植物营养与肥料学报 2012,18(6):1326-1335
Plant Nutrition and Fertilizer Science

氮素运筹对两个晚稻品种产量及其主要构成因素的影响

仇少君[1],赵士诚[1],苗建国[1],徐新朋[1],孙 刚[2],易 琼[1],王 淳[1],张文学[1,2],何 萍[1*]

(1 农业部植物营养与肥料重点实验室,中国农业科学院农业资源与农业区划研究所,北京 100081;
2 江西农业科学院土壤肥料与资源环境研究所,江西南昌 330200)

摘要: 本研究采用农民习惯施肥、实地氮素管理、实时氮素管理以及实时氮素管理基础上施用基肥,探讨了集约化农田不同氮素管理对水稻品种赣晚籼30(GWX)和博优141(BY)的产量及产量主要构成因素的影响。结果表明,与农民习惯施肥相比,不同氮素优化管理分别对水稻的产量、地上生物量、吸氮量、收获指数和氮收获指数以及穗数、每株实粒数没有显著影响。每个水稻品种的产量与生物量和吸氮量均呈极显著相关性($P<0.01$)。施用氮肥处理赣晚籼30平均产量为7.8 t/hm^2,平均生物量为16.4 t/hm^2,地上部平均吸氮量为N 175.6 kg/hm^2,博优141的平均产量为8.9 t/hm^2,生物量16.1 t/hm^2,吸氮量N为150.6 kg/hm^2。氮肥施用后,博优141的产量、收获指数、氮收获指数、每株总粒数、实粒数显著高于赣晚籼30($P<0.05$),而博优141的吸氮量、结实率和千粒重都显著低于赣晚籼30($P<0.05$)。与农民习惯施肥相比,实时氮素管理节肥率最高,实地氮素管理节肥率最小;基肥施用具有稳产作用。总之,在当前集约化农田管理中,适量减少氮肥施用并不会影响水稻产量及其主要构成因素,但氮肥减施的可持续性有待进一步研究。

关键词: 氮素管理;产量;水稻地上部;水稻穗部参数;集约化农业

中图分类号: S511.062　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1008-505X(2012)06-1326-10

Effect of different N management practices on yield and its main formed factors in two later-season rice genotypes

QIU Shao-jun[1], ZHAO Shi-cheng[1], MIAO Jian-guo[1], XU Xin-peng[1], SUN Gang[2], YI Qiong[1], WANG Chun[1], ZHANG Wen-xue[1,2], HE Ping[1*]

(*1 Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilizer, Ministry of Agriculture/Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agriculture Sciences, Beijing 100081, China; 2 Institute of Soil Fertilizer and Resource Environment, Jiangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanchang, Jiangxi 330200, China*)

Abstract: The present study employed site-specific nitrogen management (SSNM), real-time nitrogen management (RTNM) and RTNM plus basic fertilizer (RTNMB) to discuss the effect of optimum N management practices above on yield and its main formed factors between Var. Ganwanxian 30 (GWX) and Var. Boyou 141 (BY) in the intensive later-season rice agriculture. Comparing to farmer's N management practice, the site-specific nitrogen management and real-time nitrogen management and RTNM plus basic fertilizer didn't affect yield significantly, aboveground biomass, N uptake by aboveground, harvest index (HI) and N harvest index (NHI) in either genotype rice. The yield was significantly correlated with aboveground biomass and N uptake by aboveground ($P<0.01$). In all N application treatments, the average of yield, aboveground biomass and N uptake was 7.8 t/ha,

收稿日期: 2012-03-28　　**接受日期:** 2012-06-19

基金项目: 国家自然科学基金(41101277,30771256);国家重点基础研究发展计划项目(973项目)(2007CB109306);中央级公益性科研院所基本科研业务专项基金(2011-2)资助。

作者简介: 仇少君(1980—),男,山西长治人,博士,助理研究员,主要从事农田碳、氮循环和养分综合管理研究。
Tel: 010-82105029, E-mail: shjunqiu@163.com。* 通讯作者 Tel: 010-82105638, E-mail: phe@caas.ac.cn

16.4 t/ha, and 175.6 kg/ha for GWX and 8.9 t/ha, 16.1 t/ha, N 150.6 kg/ha for BY. After N application, the average of yield, HI, NHI, spikelets per plant and grain per plant of BY was significantly higher than those of GWX ($P<0.05$), while N uptake by aboveground, seed setting rate and 1000 grain weight of BY was significantly lower than those of GWX ($P<0.05$). Comparing with farmers' N management practices, the saved N percentage in RTNM was largest and that in SSNM was lowest, the basic N fertilizer application can maintain the stable of high yield. In a word, under the current intensive agriculture, the yield cannot decrease if the N amount decreased from farmers' excessive N rate to the optimum rate, but the sustainability in the decline of N fertilizer rate need further explore in the future.

Key words: N management; yield; aboveground biomass of rice; rice panicle parameters; intensive agriculture

氮肥在保障我国粮食安全方面贡献卓著，但氮肥过量施用引起的生态环境和利用效率下降问题也受到广泛关注[1-2]。对水稻而言，氮肥施用不仅过量，而且56%～85%以上的氮肥集中施用于移栽后的前10天[3]。氮肥过量施用或水稻生育前期集中施用与水稻生育后期对氮素的大量需求之间的“错位”现象，是导致水稻氮肥利用率较低的主要原因。当前，在水稻高产稳产的基础上，提高水稻氮素利用效率的氮素管理方法主要有基于叶绿素快速测定仪(SPAD)实施的实时氮肥管理(Real-time nitrogen management，RTNM)和实地氮肥管理(Site-specific nutrient management，SSNM)，它们都是根据作物最上部完全展叶片(水稻抽穗前是心叶下一叶，抽穗后是剑叶)光谱转化以迅速了解作物生长期间叶片叶绿素含量变化，进而根据作物叶绿素含量临界值确定氮素施用量[4-7]。不同的是RTNM需要不间断地定期测定水稻叶片叶绿素含量指导氮肥施用，而SSNM只要根据水稻的关键生育期叶绿素含量指导施肥即可[3-7]。Peng等[3]对我国江苏、浙江、湖南和广东4省水稻试验研究表明，基于SPAD仪测定的RTNM和SSNM与农民传统施肥相比均能显著提高水稻产量和氮肥农学效率，减少氮肥投入，但RTNM较SSNM提高的氮肥农学效率和减少的氮肥用量要大。尽管水稻产量能根据叶片叶绿素含量反映的SPAD值进行氮素推荐施肥，但是不同水稻品种间SPAD值差异很大，刘立军等[8]对汕优63 SPAD临界值设定为35，对武育粳3号SPAD临界值设定为37。此外，水稻产量的高产稳产不仅依赖于氮肥的施用，而且也受水稻穗部性状的影响[9-11]，如结实率、千粒重等，但目前在保持水稻高产的前提下，尚不清楚不同氮素运筹对水稻产量及产量主要构成因素的影响如何，氮素运筹下产量主要构成因素间是否会产生此消彼长的影响，以及氮素运筹在不同水稻品种间各产量构成因素及农学效率是否表现出一致的变化趋势。本研究选用两个晚稻品种进行田间试验，试图为阐明当前集约化管理措施下水稻田氮素运筹对产量及其主要构成因素的影响机理提供数据支持。

1　材料与方法

1.1　试验点概况

试验在江西省南昌县广福镇广福村实施(23°21′14″N，115°54′25″E)，该地区属于亚热带湿润气候，海拔20 m，平均气温17.8℃，≥10℃积温5432.2℃，无霜期240～307 d，年降水量1662 mm，50%的降雨量集中在4～7月，主要种植模式为双季稻。本研究供试土壤为第四纪红粘土发育的潮砂泥田土壤，土壤质地为壤土。供试水稻品种为赣晚籼30(GWX)和博优141(BY)，均为晚稻品种，其生育期均在135～140 d左右。赣晚籼30为以涟选籼为母本，[(莲塘早/IR36)F6//外3]F1为父本杂交选育而成的晚稻新品种；博优141是以明恢63作母本，以选育的三系恢复系248(708/迁矮18//26窄早)为父本进行杂交，后代选择结合双亲性状的中间类型单株，经6个世代系统选育定型。赣晚籼30稻田土壤pH为4.91，有机碳含量18.5 g/kg，碱解氮204 mg/kg，速效磷30.7 mg/kg，速效钾159.4 mg/kg；博优141稻田土壤pH 4.78，有机质含量16.0 g/kg，碱解氮180 mg/kg，速效磷39.5 mg/kg，速效钾82.9 mg/kg。

1.2　试验设计

试验共设置11个处理(表1)：对照(不施肥，N_0)；农民习惯处理(FP)；根据SPAD值(S)测定的3个实地氮素管理，分别为S35-37、S37-39、S39-41；

根据SPAD值(S)测定的3个实时氮素管理,分别为S37、S39、S41;和3个在实时氮素管理基础上3个施用基肥(B)的处理,分别为S37+B、S39+B、S41+B。小区面积30 m^2,密度为20 cm × 17 cm,每个处理重复3次,随机区组排列。基施磷肥 P_2O_5 120 kg/hm^2,钾肥基追肥各半,施用总量为 K_2O 150 kg/hm^2。

表1 氮素运筹下水稻不同生育期氮素施用量

Table 1 N application rates at different stages of rice growth under the different N management practices

氮素管理方式 N management method	处理 Treatment	基肥 (kg/hm^2) Basic fertilizer N	分蘖肥(kg/hm^2) Fertilizer N application at tillering stage	孕穗肥(kg/hm^2) Fertilizer N application at booting stage
不施氮肥 No N application	N_0	0	0	0
农民习惯氮用量 Farmer's N practice	FP	130	65	0
实地氮素管理 Site-specific nutrient management (SSNM)	S35-37	50	SPAD < 35, 35 < SPAD < 37, SPAD > 37, 分别施N 60、50和40 kg/hm^2 If SPAD < 35, 35 < SPAD < 37, SPAD > 37, N application 60, 50 and 40 kg/ha, respectively.	SPAD < 35, 35 < SPAD < 37, SPAD > 37, 分别施N 60、50和40 kg/hm^2 If SPAD < 35, 35 < SPAD < 37, SPAD > 37, N application 60, 50 and 40 kg/ha, respectively.
	S37-39	50	SPAD < 37, 37 < SPAD < 39, SPAD > 39, 分别施N 60、50和40 kg/hm^2 If SPAD < 35, 35 < SPAD < 39, SPAD > 39, N application 60, 50 and 40 kg/ha, respectively.	SPAD < 37, 37 < SPAD < 39, SPAD > 39, 分别施N 60、50和40 kg/hm^2 If SPAD < 35, 35 < SPAD < 39, SPAD > 39, N application 60, 50 and 40 kg/ha, respectively.
	S39-41	50	SPAD < 39, 39 < SPAD < 41, SPAD > 41, 分别施N 60、50和40 kg/hm^2 If SPAD < 39, 39 < SPAD < 41, SPAD > 41, N application 60, 50 and 40 kg/ha, respectively.	SPAD < 39, 39 < SPAD < 41, SPAD > 41, 分别施N 60、50和40 kg/hm^2 If SPAD < 39, 39 < SPAD < 41, SPAD > 41, N application 60, 50 and 40 kg/ha, respectively.
实时氮素管理 Real-time nitrogen management (RTNM)	S37	0	当SPAD < 37, 施40 kg/hm^2,否则不施 If SPAD < 37, N application 40 kg/ha, otherwise, no N application	
	S39	0	当SPAD < 39, 施40 kg/hm^2,否则不施 If SPAD < 39, N application 40 kg/ha, otherwise, no N application	
	S41	0	当SPAD < 41, 施40 kg/hm^2,否则不施 If SPAD < 41, N application 40 kg/ha, otherwise, no N application	
施用基肥基础上实时氮素管理 RTNM plus basic N fertilizer	S37+B	50	当SPAD < 37, 施40 kg/hm^2,否则不施 If SPAD < 37, N application 40 kg/ha, otherwise, no N application	
	S39+B	50	当SPAD < 39, 施40 kg/hm^2,否则不施 If SPAD < 39, N application 40 kg/ha, otherwise, no N application	
	S41+B	50	当SPAD < 41, 施40 kg/hm^2,否则不施 If SPAD < 41, N application 40 kg/ha, otherwise, no N application	

注(Note): S—SPAD; B—基肥 Basal chemical fertilizer; 37、39、41表示不同的SPAD值 Denoted different SPAD value.

不同氮素管理从水稻移栽后 14 d 开始至灌浆中期，每 7 d 测定一次 SPAD 值。FP 处理的氮肥施用量为基肥 N 130 kg/hm^2，分蘖肥 N 65 kg/hm^2。氮素实地管理是根据实测值与预设值的 SPAD 比较，确定是否需要在水稻分蘖期和幼穗分化期追肥；实时氮素管理根据实测值与预设值的 SPAD 比较，确定是否需要在 SPAD 值测定后追肥。各处理氮肥具体施用量及措施见表 1；不同生育阶段具体施肥量见表 2。

表 2　赣晚籼 30 和博优 141 不同生长期间氮肥施用量（kg/hm^2）

Table 2　N application rates of Ganwanxian 30 (GWX) and Boyou 141 (BY) in different growth stages

处理 Treatment	水稻移栽后天数 Days after rice transplanting (d)													
	赣晚籼 30 GWX							博优 141 BY						
	B	14	21	28	35	42	56	B	14	21	28	35	42	56
FP	130			65					130			65		
S35-37	50			40	40		40		50			40		40
S37-39	50			50	40		40		50			50		40
S39-41	50			50			40		50			50		40
S37										30				
S39		40								40		40		
S41		40			40					40		40		
S37 + B	50								50	30				
S39 + B	50								50	40		40		
S41 + B	50				40				50	40		40		

注(Note)：FP—农民传统施肥 Farmer's practice；S35－37、S37－39 和 S39－41 表示基于 SPAD 值测定实地氮素管理 Denoted site-specific nutrient management basing on SPAD monitored；S37、S39 和 S41 表示基于 SPAD 值测定实时氮素管理 Denoted real-time nitrogen management basing on SPAD monitored；B—基肥 Basal fertilizer.

1.3　测定项目和方法

SPAD 值采用手持 SPAD－502 仪(日本)测定。根据 Peng 等[3]文献中介绍，在田间每个小区定植 5 株水稻，测定顶端完全展开叶中部位置的 SPAD 值，并同时在同一片叶子邻近中部 30 mm 位置的上、下两点测定 SPAD 值，并求平均值记为该水稻的 SPAD 值，然后将 5 株水稻 SPAD 值的平均值记为该小区该时段的 SPAD 值。

田间每个小区定植 10 蔸水稻，在水稻灌浆前后分别测定水稻的分蘖数、株高、穗长等主要产量性状，并计算平均值；然后在水稻成熟后收割有代表性的 2 蔸，在 60℃烘干，通过烘干前后的质量差计算水稻的植株和籽粒的含水量。同时测定水稻的单株穗数、每穗总粒数、每穗实粒数和千粒重。根据整个小区的水稻收割脱粒后的实际产量和秸秆生物量计算水稻籽粒产量和秸秆生物量，然后根据水分系数计算其烘干重。

水稻籽粒和秸秆氮含量采用 H_2SO_4－H_2O_2 消化，半自动凯氏定氮仪蒸馏，0.005 mol/L H_2SO_4 滴定。

1.4　数据分析

本研究中数据以平均值 ± 标准差表示，采用 SPSS11.5 软件进行单因素统计分析，LSD 法进行差异显著性比较，显著性水平为 $P<0.05$。

2　结果与分析

从表 3 可以看出，与农民习惯施肥相比，不同氮素运筹明显降低了氮肥的施用量，实地氮素管理对两个水稻品种平均降低氮肥投入 28.2%～33.3%，实时氮素管理降低 59.0%～92.3%，实时氮肥管理基础上施用基肥降低 48.6%～66.7%。赣晚籼 30 实时氮素管理阈值为 39 或 41 时，施用或不施用基肥间总氮肥用量相差不大，除此之外，两个水稻品种的实时氮素管理施用与不施用基肥的氮肥施用总量差值恰好是基肥施用量。这一方面说明两个水稻品种对氮肥基施的要求并不一致，另一方面也说明该基肥用量条件下，施用基肥并没有很好的协同氮素供给与作物氮素需求之间的关系，因为实时氮素管理能及时反应作物氮素丰缺状况。

表3 氮素运筹下赣晚籼30和博优141整个生育期内施肥量和节肥率

Table 3 N application rate and saving N percentage in Ganwanxian 30 (GWX) and Boyou 141 (BY) under different N management practices during the whole rice growth

处理 Treatment	施肥量 (N kg/hm²) N application rate		较传统节肥率(%) Percentage of saving N in comparison with FP		平均节肥率(%) Average percentage of saving N in comparison with FP
	赣晚籼30 GWX	博优141 BY	赣晚籼30 GWX	博优141 BY	
N_0	0	0			
FP	195	195			
S35-37	130	130	33.3	33.3	33.3
S37-39	140	140	28.2	28.2	28.2
S39-41	140	140	28.2	28.2	28.2
S37	0	30	100.0	84.6	92.3
S39	80	80	59.0	59.0	59.0
S41	80	80	59.0	59.0	59.0
S37+B	50	80	74.4	59.0	66.7
S39+B	90	130	53.8	33.3	48.6
S41+B	90	130	53.8	33.3	48.6

注(Note): N_0—对照 Control; FP—农民传统施肥 Farmer's practice; S35-37、S37-39 和 S39-41 表示基于 SPAD 值测定实地氮素管理 Denoted site-specific nutrient management basing on SPAD monitored; S37、S39 和 S41 表示基于 SPAD 值测定实时氮素管理 Denoted real-time nitrogen management basing on SPAD monitored; B—基肥 Basal fertilizer.

苗期至灌浆期水稻 SPAD 值动态趋势显示(图1),两个水稻品种移栽后苗期(14 d)和灌浆中后期(77 d)SPAD 值较低,56～70 d 阶段内 SPAD 值都有一个高峰期,而此时是水稻幼穗分化期至灌浆初期。在该时期,博优141 SPAD 值明显高于赣晚籼30,说明博优141此时具有较高的光合同化能力和养分吸收能力,因为 SPAD 值的大小主要由叶绿素含量的大小决定的。两个水稻品种 SPAD 值在第21

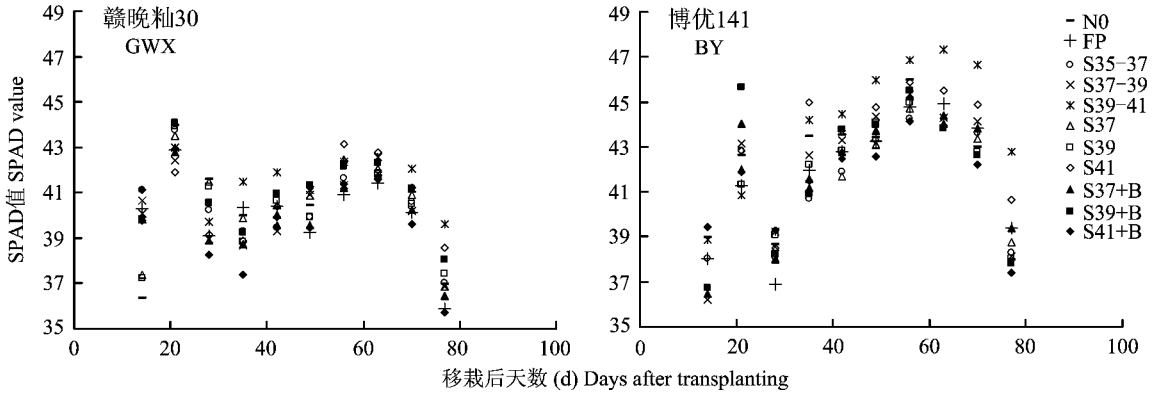

图1 氮素运筹下赣晚籼30和博优141SPAD值的动态变化

Fig. 1 Dynamics of SPAD during Ganwanxian 30 (GWX) and Boyou 141 (BY) growth under different N management practices

[注(Note): N_0—对照 Control; FP—农民传统施肥 Farmer's practice; S35-37、S37-39 和 S39-41 表示基于 SPAD 值测定实地氮素管理 S35-37, S37-39 and S39-41 denoted site-specific nutrient management basing on SPAD monitored; S37、S39 和 S41 表示基于 SPAD 值测定实时氮素管理 S37, S39 and S41 denoted real-time nitrogen management basing on SPAD monitored; B—基肥 Basal fertilizer.]

d 时较 14 d 和 28 d 有较大升高，尤其是博优 141 第 14 d 时不同氮素管理 SPAD 值变幅范围较大，这与两个水稻品种的生育期和施肥有关（表 2）。

就每个水稻品种而言，不同氮素运筹间产量没有显著差异（表 4），但所有氮素运筹处理中博优 141 产量比赣晚籼 30 高 0.3 ～2.0 t/hm^2。博优 141 品种农民习惯施肥处理的产量最高，与对照处理相比达显著水平（$P<0.05$）。实时氮素管理基础上施用基肥，水稻产量的标准差比对应的不施基肥实时氮素管理处理低，可见，施用基肥能起到稳产的作用。两个水稻品种不同处理的地上部生物量、吸氮量差异均不显著，但赣晚籼 30 不同处理的吸氮量均高于博优 141。不同氮素运筹下收获指数变化范围赣晚籼 30 为 0.42 ～ 0.50，氮收获指数为 0.46 ～ 0.53；博优 141 分别为 0.54 ～ 0.57 和 0.68 ～ 0.72，不同氮素运筹对两个水稻品种收获指数的影响均不显著，对博优 141 氮收获指数影响不显著。除生物量外，氮肥运筹对两个水稻品种间的平均产量、吸氮量、收获指数和氮收获指数均有显著影响（$P<0.05$；赣晚籼 30，$n=27$；博优 141，$n=30$）。

对两个水稻品种产量构成因子进一步分析，结果表明（表 5），两个品种产量的提高主要是通过生物量和吸氮量的提高来实现的，且都达到极显著水平（$P<0.01$），而收获指数和氮素收获指数的差异都不明显。但表 4 结果显示博优 141 的收获指数和氮收获指数较高，而生物量和吸氮量却接近或低于赣晚籼 30。较高吸氮能力促进植株生长，高的生物量又导致吸氮量增加，因此高生物量和高吸氮量是水稻高产的直接原因，而收获指数和氮收获指数与水稻高产没有直接关系。

博优 141 农学效率明显高于赣晚籼 30（图 2），赣晚籼 30 水稻氮素农学效率变化范围为 3.9 ～ 10.7 kg/kg，平均 6.4 kg/kg，博优 141 为 3.3 ～ 35.3 kg/kg，平均 11.7 kg/kg。与农民习惯施肥相比，不同氮素运筹提高了两个水稻品种的农学效率，博优 141 农学效率变化范围较赣晚籼 30 大，但总的来说，随着施氮量的增加，两个水稻品种的农学效率呈降低趋势。

大多数情况下，不同氮素运筹对两个水稻品种的单株穗数、穗总粒数、实粒数、结实率和千粒重影响不显著（表 6）。博优 141 的结实率和千粒重均低于赣晚籼 30，而总粒数、实粒数高于赣晚籼 30。施氮后两个水稻品种的平均每穗总粒数和实粒数、结实率以及千粒重的差异均达显著水平（$P<0.05$）。可见，博优 141 的产量高于赣晚籼 30，主要是通过增加每穗总粒数和实粒数实现的。

3　讨论

3.1　氮肥管理

合理的氮肥管理不仅能维持和提高作物产量（表 3），而且能减少氮肥损失[12]，提高氮肥利用效率（图 1）。本研究中，两个水稻品种的农学利用率都随施肥量的增加表现出降低的趋势（图 2），但博优 141 的农学效率高于赣晚籼 30，因此，在培育水稻品种的时候，不仅要重视提高水稻产量，而且要重视提高氮肥的利用效率。近年来，为了挖掘品种在提高氮肥利用率中的作用，一些专家将水稻品种分为低氮和高氮投入条件下氮素都能高效利用的双高型品种、只在高氮投入条件下氮素高效利用的高氮高效型、对应的双低效型和低氮高效型[9]。根据该分类，博优 141 与赣晚籼 30 相比，前者属于氮高效品种，后者属于氮低效品种，因为博优 141 的吸氮量低却产量高（表 4），其将更多的氮素转移到籽粒中去。但氮高效品种和氮低效品种只是在众多品种中相比较而言的，目前还没有一个明确的界定量化指标。

水稻氮素管理主要是基于水稻最上部完全展开叶的叶绿素氮含量指导施肥，相应的有实时氮素管理和实地氮素管理两种方法。本研究中，实时氮素管理氮肥用量远低于实地氮素管理（表 3），而且远低于两个水稻品种的吸氮量（表 4），因此两个水稻品种实时氮素管理下吸收剩余的氮素主要来自土壤氮素。从长远看，实时氮素管理导致地力耗竭，不利于土壤培肥，而且实时氮素管理需要不断地测定叶绿素氮浓度，造成大量劳动力的投入[3]。水稻分蘖期和幼穗分化期是氮肥两个最大效应期，但不同品种之间氮素的吸收差异主要是生育后期氮素吸收不同所致[9]，例如，博优 141 的 SPAD 值从孕穗期开始明显高于赣晚籼 30（图 1），潘圣刚等[13]研究指出，降低基肥用量、增加追肥用量能提高水稻产量，而当前我国农民习惯施肥中肥料的 56% ～ 85% 主要集中在移栽的前 10 d[3]。在本研究中，与农民习惯施肥相比，实时氮素管理和实地氮素管理的氮肥施用时间发生不同程度的后移（表 2），氮肥施用总量下降（表 3），但两个水稻品种的所有施氮处理产量却没有发生显著下降（表 4），可见，适量的氮肥后移使水稻氮素需求和供给时间上的同步，能够减少氮肥施用和保障水稻产量。

表4 氮素运筹对成熟期赣晚籼30和博优141产量、吸氮量和收获指数的影响($n=3$)

Table 4 Effect of different N management practices on yield, N uptake and harvest index (HI) in Ganwanxian 30 (GWX) and Boyou 141 (BY) at rice maturity stage

处理 Treatment	产量 Yield (t/hm^2)		生物量 Shoot biomass (t/hm^2)		吸氮量 N uptake (kg/hm^2)		收获指数 HI		氮收获指数 NHI	
	GWX	BY	GWX	BY	GWX	BY	GWX	BY	GWX	BY
N_0	7.1±0.61 a	7.8±0.38 b	16.9±1.87 a	14.2±0.42 b	160.9±23.3 a	122.9±6.5 a	0.42±0.02 b	0.56±0.02 a	0.46±0.01 b	0.69±0.01 a
FP	7.9±0.43 a	9.9±0.27 a	16.9±1.25 a	18.6±1.21 a	180.4±19.1 a	168.6±1.5 a	0.47±0.02 ab	0.54±0.03 a	0.50±0.01 ab	0.68±0.03 a
S35-37	8.0±0.54 a	8.3±0.58 ab	16.7±1.10 a	14.8±1.21 ab	178.9±11.1 a	133.8±22.8 a	0.48±0.00 a	0.57±0.01 a	0.51±0.01 a	0.72±0.02 a
S37-39	8.0±0.39 a	8.3±0.65 ab	16.2±1.14 a	14.9±1.53 ab	172.5±13.6 a	135.2±25.9 a	0.50±0.01 a	0.56±0.02 a	0.52±0.03 a	0.70±0.02 a
S39-41	7.8±0.62 a	9.6±0.30 ab	17.8±1.64 a	17.8±1.14 ab	195.0±14.6 a	181.4±1.1 a	0.44±0.02 ab	0.56±0.01 a	0.49±0.02 ab	0.70±0.01 a
S37	7.7±0.85 a	8.9±0.77 ab	16.3±2.24 a	15.9±1.37 ab	178.0±25.8 a	158.2±28.0 a	0.48±0.02 a	0.57±0.02 a	0.52±0.01 a	0.71±0.01 a
S39	7.6±0.73 a	8.4±0.89 ab	15.5±1.49 a	15.1±1.70 ab	169.8±20.9 a	139.9±31.3 a	0.49±0.00 a	0.55±0.01 a	0.53±0.02 a	0.68±0.01 a
S41	8.0±0.77 a	9.1±0.41 ab	17.1±1.81 a	16.3±0.65 ab	185.2±19.8 a	154.5±8.7 a	0.47±0.01 ab	0.56±0.01 a	0.51±0.01 ab	0.69±0.03 a
S37+B	7.6±0.77 a	9.0±0.27 ab	15.8±2.29 a	16.1±0.59 ab	170.2±30.6 a	159.6±20.9 a	0.49±0.03 a	0.56±0.02 a	0.52±0.01 a	0.68±0.01 a
S39+B	7.5±0.52 a	8.7±0.33 ab	15.7±1.42 a	15.9±1.19 ab	165.1±13.9 a	136.6±12.9 a	0.48±0.01 a	0.56±0.02 a	0.50±0.02 ab	0.70±0.03 a
S41+B	7.6±0.56 a	8.7±0.53 ab	15.7±1.44 a	15.6±0.87 ab	163.4±14.9 a	137.6±16.8 a	0.48±0.01 a	0.56±0.02 a	0.50±0.02 ab	0.70±0.02 a
平均 Mean*	7.8±0.07 b	8.9±0.17 a	16.4±0.23 a	16.1±0.39 a	175.6±3.41 a	150.6±5.19 b	0.48±0.01 b	0.56±0.00 a	0.51±0.00 b	0.70±0.00 a

注(Note): 数据表示平均数±标准误 Data are expressed as mean ± standard error. N_0—对照 Control; FP—农民传统施肥 Farmer's practice; S35-37、S37-39 和 S39-41 表示基于 SPAD 值测定实地氮素管理 S35-37, S37-39 and S39-41 denoted site-specific nutrient management basing on SPAD monitored; S37、S39 和 S41 表示基于 SPAD 值测定实时氮素管理 S37, S39 and S41 denoted real-time nitrogen management basing on SPAD monitored; B—基肥 Basal chemical fertilizer. *所有氮肥施用处理平均数,赣晚籼30不包括 N_0 和 S37,博优141不包括 N_0 Means of the data in all N application treatments, not including N_0 and S37 treatments for Ganwanxian 30, and N_0 treatment for Boyou 141. 不同字母表示两个品种间在5%水平差异显著 Different letter indicate significant difference between two varieties at the 0.05 level (LSD test).

表 5　成熟期水稻产量与生物量、地上部吸氮量、收获指数和氮收获指数的相关分析（n =33）

Table 5　Correlation analysis between rice yield and aboveground biomass, N uptake by aboveground, harvest index and N harvest index at maturity stage

项目 Item	赣晚籼 30 GWX	博优 141 BY
生物量 Aboveground biomass	0.82**	0.84**
地上部吸氮量 N uptake by aboveground	0.70**	0.75**
收获指数 Harvest index (HI)	0.26	0.007
氮收获指数 N harvest index (NHI)	0.03	0.05

注（Note）：** 表示差异在 1% 水平极显著 Indicate significantly different at the 1% level.

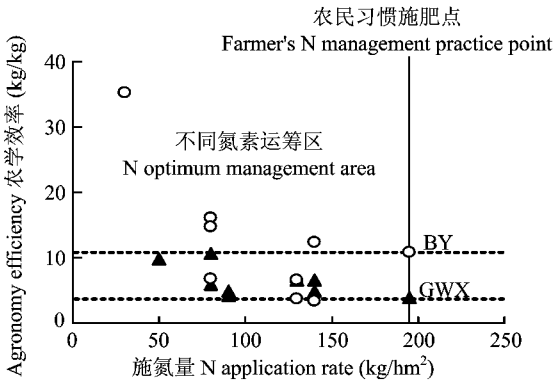

图 2　氮素运筹对成熟期赣晚籼 30 和博优 141 氮肥农学效率的影响

Fig. 2　Effect of different N management practices on N agronomy efficiency of Ganwanxian 30 (GWX) and Boyou 141 (BY) at rice maturity stage

基肥能够及时促进作物苗期根系发育，起到壮苗作用。但水稻苗期根系不发达，吸氮量低，那么由于过量施肥而导致土壤中残留氮素是否能满足作物对基肥的需求？本研究发现，在当前农田集约化条件下不施基肥并不能显著降低水稻产量，尤其是赣晚籼 30 品种，整个生育期不施肥都没有显著降低其产量（表 4），但是基肥施用后降低了各处理产量重复间的变异，由此可见，在保证我国粮食安全的前提下，基肥对于稳定作物产量仍是必不可少的，但基肥用量仍有进一步优化的空间。朱兆良和张福锁[9]对氮肥是否基施的研究表明，适宜的基穗肥搭配是最佳施肥模式，但不同的水稻品种对基肥响应并不相同，199 个水稻品种中的 96 个在施用基肥后表现为产量下降，主要原因是过量施肥造成的。

3.2　产量形成的主要影响因素

受“要高产就必须多施肥”、“高投入高产出”等传统观念和政策的影响，农民过量施肥现象相当普遍[1]，但当作物产量达到一定水平后并不能随施肥量的增加而继续增加[14]。本研究结果也显示，采用基于 SPAD 测定的不同氮素管理并没有显著降低水稻产量，而且赣晚籼 30 在采用 SPAD 阈值为 37 的实时氮素管理下（S37 处理），水稻整个生育期没有施肥同样没有显著降低其产量（表 3，表 4），这从另一个方面也表明当前集约化管理的稻田土壤中残留的氮素量基本可以满足下季水稻对氮素的需求。通过相关分析表明（表 5），博优 141 产量与生物量的相关性略高于赣晚籼 30，其次是吸氮量。朱兆良和张福锁[9]的研究也有相类似的结论，进一步提出高产的条件遵循“生物量高—吸氮量高—产量高”这一基本规律。但博优 141 与赣晚籼 30 相比，前者产量较高，后者吸氮量较高（表 4），这说明不同水稻品种的产量不同，对氮素的要求也不相同，高产水稻品种博优 141 的吸氮量要低于低产水稻品种赣晚籼 30。Hou 等[15]对我国 105 个农田玉米产量分析表明，随着产量的升高，我国玉米每公顷每吨籽粒的氮素吸收量呈下降趋势，而提高水稻产量对地上部氮素吸收量的要求是否与玉米具有一致的规律需要更多田间试验进行验证。博优 141 的收获指数高于赣晚籼 30（表 4），表明博优 141 的光合产物转运能力大于赣晚籼 30，因此植株向籽粒转运氮素和碳水化合物的能力也是影响产量的重要因素。此外，博优 141 顶端完全展开叶的 SPAD 峰值在幼穗分化期至灌浆初期明显高于赣晚籼 30（图 1），这与高产品种更加注重营养生长到生殖生长转化期间的氮素养分吸收[16]以及作物冠层的生长潜力决定着氮素养分吸收强度[17]密不可分。

Hay[18]报道水稻产量的提高主要是通过收获指数的提高来实现的，但当收获指数达到一定水平时，产量进一步的提高需要通过生物量的提高来实现[10]。增加水稻的有效穗数、粒重也是提高水稻产量的主攻方向[11]。本研究中，博优 141 产量高于赣晚籼 30 的主要原因是增加了水稻单株的总粒数和实粒数（表 6），而博优 141 结实率和千粒重都显著低于赣晚籼 30（P <0.05），因此，通过改善其他农艺措施如干湿交替灌溉等[19]，博优 141 的产量可通过

表6 氮素运筹对成熟期赣晚籼30和博优141穗部性状影响（$n=3$）

Table 6 Panicles traits of Ganwanxian 30 (GWX) and Boyou 141 (BY) under different N management practices at rice maturity stage

处理 Treatment	单株穗数(No./plant) Panicles per plant		每株总粒数 (No./plant) Spikelets per plant		每株实粒数 (No./plant) Grain per plant		结实率 (%) Seed setting rate		千粒重 (g) 1000-grain weight	
	GWX	BY	GWX	BY	GWX	BY	GWX	BY	GWX	BY
N_0	11 ±0.3 a	12 ±1.1 a	1464 ±129 a	2324 ±231ab	1132 ±42 a	1638 ±190 a	76.8 ±4.5 bc	70.6 ±3.4 a	22.4 ±1.1 bc	17.3 ±0.7 a
FP	13 ±0.3 a	13 ±1.2 a	1745 ±160 a	2559 ±314 a	1421 ±182 a	1826 ±298 a	80.8 ±3.1 abc	71.3 ±3.6 a	20.4 ±2.3 abc	17.5 ±0.7 a
S35-37	13 ±1.0 a	12 ±0.6 a	1742 ±301 a	1930 ±72 ab	1306 ±160 a	1401 ±17 a	76.1 ±4.4 bc	73.2 ±3.5 a	22.2 ±1.2 abc	18.5 ±1.7 a
S37-39	13 ±0.8 a	12 ±1.0 a	1476 ±65 a	1936 ±112 ab	1162 ±136 a	1381 ±52 a	78.4 ±5.7 abc	71.2 ±4.0 a	23.0 ±1.1 abc	17.7 ±0.5 a
S39-41	12 ±0.6 a	12 ±1.2 a	1628 ±79 a	2467 ±266 ab	1334 ±89 a	1736 ±198 a	81.7 ±1.9 abc	70.4 ±3.2 a	23.0 ±0.8 abc	16.8 ±0.6 a
S37	11 ±1.1 a	13 ±1.3 a	1529 ±103 a	2272 ±133 ab	1288 ±99 a	1562 ±164 a	84.1 ±1.2 ab	68.4 ±3.1 a	23.3 ±0.5 abc	16.9 ±0.6 a
S39	13 ±0.4 a	12 ±1.4 a	1709 ±89 a	1767 ±20 3b	1359 ±69 a	1247 ±176 a	80.4 ±1.2 abc	70.4 ±4.0 a	21.7 ±1.4 abc	17.5 ±1.0 a
S41	11 ±0.8 a	13 ±1.3 a	1716 ±179 a	2032 ±96 ab	1445 ±140 a	1366 ±93 a	84.6 ±0.8 ab	67.2 ±3.4 a	24.1 ±1.6 ab	18.2 ±1.8 a
S37 + B	12 ±1.7 a	12 ±1.9 a	1717 ±217 a	2326 ±349 ab	1300 ±160 a	1693 ±426 a	77.2 ±1.4 bc	71.0 ±7.2 a	21.3 ±0.4 abc	17.3 ±0.4 a
S39 + B	12 ±1.7 a	12 ±0.7 a	1808 ±246 a	2660 ±64 a	1348 ±184 a	1697 ±88 a	74.7 ±2.1 c	65.3 ±4.0 a	20.3 ±0.6 c	15.6 ±0.7 a
S41 + B	11 ±0.7 a	12 ±3.5 a	1538 ±258 a	2190 ±277 ab	1333 ±236 a	1443 ±163 a	86.5 ±2.7 a	65.9 ±1.1 a	24.5 ±0.4 a	17.1 ±0.9 a
平均 Mean*	11.9 ±0.3a	12.2 ±0.16 a	1675 ±36 b	2244 ±94 a	1334 ±27b	1535 ±61a	80.1 ±1.3a	69.4 ±0.82b	22.3 ±0.5a	17.3 ±0.2 b

注(Note)：数据表示平均数 ± 标准误 Data are expressed as mean ± standard error. N_0— 对照 Control；FP—农民传统施肥 Farmer's practice；S35-37、S37-39 和 S39-41 表示基于 SPAD 值测定实地氮素管理 Denoted site-specific nutrient management basing on SPAD monitored；S37、S39 和 S41 表示基于 SPAD 值测定实时氮素管理 Denoted real-time nitrogen management basing on SPAD monitored；B—基肥 Basal chemical fertilizer. * 所有氮肥施用处理平均数，赣晚籼30不包括 N_0 和 S37，博优141不包括 N_0 Means of the data in all N application treatments, not including N_0 and S37 treatments for Ganwanxian 30, and N_0 treatment for Boyou 141. 不同字母表示两个品种间在5%水平差异显著 Different letter indicate significant difference between two varieties at the 0.05 level (LSD test).

增加结实率和千粒重而进一步提高。

4 结论

与农民习惯施肥相比，基于 SPAD 测定的氮素优化管理不但能够保持水稻产量，而且在水稻整个生育期至少能减少 28.2% 的氮肥投入，提高氮肥农学效率。在水稻营养生长向生殖生长过渡期间，高产品种（博优 141）较低产品种（赣晚籼 30）具有更强的光合同化和氮素吸收转运的能力。因此，在当前集约化农田管理条件下，氮肥施用还有进一步的优化空间，如与其它农艺管理措施相结合可进一步提高水稻产量。

参 考 文 献：

[1] 张福锁，王激清，张卫峰，等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报，2008，45(5)：915-924.
Zhang F S, Wang J Q, Zhang W F *et al*. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement[J]. Acta Pedol. Sin., 2008, 45(5): 915-924.

[2] 朱兆良. 中国土壤氮素研究[J]. 土壤学报，2008，45(5)：778-783.
Zhu Z L. Research on soil nitrogen in China[J]. Acta Pedol. Sin., 2008, 45(5): 778-783.

[3] Peng S, Buresh R J, Huang J *et al*. Strategies for overcoming low agronomic nitrogen use efficiency in irrigated rice systems in China [J]. Field Crops Res., 2006, 96: 37-47.

[4] Fox R H, Piekielek W P, Macneal K M. Using a chlorophyll meter to predict nitrogen fertilizer needs of winter wheat [J]. Commun. Soil Sci. Plant Anal., 1994, 25: 171-181.

[5] Turner F T, Jund M F. Chlorophyll meter to predict nitrogen topdress requirement semidwarf rice[J]. Agron. J., 1991, 83: 926-928.

[6] Johnkutty I, Palaniappan S P. Use of chlorophyll meter for nitrogen management of lowland ric [J]. Nutr. Cycl. Agroecosyst., 1995, 45: 21-24.

[7] Peng S, Garcia F V, Laza R C. Increased N-use efficiency using a chlorophyll meter on high yielding irrigated rice[J]. Field Crop Res., 1996, 47: 243-252.

[8] 刘立军，徐伟，徐国伟，等. 水稻实地氮肥管理技术的节氮效果及其机理[J]. 江苏农业学报，2005，21 (3)：155-161.
Liu L J, Xu W, Xu G W *et al*. N-saving effect and its mechanism of site-specific nitrogen management in rice[J]. Jiangsu J. Agric. Sci., 2005, 21(3): 155-161.

[9] 朱兆良，张福锁. 主要农田生态系统氮素行为与氮肥高效利用的基础研究[M]. 北京：科学出版社，2010.
Zhu Z L, Zhang F S. N transformation and high use efficiency in major agroecosystem[M]. Beijing: Chinese Science Press, 2010.

[10] Shearman V J, Sylvester-Bradley R, Scott R K *et al*. Physiological processes associated with wheat yield progress in the UK[J]. Crop Sci., 2005, 45: 175-185.

[11] 肖国樱，袁隆平，邓晓湘，等. 水稻籼爪交和粳爪交杂种优势的研究 Ⅱ. 农艺性状的杂种优势分析[J]. 作物学报，2003，29(3)：364-371.
Xiao G Y, Yuan L P, Deng X X *et al*. Studies on heterosis of *Indica/Javanica* and *Japonica/Javanica* hybrids rice, Ⅱ. Analysis of the hetrosis of agronomic traits[J]. Acta Agron. Sin., 2003, 29(3): 364-371.

[12] 王淳，周卫，李祖章，等. 不同施氮量下双季稻连作体系土壤氨挥发损失研究[J]. 植物营养与肥料学报，2012，18 (2)：349-358.
Wang C, Zhou W, Li Z Z *et al*. Effect of different nitrogen application rates on ammonia volatilization from paddy field under double-harvest rice system[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2012, 18(2): 349-358.

[13] 潘圣刚，翟晶，曹凑贵，等. 氮肥运筹对水稻养分吸收特性及稻米品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2010，16 (3)：522-527.
Pan S G, Zhai J, Cao C G *et al*. Effect of nitrogen management practices on nutrition uptake and grain qualities of rice[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2010, 16(3): 522-527.

[14] He P, Li S, Jin J *et al*. Performance of an optimized nutrient management system for double-cropped wheat-maize rotations in North-Central China[J]. Agron. J., 2009, 101: 1489-1496.

[15] Hou P, Gao Q, Xie R *et al*. Grain yields in relation to N requirement: Optimizing nitrogen management for spring maize grown in China[J]. Field Crops Res., 2012, 129: 1-6.

[16] Cui Z, Zhang F, Chen X *et al*. In-season nitrogen management strategy for winter wheat: Maximizing yields, minimizing environmental impact in an over-fertilization context[J]. Field Crops Res., 2010, 116: 140-146.

[17] Peng Y, Niu J, Peng Z *et al*. Shoot growth potential drives N uptake in maize plants and correlates with root growth in the soil [J]. Field Crops Res., 2010, 115: 85-93.

[18] Hay R K M. Harvest index: a review of its use in plant breeding and crop physiology [J]. Ann. Appl. Biol., 1995, 126: 197-216.

[19] 张自常，李鸿伟，陈婷婷，等. 畦沟灌溉和干湿交替灌溉对水稻产量与品质的影响[J]. 中国农业科学，2011，44(24)：4988-4998.
Zhang Z C, Li H W, Chen T T *et al*. Effect of furrow irrigation and alternate wetting and drying irrigation on grain yield and quality of rice[J]. Sci. Agric. Sin., 2011, 44(24): 4988-4998.