

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^①

尹海峰, 焦加国, 孙震, 刘满强, 李辉信, 胡锋*

(南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

摘要: 针对当前我国水稻生产中日益严重的水资源短缺及稻田土壤氮素渗漏淋溶引发的面源污染问题, 本研究通过设置 2 种灌溉方式及 4 个施氮水平的双因子交互试验, 探讨了不同水肥处理对稻田土壤氮素渗漏淋溶的影响。结果表明, 稻田 20 cm 处渗漏水中 NH_4^+ -N 浓度与施氮量呈正相关关系, 减少氮肥施用量, 可降低 2%~35% 的 NH_4^+ -N 浓度, 而 80 cm 处 NH_4^+ -N 浓度与施氮量无相关关系; 稻田 20 cm、80 cm 处渗漏水中 NO_3^- -N 浓度均与施氮量呈正相关关系; 控制灌溉显著提高了稻田 80 cm 处渗漏水中 NO_3^- -N 浓度, 增幅达 31%, 但由于其水分渗漏量少, NO_3^- -N 淋溶量较常规灌溉仍降低 16%~49%; NO_3^- -N 是稻田中氮素渗漏淋溶的主要形式, 占氮素渗漏淋溶总量的 77%~92%; 减氮施肥条件下, NO_3^- -N 渗漏淋溶量降低 14%~56%。控灌减氮措施可很好地协调产量效益与水体环境效益, 是适宜太湖地区的环境友好型水肥管理模式。

关键词: NH_4^+ -N; NO_3^- -N; 渗漏淋溶; 控制灌溉

中图分类号: S153; S19

由于水资源的严重缺乏、季节分配极不均匀, 保护水资源已成为我国的一项基本国策。近年来, 学者们探索了各种各样的节水灌溉管理方法^[1-3]。1991 年, 彭世彰^[4]最早提出和发展了控制灌溉理论。这项措施已被证实在不减产的前提下可以有效地节约灌溉用水, 并且目前在我国推广应用已超过 700 万 hm^2 ^[5]。

我国是世界上最大的化肥生产国和消费国, 从 1980 年到 2009 年我国氮肥消费量由 934.2 万 t 上升到 2 329.9 万 t^[6], 增长近 1.5 倍, 而过量施用氮肥常常伴随着氮肥利用效率的降低, 当前我国氮肥的平均利用率仅有 30%~35%^[7]。过量氮肥会通过淋溶、径流、氨挥发及硝化-反硝化作用等多种途径进入周围水体和大气中^[8-10], 加速了湖泊和河流的富营养化^[11], 并通过渗漏淋溶污染地下水^[12]。Gabriel 等报道^[13], 若地下水中的 NO_3^- -N 浓度超过 10 mg/L, 人饮用后容易引发高铁血红蛋白症(methemoglobinemia, blue-baby), 尤其是 6 个月以下婴儿特别敏感, 长期饮用也可能导致成人胃癌。

目前, 有关稻田氮素利用及渗漏损失的研究多关注于施肥量、肥料类型、肥料施用方式或田间灌溉制

度等。太湖地区是我国粮食主产区之一, 并且超过 75% 的耕地被用作水稻的生产。因此, 在不同的水肥管理模式下研究稻田氮素淋失不仅对控制和提高太湖流域的水质有重要意义, 而且可以通过减少氮肥施用量和灌水量带来巨大的经济和生态效益。本研究通过在太湖地区两年的定位试验研究了不同水肥管理模式对稻田氮素的淋失形态和渗漏淋溶量的影响, 以探索该地区的合理施氮量, 为减少稻田氮素渗漏淋溶损失、指导当地施肥灌溉和保护水体生态环境提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于江苏省苏州市相城区望亭镇新埂村, 濒临太湖。当地属于北亚热带季风气候, 常年平均气温 16.6℃, 最高气温 38.1℃, 最低气温 -6.1℃, $\geq 10^\circ\text{C}$ 的有效积温 4 933.7℃, 年降雨量 1 312 mm, 年日照 1 745 h, 年平均太阳总辐射量 $4.94 \times 10^5 \text{ J/cm}^2$, 无霜期 231 天。

供试土壤为当地典型的黄泥土, 其 0~15 cm 耕

基金项目: 农业部公益性行业(农业)科研专项资助。

* 通讯作者(fenghu@njau.edu.cn)

作者简介: 尹海峰(1985—), 男, 山东滨州人, 硕士研究生, 主要从事水稻节水灌溉清洁生产方面的研究。E-mail: hfyin2010@126.com

作层的土壤基本特性如下：全氮 1.73 g/kg，有机质 30.35 g/kg，速效氮 141.83 mg/kg，速效磷 14.58 mg/kg，速效钾 92.80 mg/kg，pH 5.65。

1.2 试验设计

本试验为双因素(灌溉措施、施肥量)交互试验。灌溉措施采用控制灌溉(CI)和常规灌溉(CF)两种灌溉模式。控制灌溉：除返青期田间保持 10~20 mm 水层、分蘖后期晒田和黄熟期自然落干以外，其他各生育期灌水后均不建立水层，土壤含水率上限为饱和含水率，分蘖前期、分蘖后期、拔节孕穗期、抽穗开花期以及乳熟期，耕层土壤含水率下限分别取饱和含水率的 80%、60%、80%、80%和 70%；常规灌溉：除

返青期保持 30~40 mm 水层、分蘖后期晒田和黄熟期自然落干以外，以后每周灌水 20~30 mm。此外，设置 4 个氮肥施用水平，共 8 个处理，每个处理 3 次重复，具体见表 1。每个小区面积 20 m²，各小区区组随机排列。小区田埂筑高 20 cm，用塑料薄膜包被，向下埋深 30 cm，以减少侧渗、串流。各小区用水泵灌溉，分别设置有排水口，单灌单排。

试验于 2010、2011 年的稻季实施。本文为 2010、2011 年度的研究结果。两年均于 6 月 27 号施基肥并于第二天移栽水稻，7 月 8 号施分蘖肥，8 月 15 号施穗肥，11 月 5 号收割。供试水稻品种为“南粳 46”，为中熟粳稻品种。

表 1 试验处理设计
Table 1 Designing of experimental treatments

处理编号	处理方式	具体施氮措施		
		基肥(kg/hm ²)(复合肥)	蘖肥(kg/hm ²)(尿素)	穗肥(kg/hm ²)(尿素)
CIN0	控制灌溉、施氮 242 kg/hm ²	45	124.4	72.6
CIN1	控制灌溉、施氮 220 kg/hm ²	45	109	66
CIN2	控制灌溉、施氮 198 kg/hm ²	45	93.6	59.4
CIN3	控制灌溉、施氮 176 kg/hm ²	45	78.2	52.8
CFN0	常规灌溉、施氮 242 kg/hm ²	45	124.4	72.6
CFN1	常规灌溉、施氮 220 kg/hm ²	45	109	66
CFN2	常规灌溉、施氮 198 kg/hm ²	45	93.6	59.4
CFN3	常规灌溉、施氮 176 kg/hm ²	45	78.2	52.8

注：N0 为当地施氮水平；磷、钾肥均作为基肥以复合肥的形式施入，复合肥中 N:P:K 为 15:15:15；化肥用量均以纯 N 计。

1.3 采样和测定

1.3.1 室外观测与采样 (1) 灌水量：采用安装在灌水管上的水表测量。

(2) 渗漏量：通过稻田水分平衡法测量。每个试验小区内埋置 3 个高 40 cm、直径 25 cm 的 PVC 筒和 1 个高 50 cm、直径 25 cm 的 PVC 筒，4 个筒底部均不密封，其中筒 1 和筒 3 加盖顶盖，筒 2 的侧面则打上小孔；筒 1 的上缘高出土表 10 cm，筒 2 与筒 3 的上缘与土表齐平，内置土壤张力计，张力计底部离地表 15 cm，筒 4 的上缘高出土表 20 cm，不加盖顶盖。当田面淹水时，通过测量筒 1 外壁水面的变化即可得出田间水分的总损失量(包括渗漏量和蒸发量)，而据其内壁水面高度的变化即可换算出水分的渗漏量。田面不淹水时，每天测定筒 2(存在渗漏和蒸发)和筒 3(只存在蒸发)的土壤含水量可计算出水分的渗漏量。埋置时尽量使筒内土壤的性状接近于田间原位土壤。

(3) 土壤含水率：用安置在稻田的土壤张力计测得，张力计底部离地表 15 cm。

(4) 采样：在各小区内提前 1 个月埋设 20 cm、80 cm 深的土壤渗漏水采集装置(中科院南京土壤研究所跨克科技有限责任公司研制)。分别于基、追肥施用后的第 1、3、5、7、10 天采集渗漏水样，另在灌溉、降雨后的第 1、3、5 天采样。采集的水样迅速酸化，放入 4℃ 冰箱内保存以备分析。水稻成熟后，各小区选取 5m² 的测产区实测产量。

1.3.2 室内分析 水样中 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 浓度用连续流动化学分析仪(德国，Seal Analytical, Auto Analyzer 3)测定。

1.4 数据分析

采用 Excel 和 SPSS17.0 软件处理分析数据，并用 Origin8.0 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 不同水肥处理对稻田土壤渗漏水中 NH₄⁺-N 浓度动态变化的影响

2010 年，从 NH₄⁺-N 浓度的动态变化来看，各处

理 20 cm 深的土壤渗漏水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度均于施肥后的第 1 天达到峰值，且均在氮肥施用后达到最大值，之后迅速下降，施肥 10 天后趋于稳定，各处理浓度处于 0.03 ~ 0.87 mg/L 的范围(图 1)。同一灌溉方式下，土壤渗漏水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度随施氮量的增加而增大。常规灌溉下，与常规施肥处理 CFN0(4.67 mg/L)相比，CFN1、CFN2 和 CFN3 处理中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度分别下降了 34%、27% 和 35%；控制灌溉下，CIN1、CIN2 和 CIN3 相比常规施肥处理(5.78 mg/L)分别下降了 2%、24% 和 29%(图 1a)。施氮量相同时，灌溉措施对渗漏水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度影响不大，控制灌溉略高于常规灌溉，这与王莹等^[14]、崔远来等^[15]的研究结果相同。这是因为与常规灌溉相比，控制灌溉条件下灌水量、渗漏水量较少，基质浓度偏高。在水肥耦合的交互影响下，控灌减氮施肥有效降低了渗漏水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的浓度，减少了氮肥的无效损失。与俞映惊等^[16]的研究结果类似，氮肥施用量对稻田浅层土壤渗漏水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度变化起主要作用。

2011 年土壤渗漏水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度相比前一年略

有下降，尤其是分蘖肥施用后的高峰期，平均降幅达 8%(图 1b)，但两年中水稻全生育期动态变化趋势是基本一致的。可以看出，经过一年的减量化施肥试验后，随渗漏水淋溶损失的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度降低，有利于氮素更多地被水稻吸收利用。

80 cm 处稻田土壤渗漏水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度的动态变化规律与 20 cm 处相比差异较大，且 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度总体偏低(图 2)。除稻季开始时 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度较高外，大部分时间均处于 0 ~ 0.4 mg/L 的范围，并一直维持到水稻收获，且各处理间差异不大。深层土壤渗漏水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度较小，这可能与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在稻田土壤中的迁移转化特性有关。土壤胶体一般带负电，因此带正电的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在稻田中易被土壤胶体通过交换吸附作用固定，使其迁移能力减弱^[17-18]。同时，水稻又是喜 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 植物，耕层土壤中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 被水稻大量吸收利用，此外，由于稻田的深层土壤质地黏重，且多处于还原环境，减少了 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 向 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的转化，这进一步降低了深层土壤渗漏水中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度^[19-20]。

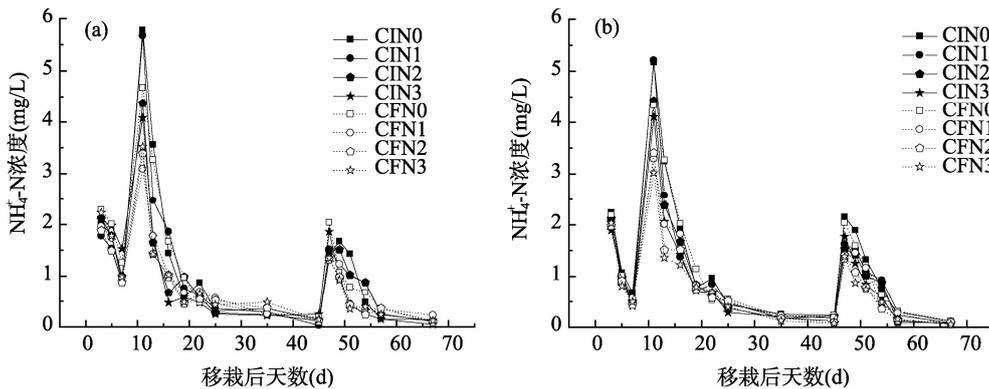


图 1 20 cm 处土壤渗漏水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度动态变化(a: 2010 年; b: 2011 年)

Fig. 1 Changes of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentrations in soil leachate at 20 cm depth

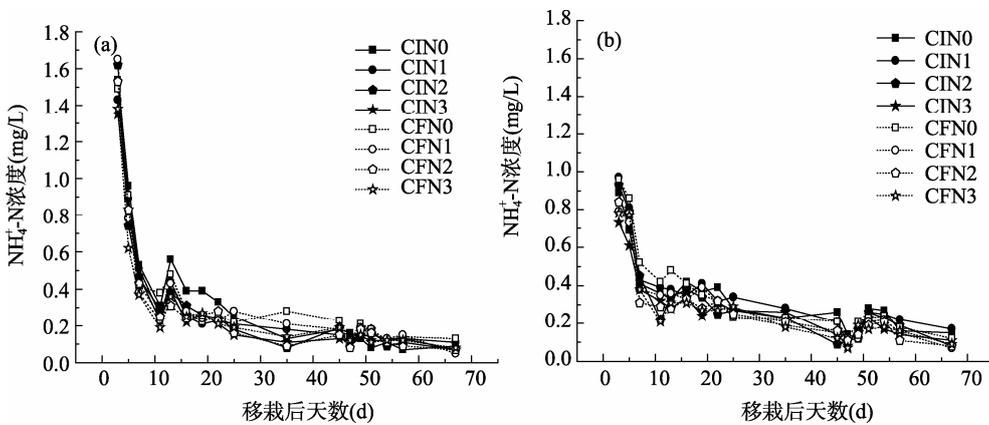


图 2 80 cm 处土壤渗漏水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度动态变化(a: 2010 年; b: 2011 年)

Fig. 2 Changes of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentrations in soil leachate at 80 cm depth

2010 和 2011 年的试验结果基本一致, 只是 2011 年 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度在稻季开始时有明显的降低, 原因可能与 20 cm 处一样, 经过一年的试验减少了土壤氮素的残存量, 降低了其渗漏淋溶的风险。

2.2 不同水肥处理对稻田土壤渗漏水中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度动态变化的影响

图 3 表示的是在水稻全生育期, 2010 年和 2011 年不同水肥处理稻田 20 cm 处土壤渗漏水中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度动态变化。在水稻移栽后分别施入基肥(第 10 天)和穗肥(第 48 天)的第二天, 稻田土壤渗漏水中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度出现峰值。此外, 在烤田结束(移栽后的第 29 ~ 35 天)灌溉复水后, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度也出现一个高峰期, 甚至高于穗肥施用后出现的最大值。随着时间的推移, 施氮后 10 天内由于受稻田氮素迁移转化及水稻对氮素吸收利用的影响, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度迅速下降, 最后趋于稳定。稻田施氮后 10 天内是 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的渗漏高峰期^[21-22], 应加强对这一时期的水肥管理以减少氮素淋溶损失。

不同水肥处理 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度变化对比表明(图 3), 在相同的施氮量条件下, 控制灌溉下施肥后 10 天内的稻田浅层土壤渗漏水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的浓度显著高于常规灌溉, 在施肥后出现的两次高峰, 平均分别高出 28% 和 80%。造成这种差异的原因可能是由于控制灌溉中灌水量较少, 导致施肥后田面水中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度较高, 而 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 在土壤中的稳定性较差, 易随渗漏水发生淋溶。有文献报道, 在控灌条件下, 稻田长时间不建立水层, 使得大量空气进入, 耕层土壤氧化还原电位升高, 加速了 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 向 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的转化, 经过一段时间的累积, 灌溉复水后 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 迅速大量淋溶^[23]。

在同一灌溉方式下, 渗漏水中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度随施

氮量的增加而升高。在两次施肥后的高峰期, 控灌常规施肥处理(CIN0)显著高于 CIN2、CIN3 的减氮处理。另外, 为抑制水稻无效分蘖的发生而进行烤田, 在烤田结束灌溉复水后, 出现了 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 渗漏淋溶的高峰期, 2010 年的试验尤为明显。在今后的水稻生产中, 要通过改进对稻田烤田后的田间管理, 尤其是改变灌溉时期及灌水量, 以降低烤田后出现的大量氮素淋溶损失。

相比 2010 年, 2011 年水稻全生育期 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度的动态变化趋势相同, 但总体浓度水平有一定程度降低。朱兆良等^[24]认为当季作物的氮肥有效利用率最高只有 35%, 2010 年稻季开始前有大量氮素残存于土壤中, 造成 2010 年试验中有较高的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋失。在施用分蘖肥、穗肥、烤田后形成 3 次渗漏高峰期, 但其 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度略有下降, 3 次高峰时平均降幅分别为 4%、16% 和 1%。

一般认为, 氮素淋失到地表 80 cm 以下便不能再被水稻吸收利用, 易对地下水造成不可逆的污染^[25]。图 4 表明, 施肥量和灌溉方式对稻田 80 cm 处土壤渗漏水中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度的动态变化均有影响, 其中灌溉方式的影响更为明显。同一施氮水平下, 控制灌溉下 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度较高, 平均高出 31%。这可能是由于控制灌溉条件下浅层土壤较高的含氧量使其硝化作用较常规灌溉剧烈, 灌溉复水后土壤积累的大量氮素随灌溉水淋失, 使其深层土壤的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度较常规灌溉有明显的提高^[14]。灌溉方式相同时, 随氮肥施用量的增加, 深层渗漏水中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度有一定的升高, 但并不显著。稻田土壤渗漏水中的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度变化规律较为复杂, 造成这种现象的原因可能是土壤的水分状况、通气条件、温度、pH、施肥量及前期土壤

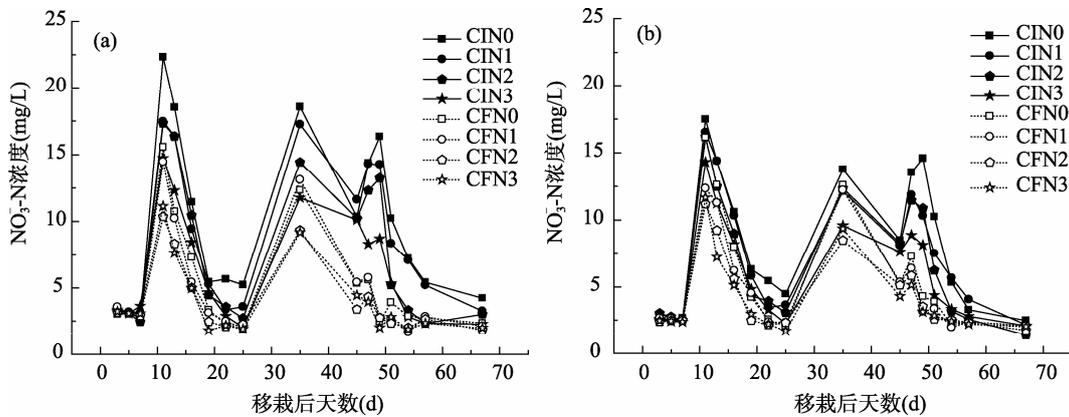


图 3 20 cm 处土壤渗漏水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度动态变化(a: 2010 年; b: 2011 年)

Fig. 3 Changes of $\text{NO}_3^- - \text{N}$ concentrations in soil leachate at 20 cm depth

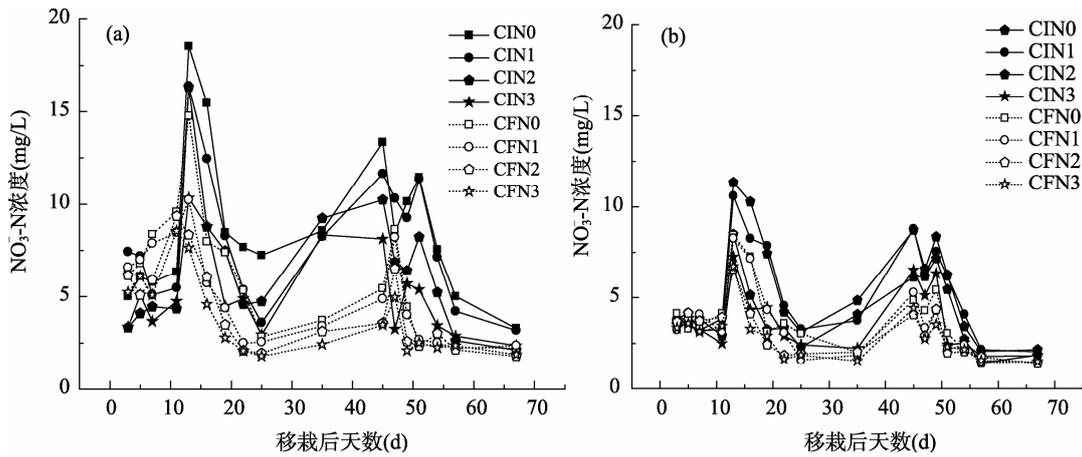


图 4 80 cm 处土壤渗漏水 NO₃-N 浓度动态变化(a: 2010 年; b: 2011 年)

Fig. 4 Changes of NO₃⁻-N concentrations in soil leachate at 80 cm depth

氮素残留量等因素综合影响了氮素在土壤中的迁移转化^[26-29], 进而影响 NO₃⁻-N 在土壤中的累积和淋溶损失量^[30-31]。

2.3 稻田氮素渗漏淋溶量估算及其与施氮量的相关性分析

稻田渗漏速率受水文条件和土壤结构的影响, 在常规灌溉下, 水稻生长期的大部分时间内土壤均有一定的水层, 稻田渗漏可以看作饱和状态下水的渗漏。但控制灌溉下, 由于稻田长时间处于不饱和状态, 渗漏速率变异较大, 因此采用稻田水分平衡法测量水分渗漏量, 可很好地避免采用测坑法^[20]或原状土柱模拟法^[27,32-33]所出现的问题。据测定, 其中 2010 年控制灌溉和常规灌溉水分日均渗漏量分别为 4.23 mm/d 和 2.77 mm/d, 在 2011 年分别下降为 4.02 mm/d 和 2.42 mm/d, 这与太湖地区稻田的其他研究结果(0 ~ 10 mm/d)基本一致^[34-35]。考虑试验区地下水位在稻季为 1 m 左右, 本研究采用水稻全生育期 80 cm 处土壤渗

漏水中 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 浓度的实测资料, 分别计算出 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 的渗漏淋溶量。

如图 5 所示, 稻田氮素渗漏淋溶以 NO₃⁻-N 为主, 约占氮素渗漏总量的 77%~92%, 与该地区的其他研究结果相似^[19,20,36]。这与 NO₃⁻-N、NH₄⁺-N 在稻田土壤中具有不同的迁移转化特性有关。不同水肥处理稻田氮素渗漏淋溶量对比分析表明, 灌溉方式一定时, NO₃⁻-N 淋溶量随施氮量的增加而升高。常规灌溉下, 各施氮处理间 NO₃⁻-N 淋溶量达显著差异 ($F = 49.627, P = 0.000$), 减氮施肥条件下, NO₃⁻-N 淋溶量下降 14%~56%; 在同一施氮水平下, 控制灌溉与常规灌溉相比, 稻田中 NO₃⁻-N 的渗漏淋溶量显著降低 ($F = 59.537, P = 0$), 降幅达 16%~49%。灌溉措施和氮肥施用两者的交互效应对稻田中 NO₃⁻-N 的渗漏淋溶量无显著影响 ($F = 2.907, P = 0.087$)。对于稻田 NH₄⁺-N 的渗漏淋溶量而言, 灌溉措施和施氮量对其

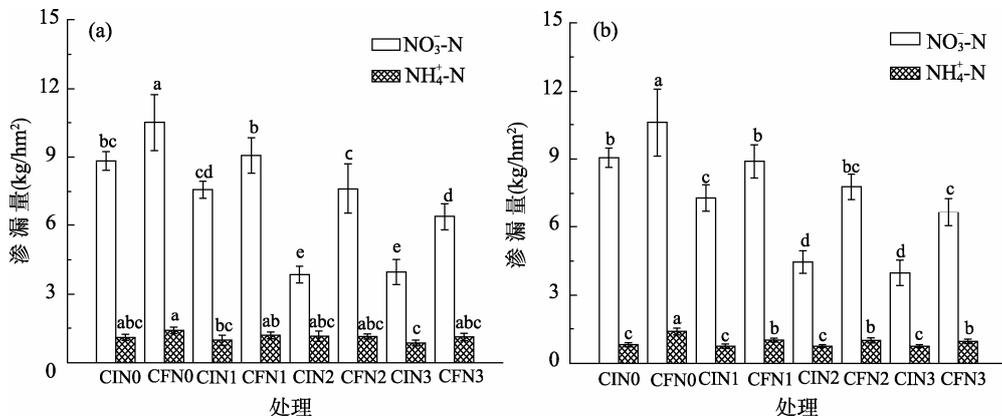


图 5 稻田氮素渗漏淋溶量(a: 2010 年; b: 2011 年)

Fig. 5 N leaching flux from paddy fields

均无显著影响。

2011 年稻田氮素渗漏淋溶量与 2010 年相差不大。虽然 2011 年稻田渗透水的 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N 浓度均有下降,但由于 7、8 月份降雨量比 2010 年同期高 35%,而这时正是稻田控制氮素淋溶损失的关键时期,使 2011 年氮素渗漏淋溶量也较高。

施氮量与 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N 渗漏淋溶量的相关性分析表明(表 2),2010 和 2011 年施氮量与 NO_3^- -N 渗漏淋溶量有显著相关关系。但施氮水平与 NH_4^+ -N 渗

漏淋溶量无显著相关性($P > 0.05$)。

2.4 水稻合理施氮量分析

由于受边际递减效应的影响,水稻产量-施氮量曲线在产量到达最大值后,氮肥小幅增加或降低对水稻产量影响均不大(图 6 和图 7)。但随着施氮量的增加,氮素渗漏淋溶量呈快速上升趋势。通过回归分析,得出施氮量与水稻产量、氮素渗漏淋溶量的函数(表 3)。函数分别求导、联立可得水稻的合理施氮量。2010 年,常规灌溉下,水稻的合理施氮量为 213.46 kg/hm^2 ,

表 2 施氮量与 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N 渗漏淋溶量的相关性分析

Table 2 Correlations between NO_3^- -N、 NH_4^+ -N leaching flux and N application rate

	NO_3^- -N 渗漏淋溶量			NH_4^+ -N 渗漏淋溶量		
	Pearson 相关系数 r	P	n	Pearson 相关系数 r	P	n
2010 年施氮水平	0.918**	0.001	24	0.564	0.156	24
2011 年施氮水平	0.820*	0.013	24	0.335	0.417	24

注: * 表示在 $P < 0.05$ 水平显著相关, ** 表示在 $P < 0.01$ 水平显著相关;下同。

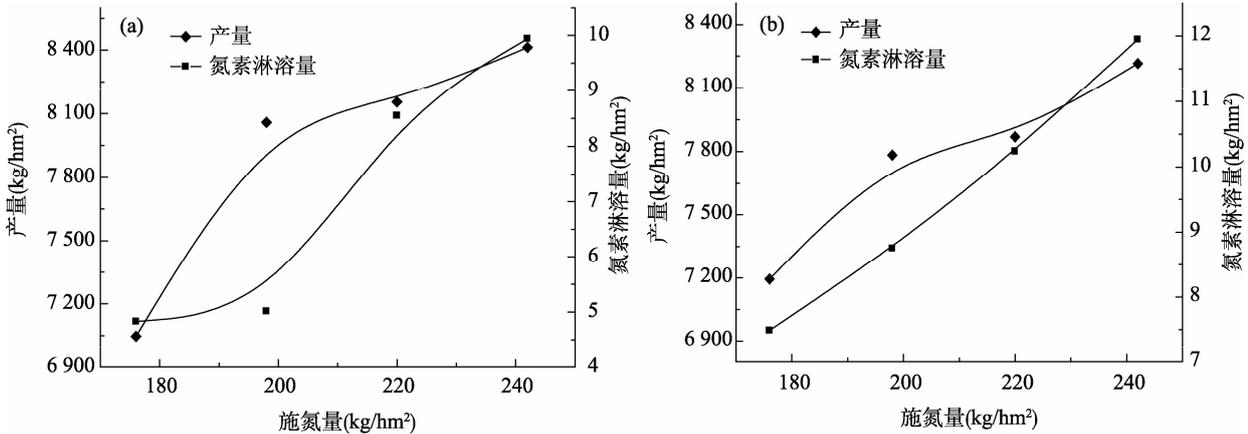


图 6 2010 年水稻施氮量与产量及氮素淋溶量的关系(a: 控灌; b: 常灌)
Fig. 6 Relationship between grain yield, N leaching flux and N application rate in 2010

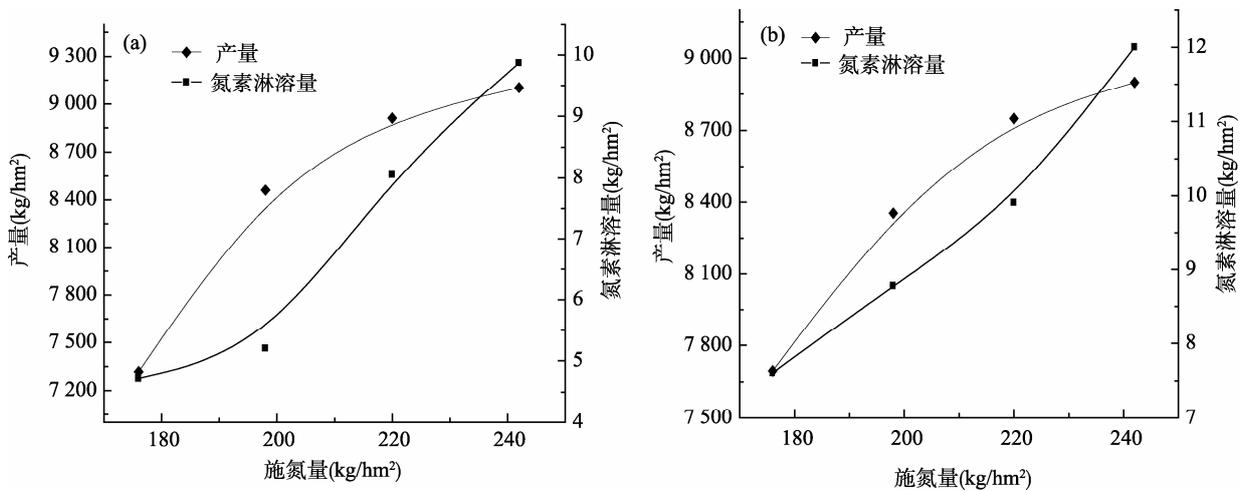


图 7 2011 年水稻施氮量与产量及氮素淋溶量的关系(a: 控灌; b: 常灌)
Fig. 7 Relationship between grain yield, N leaching flux and N application rate in 2011

表 3 水稻产量、氮素渗漏淋溶损失量与施氮量的函数
Table 3 Functions of grain yield, N leaching flux and N application rate

年份	灌溉方式	产量函数		氮素渗漏淋溶损失量函数	
2010 年	控灌	$Y = -0.389x^2 + 181.884x - 12846.3$	$R^2 = 0.946$	$Y = 0.704e^{0.012x}$	$R^2 = 0.948$
	常灌	$Y = -0.125x^2 + 66.705x - 625.844$	$R^2 = 0.841$	$Y = 2.596e^{0.006x}$	$R^2 = 0.991^{**}$
2011 年	控灌	$Y = -0.493x^2 + 232.4x - 18295.505$	$R^2 = 0.937$	$Y = 0.439e^{0.013x}$	$R^2 = 0.886$
	常灌	$Y = -0.263x^2 + 128.058x - 6701.209$	$R^2 = 0.997^{**}$	$Y = 2.352e^{0.007x}$	$R^2 = 0.990^{**}$

注：x 为施氮量。

相应的产量为 7 917.36 kg/hm²。由于控制灌溉下氮素渗漏淋溶量较小，所以其合理施氮量为 218.97 kg/hm²，相应产量为 8 329.12 kg/hm²；2011 年常规灌溉、控制灌溉下的合理施氮量分别为 214.76、220.35 kg/hm²，相应的产量分别为 8 670.48、8 976.65 kg/hm²。

3 结论

(1) 稻田 20 cm 处渗漏水中 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 浓度均与施氮量呈正相关关系。减少氮肥施用量，可降低 2%~35% 的 NH₄⁺-N 浓度。控制灌溉下 NH₄⁺-N 浓度略高；稻田 80 cm 处渗漏水中 NO₃⁻-N 浓度与施氮量呈正相关关系。控制灌溉显著提高了渗漏水中 NO₃⁻-N 浓度，增幅达 31%，但由于其水分渗透量较少，所以 NO₃⁻-N 淋溶量降低 16%~49%。NH₄⁺-N 浓度较稻田 20 cm 处大幅降低，且灌溉措施、施氮量对其影响均不显著。

(2) NO₃⁻-N 是稻田中进入地下水氮素的主要形式，占氮素渗漏淋溶总量的 77%~92%。减氮施肥条件下，NO₃⁻-N 淋溶量下降 14%~56%。

(3) 太湖地区的兼顾生产与水体环境效益的合理施氮量为 213.46~220.35 kg/hm²，相应的产量为 7 917.36~8 976.65 kg/hm²。控灌减氮施肥措施下的产量持续性仍需进一步的验证。

参考文献：

- [1] Bouman BAM, Tuong TP. Field water management to save water and increase its productivity in irrigated lowland rice. *Agric[J]. Water Manage.*, 2001, 49: 11-30
- [2] Barker R, Dawe D, Tuong TP, Bhuiyan SI, Guerra LC. The outlook for water resources in the year 2020: Challenges for research on water management in rice production[J]. *Int. Rice Comm. Newslett.*, 2000, 49: 7-21
- [3] Tabbal DF, Bouman BAM, Bhuiyan SI, Sibayan EB, Sattar MA. On-farm strategies for reducing water input in irrigated rice; case studies in the Philippines[J]. *Agric. Water Manage.*, 2002, 56: 93-112
- [4] 彭世彰. 节水高产水稻控制灌溉技术[J]. *河海科技进展*, 1991, 11(4): 75-77
- [5] Peng SZ, Yang SH, Xu JZ, Luo YF, Hou HJ. Nitrogen and phosphorus leaching losses from paddy fields with different water and nitrogen managements[J]. *Paddy Water Environ.*, 2011, 9: 333-342
- [6] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2010[M]. 北京: 中国统计出版社, 2010: 466-474
- [7] 张红举, 陈方. 太湖流域面源污染现状及控制途径[J]. *水资源保护*, 2010, 26(3): 87-90
- [8] Wortmann CS, Walters DT. Phosphorus runoff during four years following composted manure application[J]. *Environ. Qual.*, 2006, 35(2): 651-657
- [9] Yoshinaga L, Miuraa A, Hitomia T, Hamada K, Shiratani E. Runoff nitrogen from a large sized paddy field during a crop period[J]. *Agric. Water Manage.*, 87: 217-222
- [10] Chirinda N, Cater MS, Albertb KR, Ambus P, Olesen JE, Porter JR, Petersen SO. Emissions of nitrous oxide from arable organic and conventional cropping systems on two soil types[J]. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 2010, 136: 199-208
- [11] Le C, Zha Y, Li Y, Sun D, Lu H, Yin B. Eutrophication of lake waters in China: cost, causes, and control[J]. *Environ. Manage.*, 2010, 45: 662-668
- [12] 郭战玲, 沈阿林, 寇长林, 马政华, 王守刚. 河南省地下水硝态氮污染调查与监测[J]. *监测分析*, 1998(5): 125-128
- [13] Gabriel G, Monika C, James R, Cerhan. An dcologic study of nitrate in municipal drinking water and cancer incidence in Trnava District, Slovakia[J]. *Environmental Research*, 2002, 88(3): 182-187
- [14] 王莹, 彭世彰, 焦健, 孔伟丽. 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
- [15] 崔远来, 李远华, 吕国安, 沙宗尧. 不同水肥条件下水稻氮素运移与转化规律研究[J]. *水科学进展*, 2004, 15(3): 280-285
- [16] 俞映惊, 薛利红, 杨林章. 不同氮肥管理模式对太湖流域稻田土壤氮素渗漏的影响[J]. *土壤学报*, 2011, 48(9): 988-995
- [17] 张庆利, 张民, 田维彬. 包膜控释和常用氮肥氮素淋失特征及其对土水质量的影响[J]. *土壤与环境*, 2001, 10(2): 98-103
- [18] Choudhury ATMA, Kennedy IR. Nitrogen fertilizer losses from rice soils and control of environmental pollution problems[J]. *Soil Science and Plant Analysis*, 2005, 36: 1 625-1 639

- [19] 潘圣刚, 曹凑贵, 蔡明历, 翟晶, 王若函, 黄圣齐, 高良亮. 氮肥运筹对水稻氮素吸收和稻田渗漏水氮素浓度影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(10): 2 145-2 150
- [20] 黄明蔚, 刘敏, 陆敏, 侯立军, 欧冬妮, 林啸. 稻麦轮作农田系统中氮素渗漏流失的研究[J]. 环境科学学报, 2007, 27(4): 629-636
- [21] 闫德智, 王德建, 林静慧. 太湖地区氮肥用量对土壤供氮、水稻吸氮和地下水的影响[J]. 土壤学报, 2005, 42(3): 440-446
- [22] 王德建, 林静慧, 孙瑞娟, 夏立忠, 连纲. 太湖地区稻麦高产的氮肥适宜用量及其对地下水的影响[J]. 土壤学报, 2003, 40(3): 426-432
- [23] 彭世彰, 张正良, 罗玉峰, 缴锡云, 孙勇. 灌排调控的稻田排水中氮素浓度变化规律[J]. 农业工程学报, 2009, 25(9): 21-26
- [24] 朱兆良, 孙波, 杨林章, 张林秀. 我国农业面源污染的控制政策与措施[J]. 科技导报, 2005, 23(4): 47-51
- [25] 薛禹群, 张幼宽. 地下水污染防治在我国水体污染控制与治理中的双重意义[J]. 环境科学学报, 2009, 29(3): 474-481
- [26] 朱兆良, 文启孝. 中国土壤氮素[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1994: 1-249
- [27] 张静, 王德建, 王灿. 用原状土柱研究太湖地区稻麦轮作农田养分淋溶量[J]. 土壤, 2008, 40(4): 591-595
- [28] 陆敏, 刘敏, 茅国芳, 黄明蔚, 屈璠. 大田条件下稻田土壤氮素淋失研究[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2006, (4): 71-77
- [29] Kundu mc, Mandal B, Sarkar D. Assessment of the potential hazards of nitrate contamination in surface and groundwater in a heavily fertilized and intensively cultivated district of India[J]. Environ. Monit. Assess., 2008, 146: 183-189
- [30] 范晓晖, 朱兆良. 旱地土壤中的硝化-反硝化作用[J]. 土壤通报, 2002, 33(5): 385-391
- [31] 陈效民, 潘根兴, 沈其荣, 康燕. 太湖地区农田土壤中硝态氮垂直运移的规律[J]. 中国环境科学, 2001, 21(6): 481-484
- [32] 邱卫国, 唐浩, 王超. 上海郊区水稻田氮素渗漏流失特性及控制对策[J]. 中国环境科学, 2005, 25(5): 558-562
- [33] 王家玉, 王胜佳, 陈义, 郑纪慈, 李超英, 计小江. 稻田土壤中氮素淋失的研究[J]. 土壤学报, 1996, 33(1): 28-36
- [34] 李勇, 杨林章, 殷广德. 太湖地区直播稻田氮素渗漏损失试验研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(1): 99-104
- [35] 王德建, 林静慧, 夏立忠. 太湖地区稻麦轮作农田氮素淋洗特点[J]. 中国生态农业学报, 2001, 9(1): 16-18
- [36] 金洁, 杨京平. 高肥力稻田分次施氮对氮素淋失的影响[J]. 水土保持学报, 2004, 18(3): 98-101

Nitrogen Leaching Losses from Paddy Fields Under Different Water and Fertilizer Managements in Taihu Lake Area

YIN Hai-feng, JIAO Jia-guo, SUN Zhen, LIU Man-qiang, LI Hui-xin, HU Feng*

(College of Resources and Environmental Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: Due to the growing deficiency of water resources and non-point pollution caused by nitrogen leaching losses from paddy fields in China, a field case study was conducted to investigate the dynamic characteristics and the load of nitrogen leaching losses under different water and fertilizer managements by setting two kinds of irrigations and four kinds of nitrogen levels. Results showed that NH_4^+ -N concentration in the leachate was positively correlated to N application rate at 20 cm soil depth, NH_4^+ -N concentration reduced by 2%-35% when N input reduced, NH_4^+ -N concentration did not correlated with N application rate at 80 cm soil depth. NO_3^- -N concentration were both positively related to N application rate at the above two depths. Control irrigation increased NO_3^- -N concentration significantly by 31%, and water leakage was less than traditional irrigation; however NO_3^- -N leachate was 16%-49% lower. Nitrogen was leached away mainly in the form of NO_3^- -N, and it was 77%-92% of total nitrogen leaching flux. Reducing nitrogen application rate decreased NO_3^- -N leaching flux by 14%-56%. Controlling irrigation and reducing nitrogen application rate could coordinate economic benefit and water environmental benefit of nitrogen application well, and it would be environment-friendly water and fertilizer management methods for Taihu Lake region.

Key words: NH_4^+ -N, NO_3^- -N, Leaching, Controlling irrigation