

杨罗浩,彭福燕,高俊阳,等.不同种植密度和施肥水平下湖北二季晚粳群体物质生产特征及其与产量形成的关系[J].华中农业大学学报, 2020, 39(5): 76-84. DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2020.05.011

不同种植密度和施肥水平下湖北二季晚粳群体物质生产特征及其与产量形成的关系

杨罗浩¹,彭福燕¹,高俊阳¹,翁玉林¹,姚璇¹,涂军明²,杨特武¹

1.华中农业大学植物科学技术学院/农业农村部长江中游作物生理生态与耕作重点实验室,武汉 430070;

2.湖北省黄冈市农业科学研究院,黄冈 438000

摘要 为建立二季晚粳高产栽培技术,促进湖北省“早籼-晚粳”种植模式的发展,以鄂粳 403 为材料,在 2 种大田种植密度(28.3 万和 37.6 万穴/hm²)和 5 个施氮水平(0、165、195、225、255 kg/hm²)下比较了其产量形成的差异,并运用 Gompertz 方程对群体叶面积指数和地上部生物学产量增长动态及其特征参数进行了模拟。结果表明:二季晚粳产量主要决定于施肥量,而受种植密度的影响较小,说明其群体具有较强的自我调节能力。在适宜施肥水平下,单位面积有效穗数和群体生物学产量显著提高,进而增加经济产量。在本试验条件下,二季晚粳适宜施氮量为 225 kg/hm²。群体高效物质生产能力取决于其较高的干物质生产速率和较长的干物质快速积累期,并以快速建立起适宜叶面积指数为基础。高产群体具有较高的叶面积指数增长速率和较短的叶面积指数快速增长期。依据二次曲线模型提出了二季晚粳各阶段适宜的群体叶面积指数和干物质生产量,可为其高产群体的建立提供参考。

关键词 二季晚粳; 籼改粳; 群体结构; 产量; 施肥水平; 种植密度

中图分类号 S 511.2⁺2.01 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2020)05-0076-09

双季稻生产系统具有高产稳产的特点,可高效利用农作物资源,并有利于降低自然灾害风险和追求单季超高产所造成的资源和环境压力^[1]。湖北省地处南北气候过渡地带,光温水资源丰富,多数稻作区适合种植双季稻,双季稻播种面积曾达到 233 万 hm² 的历史最高水平^[2]。近 10 年来由于受种粮效益不高等多种因素的影响,双季稻种植面积逐渐萎缩,目前全省年种植面积仅在 30 万 hm² 左右。

湖北省目前以种植籼稻为主。随着消费市场对粳米需求量逐渐增加,粳米的价格明显高于籼米^[3],种植粳稻的生产效益也优于籼稻;同时,粳稻耐低温和抗倒伏能力较强,功能叶持续期较长,抽穗后光合生产能力和物质转运能力较强^[4-6],在湖北省作为二季晚稻种植有利于实现高产优质协同生产目标。因此,实施“籼改粳”战略特别是将双季籼稻改为“早籼-晚粳”种植模式,是提升湖北省水稻生产效益的有效途径之一^[2]。然而,目前适宜湖北省的晚粳高产栽培技术仍十分缺乏^[7],亟待加强研究。

适宜的种植密度和施肥水平有利于构建合理的群体结构,协调群体和个体生长矛盾,是水稻高产栽培研究的重要技术内容^[8-9]。研究表明,在一定范围内提高种植密度和施肥量有利于水稻增产^[10-11],但关于二者互作对产量的影响,不同学者的研究结果不尽一致^[8,12],仍需加强研究。水稻产量与群体光合生产能力密切相关,而群体光合生产能力又决定于适宜的群体结构^[13-15]。运用生长曲线模型定量描述群体的发展动态和特征,有助于阐明不同技术措施对作物产量形成的影响及作用机制^[16-17]。为促进本地区“早籼-晚粳”种植模式的发展,本研究以湖北省当前主推的二季晚粳品种为材料,研究不同种植密度与施肥水平组合对其生长发育、群体结构和产量形成的影响,并应用生长曲线模型描述不同群体的发展动态和特征,为建立适宜本地区的二季晚粳高产高效栽培技术提供试验和理论依据。

收稿日期: 2020-05-06

基金项目: 国家重点研发计划专项(2017YFD0301402)

杨罗浩,硕士. 研究方向: 作物栽培生理. E-mail: 562635446@qq.com

通信作者: 杨特武,博士,副教授. 研究方向: 作物生理生态学. E-mail: yangtewu@mail.hzau.edu.cn

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2018年6—10月在湖北省团风县梅家墩村(114°56'E, 30°34'N)进行,试验地位于北亚热带季风气候区。试验地土壤为长江冲积潮土,含有有机质 23.9 g/kg、碱解氮 90.8 mg/kg、速效磷 8.9 mg/kg、有效钾 61.6 mg/kg, pH 7.1。前茬种植冈早粳 11 号,于3月22日播种,4月25日插秧,7月4日收获。试验期间日均气温 23.7 °C (5.9 ~ 37.6 °C),降水量 708.7 mm。

1.2 试验品种

鄂粳 403,由湖北省农业科学院粮食作物研究所提供。

1.3 试验设计与方法

按 2(移栽密度)×5(施肥量)双因素试验设计,移栽密度分别为:28.3 万穴/hm² (D1, 26.6 cm×13.3 cm)、37.6 万穴/hm² (D2, 20.0 cm×13.3 cm),每穴 4 本;参考当地农民习惯施肥法设置 5 个本田施氮水平(kg/hm²):0(F0)、165(F1)、195(F2)、225(F3)、255(F4),共 10 个处理。氮(N)、磷(P₂O₅)、钾(K₂O)施用比为 1:0.5:1;氮肥 50%作基肥,30%作分蘖肥,20%作穗肥;磷肥全部作基肥;钾肥 50%作基肥,50%作穗肥^[18]。基肥施用三元复合肥(16-16-16),追肥施用尿素和氯化钾。

试验随机区组排列,3次重复,小区面积 15 m²。小区间设置隔离埂并包裹黑色塑料膜,防止窜水窜肥。2018年6月24日播种,7月17日移栽,11月1日收获。按当地晚稻习惯栽培法进行田间管理。

1.4 测定项目与方法

分别在移栽期、分蘖盛期、分蘖末期、拔节期、齐穗期、乳熟期和成熟期取样测定每穴茎蘖数、叶面积、地上部各器官干物质质量。移栽期取 50 株秧苗,以后各时期在每小区取代表性 5 穴进行测定。成熟期测定各小区经济产量,并从每小区取代表性 10 穴调查产量构成。

1.5 统计分析方法

依据 Gompertz 方程,采用 CurveExpert(Home Page)对不同处理群体叶面积指数(LAI)增长和地上部干物质生产进行模拟。Gompertz 模型表达式为:

$$Y = a e^{-\exp(b-ct)} \quad (1)$$

式(1)中, Y 为 t 时间相对 LAI 或相对生物学产量; t 为播种后相对生长时间; a 、 b 和 c 为常数。

计算前,利用归一法将群体最大 LAI 和最大生物学产量及全生育期时间定为 1,得到各生育阶段 LAI、生物学产量和生长时间相对值:

$$A_R = \frac{A_i}{A_M} \quad (2)$$

式(2)中, A_R 为某生育阶段 LAI 或生物学产量相对值(0~1), A_i 为该生育阶段 LAI 或生物学产量测定值, A_M 为全生育期 LAI 或生物学产量最大值。

$$t_R = \frac{t_i}{t_M} \quad (3)$$

式(3)中, t_R 为某生育阶段相对时长(0~1); t_i 为播种至该生育阶段的生长时长, d ; t_M 为全生育期时长, d 。

由式(1)、(2)和(3)可获得不同处理下列 LAI 增长或干物质积累参数:

$$t_1 = \frac{(b-0.9614) \times t_M}{c}; t_2 = \frac{(b+0.9614) \times t_M}{c}; t_0 = \frac{b \times t_M}{c} \quad (4)$$

式(4)中, t_1 为 LAI 快速增长或干物质快速积累的始期, t_2 为 LAI 快速增长或干物质快速积累的终期, t_0 为 LAI 增长或干物质积累达到最大速率的时间。

当 $t = t_0$ 时,LAI 或干物质最大增长速率:

$$V_M = \frac{a \times c \times A_M \times \exp(-1)}{t_M} \quad (5)$$

应用 SPSS20.0 对数据进行统计分析,采用 Duncan's 多重比较检验不同处理间差异显著性。

2 结果与分析

2.1 产量及其构成

收获期测定结果显示,在 2 种植密度下经济产量均以 F3 施肥水平最高;在产量相关性状中,高产与低产差异最大的是单位面积有效穗数和生物学产量(表 1)。方差分析表明,单位面积有效穗数受种植密度、施肥量及其互作的影响显著,成穗率仅受密度的影响显著,每穗实粒数和经济产量仅受施肥量的影响显著,千粒重和生物学产量同时受密度和施肥量的显著影响,而种植密度和施肥量及其互作对每穗总粒数影响均不显著(资料未列出)。

表 1 不同种植密度及施肥量处理的产量及相关性状

Table 1 Rice yield and its related traits at different plantation densities and fertilizer application rates

处理 Treatment	有效穗数/ (万穗/hm ²) Effective panicle number	成穗率/% Effective tiller ratio	穗总粒数 Total grain number per panicle	穗实粒数 Filled grain number per panicle	千粒重/g 1 000-grain weight	经济产量/ (t/hm ²) Economic yield	生物学产量/ (t/hm ²) Biological yield
D1F0	151.2e	70.8bc	124.5a	104.7c	29.1f	4.07d	9.3d
D1F1	226.8c	76.5ab	127.7a	114.5abc	29.9cde	6.55bc	14.1c
D1F2	226.8c	73.1abc	131.6a	115.5ab	29.8de	6.59bc	14.2c
D1F3	231.1c	74.4abc	134.0a	118.8a	29.6e	7.08ab	15.7b
D1F4	243.2b	79.8a	133.3a	112.7abc	29.6e	6.92abc	15.6b
D2F0	165.0d	57.7e	126.0a	107.3bc	29.1f	4.20d	9.7d
D2F1	233.2c	60.4de	129.3a	112.7abc	30.2ab	6.41c	15.4b
D2F2	230.5c	61.0de	129.6a	113.5abc	30.4a	6.43c	15.6b
D2F3	263.6a	67.6cd	128.1a	110.8abc	30.0bcd	7.16a	16.6a
D2F4	263.6a	67.3cd	122.4a	108.2bc	30.0bc	7.04ab	16.3ab

注: 同列不同小写字母表示 $\alpha=0.05$ 水平上的差异显著性。下同。Note: Different small letters mean significant difference for data in the same column at $\alpha=0.05$ level. The same as follows.

在相同密度下随着施肥量的提高,经济产量、生物学产量、每穗总粒数和实粒数以及千粒重均呈先升后降的趋势,而单位面积有效穗数基本呈上升趋势。在低密度(D1)下,每穗实粒数以 F3 最高,千粒重以 F1 最高;在高密度(D2)下,每穗实粒数和千粒重均以 F2 最高。在相同施肥水平下,不同种植密度的经济产量、每穗实粒数差异不显著,而高密度下生物学产量、单位面积有效穗数和千粒重有高于低密度的趋势,但成穗率显著低于低密度处理(表 1)。相关性分析结果显示,经济产量与单位面积有效穗数($r=0.929^{**}$)、成穗率($r=0.366^{*}$)、每穗实粒数($r=0.508^{**}$)、千粒重($r=0.722^{**}$)以

及生物学产量($r=0.935^{**}$)呈显著或极显著正相关。

2.2 叶面积指数特征

试验结果表明,从移栽期到拔节期各群体 LAI 均呈上升趋势,到齐穗期又有所下降。在相同种植密度下增加施肥量,各时期 LAI 呈先增后减趋势;在相同施肥量下,高种植密度处理的各时期 LAI 高于低种植密度处理(表 2)。

应用 Gompertz 方程对不同群体 LAI 增长进行模拟,除 2 个不施肥处理(D1F0 和 D2F0)外,其余处理群体的模型决定系数均在 0.95 以上(表 3)。

表 2 不同种植密度及施肥量群体不同时期平均叶面积指数

Table 2 Average population leaf area index (LAI) of different plantation densities and fertilizer application rates at various stages

生育时期 Growth stage	D1F0	D1F1	D1F2	D1F3	D1F4	D2F0	D2F1	D2F2	D2F3	D2F4
移栽期 Transplanting	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49
分蘖盛期 Active tillering	1.17	1.38	1.38	1.46	1.41	1.25	1.85	1.84	1.95	1.88
分蘖末期 Late tillering	2.04	3.78	3.79	4.73	4.61	2.61	5.11	5.02	6.13	6.04
拔节期 Stem elongation	3.64	5.89	6.00	7.11	7.00	4.45	7.09	7.19	8.10	8.01
齐穗期 Full heading	2.71	4.92	4.97	5.74	5.67	2.95	5.81	5.96	6.55	6.42

根据表 3 模型参数计算出不同群体 LAI 增长特征参数,结果显示:与不施肥处理比较,施肥明显提高群体 LAI 增长最大速率和快速增长长期平均速率,但延迟最大速率出现时间,并缩短快速增长长期历时。在相同种植密度下随着施肥水平的提高,LAI 增长最大速率和快速增长长期平均速率均呈先升后降

趋势,而快速增长长期起始时间呈推迟趋势,快速增长长期历时呈先缩短后延长趋势,但 F3 与 F4 间差异不大。与低密度处理比较,在相同施肥水平下高密度处理的 LAI 最大增长速率和快速增长长期平均速率增高,最大速率出现时间及快速增长长期终止时间提前,而快速增长长期历时缩短(表 4)。

表 3 不同密度及施肥量群体相对叶面积指数增长 Gompertz 模型

Table 3 Gompertz's equations of relative population leaf area index growth at different plantation densities and fertilizer application rates

处理 Treatment	模型表达式 Model equation	标准差 SD	决定系数(R ²) Determination coefficient
D1F0	$Y=0.98e^{-\exp(2.33 - 4.47t)}$	0.168 4	0.886 0
D1F1	$Y=0.96e^{-\exp(3.97 - 7.18t)}$	0.114 8	0.958 6
D1F2	$Y=0.96e^{-\exp(3.92 - 7.08t)}$	0.120 3	0.954 1
D1F3	$Y=0.92e^{-\exp(4.75 - 8.67t)}$	0.118 5	0.956 9
D1F4	$Y=0.92e^{-\exp(4.75 - 8.59t)}$	0.119 6	0.956 3
D2F0	$Y=0.88e^{-\exp(2.83 - 5.60t)}$	0.203 1	0.828 3
D2F1	$Y=0.92e^{-\exp(4.79 - 9.08t)}$	0.114 3	0.957 5
D2F2	$Y=0.94e^{-\exp(4.40 - 8.27t)}$	0.113 0	0.958 4
D2F3	$Y=0.91e^{-\exp(5.78 - 10.97t)}$	0.110 8	0.962 2
D2F4	$Y=0.90e^{-\exp(5.79 - 10.93t)}$	0.115 7	0.958 4

表 4 不同种植密度及施肥量群体叶面积指数增长模拟特征参数

Table 4 Characteristic parameters of simulated population leaf area index growth at different plantation densities and fertilizer application rates

处理 Treatment	最大速率 Fastest growth point		快速增长期 Fast growth period			
	出现时间 DAT/d Occurrence time	速率/d ⁻¹ Speed	始期 DAT/d Initial time	终期 DAT/d Terminal time	平均速率/d ⁻¹ Mean speed	历时/d Duration
D1F0	16.6	0.08	0.2	32.9	0.07	32.7
D1F1	19.1	0.20	8.9	29.2	0.17	20.4
D1F2	19.1	0.20	8.8	29.4	0.17	20.6
D1F3	18.7	0.28	10.3	27.1	0.24	16.9
D1F4	19.0	0.27	10.5	27.6	0.23	17.0
D2F0	15.3	0.11	2.3	28.4	0.09	26.1
D2F1	17.1	0.29	9.0	25.1	0.25	16.1
D2F2	16.9	0.32	9.5	24.3	0.27	14.8
D2F3	17.0	0.39	10.4	23.7	0.34	13.3
D2F4	17.2	0.38	10.6	23.9	0.33	13.4

注 Note: DAT:移栽后历时 Days after transplanting. 下同。The same as follows.

2.3 干物质生产特征

不同处理群体干物质积累动态如表 5 所示,与 LAI 变化类似,在相同密度下随着施肥量的增加,各时期干物质质量呈先增后减趋势;在相同施肥量下,高

密度处理各时期干物质产量高于低密度处理。

应用 Gompertz 方程对不同群体干物质生产动态进行模拟,所有模型决定系数均在 0.99 以上(表 6)。

表 5 不同种植密度及施肥量群体不同时期平均干物质产量

Table 5 Average dry matter production in populations of different plantation densities and fertilizer application rates at various stages

生育时期 Growth srage	D1F0	D1F1	D1F2	D1F3	D1F4	D2F0	D2F1	D2F2	D2F3	D2F4	t/hm ²
移栽期 Transplanting	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	
分蘖盛期 Active tillering	0.79	0.91	1.02	1.03	0.93	0.97	1.33	1.34	1.35	1.30	
分蘖末期 Late tillering	2.07	3.15	3.21	3.81	3.56	2.47	3.96	3.99	4.10	3.92	
拔节期 Stem elongation	4.63	6.08	6.90	7.02	6.96	5.10	7.62	7.80	7.89	7.72	
齐穗期 Full heading	6.01	8.76	9.22	9.29	9.24	6.28	9.45	9.65	10.36	10.18	
乳熟期 Milky maturity	8.08	11.58	11.82	11.98	11.83	8.17	12.19	12.24	12.76	12.64	
成熟期 Full maturity	9.30	14.14	14.21	15.65	15.57	9.70	15.43	15.57	16.59	16.33	

表 6 不同密度及施肥量群体相对干物质生产 Gompertz 模型

Table 6 Gompertz's equations of relative population dry matter production at different plantation densities and fertilizer application rates

处理 Treatment	模型表达式 Model equation	标准差 SD	决定系数(R^2) Determination coefficient
D1F0	$Y=1.04e^{-\exp(2.98-6.49t)}$	0.024 4	0.997 4
D1F1	$Y=1.05e^{-\exp(2.81-5.90t)}$	0.023 0	0.997 6
D1F2	$Y=1.03e^{-\exp(2.92-6.33t)}$	0.017 0	0.998 6
D1F3	$Y=1.06e^{-\exp(2.47-5.17t)}$	0.017 2	0.998 6
D1F4	$Y=1.06e^{-\exp(2.54-5.30t)}$	0.019 2	0.998 2
D2F0	$Y=1.04e^{-\exp(2.68-6.00t)}$	0.017 3	0.998 6
D2F1	$Y=1.05e^{-\exp(2.47-5.35t)}$	0.016 1	0.998 8
D2F2	$Y=1.05e^{-\exp(2.48-5.42t)}$	0.017 6	0.996 8
D2F3	$Y=1.05e^{-\exp(2.49-5.35t)}$	0.023 5	0.997 2
D2F4	$Y=1.05e^{-\exp(2.53-5.42t)}$	0.022 0	0.997 6

表 7 显示,与不施肥处理比较,施肥处理的干物质积累最大速率和快速积累期平均速率提高,而快速积累期延长。在相同密度下随着施肥量的增加,群体干物质积累最大速率和快速积累期平均速率基本呈提高趋势。除不施肥处理外,在相同施肥水平下高密度处理的干物质积累最大速率和快速积累期

表 7 不同种植密度及施肥量群体干物质生产模拟特征参数

Table 7 Characteristic parameters of simulated population dry matter production at different plantation densities and fertilizer application rates

处理 Treatment	最大积累速率 Fastest accumulation point		快速积累期 Fast accumulation period			
	出现时间 DAT/d Occurrence time	速率/ ($t/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$) Speed	始期 DAT/d Initial time	终期 DAT/d Terminal time	平均速率/ ($t/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$) Mean speed	历时/d Duration
D1F0	38.0	0.17	18.3	57.7	0.15	39.4
D1F1	40.7	0.23	17.9	63.6	0.20	45.7
D1F2	40.0	0.23	17.4	62.7	0.20	45.3
D1F3	40.5	0.24	15.8	65.2	0.20	49.4
D1F4	40.8	0.24	16.7	65.0	0.21	48.3
D2F0	36.5	0.17	15.2	57.8	0.13	42.6
D2F1	38.3	0.24	14.4	62.1	0.21	47.8
D2F2	37.9	0.24	14.3	61.5	0.21	47.2
D2F3	38.8	0.26	14.9	62.7	0.22	47.8
D2F4	39.0	0.26	15.4	62.6	0.22	47.2

表 8 经济产量与各阶段不同器官干物质积累量的相关系数($n=30$)

Table 8 Correlation coefficients between economic yield and dry matter accumulations in different organs during various periods

生育阶段 Growth period	叶片 Leaf	茎鞘 Culm and sheath	穗 Head
移栽期—分蘖末期 Transplanting to late tillering	0.824 **	0.797 **	
分蘖末期—拔节期 Late tillering to stem elongation	0.664 **	0.582 **	
拔节期—齐穗期 Stem elongation to full heading	0.433 *	0.116	0.889 **
齐穗期—乳熟期 Full heading to milky maturity	-0.714 **	-0.509 **	0.842 **
乳熟期—成熟期 Milky maturity to full maturity	-0.801 **	0.781 **	0.737 **

平均速率略高于低密度处理,最大速率出现时间、快速积累起始时间和终止时间均早于低密度处理;在低施肥水平(F0、F1 和 F2)下高密度群体干物质快速积累期长于低密度群体,而在高施肥水平(F3 和 F4)下高密度群体干物质快速积累期则短于低密度群体(表 7)。

2.4 经济产量与群体干物质生产特征的关系

表 8 显示,经济产量与齐穗前各阶段叶片干物质积累量呈显著或极显著正相关,与齐穗后各阶段叶片干物质积累量呈极显著负相关;与拔节前各阶段和乳熟期—成熟期茎鞘干物质积累量以及各阶段穗干物质积累量呈极显著正相关,而与齐穗期—乳熟期茎鞘干物质积累量呈极显著负相关。

相关性分析结果还显示,经济产量与群体最大 LAI($r=0.878^{**}$)、最大干物质产量($r=0.931^{**}$)、LAI 最大增长速率($r=0.744^{**}$)和快速增长期平均速率($r=0.746^{**}$),以及干物质最大积累速率($r=0.867^{**}$)和快速积累期平均速率($r=0.875^{**}$)均呈极显著正相关,而与 LAI 快速增长期历时呈极显著负相关($r=-0.615^{**}$)。

应用二次函数对经济产量与关键时期 LAI (图 1) 和干物质产量(图 2)关系进行分析,相关性均达到显著或极显著水平($P < 0.05$ 或 0.01)。依据方程可得,在分蘖盛期、分蘖末期、拔节期和齐穗期

适宜 LAI 分别为 1.86、5.49、8.40 和 6.53(图 1);在分蘖末期、拔节期、齐穗期、乳熟期和成熟期适宜干物质产量分别为 4.08、7.72、10.96、12.82 和 18.19 t/hm^2 (图 2)。

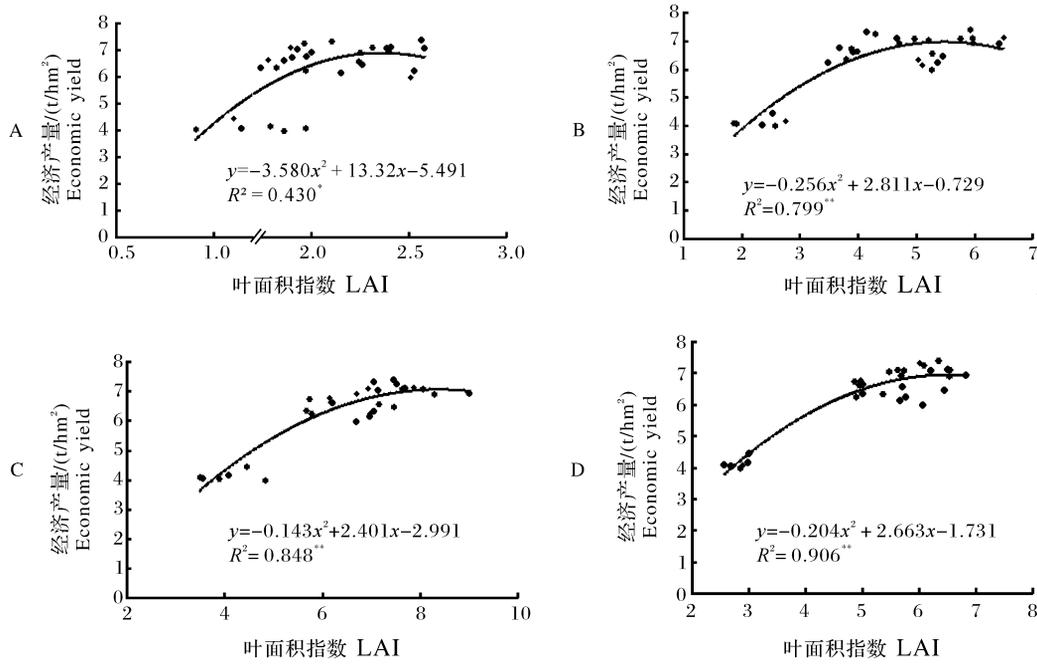


图 1 经济产量与分蘖盛期(A)、分蘖末期(B)、拔节期(C)和齐穗期(D)LAI 关系

Fig.1 Relationships of economic yield with LAI at active tillering (A), late tillering(B), stem elongation(C) and full heading(D) stages

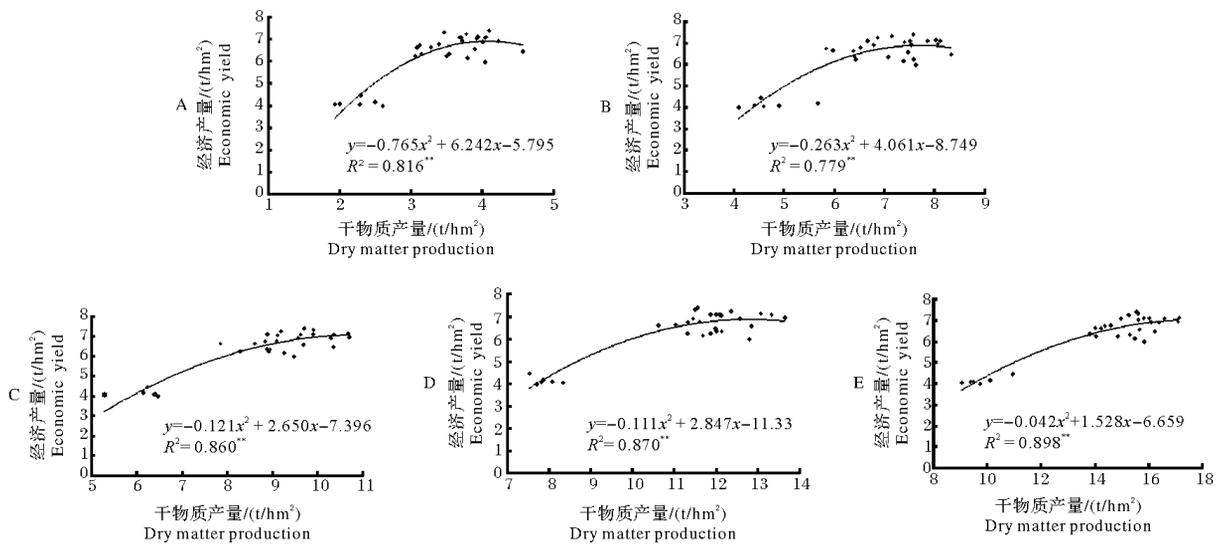


图 2 经济产量与分蘖末期(A)、拔节期(B)、齐穗期(C)、乳熟期(D)和成熟期(E)群体干物质产量关系

Fig.2 Relationships of economic yield with dry matter production in populations at late tillering(A), stem elongation(B), full heading(C), milky maturity(D) and full maturity(E) stages

3 讨 论

本研究结果表明,施肥水平显著影响第二季晚粳产量,而移栽密度对产量影响不显著。高家旭等^[12]在杂交水稻中也获得类似结果。水稻具有较强的自我调节能力,在一定范围内可通过增加分蘖、提高分蘖成穗率等^[19]来弥补低密度的产量损失。研究表明,适当提高施肥量可促进作物增产,但施肥量超出一定范围时并不能提高作物产量甚至导致减产^[20]。在本试验中,在 2 种移栽密度下第二季晚粳的适宜施 N 量都为 225 kg/hm²,适宜施肥水平主要通过提高单位面积有效穗数而促进增产。

光合物质生产是水稻产量形成的基础^[21]。本研究显示,第二季晚粳经济产量与群体生物学产量呈极显著正相关,在一定范围内增加施肥量显著提高生物学产量。绝大多数植物的生长符合 Logistic 或 Gompertz 曲线模型^[22]。本研究发现,Gompertz 生长曲线对第二季晚粳的群体干物质生产的拟合效果更好。分析结果表明,施肥可明显提高群体干物质生产速率,并延长干物质快速积累期,从而提高群体的干物质生产能力。水稻籽粒中积累的干物质有 2/3~3/4 来自抽穗后叶片的光合同化产物,1/4~1/3 则来自茎鞘等贮藏物质的再分配^[23]。本研究结果显示,第二季晚粳经济产量与齐穗后各阶段叶片以及齐穗至乳熟期茎鞘干物质积累量呈显著的负相关,说明促进灌浆结实期叶片和灌浆结实前期茎鞘同化物的转移有利于提高经济产量。然而,本试验中经济产量与乳熟至成熟期茎鞘中干物质积累量呈显著正相关,说明在灌浆结实后期茎鞘同化物过量输出可能不利于产量的提高。赵全志等^[23]研究发现,高产水稻群体在灌浆后期存在茎鞘同化物回流现象,并认为这是高产群体不早衰的一个表现。在本研究中,增加施肥量可推迟干物质快速积累期终止时间的出现,说明施肥处理的生物学产量提高与延缓群体衰老有关。目前研究者较多地关注水稻抽穗后群体的光合生产能力与高产的关系^[23],而本研究显示,齐穗前各阶段叶片,以及拔节前茎鞘干物质积累量对第二季晚粳经济产量也具有正面影响,说明晚粳高产群体的形成需要以前期适宜的物质生产为基础。

本研究模拟分析表明,第二季晚粳群体叶面积快

速增长期和最大速率的出现时间均明显早于干物质快速积累期和最大速率,说明群体干物质生产以叶片的生长为基础。前人研究表明,在一定范围内每增加 1 个单位 LAI,群体光能利用率可提高约 0.24%^[24]。在本研究中,施肥主要是通过提高 LAI 增长速率来提高 LAI。本研究还显示,第二季晚粳经济产量与 LAI 快速增长期历时呈显著负相关,增加施肥量明显缩短 LAI 快速增长期。综上,在较短的时间内快速形成群体叶面积可能是高产群体的一个特征。高产水稻群体要求 LAI 及相应的物质生产应处于适宜的范围^[23,25]。本研究应用二次方程拟合出晚粳不同生育阶段适宜的 LAI 和干物质产量,可为第二季晚粳高产栽培提供借鉴和指导。然而,由于本研究只采用了 1 个品种并且只进行了 1 a 试验,而不同类型品种的发育特征和产量潜力可能不同,并受到自然条件的影响,因此,未来尚需开展多年、多点及多品种试验,以验证本研究的结果。

参考文献 References

- [1] 邹应斌,戴魁根. 湖南发展双季稻生产的优势[J]. 作物研究, 2008, 22(4): 209-213. ZOU Y B, DAI K G. The advantages for promoting double-season rice production in Hunan Province [J]. Crop research, 2008, 22(4): 209-213 (in Chinese with English abstract).
- [2] 张似松,汤颢军,柴婷婷,等. 加快粳稻发展,进一步做强湖北省水稻产业[J]. 湖北农业科学, 2012, 51(3): 450-453. ZHANG S S, TANG H J, CHAI T T, et al. Accelerating the development of japonica rice, strengthening the rice industry in Hubei [J]. Hubei agricultural sciences, 2012, 51(3): 450-453 (in Chinese with English abstract).
- [3] 董啸波,霍中洋,张洪程,等. 南方双季晚稻籼改粳优势及技术关键[J]. 中国稻米, 2012, 18(1): 25-28. DONG X B, HUO Z Y, ZHANG H C, et al. Advantages and key techniques of late-season rice changing from indica to japonica in southern double-season rice zone [J]. China rice, 2012, 18(1): 25-28 (in Chinese).
- [4] 屈宝香,刘丽军,张华. 我国粳稻优势区域布局与产业发展[J]. 作物杂志, 2006(6): 11-13. QU B X, LIU L J, ZHANG H. Regional distribution and industrial development of japonica rice in China [J]. Crops, 2006(6): 11-13 (in Chinese).
- [5] 李旭毅,池忠志,姜心禄,等. 成都平原两熟区籼粳稻品种籽粒灌浆特性[J]. 中国农业科学, 2012, 45(16): 3256-3264. LI X Y, CHI Z Z, JIANG X L, et al. Analysis on grain filling characteristics of indica and japonica rice in rapeseed (wheat)-rice planting area in Chengdu Basin [J]. Scientia agricultura sinica, 2012,

- 45 (16):3256-3264 (in Chinese with English abstract).
- [6] 张洪程,张军,龚金龙,等.“籼改粳”的生产优势及其形成机理[J]. 中国农业科学,2013,46(4):686-704. ZHANG H C, ZHANG J, GONG J L, et al. The productive advantages and formation mechanisms of “indica rice to japonica rice”[J]. *Scientia agricultura sinica*,2013,46(4):686-704 (in Chinese with English abstract).
- [7] 王华银. 马鞍山市优质粳稻调查分析与发展对策[J]. 安徽农学通报,2016,22(2):27-28,109. WANG H Y. Investigation and analysis and countermeasures of high-quality japonica rice development in Maanshan city [J]. *Anhui agricultural science bulletin*,2016,22(2):27-28,109 (in Chinese).
- [8] 魏玉光.不同种植密度和施肥量对水稻产量及品质的影响[J]. 农业科技通讯,2012(12):62-63,129. WEI Y G. Effects of different planting densities and fertilizer application amounts on rice yield and quality[J]. *Agricultural science and technology newsletter*,2012(12):62-63,129 (in Chinese).
- [9] 周根友,汪波,夏华. 密度和施氮量对早熟晚粳通粳 981 群体结构和产量的影响[J]. 江苏农业科学,2017,45(23):59-63. ZHOU G Y, WANG B, XIA H. Effects of planting densities and nitrogen application amounts on the population structure and yield of early maturing late-season japonica rice Tongjing 981[J]. *Jiangsu agricultural sciences*,2017,45(23):59-63 (in Chinese).
- [10] 周江明,赵琳,董越勇,等. 氮肥和栽植密度对水稻产量及氮肥利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2010,16(2):274-281. ZHOU J M, ZHAO L, DONG Y Y, et al. Nitrogen and transplanting density interactions on the rice yield and N use rate [J]. *Plant nutrition and fertilizer science*,2010,16(2):274-281 (in Chinese with English abstract).
- [11] 雷凯. 双季晚粳高产栽培关键技术研究[D]. 南昌:江西农业大学,2016. LEI K. Study on the key cultivation strategies of late japonica rice in double-cropping rice area[D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University,2016 (in Chinese with English abstract).
- [12] 高家旭,蓝天琼,刘成家,等. 不同施肥量及栽培密度对水稻产量影响[J]. 农业与技术,2015,35(5):3-4. GAO J X, LAN T Q, LIU C J, et al. Effects of different fertilizer application amounts and cultivation densities on rice yield[J]. *Agriculture and technology*,2015,35(5):3-4 (in Chinese).
- [13] 杨建昌,朱庆森,曹显祖. 水稻群体冠层结构与光合特性对产量形成作用的研究[J]. 中国农业科学,1992,25(4):7-14. YANG J C, ZHU Q S, CAO X Z. Effects of the structure and photosynthetic characters of the canopy on the yield formation in rice plants[J]. *Scientia agricultura sinica*,1992,25(4):7-14 (in Chinese with English abstract).
- [14] 蒋彭炎,洪晓富,冯来定,等. 水培条件下氮浓度对水稻氮素吸收和分蘖发生的影响研究[J]. 作物学报,1997,23(2):191-199. JIANG P Y, HONG X F, PENG L D, et al. The effect of nitrogen concentration on nitrogen absorption and tiller development in rice under water culture[J]. *Acta agronomica sinica*,1997,23(2):191-199 (in Chinese with English abstract).
- [15] 周春和,苏祖芳,王辉斌,等. 水稻生育中期群体叶面积组成与光合生产的研究[J]. 扬州大学学报(自然科学版),1999,2(4):47-50. ZHOU C H, SU Z F, WANG H B, et al. Studies on the relationship between leaf area composition of population and photosynthetic production at middle growth stage of rice [J]. *Journal of Yangzhou University(natural science edition)*,1999,2(4):47-50 (in Chinese with English abstract).
- [16] 孔飞扬,江立庚,文娟,等. 直播水稻产量、产量构成因子和干物质积累的变化特点及其相互关系[J]. 华中农业大学学报,2018,37(5):11-17. KONG F Y, JIANG L G, WEN J, et al. Changes and relationships of yield, yield components and dry matter accumulation of direct seeded rice[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*,2018,37(5):11-17 (in Chinese with English abstract).
- [17] LI X H, LI Q B, YANG T W, et al. Responses of plant development, biomass and seed production of direct sown oilseed rape (*Brassica napus*) to nitrogen application at different stages in Yangtze River Basin[J]. *Field crops research*,2016,194:12-20.
- [18] 白志刚. 氮肥运筹对水稻氮代谢及稻田氮肥利用率的影响[D]. 北京:中国农业科学院,2019. BAI Z G. Effects of N management strategy on N metabolism in rice plant and N use efficiency in paddy soil[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences,2019 (in Chinese with English abstract).
- [19] 何勇,李斌,林承勇,等. 水稻直播关键技术研究[J]. 安徽农业科学,2016,44(35):51-53. HE Y, LI B, LIN C Y, et al. Key technologies of rice direct seeding[J]. *Journal of Anhui agricultural science*,2016,44(35):51-53 (in Chinese with English abstract).
- [20] 张秀芝,易琼,朱平,等. 氮肥运筹对水稻农学效应和氮素利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2011,17(4):782-788. ZHANG X, YI Q, ZHU P, et al. Agronomic responses to nitrogen application and nitrogen utilization in rice fields[J]. *Plant nutrition and fertilizer science*,2011,17(4):782-788 (in Chinese with English abstract).
- [21] HORIE T, SHIRAIWA T, HOMMA K. Can yields of lowland rice resume the increase that they showed in the 1980s? [J]. *Plant production science*,2005,8:259-274.
- [22] 钱永强,孙振元,韩蕾,等. 基于 Logistic 与 Gompertz 非线性模型的野牛草克隆生长模拟与分析[J]. 中国农业科学,2011,44(11):2252-2259. QIAN Y Q, SUN Z Y, HAN L, et al. Simulation of clonal growth curve based on nonlinear models of Logistic and Gompertz for Buffalograss (*Buchloe dactyloides* (Nutt.) Engelm. Texoka)[J]. *Scientia agricultura sinica*,2011,44(11):2252-2259 (in Chinese with English abstract).
- [23] 赵全志,黄丕生,凌启鸿. 水稻群体光合速率和茎鞘贮藏物质与产量关系的研究[J]. 中国农业科学,2001,34(3):304-310.

- ZHAO Q Z, HUANG P S, LING Q H. Relations between canopy apparent photosynthesis and store matter in stem and sheath between and yield and nitrogen regulations in rice[J]. *Scientia agricultura sinica*, 2001, 34(3): 304-310 (in Chinese with English abstract).
- [24] 周瑞庆, 邹应斌, 刘海河, 等. 水稻群体结构与施氮量的关系[J]. *作物研究*, 1992, 8(增刊): 18-20. ZHOU R Q, ZOU Y B, LIU H H, et al. Relationships between population structure and nitrogen application amounts in rice[J]. *Crop research*, 1992, 8(Sup): 18-20 (in Chinese).
- [25] 凌启鸿. 作物群体质量[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2000: 44-211. LING Q H. *Crop population quality*[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2000: 44-211 (in Chinese).

Matter production characteristics of two-season late japonica populations with different planting densities and fertilizer levels in Hubei Province and their relationships with yield

YANG Luohao¹, PENG Fuyan¹, GAO Junyang¹, WENG Yulin¹,
YAO Xuan¹, TU Junmin², YANG Tewu¹

1. *Ministry of Agriculture and Rural Affairs Key Laboratory of Crop Ecophysiology and Farming System in the Middle Reaches of the Yangtze River/College of Plant Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;*
2. *Huanggang Academy of Agricultural Sciences, Hubei Province, Huanggang 438000, China*

Abstract A randomized complete block (RCB) design field experiment of Ejing 403 with 2 transplanting densities (283 000 and 376 000 hills/hm²) and 5 fertilizer (N) levels (0, 165, 195, 225 and 255 kg/hm²) was conducted to establish the high-yield cultivation techniques of two-season late japonica and promote “early indica - late japonica” plantation pattern in Hubei Province. Rice yield under different treatments was investigated and the dynamics and characteristics of leaf area index (LAI) growth and aboveground dry matter production in different populations were simulated with Gompertz equation. The results showed that the yield was significantly affected by fertilizer level but not by planting density, indicating that the populations of two-season late japonica has strong self-regulation ability. The appropriate nitrogen level for japonica tested was 225 kg/hm². The effective panicle number and dry matter production per hectare were significantly increased at appropriate fertilizer level and thus promoted the economic yield. The high matter production depended on the higher accumulation speed and longer fast accumulation period, which were based on the rapid establishment of the appropriate LAI in the populations with high yield. The populations with higher yield had higher LAI growth speed but shorter fast growth period. The suitable population LAI and biomass production at different stages were proposed based on the modeling by quadratic equations. It will provide a guideline for establishing high-yield populations of two-season late Japonica.

Keywords two-season late japonica; transition from indica rice to japonica rice; population structure; yield; fertilizer level; planting density

(责任编辑: 张志钰)