

优质丰产杂交籼稻品种机直播产量构成及其群体质量研究

郭长春 孙知白 孙永健* 殷尧翥 武云霞 唐源 杨志远 向开宏 马均*

(四川农业大学 水稻研究所/农业部西南作物生理、生态与耕作重点实验室, 四川 温江 611130; *通讯联系人, E-mail: yongjians1980@163.com; majunp2002@163.com)

Study on Yield Formation and Population Quality of *indica* Hybrid Rice with Good Quality and High Yield Under Mechanical Direct Seeding

GUO Changchun, SUN Zhibai, SUN Yongjian*, YIN Yaozhu, WU Yunxia, TANG Yuan, YANG Zhiyuan, XIANG Kaihong, MA Jun*

(Rice Research Institute of Sichuan Agricultural University/Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology, and Cultivation in Southwest, Ministry of Agriculture, Wenjiang 611130, China; *Corresponding author, E-mail: yongjians1980@163.com; majunp2002@163.com)

Abstract: 【Objective】 Our aim is to explore the common characteristics of high-yielding and high quality *indica* hybrid rice varieties suitable for mechanical direct seeding in plain (Chongzhou) and hilly (Santai) areas and establish a standardized selection method and evaluation criteria for it, which could lay a theoretical and practical basis for the integration of hybrid *indica* rice mechanized seeding technology. 【Method】 Twenty-nine *indica* hybrid rice combinations were used as materials in two ecological zones, artificial simulated mechanized precise hill-seeding (mechanical direct seeding for short), and the effects of mechanical direct seeding on the population quality characteristics and yield of high-quality *indica* hybrid rice with different yield levels in plain and hilly areas were studied, the relationship between population quality characteristics and yield of high-quality *indica* hybrid rice combinations by mechanical seeding was also discussed. 【Results】 The results showed that, by cluster analysis based on average grain yield of each cultivars in the two areas, the 29 tested combinations could be classified into three groups: high-yielding, mid-yielding, and low-yielding. In the total tested cultivars, high-yielding combinations from Santai accounted for 17.24%, and other types covered 82.76%, high-yielding varieties from Chongzhou were 10.34%, and other types were 89.66%. Compared with the middle-yield and low-yielding varieties, the common high yielding varieties were featured by strong tillering ability, more effective panicles, higher seed-setting rate, higher leaf area index(LAI) after jointing stage and higher dry matter accumulation, moreover, its leaf length, leaf position, leaf opening angle of top three, plant height, top light energy intercept during filling exceeded obviously. In addition to population light transmittance, leaf opening angle, tillering LAI and dry matter accumulation, correlation analysis indicated that there existed significantly or highly significantly positive correlations ($r=0.37^*-0.90^{**}$) between index of population quality and yield under mechanical direct-seeding, especially between high efficiency LAI rate at full heading, dry matter accumulation at maturity, and harvest index and yield. 【Conclusion】 High-yielding varieties have higher panicle and grain number per panicle, and seed-setting rate and high growth at late growth stage. That is how it can obtain higher yields under mechanical direct-sowing.

Key words: mechanical direct-sowing; *indica* hybrid rice varieties; yield type; yield formation; population quality

摘要: 【目的】本研究旨在明确适宜平原(崇州)与丘陵(三台)稻区机直播优质杂交籼稻高产品种群体质量的共性特征,构建规范化的机直播优质杂交籼稻高产品种的鉴定方法和评价标准,以及为杂交籼稻机械化直播配套技术的融合提供理论及实践依据。【方法】两生态区以29个品种为试材,采用人工模拟精量穴直播(以下简称机直播),研究机直播对平原与丘陵稻区不同产量水平的优质杂交籼稻群体质量特征及产量的影响,并探讨机直播优质杂交籼稻群体质量特征与产量间的关系。【结果】依据两生态区各品种的平均籽粒产量聚类分析,将两生态区供试品种分为高产、中产、低产3种类型。其中,三台高产类型品种占17.24%,中产、低产类型品种占82.76%;崇州高产类型品种占10.34%,中产、低产类型品种占89.66%。与中产、低产类型品种相比,两生态区高产类型品种的共性特征为分蘖能力强、有效穗数多、结实率高,拔节期后叶面积指数(LAI)大,干物质累积量高;结实期顶3

收稿日期: 2018-02-05; 修改稿收到日期: 2018-03-15。

基金项目: 国家重点研发计划重点专项(2016YFD0300506); 国家科技支撑计划资助项目(2013BAD07B13); 四川省教育厅重点项目(16ZA0044); 四川省学术和技术带头人培养支持经费资助项目(川人社办发[2016]183号); 四川省育种攻关专项(2016NYZ0051)。

叶叶长、叶位、叶张角、株高及其顶部截获光能优势明显。相关分析表明，机直播条件下，除群体透光率、顶 3 叶叶张角、分蘖盛期 LAI 及干物质累积量外，各群体质量指标与籽粒产量均呈显著或极显著正相关($r=0.37^* \sim 0.90^{**}$)，尤其是齐穗期高效 LAI 率、成熟期干物质累积量及其收获指数与产量的相关性。【结论】机直播条件下，高产类型品种能够获得较高的有效穗数和每穗实粒数，并协同提高结实率，实现生育后期群体干物质的高增长，从而获得较高产量。

关键词：机直播；杂交籼稻品种；产量类型；产量构成；群体质量

中图分类号：S511.042

文献标志码：A

文章编号：1001-7216(2018)05-0462-13

直播稻历史悠久，优缺点明显，与传统移栽、机插相比，直播稻节省了育秧、插秧等环节，具有省工、节本、增产的效果。而机直播符合现代稻作高效化、轻简化的发展方向，其应用面积不推而广^[1]。但如何鉴选适宜机直播的水稻品种，是配套集成机直播稻优质丰产高效栽培技术的关键步骤；前人就直播稻播期^[2-3]、肥料运筹^[4-5]、穗型^[6]以及机械化种植方式^[7]等方面进行了大量研究，结论不一。曾令琴等^[8]研究认为，分蘖强、成穗率与结实率高、植株矮以及生育期适中的品种较为适宜机直播；孙永健等^[9]研究则发现，杂交籼稻品种群体茎蘖动态、物质积累特性均表现为“中稳、后高”，且产量构成特征优势明显；曾勇军等^[10]研究指出，高产类型品种具有株型紧凑、生长旺盛、产量潜力高、后期干物质生产能力强等特点。

但总体而言，我国水稻机械化直播技术研究起步晚，高产优质栽培配套技术体系尚不完备，在农机农艺融合、机械化配套研究、病虫害绿色防控措施、稻米品质尤其是食味品质等方面有待进一步提高^[11]。四川稻区人口众多，大多数人以稻米为主食；水稻品种多为杂交籼稻，而杂交籼稻品种价格高、机械化难度大、品种生育期长、前茬作物收获较晚，茬口矛盾突出、区域适应性差、筛选标准和方法研究较少。另外，四川稻区温、光条件差异显著，平

原、丘陵地区垂直变化大，单一的稻作区域，难以较好地实现机直播优质杂交籼稻高产品种的鉴选及其共性研究，且适宜不同生态条件下的机械化、轻简化的优质丰产杂交籼稻品种的生长发育特性鲜见报道，更缺乏适宜机械化种植的优质丰产杂交籼稻品种的筛选标准和综合评价指标体系。因此，本研究在 2016 年初选的基础上^[12]，精心挑选广泛应用且适合四川稻区种植的 29 个优质杂交籼稻品种，于平原、丘陵生态区进行机直播；旨在探明优质丰产杂交籼稻品种机直播适应性机理，阐明其高产高效的共性特征，建立适合机直播杂交水稻品种的评价标准和鉴选方法，为杂交籼稻机械化直播配套技术的融合以及高产高效品种的选育提供依据和参考。

1 材料与方法

1.1 试验地点情况

试验在前期研究报道的基础^[12]上，于 2017 年在四川农业大学成都市崇州(平原稻作区)试验基地、绵阳市三台县(丘陵稻作区)两个生态区进一步深入和完善；两生态区代表性试验田块土壤均为砂壤土，前茬、耕层(0~20 cm)土壤理化特性见表 1，地理及气象条件见表 2。

表 1 两个生态区试验田土壤理化性状

Table 1. Soil conditions of the test fields in two experimental locations.

地点 Location	前茬 Fore crop	pH 值 pH value	有机质 Organic matter /(g·kg ⁻¹)	全氮 Total N content /(g·kg ⁻¹)	速效磷 Available P /(mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available K /(mg·kg ⁻¹)
三台 Santai	油菜 Oilseed rape	7.48	30.57	1.80	40.59	123.47
崇州 Chongzhou	蔬菜 Vegetable	7.38	26.95	1.32	34.09	113.70

表 2 两个生态区试验田水稻生长期间地理及气象条件

Table 2. Geographical and meteorological conditions of the two experimental locations.

地点 Location	海拔 Altitude /m	经度 Longitude (E)	纬度 Latitude (N)	4-10 月日均降水量 Average diurnal rainfall from Apr. to Oct./mm	4-10 月日平均温度 Average diurnal temperature from Apr. to Oct./℃
三台 Santai	460	103°35′	30°15′	25.59	22.81
崇州 Chongzhou	560	103°28′	30°42′	44.13	21.75

1.2 试验设计

2017 年在 2016 年试验基础上,对参试品种进行了淘汰和扩增,选用 29 个优质(米质达国标 3 级以上)杂交籼稻品种(表 3),并在 2 个生态区同步进行机直播品比试验,但为了推进本研究区域水稻优良品种的更新换代,2017 年试验品种与 2016 年未完全重复,但相同品种两年测定数据基本一致,2017 年测定的数据较为齐全并生态区同步测定,所以本研究仅以 2017 年数据进行分析。各生态区品种间随机区组设计,3 次重复,小区面积在成都崇州为 13.75 m²,绵阳三台为 13.05 m²。崇州于 4 月 28 日播种,三台于 5 月 24 日播种;播种前晒种 1 d,浸种直至 90%露白为止,阴干,以种子不沾手为宜。行株距均为 25 cm×20 cm;模拟直播机机型为 2BDXS-10CP(25),自制间距为 20 cm 的排种器进行穴直播,每穴 3~7 粒。氮肥(尿素)施用量折合纯 N 150 kg/hm²,按 $m_{基肥}(1\text{叶}1\text{心}):m_{穗肥}(3\text{叶}1\text{心}):m_{穗肥}(\text{晒田复水}1\text{d后})=4:3:3$ 施用,磷肥(以 P₂O₅ 计)用量为 75 kg/hm²,作基肥一次性施入,钾肥(以 K₂O 计)用量为 150 kg/hm²,作基肥和拔节肥分次等量施入。大田周围筑埂,以防肥水流失。其他田间管理按大面积生产田进行。

表 3 两生态区各品种稻谷产量

Table 3. Rice grain yield of tested combinations in two ecological zones.

品种 Combination	三台 Santai/(kg·hm ⁻²)	崇州 Chongzhou/(kg·hm ⁻²)	两生态区稻谷平均产量 Average grain yield of two ecological zones/(kg·hm ⁻²)
F 优 498 F you 498	10523.3±142.4	10360.6±517.8	10442.0±224.4
C 两优华占 C liangyouhuazhan	10567.9±68.3	9993.9±93.1	10280.9±76.5
晶两优 534 Jingliangyou 534	10154.5±433.3	10366.4±120.3	10260.5±221.8
隆两优 1206 Longliangyou 1206	10345.5±461.7	10174.1±376.5	10259.8±156.4
晶两优华占 Jingliangyouhuazhan	10139.3±328.2	9640.3±312.5	9889.8±145.4
旌优 127 Jingyou 127	9897.1±230.7	9756.0±173.1	9826.6±196.0
隆两优 1146 Longliangyou 1146	9962.4±242.7	9645.1±263.7	9803.7±223.3
绿优 4923 Lüyou 4923	9695.8±317.4	9777.6±54.2	9736.7±185.8
天优华占 Tianyouhuazhan	9704.1±243.3	9693.1±399.5	9698.6±115.6
花香 1618 Huaxiang 1618	9849.7±264.8	9451.1±163.2	9650.4±212.4
晶两优 1377 Jingliangyou 1377	9812.3±136.8	9394.1±148.8	9603.2±46.3
宜香优 1108 Yixiangyou 1108	9531.4±49.6	9527.9±8.4	9529.7±21.2
宜香优 2168 Yixiangyou 2168	9814.3±249.0	9186.9±239.0	9500.6±82.2
川优 8377 Chuanyou 8377	9908.5±93.9	8909.3±107.0	9408.9±68.3
宜香 3728 Yixiang 3728	9234.2±105.0	9530.3±243.6	9382.3±112.5
德优 4923 Deyou 4923	9544.1±73.6	9153.9±225.1	9349.0±176.3
吉优 9 号 Jiyou 9	9348.5±115.7	8908.2±132.9	9128.3±91.0
渝香 7109 Yuxiang 7109	9108.7±187.5	9006.2±106.1	9057.4±128.4
宜香优 2115 Yixiangyou 2115	9197.6±219.5	8901.7±118.3	9049.6±161.5
德优 4727 Deyou 4727	9369.1±261.5	8612.8±413.9	8990.9±125.2
繁优 609 Fanyou 609	9084.2±295.9	8847.2±210.2	8965.7±149.9
内 5 优 39 Nei 5 you 39	9109.3±335.7	8567.5±172.0	8838.4±247.1
宜香 4245 Yixiang 4245	8630.7±8.6	8855.6±123.6	8743.1±60.9
渝香 203 Yuxiang 203	9072.7±281.8	8179.4±277.7	8626.1±117.3
宜香优 7633 Yixiangyou 7633	8742.8±328.0	8420.2±429.8	8581.5±353.6
川优 6203 Chuanyou 6203	8837.4±111.8	8216.8±352.9	8527.1±231.7
两优 2161 Liangyou 2161	8972.9±57.4	7711.4±365.7	8342.2±198.1
蓉 18 优 2348 Rong 18 you 2348	7765.5±349.4	7026.6±84.7	7396.1±136.8
Y 两优 1 号 Y liangyou 1	7329.6±347.0	7285.4±192.8	7307.5±269.9

1.3 测定项目与方法

1.3.1 茎蘖动态

各小区定点 20 穴稻株,于播种 20 d 后开始分蘖调查至齐穗,每隔 7 d 调查 1 次分蘖数。

1.3.2 干物质累积和叶面积指数

于分蘖盛期、拔节期、齐穗及成熟期各小区按平均茎蘖数取代表性稻株 5 穴,分成茎鞘、叶片、穗(结实期),用 CID-203 叶面积仪测定各生育时期稻株叶面积(成熟期除外),并计算叶面积指数。105℃下杀青 45 min,80℃烘干至恒重,测定地上部干物质量。

1.3.3 叶片着生状态

于齐穗期稻株自然状态下用透明量角器测定顶 3 叶叶张角(茎秆和叶片平直部分的夹角),每处理测定 15 株;同时测定其株高、顶 3 叶叶长、叶宽及各叶叶枕距地面的高度,取平均值。

1.3.4 群体透光率

于齐穗、齐穗 15d 及齐穗后 30 d 的晴天中午 11:00—13:00,用美国生产的植物冠层分析仪 LP-80 分别在距地面 15 cm、60 cm 和高于冠层 15 cm 处,测定同一水平高度下各处理行、间距的光照强度,其行、间距光照强度的平均值为此高度下的光照强

表 4 两生态区各品种产量

Table 4. Yield of rice combinations in two ecological areas.

产量类型 Yield type	三台 San tai	崇州 Chong zhou
高产类型 High yield	F 优 498、C 两优华占、晶两优 534、 隆两优 1206、晶两优华占 F you 498, C liangyouhuazhan, Jingliangyou 534, Longliangyou 1206, Jingliangyouhuazhan	F 优 498、晶两优 534、隆两优 1206 F you 498, Jingliangyou 534, Longliangyou 1206
产量范围 Yield range/(kg·hm ⁻²)	10346.1±289.2 a	10300.4±311.7 a
中产类型 Medium yield	旌优 127、隆两优 1146、绿优 4923、天优华占、 花香 1618、晶两优 1377、宜香优 1108、 宜香优 2168、川优 8377、宜香 3728、德优 4923、 吉优 9 号、渝香 7109、宜香优 2115、德优 4727、 繁优 609、内 5 优 39、渝香 203 Jingyou 127, Longliangyou 1146, Lüyou 4923, Tianyouhuazha, Huaxiang 1618, Jingliangyou 1377, Yixiangyou 1108, Yixiangyou 2168, Chuanyou 8377, Yixiang 3728, Deyou 4923, Jiyou 9, Yuxiang 7109, Yixiangyou 2115, Deyou 4727, Fanyou 609, Nei 5 you 39, Yuxiang 203	C 两优华占、晶两优华占、旌优 127、 隆两优 1146、绿优 4923、天优华占、 花香 1618、晶两优 1377、宜香优 1108、 宜香优 2168、川优 8377、宜香 3728、 德优 4923、渝香 7109 C liangyouhuazhan, Jingliangyouhuazhan, Jingyou 127, Longliangyou 1146, Lüyou 4923, Tianyouhuazha, Huaxiang 1618, Jingliangyou 1377, Yixiangyou 1108, Yixiangyou 2168, Chuanyou 8377, Yixiang 3728, Deyou 4923, Yuxiang 7109
产量范围 Yield range/(kg·hm ⁻²)	9513.6±135.0 b	9519.7±140.8 b
低产类型 Low yield	宜香 4245、宜香优 7633、川优 6203、 两优 2161、蓉 18 优 2348、Y 两优 1 号 Yixiang 4245, Yixiangyou 7633, Chuanyou 6203, Liangyou 2161, Rong 18 you 2348, Y liangyou 1	吉优 9 号、宜香优 2115、德优 4727、 繁优 609、内 5 优 39、宜香 4245、渝香 203、 宜香优 7633、川优 6203、两优 2161、 蓉 18 优 2348、Y 两优 1 号 Jiyou 9, Yixiangyou 2115, Deyou 4727, Fanyou 609, Nei 5 you 39, Yixiang 4245, Yuxiang 203, Yixiangyou 7633, Chuanyou 6203, Liangyou 2161, Rong 18 you 2348, Y liangyou 1
产量范围 Yield range/(kg·hm ⁻²)	8379.8±161.0 c	8341.7±70.3 c

同列数据后标不同小写字母的值在 5%水平上差异显著。下同。
Values within a column followed by different letters are significantly different at $P < 0.05$. The same as below.

度；以距地面 15 cm、60 cm 与高于冠层 15 cm 处光照强度的比值分别表示 15 cm 和 60 cm 处的群体透光率，每小区重复测定 3 个点。

1.3.5 考种与计产

成熟期各小区随机调查 60 穴，取平均后，计算有效穗数；再取代表性稻株 10 穴，考查实粒数、千粒重、结实率等性状。收获时各小区去边行，并按实收株数计产。

1.4 数据分析

用 Microsoft Excel、SigmaPlot 12.0 及 DPS 6.5 进行数据分析及绘图。

2 结果与分析

2.1 机直播优质杂交籼稻品种产量划分依据

由表 3 可知，两生态区各品种产量变化存在明显差异，其中，除晶两优 534、绿优 4923、宜香 3728、宜香 4245 外，其余品种产量表现均以三台较好，且供试品种籽粒平均产量差异较大，最高(F 优 498)达 10442.0 kg/hm²，最低(Y 两优 1 号)仅为 7307.5 kg/hm²。由于品种数多，且两个生态区，所以采用欧氏距离长短法对两生态区 29 个优质杂交籼稻品

种的籽粒平均产量进行聚类分析，产量水平由大到小分为高产、中产、低产 3 种类型，方差分析结果见表 4。其中，三台高产类型品种占 17.24%，中产类型品种占 62.07%，低产类型品种占 20.69%；崇州高产类型品种占 10.34%，中产类型品种占 48.28%，低产类型品种占 41.38%。虽然两生态区各品种归属类型有所差异，但高产、中产、低产类型间仍有较多品种归属在同一产量水平，说明两生态区的平均稻谷产量可作为品种归属类型的划分依据。在此基础上，分别从两生态区的不同产量类型中，选择归属类型相同且在四川稻区有一定种植范围的 2 个品种进行代表性分析。高产类型选择超级稻 F 优 498 和隆两优 1206，中产类型选择绿优 4923 和宜香优 1108，低产类型选择宜香 4245 和川优 6203。其中，除隆两优 1206 和宜香 4245 外，F 优 498、绿优 4923、宜香优 1108、川优 6203 均有两年产量数据，且趋势基本一致。

2.2 机直播对两生态区不同产量水平优质杂交籼稻品种产量及其构成因素的影响

由表 5 可知，两生态区各产量类型平均稻谷产量差异均达显著水平，且均以三台表现较优。其中，三台高产类品种的稻谷产量较中产、低产类品种分

表 5 机直播不同产量水平杂交籼稻品种的产量构成因素

Table 5. Yield components of rice combinations at different yield levels under mechanical direct seeding.

地点 Site	品种 Combination	有效穗数 Effective panicle number/($\times 10^4 \text{hm}^{-2}$)	每穗实粒数 Filled grain number per panicle	千粒重 1000-grain weight /g	结实率 Seed-setting rate /%	实际产量 Grain yield /($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)
三台 Santai	F 优 498 F you 498	292.0 \pm 3.5 a	140.5 \pm 1.9 b	30.5 \pm 0.6 a	86.0 \pm 1.3 a	10523.3 \pm 142.4 a
	隆两优 1206 Longliangyou 1206	295.3 \pm 7.6 a	151.0 \pm 0.7 a	26.6 \pm 0.5 c	87.1 \pm 2.0 a	10345.5 \pm 461.7 a
	高产类型平均 Average of high-yield combinations	293.7 \pm 5.0 a	145.8 \pm 0.8 a	28.5 \pm 0.3 b	86.6 \pm 1.0 a	10434.4 \pm 290.7 a
	绿优 4923 Lüyou 4923	280.0 \pm 3.5 b	131.3 \pm 1.2 c	31.1 \pm 0.4 a	74.2 \pm 0.7 bc	9695.8 \pm 317.4 b
	宜香优 1108 Yixiangyou 1108	274.0 \pm 5.3 b	136.5 \pm 0.7 b	30.3 \pm 0.4 a	75.9 \pm 4.6 b	9531.4 \pm 49.6 b
	中产类型平均 Average of medium-yield combinations	277.0 \pm 1.0 b	133.9 \pm 0.8 b	30.7 \pm 0.1 a	75.1 \pm 2.3 b	9613.6 \pm 156.9 b
	川优 6203 Chuanyou 6203	262.7 \pm 2.3 c	127.0 \pm 3.0 c	30.3 \pm 0.2 a	79.4 \pm 3.7 b	8837.4 \pm 111.8 c
	宜香 4245 Yixiang 4245	282.0 \pm 6.0 b	129.4 \pm 5.9 c	27.6 \pm 0.4 b	69.5 \pm 4.4 c	8630.7 \pm 8.6 c
	低产类型平均 Average of low-yield combinations	272.3 \pm 2.1 b	128.2 \pm 0.6 c	28.9 \pm 0.2 b	74.4 \pm 3.2 b	8734.0 \pm 60.1 c
崇州 Chongzhou	F 优 498 F you 498	286.0 \pm 1.8 b	142.8 \pm 2.2 a	29.2 \pm 0.4 c	82.6 \pm 1.3 a	10360.6 \pm 134.2 a
	隆两优 1206 Longliangyou 1206	297.0 \pm 5.7 a	140.9 \pm 0.4 a	26.5 \pm 0.4 e	83.2 \pm 1.6 a	10174.1 \pm 132.7 a
	高产类型平均 Average of high-yield combinations	291.6 \pm 2.0 a	141.9 \pm 1.0 a	27.9 \pm 0.5 c	82.9 \pm 0.5 a	10267.4 \pm 132.0 a
	绿优 4923 Lüyou 4923	275.3 \pm 5.3 c	136.5 \pm 2.2 b	30.3 \pm 0.7 ab	75.7 \pm 2.3 b	9777.6 \pm 54.2 b
	宜香优 1108 Yixiangyou 1108	263.7 \pm 2.7 d	130.3 \pm 0.6 c	31.2 \pm 0.3 a	75.2 \pm 3.0 b	9527.9 \pm 8.4 b
	中产类型平均 Average of medium-yield combinations	269.6 \pm 4.0 b	133.4 \pm 1.3 b	30.8 \pm 0.2 a	75.5 \pm 0.8 c	9652.8 \pm 25.8 b
	川优 6203 Chuanyou 6203	245.7 \pm 4.1 e	130.0 \pm 4.6 c	29.5 \pm 0.5 bc	78.8 \pm 0.4 b	8855.6 \pm 352.9 c
	宜香 4245 Yixiang 4245	246.3 \pm 7.8 e	131.6 \pm 2.1 c	27.5 \pm 0.6 d	75.7 \pm 1.3 b	8216.8 \pm 123.6 d
	低产类型平均 Average of low-yield combinations	246.0 \pm 2.4 c	130.8 \pm 1.4 c	28.5 \pm 0.4 b	77.2 \pm 0.5 b	8536.2 \pm 175.2 c

同列数据后标不同小写字母的值在 5%水平上差异显著。下同。

Values within a column followed by different letters are significantly different at $P < 0.05$. The same as below.

别高了 8.5%和 19.5%，而崇州高产品种较中产、低产品种则分别高了 6.4%和 20.3%。从产量构成因素来看，三台高产品种平均有效穗数为 293.7 万/hm²，较中产、低产品种分别高了 6.0%和 7.9%；崇州平均有效穗数为 291.6 万/hm²，较中产、低产品种分别高了 8.2%和 18.5%。此外，三台和崇州两生态区高产品种平均每穗实粒数分别为 145.8 粒和 141.9 粒，较中产、低产品种分别高了 8.9%和 13.7%，6.4%和 8.5%；平均结实率分别为 86.6%和 82.9%，较中产、低产品种分别高了 15.3%和 16.4%，9.8%和 7.4%。而从千粒重来看，虽然两生态区高产品种的千粒重优势不明显，但通过实粒数、结实率以及有效穗数等产量构成因子间的调节作用，能够补偿千粒重的不足，从而达到高产；而中产、低产品种，各产量构成因子间也可以通过互调作用，影响最终产量。说明足穗(>290 $\times 10^4$ /hm²)的同时，提高每穗实粒数(>140 粒)，且保持相对较高的结实率(>80%)是本研究机直播优质杂交籼稻高产类型品种的共性特征。

2.3 机直播对两生态区不同产量水平优质杂交籼稻品种分蘖动态的影响

由图 1 可见，两生态区不同产量水平优质杂交籼稻品种群体茎蘖数的变化趋势基本一致，均表现

为高产>中产>低产类型品种。且三台的优质杂交籼稻品种分蘖能力明显强于崇州，这与两生态区的播种时间及日均温度有关(表 2)。机直播 48 d 前，高产类型品种分蘖优势不突出，而后至 62 d 其分蘖能力显著提高，且分蘖盛期均出现在机播 52 d 后。此外，两生态区不同产量类型高峰苗均出现在播种后 62 d 左右，其中，三台高产类型品种的高峰苗较中产、低产类型品种分别提高了 8.68%和 16.28%，而崇州高产类型品种的高峰苗较中产、低产类型品种则分别高了 26.47%和 32.40%。随后高峰苗至机播 76 d 茎蘖数下降较快，之后茎蘖数降幅减小，最后趋于平缓。由图 1 还可知，两生态区各产量梯度下，分蘖能力均以三台较强，且塑造足额和适宜的分蘖基数，是本研究机直播优质杂交籼稻高产品种的群体分蘖特征。

2.4 机直播对两生态区不同产量水平优质杂交籼稻品种叶面积指数的影响

由表 6 可知，两生态区不同产量类型优质杂交籼稻品种各生育时期叶面积指数(LAI)的动态变化差异均达显著水平，各生育时期 LAI 均以三台地区表现较优。且与中产、低产类型品种相比，高产类型品种分蘖盛期以前 LAI 优势较弱，而拔节期后则相反；与中产、低产类型品种相比，三台高产类型

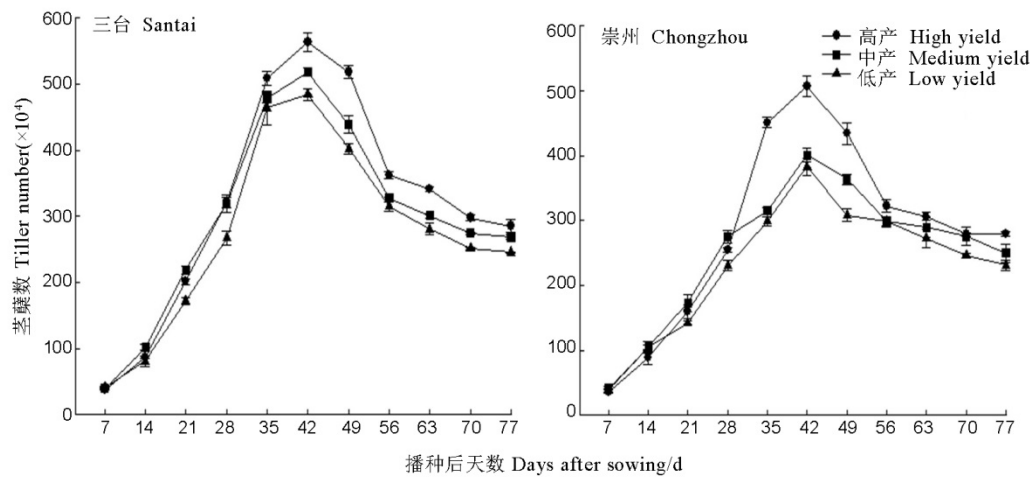


图 1 机直播不同产量水平杂交籼稻茎蘖动态变化
Fig.1. Dynamic changes of stem and tiller number of *indica* hybrid rice with different yield potentials under mechanical direct seeding.

表 6 机直播不同产量水平杂交籼稻各生育时期叶面积指数
Table 6. Leaf area index at different growth stages of rice combinations with different yield potentials under mechanical direct seeding.

地点 Site	品种 Combination	分蘖盛期 Tillering stage	拔节期 Elongation stage	齐穗期 Full heading stage		
				总 LAI Total LAI	高效 LAI Efficient LAI	高效叶面积率 Efficient leaf area ratio/%
三台 Santai	F 优 498 F you 498	2.70±0.04 d	4.37±0.03 bc	8.82±0.58 a	5.91±0.39 a	67.07±0.03 a
	隆两优 1206 Longliangyou 1206	2.91±0.07 c	5.14±0.01 a	8.33±0.24 a	5.56±0.06 b	66.72±1.30 ab
	高产类型平均 Average of high-yield combinations	2.80±0.06 c	4.76±0.01 a	8.58±0.22 a	5.74±0.18 a	66.89±0.65 a
	绿优 4923 Lüyou 4923	3.34±0.05 a	4.15±0.13 d	6.89±0.06 c	4.51±0.02 c	65.44±0.84 b
	宜香优 1108 Yixiangyou 1108	3.03±0.12 b	4.45±0.12 b	7.00±0.12 c	4.63±0.08 c	66.12±0.49 ab
	中产类型平均 Average of medium-yield combinations	3.19±0.05 a	4.30±0.01 b	6.95±0.06 c	4.57±0.04 b	65.78±0.67 a
	川优 6203 Chuanyou 6203	3.04±0.04 b	4.24±0.01 cd	7.59±0.07 b	4.56±0.01 c	59.96±0.66 d
	宜香 4245 Yixiang 4245	2.86±0.01 c	3.31±0.03 e	7.25±0.11 bc	4.53±0.08 c	62.53±0.66 c
	低产类型平均 Average of low-yield combinations	2.95±0.02 b	3.78±0.01 c	7.42±0.05 b	4.55±0.04 b	61.25±0.18 b
崇州 Chongzhou	F 优 498 F you 498	1.84±0.04 b	4.17±0.13 b	7.82±0.41 a	5.21±0.27 a	66.59±0.29 b
	隆两优 1206 Longliangyou 1206	1.89±0.06 b	4.79±0.15 a	7.59±0.24 ab	5.26±0.15 a	69.28±0.70 a
	高产类型平均 Average of high-yield combinations	1.87±0.04 a	4.48±0.14 a	7.71±0.15 a	5.23±0.13 a	67.94±0.35 a
	绿优 4923 Lüyou 4923	2.02±0.09 a	3.51±0.07 c	6.37±0.43 c	4.18±0.28 b	65.57±0.29 c
	宜香优 1108 Yixiangyou 1108	1.87±0.05 b	3.29±0.06 d	5.77±0.06 d	3.61±0.08 c	62.66±0.75 d
	中产类型平均 Average of medium-yield combinations	1.94±0.06 a	3.40±0.06 b	6.07±0.23 c	3.90±0.15 b	64.12±0.37 b
	川优 6203 Chuanyou 6203	1.95±0.03 ab	2.93±0.03 e	6.07±0.06 cd	3.54±0.03 c	53.88±0.06 f
	宜香 4245 Yixiang 4245	1.84±0.02 b	3.09±0.01 e	7.17±0.05 b	3.87±0.08 bc	58.20±0.80 e
	低产类型平均 Average of low-yield combinations	1.89±0.01 a	3.01±0.02 c	6.62±0.05 b	3.70±0.06 b	56.04±0.40 c

品种拔节期 LAI 分别高 10.70%和 25.93%；而崇州高产类型品种拔节期 LAI 则分别高 31.77%和 48.84%。此外，两生态区高产类型品种齐穗期总 LAI、高效 LAI 以及高效叶面积率均迅速增加，且显著大于中产、低产类型。以上结果表明，本研究条件下，拔节期 LAI 4.48~4.76、齐穗期总 LAI 7.71~8.58、高效 LAI 5.23~5.74 以及高效叶面积率 >66%是机直播优质杂交籼稻高产品种筛选的重要群体特征。

2.5 机直播对两生态区不同产量水平优质杂交籼稻品种干物质累积量及收获指数的影响

两生态区不同产量类型品种各生育时期地上部干物质累积量及收获指数均存在显著性差异，且不同产量梯度下，各生育时期干物质累积量以三台较高(表 7)。与中产、低产品种相比，两生态区高产类型品种分蘖盛期至拔节阶段干物质累积量互有高低。从各生育时期中产、低产品种的平均物质累积量来看，三台高产品种在分蘖盛期的物质累积量低

表 7 机直播不同产量水平杂交籼稻品种各生育时期干物质累积及收获指数
Table 7. Dry matter accumulation and harvest index of *indica* hybrid rice combinations with different yield potentials at different growth stages under mechanical direct seeding.

地点 Site	品种 Combination	生育时期 Growth stages/(kg·hm ⁻²)				收获指数 Harvest index /%
		分蘖盛期 Tillering	拔节期 Elongation	齐穗期 Full heading	成熟期 Ripening	
三台 Santai	F 优 498 F you 498	1371.2±59.3 bc	4918.9±45.9 a	14 113.7±435.0 a	18 157.0±157.9 b	50.13±0.55 a
	隆两优 1206 Longliangyou 1206	1337.5±11.8 c	4565.6±47.4 b	14 288.1±128.6 a	19 029.6±35.6 a	47.03±2.14 b
	高产类型平均 Average of high-yield combinations	1353.9±26.3 b	4741.7±45.8 a	14 200.9±480.1 a	18 593.3±69.1 a	48.58±1.15 a
	绿优 4923 Lüyou 4923	1415.2±1.8 ab	4054.1±185.9 c	12 274.3±255.3 b	17 825.5±215.5 c	47.07±2.05 b
	宜香优 1108 Yixiangyou 1108	1454.9±39.4 a	4383.2±81.3 b	13 068.0±19.1 b	17 636.1±20.5 cd	46.75±0.20 b
	中产类型平均 Average of medium-yield combinations	1435.1±20.2 a	4218.6±133.2 b	12 671.1±322.2 b	17 730.8±117.1 b	46.91±1.02 a
	川优 6203 Chuanyou 6203	1410.8±22.9 ab	3574.5±87.9 d	12 768.1±201.8 b	17 559.9±83.2 d	43.53±0.42 c
	宜香 4245 Yixiang 4245	1453.4±27.4 a	3999.3±89.1 c	13 076.1±218.6 b	16 505.0±117.7 e	45.23±0.32 bc
	低产类型平均 Average of low-yield combinations	1432.1±13.7 a	3786.9±87.8 c	12 922.1±88.7 b	17 032.4±88.0 c	44.38±0.33 b
	F 优 498 F you 498	1055.3±40.0 b	3738.0±15.3 a	13 241.0±81.4 a	18 432.9±378.6 a	48.62±2.15 a
崇州 Chongzhou	隆两优 1206 Longliangyou 1206	1054.8±26.1 b	3672.9±15.6 b	13 272.9±509.5 a	18 100.7±29.4 ab	48.62±1.82 a
	高产类型平均 Average of high-yield combinations	1055.0±26.9 b	3705.5±2.8 a	13 256.9±571.8 a	18 266.8±176.7 a	48.62±1.95 a
	绿优 4923 Lüyou 4923	1130.5±6.2 a	3540.3±56.7 c	10 384.2±240.2 b	18 171.2±301.4 ab	47.16±0.70 b
	宜香优 1108 Yixiangyou 1108	1126.0±6.8 a	3456.1±25.5 d	11 682.3±365.2 b	17 409.5±370.4 bc	47.35±0.97 b
	中产类型平均 Average of medium-yield combinations	1128.2±2.8 a	3498.2±22.4 b	11 033.3±664.8 b	17 790.4±333.9 a	47.26±0.72 b
	川优 6203 Chuanyou 6203	1058.5±20.7 b	2823.7±9.8 e	11 185.2±506.8 b	16 856.7±330.3 c	42.17±0.82 d
	宜香 4245 Yixiang 4245	1144.0±42.3 a	3474.9±13.3 d	11 580.9±226.8 b	16 915.5±89.9 c	45.28±0.39 c
	低产类型平均 Average of low-yield combinations	1101.2±24.5 ab	3149.3±7.9 c	11 383.1±157.2 b	16 886.1±333.1 b	43.73±0.59 c

了 5.6%，而在拔节期、齐穗及成熟期则分别高了 18.5%、11.0%和 7.0%；崇州的高产品种在分蘖盛期的物质累积量低了 5.4%，而拔节期、齐穗及成熟期则分别高了 11.5%、18.3%和 5.4%。就收获指数来看，与中产、低产品种相比，虽然两生态区有的高产品种收获指数显著提高，但部分高产品种与另外两种产量类型差异较小。说明适当控制分蘖盛期前的群体干物质累积，扩大分蘖盛期后尤其是齐穗后的群体干物质累积，且保持相对较高的收获指数，是本研究机直播优质杂交籼稻高产品种的物质累积特性。

2.6 机直播对两生态区不同产量水平优质杂交籼稻品种齐穗期顶三叶叶片形态的影响

由表 8 可见，两生态区不同产量水平品种齐穗期顶三叶叶长、叶宽以及叶张角差异均达极显著水平。三台各产量梯度下顶 3 叶叶宽、叶张角明显大于崇州地区，而剑叶、倒 2 叶叶长则短于崇州，倒 3 叶趋势相反。从顶三叶叶长来看，两生态区高产类型品种顶三叶叶长显著大于中产、低产类型品种。另外，从顶三叶叶宽来看，中产、低产品种上三叶叶宽差异不显著，但均显著宽于高产类型品种。与中产、低产类型品种相比，两生态区高产类型品种顶三叶叶张角相对较小。说明顶三叶叶片较长、株型紧凑是本研究机直播优质杂交籼稻高产品种重要的外部形态特征。

2.7 机直播对两生态区不同产量水平优质杂交籼稻品种齐穗期顶三叶空间分布的影响

由表 9 可知，两生态区不同产量水平品种齐穗

期上三叶着生姿态及其株高差异均达显著或极显著水平。三台各产量梯度的剑叶、倒 3 叶及其对应的相对叶位均高于崇州，而倒 2 叶叶位及其相对叶位、株高则趋势相反。两生态区高产类型品种剑叶、倒 3 叶叶位均显著高于中产、低产类型品种。另外，虽然两生态区不同产量水平间倒 2 叶着生高度互有高低，但三台高产品种的倒 2 叶叶位显著低于另外两种产量类型，而崇州高产品种倒 2 叶叶位则相反。由表 9 还可以看出，两生态区各产量水平顶三叶的相对叶位与其对应叶位趋势基本一致。与中产、低产类型品种的平均株高相比，三台高产类型品种株高提高了 1.51%，而崇州的高产类型品种的株高则提高了 1.32%。

2.8 机直播对两生态区不同产量水平优质杂交籼稻品种结实期群体透光率的影响

由表 10 可知，两生态区不同产量水平优质杂交籼稻品种结实期的群体透光率均达显著或极显著差异水平，且三台地区各产量梯度结实期群体漏光率均小于崇州地区，这可能与相应的叶宽及其叶片着生姿态有关。高产品种群体透光率显著小于中产、低产类型品种，尤其以齐穗 15 d 后稻株中部和基部群体透光率最小。与中产、低产品种稻株基部与中部群体透光率的均值比较来看，三台高产类型品种在齐穗期、齐穗 15 d 以及齐穗 30 d 光能损失分别降低了 31.50%和 29.81%、23.00%和 32.36%以及 27.73%和 33.98%；而崇州高产品种在齐穗期、齐穗 15 d 以及齐穗 30 d 的光能损失则分别降低了 32.04%和 36.23%、19.13%和 27.94%以及 30.68%和

表 8 机直播不同产量水平杂交籼稻品种齐穗期顶三叶长、宽、叶张角

Table 8. Top 3 leaf length and width, leaf opening angle of *indica* hybrid rice combinations with various yield potentials under mechanical direct seeding.

地点 Site	品种 Combination	剑叶 Flag leaf			倒 2 叶 2nd leaf			倒 3 叶 3rd leaf		
		长 Length/cm	宽 Width/cm	叶张角 Leaf angle/°	长 Length/cm	宽 Width/cm	叶张角 Leaf angle/°	长 Length/cm	宽 Width/cm	叶张角 Leaf angle/°
三台 Santai	F 优 498	41.02±0.54 a	1.98±0.06 b	8.14±0.99 e	52.64±0.47 a	1.67±0.02 d	24.86±0.55 d	56.46±0.46 a	1.45±0.03 c	35.47±0.41 d
	F you 498									
	隆两优 1206	36.83±1.59 b	1.84±0.04 c	10.19±0.17 d	48.46±0.04 b	1.58±0.07 e	24.22±0.38 d	57.34±0.67 a	1.43±0.01 c	35.28±0.25 d
	Longliangyou 1206									
	高产类型平均	38.93±0.73 a	1.91±0.02 b	9.17±0.44 c	50.55±0.23 a	1.62±0.04 b	24.54±0.44 c	56.90±0.51 a	1.44±0.02 c	35.38±0.33 c
	Average of high-yield combinations									
	绿优 4923	35.45±0.24 b	1.95±0.01 b	11.30±0.05 c	46.81±0.53 cd	1.70±0.04 cd	32.42±0.52 a	53.26±0.50 c	1.57±0.03 b	41.33±0.33 a
	Lüyou 4923									
	宜香优 1108	33.34±0.44 c	2.16±0.02 a	12.50±0.17 b	47.37±0.57 c	1.91±0.03 a	28.17±0.44 b	55.10±0.56 b	1.54±0.04 b	39.39±0.35 b
	Yixiangyou 1108									
	中产类型平均	34.39±0.33 b	2.06±0.01 a	11.90±0.09 b	47.09±0.24 b	1.81±0.02 a	30.29±0.11 a	54.18±0.12 b	1.55±0.01 b	40.36±0.27 a
	Average of medium-yield combinations									
	川优 6203	31.72±0.42 d	1.94±0.04 b	13.47±0.41 a	44.72±0.49 e	1.76±0.02 bc	28.17±0.29 b	53.85±0.54 c	1.66±0.03 a	36.83±0.73 c
	Chuanyou 6203									
	宜香 4245	32.20±0.63 cd	2.11±0.04 a	13.28±0.25 ab	45.94±0.47 d	1.82±0.03 b	27.25±0.46 c	53.26±0.37 c	1.66±0.03 a	37.30±0.05 c
崇州 Chongzhou	Yixiang 4245									
	低产类型平均	31.96±0.25 c	2.02±0.04 a	13.38±0.23 a	45.33±0.32 c	1.79±0.01 a	27.71±0.11 b	53.55±0.38 b	1.66±0.02 a	37.07±0.37 b
	Average of low-yield combinations									
	F 优 498	43.18±0.06 a	1.79±0.05 c	7.60±0.12 e	55.87±0.53 a	1.45±0.03 b	21.08±0.51 d	53.12±0.96 a	1.25±0.02 c	32.72±0.63 e
	F you 498									
	隆两优 1206	41.47±0.41 b	1.84±0.04 bc	10.01±0.38 d	53.33±0.68 b	1.35±0.04 c	19.31±0.72 e	52.65±0.90 a	1.22±0.01 c	33.83±0.58 d
	Longliangyou 1206									
	高产类型平均	42.32±0.20 a	1.81±0.03 b	8.80±0.14 c	54.60±0.59 a	1.40±0.02 b	20.19±0.10 c	52.88±0.83 a	1.23±0.01 b	33.28±0.53 c
	Average of high-yield combinations									
	绿优 4923	37.43±0.29 c	1.86±0.01 bc	12.30±0.29 bc	50.31±0.33 c	1.51±0.08 ab	23.90±0.54 bc	48.00±0.11 c	1.25±0.03 c	35.44±0.12 b
	Lüyou 4923									
	宜香优 1108	36.23±0.24 d	1.90±0.02 b	11.73±0.68 c	45.23±0.64 d	1.51±0.02 ab	23.54±0.55 c	49.56±0.22 b	1.30±0.03 ab	35.09±0.61 bc
	Yixiangyou 1108									
	中产类型平均	36.83±0.26 b	1.88±0.01 ab	12.02±0.40 b	46.92±0.20 b	1.51±0.04 a	23.72±0.49 b	48.78±0.07 b	1.28±0.01 a	35.27±0.25 b
	Average of medium-yield combinations									
	川优 6203	35.48±0.40 e	1.80±0.03 c	12.85±0.57 b	43.53±0.21 e	1.49±0.03 ab	24.71±0.21 ab	48.55±0.18 c	1.27±0.03 bc	34.31±0.46 cd
	Chuanyou 6203									
	宜香 4245	32.44±0.39 f	2.09±0.09 a	13.54±0.28 a	50.35±0.57 c	1.56±0.05 a	25.22±0.25 a	48.15±0.74 c	1.32±0.02 a	38.98±0.78 a
	Yixiang 4245									
	低产类型平均	33.96±0.23 c	1.94±0.03 a	13.20±0.42 a	47.79±0.38 b	1.53±0.01 a	24.97±0.23 a	48.35±0.46 b	1.29±0.02 a	36.64±0.25 a
	Average of low-yield combinations									

表 9 机直播不同产量水平杂交籼稻品种顶三叶空间分布

Table 9. Spatial distribution of top three leaves of *indica* hybrid rice combinations with different yield potentials under mechanical direct seeding.

地点 Site	品种 Combination	叶位 Leaf site/cm			相对叶位 Percent of leaf site to plant height/%			株高 Plant height/cm
		剑叶	倒 2 叶	倒 3 叶	剑叶	倒 2 叶	倒 3 叶	
		Flag leaf	2nd leaf	3rd leaf	Flag leaf	2nd leaf	3rd leaf	
三台 Santai	F 优 498 F you 498	96.00±0.57 b	59.94±0.30 bc	45.52±0.30 a	78.22±0.43 b	48.84±0.22 d	37.09±0.26 b	122.73±0.06 a
	隆两优 1206 Longliangyou 1206	97.35±0.19 a	59.62±0.24 c	45.37±0.18 a	81.72±0.89 a	49.70±0.69 cd	38.09±0.53 a	119.13±1.27 bc
	高产类型平均 Average of high-yield combinations	96.68±0.20 a	59.62±0.14 c	45.45±0.16 a	79.97±0.37 a	49.31±0.37 c	37.59±0.23 a	120.93±0.63 a
	绿优 4923 Lüyou 4923	91.41±0.54 c	59.29±0.88 c	40.94±0.42 c	77.34±0.54 b	50.44±0.64 bc	34.64±0.44	118.20±0.30 c
	宜香优 1108 Yixiangyou 1108	88.13±0.55 d	62.01±0.64 a	42.03±0.68 b	74.01±0.43 c	52.08±0.45 a	35.29±0.58 c	119.07±0.25 bc
	中产类型平均 Average of medium-yield combinations	89.77±0.08 b	60.82±0.16 a	41.48±0.54 b	75.67±0.09 b	51.260.18 a	34.97±0.49 b	118.63±0.13 c
	川优 6203Chuanyou 6203	87.67±0.44 d	59.85±0.52 bc	39.90±0.86 d	72.80±0.68 d	49.77±0.15 c	33.13±0.67 e	120.43±0.80 b
	宜香 4245Yixiang 4245	85.95±0.79 e	60.96±0.69 ab	40.77±0.44 cd	72.35±0.61 d	51.31±0.38 ab	34.32±0.45 d	118.80±0.89 c
崇州 Chongzhou	低产类型平均 Average of low-yield combinations	86.81±0.55 c	60.41±0.12 b	40.34±0.23 c	72.57±0.60 c	50.51±0.12 b	33.73±0.11 c	119.62±0.28 b
	F 优 498 F you 498	93.33±0.30 b	61.56±0.22 a	48.11±0.51 a	76.75±0.10 b	50.62±0.35 a	39.57±0.43 a	121.60±0.48 a
	隆两优 1206 Longliangyou 1206	98.12±0.05 a	60.62±0.64 b	43.05±0.60 b	80.39±0.47 a	49.67±0.79 b	35.27±0.50 b	122.05±0.65 a
	高产类型平均 Average of high-yield combinations	95.72±0.17 a	61.09±0.24 a	45.58±0.07 a	78.57±0.21 a	50.15±0.23 a	37.42±0.05 a	121.83±0.10 a
	绿优 4923 Lüyou 4923	90.49±0.14 c	56.50±0.43 d	41.70±0.15 c	75.11±0.11 c	46.90±0.44 d	34.62±0.17 b	120.48±0.30 b
	宜香优 1108 Yixiangyou 1108	70.91±0.76 f	44.82±0.62 f	32.06±0.66 e	59.60±1.07 f	37.67±0.25 f	26.94±0.43 e	118.98±0.88 c
	中产类型平均 Average of medium-yield combinations	80.70±0.39 c	50.66±0.42 c	36.88±0.35 b	67.36±0.48 c	42.28±0.32 c	30.78±0.26 b	119.74±0.34 c
	川优 6203 Chuanyou 6203	87.09±0.33 d	57.52±0.14 c	36.02±0.31 d	73.01±0.28 d	48.23±0.48 c	30.20±0.43 c	119.28±0.90 c
	宜香 4245 Yixiang 4245	85.31±0.76 e	48.31±0.21 e	35.36±0.62 d	69.82±0.96 e	39.54±0.37 e	28.94±0.60 d	122.18±0.62 a
	低产类型平均 Average of low-yield combinations	86.20±0.36 b	52.92±0.16 b	35.69±0.42 c	71.42±0.54 b	43.89±0.39 b	29.57±0.48 c	120.74±0.69 b

表 10 机直播不同产量水平杂交籼稻的群体透光率
Table 10. Light transmission rate of *indica* hybrid rice combinations with different yield potentials under mechanical direct seeding /%

地点 Site	品种 Combination	齐穗 Full-heading stage		齐穗后 15 d 15 days after full-heading		齐穗后 30 d 30 days after full-heading	
		中部 Middle part	基部 Basal part	中部 Middle part	基部 Basal part	中部 Middle part	基部 Basal part
三台 Santai	F 优 498 F you 498	11.21±0.58 d	6.19±0.46 c	6.81±0.32 e	2.91±0.16 d	15.85±0.64 d	8.06±0.80 d
	隆两优 1206 Longliangyou 1206	11.38±0.05 d	6.55±0.52 c	7.89±0.32 d	2.76±0.11 d	15.23±0.76 d	10.23±0.45 c
	高产类型平均 Average of high-yield combinations	11.29±0.31 c	6.37±0.03 c	7.35±0.14 c	2.83±0.10 c	15.54±0.24 c	9.14±0.58 b
	绿优 4923 Lüyou 4923	15.07±0.60 b	11.72±0.70 a	9.34±0.21 b	4.51±0.27 b	20.45±0.29 c	12.67±0.55 b
	宜香优 1108 Yixiangyou 1108	14.06±0.14 c	10.72±0.64 a	8.49±0.04 c	4.11±0.39 c	22.03±0.80 b	13.13±0.55 ab
	中产类型平均 Average of medium-yield combinations	14.57±0.23 b	11.21±0.67 a	8.91±0.13 b	4.31±0.31 b	21.25±0.54 b	12.90±0.33 a
	川优 6203 Chuanyou 6203	15.92±0.09 a	9.33±0.16 b	9.01±0.20 b	5.25±0.13 a	25.07±0.81 a	14.08±0.86 a
	宜香 4245 Yixiang 4245	14.31±0.40 c	10.75±0.57 a	10.27±0.10 a	5.58±0.01 a	22.89±0.38 b	12.69±0.80 b
	低产类型平均 Average of low-yield combinations	15.12±0.16 a	10.04±0.33 b	9.64±0.05 a	5.41±0.07 a	23.99±0.43 a	13.39±0.69 a
崇州 Chongzhou	F 优 498 F you 498	13.72±0.22 d	8.10±0.14 d	8.74±0.27 e	4.30±0.30 c	17.18±0.76 d	8.72±0.44 d
	隆两优 1206 Longliangyou 1206	13.57±0.76 d	8.11±0.42 d	9.32±0.19 d	4.36±0.23 c	16.90±0.70 d	11.23±0.65 c
	高产类型平均 Average of high-yield combinations	13.65±0.27 c	8.10±0.28 c	9.03±0.22 c	4.33±0.27 c	17.04±0.72 c	9.98±0.52 b
	绿优 4923 Lüyou 4923	20.97±0.76 c	10.87±0.27 ab	11.59±0.28 c	5.01±0.34 b	24.79±0.52 c	14.00±0.13 b
	宜香优 1108 Yixiangyou 1108	20.78±0.31 c	11.43±0.06 a	11.50±0.15 c	4.93±0.18 b	25.70±0.23 b	13.46±0.03 b
	中产类型平均 Average of medium-yield combinations	20.87±0.28 b	11.15±0.10 a	11.55±0.09 b	4.97±0.11 b	25.25±0.24 b	13.73±0.05 a
	川优 6203 Chuanyou 6203	25.06±0.33 a	10.46±0.54 b	13.58±0.05 a	5.61±0.51 a	28.40±0.56 a	14.75±0.35 a
	宜香 4245 Yixiang 4245	23.05±0.39 b	9.65±0.24 c	12.74±0.06 b	5.15±0.02 ab	25.23±0.75 bc	14.02±0.36 b
	低产类型平均 Average of low-yield combinations	24.05±0.03 a	10.06±0.39 b	13.16±0.01 a	5.38±0.26 a	26.82±0.65 a	14.39±0.34 a

34.43%。说明两生态区高产类型品种冠层结构分布较为合理，可充分利用光能，进而增产。

2.9 群体质量指标与产量及其构成的关系

由表 11 可见，除分蘖盛期 LAI 及其干物质累积量外，拔节期至齐穗期阶段的 LAI 以及高效 LAI、高效叶面积率、拔节至成熟阶段的干物质累积量以及收获指数、顶三叶叶长、着生叶位及其株高与有效穗数、每穗实粒数、结实率以及实际产量均呈显著或极显著正相关。其中，除成熟期干物累积量及收获指数外，尤以齐穗期高效叶面积率与实际产量的正相关性最高 ($r=0.79^{**}$)。另外，顶三叶叶张角，齐穗至齐穗 30 d 稻株基部及中部的群体透光率与有效穗数、每穗实粒数、结实率以及稻谷产量呈显著或极显著负相关，尤以齐穗 30 d 稻株中部的群体透光率与稻谷产量的负相关性最高($r=-0.83^{**}$)。说明提高群体高效 LAI，降低灌浆结实期光能损失，是优质杂交籼稻高产品种进一步增产的关键。

3 讨论

3.1 机直播对两生态区不同产量水平优质杂交籼稻品种产量及其构成因素的影响

随着产量构建的形成，决定不同品种产量高低的构成因素基本稳定；扩大库容量，增强籽粒充实

度是高产栽培普遍认同的途径^[13,15-16]，也是筛选适宜机直播优质杂交籼稻高产品种的关键。我国稻作区域幅员辽阔，针对不同生态区高产栽培研究结论不一。杨从党等^[13]研究指出，增加总颖花量是云南立体生态区水稻增产的主要途径，且随着海拔升高，有效穗数的贡献逐步加大；而颖花较多，势必会造成结实率偏低、籽粒不充实等问题^[14]。罗德强等^[15]研究指出，贵州高原山区杂交籼稻超高产栽培的途径是合理增加有效穗数，并提高大穗比例。马均等^[16]研究则指出，四川稻区重穗型水稻超高产的主要特征是足穗的基础上攻大穗和粒重。本研究结果表明，在机直播条件下，两生态区同一品种千粒重变化较小，而其有效穗数、实粒数以及结实率的变幅则较大，以三台地区表现较优。从两生态区不同产量类型来看，虽然高产类型品种千粒重优势不明显，但其有效穗数、实粒数以及结实率可以使高产类型品种协调出较高的稻谷产量，尤其以有效穗数与稻谷产量的正相关性最高($r=0.79^{**}$)。因此，两生态区机直播优质杂交籼稻高产品种的共性特征是塑造适宜且足额的有效穗数，在此基础上，主攻每穗实粒数，形成适宜的群体库容量，并保持相对较高的结实率，进而表现出较高的籽粒产量。当然，进一步提高粒重，将是机直播高产类型品种进一步增产的方向。

表 11 不同时期叶面积指数、群体透光率、干物质质量及株型与产量的相关性

Table 11. Correlation between leaf area index, light transmission rate, dry matter accumulation and plant type and yield at different periods (*n*=36).

指标 Index		有效穗数 Effective panicle number	每穗实粒数 Filled grain number per panicle	结实率 Seed-setting rate	实际产量 Grain yield
叶面积指数 LAI	分蘖盛期 Tillering	0.28	−0.04	−0.07	0.03
	拔节期 Elongation	0.75**	0.68**	0.63**	0.71**
	齐穗期 Full heading	0.61**	0.57**	0.59**	0.53**
高效 LAI Efficient LAI		0.83**	0.70**	0.62**	0.73**
高效叶面积率 Efficient leaf area ratio		0.88**	0.62**	0.37*	0.79**
干物质质量 Dry matter accumulation	分蘖盛期 Tillering	0.22	−0.11	−0.20	−0.04
	拔节期 Elongation	0.68**	0.53**	0.32	0.63**
	齐穗期 Full heading	0.62**	0.49**	0.48**	0.45**
	成熟期 Ripening	0.65**	0.76**	0.65**	0.84**
收获指数 Harvest index		0.72**	0.59**	0.34*	0.90**
剑叶 Flag leaf	长 Lenght	0.56**	0.62**	0.61**	0.74**
	宽 Width	−0.16	−0.33*	−0.48**	−0.29
	叶张角 Leaf angle	−0.67**	−0.67**	−0.63**	−0.83**
倒 2 叶 2nd leaf	长 Lenght	0.50**	0.61**	0.48**	0.65**
	宽 Width	−0.01	−0.31	−0.41*	−0.23
	叶张角 Leaf angle	−0.22	−0.48**	−0.46**	−0.36*
倒 3 叶 3rd leaf	长 Lenght	0.69**	0.49**	−0.45**	0.51**
	宽 Width	0.07	−0.32	−0.29	−0.25
	叶张角 Leaf angle	−0.21	−0.39*	−0.49**	−0.28
叶位 Leaf site	剑叶 Flag leaf	0.63**	0.64**	0.58**	0.52**
	倒 2 叶 2nd leaf	0.56**	0.32	0.25	0.23
	倒 3 叶 3rd leaf	0.78**	0.69**	0.52**	0.67**
株高 Plant height		0.13	0.23	0.40*	0.37*
齐穗期透光率	中部 Middle part	−0.84**	−0.56**	−0.41*	−0.65**
Light transmission during full-heading	基部 Basal part	−0.50**	−0.71**	−0.82**	−0.56**
齐穗 15 d 透光率	中部 Middle part	−0.75**	−0.54**	−0.49**	−0.70**
Light transmission 15 days after full-heading	基部 Basal part	−0.66**	−0.76**	−0.67**	−0.81**
齐穗 30 d 透光率	中部 Middle part	−0.84**	−0.79**	−0.62**	−0.83**
Light transmission 30 days after full-heading	基部 Basal part	−0.72**	−0.68**	−0.62**	−0.78**

*, ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上显著相关。

*, ** Significant correlation at $P < 0.05$ and $P < 0.01$, respectively.

3.2 机直播对两生态区不同产量水平优质杂交籼稻品种群体质量特征的影响

籽粒产量的形成与群体茎蘖动态、叶面积大小及干物质积累量密切相关^[17-18]。在茎蘖动态方面，不同生态区的不同品种分蘖强弱差异较大。本研究表明，同一产量类型下，三台地区各品种的分蘖能力显著强于崇州地区，这可能与播种时间、日均温度以及地力情况有关(表 1、表 2)。此外，机直播稻无缓苗过程，群体分蘖势强且快，两生态区高产类型品种前期分蘖弱，之后迅速达到高峰苗时期，随后降幅较快，最后趋于平缓。这个过程极易造成高产类型品种茎蘖成穗率减小，使其产量降低。当然，由图 1 可见，高产类型品种的群体分蘖基数较大，可以弥补其分蘖的不足。且两生态区优质杂交籼稻高产类型品种的分蘖特征为最大限度塑造群体分蘖数，在保证足穗的同时，提高群体的茎蘖成穗率，

可进一步使其增产。

分蘖能力的强弱与稻株物质累积直接相关，但物质累积量主要取决于叶面积及净光合速率，干物质生产初期主要取决于叶面积的大小，随着生育进程，叶面积大小对干物质生产的贡献逐渐减小。诸多研究表明^[19-20]，在适宜的 LAI 基础上，抽穗至成熟阶段的干物质积累量越多，越有利于高产。杨建昌^[21]等研究指出，分蘖成穗率>80%，抽穗期叶面积指数 7.5~8.0，成熟期干物质质量>22 t/hm² 的品种较易获得高产。马群等^[22]研究则指出，顶层水平的品种干物质生产在生育中、后期，特别是生育后期(抽穗至成熟阶段)优势明显。抽穗至成熟阶段较高的叶面积指数以及较高的经济系数是水稻品种获得最高生产力的重要保证，而关于拔节期及以前干物质积累说法不一^[21-22]。本研究表明，与中产、低产品种相比，两生态区高产类型品种通过控制分蘖

盛期以前的群体生长,促进分蘖盛期以后的群体发展,适度减小分蘖盛期前群体 LAI 和干物质积累,扩大分蘖盛期后尤其是齐穗后群体 LAI 和干物质积累,实现齐穗后群体 LAI 和干物质的高增长,从而获得高产。此外,相关分析也表明,机直播不同产量水平条件下,分蘖盛期 LAI 及干物质累积量与稻谷产量及其构成相关性较小,而拔节至成熟阶段则相反,尤其以齐穗期高效 LAI 率、成熟期干物质质量以及收获指数与籽粒产量的相关性较高,分别为 0.79^{**}、0.84^{**}和 0.90^{**}。因此,优化并调控水稻分蘖盛期前的群体叶面积,并维持其后期功能叶的群体质量,是筛选机直播优质杂交水稻高产品种的共性特征。此外,本研究高产群体质量的调控主要在于前期精确肥水的管理、稻田杂草控制恰当^[23-25]、适量稀播;均为合理的群体起点奠定了基础,也是保证高产群体构建的技术保证。

3.3 机直播对两生态区不同产量水平优质杂交水稻品种群体透光能力及其株型特征的影响

前人研究表明,结实期群体光能损失越少,产量越高,且为先降后升的趋势^[26],与表 10 的结果基本一致。本研究还表明,两生态区高产类型品种株叶结构配置较为合理,群体透光小,截获光能多,提高了光能利用率,使其籽粒产量较高,这可能与叶片着生姿态以及叶片宽度有关。此外,良好的株型配置,合理的冠层结构,是水稻高产高效的重要特征之一。而株型特征不仅受品种自身遗传的影响,也受到生态条件和栽培措施的制约。李景蕙等^[27]研究认为,高海拔生态区水稻精确定量栽培比常规栽培增产明显,与稻株上部三叶适宜的叶长、叶角、比叶重及节间的配置等优良株型性状密切相关。任亮等^[28]研究认为,超高产品种齐穗期株型特征表现为上部叶片挺立、叶面积大、与茎秆夹角小;符合袁隆平提出的超级杂交稻理想模式中叶片“长、直、窄、凹、厚”的部分特点。杜永等^[29]对黄淮地区不同粳稻品种株型特征研究表明,剑叶、倒 2 叶、倒 3 叶的叶长范围为 26~28 cm、35~40 cm、32~38 cm,全生育期 150~155 d,剑叶与穗下节间夹角<20°,穗型为半直立或直立的品种更具高产潜力。相关分析表明,两生态区不同产量水平的稻谷产量与顶三叶叶长均呈极显著正相关,尤其与剑叶叶长的相关系数最高($r=0.74^{**}$),与其剑叶、倒二叶叶夹角呈显著或极显著负相关;说明在一定范围内,顶三叶叶长、叶夹角显著影响稻谷的产量,这与前人研究结果基本一致^[29-30],而本研究还表明,不同生态区机直播条件下,优质杂交水稻高产类型品种齐穗

期株型特征为高叶位、顶三叶叶长较长、与茎秆夹角较小,整体外部形态表现为株型紧凑,叶型细长。本研究对两生态区不同产量类型机直播优质杂交水稻品种的产量形成及其群体外部特征进行了初步研究,为最终构建规范化的机直播优质杂交水稻高产品种的鉴定方法和评价体系提供理论及实践依据;而对其生理特性、抗倒伏能力等不同生育时期的共性指标鉴定,还有待进一步探究。

4 结论

在不同生态区,高产类型品种稻谷产量优势主要来源于结实率;且分蘖能力、叶面积指数、干物质累积、株型以及群体光能截获能力均以丘陵地区表现较优。另外,同一生态区下,与中产、低产类型品种相比,高产类型品种分蘖能力强,拔节后叶面积指数大,干物质累积量高,结实期株型紧凑,叶位、叶形表现合理,群体光能截获能力强,是机直播优质杂交水稻高产品种的主要共性特征。同时,本研究条件下,在保证有效穗穗数($>290 \times 10^4/\text{hm}^2$)的基础上,结实期上三叶叶张角:剑叶 8.80°~9.17°、倒 2 叶 20.19°~24.54°,株高 120 cm 左右,剑叶叶长 38.93~42.32 cm、群体叶面积指数 7.12~8.81、高效叶面积指数 5.23~5.74,并保持相对较高的每穗实粒数(>140 粒)及结实率($>80\%$),为机直播优质杂交水稻高产类型品种筛选的重要外部形态特征。

参考文献:

- [1] 许轲,唐磊,郭保卫,张洪程,霍中洋,戴其根,魏海燕. 不同直播方式水稻产量及其物质生产特点. 扬州大学学报: 农业与生命科学版, 2014, 35(3): 42-47.
Xu K, Tang L, Guo B W, Zhang H C, Huo Z Y, Dai Q G, Wei H Y. Grain yield and matter accumulation characteristics of rice in the different patterns of direct-seeding cultivation. *J Yangzhou Univ: Agric & Life Sci*, 2014, 35(3): 42-47. (in Chinese with English)
- [2] 姚义,霍中洋,张洪程,夏炎,倪晓诚,戴其根,许轲,魏海燕. 不同生态区播期对直播稻生育期及温光利用的影响. 中国农业科学, 2012, 45(4): 633-647.
Yao Y, Huo Z Y, Zhang H C, Xia Y, Ni X C, Dai Q G, Xu K, Wei H Y. Effects of sowing date on growth stage and utilization of temperature and illumination of direct seeding rice in different ecological regions. *Sci Agric Sin*, 2012, 45(4): 633-647. (in Chinese with English abstract)
- [3] 霍中洋,姚义,张洪程,夏炎,倪晓诚,戴其根,许轲,魏海燕. 播期对直播稻光合物质生产特征的影响. 中

- 国农业科学, 2012, 45(13): 2592-2606.
- Huo Z Y, Yao Y, Zhang H C, Xia Y, Ni X C, Dai Q G, Xu K, Wei H Y. Effect of sowing date on characteristics of photosynthesis and matter production of direct seeding rice. *Sci Agric Sin*, 2012, 45(13): 2592-2606. (in Chinese with English abstract)
- [4] 蒋明金, 马均, 孙永健, 严奉君, 徐徽, 杨志远, 孙加威. 播种量和氮肥运筹对直播杂交稻光合生产力及氮素利用的影响. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2015, 41(5): 516-526.
- Jiang M J, Ma J, Sun Y J, Yan F J, Xu H, Yang Z Y, Sun J W. Effects of seeding rate and nitrogen fertilizer managements on photosynthetic productivity and nitrogen utilization in direct-seeded rice. *J Zhejiang Univ: Agric & Life Sci*, 2015, 41(5): 516-526. (in Chinese with English abstract)
- [5] Pan S G, Wen X C, Wang Z M, Ashraf U, Tian H, Duan M Y, Mo Z W, Fan P S, Tang X R. Benefits of mechanized deep placement of nitrogen fertilizer in direct-seeded rice in South China. *Field Crops Res*, 2017, 203: 139-149.
- [6] 钱银飞, 张洪程, 李杰, 陈烨, 郭振华, 吴文革, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 李德剑, 周有炎. 不同穗型水稻品种直播产量及其群体质量特征的研究. 江西农业大学学报, 2008, 30(5): 766-772.
- Qian Y F, Zhang H C, Li J, Chen Y, Guo Z H, Wu W G, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Li D J, Zhou Y Y. Studies on yield and characteristics of plant population quality of direct-seeded rice cultivars of different panicle types. *Acta Agric Univ Jiangxiensis*, 2008, 30(5): 766-772. (in Chinese with English abstract)
- [7] Xing Z P, Hu Y J, Qian H J, Cao W W, Guo B W, Wei H Y, Xu K, Huo Z Y, Zhou G S, Dai Q G, Zhng H C. Comparison of yield traits in rice among three mechanized planting methods in a rice-wheat rotation system. *J Integ Agric*, 2017, 16(7): 1451-1466.
- [8] 曾令琴, 李光华, 徐志丹, 李明举. 杂交水稻品种机械穴直播适宜性研究. 种子, 2016, 35(7): 110-113.
- Zeng L Q, Li G H, Xu Z D, Li M J. Study on the suitability for direct seeding of hybrid rice varieties. *Seed*, 2016, 35(7): 110-113. (in Chinese with English)
- [9] 孙永健, 郑洪帆, 徐徽, 杨志远, 贾现文, 程洪彪, 马均. 机械旱直播方式促进水稻生长发育提高产量. 农业工程学报, 2014, 30(20): 10-18.
- Sun Y J, Zheng H Z, Xu H, Yang Z Y, Jia X W, Cheng H B, Ma J. Mechanical dry direct-sowing modes improving growth development and yield of rice. *Tran Chin Soci Agric Engin*, 2014, 30(20): 10-18. (in Chinese with English)
- [10] 曾勇军, 石庆华, 潘晓华, 韩涛. 长江中下游双季稻高产株型特征初步研究. 作物学报, 2009, 35(3): 546-551.
- Zeng Y J, Shi Q H, Pan X H, Han T. Preliminary study on the plant type characteristics of double cropping rice in middle and lower reaches of changjiang river. *Acta Agron Sin*, 2009, 35(3): 546-551. (in Chinese with English abstract)
- [11] 高成旭, 田青兰, 陶有凤, 任万军. 2000—2015 年四川省杂交籼稻品种的稻米品质变化分析. 杂交水稻, 2017, 32(1): 5-11.
- Gao C X, Tian Q L, Tao Y F, Ren W J. Analysis on grain quality change of indica hybrid rice varieties of sichuan province during 2000~2015. *Hybird Rice*, 2017, 32(1): 5-11. (in Chinese with English abstract)
- [12] 郭长春, 何艳, 孙永健, 严奉君, 王海月, 杨志远, 徐徽, 殷尧翥, 严田蓉, 马均. 直播杂交籼稻品种不同产量水平与产量形成特征及其差异性比较. 四川农业大学学报, 2017, 35(4): 476-483.
- Guo C C, He Y, Sun Y J, Yan F J, Wang H Y, Yang Z Y, Xu H, Yin Y Z, Yan T R, Ma J. Comparison of different yield levels and yield formation characteristics and differences of indica hybrid rice under direct-sowing. *J Sichuan Agri Univ*, 2017, 35(4): 476-483. (in Chinese with English abstract)
- [13] 杨从党, 李刚华, 李贵勇, 夏琼梅, 邓安凤, 刘正辉, 王绍华, 凌启鸿, 丁艳锋. 立体生态区水稻定量促控栽培技术的增产机理. 中国农业科学, 2012, 45(10): 1904-1913.
- Yang C D, Li G H, Li G Y, Xia Q M, Deng A F, Liu Z H, Wang S H, Ling Q H, Ding Y F. Research on the mechanism of grain yield increase of rice by quantitative intensifying and controlling cultivation under an erect ecology in yunnan province of china. *Sci Agric Sin*, 2012, 45(10): 1909-1913. (in Chinese with English abstract)
- [14] Takai T, Matsuura S, Nishio T, Ohsumi A, Shiraiwa T, Horie T. Rice yield potential is closely related to crop growth rate during late reproductive period. *Field Crops Res*, 2006, 96: 328-335.
- [15] 罗德强, 王绍华, 江学海, 李刚华, 周维佳, 李敏, 姬广梅, 丁艳锋, 凌启鸿, 刘正辉. 贵州省高原山区杂交籼稻不同产量水平群体的特征. 作物学报, 2016, 42(12): 1817-1826.
- Luo D Q, Wang S H, Jiang X H, Li G H, Zhou W J, Li M, Ji G H, Ding Y F, Lin Q H, Liu Z H. Characterization of populations with different yield levels in indica hybrid rice in plateau area of guizhou province. *Acta Agron Sin*, 2016, 42(12): 1817-1826. (in Chinese with English abstract)
- [16] 马均, 朱庆森, 马文波, 田彦华, 杨建昌, 周开达. 重穗型水稻光合作用、物质积累与运转的研究. 中国农业科学, 2003, 36: 375-381.
- Ma J, Zhu Q S, Ma W B, Tian Y H, Yang J C, Zhou K D. Studies on the photosynthetic characteristics and accumulation and transformation of assimilation product in heavy panicle type of rice. *Sci Agric Sin*, 2003, 36: 375-381. (in Chinese with English abstract)
- [17] 王海月, 李玥, 孙永健, 李应洪, 蒋明金, 王春雨, 赵建红, 孙园园, 徐徽, 严奉君, 马均. 不同施氮水平下缓释氮肥配施对机插稻氮素利用特征及产量的影响. 中国水稻科学, 2017, 31(1): 50-64.
- Wang H Y, Li Y, Sun Y J, Li Y H, Jiang M J, Wang C Y, Zhao J H, Sun Y Y, Xu H, Yan F J, Ma J. Effects of slow-release urea on nitrogen utilization and yield in

- mechanically-trans-planted rice under different nitrogen application rates. *Chin J Rice Sci*, 2017,31(1): 50-64. (in Chinese with English abstract)
- [18] 李敏, 张洪程, 杨雄, 葛梦婕, 马群, 魏海燕, 戴其根, 霍中洋, 许轲. 水稻高产氮高效型品种的物质积累与转运特性. 作物学报, 2013, 39(1): 101-109.
Li M, Zhang H C, Yang X, Ge M J, Ma Q, Wei H Y, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K. Characteristics of dry matter accumulation and translocation in rice cultivars with high yield and high nitrogen use efficiency. *Acta Agron Sin*, 2013, 39(1): 101-109. (in Chinese with English abstract)
- [19] 罗德强, 王绍华, 江学海, 李刚华, 周维佳, 李敏, 姬广梅, 丁艳锋, 凌启鸿, 刘正辉. 精确定量施肥对贵州高原山区杂交水稻产量与群体质量的影响. 中国农业科学, 2014, 47(11): 2099-2108.
Luo D Q, Wang S H, Jiang X H, Li G H, Zhou W J, Li M, Ji G H, Ding Y F, Lin Q H, Liu Z H. Effects of accurate fertilizer model (af) on yield and population quality of hybrid indica rice cultivars in guizhou highland area. *Sci Agric Sin*, 2014, 47(11): 2099-2108. (in Chinese with English abstract)
- [20] 秦俭, 杨志远, 孙永健, 徐徽, 吕腾飞, 代邹, 郑家奎, 蒋开锋, 马均. 氮素穗肥运筹对两个杂交中籼稻叶片形态、光合生产及产量的影响. 中国水稻科学, 2017, 31(4): 391-399.
Qin J, Yang Z Y, Sun Y J, Xu H, Lv T F, Dai Z, Zheng J K, Jiang K F, Ma J. Effects of nitrogen topdressing for panicle initiation on leaf morphology, photosynthetic production and grain yield of two middle-season hybrid rice. *Chin J Rice Sci*, 2017,31(4): 391-399. (in Chinese with English abstract)
- [21] 杨建昌, 杜永, 吴长付, 刘立军, 王志琴, 朱庆森. 超高产粳型水稻生长发育特性的研究. 中国农业科学, 2006, 39(7): 1336-1345.
Yang J C, Du Y, Wu C F, Liu L J, Wang Z Q, Zhu Q S. Growth and Development characteristics of super-high-yielding mid-season japonica rice. *Sci Agric Sin*, 2006, 39(7): 1336-1345. (in Chinese with English abstract)
- [22] 马群, 杨雄, 李敏, 李国业, 张洪程, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 魏海燕, 高辉. 不同氮肥群体最高生产力水稻品种的物质生产积累. 中国农业科学, 2011,44(20): 4159-4169.
Ma Q, Yang X, Li M, Li G Y, Zhang H C, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Wei H Y, Gao H. Studies on the characteristics of dry matter production and accumulation of rice varieties with different productivity levels. *Sci Agric Sin*, 2011, 44(20): 4159-4169. (in Chinese with English abstract)
- [23] Chauhan B S. Effect of tillage systems, seeding rates, and herbicides on weed growth and grain yield in dry-seeded rice systems in the Philippines. *Crop Prot*, 2013, 54: 244-250.
- [24] Chauhan B S, Opena J. Weed management and grain yield of rice sown at low seeding rates in mechanized dry-seeded systems. *Field Crops Res*, 2013,14: 19-15.
- [25] Ehsanullah, Anjum S A, Ashraf U, Rafiq H, Tanveer M, Khan I. Effect of sowing dates and weed control methods on weed infestation, growth and yield of direct-seeded rice. *Philipp Agric Sci*, 2014, 97(3): 307-312.
- [26] 孙永健, 马均, 孙园园, 徐徽, 严奉君, 代邹, 蒋明金, 李玥. 水氮管理模式对杂交水稻冈优 527 群体质量和产量的影响. 中国农业科学, 2014, 47(10): 2047-2061.
Sun Y J, Ma J, Sun Y Y, Xu H, Yan F J, Dai Z, Jiang M J, Li Y. Effects of water and nitrogen management patterns on population quality and yield of hybrid rice gangyou 527. *Sci Agric Sin*, 2014, 47(10): 2047-2061. (in Chinese with English abstract)
- [27] 李景蕻, 李刚华, 张应贵, 罗启荣, 杨从党, 王绍华, 刘正辉, 王强盛, 丁艳锋. 精确定量栽培对高海拔寒冷生态区水稻株型及产量的影响. 中国农业科学, 2009, 42(9): 3067-3077.
Li J H, Li G H, Zhang Y G, Luo Q R, Yang C D, Wang S H, Liu Z H, Wang Q S, Ding Y F. Effects of precise and quantitative cultivation on plant type and yield of rice in high altitude and cold ecological area. *Sci Agric Sin*, 2009, 42(9): 3067-3077. (in Chinese with English abstract)
- [28] 任亮, 郑家奎, 蒋强. 长江上游地区高产杂交水稻品种部分株型因子及生理特征研究. 西南农业学报, 2008, 21(6): 1551-1554.
Ren L, Zheng J K, Jiang Q. studies on some plant type components and physiological characteristics of high-yielding hybrid rice in up stream of Yangtze River. *Southwest China J Agric Sci*, 2008, 21(6): 1551-1554. (in Chinese with English abstract)
- [29] 杜永, 王艳, 王学红, 孙乃立, 杨建昌. 黄淮地区不同粳稻品种株型、产量与品质的比较分析. 作物学报, 2007, 33(7): 1079-1085.
Du Y, Wang Y, Wang X H, Sun N L, Yang J C. Comparisons of plant type, grain yield, and quality of different japonica rice cultivars in huanghe-huaihe river area. *Acta Agron Sin*, 2007, 33(7): 1079-1085. (in Chinese with English abstract)
- [30] 张庆, 殷春渊, 张洪程, 魏海燕, 马群, 杭杰, 李敏, 李国业. 水稻氮高产高效与低产低效两类品种株型特征差异研究. 作物学报, 2010, 36(6): 1011-1021.
Zhang Q, Yin C Y, Zhang H C, Wei H Y, Ma Q, Hang J, Li M, Li G Y. Differences of plant-type characteristics between rice cultivars with high and low levels in yield and nitrogen use efficiency. *Acta Agron Sin*, 2010, 36(6): 1011-1021. (in Chinese with English abstract)