

河套灌区秋浇对不同类型农田土壤氮素淋失的影响

冯兆忠¹, 王效科¹, 冯宗炜¹, 刘宏云², 李延林²

(1. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085; 2. 内蒙古河套灌区沙壤渠试验站, 杭锦后旗 015400)

摘要:研究了河套灌区秋浇对不同类型农田 $\text{NO}_3\text{-N}$ 淋失的影响。结果表明, 秋浇前小麦和白菜地 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量最高, 玉米地和小麦-玉米套种地次之, 葵花地最低。秋浇后土壤剖面 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的损失量按照表层(0~40cm)、中层(40~80cm)、深层(80~120cm)依次递减(玉米地除外)。不同农田 $\text{NO}_3\text{-N}$ 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。这说明, 发展套种耕作将有利于减少氮素淋失。土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的淋失还直接导致地下水质的恶化。在当前的耕作制度及秋浇定额下, 河套灌区每年可损失约 2.6×10^7 kg N。因此, 需要科学地确定秋浇方式和秋浇量, 减少氮素淋失, 减少地下水污染。

关键词:秋浇; 土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$; 淋失量; 农田类型; 河套灌区

Influence of autumn irrigation on soil N leaching loss of different farmlands in Hetao irrigation district, China

FENG Zhao-Zhong¹, WANG Xiao-Ke¹, FENG Zong-Wei¹, LIU Hong-Yun², LI Yan-Lin²

(1. Research Center for Eco-environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. Shahaoqu Experiment Station of Inner Mongolia, Hangjinhouqi 015400, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(10): 2027~2032.

Abstract: Autumn irrigation is a particular irrigation system, which washes salt to deeper soil profile and keeps higher soil water content for cultivating next spring crops in Hetao Irrigation District of China. Autumn irrigation occurs during the non-growing season and may cause leaching of any nitrates left in the soil profile. However, this nitrate leaching has been rarely paid attention. The paper is aimed to determine and compare the effects of autumn irrigation on soil nitrate leaching among different farmlands; and to quantify the mass of $\text{NO}_3\text{-N}$ leached for each type of farmlands in Hetao Irrigation District during the autumn irrigation.

The field study was conducted at Shahaoqu experiment station in Hetao Irrigation District. The fields of spring wheat, sunflower, maize, cabbage and spring wheat-maize inter-planting were chosen randomly. There were 3 sites selected for each fields, and 5 sample plots for each site. At each sample plot, seven samples were taken at seven depths: 0~20, 20~40, 40~60, 60~80, 80~100, 100~120 and 120~150 cm before and after autumn irrigation on 21st and 22nd of October 2002 and 11th and 12th of November 2002, respectively.

Since the groundwater level was about 1.3~1.5 m during autumn irrigation, and the groundwater

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30070149)

收稿日期:2002-12-09; **修订日期:**2003-05-24

作者简介:冯兆忠(1976~), 男, 山东蓬莱人, 博士研究生, 主要从事农业生态系统 N 循环的研究。E-mail: zhzhfeng201@163.com

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(No. 30070149)

Received date: 2002-12-09; **Accepted date:** 2003-05-24

Biography: FENG Zhao-Zhong, Ph. D. candidate, mainly focused on N flux and cycling in agroecology system.

level was 1.34 m when the soil was sampled, thus the amount of N leached in the soil was estimated as the $\text{NO}_3\text{-N}$ change in soil profile of 0 to 120 cm depth. Due to the short interval between the first and second soil sampling, the mineralized nitrogen in this study was ignored. So the amount of soil $\text{NO}_3\text{-N}$ leached in the soil is equal to the $\text{NO}_3\text{-N}$ amount loss after the irrigation.

At the layer of 0~150 cm depth before autumn irrigation, soil water content was the highest in the cabbage field and the lowest in the sunflower field. In addition, the water content was increasing with soil depth. However, after irrigation, the water contents at each soil layer for different farmlands were near to or in excess of water holding capability. The soil $\text{NO}_3\text{-N}$ content in farmlands before the irrigation decreased in such order spring wheat, cabbage, maize, spring wheat—maize and sunflower fields. During autumn irrigation, the leaching loss of soil $\text{NO}_3\text{-N}$ for all field except maize decreased in the order of surface (0~40 cm), mediate (40~80 cm) and deeper profiles (80~120 cm). While the amount of $\text{NO}_3\text{-N}$ leached in 0~120 cm decreased in the order of spring wheat, cabbage, maize, sunflower and spring wheat—corn inter-planting fields. So inter-planting tillage would reduce the leaching of soil $\text{NO}_3\text{-N}$. The groundwater quality degradation caused by soil $\text{NO}_3\text{-N}$ leaching has been observed. The $\text{NO}_3\text{-N}$ content in groundwater was increased from 1.73 to 21.6 mg/L after irrigation. Total nitrogen content was also increased, of which 75% was $\text{NO}_3\text{-N}$. Moreover, lower pH and higher EC were also observed after irrigation. Under present tillage and fertilizer practices, the autumn irrigation will cause about 26×10^6 kg N/a leached in irrigation farmlands, which was 20.3 % of the total fertilizer applied every year. In this study, it also be found that the amount of $\text{NO}_3\text{-N}$ leached in the soil is correlated with the average $\text{NO}_3\text{-N}$ content at the layer of 0~120 cm depth before irrigation ($r=0.841$). In all, both water use and nitrogen leaching should be seriously considered in designing the autumn irrigation mode and irrigation norm.

Key words: autumn irrigation; $\text{NO}_3\text{-N}$ in soil profile; leaching amount; farmlands; Hetao irrigation district
文章编号:1000-0933(2003)10-2027-06 中图分类号:S181 文献标识码:A

大量研究表明,目前湖泊的富营养化和农业生产地区浅层地下水中硝酸盐浓度提高与大量施用氮肥及灌溉有直接的关系^[1~4]。据张玉良^[5]估计,全世界施入土壤中的肥料大约 30%~50%经土壤淋溶而进入地下水。Kessavalou 等^[4]发现在最佳管理措施和最适施氮量下,灌溉玉米田中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 淋失量占施氮量的 41%。Timmons 等^[6]的结果表明,低、高灌溉水平下硝态氮的淋失分别比不灌水增加 17%和 53%,而且一次灌水量越多,硝态氮的淋溶损失越多^[7]。

内蒙古河套灌区是中国三大灌区之一,在提供大量商品粮的同时,由于大量使用化肥而造成的污染也日益严重,特别是,来自河套灌区的农田排水,进入了乌梁素海,成为该湖泊富营养化的一个重要原因,因此,科学地管理河套灌区的农业生产,为保护乌梁素海湿地生态系统的服务功能具有重要意义。秋浇是河套灌区传统的秋后淋盐、春季保墒的一种特殊的灌溉制度,一般在 10 月中旬至 11 月中下旬进行,是河套灌区一年来灌水量最大的一次,约 $1800 \sim 2000 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。秋浇是在作物收获后的一次非生长季灌溉,从理论上讲,土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 更易被淋移至土壤深层中,进入地下水,随着排干渠流入乌梁素海。一方面造成农用氮肥损失,另一方面将使乌梁素海富营养化加重。但到目前为止,秋浇引起土壤剖面 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的淋失还缺乏定量性观测。本文通过研究河套灌区主要农田生态系统秋浇前后的土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的变化,分析了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,初步估算出秋浇对整个河套灌区土壤硝态氮淋失量的影响。

1 自然概况与研究方法

1.1 自然概况

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 $112 \times 104 \text{ km}^2$ 。地处荒漠草原地带,年降水量 $139 \sim 222 \text{ mm}$,且集中

在7~8月份间。年蒸发量达2200~2400 mm,蒸降比在10以上,年均温6~8℃,全年封冻期5~6个月,无霜期135~150 d,年均日照时数3100~3300 h,属于典型的大陆性气候。现灌溉面积 $57 \times 10^4 \text{ hm}^2$,其中农田 $52.5 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。河套灌区是内蒙古重要的农业产区之一,可谓内蒙古的“鱼米之乡”。

1.2 采样方法

取样地点是在内蒙古河套灌区沙壕渠二闸附近。该地区土壤类型主要为重壤土,作物主要为春小麦,葵花、玉米,耕作方式为单种、套种及复种(春小麦-白菜)。在当地随机选取以下5种农田样地:春小麦单种地、玉米单种地、葵花单种地、春小麦-玉米套种地、春小麦-白菜复种地。同一种类型的农田选择3个样地,并且样地的土壤质地结构相似,均为重粉质壤土(除其中一块小麦地中间层为红黏土外)。土壤取样时,在每个地块中选取5个样点,0~120 cm土壤剖面,每20 cm为一个层次,120~150 cm为一个层次,取样深度到150 cm;取样时间均选择在秋浇前1~2d、秋浇后20d。并利用沙壕渠试验站实验地2个地下水井(位于取样地点西侧200~500m)进行秋浇前后地下水位的观测及水质的分析。地下水位的观测采用人工测定。秋浇采用漫灌的形式,以高出地面15cm为准,约 $1800 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。

1.3 分析方法

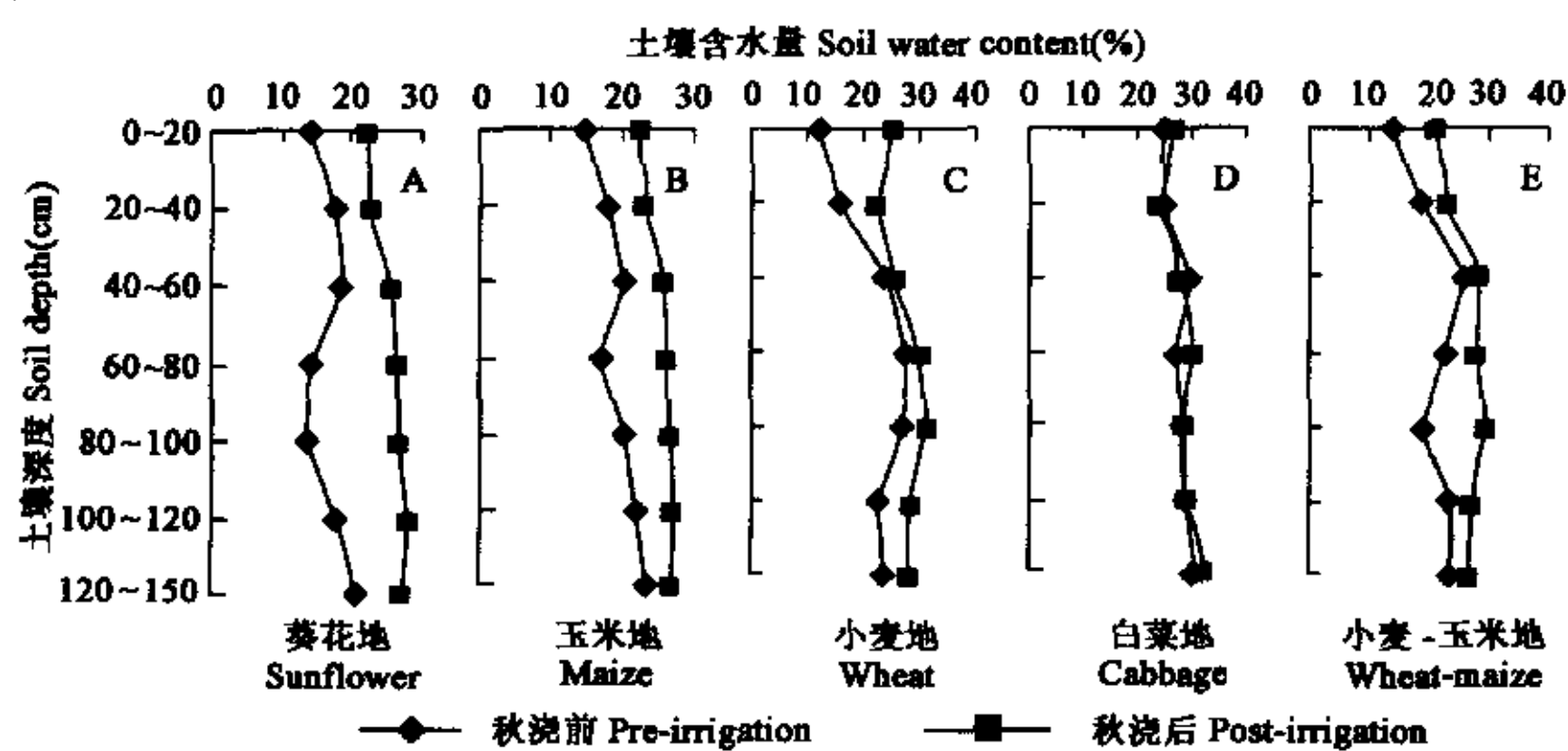
1.3.1 土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的测定 样品取后用自封袋封好,冰冻保存。样品测定时先解冻,2 mol/L KCl 浸提30 min后过滤,滤液立即在紫外分光光度计220nm和275nm比色,同步用烘干法测定土壤含水率。

1.3.2 地下水水质的分析 $\text{NO}_3\text{-N}$ 利用Dionex-120型离子色谱仪,分离柱:AS14;淋洗液:3.5mmol/L $\text{Na}_2\text{CO}_3 + 1.0 \text{ mmol/L NaHCO}_3$;流速:1.10 ml/min;总氮的测定采用碱性过硫酸钾法;pH、EC直接用pH(B-212,Horiba)、EC(B-173,Horiba)计测定。

2 结果与分析

2.1 不同类型农田土壤水分在秋浇前后的变化

由于氮素在土壤中的运移和转化受土壤水分状况的直接影响,所以分析土壤无机态氮动态,必须了解水分状况。秋浇前0~150cm土壤含水率白菜地最高(27.9%),葵花地最低(16.7%),其他3种相差不大,约20%。不同农田土壤剖面呈现表层低、深层高的趋势(图1)。在0~40cm,白菜地(25.1%)>玉米地、小麦-玉米地(16.3%)>葵花地(15.9%)>小麦地(13.9%);40~80cm,白菜地(28.4%)>小麦地、小麦-玉米地(25.1%)>玉米地(18.7%)>葵花地(16.4%);80~150cm,白菜地(29.5%)>小麦地(24.4%)>小麦-玉米、玉米地(21.8%)>葵花地(17.3%)。秋浇前白菜地土壤含水率较高,表层超过田间持水量(26.9%),这与白菜生长期多次大水漫灌,且秋天农田蒸散量较低有关。而其他作物早已收获,休闲期较长,因而表层含水量较低。秋浇后各种类型的农田土壤剖面的含水率相差不大,接近或超过了田间持水量。



A: 葵花地 sunflower B: 玉米地 maize C: 小麦地 wheat D: 白菜地 cabbage E: 小麦-玉米地 wheat-maize

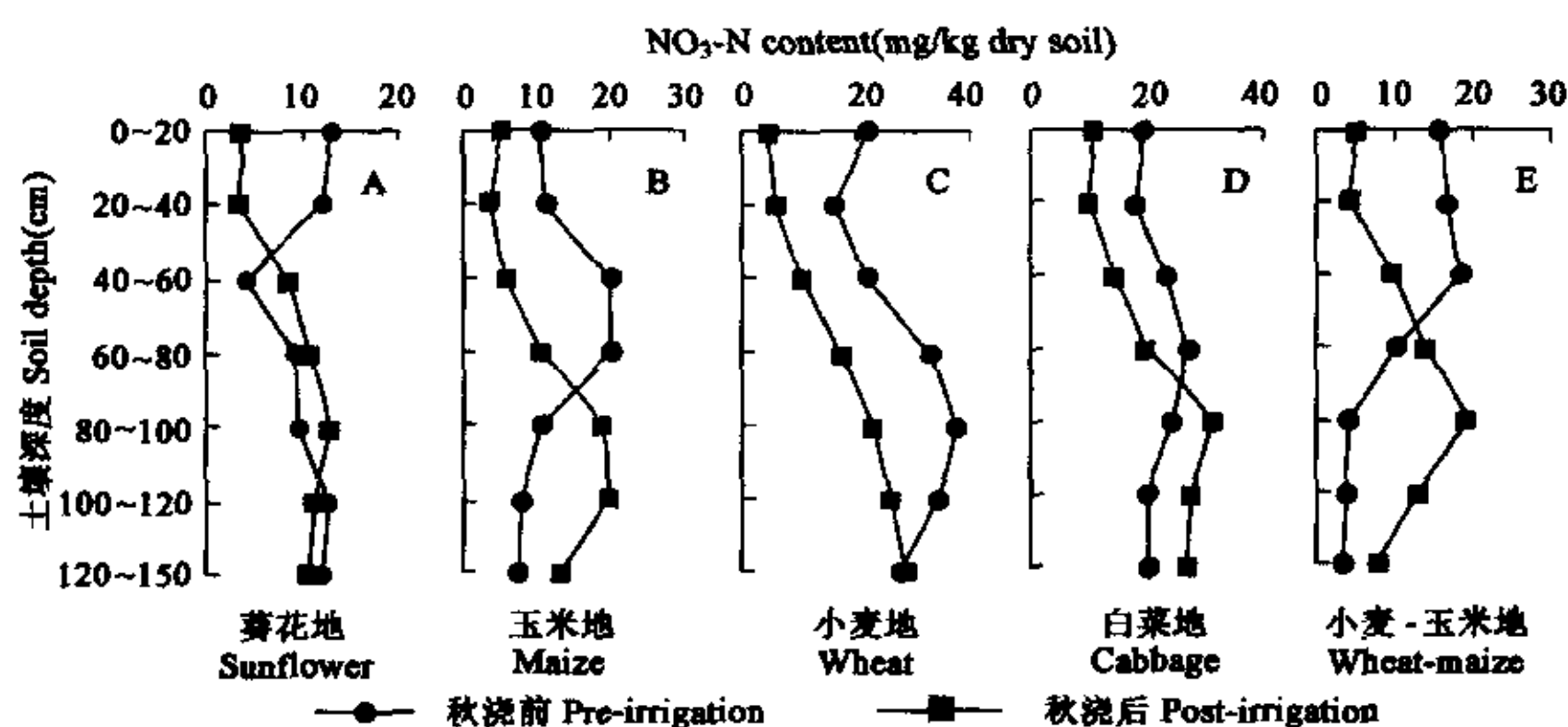
图1 不同类型农田土壤含水量的变化

Fig.1 Changes of soil water content in different farmlands

2.2 不同类型农田土壤剖面中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 在秋浇前后的变化

秋浇前不同农田土壤剖面中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的含量是不同的(图 2)。0~40cm,白菜地(19.1)>小麦(18.9)>小麦-玉米(16.4)>葵花(12.5)>玉米(10.8);40~80cm,小麦(27.3)>白菜(25.3)>玉米(20.0)>小麦-玉米(14.7)>葵花(7.0);80~150cm,小麦(33.6)>白菜(21.9)>葵花(11.4)>玉米(9.0)>小麦-玉米(4.2)(括号中的数字为 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量 mg/kg 干土)。总的来说,小麦和白菜地含量最高,小麦-玉米和玉米地次之,葵花地最低。白菜地是在小麦收获后种植的,其根系只分布在耕作层,并且在种植期间施用大量的无机肥和农家肥(平均 300 kg N/hm^2),大量灌溉 4 次,导致 $\text{NO}_3\text{-N}$ 主要累积在 40cm 土层以下。单种小麦地 $\text{NO}_3\text{-N}$ 主要累积在 60cm 土层以下,其中 80~100cm 为累积高峰,这与春小麦生育期短(7 月中旬收获,全生育期 110 d 左右),当地农民在小麦灌浆期灌溉追肥有关。

秋浇后,不同类型农田土壤剖面中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的迁移规律是不同的。这与灌溉前土壤剖面 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量及含水率不同有关。从图 2 可以看出,只有小麦地秋浇后 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量一直低于秋浇前,在 120~150cm 才表现出增加的趋势。秋浇使白菜地土壤剖面中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 累积向下迁移了 20cm,这可能与浇前较高的土壤含水率有关。单种玉米地、小麦-玉米地 $\text{NO}_3\text{-N}$ 累积高峰分别向下迁移了 40cm,葵花地秋浇后表层明显低于灌溉前,40cm 以下略高于浇前,但差异不明显,这与较低的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量有直接关系。



A: 葵花地 Sunflower B: 玉米地 Maize C: 小麦地 Wheat D: 白菜地 Cabbage E: 小麦-玉米地 Wheat-maize

图 2 不同类型农田土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 量的变化

Fig. 2 Changes in $\text{NO}_3\text{-N}$ content in the soil profile in different farmlands

2.3 $\text{NO}_3\text{-N}$ 淋失量

$\text{NO}_3\text{-N}$ 淋失究竟以多大的土壤深度来衡量,至今尚无明确的定论。考虑到秋浇后试验地点地下水位维持在 1.3~1.5m 左右,而且秋浇后取土时地下水位为 1.34m,因此以 120 cm 为限,计算土壤剖面中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的淋失量。土壤剖面中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的损失量(或淋失量)为秋浇前后土体 $\text{NO}_3\text{-N}$ 累积量(kg N/hm^2)的差值。由表 1 可以看出,秋浇后不同类型农田不同土壤剖面 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的损失量是不同的。小麦地 0~120 cm 土层均出现不同程度的损失,一般在 $25\sim49 \text{ kg N/hm}^2$ 。玉米地在 40~60cm 的损失量最大,是表层(0~20cm)的 2 倍多,其 $\text{NO}_3\text{-N}$ 主要富集在 80cm 以下。葵花地主要损失在 0~40cm,富集在 40~60cm;小麦-玉米地损失在 0~60cm, $\text{NO}_3\text{-N}$ 主要富集在 80cm 以下;白菜地在 0~80cm 剖面均出现 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的损失,80cm 以下

表 1 不同类型农田不同土壤剖面 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的损失量(kg N/hm^2)

Table 1 The loss of $\text{NO}_3\text{-N}$ in soil profile in different farmlands (kg N/hm^2)

土壤剖面 Soil profile	小麦 Wheat	玉米 Maize	葵花 Sunflower	小麦-玉米 Wheat-maize	白菜 Cabbage
0~20	49	16	28	31	26
20~40	30	20	25	36	23
40~60	33	42	-13	25	24
60~80	46	28	-3	-10	20
80~100	44	-25	-9	-45	-21
100~120	25	-35	5	-26	-22

为 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的富集区。不同农田类型 0~120cm 土壤剖面的淋失量按照小麦地、白菜地、玉米地、葵花及小麦-玉米地依次递减(图 3)。由此可见,在当地水肥条件下,可以采用套种耕作方式,有利于减少 N 淋失。

2.4 秋浇前后地下水位及地下水质的变化

秋浇明显地抬升了地下水位,由浇前 1.92 m 上升到 1.32 m(图 4)。地下水质的监测结果表明 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量秋浇后达到了 21.6 mg/L,已经严重超过国际卫生组织标准(10mg/L),总氮含量亦相应的增加,但秋浇后地下水中氮素以无机态为主。同时,大量灌溉使地下水中的 pH 下降,EC 升高。

3 讨论和结论

农田土壤硝态氮的淋失是氮素损失的重要途径之

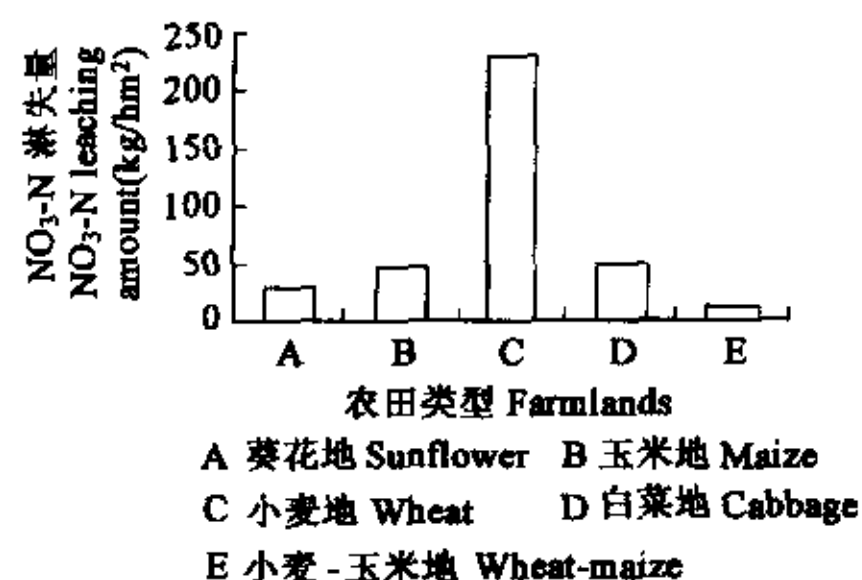


图 3 秋浇期间不同类型农田 0~120 cm 土壤剖面 $\text{NO}_3\text{-N}$ 淋失量

Fig. 3 The mass of $\text{NO}_3\text{-N}$ leached in 0~120 cm soil profile of different farmlands during autumn irrigation

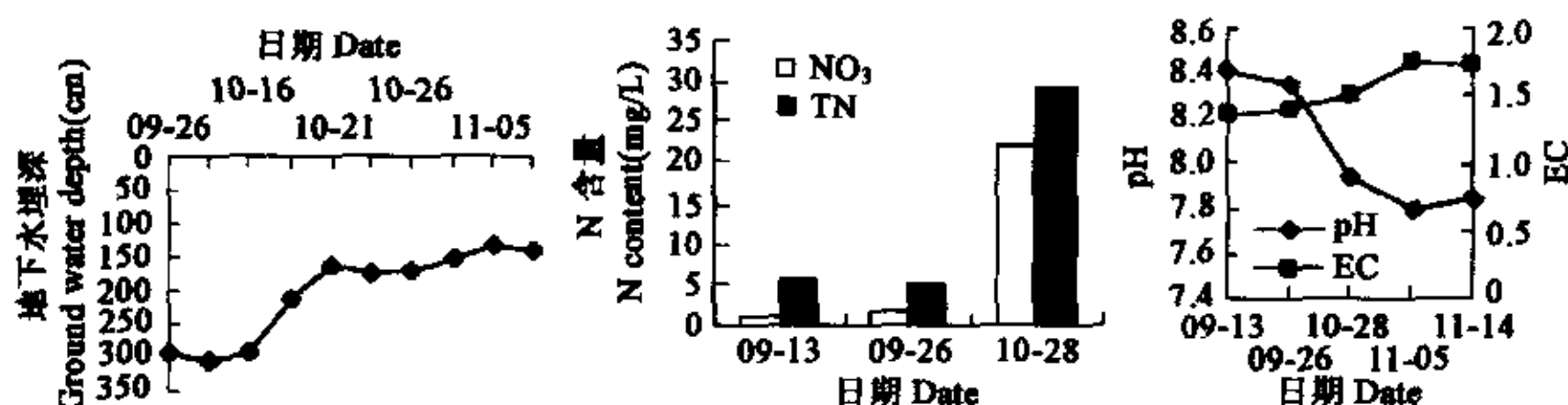


图 4 秋浇期间地下水埋深、地下水中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、总氮及 pH、EC 的变化

Fig. 4 Changes in depth, $\text{NO}_3\text{-N}$ and total N contents, pH and EC in groundwater during autumn irrigation

表 2 秋浇期间河套灌区土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 淋失量的估算

Table 2 The approximate mass of $\text{NO}_3\text{-N}$ leached in soil profiles in Hetao Irrigation District during autumn irrigation

农田类型 Farmlands	2002		2010	
	灌溉面积 * Irrigation area (km^2)	淋失量 Leaching amount (10^6 kg N)	灌溉面积 * Irrigation area (km^2)	淋失量 Leaching amount (10^6 kg N)
小麦 Wheat	77.1	17.5	73.8	16.8
玉米 Maize	52.5	2.5	46.1	2.2
葵花 Sunflower	78.8	2.5	72.7	2.3
小麦-玉米 Wheat-maize	176.1	2.1	178.2	2.1
白菜 Cabbage	27.5	1.4	22.1	1.2
合计 Sum	412.0	26.0	392.9	24.6

* 引自黄河内蒙古河套灌区续建配套与节水改造规划报告, 1999. 12. Cited by the report of water saving rebuilding scheme in Hetao Irrigation District of Inner Mongolia, 1999. 12

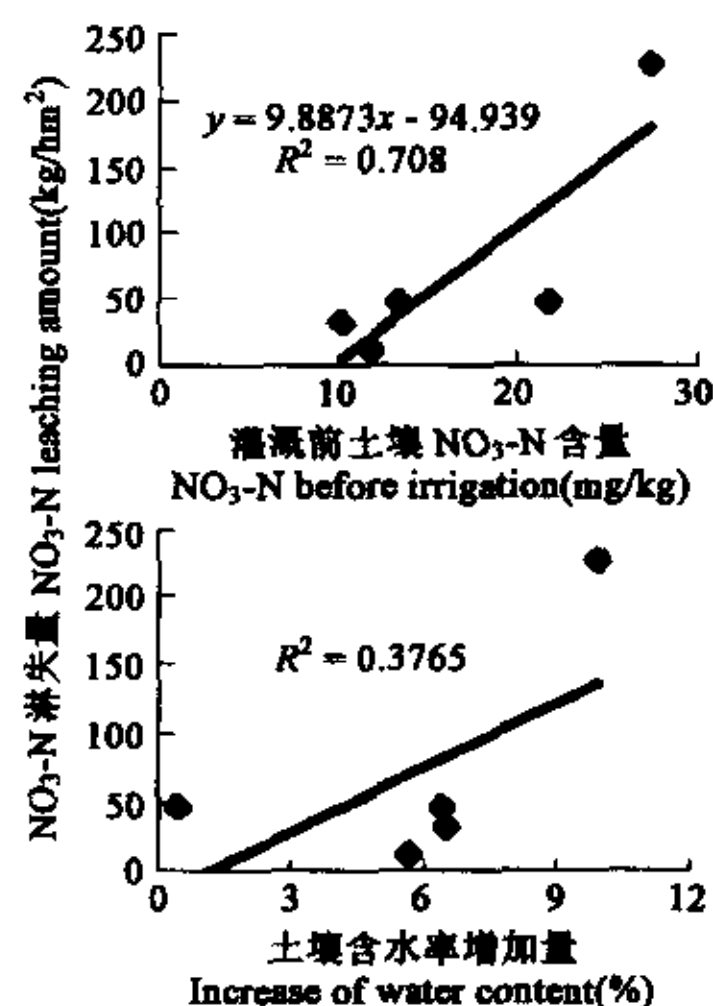


图 5 秋浇期间土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的淋失量与秋浇前 0~120 cm 土层 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量及 0~40cm 土壤含水率的增加量
Fig. 5 The relation between soil $\text{NO}_3\text{-N}$ leaching amount and soil $\text{NO}_3\text{-N}$ content before irrigation at the layer of 0~120cm and increase of soil water content at 0~40cm

一,又是引起地下水硝酸盐污染和湖泊富营养化的主要原因^[1,4,8,9]。大量研究表明,硝酸盐淋失必须具备两个条件:一是土壤中有硝酸盐积累,二是有下渗水流。前者是源,其量越多,越易淋失。后者是载体,只有饱和水流才能引起氮素淋失^[10]。由于不同作物对土壤中硝态氮的吸收利用不同^[11]及生长期不同的施肥量,导致土壤中硝态氮的累积不同(图2),因而在同一灌溉水平下土壤中硝态氮的淋失量也是不同的(图3)。回归分析结果表明,秋灌条件下,农田土壤剖面中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的淋失量与灌溉前0~120cm土层的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 平均含量呈线性正相关($r=0.841$),但并不随着土壤水分的增加而显著性增加(图5)。这说明若灌溉前土壤含水率接近或超过田间持水量,即使土壤含水率没有明显增加,但由于灌溉前土壤剖面中较高的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量,同样也能发生了较大的淋失。以往大多认为,在作物生长期,灌溉能够造成土壤硝态氮的淋失,但是在秋季作物收获之后,由于土壤蒸发少,无根系对水分移动的阻碍作用,此时灌溉可能更易使土壤残留的硝酸盐向下淋失。通过试验结果及河套灌区的灌溉面积、不同作物施氮量,可以估算出秋浇期间河套灌区土壤剖面中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的淋失量(表2)。在当前的耕作制度及秋浇定额下,河套灌区每年可损失约 2.6×10^7 kg N,相当于 5.7×10^7 kg 尿素,是当年施氮量的20.3%,这不仅造成了巨大的经济损失,同时也引起了地下水质的恶化(图4)。秋浇后地下水中氮素的75%为硝态氮,这也说明了土壤中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的大量淋失。

总之,在当前的灌溉定额下,河套灌区秋浇在洗盐的过程中造成了大量的氮素淋失,并严重污染了地下水。因此,有必要对秋浇方式和秋浇量重新进行科学评价,同时考虑水分消耗、盐分动态和氮素淋失,采取科学的水肥管理措施,包括节水灌溉、控制氮肥用量、平衡施肥、使用缓释肥和选用合理的耕作方式如套种等。尽可能地减少氮肥淋失。

References:

- [1] Power J E. Nitrate contamination of ground-water in north American. *Agron. Ecosys. Environ.*, 1989, **26**: 165~187.
- [2] Guillard K. Nitrogen utilization of selected cropping system in the U S A northeast: soil profile nitrate distribution and accumulation. *Agron. J.*, 1995, **87**: 199~207.
- [3] Westerman R L., Boman R K, Raun W R, *et al.* Ammonium and nitrate nitrogen in soil profile of long-term winter wheat fertilization experiments. *Agron. J.*, 1994, **86**: 94~99.
- [4] Kessavalou A, Doran J W, Powers W L, *et al.* Bromide and nitrogen-15 tracers of nitrate leaching under irrigated corn in central Nebraska. *J. Environ. Qual.*, 1996, **25**: 1008~1014.
- [5] Zhang Y L. *Agro-chemistry and biosphere*. Beijing: Chinese Environmental Science Press, 1987. 151~175.
- [6] Immons D R, Dylla A L. Nitrogen leaching as influenced by nitrogen management and supplemental irrigation level. *J. Environ. Qual.*, 1981, **10**: 421~426.
- [7] Ritter W F. Nitrate leaching under irrigation in the United States—A review. *J. Environ. Sci. Health A.*, 1989, **24**: 349~378.
- [8] Huang S M, Bao A J and Huangpu X R. Effect of N fertilizer application on content of nitrate-N in soil and underground water. *Agro-Environ. Protect*, 2000, **19**(4): 228~229, 241.
- [9] Wang J Y, Wang S J, Chen Y, *et al.* Study on the nitrogen leaching in rice fields. *Acta Pedol. Sin.*, 1996, **33**(1): 28~35.
- [10] Zhang G L, Zhang S. Nitrogen leaching from farmlands—A review. *Soils*, 1998, **30**(6): 291~297.
- [11] Lu R K, Liu H X, Wen D Z, *et al.* Study on the agriculture ecology system nutrient cycle and balance in Chinese typical areas I. Farmlands nutrient output parameter. *Chin. J. Soil Sci.*, 1996, **27**(4): 145~151.

参考文献:

- [5] 张玉良. 农业化学与生物圈. 北京: 中国环境科学出版社, 1987. 151~175.
- [8] 黄绍敏, 宝德俊, 皇甫湘荣. 施氮对潮土土壤及地下水硝态氮含量的影响. 农业环境保护, 2000, **19**(4): 228~229, 241.
- [9] 王家玉, 王胜佳, 陈义, 等. 稻田氮素淋失的研究. 土壤学报, 1996, **33**(1): 28~35.
- [10] 张国梁, 章申. 农田氮素淋失研究进展. 土壤, 1998, **30**(6): 291~297.
- [11] 鲁如坤, 刘鸿翔, 闻大中, 等. 我国典型地区农业生态系统养分循环和平衡研究 1. 农田养分支出参数. 土壤通报, 1996, **27**(4): 145~151.