DOI: 10.3724/SP.J.1006.2020.92051

甬优系列籼粳杂交稻产量及氮素吸收利用的差异

周 磊 刘秋员 田晋钰 朱梦华 程 爽 车 阳 王志杰
邢志鹏 胡雅杰 刘国栋 魏海燕* 张洪程*

扬州大学江苏省作物遗传生理重点实验室 / 农业部长江流域稻作技术创新中心 / 粮食作物现代产业技术协同创新中心, 江苏扬州 225009

摘 要: 从 24 个甬优系列籼粳杂交稻品种(系)中, 根据不同产量水平和氮素农学利用率筛选出具有代表性的 3 种类型(高产氮高效、高产氮中效、中产氮中效), 系统比较各类型产量和氮素农学利用率, 以探究高产氮高效型籼粳杂交稻产量和氮素吸收利用特征。结果表明, 高产氮高效型产量显著高于高产氮中效型和中产氮中效型, 分别高 4.04%~4.38%和 13.37%~13.41%, 其高产原因在于群体颖花量大, 能达到 $5.87 \times 10^8 \sim 6.20 \times 10^8 \text{ hm}^{-2}$ 。与高产氮中效型和中产氮中效型相比, 高产氮高效型成穗率高, 能保持在 68.83%~70.05%; 抽穗期叶面积指数高, 且生育后期衰减平缓, 成熟期叶面积指数在 3.85 以上; 抽穗至成熟期干物质积累量大, 达 $7.91 \sim 7.99 \text{ t hm}^{-2}$, 全生育期干物质质量可达 $21.15 \sim 21.46 \text{ t hm}^{-2}$ 。在氮素吸收利用方面, 高产氮高效型总吸氮量显著高于高产氮中效型和中产氮中效型, 分别高 5.07%~5.14%和 4.50%~5.96%; 拔节至抽穗期和抽穗至成熟期氮素吸收速率表现为高产氮高效型>高产氮中效型>中产氮中效型, 花后茎鞘氮素转运量、穗部氮素积累量和氮素收获指数也有相同表现; 氮素回收利用率、农学利用率、生理利用率和偏生产力均以高产氮高效型最高; 高产氮中效型除氮素回收利用率和百千克籽粒吸氮量外, 其他各项氮素利用指标均高于中产氮中效型。

关键词: 甬优系列籼粳杂交稻; 高产氮高效; 产量; 氮素

Differences in yield and nitrogen absorption and utilization of *indica-japonica* hybrid rice varieties of Yongyou series

ZHOU Lei, LIU Qiu-Yuan, TIAN Jin-Yu, ZHU Meng-Hua, CHENG Shuang, CHE Yang, WANG Zhi-Jie, XING Zhi-Peng, HU Ya-Jie, LIU Guo-Dong, WEI Hai-Yan*, and ZHANG Hong-Cheng*

Jiangsu Key Laboratory of Crop Genetics and Physiology / Innovation Center of Rice Cultivation Technology in Yangtze Valley, Ministry of Agriculture / Co-Innovation Center for Modern Production Technology of Grain Crops, Yangzhou University, Yangzhou 225009, Jiangsu, China

Abstract: A field experiment was conducted with 24 *indica-japonica* hybrid rice varieties (lines) of Yongyou series, from which three types (high yield and high AE (agronomic nitrogen use efficiency) [HH], high yield and medium AE [HM], medium yield and medium AE [MM]) were selected to explore the characteristics of varieties with high yield and high AE. The yield of HH type was 4.04%–4.38% and 13.37%–13.41% higher than that of HM type and MM type respectively, owing to the larger number of total spikelets, which was $5.87 \times 10^8 \sim 6.20 \times 10^8 \text{ hm}^{-2}$. Compared with HM and MM type, HH type had a high percentage of tiller rate, which was 68.83%–70.05%. The LAI of HH type was maximum at heading stage and declined slowly after heading. As a result, the LAI of HH type was above 3.85 at maturity stage. The dry matter accumulation of HH type was $7.91 \sim 7.99 \text{ t hm}^{-2}$.

本研究由国家重点研发计划项目(2016YFD0300503), 国家自然科学基金项目(31971841), 国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-01-27), 江苏省重点研发计划项目(BE2016344, BE2018355), 江苏省农业产业技术体系专项(JATS[2018]298)和扬州大学拔尖人才计划资助。

This study was supported by the National Key Research and Development Program of China (2016YFD0300503), the National Natural Science Foundation of China (31971841), the China Agriculture Research System (CARS-01-27), the Key Research Program of Jiangsu Province (BE2016344, BE2018355), the earmarked fund for Jiangsu Agricultural Industry Technology System (JATS[2018]298), and the Program for Scientific Elitists of Yangzhou University.

* 通信作者(Corresponding authors): 张洪程, E-mail: hc Zhang@yzu.edu.cn; 魏海燕, E-mail: wei_haiyan@163.com

第一作者联系方式: E-mail: 1074174043@qq.com

Received (收稿日期): 2019-10-08; Accepted (接受日期): 2020-01-15; Published online (网络出版日期): 2020-02-13.

URL: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1809.s.20200213.0837.002.html>

hm^{-2} from heading to maturity, which was the highest in three types, and its dry matter accumulation was more than $21.15\text{--}21.46 \text{ t hm}^{-2}$ in the whole growth period. The total nitrogen uptake of HH type showed $5.07\%\text{--}5.14\%$ and $4.50\%\text{--}5.96\%$ increase than that of HM type and MM type respectively at maturity stage. The nitrogen absorption rate from jointing to heading stage and from heading to maturity stage showed HH type > HM type > MM type, as well as NTSH (N transportation from stem after heading), NIPH (N increase in panicle after heading) and NHI (N harvest index). HH type had the highest NRE (nitrogen recovery use efficiency), AE, PE (physiological nitrogen use efficiency) and PFP (partial factor productivity of applied N). Except for NRE and NRG (nitrogen requirement for 100 kg grain), all the other nitrogen utilization indexes of HM type were higher than that of MM type.

Keywords: *indica-japonica* hybrid rice varieties of Yongyou series; high yield and high agronomic nitrogen use efficiency; yield; nitrogen

随着人口的增长,人们对水稻的需求量日益增加;与此同时,城镇化的不断推进导致了可用农田的减少^[1],土地资源日渐稀缺;因此,提高水稻单产是增加粮食产量的重要途径^[2]。水稻籼粳亚种间的杂种优势对水稻单产提高有重要意义^[3]。近年来,浙江省宁波农业科学院、中国水稻研究所等机构利用粳型不育系与籼粳中间型广亲和恢复系配组,培育出甬优系列^[4]、春优系列^[5]、浙优系列^[6]等新组合,其中甬优系列籼粳杂交稻表现最佳,在生产试验和大面积推广中均获得较好的产量表现^[7-9]。前人研究发现,相较于其他类型水稻,甬优系列籼粳杂交稻穗大粒多,库容量大^[10];根系生物量大、分支结构优,根冠协调水平高,生育中后期根系活力强^[11];上三叶长而内卷挺立,群体上下受光姿态好^[12];冠层结构和光合特性优势明显^[13];生育中后期光合生产能力强、干物质积累量大,收获指数高^[14];单茎茎鞘干重和单位长度节间干重大,茎秆充实度高^[15],抗倒能力较强^[16]。

氮素是水稻生长发育必不可少的元素,施用氮肥可以有效提高水稻产量^[17]。我国每年氮肥施用量占全球 37%^[18],农民习惯于通过施用过量的肥料来获得高产,过量施肥不仅降低了氮肥利用率,而且还会引发环境问题^[19]。因此,在提高产量的同时,协同提高氮肥利用率是水稻科研工作者的主要任务^[20]。李超等^[21]研究发现,甬优系列籼粳杂交稻抽穗期和成熟期植株含氮率和氮积累量极显著大于对照(常规粳稻和杂交粳稻),氮素偏生产力极显著大于常规粳稻,氮素籽粒生产效率、氮素干物质生产效率和氮素收获指数显著低于杂交粳稻;陈贵等^[22]有相似发现,相较于常规粳稻,籼粳杂交稻氮素吸收能力强,总吸氮量高;韦还和等^[23]研究发现,籼粳杂交稻花后氮素积累能力强是因为快增期天数显著多于对照(常规粳稻和杂交粳稻)。综上,籼粳杂交稻吸氮量高于其他类型水稻,但是氮素利用方面优

势不明显,因此筛选氮素利用能力强的籼粳杂交稻品种至关重要。

籼粳杂交稻不同品种获得高产的途径不尽相同,有在穗粒数和千粒重相当条件下,以单位面积穗数多和结实率高获得高产的^[15];有在群体颖花量相当条件下,以高千粒重和高结实率获得高产的^[24];也有在千粒重和结实率相当条件下,以较大群体颖花量获得高产的^[25]。氮素利用方面,也是各有差异:汪峰等^[26]研究甬优系列籼粳杂交稻不同株高品种氮素利用率的差异时发现,高秆型品种氮肥吸收利用率显著高于矮秆型和中高秆型品种,但氮肥偏生产力和氮素收获指数没有优势。韦还和等^[27]研究发现,与一般高产群体相比,甬优 12 超高产群体氮素吸收具有拔节期低,抽穗期和成熟期高的特点,但氮素籽粒生产率偏低。

上述研究大多集中在籼粳杂交稻与其他类型水稻产量、氮素吸收、物质积累特性的比较上,而对于同种类型不同品种籼粳杂交稻的比较研究相对较少。为此,本试验收集了24个甬优系列籼粳杂交稻品种(系),根据其产量和氮素农学利用率的差异,筛选出高产氮高效、高产氮中效和中产氮中效3种类型,并从每种类型筛选出具有代表性的2个品种,系统比较3种类型甬优系列籼粳杂交稻产量及其构成因素、干物质生产和氮素吸收利用方面的差异,深入分析差异形成原因,阐明其品种特征,以期甬优系列籼粳杂交稻的高产氮高效栽培与育种提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点与供试材料

试验于2017—2018年在扬州大学农学院校外试验点,泰州市姜堰区沈高镇即江苏省稻麦科技综合示范基地进行,土壤类型为潜育型水稻土,质地黏性。0~20 cm 土层含有机质质量分数 31.72 g kg^{-1} 、

全氮 1.96 g kg⁻¹、速效钾 165.26 mg kg⁻¹、速效磷 62.54 mg kg⁻¹，前茬为小麦。

2017 年选用 24 个甬优系列籼粳杂交稻品种(系)进行，供试品种均为杂交品种，2018 年根据前一年各品种(系)病虫害抗性、倒伏情况以及生育期情况，筛选出 16 个适宜当地种植的品种(系)进行试验。根据产量和氮素农学利用率(表 1)筛选出生产上最具

代表性的高产氮高效型(产量>10.5 t hm⁻² 且氮素农学利用率>18.5 kg kg⁻¹)品种甬优 1662 和甬优 4949，高产氮中效型(产量>10.5 t hm⁻² 且氮素农学利用率>14.5 kg kg⁻¹)品种甬优 2640 和甬优 4953，中产氮中效型(产量<10 t hm⁻² 且氮素农学利用率>14.5 kg kg⁻¹)品种甬优 6715 和甬优 6760，共 6 个，研究其产量和氮素吸收利用的差异。

表 1 甬优系列籼粳杂交稻产量及氮素农学利用率的差异

Table 1 Differences in yield and agronomic nitrogen use efficiency (AE) of *indica-japonica* hybrid rice varieties of Yongyou series

品种名称/年份 Variety/year	2017		2018	
	产量 Yield (t hm ⁻²)	氮素农学利用率 AE (kg kg ⁻¹)	产量 Yield (t hm ⁻²)	氮素农学利用率 AE (kg kg ⁻¹)
甬优 1206 Yongyou 1206	8.80	10.84	8.96	12.68
甬优 1218 Yongyou 1218	9.16	11.56	9.19	10.47
甬优 1271 Yongyou 1271	8.62	11.15	8.77	12.23
甬优 1526 Yongyou 1526	9.59	12.56	9.71	13.46
甬优 1662 Yongyou 1662	11.13	18.81	11.21	19.18
甬优 1826 Yongyou 1826	9.60	13.43	9.56	12.36
甬优 2519 Yongyou 2519	9.54	10.44	9.45	12.12
甬优 2640 Yongyou 2640	10.69	15.88	10.77	16.94
甬优 4949 Yongyou 4949	11.03	18.60	11.18	19.14
甬优 4953 Yongyou 4953	10.62	15.99	10.67	16.52
甬优 6715 Yongyou 6715	9.77	14.79	9.89	15.94
甬优 6760 Yongyou 6760	9.76	15.09	9.85	15.43
甬优 6763 Yongyou 6763	10.24	16.95	10.09	15.37
甬优 7053 Yongyou 7053	8.80	11.38	8.85	12.01
甬优 7722 Yongyou 7722	9.05	12.22	9.11	11.52
甬优 8484 Yongyou 8484	8.88	9.32	9.03	9.43
平均 Mean	9.71	13.69	9.77	14.05
标准差 SD	0.80	2.87	0.79	2.86
变异系数 CV (%)	8.22	20.98	8.07	20.34

CV: coefficient of variation; SD: standard deviation.

1.2 试验设计

两年试验均于 6 月 13 日播种，6 月 24 日移栽，行株距为 25 cm × 6 cm，单本栽插。采用随机区组设计，氮肥施用量为 270 kg hm⁻²，以不施氮肥为空白对照，小区面积 15 m²，重复 3 次。氮肥按基肥 穗肥 = 7 : 3 施用。基肥 第 1 次分蘖肥 第 2 次分蘖肥 穗肥 = 3 : 2 : 2 : 3。分蘖肥于移栽后 7 d 和四叶一心时分两次等量施用，穗肥于倒四叶期施用。氮(纯 N) 磷(P₂O₅) 钾(K₂O)比例为 2 : 1 : 2，磷肥一次性基施，钾肥分别于耕翻前、拔节期等量施入。水分管理及病虫害防治等相关的栽培措施均按照高产栽培要求实施。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 茎蘖动态 每个小区连续选定 10 穴作为一个观察点，移栽后 20 d 开始观察茎蘖动态，每隔 7 d 一次，直至抽穗期为止。

1.3.2 叶面积 于拔节期、抽穗期、成熟期，按每小区茎蘖数的平均数取代表性植株 3 穴，采用长宽法测定叶面积。

1.3.3 干物质 于拔节期、抽穗期、成熟期，按每小区茎蘖数的平均值取代表性植株 3 穴，分器官 105 °C 下杀青 30 min，80 °C 下烘干至恒重，测定各器官干物质重。

1.3.4 产量测定 成熟期, 普查每小区 100 穴, 计算有效穗数, 按平均穗数取 5 穴调查每穗粒数、结实率与测定千粒重, 计算理论产量, 成熟后实收每小区测产。

1.3.5 氮素测定 将拔节期、抽穗期、成熟期各器官(茎鞘、叶片、穗)烘干后粉碎, 采用 $H_2SO_4-H_2O_2$ 消化, 以半微量凯氏定氮法测定各器官以及各时期植株含氮率。

1.3.6 数据计算 叶面积指数衰减率($LAI\ d^{-1}$) = (抽穗期叶面积指数-成熟期叶面积指数)/抽穗至成熟期间隔天数; 光合势($m^2\ d\ m^{-2}$) = $(LAI_1 + LAI_2) \times (t_2 - t_1) / 2$; 式中, LAI_1 和 LAI_2 为前后 2 次测定的叶面积指数, t_1 和 t_2 为前后 2 次测定间隔的时间; 群体生长率($g\ m^2\ d^{-1}$) = $(W_2 - W_1) / (t_2 - t_1)$, W_1 、 W_2 代表前后两次测定的干物质重, t_1 和 t_2 为前后 2 次测定间隔的时间; 净同化率($g\ m^2\ d^{-1}$) = $[(\ln LAI_2 - \ln LAI_1) / (LAI_2 - LAI_1)] \times [(W_2 - W_1) / (t_2 - t_1)]$, LAI_1 和 LAI_2 为前后 2 次测定的叶面积指数, W_1 、 W_2 为前后 2 次测定的干物质重, t_1 和 t_2 为前后 2 次测定间隔的时间; 成穗率 = 有效穗数/高峰苗数 $\times 100\%$; 氮素吸收量($kg\ hm^{-2}$) = 该时期地上部干物重 $\times$ 含氮率; 氮素阶段吸收量($kg\ hm^{-2}$) = 后一时期氮素吸收量-前一时期氮素吸收量; 氮素阶段积累比例 = 氮素阶段积累量/成熟期氮素积累量 $\times 100\%$; 氮素阶段吸收速率($kg\ hm^{-2}\ d^{-1}$) = 氮素阶段吸收量/前后两时期间隔天数; 抽穗后叶片(茎鞘)氮素转运量($kg\ hm^{-2}$) = 抽穗期叶片(茎鞘)氮素积累量-成熟期叶片(茎鞘)氮素积累量; 抽穗后穗部氮素积累量($kg\ hm^{-2}$) = 成熟期穗部氮素积累量-抽穗期穗部氮素积累量; 氮素回

收利用率(%) = (施氮区水稻吸氮量-氮空白区水稻吸氮量) / 施氮量 $\times 100$; 氮素农学利用率($kg\ kg^{-1}$) = (施氮区籽粒产量-氮空白区籽粒产量) / 施氮量; 氮素生理利用率($kg\ kg^{-1}$) = (施氮区籽粒产量-氮空白区籽粒产量) / (施氮区水稻吸氮量-氮空白区水稻吸氮量); 氮肥偏生产力($kg\ kg^{-1}$) = 水稻产量 / 施氮量; 百千克籽粒吸氮量(kg) = 氮素总积累量 / 稻谷产量 $\times 100$ 。

1.3.7 数据分析 运用 Microsoft Excel 软件进行数据录入与计算, 用 SPSS 23.0 软件统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同类型甬优系列籼粳杂交稻产量及构成因素的差异

群体颖花量和产量均表现为高产氮高效型>高产氮中效型>中产氮中效型(表 2), 差异显著, 与中产氮中效型相比, 高产氮高效型和高产氮中效型群体颖花量和产量分别高 24.63%~30.80%、11.68%~12.24%和 13.37%~13.41%、8.61%~9.01%; 3 种类型水稻在结实率和千粒重上差异显著, 其中以高产氮中效型结实率最高, 中产氮中效型千粒重最高。同为籼粳杂交稻, 3 种类型在结实率和千粒重上表现不一, 说明籼粳杂交稻产量差异主要体现在群体颖花量上。

2.2 不同类型甬优系列籼粳杂交稻株高及成穗率的差异

株高和高峰苗均表现为高产氮高效型<高产氮中效型<中产氮中效型(表 3), 与中产氮中效型相比, 高产氮高效型、高产氮中效型株高和高峰苗分别低 9.08%~10.16%、5.44%~6.36%和 2.79%~2.80%、

表 2 甬优系列籼粳杂交稻产量及构成因素的差异

Table 2 Differences in yield and components of *indica-japonica* hybrid rice varieties of Yongyou series

品种类型 Type	品种名称 Variety	单位面积穗数 No. of panicles ($\times 10^4\ hm^{-2}$)	每穗粒数 Spikelets per panicle	总颖花量 Total spikelet number ($\times 10^8\ hm^{-2}$)	结实率 Percentage of filled grain (%)	千粒重 1000-grain weight (g)	产量 Yield ($t\ hm^{-2}$)
2017							
高产氮高效	甬优 1662 Yongyou 1662	241.03	243.40	5.87	81.87	24.18	11.13
HH	甬优 4949 Yongyou 4949	238.39	246.23	5.87	82.33	23.90	11.03
高产氮中效	甬优 2640 Yongyou 2640	234.00	221.41	5.18	85.70	24.20	10.69
HM	甬优 4953 Yongyou 4953	237.08	224.75	5.33	86.04	23.67	10.62
中产氮中效	甬优 6715 Yongyou 6715	218.27	215.33	4.70	81.35	28.65	9.77
MM	甬优 6760 Yongyou 6760	219.08	214.78	4.71	82.02	28.47	9.76
	HH 平均值 HH mean	239.71 a	244.82 a	5.87 a	82.10 b	24.04 b	11.08 a
	HM 平均值 HM mean	235.54 a	223.08 b	5.26 b	85.87 a	23.83 b	10.65 b
	MM 平均值 MM mean	218.68 b	215.05 c	4.71 c	81.68 b	28.56 a	9.77 c

(续表 2)

品种类型 Type	品种名称 Variety	单位面积穗数 No. of panicles ($\times 10^4 \text{ hm}^{-2}$)	每穗粒数 Spikelets per panicle	总颖花量 Total spikelet number ($\times 10^8 \text{ hm}^{-2}$)	结实率 Percentage of filled grain (%)	千粒重 1000-grain weight (g)	产量 Yield (t hm^{-2})
2018							
高产氮高效	甬优 1662 Yongyou 1662	246.08	253.38	6.24	79.46	24.17	11.21
HH	甬优 4949 Yongyou 4949	240.37	256.14	6.16	79.56	23.96	11.18
高产氮中效	甬优 2640 Yongyou 2640	232.03	232.33	5.39	84.38	24.51	10.77
HM	甬优 4953 Yongyou 4953	228.30	229.73	5.24	85.68	24.07	10.67
中产氮中效	甬优 6715 Yongyou 6715	215.91	220.75	4.77	80.91	28.65	9.89
MM	甬优 6760 Yongyou 6760	217.81	216.80	4.72	80.67	28.47	9.85
	HH 平均值 HH mean	243.23 a	254.76 a	6.20 a	79.51 b	24.07 b	11.19 a
	HM 平均值 HM mean	230.16 b	231.03 b	5.32 b	85.03 a	24.29 b	10.72 b
	MM 平均值 MM mean	216.86 c	218.77 c	4.74 c	80.79 b	28.56 a	9.87 c

同一类型同一列数据后不同小写字母表示在 0.05 水平下差异显著。

Within a column for the same variety type, values followed by different small letters are significantly different at the 0.05 probability level. HH: high yield and high agronomic nitrogen use efficiency; HM: high yield and medium agronomic nitrogen use efficiency; MM: medium yield and medium agronomic nitrogen use efficiency.

表 3 甬优系列籼粳杂交稻株高及茎蘖动态的差异

Table 3 Differences in plant height and dynamic of tillers of *indica-japonica* hybrid rice varieties of Yongyou series

品种类型 Type	品种名称 Variety	株高 Plant height (cm)	高峰苗 Peak seeding ($\times 10^4 \text{ hm}^{-2}$)	单位面积穗数 No. of panicles ($\times 10^4 \text{ hm}^{-2}$)	成穗率 RPTT (%)
2017					
高产氮高效	甬优 1662 Yongyou 1662	110.4	347.06	241.03	69.45
HH	甬优 4949 Yongyou 4949	111.8	349.49	238.39	68.21
高产氮中效	甬优 2640 Yongyou 2640	114.5	351.42	234.00	66.59
HM	甬优 4953 Yongyou 4953	116.6	352.78	237.08	67.20
中产氮中效	甬优 6715 Yongyou 6715	122.6	357.97	218.27	60.97
MM	甬优 6760 Yongyou 6760	121.8	358.65	219.08	61.08
	HH 平均值 HH mean	111.10 b	348.27 c	239.71 a	68.83 a
	HM 平均值 HM mean	115.55 b	352.10 b	235.54 a	66.89 a
	MM 平均值 MM mean	122.20 a	358.31 a	218.68 b	61.03 b
2018					
高产氮高效	甬优 1662 Yongyou 1662	109.7	349.25	246.08	70.46
HH	甬优 4949 Yongyou 4949	110.5	345.16	240.37	69.64
高产氮中效	甬优 2640 Yongyou 2640	113.8	351.12	232.03	66.08
HM	甬优 4953 Yongyou 4953	115.7	350.58	228.30	65.12
中产氮中效	甬优 6715 Yongyou 6715	122.7	360.03	215.91	59.97
MM	甬优 6760 Yongyou 6760	122.4	357.36	217.81	60.95
	HH 平均值 HH mean	110.10 c	348.70 b	243.23 a	70.05 a
	HM 平均值 HM mean	114.75 b	350.85 b	230.16 b	65.60 b
	MM 平均值 MM mean	122.55 a	358.70 a	216.86 c	60.46 c

同一类型同一列数据后不同小写字母表示在 0.05 水平下差异显著。

Within a column for the same variety type, values followed by different small letters are significantly different at the 0.05 probability level. RPTT: ratio of productive tillers to total tillers; HH: high yield and high agronomic nitrogen use efficiency; HM: high yield and medium agronomic nitrogen use efficiency; MM: medium yield and medium agronomic nitrogen use efficiency.

1.73%~2.19%; 高产氮高效型和高产氮中效型成穗率显著高于中产氮中效型, 分别高 12.78%~15.86%、8.50%~9.60%。

2.3 不同类型甬优系列籼粳杂交稻各生育阶段物质积累及其比例的差异

移栽—拔节期干物质积累量和比例表现为中产氮中效型>高产氮高效型、高产氮中效型, 抽穗—成熟期干物质积累量和比例表现则相反(表 4)。与中产氮中效型相比, 高产氮高效和高产氮中效型移栽—拔节期干物质积累量分别低 6.61%~6.64%、5.03%~6.03%, 移栽—拔节期积累比例分别低 13.33%~14.11%、10.34%~10.96%; 抽穗—成熟期干物质积累量分别高 20.95%~24.26%、15.09%~15.60%, 抽穗—

成熟期积累比例分别高 12.24%~14.06%、9.04%~9.36%。高产氮高效型和高产氮中效型群体总干物重和收获指数均显著高于中产氮中效型, 群体干物重分别高 7.44%~8.93%、5.48%~5.71%, 收获指数分别高 5.39%~4.11%、2.91%~3.32%。

2.4 不同类型甬优系列籼粳杂交稻叶面积指数及结实期叶面积衰减率的差异

拔节期叶面积指数表现为中产氮中效型>高产氮高效型、高产氮中效型, 抽穗期和成熟期则相反(表 5)。与中产氮中效型相比, 高产氮高效型和高产氮中效型拔节期叶面积指数分别低 2.88%~3.98%、2.88%~3.77%, 抽穗期叶面积指数分别高 2.76%~2.93%、1.08%~1.47%, 成熟期叶面积指数分别高

表 4 甬优系列籼粳杂交稻各生育阶段物质积累及其比例的差异

Table 4 Differences in dry matter accumulation and its ratio at main growing stages of *indica-japonica* hybrid rice varieties of Yongyou series

品种类型 Type	品种名称 Variety	移栽–拔节 T–J		拔节–抽穗 J–H		抽穗–成熟 H–M		群体总 干物重 Total dry matter accumulation (t hm ^{−2})	收获指数 Harvest index
		积累量	比例	积累量	比例	积累量	比例		
		Accumulate (t hm ^{−2})	RBT (%)	Accumulate (t hm ^{−2})	RBT (%)	Accumulate (t hm ^{−2})	RBT (%)		
2017									
高产氮高效	甬优 1662 Yongyou 1662	4.62	21.82	8.60	40.56	7.97	37.62	21.19	0.5251
HH	甬优 4949 Yongyou 4949	4.67	22.11	8.59	40.71	7.85	37.17	21.11	0.5226
高产氮中效	甬优 2640 Yongyou 2640	4.73	22.81	8.40	40.55	7.59	36.64	20.72	0.5160
HM	甬优 4953 Yongyou 4953	4.70	22.64	8.54	41.13	7.53	36.23	20.77	0.5112
中产氮中效	甬优 6715 Yongyou 6715	5.00	25.42	8.13	41.33	6.54	33.25	19.67	0.4964
MM	甬优 6760 Yongyou 6760	4.95	25.28	8.10	41.33	6.54	33.39	19.59	0.4978
	HH 平均值 HH mean	4.64 b	21.97 b	8.60 a	40.63 a	7.91 a	37.40 a	21.15 a	0.5239 a
	HM 平均值 HM mean	4.72 b	22.73 b	8.47 a	40.84 a	7.56 b	36.44 a	20.75 b	0.5136 ab
	MM 平均值 MM mean	4.97 a	25.35 a	8.11 b	41.33 a	6.54 c	33.32 b	19.63 c	0.4971 b
2018									
高产氮高效	甬优 1662 Yongyou 1662	4.82	22.45	8.64	40.22	8.02	37.33	21.48	0.5218
HH	甬优 4949 Yongyou 4949	4.79	22.36	8.68	40.49	7.97	37.16	21.44	0.5213
高产氮中效	甬优 2640 Yongyou 2640	4.81	23.19	8.59	41.42	7.34	35.39	20.74	0.5192
HM	甬优 4953 Yongyou 4953	4.85	23.27	8.52	40.91	7.46	35.82	20.83	0.5121
中产氮中效	甬优 6715 Yongyou 6715	5.11	25.93	8.19	41.54	6.41	32.54	19.71	0.5018
MM	甬优 6760 Yongyou 6760	5.17	26.26	8.07	40.97	6.45	32.77	19.69	0.5002
	HH 平均值 HH mean	4.80 b	22.41 c	8.66 a	40.35 a	7.99 a	37.24 a	21.46 a	0.5216 a
	HM 平均值 HM mean	4.83 b	23.23 b	8.56 a	41.17 a	7.40 b	35.60 b	20.78 b	0.5156 a
	MM 平均值 MM mean	5.14 a	26.09 a	8.13 b	41.26 a	6.43 c	32.65 c	19.70 c	0.5010 b

同一类型同一列数据后不同小写字母表示在 0.05 水平下差异显著。

Within a column for the same variety type, values followed by different small letters are significantly different at the 0.05 probability level. T: transplanting; J: jointing; H: heading; M: maturity; RBT: ratio of biomass to total; HH: high yield and high agronomic nitrogen use efficiency; HM: high yield and medium agronomic nitrogen use efficiency; MM: medium yield and medium agronomic nitrogen use efficiency.

表5 甬优系列籼粳杂交稻各生育期叶面积指数和结实期叶面积衰减率的差异

Table 5 Differences in leaf area index and decreasing rate of leaf area at grain-filling stage of *indica-japonica* hybrid rice varieties of Yongyou series

品种类型 Type	品种名称 Variety	叶面积指数 LAI				结实期叶面积衰减率 DRLA (LAI d ⁻¹)
		拔节期 Jointing	抽穗期 Heading	成熟期 Maturity		
2017						
高产氮高效	甬优 1662 Yongyou 1662	4.33	8.44	3.89	0.0771	
HH	甬优 4949 Yongyou 4949	4.35	8.42	3.84	0.0790	
高产氮中效	甬优 2640 Yongyou 2640	4.41	8.29	3.72	0.0816	
HM	甬优 4953 Yongyou 4953	4.37	8.32	3.75	0.0816	
中产氮中效	甬优 6715 Yongyou 6715	4.55	8.21	3.51	0.0940	
MM	甬优 6760 Yongyou 6760	4.49	8.18	3.49	0.0938	
	HH 平均值 HH mean	4.34 b	8.43 a	3.87 a	0.0780 c	
	HM 平均值 HM mean	4.39 b	8.31 b	3.73 b	0.0816 b	
	MM 平均值 MM mean	4.52 a	8.19 c	3.50 c	0.0939 a	
2018						
高产氮高效	甬优 1662 Yongyou 1662	4.39	8.53	3.88	0.0816	
HH	甬优 4949 Yongyou 4949	4.37	8.57	3.81	0.0821	
高产氮中效	甬优 2640 Yongyou 2640	4.32	8.43	3.75	0.0836	
HM	甬优 4953 Yongyou 4953	4.35	8.39	3.79	0.0807	
中产氮中效	甬优 6715 Yongyou 6715	4.49	8.34	3.45	0.0959	
MM	甬优 6760 Yongyou 6760	4.52	8.31	3.46	0.0951	
	HH 平均值 HH mean	4.38 b	8.55 a	3.85 a	0.0818 b	
	HM 平均值 HM mean	4.34 b	8.41 b	3.77 a	0.0821 b	
	MM 平均值 MM mean	4.51 a	8.32 b	3.45 b	0.0955 a	

同一类型同一列数据后不同小写字母表示在 0.05 水平下差异显著。

Within a column for the same variety type, values followed by different small letters are significantly different at the 0.05 probability level.

LAI: leaf area index; DRLA: decreasing rate of leaf area; HH: high yield and high agronomic nitrogen use efficiency; HM: high yield and medium agronomic nitrogen use efficiency; MM: medium yield and medium agronomic nitrogen use efficiency.

10.57%~11.59%、6.57%~9.28%。高产氮高效型和
高产氮中效型结实期叶面积衰减率显著低于中产
氮中效型，分别低 14.35%~16.93%、13.10%~
14.03%。

产氮中效型移栽—拔节期光合势、群体生长率和净同化率均低；拔节—抽穗期群体生长率分别高12.68%~18.07%、11.30%~12.07%，净同化率分别高12.45%~18.32%、12.80%~12.88%，有显著差异；抽穗—成熟期光合势分别高18.63%~21.79%、14.16%~14.54%，群体生长率分别高4.32%~10.23%、3.89%~4.09%，差异显著。

2.5 不同类型甬优系列籼粳杂交稻光合势、群体生长率及净同化率的差异

与中产氮中效型相比(表 6), 高产氮高效型和高

表 6 甬优系列籼粳杂交稻光合势、群体生长率及净同化率的差异

Table 6 Differences in photosynthetic potential, crop growth rate and net assimilation rate of *indica-japonica* hybrid rice varieties of Yongyou series

品种类型 Type	品种名称 Variety	光合势 Photosynthetic potential ($\text{m}^2 \text{d}^{-1} \text{m}^{-2}$)			群体生长率 Crop growth rate ($\text{g} \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$)			净同化率 Net assimilation rate ($\text{g} \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$)		
		移栽-拔节	拔节-抽穗	抽穗-成熟	移栽-拔节	拔节-抽穗	抽穗-成熟	移栽-拔节	拔节-抽穗	抽穗-成熟
		T-J	J-H	H-M	T-J	J-H	H-M	T-J	J-H	H-M
2017										
高产氮高效 HH	甬优 1662 Yongyou 1662	103.92	166.01	363.74	9.63	33.07	13.51	3.26	5.37	2.30

(续表 6)

品种类型 Type	品种名称 Variety	光合势 Photosynthetic potential (m ² d m ⁻²)			群体生长率 Crop growth rate (g m ⁻² d ⁻¹)			净同化率 Net assimilation rate (g m ⁻² d ⁻¹)		
		移栽—拔节	拔节—抽穗	抽穗—成熟	移栽—拔节	拔节—抽穗	抽穗—成熟	移栽—拔节	拔节—抽穗	抽穗—成熟
		T-J	J-H	H-M	T-J	J-H	H-M	T-J	J-H	H-M
高产氮中效 HM	甬优 4949 Yongyou 4949	106.58	166.01	355.54	9.52	33.05	13.53	3.22	5.36	2.32
	甬优 2640 Yongyou 2640	108.05	171.45	336.28	9.64	31.11	13.55	3.25	5.06	2.38
	甬优 4953 Yongyou 4953	107.07	171.32	337.96	9.60	31.65	13.44	3.24	5.16	2.34
	甬优 6715 Yongyou 6715	116.03	185.02	293.00	9.81	28.05	13.09	3.27	4.52	2.37
	甬优 6760 Yongyou 6760	112.25	183.72	297.59	9.91	27.94	12.83	3.31	4.54	2.33
	HH 平均值 HH mean	105.25 a	166.01 c	359.64 a	9.57 a	33.06 a	13.52 a	3.24 a	5.36 a	2.31 a
	HM 平均值 HM mean	107.56 a	171.38 b	337.12 b	9.62 a	31.38 b	13.49 a	3.24 a	5.11 b	2.36 a
	MM 平均值 MM mean	114.14 a	184.37 a	295.30 c	9.86 a	28.00 c	12.96 b	3.29 a	4.53 c	2.35 a
	2018									
	甬优 1662 Yongyou 1662	107.56	174.42	353.69	9.84	32.00	14.07	3.32	5.13	2.38
高产氮中效 HM	甬优 4949 Yongyou 4949	107.07	168.22	359.02	9.79	33.40	13.74	3.30	5.36	2.34
	甬优 2640 Yongyou 2640	105.84	172.13	341.04	9.82	31.82	13.11	3.33	5.18	2.27
	甬优 4953 Yongyou 4953	106.58	165.62	347.13	9.89	32.78	13.10	3.34	5.33	2.26
	甬优 6715 Yongyou 6715	114.50	179.62	300.65	10.02	29.24	12.57	3.35	4.70	2.27
	甬优 6760 Yongyou 6760	115.26	179.62	300.14	10.14	28.81	12.65	3.38	4.63	2.29
	HH 平均值 HH mean	107.32 b	171.32 a	356.36 a	9.81 a	32.70 a	13.90 a	3.31 a	5.24 a	2.36 a
	HM 平均值 HM mean	106.21 b	168.88 a	344.08 b	9.85 a	32.30 a	13.10 b	3.34 a	5.26 a	2.27 b
	MM 平均值 MM mean	114.88 a	179.62 a	300.39 c	10.08 a	29.02 b	12.61 b	3.37 a	4.66 b	2.28 ab
	2018									
	甬优 1662 Yongyou 1662	107.56	174.42	353.69	9.84	32.00	14.07	3.32	5.13	2.38

同一类型同一列数据后不同小写字母表示在 0.05 水平下差异显著。
Within a column for the same variety type, values followed by different small letters are significantly different at the 0.05 probability level. T: transplanting; J: jointing; H: heading; M: maturity; HH: high yield and high agronomic nitrogen use efficiency; HM: high yield and medium agronomic nitrogen use efficiency; MM: medium yield and medium agronomic nitrogen use efficiency.

2.6 不同类型甬优系列籼粳杂交稻各生育阶段氮素积累量及比例和吸收速率的差异

与高产氮中效型相比(表 7), 高产氮高效型拔节—抽穗期氮素积累量、积累比例和吸收速率分别高 7.74%~8.31%、2.53%~3.01%和 7.79%~12.33%, 差异显著; 抽穗—成熟期氮素积累量、吸收速率以及总吸氮量分别高 11.92%~12.01%、6.58%~10.53%和 5.07%~5.14%, 除 2017 年抽穗—成熟期氮素积累量,

均有显著差异。
与中产氮中效型相比, 高产氮高效型移栽—拔节期氮素积累量、积累比例和吸收速率均较低; 拔节—抽穗期氮素积累量和吸收速率分别高 6.25%~6.95%、13.08%~18.36%, 差异显著; 抽穗—成熟期氮素积累量、积累比例和吸收速率分别高 34.90%~43.80%、29.25%~35.67%和 15.71%~27.27%, 有显著差异; 总吸氮量高 4.50%~5.96%, 差异显著。

表 7 甬优系列籼粳杂交稻各生育阶段氮素积累量及比例和氮素吸收速率的差异
Table 7 Differences in nitrogen accumulation and its ratio and nitrogen uptake rate at main growing stages of *indica-japonica* hybrid rice varieties of Yongyou series

品种类型 Type	品种名称 Variety	移栽-拔节 T-J			拔节-抽穗 J-H			抽穗-成熟 H-M			总吸氮量 Total N accumulation (kg hm ⁻²)
		积累量 Accumulate (kg hm ⁻²)	所占比例 RIT (%)	吸收速率 Uptake rate (kg hm ⁻² d ⁻¹)	积累量 Accumulate (kg hm ⁻²)	所占比例 RIT (%)	吸收速率 Uptake rate (kg hm ⁻² d ⁻¹)	积累量 Accumulate (kg hm ⁻²)	所占比例 RIT (%)	吸收速率 Uptake rate (kg hm ⁻² d ⁻¹)	
2017											
高产氮高效	甬优 1662 Yongyou 1662	86.4	35.45	1.80	108.49	44.51	4.17	48.86	20.04	0.83	243.74
	HH	86.81	35.77	1.77	109.43	45.09	4.21	46.47	19.15	0.80	242.71
高产氮中效	甬优 2640 Yongyou 2640	88.85	38.29	1.81	100.17	43.17	3.71	43.04	18.55	0.77	232.06
	HM	87.50	37.94	1.79	101.04	43.81	3.74	42.06	18.24	0.75	230.60
中产氮中效	甬优 6715 Yongyou 6715	95.08	40.94	1.86	102.30	44.05	3.53	34.85	15.01	0.70	232.23
	MM	94.64	40.58	1.89	102.80	44.07	3.54	35.81	15.35	0.70	233.24
	HH 平均值	86.60 b	35.61 c	1.79 a	108.96 a	44.80 a	4.19 a	47.66 a	19.59 a	0.81 a	243.22 a
	HM 平均值	88.17 b	38.12 b	1.80 a	100.60 c	43.49 b	3.73 b	42.55 a	18.39 a	0.76 b	231.33 b
	MM 平均值	94.86 a	40.76 a	1.88 a	102.55 b	44.06 ab	3.54 c	35.33 b	15.18 b	0.70 c	232.74 b
2018											
高产氮高效	甬优 1662 Yongyou 1662	89.20	36.11	1.82	110.04	44.54	4.08	47.8	19.35	0.84	247.04
	HH	88.23	35.77	1.80	109.90	44.56	4.23	48.51	19.67	0.84	246.64
高产氮中效	甬优 2640 Yongyou 2640	89.48	38.17	1.83	102.19	43.59	3.78	42.75	18.24	0.76	234.42
	HM	90.17	38.30	1.84	101.95	43.30	3.92	43.31	18.40	0.76	235.44
中产氮中效	甬优 6715 Yongyou 6715	96.07	41.14	1.88	103.02	44.11	3.68	34.46	14.75	0.68	233.55
	MM	97.21	41.84	1.91	102.62	44.16	3.67	32.53	14.00	0.64	232.37
	HH 平均值	88.71 b	35.94 c	1.81 b	109.97 a	44.55 a	4.15 a	48.16 a	19.51 a	0.84 a	246.84 a
	HM 平均值	89.83 b	38.24 b	1.83 ab	102.07 c	43.45 b	3.85 b	43.03 b	18.32 a	0.76 b	234.93 b
	MM 平均值	96.64 a	41.49 a	1.89 a	102.82 b	44.14 a	3.67 b	33.49 c	14.38 b	0.66 c	232.96 b

同一类型同一列数据后不同小写字母表示在 0.05 水平下差异显著。

Within a column for the same variety type, values followed by different small letters are significantly different at the 0.05 probability level. T: transplanting; J: jointing; H: heading; M: maturity; RIT: ratio in total; HH: high yield and high agronomic nitrogen use efficiency; HM: high yield and medium agronomic nitrogen use efficiency; MM: medium yield and medium agronomic nitrogen use efficiency.

2.7 不同类型甬优系列籼粳杂交稻抽穗—成熟期各器官氮素积累及转运的差异

与高产氮中效型相比(表 8), 高产氮高效型花后茎鞘氮素转运量、穗部氮素积累量和氮素收获指数分别高 26.13%~31.51%、9.80%~11.05%和 3.93%~4.58%, 差异显著。

表 8 甬优系列籼粳杂交稻抽穗期和成熟期各器官氮素积累和转运的差异
Table 8 Differences in N accumulate and transportation in each organ at heading and maturity of indica-japonica hybrid rice varieties of Yongyou series

品种类型 Type	品种名称 Variety	氮素积累量 Nitrogen accumulation (kg hm ⁻²)						茎鞘 氮素转 运量 NTSH (kg hm ⁻²)	叶片 氮素转 运量 NTLH (kg hm ⁻²)	穗部 氮素积 累量 NIPH (kg hm ⁻²)	氮素 收获指数 NHI (%)
		抽穗期 Heading			成熟期 Maturity						
		茎鞘 Stem	叶片 Leaf	穗部 Panicle	茎鞘 Stem	叶片 Leaf	穗部 Panicle				
2017											
高产氮高效 HH	甬优 1662 Yongyou 1662	70.87	95.14	28.88	42.27	43.62	157.85	28.60	51.52	128.97	64.76
	甬优 4949 Yongyou 4949	71.38	97.14	27.72	43.13	43.92	155.66	28.25	53.22	127.94	64.13
	甬优 2640 Yongyou 2640	69.26	93.81	25.95	47.44	42.55	142.06	21.82	51.26	116.11	61.22
高产氮中效 HM	甬优 4953 Yongyou 4953	67.00	93.78	27.75	45.60	41.98	143.01	21.40	51.80	115.26	62.02
	甬优 6715 Yongyou 6715	72.28	99.37	25.73	55.49	47.47	129.27	16.79	51.90	103.54	55.66
	甬优 6760 Yongyou 6760	73.57	98.92	24.94	57.59	47.87	127.78	15.98	51.05	102.84	54.78
中产氮中效 MM	HH 平均值 HH mean	71.13 a	96.14 ab	28.30 a	42.70 b	43.77 b	156.76 a	28.42 a	52.37 a	128.46 a	64.44 a
	HM 平均值 HM mean	68.13 a	93.80 b	26.85 a	46.52 b	42.26 b	142.54 b	21.61 b	51.53 a	115.68 b	61.62 b
	MM 平均值 MM mean	72.93 a	99.14 a	25.33 a	56.54 a	47.67 a	128.52 c	16.39 c	51.47 a	103.19 c	55.22 c
2018											
高产氮高效 HH	甬优 1662 Yongyou 1662	74.53	96.20	28.50	46.45	46.67	153.92	28.08	49.53	125.42	62.31
	甬优 4949 Yongyou 4949	73.50	96.83	27.79	45.87	45.69	155.08	27.63	51.14	127.29	62.88
	甬优 2640 Yongyou 2640	69.68	95.04	26.95	48.43	44.24	141.74	21.25	50.80	114.79	60.47
高产氮中效 HM	甬优 4953 Yongyou 4953	71.99	94.27	25.87	49.08	45.11	141.25	22.91	49.16	115.38	59.99
	甬优 6715 Yongyou 6715	72.31	101.00	25.78	57.10	50.30	126.15	15.21	50.70	100.37	54.01
	甬优 6760 Yongyou 6760	73.47	101.24	25.12	57.75	49.73	124.89	15.72	51.51	99.77	53.75
中产氮中效 MM	HH 平均值 HH mean	74.02 a	96.52 b	28.15 a	46.16 c	46.18 b	154.50 a	27.85 a	50.33 a	126.36 a	62.60 a
	HM 平均值 HM mean	70.84 a	94.65 b	26.41 b	48.76 b	44.67 b	141.49 b	22.08 b	49.98 a	115.08 b	60.23 b
	MM 平均值 MM mean	72.89 a	101.12 a	25.45 c	57.42 a	50.01 a	125.52 c	15.47 c	51.10 a	100.07 c	53.88 c

同一类型同一列数据后不同小写字母表示在 0.05 水平下差异显著。
Within a column for the same variety type, values followed by different small letters are significantly different at the 0.05 probability level.
NTLH: N transportation from leaf after heading; NTSH: N transportation from stem after heading; NIPH: N increase in panicle after heading;
NHI: N harvest index; HH: high yield and high agronomic nitrogen use efficiency; HM: high yield and medium agronomic nitrogen use efficiency; MM: medium yield and medium agronomic nitrogen use efficiency.

与中产氮中效型相比, 高产氮高效型成熟期茎鞘、叶片氮素积累量显著低, 分别低 19.61%~24.48%、7.66%~8.18%, 穗部氮素积累量则显著高, 高 21.97%~23.09%; 花后茎鞘氮素转运量、穗部氮素积累量和氮素收获指数分别高 73.40%~80.03%、24.49%~26.27%和 16.18%~16.70%, 差异显著。

2.8 不同类型甬优系列籼粳杂交稻氮肥利用率的差异
与高产氮中效型相比(表 9), 高产氮高效型氮素

17.31%、2.41%~3.08%和 3.98%~4.43%, 差异显著。
与中产氮中效型相比, 高产氮高效型氮素农学利用率、氮素生理利用率和氮肥偏生产力分别高 22.12%~25.17%、17.68%~19.85%和 13.43%~13.46%, 百千克籽粒吸氮量低 7.20%~7.98%, 均有显著差异。

回收利用率、氮素农学利用率、氮素生理利用率和氮肥偏生产力分别高 11.87%~13.83%、14.52%~

表 9 甬优系列籼粳杂交稻氮肥利用效率的差异
Table 9 Differences in nitrogen use efficiency of indica-japonica hybrid rice varieties of Yongyou series

品种类型 Type	品种名称 Variety	氮素回收 利用率 NRE (%)	氮素农学 利用率 AE (kg kg ⁻¹)	氮素生理 利用率 PNUE (kg kg ⁻¹)	氮肥偏生 产力 PFP (kg kg ⁻¹)	百千克籽粒 需氮量 NRG (kg)
2017						
高产氮高效	甬优 1662 Yongyou 1662	45.16	18.81	41.65	41.23	2.19
HH	甬优 4949 Yongyou 4949	44.22	18.6	42.05	40.85	2.2
高产氮中效	甬优 2640 Yongyou 2640	39.13	15.88	40.58	39.61	2.17
HM	甬优 4953 Yongyou 4953	39.38	15.99	40.61	39.34	2.17
中产氮中效	甬优 6715 Yongyou 6715	42.42	14.79	34.87	36.19	2.38
MM	甬优 6760 Yongyou 6760	43.16	15.09	34.96	36.15	2.39
	HH 平均值 HH mean	44.69 a	18.70 a	41.85 a	41.04 a	2.19 b
	HM 平均值 HM mean	39.26 b	15.94 b	40.60 b	39.47 b	2.17 c
	MM 平均值 MM mean	42.79 a	14.94 c	34.92 c	36.17 c	2.38 a
2018						
高产氮高效	甬优 1662 Yongyou 1662	43.69	19.18	43.9	41.5	2.20
HH	甬优 4949 Yongyou 4949	44.93	19.14	42.61	41.41	2.21
高产氮中效	甬优 2640 Yongyou 2640	39.91	16.94	42.44	39.89	2.18
HM	甬优 4953 Yongyou 4953	39.31	16.52	42.03	39.51	2.21
中产氮中效	甬优 6715 Yongyou 6715	42.83	15.94	37.21	36.63	2.36
MM	甬优 6760 Yongyou 6760	42.50	15.43	36.31	36.47	2.36
	HH 平均值 HH mean	44.31 a	19.16 a	43.26 a	41.46 a	2.19 b
	HM 平均值 HM mean	39.61 b	16.73 b	42.24 a	39.70 b	2.20 b
	MM 平均值 MM mean	42.67 a	15.69 c	36.76 b	36.55 c	2.36 a

同一类型同一列数据后不同小写字母表示在 0.05 水平下差异显著。
Within a column for the same variety type, values followed by different small letters are significantly different at the 0.05 probability level. NRE: nitrogen recovery use efficiency; AE: agronomic nitrogen use efficiency; PE: physiological nitrogen use efficiency; PFP: partial factor productivity of applied N; NRG: nitrogen requirement for 100 kg grain; HH: high yield and high agronomic nitrogen use efficiency; HM: high yield and medium agronomic nitrogen use efficiency; MM: medium yield and medium agronomic nitrogen use efficiency.

3 讨论

3.1 不同类型甬优系列籼粳杂交稻产量及物质积累的差异

群体颖花量(单位面积穗数×每穗粒数)、结实率和千粒重是构成水稻产量的基本要素。前人研究表明^[7-9], 群体颖花量的提高是水稻获得高产的重要途径。吴桂成等^[28]以 4 个超级粳稻为材料研究发现, 高

产到更高产, 颖花量增加以穗数贡献率较高, 更高产到超高产, 以每穗粒数的贡献率较高; 胡雅杰等^[9]研究发现, 从高产群体到超高产群体, 颖花量的提高在于每穗粒数的显著增加; 花劲等^[8]研究表明, 双季晚粳稻从高产向超高产的实现在于适当增加穗数, 主攻大穗, 并保持较高的结实率和千粒重。本研究结果表明, 高产氮高效型品种群体颖花量显著高于高产氮中效型和中产氮中效型品种, 并且在大库

容下保证了稳定适宜的结实率和千粒重, 从而实现高产。这说明, 在同为籼粳杂交稻, 都具有“穗大粒多”特点的条件下, 想要获得高产的关键依然是提高群体颖花量, 并保证一定的结实率和千粒重。

水稻产量的形成过程实质是群体干物质合成、积累、运转与分配的过程, 增加水稻干物质生产总量, 特别是抽穗后光合物质积累量可显著提高产量水平^[29]。Wei 等^[30]研究表明, 籼粳杂交稻各生育期叶面积指数、干物质积累量以及灌浆结实时间均显著高于常规粳稻; 郭保卫等^[14]研究表明, 籼粳杂交稻抽穗—成熟期光合势和群体生长率显著高于其他类型水稻(常规粳稻、杂交粳稻和杂交籼稻); 同为籼粳杂交稻, 高产品种抽穗—成熟期干物质积累量和光合势较高, 叶面积衰减率较低^[24]; 超高产群体抽穗期、成熟期和抽穗—成熟期干物质积累量显著高于高产群体^[7-9]。本研究中, 高产氮高效型生育前期干物质积累量较低, 生育中期干物质积累迅速提高, 生育后期干物质积累量显著高于其他类型, 其原因在于高产氮高效型生育前期无效分蘖发生少; 拔节后分蘖平稳消减, 群体结构优化, 通风透光性好, 促进了生育中后期叶片的生长, 叶面积指数、光合势和群体生长率均显著提高, 物质生产能力增强; 生育后期叶面积指数高、叶面积衰减率低, 灌浆时间较其他两种类型平均长 5~6 d, 平稳较高的叶面积指数和较长的灌浆时间保证了生育后期稳定持久的光合生产能力^[30], 保证了大库容的充实。同为籼粳杂交稻, 高产需要生育前期获得适宜的分蘖, 生育中后期保持较大叶面积指数、光合势、群体生长率、较强干物质生产能力和较高干物质积累量。

3.2 不同类型甬优系列籼粳杂交稻氮素吸收及利用的差异

水稻氮素吸收分为抽穗前和抽穗后两个阶段, 抽穗前氮素吸收量占总量 70%~80%, 抽穗后所占比例较小; 前期氮素吸收量大有利于形成高产群体, 后期氮素吸氮量高有利于水稻从氮代谢向碳代谢转变, 促进抽穗后光合产物向籽粒输送, 有利于产量形成^[31]。李超等^[21]认为, 籼粳杂交稻拔节至抽穗期较高的氮素积累量和吸收速率有利于颖花分化, 形成较大的群体颖花量, 促进生育后期氮素吸收; Zhang 等^[32]研究认为, 单位面积穗数少的水稻品种, 灌浆期对碳、氮元素需求量小, 氮素积累量低; Huang 等^[33]认为, 库容量大的水稻, 抽穗后氮素积累能力强; 吴越等^[31]研究认为, 高产水稻抽穗至成

熟期氮素积累量高。综上所述, 单位面积穗数多, 群体颖花量高, 库容量大以及产量高的水稻抽穗后氮素积累量高。本研究中, 抽穗后氮素积累量表现为高产氮高效型>高产氮中效型>中产氮中效型, 这与上述研究基本一致。韦还和等^[27]研究发现, 超高产群体拔节前氮素积累量显著低于高产和更高产群体, 而拔节至抽穗期、抽穗至成熟期氮素积累量显著增加。本研究结果表明, 中产氮中效型拔节前氮素积累量最高, 这可能与其生育前期分蘖旺盛有关^[34], 拔节至抽穗期、抽穗至成熟期氮素积累量均以高产氮高效型最高。前人研究发现^[21,35], 水稻拔节—抽穗期较高的氮素积累量和氮素吸收速率有利于群体颖花量的增加。本研究中, 高产氮高效型拔节—抽穗期氮素积累量和氮素吸收速率最高, 群体颖花量最大; 高产氮中效型拔节—抽穗期氮素积累量与中产氮中效型相当(均值分别为 $101.34 \text{ kg hm}^{-2}$ 和 $102.69 \text{ kg hm}^{-2}$), 但氮素吸收速率显著高, 群体颖花量显著增加。这说明, 在保证拔节—抽穗期氮素吸收量的基础上, 提高氮素吸收速率, 有利于群体颖花量的增加。

氮素利用效率是氮素吸收、同化、转运和再利用等多个生理过程综合作用的结果, 其通用表征指标包括氮素吸收利用率、农学利用率、生理利用率、籽粒生产效率、干物质生产效率、偏生产力和收获指数等, 这些指标从不同侧面描述了作物对氮素的利用情况^[21]。提高水稻生育后期的氮素运转, 促进氮素及非结构性碳水化合物向籽粒的转运, 有利于进一步提高稻谷产量和氮肥利用效率^[27]。李超等^[21]研究发现, 籼粳杂交稻抽穗后茎鞘氮素转运量和氮素净积累量贡献率极显著高于常规粳稻和杂交籼稻; 韦还和等^[27]研究发现, 甬优 12 超高产群体花后茎鞘氮素转运量高于高产群体与更高产群体; 李敏等^[34]研究发现, 高生产力类型穗后氮素转运量和转运率显著高于中等生产力类型和低生产力类型, 且随着生产力的提高, 氮素吸收利用率、氮素生理利用率、氮素农学利用率和氮肥偏生产力均显著增加。本研究中, 3 种类型花后叶片氮素转运量相当, 高产氮高效型品种花后茎鞘向穗部氮素转运量显著高于高产氮中效型和中产氮中效型。高产氮高效型品种花后氮素从茎鞘、叶片向穗部的高效运转促进了籽粒生长发育, 增强了穗部氮素吸收能力, 提高了穗部氮素积累量, 保证了高产的形成, 从而获得了较高的氮素回收利用率、农学利用率、生理利用率、偏生

产力和收获指数。综上,提高籼粳杂交稻花后茎鞘氮素转运量有助于提高成熟期穗部氮素积累量、产量和氮素利用效率。

氮素生理利用率是指作物对所吸收的肥料氮素在作物体内的利用率,即施用氮肥而增加的产量与相应氮素积累量的增加量之比。本研究中,中产氮中效型百千克籽粒吸氮量显著高于高产氮高效型和g高产氮中效型,氮素回收利用率显著高于高产氮中效型,氮素生理利用率却显著低于其他两种类型。这说明,中产氮中效型吸氮量较高,但对氮素的利用水平较低,这可能有两方面的原因。(1)中产氮中效型品种对氮素缺失比较敏感,不施肥条件下吸氮量较低,施肥后吸氮量显著提高,因此氮素回收利用率较高;(2)可能与成熟期茎鞘氮素积累量有关^[26,36],中产氮中效型品种株高较高,为了防止后期发生倒伏,茎鞘需要维持一定的氮浓度^[34],保持茎秆稳定性,阻碍了花后氮素从茎鞘向穗部转运,影响了生育后期碳氮代谢,不利于产量的提高,导致氮素农学利用率、生理利用率和氮肥偏生产力等指标较低。

4 结论

与高产氮中效型和g中产氮中效型相比,高产氮高效型群体颖花量大;生育前期分蘖发生稳定,无效分蘖少,干物质和氮素积累量较低;中期叶面积指数、群体生长率和净同化率显著提高,群体结构优,干物质生产和氮素吸收能力强;后期光合生产能力强且持久,花后茎鞘、叶片氮素转运量高,氮素吸收速率大,穗部氮素积累多;氮素回收利用率、农学利用率、生理利用率、氮肥偏生产力和氮素收获指数高。

References

- [1] Peng S B, Tang Q Y, Zou Y B. Current status and challenges of rice production in China. *Plant Prod Sci*, 2009, 12: 3–8.
- [2] Ray D K, Mueller N D, West P C, Foley J A. Yield trends are insufficient to double global crop production by 2050. *PLoS One*, 2013, 8: e66428.
- [3] 宋昕蔚, 林建荣, 吴明国. 水稻籼粳亚种间杂种优势利用研究进展与展望. *科学通报*, 2016, 61: 3778–3786.
Song X W, Lin J R, Wu M G. Review and prospect on utilization of heterosis between *indica-japonica* rice subspecies. *Chin Sci Bull*, 2016, 61: 3778–3786 (in Chinese with English abstract).
- [4] 金芝辉, 王起, 潘康蓉, 杨赞. 籼粳杂交水稻新组合甬优 7850 机插高产栽培技术. *杂交水稻*, 2019, 34(2): 40–42.
Jin Z H, Wang Q, Pan K R, Yang Y. High-yielding machine-transplanting cultivation techniques of new *indica-japonica* hybrid rice combination Yongyou 7850. *Hybrid Rice*, 2019, 34(2): 40–42 (in Chinese with English abstract).
- [5] 吴明国, 林建荣, 宋昕蔚, 阮关海. 籼粳亚种间杂交水稻新组合春优 84 的选育. *杂交水稻*, 2014, 29(2): 19–21.
Wu M G, Lin J R, Song X W, Yuan G H. Breeding of new *indica-japonica* hybrid rice combination Chunyou 84. *Hybrid Rice*, 2014, 29(2): 19–21 (in Chinese with English abstract).
- [6] 王林友, 王建军, 张礼霞, 祁永斌, 范宏环, 宋建, 金庆生. 籼粳杂交稻新组合浙优 19 的选育与应用. *杂交水稻*, 2018, 33(6): 27–30.
Wang L Y, Wang J J, Zhang L X, Qi Y B, Fan H H, Song J, Jin Q S. Breeding and application of new *indica-japonica* hybrid rice combination Zheyou 19. *Hybrid Rice*, 2018, 33(6): 27–30 (in Chinese with English abstract).
- [7] 王晓燕, 韦还和, 张洪程, 孙健, 张建民, 李超, 陆惠斌, 杨筠文, 马荣荣, 许久夫, 王珏, 许跃进, 孙玉海. 水稻甬优 12 产量 13.5 t hm⁻² 以上超高产群体的生育特征. *作物学报*, 2014, 40: 2149–2159.
Wang X Y, Wei H H, Zhang H C, Sun J, Zhang J M, Li C, Lu H B, Yang J W, Ma R R, Xu J F, Wang J, Xu Y J, Sun Y H. Population characteristics for super-high yielding hybrid rice Yongyou 12 (>13.5 t ha⁻¹). *Acta Agron Sin*, 2014, 40: 2149–2159 (in Chinese with English abstract).
- [8] 花劲, 周年兵, 张军, 张洪程, 霍中洋, 周培建, 程飞虎, 李国业, 黄大山, 陈忠平, 陈国梁, 戴其根, 许轲, 魏海燕, 高辉, 郭保卫. 双季晚稻甬优系列籼粳杂交稻超高产结构与群体形成特征. *中国农业科学*, 2015, 48: 1023–1034.
Hua J, Zhou N B, Zhang J, Zhang H C, Huo Z Y, Zhou P J, Cheng F H, Li G Y, Huang D S, Chen Z P, Chen G L, Dai Q G, Xu K, Wei H Y, Gao H, Guo B W. The structure and formation characteristics of super-high yield population with late Yongyou series of *indica-japonica* hybrid rice in double-cropping rice area. *Sci Agric Sin*, 2015, 48: 1023–1034 (in Chinese with English abstract).
- [9] 胡雅杰, 朱大伟, 钱海军, 曹伟伟, 邢志鹏, 张洪程, 周有炎, 陈厚存, 汪洪洋, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 魏海燕, 郭保卫. 籼粳杂交稻甬优 2640 钵苗机插超高产群体若干特征探讨. *作物学报*, 2014, 40: 2016–2027.
Hu Y J, Zhu D W, Qian H J, Cao W W, Xing Z P, Zhang H C, Zhou Y Y, Chen H C, Wang H Y, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Wei H Y, Guo B W. Some characteristics of mechanically transplanted pot seedlings in super-high yielding population of *indica-japonica* hybrid rice Yongyou 2640. *Acta Agron Sin*, 2014, 40: 2016–2027 (in Chinese with English abstract).
- [10] 姜元华, 张洪程, 赵可, 许俊伟, 韦还和, 龙厚元, 王文婷, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 魏海燕, 郭保卫. 长江下游地区不同类型水稻品种产量及其构成因素特征的研究. *中国水稻科学*, 2014, 28: 621–631.
Jiang Y H, Zhang H C, Zhao K, Xu J W, Wei H H, Long H Y, Wang W T, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Wei H Y, Guo B W. Difference in yield and its components characteristics of different type rice cultivars in the lower reaches of the Yangtze River. *Chin J Rice Sci*, 2014, 28: 621–631 (in Chinese with English abstract).
- [11] 姜元华, 许俊伟, 赵可, 韦还和, 孙建军, 张洪程, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 魏海燕, 郭保卫. 甬优系列籼粳杂交稻根系形态与生理特征. *作物学报*, 2015, 41: 89–99.
Jiang Y H, Xu J W, Zhao K, Wei H H, Sun J J, Zhang H C, Dai Q

- G, Huo Z Y, Xu K, Wei H Y, Guo B W. Root system morphological and physiological characteristics of *indica-japonica* hybrid rice of Yongyou series. *Acta Agron Sin*, 2015, 41: 89–99 (in Chinese with English abstract).
- [12] 马荣荣, 许德海, 王晓燕, 禹盛苗, 金千瑜, 欧阳由男, 朱练峰. 籼粳亚种间杂交稻甬优 6 号超高产株形特征与竞争优势分析. *中国水稻科学*, 2007, 21: 281–286.
- Ma R R, Xu D H, Wang X Y, Yu S M, Jin Q Y, Ou-Yang Y N, Zhu L F. Heterosis on plant morphology of Yongyou 6, an *indica-japonica* inter-subspecific super high-yielding hybrid rice. *Chin J Rice Sci*, 2007, 21: 281–286 (in Chinese with English abstract).
- [13] 姜元华, 许轲, 赵可, 孙建军, 韦还和, 许俊伟, 魏海燕, 郭保卫, 霍中洋, 戴其根, 张洪程. 甬优系列籼粳杂交稻的冠层结构与光合特性. *作物学报*, 2015, 41: 286–296.
- Jiang Y H, Xu K, Zhao K, Sun J J, Wei H H, Xu J W, Wei H Y, Guo B W, Huo Z Y, Dai Q G, Zhang H C. Canopy structure and photosynthetic characteristics of Yongyou series of *indica-japonica* hybrid rice under high-yielding cultivation condition. *Acta Agron Sin*, 2015, 41: 286–296 (in Chinese with English abstract).
- [14] 郭保卫, 花劲, 周年兵, 张洪程, 陈波, 舒鹏, 霍中洋, 周培建, 程飞虎, 黄大山, 陈忠平, 陈国梁, 陈恒, 戴其根, 许轲, 魏海燕, 高辉. 双季晚稻不同类型品种产量及其群体动态特征差异研究. *作物学报*, 2015, 41: 1220–1236.
- Guo B W, Hua J, Zhou N B, Zhang H C, Chen B, Shu P, Huo Z Y, Zhou P J, Cheng F H, Huang D S, Chen Z P, Chen G L, Chen H, Dai Q G, Xu K, Wei H Y, Gao H. Difference in yield and population characteristics of different types of late rice cultivars in double-cropping rice area. *Acta Agron Sin*, 2015, 41: 1220–1236 (in Chinese with English abstract).
- [15] 孟天瑶, 李晓芸, 李超, 韦还和, 史天宇, 马荣荣, 王晓燕, 杨筠文, 戴其根, 张洪程. 甬优系列籼粳杂交稻中熟高产品系的株型特征. *中国水稻科学*, 2016, 30: 170–180.
- Meng T Y, Li X Y, Li C, Wei H H, Shi T Y, Ma R R, Wang X Y, Yang J W, Dai Q G, Zhang H C. Plant-type characteristics of high-yielding lines of Yongyou *indica-japonica* hybrid rice with medium maturity. *Chin J Rice Sci*, 2016, 30: 170–180 (in Chinese with English abstract).
- [16] 姜元华, 张洪程, 赵可, 许俊伟, 韦还和, 王文婷, 孟天瑶, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 魏海燕, 郭保卫. 机插条件下籼粳杂交稻茎秆的抗倒性评价及成因分析. *农业工程学报*, 2014, 30(19): 19–29.
- Jiang Y H, Zhang H C, Zhao K, Xu J W, Wei H H, Wang W T, Meng T Y, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Wei H Y, Guo B W. Evaluation and cause analysis of rice-stem lodging resistance for mechanical transplanted *indica-japonica* hybrid rice. *Trans CSAE*, 2014, 30(19): 19–29 (in Chinese with English abstract).
- [17] Wang F, Peng S B. Yield potential and nitrogen use efficiency of China's super rice. *J Integr Agric*, 2017, 16: 1000–1008.
- [18] Xu M G, Li D C, Li J M, Qin D Z, Hosen Y, Shen H P, Cong R H, He X H. Polyolefin-coated urea decreases ammonia volatilization in a double rice system of southern China. *Agron J*, 2013, 105: 277–284.
- [19] Hou W F, Xue X X, Li X K, Muhammad R K, Yan J Y, Ren T, Cong R H, Lu J W. Interactive effects of nitrogen and potassium on: grain yield, nitrogen uptake and nitrogen use efficiency of rice in low potassium fertility soil in China. *Field Crops Res*, 2019, 236: 14–23.
- [20] 李敏, 张洪程, 杨雄, 葛梦婕, 魏海燕, 戴其根, 霍中洋, 许轲. 高产氮高效型粳稻品种的叶片光合及衰老特性研究. *中国水稻科学*, 2013, 27: 168–176.
- Li M, Zhang H C, Yang X, Ge M J, Wei H Y, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K. Leaf photosynthesis and senescence characteristics of *japonica* rice cultivars with high yield and high N-efficiency. *Chin J Rice Sci*, 2013, 27: 168–176 (in Chinese with English abstract).
- [21] 李超, 韦还和, 许俊伟, 王子杰, 许轲, 张洪程, 戴其根, 霍中洋, 魏海燕, 郭保卫. 甬优系列籼粳杂交稻氮素积累与转运特征. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22: 1177–1186.
- Li C, Wei H H, Xu J W, Wang Z J, Xu K, Zhang H C, Dai Q G, Huo Z Y, Wei H Y, Guo B W. Characteristics of nitrogen uptake, utilization and translocation in the *indica-japonica* hybrid rice of Yongyou series. *Plant Nutr Fert Sci*, 2016, 22: 1177–1186 (in Chinese with English abstract).
- [22] 陈贵, 陈梅, 张红梅, 王士磊, 施卫明, 程旺大. 籼粳杂交稻与常规粳稻产量、干物质氮素累积转运及氮素利用差异研究. *浙江农业学报*, 2018, 30: 1992–2000.
- Chen G, Chen M, Zhang H M, Wang S L, Shi W M, Cheng W D. Differences of yield, accumulation and translocation properties of dry matter and N, and N use efficiency between *indica-japonica* hybrid rice and japonica rice. *Acta Agric Zhejiangensis*, 2018, 30: 1992–2000 (in Chinese with English abstract).
- [23] 韦还和, 孟天瑶, 李超, 张洪程, 史天宇, 马荣荣, 王晓燕, 杨筠文, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 魏海燕, 郭保卫. 籼粳交超级稻甬优 538 的穗部特征及籽粒灌浆特性. *作物学报*, 2015, 41: 1858–1869.
- Wei H H, Meng T Y, Li C, Zhang H C, Shi T Y, Ma R R, Wang X Y, Yang J W, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Wei H Y, Guo B W. Panicle traits and grain-filling characteristics of *indica-japonica* hybrid super rice Yongyou 538. *Acta Agron Sin*, 2015, 41: 1858–1869 (in Chinese with English abstract).
- [24] 郭保卫, 李超, 韦还和, 王子杰, 许轲, 张洪程, 戴其根, 霍中洋, 魏海燕. 不同株高类型甬优系列籼粳杂交稻产量差异及其形成机理. *核农学报*, 2017, 31: 135–144.
- Guo B W, Li C, Wei H H, Wang Z J, Xu K, Zhang H C, Dai Q G, Huo Z Y, Wei H Y. Yield difference and its formation mechanism of *indica-japonica* hybrid rice of Yongyou series in different types of plant height. *J Nucl Agric Sci*, 2017, 31: 135–144 (in Chinese with English abstract).
- [25] 徐栋, 朱盈, 周磊, 韩超, 郑雷鸣, 张洪程, 魏海燕, 王珏, 廖桢桦, 蔡仕博. 不同类型籼粳杂交稻产量和品质性状差异及其与灌浆结实期气候因素间的相关性. *作物学报*, 2018, 44: 1548–1559.
- Xu D, Zhu Y, Zhou L, Han C, Zheng L M, Zhang H C, Wei H Y, Wang J, Liao A H, Cai S B. Differences in yield and grain quality among various types of *indica-japonica* hybrid rice and correlation between quality and climatic factors during grain filling period. *Acta Agron Sin*, 2018, 44: 1548–1559 (in Chinese with English abstract).
- [26] 汪峰, 湛江华, 孙梅梅, 柴伟纲, 姚红燕, 戴瑶璐, 张玉屏, 朱德峰, 陈若霞. 甬优系列籼粳杂交稻株高变化对氮素利用率的影响. *浙江农业学报*, 2019, 31: 1–10.

- Wang F, Shen J H, Sun M M, Chai W G, Yao H Y, Dai Y L, Zhang Y P, Zhu D F, Chen R X. Effect of change of plant height on nitrogen use efficiency in Yongyou *indica-japonica* hybrid rice. *Acta Agric Zhejiangensis*, 2019, 31: 1–10 (in Chinese with English abstract).
- [27] 韦还和, 孟天瑶, 李超, 张洪程, 戴其根, 马荣荣, 王晓燕, 杨筠文. 水稻甬优 12 产量 13.5 t hm⁻² 以上超高产群体的氮素积累、分配与利用特征. 作物学报, 2016, 42: 1363–1373.
- Wei H H, Meng T Y, Li C, Zhang H C, Dai Q G, Ma R R, Wang X Y, Yang J W. Accumulation, translocation and utilization characteristics of nitrogen in Yongyou 12 yielding over 13.5 t ha⁻¹. *Acta Agron Sin*, 2016, 42: 1363–1373 (in Chinese with English abstract).
- [28] 吴桂成, 张洪程, 钱银飞, 李德剑, 周有炎, 徐军, 吴文革, 戴其根, 霍中洋, 许珂, 高辉, 徐宗进, 钱宗华, 孙菊英, 赵品恒. 粳型超级稻产量构成因素协同规律及超高产特征的研究. 中国农业科学, 2010, 43: 266–276.
- Wu G C, Zhang H C, Qian Y F, Li D J, Zhou Y Y, Xu J, Wu W G, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Gao H, Xu Z J, Qian Z H, Sun J Y, Zhao P H. Rule of grain yield components from high yield to super-high yield and the characters of super-high yielding *japonica* super rice. *Sci Agric Sin*, 2010, 43: 266–276 (in Chinese with English abstract).
- [29] 凌启鸿. 作物群体质量. 上海: 上海科技出版社, 2000. pp 1–210.
- Ling Q H. Quality of Crop Population. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 2000. pp 1–210 (in Chinese).
- [30] Wei H Y, Zhang H C, Eduardo B, Li H L, Cheng J Q, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Guo B W. Different characteristics of high yield formation between inbred *japonica* super rice and inter-sub-specific hybrid super rice. *Field Crops Res*, 2016, 198: 179–187.
- [31] 吴越, 胡静, 陈琛, 张家星, 李万元, 唐东南, 仲军, 羊彬, 朱正康, 姚友礼, 王余龙, 董桂春. 江苏省早熟晚粳高产水稻新品种氮素吸收利用特征及成因分析. 中国水稻科学, 2017, 31: 619–630.
- Wu Y, Hu J, Chen C, Zhang J X, Li W Y, Tang D N, Zhong J, Yang B, Zhu Z K, Yao Y L, Wang Y L, Dong G C. Nitrogen absorption and utilization characteristics of the newly approved early-maturity late *japonica* rice cultivars in Jiangsu province. *Chin J Rice Sci*, 2017, 31: 619–630 (in Chinese with English abstract).
- [32] Zhang Y L, Fan J B, Wang D S, Shen Q R. Genotypic differences in grain yield and physiological nitrogen use efficiency among rice cultivars. *Pedosphere*, 2009, 19: 681–691.
- [33] Huang L Y, Yang D S, Li X X, Peng S B, Wang F. Coordination of high grain yield and high nitrogen use efficiency through large sink size and high post-heading source capacity in rice. *Field Crops Res*, 2019, 233: 49–58.
- [34] 李敏, 张洪程, 马群, 杨雄, 李国业, 魏海燕, 戴其根, 霍中洋, 许珂. 不同氮肥群体最高生产力类型粳稻品种的氮素吸收利用特性. 中国水稻科学, 2012, 26: 197–204.
- Li M, Zhang H C, Ma Q, Yang X, Li G Y, Wei H Y, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K. Nitrogen absorption and utilization characteristics of *japonica* rice cultivars with different productivities at their optimum nitrogen level. *Chin J Rice Sci*, 2012, 26: 197–204 (in Chinese with English abstract).
- [35] 殷春渊, 张庆, 魏海燕, 张洪成, 戴其根, 霍中洋, 许珂, 马群, 杭杰, 张胜飞. 不同产量类型水稻基因型氮素吸收、利用效率的差异. 中国农业科学, 2010, 43: 39–50.
- Yin C Y, Zhang Q, Wei H Y, Zhang H C, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Ma Q, Hang J, Zhang S F. Differences in nitrogen absorption and use efficiency in rice genotypes with different yield performance. *Sci Agric Sin*, 2010, 43: 39–50 (in Chinese with English abstract).
- [36] 张亚丽, 樊剑波, 段英华, 王东升, 叶利庭, 沈其荣. 不同基因型水稻氮利用效率的差异及评价. 土壤学报, 2008, 45: 267–273.
- Zhang Y L, Fan J B, Duan Y H, Wang D S, Ye L T, Shen Q R. Variation of nitrogen use efficiency of rice different in genotype and its evaluation. *Acta Pedol Sin*, 2008, 45: 267–273 (in Chinese with English abstract).