

甬优系列籼粳杂交稻氮素积累与转运特征

李超¹, 韦还和¹, 许俊伟², 王子杰², 许轲^{1,2*}, 张洪程^{1,2*}, 戴其根^{1,2},
霍中洋^{1,2}, 魏海燕^{1,2}, 郭保卫^{1,2}

(1 扬州大学农业部长江流域稻作技术创新中心, 江苏扬州 225009;
2 扬州大学江苏省作物遗传生理重点实验室, 江苏扬州 225009)

摘要: 【目的】比较分析甬优系列籼粳杂交稻氮素吸收利用与转运特征, 从氮素层面阐明甬优系列籼粳杂交稻高产形成特征。【方法】2013~2014年, 选用7个甬优系列籼粳杂交稻组合为试验材料, 以2个常规粳稻品种和2个杂交籼稻品种为对照, 比较研究甬优系列籼粳杂交稻主要生育时期植株含氮率、氮素积累量, 不同生育阶段氮素积累量与吸收速率, 抽穗期和成熟期各器官的含氮率和氮积累量所占比例, 抽穗至成熟期各器官间的氮素转运, 以及氮素利用效率等特征。【结果】甬优系列籼粳杂交稻抽穗期植株含氮率和氮积累量分别为1.47%、202.67 kg/hm², 成熟期植株含氮率与氮积累量分别为1.31%、257.23 kg/hm², 极显著大于对照类型。甬优系列籼粳杂交稻氮素最大阶段性积累量为107.63 kg/hm², 所占比例为41.84%, 最大吸收速率为2.73 kg/(hm²·d), 且均出现在拔节至抽穗阶段, 杂交籼稻出现在移栽至拔节阶段。甬优系列籼粳杂交稻抽穗期茎鞘和叶的含氮率分别为1.19%和2.34%, 成熟期分别为0.75%和1.58%, 高于对照类型。甬优系列籼粳杂交稻抽穗期茎鞘和叶氮积累量所占比例分别为43.92%和43.87%, 成熟期分别为16.44%和17.44%, 极显著大于杂交籼稻。甬优系列籼粳杂交稻氮素转运量大, 表观转运率和转运贡献率不高, 抽穗后的氮素净积累量贡献率为32.06%, 显著大于对照类型。甬优系列籼粳杂交稻百公斤籽粒吸氮量为2.29 kg, 极显著大于杂交籼稻; 氮肥偏生产力为37.54 kg/kg, 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偏低。【结论】甬优系列籼粳杂交稻总吸氮量大, 在拔节期足量氮素积累的基础上, 提高了拔节至抽穗期与抽穗至成熟期两个阶段的氮积累比例; 抽穗至成熟期茎鞘和叶的氮素转运量大, 但表观转运率与表观转运贡献率低, 抽穗后氮素积累优势明显, 氮素净积累量贡献率高, 满足了灌浆期籽粒对氮素的需求。

关键词: 籼粳杂交稻; 甬优系列; 氮素; 积累; 转运; 利用效率

中图分类号: S511.01 文献标识码: A 文章编号: 1008-505X(2016)05-1177-10

Characteristics of nitrogen uptake, utilization and translocation in the indica-japonica hybrid rice of Yongyou series

LI Chao¹, WEI Huan-he¹, XU Jun-wei², Wang Zi-jie², XU Ke^{1,2*}, ZHANG Hong-cheng^{1,2*}, DAI Qi-gen^{1,2},
HUO Zhong-yang^{1,2}, WEI Hai-yan^{1,2}, GUO Bao-wei^{1,2}

(1 Innovation Center of Rice Cultivation Technology in the Yangtze Valley, Ministry of Agriculture, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225009, China; 2 Key Laboratory of Crop Genetics and Physiology of Jiangsu Province, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225009, China)

Abstract: 【Objectives】The objective of this study was to evaluate the nitrogen (N) uptake, utilization efficiency and translocation of the indica-japonica hybrid rice of Yongyou series and to identify the characteristics of their relationship with yield formation. 【Methods】Seven indica-japonica hybrid rice of Yongyou series cultivars, two japonica rice cultivars and two hybrid indica rice cultivars were used as experimental material in

收稿日期: 2015-08-14 接受日期: 2015-10-11

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFD0300502, 2016YFD0300507); 公益性行业(农业)科研专项(201303102); 江苏省农业自主创新基金项目(CX151002); 江苏省农业三新工程项目(SXGC 2014315)资助。

作者简介: 李超(1990—), 男, 江苏常州人, 硕士研究生, 主要从事水稻高产栽培生理研究。E-mail: 1193386782@qq.com

* 通信作者 E-mail: xuke@yzu.edu.cn; hczhang@yzu.edu.cn

2013–2014. The characteristics of N content and N accumulation at the main growth stages, periodical N accumulation and periodical N uptake rate, N contents and ratios of N accumulation and translocation at the heading and maturity stages, N utilization efficiency were analyzed systematically. 【 **Results** 】 The N content and N accumulation of indica-japonica hybrid rice of Yongyou series were 1.47% and 202.67 kg/hm² in heading stage, 1.31% and 257.23 kg/hm² in maturity stage, which were higher than other two control types. The highest periodical N accumulation was 107.63 kg/hm², with the highest proportion in total and periodical N uptake rate of 41.84% and 2.73 kg/(hm²·d) for the indica japonica cultivars in jointing to heading stage. The N contents of stem-sheath and leaf were 1.19% and 2.34% in heading stage, 0.75% and 1.58% in maturity stage, which were higher than other two control types. The proportions of N accumulation in stem-sheath and leaf were 43.92% and 43.87% in heading stage, 16.44% and 17.44% in maturity stage, which were significantly larger than the hybrid indica rice. The N translocation amount was larger, but the apparent transport rate and transport contribution rate were low, and net N absorbed conversion rate after heading was 32.06%, which was significantly higher than the two contrast types. N uptake per 100 kg of grain was 2.29 kg and partial factor productivity of applied N was 37.54 kg/kg, which were higher than the two control types. N utilization efficiency for grain, N utilization efficiency for biomass production and N harvesting index were lower. 【 **Conclusions** 】 The indica-japonica hybrid rice of Yongyou series accumulate enough N at transplanting-jointing stage, and increase the proportion of jointing-heading stage and heading-maturity stage. The N translocation amount in the stem-sheath and leaves from the heading to the maturity of the indica-japonica hybrid rice of Yongyou series is large. But the apparent N translocation rate and N translocation conversion rate are low. The advantage of net N accumulation after heading stage is obvious, which can meet the demand for N in grain.

Key words: the indica-japonica hybrid rice; Yongyou series; nitrogen; accumulation; translocation; utilization efficiency

水稻是人类重要的粮食作物,在现今耕地面积不断减少和人口逐年增加的背景下,提高水稻单产是提高水稻总产量的关键途径^[1-2]。近年来,浙江省宁波市农科院和宁波市种子有限公司开展了粳不/籼恢三系法杂种优势利用的研究,育成甬优 6 号、甬优 12 号、甬优 15 号、甬优 538、甬优 2640 等具有典型特征的籼粳杂交稻新品种(组合),在江苏^[3-5]、浙江^[6]、江西^[7]等稻作区展现出显著的产量优势。甬优系列籼粳杂交稻在叶片受光姿态、群体冠层光分布、光合特性等方面存在明显优势^[8]。此外,甬优系列籼粳杂交稻还具有根冠比协调水平高、群体根量大、根系分支结构优、深扎性好等优势^[9]。

氮素是水稻生长必不可少的营养元素之一,在产量形成中具有非常重要的作用。前人研究认为水稻品种对氮素的吸收利用存在明显的基因型差异^[10-12],根据水稻在不同氮肥水平下的产量差异将其分成 4 个类型,分别为双高效型、低氮高效型、双低高效型和高氮高效型,并对各类型水稻氮素吸收利用特性进行了比较研究^[13-14]。前人还从品种类型^[15]、环境条件^[16]、肥料形态^[20-21]、栽培方式^[22]等方面比较研究水稻光合物质和氮素在不同器官间的分配与转

运特征。当前关于高产栽培条件下甬优系列籼粳杂交稻的氮素吸收利用与转运特征的研究较少,特别是与目前大面积应用的常规粳稻和杂交籼稻品种之间的差异研究更少。为此,本研究选用甬优系列籼粳杂交稻为供试品种,以长江下游地区具有较大种植面积且生育期相近的常规粳稻和杂交籼稻品种为对照,采用人工手栽种植方式,配套相应的高产栽培管理技术措施,系统分析甬优系列籼粳杂交稻氮素吸收利用与转运特征,从氮素营养层面阐明甬优系列籼粳杂交稻高产形成机理,以期为籼粳杂交稻品种的高效育种和氮肥精确施用提供理论依据和技术参考。

1 材料与方法

1.1 供试品种

依据当地气候特征与茬口特点,选择 7 个甬优系列籼粳杂交稻品种组合(甬优 1573、甬优 1952、甬优 4340、甬优 4348、甬优 4356、甬优 1538、甬优 1540),2 个常规粳稻品种(镇稻 18、武运粳 30),2 个杂交籼稻品种(扬两优 6 号、丰两优香 1 号)为试验材料。

1.2 试验设计和栽培管理

试验于 2013~2014 年在扬州大学校外试验基地浙江省宁波市鄞州区洞桥镇进行。前茬为小麦, 耕层含有有机质 38.37 g/kg、全氮 0.16%、碱解氮 82.45 mg/kg、速效磷 20.14 mg/kg、速效钾 78.45 mg/kg。采取裂区设计, 以品种类型为主区, 品种为裂区, 裂区面积 30 m², 3 次重复。主区间做埂隔离, 塑料薄膜覆盖埂体, 保证单独排灌。两年播种期均在 5 月中下旬 (2013 年 5 月 18 日、2014 年 5 月 19 日), 毯苗育秧, 秧龄 20 天左右, 移栽叶龄 4.1 左右, 栽插行株距 30 cm × 13.3 cm。甬优系列籼粳杂交稻和杂交籼稻每穴 2 苗, 常规粳稻每穴 4 苗。甬优系列籼粳杂交稻和常规粳稻总施氮量为 300 kg/hm², 杂交籼稻为 225 kg/hm², 基肥: 分蘖肥: 穗肥为 3:2:5, 分蘖肥于移栽后 7 d 一次性施入, 穗肥分两次等量施用。氮磷钾配比 2:1:2, 磷肥全做基肥, 钾肥分基肥和拔节肥 2 次等量施用。分蘖期采用潜水层灌溉; 当茎蘖数达到预期穗数的 80% 时断水搁田; 拔节至成熟期采用湿润灌溉, 干湿交替, 收获前 7 天断水。病虫害防治措施均按高产栽培要求实施。

1.3 测定内容与与方法

1.3.1 生育期记载 观测记载各供试水稻品种播种、移栽、拔节、抽穗、成熟对应的准确日期 (表 1)。

1.3.2 植株全氮的测定 分别于拔节期、抽穗期、成熟期按每小区平均茎蘖数取代表性植株 5 穴, 分茎鞘、叶和穗, 105℃ 下杀青 30 min, 80℃ 下烘干至恒重, 测定干物质重。样品粉碎后采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消化, 半微量凯氏定氮法测定氮素。

1.3.3 产量测定 于成熟期, 每小区收割 100 穴, 测定水分, 去除杂质, 折算实产。

1.4 数据计算与统计分析

1.4.1 数据计算

氮素积累量 (kg/hm²) = 该时期地上部干物重 × 含氮率;

氮素总积累量 (kg/hm²) = 成熟期地上部干物重 × 含氮率;

氮素阶段积累量 (kg/hm²) = 后一时期氮素积累量 - 前一时期氮素积累量;

氮素阶段积累速率 [kg/(hm²·d)] = 氮素阶段积累量/前后两时期间隔的天数;

百公斤籽粒吸氮量 (kg) = 氮素总积累量/稻谷产量 × 100;

氮素籽粒生产效率 (kg/kg) = 稻谷产量/氮素总积

累量;

氮素干物质生产效率 (kg/kg) = 生物产量/氮素总积累量;

氮肥偏生产力 (kg/kg) = 稻谷产量/氮肥施用量;

氮素收获指数 = 成熟期籽粒含氮量/氮素总积累量;

叶片 (茎鞘) 氮素转运量 (mg/stem) = 抽穗期叶片 (茎鞘) 氮素积累量 - 成熟期叶片 (茎鞘) 氮素积累量;

叶片 (茎鞘) 氮素表观转运率 = 叶片 (茎鞘) 氮素转运量/抽穗期叶片 (茎鞘) 氮素积累量 × 100%;

叶片 (茎鞘) 氮素转运贡献率 = 叶片 (茎鞘) 氮素转运量/成熟期穗部氮素积累量 × 100%;

抽穗后的氮素净积累贡献率 = 抽穗后氮素净积累量/成熟期穗部氮素积累量 × 100%。

1.4.2 数据分析 运用 Microsoft Excel 软件录入数据、计算, 用 DPS 软件统计分析。由于 2 年试验结果趋势基本一致, 为了便于说明, 文中以 2014 年数据为主进行分析。

2 结果与分析

2.1 主要生育期植株含氮率和氮素积累量

由表 2 可知, 甬优系列籼粳杂交稻拔节期平均含氮率为 1.98%, 介于常规粳稻和杂交籼稻之间; 抽穗期和成熟期平均含氮率极显著高于对照, 含氮率分别为 1.47% 和 1.31%, 较常规粳稻分别高 7.30% 和 7.38%, 较杂交籼稻分别高 22.50% 和 24.76%。三种类型水稻氮素积累量均随着生育进程不断增加, 成熟期达到最大值。甬优系列籼粳杂交稻拔节期、抽穗期、成熟期的氮积累量平均分别为 95.04、202.67、257.23 kg/hm², 较常规粳稻分别高 16.37%、18.51%、20.75%, 较杂交籼稻分别高 1.81%、43.77%、65.01%, 除拔节期与杂交籼稻差异不显著外, 其他生育时期均极显著大于对照类型。

2.2 氮素阶段性积累量及积累速率

由表 3 可知, 甬优系列籼粳杂交稻移栽~拔节期、拔节~抽穗期、抽穗~成熟期平均氮素积累量分别为 95.04、107.63、54.57 kg/hm², 其中移栽~拔节期积累量极显著大于常规粳稻, 与杂交籼稻差异不显著, 拔节~抽穗期、抽穗~成熟期积累量极显著大于两类对照, 分别较常规粳稻高 20.47%、29.93%, 较杂交籼稻高 126.02%、265.75%。不同阶段氮积累比例, 甬优系列籼粳杂交稻移栽~拔节

表 1 供试水稻品种生育期日期 (m/d)
Table 1 Date of growth stages of different rice varieties

类型 Type	品种 Cultivar	播种期 Sowing		移栽期 Transplanting		拔节期 Jointing		抽穗期 Heading		成熟期 Maturity	
		2013	2014	2013	2014	2013	2014	2013	2014	2013	2014
		籼粳杂交稻 Indica-japonica hybrids	甬优 1573 YY1573	5/18	5/19	6/6	6/7	7/17	7/17	8/25	8/27
	甬优 1952 YY 1952	5/18	5/19	6/6	6/7	7/16	7/17	8/25	8/26	10/20	10/22
	甬优 4340 YY 4340	5/18	5/19	6/6	6/7	7/17	7/17	8/23	8/24	10/22	10/20
	甬优 4348 YY 4348	5/18	5/19	6/6	6/7	7/16	7/17	8/25	8/26	10/21	10/23
	甬优 4356 YY 4356	5/18	5/19	6/6	6/7	7/13	7/13	8/22	8/21	10/21	10/20
	甬优 1538 YY 1538	5/18	5/19	6/6	6/7	7/21	7/22	8/29	8/30	11/2	11/4
	甬优 1540 YY 1540	5/18	5/19	6/6	6/7	7/17	7/17	8/25	8/25	10/26	10/27
常规粳稻 Japonica rice	镇稻18 ZD18	5/18	5/19	6/6	6/7	7/20	7/21	8/26	8/26	10/15	10/12
	武运粳 30 WYJ 30	5/18	5/19	6/6	6/7	7/21	7/22	8/29	8/30	10/22	10/23
杂交籼稻 Hybrid indica rice	扬两优 6 号 YLY6	5/18	5/19	6/6	6/7	7/16	7/17	8/23	8/24	10/9	10/9
	丰两优香 1 号 FLYX 1	5/18	5/19	6/6	6/7	7/16	7/16	8/24	8/25	10/5	10/4

表 2 甬优系列籼粳杂交稻主要生育期含氮率和氮积累量特征

Table 2 N content and N accumulation at main growth stages of indica-japonica hybrid rice of Yongyou series

类型 Type	品种 Cultivar	含氮量 N content (%)			氮积累量 N accumulation (kg/hm ²)		
		拔节期 Jointing	抽穗期 Heading	成熟期 Maturity	拔节期 Jointing	抽穗期 Heading	成熟期 Maturity
		籼粳杂交稻 Japonica indica hybrid	甬优 1573 YY1573	1.97	1.45	1.29	94.32
	甬优 1952 YY 1952	1.95	1.45	1.30	92.74	198.37	250.08
	甬优 4340 YY 4340	1.92	1.50	1.31	94.19	208.72	266.97
	甬优 4348 YY 4348	1.98	1.50	1.30	95.98	208.19	261.83
	甬优 4356 YY 4356	2.06	1.48	1.32	98.43	201.87	260.55
	甬优 1538 YY 1538	1.97	1.46	1.31	94.32	200.66	255.48
	甬优 1540 YY 1540	1.99	1.48	1.31	95.29	202.53	256.89
	平均值 Mean	1.98 Bb	1.47 Aa	1.31 Aa	95.04 Aa	202.67 Aa	257.23 Aa
	变异系数 CV(%)	2.13	1.55	0.66	1.90	2.10	2.52
常规粳稻 Japonica rice	镇稻 18 ZD18	2.06	1.38	1.22	81.75	172.04	213.57
	武运粳 30 WYJ30	2.03	1.35	1.22	81.60	169.99	212.46
	平均值 Mean	2.05 Aa	1.37 Bb	1.22 Bb	81.67 Bb	171.01 Bb	213.02 Bb
	变异系数 CV(%)	1.27	1.58	0.07	0.13	0.85	0.37
杂交籼稻 Hybrid indica rice	扬两优 6 号 YLY6	1.89	1.20	1.05	96.00	140.22	155.52
	丰两优香 1 号 FLYX 1	1.87	1.20	1.05	90.69	141.72	156.25
	平均值 Mean	1.88 Cc	1.20 Cc	1.05 Cc	93.35 Aa	140.97 Cc	155.89 Cc
	变异系数 CV(%)	5.15	0.47	0.27	4.02	0.76	0.33

注 (Note): 数据后不同大、小写字母表示品种类型间在 1%、5% 水平差异显著 Values followed by different capital and lowercase letters mean significantly different at 1% and 5% levels among cultivar types.

表 3 甬优系列籼粳杂交稻抽穗期和成熟期茎鞘、叶、穗各器官含氮量及其氮积累量比例
 Table 3 N contents and proportion of N in stem-sheaths, leaves, panicles at the heading and maturity stages of indica-japonica hybrid rice of Yongyou series

类型 Type	品种 Cultivar	移栽~拔节 Transplanting-Jointing			拔节~抽穗 Jointing-Heading			抽穗~成熟 Heading-Maturity		
		积累量 Accumulate (kg/hm ²)	比例 Ratio in total (%)	吸收速率 Uptake rate [kg/(hm ² ·d)]	积累量 Accumulate (kg/hm ²)	比例 Ratio in total (%)	吸收速率 Uptake rate [kg/(hm ² ·d)]	积累量 Accumulate (kg/hm ²)	比例 Ratio in total (%)	吸收速率 Uptake rate [kg/(hm ² ·d)]
籼粳杂交稻 Indica-japonica hybrids	甬优 1573 YY 1573	94.32	37.91	1.60	104.01	41.80	2.54	50.51	20.30	0.81
	甬优 1952 YY 1952	92.74	37.08	1.57	105.63	42.24	2.64	51.71	20.68	0.91
	甬优 4340 YY 4340	94.19	35.28	1.60	114.53	42.90	3.01	58.25	21.82	1.02
	甬优 4348 YY 4348	95.98	36.66	1.63	112.21	42.86	2.81	53.63	20.48	0.92
	甬优 4356 YY 4356	98.43	37.78	1.79	103.44	39.70	2.65	58.68	22.52	0.98
	甬优 1538 YY 1538	94.32	36.92	1.47	106.34	41.62	2.73	54.82	21.46	0.83
	甬优 1540 YY 1540	95.29	37.09	1.62	107.25	41.75	2.75	54.35	21.16	0.86
	平均值 Mean	95.04 Aa	36.96 Bb	1.61 Aa	107.63 Aa	41.84 Aa	2.73 Aa	54.57 Aa	21.20 Aa	0.91 Aa
变异系数 CV(%)	1.90	2.35	5.83	3.89	2.57	5.55	5.60	3.75	8.42	
常规粳稻 Japonica rice	镇稻 18 ZD18	81.75	38.28	1.30	90.29	42.28	2.51	41.53	19.45	0.88
	武运粮 30 WYJ30	81.60	38.41	1.28	88.39	41.60	2.27	42.47	19.99	0.79
	平均值 Mean	81.67 Bb	38.34 Bb	1.29 Bb	89.34 Bb	41.94 Aa	2.39 Bb	42.00 Bb	19.72 Bb	0.84 Bb
	变异系数 CV(%)	0.13	0.24	1.24	1.51	1.14	7.16	1.58	1.94	8.23
杂交籼稻 Hybrid indica rice	扬两优 6 号 YLY6	96.00	61.73	1.63	44.22	28.43	1.16	15.30	9.84	0.33
	丰两优香 1 号 FLYX 1	90.69	58.04	1.54	51.03	32.66	1.31	14.53	9.30	0.36
	平均值 Mean	93.35 Aa	59.89 Aa	1.58 Aa	47.62 Cc	30.54 Bb	1.24 Cc	14.92 Cc	9.57 Cc	0.35 Cc
	变异系数 CV(%)	4.02	4.35	4.02	10.12	9.78	8.29	3.66	3.99	6.22

注 (Note): 数据后不同大、小写字母表示品种类型间在 1%、5% 水平差异显著 Values followed by different capital and lowercase letters mean significantly different at 1% and 5% levels among cultivar types.

期、拔节~抽穗期、抽穗~成熟期平均比例为 39.96%、41.84%、21.20%，与常规粳稻均呈拔节~抽穗期 > 移栽~拔节期 > 抽穗~成熟期的趋势，杂交籼稻以移栽~拔节期所占比例最大，抽穗~成熟期比例最小。甬优系列籼粳杂交稻各生育阶段氮素积累速率平均值分别为 1.61、2.73、0.91 kg/(hm²·d)，最大积累速率出现在拔节~抽穗期，与常规粳稻品种相同，杂交籼稻则出现在移栽~拔节期。抽穗~成熟期甬优系列籼粳杂交稻的氮素积累量、积累比例与氮素吸收速率均极显著大于对照类型，说明甬优系列籼粳杂交稻生育后期具有较强的氮素吸收与积累能力。

2.3 抽穗期和成熟期茎鞘、叶、穗各器官含氮率和氮积累量差异

由表 4 可知，甬优系列籼粳杂交稻抽穗期茎鞘、

叶、穗的平均含氮率为 1.19%、2.34%、1.33%，较常规粳稻高 7.21%、4.46%、3.91%，较杂交籼稻高 20.20%、26.49%、9.92%；成熟期茎鞘、叶和穗的平均含氮率为 0.75%、1.58%、1.51%，较常规粳稻高 5.63%、6.04%、4.86%，茎鞘和叶较杂交籼稻高 141.94% 和 285.37%，穗较杂交籼稻低 5.03%。甬优系列籼粳杂交稻生育中后期茎鞘和叶片中含氮量较高，说明其叶绿素含量高，光合能力强，有利于植株后期干物质及氮素的积累。各器官氮积累量占植株总积累量比例，甬优系列籼粳杂交稻抽穗期茎鞘和叶中所占比例相差较小，两者互有高低，平均值以茎鞘中含氮量略高，两对照类型均呈现叶 > 茎鞘 > 穗的分布趋势；成熟期茎鞘和叶中氮积累量占植株氮积累量比例显著下降，穗部氮积累量所占比例升高，甬优系列籼粳杂交稻各器官氮积累量所占比例

表 4 甬优系列籼粳杂交稻抽穗期和成熟期茎鞘、叶、穗各器官含氮量及其氮积累量比例
 Table 4 N contents and proportion of N in stem-sheaths, leaves, panicles at the heading and maturity stages of indica-japonica hybrid rice of Yongyou series

类型 Type	品种 Cultivar	含氮率 N content (%)						氮积累量所占比例 Ratio of N accumulation (%)					
		抽穗期 Heading			成熟期 Maturity			抽穗期 Heading			成熟期 Maturity		
		茎鞘 Stem-sheath	叶 Leaf	穗 Panicle	茎鞘 Stem-sheath	叶 Leaf	穗 Panicle	茎鞘 Stem-sheath	叶 Leaf	穗 Panicle	茎鞘 Stem-sheath	叶 Leaf	穗 Panicle
籼粳杂交稻 Indica-japonica hybrid	甬优 1573 YY1573	1.14	2.37	1.31	0.78	1.57	1.48	42.78	45.15	12.07	17.75	18.00	64.25
	甬优 1952 YY1952	1.16	2.34	1.32	0.76	1.57	1.49	43.20	44.79	12.01	16.92	17.80	65.28
	甬优 4340 YY4340	1.22	2.36	1.36	0.73	1.59	1.51	44.29	43.10	12.61	15.55	17.31	67.14
	甬优 4348 YY4348	1.23	2.34	1.36	0.73	1.59	1.49	44.87	42.62	12.51	16.02	17.49	66.49
	甬优 4356 YY4356	1.20	2.32	1.34	0.75	1.57	1.52	44.14	43.42	12.44	16.10	16.95	66.95
	甬优 1538 YY1538	1.17	2.34	1.30	0.73	1.57	1.54	43.62	44.36	12.02	15.91	17.37	66.72
	甬优 1540 YY1540	1.20	2.34	1.32	0.75	1.57	1.51	44.51	43.68	11.82	16.85	17.13	66.02
	平均值 Mean	1.19 Aa	2.34 Aa	1.33 Aa	0.75 Aa	1.58 Aa	1.51 Bb	43.92 Aa	43.87 Cc	12.21 Aa	16.44 Aa	17.44 Aa	66.12 Bb
变异系数 CV(%)	2.77	0.68	1.79	2.52	0.71	1.29	1.70	2.11	2.48	4.63	2.10	1.57	
常规粳稻 Japonica rice	镇稻 18 ZD18	1.12	2.26	1.26	0.71	1.49	1.44	43.22	44.92	11.86	17.32	19.44	63.24
	武运粳 30 WYJ30	1.10	2.22	1.29	0.70	1.48	1.44	42.41	45.15	12.43	17.08	18.32	64.60
	平均值 Mean	1.11 Bb	2.24 Bb	1.28 Bb	0.71 Aa	1.49 Bb	1.44 Cc	42.81 Bb	45.04 Bb	12.15 Aa	17.20 Aa	18.88 Aa	63.92 Bb
	变异系数 CV(%)	1.80	1.26	1.66	0.46	0.21	0.20	1.33	0.37	3.33	1.00	4.19	1.51
杂交籼稻 Hybrid indica rice	扬两优 6 号 YLY6	0.99	1.86	1.20	0.31	0.40	1.59	39.44	49.18	11.38	8.58	5.48	85.94
	丰两优香 1 号 FLYX1	0.99	1.84	1.22	0.32	0.42	1.60	40.12	47.62	12.25	9.22	5.66	85.12
	平均值 Mean	0.99 Cc	1.85 Cc	1.21 Cc	0.31 Bb	0.41 Cc	1.59 Aa	39.78 Cc	48.40 Aa	11.82 Ab	8.90 Bb	5.57 Bb	85.53 Aa
	变异系数 CV(%)	0.15	0.61	0.89	3.11	3.62	0.36	1.22	2.27	5.20	5.14	2.24	0.68

注 (Note): 数据后不同大、小写字母表示品种类型间在 1%、5% 水平差异显著 Values followed by capital and different lowercase letters mean significantly different at 1% and 5% levels among cultivar types.

与常规粳稻差异不显著, 茎鞘和叶氮积累量所占比例显著大于杂交籼稻, 穗部氮积累量所占比例显著小于杂交籼稻。说明甬优系列籼粳杂交稻成熟期较多的氮素贮存在源器官中, 稳定茎鞘结构物质与组成, 有利于提高植株抗倒伏能力, 延长叶片的光合功能期, 这是甬优系列籼粳杂交稻后期氮素积累能力强的生理基础。

2.4 抽穗至成熟期植株各器官氮素转运特征

由表 5 可知, 甬优系列籼粳杂交稻抽穗至成熟期茎鞘氮素转运量为 19.75 mg/stem, 分别较常规粳稻和杂交籼稻高 72.34% 和 17.49%, 呈极显著差异; 叶片中的氮素转运量为 18.44 mg/stem, 较常规粳稻高 60.49%, 较杂交籼稻低 24.18%。甬优系列籼粳杂交稻抽穗至成熟期茎鞘和叶片氮素表观转运率为 49.96% 和 46.90%, 显著高于常规粳稻, 极显著

低于杂交籼稻; 抽穗至成熟期茎鞘和叶片氮素转运贡献率分别为 24.83% 和 23.32%, 与常规粳稻差异不显著, 极显著低于杂交籼稻, 分别低 15.20% 和 44.97%。甬优系列籼粳杂交稻抽穗后氮素净积累贡献率达到 32.06%, 较常规粳稻高 3.92%, 较杂交籼稻高 182.72%。说明甬优系列籼粳杂交稻生育后期不仅依靠茎鞘和叶片中的氮素转运, 更多依靠抽穗后植株根系对氮素的持续吸收。

2.5 氮素利用效率特征

由表 6 可知, 2014 年甬优系列籼粳杂交稻平均实收产量达到 11.26 t/hm², 极显著高于两类对照品种, 分别较常规粳稻和杂交籼稻增产 22.13% 和 34.53%。进一步分析产量与氮素吸收利用的关系表明, 甬优系列籼粳杂交稻平均百公斤籽粒吸氮量为 2.29 kg, 与常规粳稻差异不显著, 较杂交籼稻高

表 5 甬优系列籼粳杂交稻抽穗至成熟期植株各器官氮素转运特征
 Table 5 N translocation in stem-sheath and leaves from heading to maturity stage of indica-japonica hybrid rice of Yongyou series

类型 Type	品种 Cultivar	NTA (mg/stem)		ANTR (%)		CRTN (%)		NCRH (%)
		茎鞘 Stem-sheath	叶 Leaf	茎鞘 Stem-sheath	叶 Leaf	茎鞘 Stem-sheath	叶 Leaf	
籼粳杂交稻 Indica-japonica hybrids	甬优 1573 YY1573	15.54	17.18	45.20	47.34	22.78	25.19	31.59
	甬优 1952 YY 1952	18.90	19.29	48.01	47.26	23.94	24.44	31.68
	甬优 4340 YY 4340	22.12	18.74	52.73	45.92	25.84	21.89	32.50
	甬优 4348 YY 4348	22.08	18.17	52.73	45.69	26.88	22.12	30.81
	甬优 4356 YY 4356	21.18	19.38	50.46	46.95	24.49	22.41	33.64
	甬优 1538 YY 1538	18.53	17.53	51.10	47.53	24.93	23.58	32.16
	甬优 1540 YY 1540	19.88	18.79	49.46	47.64	24.97	23.60	32.05
	平均值 Mean	19.75 Aa	18.44 Bb	49.96 Bb	46.90 Bb	24.83 Bb	23.32 Bb	32.06 Aa
变异系数 CV(%)	11.87	4.59	5.40	1.67	5.29	5.31	2.74	
常规粳稻 Japonica rice	镇稻 18 ZD18	11.36	10.77	47.61	43.45	24.90	23.62	30.75
	武运粳 30 WYJ30	11.56	12.21	47.01	46.63	23.46	24.77	30.94
	平均值 Mean	11.46 Cc	11.49 Cc	47.31 Bc	45.04 Bc	24.18 Bb	24.20 Bb	30.85 Bb
	变异系数 CV(%)	1.27	8.38	0.90	4.98	4.21	3.36	0.44
杂交籼稻 Hybrid indica rice	扬两优 6 号 YLY6	17.65	25.65	74.62	86.98	29.33	42.63	11.45
	丰两优香 1 号 FLYX1	17.00	23.72	73.33	86.21	29.78	41.56	10.93
	平均值 Mean	16.81 Bb	24.32 Aa	74.04 Aa	86.65 Aa	29.28 Aa	42.38 Aa	11.34 Cc
变异系数 CV(%)	2.64	5.52	1.23	0.63	1.08	1.80	3.31	

注 (Note): NCRH—抽穗后氮素净积累贡献率 Net N absorbed conversion rate after heading; NTA—转运量 N translocation amount; ANTR—表观转运率 Apparent N translocation rate; CRTN—转运贡献率 Contribution rate by transferred N; 数据后不同大、小写字母表示品种类型间在 1%、5% 水平差异显著 Values followed by different capital and lowercase letters mean significantly different at 1% and 5% levels among cultivar types.

23.12%，差异极显著。甬优系列籼粳杂交稻平均氮素籽粒生产效率为 43.75 kg/kg，与常规粳稻差异不显著，极显著低于杂交籼稻。甬优系列籼粳杂交稻平均氮素干物质生产效率为 77.01 kg/kg，极显著低于两类对照品种。甬优系列籼粳杂交稻平均氮肥偏生产力为 37.54 kg/kg，极显著大于常规粳稻，与杂交籼稻差异不显著。甬优系列籼粳杂交稻平均氮素收获指数为 0.66，略高于常规粳稻，极显著低于杂交籼稻，较之低 23.26%。

3 讨论

3.1 甬优系列籼粳杂交稻氮素吸收积累特性

氮素是影响水稻生长和产量形成的重要因素。一般认为单位面积产量与成熟期氮素积累量呈显著正相关^[23]。殷春渊等^[10]认为高产型水稻抽穗期与成熟

期的氮素积累量均高于低产型。Haefele 等^[22]认为水稻单位面积产量与成熟期氮素积累量呈抛物线关系。霍中洋等^[23]认为随着不同生产力水平品种产量的逐渐降低，抽穗期和成熟期叶片的氮素积累量以及成熟期穗的干物质与氮素积累量逐渐减小。本研究结果表明，单位面积产量与抽穗期和成熟期氮素积累量均呈极显著正相关，相关系数分别为 0.9396** 与 0.9287** (数据未列出)。

不同基因型水稻各生育阶段氮素积累量、积累比例以及阶段积累速率有很大差异^[12-13, 26]。单玉华等^[25]认为籼稻氮积累量大于粳稻，杂交稻大于常规稻，广亲和品种氮积累量在所有类型中最低。龚金龙等^[26]研究表明粳稻抽穗期和成熟期植株各器官以及全生育期整株含氮率均高于籼稻，移栽期、有效分蘖临界叶龄期、抽穗期和成熟期粳稻群体氮素积累量显著或极显著高于籼稻，而粳稻拔节期群体氮素积累

表 6 甬优系列籼粳杂交稻氮素利用效率
Table 6 N utilization efficiency of indica-japonica hybrid rice of Yongyou series

类型 Type	品种 Cultivar	产量 Yield (t/hm ²)		100 kg GNU (kg)	NUEG (kg/kg)	NUEB (kg/kg)	NFPF (kg/kg)	NHI
		2013	2014					
籼粳杂交稻 Indica-japonica hybrids	甬优 1573 YY1573	10.94	10.91	2.28	43.83	77.65	36.35	0.64
	甬优 1952 YY 1952	10.16	10.04	2.49	40.15	77.41	33.47	0.65
	甬优 4340 YY 4340	11.95	12.09	2.21	45.29	76.54	40.30	0.67
	甬优 4348 YY 4348	12.02	11.97	2.19	45.72	77.42	39.90	0.66
	甬优 4356 YY 4356	11.79	11.88	2.19	45.60	76.38	39.60	0.67
	甬优 1538 YY 1538	11.02	10.95	2.33	42.86	76.46	36.50	0.67
	甬优 1540 YY 1540	11.11	10.99	2.34	42.79	77.19	36.64	0.66
	平均值 Mean	11.28 Aa	11.26 Aa	2.29 Aa	43.75 Bb	77.01 Cc	37.54 Aa	0.66 Bb
变异系数 CV (%)	5.97	6.65	4.75	4.60	0.69	6.65	1.65	
常规粳稻 Japonica rice	镇稻 18 ZD18	9.08	8.99	2.38	42.09	81.41	29.97	0.63
	武运粳 30 WYJ30	9.41	9.46	2.25	44.50	81.58	31.52	0.65
	平均值 Mean	9.25 Bb	9.22 Bb	2.31 Aa	43.30 Bb	81.749 Bb	30.74 Bb	0.64 Bb
	变异系数 CV (%)	2.52	3.57	3.94	3.94	0.15	3.57	1.51
杂交籼稻 Hybrid indica rice	扬两优 6 号 YLY6	8.72	8.62	1.80	55.42	95.66	38.30	0.86
	丰两优香 1 号 FLYX 1	8.35	8.12	1.92	51.97	95.42	36.09	0.85
	平均值 Mean	8.54 Cc	8.37 Cc	1.86 Bb	53.69 Aa	95.54 Aa	37.20 Aa	0.86 Aa
	变异系数 CV (%)	3.07	4.21	4.54	4.54	0.17	4.21	0.68

注 (Note): 100 kg GNU—百公斤籽粒吸氮量 100 kg-grain N uptake; NUEG—氮素籽粒生产效率 N efficiency for grain; NUEB—氮素干物质生产效率 N utilization efficiency for biomass production; NFPF—氮肥偏生产力 Partial factor productivity of applied N; NHI—氮素收获指数 N harvesting index; 数据后不同大、小写字母表示品种类型间在 1%、5% 水平差异显著 Values followed by different capital and lowercase letters mean significantly different at 1% and 5% levels among cultivar types.

量极显著低于籼稻。本研究结果表明,甬优系列籼粳杂交稻拔节期、抽穗期、成熟期氮积累量均高于常规粳稻和杂交籼稻,但拔节期与杂交籼稻差异不显著。甬优系列籼粳杂交稻移栽至拔节阶段的氮素积累比例低于两类对照品种,拔节至抽穗阶段和抽穗至成熟阶段的氮素积累量与氮素阶段积累速率都极显著大于对照类型。主要原因是甬优系列籼粳杂交稻分蘖期无效分蘖发生少,氮积累量较小;拔节至抽穗阶段恰为水稻穗分化期,是穗粒数形成的关键时期,较高的氮素积累速率及较大的氮素积累量能促进颖花分化,这与甬优系列籼粳杂交稻穗大粒多、群体颖花量大的特点相一致。因此在甬优系列籼粳杂交稻栽培中,若适当前氮后移,增加穗肥的施用比例,可满足其生育中后期的氮素需要,这是甬优系列籼粳杂交稻获得高产的重要生理特征。

3.2 甬优系列籼粳杂交稻氮素转运特征

不同基因型水稻器官的氮素转运存在明显差

异。Ntanos 等^[27]在地中海地区对粳稻和籼稻研究表明,干物质转运率变化范围为 8.5%~39.3%,氮素转运率变化范围为 44.7%~66.7%,并认为这种转运间的差异主要是由品种间的农学性状决定的。董桂春等^[28]研究认为高氮素籽粒生产效率类型品种抽穗期、成熟期茎鞘中氮素积累比例小、穗中比例大,成熟期尤为明显,且结实期茎鞘和叶氮素转运量大、转运率高。张耀鸿等^[29]研究认为提高抽穗前的氮素积累量、抽穗后的干物质积累量和氮素转运量是提高水稻的氮素利用效率的关键。本研究结果表明,甬优系列籼粳杂交稻在抽穗至成熟期单茎的氮素转运量较高,与杂交籼稻差异不显著,极显著大于常规粳稻。但甬优系列籼粳杂交稻的单茎转运率和转运贡献率均显著小于杂交籼稻。甬优系列籼粳杂交稻灌浆期间茎鞘和叶向穗部籽粒的氮素转运量大,而转运率和贡献率不高,这与甬优系列籼粳杂交稻抽穗期前干物质和氮素积累量较高有关。其次

甬优系列籼粳杂交稻成熟期茎鞘和叶的含氮率分别达到 0.75% 和 1.58%, 其茎鞘和叶氮积累量所占比例为 16.44% 和 17.44%, 显著高于杂交籼稻, 有利于维持生育后期较强的根系活力和氮素的吸收积累利用, 保证灌浆期间穗部籽粒对氮素的需求, 与甬优系列籼粳杂交稻抽穗后的氮素净积累量贡献率高的特征相一致, 是甬优系列籼粳杂交稻高产形成的重要生理特征。

3.3 甬优系列籼粳杂交稻氮素利用效率的特征

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, 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 and 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^[32]。Park 等^[31]研究报道, 水稻品种的氮素需求量和利用率在籼稻与粳稻间有较大差异, 籼稻相对于粳稻具有较高的氮素利用效率, 主要是由于籼稻的氮素收获指数较高。龚金龙等^[29]认为粳稻氮素吸收利用率和农学利用率高于籼稻, 但差异不显著; 粳稻氮素生理利用率、籽粒生产效率、干物质生产效率和氮肥偏生产力均低于籼稻, 除氮素生理利用率外其他指标均达到显著或极显著水平。单玉华等^[32]认为, 随着库容量的增大, 氮素的干物质生产效率、籽粒生产效率及氮素收获指数均显著提高。本研究结果表明, 甬优系列籼粳杂交稻氮素籽粒生产效率、氮素干物质生产效率、氮素收获指数等极显著小于杂交籼稻品种类型; 百公斤籽粒吸氮量显著高于杂交籼稻, 氮肥偏生产力极显著大于常规粳稻。可见甬优系列籼粳杂交稻在氮素利用方面并没有明显优势, 在氮素籽粒生产效率、干物质生产效率及氮素收获指数方面不及常规粳稻或杂交籼稻, 但其优势主要体现在植株不同生育时期的氮积累量上, 尤其是抽穗后的氮素积累量。甬优系列籼粳杂交稻在主要生育时期的氮素积累量均较高, 与对照类型相比降低了移栽至拔节阶段的积累比例, 增加了抽穗至成熟阶段的积累比例。因此甬优系列籼粳杂交稻应在施用足量氮肥的基础上, 适当调整氮肥运筹比例, 增施穗肥, 与其氮素阶段性积累特点相一致, 进而提高氮素吸收利用效率, 充分挖掘甬优系列籼粳杂交稻的产量潜力。

4 结论

甬优系列籼粳杂交稻氮素积累量大, 在生育前

期足量氮素积累的基础上, 显著提高了生育中后期氮素积累量与阶段积累比例。抽穗至成熟阶段氮素转运量较大, 表观转运率与表观转运贡献率低, 较多氮素贮存在茎鞘和叶片等器官。抽穗后氮素净积累量贡献率高, 满足灌浆期籽粒对氮素的需求。氮素收获指数低。

参 考 文 献:

- [1] Horie T, Shiraiwa T, Homma K, *et al.* Can yields of lowland rice resume the increase that they showed in the 1980s [J]. *Plant Production Science*, 2005, 8: 259–274.
- [2] 于林惠, 李刚华, 徐晶晶, 等. 基于高产示范方的机插水稻群体特征研究[J]. *中国水稻科学*, 2012, 26: 451–456.
Yu L H, Li G H, Xu J J, *et al.* Population characteristics of machine-transplanted japonica rice based on high-yield demonstration fields [J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2012, 26: 451–456.
- [3] 韦还和, 姜元华, 赵可, 等. 甬优系列杂交稻品种的超高产群体特征[J]. *作物学报*, 2013, 39: 2201–2210.
Wei H H, Jiang Y Y, Zhao K, *et al.* Characteristics of super-high yield population in Yongyou series of hybrid rice [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2013, 39: 2201–2210.
- [4] 姜元华, 张洪程, 赵可, 等. 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[J]. *中国水稻科学*, 2014, 28(6): 621–631.
Jiang Y H, Zhang H C, Zhao K, *et al.* Difference in yield and its components characteristics of different type rice cultivars in the lower reaches of the Yangtze River [J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2014, 28(6): 621–631.
- [5] 胡雅杰, 朱大伟, 钱海军, 等. 籼粳杂交稻甬优2640钵苗机插超高产群体若干特征探讨[J]. *作物学报*, 2014, 40(11): 2016–2027.
Hu Y J, Zhu D W, Qian H J, *et al.* Some characteristics of mechanical transplanted pot seedlings in super high yielding population of indica-japonica hybrid rice yongyou 2640 [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2014, 40(11): 2016–2027.
- [6] 王晓燕, 韦还和, 张洪程, 等. 水稻甬优12产量13.5 t/hm²以上超高产群体的生育特征[J]. *作物学报*, 2014, 40(12): 2149–2159.
Wang X Y, Wei H H, Zhang H C, *et al.* Population characteristics for super-high yielding hybrid rice yongyou 12 (> 13.5 t/ha) [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2014, 40(12): 2149–2159.
- [7] 花劲, 周年兵, 张军, 等. 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[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(5): 1023–1034.
Hua J, Zhou N B, Zhang J, *et al.* The structure and formation characteristics of super-high yield population with late yongyou series of indica-japonica hybrid rice in double-cropping rice area [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(5): 1023–1034.
- [8] 姜元华, 许轲, 赵可, 等. 甬优系列籼粳杂交稻的冠层结构与光合特性[J]. *作物学报*, 2015, 41(2): 286–296.
Jiang Y H, Xu K, Zhao K, *et al.* Canopy structure and photosynthetic characteristics of yongyou series of indica-japonica hybrid rice under high-yielding cultivation condition [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2015, 41(2): 286–296.
- [9] 姜元华, 许俊伟, 赵可, 等. 甬优系列籼粳杂交稻根系形态与生理特征[J]. *作物学报*, 2015, 41(1): 89–99.
Jiang Y H, Xu J W, Zhao K, *et al.* Root system morphological and physiological characteristics of indica-japonica hybrid rice of Yongyou series [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2015, 41(1): 89–99.
- [10] 殷春渊, 张庆, 魏海燕, 等. 不同产量类型水稻基因型氮素吸收、利

- 用效率的差异[J]. 中国农业科学, 2010, 43(1): 39–50.
- Yin C Y, Zhang Q, Wei H Y, *et al.* Differences in nitrogen absorption and use efficiency in rice genotypes with different yield performance [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(1): 39–50.
- [11] Koutroubas S D, Ntanos D A. Genotypic differences for grain yield and nitrogen utilization in indica and japonica rice under Mediterranean conditions [J]. *Field Crops Research*, 2003, 83: 251–260.
- [12] 殷春渊, 魏海燕, 张庆, 等. 不同氮肥水平下中熟籼稻和粳稻产量、氮素吸收利用差异及相互关系[J]. 作物学报, 2009, 35(2): 348–355.
- Yin C Y, Wei H Y, Zhang Q, *et al.* Differences and correlations in grain yield, N uptake and utilization between medium-maturing indica and japonica rice under different N fertilizer levels [J]. *Acta Agronomica Sinica*. 2009, 35(2): 348–355.
- [13] 魏海燕, 张洪程, 杭杰, 等. 不同氮素利用效率基因型水稻氮素积累与转移的特性[J]. 作物学报, 2008, 34(1): 119–125.
- Wei H Y, Zhang H C, Hang J, *et al.* Characteristics of N accumulation and translocation in rice genotypes with different N use efficiencies [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2008, 34(1): 119–125.
- [14] 范淑秀, 徐正进, 杨青川. 不同基因型水稻氮效率的分类与评价[J]. 湖北农业科学, 2014, 53(1): 16–19.
- Fan S X, Xu Z J, Yang Q C. Classification and evaluation on different rice genotypes with nitrogen use efficiency [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2014, 53(1): 16–19.
- [15] 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 [J]. *Pedosphere*, 2009, 19: 681–691.
- [16] 孙永健, 孙园园, 李旭毅, 等. 水氮互作对水稻氮磷钾吸收、转运及分配的影响[J]. 作物学报, 2010, 36(4): 655–664.
- Sun Y J, Sun Y Y, Li X Y, *et al.* Effects of water-nitrogen interaction on absorption, translocation and distribution of nitrogen, phosphorus, and potassium in rice [J]. *Acta Agronomica Sinica*. 2010, 36(4): 655–664.
- [17] 王亚江, 魏海燕, 颜希婷, 等. 光、氮及其互作对超级粳稻产量和氮、磷、钾吸收的影响[J]. 作物学报, 2014, 40(7): 1235–1244.
- Wang Y J, Wei H Y, Yan X T, *et al.* Effects of light, nitrogen and their interaction on grain yield and nitrogen, phosphorus and potassium absorption in japonica super rice [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2014, 40(7): 1235–1244.
- [18] 陈晓远, 高志红, 刘振华. 供氮形态和水分胁迫对水稻生长及氮素积累和分配的影响[J]. 华北农学报, 2009, 24(6): 116–122.
- Cheng X Y, Gao Z H, Liu Z H. Effects of nitrogen forms and water stress on growth and nitrogen accumulation and distribution of rice plants [J]. *Acta Agriculturae Boreali Sinica*, 2009, 24(6): 116–122.
- [19] 俞巧钢, 叶静, 杨梢娜, 等. 不同施氮量对单季稻养分吸收及氮挥发损失的影响[J]. 中国水稻科学, 2012, 26(4): 487–494.
- Yu Q G, Ye J, Yang S N, *et al.* Effects of different nitrogen application levels on rice nutrient uptake and ammonium volatilization [J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2012, 26(4): 487–494.
- [20] 梁天锋, 徐世宏, 刘开强, 等. 栽培方式对水稻氮素吸收利用与分配特性影响的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(1): 20–26.
- Liang T F, Xu S H, Liu K Q, *et al.* Studies on influence of cultivation patterns on characteristics of nitrogen utilization and distribution on rice [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*. 2010, 16(1): 20–26.
- [21] 江立庚, 曹卫星, 甘秀芹, 等. 不同施氮水平对南方早稻氮素吸收利用及其产量和品质的影响[J]. 中国农业科学, 2004, 37(4): 490–496.
- Jiang L G, Cao W X, Gan X Q, *et al.* Nitrogen uptake and utilization under different nitrogen management and influence on grain yield and quality in rice [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(4): 490–496.
- [22] Haeefe S M, Jabbar S M A, Siopongco J D L C, *et al.* Nitrogen use efficiency in selected rice (*Oryza sativa* L.) genotypes under different water regimes and nitrogen levels [J]. *Field Crops Research*, 2008, 107(2): 137–146.
- [23] 霍中洋, 杨雄, 张洪程, 等. 不同氮肥群体最高生产力水稻品种各器官的干物质和氮素的积累与转运[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(5): 1035–1045.
- Huo Z Y, Yang X, Zhang H C, *et al.* Accumulation and translocation of dry matter and nitrogen nutrition in organs of rice cultivars with different productivity levels [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(5): 1035–1045.
- [24] Inthapanya P, Sipaseuth, Sihavong P, *et al.* Genotypic performance under fertilized and non-fertilized conditions in rainfed lowland rice [J]. *Field Crops Research*, 2000, 65: 1–14.
- [25] 单玉华, 王余龙, 山本由德, 等. 不同类型水稻在氮素吸收及利用上的差异[J]. 扬州大学学报(自然科学版), 2001, 4(3): 42–45.
- Shan Y H, Wang Y L, Yamamoto, *et al.* Study on the differences of nitrogen uptake and use efficiency in different types of rice [J]. *Journal of Yangzhou University (Natural Science Edition)*, 2001, 4(3): 42–45.
- [26] 龚金龙, 邢志鹏, 胡雅杰, 等. 籼、粳超级稻氮素吸收利用与转运差异研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(4): 796–810.
- Gong J L, Xing Z P, Hu Y J, *et al.* Differences of nitrogen uptake, utilization and translocation between indica and japonica super rice [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(4): 796–810.
- [27] Ntanos D A, Koutroubas S D. Dry matter and N accumulation and translocation for indica and japonica rice under mediterranean conditions [J]. *Field Crops Research*, 2002, 74(1): 93–101.
- [28] 董桂春, 王余龙, 周娟, 等. 不同氮素籽粒生产效率类型籼稻品种氮素分配与运转的差异[J]. 作物学报, 2009, 35(1): 149–155.
- Dong G C, Wang Y L, Zhou J, *et al.* Difference of nitrogen accumulation and translocation in conventional indica rice cultivars with different nitrogen use efficiency for grain output [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2009, 35(1): 149–155.
- [29] 张耀鸿, 张亚丽, 黄启为, 等. 不同氮肥水平下水稻产量以及氮素吸收、利用的基因型差异比较[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(5): 616–621.
- Zhang Y H, Zhang Y L, Huang Q W, *et al.* Effects of different nitrogen application rates on grain yields and nitrogen uptake and utilization by different rice cultivars [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(5): 616–621.
- [30] Novoa R, Loomis R S. Nitrogen and plant production [J]. *Plant and Soil*, 1981, 58: 177–204.
- [31] Park H, Mok S K, Seok S J. Efficiency of soil and fertilizer nitrogen in relation to rice variety and application time, using N labeled fertilizer ¹⁵N point application in fields [J]. *Journal of Korean Agricultural Chemistry*, 1982, 25: 30–34.
- [32] 单玉华, 王海候, 龙银成, 等. 不同库容量类型水稻在氮素吸收利用上的差异[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2004, 25(1): 41–45.
- Shan Y H, Wang H H, Long Y C, *et al.* Differences of nitrogen uptake and utilization in rice lines with various sink potentials [J]. *Journal of Yangzhou University (Natural Science Edition)*, 2004, 25(1): 41–45.