

机插秧同步侧深施肥对水稻产量形成及经济效益的影响

叶鑫, 宫亮*, 金丹丹, 牛世伟, 王娜, 徐嘉翼, 张鑫, 隋世江
(辽宁省农业科学院植物营养与环境资源研究所, 辽宁沈阳 110161)

摘要:【目的】为研究水稻机插秧同步侧深施肥技术节肥增产增效的作用, 改进水稻生产的养分管理方式。【方法】2019 年和 2020 年分别在盘锦和辽阳开展大田试验, 采用完全随机区组试验设计, 设置不施氮肥、农民习惯施肥、侧深施减氮肥等处理, 测定水稻产量及其构成因素、分析氮素利用效率和经济效益。【结果】盘锦和辽阳不同年份机插秧同步侧深施肥技术对水稻产量及经济效益的影响一致, 施氮量分别比当地习惯施肥降低 17.08% 和 17.09%, 仍可获得最高(目标)产量, 经济效益分别增加了 1232~1440 元 hm^{-2} 和 581~799 元 hm^{-2} , 处理间差异达到显著水平。减少氮肥用量后仍能获得较高产量, 水稻氮肥吸收利用率(NRE)、氮肥农学效率(NAE)和偏生产力(NPFP)显著提高, 与当地习惯施肥相比盘锦和辽阳减施氮肥处理 NRE 分别提高 8.41~21.19% 和 10.44~15.77%, NAE 分别增加 2.23~3.57 kg kg^{-1} 和 0.10~2.23 kg kg^{-1} , NPFP 也显著高于当地习惯施肥。【结论】在水稻稳产条件下, 与当地习惯施肥相比, 机插秧同步侧深施肥能够减少约 17% 氮肥用量, 降低人工成本 600 元 hm^{-2} , 节约肥料投入成本 3.16%~4.53%, 经济效益增加 556~1370 元 hm^{-2} 。

关键词: 侧深施肥; 氮肥减施; 氮肥利用率; 节本增效

中图分类号: S318 文献标识码: A 文章编号: 0564-3945(2022)02-0429-09

DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2021072501

叶鑫, 宫亮, 金丹丹, 牛世伟, 王娜, 徐嘉翼, 张鑫, 隋世江. 机插秧同步侧深施肥对水稻产量形成及经济效益的影响[J]. 土壤通报, 2022, 53(2): 429-437

YE Xin, GONG Liang, JIN Dan-dan, NIU Shi-wei, WANG Na, XU Jia-yi, ZHANG Xin, SUI Shi-jiang. Effects of Simultaneous Lateral Deep Fertilization with Mechanical Transplanting on Yield and Economic Benefit of Rice in Northern China[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2022, 53(2): 429-437

【研究意义】我国水稻种植面积约 3000 万 hm^2 , 稻谷年产量超过 2 亿 t, 占粮食总产量的 1/3, 对保障我国口粮供应具有重要意义。目前, 我国大部分水稻主产区农民习惯施肥仍以基肥加追肥为主^[1], 通常为人工表施、浅施或简易机械抛洒地表, 再结合整地全层混拌于 0~12 cm 耕层^[2-3], 传统的水稻人工栽培方法基肥施用与插秧并不同步进行, 施肥成本高, 施肥量过大, 肥料均匀度差, 增加了稻田氮磷养分损失风险^[4-5], 导致资源浪费并加剧环境污染。因此, 改进水稻生产的基肥施用方式, 提高机械化水平, 是推进水稻全程机械化种植的关键环节^[6]。

【前人研究进展】水稻机插秧同步侧深施肥技术 2018 年被我国农业农村部确定为十项重大引领性农业技术之一, 已经成为实现精准农业目标的关键环节之一^[7], 是众多学者研究的热点^[8-10]。水稻侧深施

肥技术可将养分精确送达根区, 减少肥料氮损失^[1,11], 促进水稻早生快发, 提高氮肥利用率和稻谷产量^[12-13], 符合水稻产业“高产、优质、高效、生态、安全”的发展要求^[14-15], 是一种资源节约和环境友好的施肥技术^[16-17]。研究机械侧深施缓释氮肥可以减少氮素淋失和挥发损失, 提高根区土壤供氮能力^[18-19], 增加有效穗数和颖花总量^[20], 增加稻谷产量和经济效益^[21-22]。侧深施肥技术由于具有减少氮素损失的特点, 在减少氮肥投入方面也受到了关注^[23-25]。白雪等^[26]研究表明, 机插秧同步侧深施肥减氮 25% 水稻增产最高, 增幅达 20.19%。钟雪梅^[27]等研究认为, 机插同步一次性精量施肥以减氮 20%~30% 增产效果最佳。怀燕^[28]等对常规复合肥减量 10% 或缓释肥减量 20% 侧深施, 都实现了减氮稳产。张爱平^[11]等采用基于缓释肥的侧条施肥技术, 在氮素投入降低约 40% 的条

收稿日期: 2021-08-09; 修订日期: 2022-01-05

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFD0200200)

作者简介: 叶鑫(1979-), 男, 辽宁沈阳人, 本科, 助理研究员, 主要从事土壤肥料研究和农业推广工作。E-mail: yearxin@163.com

*通讯作者: E-mail: gongliang1900@sina.com

件下实现了稳产。但也有研究指出^[29], 即使应用侧深施肥技术, 氮肥减量超过 5% 也不能保证水稻生长发育后期氮素的充足供应, 导致产量降低, 基肥侧深同施或者肥料全量侧深施, 水稻生育后期出现脱肥现象^[30]。【本研究切入点】已有的研究在侧深施肥技术配合氮肥减量处理对水稻产量影响方面虽然做了大量研究, 但对于氮肥减施的定量存在争议。由于水稻品种、土壤类型及环境条件等因素差异, 水稻机插秧同步侧深施肥技术对氮肥减施作用尚不明确, 其节本增效的作用也有待进一步研究。【拟解决的问题】本研究以新型稳定性肥料为氮源, 基于不同目标产量的两个地区开展水稻机械插秧同步侧深施肥研究, 以期明确应用该技术适宜的基肥氮素用量, 探讨其节肥和机械化作业对水稻生产经济效益的影响, 为加快水稻机插秧同步侧深施肥技术推广提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 供试材料

为了探讨不同土壤肥力、产量水平和气候类型条件下侧深施肥技术应用效果, 分别选择两个地点开展试验。2019 年试验地点为辽阳县宜林农场 (123°15'36"N, 41°21'00"E), 试验地位于辽河平原中部, 属暖温带季风气候, 年平均气温 8.4 °C, 年均降雨量为 700 mm, 无霜期 127 ~ 162 d。土壤类型为草甸型水稻土, 0 ~ 20 cm 土壤 pH 6.4, 有机质 22.10 g kg⁻¹, 全氮 1.27 g kg⁻¹, 全磷 1.20 g kg⁻¹, 全钾 22.0 g kg⁻¹, 速效氮 111 mg kg⁻¹, 有效磷 45.0 mg kg⁻¹, 速效钾 182 mg kg⁻¹。水稻多年平均产量 9.0 t hm⁻²。

2020 年试验地点为盘山县航程农场 (122°14'17"N, 41°9'31"E); 该试验地位于辽河平原南部, 属暖温带半湿润季风气候, 年平均气温 8.3 °C, 年平均降雨量为 610 mm, 无霜期 165 ~ 170 d。土壤类型为盐渍型水稻土, 0 ~ 20 cm 土壤 pH 7.5, 有机质 23.68 g kg⁻¹, 全氮 1.41 g kg⁻¹, 全磷 1.17 g kg⁻¹, 全钾 23.2 g kg⁻¹, 速效氮 115 mg kg⁻¹, 有效磷 24.3 mg kg⁻¹, 速效钾 225 mg kg⁻¹。水稻多年平均产量 10.5 t hm⁻²。

1.2 试验设计

根据两个试验地点土壤肥力差异、目标产量及氮肥减施目标, 设置不同的氮肥施用水平。辽阳试验设置 6 个处理, 盘锦试验设置 7 个处理, 如表 1 所示。其中, CK 为不施氮肥处理, FP 为农民习惯

施肥处理, T1-T5 为机插秧同步侧深施肥处理的不同氮肥用量水平。辽阳复合肥含 N 26%、P₂O₅ 10% 和 K₂O 12%, 盘锦复合肥含 N 28%、P₂O₅ 10% 和 K₂O 12%。其他所用肥料均一致, 磷酸二铵含 N 18%、P₂O₅ 46%, 过磷酸钙含 P₂O₅ 12%, 氯化钾含 K₂O 60%, 稳定性肥料含 N 26%、P₂O₅ 10% 和 K₂O 12%。试验小区面积 600 m², 三次重复, 随机区组排列。辽阳水稻品种为辽粳 212, 插秧密度 30 cm × 13.5 cm。盘锦品种为盐丰 47, 插秧密度 30 cm × 16.5 cm。两个试验地点均选择洋马 2FC-6 型水稻侧深施肥机, 于 5 月下旬插秧, 10 月上旬收获, 其他田间管理与农民习惯一致。

1.3 测定项目及方法

干物质积累: 在成熟期各处理按平均分蘖数随机选取代表性植株 10 穴, 分叶、茎 (含叶鞘) 和穗三部分杀青 (105 °C 烘 30 min), 80 °C 烘干至恒重, 称重。

植株氮含量: 分叶、茎 (含叶鞘) 和籽粒三部分, 采用浓 H₂SO₄ + H₂O₂ 消煮 (420 °C, 消解 2 h), 全自动凯氏定氮仪 (FOSS8400) 测定。

考种与测产: 收获前每个处理随机取 10 穴代表性植株, 调查有效分蘖和每穗粒数、每穗实粒数、千粒重等产量构成指标; 采用机械实收法对每个处理进行测产, 用测水仪测定籽粒含水量, 按 14.5% 粳稻标准水折算实际产量,

1.4 数据处理

采用 Microsoft excel 2003 进行图标处理, SPSS19 进行方差分析和通径分析。

氮肥吸收利用率 (NRE, %) = (成熟期施氮区地上部氮素积累量 - 成熟期无氮区地上部氮素积累量) / 施氮量 × 100%;

氮肥农学效率 (NAE, kg kg⁻¹) = (施氮区籽粒产量 - 无氮区籽粒产量) / 施氮量

氮肥偏生产力 (NPFP, kg kg⁻¹) = 施氮区籽粒产量 / 施氮量

氮素稻谷生产效率 (kg kg⁻¹) = 籽粒产量 / 成熟期地上部氮素积累量

氮素干物质生产效率 (kg kg⁻¹) = 成熟期地上部干物质积累量 / 成熟期地上部氮素积累量

氮素生理利用效率 (kg kg⁻¹) = (施氮区稻谷产量 - 无氮区稻谷产量) / (施氮区氮吸收总量 - 无氮区氮吸收总量)

表 1 试验方案
Table 1 Experimental design

地点 Place	处理 Treatment	施肥量 (kg hm ⁻²) Fertilizer amount			肥料施用方式 Fertilizing method
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	
辽阳	CK	0	67.5	81	机插秧。过磷酸钙562.5 kg hm ⁻² 和氯化钾135 kg hm ⁻² , 全部基施, 均匀撒施地表后混拌于0~15 cm耕层
	FP	251	67.5	81	机插秧。复合肥675 kg hm ⁻² , 基施, 均匀撒施整地混拌于0~15 cm耕层; 返青肥、分蘖肥各追施氯化铵75 kg hm ⁻² 、225 kg hm ⁻²
	T1	230	67.5	81	机插秧。稳定性肥料675 kg hm ⁻² , 磷酸二铵0 kg hm ⁻² , 氯化钾0 kg hm ⁻² , 与插秧同步混匀侧深基施; 分蘖期追施尿素120 kg hm ⁻²
	T2	214	67.5	81	机插秧。稳定性肥料600 kg hm ⁻² , 磷酸二铵16.2 kg hm ⁻² , 氯化钾15 kg hm ⁻² , 与插秧同步混匀侧深基施; 分蘖期追施尿素120 kg hm ⁻²
	T3	198	67.5	81	机插秧。稳定性肥料525 kg hm ⁻² , 磷酸二铵32.5 kg hm ⁻² , 氯化钾30 kg hm ⁻² , 与插秧同步混匀侧深基施; 分蘖期追施尿素120 kg hm ⁻²
	T4	181	67.5	81	机插秧。稳定性肥料450 kg hm ⁻² , 磷酸二铵49.0 kg hm ⁻² , 氯化钾45 kg hm ⁻² , 与插秧同步混匀侧深基施; 分蘖期追施尿素120 kg hm ⁻²
盘锦	CK	0	67.5	81	机插秧。过磷酸钙562.5 kg hm ⁻² 和氯化钾135 kg hm ⁻² , 全部基施, 均匀撒施地表后混拌于0~15 cm耕层
	FP	264	67.5	81	机插秧。复合肥675 kg hm ⁻² , 基施, 均匀撒施整地混拌于0~15 cm耕层; 返青肥、分蘖肥各追施氯化铵75 kg hm ⁻² 、225 kg hm ⁻²
	T1	245	67.5	81	机插秧。稳定性肥料675 kg hm ⁻² , 磷酸二铵0 kg hm ⁻² , 氯化钾0 kg hm ⁻² , 与插秧同步混匀侧深基施; 分蘖期追施尿素150 kg hm ⁻²
	T2	237	67.5	81	机插秧。稳定性肥料640 kg hm ⁻² , 磷酸二铵7.5 kg hm ⁻² , 氯化钾7 kg hm ⁻² , 与插秧同步混匀侧深基施; 分蘖期追施尿素150 kg hm ⁻²
	T3	217	67.5	81	机插秧。稳定性肥料550 kg hm ⁻² , 磷酸二铵27 kg hm ⁻² , 氯化钾25 kg hm ⁻² , 与插秧同步混匀侧深基施; 分蘖期追施尿素150 kg hm ⁻²
	T4	204	67.5	81	机插秧。稳定性肥料490 kg hm ⁻² , 磷酸二铵40 kg hm ⁻² , 氯化钾37 kg hm ⁻² , 与插秧同步混匀侧深基施; 分蘖期追施尿素150 kg hm ⁻²
	T5	186	67.5	81	机插秧。稳定性肥料410 kg hm ⁻² , 磷酸二铵57.5 kg hm ⁻² , 氯化钾53 kg hm ⁻² , 与插秧同步混匀侧深基施; 分蘖期追施尿素150 kg hm ⁻²

氮收获指数 (%) = 成熟期籽粒氮素积累量/成熟期植株氮素积累量

2 结果与分析

2.1 侧深施肥对水稻产量构成因素及产量的影响

与农民习惯施肥 (FP) 相比, 盘锦试验点机插秧同步侧深施肥处理 T1 和 T2 有效穗数与产量均略

有增加, 但减氮超过 23% 的 T4 和 T5 产量则显著下降。与常规施肥 FP 相比, 侧深施肥对穗粒数和实粒数无显著影响, 结实率与千粒重则略有增加。辽阳试验点机插秧同步侧深施肥处理的 T1 与 T2 对产量及产量构成因素指标均无显著影响, 在氮肥减量达 21% 的 T3 和 T4 产量表现出下降 (表 2)。

表 2 机械侧深施氮对水稻产量及其构成因素及的影响
Table 2 Effects of mechanized side deep placement of nitrogen fertilizer on yield and the yield components of rice

地点 Place	处理 Treatment	有效穗数(10 ⁴ hm ⁻²) Number of effective panicle	穗粒数 Number of grain panicle	实粒数 Number of filled grain panicle	结实率(%) Setting rate	千粒重(g) 1000-seed weight	产量(t hm ⁻²) Yield
盘锦	CK	191.2 ± 10.2 d	89.2 ± 8.9 b	83.4 ± 7.9 b	93.5 ± 0.5 a	27.9 ± 0.3 a	4.4 ± 0.29 d
	FP	402.4 ± 7.7 a	121.7 ± 1.4 a	107.0 ± 1.4 a	87.9 ± 0.1 d	26.0 ± 0.3 d	11.2 ± 0.20 a
	T1	413.5 ± 6.7 a	120.5 ± 0.7 a	105.0 ± 0.6 a	88.1 ± 0.3 d	26.5 ± 0.1 c	11.5 ± 0.06 a
	T2	406.9 ± 3.6 a	119.7 ± 2.1 a	105.1 ± 1.6 a	91.6 ± 0.5 b	26.4 ± 0.1 c	11.4 ± 0.06 a
	T3	398.0 ± 10.2 a	120.0 ± 1.4 a	105.4 ± 2.6 a	89.5 ± 1.1 c	26.2 ± 0.4 cd	11.1 ± 0.06 a
	T4	340.1 ± 6.7 b	115.2 ± 5.0 a	105.3 ± 4.6 a	92.7 ± 0.4 a	26.3 ± 0.1 cd	9.6 ± 0.35 b
	T5	300.2 ± 11.6 c	113.6 ± 4.0 a	106.1 ± 4.4 a	93.4 ± 0.6 a	26.8 ± 0.1 b	8.3 ± 0.15 c
辽阳	CK	217.0 ± 4.5 d	112.0 ± 3.0 c	106.7 ± 1.5 c	92.9 ± 0.2 a	27.23 ± 0.10 a	6.13 ± 0.03 d
	FP	395.6 ± 6.8 a	137.3 ± 0.5 a	119.3 ± 1.5 b	86.9 ± 0.8 c	24.48 ± 0.03 d	9.21 ± 0.04 a
	T1	400.5 ± 6.1 a	138.0 ± 0.1 a	123.3 ± 1.5 a	89.4 ± 1.1 b	24.53 ± 0.03 cd	9.23 ± 0.07 a
	T2	399.3 ± 2.8 a	135.7 ± 0.6 a	122.3 ± 1.5 ab	90.2 ± 1.1 b	24.56 ± 0.02 cd	9.23 ± 0.04 a
	T3	381.0 ± 4.8 b	126.3 ± 1.5 b	123.6 ± 0.5 a	93.4 ± 1.1 a	24.59 ± 0.03 c	8.88 ± 0.09 b
	T4	366.5 ± 5.3 c	125.0 ± 1.0 b	123.6 ± 2.1 a	92.0 ± 0.8 a	25.11 ± 0.06 b	8.31 ± 0.14 c

2.2 水稻产量构成因素通径分析

盘锦和辽阳两个试验点产量与产量构成因素间的回归方程分别为 $Y = -25.13067 + 0.02759X_1 + 0.06581X_2 + 0.07995X_3 + 0.39112X_4$, $F = 6811.32$, $P < 0.001$, 和 $Y = 24.51471 + 0.00416X_1 + 0.01927X_2 - 0.00204X_3 - 0.79155X_4$, $F = 65.00$, $P < 0.001$; 两式中的 Y 为水稻产量, X_1 、 X_2 、 X_3 和 X_4 分别为有效穗数、穗粒数、结实率和千粒重。由回归分析结果可知, 对水稻产量与产量构成因素间关系做通径分

析均有意义。通径分析结果表明(表3), 盘锦和辽阳两个试验水稻产量构成因素直接通径系数分别为: 有效穗数 > 穗粒数 > 结实率 > 千粒重和有效穗数 > 穗粒数 > 千粒重 > 结实率, 而有效穗数、穗粒数与水稻产量呈显著正相关, 结实率和千粒重则与水稻产量呈负相关, 这说明机插秧侧深施肥技术主要是在保证有效穗数和穗粒数稳定的前提下, 通过提高结实率和千粒重来获得稳定的产量。

表 3 水稻产量构成因素对产量的通径分析
Table 3 Path analysis of yield components to yield

地点 Place	产量构成因素 Yield component	有效穗数 Number of effective panicles	穗粒数 Number of grain panicles	结实率 Setting rate	千粒重 1000-seed weight	产量 Yield
盘锦	有效穗数	0.9889**	0.2248**	-0.1817**	-0.0440	0.9880**
	穗粒数	0.6896**	0.3223**	-0.1939**	-0.0589	0.7592**
	结实率	-0.7684**	-0.2673**	0.2338**	0.0389**	-0.7630**
	千粒重	-0.4370	-0.1904	0.0913**	0.0996	-0.4365*
辽阳	有效穗数	0.1692**	0.2928**	0.0081	0.4519**	0.9220**
	穗粒数	0.1535**	0.3227**	0.0117	0.4012**	0.8891**
	结实率	-0.0952	-0.2622	-0.0144**	-0.2521**	-0.6238*
	千粒重	-0.1393**	-0.2359**	-0.0066**	-0.5489	-0.9307**

注: x_1 : 有效穗数, x_2 : 穗粒数, x_3 : 结实率, x_4 : 千粒重。**: 极显著相关。*: 显著相关。

2.3 施氮量与水稻产量的相关性分析

由表1可知, 盘锦和辽阳两个试验地点应用水稻机插秧同步侧深施肥技术, 在一定范围内减少氮肥用量, 水稻产量无显著变化, 因此以“线性加平台”对施氮量和水稻产量关系进行拟合得图1。从图中可

知, 盘锦(图1-a)和辽阳(图1-b)两个试验地点施氮量分别达到 218.9 kg hm^{-2} 和 208.1 kg hm^{-2} 时, 即可获得与 FP 处理相近的产量, 较 FP 处理分别降低氮肥用量 17.08% 和 17.09%。

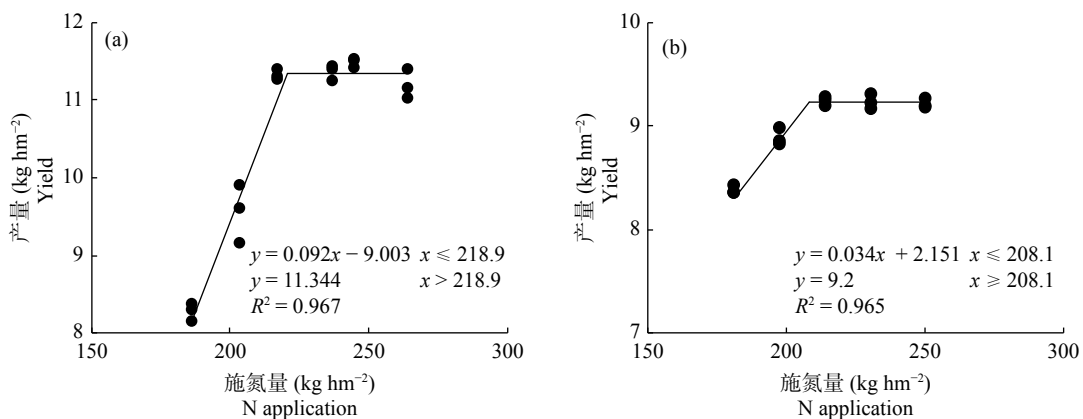


图 1 施氮量与水稻产量的关系

Fig.1 Relationship between nitrogen application rate and rice yield

2.4 不同施肥处理对氮肥利用率的影响

机插秧同步侧深施肥能够显著影响水稻氮素利用(表4)。与人工撒施基肥相比, 盘锦试验区 T1-T5 处理氮肥吸收利用率(NRE)、氮肥农学效率(NAE)和偏生产力(NPFP)呈现先增加后降低的

趋势。其中, T1-T4 处理 NRE 增加了 8.41%~21.2%, T1-T3 处理 NAE 增加了 2.23~3.57 kg kg^{-1} , 差异均达到显著水平; 偏生产力(NPFP)虽然随着施氮量的降低有所下降, 但仍显著高于 FP 处理。辽阳试验点 T1-T4 处理 NRE 增加了 10.4%~15.8%, T1-T3 处

理 NAE 增加了 0.10 ~ 2.23 kg kg⁻¹, NFPF 提高了 3.24 ~ 9.46 kg kg⁻¹, 均显著高于 FP。两个试验点侧深施肥处理的氮素稻谷生产效率和干物质生产效率均随着施氮量的降低呈逐渐下降趋势, 盘锦试验点的 T5 处理虽高于其他侧深施肥处理, 但仍显著低于 FP 处理; 氮素生理利用率随着施氮量的降低呈现逐

渐降低的趋势, 与 FP 相比, 盘锦试验点 T1 和 T2 分别增加了 1.37 kg kg⁻¹ 和 0.88 kg kg⁻¹, 辽阳试验点 T1-T3 分别增加了 2.54 kg kg⁻¹、1.99 kg kg⁻¹ 和 0.86 kg kg⁻¹, 差异均达到显著水平。两个试验点 T2 处理氮收获指数显著高于 FP, 其他处理低于 FP 处理, 但未达到显著水平。

表 4 机械侧深施氮对水稻氮素利用率的影响

Table 4 Effects of mechanized side deep placement of nitrogen fertilizer on nitrogen utilization efficiency of rice

地点 Place	处理 Treatment	氮肥吸收 利用率 N recovery efficiency (%)	氮肥农学 效率 N agronomic efficiency (kg kg ⁻¹)	氮肥偏 生产力 N partial factor productivity (kg kg ⁻¹)	氮素稻谷 生产效率 N grain production efficiency (kg kg ⁻¹)	氮素干物质 生产效率 N biomass production efficiency (kg kg ⁻¹)	氮素生理 利用率 N physiological efficiency	氮收获 指数 N harvest index (%)
盘锦	FP	27.76 ± 1.06 d	13.85 ± 0.58 b	42.42 ± 0.71 d	56.94 ± 0.96 a	50.72 ± 1.03 a	49.87 ± 0.67 cd	69.00 ± 1.15 b
	T1	41.09 ± 1.26 b	16.08 ± 0.18 a	46.87 ± 0.24 b	51.24 ± 0.12 bc	45.50 ± 1.30 b	51.24 ± 0.12 ab	68.65 ± 1.24 b
	T2	42.43 ± 1.52 b	16.11 ± 0.04 a	47.94 ± 0.41 b	50.75 ± 0.85 c	44.81 ± 0.50 b	50.75 ± 0.85 bc	72.70 ± 0.94 a
	T3	48.95 ± 1.50 a	17.42 ± 0.68 a	52.18 ± 0.29 a	49.32 ± 0.77 d	44.15 ± 0.47 bc	49.32 ± 0.77 de	68.02 ± 1.29 cb
	T4	36.17 ± 2.35 c	9.89 ± 1.84 c	46.87 ± 1.85 b	48.49 ± 0.11 d	43.08 ± 0.96 c	48.49 ± 0.11 e	68.55 ± 0.37 b
	T5	19.00 ± 1.70 e	3.94 ± 1.09 d	44.50 ± 0.64 c	52.14 ± 0.68 b	45.16 ± 0.24 b	52.14 ± 0.68 a	66.02 ± 1.55 c
辽阳	FP	25.39 ± 0.91 c	12.27 ± 0.23 c	36.77 ± 0.16 e	56.60 ± 1.05 a	51.38 ± 0.88 a	48.34 ± 0.94 c	68.60 ± 1.25 b
	T1	35.83 ± 1.00 b	13.48 ± 0.38 b	40.01 ± 0.29 d	50.88 ± 0.39 b	46.21 ± 0.29 b	50.88 ± 0.39 a	68.17 ± 0.93 b
	T2	39.47 ± 0.64 a	14.50 ± 0.15 a	43.12 ± 0.19 c	50.33 ± 0.77 bc	45.81 ± 0.68 b	50.33 ± 0.77 ab	72.10 ± 0.86 a
	T3	41.16 ± 1.45 a	13.90 ± 0.50 b	44.96 ± 0.42 b	49.20 ± 0.36 cd	44.39 ± 0.51 c	49.20 ± 0.36 bc	67.86 ± 0.61 b
	T4	40.76 ± 0.90 a	12.37 ± 0.9 c	46.23 ± 0.77 a	48.44 ± 0.35 d	43.17 ± 0.25 d	48.44 ± 0.35 c	68.48 ± 0.24 b

2.5 不同施肥处理经济效益分析

与农民习惯施肥相比, 盘锦试验点 T1-T3 处理肥料成本分别降低了 0 元 hm⁻²、99 元 hm⁻² 和 352 元 hm⁻², 人工成本降低了 600 元 hm⁻², 农机投入增加了 25 元 hm⁻²; 经济产值增加了 840 元 hm⁻²、560 元 hm⁻² 和 280 元 hm⁻², 差异未达到显著水平; 经济效益增加了 1370 元 hm⁻²、1133 元 hm⁻² 和 1279 元 hm⁻², 差异达到显著水平。辽阳试验点 T1 处理肥料成本增加了 75 元 hm⁻², T2 处理由于减少的肥料用量, 肥料成本降低了 557 元 hm⁻², 人工成本降低了 600 元 hm⁻², 农机投入增加了 25 元 hm⁻²; T1 和 T2 经济产值增加了 56 元 hm⁻² 和 63 元 hm⁻², 差异未达到显著水平; T1-T2 经济效益显著增加了 556 元 hm⁻²、774 元 hm⁻² (表 5)。

3 讨论

3.1 机插秧同步侧深施肥对水稻产量的影响

侧深施肥在水稻种植上应用的研究报道较多, 但其增产效果存在差异。本研究基于辽河平原典型稻作区 2 个试验地点盘锦和辽阳的研究结果表明, 机插秧同步侧深施肥可以保障水稻稳产。前人研究显示, 同等施肥量条件下侧深施肥具有显著增产效

果^[8,26,31-32], 但也有稳产^[28, 3-35]、减产^[8]或后期脱肥^[27-30]的研究结论。降低肥料用量后稳产^[11-12,16-17]、增产^[29-36]和减产^[2]的结果也均有报道。这可能与水稻品种^[13,27]、肥料种类^[2,23,29]、土壤肥力、农机类型^[36]和气候条件^[1]等因素有关^[37]。盘锦和辽阳两个试验地点 T1 和 T2 处理水稻有效穗数均有所增加, 这与前人关于机插秧同步侧深施肥技术增产机理的研究结论一致, 即根区施肥能提高水稻生育前期的供氮能力^[1], 有利于水稻返青, 促进分蘖早生快发^[13], 显著提高水稻有效穗数^[1,3,6,20-21,26,32], 穗粒数也有所增加^[11,16,23], 进而提高稻谷产量。机插秧同步侧深施肥技术降低了氮肥用量, 减少追肥次数, 依然能够获得较高的有效穗数, 说明其具有增加有效穗数的作用。同步侧深施肥技术可以显著增加水稻根区土层中碱解氮、有效磷和速效钾含量^[38], 改善水稻群体质量, 增加单位面积穗数和每穗实粒数^[39], 改善稻米的外观品质和食味品质^[40], 提高氮肥利用率, 增加产量^[25-27]。

3.2 机插秧同步侧深施肥对氮肥利用率及氮肥减施空间的影响

本研究结果表明, 机插秧同步侧深施肥配合化肥减量可显著提高氮肥吸收利用率 (盘锦增加

表 5 机械侧深施氮对经济效益的影响
Table 5 Effect of deep nitrogen application by mechanical side on economic benefit

地点 Place	处理 Treatment	经济产值 Output (yuan hm ⁻²)	肥料成本 Fertilizer cost (yuan hm ⁻²)	人工投入 Labor cost (yuan hm ⁻²)	农机投入 Machining cost (yuan hm ⁻²)	经济效益 Economic profit (yuan hm ⁻²)	产投比 Output/Input
盘锦	FP	31536 ± 526.8 a	3135	900	1950	25369 ± 527 b	4.24 ± 0.08 d
	T1	32149 ± 163.1 a	3135	300	1975	26739 ± 163 a	4.94 ± 0.03 b
	T2	31814 ± 273.9 a	3036	300	1975	26502 ± 274 a	4.99 ± 0.05 b
	T3	31706 ± 176.3 a	2783	300	1975	26648 ± 177 a	5.27 ± 0.04 a
	T4	26772 ± 1055.2 b	2614	300	1975	21883 ± 1055 c	4.48 ± 0.22 c
	T5	23174 ± 334.6 c	2390	300	1975	18509 ± 334 d	3.97 ± 0.07 e
辽阳	FP	25788 ± 111.1 a	3000	900	1800	20088 ± 111 b	3.53 ± 0.02 d
	T1	25844 ± 189.4 a	3075	300	1825	20644 ± 189 a	3.97 ± 0.04 c
	T2	25851 ± 116.9 a	2864	300	1825	20862 ± 116 a	4.18 ± 0.03 ab
	T3	24871 ± 234.2 b	2653	300	1825	20093 ± 234 b	4.21 ± 0.05 a
	T4	23247 ± 393.4 c	2443	300	1825	18679 ± 393 c	4.09 ± 0.09 b

注：普通复合肥 4.2 元 kg⁻¹（盘锦）、4.0 元 kg⁻¹（辽阳），稳定性肥料 4.2 元 kg⁻¹，氯化铵 1 元 kg⁻¹，尿素 2 元 kg⁻¹，磷酸二铵 4 元 kg⁻¹，氯化钾 2.6 元 kg⁻¹，人工撒施底肥 300 元 hm⁻²，人工追肥每次 300 元 hm⁻²，农机整地 900 元 hm⁻²，农机插秧及补苗 900 元 hm⁻²（辽阳），农机插秧及补苗 1050 元 hm⁻²（盘锦），侧深施肥装置折旧 25 元 hm⁻²。

8.41%~21.2%；辽阳增加 10.4%~15.8%）、氮肥农学效率（NAE）和偏生产力（NFPF），这与前人研究结果一致。机插秧同步侧深施肥在同等氮肥用量^[6]或减少氮肥用量^[8]的条件下，均能提高氮肥利用率。其原因为该技术将养分精确送达根区，减少了氮素损失^[17]，提高土壤供氮能力^[20]，促进了稻株氮素吸收和积累^[27]，增加或降低土壤氮代谢酶活性，促进氮代谢微生物的生长，提高灌浆结实期茎叶氮素表观转移量^[9]，从而提高了氮肥利用率^[1,11,27,31]。控释肥与侧深施肥技术结合可以更有效地降低稻田氮素流失量^[41-42]，提高氮肥利用率^[6,17,20,23]。这为机插秧同步侧深施肥化肥用量减施提供了可能。本试验条件下的盘锦和辽阳两地试验结果均显示，氮肥减施约 17% 水稻产量并无显著下降，这表明侧深施肥配合化肥合理减量能够实现少量增产或稳产。这与前人侧深施肥的减施空间研究结果一致。洪瑜等^[34]基于养分专家系统调整了基肥养分配比，在减氮 24.85% 并配合减磷增钾的基础上，选择控释尿素替代普通尿素进行机械插秧同步侧深施肥，较常规施肥增产 7.53%，肥料当季吸收利用率和农学效率均显著增加。化肥纯氮减施 10%^[8,13]、20%~30%^[16]或 30%^[33]~40%^[11]仍可以获得稳产或增产均有报道。另外值得注意的是，本研究中化肥减量 18%（盘锦）和 14%（辽阳）时 NAE 和水稻产量均开始下降。王晓丹等^[2]在浙江省开展侧深施肥试验示范表明，减氮 10% 处理的增产和减产的比例分别为 85.7% 和 14.3%，减氮 20% 处理的增产和减产的比例分别为 57.1% 和 42.9%。上述氮肥减施空间的差异，可能与当地农民习惯施

肥量、肥料种类、土壤肥力和水稻品种有关。因此，侧深施肥技术应该因地制宜的制定氮素运筹方案，基肥一次性施用或者基肥中氮素减施后，应加强后期氮素管理，协调兼顾氮肥利用率与水稻产量，避免脱肥减产，长期应用此种施肥方式的氮肥减施空间是否发生变化，有待进一步研究。

3.3 机插秧同步侧深施肥对经济效益的影响

本研究中机插秧同步侧深施肥对经济效益的研究结果显示，与农民习惯施肥相比，两个试验地点均可显著节省人工成本实现节本增效。盘锦试验点农民习惯用肥氮含量高于试验用稳定性肥料，两种肥料价格相近，侧深施肥由于减少基肥和追肥用量，T1-T5 处理肥料成本降低了 0~745 元 hm⁻²，辽阳试验点农民习惯用肥养分含量与试验用稳定性肥料相同，价格略低，因此与农民习惯施肥用量相同的 T1 处理肥料成本增加了 75 元 hm⁻²，T2-T4 处理由于减少肥料用量，肥料成本降低了 136~557 元 hm⁻²。这与张玲霞等^[38]研究结果相近。杨成林等^[31]研究认为，机插秧同步侧深施肥作业减少人力投入，能够节约作业成本，但侧深专用肥价格较高，增加了生产成本。因此，应用侧深施肥技术提高经济效益主要依靠产量的显著提高，过量降低肥料用量后，虽然节约了肥料成本，但产量也显著下降，因此纯收益下降。李华等^[24]、沈欣等^[33]和季雅岚^[36]等也得到了相似的结论。本研究除施肥作业外，各处理其他农事操作保持一致，因此只考虑各处理施肥作业成本差异。本试验条件下，由于过量减少氮肥投入会影响产量，因此，只有 T1-T3 处理（盘锦）和 T1-T2 处

理(辽阳)经济产值有所增加,分别增加了 0.54%~1.94% 和 0.22%~0.24%,经济效益分别增加了 4.24%~5.40% 和 2.77%~3.75%,其中,T3 处理(盘锦)和 T2 处理(辽阳)节约肥料成本分别为 11.23% 和 4.53%,产投比最高。因此,该技术对经济效益增加的贡献从大到小依次为节工>节肥>增产。虽然两个试验点过量减少氮肥投入的处理因产量降低导致经济效益下降,但产投比依然显著高于农民习惯施肥,进一步说明了该技术能够有效降低作业成本。值得注意的是,机插秧同步侧深施肥技术对肥料要求比较严格,虽然该技术能节约基肥用量,但养分配比适宜可以直接应用的肥料相对缺乏。因此,应该加强研发与该技术配套应用的新型肥料,以加快该项技术的推广应用。

4 结论

水稻机插秧同步侧深施肥技术在北方粳稻种植区应用,在适宜氮肥用量条件下可显著提高氮肥吸收利用率(NRE)、农学效率(NAE)和偏生产力(NPFP);与当地农民习惯撒施肥相比,在减少 17% 左右氮肥用量条件下能获得相同的水稻产量。同时,还可节省人工成本和肥料投入 3.16%~4.53%,增加经济效益 581~1440 元 hm^{-2} ,节本增效效益明显。因此,该技术的推广应用对推进我国水稻生产全程机械化、提高肥料资源利用效率具有重要意义。

参考文献:

- [1] 刘晓伟,陈小琴,王火焰,等.根区一次施氮提高水稻氮肥利用效率的效果和原理[J].土壤,2017,49(5):868-875.
- [2] 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.
- [3] 罗翔,药林桃,舒时富,等.机插秧同步侧深施肥对水稻生长及产量的影响江西农业学报,2020,32(2):1-8.
- [4] 官 亮,隗英华,王建忠,等.稻田田面水氮磷素动态特征研究[J].中国农学通报,2014,30(20):168-174.
- [5] 张卫峰,马 林,黄高强,等.中国氮肥发展、贡献和挑战[J].中国农业科学,2013,46(15):3161-3171.
- [6] 朱从桦,陈惠哲,张玉屏,等.机械侧深施肥对机插早稻产量及氮肥利用率的影响[J].中国稻米,2019,25(1):40-43.
- [7] 黄 菊,齐 祺,沈天宜.水稻侧深施肥关键技术培训的探索[J].农业开发与装备,2020,(4):194-195.
- [8] 赵立军,颜珊珊,王宇杰,等.侧深施肥插秧机施肥量对水稻栽培的影响[J].农机化研究,2019,(10):192-197.
- [9] 赵志华.水稻机插秧同步侧深施肥技术在衡阳的试验与应用[J].农业开发与装备,2018,(11):124-125.
- [10] 颜士敏,刘林旺,仇美华,等.关于推进江苏水稻机插侧深施肥的思考[J].中国稻米,2019,25(1):26-28.
- [11] 张爱平,刘汝亮,杨世琦,等.基于缓释肥的侧条施肥技术对水稻产量和氮素流失的影响[J].农业环境科学学报,2012,31(3):555-562.
- [12] 赵红玉,徐寿军,杨成林,等.侧深施肥技术对寒地水稻生长及产量形成的影响[J].内蒙古民族大学学报:自然科学版,2017,32(4):347-352.
- [13] 鲁立明,陈少杰,蒋 琪.侧深施肥技术对机插早稻产量的影响[J].中国稻米,2018,24(6):93-94,99.
- [14] 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.
- [15] 凌启鸿,张洪程,戴其根,等.水稻精确定量施氮研究[J].中国农业科学,2005,38(12):2457-2467.
- [16] 刘汝亮,王 芳,王开军,等.控释氮肥侧条施用对东北地区水稻产量和氮肥损失的影响[J].水土保持学报,2018,32:252-256.
- [17] 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.
- [18] Ke J, He R C, Hou P F, et al. Combined controlled-released nitrogen fertilizers and deep placement effects of N leaching, rice yield and N recovery in machine-transplanted rice[J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2018, 265: 402-412.
- [19] Zhu C H, Xiang J, Zhang Y P, et al. Mechanized transplanting with side deep fertilization increases yield and nitrogen use efficiency of rice in Eastern China[J]. Scientific Reports, 2019, 9: 1-13.
- [20] 朱从桦,张玉屏,向 镜,等.侧深施肥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.
- [21] 马 昕,杨艳明,刘智蕾,等.机械侧深施肥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,2017,33(4):1095-1103.
- [22] Kargob, Pan S G, Mo Z W, et al. Physiological basis of improved performance of super rice (*Oryza sativa* L.) to deep placed fertilizer with precision hill-drilling machine[J]. International Journal of Agriculture & Biology, 2016, 18(4): 797-804.
- [23] 王 睿,刘汝亮,赵天成,等.缓/控释肥侧条施用对水稻产量与农学性状的影响[J].中国农学通报,2017,33(6):1-5.
- [24] 李 华,丛建红,於永杰,等.机插侧深施肥对水稻产量及氮肥效应的影响[J].耕作与栽培,2019,(3):34-36.
- [25] 陈佳娜,曹放波,谢小兵,等.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[J].作物学报,2016,(8):1176-1187.
- [26] 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.
- [27] 钟雪梅,黄铁平,彭建伟,等.机插同步一次性侧深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.
- [28] 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.
- [29] 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[J]. 广东农业科学, 2017, 44(8): 61 - 65.
- [30] 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): 53 - 54.
- [31] 杨成林, 王丽妍. 不同侧深施肥方式对寒地水稻生长、产量及肥料利用率的影响[J]. 中国稻米, 2018, 24(2): 96 - 99.
- [32] 张 欢, 潘 贤, 刘晓霞, 等. 侧深施肥搭配缓控释肥对水稻生长及其产量的影响[J]. 浙江农业科学, 2020, 61(7): 1323 - 1325.
- [33] 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.
- [34] 洪 瑜, 李 旭, 张慈娟, 等. 基于养分专家系统的侧深施肥技术对宁夏引黄灌区水稻产量与养分利用的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(3): 252 - 258.
- [35] 张玲霞, 章向祝, 卢春梅. 单季稻机插同步侧深施肥减量试验研究[J]. 园艺与种苗, 2020, 40(7): 40 - 41, 51.
- [36] 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.
- [37] 马 军, 叶 迎, 赵考诚, 等. 机插水稻侧深施肥及其对水稻和环境的影响研究[J]. 中国稻米, 2020, 26(5): 58 - 61.
- [38] 陈雄飞, 罗锡文, 王在满, 等. 水稻穴播同步侧位深施肥技术试验研究[J]. 农业工程学报, 2014, 30(16): 1 - 7.
- [39] Pan S G, Wen X C, Wang Z M, et al. Benefits of mechanized deep placement of nitrogen fertilizer in direct-seeded rice in South China[J]. *Field Crops Research*, 2017, 203: 139 - 149.
- [40] 卞景阳, 刘琳帅, 孙兴荣, 等. 施肥方式对寒地粳稻产量及品质的影响[J]. 中国稻米, 2019, 25(3): 105 - 107.
- [41] Yao Z, Zheng X, Zhang Y, et al. Urea deep placement reduces yield-scaled greenhouse gas (CH_4 and N_2O) and NO emissions from a ground cover rice production system[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 11415.
- [42] Datta a, Santra S C, Adhya T K. Environmental and economic opportunities of applications of different types and application methods of chemical fertilizer in rice paddy[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2017, 107(1): 1 - 19.

Effects of Simultaneous Lateral Deep Fertilization with Mechanical Transplanting on Yield and Economic Benefit of Rice in Northern China

YE Xin, GONG Liang*, JIN Dan-dan, NIU Shi-wei, WANG Na,
XU Jia-yi, ZHANG Xin, SUI Shi-jiang

(*Institute of Plant Nutrition and Environmental Resource, Liaoning Academy of Agricultural Sciences, Shenyang 110161, China*)

Abstract: [Objective] Synchronous side deep fertilization technique of rice machine-transplanting realized the combination of agricultural machinery and agronomic technology. The appropriate amounts of nitrogen (N) in the synchronous deep side fertilization technique of rice machine-transplanting were selected and the cost-saving and efficient-increasing effects were discussed. [Method] Field experiments were conducted in 2019 and 2020 with a randomized complete block design at two different places, with different N application levels: CK, without N fertilizer; FP, Farmers' fertilization amount; T1-T5, side deep fertilization for N-reducing amounts. The N use efficiency (NUE), yield components, yield and economic benefit of rice were determined. [Result] Each N fertilizer application treatment had similar effects on yield formation and NUE in Panjin and Liaoyang in the two years. When the N application rate decreased by 17.08% and 17.17%, the target yield of farmers could still be obtained, and the economic benefit increased by 1232-1440 yuan hm^{-2} and 581-799 yuan hm^{-2} , which reached a significant level. Stable yield could be obtained after reducing N application. Nitrogen uptake and use efficiency (NRE), nitrogen agronomic efficiency (NAE) and partial productivity (NPPF) of rice were significantly increased. In Panjin and Liaoyang, NRE increased by 8.41%-21.19% and 10.44%-15.77%, NAE increased by 2.23-3.57 kg kg^{-1} and 0.10-2.23 kg kg^{-1} . NPPF was significantly higher than that of FP. [Conclusion] Under stable yield condition, mechanical transplanting synchronous deep side fertilization technology can reduce N fertilizer dosage by 17%, reduce transplanting operation cost by 600 yuan hm^{-2} , save fertilizer input cost by 3.16%-4.53%, increase economic benefit by 581-1440 yuan hm^{-2} , and significantly save cost and increase efficiency.

Key words: Side deep fertilization; Nitrogen fertilizer reduction; Nitrogen utilization efficiency; Reduce cost and increase efficiency

[责任编辑: 刘轶飞]