

宋文杰, 罗嘉润, 刘伟, 等. 控释肥一次性侧深施对水稻生长、氮素利用和产量的影响[J]. 华中农业大学学报, 2023, 42(2): 99-107.  
DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2023.02.013

## 控释肥一次性侧深施对水稻生长、 氮素利用和产量的影响

宋文杰, 罗嘉润, 刘伟, 张大弘, 李燕丽, 卢碧林

长江大学农学院, 荆州 434025

**摘要** 为探索机插水稻一次性侧深基施的轻简高效栽培技术, 以水稻品种“全两优鄂丰丝苗”为材料, 设置不施肥(N0)、控释肥一次性侧深基施(N1)、控释肥减氮10%一次性侧深基施(N2)、控释肥减氮20%一次性侧深基施(N3)和传统施肥(CK)处理, 测定水稻分蘖动态、主要生育期的叶面积指数与干物质积累量、齐穗期根系指标、氮素利用效率与产量, 研究控释肥一次性侧深施对水稻生长、氮素吸收利用和产量的影响。结果显示: 与CK相比, 处理N1、N2显著增产12.99%~14.85%和5.47%~6.09%, 处理N3产量与CK差异不显著, 对施肥量和产量拟合后分析, 在减氮18.72%时与CK产量持平。与CK相比, 控释肥一次性侧深施处理显著提高了水稻的成穗率、提高了生育中后期的叶面积指数和干物质积累量、促进了根系的生长并扩大了根系的分布范围, 处理N1、N2和N3与处理CK相比, 分别提高氮素表观利用率1.21%~46.57%、氮素农学利用率18.85%~61.73%、氮素生理利用率8.90%~17.71%和偏生产力12.99%~23.61%。研究结果表明, 控释肥一次性侧深施促进了根系生长, 增加水稻有效穗数, 提高了氮素利用效率且大幅较少施肥次数, 在减氮18.72%的范围内, 可实现水稻的高产、稳产。

**关键词** 轻简高效栽培; 控释肥; 侧深施肥; 氮肥运筹; 减氮施肥; 水稻生长; 产量; 氮素利用率

**中图分类号** S511.506.2 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2023)02-0099-09

目前水稻生产上的施肥方式仍以2次及以上的人工或机械撒施为主, 虽满足了其生长发育各阶段的养分需求, 促进了产量的提高, 但面临人工短缺且费用高、施肥均匀度难以精确控制和肥料利用率低等问题<sup>[1]</sup>, 降低了水稻生产效益<sup>[2]</sup>, 加剧水体富营养化<sup>[3]</sup>和温室气体排放<sup>[4]</sup>等环境问题。随着经济的快速发展, 农村劳动力发生了转移, 节本增效和节能降耗的轻简高效施肥方式为水稻生产所急需。水稻侧深施肥通过机械插秧, 同步将肥料施于秧苗侧边3~5 cm深的土壤中。现有研究表明, 侧深施肥可有效减少肥料损失, 增加作物产量<sup>[5]</sup>。相同施氮量下侧深施肥处理的水稻产量较常规施肥增产幅度达6.95%~8.11%<sup>[6]</sup>, 减氮条件下较常规施肥仍可以稳产<sup>[7]</sup>。

缓控释肥可根据作物生长发育对养分的需求而将养分缓慢释放或控制释放<sup>[8]</sup>, 大幅减少施肥次

数<sup>[9]</sup>, 并减少氮素损失<sup>[10]</sup>, 是一种节本增效的新途径。较常规施肥处理, 缓控释肥中缓慢释放的养分有利于增加水稻深层土壤中的根系数量, 扩大根系养分摄取范围<sup>[11]</sup>, 提高叶面积指数<sup>[12]</sup>, 增加干物质和氮素积累量<sup>[13]</sup>, 提升成穗率并增产<sup>[14]</sup>。但也有研究认为施缓控释肥难以达到增产效果<sup>[15]</sup>。

前人针对侧深施肥的氮肥运筹和缓控释肥的施用种类及用量等问题开展了大量研究, 但对侧深施肥和缓控释肥的合理减氮量, 不同学者的研究存在差异<sup>[16]</sup>, 控释肥一次性侧深施及施用量对水稻的生长和氮素利用的相关研究报道较少。本研究拟通过控释肥一次性侧深施的减量试验, 探明控释肥一次性侧深施对水稻生长、氮素吸收利用和产量的影响及减氮阈值, 以期为长江中下游水稻轻简高效栽培提供理论依据。

收稿日期: 2022-07-13

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD030130101; 2017YFD030140404)

宋文杰, E-mail: 202071615@yangtzeu.edu.cn

通信作者: 卢碧林, E-mail: blin9921@sina.com

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验于2020—2021年在湖北省荆州市华中农高区长江大学农业科技产业园进行(30°22'N, 112°4'E)。

土壤类型为轻壤土,2020年水稻移栽前0~20 cm耕层土壤pH值7.68,碱解氮73.6 mg/kg,速效磷30.1 mg/kg,速效钾78.6 mg/kg,有机质18.93 g/kg。2021年水稻栽前0~20 cm耕层土壤pH值7.73,碱解氮86.6 mg/kg,速效磷31.1 mg/kg,速效钾98.2 mg/kg,有机质22.94 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(新洋丰科技有限公司生产,N:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:K<sub>2</sub>O=15:15:15),尿素(湖北潜江金华润化肥有限公司生产,N 46%),控释氮肥(中化集团临沂分公司生产,90 d控释包衣尿素,包衣3%,N 44.6%);磷肥为过磷酸钙(16% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>,湖北三峡生态肥业有限公司生产);钾肥为氯化钾(60%,K<sub>2</sub>O中化化肥有限公司生产)。

### 1.2 试验设计

2020年,水稻5月13日播种,6月3日移栽。2021年,5月13日播种,6月4日移栽。移栽时使用带有侧深施肥装置的插秧机,三本栽插,行株距为30 cm×16 cm。以传统撒施(CK)为对照,设置全程不施肥(N0)、控释肥一次性侧深基施(N1)、控释肥减氮10%一次性侧深基施(N2)、控释肥减氮20%一次性侧深基施(N3),各处理3次重复,共15个小区。处理CK的总施氮量为195 kg/hm<sup>2</sup>,氮肥分为基肥、分蘖肥和穗肥,以5:3:2的比例人工撒施,其中基肥为复合肥,分蘖肥和穗肥均为尿素,分蘖肥及穗肥分别在移栽后7 d以及幼穗分化三期施用。N:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:K<sub>2</sub>O=2:1:2,穗肥补K<sub>2</sub>O 97.5 kg/hm<sup>2</sup>,分蘖肥及穗肥分别在移栽返青后以及幼穗分化第三期施用。侧深施肥处理的控释肥均在移栽时同步一次性基施,控释氮肥占总氮比100%,其中N1施氮量为195 kg/hm<sup>2</sup>,N2施氮量为175.5 kg/hm<sup>2</sup>,N3施氮量为156 kg/hm<sup>2</sup>,在施基肥时使用过磷酸钙和氯化钾将各处理中的P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>和K<sub>2</sub>O补至97.5 kg/hm<sup>2</sup>,在幼穗分化第三期补K<sub>2</sub>O 97.5 kg/hm<sup>2</sup>。每小区单独做埂,塑料薄膜包田埂,各处理单独灌排。

### 1.3 茎蘖动态的观测

移栽后选取具有代表性的10穴植株定点调查基

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,各处理重复3次。

### 1.4 叶面积指数的测定

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,拍照,运用Imagej 1.51计算叶面积指数(LAI)<sup>[17]</sup>。各处理重复3次。

### 1.5 干物质积累量的测定

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,放入干燥箱中杀青、烘干、称质量,保存。各处理重复3次。

### 1.6 水稻根系生长的测定

在齐穗期时,各处理按平均茎蘖数取样,连带植株根系挖出深30 cm、长30 cm、宽16 cm的土块,用流水冲洗土块表面,待根系脉络清晰后,根据移栽时侧深施肥机器施肥的不对称性,将控释肥处理根系分为施肥侧与未施肥侧,将土块均分后,连带土块放入尼龙网袋中清洗,以获得较为完整的植株根系。用Epson Expression 10000XL扫描仪配合WinRHIZO软件测定根系数据。

### 1.7 植株氮积累量的测定

将保存的成熟期茎、叶、穗干物质样粉碎,利用ECS 4024 CHNSO Classic分析仪测定各植株部分氮含量,参照文献[17]的方法,分别计算植株的氮素表观利用率(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)、氮素偏生产力(partial factor productivity nitrogen, PEPN)。

### 1.8 产量及其构成因素的测定

水稻成熟后,调查各处理穗数,每穗粒数、结实率、千粒重。各处理进行测产,3次重复。

### 1.9 数据分析

试验数据采用Data Processing System 7.05进行方差分析,平均值间采用最小显著差异法(LSD)进行多重比较,利用Origin 2017制图。

## 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

由图1可知,2020年,处理N1的产量显著高于其他处理,比CK高12.99%;处理N2的产量比CK高

5.47%；处理N3的产量与CK差异不显著。2 a产量的变化趋势一致，2020年因阴雨天气较多，齐穗期温光不足，导致结实率较2021年低，各处理产量均低于2021年。

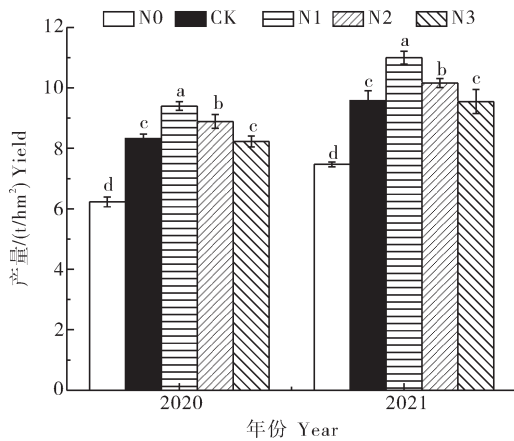


图1 不同施肥方式下的水稻产量

Fig. 1 Rice yield under different fertilization methods

氮肥减量与产量之间的关系如图2所示，控释肥一次性侧深施的氮肥减量幅度与产量的回归方程为  $y=0.0004x^2-0.0737x+10.1896$  ( $R^2=0.9996$ )。由回归方程可以得到，氮肥减量至18.72%时，产量与CK持平。

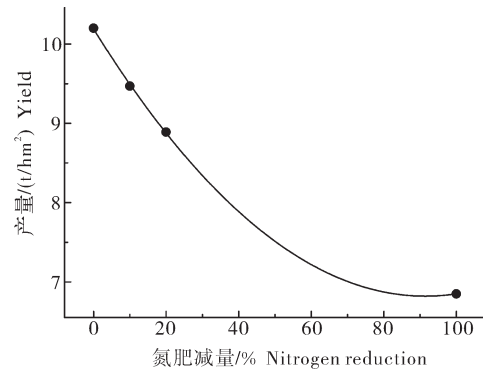


图2 氮肥减量与产量之间的相关性

Fig. 2 Correlation between nitrogen reduction and yield

不同施肥方式处理下水稻的构成因素如表1所示。由表1可知，年份和处理交互对结实率之外的构成因素影响不显著。各处理在2 a间的有效穗数和结实率存在显著差异；各处理在2 a间的千粒重有显著差异；各处理的每穗粒数在2 a间无显著差异。2020年，处理N1的有效穗与N2差异不显著，但处理N1与处理N3和CK差异达显著水平；处理N3的有效穗与N2和CK差异均不显著。各施肥处理在平均穗粒数、结实率和千粒重间差异不显著。2021处理N2的有效穗与N3达到显著差异。

表1 不同施肥方式下水稻产量及其构成

Table 1 Rice yield and its components under different fertilization methods

年份 Year(Y)	处理 Treatment(T)	有效穗数/( $\times 10^4$ /hm <sup>2</sup> ) Valid panicle No.	平均穗粒数 Spikelet per panicle	结实率/% Seed-setting rate	千粒重/g 1 000-grain weight
2020	N0	170.14±2.41d	196.01±2.64b	78.51±2.28a	24.38±0.62a
	N1	246.53±3.18a	214.06±7.73a	73.33±3.06b	24.39±0.24a
	N2	238.19±11.48ab	218.40±8.36a	72.67±3.06b	24.51±0.06a
	N3	226.39±8.42bc	218.52±6.90a	73.67±0.57b	24.78±0.46a
	CK	225.00±2.08c	221.00±7.80a	71.67±1.53b	24.57±0.07a
2021	N0	179.86±3.18d	192.34±7.13b	87.17±0.85b	24.79±0.24a
	N1	262.50±5.51a	218.04±12.37a	88.48±0.39a	24.79±0.15a
	N2	253.47±3.18b	216.50±6.88a	88.37±0.20a	24.82±0.17a
	N3	239.58±4.16c	210.13±1.71a	87.73±0.61ab	24.85±0.07a
	CK	237.50±2.08c	218.39±11.71a	87.16±0.58b	24.65±0.15a
Y		**	ns	**	*
T		**	**	*	ns
Y×T		ns	ns	**	ns

注：小写字母和\*表示差异显著( $P<0.05$ )，\*\*表示差异极显著( $P<0.01$ )，ns表示差异不显著。下同。Note: Small letters and \* in the table indicate significant difference ( $P<0.05$ ), \*\* indicate extremely significant difference ( $P<0.01$ ), ns represents no significant. The same as below.

## 2.2 不同施肥方式对水稻茎蘖动态的影响

由图3可知，各处理的茎蘖数在2 a里随生育期

的进程呈现先增加后减少的趋势。

2020年，处理N1、N2、N3在前期的分蘖速度低

于CK处理,其中CK茎蘖数最先达到峰值。处理N1的最高茎蘖数与CK差异不显著,但极显著高于其他处理。在生育后期,CK茎蘖数下降速率高于其他处

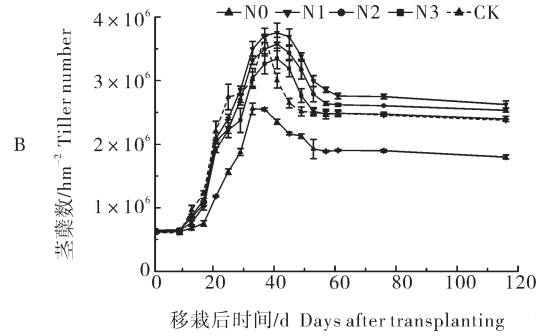
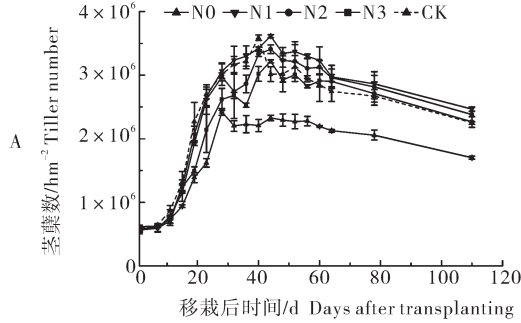


图3 2020年(A)和2021年(B)不同施肥方式下的水稻茎蘖动态

Fig. 3 Tiller dynamics of rice under different fertilization methods in 2020(A) and 2021(B)

### 2.3 不同施肥方式对水稻叶面积指数的影响

不同施肥方式下水稻的叶面积指数随时间的变化如图4所示。由图4可知,随着生育期进程的推进,各处理下水稻的叶面积指数呈现先上升后下降的趋势,并在齐穗期达到最大值。

2020年,分蘖期处理CK的叶面积指数均值最大,显著高于处理N2和N3;孕穗期处理N1的叶面

理,成穗率显著低于其他处理,其他处理间差异不显著(图3A)。2021年在各时期的茎蘖数平均值与成穗率均高于2020年(图3B)。

积指数均值最大,与除N2外其他处理间差异显著;齐穗期处理N1及N2比CK高15.31%和13.34%,CK与N3差异不显著;成熟期处理N1和N2间差异不显著,N3和CK差异不显著(图4A)。

2021年各生育期的叶面积指数均值高于2020年。处理N2与N3在分蘖期差异显著,在齐穗期差异不显著(图4B)。

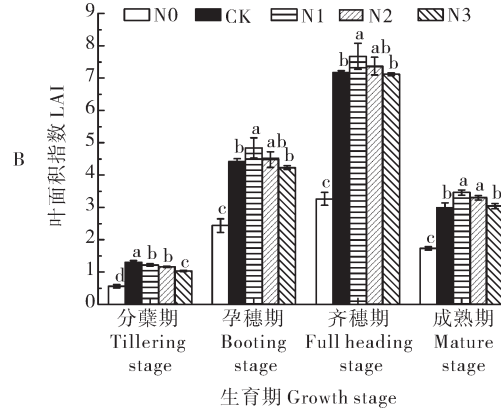
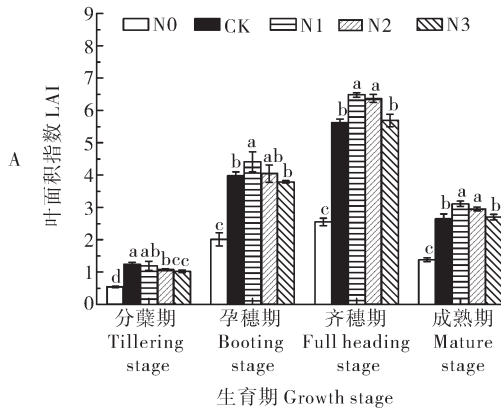


图4 2020年(A)和2021年(B)不同施肥方式下的水稻叶面积指数

Fig. 4 Leaf area index of rice under different fertilization methods in 2020(A) and 2021(B)

### 2.4 不同施肥方式对水稻地上部干物质的影响

由表2可知,年份间分蘖期的干物质积累量差异不显著;年份与处理互作在除了孕穗期之外的时期差异不显著。年份和处理互作在除了分蘖-孕穗期之外的时期差异不显著。

2020年,分蘖期处理N1与CK间差异不显著,与其他处理差异达到显著水平;孕穗期处理N1、N2和CK间差异不显著;齐穗期处理N1的干物质积累量比CK高5.04%,差异达到显著水平,处理N2与CK间差异不显著,但显著高于N3;成熟期处理N1的干物质积累量比CK高20.81%,差异显著,处理CK的

干物质积累量与N2和N3间差异均不显著。净干物质积累量中,在分蘖-孕穗期,处理N1、N2和CK间的净干物质积累量差异不显著,但显著高于其他处理;齐穗-成熟期,处理N1的净干物质积累量比CK高41.87%,差异达到显著水平,而CK与其他处理差异不显著。

2021年,在各时期干物质积累量中,在孕穗期处理N1与N2差异达到显著水平;在成熟期处理N2与N3未达显著水平。净干物质积累量中,在分蘖-孕穗期处理N1与N2差异达到显著水平;在齐穗-成熟期,处理N2与N3未达到显著水平。

表2 不同施肥方式下水稻的干物质积累量

年份 (Y) Year	处理(T) Treatment	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
2020	N0	0.56±0.01d	3.05±0.14c	6.41±0.20d	12.00±0.11d	2.49±0.15c	3.36±0.24b	5.58±0.13c
	N1	1.05±0.02a	5.47±0.16a	10.92±0.06a	22.00±1.28a	4.43±0.14a	5.45±0.14a	11.05±1.28a
	N2	0.96±0.03b	5.21±0.28a	10.28±0.12b	20.15±2.25ab	4.25±0.30a	5.06±0.20a	9.87±2.37ab
	N3	0.91±0.02c	4.81±0.05b	9.80±0.21c	17.41±0.16c	3.89±0.05b	5.00±0.21a	7.61±0.06c
	CK	1.03±0.02a	5.36±0.17a	10.40±0.26b	18.19±0.47bc	4.33±0.17a	5.04±0.43a	7.79±0.31bc
2021	N0	0.57±0.01d	5.75±0.10d	9.55±0.42d	15.97±0.43c	5.18±0.10d	3.80±0.50b	6.43±0.77c
	N1	1.04±0.02a	9.41±0.14a	14.77±0.38a	25.93±1.58a	8.37±0.15a	5.35±0.46a	11.16±1.31a
	N2	0.97±0.02b	8.68±0.52bc	14.14±0.20b	24.13±2.85ab	7.71±0.50bc	5.46±0.70a	9.99±2.93ab
	N3	0.89±0.03c	8.40±0.08c	13.62±0.09c	21.34±0.17b	7.50±0.07c	5.22±0.10a	7.73±0.25bc
	CK	1.03±0.03a	9.09±0.36ab	14.13±0.28b	22.18±1.18b	8.06±0.38ab	5.04±0.40a	8.05±1.09abc
Y	ns	**	**	**	**	ns	ns	
T	**	**	**	**	**	**	**	
Y×T	ns	**	ns	ns	**	ns	ns	

## 2.5 不同施肥方式对水稻根系的影响

由表3可见,各处理的水稻根系在平均直径上差异不显著。在不同施肥方式下,处理CK在平均根长、平均根表面积和平均根体积均显著小于施肥区域内的N1、N2和N3的根系,但CK与侧深施肥处理下未施肥区域的根系差异不显著;处理N1的总根数比CK高11.91%,比处理N3高11.57%。

在一次性施肥方式的不同施肥梯度下,N1、N2和N3处理间在施肥区域内的平均根长无显著差异,但相比未施肥区域则分别高出16.29%、9.08%和15.63%;N1、N2和N3处理间在施肥区域内的平均根表面积无显著差异,但相比未施肥区域则分别高出15.33%、9.43%和11.65%;N1、N2和N3处理间

在施肥区域内的平均根体积无显著差异,但相比未施肥区域则分别高出34.77%、35.41%和31.61%;N1和N2处理间在施肥区域内的总根数无显著差异,N2和N3处理间在施肥区域内的总根数无显著差异,但处理N1的总根数比N3高12.57%,差异达到显著水平。N1、N2和N3处理间在施肥区域内的总根数相比未施肥区域分别高出80.45%、63.14%和76.04%;侧深施肥处理的未施肥侧在根系的各项指标上差异均不显著。

## 2.6 不同施肥方式对水稻氮素利用率的影响

由表4可知,氮素积累量和各氮素利用率在处理间差异均达到显著水平;年份和处理对氮素积累量和各氮素利用率无互作效应。

表3 不同施肥方式下水稻齐穗期根系形态特征

处理 Treatments	施肥区域 Fertilizing area	平均根长/cm Average root length	平均根 表面积/cm <sup>2</sup> Average root surface area	平均直径/ mm Average diameter	平均根体积/ ×(10 <sup>-2</sup> cm <sup>3</sup> ) Average root volume	施肥区总根数 Total number of roots of fertilizing area	总根数 Total number of roots of treatments
N0	\	14.62±0.78c	2.77±0.01c	0.53±0.02a	2.29±0.16c	\	384.67±15.50c
N1	F	21.84±0.21a	3.77±0.16a	0.53±0.02a	4.39±0.10a	397.00±20.22a	617.00±9.54a
	NF	18.78±0.38b	3.27±0.18b	0.53±0.03a	3.26±0.13b	220.00±27.78c	
N2	F	20.59±0.63a	3.66±0.15a	0.53±0.01a	4.39±0.13a	370.33±14.01ab	597.33±11.37a
	NF	18.87±0.24b	3.35±0.15b	0.54±0.03a	3.24±0.07b	227.00±18.08c	
N3	F	21.40±1.65a	3.75±0.05a	0.54±0.01a	4.36±0.12a	352.67±15.53b	553.00±21.93b
	NF	18.51±0.30b	3.36±0.05b	0.53±0.03a	3.31±0.06b	200.33±6.66c	
CK	\	18.53±1.17b	3.30±0.20b	0.53±0.01a	3.30±0.15b	\	551.33±22.59b

注:F和NF分别代表侧深施肥的施肥区和未施肥区。Note:F and NF represent the fertilized side and the unfertilized side of deep side fertilization.

2020年,处理N1的氮素积累量显著高于其他处理,处理N2的氮素积累量与CK差异不显著;处理N1的氮素表观利用率比CK高10.51%,处理N2比CK高5.48%;N3与N2和CK间差异均不显著;处理CK在氮素农学利用率上与N3无显著差别,但显著低于N1和N2处理,N1和N2的氮素农学利用率差异不显著;处理N3的氮素生理利用率比CK高

6.69%,比N1高3.12%,N2与N1、N3间差异不显著;处理CK的氮素偏生产力显著低于其他处理,其中N3最高,显著高于其他处理,N1与N2间氮素偏生产力差异不显著。2021年,处理N1的氮素表观利用率和氮素农学利用率显著高于N2;处理N2的氮素农学利用率显著高于N3,其他处理同2020年。

表4 不同施肥方式下水稻氮素利用率

Table 4 N use efficiency of rice under different fertilization methods

年份(Y) Year	处理(T) Treatment	氮素积累量/(kg/hm <sup>2</sup> ) Nitrogen accumulation	氮素表观 利用率/% ANUE	氮素农学 利用率/(kg/kg) AE	氮素生理 利用率/(kg/kg) PNUE	氮素偏生 产力/(kg/kg) PPFN
2020	N0	76.17±1.86d	/	/	/	/
	N1	148.87±5.01a	37.28±2.38a	16.27±1.41a	46.74±1.72b	48.22±0.73b
	N2	132.61±3.76b	32.25±2.33ab	14.56±1.35ab	45.16±0.83ab	50.15±1.32b
	N3	119.00±4.15c	27.46±3.41bc	12.82±1.37bc	46.74±0.87a	52.74±1.15a
	CK	128.37±6.42b	26.77±2.38c	10.73±1.14c	40.05±1.60c	42.67±0.82c
2021	N0	79.73±3.05d	/	/	/	/
	N1	167.61±2.37a	45.07±1.96a	18.07±0.73a	40.15±2.45ab	56.40±1.07b
	N2	144.16±3.18b	36.72±0.12b	15.30±0.44b	41.67±1.30a	57.89±0.86b
	N3	128.28±10.02c	31.12±5.24bc	13.28±2.08c	42.72±0.50a	61.19±2.55a
	CK	139.69±6.65b	30.75±3.83c	11.17±1.84d	36.29±3.27b	49.50±2.23c
Y		**	**	ns	**	**
T		**	**	**	**	**
Y×T		ns	ns	ns	ns	ns

### 3 讨论

水稻产量主要由单位面积有效穗数、平均穗粒数和千粒重决定。通常单位面积有效穗数和平均穗粒数的增加有利于形成高产群体<sup>[18]</sup>。相同施氮量下,侧深施肥可通过提高穗粒数,保证水稻的有效分蘖数达到增产、减氮作用<sup>[19]</sup>。在减氮量上,不同学者的研究存在差异,怀燕等<sup>[20]</sup>研究认为控释肥减氮20%一次性侧深基施可减少水稻的无效分蘖,提高水稻的有效穗数从而实现增产;但魏海燕等<sup>[21]</sup>研究认为施缓控释肥难以满足多穗型品种的中后期需求,对比常规施肥处理不能增产;周亮等<sup>[22]</sup>进行双季稻施氮研究发现,控释肥减氮一次性基施的处理与施普通尿素相比会降低有效穗和穗粒数,在减氮30%时减产18.2%。不同学者得到的结论不同可能与水稻品种、肥料类型和处理方式等因素互作有关。本研究中,控释肥一次性侧深施在保证了麦茬稻结实率和千粒重的基础上,提高了单位面积有效穗和成穗率,相同施氮量下可以增产,在减氮18.72%的范围内可以稳产。

叶面积指数和干物质积累量能较好地反映作物群体大小<sup>[23]</sup>,特别是抽穗后光合作用对水稻产量影响显著<sup>[24]</sup>。控释肥通过影响水稻生长发育和生理变化来延缓叶片的衰老,增加光合作用,进而合成更多的干物质<sup>[25]</sup>,一般齐穗期后的干物质积累量与产量呈现正相关<sup>[26]</sup>;控释肥结合侧深施处理的干物质积累量在穗分化和齐穗期均显著增加<sup>[27]</sup>。本研究中,控释肥一次性侧深施在前期的分蘖速度相对较慢,但中后期速度较快,从而减少了无效分蘖的形成,增加了有效穗数,保证了群体质量的高效形成,同时显著提高了水稻中后期叶面积指数和干物质的积累量,进而获得了较大的作物群体,为水稻的高产打下了基础。

施肥方式可影响根系周围的养分分布,进而对根部产生刺激作用<sup>[28]</sup>。Shen等<sup>[29]</sup>研究发现,局部施肥有利于刺激根系偏向性生长。相较常规施肥处理,缓控释肥通过缓慢释放的养分增加水稻深层土壤中的根系数量,扩大根系养分摄取范围<sup>[30]</sup>,促进合理群体结构的形成。本研究中,控释肥侧深施具有施肥的不对称性,深施特征和肥效缓慢释放特性使

水稻的根系在生长过程中表现出偏向性,侧深施肥处理的施肥区的平均根长、平均根表面积和平均根体积等均显著高于传统撒施处理和侧深施肥处理的未施肥区,且一次性侧深施处理的总根数也显著高于传统施肥方式。控释肥一次性侧深施可促进水稻群体的地下部旺盛生长,总体上促进了根系的发育,进而可以为地上部供给充足养分,保证群体质量。

传统撒施方式下,施肥形成的土壤养分中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 多留于表层,不能被植株充分吸收利用,在生育期内容易因为径流、淋溶和挥发等途径流失<sup>[31]</sup>。而控释肥一次性侧深施,减少了肥料与田面水的直接接触,增加了水稻根际无机氮含量<sup>[32]</sup>,减少了氮损失的风险<sup>[33]</sup>。且控释肥本身的养分释放速率慢,肥效持续时间较长,深施可以显著提高水稻植株对氮素的吸收量<sup>[34]</sup>。本研究中,控释肥侧深施处理N1和N2在氮素积累量、氮素表观利用率、氮素农学利用率和氮素偏生产力上显著高于撒施处理(CK),处理N3在氮素积累量、氮素生理利用率和氮素偏生产力上显著高于撒施处理(CK),表明控释肥一次性侧深施能显著提高水稻氮素积累量并增加氮素利用率。

本研究结果表明,控释肥一次性侧深施代替传统撒施能够促进根系生长,增加植株根量,增加水稻单位面积有效穗数,提高成穗率,同时提高生育中后期的叶面积指数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。在减氮10%以下,可显著增加机插水稻产量;在减氮18.72%时,可以稳产增效。

## 参考文献 References

- [1] 李红莉,张卫峰,张福锁,等.中国主要粮食作物化肥施用量与效率变化分析[J].植物营养与肥料学报,2010,16(5):1136-1143.LI H L,ZHANG W F,ZHANG F S,et al.Chemical fertilizer use and efficiency change of main grain crops in China[J].Plant nutrition and fertilizer science,2010,16(5):1136-1143 (in Chinese with English abstract).
- [2] 钟雪梅,吴远帆,彭建伟,等.机插同步一次性精量施肥对双季稻产量及经济效益的影响[J].核农学报,2020,34(5):1079-1087.ZHONG X M,WU Y F,PENG J W,et al.Effects of machine-transplanting technique with synchronized one-time precision fertilization on grain yield and economic benefit of double-cropping rice[J].Journal of nuclear agricultural sciences,2020,34(5):1079-1087 (in Chinese with English abstract).
- [3] CONLEY D J,PAERL H W,HOWARTH R W,et al.Ecology-controlling eutrophication:nitrogen and phosphorus[J].Science,2009,323(5917):1014-1015.
- [4] 易琼,逢玉万,杨少海,等.施肥对稻田甲烷与氧化亚氮排放的影响[J].生态环境学报,2013,22(8):1432-1437.YI Q,PANG Y W,YANG S H,et al.Methane and nitrous oxide emissions in paddy field as influenced by fertilization[J].Ecology and environmental sciences,2013,22(8):1432-1437 (in Chinese with English abstract).
- [5] 莫钊文,潘圣刚,王在满,等.机械同步深施肥对水稻品质和养分吸收利用的影响[J].华中农业大学学报,2013,32(5):34-39.MO Z W,PAN S G,WANG Z M,et al.Effects of deeply mechanized fertilizer application on rice quality and nutrient absorption and utilization of direct seeding rice[J].Journal of Huazhong Agricultural University,2013,32(5):34-39 (in Chinese with English abstract).
- [6] 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[J].中国农业科学,2019,52(23):4228-4239.ZHU C H,ZHANG Y P,XIANG J,et al.Effects of side deep fertilization on yield formation and nitrogen utilization of mechanized transplanting rice[J].Scientia agricultura sinica,2019,52(23):4228-4239 (in Chinese with English abstract).
- [7] 沈欣,辛景树,殷广德,等.机插侧深施肥条件下不同减氮梯度对水稻产量及种植收益的影响[J].中国稻米,2020,26(5):62-65.SHEN X,XIN J S,YIN G D,et al.Effects of gradients of nitrogen reduction on yield components of rice and cost-benefit with applying side deep fertilization technology[J].China rice,2020,26(5):62-65 (in Chinese with English abstract).
- [8] 鲁立明,陈少杰,蒋琪.侧深施肥技术在单季晚稻上的应用效果[J].中国稻米,2019,25(4):109-110.LU L M,CHEN S J,JIANG Q.Effects of side-deep fertilization technique on single cropping late rice[J].China rice,2019,25(4):109-110 (in Chinese with English abstract).
- [9] 刘兆辉,吴小宾,谭德水,等.一次性施肥在我国主要粮食作物中的应用与环境效应[J].中国农业科学,2018,51(20):3827-3839.LIU Z H,WU X B,TAN D S,et al.Application and environmental effects of one-off fertilization technique in major cereal crops in China[J].Scientia agricultura sinica,2018,51(20):3827-3839 (in Chinese with English abstract).
- [10] 王素萍,李小坤,鲁剑巍,等.控释尿素在水及不同类型土壤中的养分释放特征[J].植物营养与肥料学报,2014,20(3):636-641.WANG S P,LI X K,LU J W,et al.Nutrient release characteristics of controlled-release urea in water and different soils[J].Journal of plant nutrition and fertilizer,2014,20(3):636-641 (in Chinese with English abstract).
- [11] 唐拴虎,徐培智,张发宝,等.一次性全层施用控释肥对水稻根系形态发育及抗倒伏能力的影响[J].植物营养与肥料学报,2006,12(1):63-69.TANG S H,XU P Z,ZHANG F B,et al.Influence of single basal application controlled-release fertilizer on morphologic development of root system and lodging resistance of rice[J].Plant nutrition and fertilizer science,2006,12(1):63-69 (in Chinese with English abstract).
- [12] 谢春生,唐拴虎,徐培智,等.一次性施用控释肥对水稻植株生长及产量的影响[J].植物营养与肥料学报,2006,12(2):2177-2182.XIE C S,TANG S H,XU P Z,et al.Effects of single basal

- application of controlled-release fertilizers on growth and yield of rice[J]. Plant nutrition and fertilizer science, 2006, 12(2): 2177-2182 (in Chinese with English abstract).
- [13] 张小翠,戴其根,胡星星,等.不同质地土壤下缓释尿素与常规尿素配施对水稻产量及其生长发育的影响[J].作物学报, 2012, 38(8): 1494-1503. ZHANG X C, DAI Q G, HU X X, et al. Effects of slow-release urea combined with conventional urea on rice output and growth in soils of different textures[J]. Acta agronomica sinica, 2012, 38(8): 1494-1503 (in Chinese with English abstract).
- [14] 李世发,刘元英,范立春,等.缓释肥对水稻生长发育及产量的影响[J].东北农业大学学报, 2008, 39(7): 38-43. LI S F, LIU Y Y, FAN L C, et al. Effects of slow-release fertilizer on growth and yield of rice[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2008, 39(7): 38-43 (in Chinese with English abstract).
- [15] GRANT C A, WU R, SELLES F, et al. Crop yield and nitrogen concentration with controlled release urea and split applications of nitrogen as compared to non-coated urea applied at seeding[J]. Field crops research, 2012, 127: 170-180.
- [16] 季雅岚,吴文革,孙雪原,等.机插秧同步侧深施肥技术对水稻产量及肥料利用率的影响[J].中国稻米, 2019, 25(3): 101-104. JI Y L, WU W G, SUN X Y, et al. Effects of fertilizer application rate of synchronized side-deep fertilization technology on yield and fertilizer use efficiency of machine-transplanted rice[J]. China rice, 2019, 25(3): 101-104 (in Chinese with English abstract).
- [17] TANG J, ZHANG R, LI H, et al. The combination of different nitrogen fertilizer types could promote rice growth by alleviating the inhibition of straw decomposition[J/OL]. Food and energy security, 2021, 10(3): 298 [2022-07-13]. <https://doi.org/10.1002/fes3.298>.
- [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[J].杂交水稻, 2010, 25(S1): 346-353. ZHANG H C, WU G C, DAI Q G, et al. Formulation of and cultural approach to super-high yielding in japonica hybrid rice[J]. Hybrid rice, 2010, 25(S1): 346-353 (in Chinese with English abstract).
- [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[J].浙江农业学报, 2017, 29(11): 1875-1881. WANG Q, JIANG L N, PAN J Q, et al. Yield effect and influence factors of one-time fertilization on single-cropping rice in the lower reaches of Yangtze River[J]. Acta agriculturae Zhejiangensis, 2017, 29(11): 1875-1881 (in Chinese with English abstract).
- [20] 怀燕,陈照明,张耿苗,等.水稻侧深施肥技术的氮肥减施效应[J].浙江大学学报(农业与生命科学版), 2020, 46(2): 217-224. HUAI Y, CHEN Z M, ZHANG G M, et al. Nitrogen reduction effect of side-deep placement of fertilizer on the rice production[J]. Journal of Zhejiang University (agriculture and life sciences), 2020, 46(2): 217-224 (in Chinese with English abstract).
- [21] 魏海燕,李宏亮,程金秋,等.缓释肥类型与运筹对不同穗型水稻产量的影响[J].作物学报, 2017, 43(5): 730-740. WEI H Y, LI H L, CHENG J Q, et al. Effects of slow/controlled release fertilizer types and their application regime on yield in rice with different types of panicle[J]. Acta agronomica sinica, 2017, 43(5): 730-740 (in Chinese with English abstract).
- [22] 周亮,荣湘民,谢桂先,等.不同氮肥施用对双季稻产量及氮肥利用率的影响[J].土壤, 2014, 46(6): 971-975. ZHOU L, RONG X M, XIE G X, et al. Effects of different nitrogen fertilizers on rice yield and nitrogen use efficiency[J]. Soils, 2014, 46(6): 971-975 (in Chinese with English abstract).
- [23] 黄峰伟.高产水稻群体发展规律及其调控途径[J].中国稻米, 2005, 11(5): 30-32. HUANG F W. Development law of high-yield rice population and its regulation approach[J]. China rice, 2005, 11(5): 30-32 (in Chinese with English abstract).
- [24] 徐英,周明耀,薛亚锋.水稻叶面积指数和产量的空间变异性及关系研究[J].农业工程学报, 2006, 22(5): 10-14. XU Y, ZHOU M Y, XUE Y F. Spatial variability and relationships of rice leaf area index and yield[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2006, 22(5): 10-14 (in Chinese with English abstract).
- [25] 周亮.控释氮肥减量施用对双季稻生长、氮素养分吸收利用及稻田氨挥发影响[D].长沙:湖南农业大学, 2014. ZHOU L. Effects of reduction application of controlled-release nitrogen fertilizer on growth, nitrogen uptake-utilization of rice and ammonia volatilization in paddy soil[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2014 (in Chinese with English abstract).
- [26] 程建平,赵锋,曾山,等.机械旱直播播种密度对水稻群体光合和产量形成的影响[J].湖北农业科学, 2012, 51(23): 5275-5278. CHENG J P, ZHAO F, ZENG S, et al. Effect of mechanical dry direct sowing seeding density on photosynthesis and yield formation of rice population[J]. Hubei agricultural sciences, 2012, 51(23): 5275-5278 (in Chinese with English abstract).
- [27] 王晓丹,向镜,张玉屏,等.水稻机插同步侧深施肥技术进展及应用[J].中国稻米, 2020, 26(5): 53-57. WANG X D, XIANG J, ZHANG Y P, et al. Research advances and application of rice mechanized transplanting with side deep fertilization technology[J]. China rice, 2020, 26(5): 53-57 (in Chinese with English abstract).
- [28] SU W, LIU B, LIU X, et al. Effect of depth of fertilizer banded-placement on growth, nutrient uptake and yield of oilseed rape (*Brassica napus* L.)[J]. European journal of agronomy, 2015, 62: 38-45.
- [29] SHEN J B, LI C J, MI G H, et al. Maximizing root/rhizosphere efficiency to improve crop productivity and nutrient use efficiency in intensive agriculture of China[J]. Journal of experimental botany, 2013, 64(5): 1181-1192.
- [30] 彭玉,马均,蒋明金,等.缓/控释肥对杂交水稻根系形态、生理特性和产量的影响[J].植物营养与肥料学报, 2013, 19(5): 1048-1057. PENG Y, MA J, JIANG M J, et al. Effects of slow/controlled release fertilizers on root morphological and physiological characteristics of rice[J]. Journal of plant nutrition and fertilizer, 2013, 19(5): 1048-1057 (in Chinese with English abstract).
- [31] NKEVIWE P M, WEINMANN M, BAR-TAL A, et al. Fertilizer placement to improve crop nutrient acquisition and yield: a re-



- view and meta-analysis [J]. *Field crops research*, 2016, 196: 389-401.
- [32] 侯朋福,薛利祥,俞映倞,等.缓控释肥侧深施对稻田氨挥发排放的控制效果[J].*环境科学*,2017,38(12):5326-5332.HOU P F,XUE L X,YU Y L, et al.Control effect of side deep fertilization with slow-release fertilizer on ammonia volatilization from paddy fields [J]. *Environmental science*, 2017, 38 (12) : 5326-5332 (in Chinese with English abstract).
- [33] 柯健.氮肥种类和施肥方式对水稻产量及氮素去向的影响[D].南京:南京农业大学,2017.KE J.Effects of different nitrogen fertilizer and placement on grain yield and the fate of nitrogen in paddy soil of machine-transplanted rice [D].Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2017 (in Chinese with English abstract).
- [34] 段然,汤月丰,王亚男,等.不同施肥方法对双季稻区水稻产量及氮素流失的影响[J].*中国生态农业学报*,2017,25(12):1815-1822.DUAN R,TANG Y F,WANG Y N, et al.Effects of different fertilization modes on rice yield and nitrogen loss in paddy soils under double cropping rice [J].*Chinese journal of eco-agriculture*,2017,25(12):1815-1822 (in Chinese with English abstract).

## Effects of one-time side deep application with controlled-release fertilizer on rice growth, nitrogen utilization and yield

SONG Wenjie, LUO Jiarun, LIU Wei, ZHANG Dahong, LI Yanli, LU Bilin

*College of Agronomy, Yangtze University, Jingzhou 434025, China*

**Abstract** Taking the rice variety “Quanliangyou Efeng Simiao” as the material, the treatments including no fertilization (N0), the one-time side deep basal application of controlled-release fertilizer (N1), the one-time side deep basal application of controlled-release fertilizer by 10% nitrogen reduction (N2), the one-time side deep basal application of controlled-release fertilizer by 20% nitrogen reduction (N3), and the traditional and fertilization (CK) were set up to develop the simple and efficient cultivation technology of machine-transplanted rice with one-time deep foundation application. The tillering dynamics, leaf area index and dry matter accumulation at stages of major growth, root index at stage of heading, various nitrogen use efficiencies and yield were measured to study effects of one-time side deep application with controlled-release fertilizer on the growth, nitrogen utilization and yield of rice. The results showed that the N1 and N2 treatment significantly increased the yield by 12.99%-14.85% and 5.47%-6.09% compared with the treatment of CK. The yield of N3 treatment was not significantly different from that of CK. After fitting analysis of fertilization amount and yield, the yield was the same as that of CK when the nitrogen was reduced by 18.72%. Compared with CK, the one-time side deep application of controlled-release fertilizer significantly increased the tiller percentage of ear bearing, the leaf area index and dry matter accumulation at stages of the middle and late growth of rice, promoted root growth and expanded the distribution range of roots. Compared with CK, N1, N2 and N3 treatment increased the apparent nitrogen use efficiency by 1.21%-46.57%, agronomic nitrogen use efficiency by 18.85%-61.73%, physiological nitrogen use efficiency by 8.90%-17.71% and partial factor productivity nitrogen by 12.99%-23.61%. It is indicated that the one-time side deep application of fertilizer release promotes root growth, increases panicle number, improves the efficiency of various nitrogen use, and greatly reduces the number of fertilizations. The high and stable yield of rice can be achieved within the scope of reducing nitrogen by 18.72%.

**Keywords** simple and efficient cultivation; controlled-release fertilizer; side deep application; nitrogen management; nitrogen reduction; rice growth; yield; nitrogen use efficiency

(责任编辑:张志钰)