

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2022.05.003

张敏, 姚元林, 田玉华, 等. 不同施肥措施对稻田氮损失和氮肥利用的影响. 土壤, 2022, 54(5): 890–895.

不同施肥措施对稻田氮损失和氮肥利用的影响^①

张敏¹, 姚元林², 田玉华³, 高佳璐¹, 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)

摘要: 通过田间原位和微区同位素试验, 研究不同施肥措施对水稻生长、氮肥利用和氮素损失的影响, 并从土壤氮素转化探究其影响机制。结果表明: ①与常规表施(CT)处理相比, 尿素深施(DT)和尿素深施下配施有机肥(DT+M)处理显著降低土壤 ¹⁵N-NH₃ 排放, DT 和 DT+M 处理的 ¹⁵N-NH₃ 排放因子分别为 0.19% 和 0.37%, 比 CT 处理分别降低 95.8% 和 91.7%。②与表施相比, 氮肥深施显著提高了植株地上部和根系对 ¹⁵N 的吸收, 减少了 ¹⁵N 的损失。不同施肥措施中, DT+M 处理的 ¹⁵N 损失最小, 比 CT 处理低 48.7%。③氮肥深施能够增强土壤对 NH₄⁺-N 的固定, 显著提高氮肥利用率。相比 CT 处理, 氮肥深施处理 DT 和 DT+M 的氮肥利用率分别增加了 69.8% 和 57.1%。此外, 氮肥深施还有助于水稻产量的提高, 但 DT 处理的增产效果受环境条件的影响, 而 DT+M 处理的作物增产较为稳定。

关键词: 水稻; 氮肥深施; 氨挥发; 氮肥利用

中图分类号: S143.1; S153.5 **文献标志码:** A

Effects of Different Fertilization on Nitrogen Loss and Use Efficiency in Rice Field

ZHANG Min¹, YAO Yuanlin², TIAN Yuhua³, GAO Jialu¹, YIN Bin^{3*}

(1 College of Life Science, Luoyang Normal University, Luoyang, Henan 471023, China; 2 School of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 3 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: The effects of different fertilization on rice growth, nitrogen use efficiency and loss were studied by *in-situ* and micro-area isotope experiments, and the mechanism was explored through the nitrogen transformation. The results show as follows: 1) Compared with conventional surface application (CT), urea deep placement (DT) and urea deep application combined with organic addition (DT+M) significantly decrease ¹⁵N-NH₃ emission. The emission factors in DT and DT+M are 0.19% and 0.37%, which are 95.8% and 91.7% lower than that in CT, respectively. 2) Compared with CT, nitrogen deep application significantly increases the uptake of ¹⁵N from rice plant and root, and reduces the loss of ¹⁵N. DT+M has the lowest ¹⁵N loss among the different fertilizer treatments, which is 48.7% lower than that of CT. 3) Nitrogen deep application can enhance the fixation of soil NH₄⁺-N and increase nitrogen use efficiency. DT and DT+M increase nitrogen recovery efficiency by 69.8% and 57.1% compared with CT, respectively. In addition, DT also contributes to the increase of rice yield, but it is affected by environmental conditions. By contrast, DT+M gives a stable increase of rice yield.

Key words: Rice; Deep application of nitrogen fertilizer; Ammonia volatilization; Nitrogen use efficiency

水稻是我国第二大粮食作物,其种植面积约占粮食作物总种植面积的 25.7%^[1]。氮是水稻生产中一个重要的产量限制因素,合理的氮肥管理是实现作物高产的关键措施^[2]。我国稻田氮肥施用方式多为表施于田面水,但是尿素表施后会迅速水解成铵态氮,进而

导致较高的氨(NH₃)挥发速率,不利于氮肥利用率的提高,并且容易引起一系列的环境污染问题^[3]。NH₃挥发是稻田氮流失的主要途径,占总施氮量的 13%~60%^[4-5]。农田排放的 NH₃ 可通过氮沉降直接或间接导致土壤酸化和水体富营养化,且气态 NH₃ 及其次级组

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

分是雾霾的重要成分, 会对人类健康造成威胁^[6]。

为了减少 NH_3 挥发损失, 提高氮素利用效率, 很多研究建议合理选择氮源、改进施肥时间和方式以及使用尿素抑制剂等^[7-9]。其中, 氮肥深施是改善水稻生长、调节氮肥供应的一项有效措施。与氮肥表施相比, 尿素深施能显著降低田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度, 减少 NH_3 损失^[10]。先前研究表明, 氮肥深施能够降低 20%~45% 的 NH_3 损失, 提高 26%~93% 的氮肥利用率, 使水稻增产 38%~55%^[11-12]。但是在这些研究中, 稻季氮肥的投入一般较低, 而我国太湖地区氮肥实际投入较高。高施氮量下, 一次性尿素深施会导致根际土壤氮素过量累积, 容易引起水稻秸秆氮素吸收过剩, 造成水稻贪青晚熟, 不利于水稻产量的提高^[12]。

一般认为, 配施有机肥能够增强土壤固氮能力, 促进水稻籽粒氮吸收^[13], 因此相比尿素深施, 尿素深施下增施有机肥可能具有进一步提高水稻产量的潜力。然而该措施对水稻生长和氮素利用的研究并不多, 其对 ^{15}N 去向的影响也缺乏认识。因此, 本研究在太湖地区进行了大田试验和微区同位素试验, 研究尿素深施下增施有机肥对水稻产量、 NH_3 损失和 ^{15}N 去向的影响, 以期为实现我国农业绿色生产提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 试验地点

试验于中国科学院常熟生态农业实验站 (31°32'93"N, 120°41'88"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℃, 年平均降水量 1 038 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 7.36, 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

本研究包括田间原位小区试验和微区同位素试验, 设有 4 个处理, 分别为: ①对照(不施肥, CK); ②常规施肥(氮肥表施, CT); ③尿素深施(DT); ④尿素深施下配施有机肥(DT+M)。每个处理 3 个重复, 各处理小区随机区组排列。田间试验包括 2015 年和 2016 年两个稻季, 施用的氮肥品种为尿素(含 N 460 g/kg), 磷肥为过磷酸钙(含 P_2O_5 160 g/kg), 钾肥为氯化钾(含 K_2O 600 g/kg)。氮肥表施处理(CT)的氮肥为表层均匀撒施, 分 3 次施用, 施肥比例为 4:2:4, 施肥时间分别为 6 月 24、7 月 7 和 8 月 14。氮肥深施处理(DT 和 DT+M)的化学氮肥为一次性基施, 具

体方法为使用自行设计的施肥工具, 计算出平均每穴施肥量, 在每穴水稻的根旁 5 cm、根下 10 cm 进行施肥。有机肥为腐熟之后的菜籽饼肥(菜籽饼肥厌氧发酵 30 d), 含水率为 70%, 含氮量(干基, 下同)为 60.7 g/kg, 含磷量为 8.8 g/kg, 含钾量为 12.7 g/kg, 有机碳含量为 504 g/kg。磷肥、钾肥各处理施用量相同, 有机肥、磷肥和钾肥于基肥时期一次性表层均匀撒施, 具体施肥情况见表 1。

表 1 不同处理的施肥情况
Table 1 Fertilizer application under different treatments

处理	有机肥用量 (kg/hm ²)	N : P ₂ O ₅ : K ₂ O(kg/hm ²)		
		基肥	第一次追肥	第二次追肥
CK	0	0 : 90 : 120	0 : 0 : 0	0 : 0 : 0
CT	0	120 : 90 : 120	60 : 0 : 0	120 : 0 : 0
DT	0	300 : 90 : 120		
DT+M	2 250	300 : 90 : 120		

微区试验开展于 2015 年, 将聚氯乙烯柱(高 50 cm、内径 38 cm)插入土壤, 上方高出土壤 15 cm。施用的氮肥为 ^{15}N 尿素(丰度为 5%, 由上海化工研究所提供), 微区管理同田间小区试验。

供试水稻品种均为南粳 46, 稻株距为 20 cm × 20 cm。小区之间田埂用塑料薄膜覆盖, 防止水肥互串。所有处理的杂草和病虫害管理与当地常规一致。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。

1.3 样品的采集与测定

小区试验的水稻成熟后, 人工收割 3 m² 的样方, 分成籽粒和秸秆, 然后风干和称重, 计算干物质量。测产后, 取一部分籽粒和秸秆样品于 75~80℃ 的烘箱中烘 24 h 直至恒重, 之后用粉碎机粉碎, 测定籽粒和秸秆氮含量。氮含量用浓硫酸消煮-凯氏定氮法测定。作物吸氮量根据干物质量和氮含量进行计算, 氮肥表观利用率(NRE, %)根据施氮区与不施氮区作物吸氮量的差值除以施氮量后的百分比来进行计算。此外, 2015 年在作物生长期(分蘖期、拔节期、孕穗期、灌浆期)和水稻收获后, 每个小区人工采集 0~20 cm 的土壤样品, 密封在塑料袋中, 在 -20℃ 的冰箱中保存, 待分析。测量时, 将土壤样品融化后混合称量适量, 用 2 mol/L KCl 提取, 采用靛酚蓝法和紫外分光光度法分别测定土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量。

微区试验用于 NH_3 挥发的采集, 采集方法为密闭室通气法, 吸收液为 2% 的硼酸(混有甲基红-溴甲酚绿指示剂)。施肥后连续每天采样, 直至硼酸吸收液不变色为止, 每天吸收后的硼酸吸收液及时带回实

实验室,用稀硫酸滴定,完成之后加 1~2 滴浓硫酸,在 80℃ 烘干,用以测定 $^{15}\text{N-NH}_3$ 损失。 NH_3 挥发总损失为采样期间每天 NH_3 挥发损失之和。微区作物收获后,采集地上部分、水稻根和土壤样品。植株样和水稻根在 80℃ 烘至恒重,然后研磨成粉,待测。 ^{15}N 丰度的测定利用同位素质谱仪(MAT-251, USA),误差为 $\pm 0.02\%$ 。来自肥料氮的百分率(Ndff)测定参考 López-Bellido 等^[14]。

$$\text{Ndff}(\%) = (B-A)/(C-A) \times 100$$

来自肥料的 NH_3 挥发损失量(N, kg/hm^2) = Ndff (%) \times NH_3 损失

来自肥料的地上部分/根系氮吸收量(N, kg/hm^2) = Ndff (%) \times 植株氮含量 \times 植株干物质量

来自肥料的土壤氮残留量(N, kg/hm^2) = Ndff (%) \times 土壤全氮含量 \times 土壤容重 \times 土壤深度
式中: A 是指 ^{15}N 天然丰度; B 是地上植株、土壤、根系 ^{15}N 丰度以及 $^{15}\text{N-NH}_3$ 浓度; C 是肥料中 ^{15}N 丰度。

1.4 数据分析

试验数据通过 SPSS 20.0 进行统计分析, Origin 9.1 制图,使用最小显著性差异法(LSD_{0.05})对不同处理之间的氮损失、氮素吸收、作物产量和氮肥利用率进行差异性分析。

2 结果与分析

2.1 微区 $^{15}\text{N-NH}_3$ 挥发

微区试验结果表明, CT 处理的 $^{15}\text{N-NH}_3$ 损失最高,为 13.4 kg/hm^2 (以单质 N 计,下同)(表 2)。稻田尿素表施容易造成大量的氮通过 NH_3 挥发的途径损失到环境中。相比氮肥表施,尿素一次性深施能够显著降低稻田肥料的 NH_3 排放, DT 和 DT+M 处理的 $^{15}\text{N-NH}_3$ 挥发分别降低了 95.7% 和 91.6%。DT 和 DT+M 处理的化肥 NH_3 排放因子仅为 0.19% 和 0.37%,相比 CT 处理显著降低了 95.8% 和 91.7% ($P < 0.05$),这表明氮肥深施能够极大程度地抑制肥料的 NH_3 挥发损失。但是 DT 和 DT+M 之间的 $^{15}\text{N-NH}_3$ 挥发损失没有显著差异,表明氮肥深施条件下配施有机肥对稻田化肥 NH_3 挥发损失没有影响。

2.2 微区 ^{15}N 利用与损失

微区水稻收获后,对其水稻根、地上植株和土壤的 ^{15}N 含量进行测定,结果见表 3。和 CT 处理相比, DT 和 DT+M 处理显著提高了水稻地上部分以及根部的 ^{15}N 吸收。DT 和 DT+M 处理的水稻植株 ^{15}N 总吸收量(地上部分与根之和)较 CT 处理分别提高了

42.8% 和 54.5% ($P < 0.05$)。DT 和 CT 处理之间土壤 ^{15}N 残留量差异不大,而 DT+M 处理显著提高了土壤 ^{15}N 残留。与 CT 处理相比, DT+M 处理的土壤 ^{15}N 残留量增加了 43.1%,这表明氮肥深施下配施有机肥有利于土壤质量的提高。

表 2 不同处理的稻田 $^{15}\text{N-NH}_3$ 损失
Table 2 $^{15}\text{N-NH}_3$ losses from rice fields under different treatments

处理	$^{15}\text{N-NH}_3$ 损失(N, kg/hm^2)			总 $^{15}\text{N-NH}_3$ 损失	NH_3 排放因子 (%)
	基肥	追肥 1	追肥 2		
CT	8.45	3.29	1.62	13.4 a	4.5 a
DT	-	-	-	0.57 b	0.19 b
DT+M	-	-	-	1.12 b	0.37 b

注: NH_3 排放因子为 NH_3 总损失占施氮量的比率;表中同列不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$);下同。

表 3 不同施肥处理的 ^{15}N 吸收、利用和损失
Table 3 ^{15}N uptake, utilization and losses under different treatments

处理	^{15}N 残留量 (N, kg/hm^2)	^{15}N 吸收量(N, kg/hm^2)		^{15}N 损失率 (%)	^{15}N 利用率 (%)
		地上部	根		
CT	63.7 b	76.8 b	7.97 b	50.5 a	25.6 b
DT	67.5 b	109 a	9.82 ab	37.1 b	36.4 a
DT+M	91.1 a	121 a	11.7 a	25.9 c	40.4 a

氮肥深施和深施下配施有机肥均能够提高水稻的 ^{15}N 利用率, DT 和 DT+M 处理的 ^{15}N 利用率分别为 36.4% 和 40.4%,较 CT 处理增加了 42.2% 和 57.8% ($P < 0.05$)。利用间接法计算不同处理的 ^{15}N 损失,结果发现,不同处理之间差异显著,具体为: CT > DT > DT+M, DT+M 处理的 ^{15}N 损失最低,仅占施肥的 25.9%,显著低于 DT+M 处理的 37.1% 和 CT 处理的 50.5%。

2.3 土壤无机氮

水稻不同生育期(分蘖、拔节、孕穗、灌浆和收获)的土壤无机氮结果见图 1。在分蘖期、拔节期和孕穗期, DT 和 DT+M 处理的土壤 NH_4^+-N 含量均显著高于 CT 处理 ($P < 0.05$),表明氮肥深施和深施下配施有机肥有助于提高土壤氮素营养供应的能力。这可能是因为氮肥深施能够抑制土壤的脲酶活性,延长氮的释放^[11]。也有研究认为,氮肥深施可以阻碍氮向上的迁移,进而提高氮的有效性^[15]。在灌浆期两种深施方式的土壤 NH_4^+-N 含量有高于 CT 处理的趋势,但是差异不显著 ($P > 0.05$)。收获期所有处理的土壤 NH_4^+-N 含量较生育期期间明显降低,且不同处理之间没有明显差异。

由于水稻生育期期间一直处于淹水条件,土壤 NO_3^--N 含量明显低于土壤 NH_4^+-N 含量。本文中,不

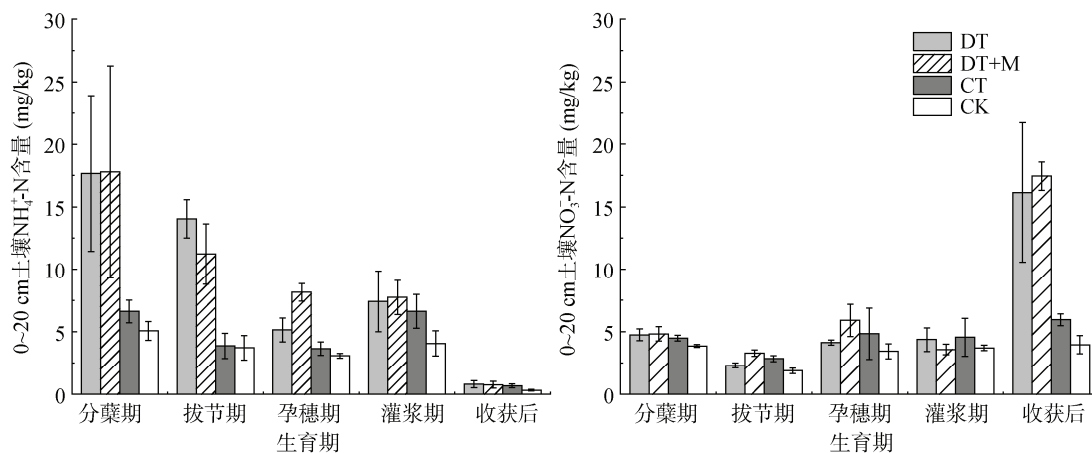


图 1 不同处理 0~20 cm 土壤的 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量

Fig. 1 Concentration of soil NH₄⁺-N and NO₃⁻-N (0-20 cm depth) under different treatments

同处理生育期间的土壤 NO₃⁻-N 含量均在 6 mg/kg 以下，且不同处理之间的土壤 NO₃⁻-N 含量没有显著差异。但是收获期 DT 和 DT+M 处理的土壤 NO₃⁻-N 含量显著高于 CT 处理，这可能是因为收获期前一周停止灌水，水稻土处于氧化环境，有利于土壤 NH₄⁺-N 向 NO₃⁻-N 的转化。

2.4 水稻产量和氮肥利用率

田间小区试验下不同处理的水稻产量和氮素吸收结果见表 4。2015 年，与 CT 处理相比，氮肥深施显著提高了水稻生物量，DT 和 DT+M 处理的水稻产量分别较 CT 处理提高了 13.4% 和 21.2%。2016 年，

由于水稻生育后期出现持续降雨，导致不同处理出现不同程度的贪青晚熟，DT 和 CT 处理之间的水稻产量没有差异。相比之下，DT+M 处理显著提高水稻产量，其相较 CT 处理增加了 13.6%，较 DT 处理增加了 9.5%。

氮肥深施有助于增强水稻秸秆和籽粒对氮素的吸收，两年里 DT 和 DT+M 处理均显著提高了作物对氮素的吸收，DT 和 DT+M 处理的平均氮素吸收量分别为 234 和 241 kg/hm²，较 CT 处理增加了 40.1% 和 44.3%。DT 和 DT+M 处理平均氮肥表观利用率(NRE)分别为 53% 和 49%，没有显著差异，但均显著高于 CT 处理，分别较 CT 处理提高了 69.8% 和 57.1%。

表 4 不同处理的水稻产量和氮素利用结果

Table 4 Yield, PNU and NRE during rice seasons under different treatments

时间	处理	籽粒产量 (t/hm ²)	氮素吸收量(N, kg/hm ²)			NRE (%)
			籽粒	秸秆	总吸收	
2015 年	CK	4.71 c	46 d	21 c	67 c	—
	CT	8.99 b	103 c	52 b	155 b	29.4 b
	DT	10.2 a	114 b	105 a	219 a	50.6 a
	DT+M	10.9 a	132 a	94 a	227 a	46.8 a
2016 年	CK	4.91 c	38 c	43 c	81 c	—
	CT	8.75 b	90 b	90 b	180 b	33.0 b
	DT	9.08 b	114 a	136 a	250 a	56.3 a
	DT+M	9.94 a	126 a	130 a	256 a	51.3 a

注：表中 NRE 的计算包括施入的有机肥。

3 讨论

稻田尿素表施容易造成大量的氮通过 NH₃ 挥发的途径损失到环境中，威胁环境安全。相比氮肥表施，尿素一次性深施能够显著降低稻田肥料的 NH₃ 挥发，本研究中深施以及深施下配施有机肥的 ¹⁵N-NH₃ 挥

发分别降低了 95.7% 和 91.6%。深施能够抑制田面水和土壤的脲酶活性，延长尿素的水解时间，在整个水稻生育期深施和深施下配施有机肥处理的田面水 NH₄⁺-N 和 pH 始终处于一个较低的水平^[10]。此外，氮肥深施还可以抑制 NH₄⁺-N 向上的迁移，使土壤保存更多的 NH₄⁺-N，提高作物对氮素的吸收，因此 NH₃

挥发损失显著降低。农业 NH_3 排放是一个急需解决的全球性问题,尤其是在我国^[16]。我国是世界上 NH_3 排放最大的国家,其中稻田 NH_3 排放占总排放的 9%~20%^[17]。本研究中氮肥深施以及深施下配施有机肥处理中化肥 NH_3 排放因子不足 0.4%,基本消除了稻田 NH_3 挥发。对比这两种管理措施,氮肥深施配施有机肥有助于提高土壤对肥料氮的固定,相比单一的氮肥深施处理其 ^{15}N 损失降低了 30%(表 3)。因此,氮肥深施配施有机肥更有助于降低农田氮损失,在减少氮肥投入对环境的污染上潜力更大。

与常规表施相比,尿素深施和深施下配施有机肥均显著提高氮肥表观利用率。尿素深施可以提高土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量,延长土壤氮供应时间,促进水稻地上部分和根系对氮的吸收(图 1)。本研究中,尿素深施和深施下配施有机肥处理的氮表观利用率比常规表施处理分别提高 69.8% 和 57.1%。类似地,先前研究中,相比表施,氮肥深施的氮肥利用率提高了 50%~70%^[15,18]。此外,前人研究报道氮肥深施向作物根际输入了更多的氮,有助于促进根系生长,增强作物对氮的吸收,进而提高作物产量^[11,19]。本研究中,与常规表施相比,2015 年氮肥深施处理的水稻产量显著提高了 13.5%。但是受生育后期持续降雨的影响,2016 年常规表施和尿素深施处理之间的作物产量并没有明显差异。这可能是由于高氮量的尿素一次性深施虽然促进了稻株对氮素的吸收,但其吸收的氮更多集中在秸秆中,导致作物容易发生贪青晚熟现象,进而不利于作物产量的稳定增产。相比之下,尿素深施下配施有机肥更好地促进水稻籽粒对氮素的吸收,水稻增产稳定。前人研究表明,有机肥是许多水稻系统的重要营养来源,对作物生长和氮肥利用有积极影响^[20-21]。因此,氮肥深施下配施有机肥不仅有助于降低农田化肥氮损失,减少氮肥投入对环境的污染,还能保障粮食安全,值得推广。

目前我国劳动力价格逐年增加,已经是农业发展的一个限制因素。人工进行稻田氮肥深施需要消耗大量的劳动力,不利于经济效益的提高。为了解决这个问题,机械作业是不可或缺的。在国外,关于稻田氮肥深施机械的研究很多^[22-23],可以作为参考引进我国。相比氮肥分次施入,一次性机械深施可以节省大量的劳力和时间,是未来稻田农业发展的一个方向。

4 结论

氮肥深施处理的 $^{15}\text{N}\text{-NH}_3$ 排放因子不足 0.4%,有效抑制了肥料氮的 NH_3 挥发。氮肥深施能够增强

土壤对氮的固定,促进水稻地上部分和根系对肥料氮的吸收,氮肥利用率提高 57.1%~69.8%。此外,氮肥深施也能促进水稻产量的提高,但其结果受环境条件的影响。和单一的氮肥深施相比,深施下配施有机肥增产效果较为稳定,且减少了 30% 的肥料氮损失,是一项值得推广的农田管理措施。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2015.
- [2] Roy R N, Misra R V, Montanez A. Decreasing reliance on mineral nitrogen—yet more food[J]. *Ambio*, 2002, 31(2): 177–183.
- [3] 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.
- [4] Huang S, Lv W S, Bloszies S, et al. Effects of fertilizer management practices on yield-scaled ammonia emissions from croplands in China: A meta-analysis[J]. *Field Crops Research*, 2016, 192: 118–125.
- [5] Griggs B R, Norman R J, Wilson C E, et al. Ammonia volatilization and nitrogen uptake for conventional and conservation tilled dry-seeded, delayed-flood rice[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2007, 71(3): 745–751.
- [6] Chen X, Wang Y H, Ye C, et al. Atmospheric nitrogen deposition associated with the eutrophication of Taihu Lake[J]. *Journal of Chemistry*, 2018, 2018: 1–10.
- [7] 刘晓伟, 陈小琴, 王火焰, 等. 根区一次施氮提高水稻氮肥利用效率的效果和原理[J]. *土壤*, 2017, 49(5): 868–875.
- [8] Sun H J, Zhang H L, Min J, et al. Controlled-release fertilizer, floating duckweed, and biochar affect ammonia volatilization and nitrous oxide emission from rice paddy fields irrigated with nitrogen-rich wastewater[J]. *Paddy and Water Environment*, 2016, 14(1): 105–111.
- [9] 孙海军, 闵炬, 施卫明, 等. 硝化抑制剂施用对水稻产量与氨挥发的影响[J]. *土壤*, 2015, 47(6): 1027–1033.
- [10] Yao Y L, Zhang M, Tian Y H, et al. Urea deep placement for minimizing NH_3 loss in an intensive rice cropping system[J]. *Field Crops Research*, 2018, 218: 254–266.
- [11] Liu T Q, Fan D J, Zhang X X, et al. Deep placement of nitrogen fertilizers reduces ammonia volatilization and increases nitrogen utilization efficiency in no-tillage paddy fields in central China[J]. *Field Crops Research*, 2015, 184: 80–90.
- [12] Afroz H, Islam M R, Islam M R. Floodwater nitrogen, rice yield and N use efficiency as influenced by deep placement of nitrogenous fertilizers[J]. *Journal of Environmental Science and Natural Resources*, 2015, 7(1): 207–213.
- [13] Pan G X, Zhou P, Li Z P, et al. Combined inorganic/organic fertilization enhances N efficiency and increases rice productivity through organic carbon accumulation in a rice paddy from the Tai Lake region,

- China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2009, 131(3/4): 274–280.
- [14] López-Bellido L, López-Bellido R J, Redondo R. Nitrogen efficiency in wheat under rainfed Mediterranean conditions as affected by split nitrogen application[J]. *Field Crops Research*, 2005, 94(1): 86–97.
- [15] Koudjega K, Ablede K A, Lawson I Y D, et al. Reducing ammonia volatilization and improving nitrogen use efficiency of rice at different depths of urea supergranule application[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2019, 50(8): 974–986.
- [16] Xu P, Liao Y J, Lin Y H, et al. High-resolution inventory of ammonia emissions from agricultural fertilizer in China from 1978 to 2008[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, 16(3): 1207–1218.
- [17] Huang X, Song Y, Li M M, et al. A high-resolution ammonia emission inventory in China[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2012, 26(1): 1–14.
- [18] Huda A, Gaihre Y K, Islam M R, et al. Floodwater ammonium, nitrogen use efficiency and rice yields with fertilizer deep placement and alternate wetting and drying under triple rice cropping systems[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2016, 104(1): 53–66.
- [19] Liu X W, Wang H Y, Zhou J M, et al. Effect of N fertilization pattern on rice yield, N use efficiency and fertilizer-N fate in the Yangtze River Basin, China[J]. *PLoS One*, 2016, 11(11): e0166002.
- [20] Yadav R L, Dwivedi B S, Prasad K, et al. Yield trends, and changes in soil organic-C and available NPK in a long-term rice-wheat system under integrated use of manures and fertilisers[J]. *Field Crops Research*, 2000, 68(3): 219–246.
- [21] 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.
- [22] Fujii T, Hasegawa H, Ohyama T, et al. Evaluation of tillage efficiency and power requirements for a deep-placement fertilizer applicator with reverse rotational rotary[J]. *Russian Agricultural Sciences*, 2015, 41(6): 498–503.
- [23] Hoque M A, Wohab M A, Hossain M A, et al. Improvement and evaluation of BARI USG applicator[J]. *Agricultural Engineering International: The CIGR e-journal*, 2013, 15(152): 87–94.