

栽插方式和施钾量对杂交籼稻叶源特征及 干物质积累与转运的影响

孙加威, 李娜, 王春雨, 张绍文, 蒋明金, 赵建红, 孙永健, 马均*

(四川农业大学水稻研究所/农业部西南作物生理生态与耕作重点实验室, 四川 温江 611130)

摘 要:以杂交籼稻 F 优 498 为材料, 研究机插 (T1) 和手插 (T2) 2 种不同栽插方式和不同施钾量 (0、60、120、180、240 kg/hm²) 对杂交籼稻叶源特征、干物质积累与转运及产量的影响。结果表明: 相较于手插稻, 抽穗后机插稻剑叶和倒 2 叶的 SPAD 值偏低, 但其变化相对平稳; 齐穗期机插稻的叶面积指数高于手插稻, 但齐穗后 10~20 d 剑叶的净光合速率下降幅度大于手插稻; 与不施钾肥比较, 施钾能稳定剑叶抽穗后 SPAD 值及齐穗后净光合速率; 随施钾量的增加, 机插稻和手插稻的叶面积指数均呈现先增加后降低的趋势, 其中机插稻的叶面积指数以施钾量 180 kg/hm² 的最高, 手插稻以施钾量 120 kg/hm² 的最高; 随施钾量的增加, 不同时期干物质质量呈现出先增加后减少的趋势, 相较于手插稻, 机插稻在拔节前干物质积累更具优势, 而手插稻在齐穗后干物质积累量和积累比例高于机插稻; 过高或过低的施钾量均不利于水稻后期茎鞘和叶片干物质的转运; 手插稻实际产量 (12 517.1 kg/hm²) 较机插稻 (12 128.3 kg/hm²) 提高了 3.21%, 机插稻实际产量较低的主要原因是总颖花量不足, 导致穗粒数偏少, 施钾能有效提高机插稻的千粒质量和结实率, 进而提高产量。在本试验条件下, 施钾水平对手插稻实际产量的影响不明显, 机插秧较适宜的施钾量为 120 kg/hm²。

关 键 词: 杂交籼稻; 机插; 手插; 施钾量; 叶源特征; 干物质积累与转运

中图分类号: S511.044

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2017)02-0117-08

Effects of transplanting methods and potassium rates on leaf character and dry matter accumulation and translocation of hybrid-rice

SUN Jiawei, LI Na, WANG Chunyu, ZHANG Shaowen, JIANG Mingjin, ZHAO Jianhong, SUN Yongjian, MA Jun*

(Rice Research Institute, Sichuan Agricultural University / Key Laboratory of Crop Physiology Ecology, and Cultivation in Southwest China, Ministry of Agriculture, Wengjiang, Sichuan 611130, China)

Abstract: Hybrid rice 'F you 498' was used to study the effects of planting patterns (mechanical transplanting and manual transplanting) and potassium application rates (0, 60, 120, 180, 240 kg/hm²) on leaf characteristic, dry matter accumulation and translocation, grain yield. The results showed that, compared to manual transplanting, SPAD values of flag leaf and top second leaf of mechanical transplanting were lower after heading stage, however they changed relatively steady. The leaf area index (LAI) of mechanical transplanting was higher than that of manual transplanting at full heading stage. However, the descend range of net photosynthetic rate of flag leaf during 10th day to 20th day after heading stage was greater in mechanical transplanting. Compared with the treatment of non potassium fertilizer, applying potassium fertilizer could stabilize SPAD value of flag leaf after heading stage and the net photosynthetic rate after full heading stage. LAI of mechanical transplanting and manual transplanting increased with the increase of potassium application rate at first, then showed a downward trend. The largest LAI of mechanical transplanting and manual transplanting was obtained in potassium application rates were 180 kg/hm² and 120 kg/hm², respectively. With the increase of potassium

收稿日期: 2016-03-16

修回日期: 2017-03-09

基金项目: 国家“十二·五”科技支撑计划项目 (2011BAD16B05, 2012BAD04B13, 2013BAD07B13); 四川省科技支撑计划项目 (2014NZ0041, 2014NZ0047)

作者简介: 孙加威 (1990—), 男, 四川雅安人, 硕士研究生, 主要从事作物高产优质高效栽培理论技术研究, sunjiaweiyaan@foxmail.com;

*通信作者, 马均, 教授, 主要从事作物高产优质高效栽培理论技术研究, majunp2002@163.com

application rate, the dry matter weight at different stages increased at first and then decreased. The mechanical transplanting had more advantage than manual transplanting in dry matter accumulation before jointing stage while that was contrary after full heading stage. Moreover, too high or too low potassium application rate was not conducive to dry matter transportation of stem-sheath and leaf in the later period of rice. The yield of manual transplanting (12 517.1 kg/hm²) was 3.21% more than that of mechanical transplanting (12 128.3 kg/hm²) due to the more spikelets per panicle and the greater sink size (total spikelets). An appropriate K could effectively enhanced 1 000-grain weight and seed-set rate and yield of the rice with mechanical transplanting. Under this experimental condition, the effect of potassium fertilizer on yield of the rice with manual transplanting was not significant. The optimal K application rate is 120 kg/hm² for the mechanical transplanting.

Keywords: hybrid rice; manual transplanting; mechanical transplanting; potassium application rate; leaf character; dry matter accumulation and translocation

随着中国老龄化的人口发展趋势和劳动力的转移^[1], 水稻生产面临着转变生产方式的挑战^[2-3], 机械化的生产方式将会逐步代替传统的精耕细作。在机械化生产过程中, 在保证水稻产量的同时, 还应注意肥料的合理分配施用, 以避免出现耕地质量下降和肥料浪费的问题。钾是水稻生长的必需营养元素, 施用钾肥能够提高水稻产量^[4-6], 并能改善水稻抗倒伏性^[7], 维持耕地养分的平衡^[8]。目前, 中国水稻生产中存在钾肥用量偏低、施用方式不合理的问题^[9-10], 长此以往势必会造成稻田钾素的大量损耗。机插稻和手插稻在生育时期、产量构成、植株形态上均存在明显差异。张洪程^[11]的研究表明, 手插稻大田生育期较机插稻早; 程建平等^[12]的研究表明, 机插稻的齐穗期比手插稻的晚, 机插稻的高峰苗期较手插稻的偏迟。在产量方面, 大量的研究均表明手插稻籽粒产量高于机插稻, 但也有争论, 尤其是随着新技术的发展, 机插的产量在逐步提高, 与手插的差异逐步缩小^[12-14]。此外, 不同栽插方式下水稻颖花的分化退化^[15]和稻米品质上^[16]也存在明显不同。钾作为水稻生长的必要元素对水稻的产量形成、干物质积累和植株形态建成上有不可或缺的作用: 一方面钾素能改善水稻叶片的理化形态^[17]; 另一方面钾素能提高水稻的结实率和千粒质量^[18], 并能对籽粒灌浆起到稳定的作用^[19], 从而提高产量。水稻产量形成过程是干物质积累、转运的过程, 干物质的形成离不开叶片“源”的供应。研究^[20-22]表明, 水稻叶片尤其是上 3 叶的叶面积指数(LAI)、SPAD 值、净光合速率与水稻干物质积累和

产量形成有密切的联系, 但目前对于不同栽插方式下, 不同施钾量对水稻产量形成的过程及叶源特征的影响鲜见报道。本研究中, 以杂交籼稻 F 优 498 为试材, 通过对比机插和手插 2 种方式下钾肥施用量对水稻叶源特征、产量形成、干物质积累转运的影响, 探寻水稻不同栽插条件下钾肥的适宜施用水平, 现将结果报道如下。

1 材料与方法

1.1 材料

供试水稻品种为 F 优 498。试验地前作为大蒜。土壤有机质含量为 19.3 g/kg, 全氮含量为 1.78 g/kg, 速效氮含量为 131.6 mg/kg, 速效钾含量为 129.5 mg/kg, 速效磷含量为 62.7 mg/kg。

1.2 试验设计

试验于 2015 年在四川农业大学水稻研究所试验农场(温江)进行。采用二因素裂区设计, 栽插方式为主区, 设机插秧(T1)和手插秧(T2)2 个处理, 其中手插秧采用旱育秧, 机插秧采用钵体毯状盘旱育秧; 施钾量为副区, 设 0(K0)、60(K1)、120(K2)、180(K3)、240 kg/hm²(K4)5 个水平。共 10 个处理, 重复 3 次。钾肥分基肥、促花肥 2 次施用, 质量比为 3:7。氮肥施用量均为 180 kg/hm², 分基肥、蘖肥、促花肥与保花肥施用, 质量比为 3:3:2:2。磷肥施用量为 90 kg/hm², 全部用作基肥。稻种均于 3 月 25 日播种, 5 月 8 日移栽, 机插采用久保田插秧机(SPU-W48C, 中国苏州)栽插, 机插和手插行

株距均为 30 cm×16 cm, 保持与当地不同栽插方式下最佳苗穴数相同(手插每穴单株, 机插平均每穴 3.2 株)。小区面积 16.5 m², 小区间筑埂(宽 40 cm), 并用塑料薄膜包裹, 以防串水串肥。其他田间管理按大面积生产田进行。

1.3 测定项目与方法

1) 地上部分干物质积累的测定。于拔节期(穗肥前)、齐穗期、成熟期每小区按平均茎蘖法取 3 穴, 分成叶片、茎鞘和穗(抽穗后)等部分装袋, 记录茎蘖数, 茎鞘、叶片和穗(抽穗后)在 105 ℃恒温烘箱中杀青 30 min 后, 调温至 80 ℃烘干至恒重, 称质量, 计算干物质积累量。拔节期干物质积累量记为 $W_1(\text{kg}/\text{hm}^2)$; 拔节期到齐穗期干物质积累量 $W_2(\text{kg}/\text{hm}^2)$ 为齐穗期干物质积累量与拔节期干物质积累量之差; 齐穗期后干物质积累量 $W_3(\text{kg}/\text{hm}^2)$ 为成熟期干物质积累量与齐穗期干物质积累量之差。拔节期前干物质积累比例(%)表示拔节期干物质积累量与成熟期干物质质量的百分比; 拔节期到齐穗期干物质积累比例(%)表示拔节期到齐穗期干物质积累量与成熟期干物质质量的百分比; 齐穗期后干物质积累比例(%)表示齐穗期后干物质积累量与成熟期干物质质量的百分比; 干物质收获指数为成熟期籽粒干质量与成熟期地上部分总干物质质量的比值; 茎鞘(叶片)物质转运量(kg/hm^2)为齐穗期茎鞘(叶片)干物质质量与成熟时茎鞘(叶片)干物质质量之差; 茎鞘(叶片)物质转运率(%)为茎鞘(叶片)物质转运量与齐穗期茎鞘(叶片)干物质质量的百分比。

2) LAI 的测定。于齐穗期, 各小区取 3 株长势一致的水稻叶片, 用美国生产的 CID-203 叶面积仪测定绿叶面积(上 3 叶的叶面积另计), 计算叶面积指数。

3) SPAD 值的测定。采用日本产 SPAD-502 叶绿素快速测定仪测定。从抽穗期当天开始, 每 7 d 测 1 次, 连续测 6 次(至抽穗后 42 d)。选有代表性的剑

叶、倒 2 叶、倒 3 叶测定叶片的中部及其上下 1/3 处 3 点的 SPAD 值, 取平均值为该叶的 SPAD 值。每个处理测 5 个点, 每点取 5 片叶的 SPAD 平均值, 分析其动态变化。

4) 净光合速率的测定。于齐穗后 10、20 d, 择晴天上午, 用美国生产的 Li-6400 便携式光合仪测定净光合速率(P_n)。测定时设置 CO_2 浓度 400 $\mu\text{mol}/\text{mol}$, 30 ℃, 光照强度 1 200 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。每处理选 5 片具代表性的主茎剑叶, 测叶中部的 P_n , 每叶重复测定 3 次, 结果取平均值。

5) 产量测定及产量构成调查方法。于收获前, 每小区分别取 5 株具有代表性的植株进行考种, 测定穗粒数、实粒数、千粒质量, 计算结实率等。收获时每小区去除四周边行, 计数缺、杂穴数, 按实收穴数分别计产。

1.4 数据分析

采用 Microsoft Excel 2013 和 DPS 6.55 处理系统分析数据, 并用 LSD 法进行显著性测验。

2 结果与分析

2.1 不同栽插方式和钾肥水平对叶片生理及形态特征的影响

由图 1 可见, 在抽穗后 0~42 d, 各叶位 SPAD 均值表现为从上往下递增的趋势, 并以倒 3 叶最大。2 种栽插方式下, 抽穗后剑叶和倒 2 叶 SPAD 值的最高值和最低值均出现在 K0 处理中, 表明在不同栽插方式下, 剑叶和倒 2 叶 SPAD 下降幅度均以 K0 处理最大。整体来看, 机插稻剑叶在抽穗后 0~42 d 的 SPAD 均值低于手插稻。机插条件下, 剑叶和倒 2 叶 SPAD 值在抽穗后 7 d 达到最大, 倒 3 叶 SPAD 值在抽穗期最大。手插条件下, 剑叶和倒 2 叶 SPAD 值在抽穗后 7~21 d 内达到最大。从各部位叶片 SPAD 值下降幅度来看, 手插处理剑叶和倒 2 叶的 SPAD 峰值和下降幅度高于机插处理。

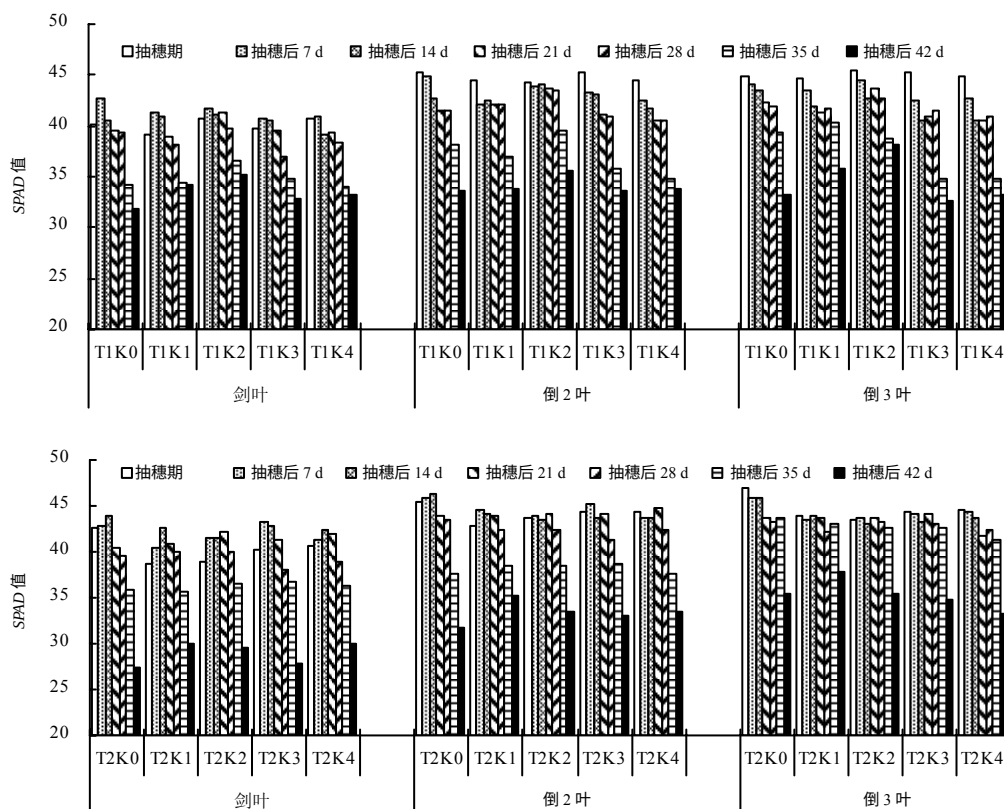


图 1 抽穗后不同部位叶片 SPAD 值

Fig.1 The SPAD value in different positions flag leaf after heading

由图 2 可见, 机插稻的 LAI 高于手插稻。不同栽插方式下, 水稻 LAI 和上 3 叶 LAI 均表现为随施钾量的增加先增加后减小, 其中机插稻的 LAI 和上 3 叶 LAI 以 K3 处理最高, 手插稻以 K2 处理最高,

表明过高的施钾量不利于水稻叶面积和高效叶面积(上 3 叶)的形成。手插稻获得最高 LAI 和上 3 叶 LAI 的需钾量低于机插稻的, 施钾水平对于机插稻 LAI 和上 3 叶 LAI 的影响强于手插稻。

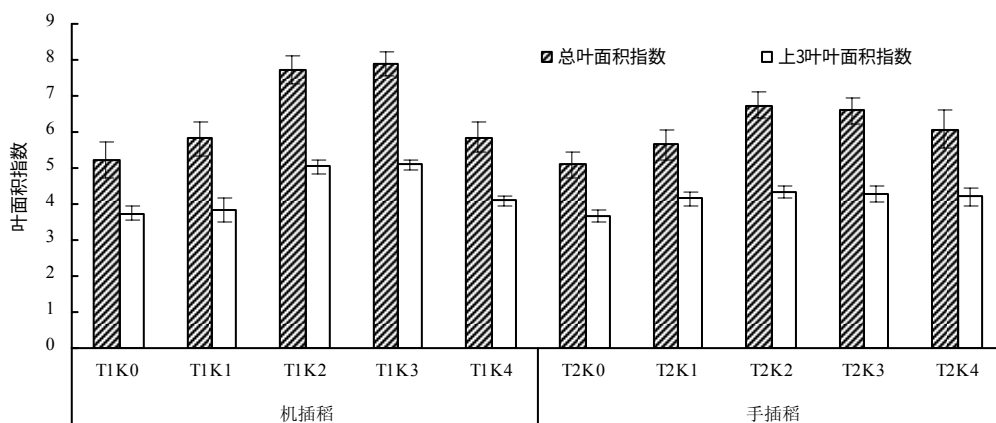


图 2 不同栽插方式和钾肥水平下齐穗期叶面积指数

Fig.2 Different transplanting method and potassium application treatments on full-heading leaf area index

由图 3 可见, 机插稻和手插稻在齐穗后 10 d 的净光合速率差异不大, 分别为 19.1 、 $19.4 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 但在齐穗后 20 d 手插稻的净光合速率 ($15.3 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$) 高于机插稻净光合速率 ($14.0 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$), 表明手插稻在齐穗后净光合速率下降幅度小于机插稻, 机插稻和手插稻在齐穗后 10、20 d

的净光合速率均表现为随施钾量的增加先增加后降低, 其中机插稻齐穗后 10 d 净光合速率以 K1 处理最高, 手插稻则以 K2 处理最高, 在齐穗后 20 d 均以 K2 处理最高。齐穗后 10~20 d 剑叶净光合速率的下降幅度以手插稻最低, 均以 K2 处理降幅最小, 表明手插稻较机插稻能够有效稳定和提

后叶片的净光合速率，以 K2 处理为佳。

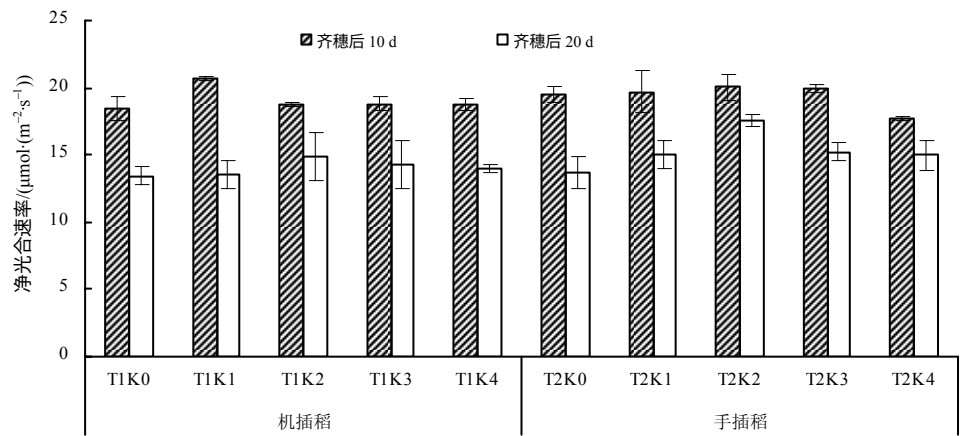


图 3 齐穗后剑叶的净光合速率

Fig.3 The net photosynthetic rate of flag leaf after full-heading

2.2 不同栽插方式和钾肥水平对各时期干物质积累的影响

由表 1 可见，在拔节期干物质积累量、干物质积累比例和拔节期到齐穗期干物质积累量、积累比例均以机插稻高于手插稻，但齐穗期后干物质积累量和积累比例则表现为手插稻显著高于机插稻。从不同的施

钾处理来看，而手插条件下各施钾处理间的差异表现不显著，不施钾会显著降低机插稻在拔节期前干物质积累量；在机插条件下拔节期到齐穗期干物质积累量在 K2、K3、K4 处理间的差异不显著，而手插稻则表现显著，说明前期钾肥施用对机插稻很重要，而手插稻的后期钾肥施用较机插稻影响更大。

表 1 不同处理下各生育阶段的干物质积累及其方差分析

Table 1 Different period dry matter accumulation under different treatments							
栽插方式	钾肥水平	W ₁ /(kg·hm ⁻²)	W ₁ 占比/%	W ₂ /(kg·hm ⁻²)	W ₂ 占比/%	W ₃ /(kg·hm ⁻²)	W ₃ 占比/%
T1	K0	3 395.3d	18.7b	8 387.0c	46.3	6 333.0c	35.0a
	K1	4 161.0c	21.6a	8 603.9b	44.6	6 502.1b	33.8ab
	K2	4 429.4ab	22.0a	9 034.3a	44.8	6 712.0a	33.2bc
	K3	4 614.7a	22.6a	9 050.9a	44.4	6 740.3a	33.0bc
	K4	4 288.4bc	21.8a	9 018.1a	45.9	6 354.7bc	32.3c
T2	K0	3 046.8b	16.4	7 838.4d	42.2	7 680.5b	41.4a
	K1	3 209.9ab	16.5	8 480.4c	43.5	7 820.3ab	40.1ab
	K2	3 307.1a	16.6	8 762.8b	44.0	7 831.9ab	39.3bc
	K3	3 359.1a	16.5	9 125.7a	44.9	7 819.6ab	38.5c
	K4	3 389.8a	16.9	8 733.6b	43.4	7 988.4a	39.7bc
T		998.755**	126.563**	11.933	1.565	555.374**	357.296**
K		29.636**	4.619*	41.533**	0.088	4.408*	5.307**
T×K		9.977**	3.668*	3.695*	1.046	4.395*	0.717

同列不同字母表示同种栽插方式、不同钾肥水平处理间在 0.05 水平上差异显著；“*”“**”分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著。

拟合钾肥水平对不同栽插方式各时期总干物质积累质量的效应函数。机插稻： $Y = -0.44981X^2 + 48.4300X + 3405.9$ (拔节期, $R^2 = 0.90548^{**}$)； $Y = -0.06310X^2 + 21.7260X + 11752.0$ (齐穗期, $R^2 = 0.88608^{**}$)；

$Y = -0.04491X^2 + 17.2550X + 18578.0$ (成熟期, $R^2 = 0.93045^{**}$)。手插稻： $Y = -0.06831X^2 + 9.5584X + 3051.2$ (拔节期, $R^2 = 0.76789^{**}$)； $Y = -0.04558X^2 + 16.3920X + 10868.0$ (齐穗期, $R^2 = 0.87610^{**}$)； $Y = -0.08872X^2 + 28.3430X +$

18 040.0(成熟期, $R^2=0.881\ 37^{**}$)。不同栽插方式下, 各时期总干物质质量均表现为随施钾量的增加先增加后降低的趋势, 各时期机插处理干物质总质量达到理论最高的需钾量均低于手插处理, 且在拔节期和齐穗期机插稻的干物质总质量均显著高于手插处理。从二次曲线拟合结果来看, 施钾量在 $65.4 \sim 187.6\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 时, 机插处理成熟期总干物质质量高于手插处理。但在不施钾和施钾量较高的条件下以手插处理的较高。

2.3 不同栽插方式和钾肥水平对各时期干物质转运的影响

由表 2 可知, 齐穗后茎鞘和叶片的干物质转运量、转运率均以机插稻显著高于手插稻。在机插处理下, 随施钾量的增加, 茎鞘、叶片干物质转运量

及叶片干物质转运率呈现出先增加后减少的趋势, 且均以 K3 处理最高, 但茎鞘干物质转运比例则表现出与茎鞘干物质转运量相反的趋势, 这可能是由于不同施钾量对机插稻茎鞘干物质积累量的影响造成的。在手插处理中, 茎鞘和叶片干物质转运量同样表现为随施钾量的提高先增后降, 其中茎鞘的转运量和比例表现以 K3 处理最高, 叶片的转运量和比例以 K2 处理最高。此外, 手插处理中不施钾处理茎鞘干物质转运率显著高于 K1 和 K4 处理, 这可能是由于不施钾处理茎鞘干物质积累量偏低造成的。从收获指数来看, 机插稻低于手插稻, 但二者间差异不显著, 不施钾或过低的施钾量均会导致水稻收获指数显著增加。

表 2 不同处理下的收获指数与干物质转运量及其方差分析

Table 2 Harvest index and dry matter transformation under different treatments

栽插方式	钾肥水平	茎鞘干物质 转运量/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	茎鞘干物质 转运率/%	叶片干物质 转运量/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	叶片干物质 转运率/%	收获指数/%
T1	K0	2 327.2c	32.0ab	661.2d	21.2d	56.4a
	K1	2 423.7bc	31.7bc	884.7c	26.2c	54.0b
	K2	2 464.3bc	30.3d	979.2b	27.7b	52.6c
	K3	2 705.6a	32.6a	1 057.3a	29.1a	52.8c
	K4	2 521.6ab	31.2c	958.3b	27.6b	53.2c
T2	K0	1 628.1b	25.4b	685.2c	23.3b	57.8a
	K1	1 608.4b	23.8c	758.9ab	23.6ab	55.4b
	K2	1 747.4ab	24.8b	800.4a	24.6a	54.4c
	K3	1 952.5a	26.7a	764.1ab	23.1b	53.9c
	K4	1 725.4b	24.0c	734.0b	23.0b	53.9c
T		804.277**	149.627**	67.392*	245.081**	14.287
K		6.674**	18.514**	33.624**	23.82**	51.489**
T×K		0.222	5.018**	13.76**	22.009**	0.956

同列不同字母表示同种栽插方式、不同钾肥水平处理间在 0.05 水平上差异显著; “*”“**”“***”分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著。

2.4 不同栽插方式和钾肥水平对籽粒产量及其构成因素的影响

由表 3 可知, 不同栽插方式对籽粒产量有极显著影响。整体而言, 手插稻产量比机插稻高 3.21%, 虽然机插稻在有效穗数、千粒质量和结实率上明显占优, 但其穗粒数显著低于手插稻, 总颖花量偏低,

导致其实际产量显著低于手插稻。在机插条件下, 实际产量以 K3 处理最高, 且显著高于 K0 处理, 其原因在于 K3 处理能够稳定机插稻有效穗数, 并能提高其实粒数和实粒质量。手插稻在不同钾肥水平下的籽粒产量没有显著差异, 不施钾的 K0 处理的总颖花数和穗粒数显著低于施钾处理。

表 3 不同处理下的籽粒产量与构成因素及其方差分析

Table 3 Yield and yield components under different treatments							
栽插方式	钾肥水平	有效穗数/ ($\times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$)	穗粒数	总颖花量/ ($\times 10^7 \cdot \text{hm}^{-2}$)	结实率/%	千粒质量/g	实际产量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)
T1	K0	225.2b	193.3	43.5	85.6a	32.02b	11 802.1b
	K1	226.5b	199.9	45.2	82.2b	32.70a	12 015.8ab
	K2	238.7a	194.6	46.3	83.8ab	32.06b	12 261.1a
	K3	230.4ab	194.6	44.8	87.2a	32.81a	12 468.2a
	K4	227.5ab	197.5	45.0	84.1ab	32.29ab	12 094.2ab
T2	K0	190.6	239.1b	45.5b	89.4a	30.49	12 407.9
	K1	190.9	259.6a	49.4a	86.6a	30.42	12 486.2
	K2	192.8	267.6a	51.5a	83.3b	30.55	12 507.8
	K3	192.6	259.1a	49.8a	86.6a	30.85	12 665.3
	K4	186.7	263.4a	49.0a	88.5a	30.41	12 518.2
T		517.475**	99.702**	8.275	11.842	24.076**	172.83**
K		1.245	1.184	2.251	2.568	2.789	1.882
T×K		0.523	0.791	0.364	1.54	1.268	0.454

同列不同字母表示同种栽插方式下、不同钾肥水平处理间在 0.05 水平上差异显著；“**”表示在 0.01 水平上差异显著。

3 结论与讨论

雷小龙等^[23]的研究表明，机插稻和手插稻间 *LAI* 差异不显著；唐海明等^[21]的研究认为，手插稻叶面积指数高于机插稻；本研究结果表明，机插稻 *LAI* 高于手插稻，可能由于机插稻在群体有效穗数方面具有明显优势。相较于手插稻，机插稻剑叶和倒 2 叶抽穗后 *SPAD* 值变化较手插稻平稳，但其均值低于手插稻。机插稻剑叶的净光合速率在齐穗后 10~20 d 下降幅度高于手插稻。比较两者的叶源特征可见，机插稻的叶源优势在于叶面积指数，即叶源的数量，而手插稻的优势在于叶源的质量，即个体产生干物质的能力。钱宏兵^[24]的研究表明，人工栽插稻生育前期干物质积累多，单茎总干质量大；郭振华^[25]的研究表明，机插稻在成熟期营养器官的干物质质量高于手栽稻，而穗的干物质质量低于手栽稻。本研究结果表明，机插稻在拔节期和齐穗期的总干物质积累量高于手插稻，可能因为这 2 个时期干物质总质量以茎秆(分蘖)所占比例最大，机插稻在这 2 个时期的茎蘖总质量较之手插稻有明显优势。在齐穗期后，手插稻的干物质积累量和积累比例高于机插稻，可能是手插稻抽穗后 0~42 d 剑叶的 *SPAD* 值及齐穗后剑叶净光合速率的表现优于机插稻。此外，虽然机插稻在群体有效穗和叶面积上明显优于手插稻，但当源充足时，库不足同样也会导致穗部干物质不足。本研究结果表明，不同栽插方式对实际产量有极显著影响。整体而言，手插稻实

际产量比机插稻高 3.21%。虽然机插稻在有效穗、千粒重和结实率上明显占优，但其穗粒数显著低于手插稻，库(总颖花量)不足，可能也是导致其齐穗后干物质积累量及积累比例不及手插稻的主要原因。本研究中，施钾水平对机插稻产量影响显著，以 K2、K3 处理显著高于不施钾处理，但两者的差异并不显著，从经济效益的角度考虑，机插稻的施钾量以 120 kg/hm² 为宜。

前人研究认为施钾肥能改善水稻冠层结构，提高叶片光能利用效率和叶绿素含量，延缓叶片的衰老^[18,26]。本研究中，随施钾量的增加水稻总 *LAI*、上 3 叶 *LAI*、齐穗后 10 d 和 20 d 时剑叶的净光合速率均表现为随施钾量的增加先增加后降低趋势，说明适量施钾有延缓叶片衰老、改善叶源特征的作用，但过量施钾会导致叶源素质下降，不利于水稻增产。郝美萍^[27]、杨卫斌等^[28]的研究认为施钾肥能提高水稻干物质的积累；吴建富等^[29]认为增施钾肥对提高干物质的积累作用不明显；本试验中，过高或过低的施钾量均不利于水稻干物质的积累。钾肥对机插稻的干物质积累的影响较为明显。结合叶源特征分析钾肥对干物质积累的影响可见，机插稻在不同施钾水平下 *LAI* 的变幅、齐穗后 10~20 d 剑叶净光合速率的变幅均高于手插稻，这可能是不同施钾水平对机插稻实际产量影响显著，而对手插稻实际产量影响不明显的原因之一。

本试验还表明：在拔节前干物质积累量方面机插稻优于手插稻，在齐穗后干物质积累量不及手插

稻。在机插条件下,应注重前期钾肥的施用,以扩大机插稻在前期干物质积累的优势,而手插稻则更要注重后期钾肥的施用,以利于后期干物质的积累。本研究中,机插稻茎鞘和叶片的干物质转运量、转运率均高于手插稻,这与刘利等^[30]的研究结果一致。黎国喜等^[31]的研究显示,钾肥可以促进水稻生长后期茎鞘干物质转运。本研究结果表明,过高或过低的施钾量均不利于提高茎鞘和叶片干物质的转运量,这也可能是过高或过低的施钾量不利于水稻产量提高的原因。综合本研究结果,施钾水平对手插稻实际产量影响不显著,机插秧较适宜的施钾量为 120 kg/hm²。

参考文献:

- [1] 杭帆,郭剑雄.人口转型、技术进步与中国农业的可持续增长[J].西北农林科技大学学报(社会科学版),2016(1):66-75.
- [2] 罗锡文,廖娟,胡炼,等.提高农业机械化水平促进农业可持续发展[J].农业工程学报,2016,32(1):1-11.
- [3] GUO L S, Zhang W J. Kinematic analysis of a rice transplanting mechanism with eccentric planetary gear trains[J]. Mechanism & Machine Theory, 2001, 36(11/12): 1175-1188.
- [4] 张洋洋,鲁剑巍,王友珠,等.钾肥施用方式对直播和移栽水稻产量和钾肥利用效率的影响[J].作物杂志,2016(1):1-5.
- [5] 廖育林,郑圣先,鲁艳红,等.长期施钾对红壤水稻土水稻产量及土壤钾素状况的影响[J].植物营养与肥料学报,2009,15(6):1372-1379.
- [6] 王伟妮,鲁剑巍,鲁明星,等.湖北省早、中、晚稻施钾增产效应及钾肥利用率研究[J].植物营养与肥料学报,2011,17(4):1058-1065.
- [7] 金正勋,郑冠龙,朱立楠,等.不同氮钾肥施用方法对水稻产量及抗倒伏性的影响[J].东北农业大学学报,2015,46(3):9-14.
- [8] 廖海艳,廖育林,鲁艳红,等.钾氮配施对湖南丘陵双季稻钾肥效应及钾素平衡的影响[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2014,40(5):463-469.
- [9] 中华人民共和国国家统计局.中国统计年鉴[EB/OL].http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2014/indexch.htm.2014.
- [10] 唐旭,计小江,李超英,等.水稻-大麦长期轮作体系钾肥效率及土壤钾素平衡[J].中国农业科学,2014,47(1):90-99.
- [11] 张洪程.水稻新型栽培技术[M].北京:金盾出版社,2011.
- [12] 程建平,吴建平,王友根,等.机插对籼型杂交水稻生育特性和产量的影响[J].中国农机化,2009(6):45-48.
- [13] 张军,王兴龙,石广跃,等.不同机栽方式下杂交稻产量及其形成特征比较[J].农业工程学报,2015,31(10):84-91.
- [14] 胡雅杰,曹伟伟,钱海军,等.钵苗机插密度对不同穗型水稻品种产量、株型和抗倒伏能力的影响[J].作物学报,2015(5):743-757.
- [15] 杨波,徐大勇,张洪程.直播、机插与手栽水稻生长发育、产量及稻米品质比较研究[J].扬州大学学报(农业与生命科学版),2012,32(2):39-44.
- [16] 田青兰,刘波,钟晓媛,等.不同播栽方式下杂交籼稻非结构性碳水化合物与枝梗和颖花形成及产量性状的关系[J].中国农业科学,2016(1):35-53.
- [17] 郭九信,冯绪猛,胡香玉,等.氮肥用量及钾肥施用对稻麦周年产量及效益的影响[J].作物学报,2013,39(12):2262-2271.
- [18] 许凤英,张秀娟,王晓玲,等.液体硅钾肥对水稻冠层结构、光合特性及产量的影响[J].江苏农业学报,2014(1):67-72.
- [19] 雷万钧,赵宏伟,辛柳,等.钾肥施用量对寒地粳稻不同穗位籽粒灌浆过程和产量的影响[J].中国土壤与肥料,2015(5):37-43.
- [20] BING Y, XUE W Y, LUO L J, et al. QTL analysis for flag leaf characteristics and their relationships with yield and yield traits in rice[J]. Acta Genetica Sinica, 2006, 33(9): 824-832.
- [21] 唐海明,逢焕成,肖小平,等.双季稻区不同栽培方式对早稻生育期、干物质积累及产量的影响[J].作物学报,2014(4):711-718.
- [22] 李杰,张洪程,常勇,等.不同种植方式水稻高产栽培条件下的光合物质生产特征研究[J].作物学报,2011,37(7):1235-1248.
- [23] 雷小龙,刘利,刘波,等.机械化种植对杂交籼稻 F 优 498 产量构成与株型特征的影响[J].作物学报,2014,40(4):719-730.
- [24] 钱宏兵.栽插方式对水稻南梗 9108 产量及其构成因素的影响[J].浙江农业科学,2015,56(12):1915-1917.
- [25] 郭振华.机插与手栽稻生长发育、产量及品质差异的比较研究[D].扬州:扬州大学,2009.
- [26] 张玉屏,曹卫星,朱德峰,等.红壤稻田钾肥施用量对超级稻生长及产量的影响[J].中国水稻科学,2009(6):633-638.
- [27] 郝美萍.不同钾肥用量对寒地水稻产量及抗病性的影响[J].现代化农业,2015(3):14-15.
- [28] 杨卫斌,赵铭浩,曹国强,等.钾肥对寒地水稻产量及抗病性的影响[J].北方水稻,2014(4):39-40.
- [29] 吴建富,潘晓华,石庆华.双季连作晚稻免耕抛秧氮钾肥施用技术的研究[J].中国土壤与肥料,2008(3):43-47.
- [30] 刘利,雷小龙,田青兰,等.机械化播栽对杂交中稻干物质生产特性的影响[J].杂交水稻,2014,29(5):55-64.
- [31] 黎国喜,石庆华,李桂花,等.两系杂交早稻田两优 402 的钾肥施用技术[J].耕作与栽培,2003(2):59-60.

责任编辑:尹小红
英文编辑:梁和