

侧条施肥技术对宁夏水稻产量和氮素利用效率的影响

刘汝亮 王芳 李友宏 赵天成 陈晨 洪瑜

(宁夏农林科学院农业资源与环境研究所, 银川 750002)

摘要: 利用田间小区试验, 系统研究了基于缓释肥料的侧条施肥技术对水稻产量和氮素利用效率的影响。试验结果表明: 与农民常规施肥处理 (FP) 比较, 侧条施肥技术高缓释肥处理 (HF) 水稻氮素投入比农民常规施肥处理 (FP) 降低约 40%, 水稻产量没有显著降低, 穗粒数比农民常规施肥处理增加了 8.36%。侧条施肥技术显著提高了水稻地上部吸氮量和氮肥偏生产力, 降低了氮素的表观损失量。侧条施肥各处理氮肥偏生产力在 39.1–67.8 公斤/公斤之间, 显著高于 FP 处理的 23.7 公斤/公斤。FP 处理氮素表观损失量高达 11.6 公斤/亩, 侧条施肥各处理表观损失量在 1.55–4.13 公斤/亩之间。综合考虑水稻产量和环境因素, 基于缓释肥料的侧条施肥技术是一种资源节约和环境友好的施肥技术。

关键词: 侧条施肥; 水稻; 产量; 氮平衡

随着农业生产水平日益提高, 农田尤其是稻田化肥过量施用导致的退水面源污染正在成为影响宁夏引黄灌区黄河水质的重要原因。长期以来, “大肥大水”促高产是农民追逐高产的主导思想, 宁夏引黄灌区化肥的投入已经处于较高水平, 加上大水漫灌等不合理灌溉方式, 不仅造成水资源的浪费, 而且还导致肥料流失严重。据统计, 宁夏引黄灌区近年来单位面积施用纯 N 量为 20–24 公斤/亩^[1-2]。氮素在土壤中的迁移受到灌溉的显著影响, 随着水分运移淋失是导致各种环境问题产生的直接原因^[3-4]。因此, 减少因稻田退水导致的农业面源污染对保障宁夏段黄河水质安全与整个黄河流域社会经济的可持续发展, 具有现实迫切性与长远的战略意义。

选择适当的氮肥种类和改进施用方式是降低肥料用量和提高利用率的有效途径^[5]。近年来国内研究结果表明缓/控释肥料因其溶解和释放速度缓慢, 可以减少肥料损失, 提高氮素利用率^[6]。翟军海等^[7]报道了施用控释/缓释肥料可使氮肥利用率达 60%–80%, 达到相同作物产量氮肥用量降低 10%–50%, 减少淋溶损失, 降低 NO₃⁻-N 污染。侧条施肥技术在提高氮肥利用率、降低养分流失方面效果显著, 为控制农业面源污染, 日本从上世纪 90 年代开始推广应用。侧条施肥是指利用侧条施肥机器在水稻插秧时将肥料呈条状集中施在水稻一侧 3–5

厘米左右, 施肥深度为 2–5 厘米, 肥料在水稻根际形成一个贮肥库逐渐释放供给水稻吸收, 降低了养分的固定和流失, 从而提高了肥料的利用率^[8]。扈艳萍等^[9]研究结果表明, 水稻机插侧条施肥与常规施肥相比, 肥料利用率提高了 19.9%, 增产 16.0%。国内将缓释肥料和侧条施肥技术结合起来的研究还未见报道, 本文利用中日政府合作项目—环境友好型农业技术开发和利用, 从日本引进了侧条施肥机在宁夏引黄灌区开展田间试验, 旨在明确基于缓释肥的侧条施肥技术对提高水稻产量和减少氮素损失的效果, 为环境友好型农业技术提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

田间试验于 2011 年 4 月–10 月宁夏灵武市灵武农场三队农田进行。试验点位于东经 106°17′58″, 北纬 38°07′33″, 该区属温带大陆性半干旱气候, 海拔为 1110 米, 多年平均降水量 192.9 毫米, 年蒸发量 1762.9 毫米, 平均温度 8.9℃, 全年日照 4434.7 小时, 无霜期 163 天, 年平均积温为 3866.3℃。供试土壤类型为灌淤土, 2011 年试验开始前农田土壤基本理化性质如表 1 所示, 供试田块土壤基础肥力中等偏上。

本研究由中国—国际植物营养研究所 (IPNI) 北京办事处, 宁夏农业综合开发办公室科技推广项目资助

作者简介: 刘汝亮 (1982–), 男, 博士, 副研究员, 从事施肥与环境 and 农业面源污染防控, E-mail: ruliang_liu@126.com

通讯作者: 王芳 (1968–), 女, 硕士, 研究员, 从事植物营养和农业环境保护研究, E-mail: berrywang@vip.sina.com

表 1 供试土壤的基本理化性质

土壤层次 (厘米)	容重 (克/厘米 ³)	质地	有机质	全氮	速效氮	速效磷	速效钾
			(克/公斤)				
0~20	1.48	中壤	13.5	0.94	78.2	29.7	167.0

1.2 试验设计

田间小区试验设以下 5 个处理：1) 不施肥料 (CK)；2) 低量缓释肥 (LF)；3) 中量缓释肥 (MF)；4) 高量缓释肥 (HF)；5) 农民常规施肥 (FP)；各处理施肥量见表 2。缓释肥料由山东烟台农资金太阳有限公司生产，其中 N 含量为 23.0%，P₂O₅ 为 13.0%，K₂O 为 10.0%。农民常规施肥处理氮素用尿素 (N, 46%)，磷肥用重过磷酸钙 (P₂O₅, 46%)，钾肥用氯化钾 (K₂O, 60%)。缓释肥料全部做基肥在插秧时用机器一次施入，农民常规处理 60% 的氮素肥料和全部磷钾肥料在整田时做基肥施入，剩余氮肥分别在水稻分蘖期和孕穗期做追肥施入，两次追肥量均为 20%。

供试水稻品种为 96D10。5 月 20 日育秧，6 月 17 日插秧，10 月 12 日收获。用侧条插秧机配套的专用育秧盘，每盘 448 穴。当秧苗高度长至 12 厘米左右时用侧条施肥机器插秧。水稻株距为 16 厘米，行距 33 厘米，每穴 3—4 株。试验小区长 43.5 米，宽 7.8 米，面积 340 米²。各试验小区之间在水稻种植前用双层塑料膜隔离，地下埋深 30 厘米，地面田埂包高 30 厘米，以减少处理间的侧渗和

串流。每个小区都设有单独的排水口和灌水口，单排单灌，灌溉水引自黄河水，其余田间管理同当地的农作习惯。水稻生长期间，水不人为排出田外，保持田面原有水深，让其自然渗漏和蒸发。每个处理重复 3 次，小区随机区组排列。水稻测产方法为小区全部收获，同时采集 1.2 米的样品进行室内考种。

1.3 测定方法

水样硝态氮和铵态氮用法国产 FUTURA 流动分析仪测定，土壤容重用环刀法，土壤和植株全氮用凯氏法，全磷用钼锑抗比色法，全钾用火焰光度法。

数据处理采用 EXCEL 和 SAS (8.0) 软件，方差分析用 LSD 检验。

2 结果与分析

2.1 侧条施肥技术对水稻产量的影响

施肥是水稻获得高产的保障。试验结果表明，各处理水稻植株和籽粒产量均随着施肥量的提高而增加。各施肥处理间比较，农民常规处理 (FP) 子粒产量最高，为

表 2 侧条施肥试验设计

处理	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	缓释肥料用量 (公斤/亩)
	(公斤/亩)			
CK	0.0	0.0	0.0	0.0
LF	4.9	2.8	2.1	21.4
MF	8.3	4.7	3.6	36.2
HF	11.7	6.6	5.1	51.0
FP	20.0	6.0	5.0	0.0

表 3 侧条施肥对水稻产量的影响

处理	秸秆产量	增产率	子粒产量	增产率
	(公斤/亩)	(%)	(公斤/亩)	(%)
CK	196d	--	226d	--
LF	274c	39.4	334c	48.1
MF	309c	57.4	387b	71.2
HF	362b	84.2	459a	103.1
FP	386a	96.3	473a	109.6

注：同列内不同字母表示差异显著 (p < 0.05)，下同。

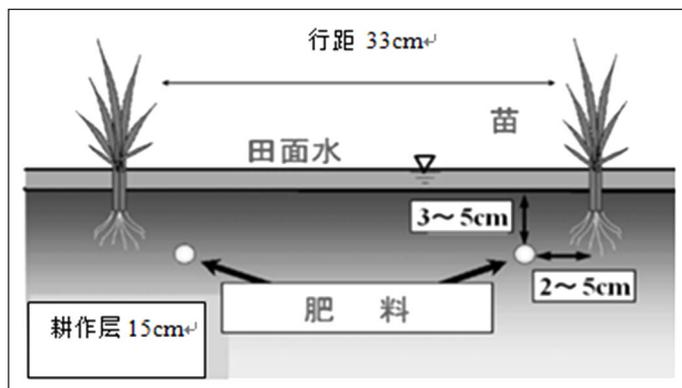


图 1 侧条施肥技术示意图

473 公斤/亩，其次是高缓释肥 (HF)，子粒产量为 459 公斤/亩，分别比对照提高了 247 公斤/亩和 233 公斤/亩，但农民常规处理 (FP) 处理与高缓释肥处理 (HF) 间差异不显著。中量缓释肥 (MF) 处理子粒产量为 387 公斤/亩，显著低于 FP 和 HF 处理。利用缓释肥料配合侧条施肥技术，HF 处理在氮素投入降低约 40% 的条件下，水稻子粒产量与 FP 处理比较没有显著降低，原因是因为缓释肥料在水稻根际附近形成的贮肥库可以缓慢释放养分供给水稻的需求，为水稻产量形成奠定了基础。

表4 侧条施肥对水稻产量构成因素的影响

处理	株高	穗长	穗粒数	有效穗	千粒重
	(厘米)		(个)	(个/米 ²)	(克)
CK	69.4 c	12.1 c	71.8 b	182 c	25.2 a
LF	84.8 b	14.9 b	93.2 a	286 b	26.2 a
MF	89.7 b	16.2 a	107.8 a	347 a	26.7 a
HF	97.8 a	17.8 a	118.4 a	384 a	26.5 a
FP	99.6 a	15.9ab	109.3 a	417 a	23.8 a

水稻苗期之后分蘖消长是水稻生长发育的基本特性之一，也是形成水稻健康群体进而实现高产的前提^[11]。农民常规施肥处理模式一般为基肥占60%，分蘖期追施20%。由于在水稻分蘖前就投入了大量的氮素，能够促进水稻早生快发，形成较高的分蘖数，从而为水稻高产打下基础。缓释肥料由于前期分解速率慢，势必会影响到水稻分蘖。在本研究条件下，农民常规处理(FP)水稻有效穗为417个/平方米，高于其它处理。高缓释肥处理(HF)由于在水稻生育后期可以持续提供养分供应，提高了水稻的穗粒数，比FP处理增加了8.3%，所以最终水稻产量并没有出现显著的降低。研究表明，侧条施肥还可以降低水稻籽粒的空秕率，提高千粒重，从而增加水稻的产量，增产幅度在16%左右^[10, 12]。

2.2 侧条施肥技术对水稻氮素吸收和偏生产力的影响

不同施肥处理对水稻秸秆吸氮量、籽粒吸氮量和地上部总吸氮量都有显著影响。氮素吸收累积主要在集中在子粒中，作物秸秆也累积相当量的氮素，且其与秸秆产量密切相关。水稻秸秆和子粒吸氮量随着施肥量提高而增加，FP处理和HF处理水稻地上部总吸氮量显著高于其它施肥处理，但FP处理和HF处理差异不显著。FP处理吸氮量为10.5公斤/亩，其次为HF处理的9公斤/亩，其它施肥处理总吸氮量显著低于FP处理和HF处理。HF处理可以满足水稻生育期对氮素的需求，在减少氮肥用量的

的前提下并没有减少植株对氮素的吸收量，降低了氮素流失的风险。

氮肥偏生产力(PFPN)表示施用每千克氮肥能生产的粮食产量，其大小可以表征提高氮肥利用率的潜力。从PFPN角度评价了水稻氮肥生产效率情况，结果表明，施用每公斤氮肥不同施肥处理可生产作物子粒产量存在差异，PFPN随着施氮量的增加呈现出降低的趋势。LF处理、MF处理、HF处理和FP处理PFPN分别为67.8、46.4、39.1和23.7公斤/公斤。侧条施肥各处理的PFPN均显著高于农民常规施肥(FP处理)。可见，侧条施肥技术可以显著提高氮肥的生产效率。

2.3 侧条施肥技术对土壤-水稻体系中氮素表现平衡的影响

根据水稻整个生育期间的氮素输入和输出项，以0-100厘米深度土层为界面，计算水稻-土壤体系内氮素表现平衡，结果如表6所示。氮肥投入和残留的Nmin是当季水稻的主要氮素输入途径，其次是灌水带入的氮，稻田土壤长期处于淹水状态，矿化作用很难发生，当季土壤氮素矿化量仅有0.16公斤/亩。水稻氮素输出主要是表现损失、水稻收获携走和土壤无机氮残留。氮素的表现损失量随着施氮量的增加表现为提高的趋势，不同施肥处理下表现损失量分别为3.3-11.6公斤/亩，最高的为FP处理，显著高于各侧条施肥处理，整个水稻生育期氮素的表现损失量为11.6公斤/亩，其次是MF处理，氮素的表现损失为4.1公斤/亩。各处理间土壤Nmin残留差异不大，CK处理在水稻收获后0-100厘米土层Nmin是3.6公斤/亩，而FP处理虽然施氮量高达20公斤/亩，水稻收获后0-100厘米土层Nmin残留也只有6.2公斤/亩。说明施入的氮肥随着渗漏水淋洗损失严重，大部分损失逸出了水稻-土壤体系，造成对环境的潜在危害。

表5 侧条施肥对水稻氮素吸收和氮肥偏生产力的影响

处理	秸秆吸氮量	子粒吸氮量	总吸氮量	氮肥偏生产力
	(公斤/亩)			(公斤/公斤)
CK	1.0d	2.4c	3.3d	--
LF	2.4c	2.8b	5.3c	67.8
MF	2.8c	3.9b	6.7b	46.4
HF	3.8b	5.2a	9.0a	39.1
FP	4.6a	5.9a	10.5a	23.7

注：氮肥偏生产力 = 作物产量 / 施氮量。

表6 水稻生育期0-100厘米土层氮素表观平衡(公斤/亩)

项目	CK	LF	MF	HF	FP
N 输入					
施氮量 r	0.0	4.9	8.3	11.7	20.0
灌水带入氮	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
秧苗带入氮	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
播前无机氮	6.9	6.9	6.9	6.9	6.9
净矿化 Ne	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
总量	8.6	13.5	16.9	20.3	28.6
N 输出					
水稻收获携走	3.4	5.8	7.3	10.0	10.8
残留无机氮	3.6	4.4	5.4	6.4	6.2
氮表观损失	1.5	3.3	4.1	3.8	11.6
总量	8.6	13.5	16.9	20.3	28.6

3 结论

1) 采用侧条施肥技术, HF 处理在氮肥用量减少约 40% 的条件下, 与农民常规施肥 (FP) 处理比较子粒产量没有显著降低; HF 处理水稻有效穗低于农民常规施肥, 但穗粒数比 FP 增加了 8.3%。

2) 水稻地上部吸氮量随着施肥量提高而增加, FP 处理和 HF 处理水稻地上部总吸氮量显著高于其它处理, 但

FP 处理和 HF 处理差异不显著。氮肥偏生产力 (PFPN) 随着施氮量的增加呈现出降低的趋势, 侧条施肥各处理的 PFPN 在 39.1-67.8 公斤/公斤之间, 显著高于 FP 处理, 侧条施肥技术可以显著提高氮肥生产效率。

3) FP 处理氮素表观损失量最高, 为 11.6 公斤/亩, 大部分氮素损失逸出了水稻-土壤体系, 造成对环境的危害。侧条施肥各处理氮素表观损失量在 3.3-4.1 公斤/亩, 显著低于常规施肥处理。

参考文献

- [1] 刘汝亮, 李友宏, 张爱平, 等. 育秧箱全量施肥对水稻产量和氮素流失的影响 [J]. 应用生态学报, 2012, 23(7):1853-1860.
- [2] 张晴雯, 张惠, 易军, 等. 青铜峡灌区水稻田化肥氮去向研究 [J]. 环境科学学报, 2010, 30(8):1707-1714.
- [3] 刘汝亮, 李友宏, 张爱平, 等. 氮肥后移对引黄灌区水稻产量和氮素淋溶损失的影响 [J]. 水土保持学报, 2012, 26(2):16-20.
- [4] 赵营, 同延安, 张树兰, 等. 氮磷钾施用量对灌淤土水稻产量及肥料利用率的影响 [J]. 西北农业学报, 2010, 19(2):118-121.
- [5] 刘汝亮, 李友宏, 马世铭, 等. 供氮水平对引黄灌区春小麦氮平衡及产量和加工品质的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(4):94-98.
- [6] 徐明岗, 李菊梅, 李东初, 等. 控释氮肥对双季水稻生长和氮肥利用率的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(5):1010-1015.
- [7] 翟军海, 高亚军, 周建斌. 控释/缓释肥料研究概述 [J]. 干旱地区农业研究, 2002, 20(1):45-48.
- [8] 易军, 张晴雯, 王明. 宁夏黄灌区灌淤土硝态氮运移规律研究 [J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(10):2046-2053.
- [9] 扈艳萍, 朱彪, 高振芹. 水稻机插侧条施肥效果研究 [J]. 辽宁农业科学, 2005, (3):22-23.
- [10] 李昊儒, 梅旭荣, 郝卫平, 等. 山东省夏玉米侧条施肥技术应用研究 [J]. 中国农学通报, 2012, 28(27):130-133.
- [11] 张惠, 杨正礼, 罗良国, 等. 黄河上游灌区稻田 N₂O 排放特征 [J]. 生态学报, 2011, 31(21):6606-6615.
- [12] 朱兆良, 张福锁. 主要农田生态系统氮素行为与氮肥高效利用的基础研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2010, 24-26.