

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2009.01672

水稻实地氮肥管理的氮肥利用效率及其生理原因

刘立军 杨立年 孙小淋 王志琴 杨建昌*

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: 以代表性品种为材料, 研究了水稻实地氮肥管理(SSNM)的氮肥利用效率及其生理机制。结果表明, SSNM 的施氮量较常规施肥方法(FFP)降低了 48.1%~63.0%, 产量提高了 0.1%~9.3%。SSNM 的氮肥吸收利用率和农学利用率分别较 FFP 提高了 31.4%~56.8%和 143.6%~166.0%。水稻氮吸收高峰出现在穗分化期至抽穗期, 此阶段 SSNM 处理氮的吸收量及其占最终总吸收量的比例均明显高于 FFP。抽穗后 SSNM 水稻的吸氮量也明显高于 FFP。自幼穗分化期开始, SSNM 水稻根系重量和根系活力(尤其是单茎占有的根系活性)逐步超过 FFP。SSNM 明显提高了幼穗分化期和抽穗期水稻叶片中谷氨酰胺合成酶、硝酸还原酶和 Fd-谷氨酸合酶的活性。抽穗后 SSNM 处理水稻剑叶的光合速率高于 FFP, 上述结果表明 SSNM 有利于促进水稻中后期根系生长, 提高物质生产和养分吸收, 从而提高氮肥的利用效率。

关键词: 水稻; 实地氮肥管理; 氮肥利用率; 生理机制

Fertilizer-Nitrogen Use Efficiency and Its Physiological Mechanism under Site-Specific Nitrogen Management in Rice

LIU Li-Jun, YANG Li-Nian, SUN Xiao-Lin, WANG Zhi-Qin, and YANG Jian-Chang*

Key Laboratory of Crop Genetics and Physiology of Jiangsu Province, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China

Abstract: Nitrogen (N) fertilizer is one of the most important factors affecting grain yield in rice. High N inputs and low use efficiency is a main problem in rice production in China. Site-specific N management (SSNM) has been considered as a new technique which could increase N use efficiency in rice. However, its underlying mechanism is not understood. In this study, one *indica* hybrid Shanyou 63 and two *japonica* cultivars Wuyujing 3 and Yangjing 9538 were field-grown, and two treatments, SSNM and farmers' fertilizer practice (FFP), were conducted. The results showed that SSNM reduced N rate by 48.1–63.0% and increased grain yield by 0.1–9.3% when compared with FFP. Recovery efficiency and agronomic efficiency of fertilizer-N under SSNM were increased by 31.4–56.8% and 143.6–166.0%, respectively, as compared with those under FFP. The peak of N uptake appeared during the period from panicle initiation to heading. The N uptake during this period and its ratio to total N uptake during the whole growth stage were significantly higher under SSNM than under FFP. The amount of N uptake after heading under SSNM was also much higher than that under FFP. From panicle initiation, root weight and activity (especially root activity per stem) under SSNM were higher than those under FFP. SSNM also significantly increased the activities of glutamine synthetase, nitrate reductase and Fd-glutamate synthase in leaves at the panicle initiation and heading stages. Photosynthetic rate of the flag leaves was also obviously greater under SSNM than under FFP. These results indicated that SSNM could promote root growth, increase matter production and nutrient uptake during the mid and late growth periods, leading to higher fertilizer-N use efficiency in rice.

Keywords: Rice; Site-specific nitrogen management (SSNM); Fertilizer-N use efficiency; Physiological mechanism

水稻是我国最主要的粮食作物, 其播种面积约
占我国粮食作物总面积的 27%, 稻谷产量占全国谷
物总产 40%以上。我国水稻单产已经连续 10 多年超
过 6 t hm⁻², 高出世界平均水平 65%左右, 这对保证

我国乃至世界粮食供应安全和社会稳定起到了十分
重要的作用^[1]。但在另一方面, 随着水稻产量水平的
提高, 化肥特别是氮肥的施用量不断增加。已有统
计数据表明, 我国水稻单季平均施氮量为 180 kg

本研究由国家自然科学基金项目(30771274)和国家科技攻关计划项目(2006BAD02A13-3-2)资助。

* 通讯作者(Corresponding author): 杨建昌, E-mail: jcyang@yzu.edu.cn; Tel: 0514-87979317

第一作者联系方式: E-mail: ljliu@yzu.edu.cn; Tel: 0514-87972133

Received(收稿日期): 2008-12-19; Accepted(接受日期): 2009-04-22.

hm^{-2} , 比世界平均水平高出约 75%^[2]。我国部分高产稻田的施氮量为 270~300 kg hm^{-2} , 高的已达 350 kg hm^{-2} 。过高的氮肥投入使得氮肥利用率过低, 我国水稻的氮肥吸收利用率一般仅有 30%~35%, 较发达国家低 10~15 个百分点。氮肥的农学利用率也由 1958—1963 年的 15~20 $\text{kg kg}^{-1} \text{N}$ 下降至 1981—1983 年的 9.1 $\text{kg kg}^{-1} \text{N}$, 明显低于热带稻区水稻的氮肥农学利用率。在施氮量较高的太湖等稻区, 氮肥的吸收利用率和农学利用率则更低^[3-5]。针对稻田施氮量过高、氮肥利用率低的现状, 我国农学家和土壤学家等从多方面进行了研究, 为稳定我国水稻产量和提高氮肥利用效率, 促进农业可持续发展做出了重要贡献。

实地氮肥管理(site-specific nitrogen management, SSNM)是以氮肥管理为中心, 多元素配合的水稻优质高产高效的施肥模式或技术。该技术的要点是依据土壤养分的有效供给量、水稻产量和稻草对养分的吸收量, 决定总的施肥量范围, 在水稻主要生育期用快速叶绿素测定仪(SPAD)或叶色卡(leaf color chart, LCC)观测叶片氮素情况并依此指导施肥, 从而最大限度地提高肥料利用效率, 获得优质高产的协调发展。试验证明这一模式简单易行, 在菲律宾等东南亚稻区的应用可以较大幅度地降低氮肥施用量, 提高水稻产量和氮肥利用效率^[6-8]。近年来, 在我国江苏省、浙江省等多点多地的试验也取得了类似的效果^[9-11]。这些研究结果对合理施氮, 提高养分资源利用效率, 促进水稻生产的可持续发展起到了十分重要的作用。但是以往关于实地氮肥管理的研究大多侧重于其技术建成及其对水稻产量和氮肥利用效率的影响方面, 而对实地氮肥管理提高氮肥利用效率的生理机理缺乏研究。本试验以代表性水稻品种为材料, 研究了实地氮肥管理水稻主要生育期氮素吸收、根系活性以及叶片氮代谢主要酶类活性的变化特征, 以期阐明实地氮肥管理提高氮肥利用效率的生理机理, 为更加科学地应用该项技术提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试验设计

试验于 2003—2005 年在江苏省江都高徐镇农户稻田和扬州大学江苏省作物栽培生理重点实验室农场进行, 前茬作物为小麦。供试水稻品种(含组合, 以下统称品种) 2003 年和 2004 年分别为常规粳稻武育粳 3 号和籼型三系杂交稻汕优 63, 2005 年为汕优 63 和常规粳稻扬粳 9538。移栽前土壤养分的基本状况见表 1。设置 3 种氮肥处理: (1)氮空白区(全生育期不施用氮肥, 0N); (2)按当地常规施肥方法和施肥量(习惯施肥方法, FFP)。汕优 63 全生育期总施氮量为 240 kg hm^{-2} , 移栽前、分蘖期、幼穗分化期(以保花肥形式施用)和抽穗期分别施 60%、10%、15% 和 15%。武育粳 3 号和扬粳 9538 全生育期总施氮量为 270 kg hm^{-2} , 移栽前、分蘖期、幼穗分化期各施 60%、10% 和 30%, 幼穗分化期所施氮肥中促花肥与保花肥的比例为 3:1; (3)实地氮肥管理(SSNM)(表 2)。

试验中所用氮肥为尿素。5 月 9~10 日播种, 6 月 10~12 日移栽, 汕优 63 单本栽插, 武育粳 3 号和扬粳 9538 双本栽插。株行距为 20 $\text{cm} \times 20 \text{ cm}$, 小区面积为 5 $\text{m} \times 6 \text{ m} = 30 \text{ m}^2$, 重复 4 次, 随机区组排列。移栽前各小区施过磷酸钙(含 P_2O_5 13.5%) 300 kg hm^{-2} 、氯化钾(含 K_2O 52%) 195 kg hm^{-2} 和 $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (含 Zn 23%) 22.5 kg hm^{-2} 。全生育期灌浅水层, 精细管理, 严格控制病、虫、草害。

1.2 测定项目及方法

1.2.1 植株干物重、含氮率、根重和根系活性 分别于分蘖中期、幼穗分化期、抽穗期和成熟期, 各处理用特制取根器挖取代表性植株 5 穴(每穴以稻株基部为中心, 挖取行距为 20 cm , 株距为 20 cm , 深 20 cm 的土块), 从分蘖节处剪开分为地上部和地下部两个部分。地上部烘干测定干物重, 保留样本, 用凯氏定氮法^[12]测定含氮率。根系装于 70 目的筛网袋中, 先用流水冲洗, 再用农用压缩喷雾器冲洗干净, 取部分根系按照章骏德等^[13]的方法测定根系活力, 其余根烘干称重。

表 1 小区试验土壤养分状况
Table 1 The status of soil nutrition of plot experiment

年份 Year	全氮 Total N (g kg^{-1})	速效磷 Available P (mg kg^{-1})	速效钾 Available K (mg kg^{-1})	有机质 Organic matter (g kg^{-1})
2003	1.14	12.3	98.6	10.9
2004	1.43	22.5	82.1	19.2
2005	1.51	28.4	89.4	20.3

表 2 实地氮肥管理的施氮时期及施氮量
Table 2 Stage and amount of N application based on SSNM

时期 Stage	施氮比例 N ratio (%)	氮肥用量 N amount (kg hm ⁻²)
移栽前 Before transplanting	35	50
分蘖期 Tillering	20	30±10 [†]
幼穗分化期 Panicle initiation	35	40±10 [†]
抽穗期 Heading	10	0 或 20, 0 或 20 [‡]
合计 Total	100	100~160

对于汕优 63, [†]: 如果 SPAD>36, 在基数用氮量上减去 10 kg hm⁻²; 如果 34<SPAD<36, 按基数用氮量施肥; 如果 SPAD<34, 在基数用氮量上增加 10 kg hm⁻²。[‡]: 如果 SPAD<36, 施氮 20 kg hm⁻², 否则不施氮。

对于武育梗 3 号和扬梗 9538, [†]: 如果 SPAD>38, 在基数用氮量上减去 10 kg hm⁻²; 如果 36<SPAD<38, 则按基数用氮量施肥; 如果 SPAD<36, 在基数用氮量上增加 10 kg hm⁻²。[‡]: 如果 SPAD<38, 施氮 20 kg hm⁻², 否则不施氮。

For Shanyou 63, [†]: if SPAD>36, apply “basic amount – 10 kg hm⁻²”; if 34<SPAD<36, apply basic amount; if SPAD<34, apply “basic amount + 10 kg hm⁻²” [‡]: if SPAD<36, apply 20 kg hm⁻², otherwise, no need to apply.

For Wuyujing 3 and Yangjing 9538, [†]: if SPAD>38, apply “basic amount – 10 kg hm⁻²”; if 36<SPAD<38, apply basic amount; if SPAD<36, apply “basic amount + 10 kg hm⁻²” [‡]: if SPAD<38, apply 20 kg hm⁻², otherwise, no need to apply.

1.2.2 叶片氮代谢酶类活性 于分蘖中期、穗分化始期和抽穗期, 各处理取样 10 张叶片(抽穗前取心叶以下一张定长叶片, 抽穗期取剑叶), 分别用 Christine 等^[14]和 Hayakawa 等^[15]的方法测定叶片中硝酸还原酶(NR)、谷氨酰胺合成酶(GS)和谷氨酸合酶(GOGAT)的活性。采用 Bradford^[16]方法测定粗酶液中蛋白质的含量, 以牛血清白蛋白(BSA)为标准。

1.2.3 剑叶光合速率 于抽穗期、抽穗后 10 d 和 30 d 分别用 LICOR-6400 光合仪测定剑叶的光合速率, 每个小区测定 5 张叶片, 作为 1 个重复。

1.2.4 考种与计产 收获前 1 d 每小区取样 12 穴, 测定水稻产量构成因素。实收 5 m² 脱粒计产。

2003 年和 2004 年两年的结果与 2005 年结果的趋势基本一致。因此文中除产量和施氮量外, 其他数据均以 2005 年的为主。

2 结果与分析

2.1 施氮量及产量

汕优 63 两年(2004 年和 2005 年)实地氮肥管理(SSNM)的施氮量均为 110 kg hm⁻², 而两粳稻品种为 100~140 kg hm⁻², 分别较习惯施肥法(FFP)少了 130 kg hm⁻² 和 130~170 kg hm⁻², 减幅分别达 54.2% 和 48.1%~63.0% (表 3)。

与 FFP 相比, SSNM 有较好的增产作用, 汕优 63 和扬梗 9538 增产 7.2%~9.3%, 差异显著; 武育梗 3 号增产 0.1%, 差异不显著(表 4)。从产量构成因素分析, SSNM 处理的单位面积穗数有所降低, 但是每穗粒数和结实率均较 FFP 处理有不同程度提高, 且每穗粒数和结实率增加之得超过了单位面积穗数减少之失。武育梗 3 号 SSNM 处理单位面积穗数较 FFP 处理大幅度降低是导致其产量与 FFP 处理无显著差异的重要原因。

3 年 3 个水稻品种氮空白区(0N)的产量变动在 5.5~6.2 t hm⁻² 之间, 均显著低于 SSNM 和 FFP 两处理。

2.2 吸氮量和氮肥利用效率

2.2.1 吸氮量 从不同生育阶段水稻氮素积累状况(图 1)可以看出, 0N(全生育期不施用氮肥)、SSNM 和 FFP 三处理水稻的吸氮高峰均集中在幼穗分化至抽穗。SSNM 处理两品种(汕优 63 和扬梗 9538)整个

表 3 水稻施氮量
Table 3 The amount of N applied in rice (kg hm⁻²)

年份 Year	品种 Cultivar	处理 Treatment	移栽前 Before transplanting	分蘖期 Tillering	幼穗分化期 Panicle initiation	抽穗期 Heading	合计 Total amount
2003	武育梗 3 号 Wuyujing 3	SSNM FFP	50 160	20 30	30 80		100 270
2004	汕优 63 Shanyou 63	SSNM FFP	50 144	30 24	30 36	36	110 240
2005	汕优 63 Shanyou 63	SSNM FFP	50 144	30 24	30 36	36	110 240
2005	扬梗 9538 Yangjing 9538	SSNM FFP	50 160	40 30	50 80		140 270

SSNM: 实地氮肥管理; FFP: 习惯施肥法。

SSNM: site-specific nitrogen management; FFP: farmers' fertilizer practice.

表 4 水稻产量及其构成
Table 4 Grain yield and its components in rice

年份 Year	品种 Cultivar	处理 Treatment	穗数 Panicles No. (m ⁻²)	每穗粒数 Spikelets per panicle	结实率 Filled grain rate (%)	千粒重 1000-grain weight (g)	产量 Grain yield (kg hm ⁻²)
2003	武育粳 3 号 Wuyujing 3	ON	219.9 c	95.6 a	90.2 a	29.1 a	5522.5 b
		SSNM	318.3 b	93.1 a	88.6 ab	28.1 b	7384.5 a
		FFP	388.8 a	78.5 b	86.7 b	27.9 b	7373.0 a
2004	汕优 63 Shanyou 63	ON	181.2 c	140.4 c	80.2 a	30.5 b	6223.0 c
		SSNM	238.6 b	173.4 a	76.4 b	30.2 b	9558.3 a
		FFP	251.1 a	152.4 b	73.4 c	31.1 a	8742.0 b
2005	汕优 63 Shanyou 63	ON	170.7 b	145.1 c	80.5 a	30.1 a	6003.3 c
		SSNM	255.4 a	166.0 a	70.2 b	29.4 b	8750.1 a
		FFP	261.7 a	157.2 b	67.9 c	29.6 ab	8268.3 b
2005	扬粳 9538 Yangjing 9538	ON	200.8 b	140.6 b	82.4 a	24.0 a	5583.2 c
		SSNM	285.8 a	158.0 a	77.0 b	23.7 ab	8240.6 a
		FFP	292.4 a	155.2 a	72.4 c	23.4 b	7688.2 b

ON: 氮空白区; SSNM: 实地氮肥管理; FFP: 习惯施肥法; a、b、c 等不同字母表示在 0.05 水平上差异显著, 同一品种同一年度内比较。

ON: no nitrogen application; SSNM: site-specific nitrogen management; FFP: farmers' fertilizer practice. Values followed by different letters are significantly different at 0.05 level within a same cultivar and a same year.

生育期总吸氮量为 145.6~152.3 kg hm⁻², 其中幼穗分化期至抽穗期的吸收量为 68.9~69.7 kg hm⁻², 占总吸氮量的 45.8%~47.3%。FFP 处理整个生育期的总吸氮量为 170.7~186.8 kg hm⁻², 其中幼穗分化期至抽穗期的吸氮量为 60.3~60.5 kg hm⁻², 占总吸氮量的 35.3%和 34.9%。此阶段无论是吸氮量或是吸氮量占总吸氮量的比例, SSNM 均高于 FFP 处理。此外, SSNM 抽穗后水稻的吸氮量也均明显高于 FFP 处理。

2.2.2 氮肥利用效率 衡量氮肥利用效率的指标通常有吸收利用率、农学利用率和生理利用率, 这些指标从不同侧面反映了水稻对氮肥或氮素利用的

状况^[2]。与 FFP 相比, SSNM 处理氮肥的农学利用率、吸收利用率及生理利用率分别提高了 143.6%~166.0%、31.4%~56.8%和 68.8%~85.6%, 差异均达显著或极显著水平(表 5)。

2.3 根重和根系活性

图 2 为汕优 63 和扬粳 9538 主要生育期根重的变化动态。两品种根重在抽穗前随着生育进程直线上升, 在抽穗期达到最大值, 其后开始下降。ON、SSNM 和 FFP 3 个处理变化趋势一致。抽穗前 FFP 处理的根重大于 SSNM 处理, 在抽穗及其以后 SSNM 处理的根重则大于 FFP 处理。

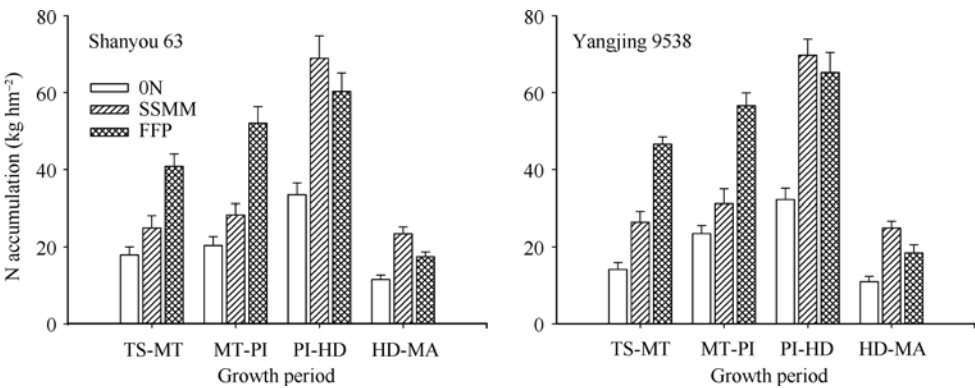


图 1 不同生育阶段水稻氮素积累量的变化

Fig. 1 Changes of N accumulation during different growth periods

TS: transplanting; MT: mid-tillering; PI: panicle initiation; HD: heading; MA: maturity.

ON: no nitrogen application; SSNM: site-specific nitrogen management; FFP: farmers' fertilizer practice.

表 5 水稻氮肥利用效率
Table 5 Fertilizer-N use efficiency in rice

品种 Cultivar	处理 Treatment	吸氮量 N uptake (kg hm ⁻²)	农学利用率 AE (kg Grain kg ⁻¹ N)	吸收利用率 RE (%)	生理利用率 PE (kg Grain kg ⁻¹ N)
汕优 63	0N	83.3	—	—	—
Shanyou 63	SSNM	147.7	25.0**	58.5**	42.7**
	FFP	172.8	9.4	37.3	25.3
扬粳 9538	0N	80.9	—	—	—
Yangjing 9538	SSNM	154.7	19.0**	52.7*	36.0**
	FFP	189.3	7.8	40.1	19.4

农学利用率(kg Grain kg⁻¹ N)=(施氮区水稻籽粒产量-氮空白区水稻籽粒产量)/施氮量, 吸收利用率(%)=(施氮区水稻植株吸氮量-氮空白区水稻植株吸氮量)/施氮量×100; 生理利用率(kg Grain kg⁻¹ N)=(施氮区水稻籽粒产量-氮空白区水稻籽粒产量)/(施氮区水稻植株吸氮量-空白区水稻植株吸氮量)。0N: 氮空白区; SSNM: 实地氮肥管理; FFP: 习惯施肥法; *, **: 表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著, 同一品种同一年度内比较。

Agronomic efficiency (AE, kg Grain kg⁻¹ N) = [Grain yield in the plot applied N fertilizer (G_N) - grain yield in the plot without N application (G₀)] / the amount of N fertilizer applied (F_N); Recovery efficiency (RE, %) = [total aboveground plant N accumulation in the plot applied N fertilizer (T_N) - total aboveground plant N accumulation in the plot without N application (T₀)]/F_N; Physiological efficiency (PE, kg Grain kg⁻¹ N) = (G_N-G₀)/(T_N-T₀). 0N: no nitrogen application; SSNM: site-specific nitrogen management; FFP: farmers' fertilizer practice. *, ** represent significant difference at 0.05 and 0.01 levels, respectively, within a same cultivar and a same year.

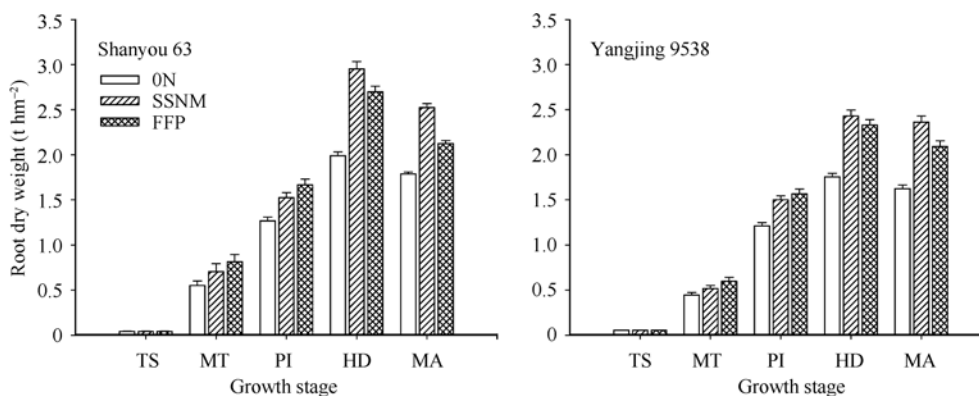


图 2 水稻根系干重动态

Fig. 2 Changes of root dry weight in rice

TS: transplanting; MT: mid-tillering; PI: panicle initiation; HD: heading; MA: maturity.
0N: no nitrogen application; SSNM: site-specific nitrogen management; FFP: farmers' fertilizer practice.

在分蘖中期、穗分化期以及抽穗期对水稻根系活力的测定结果表明(图 3), 分蘖中期两品种(汕优 63 和扬粳 9538)SSNM 处理单穴的根系活力显著低于 FFP 处理。穗分化期 SSNM 处理的根系活力也低于 FFP, 但两者差异不显著。抽穗期 SSNM 单穴根系活力则显著高于 FFP 处理(图 3-A, B)。若将单穴的根系活力转换成单茎所占有的根系活力, 则除了分蘖中期外, 穗分化期和抽穗期 SSNM 的根系活力均显著高于 FFP 处理(图 3-C, D)。

2.4 叶片氮代谢主要酶类活性变化

从叶片氮代谢主要酶类[谷氨酰胺合成酶(GS)、硝酸还原酶(NR)和谷氨酸合酶(GOGAT)]活性来看

(表 6), 除分蘖中期外, 穗分化期和抽穗期 SSNM 处理叶片的 NR、GS 和以铁氧还蛋白为电子供体的 Fd-GOGAT 的活性均显著高于 FFP 处理。GOGAT 的另外一种形式, 即以 NADH 为电子供体的 NADH-GOGAT 的活性, SSNM 与 FFP 两处理间无明显差异, 且其活性很低, 仅为 Fd-GOGAT 活性的 1% 左右。

除 NADH-GOGAT 外, 施氮两处理(SSNM 和 FFP)叶片中 GS、NR 和 Fd-GOGAT 的活性均明显高于不施氮肥处理。

2.5 剑叶光合速率

自抽穗期开始, 剑叶的光合速率逐步下降(图 4)。

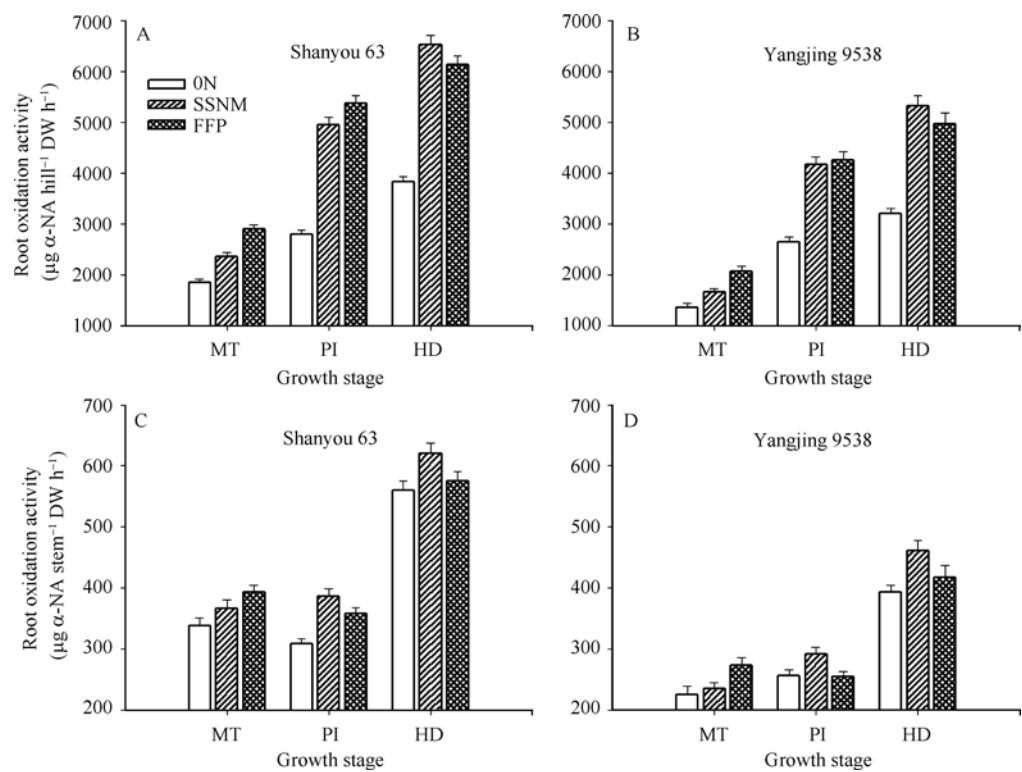


图 3 水稻根系单穴(A, B)和单茎(C, D)活力的变化
Fig. 3 Changes of root activity per hill (A, B) and per stem (C, D)
MT: mid-tillering; PI: panicle initiation; HD: heading; ON: no nitrogen application; SSNM: site-specific nitrogen management; FFP: farmers' fertilizer practice.

表 6 水稻叶片氮代谢酶类活性变化
Table 6 Changes of the activities of main enzymes involved in N metabolism in leaves of rice

品种 Cultivar	酶 Enzyme (nmol min ⁻¹ mg ⁻¹ Protein)	分蘖中期 Mid-tillering			穗分化期 Panicle initiation			抽穗期 Heading		
		ON	SSNM	FFP	ON	SSNM	FFP	ON	SSNM	FFP
汕优 63 Shanyou 63	GS	403.2 c	472.4 b	503.1 a	380.1 c	454.3 a	403.2 b	356.3 c	432.2 a	378.5 b
	NR	243.1 c	288.5 b	318.3 a	232.1 b	273.4 a	263.2 a	187.2 c	255.4 a	212.0 b
	NADH-GOGAT	3.3 a	3.2 a	3.4 a	2.9 a	2.8 a	3.0 a	2.3 a	2.5 a	2.3 a
	Fd-GOGAT	401.2 c	433.7 b	468.3 a	342.1 c	403.2 a	388.2 b	288.1 c	355.7 a	303.4 b
扬粳 9538 Yangjing 9538	GS	388.4 c	439.6 b	476.5 a	350.2 c	423.6 a	400.2 b	332.1 c	402.5 a	365.2 b
	NR	231.2 c	254.1 b	307.9 a	180.3 b	234.1 a	217.5 a	132.1 c	202.1 a	165.4 b
	NADH-GOGAT	3.2 a	3.4 a	3.1 a	3.1 a	3.0 a	2.9 a	2.5 a	2.6 a	2.5 a
	Fd-GOGAT	301.3 c	346.1 b	387.3 a	245.1 c	318.3 a	297.8 b	223.1 c	288.5 a	263.4 b

ON: 氮空白区; SSNM: 实地氮肥管理; FFP: 习惯施肥法; a、b、c 等不同字母表示在 0.05 水平上差异显著, 同一品种同一酶相同时期比较。

ON: no nitrogen application; SSNM: site-specific nitrogen management; FFP: farmers' fertilizer practice. Values followed by different letters are significantly different at 0.05 levels within a same cultivar, a same enzyme and a same stage.

汕优 63 抽穗期 SSNM 处理剑叶的光合速率高于 FFP 处理, 而扬粳 9538 抽穗期 SSNM 和 FFP 两个处理的剑叶光合速率无显著差异。两个品种叶片的光合速率在抽穗后 30 d 均表现为 SSNM 处理显著高于 FFP 处理, 表明 SSNM 有利于提高结实中后期水稻的光合生产能力。两品种不施氮的处理(ON)叶片的光合

速率均显著低于 SSNM 和 FFP 处理。

3 讨论

3.1 实地氮肥管理的水稻产量

本试验表明, 实地氮肥管理模式可以在产量有所增加或显著增加的前提下较大幅度地降低氮肥用

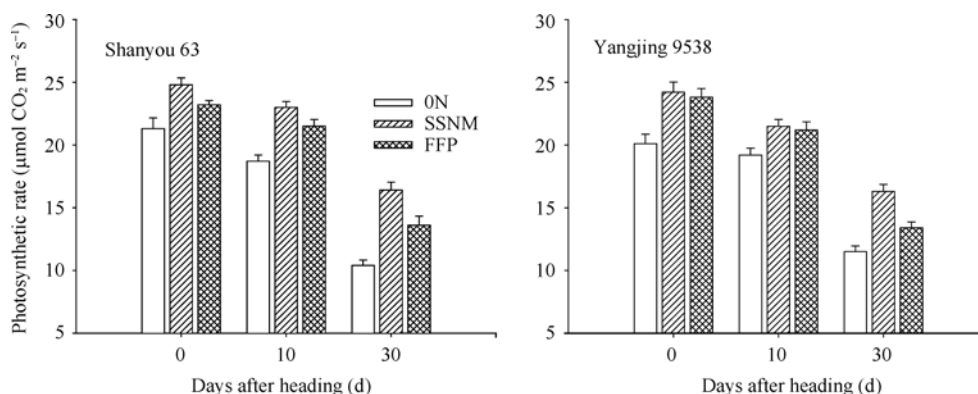


图4 剑叶光合速率的变化

Fig. 4 Changes of photosynthetic rate in flag leaves

0N: no nitrogen application; SSNM: site-specific nitrogen management; FFP: farmers' fertilizer practice.

量,这与以往研究结果一致^[5,10-11]。从产量构成因素分析,实地氮肥管理水稻基肥用量大幅度降低导致其单位面积穗数有不同程度降低,同时使最高茎蘖数明显低于农民习惯施肥方法,茎蘖成穗率提高7~12个百分点,实地氮肥管理水稻的叶面积指数发展也较为合理^[17],使其幼穗分化期单茎占有的干物质量以及单茎叶面积均明显高于农民习惯施肥方法,改善了水稻生长前期的群体质量,为促进壮秆大穗奠定了良好的物质基础。另外,实地氮肥管理提高了水稻幼穗分化期单茎的根系活力和抽穗后叶片的光合能力以及幼穗分化期至抽穗期对氮素的吸收,这些可能是实地氮肥管理水稻每穗粒数和结实率较农民习惯施肥法有所提高,但粒重并未降低的生理原因。本试验也观察到,由于实地氮肥管理基肥用量的大幅度降低使得穗形较小的水稻品种武育梗3号的单位面积穗数较农民习惯施肥方法下降了18.1%,差异达显著水平,虽然其每穗粒数和结实率有不同程度增加,但其增加之得并未明显超过单位穗数减少之失,使得两处理的水稻产量并无明显差异。根据品种的分蘖能力不同,适当增加分蘖能力较弱的水稻品种基肥的施氮量,有可能进一步提高实地氮肥管理水稻的产量。

3.2 实地氮肥管理提高水稻氮肥利用率的生理原因

水稻的吸氮高峰出现在幼穗分化期至抽穗期。自幼穗分化期开始,实地氮肥管理水稻的吸氮量和吸氮比例均明显超过习惯施肥方法,这是其吸收利用率和生理利用率提高的直接原因。实地氮肥管理水稻的根系重量、根系活力(尤其是单茎占有的根系活性)在幼穗分化后均逐步超过习惯施肥方法,实地

氮肥管理还提高了水稻灌浆结实期(抽穗至成熟)的干物质积累量^[17],这些都直接或间接地增加了实地氮肥管理水稻对氮素的吸收。

硝酸还原酶(NR)是植物氮代谢中硝酸盐同化的限速酶^[18],谷氨酰胺合成酶(GS)是以铵离子为底物与谷氨酸(Glu)合成谷氨酰胺(Gln)^[19],而谷氨酰胺合成酶(GOGAT)有两种形式,分别是Fd-GOGAT和NADH-GOGAT,在氨基酸的合成中也起重要的调控作用,两种形式的酶在植物体内不同部位所起作用的侧重点也有所不同^[20]。在本试验条件下,实地氮肥管理明显提高了幼穗分化期和抽穗期水稻叶片中GS、NR和Fd-GOGAT的活性。已有研究表明,植株体内过高的铵浓度会对水稻造成危害^[21-22],较高的GS活性有利于降低稻株体内铵离子浓度,并加速氨基酸的合成。叶片中Fd-GOGAT的活性要明显高于NADH-GOGAT的活性,这与前人的研究结果相一致^[23]。上述酶活性(除NADH-GOGAT)的变化与水稻吸氮量变化相一致,表明上述酶类对水稻吸氮有重要的调控作用。实地氮肥管理有利于提高水稻结实中后期的光合生产能力,这也可能是实地氮肥管理水稻结实期吸氮量较高的重要生理原因之一。

近年来,凌启鸿等^[24-25]提出了水稻精确定量施氮技术,对推动水稻增产提高氮肥利用效率做出了积极贡献,该技术是以斯坦福方程理论为基础,依据产量等级确定水稻需氮量,氮空白区水稻吸氮量确定土壤供氮量,并把40%的氮肥吸收利用率定为夺取高产的临界值,从而确定水稻总施氮量。其研究认为基肥和穗肥比例为5.5:4.5时有利于取得高产。在施氮总量和主要生育期施氮比例的确定上,实地氮肥管理与精确定量施氮有相类似之处^[9,11],但实

地氮肥管理在关键生育期的具体施氮量是依据水稻叶色的变化(用叶绿素仪或叶色卡监测)结合预先设定的施氮量范围进行动态调整, 如果叶色较深则少施氮甚至不施氮, 叶色浅则适当多施氮肥, 更大限度地满足水稻生长对氮素的需求, 从而有利于提高水稻产量和氮肥利用效率。作者在推广应用实地氮肥管理技术过程中发现, 不同类型水稻或同一类型水稻不同品种的叶色存在差异, 使用同一个施氮的临界叶色值仍有一定的局限性, 如何更加科学地使用叶绿素仪或叶色卡确定不同水稻品种的施氮阈值仍值得进一步深入研究。

4 结论

实地氮肥管理可以大幅度提高氮肥利用效率, 获得较高水稻产量。生育中后期根系重量大、根系活力高以及叶片中氮代谢酶活性强是其氮肥利用率和产量较高的重要生理原因。根据品种分蘖和颖花形成能力制定氮肥管理策略, 可望进一步提高水稻产量。

References

- [1] FAO. Statistical Databases, Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations, Rome. <http://www.fao.org>, 2007
- [2] Peng S-B(彭少兵), Huang J-L(黄见良), Zhong X-H(钟旭华), Yang J-C(杨建昌), Wang G-H(王光火), Zou Y-B(邹应斌), Zhang F-S(张福锁), Zhu Q-S(朱庆森). Research strategy in improving fertilizer-nitrogen use efficiency of irrigated rice in China. *Sci Agric Sin* (中国农业科学), 2002, 35(9): 1095–1103 (in Chinese with English abstract)
- [3] Zhu Z-L(朱兆良). Research progresses on the fate of soil N supply and applied fertilizer N in China. *Soil* (土壤), 1985, 17(1): 2–9 (in Chinese)
- [4] 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
- [5] Liu L-J(刘立军), Xu W(徐伟), Xu G-W(徐国伟), Zhou J-L(周家麟), Yang J-C(杨建昌). N-saving effect and its mechanism of site-specific nitrogen management in rice. *Jiangsu J Agric Sci* (江苏农业学报), 2005, 21(3): 155–161 (in Chinese with English abstract)
- [6] Dobermann A, Witt C, Dawe D, Gines H C, Nagarajan R, Satawathananont S, Son T T, Tan P S, Wang G H, Chien N V, Thoa V T K, Phung C V, Stalin P, Muthukrishna P, Ravi V, Babu M, Chatuporn S, Kongchum M, Sun Q, Fu R, Simbaha G C, Adviento M A A. Site-specific nutrient management for intensive rice cropping systems in Asia. *Field Crops Res*, 2002, 74: 37–66
- [7] Dobermann A, Witt C. The evolution of site-specific nutrient management in irrigated rice systems of Asia. In: Dobermann A, Witt C, eds. *Increasing Productivity of Intensive Rice Systems through Site-Specific Nutrient Management*. Los Baños, Philippines: International Rice Research Institute, 2004. pp 75–100
- [8] Peng S, Garcia F V, Laza R C, Sanico A L, Visperas R M, Cassman K G. Increased N-use efficiency using a chlorophyll meter on high yielding irrigated rice. *Field Crops Res*, 1996, 47: 243–252
- [9] Wang G-H(王光火), Zhang Q-C(张奇春), Huang C-Y(黄昌勇). SSNM-A new approach to increasing fertilizer N use efficiency and reducing N loss from rice fields. *J Zhejiang Agric Univ (Agric Life Sci)* (浙江大学学报·农业与生命科学版), 2003, 29(1): 67–70 (in Chinese with English abstract)
- [10] Liu L J, Sang D Z, Liu C L, Wang Z Q, Yang J C, Zhu Q S. Effects of real-time and site-specific nitrogen managements on rice yield and nitrogen use efficiency. *Agric Sci China*, 2004, 3(4): 262–268
- [11] Liu L-J(刘立军), Xu W(徐伟), Sang D-Z(桑大志), Liu C-L(刘翠莲), Zhou J-L(周家麟), Yang J-C(杨建昌). Site-specific nitrogen management increases fertilizer-nitrogen use efficiency in rice. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2006, 32(7): 987–994 (in Chinese with English abstract)
- [12] Bremner J M, Mulvaney C S. Nitrogen-total. In: Page A L ed. *Methods of Soil Analysis*. Part 2. 2nd edn. Agron Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI. 1982. pp 595–624
- [13] Zhang J-D(章骏德), Liu G-P(刘国屏), Shi Y-Y(施永永). *Research Methods of Plant Physiology* (植物生理研究法). Nanchang: Jiangxi People's Publishing House, 1982. pp 52–57 (in Chinese)
- [14] Foyer C H, Valadier M H, Migge A, Thomas W B. Drought-induced effects on nitrate reductase activity and mRNA and on the coordination of nitrogen and carbon metabolism in maize leaves. *Plant Physiol*, 1998, 117: 283–292
- [15] Hayakawa T, Yamaya T, Mae T, Ojima K. Changes in the content of two glutamate synthase proteins in spikelets of rice (*Oryza sativa*) plants during ripening. *Plant Physiol*, 1993, 101: 1257–1262
- [16] Bradford M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Anal Biochem*, 1976, 72, 248–254
- [17] Liu L-J(刘立军), Xu W(徐伟), Wu C-F(吴长付), Yang J-C(杨建昌). Characteristics of growth, development and nutrient uptake in rice under site-specific nitrogen management. *Chin J Rice Sci* (中国水稻科学), 2007, 21(2): 191–197 (in Chinese with English abstract)
- [18] Foyer C H, Noctor G, Lelandaïs M, Lescure J C, Valadier M H, Boutin J P, Horton P. Short-term effects of nitrate, nitrite and ammonium assimilation on photosynthesis, carbon partitioning and protein phosphorylation in maize. *Planta*, 1994, 192: 211–220
- [19] Mifflin B J. Ammonia assimilation. In: Mifflin B J ed. *The Biochemistry of Plants: Amino Acids and Derivatives*. New York: Academic Press, 1980. pp 169–202
- [20] Sechley K A, Yamaya T, Oaks A. Compartment of nitrogen assimilation in higher plants. *Int Rev Cytol*, 1992, 134: 85–163

- [21] Mo L-Y(莫良玉), Wu L-H(吴良欢), Tao Q-N(陶勤南). Effects of different nitrogen forms on rice seedlings under sterilized culture at high temperature. *Plant Nutr Fert Sci* (植物营养与肥料学报), 2002, 8(2): 157–161 (in Chinese with English abstract)
- [22] Husted S, Hebborn C A, Mattsson M, Schjoerring J K. A critical experimental evaluation of methods for determination of NH_4^+ in plant tissue, xylem sap and apoplastic fluid. *Physiologia Plantarum*, 2000, 109: 167–179
- [23] Lam H M, Coschigano K T, Oliveira I C, Melo-Oliveira R, Coruzzi G M. The molecular genetics of nitrogen assimilation into amino acids in higher plants. *Annu Rev Plant Physiol Plant Mol Biol*, 1996, 47: 569–593
- [24] Ling Q-H(凌启鸿), Zhang H-C(张洪程), Dai Q-G(戴其根), Ding Y-F(丁艳锋), Ling L(凌励), Su Z-F(苏祖芳), Xu M(徐茂), Que J-H(阙金华), Wang S-H(王绍华). Study on precise and quantitative N application in rice. *Sci Agric Sin* (中国农业科学), 2005, 38(12): 2457–2467 (in Chinese with English abstract)
- [25] Ling Q-H(凌启鸿), Zhang H-C(张洪程), Ding Y-F(丁艳锋), Dai Q-G(戴其根), Ling L(凌励), Wang S-H(王绍华), Xu M(徐茂). Precise and quantitative cultivation for high yield in rice. *North Rice* (北方水稻), 2007, (2): 1–9 (in Chinese with English abstract)

欢迎订阅 2010 年《遗传学报》和《遗传》

《遗传学报》、《遗传》是中国遗传学会和中国科学院遗传与发育生物学研究所主办、科学出版社出版的学术期刊,中国精品科技期刊,已被美国化学文摘(CA)、生物学数据库(BIOSIS)、生物学文摘(BA)、医学索引(Medical Index)、俄罗斯文摘杂志(AJ)以及 NCBI、CABI 等 20 多种国内外重要检索系统与数据库收录。刊登内容涉及遗传学、发育生物学、基因组学、细胞生物学以及分子进化等。读者对象为基础医学、农林牧渔、生命科学领域的科研与教学人员、研发人员、研究生、大学生、中学生物学教师等。

2005 年,《遗传学报》获得第三届国家期刊奖提名奖,2006—2009 年,连续获得中国科协精品科技期刊工程项目(B 类)资助。自 2007 年起,《遗传学报》的外文刊名变更为 *Journal of Genetics and Genomics*, 2008 年,《遗传学报》被 SCI-E 收录。

《遗传学报》(ISSN 1673-8527, CN11-5450/R)为月刊,全年 12 期,国内邮发代号 2-819,国外发行代号: M63。2010 年定价 50 元,全年 600 元。http://www.jgenetgenomics.org/

《遗传》(ISSN 0253-9772, CN11-1913/R)为月刊,全年 12 期。国内邮发代号 2-810,国外发行代号: M62。2010 年定价 50 元,全年 600 元。http://www.Chinagene.cn

遗传学会会员个人直接向编辑部订阅《遗传学报》和《遗传》,5 折优惠,免收邮寄费。欢迎订阅,欢迎网上注册投稿,欢迎刊登广告

地址:北京市北辰西路 1 号院:中国科学院遗传与发育生物学研究所编辑室(邮编:100101)

电话:010-64807669; 传真:010-64807786

主编:薛勇彪, E-mail: ybxue@genetics.ac.cn; 编辑室主任:李绍武, E-mail: swli@genetics.ac.cn