

实地氮肥管理对寒地水稻干物质积累和产量的影响

彭显龙¹, 刘元英¹, 罗盛国¹, 范立春¹, 宋添星¹, 郭艳文²

(¹东北农业大学资源与环境学院, 哈尔滨 150030; ²庆安县和平水利灌溉站, 庆安 152000)

摘要:【目的】以寒地 5 个粳稻品种为试验材料, 研究实地氮肥管理的增产机理。【方法】2004 和 2005 年, 通过农民习惯施肥和实地氮肥管理的大田对比试验和不同 SPAD 阈值的小区试验, 探讨实地氮肥管理对水稻群体质量、干物质积累规律和氮积累的影响。【结果】与农民习惯施肥相比, 实地氮肥管理使氮肥总量平均减少了 33.8%, 水稻成穗率平均提高了 12.3% ($P < 0.05$), 灌浆期水稻叶面积指数提高了 14.1%~27.6% ($P < 0.05$), 抽穗期以后水稻干物质增加了 4.3%~29.1%, 抽穗后干物重与产量呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$), 产量平均增加了 9.8%; 抽穗后氮积累量增加了 11.8%~55.1% ($P < 0.05$), 氮肥吸收利用率和农学利用率分别提高了 38.5%~133.4% ($P < 0.05$) 和 39.78%~194.26% ($P < 0.05$)。【结论】该技术通过改善水稻群体质量, 增加抽穗后 LAI, 促进干物质和氮积累, 增加水稻产量和氮肥利用率。

关键词: 寒地; 水稻; 实地氮肥管理; 产量; 干物质; 氮肥利用率

Effects of the Site-Specific Nitrogen Management on Yield and Dry Matter Accumulation of Rice in Cold Areas of Northeastern China

PENG Xian-long¹, LIU Yuan-ying¹, LUO Sheng-guo¹, FAN Li-chun¹, SONG Tian-xing¹, GUO Yan-wen²

(¹Resource and Environment College, Northeast Agricultural University, Harbin 150030; ²Heping Irrigation Station, Qing'an 152000)

Abstract: 【Objective】Using 5 rice varieties in cold areas, the effects of increasing yield and mechanism of site-specific nitrogen management (SSNM) were studied; 【Method】Scientists conducted research on critical SPAD value and experiments of two fertilization methods, SSNM and farmer's fertilization practice (FFP). These were done to study the effects on rice population quality and dry matter accumulation of rice, as well as N uptake; 【Result】compared with FFP, SSNM significantly decreased the average N rate by 33.8%, significantly increased average earbearing tiller rate and LAI after grain filling stages by 12.3% and 14.1%-27.6%. It also improved dry matter weight and N uptake after heading period by 0.4%-29.1% and 11.8%-55.1% ($P < 0.05$), and heightened recovery efficiency and agronomic efficiency by 38.5%~133.4% ($P < 0.05$) and 39.78%-194.26% ($P < 0.05$), respectively. It increased the average yield by 1.1%-33.3% in 2004 and 2005. 【Conclusion】The results suggested that accumulation rate of dry matter and N makes rice yield and N use efficiency increase because of improving rice population and increasing LAI after heading period.

Key words: Cold area; Rice; Site-specific nitrogen management; Yield; Dry matter; N use efficiency

0 引言

【本研究的重要意义】黑龙江省是中国优质粳稻的主产区, 近年来水稻产量提高很快。但是水稻生产中普遍存在氮肥施用量过高, 氮肥施用时期不合理的问题^[1], 前期施用的氮肥被大量的浪费, 不但造成肥料利用率低, 而且直接和间接地导致一系列不良的环

境问题^[2]。解决这一问题对提高水稻产量和生产效率具有重要意义。【前人研究进展】中国氮肥利用率为 30%~35%, 低于世界平均水平^[3], 黑龙江省水稻氮肥利用率低的只有 22.2%^[4]。研究者认为氮肥用量过高、施肥时期不合理是氮肥利用率低的主要原因^[2,5]。因此确定合适氮肥用量, 使施肥与作物需肥规律相一致一直是国内外研究热点, 国际水稻所的实地氮肥管理技

收稿日期: 2006-02-11; 接受日期: 2006-08-07

基金项目: 国家自然科学基金重大项目 (30390080) 和农业部“948”项目 (2003-Z53) 资助

作者简介: 彭显龙 (1976-), 男, 黑龙江依安人, 讲师, 博士研究生, 研究方向为植物营养与施肥。Tel: 0451-55190439; Fax: 0451-55191170; E-mail: PXL0508@163.com。通讯作者刘元英 (1954-), 辽宁建平人, 教授, 研究方向为植物营养与施肥。Tel: 0451-55190439; E-mail: yuanyingl@163.com

术 (site-specific nitrogen management, SSNM) 即具有这样的作用。该技术在中国南方应用, 不仅提高水稻产量且显著提高肥料利用率^[6-8]。在寒地, 刘元英等首先应用该技术, 并获得了寒地水稻调整追肥的 SPAD 阈值^[9]。在寒地, 应用该技术并未出现农户担心的施用穗粒肥会造成水稻的倒伏、贪青迟熟等现象。相反 SSNM 技术使水稻产量有所增加, 氮肥利用率显著提高。【本研究切入点】但 SSNM 对寒地水稻干物质和氮积累规律的影响未见报道。【拟解决的关键问题】作者设置了大田对比试验和不同 SPAD 阈值小区试验, 研究干物质和氮积累对水稻产量和氮肥利用率的影响, 揭示 SSNM 技术增产原理。

表 1 各试验点土壤肥力状况

Table 1 Soil fertility at experiment sites

| 年份 Year | 地点 Site | 有机质 O.M.(g·kg ⁻¹) | 全氮 Total N(g·kg ⁻¹) | 速效磷 Avail. P(mg·kg ⁻¹) | 速效钾 Avail. K(mg·kg ⁻¹) | pH |
|------------|-----------------|----------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-----|
| 2004 | 阿城 Acheng | 46.6 | 2.06 | 32.4 | 129.2 | 6.2 |
| | 857 农场 857 Farm | 48.3 | 2.06 | 39.3 | 67.0 | 6.1 |
| | 友谊农场 Youyi farm | 51.7 | 2.30 | 32.2 | 211.8 | 6.5 |
| 2005 | 庆安 Qing'an | 38.4 | 2.14 | 45.1 | 87.6 | 5.7 |
| | 五常 Wuchang | 30.8 | 2.00 | 52.7 | 75.5 | 5.9 |
| | 852 农场 852 Farm | 47.2 | 2.21 | 44.9 | 50.1 | 6.0 |
| | 木兰 Mulan | 27.3 | 1.82 | 33.2 | 114.5 | 6.1 |
| | 850 农场 850 Farm | 32.6 | 1.80 | 73.7 | 38.9 | 5.5 |

1.2 试验方法

1.2.1 试验设计

大田对比试验: 设农民习惯施肥 (farmer's fertilization practice, FFP) 和 SSNM 两个处理。阿城的 SSNM 和 FFP 处理面积均为 0.33 ha, 重复 5 次; 友谊农场和 857 农场各 0.66 ha, 庆安各 1 ha; 五常、木兰和 852 农场各 0.5 ha, 均重复 3 次。为了计算肥料利用率, 在其中的 1 次重复中以土壤分隔出 25 m² 的小区作减氮区, 不施氮肥, 磷、钾肥用量同 SSNM 处理。2004 年的阿城、857 农场、友谊农场和 2005 年的庆安、五常、852 农场、木兰 SSNM、FFP 处理分别缩写为: AS、AF、857S、857F、YS、YF、QS、QF、WS、WF、852S、852F 和 MS、MF。氮、磷、钾总量依据土壤有机质、有效磷和钾含量, 按土壤养分校正系数法和目标产量确定。预设 857 农场的总氮量为 120 kg·ha⁻¹, 其余地点均为 90 kg·ha⁻¹。2004 年基肥、分蘖肥、穗肥和粒肥比例为 3:3:3:1, 采用 SPAD=38 作为追肥微调穗肥和粒肥氮量的阈值。穗分化期: SPAD>40, 追施 20%; 38<SPAD<40, 追施

1 材料与方法

1.1 试验材料

对比试验于 2004 和 2005 年在黑龙江省第 1 积温带的阿城市城建乡、五常市民乐乡红光村、第 2 积温带的庆安县平安乡小江店村、木兰县利东乡三胜村和第 3 积温带的友谊农场、857 农场和 852 农场农户田中进行。小区试验在 850 农场进行。阿城、五常、庆安和木兰的水稻品种分别为松粳 98-128、五优稻 1 号、庆 20-4 和龙粳 8 号, 农场的品种均为空育 131, 试验品种均是当地主栽品种。

供试肥料为: 尿素、硫酸铵、磷酸二铵、过磷酸钙和硫酸钾。土壤肥力如表 1。

肥 30%; SPAD<38, 追施 40%; 抽穗期: SPAD>38, 不追; SPAD<38, 追施 10%; 2005 年, 试验方案调整为基肥、分蘖肥、促花肥和保花肥比例为 4.5:2:1.5:2。SPAD>40, 穗分化期和减数分裂期均追施 10%; 38<SPAD<40, 分别追 15% 和 20%; SPAD<38, 分别追施 20% 和 30%; 木兰以叶色卡值 (leaf color chart value, LCC) 指导氮肥施用, LCC>4.0, 均追 10%; 3.5<LCC<4.0, 分别追施 15% 和 20%, LCC<3.5, 分别追 20% 和 30%。磷肥全部作基肥, 钾肥一半作基肥, 一半在穗分化期和氮肥一同施用。阿城、五常移栽密度为 33.3 cm×16.7 cm, 庆安为 30 cm×13.2 cm, 其余地点移栽密度均为 30 cm×12.5 cm, 每穴插 2~3 株。友谊农场是井水灌溉, 其它试验点采用河水灌溉, 按常规方法管理。

小区试验: 2005 年, 850 农场小区试验设 5 个处理, N0: 减氮区; FFP: 农民常规施肥; SSNM1、SSNM2 和 SSNM3 处理, 预设氮肥总量分别为 90、120 和 150 kg·ha⁻¹, SSNM1、SSNM2 和 SSNM3 处理分别以 38、40 和 42 作为微调追肥用量的阈值, 氮肥比例同田间

试验。小区面积 50 m²，随机区组排列，3 次重复。各小区间用塑料板相隔，单排单灌，田间管理一致。对

比试验和小区试验施肥量和时期如表 2。

1.2.2 样品采集与测试 分蘖数、SPAD 值、产量构

表 2 施肥时间和施肥量 (kg·ha⁻¹)

Table 2 Timing and amount of fertilizer applied

| 年份 Year | 处理 Treatment | 基肥施氮量 Basal N rate | 第 1 次追肥 | | 第 2 次追肥 | | 第 3 次追肥 | | 总氮 Total N | 总磷 Total P ₂ O ₅ | 总钾 Total K ₂ O |
|------------|-----------------|-----------------------|--------------------|---------------|--------------------|---------------|--------------------|---------------|------------------|--|---------------------------------|
| | | | 1st N top dressing | | 2nd N top dressing | | 3rd N top dressing | | | | |
| | | | 日期 Date | 施氮量 N rate | 日期 Date | 施氮量 N rate | 日期 Date | 施氮量 N rate | | | |
| 2004 | AF | 52 | 5.30 | 81 | - | - | - | - | 133 | 52 | 90 |
| | AS | 27 | 5.27 | 31 | 6.30 | 27 | 8.3 | 9 | 94 | 25 | 90 |
| | 857F | 19 | 6.8 | 80 | 7.1 | 41 | 8.1 | 7 | 147 | 48 | 27 |
| | 857S | 36 | 6.8 | 42 | 7.1 | 36 | 8.1 | 0 | 114 | 21 | 65 |
| | YF | 36 | 6.1 | 57 | 6.18 | 56 | 7.2 | 36.8 | 185 | 46 | 35 |
| | YS | 27 | 6.1 | 31 | 7.2 | 27 | 8.1 | 0 | 85 | 25 | 30 |
| 2005 | QF | 70 | 6.5 | 7 | - | - | - | - | 77 | 46 | 42 |
| | QS | 40 | 6.2 | 18 | 6.25 | 14 | 7.12 | 18 | 90 | 25 | 90 |
| | WF | 54 | 5.24 | 22 | 6.12 | 16 | 7.15 | 19 | 111 | 20 | 54 |
| | WS | 40 | 5.24 | 18 | 6.27 | 14 | 7.12 | 18 | 90 | 25 | 90 |
| | 852F | 12 | 6.1 | 76 | 6.14 | 48 | 7.6 | 17 | 153 | 18 | 18 |
| | 852S | 40 | 6.1 | 18 | 6.23 | 14 | 7.6 | 18 | 90 | 21 | 75 |
| | MF | 70 | 6.8 | 23 | 6.17 | 52 | - | - | 145 | 60 | 22 |
| | MS | 40 | 6.8 | 18 | 6.24 | 14 | 7.6 | 18 | 90 | 25 | 75 |
| | FFP | 52 | 5.25 | 31 | 6.22 | 10 | 7.2 | 20 | 113 | 52 | 51 |
| | SSNM1 | 32 | 5.25 | 18 | 6.22 | 7 | 7.6 | 18 | 75 | 21 | 120 |
| | SSNM2 | 46 | 5.25 | 24 | 6.22 | 11 | 7.6 | 24 | 105 | 21 | 120 |
| | SSNM3 | 60 | 5.25 | 30 | 6.22 | 18 | 7.6 | 30 | 138 | 21 | 120 |

成因素和土壤肥力均参考范立春采用的方法^[9]。2004 年在穗分化期、抽穗期和成熟期，2005 年在庆安、五常和 850 农场小区于穗分化期、减数分裂期、抽穗期和成熟期按测定水稻产量构成因素的方法取样，在成熟期每大区实收测产。按常规分析方法测定干物重和含氮量。水稻叶面积指数参见李荣田采用的方法^[10]。

1.2.3 数据分析 按下式计算氮肥利用率。

$$\text{氮肥吸收利用率 (\%)} = (\text{施氮区地上部吸氮量} - \text{空白区地上部吸氮量}) / \text{施氮量} \times 100\%$$

$$\text{氮肥农学利用率 (kg·kg}^{-1}\text{)} = (\text{施氮区产量} - \text{空白区产量}) / \text{施氮量}$$

$$\text{氮肥生理利用率 (kg·kg}^{-1}\text{)} = (\text{施氮区产量} - \text{空白区产量}) / (\text{施氮区地上部分吸氮量} - \text{空白区地上部吸氮量})$$

$$\text{氮肥偏生产力 (kg·kg}^{-1}\text{)} = \text{施氮区产量} / \text{施氮量}$$

试验数据均采用 Microsoft excel 2000 统计软件处理，田间试验按 *t* 检验方法进行显著性分析。小区试验按邓肯法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 SSNM 对水稻分蘖动态和分蘖成穗率的影响

几个试验点各时期平均分蘖见图 1。在分蘖期，SSNM 和 FFP 处理分蘖差异不显著，从穗分化期到减数分裂期，FFP 处理分蘖显著高于 SSNM，收获期两处理无差异；但是穗分化期友谊农场两处理间分蘖数基本相同。SSNM 处理分蘖成穗率在 80%~91% 间，平均比 FFP 处理增加 12.3%，达 5% 显著水平。

2.2 SSNM 对水稻干物质和氮积累的影响

表 3 显示，穗分化前，田间对比试验 SSNM 处理水稻干物质和氮积累总量比 FFP 处理低 6.0%~27.1% 和 10.7%~27.4%；从穗分化期到抽穗期，虽然 SSNM 处理(除阿城外)水稻干物质积累量和吸氮量均比 FFP 处理高，但抽穗期前 SSNM 处理干物质和氮积累总量(庆安除外)均低于 FFP 处理；抽穗期后，SSNM 处理干物质和氮积累量分别比 FFP 处理提高了 4.3%~29.1% 和 34.6%~55.1%，氮积累差异达 5% 的显著水平。抽穗到成熟期，庆安 SSNM 处理积累了 18.00 kg·ha⁻¹，而 FFP 处理氮积累量为负值，这可能与后期水稻脱肥而引起早衰，使得叶片脱落和植株中的氮挥发损失加剧有关。小区试验中，基肥用量越大，穗

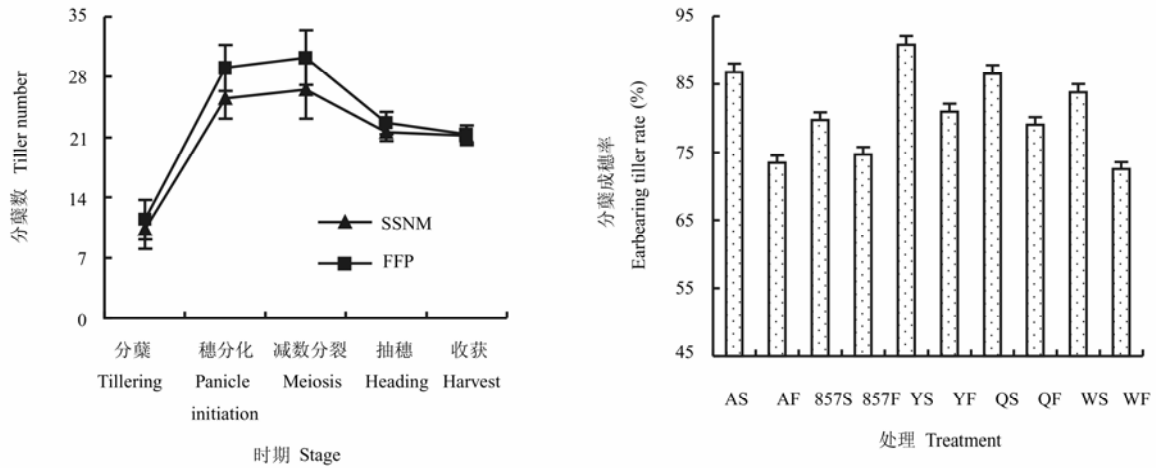


图 1 SSNM 对水稻分蘖动态和分蘖成穗率的影响

Fig. 1 Effects of SSNM on tiller number and earbearing tiller rate of rice

表 3 SSNM 对水稻干物质和氮积累的影响

Table 3 Effect of SSNM on dry matter weight and N uptake of rice

| 年份 Year | 处理 Treatment | 干物重 Dry matter weight (t·ha ⁻¹) | | | | 吸氮量 N uptake (kg·ha ⁻¹) | | | |
|---------|--------------|---|---------------|-------------|------------|-------------------------------------|---------------|-------------|------------|
| | | 穗分化期 Panicle initiation | 减数分裂期 Meiosis | 抽穗期 Heading | 成熟期 Mature | 穗分化期 Panicle initiation | 减数分裂期 Meiosis | 抽穗期 Heading | 成熟期 Mature |
| 2004 | AS | 0.51 a | - | 8.34 a | 13.70 a | 21.75 a | - | 92.17 a | 110.18 a |
| | AF | 0.70 b | - | 8.84 a | 13.60 a | 29.95 b | - | 94.14 a | 106.27 a |
| | 857S | 0.77 a | - | 8.14 a | 12.94 a | 37.72 a | - | 89.69 a | 115.01 a |
| | 857F | 0.85 a | - | 8.16 a | 12.76 a | 46.13 b | - | 95.11 a | 111.44 a |
| | YS | 0.78 a | - | 10.18 a | 15.09 a | 26.34 a | - | 83.12 a | 114.99 a |
| | YF | 0.83 a | - | 10.29 a | 14.40 a | 29.48 b | - | 88.79 a | 112.47 a |
| 2005 | QS | - | 2.33 a | 8.26 a | 13.19 a | - | 41.97 a | 87.45 a | 105.45 a |
| | QF | - | 2.54 a | 8.26 a | 12.08 b | - | 44.72 a | 83.40 a | 80.23 b |
| | WS | 0.88 a | 4.30 a | 8.63 a | 13.58 a | 35.03 a | 65.90 a | - | 95.72 a |
| | WF | 1.03 b | 4.55 a | 8.72 a | 13.13 b | 42.24 b | 66.09 a | - | 92.26 a |
| | FFP | 0.55 a | 2.14 a | 6.40 a | 11.95 a | 17.08 a | 56.43 a | 100.63 a | 133.81 a |
| | SSNM1 | 0.47 b | 1.92 a | 7.30 a | 12.97 a | 13.20 b | 44.78 b | 104.18 a | 142.47 a |
| | SSNM2 | 0.54 a | 1.99 a | 6.68 a | 12.55 a | 16.71 a | 52.83 a | 108.13 a | 151.98 a |
| | SSNM3 | 0.65 c | 2.20 a | 6.37 a | 12.54 a | 20.79 c | 58.92 a | 110.74 a | 152.72 a |

不同字母代表达到 5% 的显著水平。下同

Different letters represented significant difference at 0.05 level. The same as below

分化期前水稻干物质和氮积累的越多；穗分化到抽穗期，随基肥用量增加，干物质和氮积累量反而降低；抽穗后，FFP 处理氮积累量比 SSNM 各处理低 11.8%~26.5%，达 5% 的显著水平，干物质积累差异不显著。

2.3 SSNM 对抽穗后水稻叶面积指数的影响

2005 年，抽穗期和灌浆期水稻 LAI 如图 2-a 所示：抽穗期，庆安 SSNM 处理叶面积指数高于 FFP 处理，五常处理间无差异；在灌浆期，与 FFP 处理相比，庆安和五常 SSNM 处理水稻 LAI 提高了 14.6% 和 14.1%，均达到了 5% 的显著水平。由小区试验结果图 2-b 可

知，抽穗后 FFP 处理叶面积指数最低，SSNM 各处理随着后期氮肥用量增加叶面积指数有增加趋势；灌浆期，与 FFP 处理相比，SSNM 各处理叶面积指数提高了 14.2%~27.6%，均达到 5% 的显著水平。

2.4 SSNM 对水稻产量的影响

表 4 试验结果表明，与 FFP 处理相比，田间试验 SSNM 处理水稻结实率增加了 0.1~12.5 个百分点，千粒重提高了 0.3~1.8 g，不同施肥处理水稻穗数差异不大，穗粒数有增加趋势，水稻产量增加了 1.1%~33.3%，平均增产 9.8%。其中友谊农场、庆安、五常

和木兰水稻产量分别提高了 8.3%、33.3%、11.2% 和 16.1%，均达到了 5% 的显著水平。SSNM 处理水稻经济系数均比 FFP 处理高，2004 年的经济系数比 2005 年高，这主要与这两年气候有关，2004 年水稻结实率高因而经济系数高。小区试验结果显示，SSNM1 处理结实率比其它处理高 10.0%~16.2%，达 5% 显著水平；SSNM2、SSNM3 处理穗数显著高于 SSNM1、FFP 处理，FFP 处理后氮肥比例低，钾肥用量不足可能是其成穗率低的原因；SSNM 处理产量比 FFP 处理高 1.1%~5.4%。

对田间试验干物质积累量与水稻产量进行了相关

分析，穗分化期到抽穗期水稻干物质积累量与产量间相关系数为 $r=0.653 < r_{0.05}=0.754$ ($n=7$)，相关不显著。抽穗后水稻干物质积累量与产量间相关系数为 $r=0.839 > r_{0.01}=0.798$ ($n=9$)，达到了 1% 的显著水平；小区试验水稻产量和氮肥用量的效应函数为 $y = -0.0001x^2 + 0.0294x + 6.8$ ，相关系数 0.912，达 1% 显著水平。小区最高产量施肥量为 $147 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ，氮肥用量由 $105 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ 增加到 $147 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ，用量增加了 40%，但产量只降低 0.8%，因些从投入和产出角度看，水稻氮肥用量在 105 kg，产投比较高。

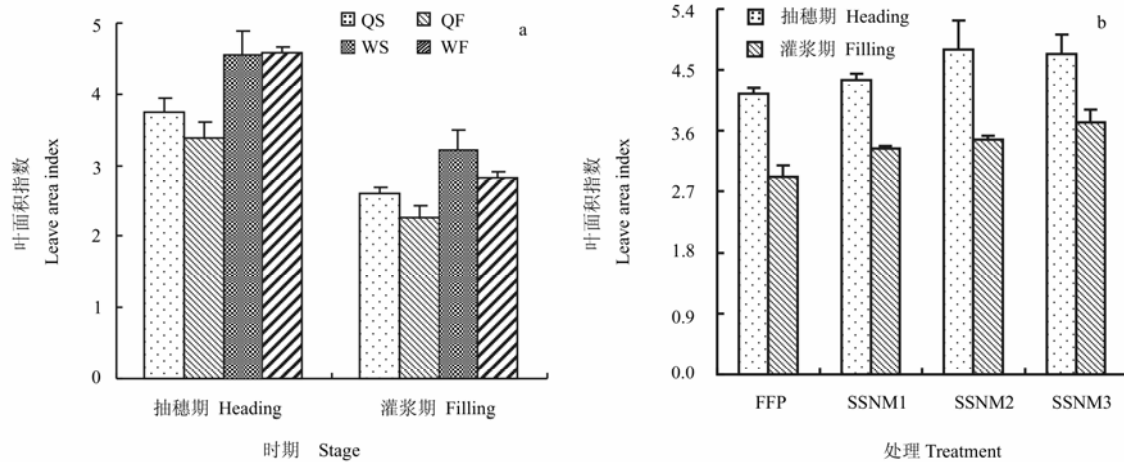


图 2 对比试验 (a) 和小区试验 (b) SSNM 对水稻叶面积指数的影响

Fig. 2 Effect of SSNM on leaf area index (LAI) of rice in field (a) and plot (b) experiments

表 4 实地氮肥管理对水稻产量性状的影响

Table 4 Effect of SSNM on rice yield index

| 年份 Year | 处理 Treatment | 穗数 Panicle number ($\times 10^4$ panicle/ha) | 穗粒数 Grains per panicle | 结实率 Filled grain rate (%) | 千粒重 1000-grain weight (g) | 产量 Yield ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) | 经济系数 Harvest index |
|---------|--------------|---|------------------------|---------------------------|---------------------------|---|--------------------|
| 2004 | AS | 364 a | 101.0 a | 93.6 a | 26.7 a | 9326 a | 0.63 a |
| | AF | 391 a | 95.6 a | 91.8 a | 26.0 a | 9156 a | 0.62 a |
| | 857S | 478 a | 71.0 a | 90.0 a | 27.4 a | 8386 a | 0.61 a |
| | 857F | 510 a | 68.8 a | 88.2 a | 26.7 a | 8157 a | 0.60 a |
| | YS | 612 a | 68.0 a | 94.1 a | 27.7 a | 9629 a | 0.63 a |
| | YF | 536 b | 72.6 a | 94.0 a | 27.4 a | 8890 b | 0.61 a |
| 2005 | QS | 398 a | 83.1 a | 86.0 a | 25.6 a | 8000 a | 0.55 a |
| | QF | 402 b | 78.4 a | 82.6 a | 25.0 a | 6000 b | 0.54 a |
| | WS | 357 a | 98.3 a | 80.8 a | 26.7 a | 7993 a | 0.57 a |
| | WF | 352 a | 96.6 a | 75.6 a | 25.9 a | 7185 b | 0.56 a |
| | 852S | 535 a | 72.6 a | 85.4 a | 26.7 a | 8700 a | - |
| | 852F | 559 a | 72.2 a | 79.0 a | 26.4 a | 8430 a | - |
| | MS | 536 a | 76.2 a | 88.6 a | 27.7 a | 9024 a | - |
| | MF | 480 b | 75.8 a | 76.1 b | 25.9 a | 7771 b | - |
| | FFP | 587 a | 68.8 a | 80.0 a | 25.0 a | 8284 a | - |
| | SSNM1 | 575 a | 70.5 a | 88.0 b | 25.6 a | 8371 a | - |
| | SSNM2 | 650 b | 70.8 a | 75.7 a | 25.0 a | 8687 a | - |
| | SSNM3 | 678 b | 70.4 a | 76.6 a | 24.8 a | 8734 a | - |

2.5 SSNM 对水稻氮肥利用率的影响

表 5 试验结果表明, 阿城、857 农场的 SSNM 处理氮肥生理利用率和 FFP 处理无明显差异, 而友谊农场、庆安的 SSNM 处理比 FFP 处理提高了 26.5% 和 40.4%, 达 5% 的显著水平。与 FFP 处理相比, SSNM 处理氮肥吸收利用率、氮肥农学利用率和氮肥偏生产力 (庆安除外) 分别增加了 38.5%~133.4%、39.78%~

194.26% 和 16.32%~134.38%, 均达到了 5% 的显著水平。小区试验中, 与 FFP 处理相比, SSNM1 处理氮肥吸收利用率和农学利用率分别提高 90.0% 和 59.3%, 均达 5% 显著水平; 各处理氮肥生理利用率无差异, 随着氮肥用量增加, 氮素吸收利用率、农学利用率和偏生产力显著下降。

表 5 SSNM 对水稻氮肥利用率的影响

Table 5 Effect of SSNM on N use efficiency of rice

| 年份 Year | 处理 Treatment | 氮肥吸收利用率 Recovery efficiency (%) | 氮肥农学利用率 Agronomic efficiency (kg·kg ⁻¹) | 氮肥生理利用率 Physiological efficiency (kg·kg ⁻¹) | 氮肥偏生产力 Partial factor productivity (kg·kg ⁻¹) |
|------------|-----------------|---------------------------------------|---|---|---|
| 2004 | AS | 46.4 a | 32.5 a | 70.0 a | 88.3a |
| | AF | 29.8 b | 21.6 b | 73.9 a | 60.4 b |
| | 857S | 35.4 a | 15.3 a | 42.8 a | 73.6 a |
| | 857F | 25.0 b | 11.0 b | 43.7 a | 63.2 b |
| | YS | 40.5 a | 28.7 a | 70.9 a | 98.8 a |
| | YF | 17.4 b | 9.8 b | 56.0 b | 42.2 b |
| 2005 | QS | 55.8 a | 29.8 a | 53.4 a | 71.7 a |
| | QF | 40.2 b | 15.3 b | 38.1 b | 70.1 a |
| | FFP | 30.2 a | 11.8 a | 39.0 a | 66.0 a |
| | SSNM1 | 57.0b | 18.8 b | 32.5 a | 100.5 b |
| | SSNM2 | 49.8 c | 16.1 c | 34.0 a | 74.5 c |
| | SSNM3 | 38.4 d | 12.6 ad | 32.9 a | 57.0 d |

3 讨论

寒地由于早春气温较低, 在栽培管理上, 始终以促进分蘖早生快发为核心, 强调基肥的施用。与 SSNM 相比, 分蘖前期 FFP 水稻分蘖数并不高, 只是在分蘖中后期分蘖数增高, 而收获时两处理分蘖数基本相同。说明大量施基肥的 FFP 不但未明显促进分蘖早生快发, 相反由于分蘖成穗率低, 因此收获时水稻穗数基本相同。钟旭华指出, 成穗率与穗分化始期干重以及穗分化始期干重占开花期干重的比例都呈极显著负相关, 前期干物质积累越多, 分蘖成穗率越低^[11]。本试验结果也显示, 穗分化期前, FFP 水稻干物质积累总量和比例均高于 SSNM, 其分蘖成穗率也低。另外, 水稻前期分蘖过多, 往往导致单茎重小, 不利于形成大穗^[11], 这一点也在本试验中得到证实。因此, 一味追求“早生快发”, 导致前期群体“发过头”, 对提高成穗率和高产是不利的。凌启鸿等指出, 在保证获得适宜穗数的前提下, 提高群体的茎蘖成穗率是水稻群体质量的重要指标, 当成穗率达到 80% 以上, 在此基础上, 群体的各项指标均可以全面优化,

实现高产稳产^[12]。笔者的试验也证实, 合理氮素调控使 SSNM 处理的水稻分蘖成穗率达到了 80% 以上, 显著提高抽穗后的叶面积指数, 改善水稻群体质量, 促进抽穗后干物质积累。此时积累的干物质主要集中在穗中, 因此干物质积累量与水稻产量相关关系达极显著水平。说明在保证抽穗前具有适宜的干物质积累条件下, 抽穗后干物质积累对增加水稻产量贡献更大。这段时间集中在穗中的干物质也有利于籽粒更饱满, 这正是 SSNM 水稻结实率和千粒重较高的原因。以上结果表明, 寒地水稻大量施用基肥是不科学的, 前氮适量后移有利于控制无效分蘖发生, 提高分蘖成穗率, 增加后期叶面积指数, 改善水稻群体质量, 促进抽穗后干物质和养分积累, 从而提高水稻千粒重和结实率, 增加水稻产量。

在穗分化期, 通常 SSNM 处理的水稻分蘖数低, 但友谊农场的 SSNM 比 FFP 处理高。这可能因该地是井水灌溉, 分蘖期水温低, 此时碳水化合物合成受阻, 氮的受体减少^[13], 加之农户稻田氮肥用量高, 造成铵态氮在水稻体内的积累, 抑制水稻早期分蘖发生, 使水稻前期分蘖减少, 分蘖成穗率降低, 最终 FFP 的

穗数显著降低。一般认为氮肥生理利用率不会有显著差异,而井水灌溉 FFP 处理的氮肥生理利用率显著降低,这也从侧面印证了井水灌溉前期过高的氮确实抑制了水稻生长。因此在井灌区前期氮肥用量更不能高,同时要采取一些增温措施提高水温,这样才能促进水稻干物质积累,提高产量。

长期以来一直认为,寒地土壤有机质含量高,随气温升高,到 7、8 月份有机氮矿化会释放大量的有效氮,再施氮会造成贪青晚熟。事实上,前期大量施氮,无论后期施氮与否,FFP 均比 SSNM 晚抽穗 2~3 d。根据笔者 5 年的试验(2001~2005 年),水稻贪青晚熟不决定于后期氮肥施用量,而是决定于营养生长期氮的用量。因分蘖期过高的氮会促进新根的大量发生,而细胞分裂素是在新根的根尖上分泌,势必使根尖细胞分裂素含量增加,过高的细胞分裂素能延长营养生长期^[14],使抽穗时间延后,这有待深入研究。

本试验根据土壤养分状况,把氮肥用量降低了 30% 以上,尤其在水稻生育前期大量减少氮肥用量。虽然 SSNM 前期水稻吸氮量较少,但由于在水稻吸收养分最快、需要量最多的穗分化期施用氮肥^[15],显著增加了该时期水稻吸氮量。而 FFP 前期长势过旺,群体质量下降,生育中后期养分积累量显著降低,最终 SSNM 氮积累总量超过 FFP,这是 SSNM 提高水稻氮肥利用率的主要原因。在中国和菲律宾,良好的养分管理可使水稻的氮肥农学利用率达 20 kg·kg⁻¹ 以上^[16,17]。本试验中,农民习惯施肥的农学利用率平均为 14.4 kg·kg⁻¹,SSNM 水稻的氮肥农学利用率平均高达 25.0 kg·kg⁻¹,产量多数也达到 9.0 t·ha⁻¹ 以上,这不能认为是氮肥不足。国内外研究结果表明,每 100 kg 稻谷吸氮量变动在 1.4~2.97 kg,江苏南京地区平均为 2.1 kg^[12],笔者实测水稻吸氮量平均只有 1.6 kg,这样弥补同样水稻产量需要补充的氮量要少得多,这是农学利用率高的主要原因。857 和 850 农场空白区产量达 6.8 t/ha,土壤背景氮过高是两地氮肥农学利用率低于平均值的原因^[2,8]。

与农民习惯施肥相比,2004 年 SSNM 水稻产量只增加 4.3%,在中国南方各地点的试验结果也基本是平产或产量稍有增加,该技术最突出的优势是提高肥料利用率^[18~21]。2005 年,SSNM 水稻产量平均增加 14.7%,增产显著。这与把穗分化期 1 次施肥调整为穗分化期和减数分裂期 2 次施肥有关,笔者认为增产多少决定于施肥时期和施肥比例的选择。因此如何进一步调整水稻氮肥施用时期和比例,在资源高效利用

的同时提高产量,需要深入研究。

4 结论

通过前氮后移的实地氮肥管理,可合理调控水稻的碳氮代谢,从而保证水稻具有适宜穗数,减少无效分蘖的发生,提高分蘖成穗率,改善水稻群体质量,促进提早抽穗,利于形成大穗;同时能控制水稻抽穗前期干物质的积累,增加抽穗后期干物质和养分积累量,从而增加水稻结实率,提高水稻千粒重,在显著降低水稻氮肥施用量的前提下,增加水稻产量。由此可见,穗分化期、减数分裂期根据水稻叶片 SPAD 值适当调控氮肥追施量,使穗分化期后氮肥比例增加到总氮量的 30%~40% 的氮肥管理技术是完全可行的,具有在广大寒地稻区推广的前景。

致谢: 在试验方案形成过程中,中国农业大学资源与环境学院的申建波教授、浙江大学资源与环境学院王光火教授、扬州大学农学院的凌启鸿教授、杨建昌教授和华中农业大学作物生理与栽培研究中心的黄见良教授给予了大力支持和帮助,在此表示衷心的感谢!

References

- [1] 孙淑红. 黑龙江省水稻生产与科研现状. 中国农学通报, 2004, 20(1): 233-235.
Sun S H. The rice production and current situation of scientific researches in Heilongjiang Province. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2004, 20(1): 233-235. (in Chinese)
- [2] 彭少兵, 黄见良, 钟旭华, 杨建昌, 王光火, 邹应斌, 张福锁, 朱庆森, Roland Buresh, Christian Witt. 提高中国稻田氮肥利用率的策略. 中国农业科学, 2002, 35: 1095-1103.
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. Research strategy in improving fertilizer-nitrogen use efficiency of irrigated rice in China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35: 1095-1103. (in Chinese)
- [3] 李庆逵. 中国农业持续发展中的肥料问题. 江西: 江西科学技术出版社, 1997.
Li Q K. *Fertilizer Issues in the Sustainable Development of China Agriculture*. Jiangxi: Jiangxi Science and Technology Press, 1997. (in Chinese)
- [4] 韩晓增, 王守宇, 宋春雨, 乔云发. 黑土区水田化肥氮去向的研究. 应用生态学报, 2003, 14 (11): 1859-1862.
Han X Z, Wang S Y, Song C Y, Qiao Y F. Fate of fertilizer nitrogen in paddy field of black soil region. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(11): 1859-1862. (in Chinese)

- [5] 朱兆良. 氮素管理与粮食生产和环境. 土壤学报, 2002, 39(增刊): 1-11.
Zhu Z L. Nitrogen management in relation to food production and environment in China. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(Suppl.): 1-11. (in Chinese)
- [6] 刘立军, 桑大志, 刘翠莲, 王志琴, 杨建昌, 朱庆森. 实时实地氮肥管理对水稻产量和氮素利用率的影响. 中国农业科学, 2003, 36: 1456-1461.
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. *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, 36: 1456-1461. (in Chinese)
- [7] 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. *Agronomy Journal*, 2001, 93: 869-878.
- [8] 刘立军, 徐伟, 徐国伟, 周家麟, 杨建昌. 水稻实地氮肥管理技术的节氮效果及其机理. 江苏农业学报, 2005, 21(3): 155-161.
Liu L J, Xu W, Xu G W, Zhou J L, Yang J C. N-saving effect and its mechanism of site-specific nitrogen management in rice. *Jiangsu Journal of Agricultural Science*, 2005, 21(3): 155-161. (in Chinese)
- [9] 范立春, 彭显龙, 刘元英, 宋添星. 寒地水稻实地氮肥管理的研究与应用. 中国农业科学, 2005, 38: 1761-1766.
Fan L C, Peng X L, Liu Y Y, Song T X. Study on the site-specific nitrogen management of rice in cold area of northeastern China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38: 1761-1766. (in Chinese)
- [10] 李荣田, 秋太权, 金学泳. 寒地水稻品种成熟期叶面积变化过程及其对结实率的影响. 东北农业大学学报, 2002, 33(2): 105-110.
Li R T, Qiu T Q, Jin X Y. Varietal difference in change process of leaf area per plant during ripening period and their effects to percentage of ripened grains of rice in cold area. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2002, 33(2): 105-110. (in Chinese)
- [11] 钟旭华, 彭少兵, John E. Sheehy, 刘鸿先. 水稻群体成穗率与干物质积累动态关系的模拟研究. 中国水稻科学, 2001, 15(2): 107-112.
Zhong X H, Peng S B, Sheehy J S, Liu H X. Relationship between productive tiller percentage and biomass accumulation in rice (*Oryza sativa* L.): A simulation approach. *Chinese Journal of Rice Science*, 2001, 15(2): 107-112. (in Chinese)
- [12] 凌启鸿. 作物群体质量. 上海: 上海科学技术出版社, 2000: 156-158.
Ling Q H. *Crop Population Quality*. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2000: 156-158. (in Chinese)
- [13] 孙羲. 作物营养与施肥. 北京: 农业出版社, 1990: 102-155.
Sun X. *Crop Nutrition and Fertilization*. Beijing: Agricultural Press, 1990: 102-155. (in Chinese)
- [14] H. Marschner (主编). 李春俭 (译). 高等植物的矿质营养. 北京: 中国农业大学出版社, 2001: 91-126.
Marschner H (Editor). Li C J (Translation). *Mineral Nutrition of Higher Plant*. Beijing: Chinese Agricultural University Press, 2001: 91-126. (in Chinese)
- [15] Peng S, Cassman K G. Upper thresholds of nitrogen uptake rates and associated nitrogen fertilizer efficiencies in irrigated rice. *Agronomy Journal*, 1998, 90(2): 178-195.
- [16] Peng S B, Buresh R J, Huang J L, Yang J C, Zou Y B, Zhong X H, Wang G H. Over-application of nitrogen fertilizer in intensive rice system in China. In: Li C J, Zhang F S, Dobermann A, Hinsinger P, Lambers H, Li X L, Marschner P, Maene L, Mcgrath S, Oenema O, Peng S B, Rengel Z, Shen Q R, Welch R, Von W N, Yan X L, Zhu Y G. *Plant Nutrition for Food Security, Human Health and Environmental Protection*. Beijing: Tsinghua University Press, 2005: 62-63.
- [17] Dobermann A, Simbahan G C, Moya P F, Adiviento M A A, Tiongco M, Witt C, Dawe D. Methodology for socioeconomic and agronomic on-farm research in the RTDP project. In: Dobermann A, Witt C, Dawe D. *Increasing Productivity of Intensive Rice Systems Through Site-specific Nutrient Management*. Science Publisher, Inc., and International Rice Research Institute. Los Banos, Philippines. 2004: 11-27.
- [18] Dobermann A, Abdulrachman S, Gines H C, Nagarajan R, Satawatananon S, Son T T, Tan P S, Wang G H, Simbahan G C, Adiviento M A A, Wilt C. Agronomic performance of site-specific nutrient management in intensive rice-cropping systems of Asia. In: Dobermann A, Witt C, Dawe D. *Increasing Productivity of Intensive Rice Systems Through Site-specific Nutrient Management*. Science Publisher, Inc., and International Rice Research Institute. Los Banos, Philippines. 2004: 307-336.
- [19] 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. *Agricultural Sciences in China*, 2004, 3: 262-268.
- [20] Cassman K G, Gines G C, Dizon M A, Samson M I, Alcantara J M. Nitrogen-use efficiency in tropical lowland rice systems — contributions from indigenous and applied nitrogen. *Field Crops Research*, 1996, 47: 1-12.
- [21] Peng S B, Buresh R J, Huang J L, Yang J C, Zou Y B, Zhong X H, Wang G H, Zhang F S. Strategies for overcoming low agronomic nitrogen use efficiency in irrigated rice systems in China. *Field Crops Research*, 2006, 96(1): 37-47.