基蘖同步侧深施下氮肥运筹对水稻生长、氮素利用和产量的影响

游 昊　宋文杰　付 斌　张大弘　江 勋　卢碧林

（长江大学农学院，434025，湖北荆州）

摘　要　为研究基蘖同步侧深施下施肥量和施肥方式对水稻氮素利用、氮素转运以及植株干物质积累和水稻经济产量等的影响，以水稻品种全两优鄂丰丝苗为材料，以传统撒施（CK）为对照，设置不施氮肥（N0）、基蘖肥和穗肥全量侧深施（N1）、基蘖肥和穗肥的氮肥共减量 10%（N2）、基蘖肥和穗肥的氮肥共减量 20%（N3）、基蘖肥的氮肥减量 10%（N4）和基蘖肥的氮肥减量 20%（N5）共 7 个处理，分析基蘖同步侧深施肥下氮肥运筹对水稻生长、氮素利用和产量的影响。结果表明，与 CK 处理相比，N1 处理 2 年平均产量显著增加 9.58%，基蘖同步侧深施处理显著提高了水稻的有效穗数，还提高了生育中后期的叶面积指数和干物质积累量。N1、N2 和 N4 处理与 CK 处理相比氮素表观利用率提高 4.53%~27.10%，氮素农学利用率提高 13.20%~40.65%，氮素生理利用率提高 5.19%~17.20%，偏生产力提高 9.57%~14.07%。综上，基蘖同步侧深施能够增加水稻有效穗数，提高水稻生育中后期的叶面积指数和干物质积累量，并提高氮素利用率，从而提高产量。

关键词　氮肥运筹；侧深施肥；水稻生长；产量；氮素利用率

随着经济的快速发展和农村劳动力的转移，作物生产施肥方式向节本增效和节能降耗的轻简高效方向转变，侧深施肥成为一项提质增效的技术。与传统技术相比，水稻侧深施肥技术通过优化施肥位置，可促进水稻对氮素的吸收[1-2]，提高氮素利用率[3-4]，增产达 6%~12%[5-6]。水稻侧深施肥的主要方式为控释肥一次性侧深施、基肥侧深施和基蘖肥同步侧深施。目前，控释肥侧深施技术受肥料成本较高、环境限制及与水稻需肥特性匹配度欠佳等因素制约，生产应用较慢[7-9]；基肥侧深施效果好，但仍需 3 次施肥，轻简化程度不够；基蘖同步侧深施成为水稻施肥技术研究和生产应用的热点。

基蘖同步侧深施减少了施肥次数的同时，能有效提高叶面积指数，增加叶片叶绿素含量，增加干物质积累量，提高产量与品质[10]。但对于基蘖同步侧深施时的氮素运筹比例，不同学者的研究结果存在差异。基蘖同步侧深施的适宜施氮量以及氮肥运筹对水稻的生长和氮素利用的相关研究报道较少。本研究拟在江汉平原水稻生产的典型区域，采用典型籼型杂交水稻开展基蘖同步侧深施的氮肥减量试验，分析不同施氮比例对水稻生长、氮素利用率和产量的影响，探索基蘖同步侧深施下适宜的减氮策略，以期为本区域水稻高产、高效、优质、安全生产提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验材料

试验于 2021−2022 年在湖北省荆州市华中农高区长江大学农业科技产业园（30°22′ N，112°4′ E）进行。土壤类型为轻壤土，2021 年水稻移栽前 0~20 cm 耕层土壤 pH 7.8、碱解氮 74.3 mg/kg、速效磷 32.5 mg/kg、速效钾 77.2 mg/kg、有机质 17.94 g/kg。2021 年水稻栽前 0~20 cm 耕层土壤 pH 7.7、碱解氮 88.4 mg/kg、速效磷 33.5 mg/kg、速效钾 95.5 mg/kg、有机质 23.56 g/kg。

供试品种为杂交籼稻全两优鄂丰丝苗（湖北荃银高科种业有限公司生产）。试验氮肥为洋丰复合肥（N∶P_2O_5∶K_2O=15∶15∶15，新洋丰科技有限公司生产），尿素（46% N，湖北潜江金华润化肥有限公司生产）；磷肥为过磷酸钙（16% P_2O_5，湖北三峡生态肥业有限公司生产）；钾肥为氯化钾（60% K_2O，中化化肥有限公司生产）。

1.2　试验设计

2021 年 5 月 11 日播种，6 月 2 日移栽；2022

作者简介：游昊，研究方向为水稻侧深施肥，E-mail：1272066070@qq.com
卢碧林为通信作者，主要从事作物机械化栽培研究，E-mail：blin9921@sina.com
基金项目：国家重点研发计划项目（2018YFD030130101）
收稿日期：2025-06-24；修回日期：2025-07-16；网络出版日期：2025-08-28

年 5 月 10 日播种，6 月 1 日移栽。移栽时使用水稻侧深施肥机（2FC-6，洋马农机有限公司），通过专用装置在水稻机插秧的同时根据预设参数将肥料精准施入秧苗根际外侧 3~5 cm、土层下 3~5 cm 的位置，避免传统撒施导致的养分流失。株行距为 16 cm×30 cm。以传统撒施为对照（CK），设置不施氮肥（N0）、基蘖肥和穗肥全量侧深施（N1）、基蘖肥和穗肥的氮肥共减量 10%（N2）、基蘖肥和穗肥的氮肥共减量 20%（N3）、基蘖肥的氮肥减量 10%（N4）、基蘖肥的氮肥减量 20%（N5），共 7 个处理，每个处理 3 次重复，共 21 个小区。各处理下的氮肥施用方案如表 1 所示。

表 1 各处理的氮肥施用量

Table 1 Nitrogen application rate of each treatment kg/hm^2

处理 Treatment	总施氮量 Total nitrogen application	基肥 Base fertilizer		分蘖肥 Tillering fertilizer		穗肥 Panicle fertilizer	
		氮肥种类 Classification of nitrogen fertilizers	施氮量 Nitrogen application	氮肥种类 Classification of nitrogen fertilizers	施氮量 Nitrogen application	氮肥种类 Classification of nitrogen fertilizers	施氮量 Nitrogen application
N0	0.00	复合肥	0.00	尿素	0.00	尿素	0.00
N1	195.00	复合肥	97.50	尿素	58.50	尿素	39.00
N2	175.50	复合肥	87.75	尿素	52.65	尿素	35.10
N3	156.00	复合肥	78.00	尿素	46.80	尿素	31.20
N4	175.50	复合肥	78.00	尿素	58.50	尿素	39.00
N5	156.00	复合肥	58.50	尿素	58.50	尿素	39.00
CK	195.00	复合肥	97.50	尿素	58.50	尿素	39.00

每个小区单独做田埂，塑料薄膜包田埂，单独灌排。CK 处理的全生育期总施氮量为 195.00 kg/hm^2，按基肥∶分蘖肥∶穗肥=5∶3∶2 的比例施用，氮、磷、钾施用比例为 2∶1∶2，其中磷肥全部基施，钾肥在基肥和穗肥各施 50%，基肥在土壤耕作后撒施，分蘖肥及穗肥分别在移栽后 7 d 以及幼穗分化三期施用。侧深施肥中各处理磷钾肥的量均补齐至 CK 处理的水平，穗肥均采用撒施。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 *茎蘖动态* 移栽后选取具有代表性的植株 10 穴定点调查基本苗，返青之后每 4 d 调查 1 次水稻茎蘖数，直至水稻茎蘖数的变化趋于平缓，记录高峰苗和有效穗数，各处理重复测定 3 次。

1.3.2 *叶面积指数（LAI）* 在分蘖期、孕穗期、齐穗期和成熟期，根据各处理的平均茎蘖数选择具有代表性的植株，将处理的全展叶剪下后拍照，运用 Imagej 1.51 软件描图，计算 LAI。各处理重复测定 3 次。

1.3.3 *相对叶绿素含量（SPAD 值）* 使用叶绿素分析仪 SPAD-502Plus（Konica Minolta，日本），在水稻分蘖期、孕穗期、齐穗期和成熟期分别测定 1 次水稻叶片的 SPAD 值。测定时，选取主茎顶部第 1 片完整叶片，将叶片的上 1/3、中 1/3 和下 1/3 的平均值作为水稻植株叶片的 SPAD 值，各处理重复测定 5 次。

1.3.4 *干物质积累量* 在分蘖期、孕穗期、齐穗期和成熟期，根据各处理的平均茎蘖数选择具有代表性的植株 3 穴，将茎、叶、穗分开装袋，放入干燥箱中 105 ℃杀青 30 min，在 80 ℃烘干至恒重后称重，保存。各处理重复测定 3 次。

1.3.5 *植株氮含量* 在分蘖期、孕穗期、齐穗期和成熟期，根据各处理的平均茎蘖数选择长势良好且具有代表性的植株 3 穴，将茎、叶、穗分开装袋，先在 105 ℃下杀青 30 min，然后在 80 ℃下烘干至恒重后称重。将各生育期的样品粉碎，并通过 ECS 4024 CHNSO Classic 分析仪测量水稻植株的氮含量，参照文献[11]的方法，计算氮素表观利用率（apparent nitrogen use efficiency，ANUE）、氮素农学利用率（agronomic nitrogen use efficiency，AE）、氮素生理利用率（physiological nitrogen use efficiency，PNUE）和氮素偏生产力（partial factor productivity of nitrogen，PFPN），各处理重复测定 3 次。

$$ANUE=(N_n-N_0)/N \quad (1)$$

$$AE=(G_n-G_0)/N \quad (2)$$

$$PNUE=(G_n-G_0)/(N_n-N_0) \quad (3)$$

$$PFPN=G_n/N \quad (4)$$

式中，N 为氮肥施用总量（kg/hm^2）；N_n 为成熟期施氮区植株总氮量（kg/hm^2）；G_n 为施氮区稻谷产量（kg/hm^2）；G_0 为不施氮区稻谷产量

（kg/hm^2）。

1.3.6　*测产与考种*　水稻成熟后，调查各处理有效穗数、每穗粒数、结实率和千粒重。各处理选择约 5 m^2 的面积进行测产，各处理重复测定 3 次。

1.4　数据处理

采用 Data Processing System 7.05 和 Origin 2017 进行方差分析和绘图，采用最小显著差异法（LSD）进行多重比较。

2　结果与分析

2.1　不同施肥方式对水稻产量及其构成因素的影响

不同施肥方式处理下水稻的产量及其构成因素如表 2 所示。结果表明，2 年的产量及其构成因素所表现的规律相似，N1 处理的产量均为最高。产量表现上，N1 处理的水稻产量平均比 CK 处理的高 9.58%，差异达到显著水平；CK 与 N2、N4 处理无显著差异；N3 和 N5 处理分别平均比 N1 处理低 16.25%和 18.12%，差异均达到显著水平；产量构成上，各施肥处理的结实率、平均穗粒数和千粒重无显著差别，主要差异体现在有效穗数上，N1 处理的有效穗数最大，平均比 CK 处理高 8.34%，差异达到显著水平。CK 处理与 N2 和 N4 处理在有效穗数上差异不显著；CK 处理比 N3 和 N5 处理分别平均高 7.53%和 7.98%，差异均达显著水平。2022 年水稻齐穗期间持续出现高温、干旱的天气，影响了水稻的成穗率与结实率，导致 2022 年水稻产量低于 2021 年。

表 2　各处理下水稻的产量及其构成因素

Table 2　Rice yield and its components under each treatment

年份 Year	处理 Treatment	有效穗数 Effective panicle number (×10^4/hm^2)	平均穗粒数 Average number of grains per panicle	结实率 Seed-setting rate (%)	千粒重 1000-grain weight (g)	产量 Yield (×10^3 kg/hm^2)
2021	N0	184.03±3.18d	190.46±4.86b	87.80±0.44a	24.57±0.08a	7.43±0.23d
	N1	256.94±3.18a	217.22±12.58a	88.69±0.28a	24.55±0.04a	10.65±0.40a
	N2	245.14±3.18b	214.33±8.90a	88.48±0.11a	24.85±0.22a	9.98±0.30b
	N3	219.44±5.24c	220.59±3.75a	88.56±0.41a	24.64±0.31a	9.16±0.04c
	N4	243.75±3.61b	215.60±10.06a	88.29±0.30a	24.59±0.13a	9.68±0.22b
	N5	220.14±6.70c	219.73±3.84a	87.71±0.75a	24.60±0.05a	9.01±0.29c
	CK	239.58±3.61b	218.16±7.02a	88.36±0.95a	24.66±0.11a	9.72±0.29b
2022	N0	192.36±2.41d	182.80±14.89b	80.16±0.14a	24.32±0.05b	6.40±0.20d
	N1	274.31±2.40a	207.85±12.07a	80.36±0.36a	24.32±0.04b	9.17±0.34a
	N2	248.61±2.41b	205.20±8.38a	80.12±0.15a	24.61±0.21a	8.59±0.26b
	N3	236.80±3.18c	211.20±3.91a	80.20±0.76a	24.41±0.30ab	7.89±0.03c
	N4	247.92±2.09b	207.01±10.33a	79.74±0.58a	24.36±0.13ab	8.33±0.20b
	N5	234.03±4.34c	209.12±4.72a	79.90±0.34a	24.37±0.05ab	7.77±0.25c
	CK	250.70±3.18b	205.11±4.32a	79.94±0.41a	24.49±0.12ab	8.37±0.24b
年份 Year (Y)		**	**	**	**	**
处理 Treatment (T)		**	**	ns	*	**
Y×T		ns	ns	ns	ns	ns

同列数据后不同小写字母代表相同年份下各处理间差异达显著水平（$P < 0.05$）；“*”和“**”分别代表差异达显著（$P < 0.05$）或极显著水平（$P < 0.01$），ns 代表差异未达显著水平。下同。

Different lowercase letters among each treatment under the same year are significant difference according to the least significant difference at the level of $P < 0.05$; “*” and “**” indicate significant difference at the $P < 0.05$ and $P < 0.01$ levels, respectively; ns represents no significant difference. The same below.

基蘖同步侧深施下总施氮减量与水稻产量之间的关系如图 1 所示。由图 1 可知，基蘖同步侧深施下基蘖肥、穗肥全程减氮量与水稻产量之间的方程为 $y=3.26078e^{-\frac{x}{37.35437}}+6.68592$，$R^2=0.9966$，当减氮量为 12.01%时，产量与 CK 处理相等。基蘖同步侧深施下基蘖肥减量、穗肥全量施与水稻产量之间的方程为 $y=3.09183e^{-\frac{x}{29.43744}}+6.8129$，$R^2=0.9995$，当氮减量比例为 9.51%时，产量与 CK 处理相等。式中，e 为 2.71828。

2.2　不同施肥方式对水稻氮素利用率的影响

不同施肥方式下氮肥运筹的氮素利用率如表 3 所示。由表 3 可知，年份与各处理互作下，各指标的差异不显著，各处理氮素生理利用率的均值在 2 年间无显著差异。侧深施肥处理的植株氮素积累量、氮素表观利用率、氮素农学利用率以及氮素偏

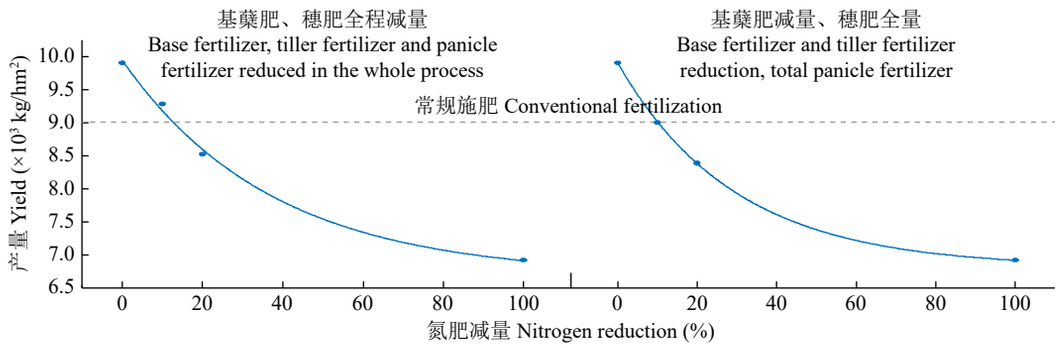


图 1 基蘖同步侧深施下总施氮减量与水稻产量之间的关系

Fig.1 Relationship between total nitrogen application reduction and rice yield under synchronized side-deep fertilization of basal and tillering fertilizers

表 3 各处理下水稻的氮素利用率

Table 3 N use efficiency of rice under each treatment

年份 Year	处理 Treatment	氮素积累量 Nitrogen accumulation (kg/hm²)	氮素表观利用率 ANUE (%)	氮素农学利用率 AE (kg/kg)	氮素生理利用率 PNUE (kg/kg)	氮素偏生产力 PFPN (kg/kg)
2021	N0	81.08±2.52d	/	/	/	/
	N1	161.50±2.33a	41.24±2.49a	16.49±0.86a	40.03±1.93ab	54.60±2.03c
	N2	141.88±1.17b	34.64±0.78b	14.50±0.75b	41.90±2.97a	56.84±1.68b
	N3	123.10±5.54c	26.93±3.51c	11.09±1.26de	41.34±3.20a	58.72±0.23a
	N4	141.97±3.55b	34.69±2.96b	12.80±0.37c	37.11±3.98cd	55.13±1.26c
	N5	121.87±1.18c	26.14±2.07c	10.13±0.39e	38.88±2.72bc	57.76±1.86ab
	CK	144.79±2.90b	32.67±2.27b	11.74±0.37cd	36.04±2.43d	49.85±1.48d
2022	N0	70.70±0.69d	/	/	/	/
	N1	141.29±3.34a	36.20±1.67a	14.20±0.78a	39.24±0.72abc	47.03±1.77c
	N2	122.81±1.54b	29.67±0.93b	12.49±0.63b	42.11±2.73ab	48.96±1.49b
	N3	105.29±4.59c	22.17±2.89c	9.54±1.10c	43.16±3.32a	50.57±0.20a
	N4	121.65±6.77b	29.03±3.67b	11.90±0.73b	38.29±5.35bc	47.46±1.15c
	N5	105.88±2.77c	22.56±1.69c	8.75±0.28c	38.91±1.87abc	49.79±1.57ab
	CK	125.86±0.70b	28.29±0.48b	10.08±0.29c	35.64±0.84c	42.90±1.25d
年份 Year (Y)		**	**	**	ns	**
处理 Treatment (T)		**	**	**	**	**
Y×T		ns	ns	ns	ns	ns

生产力在 2 年间所表现的规律一致，即均随施肥量的减少呈降低趋势，侧深施肥处理的偏生产力随施肥量的减少呈增加趋势。

2021 年，N1 处理的氮素积累量显著高于其他处理，其中，较 CK、N2 和 N4 处理分别高 11.54%、13.83%和 13.76%；N1 处理的氮素表观利用率比 CK 处理高 26.23%，差异达到显著水平；N1 处理的氮素农学利用率比 CK 处理高 40.45%；CK 处理的氮素生理利用率和氮素偏生产力在各施肥处理中均为最低，N2 处理的氮素生理利用率最大，比 CK 处理高 16.24%；N3 处理的氮素偏生产力最大，比 CK 处理高 17.80%。2022 年，N1 处理的氮素积累量显著高于其他处理，其中，较 CK、N2 和 N4 处理分别高 12.26%、15.05%和 16.15%；N1 处理的氮素表观利用率比 CK 处理高 27.97%，差异达到显著水平；N1 处理的氮素农学利用率比 CK 处理高 40.93%；CK 处理的氮素生理利用率和氮素偏生产力在各施肥处理中均为最低，N3 处理在氮素生理利用率和氮素偏生产力上均为最大，分别比 CK 处理高 21.11%和 17.85%。

2.3 不同施肥方式对水稻干物质积累量的影响

不同施肥方式下的水稻干物质积累量随时间的变化如表 4 所示。由表 4 可知，各生育期的干物质积累量在处理间的差异均达显著水平；孕穗期的干物质积累量在 2 年间无显著差异，其他时期的干物质积累量在年份间差异极显著；年份与处理间的互作效应对除分蘖期和齐穗期外其他时期的干物质积累量无显著影响。N1 处理在各个生育期的干

表 4　各处理下水稻在不同生育期的干物质积累量

Table 4　Dry matter accumulation of rice at different growth stages under each treatment　　×10³ kg/hm²

年份 Year	处理 Treatment	干物质积累量 Dry matter accumulation				净干物质积累量 Net matter accumulation		
		分蘖期 Tillering stage	孕穗期 Booting stage	齐穗期 Full heading stage	成熟期 Mature stage	分蘖－孕穗期 Tillering-booting	孕穗－齐穗期 Booting-full heading	齐穗－成熟期 Full heading-mature
2021	CK	1.30±0.02a	8.21±0.17b	14.59±0.19b	22.79±0.39b	6.92±0.16b	6.38±0.24a	8.20±0.23b
	N0	0.56±0.01e	5.78±0.17d	9.81±0.39d	16.06±0.41d	5.22±0.16d	4.03±0.27c	6.24±0.13d
	N1	1.30±0.05a	9.14±0.09a	15.99±0.02a	24.91±0.33a	7.84±0.11a	6.85±0.07a	8.92±0.31a
	N2	1.24±0.05b	8.20±0.15b	14.76±0.29b	23.25±0.18b	6.96±0.12b	6.56±0.44a	8.50±0.14b
	N3	1.19±0.02c	7.66±0.13c	13.33±0.14c	21.13±0.31c	6.46±0.15c	5.67±0.02b	7.80±0.22c
	N4	1.20±0.02c	8.14±0.21b	14.90±0.56b	23.27±0.54b	6.94±0.20b	6.76±0.62a	8.37±0.06b
	N5	1.03±0.02d	7.53±0.08c	13.06±0.18c	20.87±0.37c	6.50±0.08c	5.53±0.16b	7.81±0.20c
2022	CK	1.04±0.02b	8.43±0.27b	14.30±0.19b	20.05±0.60b	7.38±0.27b	5.88±0.40a	5.75±0.66bc
	N0	0.59±0.01c	5.64±0.51d	9.68±0.17d	14.28±0.68d	5.05±0.01e	5.59±0.51a	4.60±0.17c
	N1	1.27±0.08a	9.56±0.36a	15.15±0.21a	22.17±0.44a	8.29±0.08a	5.59±0.36a	7.02±0.21a
	N2	1.24±0.08a	8.36±0.36b	14.20±0.48b	20.56±0.27b	7.12±0.08bc	5.85±0.36a	6.36±0.48ab
	N3	1.23±0.02a	7.66±0.12c	12.36±0.28c	18.50±0.67c	6.43±0.02d	4.70±0.12b	6.14±0.28ab
	N4	1.26±0.05a	8.31±0.32b	14.15±0.09b	20.29±1.01b	7.05±0.05bcd	5.84±0.32a	6.14±0.09ab
	N5	1.02±0.04b	7.56±0.09c	12.13±0.15c	18.35±0.32c	6.54±0.04cd	4.57±0.09b	6.22±0.15ab
年份 Year (Y)		**	ns	**	**	ns	**	**
处理 Treatment (T)		*	**	**	**	**	**	**
Y×T		**	ns	*	ns	ns	ns	ns

物质积累量和净干物质积累量均高于其他处理。

2021 年，在分蘖期，CK 与 N1 处理的干物质积累量差异不显著，但显著高于其他施肥处理；在孕穗期及随后的生育期中，各处理的干物质积累量表现为 N1 处理最大，N2、N4 和 CK 处理次之，然后为 N3 和 N5 处理，N0 处理最小。在齐穗期，N1 比 CK 处理高 8.76%，差异达显著水平，CK 与 N2 和 N4 处理差异不显著，分别比 N3 和 N5 处理高 9.46%和 11.71%，差异均达显著水平。在齐穗－成熟期，CK 与 N2 和 N4 处理差异不显著，分别比 N3 和 N5 处理高 3.55%与 3.39%，均达显著水平。

2022 年，在分蘖期，CK 与 N5 处理的干物质积累量差异不显著，但显著低于其他施肥处理；在孕穗期及随后的生育期中，各处理的干物质积累量表现为 N1 处理最大，N2、N4 和 CK 处理次之，然后为 N3 和 N5 处理，N0 处理为最小。在齐穗期，N1 比 CK 处理高 5.91%，差异达显著水平，CK 与 N2 和 N4 处理差异不显著，分别比 N3 和 N5 处理高 13.60%和 15.21%，差异均达显著水平。在齐穗－成熟期，N1 处理的净干物质积累量比 CK 高 22.24%，差异达显著水平。

2.4　不同施肥方式对水稻茎蘖动态的影响

不同施肥方式下的水稻茎蘖数随时间的变化如图 2 所示，各处理下水稻 2 年的茎蘖数在移栽后随时间变化呈先上升后下降的趋势。

2021 年，N1 处理在分蘖前期的分蘖速度最快；

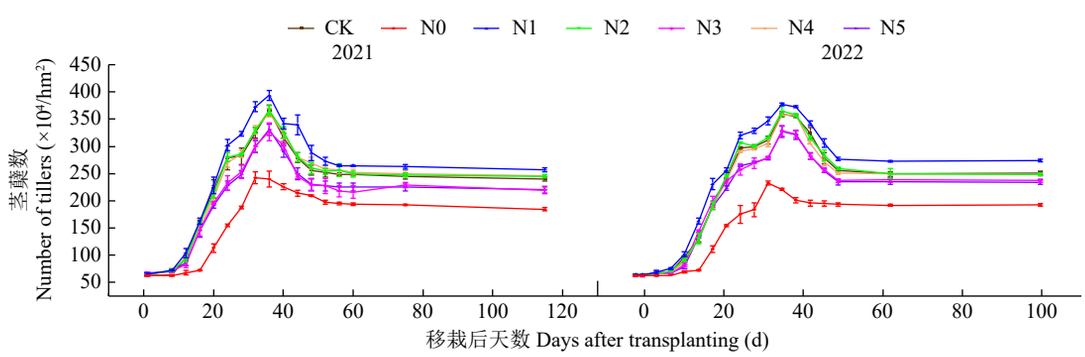


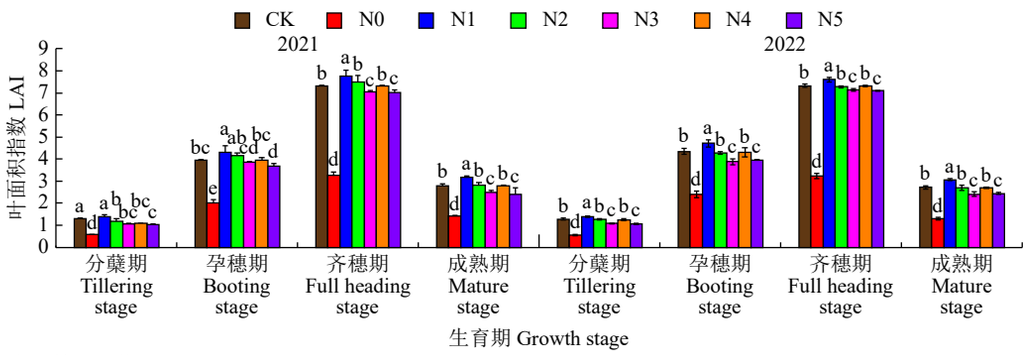
图 2　各处理下的水稻茎蘖动态

Fig.2　Tiller dynamics of rice under each treatment

CK 处理的分蘖速度仅次于 N1，但在随后的生长阶段中，CK 的分蘖速度逐渐减缓，与 N3 和 N5 处理无异；移栽后第 29 天，CK 处理的分蘖数较 N1 低 12.69%，较 N3 和 N5 处理分别高 11.23%和 13.41%；各处理下水稻最终成穗数的排序为N1＞N4＞N2＞CK＞N5＞N3＞N0，其中 N1 处理最高，CK 处理与 N2、N4 处理差异较小，CK 处理明显高于 N3 和 N5。2022 年，移栽后第 23 天，N1 处理的分蘖数较 CK 处理高 17.78%；CK、N2 和 N4 处理分蘖数间的差异均较小；各处理间分蘖动态的趋势与 2021 年保持一致。

2.5 不同施肥方式对水稻 LAI 的影响

不同施肥方式下的水稻 LAI 随时间的变化如图 3 所示，随着生育期的推进呈先上升后下降的趋势，并且在齐穗期达到最大值。各处理下水稻的 LAI 在 2 年间所表现的规律一致，即侧深施肥下水稻的 LAI 均随施肥量的减少呈下降趋势，N1 处理在各生育期的 LAI 均最大。



不同小写字母表示差异显著（$P < 0.05$）。
Different lowercase letters indicate significant differences ($P < 0.05$).

图 3 各处理下水稻在不同生育期的 LAI
Fig.3 LAI of rice at different growth stages under each treatment

2021 年，CK 与 N1 处理在分蘖期的 LAI 差异不显著，CK 处理在随后的生育期 LAI 则低于 N1 处理，N1 处理在齐穗期高于其他施肥处理，高 3.86%~10.75%；N2 和 N4 处理在分蘖期的 LAI 低于 CK 处理，低 11.19%~17.65%，差异达显著水平，N2 和 N4 处理在随后生育期的 LAI 与 CK 处理差异不显著；CK 处理在齐穗期的 LAI 比 N3 和 N5 处理分别高 3.78%和 4.07%。2022 年，N1 处理在齐穗期高于其他施肥处理，高 3.69%~7.01%；N2 和 N4 处理在分蘖期的 LAI 低于 CK 处理，分别低 10.09%和 11.11%，差异达显著水平，N2 和 N4 处理在随后生育期的 LAI 与 CK 处理差异不显著；CK 处理在齐穗期的 LAI 比 N3 和 N5 处理分别高 2.71%和 3.21%。

2.6 不同施肥方式对水稻 SPAD 值的影响

不同施肥方式下的水稻叶片 SPAD 值随时间的变化如图 4 所示，各处理下水稻叶片的 SPAD 值随生育期推进呈先增加后减少的趋势，并在齐穗期达到最大值。各处理下水稻的 SPAD 值在 2 年间所表现的规律一致，即侧深施肥下水稻的 SPAD 值均随

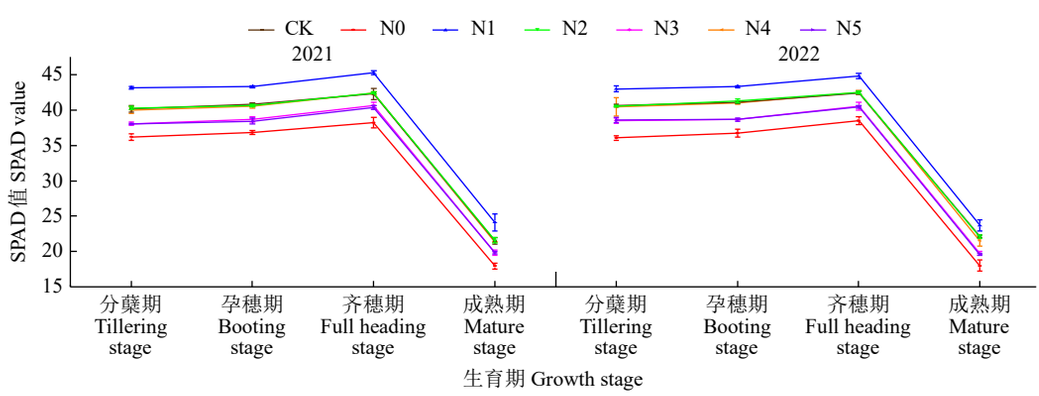


图 4 各处理下水稻叶片的 SPAD 值
Fig.4 The SPAD value of rice leaves under each treatment

施肥量减少呈减少的趋势，N1 处理在全生育期的 SPAD 值均高于其他处理。

2021 年，CK 处理与 N2 和 N4 处理的 SPAD 值在全生育期差异较小；N3 与 N5 处理的 SPAD 值在全生育期差异较小；分蘖期，N1 处理的 SPAD 值比 CK 处理高 7.46%，差异达显著水平；齐穗期，N1 处理的 SPAD 值比 CK 处理高 7.17%，CK 的 SPAD 值比 N3 和 N5 处理分别高 3.78%和 4.49%。2022 年，CK 处理与 N2 和 N4 处理的 SPAD 值在全生育期差异不明显；N3 与 N5 处理的 SPAD 值在全生育期差异不明显；分蘖期，N1 处理的 SPAD 值比 CK 处理高 5.82%；齐穗期，N1 处理的 SPAD 值比 CK 处理高 5.66%，比 N2 和 N4 处理分别高 5.49%与 5.40%，CK 处理的 SPAD 值比 N3 和 N5 处理分别高 4.69%和 4.77%。

3　讨论

水稻产量由结实率、千粒重、单位面积有效穗数和平均穗粒数决定。LAI 和干物质积累量是反映作物长势和产量潜力的重要指标[12-16]。研究[17]表明，与传统施肥相比，侧深施肥能显著增加 LAI，而较高的 LAI 又可获得更多的光合产物，从而提高水稻的干物质积累量，为水稻高产打下基础。高产群体的形成与单位面积有效穗数和平均穗粒数有紧密联系[18]。侧深施肥通过提高水稻有效分蘖数和穗粒数，达到减氮、增产的作用[19]。杜同庆等[20]研究认为，基蘖同步侧深施氮肥减量 10%、基蘖肥与穗肥比例 6∶4 时水稻能达到优质高产的目标；张军等[21]研究则认为氮肥减量 20%且基蘖肥与穗肥比例 7∶3 为最理想状态。不同学者得到的结论不同可能与试验品种及生态区差异有关。本研究中采用基蘖同步侧深施的施肥方式，发现基蘖肥和穗肥全程减氮量在 12.01%的范围内能够稳产；基蘖肥减氮量在 9.51%的范围内、穗肥全量施时能够稳产。受土壤肥力、气候和品种等因素的影响，不同地区所得到的试验结果可能与本研究存在差异。

在传统撒施方式下，肥料中的氮素易滞留在土壤表层，难以被水稻根系吸收，并在生育期间易通过径流、淋溶和挥发等途径损失[22]。侧深施肥技术将氮素直接施在靠近水稻根部的土壤中，将更多的养分直接供给水稻根系，减少氮素流失，有利于水稻根系生长，提高氮素吸收速率，有效提高氮肥的利用效率，促进水稻对氮素的吸收利用[23-24]。本研究中，基蘖同步侧深施（N1、N2 和 N4）处理在氮素表观利用率和氮素农学利用率上显著高于 CK 处理，N3、N5 处理在氮素生理利用率和氮素偏生产力上显著高于 CK 处理，表明基蘖同步侧深施能显著提高水稻氮素利用率。

4　结论

基蘖同步侧深施能够增加水稻单位面积有效穗数，同时提高水稻中后期的 LAI 和干物质积累量，并提高氮素表观利用率、氮素农学利用率、氮素生理利用率和氮素偏生产力，从而提高水稻产量。基蘖同步侧深施肥相较于传统撒施能够在减氮的条件下保持稳产，达到降本增效的目的。

参考文献

[1] Ye Y S，Liang X Q，Chen Y X，et al. Alternate wetting and drying irrigation and controlled-release nitrogen fertilizer in late-season rice. Effects on dry matter accumulation, yield, water and nitrogen use. Field Crops Research，2013，144：212-224.

[2] Geng J B，Ma Q，Zhang M，et al. Synchronized relationships between nitrogen release of controlled release nitrogen fertilizers and nitrogen requirements of cotton. Field Crops Research，2015，184：9-16.

[3] 钟雪梅，黄铁平，彭建伟，等. 机插同步一次性精量施肥对双季稻养分累积及利用率的影响. 中国水稻科学，2019，33(5)：436-446.

[4] 陈立才，李艳大，秦战强，等. 侧深施用控释肥对机插中稻生长、产量及氮肥农学效率的影响. 安徽农业大学学报，2020，47(5)：839-844.

[5] 聂云鑫，徐卫红，陈序根，等. 脲酶硝化双抑制剂缓释肥对土壤养分含量及土壤酶活性的影响. 中国农学通报，2019，35(11)：65-71.

[6] Chu G，Chen T T，Chen S，et al. Polymer-coated urea application could produce more grain yield in “super” rice. Agronomy Journal，2018，110(1)：246-259.

[7] Azeem B，KuShaari K，Man B Z，et al. Review on materials & methods to produce controlled release coated urea fertilizer. Journal of Controlled Release，2014，181：11-21.

[8] Prasad Y T，Raju A，Phil C，et al. Enhanced efficiency fertilisers: a review of formulation and nutrient release patterns. Journal of the Science of Food and Agriculture，2015，95(6)：1131-1142.

[9] Ni B L，Liu M Z，Lu S Y，et al. Novel slow-release multielement compound fertilizer with hydroscopicity and moisture preservation. Industrial & Engineering Chemistry Research，2010，49(10)：4546-4552.

[10] 赵海成，杜春影，魏媛媛，等. 施肥方式和氮肥运筹对寒地水稻产量与品质的影响. 中国土壤与肥料，2019(3)：76-86.

[11] Tang J C，Zhang R Y，Li H C，et al. The combination of different nitrogen fertilizer types could promote rice growth by alleviating the inhibition of straw decomposition. Food and Energy Security，2021，10(3)：e298.

[12] 黄高宝. 作物群体受光结构与作物生产力研究. 生态学杂志，

1999，18(1)：60-66.
[13] 杨建昌，朱庆森，曹显祖. 水稻群体冠层结构与光合特性对产量形成作用的研究. 中国农业科学，1992，25(4)：7-14.
[14] 徐正进，陈温福，张龙步，等. 水稻不同穗型群体冠层光分布的比较研究. 中国农业科学，1990，23(4)：10-16.
[15] 薛利红，曹卫星，罗卫红，等. 光谱植被指数与水稻叶面积指数相关性的研究. 植物生态学报，2004，28(1)：47-52.
[16] 潘胜才，陈余波，简叙，等. 光照、氮素对杂交水稻干物质积累、分配和产量形成的影响. 作物研究，2024，38(1)：1-9，15.
[17] 黄恒，姜恒鑫，刘光明，等. 侧深施氮对水稻产量及氮素吸收利用的影响. 作物学报，2021，47(11)：2232-2249.
[18] 张洪程，吴桂成，戴其根，等. 粳型杂交水稻超高产形成规律与栽培途径的探讨. 杂交水稻，2010，25（增 1）：346-353.
[19] 王强，姜丽娜，潘建清，等. 长江下游单季稻一次性施肥产量效应及影响因子研究. 浙江农业学报，2017，29(11)：1875-1881.
[20] 杜同庆，仝斌，徐鹏，等. 氮肥减量下不同基蘖肥与穗肥运筹对机插稻生长发育特性的影响. 大麦与谷类科学，2022，39(5)：59-63.
[21] 张军，周冬冬，许轲，等. 淮北地区麦茬机插优质食味粳稻氮肥减量的精确运筹. 作物学报，2022，48(2)：410-422.
[22] Nkebiwe M P， Weinmann M， Bar-Tal A， et al. Fertilizer placement to improve crop nutrient acquisition and yield: a review and meta-analysis. Field Crops Research，2016，196：389-401.
[23] 朱从桦，张玉屏，向镜，等. 侧深施氮对机插水稻产量形成及氮素利用的影响. 中国农业科学，2019，52(23)：4228-4239.
[24] 邹应斌，黄见良，屠乃美，等. “旺壮重”栽培对双季杂交稻产量形成及生理特性的影响. 作物学报，2001，27(3)：343-350.

Effects of Synchronized Basal-Tiller Side Deep Nitrogen Application on Rice Growth, Nitrogen Use Efficiency, and Yield

You Hao, Song Wenjie, Fu Bin, Zhang Dahong, Jiang Xun, Lu Bilin

(College of Agriculture, Yangtze University, Jingzhou 434025, Hubei, China)

Abstract To investigate the effects of fertilizer application rate and fertilization method under synchronized basal-tiller side-deep fertilization on nitrogen utilization, nitrogen translocation, plant dry-matter accumulation and grain yield of rice, taking rice cultivar Quanliangyouefengsimiao as the experimental material, with traditional broadcast fertilization as the control (CK), seven treatments were set up, including no nitrogen application (N0), full-rate side-deep application of basal-tiller and panicle nitrogen fertilizer (N1), 10% total nitrogen reduction for basal-tiller and panicle fertilizer (N2), 20% total nitrogen reduction for basal-tiller and panicle fertilizer (N3), 10% nitrogen reduction only for basal-tiller fertilizer (N4), and 20% nitrogen reduction only for basal-tiller fertilizer (N5). A field experiment was carried out to explore the effects of nitrogen management on rice growth, nitrogen utilization and yield under synchronous side-deep basal-tiller fertilization. The results showed that compared to the CK, the yield under N1 treatment averaged across two years significantly increased by 9.58%; synchronized basal-tiller side-deep treatment significantly increased the effective panicle number of rice, enhanced the leaf area index and dry matter accumulation at mid and late growth stages. Compared to CK, apparent nitrogen use efficiency, agronomic nitrogen use efficiency, physiological nitrogen use efficiency and partial factor productivity under N1, N2, and N4 treatments significantly increased by 4.53%-27.10%, 13.20%-40.65%, 5.19%-17.20%, and 9.57%-14.07%, respectively. Synchronized basal-tiller side-deep can increase the panicle number of rice, improve the leaf area index and dry matter accumulation in the mid-to-late growth stages, and enhance nitrogen use efficiency, thereby increasing rice yield.

Key words Nitrogen application; Side-deep fertilization; Rice growth; Yield; Nitrogen use efficiency