

引用格式:

袁紫依, 戴锦清, 龙攀, 郑华斌, 傅志强, 陈洋, 喻娟, 张秋平. 厢宽和种植密度对双季稻光合特性及产量的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2025, 51(6): 10–17.

YUAN Z Y, DAI J Q, LONG P, ZHENG H B, FU Z Q, CHEN Y, YU J, ZHANG Q P. Effects of ridge width and planting density on photosynthetic characteristics and yield in a double-cropped rice system[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2025, 51(6): 10–17.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



厢宽和种植密度对双季稻光合特性及产量的影响

袁紫依, 戴锦清, 龙攀, 郑华斌, 傅志强, 陈洋, 喻娟, 张秋平*

(湖南农业大学农学院, 湖南 长沙 410128)

摘要: 为探究厢作模式和种植密度对双季稻光合特性及产量的影响, 以‘株两优819’(早稻)和‘泰优390’(晚稻)为供试材料, 采用随机区组试验设计, 设置CP(常规密度、平作)、ZP(种植密度增加20%、平作)、C1(常规密度, 1 m厢宽)、Z1(种植密度增加20%、1 m厢宽)、C2(常规密度, 2 m厢宽)、Z2(种植密度增加20%、2 m厢宽)6个处理, 对各处理双季稻的光合特性、叶面积指数及产量进行比较分析。结果表明: Z1处理早、晚稻各个生育期的叶绿素相对含量(SPAD值)均高于其他处理的; 增加种植密度处理和厢作栽培均能提高叶面积指数; 早稻产量与孕穗期倒2叶的胞间CO₂浓度(C_i)、蒸腾速率(T_r)以及乳熟期剑叶的净光合速率(P_n)、C_i、气孔导度(G_s)呈显著正相关, 与乳熟期的T_r呈极显著正相关; 晚稻产量与抽穗期剑叶的P_n以及乳熟期剑叶的P_n、C_i呈显著正相关, 与乳熟期的T_r呈极显著正相关; 与CP处理相比, Z1处理可提高水稻SPAD值、P_n、C_i、G_s、T_r和叶面积指数; Z1处理有利于提高有效穗数、结实率和产量, 相较于CP处理, 早稻产量提高了14.67%, 晚稻产量提高了11.92%。综合分析, 在垄厢栽培模式下, 采用1 m厢宽、种植密度增加20%的处理有利于提高水稻的光合特性和水稻产量。

关键词: 双季稻; 厢宽; 种植密度; 光合特性; 产量

中图分类号: S511.06

文献标志码: A

文章编号: 1007–1032(2025)06–0010–08

Effects of ridge width and planting density on photosynthetic characteristics and yield in a double-cropped rice system

YUAN Ziyi, DAI Jinqing, LONG Pan, ZHENG Huabin, FU Zhiqiang, CHEN Yang, YU Juan, ZHANG Qiuping*

(College of Agronomy, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China)

Abstract: To investigate the effects of ridge-furrow planting system and planting density on photosynthetic characteristics and yield in a double-cropping rice system, a field experiment was conducted using the early-season cultivar ‘Zhuliangyou 819’ and the late-season cultivar ‘Taiyou 390’. A randomized block experimental design was employed with six treatments: CP(conventional density, flat cropping), ZP(density increased by 20%, flat cropping), C1(conventional density, 1-m ridge width), Z1(density increased by 20%, 1-m ridge width), C2(conventional density, 2-m ridge width), and Z2(density increased by 20%, 2-m ridge width). Photosynthetic characteristics, leaf area index and yield were compared and analyzed across all treatments. The results showed that treatment Z1 maintained significantly higher relative chlorophyll content(SPAD value) than those of other treatments across all growth stages in both early and late rice. Increased planting density and ridge-furrow planting system independently contributed to a higher leaf area index. The early rice yield showed a significant positive correlation with the intercellular CO₂ concentration(C_i) and transpiration rate(T_r) of the second-top leaf during the booting stage, as well as with the net photosynthetic rate(P_n), C_i, and stomatal conductance(G_s) of the flag leaf during the milky stage, while it exhibited a highly significant positive

收稿日期: 2025–01–18

修回日期: 2025–05–26

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD2300305)

作者简介: 袁紫依(2000—), 女, 湖南临湘人, 硕士研究生, 主要从事作物高产高效栽培研究, 864857481@qq.com; *通信作者, 张秋平, 博士, 副教授, 主要从事作物栽培与抗病分子机理研究, zhangqiuping@hunau.edu.cn

correlation with T_r during the milky stage. The late rice yield was significantly positively correlated with the P_n of the flag leaf at the heading stage and with the P_n and C_i of the flag leaf during the milky stage, while demonstrating a highly significant positive correlation with T_r during the milky stage. Compared to CP treatment, Z1 treatment increased SPAD value, P_n , C_i , G_s , T_r and leaf area index. Z1 treatment was beneficial to increase the effective panicle number and seed setting rate, thereby increasing rice yield. Compared to CP treatment, the yield of early rice increased by 14.67% and the yield of late rice increased by 11.92%. Comprehensive analysis showed that, for ridge-furrow planting, implementing a 1-m ridge width coupled with a 20% density increase could effectively improve the photosynthetic characteristics of rice and rice yield.

Keywords: double cropping rice; ridge width; planting density; photosynthetic characteristics; yield

稻米是我国主要的粮食作物之一, 全国60%以上的人口以大米为主食^[1]。南方双季稻区作为我国水稻生产的主产区, 对确保我国的粮食安全具有深远的意义^[2-3]。近年来, 随着稻田综合种养模式的发展, 厢作栽培技术在水稻生产领域得到了广泛的推广和应用^[4]。针对湖南地区晚稻季出现的干旱问题, 采取厢作栽培方式可以实现节水抗旱的效果^[5-6]。水稻产量受多种因素影响, 其中光合作用是物质积累和产量形成的核心过程。群体结构直接影响光能分布和利用效率, 而厢宽和种植密度是调控群体结构的重要农艺措施。因此, 研究厢宽和种植密度对双季稻光合特性及产量的影响, 对优化种植模式、提高产量具有重要意义。研究发现, 与常规平作相比, 厢作栽培能提高土壤的通气性和透光性, 提高稻田对水分的利用效率, 改变土壤的水分轨迹, 影响肥料、温度、空气的流动规律, 促进稻田系统物质与资源的生态循环^[7], 有利于水稻群体与根系的生长发育^[8], 提高水稻抗病虫和抗倒伏的能力^[9], 增加土壤中速效养分的含量, 提升水稻产量与品质^[10]。

合理密植是水稻丰产的重要举措, 在保证单穗质量稳定的基础上, 通过适当增加种植密度和提高群体数量, 可达到增产的目的^[11-12]。有研究表明, 适度增加种植密度可提高群体光合速率和产量^[13], 但密度过高会导致光抑制和呼吸消耗增加, 反而降低产量^[14]; 适宜的种植密度有利于水稻个体的生长发育, 提高叶面积指数和剑叶的净光合效率^[15-17]。因此, 探索适宜种植密度对优化群体光合特性至关重要。尽管厢宽和种植密度对水稻光合特性及产量的影响已得到广泛研究, 但两者间的交互作用及其对双季稻的影响尚未完全明确。基于此, 本研究对不同厢宽和种植密度处理下双季稻的生长情况和产量进行比较分析, 以探索厢宽和种植密度的最优组合方式, 为双季稻垄厢栽培技术的应用提供参考。

1 试验地概况

试验地点位于衡阳县西渡镇梅花村(26°59'42"N, 112°23'19"E), 属亚热带季风气候, 温暖湿润。该地年均降水量1 452 mm, 年平均气温约17.9 °C, 1月平均气温4.6 °C, 7月平均气温30.3 °C。耕前土壤中的碱解氮、有效磷、速效钾含量分别为147.35、15.89、124.35 mg/kg, 有机质、全氮、全磷、全钾含量分别为30.05、1.66、0.41、36.83 g/kg, 土壤pH为6.82。

2 材料与方法

2.1 供试材料

早稻为‘株两优819’, 株型紧凑适中, 茎秆中粗, 长势旺, 分蘖力强, 成穗率高, 抽穗整齐, 成熟落色好; 晚稻为‘泰优390’, 株型适中, 生长势强, 植株整齐度一般, 叶姿平展, 叶鞘绿色, 稃尖秆黄色, 短顶芒, 叶下禾, 后期落色好。

2.2 试验设计

本试验采用随机区组设计, 设置厢宽和种植密度2个试验因素, 厢宽设1 m厢宽(1)、2 m厢宽(2)、平作(P)3个水平, 平作栽培插秧后灌水至水层深3~5 cm; 厢作栽培保持水满厢沟, 与平作栽培水面齐平; 种植密度设为常规密度(C)和种植密度增加20%(Z)2个水平。6个处理分别为CP(常规密度、平作)、ZP(种植密度增加20%、平作)、C2(常规密度、2 m厢宽)、Z2(种植密度增加20%、2 m厢宽)、C1(常规密度、1 m厢宽)、Z1(种植密度增加20%、1 m厢宽), 每个处理3次重复, 共18个小区, 小区面积为42 m²。早稻常规株行距为13 cm×25 cm, 种植密度增加20%处理的株行距为11 cm×25 cm; 晚稻常规株行距为14 cm×25 cm, 种植密度增加20%处理的株行

距为12 cm×25 cm。1 m厢宽处理的沟宽15 cm, 沟深15 cm; 2 m厢宽处理的沟宽25 cm, 沟深15 cm; 早、晚稻的小区设计和移栽方式均一致。早稻移栽时间为4月25日, 收获时间为7月9日; 晚稻移栽时间为7月16日, 收获时间为10月18日。早稻整个生育期施纯N 150 kg/hm², P₂O₅ 75 kg/hm², K₂O 120 kg/hm², 晚稻整个生育期施纯N 180 kg/hm², P₂O₅ 90 kg/hm², K₂O 144 kg/hm²。氮肥为尿素(含N 46%), 磷肥为过磷酸钙(含P₂O₅ 12%), 钾肥为氯化钾(含K₂O 60%)。磷肥和钾肥均以基肥的形式一次施入, 氮肥中基肥、分蘖肥、穗肥的施用比例为5:3:2。田间病虫害防治按当地高产栽培技术进行, 早、晚稻均采用手割收获。

2.3 测定项目与方法

2.3.1 叶绿素相对含量的测定

在水稻孕穗期、抽穗期和乳熟期的晴天9:00—11:30, 每个小区选取具有代表性的10片叶(孕穗期测倒2叶, 抽穗期和乳熟期测剑叶), 利用叶绿素计SPAD-502测量叶绿素相对含量(SPAD值)。

2.3.2 叶面积指数的测定

分别于水稻孕穗期、抽穗期和乳熟期, 每个小区取5穴长势一致的植株, 测量每穴水稻所有绿色叶片的长和宽, 计算单株总叶面积, 取平均值计为该小区水稻单株总叶面积, 并根据插秧密度计算该处理水稻叶面积指数。

2.3.3 光合速率的测定

在水稻孕穗期、抽穗期和乳熟期的晴天9:00—11:30, 每个小区选取具有代表性的5片叶, 采用LI-6800XT光合测量仪测定叶片(孕穗期为倒2叶, 抽穗期和乳熟期为剑叶)的净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间CO₂浓度(C_i)和蒸腾速率(T_r)。光合测量仪设置的参数为: 湿度60%、光照强度1 200 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 、CO₂浓度400 $\mu\text{mol}/\text{mol}$ 。

2.3.4 产量及产量构成因子的测定

于水稻收获前1 d, 每小区按平均有效穗数选取8穴代表性植株进行考种, 测定有效穗数、每穗实粒数、空瘪粒数、千粒质量、结实率, 计算理论产量。在水稻收获当天, 每个小区随机割取2个2 m²的样方, 脱粒后晒干风选, 并称量每个小区的稻谷干质量, 计算实际产量。

2.4 数据处理与分析

采用Microsoft Excel 2019进行数据处理及绘图; 采用IBM SPSS Statistics 26.0进行方差分析和显著性检验, 选用Duncan法进行多重比较($P<0.05$)。

3 结果与分析

3.1 不同厢宽和种植密度对双季稻光合特性的影响

3.1.1 不同厢宽和种植密度对双季稻SPAD值的影响

从表1可知, 早稻各处理的SPAD值在孕穗到抽穗过程中呈上升趋势, 到乳熟期下降。孕穗期, Z1、C1、ZP、Z2、C2、CP的SPAD值依次降低, 但差异不显著; 抽穗期, Z1处理的SPAD值最高, CP处理的SPAD值最低, Z1处理较CP处理提高了4.55%, 且差异显著, 其他处理间差异不显著; 乳熟期Z1处理的SPAD值最高, 显著高于CP、ZP、C2处理的, 其他处理间差异不显著。3个生育期, CP处理的SPAD值均最小, 与CP处理的相比, 其他处理的SPAD值提高了3.58%~6.26%。

表1 早、晚稻季不同生育时期各处理水稻的SPAD值
Table 1 SPAD values of rice under different treatments across different growth stages in early and late seasons

季别	处理	孕穗期	抽穗期	乳熟期
早稻	C2	40.78±1.26	(41.74±1.22)ab	(35.73±0.31)b
	Z2	41.58±0.83	(42.66±0.33)ab	(36.30±0.82)ab
	C1	41.99±0.48	(42.37±0.09)ab	(37.27±1.31)ab
	Z1	42.19±0.95	(42.93±0.56)a	(37.83±0.55)a
	CP	40.73±2.45	(41.06±0.51)b	(35.60±1.41)b
	ZP	41.61±1.48	(42.24±0.44)ab	(35.70±0.98)b
晚稻	C2	(40.54±0.93)ab	(42.65±0.44)ab	(34.70±0.90)ab
	Z2	(40.56±0.55)ab	(42.68±0.94)ab	(35.88±1.77)ab
	C1	(41.26±0.63)ab	(43.21±0.75)ab	(36.68±0.66)ab
	Z1	(42.12±0.54)a	(43.93±0.59)a	(37.76±1.69)a
	CP	(40.38±0.50)b	(41.99±0.42)b	(34.26±0.40)b
	ZP	(40.65±0.15)ab	(42.08±1.61)b	(35.51±1.54)ab

注: 不同小写字母表示相同季别相同生育期不同处理间的差异有统计学意义($P<0.05$)。

晚稻季, 孕穗期以Z1处理的SPAD值最高, CP处理的最低, Z1较CP的高4.31%, 且差异显著, 其他处理间差异不显著; 抽穗期Z1处理的SPAD值最高, 显著高于CP、ZP处理的, 其他处理间无显著差异; 乳熟期Z1处理的SPAD值最高, CP处理的最低, Z1较CP提高了10.22%, 且差异显著, 其他处理间差

异不显著。3个生育期, CP处理的SPAD值均最小, 与CP处理的相比, 其他处理的SPAD值提高了4.31%~10.22%

3.1.2 不同厢宽和种植密度对双季稻净光合速率的影响

由图1(a)可知, 早稻季各处理叶片的 P_n 随生育进程的推进呈逐渐下降的趋势, 乳熟期的 P_n 最低。孕穗期, 在常规种植密度条件下, C2较CP处理显著提高了9.52%, C1较CP处理显著提高了9.58%; 在种植密度增加20%条件下, Z1较ZP处理显著提高了11.59%; 平作条件下, ZP较CP提高了2.97%, 但差异不显著。抽穗期, 在常规种植密度条件下, C2较CP处理显著提高了15.35%, C1较CP处理显著提高了27.28%; 在种植密度增加20%条件下, Z2较ZP处理显著提高了17.05%, Z1较ZP处理显著提高了

24.27%。乳熟期, 在常规种植密度条件下, C2较CP处理显著提高了10.31%, C1较CP处理显著提高了20.13%; 在种植密度增加20%条件下, Z2较ZP处理显著提高了9.61%, Z1较ZP处理显著提高了18.62%。

由图1(b)可知, 晚稻季, 抽穗期的叶片 P_n 最高, 乳熟期的最低。孕穗期, 在常规种植密度条件下, C2较CP处理显著提高了10.85%, C1较CP处理显著提高了22.00%; 在种植密度增加20%条件下, Z2较ZP处理显著提高了7.83%, Z1较ZP处理显著提高了19.05%; 在同一厢宽条件下, 不同种植密度处理间的差异不显著。抽穗期, 在2 m厢宽条件下, Z2较C2显著提高了7.55%; 在同一种植密度条件下, 不同厢宽处理间差异不显著。乳熟期, 在常规种植密度条件下, C1较CP处理显著提高了23.58%; 在种植密度增加20%条件下, Z1较ZP处理显著提高了21.60%; 在1 m厢宽条件下, Z1较C1显著提高了9.87%。

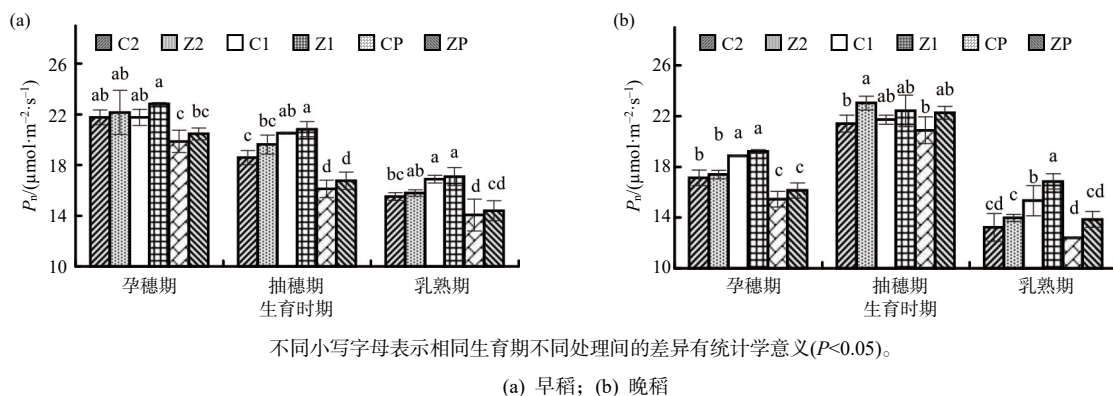


图1 不同处理下早稻和晚稻不同生育期的净光合速率

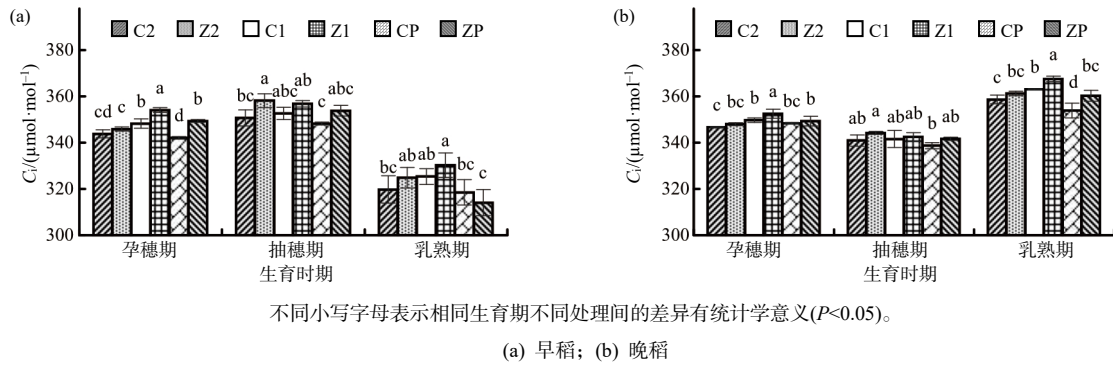
Fig. 1 Net photosynthetic rates of early season rice and late season rice at different growth stages under different treatments

3.1.3 不同厢宽和种植密度对双季稻胞间 CO_2 浓度的影响

由图2(a)可知, 早稻的胞间 CO_2 浓度(C_i)在抽穗期最高, 乳熟期最低。孕穗期, 在常规种植密度条件下, C2较CP处理提高了0.49%, 但差异不显著, C1较CP处理显著提高了1.80%; 在种植密度增加20%条件下, Z2较ZP处理显著降低了1.01%, Z1较ZP处理显著提高了1.35%; 1 m厢宽条件下, Z1较C1显著提高了1.67%; 平作条件下, ZP较CP显著提高了2.13%。抽穗期, 2 m厢宽条件下, Z2较C2显著提高了2.14%; 在同一种植密度条件下, 不同厢宽处理间差异不显著。乳熟期, 在种植密度增加20%条件下, Z2较ZP处理显著提高了3.44%, Z1较ZP处

理显著提高了5.17%; 在同一厢宽条件下, 不同种植密度处理间差异不显著。

由图2(b)可知, 晚稻季各处理的 C_i 在乳熟期最高, 抽穗期最低。孕穗期, 在种植密度增加20%条件下, Z1较ZP处理显著提高了0.91%; 在1 m厢宽条件下, Z1较C1显著提高了0.79%。抽穗期Z2处理的 C_i 最高, CP处理的最低, Z2较CP提高了1.63%, 且差异显著, 其他各处理间的差异不显著; 乳熟期, 在常规种植密度条件下, C2较CP处理显著提高了1.34%, C1较CP处理显著提高了2.60%; 在种植密度增加20%条件下, Z1较ZP处理显著提高了2.01%; 在平作条件下, ZP较CP显著提高了1.81%。

图2 不同处理下早稻和晚稻不同生育期的胞间CO₂浓度Fig. 2 Intercellular CO₂ concentrations in early season rice and late season rice at different growth stages under different treatments

3.1.4 不同厢宽和种植密度对双季稻气孔导度的影响

由图3(a)可以看出, 孕穗期, ZP、Z2、C2、Z1、C1、CP处理的 G_s 依次降低, 但是各处理间差异不显著; 抽穗期, 在种植密度增加20%条件下, Z2较ZP处理显著提高了34.08%, Z1较ZP处理显著提高了31.09%; 在同一厢宽条件下, 不同种植密度处理间的差异不显著。乳熟期, ZP、Z2、C2、Z1、C1、CP处理的 G_s 依次降低, 但是各处理间的差

异不显著。

由图3(b)可以看出, 孕穗期, Z2、C2、Z1、ZP、C1、CP处理的 G_s 依次降低, 但是各处理间的差异不显著; 抽穗期, Z2、Z1、ZP、C1、C2、CP处理的 G_s 依次降低, 各处理间差异也不显著; 乳熟期, 在种植密度增加20%条件下, Z2较ZP处理显著提高了18.08%, Z1较ZP处理显著提高了19.20%; 在同一厢宽条件下, 不同种植密度处理间的差异不显著。

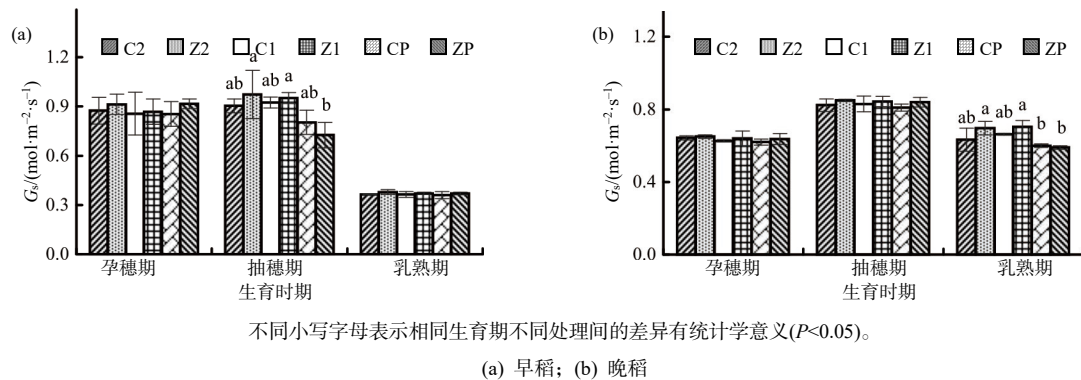


图3 不同处理下早稻和晚稻不同生育时期的气孔导度

Fig. 3 Stomatal conductance of early season rice and late season rice at different growth stages under different treatments

3.1.5 不同厢宽和种植密度对双季稻蒸腾速率的影响

由图4(a)可以看出, 早稻季各处理的蒸腾速率(T_r)随生育进程的推进呈逐渐下降的趋势。孕穗期 Z1处理的 T_r 最高, CP处理的最低, Z1较CP显著提高了7.74%, 其他各处理间的差异不显著; 抽穗期 Z2处理的 T_r 最高, 显著高于CP、ZP处理的, 较CP、ZP分别提高了14.07%、14.28%, 其他处理间的差异不显著; 乳熟期, 在1 m厢宽条件下, Z1较C1显著提高了4.67%; 在同一种植密度条件下, 不同厢宽处理间的差异不显著。

由图4(b)可以看出, 晚稻季各处理的 T_r 在抽穗期最高, 孕穗期最低。孕穗期, Z2、C2、Z1、C1、CP、ZP处理的 T_r 依次降低, 各处理之间的差异不显著; 抽穗期Z2处理的 T_r 最高, 显著高于CP处理的, Z2较CP提高了10.70%, 其他处理间的差异不显著; 乳熟期, 在常规种植密度条件下, C2较CP处理显著提高了16.62%, C1较CP处理显著提高了22.53%; 在种植密度增加20%条件下, Z2较ZP处理显著提高了11.71%, Z1较ZP处理显著提高了20.49%; 在同一厢宽条件下, 不同种植密度处理间的差异不显著。

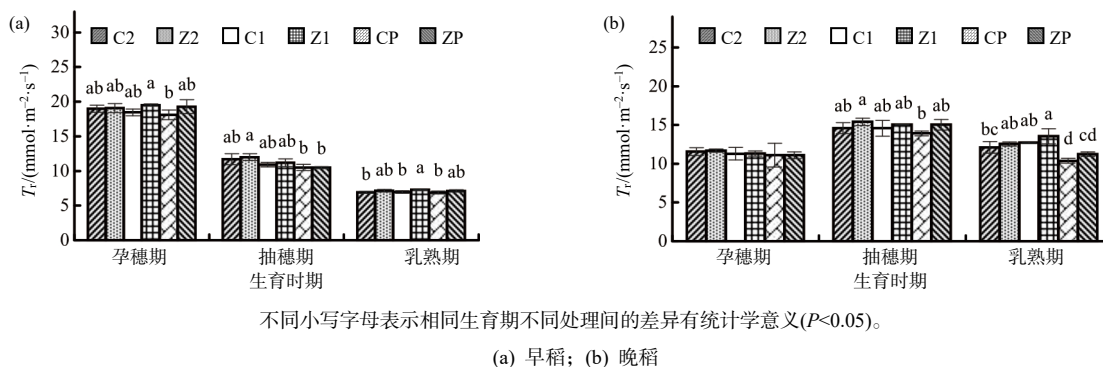


图4 不同处理下早稻和晚稻不同生育期的蒸腾速率

Fig. 4 Transpiration rates of early season rice and late season rice at different growth stages under different treatments

3.2 不同厢宽和种植密度对双季稻叶面积指数的影响

由图5(a)可知,在早稻季,孕穗期,Z2、Z1、C1、C2、ZP、CP处理的叶面积指数依次降低;抽穗期,Z1、C1、Z2、CP、ZP、C2处理的叶面积指数依次降低;乳熟期,Z1、C1、Z2、ZP、C2、CP处理的叶面积指数依次降低,但同一生育期各处理间的差异均不显著。

由图5(b)可知,在晚稻季,孕穗期,Z1处理的

叶面积指数最高,Z2处理次之,CP处理的最低,Z1、Z2处理的显著高于CP的,分别较CP提高了35.59%、36.40%,其他处理间的差异不显著;抽穗期,Z2、ZP、Z1、C2、C1、CP处理的叶面积指数依次降低;乳熟期,Z1、C1、Z2、ZP、C2、CP处理的叶面积指数依次降低,抽穗期和乳熟期各处理的差异均不显著。综上,增加种植密度和厢作处理有助于提高叶面积指数。

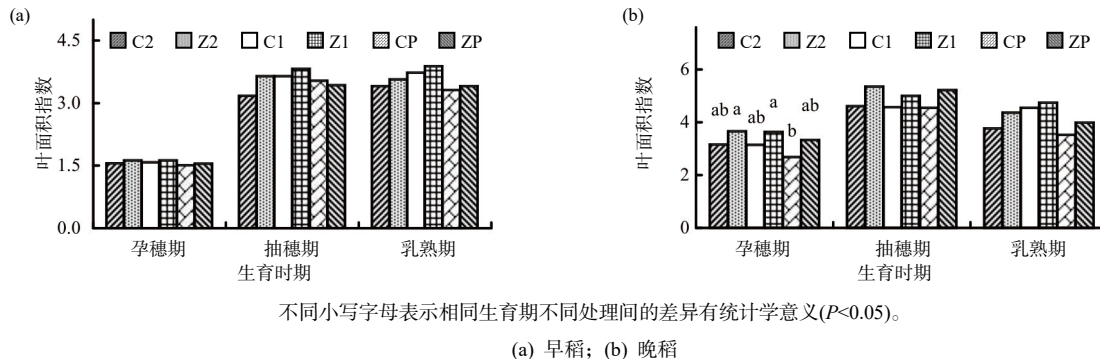


图5 不同处理早稻和晚稻不同生育时期的叶面积指数

Fig. 5 Leaf area index of early season rice and late season rice at different growth stages under different treatments

3.3 不同厢宽和种植密度对双季稻产量及产量构成的影响

由表2可知,早稻季Z1的产量最高,较CP显著增产14.67%;同一厢宽条件下,增加种植密度处理的产量较常规密度处理的增产5.79%~11.23%;同一种植密度下,1 m厢宽处理的产量最高。进一步分析其产量构成因子可知,Z1的优势主要体现在有效穗数和结实率上,与CP相比,分别提高了16.40%、

10.02%。晚稻季Z1的产量也最高,Z2的次之,分别较CP的显著增产11.92%、10.82%;同一厢宽条件下,增加种植密度处理的产量较常规密度处理的增产4.93%~7.67%;同一种植密度下,1 m厢宽处理的产量也最高。进一步分析其产量构成因子可知,Z1、Z2的优势主要体现在有效穗数上,与CP相比分别提高了10.88%、13.36%。综上可见,增加种植密度、进行厢作栽培可提高有效穗数和水稻产量。

表2 不同处理早稻和晚稻产量及产量构成

Table 2 The yield and yield components of early and late season rice under different treatments						
季别	处理	有效穗数/(10 ⁴ ·hm ⁻²)	每穗粒数	结实率/%	千粒质量/g	产量/(t·hm ⁻²)
早稻	C2	(379.49±29.88)ab	(111.00±3.29)ab	(66.46±2.21)ab	(26.45±0.21)ab	(7.60±0.64)ab
	Z2	(393.94±32.88)a	(106.00±2.10)ab	(69.72±2.13)a	(26.00±0.17)b	(8.26±0.52)ab
	C1	(365.39±21.42)ab	(108.50±4.60)ab	(66.23±3.26)ab	(25.95±0.58)b	(7.66±0.40)ab
	Z1	(395.45±12.03)a	(111.37±6.09)a	(69.09±2.27)a	(26.07±0.30)ab	(8.52±0.53)a
	CP	(339.74±15.54)b	(106.50±4.59)ab	(62.80±1.32)b	(26.23±0.05)ab	(7.43±0.43)b
	ZP	(393.94±22.42)a	(98.80±12.02)b	(68.80±4.43)a	(26.59±0.16)a	(7.86±0.28)ab
晚稻	C2	(365.48±19.67)ab	168.20±6.08	68.22±3.40	23.93±0.41	(7.71±0.26)ab
	Z2	(380.56±32.37)a	168.91±2.00	69.24±1.80	22.96±0.72	(8.09±0.42)a
	C1	(338.10±25.84)b	169.09±2.20	68.79±5.64	23.41±1.59	(7.76±0.51)ab
	Z1	(372.22±21.38)ab	167.60±6.33	71.38±2.32	23.90±0.34	(8.17±0.07)a
	CP	(335.71±3.58)b	173.05±9.55	66.91±3.44	23.39±1.40	(7.30±0.38)b
	ZP	(366.67±12.50)ab	171.76±1.14	67.90±1.33	22.58±1.18	(7.86±0.08)ab

注：同列数据后不同小写字母表示处理间差异有统计学意义($P<0.05$)。

3.4 双季稻产量与不同生育期光合特性指标的相关性分析

双季稻产量与3个生育时期不同光合特性指标的相关性分析结果如表3所示。早稻季，产量与孕穗期的 C_i 、 T_r 呈显著正相关，与抽穗期的SPAD值呈

极显著正相关，与抽穗期的 C_i 以及乳熟期的 P_n 、 C_i 、 G_s 呈显著正相关，与乳熟期的 T_r 呈极显著正相关。晚稻季，产量与抽穗期的 P_n 以及乳熟期的SPAD值、 P_n 、 C_i 呈显著正相关，与乳熟期的 T_r 呈极显著正相关。

表3 水稻产量与3个生育期不同光合特性指标的相关系数

Table 3 Correlation coefficient between yield and photosynthetic characteristics at different growth stages						
季别	时期	SPAD值	$P_n/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	$C_i/(\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1})$	$G_s/(\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	$T_r/(\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$
早稻	孕穗期	0.36	0.40	0.53*	0.39	0.47*
	抽穗期	0.72**	0.45	0.51*	0.33	0.09
	乳熟期	0.37	0.52*	0.58*	0.49*	0.63**
晚稻	孕穗期	0.35	0.40	0.24	0.21	-0.28
	抽穗期	0.32	0.50*	0.38	0.28	0.34
	乳熟期	0.48*	0.53*	0.51*	0.37	0.61**

注：*表示相关性显著($P<0.05$)；**表示相关性极显著($P<0.01$)。

4 讨论

有研究^[18]表明，早稻抽穗后SPAD值会随种植密度的增大而升高。全妙华等^[19]研究表明，厢作栽培主要通过改善根系吸收、增加分蘖数和有效穗数、提高光合率等方式提高水稻的 P_n 、 G_s 和水分利用率及其他光合参数，进而提高产量。康楷等^[20]研究表明，与传统平作相比，垄作栽培方式处理的穗质量和一次枝梗数分别显著提高了7.88%和7.00%，灌浆期 P_n 、 T_r 、 C_i 和 G_s 分别显著增加了9.33%、14.81%、11.46%和27.09%。本研究中，早、晚稻各处理的SPAD值在抽穗期达到最高，早、晚稻各生育期Z1处理的SPAD值均高于其他处理的，与CP处理相比，早稻SPAD值提高了3.58%~6.26%，晚稻

SPAD值提高了4.31%~10.22%；早、晚稻各个生育期(晚稻抽穗期除外)Z1处理的 P_n 均最高，说明Z1处理能提高双季稻的净光合速率。有研究认为，水稻结实期叶片的净光合能力是影响产量的关键因素^[21]，水稻的产量形成90%来自抽穗后的光合产物，而这些光合产物大多通过叶片的光合作用产生^[22]。本研究结果表明，早稻产量与抽穗期的SPAD值呈极显著正相关，与乳熟期的 P_n 呈显著正相关；晚稻产量与抽穗期的 P_n 以及乳熟期的SPAD值、 P_n 呈显著正相关，说明抽穗后保持较高的叶绿素含量和较高的光合速率是双季稻高产的关键^[23]。

合理地增加种植密度有利于高产的形成，双季稻增产的关键在于较高的有效穗数、结实率以及光合速率^[24]。李木英等^[25]认为，合理密植、优化田间

管理技术措施能改善田间的小气候环境,水稻群体良好的内部小环境能促进生长发育,对水稻高产高效起着重要作用。在本研究中,同一厢宽条件下,增加种植密度处理的产量高于常规密度处理的,早、晚稻分别增产5.79%~11.23%和4.93%~7.67%,从产量构成方面看,主要表现在有效穗数的差异上,其原因可能是增加种植密度提高了叶片光合作用能力,促进了水稻生长中后期光合产物和籽粒干物质的积累。

5 结论

在本试验条件下,Z1处理既能提高叶片光合速率又能提高双季稻产量。综合分析,湖南双季稻区采用垄厢栽培模式种植水稻时,可设置厢宽1 m、沟宽15 cm、沟深15 cm的垄厢,并适当增加种植密度(早稻株行距11 cm×25 cm,晚稻株行距12 cm×25 cm)。

参考文献:

- [1] 陈丽虹,燕金香,褚光,等. 长江中下游稻区双季晚粳稻产量生理与资源利用效率研究进展[J]. 中国稻米, 2017, 23(5): 1-4.
- [2] 廖萍. 施石灰对双季稻系统氮素循环的影响及其作用机制[D]. 南昌: 江西农业大学, 2020.
- [3] 成臣, 吕伟生, 朱博, 等. 秸秆全量还田下磷钾配施对晚粳稻产量及品质的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(6): 244-251.
- [4] 唐志伟, 周文涛, 王勃然, 等. 垄厢栽培对水稻根系特性与土壤物理性质的影响[J]. 生态学杂志, 2021, 40(12): 3961-3969.
- [5] 冯利平, 莫志鸿, 黄晚华, 等. 湖南省季节性干旱对双季稻生长及产量影响的模拟研究[J]. 作物学报, 2011, 37(5): 895-902.
- [6] 郭尔静, 杨晓光, 王晓煜, 等. 湖南省双季稻产量差时空分布特征[J]. 中国农业科学, 2017, 50(2): 399-418.
- [7] 郭慧娟, 傅志强, 李超, 等. 垄作稻田在生态种养中的应用研究进展[J]. 生态学杂志, 2020, 39(7): 2416-2425.
- [8] 郑华斌, 姚林, 刘建霞, 等. 种植方式对水稻产量及根系性状的影响[J]. 作物学报, 2014, 40(4): 667-677.
- [9] 康楷, 刘丽华, 郑桂萍, 等. 不同耕作方式对水稻抗折力的影响[J]. 北方水稻, 2020, 50(3): 7-11.
- [10] 韦本辉, 刘斌, 甘秀芹, 等. 粉垄栽培对水稻产量和品质的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(19): 3946-3954.
- [11] 张洪程, 胡雅杰, 杨建昌, 等. 中国特色水稻栽培学发展与展望[J]. 中国农业科学, 2021, 54(7): 1301-1321.
- [12] 夏琼梅, 胡家权, 董林波, 等. 水稻前控后促施氮技术增产机理研究[J]. 中国土壤与肥料, 2022(5): 18-26.
- [13] 柴紫薇. 不同氮肥对水稻密植及产量的影响研究[D]. 武汉: 湖北大学, 2024.
- [14] 李超, 肖小平, 唐海明, 等. 减氮增密对机插双季稻生物学特性及周年产量的影响[J]. 核农学报, 2019, 33(12): 2451-2459.
- [15] 刘利成, 陈立云, 肖应辉, 等. 栽培密度对双季稻产量及群体光合特性的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2014, 40(5): 449-457.
- [16] 隋鑫, 付立东, 王宇, 等. 密度对滨海稻区机插水稻光合特性及产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(3): 91-93.
- [17] 刘文祥, 青先国, 艾治勇. 不同密度和栽插苗数对水稻冠层和产量的影响[J]. 华北农学报, 2013, 28(2): 114-121.
- [18] 刘武. 氮肥用量和移栽密度对早稻产量及某些生理性状的影响[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2008.
- [19] 全妙华, 胡爱生, 欧立军, 等. 耕作方式对水稻光合及根系生理特性的影响[J]. 杂交水稻, 2012, 27(3): 71-75.
- [20] 康楷, 刘丽华, 秦猛, 等. 垄作双深与株行配置对水稻光合作用、产量及穗部性状的影响[J]. 作物杂志, 2020(5): 164-169.
- [21] 魏友伯. 水稻叶绿素含量与荧光特性的基因型差异及机理研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2022.
- [22] 龚金龙, 张洪程, 李杰, 等. 水稻超高产栽培模式及系统理论的研究进展[J]. 中国水稻科学, 2010, 24(4): 417-424.
- [23] HOU W F, KHAN M R, ZHANG J L, et al. Nitrogen rate and plant density interaction enhances radiation interception, yield and nitrogen use efficiency of mechanically transplanted rice[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2019, 269: 183-192.
- [24] 敖和军, 王淑红, 邹应斌, 等. 超级杂交稻干物质生产特点与产量稳定性研究[J]. 中国农业科学, 2008, 41(7): 1927-1936.
- [25] 李木英, 石庆华, 王涛, 等. 种植密度对双季超级稻群体发育和产量的影响[J]. 杂交水稻, 2009, 24(2): 72-77, 80.

责任编辑: 毛友纯

英文编辑: 罗 维