植物营养与肥料学报 2014,20(5):1051-1062
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer doi: 10.11674/zwyf.2014.0501

我国南方主推水稻品种氮效率筛选及评价

冯 洋[1], 陈海飞[1], 胡孝明[2], 周 卫[3], 徐芳森[1], 蔡红梅[1*]
(1 华中农业大学, 农业部长江中下游耕地保育重点实验室, 湖北武汉 430070;
2 黄冈师范学院化学与生命科学学院, 湖北黄冈 438000; 3 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘要:【目的】评价我国南方地区主推水稻品种氮效率,筛选氮高效和氮低效品种,并探索其高效和低效的原因及其生理机制。**【方法】**选用34份我国南方主推水稻品种,采用大田小区试验和盆栽试验,进行正常氮和低氮处理,利用产量法并结合产量构成因子、叶片SPAD值以及水稻地上部氮素累积量,筛选出氮高效和氮低效品种。**【结果】**1)在2011年大田试验中,34个品种正常氮处理产量大多高于低氮处理的产量。通过对氮效率的分析发现,徽两优6号、广两优35和天优华占3个品种具有较高的氮效率,分别达到1.11、1.02和1.00,而秀水134、富稻2号和五丰优7025的氮效率较低,分别为0.55、0.61和0.61。通过对各品种的产量构成因子分析发现,正常氮处理下,各品种产量构成因子大多高于低氮处理。在低氮条件下,氮高效品种的穗数和穗粒数以及千粒重均较高。通过筛选发现徽两优6号、广两优35和天优华占3个水稻品种表现为氮高效;秀水134、富稻2号和五丰优7025 3个品种表现为氮低效。2)通过2012年大田和盆栽试验的复筛,发现大田与盆栽试验结果基本一致。实际产量和理论产量均表现出徽两优6号和广两优35的产量和氮效率较高,秀水134、五丰优7025和富稻2号的氮效率较低。通过对各品种的产量构成因子分析发现,2012年大田试验中,在正常氮条件下,高效品种广两优35的穗数、千粒重均显著高于低效品种。在对SPAD值的分析中发现,2012年大田试验中,低氮处理下氮高效品种在同一生育时期其SPAD值普遍高于或者显著高于低效品种。2012年盆栽试验中,正常氮处理下,高效品种叶片SPAD值略高于低效品种。在对水稻地上部氮累积量的研究中发现,在正常氮处理下,不同生育期高效品种与低效品种间普遍没有显著性差异,仅低效品种秀水134显著低于其它几个品种;而在低氮处理下,在分蘖期高效品种与低效品种并无显著性差异,甚至高效品种徽两优6号氮素累积量还要低于低效品种;但在灌浆期和成熟期,两个高效品种的氮素累积量高于或显著高于低效品种。**【结论】**确定广两优35为高效品种,秀水134为低效品种。氮高效品种在低氮胁迫下,能够获得较高的穗数和穗粒数,从而获得较高产量。特别在生育后期,高效品种地上部能够积累更多的氮素,从而可促进光合作用,提高碳、氮同化效率,并获得较高产量。

关键词: 水稻; 产量; 氮效率; 品种筛选
中图分类号: S511.038 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2014)05-1051-12

Nitrogen efficiency screening of rice cultivars popularized in South China

FENG Yang[1], CHEN Hai-fei[1], HU Xiao-ming[2], ZHOU Wei[3], XU Fang-sen[1], CAI Hong-mei[1*]
(*1 Huazhong Agricultural University/Key Laboratory of Cultivated Land Conservation, Ministry of Agriculture, Wuhan, Hubei 430070, China; 2 College of Chemistry and Life Science, Huanggang Normal University, Huanggang, Hubei 438000, China; 3 Institute of Agricultural Resource and Regional Planning, CAAS, Beijing 10081, China*)

Abstract:【Objectives】The objective of this study is to screen and evaluate the nitrogen efficiency of rice cultivars widely grown in South China, and investigate the different phsiology mechanisms between the high and low nitrogen efficient cultivars.**【Methods】**Thirty four rice cultivars were tested in field trials and pot experiments under both normal and low nitrogen supplies. The high and low nitrogen efficient cultivars were identified by analyzing parameters related to yield and its components, the leaf SPAD value and the aboveground nitrogen accumulation rate of rice.**【Results】**1) Field trials results in 2011 showed that the yields under normal nitrogen treatment were

收稿日期: 2013-09-25 **接收日期:** 2014-04-04
基金项目: 农业部公益性行业(农业)科研专项(201003016);现代农业产业技术体系建设专项资金资助(CARS-01-31)资助。
作者简介: 冯洋(1987—),男,河南延津人,硕士研究生,主要从事水稻氮肥施用技术研究。E-mail: fengyang310@126.com
* 通信作者 E-mail: caihongmei@mail.hzau.edu.cn

higher than those under low nitrogen treatment for most of the 34 cultivars. Huiliangyou 6, Guangliangyou 35 and Tianyouhuazhan had higher nitrogen efficiencies with 1.11, 1.02 and 1.00, respectively; Xiushui 134, Fudao 2 and Wufengyou 7025 had lower nitrogen efficiencies with 0.55, 0.61 and 0.61, respectively. Similarly, the yield components under the normal nitrogen treatment were higher than those under the low nitrogen treatment for most of the 34 cultivars. The cultivars with higher nitrogen efficiencies have higher panicle number, spikelet number per panicle, as well as thousand grain weight under low nitrogen condition. As a consequence, Huiliangyou 6, Guangliangyou 35 and Tianyouhuazhan were screened as the high nitrogen efficient rice cultivars, and Xiushui 134, Fudao 2 and Wufengyou 7025 as the low nitrogen efficient ones. 2) Field and pot experiments in 2012 showed similar results. Both the actual and theoretical yields and nitrogen efficiencies of Huiliangyou 6 and Guangliangyou 35 are in the high ranking of the tested 34 cultivars, while Xiushui 134, Wufengyou 7025 and Fudao 2 in low ranking. In field trial, both the panicle number and thousand grain weight of high nitrogen efficient cultivar, Guangliangyou 35, were significantly higher than those of low nitrogen efficient ones under normal nitrogen treatment. Under low nitrogen condition, the high N efficient cultivars performed higher or significantly higher SPAD values than the low nitrogen efficient ones. Under normal nitrogen supply in the pot experiment, the SPAD values of the high nitrogen efficient cultivars were slightly higher than the low ones. Under the normal nitrogen condition, there were no significant differences in aboveground N accumulation between the high and low N efficient cultivars at each growth stage, except for Xiushui 134. Under the low N condition, no significant differences at tillering stage, except high N efficient cultivar Huiliangyou 6, in which the N accumulation even lower than N low efficient cultivars. At the heading stage and mature stage, the N accumulation in two high N efficient cultivars were significantly higher than those in low ones. **【Conclusion】** Guangliangyou 35 is identified as the highest nitrogen efficient cultivar and Xiushui 134 as the lowest nitrogen efficient cultivar. The high nitrogen efficient cultivar has higher panicle number and spikelet number per panicle under low nitrogen supply condition, which led to the higher yields than the low nitrogen efficient cultivar. Compared with that in the low nitrogen efficient cultivars, the more nitrogen was accumulated in the high nitrogen efficient cultivars at the late growth stage, which enhanced photosynthesis, the carbon and nitrogen assimilation, and then improved yields.

Key words: rice; yield; nitrogen efficiency; cultivar screening

水稻(*Oryza sativa* L.)是世界上最重要的粮食作物之一,我国是亚洲也是世界上水稻种植面积最大的国家,稻田总面积占亚洲稻田面积的31%,对世界粮食安全起到了至关重要的作用[1]。氮是植物体内许多重要化合物的成分,是水稻生长必不可少的营养元素。但过量施氮会直接或间接导致水稻倒伏,病虫害加剧,产量、品质和氮肥利用率下降以及环境污染等一系列问题[2]。据报道,目前我国水稻氮肥利用效率仅为28%~40%,大部分氮素则通过淋溶、挥发等以 NH_3、NO_3^-、N_2O 的形式进入环境并损失,并对地下水、土壤、河流和大气造成污染,进而影响人体健康[3]。因此如何提高氮素利用效率并减少氮肥对环境的污染是当前农业领域所面临的重要课题之一。长期以来,在水稻生产中为了稳定和提高水稻产量多采用大量施用氮肥的措施,但随氮肥用量加大,利用率降低,水稻产量增幅下降,从经济方面考虑也并不总是最优的[4]。近年来,随着人们对环保意识的增强,氮高效品种的选育日益受到国际广泛关注,人们试图通过选用氮高效品种来降低氮肥用量和缓解施氮带来的环境问题[3-10]。大量研究表明,水稻氮素利用效率存在基因型差异,氮素的吸收利用与产量形成关系密切[11]。基于此,国内外越来越重视研究和改良水稻氮素吸收利用的遗传潜力和生理机制,建立高效生产技术体系,从根本上提高水稻对氮素营养的吸收利用[12]。国际水稻研究所和韩国等非常重视有关氮高效水稻品种的育种方法与遗传及生理生化研究,试图从目前广泛收集的水稻种质资源中,筛选出在施氮肥较少的条件下保持稳产和高产的氮高效耐低氮水稻种质,并通过育种手段来培育氮素利用效率较高的环保型耐低氮水稻新品种[6-8]。因此可以通过对不同品种进行低氮胁迫,筛选出若干份氮高效株系,为水稻耐低氮胁迫的机理研究及氮高效品种的选育提供基础材料[11]。据统计,我国南方中低产田面积占水稻种植

面积的 57.4%，但在土壤改良或推广耐低氮胁迫的水稻品种来提高产量等方面的研究较少，本研究以南方各地主推的 34 个水稻品种为材料，在湖北省黄冈进行两年的大田筛选评价试验，利用盆栽筛选和对水稻生理特性的研究，筛选出氮高效和氮低效品种，以期为氮高效和耐低氮水稻品种的筛选以及新品种的培育提供理论基础，并为水稻氮高效的生理与分子机制研究提供材料。

1　材料与方法

1.1　试验材料

2011～2012 年，在湖北省黄冈市黄州区梅家墩实验基地（东经 115°03′，北纬 31°18′）进行两年的大田试验筛选，该地区气候适宜，降水适中。2011 年供试品种为我国南方地区各地农科院提供的主推水稻品种共 34 份（表 1），2012 年大田试验品种为 2011 年大田试验中筛选出来的氮高效品种（广两优 35 和徽两优 6 号）和氮低效品种（秀水 134、五丰优 7025 和富稻 2 号）；2012 年盆栽试验供试品种为 2011 年大田试验中筛选出来的氮高效品种（广两优 35 和徽两优 6 号）和氮低效品种（秀水 134 和五丰优 7025），盆栽试验在华中农业大学盆栽场进行。

大田试验土壤为水稻土，盆栽试验土壤为黄棕壤。由两种土壤的基础理化性质（表 2）可以看出，2012 年大田土壤与 2011 年相比，有机质、全氮、速效磷、碱解氮和 CEC 都有所增加。盆栽试验所用土壤的各项指标低于大田水稻土。

1.2　试验设计

2011 年大田试验的 34 个水稻品种，按一季中稻种植。试验设 2 个处理，低氮（N 60 kg/hm^2，LN）和正常氮（N 180 kg/hm^2，NN），小区以行区设置，每品种每小区种植 8 行，每行 10 株，栽插密度 26 cm × 13 cm，每处理 3 个重复。2012 年大田试验，以 2011 年大田试验筛选出来的 2 个氮高效品种（广两优 35 和徽两优 6 号）和 3 个氮低效品种（秀水 134、五丰优 7025 和富稻 2 号）为研究材料，按一季中稻种植，试验设 2 个处理，低氮（N 45 kg/hm^2，LN）和正常氮（N 225 kg/hm^2，NN），小区以行区设置，每品种每小区种植 12 行，每行 12 株，栽插密度 26 cm × 13 cm，每处理 3 个重复。磷、钾肥用量相同，分别为 P_2O_5 90 kg/hm^2、K_2O 120 kg/hm^2。氮肥所用肥料为尿素，磷肥为过磷酸钙，钾肥为氯化钾。磷、钾肥均作基肥一次施入，氮肥按基：蘖：穗为 40：30：30 的比例施用。

表 1　供试水稻品种

Table 1　The rice cultivars used in the experiments

编号 No.	品种 Cultivar	编号 No.	品种 Cultivar
1	ZS97	18	五丰优 316 Wufengyou 316
2	秀水 134 Xiushui 134	19	天优 998 Tianyou 998
3	日本晴 Nipponbare	20	宜香 1577 Yixiang 1577
4	MH63	21	五丰优 7025 Wufengyou 7025
5	Dular	22	川香 9838 Chuanxiang 9838
6	9311	23	Ⅱ优 838 Ⅱ you 838
7	02428	24	广两优 35 Guangliangyou 35
8	南京 11 Nanjing 11	25	两优宣 69-9 Liangyouxuan 69-9
9	IRAT109	26	富稻 2 号 Fufao 2
10	IR64	27	D 优 781 D you 781
11	中花 11 Zhonghua 11	28	华籼糯 3 号 Huaxianruo 3
12	巴利拉 Balila	29	两优 6326 Liangyou 6326
13	天优华占 Tianyouhuazhan	30	Q 优 6 号 Q you 6
14	徽两优 6 号 Huiliangyou 6	31	金优 12 Jinyou 12
15	天优 103 Tianyou 103	32	中 9 优 288 Zhong 9you 288
16	皖稻 153 Wandao 153	33	培两优 1108 Peiliangyou 1108
17	川香 8 号 Chuanxiang 8	34	D 优 33 D you 33

表2 试验地土壤的理化性状

Table 2 The physical-chemical properties of experimental soils

项目 Item	有机质 Organic matter (g/kg)	全氮 Total-N (g/kg)	速效磷 Olsen-P (mg/kg)	速效钾 Available K (mg/kg)	碱解氮 Alkali-N (mg/kg)	CEC (cmol/kg)	pH (soil∶water = 1∶2.5)
2011 大田 2011 Field trial	16.35	1.32	6.14	102.16	108.9	16.50	7.21
2012 大田 2012 Field trial	27.13	1.47	8.99	89.54	125.2	20.50	7.76
盆栽 Pot experiment	6.93	0.53	3.55	79.65	73.6	18.95	5.99

大田试验不同处理小区四周围田埂用薄膜包裹覆盖,以防止窜水窜肥。2011 年大田水稻移栽时间为6月26日,2012 年为6月14～15日。水分管理按当地习惯,采用深水返青(移栽后5 d内)、浅水分蘖(移栽后6～25 d)、中期晒田(达到穗数的80%开始)、复水(晒田后5～7 d)、以后保持浅水层直到抽穗、抽穗后干干湿湿(后水不见前水)、收割前7 d断水等水分管理措施,严格控制病虫害和杂草。

2012 年盆栽试验,水稻品种为2011 大田试验筛选出来的2个氮高效品种(广两优35和徽两优6号)和2个氮低效品种(秀水134和五丰优7025)。每个品种种植5盆(5个重复),每盆种植5株,每盆装土10 kg。试验设低氮(N 0.05 g/kg土, LN)和正常氮(N 0.25 g/kg土,NN)两个处理。磷肥用量为 P_2O_5 0.20 g/kg土,钾肥用量为 K_2O 0.20 g/kg土。磷、钾肥均作基肥一次施入,氮肥40%作基施、30%分蘖肥、30%穗肥。

盆栽试验移栽时间为2012 年6月20日,分蘖期保证5 cm深度水分覆盖,每天上午7点拉开棚子接受光照,11点拉上棚子,避开光照;下午4点拉开棚子,7点关闭棚子。中期晒田(达到穗数的80%开始),复水(晒田后2～3 d),以后保持浅水层直到抽穗,严格控制病虫害和杂草。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 测产与考种 水稻成熟期从每个小区随机取5株水稻作为考种材料,调查单株产量、穗数,每穗粒数、结实率和千粒重。然后将每个小区单打单收,田间直接测定产量;取1 kg水稻籽粒样品,烘干后计算含水量,再通过含水量折算出实际产量。盆栽试验取每盆所有水稻进行考种,脱粒后直接称重测产,再通过含水量折算出实际产量。

1.3.2 氮含量测定 植株样品整株取样装网袋放入烘箱中于105℃杀青后,降温至75℃烘干至恒重,粉碎,过20目筛。样品经 H_2SO_4-H_2O_2 消煮后,定容,过滤,采用流动注射分析仪(FIAstar5000, Sweden)测定植株全氮含量。

1.3.3 SPAD值测定 在水稻分蘖期,穗分化期,灌浆期和成熟期的当天中午11:00～13:00,利用便携式叶绿素测定仪测定不同处理小区水稻顶部叶片的SPAD值。

1.3.4 数据处理 试验数据采用 Microsoft Excel 2007 软件和 SPSS 17.0 数据处理系统进行统计分析。

计算公式为:

氮效率 = 低氮处理产量/正常氮处理产量

氮累积量 = 干物质量 × 含氮率 × 100%

理论产量 = 穗数 × 穗粒数 × 千粒重 × 结实率

2 结果与分析

2.1 不同水稻品种不同氮处理下的产量及其氮效率

表3结果表明,不同水稻品种在低氮和正常氮条件下的籽粒产量和氮效率存在显著性差异。在2011 年大田试验中,34个品种正常氮处理产量大多高于低氮处理的产量。通过对氮效率的分析发现,徽两优6号、广两优35和天优华占3个品种具有较高的氮效率,分别达到1.11、1.02和1.00,因此选择这三个品种作为氮高效品种进行后续试验。而秀水134、富稻2号和五丰优7025的氮效率较低,分别为0.55、0.61和0.61,选择其作为氮低效品种作为后续试验。2012 年大田和盆栽试验获得的结果一致(表4、表5),由表4可知,实际产量和理论产量均表现出徽两优6号和广两优35的产量和氮效率较高,秀水134、五丰优7025和富稻2号的氮效率较

低。由表 5 可知,2012 年盆栽与大田试验呈现出一致的结果,但由于盆栽试验土壤养分含量较低,总体产量和氮效率值偏低。经过两年大田和盆栽试验筛选,确定广两优 35 和秀水 134 分别作为氮高效材料和氮低效材料。

表 3　2011 年大田筛选各品种产量及其氮效率

Table 3　The yield and nitrogen efficiency of each rice cultivar in the field trial in 2011

编号 No.	品种 Cultivar	低氮处理产量 Yield of low N (kg/hm^2)	正常氮处理产量 Yield of normal N (kg/hm^2)	氮效率 N efficiency
2	秀水 134 Xiushui 134	5002	9037	0.55
26	富稻 2 号 Fudao 2	7315	11898	0.61
21	五丰优 7025 Wufengyou 7025	7532	12325	0.61
17	川香 8 号 Chuanxiang 8	8230	12877	0.64
28	华籼糯 3 号 Huaxiannuo 3	5164	7907	0.65
27	D 优 781 D you 781	8069	11145	0.72
23	Ⅱ优 838 Ⅱ you 838	7665	10543	0.73
6	9311	5164	7003	0.74
33	培两优 1108 Peiliangyou 1108	8230	10392	0.79
18	五丰优 316 Wufengyou 316	7423	9338	0.79
4	MH63	6132	7681	0.80
20	宜香 1577 Yixiang 1577	7746	9639	0.80
7	02428	7746	9489	0.82
34	D 优 33 D you 33	8499	10393	0.82
8	南京 11 Nanjing 11	4518	5422	0.83
19	天优 998 Tianyou 998	7907	9489	0.83
32	中 9 优 288 Zhong 9 you 288	5648	6552	0.86
22	川香 9838 Chuanxiang 9838	8230	9489	0.87
30	Q 优 6 号 Q you 6	9037	9489	0.95
12	巴利拉 Balila	7423	7682	0.97
16	皖稻 153 Wandao 153	7821	7585	0.97
13	天优华占 Tianyouhuazhan	7423	7456	1.00
24	广两优 35 Guangliangyou 35	10650	10393	1.02
14	徽两优 6 号 Huiliangyou 6	8553	7682	1.11

注(Note)：氮效率 = 低氮处理产量/正常氮处理产量 N efficiency = yield of low nitrogen/yield of normal nitrogen.

2.2　不同水稻品种不同氮处理下产量构成因子

不同水稻品种产量构成因子有很大差异(表 6、表 7),正常氮处理下,各构成因子大多高于低氮处理。表 6 显示,不同品种干物质量在正常氮处理下,徽两优 6 号和广两优 35 两个品种较高,均达到 120 g/plant;而在低氮处理下,同样具有较高的干物质量,与产量法计算的氮效率结果一致。通过对氮高效品种和低效品种产量构成因子的分析发现,在低氮条件下,氮高效品种的穗数和穗粒数以及千粒重均较高。2012 年的盆栽试验(表 7)中，正常氮条件

表4 2012年大田试验水稻各品种产量及其氮效率

Table 4 The yield and nitrogen efficiency of rice cultivars in the field trial in 2012

项目 Item	编号 No.	品种 Cultivar	低氮处理产量 Yield of low N (kg/hm^2)	正常氮处理产量 Yield of normal N (kg/hm^2)	氮效率 N efficiency
实际产量 Actual output	14	徽两优6号 Huiliangyou 6	5810 b	7397 b	0.81
	24	广两优35 Guangliangyou 35	6704 a	7705 ab	0.87
	2	秀水134 Xiushui 134	5007 c	7084 b	0.71
	21	五丰优7025 Wufengyou 7025	5069 c	6907 bc	0.73
	26	富稻2号 Fudao 2	6663 a	8257 a	0.80
理论产量 Theoretical yield	14	徽两优6号 Huiliangyou 6	7513 a	8880 a	0.85
	24	广两优35 Guangliangyou 35	7263 a	7844 a	0.93
	2	秀水134 Xiushui 134	3398 c	4348 c	0.78
	21	五丰优7025 Wufengyou 7025	5543 b	6695 b	0.83
	26	富稻2号 Fudao 2	5850 b	7274 b	0.80

注(Note):氮效率 = 低氮处理产量/正常氮处理产量 N efficiency = yield of low nitrogen/yield of normal nitrogen. 同列数据后不同字母表示相同处理不同品种之间差异达5%显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among different cultivars under the same treatment at the 5% level.

表5 2012年盆栽试验水稻各品种产量及其氮效率

Table 5 The yield and nitrogen efficiency of rice cultivars in the pot experiment in 2012

处理 Treatment	编号 No.	品种 Cultivar	低氮处理产量 Yield of low N (g/plant)	正常氮处理产量 Yield of normal N (g/plant)	氮效率 N efficiency
实际产量 Actual output	14	徽两优6号 Huiliangyou 6	8.9 a	17.5 a	0.51
	24	广两优35 Guangliangyou 35	9.4 a	16.6 a	0.57
	2	秀水134 Xiushui 134	4.0 c	9.4 c	0.42
	21	五丰优7025 Wufengyou 7025	6.8 b	14.8 b	0.46
理论产量 Theoretical yield	14	徽两优6号 Huiliangyou 6	8.1 a	16.2 a	0.50
	24	广两优35 Guangliangyou 35	8.8 a	15.9 a	0.55
	2	秀水134 Xiushui 134	3.4 c	8.7 b	0.39
	21	五丰优7025 Wufengyou 7025	7.8 b	15.6 a	0.50

注(Note):氮效率 = 低氮处理产量/正常氮处理产量 N efficiency = yield of low nitrogen/yield of normal nitrogen. 同列数据后不同字母表示相同处理不同品种之间差异达5%显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among different cultivars under the same treatment at the 5% level.

下,氮高效品种广两优35在穗数,穗粒数和千粒重上均显著高于其它3个品种,而高效品种徽两优6号与另外两个低效品种并无显著差异;在低氮胁迫下,高效品种的每穗粒数和千粒重显著高于其它两个低效品种,广两优35在穗数上也高于低效品种。高效品种的结实率没有显著性差异。在2012年大田试验中,在正常氮条件下,高效品种广两优35的穗数、千粒重均显著高于低效品种,其它品种差异不显著,甚至氮低效品种的穗粒数显著高于高效品种;在低氮条件下,高效品种的产量构成因子均普遍高于低效品种,其中广两优35的穗数、穗粒数、千粒重以及结实率均高于或显著高于其它3个品种。这也说明,氮高效品种在低氮条件下具有较高的氮素吸收利用效率,从而获得较多的穗数,增加谷壳库容

表 6　2011 年大田试验各品种干物质量与产量构成因子

Table 6　The aboveground dry weight and yield components of each rice cultivar in the field trial in 2011

编号 No.	品种 Cultivar	干物质量 ATB (g/plant)		穗数 PN ($\times 10^4$ No./hm^2)		每穗粒数 SPP (No./panicle)		千粒重 GW (g)		结实率 FP (%)	
		NN	LN	NN	LN	NN	LN	NN	LN	NN	LN
2	秀水 134 Xiushui 134	86.7	80.0	266.3	253.1	122.9	102.6	25.9	24.1	87.9	87.9
4	MH63	85.6	80.0	259.7	312.3	163.3	130.2	28.2	27.9	84.3	86.6
6	9311	82.4	83.3	174.2	261.3	239.2	163.9	29.1	27.6	80.2	88.3
7	02428	92.5	82.0	298.3	229.3	173.5	134.2	26.2	28.1	78.1	81.7
8	南京 11 Nanjing 11	88.3	70.0	328.7	355.0	169.8	79.0	23.7	23.7	81.3	68.7
10	IR64	65.0	65.6	202.2	303.3	253.5	128.7	25.5	20.9	61.3	82.5
12	巴利拉 Balila	101.1	77.8	320.5	341.9	221.3	275.0	23.0	25.4	90.4	79.7
13	天优华占 Tianyouhuazhan	96.7	74.4	330.4	263.0	181.5	181.6	24.3	23.5	85.2	77.3
14	徽两优 6 号 Huiliangyou 6	120.0	108.1	394.5	266.3	190.2	179.3	26.4	26.2	87.1	76.8
16	皖稻 153 Wandao 153	83.3	81.1	325.4	295.9	145.0	178.4	25.1	26.1	90.9	86.0
17	川香 8 号 Chuanxiang 8	99.3	85.8	276.1	259.7	207.2	186.2	28.1	29.5	82.8	87.3
18	五丰优 316 Wufengyou 316	83.0	66.7	309.0	234.7	195.3	227.4	23.3	21.8	82.4	80.4
19	天优 998 Tianyou 998	95.6	70.0	299.1	253.1	248.2	173.8	24.7	25.1	80.3	81.6
20	宜香 1577 Yixiang 1577	87.8	65.3	302.4	273.7	141.1	155.0	28.1	29.9	85.4	81.9
21	五丰优 7025 Wufengyou 7025	68.3	83.3	192.3	197.2	252.3	367.4	22.6	23.4	74.8	80.5
22	川香 9838 Chuanxiang 9838	102.0	102.2	312.3	272.8	214.7	201.5	26.8	29.0	86.7	86.2
23	Ⅱ优 838 Ⅱyou 838	99.2	84.0	317.6	254.4	169.2	188.3	27.6	26.8	88.8	91.0
24	广两优 35 Guangliangyou 35	120.0	110.5	286.0	233.4	191.8	187.2	30.0	26.6	90.7	89.5
26	两优宣 69 Liangyouxuan 69	78.3	83.3	207.1	212.0	171.4	208.4	27.5	29.2	90.7	91.2
27	富稻 2 号 Fufao 2	83.3	101.1	253.1	276.1	206.7	214.7	28.8	27.3	75.5	83.3
28	D 优 781 D you 781	85.0	76.7	197.2	192.3	235.5	213.7	25.1	25.0	78.4	80.9
29	华籼糯 3 号 Huaxiannuo 3	97.8	75.6	246.5	174.2	227.3	212.5	27.2	28.0	89.0	89.1
30	两优 6326 Liangyou 6326	92.7	96.7	325.4	330.4	199.9	176.4	28.5	26.3	91.9	87.7
31	Q 优 6 号 Q you 6	73.3	78.3	207.1	305.7	143.3	111.2	24.0	27.7	78.3	78.3
32	金优 12 Jinyou 12	85.0	87.8	299.1	335.3	177.0	155.6	25.6	25.2	89.1	83.1
33	中 9 优 288 Zhong 9 you 288	113.3	92.2	309.0	271.2	168.4	172.2	28.7	29.3	88.8	82.9
34	培两优 1108 Peiliangyou 1108	104.4	85.6	318.9	236.7	159.6	189.6	28.7	29.5	88.7	84.5

注(Note)：ATB—Aboveground total biomass；PN—Panicle number；SPP—Spikelet number per panicle；GW—1000-grain weight；FP—Filled-grain percentage；NN—正常氮 Normal N；LN—低氮 Low N.

量,并获得较高的产量。

2.3　不同水稻品种各生育时期叶片的 SPAD 值

表 8 和表 9 结果表明,不同品种正常氮处理的叶片 SPAD 值均显著高于低氮处理。而叶片 SPAD 值随着水稻生育期的推进呈现先升高后降低的趋势。表 8 显示,2012 年大田试验中,低氮处理下氮高效品种在同一生育时期其 SPAD 值普遍高于或者显著高于低效品种。在正常氮条件下,徽两优 6 号的 SPAD 值显著高于低效品种,高效品种广两优 35 与低效品种秀水 134 并无显著性差异。2012 年盆

表7 2012年大田与盆栽试验各品种产量构成因子

Table 7 The yield components of each rice cultivar in the field trial and pot experiment in 2012

处理 Treat.	编号 No.	品种 Cultivar	穗数 PN ($\times 10^4$ No./hm^2)		每穗粒数 SPP (No./panicle)		千粒重 GW (g)		结实率 FP (%)	
			NN	LN	NN	LN	NN	LN	NN	LN
盆栽 Pot exp.	14	徽两优6号 Huiliangyou 6	117.0 b	49.1 b	95.1 a	92.9 a	27.1 a	24.1 a	83.5 a	70.5 a
	24	广两优35 Guangliangyou 35	128.3 a	64.2 a	91.8 a	88.0 a	24.9 a	23.1 a	76.0 a	68.7 a
	2	秀水134 Xiushui 134	105.9 c	54.2 b	98.4 a	92.4 a	20.8 b	18.8 b	67.7 a	64.5 ab
	21	五丰优7025 Wufengyou 7025	117.0 b	30.2 c	99.4 a	67.2 b	24.8 a	18.3 b	53.9 b	79.6 a
大田 Field trial	14	徽两优6号 Huiliangyou 6	153.3 c	157.0 b	207.0 b	208.4 a	28.5 a	27.3 a	88.8 a	88.0 a
	24	广两优35 Guangliangyou 35	226.3 a	211.7 a	199.8 b	198.3 b	26.0 a	27.1 a	83.9 a	77.8 b
	2	秀水134 Xiushui 134	200.8 b	160.6 b	223.4 a	194.1 b	20.6 b	21.9 b	72.5 b	77.3 b
	21	五丰优7025 Wufengyou 7025	160.6 c	143.6 c	239.9 a	178.7 c	27.0 a	27.0 a	69.9 b	84.5 a
	26	富稻2号 Fufao 2	211.7 b	136.3 c	145.4 c	146.1 d	20.5 b	21.8 b	68.9 b	78.3 b

注(Note): PN—Panicle number; SPP—Spikelet number per panicle; GW—1000-grain weight; FP—Filled-grain percentage; NN—正常氮 Normal N; LN—低氮 Low N. 同列数据后不同字母表示相同处理不同品种之间差异达5%显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among different cultivars under the same treatment at the 5% level.

表8 2012年大田实验筛选不同水稻品种各生育时期叶片SPAD值

Table 8 The leaf SPAD values of each rice cultivar at different stages in the field trials in 2012

处理 Treatment	编号 No.	品种 Cultivar	分蘖期 Tillering stage	穗分化期 Panicle initiation stage	灌浆期 Heading stage	成熟期 Mature stage
NN	14	徽两优6号 Huiliangyou 6	43.0 a	46.5 a	47.4 a	45.2 a
	24	广两优35 Guangliangyou 35	41.8 ab	44.8 b	45.4 b	44.1 ab
	2	秀水134 Xiushui 134	43.0 a	46.7 a	45.0 b	42.5 b
	21	五丰优7025 Wufengyou 7025	41.0 b	43.8 bc	42.6 c	42.3 b
	26	富稻2号 Fufao 2	41.4 b	43.3 c	43.0 c	43.1 b
LN	14	徽两优6号 Huiliangyou 6	41.1 a	43.0 a	45.3 a	42.2 a
	24	广两优35 Guangliangyou 35	39.0 b	41.7 ab	42.6 b	40.9 ab
	2	秀水134 Xiushui 134	39.9 ab	41.6 ab	38.5 c	39.1 b
	21	五丰优7025 Wufengyou 7025	38.1 b	41.4 ab	41.9 b	39.5 b
	26	富稻2号 Fufao 2	40.5 ab	39.2 b	41.6 b	39.8 b

注(Note): NN—正常氮 Normal N; LN—低氮 Low N. 同列数据后不同字母表示相同生育期不同品种之间差异达5%显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among different cultivars under the same growth stages at the 5% level.

栽试验中,正常氮处理下,高效品种叶片SPAD值略高于低效品种;表8中,在低氮处理下,广两优35和徽两优6号两个高效品种的SPAD值高于或显著高于五丰优7025和秀水134两个低效品种。由表9可以看出,2012年盆栽试验与大田试验的结果基本一致,盆栽试验同一时期,同一处理的SPAD值低于大田试验。

表 9　2012 年盆栽实验筛选不同水稻品种各生育时期叶片 SPAD 值

Table 9　The leaf SPAD values of each rice cultivar at different stages in the pot experiment in 2012

处理 Treatment	编号 No.	品种 Cultivar	分蘖期 Tillering stage	穗分化期 Panicle initiation stage	灌浆期 Heading stage	成熟期 Mature stage
NN	14	徽两优 6 号 Huiliangyou 6	42.1 b	45.6 ab	46.6 a	41.1 a
	24	广两优 35 Guangliangyou 35	42.9 b	45.5 ab	45.8 ab	40.8 ab
	2	秀水 134 Xiushui 134	45.0 a	46.3 a	45.0 b	42.2 a
	21	五丰优 7025 Wufengyou 7025	43.0 b	44.2 b	42.8 c	39.9 b
LN	14	徽两优 6 号 Huiliangyou 6	35.6 b	39.6 a	41.5 b	38.6 b
	24	广两优 35 Guangliangyou 35	32.8 c	36.1 b	43.6 a	38.8 b
	2	秀水 134 Xiushui 134	40.3 a	40.8 a	42.5 ab	41.0 a
	21	五丰优 7025 Wufengyou 7025	32.8 c	36.0 b	39.8 c	35.8 c

注(Note)：NN—正常氮 Normal N；LN—低氮 Low N. 同列数据后不同字母表示相同生育期不同品种之间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among different cultivars under the same growth stages at the 5% level.

2.4　不同水稻品种各时期地上部氮累积量

表 10 结果表明,同一水稻品种,相同处理的不同时期的氮素累积量随着水稻生育期的推进不断增加。在正常氮处理下,不同生育期,高效品种与低效品种间,普遍没有显著性差异,仅低效品种秀水 134,显著低于其它几个品种;而在低氮处理下,在分蘖期,高效品种与低效品种并无显著性差异,甚至高效品种徽两优 6 号氮素累积量还要低于低效品种;但在灌浆期和成熟期,两个高效品种的氮素累积量高于或显著高于低效品种。这表明在低氮处理下,在水稻生育期前期,氮高效品种与氮低效品种相比并没有显著的氮素吸收利用优势;但是在水稻生育期后期,氮高效品种表现出较高的氮素累积优势。

表 10　2012 年大田试验不同水稻品种地上部氮累积量(mg/plant)

Table 10　The nitrogen accumulation in the aboveground of each rice cultivar at different stages in the field trial in 2012

处理 Treatment	编号 No.	品种 Cultivar	分蘖期 Tillering stage	穗分化期 Panicle initiation stage	灌浆期 Heading stage	成熟期 Mature stage
NN	14	徽两优 6 号 Huiliangyou 6	23.76 a	135.46 a	117.83 a	152.02 a
	24	广两优 35 Guangliangyou 35	21.80 a	124.11 b	94.70 b	111.44 b
	2	秀水 134 Xiushui 134	11.14 b	100.70 c	87.23 bc	103.88 b
	21	五丰优 7025 Wufengyou 7025	24.81 a	128.16 ab	107.02 ab	110.86 b
	26	富稻 2 号 Fudao 2	21.13 a	132.80 a	103.70 b	95.88 c
LN	14	徽两优 6 号 Huiliangyou 6	9.40 bc	78.40 d	93.55 b	99.77 b
	24	广两优 35 Guangliangyou 35	14.23 b	70.01 d	80.62 c	99.28 b
	2	秀水 134 Xiushui 134	6.90 c	47.11 e	59.19 d	58.07 c
	21	五丰优 7025 Wufengyou 7025	10.41 b	70.17 d	59.55 d	62.54 c
	26	富稻 2 号 Fudao 2	14.84 b	72.55 d	57.83 d	58.83 c

注(Note)：NN—正常氮 Normal N；LN—低氮 Low N. 同列数据后不同字母表示相同生育期不同品种之间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among different cultivars under the same growth stages at the 5% level.

3 讨论与结论

水稻利用氮素的效率包括氮吸收效率(N uptake efficiency)和氮利用效率(N utilization efficiency)[12]。其中,植物氮吸收量与供氮量之比为氮吸收效率;而谷粒产量与氮吸收量之比为氮素利用效率[13]。根据现有的研究,氮素利用效率的筛选宜采用苗期和全生育期相结合的方法。苗期水稻氮高效的筛选应将缺氮和正常氮下的比值,即相对指标,如相对干物重、相对SPAD值和相对分蘖数3个指标结合起来考虑,以减少单一指标鉴定可能带来的误差。全生育期水稻氮高效以谷粒产量、地上部干物质量和单株分蘖数作为筛选指标是可行的[14]。曾健敏等研究表明,全生育期鉴定是在筛选的基础上对氮高效基因型做出准确判断(未发表)。在水稻分蘖期,以相对分蘖率作为指标,并结合SPAD值,相对简单,但是有时候不是很可靠。例如本试验中低效品种秀水134虽然在各生育期SPAD值均高于或显著高于氮高效品种,但是氮效率值很低,干物质量和产量也不高。虽然干物重也能区分不同基因型的差异,但由于其受不同材料和生育期以及其它因素的影响,而且种植水稻最终的目标是产量,因此,同样考虑和产量构成因素有关的指标比较可靠。在收获期,经济产量能综合反映不同水稻品种对氮的吸收、利用和转运效率的差异,且生产中操作简单,同时可以避免不同材料本身遗传背景的差异。综上所述,本试验以产量作为筛选指标,对各水稻品种进行了全生育期筛选。

曾健敏等研究还表明,对于水稻品种全生育期筛选,产量构成因素作为参考指标相对有较高的可靠性(未发表)。本研究中(表3~表6),高效品种广两优35在低氮条件下的穗数、穗粒数、千粒重均高于或显著高于其它3个低效品种。而结实率与其它品种并无显著性差异。有研究表明,增施氮肥会降低水稻的结实率[15]。这是由于较高的氮吸收效率有利于促进生长和分蘖,从而决定潜在的穗数。在穗形成初期,氮素有利于小穗的形成,而在穗形成后期,则通过减少退化小穗数,增加谷壳大小而增加库容。氮素在抽穗前增加了茎和叶鞘中碳水化合物的积累,而籽粒灌浆则有助于增加籽粒中碳水化合物的积累。本研究发现,氮素并不显著影响水稻的结实率。由表6可知,高效品种产量与生物量呈正相关,氮效率较高的品种在正常氮和低氮条件下均能达到较高的生物量,这是因为水稻收获的籽粒产量与生物产量关系密切,并且提高生物产量是提高籽粒产量的有效途径之一[16]。大量研究表明,高氮素累积量类型的品种其生物产量大,且高氮素累积量类型的籼稻品种抽穗前和抽穗后干物质生产量均较大[17-21]。总之,氮素的高效吸收利用能提高水稻产量构成因子,从而促进籽粒灌浆,获得较高产量。

SPAD测定仪是近年来欧美一些国家在田间施用氮肥中推荐使用的一种新型便携式测定仪器,可快速、简便、无损地测定植物叶片的叶绿素相对含量,进而反映作物的氮营养状况[22]。由于叶片氮素含量与光合速率及干物质生长密切相关,因此在一个生长季内,叶片氮素含量可以较灵敏地反映作物对氮的需求动态,叶片氮含量对生物产量的贡献很大,叶片氮含量和水稻单叶光合速率呈正相关[23]。叶片氮通过叶面积大小影响群体光合作用效率。植物氮含量高可延缓叶片衰老,延长光合作用时间[24]。本试验通过测定水稻高效品种和低效品种不同时期的SPAD值(表8、表9),发现在水稻生育前期,低氮条件下,高效品种并没有太大的叶片氮积累优势。但是在穗分化期之后,高效品种的氮积累优势才显示出来,两个高效品种的叶片SPAD值要显著高于低效品种。由表10可看出,不同时期氮素累积量也呈现与叶片SPAD值相同的结果。在低氮胁迫下,高效品种在分蘖期和穗分化期的氮素累积量与低效品种并无显著性差异,甚至高效品种徽两优6号在分蘖期还要低于低效品种(表10)。但是灌浆期后,高效品种氮素累积量显著高于低效品种,这也表明不同水稻品种在水稻生育前期吸收利用效率差异不显著,但是在后期高效品种具有更强的利用效率,从而能够促进氮素向籽粒的转移,增大库容量,促进灌浆,进而提高产量。

本研究中34个供试水稻品种均为我国南方的主推水稻品种,筛选的目的是筛选在南方中、低产田下种植氮效率较高的品种。不同品种的生育期有长有短,适宜栽培环境也不尽相同,这都不影响对适宜于中、低产水稻田的水稻品种氮效率的评价。但如果推广应用,应该在该品种的主推地区做进一步验证。在施肥设计上,2011年试验的正常氮处理是根据对试验地农民往年施肥量的调查而设置的,而低氮处理按照低氮和正常氮的比例为1∶3设定的。试验结果中出现个别品种氮效率大于1,可能的原因有两个:一方面是因为低氮处理的水稻田靠近保护行,在施肥的时候可能出现窜水窜肥,导致其实际氮素投入量增多;另一方面可能是因为氮高效品种

本身有较高的氮素吸收利用能力。2012 年的试验，根据 2011 年的试验结果（表 3），天优华占、巴利拉以及皖稻 153 虽然氮效率均高于 Q 优 6 号，但籽粒产量却远低于后者。所以我们考虑到是否是有些品种需要的适宜施氮量较高，而低氮胁迫的程度较低？另外一方面是在 2012 年的方案中，增加了正常氮处理，设定为 N 225 kg/hm^2，并且以正常氮：低氮为 5∶1，降低低氮施氮量，加强氮素胁迫，从而继续进行筛选。此外，与 2011 年相比，2012 年试验地基础土壤理化性质中有机质等部分指标含量有所提高，可能是由于在水稻收割后，留在水稻田中的秸秆以及部分收获秸秆留在田间腐熟所致。

通过对大田与盆栽试验高、低效品种产量及其构成因子、地上部氮素累积量的分析发现，高效品种比低效品种具有较高的氮素利用效率。从表 6 和表 7 可以看出，与低效品种相比，高效品种具有较高的穗数和穗粒数。穗数与穗粒数的乘积就是总颖花数，而水稻群体质量和产量均与总颖花数密切相关。高效品种地上部氮素累积量显著高于低效品种（表 10），是因为高效品种具有更强的氮素吸收能力，可促进其自身的营养生长和发育。综上所述，高效品种不仅具有较强的氮素吸收能力，同时也具有较高的氮素利用效率，这也是高效品种在产量上明显优于低效品种的主要原因。

本研究通过对南方主推品种进行氮效率筛选，通过在低氮条件下不同水稻品种产量及其产量构成因素等指标，筛选出氮高效品种和低效品种各一个，并将继续开展试验，探索高、低效品种的基因型差异，从而为水稻氮高效品种的育种打好基础。氮素吸收和利用是十分复杂的生物学过程，尽管前人做了很多研究，但需要解决的问题还有很多，如氮素利用效率的遗传规律，高效利用氮素的生理机制等等。我们将在现有的基础上进一步探索。

参 考 文 献：

[1] 申建波，张福锁，水稻养分资源综合管理理论与实践[M]. 北京：中国农业大学出版社，2006. 236-263.
Shen J B, Zhang F S. Theory and practice of nutrient resources management in rice[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2006. 236-263.

[2] 彭少兵，黄见良，Roland Buresh，等. 提高中国稻田氮肥利用率的研究策略[J]. 中国农业科学，2002，35(9)：1095-1103.
Peng S B, Huang J L, Buresh R *et al*. Research strategy in improving fertilizer-nitrogen efficiency of irrigated rice in China [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2002, 35(9): 1095-1103.

[3] 朴钟泽，韩龙植，高熙宗. 水稻不同基因型氮素利用效率差异[J]. 中国水稻科学，2003，17(3)：233-238.
Piao Z Z, Han L Z, Gao X Z. Variations of nitrogen use efficiency by rice genotype[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2003, 17(3): 233-238.

[4] Bohlool B B, Ladha J K, Garrity D P *et al*. Biological nitrogen fixation for sustainable agriculture: A perspective[J]. Plant and Soil, 1992, 141: 1-11.

[5] Broadbent F E, De Datta S K, Laureles E V. Measurement of nitrogen efficiency in rice genotypes [J]. Agronomy Journal, 1987, 79: 786-791.

[6] De Datta S K, Brodbent F E. Methodology for evaluating nitrogen efficiency by rice genotypes[J]. Agronomy Journal, 1988, 80: 793-798.

[7] Guindo D, Wells B R, Norman R J. Cultivars and nitrogen rate influence on nitrogen uptake and partitioning in rice[J]. Soil Science Society of America Journal, 1994, 58(3): 840-849.

[8] Wu P, Tao Q N. Genotype response and selection pressure on nitrogen efficiency in rice under different nitrogen regimes[J]. Journal of Plant Nutrition, 1995, 18(3): 487-500.

[9] 江立庚，戴廷波，韦善清，等. 南方水稻氮素吸收与利用效率的基因型差异及评价[J]. 植物生态学报，2003，27(4)：466-471.
Jiang L G, Dai T B, Wei S Q *et al*. Genotypic differences and evaluation in nitrogen uptake and utilization efficiency in rice[J]. Acta Phytoecologica Sinica, 2003, 27(4): 466-471.

[10] Ladha J K, Kirk G J D, Bennett J *et al*. Opportunities for increased nitrogen-efficiency from improved lowland rice germplasm[J]. Field Crops Research, 1988, 56: 41-71.

[11] 阮新民，施伏芝，罗志祥，等. 水稻苗期氮高效品种评价和筛选的初步研究[J]. 中国稻米，2010，16(2)：22-25.
Ruan X M, Shi F Z, Luo Z X *et al*. A preliminary study on the evaluation and screening of rice varieties with high nitrogen efficiency at seedling stage[J]. Chinese Rice, 2010, 16(2): 22-25.

[12] 崔士友，缪亚梅，史传怀，等. 氮高效水稻育种研究与展望[J]. 中国农业科技导报，2006，8(6)：47-51.
Cui S Y, Miao Y M, Shi C H *et al*. Research and prospects of breeding for nitrogen efficiency in rice[J]. Review of China Agricultural Science and Technology, 2006, 8(6): 47-51.

[13] 郑家奎，文春阳，张涛，等. 耐低氮水稻材料筛选及筛选指标研究[J]. 安徽农业科学，2009，37(16)：7361-7363，7377.
Zheng J K, Wen C Y, Zhang T *et al*. Studies on the screening index for low nitrogen tolerant rice and its selection[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2009, 37(16): 7361-7363, 7377.

[14] Ying J, Peng S, Yang G *et al*. Comparison of high yield rice in tropical and subtropical environments: II. Nitrogen accumulation and utilization efficiency[J]. Field Crops Research, 1998, 57: 85-93.

[15] 李熙英，吕龙石，李桂花，等. 氮磷钾不同施肥量对水稻产量构成因素的影响[J]. 延边大学农学学报，1996，25(3)：

260-265.
Li X Y, Lv L S, Li G H *et al*. Effect of different amount of NPK fertilizer on component of rice yield[J]. Journal of Agricultural Science of Yanbian University, 1996, 25(3): 260-265.

[16] 杨惠杰, 李义珍, 杨仁崔, 等. 超高产水稻的干物质生产特性研究[J]. 中国水稻科学, 2001, 15(4): 265-270.
Yang H J, Li Y Z, Yang R C *et al*. Dry matter production characteristics of super high yielding rice[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2001,15(4): 265-270.

[17] 张岳芳, 王余龙, 陈培峰, 等. 不同氮素累积量类型的籼稻品种物质生产与分配特点[J]. 江苏农业学报, 2007, 23(5): 385-390.
Zhang Y F, Wang Y L, Chen P F *et al*. Dry matter accumulation and distribution in different nitrogen accumulation types of *Indica* rice[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2007, 23(5): 385-390.

[18] 石庆华, 徐益群, 张佩莲, 等. 籼粳杂交稻的氮素吸收特性及其对库源特征的影响[J]. 江西农业大学学报, 1994, 16(4): 333-339.
Shi Q H, Xu Y Q, Zhang P L *et al*. Effect of N uptake on sink and source of *Indica-Japonica* F_1 hybrid rice [J]. Acta Agricultural Universities Jiangxiensis, 1994, 16(4): 333-339.

[19] 李木英, 石庆华, 谭雪明. 水稻根系营养吸收特性及其与干物质生产和稻米品种关系的研究[J]. 江西农业大学学报, 1996, 18(4): 376-382.
Li M Y, Shi Q H, Tan X M. Studies on the relationship between the characteristics of nutrition uptake of rice roots and the dry matter production, grain yield and grain quality [J]. Acta Agricultural Universities Jiangxiensis, 1996, 18(4): 376-382.

[20] 黄见良, 李合松, 李建辉, 等. 不同杂交水稻吸氮特性与物质生产的关系[J]. 核农学报, 1998, 12(2): 89-94.
Huang J L, Li H S, Li J H *et al*. Relation between N absorption characteristic and dry matter production for various hybrid rice [J]. Acta Agricultural Nucleatae Sinica, 1998, 12(2): 89-94.

[21] Ntanos D A, Koutroub S D. Dry matter and N accumulation and translocation for *Indica* and *Japonica* rice under mediterranean conditions[J]. Field Crops Research, 2002, 74: 93-100.

[22] 刘志军, 桑大志, 刘翠莲, 等. 实时实地氮肥管理对水稻产量和氮素利用率的影响[J]. 中国农业科学, 2003, 36 (12): 1456-1461.
Liu Z J, Sang D Z, Liu C L *et al*. Effects of real-time and site-specific nitrogen managements on rice yield and nitrogen efficiency[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2003, 36(12): 1456-1461.

[23] Peng S B, Cassman K G, Kropff M J. Relationship between leaf photosynthesis and nitrogen content of field-grown rice in the tropics[J]. Crop Science, 1995, 35: 1627-1630.

[24] Makino A, Mae T, Ohira K. Changes in photosynthetic capacity in rice leaves from emergence through senescence. Analysis from ribulose-1, 5-biphosphate carboxylase and leaf conductance[J]. Plant and Cell Physiology, 1984, 25: 511-521.