

氮肥运筹模式对双季稻北缘水稻氮素吸收利用及产量的影响

吴文革^{1,2}, 张四海¹, 赵决建³, 吴桂成², 李泽福¹, 夏加发¹

(1 安徽省农业科学院水稻研究所, 农业部长江中下游稻作技术创新中心, 安徽合肥 230031;

2 扬州大学农学院, 扬州 225009; 3 安徽省桐城市农技推广中心, 231400)

摘要: 在双季稻北缘地区, 以常规品种早籼 65 和杂交组合香两优 68 为试验材料, 在施氮量 150 kg/hm² 的条件下, 研究了不同氮肥运筹模式对早稻产量及氮素吸收利用特性的影响。结果表明: 减少基、蘖肥, 提高穗肥比例可增加抽穗一成熟期的叶片含氮量, 使 SPAD 值维持较高水平, 提高齐穗后的绿叶面积和有效叶面积率, 提高群体光合势, 有利于促进干物质积累而提高产量和氮素吸收, 常规稻和杂交稻均以基: 蘖: 穗 = 50: 25: 25 运筹模式产量最高; 前氮后移增施穗肥因能为水稻整个生育期提供比较平衡的氮素供应, 可促进氮素的吸收; 氮肥当季利用效率随穗肥比例提高而增加, 但氮肥的农学利用率与产量有更好的对应关系。基: 蘖: 穗 = 50: 25: 25 的运筹模式是双季稻北缘地区早稻合理的施肥技术。

关键词: 早稻; 氮肥运筹; 产量; 吸氮特性

中图分类号: S511.4⁺2.062

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2007)05-0757-08

Nitrogen uptake, utilization and rice yield in the north rimland of double-cropping rice region as affected by different nitrogen management strategies

WU Wen-ge^{1,2}, ZHANG Si-hai¹, ZHAO Jue-jian³, WU Gui-cheng², LI Ze-fu¹, XIA Jia-fa¹

(1 Rice Cultivation Technology Innovation Center in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River, Ministry of Agriculture, Institute of Rice Science, Anhui Agriculture Academy, Hefei 230031, China;

2 Agricultural College, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China;

3 Anhui Province Tongcheng City Center of Agricultural Extension, Tongcheng 231400, China)

Abstract: Two early indica rice cultivars of Xiangliangyou 68 and Zaoxian 65 were used to study nitrogen uptake, utilization, yield and yield components as affected by different split N application strategies when the total nitrogen application amount was 150 kg/ha in the north rimland of double-cropping rice. Results showed that reducing N application before transplanting and at tillering stage but increasing N application at booting stage could increase rice yield and nitrogen uptake and utilization, by increasing leaf nitrogen content and SPAD in top 3 leaves during heading stage to mature stage, and increasing LAI and effective leaf area percentage. When nitrogen fertilizer was applied before transplanting (50%), tillering (25%), booting (25%), both hybrid and conventional rice cultivars had highest yield. The main benefit of postponing N fertilizer application time on yield formation was related to its improved splitting and timing of fertilizer N applications leading to a more balanced supply of N nutrition for rice growth than the common fertilizer practice, and to increase total amount of N-absorption (ANA). Nitrogen fertilizer use efficiency (NUE) increased with the percentage of panicle fertilizer, but the agronomic use efficiency of N fertilizer had better relationship with yield. It is concluded that the split application of N before transplanting (50%), at tillering stage (25%) and at booting stage (25%) is a rational

收稿日期: 2006-06-05

修改稿收到日期: 2007-01-29

基金项目: 国家粮食丰产科技工程项目(2004BA520A21, 2006BAD02A06); 农业部结构调整专项(06-03-05B)资助。

作者简介: 吴文革(1967—), 男, 安徽安庆人, 博士, 副研究员, 主要从事水稻生理生态研究。Tel: 0551-2160196, E-mail: wengewu@sohu.com

N application strategy in the north rimland of double-cropping rice.

Key words: early rice; nitrogen management; yield; characters of nitrogen uptake

水稻是我国最主要的粮食作物之一,氮素是限制水稻生长发育及产量形成的重要养分因子^[1]。近年来水稻生产上大量使用氮肥引起稻田氮肥利用率下降^[2],不仅造成资源浪费,而且会导致严重的环境污染。这种现象已经引起人们的普遍关注^[3-4]。稻田氮肥吸收和利用与氮肥运筹关系密切,合理的氮肥施用能促进水稻生产发育、提高产量,从而提高水稻氮素吸收利用^[5-6]。研究表明,分次施肥不仅能满足水稻不同生育期对氮素的需求,而且可有效地降低氮素损失^[2],不失为提高水稻氮肥利用率的有效技术措施。水稻对不同生育期追施氮肥的吸收利用表现出较大差异,后期施肥的氮肥利用率明显高于前期施肥^[7]。适当增加穗粒肥比率,可以提高氮肥的吸收利用率与生产效率^[8]。后期施肥对提高水稻群体质量和产量也有重要作用,因此合理增施穗肥是水稻高产群体质量的重要优化调控技术^[9-12]。本文在综合前人研究的基础上,系统研究我国双季稻北缘地区生态条件下氮肥运筹和穗肥比率对氮素吸收、利用及产量形成的影响,为建立不同生态区水稻高效利用氮素的优化调控技术提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

本研究包括 2004 年、2005 年早季和 2006 年早季水稻共 3 个田间试验。本文主要分析 2005 年的试验结果,2006 年的试验设计在前两年的基础上精简了处理,并突出测定重点。试验结果进行误差同质分析。

试验一:于 2004~2005 年连续在双季稻北缘的怀宁县农科所试验农场进行。试验地土壤 pH 6.3,有机质 1.79 g/kg,全 N 1.57 g/kg,速效 P 9.58 mg/kg,速效 K 75.3 mg/kg。供试品种选用香两优 68 和早籼 15,3 月 26 日播种,湿润育秧,播量 150 kg/hm²,30 d 秧龄,栽插株行距 20 cm × 13.3 cm。香两优 68 每穴 2 粒种子苗,早籼 65 每穴 3 粒种子苗。本田前茬空闲,栽前两犁两耙一耖,平田后区划作埂,并用薄膜覆盖包埋,保证各小区单独排灌。按设计施肥,总施肥量 N、P₂O₅、K₂O 分别为 150、75、120 kg/hm²,其中磷肥(P₂O₅),钾肥(K₂O)的用量各处理一致、均作基肥一次施入,氮肥施用量及分配按表 1

设计进行。基肥在移栽前 3 d 施入,分蘖肥于移栽后 5 d 施入,穗肥在倒 3.5 叶施用。氮肥用尿素,磷肥用过磷酸钙,钾肥用氯化钾。试验小区面积 29 m²,每品种 14.5 m²,随机区组排列,三次重复。

表 1 移栽早稻氮肥运筹试验设计

Table 1 Design of split nitrogen application strategies for early indica rice test

处理 Treat.	占肥料施用总量的百分数 (%) Percentage of total nitrogen		
	基肥 Basic fert.	分蘖肥 Tiller. fert.	穗肥 Ear fert.
	B ₇ T ₃ E ₀	70	30
B ₆ T ₃ E ₁	60	30	10
B ₆ T ₂ E ₂	60	20	20
B ₅ T _{2.5} E _{2.5}	50	25	25
B ₄ T ₃ E ₃	40	30	30
B ₃ T ₃ E ₄	30	30	40
CK	0	0	0

试验二:于 2006 年早季在双季稻北缘的桐城市农技推广中心试验场进行,试验田为下蜀系黄土发育的马肝泥土,土壤有机质 27.6 g/kg,全 N 1.8 g/kg,有效 P 5.7 mg/kg,有效 K 63 mg/kg,土壤肥力中等。供试早稻品种为早籼 15,试验处理选取上年度的处理 B₇T₃E₀、B_{2.5}T_{2.5}E_{2.5}、B₃T₃E₄ 和 CK,小区面积 15 m²,三次重复随即排列,田间管理同试验一。

1.2 测定项目与方法

1) 叶龄、茎蘖动态:栽后每隔 5 d 各小区定 2 个非边行点(每点连续 10 穴)调查茎蘖数和叶龄,直至齐穗期。

2) 干物质和叶面积测定:于分蘖期(移栽后 20 d)(Tillering stage, TS)、拔节期(Jointing stage, JS)、孕穗期(Booting stage, BS)、抽穗期(Heading stage, HS)、灌浆结实期(抽穗后 20 d)(Grain-filling stage, GS)、成熟期(Mature stage, MS)几个关键生育期,按调查群数每小区取样 3 穴,分茎、叶、穗各器官分别测定干物重;采用长宽系数法测定叶面积,即 $S = K \times L \times D$ (其中 L 为叶片长, D 为叶片宽; K 为叶面积换算系数,本研究中 K 取 0.75)。

3) 叶绿素含量测定:于孕穗期、齐穗期(Full heading stage, FhS)、成熟期用 SPAD-502 型叶绿素测

定义测定功能叶的相对叶绿素含量 (SPAD), 于孕穗期每小区选 20 株生长相对一致的稻株, 挂牌标记, 跟踪联体无损测定上三叶 SPAD 值, 测定部位为距叶基部 2/3 的非叶脉处^[13], 求其平均值。

4) 植株含氮量测定: 在关键生育期取样, 分茎、叶、穗各器官分别粉碎、过筛后烘干, 用凯氏半微量定氮法测定各器官的全氮含量。

5) 测产和考种: 成熟期各小区平均取 5 株样, 考查产量结构; 分小区收割、晒干后计实产。

1.3 氮素吸收与利用效率的计算

氮素积累总量 (Total nitrogen accumulation, TNA) = 成熟期单位面积全株地上部 (茎、叶和穗) 干物重 (W) × 植株含氮率 (茎、叶和穗含氮的加权平均)。

氮素干物质生产效率 (Nitrogen dry matter production efficiency, NDMPE) = 单位面积植株干物质重 (W) / 单位面积植株氮素积累总量 (TNA)。

氮素稻谷生产效率 (Nitrogen grain production efficiency, NGPE) = 单位面积籽粒产量 / 单位面积植株 N 积累量。

百公斤子粒吸氮量 (The amount of absorbing nitrogen per 100 kg grains, 100 kg-AAN) = (氮素积累总量 / 稻谷产量) × 100。

氮素收获指数 (Nitrogen harvest index, NHI) = (成熟期单位面积植株穗部氮素积累量 / 植株氮素积累总量) × 100%。

氮素回收效率 (Nitrogen recovery efficiency, NRE) = (施 N 处理植株 N 素积累量 - 不施 N 处理植株 N 素积累量) / 施 N 量 × 100%。

氮肥当季氮素利用率 (Nitrogen fertilizer use efficiency, NUE) = (施氮处理总吸氮量 - 不施氮肥处理总吸氮量) / 总施氮量 × 100%。

氮素农艺效率 (Productivity of grains to the total nitrogen fertilizer applied, TNP) = (施肥处理稻谷产量 - 不施氮肥处理稻谷产量) / 总施氮量 × 100%。

2 结果与分析

2.1 不同施氮处理对产量及其构成因素的影响

从表 2 可以看出, 杂交稻香两优 68 不同施肥处理的产量高低顺序依次为处理 B₅T_{2.5}E_{2.5}、B₄T₃E₃、B₆T₂E₂、B₃T₃E₄、B₆T₃E₁、B₇T₃E₀、CK, 常规稻早籼 65 不同施肥处理的产量高低顺序基本一致。无论是理论产量还是实收产量两品种均以处理 B₅T_{2.5}E_{2.5} 为最高; 其次, 杂交组合香两优 68 为处理 B₄T₃E₃, 但处理 B₄T₃E₃ 与处理 B₅T_{2.5}E_{2.5} 之间差异不显著; 常规品种

表 2 香两优 68、早籼 65 不同氮肥运筹处理的产量及其构成 (2004 ~ 2005)
Table 2 Yield and instrument of xiangliangyou 68 and early indica rice 65 under different nitrogen fertilizer operations

品种 Variety	处理 Treat.	有效穗数 Effective panicles (× 10 ⁴ /hm ²)	穗粒数 Grains per panicle (No.)	群体颖花量 Total amount of spikelets (× 10 ⁴ /hm ²)	结实率 Seed setting (%)	千粒重 1000-grain weight (g)	理论产量 Theoretical yield (kg/hm ²)	实收产量 Harvested yield (kg/hm ²)	
香两优 68	B ₇ T ₃ E ₀	418.05 a	85.5 b	35744.0 a	80.2 e	24.8 b	7110.1 c	6780.0 d	
	Xiangliang	401.25 b	87.4 b	35071.8 a	81.4 de	25.1 ab	7166.3 bc	6908.5 cd	
	liang	384.45 c	93.6 a	35983.3 a	82.1 cd	25.2 ab	7453.7 ab	7182.0 abc	
	you 68	B ₅ T _{2.5} E _{2.5}	381.75 cd	93.4 a	35656.1 a	83.1 bc	25.5 a	7600.4 a	7405.5 a
		B ₄ T ₃ E ₃	378.15 cd	92.8 a	35088.7 a	84.6 b	25.0 b	7420.7 abc	7287.0 ab
		B ₃ T ₃ E ₄	372.6 d	95.1 a	35446.6 a	83.2 bc	24.8 b	7310.9 abc	7006.5 bed
	CK	245.25 e	88.2 b	21626.1 b	86.8 a	25.5 a	4793.2 d	4614.0 e	
早籼 65	B ₇ T ₃ E ₀	399.91 a	91.6 d	36627.8 a	75.1 f	23.5 cd	6462.6 b	6429.3 c	
	Zaoxian65	386.32 b	93.2 cd	36000.0 a	78.1 e	23.8 bc	6690.8 b	6569.5 bc	
		B ₆ T ₂ E ₂	369.85 c	100.2 b	37190.7 a	80.3 d	23.9 bc	7135.5 a	6911.0 a
		B ₅ T _{2.5} E _{2.5}	365.55 cd	99.3 b	36313.1 a	82.4 c	24.2 b	7237.5 a	7035.5 a
		B ₄ T ₃ E ₃	363.5 cd	99.0 b	35986.1 a	83.9 b	23.6 cd	7124.6 a	6834.0 ab
		B ₃ T ₃ E ₄	358.55 d	104.1 a	37321.2 a	81.5 c	23.3 d	7122.4 a	6754.7 ab
	CK	223.45 e	95.1 c	21247.2 b	85.6 a	24.6 a	4478.6 c	4371.9 d	

注 (Note): 同一品种同列中不同字母表示在 0.05 水平差异显著, 下同。Data of same variety in each column followed by different letter indicates significant difference at 0.05 level, and the same symbol was used for other tables.

早籼 65 产量居第二位的为处理 $B_6T_2E_2$, 但处理 $B_6T_2E_2$ 与处理 $B_5T_{2.5}E_{2.5}$ 之间的差异也不显著。其后的产量排序两品种均依次为处理 $B_3T_3E_4$ 、 $B_6T_3E_1$ 、 $B_7T_3E_0$ 和 CK, 与处理 $B_5T_{2.5}E_{2.5}$ 差异显著。

方差分析结果表明, 实收产量和理论产量及其构成因素中, 除结实率在处理间、品种间以及处理与品种间的互作极显著外, 其它各项在品种和处理间的互作均不显著, 但处理间均达显著或极显著水平, 品种间差异有的显著而有的不显著。

2.2 穗肥比例与产量之间的关系

在施氮量相同的条件下, 两品种产量均随穗肥增加而提高, 当穗肥比例达 25% 左右时产量最高, 之后穗肥比增加产量反而下降, 即表现为产量与穗肥比例均呈极显著的抛物线关系(图 1), 说明生育后期穗肥施用比例要合理。通过寻优计算, 穗肥施氮量占总施氮量的比例为 23.6% (稍小于 25.0%) 时, 常规稻早籼 65 产量最高; 穗肥施氮量占总施氮量的比例为 27.2% (稍大于 25.0%) 时, 杂交早稻香两优 68 产量最高。虽然品种间表现略有差异, 但均以基: 蘖: 穗 = 50: 25: 25 的氮肥运筹方式易于获得高产。

2.3 穗肥比例对后期功能叶叶面积的影响

增施氮穗肥, 后期上三叶叶面积增大, 与不施氮

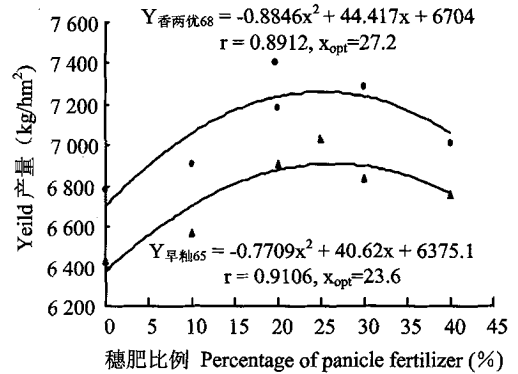


图 1 穗肥比例与产量的关系(2004 ~ 2005)

Fig.1 Relation between yield and the percentage of panicle fertilizer

肥(CK)相比, 施氮处理的叶面积显著增大; 施氮量相同时, 上三叶叶面积随穗肥比例的增加而增加。而且随着生育进程, 这种差异越来越大, 即穗肥比例越大, 功能叶面积衰减越慢(表 3)。说明在总施氮量相同的条件下, 降低基蘖肥的氮肥用量, 增加穗肥的氮肥比例, 有利于提高水稻齐穗后有效叶面积率, 使有效叶面积显著提高, 为增加后期光合产物的积累打下基础。方差分析结果表明, 处理 $B_3T_3E_4$ (穗肥比例 25%) 与处理 $B_3T_3E_4$ (穗肥比例 40%) 两者间功能叶面积及其变化的差异不显著。

表 3 穗肥比例与功能叶叶面积变化(2006, 早籼 15)

Table 3 LAI of top 3 leaves and the rate of panicle fertilizer (2006, Zaoshan 15)

处理 Treat	总叶面积 Total LAI (cm ²)	孕穗期 BS		齐穗期 FhS		成熟期 MS	
		上 3 叶叶面积 LAI of top 3 leaves (cm ²)	有效叶面积率 Effective Leaf area percentage (%)	上 3 叶叶面积 LAI of top 3 leaves (cm ²)	衰减 Attenuation proportion (%)	上 3 叶叶面积 LAI of top 3 leaves (cm ²)	衰减 Attenuation proportion (%)
CK	3.4 c	2.2 c	66.7 a	1.9 d	14.5 a	1.57 c	30.0 a
$B_7T_3E_0$	5.1 ab	3.0 b	58.6 c	2.6 c	13.4 a	2.24 b	25.0 b
$B_5T_{2.5}E_{2.5}$	5.6 a	3.5 a	62.1 b	3.2 ab	6.8 b	2.74 ab	21.3 bc
$B_3T_3E_4$	5.5 a	3.6 a	65.2 ab	3.4 a	4.3 b	2.86 a	20.0 c

2.4 不同穗肥比例对功能叶 SPAD 值的影响

在孕穗期、齐穗期和成熟期对功能叶 SPAD 值的测定结果(图 2) 表明, 剑叶 SPAD 值孕穗期稍低, 齐穗期增加到高峰值, 之后下降, 所比较的三个时期(BS, FhS, MS)变化趋势一致; 但不施氮肥的处理各期的 SPAD 值均明显较低, 灌浆结实期下降得也较快, 而施氮肥的处理随着穗肥比例的增加, 剑叶的 SPAD 值增高, 且后期下降得也较慢; 倒 2 叶和倒 3 叶的 SPAD 值均以孕穗期最高, 之后都呈下降趋势,

其中不施氮肥的处理各时期的 SPAD 值均明显较低、下降快; 穗肥比例越高的处理, 倒 2 叶和倒 3 叶灌浆结实期的 SPAD 值下降也越慢, 成熟时的 SPAD 值越高。可见增施穗肥能提高齐穗期和灌浆结实期功能叶的 SPAD 值, 并使其在成熟期仍维持较高水平, 其中齐穗后功能叶的 SPAD 值处理 $B_3T_3E_4$ 高于处理 $B_5T_{2.5}E_{2.5}$, 但两者之间差异未达显著水平。

2.5 功能叶含氮量的变化

叶色的变化是不同的氮肥运筹对水稻生长影响

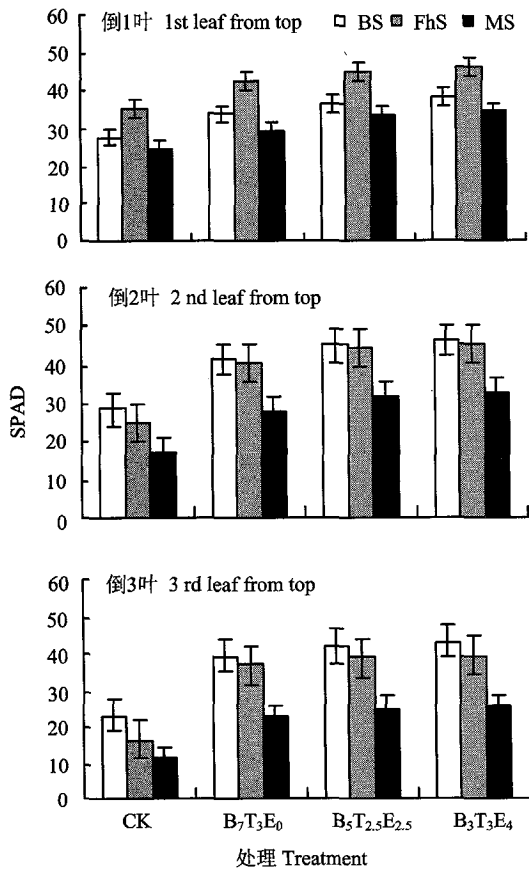


图2 穗肥比例对功能叶片相对叶绿素含量的影响 (2006, 早籼 15)

Fig.2 Effect of the percentage of panicle fertilizer on the SPAD of functional leaves (2006, Zaoxian 15)

的外在表现,其实质是叶片含氮量、叶绿素含量的变化^[14]。叶片含氮量总体变化随“分蘖期—拔节期—孕穗期—抽穗期—灌浆结实成熟期”的生育进程表现为“高一低—高一稳定—缓慢降低”的变化趋势,但不同氮肥运筹处理间有差异(表4)。穗肥比例高的处理孕穗期叶片含氮量高、灌浆结实期下降慢;而基肥比例高、穗肥比例低的处理分蘖期叶片含

氮量高、孕穗期以后均相对较低。相关分析表明(表5),孕穗期叶片含氮量与单株穗粒数之间极显著相关($r = 0.999^{**}$, $R_{0.01} = 0.999$)。可见欲培育大穗型群体,增施穗肥是必要的。相关分析还表明,穗肥施用后,不再人为干预稻田氮素供应环境,从孕穗期开始前一生育期叶片含氮量显著或极显著地影响其后的叶片含氮量。如 X_3 与 X_4 极显著相关, X_4 与 X_5 极显著相关, X_5 与 X_6 极显著相关。

随穗肥比例的增加,抽穗结实期间叶片含氮量提高,产量表现为先升后降;因此,虽然增施穗肥有利于培育大穗,但结实期叶片含氮量过高,改变了植株的碳氮关系、影响物质运转,结实率、籽粒充实度下降,最终导致产量不高。

2.6 氮肥运筹对水稻氮素吸收及利用的影响

表6可见,运筹方式不同,氮素的吸收及利用也不同。地上部分氮素总的吸收量随穗肥施用比例的增加而提高,其中穗肥比例25%以上的显著高于其它各处理,因而氮肥的当季利用率、氮素回收率、氮素收获指数也随着穗肥比例的增加而提高。氮素干物质生产效率、氮素稻谷生产效率则随着穗肥比例的提高、吸氮量增加而降低;氮素农艺效率与氮的穗肥比例呈抛物线关系,在穗肥比例25%最高,与产量相关达极显著水平。

上述结果表明,减少氮素的基、蘖肥用量,增加穗肥用量,总体上可提高产量、氮素的吸收量、百公斤子粒吸氮量、氮素收获指数,因而可以提高氮肥的单季利用率、氮素回收率;但也不是穗肥氮素用量越多越好,即只有当氮素基、蘖肥与穗肥比例协调时氮素的生产效率最高、农艺效率也最高。

进一步分析表明(表7),基、蘖肥比例越高,拔节前吸氮量越多,占总吸氮量的比例也越高;氮肥70%作底肥、30%作分蘖肥而不施穗肥的处理,拔节期前的吸氮量最多,显著高于施用穗肥的处理;随着

表4 不同处理叶片含氮量及产量形成

Table 4 Relationship between yield formation and leaf nitrogen content at different stages

处理 Treat.	叶片含氮量 Leaf nitrogen content						有效穗数 Effective panicles ($10^4/hm^2$)	穗粒数 Grains per panicle (No.)	结实率 Seed setting (%)	千粒重 1000-grain weight (g)	产量 Yield (kg/hm^2)
	分蘖期 (TS)	拔节期 (JS)	孕穗期 (BS)	抽穗期 (HS)	结实期 (CS)	成熟期 (MS)					
CK	28.6 c	18.2 a	21.8 bc	21.9 b	15.1 c	10.4 c	217.5 d	67.1 d	92.1 a	32.8 a	4412.3 c
B ₇ T ₃ E ₀	34.5 a	19.7 a	22.9 b	22.6 ab	16.3 b	11.8 b	346.8 c	80.3 c	90.5 ab	32.2 a	8113.7 b
B ₅ T _{2.5} E _{2.5}	32.6 b	19.5 a	24.4 ab	24.0 a	17.5 a	12.7 a	385.4 a	89.5 ab	90.7 ab	32.5 a	10182.2 a
B ₃ T ₃ E ₄	31.3 b	19.2 a	24.8 a	24.3 a	17.7 a	12.8 a	367.7 bc	92.6 a	87.2 c	32.3 a	9586.4 ab

表5 不同生育时期叶片含氮量与穗粒数的相关性(2006,早籼15)

Table 5 Relationship between grains per panicle and leaf nitrogen content at different stages(2006, Zaoxian15)

项目 Item	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	Y
分蘖期(TS) X ₁	0.998*	-0.928	-0.914	-0.900	-0.881	-0.943
拔节期(JS) X ₂		-0.906	-0.89	-0.875	-0.854	-0.923
孕穗期(BS) X ₃			0.999**	0.998*	0.994	0.999**
抽穗期(HS) X ₄				0.999**	0.997*	0.997
结实期(GS) X ₅					0.999**	0.994
成熟期(MS) X ₆						0.988

注(Note): Y—穗粒数 Grains per panicle; R_{0.05} = 0.997, R_{0.01} = 0.999, *, ** 表示差异分别达 P < 0.05 和 P < 0.01 水平, *, ** Indicate significant at P < 0.05 and P < 0.01 levels, respectively.

表6 氮肥运筹对氮素吸收利用的影响(2005,早籼65)

Table 6 Effects of nitrogen uptake under split nitrogen application strategies (2005, Zaoxian 65)

处理 Treat.	穗肥比例 Perc. of panicle fertilizer (%)	氮素积 累总量 TNA (kg/hm ²)	氮素干物质 生产效率 NDMPE (kg/kg)	氮素稻谷 生产效率 NGPE (kg/kg)	氮肥当季 利用率 NUE (kg/kg)	氮素 回收率 NRE (%)	氮素 农艺效率 NAE (kg/kg)
B ₇ T ₃ E ₀	0	113.7 d	96.6 b	56.5 b	23.6 d	28.3 d	10.2 e
B ₆ T ₃ E ₁	10	121.1 c	92.6 c	54.2 bc	27.7 c	33.3 c	10.9 d
B ₆ T ₂ E ₂	20	129.7 b	90.1 cd	53.3 bc	32.4 b	38.9 b	12.8 ab
B ₅ T _{2.5} E _{2.5}	25	130.1 ab	90.1 cd	54.1 bc	32.6 b	39.2 ab	13.5 a
B ₄ T ₃ E ₃	30	132.8 ab	87.7 de	51.5 c	34.2 a	41.0 ab	12.4 bc
B ₃ T ₃ E ₄	40	135.2 a	85.5 e	50.0 c	35.5 a	42.6 a	12.0 c
CK	—	71.3 e	107.1 a	64.6 a	—	—	—

表7 不同生育阶段氮素吸收(2005,早籼5)

Table 7 Nitrogen uptake in different growth stages (2005, Zaoxian 65)

处理 Treat.	不同生育阶段氮素的吸收 Nitrogen uptake in different growth stage							百公斤子粒 吸氮量 100 kg-grain (kg)	氮素收 获指数 NHI	稻谷收 获指数 HI
	(kg/hm ²)				(%)					
	拔节前 BJS	拔节-抽穗 JS-HS	抽穗-成熟 HS-MS	总量 Total	拔节前 BJS	拔节-抽穗 JS-HS	抽穗-成熟 HS-MS			
B ₇ T ₃ E ₀	57.5 a	41.2 e	14.9 e	113.7 d	50.6	36.3	13.1	1.77	0.517	0.497
B ₆ T ₃ E ₁	54.6 b	46.5 d	20.0 d	121.1 c	45.0	38.4	16.5	1.84	0.518	0.503
B ₆ T ₂ E ₂	52.2 bc	54.0 c	23.5 bc	129.7 b	40.2	41.6	18.1	1.88	0.525	0.504
B ₅ T _{2.5} E _{2.5}	50.7 cd	54.9 c	24.4 bc	130.1 ab	39.0	42.2	18.8	1.85	0.536	0.509
B ₄ T ₃ E ₃	49.3 d	57.8 b	25.7 ab	132.8 ab	37.1	43.5	19.4	1.94	0.552	0.516
B ₃ T ₃ E ₄	48.3 d	60.0 a	26.9 a	135.2 a	35.7	44.4	19.9	2.00	0.553	0.504
CK	26.4 e	37.3 f	7.5 g	71.3 f	37.0	52.4	10.6	1.55	0.558	0.503

注(Note): BJS—Before jointing stage.

基、蘖肥比例的降低(穗肥比例的增加),拔节前吸氮量减少,但处理 B₆T₃E₁、B₆T₂E₂ 之间,处理 B₆T₂E₂ 和 B₅T_{2.5}E_{2.5} 之间,处理 B₅T_{2.5}E_{2.5}、B₄T₃E₃、B₃T₃E₄ 之间差异不显著。拔节至抽穗期以及抽穗至成熟期的吸氮量均随穗肥比例增加而提高,总吸氮量也随着穗肥比例的增加而提高,但穗肥比例为 25%~40% 的各处理的总吸氮量差异不显著(表 6)。上述结果说明,前氮后移,全生育期氮素平稳供应有利于水稻对

氮的吸收利用。

进一步相关分析表明,在相同施氮量条件下,产量与拔节前氮素吸收量呈负相关($r_{BJS} = -0.730$, $r_{0.05} = 0.811$),与抽穗至成熟期的吸氮量以及与抽穗后的吸氮量均呈正相关($r_{JS-HS} = 0.765$ 、 $r_{HS-MS} = 0.783$)。可见提高穗肥比例,适当增加中后期的氮素吸收有利于提高产量。

3 讨论

3.1 双季稻北缘地区早稻的氮肥运筹模式

氮是水稻养分管理中需求量最大而又较难控制的必需营养元素,合理施氮是植物营养学研究的长期任务。双季水稻是安徽省重要稻作方式,其中早稻常年种植面积 30 万 hm^2 以上。由于地处双季稻北缘,生长季节短,温光资源紧张,农民习惯将氮肥集中在水稻生育前期施用(70%的基肥,30%的分蘖肥仍是目前双季稻生产氮肥施用的主要方法)而不施穗肥,后期易脱肥早衰。这种较多地采用“重施基肥、早施攻蘖肥”的氮肥运筹法,依靠增加穗数来提高产量,一方面有悖于现代高产水稻偏重于以大穗形成较多的颖花量以实现高产的群体质量栽培发展趋势,不利于高产优质的形成。另一方面,在水稻生育前期重施氮肥的传统施肥模式,肥料利用效率低,浪费有限的农业资源、增加生产成本^[2,4,15-16],加之春夏时节的多雨还容易引起氮肥的面源污染。

连续三年的试验表明,在双季稻北缘地区,早稻生长季节短(早稻大多选择生育期 110 d 以内的,30 d 左右的秧龄、本试验田营养生长期为 15~20 d、灌浆结实期 28~33 d),在 30 d 秧龄栽培条件下,基:蘖:穗肥为 50:25:25 氮肥施用模式易于获得高产。而穗肥比例增加到 35% 以上往往不利于其转色成熟,也不利于产量提高,这与一季中稻、双季晚稻适宜的穗肥比例 30% 以上甚至达 50% 不同^[9-10,19-20],也与其南方生育期充裕的双季早稻也有所不同^[7,12,17-18]。但采取稀播长秧龄化控育秧,本田营养生长期更短的栽培条件下的氮肥运筹模式又有所不同(结果另文发表)。

本试验结果表明,提高穗肥比例,有利于增加氮素吸收量,提高氮肥的当季利用率、氮素的回收率和氮素收获指数,但以基:蘖:穗肥为 50:25:25 的氮肥运筹模式产量最高,氮肥农艺效率也最高。且这种氮肥运筹模式已在生产中得到验证^[22],产生了较好的增产增效结果,因而可以作为双季稻北缘地区早稻推荐施氮模式。

3.2 氮肥运筹与氮素利用

热带稻田的氮肥吸收利用率一般为 30%~50%^[2,5],我国稻田的氮肥利用效率一般为 30% 左右,低于世界平均水平,比美国、日本等发达国家低 10~15 个百分点^[2,16]。本研究结果表明氮肥集中作基肥和分蘖肥,当季利用率为 15.9%~23.6%,氮肥后移增加穗肥的比例,氮肥当季利用率随之提高,

可达 35% 左右。但就氮肥肥效而言也不是穗肥比例越高越好,穗肥比例过高容易造成后期植株含氮量高,在田间长势上表现为贪青,在物质积累上表现为运转到子粒中的物质质量减少,经济系数低,因而产量并不高,这样虽然表观氮肥当季利用率有所提高,但转移到子粒中的氮素并不高,即氮肥的当季利用率与稻谷产量不尽完全一致。在施氮量相同、运筹不同条件下,氮肥的农学效率与产量曲线有一定相关性,更能表征氮素利用状况。

3.3 双季稻北缘早稻施氮量确定

根据斯坦福(Standford)方程精确定量施用氮肥,需要确定在目标产量水平下需氮量、土壤供氮量和氮肥的当季利用率^[21],在求得这 3 个可供应用的稳定的参数值后,实施稻田氮肥施用精确定量化。

根据本试验及近年试验示范结果,安徽沿江稻区双季早稻中等以上田块基础地力在 3750~4500 kg/hm^2 。目标产量 8250 kg/hm^2 的每百公斤稻谷的吸氮量为 1.75~1.85 kg ,平均 1.80 kg ;在基、蘖、穗肥比例为 50:25:25 的氮肥运筹模式下,氮肥的当季利用率为 32%~34%。按斯坦福(Standford)方程计算,在基础地力为 4500 kg/hm^2 的田块上实现 8250 kg/hm^2 的目标产量,其适宜施氮量应为 210 kg/hm^2 。

4 结论

双季稻北缘地区,适当减少双季早稻的蘖肥、增加穗肥可以在稳定单位面积的适宜穗数的基础上,增加抽穗一成熟期的叶片含氮量,提高叶绿素含量,防止“一头轰”式施肥引发的后期脱肥早衰,提高齐穗后的绿叶面积和有效叶面积率以及群体光合势,有利于促进干物质积累,从而提高产量。前氮后移增施穗肥,能为水稻整个生育期提供比较平衡的氮素供应,可促进氮素的吸收;提高氮肥当季利用效率。在施氮量 180 kg/hm^2 的条件下,基:蘖:穗 = 50:25:25 的运筹模式是双季稻北缘地区早稻的合理施肥方式。

参考文献:

- [1] Bockman O C, Olf H W. Fertilizers, agronomy and N_2O [J]. Nutr. Cycl. Agroecosyst., 1998, 52: 165-170.
- [2] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策[J]. 土壤与环境, 2000, 9(1): 1-6.
Zhu Z L. Loss of fertilizer N from plant-soil system and the strategies and techniques for its reduction[J]. Soil Environ. Sci., 2000, 9(1): 1-6.
- [3] 李菊梅,徐明岗,秦道珠,等. 有机无机肥配施对稻田氮挥发和

- 水稻产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(1): 51-56.
- Li J M, Xu M G, Qin D Z *et al.* Effects of chemical fertilizers application combined with manure on ammonia volatilization and rice yield in red paddy soil[J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.* 2005, 11(1): 51-56.
- [4] 宋勇生, 范晓晖. 稻田氨挥发研究进展[J]. 生态环境, 2003, 12(2): 240-244.
- Song Y S, Fan X H. Summary of research on ammonia volatilization in paddy soil[J]. *Ecol. Environ.*, 2003, 12(2): 240-244.
- [5] Ohnishi M, Horie T, Homma K *et al.* Nitrogen management and cultivar effects on rice yield and nitrogen use efficiency in Northeast Thailand[J]. *Field Crops Res.*, 1999, 64: 109-120.
- [6] Cassman K G, Peng S, Oik D C *et al.* Opportunities for increased nitrogen use efficiency from improved resource management in irrigated rice systems[J]. *Field Crops Res.*, 1998, 56: 7-39.
- [7] 邹长明, 秦道珠, 陈福兴, 刘更另. 水稻氮肥施用技术 I. 氮肥施用的适宜时期与用量[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2000, 26(6): 467-470.
- Zou C M, Qing D Z, Chen F X *et al.* Technique of nitrogen fertilizer application on rice I. Appropriate rime and rate of application[J]. *J. Hunan Agric. Univ. (Nat. Sci.)*, 2000, 26(6): 467-470.
- [8] 凌启鸿. 改革肥料运筹, 优化水稻群体质量[A]. 黄仲青. 水稻高产高效理论与技术—第五届全国水稻高效高产与技术研讨会论文集[C]. 北京: 中国农业科技出版社, 1996. 124-135.
- Ling Q H. Improving fertilizer operations and population quality[A]. Huang Z Q. Theory and new technique on high-yielding and high efficiency in rice[C]. Peking: Chinese Agricultural & Technical Publisher, 1996. 124-125.
- [9] 单玉华, 王余龙, 黄建晔, 等. 中后期追施¹⁵N对水稻氮素积累与分配的影响[J]. 江苏农业研究, 2000, 21(4): 18-21.
- Shan Y H, Wang Y L, Huang J Y *et al.* Effect of nitrogen fertilizer applied at middle and late growing stages on ¹⁵N uptake and distribution in rice (*Oryza sativa* L.)[J]. *Jiangsu Agric. Res.* 2000, 21(4): 18-21.
- [10] 徐茂, 王鹤平, 殷广德, 等. 穗肥施用时期对水稻产量和群体质量的影响[J]. 江苏农业研究, 2000, 21(2): 36-40.
- Xu M, Wang H P, Ying G D *et al.* Effect of application stage of panicle fertilizer on rice grain yield and its population quality[J]. *Jiangsu Agric. Res.*, 2000, 21(2): 36-40.
- [11] 冯惟珠, 苏祖芳, 杜永林, 等. 水稻灌浆期源质量与产量关系及氮素调控的研究[J]. 中国水稻科学, 2000, 14(1): 24-30.
- Feng W Z, Su Z F, Du Y L *et al.* Relationship between source quality and grain yield during filling period in rice and its nitrogen regulation approach[J]. *Chin. J. Rice Sci.*, 2000, 14(1): 24-30.
- [12] 唐启源, 邹应斌, 米湘成, 等. 不同施氮条件下超级杂交稻的产量形成特点与氮肥利用[J]. 杂交水稻, 2003, 18(1): 44-48.
- Tang Q Y, Zou Y B, Mi X C *et al.* Grain yield construction and N fertilizer efficiency of super hybrid rice under different N applications [J]. *Hybrid Rice*, 2003, 18(1): 44-48.
- [13] 李刚华, 丁艳锋, 薛利红, 王绍华. 利用叶绿素计(SPAD-502)诊断水稻氮素营养和推荐追肥的研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(3): 412-416.
- Li G H, Ding Y F, Xie L H, Wang S H. Research progress on diagnosis of nitrogen nutrition and fertilization recommendation for rice by use chlorophyll meter[J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.* 2005, 11(3): 412-416.
- [14] 吴良欢, 陶勤南. 水稻叶绿素计诊断追氮法研究[J]. 浙江农业大学学报, 1999, 25(2): 135-138.
- Wu L H, Tao Q N. Nitrogen fertilizer application based on the diagnosis of nitrogen nutrition of rice plants (*Oryza sativa* L.) using chlorophyllmeter[J]. *J. Zhejiang Agric. Univ.*, 1999, 25(2): 135-138.
- [15] Wang G H, Dobermann A, Witt C *et al.* Performance of site specific nutrient management for irrigated rice in Southeast China[J]. *Agron J.*, 2001, 93: 869-879.
- [16] Cassman K G, Peng S, Oik D C *et al.* Opportunities for increased nitrogen use efficiency from improved resource management in irrigated rice systems[J]. *Field Crops Res.*, 1998, 56: 7-39.
- [17] 吴文革, 徐军, 袁功平, 等. 双季稻北缘早稻优化氮肥施用研究[J]. 安徽农业大学学报, 2007, 34(1): 57-60.
- Wu W G, Xu J, Yuan G P *et al.* Optimal nitrogen application for the north rimland of double-cropping rice[J]. *J. Anhui Agric. Univ.*, 2007, 34(1): 57-60.
- [18] 江立庚, 曹卫星, 甘秀芳, 等. 不同施氮水平对南方早稻氮素吸收利用及其产量和品质的影响[J]. 中国农业科学, 2004, 37(4): 490-496.
- Jiang L G, Cao W X, Gan X Q *et al.* Nitrogen uptake and utilization under different nitrogen management and influence on grain yield and quality in rice[J]. *Sci. Agric. Sin.*, 2004, 37(4): 490-496.
- [19] 李泽福, 藤井俊夫. 后期氮肥比例对不同穗型粳稻品种的效应[J]. 安徽农业科学, 1998, 26(4): 326-329.
- Li Z F, Ito T. Varietal differences in rice agronomic characters under different rate of topdressing nitrogen[J]. *J. Anhui Agric. Sci.* 1998, 26(4): 326-329.
- [20] 丁艳锋, 刘胜环, 王绍华, 等. 氮素基、穗肥用量对水稻氮素吸收与利用的影响[J]. 作物学报, 2004, 30(8): 739-744.
- Ding Y F, Liu C H, Wang S H *et al.* Effects of the amount of basic and tillering nitrogen applied on absorption and utilization of nitrogen in rice[J]. *Acta Agron. Sin.*, 2004, 30(8): 739-744.
- [21] 凌启鸿, 张洪程, 戴其根, 等. 水稻精确定量施氮研究[J]. 中国农业科学, 2005, 38(12): 2457-2467.
- Ling Q H, Zhang H C, Dai Q G *et al.* Study on precise and quantitative n application in rice[J]. *Acta Agron. Sin.*, 2005, 38(12): 2457-2467.