

网络出版时间:2018-03-09 17:09

DOI:10.13207/j.cnki.jnwfufu.2018.07.007

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20180309.1708.014.html>

# 优化施肥对不同轮作系统稻田氨挥发的影响

盛伟红<sup>1</sup>, 刘文波<sup>1</sup>, 赵晨光<sup>1</sup>, 郭俊杰<sup>1</sup>, 孙 博<sup>1</sup>, 陈 健<sup>2</sup>, 周 毅<sup>3</sup>, 郭世伟<sup>1</sup>

(1 南京农业大学 资源与环境科学学院, 江苏 南京 210095; 2 如皋市农业科学研究所, 江苏 南通 226575;

3 安徽科技学院 资源与环境科学学院, 安徽 凤阳 233100)

**【摘要】**【目的】探究 3 种主要水旱轮作系统下, 优化施肥对当季稻田  $\text{NH}_3$  挥发及氮素利用率的影响。【方法】试验设置水稻-小麦、水稻-蔬菜与水稻-冬闲田 3 种水旱轮作系统, 每种轮作系统下设农民习惯施肥方式(FFP)和优化施肥方式(OPT) 2 种施肥处理, 以不施肥处理为对照(CK), 其中农民习惯施肥方式氮肥以基肥与分蘖肥施用量比例 5:5 施入, 优化施肥方式氮肥以基肥、分蘖肥、穗肥施用量比例 5:3:2 施入。于 2015—2016 年, 采用传统抽气密闭室法, 田间原位监测了不同处理以及 4 个环境因子(田面水  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  质量浓度、水层 pH、温度和深度)对当季稻田  $\text{NH}_3$  挥发的影响, 并分析了 4 个环境因子与  $\text{NH}_3$  挥发通量的相关性, 最后测定了不同处理水稻的产量、氮农学利用率、氮回收效率以及氮偏生产力。【结果】当氮肥作为基肥和分蘖肥施用后, 由于尿素在水中的快速分解, 各处理  $\text{NH}_3$  挥发通量均在施肥后第 2 天达到峰值, 随后急剧下降, 至第 10 天左右趋近于零; 优化施肥方式下, 穗肥施用后, 由于施肥量较少且此时水稻对氮素的吸收利用增加,  $\text{NH}_3$  挥发通量无明显峰值, 趋近于零。  $\text{NH}_3$  挥发积累量受施肥方式影响显著( $P<0.05$ ), 轮作制度及其与施肥方式交互作用对  $\text{NH}_3$  挥发通量影响不显著。3 种轮作制度下, 农民习惯施肥方式  $\text{NH}_3$  挥发积累量占氮肥施用量比例为 25.9%~27.6%, 显著高于优化施肥方式(22.6%~23.0%)。3 种轮作制度下,  $\text{NH}_3$  挥发通量均主要受田面水  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  质量浓度的影响, 且二者间呈显著正相关关系, 与水层 pH、温度均无显著相关性;  $\text{NH}_3$  挥发通量与水层深度呈负相关关系, 其中只有部分处理相关性达显著水平。在 3 种水旱轮作系统下, 优化施肥方式平均水稻产量(9.0~10.2 t/hm<sup>2</sup>)与农民习惯施肥方式(8.9~10.2 t/hm<sup>2</sup>)差异均不显著, 但氮肥农学利用率(21.3~26.1 kg/kg)、氮回收效率(55.6%~60.3%)、氮偏生产力(50.0~56.8 kg/kg)与农民习惯施肥方式(氮肥农学利用率 12.6~15.6 kg/kg, 氮回收效率 35.0%~37.6%, 氮偏生产力 29.8~34.1 kg/kg)相比均有显著提高。【结论】不同施肥方式是影响  $\text{NH}_3$  挥发的主要因素, 在不同的水旱轮作系统下优化施肥均可以通过氮肥运筹, 在减少施肥量和保证产量水平的基础上, 降低稻田的  $\text{NH}_3$  挥发损失, 提高氮素利用率。

**【关键词】** 水旱轮作; 优化施肥; 氨挥发; 氮肥利用率

**【中图分类号】** S143.1<sup>+</sup>4

**【文献标志码】** A

**【文章编号】** 1671-9387(2018)07-0045-09

## Effect of optimized fertilization on ammonia volatilization of paddy rice under different rotation systems

SHENG Weihong<sup>1</sup>, LIU Wenbo<sup>1</sup>, ZHAO Chenguang<sup>1</sup>, GUO Junjie<sup>1</sup>,  
SUN Bo<sup>1</sup>, CHEN Jian<sup>2</sup>, ZHOU Yi<sup>3</sup>, GUO Shiwei<sup>1</sup>

(1 College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing, Jiangsu 210095, China;

2 Institute of Agriculture Science Research Rugao County, Nantong, Jiangsu 226575, China;

3 College of Resources and Environmental Science, Anhui Science and Technology University, Fengyang, Anhui 233100, China)

**Abstract:** 【Objective】 This study investigated the effect of optimal fertilization on  $\text{NH}_3$  volatilization and nitrogen use efficiency in rice fields in three paddy rice-upland crop rotation systems. 【Method】 The

**【收稿日期】** 2017-04-14

**【基金项目】** 国家“973”计划项目“肥料养分持续高效利用机理与途径”(2013CB127403); 国家公益性行业科研专项“水田两熟区耕地培肥与合理农作制”(201503122)

**【作者简介】** 盛伟红(1992—), 女, 吉林蛟河人, 硕士, 主要从事养分资源管理研究。E-mail: 2014103115@njau.edu.cn

**【通信作者】** 郭世伟(1969—), 男, 吉林临江人, 教授, 主要从事植物营养学研究。E-mail: sguo@njau.edu.cn

farmer's fertilizer practice (FFP), optimal fertilization (OPT) and control (CK) were established in three cropping systems including rice-wheat (RW), rice-vegetable (RV) and rice-fallow (RF) cropping systems. The application ratio of basal and tiller was 5 : 5 under FFP and the application ratio of basal, tiller and panicle was 5 : 3 : 2 under OPT. Through *in-situ* monitoring, the effects of different treatments and environmental factors ( $\text{NH}_4^+$ -N concentration, water layer pH, water layer temperature and water depth) on  $\text{NH}_3$  volatilization were studied using a continuous airflow enclosure method under different crop rotation systems from 2015 to 2016. The correlation between four environmental factors and  $\text{NH}_3$  volatiles was also analyzed. Finally, the rice yield, nitrogen utilization efficiency, nitrogen recovery efficiency and nitrogen partial productivity were evaluated. 【Result】 Due to the rapid decomposition of urea in water,  $\text{NH}_3$  emission fluxes peaked on the second day after nitrogen fertilizer was used as basal and tillering fertilizer in the paddy field, and then decreased sharply to zero in the tenth day. After the application of panicle fertilizer, because of the less fertilizer and increased nitrogen utilization, the  $\text{NH}_3$  emission flux of OPT was close to zero. The total  $\text{NH}_3$  volatilization amount was significantly affected by fertilization method ( $P < 0.05$ ), and insignificantly affected by rotation and its interaction with fertilization. The ratio of  $\text{NH}_3$  volatilization to total N application under FFP was 25.9%—27.6%, which was significantly higher than that under OPT (22.6%—23.0%). Significant positive correlation was observed between  $\text{NH}_3$  flux and  $\text{NH}_4^+$ -N concentration in surface water under all three rotations. The temperature of water layer and pH had no significant effects on  $\text{NH}_3$  flux. Negative correlation was observed between  $\text{NH}_3$  flux and water depth, with significant correlation in partial treatments. There was no significant difference in rice yield between FFP (8.9—10.2 t/hm<sup>2</sup>) and OPT (9.0—10.2 t/hm<sup>2</sup>), while the nitrogen agronomy efficiency (21.3—26.1 kg/kg), nitrogen recovery efficiency (55.6%—60.3%) and nitrogen partial factor productively (50.0—56.8 kg/kg) under OPT were higher than those under FFP (12.6—15.6 kg/kg, 35.0%—37.6% and 29.8—34.1 kg/kg). 【Conclusion】 Fertilization method was the main factor influencing  $\text{NH}_3$  volatilization. OPT reduced  $\text{NH}_3$  volatilization loss and increased nitrogen agronomy efficiency on the basis of reducing fertilizer and ensuring yield.

**Key words:** paddy-upland crop rotation system; optimal fertilization regime; ammonia volatilization; nitrogen utilization rate

据估计,目前我国农田的氮肥损失率为 40%~50%<sup>[1]</sup>,而氮肥的不合理施用是造成氮肥损失率居高不下的主要原因之一,这既带来了经济损失,也会污染大气、水体等环境。因此,降低氮素损失,成为农田、区域和国家尺度控制氮肥用量、提高氮肥有效率和降低环境污染的关键<sup>[2]</sup>。

水旱轮作系统是我国典型的水稻种植制度,包括水稻-小麦、水稻-冬闲田、水稻-蔬菜等多种轮作方式,主要分布在长江和淮海流域 10 多个省(市),种植面积约 470 万 hm<sup>2</sup><sup>[3]</sup>。研究表明,我国稻田氮肥损失率可高达 50%以上<sup>[4]</sup>,其中氨( $\text{NH}_3$ )挥发是肥料氮的主要损失途径之一<sup>[5-6]</sup>。已经证实,在长江中下游双季稻连作体系中,肥料氮的氨挥发损失可达 30%以上<sup>[7]</sup>。国内外对单、双季稻作区和旱作作物氨挥发研究报道已有很多,然而在水旱轮作系统下,采用优化施氮的方式降低水田氨挥发的相关研究却鲜有报道。本研究通过定量监测 3 种水旱轮作系统

下稻田  $\text{NH}_3$  挥发的动态变化趋势,探究在不同轮作系统下,稻田  $\text{NH}_3$  挥发的影响因素及其与水稻产量的关系,以期了解不同水旱轮作系统下稻田  $\text{NH}_3$  挥发损失的规律,从而为通过养分资源管理途径,减少我国不同水旱轮作制度下稻田生态系统的  $\text{NH}_3$  挥发,实现高产高效水稻生产提供理论依据和技术支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验点位于江苏省如皋市农业科学研究所试验田(120°49'E, 32°37'N),供试土壤为江淮冲积物形成的薄层高砂土。土壤基本理化性质如下:土壤有机质含量 21.30 g/kg,全氮含量 1.22 g/kg,有效磷含量 27.9 mg/kg,速效钾含量 78.33 mg/kg, pH 7.46。2015 年旱作作物收获后土壤基本理化性质为:土壤有机质含量 20.27 g/kg,全氮含量 1.17

g/kg,有效磷含量 30.47 mg/kg,速效钾含量 75.94 mg/kg,pH 7.49;2016 年旱作作物收获后基本理化性质为:土壤有机质含量 20.19 g/kg,全氮含量1.19 g/kg,有效磷含量 30.18 mg/kg,速效钾含量 74.17 mg/kg,pH 7.56。田间试验始于 2015 年 6 月,于

2015 年和 2016 年 6 月水稻移栽后开始进行 NH<sub>3</sub> 挥发的测定,测定期间气温与降雨量情况如图 1 所示。

供试水稻、小麦和蔬菜品种分别为镇稻 11 号、扬麦 10 号和上海青,系当地常规种植品种。

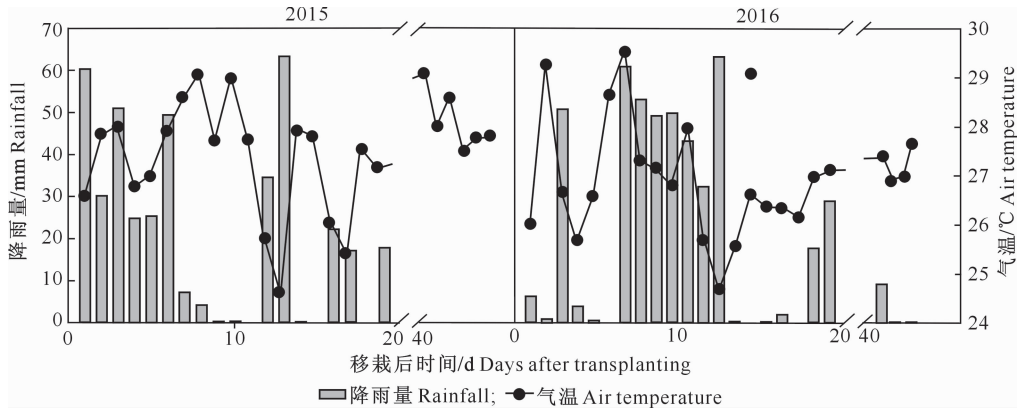


图 1 2015—2016 年水稻季 NH<sub>3</sub> 挥发测定时期气温与降雨量的动态变化

Fig.1 Variations of temperature and rainfall during the rice season from 2015 to 2016

1.2 试验设计

采用完全随机区组试验设计。设置水稻-小麦轮作(RW)、水稻-蔬菜轮作(RV)与水稻-冬闲田轮作(RF)3 种轮作系统,每种轮作系统下设 2 种施肥处理,即农民习惯施肥(FFP)和优化施肥(OPT)处理。同时设置不施肥处理(CK)以计算氮肥利用率,共计 9 个处理。每处理设置 3 个重复,各小区面积为 40 cm<sup>2</sup> (5 m×8 m)。

2015 年和 2016 年水稻的移栽时间分别为 6 月 25 日和 6 月 24 日。种植密度为 30.77 × 10<sup>4</sup> 穴/hm<sup>2</sup>,每穴定植 2 株,株行距为 25 cm×13 cm。不同轮作系统下肥料施用量见表 1。其中,在农民

习惯施肥处理中,氮肥(300 kg/hm<sup>2</sup>)作为基肥与分蘖肥按 5 : 5 质量比施入,分蘖肥分别为水稻移栽后第 8 天(2015 年)和第 10 天(2016 年)施入;磷肥(120 kg/hm<sup>2</sup>)与钾肥(75 kg/hm<sup>2</sup>)均作为基肥,于水稻移栽前一次性施入。在优化施肥处理中,氮肥(180 kg/hm<sup>2</sup>)作为基肥、分蘖肥、穗肥(水稻移栽后 41 d)按 5 : 3 : 2 质量比施入;磷肥(60 kg/hm<sup>2</sup>)全部基施;钾肥(75 kg/hm<sup>2</sup>)作为基肥、穗肥按 6 : 4 质量比施入。试验所用氮肥、磷肥和钾肥分别为尿素(N,46%)、过磷酸钙(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>,14%)和氯化钾(K<sub>2</sub>O,64%)。其他田间管理措施同当地习惯。

表 1 不同轮作系统下肥料的施用量

Table 1 Fertilizer application rates of different rotation systems kg/hm<sup>2</sup>

| 轮作制度<br>Rotation system | 施肥方式<br>Fertilization method | 前茬作物 Fore crop                |                               |                  | 水稻 Rice                |                               |                  |                          |                          |                  |
|-------------------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------|------------------------|-------------------------------|------------------|--------------------------|--------------------------|------------------|
|                         |                              | 施肥量<br>Fertilizer application |                               |                  | 基肥<br>Basal fertilizer |                               |                  | 分蘖肥<br>Tiller fertilizer | 穗肥<br>Panicle fertilizer |                  |
|                         |                              | N                             | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | K <sub>2</sub> O | N                      | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | K <sub>2</sub> O | N                        | N                        | K <sub>2</sub> O |
| RW                      | FFP                          | 300                           | 120                           | 45               | 150                    | 120                           | 75               | 150                      | —                        | —                |
|                         | OPT                          | 120                           | 60                            | 45               | 90                     | 60                            | 45               | 54                       | 36                       | 30               |
| RF                      | FFP                          | 0                             | 0                             | 0                | 150                    | 120                           | 75               | 150                      | —                        | —                |
|                         | OPT                          | 0                             | 0                             | 0                | 90                     | 60                            | 45               | 54                       | 36                       | 30               |
| RV                      | FFP                          | 750                           | 180                           | 120              | 150                    | 120                           | 75               | 150                      | —                        | —                |
|                         | OPT                          | 250                           | 90                            | 120              | 90                     | 60                            | 45               | 54                       | 36                       | 30               |

注:RW-FFP、RW-OPT、RV-FFP、RV-OPT、RF-FFP 和 RF-OPT 分别表示水稻-小麦轮作农民习惯施肥方式、水稻-小麦轮作优化施肥方式、水稻-蔬菜轮作农民习惯施肥方式、水稻-蔬菜轮作优化施肥方式、水稻-冬闲田轮作农民习惯施肥方式和水稻-冬闲田轮作优化施肥方式。下表同。

Note:RW-FFP,RW-OPT,RV-FFP,RV-OPT,RF-FFP and RF-OPT represent the rice-wheat rotation system (farmer’s fertilizer practices),the rice-wheat rotation system (optimal fertilization),the rice-vegetable rotation system (farmer’s fertilizer practices),the rice-vegetable rotation system (optimal fertilization),the rice-fallow rotation system (farmer’s fertilizer practices) and the rice-fallow rotation system (optimal fertilization). The same follow.

1.3 测定项目与方法

1.3.1  $\text{NH}_3$  挥发通量 采用传统抽气密闭室法测定  $\text{NH}_3$  挥发通量,田间装置图见文献[8]。其原理是利用抽气减压的方法将田间挥发的  $\text{NH}_3$  吸入装有 2% 硼酸的固定装置中,再通过 0.01 mol/L 稀硫酸滴定吸收  $\text{NH}_3$  的硼酸,以滴定消耗的体积来计算  $\text{NH}_3$  挥发通量。在施肥后第 1 天开始测定,测定时待吸收装置中看不到明显变色时停止。固定于每天上午 08:00—10:00 开始测定,共测定 3 次,每次测试时间为 55 min,间隔 5 min 再开始下一次。通常情况下  $\text{NH}_3$  挥发通量在 06:00—08:00 水平较低,在 14:00—16:00 水平较高,因此以 08:00—10:00 测定的通量值作为  $\text{NH}_3$  挥发通量,各处理间换气频率保持一致,为每分钟 15~20 次, $\text{NH}_3$  挥发通量计算公式如下<sup>[9]</sup>:

$$F=\frac{2\times V_s\times C_s\times 14\times 10^{-2}}{3.14\times r^2}\times \frac{24}{t}.$$

式中: $F$  代表  $\text{NH}_3$  挥发通量( $\text{kg}/(\text{hm}^2\cdot \text{d})$ ), $C_s$  为硫酸浓度(mol/L), $V_s$  为消耗硫酸溶液的体积(mL), $r$  为气室的半径(m), $t$  为  $\text{NH}_3$  挥发收集的时间(h)。2015 年由于水稻移栽后出现持续暴雨天气,无法测定水稻移栽后的  $\text{NH}_3$  挥发通量,造成数据缺失。

1.3.2 田面水的  $\text{NH}_4^+$ -N 质量浓度、pH、水温和水层深度 施肥后  $\text{NH}_3$  挥发期内每天多点采取水样,

采用流动分析仪(德国,AA3)测定田面水的  $\text{NH}_4^+$ -N 质量浓度,同时监测记录田间水层 pH、水温和水层深度。

1.4 数据处理

采用 Excel 2007 和 SAS 9.1 对试验数据进行统计分析;采用 SPSS 17.0 对试验数据进行偏相关分析。

氮农学利用率(Nitrogen agronomic efficiency,  $\text{AE}_\text{N}, \text{kg}/\text{kg}$ )=(施氮区产量-不施肥地区产量)/施氮量。

氮回收效率(Nitrogen recovery efficiency,  $\text{RE}_\text{N}$ )=(施氮区氮积累量-不施肥地区氮积累量)/施氮量 $\times 100\%$ 。

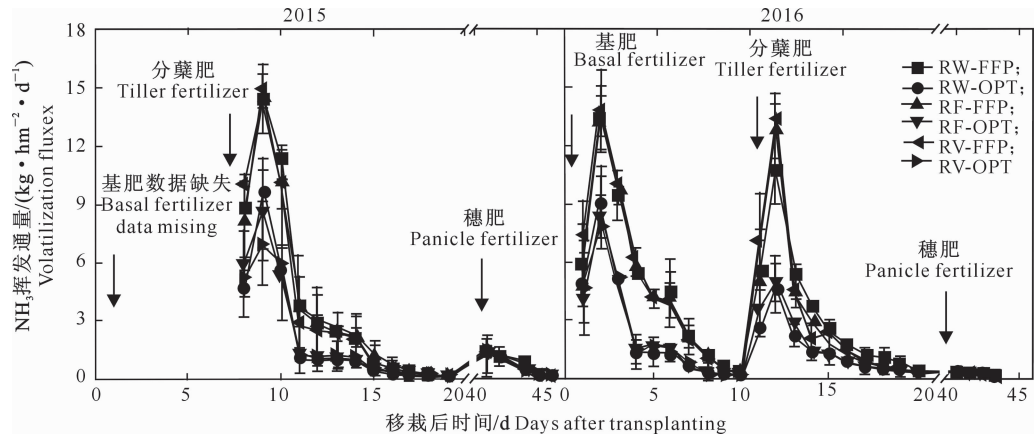
氮偏生产力(Nitrogen partial factor productivity,  $\text{PFP}_\text{N}, \text{kg}/\text{kg}$ )=施氮区产量/施氮量。

增产率(Yield increase rate)=(施氮区产量-不施肥地区产量)/不施肥地区产量 $\times 100\%$ 。

2 结果与分析

2.1 不同轮作系统下施肥对稻田  $\text{NH}_3$  挥发通量及积累量的影响

2.1.1  $\text{NH}_3$  挥发通量的动态变化 2015—2016 年不同处理下水稻生长期间氮挥发通量的动态变化见图 2。



RW-FFP、RW-OPT、RV-FFP、RV-OPT、RF-FFP 和 RF-OPT 分别表示水稻-小麦轮作农民习惯施肥方式、水稻-小麦轮作优化施肥方式、水稻-蔬菜轮作农民习惯施肥方式、水稻-蔬菜轮作优化施肥方式、水稻-冬闲田轮作农民习惯施肥方式和水稻-冬闲田轮作优化施肥方式。下图同

RW-FFP, RW-OPT, RV-FFP, RV-OPT, RF-FFP and RF-OPT represent the rice-wheat rotation system (farmer's fertilizer practices), the rice-wheat rotation system (optimal fertilization), the rice-vegetable rotation system (farmer's fertilizer practices), the rice-vegetable rotation system (optimal fertilization), the rice-fallow rotation system (farmer's fertilizer practices) and the rice-fallow rotation system (optimal fertilization). The same follow

图 2 2015—2016 年不同处理下水稻生长期间氮挥发通量的动态变化  
Fig. 2 Variations of ammonia volatilization fluxes after fertilizer application during the rice growing period under different treatments from 2015 to 2016

由图 2 可以看出,2016 年稻田施入基肥后,各处理 NH<sub>3</sub> 挥发通量明显增加,并于施肥后第 2 天达到最大值,随后逐渐下降,至第 10 天趋近于零;各处理 NH<sub>3</sub> 挥发通量的变化规律相似;在 3 种轮作系统下,均表现出农民习惯施肥处理 NH<sub>3</sub> 的挥发通量峰值(13.3~13.8 kg/(hm<sup>2</sup>·d))明显高于优化施肥处理(8.3~9.1 kg/(hm<sup>2</sup>·d))。稻田施入分蘖肥后,两个年度 NH<sub>3</sub> 挥发通量的动态变化趋势与 2016 年施入基肥后的变化趋势基本一致。稻田施入穗肥后,由于施肥量较少且在此生育时期水稻对氮素吸收利用加快等原因,优化施肥处理没有按施肥量(相当于基肥的 40%,分蘖肥的 67%)等比例出现 NH<sub>3</sub> 挥发通量的峰值,且与农民习惯处理也无明显差异,而 2015 年 NH<sub>3</sub> 挥发通量出现了较低的峰

值可能与当时的气温相对较高,促进了 NH<sub>3</sub> 挥发有关。

2.1.2 NH<sub>3</sub> 挥发积累量 鉴于 2015 年施用基肥后缺失 NH<sub>3</sub> 挥发通量数据,故只对 2016 年 NH<sub>3</sub> 挥发积累量进行分析,结果见表 2。表 2 显示,在 3 种水旱轮作方式下,优化施肥处理显著降低了 NH<sub>3</sub> 挥发积累量及其占氮肥施用量百分比,平均降幅分别为 49.1%和 4.0%。对 2016 年水稻 NH<sub>3</sub> 挥发积累量与其占氮肥施用量百分比的影响进行双因素方差分析,发现 NH<sub>3</sub> 挥发积累量与其占氮肥施用量百分比受施肥方式影响显著( $P<0.05$ ),轮作制度( $P=0.575$ , $P=0.742$ )及其与施肥方式交互作用( $P=0.430$ , $P=0.542$ )的影响不显著。

表 2 2016 年不同处理下水稻生长期间 NH<sub>3</sub> 挥发积累量与百分比  
Table 2 Cumulative amounts and ratios of ammonia volatilization during the rice season under different treatments in 2016

| 轮作制度<br>Rotation system | 施肥方式<br>Fertilization method | 施氮量/(kg·hm <sup>-2</sup> )<br>Fertilizer application | NH <sub>3</sub> 挥发积累量/<br>(kg·hm <sup>-2</sup> )<br>Cumulative amounts of<br>NH <sub>3</sub> volatilization | 占氮肥施用量<br>百分比/%<br>Ratio of NH <sub>3</sub><br>volatilization |
|-------------------------|------------------------------|------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| RW                      | FFP                          | 300                                                  | 80.4±3.8 a                                                                                                  | 26.8±1.3 a                                                    |
|                         | OPT                          | 180                                                  | 40.8±4.3 b                                                                                                  | 22.6±2.4 b                                                    |
| RF                      | FFP                          | 300                                                  | 77.6±4.8 a                                                                                                  | 25.9±1.6 a                                                    |
|                         | OPT                          | 180                                                  | 41.3±2.6 b                                                                                                  | 23.0±1.5 b                                                    |
| RV                      | FFP                          | 300                                                  | 82.9±4.3 a                                                                                                  | 27.6±1.4 a                                                    |
|                         | OPT                          | 180                                                  | 40.7±2.0 b                                                                                                  | 22.6±1.1 b                                                    |

注:同列数据后标不同小写字母表示同一制度不同处理间  $P<0.05$  水平差异显著。表 4 同。  
Note: Different small letters in each period mean significant difference at  $P<0.05$  level among different N treatments. The same in table 4.

2.2 NH<sub>3</sub> 挥发环境影响因素及相关性分析

2.2.1 环境影响因素 不同处理下水稻生长期间影响 NH<sub>3</sub> 挥发环境条件的动态变化见图 3。图 3 显示,田面水 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 质量浓度变化趋势与 NH<sub>3</sub> 挥发通量基本一致,施用基肥与分蘖肥后,田面水 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 质量浓度迅速升高,在施肥后的第 2 天达到峰值后又逐渐下降;但在施用穗肥后,优化施肥处理的田面水 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 质量浓度并无明显变化。

图 3 显示,在水稻生长季,田面水层 pH 为 7.4~9.1,尿素的施入导致各处理 pH 值总体呈现出先升高后下降的现象。而施入分蘖肥后,水田 pH 值明显的升高则是由于当日喷施了碱性农药所致。

图 3 显示,在水稻生长期间,田间水层温度波动较大,整体趋势表现为水稻生长初期温度较高,但后期温度略有下降。在 NH<sub>3</sub> 挥发通量测定期间,水稻田间均处于淹水状态,且由于降雨等原因,水层深度

变化无明显规律。

2.2.2 NH<sub>3</sub> 挥发通量与环境影响因素间的偏相关性 以各处理 NH<sub>3</sub> 挥发通量分别与其相关环境条件进行偏相关性分析,结果见表 3。由表 3 可以看出,2015 年和 2016 年田面水 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 质量浓度与 NH<sub>3</sub> 挥发通量均呈极显著的正相关关系( $P<0.001$ ),这说明,田面水 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 质量浓度对 NH<sub>3</sub> 挥发通量的影响相对较为明显。在 2015 年, NH<sub>3</sub> 挥发通量大部分处理与 pH 和水层温度呈正相关关系,但未达显著水平;在水稻-小麦轮作系统优化施肥处理以及水稻-冬闲田轮作系统下, NH<sub>3</sub> 挥发通量与水层深度呈显著负相关。在 2016 年,仅在水稻-蔬菜轮作系统下,优化施肥处理的 NH<sub>3</sub> 挥发通量与水层 pH 间存在显著的相关关系;在水稻-冬闲田轮作系统和水稻-蔬菜轮作系统下,农民习惯施肥处理的 NH<sub>3</sub> 挥发通量也与水层深度呈极显著负相关。

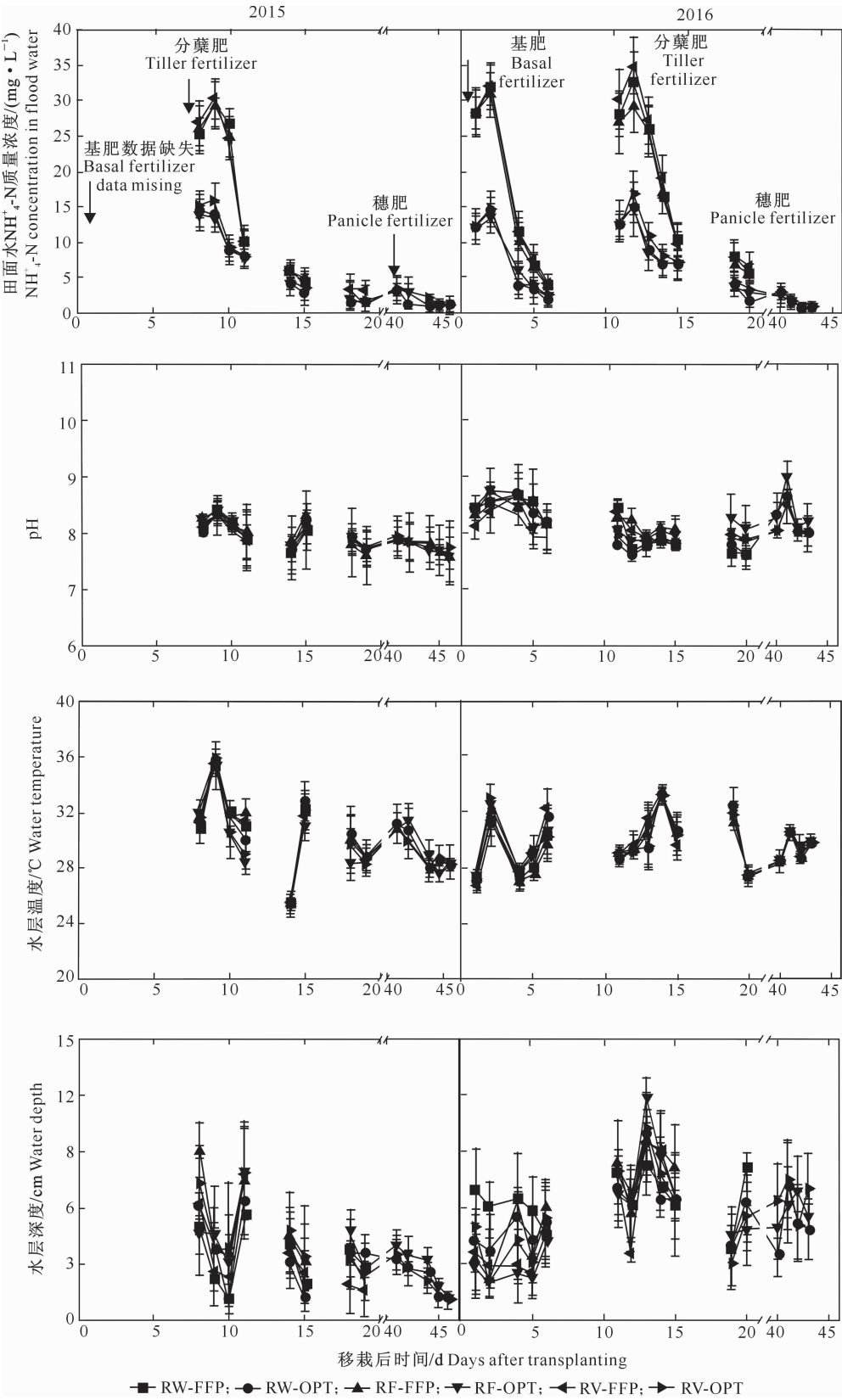


图 3 不同处理下水稻生长期间影响  $\text{NH}_3$  挥发环境条件的动态变化

Fig. 3 Influencing factors of ammonia volatilization during rice growing season under different treatments

表 3 不同处理下水稻季 NH<sub>3</sub> 挥发通量与环境条件间的偏相关性

Table 3 Partial correlations between NH<sub>3</sub> volatilization fluxes and ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) content,pH, temperature in floodwater,and water depth during rice growing season under different treatments

| 轮作制度<br>Rotation system | 施肥方式<br>Fertilization method | 田面水 NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N 质量浓度<br>NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N concentration in flood water |          | 水层 pH<br>pH in flood water |         | 水层温度<br>Water temperature |        | 水层深度<br>Water depth |           |
|-------------------------|------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|----------------------------|---------|---------------------------|--------|---------------------|-----------|
|                         |                              | 2015                                                                                                     | 2016     | 2015                       | 2016    | 2015                      | 2016   | 2015                | 2016      |
| RW                      | FFP                          | 0.933***                                                                                                 | 0.780*** | -0.159                     | 0.011   | 0.181                     | 0.021  | -0.343              | -0.267    |
|                         | OPT                          | 0.785***                                                                                                 | 0.829*** | 0.151                      | 0.066   | 0.197                     | 0.049  | -0.352*             | -0.238    |
| RF                      | FFP                          | 0.934***                                                                                                 | 0.776*** | 0.248                      | 0.175   | -0.166                    | -0.137 | -0.532*             | -0.474**  |
|                         | OPT                          | 0.706***                                                                                                 | 0.804*** | 0.245                      | 0.008   | 0.279                     | 0.201  | -0.379*             | -0.350*   |
| RV                      | FFP                          | 0.933***                                                                                                 | 0.837*** | 0.129                      | 0.046   | 0.055                     | 0.045  | -0.242              | -0.542*** |
|                         | OPT                          | 0.704***                                                                                                 | 0.850*** | 0.171                      | 0.400** | 0.001                     | 0.011  | -0.186              | -0.204    |

注:2015 年  $n_1=24,n_2=39$ ;2016 年  $n_1=36,n_2=48$ ,其中  $n_1$  为农民习惯施肥方式下采样频率, $n_2$  为优化施肥方式下采样频率。“\*”、“\*\*”和“\*\*\*”分别表示在  $P<0.05,P<0.01$  和  $P<0.001$  水平显著相关。  
Note:In 2015, $n_1=24$  and  $n_2=39$  and in 2016, $n_1=36$  and  $n_2=48$ .  $n_1$  represents sample number of FFP and  $n_2$  represent sample number of OPT.“\*”,“\*\*” and “\*\*\*” indicate significant correlation at  $P<0.05,P<0.01$  and  $P<0.001$ ,respectively.

2.3 水稻产量与氮肥利用率

表 4 表明,在不同轮作系统下,优化施肥处理与农民习惯施肥处理的水稻平均产量差异均不显著。与不施肥处理相比,3 种轮作系统优化施肥处理的平均增产率为 79.0%,较农民习惯施肥处理提高 1.4%。同时,优化施肥处理的氮农学利用率、氮回收效率、氮偏生产力也均大于其同一轮作系统下的农民习惯施肥处理,分别较农民习惯施肥处理提高 70.1%,59.7%和 68.0%。这说明,优化施肥处理

可显著提高稻田的氮肥利用率。在同一施肥处理条件下,水稻-蔬菜轮作制度下水稻平均产量(10.2 t/hm<sup>2</sup>)也显著高于水稻-小麦轮作(9.5 t/hm<sup>2</sup>)和水稻-冬闲田轮作(9.0 t/hm<sup>2</sup>)。因而将施肥处理与轮作方式对 2015—2016 年平均水稻产量做双因素分析,结果表明,轮作制度对水稻产量差异显著( $P<0.05$ ),而施肥方式( $P=0.495,P=0.496$ )及其与轮作制度交互作用( $P=0.831,P=0.835$ )对水稻产量均无显著影响。

表 4 2015—2016 年不同处理下水稻平均产量及氮肥利用率

Table 4 Grain yield and nitrogen use efficiency from 2015 to 2016 under different treatments

| 轮作制度<br>Rotation system | 施肥方式<br>Fertilization method | 产量/(t·hm <sup>-2</sup> )<br>Yield | 增产率/%<br>Yield increase rate | 氮农学利用率/<br>(kg·kg <sup>-1</sup> )<br>AE <sub>N</sub> | 氮回收效率/%<br>RE <sub>N</sub> | 氮偏生产力/<br>(kg·kg <sup>-1</sup> )<br>PFP <sub>N</sub> |
|-------------------------|------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|------------------------------------------------------|----------------------------|------------------------------------------------------|
| RW                      | FFP                          | 9.4±0.2 bc                        | 74.6±3.0 b                   | 13.3±0.5 d                                           | 35.8±1.7 d                 | 31.2±0.5 e                                           |
|                         | OPT                          | 9.5±0.2 b                         | 77.6±3.9 ab                  | 23.2±1.2 b                                           | 57.2±1.0 ab                | 53.0±1.2 b                                           |
| RF                      | FFP                          | 8.9±0.2 c                         | 73.5±4.6 b                   | 12.6±0.8 d                                           | 35.0±1.2 d                 | 29.8±0.8 e                                           |
|                         | OPT                          | 9.0±0.3 c                         | 74.7±6.6 b                   | 21.3±1.9 b                                           | 55.6±1.6 b                 | 50.0±1.9 c                                           |
| RV                      | FFP                          | 10.2±0.2 a                        | 84.7±2.8 a                   | 15.6±0.5 c                                           | 37.6±2.2 d                 | 34.1±0.5 d                                           |
|                         | OPT                          | 10.2±0.3 a                        | 84.8±5.5 a                   | 26.1±1.7 a                                           | 60.3±4.5 a                 | 56.8±1.7 a                                           |

3 讨 论

3.1 不同水旱轮作系统下优化施肥对 NH<sub>3</sub> 挥发的影响

有研究表明,在轮作系统中,前茬作物收获后的残茬可通过增加土体有机质及改善土壤结构,影响 NH<sub>3</sub> 挥发总量<sup>[10]</sup>。但是在本试验中,当施肥量相同时,不同轮作系统下 NH<sub>3</sub> 挥发积累量差异不显著,这与前人的研究结果不一致。造成这种差异的主要原因可能是本研究的轮作年限较短,2015 至 2016 年不同前茬作物收获后有机质含量分别为 20.27 和 20.19 g/kg,前茬作物的种植并未对土壤有机质造成显著影响,因此没有影响下一季度水稻 NH<sub>3</sub> 挥发

通量。在 3 种轮作方式下,农民习惯施肥处理与优化施肥处理平均 NH<sub>3</sub> 挥发积累量分别为 80.3 和 40.9 kg/hm<sup>2</sup>,且均表现出农民习惯施肥处理的 NH<sub>3</sub> 挥发积累量显著高于优化施肥处理,增幅可达 96.3%。同时,NH<sub>3</sub> 挥发积累量所占施肥总量比例变化也呈现与 NH<sub>3</sub> 挥发积累量相同的趋势,这表明在短期轮作制度下,NH<sub>3</sub> 挥发主要与氮肥用量及基肥、分蘖肥的分配比例等施肥制度密切相关,具体表现为基肥和分蘖肥的施肥量越大,NH<sub>3</sub> 挥发通量与 NH<sub>3</sub> 积累量也越高,这也是导致氮肥损失量增加的主要原因。

本研究中,在农民习惯施肥处理中,由于作为基肥与分蘖肥的氮肥用量相同,这 2 次施肥后,稻田



$\text{NH}_3$  挥发通量基本无差异;在优化施肥处理中,氮肥作为基肥施用后的  $\text{NH}_3$  挥发通量明显高于其作为分蘖肥施用,这主要是由后者的氮肥施用量( $54 \text{ kg/hm}^2$ )低于前者( $90 \text{ kg/hm}^2$ )所致。氮肥作为穗肥施用( $36 \text{ kg/hm}^2$ )后也并未出现按施肥量(相当于基肥的 40%,分蘖肥的 67%)等比例  $\text{NH}_3$  挥发通量的峰值,这主要是由于,一方面施用穗肥时水稻已生长茂盛,对田面产生一定的覆盖,阻碍空气流通,不利于  $\text{NH}_3$  挥发;另一方面相比生育前期而言,穗肥施用时期的水稻根系相对较发达,对氮素的吸收利用速度较快,从而降低了  $\text{NH}_3$  挥发损失<sup>[11-12]</sup>。

### 3.2 影响稻田 $\text{NH}_3$ 挥发通量的环境因素

许多研究表明,田间水层  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  质量浓度是影响稻田  $\text{NH}_3$  挥发通量的决定因子<sup>[13-14]</sup>。这与本研究中  $\text{NH}_3$  挥发通量与田间水层  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  质量浓度呈极显著正相关的结果相一致。本研究在试验前期发现,随着田间水层  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  质量浓度的增加, $\text{NH}_3$  挥发通量呈现非线性增长趋势,在以尿素作为氮肥时田间水层的  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  主要来自于尿素的水解,以此提供  $\text{NH}_3$  挥发底物,因此较高的田间水层  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  质量浓度可能与尿素的施用量和施用方法有很大关系<sup>[15]</sup>。同时,本研究结果也表明,田间水层  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  质量浓度与  $\text{NH}_3$  挥发通量变化趋势一致,说明优化施肥处理可通过降低基肥施用量进行施肥运筹,降低田面水的  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  质量浓度进而减少  $\text{NH}_3$  的挥发量。

一般认为,pH 是影响稻田  $\text{NH}_3$  挥发通量的另一个重要因素。在施入尿素后,由于尿素在水中的分解转化,导致 pH 出现先升高后降低的变化趋势,而 pH 的升高会促进铵离子向氨气转化,引起  $\text{NH}_3$  挥发通量的增加<sup>[16]</sup>。本研究中,2016 年氮肥作为基肥施用后,水稻田 pH 显示出先升高后降低的趋势;氮肥作为分蘖肥施用后,在第 1 天即达到峰值。两个年度在水稻施分蘖肥后第 6 天(2015 年)、第 8 天(2016 年)出现 pH 明显升高的现象,则是由于喷洒了碱性农药所致,但这并未造成  $\text{NH}_3$  挥发通量的明显增加,可能与此时田面水层的  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  质量浓度相对较低有关。

水层温度与深度同样是研究稻田  $\text{NH}_3$  挥发通量时需要考虑的环境因素。已有研究表明,高温会通过提高脲酶活性加快尿素的水解速度,也可通过提高  $\text{NH}_3$  和  $\text{NH}_4^+$  的扩散速率,促进  $\text{NH}_4^+$  转化为  $\text{NH}_3$ <sup>[17]</sup>。本试验中,水层温度与  $\text{NH}_3$  挥发通量之间总体呈正相关关系,但未达显著水平。这可能是

由于,在本试验中高温多发生于肥料施用后第 4~5 天,此时尿素已基本分解,因此  $\text{NH}_3$  挥发受水温影响不明显。本研究中,水层深度与  $\text{NH}_3$  挥发通量之间均呈负相关关系。一般来说,浅水层  $\text{NH}_3$  挥发速率要高于深水层,这主要是由于浅水层具有相对更高的  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  质量浓度和水温<sup>[18]</sup>。田间水层深度也会通过稀释效应<sup>[19]</sup>,增加扩散距离,以及  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  和  $\text{NH}_3$  的垂直对流产生的混合效应<sup>[20]</sup>均会对  $\text{NH}_3$  挥发通量产生影响。

### 3.3 优化施肥对水稻产量及氮素利用率的影响

一般而言,随着施氮量的增加,作物产量与氮吸收量会增加,但是当施氮量达到一定阈值时,产量增加与氮素投入量不匹配,导致氮素利用率显著降低<sup>[21-22]</sup>。本研究结果表明,在相同轮作系统下,农民习惯施肥处理的产量均略低于优化施肥处理,降低幅度为 1.4%,且优化施肥处理的氮素农学利用率、回收效率、偏生产力均分别较农民习惯施肥处理高  $9.3 \text{ kg/kg}$ 、21.6%和  $21.6 \text{ kg/kg}$ ,可知增加氮肥施用量并无相应增产效应,且还会导致氮素利用率下降。已有研究证实,水稻实地养分管理比农民习惯施肥方式增产 5.0%左右<sup>[23]</sup>,这说明合理施用氮肥可在降低施用量的基础上保持产量稳定,甚至增产。

本研究中,在 3 种轮作系统中,水稻-蔬菜轮作体系下的水稻平均产量( $10.2 \text{ t/hm}^2$ )依次高于水稻-小麦轮作系统( $9.5 \text{ t/hm}^2$ )和水稻-冬闲田轮作系统( $9.0 \text{ t/hm}^2$ )。由水稻平均产量与增产率的双因素(轮作制度、施肥制度)方差分析结果可知,这主要是受到不同轮作间的影响( $P < 0.05$ )。造成这种现象的原因可能是由于前茬种植作物施用氮肥量不同。有研究表明,施入土壤中的氮肥除了被作物吸收以及通过挥发等途径损失到环境中外,还有很大一部分会残留在土壤中<sup>[24]</sup>,作物收获后残留的肥料氮可占施氮量的 15%~30%,最高可达 48%<sup>[25]</sup>,这些残留肥料氮的有效性高于土壤固有的氮<sup>[26]</sup>,致使残留氮很容易被后茬作物吸收利用,从而增加作物产量。

## 4 结 论

不同施肥方式是影响  $\text{NH}_3$  挥发通量的主要因素。综合生产效益和环境效益,在不同的水旱轮作系统中,通过推荐施用氮肥  $180 \text{ kg/hm}^2$ ,并采用基肥、分蘖肥、穗肥质量比 5:3:2 进行氮肥运筹的优化施肥方式,可在减少氮肥施用的基础上既保证水稻获得高产,显著减少稻季施氮的  $\text{NH}_3$  挥发损失,



又能提高氮素利用率,降低了施肥对农田生态系统造成的环境风险,最终实现水旱轮作系统稻田作物的高产高效。

## [参考文献]

- [1] 巨晓棠. 氮肥有效率的观念及意义:兼论对传统氮肥利用率的理解误区 [J]. 土壤学报, 2014, 51(5): 921-933.
- Ju X T. The concept and meanings of nitrogen fertilizer availability ratio discussing misunderstanding of traditional nitrogen use efficiency [J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(5): 921-933.
- [2] 巨晓棠, 谷保静. 我国农田氮肥施用现状、问题及趋势 [J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(4): 783-795.
- Ju X T, Gu B J. Status-quo, problem and trend of nitrogen fertilization in China [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(4): 783-795.
- [3] 范明生, 江荣风, 张福锁, 等. 水旱轮作系统作物养分管理策略 [J]. 应用生态学报, 2008, 19(2): 424-432.
- Fan M S, Jiang R F, Zhang F S, et al. Nutrient management strategy of paddy rice-upland rotation system [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(2): 424-432.
- [4] 晏娟, 尹斌, 张绍林, 等. 太湖地区稻麦轮作系统中氮肥效应研究 [J]. 南京农业大学学报, 2009, 32(1): 61-66.
- Yan J, Yin B, Zhang S L, et al. Effect of nitrogen fertilizer on rice-wheat rotation system in Taihu region [J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2009, 32(1): 61-66.
- [5] 朱坚, 石丽红, 田发祥, 等. 湖南典型双季稻田氨挥发对施氮量的响应研究 [J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(5): 1129-1138.
- Zhu J, Shi L H, Tian F X, et al. Effect of ammonia volatilization to nitrogen application amount in typical double cropping paddy fields in Hunan Province [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2013, 19(5): 1129-1138.
- [6] Roelcke M, Li S X, Tian X H, et al. *In situ* comparisons of ammonia volatilization from N fertilizers in Chinese loess soils [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2002, 62(1): 73-88.
- [7] 王淳, 周卫, 李祖章. 不同施氮量下双季稻连作体系土壤氨挥发损失研究 [J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(2): 349-358.
- Wang C, Zhou W, Li Z Z. Effects of different nitrogen application rates on ammonia volatilization from paddy fields under double-harvest rice system [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, 18(2): 349-358.
- [8] 吴萍萍. 不同施肥制度下红壤稻田氨挥发与氧化亚氮排放的研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2008: 28.
- Wu P P. Ammonia volatilization and nitrous oxide emissions from double-rice system in red paddy soil under different fertilizing systems [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2008: 28.
- [9] 倪康, 丁维新, 蔡祖聪. 有机无机肥长期定位试验土壤小麦季氨挥发损失及其影响因素研究 [J]. 农业环境科学学报, 2009, 2(12): 2614-2622.
- Ni K, Ding W X, Cai Z C. Ammonia volatilization from soil as affected by long-term location application of manure and chemical fertilizers during wheat growing season [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, 2(12): 2614-2622.
- [10] 胡安永, 孙星, 刘勤, 等. 太湖地区不同轮作方式对稻田氨挥发和水稻产量的影响 [J]. 水土保持学报, 2013, 27(6): 275-279.
- Hu A Y, Sun X, Liu Q, et al. Influence of different rotations on ammonia volatilization and rice yields of paddy fields in Taihu Lake region [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(6): 275-279.
- [11] 唐良梁, 李艳, 李恋卿, 等. 不同施氮量对稻田氨挥发的影响及其阈值探究 [J]. 土壤通报, 2015, 46(5): 1232-1239.
- Tang L L, Li Y, Li L Q, et al. Effects of different nitrogen application rate on paddy ammonia volatilization and nitrogen threshold [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2015, 46(5): 1232-1239.
- [12] 卢成, 郑世宗, 胡荣祥. 不同水肥模式下稻田氮渗漏和挥发损失的 $^{15}\text{N}$ 同位素示踪研究 [J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(3): 107-109.
- Lu C, Zheng S Z, Hu R X. Percolation and volatilization loss of fertilizer-N in paddy field by isotope  $^{15}\text{N}$  tracer in different irrigation and fertilizer modes [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2014, 33(3): 107-109.
- [13] 高翠民, 梅新兰, 商庆银, 等. 长期不同施肥红壤性稻田水稻产量和氨挥发的变化 [J]. 南京农业大学学报, 2012, 35(1): 63-68.
- Gao C M, Mei X L, Shang Q Y, et al. Dynamic change of ammonia volatilization and rice yield during double-rice growing seasons in red paddy soil and different long-term fertilizing systems [J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2012, 35(1): 63-68.
- [14] 周亮, 荣湘民, 谢桂先, 等. 不同氮肥施用对双季稻稻田氨挥发及其动力学特性的影响 [J]. 水土保持学报, 2014, 28(4): 143-147.
- Zhou L, Rong X M, Xie G X, et al. Effect of different nitrogen fertilizers on ammonia volatilization and its dynamic characteristics of double cropping rice [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(4): 143-147.
- [15] Shang Q Y, Gao C M, Yang X X. 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.
- [16] 叶世超, 林忠成, 戴其根, 等. 施氮量对稻季氨挥发特点与氮素利用的影响 [J]. 中国水稻科学, 2011, 25(1): 71-78.
- Ye S C, Lin Z C, Dai Q G, et al. Effects of nitrogen application rate on ammonia volatilization and nitrogen utilization in rice growing season [J]. Chinese Journal of Rice Science, 2011, 25(1): 71-78.

exponent;a case study of applicatings to climatic change [J].  
*Scientia Geographica Sinica*,2004,24(2):177-182.

[23] 叶子君,欧阳宸曦,冯子悦,等. 基于 Hurst 模型的庐山自然保护区植被覆盖优势及其可持续性分析 [J]. 环境与可持续发展,2015,40(1):168-172.  
Ye Z J,Ouyang C X,Feng Z Y,et al. Analysis of the dominance and sustainability of vegetation cover in Lushan Nature Reserve [J]. *Environment and Sustainable Development*, 2015,40(1):168-172.

[24] Cao R,Jiang W,Yuan L,et al. Inter-annual variations in vegetation and their response to climatic factors in the upper catchments of the Yellow River from 2000 to 2010 [J]. *Journal of Geographical Sciences*,2014,24(6):963-979.

[25] 袁丽华,蒋卫国,申文明,等. 2000—2010 年黄河流域植被覆盖的时空变化 [J]. 生态学报,2013,33(24):7798-7806.  
Yuan L H,Jiang W G,Shen W M,et al. The spatio-temporal variations of vegetation cover in the Yellow River Basin from 2000 to 2010 [J]. *Acta Ecologica Sinica*,2013,33(24):7798-7806.

[26] 黄 麟,邵全琴,刘纪远. 近 30 年来青海省三江源区草地的土壤侵蚀时空分析 [J]. 地球信息科学学报,2011,13(1):12-21.  
Huang L,Shao Q Q,Liu J Y. Spatial-temporal analysis of soil erosion in grassland over the past three decades in Sanjiangyuan region,Qinghai province,China [J]. *Journal of Geo-Information Science*,2011,13(1):12-21.

.....

(上接第 53 页)

[17] 蒋朝晖,曾清如,方 至,等. 不同温度下施入尿素后土壤短期内 pH 的变化和氨气释放特性 [J]. 土壤通报,2004,35(3):299-302.  
Jiang Z H,Zeng Q R,Fang Z,et al. Short-term changes of pH and volatilization of ammonia from urea fertilizer in soil under different temperatures [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004,35(3):299-302.

[18] 商庆银. 长期不同施肥制度下双季稻田土壤肥力与温室气体排放规律的研究 [D]. 南京:南京农业大学,2012.  
Shang Q Y. Studys on soil fertility and carbon sequestration and mitigation under long-term fertilization in Chinese double rice cropping systems [D]. Nanjing:Nanjing Agricultural University,2012.

[19] Jayaweera G R,Mikkelsen D S. Assessment of ammonia volatilization from flooded soil systems [M]//Brady N C. *Advances in Agronomy*. San Diego: Academic Press,1991:303-356.

[20] Leaning R,Denmead O T,Simpson J R,et al. Processes of ammonia loss from shallow floodwater [J]. *Atmospheric Environment*,1984,18(8):1583-1592.

[21] 赵 营,同延安,赵护兵. 不同供氮水平对夏玉米养分累积、转运及产量的影响 [J]. 植物营养与肥料学报,2006,12(5):622-627.  
Zhao Y,Tong Y A,Zhao H B. Effects of different N rates on nutrients accumulation, translocation and yield of summer maize [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*,2006,12(5):622-627.

[22] 李伟波,吴留松,廖海秋. 太湖地区高产稻田氮肥施用与作物吸收利用的研究 [J]. 土壤学报,1997,34(8):67-73.  
Li W B,Wu L S,Liao H Q. Application and crop recovery of N-fertilizer in high-yielding paddy fields of Taihu region [J]. *Acta Pedologica Sinica*,1997,34(8):67-73.

[23] Peng S,Buresh R J,Huang J,et al. Improving nitrogen fertilization in rice by site-specific N management;a review [J]. *Agronomy for Sustainable Development*,2010,30(3):649-656.

[24] 黄生斌,陈新平,张福锁. 冬小麦施氮对下茬夏玉米的后效 [J]. 中国农业大学学报,2002(1):54-58.  
Huang S B,Chen X P,Zhang F S. Effect of residual nitrogen applied to winter wheat on the following summer maize [J]. *Journal of China Agricultural University*,2002(1):54-58.

[25] 刘新宇,巨晓棠,张丽娟,等. 不同施氮水平对冬小麦季化肥氮去向及土壤氮素平衡的影响 [J]. 植物营养与肥料学报,2010,16(2):296-303.  
Liu X Y,Ju X T,Zhang L J,et al. Effects of different N rates on fate of N fertilizer and balance of soil N of winter wheat [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*,2010,16(2):296-303.

[26] Broadbent F E. Residual effects of labeled N in field trials [J]. *Agronomy Journal*,1980,72:325-329.