



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbtdqk.2016.01.007

石敏, 肖伟华, 王春梅, 等. 施肥与灌溉对黑土区稻田氮素渗漏淋溶的影响[J]. 2016, 14(1): 42-49.

SHI Min, XIAO Wei hua, WANG Chun mei, et al. Influence of fertilization and irrigation on nitrogen percolation leaching in black soil region[J]. 2016, 14(1): 42-49. (in Chinese)

# 施肥与灌溉对黑土区稻田氮素渗漏淋溶的影响

石敏<sup>1</sup>, 肖伟华<sup>2</sup>, 王春梅<sup>1</sup>, 郝彩莲<sup>2,3</sup>

(1. 北京林业大学 环境科学与工程学院, 北京 100083; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 3. 东华大学 环境科学与工程系, 上海 201620)

**摘要:** 为明确东北黑土区稻田土壤氮素渗漏规律, 在典型黑土区开展了基于农田水平衡的小区试验, 分析了不同灌溉方式和施氮水平条件下稻田土壤渗漏水中三氮浓度变化情况, 并结合农田水平衡方程计算出了不同水肥条件下的氮素淋失总量。结果表明, 渗漏水中铵态氮、硝态氮和总氮浓度与施氮量呈正相关关系, 控制灌溉和浅湿灌溉分别可以减少硝态氮渗漏浓度 11.89% 和 14.15%; 常规灌溉方式下每公顷每增加 1 kg 施氮量(折合成纯氮), 氮素淋失量增加 0.117 5 kg, 控制灌溉和浅湿灌溉则分别增加 0.035 9 kg 和 0.055 7 kg; 在水稻全生育期, 控制灌溉氮素淋失总量最小, 平均为 4.51 kg/hm<sup>2</sup>, 约是常规灌溉的 1/3、浅湿灌溉的 1/2。综合分析认为, 浅湿灌溉是适用性更高的灌溉方式, 理论合理施肥量为 137.30 kg/hm<sup>2</sup>。

**关键词:** 黑土区; 水稻田; 氮素; 渗漏淋溶; 水肥管理

**中图分类号:** S158 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2016)01-0042-08

## Influence of fertilization and irrigation on nitrogen percolation leaching in black soil region

SHI Min<sup>1</sup>, XIAO Wei hua<sup>2</sup>, WANG Chun mei<sup>1</sup>, HAO Cai lian<sup>2,3</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Beijing Forest University, Beijing 100083, China;

2. Water Resources Department, China Institute of water resources and Hydropower Research, Beijing 100083, China;

3. Environmental Science and Engineering Department, Donghua University, Shanghai 201620, China)

**Abstract:** In order to clarify the realities of nitrogen leakage in paddy soil in black soil area of Northeast China and to understand nitrogen migration pattern, a district experimental was developed in typical black district based on farmland water balance, so as to control the nitrogen leakage and reduce groundwater pollution threat. The three nitrogen concentration changes in leakage water of paddy soil under different irrigation and nitrogen level conditions were analyzed, and the total amount of nitrogen leaching in different treatment was calculated using the water balance equation. Results showed that the concentrations of ammonium nitrogen, nitrate nitrogen and total nitrogen in the leaching water were positively correlated with nitrogen application amount. Control irrigation and wet shallow irrigation can reduce 11.89% and 14.15% of nitrate leakage concentration, respectively. Nitrogen leaching amount increased 0.117 5 kg per hectare with each additional kilogram of nitrogen (converted into pure nitrogen) when using normal irrigation, it was respectively 0.035 9 kg and 0.055 7 kg for control irrigation and wet shallow irrigation. The nitrogen leaching loss in whole growth period under control irrigation was the least, average at 4.51 kg/hm<sup>2</sup>, and it is respectively 1/3 and 1/2 of that under normal irrigation and wet shallow irrigation. Wet shallow irrigation was more applicable, and the most reasonable theoretic fertilizer amount is 137.30 kg/hm<sup>2</sup>.

**Key words:** black soil region; paddy field; nitrogen; leakage; farmland water balance; fertilizer; irrigation

收稿日期: 2015-05-07 修回日期: 2015-12-24 网络出版时间: 2016-02-27

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20160227.1624.005.html>

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07601001)

Fund: Major Science and Technology Program for Water Pollution Control and Treatment of China(2012ZX07601001)

作者简介: 石敏(1989-), 男, 湖南衡阳人, 主要从事环境污染修复方面研究。E-mail: shiminhoney@126.com

通讯作者: 肖伟华(1981-), 男, 湖南永兴人, 工程师, 博士, 主要从事水水资源合理配置、水资源保护与管理、水环境系统模拟与规划等方面的研究。E-mail: xwsen998@163.com

目前我国水资源缺乏,日益突出的农田面源污染、地下水污染等问题加剧了水资源的紧缺。作为农业大国,我国农业灌溉用水量占总用水量的60%,其中水稻灌溉占90%<sup>[1-4]</sup>。在稻田农业水循环中,水源消耗方面集中地体现为蒸发蒸腾和深层渗漏,其中深层渗漏为非生产性无效消耗<sup>[5]</sup>,是稻田水分流失的重要方式,同时伴随着氮素流失,容易造成农业面源污染,威胁水环境安全。在保证产量的前提下,减少稻田氮素渗漏损失对于环境保护和水稻种植的可持续性发展具有重大现实意义。

东北黑土区是世界三大黑土区之一<sup>[6]</sup>,是我国重要商品粮基地,其土壤肥力居全国各类土壤之首<sup>[7]</sup>。随着规模化水稻种植的开展,旱田改水田工程增多,虽然提高了粮食总产量,但单位面积稻田由于渗漏和径流所产生的氮、磷负荷量是旱地的4倍多<sup>[8]</sup>,农业面源污染问题也开始显现,加之当地严重的水土流失,加剧了粮食生产和环境保护的矛盾。我国不同地区由于地形、土壤理化性质等的禀赋不同,稻田渗漏量的差异也很大<sup>[9-10]</sup>,已有研究表明施肥方式<sup>[11-13]</sup>、施氮量<sup>[14]</sup>、灌溉方式<sup>[15]</sup>等措施影响稻田氮素渗漏淋溶的程度,但关于黑土区的该类研究较少。本研究在黑土区开展基于农田水平衡的小区试验,在分析不同水肥处理渗漏水中氮素变化特征的基础上,估算稻田氮素渗漏淋失量,并对比分析不同水肥处理模式,以期得出适宜当地的合理施肥量和灌溉方式。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验样地位于黑龙江省齐齐哈尔市克山县宏伟灌区,地处东经125°55′15″,北纬48°13′41″,土壤属于典型黑土。地势由东北向西南微倾,处于第三积温带,寒温带大陆季风气候。年降水量420~600 mm,雨季集中在每年6月~8月,试验样地坡度在

2°~4°之间。

供试水稻品种为三江2号。供试土壤为典型黑土,其基本理化性质见表1。供试肥料品种为:尿素(含N 46%)、磷酸二铵(含P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 46%,含N 18%)、硫酸钾(含K<sub>2</sub>O 50%)。

表1 供试土壤理化性质

Tab. 1 General characteristics of soil

土壤深度 / cm	有机碳 / (g · kg <sup>-1</sup> )	全氮 / (g · kg <sup>-1</sup> )	全磷 / (g · kg <sup>-1</sup> )	容重 / (g · cm <sup>-3</sup> )
0~20	34.28	2.68	1.20	1.15
20~60	26.22	2.03	0.85	1.26

## 1.2 试验设计

### 1.2.1 分组处理

试验于2014年5月~2014年9月进行。在当地选取两块相邻长方形水稻田进行小区试验,每个水稻试验田划分为90个小区(30个试验区,60个非试验保护区)。试验小区的规格为2 m × 10 m,每个试验小区两边均设有面积为1 × 10 m<sup>2</sup>的非试验保护区,且非试验保护区和对应试验小区的每公顷施肥量一样,以减少侧渗、串流的影响。各试验小区和非试验保护区的田埂筑高0.3 m,并用塑料薄膜包被。每个小区都设有单独的排水口和进水口,实行单排单灌。

本试验为双因素(灌溉方式、施氮水平)交互试验,共设常规灌溉(G1)、控制灌溉(G2)和浅湿灌溉(G3)3种灌溉处理见表2;设N1至N5即施尿素195 kg/hm<sup>2</sup>、180 kg/hm<sup>2</sup>、165 kg/hm<sup>2</sup>、150 kg/hm<sup>2</sup>和135 kg/hm<sup>2</sup>共5个施氮水平,共计15个处理见表3,每个处理三次重复。插秧行穴距为30 cm × 10 cm,每穴3~5株,5月31日施底肥,6月10日施返青肥,氮肥基肥、返青肥各占50%,磷肥全部做基肥一次施入,钾肥基肥、返青肥分别占66.7%和33.3%。

表2 不同灌溉方式田面水深设计

Tab. 2 Design of water depth under different irrigation

灌溉方式	幼苗期(7d)	分蘖期(30d)	分蘖后期(8d)	拔节孕穗(15d)	抽穗扬花(12d)	灌浆乳熟(15d)	黄熟(34d)
G1	灌溉上限	50 mm	30 mm	0 mm	50 mm	50 mm	50 mm
	灌溉下限	30 mm	0 mm	0 mm	30 mm	30 mm	30 mm
G2	灌溉上限	30 mm	100%	100%	100%	100%	100%
	灌溉下限	10 mm	80%	60%	80%	80%	70%
G3	灌溉上限	60 mm	50 mm	100%	50 mm	100%	50 mm
	灌溉下限	40 mm	30 mm	60%	30 mm	80%	30 mm

注: %是指占土壤饱和含水率(研究区为62%)的比例。Note “%” refers to the percentage of soil saturated water content ratio.

表 3 各小区施肥处理

Tab. 3 Fertilizer treatment of each cell

组别	施氮水平	尿素/(kg·hm <sup>2</sup> )	磷酸二铵/(kg·hm <sup>2</sup> )	硫酸钾/(kg·hm <sup>2</sup> )	N 折纯量/(kg·hm <sup>2</sup> )	各试验小区施尿素总量/kg	灌溉方式
1	N1	195	75	112.5	103.98	0.39	G1
2	N2	180	75	112.5	97.02	0.36	G1
3	N3	165	75	112.5	90.06	0.33	G1
4	N4	150	75	112.5	83.1	0.30	G1
5	N5	135	75	112.5	76.14	0.27	G1
6	N1	195	75	112.5	103.98	0.39	G2
7	N2	180	75	112.5	97.02	0.36	G2
8	N3	165	75	112.5	90.06	0.33	G2
9	N4	150	75	112.5	83.1	0.30	G2
10	N5	135	75	112.5	76.14	0.27	G2
11	N1	195	75	112.5	103.98	0.39	G3
12	N2	180	75	112.5	97.02	0.36	G3
13	N3	165	75	112.5	90.06	0.33	G3
14	N4	150	75	112.5	83.1	0.30	G3
15	N5	135	75	112.5	76.14	0.27	G3

### 1.2.2 样品采集与测定

(1) 灌溉水量测定。测定基本参数,按式(1)计算次灌溉水量。

$$S = \left[ 25 \times \cos^{-1} \left( \frac{h-5}{5} \right) - \sqrt{25 - (5-h)^2} \times (h-5) \right] \times v \times \frac{t}{10^6} \times 50 \quad (1)$$

式中:  $S$  为某次灌溉水量(mm);  $v$  为由 FP111 直读式流速仪测得的进水管水流平均速度(cm/s);  $h$  代表某次灌溉管内水面至管顶平均垂直距离(cm);  $t$  为某次灌溉时间(s)。

(2) 渗漏水采集。每个试验小区中心处,插入直径 5 cm, 长度 80 cm 的 PVC 管见图 1, 管底在 50 cm 深处(对于水稻浅根性作物来说,一般认为 50 cm 以下的氮不会被作物吸收)。为防止降水和田面水的影响,渗漏管带盖并高出田面 30 cm。在距 PVC 管底部约 5 cm 的管壁上均匀钻取一排直径 0.5 cm 的小孔,并用塑料纱网将其连同管底包裹严实。在取样管距地表 30 cm 深处管壁四周缠有塑料薄膜,薄膜土表部分向外延伸 20 cm,并回垫原层次土。采样时间为从施基肥开始每隔 9 d 采集一次,采集的水样经酸化预处理后即在 4 °C 冰柜中冷冻保存以备分析。

(3) 土壤样品采样。按灌溉方式将试验田分为三块,每块随机选取 5 处采样点,在种植前后在土层深度 10 cm、40 cm 处用环刀采集未搅动的土壤样品,重复 3 次,用烘干法测得土壤容重并取平均值,

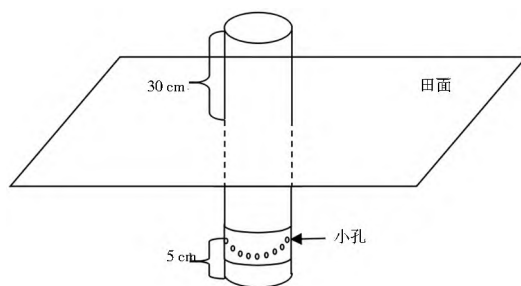


图 1 PVC 塑料取样管

Fig. 1 Diagram of PVC plastic sampling tube

作为土壤容重试验数据。

(4) 土壤储水量的计算。用土壤水分测试仪测定土壤 0~20 cm、20~60 cm 水稻种植前后土壤含水率,按式(2)计算土壤储水量变化。

$$\Delta W = k(c_{\text{前}} d_{\text{前}} - c_{\text{后}} d_{\text{后}}) \quad (2)$$

式中:  $\Delta W$  为土壤储水量变化量(mm);  $d_{\text{前}}$  和  $d_{\text{后}}$  分别为水稻种植前、后的土壤容重(g/cm<sup>3</sup>);  $c_{\text{前}}$  和  $c_{\text{后}}$  分别为种植前后土层含水率(%);  $k$  为土层厚度(mm)。

(5) 植物测产。水稻成熟期于田间随机采样,室内测产。

(6) 水样测试方法。水样总氮测定采用流动注射-盐酸萘乙二胺分光光度法,铵态氮测定采用纳氏试剂分光光度法,硝态氮测定采用离子色谱法。

(7) 数据分析。采用 EXCEL 2007 和 Origin 8.0 对数据进行分析处理和做图。

## 2 结果与分析

### 2.1 稻田土壤渗漏水铵态氮浓度变化

从2014年5月-8月铵态氮动态变化看,三种灌溉方式下渗漏水中铵态氮浓度对比为:常规灌溉>浅湿灌溉>控制灌溉。三种灌溉方式下的渗漏水中铵态氮的浓度均表现为先降低,再升高,而后又降低

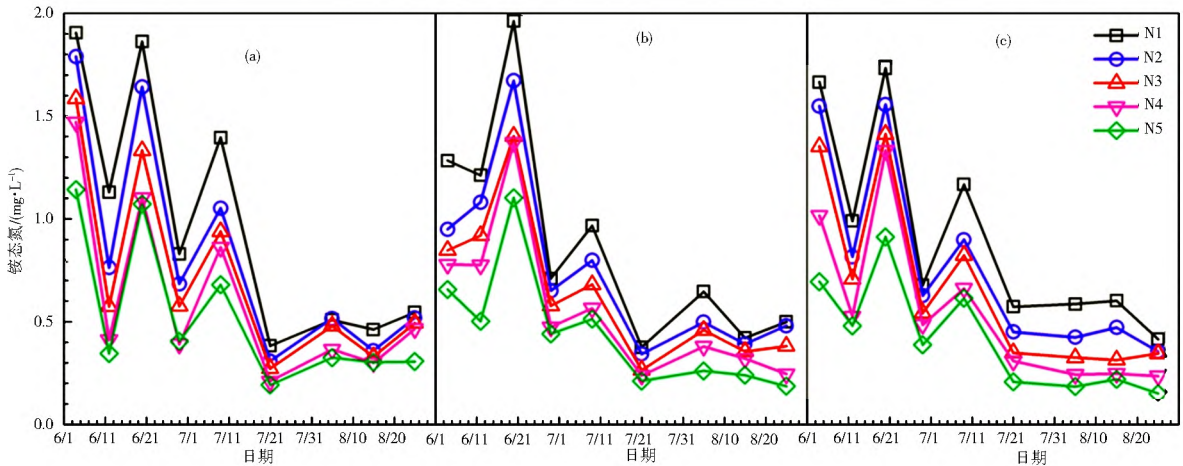


图2 不同施氮水平和灌溉方式渗漏水中铵态氮浓度变化(a:常规灌溉;b:控制灌溉;c:浅湿灌溉)

Fig. 2 Changes of ammonium nitrogen concentration in leakage water under different nitrogen levels and irrigation ways (a: normal irrigation; b: control irrigation; c: wet shallow irrigation)

重复测量方差显示见表4,不同施氮水平间水稻全生育期渗漏水中铵态氮浓度有极显著性差异( $p < 0.01$ ),多重检验得出N1与N5差异性极显著( $p < 0.01$ ),N1与N4有显著性差异( $p < 0.05$ ),说明施氮能显著提高渗漏水铵态氮浓度水平。不同灌溉方式对渗漏水中铵态氮浓度无显著影响( $p > 0.1$ )见表4。不同施氮水平与不同灌溉方式对渗漏水中铵态氮浓度没有显著的交互作用( $p > 0.1$ )。

表4 不同施氮水平和灌溉方式渗漏水铵态氮浓度的重复测量方差分析

Tab. 4 Repeated measures variance analysis of ammonium nitrogen concentration in leaching water under different N application level and irrigation methods

项目	df	Mean Square	F	P
不同施氮水平	4	0.916	4.853	0.003
不同灌溉方式	2	0.078	0.415	0.661
不同施氮水平×不同灌溉方式	8	0.003	0.014	1.003

常规灌溉方式下渗漏水中的铵态氮浓度平均值(0.75 mg/L)大于浅湿灌溉(0.69 mg/L)和控制灌溉(0.68 mg/L),说明灌溉水量多时,田面水垂直压增大,促进水分向下运移,也增加了渗漏水中铵态氮的浓度,相比较而言控制灌溉可以减少渗漏水中铵态氮浓度10.31%,浅湿灌溉可以减少8.69%。

### 2.2 稻田土壤渗漏水硝态氮浓度变化

水稻全生育期,不同水肥处理条件下稻田渗漏水中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度动态变化见图3。施肥后,由于硝化

的趋势,拔节孕穗期后均趋于平稳,施氮量越大,渗漏水中铵态氮浓度越高见图2,各施氮水平处理铵态氮浓度处于0.20~0.65 mg/L范围。左海军<sup>[16]</sup>研究降雨量与土壤水渗漏的关系指出,较短时段内多次出现降雨事件能显著增大瞬时渗漏率,引发下渗峰值,7月9日取样时间正值当地全年最强降雨(达到61.6 mm/d)歇停,故会导致铵态氮浓度略有上升。

作用,铵态氮逐步转化为硝态氮,但此时硝态氮浓度并不比铵态氮浓度大许多。这是由于黑土土壤质地黏粒含量、容重及有机质含量很高,土壤质地细,对水分的滞留作用强,易于反硝化作用的进行<sup>[17]</sup>,影响了水分的向下运移,而硝态氮主要通过水分向下运移渗漏,故到达耕层50 cm左右的硝态氮含量会减少许多。硝态氮浓度的一般变化趋势是:施用返青肥10 d后出现高峰值,随后迅速下降,之后在7月9日由于强降水导致土壤下渗累计量增加而出现一个次峰,分蘖期后水稻进入营养生育期,大量吸收氮素,硝态氮含量大幅下降并趋于平稳,浓度在0.5 mg/L以下。

重复测量方差显示见表5,不同施氮水平间水稻全生育期渗漏水中硝态氮浓度有极显著性差异( $p < 0.01$ ),多重检验得出N1与N5差异性极显著( $p < 0.01$ ),N1与N4有显著性差异( $p < 0.05$ ),说明施氮能显著提高渗漏水硝态氮浓度水平。不同灌溉方式对渗漏水中硝态氮浓度无显著影响( $p > 0.1$ )(表5)。不同施氮水平与不同灌溉方式对渗漏水中硝态氮浓度没有显著的交互作用( $p > 0.1$ )。与N1水平相比,N2、N3、N4、N5施肥处理中硝态氮浓度分别下降12.30%~20.36%、21.78%~34.52%、29.91%~44.54%和39.54%~54.61%。控制灌溉可以减少渗漏水中硝态氮浓度11.89%,浅湿灌溉可以减少14.15%。

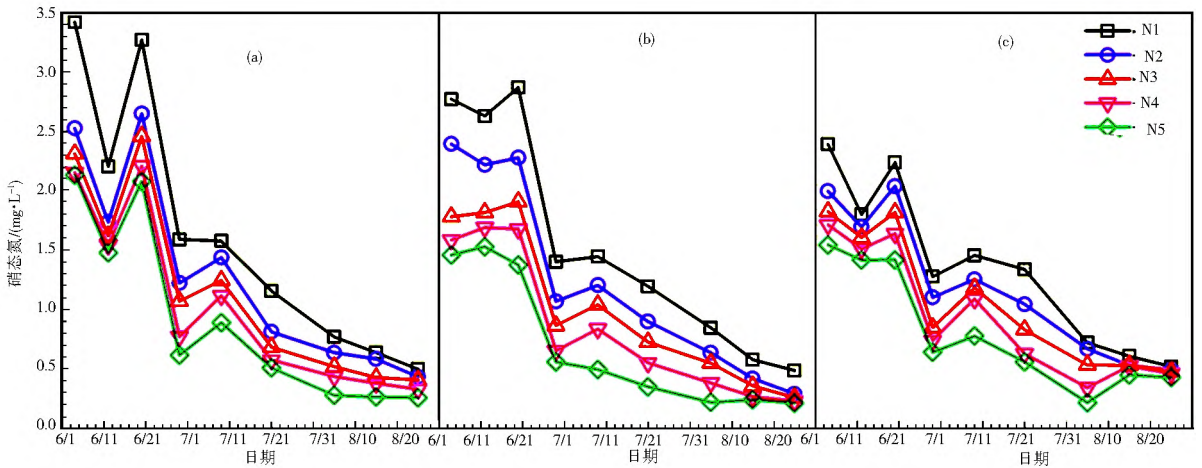


图 3 不同施肥处理渗漏水中铵态氮浓度变化(a: 常规灌溉; b: 控制灌溉; c: 浅湿灌溉)

Fig. 3 Changes of ammonium nitrogen concentration in leakage water under different fertilizer levels and irrigation ways (a: normal irrigation; b: control irrigation; c: wet shallow irrigation)

表 5 不同施氮水平和灌溉方式渗漏水中硝态氮浓度的重复测量方差分析

Tab. 5 Repeated measures variance analysis of nitrite nitrogen concentration in leaching water under different N application level and irrigation methods

项目	df	Mean Square	F	P
不同施氮水平	4	0.916	4.853	0.003
不同灌溉方式	2	0.078	0.415	0.661
不同施氮水平 × 不同灌溉方式	8	0.003	0.014	1.003

呈波动下降趋势, 后期趋于稳定见图 4。施返青肥后总氮浓度立即升高, 10 d 后达到最大值, 之后降低, 在水稻分蘖盛期由于降雨冲刷增加土壤渗漏积累, 有小幅上升, 而后降低并趋于平稳, 且浓度大多在 2.22 mg/L 以下。施氮量与渗漏水中总氮的浓度呈正线性相关。各灌溉方式在施底肥 3~5 d 左右总氮浓度达到最大值, 常规灌溉的最大值为 4.1~6.6 mg/L, 均比控制灌溉和浅湿灌溉大。控制灌溉可以减少渗漏水中总氮浓度 5.08%, 而浅湿灌溉则增加 5.72%。

### 2.3 稻田土壤渗漏水总氮浓度变化

不同施肥方式下, 渗漏水中总氮浓度在施肥后

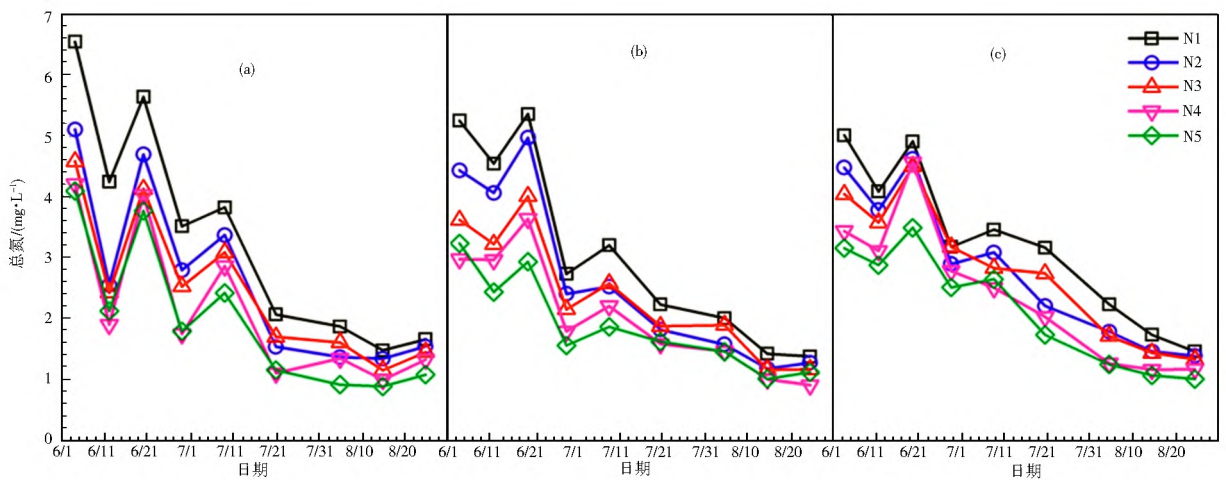


图 4 不同施氮水平和灌溉方式渗漏水中总氮浓度变化(a: 常规灌溉; b: 控制灌溉; c: 浅湿灌溉)

Fig. 4 Changes of total nitrogen concentration in leakage water under different nitrogen levels and irrigation ways (a: normal irrigation; b: control irrigation; c: wet shallow irrigation)

重复测量方差显示见表 6, 不同施氮水平间水稻全生育期渗漏水中总氮浓度有极显著性差异 ( $p < 0.01$ ), 多重检验得出 N1 与 N5 差异性极显著 ( $p < 0.01$ ), N1 与 N4 有显著性差异 ( $p < 0.05$ ), 说明施氮能显著提高渗漏水总氮浓度水平。不同灌溉方式对渗漏水中总氮浓度无显著影响 ( $p > 0.1$ ) 见表 6。不同施氮水平与不同灌溉方式对渗漏水中总氮浓度没有显著的交互作用 ( $p > 0.1$ )。

表 6 不同施氮水平和灌溉方式渗漏水中总氮浓度的重复测量方差分析

Tab. 6 Repeated measures variance analysis of total nitrogen concentration in leaching water under different N application level and irrigation methods

项目	df	Mean Square	F	P
不同施氮水平	4	6.351	3.904	0.005
不同灌溉方式	2	0.858	0.528	0.591
不同施氮水平 × 不同灌溉方式	8	0.100	0.062	1.002

## 2.4 不同水肥处理稻田氮素淋失量计算与分析

稻田根系层水分平衡的基本方程可由式(2)表示:

$$P+ I= ET+ D+ OUT \pm \Delta W \quad (2)$$

式中:  $P$  为水稻生育期内降雨量(mm);  $I$  为生育期内灌溉水量(mm);  $ET$  为水稻生育期内土壤蒸发和作物蒸腾而消耗的水量(mm);  $D$  为水稻生育期内深层渗漏水量(mm);  $OUT$  为水稻生育期内地表径

流和排水量(mm);  $\Delta W$  为水稻种植前后土壤储水量之差,多雨年为负号,少雨年为正号<sup>[18]</sup>(mm)。

通过稻田水平衡计算出渗漏水量(表 7), 可以得出水稻全生育期日平均渗漏量: 常规灌溉、控制灌溉和浅湿灌溉分别为 4.75 mm/d、1.66 mm/d 和 2.86 mm/d。根据水稻全生育期 TN 浓度的实测资料, 插值计算出深层渗漏水中 TN 的逐日浓度, 结合日平均渗漏量分别计算水稻各生育期氮素淋失量见表 8。

表 7 不同处理方式下的全生育期稻田系统水分平衡

Tab. 7 Water balance of paddy system under different treatments in whole growth period

施氮水平/(kg·hm <sup>-2</sup> )	灌溉方式	水分输入/mm		水分输出/mm			土壤储水量变化/mm
		灌溉水量	降水量	排水量	蒸散量	渗漏水量	
N1	G1	885.3	506.0	0	551.0	775.4	64.9
	G2	227.9	506.0	51.9	473.0	150.3	58.7
	G3	543.1	506.0	0	516.0	480	53.1
N2	G1	693.6	506.0	0	551.0	583.7	64.9
	G2	209.3	506.0	13.4	473.0	170.2	58.7
	G3	407.1	506.0	0	516.0	344	53.1
N3	G1	650.8	506.0	0	551.0	540.9	64.9
	G2	235.3	506.0	34.7	473.0	174.9	58.7
	G3	437.0	506.0	0	516.0	373.9	53.1
N4	G1	740.3	506.0	0	551.0	630.4	64.9
	G2	260.0	506.0	0	473.0	234.3	58.7
	G3	369.0	506.0	0	516.0	305.9	53.1
N5	G1	621.0	506.0	0	551.0	511.1	64.9
	G2	386.6	506.0	27.8	473.0	333.1	58.7
	G3	478.8	506.0	86.5	516.0	329.2	53.1

表 8 不同处理方式下的各生育期稻田氮素淋失量

Tab. 8 Nitrogen leaching loss under different treatments in whole growth period

处理	幼苗期至分蘖前期 /(kg·hm <sup>-2</sup> )	分蘖前期至抽穗期 /(kg·hm <sup>-2</sup> )	抽穗期至黄熟期 /(kg·hm <sup>-2</sup> )	总计 /(kg·hm <sup>-2</sup> )	占施肥量(折合为 纯氮)比例(%)
N1G1	3.35±0.14	9.85±0.26	4.69±0.19	17.89	17.20
N2G1	2.37±0.09	8.09±0.23	3.96±0.16	14.41	14.86
N3G1	2.17±0.07	7.45±0.25	3.92±0.14	13.54	15.03
N4G1	1.88±0.05	6.33±0.30	3.40±0.15	11.61	13.97
N5G1	1.92±0.08	5.93±0.22	2.64±0.10	10.48	13.77
N1G2	1.06±0.04	3.09±0.12	1.57±0.05	5.72	5.50
N2G2	0.92±0.03	2.67±0.10	1.31±0.03	4.90	5.05
N3G2	0.74±0.022	2.41±0.09	1.37±0.03	4.52	5.02
N4G2	0.64±0.01	2.09±0.07	1.09±0.04	3.82	4.59
N5G2	0.61±0.02	1.80±0.07	1.16±0.02	3.57	4.69
N1G3	1.70±0.05	5.79±0.23	3.07±0.10	10.56	10.15
N2G3	1.54±0.06	5.04±0.21	2.60±0.09	9.18	9.46
N3G3	1.42±0.04	5.21±0.24	2.52±0.05	9.14	10.15
N4G3	1.22±0.05	4.66±0.17	2.00±0.07	7.88	9.48
N5G3	1.12±0.05	4.07±0.18	1.85±0.03	7.03	9.23

各处理水稻在分蘖前期至抽穗期间的氮素渗漏量最大, 平均占全生育期累计氮素淋失总量的 55%。灌溉方式相同时, 五种施氮水平稻田氮素淋失量存在显著差异。常规灌溉方式下每公顷每增加 1 kg 施氮量(折合成纯氮)氮素淋失量增加 0.1175 kg, 控制灌溉和浅湿灌溉则分别为 0.0359 kg 和 0.0557 kg, 说明相同施氮量时浅湿灌溉和控制灌溉可有效减少氮素淋失量。施肥水平相同时, 三种灌溉模式稻田硝化反硝化作用和水稻对氮的吸收和利用效率不同, 氮素淋失量存在显著差异<sup>[19]</sup>, 对比不同处理, 控制灌溉水稻全生育期氮素淋失总量最小, 平均为 4.51 kg/hm<sup>2</sup>, 只是常规灌溉的约 1/3, 浅湿灌溉的 1/2 左右。

水稻全生育期稻田总氮淋失量与施肥量(折合成纯氮)的比值可以综合反映氮素淋失量的相对水

平<sup>[20]</sup>, 施肥水平相同条件下, 控制灌溉的该比值比常规灌溉平均低 9.99 个百分点, 浅湿灌溉则平均低 5.27 个百分点, 可见控制灌溉比较而言是减少氮素淋溶的最佳灌溉方式。

### 2.5 水稻合理施氮量分析

三种灌溉方式下, 施氮量的增加并不会无限增加水稻产量, 而是在达到最大产量之后开始下降, 氮素淋失量则随着施氮量增加而呈快速增大的趋势见图 5。通过回归分析和拟合, 得出试验小区的当年水稻产量、氮素淋失量与施氮量的函数见表 9, 联立函数求导可得当年合理施氮量, 常规灌溉、控制灌溉和浅湿灌溉条件下分别为 132.36 kg/hm<sup>2</sup>、128.13 kg/hm<sup>2</sup> 和 137.30 kg/hm<sup>2</sup>, 对应的产量分别为 5934.18 kg/hm<sup>2</sup>、5722.02 kg/hm<sup>2</sup> 和 6245.77 kg/hm<sup>2</sup>。

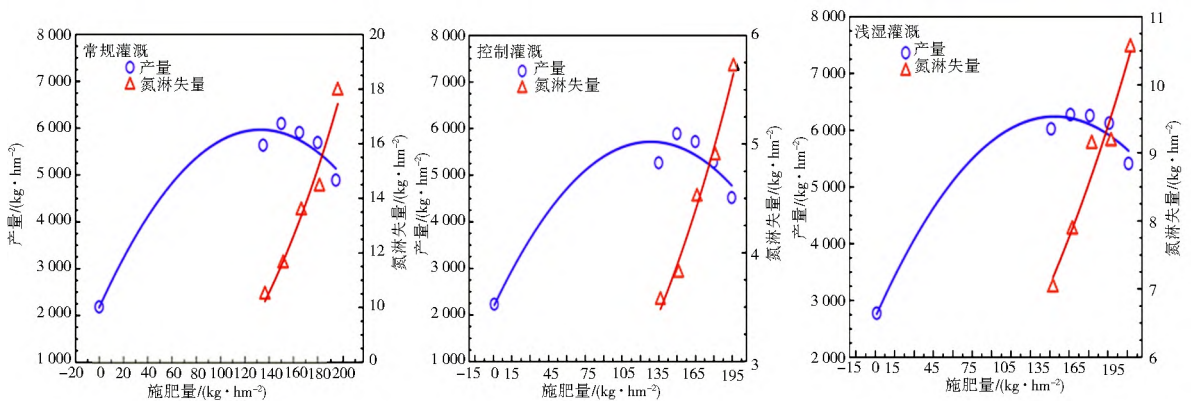


图 5 不同灌溉方式下水稻施氮量与产量及氮素淋失量的关系

Fig. 5 Relationship between grain yield, nitrogen leaching loss and N application rate under different irrigation

表 9 水稻产量、氮素渗漏淋失量与施氮量的函数

Tab. 9 Functions of grain yield, nitrogen leaching loss and N application rate

灌溉方式	产量函数	氮渗漏淋失量函数
常规灌溉	$Y = -0.214x^2 + 56.739x + 2173.306 \quad R^2 = 0.957$	$Y = 3.096e^{0.0089x} \quad R^2 = 0.958$
控制灌溉	$Y = -0.213x^2 + 54.608x + 2221.978 \quad R^2 = 0.920$	$Y = 1.171e^{0.0081x} \quad R^2 = 0.981$
浅湿灌溉	$Y = -0.184x^2 + 50.573x + 2770.738 \quad R^2 = 0.970$	$Y = 3.049e^{0.0063x} \quad R^2 = 0.933$

### 3 结论

(1) 研究区渗漏水中铵态氮、硝态氮和总氮的浓度均与施氮量呈正相关关系。不同灌溉方式对渗漏水中三氮浓度无显著影响, 不同施氮水平与不同灌溉方式对渗漏水中三氮浓度没有显著的交互作用。

(2) 常规灌溉方式下每公顷每增加 1 kg 施氮量(折合成纯氮)氮素淋失量增加 0.1175 kg, 控制灌溉和浅湿灌溉则分别为 0.0359 kg 和 0.0557 kg, 控制灌溉可有效减少氮素淋失量。

(3) 本试验所设条件下的合理施氮量为 128.13~137.30 kg/hm<sup>2</sup>, 对应的产量为 5722.02~

6245.77 kg/hm<sup>2</sup>, 如何在保证产量的同时合理控制浅湿灌溉氮素淋溶量是未来水肥管理措施的重要内容。

(4) 水稻对化肥氮的吸收率是衡量水肥措施合理性的另一重要因素, 有待进一步的研究。

#### 参考文献(References):

[1] 陈林, 程莲, 李丽, 等. 水稻膜下滴灌技术的增产效果与经济效益分析[J]. 中国稻米, 2013, 19(1): 4-43. (CHEN Lin, CHENG Lian, LI Li, et al. Analysis on yield and economic of drip irrigation techniques on rice[J]. China Rice, 2013, 19(1): 4-43. (in Chinese))

[2] 肖新, 朱伟, 杨露露, 等. 灌溉模式与施氮量对水稻需水规律及

- 产量的影响[J]. 南京农业大学学报, 2012, 35(4): 27-31. (XIAO Xin, ZHU Wei, YANG Lir lu, et al. Effects of irrigation model and nitrogen fertilization on rice evapotranspiration and yield[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2012, 35(4): 27-31. (in Chinese))
- [3] 蔡守华, 赵明华. 稻田节水潜力与节水策略[J]. 中国农村水利水电, 2004(4): 79. (CAI Shou hua, ZHAO Ming hua. Water-saving potential and strategies for paddy rice[J]. China Rural Water and Hydropower, 2004(4): 79. (in Chinese))
- [4] 高峰. 稻田土壤水分动态模拟研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2008. (GAO Feng. Simulation on soil water dynamics of rice field[D]. Nanjing: Nanjing University of information science & technology. 2008. (in Chinese))
- [5] 杨贵羽, 王浩. 基于农业水循环结构和水资源转化效率的农业用水调控策略分析[J]. 中国水利, 2011(13): 14-17. (YANG Guī yu, WANG Hao. Analysis of the agriculture water use regulation based on the agricultural water cycle structure and water resources use efficiency[J]. China Water Resources, 2011(13): 14-17. (in Chinese))
- [6] 邹文秀, 韩晓增, 王守宇, 等. 施肥管理对东北黑土区玉米耗水量的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2012, 28(6): 681-686. (ZOU Wen xiu, HAN Xiao zeng, WANG Shou yu, et al. Water consumption by maize under different fertilization managements in black soil zone of northeast China[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2012, 28(6): 681-686. (in Chinese))
- [7] 韩晓增, 王守宇, 宋春雨, 等. 黑土区水田化肥去向的研究[J]. 应用生态学报, 2003, 14(11): 1859-1862. (HAN Xiao zeng, WANG Shou yu, SONG Chun yu. Fate of fertilizer nitrogen in paddy field of black soil region[J]. China Journal of Applied Ecology, 2003, 14(11): 1859-1862. (in Chinese))
- [8] 樊庆铎, 孟婷婷, 李金梦, 等. 江川灌区旱田改水田加刷水体氮磷污染[J]. 农业工程学报, 2014, 30(12): 79-86. (FAN Qing-xin, MENG Tingting, LI Jinmeng et al. Changing from dry field to paddy field intensifying water pollution by nitrogen and phosphorus loads in Jiangchuan irrigation area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(12): 79-86. (in Chinese))
- [9] 罗良国, 许健民. 北方稻田生态系统水量平衡及水分效率研究[J]. 应用生态学报, 1996, 7(4): 371-376. (LUO Liang guo, XU Jian min. Water balance and its efficiency in rice field ecosystems of Northern China[J]. China Journal of Applied Ecology, 1996, 7(4): 371-376. (in Chinese))
- [10] 尹海峰, 焦加国, 孙震, 等. 不同水肥管理模式对太湖地区稻田土壤氮素渗漏淋溶的影响[J]. 土壤, 2013, 45(2): 199-206. (YIN Hai feng, JIAO Jia guo, SUN Zhen, et al. Nitrogen leaching losses from paddy fields under different water and fertilizer managements in Taihu lake area[J]. Soils, 2013, 45(2): 199-206. (in Chinese))
- [11] Schnier H F, Dingkuhn M, De Datta S K, et al. Nitrogen balance in transplanted and direct seeded flooded rice as affected by different methods of urea application[J]. Biology and fertility of soils, 1990, 10(2): 89-96.
- [12] Biloni M, Bocchi S. Nitrogen application in dry seeded delayed flooded rice in Italy[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2003, 67(2): 117-128.
- [13] 刘汝亮, 李友宏, 张爱平, 等. 氮肥后移对引黄灌区水稻产量和氮素淋溶损失的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(2): 16-20. (LIU Ru liang, LI You hong, ZHANG Ai ping, et al. Effect of postponing N application on rice yield and N losses in Yellow River irrigation area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(2): 16-20. (in Chinese))
- [14] 顾海燕. 施氮量及时期对稻田氮素挥发、淋失和水稻利用的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2012. (GU Hai yan. Effects of nitrogen application amount and time on ammonia volatilization, nitrogen leaching and use efficiency[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2012. (in Chinese))
- [15] 姜萍, 袁永坤, 宋日恒, 等. 节水灌溉条件下稻田氮素径流与渗漏流失特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(8): 1592-1596. (JIANG Ping, YUAN Yongkun, ZHU Ri heng, et al. Study on the nitrogen loss from paddy fields on different water management[J]. Journal of Agro Environment Science, 2013, 32(8): 1592-1596. (in Chinese))
- [16] 左海军, 张奇, 徐力刚, 等. 基于数值模拟的土壤水渗漏对降雨条件的响应[J]. 水土保持学报, 2009(1): 007. (ZUO Hai jun, ZHANG Qi, XU Li gang, et al. Numerical investigation on response of soil water percolation to rainfall condition[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009(1): 007. (in Chinese))
- [17] 魏矛. 灌区农田水氮运移机理及其数值模拟研究[D]. 长安大学, 2014. (WEI Mao. Irrigated farmland water and nitrogen transport model and numerical simulation study[D]. Chang'an University, 2014. (in Chinese))
- [18] 孟春红, 夏军. “土壤水库”储水量的研究[J]. 节水灌溉, 2004(4): 8-10. (MENG Chun hong, XIA Jun. Research on the water storage of soil reservoir[J]. Water Saving Irrigation, 2004(4): 8-10. (in Chinese))
- [19] 王莹, 彭世彰, 焦健, 等. 不同水肥条件下水稻全生育期稻田氮素浓度变化规律[J]. 节水灌溉, 2009(9): 12-16. (WANG Ying, PENG Shi zhang, JIAO Jian, et al. Research on nitrogen dynamics in paddy field under different levels of water and fertilizer during whole growing period[J]. Water Saving Irrigation, 2009(9): 12-16. (in Chinese))
- [20] 彭世彰, 王莹, 缴锡云, 等. 不同水肥条件稻田氮素浓度动态变化及淋失量计算[EB/OL]. <http://www.paper.edu.cn/html/releasepaper/2008/06/195/>, 2008. (PENG Shi zhang, WANG Ying, JIAO Xi yun, et al. Nitrogen dynamics and leaching in paddy field as affected by different levels of water and fertilizer[EB/OL]. <http://www.paper.edu.cn/html/releasepaper/2008/06/195/>, 2008. (in Chinese))