

# 宁夏银南灌区稻田控制排水条件下氮素淋失的研究\*

尹娟<sup>1,2</sup>, 费良军<sup>1</sup>, 勉韶平<sup>3</sup>

(1 西安理工大学 水资源研究所, 陕西 西安 710048; 2 宁夏大学 土木与水利工程学院, 宁夏 银川 750021; 3 银川第一市政有限责任公司, 宁夏 银川 750012)

**[摘要]** 为探讨不同排水条件下稻田中氮素的迁移、转化规律, 通过大田试验, 对宁夏银南灌区稻田土壤中氮素的淋失情况进行了研究。结果表明, 排水量越大,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  下移深度越大; 在下渗水流的驱动下,  $\text{NO}_3^--\text{N}$  的下移深度明显大于  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ ; 不同排水处理中, 土壤剖面  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  浓度呈现随深度增加逐渐降低的趋势,  $\text{NO}_3^--\text{N}$  浓度在地面以下 100 cm 内随深度增加逐渐升高, 超过 100 cm 之后逐渐降低; 每次施肥后, 不同处理的排水水中  $\text{NO}_3^--\text{N}$  和  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  浓度均表现出短期内迅速上升, 以后又逐渐下降的趋势; 氮素的淋失主要发生在拔节期以前, 在此期间, 应加强水肥管理, 以减少氮素淋失。

**[关键词]** 宁夏银南灌区; 稻田; 氮素淋失; 控制排水; 氮肥运移转化

**[中图分类号]** S143.1<sup>+</sup>2; S143.1<sup>+</sup>3

**[文献标识码]** A **[文章编号]** 1671-9387(2006)01-0108-05

近 20 年来, 全球氮素淋失有增无减, 对美国中北部、东北部的“玉米带”和西部、东南部的灌溉农业区<sup>[1]</sup>, 英格兰中、东部石灰岩和砂岩地区<sup>[2]</sup>及我国京、津、唐地区<sup>[3]</sup>和太湖流域<sup>[4]</sup>的研究结果均表明, 地下水中有硝酸盐的污染, 并且其浓度尚在持续升高; 化肥使用与浅层地下水中硝酸盐浓度的升高具有明显的相关性。国内对排水条件下, 稻田土壤的氮素淋失情况作了大量的研究工作, 取得显著成绩<sup>[5-7]</sup>。研究发现, 农田特别是稻田中的氮素淋失, 是其对水环境影响的主要途径<sup>[8-10]</sup>。据统计, 南方稻田氮肥的施用量往往超过适用量的 2 倍以上, 致使氮肥的利用率降低<sup>[11]</sup>。因此, 加强稻田水肥管理, 减少稻田氮素损失, 对提高氮素利用率、控制农田源污染具有重要意义。鉴于此, 笔者就排水条件下宁夏银南

灌区稻田中氮素运移转化的规律进行了研究, 以为稻田的合理施肥和控制农田源污染提供理论依据。

## 1 试验方法

### 1.1 试验区概况

试验区选在宁夏银南灌区望远镇西卫村。试验区气候属较典型的大陆气候, 灌区地处干旱地带, 降水少蒸发大, 而且降水量年内分布极不均匀, 多集中在 7~9 月份, 汛期 6~9 月份的降雨量一般占全年总降雨量的 70% 左右。多年平均降水量 180~220 mm, 蒸发量 1 000~1 550 mm, 干旱指数 4.8~8.5。光热资源丰富, 多年平均气温 8.5℃, 平均日照时数 2 870~3 080 h, 全年无霜期 164 d。供试土壤为粉质壤土, 其基本的理化性状见表 1 和表 2。

表 1 供试土壤的基本化学性状

Table 1 Chemical property of the tested soil

g/kg

项目 Item	质量浓度 Content	项目 Item	质量浓度 Content	项目 Item	质量浓度 Content
有机质 Organic matter	14.3	全磷 Total P	0.66	水解氮 Available N	72.6
全氮 Total N	0.93	全盐 Total salt	0.94	速效磷 Rapidly available P	35.5
全钾 Total K	19.0	pH	8.02	速效钾 Rapidly available K	190.5

\* [收稿日期] 2005-05-20

[基金项目] 宁夏回族自治区教育厅基金项目(02003); 国家自然科学基金项目(50579064, 50179030)

[作者简介] 尹娟(1971-), 女, 宁夏同心人, 副教授, 在读博士, 主要从事节水灌溉理论与技术研究。

表 2 供试土样的粒径分布

Table 2 Particle distribution of the soil samples

粒径/mm Grain diameters	< 1	< 0.5	< 0.25	< 0.1	< 0.05	< 0.025	< 0.01	< 0.005	< 0.0025	< 0.001
含量/% Content	100	100	100	99.98	80.6	56.27	37.73	26.73	17.87	5

1.2 试验设计

试验共设 A, B, C, D 4 块试验田, 每块面积为 300 m × 78 m, 其中 A 和 B 田块进行控制排水试验, C 和 D 田块进行非控制排水对比试验。在试验区地面以下不同深度处共设观测井 48 个, 观测井深度分为 30, 65, 100, 140 和 170 cm 等 5 种。试验区设有 5 条排水沟, 其中沟 2 为典型的控排沟, 整个沟中设有 3 个控排建筑物; 沟 4 为典型的非控排沟, 整个沟中

只设 1 处控排建筑物。试验期间沟水位控制在 1 m 左右。

供试水稻品种为 D 101。试验田于 2004-04-03 施基肥, 2004-04-08 旱播, 2004-10-02 收割。全生育期施肥 1 200 kg/hm<sup>2</sup>, 追肥方式为撒施, 各生育期施肥情况见表 3。水稻的平均产量为 8 250 kg/hm<sup>2</sup>。全生育期灌水 33 次, 推算出的灌溉定额为 370 76 mm。

表 3 水稻生育期的施肥情况

Table 3 Fertilizing data for rice in different growth stage

施肥方式 Fertilizing type	肥料类型 Fertilizer type	施肥时间 Applying fertilizer time	施肥量/(kg · hm <sup>-2</sup> ) Application rate of fertilizer	施氮量/(kg · hm <sup>-2</sup> ) Nitrogen application rate
基肥 Base fertilizer	碳铵 Ammonium bicarbonate	2004-04-05	375	66.45
基肥 Base fertilizer	磷肥 Phosphoric fertilizer	2004-04-05	375	0.00
返青追肥 Return green stage top dressing	尿素 Urea	2004-05-20	112.5	50.63
分蘖追肥 Tiller stage top dressing	尿素 Urea	2004-06-02	187.5	84.38
拔节追肥 Jointing stage top dressing	尿素 Urea	2004-06-20	135	60.75
抽穗期追肥 Heading stage top dressing	尿素 Urea	2004-07-02	75	33.75
合计 Total			1 260	291.76

1.3 测定项目及方法

观测项目有: 排水量、排水沟及观测剖面中 NO<sub>3</sub>-N 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度。排水沟排水量的测量试验从 2004-07-01 日开始, 至 2004-07-22 结束, 期间分别于 07-03, 07-07, 07-15 灌水, 且随着作物需水量的增加和气温升高灌水量依次增加。试验区内各沟中的排水量利用挡水堰上的读数, 代入经验公式 Q = 8.85H<sup>2.4705</sup> 计算而得。

地下水水质观测井为管径 4 cm 左右的 PVC 管, 在不同长度的管子底部用小型的电钻打数个梅花形孔, 孔距管底的距离为 5 cm, 有孔部位的长度约为 10~15 cm。为了取水样专门焊制了 2 个高度分别为 10 和 25 cm、直径为 2.5 cm 的取样器, 一端有底, 在大、小取样器的上端分别安装长度为 1.8 和 1.0 m 的竹杆。

氮素测量从 2004-05-15 开始, 至 2004-09-16 结束。测量频率为: 5~6 月份每 5 d 测定 1 次, 7~9 月份每 10 d 左右测定 1 次。这是因为在 5~6 月刚开始灌溉时, 水稻田里不仅施有基肥, 而且第一次灌溉

完后还要施追肥, 地下水及排水沟内硝态氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)和氨态氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)的浓度变化较大, 所以这一时段测量频率较高; 而到了 6 月底以后, 基本上不再施肥, 硝态氮、氨态氮的浓度变化不大, 而且有一定的规律性, 所以这段时间测量频率较小。NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 的测定采用紫外分光光度法<sup>[12]</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的测定采用纳氏试剂分光光度法<sup>[12]</sup>。

2 结果与分析

2.1 排水量随时间的变化规律

由于沟 2(控排)和沟 4(非控排)的试验数据有很明显的规律, 因此整理沟 2 和沟 4 的排水观测资料后绘出其排水量变化曲线(图 1)。根据测量期的灌水情况, 由图 1 可知, 沟 2 和沟 4 的排水量均在灌水后的 1~3 d 达到最大值, 之后逐渐减小。沟 2 的排水量分别在 07-05, 07-08, 07-17 出现峰值, 且排水量峰值逐渐增大。可见, 排水量总是随着灌水量的增加而增加。由图 1 还可看出, 控排沟(沟 2)排水量的峰值明显比非控排沟(沟 4)小, 说明控制排水有

削减排水沟中排水量的作用。

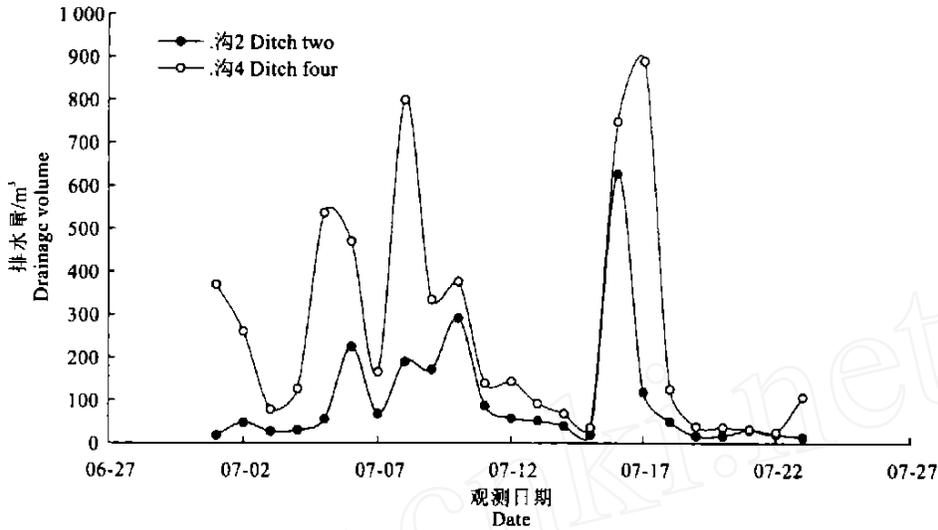


图 1 控排与非控排排水量的对比

Fig. 1 Drainage volume comparison

2.2 排水沟中氮素浓度随时间的变化规律

2.2.1  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  浓度随时间的变化规律 图 2 表明, 2 种排水处理, 排水沟中  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  浓度随时间的变化规律很相近。由表 3 和图 2 可知,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  浓度均在施肥后的第 4~7 天达到最大值, 之后又减小。例如, 试验分别于 05-20, 06-02 和 06-20 追施 3 次尿素, 施氮量占整个水稻生育期氮肥施用量的 67.1%, 4~7 d 后, 即 05-25, 06-09 和 06-24 控排处理出现了  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  浓度峰值, 其值分别为 0.9, 7.32, 0.9  $\text{mg/L}$ 。可见排水沟中  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  浓度与施肥量有关, 施肥量越大, 排水沟中  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  浓度越大。

2.2.2  $\text{NO}_3^--\text{N}$  浓度随时间的变化规律 由图 3 可以看出, 不同处理的排水中  $\text{NO}_3^--\text{N}$  浓度随时间的

变化趋势相同。从施基肥到 06-02 之前, 排水沟中  $\text{NO}_3^--\text{N}$  浓度在整个试验期间处于较高水平, 随着时间的推移, 各处理  $\text{NO}_3^--\text{N}$  浓度逐渐减少。这是由于水稻生长初期, 作物根系处于非活跃阶段的幼苗期, 秧苗对肥料氮的吸收较少, 大量氮素溶于田面水层或土壤中, 使得排水中  $\text{NO}_3^--\text{N}$  浓度较高。06-18~08-01, 排水沟中  $\text{NO}_3^--\text{N}$  保持极低的浓度。这是由于此期作物根系发育成熟, 生长旺盛, 对氮素的需求量猛增, 所以排水中  $\text{NO}_3^--\text{N}$  浓度迅速降至很低的水平。08-01~08-19, 排水中  $\text{NO}_3^--\text{N}$  浓度又有增加的趋势, 因为此期稻田开始落干晒田, 灌水较少, 加上当地气温较高, 蒸发量大, 所以排水中  $\text{NO}_3^--\text{N}$  浓度有所增加。

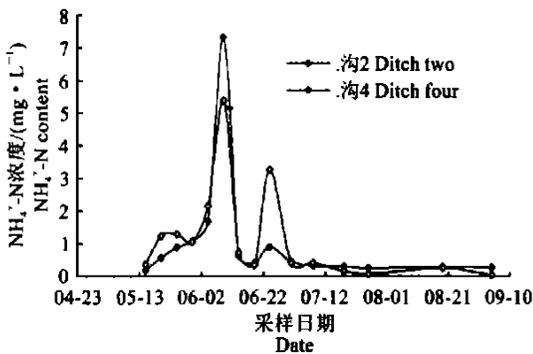


图 2 排水沟中  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  浓度随时间的变化规律

Fig. 2  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  content change regulation with time

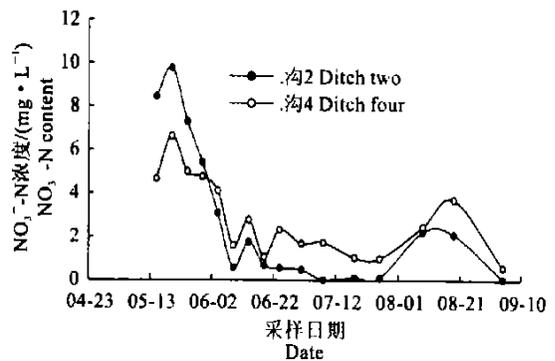


图 3 排水沟中  $\text{NO}_3^--\text{N}$  浓度随时间的变化规律

Fig. 3  $\text{NO}_3^--\text{N}$  content change regulation with time

由上述分析可知, 氮素在下渗水流驱动力的作

用下, 很容易发生淋失。在 06-02 以前, 稻田水和土

壤中的氮素较多, 如果灌排水量控制不合理, 很容易造成大量的氮素淋失。因此, 减少氮素渗漏损失应从这个阶段开始。

### 2.3 剖面渗漏水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度的变化规律

分别测算 5, 6, 7 月不同深度剖面渗漏水的平均  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度, 并求出这 3 个月相应深度的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度值的均值, 绘制剖面  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度曲线图(图 4)。图 4 表明, 不同排水处理中,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度均呈现出上层较高, 随深度增加而逐渐减小的剖面分布特征。例如, 在控排处理中, 地表以下 30 cm 处  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的平均浓度最大, 为  $2.03 \text{ mg/L}$ , 至 170 cm 处则降为  $0.94 \text{ mg/L}$ , 有明显的递减趋势。不同排水处理中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度的这一剖面分布特征, 显然与土壤胶体对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的吸附有关。土壤胶体带负电荷,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  在随渗漏水向下迁移的过程中, 被土壤颗粒和土壤胶体吸附和滞留, 从而导致上下层土壤渗滤液中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度的差异。与控排处理相比, 非控排处理的峰值出现在地表以下 65 cm 处, 为  $2.15 \text{ mg/L}$ , 当深度增至 170 cm 时,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度为  $0.83 \text{ mg/L}$ 。

随剖面深度变化的不同, 2 种处理  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度

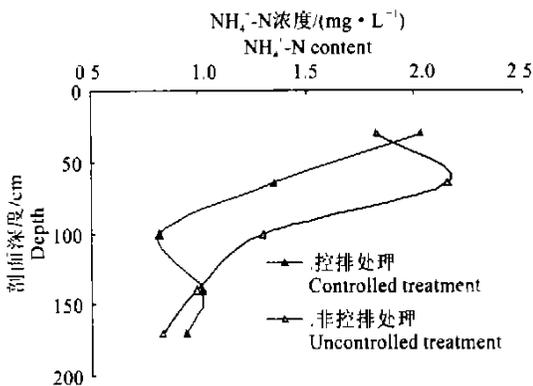


图 4 剖面渗漏水中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度的变化规律

Fig. 1  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  content distribution with depth

由图 5 还可以看出, 在整个土壤剖面中, 非控排处理的  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  浓度均大于控排处理。其原因是由于在非控排处理中, 土壤经常处于半饱和状态, 非饱和层的厚度大, 因而使土壤的通气状况得到了有效改善。这一方面加强了硝化作用, 使大量的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  在硝化细菌的作用下转化成  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ , 另一方面则由于大量氧气的存在抑制了反硝化作用的进行。因此, 非控排处理的  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  浓度在整个土壤剖面中均较大。而控排处理中, 因稻田排水受控而排水不畅, 土壤处于饱和或近似饱和状态, 土壤的还原作用强烈,

的差异主要表现为浓度峰值出现的深度不相同。控排处理浓度峰值出现在地面以下 30 cm 处, 非控排处理出现在 65 cm 处。这是由于在渗漏水驱动力作用下,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  向下迁移, 下移深度与排水量有关, 排水量越大,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  向下迁移的深度越大, 非控排的排水量较控排的大, 所以其  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度最大处的深度也较控排的深。

### 2.4 剖面渗漏水中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度的变化规律

控排与非控排 2 种处理的剖面渗漏水中  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  浓度与  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度变化趋势有很大差别,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  浓度在剖面上层较小, 在 100 cm 处最大, 之后又逐渐减小(图 5)。究其原因, 可能与供试土壤的物理化学性质有关。  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  易被土壤固相所吸持, 而  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  则不易被土壤固相吸持, 因而易随渗漏水下移到剖面下部, 从而使相当数量的  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  下淋而进入深层地下水中, 所以  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  在地面以下 100 cm 处大量积累, 出现了峰值。可见,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  下移深度可达到 100 cm。当剖面深度大于 100 cm 时,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  浓度又逐渐减小, 这一方面是由于部分  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  被反硝化作用损失掉, 另一方面是由于  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  在随水分下移过程中的扩散和弥散作用。

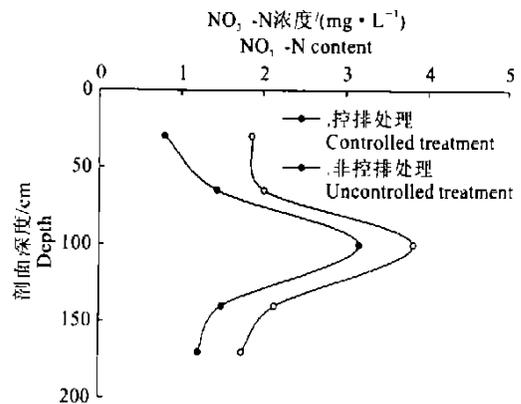


图 5 剖面渗漏水中  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  浓度的变化规律

Fig. 5  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  content distribution with depth

部分  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  损失于反硝化作用, 同时, 吸附在土壤中的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  硝化作用缓慢, 产生的  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  较少。因此, 整个剖面控排处理的  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  浓度相对较小。可见, 在其他条件相同的情况下, 排水量越大, 土壤中的  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  越易流失并进入地下水中, 造成水体严重污染。

## 3 结 论

通过大田试验研究了排水量不同条件下  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  的运移规律, 初步得到以下结论:

(1) 在其他条件相同的情况下, 施肥量越大, 排水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的浓度越大。为了减少水稻田中氮素损失, 应控制施肥量, 提倡合理施肥。

(2) 在水稻拔节期(06-05)以前, 排水沟中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的浓度较大, 说明氮素的渗漏主要发生在拔节期以前。因此, 为了减少水稻田中的氮素损失, 在这一时期除了控制施肥量外, 合理进行水分管理也是极其重要的。

(3) 在稻田土壤剖面渗漏水中, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度从上到下逐渐增大, 在 100 cm 处达最大值, 之后又逐渐减小; $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度与 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度的分布变化趋势有很大差别, 随着深度的增大而减小。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 向下迁移的深度与稻田排水量有关, 排水量越大, 下移深度越大, 非控排处理 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度峰值出现在 65 cm 深处。

### [参考文献]

- [1] Chilton P J, Forster S S D. Control of groundwater nitrate pollution in Britain by land-use change N itrate contamination: exposure, consequence, and control[C]//N ato ASI, Ser G Ecological Science Berlin: Spriger-V erlag, 1991: 333-347.
- [2] Croll B T, Haves C R. Nitrate and water supplies in the united kingdom [J]. Environ Poll, 1988, 50: 163- 187.
- [3] 张维理 我国北方农用氮肥造成地下水硝酸盐污染的调查[J]. 植物营养学与肥料学报, 1995, 1(2): 80-87.
- [4] 吕忠贵 浅析氮磷化肥的使用及对农业生态环境污染[J]. 农业环境与发展, 1997(3): 30-34
- [5] 张瑜芳, 张蔚榛, 沈荣开, 等. 淹灌稻田的暗管排水中氮素流失的试验研究[J]. 灌溉排水, 1999, 18(3): 12-16
- [6] 刘培斌, 程伦国, 陈瑞忠, 等. 排水条件下稻田中氮素运移转化规律的试验研究[J]. 农田水利与小水电, 1994(4): 15-20
- [7] 张瑜芳, 张蔚榛, 沈荣开. 排水农田氮素运移、转化及流失规律的研究[J]. 水动力学研究与进展, 1996, 11(3): 251-260
- [8] 朱兆良 农田氮素的损失与对策[J]. 土壤与环境, 2000, 9(1): 1-6
- [9] 张国梁, 章 申. 农田氮素淋失研究进展[J]. 土壤, 1998, 30(6): 291-297.
- [10] 高效江, 胡雪峰, 王少平, 等. 淹水稻田中氮素损失及其对水环境影响试验研究[J]. 农业环境保护, 2001, 20(4): 196-198
- [11] 王胜佳, 王家玉, 陈 义. 稻田土壤氮素淋失的形态及其在剖面分布特征[J]. 浙江农业学报, 1997, 9(2): 57-61.
- [12] 魏复盛 水和废水监测分析方法[M]. 第 4 版 北京: 中国环境科学出版社, 1994: 266-268; 279-281.

## Experiment on the nitrogen leaching in the drainage condition of rice field in Ningxia Yinnan irrigation region

Y IN Juan<sup>1,2</sup>, FEIL iang-jun<sup>1</sup>, M IAN Shao-ping<sup>3</sup>

(1 X i'an University of Technology, X i'an, Shaanxi 710048, China; 2 Colloge of Civill and Conservancy Engineering,

N ingxia University, Yinchuan, N ingxia 750012, China;

3 N ingxia Yingchuan First Towns Company, Yingchuan, N ingxia 750010, China)

**Abstract:** A nitrogen transportation experiment was conducted in Yinnan irrigation district Based on this experiment, this paper tried to find out the nitrogen transportation and transformation law in rice field under different drainage treatment The results show that the depth of  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  transferring increases with the increase of drainage volume; Driven by the leached water flow,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  and  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  can be transferred into the ground at a certain depth, but  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  is deeper than  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ; The concentration of  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  in different treatment soil profile tends to decrease with the depth; The concentration of  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  tends to increase with the depth at range of 100 cm, then decreased gradually. Nitrogen leaching occurs mainly before June 9 in the same year, during which, the management of water and fertilizing should be enforced in order to reduce nitrogen loss

**Key words:** Ningxia Yinnan irrigation region; rice field; nitrogen leaching; controlled drainage; transportation and transformation of nitrogen