

# 不同类型氮肥和耕作方式 对稻田土壤氮挥发的影响

曹凑贵 李成芳 寇志奎 杨金花 汪金平

(华中农业大学/农业部华中作物生理生态与栽培重点开放实验室 植物科技学院 湖北 武汉 430070)

**摘要:** 研究不同类型氮肥与耕作方式下稻田土壤氮挥发特征,开展稻田土壤氮挥发损失的田间试验,分析不同类型氮肥与耕作方式对稻田土壤氮挥发速率的季节性变化规律和稻季氮挥发损失量的影响。结果表明,氮肥类型影响着稻田土壤氮挥发,施用猪粪总氮挥发量最大,尿素次之,后依次为复合肥、包膜尿素与新型缓效有机肥(脲肽磷复肥),其中包膜尿素与新型缓效有机肥处理总氮挥发量相当;猪粪、尿素与复合肥处理氮挥发通量的峰值出现在施肥后1~3 d;相对于稻田免耕,稻田翻耕显著降低土壤氮挥发,其总氮挥发量是免耕处理的70%,表明稻田免耕降低了水稻对肥料氮的利用率。

**关键词:** 氮肥; 缓效肥; 耕作措施; 稻田; 氮挥发

中图分类号: S154.1 文献标志码: A 文章编号: 1000-2286(2010)05-0881-06

## Effects of N Source and Tillage on NH<sub>3</sub> Volatilization from Paddy Soils

CAO Cou-gui, LI Cheng-fang, KOU Zhi-kui, YANG Jin-hua, WANG Jin-ping

(Key Lab of Huazhong Crop Production, Physiology and Ecology of Agriculture Ministry of China, College of Plant Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** Agricultural managements affect NH<sub>3</sub> volatilization from paddy soils. Thus, a field experiment was conducted to study the effects of N sources (swine manure, urea, compound fertilizer, coated urea and slow-release phosphorus peptide fertilizer) and tillage practices (no-tillage and conventional tillage) on NH<sub>3</sub> volatilization. Treatments were established following a split-plot design of a randomized complete block with tillage practices as the main plot and N sources as the split-plot treatment. The results indicated that N sources significantly affected NH<sub>3</sub> volatilization. Cumulative NH<sub>3</sub> volatilizations from swine manure treatments were the greatest, and then followed by urea > compound fertilizer > coated urea ≈ slow-release phosphorus peptide fertilizer. Peaks of NH<sub>3</sub> fluxes occurred on 1~3 d after N fertilizer application. Tillage had significant effects on soil NH<sub>3</sub> volatilization, where NT significantly increased NH<sub>3</sub> volatilization relative to CT and cumulative

收稿日期: 2010-08-20

基金项目: 国家粮食丰产科技工程项目(2006BA520A02)

**作者简介:** 曹凑贵(1963—),江西都昌人,博士,教授,博士生导师,国家教学名师。1985年7月本科毕业于江西农业大学农学专业,1985年7月—1987年8月在江西农业大学农学系工作。现任华中农业大学植物科学技术学院院长、中国生态学会农业生态专业委员会副主任委员、中国作物学会常务理事、中国农学会耕作制度分会常务理事、湖北省生态学会理事、武汉市农学会副会长。主要从事水稻栽培生理生态、农业生态学和区域可持续发展的教学科研工作,主持和参加科研项目30余项,获国家科技进步二等奖1项、湖北省科技进步二等奖1项、获国家教学成果一等奖1项、湖北省教学成果特等奖1项、湖北省教学成果二等奖1项。发表相关研究论文110余篇,获国家专利2项,主编、副主编教材、专著13部,主编21世纪课程教材《生态学概论》获中华科教基金优秀教材奖,主持《生态学》国家精品课程。E-mail: ccgui@mail.hzau.edu.cn。

$\text{NH}_3$  volatilizations from NT treatments were 42% higher than those from CT treatments. Therefore, the results showed that NT appeared to be ineffective in reducing N losses from N fertilizer applied to paddy fields, suggesting that methods for reducing fertilizer N loss from NT rice fields should be advocated.

**Key words:** nitrogen fertilizer; slow-release fertilizer; tillage; paddy;  $\text{NH}_3$  volatilization

我国是世界第一大化肥消费国,氮肥用量占全球氮肥用量的30%<sup>[1]</sup>。研究表明,施入土壤的氮肥只有30%~35%被作物吸收利用<sup>[2]</sup>,其余部分氮通过各种途径损失掉。氮挥发是稻田中氮肥的主要损失途径之一,其损失量占氮肥总损失量的5%~47%<sup>[3]</sup>。氮挥发带来了许多环境问题,如大气沉降、 $\text{NH}_3$ 与 $\text{NH}_4^+$ 的积累促进水体富营养化和土壤酸化,同时在大气中转化为 $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{NO}$ 等温室气体,引起空气质量恶化等<sup>[4]</sup>。因此加强稻田氮挥发的研究有利于降低氮肥的损失以提高作物的产量,同时对于预防氮挥发所引起的环境问题具有重要意义。

通常氮挥发损失量随施氮量的增加而增加<sup>[5-6]</sup>,且不同氮肥表现出不同的氮挥发<sup>[7-9]</sup>。研究表明,施用化肥促进氮挥发,而有关有机肥的影响并未取得一致结论。Banerjee等<sup>[10]</sup>和李菊梅等<sup>[11]</sup>研究表明有机肥施用对氮挥发有抑制作用,但也有研究认为有机质能增加 $\text{NH}_4^+$ 有效性,从而加强氮挥发<sup>[12]</sup>。同时,相关研究表明,在不同的耕作方式下土壤氮挥发也各不相同<sup>[13-16]</sup>。Mkhabela等<sup>[15]</sup>和Rochette等<sup>[16]</sup>报道,免耕导致肥料在土壤表层的富集,从而促进氮的挥发;而Palma等<sup>[13]</sup>和Griggs等<sup>[14]</sup>研究表明,耕作措施并不影响氮的挥发。不同的研究结论可能与土壤类型掩盖了耕作措施对氮挥发的影响有关<sup>[16]</sup>。总之,施化肥能促进氮挥发,但有机肥施用对土壤氮挥发的影响说法不一,且耕作对土壤氮挥发的研究还有欠缺,因此有待进一步探讨施肥与耕作对土壤氮挥发的影响。本文就不同类型氮肥与耕作方式对稻田氮挥发的影响展开讨论,以期有效减少肥料氮损失和降低氮环境危害提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验点概况

试验地点为湖北省武穴市大法寺镇中桂村试验基地,此试验田已连续30年实行油菜免耕-水稻翻耕轮作制度。试验田地处 $115^\circ30'E$   $29^\circ55'N$ ,海拔20 m,土壤为潴育型水稻土,泥沙田,土壤肥力中等,质地为重壤,耕层20 cm,犁底层10 cm。试验田土壤基本理化性状为:pH值6.58,有机质31.7 mg/kg,全氮3.57 g/kg,铵态氮2.43 mg/kg,硝态氮4.37 mg/kg,全磷0.70 g/kg,速效磷3.65 mg/kg,速效钾111 mg/kg。

选取2009年5月下旬-10月上旬试验进行研究,所用中稻品种为两优培9(*Oryza sativa* L.)。

### 1.2 试验设计与田间管理

试验各区随机设计,耕作为主区,分免耕(NT)与翻耕(CT)2个水平;氮肥类型为副区,分猪粪(SM)、尿素(U)、包膜尿素(CU)、新型缓效有机肥(脲肽磷复肥,SR)和复合肥(CF)等5个水平;共有10个处理,每个处理3次重复,每个小区面积45 m<sup>2</sup>,小区之间设埂,覆塑料薄膜,埂高20 cm。

6月4日用浓度为36%克无踪喷雾除草(3 L/hm<sup>2</sup>),6月5日泡田,6月8日用犁耙对CT处理进行翻耕,耕作深度为20 cm,耕作3次;免耕处理不犁耕,其他农艺措施均与翻耕处理一致。在耕作完毕,所有小区立即表施底肥,施肥方式与当地相同:水稻全生育期氮、磷、钾施用标准为:N 210 kg/hm<sup>2</sup>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 105 kg/hm<sup>2</sup>, K<sub>2</sub>O 240 kg/hm<sup>2</sup>。6月9日播种,播种量22.5 kg/hm<sup>2</sup>,直播前稻谷先于清水中浸泡12 h,后与旱育保姆充分混匀。对于猪粪、尿素与复合肥处理,底肥施N 84 kg/hm<sup>2</sup>,其余氮以尿素追施,底肥与追肥比为4:2:2:2,于6月23日、7月17日和8月26日追3次肥,磷肥和钾肥作为基肥于播种前一次性施入,在水稻生长期不追磷钾肥;对于包膜尿素和新型缓效有机肥处理,氮、磷、钾肥一次性施入,不足磷、钾肥以过磷酸钙(15% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)和氯化钾(60% K<sub>2</sub>O)补足。稻田进行浅水灌溉,10月7日收获。除猪粪来自当地农户,其余所用肥料来自中化化肥有限公司,各种肥料氮、磷、钾含量见表1。

### 1.3 $\text{NH}_3$ 挥发测定

采用动态密闭室法测定氮的挥发量,原理是用抽气减压的办法将田面挥发到空气中的氮吸入装有1%硼酸的洗气瓶使其吸收固定于硼酸溶液中,再用0.01 mol/L标准盐酸滴定硼酸所吸收的 $\text{NH}_3$ 的量,

即为氨挥发损失量。田间采集氨气的装置见文献 [17]。稻田采气时调节挥发室体积和抽气流量,使换气频率控制在  $151 \text{ S}^{-1}$ 。同时以装有灌溉水的塑料盆为对照测定大气氨背景值。在每次施肥后 1 3 5 7 d 进行氨气采集,此后大约每周采集 1 次。

1.4 数据处理

用 SPSS 11.5 软件先对原始数据进行正态分布检测,符合正态分布再进行二元方差分析(Two - Way ANOVA)。

2 结果与分析

图 1 为不同氮肥种类与耕作方式条件下稻田土壤氨挥发通量的季节性变化规律。对于猪粪、尿素和复合肥处理,施用氮肥促进氨挥发,且施用氮肥后 1 ~ 3 d,氨通量达到峰值,在  $205.7 \sim 709.7 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$  波动,随后迅速降低,1 个星期后降到稳定的低水平。猪粪、尿素和复合肥处理氨通量在第 2 次与第 3 次追肥较第 1 次追肥小,其峰值分别在  $125.1 \sim 288.9 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$  和  $113.6 \sim 261.8 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$  波动,而第 1 次追肥氨挥发量最小;猪粪、尿素和复合肥处理平均氨通量分别为  $62.1、41.7$  和  $25.5 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ,且两两间差异显著( $P < 0.05$ )。对于包膜尿素与新型缓效有机肥处理,水稻全生育期间氨挥发量远小于猪粪、尿素和复合肥处理( $P < 0.05$ ),且氨挥发通量变化不大,在  $15.0 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$  上下波动,同时两者差异不显著( $P > 0.05$ )。对于免耕与翻耕处理,免耕处理氨挥发通量显著高于翻耕处理,前者在  $3.64 \sim 184.9 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$  波动,而后者在  $2.65 \sim 100.7 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$  波动。

表 1 所使用肥料氮、磷、钾含量

Tab. 1 Contents of N, P and K in used N fertilizers

肥料 Fertilizers	TN/%	TP/%	TK/%
SM	2.14	1.02	0.70
U	46.3		
CU	46.3		
SR	16	8	14
CF	15	15	15

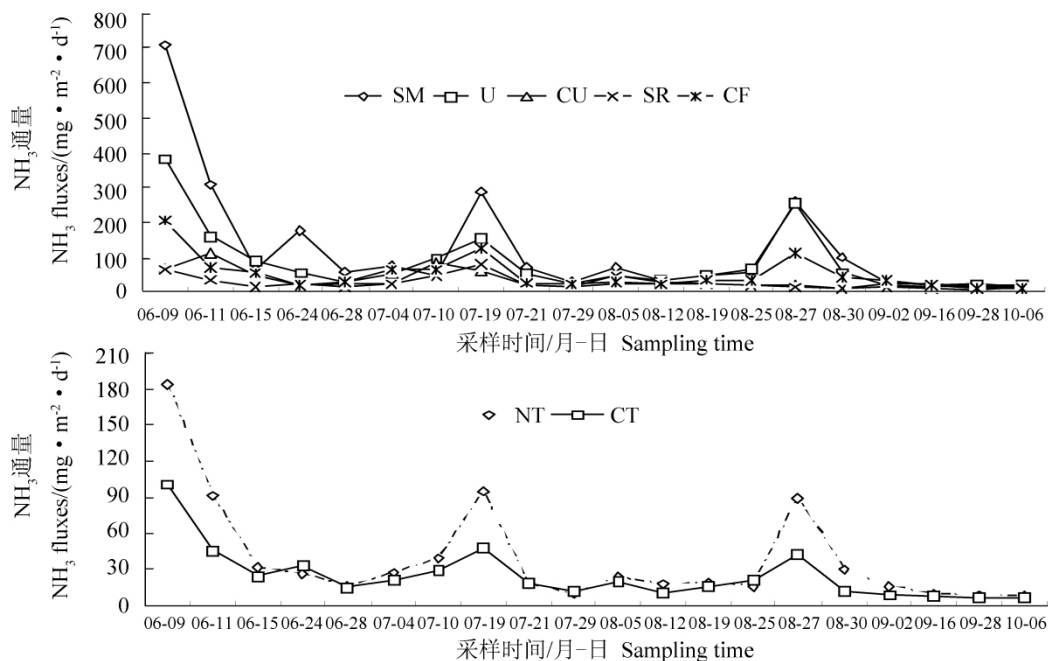


图 1 稻田土壤氨挥发通量的季节性变化

Fig. 1 Seasonal changes of  $\text{NH}_3$  volatilization fluxes from paddy soils during rice growing seasons

从表 2 可知,耕作显著影响稻田土壤总氮挥发量。免耕处理总氮挥发量为  $(3.21 \pm 2.76) \text{ g}/\text{m}^2$ ,高出翻耕处理  $(2.26 \pm 1.31) \text{ g}/\text{m}^2$  的 42%。不同种类氮肥施用显著影响着稻季土壤氮挥发( $P < 0.001$ ),猪粪处理总氮挥发量最大,为  $(4.74 \pm 3.82) \text{ g}/\text{m}^2$ ,然后依次为尿素、复合肥、包膜尿素与新型缓效有机肥。其中包膜尿素与新型缓效有机肥总氮挥发量相当( $P > 0.05$ ),分别为猪粪、尿素与复合肥处理的 29% ~ 38%、40% ~ 53% 与 59% ~ 78%。由表 2 还可以看出,氮肥种类与耕作措施交互作用显著影响着稻田土壤总氮挥发量( $F = 74.91, P < 0.001$ )。

施肥后1周内稻田土壤氮挥发损失量见表3。对于猪粪、尿素与复合肥处理,底肥施用后1周内氮挥发损失量最大,占总氮挥发量的13%~30%;第2次和第3次追肥次之,占8%~16%;而第1次追肥最小,占6%~9%。对于包膜尿素与新型缓效肥处理,不同追肥期的氮挥发量占总挥发量比例相当,且每个追肥期氮挥发量占总挥发量比例两处理差异不显著( $P > 0.05$ )。

### 3 讨论

对于猪粪、尿素与复合肥处理,每次施肥后1~3 d即出现氮释放峰值,此后迅速降低,这与国内外报道较为一致<sup>[18-21]</sup>。这是由于肥料氮(复合肥与尿素)在脲酶作用下释放出 $\text{NH}_4^+$ ,同时猪粪本身含高浓度 $\text{NH}_4^+$ ,因此释放出的 $\text{NH}_4^+$ 很快与水结合,形成高的氨分压,导致大量氨气挥发<sup>[22]</sup>。此后随着 $\text{NH}_4^+$ 浓度迅速降低,氨挥发降低。施用底肥后,氨挥发大于追肥,这与底肥氮施用量高有关。第2次与第3次追肥氨挥发大于第1次追肥,这与试验地气温有关。第2次与第3次追肥出现在7~8月,此时试验地气温在一年中最高,高温促进氨挥发<sup>[5,18]</sup>。

表2 稻季土壤总氮挥发量

Tab.2 Cumulative  $\text{NH}_3$  volatilization from paddy soils under different treatments during rice growing season  $\text{g/m}^2$

耕作 Tillage	氮肥 N fertilizer	总氮挥发量 Total $\text{NH}_3$ volatilization	
NT	SM	5.51a	
	U	4.07b	
	CU	1.96d	
	SR	1.72d	
	CF	2.78c	
	CT	SM	3.96a
		U	2.77b
		CU	1.67c
		SR	1.02d
	CF	1.87c	
方差分析 ANOVA			
	T	20.44***	
	F	10.85***	
	T × F	74.91***	

T: 耕作; F: 氮肥; \*\*\*:  $P < 0.001$ 。同一列不同小写字母表示在5%水平上差异显著。

T, tillage; F, N fertilizer, \*\*\*,  $P < 0.001$ . Different lower cases in a column denote significant difference at the 5% level.

表3 追肥后1周稻田土壤氮挥发损失量

Tab.3  $\text{NH}_3$  losses from volatilization during 1 week after N fertilization  $\text{g/m}^2$

氮肥 N fertilizer	底肥 Basal fertilizer	追肥1 Topdressing - 1	追肥2 Topdressing - 2	追肥3 Topdressing - 3	总氮挥发量 Total losses
SM	1.43a	0.43a	0.55a	0.53a	4.74a
U	0.85b	0.21b	0.37b	0.42b	3.42b
CU	0.21d	0.12c	0.18d	0.22d	1.61d
SR	0.19d	0.09c	0.11cd	0.10e	1.37d
CF	0.43c	0.18b	0.26c	0.34c	2.32c

同一列不同小写字母表示在5%水平上差异显著。

Different lower cases in a column denote significant difference at the 5% level.

对于缓效肥处理(包膜尿素与新型缓效有机肥),在水稻生育期氮挥发保持较低水平,其原因可能是包膜尿素中包膜材料阻隔膜内尿素与土壤脲酶的直接接触及阻碍膜内尿素溶出过程所必需的水分转移,使得参与氮挥发的底物尿素态氮逐渐释放出来<sup>[22-23]</sup>。新型缓效有机肥脲肽磷复肥的主要成分是有有机氮(例如氨基酸等)在土壤微生物的作用下经过一段时间才能被矿化<sup>[22]</sup>,因此在水稻生育期缓效肥处理氮挥发保持在一个较稳定的低水平;同时,缓效肥处理土壤脲酶活性明显低于普通氮肥<sup>[22]</sup>,这是土壤氮挥发量较低的另一重要原因,这也导致了缓效肥处理氮挥发损失显著低于其他3个肥料处理。

Li 等<sup>[23]</sup>、胡小凤等<sup>[22]</sup>和赵斌等<sup>[24]</sup>都已报道施用缓释肥料能够显著降低氮挥发损失。

本研究中,相对于尿素与复合肥处理,猪粪处理具有更高的氮挥发,这与 Das 等<sup>[7]</sup>的报道并不一致,这可能与所使用猪粪  $\text{NH}_4^+$  含量高低不同有关。Das 等所使用的猪粪经腐熟降解,  $\text{NH}_4^+$  显著降低,而我们所使用猪粪未经腐熟,含有高浓度  $\text{NH}_4^+$ 。此外,我们的田间观测表明,施用猪粪能促进藻类繁殖。研究表明,藻类繁殖促进了氮挥发损失<sup>[4]</sup>,其原因可能是藻类光合作用降低了田面水  $\text{CO}_2$  浓度,因此提高了田面水 pH 值。

复合肥处理氮挥发显著低于尿素处理,这与复合肥组分有关。本试验所使用复合肥为硫硝酸铵、磷酸铵与氯化钾添加一定比例的粘合剂和填充料所制,因此在粘合剂和填充料保护下,施入稻田中有部分氮并未完全溶于水,使得稻田氮挥发降低。苏芳等<sup>[25]</sup>报道,相对于尿素,施用硫硝酸铵能降低土壤氮挥发损失,显著提高 N 肥利用率。而对于包膜尿素与新型缓效有机肥,施入土壤后,只有少部分的氮首先释放出来,其余的氮素需要经过一定的时间才能逐渐被矿化或释放,使得氮挥发相对较低,两处理氮挥发差异不显著。

对于猪粪、尿素与复合肥处理,其底肥施用后 1 周内氮挥发损失量大于各个追肥期,表明稻田在施肥后 1 周是氮挥发损失的高峰期,从而导致大量肥料的流失,因此是采取必要措施减少稻田氮挥发的关键时期。然而本研究底肥施用后 1 周内氮挥发量占总挥发量比例远小于彭世彰等<sup>[21]</sup>的 83% ~ 85% 和 Lin 等<sup>[6]</sup>的 72% ~ 84%,这可能与试验追肥量有关。本试验追肥量占总施肥量的 40%,小于彭世彰等<sup>[21]</sup>的 73% 和 Lin 等<sup>[6]</sup>的 50%。

土壤氮挥发受自然、人为干扰等多种因素的影响,其中耕作是最重要的影响因素之一<sup>[15]</sup>。然而目前有关耕作对氮挥发的影响研究结论并不一致。Griggs 等<sup>[14]</sup>研究表明耕作措施不影响土壤氮的挥发,而 Mkhabela 等<sup>[15]</sup>和 Rochette 等<sup>[16]</sup>研究指出,耕作显著影响土壤氮挥发。本研究表明,相对于翻耕,免耕显著提高稻田土壤氮挥发。我们的研究<sup>[25]</sup>和前人的报道<sup>[16]</sup>都表明免耕能提高表层土壤脲酶活性;同时,免耕表土层作物残茬的存在减少了肥料与土壤颗粒的接触,降低了土壤颗粒对肥料氮的固定<sup>[16]</sup>,因此促进了免耕土壤氮挥发;此外,部分肥料落入翻耕土壤孔隙,这也是导致翻耕土壤氮挥发降低的一个重要因素<sup>[16]</sup>。此外,虽然免耕具有省时省工、改善土壤肥力及结构等特点<sup>[26]</sup>,但免耕更高的氮挥发说明了免耕稻田对肥料氮吸收降低,进而影响水稻产量。因此必须加强免耕稻田肥料氮的氮挥发研究,以提高免耕稻田氮肥利用率,进而降低氮的环境危害。

## 4 结 论

试验表明,不同类型氮肥与耕作措施影响着稻田土壤氮挥发。相对于尿素、复合肥与猪粪,缓效肥(包膜尿素与新型缓效有机肥)降低了稻田田面水  $\text{NH}_4^+$  浓度,从而有效地抑制氮挥发。然而,稻田免耕提高了表层土壤脲酶活性,降低了肥料与土壤颗粒接触,促进了土壤氮挥发。因此应加强研究降低稻田氮挥发的技术途径,以提高稻田肥料氮的利用率,从而提高农业经济效益和降低由此引起的环境污染。

### 参考文献:

- [1] 彭少兵, 黄见良, 钟旭华, 等. 提高中国稻田氮肥利用率的研究策略[J]. 中国农业科学, 2002, 35(9): 1095 - 1103.
- [2] 李庆逵. 中国农业持续发展中的肥料问题[M]. 南昌: 江西科学技术出版社, 1997.
- [3] 沈善敏. 氮肥在中国农业发展中的贡献和农业中氮的损失[J]. 土壤学报, 2002, 39(增刊): 12 - 25.
- [4] Hayashi K, Nishimur S, Yagi K. Ammonia volatilization from a paddy field following applications of urea: rice plants are both an absorber and an emitter for atmospheric ammonia[J]. Sci Total Environ, 2008, 390: 485 - 494.
- [5] 田光明, 蔡祖聪, 曹金留, 等. 镇江丘陵区稻田化肥氮的氮挥发及其影响因素[J]. 土壤学报, 2001, 38(3): 324 - 332.
- [6] Lin D X, Fan X H, Hu F, 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.
- [7] Das P, Kim K H, Sa J H, et al. Emissions of ammonia and nitric oxide from an agricultural site following application of different synthetic fertilizers and manures[J]. Geosci J, 2008, 12(2): 177 - 190.
- [8] 董文旭, 胡春胜, 张玉铭. 不同施肥土壤对尿素挥发的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 9(3): 11 - 14.
- [9] Norman R J, Wilson J C E, Slaton N A, et al. Nitrogen fertilizer sources and timing before flooding dry-seeded, delayed -

- flood rice [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2009, 73: 2184 – 2190.
- [10] Banerjee B, Pathak H, Aggarwal P K. Effect of dicyandiamide, farmyard manure and irrigation on crop yields and ammonia volatilization from an alluvial soil under a rice (*Oryza sativa* L.) – wheat (*Triticum aestivum* L.) cropping system [J]. *Biol Fertil Soils*, 2002, 36: 207 – 214.
- [11] 李菊梅, 徐明岗, 秦道珠, 等. 有机肥无机肥配施对稻田氨挥发和水稻产量的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2005, 11 (1): 51 – 56.
- [12] 张庆利, 张民, 杨越超, 等. 碳酸氢铵和尿素在山东省主要土壤类型上的氨挥发特性研究 [J]. *土壤通报*, 2002, 33 (1): 32 – 34.
- [13] Palma R M, Saubidet M I, Rímolo M, et al. Nitrogen losses by volatilization in a corn crop with two tillage systems in the *Argentina pampa* [J]. *Commun Soil Sci Plant Anal*, 1998, 29: 2865 – 2879.
- [14] Griggs B R, Norman R J, Wilson Jr C E, et al. Ammonia volatilization and nitrogen uptake for conventional and conservation tilled dry – seeded, delayed – flood rice [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2007, 71: 745 – 751.
- [15] 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 Till Res*, 2008, 98: 187 – 199.
- [16] 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 Till Res*, 2009, 103: 310 – 315.
- [17] Tian G M, Cao J L, Cai Z C, et al. Ammonia volatilization from winter wheat field top – dressed with urea [J]. *Pedosphere*, 1998, 8(4): 331 – 336.
- [18] Sogaard H T, Sommer S G, Hutchings N J, et al. Ammonia volatilization from field – applied animal slurry—the ALFAM model [J]. *Atmos Environ*, 2002, 36: 3309 – 3319.
- [19] 曹志洪, 林先贵, 胡正义. 论“稻田圈”在保护城乡生态环境中的功能. II. 稻田土壤氮素养分的累积、迁移及其生态环境意义 [J]. *土壤学报*, 2006, 43(2): 256 – 260.
- [20] 邓美华, 尹斌, 张绍林, 等. 不同施氮量和施氮方式对稻田氨挥发损失的影响 [J]. *土壤*, 2006, 38(3): 263 – 269.
- [21] 彭世彰, 杨士红, 徐俊增. 节水灌溉稻田氨挥发损失及影响因素 [J]. *农业工程学报*, 2009, 25(8): 35 – 39.
- [22] 胡小凤, 王正银, 孙倩倩, 等. 缓释复合肥料在不同 pH 值紫色土中氨挥发特性 [J]. *农业工程学报*, 2009, 25(6): 100 – 103.
- [23] Li J Y, Hua Q X, Tan J F, et al. Mineral coated fertilizer effect on nitrogen—use efficiency and yield of wheat [J]. *Pedosphere*, 2005, 15(4): 526 – 531.
- [24] 赵斌, 董树亭, 王空军, 等. 控释肥对夏玉米产量及田间氨挥发和氮素利用率的影响 [J]. *应用生态学报*, 2009, 20 (11): 2678 – 2684.
- [25] 苏芳, 黄彬香, 丁新泉, 等. 不同氮肥形态的氨挥发损失比较 [J]. *土壤*, 2006, 38(6): 682 – 686.
- [26] Li C F, Yang J, Zhang C, et al. Effects of short – term tillage and fertilization on grain yields and soil properties of rice production systems in central China [J]. *J Food Agr Environ*, 2010, 8(2): 577 – 584.