

doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.21048

水稻前控后促施氮技术增产机理研究

夏琼梅¹, 胡家权², 董林波², 钱文娟², 李贵勇¹, 龙瑞平¹, 朱海平¹, 杨从党^{1*}

(1. 云南省农业科学院粮食作物研究所, 云南 昆明 650200;

2. 云南省曲靖市麒麟区农业技术推广中心, 云南 曲靖 655000)

摘要: 为探索云南水旱轮作区水稻肥料高效施用技术, 提高氮肥利用效率和实现减氮增效的绿色生产目标提供理论依据。以粳稻品种会梗 17 号和楚梗 28 号为供试材料, 于 2016 和 2017 年, 在大田条件下设 4 种氮肥施用模式: 不施氮的空白区 (N0)、当地农户常规施氮技术 (CK, N 总量 270 kg/hm², 基肥: 分蘖肥: 促花肥: 保花肥 = 5:5:0:0)、均衡施氮技术 (BNF, N 总量 216 kg/hm², 基肥: 分蘖肥: 促花肥: 保花肥 = 2.5:2.5:2.5:2.5) 和前控后促施氮技术 (FCBP, N 总量 162 kg/hm², 基肥: 分蘖肥: 促花肥: 保花肥 = 0:0:6:4), 比较研究不同施氮技术对水稻生长发育和产量形成的影响。结果表明, 2 年不同施氮技术对水稻产量的影响基本一致。与 CK 相比, 2016 年 BNF 和 FCBP 处理分别增产 19.23% 和 21.93%, 2017 年分别增产 11.70% 和 27.04%。FCBP 处理减氮增效作用更明显, 水稻季不施基肥和分蘖肥, 通过穗肥的调控, 稳定了有效穗数, 穗总粒数和单位面积的总颖花量显著提高。随着氮肥减量后移, 氮肥农学利用率大幅度提高, 2016 年 BNF 和 FCBP 处理分别提高 165.20% 和 280.45%, 2017 年分别提高 105.02% 和 313.42%。另外, FCBP 处理能够有效控制无效分蘖的发生, 降低高峰苗数, 提高茎蘖成穗率, 延长水稻穗分化期, 促进倒二叶和剑叶的伸长, 高效叶面积率和实粒叶比较高, 抽穗至灌浆期干物质积累量显著增加。因此, 云南水旱轮作区应用前控后促施氮技术可以实现水稻减氮增效的目标。

关键词: 水稻; 氮肥; 前控后促施氮技术; 增产机理

云南水稻生产中水旱轮作田块比例较大, 且旱季多种蔬菜等经济作物, 而经济作物总体施肥水平较高, 目前是水稻的 1.5 ~ 3.0 倍, 长期大量施肥造成土壤养分大量积累, 对作物品质和环境造成一定影响^[1]。近年来, 多点肥料试验研究显示, 此类田块水稻种植施用基肥和分蘖肥后, 无效分蘖期叶色不能正常落黄, 促花肥不能按时施用、分蘖成穗率低, 特殊田块施用肥料后甚至出现倒伏、减产的现象, 导致氮肥利用率低, 产投比不高 (数据尚未发表)。针对上述问题, 结合氮肥后移优化管理措施, 研究水稻前控后促施氮技术, 对提高水稻氮肥利用效率, 实现水稻减氮增效的绿色生产目标具有重要意义。21 世纪水稻栽培科学的发展目标已经由追求高产的单一目标, 发展成为追求高产、优质、

高效、生态、安全的综合目标^[2]。稻田不仅氮肥施用量最大, 而且对群体的调控作用最为明显^[3]。国内对水稻栽培中氮肥的施用由重前期施肥法逐渐改进, 开始重视中、后期氮肥的施用, 提出了以 50% 作基肥, 25% ~ 35% 作分蘖肥, 其余作穗肥的“三定”栽培技术^[4-5]; 基蘖肥由 80% 降低到 60%, 穗肥增加到 40% 的“三控”栽培技术^[6]等。还有结合我国水稻生产, 从国际水稻所引进创建的水稻实地氮肥管理技术^[7]。但更具有普遍指导意义的是水稻精确定量栽培理论与技术体系, 该技术将系统工程方法论引入作物栽培学领域, 以斯坦福方程为理论基础, 实现了水稻精确定量施氮^[2-3]。前人研究表明, 基蘖肥、穗肥不同施氮比例及穗肥不同施氮时期对水稻氮素利用率均有显著的影响^[8]。适宜的基蘖氮肥是水稻高产的关键^[9-10], 穗肥最适宜施用时期为倒 4 叶和倒 2 叶抽出时^[11-12], 并得出了根据顶 4 叶和顶 3 叶叶色差值计算促花、保花肥施用量的方法, 使穗肥施用更为精确^[13-15]。氮肥精确后移在大面积生产上应用增产增效表现显著^[16]。然而, 为更有效地控制水稻无效分蘖的发生, 避免群体过大, 在减少氮肥施用总量的前提

收稿日期: 2021-01-26; 录用日期: 2021-03-05

基金项目: 云南省财政部门预算项目重大专项 (530000210000000013809); 云南省科技计划项目 (202104BI090025)。

作者简介: 夏琼梅 (1983-), 副研究员, 硕士研究生, 主要从事水稻高产生理及栽培技术研究。E-mail: xiaqiongmei1983@126.com。

通讯作者: 杨从党, E-mail: yangcd2005@163.com。

下,不施基肥,全部后移至穗肥对水稻生长发育及产量形成的影响鲜见报道。此外,云南水旱轮作面积较大,随着旱季经济作物种植规模扩大,且施肥量较高,稻田冗余肥料较多,水稻减肥增效具有较大潜力。本研究利用水稻精确定量栽培技术体系水稻叶龄模式、高产群体质量指标和优化控制原理,结合云南稻田前作栽培条件及土壤基础地力,采用前控后促的施氮技术,减少氮肥施用总量,精确控制施用时期,与农户常规施氮技术和均衡施氮技术进行比较研究,明确前控后促施氮技术对水稻生长发育进程、群体质量、产量及其构成因素等的影响,为云南水稻绿色生产和水旱轮作区水稻对耕地保护的生态意义提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验点概况

试验于2016和2017年在云南省曲靖市麒麟区越州镇(103°42'N, 25°27'E)进行,亚热带高原季风气候,年平均气温15℃,年无霜期265 d,年降水量980~1100 mm,年日照时数1967.4 h。试验地土壤类型为赤红壤,主要为壤土,有机质、全氮、有效磷、速效钾含量丰富。2016年试验地耕层土壤(0~20 cm) pH值6.5,有机质含量42.4 g/kg,全氮含量2.495 g/kg,全磷含量1.357 g/kg,全钾含量12.29 g/kg,有效磷含量37.0 mg/kg,速效钾含量402 mg/kg; 2017年为pH值7.2,有机质含量34.8 g/kg,全氮含量2.754 g/kg,全磷含量0.952 g/kg,全钾含量19.62 g/kg,有效磷含量20.5 mg/kg,速效钾含量243 mg/kg。

1.2 供试材料

水稻品种2016年为会梗17号,2017年为楚梗28号,均为常规粳稻品种。氮肥类型均为尿素(N≥46.4%,云南云天化股份有限公司生产)。

1.3 试验设计

试验采用随机区组设计,设置4种氮肥处理方式,分别为N0:空白处理,不施用氮肥;CK:对照,当地习惯施肥方法,N总量270 kg/hm²,按基肥:分蘖肥:促花肥:保花肥=5:5:0:0施用;BNF:均衡施氮技术,氮肥总量为CK处理的80%,N总量216 kg/hm²,基肥:分蘖肥:促花肥:保花肥=2.5:2.5:2.5:2.5;FCBP:前控后促施氮技术,N总量162 kg/hm²,按基肥:分蘖肥:促花肥:保花肥=0:0:6:4施用。根据多年调查当地水稻品

种特性多为14叶,4个伸长节间的品种设计:促花肥于第10叶抽出3~5 cm时施用,保花肥于第12叶抽出3~5 cm时施用。磷钾肥均采用相同的施用方法,其中磷肥为过磷酸钙(P₂O₅ 12%),用量(折合P₂O₅)150 kg/hm²,一次性作基肥施用;钾肥为氯化钾(K₂O 60%),用量(折合K₂O)150 kg/hm²,按基肥:促花肥=5:5施用。3次重复,小区面积15 m²,各小区之间用塑料隔水板隔开,具体施肥量按小区的实际面积计算。

播种前进行晒种、药剂浸种催芽至露白均匀播种,采用薄膜育秧。2016年3月20日播种,4月26日移栽,4月25日施基肥,5月9日施分蘖肥,6月20日施促花肥,6月28日施保花肥。2017年3月13日播种,5月9日移栽,5月8日施基肥,5月22日施分蘖肥,6月20日施促花肥,7月3日施保花肥。移栽密度均为37.5万丛/hm²,移栽行株距27 cm×10 cm,2~3苗移栽。浅水插秧,移栽后建立浅水层,在分蘖达到预计穗数的80%时,排水晒田,控制无效分蘖;拔节长穗期至灌浆结实期采用浅湿交替灌溉,成熟期收获前7 d排干,便于收获。

田间病虫害统一管理,在水稻破口5%时用吡虫啉、三环唑、井冈霉素等防稻飞虱、稻瘟病、稻曲病。

1.4 测定项目及方法

1.4.1 土样采集

基肥施用5 d前进行土壤采样,采用取样器取田间表层0~20 cm处的土壤。采用对角取样法取5个点的土样,然后混合,3次重复。采集后的土样于室内自然风干,然后碾碎,从中称取200 g粉样进行土壤分析。测定项目包括土壤有机质含量、pH值、全氮含量、有效磷含量、速效钾含量。

1.4.2 叶龄、茎蘖动态调查

移栽后各小区去除边行连续选取10穴水稻,每7 d标记1次主茎叶龄,并调查分蘖数、叶龄直至主茎剑叶抽出,记录主茎总叶数、茎蘖数直至齐穗期。

1.4.3 干物质重

分别于齐穗期、成熟期取样。每小区非边行选取60丛调查有效穗数,按平均有效穗数取3丛,在室内测定齐穗期叶面积(叶面积仪:LICOR-3100)、倒1叶至倒4叶叶长、SPAD值(叶绿素仪:SPAD-502),并将其分割为茎鞘、叶、穗

器官,分别装于牛皮纸袋,然后在烘箱中 105℃杀青 0.5 h,再 80℃烘干至恒重,并用百分位电子秤称量,计算地上部分干物重、抽穗后干物质积累量、叶面积指数、群体生长率、净同化率、氮肥农学利用率等指标。

群体生长率 $[g/(m^2 \cdot d)] = (W_2 - W_1) / (t_2 - t_1)$ 。式中, W_1 和 W_2 为前后 2 次测定的干物质重, t_1 和 t_2 为前后 2 次测定的时间。

净同化率 $[g/(m^2 \cdot d)] = [(lnL_2 - lnL_1) / (L_2 - L_1)] \times [(W_2 - W_1) / (t_2 - t_1)]$ 。式中, L_1 和 L_2 为前后两次测定的叶面积, W_1 和 W_2 为前后 2 次测定的干物质重, t_1 和 t_2 为前后 2 次测定的时间。

氮肥农学利用率 $(kg/kg) = (\text{施氮区水稻产量} - \text{无氮区水稻产量}) / \text{总施氮量}$

氮肥贡献率 $(\%) = (\text{施氮区产量} - \text{不施氮区产量}) / \text{施氮区产量} \times 100$

收获指数 = 单位面积稻谷产量 / 生物产量

1.4.4 产量及其构成因素的测定

每小区全部实割测产,用谷物水分仪(M-3G/M-20P)测定籽粒含水量,然后称量,按 14.5% 的含水量换算成实际产量。成熟期每小区选取非边行 60 丛调查平均有效穗数,计算成穗率。按照平均有效穗数取样,每个小区取 3 丛,将稻穗剪下后按小区分别装于网袋,稻穗样品手工脱粒后去除籽粒中混杂的枝梗,风干后按小区采用水选法将实粒

和瘪粒分开。用自动数粒仪(SLY-E)进行考种,考查每穗总粒数、实粒数、瘪粒数、结实率和千粒重。

1.5 数据处理及分析

生育进程、主茎总叶片数、茎蘖动态和产量及其构成因素为 2016 和 2017 年 2 年数据,其余调查指标为 2017 年数据。文中数据除茎蘖动态图和成穗率为原始数据外,其余数据均为 CK 处理与其余处理相比的增减效应值(%)。运用 Excel 2010 和 SPSS 19.0 进行数据作图和统计分析,用 LSD 法进行处理间多重比较和差异显著性检验($P=0.05$),利用 Pearson 相关系数进行相关分析。

2 结果与分析

2.1 不同施氮技术对水稻生育进程的影响

从生育阶段来看,不同施氮技术对幼穗分化始期至齐穗期天数影响较大,与 CK 处理相比, N_0 处理缩短了 2 ~ 3 d, BNF 和 FCBP 处理分别延长 5 和 10 d,为大穗形成奠定了基础(表 1)。在施用促花肥之前,不同施氮技术生育进程一致,随后氮素穗肥越多,全生育期越长,延长了 5 ~ 8 d,表明 FCBP 处理并没有因为氮肥用量的减少而出现早衰,通过氮肥后移反而适当延长了水稻生育期。FCBP 处理齐穗期至成熟期的天数缩短了 2 ~ 3 d,表明 FCBP 处理可以适当促进水稻提前完成灌浆。

表 1 不同施氮技术对水稻生育进程天数的增减效应

(d)

年份	品种	处理	移栽 - 幼穗分化始期天数	幼穗分化始期 - 齐穗期天数	齐穗期 - 成熟期天数	全生育期天数
2016	会梗 17	CK	0	0	0	0
		N_0	0	-3	1	-2
		BNF	0	5	0	5
		FCBP	0	10	-3	7
2017	楚梗 28	CK	0	0	0	0
		N_0	0	-2	0	-2
		BNF	0	5	0	5
		FCBP	0	10	-2	8

2.2 不同施氮技术对水稻茎蘖动态及成穗率的影响

从 2 年的茎蘖动态来看,在 $N-n-1$ 叶抽出之前,各处理间茎蘖数差异较小,茎蘖数的差异主要出现在第 10 叶期,施基蘖肥的 CK 和 BNF 处理,茎蘖数开始增加,而无基蘖肥的 N_0 和 FCBP 处理

茎蘖数差异较小(图 1)。施用了促花肥后, BNF 和 FCBP 处理的水稻分蘖持续发生,FCBP 处理的茎蘖数继续增加,但茎蘖数仍低于 CK 和 BNF。2016 年 N_0 和 CK 处理的高峰苗尽管出现在拔节(第 13/0 叶)的前一个叶龄期(第 12 叶期),但

随后茎蘖数开始下降,因后期肥料不足,分蘖消亡过多;而BNF和FCBP处理的高峰苗出现在拔节期,主要是促花肥的施用促进了动摇分蘖成活,延缓了分蘖的消亡。CK处理的高峰苗数最高,BNF、FCBP处理次之,N0处理最少。2017年所有处理的高峰苗均出现在N-n+1叶龄期(第12叶期),BNF>CK>FCBP>N0。从茎蘖动态消亡情况来看,上一季经济作物余留的肥料能够满足水稻前期生长所需,采用前控后促施氮技术的FCBP处理有效分蘖临界叶龄期茎蘖数仍能达到预计穗数;而不施氮肥的N0处理后期茎蘖数不足,CK处理因前期基肥过多导致茎蘖数过高,均不利于群体合理发展。表

明氮素基肥对分蘖的发生具有促进作用,是水稻生长不可或缺的一部分,但水稻季投入用量的多少应根据旱作季土壤肥力状况合理施用;适宜时期施用穗肥可促进动摇分蘖向有效分蘖发展,但对分蘖的发生作用不如基肥。

2016年BNF和FCBP处理的茎蘖成穗率最高(图2),均超过90%,其次是N0处理,CK处理最低;2017年N0和FCBP处理较高,其次是BNF处理,CK处理最低。总体来看,采用前控后促施氮技术的FCBP处理不施基肥后移至穗肥,茎蘖动态合理,施用促花肥后对分蘖的发生有一定的促进作用,高峰苗数适中,成穗率较高。

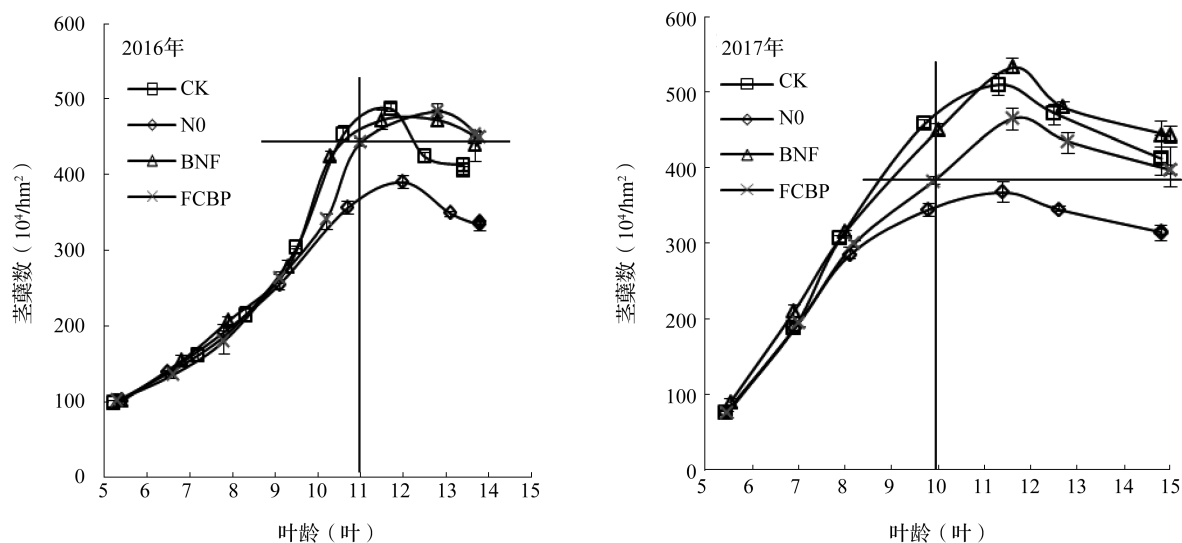


图1 不同氮肥处理水稻茎蘖动态变化

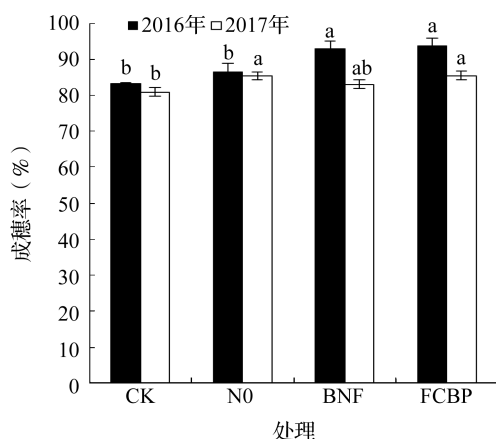


图2 不同氮肥处理水稻成穗率

注:图中小写字母不同表示同一年度不同处理在0.05水平上差异显著。

2.3 不同施氮技术对水稻产量及其构成因素、氮肥农学利用率、氮肥贡献率的影响

与CK处理相比,稻谷产量N0处理显著减产,

BNF和FCBP处理显著增产,N0处理减产17%~18%,2016年BNF和FCBP处理分别增产19.23%和21.93%,2017年分别增产11.70%和27.04%(表2)。与CK处理相比,随着氮肥减量的后移,氮肥农学利用率大幅度提高,2016年BNF和FCBP处理分别提高165.20%和280.45%,2017年分别提高105.02%和313.42%。氮肥贡献率2016年BNF和FCBP处理比CK分别提高113.07%和128.98%,2017年分别提高64.04%和84.01%。说明氮肥对稻谷产量的贡献显著,随着氮肥施用的后移,农学利用率增加,贡献作用更大。

从两年产量构成因素看,与CK处理相比,N0处理有效穗和颖花量受影响较大,两年有效穗分别减少19.20%和22.59%,颖花量分别减少18.81%和33.76%,重施基肥对总粒数没有明显的促进

作用。与CK处理相比,有效穗2016年BNF和FCBP处理均增加10%左右,2017年分别增加7.23%和0.90%;施用氮肥后有效穗显著高于不施氮肥处理,但不同施氮技术有效穗差异不显著。表明FCBP处理虽然没有施用基肥,但土壤中残留的氮肥能够满足有效分蘖发生的需要,穗肥的施用保证了分蘖成穗,通过降低高峰苗,提高茎蘖成穗率,优化了群体质量,有效穗数高于仅施用基肥和分蘖肥的CK处理,但低于BNF处理。每穗总粒数2016年BNF和FCBP处理比CK分别增加23.15%和32.42%,2017年分别增加6.18%和13.82%,其

中FCBP两年均达显著水平。表明FCBP处理能显著促进幼穗分化,提高每穗总粒数,形成大穗。颖花量2016年BNF和FCBP处理比CK处理显著增加,分别增加35.64%和44.89%;2017年均增加14%左右,且差异不显著。施用氮肥能明显提高单位面积的颖花量,尤其是穗肥促进颖花量增加的效果更明显。结实率2016年BNF和FCBP处理与CK处理相比显著下降,降低8%左右,可能是由于颖花量的增加而引起,2017年FCBP处理提高7.78%,但差异不显著。千粒重2016年不同施氮技术处理间差异显著;2017年不同处理间差异较小。

表2 不同施氮技术对产量及其构成因素、氮肥农学利用率和氮肥贡献率的增减效应 (%)

年份	处理	有效穗	总粒数	结实率	千粒重	总颖花量	实际产量	氮肥农学利用率	氮肥贡献率
2016	CK	0a	0c	0b	0b	0b	0b	0	0
	N0	-19.20b	0.49c	6.94a	1.85a	-18.81c	-17.00c		
	BNF	10.14a	23.15b	-7.74c	-3.32c	35.64a	19.23a	165.20	113.07
	FCBP	9.42a	32.42a	-8.56c	-5.54d	44.89a	21.93a	280.45	128.98
2017	CK	0a	0b	0b	0a	0a	0c	0	0
	N0	-22.59b	-14.43c	14.86a	1.63a	-33.76b	-18.27d		
	BNF	7.23a	6.18ab	-2.82b	0.58a	13.86a	11.70b	105.02	64.04
	FCBP	0.90a	13.82a	7.78ab	1.35a	14.85a	27.04a	313.42	84.01

注:不同小写字母表示在0.05水平差异显著。下同。

2.4 不同施氮技术对水稻抽穗后群体干物重及群体质量的影响

与CK处理相比,不施肥的N0处理抽穗后

群体干物重及群体质量均显著降低,收获指数因生物产量显著降低反而较高,但差异不显著(表3)。

表3 不同施氮技术对水稻抽穗后群体干物重及群体质量的增减效应 (%)

处理	齐穗期				成熟期				抽穗后干物质积累	抽穗后群体生长率	收获指数
	茎	叶	穗	总	茎	叶	穗	总			
CK	0a	0a	0a	0a	0a	0a	0c	0a	0b	0b	0c
N0	-26.67b	-43.73c	-16.39b	-29.22c	-29.16b	-38.74b	-20.45d	-25.54b	-20.35c	-20.35c	9.55bc
BNF	-6.09a	-3.28a	2.89a	-4.20a	-8.03a	-0.40a	7.56b	0.87a	8.05ab	8.05b	10.67b
FCBP	-17.53b	-18.95b	4.10a	-14.89b	-17.54ab	-13.64a	16.78a	0.79a	28.09a	28.09a	26.04a

与CK处理相比,BNF和FCBP处理齐穗期和成熟期茎、叶干物重均降低,BNF处理降低10%以下,FCBP处理降低10%~20%,齐穗期FCBP处理与CK处理差异显著,成熟期差异不显著;穗干重BNF和FCBP处理齐穗期和成熟期均增加,齐穗期不同施氮技术处理间差异不显著,成熟期差异显著。施用氮肥可以促进水稻干物质量的增加,重

施基肥的CK处理,其肥效集中在生育前期,表现在抽穗期较高的干物质量,主要是水稻茎和叶重量的增加;而FCBP处理在幼穗分化期施用,齐穗期干物质积累量较低,但是穗部干物质显著增加,使得抽穗至成熟期干物质积累量显著增加,从而实现增产。抽穗后氮肥后移的两个处理群体生长率分别比CK处理增加了8.05%和28.09%,差异达显著

水平。齐穗期到成熟期干物质积累量高是水稻高产的核心。

2.5 不同施氮技术对叶面积指数、高效叶面积率和实粒叶比的影响

齐穗期叶面积是保证抽穗至成熟期干物质积累的基础，因此需要建立较高叶面积指数（LAI）的群体。与 CK 处理相比，BNF 处理齐穗期总 LAI 增加 8.00%，FCBP 处理降低 8.06%，而高效 LAI 氮肥后移后分别增加 10.54% 和 3.97%（表 4）。高效叶面积率 FCBP 处理最高，显著高于其余处理。颖花叶比、实粒叶比和粒重叶比均为 FCBP 处理最高，分别比 CK 处理高 24.80%、34.59% 和 37.67%。

N0 处理因不施用氮肥，齐穗期总 LAI 显著降低，因此实粒叶比反而较高，CK 处理由于施用了氮肥，促进了叶片的伸长和叶面积的增加，但重施基肥对分蘖和叶片伸长的促进作用较大，对幼穗分化的促进作用较小，因此实粒叶比均最小；而 BNF 处理采用均衡施氮技术，既促进了叶片的生长，也促进了颖花量的增加，在本试验中对叶片的促进效果更大，因此实粒叶比高于 CK 处理。FCBP 处理尽管氮肥用量最少，但施用了促花肥和保花肥，在促进叶片伸长的同时也促进了幼穗分化，对幼穗分化促进作用更大，因此，其实粒叶比均最高。

表 4 不同施氮技术对齐穗期叶面积指数、高效叶面积率和实粒叶比的增减效应 (%)

处理	齐穗期			颖花叶比	实粒叶比	粒重叶比
	高效 LAI	总 LAI	高效叶面积率			
CK	0a	0ab	0b	0b	0b	0b
N0	-38.51b	-39.94c	2.38b	9.61ab	25.38a	34.66a
BNF	10.54a	8.00a	2.31b	4.30b	1.50b	2.57b
FCBP	3.97a	-8.06b	13.08a	24.80a	34.59a	37.67a

2.6 不同施氮技术对齐穗期倒 1 叶至倒 4 叶叶长和 SPAD 值的影响

N0 处理齐穗期倒 1 叶至倒 4 叶叶长及 SPAD 值均低于 CK 处理，其中倒 2 叶至倒 4 叶叶长、倒 4 叶 SPAD 值差异显著。与 CK 相比，BNF 和 FCBP 处理的倒 1 叶和倒 2 叶显著增长，倒 3 叶和倒 4 叶缩短，倒 3 叶 3 个处理间差异显著，倒 4 叶 CK 和

FCBP 处理差异显著（表 5）。表明氮肥后移抑制了倒 4 叶和倒 3 叶的伸长，促进了倒 2 叶和剑叶的伸长，前控后促施氮技术作用更明显。与 CK 相比，氮肥后移齐穗期倒 1 叶至倒 4 叶 SPAD 值显著增加，表明前控后促施肥技术氮肥用量减少，前期无基肥，但通过后移至穗肥，显著提高了叶片的氮含量。

表 5 不同施氮技术对齐穗期倒 1 叶至倒 4 叶叶长和 SPAD 值的增减效应 (%)

处理	叶长				SPAD 值			
	倒 1 叶	倒 2 叶	倒 3 叶	倒 4 叶	倒 1 叶	倒 2 叶	倒 3 叶	倒 4 叶
CK	0c	0b	0b	0b	0c	0b	0b	0b
N0	-3.25c	-10.96c	-21.49c	-26.81c	-5.17c	-12.78c	-13.55c	-31.73c
BNF	23.92b	13.18a	-2.56a	-10.45ab	8.61b	12.20a	16.49a	11.04ab
FCBP	41.58a	15.37a	-15.75a	-28.32a	16.55a	13.21a	18.32a	14.44a

3 讨论

3.1 水稻前控后促施氮技术的可行性分析

超高产水稻氮肥运筹的原则是根据土壤肥力定量施用基肥，促早发够苗，穗肥适当后移（总氮量的 40% ~ 50%），保证水稻生育期“黑黄”节奏变化，建立抽穗期适宜 LAI 的群体，保持超高

产株型特征^[17]，并在全国多地创造了水稻超高产^[18-23]，但对于大面积水稻生产而言，如何降低农户常规施氮量并适当提高当地水稻平均单产具有更广泛的指导意义。研究表明，基肥氮素流失率显著高于分蘖肥和穗肥^[24]，氮肥减量增产重点在于减少前期用肥，即基肥的用量^[25-27]，同时适当增施穗肥能增加每穗颖花数，提高结实率和千粒重^[28-30]，

且适宜的穗肥能明显提高弱势小穗灌浆期的平均灌浆速度、最大灌浆速度和粒重, 进而提高产量^[31]。应用前氮后移的氮肥管理技术可以节约氮肥用量 30% 左右, 并能提高水稻产量 10% 以上, 显著提高了氮肥利用率^[32-36]; 氮肥后移减少了穗肥的损失, 同时对下一季作物的氮肥利用率影响不显著^[37]。另外, 与籼稻相比, 粳稻分蘖能力略弱, 前期吸氮能力较差, 通过适当降低基蘖肥施用比例以使生育中后期氮素供应充足, 从而获得高产^[38]。

基于前人在氮肥后移增效机制方面的大量研究, 本研究结合多年的栽培技术试验及示范, 根据当地土壤基础地力条件, 提出前控后促施氮技术。结果表明, 采用该技术后, 氮肥对产量的贡献率和氮肥农学利用率大幅度提高, 比农户常规施氮技术增产 20% 以上, 比均衡施氮技术增产 2% 以上, 说明前控后促施氮技术可以为云南水稻绿色生产提供技术支撑。

另外, 土壤基础供氮能力对水稻氮肥肥效的发挥具有显著影响, 土壤基础供氮量越高, 水稻对土壤氮的依赖性越高, 相应地肥料氮的依赖性越低^[39]。本研究中水稻季没有施入基蘖肥, 且氮肥总用量减少 40% 的基础上稻谷仍增产, 说明土壤基础供氮能力较高。空白区高峰苗前的茎蘖动态及 N-n 期茎蘖数可作为水稻绿色生产中土壤基础供氮能力的参考依据之一。

3.2 水稻前控后促施氮技术的节本增效特性

3.2.1 前控后促施氮技术调控和建成合理的群体茎蘖动态

在群体起点基本茎蘖苗数相同的情况下, 控制倒 n-2 叶龄期之前的生长量, 特别是控制 N-n 期茎蘖生长量, 降低高峰苗, 形成合理的茎蘖动态, 这是高成穗率高产群体的基础^[40]。适宜的氮素基蘖肥用量是优化群体质量获得高产的关键, 但过多易导致群体过大, 无效生长多, 有效茎蘖个体小, 因此现在生产上的氮素基蘖肥用量完全可以调整下来^[41]。栽培途径上适当减少基蘖肥用量有利于提高成穗率, 而高成穗率有利于大穗形成, 协调穗数与大穗的关系, 进一步提高产量^[42]。同时, 分蘖率可作为作物需氮量的指标, 不同穗型水稻品种的分蘖率达到一定数值后前期可以不施用氮肥^[43], 因此, 本研究中农民常规施氮技术仅在前期施用基蘖肥, 导致 N-n 期至倒 n-2 叶龄期茎蘖生长量过大, 无效分蘖过多, 成穗率降低; 均衡施

氮技术尽管氮肥总量减少, 且进行了后移, 但因前期仍施用一定比例的基蘖肥, 所以 N-n 期至倒 n-2 叶龄期茎蘖生长量没有得到有效控制, 高峰苗较多。不施用肥料的空白处理 N-n 期已经够苗, 采用前控后促施氮技术施用穗肥后, 促进了其动摇分蘖成穗, 利于改善中后期群体质量。

3.2.2 前控后促施氮通过优化管理措施培育水稻高产优质群体

水稻超高产群体抽穗期叶面积指数、有效和高效叶面积率、粒叶比、干物质积累量高 (占生物学产量的 40.0% 以上), 且抽穗期至成熟期的干物重与产量呈极显著正相关^[44]。在贵州各个生态区精确定量施肥模式之所以能够实现高产超高产, 主要是通过降低基蘖氮肥、增加保花肥等措施, 在前期适宜群体的基础上, 促进中期 (拔节期至抽穗期) 叶面积指数扩大, 实现后期 (抽穗期至成熟期) 群体干物质的高积累^[45]。提高抽穗期至成熟期氮累积量, 促进叶片与茎鞘氮运转量, 尤其应提高茎鞘氮素运转率, 可实现高产与氮高效利用的同步提高^[46]。随着穗肥使用比例的加大, 齐穗期水稻高效叶面积率逐渐增大^[47]。本研究采用前控后促施氮技术优化管理措施后, 生长发育中期物质积累相对较少, 抽穗期至成熟期干物重积累显著提高, 齐穗期高效叶面积指数适宜, 高效叶面积率达 80% 以上, 促进了倒 1 叶和倒 2 叶的生长, 抑制了倒 4 叶的生长, 培育了水稻高产优质群体。

4 结论

在云南旱季种植蔬菜等经济作物的田块, 水稻季采用前控后促施氮技术, 前期不施基肥和分蘖肥, 土壤基础供氮总量能够满足有效分蘖临界叶龄期前两张叶片 (N-n-2) 抽出时分蘖发生的需氮量, 控制了无效分蘖发生, 高峰苗数降低, 成穗率提高, 在幼穗分化期补充适宜的氮肥, 促进了幼穗的分化和高效叶片的伸长, 齐穗期保持适宜 LAI 的同时具有较高的高效叶面积率, 促进抽穗期到成熟期的干物质积累, 实现了减肥高产, 提高了氮肥利用率。与农户常规施氮技术相比, 减少氮肥用量 40%, 增产 20% 以上, 氮肥农学利用率提高 2.5 倍以上。因此, 前控后促施氮技术能实现水稻减肥增产的目标, 可以为云南水稻绿色生产提供技术支撑, 大面积推广应用后将对水旱轮作区耕地保护具有重要的生态意义。

致谢：感谢凌启鸿教授的审阅，并提出中肯的修改意见。

参考文献：

- [1] 何晓滨, 李庆龙, 段庆钟, 等. 云南省施肥及土壤养分变化分析 [J]. 中国土壤与肥料, 2011 (3): 21-26.
- [2] 凌启鸿, 张洪程, 丁艳锋, 等. 水稻精确定量栽培理论与技术 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2007.
- [3] 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.
- [4] 邹应斌, 敖和军, 王淑红, 等. 超级稻“三定”栽培法研究 (I) [J]. 中国农学通报, 2006, 22 (6): 158-162.
- [5] 邹应斌, 夏胜平. 超级稻“三定”栽培理论与技术 [M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 2011.
- [6] 钟旭华, 黄农荣, 胡应学. 水稻“三控”施肥技术 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2013.
- [7] Ibrahim M, Peng S B, Tang Q Y, et al. Comparisons of yield and growth behaviors of hybrid rice under different nitrogen management methods in tropical and subtropical environments [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2013, 12 (4): 621-629.
- [8] 万靛军, 张洪程, 霍中洋, 等. 氮肥运筹对超级杂交粳稻产量、品质及氮素利用率的影响 [J]. 作物学报, 2007, 33 (2): 175-182.
- [9] 彭显龙, 潘新杰, 秦迎春, 等. 基肥氮量与寒地水稻产量和氮效率的关系 [J]. 中国土壤与肥料, 2016 (2): 72-77.
- [10] 范立慧, 徐珊珊, 侯朋福, 等. 不同地下基肥氮运筹比例对水稻产量及氮肥吸收利用的影响 [J]. 中国农业科学, 2016, 49 (10): 1872-1884.
- [11] 王艳, 易军, 高继平, 等. 不同叶龄氮、穗氮肥组合对粳稻产量及氮素利用的影响 [J]. 作物学报, 2020, 46 (1): 102-116.
- [12] 许轲, 张军, 张洪程, 等. 双季晚粳稻氮肥精确运筹研究 [J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20 (5): 1063-1075.
- [13] 王绍华, 刘胜环, 王强盛, 等. 水稻产量形成与叶片含氮量及叶色的关系 [J]. 南京农业大学学报, 2002, 25 (4): 1-5.
- [14] 王绍华, 曹卫星, 王强盛, 等. 水稻叶色分布特点与氮素营养诊断 [J]. 中国农业科学, 2002, 35 (12): 1461-1466.
- [15] 凌启鸿, 王绍华, 丁艳锋, 等. 关于用水稻“顶3顶4叶叶色差”作为高产群体叶色诊断统一指标的再论证 [J]. 中国农业科学, 2017, 50 (24): 4705-4713.
- [16] 张洪程, 吴桂成, 戴其根, 等. 水稻氮肥精确后移及其机制 [J]. 作物学报, 2011, 37 (10): 1837-1851.
- [17] 李刚华, 张国发, 陈功磊, 等. 超高产常规粳稻宁梗1号和宁梗3号群体特征及对氮的响应 [J]. 作物学报, 2009, 35 (6): 1106-1114.
- [18] 罗德强, 王绍华, 江学海, 等. 贵州省高原山区杂交水稻不同产量水平群体的特征 [J]. 作物学报, 2016, 42 (12): 1817-1826.
- [19] 韦还和, 孟天瑶, 李超, 等. 水稻甬优12产量13.5 t·hm⁻²以上超高产群体的氮素积累、分配与利用特征 [J]. 作物学报, 2016, 42 (9): 1363-1373.
- [20] 吴文革, 习敏, 许有尊, 等. 粳梗交组合甬优1540钵育机插超高产的产量构成及其群体光合特征 [J]. 扬州大学学报 (农业与生命科学版), 2017, 38 (1): 73-80.
- [21] 花劲, 周年兵, 张军, 等. 双季晚稻甬优系列粳梗杂交稻超高产结构与群体形成特征 [J]. 中国农业科学, 2015, 48 (5): 1023-1034.
- [22] 李刚华, 王绍华, 杨从党, 等. 超高产水稻适宜单株成穗数的定量计算 [J]. 中国农业科学, 2008, 41 (11): 3556-3562.
- [23] Li G H, Xue L H, Gu W, et al. Comparison of yield components and plant type characteristics of high-yield rice between Taoyuan, a ‘special eco-site’ and Nanjing, China [J]. Field Crops Research, 2009, 112: 214-221.
- [24] Hu A Y, Tang T T, Liu Q. Nitrogen use efficiency in different rice-based rotations in southern China [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2018, 112: 75-86.
- [25] 郭俊杰, 柴以潇, 李玲, 等. 江苏省水稻减肥增产的潜力与机制分析 [J]. 中国农业科学, 2019, 52 (5): 849-859.
- [26] 薛利红, 李刚华, 侯朋福, 等. 太湖地区稻田持续高产的减量施氮技术体系研究 [J]. 农业环境科学学报, 2016, 35 (4): 729-736.
- [27] Li G H, Lin J J, Xue L H, et al. Fate of basal N under split fertilization in rice with ¹⁵N isotope tracer [J]. Pedosphere, 2018, 28 (1): 135-143.
- [28] 张洪程, 吴桂成, 吴文革, 等. 水稻“精苗稳前、控蘖优中、大穗强后”超高产定量化栽培模式 [J]. 中国农业科学, 2010, 43 (13): 2645-2660.
- [29] 胡群, 夏敏, 张洪程, 等. 氮肥运筹对钵苗机插优质食味水稻产量及品质的影响 [J]. 作物学报, 2017, 43 (3): 420-431.
- [30] 严田蓉, 李旭毅, 李娜, 等. 氮肥运筹与栽植方式对杂交籼稻籽粒灌浆及产量的影响 [J]. 中国生态农业学报, 2017, 25 (10): 1485-1494.
- [31] Jiang Q, Du Y L, Tian X Y, et al. Effect of panicle nitrogen on grain filling characteristics of high-yielding rice cultivars [J]. European Journal of Agronomy, 2016, 74: 185-192.
- [32] 彭显龙, 刘元英, 罗盛国, 等. 寒地稻田施氮状况与氮素调控对水稻投入和产出的影响 [J]. 东北农业大学学报, 2007, 38 (4): 467-472.
- [33] 张慧, 彭显龙, 刘元英, 等. 前氮后移对寒地水稻群体质量的影响 [J]. 土壤通报, 2011, 42 (2): 402-406.
- [34] 范立春, 彭显龙, 刘元英, 等. 寒地水稻实地氮肥管理的研究与应用 [J]. 中国农业科学, 2005, 38 (9): 1761-1766.
- [35] 刘立军, 桑大志, 刘翠莲, 等. 实时实地氮肥管理对水稻产量和氮素利用率的影响 [J]. 中国农业科学, 2003, 36 (12): 1456-1461.
- [36] 韩宝吉, 曾祥明, 卓光毅, 等. 氮肥施用措施对湖北中稻产量、品质和氮肥利用率的影响 [J]. 中国农业科学, 2011,

- 44 (4): 842–850.
- [37] Xu H G, Zhong G R, Lin J J, et al. Effect of nitrogen management during the panicle stage in rice on the nitrogen utilization of rice and succeeding wheat crops [J]. *European Journal of Agronomy*, 2015, 70: 41–47.
- [38] 霍中洋, 魏海燕, 张洪程, 等. 穗肥运筹对不同秧龄机插超级稻宁粳1号产量及群体质量的影响 [J]. *作物学报*, 2012, 38 (8): 1460–1470.
- [39] 曾祥明, 韩宝吉, 徐芳森, 等. 不同基础地力土壤优化施肥对水稻产量和氮肥利用率的影响 [J]. *中国农业科学*, 2012, 45 (14): 2886–2894.
- [40] 苏祖芳, 张娟, 王辉斌, 等. 水稻群体茎蘖动态与成穗率和产量形成关系的研究 [J]. *江苏农学院学报*, 1997, 18 (1): 36–40.
- [41] 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.
- [42] 凌启鸿, 苏祖芳, 张海泉. 水稻成穗率与群体质量的关系 [J]. *作物学报*, 1995, 21 (4): 463–469.
- [43] Peng S B, Huang J L, Zhong X H, et al. Challenge and opportunity in improving fertilizer–nitrogen use efficiency of irrigated rice in China [J]. *Agricultural Sciences in China*, 2002, 1 (7): 776–785.
- [44] 吴桂成, 张洪程, 戴其根, 等. 南方粳型超级稻物质生产积累及超高产特征的研究 [J]. *作物学报*, 2010, 36 (11): 1921–1930.
- [45] 罗德强, 王绍华, 江学海, 等. 精确定量施肥对贵州高原山区杂交水稻产量与群体质量的影响 [J]. *中国农业科学*, 2014, 47 (11): 2099–2108.
- [46] 孙永健, 孙园园, 蒋明金, 等. 施肥水平对不同氮效率水稻氮素利用特征及产量的影响 [J]. *中国农业科学*, 2016, 49 (24): 4745–4756.
- [47] 付立东, 王宇, 隋鑫, 等. 氮素基穗肥不同施入比例对超级稻生育及产量的影响 [J]. *作物杂志*, 2010 (5): 34–38.

Mechanism of reduced amount with late application of nitrogen on increasing yield of japonica rice

XIA Qiong-mei¹, HU Jia-quan², DONG Lin-bo², QIAN Wen-juan², LI Gui-yong¹, LONG Rui-ping¹, ZHU Hai-ping¹, YANG Cong-dang^{1*} (1. Institute of Food Crops of Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kunming Yunnan 650200; 2. Qilin District Agricultural Technology Extension Center, Qujing Yunnan 655000)

Abstract: To explore the efficient nitrogen application method for *japonica* rice production in rice-vegetable rotation, improve the utilization efficiency of nitrogen fertilizer, and provide theoretical basis for realizing the green production goal of reducing nitrogen and increasing efficiency, field experiments were conducted with two conventional *japonica* rice varieties (Huijing 17 and Chujing 28) as materials in Yunnan in 2016 and 2017, and the effects of different nitrogen application techniques on rice growth and yield formation were compared. Four treatments with different nitrogen rates and ratios of basal, tiller, spikelet-promoting and spikelet-sustaining application (N0, 0 kg/hm²; CK, total N 270 kg/hm², 5 : 5 : 0 : 0; BNF, total N 216 kg/hm², 2.5 : 2.5 : 2.5 : 2.5; FCBP, total N 162 kg/hm², 0 : 0 : 6 : 4) were set up. Rice population characteristics difference in growth stage, yield and its components at maturity, grain/leaf ratio, main population quality indices were determined. Compared with CK, yield was significantly increased under BNF and FCBP, which increased by 19.23% and 21.93% in 2016, 11.70% and 27.04% in 2017, respectively. Nitrogen agronomic efficiency was greatly improved, which was increased by 165.20% and 280.45% under BNF and FCBP in 2016, and by 105.02% and 313.42% in 2017, respectively. Mechanism of high yield and apparent nitrogen recovery efficiency in FCBP was that high ratio of productive tillers to total tillers and enough population panicles were formed through controlling non-productive tiller and reducing the peak seedling number of the population; high yield population quantity were obtained through forming large total number of spikelets, high grain/leaf ratio, appropriate LAI and high effective leaf area exceeded 80% were enlarged through enriching dry matter accumulation from heading to maturity stage. Overall, FCBP had provided a technical support for rice green production in Yunnan rice rotation.

Key words: *japonica* rice; nitrogen fertilizer; reduced amount with late application of nitrogen; mechanism of high yield