

河套灌区春小麦-萝卜复种模式下土壤 NO_3^- -N 动态

冯兆忠, 王效科*, 冯宗炜

(中国科学院生态环境研究中心系统生态国家重点实验室, 北京 100085)

摘要: 研究了河套灌区春小麦-萝卜复种模式下, 土壤、土壤溶液和地下水 NO_3^- -N 浓度的动态变化. 结果表明: 随着试验时间的延长, 土壤表层 NO_3^- -N 含量降低, 深层(100~150cm)增加; 土壤溶液中、下层 NO_3^- -N 浓度(70、120cm)显著高于上层(30cm), 尤其是在萝卜生长季. 当前的灌溉条件下, 不同年度、不同生长季土壤 NO_3^- -N 淋失量的多少与土壤水分的下渗量密切相关, 且输入的氮素中有 30% 以上以 NO_3^- -N 的形式淋失掉. 施肥区地下水 NO_3^- -N 浓度显著高于未施肥区, 且 65.5% 的水样超过 WHO 规定的上限(11.3mg/L). 总之, 经过连续 2a 的春小麦与萝卜复种可使表层土壤 NO_3^- -N 含量明显降低, 但由于中、下层土壤剖面中残留大量的 NO_3^- -N, 因此在当前灌溉措施下, 短期内 NO_3^- -N 淋失是不可避免的.

关键词: NO_3^- -N 淋失; 春小麦-萝卜复种; 地下水; 干旱地区; 河套灌区

中图分类号: X171.1; S158.2 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2006)06-1223-06

NO_3^- -N Dynamics in a Spring Wheat and Radish Multiple-Crop System in the Hetao Irrigation District

FENG Zhaozhong, WANG Xiaoke, FENG Zongwei

(State Key Laboratory of Systems Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: The NO_3^- -N dynamics of the soil, soil solution and groundwater were studied under spring wheat and radish multiple-crop system in Hetao Irrigation District over two years. A strong tendency of NO_3^- -N to move from upper layer to deeper layer could be observed and soil NO_3^- -N was increased at the layer of 100~150cm. NO_3^- -N concentration of soil solution at the depth of 70 and 120 cm was significantly higher than that at the depth of 30 cm, especially in the radish growth season. NO_3^- -N leaching amount was correlated with deep percolation at both different crop growth seasons and different years and it accounted for higher than 30% of total N input across two years. In the fertilizer plot, the concentration of NO_3^- -N in groundwater was far higher than that in the non-fertilizer plot, and 65.5% samples were over the safe standard of WHO (11.3mg/L) in the fertilizer plot. The topsoil NO_3^- -N content was markedly decreased during the two years multiple-crop system. However, NO_3^- -N leaching was inevitable in the near future due to a large amount of residual NO_3^- -N in the middle and deeper soil profiles.

Key words: NO_3^- -N leaching; spring wheat and radish multiple-crop system; groundwater; arid areas; Hetao Irrigation District

在农田生产系统中, 氮肥是影响作物产量的最活跃的因子之一. 为了提高单位土地面积的粮食产量, 满足人口对农产品的需求, 农田氮肥的使用量逐年增长. 目前我国氮肥使用量已跃居世界第一, 单位面积的施用量也高于世界平均水平, 但氮肥利用率仅为 30%~41%^[1]. 研究表明: 施入的氮肥除一部分被作物吸收外, 大部分以 NO_3^- -N 淋溶、反硝化、 NH_3 挥发等途径从土壤中损失掉, 其中 NO_3^- -N 淋溶对地下水(饮用水源)的污染倍受关注^[2]. 根据 Bin 等^[3]用模型预测的结果, 在自然生态系统中, 淋失的 NO_3^- -N 仅为 $10\text{kg}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$, 然而在农田生态系统中, 随着施氮量的增加, 硝态氮的淋失量可达 $20\text{kg}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$, 特别是美国、欧洲和我国的有些地区最大硝态氮淋失量可达 $133\text{kg}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$. 许多研

究者试图通过轮作、间作等农艺措施降低土壤 NO_3^- -N 的含量, 结果表明玉米-大豆、小麦-大豆、水稻-小麦轮作等都可明显减少 NO_3^- -N 的淋失^[4~6], 但复种模式能否减少 NO_3^- -N 的淋溶鲜见报道. 本文以河套灌区春小麦-萝卜复种为例, 探讨了干旱地区灌溉农业下土壤、土壤溶液及地下水 NO_3^- -N 浓度的动态变化, 为当地水环境保护提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 自然概况

收稿日期: 2005-06-06; 修订日期: 2005-09-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(30070149); 国家自然科学基金委创新群体项目(40321101)

作者简介: 冯兆忠(1976~), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为污染生态与农业生态学.

* 通讯联系人

内蒙古河套灌区是中国三大灌区之一,地处北纬 $40^{\circ}19' \sim 41^{\circ}18'$, 东经 $106^{\circ}20' \sim 109^{\circ}19'$, 年降水量 139~ 222mm, 且集中在 7~ 8 月间. 年蒸发量达 2 200~ 2 400mm, 蒸降比在 10 以上, 年均温 $6 \sim 8^{\circ}\text{C}$, 全年封冻期 5~ 6 个月, 无霜期 135~ 150d, 年均日照时数 3 100~ 3 300h, 属于典型的大陆性气候. 该地区主要作物是春小麦、玉米、葵花(油葵和花葵), 耕作方式为单种、套种和复种, 氮肥施用量按纯氮计一般每年可达到 450 到 $600\text{kg}/\text{hm}^2$. 试验土壤为沙壤土, 基本理化性质如下: 容重 $1.51\text{g}/\text{cm}^3$, pH (H_2O) 为 8.7, 有机碳 1.02%, 总氮 0.94%, 碱解氮 $104.1\text{mg}/\text{kg}$, 速效 P $55.4\text{mg}/\text{kg}$, 速效 K $121.1\text{mg}/\text{kg}$, 属于高肥力土壤.

1.2 试验设计

以春小麦 (*Triticum aestivum* L.) 和萝卜 (*Raphanus sativus* L.) 为供试作物, 于 2002-03~ 2003-10 进行, 共 4 个生长周期. 春小麦品种为永粮-4号, 该品种抗盐性强, 灌浆快, 生育期 100d 左右, 是解放闸灌域大面积种植的当家品种. 2002 年施用的底肥为磷酸二铵 (N 18%, P_2O_5 46%), 在追肥时施用硝铵 (N 35%). 2003 年底肥为磷酸二铵, 在追肥时施用尿素 (N 46%). 磷钾肥全部基施, 施肥量为 P_2O_5 : $388\text{kg}/\text{hm}^2$, K_2O : $150\text{kg}/\text{hm}^2$. 2002 年按照当地施肥时期施肥, 施肥量也按照当地的习惯. 2003 年施肥分为基肥和追肥(拔节期灌溉时地表撒施或块茎膨大期) 2 次施入, 基肥占总施氮量的 40%, 耕前撒施. 试验期间的施肥量、施肥时期、供水量见表 1 和表 2. 试验区面积为 $5\text{m} \times 3\text{m} = 15\text{m}^2$, 3 个重复. 在每个小区深 100cm 周围用塑料布圈住, 防止小区间水分和养分的相互流动. 在实验开始前于每个试验小区中间安装 200cm 长的 TDR 探管来监测不同土壤剖面水分的变化. 分别在地表以下 30cm、70cm、120cm 深度竖埋陶瓷头吸取杯(直径 1.5cm, 长 5cm), 并且每个陶瓷头相距 15cm, 尽可能地靠近 TDR. 通过这 3 个吸取杯获得的土壤溶液, 分别代表来自于 20~ 40、60~ 80、110~ 130cm 土层的土壤溶液. 在灌溉后 3~ 5d, 抽取不同土层的土壤溶液, 溶液经过 $0.45\mu\text{m}$ 的滤膜后, 于 -20°C 冷冻保存. 2002-08 分别在小区内、外建设了 2 座地下水观测井, 用于监测地下水位和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度的变化.

1.3 取样方法

2002 年分别在春小麦播种前、拔节期、收获期, 萝卜块茎膨大期、收获期共取土 5 次进行土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的测定. 采样深度为 0~ 150cm, 按照 0~

表 1 不同年度的施肥时期和施氮量/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$

Table 1 Nitrogen application time and rates at different years/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$

年份	春小麦				萝卜		
	播前	拔节期	开花期	合计	播前	膨大期	合计
2002	55	100	70	225	30	130	160
2003	90	135	0	225	0	120	120

表 2 试验期间的降雨量和灌溉量/mm

Table 2 Precipitation and irrigation in crop growth season/mm

年份	作物	降雨量	灌水量	总供水量
2002	春小麦	96.3	384	480.3
	萝卜	29.1	236	265.1
2003	春小麦	57.5	292	349.5
	萝卜	86.9	331	417.9

20, 20~ 40, 40~ 60, 60~ 80, 80~ 100, 100~ 120, 120~ 150cm 的土壤层次, 每个小区随机取 2 钻, 相同层次的土壤混合为 1 个样. 土壤溶液从 5 月中旬第一水灌溉完开始, 平均 15~ 20d 抽取 1 次, 全年共取 10 次. 在抽取时利用手泵抽负压至 90Pa, 15h 后取回溶液进行 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的分析. 2003 年土壤样品 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的测定分别在春小麦播种前、拔节期、收获期、萝卜块茎膨大期、秋浇后(收获期)共 5 次, 采样深度同 2002 年. 土壤溶液的抽取及测定项目同 2002 年.

1.4 分析方法

1.4.1 土壤水分的测定

利用 TRIME-FM 型 TDR(德国)测定, 每 20cm 为一层次, 直至 140cm. 2002 年每 5d 测定 1 次, 灌溉时每天测定 1 次, 大的降雨时加测. 2003 年每 7d 测定 1 次, 大的降雨、灌溉时每天测定 1 次, 直至数据变化幅度低于 5%.

1.4.2 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, $2\text{mol}/\text{L}$ KCl 浸提 60min 后过滤, 滤液立即在紫外分光光度计 220nm 和 275nm 比色, 同步测定土壤含水率(烘干法).

1.4.3 土壤溶液 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的测定

土壤溶液 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的测定采用紫外分光光度法.

1.5 结果计算

1.5.1 土壤水分下渗量的计算

土壤水分下渗量计算采用土壤水分质量平衡法. 即在某一时段内, 一定面积和一定土层厚度的各来水项和去水项应该相等. 其方程可简单地表达为式(1):

$$P + I = D + ET + \Delta W \quad (1)$$

式中: ΔW 为平衡土层内土壤储水量变化(mm), 数据来自 TDR 的测定结果; P 为降水量(mm); I 为灌水量(mm); D 为渗漏水量(mm); ET 为实际蒸散量(mm), 根据 Penman-Monteith 公式计算参考作物蒸散量(ET_0), 然后根据作物不同生长阶段的 K_c , 计算出实际蒸散量(ET), 即:

$$ET = ET_0 \times K_c \quad (2)$$

1.5.2 NO_3^- -N 淋失量的计算

土壤 NO_3^- -N 淋失量计算公式为:

$$L_N = 0.1 \times D \times c_{\text{NO}_3^- \text{-N}} \quad (3)$$

其中: D 为土壤水分下渗量(mm); $c_{\text{NO}_3^- \text{-N}}$ 为 120cm 深度处土壤溶液的 NO_3^- -N 浓度; 0.1 为单位转换系数。

2 结果与讨论

2.1 土壤 NO_3^- -N 含量的动态变化

由图 1 可见, 试验前表层土壤 NO_3^- -N 含量较高, 随着土壤深度的增加, NO_3^- -N 含量降低, 但在 60~80cm 达到最高值, 随后又降低, 说明 NO_3^- -N 主要积累在 60~80cm 处。2002 年在春小麦拔节期灌溉追肥后(播种后 62d), 除 20~40cm 外, 其它剖面 NO_3^- -N 含量明显增加。但由于在 2003-05-27 取样前进行了 2 次灌溉(共 146mm), 使得拔节期追肥不但没有增加表层 NO_3^- -N 含量, 反而明显低于播种前, 且 NO_3^- -N 累积高峰向下迁移了 20cm, 说明灌溉是引起干旱地区土壤 NO_3^- -N 向深层迁移的主要因素。随着春小麦生长速度的加快, 其对氮素的吸收强度逐渐增大, 收获期(112d 和 07-25)表层土壤 NO_3^- -N 含量低于播种前, 在 100cm 以下, NO_3^- -N 发生了累积。由于 2002 年在萝卜播种前与块茎膨大期进行了 2 次灌溉施肥(表 1), 因此 168d 的结果显示, NO_3^- -N 累积高峰由 60~80cm 向下移动了 20cm, 且出现了明显的次高峰(40~60cm); 但 2003 年追肥并未引起 NO_3^- -N 含量的明显增加, 这一方面由于萝卜播种前只灌溉未施肥, 另一方面可能因为萝卜是浅根系作物, 对土壤养分的利用只在耕作层。秋浇(212d 和 09-30)引起土壤表层 NO_3^- -N 含量下降, 深层 NO_3^- -N 含量升高, 其中 2002 年土壤 NO_3^- -N 含量在 80cm 以下达到 1a 来所测定的最高值, 说明秋浇引起大量 NO_3^- -N 向土壤深层迁移并发生了淋失。总的来看, 2003 年不同土壤剖面

NO_3^- -N 含量比 2002 年低, 尤其是萝卜生长季。

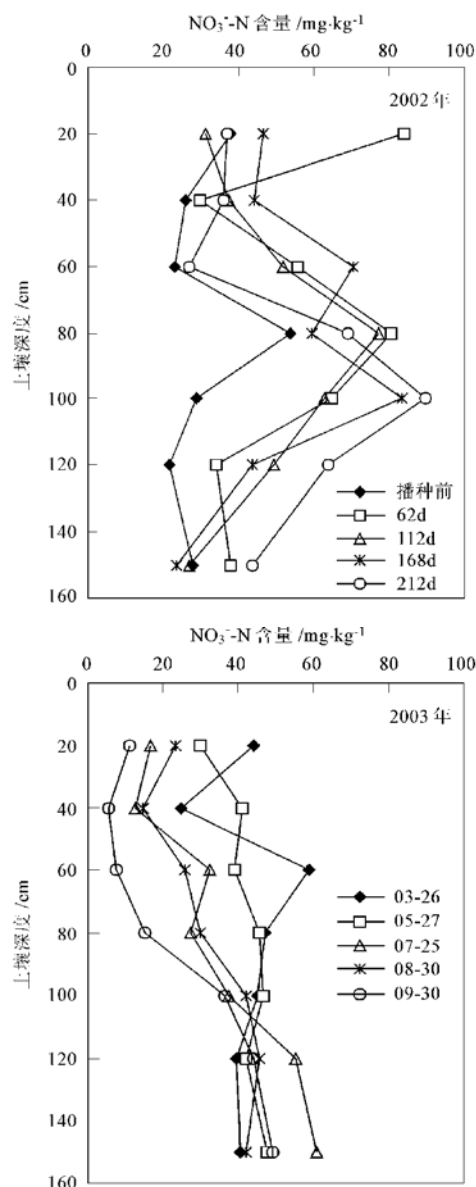


图 1 不同土壤深度 NO_3^- -N 含量的动态变化

Fig. 1 Dynamics of soil NO_3^- -N in different soil depths

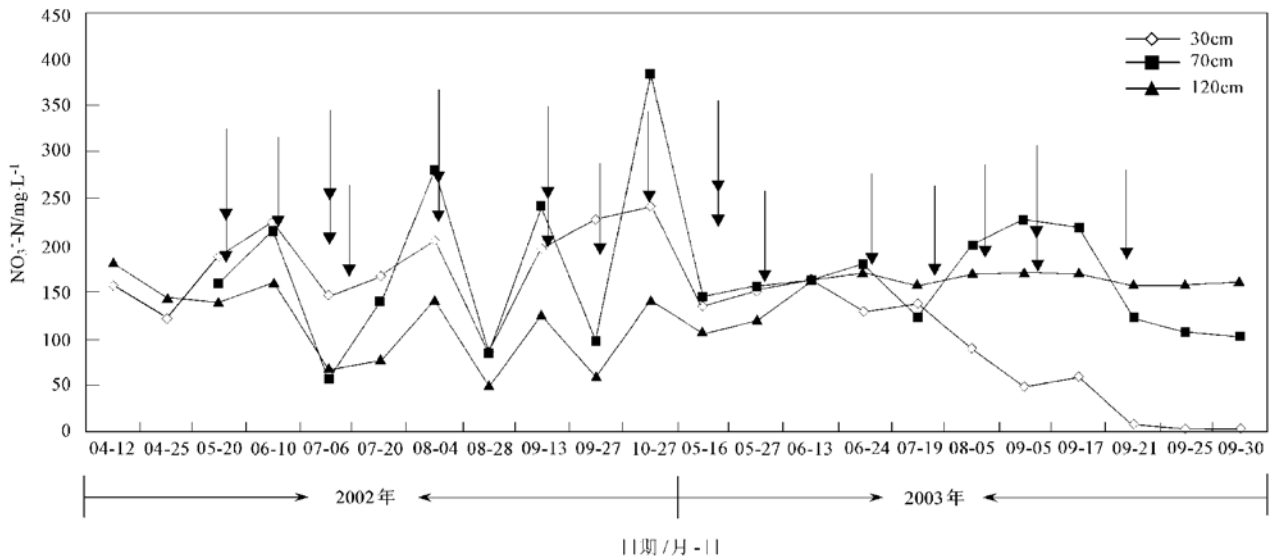
2.2 土壤溶液 NO_3^- -N 浓度的动态变化

由图 2 可见, 随着试验时间的延长, NO_3^- -N 在土壤中的迁移规律不同。2002 年各个土壤层次的 NO_3^- -N 浓度呈波浪式变化, 并且 30cm 与 70cm 处土壤溶液 NO_3^- -N 的平均浓度分别为 177.9mg/L 和 184.5mg/L, 显著高于下层 120cm 处(116.2mg/L)。经过 1a 耕作后, 30cm 处 NO_3^- -N 平均浓度仅为 83.1mg/L, 显著低于 70cm 和 120cm 处(158.3mg/L 和 153.9mg/L), 尤其是在萝卜生长季(07-19 之后), 这种变化趋势更加明显。另外, 不同土壤深度的 NO_3^- -N 浓度的年际间变化较大。与

2002 年相比, 2003 年 30cm 处的 NO_3^- -N 浓度显著下降, 为 2002 年的 46.7%; 120cm 处 NO_3^- -N 浓度却显著增加, 为 2002 年的 1.32 倍, 70cm 处 NO_3^- -N 浓度下降了 85.8%, 但差异不显著. 由图 2 还可以看出, 灌溉后上层 NO_3^- -N 浓度降低, 而中下层

NO_3^- -N 浓度增加, 待土壤水分稳定后, 上层 NO_3^- -N 浓度又有所升高, 这可能是土壤蒸发通过毛管水将下层 NO_3^- -N 带到上层. 秋浇(09-18~ 09-30)引起了土壤上、中层 NO_3^- -N 浓度显著降低.

2.3 NO_3^- -N 淋失量



单箭头表示只灌溉, 双箭头表示灌溉和追肥

图 2 不同土壤深度土壤溶液 NO_3^- -N 浓度的动态变化

Fig. 2 Dynamics of NO_3^- -N in soil solution at different soil depths

2.3.1 土壤水分下渗量

在现有的灌溉措施下, 土壤水分的渗漏量是相当的(表 3、图 3). 2002 和 2003 年春小麦-萝卜复种期间全年总土壤水分渗漏量分别为 278.3mm 和 209.2mm, 为地表获得总水量(降雨量+灌溉量)的 37.3% 和 27.3%, 为灌溉水量的 44.9% 和 33.6%. 由表 3 可见, 不同年份土壤水分下渗量的主要发生时期也不同. 2002 年主要发生在春小麦生长季, 占全年的 59.3%, 而 2003 年则为秋浇期间, 占全年的 44.3%, 造成这种差异是由于在 2002 年小麦生长后期试验田被淹.

从图 3 可看到, 土壤水分渗漏峰值分别出现在 2002 年 7 月上旬, 2002 年 7 月中下旬, 2002 年 8 月初, 2002 年 10 月下旬, 2003 年 7 月下旬, 2003 年 9 月下旬, 正好与大的降雨、裸地灌溉、秋浇等相对应, 其它时期观测的下渗量也是在相应的灌溉后出现的. 另外 2a 内均发现在萝卜生长期, 水分下渗主要发生在播种前的裸地灌溉, 这可能与萝卜对水分的吸收较大有关. 可见, 在当地的灌溉习惯下, 土壤水分下渗是很严重的, 因此有必要对当前的灌溉措

施进行改善.

表 3 试验期间各个生长季及秋浇期间下渗水量/mm

Table 3 Deep percolation during plant growth and autumn irrigation period/mm

年份	小麦	萝卜	秋浇	总计
2002	165.1	69.5	43.7	278.3
2003	62.1	54.4	92.4	209.2

2.3.2 NO_3^- -N 淋失量

由表 4 可见, 不同年度 NO_3^- -N 淋失量的发生时期不同. 2002 年 NO_3^- -N 淋失主要发生在春小麦和萝卜生长期, 分别占总淋失量的 35.9% 和 45.3%; 而 2003 年则为萝卜生长期和秋浇, 分别占总量的 36.1% 和 47.4%. 2002 年 NO_3^- -N 淋失量比 2003 年高 31.1%. 这一方面是由于 2002 年土壤溶液中 NO_3^- -N 浓度较高, 另一方面也与下渗水量较大有关(表 3). 表 5 显示, 2002 年总输入的氮素为 969.2kg/hm², 比 2003 年低 85.8%, 且输入的氮素中有 30% 以上以 NO_3^- -N 形式淋失掉.

2.4 地下水 NO_3^- -N 浓度的变化

土壤 NO_3^- -N 的淋失必然引起地下水 NO_3^- -N

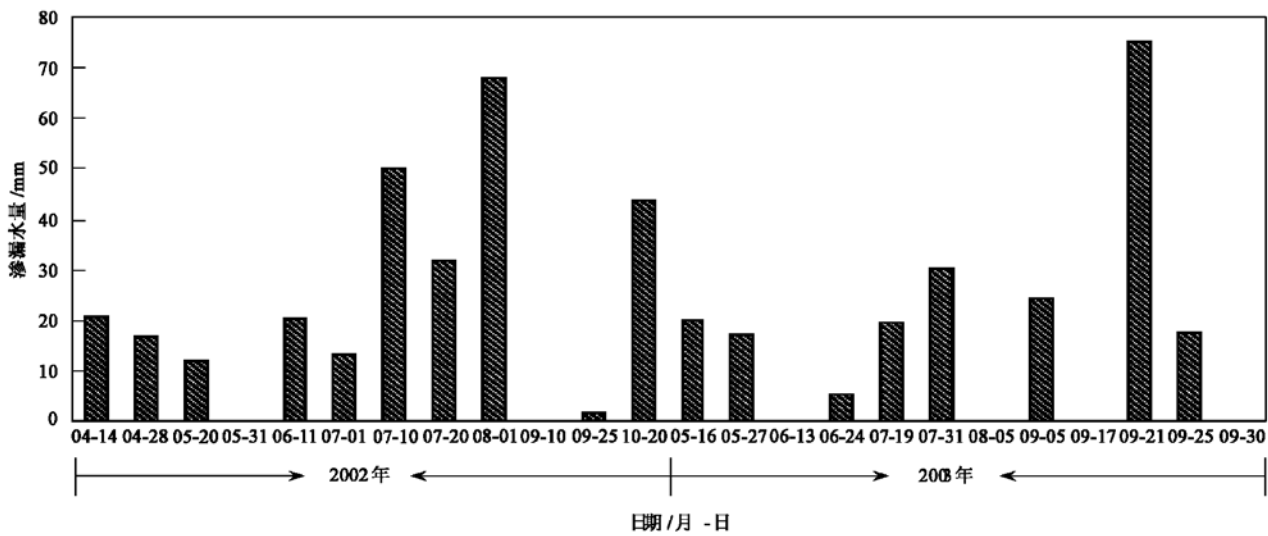


图 3 试验期间土壤水分下渗量

Fig. 3 Water percolation amount during the two cycle of a spring wheat and radish cropping

表 4 各个生长季及秋浇期间 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的淋失量/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$

Table 4 $\text{NO}_3\text{-N}$ leaching amount during crop growth and autumn irrigation period/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$

年份	小麦	萝卜	秋浇	总计
2002	172.1	217.1	89.8	479.0
2003	60.6	131.7	173.0	365.3

表 5 氮素输入与 $\text{NO}_3\text{-N}$ 淋失量/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$

Table 5 Nitrogen input and $\text{NO}_3\text{-N}$ leaching amount/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$

年份	施氮量	播前	灌溉水	雨水	N 淋失量
2002	385	562	21.57	1.05	478.9
2003	345	766.7	16.74	1.20	365.3

浓度的升高. 在不同时间采集的水样中, 1 号井(施肥区内) 65.5% 的水样 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度超过 WHO 规定的上限 11.3mg/L, 而 2 号井(非施肥区内) 仅有 27.6%(图 4). 全年的监测结果 2 号井水平均值为 $(7.67 \pm 4.48) \text{ mg/L}$ ($n=29$), 明显低于 1 号井水平均值 $(17.55 \pm 15.02) \text{ mg/L}$ ($p < 0.01$). 2 口井除施肥外, 灌溉和其他生产措施均相同, 地下水埋深也无明显差异, 可见施肥是地下水 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度增高的主要原因之一.

2.5 讨论

土壤硝态氮的淋失是农田氮素损失的重要途径

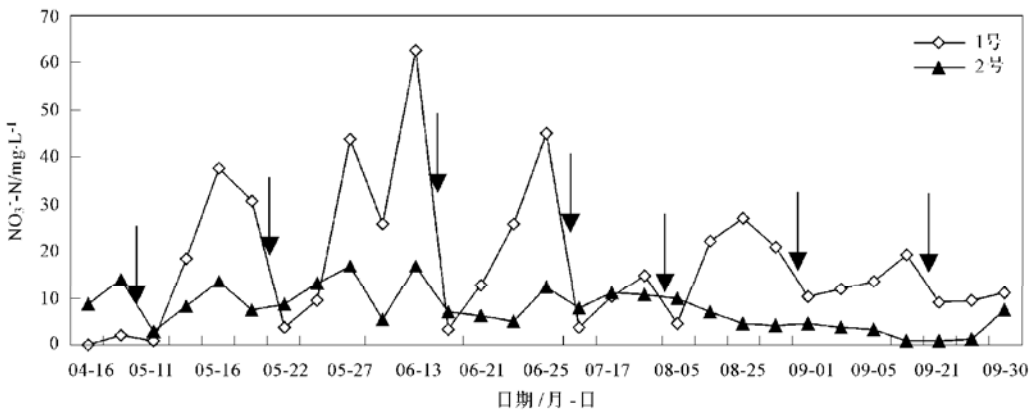


图 4 地下水 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度的动态变化(箭头代表灌溉日期)

Fig. 4 Dynamics of $\text{NO}_3\text{-N}$ in groundwater during 2003. Arrows denote irrigation

之一, 又是地下水硝酸盐浓度升高的主要原因^[7-9]. 许多研究表明, 土壤中大量残留硝酸盐及

水分运动是土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 淋失的必要条件^[9,10], 而且土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的淋失最易发生在施肥后立即灌溉

或大强度的降雨. 由于河套灌区长期形成的高施肥量和高灌溉量, 因此任一次灌溉都可能引起大量的 NO_3^- -N 从植物根区以下淋失掉. 笔者的试验结果显示了该地区土壤 NO_3^- -N 含量较高(图 1, 2), 这是试验前农民施肥量过高, 造成大量的 NO_3^- -N 残留于土壤剖面中, 这在当地是比较普遍的. 由于近些年来农产品价格不断上涨, 高产成为农民的追求目标, 因此农民通过盲目的大量施肥来增加产量, 但是施肥量已经超过了作物吸收量, 造成了大量的氮素在土壤中累积, 这无疑为 NO_3^- -N 的淋失提供了大量的氮源. 同时也发现, 该地区土壤水分渗漏的产生总是与灌溉或大的降雨时期相吻合, 这为 NO_3^- -N 的淋失提供了载体. 事实上, 每次灌溉或大的降雨之后, 都可观察到表层 NO_3^- -N 浓度降低, 中、下层浓度增加, 且地下水 NO_3^- -N 浓度增加的规律, 尤其是经过 1a 控制实验后, 这种现象更加明显(图 2, 4). 由表 3 和表 4 可见, 不同年度、不同生长季土壤 NO_3^- -N 淋失量的多少与土壤水分的下渗量密切相关. 这说明在当地的水肥条件下, NO_3^- -N 能够向土壤深层迁移并有大量的 NO_3^- -N 从植物根区以下淋失掉, 并且灌溉是当地土壤 NO_3^- -N 向深层迁移的主要因素(图 1). 秋浇是河套灌区的一种特殊灌溉制度, 一般在 9 月下旬至 11 月中下旬进行的一次非生长季灌溉, 是灌区内 1a 来灌水量最大的 1 次, 约 $1\,800\sim 2\,000\text{m}^3/\text{hm}^2$. 秋浇引起了大量的土壤 NO_3^- -N 淋失, 最大可达到 $170\text{kg}/\text{hm}^2$ 以上, 这与笔者以前的研究结果相似^[11]. 值得注意的是, 在萝卜播种前的裸地灌溉中, 土壤水分下渗量较大(图 3), 这必然会引起较高的 NO_3^- -N 淋失, 甚至在整个萝卜生长季节中都占有较大的份额.

3 结论

(1) 河套灌区农田生态系统土壤 NO_3^- -N 含量呈现表层低, 中、下层高的趋势. 由于土壤 NO_3^- -N 的迁移, 中、下层土壤溶液中的 NO_3^- -N 浓度随着灌溉次数的增加而升高.

(2) 当前的灌溉条件下, 不同年度、不同生长季土壤 NO_3^- -N 淋失量的多少与土壤水分的下渗量密切相关, 且输入的氮素中有 30% 以上以 NO_3^- -N 的形式淋失掉. 土壤 NO_3^- -N 的淋失主要发生在萝卜

播种前的裸地灌溉和秋浇.

(3) 在灌溉量和其他生产条件相同的情况下, 施肥区井水 NO_3^- -N 浓度 (17.55 ± 15.02) $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 明显高于未施肥区浓度 (7.67 ± 4.48) $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 且 65.5% 的水样 NO_3^- -N 浓度超过 WHO 规定的生活饮用水 NO_3^- -N 浓度上限值 ($11.3\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$). 可见施肥是地下水 NO_3^- -N 浓度增高的主要原因之一.

(4) 经过连续 2a 的春小麦与萝卜复种可使表层土壤 NO_3^- -N 含量明显降低. 但由于中、下层土壤剖面中残留大量的 NO_3^- -N, 因此在当前灌溉下, 短期内 NO_3^- -N 淋失是不可避免的.

参考文献:

- [1] 朱兆良, 文启孝. 中国土壤氮素[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1992: 213~249.
- [2] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策[J]. 土壤与环境, 2000, 9(1): 1~6.
- [3] Bin L L, Sakoda A, Shibasaki R, *et al.* A modeling approach to global nitrate leaching caused by anthropogenic fertilization[J]. Water Res., 2001, 35: 1961~1968.
- [4] Owen L B, Malone R W, Shipitalo M J, *et al.* Lysimeter study of nitrate leaching from a corn-soybean rotation[J]. J. Environ. Qual., 2000, 29: 467~474.
- [5] Owen L B, Van Keuren R W, Edwards W M. Groundwater quality changes resulting from a surface bromide application to a pasture[J]. J. Environ. Qual., 1985, 14: 543~548.
- [6] Aulakh M S, Khera T S, Doran J W, *et al.* Yield and nitrogen dynamics in a rice-wheat system using green manure and inorganic fertilizer[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 2000, 64: 1867~1875.
- [7] Pereira L S, Gilley J R, Jensen M E. Research agenda on sustainability of irrigated agriculture[J]. J. Irrig. Eng., 1996, 122: 172~177.
- [8] Watts D G, Hergert G W, Nichols J T. Nitrogen leaching losses from irrigated Orchard grass on sandy soils [J]. J. Environ. Qual., 1991, 20: 355~362.
- [9] Ritter W F. Nitrate leaching under irrigation in the United States—A review[J]. J. Environ. Sci. Health A, 1989, 24: 349~378.
- [10] Ottman M J, Tickes B R, Husman S H. Nitrogen 15 and bromide tracers of nitrogen fertilization movement in irrigated wheat production[J]. J. Environ. Qual., 2000, 29: 1500~1508.
- [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): 2027~2032.