DOI: 10.3724/SP.J.1006.2020.92009

不同叶龄蘖、穗氮肥组合对粳稻产量及氮素利用的影响

王 艳 易 军 高继平* 张丽娜 杨继芬 赵艳泽 辛 威
甄晓溪 张文忠*

沈阳农业大学水稻研究所 / 教育部省部共建北方粳稻遗传育种重点实验室 / 农业农村部东北水稻生物学与遗传育种重点实验室,
辽宁沈阳 110161

摘 要: 以主茎叶片数不同的粳稻品种吉粳 88 (14 片)、沈农 265 (15 片)和沈农 1401 (16 片)为试材, 采用大田简栽方式, 在总施氮量 225 kg hm^{-2} 及轻简施肥(基肥、蘖肥、穗肥)模式基础上, 设置基蘖肥 穗肥 6 : 4 和 8 : 2 两种施肥比例, 并分设不同源、库叶龄期施氮组合即不同叶龄蘖、穗肥精确施氮组合。分析了不同源库期氮肥运筹模式对水稻农艺性状、产量及氮素利用特性的影响。结果表明: (1)在有效穗数、分化颖花数、产量和氮素利用率方面, 吉粳 88、沈农 265、沈农 1401 不同氮肥运筹下最佳蘖、穗肥叶龄组合均为 6 : 4 显著高于 8 : 2。(2)不同氮肥运筹下, 吉粳 88 在 8 叶(叶龄指数 57.1%)、沈农 265 在 9 叶(叶龄指数 60.0%)、沈农 1401 在 10 叶(叶龄指数 62.5%)时, 即叶龄指数在 60%左右时, 施用蘖肥效果最佳, 最终穗数最多, 对保蘖起主要作用; 吉粳 88 在 11 叶(叶龄指数 78.6%)、沈农 265 在 12 叶(叶龄指数 80.0%)、沈农 1401 在 13 叶(叶龄指数 81.3%)时, 即叶龄指数在 80%左右时, 施用穗肥效果最佳, 最终穗粒数最多, 对促花起主要作用。(3)吉粳 88-6 : 4 (8, 11), 沈农 265-6 : 4 (9, 12), 沈农 1401-6 : 4 (10, 13) 3 组处理, 在产量、氮素积累量、氮素吸收利用率、农学利用率及偏生产力等方面, 显著高于同品种不同叶龄蘖、穗氮肥组合中的其他处理。因此, 适当延迟蘖肥施用叶龄期(叶龄指数 60%左右)、提前穗肥施用叶龄期(叶龄指数 80%左右)同时增加穗肥施用比例, 既可以显著提高氮素积累量、氮素吸收利用率、农学利用率及偏生产力, 又能显著促进成穗率的提高和颖花数的分化, 达到保蘖促花的双重作用, 实现优源、扩库、充实的目标, 从而获得高产。

关键词: 粳稻; 保蘖氮肥; 促花氮肥; 产量; 氮素利用效率

Effects of precision leaf age fertilization on yield and nitrogen utilization of japonica rice

WANG Yan, YI Jun, GAO Ji-Ping*, ZHANG Li-Na, YANG Ji-Fen, ZHAO Yan-Ze, XIN Wei, ZHEN Xiao-Xi, and ZHANG Wen-Zhong*

Rice Research Institute, Shenyang Agricultural University / Key Laboratory of Northern Japonica Rice Genetics and Breeding, Ministry of Education and Liaoning Province / Key Laboratory of Northeast Rice Biology, Genetics and Breeding, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shenyang 110161, Liaoning, China

Abstract: The japonica rice cultivar Jigeng 88 (14 leaves), Shennong 265 (15 leaves) and Shennong 1401 (16 leaves) with different main leaf ages were used to analyze the effects of different source-sink nitrogen fertilizer application models on agronomic traits, yield and nitrogen utilization characteristics of rice grown in the field-tube condition. Two kinds of fertilizer proportions (base fertilizer: panicle fertilizer was 6:4 and 8:2) were set under 225 kg hm^{-2} of nitrogen application based on the light and simple fertilization model (basal fertilizer, tillering fertilizer, panicle fertilizer). The tillering fertilizer was applied at the stage of

本研究由国家重点研发计划项目(2018YFD0300306), 国家自然科学基金项目(31501250), 辽宁省百千万人才工程项目(2015-39)和沈阳市科技计划项目(17-231-37)资助。

This study was financed by the National Key Research and Development Program (2018YFD0300306), the National Natural Science Foundation of China (31501250), the Liaoning Bai-Qian-Wan Talents Program (2015-39), and the Project of Shenyang Science and Technology (17-231-37).

* 通信作者(Corresponding authors): 高继平, E-mail: gaojiping1983@163.com; 张文忠, E-mail: zwzhong@126.com

第一作者联系方式: E-mail: 2422437380@qq.com

Received (收稿日期): 2019-03-01; Accepted (接受日期): 2019-08-09; Published online (网络出版日期): 2019-09-10.

URL: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20190910.1132.008.html>

source construction, and panicle fertilizer was applied at stage of sink formation. The precise nitrogen application combined different nitrogen fertilizer modes for tillering and panicle fertilizers with different leaf ages. Number of differentiated spikelets, effective panicles, yield, and nitrogen use efficiency, were significantly higher by using the 6:4 fertilizer proportions than by using 8:2 under all nitrogen fertilizer application models in these cultivars. Under different nitrogen fertilizer regimes, the 8 leaves of Jigeng 88 (leaf age index was 57.1%), 9 leaves of Shennong 265 (leaf age index was 60.0%), and 10 leaves of Shennong 1401 (leaf age index was 62.55%) were the best stage to apply tillering fertilizer. It means that the leaf age index about 60% is better to protect the more panicle formation. The 11 leaves of Jigeng 88 (leaf age index was 78.6%), 12 leaves of Shennong 265 (leaf age index was 80.0%), 13 leaves of Shennong 1401 (leaf age index was 81.3%) were the best stage to apply panicle fertilizer. It means that leaf age index about 80% is better to promote spikelet differentiation. The yield, nitrogen accumulation, nitrogen uptake and utilization, agronomic efficiency, and partial productivity were significantly higher in 6:4 (8, 11) of Jigeng 88, 6:4 (9, 12) of Shennong 265, 6:4 (10, 13) of Shennong 1401 than in other treatments. Therefore, the delayed leaf age of tillering nitrogen fertilizer application (leaf age index was about 60%), ahead of applied the panicle fertilizer (leaf age index was about 80%), and increasing the ratio of nitrogen fertilizer application not only significantly increase nitrogen accumulation, nitrogen absorption and utilization, nitrogen agronomic utilization rate and partial productivity but also promote number of differentiated spikelets and the percentage of effective panicle number, achieving the dual role of protecting and promoting spikelets, and high yields.

Keywords: *japonica* rice; tillering protecting nitrogen fertilizer; flower promoting nitrogen fertilizer; yield; nitrogen use efficiency

氮肥运筹是水稻生产过程中最重要的营养调控手段之一,科学的氮肥运筹对提高水稻氮素吸收利用率,增加水稻产量及提升品质至关重要。关于氮肥的合理运筹,前人在施用总量、前氮后移、基蘖肥与穗肥比例、施用次数及施用时期对水稻群体指标、产量和氮素利用率的影响等方面做了大量研究^[1-9],一致认为提高水稻生育后期氮肥施用比例可显著优化群体质量、提高产量和氮素利用率,并在此基础上形成了一批氮肥运筹技术(“高产高效栽培技术”、“精确定量栽培技术”、“三段五次”、“稳前、攻中、优后”和“前氮后移”等)^[10-16],对构建和优化氮肥施用模式起到了重要作用。纵观以往的研究发现,由于水稻种植的生态区域或研究所选用的水稻品种类型不同,其研究结果具有一定局限性。目前关于不同叶龄蘖、穗氮肥组合对东北不同生育期高产粳稻品种产量及氮素利用的影响鲜有报道。本研究以叶龄模式为基础,采用3个不同主茎叶片数的粳稻品种,设置不同基蘖肥与穗肥比例,按照“源”建成期叶龄和“库”建成期叶龄逐叶进行精确组合施氮,剖析不同蘖、穗肥组合对水稻形态建成、产量构成以及氮素利用的利弊影响,明确不同粳稻品种适宜的蘖、穗肥施用时期,为系统构建及应用高产高效精确施氮模式奠定基础。

1 材料与方法

1.1 试验地点与供试品种

试验于2016—2017年在沈阳农业大学水稻研究所试验基地进行(41°50'N, 123°24'E)。2年试验水稻生长季节的温度、降雨量、湿度、日照时数等气象

数据见表1(来源于国家气象数据中心)。土壤类型为沙壤土,地力中等偏上。2016年耕层(0~20 cm)含全氮0.92 g kg⁻¹、有机质16.25 g kg⁻¹、速效磷70.55 mg kg⁻¹、速效钾115.04 mg kg⁻¹, pH 7.2。2017年耕层(0~20 cm)含全氮0.89 g kg⁻¹、有机质17.30 g kg⁻¹、速效磷70.56 mg kg⁻¹、速效钾115.06 mg kg⁻¹, pH 7.1。

供试品种吉粳88(吉林省超级稻品种),主茎叶片数14,伸长节间数5,全生育期145 d左右;沈农265(辽宁省超级稻品种),主茎叶片数15,伸长节间数5,全生育期157 d左右;沈农1401(辽宁省超高产品系),主茎叶片数16,伸长节间数5,全生育期160 d左右。

1.2 田间试验设计

全生育期施尿素(N 46%) 489.1 kg hm⁻²(纯氮量225 kg hm⁻²)、过磷酸钙(含P₂O₅ 12%) 937.5 kg hm⁻²、硫酸钾(含K₂O 50%) 225.0 kg hm⁻², N P₂O₅ K₂O比例为2 1 1。采用水溶法,磷肥作基肥一次性全量施入,钾肥分基肥(移栽前1 d)和穗肥(倒4叶)两次等量施入。氮肥设置2个运筹比例,即基蘖肥与穗肥比例分别为6 4和8 2,基肥与分蘖肥中的氮肥施用比例为6 4(表2),另设不施氮空白组(N0),与此同时设置蘖肥与穗肥施用叶龄期组合处理试验,其中蘖肥设置3个施用叶龄时期(吉粳88为6、7、8叶,沈农265为7、8、9叶,沈农1401为8、9、10叶),穗肥设置2个施用叶龄时期,即苞分化期(倒4叶)和颖花分化期(倒2叶),即吉粳88为11叶和13叶,沈农265为12叶和14叶,沈农1401为13叶和15叶(表3),共39个处理,每处理1筒,重复3次,总计117筒。在耙地均匀后埋设内径为30 cm的无底“315PVC平壁圆筒”,

壁厚0.5 cm, 筒高35 cm, 将筒钉压至犁底层(25 cm 处)。基施磷、钾肥在钉筒前水耙地时统一进行, 基施氮肥(尿素)由于各处理不同, 在钉筒后分筒单施。采用早育秧塑料硬盘方式培育秧苗, 于4月21日播种, 5月24日移栽(移栽叶龄5.0叶), 每筒2穴, 每穴2株苗, 穴距15.5 cm, 南北行向, 行距31 cm (筒直径+壁厚), 各筒在水稻生长期按表3确定的叶片组合施肥, 单独灌水。将所有筒连排紧靠形成一个长8.40 m、宽4.42 m 的田间小区, 筒外种植普通品种作为保护行。

表 1 水稻生育期间温度、降雨量、相对湿度和日照时数
Table 1 Monthly temperature, rainfall, relative humidity, and sunshine hours during the growth season in 2016 and 2017

月份 Month	平均温度 Average temperature (°C)				降雨量 Rainfall (mm)		平均湿度 Average relative humidity (%)		总日照时数 Total sunshine hours (h)	
	最小值 Minimum		最大值 Maximum		2016	2017	2016	2017	2016	2017
	2016	2017	2016	2017						
5 月 May	10.5	11.0	24.2	25.9	175.7	37.1	51.7	49.5	257.5	292.8
6 月 June	16.1	15.8	27.7	29.3	170.3	64.9	66.2	56.7	204.0	268.4
7 月 July	20.4	21.2	30.0	31.7	363.7	109.8	77.2	71.8	188.4	206.5
8 月 August	19.7	18.8	29.6	29.3	68.6	128.1	75.8	80.7	224.7	170.4
9 月 September	13.7	11.4	24.7	25.3	40.5	57.6	77.7	72.9	233.7	207.5

表 2 基肥与穗肥施用分配(施氮总量 225 kg hm⁻²)
Table 2 Ratio and applied amount of base tillering fertilizer and panicle fertilizer (total N 225 kg hm⁻²) (kg hm⁻²)

基肥:穗肥 B:P	基肥 Basal fertilizer	穗肥 Tillering fertilizer	基肥+穗肥 Basal fertilizer and tillering fertilizer	穗肥 Panicle fertilizer
8:2	108	72	180	45
6:4	81	54	135	90

B:P 为基肥:穗肥。B:P means basal tillering fertilizer: panicle fertilizer.

表 3 不同品种穗肥与穗肥叶龄组合
Table 3 Leaf age combination of tillering fertilizer and ear fertilizer in different varieties

吉粳 88 Jigeng 88			沈农 265 Shennong 265			沈农 1401 Shennong 1401		
叶龄 (叶龄指数) Leaf ages (leaf age index)	11 叶 11 leaves (78.6%)	13 叶 13 leaves (92.9%)	叶龄 (叶龄指数) Leaf ages (leaf age index)	12 叶 12 leaves (80.0%)	14 叶 14 leaves (93.3%)	叶龄 (叶龄指数) Leaf ages (leaf age index)	13 叶 13 leaves (81.3%)	15 叶 15 leaves (93.6%)
6 (42.9%)	(6, 11) [#]	(6, 13)	7 (46.7%)	(7, 12)	(7, 14)	8 (50.0%)	(8, 13)	(8, 15)
7 (50.0%)	(7, 11)	(7, 13)	8 (53.3%)	(8, 12)	(8, 14)	9 (56.3%)	(9, 13)	(9, 15)
8 (57.1%)	(8, 11)	(8, 13)	9 (60.0%)	(9, 12)	(9, 14)	10 (62.5%)	(10, 13)	(10, 15)

穗肥于 6、7、8、9 叶分别施入, 穗肥于 11、12、13、14、15 叶分别施入。[#] (6, 11)组合表示于第 6 叶完全抽出时施入穗肥, 于第 11 叶完全抽出时施入穗肥; 其他依此类推。

Tillering fertilizer was applied when the 6, 7, 8, 9 leaves extracted, panicle fertilizer was applied when the 11, 12, 13, 14, 15 leaves extracted.

[#] (6, 11) means that the tillering fertilizer was applied when the sixth leaf was fully extracted, and the panicle fertilizer was applied when the eleventh leaf was completely extracted; the rest may be deduced by analogy.

1.3 测定项目

1.3.1 叶龄动态 移栽后2 d调查标定叶龄数, 从6月1日开始每隔5 d调查叶龄进程, 直至主茎叶片全部抽出。

1.3.2 茎秆成穗率 从移栽后15 d开始调查, 每隔5 d普查筒栽全部植株, 并记录每穴茎秆数消长动态, 直至抽穗期结束, 计算成穗率。

1.3.3 分化颖花数 在颖花分化期, 选取每筒处理中第1穴内大小均匀、长势基本一致的3个穗, 使用解剖镜分别观察测定每穗总颖花数^[17]。

1.3.4 实际颖花数 在水稻成熟期, 选取每筒处理中第2穴, 对其中大小均匀、长势基本一致的3个穗, 观察测定每穗实粒数和秕粒数。

1.3.5 考种 收取筒栽所有稻穗, 每穴单独分装

标记, 风干后进行室内考种, 包括穗数、穗粒数、结实率、千粒重等。

1.3.6 氮素含量 考种后, 将所有处理按茎鞘、叶、穗分别烘干至恒重, 并用FZ102微型植物粉碎机磨粉, 从每个处理称取0.5 g混合样置于玻璃消解管中, 加 H_2SO_4^+ 定氮催化片消煮, 后用丹麦进口的FOSS全自动凯氏定氮仪Kjeltec 8400测定氮素含量。

1.4 数据计算和统计分析

实际颖花数=结实颖花数+空瘪颖花数;

退化颖花数=分化颖花数-实际颖花数;

氮素积累总量(kg hm^{-2})=成熟期单位面积植株(茎鞘、叶、穗)氮积累量的总和;

氮素吸收利用率(%)=(施氮区植株总吸氮量-空白区植株总吸氮量)/施氮量 $\times 100$;

氮素农学利用率(kg kg^{-1})=(施氮区产量-空白区产量)/施氮量;

氮素偏生产力(kg kg^{-1})=籽粒产量/施氮量。

运用Microsoft Excel 2010软件录入数据, Origin 9软件制作图形, SPSS19软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 叶龄进程

由图1可知, 从整个生育期叶片生长速度来看, 同一品种不同叶片的出叶速度及持续时间略有差异, 但差异不明显, 不同氮肥运筹及空白(N0)条件下均如此。出叶速度最快的叶片均在8叶以后, 吉粳88在8.3~9.2叶间、沈农265在8.2~10.2叶间、沈农1401在8.9~11.7叶间出叶速度相对最快。在全生育时期总施氮量一致的条件下, 不同品种2种氮肥运筹与相应空白对照(N0)相比, 在叶龄进程、主茎叶片数上均无显著差异, 说明水稻生育进程及生育期主要受遗传特性决定, 与外源氮素及其施用方式无关。

图1 不同氮肥运筹下各处理每5 d叶龄进程

Fig. 1 Leaf age process of every five days under different nitrogen applications

图中横坐标始于5, 表示叶龄为5叶时移栽, 每条柱中各小段表示每5 d的叶龄进程。

The abscissa in the picture starts at 5, said leaf transplanting age of 5 leaves. Each section in each bar represents the process of leaf age growth every five days.

2.2 茎蘖成穗率

在不同氮肥运筹下3个水稻品种的茎蘖成穗率存在显著差异, 且氮肥运筹6:4处理下的成穗率显著大于8:2处理, 2年规律基本一致。2016年和2017年吉粳88在氮肥运筹8:2处理下平均成穗率分别为64.3%和63.2%, 在6:4处理下平均成穗率分别为78.6%和74.8%; 其中处理6:4(8, 11)的成穗率最大, 两年分别为87.3%和80.3%。沈农265在氮肥运筹8:2处理下2年的平均成穗率分别为59.4%和65.9%, 在

6:4处理下分别为75.4%和73.5%; 其中处理6:4(9, 12)的平均成穗率达到最大, 2年分别为82.5%和85.5%。沈农1401在氮肥运筹8:2处理下2年的平均成穗率分别为61.6%和52.0%, 在6:4处理下分别为69.8%和65.1%, 其中处理6:4(10, 13)的平均成穗率达到最大, 分别为86.4%和81.2%。氮肥施用比例后移、蘖肥施用时期后移均显著提高了成穗率, 起到了保蘖效果。在同一氮肥运筹下, 2年3个品种的茎蘖成穗率均随蘖肥施用叶龄的延后而增加(图2)。

图 2 不同氮肥运筹下各处理茎蘖成穗率(2016–2017)

Fig. 2 Productive tiller percentage of rice for different treatments under different nitrogen applications (2016–2017)

图中标注的字母为成穗率的显著性。不同字母表示在 0.05 水平上差异显著。

Bars superscripted by different letters are significantly different at $P < 0.05$.

2.3 群体颖花数

由图 3 可知, 2 种氮肥运筹下不同品种的最大分化颖花数的蘖、穗肥叶龄组合分别是 8 叶和 11 叶(吉粳 88)、9 叶和 12 叶(沈农 265)、10 叶和 13 叶(沈农 1401), 且氮肥运筹 6-4 总体均高于氮肥运筹 8-2。在同一施用穗肥的叶龄下, 3 个不同生育期水稻品种的最大分化颖花数和实际颖花数均随蘖肥施用的延后而增加; 在同一施用蘖肥的叶龄下, 3 个水稻品种

的最大分化颖花数和实际颖花数整体上均表现为倒 4 叶穗肥处理下高于倒 2 叶处理, 且倒 4 叶穗肥处理下 3 个水稻品种的退化颖花数明显高于倒 2 叶处理, 但空瘪颖花数差异不明显, 2 年试验结果趋势基本一致。说明施氮量和蘖肥施用时期适度后移、穗肥适当前移, 有利于提高分化颖花数和实际颖花数。2016 年水稻植株的空瘪颖花数整体上较 2017 年高。

图 3 氮肥运筹对不同品种粳稻颖花量的影响(2016–2017)

Fig. 3 Effect of nitrogen application on the flower volume of japonica rice in cultivars (2016–2017)

图 3 中所标注的字母为分化颖花数的显著性, 即实际颖花数、空瘪颖花数与退化颖花数之和。不同字母表示在 0.05 水平上差异显著。The letters marked in the figure are significant for the number of spikelets, which is the sum of the number of degradation glumous flower, empty glumous flower and practical glumous flower. Different letters above bars stand for significant differences at $P < 0.05$.

2.4 产量及其构成因素

由表4和表5可以看出, 6-4运筹下的不同品种产量及其构成因素大都显著高于8-2运筹, 2年呈相同趋势。在同一比例的氮肥运筹下, 吉粳88的(8, 11)、沈农265的(9, 12)和沈农1401的(10, 13)处理的

产量均高于同品种的其他处理, 且在6-4运筹下最高; 在同一穗肥施用叶龄下, 3个水稻品种的产量均表现为随穗肥施用叶龄的延后而增加, 且总体表现出产量高者有效穗数也较高。不同穗肥施用叶龄产量吉粳88为11叶>13叶, 沈农265为12叶>14叶,

沈农1401为13叶>15叶, 即各处理产量表现趋势为倒4叶>倒2叶, 且总体表现出产量高者穗粒数也较高。说明适当后移穗肥施用叶龄时期保穗效果最

佳, 成穗率显著提高; 穗肥施用叶龄时期前移, 同时提高穗肥施用比例, 可显著促进颖花分化, 增加穗粒数。

表 4 2016 年不同氮肥运筹对各处理产量及其构成的影响

Table 4 Effects of different nitrogen fertilizers on yield and its component of each variety in 2016

品种 Cultivar	基肥:穗肥 B:P	处理时期 Treatment	每筒有效穗数 No. of panicles per pot	每穗粒数 No. of grains per panicle	结实率 Filled-grain percentage (%)	千粒重 1000-grain weight (g)	每筒实 测产量 Yield per pot (g)
吉粳 88 Jigeng 88	8:2	(6, 11) [#]	21.6±2.4 ab	139.8±5.9 c	89.2±4.0 abcd	21.3±0.4 bc	56.8±0.8 b
		(6, 13)	18.2±0.5 b	137.3±4.7 c	86.9±3.5 cd	20.4±0.2 cd	52.8±0.4 b
		(7, 11)	23.6±2.6 ab	139.0±10.8 c	88.5±5.1 abcd	21.1±1.2 bc	60.0±2.8 b
		(7, 13)	24.0±2.1 ab	120.0±1.0 d	87.1±0.0 bcd	21.0±0.6 bc	52.8±3.4 b
		(8, 11)	26.2±3.6 a	146.6±14.4 abc	90.5±0.3 abcd	19.3±2.0 d	67.2±5.4 ab
		(8, 13)	23.2±0.8 b	134.8±4.9 c	92.1±0.2 ab	21.1±1.1 bc	60.8±4.0 b
	6:4	(6, 11)	22.0±2.0 ab	159.3±7.4 a	86.1±2.3 d	21.0±0.4 bc	62.4±0.4 ab
		(6, 13)	18.2±0.5 b	146.7±2.1 abc	91.5±1.1 abc	20.8±0.1 bc	54.4±0.4 b
		(7, 11)	24.6±1.2 ab	143.4±10.5 bc	91.5±3.3 d	21.1±1.3 bc	64.8±4.0 b
		(7, 13)	19.8±1.2 ab	134.0±7.9 c	92.1±1.4 abcd	21.9±0.2 b	52.8±2.8 b
		(8, 11)	25.2±1.2 a	155.4±11.7 ab	93.1±2.2 a	20.9±0.6 bc	76.0±1.6 a
		(8, 13)	25.0±1.5 a	136.4±11.3 c	91.1±2.5 abc	20.5±0.5 bcd	63.2±1.2 ab
	N0	(0, 0)	10.2±0.5 c	114.0±3.5 d	89.5±2.9 abcd	23.7±0.9 a	24.8±2.4 c
沈农 265 Shennong 265	8:2	(7, 12)	18.0±0.8 c	155.8±8.3 ab	86.0±1.1 def	24.1±0.4 abc	57.6±1.2 ef
		(7, 14)	18.8±0.4 c	147.0±2.2 bcd	83.5±1.4 f	24.0±0.2 abc	55.2±0.4 f
		(8, 12)	21.2±1.0 abc	134.0±4.5 e	90.8±1.0 ab	23.7±0.1 bcd	60.8±1.6 def
		(8, 14)	21.6±0.8 abc	136.8±7.8 de	87.8±2.3 cde	23.0±0.6 ef	59.2±2.4 ef
		(9, 12)	23.6±1.4 ab	149.3±9.4 bc	88.8±1.6 bcd	22.8±0.4 f	71.2±1.2 b
		(9, 14)	19.2±0.7 c	149.3±7.3 bc	91.4±0.4 a	23.5±0.4 de	61.6±1.2 def
	6:4	(7, 12)	22.0±2.0 abc	142.5±8.2 cde	86.8±1.0 cde	22.8±0.4 f	61.6±3.2 de
		(7, 14)	18.0±0.8 c	162.0±7.8 a	84.1±1.8 f	24.2±0.1 ab	59.2±1.6 ef
		(8, 12)	23.6±2.0 ab	155.3±10.2 ab	85.2±3.4 ef	22.0±0.3 g	68.0±2.4 bc
		(8, 14)	19.6±1.4 c	152.5±9.9 abc	88.8±0.5 bcd	24.2±0.2 ab	64.0±2.4 cde
		(9, 12)	24.4±1.4 a	149.3±4.5 bc	91.3±2.5 ab	23.2±0.8 def	76.8±1.2 a
		(9, 14)	20.4±1.2 bc	150.8±7.5 abc	89.7±3.0 abc	24.3±0.1 a	66.4±2.4 bcd
	N0	(0, 0)	10.4±0.7 d	115.0±4.2 f	95.4±0.7 a	24.2±0.2 ab	27.2±1.2 g
沈农 1401 Shennong 1401	8:2	(8, 13)	18.0±0.8 abcd	142.3±18.2 abc	70.3±9.0 abcd	26.0±1.0 ab	66.4±4.4 bcd
		(8, 15)	15.6±1.4 de	144.5±4.0 abc	76.8±1.3 a	26.5±0.7 a	59.2±3.6 de
		(9, 13)	17.6±1.1 bcde	133.3±8.4 cd	66.3±8.7 abcd	25.2±0.5 abc	59.2±2.8 de
		(9, 15)	17.2±0.4 bcde	119.8±9.3 d	62.4±10.9 bcd	26.7±0.8 a	55.2±2.4 e
		(10, 13)	18.4±0.5 abc	152.3±12.6 ab	64.1±6.3 abcd	24.7±0.8 bc	68.8±3.6 abc
		(10, 15)	16.0±0.7 cde	138.5±15.9 bc	70.6±10.3 abc	26.2±1.1 ab	57.6±3.2 de

(续表 4)

品种 Cultivar	基蘖肥:穗肥 B:P	处理时期 Treatment	每筒有效穗数 No. of panicles per pot	每穗粒数 No. of grains per panicle	结实率 Filled-grain percentage (%)	千粒重 1000-grain weight (g)	每筒实 测产量 Yield per pot (g)
沈农 1401 Shennong 1401	6:4	(8, 13)	18.8±1.0 ab	151.5±5.4 ab	61.2±3.9 cd	25.4±0.3 abc	72.0±2.4 ab
		(8, 15)	17.2±0.4 bcde	138.5±1.7 bc	63.6±4.0 abcd	26.1±0.9 ab	62.4±0.8 cde
		(9, 13)	18.4±0.5 abc	131.3±4.3 cd	56.7±5.8 d	26.6±0.6 a	64.0±1.2 bcd
		(9, 15)	16.0±0.7 cde	144.8±4.5 abc	75.3±5.3 ab	26.0±0.6 ab	60.0±2.0 de
		(10, 13)	20.4±1.0 a	155.3±8.1 a	71.3±6.7 abc	24.1±1.9 c	76.0±1.6 a
		(10, 15)	15.2±0.5 e	149.3±11.2 ab	66.5±7.6 abcd	26.2±1.3 ab	59.2±1.6 de
	N0	(0, 0)	8.0±0.7 f	103.0±4.5 e	64.9±9.3 abcd	25.5±0.8 abc	20.8±1.2 f

蘖肥于 6、7、8、9 叶分别施入, 穗肥于 11、12、13、14、15 叶分别施入。[#] (6,11)组合表示于第 6 叶完全抽出时施入蘖肥, 于第 11 叶完全抽出时施入穗肥; 其他依此类推。B:P 为基蘖肥: 穗肥。相同品种, 同一列中不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。

Tillering fertilizer was applied when the 6, 7, 8, 9 leaves extracted, panicle fertilizer was applied when the 11, 12, 13, 14, 15 leaves extracted.

[#] (6, 11) means that the tillering fertilizer was applied when the sixth leaf was fully extracted, and the panicle fertilizer was applied when the eleventh leaf was completely extracted; the rest may be deduced by analogy. B:P means basal tillering fertilizer : panicle fertilizer. Values within a column followed by different letters are significantly different at $P < 0.05$ in the same cultivar.

表 5 2017 年不同氮肥运筹对各处理产量及其构成的影响

Table 5 Effects of different nitrogen fertilizers on yield and its component of each variety in 2017

品种 Cultivar	基蘖肥:穗肥 B:P	处理时期 Treatment	每筒有效穗数 No. of panicles per pot	每穗粒数 No. of grains per panicle	结实率 Filled-grain percentage (%)	千粒重 1000-grain weight (g)	每筒实测产量 Yield per pot (g)
吉粳 88 Jigeng 88	8:2	(6, 11) [#]	19.2±1.6 c	146.7±5.7 bc	97.4±1.2 a	24.2±1.3 ab	66.4±5.2 abc
		(6, 13)	19.4±0.6 c	137.0±5.2 d	96.5±2.8 a	22.8±1.3 bc	58.4±2.4 bc
		(7, 11)	21.4±0.4 bc	159.0±19.3 bc	96.0±1.2 a	22.5±0.7 bc	72.8±3.2 abc
		(7, 13)	19.2±1.3 c	153.3±22.2 bc	94.2±4.1 a	22.4±0.5 bc	60.8±3.2 abc
		(8, 11)	22.4±0.7 ab	170.7±7.4 ab	96.5±0.9 a	22.6±0.9 bc	84.0±5.6 a
		(8, 13)	21.8±0.8 b	166.0±28.4 ab	94.4±2.7 a	21.6±0.6 c	74.4±3.8 abc
	6:4	(6, 11)	20.8±0.8 bc	141.7±3.1 bc	98.4±0.7 a	23.1±0.4 bc	67.2±3.6 abc
		(6, 13)	17.4±0.6 c	137.3±7.5 cd	94.9±4.1 a	26.5±2.4 a	59.2±1.2 abc
		(7, 11)	19.2±1.6 c	146.7±5.7 bc	97.4±1.2 a	24.2±1.3 ab	66.4±5.2 abc
		(7, 13)	19.2±1.3 c	164.0±9.2 ab	95.4±2.8 a	23.4±0.6 abc	70.4±4.8 abc
		(8, 11)	24.0±1.1 ab	175.7±39.7 ab	95.9±1.5 a	21.5±0.3 c	84.8±6.4 a
		(8, 13)	21.8±0.8 b	161.3±15.4 bc	96.8±1.1 a	21.6±0.6 c	72.8±1.2 abc
	N0	(0, 0)	8.6±0.4 d	137.3±17.3 cd	98.6±1.6 a	23.3±0.2 abc	26.4±1.2 d
沈农 265 Shennong 265	8:2	(7, 12)	19.2±2.1 abcd	152.5±33.4 ab	95.2±0.8 ab	25.1±1.1 ab	72.8±8.0 bc
		(7, 14)	17.6±0.7 bcd	147.2±23.0 bc	94.1±1.3 b	24.8±0.8 abc	60.8±3.6 d
		(8, 12)	21.8±1.1 abc	140.8±10.7 bc	97.4±0.9 a	24.7±0.5 abc	74.4±5.6 bc
		(8, 14)	17.0±1.7 cd	147.7±6.7 bc	95.2±1.2 ab	25.6±0.7 a	61.6±3.4 d
		(9, 12)	23.4±1.7 a	146.6±10.9 bc	93.3±2.3 b	24.3±0.6 bc	79.2±4.6 ab
		(9, 14)	23.0±2.1 ab	133.2±7.5 cd	94.1±2.4 b	23.7±0.9 c	68.0±3.4 cd
	6:4	(7, 12)	21.8±1.1 abc	156.5±23.8 ab	93.7±1.3 b	23.7±1.0 c	76.8±4.2 b
		(7, 14)	19.8±1.1 abcd	151.0±21.5 ab	94.6±1.3 b	24.9±0.5 abc	71.2±4.2 cd

(续表 5)

品种 Cultivar	基肥:穗肥 B:P	处理时期 Treatment	每筒有效穗数 No. of panicles per pot	每穗粒数 No. of grains per panicle	结实率 Filled-grain percentage (%)	千粒重 1000-grain weight (g)	每筒实测产量 Yield per pot (g)
沈农 265 Shennong 265		(8, 12)	20.2±0.9 abcd	160.7±3.8 a	94.8±2.4 b	24.9±1.1 abc	76.8±3.6 b
		(8, 14)	23.0±0.4 ab	146.8±24.3 bc	93.9±3.0 b	22.4±1.0 d	71.2±4.0 cd
		(9, 12)	23.4±2.2 a	163.7±11.7 a	93.0±1.9 b	22.5±1.4 d	81.6±5.8 a
		(9, 14)	19.8±2.3 abcd	149.7±14.0 bc	94.8±1.9 b	24.3±0.7 bc	68.8±5.4 cd
	N0	(0, 0)	12.6±1.7 d	117.5±11.9 d	93.9±2.1 b	24.5±0.7 abc	34.4±2.8 e
沈农 1401 Shennong 1401	8:2	(8, 13)	17.0±0.1 bcd	155.5±12.1 ab	65.5±1.7 ab	25.0±1.0 bc	56.0±2.4 bc
		(8, 15)	13.4±0.5 d	148.6±10.1 abc	66.9±2.6 ab	25.6±1.0 ab	48.0±4.0 de
		(9, 13)	15.0±0.6 cd	157.5±11.7 ab	74.6±4.9 ab	27.0±0.9 a	61.6±4.2 b
		(9, 15)	14.4±0.4 cd	124.2±11.8 bc	65.0±3.3 ab	26.8±1.6 a	41.6±3.6 e
		(10, 13)	20.8±0.8 ab	156.5±9.5 ab	80.5±5.6 a	24.3±0.8 bc	73.6±4.4 a
		(10, 15)	17.0±0.4 bcd	133.5±10.1 bc	73.2±6.3 ab	26.5±1.0 ab	57.6±7.2 bc
	6:4	(8, 13)	18.2±0.5 abc	163.8±12.0 ab	61.9±4.3 b	25.0±0.5 bc	60.8±4.0 b
		(8, 15)	17.0±0.1 bcd	154.7±14.2 abc	69.1±4.3 ab	25.6±0.9 bc	53.6±4.4 c
		(9, 13)	19.8±0.4 ab	156.3±9.2 ab	67.2±3.1 ab	24.0±1.4 bc	50.4±2.6 cd
		(9, 15)	16.6±0.1 bcd	150.8±12.2 abc	66.5±4.5 ab	26.0±1.0 ab	43.2±3.2 e
		(10, 13)	22.4±0.8 a	164.3±10.6 ab	68.6±1.7 ab	24.4±0.9 bc	75.2±4.1 a
		(10, 15)	17.6±0.8 bcd	152.7±14.6 abc	62.9±4.9 b	25.5±1.4 bc	55.2±3.6 bc
	N0	(0, 0)	9.0±0.5 e	118.8±13.4 c	70.3±8.8 ab	27.2±1.4 a	23.2±1.8 f

穗肥于 6、7、8、9 叶分别施入, 穗肥于 11、12、13、14、15 叶分别施入。[#] (6, 11) 组合表示于第 6 叶完全抽出时施入穗肥, 于第 11 叶完全抽出时施入穗肥; 其他依此类推。B:P 为基肥: 穗肥。相同品种, 同一列中不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。

Tillering fertilizer was applied when the 6, 7, 8, 9 leaves extracted, panicle fertilizer was applied when the 11, 12, 13, 14, 15 leaves extracted.

[#] (6, 11) means that the tillering fertilizer was applied when the sixth leaf was fully extracted, and the panicle fertilizer was applied when the eleventh leaf was completely extracted; the rest may be deduced by analogy. B:P means basal tillering fertilizer: panicle fertilizer. Values within a column followed by different letters are significantly different at $P < 0.05$ in the same cultivar.

2.5 氮素积累量与氮肥利用率

由表 6 和表 7 可知, 不同氮肥运筹下, 相同(叶龄模式)施肥处理的氮肥积累量及各氮肥利用率表现为 6 4 高于 8 2; 同一氮肥运筹下, 处理吉梗 88-6 4 (8, 11)、沈农 265-6 4 (9, 12)、沈农 1401-6

4 (10, 13)的氮素积累总量以及各氮素利用率均显著高于同品种其他处理, 2 年趋势基本一致。在相同穗肥施用叶龄下, 3 个水稻品种分别在倒 4 叶穗肥处理时, 植株的氮素积累总量、吸收利用率、农学利用率和偏生产力均明显高于倒 2 叶穗肥处理。

表 6 2016 年不同氮肥运筹下各处理氮素利用率

Table 6 Effects of different nitrogen fertilizers on nitrogen use efficiency in 2016

品种 Cultivar	基肥:穗肥 B:P	处理时期 Treatment	每筒氮积累总量 N total uptake (g pot ⁻¹)	吸收利用率 Recovery efficiency (%)	农学利用率 Agronomic efficiency (kg kg ⁻¹ N)	偏生产力 Partial factor productivity (kg kg ⁻¹ N)
吉梗 88 Jigeng 88	8:2	(6, 11) [#]	1.22±0.05 cde	32.8±2.3 cde	20.1±0.5 b	31.5±0.8 bcd
		(6, 13)	1.15±0.12 de	28.8±7.1 de	17.6±0.3 b	29.4±0.6 bcd
		(7, 11)	1.28±0.11 bcd	36.6±7.6 bcd	22.1±1.8 b	33.4±3.3 abcd
		(7, 13)	1.21±0.02 cde	32.4±1.3 cde	17.6±2.1 b	26.9±1.9 cd

(续表 6)

品种 Cultivar	基蘖肥:穗肥 B:P	处理时期 Treatment	每筒氮积累总量 N total uptake (g pot ⁻¹)	吸收利用率 Recovery efficiency (%)	农学利用率 Agronomic efficiency (kg kg ⁻¹ N)	偏生产力 Partial factor productivity (kg kg ⁻¹ N)
吉粳 88 Jigeng 88	6:4	(8, 11)	1.37±0.10 ab	42.6±7.3 ab	26.7±3.4 ab	37.2±11.9 ab
		(8, 13)	12.30±0.01 cd	33.7±0.8 cde	22.6±2.5 b	34.0±4.6 abc
		(6, 11)	1.27±0.04 bcd	36.2±3.8 bcd	23.6±0.3 ab	34.8±0.3 abc
		(6, 13)	1.10±0.01 e	25.5±1.1 e	18.6±0.3 b	30.1±0.4 bcd
		(7, 11)	1.42±0.14 ab	45.5±9.9 ab	25.2±2.5 b	35.8±4.3 abc
		(7, 13)	1.31±0.08 abc	38.7±5.6 abc	17.6±1.8 b	28.8±2.8 bcd
		(8, 11)	1.43±0.02 a	45.8±1.5 a	32.2±1.0 a	42.2±1.9 a
		(8, 13)	1.16±0.06 de	29.2±4.6 de	24.1±0.8 ab	35.1±1.3 abc
	N0	(0, 0)	0.70±0.02 f	—	—	—
沈农 265 Shennong 265	8:2	(7, 12)	1.15±0.00 d	28.1±0.9 d	19.1±0.8 ef	36.6±2.8 d
		(7, 14)	1.07±0.01 e	23.2±1.6 e	17.6±0.3 f	34.8±1.9 c
		(8, 12)	1.16±0.01 d	28.9±2.3 d	21.1±1.0 def	39.4±5.9 c
		(8, 14)	1.13±0.03 d	27.3±0.5 d	20.1±1.5 ef	38.3±3.7 c
		(9, 12)	1.36±0.01 b	41.4±1.3 ab	27.7±0.8 b	43.5±3.1 bc
		(9, 14)	1.05±0.02 e	21.9±1.4 e	21.6±0.8 def	39.2±5.2 bc
	6:4	(7, 12)	1.22±0.02 c	32.9±2.1 c	21.6±2.0 de	39.8±6.7 bc
		(7, 14)	1.06±0.02 e	22.7±0.5 e	20.1±1.0 ef	35.1±1.5 bc
		(8, 12)	1.35±0.02 b	40.7±3.9 b	25.7±1.5 bc	40.8±1.9 bc
		(8, 14)	1.16±0.01 d	28.9±1.6 d	23.1±1.5 cde	39.0±2.8 bc
		(9, 12)	1.42±0.03 a	45.3±3.7 a	31.2±0.8 a	46.5±4.2 abc
		(9, 14)	1.17±0.06 d	29.5±2.8 d	24.6±1.5 bcd	38.9±4.8 ab
	N0	(0, 0)	0.70±0.02 f	—	—	—
沈农 1401 Shennong 1401	8:2	(8, 13)	1.31±0.09 bcde	36.4±6.2 bcde	28.7±2.8 bcd	36.8±4.9 bcd
		(8, 15)	1.17±0.04 ef	27.5±3.3 e	24.1±2.3 de	33.0±4.1 de
		(9, 13)	1.43±0.07 ab	43.9±5.1 b	24.1±1.8 de	32.7±3.1 de
		(9, 15)	1.21±0.06 ef	29.7±4.2 de	21.6±1.5 e	30.5±2.6 e
		(10, 13)	1.42±0.07 ab	43.2±4.9 b	30.2±2.3 abc	38.4±4.1 abc
		(10, 15)	1.24±0.07 cdef	31.9±5.2 cde	23.1±2.0 de	32.2±3.4 de
	6:4	(8, 13)	1.39±0.16 abc	41.2±10.6 bc	32.2±1.5 ab	41.2±1.0 ab
		(8, 15)	1.23±0.02 def	31.1±2.3 cde	26.2±0.5 cde	34.5±1.1 cde
		(9, 13)	1.44±0.12 ab	44.3±8.4 ab	27.2±0.8 bcd	35.2±1.2 cde
		(9, 15)	1.16±0.05 f	26.6±3.6 e	24.6±1.3 de	33.3±2.2 de
		(10, 13)	1.47±0.11 a	46.2±7.2 a	34.7±1.0 a	43.2±1.4 a
		(10, 15)	1.36±0.06 abcd	39.4±4.6 bcd	24.1±1.0 de	32.9±1.8 de
	N0	(0, 0)	0.73±0.04 g	—	—	—

蘖肥于 6、7、8、9 叶分别施入, 穗肥于 11、12、13、14、15 叶分别施入。[#] (6, 11) 组合表示于第 6 叶完全抽出时施入蘖肥, 于第 11 叶完全抽出时施入穗肥; 其他依此类推。B:P 为基蘖肥: 穗肥。相同品种, 同一列中不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。

Tillering fertilizer was applied when the 6, 7, 8, 9 leaves extracted, panicle fertilizer was applied when the 11, 12, 13, 14, 15 leaves extracted.

[#] (6, 11) means that the tillering fertilizer was applied when the sixth leaf was fully extracted, and the panicle fertilizer was applied when the eleventh leaf was completely extracted; the rest may be deduced by analogy. B:P means basal tillering fertilizer: panicle fertilizer. Values within a column followed by different letters are significantly different at $P < 0.05$ in the same cultivar.

表 7 2017 年不同氮肥运筹下各处理氮素利用率

Table 7 Effects of different nitrogen fertilizers on nitrogen use efficiency in 2017

品种 Cultivar	基肥:穗肥 B:P	处理时期 Treatment	每筒氮积累总量 N total uptake (g pot ⁻¹)	吸收利用率 Recovery efficiency (%)	农学利用率 Agronomic efficiency (kg kg ⁻¹ N)	偏生产力 Partial factor productivity (kg kg ⁻¹ N)
吉粳 88 Jigeng 88	8:2	(6, 11) [#]	1.10±0.07 de	21.8±0.7 bcd	25.2±3.3 abc	36.2±2.1 b
		(6, 13)	1.02±0.06 e	16.8±0.8 d	20.1±1.5 bc	36.0±2.4 b
		(7, 11)	1.28±0.03 bc	30.4±6.2 abc	29.2±2.0 abc	37.3±2.6 b
		(7, 13)	1.10±0.06 de	19.0±13.7 cd	21.6±2.0 abc	36.2±1.2 b
		(8, 11)	1.29±0.04 bc	30.7±6.6 abc	36.2±3.5 a	41.4±2.3 ab
		(8, 13)	1.26±0.05 c	28.9±7.4 abcd	30.2±2.4 abc	36.3±1.7 b
	6:4	(6, 11)	1.32±0.05 bc	35.3±0.8 a	25.7±2.3 abc	36.4±2.9 b
		(6, 13)	1.03±0.04 e	17.0±1.5 d	20.6±0.8 abc	37.4±2.3 b
		(7, 11)	1.33±0.03 abc	33.3±5.5 ab	25.2±3.3 abc	43.5±2.2 ab
		(7, 13)	1.15±0.07 d	22.1±13.5 bcd	27.7±3.0 abc	40.5±3.7 ab
		(8, 11)	1.42±0.03 a	38.7±1.8 a	36.7±4.0 a	47.2±1.4 a
		(8, 13)	1.37±0.05 ab	35.5±4.9 a	29.2±0.8 abc	42.3±2.6 ab
	N0	(0, 0)	0.76±0.06 f	—	—	—
沈农 265 Shennong 265	8:2	(7, 12)	1.21±0.05 d	28.3±2.7 d	24.1±5.0 bc	39.5±15.2 de
		(7, 14)	1.18±0.05 d	26.9±1.3 d	16.6±2.3 d	33.1±6.5 e
		(8, 12)	1.46±0.04 ab	44.1±2.3 ab	25.2±3.5 bc	41.4±4.3 cde
		(8, 14)	1.30±0.04 c	34.4±2.7 c	17.1±2.1 d	34.9±6.7 de
		(9, 12)	1.47±0.01 ab	45.0±1.6 ab	28.2±2.9 ab	47.8±5.5 ab
		(9, 14)	1.42±0.04 b	41.5±1.2 b	21.1±2.1 cd	38.4±7.3 de
	6:4	(7, 12)	1.43±0.03 ab	42.3±3.5 ab	26.7±2.6 b	42.5±5.2 bcd
		(7, 14)	1.22±0.01 d	29.0±1.6 d	23.1±2.6 cd	38.4±7.5 de
		(8, 12)	1.47±0.05 ab	44.7±4.1 ab	26.7±2.3 b	33.3±19.0 de
		(8, 14)	1.41±0.04 b	41.0±3.0 b	23.1±2.5 cd	39.0±5.4 de
		(9, 12)	1.49±0.04 a	46.3±2.9 a	29.7±3.6 a	43.8±11.5 bc
		(9, 14)	1.48±0.00 ab	45.3±2.2 ab	21.6±3.4 cd	38.2±9.9 de
	N0	(0, 0)	0.76±0.04 e	—	—	—
沈农 1401 Shennong 1401	8:2	(8, 13)	1.15±0.14 efg	25.2±8.9 efg	20.6±1.5 bc	27.9±5.8 abcd
		(8, 15)	1.00±0.08 g	15.6±5.0 h	15.6±2.5 de	25.8±2.0 cd
		(9, 13)	1.16±0.09 ef	25.6±5.5 ef	24.1±2.6 b	41.7±18.1 ab
		(9, 15)	1.02±0.10 fg	16.5±6.4 g	11.6±2.3 e	30.8±3.9 abcd
		(10, 13)	1.49±0.04 ab	46.3±2.4 ab	31.7±2.8 a	40.9±5.8 ab
		(10, 15)	1.20±0.09 de	28.3±5.8 de	21.6±4.5 bc	37.5±11.2 abc
	6:4	(8, 13)	1.39±0.08 abc	40.3±4.9 abc	23.6±2.5 b	34.4±13.0 abc
		(8, 15)	1.30±0.13 cde	34.4±8.2 cde	19.1±2.8 c	27.5±0.6 bcd
		(9, 13)	1.51±0.06 a	47.6±3.6 a	17.1±1.6 cd	41.0±9.8 a
		(9, 15)	1.28±0.06 cde	33.1±3.8 cde	12.6±2.0 e	32.0±8.1 abcd

(续表 7)

品种 Cultivar	基蘖肥:穗肥 B:P	处理时期 Treatment	每筒氮积累总量 N total uptake (g pot ⁻¹)	吸收利用率 Recovery efficiency (%)	农学利用率 Agronomic efficiency (kg kg ⁻¹ N)	偏生产力 Partial factor productivity (kg kg ⁻¹ N)
沈农 1401		(10, 13)	1.53±0.03 a	48.8±1.6 a	32.7±2.6 a	41.9±8.4 a
Shennong 1401		(10, 15)	1.35±0.12 bcd	37.5±7.3 bcd	20.1±2.3 bc	28.2±4.6 abcd
	N0	(0, 0)	0.77±0.02 h	—	—	—

蘖肥于 6、7、8、9 叶分别施入，穗肥于 11、12、13、14、15 叶分别施入。[#] (6, 11)组合表示于第 6 叶完全抽出时施入蘖肥，于第 11 叶完全抽出时施入穗肥；其他依此类推。B:P 为基蘖肥：穗肥。相同品种，同一列中不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。
Tillering fertilizer was applied when the 6, 7, 8, 9 leaves extracted, panicle fertilizer was applied when the 11, 12, 13, 14, 15 leaves extracted.
[#] (6, 11) means that the tillering fertilizer was applied when the sixth leaf was fully extracted, and the panicle fertilizer was applied when the eleventh leaf was completely extracted; the rest may be deduced by analogy. B:P means basal tillering fertilizer: panicle fertilizer. Values within a column followed by different letters are significantly different at $P < 0.05$ in the same cultivar.

3 讨论

3.1 不同叶龄蘖、穗氮肥组合对粳稻穗数、颖花数和产量的影响

单位面积颖花量是穗数和每穗粒数的乘积，单位面积颖花数越多越有利于产量的提高^[18]，而每穗颖花数的多少决定于分化颖花数和退化颖花数^[19]。杨弘远等^[20]研究表明，在幼穗发育的前期就应促使颖花形成，降低颖花退化，确保每穗颖花数的增多。张洪程等^[21]、胡群等^[22]、严田蓉等^[23]研究认为，高产水稻在穗期吸氮较多，应适当降低前期基蘖肥用量，增加后期穗粒肥用量，使基蘖肥与穗粒肥配比达 6：4，以优化整个水稻生育期的群体质量，同时能提高每穗粒数、结实率和千粒重。本文研究结果表明，不同叶龄蘖肥、穗肥组合处理下，基蘖肥与穗肥比例为 6：4 时，各处理分化颖花数和实际颖花数均显著高于 8：2，但退化颖花数也相应增加，这可能与总颖花量大幅提高后源、库协调关系发生变化、源相对不足有关，也可能与自身的环境适应能力有关。

合理氮肥运筹是影响分蘖成穗率和产量最重要的因素，穗肥能增加每穗颖花数，提高结实率和千粒重，其中穗肥最佳施用叶龄期为倒 4 叶和倒 2 叶两个时期^[24-25]。丁艳锋等^[26]在研究不同穗肥施用时期时发现，在较早穗肥施用时，较大穗型水稻品种的每穗粒数明显增加，从而产量也明显增加，而小穗型品种表现为结实率明显提高导致产量增加。本试验结果显示，3 个大穗型粳稻品种吉粳 88、沈农 265 和沈农 1401 均在倒 4 叶施入穗肥时明显比倒 2 叶施入穗肥时的分化颖花数和实际颖花数高，且产量最高，这与超高产水稻应是沿着“足额的穗数→

较多的总颖花数→巨大的库容量→超高产”这一主线推进^[27]相一致。

水稻蘖肥是决定足额穗数的前提保证。在美国加利福尼亚州的灌溉水稻生产中，蘖肥施用时期通常在最大分蘖期^[28]。在我国南方广东等地区采用的水稻“三控”施肥技术中，蘖肥施用时期在分蘖中期^[29]。黄大山等^[30]在研究不同时期施用分蘖肥时，发现与常规移栽后 5~7 d 施入蘖肥处理相比，4 种早稻或晚稻品种均在移栽后 14 d 左右施入蘖肥成穗率显著提高。与传统栽培不同的是，本试验采取水稻分蘖期不进行控蘖处理，并且在分蘖高峰期即分蘖进入“高台期”开始追施蘖肥，使有效分蘖临界期前形成的中小蘖能保蘖成穗，而在其后新增的小蘖能促进蘖增穗，总体成穗率相应提高。本研究蘖、穗叶龄氮肥组合结果表明，在基蘖肥与穗肥运筹比例 6：4 基础上，蘖肥适当后移(保蘖肥)，避免了因蘖肥过早施入或施入过量造成前期浪费、后期脱肥，有效分蘖临界期已有茎蘖营养不足而成穗小，新增小蘖营养不足而难成穗现象的发生；穗肥适当前移(促花肥)，避免了因穗肥过晚施入造成颖花分化不足，库容量降低。蘖、穗叶龄合理组合施氮符合水稻营养生长和幼穗发育期间对氮素的吸收利用规律，能够起到增加有效穗数和提高库容量的作用，从而更有利于增产，这与本课题组前期研究结果一致^[31]。此外，氮肥施用量对水稻产量及农艺性状的影响因品种不同而有所差异，本试验仅在中量供氮水平下，研究了 3 个不同叶片数粳稻直立或半直立穗型品种的叶龄蘖、穗氮肥组合对粳稻茎蘖动态、成穗率、颖花分化及产量构成因素的影响，而关于不同生育类型粳稻品种在不同供氮水平及田间配置下茎蘖成穗、颖花分化及产量构成的变化规律，是

否符合本研究结果, 还需进一步验证。

3.2 不同叶龄蘖、穗氮肥组合对粳稻氮素利用效率的影响

我国衡量氮肥利用率的一个指标主要是氮肥吸收利用率。杨海生等^[32]认为依叶龄追施氮肥能稳产高产, 提高氮效率。林忠成等^[33]和许轲等^[34]在研究双季粳稻时, 发现双季稻区的基蘖肥与穗肥为 6 : 4 时水稻氮素利用率显著高于 8 : 2。Wang 等^[35]认为降低基蘖肥比例, 适当推迟蘖肥的追肥时间, 可提高氮肥利用率。张洪程等^[12]认为在水稻倒 4、倒 3 叶期施用穗肥, 水稻植株氮素积累量和氮素利用率最高, 利于高产稳产。刘立军等^[36]按照实地氮肥管理方式对汕优 63 施肥, 发现在移栽后 15~19 d 施蘖肥, 水稻的氮肥利用率显著提高。本研究也认为适当推迟蘖肥施用时期可提高氮肥利用率, 粳稻进入最高分蘖期前后, 即吉粳 88 在 8 叶期(叶龄指数 57.1%), 沈农 265 在 9 叶期(叶龄指数 60.0%), 沈农 1401 在 10 叶期(叶龄指数 62.5%)时施用蘖肥, 其保蘖成穗、促蘖增穗效果要优于分蘖快速增长始期和分蘖快速增长期, 氮肥利用效率显著提高。而在相同基蘖肥比例下, 不同品种诸处理穗肥均以穗分化始期(倒四叶)促花效果最佳, 即吉粳 88 于 11 叶(叶龄指数 78.6%), 沈农 265 于 12 叶(叶龄指数 80.0%), 沈农 1401 于 13 叶(叶龄指数 81.3%)施用穗肥时, 氮素积累量、农学利用率以及偏生产力等较高。

本研究采取田间简栽方式, 既有小简试验的精确性、可控性, 又有大田试验的开放性、普适性, 各简内部上下通透而周边封闭, 简间集群而形成群体生长环境, 因而在施肥处理上可以精确控制, 而土壤和生态环境又可以最大限度地与田间小区接近, 这就在一定程度上大大提升了试验结果的精准性和可靠性。但尽管如此, 由于试验结果(尤其是产量结果)是以单简或单穴来统计的, 终非小区群体数据, 而且在试验样本数量、代表性、田间生长状态等方面, 毕竟与大田小区试验不同, 因此, 相关试验结果、结论等还需在群体条件下进一步印证。此外, 本试验年际间的气候差异明显, 影响了个别试验结果的年际间稳定性, 如 2016 年水稻灌浆期温度较高, 影响了水稻籽粒的灌浆结实及氮素利用率, 这也是需要注意的。

综上所述, 在水稻氮肥施用上, 应确保适宜的施氮量, 优化氮肥施用比例和施用时期, 协调营养生长与生殖生长, 促进源、库、流三者高位平

衡, 以获得最佳产量构成因素, 进而实现增产增效双重目标。

4 结论

基蘖肥与穗肥运筹比例 6 : 4 显著优于 8 : 2, 且高产最适宜的叶龄组合为吉粳 88-6 : 4 (8, 11)、沈农 265-6 : 4 (9, 12)、沈农 1401-6 : 4 (10, 13), 即提高穗肥比例、蘖肥施用时期后移(叶龄指数在 60.0%左右), 穗肥施用时期前移(叶龄指数在 80.0%左右), 能显著促进有效分蘖和分化颖花数的提高, 起到保蘖促花效果, 显著提高氮素积累量、氮素吸收利用率、农学利用率和偏生产力, 最终达到高产高效的目的。

References

- [1] 孙永健, 孙园园, 蒋明金, 李应洪, 严奉君, 徐徽, 王海月, 马均. 施肥水平对不同氮效率水稻氮素利用特征及产量的影响. 中国农业科学, 2016, 49: 4745-4756.
Sun Y J, Sun Y Y, Jiang M J, Li Y H, Yan F J, Xu H, Wang H Y, Ma J. Effects of fertilizer levels on nitrogen utilization characteristics and yield in rice cultivars with different nitrogen use efficiencies. *Sci Agric Sin*, 2016, 49: 4745-4756 (in Chinese with English abstract).
- [2] Zhong X H, Peng S B, Buresh R J, Huang J L, Yang J C, Zou Y B, Zhang X H, Wang G H, Zhang F S. Strategies for overcoming low agronomic nitrogen use efficiency in irrigated rice systems in China. *Field Crops Res*, 2006, 96: 37-47.
- [3] 范立慧, 徐珊珊, 侯朋福, 薛利红, 李刚华, 丁艳锋, 杨林章. 不同地力下基蘖肥运筹比例对水稻产量及氮肥吸收利用的影响. 中国农业科学, 2016, 49: 1872-1884.
Fan L H, Xu S S, Hou P F, Xue L H, Li G H, Ding Y F, Yang L Z. Effect of different ratios of basal to tiller nitrogen on rice yield and nitrogen utilization under different soil fertility. *Sci Agric Sin*, 2016, 49: 1872-1884 (in Chinese with English abstract).
- [4] Peng S B, Huang J L, Zhong X H, Yang J C, Wang G H, Zou Y B, Zhang F S, Zhu Q S, Buresh R, Witt C. Challenge and opportunity in improving fertilizer-nitrogen use efficiency of irrigated rice in China. *J Integr Agric*, 2002, 1: 776-785.
- [5] 罗文姬, 江立庚, 覃丽玲, 梁天锋, 罗必敬. 氮肥基追比对机插稻产量和氮肥利用效率的影响. 作物杂志, 2016, 32(5): 119-123.
Luo W J, Jiang L G, Qin L L, Liang T F, Luo B J. Nitrogen fertilization ratio on grain yield and nitrogen use efficiency of mechanical transplanting rice. *Crops*, 2006, 32(5): 119-123 (in Chinese with English abstract).
- [6] 白志刚, 张均华, 黄洁, 朱练峰, 曹小闯, 朱春权, 钟楚, 金千瑜. 氮肥运筹对水稻氮代谢及稻田土壤氮素迁移转化的影响. 生态学杂志, 2018, 37: 3440-3448.
Bai Z G, Zhang J H, Huang J, Zhu L F, Cao X C, Zhu C Q, Zhong C, Jin Q Y. Effects of nitrogen regime on nitrogen metabolism of rice and nitrogen transformation and translocation in paddy soils. *Chin J Ecol*, 2018, 37: 3440-3448 (in Chinese with English abstract).

- [7] 霍中洋, 魏海燕, 张洪程, 龚振恺, 戴其根, 许轲. 穗肥运筹对不同秧龄机插超级稻宁粳 1 号产量及群体质量的影响. 作物学报, 2012, 38: 1460–1470.
Huo Z Y, Wei H Y, Zhang H C, Gong Z K, Dai Q G, Xu K. Effect of panicle nitrogen fertilizer management on yield and population quality in mechanical transplanted super rice Ningjing 1 with different seedling ages. *Acta Agron Sin*, 2012, 38: 1460–1470 (in Chinese with English abstract).
- [8] 丁艳锋, 刘胜环, 王绍华, 王强盛, 黄丕生, 凌启鸿. 氮素基、穗肥用量对水稻氮素吸收与利用的影响. 作物学报, 2004, 30(8): 739–744.
Ding Y F, Liu S H, Wang S H, Wang Q S, Huang P S, Ling Q H. Effects of amount of basic and tillering nitrogen applied on absorption and utilization of nitrogen in rice. *Acta Agron Sin*, 2004, 30: 739–744 (in Chinese with English abstract).
- [9] 王维金, 徐竹生, 鲍隆清. 重施穗肥对杂交水稻的产量和氮素营养的影响. 华中农业大学学报, 1993, 12(3): 209–214.
Wang W J, Xu Z S, Bao L Q. Effects of heavy spike fertilizer on yield and nitrogen in middle-season hybrid rice. *J Huazhong Agric Univ*, 1993, 12(3): 209–214 (in Chinese with English abstract).
- [10] 薛亚光, 陈婷婷, 杨成, 王志琴, 刘立军, 杨建昌. 中粳稻不同栽培模式对产量及其生理特性的影响. 作物学报, 2010, 36: 466–476.
Xue Y G, Chen T T, Cheng Y, Wang Z Q, Liu L J, Yang J C. Effects of different cultivation patterns on the yield and physiological characteristics in mid-season japonica rice. *Acta Agron Sin*, 2010, 36: 466–476 (in Chinese with English abstract).
- [11] 凌启鸿, 张洪程, 戴其根, 丁艳锋, 凌励, 苏祖芳, 徐茂, 阙金华, 王绍华. 水稻精确定量施氮研究. 中国农业科学, 2005, 38: 2457–2467.
Ling Q H, Zhang H C, Dai Q G, Ding Y F, Ling L, Su Z F, Xu M, Que J H, Wang S H. Study on precise and quantitative N application in rice. *Sci Agric Sin*, 2005, 38: 2457–2467 (in Chinese with English abstract).
- [12] 张洪程, 吴桂成, 戴其根, 霍忠洋, 许轲, 高辉, 魏海燕, 吕修涛, 万靛军, 黄银忠. 水稻氮肥精确后移及其机制. 作物学报, 2011, 37: 1837–1851.
Zhang H C, Wu G C, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Gao H, Wei H Y, Lyu X T, Wan L J, Huang Y Z. Precise postponing nitrogen application and its mechanism in rice. *Acta Agron Sin*, 2011, 37: 1837–1851 (in Chinese with English abstract).
- [13] 凌启鸿, 张洪程, 苏祖芳, 凌励. 稻作新理论: 水稻叶龄模式. 北京: 科学出版社, 1994.
Ling Q H, Zhang H C, Su Z F, Ling L. New Theory of Rice Cultivation: the Leaf-age-model of Rice. Beijing: Science Press, 1994 (in Chinese).
- [14] 凌启鸿, 张洪程, 丁艳锋, 戴其根, 凌励, 王绍华, 徐茂. 水稻高产精确定量栽培. 北方水稻, 2007, 37(2): 1–9.
Ling Q H, Zhang H C, Ding Y F, Dai Q G, Ling L, Wang S H, Xu M. Precise and quantitative cultivation for high yield in rice. *North Rice*, 2007, 37(2): 1–9 (in Chinese with English abstract).
- [15] 张洪程, 吴桂成, 吴文革, 戴其根, 霍忠洋, 许轲, 高辉, 魏海燕, 黄幸福, 龚金龙. 水稻“精苗稳前、控氮优中、大穗强后”超高产定量栽培模式. 中国农业科学, 2010, 43: 2645–2660.
Zhang H C, Wu G C, Wu W G, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Gao H, Wei H Y, Huang X F, Gong J L. The SOI model of quantitative cultivation of super-high yielding rice. *Sci Agric Sin*, 2010, 43: 2645–2660 (in Chinese with English abstract).
- [16] 万靛军, 张洪程, 霍中洋, 林忠成, 戴其根, 许轲, 张军. 氮肥运筹对超级杂交粳稻产量、品质及氮素利用率的影响. 作物学报, 2007, 33: 175–182.
Wang L J, Zhang H C, Huo Z Y, Lin Z C, Dai Q G, Xu K, Zhang J. Effects of nitrogen application regimes on yield, quality, and nitrogen use efficiency of super japonica hybrid rice. *Acta Agron Sin*, 2007, 33: 175–182 (in Chinese with English abstract).
- [17] 柳新伟, 孟亚利, 周治国, 曹卫星. 水稻颖花分化与退化的动态特征. 作物学报, 2005, 31: 451–455.
Liu X W, Meng Y L, Zhou Z G, Cao W X. Dynamic characteristics of floret differentiation and degeneration in rice. *Acta Agron Sin*, 2005, 31: 451–455 (in Chinese with English abstract).
- [18] Kim H Y, Lieferring M, Miura S, Kobayashi K, Okada M. Growth and nitrogen uptake of CO₂-enriched rice under field conditions. *New Phytol*, 2001, 150: 223–229.
- [19] 杨洪建, 杨连新, 刘红江, 董桂春, 颜士敏, 朱建国, 王余龙. FACE 对武香粳 14 根系活性影响的研究. 作物学报, 2006, 32(1): 118–124.
Yang H J, Yang L X, Huang J Y, Liu H J, Dong G C, Yan S M, Zhu J G, Wang Y L. Effect of free-air CO₂ enrichment on spikelet differentiation and degeneration of japonica rice (*Oryza sativa* L.) cultivar Wuxiangjing 14. *Acta Agron Sin*, 2006, 32: 118–124 (in Chinese with English abstract).
- [20] 杨弘远. 水稻生殖生物学. 杭州: 浙江大学出版社, 2005.
Yang H Y. Rice Reproductive Biological. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2005 (in Chinese).
- [21] 张洪程, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 高辉, 魏海燕, 桂玉清, 吴文革, 吴桂成, 端木银熙, 孙菊英, 赵品恒, 徐军, 李杰, 王艳, 龚金龙, 姚义, 沙安勤, 周有炎, 李德剑, 肖跃成, 王宝金, 吴爱国, 钱宗华, 淤永杰, 李华. 水稻超高产栽培研究与探讨. 中国稻米, 2012, 18(1): 1–14.
Zhang H C, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Gao H, Wei H Y, Gui Y Q, Wu W G, Wu G C, Duan-Mu Y X, Sun J Y, Zhao P H, Xu J, Li J, Wang Y, Gong J L, Yao Y, Sha A Q, Zhou Y Y, Li D J, Xiao Y C, Wang B J, Wu A G, Qian Z H, Yu Y J, Li H. Research and discussion on super high yielding cultivation of rice. *Chin Rice*, 2012, 18(1): 1–14 (in Chinese with English abstract).
- [22] 胡群, 夏敏, 张洪程, 曹利强, 郭保卫, 魏海燕, 陈厚存, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 林昌明, 韩宝富. 氮肥运筹对钵苗机插优质食味水稻产量及氮素吸收利用的影响. 作物学报, 2016, 42: 1666–1676.
Hu Q, Xia M, Zhang H C, Cao L Q, Guo B W, Wei H Y, Chen H C, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Lin C M, Han B F. Effect of nitrogen application regime on yield, nitrogen absorption and utilization of mechanical pot-seedling transplanting rice with good taste quality. *Acta Agron Sin*, 2016, 42: 1666–1676 (in Chinese with English abstract).
- [23] 严田蓉, 李旭毅, 李娜, 蒋明金, 杨志远, 何艳, 王春雨, 王海月, 马均. 氮肥运筹与栽植方式对杂交籼稻籽粒灌浆及产量的影响. 中国生态农业学报, 2017, 25: 1485–1494.
Yan T R, Li X Y, Li N, Jiang M J, Yang Z Y, He Y, Wang C Y, Wang H Y, Ma J. Effect of nitrogen management and cultivation method on grain-filling characteristics and grain yield of indica

- hybrid rice. *Chin J Eco-Agric*, 2017, 25: 1485–1494 (in Chinese with English abstract).
- [24] 李贵勇, 何清兰, 朱建宇, 王秋英, 叶进华, 夏琼梅, 龙瑞平, 朱海平, 邓安凤, 杨从党. 不同叶龄期穗肥对籼稻产量及氮肥利用效率的影响. *中国稻米*, 2017, 23(4): 147–150.
Li G Y, He Q L, Zhu J Y, Wang Q Y, Ye J H, Xia Q M, Long R P, Zhu H P, Deng A F, Yang C D. Effects of panicle fertilizers of different leaf ages on *japonica* rice yield and nitrogen use efficiency. *Chin Rice*, 2017, 23(4): 147–150 (in Chinese with English abstract).
- [25] Fan M S, Lu S H, Jiang R F, Liu X J, Zhang F S. Triangular transplanting pattern and split nitrogen fertilizer application increase rice yield and nitrogen fertilizer recovery. *Agron J*, 2009, 101: 1421–1425.
- [26] 丁艳锋, 赵长华, 王强盛. 穗肥施用时期对水稻氮素利用及产量的影响. *南京农业大学学报*, 2003, 26(4): 5–8.
Ding Y F, Zhao C H, Wang Q S. Effect of application stage of panicle fertilizer on rice grain yield and the utilization of nitrogen. *J Nanjing Agric Univ*, 2003, 26(4): 5–8 (in Chinese with English abstract).
- [27] 霍中洋. 长江中游地区双季早稻超高产形成特征及精确定量栽培关键技术研究. 扬州大学博士学位论文, 江苏扬州, 2010.
Huo Z Y. Study on Super-high Yield Formational Characteristics of Early Rice in the Double-cropping System in the Model Researches of the Yangtze River and Its Key Techniques of Precise and Quantitation Cultivation. PhD Dissertation of Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu, China, 2010 (in Chinese with English abstract).
- [28] Williams J F, Muttters R G, Greer C A, Horwath W R. Rice Nutrient Management in California. Richmond, California: Agriculture and Natural Resources, University of California Press, 2010.
- [29] Wang H Y, Hu R F, Chen X X, Zhong X H, Zheng Z T, Huang N R, Xue C L. Reduction in nitrogen fertilizer use results in increased rice yields and improved environmental protection. *Int J Agric Sustain*, 2017, 15: 681–692.
- [30] 黄大山, 陈忠平, 程飞虎, 周培建, 林志南, 吴放斌. 不同时期施用分蘖肥对水稻产量及其结构的影响. *江西农业学报*, 2014, 26(5): 29–32.
Huang D S, Chen Z P, Cheng F H, Zhou P J, Lin Z N, Wu F B. Effects of applying tillering fertilizer at different times on yield and yield components of rice. *Acta Agric Jiangxi*, 2014, 26(5): 29–32 (in Chinese with English abstract).
- [31] 史鸿儒, 张文忠, 解文孝, 杨庆, 张振宇, 韩亚东, 徐正进, 陈温福. 不同氮肥施用模式下北方粳型超级稻物质生产特性分析. *作物学报*, 2008, 34: 1985–1993.
Shi H R, Zhang W Z, Xie W X, Yang Q, Zhang Z Y, Han Q D, Xu Z J, Chen W F. Analysis of matter production characteristics under different nitrogen application patterns of *japonica* super rice in North China. *Acta Agron Sin*, 2008, 34: 1985–1993 (in Chinese with English abstract).
- [32] 杨海生, 张洪程, 杨连群, 张士永, 戴其根, 霍中洋. 依叶龄运筹氮肥对优质水稻产量与品质的影响. *中国农业大学学报*, 2002, 7(3): 19–26.
Yang H S, Zhang H C, Yang L Q, Zhang S Y, Dai Q G, Huo Z Y. Effects of nitrogen operations according to leaf-age on yield and quality in good-quality rice. *J Chin Agric Univ*, 2002, 7(3): 19–26 (in Chinese with English abstract).
- [33] 林忠成, 李士明, 吴福观, 张洪程, 戴其根, 叶世超, 郭宏文. 基肥与穗肥氮比例对双季稻产量和碳氮比的影响. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17: 269–275.
Lin Z C, Li T M, Wu F G, Zhang H C, Dai Q G, Ye S C, Guo H W. Effects of nitrogen application on yield and C/N of double-cropping rice. *J Plant Nutr Fert*, 2011, 17: 269–275 (in Chinese with English abstract).
- [34] 许轲, 张军, 张洪程, 花劲, 郭保卫, 霍中洋, 戴其根, 魏海燕, 高辉, 周培建, 程飞虎, 黄大山, 陈忠平, 陈国梁. 双季晚粳稻氮肥精确运筹研究. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20: 1063–1075.
Xu K, Zhang J, Zhang H C, Hua J, Guo B W, Huo Z Y, Dai Q G, Wei H Y, Gao H, Zhou P J, Cheng F H, Huang D S, Chen Z P, Chen G L. Nitrogen managements of late *japonica* rice in double-cropping rice area. *J Plant Nutr Fert*, 2014, 20: 1063–1075 (in Chinese with English abstract).
- [35] Wang G H, Dobermann A, Witt C, Sun Q Z, Fu R X. Performance of site-specific nutrient management for irrigated rice in Southeast China. *Agron J*, 2001, 93: 869–878.
- [36] 刘立军, 徐伟, 桑大志, 刘翠莲, 周家麟, 杨建昌. 实地氮肥管理提高水稻氮肥利用效率. *作物学报*, 2006, 32: 987–994.
Liu L J, Xu W, Sang D Z, Liu C L, Zhou J L, Yang J C. Site-specific nitrogen management increases fertilizer-nitrogen use efficiency in rice. *Acta Agron Sin*, 2006, 32: 987–994 (in Chinese with English abstract).