

# 水稻光能辐射利用率与产量的关系

李迪秦, 唐启源\*, 秦建权, 张运波, 杨胜海, 陈立军, 李小勇

(湖南农业大学 农学院, 湖南 长沙 410128)

**摘 要:** 以超级杂交稻、普通杂交稻、常规稻各 2 个品种(组合)分 2 个播期进行试验, 探讨水稻群体光能辐射利用率与产量的关系。结果表明: 同一播期, 超级稻产量最高; 5 月 22 日播种的超级稻产量与普通杂交稻和常规稻差异显著, 且产量都高于 6 月 17 日的, 超级稻产量最高的原因是具有较高的颖花量。6 月 17 日播种的水稻群体光能辐射利用率比 5 月 22 日的高。超级稻群体光能辐射利用率最大。播期 1, 水稻群体光能截获率与结实率呈显著负相关, 从孕穗期到齐穗期与粒重呈极显著正相关, 与穗数、穗粒数、产量及收获指数不相关; 播期 2, 水稻群体光能截获率与结实率只在分蘖中期和齐穗期呈显著负相关, 与穗数、穗粒数、粒重、产量和收获指数均无显著相关性。

**关 键 词:** 水稻; 播期; 光能辐射利用率; 产量

中图分类号: S511.01 文献标志码: A 文章编号: 1007-1032(2011)01-0001-06

## Relationship between solar radiation use efficiency and rice grain yield

LI Di-qin, TANG Qi-yuan\*, QIN Jian-quan, ZHANG Yun-bo, YANG Sheng-hai, CHEN Li-jun, LI Xiao-yong

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

**Abstract:** Three types of rice varieties including super hybrid rice, hybrid rice and conventional rice were used to explore the relationships between radiation use efficiency (*RUE*) and grain yield. The results showed as follows. Grain yield of super hybrid rice was higher than hybrid rice and conventional rice on the same sowing date, and there was a significant difference among three types of rice varieties sowing May 22. And grain yield sowed in May 22 was higher than sowed in July 17. There was higher grain yield of super hybrid rice because of high spikelet numbers. Grain yield sowed in May 22 was higher than sowed in July 17. There was higher radiation use efficiency of super hybrid rice. There was a significant negative correlation between *RUE* and the filled ratio during rice growth and development sowing May 22, and a significant positive correlation between *RUE* and 1 000-grain weight from booting to head-flowering, but *RUE* was not related to the other indices, including the number of spikelet, grain yield and harvest index; there was a significant negative correlation between *RUE* and the filled ratio on the MT and FL sowing July 17, and were no significant trend among *RUE* and the other indices, such as the number of spikelet, grain yield and harvest index.

**Key words:** rice; sowing date; solar radiation use efficiency; yield

大量研究<sup>[1-7]</sup>表明, 作物生物量的累积与冠层截获光合有效辐射量(*IPAR*)有着密切的关系。作物群体光能利用率由群体对光能的截获水平和被截获光能的转化效率<sup>[8-10]</sup>两方面决定。播期、品种不

同, 群体的叶面积指数、生长速率、干物质积累量、群体的透光性能及光能吸收利用率有差异, 这种差异最终体现为产量的差异<sup>[11-21]</sup>。选择适宜的水稻品种和播期, 充分利用当地光热资源, 是获得高产的

收稿日期: 2010-05-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(30671219); 长沙市科技局项目(k0803115-21)

作者简介: 李迪秦(1963—), 男, 湖南武冈人, 博士, 副教授, 主要从事作物栽培生理研究, ldqhnd2009@163.com; \* 通信作者, cntqy@yahoo.com.cn

重要途径。笔者选用超级杂交稻、普通杂交稻、常规稻各2个品种(组合),研究不同播期、不同群体的光能利用率与产量性状的关系,以期在不同生态区域选择适宜品种(组合)及播期,充分利用光能资源,提高产量提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试验地概况

超级杂交稻Y两优1号(A)和两优培九(B);普通杂交稻汕优63(C)和II优838(D);常规稻扬稻6号(E)和黄花占(F),由国家杂交水稻工程技术研究中心提供。试验于2008年在湖南省浏阳市永安镇试验基地进行,前茬作物为油菜。土壤为红壤黏土,肥力中等偏上,pH值为5.55,碱解氮含量为127.1 mg/kg,有机质含量为31.1 g/kg,速效钾含量为102.1 mg/kg,有效磷含量为19.3 mg/kg。

### 1.2 试验设计

采用随机区组设计,小区面积30 m<sup>2</sup>,4次重复。氮、磷、钾肥料分别为尿素(N 150 kg/hm<sup>2</sup>)、过磷酸钙(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 40 kg/hm<sup>2</sup>)、氯化钾(K<sub>2</sub>O 100 kg/hm<sup>2</sup>),基施锌(ZnSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O 5 kg/hm<sup>2</sup>)。

水稻种子用1.0%的“农博士”氨基酸溶液浸种1 h后,清水洗净,浸种催芽。播期1(T1)于5月22日播种,播期2(T2)于6月17日播种,秧龄20 d,插2本,栽植规格23.3 cm×23.3 cm,田间病虫害防治和水分管理与当地高产栽培管理一致。

### 1.3 测定项目

#### 1.3.1 干物质质量的测定

于分蘖中期(移栽后20 d)、幼穗分化期、孕穗期、齐穗期、成熟期,每小区取9蔸(0.49 m<sup>2</sup>)测定绿叶叶面积和植株干物质质量。绿叶叶面积采用Licor-3100结合比叶重测定,计算叶面积指数(LAI)。

干物质质量按叶片、茎鞘、穗分别测定。

#### 1.3.2 水稻群体太阳辐射总量与光能截获率的测定

水稻移栽后,运用安装在试验田附近高处的Da VIS Vantage PR02 微型气象站(美国产)自动记录逐日太阳辐射量,直到成熟收获。同时结合取样,采用Sun Scan冠层分析系统测定小区群体冠层的顶部和基部(距离地面5 cm)的太阳光有效辐射量,计算群体的光能辐射截获率。群体的光能辐射截获率(%)=(顶部太阳光总辐射量-基部太阳光总辐射量)/顶部太阳光总辐射量×100%。以各生长发育时段群体的干物质质量和冠层拦截累积量构建直线关系,计算斜率,作为各处理全生育期群体的太阳辐射利用率(RUE)<sup>[1-2]</sup>。

#### 1.3.3 测产

以水稻成熟期每小区中心5 m<sup>2</sup>作为测产小区,沿对角线取10蔸用于考查穗数、每穗粒数、结实率和千粒重;其余单打单收和晒干,测定稻谷质量和含水量,再折算成含水量14%的实际产量。

### 1.4 数据分析

采用SAS9.0进行数据处理和分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同播期和品种群体的产量及产量构成因子

从表1可知,同一播期,超级稻群体产量最高。播期1,超级稻产量与普通杂交稻和常规稻相比差异显著,超级稻产量最高是由于群体拥有较高的穗粒数。播期1超级稻产量高于播期2,也是因为具有较高的穗粒数。播期1超级稻穗数、结实率、千粒重则基本低于播期2。超级稻收获指数高于普通杂交稻和常规稻,播期1收获指数高于播期2(黄花占除外)。

表 1  不同播期水稻群体的产量及产量构成因子

Table 1  Yield and its components of the different sowing date

播期	品种	穗数/(个·m <sup>-2</sup> )	每穗粒数	总颖花数/(个·m <sup>-2</sup> )	结实率/%	千粒重/g	产量/(kg·hm <sup>-2</sup> )	收获指数
T1	A	218.9ab	190.8b	47 991.0a	85.3ab	24.7c	10 174.4a	0.52a
	B	219.5ab	227.6a	40 909.0b	73.4c	23.2d	10 305.0a	0.50b
	C	227.3ab	159.4c	35 106.0c	74.2c	26.7b	8 821.6b	0.47c
	D	197.7b	173.8bc	34 491.0c	83.6b	27.9a	8 414.6b	0.44d
	E	199.4b	175.4bc	34 799.0c	80.2b	27.8a	9 037.9b	0.47c
	F	248.0a	167.4bc	40 595.0b	90.3a	19.9e	9 099.9b	0.48bc
T2	A	267.09b	149.4b	39 921.0b	87.1b	25.3d	9 786.7a	0.49ab
	B	274.46ab	158.3a	43 455.0a	82.9d	24.2e	9 806.3a	0.48abc
	C	266.17b	137.5cd	33 604.0c	83.4d	28.0b	8 140.9b	0.47bc
	D	260.95b	129.3d	33 146.0c	85.6c	26.5c	8 936.0ab	0.47bc
	E	227.18c	139.2c	31 627.0c	89.3a	29.0a	8 962.0ab	0.46c
	F	288.27a	140.4c	42 338.0ab	90.6a	20.3f	8 878.1ab	0.50a

2.2  不同播期水稻群体的 *IPAR* 及 *RUE*

从表 2 可知，不同播期，从幼穗分化期到成熟期，超级杂交稻太阳辐射截获量提高了 4.4% ~ 27.3 %，普通杂交稻提高了 4.0% ~ 16.8%，常规稻提高了 20.4 % ~ 29.8 %。在同一播期，普通杂交稻的辐射截获量最高，常规稻最低，播期 1，

三者相互间有显著差异，播期 2 只在齐穗期超级杂交稻与普通杂交稻和常规稻之间有显著差异，其他生育期三者间无显著差异。

播期 1 超级杂交稻群体 *RUE* 比播期 2 高 1.4%；普通杂交稻比播期 2 高 1.5%；高产常规稻比播期 2 高 7.0%。

表 2  不同播期水稻群体的 *IPAR* 与 *RUE* 均值

Table 2  Average *RUE* and *IPAR* of rice population in different sowing date

播期	品种类型	<i>IPAR</i> /(MJ·m <sup>-2</sup> )					<i>RUE</i> /(g·MJ <sup>-1</sup> )
		分蘖中期	孕穗期	幼穗分化期	齐穗期	成熟期	
T1	超级杂交稻	54.3b	188.1b	332.2b	396.9b	613.6b	1.47a
	普通杂交稻	59.5a	203.4a	355.8a	420.6a	623.7a	1.38b
	高产常规稻	49.1c	175.3c	283.3c	353.2c	553.2c	1.52a
T2	超级杂交稻	54.0	201.7	346.7	505.1a	706.5	1.45
	普通杂交稻	62.4	228.8	370.0	458.6b	728.6	1.36
	高产常规稻	47.5	196.3	341.0	458.6b	690.2	1.42

2.3  不同播期和品种群体的干物质积累量

从表 3 可知，同一播期成熟期群体干物质积累量，超级稻最大(播期 1 中品种 D 与 E 除外)，播期 1 只有品种 B 与 F，播期 2 中品种 A 与 C 和 D 及品种 B 与 D 间有显著差异；播期 2 超级稻干物质积累量高于播期 1，品种 A 与 B 分别高 2.1%、7.2%，说明超级稻群体光合作用能力和转化率要高于普通杂交稻和常规稻；同时，尽管播期 2 的干

物质积累量要大，但产量低，不利于产量的提高，群体干物质的转化效率低于播期 1。

超级稻群体干物质积累量，播期 1，从分蘖中期到孕穗期呈快速增加的趋势；播期 2，从分蘖中期到孕穗期、幼穗分化到齐穗期，群体干物质积累量增幅最大。结合超级稻产量变化规律，可以得知，播期 1 更加有利于超级稻群体生长发育。

表 3 水稻群体干物质积累量  
Table 3 Dry matter of rice population

播期	品种	干物质积累量/(g·m <sup>-2</sup> )				
		分蘖中期	孕穗期	幼穗分化期	齐穗期	成熟期
T1	A	128.3b	564.5ab	1 171.8a	1 203.6ab	1 674.0ab
	B	133.9b	515.7bc	1 108.2ab	1 303.0a	1 761.0a
	C	145.5ab	560.9abc	1 072.5ab	1 172.1b	1 662.3ab
	D	158.9a	590.8a	1 166.0a	1 213.7ab	1 715.7a
	E	130.8b	511.8c	1 027.0bc	1 113.1b	1 681.5ab
	F	137.5b	536.7bc	902.5c	1 116.9b	1 556.5b
T2	A	102.3d	660.7a	938.7ab	1 256.8b	1 804.5a
	B	131.7c	622.3bc	961.4a	1 332.2a	1 798.6ab
	C	146.1b	602.5c	894.0bc	1 147.7c	1 658.3bc
	D	162.1a	646.3ab	899.5bc	1 051.8d	1 604.8c
	E	125.3c	620.3bc	847.8c	1 303.9ab	1 718.0abc
	F	103.9d	593.9c	913.6ab	1 131.1c	1 709.3abc

2.4 水稻群体叶面积指数

从表 4 可知,同播期各个生长发育时期,超级稻群体叶面积指数及各个生育时期群体叶面积指数的平均值不是最大的。在生产上种植超级稻应该

通过栽培技术措施适当控制其群体的大小,这样才能更好发挥其超高产潜力。

不同播期间,超级稻群体各个生长发育时期叶面积指数及其平均值均表现为播期 2 高于播期 1。

表 4 水稻群体叶面积指数  
Table 4 Leaf area index of rice population

播期	品种	叶面积指数			
		分蘖中期	孕穗期	幼穗分化期	齐穗期
T1	A	1.45c	4.40b	5.80b	5.61bc
	B	1.55bc	4.74b	6.12ab	5.88ab
	C	1.79ab	5.57a	6.78ab	6.17a
	D	1.97a	5.95a	7.09a	6.18a
	E	1.40c	4.65b	6.34ab	5.17cd
	F	1.33c	4.26b	6.05b	4.81d
T2	A	1.49c	6.84b	7.29bc	6.78b
	B	1.81b	6.68b	7.56b	6.78b
	C	1.81b	6.91ab	7.75b	7.75a
	D	2.11a	7.88a	8.76a	7.68a
	E	1.76b	6.37bc	8.61a	7.42a
	F	1.58c	5.61c	6.72d	6.31b

2.5 水稻品种群体 *IPAR* 与产量及产量构成因子间的相关性

经相关性分析得知,在播期 1,分蘖中期群体的 *IPAR* 与结实率呈显著负相关( $R^2 = -0.6185^*$ ),在其

他生育期(孕穗期、幼穗分化期、齐穗期、成熟期)呈极显著负相关( $R^2$  分别为  $-0.6137^{**}$ 、 $-0.7658^{**}$ 、 $-0.7606^{**}$ 、 $-0.7133^{**}$ ),在孕穗期、齐穗期与粒重呈极显著正相关( $R^2$  分别为  $0.7078^{**}$ 、 $0.6265^{**}$ ),

而与穗数、穗粒数、产量及收获指数相关性不显著。表明播期 1 中, 群体生长发育中后期,  $LAI$  越大, 有利于增加粒重, 但不利于结实率的提高。

播期 2 只在孕穗期和齐穗期, 群体  $IPAR$  与结实率呈显著负相关( $R^2$  分别为 -0.606 4\*、-0.660 4\*); 而与穗数、穗粒数、粒重、产量和收获指数均无显著相关性。

## 2.6 水稻品种群体 $IPAR$ 与干物质积累总量的相关性

播期 1, 分蘖中期群体  $IPAR$  与群体的干物质积累量呈极显著相关( $R^2=0.657\ 8^{**}$ ); 播期 2, 分蘖中期、齐穗期群体  $IPAR$  与干物质积累量呈显著和极显著正相关( $R^2$  分别为 0.558 7\*、0.700 6\*\*), 表明群体越大, 越有利于  $IPAR$  的提高, 对提高群体干物质积累量有利。

## 2.7 水稻品种群体 $IPAR$ 与叶面积指数的相关性

群体  $IPAR$  在播期 1 的幼穗分化、齐穗两个时期与  $LAI$  有显著相关性( $R^2$  分别为 0.779 6\*、0.711 9\*); 在播期 2 与  $LAI$  没有显著相关性。由此说明, 在适应的水稻品种播插期, 较大的群体  $LAI$  有利于提高群体  $IPAR$ 。

## 3 讨 论

不同的水稻品种有其适宜的种植区域和播期, 在适宜的光温和土壤条件下才能发挥其增产潜力<sup>[11]</sup>。在适播期内, 杂交稻适当早播, 能早生快发, 提高群体的光能利用率, 促进产量的提高<sup>[12-16]</sup>。葛东生等<sup>[17]</sup>报道, 杂交稻在安徽作中稻或连作晚稻栽培, 表现早播高产、迟播减产, 认为在茬口允许的条件下, 应尽量早播。谢光辉等<sup>[18]</sup>发现, 在湘西武陵山区, 杂交水稻的适播期为 4 月上、中旬, 并与海拔高度有关。水稻产量对播期的反应敏感, 不同的播种期群体的叶面积指数、生长速率、产量及产量构成因子、群体的光能辐射利用率有差异<sup>[12-15,19]</sup>。 $LAI$  越大, 叶片越多, 叶层越厚, 对太阳辐射截获量越大, 但只有当群体的  $RUE$  也高时, 干物质的积累量才多, 这样在适宜的收获指数下, 群体才可获得较高产量<sup>[20-21]</sup>。

本研究结果表明, 不同播期的超级稻群体  $IPAR$  与  $RUE$  有差异, 是因为群体的生长发育前期,  $T2$

比  $T1$  能更好地利用光温资源, 构建更大群体, 使得播期 2 群体叶面积指数更大, 光合合成与积累的干物质相对更多, 但由于群体  $RUE$  差异, 导致干物质转化效率不一样, 使得播期 2 产量反低于播期 1。因此,  $RUE$  是衡量超级稻群体超高产的又一生理指标, 但只有在适宜播插期、群体大小适宜时,  $RUE$  值方可反映出群体产量。

同一播期, 超级稻群体  $RUE$  均最大, 常规稻次之, 普通杂交稻(品种 E 除外)最小,  $T2$  以超级稻最高, 进一步说明超级稻群体有较高  $RUE$  是其超高产的重要原因之一。

水稻生长发育中某些时期, 群体  $IPAR$  与结实率呈显著负相关性, 粒重与中后期群体的  $IPAR$  呈显著正相关,  $IPAR$  在群体生长发育中后期与  $LAI$  呈显著正相关; 群体的  $IPAR$  与产量无显著相关性。这主要是因为较高群体  $LAI$  是提高群体  $IPAR$  的前提, 较高的群体  $IPAR$  并不代表群体可以高产, 只有在较高或适应的群体  $RUE$  和收获指数前提下方可获得高产; 同时较高的  $LAI$ , 容易导致群体通风透气性下降, 引起病害产生而减产。因此, 从群体光能利用的角度看, 水稻产量的提高, 一定程度上主要靠提高群体  $LAI$  和  $RUE$  来实现。

## 参考文献:

- [1] Kiniry J R, Jones C A, Toole J C O, et al. Radiation-use efficiency in biomass accumulation prior to grain-filling for five grain-crop species[J]. Field Crops Research, 1989, 20: 51-64.
- [2] Francis F, Kiniry J R, Board J E, et al. Row spacing effects on light extinction coefficients of corn, sorghum, soybean, and sunflower[J]. Agron J, 1996, 88: 185-190.
- [3] Kiniry J R, Williams J R, Vanderlip R L, et al. Evaluation of two maize model for nine US location [J]. Agron J, 1997, 89: 421-426.
- [4] Medlyn B. Physiological basis of the light use efficiency model[J]. Tree Physiology, 1998, 18: 167-176.
- [5] Connor D J, Fereres E. A dynamic model of crop growth and tining of biomass[J]. Field Crops Research, 1999, 63: 139-157.
- [6] Kiniry J R, Mc Cauley G, Xie Y, et al. Rice parameters describing crop performance offour US cuhivars [J]. Agron J, 2001, 93: 1354-1361.

- [7] Gallo K P, Daughtry C S T. Techniques for measuring intercepted and absorbed photo-synthetically active radiation in corn canopies [J]. Agron J, 1986, 78: 752-756.
- [8] 卢其尧. 我国水稻生产光温潜力的探讨[J]. 中国农业气象, 1980(1): 1-11.
- [9] 陈温福, 徐正进, 张龙步, 等. 不同穗型水稻群体光分布和物质生产差异的比较研究[C]/陈温福. 水稻高产理论与实践. 北京: 中国农业出版社, 1994: 59-63.
- [10] 徐正进, 陈温福, 周鸿飞, 等. 直立穗型水稻群体生理生态特性及其利用前景[J]. 科学通报, 1996, 41(12): 1122-1126.
- [11] 陈温福, 徐正进, 张龙步. 水稻超高产育种生理基础[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1995: 23-27.
- [12] 邵玺文, 孙长占, 孙彤, 等. 播期和播量对水稻生育性状及产量的影响[J]. 吉林农业大学学报, 2002, 24(4): 11-14, 18.
- [13] 姜文超, 孙龙泉, 肖伯群, 等. 播种期对两优培九产量及生育特性的影响[J]. 杂交水稻, 2001, 16(1): 38-40.
- [14] 韩亚东, 张文忠, 王琼, 等. 不同行向对不同穗型水稻品种群体光能分布的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2002, 33(6): 404-407.
- [15] 郭伟, 于立河, 薛盈文, 等. 播种期对强筋小麦生长的影响[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2006, 18(3): 21-24.
- [16] 刘文成, 王景顺, 马瑞霞. 不同播期对郑单 18 玉米产量的影响[J]. 河南农业科学, 2003(6): 8-9.
- [17] 葛东生, 张秀云, 刘襄, 等. 杂交中稻及杂交晚稻适宜播期的研究[J]. 安徽农业科学, 1995, 23(1): 22-23.
- [18] 谢光辉, 苏宝林, 石磊, 等. 湘西武陵山区单季稻生长发育及物质生产的研究 II. 不同海拔播期对杂交稻物质生产的影响[J]. 中国农业大学学报, 1996(1): 89-94.
- [19] 沈新平, 沈晓燕, 顾丽, 等. 两优培九稻米垩白在江苏省不同纬度点的播期效应[J]. 中国水稻科学, 2007, 21(6): 677-680.
- [20] 章家恩, 黄润, 饶卫民. 玉米群体内太阳光辐射垂直分布规律研究[J]. 生态科学, 2001, 20(4): 8-11.
- [21] 李迪秦, 秦建权, 张云波, 等. 品种和播期对齐穗期水稻群体光能截获量和干物质垂直分布的影响[J]. 核农学报, 2009, 23(5): 858-863.

责任编辑: 杨盛强

英文编辑: 易来宾