

长期配施有机肥对宁夏引黄灌区水稻产量和稻田氮素淋失及平衡特征的影响

刘汝亮¹, 张爱平^{2*}, 李友宏¹, 王芳¹, 赵天成¹, 陈晨¹, 洪瑜¹

(1.宁夏农林科学院农业资源与环境研究所, 银川 750002; 2.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:在宁夏引黄灌区的青铜峡稻田,通过4年的田间定位试验研究了长期配施有机肥对水稻籽粒产量、氮素吸收利用和氮素淋失特征的影响。试验共设置5个处理:不施用氮肥(T_1)、常规化学氮肥 $300\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (T_2)、优化化学氮肥 $210\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ +有机肥氮肥 $90\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (T_3)、优化化学氮肥 $240\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (T_4)、优化化学氮肥 $195\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ +有机肥氮肥 $45\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (T_5)。用稻田退水采集装置收集20、60 cm和100 cm深度的淋溶水,计算氮素淋失量。试验结果表明:在常规施氮和优化施氮水平下配施有机肥,水稻籽粒产量没有降低,氮肥利用率分别提高了5.2、1.9个百分点;配施有机肥可以显著降低田面水中的总氮浓度和土体中氮素淋失量,20 cm土层中总氮淋失量分别降低了9.99%和6.02%,100 cm土层中总氮淋失量分别降低了17.9%和9.3%;氮平衡特征计算结果表明,同等施氮水平下配施有机肥氮素表观损失量分别降低了12.1%和12.5%。与常规只施用化肥比较,配施有机肥可以显著降低氮素的淋洗损失,优化施氮水平下配施有机肥(T_5 处理)为协调水稻产量和环境安全的合理选择。

关键词:引黄灌区;稻田;有机肥;氮淋失;氮平衡

中图分类号:S511 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2015)05-0947-08 doi:10.11654/jaes.2015.05.018

Rice Yield, Nitrogen Use Efficiency (NUE) and Nitrogen Leaching Losses as Affected by Long-term Combined Applications of Manure and Chemical Fertilizers in Yellow River Irrigated Region of Ningxia, China

LIU Ru-liang¹, ZHANG Ai-ping^{2*}, LI You-hong¹, WANG Fang¹, ZHAO Tian-cheng¹, CHEN Chen¹, HONG Yu¹

(1. Institute of Agricultural Resources and Environment, Ningxia Academy of Agro-forestry Science, Yinchuan 750002, China; 2. China Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, China Academy of Agricultural Science/Key Laboratory of Agriculture Environment and Climate Change, Ministry of Agriculture, Agricultural Clean Watershed Innovation Team, Beijing 100081, China)

Abstract: To maximize rice yields, excessively high nitrogen fertilization and irrigation are very common management practices in the Yellow River Irrigated Region of Ningxia. However, these practices have greatly increased the risks of nitrogen losses and non-point source pollution. Production systems with more yields and less environmental impacts are urgently needed in this region. A continuous four year field experiment was conducted to evaluate the effects of combined applications of manure and chemical fertilizers on rice yields and nitrogen utilization and nitrogen leaching losses in Qingtongxia in the Yellow River Irrigated Region of Ningxia. Five nitrogen treatments were used: no nitrogen fertilizer (T_1), conventional chemical nitrogen of $300\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (T_2), chemical plus organic-chemical nitrogen of $210\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ + manure nitrogen of $90\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (T_3), reduced chemical nitrogen of $240\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (T_4), and optimized chemical nitrogen of $195\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ + manure nitrogen of $45\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (T_5). The experimental design was a randomized complete block with three replicates. Each plot was 45 m^2 ($5\text{ m}\times 9\text{ m}$). An in-situ leaching device was used to sample leachate from 20 cm, 60 cm, and 100 cm soil depths. Total nitrogen, NO_3^--N and NH_4^+-N leaching losses were calculated based on nitrogen concentrations in the leachate and the volume of the leachate. Compared with the conven-

收稿日期:2014-11-18

基金项目:宁夏科技支撑计划项目;宁夏农林科学院科技创新先导资金项目;中央公益型科研院所基本科研业务费专项资金(BSRF201306);农业清洁流域创新基金;山西省自然科学基金(2013011039-3)

作者简介:刘汝亮(1982—),男,河南夏邑人,博士,副研究员,主要从事农业环境保护和面源污染阻控方面的研究工作。E-mail: ruliang_liu@126.com

* 通信作者:张爱平 E-mail: apzhang0601@126.com

tional chemical nitrogen, rice grain yields in all treatments with lowered chemical nitrogen with and without manure did not decrease, whereas nitrogen use efficiency was 5.2 and 1.9 percentage points higher. The total nitrogen concentration in the surface water and nitrogen leaching losses at different soil depths were all significantly decreased in lowered chemical nitrogen combined with manure as compared to the conventional chemical nitrogen. At 20 cm soil depth, total nitrogen leaching losses were 9.99% and 16% lower than that in the conventional chemical nitrogen, while 17.9% and 9.3% lower at 100 cm soil depth. Under the same nitrogen level, apparent nitrogen losses were respectively reduced by 12.1% and 12.5% in combined manure and chemical fertilizer treatments over the conventional chemical nitrogen and reduced chemical nitrogen alone. In conclusion, applying chemical nitrogen of $195 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ + manure nitrogen of $45 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ could maintain paddy rice yields while alleviating environmental pollution in the Yellow River Irrigated Region of Ningxia.

Keywords: Yellow River Irrigated Region of Ningxia; paddy rice field; manure; nitrogen leaching losses; nitrogen balance

宁夏引黄灌区地处西北内陆,已有2000多年的灌溉历史,有着“塞上江南”的美誉,是全国主要的商品粮食基地^[1-2]。该区土壤类型主要为灌淤土,年均蒸发量1100~1600 mm,年均降水量180~200 mm,降雨量远不能满足当季作物生长的需水量,当地农业用水90%以上来自黄河灌溉^[3]。农业灌溉用水占到全部引水量的95%,通过排水沟和渗漏退回到黄河中的退水量约40亿 m^3 ,排水引水比例在54%左右^[4],农田退水中携带的营养元素流入黄河水体,对黄河水质安全构成潜在威胁。水稻是引黄灌区种植面积最大的作物,长期过量施用氮肥导致土壤中氮素出现盈余,大量未被吸收的氮素通过径流、淋洗和氨挥发途径损失,退水中总氮浓度较高,造成土壤和浅层地下水体污染^[5-6]。宁夏引黄灌区的氮肥损失率在20%~65%之间^[7-8],主要损失途径为淋洗损失^[9],退水污染源解析表明,源于水稻作物的氮素负荷约为72%^[10],由稻田氮素淋洗损失引起的环境问题已经成为引黄灌区面源污染防治的焦点^[11]。

畜禽养殖是农业的重要组成部分,粪便的不合理利用导致的面源污染对农业环境构成威胁,农田作为畜禽粪便氮污染消纳的主要场所^[12-13],其用量的多少对畜禽粪便氮污染接纳能力起决定作用^[14-15],宁夏单位农田氮污染负荷高达 $80.76 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[16]。当前关于有机肥对稻田的研究主要集中在水稻产量、氮素吸收和土壤理化性状方面,关于施用有机肥对稻田氮素淋失的研究鲜有报道^[2]。腐熟的畜禽粪便内含有作物生长需要的大、中量和微量元素,同时在更新土壤有机质、促进微生物繁殖、增强土壤水肥保持能力和降低土壤养分淋洗方面有着特殊作用^[17]。因此,本研究针对引黄灌区稻田氮肥过量施用和畜禽粪便无序排放导致的面源污染问题,开展有机肥替代部分化肥配施研究,控制氮素淋失对水体造成的风险,为改善引黄灌区退水水质提供科技支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

田间小区试验位于宁夏引黄灌区精华区的灵武农场3队($106^{\circ}17'57'' \text{ E}$, $38^{\circ}07'32'' \text{ N}$),该区属典型的大陆性干旱气候,平均海拔为1110 m,多年年均降水量192.9 mm,蒸发量1762.9 mm,平均温度 8.9°C ,全年无霜期163 d,平均积温 3866.3°C 。该地区主要的粮食作物为水稻、玉米和小麦,种植方式是水旱轮作,一年一熟。供试土壤类型为灌淤土,20 cm耕层土壤理化性状:容重 $1.51 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,有机质含量 $13.74 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮 $1.13 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效氮 $78.64 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷 $28.71 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾 $158.86 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,基础肥力中等偏上。

1.2 试验设计

田间小区试验于2010年至2013连续进行4年,2010年种植作物为水稻,2011年种植作物为春小麦,2012年和2013年均种植水稻,每年种植一季作物。试验共设5个处理:对照为不施用氮肥,常规施氮量 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 条件下设单施化肥和配施有机肥2个处理,优化施氮量 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 条件下设单施化肥和配施有机肥2个处理。优化施肥是课题组根据前期田间试验研究结果,在常规施氮量基础上降低20%,具体施肥量见表1。2013年是试验进行的第4年,有机肥

表1 试验设计

Table 1 Experimental design

处理 Treatment	$\text{N/kg} \cdot \text{hm}^{-2}$			$\text{P}_2\text{O}_5/kg \cdot \text{hm}^{-2}$	$\text{K}_2\text{O}/kg \cdot \text{hm}^{-2}$
	化肥 C.F.	有机肥 O.F.	合计		
T ₁	0	0	0	90	90
T ₂	300	0	300	90	90
T ₃	210	90	300	90	90
T ₄	240	0	240	90	90
T ₅	195	45	240	90	90

注:C.F.代表化学肥料,O.F.代表有机肥。

Note: C.F.—Chemical fertilizer, O.F.—Organic fertilizer.

使用腐熟的羊粪,有机质含量为 34.8%、全氮含量为 0.71%、全磷含量为 0.52%、全钾含量为 0.27%。氮肥 50%作为基肥在整地时施入,30%在分蘖期施入(6 月 1 日),20%在拔节期施入(6 月 24 日),有机肥氮肥均作底肥一次施入;全部磷肥和钾肥均作基肥在整地时一次施入,P₂O₅ 的用量为 90 kg·hm⁻²,K₂O 的用量为 90 kg·hm⁻²。有机肥和化肥配施处理先折算有机肥带入的磷钾,剩余的用化肥补充。

2013 年度田间试验于 4 月至 10 月进行,水稻品种为宁粳 43 号,于 5 月 16 日插秧,9 月 27 日收获,株距为 10 cm,行距为 30 cm,插秧时每穴 3~4 株。试验小区面积为 5 m×9 m=45 m²,重复 3 次,随机区组排列,田间试验排列见图 1。试验开始前在小区之间用长寿膜隔离,地面田埂包高 30 cm,隔离地下埋深 100 cm,以防止小区之间的侧渗和串流,每个小区设有单独的灌水口和排水口,单灌单排,淋溶水采样装置布置在小区中间。灌溉用水引自黄河水,田间除草和管理同农户习惯做法。

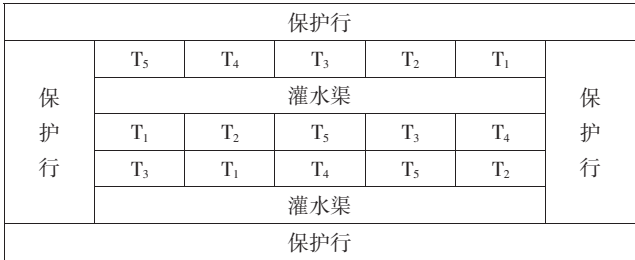


图 1 田间小区排列
Figure 1 Arrangement of field plots

1.3 样品采集

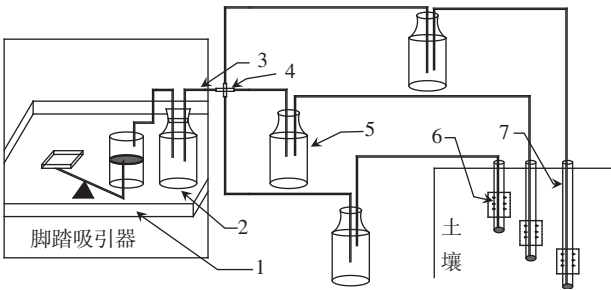
水稻收获时采集植株样,测定植株养分含量和考种,水稻产量整个小区实打实收。稻田田面水在每次追肥后第 3、7、10 d 连续采集 3 次,采样时用注射器不扰动土层,随机抽取小区内 3 处中上层田面水。稻

田渗漏量用渗漏仪测定,渗漏仪的安装按照水利行业标准 SL13—2004 操作。淋洗水样用已经申请专利的装置采集(图 2),试验布置前分别埋入 20、60、100 cm 深度的淋洗水样收集管,每次施肥后第 3、7、10 d 连续采集 3 次,其余时间每隔 10 d 采集 1 次,采集的淋溶水用 500 mL 容量的塑料瓶收集,带回实验室于-4℃的冰箱内保存。

氮素渗漏量计算:

$$P=\sum_{i=1}^n C_i \times V_i$$

式中:P 为氮素淋失量;C_i 为第 i 次淋溶水中氮的浓度;V_i 为第 i 次淋溶水的体积。



1:吸引器 Aspirator;2:1 L 容量瓶 1 L volumetric flask;
3:PE 气管 PE trachea;4:阀门 Valve;
5:0.5 L 容量瓶 0.5 L volumetric flask;
6:无纺布 Non-woven fabric;7:PVC 管 PVC pipe

图 2 淋溶水采集装置
Figure 2 Leachate sampling device

1.4 样品测定与数据处理

土壤容重用环刀法,植株全氮用凯氏定氮法,速效氮用扩散皿法,速效磷用钼蓝比色法,速效钾用火焰光度法^[18],水样总氮用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法测定。

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

表 2 施用有机肥对水稻产量和氮肥利用效率的影响
Table 2 Effect of organic fertilizer on rice yield and N use efficiency

处理 Treatment	平均产量 Grain yield/kg·hm ⁻²	秸秆吸氮量 Straw N uptake/kg·hm ⁻²	籽粒吸氮 Grain N uptake/kg·hm ⁻²	总吸氮 Total N uptake/kg·hm ⁻²	氮肥利用率 NUE/%
T ₁	5631a	21.4	47.3	68.7a	—
T ₂	9152b	67.7	86.2	153.9b	28.4a
T ₃	9912c	58.8	110.6	169.4c	33.6b
T ₄	9480b	53.9	101.8	155.7b	36.3bc
T ₅	9378b	51.9	108.3	160.2bc	38.1c

注:同列不同字母表示差异显著(P<0.05)。下同。
Note: Different letters within a column mean significant difference(P<0.05). The same as below.

2 结果与分析

2.1 施用有机肥对水稻产量和氮肥利用效率的影响

施用有机肥对水稻产量和氮肥利用率的影响见表2,水稻产量随着施氮量增加逐渐提高,各施肥处理均显著高于对照(T_1)处理。各施氮处理水稻产量分别增加了3521、4281、3849、3747 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,相应的增产率在62.5%~76.0%之间。 T_4 处理是课题组前期工作得出的优化施氮量,在氮肥降低20%条件下,与常规施氮量 T_2 处理比较产量没有显著降低,说明优化施氮措施是可行的。同等施氮水平下,用有机肥替代部分氮源,水稻产量也未显著降低。各施肥处理间比较 T_3 处理水稻产量最高,显著高于其余处理,其他处理间水稻产量则没有显著差异,说明优化施氮和分配施有机肥替代化肥中的氮源^[19],不会导致水稻籽粒产量的显著降低^[20]。

单施化肥处理间比较,水稻氮肥利用率随着施氮量的增加表现出降低的趋势, T_5 处理的氮肥利用率最高,比常规施肥处理提高了9.7个百分点。各施肥处理间的氮肥利用率排序为 $T_5 > T_4 > T_3 > T_2$ 。在同等施氮水平条件下,配合施用有机肥替代部分化肥氮源,可以显著提高氮肥利用率, T_3 和 T_5 处理的氮肥利用率分别比只施用化学氮肥的 T_2 和 T_4 处理提高了5.2、1.9个百分点。施用有机肥时,籽粒对氮素的吸收增加量高于秸秆吸氮的减少量,因而提高了氮肥利用率^[21]。

2.2 施用有机肥对稻田田面水 TN 浓度动态变化的影响

水稻田田面水中的养分极易随着退水和降雨以径流的形式进入地表水体,造成水体富营养化,因此监测田面水中的 TN 动态变化对面源污染防控具有重要意义^[22]。尿素极易溶解于水中,田面水 TN 浓度在

每次施肥后的第3 d迅速达到极值,之后随着作物的吸收和转化逐渐降低,在第10 d左右降低到较低的水平(图3)。由于基施氮肥比例较高, T_2 和 T_4 处理田面水中的 TN 浓度在插秧后第3 d出现峰值,分别达到36.70、26.71 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。优化施肥可以显著降低田面水中的 TN 浓度, T_4 处理氮肥用量比 T_2 处理减低了20%,水稻生育期内田面水中的 TN 浓度始终低于 T_2 处理,减少氮肥用量可以显著降低田面水中的氮素以径流形式损失。在常规施氮水平和优化施氮水平条件下,配施一定量的有机肥替代化肥中的氮源均可以显著降低田面水 TN 浓度,插秧后第一次对田面水的监测结果表明, T_3 和 T_5 处理田面水 TN 峰值分别为16.74、17.31 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,远低于等量施用化学氮肥的 T_2 和 T_4 处理。对于常规施肥处理,施肥后前7 d内最容易导致氮素流失,控制好这段时间内的氮素径流损失是面源污染防控的关键,配施有机肥则可以显著降低氮素径流损失的风险。

2.3 施用有机肥对稻田氮素淋洗损失的影响

施用有机肥对土体中氮素淋失的影响见图4。增施氮肥显著增加了 TN 在不同深度的淋洗损失量,各处理均表现出 TN 淋失量随着土层深度增加逐渐降低的趋势。各处理 TN 淋失量主要发生在20 cm 深度的土层,因为氮素在这层土体内转化比较强烈,各种形态氮素极易随着水分向下迁移,同等施氮水平下,配合施用有机肥可以显著降低 TN 淋洗损失, T_3 处理 TN 淋失量比 T_2 处理减低了9.99%, T_5 处理比 T_4 处理减低了6.02%。施用有机肥可以使较多的氮素保留在20 cm 土层中^[23],减少氮素向下的淋洗损失。

灌淤土犁底层一般在50~60 cm,淋洗至土壤60 cm 深度的氮素作物根系很难吸收,具有淋失的风险。各施肥处理60 cm 土层处 TN 淋失量分别为

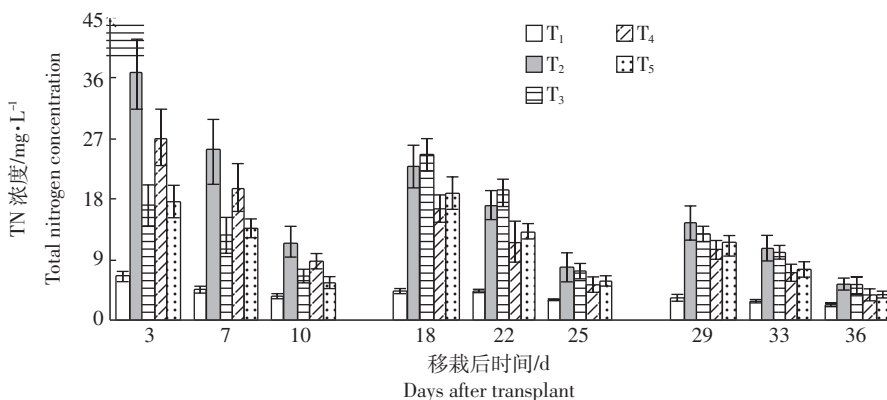


图3 施用有机肥对田面水中总氮含量的影响

Figure 3 Effect of organic fertilizer on total nitrogen concentrations in surface water of paddy field

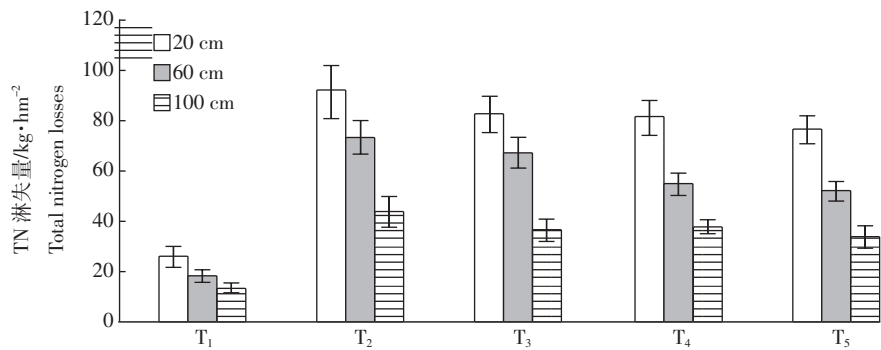


图 4 施用有机肥对不同深度土体中总氮淋失量的影响

Figure 4 Effect of organic fertilizer on total nitrogen leaching losses in different soil depths

72.64、66.45、54.56、51.76 kg·hm⁻²,对 TN 淋失量占到施氮量的比例进行计算,结果见表 3。T₂、T₃、T₄、T₅ 处理潜在淋失风险占到施氮量的 21.6%~24.2%。TN 淋洗达 100 cm 土壤深度的量分别为 43.51、35.76、36.89、33.47 kg·hm⁻²,相应所占施氮量比例为 11.9%~15.4%。100 cm 土壤深度 T₂ 处理淋洗损失量最高,淋洗损失量最低的则为 T₅ 处理,氮素淋失量减少了 23.1%,说明在优化施氮的条件下配施有机肥替代部分化学氮源,可以显著降低氮素淋洗出 100 cm 深度土体,而且水稻籽粒产量没有显著下降,是一种合理的氮肥运筹模式。

进一步对 100 cm 土层深度水稻不同生育期间的氮素淋失量进行分析,结果见表 4。由于没有氮肥投入,对照(T₁)处理淋失的总氮来自于土体中上季作物的残留,淋失主要发生在分蘖期和孕穗期。受到插秧和补秧等田间操作的影响,水稻生长前期极易发生氮素的淋失,T₂ 处理和 T₄ 处理 TN 淋失主要发生在分蘖期,此生育期 TN 淋失量占全生育期总淋失量的比例分别为 38.0%和 36.5%,T₃ 处理和 T₅ 处理由于配施了有机肥,土体对盈余氮素的吸附能力较强,TN 淋失高峰有所延迟,分蘖期 TN 淋失量占全生育期总淋失量的比例仅分别为 23.3%和 23.1%。T₃ 和 T₅ 处理 TN 淋失量峰值均推迟到孕穗期,此阶段 TN 淋失量占全生

表 3 不同深度土体中总氮淋失量占施氮量的比例(%)

Table 3 Proportion of nitrogen leaching losses to nitrogen application rates in different soil depths(%)

处理 Treatment	20 cm 20 cm depth	60 cm 60 cm depth	100 cm 100 cm depth
T ₂	30.5	24.2	14.5
T ₃	27.4	22.2	11.9
T ₄	33.9	22.7	15.4
T ₅	31.8	21.6	13.9

表 4 施用有机肥对水稻不同生育期 100 cm 土层处总氮淋失量的影响(kg·hm⁻²)

Table 4 Cumulative TN leaching losses at different growth stages at 100 cm soil depth(kg·hm⁻²)

不同生育期 Difference stage	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅
返青期 Seedling stage	1.31a	3.67d	2.14b	2.91c	2.07b
分蘖期 Tillering stage	3.31a	16.45d	8.34b	13.46c	7.74b
孕穗期 Jointing stage	3.68a	12.47c	12.03c	10.82b	11.73bc
开花期 Flowering stage	1.84a	5.13b	9.12c	4.67b	8.17c
灌浆期 Heading stage	1.26a	3.94d	2.54bc	3.12c	2.04b
成熟期 Harvest stage	0.97a	1.85b	1.59b	1.91b	1.72b

注:方差分析仅在不同处理之间同一生育期进行比较。
Note: Analysis of variance was performed at each growth stage.

育期总淋失量的比例分别为 33.6%和 35.0%。

2.4 施用有机肥对稻田氮素表观平衡的影响

以 0~100 cm 土层为研究界面,根据水稻整个生长期间的氮素输入和输出结果计算了氮素平衡特征,结果如表 5 所示。除施肥投入的氮素以外,当季水稻的氮素输入途径主要包括灌水带入和上季土体中的残留,在水稻生长期由于长期淹水,氮素的矿化很难进行,矿化量较低(仅 3.6 kg·hm⁻²)。氮素的输出途径主要为作物收获后植株移走的和在土体中的残留,对照(T₁)处理的氮素表观损失量最低(仅 4.4 kg·hm⁻²),各施肥处理间比较氮素表观损失量也存在显著差异,同等施氮水平下,配施有机肥均可以减少氮素的表观损失,T₃ 和 T₅ 处理的氮素表观损失量分别降低了 23.9、16.5 kg·hm⁻²,相应的降低幅度分别为 12.1%和 12.5%。

3 讨论

宁夏引黄灌区农业生产中化学肥料尤其是氮肥施用量为全国平均水平的 3 倍多^[10],水稻种植中氮肥

表 5 施用有机肥对水稻生育期 0~100 cm 土层氮素表观平衡的影响(kg·hm⁻²)
Table 5 Apparent N balance in 0~100 cm soil layer during rice season(kg·hm⁻²)

项目 Item	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅
N 素输入 N input					
施肥投入氮量 N fertilizer	0	300	300	240	240
降雨和灌水带入氮 Irrigation N	23.7	23.7	23.7	23.7	23.7
秧苗带入氮 Seeding N	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
播前无机氮 N _{min} before planting	74.2	109.2	102.3	95.7	84.5
净矿化 Net mineralization	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6
总量 Sum	102.9	437.9	431.0	364.4	353.2
N 素输出 N output					
水稻收获携走 N removal by harvest	68.7	153.9	169.4	155.7	160.2
残留无机氮 Residual N _{min}	29.8	106.0	87.5	96.4	77.3
氮表观损失 N surplus	4.4a	198.0d	174.1c	132.3b	115.7b
总量 Sum	102.9	437.9	431.0	364.4	353.2

的施用量更高^[24],稻田退水导致的面源污染对黄河水质造成了严重威胁。施有机肥对氮肥迁移转化过程的影响较为复杂,结果也不尽相同^[25-26]。引黄灌区土壤类型为灌淤土,土壤保肥能力较差,施用有机肥后可以提高土壤的 C/N,有利于提高土壤微生物活性,降低氮素在土体中的释放转化速率,从而提高土壤的保肥性,减少氮素向下层土体的淋洗。Maeda 等^[27]通过长期定位试验研究认为,施用有机肥可以显著降低 60 cm 深度的硝态氮淋洗并且可以提高作物产量,施用有机肥可以提高土壤有机质含量和作物产量,从而提高化肥养分利用率并降低养分损失,但过量施用有机肥也可能导致养分淋洗损失。谢育平等^[28]的研究结果表明,长期大量施用有机肥会提高稻田土壤氮素水平,容易造成硝态氮在土体中的累积,引发氮素向深层土体淋洗损失。高懋芳等^[29]的研究结果表明,长期施用有机肥增加了土体中氮素的淋失风险,且淋失浓度随着施肥量增加逐渐提高,从而对流域的水环境安全构成潜在威胁^[30]。降低氮肥投入也可以减少氮素的淋洗损失^[31-32],刘汝亮等^[1]在宁夏引黄灌区稻田的研究结果表明,优化施肥处理在氮素降低 20%的条件下,氮肥利用率提高了 8.8%,总氮淋失量降低了 33.1%。欧盟国家的氮肥推荐量在 110~140 kg·hm⁻² 之间,可以显著降低农田的硝态氮淋洗损失^[33]。

本试验结果表明,常规施氮和优化施氮水平配施有机肥均没有降低水稻籽粒产量,后者调节了水稻生育后期土壤和化肥养分的释放速率,提高了氮肥利用率。配施有机肥均可以显著降低田面水中 TN 的浓度并延迟峰值出现的时间,减少了水稻生育前期排水导致的氮素径流损失风险,在同等施氮水平下比较,配

施有机肥显著降低了 TN 淋洗损失量,与张爱平等^[2]和王永生等^[21]的研究结果一致。施用有机肥降低深层土壤中氮素淋失的原因是盈余的氮素被吸附和固持在了上层土体中,减少了向深层土体的淋洗。过量施用氮肥并没有增加水稻收获时氮素的携出量,却增加了土体中氮素的残留,造成氮素淋洗损失,氮素表观损失量增加。由于有机肥质量受到肥源和堆肥处理过程中多种因素的影响^[34],有机肥对作物、土壤质量和养分转化的影响过程比较复杂,本研究只考虑了堆肥条件下有机肥中的氮、磷、钾养分,没有综合考虑其他因素可能对水稻产量和氮素循环的影响。因此,本研究结果仅反映了配施有机肥在宁夏引黄灌区的效果,在今后的研究中,应综合考虑有机肥施用量、有机氮矿化和土壤中氮素转化等因素,进一步探明有机肥和化肥配合使用对引黄灌区稻田氮素淋失机制的影响,探讨土壤有机质含量和微生物特性与氮素淋失之间的响应,为有机肥合理施用和灌区面源污染控制提供科学依据。

4 结论

长期优化施氮和配施有机肥不会降低水稻籽粒产量,与单施化肥比较,配施有机肥有利于提高籽粒对氮素的吸收量,使籽粒吸氮量高于秸秆对氮素吸收的减少量,提高氮肥利用率。同等施氮水平下,配施有机肥可以降低田面水中和各层次淋溶水中 TN 浓度,减少氮素通过径流和淋洗途径损失,但配施有机肥对氮素在稻田中的转化过程和土壤质量方面的研究还需要深入。氮平衡特征计算结果表明,配施有机肥显著降低土体中无机氮残留,降低氮素表观损失量。在

引黄灌区水稻生产中配施一定比例有机肥是协调作物产量和环境效益的合理选择,以优化施用化学氮肥 $195 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 并配施有机氮肥 $45 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 效果最佳。

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.
LIU Ru-liang, LI You-hong, ZHANG Ai-ping, et al. Effect of seeding-box total fertilization technology based on controlled-release nitrogen fertilizer on the paddy rice yield and nitrogen losses[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(7): 1853-1860.
- [2] 张爱平,杨世琦,易军,等.宁夏引黄灌区水体污染现状及污染源解析[J].中国生态农业学报,2010,18(6):1295-1301.
ZHANG Ai-ping, YANG Shi-qi, YI Jun, et al. Analysis on current situation of water pollution and pollutant source in Ningxia Yellow River Irrigation Region[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(6): 1295-1301.
- [3] 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.
- [4] 邵晓梅,严昌荣.基于 sufer7.0 的黄河流域不同旱作类型区土壤水分动态变化的比较[J].自然资源学报,2005,20(6):843-849.
SHAO Xiao-mei, YAN Chang-rong. Comparison of soil moisture dynamics based on sufer7.0 between different dry farmings areas in the Yellow River Basin[J]. *Journal of Nature Resources*, 2005, 20(6): 843-849.
- [5] 李强坤,李怀恩,胡亚伟,等.青铜峡灌区氮素流失试验研究[J].农业环境科学学报,2008,27(2):683-686.
LI Qiang-kun, LI Huai-en, HU Ya-wei, et al. Experimental study on nitrogen loss in Qingtongxia Irrigation[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(2): 683-686.
- [6] 穆鑫,吕谋超,温随群,等.宁夏引黄灌区农田退水回灌对土壤盐分影响的试验研究[J].灌溉排水学报,2011,30(1):76-79.
MU Xin, LÜ Mou-chao, WEN Sui-qun, et al. Experimental study on Yellow River Irrigated Area in Ningxia withdrawal of water on soil salinity recharge[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2011, 30(1): 76-79.
- [7] 陈伟伟,李强坤,胡亚伟,等.青铜峡灌区水稻田三氮变化特征试验研究[J].农业环境科学学报,2010,29(4):790-794.
CHEN Wei-wei, LI Qiang-kun, HU Ya-wei, et al. Experimental research on variation feature of three kinds of nitrogen from paddy field in Qingtongxia Irrigation Area[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(4): 790-794.
- [8] 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.
ZHANG Ai-ping, LIU Ru-liang, YANG Shi-qi, et al. Effect of side bar fertilization technology based on slow-release fertilizer on rice yield and nitrogen losses[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(3): 555-562.
- [9] 张惠,杨正礼,罗良国,等.黄河上游灌区稻田 N_2O 排放特征[J].生态学报,2011,31(21):6606-6615.
ZHANG Hui, YANG Zheng-li, LUO Liang-guo, et al. The feature of N_2O emission from a paddy field in irrigation area of the Yellow River[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(21): 6606-6615.
- [10] 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.
ZHANG Qing-wen, ZHANG Hui, YI Jun, et al. The fate of fertilizer-derived nitrogen in a rice field in the Qingtongxia Irrigation Area[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(8): 1707-1714.
- [11] 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.
YI Jun, ZHANG Qing-wen, WANG Ming. Nitrate-nitrogen transport in an anthropogenic-alluvial soil of Ningxia irrigation area[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(10): 2046-2053.
- [12] Anonym. Fertilized to death[J]. *Nature*, 2003, 425: 894-895.
- [13] Bahman E, Gilley J E. Phosphorus and nitrogen in runoff following beef cattle manure or compost application[J]. *J Environment Qual*, 1999, 28(4): 1201-1210.
- [14] Chen C R, Xu Z H, Zhang S L, et al. Soluble organic nitrogen pool in forest soils of Subtropical Australia[J]. *Plant and Soil*, 2005, 277(1-2): 285-297.
- [15] Ju X T, Xing G X, Chen X P, et al. Reducing environment risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems[J]. *PNAS*, 2009, 106(9): 3041-3046.
- [16] 杨飞,杨世琦,诸云强,等.中国近30年畜禽养殖量及其耕地氮污染负荷分析[J].农业工程学报,2013,29(5):1-11.
YANG Fei, YANG Shi-qi, ZHU Yun-qiang, et al. Analysis on livestock and poultry production and nitrogen pollution load of cultivated land during last 30 years in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(5): 1-11.
- [17] 杨俊刚,张冬雷,徐凯,等.控释肥与普通肥料混施对设施番茄生长和土壤硝态氮残留的影响[J].中国农业科学,2012,45(18):3782-3791.
YANG Jun-gang, ZHANG Dong-lei, XU Kai, et al. Effects of mixed application of controlled-release fertilizer and common fertilizers on-greenhouse tomato growth, yield, root distribution, and soil nitrate residual[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(18): 3782-3791.
- [18] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000.
BAO Shi-dan. Analysis of agricultural soil[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000.
- [19] 杨世琦,王永生,谢晓军,等.宁夏引黄灌区猪粪还田对麦田土壤硝态氮淋失的影响[J].应用生态学报,2014,25(6):1759-1764.
YANG Shi-qi, WANG Yong-sheng, XIE Xiao-jun, et al. Effect of swine manure application on nitrate leaching in winter wheat field in the Yellow River Irrigation Area of Ningxia, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(6): 1759-1764.
- [20] 王静,郭熙盛,王允青,等.保护性耕作与平衡施肥对巢湖流域稻田氮素径流损失及水稻产量的影响研究[J].农业环境科学学报,2010,29(6):1164-1171.
WANG Jing, GUO Xi-sheng, WANG Yun-qing, et al. Effects of conservation tillage and balanced fertilization on nitrogen loss from paddy field and rice yields in Chaohu Region[J]. *Journal of Agro-Environment*

- Science*, 2010, 29(6): 1164–1171.
- [21] 王永生, 黄剑, 杨世琦. 宁夏黄灌区稻秆还田对硝态氮流失量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(4): 697–703.
- WANG Yong-sheng, HUANG Jian, YANG Shi-qi. The influence of rice straw returning on the leaching losses of the nitrate nitrogen in Ningxia Irrigation District, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(4): 697–703.
- [22] 罗良国, 赵天成, 刘汝亮, 等. 宁夏引黄灌区农田排水沟水生植物多样性[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(12): 2436–2442.
- LUO Liang-guo, ZHAO Tian-cheng, LIU Ru-liang, et al. Diversity of aquatic plants in drainage ditches in the Yellow River Irrigation Area of Ningxia[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(12): 2436–2442.
- [23] 林清火, 罗微, 屈明, 等. 尿素在砖红壤中的淋失特征: II. NO_3^- -N 的淋失[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(4): 638–642.
- LIN Qing-huo, LUO Wei, QU Ming, et al. Leaching characters of NO_3^- -N in latosol after applying urea: II. Loss of NO_3^- -N by leaching[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(4): 638–642.
- [24] 张学军, 赵营, 陈晓群, 等. 滴灌施肥中施氮量对两年蔬菜产量、氮素平衡及土壤硝态氮累积的影响[J]. 中国农业科学, 2007, 40(11): 2535–2545.
- ZHANG Xue-jun, ZHAO Ying, CHEN Xiao-qun, et al. Effects of application of nitrogen on vegetable yield, nitrogen balance and soil nitrogen accumulation under two years' drip fertigation[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(11): 2535–2545.
- [25] Zhang L X, Ulgiati S, Yang Z F, et al. Emergy evaluation and economic analysis of three wetland fish farming systems in Nansi Lake area, China[J]. *J Environ Manage*, 2011, 92(3): 683–694.
- [26] Zhang Y M, Chen D L, Zhang J B, et al. Ammonia volatilization and denitrification losses from an irrigated maize-wheat rotation field in the North China[J]. *Pedosphere*, 2004, 14(4): 533–540.
- [27] Maeda M, Ihara H, Ota T. Deep soil adsorption of nitrate in a Japanese andisol in response to different nitrogen sources[J]. *Soil and Water Management and Conservation*, 2008, 72(3): 702–710.
- [28] 谢育平, 周摇舟, 金一鸣, 等. 长期施用畜禽粪便稻田土壤氮素养分的剖面分布特征研究[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(2): 893–894, 903.
- XIE Yu-ping, ZHOU Yao-zhou, JIN Yi-ming, et al. Study on the profile distribution characteristics of nitrogen in paddy soils under long-term poultry manure application[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, 38(2): 893–894, 903.
- [29] 高懋芳, 邱建军, 李长生, 等. 应用 Manure-DNDC 模型模拟畜禽养殖氮素污染[J]. 农业工程学报, 2012, 28(9): 183–189.
- GAO Mao-fang, QIU Jian-jun, LI Chang-sheng, et al. Modelling nitrogen pollution from livestock breeding using Manure-DNDC model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(9): 183–189.
- [30] 陈天宝, 万昭军, 付茂忠, 等. 基于氮素循环的耕地畜禽承载能力评估模型建立与应用[J]. 农业工程学报, 2012, 28(2): 191–195.
- CHEN Tian-bao, WAN Zhao-jun, FU Mao-zhong, et al. Modeling and application of livestock supporting capacity estimation of cropland based on nitrogen cycling in Southwest China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(2): 191–195.
- [31] 张学军, 任发春, 赵营, 等. 引黄灌区设施菜田硝态氮淋失的季节性特征[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(10): 1964–1972.
- ZHANG Xue-jun, REN Fa-chun, ZHAO Ying, et al. Seasonal changes of nitrate leaching in greenhouse vegetable field in Yellow River Irrigation Region of Ningxia, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(10): 1964–1972.
- [32] 张维理, 田哲旭, 张宁, 等. 我国北方农田氮肥造成地下水硝酸盐污染的调查[J]. 植物营养与肥料学报, 1995, 1(2): 80–87.
- ZHANG Wei-li, TIAN Zhe-xu, ZHANG Ning, et al. Investigation of nitrate pollution in ground water due to nitrogen fertilization in agriculture in North China[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1995, 1(2): 80–87.
- [33] 范成五, 罗益, 王文华, 等. 4 不同管理措施对黄壤坡耕地径流氮输出的控制效果[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(10): 1948–1955.
- FAN Cheng-wu, LUO Yi, WANG Wen-hua, et al. Effects of different management practices on nitrogen runoff losses from sloping yellow soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(10): 1948–1955.
- [34] 李江涛, 钟晓兰, 赵其国. 施用畜禽粪便和化肥对土壤活性有机碳库和团聚体稳定性影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(1): 233–238.
- LI Jiang-tao, ZHONG Xiao-lan, ZHAO Qi-guo. Soil active organic carbon pool and aggregate stability as affected by application of livestock and poultry excrement and chemical fertilizer[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(1): 233–238.