

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

钟雪梅¹ 黄铁平² 彭建伟^{1,*} 卢文璐³ 康兴蓉¹ 孙梦飞¹ 宋思明⁴ 唐启源¹
陈裕新⁵ 湛冬至³ 周旋^{6,*}

(¹湖南农业大学 资源环境学院, 长沙 410128; ²湖南省农业委员会, 长沙 410005; ³汨罗市农业局, 湖南 汨罗 414400; ⁴湖南龙舟农机股份有限公司, 湖南 汨罗 414400; ⁵湖南金叶众望科技股份有限公司, 湖南 岳阳 414300; ⁶湖南省土壤肥料研究所, 长沙 410125; *通讯联系人, E-mail: 314967900@qq.com; Zhouxuan_123@126.com)

Effects of Machine-transplanting Synchronized with One-time Precision Fertilization on Nutrient Uptake and Use Efficiency of Double Cropping Rice

ZHONG Xuemei¹, HUANG Tieping², PENG Jianwei^{1,*}, LU Wenlu³, KANG Xingrong¹, SUN Mengfei¹,
SONG Siming⁴, TANG Qiyuan¹, CHEN Yuxin⁵, ZHAN Dongzhi³, ZHOU Xuan^{6,*}

(¹College of Resource & Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; ²Hunan Provincial Agricultural Committee, Changsha 410005, China; ³Miluo Agricultural Bureau, Miluo 414400, China; ⁴Hunan Dragon Boat Agricultural Machinery Co. Ltd., Miluo 414400, China; ⁵Hunan Jinyezhongwang Technology Co. Ltd., Yueyang 414300, China; ⁶Soil and Fertilizer Institute of Hunan Province, Changsha 410125, China; *Corresponding author, E-mail: 314967900@qq.com; Zhouxuan_123@126.com)

Abstract: 【Objective】 Our aim is to ensure the precision in rice fertilization, and to reveal the nutrient utilization characteristics of machine-transplanted rice under one-time, one-side deep fertilization with reduced nitrogen (N) application level and to improve the nitrogen utilization efficiency for double-cropping rice. **【Method】**Field experiments (2017–2018) were conducted using soil-tested formulated fertilization with precise fertilizer distributor to study the effects of one-time precision fertilization on nutrient absorption and utilization of double-cropping rice system in typical growing regions, and to investigate the relationships between nutrient contents and yield. **【Result】**As compared with conventional fertilization treatment, the accumulations of N, P, K in machine-transplanted early rice under one-time N application rate (reduced by 10%–30%) increased by 7.9%–11.7%, 9.4%–25.9% and 2.0%–6.5% in 2017, 8.2%–15.0%, 6.9%–14.1% and 13.9%–16.7% in 2018, in late rice by –0.6%–5.7%, 9.1%–14.4% and 3.7%–19.6% in 2017, 6.1%–8.5%, 9.4%–19.3% and 18.7%–22.2% in 2018, and N recovery efficiency (NRE), N agronomic efficiency (NAE) and N partial factor productivity (NPFP) in early rice by 38.6%–92.7%, 49.9%–103.6% and 29.49%–103.6% in 2017, 36.9%–85.1%, 46.0%–98.4% and 20.7%–75.4% in 2018, and NRE, NAE, NPFP in late rice by 20.8%–43.1%, 31.3%–64.2% and 18.3%–48.5% in 2017, 26.8%–99.1%, 60.0%–82.9% and 26.6%–60.5% in 2018. The optimum treatment was obtained with a reduction of 20%–30% in N application rate. With the reduction of N application rate, NRE of double-cropping rice first increased then reduced, while NHI, NAE and NPFP were on the rise, and soil alkali-hydrolyzable N declined. **【Conclusion】**The integration and optimization of fertilization technology and machine-transplanted technique can effectively reduce N application rate, facilitating N, P, K accumulation and utilization, which is conducive to raise grain yield and N use efficiency of double-cropping rice.

Key words: double cropping rice; machine-transplanted rice; deep fertilization; nutrient uptake; nitrogen use efficiency

摘 要: 【目的】为保证水稻施肥的准确性, 揭示水稻机插与同步一次性侧深减量施肥的养分利用特征, 为机插双季稻的氮(N)肥高效利用提供依据。**【方法】**在典型双季稻种植区, 以测土配方施肥量为依据, 结合精量施肥机, 2017–2018 年研究机插同步一次性精量施肥对双季稻养分吸收和利用的影响。**【结果】**与常规施肥处理相比, 机插同步一次性减 N 10%~30% 处理早稻 N、P、K 累积量分别提高 7.9%~11.7%、9.4%~25.9% 和 2.0%~6.5% (2017), 8.2%~15.0%、9.0%~12.1% 和 14.0%~18.1% (2018); 晚稻分别提高 –0.6%~5.7%、9.1%~14.4% 和 3.7%~19.6% (2017), 6.1%~8.5%、9.4%~19.3% 和 18.7%~22.2% (2018); 早稻 N 肥吸收利用率(NRE)、N 肥农学利用率(NAE)、N 肥偏生产力(NPFP) 分别提高 38.6%~92.7%、49.9%~103.6% 和 29.5%~71.7% (2017), 35.4%~71.4%、46.0%~98.4% 和 20.7%~75.4% (2018); 晚稻分别提高 20.8%~43.1%、31.3%~64.2% 和 18.3%~48.5% (2017), 26.8%~99.1%、60.0%~

收稿日期: 2018-07-16; 修改稿收到日期: 2019-07-09。

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFD200703-3); 国家水稻产业技术体系资助项目(CARS-01-26)。

82.9%和26.6%~60.5%(2018)。其中,早晚稻以减N 20%~30%处理效果较好。水稻机插同步一次性精量施肥随着施N量的降低,双季稻NRE先增加后降低,NHI、NAE和NPFP呈上升趋势,而土壤碱解氮含量呈下降趋势。

【结论】通过施肥技术和机插模式的集成与优化,能有效减少稻田N肥施入,利于N、P、K吸收积累,同步提高双季稻的产量和N肥利用效率。

关键词: 双季稻; 机插稻; 侧深施肥; 养分累积; 氮肥利用率

中图分类号: S143.1; S511.048

文献标识码: A

文章编号: 1001-7216(2019)05-0436-11

氮(N)素是水稻生产的主要养分限制因子。我国水稻生产中N肥施用量高、肥料利用率低的问题尤为突出,单季平均施N量为 180 kg/hm^2 ,较世界平均水平高约75%,而稻田N肥吸收利用率仅为30%~35%^[1-2]。农户为了获得高产往往增加N肥用量,尤其随着水稻品种的改良和产量水平的提高,施N量不断加大。过量施用N肥不仅造成N素大量损失,还会引起地下水硝酸盐污染、湖泊富营养化及温室气体排放增加等诸多问题^[3]。同时,水稻N肥利用率与种植季节、栽培体系、N肥运筹、栽插密度及品种本身特性等有关^[4]。因此,如何有效提高N肥利用率、保证作物高产并降低环境风险,是农业生产与环境保护迫切需要解决的问题^[5]。

面对我国耕地面积不断减少而粮食需求不断增长的局面,稳定和增加双季稻种植面积、提高单产是提高粮食总产的重要途径^[6]。长江中下游地区具备种植双季稻的土壤和气候条件,是我国最重要的生产区域^[7]。但随着经济快速发展和农村劳动力大量转移,双季稻生产区适龄劳动力季节性短缺的矛盾日益突出,劳动力成本迅速上升,水稻生产迫切需要发展以机插秧为主的移栽方式,以适应稻农对现代稻作技术的要求^[8-9]。近年来,随着机插秧技术的发展,机插水稻高产栽培配套技术已成为水稻栽培研究的热点,而针对双季稻鲜有报道^[10]。

合理施用N肥是兼顾作物产量、增加经济效益、提高N素利用效率和控制农业面源污染的重要举措。N肥适宜施入量受目标产量、品种、土壤、气候特点、秧苗素质及基本苗移栽量等多因素制约。肥料深施能提高利用率,减少损失,改善农业生态环境^[11-13]。水稻侧深施肥是在机械插秧的同时,将颗粒肥料(基肥和蘖肥)一次性施于水稻秧苗侧位一定深度土壤中的施肥方式,即肥料呈条带状施于耕层,距根系近,利于根系吸收利用,可提高肥料利用率^[14-15]。相关研究认为,N素供应与水稻需N相匹配是提高N素利用效率的有效途径之一^[16]。目前,侧深一次性施肥对双季稻养分吸收利用和分配特征影响鲜有报道。本研究在原有测土配方施肥工作基础上,于2017-2018年将机插和施肥技术等结合起来,利用电机螺旋挤压的原理深施肥,探讨

水稻机插同步精量一次性施肥下,不同N肥用量对双季稻N、P、K吸收利用特点的影响,并比较各养分吸收、分配及其与产量间的关系,以期对双季稻两熟区绿色轻简化生产和施肥精细化提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

2017年3月-10月在湖南省汨罗市古培镇三港村稻田(28°77'93"N, 113°06'10"E)进行试验。该区以丘岗、山地为主,气温、雨量适宜,属于典型亚热带湿润气候,四季分明。年均降水量1537.8 mm,年日照时数为1271.0 h,海拔39.6 m。2017年早稻生长季4-7月平均气温28.9℃,晚稻生长季7-10月平均气温18.1℃,供试土壤为发育于粉砂质页岩的白鳝泥,中等地力,前茬为水稻。0-20 cm耕层土壤基本理化性质为pH 6.1($m_{\text{土}}:m_{\text{水}}=1:2.5$),有机质31.62 g/kg,全N 1.79 g/kg,全磷0.47 g/kg,全钾16.08 g/kg,碱解N 133.74 mg/kg,有效磷9.5 mg/kg,速效钾103.37 mg/kg。

2018年3月-10月在湖南省益阳市赫山区兰溪镇桐木垸村稻田(28°58'25"N, 112°45'47"E)进行试验。该地属亚热带季风性湿润气候,四季分明,光热丰富,雨量充沛。年均降水量1465.0 mm,年日照时数为1560.0 h,海拔63.7 m。2018年早稻生长季4-7月平均气温23.8℃,晚稻生长季7-10月平均气温26.4℃,供试土壤红黄泥,中等地力,前茬为水稻。0-20 cm耕层土壤基本理化性质为pH 6.1,有机质39.21 g/kg,全氮1.95 g/kg,全磷0.54 g/kg,全钾11.26 g/kg,碱解氮157.15 mg/kg,有效磷7.8 mg/kg,速效钾118.6 mg/kg。

1.2 供试材料

2017年供试早稻品种为杂交籼稻两优25(生育期137 d),晚稻品种为杂交籼稻H优518(生育期130 d)。2018年供试早稻品种为杂交籼稻湘早籼45(生育期107 d),晚稻品种为杂交籼稻湘晚籼12(生育期128 d)。供试N肥为尿素(含N 46%),磷肥为过磷酸钙(含 P_2O_5 12%),钾肥为氯化钾(含 K_2O 60%);

表 1 施肥方式及施肥用量

Table 1. Fertilization method and application rate.

稻季	处理	基肥	分蘖肥
Season	Treatment	Base fertilizer	Tillering fertilizer
早稻 Early rice	T ₁	复混肥 Compound fertilizer(20-10-10) 450 kg/hm ²	尿素 130.5 kg/hm ² +氯化钾 75.0 kg/hm ² Urea 130.5 kg/hm ² +KCl 75.0 kg/hm ²
	T ₂	水稻生产专用肥 Special fertilizer(26.1-8.7-17.4) 517.3 kg/hm ²	
	T ₃	水稻生产专用肥 Special fertilizer(24.8-9.3-18.6) 483.9 kg/hm ²	
	T ₄	水稻生产专用肥 Special fertilizer(23.1-9.9-19.8) 454.6 kg/hm ²	
	T ₅	水稻生产专用肥 Special fertilizer(21.0-10.5-21.0) 428.6 kg/hm ²	
晚稻 Late rice	CK	过磷酸钙 Calcium superphosphate 375.0 kg/hm ² +氯化钾 KCl 75.0 kg/hm ²	氯化钾 75.0 kg/hm ² KCl 75.0 kg/hm ²
	T ₁	复混肥 Compound fertilizer(20-8-12) 450 kg/hm ²	尿素 130.5 kg/hm ² +氯化钾 75.0 kg/hm ² Urea 130.5 kg/hm ² +KCl 75.0 kg/hm ²
	T ₂	水稻生产专用肥 Special fertilizer(28.9-7-17.5) 514.05 kg/hm ²	
	T ₃	水稻生产专用肥 Special fertilizer(27.1-7.4-18.5) 486.45 kg/hm ²	
	T ₄	水稻生产专用肥 Special fertilizer(25.4-7.9-19.8) 455.7 kg/hm ²	
	T ₅	水稻生产专用肥 Special fertilizer(23.1-8.4-21) 428.55 kg/hm ²	
	CK	过磷酸钙 Calcium superphosphate 300.0 kg/hm ² +氯化钾 KCl 75.0 kg/hm ²	氯化钾 75.0 kg/hm ² KCl 75.0 kg/hm ²

T₁—农民习惯施肥处理(早稻施 N 量折合纯 N 为 150 kg/hm², 晚稻为 165 kg/hm²); T₂—机插同步一次性减 N 10%施肥处理(早稻施 N 量折合纯 N 为 135 kg/hm², 晚稻为 148.5 kg/hm²); T₃—机插同步一次性减 N 20%施肥处理(早稻施 N 量折合纯 N 为 120 kg/hm², 晚稻为 132 kg/hm²); T₄—机插同步一次性减 N 30%施肥处理(早稻施 N 量折合纯 N 为 105 kg/hm², 晚稻为 115.5 kg/hm²); T₅—机插同步一次性减 N 40%施肥处理(早稻施 N 量折合纯 N 为 90 kg/hm², 晚稻为 99 kg/hm²); CK—不施 N 处理(0 kg/hm²)。

T₁, Farmers' traditional fertilization practice(150 kg/hm² in nitrogen term for early rice, 165 kg/hm² for late rice); T₂, Mechanical transplanting under one-time precise fertilization with reduced nitrogen application of 10%(135 kg/hm² for early rice and 148.5 kg/hm² for late rice); T₃, Mechanical transplanting under one-time precise fertilization with reduced nitrogen application of 20%(120 kg/hm² for early rice and 132 kg/hm² for late rice); T₄, Mechanical transplanting under one-time precise fertilization with reduced nitrogen application of 30%(105 kg/hm² for early rice and 115.5 kg/hm² for late rice); T₅, Mechanical transplanting under one-time precise fertilization with reduced nitrogen application of 40%(90 kg/hm² for early rice and 99 kg/hm² for late rice); CK, Zero nitrogen application.

水稻侧深施专用肥(基蘖同施), 分别由湖南金叶众望公司(2017 年)和湖南华绿公司配制生产(2018 年)。

供试机械为 2FH-8 插秧同步精量施肥机, 由湖南龙舟农机股份有限公司研发。该机采用国内独创的螺杆强制推肥结构, 配合搭载插秧机实现施肥与插秧同步作业, 利用机械侧深施肥, 将肥料定量、定点(深度: 35–65 mm; 侧距: 40–80 mm)地深施到秧苗一侧的泥土里, 实现全程监控作业, 可通过控制减速电机旋转速度, 采用屏显控制面板调节施肥量, 保证施肥均匀。

1.3 试验设计

采用田间小区试验, 早稻设 6 个处理: T₁, 农民习惯施肥处理(折合纯 N 150 kg/hm²); T₂, 机插同步一次性减 N 10%施肥处理(N 135 kg/hm²); T₃, 机插同步一次性减 N 20%施肥处理(N 120 kg/hm²); T₄, 机插同步一次性减 N 30%施肥处理(N 105 kg/hm²); T₅, 机插同步一次性减 N 40%施肥处理(N 90 kg/hm²); CK, 不施 N 肥处理(N 0 kg/hm²)。磷(折合成 P₂O₅)、钾(折合成 K₂O)用量分别为 45 kg/hm² 和 90 kg/hm²。

晚稻设 6 个处理: T₁, 农民习惯施肥处理(折合纯 N 165 kg/hm²); T₂, 机插同步一次性减 N 10%施肥处理(N 148.5 kg/hm²); T₃, 机插同步一次性减 N 20%施肥处理(N 132 kg/hm²); T₄, 机插同步一次性减 N 30%施肥处理(N 115.5 kg/hm²); T₅, 机插同步

一次性减 N 40%施肥处理(N 99 kg/hm²); CK, 不施 N 肥处理(N 0 kg/hm²)。磷(折合成 P₂O₅)、钾(折合成 K₂O)用量分别为 36 kg/hm² 和 90 kg/hm²。具体施肥方式及用量见表 1。

各处理重复 3 次, 随机区组排列。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。T₁、CK 处理提前半个月筑好小区田埂, 并按小区机插前施好基肥, 插后马上完善小区田埂。T₂~T₅ 处理都采用 PVC 板(宽度为 60 cm), 先按小区长度固定不同小区间 PVC 板, 在机插同步施肥后马上固定小区两端 PVC 板。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。2017 年早稻于 3 月 15 日播种, 4 月 20 日移栽, 7 月 17 日收获; 晚稻于 6 月 16 日播种, 7 月 19 日移栽, 10 月 24 日收获。2018 年早稻 3 月 25 日播种, 4 月 19 日移栽, 7 月 10 日收获; 晚稻 6 月 16 日播种, 7 月 18 日移栽, 11 月 1 日收获。移栽至返青保持水稻田浅水层, 返青至有效分蘖临界叶龄期进行间歇湿润灌溉, 当田间群体苗数达到计划穗数的 85%时排水搁田 7~8 d, 以后采用间歇湿润灌溉, 在抽穗期间采用浅水灌溉, 之后干湿交替灌溉, 成熟前 7 d 断水。田间其他管理按常规进行。

1.4 测定项目及方法

分别于水稻分蘖盛期、抽穗期、灌浆期(2017 年早稻抽穗后 17 d, 晚稻抽穗后 19 d; 2018 年早稻

抽穗后 25 d, 晚稻抽穗后 28 d) 及成熟期, 按各小区平均茎蘖数各取代表性稻株 5 穴, 剪去根后, 分茎叶和穗(抽穗后两部分烘干称重并粉碎), 测定各器官中养分含量, 用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮, 凯氏定氮法测 N 含量(KDN-102C 定氮仪); 钒钼黄比色法测 P 含量(UV-5100 分光光度计); 火焰光度计法测 K 含量(FP 640 火焰光度计)。成熟期各小区单收, 按实收株数计产, 测定 0~20 cm 土壤碱解氮含量。

收获指数(Harvest index, HI)=成熟期籽粒干质量/成熟期植株总干质量;

N、P、K 素积累总量(Total N, P, K accumulation, TNA, TPA, TKA)分别为成熟期单位面积植株(茎叶和穗)N、P、K 积累量的总和;

N、P、K 收获指数(N, P, K harvest index, NHI, PHI, KHI)分别为成熟期单位面积植株籽粒 N、P、K 素积累量/植株该元素总积累量;

N 肥吸收利用率(N recovery efficiency, NRE)=(施 N 区 N 总吸收量-无 N 区 N 总吸收量)/施 N 量 $\times 100\%$;

N 肥农学利用率(N agronomic efficiency, NAE)=(施 N 区稻谷产量-无 N 区稻谷产量)/施 N 量;

N 肥生理利用率(N physiological efficiency, NPE)=(施 N 区稻谷产量-无 N 区稻谷产量)/(施 N 区 N 总吸收量-无 N 区 N 总吸收量);

N 肥偏生产力(N partial factor productivity, NPFP)=施 N 区稻谷产量/施 N 量;

N 素干物质生产效率(N biomass production efficiency, NBPE)=干物质积累量/N 总吸收量;

N 素稻谷生产效率(N grain production efficiency, NGPE)=稻谷产量/N 总吸收量。

1.5 数据处理

采用 Microsoft Excel 2003 和 SPSS 17.0 数据分

析软件进行统计分析, 处理间差异显著性分析采用最小显著差数法(LSD)检验法。

2 结果与分析

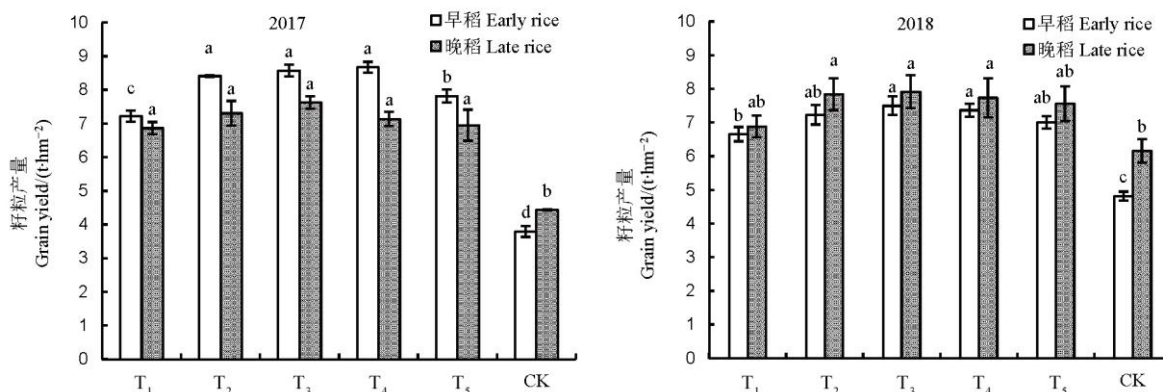
2.1 双季稻产量

由图 1 可知, 早、晚稻施 N 处理产量较 CK 处理 2017 年增幅分别为 90.1%~128.5% 和 54.9%~72.1%, 2018 年增幅为 38.1%~55.6% 和 11.9%~28.7%。与 T_1 处理相比, T_2 、 T_3 、 T_4 和 T_5 处理 2017 年早稻产量分别提高 16.5%、18.8%、20.2% 和 8.3%, 差异显著, 晚稻分别提高 6.4%、11.1%、3.9% 和 1.3%, 差异不显著; 2018 年早稻分别提高 7.9%、11.9%、10.0% 和 4.6%, 差异不显著; 晚稻分别提高 13.9%、15.0%、12.4% 和 9.8%, 差异不显著。说明机插侧深一次性施肥定位、定量、均匀, 虽然较农民习惯施肥降低施肥用量, 但能有效提高双季稻产量, 实现高产稳产, 而过量减 N 施用增产效果不佳。

2.2 双季稻干物质积累

由表 2 可知, 整个生育期双季稻各处理干物质积累量呈上升趋势, 各生育期均以 CK 处理最低。说明 N 肥施用有利于双季稻干物质的积累。分蘖盛期、抽穗期和灌浆期施 N 处理干物质积累量处理间差异不大。早、晚稻侧深施肥处理(T_2 - T_5)HI 较 T_1 处理 2017 年增幅分别为 -2.2%~8.2% 和 0.1%~6.4%; 2018 年增幅分别为 3.4%~13.2% 和 3.2%~10.6%。

早、晚稻施 N 处理成熟期干物质积累量较 CK 处理 2017 年增幅为 27.2%~45.5% 和 20.2%~32.6%; 2018 年增幅分别为 37.2%~54.9% 和 29.4%~45.2%。与 T_1 处理相比, T_2 、 T_3 和 T_4 处理早稻成熟期干物



柱上不同小写字母代表处理间在 5% 水平上差异显著 (LSD)。图中数值为平均值 \pm 标准误 ($n=3$)。

Different small letters above the bars mean significant difference among treatments at 5% level (LSD). Data in the figure are Mean \pm SE ($n=3$).

图 1 不同施肥处理下机插双季稻籽粒产量

Fig. 1. Grain yield of machine-transplanted double-cropping rice under different fertilization treatments.

表2 不同施肥处理下机插双季稻各生育期干物质质量和收获指数
Table 2. Dry matter accumulation at different growth stages and harvest index of machine-transplanted double-cropping rice under different fertilization treatments.

年份 Year	稻季 Season	处理 Treatment	各生育期干物质质量 Dry matter accumulation at different growth stages/(t·hm ⁻²)				收获指数 HI/%
			分蘖盛期 MT	抽穗期 HS	灌浆期 FS	成熟期 MS	
2017	早稻 Early rice	T ₁	0.8 a	3.5 a	6.1 b	12.5 ab	59.4 ab
		T ₂	0.9 a	4.0 a	6.3 ab	13.4 a	58.1 b
		T ₃	0.9 a	4.0 a	6.7 ab	13.5 a	59.7 ab
		T ₄	1.0 a	4.1 a	6.9 a	13.7 a	61.0 ab
		T ₅	0.8 a	3.5 a	6.3 ab	12.0 b	64.2 a
		CK	0.3 b	1.8 b	3.4 c	9.4 c	61.1 ab
		平均值 Average	0.8	3.5	5.9	12.4	60.6
	晚稻 Late rice	T ₁	1.3 ab	6.6 ab	8.8 a	12.8 ab	45.2 b
		T ₂	1.4 ab	7.1 a	9.3 a	13.4 ab	45.2 b
		T ₃	1.4 a	6.9 ab	9.1 a	13.7 a	46.8 b
		T ₄	1.5 a	6.6 ab	9.0 a	12.9 ab	48.1 ab
		T ₅	1.2 b	6.0 b	8.2 a	12.4 b	47.9 ab
		CK	0.6 c	2.1 c	4.3 b	10.3 c	53.4 a
		平均值 Average	1.2	5.9	8.1	12.6	47.8
2018	早稻 Early rice	T ₁	1.6 a	4.0 a	11.0 a	14.2 b	46.9 a
		T ₂	1.5 ab	4.2 a	11.2 a	14.9 ab	48.5 a
		T ₃	1.5 abc	4.3 a	11.2 a	15.1 a	51.2 a
		T ₄	1.4 bc	4.0 a	10.9 a	14.4 ab	51.3 a
		T ₅	1.4 c	3.6 a	10.7 a	13.2 c	53.1 a
		CK	0.8 d	2.1 b	8.5 b	9.6 d	50.1 a
		平均值 Average	1.4	3.7	10.6	13.6	50.2
	晚稻 Late rice	T ₁	4.0 a	6.7 a	12.5 ab	17.9 b	38.4 a
		T ₂	2.9 b	6.8 a	13.8 ab	19.0 ab	41.3 a
		T ₃	2.5 bc	7.1 a	14.4 a	19.9 a	39.6 a
		T ₄	2.5 bcd	7.0 a	12.8 ab	18.9 ab	40.7 a
		T ₅	1.8 cd	6.4 a	11.7 b	17.8 b	42.5 a
		CK	1.7 d	4.9 b	8.7 c	13.7 c	45.0 a
		平均值 Average	2.5	6.5	12.3	17.9	41.3

表中数值为平均值±标准误(n=3)。各稻季同列中标以不同字母的值在 0.05 水平上差异显著(LSD 检验)。下同。
Values are Mean±SE(n=3). MT, Mid-tillering stage; HS, Heading stage; FS, Filling stage; MS, Maturity stage. HI, Harvest index. Values followed by different letters during different growing seasons are significantly different at *P*<0.05 (LSD). The same as below.

质累积量 2017 年分别提高 7.3%、8.4%和 9.7%，晚稻分别提高 4.3%、6.9%和 0.7%；2018 年早稻分别提高 4.9%、6.1%、1.1%，晚稻提高 5.9%、11.3%、5.8%；而 T₅ 处理早晚稻分别降低 4.1%和 3.2% (2017)、7.1%和 0.8%(2018)。说明机插侧深一次性施肥能有效提高双季稻成熟期干物质积累，为高产稳产奠定基础，而过量减 N 会导致干物质累积量降低，影响产量构成。

2.3 双季稻 N 素吸收与利用率

2.3.1 双季稻 N 素吸收

由表 3 可知，整个生育期双季稻各处理 TNA 呈上升趋势，各生育期均以 CK 处理最低。说明 N

肥施用有利于双季稻氮的积累。分蘖盛期、抽穗期和成熟期施 N 处理间 TNA 差异不大。早、晚稻各处理间 NHI 的差异不大。

早、晚稻施 N 处理成熟期 TNA 较 CK 处理 2017 年增幅为 39.2%~64.5%和 46.0%~74.4%；2018 年增幅为 45.1%~74.9%和 25.6%~38.4%。与 T₁ 处理相比，T₂、T₃ 和 T₄ 处理 2017 年早稻成熟期 TNA 分别提高 7.9%、11.7%和 11.2%，晚稻分别提高 3.4%、5.7%和-0.6%；2018 年早稻提高 8.2%、15.0%、11.9%，晚稻提高 6.1%、8.5%、6.1%，而 T₅ 处理早晚稻分别降低 5.4%和 11.5%(2017)，4.6%和 1.5%(2018)。说明机插侧深一次性施肥的土壤供 N 能力持续时间长，有利于满足水稻的 N 素需求，能有效提高水

表 3 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
Table 3. N uptake at different growth stages and N harvest index of machine-transplanted double-cropping rice under different fertilization treatments.

年份 Year	稻季 Season	处理 Treatment	各生育期 N 素累积量 TNA at different stages/(kg·hm ⁻²)				N 收获指数 NHI/%	抽穗后 N 素累积 N accumulation after heading/(kg·hm ⁻²)	抽穗后 N 素累积比例 N accumulation ratio after heading/%
			分蘖盛期	抽穗期	灌浆期	成熟期			
			MT	HS	FS	MS			
2017	早稻 Early rice	T ₁	23.3 a	78.4 a	77.8 b	140.5 ab	61.4 a	62.1 a	43.5 b
		T ₂	23.7 a	82.8 a	92.1 ab	151.6 ab	60.1 a	68.9 a	45.4 b
		T ₃	24.0 a	84.6 a	99.5 a	157.0 a	61.9 a	72.4 a	46.0 b
		T ₄	23.5 a	87.8 a	109.4 a	156.2 a	64.0 a	68.4 a	43.9 b
		T ₅	22.2 a	67.9 a	99.3 a	132.9 b	66.6 a	65.0 a	49.8 b
		CK	15.9 b	25.6 b	33.9 c	95.4 c	63.6 a	69.8 a	73.2 a
		平均值 Average	17.5	71.2	85.3	138.9	62.9	67.8	50.3
	晚稻 Late rice	T ₁	32.3 ab	99.2 ab	119.6 ab	165.0 a	53.0 a	65.8 a	35.0 b
		T ₂	38.4 a	109.4 a	149.9 a	170.7 a	54.0 a	61.3 a	35.9 b
		T ₃	40.0 a	108.5 a	144.3 ab	174.4 a	55.2 a	65.9 a	37.6 b
		T ₄	37.7 ab	101.7 ab	129.6 ab	163.9 a	55.8 a	62.2 a	37.8 b
		T ₅	30.2 b	90.6 b	109.3 b	146.1 ab	54.9 a	55.5 a	38.1 b
		CK	9.6 c	30.1 c	49.1 c	100.0 b	52.8 a	69.9 a	69.5 a
		平均值 Average	31.4	89.9	117.0	153.3	54.3	63.4	42.3
2018	早稻 Early rice	T ₁	27.8 a	92.6 a	103.2 a	150.2 ab	54.0 a	57.6 a	37.9 b
		T ₂	23.1 b	94.1 a	120.4 a	162.6 ab	57.6 a	68.5 a	41.1 ab
		T ₃	22.1 bc	96.8 a	118.7 a	172.8 a	61.3 a	76.1 a	44.1 ab
		T ₄	20.3 bc	89.9 a	111.7 a	168.1 ab	58.6 a	78.2 a	46.2 ab
		T ₅	19.1 c	78.9 a	101.3 a	143.4 b	57.6 a	71.7 a	45.0 ab
		CK	7.1 d	40.6 b	58.6 b	98.8 c	55.3 a	58.3 a	58.3 a
		平均值 Average	19.9	82.2	102.3	149.3	48.6	68.4	45.4
	晚稻 Late rice	T ₁	96.9 a	134.7 a	152.0 a	195.3 a	49.5 a	50.6 a	31.0 a
		T ₂	81.9 ab	150.7 a	174.6 a	207.2 a	46.9 a	56.5 a	26.6 a
		T ₃	68.6 bc	154.3 a	176.4 a	211.9 a	44.7 a	57.6 a	27.7 a
		T ₄	72.4 abc	147.6 a	156.7 a	207.1 a	48.6 a	59.5 a	28.8 a
		T ₅	48.2 cd	127.1 a	140.6 ab	192.4 a	48.9 a	75.9 a	33.9 a
		CK	37.2 d	83.4 b	97.9 b	153.1 b	52.9 a	69.7 a	45.6 a
		平均值 Average	67.6	132.9	149.7	194.5	48.6	61.7	32.3

TNA—N 素累积量; NHI—N 素收获指数。
TNA, Total N accumulation; NHI, N harvest index.

稻成熟期 TNA 累积，为高产稳产奠定基础，而过量减 N 施用会导致 TNA 降低，影响产量构成。早、晚稻 CK 处理抽穗后 N 素累积比例分别为 73.2%和 69.5%(2017)，58.3%和 48.6%(2018)，施 N 处理分别为 43.5%~49.8%和 35.0%~38.1% (2017)，37.9%~46.2%和 26.6%~33.9%(2018)。

由表 4 可知，与 T₁ 处理相比，T₂、T₃ 和 T₄ 处理早稻施 N 处理 NRE 分别提高 38.6%、70.7%和 92.7%(2017)，21.9%、85.1%和 73.0%(2018)；NAE 分别提高 49.9%、74.5%和 103.6%(2017)，46.0%、82.5%和 98.4%(2018)；NPFP 分别提高 29.5%、48.5%和 71.7%(2017)，20.7%、40.9%和 58.2%(2018)。晚稻施 N 处理 NRE 分别提高 20.8%、43.1%和

40.5%(2017)，35.4%、71.4%和 62.1%(2018)；NAE 分别提高 31.3%、64.2%和 58.7%(2017)，60.0%、82.7%和 82.9%(2018)；NPFP 分别提高 18.3%、38.9%和 48.5%(2017)，26.6%、43.8%、60.5%(2018)。说明机插侧深一次性施肥能提高水稻 NRE、NAE 和 NPFP，为高产稳产奠定基础。水稻机插同步一次性精量施肥处理随着施 N 量的降低，双季稻 NRE 先增加后降低，NHI、NAE 和 NPFP 呈上升趋势。

2.4 双季稻 P 素吸收

由表 5 可知，整个生育期各处理 TPA 以 CK 处理最低，2017 年早稻呈上升趋势，晚稻呈 S 型曲线；2018 年早晚稻均呈上升趋势。说明 N 肥施用有利于双季稻 P 的积累。不同生育期早、晚稻 TPA 以减

表4 不同施肥处理下机插双季稻N肥利用效率
Table 4. N use efficiency of machine-transplanted double-cropping rice under different fertilization treatments.

年份 Year	稻季 Season	处理 Treatment	氮肥吸收利用率 NRE/%	氮肥农学利用率 NAE/(kg kg ⁻¹)	氮肥偏生产力 NPFP/(kg kg ⁻¹)	氮肥生理利用率 NPE/(kg kg ⁻¹)	氮素干物质 生产效率 NBPE/(kg kg ⁻¹)	氮素稻谷生产 效率 NGPE/(kg kg ⁻¹)
2017	早稻 Early rice	T ₁	30.1 b	22.8 d	48.1 d	80.9 a	89.2 b	51.8 a
		T ₂	41.6 ab	34.2 c	62.3 c	82.9 a	88.3 b	55.5 a
		T ₃	51.3 a	39.8 bc	71.4 b	78.9 a	86.2 b	54.7 a
		T ₄	57.9 a	46.4 a	82.6 a	83.3 a	88.0 b	55.7 a
		T ₅	41.6 ab	44.7 ab	86.9 a	110.8 a	90.3 b	59.4 a
		CK	-	-	-	-	98.8 a	39.9 b
		平均值	44.5	37.6	70.3	87.4	90.1	52.8
	晚稻 Late rice	T ₁	39.4 a	11.8 b	33.3 c	39.3 a	81.3 b	35.2 a
		T ₂	47.6 a	15.5 ab	39.4 c	32.7 a	78.5 b	34.3 a
		T ₃	56.3 a	19.4 a	46.2 b	36.2 a	78.6 b	35.1 a
		T ₄	55.3 a	18.7 a	49.4 b	39.0 a	80.0 b	35.3 a
		T ₅	46.5 a	20.4 a	56.2 a	45.4 a	85.1 b	38.3 a
		CK	-	-	-	-	103.7 a	35.6 a
		平均值	49.0	17.1	44.9	38.5	84.5	35.6
2018	早稻 Early rice	T ₁	33.1 b	12.2 c	44.4 e	49.0 a	99.4 a	45.0 a
		T ₂	44.9 ab	17.9 bc	53.6 d	38.3 a	92.0 ab	44.9 a
		T ₃	56.8 a	22.3 ab	62.5 c	37.2 a	84.8 ab	43.4 a
		T ₄	53.7 a	24.3 a	70.2 b	38.4 a	83.8 b	43.9 a
		T ₅	45.9 ab	22.8 ab	77.8 a	50.4 a	88.6 ab	47.0 a
		CK	-	-	-	-	97.9 ab	49.0 a
		平均值	46.9	19.9	61.7	42.7	91.1	45.6
	晚稻 Late rice	T ₁	26.1 b	6.5 d	41.7 d	23.1 a	93.8 a	37.5 a
		T ₂	33.0 b	10.3 c	52.8 cd	31.1 a	92.8 a	38.1 a
		T ₃	51.9 a	11.8 b	60.0 bc	35.7 a	94.9 a	37.7 a
		T ₄	46.7 a	11.8 b	67.0 ab	29.5 a	91.8 a	37.6 a
		T ₅	45.2 a	12.8 a	76.3 a	31.0 a	89.1 a	37.4 a
		CK	-	-	-	-	89.8 a	40.3 a
		平均值	40.6	10.7	59.6	30.1	92.0	38.1

NRE, N recovery efficiency; NAE, N agronomic efficiency; NPFP, N partial factor productivity; NPE, N physiological efficiency; NBPE, N use efficiency for biomass production; NGPE, N use efficiency for grain production.

量 20%~30%处理较高,施 N 处理间 TPA 差异不大。早、晚稻成熟期施 N 处理 TPA 较 CK 处理增幅为 46.8%~84.8%和 21.6%~39.0%(2017), 42.6%~ 62.6%和 32.2%~48.2%(2018)。与 T₁ 处理相比, T₂、T₃、T₄ 和 T₅ 处理早稻成熟期 TPA 分别提高 9.4%、17.2%、25.9%和 3.4%(2017), 8.1%、12.1%、9.0%和 4.4%(2018), 晚稻分别提高 9.1%、14.4%、10.2%和 3.0%(2017), 9.4%、19.3%、11.6%和 2.0%(2018)。说明机插侧深一次性施肥有利于满足水稻的养分需求,能有效提高双季稻成熟期 TPA 累积,为高产稳产奠定基础。

2.5 双季稻 K 素吸收

由表 6 可知,2017 年整个生育期双季稻各处理 K 素累积量大致呈 S 型曲线变化,于抽穗期至灌浆期达到峰值,各生育期均以 CK 处理最低;2018 年整个生育期双季稻各处理呈上升趋势,各生育期均以 CK 处理最低,说明 N 肥施用有利于提高双季稻 K 素累积量。

早、晚稻成熟期施 N 处理 TKA 较 CK 处理增幅为 36.4%~66.8%和 21.6%~53.8%(2017), 21.1%~43.4%和 30.8%~63.9%(2018)。与 T₁ 处理相比,2017 年 T₂、T₃、T₄ 处理早稻成熟期 TKA 分别提高 2.0%、6.5%和 6.0%,晚稻分别提高 11.6%、19.6%和 3.7%,而 T₅ 处理分别降低 12.9%和 5.5%;2018 年 T₂、T₃、T₄、T₅ 早稻成熟期 TKA 分别提高 14.0%、18.4%、15.3%和 5.7%,晚稻分别提高 18.7%、22.2%、18.7%和 15.4%。说明机插侧深一次性施肥有利于满足水稻的养分需求,能有效提高水稻成熟期 TKA 累积,为高产稳产奠定基础,而过量减 N 施用可能会导致 TKA 降低。

2.6 土壤碱解氮含量

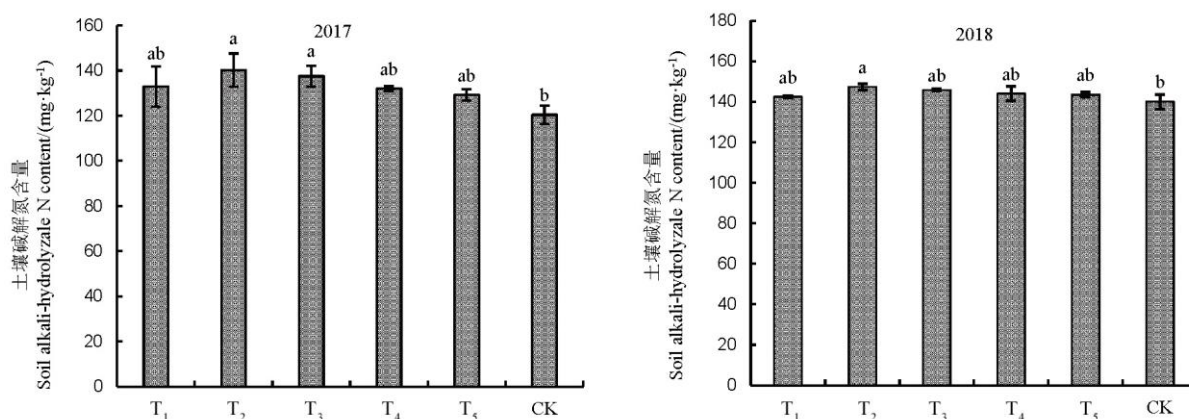
由图 2 可知,双季稻成熟期施 N 处理土壤碱解氮含量较 CK 处理增幅分别为 7.0%~16.4%(2017)、1.6%~5.2%(2018)。与 T₁ 处理相比, T₂、T₃、T₄ 和 T₅ 处理土壤碱解氮含量分别提高 8.8%、6.7%、2.4%和 0.2%(2017), 3.5%、2.4%、1.1%和 0.7%(2018),

表5 不同施肥处理下机插双季稻各生育期P素吸收和P收获指数
Table 5. P uptake at different growth stages and P harvest index of machine-transplanted double-cropping rice under different fertilization treatments.

年份 Year	稻季 Season	处理 Treatment	各生育期 P 素累积量 Total P accumulation at different stages/(kg hm ⁻²)				P 收获指数 P harvest index/%
			分蘖盛期 MT	抽穗期 HS	灌浆期 FS	成熟期 MS	
2017	早稻 Early rice	T ₁	3.7 a	8.6 a	27.1 a	49.5 c	72.9 a
		T ₂	4.2 a	9.8 a	27.7 a	54.1 abc	67.2 abc
		T ₃	4.7 a	10.2 a	30.2 a	58.0 ab	65.9 bc
		T ₄	5.1 a	11.1 a	31.9 a	62.3 a	67.2 abc
		T ₅	4.1 a	9.0 a	28.0 a	51.2 bc	71.8 ab
		CK	1.5 b	3.5 b	13.8 b	33.7 d	64.8 c
		平均值 Average	3.9	8.7	26.5	51.4	68.3
	晚稻 Late rice	T ₁	3.0 a	8.9 b	31.5 a	25.2 ab	55.1 a
		T ₂	3.9 a	14.7 a	33.0 a	27.5 ab	52.7 a
		T ₃	4.1 a	14.9 a	33.4 a	28.9 a	52.9 a
		T ₄	4.1 a	14.3 a	32.7 a	27.8 ab	56.9 a
		T ₅	3.6 a	9.8 b	30.5 a	26.0 ab	57.0 a
		CK	1.3 b	3.2 c	15.1 a	20.8 b	64.1 a
		平均值 Average	3.3	11.0	29.4	26.0	56.4
2018	早稻 Early rice	T ₁	6.4 a	14.8 a	29.6 ab	42.7 c	56.1 a
		T ₂	5.3 bc	15.8 a	31.9 ab	46.2 ab	54.5 a
		T ₃	5.4 bc	16.1 a	34.3 a	47.9 a	53.6 a
		T ₄	5.4 b	16.0 a	32.3 a	46.6 ab	56.2 a
		T ₅	5.0 c	14.2 a	30.3 ab	44.6 bc	54.3 a
		CK	3.6 d	7.7 b	27.0 b	32.3 d	47.8 b
		平均值 Average	5.2	14.1	30.9	43.4	53.8
	晚稻 Late rice	T ₁	15.6 a	28.2 a	32.1 b	34.5 a	35.8 a
		T ₂	10.7 b	31.1 a	37.7 a	37.7 a	34.3 a
		T ₃	10.7 b	32.7 a	39.0 a	41.1 a	32.5 a
		T ₄	9.9 bc	31.0 a	36.4 ab	38.5 a	34.6 a
		T ₅	6.9 bc	28.4 a	33.9 ab	35.1 a	37.2 a
		CK	6.5 c	19.4 b	21.9 c	25.7 b	37.7 a
		平均值 Average	10.1	28.5	33.5	35.4	35.3

表6 不同施肥处理下机插双季稻各生育期K素吸收和K收获指数
Table 6. K uptake at different growth stages and K harvest index of machine-transplanted double-cropping rice under different fertilization treatments.

年份 Year	稻季 Season	处理 Treatment	各生育期 K 素累积量 Total K accumulation at different stages/(kg hm ⁻²)				K 收获指数 K harvest index/%
			分蘖盛期 MT	抽穗期 HS	灌浆期 FS	成熟期 MS	
2017	早稻 Early rice	T ₁	20.1 a	82.9 a	83.0 c	72.4 a	10.1 b
		T ₂	24.5 a	96.6 a	88.8 bc	73.8 a	11.2 ab
		T ₃	26.4 a	98.2 a	96.0 ab	77.1 a	11.6 ab
		T ₄	27.5 a	101.4 a	101.5 a	76.7 a	12.6 a
		T ₅	20.3 a	88.1 a	95.0 ab	63.0 b	12.6 a
		CK	6.6 a	46.2 b	55.1 d	46.2 c	12.2 ab
		平均值 Average	20.9	85.6	86.6	68.2	11.7
	晚稻 Late rice	T ₁	23.2 a	69.2 ab	72.6 a	75.3 ab	10.9 a
		T ₂	25.0 a	75.5 a	81.1 a	84.1 a	11.4 a
		T ₃	25.6 a	77.3 a	83.2 a	90.1 a	11.0 a
		T ₄	24.7 a	67.8 ab	86.7 a	78.1 ab	11.8 a
		T ₅	19.0 a	57.5 b	67.9 a	71.2 ab	10.5 a
		CK	7.7 b	19.4 c	32.7 b	58.5 b	13.9 a
		平均值 Average	20.9	61.1	70.7	76.2	11.6
2018	早稻 Early rice	T ₁	13.5 a	40.6 b	110.8 a	114.1 c	12.8 a
		T ₂	14.0 a	48.8 a	112.4 a	130.1 ab	12.3 a
		T ₃	14.4 a	51.4 a	120.9 a	135.0 a	13.2 a
		T ₄	11.2 b	49.4 a	117.8 a	131.5 ab	13.5 a
		T ₅	11.0 b	40.7 b	111.9 a	120.5 bc	12.0 a
		CK	9.1 b	22.2 c	72.1 b	94.2 d	14.2 a
		平均值 Average	12.7	42.2	107.7	120.9	13.0
	晚稻 Late rice	T ₁	42.4 a	67.4 b	81.9 bc	97.7 b	9.3 a
		T ₂	34.5 b	74.9 b	97.5 a	116.0 a	8.9 ab
		T ₃	30.2 bc	86.2 a	98.0 a	119.4 a	9.1 ab
		T ₄	27.3 c	74.1 b	99.3 a	116.0 a	8.8 ab
		T ₅	25.4 c	67.9 b	91.9 ab	112.7 a	8.3 b
		CK	18.0 d	49.6 c	69.3 c	89.8 b	8.3 b
		平均值 Average	29.6	70.0	90.0	108.6	8.8



柱上不同小写字母代表处理间在 5% 水平上差异显著 (LSD)。图中数值为平均值 ± 标准误 ($n=3$)。

Different small letters above the bars mean significant difference among treatments at 5% level (LSD). Data in the figure are Mean ± SE ($n=3$).

图2 不同施肥处理下机插双季稻土壤碱解氮含量

Fig. 2. Soil alkali-hydrolyzable N content of machine-transplanted double-cropping rice under different fertilization treatments.

差异不显著;且随着施 N 量的降低,呈下降趋势。说明机插侧深一次性施肥定位、定量、均匀,虽然较农民习惯施肥降低施肥用量,但能有效提高稻田土壤碱解氮含量,从而提高对植株的 N 素供应,进而实现 N 素的高效利用及土壤 N 素平衡,而过量减 N 施用土壤有效养分含量低。

3 讨论

3.1 机插侧深施肥对水稻养分吸收利用的影响

本研究中,插秧同步精量施肥机采用国内独创的螺杆强制推肥结构,搭载配合插秧机能实现施肥与插秧同步作业,将肥料定量、定点(深度:35~65 mm;侧距:40~80 mm)地深施到秧苗一侧的泥土里,实现作业全程监控。与常规施肥处理相比,机插同步一次性减 N 10%~30% 处理早稻 NRE、NAE、NPFP 分别提高 38.6%~92.7%、49.9%~103.6% 和 29.5%~71.7% (2017), 35.4%~71.4%、46.0%~98.4% 和 20.7%~75.4% (2018); 晚稻 NRE、NAE、NPFP 分别提高 20.8%~43.1%、31.3%~64.2% 和 18.3%~48.5% (2017), 26.8%~99.1%、60.0%~82.9% 和 26.6%~60.5% (2018)。进一步反映深施肥能抑制化肥分解减少化肥损失,同时肥床上部有较厚的覆土层,能减缓化肥分解挥发,保存其肥效,延长化肥肥效。

林玉萍等^[17]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%,但肥料全量侧深施处理后期出现脱肥现象。同时,马增奇等^[18]认为,侧施肥技术可促进水稻前期生育,提高肥料利用率,但免追肥

试验各处理后期出现脱肥现象。这与本研究结果相似,早晚稻抽穗后 N 素积累比例施 N 处理分别为 43.5%~49.8% 和 35.0%~38.1% (2017), 37.9%~46.2% 和 26.6%~33.9% (2018)。

而敖和军等^[19]发现,超级杂交稻在其生育后期(抽穗至成熟)的 N 素吸收量高,有利于充实籽粒,提高结实率和 NHI。一次性全量基施普通 N 肥不能满足水稻生长需要,会造成水稻减产;而基施控释 N 肥能提高群体的有效穗数,改善单株的产量构成结构,显著提高 N 肥利用率,最终提高水稻产量等^[20]。本研究中 2017 年晚稻的增产效果并不理想,可能是后期养分供应不足以及气候变化所致。马昕等^[16]发现,机插侧深施用控释掺混肥能保证水稻整个生育期对氮素的需求,成熟期 N 积累和干物质积累显著增加,增加水稻产量和 N 效率。同时,水稻收获后土壤碱解氮含量显著受施氮量影响,随着施用量的降低而下降。施用控释尿素能有效提高土壤耕层 N 素养分含量^[21]。因此,应重点开展配合侧深施肥控释肥料的研发工作,保障水稻生长后期的养分吸收,进一步提高肥料利用率,实现增产增收。

3.2 精量施肥对水稻养分吸收利用的影响

张满利等^[22]发现,随着 N 肥施用量的增加,水稻吸收 N 素的总量提高, N 素生理利用率、农学利用率、N 肥偏生产力、N 素干物质生产率和 N 素稻谷生产率随之降低。孙永健等^[23]发现,在一定范围内, N、P、K 转运量随施 N 量的增加而提高,但过量施用 N 肥会使养分转运量下降。这与本研究结果相符,水稻机插同步一次性精量施肥随着施 N 量的降低,双季稻 NRE 先增加后降低, NHI、NAE、

NPFP 和 NPE 呈上升趋势。与常规施肥处理相比, 机插同步一次性减 N 10%~30% 处理早稻 N、P、K 积累量分别提高 7.9%~11.7%、9.4%~25.9% 和 2.0%~6.5%(2017), 8.2%~15.0%、8.1%~12.1% 和 14.0%~18.4%(2018); 晚稻 N、P、K 积累量分别提高 0.6%~5.7%、9.1%~14.4% 和 3.7%~19.6%(2017), 6.1%~8.5%、9.4%~19.3% 和 18.7%~22.2%(2018)。因此, 协调产量和 N 肥吸收利用率之间的矛盾, 应在在保证作物产量的前提下, 提高 N 肥利用效率, 同时避免水稻营养体对 N 素的奢侈吸收^[10, 24]。相关性分析表明, 双季稻成熟期 N、P、K 吸收量与产量均呈显著正相关。

谢小兵等^[25]发现, 实时 N 肥处理(早稻 110 kg/hm², 晚稻 140 kg/hm²)下, 机插双季稻群体 N 素利用率、N 吸收率、N 肥偏生产力、N 素转运率、N 素籽粒生产率及 N 收获指数均高于高 N 处理(早稻 176 kg/hm², 晚稻 189 kg/hm²)。杨成林等^[26]发现, 侧深施肥方式减量后寒地水稻 N 素籽粒生产效率、N 素干物质生产效率和 N 肥偏生产力有所提高, 且 N 素农学利用率在减量 5% 后达到最大。白雪等^[15]研究表明, 侧深施肥减氮 25% 水稻增产最高, 增幅达 20.19%。本研究中, 农民习惯施肥处理 N 肥施用量较高, 但机插秧一次性 N 肥适宜减量施用对于水稻籽粒 N 素累积量具有一定的促进作用。N 素施用量较少不能保证后期水稻氮素的充足供应, 导致产量降低^[26]。2017 年早稻氮肥减量 30% 较常规施肥增产 20.2%、晚稻减量 20% 增产 11.1%; 2018 年早晚稻减量 20% 分别增产 11.9% 和 15.0%。因此, 合理的配方施肥用量更有利于养分的吸收利用。

4 结论

机插同步一次性精量施肥(深度: 35~65 mm; 侧距: 40~80 mm)虽然降低施肥用量, 但能为双季稻整个生育期提供比较平衡的养分供应, 促进水稻生长, 有利于 N、P、K 的吸收和积累, 提高 N 肥当季利用效率(NRE、NAE 和 NPFP), 增加植株生物量, 实现增产稳产、节本增效。其中, 以减 N 20%~30% 处理的应用效果最佳。

参考文献:

- [1] 彭少兵, 黄见良, 钟旭华, 杨建昌, 王光火, 邹应斌, 张福锁, 朱庆森, Buresh R, Witt C. 提高中国稻田氮肥利用率的研究策略. 中国农业科学, 2002, 35(9): 1095-1103.
Peng S B, Huang J L, Zhong X H, Yang J C, Wang G H, Zhou Y B, Zhang F S, Zhu Q S, Buresh R, Witt C. Research strategy in improving fertilizer-nitrogen use efficiency of irrigated rice in China. *Sci Agric Sin*, 2002, 35(9): 1095-1103. (in Chinese with English abstract)
- [2] 刘立军, 杨立年, 孙小淋, 王志琴, 杨建昌. 水稻实地氮肥管理的氮肥利用效率及其生理原因. 作物学报, 2009, 35(9): 1672-1680.
Liu L J, Yang L N, Sun X L, Wang Z Q, Yang J C. Fertilizer-nitrogen use efficiency and its physiological mechanism under site-specific nitrogen management in rice. *Acta Agron Sin*, 2009, 35(9): 1672-1680. (in Chinese with English abstract)
- [3] Ju X T, Xing G X, Chen X P, Zhang S L, Zhang L J, Liu, X J, Cui Z L, Yin B, Christie P, Zhu Z L, Zhang F S. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 2009, 106(9): 3041-3046.
- [4] Xu X P, He P, Zhao S C, Qiu S J, Johnston A M, Wei Z. Quantification of yield gap and nutrient use efficiency of irrigated rice in China. *Field Crops Res*, 2016, 186.
- [5] Bodirsky B L, Müller C. Robust relationship between yields and nitrogen inputs indicates three ways to reduce nitrogen pollution. *Environ Res Lett*, 2014, 9(11): 111005.
- [6] 朱德峰, 陈惠哲, 徐一成, 张玉屏. 我国双季稻生产机械化制约因子与发展对策. 中国稻米, 2013, 19(4): 1-4.
Zhu D F, Chen H Z, Xu Y C, Zhang Y P. Mechanization constraints and development counter measures of double cropping rice production in China. *China Rice*, 2013, 19(4): 1-4. (in Chinese with English abstract)
- [7] 邹应斌. 长江流域双季稻栽培技术发展. 中国农业科学, 2011, 44(2): 254-262.
Zou Y B. Development of Cultivation Technology for double cropping rice along the Changjiang River Valley. *Sci Agric Sin*, 2011, 44(2): 254-262. (in Chinese with English abstract)
- [8] 朱德峰, 陈惠哲. 水稻机插秧发展与粮食安全. 中国稻米, 2009, 20(6): 4-7.
Zhu D F, Chen H Z. Development and food security of rice transplanting. *China Rice*, 2009, 20(6): 4-7. (in Chinese with English abstract)
- [9] 张文毅, 袁钊和, 吴崇友, 金梅. 水稻种植机械化进程分析研究——水稻种植机械化由快速向高速发展的进程. 中国农机化, 2011(1): 19-22.
Zhang W Y, Yuan Z H, Wu C Y, Jin M. Analysis and research on the process of rice planting mechanization: The rapid development of rice planting mechanization. *J Chin Agric Mechan*, 2011(1): 19-22. (in Chinese with English abstract)
- [10] 陈佳娜, 曹放波, 谢小兵, 单双吕, 高伟, 李志斌, 黄敏, 邹应斌. 机插条件下低氮密植栽培对“早晚兼用”双季稻产量和氮素吸收利用的影响. 作物学报, 2016, 42(8): 1176-1187.
Chen J N, Cao F B, Xie X B, Dan S L, Gao W, Li Z B, Huang M, Zhou Y B. Effect of low nitrogen rate combined with high plant density on yield and nitrogen use efficiency of machine-transplanted early-late season double cropping rice. *Acta Agron Sin*, 2016, 42(8): 1176-1187.

- 1176-1187. (in Chinese with English abstract)
- [11] 毕春辉, 陈长海, 李明金, 吴家安, 张宝库. 浅谈水稻侧深施肥技术. 农业装备技术, 2011, 37(6): 24-25.
Bi C H, Chen C H, Li M J, Wu J A, Zhang B K. Brief discussion on side deep fertilization technology of rice. *Agric Equip & Technol*, 2011, 37(6): 24-25. (in Chinese with English abstract)
- [12] 侯朋福, 薛利祥, 俞映惊, 薛利红, 范立慧, 杨林章. 缓控释肥侧深施对稻田氨挥发排放的控制效果. 环境科学, 2017, 38(12): 5326-5332.
Hou P F, Xue L X, Yu Y J, Xue L H, Fan L H, Yang L Z. Control effect of side deep fertilization with slow-release fertilizer on ammonia volatilization from paddy fields. *Environ Sci*, 2017, 38(12): 5326-5332. (in Chinese with English abstract)
- [13] Alimata B, Fofana B, Sansan Y, Ebenezer S, Robert A, Opoku A. Effect of fertilizer deep placement with urea supergranule on nitrogen use efficiency of irrigated rice in Sourou Valley (Burkina Faso). *Nut Cyc Agroeco*, 2015, 102(1): 79-89.
- [14] 夏艳涛, 吴亚晶. 寒地水稻侧深施肥技术研究. 北方水稻, 2014(1): 30-32.
Xia Y T, Wu Y J. Study on side deep fertilizing of rice in cold area. *North Rice*, 2014(1): 30-32. (in Chinese)
- [15] 白雪, 郑桂萍, 王宏宇, 潘世驹, 蔡永胜, 王安东. 寒地水稻侧深施肥效果的研究. 黑龙江农业科学, 2014(6): 40-43.
Bai X, Zheng G P, Wang H Y, Pan S X, Cai Y S, Wang A D. Study on the effect of deep lateral fertilization on rice in cold region. *Heilongjiang Agric Sci*, 2014(6): 40-43. (in Chinese)
- [16] 马昕, 杨艳明, 刘智蕾, 孙彦坤, 于彩莲, 彭显龙. 机械侧深施控释掺混肥提高寒地水稻的产量和效益. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(4): 1095-1103.
Ma X, Yang Y M, Liu Z L, Sun Y K, Yu C L, Peng X L. Yield increasing effect of mechanical topdressing of polymer-coated urea mixed with compound fertilizer in cold area rice. *J Plant Nutr Fert*, 2017, 23(4): 1095-1103. (in Chinese with English abstract)
- [17] 林玉萍, 聂录, 姜灏, 丁亮. 水稻侧深施肥技术研究. 现代化农业, 2017(3): 19-21.
Lin Y P, Nie L, Jiang H, Ding L. Study on deep side fertilization technology of rice. *Mod Agric*, 2017 (3): 19-21. (in Chinese with English abstract)
- [18] 马增奇, 周成, 刘卫东. 机械式强排侧深施肥技术的应用. 现代化农业, 2017(12): 53-54.
Ma Z G, Zhou C, Liu W D. Application of mechanical strong drainage side deep fertilization technology. *Mod Agric*, 2017(12): 53-54. (in Chinese)
- [19] 敖和军, 王淑红, 邹应斌, 彭少兵, 程兆伟, 刘武, 唐启源. 不同施肥水平下超级杂交稻对氮、磷、钾的吸收累积. 中国农业科学, 2008(10): 3123-3132.
Ao H J, Wang S H, Zou Y B, Peng S B, Chen Z W, Liu W, Tang Q Y. Characteristics of nutrient uptake and utilization of super hybrid rice under different fertilizer application rates. *Sci Agric Sin*, 2008, 41(10): 3123-3132. (in Chinese with English abstract)
- [20] 袁嫚嫚, 叶舒娅, 刘枫, 李敏, 吴学忠. 氮肥施用方法对水稻产量和氮肥利用率的影响. 河北农业科学, 2011, 15(3): 39-41.
Yuan W W, Ye S Y, Liu F, Li M, Wu X Z. Effects of nitrogen application methods on rice yield and nitrogen fertilizer utilization. *J Hebei Agric Sci*, 2011, 15(3): 39-41. (in Chinese with English abstract)
- [21] 黄巧义, 唐拴虎, 张发宝, 张木, 黄旭, 黄建凤, 李苹, 付弘婷. 减氮配施控释尿素对水稻产量和氮肥利用的影响. 中国生态农业学报, 2017, 25(6): 829-838.
Huang Q Y, Tang S H, Zhang F B, Zhang M, Huang X, Huang J F, Li P, Fu H T. Effect of combined application of controlled-release urea and conventional urea under reduced N rate on yield and N utilization efficiency of rice. *Chin J Eco-Agric*, 2017, 25(6): 829-838. (in Chinese with English abstract)
- [22] 张满利, 陈盈, 隋国民, 侯守贵, 于广星, 李海波, 王有芬, 吴凯. 氮肥对水稻产量和氮肥利用率的影响. 中国农学通报, 2010, 26(13): 230-234.
Zhang M L, Chen Y, Sui G M, Hou S G, Yu G X, Li H B, Wang Y F, Wu K. Effect of N fertilizer on the yield and nitrogen use efficiency in rice. *Chin Agric Sci Bull*, 2010, 26(13): 230-234. (in Chinese with English abstract)
- [23] 孙永健, 孙园园, 李旭毅, 张荣萍, 郭翔, 马均. 水氮互作对水稻氮磷钾吸收、转运及分配的影响. 作物学报, 2010, 36(4): 655-664.
Sun Y J, Sun Y Y, Li X Y, Zhang R P, Guo X, Ma J. Effects of water-nitrogen interaction on absorption, translocation and distribution of nitrogen, phosphorus, and potassium in rice. *Acta Agron Sin*, 2010, 36(4): 655-664. (in Chinese with English abstract)
- [24] 王海月, 李玥, 孙永健, 李应洪, 蒋明金, 王春雨, 赵建红, 孙园园, 徐徽, 严奉君, 马均. 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. 中国水稻科学, 2017, 31(1): 50-64.
Wang H Y, Li Y, Sun Y J, Li Y H, Jiang M J, Wang C Y, Zhao J H, Sun Y Y, Xu H, Yan F J, Ma J. Effects of slow-release urea on nitrogen utilization and yield in mechanically-trans-planted rice under different nitrogen application rates. *Chin Rice Sci*, 2017, 31(1): 50-64. (in Chinese with English abstract)
- [25] 谢小兵, 周雪峰, 蒋鹏, 陈佳娜, 张瑞春, 伍丹丹, 曹放波, 单双吕, 黄敏, 邹应斌. 低氮密植栽培对超级稻产量和氮素利用率的影响. 作物学报, 2015, 41(10): 1591-1602.
Xie X B, Zhou X F, Jiang P, Chen J N, Zhang R C, Wu D D, Cao F B, Shan S L, Huang M, Zhou Y B. Effect of low nitrogen rate combined with high plant density on grain yield and nitrogen use efficiency in super rice. *Acta Agron Sin*, 2015, 41(10): 1591-1602. (in Chinese with English abstract)
- [26] 杨成林, 王丽妍, 赵红玉. 侧深施肥对寒地水稻产量及肥料利用率的影响. 广东农业科学, 2017, 44(8): 61-65.
Yang C L, Wang L Y, Zhao H Y. Effects of different application rates of side deep fertilization on yield and fertilizer use efficiency of rice in cold region. *Guangdong Agric Sci*, 2017, 44(8): 61-65. (in Chinese)