

doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.19506

栽培方式对寒地水稻产量及光合特性的影响

郭晓红, 兰宇辰, 胡月, 王鹤璎, 徐令旗, 孙光旭, 姜红芳, 吕艳东*

(黑龙江八一农垦大学农学院 / 黑龙江省现代农业栽培技术与
作物种质改良重点实验室, 黑龙江 大庆 163319)

摘要: 为构建寒地水稻高产栽培技术体系提供理论和实践依据, 进行了不同栽培方式对寒地水稻产量及光合特性影响的研究。于 2017 ~ 2018 年, 在大田条件下, 以粳稻品种为试验材料, 设置 3 种栽培方式, 即当地农民栽培方式 (FP)、高产栽培方式 (HY) 和超高产栽培方式 (SHY), 其中以 FP 为对照, 研究了不同栽培方式下寒地水稻产量及产量构成、叶面积指数、光合特征参数、群体生长特征、干物质积累与转运等的差异。结果表明, 与 FP 相比, HY 和 SHY 的增产幅度在 2 年间分别为 9.85% ~ 24.78% 和 12.76% ~ 23.54%; HY 和 SHY 显著提高了各时期水稻叶面积指数及水稻高效叶面积率; HY 和 SHY 显著提高了净光合速率、气孔导度、蒸腾速率, 降低了胞间 CO₂ 浓度; HY 和 SHY 在分蘖盛期至齐穗期的光合势和群体生长率均显著高于 FP; HY 和 SHY 显著提高了水稻群体干物质重及叶、茎、鞘的物质输出率、转化率。可见, 高产栽培方式和超高产栽培方式通过提高水稻群体物质生产能力, 从而实现了水稻高产。

关键词: 栽培方式; 寒地; 水稻; 产量; 光合特征; 干物质

黑龙江省是我国最北部的寒地稻作区, 也是我国重要的商品粮基地。黑龙江省水稻的高产稳产对我国粮食安全具有重要影响^[1]。水稻产量主要来源于其光合产物, 而水稻群体质量和产量形成取决于光合物质的积累、分配、输出和转化是否合理^[2]。吴培等^[3]研究认为提高水稻群体质量有利于水稻高产。吴桂成等^[4]研究认为, 提高水稻在生育前期和中期干物质积累量, 对水稻增产有重要作用。迄今为止, 关于水稻物质生产特性的研究, 前人已有大量报道, 并认为其受品种特性、栽培密度、氮素营养、插秧方式和种植方式^[5-9]等因素的影响。然而, 以上研究大都针对某一单因素对水稻的影响, 通过栽培技术的集成与优化使水稻达到高产或超高产的群体物质生产研究相对较少。前期研究结果表明, 高产高效和超高产栽培在保证水稻高产的同时, 可以显著提高各器官及全株

的氮、磷、钾含量和积累量, 有利于寒地水稻养分的高效吸收与利用^[10]。为此, 本试验比较了不同栽培方式下叶面积指数、光合特征参数、群体生长特征、干物质积累分配与转运等方面的影响, 为构建寒地水稻高产栽培技术体系提供理论与实践依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点及供试材料

试验于 2017 ~ 2018 年在黑龙江省绥化市绥棱县上集镇水稻综合试验站 (E127° 18', N47° 09') 大田条件下进行。该地区属于典型的寒温带大陆季风气候区, 年均降水量为 545 mm, 年蒸发量在 700 ~ 800 mm, 年平均气温为 2.59℃, 气象数据由位于试验田内的农业气象站测定。供试土壤为黑土, 试验前 0 ~ 20 cm 土层基础理化性质为: 有机质 44.51 g · kg⁻¹, 碱解氮 160 mg · kg⁻¹, 有效磷 10.62 mg · kg⁻¹, 速效钾 185.84 mg · kg⁻¹, pH 6.3。种植制度为一年一作。

供试水稻品种为龙粳 46 号。

1.2 试验设计

试验共设 3 个处理, 分别为当地农民栽培方式 (FP)、高产栽培方式 (HY) 和超高产栽培方式 (SHY)。小区面积 200 m² (20 m × 10 m), 每个

收稿日期: 2019-10-30; 录用日期: 2020-03-18

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFD0300104); 黑龙江八一农垦大学青年创新人才项目 (CXRC2017001); 黑龙江八一农垦大学三横三纵支持计划 (TDJH201802); 黑龙江八一农垦大学校启动计划项目 (XDB-2016-02)。

作者简介: 郭晓红 (1980-), 女, 黑龙江省宁安市人, 副教授, 博士, 主要从事水稻栽培研究。E-mail: guoxh1980@163.com。

通讯作者: 吕艳东, E-mail: lvyd_1978@163.com。

处理 3 次重复, 随机排列。各处理间主要栽培措施和肥料运筹如表 1 所示。N 肥以基肥:分蘖肥:调节肥:穗肥=4:3:1:2 的比例施入, P 肥作为基肥一次性施入, K 肥以基肥:穗肥=6:4 的比例施入, 纳米硅复合肥和生物有机肥为基肥一次性施入。基肥、分蘖肥、拔节肥、穗肥分别于移栽前 12 d (2017 年 5 月 3 日和 2018 年 5 月 1 日)、返青期 (2017 年 5 月 20 日和 2018 年 5 月 19 日)、8.5 叶 (2017 年 6 月 28 日和 2018 年 6 月 26 日) 和 10.5 叶 (2017 年 7 月 8 日

和 2018 年 7 月 6 日) 施用。化学肥料分别为尿素 (N 46%)、磷酸二铵 (N 18%, P₂O₅ 46%)、硫酸钾 (K₂O 50%), 纳米硅复合肥 (有效硅 ≥ 55%)、生物有机肥 (N+P₂O₅+K₂O ≥ 5%; 有机质 ≥ 40%)。试验期间各处理水分管理单排单灌, 防止相互影响。播种日期分别为 2017 年 4 月 11 日、2018 年 4 月 9 日, 移栽日期分别为 2017 年 5 月 15 日、2018 年 5 月 13 日, 收获日期分别为 2017 年 9 月 28 日、2018 年 9 月 27 日。

表 1 不同栽培方式下肥料运筹及栽培措施

处理	育苗方式	行株距 (cm)	肥料管理 (kg · hm ⁻²)				
			化学肥料			生物有机肥	纳米硅复合肥
			N	P ₂ O ₅	K ₂ O	(商品量)	(商品量)
FP	常规育苗	均行 30 × 13.3	150	70	70	—	—
HY	常规育苗	均行 30 × 13.3	160	80	130	300	—
SHY	钵育苗	宽窄行 (20 ~ 40) × 13.3	180	90	180	450	15

1.3 测定内容与方法

1.3.1 干物质积累

分别在分蘖盛期、拔节期、齐穗期、成熟期, 每小区按平均茎蘖数取代表性植株 10 穴, 分蘖盛期和拔节期分为叶片、茎鞘 2 部分, 齐穗期和成熟期分叶片、茎、鞘、穗 4 部分, 置于烘箱 105 °C 下杀青 30 min, 80 °C 下烘至恒重, 测定各器官干物质质量。

1.3.2 叶面积

分别在分蘖盛期、拔节期、齐穗期, 根据平均茎蘖数取代表性植株 4 穴, 采用长宽系数法^[10](叶长 × 叶宽 × 0.7) 测定各时期叶面积, 在齐穗期测定剑叶、倒 2 叶、倒 3 叶、余叶的叶面积, 并计算群体生长特征, 各指标计算公式^[11]如下:

(1) 高效叶面积率 (%) = 有效茎蘖上 3 叶总叶面积 / 有效茎蘖总叶面积 × 100

(2) 表观输出率 (%) = [表观输出量 / 齐穗期叶 (茎、鞘) 干重] × 100

(3) 表观转化率 (%) = [表观输出量 / 成熟期籽粒干重] × 100

(4) 光合势 (10⁴ m² · d · hm⁻²) = (L₁+L₂) × (t₁-t₂)/2, 式中, L₁ 和 L₂ 为前后 2 次测定的叶面积。

(5) 群体生长率 (g · m⁻² · d⁻¹) = (W₂-W₁) /

(t₂-t₁), 式中, W₁ 和 W₂ 为前后 2 次测定的干物质重。

1.3.3 光合特征参数

在齐穗期叶片全展时, 选择晴朗无风、光照稳定的天气, 于 9:00 至 11:00 用 CIRAS-3 型光合仪 (美国) 测定剑叶中部净光合速率 (P_n)、气孔导度 (G_s)、胞间二氧化碳浓度 (C_i) 和蒸腾速率 (T_r), 重复 4 次。

1.3.4 产量及产量构成因素

收获时各小区根据平均成穗数取 10 穴, 考查每穗粒数、结实率、千粒重等性状。选择长势均匀的 4 点, 割取 5 m² 水稻, 脱谷、晒干、风选后测定实际产量。

1.4 数据处理与统计方法

用 Excel 2016 进行数据处理, 用 DPS 7.05 进行数据统计分析, 采用 LSD 法进行多重比较 (P<0.05)。

2 结果与分析

2.1 不同栽培方式对寒地水稻产量及其构成因素的影响

由表 2 可知, 2 年试验产量及产量构成因素变化趋势基本一致。不同栽培方式下水稻产量存在显

著差异,以 SHY 处理产量最高,2017 年和 2018 年实际产量较 FP 处理分别增加 24.78% 和 23.54%,差异达显著水平 ($P<0.05$)。其次是 HY 处理。从产量构成因素来看,SHY 处理较 FP 处理水稻穗

数、穗粒数均显著增加,2018 年结实率显著降低;HY 处理较 FP 处理水稻穗数、穗粒数均显著增加,但 2017 年结实率和千粒重差异不显著。SHY 和 HY 处理增产的主要原因是由于穗数和穗粒数的增加。

表 2 不同栽培方式下水稻产量及其构成因素的比较

年份	处理	穗数		结实率 (%)	千粒重 (g)	产量 (t·hm ⁻²)
		(10 ⁴ 穗·hm ⁻²)	穗粒数			
2017	FP	490.26c ± 19.57	71.15c ± 4.64	87.43b ± 2.18	25.11a ± 0.59	6.90c ± 0.49
	HY	495.41b ± 17.16	79.22b ± 1.99	88.36b ± 3.63	25.60a ± 0.24	7.58b ± 0.25
	SHY	590.61a ± 20.00	85.49a ± 3.03	90.68a ± 5.10	25.26a ± 0.34	8.61a ± 0.63
2018	FP	446.07c ± 14.47	74.20c ± 4.35	92.58a ± 5.05	23.70b ± 0.63	8.07c ± 0.41
	HY	492.43b ± 12.54	80.70b ± 3.29	88.46b ± 4.08	25.29a ± 0.67	9.10b ± 0.68
	SHY	603.95a ± 20.47	91.76a ± 3.73	87.18b ± 3.26	22.92b ± 0.42	9.97a ± 0.61

注:同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。下同。

2.2 不同栽培方式对寒地水稻叶面积指数的影响

由表 3 可知,不同栽培模式下水稻叶面积指数存在明显差异。从分蘖盛期至齐穗期,各处理叶面积指数随着生育进程的推进而增加,趋势均表现为 SHY>HY>FP,且在各时期 SHY 和 HY 处理与 FP 处理间的叶面积指数差异均达显著水平。齐穗期上三叶叶面积指数均表现为 SHY>HY>FP

的趋势,各处理间倒 2 叶叶面积指数均高于剑叶和倒 3 叶。HY 和 SHY 对水稻高效叶面积率有显著影响,2 年间分别较 FP 平均显著提高 6.31% 和 9.76%。可见,SHY 和 HY 在各时期能够保证较高的叶面积指数,并且可以有效提高水稻齐穗期高效叶面积率,从而增大水稻群体叶源生长优势。

表 3 不同栽培方式下水稻叶面积指数及齐穗期高效叶面积率的变化

年份	处理	叶面积指数			齐穗期高效叶面积指数			齐穗期高效 叶面积率 (%)
		分蘖盛期	拔节期	齐穗期	剑叶	倒 2 叶	倒 3 叶	
2017	FP	0.18c	3.25c	4.18c	1.09c	1.25c	0.84b	76.06c
	HY	0.22b	3.98b	5.49b	1.60b	1.72b	1.17a	81.72b
	SHY	0.28a	4.55a	6.30a	1.82a	2.23a	1.25a	84.05a
2018	FP	0.15c	3.05c	4.26c	1.12c	1.27c	0.87b	76.53c
	HY	0.21b	3.95b	5.13b	1.48b	1.59b	1.07a	80.49b
	SHY	0.25a	4.63a	6.04a	1.73a	2.13a	1.18a	83.43a

2.3 不同栽培方式对水稻剑叶光合特征参数的影响

不同栽培方式下水稻剑叶光合特征参数变化如表 4 所示,2 年间光合特征参数变化趋势较为一致。不同栽培方式下水稻净光合速率、气孔导度和蒸腾速率存在显著差异,变化趋势表现为

HY>SHY>FP,胞间 CO₂ 浓度则呈现相反趋势。HY 处理 2 年间净光合速率、气孔导度和蒸腾速率分别较 FP 平均显著提高 28.49%、59.72% 和 23.84%。SHY 处理 2 年间净光合速率、气孔导度和蒸腾速率分别较 FP 平均显著提高 11.91%、31.75% 和 12.85%。

表 4 不同栽培方式下齐穗期水稻剑叶光合特征参数变化

年份	处理	光合特征参数			
		净光合速率 P_n ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	气孔导度 G_s ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	胞间 CO_2 浓度 C_i ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	蒸腾速率 T_r ($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
2017	FP	21.15c	0.94c	290.25a	8.82c
	HY	26.28a	1.46a	263.25b	10.49a
	SHY	23.98b	1.21b	271.50b	9.64b
2018	FP	20.87c	0.92c	295.33a	8.35c
	HY	27.70a	1.51a	243.02c	10.75a
	SHY	23.05b	1.24b	289.23b	9.72b

2.4 不同栽培方式对寒地水稻光合势和群体生长率的影响

由图 1 可知, 在不同栽培方式下, 各生育阶段光合势在移栽至分蘖盛期最小, 其次是分蘖盛期至拔节期, 拔节期至齐穗期呈现最大值, 呈现逐渐增加的趋势。2 年间在 HY 和 SHY 下各生育阶段的光合势较 FP 平均分别显著提高 30.77% ~ 62.29%、

26.14% ~ 46.68% 和 13.71% ~ 22.94%; 各生育阶段群体生长率均表现为 SHY>HY>FP 的变化趋势, 且在拔节期至齐穗期群体生长率最高, 在移栽至分蘖盛期、分蘖盛期至拔节期和拔节期至齐穗期, 各处理之间群体生长率差异显著, 从齐穗期至成熟期, HY 和 SHY 群体生长率较 FP 高, 但差异并不显著。

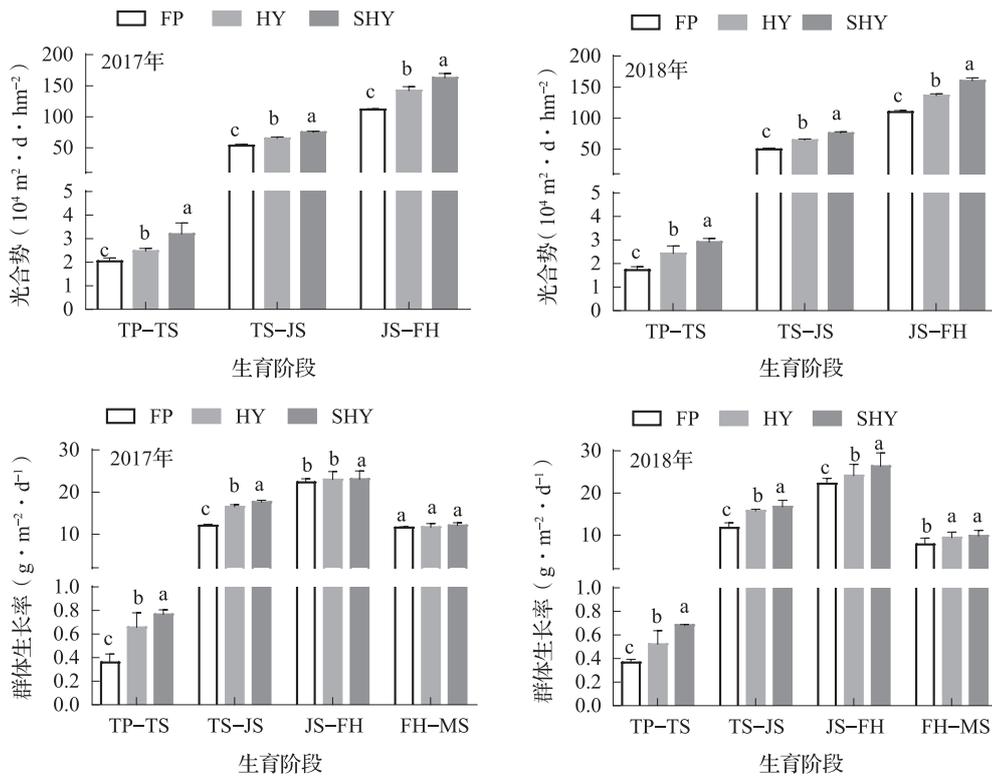


图 1 不同栽培方式下水稻光合势和群体生长率的变化

注: TP, 移栽期; TS, 分蘖盛期; JS, 拔节期; FH, 齐穗期; MS, 成熟期。

图柱上不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

2.5 不同栽培方式对寒地水稻群体干物质积累的影响

不同栽培方式下水稻群体干物质重变化如图 2 所示, 2 年间在各时期群体干物质重均在 SHY 下为最高, 其次是 HY, HY 和 SHY 在分蘖盛期、拔节

期、齐穗期和成熟期群体干物质重平均分别较 FP 显著提高 50.0% ~ 90.0%、38.7% ~ 45.8%、15.3% ~ 24.7% 和 14.9% ~ 22.9%。HY、SHY 处理尤其是拔节期之前, 群体干物质重显著提高, 为水稻高产或超高产搭建良好的前期物质基础。

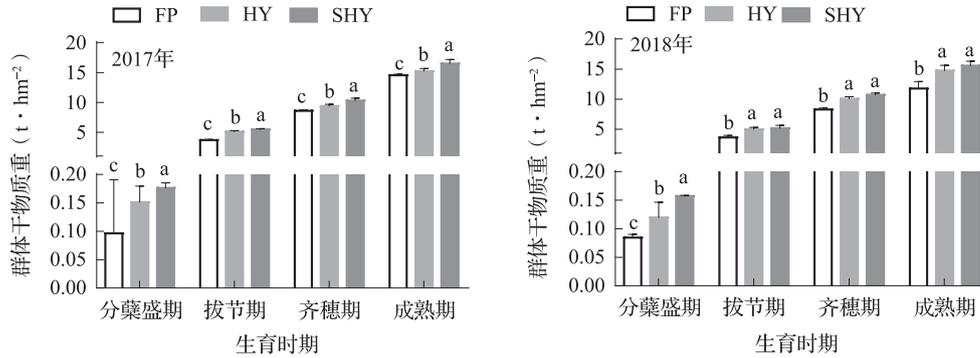


图 2 不同栽培方式水稻群体干物质重变化

2.6 不同栽培方式对寒地水稻干物质转运的影响

由表 5 可知, 不同栽培方式对水稻抽穗前贮藏物质的转运存在明显差异。水稻叶、茎、鞘干物质输出率、转化率在各处理间均表现为鞘 > 叶 > 茎, 各器官的输出率、转化率均表现为

SHY>HY>FP 的趋势, 且 SHY 均显著高于其它 2 种栽培方式。但各处理间茎的输出率和 2018 年转化率均为负值, 说明各处理均出现干物质二次充实回升现象。由此可见, 不同栽培方式下, HY 和 SHY 均能促进水稻干物质向籽粒中转运, 尤其是鞘向籽粒中的转运。

表 5 不同栽培方式下水稻叶、茎、鞘干物质的输出和转化 (%)

年份	处理	输出率			转化率		
		叶	茎	鞘	叶	茎	鞘
2017	FP	30.31b	-9.77b	32.23b	10.19b	10.19b	10.19b
	HY	30.73b	-8.36a	33.11b	10.88b	10.88b	10.88b
	SHY	31.00a	-7.18a	43.48a	14.39a	14.39a	14.39a
2018	FP	28.36b	-10.52b	28.06b	8.78b	-15.11c	11.3b
	HY	28.68b	-6.71a	29.97b	8.92a	-8.29b	13.01ab
	SHY	37.18a	-5.76a	41.00a	9.21a	-6.80a	14.24a

2.7 不同栽培方式下叶面积指数、光合物质生产与产量的关系

由表 6 可得, 不同栽培方式下水稻拔节期和齐穗期叶面积指数、齐穗期净光合速率、各阶段群体

生长率及拔节 - 齐穗期光合势整体上与成熟期干物质重、有效穗数、每穗粒数及产量呈显著或极显著正相关, 而与结实率和千粒重整体呈负相关, 但差异不显著。

表 6 不同栽培方式下叶面积指数、光合物质生产与产量的相关系数

指标	生育期	成熟期干物质重	有效穗数	穗粒数	结实率	千粒重	产量
叶面积指数	拔节期	0.97**	0.96**	0.96**	-0.61	-0.59	0.96**
	齐穗期	0.95**	0.96**	0.93**	-0.59	-0.61	0.95**
净光合速率	齐穗期	0.76*	0.59	0.70*	-0.51	-0.14	0.67*
群体生长率	分蘖盛期 - 拔节期	0.96**	0.93**	0.93**	-0.6	-0.52	0.94**
	拔节期 - 齐穗期	0.87**	0.85**	0.95**	-0.53	-0.59	0.86**
	齐穗期 - 成熟期	0.86**	0.72*	0.60	-0.58	-0.08	0.72*
光合势	拔节期 - 齐穗期	0.96**	0.96**	0.95**	-0.60	-0.60	0.96**

注：*、** 分别表示相关性达到 5% 和 1% 显著水平。

3 讨论

本研究结果表明，与农民栽培方式相比，高产栽培方式和超高产栽培方式均能通过提高穗数和穗粒数来实现产量的提高，尤以超高产栽培方式增产最高。此研究结果与前人研究结果相符。有研究表明，适当减少基肥氮用量，增加蘖肥和穗肥氮用量等氮后移措施，可提高分蘖数，增加成穗率和每穗实粒数^[12-13]。另有研究表明，有机无机肥配施能够满足水稻生育前期的速效养分的需求，促进有效穗数的增加，进而使水稻产量增加^[14-15]。除此，薛亚光等^[16]也认为水稻增产增效栽培和超高产栽培均是通过穗数增加来提高产量。本试验中高产栽培方式和超高产栽培方式较农民栽培方式相比，除增加了蘖肥和穗肥氮用量外，还增施了生物有机肥和复合肥，且超高产栽培方式又采用了钵苗摆栽及宽窄行栽培技术，这些措施的集成与优化是水稻获得高产的基础。

水稻能进行有效的光合物质生产是实现高产的重要保障。光合物质生产是水稻有机物质的来源，同时也是水稻产量形成的重要基础。叶面积指数、光合速率、光合势和群体生长率等作为反映水稻群体光合生产能力的重要指标，尤其是叶面积指数可以反映光合源数量的多少，与产量密切相关。张洪程等^[17]研究认为较大的光合势和群体生长率能够增加水稻群体干物质积累量，从而保证群体质量较高。邢智鹏等^[18]研究认为水稻群体生长率变化为生育前期高、后期低，在齐穗期达到峰值，成熟期直线下降。杨惠杰等^[19]对水稻在超高产栽培条件下的研究也得出相同的结论。本研究结果表明，在高产栽培和超高产栽培方式下，水稻各时期光合势、净光合速率、群体生长率（分蘖盛期 - 拔

节期、拔节期 - 齐穗期）均显著高于当地农民栽培方式，说明增施基肥生物有机肥和复合肥，增加蘖肥和穗肥氮用量，以及采用钵苗摆栽及宽窄行栽培技术，能够有效改善水稻生育后期田间通风透光条件，个体生长潜力得到充分发挥，因此，二者均有较高的叶面积指数，增强了植株叶片的光合能力，促进了光合性能，为后期达到高效物质生产奠定了基础，这与前人研究结果基本一致。

水稻的光合速率不仅受品种自身特性影响，外界因素和生长环境对水稻光合速率也有影响^[20]。本研究结果表明，高产栽培和超高产栽培方式在齐穗期的净光合速率、气孔导度和蒸腾速率均较当地农民栽培方式有显著提高，胞间 CO₂ 浓度则显著降低。有研究表明^[21]，胞间 CO₂ 浓度值越低，浓度差就越大，导致较多的二氧化碳进入到气孔当中，从而提高光合速率，即较低的胞间 CO₂ 浓度可以提高光合速率，这与本研究结果基本一致。

水稻干物质生产的 80% ~ 90% 都来自于光合作用，且水稻群体质量和产量形成也取决于光合物质的积累、输出和转化是否合理。抽穗后至成熟期的干物质积累量是衡量水稻群体质量的重要指标之一^[22]。吴桂成等^[4]研究认为，生育前期和中期保持较高的群体干物质质量，是保证水稻高产的关键。薛亚光等^[23]研究认为，高产栽培和超高产栽培方式可以显著提高水稻从齐穗至成熟期的群体干物质质量。张洪程等^[17, 24]研究也指出，在超高产栽培方式下，提高拔节期至成熟期干物质积累量对促进水稻高产有关键作用。本研究结果表明，在整个生育过程中，通过栽培措施的集成与优化，均能有效提高各阶段干物质积累量，尤其是齐穗后群体干物质积累量，整个生育期中，齐穗至成熟期是水稻群体干物质积累量迅速提升的阶段，随着成熟期水稻

群体干物质质量的增加,产量水平显著提高。由此可知,在保证生育前期干物质生产量适宜范围的基础上,通过提高齐穗后高效物质生产量,保证水稻在齐穗后干物质持续生产,以高效率的物质生产形成高质量的水稻高产群体,是高产栽培和超高产栽培方式提高物质生产能力和产量的物质基础。

籽粒灌浆是产量形成的直接过程,灌浆物质来自抽穗后的光合产物以及叶、茎、鞘中贮藏物质的分配。“库大、源足”是水稻高产的重要基础^[25],干物质输出与转化是衡量水稻源库关系是否协调的重要指标^[26]。龚金龙等^[27]研究表明,高产水稻在生育前期叶、茎、鞘中贮藏的光合产物多,则在后期能较多的向穗部运转。多项研究表明^[28-29],高产水稻群体的茎鞘干重在灌浆后期会出现二次增重,即茎鞘干物重在抽穗后仍有回升的现象。本研究结果表明,在不同栽培方式下,茎干物质输出量均为负值,说明茎干物质在后期光合产物仍有所积累,而鞘的干物质则始终向外输出,茎、鞘干物质输出率和物质输出转化率在高产栽培和超高产栽培方式中有所提高,尤其是超高产栽培方式尤为显著。由此可知,在高产栽培方式和超高产栽培方式中,水稻的叶、茎、鞘向穗部输出更多的光合产物。本研究中水稻各器官输出率及物质输出转换率在高产栽培和超高产栽培方式得到显著提高,有利于源库流关系的协调,在扩大库容的基础上,又保证了“源”的供给,达到了更高水平的库源平衡,从而提高产量。

4 结论

综上所述,不同栽培方式下水稻产量、光合物质生产特性均存在显著差异。高产栽培方式和超高产栽培方式提高了叶片光合性能,显著提高了物质生产能力,促进物质由源向库的转化,从而提高了寒地水稻产量,为寒地水稻高产栽培方式提供理论支持。

参考文献:

- [1] 李大林,刘成才,李修平,等. 黑龙江省水稻生产存在的问题与建议[J]. 黑龙江农业科学, 2015(1): 23-26.
- [2] 赵黎明,李明,郑殿峰,等. 灌溉方式与种植密度对寒地水稻产量及光合物质生产特性的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(6): 159-169.
- [3] 吴培,陈天晔,袁嘉琦,等. 施氮量和直播密度互作对水稻产量形成特征的影响[J]. 中国水稻科学, 2019, 33(3): 269-281.
- [4] 吴桂成,张洪程,戴其根,等. 南方粳型超级稻物质生产积累及超高产特征的研究[J]. 作物学报, 2010, 36(11): 1921-1930.
- [5] 朱德峰,张玉屏,陈惠哲,等. 中国水稻高产栽培技术创新与实践[J]. 中国农业科学, 2015, 48(17): 3404-3414.
- [6] 孟维韧,全东兴,金成海,等. 栽培措施对不同水稻产量影响[J]. 东北农业科学, 2016, 41(6): 26-30.
- [7] Katsura K, Maeda S, Horied T, et al. Analysis of yield attributes and crop physiological traits of Liangyoupeijiu, a hybrid rice recently bred in China[J]. Field Crops Research, 2007, 103: 170-177.
- [8] 曾勇军,石庆华,潘晓华,等. 施氮量对高产早稻氮素利用特征及产量形成的影响[J]. 作物学报, 2008, 34(8): 1409-1416.
- [9] 闫川,丁艳锋,王强盛,等. 行株距配置对水稻茎秆形态生理与群体生态的影响[J]. 中国水稻科学, 2007, 21(5): 530-536.
- [10] 吕艳东,胡月,李猛,等. 栽培模式对寒地粳稻产量及养分吸收积累的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2019(5): 187-193.
- [11] 李应洪,王海月,吕腾飞,等. 不同秧龄下机插方式与密度对杂交稻光合生产及产量的影响[J]. 中国水稻科学, 2017, 31(3): 265-277.
- [12] 石丽红,纪雄辉,朱校奇,等. 提高超级杂交稻库容量的施氮数量和时期运筹[J]. 中国农业科学, 2010, 43(6): 1274-1281.
- [13] 程建平,张旅峰,吴建平,等. 播种量与氮肥运筹方式对直播早稻生物学特性和产量的影响[J]. 湖北农业科学, 2010, 49(10): 2362-2365.
- [14] Kim H, Kang H. The impacts of excessive nitrogen additions on enzyme activities and nutrient leaching in two contrasting forest soils[J]. Journal of Microbiology, 2011, 49(3): 369-375.
- [15] 陈猛猛,张士荣,吴立鹏,等. 有机-无机配施对盐渍土壤水稻生长及养分利用的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(6): 311-325.
- [16] 薛亚光,王康君,颜晓元,等. 不同栽培模式对杂交粳稻常优3号产量及养分吸收利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(23): 4781-4792.
- [17] 张洪程,吴桂成,吴文革,等. 水稻“精苗稳前、控蘖优中、大穗强后”超高产定量化栽培方式[J]. 中国农业科学, 2010, 43(13): 2645-2660.
- [18] 邢志鹏,曹伟伟,钱海军,等. 播期对不同机插稻产量及光合物质生产特性的影响[J]. 核农学报, 2015, 29(3): 528-537.
- [19] 杨惠杰,李义珍,杨仁崔,等. 超高产水稻的干物质生产特性研究[J]. 中国水稻科学, 2001, 15(4): 265-270.
- [20] 胡继杰,朱练峰,钟楚,等. 增氧模式对水稻光合特性及产量的影响[J]. 中国水稻科学, 2017, 31(3): 278-287.

- [21] 王会提, 曾凡江, 张波, 等. 不同种植方式下柞柳光合生理参数光响应特性研究 [J]. 干旱区地理, 2015, 38 (4): 753-762.
- [22] 谢成林, 周兴涛, 姚义. 不同机插方式水稻高产群体特征及其产量研究 [J]. 作物杂志, 2014 (3): 109-112.
- [23] 薛亚光, 葛立立, 王康君, 等. 不同栽培方式对杂交粳稻群体质量的影响 [J]. 作物学报, 2013, 39 (2): 280-291.
- [24] 张洪程, 吴桂成, 戴其根, 等. 水稻氮肥精确后移及其机制 [J]. 作物学报, 2011, 37 (10): 1837-1851.
- [25] 张志兴, 李忠, 陈军, 等. 超级稻“Ⅱ优航1号”和“Ⅱ优航2号”源、库、流特性分析 [J]. 中国生态农业学报, 2011, 19 (2): 326-330.
- [26] 陈健晓, 王效宁, 林朝上, 等. 钮翠绿叶面肥对超级早稻产量形成的影响 [J]. 广东农业科学, 2013, 40 (1): 57-59, 65.
- [27] 龚金龙, 邢志鹏, 胡雅杰, 等. 籼、粳超级稻光合物质生产与转运特征的差异 [J]. 作物学报, 2014, 40 (3): 497-510.
- [28] 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 [J]. 作物学报, 1997, 23 (1): 82-88.
- [29] 庄宝华, 林菲, 洪植蕃. 两系亚种间杂交稻结实生理调节的研究 [J]. 中国水稻科学, 1994, 8 (2): 111-114.

Effects of cultivation methods on yield and photosynthetic characteristics of rice in cold region

GUO Xiao-hong, LAN Yu-chen, HU Yue, WANG He-ying, XU Ling-qi, SUN Guang-xu, JIANG Hong-fang, LÜ Yandong* (College of Agronomy, Heilongjiang Bayi Agricultural University/Heilongjiang Provincial Key Laboratory of Modern Agricultural Cultivation and Crop Germplasm Improvement, Daqing Heilongjiang 163319)

Abstract: The effects of different cultivation methods on the yield and photosynthetic characteristics of rice in cold region were discussed, which provided theoretical and practical basis for the construction of high yield cultivation technology system of rice in cold region. In 2017 ~ 2018, under the field conditions, three cultivation methods were set up, i.e. local farmers' cultivation method (FP), high-yield cultivation method (HY) and super-high-yield cultivation method (SHY), with japonica rice varieties as the experimental materials. The yield and yield composition, leaf area index, photosynthetic characteristic parameters, population growth characteristics, dry matter accumulation and transport of rice in different cultivation methods were studied with FP as the control. The results showed that, compared with FP, the yield increase of HY and SHY was 9.85% ~ 24.78% and 12.76% ~ 23.54% in two years, respectively. HY and SHY significantly increased the leaf area index and efficient leaf area rate of rice in each period. HY and SHY significantly increased the net photosynthetic rate, stomatal conductance, transpiration rate, and reduced the intercellular CO₂ concentration. The photosynthetic potential and population of HY and SHY from the tillering stage to the full heading stage were significantly higher than those of FP. HY and SHY significantly increased the dry matter weight of rice, the material export rate and transformation rate of leaves, stems and sheaths. In summary, high-yield cultivation methods and super-high-yield cultivation methods can achieve high yields of rice by improving population growth structure.

Key words: cultivation method; cold region; rice; yield; photosynthetic characteristics; dry matter