

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2013.02238

两个超级杂交水稻品种物质生产的特性

纪洪亭 冯跃华* 何腾兵 李 云 武 彪 王小艳

贵州大学农学院, 贵州贵阳 550025

摘 要: 定量分析超级杂交水稻若干群体指标的动态特征, 以期为其高产栽培提供依据。于 2011 年和 2012 年在大田条件下, 以超级杂交水稻准两优 527、Q 优 6 号 and 对照品种 II 优 838 为试材, 通过连续测定干物质和叶面积, 建立了水稻群体干物质和相对叶面积指数动态模型, 进而以群体干物质和相对叶面积指数模型为基础, 分析了超级杂交水稻作物生长率、相对生长率、光合势、净同化率、叶面积比率动态变化特征。结果表明, 超级杂交水稻快增期的干物质积累量及其占总生物量的比例均高于对照。作物生长率(CGR)随移栽后时间呈先升高后下降的单峰曲线变化, 其快增期的 CGR 较大。与对照相比, 超级杂交水稻相对生长率(RGR)表现出上升快、峰值大、下降快的特点。准两优 527 在移栽后 23 d 至成熟期高于对照, Q 优 6 号的 RGR 在移栽后 43 d 以前低于对照, 移栽后 43 d 至 113 d 高于对照, 两者在移栽后 113 d 至成熟期的 RGR 相差不大。不同水稻净同化率(NAR)随移栽后时间呈先上升后下降的单峰曲线变化, 最大 NAR 出现在移栽后 43~53 d。总光合势与快增期光合势及与快增期绿叶面积持续时间均呈极显著正相关。2 个超级杂交水稻叶面积比率(LAR)在移栽后 23 d 至 43 d 迅速下降, 移栽后 43 d 至 73 d 缓慢下降, 移栽后 73 d 至成熟期快速下降, 其快增期的 LAR 较大。

关键词: 超级杂交水稻; 群体生长率; 相对生长率; 光合势; 净同化率; 叶面积比率; 动态特征

Dynamic Characteristics of Matter Population in Two Super Hybrid Rice Cultivars

Ji Hong-Ting, FENG Yue-Hua*, HE Teng-Bing, LI Yun, WU Biao, and WANG Xiao-Yan

College of Agriculture, Guizhou University, Guiyang 550025, China

Abstract: In order to find foundations of high-yield cultivation in super hybrid rice (SHR), we modeled on dynamics of population indices. A field experiment with two super hybrid rice cultivars (Zhunliangyou 527, Q you 6) and control (II you 838) was conducted in 2011 and 2012, and dry matter accumulation (DMA) and leaf area index (LAI) were measured. The dynamic equations of DMA and relative leaf area index (RLAI) were established and the dynamic characteristics of crop growth rate (CGR), relative growth rate (RGR), leaf area duration (LAD), net assimilation rate (NAR), and specific leaf area (LAR) were analyzed based on the equations. The DMA and its proportion to the total biomass at rapid growth stage were significantly higher than those of Control. In the process of time after transplanting, the tendency of CGR was expressed in a single peak curve, and CGR of two SHR was higher than that of control in rapid growth stage. The RGR of Zhunliangyou 527 was higher than that of control from 23 d after transplanting to mature period. As compared with the RGR of control, the RGR of Q you 6 was lower before 43 d after transplanting, higher from 43 d to 113 d after transplanting, and not much difference from 113 d after transplanting to maturity. A significant correlation was observed between gross LAD and LAD at rapid growth stage, and also between gross LAD and duration of LAI at rapid growth stage. Compared with Control, the RGR of SHR showed faster increasing and decreasing, and its peak value was higher. A single peak curve was available for the dynamic changes of NAR with its most high value from 43 d to 53 d after transplanting. The LAR of two SHR decreased fast from 23 d to 43 d after transplanting, moderately from 73 d to mature stage, and slowly from 43 d to 73 d after transplanting stage. The LAR of two SHR was higher in rapid growth stage than that of control.

Keywords: Super hybrid rice; CGR; RGR; LAD; NAR; LAR; Dynamic characteristic

本研究由国家自然科学基金项目(31160263, 31360311), 贵州省科技重大专项计划项目(黔科合重大专项字[2011]6012-1), 贵州省农业科技攻关项目(黔科合 NY[2011]3085 号)和贵州省科学技术基金项目(黔科合 J 字[2011]2139 号)资助。

* 通讯作者(Corresponding author): 冯跃华, E-mail: fengyuehua2006@126.com, Tel: 13984385198

第一作者联系方式: E-mail: jihongting2010@126.com

Received(收稿日期): 2013-04-27; Accepted(接受日期): 2013-07-25; Published online(网络出版日期): 2013-09-29.

URL: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20130929.1538.011.html>

目前我国正在大力推广超级水稻, 与一般高产水稻相比, 超级杂交水稻产量潜力较高。研究超级杂交水稻主要群体指标动态变化特征, 对充分发挥超级杂交水稻的产量潜力, 实现超级杂交水稻大面积高产栽培具有重要意义。关于超级杂交水稻物质生产特性的研究已有较多报道^[1-8]。一些学者对不同生育阶段平均作物生长率的动态变化进行了研究^[9-11], 然而阶段性的作物生长率动态变化不能准确反映群体生长率的瞬时变化; 另一些学者利用数学模型对相对群体干物质积累速率进行了分析^[12,13], 因作物群体干物质的积累速率=相对群体干物质积累速率×最大干物质积累量/生育期, 并且作物不同品种的最大群体干物质积累量和生育期不同, 所以不同品种间群体相对干物质积累速率的差异不能准确反映其群体干物质积累速率的差异, 即不同品种的作物生长率的差异不能被反映。关于水稻干物质积累的过程的划分, 也有一些报道。朱庆森等^[14]利用 Richards 方程的 2 个拐点将水稻籽粒灌浆的过程划分为前、中、后期, 并对籽粒灌浆速率、平均生长速率、相对生长速率等指标进行了分析。李艳大等^[15]利用 Richards 方程的 2 个拐点将水稻整个干物质积累过程划分为渐增期(0~0.40)、快增期(0.40~0.71)和缓增期(0.71~0.91), 具有明确的生物学意义, 比实际观察法更确切更易操作, 然而其未对水稻群体指标动态特征做进一步分析。本研究定量分析准两优 527 和 Q 优 6 号群体指标的动态特征, 以期为其高产栽培提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2011 年和 2012 年在贵州大学教学实验农场进行, 试验田土壤为黄泥土, 含有机质 38.11 g kg⁻¹、全氮 2.93 g kg⁻¹、全磷 1.35 g kg⁻¹、全钾 7.76 g kg⁻¹、碱解氮 228.63 mg kg⁻¹、速效磷 29.46 mg kg⁻¹、速效钾 172.69 mg kg⁻¹、pH 6.3。试材为准两优 527、Q 优 6 号超级稻品种、II 优 838 对照品种。采用单因素随机区组设计, 品种为试验因素, 3 个品种即为 3 个水平, 重复 3 次, 共 9 个小区; 小区面积 9 m×6 m; 株行距 20.0 cm×26.7 cm; 走道宽 50 cm, 四周种保护行。氮肥(纯氮)用量为 240 kg hm⁻², 基肥、分蘖肥、促花肥和保花肥的用量分别占总施氮量的 35%、20%、30%和 15%; 磷肥(P₂O₅) 120 kg hm⁻², 全部基施, 钾肥(K₂O) 240 kg hm⁻²分 2 次施用, 基肥和促花肥各半。2011 年 5 月 1 日播种, 6 月 7 日移栽, 10 月

16 日收获; 2012 年 4 月 18 日播种, 6 月 8 日移栽, 10 月 21 日收获。每穴单本栽插, 其他同大田管理。两年试验均采用相同品种、同一当地高产栽培方式, 相同田块和相同小区。

1.2 测定项目与方法

1.2.1 群体干物质积累量(DMA)和叶面积指数(LAI)

从水稻移栽至成熟, 每 10 d 每小区随机选取代表性稻株 6 株, 将绿叶和茎鞘分开, 在 105℃下杀青 30 min, 75℃烘干 48 h 至恒重后称量, 计算群体地上部干物质积累量。以长×宽×0.75 测定叶面积^[16,17]。

1.2.2 作物生长率(CGR) 采用朱庆森等^[14]的方法。

1.2.3 相对生长率(RGR) 即单位时间瞬时干重的速率变化。 $RGR_t = CGR_t/W_t$, 其中, RGR_t 是 t 时间的相对生长率, CGR_t 是 t 时间的作物生长率, W_t 是 t 时间的干物重。

1.2.4 平均叶面积和光合势(LAD)以及最大叶面积指数出现时间 采用文献^[18-19]方法计算。将相对 LAI 动态模型 $y=(a+bx)/(1+cx+dx^2)$ 从 x_1 到 x_2 积分即为 x_1 至 x_2 时期总相对光合势(RLAD); 将 RLAD 除以持续时间 x_2-x_1 , 可得到 x_1 至 x_2 时期平均相对叶面积指数(ARLAI); 然后乘以最大叶面积指数即可得 x_1 至 x_2 时期平均叶面积指数(ALAI)。总光合势、最大叶面积指数(LAI_{max})以及大田期生长时间三者的乘积即为大田期实际总 LAD。

$$RLAD = \int_{x_1}^{x_2} \left(\frac{a+bx}{1+cx+dx^2} \right) dx = \frac{b}{2d} \ln \left(x^2 \frac{c}{d}x + \frac{1}{d} \right) + \frac{2ad-bc}{d\sqrt{4d-c^2}} \arctan \frac{2dx+c}{\sqrt{4d-c^2}}$$

$$ARLAI = RLAD / (x_2 - x_1)$$

$$ALAI = ARLAI \times LAI_{max}$$

对相对 LAI 动态模型 $y=(a+bx)/(1+cx+dx^2)$ 求一阶导数即可得相对 LAI 变化速率方程, 令相对 LAI 变化速率方程等于 0, 即可得到最大 LAI 出现的相对时间 x_0 。

$$x = \frac{\sqrt{a^2d^2 + b^2d - abcd - ad}}{bd}$$

1.2.5 净同化率(NAR) 即单位叶面积的作物生长率。 $NAR_t = CGR_t/L_t$, 其中, NAR_t 是 t 时间的净同化率, CGR_t 是 t 时间的作物生长率, L_t 是 t 时间的叶面积。

1.2.6 叶面积比率(LAR) 即单位干物重的叶面积。 $LAR_t = L_t/W_t$, 其中, L_t 为 t 时间的叶面积, W_t 是 t 时间所对应的植株干物重。

1.3 数据处理与分析

利用归一化方法^[20-21], 将水稻移栽至成熟的生

长时间(T_i)与最大 LAI (LAI_M)定为 1, 得到相对时间 T_R (0~1)、相对叶面积指数 LAI_R (0~1)。

$T_R = T_i/T_t$, T_i 为移栽至 i 天的生长时间, T_t 为移栽至成熟的天数。

$LAI_R = LAI_i/LAI_M$, 其中, LAI_i 为第 i 天的实测 LAI , LAI_M 为最大 LAI 。

1.4 建模与检验方法

利用 2011 年和 2012 年群体干物质数据建立模型; 2011 年叶面积数据用于相对叶面积指数模型的构建, 2012 年叶面积数据用于相对叶面积指数模型的检验。利用 Curve Expert 1.50 软件对方程进行拟合, 用 SAS9.0 统计分析数据。

采用根均方差(RMSE)和相对根均方差(RRMSE)来衡量模拟值与实测值之间的符合度, RRMSE 值若小于 10%, 表明模拟值与观测值之间的一致性很好, 10%~20%为比较好, 20%~30%表明模拟效果一般^[22-24]。

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(O_i - P_i)^2}{n}}$$

$$RRMSE = \frac{RMSE}{O} \times 100\%$$

式中, O_i 为实测值, P_i 为模拟值, n 为样本容量; O 为实测值的平均值。

1.5 Gompertz 方程参数及干物质积累过程特征值

以 Gompertz 方程 $y = ae^{-\exp(b-cx)}$ 求一阶导数得到作物生长率, 即 $y' = ac \exp^{b-cx-\exp(b-cx)}$, 该方程为一连续变化的单峰曲线, 其中, y 为群体干物质积累量, x 为移栽后天数, y' 为作物生长率。对式 $y = ae^{-\exp(b-cx)}$ 求二阶导数, 令其分别等于 0, 可得最大群体生长率出现的时间 $x_2 = b/c$, 此时最大作物生长率 $y' = ac/e$ 。对 Gompertz 方程求三阶导数, 可得水稻干物质积累动态曲线的 2 个拐点 $x_1 = (b-0.9614)/c$, $x_3 = (b+0.9614)/c$ 。

在 $[0 \sim x_1]$ 阶段为干物质积累缓增期, 该期作物生长率缓慢增加, $[x_1 \sim x_3]$ 时期为干物质积累快增期, $[x_3 \sim \text{成熟期}]$ 为干物质减速增长期, 干物质积累在此期仍在增加, 但其作物生长率较低, 且随生育进程逐渐下降^[15,25]。

2 结果与分析

2.1 不同水稻品种产量

由表1可知, 2个超级杂交水稻2011年和2012年的平均稻谷产量分别为10 531.9 kg hm⁻²和8 518.4 kg hm⁻², 分别比对照高3.9%和9.6%, 两者差异不显著, 其中准两优527的稻谷产量显著高于对照。2个超级杂交水稻2年产量的平均值虽与对照差异不显著, 但仍比对照高6.2%。

2个超级杂交水稻2011年的平均生物产量为17 729.5 kg hm⁻², 比对照高10.3%, 但差异不显著。2012年的平均生物产量为15 631.8 kg hm⁻², 比对照高12.9%, 差异显著。其2年生物产量的平均值比对照高11.5%, 差异显著。

2.2 不同水稻品种群体干物质积累动态

不同水稻2011年和2012年的群体干物质积累动态基本一致。以2012年数据为例, 移栽后, 不同水稻群体干物质积累量呈“慢-快-慢”的 S 型曲线变化; 3个水稻品种在前期增长缓慢, 中期增长迅速, 此后增长又趋于缓慢, 至成熟期达最大值。成熟期的群体干物质积累量, 准两优527和 Q 优6号分别为16 386.2 kg hm⁻²和153 031.5 kg hm⁻², 分别比对照高18.0%和8.2% (图1)。

2.3 不同水稻品种叶面积指数的动态变化

由图2可知, 不同水稻品种叶面积指数移栽后, 前期缓慢增长, 中期快速增长, 至最大值后迅速下降。准两优527在整个大田期叶面积指数与对照相

表 1 不同水稻品种产量
Table 1 The yield in different cultivars of rice (kg hm⁻²)

品种 Cultivar	稻谷产量 Grain yield		平均值 Average	生物产量 Biological yield		平均值 Average
	2011	2012		2011	2012	
准两优 527 Zhunliangyou 527	10437.8 a	8886.9 a	9662.3 a	18025.0 a	16583.7 a	17304.3 a
Q 优 6 号 Qyou 6	10626.0 a	8149.9 ab	9387.9 a	17433.9 a	14679.9 a	16056.9 b
II 优 838 II you 838	10168.3 Aa	7771.7 Ab	8970.0 Aa	16073.3 Aa	13849.7 Ba	14961.5 Bc
2 个超级杂交稻的平均值 MSR	10531.9 A	8518.4 A	9525.1 A	17729.5 A	15631.8 A	16680.6 A
超级稻比对照增加百分比 Increased (%)	3.6	9.6	6.2	10.3	12.9	11.5

同一列数据后跟不同大小写字母表示差异达到 0.01 和 0.05 显著水平。

MSR: mean of the two super hybrid rice. Data followed by the different capitals and lowercases indicate significant difference at $P < 0.01$ and $P < 0.05$, respectively.

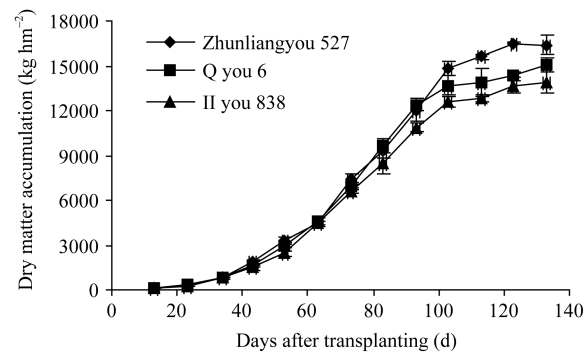


图 1 不同水稻品种群体干物质积累动态
Fig. 1 Dynamics of dry matter accumulation in different rice cultivars

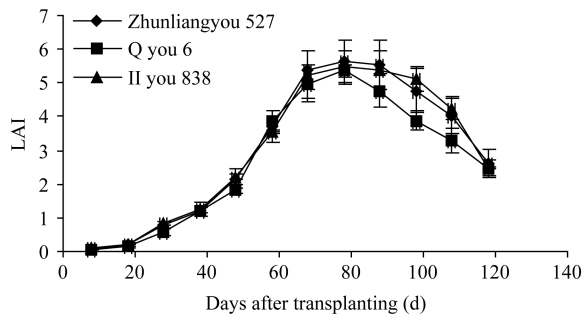


图 2 不同水稻品种叶面积指数的动态
Fig. 2 Dynamics of LAI in different rice cultivars

差不多, Q 优 6 号生育中、前期的叶面积指数相差不多, 在抽穗以后衰减速度较快。

2.4 水稻群体干物质积累 Gompertz 模型的建立与分析

利用 2011 年和 2012 年不同品种水稻群体干物质积累量数据, 以移栽后生长时间(T_R)为自变量, 群体干物质积累量(DMA_R)为因变量, 建立了基于 Gompertz 方程 $y=ae^{-\exp(b-cx)}$ 的水稻群体干物质积累动态模型, 进而分别对同一水稻品种 2 年群体干物质积累方程参数及其特征参数进行了方差分析(表 2)。

通过对超级杂交水稻与对照干物质积累特征参

数对比分析表明, 准两优 527 最大作物生长率(MCGR)出现在移栽后 72 d, Q 优 6 号 MCGR 出现在移栽后 69 d, 而对照 MCGR 出现在移栽后 68 d。准两优 527 干物质积累的快增期起始于移栽后 42 d, 结束于移栽后 103 d; Q 优 6 号干物质积累的快增期起始于移栽后 44 d, 结束在移栽后 95 d, 对照干物质快速增长期始于移栽后 42 d, 结束于移栽后 93 d; 超级杂交水稻快增强的持续时间比对照长 6 d (数据为 2 年数据的平均值)。

不同干物质积累模型参数组合反应了不同的干物质积累过程。本研究结果表明, 相同品种不同年份各参数之间差异不显著, 说明同一水稻品种不同年份群体干物质积累过程表现出相似的规律。本文利用 2012 年不同水稻品种试验数据, 分析 2 个超级杂交水稻群体指标的动态变化。

2.5 水稻相对叶面积指数动态模型的建立与检验

2.5.1 模型的建立 参考李向岭等^[18]和张宾等^[19]的方法, 用 Ration 方程 $y=(a+bx)/(1+cx+dx^2)$ 分析超级杂交水稻相对 LAI 动态变化特征, 其中 y 为相对叶面积指数, x 为移栽后天数的相对值。利用 2011 年试验数据, 采用 Curve Expert 1.50 软件对移栽后的相对时间和相对 LAI 进行拟合来确定方程的参数(表 3)。

2.5.2 模型的检验 利用 2012 年的 LAI 试验数据检验模型。不同水稻的根均方差(RMSE)分别为 0.39、0.32、0.26, 对应的相对根均方差(RRMSE)分别为 15.1%、14.6%和 11.0%, 说明模拟值与实测值吻合度较好, 可用该方程对 2012 年群体相关指标进行分析。

2.6 超级杂交水稻生长特征分析

2.6.1 不同生育阶段干物质积累 由表 4 可知, 2 个超级杂交水稻不同生育阶段群体干物质积累量及

表 2 不同水稻品种群体干物质积累动态模型参数								
Table 2 Parameters of dry matter accumulation dynamic equation of different rice cultivars								
品种 Cultivar	年份 Year	方程参数 Equation parameter			特征参数 Characteristic parameter			
		a	b	c	最大作物生长率 Maximum crop growth rate	x_1	x_2	x_3
准两优 527	2011	20781.4 a	2.0131 a	0.0278 a	209.75 a	38 a	73 a	109 a
Zhunliangyou 527	2012	19780.7 a	2.6488 a	0.0375 a	272.12 a	45 a	71 a	97 a
Q 优 6 号	2011	19263.5 a	2.4358 a	0.0349 a	242.85 a	42 a	71 a	100 a
Q you 6	2012	16238.7 a	3.0641 a	0.0458 a	272.51 a	45 a	67 a	89 a
II 优 838	2011	17718.2 a	2.5343 a	0.0383 a	250.07 a	41 a	66 a	91 a
II you 838	2012	15804.4 a	2.6262 a	0.0384 a	219.29 a	43 a	69 a	95 a

同一列中数据后跟相同小写字母表示差异未达 0.05 显著水平。
Data followed by the same lowercases are not significantly different at $P<0.05$.

表 3 不同水稻品种相对叶面积动态模型参数
Table 3 Parameters of LAI equation of different rice cultivars

品种 Cultivar	参数 Parameter			
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
准两优 527 Zhunliangyou 527	-0.0107	0.3098	-3.0075	2.7253
Q 优 6 号 Q you 6	-0.0347	0.3747	-3.2081	3.0828
II 优 838 II you 838	0.0115	0.3120	-2.8922	2.5897

表 4 超级杂交水稻不同生育阶段干物质积累
Table 4 Dry matter accumulation (DMA) of super hybrid rice at different stages

品种 Cultivar	缓增期 DMA		快增期 DMA		减速增长期 DMA	
	Slow increase period		Rapid growth period		Deceleration growth period	
	(kg hm ⁻²)	(%)	(kg hm ⁻²)	(%)	(kg hm ⁻²)	(%)
准两优 527 Zhunliangyou527	954.0 a	5.8	13463.8 a	82.5	1901.7 a	11.2
Q 优 6 号 Q you 6	941.6 a	6.2	10881.4 b	72.5	3146.8 a	21.0
II 优 838 II you 838	995.5 a	6.7	9476.0 c	65.0	4075.5 a	27.9
2 个超级杂交稻的平均值 MSR	947.8	6.0	12172.6	73.8	2524.3	16.1
超级稻比对照增加百分比 Increased (%)	-47.7	0.7	2696.6	12.5	-1551.3	-8.4

同一列中数据后跟不同小写字母在 0.05 显著水平下表示差异。
MSR: mean of two super hybrid rice cultivars. Data followed by the different lowercases are significantly different at $P<0.05$.

其占总生物量的比例均表现为快增期>减速增长期>缓增期。2个超级杂交水稻缓增期的干物质积累量及其占总生物量的比例略低于对照，差异不显著，但快增期的干物质积累量高于对照，差异显著，干物质积累量占总生物量的比例较对照高12.5%；在减速增长期，超级杂交水稻干物质积累量及其占总生物量的比例分别较对照低1551.3 kg hm⁻²、8.4%，差异不显著。

2.6.2 作物生长率(CGR) 由图 3 可知，2 个超级杂交水稻作物生长率动态变化呈前期缓慢增加，中期快速增加，至最大值后缓慢下降的趋势。与对照相比，准两优 527 缓增期的 CGR 基本相当，Q 优 6 号的 CGR 略低；超级杂交水稻快增期的 CGR 较高；在减速增长期，准两优 527 的 CGR 高，而 Q 优 6 号低。

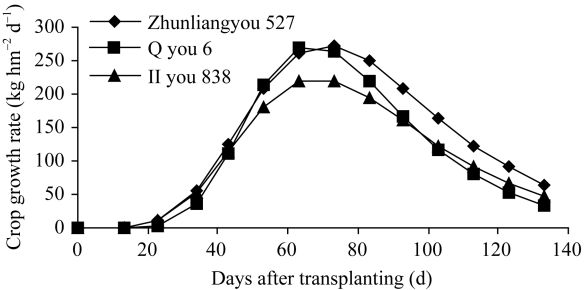


图 3 不同水稻品种作物生长率动态变化
Fig. 3 Dynamic changes of CGR in different rice cultivars

2.6.3 相对生长率(RGR) 由图 4 可以看出，不同水稻品种的 RGR 随移栽后时间的推移呈先升高

后下降的单峰曲线，最大值出现在移栽后 53~63 d。对 2 个超级杂交水稻的 RGR 分析表明，准两优 527 在移栽后 63 d 前高于 Q 优 6 号，移栽后 63 d 至成熟期两者相差不大。准两优 527 和 Q 优 6 号 NAR 到达峰值的时间分别为移栽后 53 d 和 63 d。

与对照相比，准两优 527 的 RGR 在移栽后 23 d 至成熟期较高。Q 优 6 号在移栽后 43 d 前较低，移栽后 43 d 至移栽后 113 d 较高，移栽后 113 d 至成熟期差异不显著。

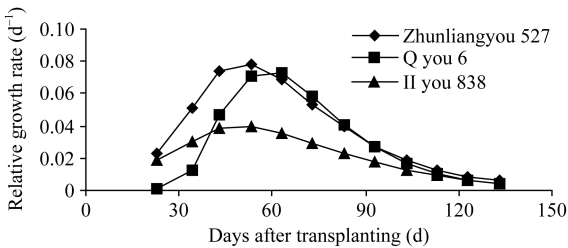


图 4 不同水稻品种相对生长率动态变化
Fig. 4 Dynamic changes of RGR in different rice cultivars

2.6.4 平均叶面积指数(ALAI)和光合势(LAD)
绿叶面积持续时间为快增期(P_2)>缓慢增长期(P_1)>减速增长期(P_3)，群体平均 LAI 为快增期(P_2)>减速增长期(P_3)>缓增期(P_1)。光合势为快增期(P_2)>减速增长期(P_3)>缓增期(P_1)(表 5)。

准两优 527 的平均叶面积指数和总光合势均高于对照，而 Q 优 6 号均低于对照。2 个超级杂交水稻最大叶面积出现的时间均早于对照。

相关性分析表明，总光合势与快增期的光合势、绿叶面积持续时间呈极显著正相关，与快速期的平均叶面积指数相关性不显著。快增期光合势与绿叶面积持续时间和平均叶面积指数呈极显著正相关，绿叶面积持续时间与平均叶面积指数不相

关。Q 优 6 号总光合势较低的原因是其快增期绿叶的持续时间较短及平均叶面积指数较低，快增期绿叶持续时间对总光合势产生直接影响，而平均叶面积指数主要是通过影响快增期光合势来影响总光合势(表 6)。

表 5 不同水稻品种不同时期光合势分析
Table 5 Analysis on leaf area duration (LAD) of different rice cultivars at different period

品种 Cultivar	持续时间 Duration			不同时期平均叶面积指数 ALAI at different stages.			平均 LAI ALAI	最大 LAI 出现时间 Time of maximum LAI occurrence	光合势 LAD			总光合势 Gross LAD
	T ₁	T ₂	T ₃	L ₁	L ₂	L ₃			P ₁	P ₂	P ₃	
准两优 527 Zhunliangyou 527	45 a	53 a	36 a	0.45 a	3.93 a	2.71 a	2.34 a	80	20.2 a	209.5 a	100.1 a	329.8 a
Q 优 6 号 Q you 6	45 a	45 a	44 a	0.39 a	3.10 a	2.34 a	1.91 a	77	18.3 a	134.3a	104.5 a	257.0 a
II 优 838 II you 838	43 a	52 a	38 a	0.46 a	3.35 a	2.79 a	2.27 a	82	19.4 a	177.2 a	106.8 a	302.4 a

P₁: 缓增期; P₂: 快增期; P₃: 减速增长期。同一列中数据后跟相同字母表示差异未达 0.05 显著水平。
Data followed by the same letter are not significantly different at $P<0.05$. ALIA: average leaf area index; P₁: slow increase period; P₂: rapid growth period; P₃: deceleration growth period.

表 6 各相关参数间的相关系数
Table 6 Coefficients of correlation between relative parameters

	持续时间 Duration	平均叶面积指数 ALAI	快增期光合势 LAD of rapid growth stage
平均叶面积指数 A LAI	0.247		
快增期光合势 LAD of rapid growth stage	0.742*	0.832**	
总光合势 Gross LAD	0.953**	0.401	0.819**

*和**表示 0.05 和 0.01 显著水平。* and ** denote significance at 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

2.6.5 净同化率(NAR) 不同水稻品种净同化率(NAR)随移栽后时间呈先升高后下降的趋势，最大 NAR 出现在移栽后 43~53 d。2 个超级水稻 NAR 在移栽后 23~43 d 以前迅速上升的，移栽后 43~53 d 准两优 527 缓慢上升，而 Q 优 6 号则缓慢下降，移栽后 53~83 d 的 NAR 迅速下降，移栽后 83 d 至成熟期，NAR 则缓慢下降。与对照相比，在移栽后 23 d 至成熟期，2 个超级杂交稻的 NAR 均较高(图 5)。

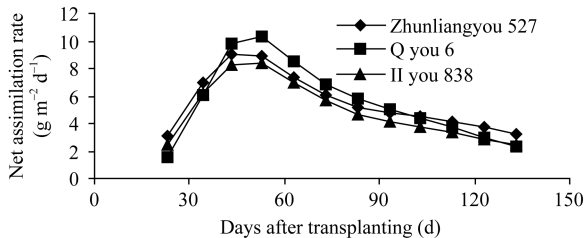


图 5 不同水稻品种净同化率
Fig. 5 Dynamic changes of NAR in different rice cultivars

2.6.6 叶面积比率(LAR) 不同水稻品种叶面积比率随移栽后时间的推移呈下降趋势(图 6)，移栽后

23~43 d LAR 迅速下降，移栽后 43~73 d 缓慢下降，移栽后 73 d 至成熟期下降速度变快。除 Q 优 6 号的 LAR 在移栽后 23~33 d 低于对照外，准两优 527 和 Q 优 6 号的 LAR 在移栽后 93 d 以前高于对照，移栽后 93 d 至成熟期与对照相差不大。

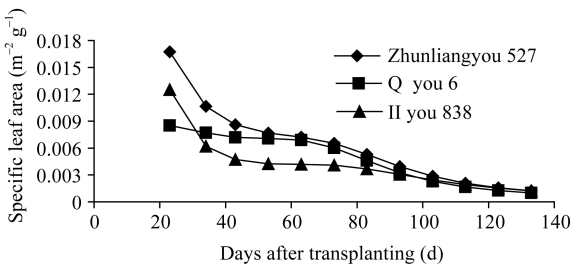


图 6 不同水稻品种叶面积比率的动态变化
Fig. 6 Dynamic changes of LAR in different rice cultivars

2.6.7 作物群体指标的综合分析 相关性分析表明，群体生长率与总生物量显著相关，其他指标与总生物量相关性不显著，说明作物生长率是水稻群体干物质积累过程中一个重要指标。作物

生长率与平均叶面积指数呈正相关，但不显著，与净同化率呈显著正相关，平均叶面积与净同化率呈显著正相关。因此，作物生长率主要受净同化率的影响，叶面积通过影响净同化率间接影响作物生长率。净同化率与叶面积比率呈极显著负相关(表 7)。

表 7 各群体指标的相关性
Table 7 Coefficients of correlation between population indices

群体指标 population index	作物生长率 Crop growth rate	平均叶面积指数 Average LAI	净同化率 Net assimilation rate	相对生长率 Relative growth rate	叶面积比率 Specific leaf area
平均叶面积指数 Average LAI	0.483				
净同化率 Net assimilation rate	0.667*	0.677*			
相对生长率 Relative growth rate	0.452	0.256	0.343		
叶面积比率 Specific leaf area	-0.475	-0.638	-0.949**	-0.248	
总生物量 Total biomass	0.710*	0.538	0.589	0.400	-0.395

*和**表示 0.05 和 0.01 显著水平。* and ** denote significance at 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

3 讨论

作物生长模拟方程可解释作物生长动态，其推导出的特征参数具有生物学意义^[26-27]，特征参数在不同的气象条件下虽存在差异，但干物质积累特征基本一致^[28]。在相同的栽培措施条件下，本研究通过建立数学模型对准两优527和 Q 优6号群体干物质的积累特征以及主要群体指标进行了分析。从所建模型可以看出，不同年份间模型的参数以及干物质积累特征参数之间差异不显著，表明2年不同水稻群体干物质积累的特征基本一致。

赵娇等^[28]研究表明，快增期结束时间离收获期越近，持续时间越长，有利于产量的提高。刘娟等^[29]分析得出，快增期是干物质积累变化速率对密度的敏感反映期。明确超级杂交水稻快增期的起止时间，有利于其群体的调控。本研究表明，超级杂交水稻快增期的干物质积累量及占总生物量的比例均显著高于对照，其快增期的持续时间比对照的长 6 d；准两优 527 群体干物质积累的快速增长期开始于移栽后 42 d，结束于移栽后 103 d，而 Q 优 6 号这两时间分别是移栽后 44 d 和移栽后 95 d。

作物群体生长率即单位面积上群体干物质的积累速率，它可以很好地反映水稻整个生育期的干物质积累情况。本研究通过对水稻群体干物质积累量动态模型 Gompertz 方程求导，可获得瞬时群体生长率方程，利用该方程可得到瞬时群体生长率随移栽后时间的动态变化曲线，进而对不同水稻品种的群体生长率进行了比较分析。2个超级杂交水稻的 CGR 呈先升高后下降的单峰曲线，最大 CGR 出现在移栽后 69~72 d。准两优527缓增期的作物生长率与对照

基本相当，Q 优6号的作物生长率低于对照，这可能与 Q 优6号缓慢增长期相对生长率低有关；2个超级杂交水稻快增期的作物生长率均明显高于对照，主要原因是 CGR 主要受 NAR 的影响，2个超级杂交水稻快增期的 NAR 较高；减速增长期2个超级杂交水稻表现不一致，准两优527的 CGR 高于对照，而 Q 优6号 CGR 低于对照，其原因是减速增长期 Q 优6号的叶面积衰减较快，叶面积较小。因此，减缓 Q 优6号减速增长期叶面积衰减速度，保持一个适宜的叶面积指数可以进一步提高其产量。

本研究表明，不同水稻相对生长率(RGR)移栽以后逐渐增加，至移栽后 53~63 d (约为孕穗期)达到最大值，孕穗期以后植株逐渐以生殖生长为中心，RGR 逐渐减小。2 个超级杂交水稻相对生长率在孕穗期以后高于对照，说明超级杂交水稻在孕穗期以后具有较强的“源”供应能力，这可能是超级杂交水稻产量较高的一个原因。

光合势(LAD)是单位土地面积的绿叶面积与光合时间的乘积，由叶面积指数及其持续时间共同决定。有研究表明，LAD 比 LAI 更能解析超级稻的物质生产优势^[9]。总光合势与快增期光合势、快增期绿叶面积持续时间呈极显著正相关。Q 优 6 号总光合势较低的原因是其快增期绿叶的持续时间较短以及平均叶面积指数较低。

本研究表明，不同水稻净同化率(NAR)随移栽后时间呈先上升后下降的偏峰曲线，NAR 在移栽后 43~53 d 达到最大值，移栽后 43~53 d 至移栽后 83 d 迅速下降，其原因作为作物群体叶面积指数会影响净同化率，叶面积指数达高峰期，叶片相互遮蔽使群体受光面积不再随叶面积的增加而增加。同时，移

栽后 43~53 d 至移栽后 83 d 处于水稻拔节至抽穗期, 植株新陈代谢旺盛, 呼吸消耗多, 导致净同化率迅速下降。移栽后 83 d 以后, 叶面积逐渐衰减, 群体干物质积累速度减慢, 净同化率趋于平缓。

从作物的生活周期来看, 随叶片的增长减缓、停滞和衰老, 叶面积比率(LAR)越来越小^[31]。超级杂交水稻 LAR 动态过程呈三段变化, 即移栽后 23~43 d LAR 迅速下降, 移栽后 43 d~73 d 缓慢下降, 移栽后 73 d 至成熟期快速下降。LAR 反映了源供应能力的强弱以及源库是否协调^[30], 2 个超级杂交水稻在生育中后期的 LAR 较大, 说明其源供应能力较强。

4 结论

快增期是超级杂交水稻与对照干物质积累量差异较大的时期。CGR 可以很好地反映水稻整个生育期的干物质积累情况, 超级杂交稻的 CGR 随移栽后时间呈单峰曲线变化, 前期缓慢增加, 中期快速增加, 至最大值后缓慢下降。超级杂交水稻干物质积累快增期的 CGR、RGR、NAR、LAR 均高于对照。

References

- [1] Fan S-X(范淑秀), Chen W-F(陈温福), Wang J-Y(王嘉宇). Studies on production characters of dry matter in high-yield rice. *Liaoning Agric Sci* (辽宁农业科学), 2005, 3(3): 6-8 (in Chinese with English abstract)
- [2] Ao H-J(敖和军), Wang S-H(王淑红), Zou Y-B(邹应斌), Peng S-B(彭少兵), Tang Q-Y(唐启源), Fang Y-X(方远祥), Xiao A-M(肖安民), Chen Y-M(陈玉梅), Xiong C-M(熊昌明). Study on yield stability and dry matter characteristics of super hybrid rice. *Sci Agric Sin* (中国农业科学), 2008, 41(7): 1927-1936 (in Chinese with English abstract)
- [3] Lin R-Y(林瑞余), Liang Y-Y(梁义元), Cai B-Q(蔡碧琼), He H-B(何海斌), Lin W-X(林文雄). Characteristics of dry matter accumulation and partitioning in the process of yield formation in different rice cultivar. *Chin Agric Sci Bull* (中国农学通报), 2006, 22(2): 185-190 (in Chinese with English abstract)
- [4] Hong Z-F(洪植蕃), Lin F(林菲), Zhuang B-H(庄宝华), Zhu Z-Z(朱朝枝), Yang J-T(杨居钊). Studies on agro-physio-ecological characteristics of two-line rice hybrids: II. Characteristics of dry matter production and partitioning. *J Fujian Agric Coll* (福建农学院学报), 1992, 21(2): 129-136 (in Chinese with English abstract)
- [5] Li J(李杰), Zhang H-C(张洪程), Chang Y(常勇), Gong J-L(龚金龙), Guo Z-H(郭振华), Dai Q-G(戴其根), Huo Z-X(霍中洋), Xu K(许柯), Wei H-Y(魏海燕), Gao H(高辉). Characteristics of photosynthesis and matter production of rice with different planting methods under high-yielding cultivation condition. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2011, 37(7): 1235-1248 (in Chinese with English abstract)
- [6] Xie H-A(谢华安), Wang W-Q(王乌齐), Yang H-J(杨惠杰), Yang G-Q(杨高群), Li Y-Z(李义珍). The characteristics of super high-yielding hybrid rice. *Fujian J Agric Sci* (福建农业学报), 2003, 18(4): 201-204 (in Chinese with English abstract)
- [7] Yang C-D(杨从党), Zhu D-F(朱德峰), Yuan P-R(袁平荣), Huang Q-Y(黄庆宇), Zheng X-Y(郑学玉), Yang A-B(杨爱兵). Research on relationship between traits of rice matter production and grain yield. *Southwest China J Agricul Sci* (西南农业学报), 2006, 19(4): 561-564 (in Chinese with English abstract)
- [8] Wu G-C(吴桂成), Zhang H-C(张洪程), Dai Q-G(戴其根), Huo Z-Y(霍中洋), Xu K(许柯), Gao H(高辉), Wei H-Y(魏海燕), Sha A-Q(沙安勤), Xu Z-J(徐宗进), Qian Z-H(钱宗华), Sun J(孙菊). Characteristics of dry matter production and accumulation and super-high yield of japonica super rice in South China. *Acta Agron Sin* (中国农业科学), 2010, 36(11): 1921-1930 (in Chinese with English abstract)
- [9] Yang H-J(杨惠杰), Li Y-Z(李义珍), Yang R-C(杨仁崔), Jiang Z-W(姜照伟), Zheng J-S(郑景生). Dry matter production characteristics of super high yielding rice. *Chin J Rice Sci* (中国水稻科学), 2001, 15(4): 265-270 (in Chinese with English abstract)
- [10] Wu W-G(吴文革), Zhang H-C(张洪程), Qian Y-F(钱银飞), Chen Y(陈烨), Xu J(徐军), Wu G-C(吴桂成), Zhai C-Q(翟超群), Huo Z-Y(霍中洋), Dai Q-G(戴其根). Analysis on dry matter production characteristics of middle-season indica super hybrid rice. *Chin J Rice Sci* (中国水稻科学), 2007, 21(3): 287-293 (in Chinese with English abstract)
- [11] Yang C-D(杨从党), Zhou X(周能), Yuan P-R(袁平荣), He Q-R(贺庆瑞), Ying J-F(应继锋), Yang H(杨洪), Yang G-Q(杨高群). Analysis of dry matter production in high-yielding rice cultivars. *Southwest China J Agric Sci* (西南农业学报), 1998, 11(S3): 89-94 (in Chinese with English abstract)
- [12] Li X-L(李向玲), Zhao M(赵明), Li C-F(李从锋), Ge J-Z(葛均筑), Hou H-P(侯海鹏), Li Q(李琦), Hou L-B(侯立白). Effect of sowing-date and planting density on dry matter accumulation dynamic and establishment of its simulated model in maize. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2010, 36(12): 2143-2153 (in Chinese with English abstract)
- [13] Hou Y-H(侯玉虹), Chen C-Y(陈传永), Gou Z-Q(郭志强), Hou L-B(侯立白), Dong Z-Q(董志强), Zhao M(赵明). Establishment of dry matter accumulation dynamic simulation model and analysis of growth characteristic for high-yielding population of spring maize. *J Maize Sci* (玉米科学), 2008, 16(6): 90-95 (in Chinese with English abstract)
- [14] Zhu Q-S(朱庆森), Cao X-Z(曹显祖), Luo Y-Q(骆亦其). Growth analysis on the process of grain filling in rice. *Acta Agron Sin* (作物学报), 1988, 14(3): 182-193 (in Chinese with English abstract)
- [15] Li Y-D(李艳大), Tang L(汤亮), Chen Q-C(陈青春), Zhang Y-P(张玉屏), Cao W-X(曹卫星), Zhu Y(朱艳). Dry matter accumulation in rice aboveground part: Quantitative simulation. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 2010, 21(6): 1504-1510 (in Chinese with English abstract)

- [16] Diao C-Q(刁操铨). Experimental Guide for Crop Cultivation (作物栽培学实验指导). Beijing: Agricultural Press, 1988. pp 1–3 (in Chinese)
- [17] Zhang X-Z(张宪政). Research Methods on Crop Physiology (作物生理研究法). Beijing: Agricultural Press, 1992. pp 136–156 (in Chinese)
- [18] Li X-L(李向岭), Zhao M(赵明), Li C-F(李从锋), Ge J-Z(葛均筑), Hou H-P(侯海鹏). Dynamic characteristics of leaf area index in maize and its model establishment based on accumulated temperature. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2011, 37(2): 321–330 (in Chinese with English abstract)
- [19] Zhang B(张宾), Zhao M(赵明), Dong Z-Q(董志强), Li J-G(李建国), Chen C-Y(陈传永), Sun R(孙锐). Establishment and test of LAI dynamic simulation model for high yield population. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2007, 33(4): 612–619 (in Chinese with English abstract)
- [20] Zhang X-D(张旭东), Cai H-J(蔡焕杰), Fu Y-J(付玉娟), Wang J(王健). Study on leaf area index of summer maize in loess areas. *Agric Res Arid Areas* (干旱地区农业研究), 2006, 24(2): 25–29 (in Chinese with English abstract)
- [21] Fu X-L(付雪丽), Zhao M(赵明), Zhou B-Y(周宝元), Cui G-M(崔国美), Ding Z-S(丁在松). Optimal model for dynamic characteristics of grain weight commonly used in wheat and maize. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2009, 35(2): 309–316 (in Chinese with English abstract)
- [22] Rinaldi M, Losavio N, Flagella Z. Evaluation and application of the OILCROP-SUN model for sunflower in southern Italy. *Agric Syst*, 2003, 78: 17–30
- [23] Caton B P, Foin T C, Hill J E. A plant growth model for integrated weed management in direct-seeded rice: II. Validation testing of water-depth effects and monoculture growth. *Field Crops Res*, 1999, 62: 145–155
- [24] Kobayashi K, Salam M U. Comparing simulated and measured values using mean squared deviation and its components. *Agron J*, 2000, 92: 345–352
- [25] Ji H-T(纪洪亭), Feng Y-H(冯跃华), He T-B(何腾兵), Pan J(潘剑), Fan L-L(范乐乐), Xiao M(肖铭), Liang X-L(梁显林). A dynamic model of dry matter and nutrient accumulation in super hybrid rice and analysis of its characteristics. *Sci Agric Sin* (中国农业科学), 2012, 45(18): 3709–3720 (in Chinese with English abstract)
- [26] Hu Y-J(胡延吉), Lan J-H(兰进好), Zhao T-F(赵檀方). Dry matter accumulation and partitioning in three major wheat cultivars released in different period. *J Shandong Agric Univ* (山东农业大学学报·自然科学版), 1999, 30(4): 404–408 (in Chinese with English abstract)
- [27] Li G-Q(李国强), Tang L(汤亮), Zhang W-Y(张文宇), Zhang W-Y(张文宇), Cao W-X(曹卫星). Dynamic analysis on response of dry matter accumulation and partitioning to nitrogen fertilizer in wheat cultivars with different plant types. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2009, 35(12): 2258–2265 (in Chinese with English abstract)
- [28] Zhao J(赵娇), Zheng Z-F(郑志芳), Fang Y-R(方艳茹), Zhou S-L(周顺利), Liao S-H(廖树华), Wang P(王璞). Effect of dry matter accumulation characteristics on yield of winter wheat analyzed by dynamic simulation model. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2013, 39(2): 300–308 (in Chinese with English abstract)
- [29] Liu J(刘娟), Xiong S-P(熊淑萍), Yang Y(杨阳), Zhai Q-Y(翟清云), Wang Y-F(王严峰), Wang J(王静), Ma X-M(马新明). A model to predict dry matter accumulation dynamics in wheat based on the normalized method. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 2012, 32(17): 5512–5520 (in Chinese with English abstract)
- [30] Chen C-Y(陈传永), Dong Z-Q(董志强), Zhao M(赵明), Zhang B(张宾), Zhu P(朱平). Researches of analysis and growth on spring maize with super-high yield in cold region. *J Maize Sci* (玉米科学), 2007, 15(3): 75–79 (in Chinese with English abstract)