

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2010.01.009

不同水肥处理对稻田土壤中 氮素剖面分布与氨挥发损失的影响

杨士红^{1,2} 彭世彰^{1,2} 徐俊增¹ 王朋峰³

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室 江苏 南京 210098 2. 河海大学节水研究所 江苏 南京 210098 ;
3. 山东金正生态工程股份有限公司 山东 临沂 276700)

摘要 对苏南地区不同水肥处理稻田土壤中铵态氮和硝态氮剖面分布、稻田氨挥发损失以及水稻地上干物质量及产量进行了研究。结果表明 稻田土壤中无机氮以铵态氮为主 铵态氮质量比随着土层深度的增加而降低 20 ~ 60 cm 深度土层中的铵态氮质量比相对稳定 随着水稻生育期的进行 稻田土壤中氨态氮质量比逐渐降低 稻田土壤中硝态氮质量比呈现上层低于下层的趋势 控制灌溉稻田施用控释肥减少了表层土壤中的铵态氮质量比以及底层土壤中的铵态氮和硝态氮质量比 降低了氮素损失的风险。控制灌溉和控释肥的使用 减少了稻田氨挥发损失 减少幅度达到 83.71 %。

关键词 控制灌溉 控释肥 铵态氮 硝态氮 氨挥发 稻田

中图分类号 S511 文献标识码 A 文章编号 1006-7647(2010)01-0040-05

Influences of different water and fertilizer treatments on distribution of nitrogen profiles and loss of ammonia volatilization in soils of paddy fields//YANG Shi-hong^{1,2}, PENG Shi-zhang^{1,2}, XU Jun-zeng¹, WANG Peng-feng³ 1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Institute of Water-Saving Irrigation, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Shandong Kingenta Ecological Engineering Co., Ltd., Linyi 276700, China)

Abstract : The distribution of ammonium nitrogen and nitrate nitrogen in soils, the loss of ammonia volatilization, the mass of dry materials and the rice yield in paddy fields under different water and fertilizer treatments in southern Jiangsu Province were analyzed. The results show that the major fraction of inorganic nitrogen in soils of the paddy fields is the ammonium nitrogen. The content of the ammonium nitrogen in soils decreases with the increase of the soil depth. The mass ratio of the ammonium nitrogen is relatively stable at the soil depth of 20-60 cm and decreases with the process of bearing time of the paddy. The mass ratio of the nitrate nitrogen in soils also decreases with the increase of the soil depth. The application of controlled fertilizer release in the paddy fields under controlled irrigation reduces the mass ratio of the ammonium nitrogen in the surface soil layers and the mass ratio of the ammonium nitrogen and nitrate nitrogen in the bottom soil layer, resulting in the decrease of the risk of nitrogen loss. The application of controlled irrigation and controlled fertilizer release reduces the loss of the ammonia volatilization in the paddy fields with a decrease by 83.71 %.

Key words : controlled irrigation; controlled fertilizer release; ammonium nitrogen; nitrate nitrogen; ammonia volatilization; paddy field

目前,我国氮肥年施用量达到 2 621 万 t^[1],但利用率一般只有 40% 左右^[2]。氮肥的过量施用在导致肥料利用率下降的同时,未被作物吸收的氮通过氨挥发、淋洗、径流等途径损失,对环境产生了现实和潜在的污染^[3-4]。太湖高施氮水稻种植区的上述情况尤为严重^[1,5],在保证水稻产量的同时,如何实现水肥高效利用和控污减排已成为水稻生产中迫切需要解决的问题。因此,既能提高氮肥利用率,又能减少氮素损失的控释肥料成为当前研究的热点。已有的水稻控释氮肥研究大多是针对淹水灌溉稻田^[6-7],节水灌溉条件下施用控释肥对水稻产量、土壤中氮素分布及氮素损失的影响等研究较少。本文主要研究节水灌溉条件下施用控释肥后稻田土壤中氮素的剖面分布特征、稻田氨挥发损失以及成熟期

水稻干物质质量及产量,旨在探讨有效减少稻田氮素损失的水肥高效利用模式,为农田节水高产、控污减排提供依据。

1 材料与方法

1.1 试区概况

试区位于河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室昆山试验研究基地内。试区属亚热带南部季风气候区,年平均气温 15.5℃,年降雨量 1097.1 mm,年蒸发量 1365.9 mm,日照时数 2085.9 h。当地习惯稻麦轮作,土壤为潴育型黄泥土,耕层土壤为重壤土。

1.2 试验设计

在水稻选种、育秧、移栽、种植密度、植保、用药等技术措施以及基础地力相同的条件下,试验采用裂区设计,主处理为 2 种灌水方式,即淹水灌溉(T)和控制灌溉(C),副处理为 2 种施肥方式,即农民习惯施肥(FFP)和控释肥(CRF)。4 个处理分别为 TF(T 和 FFP)、CF(C 和 FFP)、TC(T 和 CRF)、以及 CC(C 和 CRF),每个处理设 3 次重复,总共 12 个小区。每个小区面积为 150 m²,各小区之间用砖砌混凝土隔离,田埂向地下内嵌 50 cm 深的塑料防渗膜,防止小区间的水量交换。

前茬作物为冬小麦,供试水稻品种为单季晚粳(嘉 04-33),2008 年 6 月 25 日移栽,平均密度为 23.43 万穴/hm²,每穴 3~4 株,10 月 25 日收割。其中,FFP 处理在 6 月 25 日、7 月 11 日、7 月 23 日和 8 月 10 日分别施基肥、蘖肥、壮苗肥及穗肥,施肥量(折合成纯氮)分别为 107.55 kg/hm²,121.8 kg/hm²,104.4 kg/hm² 和 69.6 kg/hm²,共 403.35 kg/hm²;CRF 处理作为基肥一次施入,施肥量(折合成纯氮)为 180 kg/hm²,控释尿素由山东金正大公司提供。各处理施用钾肥(K₂O)56.25 kg/hm² 和磷肥(P₂O₅)56.25 kg/hm²。

淹水处理除分蘖末期晒田外,从水稻插秧开始一直维持 30~50 mm 水层,直到黄熟期后自然落干至收割。控制灌溉处理是在秧苗本田移栽后的返青期田面保留 5~25 mm 薄水层,以后的各个生育期除生产性用水外,灌溉后田面不保留灌溉水层,以根层土壤水分作为控制指标,确定灌水时间和灌水定额^[8]。

1.3 观测内容及方法

a. 在各处理小区用土钻分层采集土壤样品(0~10 cm,10~20 cm,20~30 cm,30~40 cm 和 40~60 cm)施氮肥后每隔 2 d 取样 1 次,共取 5 次;然后每隔 4 d 取样 1 次,共取 2 次;以后每隔 7 d 取样 1 次,稻季始末各取样 1 次。土样中 NH₄⁺-N(铵态

氮)质量比测定采用 KCl 浸提-靛酚蓝比色法,NO₃⁻-N(硝态氮)质量比测定采用酚二黄酸比色法^[9]。

b. 在各生育期每个处理取 2 株有代表性的植株,分别将根、茎、叶、鞘与穗分装,放入烘箱内 105℃杀青(30 min),70℃烘干 48 h 后称重。各小区单打单收,晒干扬净后测定实际产量。

c. 采用通气法测定氮挥发^[10]。试验中将通气法的氮挥发收集管高度改为 20 cm,以适用于水田。取样时间为:施肥后第 1 周,每天取样 1 次;第 2~3 周,视测到的挥发数量多少,每 1~3 d 取样 1 次,以后取样间隔可延长到 1~2 周,直到水稻收获。

2 结果与讨论

2.1 不同水肥处理对稻田土壤中 NH₄⁺-N 质量比剖面分布的影响

图 1 为不同水肥处理稻田土壤中 NH₄⁺-N 质量比剖面分布特征。由图 1 可以看出,移栽前 10~20 cm 土层中 NH₄⁺-N 质量比最高,表层次之。由于 NH₄⁺-N 容易被土壤吸附,不容易随水向深层土壤移动,从水稻返青期到黄熟期各处理土壤中 NH₄⁺-N 质量比随土层深度增加而降低,从表层到 20 cm 土层 NH₄⁺-N 质量比急剧下降,20 cm 以下 NH₄⁺-N 质量比基本趋于稳定。各层土壤中 NH₄⁺-N 质量比由于水稻生长阶段的吸收以及各种损失导致随着生育期进行也呈现降低趋势。在 0~10 cm 土层中的 NH₄⁺-N 质量比,除 TF 处理最大值出现在拔节期外,其他各处理最大值均出现在返青-分蘖期,最小值均出现在黄熟期;TF 和 CF 处理在最大值后逐渐降低,TC 和 CC 处理也呈现降低趋势,但是在抽穗开花期出现小幅度升高;各处理的 NH₄⁺-N 质量比最大值为 TF>CF>TC>CC,各处理之间不存在显著差异(P>0.05)。在 10~20 cm 土层中的 NH₄⁺-N 质量比,各处理最大值均出现在返青-分蘖期,黄熟期出现最小值,随生育期进行呈现逐渐降低趋势,使用控制灌溉的 TF 和 TC 处理在抽穗开花期 NH₄⁺-N 质量比出现小幅度升高;全生育期 NH₄⁺-N 质量比平均值为 TF>CF>TC>CC,但各处理之间无显著差异(P>0.05)。在 20~30 cm 土层中的 NH₄⁺-N 质量比,除 TF 处理最大值出现在拔节期外,其他各处理最大值均出现在返青-分蘖期,最小值出现在黄熟期;各处理 NH₄⁺-N 质量比出现最大值后都呈现逐渐变小趋势,CF、CC 处理在乳熟期出现小幅度升高,全生育期 NH₄⁺-N 质量比平均值为 TF>TC>CF>CC,各处理之间无显著差异(P>0.05)。在 30~40 cm 土层中的 NH₄⁺-N 质量比,TF 处理最大值出现在拔节期,其

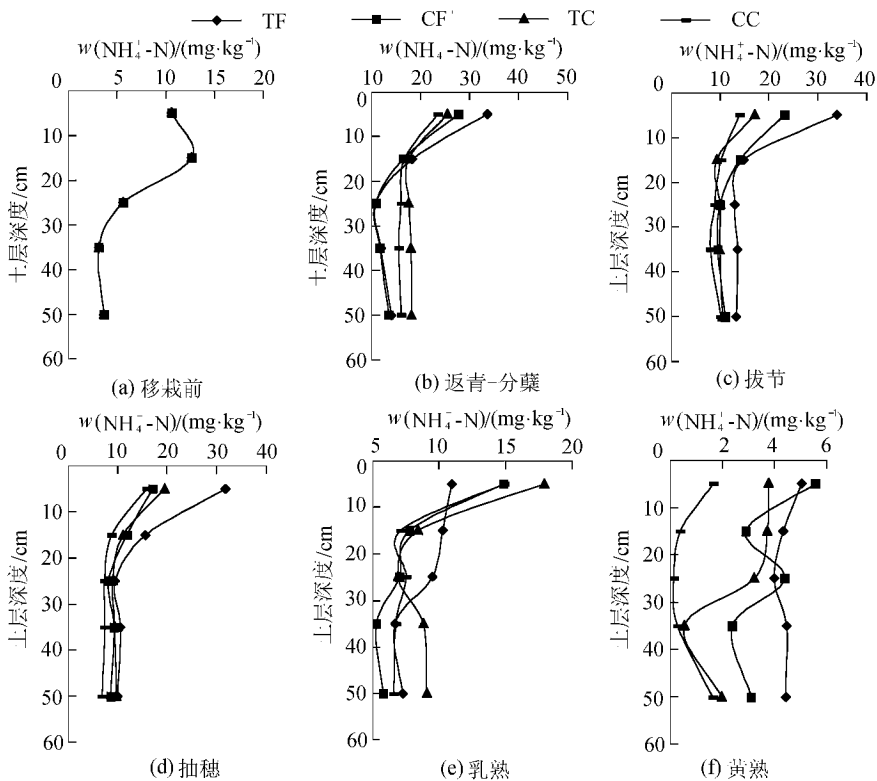


图1 不同水肥处理稻田土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量比剖面分布特征(江苏昆山 2008)

他各处理最大值均出现在返青-分蘖期,最小值也均出现在了黄熟期,各处理在出现最大值后都呈现逐渐降低趋势;全生育期 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量比平均值 TF 处理为 9.44 mg/kg,CF 处理为 7.65 mg/kg,TC 处理为 9.34 mg/kg,CC 处理为 7.61 mg/kg,各处理之间不存在显著差异 ($P > 0.05$)。在 40 ~ 60 cm 土层中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量比,各处理最大值均出现在返青-分蘖期,在黄熟期质量比出现最小值,最大值后呈现逐渐变小趋势;全生育期 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量比平均值为 TF > TC > CF > CC,各处理之间无显著差异 ($P > 0.05$)。

控制灌溉稻田施用控释肥后各层土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量比都小于淹水灌溉稻田,但均不存在显著差异,这种水肥利用模式在保证水稻生长营养供应的同时,降低了 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 淋溶及径流损失的风险。

2.2 不同水肥处理对稻田土壤中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 质量比剖面分布的影响

图2为不同水肥处理稻田土壤中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 质量比剖面的分布特征。由图2可以看出,移栽前表层土壤中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 质量比最高,达到 4.44 mg/kg;30 ~ 40 cm 土层中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的质量比也很高,为 4.34 mg/kg;其他土层 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的质量比较低。这是因为麦季的旱作管理导致表层土壤中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 质量比较高, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 随稻季的降雨下移到 30 ~ 40 cm 土层中。在 0 ~ 10 cm 土层中,FFP 处理 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 质量比最大值出现在抽穗开花期,CRF 处理出现在返青-分

蘖期;全生育期 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 质量比平均值为 TF > CF > CC > TC,其中 TF 处理为 1.16 mg/kg,TC 处理为 0.49 mg/kg,各处理之间差异不显著 ($P > 0.05$)。在 10 ~ 20 cm 土层中的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 质量比,除 TC 处理最大值出现在拔节期外,其他各处理均出现在返青-分蘖期,TC 处理最小值出现在抽穗开花期,其他处理最小值出现在乳熟期;全生育期 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 质量比平均值为 TF > CF > TC > CC,各处理之间不存在显著差异 ($P > 0.05$)。在 20 ~ 30 cm 土层中的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 质量比,FFP 处理最大值出现在抽穗开花期,CRF 处理最大值出现在拔节期;全生育期 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 质量比平均值为 CF > TC > CC > TF,各处理之间 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 质量比相差不大,无显著差异 ($P > 0.05$)。在 30 ~ 40 cm 土层中的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 质量比,TF 处理最大值出现在黄熟期,其他处理最大值均出现在生育前期的返青-分蘖和拔节期;全生育期 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 质量比平均值为 TF > TC > CF > CC,相同施肥处理条件下控制灌溉稻田的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 质量比要小于淹水灌溉稻田的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 质量比,TF 处理为 1.04 mg/kg,CF 处理比 TF 处理小 29.4%,TC 处理为 1.13 mg/kg,CC 处理比 TC 处理小 58.9%。在 40 ~ 60 cm 土层中的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 质量比,TF,CF 和 TC 处理最大值均出现在拔节期,CC 处理在返青-分蘖期达到最大值;全生育期 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 质量比平均值为 TF > TC > CF > CC,相同施肥处理条件下控制灌溉稻田的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 质量比小于淹水灌溉稻田的

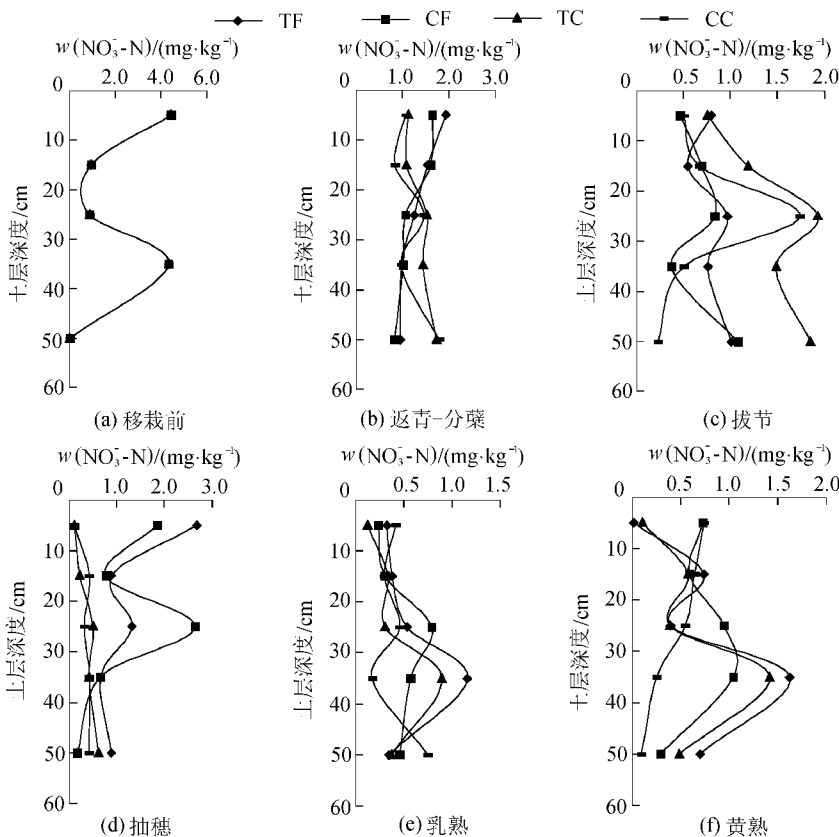


图2 不同水肥处理稻田土壤中 NO_3^- -N 质量比剖面分布特征(江苏昆山 2008)

NO_3^- -N 质量比,FFP 处理减少 21.2% ,CRF 处理减少 35.6%。

水稻泡田-返青期的有水层管理导致返青-分蘖期表层土壤中的 NO_3^- -N 质量比降低,而基肥氮的施用增加了土壤中的 NO_3^- -N 质量比,但各层土壤中的 NO_3^- -N 质量比明显低于相应土层的 NH_4^+ -N 质量比。CC 处理稻田土壤中的 NO_3^- -N 质量比除拔节期外,其他生育期都要小于 FFP 处理。CC 处理在 10~60 cm 土层中的 NO_3^- -N 质量比从抽穗期开始一直处于最低水平。 NO_3^- -N 带有负电荷,不易被土壤胶体所吸附,在淹水灌溉条件下很容易随水向下层土壤移动,并造成地下水污染。控制灌溉的无水层管理减少了 NO_3^- -N 质量比向下层的迁移,相同肥料处理条件下控制灌溉稻田土壤 40~60 cm 土层中 NO_3^- -N 质量比要低于淹水灌溉稻田土壤中的 NO_3^- -N 质量比,控释肥施用进一步减少了根系层以下土壤中 NO_3^- -N 质量比,CC 处理在 40~60 cm 土层中的 NO_3^- -N 质量比最少,降低了 NO_3^- -N 淋溶损失的风险。

2.3 不同水肥处理稻田氮挥发损失量

稻田氮挥发量主要发生在水稻生育前中期的 6~8 月份,FFP 处理在这 3 个月的氮挥发量占全生育期氮挥发总量的 98.37% ;CRF 处理也都达到了 93.73%。这主要是因为施肥全部分布在这 3 个月,

且与苏南地区在这 3 个月气温较高有关。FFP 处理每次施肥后 1 周的氮挥发损失量之和占稻季总挥发量的 85.25% 以上,这与 Lin 等^[11]的结论一致。CRF 处理在施肥后 1 周的氮挥发损失量只占稻季总挥发量的 22.64% ,施肥后 1 个月的氮挥发损失量占总挥发量的 76.90%。由此可以看出,施用常规肥料的稻田在施肥后 1 周是氮挥发损失的高峰期,从而导致大量肥料的流失,控释肥料由于减缓了养分的释放,从而避免了施肥后 1 周的氮挥发高峰,减少了肥料的氮挥发损失,提高了肥料的利用率。表 1 为不同水肥处理稻田氮挥发损失量。

表 1 不同水肥处理稻田氮挥发损失量

处理方式	氮损失量/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	氮损失率/%
TF	145.64	36.11
CF	125.27	31.06
TC	33.30	18.50
CC	23.73	13.18

注:氮损失率表示氮损失量占稻季施肥量的比例。

从表 1 可看出,TF 处理氮挥发损失量最大,为 $145.64 \text{ kg}/\text{hm}^2$,占当季氮肥施用量的 36.11% ;CRF 处理稻田氮挥发量要远小于常规施肥稻田,CC 处理氮挥发损失量最小,为 $23.73 \text{ kg}/\text{hm}^2$,占当季氮肥施用量的 13.18% ,与 TF 处理相比减少了 83.71%。控释肥和控制灌溉模式相结合的水肥联合利用模式在节水的同时,大幅度减小了稻田的氮挥发损失,提

高了稻田肥料利用率,减少了对环境的污染。

2.4 不同水肥处理稻田水稻地上干物质量及产量

表 2 为不同水肥处理稻田水稻成熟期地上干物质量与产量。由表 2 可知,相同灌溉方式下,CC 处理成熟期水稻地上干物质量比 TC 处理多 12.6%,TC 和 TF 处理干物质量差异不显著。节水灌溉条件下,适当的氮肥投入促进了干物质的生长和累积,生育后期仍能保证足够的光合产物。相同施肥措施下,控制灌溉处理生育末期地上干物质量高于淹水灌溉处理生育末期地上干物质量,CC 和 CF 处理生育末期地上干物质量分别比 TC 和 TF 处理生育末期地上干物质量多 24.6%和 4.05%,FFP 处理差异不显著,说明水分亏缺条件下高氮肥的施入不利于水稻干物质量的累积。

表 2 不同水肥处理稻田水稻成熟期地上干物质量及产量 kg/hm²

处理方式	地上干物质量	产量
TF	11 756.36	7 200.85
CF	12 232.24	6 996.21
TC	11 055.94	6 387.21
CC	13 771.99	5 859.39

相同灌溉方式下,CRF 处理与 FFP 处理相比产量下降,但差异不显著($P > 0.05$)。虽然 CRF 处理施氮量比 FFP 处理减少 55.4%,但地上干物质量并未出现减少,且 CC 处理的地上干物质量最大,故产量的降低主要与试验中控释尿素的释放时间、施入方式有关,采用基肥一次性施入后氮素释放时间比水稻需氮期短,生育后期肥力供应不足导致产量降低。因此,要改进控释尿素的释放特性以适应苏南地区水稻的吸氮特点。在减少氮素施用量的情况下保证水稻产量,提高氮素利用率,减少氮素损失对环境的污染。

3 结 论

a. 稻田土壤中无机氮以 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 为主; $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 质量比随着土层深度的增加而降低,20 ~ 60 cm 土层中的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 质量比相对稳定,随着生育期的进行土层中的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 质量比逐渐降低。稻田土壤中的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 质量比呈现上层低于下层的趋势。相同肥料处理条件下,控制灌溉减少了表层土壤中的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 质量比以及 40 ~ 60 cm 土层中的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 质量比,减小了稻田氮素氨挥发损失、径流损失以及淋溶损失的风险。节水灌溉条件下控释肥的施用在保证水稻营养供给的同时,进一步减小了氮素损失的风险。

b. 控释肥料由于减缓了养分的释放,从而避免

了施肥后 1 周的氮挥发高峰。淹水灌溉和农民习惯施肥使用的稻田稻季氮挥发损失总量最大,控释肥稻田稻季的氮挥发损失要远小于常规施肥稻田稻季的氮挥发损失,其中,控制灌溉和控释肥使用的稻田氮挥发损失最小,为 23.73 kg/hm²,占当季氮肥施用量的 13.18%,与淹水灌溉和农民习惯施肥使用的稻田相比氮挥发损失减少了 83.71%。这种水肥联合利用模式在节水的同时,减小了稻田的氮挥发损失。

c. 相同施肥处理条件下,与淹水灌溉相比,控制灌溉促进了干物质的生长和积累,有利于水稻对于氮素的吸收和利用,控制灌溉和控释肥使用的稻田地上干物质量最大,控释肥处理的水稻产量有所下降,但差异不显著,主要与控释肥氮素释放时间较水稻需氮时间短、后期氮素供应不足有关。

参考文献:

[1] JU Xiao-tang, XING Guang-xi, CHEN Xin-ping, et al. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2009, 106: 3041-3046.

[2] 朱兆良, DAVID N, 孙波. 中国农业面源污染控制对策[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2006: 1-6.

[3] 沃飞, 陈效民, 方, 等. 太湖地区两种典型水稻土中氮、磷迁移转化的研究[J]. 土壤通报, 2007, 38(6): 1058-1063.

[4] 王超. 土壤及地下水污染研究综述[J]. 水利水电科技进展, 1996, 16(6): 1-4.

[5] 陈荷生. 太湖流域的水资源保护[J]. 水利水电科技进展, 2003, 23(3): 10-13.

[6] 谢春生, 唐拴虎, 徐培智, 等. 一次性施用控释肥对水稻植株生长及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(2): 177-182.

[7] 阴红彬, 韩晓日, 宋正国, 等. 水稻专用控释肥的养分释放规律及对养分利用的影响[J]. 中国农学通报, 2006, 22(2): 234-236.

[8] 彭世彰, 俞双恩, 张汉松, 等. 水稻节水灌溉技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998: 1-7, 18-45.

[9] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 1999: 50-52, 54-56.

[10] WANG Zhao-hui, LIU Xue-jun, JU Xiao-tang, et al. Ammonia volatilization loss from surface-broadcast urea: comparison of vented and closed-chamber methods and loss in winter wheat-summer maize rotation in North China Plain[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2004, 35: 2917-2939.

[11] LIN De-xi, FAN Xiao-hui, HU Feng, et al. Ammonia volatilization and nitrogen utilization efficiency in response to urea application in rice fields of the Taihu Lake Region, China[J]. Pedosphere, 2007, 17(5): 639-645.

(收稿日期: 2009-04-21 编辑: 方宇彤)