

引黄灌区灌淤土氮素淋失特征土柱模拟研究

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

(1.宁夏农林科学院农业资源与环境研究所, 宁夏 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:采取土柱模拟实验的方法研究了不同施氮强度对宁夏引黄灌区灌淤土中氮素淋洗损失特征,以期为氮素淋失控制和合理施用提供科学依据。试验设5个氮水平,分别为对照处理(N0)、常规氮水平 300 kg·hm⁻² (N300)、优化氮水平(N240)、2倍常规氮水平(N600)、2倍优化氮水平(N480)。试验结果表明:不同施氮水平淋洗液中NO₃⁻-N的浓度表现出先升高后降低的趋势,浓度峰值出现的时间随施氮水平增加逐渐后移,NO₃⁻-N是氮素淋洗损失的主要形态,而NH₄⁺-N的淋失损失主要出现在淋洗前期,增加施氮量可以推迟各形态氮素峰值出现时间,增加淋失风险。N240,N300,N480和N600处理总氮累积淋失量分别为94.53、128.02、222.06 kg·hm⁻²和268.6 kg·hm⁻²,淋洗损失比例分别为39.38%、42.67%、46.26%和44.77%,当季施入稻田土壤的氮肥极易淋洗到100 cm深度以下,成为浅层地下水的潜在威胁。施入到灌淤土的氮素有39.38%~46.26%通过淋洗途径损失,各处理总氮累积量淋失规律服从对数方程 $Y_t=a+b\ln t$ ($R^2=0.927\sim 0.975$)。

关键词:引黄灌区;灌淤土;氮素;淋失

中图分类号:X522

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2014)06-0513-08

doi: 10.13254/j.jare.2014.0207

Anthropogenic-alluvial Soil Nitrogen Fertilizer Leaching Loss Characteristics Study Using Soil Column Simulation in Yellow River Irrigation Area, China

ZHOU Li-na¹, LIU Ru-liang¹, ZHANG Ai-ping^{2*}, WANG Fang¹, LI You-hong¹, ZHAO Tian-cheng¹, 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: A soil column simulation experiment was conducted to study the effect of different nitrogen intensity in nitrogen fertilizer leaching loss characteristics in anthropogenic-alluvial soil. There were 5 treatments in this experiment, no nitrogen fertilizer treatment (N0), conventional fertilization treatment (N300), optimized fertilization treatment (N240), double conventional fertilization treatment (N600) and double optimized fertilization treatment (N480). The results showed that with different nitrogen intensity treatments, nitrate nitrogen concentration increased firstly and then decreased and leaching concentration peak appeared delay with nitrogen rates increasing. Nitrate nitrogen was the predominant nitrogen leaching form, increase of nitrogen application could postpone nitrogen peak appear time and lead to leaching risk. Ammonium nitrogen leaching loss occurred in the earlier period. Total N leaching losses were 94.53, 128.02, 222.06 kg·hm⁻² and 268.6 kg·hm⁻² in treatments N240, N300, N480 and N600, which accounted for nitrogen leaching losses rates by 39.38%, 42.67%, 46.26% and 44.77%, respectively. Applied nitrogen fertilizer was very easily leaching to 100 cm soil depth, indicating that nitrogen fertilizer leaching could be a pollution source for underground water. About 39.38%~46.26% of fertilizer nitrogen applied in soil was lost by leaching. The accumulative total N leaching amount was in accordance with logarithmic equation of $Y_t=a+b\ln t$.

Keywords: Yellow River irrigation area; anthropogenic-alluvial soil; nitrogen fertilizer; leaching losses

宁夏引黄灌区地处我国西北内陆,有着2000多年的灌溉历史,自古以来就是重要的粮食基地。由于农

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污染正在成为影响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处于较高水平,加上大水漫灌等不合理灌溉方式,导致养分损失严重。宁夏引黄灌区近年来化肥平均施用量为1400~1500 kg·hm⁻²,其中纯N施用量为300~360 kg·hm⁻² [1-2]。研

收稿日期:2014-08-13

基金项目:宁夏自然科学基金项目资助(NZ12257);宁夏科技支撑计划项目资助

作者简介:周丽娜(1980—),女,助理研究员,主要从事农业节水和植物营养方面的研究工作。E-mail: linazhou@163.com

*通信作者:张爱平 E-mail: apzhang0601@126.com

究结果表明,宁夏引黄灌区每年氮素流失超过 30 万 t, 施入农田的氮肥有 20%~65% 流失进入黄河水体, 来源于水稻作物的总氮负荷占的比例最大, 约为 72%, 通过对稻田氮素平衡特征进行计算, 氮素当季的利用率仅为 28%, 土体内残留量在 23%, 当地的表观损失量约为 49%^[3]。宁夏引黄灌区土壤类型为灌淤土, 是人为灌溉耕作条件下形成的土壤类型, 灌淤层厚度一般可达 30~70 cm^[1]。该地区地下水位较浅, 水源充沛, 排水条件较差, 有次生盐渍化现象, 因此农户长期养成了大水漫灌洗盐的习惯^[4]。该区的灌溉制度一般分为春灌、秋灌和冬灌, 每年灌溉时期一般从 4 月开始^[5], 旱地作物整个生育期灌溉次数在 3~5 次, 而水稻整个生育期灌水次数一般均超过 10 次, 且每次的灌水量都较大^[6]。

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^[7-8]。目前针对不同土壤类型、肥料种类和环境条件下土壤中氮素淋洗特征的研究已经很多^[9-11], 但灌淤土由于其成土条件的特殊性, 有机质含量低, 质地偏砂土, 养分淋溶作用强烈, 氮素淋失特征也与其他类型土壤不同^[12-13]。受到有机质含量和粘粒的影响, 灌淤土中各土层硝态氮穿透曲线差异较大, 硝态氮迁移与水分湿润锋运移有较高的一致性, 且容易在水分运动的湿润锋处累积^[3]。因此, 本研究利用室内土柱模拟实验, 模拟水稻整个生育期灌水定额, 研究不同施氮强度条件下氮素的淋失动态和形态特征, 旨在了解引黄灌区灌淤土中氮素淋洗损失特征及规律, 为氮肥的合理施用和保护水环境安全提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 供试材料

土柱淋洗模拟试验供试土样采自位于宁夏引黄灌区的银川市灵武农场三队, 取样点位于东经 106°17'58", 北纬 38°07'33", 土壤类型为灌淤土。土壤样品

按照 0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm 层次采集, 自然风干后过 2 mm 筛。同时用环刀采集土样测定容重, 0~100 cm 各土层土壤容重依次为 1.47、1.62、1.57、1.46 g·cm⁻³ 和 1.43 g·cm⁻³。

土样采集后, 一部分放置于 4 ℃ 左右的冰箱内, 用于土壤水分等指标的测定。另一部分经自然风干后, 用于常规理化指标的测定, 供试土壤各层次基本理化性状见表 1。

1.2 试验装置

模拟土柱用 PVC 管材加工而成, 土柱高度为 120 cm、内径为 6 cm, 底部垫上 2 层无纺布, 再用 300 目尼龙网包扎, 垫上约 2 cm 厚度洗净的石英砂。以 20 cm 为一个土层按照容重计算装填的土量, 各层土壤装填时压实边缘土壤防止侧渗发生。肥料与 0~20 cm 土层土壤混匀后一次性装入管中, 然后在 PVC 管表层土壤铺上 2 cm 厚的细砂, 防止灌水时扰动耕层土壤。用保鲜膜封住 PVC 管顶部, 用针扎一些小孔, 保障水分正常入渗又能防止大量蒸发。土柱放在实验室内进行淋洗模拟, 室内温度保持在 23~28 ℃ 之间。

1.3 试验设计

试验设计 5 个施氮水平, 分别为对照处理不施氮肥 (N0)、常规氮肥水平 300 kg·hm⁻² (N300)、优化氮肥水平 (N240)、2 倍常规氮肥水平 (N600)、2 倍优化氮肥水平 (N480)。P₂O₅ 用量为 90 kg·hm⁻²、K₂O 用量为 75 kg·hm⁻², 氮肥用尿素 (N 含量 46.0%), 磷肥用重过磷酸钙 (P₂O₅ 含量 26%), 钾用氯化钾 (K₂O 含量 60%), 各处理均重复 3 次。肥料在土柱装填时与 0~20 cm 耕层土壤混匀, 以常规施肥 N300 为例, 尿素用量为 0.103 2 g, 重过磷酸钙用量为 0.031 2 g, 氯化钾用量为 0.019 8 g, 其他施肥处理肥料用量以此类推。开始时土柱先加入 350 mL 蒸馏水淋洗使土壤湿润, 调节土柱中土壤持水量与田间取样时相同, 第 2 d 开始第 1 次淋洗, 单个土柱每次用 224 mL 蒸馏水, 共淋洗 10 次 (模拟引黄灌区水稻生育期灌水 10 次左右),

表 1 供试土壤的基本物理化学性状

Table 1 Basic physicochemical properties of test soil

土壤层次 Soil depth/cm	有机质 Organic mater/g·kg ⁻¹	总氮 Total N/g·kg ⁻¹	速效磷 Available P/mg·kg ⁻¹	速效钾 Available K/mg·kg ⁻¹	铵态氮 NH ₄ ⁺ -N/mg·kg ⁻¹	硝态氮 NO ₃ ⁻ -N/mg·kg ⁻¹
0~20	13.98	1.21	35.8	187.6	9.48	17.43
20~40	12.84	1.04	19.2	154.5	8.49	24.92
40~60	8.36	0.87	5.2	114.7	4.41	25.75
60~80	5.67	0.58	4.7	108.6	4.18	7.62
80~100	3.82	0.41	4.8	98.4	2.53	8.02

灌溉水总量相当于引黄灌区水稻田一季的灌溉量 ($900 \text{ m}^3 \cdot 666.7 \text{ m}^{-2}$)。

1.4 样品采集和测定

土柱淋洗模拟试验在2012年5月—10月间开展,淋洗频率为间隔10 d淋洗1次,渗滤液用烧杯承接,每次不再有渗滤液流出时,用量筒量取渗滤液体积。土柱模拟试验总共淋洗10次,并在样品采集完的当天进行各项指标测定。水样总氮用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定,硝态氮和铵态氮用流动注射分析仪测定^[14],数据和图表处理用Excel软件,回归方程和显著性检验用SPSS软件。

2 结果与分析

2.1 不同施氮水平对硝态氮淋洗特征的影响

2.1.1 不同施氮水平对硝态氮淋洗浓度的影响

从图1可以看出,随着淋洗次数的逐渐增加,N0处理淋洗液中 NO_3^- -N浓度表现出逐渐降低的趋势,而各施氮处理淋洗液中 NO_3^- -N的浓度均表现出先升高后降低的变化趋势。前2次淋洗结束后,各施氮处理淋洗液中 NO_3^- -N的浓度没有显著高于对照(N0)处理,由施肥导致的 NO_3^- -N转化和迁移速度较慢,没有淋洗出100 cm深度的土层,可能是高灌水量导致

土壤湿度较大,微生物的活性下降导致了土壤的硝化能力降低,反硝化能力反而得到增强,土体中的 NO_3^- -N通过反硝化作用损失^[10],这与林清火等^[15]的研究结果相似。随着施氮量增加,淋洗液中 NO_3^- -N浓度峰值出现的时间向后推移,表明淋洗液中的 NO_3^- -N主要来自于上层土体中的向下迁移, NO_3^- -N的产生源为施入的氮肥。N240处理 NO_3^- -N浓度峰值出现在第5次淋洗后,而N300、N480和N600处理淋洗液中 NO_3^- -N浓度峰值在第6次淋洗后出现。在10次淋洗结束后,各施肥处理淋洗液中 NO_3^- -N浓度均在 $20.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上。N480和N600处理淋洗液中 NO_3^- -N浓度峰值更是高达 $114.98 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $124.56 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。水稻作物对养分的吸收利用深度在100 cm范围以内,淋洗到100 cm深度以下的养分很难被作物吸收,继续向下迁移将进入到地下水体^[16],因此在引黄灌区大水大肥的条件下,过量施用氮肥导致 NO_3^- -N淋洗出100 cm深度土层并通过淋洗和侧渗进入地下和地表水体,给黄河水质带来潜在威胁。

2.1.2 不同施氮水平对硝态氮累计淋失量的影响

从 NO_3^- -N的累计淋失量变化(图2)可以看出,各处理前3次累计淋失量斜率变化比较平缓,原因是施肥转化而成的 NO_3^- -N短时间内很难淋洗到出100

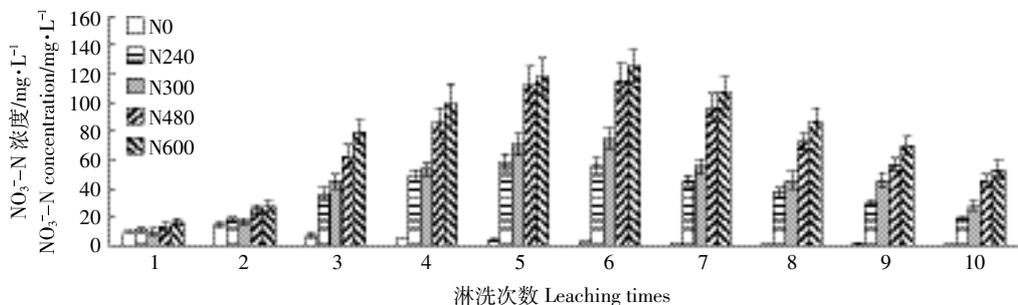


图1 施肥处理对淋洗液中 NO_3^- -N浓度的影响

Figure 1 Effects of different fertilization treatments on NO_3^- -N concentration

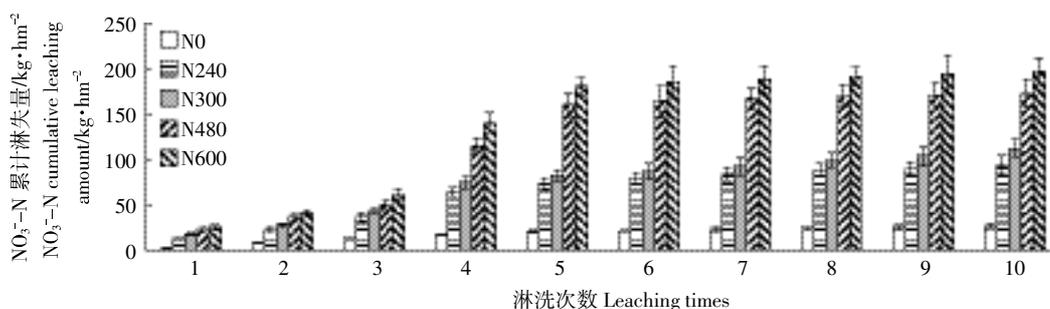


图2 施肥处理对 NO_3^- -N累计淋失量的影响

Figure 2 Effects of different fertilization treatments on NO_3^- -N cumulative leaching amount

cm 深度的土层。从第 4 次开始,各施肥处理 NO_3^- -N 的累计淋失量迅速增加,并且随着施肥量的提高而增加,第 4~5 次是曲线斜率迅速变陡,此段时期尿素溶解和转化较快,因而 NO_3^- -N 淋失量迅速增加,之后变得平缓。各施肥处理的 NO_3^- -N 淋失量与 N0 处理的差值可视为施肥导致的 NO_3^- -N 损失^[17],N240、N300、N480 和 N600 处理的 NO_3^- -N 累计淋失量分别为 68.37、86.22、146.26 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 170.68 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,占施氮量的比例则分别为 28.49%、28.74%、30.47%和 28.45%。可见,施入土体中的氮肥有 30%左右以 NO_3^- -N 的形式淋洗损失掉,在引黄灌区水稻种植中,氮肥以 NO_3^- -N 形态淋洗损失是氮肥利用率较低的原因之一^[18]。

2.2 不同施氮水平对铵态氮淋洗特征的影响

2.2.1 不同施氮水平对铵态氮淋洗浓度的影响

从图 3 可以看出,淋洗液中 NH_4^+ -N 浓度变化趋势与 NO_3^- -N 有所不同, NH_4^+ -N 浓度在第 2 次淋洗时浓度便显著高于第 1 次,之后浓度迅速提高。对照(N0)处理 NH_4^+ -N 浓度随着淋洗次数增加逐渐降低,而各施肥处理淋洗液中 NH_4^+ -N 浓度在淋洗第 4 次或第 5 次达到峰值,且浓度峰值跟施氮量显著相关,随着施氮量增加而变大。各施肥处理 N240、N300、N480 和 N600 处理淋洗液中 NH_4^+ -N 峰值分别为 4.50、5.49、8.41 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 9.55 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,10 次淋洗结束

时,各施肥处理 NH_4^+ -N 浓度在 1.09~2.56 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间。由于土柱模拟实验连续灌水,土柱中土壤含水量一直高于田间饱和持水量,降低土壤的通透性,同时也不利于硝化作用,使得 NH_4^+ -N 在土柱中较长时间存在,造成淋洗液中 NH_4^+ -N 浓度较高;另外施入的尿素开始水解产生的 NH_4^+ -N 容易被土壤胶体所吸附,随着尿素的进一步水解和土壤胶体对 NH_4^+ -N 的吸附趋向饱和,更多的 NH_4^+ -N 被交换出来淋洗到下层土体也是造成淋洗液中 NH_4^+ -N 浓度较高原因之一。在宁夏引黄灌区水稻种植集约化条件下,土壤中 NH_4^+ -N 随着农田灌溉水向下淋洗损失,也会对农田退水和浅层地下水水质带来负面影响。

2.2.2 不同施氮水平对铵态氮累计淋失量的影响

从图 4 可以看出,除对照(N0)处理 NH_4^+ -N 累计淋失量变化比较平稳外,各施肥处理 NH_4^+ -N 累计淋失量前期(2~4 次)斜率均较陡,说明前期 NH_4^+ -N 淋失量增加较快,第 5 次淋洗后斜率逐渐变缓,说明 NH_4^+ -N 淋失量后期逐渐变慢,且随着施氮量增加显著提高。 NH_4^+ -N 淋洗损失主要发生在前期,在第 4 次淋洗结束后,N240、N300、N480 和 N600 处理 NH_4^+ -N 淋失量占到全部 10 次 NH_4^+ -N 累计淋失量的比例均在 80%以上,避免 NH_4^+ -N 前期淋洗损失是提高肥料利用率和减少养分淋失的关键。试验结束后,N240、

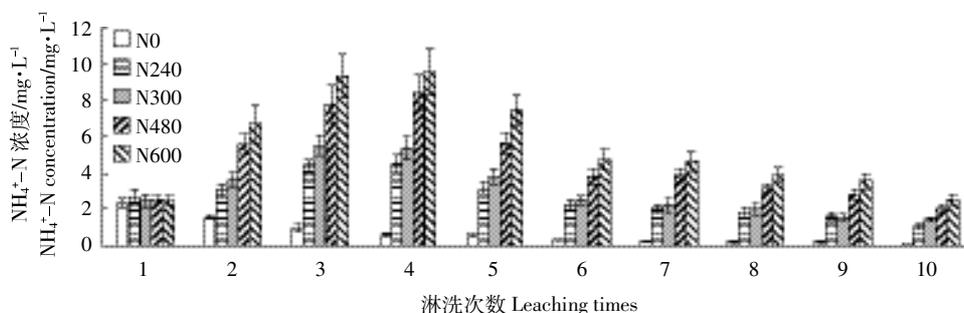


图 3 不同施肥处理对淋洗液中 NH_4^+ -N 浓度的影响

Figure 3 Effects of different fertilization treatments on NH_4^+ -N concentration

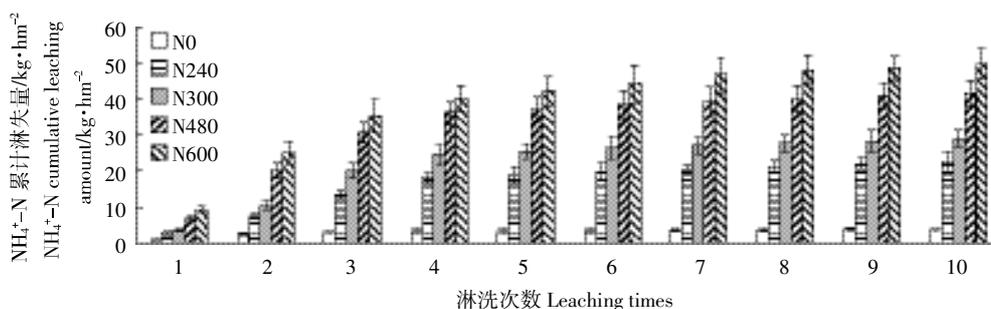


图 4 不同施肥处理对 NH_4^+ -N 累计淋失量的影响

Figure 4 Effects of different fertilization treatments on NH_4^+ -N cumulative leaching amount

N300、N480 和 N600 处理 100 cm 处的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 累计淋失量分别为 18.60、25.07、37.77 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 45.96 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 占施肥量的比例则分别为 7.75%、8.36%、7.87%和 7.66%。林清火等^[15]在研究结果表明,淋洗液中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 来源主要为土壤,受到施肥量的影响不大,施入土柱中的尿素在 75 d 之内淋洗到 120 cm 以下的土层量较少,往下淋失的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 很容易被土壤吸附。本研究结果表明 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 淋失比例可以占施肥量的 8%左右,高于前人的研究结果^[19],原因可能是因为灌淤土为砂质土质地,土壤有机质含量较低,对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸附能力较低,加上灌溉强度较大,从而加剧了 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 淋失量。

2.3 不同施氮水平对总氮淋洗特征的影响

2.3.1 不同施氮水平对总氮淋洗浓度的影响

从图 5 可以看出,对照(N0)处理 TN 浓度峰值出现在第 2 次淋洗,因为没有氮肥施入,淋洗出的 TN 主要来源于土壤,随着淋洗进程慢慢降低。随着施氮量的增加,TN 浓度峰值出现的时间逐渐向后推移,N240 和 N300 处理 TN 浓度峰值出现在第 6 次淋洗后,淋洗液中的 TN 浓度为 114.78 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 130.32 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,N480 和 N600 处理 TN 浓度峰值则出现在第 5 次淋洗后,淋洗液中的 TN 浓度分别高达 193.56 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 223.47 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。在淋失结束时 N480 和 N600

处理淋洗液中的 TN 浓度依然保持在较高水平,N240 和 N300 处理淋洗液中的 TN 浓度则降低到 50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下。不同施肥处理间比较,淋洗液中的 TN 浓度随着施氮量增加显著提升,且 TN 浓度峰/值出现的时间随着施氮量增加向后推迟,在淋失结束后,淋洗液中 TN 浓度依然保持较高水平,对地下水环境安全构成威胁。

2.3.2 不同施氮水平对总氮累计淋失量的影响

从图 6 可以看出,在不施氮肥的条件下,氮素淋洗到 100 cm 以下的总量很小,只有不到 40 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。随着施氮量提高 TN 的淋失量显著增加,N240、N300、N480 和 N600 处理 TN 淋洗到 100 cm 以下的累计淋失量分别高达 94.53、128.02、222.06 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 268.6 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,分别占到施氮量的 39.38%、42.67%、46.26% 和 44.77%。也就是说,施入到稻田土壤中的氮肥,有 39.38%~46.26%的比例通过淋洗途径损失,进入到排水沟和地下水水体,给当地水环境带来严重威胁,研究结果与林清火等^[15](氮素的淋失量占到施肥量的 3.6%~52.3%)相一致。由于氮素损失以 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 形态为主,因此 TN 的淋失动态特征与 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 相似。在前 5 次淋失结束以后,N240、N300、N480 和 N600 处理 TN 淋失量占总累计淋失量的比例分别为 78.01%、74.24%、75.87%和 85.78%,而对照(N0)处理前 5 次 TN 淋失量更是占到总累计淋失量 85.17%。可见引黄

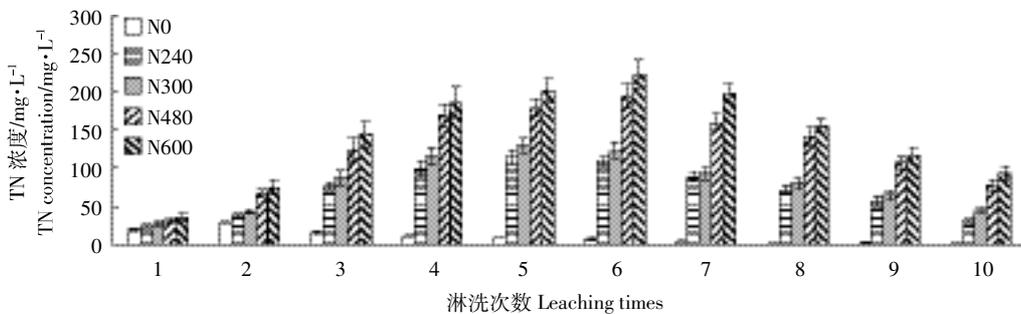


图 5 不同施肥处理对淋洗液中 TN 浓度的影响

Figure 5 Effects of different fertilization treatments on TN concentration

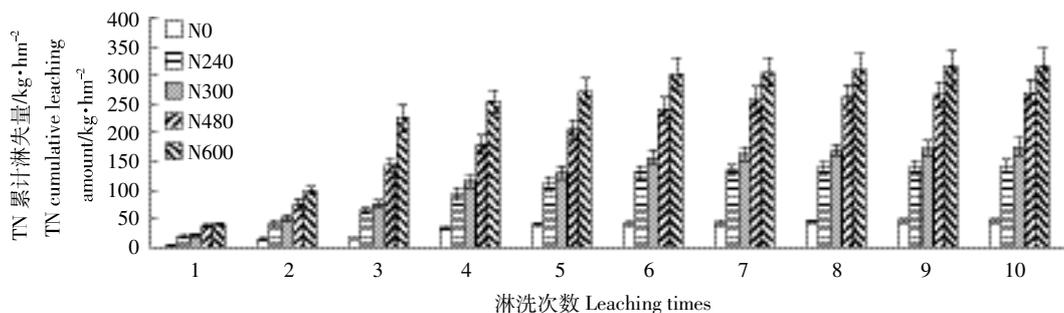


图 6 不同施肥处理对 TN 累计淋失量的影响

Figure 6 Effects of different fertilization treatments on TN cumulative leaching amount

灌区灌淤土中氮素淋洗损失较为严重,也是导致肥料利用率较低和水环境质量较差的重要原因。

2.3.3 不同施氮水平条件下总氮淋失特征拟合方程

分别用指数方程、直线方程、幂函数方程和对数方程对 TN 的累计淋失量 Y_t 与淋洗时间 $t(d)$ 进行拟合,拟合的结果如表 2 所示。幂函数方程和对数方程的复相关系数均达到了极显著水平,说明其可以准确地模拟灌淤土中施入的氮素以 TN 形态淋失量与淋洗时间的动态变化过程。比较各模拟方程 R^2 值的大小,对照(N0)处理以 $\ln Y_t = a + b \ln t$ (幂函数方程)的拟合效果最好,而各施肥处理则均以 $Y_t = a + b \ln t$ (对数方程)的拟合效果最好。在对数方程 $Y_t = a + b \ln t$ 中, a 代表第 1 次各处理的 TN 淋失量, b 则表示淋失量变化速率,从各施肥处理的 b 值大小来看, b 值随着施氮量的增加逐渐变大,说明土柱中 TN 的淋失速率随着施氮量的增加逐渐变快,增加的幅度也随之变大,导

致 TN 累计淋失量较高。

2.3.4 不同形态氮素累计淋失特征

从表 3 可以看出,氮素淋洗损失量与施氮量显著相关, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 TN 的淋失量均随着施氮量增加表现出升高的趋势。在宁夏引黄灌区灌淤土上,稻田当季施用的化肥较容易淋洗到 100 cm 以下土层损失,成为退水和地下水潜在的污染源^[20-21]。氮素流失主要是以 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 形态存在^[12],本试验条件下对照(N0)处理 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 形态淋失的量为 $26.15 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,远高于以 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 形态淋失的 $3.87 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,各施肥处理间也表现出类似的特征,氮素淋失形态以 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 为主,而以 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 形态淋失的比例则较小。 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋失量占施氮比例的 28.49%~30.47%,而 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 淋失量则仅占施氮比例 7.66%~8.36%,可见预防氮素以 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 形态淋失是提高引黄灌区氮素利用率的关键。N240、N300、N480 和 N600 处理的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 累计淋

表 2 不同处理 TN 淋失量 Y_t (kg N)与时间 $t(d)$ 的拟合方程

Table 2 The modeling equation between times and leaching amounts of TN in different treatments

拟合方程 Fitting equation	系数 Coefficient	处理 Treatment				
		N0	N240	N300	N480	N600
$Y_t = ae^{bt}$	a	8.300	30.756	35.245	59.847	80.598
	b	0.022	0.019	0.020	0.019	0.017
	R^2	0.721*	0.758*	0.756*	0.741*	0.611
$Y_t = a + bt$	a	0.477	24.692	27.109	50.473	90.174
	b	6.608	1.388	1.738	2.592	2.777
	R^2	0.845**	0.882**	0.897**	0.882**	0.752*
$\ln Y_t = a + b \ln t$	a	0.578	3.056	3.140	6.015	7.957
	b	1.010	0.879	0.920	0.872	0.859
	R^2	0.935**	0.957**	0.957**	0.947**	0.867**
$Y_t = a + b \ln t$	a	-46.185	-127.684	-161.874	-236.092	-245.015
	b	20.730	59.985	74.604	112.546	127.966
	R^2	0.927**	0.965**	0.971**	0.975**	0.936**

注:“*”表示显著相关,“**”表示极显著相关。

Note: ‘*’ indicates significant correlation, ‘**’ indicates highly significant correlation.

表 3 各处理氮素累计淋失量

Table 3 Accumulative leaching loss amounts of nitrogen in different treatments

处理 Treatment	$\text{NO}_3^- - \text{N}/\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	$\text{NO}_3^- - \text{N}/\text{TN}/\%$	$\text{NH}_4^+ - \text{N}/\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	$\text{NH}_4^+ - \text{N}/\text{TN}/\%$	$\text{TN}/\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	$(\text{NO}_3^- - \text{N} + \text{NH}_4^+ - \text{N})/\text{TN}/\%$
N0	26.15 ± 2.07 a	8.27	3.87 ± 0.47 a	55.86	46.81 ± 3.21 a	64.13
N240	94.52 ± 6.32 b	66.87	22.47 ± 1.43 b	15.90	141.34 ± 11.24 b	82.77
N300	112.37 ± 9.43 b	64.27	28.94 ± 2.14 c	16.55	174.83 ± 14.37 c	80.82
N480	172.41 ± 13.14 c	64.12	41.64 ± 3.56 d	15.45	268.87 ± 18.34 d	79.57
N600	196.83 ± 15.23 d	62.40	49.83 ± 5.41 e	15.88	315.41 ± 16.33 e	78.28

注:同栏内不同字母表示差异显著($P < 0.05$)。

Note: different letters within the same column mean significant difference ($P < 0.05$).

失量占 TN 淋失量的比例分别为 66.87%、64.27%、64.12%和 62.40%,而 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的比例分别为 15.90%、16.55%、15.45%和 15.88%。无机氮($\text{NO}_3^-\text{-N}+\text{NH}_4^+\text{-N}$)累计淋失量占 TN 流失量在 78.28%~82.77%之间,约有 20%左右的氮素是以有机态的形态淋失掉^[22],与前人研究结果相类似^[15,23]。

3 讨论

宁夏引黄灌区地处我国西北内陆,多年平均降水量在 200 mm 左右,是典型的干旱地区,已经有 2 000 多年的自流灌溉历史,有着“天下黄河富宁夏”的美誉。当地农业用水 90%以上来自黄河自流灌溉^[3],年排水引水比例约为 50%,通过排水沟和渗漏回到黄河中的退水量约 40 亿 m^3 。引黄灌区作物单季氮肥施用量高达 $300 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 以上^[1],有大水漫灌的驱动因素,加上过量施用氮肥,同时有驱动的源和流失的库,导致氮素通过淋洗途径大量的损失,造成灌区氮肥利用率相对偏低^[1]和损失严重。水稻是引黄灌区种植面积最大的作物品种,研究表明稻田单季氮素的损失率在 20%~65%之间^[5],退水污染源解析则表明源于水稻作物的氮素负荷约为 72%,稻田氮素的损失途径主要为淋洗损失^[3]和气态挥发损失^[2],因此由稻田氮素淋洗损失引起的退水中营养物质超标对引黄灌区水体造成的污染成为近年来研究的热点。

国内关于氮素在土壤中淋失的模拟研究主要集中在南方水稻土^[23]和北方旱地土壤上^[21],本实验则通过模拟水稻整个生育期内灌溉量和灌溉次数,利用土柱实验研究氮素在引黄灌区灌淤土中的淋失形态和特征。实验结果表明 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 仍然是氮素淋失的主要形态,淋失量占到施氮量的 30%左右,与 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 不易被土壤吸附在氮素形态转化过程中较活跃的特性有关^[22],跟王永生^[12]和陈伟伟等^[7]的研究结果一致。由于尿素在分解过程中的最先的形态是 $\text{NH}_4^+\text{-N}$,因此 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 淋失主要发生在前期,而在水稻种植过程中为促进水稻分蘖,大量灌水和施肥往往集中在秧苗刚移栽后的 2 周内,这段时期内超过土壤吸附能力的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 较容易随水淋失,做好水稻插秧后的水肥管理是控制 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 淋失的关键节点^[23]。张晴雯等^[3]在青铜峡灌区的研究结果表明常规施肥条件下($300 \text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$)单季稻田损失的氮素高达 $146.37 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,损失的氮主要以 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的形态随着灌溉向下层土壤迁移逐渐进入地下水,但有多大比例进入地下水体还需要进一步研究。本实验研究结果表明,氮素淋失量随着

施肥量的提高逐渐增加,施入灌淤土的氮肥有 39.38%~46.26%通过淋洗损失,对退水和地下水环境构成了严重威胁。控制农田化肥投入量,降低氮素淋洗损失进而减少农业面源污染物排放系数^[24-25],是引黄灌区面源污染防控工作的重点。研究中还发现 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 占到总氮流失量比例的 80%左右,说明约有 20%左右的氮素是以有机氮的形态淋洗损失,这部分氮素损失形态是今后研究中需要重点关注的对象。

4 结论

(1)淋洗液中各施肥处理 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度随着淋洗次数的推移呈现先上升后降低的趋势,施肥量越大出现峰值的时间越晚,以 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 形态的淋失是氮素损失的主要途径。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度在淋洗 3~4 次时达到峰值,流失主要集中在前期。

(2)各施肥处理由肥料引起的 TN 淋失量占施氮量的比例在 39.38%~46.26%之间。将 TN 各次的累计淋失量 Y_t 与淋洗时间 $t(\text{d})$ 用方程进行拟合,NO 处理以幂函数方程 $\ln Y_t = a + b \ln t$ 的拟合效果最好,各施肥处理则以对数方程 $Y_t = a + b \ln t$ 的 R^2 的拟合效果最好。

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. (in Chinese)
- [2] 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. (in Chinese)
- [3] 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 Circum Stantiae*, 2010, 30(8): 1707-1714. (in Chinese)
- [4] 赵营,张学军,陈晓群,等. 施肥对设施番茄-黄瓜养分利用与土壤氮素淋失的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(2): 374-383.
ZHAO Ying, ZHANG Xue-jun, CHEN Xiao-qun, et al. Effect of fertilization on nitrogen leaching loss from soil and nutrients utilization by tomato and cucumber in greenhouse[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(2): 374-383. (in Chinese)
- [5] 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.(in Chinese)
- [6] 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.(in Chinese)
- [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.(in Chinese)
- [8] 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.
- [9] Kim J H, Guo X J, Park H S. Comparison study of the effects of temperature and free ammonia concentration on nitrification and nitrite accumulation[J]. *Process Biochemistry*, 2008, 43: 154-160.
- [10] Wang C H, Wan S Q, Xing X Y, et al. Temperature and soil moisture interactively affected soil net N mineralization in temperate grassland in Northern China[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38: 1101-1110.
- [11] Maeda M, Zhao B Z, Ozaki Y, et al. Nitrate leaching in an Andisol treated with different types of fertilizers[J]. *Environmental Pollution*, 2003, 121: 477-487.
- [12] 王永生, 黄 剑, 杨世琦. 宁夏黄灌区稻田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.(in Chinese)
- [13] 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.(in Chinese)
- [14] 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.(in Chinese)
- [15] 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.(in Chinese)
- [16] Zhou J B, Xi J G, Chen Z J, et al. Leaching and transformation of nitrogen fertilizers in soil after application of N with irrigation: a soil column method[J]. *Pedosphere*, 2006, 16: 245-252.
- [17] 李世清, 李生秀. 半干旱地区农田生态系统中硝态氮的淋失[J]. 应用生态学报, 2000, 11(2): 240-242.
LI Shi-qing, LI Sheng-xiu. Leaching loss of nitrate from semiarid area agro-ecosystem[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(2): 240-242.(in Chinese)
- [18] 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.(in Chinese)
- [19] 邢承华, 章永松, 林咸永, 等. 饱和铵贮库施肥法对降低土壤氮素挥发和淋失的作用研究[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2006, 32(2): 155-161.
XING Cheng-hua, ZHANG Yong-song, LIN Xian-yong, et al. Study on decreasing ammonia volatilization and leaching rates by NDSA fertilization method[J]. *Journal of Zhejiang University (Agric & Life Sci)*, 2006, 32(2), 155-161.(in Chinese)
- [20] Zhao Ying, Luo Jiang-Hang, Chen Xiao-Qun, et al. Greenhouse tomato cucumber yield and soil N leaching as affected by reducing N rate and adding manure: a case study in the Yellow River irrigation region, China[J]. *Nutr Cycl Agroecosyst*, 2012, 94: 221-235.
- [21] 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.(in Chinese)
- [22] Zhao Y, Luo J H, Chen X Q, et al. Greenhouse tomato cucumber yield and soil N leaching as affected by reducing N rate and adding manure: a case study in the Yellow River irrigation region, China[J]. *Nutr Cycl Agroecosyst*, 2012, 94: 221-235.
- [23] Yang Y, Chen Y, Zhang X, et al. Methodology for agricultural and rural NPS pollution in a typical county of the North China plain[J]. *Environ Pollut*, 2012, 16(8): 170-176.
- [24] 杜 军, 杨培岭, 李云开, 等. 不同灌期对农田氮素迁移及面源污染产生的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 66-74.
DU Jun, YANG Pei-ling, LI Yun-kai, et al. Effect of different irrigation seasons on the transfer of N in different types farmlands and the non-point pollution production[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(1): 66-74.(in Chinese)
- [25] 曾曙才, 吴启堂. 华南赤红壤无机复合肥氮磷淋失特征[J]. 应用生态学报, 2007, 18(5): 1015-1020.
ZENG Shu-cai, WU Qi-tang. Leaching characteristics of nitrogen and phosphorus in inorganic compound fertilizer from latosolic red soil in South China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(5): 1015-1020.(in Chinese)