

控释掺混肥机插侧深施实现双季稻增产与增效

钟雪梅¹, 吴远帆², 彭建伟¹, 王刚⁶, 卢文璐³,
宋思明⁴, 唐启源¹, 湛冬至³, 周旋⁵

(1.湖南农业大学资源环境学院,长沙 410128;2.湖南省农业农村厅,长沙 410005;
3.汨罗市农业农村局,湖南 汨罗 414400;4.湖南龙舟农机股份有限公司,湖南 汨罗 414400;
5.湖南省土壤肥料研究所,长沙 410125;6.益阳市赫山区农业农村局,湖南 益阳 413000)

摘要:为揭示控释掺混肥机插侧深施在南方双季稻上的应用效果。采用田间小区试验,早、晚稻分别设置不施氮(N)肥、常规施肥、减N 30%机插侧深施肥和减N 30%机插侧深施控释掺混肥共4个处理,比较控释掺混肥机插侧深施与常规施肥对双季稻产量、经济效益及养分吸收、利用的差异,及其减施潜力。结果表明:与常规施肥处理相比,减N 30%机插侧深施肥处理早稻产量和经济效益分别提高20.2%~20.9%和31.8%~32.4%,有效穗数、总颖花数和总实粒数分别提高6.2%~7.5%,20.5%~25.3%和27.6%~28.2%;晚稻产量和经济效益分别提高3.9%~5.2%和12.6%~13.8%,有效穗数、总颖花数和总实粒数分别提高15.8%~17.8%,16.8%~18.6%和14.0%~16.8%。其中,以减量控释掺混肥机插侧深施处理效果较好。在减N 30%机插侧深施条件下,控释掺混肥处理较常规减N处理早稻成熟期N、P、K养分累积量分别提高1.6%,2.5%,7.9%,晚稻分别提高4.0%,1.1%,0.9%;早、晚稻N肥吸收利用率分别增加4.2%和10.2%,N肥农学利用率分别增加3.3%和1.2%,N肥偏生产力分别增加0.6%和1.2%。总体而言,在洞庭湖平原地区,控释掺混肥机插侧深施能有效减少稻田的N肥投入量,利于形成有效穗,并保证植株整个生育期对N素的需求,提高成熟期N、P、K累积量及N肥利用效率,减少N素损失,从而实现双季稻生产节肥、省工、增产和增效。

关键词:双季稻;机插侧深施;控释掺混肥;减氮;产量;氮素利用

中图分类号:S233.71;S511 文献标识码:A 文章编号:1009-2242(2020)04-0256-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.04.038

Machine-transplanting with Side-deep Fertilization of Controlled-release Blended Fertilizer Improved Yield and Nitrogen Use Efficiency of Double-cropping Rice

ZHONG Xuemei¹, WU Yuanfan², PENG Jianwei¹, WANG Gang⁶, LU Wenlu³,
SONG Siming⁴, TANG Qiyuan¹, ZHAN Dongzhi³, ZHOU Xuan⁵

(1.College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128;

2.Hunan Provincial Agriculture Committee, Changsha 410005; 3.Miluo Agricultural Bureau, Miluo,

Hunan 414400; 4.Hunan Dragon Boat Agricultural Machinery Co., Ltd., Miluo, Hunan 414400;

5.Hunan Soil and Fertilizer Institute, Changsha 410125;6. Heshan Agricultural Bureau, Yiyang, Hunan 413000)

Abstract: In order to reveal the application effect of machine-transplanting with side-deep fertilization of controlled-release blended fertilizer in the southern double cropping rice. Field experiment was conducted for early- and late-rice, and 4 treatments were set up: no nitrogen (N) fertilizer application, conventional fertilization, machine-transplanting with side-deep fertilization by reducing N of 30% and machine-transplanting with side-deep fertilization of controlled-release blended fertilizer by reducing N of 30%. The objective of this study was to compare the effect of machine-transplanting with side-deep fertilization of controlled-release blended fertilizer and conventional fertilization on yield, economic benefits and nutrient uptake and utilization

收稿日期:2020-01-10

资助项目:国家重点研发计划项目“聚醚类聚氨酯包膜缓控释肥料研制与应用”(2017YFD200703-3);国家水稻产业技术体系项目(CARS-01-26);湖南省农业科技创新基金项目(2019LS03-3)

第一作者:钟雪梅(1992—),女,湖南湘阴人,博士研究生,主要从事植物营养生理生态研究。E-mail: 742650555@qq.com

通信作者:彭建伟(1970—),男,湖南湘阴人,博士,教授,主要从事植物营养生理生态研究。E-mail: 314967900@qq.com

周旋(1986—),男,四川攀枝花人,博士,助理研究员,主要从事肥料与养分资源管理研究。E-mail: zhouxuan_123@126.com

of double-cropping rice, and its reducing potential. Results showed that the yield and economic benefit of machine-transplanting with side-deep fertilization reduced N by 30% of early-rice is higher than those of conventional fertilization by 20.2%~20.9% and 31.8%~32.4%, and its effective panicle, total spikelet and total grain increased by 6.2%~7.5%, 20.5%~25.3%, and 27.6%~28.2%, respectively. The yield and economic benefit of machine-transplanting with side-deep fertilization reduced N by 30% of late rice increased by 3.9%~5.2% and 12.6%~13.8%, and its effective panicle, total spikelet, and total grain increased by 15.8%~17.8%, 16.8%~18.6% and 14.0%~16.8%, respectively. Hence, the effect of the reduction of side-deep application of controlled-release blended fertilizer is better. Under the condition of machine-transplanting with side-deep fertilization with a N reduction of 30%, the N, P and K uptakes of early-rice with controlled-release blended fertilizer compare with conventional fertilization reduction at harvest time increased by 1.6%, 2.5% and 7.9%, respectively, and those of late rice increased by 4.0%, 1.1% and 0.9%, and those of early- and late-rice were increased in N recovery efficiency by 4.2% and 10.2%, in N agronomic efficiency by 3.3% and 1.2%, in N partial factor productivity by 0.6% and 1.2%. In conclusion, in the Dongting Lake area, machine-transplanting with side-deep fertilization of controlled-release blended fertilizer can effectively reduce N fertilizer application in the rice field, facilitate the formation of effective panicle, improve N, P, K accumulation and N fertilizer use efficiency, reduce N loss, and thus realize the production of double-cropping rice in terms of saving fertilizer, saving labor, increasing efficiency and increasing yield.

Keywords: double-cropping rice; machine-transplanting with side-deep fertilization; controlled-release blended fertilizer; reduction of nitrogen rate; yield; nitrogen utilization

氮(N)肥施入稻田后短时间内迅速水解,一次性基施通常使水稻前期 N 素养分供应过多,会加剧病虫害及倒伏的风险,同时中后期 N 素养分供应不足,将导致结实率、养分利用率的降低且 N 素损失量增加^[1-2]。一般来说,N 肥经分次施用后能切实满足水稻全生育期的养分需求,但这种施肥方式已不适应目前农村劳动力日益紧缺的严峻现状^[3]。为了实现移栽前排水 N 肥不随水损失,后期不追肥且减少氨挥发损失,并节省劳动力,稻田侧深施肥技术研究一直备受关注。

当前,我国南方水稻栽培模式已由传统的人工移栽向直播、抛栽和机插等轻简化模式转变,但仍以传统的水稻基、追肥施用为主^[4]。现今几种移栽模式均需移栽前排水,控制田面水量才能操作,易造成基肥随移栽前排水大量流失;传统追肥后中耕除草,让肥料入泥后不易损失,而当前模式大多使用除草剂不实行中耕,易造成 N 肥挥发损失。侧深施肥技术是在水稻插秧机上配置侧深施肥器,在进行水稻移栽的同时将肥料定点、定量地施于秧苗侧位的土壤中并覆盖^[5-7]。水稻插秧施肥一体机不仅能一次性完成插秧、施肥 2 个作业环节,且肥料集中深施于根系侧位,定位隔离秧苗和肥料,避免烧根烧苗,显著提高肥料利用率,有效减少肥料损失,增产增效节本^[8-10]。此外,适度 N 肥减量施用水稻产量不减产,甚至增产,明显节本增效^[11]。

控释肥料能缓慢释放养分,释放周期长,为作物整个生育期提供所需营养^[12],且实现作物养分需求与肥料养分的释放相一致^[13]。一次性全量施用控释肥

作基肥,由于控释肥会减缓水稻生长初期养分的释放,因此不利于水稻分蘖,而控释肥的全量施用成本高,不利于大规模的推广与普及^[14]。少量速效 N 肥与缓释控释肥混合后一次性基施,可满足作物早期对 N 元素的营养需求,保证充足的分蘖数与有效穗,并实现高产^[15]。有研究^[16-18]发现,相比仅施用尿素处理,缓释 N 肥与尿素混合处理施用能有效提高水稻产量与氮肥利用,且经济效益最佳^[19]。因此,采用控释掺混肥(控释肥+尿素)施用能进一步改进一次性施肥的技术,既充分满足作物生长的养分需求,又降低施入成本及劳动力投入,且获得高产^[20]。

目前,关于控释掺混肥机插侧深施在南方双季稻中的应用鲜有报道^[3]。因此,本研究以湖南洞庭湖典型双季稻区为研究对象,研究机插控释掺混肥减量侧深施对水稻产量、经济效益、养分积累分配及 N 素利用的影响,探明机插侧深施的应用效果,可为南方双季稻区农业部推广机插秧配套一次性施肥技术肥料的研究应用提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

试验于 2017 年 3 月至 10 月在湖南省汨罗市古培镇三岗村稻田(28°77'09"N,113°06'10"E)进行。该地区属典型的亚热带湿润气候,以丘陵山地为主,气温和降雨量适宜,四季分明。年均降水量 1 537.8 mm,年日照时间为 1 271.0 h,海拔 39.6 m。早稻生长季为 4—7 月,平均气温 28.9 °C,晚稻生长季为 7—10

月,平均气温 18.1 ℃。土壤类型为发育于粉砂质页岩的白蟾泥,中等地力,前茬为水稻。耕层土壤的理化性状为:pH(H₂O) 6.1(土:水为 1:2.5),有机质含量 31.62 g/kg,全氮(N)、全磷(P)、全钾(K)含量分别为 1.79,0.47,16.08 g/kg,碱解 N、有效 P、速效 K 含量分别为 133.0,9.5,103.0 mg/kg。

1.2 供试材料

供试早稻品种为“杂交籼稻—两优 25”,生育期 137 天;晚稻品种为“杂交籼稻—H 优 518”,生育期 130 天,由汨罗市农业局提供。供试 N 肥为尿素(含 N 46%),P 肥为过磷酸钙(含 P₂O₅ 12%),K 肥为氯化钾(含 K₂O 60%),由汨罗市农业局提供普通复合肥。水稻侧深施专用肥与控释掺混肥由湖南金叶众望公司生产提供。供试机械为湖南龙舟农机有限公司研制生产 2FH-8 插秧同步精量施肥机。

1.3 试验设计

早稻小区设置 4 个处理:T1,农民常规施肥(N 150 kg/hm²);T2,机插侧深施专用肥减 N 30%施肥处理(N 105 kg/hm²);T3,控释掺混肥机插侧深施处理(N 105 kg/hm²);CK,对照处理(N 0 kg/hm²)。各施肥处理分别施用 P₂O₅ 45 kg/hm²,K₂O 90 kg/hm²。

晚稻小区设置 4 个处理:T1,农民常规施肥(N 165 kg/hm²);T2,机插侧深施减 N 30%施肥处理(N 115.5 kg/hm²);T3,控释掺混肥机插侧深施处理(N 115.5 kg/hm²);CK,对照处理(N 0 kg/hm²)。各施肥处理分别施用 P₂O₅ 36 kg/hm²,K₂O 90 kg/hm²。具体施肥方式及用量见表 1。

表 1 施肥方式及施肥用量

稻季	施肥处理	基肥/(kg·hm ⁻²)			分蘖肥/(kg·hm ⁻²)		
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
早稻	T1	90	45	45	60	—	45
	T2	105	45	90	—	—	—
	T3	105	45	90	—	—	—
	CK	0	45	90	—	—	45
晚稻	T1	90	36	45	75	—	45
	T2	115.5	36	90	—	—	—
	T3	115.5	36	90	—	—	—
	CK	0	36	45	—	—	45

各小区随机区组排列,各处理设置 3 次重复。小区面积 48 m²(12 m×4 m),栽插密度 12 cm×25 cm(早稻)和 16 cm×25 cm(晚稻),每穴插 3~4 苗。小区四周用 PVC 板隔离,区组间设置 4~6 m 宽的保护区,便于插秧机回转操作,区组间设排灌沟,单灌单排。早稻试验于 3 月 15 日进行播种,4 月 20 日移栽,7 月 17 日收获;晚稻试验于 6 月 16 日进行播种,7 月 19 日移栽,10 月 24 日收获。田间其他管理按常规进行。

1.4 测定项目与方法

分别于分蘖期、抽穗期、灌浆期(抽穗后 15 天左右)及成熟期进行水稻植株取样,成熟后各小区单独进行收割并测定籽粒产量和秸秆生物量。采集代表性植株 5 兜进行考种,考种后将秸秆与籽粒分离,并分别称量籽粒和秸秆重,生育期测定各器官中养分含量,采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮,分别采用凯氏定 N 法(KDN-102C 定氮仪)、钒钼黄比色法(UV-5100 分光光度计)、火焰光度计法(FP 640 火焰光度计)测定 N、P、K 含量。

养分吸收积累及利用效率计算公式为:

$$N \text{ 收获指数}(\%) = \text{稻谷 } N \text{ 吸收量} / \text{地上部 } N \text{ 总吸收量} \times 100\%$$

$$N \text{ 肥利用率}(\%) = (\text{施 } N \text{ 区作物吸 } N \text{ 量} - \text{不施 } N \text{ 区作物吸 } N \text{ 量}) / \text{施肥量} \times 100\%$$

$$N \text{ 肥农学利用率}(\text{kg}/\text{kg}) = (\text{施 } N \text{ 区稻谷产量} - \text{不施 } N \text{ 区稻谷产量}) / \text{施 } N \text{ 肥量}$$

$$N \text{ 肥生理利用率}(\text{kg}/\text{kg}) = (\text{施 } N \text{ 区稻谷产量} - \text{不施 } N \text{ 区稻谷产量}) / (\text{施 } N \text{ 区地上部 } N \text{ 积累量} - \text{不施 } N \text{ 区地上部 } N \text{ 积累量})$$

$$N \text{ 肥偏生产力}(\text{kg}/\text{kg}) = \text{稻谷产量} / \text{施 } N \text{ 量}$$

$$N \text{ 素干物质生产效率}(\text{kg}/\text{kg}) = \text{干物质积累量} / N \text{ 总吸收量}$$

$$N \text{ 素稻谷生产效率}(\text{kg}/\text{kg}) = \text{稻谷产量} / N \text{ 总吸收量}$$

1.5 数据处理

试验数据应用 Microsoft Excel 2003 和 SPSS 17.0 统计分析软件进行处理与分析,处理间差异显著性分析采用最小显著法(LSD)检验法。

2 结果与分析

2.1 机插双季稻 N 素吸收与利用率

2.1.1 机插双季稻 N 素吸收 由表 2 可知,早、晚稻 N 素积累量变化趋势大体相似。早、晚稻各处理 N 素积累量从分蘖期至成熟期呈上升趋势,且显著高于 CK 处理($P < 0.05$),表明施用 N 肥能提供水稻生育期的 N 素营养。机插侧深施处理 N 累积在水稻整个生育期总体高于 T1 处理,T2 处理分别在分蘖期与抽穗期 N 素积累量高出 T3 处理 1.8% 和 10.0%,可能是由于前期尿素水解速度快,养分供应多,控释掺混肥前期控释 N 养分还未及时释放。而到水稻生育中后期控释 N 养分释放,促进抽穗后 N 的吸收与干物质的积累,灌浆期与成熟期 N 素积累量 T3 处理高出 T2 处理 2.6% 和 14.2%,抽穗后 N 素积累 T3 处理高出 T2 处理 12.8%。表明在同等减 N 水平下,机插侧深施常规减 N 与控释掺混肥均能满足水稻生育期的 N 素需求,早、晚稻均以减 N 条件下控释掺混肥

更利于水稻 N 素积累量的增加,与水稻养分需求规律较同步适应。

表 2 不同施肥处理下机插双季稻各生育期 N 素吸收和 N 收获指数

稻季	处理	各生育时期 N 素积累量/(kg·hm ⁻²)				N 收获 指数/%	抽穗后 N 素积累/ (kg·kg ⁻¹)	抽穗后 N 素 积累比例/%
		分蘖期	抽穗期	灌浆期	成熟期			
早稻	T1	23.3a	78.4a	77.8b	140.5a	61.4a	62.1a	43.5b
	T2	23.5a	87.8a	109.4a	156.2a	64.0a	68.4a	43.9b
	T3	23.1a	79.0a	112.2a	158.8a	63.2a	79.8a	50.4b
	CK	15.9b	25.6b	33.9c	95.4b	63.6a	69.8a	73.2a
	均值	21.4	67.7	83.3	137.7	63.0	70.0	52.9
晚稻	T1	32.3a	99.2a	119.6a	165.0a	53.0a	65.8a	35.0b
	T2	37.7a	101.7a	129.6a	163.9a	55.8a	62.2a	37.8b
	T3	36.1a	94.6a	134.3a	170.4a	56.8a	75.9a	44.4b
	CK	9.6b	30.1b	49.1b	100.0b	52.8a	69.9a	69.5a
	均值	28.9	81.4	108.1	149.8	54.6	68.4	46.7

注:同列数据后不同字母表示差异达显著水平($P<0.05$)。下同。

2.1.2 机插双季稻 N 肥利用效率 由表 3 可知,早、晚稻在减 N 水平下 NRE、NAE 和 NFPF 均较常规施肥有不同程度的增加,早稻增幅分别为 92.7%~100.8%,103.6%~106.0%和 71.7%~72.8%;晚稻增幅分别为 40.5%~54.8%,58.7%~63.9%和 48.5%~61.1%。早、晚稻 NRE、NAE 和 NFPF 控释掺混肥处理(T3)均显著高于常规减 N 处理(T2)($P<0.05$),与 N 素积累量、产量的高低有关。相较于农民习惯施肥,机插侧深施减 N 施肥不仅能提高水稻 NRE、

NAE,且同等量减 N 水平下,控释掺混肥处理提高 NRE、NAE 优于常规减 N 处理。NPE 在早、晚稻试验中,各施肥处理保持平稳状态,早、晚稻变化幅度为 78.5~80.9,31.9~39.3 kg/kg,各施肥处理间差异不显著($P>0.05$),说明 NPE 受 N 素积累量、产量影响效果不明显。早、晚稻各处理间 NBPE、NGPE 无显著差异($P>0.05$)。早、晚稻 NBPE 变化幅度分别为 85.6~89.2,78.0~81.3 kg/kg,NGPE 变化幅度分别为 51.8~55.7,33.9~35.2 kg/kg。

表 3 不同施肥处理下机插双季稻 N 肥利用效率

稻季	处理	N 肥	N 肥农学利用率/	N 肥生理利用率/	N 肥偏生产力/	N 素干物质生产效率/	N 素稻谷生产效率/
		利用率/%	(kg·kg ⁻¹)	(kg·kg ⁻¹)	(kg·kg ⁻¹)	(kg·kg ⁻¹)	(kg·kg ⁻¹)
早稻	T1	30.1b	22.8b	80.9a	48.1b	89.2ab	51.8a
	T2	57.9a	46.4a	83.3a	82.6a	88.0b	55.7a
	T3	60.4a	47.0a	78.5a	83.1a	85.6b	55.0a
	CK	—	—	—	—	98.8a	39.9b
	均值	49.4	38.7	80.9	71.3	90.4	50.6
晚稻	T1	39.4a	11.8b	39.3a	33.3b	81.3b	35.2a
	T2	55.3a	18.7a	39.0a	49.4a	80.0b	35.3a
	T3	60.9a	19.3a	31.9a	50.0a	78.0b	33.9a
	CK	—	—	—	—	103.7a	35.6a
	均值	51.9	16.6	36.7	44.2	85.8	35.0

2.2 机插双季稻不同部位 N、P、K 积累量

由图 1 可知,成熟期施 N 处理间 TNA 差异不大,均显著高于 CK 处理($P<0.05$)。早、晚稻施 N 处理成熟期 TNA、TPA、TKA 较 CK 处理增幅分别为 47.3%~66.4%和 63.9%~70.4%,46.8%~89.5%和 21.6%~35.4%,56.6%~79.0%和 28.7%~34.6%;与常规施肥(T1)处理相比,T2 和 T3 处理早稻成熟期 TNA、TPA、TKA 分别提高 11.2%,13.0%,25.9%和 29.1%,6.0%,14.3%,晚稻分别提高 0.6%,3.3%,10.2%和 11.4%,3.7%,4.6%。与 T2 处理相比,T3 处理早稻 TNA、TPA、TKA 分别提高 1.6%,2.5%,7.9%,晚稻分别提高 4.0%,1.1%,0.9%。说明机插侧深施肥有利于满足水稻的养分需求,能有效提高双季稻 N、P、K 累积,为高产稳产奠定基础。

2.3 机插双季稻产量及其构成因素

由表 4 可知,早、晚稻施 N 处理籽粒产量较 CK 处理均显著增加 45.8%~97.1%和 54.9%~62.9%($P<0.05$)。与 T1 处理相比,机插减 N 施肥均有增产,T2 和 T3 处理早稻产量分别增加 34.2%,35.2%,晚稻分别增产 3.9%,5.2%。早、晚稻产量构成因素 T2 与 T3 处理间差异不显著($P>0.05$)。说明机插侧深施肥定位、定量、均匀,能有效提高双季稻产量,实现高产稳产。

早、晚稻施 N 处理的有效穗数较 CK 分别增加 29.1%~38.8%和 56.6%~84.5%,总实粒数分别增加 66.0%~112.9%和 80.2%~110.4%。与 T1 处理相比,T2、T3 处理早、晚稻有效穗数分别提高 7.5%和 6.2%,15.8%和 17.8%,总实粒数分别提高 27.6%

和 28.2%, 14.0% 和 16.8%。说明机插侧深施肥定

位、定量、均匀,能有效提高双季稻有效穗数及总实

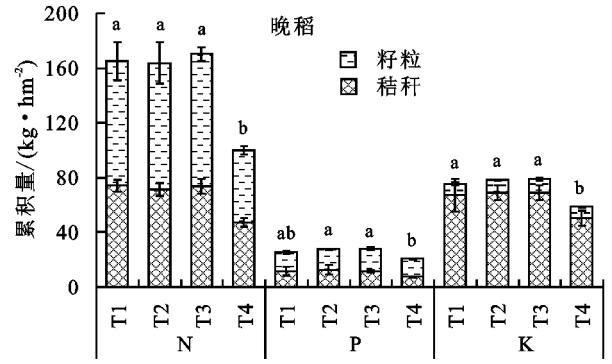
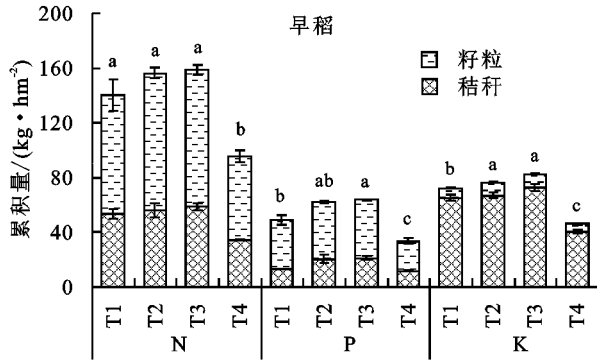


图 1 不同施肥处理双季稻不同部位 N、P、K 累积量

表 4 不同施肥处理下机插双季稻产量及其构成因素

稻季	处理	株高/ cm	穗长/ cm	有效穗数/ ($\times 10^4$ hm^{-2})	每穗 粒数	每穗 实粒数	结实率/ %	总颖花数/ ($\times 10^7$ hm^{-2})	总实粒数/ $\times 10^7$ hm^{-2})	千粒重/ g	谷草比	实际产量/ ($t \cdot hm^{-2}$)
早稻	T1	89.9ab	19.7ab	281.1a	149.6a	109.4a	73.0a	41.8b	30.5b	21.3c	1.5a	7217.7b
	T2	94.4a	19.6ab	302.2a	173.3a	129.1a	74.5a	52.4a	39.0a	22.3b	1.6a	8673a
	T3	96.2a	20.2a	298.7a	168.7a	131.0a	77.7a	50.4a	39.2a	22.4b	1.6a	8729.7a
	CK	80.0b	18.6b	217.8b	111.3b	85.9b	77.2a	23.8c	18.4c	24.2a	1.6a	4002.2c
	平均值	90.1	19.5	274.9	150.7	113.9	75.6	42.1	31.8	22.5	1.6	7119.7
晚稻	T1	105.8a	23.9a	295.0b	116.0a	78.9a	68.0a	34.2b	23.2a	24.3a	1.0b	6862.0a
	T2	101.8a	23.7a	341.7a	117.1a	77.8a	66.5a	39.9a	26.5a	24.4a	1.1ab	7131.8a
	T3	102.4a	23.4a	347.5a	116.8a	77.9a	67.1a	40.5a	27.1a	24.5a	1.0b	7220.1a
	CK	77.3b	19.0b	188.3c	106.3a	68.5a	64.5a	20.0c	12.9b	24.5a	1.3a	4430.9b
	平均值	96.8	22.5	293.1	114.1	75.8	66.5	33.6	22.4	24.4	1.1	6411.2

注:各稻季同列不同字母表示差异显著($P < 0.05$);谷草比=籽粒产量/秸秆产量。下同。

2.4 机插双季稻经济效益

由表 5 可知,早、晚稻不同施 N 处理经济效益较 CK 处理分别显著提高 107.3%~174.4%和 57.8%~79.7%($P < 0.05$)。

与 T1 处理相比,机插侧深施减 N 量 30%(T2 和 T3)处理早稻经济效益分别显著提高 31.8%和 32.4%,

12.6%和 13.8%($P < 0.05$)。早、晚稻中不同施肥处理产投比为 $T2 > T3 > T1 > CK$ 。而同等减 N 水平下,施用控释掺混肥与专用肥间经济效益、产投比差异不显著($P > 0.05$)。说明机插侧深施肥定位、定量、均匀,且节本、省力、增效,能有效提高双季稻经济效益,为农户增收奠定基础。

表 5 不同施肥处理下机插双季稻经济效益

稻季	处理	经济产值/ (元· hm^{-2})	肥料成本/ (元· hm^{-2})	人工费用/ (元· hm^{-2})	机械费用/ (元· hm^{-2})	经济效益/ (元· hm^{-2})	产投比
早稻	T1	18766.0b	1487.1	1920	0	15358.9b	4.5b
	T2	22549.8a	1113.8	0	1200	20236.0a	8.7a
	T3	22696.2a	1159.2	0	1200	20337.0a	8.6a
	CK	9870.5c	540.0	1920	0	7410.5c	3.0c
	均值	18470.6	1075.0	1920	1200	15835.6	6.2
晚稻	T1	17841.1a	1516.7	1920	0	14404.4b	4.2b
	T2	18542.7a	1130.1	0	1200	16212.6a	7.0a
	T3	18772.2a	1175.7	0	1200	16396.5a	6.9a
	CK	11520.4b	474.0	1920	0	9126.4c	3.8b
	均值	16870.9	1074.1	1920	1200	14236.7	5.5

注:肥料价格为普通尿素 2.20 元/kg,氯化钾为 2.80 元/kg,过磷酸钙为 0.72 元/kg;普通复合肥(20-10-10)为 2.20 元/kg,专用肥(23.1-9.9-19.8)为 2.45 元/kg,控释掺混肥(23.1-9.9-19.8,含 23.4%控释氮肥)为 2.55 元/kg;普通复混肥(20-8-12)为 2.20 元/kg,专用肥(25.4-7.9-19.8)为 2.48 元/kg,控释掺混肥(25.4-7.9-19.8,含 23.4%控释氮肥)为 2.58 元/kg;早、晚稻籽粒价格为 2.6 元/kg;插秧、施肥人工费为 1 920 元/ hm^2 ,机械一体化费用为 1 200 元/ hm^2 ;经济效益(元/ hm^2)=水稻产量 \times 单价-肥料成本-人工费用-机械费用^[26],各处理其他农作费用一致。

3 讨论

3.1 控释掺混肥机插侧深施对双季稻产量及经济效益的影响

减 N 30% 机插侧深施处理(T₂、T₃)较 T₁ 处理早、晚稻产量增加幅度分别为 20.2%~20.9% 和 1.2%~3.9%。其中,水稻有效穗数的增加以及籽粒库容的提高为最终高产奠定基础。白雪等^[21]研究与本试验研究结果相符,侧深施肥降低 25% 施 N 量的增产效果最佳,较常规施肥产量提高 20.2%,主要是由于单位面积穗数增加,但对穗粒数、结实率和千粒重的影响不显著。为确保水稻增产,许多农户过量施用 N 肥,易造成稻田 N 肥当季利用率偏低、损失率偏高、环境风险增加等问题^[22]。相较于传统人工撒施肥,机械定位深施减少 25% 施肥量仍获较高水稻产量,且利于节肥增效^[23],基肥侧深同施处理增产 6.3%,而肥料全量侧深施处理使水稻生育后期产生脱肥现象^[24]。由于全量单施普通 N 肥且无追肥不能提供水稻全生育期生长对养分的需求,导致产量有一定的下降,而控释 N 肥可增加水稻群体有效穗数,改善产量构成要素,有效提高 N 肥利用率,最终增产^[16]。刘汝亮等^[25]研究发现,相较于农民常规施肥,减 N 40% 侧条施缓释肥处理水稻增加穗粒数 8.4%。吴正贵等^[26]研究发现,侧深施硫包膜尿素能均衡提高各产量构成要素,从而显著增加水稻产量。本试验研究结果认为,机插侧深施减量 30% 条件下,控释掺混肥处理(T₃)较水稻专用肥处理(T₂)水稻利于增加实粒数,早晚稻分别增加 1.5% 和 2.3%。

田小海等^[27]研究表明,超级杂交水稻后期物质生产量大,养分需求增大,单靠缓释肥的控制性释放无法切实满足其营养需求。汤海涛等^[28]研究表明,使用机械深施缓释复混肥能满足精量穴直播水稻生育后期养分,较习惯施肥产量提高 630.0~924.8 kg/hm² (10.3%~16.5%)。本试验中,机插侧深施技术改变传统施肥模式,通过插秧与施肥一体化的机械操作,与人工表施相比,化肥 N 用量减少 30% 仍可提高水稻产量,增加纯收益。此外,谷学佳等^[29]研究结果与本研究相符,插秧施肥一体化技术减少 N 肥用量能有效提高水稻产量,施用缓释肥减量 15%, 30% 分别增产 6.3%, 4.0%, 且普通肥料基施一体化与追施模式在减量 15% 基础上增产 3.9%。杨艳明^[30]研究发现,与常规穗肥人工表施处理相比,控释掺混肥一次机施可大幅节约人工劳动成本,减少肥料浪费,提高产投比,增加农民收益 2 391 元/hm²。因此,控释掺混肥技术结合机插深施技术模式将进一步降低双季稻田的肥料用量,从而达到稳产甚至增产。

3.2 控释掺混肥机插侧深施对双季稻氮素累积及氮肥利用率的影响

本试验中机插侧深施控释掺混肥处理(T₃)与农民常规施肥处理(T₁)相比,早稻 NRE、NAE、NFPF 分别提高 100.8%, 106.0%, 72.8%, 而晚稻 NRE、NAE 和 NFPF 分别提高 54.8%, 63.9%, 33.5%。这主要是由于控释掺混肥机插侧深施能有效提高水稻中后期生育进程的 N 素营养供应,促进生育后期干物质积累和 N 素吸收,显著提高水稻 N 素利用效率并实现增产^[14]。钱银飞等^[31]也指出,施用包膜控释尿素替代部分普通尿素减 N 20% 均能提高早、晚稻 NRE、NAE、NPE 和 NFPF。

林玉萍等^[32]研究发现,基肥侧深同施处理 N、P、K 肥利用率分别提高 0.9, 5.2, 9.7 个百分点,且较常规施肥增产 6.3%;同时,马增奇等^[7]研究认为,侧深施肥技术可促进水稻前期养分吸收,提高肥料利用率,但免追肥试验处理水稻生育后期产生脱肥现象。李玥等^[33]研究发现,与施用常规尿素相比,树脂包膜 N 肥能促进干物质积累,促进 N 素的吸收和运输,使穗内 N 素积累增加 51.8%,促进机插稻结实灌浆期干物质积累,NAE、NFPF 分别增加 18.7%, 5.5%。这些与本研究结果相符。等 N 条件下,控释掺混肥机插侧深施处理(T₃)与水稻专用肥处理(T₂)相比,早、晚稻抽穗后 N 素积累比例分别提高 14.6% 和 17.6%。缓释掺混肥水稻生育期内能持续供 N,避免单施尿素处理的后期供 N 不足与单施控释 N 肥可能造成的贪青晚熟现象,充足的 N 素供应可合理调节土壤与作物间的供需平衡,为水稻生长创造适宜的生长条件^[34]。王晓琪等^[35]研究发现,控释肥料与尿素混合一次性基施可保持水稻土中较高的无机 N 水平,相比普通尿素多次施用,掺混处理可实现水稻增产并提高 N 素利用率。因此,普通尿素与控释尿素分别提供水稻生长前期和中后期的 N 素营养,既满足水稻生长对 N 素养分的需求,又降低全施缓释尿素带来的成本难题。

4 结论

(1) 在减氮 30% 条件下,控释掺混肥机插侧深施相比常规施肥能有效提高早、晚稻产量 20.9% 和 5.2%,经济效益提高 32.4% 和 13.8%,N 肥吸收利用率增加 4.2% 和 10.2%。

(2) 本试验中,机插侧深适量减 N 施肥能有效提高双季稻结实率及总实粒数,确保水稻生长稳产、高产,提高产投比,同时较农民常规施肥能明显提高水稻植株 N、P、K 养分累积量。

(3) 控释掺混肥机插侧深施在生育前期能减缓养分释放,供应作物中后期的养分需求,更能进一步增加水稻对 N、P、K 吸收和积累,提高 N 肥当季利用效率。

(4)此机插侧深试验仅一个地区的双季稻试验,由于栽培区域、灌溉条件、不同土壤特点及种植模式各有差异,需开展多点多地不同混施比例及用量试验研究,从而开发出适合不同地区的最佳掺混比。因此,进一步探索控释肥养分释放供应与作物养分吸收在生育期上的同步,仍是有待深究的问题。

参考文献:

- [1] 彭显龙,刘元英,罗盛国,等.实地氮肥管理对寒地水稻干物质积累和产量的影响[J].中国农业科学,2006,39(11):2286-2293.
- [2] 李敏,郭熙盛,叶舒娅,等.硫膜和树脂膜控释尿素对水稻产量、光合特性及氮肥利用率的影响[J].植物营养与肥料学报,2013,19(4):808-815.
- [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[J].中国水稻科学,2019,33(5):436-446.
- [4] 周旋.生化抑制剂组合对黄泥田土壤氮素转化的影响及其环境生态效应[D].杭州:浙江大学,2017.
- [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.
- [6] 潘圣刚,莫钊文,罗锡文,等.机械同步深施肥对水稻群体质量及产量的影响[J].华中农业大学学报,2013,32(2):1-5.
- [7] 马增奇,周成,刘卫东.机械式强排侧深施肥技术的应用[J].现代化农业,2017(12):55-56.
- [8] 毕春辉,陈长海,李明金,等.浅谈水稻侧深施肥技术[J].农业装备技术,2011,37(6):24-25.
- [9] 黄凰,曹卫华,杨敏丽,等.水稻多功能插秧机侧向深施肥试验效果分析[J].中国农业大学学报,2014,19(4):150-154.
- [10] 缪晓霖.张家港市水稻机插施肥一体化技术试验[J].农业装备技术,2015,41(5):19-21.
- [11] 陈佳娜.“早晚兼用型”机插双季稻产量形成机理及高产栽培技术研究[D].长沙:湖南农业大学,2017.
- [12] Halvorson A D, Alluvione F, Del Grosso S J. Tillage and inorganic nitrogen source effects on nitrous oxide emissions from irrigated cropping systems[J].Soil Science Society of America Journal,2010,74:436-445.
- [13] 蒋曦龙,陈宝成,张民,等.控释肥氮素释放与水稻氮素吸收相关性研究[J].水土保持学报,2014,28(1):215-220.
- [14] 马昕,杨艳明,刘智蕾,等.机械侧深施控释掺混肥提高寒地水稻的产量和效益[J].植物营养与肥料学报,2017,23(4):1095-1103.
- [15] 符建荣.控释氮肥对水稻的增产效应及提高肥料利用率的研究[J].植物营养与肥料学报,2001,7(2):145-152.
- [16] 袁嫚嫚,叶舒娅,刘枫,等.树脂包膜尿素对水稻产量和氮肥利用率的影响[J].中国农业气象,2011:89-93.
- [17] 曲均峰.不同控氮比掺混肥在水稻上的应用效果[J].中国农学通报,2014,30(12):176-180.
- [18] 付月君,王昌全,李冰,等.控释氮肥与尿素配施对单季稻产量及氮肥利用率的影响[J].土壤,2016,48(4):648-652.
- [19] 王海月,李玥,孙永健,等.不同施氮水平下缓释氮肥配施对机插稻氮素利用特征及产量的影响[J].中国水稻科学,2017,31(1):50-64.
- [20] 鲁艳红,聂军,廖育林,等.不同控释氮肥减量施用对双季水稻产量和氮素利用的影响[J].水土保持学报,2016,30(2):155-161.
- [21] 白雪,郑桂萍,王宏宇,等.寒地水稻侧深施肥效果的研究[J].黑龙江农业科学,2014(6):40-43.
- [22] 朱兆良.中国土壤氮素研究[J].土壤学报,2008,45(5):778-783.
- [23] 舒时富,唐湘如,罗锡文,等.机械定位深施超级稻专用肥提高土壤肥力和稻产量[J].农业工程学报,2013,29(23):9-14.
- [24] 林玉萍,聂录,姜灏,等.水稻侧深施肥技术研究[J].现代化农业,2017(3):19-21.
- [25] 刘汝亮,李友宏,王芳,等.缓释肥侧条施肥技术对水稻产量和氮素利用效率的影响[J].农业资源与环境学报,2014,31(1):45-49.
- [26] 吴正贵,柯健,何荣川,等.太湖地区水稻控释肥机插侧条施肥技术[J].江苏农业科学,2017,45(23):69-71.
- [27] 田小海,马国辉,杨灵芝,等.缓释氮肥对超级杂交稻后期生长与生理功能的影响[J].杂交水稻,2010,25(5):64-69.
- [28] 汤海涛,马国辉,罗锡文,等.水稻机械精量穴直播定位深施肥节氮栽培效果研究[J].农业现代化研究,2011,32(1):111-114.
- [29] 谷学佳,王玉峰,张磊,等.施肥插秧一体化技术对水稻产量及氮素流失的影响[J].黑龙江农业科学,2017(8):12-17.
- [30] 杨艳明.机插侧深施肥对寒地水稻产量的影响[D].哈尔滨:东北农业大学,2017.
- [31] 钱银飞,邵彩虹,邱才飞,等.包膜缓释尿素与普通尿素配施对双季超级稻产量及氮肥利用的影响[J].中国土壤与肥料,2015(5):33-38.
- [32] 林玉萍,聂录,姜灏,等.水稻侧深施肥技术研究[J].现代化农业,2017(3):19-21.
- [33] 李玥,李应洪,赵建红,等.缓释控氮肥对机插稻氮素利用特征及产量的影响[J].浙江大学学报(农业与生命科学版),2015,41(6):673-684.
- [34] 孙磊.控释氮肥在水稻上的应用效果研究[J].作物杂志,2009(2):83-85.
- [35] 王晓琪,朱家辉,陈宝成,等.控释尿素不同比例配施对水稻生长及土壤养分的影响[J].水土保持学报,2016,30(4):178-182.