

李诗豪, 刘天奇, 马玉华, 等. 耕作方式与氮肥类型对稻田氨挥发、氮肥利用率和水稻产量的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35(5): 447-454.

LI Shi-hao, LIU Tian-qi, MA Yu-hua, et al. Effects of tillage practices and nitrogen sources on NH_3 volatilization, nitrogen use efficiency and yield in paddy fields in central China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2018, 35(5): 447-454.

耕作方式与氮肥类型对稻田氨挥发、氮肥利用率和水稻产量的影响

李诗豪¹, 刘天奇¹, 马玉华¹, 李成芳^{1,2*}

(1. 农业部长江中游作物生理生态与耕作重点实验室/华中农业大学植物科学技术学院, 武汉 430070; 2. 长江大学/长江大学主要粮食作物产业化湖北省协同创新中心, 湖北 荆州 434023)

摘要:通过大田试验, 设置常规翻耕(CT)、免耕(NT)两种耕作方式和不施氮肥(N0)、无机氮肥(IF)、缓释氮肥(SR)、有机无机氮肥配施(IFOF) 4种施肥模式, 研究其对稻田 NH_3 挥发、氮肥利用率和水稻产量的影响。研究结果表明: 耕作方式显著影响 NH_3 挥发, 而对氮肥利用率和水稻产量影响不大。与 CT 处理相比, NT 处理 NH_3 挥发量显著提高了 15.5%。氮肥施用显著提高了 NH_3 挥发、氮肥利用率和水稻产量。与 N0 处理相比, IF、SR 与 IFOF 处理 NH_3 挥发量分别提高了 150.2%、75.8% 与 137.8%。氮肥处理中 IFOF 处理具有最高的氮肥利用率。与 IF 处理相比, IFOF 处理氮肥吸收利用率(NRE)显著提高了 43.2%, 氮肥偏生产力(NPFP)提高了 16.9%, 氮肥农学效率(NAE)提高了 20.1%; 与 SR 处理相比, IFOF 处理 NRE 显著提高了 38.3%, NPFP 提高了 22.1%, NAE 提高了 51.3%。IF、SR 与 IFOF 处理较 N0 处理水稻产量分别提高了 43.6%、30.0% 与 44.4%。本研究结果表明, 翻耕下有机无机氮肥配施能有效地降低 NH_3 挥发, 提高氮肥利用率和产量, 但未来如何达到稻田 NH_3 与温室气体的同步减排需要进一步研究。

关键词: NH_3 通量; 免耕; 有机肥; 缓释肥; 氮肥吸收利用率

中图分类号: S143

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2018)05-0447-08

doi: 10.13254/j.jare.2018.0015

Effects of tillage practices and nitrogen sources on NH_3 volatilization, nitrogen use efficiency and yield in paddy fields in central China

LI Shi-hao¹, LIU Tian-qi¹, MA Yu-hua¹, LI Cheng-fang^{1,2*}

(1. Key Laboratory of Crop Ecophysiology and Farming System in the Middle Reaches of the Yangtze River of MOA/College of Plant Science & Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2. Hubei Collaborative Innovation Center for Grain Industry, Yangtze University, Jingzhou 434023, China)

Abstract: A field experiment was conducted to assess effects of tillage practices as conventional intensive tillage (CT) and no-tillage (NT) and N sources as no N fertilizer (N0), inorganic N fertilizer (IF), slow-release N fertilizer (SR) and inorganic+organic N fertilizer (IFOF) on NH_3 volatilization, N use efficiency and yield in paddy fields in central China. Tillage practices significantly affected NH_3 volatilization, but had no effects on N use efficiency and rice yield. Compared with CT, NT obviously increased NH_3 volatilization by 15.5%. N fertilization significantly enhanced NH_3 volatilization, N use efficiency and rice yield. Treatments of IF, SR, IFOF remarkably increased NH_3 volatilization by 150.2%, 75.8% and 137.8%, respectively, relative to N0. IFOF treatment showed the highest N use efficiency among N fertilizer treatments. Compared with IF treatment, IFOF treatment significantly enhanced NRE (N recovery efficiency) by 43.2%, NPFP (N partial factor productivity) by 16.9% and NAE (N agronomic efficiency) by 20.1%; IFOF treatment significantly enhanced NRE by 38.3%, NPFP

收稿日期: 2018-01-12 录用日期: 2018-02-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(31671637); 国家重点研发计划项目(2017YFD0301403)

作者简介: 李诗豪(1990—), 男, 湖北荆门人, 博士研究生, 主要从事农业生态学研究。E-mail: 370024308@qq.com

*通信作者: 李成芳 E-mail: lichengfang@126.com

by 22.1% and NAE by 51.3% relative to SR treatment. Rice yields under IF, SR and IFOF treatments were significantly 43.6%, 30.0% and 44.4% higher than that under N0 treatment. Our results suggested that CT in combination with IFOF could effectively mitigate NH_3 volatilization and increase N use efficiency and rice yield. However, further investigation is needed to discuss how to synchronously decrease NH_3 and greenhouse gas emissions

Keywords: NH_3 flux; no-tillage; organic fertilizer; slow-release fertilizer; N recovery efficiency

水稻是我国最重要的谷类作物之一,其种植面积占我国总耕地面积的25%。我国水稻生产存在氮肥使用量过大,氮肥利用率偏低等问题。每年我国水稻生产中化学氮肥用量占全世界总用量的37%^[1],稻田氮肥利用率为20%~40%^[2],远低于世界平均水平^[2]。这不仅导致较低的稻谷产量,也可能危害环境与人体健康^[3]。因此,优化稻田氮肥使用对于降低稻田氮损失和提高氮肥利用率具有重要意义。

NH_3 挥发是稻田氮损失的重要途径之一,占施氮量的9%~40%^[4]。因此,通过降低 NH_3 挥发以提高氮肥利用率的各种措施被提出,例如缓释氮肥的使用与无机有机氮肥配施等^[1,5-7]。相关研究指出,施用缓释氮肥能有效降低 NH_3 挥发,从而提高氮肥利用率和水稻产量^[5,7]。然而,有研究报道施用缓释氮肥或无机有机氮配施虽然降低了 NH_3 挥发,但同时也降低了水稻产量和氮肥利用率^[8-9]。因此,有必要进一步探讨不同氮肥施用对稻田 NH_3 挥发与氮肥利用率的影响。

作为保护性耕作措施之一,免耕能保护水土、提高有机碳含量和减少劳动成本,近些年在我国水稻生产中得到了大力推广^[10]。关于免耕对稻田 NH_3 挥发的影响研究已取得较为一致的结果^[11-12],然而免耕对水稻产量的影响说法不一。高明等^[13]报道,由于对稻田土壤的理化性质的改善,免耕提高水稻产量。Panday等^[14]在印度Himalayan西北地区的研究则指出,耕作措施未影响水稻产量。也有研究报道,由于免耕增加了土壤容重,影响了根系生长,从而降低了水稻产量^[15-16]。研究结果的差异可能与不同的土壤类型和大田管理措施有关^[15]。因此,进一步研究免耕对水稻产量的影响对于推广免耕技术具有重要意义。

当前,有关耕作措施与氮肥类型对作物生产的影响多为单因素分析,而把两者结合起来研究不多^[17]。因此,本研究通过大田试验,探讨了不同耕作措施(常规翻耕与免耕)和氮肥类型(不施氮肥、无机氮肥、缓释氮肥、有机无机氮肥配施)对稻田 NH_3 挥发、氮肥利用率、水稻产量的影响,以期有效减少稻田氮肥损

失和降低氨环境危害提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验点概况

本试验于2012年5—10月在湖北省武穴市花桥镇华中农业大学试验基地进行。试验点位于东经115°33′、北纬29°51′,年均温17.8℃,年均日照时间1 913.5 h,年降雨量1 361 mm。试验点种植模式为油菜(华双5号, *Brassica napus*)—水稻(两优培九, *Oryza sativa* L.)。试验点土壤为砂壤土,油菜收获后耕作层(0~20 cm)土壤的基本理化性质:pH 5.18、全氮2.39 g·kg⁻¹、全磷4.25 g·kg⁻¹、全钾3.31 g·kg⁻¹、铵态氮4.36 mg·kg⁻¹、硝态氮11.15 mg·kg⁻¹、有效磷4.28 mg·kg⁻¹、有效钾67.12 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计

试验采用裂区设计,耕作方式为主区,氮肥类型为副区。其中,耕作方式为常规翻耕(CT)和免耕(NT);氮肥类型为不施氮肥(N0)、无机氮肥(IF)、缓释氮肥(SR)、无机氮肥+有机氮肥(IFOF)。每个处理3次重复,每个小区面积38.8 m²,小区间设田埂并覆盖黑色塑料薄膜。同时,主区间设1 m宽保护行并种植水稻,利用水稻对肥水的吸收进一步防止处理间肥水串流。在每个小区单独设进水口和出水口,防止管水时出现串流。

除N0(不施N肥,施P、K肥)外,其他处理水稻全生育期N施用量均为180 kg N·hm⁻²。对于所有的处理,全生育期P、K肥施用量分别为90 kg P₂O₅·hm⁻²、180 kg K₂O·hm⁻²。对于IF与IFOF处理,全生育期间氮肥按5:2:1.2:1.8施用。对IF处理,基肥采用复合肥(15%N、15%P₂O₅、15%K₂O);对于IFOF处理,基肥采用菜籽饼(全N、P、K含量为4.2%、2.4%、7.4%),两个处理追肥均为尿素(46%N)。对于SR处理,缓释氮肥作为基肥一次性施入。缓释氮肥产自以色列 Everris公司,养分释放期为5个月(在21℃静水条件下),包膜材料为有机树脂包膜,全N、P、K含量分别为18%、8%、16%。所有处理P、K肥均作为基肥一次性施入,不足磷、钾肥以过磷酸钙(15% P₂O₅)和氯化钾

(60% K₂O)补足。具体施肥见表1。

2012年5月19日采用36%克无踪除草,5月20日泡田,5月21日施基肥,2012年6月17日、7月18日和8月14日分别追施分蘖肥、促花肥和保花肥。免耕稻田肥料表施,翻耕稻田肥料施用后立即用犁将肥料翻入土中。2012年5月23日播种,直播前稻谷先在清水中浸泡12 h,后与“早育保姆”充分混匀,播种量22.5 kg·hm⁻²,稻田浅水灌溉,2012年9月28日收获。

1.3 测定指标与方法

稻田NH₃挥发采用通气法测定^[18-19]。将两块厚度均为2 cm、直径为12 cm的海绵均匀浸以磷酸甘油溶液,置于聚氯乙烯硬质塑料管(内径11 cm,高25 cm),下层海绵距管底15 cm,上层海绵与管顶部相平,下层海绵用以吸收稻田挥发的NH₃,上层海绵用于防止空气中的NH₃和灰尘进入。施肥后立即进行NH₃挥发测定,每个小区设置2个收集装置,每次取样时间为上午9:00。具体的测定过程与计算方法参考文献[19]。

在水稻收获时,随机取8株水稻植株,分离成穗粒、茎叶两部分,烘干称重,磨碎混匀,过100目筛,用以测定植株含氮量。植株氮含量采用元素分析仪(Elementar Vario EL,德国)测定。另取3个1 m×1 m长势均一的田块进行测产。

氮肥利用率的计算方法参照刘立军等^[20],具体如下:

吸氮量=植株茎叶干物重×植株茎叶含氮量+穗粒干物重×穗粒含氮量

氮肥吸收利用率(N recovery efficiency, NRE)=(施氮区地上部植株总吸氮量-空白区地上部植株总吸氮量)/施氮量

氮肥农学效率(N agronomic efficiency, NAE)=(施氮区产量-无氮区产量)/施氮量

氮肥偏生产力(N partial factor productivity, NPFP)=施氮区产量/施氮量

1.4 数据分析

所有试验数据均采用Excel 2013进行整理分析和

绘图,采用SPSS 软件广义线性模型(General Linear Models)进行方差分析。试验结果均以3次重复分析的平均值与标准差来表示。

2 结果与分析

2.1 NH₃挥发

稻田NH₃通量的季节性变化见图1。IF与IFOF处理NH₃通量在每次氮肥施用后1~3 d即达到峰值,之后迅速降低,9~10 d后达到N0水平;SR处理NH₃通量在水稻整个生育期均处于相对较低水平。氮肥施用显著提高了NH₃通量。IF、SR、IFOF处理水稻全生育期平均NH₃通量分别为(1.85±0.07)、(1.20±0.01)、(1.92±0.03) mg·m⁻²·h⁻¹,显著高于N0处理的(0.68±0.03) mg·m⁻²·h⁻¹。耕作措施显著影响NH₃通量。NT处理水稻全生育期平均NH₃通量为(1.44±0.04) mg·m⁻²·h⁻¹(图1a),显著高于CT处理的(1.33±0.03) mg·m⁻²·h⁻¹(图1b)。

耕作方式和氮肥类型显著影响全生育期NH₃挥发(表2)。与CT处理相比,NT处理累积NH₃挥发量显著提高了15.5%。氮肥处理(IF、SR和IFOF)累积NH₃挥发量是N0处理的1.7~2.8倍(P<0.05)。氮肥处理中SR处理累积NH₃挥发量最小,分别比IF与IFOF处理显著降低28.7%~30.9%(P<0.05)和20.3%~22.7%(P<0.05)。耕作方式与氮肥类型的交互作用显著影响全生育期NH₃挥发。

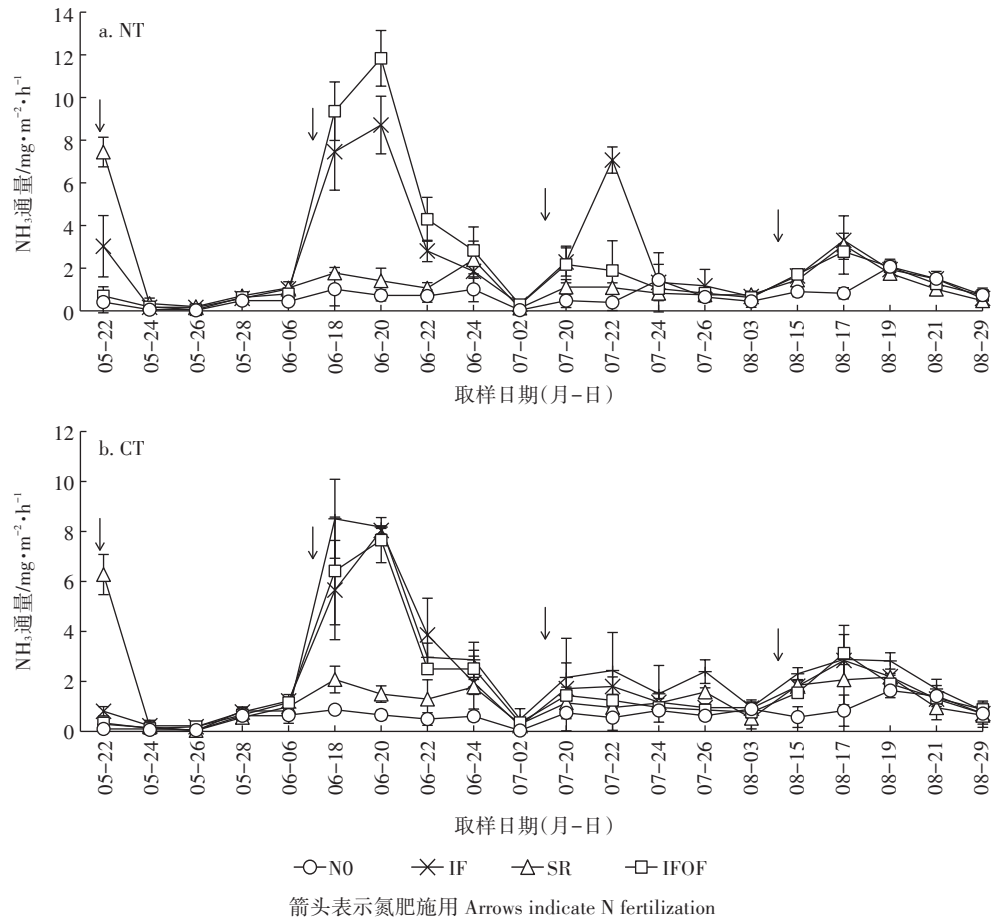
氮肥处理NH₃挥发主要发生在水稻生育前期,即水稻播种后一个月,其挥发量占全生育期挥发量的43.8%~52.5%(表2)。同时,各处理在全生育期累积稻田NH₃挥发量占施氮量的5.4%~13.0%。

2.2 氮肥利用率

耕作方式对水稻氮吸收与氮肥利用率的影响不显著,而氮肥施用显著影响氮肥利用率(表3)。氮肥施用显著提高了水稻吸氮量,IF、SR与IFOF处理水稻吸氮量是N0处理的1.61、1.57倍(P<0.05)与2.23倍(P<0.05)。氮肥处理中IFOF处理氮肥利用率最高,而IF处理最低。与IF处理相比,IFOF处理NRE

表1 具体施肥情况
Table 1 Specific scheme of fertilizer application

氮肥处理	基肥(2012年5月21日)	分蘖肥 (2012年6月17日)	拔节肥 (2012年7月19日)	保花肥 (2012年8月14日)
N0	600 kg·hm ⁻² 过磷酸钙+300 kg·hm ⁻² 氯化钾	—	—	—
IF	600 kg·hm ⁻² 复合肥+150 kg·hm ⁻² 氯化钾	78 kg·hm ⁻² 尿素	48 kg·hm ⁻² 尿素	70 kg·hm ⁻² 尿素
SR	1000 kg·hm ⁻² 缓释氮肥+66.7 kg·hm ⁻² 过磷酸钙+33.3 kg·hm ⁻² 氯化钾	—	—	—
IFOF	2143 kg·hm ⁻² 菜籽饼+257 kg·hm ⁻² 过磷酸钙+35.7 kg·hm ⁻² 氯化钾	78 kg·hm ⁻² 尿素	48 kg·hm ⁻² 尿素	70 kg·hm ⁻² 尿素

图1 不同耕作与氮肥处理稻田NH₃通量的季节性变化Figure 1 Seasonal changes in NH₃ fluxes from different tillage practices and N fertilizer treatments表2 不同耕作与氮肥处理下稻田累积NH₃挥发量的变化(kg N·hm⁻²)Table 2 Changes in cumulative NH₃ volatilization from paddy fields under different tillage practices and N fertilizer treatments (kg N·hm⁻²)

耕作方式	氮肥类型	5月22日—6月18日	6月18日—7月20日	7月20日—8月15日	8月15日—9月28日	全生育期
NT	N0	1.43±0.16	2.01±0.09	3.92±0.48	6.78±0.16	14.14±0.41
	IF	2.99±0.47	12.07±0.53	8.51±0.64	10.30±0.40	33.86±1.79
	SR	5.90±0.68	5.26±0.47	5.59±0.49	7.38±0.19	24.13±0.73
	IFOF	2.43±0.37	12.42±0.47	6.02±0.16	9.42±0.24	33.94±1.09
	平均	3.19±1.92a	7.94±5.15a	6.01±1.90a	8.47±1.66a	26.52±9.45a
CT	N0	1.17±0.42	1.80±0.12	3.37±0.33	5.44±0.40	11.77±0.37
	IF	3.33±0.34	11.75±1.37	6.75±0.62	9.15±0.16	30.98±0.25
	SR	5.08±0.50	6.16±0.83	4.08±0.12	6.06±0.10	21.41±0.60
	IFOF	2.21±0.05	11.91±0.06	5.42±0.47	8.13±0.20	27.68±0.22
	平均	2.95±1.67b	7.90±4.87a	4.90±1.50b	7.20±1.74b	22.96±8.45b
ANOVA						
耕作方式		**	ns	ns	**	*
氮肥类型		**	**	**	**	**
耕作方式×氮肥类型		ns	ns	**	**	**

注：表中同列不同小写字母表示在5%水平上差异显著。“ns”表示影响不显著；“*”表示在5%水平上影响显著；“**”表示在1%水平上影响显著。下同。

Note: Different small letters in a row mean significant differences at 5% level. ns, not significant; *, $P < 0.05$; **, $P < 0.01$. The same below.

表3 不同耕作与氮肥处理下氮肥利用率与水稻氮吸收的变化

Table 3 Changes in N use efficiency and N uptake by rice under different tillage practices and N fertilizer treatments

耕作方式	氮肥类型	吸氮量/kg N·hm ⁻²	氮肥吸收利用率(NRE)/%	氮肥偏生产力(NPFP)/kg·kg ⁻¹	氮肥农学效率(NAE)/kg·kg ⁻¹
NT	N0	92.39±3.79	—	—	—
	IF	154.18±9.92	30.52±3.47	53.41±2.32	13.24±1.42
	SR	150.96±1.87	32.54±1.39	53.87±1.91	11.66±2.43
	IFOF	213.18±12.16	44.74±3.05	61.48±2.00	15.56±1.45
	平均	152.68±49.33a	35.93±7.69a	56.25±4.53a	13.49±1.96a
CT	N0	101.37±7.51	—	—	—
	IF	157.61±1.25	30.52±1.70	53.33±1.19	13.96±2.65
	SR	153.34±2.489	30.65±3.15	48.34±0.92	9.92±0.89
	IFOF	218.50±13.24	42.69±1.09	63.32±0.19	17.10±0.85
	平均	157.70±47.92a	34.62±6.99a	55.00±7.63a	13.66±3.60a
ANOVA					
耕作方式		ns	ns	ns	ns
氮肥类型		**	**	**	**
耕作方式×氮肥类型		ns	ns	*	ns

显著提高了43.2% ($P<0.05$), NPFP提高了16.9% ($P<0.05$), NAE提高了20.1% ($P<0.05$); 与SR处理相比, IFOF处理NRE提高了38.3% ($P<0.05$), NPFP提高了22.1% ($P<0.05$), NAE提高了51.3% ($P<0.05$)。耕作方式与氮肥类型的交互作用对氮肥利用率没有显著影响。

耕作方式对水稻产量没有影响, 而氮肥施用显著提高水稻产量(图2)。与N0处理相比, IF、SR与IFOF处理分别显著地提高水稻产量43.6% ($P<0.05$)、30.0% ($P<0.05$)与44.4% ($P<0.05$)。耕作方式与氮肥类型的交互作用对水稻产量没有显著影响。

3 讨论

3.1 NH₃挥发季节性变化

氮肥施用显著影响NH₃排放(图1)。IF和IFOF

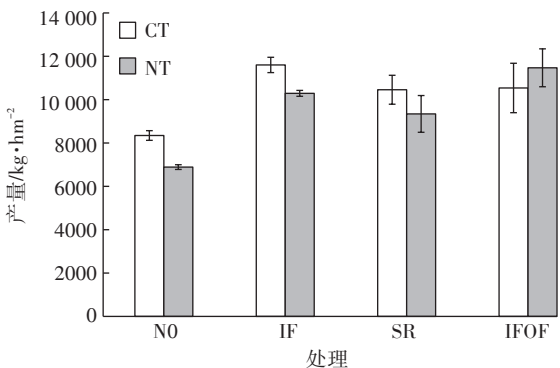


图2 不同耕作与氮肥处理下水稻产量的变化
Figure 2 Changes in rice grain yields under different tillage practices and N fertilizer treatments

处理NH₃通量在每次氮肥施用(5月21日、6月17日、7月19日、8月14日)后1~3 0d达到峰值;之后NH₃浓度迅速降低,氮挥发降低到N0水平(图1)。这与土壤脲酶在短期内将施入的氮肥水解成NH₄⁺有关^[21],与国内外的研究结果一致^[5,7,11-12]。SR处理NH₃通量在水稻全生育期维持较低的水平,可能与缓释氮肥自身缓慢释放特性有关^[6]。

施肥处理NH₃挥发主要发生在水稻播种后一个半月内,其挥发量占全生育期总挥发量的43.8%~52.5%(表2)。究其原因可能与该时期较高的气温和较小的水稻群体有关^[22]。本研究水稻播种在5月底,此后一个月的气温在30℃上下波动,高温有利于NH₃挥发。同时,Bash等^[23]研究指出,作物密闭的冠层作为屏障能有效地降低NH₃挥发。因此,水稻生育前期稀疏的冠层导致的透光、透气、透风的气候环境有利于NH₃挥发^[24]。本研究指出,全生育期稻田NH₃挥发量占施氮量的5.4%~13.0%(表2)。这与黄进宝等^[25]在黄泥土上报道的3.7%~11.7%的研究结论较为一致,但显著低于宋勇生等^[26]在乌栅土上报道的18.6%~38.7%。研究结果的差异可能与不同试验点土壤pH值差异有关。本研究土壤pH值为5.18,略低于黄泥土的5.23,远低于乌栅土的7.07。研究结果进一步表明土壤pH值是影响稻田NH₃挥发的重要因素之一。

3.2 耕作措施与氮肥类型对NH₃挥发的影响

耕作措施是影响NH₃挥发的重要因子^[11-12,22]。本研究表明,与CT处理相比,NT稻田NH₃挥发量显著提高了15.5%(表2),这与Mkhabela等^[27]、Rochette

等^[11]和Zhang等^[12]的研究结果一致。其原因可能是NT提高了表层土壤脲酶活性^[12],促进了氮肥的水解;同时,NT稻田作物残茬与枯枝落叶在土壤表层的覆盖降低了肥料与土壤颗粒的接触,减少了土壤颗粒对其的固定^[11],因此促进了NH₃挥发。此外,部分肥料落入CT土壤孔隙,也是导致CT土壤NH₃挥发降低的一个重要因素^[11]。

本研究表明,氮肥类型显著影响稻田NH₃挥发(表2)。与IF处理相比,SR和IFOF处理显著降低了稻田NH₃挥发(表2)。究其原因在于缓释氮肥表层的包膜材料阻隔了膜内尿素与土壤脲酶的直接接触,降低了膜内尿素的水解速率,促使缓释氮肥的氮供给与水稻生长过程中氮的需求相匹配,从而有效减少NH₃挥发^[6]。无机有机氮肥配施能有效降低NH₃挥发,可能是有机氮肥中的有机质分解过程中产生大量有机酸,并且其中部分形成腐殖质,导致土壤pH值与土壤的吸附能力增强,增加土壤胶体吸附的NH₄⁺,进而有效地抑制NH₃挥发^[28]。此外,有机氮肥相对较低的氮有效性也是导致较低的NH₃挥发的原因之一^[8]。与IFOF处理相比,SR处理显著降低了NH₃挥发,可能在于缓释氮肥的缓慢氮供给与水稻生长过程中氮的需求相匹配降低了土壤NH₄⁺浓度^[6],因此降低了NH₃挥发。本研究耕作措施与氮肥类型对稻田NH₃挥发有显著的互作效应(表2),表明合理的耕作措施与氮肥类型配合使用是降低NH₃挥发的行之有效途径。从本研究结果可知,翻耕稻田施用SR或IFOF是一个有效降低NH₃挥发的农艺措施。

3.3 耕作措施与氮肥类型对氮肥利用率的影响

虽然本研究(表2)和前人的研究^[12]表明免耕促进NH₃挥发、氮淋失与氮流失,但在免耕条件下作物残茬覆盖能改善土壤理化性质、肥力与微生物活性,从而有效地缓解免耕对氮损失的负效应^[29],因此本研究未观察到耕作措施对氮肥利用率有显著的影响(表3)。Liang等^[16]通过Meta分析表明,总体上免耕降低了氮吸收与氮肥利用率。不同研究结果的差异可能与不同的农艺措施、气候条件、土壤条件和免耕的年限有关^[16]。

本研究表明,氮肥类型显著影响氮肥利用率(表3)。IFOF处理水稻吸氮量与氮肥利用率显著高于IF和SR处理,这与王昌全等^[30]的研究结果一致。其原因可能在于有机与无机氮肥配合施用促进了化学氮肥料与有机氮肥之间的螯合与相互溶解,加速水稻吸收^[31],这与徐明岗等^[32]的研究结果较为一致。本研究

指出,SR处理水稻吸氮量与氮肥利用率略低于IF处理(表3)。虽然有研究指出,缓释氮肥的释放特性与水稻生长对氮的需求较为一致^[1],但缓释氮肥前期缓慢的释放也许导致水稻生长前期氮供应的不足^[6],因此影响SR处理水稻后期生长,进而影响水稻对氮的吸收与利用。

3.4 耕作措施与氮肥类型对产量的影响

产量是评估作物对耕作措施响应的重要指标。关于耕作措施对水稻产量的影响研究结论并不一致。高明等^[13]报道,免耕较翻耕提高了水稻产量;Gathala等^[15]报道了免耕对水稻产量的负作用,而Zhang等^[12]发现免耕对水稻产量没有影响。不同研究结果的差异可能与不同试验点的土壤性质(如质地与pH)、气候条件(如光照与温度)和田间管理措施(如氮肥类型、氮肥施用比例、轮作、秸秆管理与免耕年限)的差异有关^[12]。大量研究结果表明,免耕显著降低了水稻产量^[6,11]。而本研究表明,耕作措施对水稻产量没有显著影响(图2)。有研究指出,砂性土上实行免耕能缓解免耕对作物产量的负效应^[11],原因在于砂性土壤较高的通透性和导水性缓解了免耕造成的土壤容重加大、土壤板结等问题^[11]。本试验土壤为砂壤土,因此本试验没有观测到免耕对水稻产量的负效应。

本研究表明,氮肥类型显著影响水稻产量(图2)。施肥处理中IFOF处理产量最高,而SR处理最低。其原因可能与有机无机氮肥配合施用改善了土壤养分状况和提高了有机质有关^[32]。Wei等^[33]对中国32个长期试验的研究进行了综述,研究发现有机无机氮肥配合施用能有效提高作物产量。SR处理产量最低,可能与缓释氮肥前期缓慢的释放导致水稻生长前期氮供给相对不足有关^[6]。

综上所述,虽然SR处理具有最小NH₃挥发,同时其最低氮素利用率和产量表明单施缓释氮肥不是一个经济的农艺措施。与免耕处理相比,翻耕处理具有更低的NH₃挥发,而对氮肥利用率和水稻产量没有影响;同时,IFOF处理具有相对较低NH₃挥发、最大氮肥利用率与最高产量。因此,本研究结果表明,翻耕+有机无机氮肥配施是一个有效的降低NH₃挥发、提高氮肥利用率和产量的农业措施。然而,本研究组先前研究指出,与免耕相比,翻耕促进了稻田温室气体排放^[34],因此如何达到稻田NH₃与温室气体的同步减排需要进一步研究。

4 结论

耕作方式显著影响NH₃挥发,但不影响氮肥利用

率和水稻产量。与翻耕处理相比,免耕处理 NH_3 挥发显著提高了15.5%。氮肥类型显著影响 NH_3 挥发、氮肥利用率和水稻产量。氮肥处理中有机无机氮肥配施处理具有相对较低的 NH_3 挥发和最高的氮肥利用率与产量。本研究结果表明,翻耕+有机无机氮肥配施是一项有效地降低 NH_3 挥发,提高氮肥利用率和产量的可持续发展的农业措施,但未来如何同时降低 NH_3 挥发与温室气体排放需要进一步的研究。

参考文献:

- [1] Xu M, Li D, Li J, et al. Polyolefin-coated urea decreases ammonia volatilization in a double rice system of southern China[J]. *Agronomy Journal*, 2013, 105(1):277-284.
- [2] 张卫峰, 张福锁. 中国肥料发展研究报告(2012)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2013:90-93.
- ZHANG Wei-feng, ZHANG Fu-suo. Research report of Chinese fertilizer development[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2013:90-93.
- [3] Peng S B, Buresh R J, Huang J L, et al. Strategies for overcoming low agronomic nitrogen use efficiency in irrigated rice systems in China[J]. *Field Crops Research*, 2006, 96:37-47.
- [4] Fan X H, Song Y S, Lin D X, et al. Ammonia volatilization losses and ^{15}N balance from urea applied to rice on a paddy soil[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2006, 18(2):299-303.
- [5] 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.
- [6] Ke J, Xing X M, Li G H, et al. Effects of different controlled-release nitrogen fertilizers on ammonia volatilization, nitrogen use efficiency and yield of blanket-seedling machine-transplanted rice[J]. *Field Crops Research*, 2017, 205:147-156.
- [7] Li P F, Lu J W, Hou W F, et al. Reducing nitrogen losses through ammonia volatilization and surface runoff to improve apparent nitrogen recovery of double cropping of late rice using controlled release urea[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(12):11722-11733.
- [8] Bayu W, Rethman N F G, Hammes P S, et al. Effects of farmyard manure and inorganic fertilizers on sorghum growth, yield, and nitrogen use in a semi-arid area of Ethiopia[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2006, 29(2):391-407.
- [9] Yang J, Gao W, Ren S. Long-term effects of combined application of chemical nitrogen with organic materials on crop yields, soil organic carbon and total nitrogen in fluvo-aquic soil[J]. *Soil and Tillage Research*, 2015, 151:67-74.
- [10] Huang M, Ibrahim M D, Xia B, et al. Significance, progress and prospects for research in simplified cultivation technologies for rice in China[J]. *Journal of Agricultural Sciences*, 2011, 149(4):487-496.
- [11] Rochette P, Angers D A, Chantigny M H, et al. Ammonia volatilization following surface application of urea to tilled and no-till soils: A laboratory comparison[J]. *Soil and Tillage Research*, 2009, 103:310-315.
- [12] Zhang J S, Zhang F P, Yang J H, et al. Emissions of N_2O and NH_3 , and nitrogen leaching from direct seeded rice under different tillage practices in central China[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2011, 140(1/2):164-173.
- [13] 高明, 张磊, 魏朝富, 等. 稻田长期免耕对水稻产量及土壤肥力的影响研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(4):343-348.
- GAO Ming, ZHANG Lei, WEI Chao-fu, et al. Study of the changes of the rice yield and soil fertility on the paddy field under long-term no-tillage and ridge culture conditions[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2004, 10(4):343-348.
- [14] Panday S C, Singh R D, Saha S, et al. Effect of tillage and irrigation on yield, profitability, water productivity and soil health in rice (*Oryza sativa*)-wheat (*Triticum aestivum*) cropping system in north-west Himalayas[J]. *Journal of Agricultural Sciences*, 2008, 78(12):1018-1022.
- [15] Gathala M K, Ladha J, Saharawat Y S, et al. Effect of tillage and crop establishment methods on physical properties of a medium-textured soil under a seven-year rice-wheat rotation[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2011, 75(5):1851-1862.
- [16] Liang X, Zhang H, He M, et al. No-tillage effects on grain yield, N use efficiency, and nutrient runoff losses in paddy fields[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(21):21451-21459.
- [17] Balkcom K S, Burmester C H. Nitrogen applications for wheat production across tillage systems in Alabama[J]. *Agronomy Journal*, 2015, 107(2):425-434.
- [18] 王朝辉, 刘学军, 巨晓棠, 等. 田间土壤氨挥发的原位测定——通气法[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(2):205-209.
- WANG Zhao-hui, LIU Xue-jun, JU Xiao-tang, et al. Field *in situ* determination of ammonia volatilization from soil: Venting method[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8(2):205-209.
- [19] 马玉华, 刘兵, 张枝盛, 等. 免耕稻田氮肥运筹对土壤 NH_3 挥发及氮肥利用率的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(18):5556-5564.
- MA Yu-hua, LIU Bing, ZHANG Zhi-sheng, et al. Effects of nitrogen management on NH_3 volatilization and nitrogen use efficiency under no-tillage paddy fields[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(18):5556-5564.
- [20] 刘立军, 桑大志, 刘翠莲, 等. 实时实地氮肥管理对水稻产量和氮素利用率的影响[J]. 中国农业科学, 2003, 36(12):1456-1461.
- LIU Li-jun, SANG Da-zhi, LIU Cui-lian, et al. Effects of real-time and site-specific nitrogen managements on rice yield and nitrogen use efficiency[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, 36(12):1456-1461.
- [21] Shang Q Y, Gao C M, Yang X X, et al. Ammonia volatilization in Chinese double rice-cropping systems: A 3-year field measurement in long-term fertilizer experiments[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2014, 50(5):715-725.
- [22] 田玉华, 贺发云, 尹斌, 等. 太湖地区氮磷肥施用对稻田氨挥发的影响[J]. 土壤学报, 2007, 44(5):893-899.
- TIAN Yu-hua, HE Fa-yun, YIN Bin, et al. Ammonia volatilization from paddy fields in the Taihu Lake region as affected by N and P combination in fertilization[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(5):

- 893-899.
- [23] Bash J O, Walker J T, Katul G G, et al. Estimation of in-canopy ammonia sources and sinks in a fertilized *Zea mays* field[J]. *Environmental Science and Technology*, 2010, 44(5):1683-1689.
- [24] Zhao M, Tian Y H, Ma Y C, et al. Mitigating gaseous nitrogen emissions intensity from a Chinese rice cropping system through an improved management practice aimed to close the yield gap[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2015, 203:36-45.
- [25] 黄进宝, 范晓辉, 张绍林. 太湖地区铁渗水耕人为水稻季上氮肥的氨挥发[J]. 土壤学报, 2006, 43(5):786-792.
HUANG Jin-bo, FAN Xiao-hui, ZHANG Shao-lin. Ammonia volatilization from nitrogen fertilizer in the rice field of Fe-leachi-stagnic anthrosols in the Taihu Lake Region[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(5):786-792.
- [26] 宋勇生, 范晓晖. 稻田氨挥发研究进展[J]. 生态环境, 2003, 12(2):240-244.
SONG Yong-sheng, FAN Xiao-hui. Summary of research on ammonia volatilization in paddy soil[J]. *Ecology and Environment*, 2003, 12(2):240-244.
- [27] Mkhabela M S, Madani A, Gordon R, et al. Gaseous and leaching nitrogen losses from no-tillage and conventional tillage systems following surface application of cattle manure[J]. *Soil and Tillage Research*, 2008, 98:187-199.
- [28] 庞凤梅. 有机无机肥料配施对麦田土壤氨挥发和硝态氮含量的影响[D]. 北京:中国农业科学院, 2008.
PANG Feng-mei. Effects of combined application of organic and inorganic fertilizers on soil ammonia volatilization and nitrate accumulation in winter wheat field[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2008.
- [29] 黄景, 顾明华, 徐世宏, 等. 稻草还田免耕抛秧对土壤剖面氮、磷、钾含量的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(13):2648-2657.
HUANG Jing, GU Ming-hua, XU Shi-hong, et al. Effects of no tillage and rice-seedling casting with rice straw returning on content of nitrogen, phosphorus and potassium of soil profiles[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(13):2648-2657.
- [30] 王昌全, 李廷强, 夏建国, 等. 有机无机复合肥对农产品产量和品质的影响[J]. 四川农业大学学报, 2001, 19(3):241-244.
WANG Chang-quan, LI Ting-qiang, XIA Jian-guo, et al. Effects of organic-inorganic compound fertilizer on the yield and quality of agricultural products[J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2001, 19(3):241-244.
- [31] 胡润, 王允青, 唐杉, 等. 有机肥与无机肥配合施用及氮肥运筹对晚稻产量农艺性状的影响[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(36):22397-22398.
HU Run, WANG Yun-qing, TANG Shan, et al. Effects of combining application of different organic fertilizer and inorganic fertilizer and N-fertilizer operation method on late rice yield and agronomic traits[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2011, 39(36):22397-22398.
- [32] 徐明岗, 李冬初, 李菊梅, 等. 化肥有机肥配施对水稻养分吸收和产量的影响[J]. 中国农业科学, 2008, 41(10):3133-3139.
XU Ming-gang, LI Dong-chu, LI Ju-mei, et al. Effects of organic manure application combined with chemical fertilizers on nutrients absorption and yield of rice in Hunan of China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(10):3133-3139.
- [33] Wei W L, Yan Y, Cao J, et al. Effects of combined application of organic amendments and fertilizers on crop yield and soil organic matter: An integrated analysis of long-term experiments[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2016, 225:86-92.
- [34] Zhang Z S, Chen J, Liu T Q, et al. Effects of nitrogen fertilizer sources and tillage practices on greenhouse gas emissions in paddy fields of central China[J]. *Atmospheric Environment*, 2016, 144:274-281.