

# 猪粪施用对成都平原稻季氨挥发特征的影响

李喜喜, 杨娟\*, 王昌全, 白根川, 游来勇, 易云亮, 黄帆, 李博, 曾鹏宇

(四川农业大学资源学院, 成都 611130)

**摘要:**采用通气法开展田间小区原位监测试验, 分别设置对照、常规化肥、猪粪和化肥配施、单施猪粪等7个处理, 探讨不同比例猪粪施用对稻田氨挥发特征及环境、效益的影响。结果表明, 氨挥发通量在施肥后的第2 d达到峰值, 然后迅速下降, 氨挥发主要集中在施肥后的1周左右。在整个监测期间, 氨挥发平均通量为 $2.87\sim 5.89\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ , 氨挥发累积量为 $43.72\sim 87.38\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 占氮肥施用量的24.27%~29.17%; 猪粪和化肥配施处理较常规施肥处理能降低氨挥发累积量4.21%~16.74%, 猪粪和化肥配施也有效降低了田面水铵态氮和硝态氮浓度, 单施过量猪粪则促进了氨挥发; 氨挥发通量与田面水铵态氮浓度呈明显线性正相关。猪粪和化肥配施处理较常规施肥处理稻谷增产 $196\sim 779\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 同时猪粪的施用也降低了稻田肥料投入成本, 有效提高了农民纯收入。综合环境及经济效益, 化肥+猪粪50%处理的猪粪投入量最佳, 稻田猪粪消耗量为 $13\ 264.54\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 生猪承载量为 $20.19\text{ 头}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

**关键词:**水稻; 氨挥发; 猪粪; 铵态氮

中图分类号: X713 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2015)11-2236-09 doi:10.11654/jaes.2015.11.028

## Effects of Pig Manure Applications on Ammonia Volatilization in Soil During Rice Season in Chengdu Plain

LI Xi-xi, YANG Juan\*, WANG Chang-quan, BAI Gen-chuan, YOU Lai-yong, YI Yun-liang, HUANG Fan, LI Bo, ZENG Peng-yu

(College of Resources, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

**Abstract:** A field plot experiment was conducted to examine the ammonia volatilization in paddy field supplied with pig manure during rice season. Ammonia volatilization mainly occurred within one week or so after fertilization. The fluxes of ammonia volatilization peaked on the second day after fertilization, and then decreased rapidly. During the monitoring period, the average flux of ammonia volatilization was  $2.87\sim 5.89\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ , and the cumulative amount of ammonia volatilization was  $43.72\sim 87.38\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , accounting for 24.27%~29.17% of total amount of nitrogen fertilizer. Compared with the conventional fertilization, applications of pig manure with conventional fertilizers reduced cumulative amount of ammonia volatilization by 4.21%~16.74%, whereas applying pig manure alone would promote ammonia volatilization. The combined applications of pig manure and chemical fertilizer reduced ammonium nitrogen and nitrate in the water. The flux of ammonia volatilization showed a significant linear positive correlation with ammonium nitrogen concentration in the surface water. In the treatments with combined pig manure and chemical fertilizer, the rice grain yields increased by  $196\sim 779\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , as compared with chemical fertilizer alone. Moreover, the applications of pig manure decreased the inputs of chemical fertilizers and thus increased farmers' net income. Taking into consideration of the environmental and economic benefits, chemical fertilizer plus 50% manure would be the optimal application amount, which could consume swine manure up to  $13\ 264.54\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  and carry pigs up to  $20.19\text{ pigs}\cdot\text{hm}^{-2}$ .

**Keywords:** rice; ammonia volatilization; pig manure; ammonium nitrogen

随着我国畜禽养殖业的迅猛发展, 养殖业废弃物大幅增加<sup>[1-2]</sup>。种养过程长期分离造成大量的粪便堆积或直接排放, 引发了一系列区域环境危害<sup>[3]</sup>。据统计, 我国主要粮食作物氮肥利用率30%~35%, 每年农田氮肥损失率在33.3%~73.6%之间<sup>[4]</sup>, 且在稻田土壤生态

系统中, 氨挥发损失占施氮量的10%~38%, 是稻田氮肥损失的主要途径<sup>[5-7]</sup>。大气中的 $\text{NH}_3$ 被氧化及与酸反应能够引起雾霾天气<sup>[8]</sup>。同时,  $\text{NH}_3$ 通过干湿沉降返回陆地和水体, 造成水体富营养化, 加剧温室效应, 促进土壤酸化<sup>[9-10]</sup>。氨挥发受土壤含水量、温度、pH、耕作方法、施肥方式、肥料类型等影响<sup>[11-15]</sup>。如何降低氨挥发损失, 提高氮肥利用率, 充分发挥氮肥增产效益, 保护生态环境是我国农业亟待解决的问题。

畜禽粪便农田施用是实现畜禽粪便资源化的直接途径, 在减少化肥用量、降低农业环境压力等方面

收稿日期: 2015-05-11

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划(2012BAD14B18-02); 四川省科技支撑计划项目(2012JZ003, 2013NZ0028)

作者简介: 李喜喜(1989—), 男, 内蒙古呼和浩特人, 硕士研究生, 从事土壤质量与环境可持续研究。E-mail: 284645478@qq.com

\*通信作者: 杨娟 E-mail: 465948121@qq.com

具有重要意义<sup>[16]</sup>。猪粪含有大量植物生长所必需的营养物质和微量元素,以及多种有益微生物和酶,施入土壤后,对于改善土壤物理特性、提高土壤肥力、增加作物生产力具有明显效应<sup>[17-19]</sup>。畜禽粪便农田施用对土壤氨挥发特征的影响研究报道较多,但大都基于盆栽或光温培养<sup>[20]</sup>,而大田试验不同用量猪粪对稻田氨挥发特征及环境效益的影响尚不明确。为此,本研究通过田间原位监测试验,设置不同梯度猪粪施用量,探讨猪粪施用对稻田氨挥发特征及环境、效益的影响,为猪粪合理施用、减少氮肥损失、防控农业面源污染提供理论依据。

## 1 试验与方法

### 1.1 试验地点与材料

试验地点位于都江堰天马镇(30°57′0.99″N; 103°44′3.69″E,海拔 648.04 m),地处成都平原的西北边缘,属四川盆地中亚热带湿润季风气候区,年均气温 15.2℃,年均降水量近 1200 mm,年均无霜期 280 d,历年平均日照时数 1 016.9 h。供试地块土壤为灰色冲积物发育的淹育水稻土,土壤肥力均匀,灌排方便。0~20 cm 土层土壤基本化学性质为:pH6.98,有机质 28.40 g·kg<sup>-1</sup>,全氮 1.87 g·kg<sup>-1</sup>,全磷 0.86 g·kg<sup>-1</sup>,全钾 32.2 g·kg<sup>-1</sup>,碱解氮 176 mg·kg<sup>-1</sup>,有效磷 11.6 mg·kg<sup>-1</sup>,速效钾 58.2 mg·kg<sup>-1</sup>。供试猪粪由都江堰德宏农业公司提供,含 N 1.75%、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 5.46%、K<sub>2</sub>O 1.59%,含水率为 61.14%;无机肥料分别为市售尿素(46.4%N)、过磷酸钙(12% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)、氯化钾(60% K<sub>2</sub>O)。水稻品种为 F 优 498。

### 1.2 试验设计

本试验为田间定位试验,从 2012 年 10 月开始,为冬小麦-水稻轮作体系,水稻季与小麦季所有处理均一致,本文针对 2014 年水稻季试验结果进行研究讨

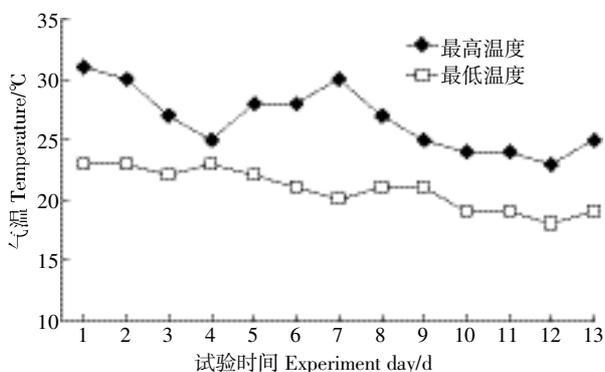


图 1 氨挥发监测期间气温变化

Figure 1 Dynamics of temperature during experiment

论。试验共设对照(CK)、常规化肥(NPK)、化肥+猪粪 25%(NKM1)、化肥+猪粪 50%(NKM2)、猪粪 100%(M3)、猪粪 150%(M4)、猪粪 200%(M5) 7 个处理,3 次重复,小区面积 20.0 m<sup>2</sup>,各区组随机排列。小田间田埂用塑料薄膜覆盖,以防肥、水相互渗透,四周设保护行,每个小区均单设进、排水口。水稻在 2014 年 5 月 30 日移栽,株、行距分别为 13、28.5 cm,每穴定植 2 株。水稻移栽后保持田面水层 5~12 cm,田面水低于 5 cm 时在傍晚进行灌溉,施肥后 13 d 气温变化如图 1 所示。所有肥料均按当地施肥习惯作为基肥一次性施入,猪粪施用量按照常规化肥施氮量折算,不足养分用化肥补充。具体的施肥处理见表 1。

### 1.3 样品采集与测试

#### 1.3.1 氨挥发采集与测试

稻田氨挥发采用通气法测定<sup>[21]</sup>。氨挥发采集装置如图 2 所示。由内径 16 cm、高 25 cm,无底的硬质 PVC 管制成,取样前将厚度分别为 2、3 cm 的海绵均匀浸入 25 mL 磷酸甘油溶液(50 mL 磷酸+40 mL 丙三醇,定容至 1000 mL),置于 PVC 管中,下层用 2 cm 厚海绵放置于距管底 15 cm 处,用于吸收土壤挥发出来的氨,上层放 3 cm 厚海绵与 PVC 管顶部相平,用于防止外界气体污染和灰尘的进入。每个小区不同位置设置 2 个氨挥发收集装置。施肥后当天将采集装置放入田间,立即进行氨挥发收集取样,放置 24 h;第二天上午 8:00 开始取样,每次在 8:00—9:00 间完成取样。在施肥后的第 1 周,每天取样 1 次,之后每隔 1 d 取样一次。取样时将下层海绵取出,立即放入自封袋,密封,同时下层放入另一块 2 cm 厚浸过磷酸甘油溶液的海绵,重新变动 PVC 管放置位置,进行下一次取样,上层海绵视干湿情况,2~3 d 更换 1 次。把取下的海绵带回实验室,分别装入 500 mL 的塑料瓶中,加入 300 mL 1 mol·L<sup>-1</sup> 的 KCl,振荡 1 h,浸提液中的铵态氮

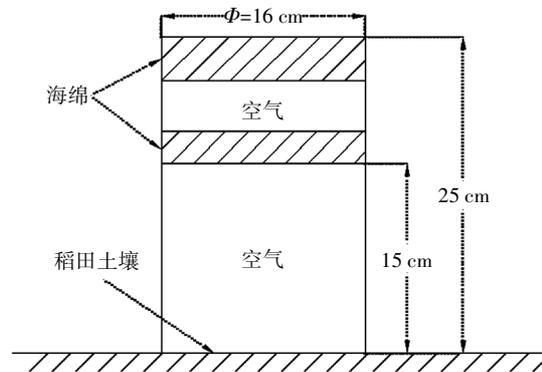


图 2 稻田氨挥发测定装置

Figure 2 Device used for ammonia collection

表1 不同施肥处理方案(kg·hm<sup>-2</sup>)  
Table 1 Fertilization scheme(kg·hm<sup>-2</sup>)

处理 Treatment	化肥 Fertilizers			猪粪干重 Pig manure(Dry weight)
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	
对照 Control(CK)	—	—	—	—
常规化肥 Chemical fertilizer(NPK)	180	90	90	—
化肥+猪粪 Chemical fertilizer+pig manure 25%(NKM1)	135	0	81.6	2 578.6
化肥+猪粪 Chemical fertilizer+pig manure 50%(NKM2)	90	0	13.1	5 154.6
猪粪 Pig manure 100%(M3)	—	—	—	10 312.5
猪粪 Pig manure 150%(M4)	—	—	—	15 467.1
猪粪 Pig manure 200%(M5)	—	—	—	20 625.0

注：“—”没有施用肥料。

Note: “—” No fertilizer applied.

用靛酚蓝比色法进行测定。

田间土壤氨挥发通量由公式(1)计算,在水稻生育期间,氨挥发累积量及氨挥发损失率分别根据公式(2)、(3)计算:

$$F_i = (M/A \times D) / 100 \quad (1)$$

$$Y = \sum_{i=1}^n F_i (n=1, 2, 3 \dots 13) \quad (2)$$

$$\text{氨挥发损失率} = (Y/N) \times 100\% \quad (3)$$

式中:  $F_i$  为第  $i$  天采样时氨挥发通量, kg N·hm<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>;  $M$  为通气法单个装置平均每次测得的氨(NH<sub>3</sub>-N)挥发量, mg;  $A$  为收集装置的横截面积, m<sup>2</sup>;  $D$  为每次连续收集的时间, d;  $Y$  为氨挥发累积量, kg N·hm<sup>-2</sup>;  $N$  为氮肥总施肥量, kg N·hm<sup>-2</sup>。

### 1.3.2 田面水采集与测试

稻田田面水采样与氨挥发采集时间一致,在不扰动土层的情况下,每个小区用 100 mL 医用注射器,采用 5 点“S”型采样法小心抽取 5 处田面水混合成一个水样,注入聚乙烯塑料瓶,带回实验室经定量滤纸初步过滤后分析测定,少量不能测定的,滴加浓硫酸并冰冻保存,一周内测样完毕。硝态氮(NO<sub>3</sub>-N)用紫外分光光度法测定。

### 1.4 数据处理

本实验数据统计分析利用 Microsoft Excel 2007 和 SPSS 19.0 软件对试验数据进行分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同施肥稻田氨挥发动态特征

稻田施肥后氨挥发通量随时间的动态变化如图 3 所示。施肥后各处理氨挥发通量变化趋势基本相似,均在施肥后的第 1 d 达到峰值,3 d 内下降幅度最大,之后随着时间的推移逐渐趋于对照水平,各施肥

处理较高氨挥发通量均维持在 1 周之内。比较施肥后的第 1 d 各施肥处理氨挥发通量,等氮水平下,与 NPK 处理相比,猪粪和化肥配施、单施猪粪处理的氨挥发通量分别降低了 5.28%~19.57% 和 22.57%。高氮处理 M4、M5 氨挥发通量最大,较 NPK 处理提高了 3.45%~23.98%。具体氨挥发通量表现为 M5>M4>NPK>NPKM1>NPKM2>M3>CK。氨挥发主要集中于施肥后的半个月左右,适量的猪粪施用能有效降低氨挥发通量。

### 2.2 不同施肥稻田田面水 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 的变化

稻田施肥后田面水 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度随时间的动态变化如图 4 所示。各处理 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度变化规律基本一致,常规化肥和猪粪配施处理峰值均出现在施肥后第 1 d,单施猪粪处理峰值出现在第 3 d,各施肥处理田面水较高浓度 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 均维持在 1 周之内,随着时间的推移浓度逐渐降低,并下降至对照水平。降雨会对田面水氮素浓度产生稀释作用,从而使施肥后第 5 d 田面水表现出氮素浓度迅速降低并接近对照的现象。NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 与 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、氨挥发通量变化规

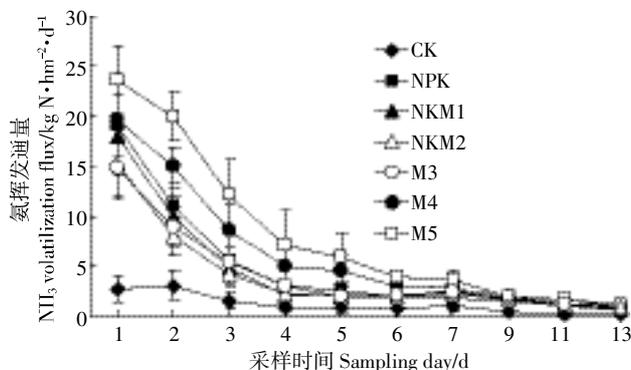


图3 不同施肥处理稻田氨挥发动态变化

Figure 3 Dynamics of ammonia volatilization in different fertilizer treatments

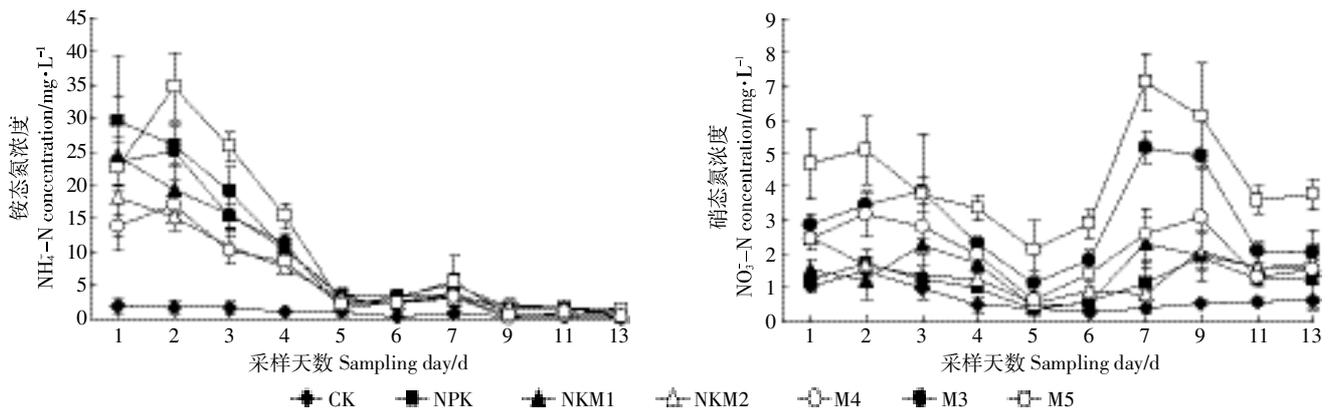


图4 不同施肥处理稻田面水铵态氮和硝态氮动态变化

Figure 4 Concentrations of ammonium-nitrogen ( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ) and nitrate ( $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ) in water in different treatments

律则截然相反,呈现此消彼长的关系。 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 在施肥后的前7 d内均表现出了较低的浓度,随着时间的推移下降缓慢;在第7 d迅速升高,达到峰值,并维持在较高浓度,之后随着时间的推移逐渐降低,并趋于对照水平。这可能与土体 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 释放速度与硝化-反硝化间的转化有关。旱作小麦使土体 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量增加,水稻移栽后,水体渗漏,致使 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量有所下降,随着时间的推移,硝化作用变强,并大于反硝化作用,致使 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度升高;随后,由于土壤淹水, $\text{O}_2$ 欠缺,硝化作用减弱,致使 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 损失量远大于硝化作用的生成量, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的含量随之下降<sup>[2]</sup>。等氮水平下,与NPK处理相比,猪粪和化肥配施能明显降低 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度,可以有效降低氮素流失,高氮猪粪处理提高了田面水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度。

### 2.3 氨挥发通量与田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度相关性分析

稻田氨挥发通量与其对应小区田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度关系如图5所示。NPK、NKM1、NKM2、M3、M4和M5处理其决定系数分别为0.8557、0.8066、0.8287、0.8933、0.7273和0.7793,表明各施肥处理的氨挥发通量和对应田面水中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度呈线性正相关关系,即田面水中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度是影响稻田氨挥发通量的重要因素。因此,控制水稻田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度是控制氨挥发通量的主要途径,也是决定稻田氮素养分利用效率的根本途径之一。

### 2.4 不同施肥稻田氨挥发量比较

从表2可以看出,除对照外,氨挥发平均通量在 $2.87\sim 5.89\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 之间,施肥显著提高了稻田平均氨挥发通量。等氮水平下,相比NPK处理,NKM2处理能显著降低平均氨挥发通量12.03%;随着猪粪投入量的增加,氨挥发通量显著上升,M4、M5处理分别是NPK处理的1.32倍和1.74倍。

不同施肥处理氨挥发累积量存在很大差异,除对照外,均在 $43.72\sim 87.38\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 之间,具体表现为 $\text{M5}>\text{M4}>\text{NPK}>\text{NKM1}>\text{NKM2}>\text{M3}>\text{CK}$ 。施肥明显提高了氨挥发累积量,各施肥处理氨挥发累积量是对照的3.22~6.64倍。相比NPK处理,在等氮水平上,猪粪和化肥配施、单施猪粪处理氨挥发累积量分别降低4.21%~16.72%和10.10%,显著降低了稻田氨挥发;单施高氮猪粪M4、M5处理较NPK处理氨挥发累积量提高了28.97%和66.44%,显著提高了氨挥发,造成氮肥损失。

从氨挥发损失率来看,施肥后各处理间均在24.27%~29.17%之间,NPK处理氨挥发损失率最高,达29.17%;猪粪和化肥配施、单施猪粪较NPK处理减少1.23%~4.9%。综上所述,猪粪适量配施化肥,能

表2 不同施肥处理氨挥发特征比较

Table 2 Comparison of ammonia volatilization in different fertilization

处理 Treatment	平均挥发通量 Average ammonia volatilization flux/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$	氨挥发累积量 Cumulative ammonia volatilization/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	氨挥发损失率 Ammonia volatilization loss/%
CK	0.89±0.09e	13.16±1.12f	—
NPK	3.39±0.20c	52.5±2.26c	29.17
NKM1	3.26±0.19cd	50.29±1.87cd	27.94
NKM2	2.87±0.13d	43.72±1.33e	24.29
M3	3.16±0.21c	47.2±2.01de	26.22
M4	4.46±0.26b	67.71±3.72b	25.08
M5	5.89±0.57a	87.38±4.31a	24.27

注:表内同列不同小写字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ ),下同;平均氨挥发通量为2014年水稻季施基肥第1~13 d测定数据的平均值。

Note: Different small letters within a column show significant differences between treatments ( $P<0.05$ ). The same below. Average ammonia volatilization fluxes were mean values of ammonia volatilization in 1~13 days after fertilization for 2014 rice season.

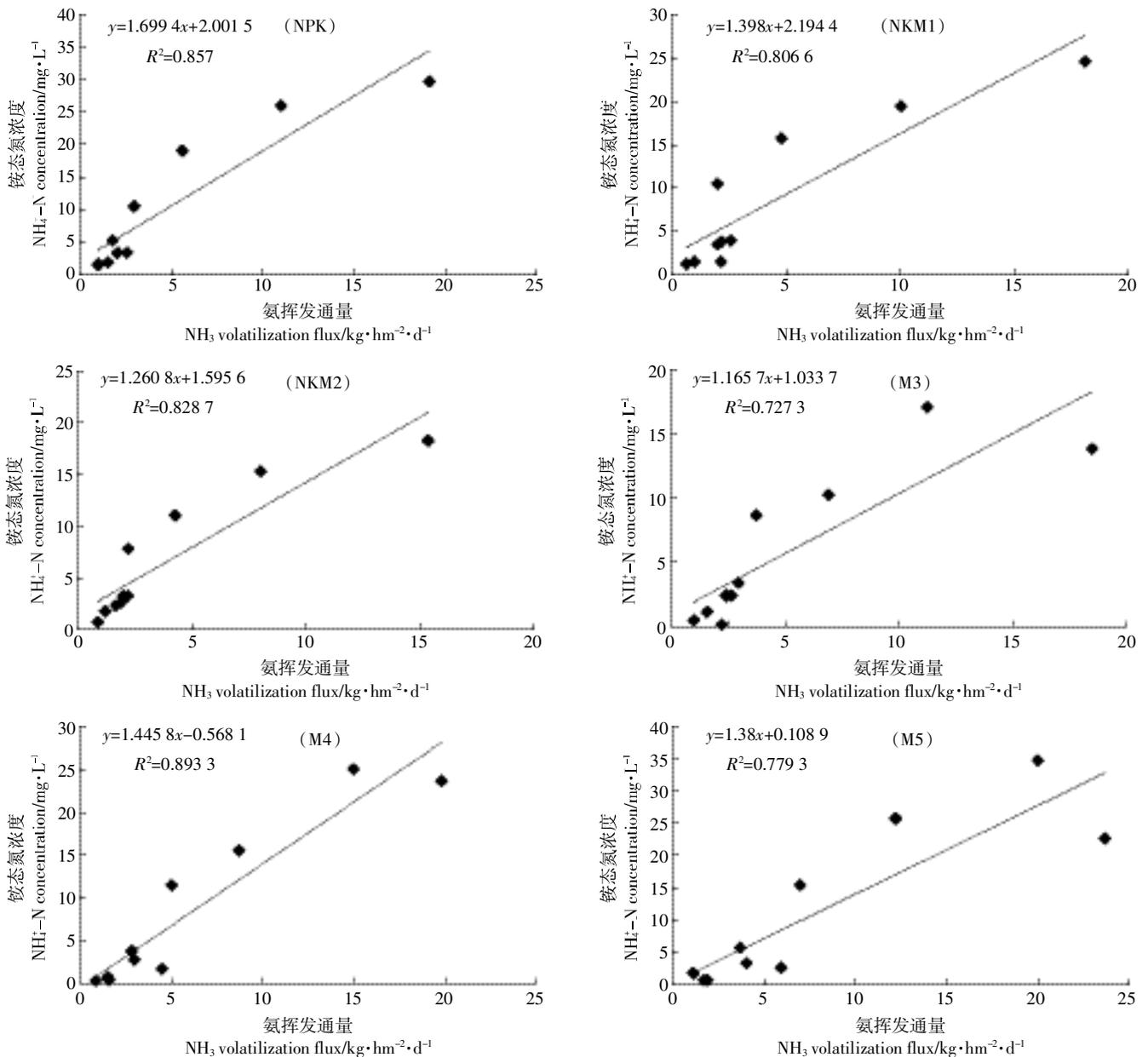


图5 氨挥发与稻田田面水铵态氮浓度关系

Figure 5 Relationship between ammonia volatilization and  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  in field surface water

有效降低氨挥发通量以及氨挥发累积量,能有效减少氮肥损失,提高氮肥利用率,也是实现畜禽粪便资源化利用的有效途径之一。

### 2.5 稻田氨挥发累积量的经验模型

稻田氨挥发累积量的经验模拟如图6所示。在稻田施肥后,稻田氨挥发累积量与时间的关系可以用经验函数表示。各处理间氨挥发累积量与时间的关系符合对数函数模型( $R^2 \geq 0.99$ ),在该模型的初始阶段氨挥发累积量增加幅度较大,在后期增加速率减小。对数模型可以对各处理氨挥发累积量变化做出一个基本计算。

### 2.6 经济产量及效益分析

由表3可以看出,所有施肥处理显著提高了稻谷产量。猪粪和化肥配施、单施猪粪处理与NPK处理相比,稻谷产量分别增加了2.35%~9.35%和2.51%~7.87%,其中NKM2处理稻谷产量最高( $9114 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$ )。随着稻田猪粪投入量的增加,M3、M4、M5处理较NKM2处理稻谷产量有所下降,主要由于稻田氮肥投入量太高,导致水稻贪青晚熟,造成稻谷减产。各处理间稻谷产量具体表现为 $\text{NKM2} > \text{M3} > \text{M4} > \text{M5} > \text{NKM1} > \text{NPK} > \text{CK}$ 。

从总投入成本来看,常规施肥处理投入成本最高

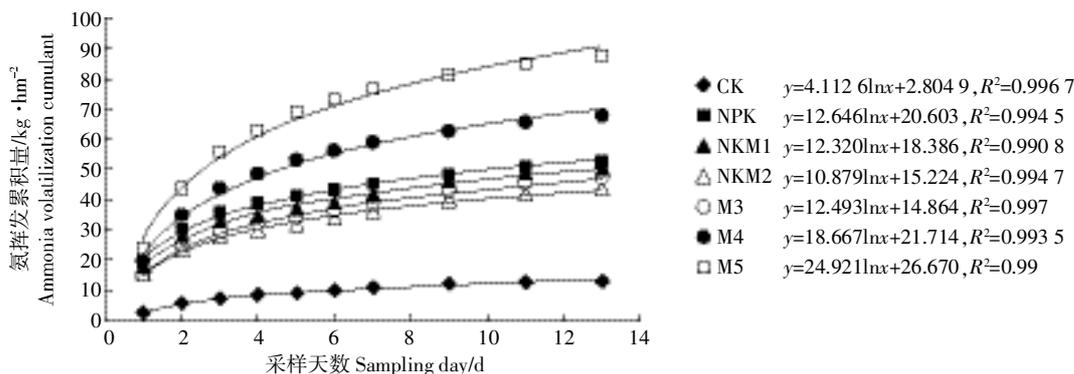


图 6 氨挥发累积量经验模拟

Figure 6 Simulation models for cumulative ammonia volatilization

表 3 不同施肥处理经济产量及效益分析

Table 3 Economic yields and benefit analysis under different doses of fertilizers applied

处理 Treatment	水稻产量 Grain yields/kg·hm <sup>-2</sup>	化肥投入成本 Chemical input/元·hm <sup>-2</sup>	猪粪投入成本 Cost of pig ammonium/元·hm <sup>-2</sup>	人工投入成本 Artificial cost/元·hm <sup>-2</sup>	总投入成本 Total cost/元·hm <sup>-2</sup>	纯收入 Net income/元·hm <sup>-2</sup>
CK	6466±70d	—	—	—	—	17 199.56
NPK	8335±20c	2 293.74	—	—	2 293.74	19 877.36
NKM1	8531±24bc	1 436.36	412.58	141.82	1 990.76	20 701.69
NKM2	9114±22a	570.18	824.74	283.50	1 678.42	22 564.81
M3	8984±23a	—	1 650.00	567.18	2 217.18	21 680.25
M4	8875±22ab	—	2 474.74	850.69	3 325.43	20 282.06
M5	8544±26bc	—	3 300.00	1 134.3	4 434.37	18 292.66

注:肥料价格(含运费):N 4.83 元·kg<sup>-1</sup>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 5.95 元·kg<sup>-1</sup>, K<sub>2</sub>O 8.3 元·kg<sup>-1</sup>;猪粪价格(折合干重,含运费):160 元·t<sup>-1</sup>;稻谷价格:2.66 元·kg<sup>-1</sup>;人工成本(猪粪):55 元·t<sup>-1</sup>;纯收入=总收入-肥料投入-人工投入成本。

Note: Fertilizer price (including transportation costs): N 4.83 yuan·kg<sup>-1</sup>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 5.95 yuan·kg<sup>-1</sup>, K<sub>2</sub>O 8.3 yuan·kg<sup>-1</sup>; Pig manure (dry weight, including transportation costs): 160 yuan·t<sup>-1</sup>; Rice price: 2.66 yuan·kg<sup>-1</sup>; Artificial cost (pig manure): 55 yuan·t<sup>-1</sup>; Net income = total revenue - fertilizer inputs - artificial cost.

(2 293.74 元·hm<sup>-2</sup>), NKM2 处理投入成本最低(1 678.42 元·hm<sup>-2</sup>), 适量的猪粪投入量降低了投入成本。从纯收入来看,除对照外, NKM2 处理纯收入最高(22 564.81 元·hm<sup>-2</sup>), 常规施肥与 M5 处理收入最低, 分别为 19 877.36、18 292.66 元·hm<sup>-2</sup>。高成本投入的 NPK 处理(2 293.74 元·hm<sup>-2</sup>) 与 M5(4 434.37 元·hm<sup>-2</sup>) 处理并没有带来高收入。因此,猪粪适量施用能有效提高经济收入,同时也是养殖废弃物农田消纳的有效途径之一。

### 3 讨论

本试验通过田间原位监测,对猪粪施用稻田氨挥发特征及稻田经济效益等进行了相关分析。稻田施肥后,各处理间氨挥发均呈现相似的变化趋势,氨挥发通量在施肥的第 1 d 达到了峰值,之后迅速下降,一周后趋于稳定。这与国内外研究基本一致<sup>[23-25]</sup>。主要由于水稻移栽期间,正值高温天气,日照强烈,田面水温度升高,施肥后尿素与猪粪迅速水解为 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N,促进了氨挥发;之后由于水体渗漏、土壤的固定和水稻的

吸收,导致 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度降低,氨挥发减弱。

在稻田施肥后的整个监测过程中,除对照外,氨挥发平均通量为 2.87~5.89 kg N·hm<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>, 氨挥发累积量为 43.72~87.38 kg N·hm<sup>-2</sup>。马玉华等<sup>[26]</sup>报道的免耕施肥处理 NH<sub>3</sub> 挥发累积量为 19.63~23.8 kg N·hm<sup>-2</sup>, 汪军等<sup>[27]</sup>报道的乌栅土和黄泥土氨挥发累积量分别为 38.1~45.6 kg N·hm<sup>-2</sup> 和 10.2~12.3 kg N·hm<sup>-2</sup>, 而肖新等<sup>[25]</sup>报道的水稻土氨挥发量为 31.67~69.70 kg N·hm<sup>-2</sup>, 与本试验结果相接近。究其原因可能与耕作模式、pH、土壤类型有关。本试验水稻土为旋耕模式,土壤结构疏松,呼吸作用强烈,土壤微生物活跃,促进了稻田氨挥发;其次,马玉华研究的水稻土与汪军研究的黄泥土 pH 值分别为 5.16 和 5.8, 而本试验的 pH 值为 6.98。相关研究也表明,稻田氨挥发与 pH 值呈正相关关系<sup>[11-12]</sup>。同时,在本试验等氮水平上,随着猪粪的投入量增加氨挥发累积量减小,其中 NKM2 处理最小,主要由于猪粪施用后,在分解过程中产生有机酸降低土壤 pH,同时形成的腐殖质增加了土壤吸附力,对氨挥发有明显的抑制作用<sup>[28]</sup>。此外,猪粪投

人对土壤提供了充足的碳源和氮源,促进了微生物活动,微生物对有机质分解的过程中将无机氮固定转化为有机氮,无机氮数量的减少最终降低了氨挥发累积量<sup>[29]</sup>。

在稻田施肥后,各处理间氨挥发累积量与时间的关系符合对数函数模型( $R^2 \geq 0.99$ )。上官宇先等<sup>[30]</sup>研究表明,平常耕作氨挥发累积量符合对数函数模型,而垄作氨挥发累积量符合线性函数模型,因此,氨挥发累积量经验模型受耕作模式等其他因素影响,还需进一步探讨验证。

朱兆良等和俞映惊等<sup>[6]</sup>在太湖地区水稻土上研究表明,稻季氨挥发损失量一般占各施肥期施氮量的18.6%~38.7%,而肖新等<sup>[25]</sup>在南方丘陵地带研究表明,氨挥发损失量占施氮量的17.95%~28.64%,与本试验氨挥发累积量占施氮量24.27%~29.17%的结果基本一致。而朱小红等<sup>[31]</sup>和马玉华等<sup>[26]</sup>研究表明,稻季氨挥发总损失量分别占氮肥施用量的5.24%~7.13%和6.2%~8.5%,与本试验结果相比偏低。可能由于氮肥用量不同所导致,本试验地区常规施氮量为 $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,而其他地区施氮量在 $200 \sim 250 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,甚至高达 $350 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,氨挥发累积量一定,施肥量越高,氨挥发损失率越小;其次,本试验在水稻移栽后几天降雨导致稻田一直处于淹水状态,加剧了稻田氨挥发;pH值不同也是导致氨挥发损失率差异的直接因素。

大量研究表明,田面水 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 浓度是氨挥发的决定因素之一,与氨挥发通量呈正相关<sup>[13-14]</sup>。本试验各处理田面水 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 浓度变化规律基本一致,在施肥后的1~2 d达到峰值,之后迅速下降,逐渐趋于对照, $\text{NO}_3^--\text{N}$ 与 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 呈现此消彼长的关系,与前人研究结果基本一致<sup>[32-33]</sup>。田面水高浓度 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 均维持在一周之内,是控制氮素流失风险的关键时期。猪粪适量农田施用能有效降低田面水 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 浓度,同时也降低了氨挥发通量。主要由于猪粪施用后,一部分铵态氮转化为 $\text{NH}_3$ ,通过 $\text{NH}_3$ 的形式挥发到空气中,另一部分 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 随水体渗漏到土壤底层,同时表层的 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 通过硝化转化为 $\text{NO}_3^--\text{N}$ ,降低了田面水 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 浓度<sup>[34]</sup>。在稻田施肥后的整个监测期间,各处理氨挥发通量与对应田面水中 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 浓度相关系数为0.729 3~0.893 3,呈线性正相关关系,与朱小红等<sup>[31]</sup>研究结果的相关系数(0.638 9~0.839 4)相吻合。进一步验证了氨挥发通量与田面水 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 的密切相关性。

吴萍萍等<sup>[35]</sup>研究表明,一定范围内,温度升高能够提高脲酶活性,促进尿素分解;同时,温度升高增加

液相中氨态氮在铵态和氨态氮总量中的比例,从而促进氨挥发。此外,当气温高、水分蒸发速率大时,氨会随着水分大量逸散<sup>[36]</sup>。土壤 Eh 与土壤类型也是氨挥发通量的影响因子,汪军等<sup>[27]</sup>研究表明,秸秆还田降低了表层土壤 Eh, 主要由于秸秆降解会消耗一部分土壤中的溶解氧,从而导致表层土壤 Eh 下降;乌栅土氨挥发通量大于黄泥土,可能由于乌栅土通透性强,土壤空气扩散性与流动性较好,尿素施入后,土层对氨气扩散的阻隔作用被削弱,促进了氨挥发。

从稻田经济产量和效益来看,等氮水平猪粪与化肥配施能显著提高稻谷产量,随着猪粪量投入的增加,产量有所降低,这与张鸣等<sup>[17]</sup>、高菊生等<sup>[18]</sup>研究结果一致。主要由于猪粪氮磷钾等营养元素丰富,同时含有多种微量元素,且有机质在分解过程中增加土壤胶体,形成水稳性团粒结构,提高了营养元素有效性,进而提高了稻谷产量。化肥长期施用易造成土壤退化,稻谷减产,同时化肥成本高;而猪粪施用,能有效降低稻田投入成本,提高农民收入,值得大力推广。

从稻田消纳量和承载力来看,稻田猪粪适量施用能有效降低氨挥发通量与田面水 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 浓度,能有效降低氨挥发损失率与氮肥流失风险。通过对稻田环境及经济效益等方面综合分析,确定 NKM2 处理水平为水稻生长最佳投入量,由此可以计算得出稻田鲜猪粪消纳量为 $13\ 264.54 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。根据文献<sup>[37]</sup>和<sup>[38]</sup>,生猪的排便量为 $1.8 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$ ,则稻田对生猪的承载力为 $20.19 \text{ 头} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。而王大娟等<sup>[39]</sup>研究表明,在保证水稻产量和环境效应前提下,稻田最大猪粪消纳量为 $14\ 911 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,按复种指数为2计算,生猪承载量为 $45.39 \text{ 头} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。这与本试验复种指数为2计算的 $40.38 \text{ 头} \cdot \text{hm}^{-2}$ 有一定的差异,可能由于两个试验所用猪粪性质、土壤地力水平、水热气候条件及水稻品种不同。

#### 4 结论

成都平原稻田常规生产条件下,施肥后较高氨挥发通量持续在一周之内。在整个监测期间,氨挥发平均通量为 $2.87 \sim 5.89 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ,氨挥发累积量为 $43.72 \sim 87.38 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,占氮肥施用量的24.27%~29.17%。猪粪适量施用能有效降低稻田氨挥发通量,与常规施肥相比,猪粪和化肥配施能减少氨挥发累积量 $2.21 \sim 8.78 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,单施过量猪粪促进了氨挥发。

稻田田面水 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 与 $\text{NO}_3^--\text{N}$ 浓度呈现此消彼长的关系,猪粪和化肥配施有效降低了 $\text{NH}_4^+-\text{N}$

和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度。氨挥发通量与田面水 $\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度呈明显线性正相关。从环境和氮肥利用考虑,施肥后一周是控制径流和氨挥发的关键时期。

稻田猪粪适量施用也提高了稻谷产量,与常规施肥相比,猪粪和化肥配施稻谷增产 $196\sim 779\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。猪粪的施用同时也降低了稻田肥料投入成本,增加了农民收入。综合环境及经济效益等方面考虑,化肥+猪粪50%处理猪粪投入量最佳,稻田消纳猪粪 $13\ 264.54\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,生猪承载量为 $20.19\text{ 头}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,既能有效实现畜禽粪便资源化利用,同时可获得较高经济效益,适宜在成都平原推广。

#### 参考文献:

- [1] 环境保护部,农业部. 全国畜禽养殖污染防治“十二五”规划[R]. 北京:环境保护部,农业部. 2012.  
Ministry of Environmental Protection, Ministry of Agriculture. The national livestock and poultry breeding pollution prevention "12th Five-Year Plan" [R]. Beijing: Ministry of Environmental Protection, Ministry of Agriculture. 2013.
- [2] 赵晨阳,李洪枚,魏源送,等. 翻堆频率对猪粪条垛堆肥过程温室气体和氨气排放的影响[J]. 环境科学, 2014, 35(2): 533-540.  
ZHAO Chen-yang, LI Hong-mei, WEI Yuan-song, et al. Effects of turning frequency on emission of greenhouse gas and ammonia during swine manure windrow composting[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(2): 533-540.
- [3] 苏 杨. 我国集约化畜禽养殖场污染问题研究[J]. 中国生态农业学报, 2006, 14(2): 15-18  
SU Yang, et al. Research of countermeasures on waste treating of intensive livestock and poultry farms in China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2006, 14(2): 15-18
- [4] 薛利红,杨林章,施卫明,等. 农村面源污染治理的“4R”理论与工程实践-源头减量技术[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(5): 881-888.  
XUE Li-hong, YANG Lin-zhang, SHI Wei-ming, et al. Reduce-Retain-Reuse-Restore technology for controlling the agricultural non-point pollution in countryside in China; Source reduction technology[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(5): 881-888.
- [5] 朱兆良,范晓晖,孙永红,等. 太湖地区水稻土上稻季氮素循环及其环境效应[J]. 作物研究, 2004, 4(2): 187-191.  
ZHU Zhao-liang, FAN Xiao-hui, SUN Yong-hong, et al. The Taihu Lake region on rice paddy soil nitrogen cycle and its environmental effects[J]. *Crop Research*, 2004, 4(2): 187-191.
- [6] 俞映惊,薛利红,杨林章. 太湖地区稻田不同氮肥管理模式下氨挥发特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(8): 1682-1689.  
YU Ying-liang, XUE Li-hong, YANG Lin-zhang, et al. Ammonia volatilization from paddy fields under different nitrogen schemes in Tai Lake region[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(8): 1682-1689.
- [7] Behera S N, Sharma M, Aneja V P, et al. Ammonia in the atmosphere: A review on emission sources, atmospheric chemistry and deposition on terrestrial bodies[J]. *Environmental Science & Pollution Research International*, 2013, 20(11): 8092-8131.
- [8] 高 健,张岳翀,王淑兰,等. 北京2011年10月连续灰霾过程的特征与成因初探[J]. 环境科学研究, 2012, 25(11): 1201-1207.  
GAO Jian, ZHANG Yue-chong, WANG Shu-lan, et al. Study on the characteristics and formation of a multi-day haze in October 2011 in Beijing[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2012, 25(11): 1201-1207.
- [9] Krupa S V. Effects of atmospheric ammonia( $\text{NH}_3$ ) on terrestrial vegetation: A review[J]. *Environmental Pollution*, 2003, 124(2): 179-221.
- [10] Hayashi K, Nishimura 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]. *Science of the Total Environment*, 2008, 390: 485-494.
- [11] 李菊梅,李冬初,徐明岗,等. 红壤双季稻田不同施肥下的氨挥发损失及其影响因素[J]. 生态环境, 2008, 17(4): 1610-1613.  
LI Ju-mei, LI Dong-chu, XU Ming-gang, et al. Ammonia volatilization and its influence factors under different fertilization in red paddy soil with double rice cropping system[J]. *Ecology and Environment*, 2008, 17(4): 1610-1613.
- [12] 靳红梅,常志州,郭德杰,等. 追施猪粪沼液对菜地氨挥发的影响[J]. 土壤学报, 2012, 49(1): 86-95.  
JIN Hong-mei, CHANG Zhi-zhou, GUO De-jie, et al. Effect of top-dressing with digested pig slurry on ammonia volatilization in vegetable fields[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(1): 86-95.
- [13] 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): 893-900.  
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): 893-900.
- [14] 杨士红,彭世彰,徐俊增,等. 不同水氮管理下稻田氨挥发损失特征及模拟[J]. 农业工程学报, 2012, 28(11): 99-104.  
YANG Shi-hong, PENG Shi-zhang, XU Jun-zeng, et al. Characteristics and simulation of ammonia volatilization from paddy fields under different water and nitrogen management[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(11): 99-104.
- [15] 杨 阳,李 娜,王林权,等. 垄作对降低黄土高原南部冬小麦田氨挥发风险的影响[J]. 环境科学研究, 2015, 28(3): 431-439.  
YANG Yang, LI Na, WANG Lin-quan, et al. Effects of ridge tillage practices on reducing ammonia volatilization from winter wheat fields in southern Loess Plateau of China[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2015, 28(3): 431-439.
- [16] 李江涛,钟晓兰,赵其国. 畜禽粪便施用对稻麦轮作土壤质量的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(10): 2837-2845.  
LI Jiang-tao, ZHONG Xiao-lan, ZHAO Qi-guo, et al. Enhancement of soil quality in a rice-wheat rotation after long-term application of Poultry litter and livestock manure[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(10): 2837-2845.
- [17] 张 鸣,高天鹏,李 昂,等. 畜禽粪肥与化肥配施对春小麦产量和养分吸收利用的影响[J]. 麦类作物学报, 2014, 34(2): 216-221.  
ZHANG Ming, GAO Tian-peng, LI Ang, et al. Effects of different combinations of animal manures and chemical fertilizer on yield, nutrient uptake and utilization of spring wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2014, 34(2): 216-221.
- [18] 高菊生,黄 晶,董春华,等. 长期有机无机肥配施对水稻产量及土壤有效养分影响[J]. 土壤学报, 2014, 51(2): 314-324.  
GAO Ju-sheng, HUANG Jing, DONG Chun-hua, et al. Effects of long-term combined application of organic and chemical fertilizers on rice yield and soil available nutrients[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(2): 314-324.

- [19] 柳开楼, 李大明, 黄庆海, 等. 红壤稻田长期施用猪粪的生态效益及承载力评估[J]. 中国农业科学, 2014, 47(2):303-313.  
LIU Kai-lou, LI Da-ming, HUANG Qing-hai, et al. Ecological benefits and environmental carrying capacities of red paddy field subjected to long-term pig manure amendments[J]. *Scientia Agricultural Science*, 2014, 47(2):303-313.
- [20] 郝小雨, 高伟, 王玉军, 等. 有机无机肥料配合施用对日光温室土壤氨挥发的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(21):4403-4414.  
HAO Xiao-yu, GAO Wei, WANG Yu-jun, et al. Effects of combined application of organic manure and chemical fertilizers on ammonia volatilization from greenhouse vegetable soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(21):4403-4414.
- [21] 王朝辉, 刘学军, 巨晓棠. 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.
- [22] Wang G L, Chen D L, Yong L I, et al. Effect of soil temperature, moisture and  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  concentration on nitrification and nitrification induced  $\text{N}_2\text{O}$  emission[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(1):1-6.
- [23] 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.
- [24] Lin Z, Dai Q, Ye S, et al. Effects of nitrogen application levels on ammonia volatilization and nitrogen utilization during rice growing season[J]. *Rice Science*, 2012, 19(2):125-134.
- [25] 肖新, 杨雨露, 邓艳萍, 等. 水氮耦合对水稻田间氨挥发规律的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(10):2066-2071.  
XIAO Xin, YANG Lu-lu, DENG Yan-ping, et al. Effects of irrigation and nitrogen fertilization on ammonia volatilization in paddy field[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(10):2066-2071.
- [26] 马玉华, 刘兵, 张枝盛, 等. 免耕稻田氮肥运筹对土壤  $\text{NH}_3$  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  $\text{NH}_3$  volatilization and nitrogen use efficiency under no-tillage paddy fields[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(18):5556-5564.
- [27] 汪军, 王德建, 张刚, 等. 麦秸全量还田下太湖地区两种典型水稻土稻季氨挥发特性比较[J]. 环境科学, 2013, 34(1):27-33.  
WANG Jun, WANG De-jian, ZHANG Gang, et al. Comparing the ammonia volatilization characteristic of two typical paddy soil with total wheat straw returning in Taihu Lake region[J]. *Environmental Science*, 2013, 34(1):27-33.
- [28] 葛顺峰, 姜远茂, 彭福田, 等. 春季有机肥和化肥配施对苹果园土壤氨挥发的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(5):199-203.  
GE Shun-feng, JIANG Yuan-mao, PENG Fu-tian, et al. Effect of chemical fertilizers application combined with organic manure on ammonia volatilization in spring in apple orchard[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(5):199-203.
- [29] 董文旭, 吴电明, 胡春胜, 等. 华北山前平原农田氨挥发速率与调控研究[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(5):1115-1121.  
DONG Wen-xu, WU Dian-ming, HU Chun-sheng, et al. Ammonia volatilization and control mechanisms in the piedmont of North China Plain[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(5):1115-1121.
- [30] 上官宇先, 师日鹏, 李娜, 等. 垄作覆膜条件下田间氨挥发及影响因素[J]. 环境科学, 2012, 33(6):1987-1993.  
SHANGGUAN Yu-xian, SHI Ri-peng, LI Na, et al. Factors influencing ammonia volatilization in a winter wheat field with plastic film mulched ridges and unmulched furrows[J]. *Environmental Science*, 2012, 33(6):1987-1993.
- [31] 朱小红, 马中文, 马友华, 等. 施肥对巢湖流域稻季氨挥发损失的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(7):2119-2126.  
ZHU Xiao-hong, MA Zhong-wen, MA You-hua, et al. Effect of fertilization on ammonia volatilization from paddy fields in Chao Lake Basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(7):2119-2126.
- [32] 潘圣刚, 黄胜奇, 曹凑贵, 等. 氮肥运筹对稻田田面水氮素动态变化及氮素吸收利用效率影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(5):1000-1005.  
PAN Sheng-gang, HUANG Sheng-qi, CAO Cou-gui, et al. Effects of nitrogen management dynamics of nitrogen in surface water from rice field and nitrogen use efficiency[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(5):1000-1005.
- [33] 郑小龙, 吴家森, 陈裴裴, 等. 生物质炭与不同肥料配施对水稻田面水养分流失风险的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(1):221-226.  
ZHENG Xiao-long, WU Jia-sen, CHEN Pei-pei, et al. Effects of different nitrogen and biomass carbon fertilization on nutrient loss risk in field surface water[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(1):221-226.
- [34] 王忠江, 蔡康妮, 王丽丽, 等. 沼肥表施对土壤氮素动态分布及氨挥发的影响[J]. 农业机械学报, 2014, 45(7):139-143.  
WANG Zhong-jiang, CAI Kang-ni, WANG Li-li, et al. Influence of surface application of biogas slurry on ammonia volatilization and dynamic distribution of soil nitrogen[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(7):139-143.
- [35] 吴萍萍, 刘金剑, 杨秀霞, 等. 不同施肥制度对红壤地区双季稻田氨挥发影响[J]. 中国水稻科学, 2009, 23(1):85-93.  
WU Ping-ping, LIU Jin-jian, YANG Xiu-xia, et al. Effects of different fertilization systems on ammonia volatilization from double-rice cropping field in red soil region[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2009, 23(1):85-93.
- [36] Li H, Liang X Q, Chen Y X, et al. Ammonia volatilization from urea in rice fields with zero-drainage water management[J]. *Agriculture Water Management*, 2008, 95(8):887-894.
- [37] Bassanino M, Grignani C, Sacco D, et al. Nitrogen balances at the crop and farm-gate scale in livestock farms in Italy[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2007, 122(3):282-294.
- [38] 董红敏, 朱志平, 黄宏坤, 等. 畜禽养殖业产污系数和排污系数计算方法[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1):303-308.  
DONG Hong-min, ZHU Zhi-ping, HUANG Hong-kun, et al. Pollutant generation coefficient and discharge coefficient in animal production[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(1):303-308.
- [39] 王大娟, 苏文幸, 许振成, 等. 水稻田对猪粪的最大消纳能力研究[J]. 环境科学研究, 2013, 26(10):1118-1125.  
WAN Da-juan, SU Wen-xing, XU Zhen-cheng, et al. Determination on maximum capacity of pig-manure fertilization for the rice paddy in subtropical areas[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2013, 26(10):1118-1125.