西北农业学报 2019,28(8):1232-1241
Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica

网络出版日期:2019-07-09 doi:10.7606/j.issn.1004-1389.2019.08.004
网络出版地址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1220.S.20190708.0933.038.html

不同种植模式对水稻生长发育和光合特性及产量构成的影响

张向前[1],徐云姬[2],武盼盼[3]

(1.安徽省农业科学院 作物研究所,合肥 230031;2.扬州大学 教育部农业与农产品安全国际合作联合实验室,江苏扬州 225009;3.舒城县农业科学研究所,安徽舒城 231300)

摘 要 为水稻机直播增产机理及大面积推广应用提供依据,研究水播和旱播下机直播和撒播对水稻生长、光合及产量形成的影响。结果表明:水播比旱播有利于提高叶面积指数,在旱播和水播下机直播处理叶面积指数在拔节期以后皆显著高于撒播。水播机直播处理组合最有利于提高叶绿素 SPAD 值,并显著高于旱播撒播处理。其他条件相同,机直播相比撒播、水播相比旱播皆利于提高水稻各生育期群体干物质量。灌浆中期'桃湘优莉晶'和'原旱稻 3 号'水播机直播比水播撒播光合速率、气孔导度、蒸腾速率分别增加了 7.06%、5.75%、4.32%和 5.94%、12.68%、4.33%,水播相比旱播光合特性总体表现较优。其他处理相同下,机直播穗数、千粒质量、穗粒数、结实率、产量和收获指数皆高于撒播,'桃湘优莉晶'和'原旱稻 3 号'收获指数旱播和水播下机直播比撒播增加 2.58%、8.96%和 6.22%、7.37%,而旱播机直播穗数、穗粒数、结实率与水播撒播差异不显著。产量与叶面积指数、群体干物质量、结实率、穗粒数、千粒质量、穗数皆呈显著正相关,与叶绿素 SPAD 值、光合速率、气孔导度、蒸腾速率呈不显著正相关,与胞间 CO_2 摩尔分数呈负相关。研究认为水播机直播相比水播撒播、旱播撒播及旱播机直播在改善水稻生长、光合及产量方面优势明显。

关键词 水稻;种植模式;光合特性;产量构成因子

中图分类号 S521.1;S311 **文献标志码** A **文章编号** 1004-1389(2019)08-1232-10

从水稻的栽种方式来看,传统水稻栽培长期以手工插秧为主,随着社会经济的发展,农村老龄化和劳动力大量转移现象的不断加剧,以手工插秧为主的传统水稻种植方式已明显不适应社会经济发展对现代稻作技术发展的要求[1]。随着栽培轻简化的发展,目前许多国家逐步采用水稻直播的方法,如澳大利亚和美国水稻已基本全部采用机械直播,意大利和马来西亚水稻直播面积也已分别达 98%和 50%以上[2]。就安徽邻省江苏省而言,近年来直播稻的面积发展迅猛,其播种面积已占水稻种植面积的 30%左右[3-4]。

水稻机械直播与机械插秧相比,水稻直播机将水稻种子直接播到田地里,是一种相对简化的种植模式,省去了育秧、起秧、移栽等环节,以其工艺简单、高效、成本低的特点成为当前水稻生产发展的主流,且相关研究还表明,水稻机直播比移栽略有增产[5-6]。张耗等[7]研究指出,通过水稻机直播方式的改进和合理运用可以有效提高水稻生长中后期的叶片光合速率,促进地上部群体合理生长,有效提高产量。孙永健等[8]研究发现,水稻机直播高产的重要原因之一是能优化群体茎蘖数,提高成穗率,保证齐穗期适宜的叶面积指数(LAI),提高高效叶面积和净光合速率,优化群体结构和生育进程增加光合产物的积累。安徽是全国 13 个主产稻米省份之一,水稻一直是其主要粮食作物,发展至今,安徽省已成为中国重要的水稻集中产区和商品粮基地[9]。研究和推广水稻轻简机械化高产种植技术,对稳定和扩大安徽水稻种植面积,提高水稻单产,保障安徽粮食安全具有重要意义[10-11],但目前安徽有关水稻机械直播的研究和推广仍相对滞后。为此,本试验以撒播为对照研究水播和旱播条件下水稻机械直播对水稻群体生长发育、光合特性及产量形成的影响,以期为安徽水稻机直播增产机理及大面积推广应用提供

收稿日期:2019-03-26 **修回日期**:2019-04-24

基金项目:国家重点研发计划(2017YFD0301305);扬州大学教育部农业与农产品安全国际合作联合实验室开放课题(JRK2018004)。

第一作者:张向前,男,博士,副研究员,主要从事作物栽培研究。E-mail:xiangqian111@163.com

科学依据和技术支撑。

1　材料与方法

1.1　试验设计

试验于 2017 年 6 月至 11 月在安徽省舒城县农科所试验基地进行,前茬作物为小麦,小麦收获后将秸秆粉碎还田。试验采用三因素设计,设 2 种水稻品种籼稻'桃湘优莉晶'和'粳稻原旱稻 3 号',2 种播栽方式水播和旱播,2 种播种方式机直播和人工撒播,共计 8 个处理,小区面积 10 m×30 m=300 m^2。精量水稻直播机型号为 2BD-10,于 6 月 10 日播种,11 月 20 日收获,播种行穴距为 28 cm×19 cm,播种密度皆为基本苗 120×10^4 hm^{-2}。施肥 P_2O_5 120 kg·hm^{-2} 和 K_2O 90 kg·hm^{-2},纯氮 225 kg·hm^{-2},磷肥和钾肥全部基施,氮肥基肥∶分蘖肥∶穗肥质量比为 4∶3∶3。试验点 0～20 cm 耕层土壤全氮 1.36 g·kg^{-1},碱解氮 113.45 mg·kg^{-1},有效磷 11.21 mg·kg^{-1},速效钾 123.34 mg·kg^{-1},有机质 19.87 g·kg^{-1},pH 为 6.3。其他病虫害防治和田间管理措施同一般大田高产栽培要求。

1.2　样品采集及测定项目与方法

叶面积指数:首先用直尺测量叶片的长度和最宽处(每小区 10 株),然后用长和宽的乘积再乘以折算系数 0.83 确定单叶叶面积,叶面积指数(LAI)= 叶片总面积/土地面积。

叶绿素 SPAD 值:用手持式叶绿素测定仪(SPAD-502)于拔节期、孕穗期、开花期和灌浆中期测定。

群体干物质量:分别于苗期、拔节期、开花期和成熟期取样(每小区 10 株)测定干物质量,将所取样品在 105 ℃下杀青 20 min,80 ℃烘干至恒质量,称取干物质量。

旗叶光合特性:采用 Li-6400 便携式光合仪(美国 LI-COR 公司)于晴朗天气的 9:30－11:30 测定水稻旗叶光合速率、胞间 CO_2 摩尔分数、气孔导度和蒸腾速率,测定时期为抽穗期和灌浆中期。

产量:收割晒干后折算成每公顷产量,并统计出产量构成三要素穗数、穗粒数和千粒质量。

收获指数:经济产量与生物产量的比值。

1.3　统计分析

采用 Microsoft Excel 2013 软件对数据进行处理和作图,采用 SPSS 17.0 软件和 LSD 最小显著差数法进行方差分析。

2　结果与分析

2.1　不同种植模式对叶面积指数的影响

2 个水稻品种无论在旱播和水播条件下(表 1),机直播处理各生育期的叶面积指数皆高于撒播,并在拔节期以后差异达到显著水平,其中'桃湘优莉晶'旱播和水播条件下机直播的叶面积指

表 1　不同播栽方式下水稻主要生育期叶面积指数

Table 1　Leaf area index of rice at different growth stages under different planting patterns

品种 Variety	播栽方式 Planting pattern	播种方式 Planting pattern	苗期 Seedling stage	拔节期 Jointing stage	开花期 Flowering stage	灌浆中期 Middle of filling stage
桃湘优莉晶 Taoxiangyoulijing	旱播 Upland field	机直播 Direct seeding	1.38±0.04 ab	3.43±0.06 bc	7.46±0.05 c	3.56±0.08 ab
		撒播 Broadcast sowing	1.22±0.04 c	3.11±0.09 e	6.53±0.11 f	3.18±0.09 de
	水播 Paddy field	机直播 Direct seeding	1.46±0.07 a	3.62±0.08 a	7.79±0.06 a	3.71±0.06 a
		撒播 Broadcast sowing	1.42±0.05 ab	3.35±0.09 cd	6.71±0.08 e	3.33±0.08 cd
原旱稻 3 号 Upland rice No. 3	旱播 Upland field	机直播 Direct seeding	1.33±0.08 b	3.34±0.09 cd	7.29±0.05 d	3.43±0.04 bc
		撒播 Broadcast sowing	1.18±0.04 c	2.92±0.09 f	6.39±0.06 g	3.10±0.17 e
	水播 Paddy field	机直播 Direct seeding	1.41±0.06 ab	3.51±0.06 ab	7.62±0.04 b	3.56±0.05 ab
		撒播 Broadcast sowing	1.36±0.04 ab	3.26±0.09 d	6.52±0.07 f	3.30±0.10 cd

注:数据为"平均值±标准差",各列后不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: The data is "average± SD", lowercase letters in the same column indicate significant difference ($P<0.05$). The same below.

数比撒播于苗期、拔节期、开花期和灌浆中期分别增加了 13.11%、10.29%、14.24%、11.95% 和 2.82%、8.06%、16.10、11.41%。相同播种方式下(机直播和撒播),水播的叶面积指数皆高于旱播,'原旱稻 3 号'水播比旱播的叶面积指数在机直播和撒播下于苗期、拔节期、开花期和灌浆中期分别增加了 6.02%、5.09%、4.53%、3.79% 和 15.25%、11.64%、2.03%、6.45%。从表 1 中亦可看出,同一生育期相同处理下 2 个水稻品种的叶面积指数以'桃湘优莉晶'偏高。

2.2 不同种植模式对叶绿素 SPAD 值的影响

无论在水播还是旱播条件下(表 2),机直播不同生育期的叶绿素 SPAD 值皆高于撒播,其中在开花期和灌浆中期两者差异显著,'桃湘优莉晶'在旱播和水播条件下机直播相比撒播叶绿素 SPAD 值于拔节期、孕穗期、开花期、灌浆中期分别增加了 2.55%、4.10%、3.04%、5.77% 和 2.49%、6.71%、3.37%、6.08%,可见机直播相对撒播有利于提高水稻叶绿素 SPAD 值。相同播种方式下(机直播和撒播),水播的叶绿素 SPAD 值皆高于旱播,'原旱稻 3 号'在机直播与撒播下水播相比旱播叶绿素 SPAD 值于拔节期、孕穗期、开花期、灌浆中期分别增加了 3.17%、4.89%、1.96%、1.84% 和 1.95%、1.20%、2.40%、1.90%。从表 2 中亦可看出,旱播机直播的叶绿素 SPAD 值皆与水播撒播差异不显著,水播机直播的叶绿素 SPAD 值皆显著高于旱播撒播。

表 2 不同播栽方式下水稻主要生育期叶绿素 SPAD 值

Table 2 Chlorophyll SPAD value of rice at different growth stages under different planting patterns

品种 Variety	播栽方式 Planting pattern	播种方式 Planting pattern	SPAD 均值 Mean of SPAD value			
			拔节期 Jointing stage	孕穗期 Booting stage	开花期 Flowering stage	灌浆中期 Middle of filling stage
桃湘优莉晶 Taoxiangyoulijing	旱播 Upland field	机直播 Direct seeding	45.50±1.25 cd	50.73±1.37 bcd	56.57±0.96 bc	40.30±0.82 c
		撒播 Broadcast sowing	44.37±0.80 d	48.73±0.96 d	54.90±0.70 d	38.10±1.04 d
	水播 Paddy field	机直播 Direct seeding	46.50±0.82 bc	52.47±1.21 ab	57.13±0.72 b	41.90±0.36 ab
		撒播 Broadcast sowing	45.37±0.80 cd	49.17±1.21 d	55.27±1.00 cd	39.50±0.66 cd
原旱稻 3 号 Upland rice three	旱播 Upland field	机直播 Direct seeding	47.27±0.40 b	51.70±1.71 bc	57.67±0.90 ab	41.93±0.55 ab
		撒播 Broadcast sowing	46.20±0.60 bc	49.87±1.32 cd	55.37±0.97 cd	39.97±0.32 c
	水播 Paddy field	机直播 Direct seeding	48.77±0.91 a	54.23±0.55 a	58.80±1.01 a	42.70±0.53 a
		撒播 Broadcast sowing	47.10±0.82 b	50.47±1.03 bcd	56.70±1.01 bc	40.73±1.37 bc

2.3 不同种植模式对群体干物质量的影响

由表 3 可知,'桃湘优莉晶'和'原旱稻 3 号'2 个水稻品种水播机直播各生育期的群体干物质量显著高于旱播撒播,于苗期、拔节期、开花期、成熟期分别显著增加了 32.17%、33.66%、18.50%、15.15% 和 28.27%、19.82%、15.02%、12.75%,而旱播机直播成熟期群体干物质量与水播撒播差异皆不显著。从表 3 中亦可看出,在相同水播和旱播下,机直播相对于撒播可以提高水稻各生育期的群体干物质量,'桃湘优莉晶'机直播相比撒播在旱播和水播下于苗期、拔节期、开花期、成熟期分别显著增加了 12.73%、17.44%、12.59%、7.75% 和 11.36%、11.37%、7.08%、8.25%。同一播种方式下(机直播和撒播),水播各生育期的群体干物质量皆显著高于旱播,证实水播相比旱播可以显著提高水稻群体干物质量。

2.4 不同种植模式对光合特性的影响

由表 4 可知,同一旱播和水播下,机直播抽穗期和灌浆中期的光合速率、气孔导度、蒸腾速率皆高于撒播,而胞间 CO_2 摩尔分数低于撒播,其中在灌浆中期'桃湘优莉晶'和'原旱稻 3 号'水播机直播比水播撒播光合速率、气孔导度、蒸腾速率分别增加了 7.06%、5.75%、4.32% 和 5.94%、12.68%、4.33%。相同播种方式下(机直播和撒

播),水播两生育期的光合速率、气孔导度、蒸腾速率高于旱播,而胞间 CO_2 摩尔分数低于旱播。从表中亦可看出,旱播机直播的光合速率、气孔导度、胞间 CO_2 摩尔分数与水播撒播差异皆不显著,而蒸腾速率显著低于水播。2 个品种水播机直播的光合速率、气孔导度、蒸腾速率、胞间 CO_2 摩尔分数与旱播撒播存在显著差异,其中抽穗期和灌浆中期'原旱稻 3 号'水播机直播的光合速率、气孔导度、蒸腾速率比旱播撒播显著增加了 12.03%、14.20%、18.50%和 13.57%、20.32%、21.43%。

表 3　不同播栽方式下水稻主要生育期群体干物质量

Table 3　Dry matter mass of rice population at different growth stages under different planting patterns

品种 Variety	播栽方式 Planting pattern	播种方式 Planting pattern	群体干物质量/(kg·hm^{-2}) Population dry matter mass			
			苗期 Seedling stage	拔节期 Jointing stage	开花期 Flowering stage	成熟期 Maturity stage
桃湘优莉晶 Taoxiangyoulijing	旱播 Upland field	机直播 Direct seeding	3 855.57±110.15 c	7 794.47±91.12 c	17 738.70±167.04 b	25 060.97±106.01 bc
		撒播 Broadcast sowing	3 420.30±28.32 d	6 637.17±52.44 f	15 754.43±336.90 e	23 259.03±342.33 e
	水播 Paddy field	机直播 Direct seeding	4 520.70±118.89 a	8 871.00±73.36 a	18 669.03±281.02 a	26 782.93±289.67 a
		撒播 Broadcast sowing	4 059.70±85.09 b	7 965.13±60.00 b	17 435.17±115.84 c	24 740.90±166.84 c
原旱稻 3 号 Upland rice No. 3	旱播 Upland field	机直播 Direct seeding	3 728.80±36.51 c	6 965.07±60.11 e	16 516.77±55.34 d	24 651.97±205.31 cd
		撒播 Broadcast sowing	3242.57±101.93 e	6 086.13±60.93 g	15 223.70±100.35 f	22 471.07±106.75 f
	水播 Paddy field	机直播 Direct seeding	4 159.27±66.98 b	7 292.50±56.06 d	17 509.57±50.39 bc	25 335.23±173.35 b
		撒播 Broadcast sowing	3 783.10±65.93 c	6 537.30±121.04 f	16 484.97±58.78 d	24 279.10±263.40 d

表 4　不同播栽方式下水稻主要生育期光合特性

Table 4　Photosynthetic characteristics of rice at different growth stages under different planting patterns

处理 Treatment				光合速率/(μmol·m^{-2}·s^{-1}) Photosynthetic rate	气孔导度/(mol·m^{-2}·s^{-1}) Stomatal conductance	蒸腾速率/(mmol·m^{-2}·s^{-1}) Ttranspiration rate	胞间 CO_2 摩尔分数/(μmol·mol^{-1}) Intercellular CO_2 mole faction
抽穗期 Heading stage	桃湘优莉晶 Taoxiangyoulijing	旱播 Upland field	机直播 Direct seeding	17.83±0.61 c	0.427±0.02 de	4.38±0.15 de	437.33±13.15 b
			撒播 Broadcast sowing	17.07±0.15 d	0.397±0.02 e	4.07±0.13 f	463.07±14.40 a
		水播 Paddy field	机直播 Direct seeding	18.67±0.40 b	0.457±0.02 cd	4.95±0.07 ab	404.10±7.39 de
			撒播 Broadcast sowing	17.57±0.32 cd	0.433±0.03 de	4.75±0.11 bc	426.67±10.34 bc
	原旱稻 3 号 Upland rice No. 3	旱播 Upland field	机直播 Direct seeding	18.90±0.20 b	0.547±0.03 a	4.58±0.07 cd	399.47±12.42 e
			撒播 Broadcast sowing	17.70±0.26 cd	0.493±0.02 bc	4.27±0.13 e	423.97±10.95 bcd
		水播 Paddy field	机直播 Direct seeding	19.83±0.60 a	0.563±0.04 a	5.06±0.16 a	372.10±16.14 f
			撒播 Broadcast sowing	18.83±0.25 b	0.520±0.03 ab	4.86±0.07 b	407.73±13.81 cde
灌浆中期 Middle of filling stage	桃湘优莉晶 Taoxiangyoulijing	旱播 Upland field	机直播 Direct seeding	15.83±0.61 c	0.380±0.01 fg	4.76±0.06 e	484.30±15.16 b
			撒播 Broadcast sowing	15.07±0.15 d	0.350±0.02 g	4.45±0.10 f	517.13±15.52 a
		水播 Paddy field	机直播 Direct seeding	16.67±0.40 b	0.423±0.04 de	5.55±0.07 b	463.07±4.07 c
			撒播 Broadcast sowing	15.57±0.32 cd	0.400±0.03 ef	5.32±0.10 c	499.57±12.37 ab
	原旱稻 3 号 Upland rice No. 3	旱播 Upland field	机直播 Direct seeding	16.90±0.20 b	0.487±0.04 b	4.96±0.07 d	454.83±6.02 c
			撒播 Broadcast sowing	15.70±0.26 cd	0.443±0.02 cd	4.76±0.08 e	483.13±10.56 b
		水播 Paddy field	机直播 Direct seeding	17.83±0.60 a	0.533±0.03 a	5.78±0.09 a	432.23±9.76 d
			撒播 Broadcast sowing	16.83±0.25 b	0.473±0.02 bc	5.54±0.08 b	455.67±10.85 c

2.5 不同种植模式对产量及其构成的影响

从表 5 可以看出，2 个品种水播和旱播下机直播的穗数、千粒质量、穗粒数、结实率和产量皆高于撒播，其中‘桃湘优莉晶’机直播比撒播的穗数、千粒质量、穗粒数、结实率和产量在旱播和水播下分别增加了 3.52%、3.04%、10.26%、1.69%、17.59% 和 1.55%、4.19%、2.90%、2.35%、9.34%。相同播种方式下（机直播和撒播）水播的产量及产量构成皆优于旱播，‘原旱稻 3 号’穗数、千粒质量、穗粒数、结实率、产量水播机直播比旱播机直播分别增加了 2.59%、1.00%、2.07%、2.53%、6.47%，水播撒播比旱播撒播分别增加了 4.93%、2.82%、7.20%、3.74%、13.76%。从产量来看，相同处理下，水播和旱播、机直播和撒播间的产量差异皆达到显著水平。从表 5 中亦可看出，水播机直播的产量及产量构成皆显著高于旱播撒播，旱播机直播的产量显著高于水播撒播，而穗数、穗粒数、结实率与水播撒播差异不显著。

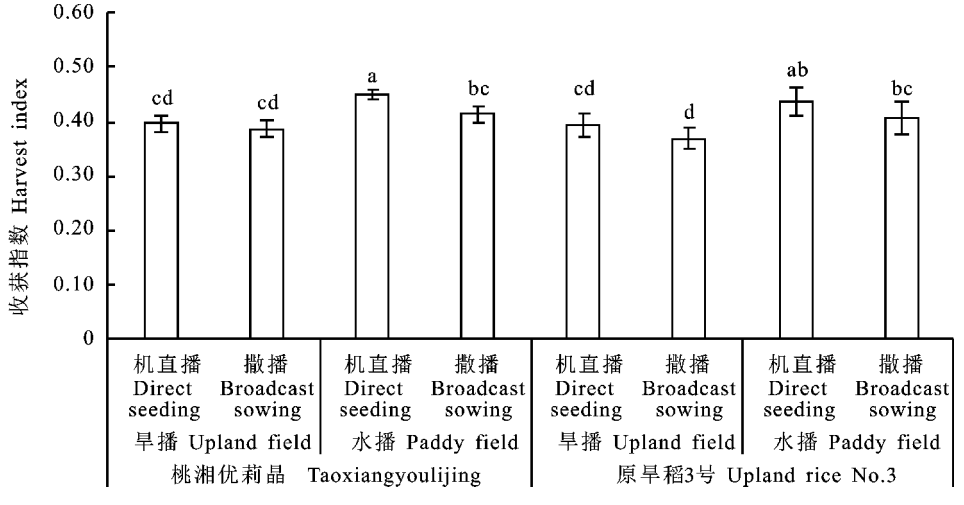
表 5 不同播栽方式下水稻产量及其构成

Table 5 Rice yield and its components under different planting patterns

品种 Variety	播栽方式 Planting pattern	播种方式 Planting pattern	穗数（×10⁴）/ hm⁻² Spike number	千粒质量/g 1 000-kernel mass	穗粒数 Grains per spike	结实率/% Seed setting rate	产量/（kg·hm⁻²） Yield
桃湘优莉晶 Taoxiangyoulijing	旱播 Upland field	机直播 Direct seeding	195.23±2.47 ab	26.10±0.44 ab	213.93±8.03 a	90.37±0.80 bc	12 879.67±58.39 b
		撒播 Broadcast sowing	188.60±3.40 c	25.33±0.51 de	194.03±7.47 c	88.87±1.25 cd	10 952.87±44.14 g
	水播 Paddy field	机直播 Direct seeding	198.60±2.38 a	26.60±0.26 a	215.23±1.72 a	93.27±1.00 a	13 372.77±77.54 a
		撒播 Broadcast sowing	195.57±3.15 ab	25.53±0.32 cd	209.17±3.74 ab	91.13±1.00 abc	12 230.77±39.97 d
原旱稻 3 号 Upland rice No. 3	旱播 Upland field	机直播 Direct seeding	185.20±2.72 c	25.97±0.29 bc	209.60±0.92 ab	89.83±1.10 bc	11 815.93±69.19 e
		撒播 Broadcast sowing	178.40±2.91 d	24.83±0.25 e	192.63±2.51 c	87.40±1.04 d	10 157.13±150.37 h
	水播 Paddy field	机直播 Direct seeding	190.00±4.35 bc	26.23±0.45 ab	213.93±2.01 a	92.10±1.91 ab	12 579.83±85.74 c
		撒播 Broadcast sowing	187.20±2.38 c	25.53±0.40 cd	206.50±1.21 b	90.67±1.44 bc	11 554.93±99.00 f

2.6 不同种植模式对收获指数的影响

从图 1 可以看出，相同处理下机直播的收获指数皆高于撒播，‘桃湘优莉晶’和‘原旱稻 3 号’旱播和水播下机直播分别比撒播的收获指数增加了 2.58%、8.96% 和 6.22%、7.37%，其中‘桃湘优莉晶’水播下机直播的收获指数显著高于撒播。相同品种同一播种方式下（机直播和撒播），水播的收获指数皆高于旱播，其中‘桃湘优莉晶’收获



柱状图上的不同字母代表差异达到显著水平（$P<0.05$） Histograms capped with different letters indicate significant difference ($P<0.05$)

图 1 不同种植模式下水稻收获指数

Fig. 1 Harvest index of rice under different planting patterns

指数水播机直播比旱播机直播增加了 13.4%,水播撒播比旱播撒播增加了 6.7%。从图中亦可看出,水播散播处理的收获指数亦皆略高于旱播机直播和旱播撒播,表明水播相比旱播有利于提高水稻收获指数。此外,相同种植模式处理下 2 个水稻品种的收获指数差异皆不显著。

2.7　相关性分析

从表 6 可以看出,产量与叶面积指数、群体干物质量、结实率、穗粒数、千粒质量、穗数皆呈显著正相关关系,与叶绿素 SPAD 值、光合速率、气孔导度、蒸腾速率呈不显著正相关关系,而与胞间 CO_2 摩尔分数呈负相关关系。收获指数与叶面积指数、群体干物质量、蒸腾速率、结实率、穗粒数、千粒质量、穗数、产量皆呈显著正相关关系,与叶绿素 SPAD 值、光合速率、气孔导度呈不显著正相关关系,与胞间 CO_2 摩尔分数呈负相关关系。从表 6 中亦可看出光合指标中的光合速率、气孔导度、蒸腾速率、叶绿素 SPAD 值皆与产量构成要素结实率、穗粒数、千粒质量、穗数及群体干物质量呈显著或不显著正相关关系,而胞间 CO_2 摩尔分数除与穗数不呈负相关外,与表中其他指标皆呈显著或不显著负相关关系。

表 6　光合效应指标与产量及产量构成要素间的相关性

Table 6　Correlation among photosynthetic efficiency indexes and yield components

项目 Item	叶绿素 SPAD 值 Chlorophyll SPAD value	群体干物质量 Dry matter mass of population	光合速率 Photosynthetic rate	气孔导度 Stomatal conductance	蒸腾速率 Ttranspiration rate	胞间 CO_2 摩尔分数 Intercellular CO_2 mole fraction
叶面积指数　Leaf area index	0.76*	0.87**	0.59	0.23	0.53	−0.54
叶绿素 SPAD 值　Chlorophyll SPAD value		0.61	0.96**	0.77*	0.71*	−0.88**
群体干物质量　Dry matter mass of population		0.53	0.10	0.73*	−0.50	−0.50
光合速率　Photosynthetic rate				0.87**	0.81**	−0.96**
气孔导度　Stomatal conductance					0.56	−0.88**
蒸腾速率　Ttranspiration rate						−0.85**
胞间 CO_2 摩尔分数　Intercellular CO_2 mole fraction						
结实率　Seed setting rate						
穗粒数　Grains per spike						
千粒质量　1 000-kernel mass						
穗数　Spike number						
产量　Yield						

项目 Item	结实率 Seed setting rate	穗粒数 Grains per spike	千粒质量 1 000-kernel mass	穗数 Spike number	产量 Yield	收获指数 Harvest index
叶面积指数　Leaf area index	0.74*	0.84**	0.95**	0.60	0.87**	0.72*
叶绿素 SPAD 值　Chlorophyll SPAD value	0.59	0.71*	0.73*	0.13	0.56	0.59
群体干物质量　Dry matter mass of population	0.95**	0.92**	0.96**	0.82**	0.97**	0.90**
光合速率　Photosynthetic rate	0.57	0.62	0.59	0.02	0.43	0.60
气孔导度　Stomatal conductance	0.13	0.26	0.17	0.44	0.32	0.18
蒸腾速率　Ttranspiration rate	0.84**	0.75*	0.62	0.41	0.64	0.85**
胞间 CO_2 摩尔分数　Intercellular CO_2 mole fraction	−0.54	−0.58	−0.51	0.01	−0.38	−0.59
结实率　Seed setting rate		0.87**	0.87**	0.81**	0.91**	0.98**
穗粒数　Grains per spike			0.90**	0.72*	0.94**	0.77*
千粒质量　1 000-kernel mass				0.72*	0.94**	0.82**
穗数　Spike number					0.88**	0.73*
产量　Yield						0.83**

注:"*"为显著相关($P<0.05$),"**"为极显著相关($P<0.01$)。

Note:"*"Significant correlation is significant($P<0.05$);"**"Significant correlation is markedly significant($P<0.01$).

3 讨 论

叶面积指数是指单位土地表面积上植物单叶面积的总和，能反映作物群体叶面积的变化，与作物蒸腾作用、呼吸作用、群体光能截获及净初级生产力等密切相关[12]。袁菊红等[13]通过水田和旱地栽培比较试验研究发现，水田栽培处理的叶面积指数要比旱地栽培的大。程建平等[14]通过研究机械精量穴直播、人工手插种植和人工撒播对水稻生长发育和叶面积的影响发现，机械精量穴直播相比另外 2 种种植模式有利于加快水稻生长发育，降低主茎总叶龄，提高群体叶面积指数。叶绿素 SPAD 值和植物的发育状况及光合能力具有较强的相关性，它通常是光合作用能力和植物发育状况的指示器[15-16]。刘红江等[17]研究直播稻、手栽秧和机插秧处理对水稻的生长发育影响发现，机插秧处理水稻叶片叶绿素 SPAD 值高于直播稻、手栽秧处理。张亚洁等[18]研究发现，水稻裸地旱种和水种对水稻叶绿素 SPAD 值具有明显影响，其中水稻裸地旱种处理花后剑叶叶绿素 SPAD 值下降相对较快。本研究发现，在旱播和水播下机直播处理叶面积指数在拔节期以后皆显著高于撒播，机直播相对于撒播能有效提高水稻叶面积指数，相同品种和播栽方式下，水播处理的叶面积指数皆高于旱播；水播机直播处理组合最有利于提高叶绿素 SPAD 值，其各生育期的叶绿素 SPAD 值高于水播撒播和旱播机直播处理。机直播相对于撒播、水播相对于旱播有利于提高水稻叶面积指数和叶绿素 SPAD 值主要可能是由于机械直播相对于人工撒播更有利于合理的群体质量构建及生长发育特性的改善[8]，水播相比旱播能为水稻生长提供充足的水分，不会因水分缺乏对水稻生长及叶面积和叶绿素的形成产生影响[13]。

水稻的产量主要来源于光合产物，且其产量的高低主要取决于光合物质的积累量、研究水稻干物质积累量及光合生产特性对揭示产量形成和高产群体构建意义质量大[19-20]。李杰等[21]通过研究不同种植方式对长江下游稻-麦两熟制条件下水稻干物质形成的影响指出，不同种植模式对水稻干物质积累量和干物质运转分配具有明显影响。邢志鹏等[22]通过研究不仅发现与毯苗机插和机械直播相比，钵苗机插有利于提高剑叶净光合速率，而且不同播栽方式下不同水稻品种的光合速率存在明显差异，其中钵苗机插下杂交籼稻净光合速率大于籼粳交水稻和常规粳稻，机直播下杂交籼稻净光合速率小于籼粳交水稻和常规粳稻。蔡永萍等[23]通过研究水稻水作与旱作栽培模式下水稻衰老和后期一些生理活性的变化发现水稻水作相比旱作不仅改善了水稻剑叶光合因子，而且可提高光合效率。本研究发现，其他处理相同下，机直播相比撒播及水播相比旱播皆利于提高水稻各生育期群体干物质量；撒播水稻旗叶光合速率、气孔导度、蒸腾速率在抽穗期和灌浆中期皆低于机直播，水播在改善水稻叶片光合特性方面明显优于旱播。机直播相比撒播、水播相比旱播能增加水稻群体干物质量和光合速率主要可能是由于机直播和水作对水稻的重要作用不仅是延缓了叶片衰老，而且通过根系代谢变化影响叶片和植株养分吸收和积累，使水稻叶片在生育后期衰老缓慢，始终维持高的光合速率，保证了“源”充足，从而在改善叶片光合的同时增加了干物质积累[23-26]。

何瑞银等[27]研究指出，水稻不同种植方式间的产量和经济效益存在明显差异。程建平等[14]研究指出，机械精量穴直每平方米有效穗可比人工手插和人工撒播分别提高 24.63%和 15.25%，机直播产量较人工撒播和手插处理分别增产 14.92%和 4.59%。吴丹等[28]通过水稻水作与旱作生物量和籽粒产量的差异研究证实水作水稻的穗粒数、有效穗、结实率、千粒质量和产量都明显高于旱作水稻。本研究同样发现，机直播穗数、千粒质量、穗粒数、结实率、产量和收获指数皆高于撒播，水播的产量及产量构成皆优于旱播，水播相比旱播亦有利于收获指数的提高。机直播相比撒播、水播相比旱播能改善产量构成提高籽粒产量和收获指数主要可能是由于[8,23,29-30]水播机直播群体茎蘖动态和物质生产上表现为“前小、中稳、后高”，在产量形成上表现为“穗足、穗质量高、结实率高”，在根系及生理代谢方面表现为“根系活性强”、在叶片生理方面表现为光合势高“源、库、流”协调，具有较高的物质积累量，在对土壤养分利用上能更充分的吸收利用土壤水分和各种营养物质。此外本研究亦发现产量与叶面积指数、群体干物质量、结实率、穗粒数、千粒质量、穗数皆呈显著正相关关系，与叶绿素 SPAD 值、光合速率、气孔导度、蒸腾速率呈不显著正相关关系，从侧面证实了机直播和水播可以通过改善水稻叶面积、

群体干物质积累、叶绿素 SPAD 值、光合速率及产量构成三要素等实现产量的提高。

4　结 论

水播相比旱播及机直播相比撒播可通过提高水稻光合效应指标叶面积指数、叶绿素 SPAD 值、光合速率实现水稻群体干物质量及产量构成要素穗数、千粒质量、穗粒数、结实率、产量等的增加,综合认为水播机直播相比水播撒播、旱播撒播及旱播机直播在改善水稻生长、光合及产量方面优势明显,可以作为水稻主要种植模式之一大面积推广应用。

参考文献　Reference:

[1] 刘红江,陈留根,郑建初,等. 不同播栽方式对水稻产量形成和经济效益的影响[J]. 江苏农业学报,2014,30(3):474-479.
LIU H J,CHEN L G,ZHENG J CH,*et al*. Effects of different planting modes on grain yield formation and economic benefits of rice(*Oryza sativa* L.) [J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*,2014,30(3):474-479.

[2] KUMAR V,LADHA J K. Chapter six-direct seeding of rice:recent developments and future research needs[J]. *Advances in Agronomy*,2011,111:297-413.

[3] LIU H,HUSSAIN S,ZHENG M,*et al*. Dry direct-seeded rice as an alternative to transplanted-flooded rice in central China[J]. *Agronomy for Sustainable Development*,2015,35(1):285-294.

[4] 徐国伟,谈桂露,王志琴,等. 秸秆还田与实地氮肥管理对直播水稻生长的影响[J]. 作物学报,2009,35(4):685-694.
XU G W,TAN G L,WANG ZH Q,*et al*. Effects of wheat-residue application and site-specific nitrogen management on growth and development in direct-seeding rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*,2009,35(4):685-694.

[5] FAROOQ M,SIDDIQUE K H M,REHMAN H,*et al*. Rice direct seeding: Experiences, challenges and opportunities [J]. *Soil and Tillage Research*,2011,111(2):87-98.

[6] 孙永健,郑洪帧,杨志远,等. 机械旱直播方式对水稻氮磷钾吸收转运及分配的影响[J]. 农业工程学报,2017,33(3):73-80.
SUN Y J,ZHANG H ZH,YANG ZH Y,*et al*. Effects of mechanical dry direct-sowing modes on absorption,translocation and distribution of nitrogen,phosphorus,and potassium in rice [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*,2017,33(3):73-80.

[7] 张　耗,余　超,陈可伟,等. 直播方式对水稻生理性状和产量的影响及其成本分析[J]. 农业工程学报,2017,33(13):58-64.
ZHANG H,YU CH,CHEN K W,*et al*. Effect of direct-seeding methods on physiological characteristics and grain yield of rice and its cost analysis[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*,2017,33(13):58-64.

[8] 孙永健,郑洪帧,徐　徽,等. 机械旱直播方式促进水稻生长发育提高产量[J]. 农业工程学报,2014,30(20):10-18.
SUN Y J,ZHENG H ZH,X H,*et al*. Mechanical dry direct-sowing modes improving growth,development and yield of rice[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*,2014,30(20):10-18.

[9] 杨太明,孙喜波,刘布春,等. 安徽省水稻高温热害保险天气指数模型设计[J]. 中国农业气象,2015,36(2):220-226.
YANG T M,SUN X B,LIU B CH,*et al*. Design on weather indices model for insurance of rice heat damage in Anhui province[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*,2015,36(2):220-226.

[10] 朱德峰,程式华,张玉屏,等. 全球水稻生产现状与制约因素分析[J]. 中国农业科学,2010,43(3):474-479.
ZHU D F,CHENG SH H,ZHANG Y P,*et al*. Analysis of status and constraints of rice production in the world[J]. *Scientia Agricultura Sinica*,2010,43(3):474-479.

[11] 朱聪聪,张洪程,郭保卫,等. 钵苗机插密度对不同类型水稻产量及光合物质生产特性的影响[J]. 作物学报,2014,40(1):122-133.
ZHU C C,ZHANG H CH,GUO B W,*et al*. Effect of planting density on yield and photosynthate production characteristics in different types of rice with bowl mechanical-transplanting method[J]. *Acta Agronomica Sinica*,2014,40(1):122-133.

[12] 贺　佳,刘冰锋,李　军. 不同生育时期冬小麦叶面积指数高光谱遥感监测模型[J]. 农业工程学报,2014,30(24):141-150.
HE J,LIU B F,LI J. Monitoring model of leaf area index of winter wheat based on hyperspectral reflectance at different growth stages[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*,2014,30(24):141-150.

[13] 袁菊红,屠乃美,张桂莲. 水陆稻在水田和旱地栽培的性状比较[J]. 湖南农业大学学报(自科版),2005,31(1):1-6.
YUAN J H,TU N M,ZHANG G L. Characters of upland and lowland rice under different cultivations[J]. *Journal of Hunan Agricultural University*(*Natural Sciences*),2005,31(1):1-6.

[14] 程建平,罗锡文,樊启洲,等. 不同种植方式对水稻生育特性和产量的影响[J]. 华中农业大学学报,2010,29(1):1-5.
CHENG J P,LUO X W,FAN Q ZH,*et al*. Influence of different planting methods on growth and development characteristics and yield of rice[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*,2010,29(1):1-5.

[15] NIKOLAEVA M K,MAEYSKAYA S N,SHUGAEV A G,*et al*. Effect of drought on chlorophyll content and antioxidant enzyme activities in leaves of three wheat culti-

vars varying in productivity[J]. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2010, 57(1): 87-95.

[16] FITZGERALD G, RODRIGUEZ D, O'LEARY G. Measuring and predicting canopy nitrogen nutrition in wheat using a spectral index-the canopy chlorophyll content index(CCCI)[J]. *Field Crops Research*, 2010, 116(3): 318-324.

[17] 刘红江,郑建初,陈留根,等. 不同播栽方式对水稻生长发育特性的影响[J]. 生态学杂志, 2013, 32(9): 2326-2331.
LIU H J, ZHANG J CH, CHEN L G, *et al*. Effects of different planting modes on the growth and development characteristics of rice[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(9): 2326-2331.

[18] 张亚洁,周彧然,杜 斌,等. 不同种植方式下氮素营养对陆稻和水稻产量的影响[J]. 作物学报, 2008, 34(6): 1005-1013.
ZHANG Y J, ZHOU Y R, DU B, *et al*. Effects of nitrogen nutrition on grain yield of upland rice and paddy rice under different cultivation methods[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2008, 34(6): 1005-1013.

[19] KATO M, KOBAYASHI K, OGISO E, *et al*. Photosynthesis and dry-matter production during ripening stage in a female-sterile line of rice[J]. *Plant Production Science*, 2004, 7(2): 184-188.

[20] GUO-HUA L, YONG-FENG W U, BAI W B, *et al*. Influence of high temperature stress on net photosynthesis, dry matter partitioning and rice grain yield at flowering and grain filling stages[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2013, 12(4): 603-609.

[21] 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.
LI J, ZHANG H CH, CHANG Y, *et al*. Characteristics of photosynthesis and matter production of rice with different planting methods under high-yielding cultivation condition [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(7): 1235-1248.

[22] 邢志鹏,吴 培,朱 明,等. 机械化种植方式对不同品种水稻株型及抗倒伏能力的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(1): 52-62.
XING ZH P, WU P, ZHU M, *et al*. Effect of mechanized planting methods on plant type and lodging resistance of different rice varieties[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(1): 52-62.

[23] 蔡永萍,杨其光. 水稻水作与旱作对抽穗后剑叶光合特性,衰老及根系活性的影响[J]. 中国水稻科学, 2000, 14(4): 219-224.
CAI Y P, YANG Q G. Effect of rice cultivated under paddy and upland condition on photosynthesis and senescence of flag leaf and activity of root system after heading[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2000, 14(4): 219-224.

[24] 凌祖铭,李自超,余 荣,等. 水旱栽培条件下水、陆稻品种产量和生理性状比较[J]. 中国农业大学学报, 2002, 7(3): 13-18.
LING Z M, LI Z CH, Y R, *et al*. Comparison of yield and physiological characters between upland rice and paddy rice cultivars under submerged and rain-fed conditions[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2002, 7(3): 13-18.

[25] 张祖建,谢成林,谢仁康,等. 苏中地区直播水稻的群体生产力及氮肥运筹的效应[J]. 作物学报, 2011, 37(4): 677-685.
ZHANG Z J, XIE CH L, XIE R K, *et al*. Population production capacity of direct-seeding rice in central Jiangsu region and effects of nitrogen application[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(4): 677-685.

[26] 程建平,赵 锋,吴 波,等. 不同直播种植模式对水稻根系特征和产量形成的影响[J]. 湖北农业科学, 2013, 52(24): 5979-5983.
CHENG J P, ZHAO F, WU B, *et al*. Effects of different direct-sowing planting patterns on characteristics of the roots and yield of rice[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2013, 52(24): 5979-5983.

[27] 何瑞银,罗汉亚,李玉同,等. 水稻不同种植方式的比较试验与评价[J]. 农业工程学报, 2008, 24(1): 167-171.
HE R Y, LUO H Y, LI Y T, *et al*. Comparison and analysis of different rice planting methods in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(1): 167-171.

[28] 吴 丹,吴川德,何美丹,等. 水作和旱作对山栏稻生长的影响[J]. 热带生物学报, 2017, 8(3): 318-323.
WU D, WU CH D, HE M D, *et al*. The effects of paddy and upland cultivation on physiological parameters, agronomic traits and yield of Shanlan upland rice[J]. *Journal of Tropical Biology*, 2017, 8(3): 318-323.

[29] 尹金来,周春霖,沈其荣,等. 水稻水作与旱作条件下土壤和植物磷素有效性的研究[J]. 南京农业大学学报, 2002, 25(4): 53-56.
YIN J L, ZHOU CH L, SHEN Q R, *et al*. Availabilities of phosphorus in soil and rice plant under waterlogged and aerobic conditions[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2002, 25(4): 53-56.

[30] 黄新宇,徐阳春,沈其荣,等. 不同地表覆盖旱作水稻和水作水稻水分利用效率的研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(3): 140-143.
HUANG X Y, XU Y CH, SHEN Q R, *et al*. Water use efficiency of rice crop cultivated under waterlogged and aerobic soil mulched with different materials[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 17(3): 140-143.

The Effects of Different Planting Patterns on Growth and Development, Photosynthetic Characteristics and Yield Components of Rice

ZHANG Xiangqian[1], XU Yunji[2] and WU Panpan[3]

(1. Crops Research Institute, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei 230031, China; 2. Joint International Research Laboratory of Agriculture and Agri-Product Safety, the Ministry of Education of China, Yangzhou University, Yangzhou Jiangsu 225009, China; 3. Research Institute of Agricultural Sciences in Shucheng County, Shucheng Anhui 231300, China)

Abstract In order to explore the yield-increasing mechanism and lay the foundation for large-area popularization and application of mechanical direct seeding, the effects of mechanical direct seeding and broadcast sowing on the growth, photosynthesis and yield formation of rice under paddy field and upland field were studied. The results showed that rice sowed in paddy field enhanced leaf area index compared with rice sowed in upland field, and since jointing stage, mechanical direct seeding had been higher leaf area index than broadcast sowing in both paddy field and upland field. The chlorophyll mass fraction was the highest in the treatment of mechanical direct seeding in paddy field, and significantly higher than that of the treatment of broadcast sowing in upland field. The dry matter mass of rice population at each growth stage was higher in mechanical direct seeding than broadcast sowing, and similar tendency in paddy field compared to upland field. In paddy field, mechanical direct seeding had higher photosynthetic rate, stomatal conductance, and transpiration rate than broadcast sowing, increased by 7.06%, 5.75% and 4.32% respectively for rice cultivar. 'Taoxiangyoulijing' and by 5.94%, 12.68% and 4.33% respectively for 'Upland rice No. 3'. The rice in paddy field had better photosynthetic characteristics. When the other treatments were the same, caused higher the spike number, 1 000-kernel mass, grains per spike, seed setting rate, yield, and harvest index. The treatment of mechanical direct seeding increased the harvest index of 'Taoxiangyoulijing' and upland rice three by 2.58%, 8.96%and 6.22%, 7.37% respectively under paddy field and upland field, and the difference in spike number, grains per spike, seed setting rate between mechanical direct seeding in upland field and broadcast sowing in paddy field were insignificant. Yield was significantly positively correlated with leaf area index, dry matter mass of population, seed setting rate, grains per spike, 1 000-kernel mass, spike number, and insignificantly positively correlated with chlorophyll mass fraction, photosynthetic rate, stomatal conductance, transpiration rate, and negatively correlated with intercellular CO_2 mole fraction. The research shows that mechanical direct seeding in paddy field in comparison with broadcast sowing in paddy field, broadcast sowing in upland field and mechanical direct seeding in upland field has obvious advantages in improving rice growth, photosynthesis and yield.

Key words Rice; Planing pattern; Photosynthesis characteristics; Yield components

Received 2019-03-26　　**Returned** 2019-04-24

Foundation item National Key Research and Development Program of China(No. 2017YFD0301305); the Open Project from Joint International Research Laboratory of Agriculture and Agri-Product Safety of Yangzhou University(No. JRK2018004).

First author ZHANG Xiangqian, male, Ph. D, associate research fellow. Research area: crop cultivation. E-mail: xiangqian111@163.com

(责任编辑:成　敏　Responsible editor: CHENG Min)