肥全部作基肥施用;各处理分蘖前期浅水干湿交替灌溉,在N-n-1叶龄期晒田(N为品种主茎总叶片数;n为品种主茎伸长节间数),穗分化至抽穗扬花期浅水(2 cm左右)灌溉;灌浆结实期干湿交替灌溉,直至收获前7d排干。小区四周扎30 cm土埂,并用塑料薄膜包埂以防肥互相渗透,其他田间管理按大面积生产田进行。

1.2 测定项目及方法

1.2.1 生育时期调查

记录播种期、分蘖盛期、拔节期、齐穗期、乳熟期和黄熟期,并标记叶龄。

1.2.2 植株抗倒性指标的测定

抽穗期每小区挂牌标记抽穗一致的20个主茎(每穴茎蘖数为各小区的平均茎蘖数),在齐穗后30d(成熟前10d),各处理取10个有代表性的主茎,参考马均等^[2]和濂古秀生^[22]的方法测定穗下第3(I₃)、第4(I₄)和第5(I₅)节间茎秆的抗折力。将待测茎秆(保留叶鞘)置于测定器上(两支点间距5 cm),在节间中点挂一盘子,逐渐加入砝码至茎秆折断,此时盘子及砝码的重量为该节间的抗折力(g)。各节间的茎秆力学特性按濂古秀生^[22]、Ookawa等^[23]的方法计算:弯曲力矩(g·cm)=该节间基部至穗顶鲜质量(g)×节间基部至穗顶长度(cm);抗折弯矩(g·cm)=抗折力×两支点间距/4;倒伏指数=弯曲力矩/抗折弯矩×100。

1.2.3 群体透光率的测定

于齐穗期、齐穗后30d的晴天11:00~13:00,用美国生产的LICOR-250照度计分别在距地面15

cm、60 cm 和高于冠层 15 cm 处,测定同一水平高度下各处理行、间距的光照强度,其行、间距光照强度的平均值为此高度下的光照强度;以距地面 15 cm、60 cm 与高于冠层 15 cm 处光照强度的比值分别表示 15 cm 和 60 cm 处的群体透光率,每小区重复测定 3 个点。

1.2.4 根系伤流强度的测定

于齐穗期、齐穗后 30 d 选取小区内长势一致的稻株 5 穴,测基部的伤流量(头日 19:00 在离泥面 10 cm 处剪去地上部分,套上内装有脱脂棉并已称重的塑料袋,次日 7:00 收集塑料袋称重),计算伤流强度^[24]。

1.2.5 茎鞘物质的积累与转运

于齐穗期和成熟期每处理取代表性 5 穴,分叶片、茎鞘和穗测定各部位干物质质量。按杨建昌等^[25]的方法,计算茎鞘物质输出率及转换率。

1.2.6 叶片着生状态及叶面积测定

于齐穗后 30 d 用透明大量角器测顶 3 叶叶倾角(茎秆和叶片平直部分的夹角),每处理测定 15 株,同时测定顶 3 叶的叶长、宽,取平均值。另利用 1.2.4 各处理的 5 穴样株,用美国生产的 CID-203 叶面积仪测定绿叶面积(另计上 3 叶面积),计算叶面积指数,并按照凌启鸿等^[14]的方法计算齐穗期粒叶比=单位面积总颖花数/齐穗期叶面积指数。

1.2.7 有效穗数

收获前 7 d 每小区在田间调查具代表性植株 20 穴,计数有效穗数并计算平均值。

1.2.8 考种与计产

成熟时每小区取代表性稻株 5 穴,考查实粒数、结实率和千粒重,并去除四周边行、杂株,按实收计产。

1.3 数据分析

用 Microsoft Excel 和 SPSS 10.0 处理系统分析数据。

2 结果与分析

2.1 茎秆抗倒伏能力

由表 1 可知,同一施氮水平下,第 3(I₃)、第 4(I₄)和第 5(I₅)节间茎秆的弯曲力矩均随栽插密度的降低而明显增大,而增施氮肥在一定程度上降低了各节间弯曲力矩,但同一栽插密度下各施氮量处理间差异均未达到显著水平,间接说明了群体的大小对各节间弯曲力矩的影响程度明显高于施氮水平。与此同时,增施氮肥,增加栽插密度均会导致各节间茎秆抗折弯矩呈不同程度的下降,从而进一步降低茎秆的抗倒伏能力,增加其倒伏指数。究其原因,可能是栽插密度大,群体增大,影响个体发育,导致基部茎秆变细,机械强度下降;而增施氮肥主要降低了基部节间的壁厚,进而使茎秆的抗倒伏能力下降。

2.2 叶面积指数(LAI)及粒叶比

由表 2 可知,增施氮肥使 LAI 及上 3 叶 LAI 上升,但会导致上 3 叶叶面积率、粒叶比呈不同程度的降低。同一施氮水平下,齐穗期 LAI、上 3 叶 LAI、

表 1 三角形强化栽培下施氮量和栽插密度对基部节间抗倒伏能力的影响

Table 1. Effects of N application rate and planting density on lodging resistance (BM), breaking resistance (BR) and lodging index (LI) during filling stage under triangle-planted system of rice intensification.

处理 Treatment	第 3 节间 I ₃			第 4 节间 I ₄			第 5 节间 I ₅		
	弯曲力矩	抗折弯矩	倒伏指数	弯曲力矩	抗折弯矩	倒伏指数	弯曲力矩	抗折弯矩	倒伏指数
	BM/(g·cm)	BR/(g·cm)	LI	BM/(g·cm)	BR/(g·cm)	LI	BM/(g·cm)	BR/(g·cm)	LI
N ₁ D ₁	1891.3 c	1209.2 d	156.4 b	2662.3 c	1338.5 d	198.9 b	3231.6 bc	1474.3 d	219.2 b
N ₁ D ₂	1987.8 b	1410.8 c	140.9 c	2821.5 bc	1535.1 c	183.8 cd	3235.1 bc	1692.0 c	191.2 d
N ₁ D ₃	2170.1 a	1671.9 a	129.8 d	3164.7 a	1804.3 a	175.4 d	3462.1 a	1920.2 a	180.3 e
平均 Average	2016.4	1430.6	142.4	2882.8	1559.3	186.0	3309.6	1651.0	196.9
N ₂ D ₁	1873.1 c	1100.3 e	170.2 a	2636.9 c	1227.8 e	214.8 a	3130.0 c	1350.6 e	231.8 a
N ₂ D ₂	1953.7 bc	1269.5 d	153.9 b	2811.9 bc	1500.5 c	187.4 c	3248.8 b	1595.7 c	203.6 c
N ₂ D ₃	2133.0 a	1531.2 b	139.3 cd	2945.0 ab	1692.5 b	174.0 d	3411.5 a	1803.1 b	189.2 de
平均 Average	1986.6	1300.3	154.5	2797.9	1473.6	192.1	3263.4	1583.1	208.2

同一栏中数据后跟不同小写字母表示在 5% 水平上差异显著。I₃—第 3 节间; I₄—第 4 节间; I₅—第 5 节间。下同。

Values within a column followed by different lowercase letters are significantly different at $P < 0.05$. I₃, I₄, and I₅ denote the 3rd, 4th, and 5th internodes, respectively. The same as in tables below.

表 2 三角形强化栽培下施氮量和栽插密度对结实期水稻叶面积指数(LAI)及粒叶比的影响

Table 2. Effects of N application rate and planting density on LAI and spikelet-leaf ratio during filling stage under triangle-planted system of rice intensification.

处理 Treatment	齐穗期 Full heading stage			齐穗后 30 d 30 days after full heading	
	叶面积指数 LAI	上 3 叶叶面积指数 LAI _{top3}	上 3 叶叶面积率 LAI _{top3} to LAI/%	粒叶比 Spikelets/LAI	上 3 叶叶面积指数 LAI _{top3}
	N ₁ D ₁	8.39 b	5.81 ab	69.24 a	0.508 b
N ₁ D ₂	7.88 c	5.42 bc	68.80 a	0.568 a	2.28 cd
N ₁ D ₃	7.63 c	5.09 cd	66.67 b	0.561 a	2.14 d
平均 Average	7.97	5.44	68.22	0.546	2.26
N ₂ D ₁	8.90 a	6.14 a	69.00 a	0.478 b	3.02 a
N ₂ D ₂	8.09 bc	5.54 b	68.55 ab	0.561 a	2.72 b
N ₂ D ₃	7.81 c	4.94 d	63.29 c	0.570 a	2.56 b
平均 Average	8.27	5.54	67.05	0.536	2.77

LAI_{top3}, LAI of top 3 leaves.

表 3 三角形强化栽培下施氮量和栽插密度对结实期群体透光率和植株伤流量的影响

Table 3. Effects of N application rate and planting density on light transmission rate and amount of sap flow of rice plant during filling stage under triangle-planted system of rice intensification.

处理 Treatment	群体透光率 Light transmission rate/%				植株伤流量 Amount of sap flow /(g · stem ⁻¹ · h ⁻¹)	
	齐穗期 Full heading stage		齐穗后 30 d 30 days after full heading		齐穗期 Full heading stage	齐穗后 30 d 30 days after full heading
	中部 Middle part	基部 Basal part	中部 Middle part	基部 Basal part		
	N ₁ D ₁	23.37 d	7.28 c	31.87 cd	11.92 c	41.32 d
N ₁ D ₂	29.16 c	8.36 c	34.71 c	12.60 c	46.90 b	29.32 b
N ₁ D ₃	40.74 a	16.91 a	48.03 a	22.44 a	51.40 a	30.42 a
平均 Average	31.09	10.85	38.20	15.66	46.54	28.12
N ₂ D ₁	18.49 e	4.46 e	29.84 d	9.32 d	44.12 c	25.20 c
N ₂ D ₂	25.84 d	5.82 d	32.09 cd	11.12 c	50.20 a	29.86 ab
N ₂ D ₃	36.88 b	11.89 b	44.57 b	20.31 b	52.54 a	30.30 ab
平均 Average	27.07	7.39	35.50	13.58	48.96	28.46

上 3 叶叶面积率以及齐穗后 30 d 上 3 叶 LAI 均随栽插密度的降低而减小,尤其在 D₁ 处理(高密度)和 D₃ 处理(低密度)间差异均达显著水平;而粒叶比变化趋势不明显,N₁ 处理下以 D₂ 处理较高,N₂ 处理下以 D₃ 处理最高,但各施氮水平下,D₃ 处理均显著高于 D₁ 处理。

2.3 群体透光率

由表 3 可见,不同施氮水平和栽插密度对各生育时期群体内不同层次透光率的影响均达显著水平。在齐穗期和齐穗后 30 d,各氮肥水平下,水稻群体中部及基部透光率随栽插密度的降低均呈不同程度的增加趋势,且 D₁ 处理中部及基部群体透光率均显著低于 D₃ 处理。同一栽插密度下,增施氮肥会导致群体透光率显著下降,尤其在齐穗期,水稻中部及

基部群体透光率降幅均达到显著水平。

2.4 根系活力

由表 3 可知,同一施氮量下,随栽插密度的下降,稻株伤流量呈不同程度的增加,且 N₁ 处理下栽插密度间的差异更明显。各栽插密度下,增施氮肥能不同程度增强齐穗期、齐穗后 30 d 各栽插密度下水稻的根系活力,但随生育进程根系伤流强度显著降低,且齐穗后 30 d 各栽插密度下不同施氮水平间差异均未达到显著水平,表明齐穗后 30 d,施氮量对根系活力的影响已明显小于栽插密度。

2.5 冠层叶片形态

表 4 表明,齐穗后 30 d 不同施氮量、栽插密度处理对水稻上 3 叶各单叶平均叶长、宽及叶倾角的影响均达显著水平。从上 3 叶各单叶大小来看,平

表 4 三角形强化栽培下施氮量和栽插密度对齐穗后 30 d 水稻上 3 叶长、宽和叶角的影响

Table 4. Effects of N application rate and planting density on length, width and leaf angles of top three leaves during filling stage under triangle-planted system of rice intensification.

处理 Treatments	剑叶 Flag leaf			倒 2 叶 2nd leaf			倒 3 叶 3rd leaf		
	长	宽	叶倾角	长	宽	叶倾角	长	宽	叶倾角
	Length/cm	Width/cm	Leaf angle/°	Length/cm	Width/cm	Leaf angle/°	Length/cm	Width/cm	Leaf angle/°
N ₁ D ₁	37.17 d	2.08 c	10.8 bc	46.05 c	1.95 e	16.3 c	54.49 e	1.90 b	24.4 d
N ₁ D ₂	38.08 cd	2.16 bc	10.4 c	47.51 bc	1.98 de	16.7 c	55.12 de	1.90 b	24.0 d
N ₁ D ₃	39.78 bc	2.19 b	12.0 a	48.62 b	2.01 cd	18.2 b	58.38 cd	1.93 ab	26.9 ab
平均 Average	38.34	2.14	11.1	47.39	1.98	17.1	56.00	1.91	25.1
N ₂ D ₁	39.43 c	2.23 b	11.5 ab	48.37 b	2.04 bc	18.0 b	59.02 bc	1.93 ab	27.2 a
N ₂ D ₂	41.65 ab	2.37 a	11.5 ab	52.13 a	2.07 ab	18.3 b	62.13 ab	1.94 ab	26.6 bc
N ₂ D ₃	42.10 a	2.36 a	12.0 a	52.74 a	2.10 a	19.4 a	62.69 a	1.95 a	26.2 c
平均 Average	41.06	2.32	11.7	51.08	2.07	18.6	61.28	1.94	26.7

表 5 三角形强化栽培下施氮量和栽插密度对结实期干物质积累及转运的影响

Table 5. Effects of N application rate and planting density on the dry-matter accumulation and transport during filling stage under triangle-planted system of rice intensification.

处理 Treatment	齐穗期	成熟期	成熟期	齐穗后	茎鞘物质	茎鞘物质
	茎鞘干质量	茎鞘干质量	穗干质量	干物质积累量	输出率	转换率
	SSWF	SSWM	PWM	DMAF	EPSS	TPSS
	/(g·m ⁻²)	/(g·m ⁻²)	/(g·m ⁻²)	/(g·m ⁻²)	%	/%
N ₁ D ₁	662.3 a	468.7 b	887.4 c	321.5 c	29.23 c	21.82 cd
N ₁ D ₂	651.4 d	422.2 d	969.1 a	352.1 ab	35.19 a	23.65 a
N ₁ D ₃	609.8 d	401.3 e	941.8 b	340.2 b	34.19 ab	22.14 c
平均 Average	641.2	430.7	932.8	337.9	32.87	22.54
N ₂ D ₁	671.7 a	488.5 a	853.0 d	329.8 c	27.27 d	21.48 d
N ₂ D ₂	662.0 a	442.7 c	952.2 ab	357.0 a	33.13 b	23.03 b
N ₂ D ₃	632.2 c	411.9 de	954.7 ab	359.8 a	34.85 a	23.08 ab
平均 Average	655.3	447.7	920.0	348.9	31.75	22.53

SSWH, Stem-sheath weight in full-heading; SSWM, Stem-sheath weight in maturing; PWM, Panicle weight in mature; DMAH, Dry-matter accumulation after full-heading; EPSS, Export percentage of stem-sheath; TPSS, Translocation percentage of stem-sheath.

均单叶长、宽均表现出一致的趋势:叶长和叶倾角大小顺序均为倒 3 叶>倒 2 叶>剑叶,叶宽顺序为剑叶>倒 2 叶>倒 3 叶。同一栽插密度下,增施氮肥,除对 D₃处理的剑叶叶倾角影响不显著外,对其他各处理的上 3 叶叶长、宽及叶倾角均显著增加。各氮肥水平下,随着栽插密度的降低,上 3 叶的叶长、宽及倒 2 叶叶倾角均呈不同程度的增加,而剑叶及倒 3 叶叶倾角变化规律不明显,但 D₃处理均显著高于 D₁处理。

2.6 物质累积与转运

从光合产物的积累来看,齐穗期和成熟期茎鞘干质量随移栽密度的减小、施氮量的增加而呈不同程度的增加趋势(表 5),且同一氮肥处理下,D₁处理茎鞘干质量均显著高于 D₃处理。不同施氮量和栽插密度处理下,成熟期最大穗干质量在 N₁处理下栽

插密度为 40 cm × 40 cm 获得,继续增加或减小栽插密度均会导致穗干质量显著下降,而增施氮肥处理下,必须适当增加栽插密度来提高穗干质量。从齐穗后干物质积累量、茎鞘物质输出率、转换率来看,同一栽插密度处理下,提高氮肥施用量能促进齐穗后干物质累积,但茎鞘物质输出率及转换率会有不同程度的下降;各施氮水平下,随栽插密度的减少齐穗后干物质累积,茎鞘物质输出率及转换率表现不太一致,N₁处理下均以 D₂处理最高,N₂处理下则以 D₃处理较高,且 N₁D₂和 N₂D₃处理间差异均未达到显著水平。

2.7 产量及其构成因素

由表 6 可知,三角形强化栽培下施氮量和栽插密度对水稻产量及其构成因素的影响均达显著水平,多重比较表明,提高氮肥施用量可增加有效穗

表 6 三角形强化栽培下施氮量和栽插密度对产量及其构成因素的影响

Table 6. Effects of N application rate and planting density on grain yield and its components under triangle-planted system of rice intensification.

处理 Treatment	有效穗数 No. of productive panicles /($\times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$)	穗实粒数 No. of filled grains	千粒重 1000-grain weight /g	结实率 Seed-setting weight /%	充实率 Grain filling rate /%	产量 Grain yield /($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)
N ₁ D ₁	209.6 b	172.8 d	29.36 c	84.95 c	91.70 c	9131.7 d
N ₁ D ₂	217.3 a	180.1 b	29.98 a	87.50 ab	93.30 b	10074.6 a
N ₁ D ₃	202.4 c	186.1 a	30.11 a	88.02 a	95.36 a	9626.3 c
平均 Average	209.8	179.7	29.82	86.82	93.45	9610.9
N ₂ D ₁	210.7 b	168.9 e	29.06 d	83.70 d	89.81 d	8604.3 e
N ₂ D ₂	219.9 a	177.2 c	29.75 b	85.80 c	92.04 c	9911.6 b
N ₂ D ₃	209.3 b	184.8 a	30.00 a	86.90 b	92.45 bc	9945.9 b
平均 Average	213.3	177.0	29.60	85.47	91.43	9487.3

数,但穗实粒数和千粒重则会下降,尤其会导致结实率和籽粒充实率的显著下降;各栽插密度下,施氮量对产量的影响不太一致,D₁和D₂处理下提高施氮量,会导致产量显著下降,而D₃处理下,施氮量由N₁增至N₂水平,显著提高水稻产量。这可能由于低密度下,适当提高施氮水平会促进个体的生长,能显著提高单位面积有效穗数,进而弥补群体数量不足,最终达到增产的目的。各氮肥水平下,栽插密度对产量的影响有所不同,N₁处理下各栽插密度处理间差异显著,产量以D₂处理最高,分别比D₁和D₃处理增产10.3%和4.66%,为本试验最佳的施氮量和栽插密度组合;N₂处理下,随栽插密度的下降,产量则呈不同程度的增加趋势。由表6还可看出,同一施氮水平下,有效穗数均以D₂处理最高,栽插密度上升或下降,均会导致有效穗数显著降低,而穗实粒数、千粒重、结实率和籽粒充实率均随栽插密度的减少,而呈不同程度的降低趋势,且D₁处理均显著低于D₃处理。相关性分析表明,产量受有效穗数和每穗实粒数影响较大,相关系数分别为0.807**和0.857**。

2.7 抗倒伏特性与群体质量特性的关系

表7可见,三角形强化栽培条件下,稻株茎秆基部各节间的抗折弯矩与齐穗期LAI、齐穗后30d上3叶LAI均存在显著负相关,而与齐穗期上3叶LAI呈极显著负相关,但LAI与茎节基部各节间的倒伏指数均极显著正相关。从齐穗后30d叶片形态与茎秆基部各节间抗倒伏能力的相关性来看,除倒2叶叶倾角与穗下第4、第5节间的抗折弯矩呈显著正相关外,其余上3叶各叶的叶长、叶宽及叶倾角与抗折弯矩及倒伏指数相关性均未达到显著水

平,且齐穗后30d上3叶叶片形态与抗折弯矩的相关性要明显高于对倒伏指数的影响。粒叶比、群体透光率及根系伤流强度与茎秆基部各节间的抗折弯矩显著或极显著正相关,而与抗倒伏指数负相关,且齐穗期中部、齐穗后30d中部群体透光率,以及齐穗后30d根系伤流量对各节间抗倒伏能力的影响均明显高于基部透光率、齐穗期伤流强度对抗倒伏性的影响,不同的是群体透光率对茎秆基部各节间抗倒伏性的影响表现为:第3节间>第4节间>第5节间,根系活力则表现为:第5节间>第4节间>第3节间。说明群体透光率和根系活力对基部不同节间的影响不同,但群体透光率及根系活力直接影响水稻的抗倒伏能力。此外,结实期茎鞘的转运量和转换率与基部各节间抗折弯矩呈正相关,与倒伏指数呈负相关,但均未达到显著水平,而茎鞘物质输出率与稻株基部茎秆各节间抗折弯矩呈极显著正相关,与穗下第4、第5节间的倒伏指数呈显著负相关。

3 讨论

三角形强化栽培是根据水稻强化栽培(SRI)理念,针对四川盆地稻作地区湿度大、日照少、温差小的自然条件,经过多年多点的试验,对水稻强化栽培技术进行的相应改良而形成的。2004—2009年在四川省已累计推广应用1.4万hm²(900多万亩),增产幅度达到20%左右,节水20%~40%。该技术已形成技术规程(DB51/T913-2009),被确立为2009、2010和2011年四川省水稻主推技术和农业部水稻高产创建核心技术之一,但其主要应用于小、中苗,与四川稻田种植制度、不同稻作区生态条件结

表 7 三角形强化栽培下茎秆抗折弯矩和倒伏指数与群体质量指标间的相关性($n=18$)Table 7. Correlation coefficients between breaking resistance, lodging index and some population quality characteristics under triangle-planted system of rice intensification ($n=18$).

群体质量特性 Population quality characteristics	抗折弯矩 Breaking resistance			倒伏指数 Lodging index		
	I ₃	I ₁	I ₅	I ₃	I ₁	I ₅
叶面积指数 Leaf area index (LAI)						
齐穗期 LAI LAI at full heading stage	-0.535*	-0.531*	-0.516*	0.953**	0.976**	0.964**
齐穗期上 3 叶 LAI LAI of top 3 leaves at full heading stage	-0.654**	-0.656**	-0.633**	0.938**	0.985**	0.953**
齐穗后 30 d 上 3 叶 LAI LAI of top 3 leaves at 30 days after full heading	-0.557*	-0.483*	-0.515*	0.838**	0.711**	0.749**
齐穗后 30 d 上 3 叶叶片形态 Leaf morphology at 30 days after full heading						
剑叶长 Length of flag leaf	0.302	0.414	0.376	0.154	0.048	0.059
剑叶宽 Width of flag leaf	0.277	0.401	0.364	0.244	0.109	0.128
剑叶叶倾角 Leaf angle of flag leaf	0.402	0.457	0.412	0.149	0.138	0.154
倒 2 叶长 Length of the 2nd leaf from the top	0.376	0.458	0.431	0.135	-0.002	0.029
倒 2 叶宽 Width of the 2nd leaf from the top	0.315	0.396	0.382	0.337	0.280	0.270
倒 2 叶叶倾角 Leaf angle of the 2nd leaf from the top	0.464	0.543*	0.502*	0.070	-0.005	-0.003
倒 3 叶长 Length of the 3rd leaf from the top	0.302	0.420	0.373	0.220	0.092	0.120
倒 3 叶宽 Width of the 3rd leaf from the top	0.322	0.370	0.380	0.386	0.412	0.367
倒 3 叶叶倾角 Leaf angle of the 3rd leaf from the top	0.226	0.290	0.251	0.362	0.370	0.319
粒/叶 Spikelet/LAI						
齐穗期粒叶比 Spikelet /LAI at full heading stage	0.479*	0.542*	0.553*	-0.123	-0.141	-0.183
群体透光率 Light transmission rate						
齐穗期中部 Middle part at full heading stage	0.985**	0.975**	0.971**	-0.796**	-0.728**	-0.776**
齐穗期基部 Basal part at full heading stage	0.936**	0.886**	0.878**	-0.777**	-0.639**	-0.710**
齐穗后 30 d 中部 Middle part at 30 days after full heading	0.956**	0.930**	0.923**	-0.690**	-0.600**	-0.652**
齐穗后 30 d 基部 Basal part at 30 days after full heading	0.932**	0.902**	0.892**	-0.731**	-0.649**	-0.682**
伤流量 Amount of sap flow						
齐穗期 Full heading stage	0.783**	0.863**	0.833**	-0.387	-0.435	-0.471*
齐穗后 30 d 30 days after full heading	0.817**	0.890**	0.879**	-0.477*	-0.500*	-0.561*
茎鞘物质转运 Dry matter translocation of stem-sheaths						
转运量 Translocation amount	0.333	0.399	0.420	-0.355	-0.403	-0.439
输出率 Export percentage	0.732**	0.774**	0.790**	-0.425	-0.467*	-0.521*
转换率 Translocation percentage	0.324	0.373	0.388	-0.201	-0.260	-0.273

*, ** 分别表示显著和极显著相关。

*, ** Significantly correlated at 0.05 and 0.01 probability levels.

合的紧密程度还不够,尚需对中、大苗强化栽培技术新体系,以及对群体优化构建调控技术进行补充、完善,以扩大其生产应用范围。此外,为了提高农机和农艺的结合,进行高效低碳种植,目前已研制出简易的三角形强化栽培撬窝机具,并能按照要求的规格,进行固定厢沟免耕撬窝打孔,但利用机械化实现三角形栽插的农机具尚待于进一步研制。

目前,水稻高产群体的研究重点已由原来的群体数量转移到群体质量,培育合理的群体结构,调节和改善冠层内的辐射分布,提高光能利用率是夺取高产的基础,历来倍受研究者重视^[12-20]。作物光合作用是由叶面积指数(LAI),单位叶面积的潜在光合速率,透射到下部叶片的光占到达冠层顶部总光量的比例(光传递比率)和叶片寿命(叶片持续期)决定的,而叶面积对籽粒产量的贡献比光合速率要高得多^[26]。适宜的 LAI、高效叶面积、叶片着生状态,以及群体透光率的大小,是提高群体结实期光合积累量的形态生理的基础指标。本研究表明,上述各指标均受施氮量和栽插密度的调控,而且不同的施

氮水平和栽插密度对各指标调控是影响接受光照能力的前提,也是促进光合产物累积的基础。各施氮量下,栽插密度的降低虽提高了结实期单株上 3 叶的叶长、叶宽和叶倾角的大小,但由于群体 LAI、上 3 叶 LAI 均呈不同程度下降,必然导致群体中部、基部透光率过高,必然有漏光损失,不可能获得高产;而增施氮肥处理下群体冠层叶片生长过大,将造成叶片披垂,中下层叶片生长环境恶化,水稻群体中部、基部透光率下降,也不利于水稻的生长及产量的增加。可见,氮肥水平和栽插密度对 LAI、叶片着生状态及群体透光率的影响存在一定的互作效应,表明不同的栽插密度,配合适宜的氮肥管理措施,有利于调控三角形强化栽培水稻抽穗后叶片的着生状态,改善群体透光条件,减少漏光损失。此外,相关分析表明,最终产量与齐穗期及齐穗后 30 d 中部的群体透光率呈显著或极显著正相关,相关系数分别为 0.595** 和 0.481*, 且与上 3 叶的叶长、叶宽、粒叶比以及根系活力也呈显著或极显著正相关($r=0.485^* \sim 0.631^{**}$, $n=18$),但与上 3 叶叶倾角、

LAI及基部群体透光率相关性均未达到显著水平。这可能受群体数量构建,即栽插密度的小影响较大有关。

水稻抗倒伏能力与诸多因素有关^[2-10],高产与抗倒矛盾的调和是众多学者研究的重点。高产栽培应在保证一定数量的群体数目的前提下,需要足够的生物生产量,尤其是穗子要大,这就使茎秆承受的重量增加,倒伏的风险增大^[2,5]。杨世民等^[5]、张丰转等^[7]的研究表明,水稻抗倒伏性与茎秆的理化特性密切相关,其中以齐穗期茎秆中纤维素、木质素、淀粉及钾和硅的含量、成熟前茎鞘中氮、铜、锰、锌、钙、镁的含量对茎秆基部节间的倒伏指数的影响最大,增施硅肥有利于提高水稻抗倒伏能力。本研究表明,通过对三角形强化栽培下水稻群体质量的调控,能明显改善水稻的抗倒伏性,进而增产,且水稻茎秆基部各节间抗倒伏性与齐穗期水稻 LAI 和上3叶,存在显著或极显著负相关,而与群体透光率、根系活力,以及茎鞘物质输出率均存在显著或极显著的正相关(表7)。根据各群体质量指标与抗倒伏能力,以及与最终产量相关性分析表明,尤其以齐穗期、齐穗后30d中部的群体透光率,以及齐穗后30d的根系伤流量对水稻产量及抗倒伏性的影响显著。此外,从齐穗后上3叶叶片着生状态与基部茎秆各节间抗倒伏相关性来看(表7),齐穗后30d上3叶各叶的叶长、叶宽及叶倾角、粒叶比的增大对基部茎秆各节间的抗折弯矩存在一定的促进作用。这可能主要由水稻抽穗前期茎秆粗细、茎壁厚度、维管束数目、叶鞘厚度、茎壁充实程度等因素决定的,但另一方面是否也可能由于水稻上3叶的叶片形态的优劣直接关系到截获和利用光能的能力强弱,进而不同程度影响结实期地上部分物质的累积,而稻株为了支持由于地上部分重量的改变,通过自身对地上部分的感应,来适当调整结实期茎秆基部各节间的物质积累和转运,进而适度补偿茎秆基部各节间的抗折能力?对于水稻自身是否存在对抗倒伏调节讯号的感应及其与各节间理化特性的联系尚待进一步研究。

参考文献:

- [1] 武小金. 提高水稻杂种优势水平的可能途径. *中国水稻科学*, 2000, 14(1):61-64.
- [2] 马均, 马文波, 田彦华, 等. 重穗型水稻植株抗倒伏能力的研究. *作物学报*, 2004, 30(2): 143-148.
- [3] 李红娇, 张喜娟, 李伟娟, 等. 不同穗型粳稻品种抗倒伏性的比较. *中国水稻科学*, 2009, 23(2):191-196.
- [4] 杨长明, 杨林章, 颜廷梅, 等. 不同养分和水分管理模式对水稻抗倒伏能力的影响. *应用生态学报*, 2004, 15(4): 646-650.
- [5] 杨世民, 谢力, 郑顺林, 等. 氮肥水平和栽插密度对杂交稻茎秆理化特性与抗倒伏性的影响. *作物学报*, 2009, 35(1): 93-103.
- [6] 马国辉, 邓启云, 万宜珍, 等. 超级杂交稻抗倒生理与形态机能的研究. *湖南农业大学学报: 自然科学版*, 2000, 26(5): 329-331.
- [7] 张丰转, 金正勋, 马国辉, 等. 灌浆成熟期粳稻抗倒伏性和茎鞘化学成分含量的动态变化. *中国水稻科学*, 2010, 24(3): 264-270.
- [8] 郭玉华, 朱四光, 张龙步. 不同栽培条件对水稻茎秆生化成分的影响. *沈阳农业大学学报*, 2003, 34(2):89-91.
- [9] 肖应辉, 罗丽华, 闫晓燕, 等. 水稻品种倒伏指数 QTL 分析. *作物学报*, 2005, 31(3):348-354.
- [10] Kashiwagi T, Togawa E, Hirotsu N, et al. Improvement of lodging resistance with QTLs for stem diameter in rice (*Oryza sativa* L). *Theor Appl Genet*, 2008, 117:749-757.
- [11] Shekhar Kumar Sinha, Jayesh Talati. Productivity impacts of the system of rice intensification (SRI): A case study in West Bengal, India. *Agric Water Manag*, 2007, 87:55-60.
- [12] 袁隆平. 水稻强化栽培体系. *杂交水稻*, 2001, 16(4):1-3.
- [13] 徐富贤, 熊洪, 朱永川, 等. 冬水田杂交中稻组合类型对强化栽培的适应性. *作物学报*, 2005, 31(4): 493-497.
- [14] 凌启鸿, 张洪程, 蔡建中, 等. 水稻高产群体质量及其优化控制探讨. *中国农业科学*, 1993, 26(6):1-11.
- [15] 王绍华, 曹卫星, 姜东, 等. 水稻强化栽培对植株生理与群体发育的影响. *中国水稻科学*, 2003, 17(1): 31-36.
- [16] 贺阳冬, 马均, 魏万蓉. 不同种类肥料对水稻强化栽培产量及稻米品质的影响. *中国农学通报*, 2004, 20(6):177-182.
- [17] 龙旭, 马均, 许凤英, 等. 水稻强化栽培的适宜秧龄和栽植密度研究. *四川农业大学学报*, 2005, 23(3):368-372.
- [18] 陈宇, 马均, 童平, 等. 氮肥运筹对大苗三角强化栽培水稻生理和产量的影响. *西南农业学报*, 2009, 22(2):122-130.
- [19] 汪仁全, 马均, 童平, 等. 三角形强化栽培技术对水稻光合生理特性及产量形成的影响. *杂交水稻*, 2006, 25(6): 60-65.
- [20] 龙旭, 汪仁全, 孙永健, 等. 不同施氮量下三角形强化栽培水稻群体发育与产量形成特征. *中国水稻科学*, 2010, 24(2): 162-168.
- [21] 许凤英, 马均, 王贺正, 等. 水稻强化栽培下的稻米品质. *作物学报*, 2005, 31(5):577-583.
- [22] 濑古秀生. 水稻の倒伏に関する研究. *九州农试彙報*, 1962, 7: 419-495.
- [23] Ookawa T, Ishihara K. Varietal difference of physical characteristic of the culm related to lodging resistance in paddy rice. *Jpn J Crop Sci*, 1992, 61: 419-425.
- [24] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [25] 杨建昌, 朱庆森, 王志琴, 等. 亚种间杂交稻光合特性及物质积累与运转的研究. *作物学报*, 1997, 23(1): 82-88.
- [26] Ishii R. Leaf photosynthesis in rice in relation to grain yields// Abrol Y P. Photosynthesis- photoreactions to plant productivity. Kluwer Dordrecht, 1993:561-569.