

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2020.04.016

张敏, 姚元林, 曾科, 等. 配施有机肥减少太湖地区稻田土壤硝态氮淋失的机理研究. 土壤, 2020, 52(4): 766–772.

配施有机肥减少太湖地区稻田土壤硝态氮淋失的机理研究^①

张敏¹, 姚元林², 曾科³, 李冰洋⁴, 田玉华³, 尹斌^{3*}

(1 洛阳师范学院生命科学学院, 河南洛阳 471023; 2 南京信息工程大学应用气象学院, 南京 210044; 3 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 4 河南省煤炭地质勘查研究总院, 郑州 450052)

摘要: 采用田间小区试验, 设计两种无机氮肥梯度, 研究配施有机肥对太湖地区水稻季土壤氮素淋失的影响, 并从水/土 NO_3^- -N 迁移研究其对土壤 NO_3^- -N 淋失的影响机制。设置的处理有: 对照(CK)、常规施氮(CT)、减氮施肥(RT)、常规施氮下配施有机肥(CT+M)、减氮施肥下配施有机肥(RT+M)。结果发现: ①除去 2015 年的 CT 处理, 两年里 30 cm 处配施有机肥和单施无机肥处理之间的土壤 NO_3^- -N 淋失均没有显著差异; 80 cm 处, CT+M 处理的 NO_3^- -N 淋失较 CT 处理减少 41%, RT+M 处理较 RT 处理减少 12%。②无机肥处理的田面水 NO_3^- -N 和土壤淋溶水 NO_3^- -N 之间存在极显著线性相关, 但是有机肥的参与会削弱二者之间的相关性。③配施有机肥有利于土壤有机质含量的提高, CT+M 处理的有机质含量较 CT 处理提高 6.7%。0~20 cm 土层, 配施有机肥处理土壤 NO_3^- -N 含量明显高于无机肥处理; 而 20~40 cm 土层, 二者之间的土壤 NO_3^- -N 含量差异很小。这表明配施有机肥是通过提高土壤有机质含量, 增强土壤表层对 NO_3^- -N 的吸附固持, 从而抑制土壤 NO_3^- -N 的向下迁移, 而不是通过减少田面水 NO_3^- -N 浓度来实现的。此外, 配施有机肥还可以提高土壤质量和水稻产量, 促进作物对土壤氮素的吸收, 这也是稻田土壤 NO_3^- -N 淋失减少的一个原因。研究结果为减少农田土壤 NO_3^- -N 淋失提供了科学依据。

关键词: 水稻; 有机肥; 淋溶; 机制; 太湖地区

中图分类号: S143.1; S153.5 **文献标志码:** A

Study on Mechanism of Reducing Nitrate Leaching with Organic Addition from Paddy Field in Taihu Lake Region

ZHANG Min¹, YAO Yuanlin², ZENG Ke³, LI Bingyang⁴, TIAN Yuhua³, YIN Bin^{3*}

(1 College of Life Science, Luoyang Normal University, Luoyang, Henan 471023, China; 2 College of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Technology, Nanjing 210044, China; 3 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 4 Henan Province Research Institute of Coal Geological Prospecting, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: Field plot experiment with two nitrogen (N) applying rates was conducted to study the effect of organic addition on N leaching in rice season of Taihu Lake Region, and the mechanism was also studied through nitrate (NO_3^- -N) migration of water and soil. The designed treatments included no nitrogen (CK), conventional chemical N fertilizer (CT, N 300 kg/hm²), reducing N (RT, N 225 kg/hm²), CT+ rapeseed cake fertilizer (CT+M, M 2 250 kg/hm²), RT+rapeseed cake fertilizer (RT+M). The results showed that: 1) There was no significant difference in soil NO_3^- -N leaching between organic addition and inorganic fertilizer treatments at 30 cm depth during the two rice seasons of 2014 and 2015 except CT treatment in 2015. NO_3^- -N leaching at 80 cm depth in CT+M was 41% lower than that in CT, and RT+M produced 12% lower NO_3^- -N leaching loss compared to RT. 2) Floodwater NO_3^- -N under chemical N treatments was significant correlated with soil NO_3^- -N leaching, but the involvement of organic fertilizer weakened the correlation. 3) Organic addition increased soil organic matter content (SOM), and CT+M achieved 6.7% higher than CT. Organic N treatments showed higher soil NO_3^- -N content at 0–20 cm layer compared to chemical N treatments. And soil NO_3^- -N content at 20–40 cm layer differed little between organic N and chemical N treatments. These indicated that organic addition enhanced the absorption and fixation of NO_3^- -N by soil through the improved SOM and thus

①基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFD0200104)资助。

* 通讯作者(byin@issas.ac.cn)

作者简介: 张敏(1990—), 女, 河南周口人, 博士, 讲师, 主要从事土壤氮素转化与损失机理及其环境污染控制技术的研究。E-mail: 792700705@qq.com

inhibited the migration of NO_3^- -N to deep soil. The reduced NO_3^- -N leaching under organic addition was not achieved by reducing floodwater NO_3^- -N concentration. Additionally, organic addition improved soil quality and rice yield, promoted crop N uptake, and thus could also explain the reduced NO_3^- -N leaching loss. The results provide scientific basis for decreasing NO_3^- -N leaching in farmland.

Key words: Rice; Organic fertilizer; N leaching; Mechanism; Taihu Lake region

稻田是我国最主要的农业土地利用方式之一,我国 65% 以上的人口都是以稻米为主食^[1]。为了确保水稻最大生产力,农民通常施用过量的无机氮肥。未被作物吸收利用且超过土壤固定吸附的氮会通过氨挥发、淋溶、径流和硝化-反硝化等途径损失到环境中,引起环境质量下降^[2-3]。其中氮淋失是农田氮素损失的重要途径之一,我国农田总氮平均表观淋失率为 2.2%^[4]。土壤氮淋失不仅降低稻田氮肥利用率,还会危害周围水体的环境质量^[5]。近年来随着地表水和地下水质的恶化,稻田氮淋溶损失也一直是世界所关注的问题。

无机氮肥过量施用是导致农田土壤氮淋失的重要原因^[6]。施入土壤的氮肥在土壤微生物的作用下,转化为硝态氮和亚硝态氮,因其不易被土壤所固定,且极易溶于水,因此易随土壤水分的迁移而移动,向下渗漏产生氮淋失。硝酸盐淋失是农田土壤氮素淋失的主要形式^[7]。据统计,水田中 NO_3^- -N 的平均淋失量为 6.3 kg/hm^2 ^[4]。土壤 NO_3^- -N 淋失会引起地下水硝酸盐污染,威胁人体健康^[8]。潘田和张幼宽^[9]对太湖流域浅层地下水硝酸盐浓度和氮肥用量进行统计分析,发现二者之间存在正相关关系。过量 NO_3^- -N 进入人体后,能通过酶系统被还原为亚硝态氮,引发高铁血红蛋白病,尤其是婴幼儿,对此更为敏感。因此减少农田土壤 NO_3^- -N 淋失对保障饮用水安全有着重要意义。

和无机肥相比,配施有机肥能够促进作物对氮的吸收,有效降低土壤氮淋失^[10-11]。土壤氮淋失主要和田面水、土壤的氮含量有关。有研究认为配施有机肥能够降低田面水 NO_3^- -N 浓度,从而降低土壤氮淋失^[12];也有研究认为配施有机肥能提升土壤有机质含量,增加对 NO_3^- -N 的固持作用,进而阻碍了 NO_3^- -N 向下移动^[13-14]。但是关于有机肥降低稻田氮淋失的具体作用机制还不甚清晰,因此还需进一步的研究。太湖流域地处长江三角洲中心,是我国水稻种植的主要地区之一。该地区稻田高氮投入特征明显,据统计,太湖流域单季水稻平均施氮量为 300 kg/hm^2 ^[15]。过多氮肥投入以及不合理的施用方式导致大量氮素损失,威胁周围环境质量。潘田和张幼宽^[9]对太湖流域长兴

县 43 个浅层地下水样进行了分析,发现硝酸盐超标率达 16%,主要分布在农业集中区。因此本研究在太湖地区开展田间试验,探讨配施有机肥对稻田土壤氮淋失的影响机制,为减少该地区土壤 NO_3^- -N 淋失提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点与土壤基本性状

田间试验于中国科学院常熟生态农业实验站($31^\circ 32' 93'' \text{ N}$, $120^\circ 41' 88'' \text{ E}$)进行。该站位于太湖地区,属亚热带季风气候,年平均气温 15.5°C ,年平均降水量 $1\ 038 \text{ mm}$ 。供试土壤为湖积物发育的潜育型水稻土(乌栅土),表层土(0 ~ 20 cm)基本性质: pH 7.35,有机质 35 g/kg ,全氮 2.09 g/kg ,全磷 0.93 g/kg ,阳离子交换量 17.7 cmol/kg 。

1.2 试验设计

试验包括 2014 年和 2015 年两个水稻季,设有 5 个处理,分别为:①对照(CK);②常规施肥(CT);③减氮处理(RT);④常规配施有机肥(CT+M);⑤减氮配施有机肥(RT+M)。氮肥以尿素(含 N 460 g/kg)形式施入,基肥、分蘖肥、穗肥的施肥比例为 4 : 2 : 4,对照不施氮肥。磷肥为过磷酸钙(含 P_2O_5 120 g/kg),钾肥为氯化钾(含 K_2O 600 g/kg),磷肥、钾肥和有机肥均作为基肥一次性施入,具体施肥见表 2。用于试验的有机肥为腐熟的菜籽饼肥(菜子饼与水混合,厌氧发酵 30 d),含水率为 70%,含氮量(干重)为 60.7 g/kg ,含磷(干重) 8.8 g/kg ,含钾(干重) 12.7 g/kg ,有机碳(干重)含量为 504 g/kg 。

试验采用的水稻为南粳 46,栽插株行间距为 $20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ 。试验小区面积为 42 m^2 ($6 \text{ m} \times 7 \text{ m}$),随机区组排列,重复 3 次。小区之间设有田埂并用塑料薄膜包被,各小区设置独立的排灌沟,以防止串水、串肥。所有处理肥料均为表层均匀撒施,杂草和病虫害管理与当地常规管理一致。除烤田外,田间始终保持 3 ~ 5 cm 的田面水,直至收获前一周左右。水稻收获日期分别为 2014 年 11 月 5 日和 2015 年 11 月 9 日。

表 1 稻季不同处理的施肥量(kg/hm²)
Table 1 Fertilizer application under different treatments during rice season

处理	菜籽饼肥	基肥		分蘖肥		穗肥		总用量	
		N : P ₂ O ₅ : K ₂ O		N : P ₂ O ₅ : K ₂ O		N : P ₂ O ₅ : K ₂ O		N : P ₂ O ₅ : K ₂ O	
CK		0 : 90 : 120		0 : 0 : 0		0 : 0 : 0		0 : 90 : 120	
CT		120 : 90 : 120		60 : 0 : 0		120 : 0 : 0		300 : 90 : 120	
RT		90 : 90 : 120		45 : 0 : 0		90 : 0 : 0		225 : 90 : 120	
CT+M	2 250	120 : 90 : 120		60 : 0 : 0		120 : 0 : 0		300+41 : 90 : 120	
RT+M	2 250	90 : 90 : 120		45 : 0 : 0		90 : 0 : 0		225+41 : 90 : 120	

1.3 水样、植株样和土样采集、分析与数据处理

本研究利用陶瓷头提取器法采集土壤水溶液^[16]。陶瓷头微孔直径约为 2 μm, 主体为圆柱体, 高 5 cm, 内径 2 cm, 管中插入抽取水样的塑料软管, PVC 管与土壤间灌入泥浆, 以保证无缝隙。每个小区预先埋设一组多孔陶杯, 深度分别为 30 cm 和 80 cm。水稻生育期内, 每隔 10~20 d, 利用真空泵采集不同深度的土壤水溶液 1 次, 然后贮存于 -20 °C 的冰箱内备测。通过土壤水分垂直渗漏量和土壤水溶液中的氮素浓度来估算土壤氮素淋溶损失量。在水稻生育期内淹水条件下, 土壤水分垂直渗漏速率平均为 5 mm/d^[17]。利用靛酚蓝比色法测定土壤水溶液中 NH₄⁺-N 的浓度, 紫外分光光度法测定土壤水溶液中 NO₃⁻-N 的浓度, 碱性过硫酸钾紫外分光光度法测定土壤水溶液中总氮浓度^[18]。氮素渗漏量计算公式为: $P = C \times t \times 5 \times 10^{-2}$, 式中: P 为氮素淋失量(kg/hm²); C 为 30 cm 或 80 cm 深度氮素淋失的平均浓度(mg/L), t 为水稻移栽至收获之间的淹水天数(d)。

淋溶水采集的同时收集田面水样品, 用于田面水中 NO₃⁻-N 浓度的测定。为了尽可能抵消取样误差, 在每个小区均设置 5 个取样点来收集田面水样品。同一小区采集的水样混匀后经 0.45 μm 微孔滤膜过滤, 利用紫外分光光度法测定 NO₃⁻-N 含量^[18]。

水稻成熟后, 人工收割 6 m²用以计产; 另取一份考种样, 烘至恒重后粉碎, 测定其总氮含量。植株吸氮量为植株干重与总氮含量之积。作物生长期以及作物收获后, 利用对角线取样法, 每个小区人工采集 0~20 cm 和 20~40 cm 土层 5 点, 混为 1 个样品, 之后贮存于 -20 °C 的冰箱内备测。测样时先将土样解冻, 然后去除土壤样品中的植物根、石砾及其他杂质后混匀, 称取 6~10 g 鲜土, 用 50 ml 2 mol/L 氯化钾溶液振荡浸提 1 h(振荡机转速>150 r/min), 之后过滤, 用靛酚蓝比色法和紫外分光光度法分别测定土壤 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量, 同时测定土壤含水率^[18]。水稻收获后的土样风干后, 研磨过 100 目筛, 用以测定土壤有机质(SOM)和全氮(TN)。土壤 SOM 和 TN 含量的测定方法分别为重铬酸钾容量法和凯氏定氮法。

试验数据使用 SPSS19.0 分析, Origin 9.1 作图。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理的土壤氮淋失量

土壤氮淋失量随土壤深度的增加而减少, 30 cm 处氮淋失量高于 80 cm 处。土壤氮淋失以 NO₃⁻-N 为主, NO₃⁻-N 淋失量占总氮淋失量的 42%~75%, 而 NH₄⁺-N 仅占 8%~26%。就土壤 NH₄⁺-N 淋失而言, 两种深度下不同施肥处理间均没有显著差异。

表 2 不同土壤深度(30 cm 和 80 cm)下不同处理的土壤氮淋失量(kg/hm²)
Table 2 N leaching loss under different treatments at 30 cm and 80 cm depths

时间	处理	NH ₄ ⁺ -N 淋失量		NO ₃ ⁻ -N 淋失量		总 N 淋失量	
		30 cm	80 cm	30 cm	80 cm	30 cm	80 cm
2014 年	CK	0.92 b	0.63 b	3.58 b	1.36 c	4.80 b	2.36 c
	RT	1.64 a	1.05 ab	5.55 a	2.67 ab	8.35 a	5.10 ab
	CT	1.39 a	1.04 ab	6.55 a	3.22 a	9.75 a	6.52 a
	RT+M	1.75 a	0.87 ab	6.06 a	2.17 b	9.07 a	4.32 b
	CT+M	1.57 a	1.23 a	5.70 a	2.08 b	8.90 a	5.53 ab
2015 年	CK	0.48 b	0.45 a	2.65 c	2.01 c	5.17 c	3.25 d
	RT	1.07 a	0.86 a	4.63 b	4.16 b	8.18 b	7.30 b
	CT	0.98 a	0.92 a	6.10 a	5.49 a	11.1 a	9.47 a
	RT+M	0.75 a	0.81 a	4.70 b	3.88 b	8.38 b	6.26 bc
	CT+M	1.09 a	0.86 a	3.72 b	3.12 b	7.01 b	5.95 c

注: 同列不同小写字母表示同一时间不同处理间差异显著($P < 0.05$), 下同。

对于土壤 NO_3^- -N 淋失, 30 cm 处, 两年里配施有机肥和无机肥处理之间均没有显著差异(不包括 2015 年的 CT 处理)。80 cm 处, 两年里 CT 处理的 NO_3^- -N 淋失平均值为 4.4 kg/hm^2 , 显著高于 CT+M 处理的 2.6 kg/hm^2 ($P < 0.05$); RT 处理的平均值为 3.4 kg/hm^2 , 相比于 RT+M 处理提高了 13%。

土壤总氮淋失量结果与 NO_3^- -N 淋失量结果类似。30 cm 处, 除去 2015 年的 CT 处理, 两年里配施有机肥和无机肥处理之间均没有显著差异 ($P > 0.05$)。80 cm 处, CT+M 处理的总氮淋失平均值为 5.7 kg/hm^2 , 较 CT 处理减少了 28% ($P < 0.05$); RT+M 处理的总氮淋失平均值为 5.3 kg/hm^2 , 较 RT 处理减少了 15%。

以上结果表明, 配施有机肥有助于降低土壤深层 NO_3^- -N 和总氮的淋溶损失。

2.2 淋溶水 NO_3^- -N 浓度与田面水 NO_3^- -N 浓度之间的关系

田面水 NO_3^- -N 是土壤 NO_3^- -N 淋失的一个来源。对无机肥处理的田面水 NO_3^- -N 浓度和土壤淋溶水 NO_3^- -N 浓度(80 cm 处)作拟合分析, 结果发现二者之间存在极显著线性相关 ($P < 0.01$) (图 1A); 田面水 NO_3^- -N 可以解释 45% 的 NO_3^- -N 淋溶损失。然而, 当把有机肥处理(RT+M 和 CT+M)也包括进来时(图 1B), 田面水 NO_3^- -N 浓度和淋溶水 NO_3^- -N 浓度之间的相关性降低很多, R^2 仅为 0.24。这表明有机肥的参与削弱了田面水 NO_3^- -N 和淋溶水 NO_3^- -N 之间的关系。

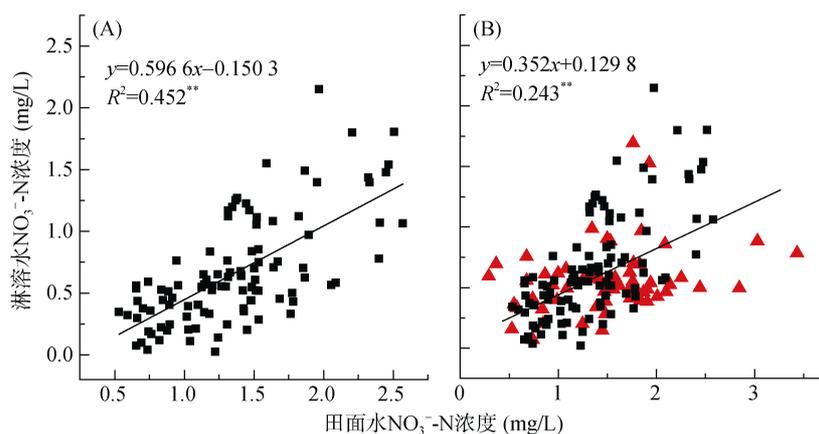


图 1 为无机肥处理, 包括空白处理; 图 B 为包括配施有机肥的 RT+M、CT+M 处理在内的所有处理; 其中方形数据点表示无机肥处理, 三角形数据点表示配施有机肥处理; **表示在 $P < 0.01$ 上显著相关)

图 1 2014 年和 2015 年田面水 NO_3^- -N 浓度和淋溶水 NO_3^- -N 浓度之间的相关关系

Fig. 1 Relationship between floodwater NO_3^- -N concentration and NO_3^- -N concentration in percolation water in rice seasons of 2014 and 2015

两年里 CT+M 处理田面水 NO_3^- -N 平均浓度为 1.83 mg/L , 高于 CT 处理的 1.55 mg/L ; 同样, RT+M 处理田面水 NO_3^- -N 平均浓度 (1.68 mg/L) 也高于 RT 处理 (1.43 mg/L)。这表明配施有机肥并不能降低田面水 NO_3^- -N 浓度, 反而会增加田面水 NO_3^- -N 浓度。由此可知, 配施有机肥处理 NO_3^- -N 淋失的减少, 并不是通过降低田面水 NO_3^- -N 浓度来实现的。

2.3 不同深度土壤 NO_3^- -N 含量

水稻生育期, 分别采集分蘖期、拔节期、孕穗期、灌浆期和收获期(2015 年灌浆期土样没有采集, 而增加了基肥期土样采集)的土样, 不同深度土壤的 NO_3^- -N 含量结果见图 2。两年的结果类似, 土壤 NO_3^- -N 含量随土壤深度的增加而降低, $0 \sim 20 \text{ cm}$ 土层 NO_3^- -N 含量高于 $20 \sim 40 \text{ cm}$ 土层。

对于 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 土层, 不同时期施肥处理的土壤 NO_3^- -N 含量均高于空白处理; 不同施肥处理下, 配

施有机肥处理的 NO_3^- -N 含量明显高于单施无机肥处理。但是 $20 \sim 40 \text{ cm}$ 土层, 不同时期配施有机肥处理和单施无机肥处理之间土壤 NO_3^- -N 含量差异很小(图 2)。这表明配施有机肥可以减少 NO_3^- -N 向土壤深层的迁移, 提高土壤对 NO_3^- -N 的吸附和固定, 使得更多的 NO_3^- -N 保存在土壤表层。

2.4 土壤有机质和全氮含量

水稻收获后, 不同处理土壤的 SOM 含量见图 3。与 CK 处理相比, 两年里配施有机肥均显著提高了土壤 SOM 含量 ($P < 0.05$); 无机肥处理土壤的 SOM 含量较 CK 处理有增加的趋势, 但是二者之间的差异不显著 ($P > 0.05$)。两年里 CT+M 处理土壤的平均 SOM 含量为 38.0 g/kg , 比 CT 处理提高 6.7%。

不同处理土壤的 TN 含量变化趋势和 SOM 含量类似, 结果见图 4。两年里 CT+M 处理土壤的平均 TN 含量为 2.26 g/kg , 比 CT 处理提高 5.1%。

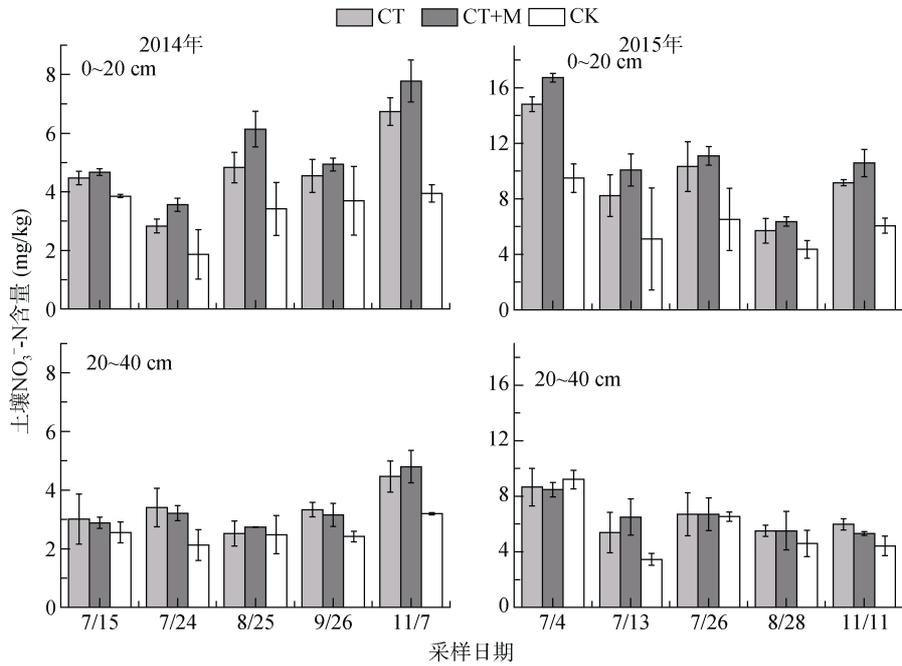


图 2 2014 年(左)和 2015 年(右)不同处理 0~20 cm 和 20~40 cm 土层的 NO₃-N 含量
 Fig. 2 Soil NO₃-N concentrations in 0-20 cm and 20-40 cm layers under different treatments in 2014 and 2015

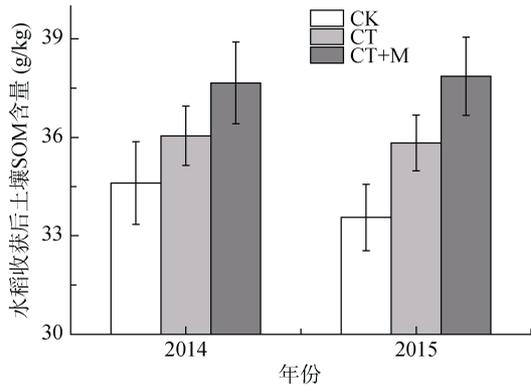


图 3 2014 年和 2015 年水稻收获后不同处理土壤表层有机质含量

Fig. 3 Soil organic matter contents in 0-20 cm layer after rice harvest in 2014 and 2015

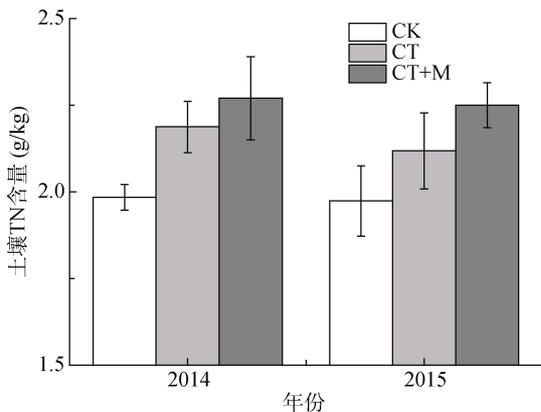


图 4 2014 年和 2015 年水稻收获后不同处理土壤表层全氮含量

Fig. 4 Soil TN contents in 0-20 cm layer after rice harvest in 2014 and 2015

2.5 水稻产量和吸氮量

2014 年由于受到台风影响作物发生倒伏, 导致该年不同施肥处理之间的水稻产量差异并不显著($P > 0.05$, 表 3)。与无机肥处理相比, 2015 年配施有机肥处理显著提高了水稻产量($P < 0.05$)。RT+M 处理的平均水稻产量为 9.3 t/hm², 较 RT 处理显著提高 12%; CT+M 处理的水稻产量平均为 9.6 t/hm², 较 CT 处理显著提高 13%。

表 3 2014 年和 2015 年不同处理的作物产量和吸氮量
 Table 3 Rice yields and crop N uptake under different treatments during rice seasons of 2014 and 2015

处理	2014 年		2015 年	
	产量(t/hm ²)	吸氮量(kg/hm ²)	产量(t/hm ²)	吸氮量(kg/hm ²)
CK	4.88 b	78 c	4.71 c	67 c
RT	7.80 a	141 b	8.80 b	141 b
CT	7.96 a	148 b	8.99 b	155 b
RT+M	8.29 a	155 a	10.4 a	182 a
CT+M	8.49 a	159 a	10.7 a	187 a

两年里, 配施有机肥处理的吸氮量均显著高于无机肥处理。RT+M 处理的吸氮量平均值为 169 kg/hm², 较 RT 处理提高 19%; CT+M 处理的吸氮量平均值为 173 kg/hm², 较 CT 处理提高 14%。

3 讨论

施入土壤中的无机氮肥在脲酶的作用下很快发生水解, 之后在硝化作用下产生 NO₃-N, 由于 NO₃-N

不易被土壤固定,在淹水条件下易随水分向下渗漏^[17]。在同等水分和土壤性质条件下,施肥是影响氮素淋失的最重要因素。与无机肥相比,施用有机肥有助于降低深层土体的 NO_3^- -N淋失^[19]。类似地,本研究中配施有机肥处理 NO_3^- -N淋失较无机肥处理降低了12%~40%。

田面水 NO_3^- -N是土壤 NO_3^- -N淋失的一个重要来源,有研究认为配施有机肥可以降低田面水 NO_3^- -N浓度,从而减少土壤 NO_3^- -N淋失。本研究中无机肥处理的田面水 NO_3^- -N浓度和淋溶水 NO_3^- -N浓度存在极显著线性相关($P < 0.01$,图1A),表明降低田面水 NO_3^- -N浓度可以减少土壤 NO_3^- -N淋溶损失。但是有机肥的存在会削弱这种相关性(图1B),并且配施有机肥处理的田面水 NO_3^- -N浓度高于无机肥处理,因此配施有机肥处理土壤 NO_3^- -N淋失的降低并不是由田面水 NO_3^- -N浓度的减少来实现的。

配施有机肥能够增加土壤有机质含量,提高土壤表层对 NO_3^- -N的吸附固持作用(图2),抑制土壤 NO_3^- -N的向下迁移,从而减少氮素向下层土体的淋移。有机质含量的提高可以增强土壤团聚体的稳定性,增加土壤物理性黏粒的含量和阳离子的代换量,有利于提高土壤对 NO_3^- -N的固持作用,进而阻碍 NO_3^- -N向下部的移动^[20-21]。施用有机肥还能够提高土壤的C/N比,促进土壤微生物活性的增强,提高微生物对氮的固持,从而减少土壤氮素淋失^[14,22]。王永生和杨世琦^[23]认为配施有机肥条件下,土壤微生物更多地利用无机氮,有利于减少施入的无机氮的淋洗量,因此在宁夏灌区增施猪粪较常规施肥可以有效减缓稻田 NO_3^- -N淋失的速度。此外,本文中配施有机肥处理有助于土壤质量和水稻产量的提高,增强水稻作物对土壤氮素的吸收(表3),因此这也是土壤氮素淋失减少的一个原因。

由于有机肥对土壤性质和养分转化的影响过程较为复杂,有机肥施用对土壤氮淋失的影响随有机肥质量和施用量的不同而不同。有研究表明,过量施用有机肥也可能增加养分淋洗损失^[24-25]。例如,高懋芳等^[25]认为长期大量施用有机肥会提高稻田土壤氮素水平,容易造成 NO_3^- -N在土体中的累积,引发氮素向深层土体的淋失,且淋失浓度随着施肥量的增加逐渐提高,威胁着地下水环境安全。本研究结果仅反映了配施有机肥对太湖地区稻田土壤氮淋失的影响,并且仅从水/土中氮素转化和氮素吸收考虑配施有机肥对稻田土壤氮素淋失影响机制还有所欠缺,今后还需进一步探讨土壤微生物特性与氮素淋失之间的响应。

4 结论

配施有机肥有助于减少稻田土壤 NO_3^- -N淋失,但并不是依靠减少田面水 NO_3^- -N浓度来实现的,而是因为施用有机肥能够提高土壤有机质含量,增强土壤表层对 NO_3^- -N的吸附固持,进而抑制土壤 NO_3^- -N的向下迁移;此外,配施有机肥可以提高土壤质量和水稻产量,促进作物对土壤氮素的吸收,有助于减少土壤氮素淋失。就无机肥处理而言,田面水 NO_3^- -N浓度和土壤淋溶水 NO_3^- -N浓度之间存在极显著线性相关,降低田面水 NO_3^- -N浓度有利于土壤 NO_3^- -N淋溶损失的减少。

参考文献:

- [1] Peng S B, Tang Q Y, Zou Y B. Current status and challenges of rice production in China[J]. *Plant Production Science*, 2009, 12(1): 3-8.
- [2] Zhu Z L, Wen Q X, Freney J R. Nitrogen in soils of China[M]. Dordrecht: Springer Netherlands, 1997.
- [3] 乔春连,布仁巴音. 合成氮肥对中国茶园土壤养分供应和活性氮流失的影响[J]. *土壤学报*, 2018, 55(1): 174-181.
- [4] 胡玉婷,廖千家骅,王书伟,等. 中国农田氮淋失相关因素分析及总氮淋失量估算[J]. *土壤*, 2011, 43(1): 19-25.
- [5] Yang S H, Peng S Z, Xu J Z, et al. Nitrogen loss from paddy field with different water and nitrogen managements in Taihu lake region of China[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2013, 44(16): 2393-2407.
- [6] Lee C, Feyereisen G W, Hristov A N, et al. Effects of dietary protein concentration on ammonia volatilization, nitrate leaching, and plant nitrogen uptake from dairy manure applied to lysimeters[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2014, 43(1): 398-408.
- [7] Zhang M, Tian Y H, Zhao M, et al. The assessment of nitrate leaching in a rice-wheat rotation system using an improved agronomic practice aimed to increase rice crop yields[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2017, 241: 100-109.
- [8] Luo L G, Itoh S, Zhang Q W, et al. Leaching behavior of nitrogen in a long-term experiment on rice under different N management systems[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2011, 177(1/2/3/4): 141-150.
- [9] 潘田,张幼宽. 太湖流域长兴县浅层地下水氮污染特征及影响因素研究[J]. *水文地质工程地质*, 2013, 40(4): 7-12.
- [10] Zhang M, Yao Y L, Tian Y H, et al. Increasing yield and N use efficiency with organic fertilizer in Chinese intensive rice cropping systems[J]. *Field Crops Research*, 2018, 227: 102-109.

- [11] 魏静, 郭树芳, 翟丽梅, 等. 有机无机肥配施对水稻氮素利用率与氮流失风险的影响[J]. 土壤, 2018, 50(5): 874–880.
- [12] 汪军, 王德建, 张刚, 等. 秸秆还田条件下氮肥用量对稻田氮素淋失的影响[J]. 中国环境科学, 2010, 30(12): 1650–1657.
- [13] 陈婷, 韩士群, 周庆. 巢湖藻-草-泥堆制有机肥对土壤性质的影响[J]. 土壤, 2018, 50(5): 910–916.
- [14] 刘汝亮, 张爱平, 李友宏, 等. 长期配施有机肥对宁夏引黄灌区水稻产量和稻田氮素淋失及平衡特征的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(5): 947–954.
- [15] Hofmeier M, Roelcke M, Han Y, et al. Nitrogen management in a rice-wheat system in the Taihu Region: Recommendations based on field experiments and surveys[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015, 209: 60–73.
- [16] Tian Y H, Yin B, Yang L Z, et al. Nitrogen runoff and leaching losses during rice-wheat rotations in Taihu lake region, China[J]. *Pedosphere*, 2007, 17(4): 445–456.
- [17] Cao Y S, Tian Y H, Yin B, et al. Improving agronomic practices to reduce nitrate leaching from the rice-wheat rotation system[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 195: 61–67.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2002
- [19] 张玉平, 刘强, 荣湘民, 等. 有机无机肥配施对双季稻田土壤养分利用与渗漏淋失的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(1): 22–27, 32.
- [20] 宁川川, 王建武, 蔡昆争. 有机肥对土壤肥力和土壤环境质量的影响研究进展[J]. 生态环境学报, 2016, 25(1): 175–181.
- [21] Lee J. Effect of application methods of organic fertilizer on growth, soil chemical properties and microbial densities in organic bulb onion production[J]. *Scientia Horticulturae*, 2010, 124(3): 299–305.
- [22] 武爱莲, 王劲松, 董二伟, 等. 施用生物炭和秸秆对石灰性褐土氮肥去向的影响[J]. 土壤学报, 2019, 56(1): 176–185.
- [23] 王永生, 杨世琦. 宁夏黄灌区稻田冬春休闲期硝态氮淋失量[J]. 生态学报, 2011, 31(16): 4653–4660.
- [24] 李彦, 孙翠平, 井永苹, 等. 长期施用有机肥对潮土土壤肥力及硝态氮运移规律的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(7): 1386–1394.
- [25] 高懋芳, 邱建军, 李长生, 等. 应用 Manure-DNDC 模型模拟畜禽养殖氮素污染[J]. 农业工程学报, 2012, 28(9): 183–189, F0004.