

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

刘汝亮¹, 王芳¹, 王开军², 张爱平³, 李友宏¹, 洪瑜¹, 杨正礼³

(1. 宁夏农林科学院农业资源与环境研究所, 银川 750002; 2. 方正县农业技术推广中心, 黑龙江 方正 150800;

3. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 农业部农业环境重点实验室, 农业清洁流域创新团队, 北京 100081)

摘要: 为探索东北地区水稻种植过程中控释氮肥侧条施用对水稻产量和氮素损失的影响, 设置对照不施氮肥(CK)、农民常规施肥(FP)、高量控释氮肥(HN)、中量控释氮肥(MN)和低量控释氮肥(LN)共5个处理, 通过田间小区试验研究了控释氮肥侧条施用对水稻产量、氮素回收率、农学利用效率、径流损失和不同层次淋溶水中总氮浓度变化的影响。结果表明: HN处理和MN处理在氮肥用量降低10%~20%的条件下与FP处理比较水稻籽粒产量没有显著降低, HN处理的穗数和穗粒数分别比FP处理提高了10.79%和15.38%, 当氮肥减量30%(LN处理)时, 水稻籽粒产量降低明显。控释氮肥侧条施用显著提高了氮肥回收率和农学利用效率, HN处理与FP处理比较氮肥回收率提高了5.23个百分点, 氮肥农学效率也比FP处理提高了6.48 kg/kg。控释氮肥侧条施用降低了田面水中总氮浓度和径流损失, 控释氮肥各处理氮素径流损失降低幅度在37.32%~47.10%。控释氮肥侧条施用降低了淋溶水体中总氮浓度, 并延迟了总氮浓度峰值出现时间, 减少了氮素淋洗损失的风险, 是一种兼顾水稻产量的环境友好型施肥技术。

关键词: 东北地区; 水稻; 控释氮肥; 产量; 氮素损失

中图分类号: S143.1; S511

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)02-0252-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.02.037

Effects of Side Strip Application of Controlled Release Nitrogen Fertilizer on Rice Yield and Nitrogen Loss in Northeast China

LIU Ruliang¹, WANG Fang¹, WANG Kaijun², ZHANG Aiping³,

LI Youhong¹, HONG Yu¹, YANG Zhengli³

(1. Institute of Agricultural Resources and Environment, Ningxia Academy of Agro-forestry Science, Yinchuan

750002; 2. Fangzheng County Agricultural Technology Extension Service Center, Fangzheng, Heilongjiang 150800; 3. Institute of

Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Science, Key Laboratory of Agriculture Environment and Climate Change, Ministry of Agriculture, Agricultural Clean Watershed Innovation Team, Beijing 100081)

Abstract: A field experiment was carried out in rice planting field in Northeast China, to investigate the effect of controlled release nitrogen fertilizer side strip application on rice yield and nitrogen losses. Five treatments were set up, including no nitrogen fertilizer as control (CK), farmer conventional fertilization (FP), high amount controlled release nitrogen fertilizer (HN), medium amount controlled release nitrogen fertilizer (MN), and low amount controlled release nitrogen fertilizer (LN). The effects of controlled release nitrogen fertilizer side strip application on rice yield, nitrogen recovery rate, agronomic efficiency, runoff loss, and total nitrogen concentration in leaching water at different levels were studied. Results showed that the grain yield in HN treatment and MN treatment that reduce 10% to 20% nitrogen fertilizer use show no significant change compared with that in FP treatment. The number of spikes and grain number per spike in HN treatment were 10.79% and 15.38% higher than that in FP treatments, respectively. When the nitrogen fertilizer was reduced by 30% (LN treatment), the grain yield of rice was significantly decreased. In HN treatment, the recovery rate of nitrogen fertilizer increased by 5.23%, and the agronomic efficiency of nitrogen fertilizer was 6.48 kg/kg higher than that in FP treatment. Compared with the FP treatment, controlled release nitrogen fertilizer Side Strip Application treatments reduced the total nitrogen concentration and runoff loss in surface water, nitrogen loss reduction rate in HN treatment, MN treatment and LN treatment varied between 37.32%~

收稿日期: 2017-10-12

资助项目: 水体污染控制与治理重大专项(2014ZX07201-009); 国家自然科学基金项目(31660597, 41401134); 宁夏农林科学院科技创新先导资金(NKYJ-16-0904); 宁夏环保科技项目

第一作者: 刘汝亮(1982—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事施肥和农业环境保护研究。E-mail: ruliang_liu@126.com

通信作者: 张爱平(1980—), 女, 博士, 副研究员, 主要从事农业面源污染控制研究。E-mail: apzhang0601@126.com

47.10%。Controlled release nitrogen fertilizer Side Strip Application can reduced the risk of nitrogen losses, delayed both the total nitrogen concentration in the leaching water and the peak time of the total nitrogen concentration, and be considered as an environment-friendly fertilization technology that takes rice yield into account.

Keywords: Northeast region; rice; controlled release nitrogen fertilizer; yield; nitrogen loss

黑龙江省是我国水稻种植面积最大的省份,近年来水稻种植面积稳定在 400~450 万 hm^2 ,约占全国粳稻种植面积的 50%。随着水稻集约化生产程度提高和高产技术的推广应用,黑龙江省水稻生产中普遍存在氮肥用量过多、施肥时期不合理的问题,导致水稻生育后期养分供应缺乏,降低了水稻品质,且氮肥利用率低^[1]。控释氮肥是指通过物理或化学途径控制氮素养分的溶出速率使氮肥养分的释放速率与作物对营养的需求规律相一致的新型肥料^[2-3],控释氮肥的肥效较长,具有施肥次数少、养分损失少,养分利用率高、农业面源污染低等优点^[4-6]。控释氮肥一般做基肥撒施,本研究采用的侧条施肥技术是利用水稻插秧施肥机械在水稻插秧时将肥料一次集中施于秧苗一侧 5 cm 处,施肥深度为 3~5 cm 的施肥方法,优点是可将肥料呈条状集中而不分散,在水稻根际附近形成贮肥库逐渐释放,供给水稻生育期对养分的需求,适应水稻自身代谢对养分的需要,从而减少养分的固定和流失,提高肥料利用率^[7-9]。本试验通过研究控释氮肥侧条施肥对水稻产量和氮肥利用效率的影响,探讨控释肥料降低氮素损失的积极效应,为减少氮素流失、发展环境友好型农业技术提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

田间小区试验位于黑龙江省方正县水稻研究院试验基地。方正县位于黑龙江省中南部,松花江中游南岸,长白山支脉张广才岭西北麓,蚂蚁河下游,气候属于寒温带大陆性季风气候,降水丰富,年均降水量 579.7 mm,太阳可照时间年平均为 4 446 h,水稻生育期为 5—9 月,总日照时间为 1 178 h,日照百分率为 54%,平均每天 8 h。供试土壤类型为白浆土型水稻土,播前土壤有机质含量 31.76 g/kg,全氮含量 1.58 g/kg,碱解氮含量 121.50 mg/kg,全磷含量 0.73 g/kg,速效磷含量 56.51 mg/kg,速效钾含量 153.10 mg/kg,土壤基础肥力中等水平。

1.2 试验设计

田间小区试验于 2016 年 5—9 月进行,共设 5 个处理:(1)CK(Control,不施氮肥);(2)FP(Farmer Practice,农民常规施肥);(3)HN(High amount control release nitrogen,高量控释氮肥,较 FP 减氮 10%);(4)MN(Middle amount control release nitrogen,中量控释氮肥,较 FP 减氮 20%);(5)LN(Low amount control release nitrogen,低量控释氮肥,较 FP 减氮 30%);各处理具体施肥量见表 1。控释掺混肥料由宁夏

农林科学院资环所自主研制,委托山东烟农金太阳肥业公司生产,其中 N 含量为 26.0%(60%为控释包膜氮肥,40%为普通尿素), P_2O_5 含量为 10.0%, K_2O 含量为 12.0%。农民常规施肥处理氮素用尿素(N,46%),磷肥用重过磷酸钙(P_2O_5 ,46%),钾肥用氯化钾(K_2O ,60%),控释氮肥侧条施用各处理肥料全部作为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追肥施入,2 次氮肥追肥量均为 20%。

表 1 试验设计 单位:kg/hm²

处理	N	P_2O_5	K_2O	控释肥料用量
CK	0	60.0	75.0	—
FP	150	60.0	75.0	—
HN	135	51.9	62.3	519.2
MN	120	46.2	55.4	461.5
LN	105	40.4	48.0	403.8

供试水稻品种为龙稻 18,插秧株行距为 12 cm×30 cm,试验小区面积为 9 m×30 m=270 m²,重复 3 次,随机区组排列。小区之间在试验开始前用地膜隔离,地面田埂高 30 cm,地下隔离埋深 60 cm,防止小区之间水分和养分的测渗和串流,各小区均设有单独的灌水口和排水口,单灌单排^[10-11],水稻生育期间田间除草和管理同农户常规管理。

1.3 样品采集

2016 年 9 月水稻收获时采集植株样品,10 月测定植株养分含量,并考种;整个小区实打实收计算水稻产量,并计算养分吸收量和回收率。稻田田面水样分别在插秧和追肥后连续采集 3 次,其余时间按照水稻生育期采集,采样时用注射器随机抽取小区内 3~5 处中上层田面水^[12-13]。采集的水样用 500 mL 容量的塑料瓶收集,带回实验室放在-4 ℃的冰箱内保存。

1.4 样品测定与数据处理

植株全氮含量采用凯氏定氮法测定;土壤速效氮含量采用扩散皿法测定;速效磷含量采用钼蓝比色法测定;速效钾含量采用火焰光度法测定;水样总氮含量采用过硫酸钾氧化—紫外分光光度法^[14]测定。

采用 EXCEL 和 SAS 8.0 软件进行数据处理,采用 Duncan 新复极差法进行方差分析检验。

2 结果与分析

2.1 控释氮肥侧条施用对水稻产量及其构成因素的影响

控释氮肥减量施用各处理对水稻籽粒产量和构成因素的影响见表 2。与 CK 比较,施用氮肥均显著提高了水稻籽粒产量,各处理增产量为 3 487~4 699

kg/hm²,相应的增产率为 57.65%~77.68%。各施氮处理间比较,FP 和 HN 处理的水稻籽粒产量最高,其次为 MN 处理,但差异并不显著,说明施氮量降低 10%~20%的条件下,采用控释氮肥侧条施用技术不会降低水稻产量,为适宜的氮肥合理减量处理,当氮肥减量 30%(LN 处理)时,水稻籽粒产量出现了显著降低。

比较各处理产量构成因素,HN 处理的穗数和穗粒数分别比 FP 处理提高了 10.79%和 15.38%,MN 处理的穗数和穗粒数分别比 FP 处理提高了 3.83%和 8.50%。控释氮肥侧条施用技术提高了水稻根系附近的养分浓度,控释氮肥释放期较长,满足了水稻生育后期的养分需求^[15],与 FP 处理比较,HN 和 MN 处理穗数和穗粒数均有所提高,保障氮肥用量减少 10%~20%条件下水稻产量不会显著降低。

表 2 控释氮肥侧条施用对水稻产量及其构成因素的影响

处理	籽粒产量/ (kg·hm ⁻²)	增产率/ %	株高/ cm	穗数/ (个·m ⁻²)	穗粒数/ 个	千粒重/ g
CK	6049c	—	71.8c	324.1c	93.7c	27.3a
FP	10298a	70.2	86.4a	522.8b	104.7b	22.7ab
HN	10748a	77.7	87.3a	579.2a	120.8a	24.7a
MN	9749ab	61.2	83.9ab	542.8ab	113.6a	24.8a
LN	9536b	57.7	82.7a	516.2b	102.1b	24.9a

注:同列内不同字母表示差异显著(P<0.05)。下同。

2.2 控释氮肥侧条施用对水稻氮素吸收的影响

从表 3 可以看出,各处理植株总吸氮量表现为随施氮量的减少逐渐降低,吸氮量最高的 HN 处理为 95.24 kg/hm²,其次为 FP 处理,但两者间的差距不大。FP 处理的氮肥回收率仅为 31.64%,控释氮肥侧条施用各处理的氮肥回收率为 36.53%~38.64%,显著高于 FP 处理,其中 LN 处理氮素回收率最高。氮肥农学利用率随着施氮量的降低逐渐提高,比较各施肥处理的氮肥农学效率,HN 处理比 FP 处理提高了 6.48 kg/kg。HN 和 MN 处理,在氮素投入分别降低 10%和 20%的条件下水稻对氮素的吸收量没有明显降低,且氮素回收率明显高于常规施肥(FP 处理),可以满足水稻生育期对氮素的需求,提高了氮肥农学利用效率,降低了氮素流失的风险。

表 3 控释氮肥侧条施用对水稻氮素吸收利用的影响

处理	籽粒吸氮量/ (kg·hm ⁻²)	秸秆吸氮量/ (kg·hm ⁻²)	总吸氮量/ (kg·hm ⁻²)	氮肥回 收率/%	氮肥农学效率/ (kg·kg ⁻¹)
CK	34.3b	11.2c	45.5c	—	—
FP	62.2a	30.8ab	92.9a	31.6b	28.3b
HN	60.7a	34.6a	95.2a	36.9a	34.8a
MN	60.2a	29.2b	89.3a	36.5a	30.8a
LN	57.4a	28.6b	86.0b	38.6a	33.2a

注:氮回收率=(施肥处理吸氮量-对照处理吸氮量)/施氮量。

2.3 控释氮肥侧条施用对田面水浓度变化和总氮径流损失的影响

从图 1 可以看出,CK 处理由于全生育期没有氮肥投入,田面水中 TN 浓度一直保持较低的水平,全生育

期内保持在 1.32 mg/L 以下。FP 处理田面水中 TN 浓度在水稻插秧 2 天后达到较高浓度水平,为 5.97 mg/L,之后随着生育期延长逐渐降低,直到水稻追肥后,田面水浓度达到 9.43 mg/L 的峰值,之后逐渐降低。HN 和 MN 处理的田面水 TN 浓度在水稻移栽 10 天后超过 FP 处理,分别达到 7.42,6.64 mg/L。由于侧条施肥处理控释氮肥为一次全量施肥,基肥总氮施用量高于常规施肥(基施 60%)处理,水稻插秧后需要进行补秧等农事操作,对耕层土壤扰动导致部分溶解的氮素进入田面水^[16],导致水稻生育前期 HN 和 MN 处理的田面水 TN 浓度高于 FP 处理,但在 FP 处理水稻进行追肥后,其田面水 TN 浓度一直低于 FP 处理。从田面水中总氮浓度变化特征可以推断,水稻移栽和每次追肥后 10 天内田面水 TN 浓度较高,应避免在此阶段人为排水,减少氮素径流损失。

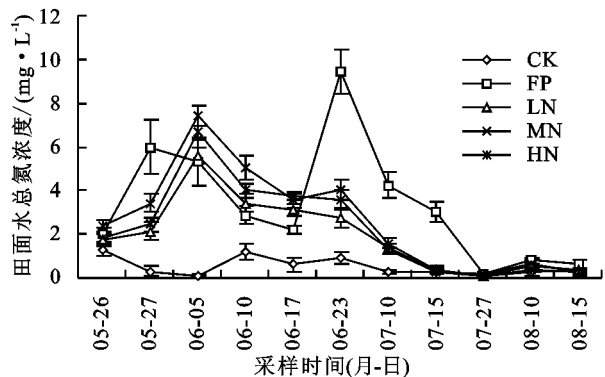


图 1 控释氮肥侧条施用对田面水浓度动态变化的影响

稻田生育期间排水造成的径流流失是养分损失的途径之一,氮磷养分随径流退水进入地表水体是造成农业面源污染的主要原因^[17]。常规施肥(FP 处理)生育期间 2 次追肥方式均为田面撒施,养分极易随着稻田排水进入地表水体,不仅造成了养分损失,还会导致严重的环境问题。侧条施肥在水稻插秧时直接将肥料施在水稻根系附近,减少了田面追肥,显著降低了养分随稻田退水导致的径流损失。常规施肥模式下(FP 处理)稻田全生育期氮素径流损失为 2.76 kg/hm²,侧条施肥各处理(HN、MN、LN)的氮素径流损失分别为 1.73,1.57,1.46 kg/hm²,分别比 FP 处理减少了 1.03,1.19,1.30 kg/hm²,降低幅度为 37.32%~47.10%。各施氮处理 TN 径流损失量与 CK 处理 TN 径流损失量之差可视为水稻生育期内 TN 净径流损失量,FP、HN、MN 和 LN 处理的 TN 净径流损失分别为 2.07, 1.04,0.88,0.77 kg/hm²,占施氮量的比例分别为 1.38%,0.77%,0.733%,0.70%(图 2)。

2.4 控释氮肥侧条施用对稻田淋溶水浓度的影响

各处理水稻生育期间浅层淋溶水(20 cm)中 TN 浓度动态变化规律见图 3。稻田浅层淋溶水中的 TN 浓度受施肥影响较为剧烈,CK 处理水稻整个生育期间由于没有氮素投入,TN 浓度表现为随生育期延长

逐渐降低,仅在水稻移栽后达到 2.03 mg/L,之后逐渐下降。FP 处理在水稻移栽 10 天后浅层淋溶水中 TN 浓度达到最大值,为 9.46 mg/L,HN、MN 和 LN 处理 TN 浓度分别为 4.02,3.67,3.51 mg/L,仅为 FP 处理的 42.49%,38.79%,37.10%。受生育期间追肥的影响,FP 处理 7 月中旬出现第 2 个峰值,TN 浓度达到 7.24 mg/L,之后逐渐降低。HN、MN 和 LN 处理由于施用控释氮肥,水稻生育前期释放较慢,因此浅层淋溶水中 TN 浓度在移栽 30 天才达到极值,TN 最高浓度分别达到 6.01,5.31,4.13 mg/L,远低于 FP 处理的 9.46 mg/L,降低了氮素继续向深层淋洗损失的风险。

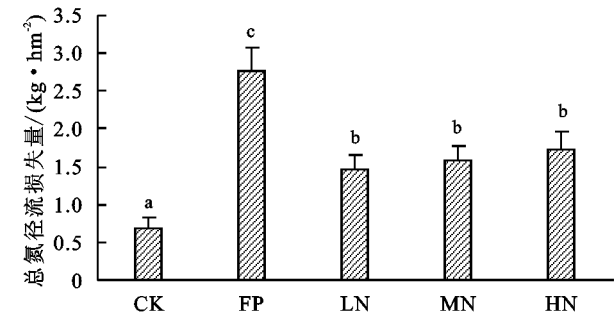


图 2 控释氮肥侧条施用对稻田总氮径流损失的影响

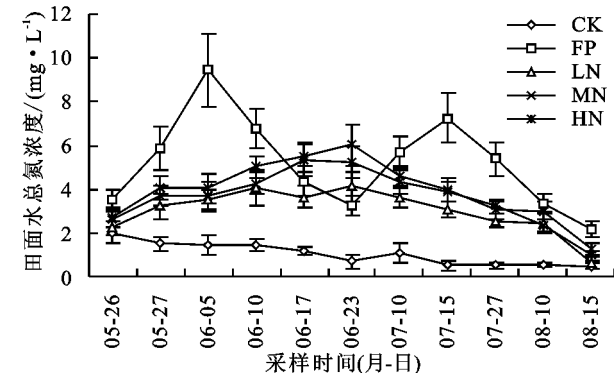


图 3 控释氮肥侧条施用对稻田浅层淋溶水(20 cm)TN 浓度的影响

与浅层淋溶水(20 cm)中 TN 浓度相比,深层淋溶水(60 cm)TN 浓度变化趋势比较平缓,各施肥处理均表现为随水稻生育期延长先缓慢升高然后逐渐降低的趋势(图 4)。

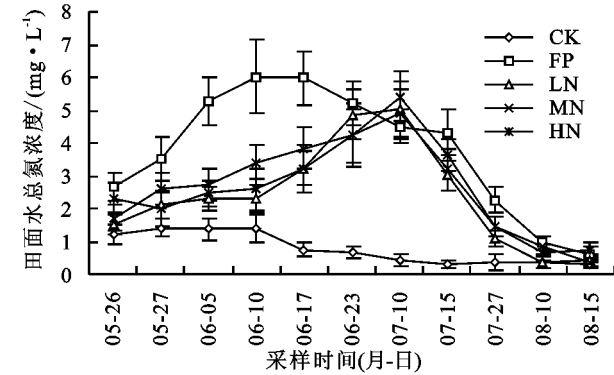


图 4 控释氮肥侧条施用对稻田深层淋溶水(60 cm)TN 浓度的影响

FP 处理 TN 浓度峰值出现在水稻移栽后 15 天,最高值达到 6.02 mg/L。各控释氮肥侧条施用处理由于氮素前期释放缓慢,且需要随着水体运动一段时间才能到达深层水体,TN 浓度峰值出现在水稻移栽后约 45 天,HN 处理 TN 浓度峰值最大,达到 5.42 mg/L,MN 和 LN 处理间 TN 浓度差异不大,分别为 4.90,5.02 mg/L。

3 讨论

3.1 控释氮肥侧条施用对水稻产量和氮肥利用效率的影响

本研究结果表明,基于控释氮肥的侧条施肥处理在氮肥施用量降低 10%~20%条件下,与常规施肥量相比较,水稻籽粒产量没有出现显著降低的趋势,但当氮肥施用量降低 30%时,水稻籽粒产量显著降低。由于东北地区土壤有机质含量丰富,水稻当季氮肥施用量远低于同种气候条件下的西北稻区(单季施氮量 300 kg/hm²),过量减氮不能满足当季作物对氮素的需求,导致水稻产量下降。张爱平等^[18]在宁夏引黄灌区的研究结果表明,缓释肥侧条施肥处理水稻氮素投入比农民常规施肥处理降低约 40%,水稻产量没有降低,穗粒数和千粒重分别比农民常规施肥处理增加 17.0%和 16.6%;杨俊刚等^[15]研究表明,与常规施肥处理相比,控释肥与普通化肥配施在降低 1/2 施肥量的情况下,没有造成作物减产,且显著减少了土壤溶液中硝态氮浓度,提高了氮肥利用率;李文军等^[17]研究发现,当施氮量高于 200 kg/hm² 时,水稻花后氮素转运率和氮肥利用率均随施氮量的增加而降低。本研究条件下,当施氮量降低 10%时,植株总吸氮量与常规施肥比较没有降低,氮肥回收率提高了 5.23 个百分点,氮肥农学效率比 FP 处理提高了 6.48 kg/kg。基于控释氮肥的侧条施肥 HN 和 MN 处理,在氮素投入分别降低 10%和 20%的条件下可以满足水稻生育期对氮素的需求,控释氮肥在水稻根际附近形成的贮肥库能逐渐释放养分供应水稻的生长需求,有利于水稻对养分的吸收,为水稻的产量形成奠定基础,提高了氮肥回收率和农学利用效率。

3.2 控释氮肥侧条施用对稻田氮素径流和淋洗损失的影响

东北地区由于独特的灌溉措施和气候条件,大部分稻田灌溉用水来源于深层地下水,然后经过径流和淋洗退回到地表和浅层地下水中,稻田不合理的氮素投入不仅会导致肥料利用率降低,而且会通过径流和退水对地表水环境和浅层地下水造成污染,因此减少氮肥施用量,进而降低养分流失是保障水环境安全的重要措施。控释氮肥因释放周期长,结合侧条施肥技术一次施在水稻根系附近,形成一个高浓度的贮肥库逐渐释放满足水稻对养分的吸收,有效降低了氮素径

流和淋洗损失,各侧条施肥处理氮素径流损失分别比 FP 处理减少了 1.03,1.19,1.30 kg/hm²,降低幅度为 37.32%~47.10%。水稻生育期浅层淋溶水和深层淋溶水 TN 浓度低于常规施肥处理,有效降低了氮素向深层淋失。纪雄辉等^[19]研究表明,用控释氮肥作氮源,由于肥料自身缓慢释放的特性,导致田面水中总氮浓度显著低于常规施肥处理,大大降低了氮素随降雨或者农田排水径流损失的风险;易军等^[11]的研究结果证明尿素在施入农田后迅速溶解,常规施肥处理在施肥后 1~3 天内田面水中总氮浓度达到最高值,之后迅速降低,每次施肥后 10 天内是氮素径流损失的关键时期;张朝等^[20]采用模拟土柱的方法研究发现,施用尿素和硫酸铵后,土壤 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量显著提高,尤其在 0~50 mm 土层内,分别相当于对照的 4.8~242 倍和 5.7~316 倍,表明肥料氮素的迁移转化主要发生在 0~50 mm 土层内。本研究条件下,控释氮肥侧条施用各处理水稻生育前期淋溶水中 TN 浓度均低于常规施肥,浅层淋溶水中 HN、MN 和 LN 处理 TN 浓度仅为 FP 处理高峰时的 42.49%,38.79%和 37.10%。侧条施肥技术在氮素施用量降低 10%~20%的条件下,可以显著提高水稻的氮素养分回收率和农学效率,有效减少了氮素养分的淋溶流失,促进农业可持续发展和生态环境保护。本试验条件下,综合考虑水稻产量、氮素径流和淋洗损失等因素,控释氮肥减量施用 10%~20%是较合理的氮素运筹模式。由于稻田氮素损失途径和损失形态较为多样,关于控释氮肥侧条施用技术对稻田气态损失和氮素损失平衡特征的影响还有待于深入研究。

4 结论

(1)与常规施肥处理比较,控释氮肥侧条施用技术施氮量减少 10%~20%水稻籽粒产量不会降低,并能提高水稻的穗数和穗粒数,为适宜的氮肥合理减量水平,当氮肥减量达到 30%时水稻籽粒产量显著降低。降低氮素投入可以显著提高水稻的氮肥回收率和农学效率,HN 处理氮肥回收率比常规施肥处理提高 5.23 个百分点,氮肥农学效率提高 6.48 kg/kg。

(2)控释氮肥侧条施用减少了水稻生育期间的氮素径流损失量,同时降低了田面水和淋溶水体中的 TN 浓度。采用控释氮肥侧条施肥技术,氮肥减量施用 10%~20%条件下是兼顾水稻产量和降低氮素损失的合理氮素运筹模式。由于试验结果仅为一年的结论,其在东北地区稻田的适用性有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 范立春,彭显龙,刘元英,等. 寒地水稻实地氮肥管理的研究与应用[J]. 中国农业科学, 2005,38(9):1761-1766.
- [2] Nosengo N. Fertilized to death[J]. Nature, 2003, 425

(6961):894-895.

- [3] Knowles O A, Robinson B H, Contangelo A, et al. Biochar for the mitigation of nitrate leaching from soil amended with biosolids[J]. Science of The Total Environment, 2011, 409(17):3206-3210.
- [4] 徐明岗,李菊梅,李东初,等. 控释氮肥对双季稻生长及氮肥利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(5):1010-1015.
- [5] Kiran J K, Khanif Y M, Amminuddin H, et al. Effects of controlled release urea on the yield and nitrogen nutrition of flooded rice[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2010, 41(7):811-819.
- [6] 刘汝亮,张爱平,李友宏,等. 生物炭对引黄灌区水稻产量和氮素淋失的影响[J]. 水土保持学报 2016, 30(2): 209-213.
- [7] 汪丽婷,马友华,储茵,等. 巢湖流域不同施肥措施下稻田氮磷流失特征与产量研究[J]. 水土保持学报, 2011, 25(10):40-44.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 易军,张晴雯,王明,等. 宁夏黄灌区灌淤土硝态氮迁移规律研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(10):2046-2053.
- [13] 刘汝亮,张爱平,李友宏,等. 长期配施有机肥对宁夏引黄灌区水稻产量、氮素利用率和氮素淋失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(5):947-954.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京:中国农业出版社, 2000:302-316.
- [15] 杨俊刚,徐凯,佟二健,等. 控释肥料与普通氮肥混施对春白菜产量、品质和氮素损失的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(12):3147-3153.
- [16] 汪丽婷,马友华,储茵,等. 巢湖流域不同施肥措施下稻田氮磷流失特征与产量研究[J]. 水土保持学报, 2011, 25(10):40-44.
- [17] 李文军,夏永秋,杨晓云,等. 施氮和肥料添加剂对水稻产量、氮素吸收转运及利用的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(9):2331-2336.
- [18] 张爱平,刘汝亮,高霁,等. 生物炭对灌淤土氮素流失及水稻产量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(12):2395-2403.
- [19] 纪雄辉,郑圣先,鲁艳红,等. 施用尿素和控释氮肥的双季稻田表层水氮素动态及其径流损失规律[J]. 中国农业科学, 2006, 39(12):2521-2530.
- [20] 张朝,车玉萍,李忠佩. 水稻土模拟土柱中肥料氮素的迁移转化特征[J]. 应用生态学报, 2011, 22(12):3236-3242.