

不同灌期对农田氮素迁移及面源污染产生的影响

杜军^{1,2}, 杨培岭^{1*}, 李云开¹, 任树梅¹, 王永忠², 李仙岳¹, 苏艳平¹

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100081; 2. 宁夏农垦事业管理局, 银川 750001;)

摘要: 通过分析从秋灌到秋浇后河套灌区乌拉特灌域典型区不同类型土壤剖面(0~160 cm)、浅层地下水中和沟道中氮素质量分数的变化过程, 以便为灌区氮素污染控制提供相应的理论指导。研究表明: 秋灌期深层土壤剖面(120~160 cm)中 NO_3^- -N 累积不明显, 秋浇后 3 种类型土壤剖面(80~160 cm)中 NO_3^- -N 平均质量分数分别增加了 1.25、2.72 和 2.89 mg/kg。土壤剖面中的 NH_4^+ -N 质量分数分布相对较均匀。3 种耕地土壤剖面中 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 质量分数的变化具有季节性的增高或降低。盐荒地土壤剖面中 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 都处于积累状态, 对整个灌区农业面源污染物的排泄有减缓作用。浅层地下水中 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 质量分数在秋浇期的增幅大于秋灌期。农田土壤、浅层地下水和沟道中的氮素质量分数有着较好的时间相关性, 秋浇期河套灌区土壤中 NO_3^- -N 最易发生淋洗, 且是灌区产生农业面源污染最严重的时期。

关键词: 灌溉, 氮素, 水污染, 河套灌区, 农田类型, 面源污染

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2011.01.010

中图分类号: S274.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2011)-01-0066-09

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 Peiling, Li Yunkai, et al. Effect of different irrigation seasons on the transfer of N in different types farmlands and the no-point pollution production [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(1): 66-74. (in Chinese with English abstract)

0 引言

氮是植物生长所需的主要营养元素之一, 但由于人类不合理的施用以及对氮肥环境负效应的忽视^[1], 使氮素污染已成为仅次于气候变暖和生物多样性衰减的全球性环境威胁^[2]。农田生态系统中影响土壤氮素迁移和转化的因素较多, 如土壤基质、温度、pH 值、通气条件、降水和土壤含水率等, 其中土壤水分是土壤中 N 素迁移主要影响因子^[3]。灌水明显影响土壤硝态氮累积量, 随灌水次数增加, 土壤硝态氮累积量降低, 而且在高灌水条件下土壤硝态氮累积量变化比低灌水量时大^[4-5]。同时, 采用不同的灌溉方式, 可以有效地缓解氮损失^[6]。化肥态氮肥投入是土壤氮素收入的主要途径, 占到氮素总收入量的近 60%, 其大量投入是造成农田土壤氮素过剩的主要原因^[7-8]。一般情况下, 土壤中氮素的淋溶损失主要是 NO_3^- -N, 对地下水硝酸盐污染调查研究结果表明, 过量施氮导致的土壤硝态氮残留和淋洗对污染负有重要责任^[9]。在美国俄亥俄州的草地上进行了 15 a 的试验^[10], 前 5 a 中每年施氮 224

kg/hm², 地下水中硝态氮逐渐上升到 10 mg/L 左右, 停止施肥后改种绿肥, 则地下水中的硝态氮迅速下降, 2 a 即下降 50%, 然后逐渐恢复到施肥前水平。也有资料表明^[11], 在土壤中 NH_4^+ -N 质量分数达到一定量后, 有少量的 NH_4^+ -N 也会被淋溶到深层土壤中。

内蒙古河套灌区是中国三大灌区之一, 农田化肥用量已由 1978 年的 7×10^4 t 迅速上升到 2002 年的 52×10^4 t。2005 年氮肥施用强度达到 361.86 kg/hm², 化肥利用率仅 30%。独特气候和地理条件, 使得灌区农业灌溉分为夏灌(4 月至 6 月, 用于补充土壤水分, 以便满足作物生长发育需求)、秋灌(秋灌一般在 7 月至 9 月间, 灌水 3 次, 灌水量占到总灌溉量的 30%)和秋浇(秋浇一般在 10 月中旬至 11 月中下旬进行, 是河套灌区一年中灌水量最大的一次, 约为 1800~2000 m³/hm², 目的在于压盐和保墒)。从理论上讲, 土壤中发生氮素淋失要满足 2 个条件: 一是土壤中有大量的可溶性氮素存在; 二是有迁移的水分。秋灌期结束后, 作物进入了成熟期, 而在整个作物生育期内对氮素的利用率仅占到总施氮量的 30%。因此, 秋灌后土壤必定残留大量的氮素。秋浇期间的大水压盐保墒, 为土壤中氮素淋失创造了第 2 个条件, 即大量的可迁移的土壤水分。近几年对河套灌区农田中氮素研究表明: 河套灌区内作物结构多样性有助于抑制氮素损失, 不同农田 NO_3^- -N 淋失量按照小麦地、白菜地、玉米地、葵花地、小麦-玉米地依次递减^[12]; 年内不同季节里农田系统氮素损失差异较大^[13-14]; 氮素在时间分布上表现为 4 月份较高, 11 月份较低, 时空变异受灌区内地下水位、

收稿日期: 2010-05-19 修订日期: 2010-10-12

基金来源: 水利部公益性行业专项经费项目(200701025); 长江学者和创新团队发展计划(IRT0657); 中国农业大学与内蒙古农业大学科研合作基金; 中国农业大学研究生科研创新专项(kycx09113)

作者简介: 杜军(1979-), 男, 博士生, 主要从事水土资源与环境研究工作。北京 中国农业大学水利与土木工程学院, 100081。

Email: dujun7927@163.com

*通信作者: 杨培岭, 教授, 博士生导师, 主要从事灌溉理论与技术、水资源与水环境、水土保持与荒漠化防治等研究。北京 中国农业大学水利与土木工程学院, 100081。Email: yangpeiling@126.com

引水和农田排水的影响较大^[14]; 乌梁素海富营养化主要是其上游河套灌区化肥量增加而使农业面源污染加重, 导致湖水中氮和磷量增加^[15]。到目前为止, 对于河套灌区秋灌-秋浇阶段对农田土壤、浅层地下水和沟道水体中氮素的迁移影响缺乏定量性观测, 对灌区农业面源污染产生的机理缺少定性的描述。本文通过研究河套灌区典型区域农田生态系统秋灌-秋浇期土壤中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4\text{-N}$ 质量分数的变化, 分析了秋灌-秋浇对河套灌区不同类型农田土壤剖面中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的淋溶效应和 $\text{NH}_4\text{-N}$ 转化特性以及浅层地下水和排水沟道中氮素的变化规律, 以便为灌区氮素污染控制提供相应的指导, 科学地管理河套灌区的农业生产。

1 材料与方法

1.1 试验区自然状况

内蒙古河套灌区地处北纬 $40^\circ 19' \sim 41^\circ 18'$, 东经 $106^\circ 20' \sim 109^\circ 19'$; 南临黄河, 北抵阴山, 西与乌兰布和沙漠相接, 东至包头市, 总土地面积 $112 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。年降水量为 $139 \sim 222 \text{ mm}$, 且集中在 $7 \sim 9$ 月间, 年蒸发量达 $2200 \sim 2400 \text{ mm}$ 。年均温 $6 \sim 8^\circ \text{C}$, 全年封冻期 $5 \sim 6$ 个月, 无霜期 $135 \sim 150 \text{ d}$, 年均日照时数 $3100 \sim 3300 \text{ h}$, 属于典型的大陆性气候。现有灌溉面积 $57.4 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 其中农田 $52.5 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。

试验区位于内蒙古乌拉特前旗北圪堵乡庆华村北场社和邓存店村塔布社, 乌拉特前旗西北方向, 距乌拉特前旗 30 km , 五原县 25 km , 东经 $40^\circ 52' 39.8'' \sim 40^\circ 53' 53.5''$, 北纬, $108^\circ 32' 32.2'' \sim 108^\circ 34' 51.7''$ (图 1)。试验区东至 110 国道, 南至河套灌区塔布渠, 西至四支渠, 北至乌拉特前旗北圪堵乡公路, 现有土地面积为 477 hm^2 , 耕地 394 hm^2 (葵花 290.5 hm^2 、玉米 77.5 hm^2 、番茄 26.0 hm^2), 盐荒地 43 hm^2 , 村庄 40 hm^2 , 是农田灌排系统比较完善, 农业种植成熟的区域, 无工业点源污染。试验区中有一条北场支沟 (从南到北将试验区分为 2 片, 东区为北场支渠灌溉, 西区为左四支渠灌溉), 试验区农田退水全部由此沟排泄出。近 3 a 来, 试验区主要种植葵花 (06-25 种植, 底肥施尿素 375 kg/hm^2 、二铵 300 kg/hm^2)、玉米 (05-20 种植, 底肥施二铵 300 kg/hm^2 , 06-20、07-03 (追肥施入尿素 475 kg/hm^2) 和 08-01 日灌溉)、番茄 (05-25 种植, 底肥施二铵 375 kg/hm^2 , 06-20 灌溉, 且追肥施入尿素 300 kg/hm^2) 等。年用水量为 $200 \sim 250 \text{ 万 m}^3$ 。2009 年秋灌从 07-01—10-01 (作物不同, 灌溉时间和次数也不同), 秋浇从 10-10—10-25。

1.2 采样方法

选取种植典型作物农田 (图 1, 玉米 4 个样点 (7[#]、8[#]、13[#]、14[#])、番茄地 4 个样点 (1[#]、2[#]、5[#]、6[#]) 和葵花地 5 个样点 (3[#]、4[#]、12[#]、15[#]、16[#]), 分布于左四斗沟两侧。) 和盐荒地 (1 个样点, 位置为 “N5”, 图 1)。在每个典型区中用 GPS 定点, 以此点为圆心, 以半径为 0.5 m 的区域为采样区域。根据河套灌区多年平均浅层地下水埋深 $150 \sim 210 \text{ cm}$, 将试验区有效土壤剖面深度定为

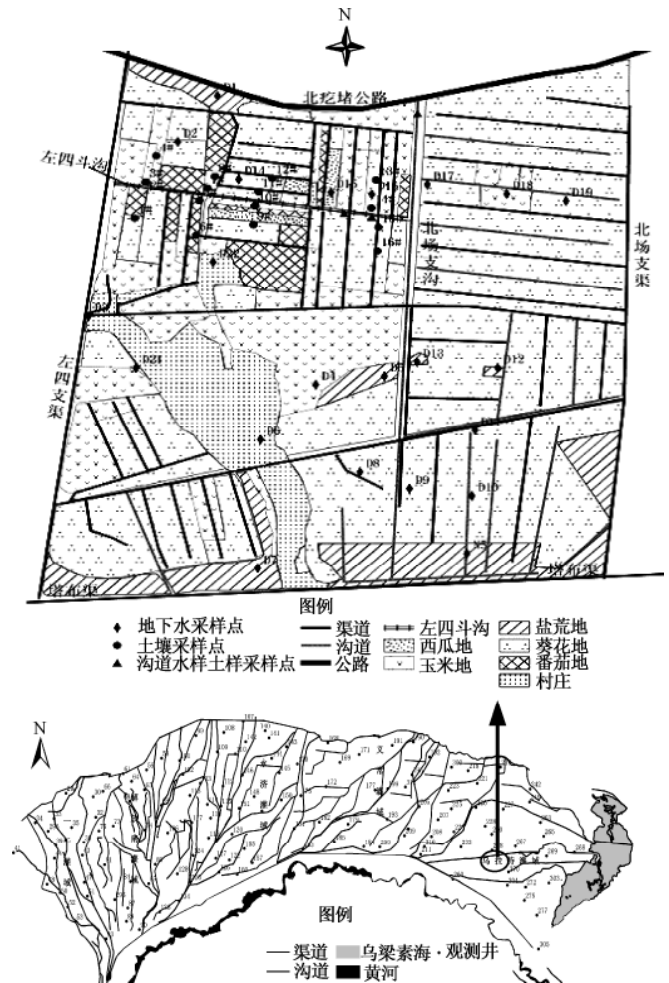


图 1 试验区位置示意图

Fig.1 Location of study district

160 cm 。按照 $0 \sim 20$ 、 $>20 \sim 40$ 、 $>40 \sim 80$ 、 $>80 \sim 120$ 和 $>120 \sim 160 \text{ cm}$ 共 5 个层次, 用土钻分层取出土样后, 装入密封袋, 在当天将土样 (鲜土) 送于巴彦淖尔市水利科学研究所化验分析土壤中硝态氮与铵态氮质量分数。同步采集土样, 利用烘干法测定土壤含水率, 第 1 层和第 2 层为 $0 \sim 10$ 和 $>10 \sim 20 \text{ cm}$, 其它每个测定土层为 20 cm , 总深度为 160 cm 。采样时间: 秋灌前 (07-01), 秋灌后 (07-07, 区域不同, 秋灌的时间和灌溉次数不同。), 以后按照每月 15 号前后采样直至秋浇前 (10-10); 由于秋浇后, 大田中积水较多, 且在 11 月中旬已封冻, 在次年 03-15 采样 (方法同上)。

浅层地下水取样时 (图 1), 将取样器插入观测井水面以下 25 cm , 取样后立即将水样装入聚氯乙烯 (PVC) 瓶中, 密封遮阳。在当天将水样送于巴彦淖尔市水利科学研究所化验分析水体中硝态氮与铵态氮质量分数。取样时间点同土壤采集, 采样期为 2009-06-30—2010-03-15。

排水沟中取样方法及时间同上。设北场支沟排水口上游 20 m 处一个采样点, 左四斗沟 (北场支沟的一条斗沟) 排水口上游 100 m 和 150 m 2 个采样点 (图 1)。利用 LS68 型旋杯式流速仪测定排水口流速。

2 结果及分析

2.1 不同类型土壤含水率变化分析

根据番茄生育特性, 整个生育期期间只灌 1 次水 (06-20 灌溉)。07-03 葵花和玉米灌水后 (这两种作物占居大部分种植面积), 随着浅层地下水水位的上升, 番茄地土壤 (图 2, 0~160 cm 土层。) 平均含水率 $\theta_{\text{番茄}}$ 从秋灌前 (07-01) 的 23.5% 上升到 25% (07-09)。由于试验区处于河套灌区下游, 葵花只灌溉 1 次 (7 月初, 此时是玉米第 2 次灌水)。从图 2 中看出, 灌溉后的葵花地和玉米土壤 (0~160 cm) 平均含水率迅速从灌前的 26.5% 和 24.5% (07-01) 上升至 28% 和 31% (07-09)。进入秋灌 (07-01) 以后, 3 种类型土壤含水率始终保持以玉米地最高, 葵花次之, 番茄地最小, 平均分别为 27%、24% 和 20% (07-09—09-30)。一方面原因是由于灌水次数的不同: 秋灌期间, 玉米地灌水 2 次 (第 2 次在 8 月初), 葵花地灌水 1 次, 而番茄地不灌溉; 另一方面由于土壤质地的不同: 番茄和葵花地在 0~120 cm 土层中土壤质地以壤土为主, 而玉米地以黏土为主, 土壤的保水性有显著的差异。进入秋灌后, 从 3 种类型土壤含水率的变化来看: 番茄地土壤含水率的变化属于单一的蒸腾蒸发型, 即表土深层土壤含水率逐渐减小, 在毛管力的作用下, 深层土壤水分补充表层土壤水分, 浅层地下水补给深层土壤水分; 而葵花地和玉米地土壤水分变化是先渗漏补给地下水, 然后浅层地下水在水势的作用下上升补给土壤水分, 即渗漏—蒸腾蒸发型。

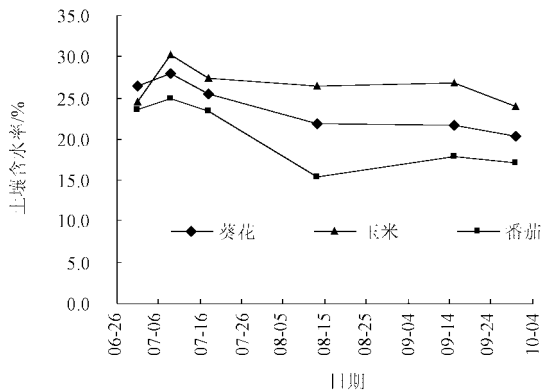


图 2 三种类型土壤 0~160 cm 平均土壤含水率
Fig.2 Water content of three type soils

2.2 土壤中氮素迁移转化分析

2.2.1 土壤中硝态氮迁移转化分析

1) 秋灌对土壤中硝态氮迁移转化影响

从图 3 中看出: 在秋灌期间 (07—09 月), 玉米地 (图 3a) 土壤中 $\text{NO}_3^- \text{N}$ 质量分数随着土层深度加大而逐渐减少。原因在于秋灌期间灌水量较少, 且玉米地黏土透水性较差 (相对于壤土), 所以 $\text{NO}_3^- \text{N}$ 不易被淋洗到深层土壤中。同时, 玉米地土壤主要以黏土为主, 且长时间保持较高的含水率, 土壤溶液中溶解氧较少, 减少了氧化还原电位, 使得反硝化作用增强, 导致玉米地土壤中 $\text{NO}_3^- \text{N}$ 质量分数相对于番茄地和葵花地较少。在 7

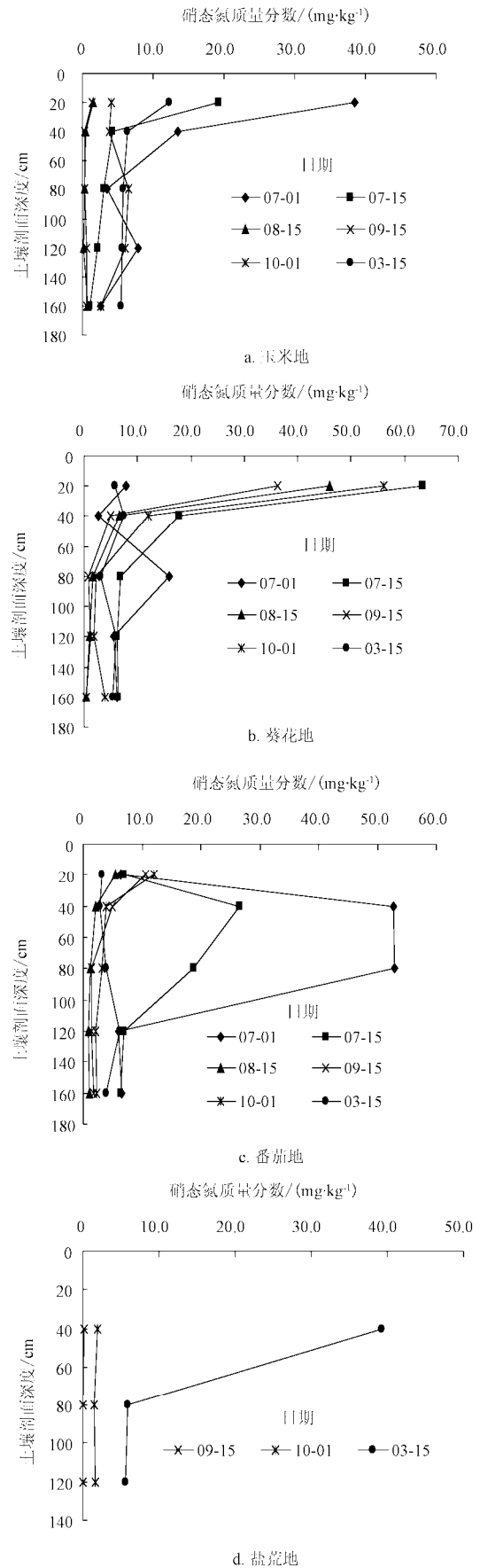


图 3 不同时期 4 种类型土壤剖面 $\text{NO}_3^- \text{N}$ 质量分数变化 (mg/kg)

Fig.3 $\text{NO}_3^- \text{N}$ content variation of different period in four type soils profile

月上旬秋灌后, 土壤含水量的增多, 增强了根系对养分的吸收速度和量, 使 >40~80 cm 土壤剖面中 NO_3^- -N 质量分数迅速减少, 但是随着浅层地下水水位的回落, >120~160 cm 土壤中 NO_3^- -N 质量分数积累不明显。秋浇前 (10-01) 土壤剖面 (0~160 cm) 中 NO_3^- -N 平均残留量为 4.61 mg/kg (此值为占鲜土质量的百分比, 下同)。

由于葵花的生育期主要集中在 7 月到 9 月间, 在葵花幼苗期时 (7 月初) 施肥灌水。因此, 秋灌期间葵花地土壤中氮素变化不同于番茄地和玉米地。葵花地 (07-15-10-01) NO_3^- -N 主要积存在 0~20 cm 土壤中 (图 3b), 平均质量分数为 50.4 mg/kg, 占到 0~160 cm 土壤中 NO_3^- -N 总量的 72.9%。随着葵花根系对水分以及养分的吸收逐渐增大, 各层土壤剖面中 NO_3^- -N 质量分数逐渐减少; 由于浅层地下水埋深浅, 土壤水分下渗缓慢导致深层 (>120~160 cm) 土壤剖面中 NO_3^- -N 的积累不显著。同时, 从 08-15 到秋浇前, 土壤水分运动处于单一的蒸发过程也阻碍了 NO_3^- -N 的下移。秋浇前 (10-01) 土壤剖面 (0~160 cm) 中 NO_3^- -N 平均残留量为 15.24 mg/kg。

灌区进入秋灌期也是番茄开花挂果期, 07-01 采样测定 0~40、>40~80 和 >80~160 cm 土层中 NO_3^- -N 的质量分数分别为 6.4、52.8 和 6.0 mg/kg (图 3c), 大量的 NO_3^- -N 积存在 40~80 cm 土壤中, 占到 0~160 cm 土层中 NO_3^- -N 总量的 66.0%。原因在于夏灌后淋洗和氨挥发等物理化学反应减少表层土壤中 NO_3^- -N 的质量分数; 同时, 夏灌水量较少, 且随着土层深度加深, 黏性土壤增多, 水分不易下渗, 80 cm 以下土壤剖面中 NO_3^- -N 的量相对较少。随着秋灌开始, 地下水水位上升, 土壤含水率上升, 导致番茄地对养分的吸收增强, 土壤中 NO_3^- -N 质量分数随着土层深度加大而逐渐减少。秋浇前 (10-01) 土壤剖面 (0~160cm) 中 NO_3^- -N 平均残留量为 4.67 mg/kg。河套灌区盐荒地插花分布在耕地间, 盐荒地土壤水分主要来自耕地灌溉后浅层地下水的侧流和土壤水分的侧渗。从图 3d 中看出, 在秋浇前盐荒地土壤剖面中 NO_3^- -N 质量分数逐渐升高, 成为灌区农业面源污染的汇。

2) 秋浇对土壤中硝态氮迁移转化的影响

从图 3 中看到, 秋浇前 (10-01) 3 种类型农田土壤剖面中 NO_3^- -N 的质量分数随着土层深度的增加而逐渐减少。玉米地、番茄地和葵花地 0~160 cm 土壤中平均 NO_3^- -N 质量分数分别为 4.61、4.67 和 15.24 mg/kg。秋浇后 (03-15) 3 种类型深层土壤中 NO_3^- -N 的质量分数出现积累, 即: 玉米地、番茄地和葵花地 >80~160 cm 层土壤剖面中 NO_3^- -N 质量分数分别增加了 1.25、2.89 和 2.72 mg/kg。表明秋浇期是河套灌区土壤中 NO_3^- -N 最易发生淋洗的时期。从图 3d 中看到, 秋浇以后盐荒地土壤中 NO_3^- -N 质量分数迅速上升, 特别是 0~40 cm 层土壤 NO_3^- -N 质量分数由秋浇前的 1.91 mg/kg (10-01) 上升到秋浇后的 39.34 mg/kg (03-15), 对整个灌区农业面源污染物的排泄起到了减缓作用。

2.2.2 土壤中铵态氮迁移转化分析

1) 秋灌对土壤中铵态氮迁移转化影响氮肥施入土壤

后主要形成 NH_4^+ -N, 这些 NH_4^+ -N 除了部分发生氨挥发、生物吸收和土壤吸附等作用被消耗和滞留外, 还有相当部分发生硝化作用形成硝态氮。一般认为在旱作条件下,

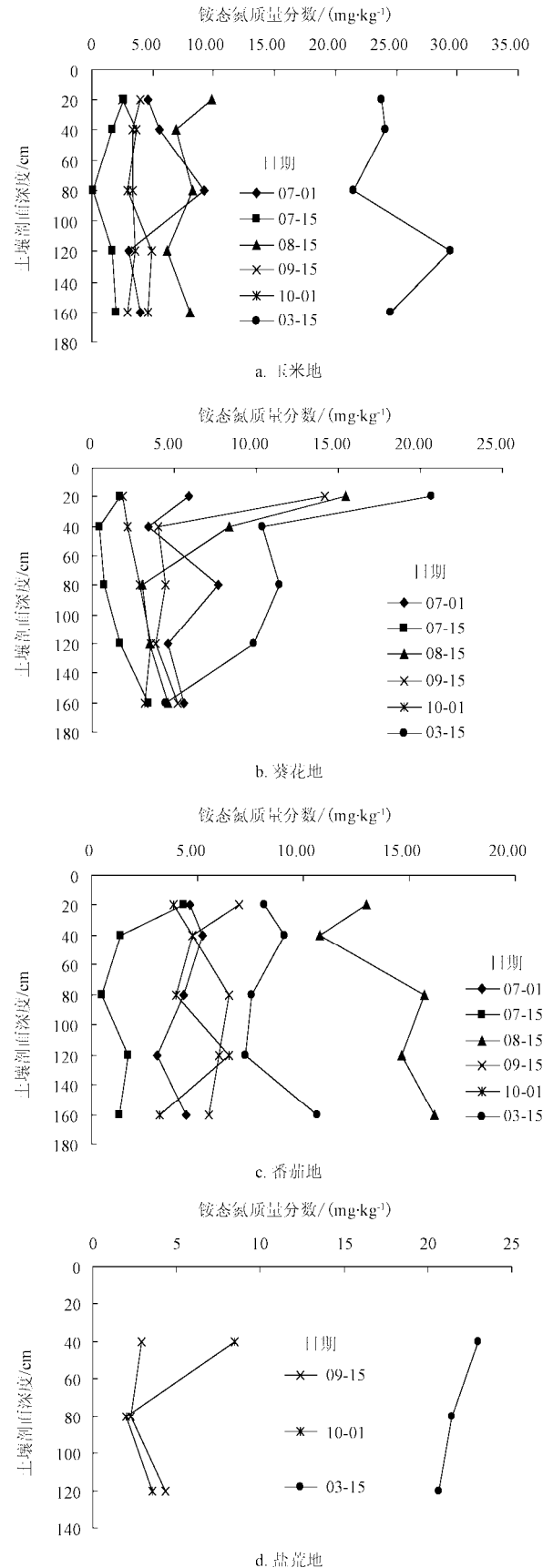


图 4 4 种类型土壤中 NH_4^+ -N 质量分数变化
Fig.4 NH_4^+ -N content variation in four type soils profile

铵态氮肥施入土中, 会经硝化作用很快转化为硝态氮, 但硝化作用的快慢受土壤含氧量、酸度、温度等因素的影响较大。农田施肥灌溉后, 农田系统中温度、土壤含氧量等因素变化频繁, 土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 转化也相对频繁。从图 4 中看出, 葵花地 (图 4b) 0~40cm 土层中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量分数变化从 4.63 mg/kg (07-01) 下降到 0.54 mg/kg (07-15), 然后逐步上升到 11.88 mg/kg (08-15)。随着葵花根系对氮素的吸收和硝化的作用, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的质量分数又逐渐变为 2.01 mg/kg (10-01)。但是, 由于土壤胶体对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的较强吸附作用, 使得土壤剖面中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量分数分布相对较均匀, 不易迁移。如秋浇前 (10-01) 玉米地、葵花地和番茄地土壤剖面 (0~160 cm) 中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量分数分布区间分别为: 2.56~4.94、1.85~3.55 和 3.86~6.48 mg/kg。由于盐荒地土壤水分主要来自农田退水, 且土壤水分长期处于饱和状态, 伴随着农田退水将泥沙和有机质带入盐荒地时, 大量的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 也随之进入盐荒地。同时, 盐荒地土壤质地为沙土, 土壤水分易下渗。因此, 从图 4d 中看到, 从 09-15 到 10-01 期间, 盐荒地土壤剖面 (0~120 cm) 中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均质量分数从 3.19 mg/kg (09-15) 上升到 4.68 mg/kg (10-01)。

2) 秋浇对土壤中铵态氮迁移转化影响

在 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的环境行为中, 吸附作用是一个可以阻滞和延缓氮素进一步迁移和转化, 在一定程度上抑制氮素流失的重要过程。但土壤吸附容量有限, 当吸附达到饱和后,

高质量分数 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 也可进入地下水中。特别是像秋浇这种大水灌溉, 更易发生表层土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 被淋洗到深层土壤中 (图 4)。而且秋浇后土壤水分在很长一段时间内处于饱和状态, 有利于其它氮素形态转化为 $\text{NH}_4^+\text{-N}$, 使得土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量分数增加幅度较大, 即土壤剖面中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量分数变化曲线水平向“右”移动 (图 4)。特别是盐荒地土壤剖面 (0~120 cm) 中平均 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量分数由秋浇前的 4.68 mg/kg 增大到秋浇后的 21.71 mg/kg。

2.2.3 秋灌-秋浇期土壤中硝态氮与铵态氮质量分数关系分析

农田施肥且灌溉后, 土壤中的 N 素发生复杂的变化, 从有机氮通过矿化转变成氨, 再通过硝化作用将 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 转变成 $\text{NO}_3^-\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 再由反硝化作用转变成 N_2O 、 N_2 和 O_2 。由于此过程受到准多因素的影响, 而这些因素中气温和土壤水分的变化具有季节性的变化 (其它因素如基质、氧化还原电位和耕种土壤条件等相对稳定)。因此, 土壤中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量分数的变化也具有季节性的增高或降低。在作物生育期内, 根系对 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的选择性吸收也增强了这两者质量分数在土壤中的季节性变化。如图 5 中所示, 3 种类型农田土壤中施肥后 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 质量分数迅速上升, 而 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量分数却下降 (图 5a、b 为玉米地和番茄地土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量分数变化规律。由于本次采样从 07-01 开始, 而在这之前, 玉米地和番茄地已经施肥, 所以 2 种形态的氮素

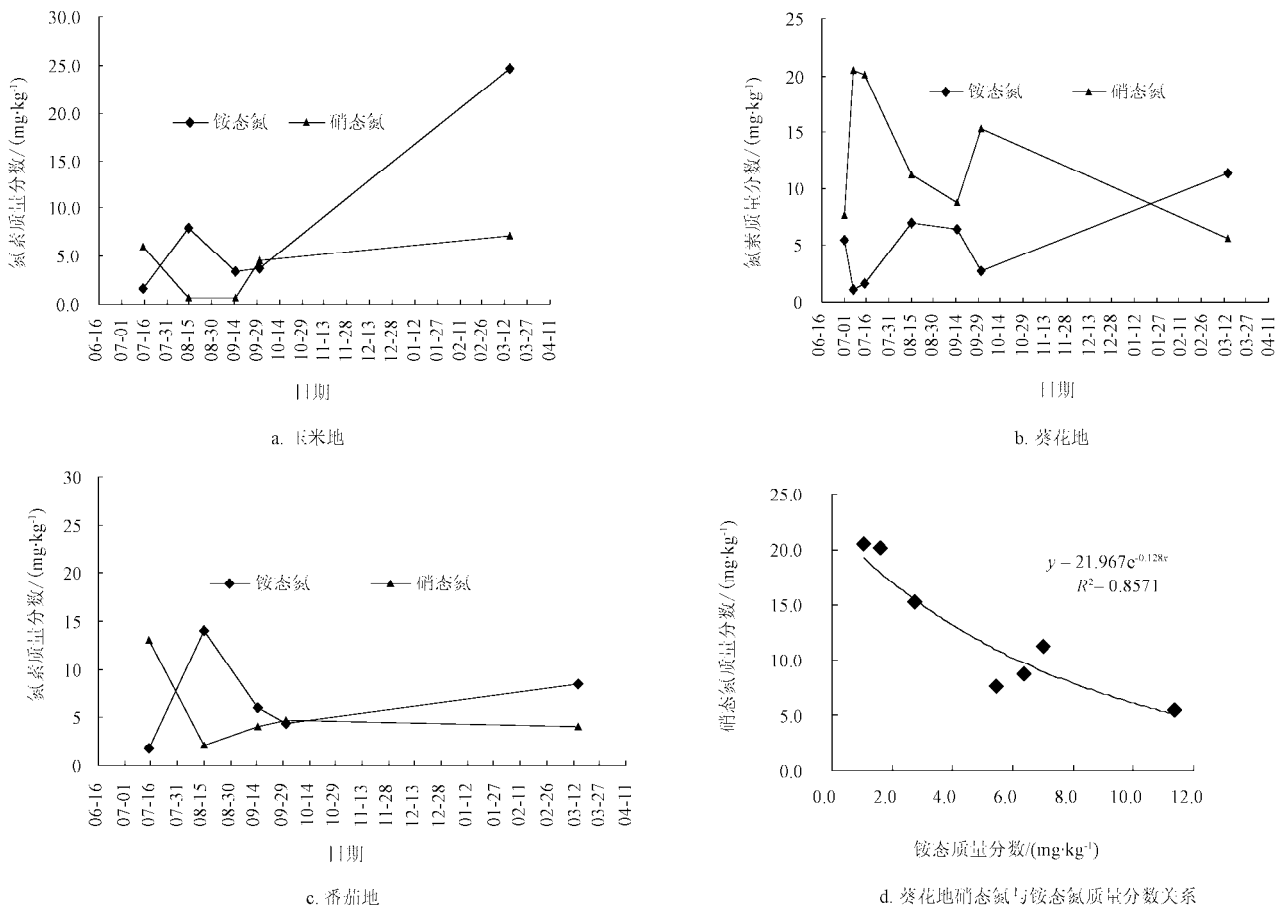


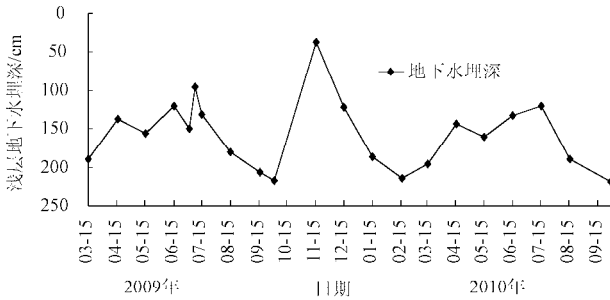
图 5 3 种类型土壤剖面 (0~160cm) 平均硝态氮与铵态氮质量分数变化关系

Fig.5 Relationship between $\text{NO}_3^-\text{-N}$ and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ in three type soils profile (0~160cm)

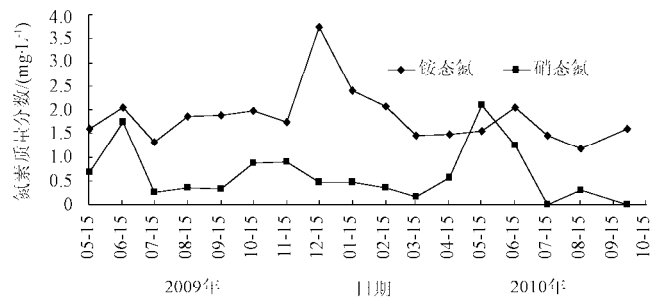
质量分数变化表现为：在 07-01 时 NO_3^- -N 的质量分数显著高于 NH_4^+ -N 的质量分数。随着时间的推移，农田系统中影响氮素转化的条件的变化使得 NO_3^- -N 质量分数下降，而 NH_4^+ -N 质量分数上升，即两者在土壤中的质量分数具有相反的变化过程。从图 5d 中看到，葵花地中两者质量分数具有较好的指数相关关系 ($R^2=0.86$) 其它 2 种土壤中 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 质量分数相关关系弱 (玉米地中 $R^2=0.14$, 番茄地中 $R^2=0.57$)。

2.3 秋灌-秋浇对浅层地下水中氮素影响

试验区内浅层地下水的主要补给源为耕地面状渗漏



和渠道线状渗漏，浅层地下水埋深变化主要受到灌溉时间和量的影响。秋灌前后 (07-01—07-06)，浅层地下水埋深从秋灌前 (07-01) 140 cm 减小到秋灌后 (07-08) 的 89 cm (图 6a)。进入 8 月份后，是作物蒸腾蒸发最旺盛的时期 (番茄开始挂果成熟期，玉米从抽穗到灌浆期，葵花处于显蕾期)，土壤含水量减少较快，在水势的作用下浅层地下水移补充土壤水分，使得浅层地下水埋深逐渐增大到 230 cm (10-01)。秋浇后，浅层地下水埋深急速减小为 27 cm (11-15)，随着潜水蒸发和冻土层的增厚，在水势的作用下，水位埋深逐渐增大为 217 cm (次年 02-15)。



a. 浅层地下水埋深变化图

b. 地下水中氮素质量分数变化

图 6 地下水埋深及氮素变化

Fig.6 Variation of groundwater table depth and N content

从图 6a 中看出，从秋灌到次年 4 月份，浅层地下水平均埋深为 150 cm，且埋深出现了 2 个峰值和 2 个谷值。水位的波动对土壤中氮素的影响很明显，随之也影响着浅层地下水中氮素质量分数变化。秋灌后，浅层地下水中氮素质量分数稍有上升 (图 6b)， NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 质量分数从秋灌前 (07-01) 0.01 mg/L 和 1.28 mg/L 上升到秋灌后的 0.33 mg/L 和 1.88 mg/L (08-15)，随着氮素之间的转化和浅层地下水蒸发，2 者质量分数又下降到秋浇前的 0.12 mg/L 和 1.44 mg/L (10-01)。秋浇后，大量的 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 被淋洗到浅层地下水中，两者质量分数上升幅度较大，分别为 0.90 mg/L (11-15) 和 3.75 mg/L (12-15)。由于 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 化学性质的差异，浅层地下水中两者最大质量分数出现的时间不同。但从秋灌和秋浇后，浅层地下水中氮素质量分数的增加幅度来看，秋浇是河套灌区产生农业面源污染最严重的时期，大量的氮素随着水分进入地下水。从图 6 中看出，浅层地下水中氮素质量分数的变化与浅层地下水水位变化相似，即氮素质量分数随着浅层地下水水位上升而增加，下降而减少。也就是说，在浅层地下水水位上升的过程中，土壤中可溶性氮素逐渐溶解于水中，水体中氮素质量分数逐渐增大。而在浅层地下水回落时，浅层的地下水的侧流和土壤水的侧渗带走了大量的氮素，同时土壤颗粒对氮素的吸附也减少了水体中氮素的质量分数。

3 讨论

3.1 河套灌区农业面源污染产生的过程

在河套灌区，次降雨量较少，农业面源污染物的迁移主要是以农业灌溉水为载体而移动。对秋灌—秋浇期

试验区沟道中积水过程观测，发现排水沟中的积水主要从沟道边坡渗入，渗入量随着浅层地下水水位的上升而增加，下降而减少 (图 7，04-15 水深为冻土融化时渗漏积水)，而从大田直接排入的水量极少。由于秋灌期积水量较少，从北场支沟排出试验区的水量极少，绝大部分渗漏积水存在沟道中，以蒸发形式消耗。在秋浇期间灌水量较大，沟道积水较多，从北场支沟排出的水量为 22.8 万 m^3 (占秋浇水量的 10.1%)。按照此期间沟道水体中无机氮平均质量分数计算，从试验区共有 516 kg 无机氮素排入九排干沟。从图 5、6 和 8 中看到，九排干沟 (河套灌区 10 条排干沟之一，汇集排域内的农田退水、生活污水和工业污水，直接流入乌梁素海。) 和试验区北场支沟水体中氮素质量分数出现峰值的时段 (9 月到 10 月间) 恰好是农田土壤中氮素质量分数出现最低值的时段，此时段又正好提前于浅层地下水水体中氮素质量分数峰值出现的时段 (11 月到 12 月间)。氮素质量分数峰值在时间上的差异，正好反映出河套灌区农业面源污染产生的过程。即：秋浇期，农田土壤中大量的氮素随着

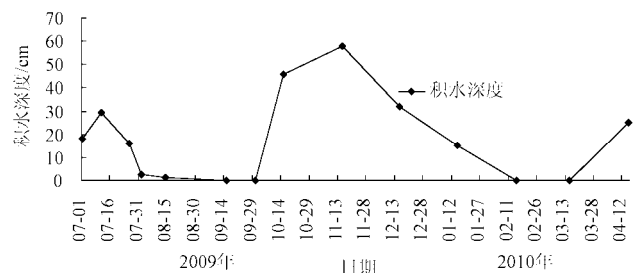


图 7 秋灌-秋浇期典型沟道 (左四支沟) 积水深度变化

Fig.7 Change of accumulated water amount in type ditch

灌溉水的下渗进入浅层地下水（此时浅层地下水水位逐渐上升），土壤中氮素质量分数逐渐下降，浅层地下水中氮素质量分数逐渐增加。随着浅层地下水水位的上升，沟道边坡两边开始渗水，溶于浅层地下水中的氮素也随之进入沟道中，沟道中氮素质量分数逐渐增加。秋浇结束后，浅层地下水水位开始回落，沟道边坡的渗水量逐渐停止，沟道中氮素的补给也相应停止，质量分数达到了峰值。随着冻结期的开始，表层土壤开始冻结，深层土壤水分此时处于上移和下渗 2 种状态，也就是说在此时段内浅层地下水水体中氮素还处于被补给状态(土壤水分下渗带动上层土壤中氮素下移)，故而浅层地下水水体中氮素质量分数峰值出现的晚。

从以上分析说明，浅层地下水水位与沟道中氮素质量分数在短时间内存在正相关，即农田灌溉后，浅层地下水水位上升，沟道水体中氮素质量分数也逐渐上升。大量的氮素又随着沟道退水进入九排干沟，再通过九排干沟汇入乌梁素海，使得湖水中的 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 质量分数增高。据李畅游对乌梁素海富营养化主控因子年季变化分析发现乌梁素海上浮水中主要的氮素形态为 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ ^[15]，且湖水中氮和磷的增加主要原因是上游河套灌区多年来化肥的使用量逐渐增加^[15]。从图 6 和图 8b 中看到，浅层地下水体和沟道水体中氮素主要形态也是 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 。从这一点上分析，河套灌区的农业面源污染对下游乌梁素海富营养化有着显著的影响。

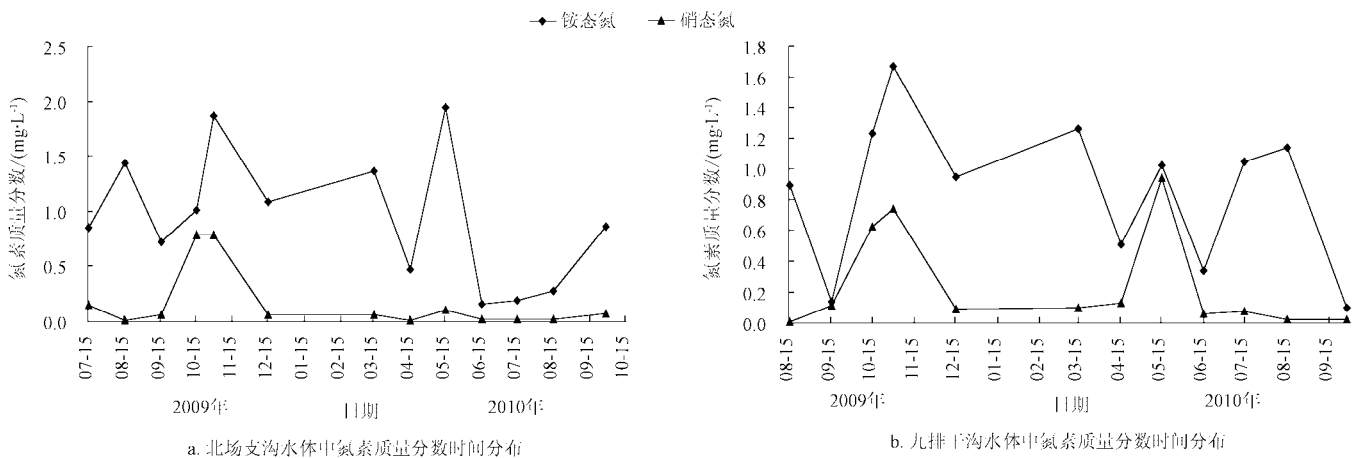


图 8 沟道水体中氮素时间分布

Fig.8 Temporal distribution of N content in the ditch

3.2 减缓河套灌区农业面源污染的措施

在秋收结束后，种植不同作物的农田土壤剖面中氮素的分布及残留量是不同的。在作物生育期较长的农田土壤中氮素的残留量相对较少，对农业面源污染的贡献也相对较少。由于河套灌区特殊的气候条件，农田灌溉次数较多，导致土壤水分质量分数较高且波动频繁，而这种频繁的波动也导致了土壤中氮素的转化出现波动变化（图 5a、b、c）。相关研究表明， $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 淋失必须具备土壤中有硝酸盐积累和下渗水流。由于不同作物在其生育期内施肥量不同且对土壤中硝态氮的吸收利用不同，导致土壤中硝态氮的累积不同（图 3）。这种不同的氮素残留量在同一灌溉水平（秋浇）下的淋失量必然不同（图 3）。冯兆忠对河套灌区不同类型农田土壤氮素淋失的影响分析后发现^[11]：发展套种耕作将有利于减少氮素淋失。根据本试验中玉米、番茄和葵花地深层土壤中硝酸盐的积累量的不同来看，如果将葵花地改种为玉米，作物收获后，农田土壤剖面（0~160 cm）中 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 平均质量分数将会减少 10.63 mg/kg（由于农田试验受到多种因素影响，此差值较大。但是定性的来看，能够较好份反映出作物结构的改变将有利于减少秋收后土壤中残留的氮素量），这将减少土壤中硝酸盐的积累量，也就减少了地下水中氮素的质量分数。从浅层地下水水位于

沟道中氮素在短时间内的正相关关系分析，改变农业种植结构，将有效的减少沟道水体中的氮素质量分数，也就相应的减少汇入乌梁素海的氮素量，缓解湖水富营养化。

另外，在秋灌到秋浇期间，盐荒地土壤中氮素都处于积累状态，而且部分沟道湿地长期处于积水状态，是一种天然的农业面源污染物消耗区。如果在秋浇期人为的将部分农田退水排入荒地中，减少农田沟道排入排干的水量，将有效的发挥灌区自身的净污能力。

4 结论

1) 种植不同的农作物导致农田土壤含水率显著不同。在秋灌阶段（07-01—10-01）3 种类型农田土壤含水率始终保持以玉米地最高，葵花次之，番茄地最小。

2) 种植不同的农作物导致农田土壤剖面中 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的含水率显著不同：秋灌期，玉米地土壤剖面（0~160 cm）中 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 平均质量分数相对于番茄地和葵花地较少。在整个葵花和番茄生育期内，土壤中 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 分别主要积累在 0~20 cm（占到 0~160 cm 土壤中 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 总量的 72.9%）和 40~80 cm（占到 0~160 cm 土壤中 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 总量的 66.0%）土壤中。3 种类型农田土壤剖面中 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 没有发生明显的淋洗。

3) 由于秋浇水量大, 秋浇后玉米地、葵花地和番茄地 80~160 cm 层土壤中 NO_3^- -N 质量分数分别较秋浇前增加了 1.25、2.72 和 2.89 mg/kg。但是, 土壤剖面中 NH_4^+ -N 分布相对较均匀, 随着生育期的推进, 土壤剖面中 NH_4^+ -N 质量分数整体增大。

4) 土壤中 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 质量分数的变化具有季节性的增高或降低, 两者在土壤中的质量分数具有相反的变化过程。

5) 从秋灌到秋浇, 盐荒地土壤剖面中 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 质量分数都处于增大状态, 对整个灌区农业面源污染物的排泄有减缓作用。

6) 秋灌后浅层地下水中 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 质量分数上升幅度较小, 而在秋浇后增幅则较大, 表明秋浇是河套灌区产生农业面源污染最严重的时期。河套灌区的农业面源污染对下游乌梁素海富营养化有着显著的影响。

[参 考 文 献]

- [1] Vitousek P M, Aber J D, Howarth R W, et al. Human alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences[J]. *Ecology Application*, 1997, 7(3): 737—750.
- [2] Giles J. Nitrogen fertilizes fears of pollution [J]. *Nature*, 2005, 433: 791.
- [3] 周顺利, 张福锁, 王兴仁. 土壤硝态氮时空变异与土壤氮素表观盈亏 II. 夏玉米[J]. *生态学报*, 2002, 22(1): 48—53.
Zhou Shunli, Zhang Fusuo, Wang Xingren. The spatiotemporal variations of soil NO_3^- -N and apparent budget of soil nitrogen II. summer maize [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(1): 48—53. (in Chinese with English abstract)
- [4] 叶优良, 李隆, 张福锁, 等. 灌溉对大麦-玉米带田土壤硝态氮累积和淋失的影响[J]. *农业工程学报*, 2004, 20(5): 105—109.
Ye Youliang, Li Long, Zhang Fusuo, et al. Effect of irrigation on soil NO_3^- -N accumulation and leaching in maize/barley intercropping field[J]. *Transactions of the CSAE*, 2004, 20(5): 105—109. (in Chinese with English abstract)
- [5] 王晓英, 贺明荣, 刘永环, 等. 水氮耦合对冬小麦氮肥吸收及土壤硝态氮残留淋溶的影响[J]. 2008, 28(2): 685—694.
Wang Xiaoying, He Mingrong, Liu Yonghuan, et al. Interactive effects of irrigation and nitrogen fertilizer on nitrogen fertilizer recovery and nitrate-N movement across soil profile in a winter wheat field[J]. *Acta Ecologica Sinica* 2008, 28(2): 685—694. (in Chinese with English abstract)
- [6] 韦彦, 孙丽萍, 王树忠, 等. 灌溉方式对温室黄瓜灌溉水分配及硝态氮运移的影响[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(8): 67—72.
Wei Yan, Sun Liping, Wang Shuzhong, et al. Effects of different irrigation methods on water distribution and nitrate nitrogen transport of cucumber in greenhouse[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(8): 67—72. (in Chinese with English abstract)
- [7] 邱建军, 李虎, 王立刚. 中国农田施氮水平与土壤氮平衡的模拟研究[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(8): 40—44.
Qiu Jianjun, Li Hu, Wang Ligang. Simulation of nitrogen level and balance in cropland in China[J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(8): 40—44. (in Chinese with English abstract)
- [8] 郭鸿鹏, 朱静雅, 杨印生. 农业非点源污染防治技术的研究现状及进展[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(4): 290—295.
Guo Hongpeng, Zhu Jingya, Yang Yinsheng. Research status and development of technologies for controlling the agricultural non-point source pollution[J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(4): 290—295. (in Chinese with English abstract)
- [9] 王百群, 戴鸣钧. 土壤不同形态氮素在剖面中移动特征的模拟研究[J]. *水土保持研究*, 2000, 7(4): 117—222.
Wang Baiqun, Dai Mingjun. Simulated study on movement features of soil nitrogen in different forms in soil profile[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2000, 7(4): 117—222. (in Chinese with English abstract)
- [10] Owens L B, Edwards W M, Keuren, R W. Groundwater nitrate levels under fertilized grass and grass-legume pastures [J]. *Environ Qual*, 1994, 23: 752—758.
- [11] 冯兆忠, 王效科, 冯宗炜, 等. 河套灌区秋浇对不同类型农田土壤氮素淋失的影响[J]. *生态学报*, 2003, 23(10): 2028—2035.
Feng Zhaozhong, Wang Xiaoke, Feng Zongwei. Influence of autumn irrigation on soil N leaching loss of different farmlands in hetao irrigation district, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(10): 2028—2035. (in Chinese with English abstract)
- [12] 冯兆忠, 王效科, 冯宗炜. 河套灌区地下水水质污染状况 [J]. *农村生态环境*, 2005, 21(4): 74—76.
Feng Zhaozhong, Wang Xiaoke, Feng Zongwei. N pollution of groundwater in Hetao irrigation district[J]. *Rural Ecoenvironment*, 2005, 21(4): 74—76. (in Chinese with English abstract)
- [13] 曾阿妍, 郝芳华, 张嘉勋, 等. 内蒙古农业灌区夏、秋浇的氮磷流失变化[J]. *环境科学学报*, 2008, 28(5): 838—844.
Zeng Ayan, Hao Fanghua, Zhang Jiayun, et al. 2008. Nitrogen and phosphorus losses caused by the summer and fall irrigation runoff in the agricultural irrigation area in inner mongolia[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 28(5): 838—844. (in Chinese with English abstract)
- [14] 郝芳华, 欧阳威, 李鹏, 等. 河套灌区不同灌季土壤氮素时空分布特征分析[J]. *环境科学学报*, 2008, 28(5): 845—852.
Hao Fanghua, Ouyang W, Li Peng, et al. Temporal and spatial variability of nitrogen in soil in the wulate irrigation district of the Hetao irrigation area in inner mongolia[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(5): 845—852. (in Chinese with English abstract)
- [15] 李畅游, 刘廷玺, 高瑞忠, 等. 乌梁素海富营养化主控因子年季变化分析及综合评价[J]. *水文*, 2004, 24(3): 14—18.
Li Changyou, Liu Tingxi, Gao Ruizhong, et al. Study and

synthetic assessment for the season-year change of the eutrophication main-control factors in wuliangshai lake[J].

Hydrology, 2004, 24(3): 14–18. (in Chinese with English abstract)

Effect of different irrigation seasons on the transport of N in different types farmlands and the agricultural non-point pollution production

Du Jun^{1, 2}, Yang Peiling^{1*}, Li Yunkai¹, Ren Shumei¹, Wang Yongzhong², Li Xian Yue¹, Su Yanping¹

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100081, China;

2. Ningxia Administration Bureau of Farms and Land Reclamation, Yinchuan, 750001, China)

Abstract: Through the analysis of the transport of N in the groundwater, ditch and soil profile during the period from the first-autumn irrigation to the second-autumn irrigation in Wulate irrigation region in Hetao Irrigation District Inner Mongolia, and the law of the agricultural non-point pollution production was analyzed so as to provide the corresponding theoretical guidance of the control of nitrogen pollution in Hetao Irrigation District. The study results shows that the accumulation of NO_3^- -N in the deeper soil profile (120-160 cm) was not significantly during the first-autumn irrigation period. The NO_3^- -N content were increased by 1.25、2.72 and 2.89 mg/kg in the three farmland soil profiles (80~160 cm) respectively after the second-autumn irrigation period. The NH_4^+ -N distributions were relatively homogeneous from surface to deep of soil profile. The change law of the NO_3^- -N and NH_4^+ -N content in the three type soil profiles were increased or reduced seasonally. The content of NO_3^- -N and NH_4^+ -N in the groundwater in the second-autumn irrigation period were higher than that of the first-autumn irrigation period. The second-autumn irrigation period was the key stages which produced the agricultural non-point pollution in Hetao Irrigation District. The NO_3^- -N and NH_4^+ -N were accumulated in the soil profile of salt wasteland, which was helpful to reduced the amount of the agricultural non-point pollutant discharge.

Key words: irrigation, Nitrogen, water pollution, hetao irrigation district, farmlands, non-point pollution