

张巫军,段秀建,李茂瑜,等. 播期和密度对精量穴直播水稻产量和抗倒伏性的影响[J]. 江苏农业学报,2024,40(8):1412-1423.  
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2024.08.006

## 播期和密度对精量穴直播水稻产量和抗倒伏性的影响

张巫军<sup>1</sup>, 段秀建<sup>1</sup>, 李茂瑜<sup>2</sup>, 刘强明<sup>1</sup>, 唐永群<sup>1</sup>, 李经勇<sup>1</sup>, 姚 雄<sup>1</sup>

(1.重庆市农业科学院/重庆再生稻研究中心,重庆 九龙坡 401329; 2.重庆市种子站,重庆 渝北 401121)

**摘要:** 为探究渝西地区播期与密度互作对精量穴直播水稻产量和抗倒伏的影响,以渝香优 8133 和泰优粤禾丝苗为试验材料,设置 2 个播期(B1:3 月 29 日、B2:5 月 25 日)和 5 个播种密度(D1:每 1 hm<sup>2</sup> 1.50×10<sup>5</sup> 穴、D2:每 1 hm<sup>2</sup> 1.95×10<sup>5</sup> 穴、D3:每 1 hm<sup>2</sup> 2.40×10<sup>5</sup> 穴、D4:每 1 hm<sup>2</sup> 2.85×10<sup>5</sup> 穴、D5:每 1 hm<sup>2</sup> 3.30×10<sup>5</sup> 穴),分析茎秆力学、茎秆形态及器官干物质积累与茎秆抗倒伏性和产量的关系。结果表明,与早播处理(B1)相比,迟播处理(B2)可显著提高精量穴直播水稻产量水平;同时,B2 播期处理较高的叶面积指数(LAI)和有效穗数导致茎秆倒伏指数显著提高。随着播种密度增加,2 个水稻品种的产量均呈先增加后降低趋势,B1 播期下 D3 处理产量最高,B2 播期下 D4 处理产量最高,但与 D3 处理差异不显著;而倒伏指数呈持续增加趋势,2 个水稻品种趋势一致。与 D1 处理相比,B1 和 B2 播期的 D2、D3 处理倒伏指数增幅较小,D4、D5 处理显著升高,以渝香优 8133 表现明显。在 B1 和 B2 播期下,D2、D3 处理的单株茎秆干重、基部节间茎粗、壁厚及茎鞘充实度与 D1 处理相当,而 D4、D5 处理大幅降低。综合分析认为,在 B1 和 B2 播期下,D3 处理是精量穴直播水稻产量、抗倒伏协同较好的适宜播种密度。

**关键词:** 精量穴直播水稻; 抗倒伏; 产量; 播期; 密度

**中图分类号:** S511 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2024)08-1412-12

## Effects of sowing date and density on yield and lodging resistance of precision hill-direct-seeding rice

ZHANG Wujun<sup>1</sup>, DUAN Xiujian<sup>1</sup>, LI Maoyu<sup>2</sup>, LIU Qiangming<sup>1</sup>, TANG Yongqun<sup>1</sup>, LI Jingyong<sup>1</sup>, YAO Xiong<sup>1</sup>

(1.Chongqing Academy of Agricultural Sciences/Chongqing Ratooning Rice Research Center, Jiulongpo 401329, China; 2.Seed Station of Chongqing Municipality, Yubei 401121, China)

**Abstract:** To explore the effects of sowing date and density interaction on yield and lodging resistance of precision hill-direct-seeding rice in western Chongqing, Yuxiangyou 8133 and Taiyou Yuehesimiao were used as experimental materials. Two sowing dates (B1: March 29, B2: May 25) and five sowing densities (D1: 1.50×10<sup>5</sup> holes per hectare, D2: 1.95×10<sup>5</sup> holes per hectare, D3: 2.40×10<sup>5</sup> holes per hectare, D4: 2.85×10<sup>5</sup> holes per hectare, D5: 3.30×10<sup>5</sup> holes per hectare) were set.

The relationship between stem mechanics, stem morphology, organ dry matter accumulation and plant lodging resistance and yield was analyzed. The results showed that compared with the early sowing treatment (B1), the late sowing treatment (B2) could significantly increase the yield of precision hill-direct-seeding rice. At the same time, higher leaf area index (LAI) and effective panicles under B2 treatment led to a significant increase in stem lodging index. With the increase of planting density, the yield of the two rice varieties increased first and then

收稿日期:2023-09-12

**基金项目:**国家自然科学基金项目(31701382);重庆市农业科学院青年创新团队项目(NKY-2019CQ10);重庆市现代农业产业技术体系项目(CQMAITS202301);重庆市农业科学院管绩效激励引导专项(cqaas2021jxjl35)

**作者简介:**张巫军(1986-),男,甘肃陇南人,博士,副研究员,主要从事水稻生理生态及轻简栽培技术研究工作。(E-mail) zhangwj881125@163.com

**通讯作者:**姚 雄,(E-mail) yaoxiong0004@163.com

decreased. The yield in D3 treatment was the highest under B1 sowing date. The yield in D4 treatment was the highest under B2 sowing date, but there was no significant difference with the yield in D3 treatment. Moreover, the lodging index showed a continuous increasing trend, and the two rice varieties had the same trend. Compared with D1 treatment, the lodging index in D2 and D3 treatments under B1 and B2 sowing date treatments increased slightly, and the lodging index in D4 and D5 treatments increased significantly, especially for Yuxiangyou 8133. Under B1 and B2 sowing dates, the stem and sheath dry weight per plant, basal internode stem diameter, wall thickness and stem and sheath plumpness in D2 and D3 treatments were comparable to those in D1 treatment, but decreased significantly in D4 and D5 treatments. The comprehensive analysis results showed that D3 treatment was the suitable sowing density for the yield and lodging resistance of precision hill-direct-seeding rice under B1 and B2 sowing dates.

**Key words:** precision-hill-direct-seeding rice; lodging resistance; yield; sowing date; density

随着中国城镇化建设的快速发展,农村劳动人口不断转移,导致“谁来种田”的问题愈发突出。人工栽秧的水稻种植方式劳动强度大、种植成本高,已难以适应新时期社会经济发展的需要。因此,水稻种植方式由人工栽秧向机械化栽培变化的趋势愈发明显<sup>[1]</sup>。精量穴直播水稻免去了育秧和移栽环节,大幅降低了劳动强度,提高了作业效率,增加了水稻的种植效益<sup>[2]</sup>。近年来,随着南方地区直播水稻种植面积不断扩大,稳定水稻单产至关重要<sup>[3]</sup>。然而,直播水稻种植密度大,“一播全苗”、“杂草防除”和“后期倒伏”问题普遍存在。已有研究表明,直播水稻的倒伏包括根倒伏和茎倒伏,且以后者为主,是制约直播水稻丰产稳产的关键因素<sup>[4-5]</sup>。因此,在南方籼稻区不同熟制背景下,研究播期和密度对精量穴直播水稻茎秆抗倒伏的调控效应与产量关系,对保障中国粮食安全具有重要意义。

已有研究结果发现,适宜机械直播的水稻品种具有茎秆基部节间抗折力大于 1.5 kg,收获指数大于 0.45,全生育期小于 150 d,穗粒数大于 140.0 粒的特征<sup>[6]</sup>,适宜双季晚稻直播的品种具有总颖花量大,日产量高和抗倒伏性强的特征<sup>[7]</sup>。机械开沟穴直播的种植方式有利于提高直播早籼稻的出苗率、基部节间的充实度和抗折力,增产的同时也可以降低植株的倒伏风险<sup>[8]</sup>。蒋明金等<sup>[9]</sup>认为,与移栽水稻相比,直播水稻基部节间长度的增加,茎秆维管束面积和机械组织厚度的减小,以及木质素、纤维素和半纤维素含量的降低,是增加直播水稻倒伏风险的直接原因。徐波等<sup>[10]</sup>发现,提早播种可缩短直播粳稻基部的第 1、第 2 伸长节间,提高茎鞘干重和充实程度,增加抗倒伏能力。而在小麦中,迟播在维持小麦产量和氮素利用率的同时,显著提高茎秆抗倒伏能力,主要原因是在小麦迟播处理下,茎秆中木质素

合成关键基因(*TaPAL*、*TaCCR*、*TaCOMT*、*TaCAD*、*TaCesA1*、*TaCesA3*、*TaCesA4*、*TaCesA7*、*TaCesA8*)上调表达,提高了木质素合成酶(*TaPAL*、*TaCCR*、*TaCAD*)活性,增强了茎秆强度<sup>[11-12]</sup>。在不同播期下,优化播种密度是小麦获得高产的主要途径<sup>[13]</sup>。在玉米中,随着种植密度的增加,玉米冠层结构随之改变导致基部节间茎粗、充实程度和刺穿强度显著下降,茎秆皮层和维管束内部厚壁细胞厚度变薄,维管束数目亦随之减少,从而增加了倒伏风险<sup>[14-16]</sup>。

已有的有关水稻茎秆抗倒伏的研究主要集中在移栽水稻氮素运筹方式<sup>[17-18]</sup>、茎秆生化成分<sup>[19-21]</sup>等方面,鲜有研究直播水稻播期,特别是播期与密度互作对精量穴直播水稻茎秆抗倒伏的调控效应及与产量关系的研究。因此,本研究基于精量穴直播水稻的不同播期和播种密度处理,研究水稻茎秆力学、形态结构及物质分配特征与茎秆抗倒伏能力和产量的关系,为南方籼稻区不同熟制下精量穴直播水稻丰产抗倒伏栽培调控提供理论基础和实践依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地点

本试验于 2022 年 3-9 月在重庆市永川区来苏镇重庆市农业科学院水稻试验基地(29°16'15"N, 105°47'53"E,海拔 308 m)进行。试验地前茬为冬闲田,供试土壤为紫色水稻土,0~20 cm 耕层土壤的理化特性为:土壤 pH 值 5.4,有机质含量 22.3 g/kg,全氮含量 1.31 g/kg,速效氮含量 119.0 mg/kg,速效磷含量 23.5 mg/kg,速效钾含量 74.7 mg/kg。

### 1.2 试验设计

试验采用三因素裂区设计,播期为主区,设置 2 个水平,分别为 3 月 29 日(B1,早播)、5 月 25 日(B2,迟播);密度为裂区,设置 5 个水平,分别为 D1

(每 1 hm<sup>2</sup> 1.50×10<sup>5</sup> 穴, 30.0 cm×22.2 cm)、D2(每 1 hm<sup>2</sup> 1.95×10<sup>5</sup> 穴, 30.0 cm×17.1 cm)、D3(每 1 hm<sup>2</sup> 2.40×10<sup>5</sup> 穴, 30.0 cm×13.9 cm)、D4(每 1 hm<sup>2</sup> 2.85×10<sup>5</sup> 穴, 30.0 cm×11.7 cm) 和 D5(每 1 hm<sup>2</sup> 3.30×10<sup>5</sup> 穴, 30.0 cm×10.1 cm); 品种为再裂区, 设置 2 个水平, 分别为渝香优 8133 和泰优粤禾丝苗。试验共计 20 个处理, 设置 3 次重复, 60 个试验小区, 小区面积为 15 m<sup>2</sup> (3 m×5 m)。

为防止不同处理小区间串肥, 每个试验小区均采用塑料薄膜包田埂。播种前, 每个小区田面保持湿润无明水, 采用人工点播方式模拟机械精量穴直播进行播种。全生育期施纯氮 120 kg/hm<sup>2</sup>, 按照氮量(N 量): 磷量(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 量): 钾量(K<sub>2</sub>O 量)=1.0: 0.5: 0.8 比例配施, 氮肥按照基肥: 分蘖肥=6: 4 比例施用, 磷肥(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) 和钾肥(K<sub>2</sub>O) 施用量分别为 60 kg/hm<sup>2</sup> 和 96 kg/hm<sup>2</sup>, 均作基肥一次性施入土壤。播种前 24 h 对种子进行浸种处理, 浸种后晾干, 福美双·克百威人工拌种和包衣, 防止鸟害。田面湿润条件下播种, 出苗, 3 叶期定苗, 每穴定植 3 棵种子苗。3 叶 1 心期, 进行稻田杂草一次性茎叶防除, 同时 48 h 内小区灌水, 以淹没杂草不淹没水稻心叶为准。同时, 3 叶 1 心期小区施用基肥, 基肥以复合肥(N 量: P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 量: K<sub>2</sub>O 量=15: 15: 15) 为主, 其中磷肥、钾肥不足部分以过磷酸钙和氯化钾补足, 分蘖肥于 4 叶 1 心期以尿素追施。水分管理及病、虫、草害防除同直播水稻高产示范管理方案一致。

### 1.3 测定项目与方法

**1.3.1 产量结构** 水稻成熟期每个小区普查 40 穴的有效穗数, 按照平均每穴有效穗数取代表性稻株 5 穴, 剪下穗子装袋, 以备拷种。拷种项目包括每穗总粒数、空瘪粒数和千粒重。各小区实收 2 m<sup>2</sup> 样方计实产, 以籽粒含水量为 13.5% 折算得到稻谷实际产量。

**1.3.2 倒伏指数及力学指标** 于水稻抽穗后 20 d 每小区随机取代表性主茎 10 根, 保持稻株新鲜不失水。用铅笔标记基部第 2 伸长节间所在位置, 将稻株基部第 2 伸长节间置于距离为 8 cm 的两个支点上, 用 ALGOL 数显推拉力计(HF-5, 日本) 垂直作用于基部第 2 伸长节间中间部位并向下缓缓用力, 直至茎秆恰好折断, 记录其时推拉力计所显示力的值。然后剪下基部第 2 伸长节间, 并且在基部第 2 伸长节间中部剪断, 剥去叶鞘, 用游标卡尺测量中空椭圆

形茎秆的长轴、短轴内径和外径, 各项力学指标参考 Zhang 等<sup>[20]</sup> 的计算公式如下:

$$WP=SL \times FW \quad (1)$$

式中,  $WP$  为全株加在基部节间的弯曲力矩(g·cm),  $SL$  为基部节间折断部位到主茎顶端的距离(cm),  $FW$  为基部节间折断部位至穗顶的鲜重(g)。

$$M=F \times L/4 \quad (2)$$

式中,  $M$  为折断弯矩(g·cm),  $F$  为使基部被测定节间折断时所施加的力(kg),  $L$  为两支点间的距离(cm)。

$$Z=\pi/32 \times (a_1^3 b_1 - a_2^3 b_2)/a_1 \quad (3)$$

式中,  $Z$  为基部椭圆形中空节间横切面大小的断面系数(mm<sup>3</sup>),  $a_1$  和  $a_2$  分别表示短轴的外径和内径(mm),  $b_1$  和  $b_2$  分别表示长轴的外径与内径(mm)。

$$BS=M/Z \quad (4)$$

式中,  $BS$  为茎秆的弯曲应力(g/mm<sup>2</sup>)。

$$LI=WP/M \times 100\% \quad (5)$$

式中,  $LI$  为倒伏指数。

取稻株基部第 2 伸长节间的茎、鞘分别装袋, 样品置于 105 °C 烘箱杀青 30 min, 70 °C 烘干至恒重, 分别称干重。计算基部第 2 伸长节间茎、鞘充实度(单位长度茎、鞘干重)。

**1.3.3 茎秆的形态指标** 于水稻齐穗期每小区随机取代表性的主茎 10 根, 分别测定稻株的株高、重心高度、节间长度、穗长、茎粗和壁厚<sup>[20]</sup>。本研究供试的 2 个水稻品种(渝香优 8133 和泰优粤禾丝苗) 穗下均有 6 个伸长节间, 分别为穗下第 1、第 2、第 3、第 4、第 5、第 6 伸长节间, 分别记作 N1、N2、N3、N4、N5、N6, N0 为穗长。定义穗下第 1 伸长节间(N1) 为上部节间, 穗下第 2、第 3 伸长节间(N2+N3) 为中部节间, 穗下第 4、第 5、第 6 伸长节间(N4+N5+N6) 为下部节间<sup>[21]</sup>。

**1.3.4 单株干重** 水稻成熟期每小区调查 40 穴的有效穗, 按照平均每穴有效数取代表性稻株 5 穴。洗净并剪根, 按照茎、叶、穗分样并装袋。于 105 °C 杀青 0.5 h, 80 °C 烘干至恒重, 称量并计算单株茎、叶、穗干重。

### 1.4 数据统计与分析

采用 Microsoft Excel 2010 进行数据处理和图、表绘制, 使用 SPSS20.0 软件进行统计分析, 采用 Duncan's 法进行多重比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同播期和密度对精量穴直播水稻产量的影响

由表 1、表 2 可知,与早播(B1)处理相比,迟播(B2)处理显著提高了水稻产量( $F=73.0^{**}$ ),归因于有效穗( $F=184.3^{**}$ )显著增加,2 个水稻品种趋势一致。在 B1 和 B2 播期处理中,渝香优 8133 产量分别为  $8.0\sim 9.4\text{ t/hm}^2$  和  $8.7\sim 10.0\text{ t/hm}^2$ ,泰优粤禾丝苗产量分别为  $6.7\sim 8.9\text{ t/hm}^2$  和  $9.0\sim 10.6\text{ t/hm}^2$ 。随着直播密度的增加,2 个品种水稻的产量均呈先增加后降低趋势,在 B1 播期处

理中,D3 处理的产量均最高,分别为  $9.4\text{ t/hm}^2$  和  $8.9\text{ t/hm}^2$ ,且 D2、D3、D4、D5 处理间差异不显著;在 B2 播期处理中,D4 处理的产量均最高,分别为  $10.0\text{ t/hm}^2$  和  $10.6\text{ t/hm}^2$ ,与 D3 处理差异不显著,但与 D1、D2 和 D5 处理间的差异显著或极显著(除渝香优 8133 的 D2 处理差异不显著外)。增加直播密度,有效穗先增加后降低,穗粒数呈显著降低趋势( $F=14.9^{**}$ ),较 D1 处理,D2、D3 处理差异较小,D4、D5 处理降幅较大,而结实率和千粒重差异不显著。此外,播期和品种对产量、有效穗、结实率和千粒重的互作效应均达显著水平。

表 1 不同播期和密度对精量穴直播水稻产量及构成因素影响的方差分析

Table 1 Variance analysis of the effects of different sowing dates and densities on yield and yield components of precision hill-direct-seeding rice

| 品种              | 1 m <sup>2</sup> 有效穗数 | 穗粒数     | 结实率      | 千粒重        | 产量      |
|-----------------|-----------------------|---------|----------|------------|---------|
| 品种(V)           | 4.8 *                 | 89.4 ** | 2.5      | 1 446.4 ** | 2.3     |
| 播期(B)           | 184.3 **              | 1.0     | 149.1 ** | 20.7 **    | 73.0 ** |
| 密度(D)           | 34.8 **               | 14.9 ** | 0.8      | 0.4        | 17.9 ** |
| 品种×播期(V×B)      | 12.0 **               | 1.5     | 4.3 *    | 8.0 **     | 17.5 ** |
| 品种×密度(V×D)      | 1.6                   | 0.1     | 1.3      | 0.4        | 0.5     |
| 密度×播期(D×B)      | 2.8                   | 1.6     | 1.1      | 2.8        | 1.4     |
| 品种×密度×播期(V×D×B) | 0.5                   | 1.1     | 0.6      | 0.7        | 0.8     |

\* 和 \*\* 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上显著。

表 2 不同播期和密度处理的精量穴直播水稻产量及构成因素

Table 2 Yield and yield components of precision hill-direct-seeding rice under different sowing dates and densities

| 播期 | 品种       | 直播密度 | 1 m <sup>2</sup> 有效穗数 | 穗粒数<br>(粒) | 结实率<br>(%) | 千粒重<br>(g) | 产量<br>(t/hm <sup>2</sup> ) |
|----|----------|------|-----------------------|------------|------------|------------|----------------------------|
| B1 | 渝香优 8133 | D1   | 207.5c                | 151.8a     | 87.1a      | 29.1a      | 8.0b                       |
|    |          | D2   | 245.7b                | 142.0ab    | 85.7a      | 29.6a      | 8.8ab                      |
|    |          | D3   | 258.4ab               | 143.3ab    | 85.6a      | 29.6a      | 9.4a                       |
|    |          | D4   | 289.4a                | 124.0c     | 86.1a      | 30.2a      | 9.3a                       |
|    |          | D5   | 281.2ab               | 126.6bc    | 83.1a      | 30.2a      | 8.9ab                      |
|    | 泰优粤禾丝苗   | D1   | 200.5c                | 169.4ab    | 80.4a      | 24.6a      | 6.7b                       |
|    |          | D2   | 231.0bc               | 176.1a     | 85.3a      | 24.3a      | 8.4a                       |
|    |          | D3   | 260.0ab               | 166.8abc   | 83.9a      | 24.3a      | 8.9a                       |
|    |          | D4   | 290.7a                | 149.2bc    | 79.4a      | 24.5a      | 8.4a                       |
|    |          | D5   | 274.6a                | 146.4c     | 81.3a      | 24.9a      | 8.1a                       |
| B2 | 渝香优 8133 | D1   | 281.2b                | 143.3ab    | 74.2a      | 29.6a      | 8.8b                       |
|    |          | D2   | 292.4ab               | 151.9a     | 74.2a      | 29.2a      | 9.6a                       |
|    |          | D3   | 306.2a                | 147.6ab    | 74.4a      | 29.7a      | 9.9a                       |
|    |          | D4   | 304.8a                | 140.6b     | 79.2a      | 29.6a      | 10.0a                      |
|    |          | D5   | 299.5ab               | 129.6b     | 76.0a      | 29.4a      | 8.7b                       |



续表2 Continued 2

| 播期 | 品种     | 直播密度 | 1 m <sup>2</sup> 有效穗数 | 穗粒数<br>(粒) | 结实率<br>(%) | 千粒重<br>(g) | 产量<br>(t/hm <sup>2</sup> ) |
|----|--------|------|-----------------------|------------|------------|------------|----------------------------|
| B2 | 泰优粤禾丝苗 | D1   | 278.7c                | 169.9a     | 81.1a      | 23.4a      | 9.0c                       |
|    |        | D2   | 301.4b                | 164.9a     | 80.6a      | 23.4a      | 9.4bc                      |
|    |        | D3   | 334.5a                | 164.4a     | 80.3a      | 23.6a      | 10.4a                      |
|    |        | D4   | 345.9a                | 158.1ab    | 82.8a      | 23.5a      | 10.6a                      |
|    |        | D5   | 336.4a                | 148.1b     | 82.1a      | 23.3a      | 9.5b                       |

B1:播种期 3 月 29 日(早播);B2:播种期 5 月 25 日(迟播);D1:每 1 hm<sup>2</sup> 1.50×10<sup>5</sup>穴,30.0 cm×22.2 cm;D2:每 1 hm<sup>2</sup> 1.95×10<sup>5</sup>穴,30.0 cm×17.1 cm;D3:每 1 hm<sup>2</sup> 2.40×10<sup>5</sup>穴,30.0 cm×13.9 cm;D4:每 1 hm<sup>2</sup> 2.85×10<sup>5</sup>穴,30.0 cm×11.7 cm;D5:每 1 hm<sup>2</sup> 3.30×10<sup>5</sup>穴,30.0 cm×10.1 cm。同一品种同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。

2.2 不同播期和密度对精量穴直播水稻茎秆力学性状的影响

由表 3、表 4 可知,与 B1 播期处理相比, B2 播期处理显著提高了水稻茎秆倒伏指数( $F=513.8^{**}$ ),归因于折断弯矩( $F=188.2^{**}$ )显著降低和弯曲力矩( $F=330.9^{**}$ )显著升高,2 个水稻品种趋势一致。在 B1 和 B2 播期处理中,渝香优 8133 的倒伏指数分别为 95.2%~137.6%和 144.8%~184.5%,泰优粤禾丝苗的倒伏指数分别为 72.9%~87.3%和 100.2%~145.2%。随着直播密度的增加,2 个水稻品种的倒伏指数( $F=39.0^{**}$ )增加趋势一致。在 B1 和 B2 播期处理中,与 D1 处理相比,渝香

优 8133 的 D2、D3 处理倒伏指数分别增加了 3.9%、4.7%和 5.8%、15.0%,D4 和 D5 处理分别增加了 27.5%、44.6%和 24.0%、27.4%;泰优粤禾丝苗的 D2、D3 处理倒伏指数分别增加了 1.9%、8.2%和 10.3%、14.2%,D4 和 D5 处理分别增加了 17.6%、19.6%和 37.3%、44.3%。增加直播水稻密度,茎秆断面系数( $F=20.2^{**}$ )和折断弯矩( $F=109.8^{**}$ )降低显著,导致两品种倒伏指数( $F=39.0^{**}$ )显著增加。此外,播期和品种对倒伏指数、折断弯矩、断面系数、弯曲力矩和折断部位至穗顶鲜重的互作效应均达显著水平。

表 3 不同播期和密度对精量穴直播水稻茎秆倒伏指数及力学参数影响的方差分析

Table 3 Variance analysis of the effects of different sowing dates and densities on stem lodging index and mechanical parameters of precision hill-direct-seeding rice

| 品种              | 折断弯矩                | 弯曲应力               | 断面系数                | 弯曲力矩                  | 折断部位至穗<br>顶鲜重         | 折断部位至穗<br>顶长度       | 倒伏指数                |
|-----------------|---------------------|--------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|---------------------|
| 品种(V)           | 216.7 <sup>**</sup> | 37.5 <sup>**</sup> | 267.9 <sup>**</sup> | 1 452.7 <sup>**</sup> | 1 421.8 <sup>**</sup> | 908.7 <sup>**</sup> | 305.8 <sup>**</sup> |
| 播期(B)           | 188.2 <sup>**</sup> | 3.8                | 147.9 <sup>**</sup> | 330.9 <sup>**</sup>   | 242.3 <sup>**</sup>   | 248.3 <sup>**</sup> | 513.8 <sup>**</sup> |
| 密度(D)           | 109.8 <sup>**</sup> | 1.1                | 20.2 <sup>**</sup>  | 4.2 <sup>*</sup>      | 7.3 <sup>**</sup>     | 1.4                 | 39.0 <sup>**</sup>  |
| 品种×播期(V×B)      | 12.8 <sup>**</sup>  | 23.3 <sup>**</sup> | 24.7 <sup>**</sup>  | 90.7 <sup>**</sup>    | 124.9 <sup>**</sup>   | 3.5                 | 9.8 <sup>**</sup>   |
| 品种×密度(V×D)      | 4.0 <sup>*</sup>    | 1.0                | 2.8                 | 2.1                   | 2.7                   | 1.6                 | 0.9                 |
| 密度×播期(D×B)      | 4.4 <sup>*</sup>    | 1.0                | 0.9                 | 1.3                   | 2.1                   | 0.7                 | 1.9                 |
| 品种×密度×播期(V×D×B) | 4.1 <sup>*</sup>    | 1.3                | 0.7                 | 0.5                   | 1.8                   | 0.1                 | 3.0 <sup>*</sup>    |

\* 和 \*\* 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上显著。

由图 1 可知,综合品种各处理叶面积指数(LAI)、倒伏指数(LI)和产量的数据,直播水稻的 LAI 与 LI 呈 $Y=20.639 0x-20.660 0$ 的线性增加趋势( $R^2=0.798^{**}$ ),与产量呈 $Y=-0.151 0x^2+2.515 0x-0.726 2$ 的二次函数关系。当 LAI 处于 4.5~7.0 时,

产量呈线性增加趋势,当 LAI 处于 7.0~8.5 时,产量达到最高值并趋于平稳,随着 LAI 的持续增加,产量表现为下降趋势,且 LI 呈进一步增加趋势。本研究中,当 LAI 处于 7.0~7.5 时,直播水稻产量已接近最大值,且倒伏指数处于较低水平。

表 4 不同播期和密度处理的精量穴直播水稻茎秆倒伏指数及力学参数

Table 4 Stem lodging index and mechanical parameters of precision hill-direct-seeding rice under different sowing dates and densities

| 播期 | 品种       | 直播密度 | 折断弯矩<br>(g/cm) | 弯曲应力<br>(g/mm <sup>2</sup> ) | 断面系数<br>(mm <sup>3</sup> ) | 弯曲力矩<br>(g/cm) | 折断部位至<br>穗顶鲜重<br>(g) | 折断部位至<br>穗顶长度<br>(cm) | 倒伏指数<br>(%) |
|----|----------|------|----------------|------------------------------|----------------------------|----------------|----------------------|-----------------------|-------------|
| B1 | 渝香优 8133 | D1   | 3 040.0a       | 860.6a                       | 35.4a                      | 2 890.1a       | 23.4a                | 123.7a                | 95.2c       |
|    |          | D2   | 3 061.2a       | 916.9a                       | 33.5a                      | 3 024.6a       | 24.1a                | 125.2a                | 98.8c       |
|    |          | D3   | 2 917.5a       | 870.0a                       | 33.6a                      | 2 906.7a       | 23.6a                | 123.0a                | 99.6c       |
|    |          | D4   | 2 405.9b       | 724.6b                       | 33.3a                      | 2 917.9a       | 23.2a                | 125.5a                | 121.3b      |
|    |          | D5   | 2 001.3c       | 738.0b                       | 27.2b                      | 2 754.9a       | 22.9a                | 120.4a                | 137.6a      |
|    | 泰优粤禾丝苗   | D1   | 2 679.2a       | 1 068.9a                     | 25.3a                      | 1 953.4a       | 19.3a                | 101.4a                | 72.9b       |
|    |          | D2   | 2 551.0ab      | 1 059.6a                     | 24.2ab                     | 1 893.4ab      | 18.9ab               | 100.1ab               | 74.3b       |
|    |          | D3   | 2 424.2b       | 1 182.1a                     | 20.9abc                    | 1 911.5ab      | 19.3a                | 99.0ab                | 78.9b       |
|    |          | D4   | 2 042.5c       | 1 161.6a                     | 17.6bc                     | 1 749.0c       | 18.2b                | 96.2b                 | 85.7a       |
|    |          | D5   | 2 073.9c       | 1 144.8a                     | 18.6c                      | 1 806.6bc      | 18.5ab               | 97.7ab                | 87.3a       |
| B2 | 渝香优 8133 | D1   | 2 778.8a       | 1 042.6a                     | 26.7a                      | 4 010.0a       | 28.7a                | 139.5a                | 144.8c      |
|    |          | D2   | 2 515.6b       | 1 076.1a                     | 23.7abc                    | 3 847.4a       | 27.9ab               | 137.9a                | 153.1bc     |
|    |          | D3   | 2 408.4bc      | 964.9a                       | 24.3ab                     | 3 995.6a       | 28.9a                | 138.5a                | 166.5ab     |
|    |          | D4   | 2 203.6cd      | 977.9a                       | 22.6bc                     | 3 949.0a       | 28.0ab               | 141.1a                | 179.6a      |
|    |          | D5   | 2 013.0d       | 982.9a                       | 20.5c                      | 3 714.7a       | 27.0b                | 137.7a                | 184.5a      |
|    | 泰优粤禾丝苗   | D1   | 2 425.5a       | 1 136.4a                     | 21.4a                      | 2 430.6a       | 21.3a                | 114.1a                | 100.2b      |
|    |          | D2   | 1 956.0b       | 1 079.0a                     | 18.1b                      | 2 157.3b       | 19.7b                | 109.3b                | 110.5b      |
|    |          | D3   | 1 868.7b       | 1 013.4a                     | 18.6b                      | 2 129.2b       | 19.0b                | 111.9ab               | 114.5b      |
|    |          | D4   | 1 491.9c       | 1 023.9a                     | 14.6c                      | 2 044.6b       | 18.6b                | 109.7b                | 137.6a      |
|    |          | D5   | 1 461.1c       | 971.6a                       | 15.1c                      | 2 122.2b       | 19.3b                | 110.0ab               | 145.2a      |

B1:播种期 3 月 29 日(早播);B2:播种期 5 月 25 日(迟播);D1:每 1 hm<sup>2</sup> 1.50×10<sup>5</sup>穴,30.0 cm×22.2 cm;D2:每 1 hm<sup>2</sup> 1.95×10<sup>5</sup>穴,30.0 cm×17.1 cm;D3:每 1 hm<sup>2</sup> 2.40×10<sup>5</sup>穴,30.0 cm×13.9 cm;D4:每 1 hm<sup>2</sup> 2.85×10<sup>5</sup>穴,30.0 cm×11.7 cm;D5:每 1 hm<sup>2</sup> 3.30×10<sup>5</sup>穴,30.0 cm×10.1 cm。同一品种同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。

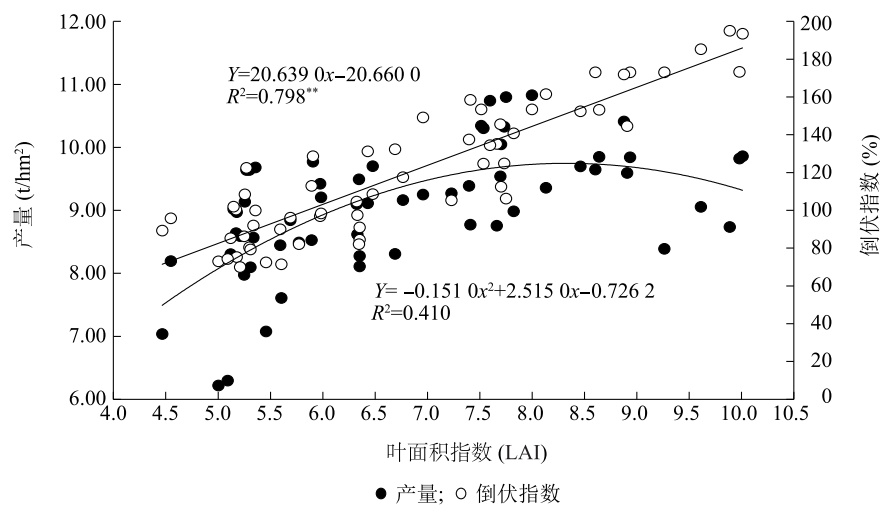


图 1 不同播期和密度下精量穴直播水稻叶面积指数(LAI)与产量和倒伏指数(LI)的相关性

Fig.1 Correlation analysis of leaf area index (LAI) with yield and lodging index (LI) of precision hill-direct-seeding rice under different sowing dates and densities

2.3 不同播期和密度下水稻茎秆形态指标与倒伏指数的关系

由表 5、表 6 可知,与 B1 播期处理相比, B2 播期处理显著提高了水稻 LAI ( $F=502.9^{**}$ ),显著降低了茎粗( $F=171.6^{**}$ )、壁厚( $F=13.4^{**}$ )、茎充实度( $F=86.4^{**}$ )和鞘充实度( $F=69.3^{**}$ ),2 个水稻品种趋势一致。其中,在 B1 和 B2 播期处理中,渝香优 8133 的 LAI 分别为 4.7~6.7 和 7.6~9.6;泰优

粤禾丝苗 LAI 分别为 5.2~6.0 和 6.2~7.9。随着播种密度增加, LAI 总体表现为显著增加趋势 ( $F=24.8^{**}$ ),其中渝香优 8133 在 B1 和 B2 处理均显著增加,泰优粤禾丝苗仅在 B2 处理增加显著。随着播种密度增大,基部节间茎粗、壁厚、茎充实度和鞘充实度显著降低,其中以茎粗( $F=13.0^{**}$ )和茎充实度( $F=13.1^{**}$ )降幅较大,2 个水稻品种趋势一致。

表 5 不同播期和密度对精量穴直播水稻叶面积指数 (LAI) 及茎秆形态指标影响的方差分析

Table 5 Variance analysis of the effects of different sowing dates and densities on leaf area index (LAI) and stem morphological indexes of precision hill-direct-seeding rice

| 品种               | 叶面积指数    | 茎粗       | 壁厚       | 茎充实度    | 鞘充实度    |
|------------------|----------|----------|----------|---------|---------|
| 品种 (V)           | 51.9 **  | 140.2 ** | 133.4 ** | 34.7 ** | 0.6     |
| 播期 (B)           | 502.9 ** | 171.6 ** | 13.4 **  | 86.4 ** | 69.3 ** |
| 密度 (D)           | 24.8 **  | 13.0 **  | 9.1 **   | 13.1 ** | 8.4 **  |
| 品种×播期 (V×B)      | 41.8 **  | 6.4 *    | 0.1      | 0.8     | 2.1     |
| 品种×密度 (V×D)      | 2.6      | 1.8      | 3.0 *    | 2.0     | 0.5     |
| 密度×播期 (D×B)      | 3.1 *    | 0.7      | 0.3      | 0.4     | 0.3     |
| 品种×密度×播期 (V×D×B) | 0.9      | 0.9      | 0.9      | 0.3     | 0.5     |

\* 和 \*\* 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上显著。

表 6 不同播期和密度处理的精量穴直播水稻叶面积指数 (LAI) 及茎秆形态指标

Table 6 Leaf area index (LAI) and stem morphological indexes of precision hill-direct-seeding rice under different sowing dates and densities

| 播期 | 品种       | 直播密度 | 叶面积指数 (LAI) | 茎粗 (mm) | 壁厚 (mm) | 茎充实度 (mg/cm) | 鞘充实度 (mg/cm) |
|----|----------|------|-------------|---------|---------|--------------|--------------|
| B1 | 渝香优 8133 | D1   | 4.7c        | 7.22a   | 1.07a   | 40.1a        | 21.4a        |
|    |          | D2   | 5.4b        | 6.90a   | 1.03ab  | 39.6ab       | 20.4ab       |
|    |          | D3   | 5.5b        | 6.88a   | 1.03ab  | 40.4a        | 21.1a        |
|    |          | D4   | 5.7b        | 6.82ab  | 1.05a   | 35.0ab       | 18.2ab       |
|    |          | D5   | 6.7a        | 6.44b   | 0.98b   | 32.9b        | 15.8b        |
|    | 泰优粤禾丝苗   | D1   | 5.2a        | 6.23a   | 0.93a   | 35.5a        | 19.4a        |
|    |          | D2   | 5.3a        | 6.24a   | 0.94a   | 35.9a        | 20.4a        |
|    |          | D3   | 5.6a        | 5.98a   | 0.93a   | 35.4a        | 19.7a        |
|    |          | D4   | 5.5a        | 5.80a   | 0.83b   | 29.8ab       | 18.8a        |
|    |          | D5   | 6.0a        | 6.02a   | 0.84b   | 28.2b        | 16.9a        |
| B2 | 渝香优 8133 | D1   | 7.6b        | 6.22a   | 1.02ab  | 34.6a        | 15.7a        |
|    |          | D2   | 8.6b        | 6.08ab  | 0.97b   | 29.0b        | 15.0a        |
|    |          | D3   | 8.3b        | 6.18a   | 1.03a   | 30.9ab       | 15.3a        |
|    |          | D4   | 9.6a        | 5.78bc  | 0.95b   | 30.6ab       | 13.3a        |
|    |          | D5   | 9.6a        | 5.66c   | 0.97ab  | 26.6b        | 12.8a        |
|    | 泰优粤禾丝苗   | D1   | 6.2c        | 5.87a   | 0.89ab  | 28.9a        | 16.8ab       |
|    |          | D2   | 6.8b        | 5.52b   | 0.92a   | 27.5a        | 17.7a        |
|    |          |      |             |         |         |              |              |

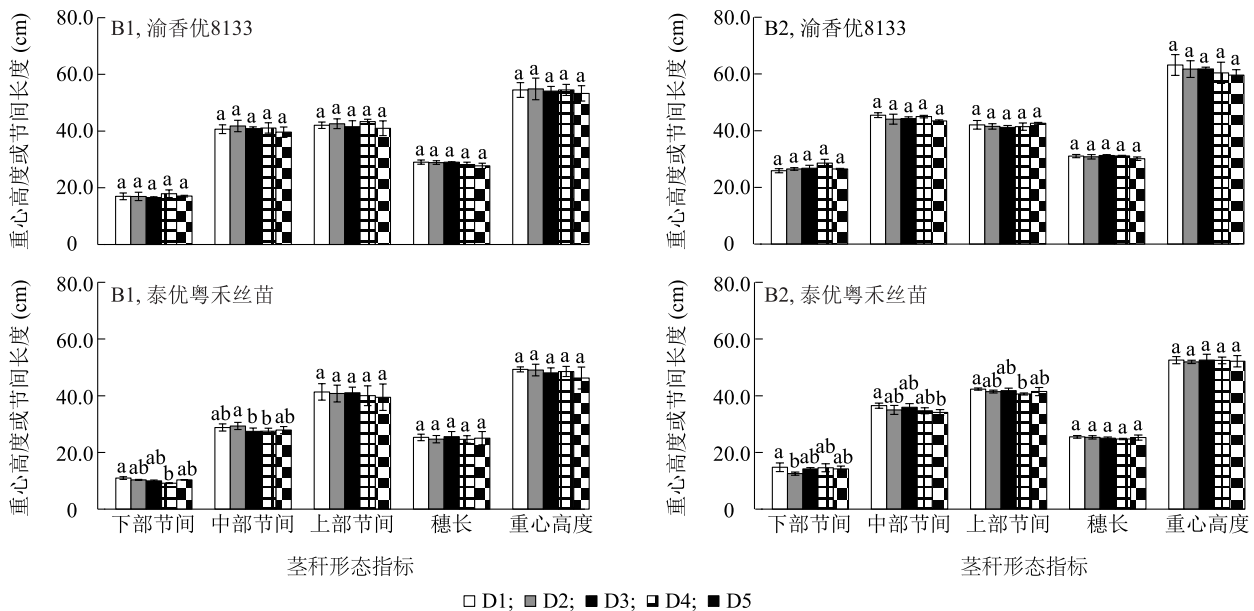
续表6 Continued 6

| 播期 | 品种     | 直播密度 | 叶面积指数<br>(LAI) | 茎粗<br>(mm) | 壁厚<br>(mm) | 茎充实度<br>(mg/cm) | 鞘充实度<br>(mg/cm) |
|----|--------|------|----------------|------------|------------|-----------------|-----------------|
| B2 | 泰优粤禾丝苗 | D3   | 7.7a           | 5.52b      | 0.87ab     | 26.9a           | 15.8b           |
|    |        | D4   | 7.8a           | 5.13c      | 0.78ab     | 21.1b           | 14.3c           |
|    |        | D5   | 7.9a           | 5.27c      | 0.77b      | 20.9b           | 13.2c           |

B1:播种期3月29日(早播);B2:播种期5月25日(迟播);D1:每1 hm<sup>2</sup> 1.50×10<sup>5</sup>穴,30.0 cm×22.2 cm;D2:每1 hm<sup>2</sup> 1.95×10<sup>5</sup>穴,30.0 cm×17.1 cm;D3:每1 hm<sup>2</sup> 2.40×10<sup>5</sup>穴,30.0 cm×13.9 cm;D4:每1 hm<sup>2</sup> 2.85×10<sup>5</sup>穴,30.0 cm×11.7 cm;D5:每1 hm<sup>2</sup> 3.30×10<sup>5</sup>穴,30.0 cm×10.1 cm。同一品种同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ )。

由图2可知,与B1播期处理相比,B2播期处理的重心高度大幅提高,归因于下部节间长度显著提高,其中,B2播期下渝香优8133下部节间长度为25.9~28.6 cm,较B1播期提高了52.6%~61.8%;泰优粤禾丝苗下

部节间长度为12.5~14.8 cm,较B1播期处理提高了21.3%~59.5%。随着直播密度增加,株高和重心高度略有降低,差异不显著,这归因于中部节间长度略有缩短,以品种泰优粤禾丝苗表现明显。



B1:播种期3月29日(早播);B2:播种期5月25日(迟播);D1:每1 hm<sup>2</sup> 1.50×10<sup>5</sup>穴,30.0 cm×22.2 cm;D2:每1 hm<sup>2</sup> 1.95×10<sup>5</sup>穴,30.0 cm×17.1 cm;D3:每1 hm<sup>2</sup> 2.40×10<sup>5</sup>穴,30.0 cm×13.9 cm;D4:每1 hm<sup>2</sup> 2.85×10<sup>5</sup>穴,30.0 cm×11.7 cm;D5:每1 hm<sup>2</sup> 3.30×10<sup>5</sup>穴,30.0 cm×10.1 cm。图柱上不同小写字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ )。

图2 不同播期和密度对精量穴直播水稻节间长度、穗长和重心高度的影响

Fig.2 Effects of different sowing dates and densities on internode length, panicle length and barycenter height of precision hill-direct-seeding rice

相关分析结果表明,倒伏指数与节间长度呈不同程度相关关系(图3)。其中倒伏指数与下部节间长度( $r=0.855^{**}$ )、中部节间长度( $r=0.741^{**}$ )和穗长( $r=0.649^{*}$ )呈显著或极显著正相关关系,而与上部节间长度相关不显著( $r=0.239$ )。

## 2.4 不同播期和密度对精量穴直播水稻植株干物质积累和分配的影响

由图4可知,与B1播期处理相比,B2播期处理不同程度降低了成熟期单株干重。其中,渝香

优8133和泰优粤禾丝苗成熟期单株茎鞘干重分别降低了22.4%和17.6%,而单株叶干重和穗干重差异较小。随着播种密度的增加,直播水稻成熟期单株器官干重呈不同程度降低趋势,与D1处理相比,D2和D3处理降低幅度较小,D4和D5处理降低幅度较大,尤其在B1播期处理下降幅较为明显,2个水稻品种表现基本一致。这说明单株茎鞘干重和穗干重的降低是单株干物质积累不足的主要原因。



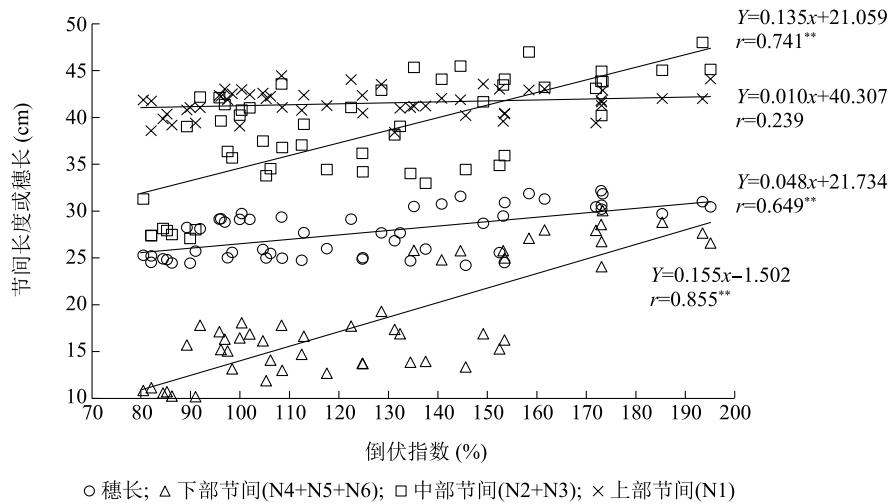
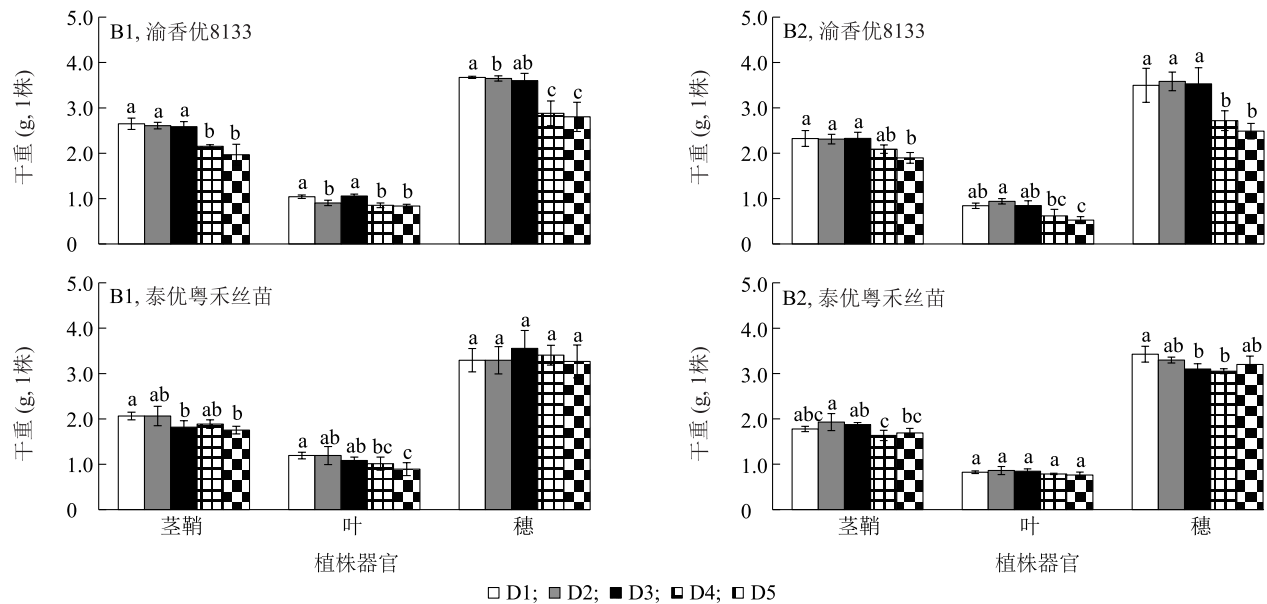


图 3 不同播期和密度下精量穴直播水稻节间长度、穗长与倒伏指数的相关性

Fig.3 Correlation analysis of internode length, panicle length and lodging index of precision hill-direct-seeding rice under different sowing dates and densities



B1:播种期 3 月 29 日(早播);B2:播种期 5 月 25 日(迟播);D1:每 1 hm<sup>2</sup> 1.50×10<sup>5</sup>穴,30.0 cm×22.2 cm;D2:每 1 hm<sup>2</sup> 1.95×10<sup>5</sup>穴,30.0 cm×17.1 cm;D3:每 1 hm<sup>2</sup> 2.40×10<sup>5</sup>穴,30.0 cm×13.9 cm;D4:每 1 hm<sup>2</sup> 2.85×10<sup>5</sup>穴,30.0 cm×11.7 cm;D5:每 1 hm<sup>2</sup> 3.30×10<sup>5</sup>穴,30.0 cm×10.1 cm。图柱上不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P<0.05$ )。

图 4 不同播期和密度对精量穴直播水稻单株干物质积累和分配的影响

Fig.4 Effects of different sowing dates and densities on dry matter accumulation and distribution of single plant of precision hill-direct-seeding rice

相关分析结果表明,倒伏指数与直播水稻成熟期茎、叶和穗呈不同程度相关关系(图 5)。其中倒伏指数与精量穴直播水稻成熟期叶干重( $r=0.368^{**}$ )呈

显著正相关关系,与精量穴直播水稻成熟期茎干重( $r=-0.571^{**}$ )呈显著负相关关系,而与精量穴直播水稻成熟期穗干重相关不显著( $r=0.045$ )。

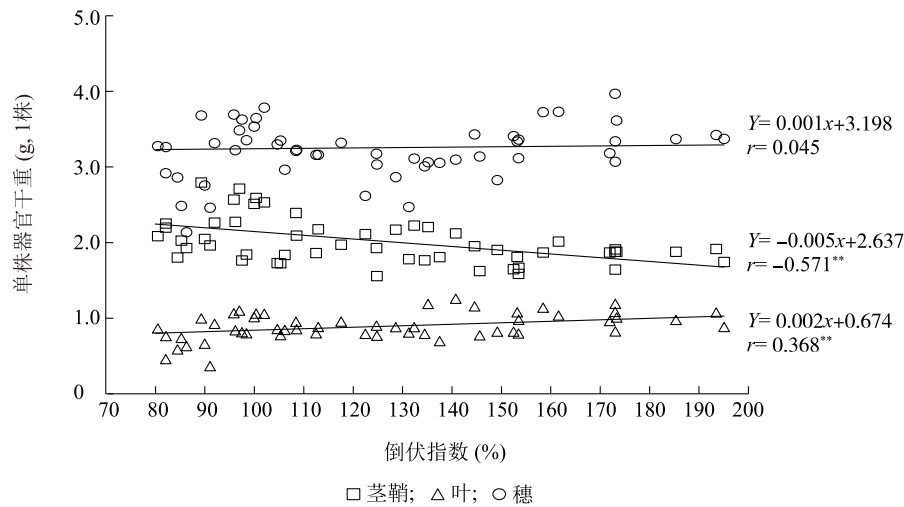


图5 精量穴直播水稻单茎干物质分配与倒伏指数的相关性

Fig.5 Correlation analysis between single stem dry matter distribution and lodging index of precision hill-direct-seeding rice

### 3 讨论

#### 3.1 密度对精量穴直播水稻产量和抗倒伏性的影响

当直播水稻密度由 D1 处理增加到 D2 和 D3 处理时,产量呈增加趋势,而增加到 D4 和 D5 处理时,产量不增反降;B1 播期下的 D3 处理产量最高, B2 播期下的 D4 产量最高,2 个水稻品种变化趋势基本一致。通过对产量构成因素分析发现,播期和密度通过影响有效穗和穗粒数进而影响精量穴直播水稻产量,与 D1 处理相比,D2 和 D3 处理的穗粒数略有降低但差异不显著,有效穗呈增加趋势进而增加了产量;D4 和 D5 处理的穗粒数显著降低,特别是 D5 处理有效穗大幅降低,导致减产。说明,在不影响穗粒数和群体质量的前提下适宜增加播种密度,可提高群体有效穗增加产量;而过密直播使得群体内植株竞争加剧,个体生长受到抑制,穗粒数大幅减少,从而导致产量降低<sup>[22-23]</sup>。此外,当直播密度由 D1 处理增加到 D5 处理,倒伏指数表现出先“缓增”到“快增”的变化过程。与 D1 处理相比,D2、D3 处理倒伏指数增加不显著,D4、D5 处理倒伏指数大幅上升,差异达显著水平,B1 播期和 B2 播期条件下,2 个品种的倒伏指数变化趋势总体一致,品种间泰优粤禾丝苗的倒伏指数总体小于渝香优 8133。因此,选择耐密抗倒的品种并适当增加直播密度,更有利于提高直播水稻产量,并缓解植株倒伏风险。综合来

看,在 B1 和 B2 播期下 D3 处理的精量穴直播水稻易获得高产和抗倒的协同。

#### 3.2 播期对精量穴直播水稻茎秆倒伏风险的影响

播期可显著影响作物个体质量进而影响群体生长发育和产量形成<sup>[24-25]</sup>。较早播(B1 处理),迟播(B2 处理)条件下,直播水稻生长避开了苗期低温不利条件,出苗齐,分蘖发生快,生长迅速,高峰苗数大幅提高,因此,营养生长期更易于形成旺长群体,导致节间长度增加和株高增高<sup>[3]</sup>。本研究,与 B1 播期处理相比,2 个水稻品种在 B2 播期处理下植株倒伏指数总体增加 34.1%~67.1%,这与在小麦上的研究结果<sup>[11-12]</sup>恰好相反。分析原因:一是迟播处理下,直播水稻营养生长期植株生长迅速,群体高峰苗数和有效穗数明显提高,LAI 的大幅增加加剧了群体内部个体间对光照和养分资源的竞争效应,弱化了个体生长,从而降低了茎秆强度,这与 Zhong 等<sup>[26]</sup>的研究结果相吻合。综合各处理数据表明,LI 与 LAI 呈显著正相关( $R^2 = 0.798^{**}$ ),产量与 LAI 呈二次抛物线关系,当 LAI 为 7.0~7.5 时,直播水稻产量处于高产水平,且倒伏指数处于较低水平,由此可推断,精量穴直播水稻高产和抗倒伏相协调的适宜 LAI 范围是 7.0~7.5。二是,迟播处理下,尽管对穗长(N0)、上部节间(N1)、中部节间(N2+N3)的影响较小,但下部节间(N4+N5+N6)增加 21.3%~61.8%,使得株高、重心高度提高,增加植株弯曲力矩和倒伏指数。相关分析结果表明,倒伏指数与下部节间长

度呈极显著正相关( $r=0.855^{**}$ ),而与上部节间相关不显著。这说明,迟播通过提高直播水稻植株下部节间长度,增加植株株高和弯曲力矩,进而增大直播水稻倒伏指数,这与张巫军等<sup>[27-28]</sup>研究结果相吻合。三是迟播处理下,基部第二伸长节间茎粗、壁厚、茎充实度和鞘充实度显著降低,减小了基部节间对植株上部的支撑作用,进而增大了倒伏风险。前人指出,直播种植模式下,增加基部节间茎粗、壁厚及茎鞘充实度,有利于提高植株茎秆抗折力和秆型指数,降低弯曲力矩与倒伏指数<sup>[29-30]</sup>。也有研究者指出,增加基部茎秆长轴、短轴外径和茎秆粗度,提高断面系数,可有效增强重穗型水稻茎秆强度<sup>[19]</sup>。本研究中,推迟播期,基部节间弯曲应力差异较小,而断面系数( $F=147.9^{**}$ )显著降低,这与基部节间茎粗和壁厚变化趋势一致。这说明,迟播处理下,茎粗变小,茎秆趋于纤细,导致断面系数和折断弯矩降低,增加了植株倒伏风险。

### 3.3 密度对精量穴直播水稻干物质分配及茎秆抗倒伏性的影响

增加密度是提高作物产量的有效途径之一,而过度密植反而导致玉米<sup>[15-16]</sup>、小麦<sup>[13]</sup>和水稻<sup>[3]</sup>等作物冠层结构劣化,特别是冠层下部光照减弱,植株个体发育不良,抗倒伏性差,产量不增反降。而优化栽培措施和合理密植,使玉米冠层干物质垂直分布似“纺锤形”,使得玉米植株重心下降,冠层结构得到优化,进而提高玉米籽粒产量<sup>[31]</sup>。在水稻中,增加抽穗期光合产物向茎鞘分配,适度减小向叶片分配,有利于实现大穗的同时,增加生育后期的抗倒伏性<sup>[32]</sup>。本研究中,与 B1 播期处理相比,B2 播期处理明显降低了单株生物量,归因于单株茎鞘干重的显著降低。与 D1 处理相比,D2、D3 处理单株茎鞘干重差异较小,D4、D5 处理单株茎鞘干重大幅降低,这与茎秆折断弯矩变化趋势一致,其中早播处理(B1)中降幅显著,且品种间差异显著。分析结果表明,倒伏指数与单株叶干重呈显著正相关( $r=0.368^{**}$ ),而与单株茎鞘干重呈显著负相关( $r=-0.571^{**}$ )。这说明适度增加密度,可维持较高的单株茎鞘干重,减少茎秆强度下降速率,实现直播水稻较高的单穗干重和产量水平。进一步分析发现,在高密度处理(D4、D5)下,基部第 1、第 2、第 3 伸长节间长度差异和株高差异

不显著。这说明,增加播种密度并未通过增加株高来降低精量穴直播水稻的抗倒伏性。增加播种密度处理下,茎粗、壁厚、茎充实度和鞘充实度显著降低是直播水稻基部节间横向生长不足、茎秆质量变劣、倒伏指数增加的直接原因<sup>[33]</sup>。

众所周知,水稻茎秆充实程度与茎组织结构的细胞分裂分化与茎鞘中纤维素、半纤维素、木质素、淀粉和非结构性碳水化合物(NSC)密切相关,进而影响直播水稻抗倒伏性<sup>[5]</sup>。本研究中,仅从茎秆形态结构、干物质积累和分配方面进行了比较分析。然而,在水稻精量穴直播种植方式下,茎鞘中化学组分积累过程的变化具体如何?特别是基部节间解剖结构,包括机械组织、大小维管束及薄壁组织对播期、密度互作的响应机制尚不清楚。今后,将进一步研究不同播期下,精量穴直播水稻拔节后茎秆中木质素、纤维素、半纤维和 NSC 积累相关酶的动态变化,并结合组织化学技术分析茎秆化学组分在机械组织、大小维管束及薄壁组织中的沉积和分布,来阐明其与精量穴直播水稻茎秆抗倒伏性的关系。

## 4 结 论

与 B1 播期处理相比,B2 播期处理产量显著提高,群体 LAI 和有效穗显著增加,倒伏指数显著提高。随着播种密度的增加,精量穴直播水稻产量呈先增加后降低趋势,而倒伏指数呈持续增加趋势,当 LAI 为 7.0~7.5 时,是精量穴直播水稻高产和抗倒伏的适宜范围。与 D1 处理相比,D2、D3 处理单株茎鞘干重、基部节间茎粗、壁厚及茎鞘充实度降低较小,从而维持了较高的茎秆折断弯矩;而 D4、D5 处理大幅降低,茎秆质量劣化,基部节间折断弯矩显著减小,从而大幅提高了植株倒伏风险。综上所述,精量穴直播水稻可通过适宜的播种密度,改善群体结构,提高茎秆质量和机械强度,增强抗倒伏性并同时获得高产;在 B1 和 B2 播期下,D3 处理是精量穴直播水稻协调高产和抗倒伏的适宜播种密度。

### 参考文献:

- [1] 彭少兵. 对转型时期水稻生产的战略思考[J]. 中国科学, 2014, 44(8): 845-850.
- [2] 张晓丽,陶 伟,高国庆,等. 直播栽培对双季早稻生育期、抗

- 倒伏能力及产量效益的影响[J]. 中国农业科学, 2023, 56(2): 249-263.
- [3] 张洪程, 邢志鹏, 翁文安, 等. 生育约束型直播水稻生育特征与稳产关键技术[J]. 中国农业科学, 2021, 54(7): 1322-1337.
- [4] 李 杰, 张洪程, 龚金龙, 等. 不同种植方式对超级稻植株抗倒伏能力的影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(11): 2234-2243.
- [5] 蒋明金, 王海月, 何 艳, 等. 氮肥管理对直播杂交水稻抗倒伏能力的影响[J]. 核农学报, 2020, 34(1): 157-168.
- [6] 李 敏, 周维佳, 罗德强, 等. 适宜机直播的优质籼稻品种筛选及其评价指标体系[J]. 南方农业学报, 2020, 51(7): 1660-1668.
- [7] 何汛峰, 李祖军, 田雪飞, 等. 双季直播晚稻品种筛选及抗倒伏能力研究[J]. 西南农业学报, 2020, 33(12): 2745-2754.
- [8] 易艳红, 王文霞, 曾勇军, 等. 人工模拟机械开沟穴直播提高早籼稻茎秆抗倒伏能力及产量[J]. 中国农业科学, 2019, 52(15): 2729-2742.
- [9] 蒋明金, 大川泰一郎, 马 均. 播栽方式对 2 个籼稻品种抗倒伏能力的影响[J]. 四川农业大学学报, 2020, 38(4): 391-398.
- [10] 徐 波, 王宝祥, 杨 波, 等. 播种期对直播稻茎秆抗倒伏性状的影响[J]. 北方农业学报, 2020, 48(4): 10-17.
- [11] DONG X C, QIAN T F, CHU J P, et al. Late sowing enhances lodging resistance of wheat plants by improving the biosynthesis and accumulation of lignin and cellulose[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2023, 22(5): 1351-1365.
- [12] DAI X L, WANG Y C, DONG X C, et al. Delayed sowing can increase lodging resistance while maintaining grain yield and nitrogen use efficiency in winter wheat[J]. The Crop Journal, 2017, 5: 541-552.
- [13] SPINK J H, SEMERE T, SPARES D L, et al. Effect of sowing date on the optimum plant density of winter wheat[J]. Annals of Applied Biology, 2000, 137: 179-188.
- [14] JIA Q M, XU Y Y, SHAHZAD A, et al. Strategies of supplemental irrigation and modified planting densities to improve the root growth and lodging resistance of maize (*Zea mays* L.) under the ridge-furrow rainfall harvesting system[J]. Field Crop Research, 2018, 224: 48-59.
- [15] 郑迎霞, 陈 杜, 魏鹏程, 等. 种植密度对贵州春玉米茎秆抗倒伏性能及籽粒产量的影响[J]. 作物学报, 2021, 47(4): 738-751.
- [16] 任佰朝, 李利利, 董树亭, 等. 种植密度对不同株高夏玉米品种茎秆性状与抗倒伏能力的影响[J]. 作物学报, 2016, 42(12): 1864-1872.
- [17] ZHANG J, LI G H, SONG Y P, et al. Lodging resistance characteristics of high-yielding rice populations[J]. Field Crops Research, 2014, 161: 64-74.
- [18] ZHANG W J, LI G H, YANG Y M, et al. Effects of nitrogen application rate and ratio on lodging resistance of super rice with different genotypes[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2014, 13(1): 63-72.
- [19] ZHANG W J, YAO X, DUAN X J, et al. Foliar application uniconazole enhanced lodging resistance of hybrid indica rice by altering basal stem quality under poor light stress[J]. Agronomy Journal, 2021, 114(1): 1-21.
- [20] ZHANG W J, WU L M, DING Y F, et al. Top-dressing nitrogen fertilizer rate contributes to decrease culm physical strength by reducing structural carbohydrate content in japonica rice[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2016, 15(5): 992-1004.
- [21] ZHANG W J, WU L M, WU X R, et al. Lodging Resistance of Japonica Rice (*Oryza Sativa* L.): Morphological and Anatomical Traits due to top-Dressing Nitrogen Application Rates[J]. Rice, 2016b, 9(31): 1-11.
- [22] 郭长春, 张 桥, 孙永健, 等. 不同产量水平的杂交籼稻品种穴直播茎秆抗倒特性及其差异性比较[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2019, 45(2): 143-156.
- [23] 王在满, 郑 乐, 张明华, 等. 不同播种方式对直播水稻倒伏指数和根系生长的影响[J]. 江苏农业学报, 2016, 32(4): 725-728.
- [24] 巩若琳, 宋 波, 杨志叶, 等. 迟播和密度对不同油菜品种抗倒伏及产量的影响[J]. 作物学报, 2023, 49(10): 2777-2792.
- [25] 袁 圆, 汪 波, 周广生, 等. 播期和种植密度对油菜产量和茎秆抗倒性的影响[J]. 中国农业科学, 2021, 54(8): 1613-1626.
- [26] ZHONG X H, LIANG K M, PENG B L, et al. Basal internode elongation of rice as affected by light intensity and leaf area[J]. The Crop Journal, 2020, 8(1): 62-70.
- [27] 张巫军, 段秀建, 姚 雄, 等. 烯效唑对遮阴下重穗型水稻渝香 203 茎秆形态结构和抗倒伏性的影响[J]. 四川农业大学学报, 2019, 37(6): 755-761.
- [28] WANG X Y, XU L, LI X X, et al. Grain yield and lodging-related traits of ultrashort-duration varieties for direct-seeded and double-season rice in Central China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2022, 21(10): 2888-2899.
- [29] 王文霞, 易艳红, 周燕芝, 等. 早直播提高南方早稻产量及抗倒伏性状[J]. 核农学报, 2020, 34(2): 383-391.
- [30] 王文霞, 周燕芝, 曾勇军, 等. 不同机直播方式对南方优质晚籼稻产量及抗倒伏特性的影响[J]. 中国水稻科学, 2020, 34(1): 46-56.
- [31] 朴 琳, 李 波, 陈喜昌, 等. 优化栽培措施对春玉米密植群体冠层结构及产量形成的调控效应[J]. 中国农业科学, 2020, 53(15): 3048-3058.
- [32] 吴晓然, 张巫军, 伍龙梅, 等. 超级杂交籼稻抗倒伏能力比较及其对氮素的响应[J]. 中国农业科学, 2015, 48(14): 2705-2717.
- [33] MATSUYAMA H, OOKAWA T. The effects of seeding rate on yield, lodging resistance and culm strength in wheat[J]. Plant Production Science, 2020, 23(3): 322-332.

(责任编辑: 蒋永忠)