

氮肥对水稻不同生长期土壤不同深度氮素渗漏的影响^①

陈 贵¹, 陈 莹², 施卫明^{1*}

(1 中国科学院南京土壤研究所面源污染治理技术研发中心, 南京 210008; 2 南京林业大学森林资源与环境学院, 南京 210037)

摘 要: 为了探明太湖地区氮肥施用对水稻不同生长期稻田土壤氮素渗漏的影响, 利用渗漏管进行了原位监测。结果表明: ①土壤各层(20~40、40~60、60~80 和 80~120 cm)渗漏液中铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)的平均浓度在水稻分蘖期较高, 而硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)和全氮(TN-N)的平均浓度则在苗期相对较高。渗漏液中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TN-N 浓度随土壤深度增加基本呈降低趋势。②以土壤 80~120 cm 深处渗漏量为进入地下水的氮素渗漏量, 发现 TN-N 渗漏量占施肥量的比例为 1.69%~2.04%。分蘖期的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 渗漏量相对较多, 而苗期 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 TN-N 相对较多, 总 TN-N 渗漏量中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 基本无差异。③氮肥用量增加降了氮肥利用效率, 加剧了土壤各层氮素渗漏风险。当施氮量由 N 200 增至 270 kg/hm² 时, 氮肥表观利用率下降 7.14%, 下渗至地下水中的 TN-N 增加 12.3%。

关键词: 水稻生长时期; 氮素形态; 氮素渗漏; 土壤深度; 过量施氮

中图分类号: X523

太湖地区作为我国三大粮食生产基地之一, 以集约化农业生产为特征^[1]。近年来, 随着生活水平的不断提高, 城镇化建设的加快, 经济作物耕种面积的不断扩增, 粮食安全越来越受到关注。为了追求高产, 太湖地区曾报道了高达 N 300 kg/hm² 的稻季氮肥施用量^[2], 远超在此地区推荐的 N 200 kg/hm² 氮肥施用量^[3]。氮肥过量施用不但会造成资源浪费, 生产成本增加, 同时, 也导致氮肥利用效率降低, 促使大量氮以氨挥发、反硝化、径流、渗漏等途径进入大气和水体, 造成环境污染^[4-5]。研究者发现由于农事活动而产生氮素量对太湖水质富营养化的贡献率达 34%~52%^[6-7]。氮素渗漏作为稻田一种主要的氮素损失途径, 其对地下水水质及地表水富营养化的影响越来越受到人们关注^[8-9], 对于太湖地区稻田氮素渗漏的研究, 尽管前人已经做了相关工作, 但大多并非采用土壤原位监测技术^[10-12], 且并未对水稻各关键生育期内氮素的渗漏浓度、渗漏量作细致分析^[13-14]。本研究采用土壤渗漏原位监测技术, 于 2011 年在太湖地区主要稻田土壤类型湖白土上监测了不同施氮量下, 水稻不同生育期内土壤各层氮素渗漏状况, 同时分析了氮肥过量施用对水稻干物质和氮素累积、氮素利用效率及氮素渗漏的影响, 以期对太湖地区水稻不同生育期内的稻田氮素施用和管理, 提供理论依据和数据支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地点及设计

试验小区位于太湖地区的江苏省宜兴市丁蜀镇涓渎村(31°16'N, 119°54'E), 属北亚热带季风气候区, 年平均气温为 16℃, 年降雨量为 1 100~1 400 mm。试验地土壤发育于湖泊沉积物, 属湖白土, 是太湖地区的主要土壤类型。0~20 cm 耕层土壤理化性状为: 全氮 1.45 g/kg, 有机质 22.7 g/kg, 碱解氮 148.9 mg/kg, 速效磷 27.4 mg/kg, 速效钾 39.3 mg/kg, pH 5.37。

试验设 3 个氮水平, 分别为 N 0、200、270 kg/hm², 每个氮水平重复 3 次, 共计 9 个小区, 各小区随机排列, 面积均为 20 m²。供试水稻品种为武运粳 23 号(W23), 稻种用 15% 双氧水消毒后于 2011 年 6 月 1 日在苗床上开始育苗, 6 月 29 日插秧, 插秧密度按当地农户习惯, 各小区为 480 穴左右。水稻不同生育期的时期分别为: 苗期, 6 月 29 日至 7 月 16 日; 分蘖期, 7 月 17 日至 8 月 10 日; 拔节期, 8 月 11 日至 9 月 1 日; 齐穗期后, 9 月 2 日至收获。

尿素(含氮量 460 g/kg)为本研究氮肥来源, 按 4:3:3 比例分别作为基肥、分蘖肥、穗肥施入。2011 年 6 月 29 日下午施用基肥, 施用方式: 水稻移栽前和耕层土壤混合施用; 2011 年 7 月 16 日下午施用分蘖肥;

①基金项目: 公益性行业(农业)科研专项项目(20100314-1)和国家科技支撑项目(2012BAD15B03)资助。

* 通讯作者(wmshi@issas.ac.cn)

作者简介: 陈贵(1982—), 男, 山西运城人, 博士研究生, 主要从事稻田氮素循环及环境排放研究。E-mail: gchen@issas.ac.cn

2011 年 8 月 11 日下午施用穗肥,分蘖肥和穗肥均以表面撒施形式施用。磷肥为过磷酸钙,施用量为 P_2O_5 75 kg/hm^2 ,钾肥为氯化钾,施用量为 K_2O 130 kg/hm^2 ,磷钾肥均以基肥形式于移栽前与耕层土壤充分混合一次性施入。

1.2 原位土壤渗漏液采集装置的布置及样品采集、测定

土壤渗漏液通过多孔渗漏管(中国科学院南京土壤研究所生产)来收集,多孔渗漏管是由直径为 5 cm 的 PVC 管,管的一端距边缘 20 cm 的管壁上均匀分布直径为 0.5 cm 的小孔,小孔被细密的尼龙纱网包裹,一根直径为 0.5 cm 的塑料管由 PVC 管另一端插入直至布满小孔端底部。长度(埋入土平面下长度)40、60、80、120 cm 的渗漏管分别埋入各小区,分别代表土壤 20~40、40~60、60~80 及 80~120 cm 深度范围内的土壤渗漏状况,渗漏液采集通过真空泵来完成。施肥后隔天采集渗漏液水样,共采 4 次,之后每隔 10 天采集 1 次。样品采集后立即保存在 -20°C 冰箱中待测。渗漏液样品中铵态氮 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、硝态氮 ($\text{NO}_3^-\text{-N}$)、全氮 (TN-N) 浓度的分析测定采用流动分析仪(Skalar Analytical B.V., the Netherlands)。通过快速反应渗漏计监测该试验地区 24 h 的渗漏量为 $2\text{ mm}^{[15]}$,从而根据此数值计算各形态氮的渗漏量。快速反应渗漏计如图 1 所示。

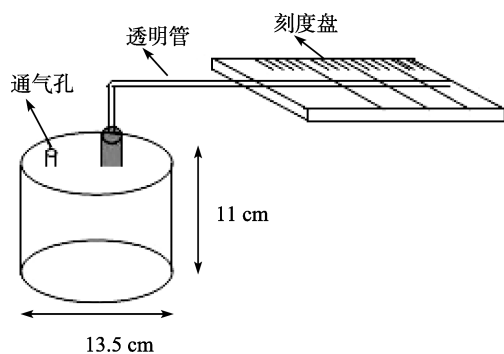


图 1 快速反应渗漏计示意图

Fig. 1 Schematics view of rapid-response percolation meter

总氮素渗漏量 = 施氮处理水稻整个生育期渗漏水的加权平均浓度 $\times$ 渗漏量 - 对照处理(不施氮)相应值
各生长期内的氮素渗漏量 = 施氮处理水稻各生长期渗漏水的加权平均浓度 $\times$ 渗漏量 - 对照处理(不施氮)相应值

1.3 水稻产量及植株样品采集及测定

产量:收获时采集各小区 4 m^2 面积水稻(避免边际效应),脱粒后测定产量;干物质累积:采集各小区生长一致的 4 穴水稻植株地上部, 105°C 杀青 30 min 后,

70°C 烘干直至恒重,称重,再根据每公顷 24 万穴水稻,换算为单位公顷干物质质量;氮素累积:将测完干物质累积的水稻植株样品,磨细,用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮,用开氏定氮法测量全氮含量,并计算氮素累积量。

1.4 数据处理

数据均采用 SAS 数据分析软件包进行多重比较,用 sigmaplot 软件制图。

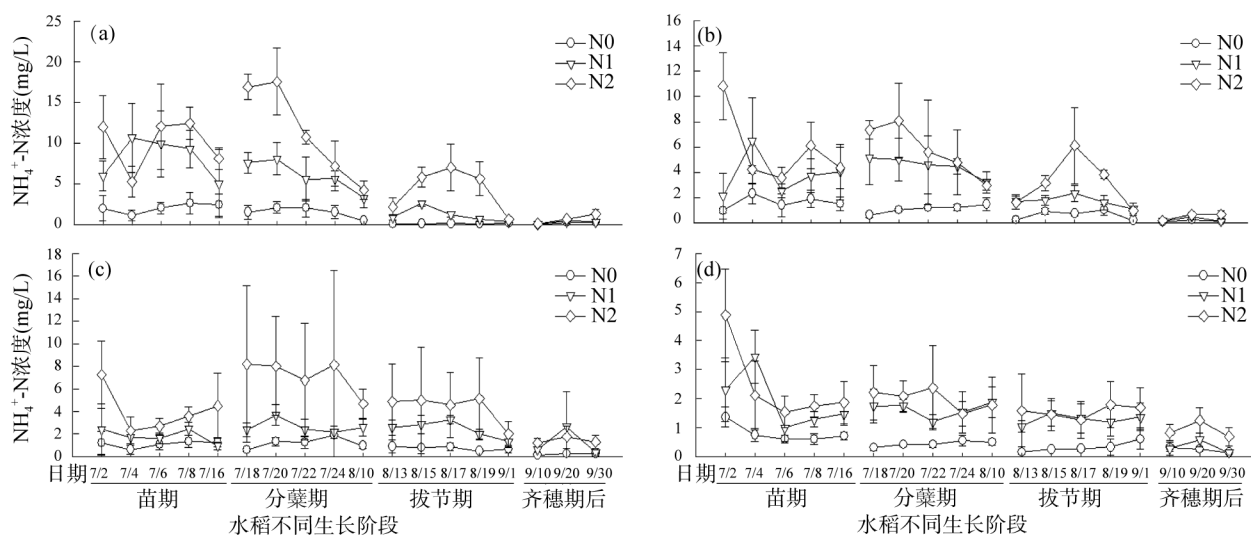
2 结果与分析

2.1 水稻不同生长时期土壤渗漏液中氮素浓度动态变化

2.1.1 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度动态变化 由图 2 可知,随土壤深度(20~40、40~60、60~80、80~120 cm)的增加,各土层渗漏液中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度呈下降趋势,平均浓度依次为 4.22、2.66、2.52 和 1.22 mg/L 。其中,从 20~40 cm 到 40~60 cm 土层 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度下降幅度最大。水稻苗期和分蘖期土壤各层 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度相对较高,而在分蘖期以后, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度呈下降趋势。其中,苗期、分蘖期、拔节期和齐穗期后 20~120 cm 土层 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的平均浓度依次为 3.64、3.79、1.81 和 0.55 mg/L 。当施氮量由 $\text{N } 200\text{ kg/hm}^2$ 增至 270 kg/hm^2 时,水稻苗期、分蘖期、拔节期和齐穗期后 20~120 cm 土层 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的平均浓度由 3.93、3.70、1.65 和 0.53 mg/L 增至 5.57、6.56、3.32 和 0.90 mg/L 。

2.1.2 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度动态变化 由图 3 可见,随土壤深度(20~40、40~60、60~80 cm)的增加,土壤各层渗漏液中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度呈下降趋势,平均浓度依次为 1.21、1.09 和 0.67 mg/L ,而 80~120 cm 土层为 0.98 mg/L 。20~40 cm 和 40~60 cm 土层,除齐穗期后时期,水稻其他各生育期渗漏液中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度的波动性均较大。60~80 cm 和 80~120 cm 土层,除苗期外,其他各时期土壤渗漏液中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度基本无较大波动。水稻苗期、分蘖期、拔节期和齐穗期后 20~120 cm 土层的平均 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度分别为 1.52、0.70、1.02 和 0.52 mg/L 。当施氮量由 $\text{N } 200\text{ kg/hm}^2$ 增至 270 kg/hm^2 时,对 20~40 cm 和 40~60 cm 土层 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度的影响要大于对 60~80 cm 和 80~120 cm 土层。其中,20~40 cm 和 40~60 cm 土层 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度由 1.43 和 0.96 mg/L 变为 1.94 和 1.71 mg/L 。

2.1.3 土壤渗漏液中 TN-N 浓度动态变化 随土壤深度(20~40、40~60、60~80 和 80~120 cm)的增加,土壤各层渗漏液中 TN-N 浓度呈下降趋势,平均浓度依次为 9.39、8.55、5.23 和 3.52 mg/L 。除 80~120 cm 土层不明显外,其他各层土壤渗漏中 TN-N 浓度随水



(图中 N0、N1、N2 分别代表施氮水平 N 0、200、270 kg/hm²，图中各点均为 3 次重复的平均值；下同)

图 2 水稻不同生长期 20~40 (a)、40~60 (b)、60~80 (c) 和 80~120 cm (d) 深处土壤渗漏水 NH₄⁺-N 浓度动态变化
Fig. 2 Dynamic changes of NH₄⁺-N concentrations in percolation water collected in 20~40 (a), 40~60 (b), 60~80 (c) and 80~120 cm (d) of soil depths during rice growth stages

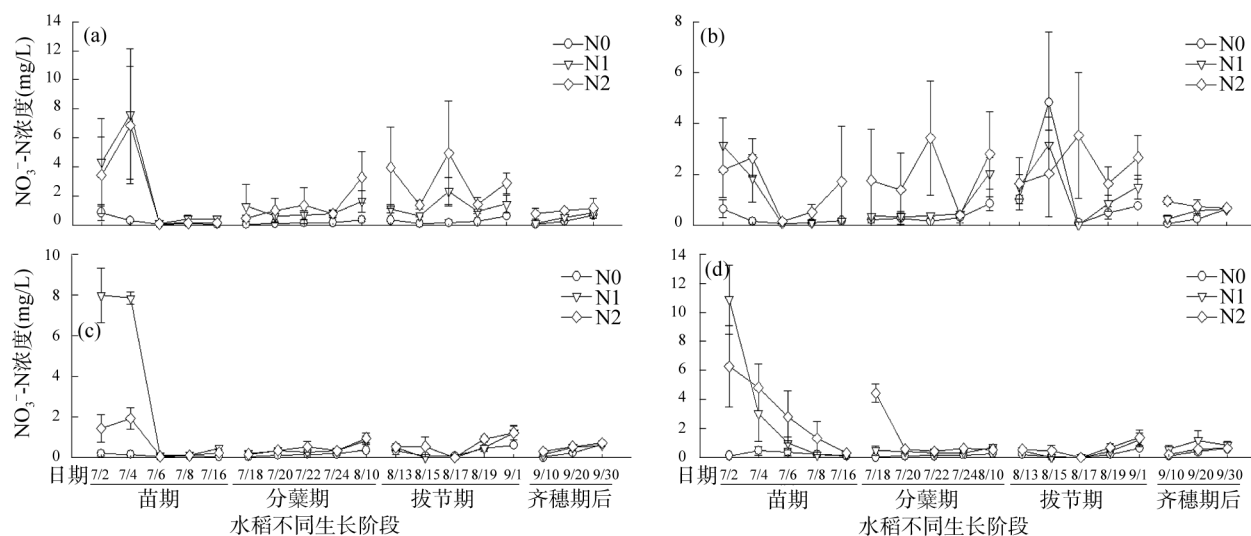


图 3 水稻不同生长期 20~40 (a)、40~60 (b)、60~80 (c) 和 80~120 cm (d) 深处土壤渗漏水中 NO₃⁻-N 浓度动态变化
Fig. 3 Dynamic changes of NO₃⁻-N concentrations in percolation water collected in 20~40 (a), 40~60 (b), 60~80 (c) and 80~120 cm (d) of soil depths during rice growth stages

稻生长期延长基本呈下降趋势。水稻苗期、分蘖期、拔节期和齐穗期后 20~80 cm 土层的平均 TN-N 浓度分别为 12.0、8.20、6.43 和 1.93 mg/L。水稻苗期前期生长阶段，土壤各层渗漏水中 TN-N 浓度波动性均较大，且整个生育期的 TN-N 浓度峰值均出现在此时期。而齐穗期后土壤各层渗漏水中 TN-N 浓度均较小。当施氮量由 N 200 kg/hm² 增至 270 kg/hm² 时，除 80~120 cm 土层外，土壤其他各层(20~40、40~60、60~80 cm)渗漏水中 TN-N 浓度均有不同程度增加，其平均浓度分别由 8.73、10.2 和 4.93 mg/L 升至 16.5、12.6 和 8.55 mg/L；水稻苗期、分蘖期、拔节期 20~120 cm 土层 TN-N 平均浓度分别由 11.0、7.59、6.09 和 1.92 mg/L

变为 17.4、10.3、8.39 和 2.66 mg/L(图 4)。

2.2 80~120 cm 土层氮素渗漏量

由表 1 可知，分蘖时期的 NH₄⁺-N 渗漏量最大，但与其他时期相比差异不显著($P>0.05$)；当施氮量在 N 200 kg/hm² 时，从分蘖期到齐穗期后 NH₄⁺-N 渗漏量呈下降趋势，但在施氮量为 N 270 kg/hm² 时，此趋势不明显；整个生育期 NH₄⁺-N 渗漏量占 TN-N 总渗漏量的 35.0%~48.5%。NO₃⁻-N 渗漏主要发生在水稻苗期，与其他时期相比渗漏量差异显著($P<0.05$)，而其他时期期间的渗漏量则无明显差异($P>0.05$)；整个生育期 NO₃⁻-N 渗漏量占 TN-N 总渗漏量的 29.0%~36.2%。整个生育期 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 渗

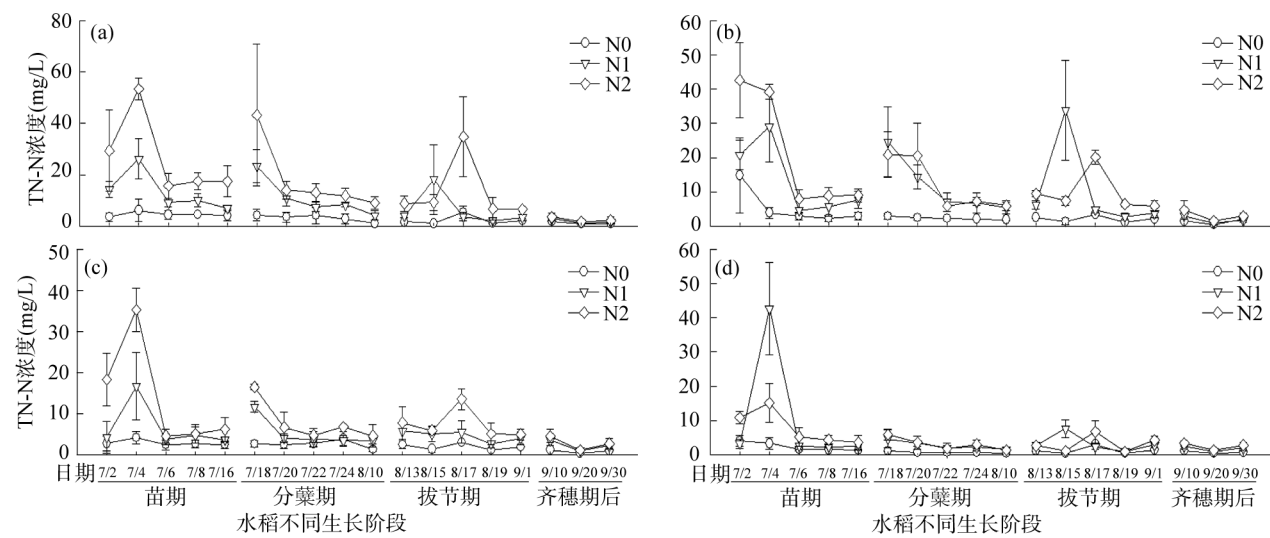


图 4 水稻不同生长期 20 ~ 40 (a)、40 ~ 60 (b)、60 ~ 80 (c) 和 80 ~ 120 cm (d) 深处土壤渗漏液中 TN 浓度动态变化
Fig. 4 Dynamic changes of TN concentrations in percolation water collected in 20–40 (a), 40–60 (b), 60–80 (c) and 80–120 cm (d) of soil depths during rice growth stages

表 1 水稻不同生长时期及整个生育期 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 TN-N 渗漏量 (N , kg/hm^2)

Table 1 The amounts of $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ and TN-N percolated from soil during different growth stages or whole stage of rice

水稻生长期	$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 渗漏量		$\text{NO}_3^-\text{-N}$ 渗漏量		TN-N 渗漏量	
	N1	N2	N1	N2	N1	N2
苗期	0.33 ± 0.07 ab	0.53 ± 0.19 a	0.78 ± 0.20 a	0.72 ± 0.23 a	1.79 ± 0.48 a (44.0%)	1.49 ± 0.69 ab (32.5%)
分蘖期	0.62 ± 0.17 a	0.67 ± 0.27 a	0.18 ± 0.06 b	0.31 ± 0.08 b	0.70 ± 0.37 c (17.2%)	0.73 ± 0.22 bc (15.9%)
拔节期	0.36 ± 0.24 ab	0.49 ± 0.34 a	0.17 ± 0.11 b	0.23 ± 0.15 b	0.73 ± 0.47 bc (17.9%)	0.96 ± 0.49 bc (21.0%)
齐穗期后	0.11 ± 0.07 b	0.52 ± 0.10 a	0.35 ± 0.28 b	0.07 ± 0.02 b	0.85 ± 0.37 bc (20.9%)	1.40 ± 0.26 abc (30.6%)
总渗漏量	1.42 ± 0.46 B (35.0%)	2.21 ± 0.51 B (48.5%)	1.47 ± 0.58 B (36.2%)	1.33 ± 0.43 B (29.0%)	4.07 ± 1.05 A	4.57 ± 1.44 A

注：表中括号内数值为占 TN-N 总渗漏量的百分比；表中不同小写字母表示同一氮素形态下各组数据间的差异在 $P<0.05$ 水平显著；不同大写字母表示各氮素总渗漏量间差异在 $P<0.05$ 水平显著。

漏量之间并无明显差异。TN-N 渗漏也主要发生在苗期，渗漏量占总渗漏量的 32.5% ~ 44.0%。此外，齐穗期后 TN 渗漏也相对较多，占总渗漏量的 20.9% ~ 30.6%；分蘖期和拔节期的 TN-N 渗漏量则基本一致。整个生育期 TN 渗漏量占施氮量的 1.69% ~ 2.04%。

当施氮量由 $\text{N } 200 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 增至 $270 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 时，水稻各生育时期的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 渗漏量基本呈增加趋势。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 总渗漏量增加了 55.6%，但差异未达显著水

平($P>0.05$)。 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 在水稻各生育期的趋势表现并不一致。对 TN-N 而言，除苗期外，其他各生育期的 TN-N 渗漏量随施氮量增加基本呈增加趋势，但并未达显著水平($P>0.05$)。增加氮肥施用量加大了 TN-N 渗漏总量，增长比例为 12.3%。

2.3 水稻产量、干物质质量和氮素累积量、氮素利用效率

表 2 显示，当施氮量由 $\text{N } 200 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 增至 $270 \text{ kg}/\text{hm}^2$

表 2 各施氮量下水稻干物质质量、氮素累积量、产量及氮素利用效率

Table 2 Rice dry matter and nitrogen accumulation, grain yield and N utilization efficiency under different N applied

施氮量 (N , kg/hm^2)	干物质质量 (t/hm^2)	产量 (t/hm^2)	氮素累积量 (N , kg/hm^2)	氮同化效率 (N , kg/kg)	氮生理利用率 ($\text{kg}/\text{kg N}$)	氮肥表观利用率 (%)
200	16.8 ± 0.86 a	8.93 ± 0.38 a	175 ± 7.55 a	95.9 ± 4.90 a	50.9 ± 2.14 a	30.8 ± 3.78 a
270 (35%)	17.9 ± 0.69 a (6.55%)	9.28 ± 0.14 a (3.92%)	191 ± 7.67 a (9.14%)	93.9 ± 3.61 a (2.09%)	48.6 ± 0.74 a (4.52%)	28.6 ± 2.64 a (7.14%)

注：括号内百分数代表施肥量从 $\text{N } 200 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 增加至 $270 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 时，各参数的增加/降低比例；氮同化效率 = 干物质累积量/氮素累积量；氮生理利用率 = 产量/氮素累积量；氮肥表观利用率 = (施氮区水稻氮素累积量 - 未施氮区水稻氮素累积量)/氮肥施用量 $\times 100\%$ 。表中同列不同小写字母表示不同施氮处理间差异在 $P<0.05$ 水平显著。

时,水稻干物质量、氮素累积量和产量均有不同程度增加,但增幅不大,依次为6.55%、9.14%、3.92%。而氮同化效率、氮生理利用率和氮肥表观利用率则都有不同程度的下降,下降比例依次为2.09%、4.52%、7.14%,其中氮肥表观利用率下降比例最大。

3 结论与讨论

关于稻田渗漏液中主要无机氮素形态,目前尚无一致结果。有研究者认为稻田渗漏以 NO_3^- -N为主,也有人认为以 NH_4^+ -N为主。另外,也有报道称不同试验年份土壤渗漏液中的主要无机氮形态会发生互换^[8-9,15-16]。造成结果不一致的主要原因可能是由于土壤类型、施肥种类及用量、田间水管理、气候以及监测土壤深度等方面的差异所致。本研究中,在两种施氮水平下,20~40、40~60和60~80 cm土层渗漏液中的 NH_4^+ -N平均浓度均大于 NO_3^- -N平均浓度,且呈较大差异。而在80~120 cm土层两者值则很接近。说明,土壤 NH_4^+ -N渗漏主要集中在20~80 cm深处,随土壤深度增加,呈降低趋势。因此,稻田 NH_4^+ -N潜在渗漏风险不容忽视。20~80 cm土层渗漏液中以 NH_4^+ -N为主的原因可能是尿素施用后,高温促使脲酶活性增强,导致尿素很快分解,短时间内产生大量 NH_4^+ -N^[12],加之,2011年前半年太湖地区出现60年未遇的干旱,使地下水位下降,土壤含水量下降,尽管基肥施用前,已进行了灌水泡田,但是田面水下渗还是相对较快,从而使 NH_4^+ -N未来得及发生硝化反应而随水下渗。而在80~120 cm深处由于所监测土壤距离较大,加之土壤深度增加对 NH_4^+ -N渗漏有减弱作用,导致 NH_4^+ -N浓度降低幅度较大。苗期和分蘖期土壤各层均监测到相对较高的 NH_4^+ -N浓度,主要原因为40%和30%的尿素分别作为基肥和分蘖肥施用,而在这两个阶段水稻植株相对较小,氮吸收能力差,加之,尿素分解快,从而导致这两个时期的 NH_4^+ -N渗漏量较大。因此这两个时期的氮肥施用、管理尤为重要。

研究者认为在稻-麦轮作体系中,稻田渗漏水 NO_3^- -N主要来自麦季土壤残留的 NO_3^- -N,残留量高低决定了稻季 NO_3^- -N的渗漏量^[12,17]。另外,王德建等^[10,18]发现在稻-麦轮作体系中 NO_3^- -N渗漏主要发生在泡田插秧初期,且氮肥施用量增加明显增加了土壤渗漏液中 NO_3^- -N浓度,说明泡田插秧阶段土壤渗漏液中高浓度的 NO_3^- -N除来自于麦季土壤残留外,氮肥施入也可能造成早期土壤渗漏液中 NO_3^- -N浓度的增加。本研究中,在苗期初期,不施

氮处理除在20~40 cm和40~60 cm土层土壤渗漏液中检测到少量 NO_3^- -N,在60~80 cm和80~120 cm土壤深度并未监测到明显的 NO_3^- -N存在,说明,麦季土壤残留 NO_3^- -N的量不大。在60~80 cm和80~120 cm土壤深度,苗期渗漏液 NO_3^- -N浓度最大,而其他时期,土壤渗漏液中 NO_3^- -N浓度均较低且波动性相对较小。这可能是由于水稻移栽前灌水泡田后立即施入尿素,由于此时土壤中氧气相对较多导致一部分 NH_4^+ -N被硝化为 NO_3^- -N,随水很快下渗至土壤深处所致。在20~40 cm和40~60 cm土壤深度,拔节期渗漏液 NO_3^- -N浓度相对较大,主要原因可能是中期烤田发生在分蘖中后期及拔节期开始前,干湿交替加剧硝化反应,使大量 NH_4^+ -N被氧化为 NO_3^- -N^[4]。

另外,本研究中,在苗期初期,土壤各层均检测到相当高的TN-N浓度,且随施氮量增加呈增加趋势。一些研究者在对稻田氮素渗漏的研究中也报道了相同的趋势^[13,15,19],Zhu等^[19]认为渗漏水中TN-N浓度高的原因可能是由于水溶性有机氮的存在。纪雄辉等^[16]认为前期土壤渗漏液中监测到的高浓度TN-N可能是由于翻整土壤造成氮素淋溶增加的缘故。

由于本试验地区的地下水位基本在1 m左右,故土壤80~120 cm深度的氮素渗漏量反映了稻田氮素通过渗漏方式进入地下水的量。通过监测发现, NH_4^+ -N渗漏量以分蘖期为最高,而 NO_3^- -N渗漏量则主要以苗期为最多,TN-N在苗期阶段的渗漏量也相对较大。说明,应重点关注水稻生育前期的氮素施用与管理,氮肥施用不当会加剧对地下水的污染。本研究中穗肥在拔节期后至穗分化期前施用,由于此时水稻生物量较大、吸氮能力强,所以氮肥施用后很快被植物吸收,故穗肥在此时期的渗漏量应该相对较小,而事实上拔节期和齐穗期后的TN-N渗漏量之和却相对较大,可能是由于未被植物吸收的基肥、分蘖肥长时间下渗叠加所致。有关此方面的原因有待进一步研究。

对于氮肥用量对土壤氮素渗漏的影响,总体来说随土壤深度增加,施氮量对各形态氮素渗漏的影响逐渐减少。当施氮量由 $\text{N } 200 \text{ kg/hm}^2$ 增加35%至 270 kg/hm^2 ,而水稻产量仅增加了3.92%,但是,同时造成氮素利用率和肥料表观利用率的下降,下渗至地下水中的TN-N渗漏量增加了12.3%。由此可见,氮肥用量的增加加大了氮素渗漏的风险,易使更多的氮素进入大气和水体,对环境造成危害。

参考文献：

- [1] Qiao J, Yang LZ, Yan TM, Xue F, Zhao D. Nitrogen fertilizer reduction in rice production for two consecutive years in the Taihu Lake area[J]. *Agr. Ecosyst. Environ.*, 2012, 146: 103–112
- [2] 崔玉亭, 程序, 韩纯儒, 李荣刚. 苏南太湖流域水稻经济生态适宜施氮量研究[J]. *生态学报*, 2000, 20(4): 559–662
- [3] 朱兆良, 张绍林, 尹斌, 颜晓元. 太湖地区单季晚稻产量-氮肥施用量反应曲线的历史比较[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(1): 1–5
- [4] Zhao X, Xie YX, Xiong ZQ, Yan XY, Xing GX, Zhu ZL. Nitrogen fate and environmental consequence in paddy soil under rice-wheat rotation in the Taihu lake region, China[J]. *Plant Soil*, 2009, 319: 225–234
- [5] De Datta SK, Buresh RJ. Integrated nitrogen management in irrigated rice[J]. *Adv. Soil. Sci.*, 1989, 10: 143–169
- [6] 张维理, 武淑霞, 冀宠杰, Kolbe H. 中国农业面源污染形势估计及控制对策 I. 21 世纪初期中国农业面源污染的形势估计[J]. *中国农业科学*, 2004, 37(7): 1 008–1 017
- [7] 金相灿, 叶春, 颜昌宙, 丙相, 张永春, 汪小泉, 汪耀斌. 太湖重点污染控制区综合治理方案研究[J]. *环境科学研究*, 1999, 12(5): 1–5
- [8] 王胜佳, 王家玉, 陈义. 稻田土壤氮素淋失的形态及剖面分布特征[J]. *浙江农业学报*, 1997, 9(2): 57–61
- [9] 罗国良, 闻大钟, 沈善敏. 北方稻田生态系统养分渗漏规律研究[J]. *中国农业科学*, 2000, 33(2): 68–74
- [10] 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
- [11] 王小治, 尹微琴, 蔡玉琪, 封克, 朱建国. 施用不同尿素对稻季不同层次土壤溶液中氮形态所影响[J]. *生态环境学报*, 2009, 18(4): 1 516–1 521
- [12] 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
- [13] 田玉华, 尹斌, 朱兆良. 稻田氮素淋洗损失研究[J]. *安徽农业科学*, 2006, 34(2): 2 792–2 794
- [14] 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
- [15] Zhao X, Zhou Y, Min J, Wang SQ, Shi WM, Xing GX. Nitrogen runoff dominates water nitrogen pollution from rice-wheat rotation in the Taihu Lake region of China[J]. *Agr Ecosyst Environ*, 2012, 156: 1–11
- [16] 纪雄辉, 郑圣先, 石丽红, 廖育林. 洞庭湖区不同稻田土壤及施肥对养分淋溶损失的影响[J]. *土壤学报*, 2008, 45(4): 663–671
- [17] 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
- [18] 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
- [19] Zhu JG, Han Y, Liu G, Zhang YL, Shao XH. Nitrogen in percolation water in paddy fields with a rice/wheat rotation[J]. *Nutr. Cycl. Agroecosys.*, 2000, 57: 75–82

Effect of Fertilizer N on N Leaching at Different Soil Depths During Growth Periods of Rice

CHEN Gui¹, CHEN Ying², SHI Wei-ming^{1*}

(1 *Research Center of Non-point Source Pollution Control, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China*; 2 *College of Forest Resources and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China*)

Abstract: An in-situ observing experiment was carried to understand the effect of N application on N leaching of various depth of soil during different period of rice growth. The results showed 1) rice tillering stage had relatively higher averaged concentration of ammonium nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) in percolation water collected from soil depths of 20–40, 40–60, 60–80 and 80–120 cm. But nitrate nitrogen ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) and total N (TN-N) had relatively higher averaged concentrations during seedling stage and showed gradually decreased trend with soil depths; 2) the amount of TN-N percolated in 80–120 cm soil depth accounted for 1.69%–2.04% of N application rate which could presented the amount of N percolated into groundwater. Relatively higher amount of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ percolation happened during tillering stage. However, higher amounts of $\text{NO}_3^-\text{-N}$ and TN-N happened during seedling stage. The amounts of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ showed parallel level in TN-N percolated from soil; 3) increased N application rate decreased fertilizer N use efficiency and accelerated risk of N percolation in soil.

Key words: Rice growth stage, Nitrogen form, Nitrogen leaching, Soil depth, Excessive application of nitrogen fertilizer