

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

汪军^{1,2}, 王德建^{1*}, 张刚¹, 王远¹

(1. 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 2. 中国科学院南京土壤研究所土壤环境与污染修复重点实验室, 南京 210008)

摘要: 利用原状土柱在田间试验条件下, 比较了麦秸还田下乌栅土和黄泥土稻季氮素氨挥发损失规律, 每种试验土壤均设对照、氮肥、氮肥加麦秆这3个处理, 同步测定施肥后氨挥发、田面水铵态氮浓度与pH、以及表层土壤Eh。结果表明, 乌栅土氨挥发速率及其累积挥发量显著高于黄泥土, 两种土壤的稻季平均氨挥发的氮素损失量分别为 $41.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $11.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 分别占氮肥用量的15.2%和3.8%; 在3个施肥时期中, 分蘖期氨挥发损失率最高, 乌栅土和黄泥土分别占氮肥用量的29.4%和8.3%; 麦秸还田显著增加了氮肥的氨挥发损失, 麦秸还田下乌栅土和黄泥土稻季氨挥发损失比单施氮肥处理分别增加了19.8%和20.6%。两种土壤氨挥发速率均与田面水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度、pH呈正相关关系, 但与表层土壤Eh的关系还需进一步研究。

关键词: 秸秆还田; 太湖地区; 水稻土; 氨挥发; 氮素损失

中图分类号: X592 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)01-0027-07

Comparing the Ammonia Volatilization Characteristic of Two Typical Paddy Soil with Total Wheat Straw Returning in Taihu Lake Region

WANG Jun^{1,2}, WANG De-jian¹, ZHANG Gang¹, WANG Yuan¹

(1. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: An experiment using monolith lysimeter was conducted to compare the characteristic of N loss by ammonia (NH_3) volatilization between the gleyed paddy soil (G soil) and hydromorphic paddy soil (H soil) the Changshu National Agro-ecological Experimental Station of the Chinese Academy of Sciences ($31^\circ 33' \text{N}$, $123^\circ 38' \text{E}$). Three treatments were designed for each soil type, i. e. control (no urea and straw applied), nitrogen solely and nitrogen plus wheat straw. Ammonia volatilization, flood water $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ concentration, pH and top soil Eh were measured during the rice-growing season. Results showed that the NH_3 volatilization flux and cumulative N losses by NH_3 volatilization from G soil were significantly higher than those from H soil, the average cumulative N losses being about $41.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ and $11.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, or 15.2% and 3.8% of the fertilizer N, respectively. The average N loss by NH_3 volatilization during the tillering stage was the highest among the three fertilization stages, accounting for 29.4% and 8.3% of the fertilizer N for G soil and H soil, respectively. Wheat straw returning significantly increased paddy field NH_3 volatilization losses. Comparing with the sole application of fertilizer-N, the cumulative N loss by NH_3 volatilization of fertilizer-N in combination with wheat straw was increased by 19.8% and 20.6% for G soil and H soil, respectively. In addition, ammonia volatilization fluxes showed a positive relationship with the flood water $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ concentration and pH for both soils, but the relationship with top soil Eh still needs further study.

Key words: straw returning; Taihu Lake region; paddy soil; ammonia volatilization; nitrogen losses

研究表明, 中国2008年氮肥用量达到2300万t, 占世界氮肥用量的28%^[1]。太湖地区作为我国重要的粮食生产基地, 在稻麦轮作体制下, 稻季氮肥平均用量达到 $352 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[2], 其中尿素用量约占75%^[3]。然而, 施入稻田的尿素利用率大约在30%~35%左右^[4], 而通过稻田氨挥发损失占施氮量的10%~60%^[5], 是稻田土壤系统中氮肥损失的主要途径之一^[6]。氨是空气中重要碱性气体, 易与大气中硫氧化物、氮氧化物结合形成铵态氮, 铵态氮达到一定浓度将发生沉降到地表, 从而导致地表活性

氮增多, 引发诸如水体富营养化、土壤酸化等一系列的二次污染问题^[7,8]。国内外大量研究表明影响稻田土壤氨挥发的因素很多, 主要包括土壤性质、通气状况、水分管理、气候条件、施肥种类及方式、用量等^[9~14]。彭世彰等^[15]研究表明, 控制灌溉能够

收稿日期: 2012-04-01; 修订日期: 2012-06-19

基金项目: 江苏省农业科技创新基金项目(CX(12)-1002); 国家自然科学基金项目(40871145)

作者简介: 汪军(1982~), 男, 博士后, 主要研究方向为环境污染生态修复与面源污染控制, E-mail: flypigging@hotmail.com

* 通讯联系人, E-mail: djwang@issas.ac.cn

有效减少稻田氨挥发损失,夏文建等^[16]研究表明,适当增加追肥用量和施肥次数能够有效减少稻田肥料氮的氨挥发损失。另有一些学者阐述了有机无机肥配施对稻田氨挥发的影响^[17~21],Ruijter 等^[22]研究认为作物秸秆及有机残体能够有效增加氨挥发,但是作物秸秆对旱地氨挥发没有显著影响^[23]; Tian 等^[24]研究结果表明水稻秸秆还田配施尿素降低了小麦拔节期的氨挥发,却增加了水稻基肥期氨挥发。

秸秆全量直接还田,省工节本,简便易行,近年来在江苏省进行了大面积推广。太湖地区作为江苏重要的稻麦产区,年均秸秆还田率达到 22% 左右。但是关于秸秆还田的综合环境效应的研究报道不多,许多研究者在太湖地区稻田土壤氨挥发方面进行了研究^[5, 25~27],但关于秸秆全量还田配施氮肥条件下稻田氨挥发的研究较为鲜见。因此,本研究基于麦秸全量还田条件下,比较太湖地区两种主要稻

田土壤的氨挥发特征、环境差效应差异,以揭示秸秆还田配施不同氮肥条件下土壤氨挥发规律,以期优化秸秆还田配套施肥措施提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验概况

试验于 2010 年稻季在中国科学院常熟农业生态国家试验站(31°33'N, 123°38'E)进行。站区所在地属亚热带北部湿润季风气候区,年均气温 16.5℃,最高气温 39.1℃,年降雨量 1 316 mm。站区地形属阳澄湖低洼平原,海拔 3.12 m,地下水深 80 cm 左右。模拟试验土壤采自常熟生态站(乌栅土)与常熟市大义镇五新村(黄泥土),两种土壤为该区的典型水稻土(系统分类名分别为:普通潜育水耕人为土和普通简育水耕人为土),0~15 cm 耕层土壤的基本性状如表 1 所示。

表 1 供试两种典型土壤基本性状

Table 1 Basic characteristic of two typical soils

类型	全氮 /g·kg ⁻¹	有机质 /g·kg ⁻¹	全磷 /g·kg ⁻¹	碱解氮 /mg·kg ⁻¹	速效磷 /mg·kg ⁻¹	速效钾 /mg·kg ⁻¹	pH
乌栅土	1.83	30.8	0.93	161.3	13.1	121.3	7.4
黄泥土	1.45	25.6	0.67	108.2	8.4	76.3	5.8

1.2 试验设计

试验采用原状模拟土柱,土柱高度为 100 cm,直径为 48 cm,原状土柱采集方法依据文献[28],安置好的原状土柱经过 1 季的预试验后,开始布置试验。两种土壤分别设置无氮对照、氮肥(240 kg·hm⁻²)和全量麦秸(5 000 kg·hm⁻²)+氮肥(240 kg·hm⁻²)这 3 个处理,分别用 WN0、WN240、WSN240 表示乌栅土处理,HN0、HN240、HSN240 表示黄泥土处理。每个处理 3 次重复,随机区组排列。氮肥的运筹是基肥占 40%、分蘖肥占 20%、穗肥占 40%,分别于 6 月 24 日、7 月 2 日、8 月 6 日施用。3 个处理的磷钾肥用量相同,分别为 15、90 kg·hm⁻²(肥料用量以 N、P、K 元素态量计),磷肥(过磷酸钙)与钾肥(氯化钾)均作为基肥一次施入。用于还田的小麦秸秆有机碳含量为 440.5 g·kg⁻¹,全氮含量为 4.02 g·kg⁻¹,碳氮比为 109.5。水稻栽插密度为 23 穴·m⁻²,水稻于 6 月 24 日插秧,10 月 25 日收获。

1.3 样品采集与测定

1.3.1 氨挥发测定

采用密闭室法^[24, 29, 30]测定氨挥发量,田间采气装置的密闭室是用一直径 200 mm、高 150 mm 有机玻璃罩子,放入水田中即成为一密闭的气室。罩子

顶部开有两个孔,其中一个为直径为 25 mm 进气孔,连接进气管口到 2 500 mm 高处,以减少田面交换空气对稻田 NH₃ 挥发测定的影响;另一个为采气孔,与盛有 2% 硼酸的吸收瓶相连,吸收瓶再与真空泵相连,调节真空泵抽气量,使密闭室的换气频率控制在每分钟 15~20 次^[31, 32]。分别于每天上午 08:00~10:00,下午 14:00~16:00 进行 2 h 的连续抽气测定,两次测定值平均后乘以 12,计算出每天的总氨挥发量^[28, 33],氨气采集装置如图 1 所示。

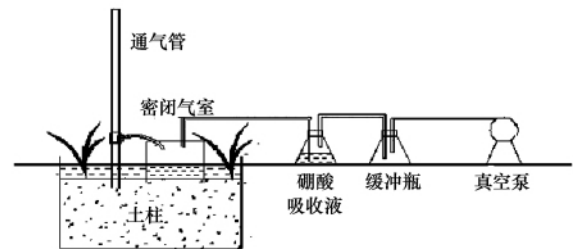


图 1 氨气田间捕获装置

Fig. 1 Sketch of NH₃ absorption equipment in the paddy field

1.3.2 水样

水样采集始于水稻移栽后第 2 d,每天采集 1 次田面水,直至稻季氨挥发测定结束。采集的水样过滤后采用流动分析仪测定铵态氮(NH₄⁺-N)。

1.3.3 pH 和 Eh

氨挥发测定期间利用电位计同时测定稻田田面水的 pH 和表层土壤 Eh, 分别于每天上午 08:00 ~ 10:00 和下午 14:00 ~ 16:00 各测定一次。

1.4 数据计算与分析

数据计算和分析采用 Microsoft Excel 2003 和 SPSS 18.0 绘图采用 Origin 8.0。不同处理氨挥发累积损失量差异性分析采用 Duncan's 检验。

2 结果与讨论

2.1 麦秸全量还田下两种水稻土的稻季氨挥发速率

从麦秸全量还田下乌栅土和黄泥土水稻不同施肥期的氨挥发速率变化曲线(图 2)可以看出,两种土壤的氨挥发速率在整个测定期间共出现 3 次峰值,分别在每次施肥后的 1~3 d 内;施肥处理稻田氨挥发速率均在施肥后 5~7 d 内降低到对照水平,这与前人研究结果一致^[15,16,25,33]。乌栅土和黄泥土氨挥发速率在基肥、穗肥后第 1 d 达到的峰值,乌栅土在分蘖肥期氨挥发速率的峰值于施肥后第 2 d 或 3 d 达到;每次施肥后的 3~5 d 内乌栅土氨挥发速率明显高于黄泥土。在 3 个施肥期内穗肥期两种土壤的氨挥发速率峰值最大,乌栅土 WN0、WN240 和 WSN240 处理的峰值分别为 21.4、278.4、318.5 $\text{g} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{h})^{-1}$,黄泥土 HN0、HN240 和 HSN240 处理的峰值分别为 11.0、93.6、107.1 $\text{g} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{h})^{-1}$,乌栅土氨挥发速率峰值显著高于黄泥土,麦秸还田配施氮肥的稻田氨挥发速率显著高于单施化肥处理。WN0、WN240 和 WSN240 处理整个水稻季平均氨挥发速率分别为 10.9、83.6、103.1 $\text{g} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{h})^{-1}$,

是黄泥土各对应处理的 1.20、1.88、1.94 倍,乌栅土和黄泥土秸秆还田处理的平均氨挥发速率分别是单施化肥处理的 1.23 和 1.19 倍。

本研究中基肥、穗肥的施氮量是分蘖肥的 2 倍,但基肥与分蘖肥的平均氨挥发速率差异较小,穗肥平均氨挥发速率最高,这可能是由于在基肥、分蘖肥施肥后均与表层土壤混匀,而穗肥则是直接撒施于表层未与土壤混匀;此外,施基肥、分蘖肥、穗肥期间的平均温度分别为 27.6、29.1 和 34.1℃,3 个时期的降水量分别为 5.8、54.1 和 0 mm,从而导致了各施肥期氨挥发速率的差异。研究表明,不同施肥方式会影响稻田氨挥发速率^[15,19],而气温、降雨作为稻田氨挥发的重要驱动因子和影响因素^[24,25],其差异会对稻田氨挥发速率产生较大的影响。文献[25,26,28,33]对太湖地区乌栅土与黄泥土稻季氨挥发的研究结果显示,乌栅土氨挥发速率高于黄泥土,这与本研究结果相一致。麦秸还田增加了乌栅土和黄泥土稻田的氨挥发速率,这是因为秸秆还田促进了尿素的分解,提高了田面水的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度,从而提高了稻田氨挥发速率^[24,33,34]。本研究表明,麦秸全量还田提高了乌栅土和黄泥土的稻季氨挥发速率,并表明稻季氨挥发速率受施肥方式、气温、降雨和土壤类型的影响。

2.2 麦秸全量还田下两种水稻土稻季累积氨挥发损失量

乌栅土和黄泥土稻田累积氨挥发损失量、损失率如表 2 所示。结果表明,在两种土壤中,乌栅土氨

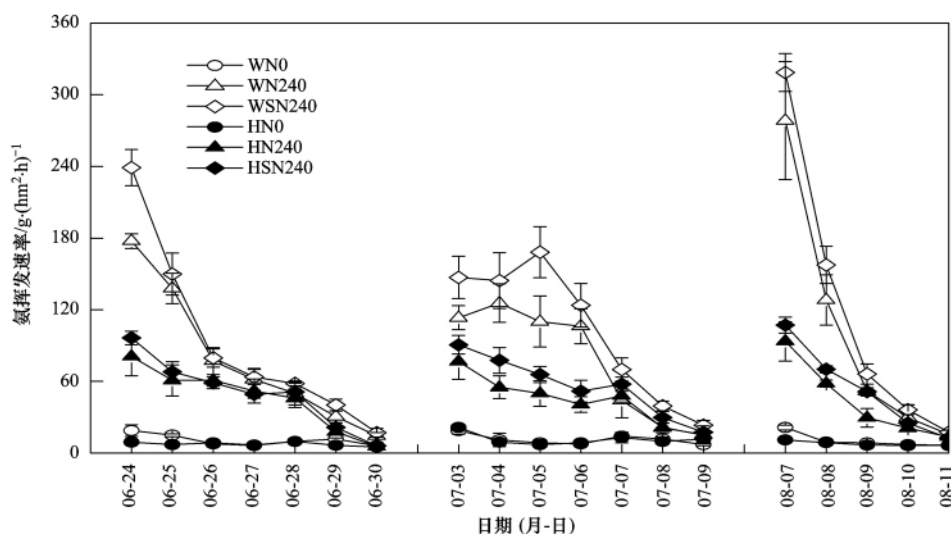


图 2 不同处理两种土壤稻季氨挥发速率变化

Fig. 2 Dynamics of ammonia volatilization flux with different treatments

挥发损失量显著高于黄泥土,乌栅土与黄泥土无氮肥处理是稻季累积氮挥发损失分别为 $5.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $2.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,施肥处理稻季平均氮挥发损失量分别为 $41.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $11.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,分别占氮肥用量的 15.2% 和 3.8%,乌栅土氮挥发损失是黄泥土的 3.7 倍. 在不同施肥处理中,麦秸还田显著增加了两种土壤的氮挥发损失,乌栅土和黄泥土秸秆加氮肥处理的氮挥发损失比单施氮肥分别增加了 19.8% 和 20.6%. 在 3 个施肥时期中,两种土壤的累积氮挥发损失均值分蘖肥期最高、基肥期次之、穗肥期最低,乌栅土和黄泥土分蘖肥期氮挥发损失率分别占氮肥用量的 29.4% 和 8.3%,穗肥期分别占氮肥用量的 12.1% 和 1.8%.

乌栅土和黄泥土基肥与分蘖肥期稻田氮挥发损失量占整个稻季氮挥发损失量的 69.2% 和 80.2%,表明稻季氮挥发主要发生在水稻生长初期,这可能是由于水稻基肥、分蘖肥期,氮肥施用量较大,间隔

较短,水稻在基肥期和分蘖初期对氮肥利用有限,从而导致大量氮肥通过氮挥发损失^[13,35]. 乌栅土和黄泥土分蘖肥期平均氮挥发损失率分别为 29.3% 和 8.3%,乌栅土氮挥发损失略高于其他研究^[13],而黄泥土的氮挥发损失低于前人研究^[26],这可能是由于施肥量、气候差异等造成的. 本研究乌栅土稻季单施氮肥和麦秆加氮肥处理的累积氮挥发氮素损失分别为 $38.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $45.6 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,分别占氮肥用量的 13.8% 和 16.7%;黄泥土处理的氮挥发氮素损失分别为 $10.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $12.3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,占氮肥用量的 3.3% 和 4.2%. 已有研究表明,太湖地区稻季氮肥氮挥发损失率乌栅土变幅在 3.7% ~ 38.7%^[25,33,35],黄泥土在 3.7% ~ 22.9%^[26,28]. 本研究的两种土壤稻季氮肥氮挥发损失也在此范围内,但氮挥发损失量均比较低,这可能是由于氮肥用量和运筹、施肥方法、年际间气象因子等差异造成的^[33].

表 2 两种水稻土氮挥发损失量及占氮肥用量的比例¹⁾

Table 2 Cumulative amount of NH_3 losses and the proportion of applied N lost as ammonia volatilization in different soils

土壤类型	处理	累计氮挥发损失量/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$				氮挥发损失占施氮量/%			
		基肥	分蘖肥	穗肥	总计	基肥	分蘖肥	穗肥	总计
乌栅土	WN0	1.9e	1.9d	1.3c	5.0e	—	—	—	—
	WN240	13.1b	12.9b	12.1a	38.1b	11.7	26.8	11.3	13.8
	WSN240	14.8a	17.2a	13.6a	45.6a	13.5	31.8	12.8	16.7
黄泥土	HN0	0.7e	0.96d	0.5c	2.1e	—	—	—	—
	HN240	3.7d	4.3c	2.1b	10.2d	3.2	7.0	1.7	3.3
	HSN240	4.4c	5.6b	2.3b	12.3c	3.8	9.7	1.8	4.2

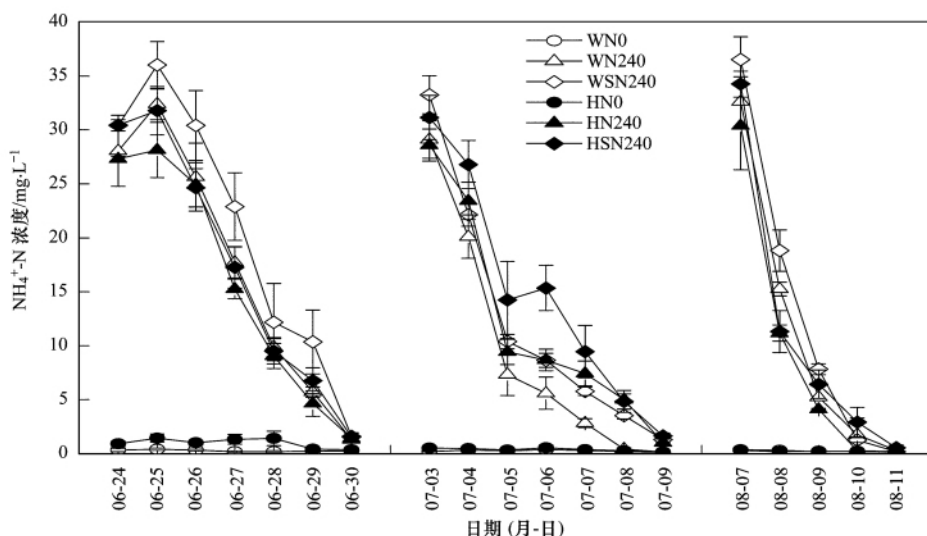
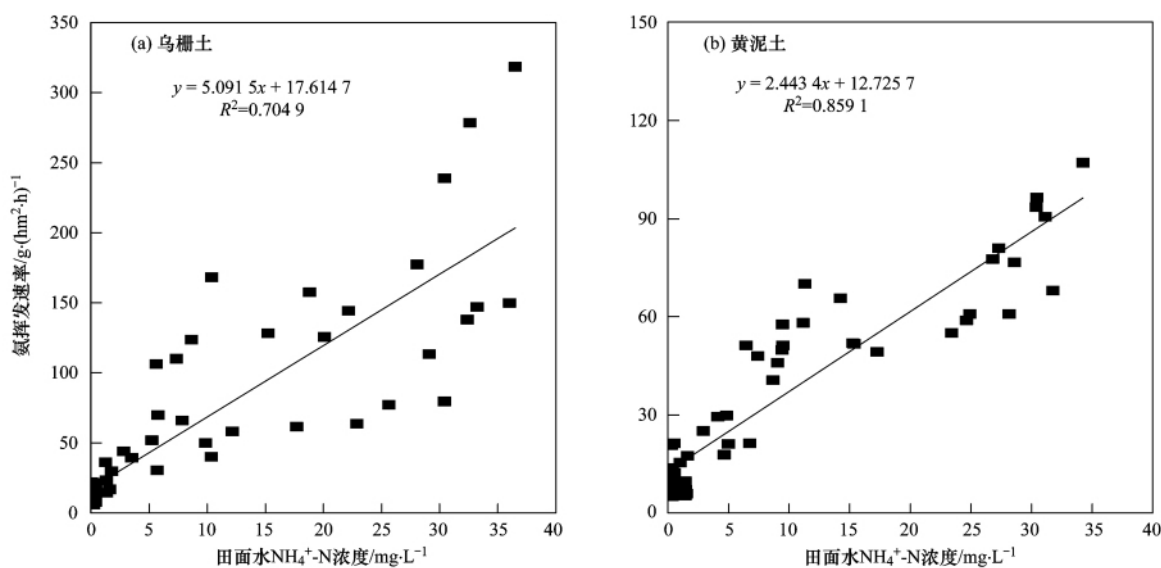
1) 同一列字母不同表示处理之间存在显著差异 $P < 0.05$

2.3 麦秸全量还田下两种水稻土田面水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度

秸秆全量还田下,不同施肥期乌栅土和黄泥土田面水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的浓度变化特征如图 3 所示. 结果表明,两种土壤田面水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度均在施肥后第 2 d 达到峰值,随后急剧下降,并于每次施肥后第 5 ~ 7 d 接近对照水平. 两种土壤田面水中铵态氮浓度的变化趋势与两种土壤的氮挥发速率一致,同等氮肥用量下,麦秸还田显著增加了两种土壤田面水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度. 乌栅土 WSN240 处理基肥、分蘖肥、穗肥期的田面水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 平均浓度为 20.6、12.2、11.2 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,比 WN240 处理分别增加了 19.2%、29.8%、20.7%;黄泥土 HSN240 处理基肥、分蘖肥、穗肥期的田面水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 平均浓度分别为 17.4、14.8、10.3 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,比 HN240 处理分别提高了 10.1%、23.8%、21.6%;HN0、HN240、HSN240 处理分蘖肥期田面水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 平均浓度分别

比 WN0、WN240、WSN240 高 45.1%、27.5%、21.7%.

研究结果表明,田面水中铵态氮浓度变化趋势与氮挥发速率变化一致,峰值出现在施肥后第 2 d;两种土壤氮挥发速率随田面水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度升高而显著升高,乌栅土与黄泥土氮挥发速率 y 与田面水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度 x 的关系方程分别为 $y = 5.092x + 17.615$ 和 $y = 2.443x + 12.726$,关系方程的决定系数分别为 0.705 和 0.859,稻田氮挥发速率与田面水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度之间呈显著 ($P < 0.05$) 正相关关系 (图 4),这与前人研究结果一致^[25,26,33]. 田面水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度是影响稻田氮挥发速率的主要因素之一^[5,24~28]. 秸秆还田处理增加了田面水中铵态氮的浓度,从而提高了氮挥发速率,这是因为有机物质阻碍了 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 进入黏土矿物固定位置,减少铵的晶穴固定的缘故^[14],同时作物秸秆能够促进尿素水解,从而提高施肥初期田面水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度和氮挥发速

图3 不同处理田面水中 NH_4^+ -N浓度变化Fig. 3 Dynamics of NH_4^+ -N concentrations in surface water with different treatment图4 氨挥发速率与田面水 NH_4^+ -N浓度的关系Fig. 4 Relationships between ammonia volatilization flux and NH_4^+ -N concentration in floodwater

率^[12].

2.4 麦秸全量还田下两种水稻土田面水 pH 和表层土壤 Eh 变化

麦秸还田下两种土壤田面水 pH 和 Eh 的动态变化如图 5 所示. 结果表明, 乌栅土在基肥、分蘖肥、穗肥期的田面水 pH 均显著高于对应黄泥土处理, 两种土壤的基肥、分蘖肥期施肥处理 pH 均高于对照处理, 穗肥期则低于对照处理. 乌栅土与黄泥土总的 pH 变化范围分别为 6.23 ~ 9.08 和 5.97 ~ 8.02, 单施氮肥与氮肥加秸秆处理时, 乌栅土的 pH 范围分别为 6.08 ~ 7.46 和 7.09 ~ 7.75, 黄泥土分别

为 6.53 ~ 6.98 和 6.44 ~ 7.04. 麦秸还田改变了两种土壤田面水的 pH, 乌栅土和黄泥土的 pH 分别提高了 -0.11 ~ 0.60 和 -0.34 ~ 0.37 个 pH 单位, 乌栅土的 pH 分别比对应的黄泥土处理高 0.01 ~ 1.06 个 pH 单位.

麦秸还田两种土壤表层 Eh 的动态变化如图 5 所示. 结果表明, 相同氮肥和秸秆处理时, 乌栅土表层 Eh 总体上低于黄泥土, 麦秸还田显著降低表层土壤 Eh; 两种土壤分蘖肥期间表层土壤 Eh 最低, 对照与单一氮肥处理表层土壤 Eh 变化较小. 麦秸还田使得乌栅土和黄泥土表层 Eh 分别降低了 9 ~

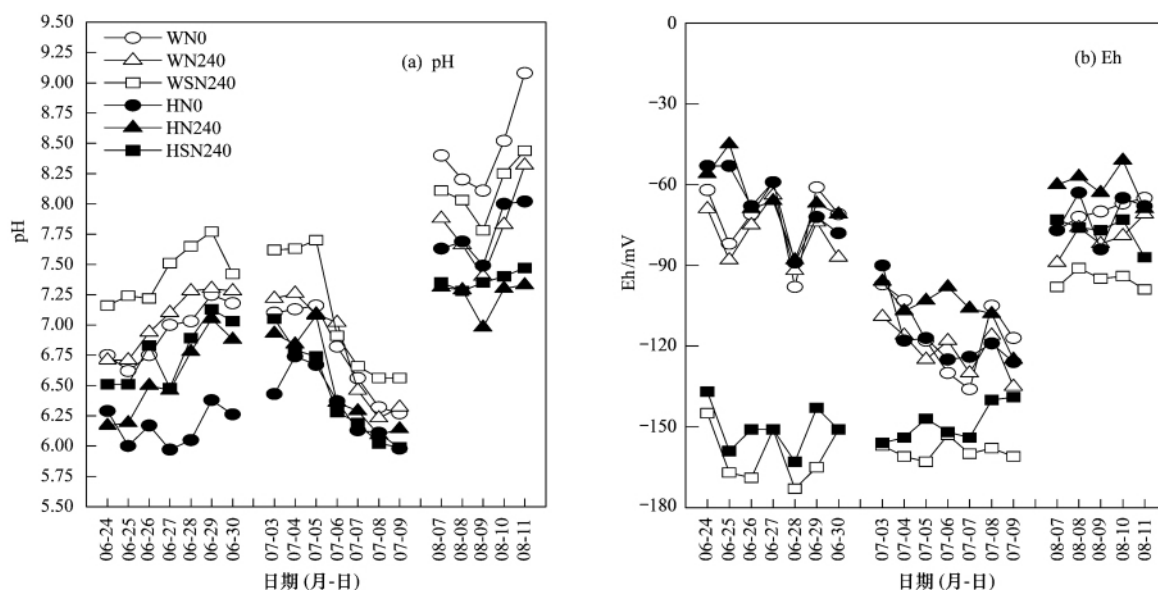


图5 不同处理田面水 pH、Eh 变化特性

Fig. 5 Dynamics of surface water pH and Eh with different treatments

94 mV 和 13 ~ 94 mV, 除 N0 处理外, 乌栅土氮肥处理和氮肥加秸秆处理的平均 Eh 分别为 -78 ~ -121 mV 和 -114 ~ -160 mV, 黄泥土分别为 -66 ~ -106 mV 和 -96 ~ -151 mV, 乌栅土表层土壤平均 Eh 值比黄泥土低 -2 ~ 43 mV。

本研究结果表明, 乌栅土与黄泥土氨挥发速率随田面水 pH 的升高和表层土壤 Eh 的降低而增加的趋势。前人研究结果也显示稻田氨挥发速率与田面水 pH 存在正相关关系^[12, 19], 但关于 Eh 与稻田氨挥发速率之间关系还缺乏研究。两种土壤穗肥期田面水 pH 均比基肥期、分蘖肥期高, 这可能是由于穗肥期各土柱表层均生长了许多藻类, 并且该期间太阳光照较强的缘故^[12, 28]。秸秆还田提高了田面水 pH, 降低了表层土壤 Eh, 这可能是由于秸秆降解过程中产生的有机基团中和了田面水中部分酸根离子^[14], 从而提高了田面水的 pH, 同时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。穗肥期间土壤 Eh 较高, 可能是由于搁田时增加了土壤的含氧量, 但也有研究表明水稻生长旺盛期, 水稻通过呼吸作用将一部分氧气带入水稻根部^[8, 17, 24], 从而降低了表层土壤的 Eh。李菊梅等^[18, 19]研究表明, 有机质分解过程会产生大量有机酸, 从而降低土壤 pH, 这可能是土壤性质差异等造成的。

3 结论

(1) 乌栅土稻季的氨挥发量显著高于黄泥土,

氨挥发速率每次施肥后的第 2 d 达峰值, 大约 5 ~ 7 d 降低到对照水平; 乌栅土、黄泥土稻季氨挥发损失率分别占氮肥用量的 15.2% 与 3.8%, 在基肥和分蘖肥期的氨挥发量分别占总损失量的 69.2% 和 80.2%。

(2) 麦秸还田显著提高了田面水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度和 pH, 降低了表层土壤的 Eh, 从而提高了两种土壤稻季土壤氨挥发速率和累积损失量; 氨挥发速率与田面水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度呈显著正相关关系, 并随田面水 pH 升高而呈增加趋势。

参考文献:

- [1] Zhu Z L, Chen D L. Nitrogen fertilizer use in China—contributions to food production, impacts on the environment and best management strategies [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, **63**(2-3): 117-127.
- [2] 王海, 席运官, 陈瑞冰, 等. 太湖地区肥料、农药过量施用调查研究[J]. *农业环境与发展*, 2009, (3): 10-15.
- [3] Wang Z H, Li X J, Ju X T, et al. Ammonia volatilization loss from surface-broadcast urea: comparison of vented-and closed-chamber methods and loss in winter wheat-summer maize rotation in north China plain [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2004, **35**(19-20): 2917-2939.
- [4] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策[J]. *土壤与环境*, 2000, **9**(1): 1-6.
- [5] 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.
- [6] 尹娟, 费良军, 田仓军, 等. 水稻田中氮肥损失研究进展[J]. *农业工程学报*, 2005, **21**(6): 189-191.

- [7] Fangmeier A, Hadwiger-Fangmeier A, Van der Eerden L, *et al.* Effects of atmospheric ammonia on vegetation—a review [J]. *Environmental Pollution*, 1994, **86**: 43–82.
- [8] Martines A M, Nogueira M A, Santos C A, *et al.* Ammonia volatilization in soil treated with tannery sludge [J]. *Bioresource Technology*, 2010, **101**(12): 4690–4696.
- [9] 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]. *Geosciences Journal*, 2008, **12**(2): 177–190.
- [10] Liu G D, Li Y C, Alva A K. Moisture quotients for ammonia volatilization from four soils in potato production regions [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2007, **183**(1–4): 115–127.
- [11] 李鑫, 巨晓棠, 张丽娟, 等. 不同施肥方式对土壤氨挥发和氧化亚氮排放的影响 [J]. *应用生态学报*, 2008, **19**(1): 99–104.
- [12] 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的影响 [J]. *中国水稻科学*, 2009, **23**(1): 85–93.
- [13] 周伟, 田玉华, 尹斌. 太湖地区水稻追肥的氨挥发损失和氮素平衡 [J]. *中国生态农业学报*, 2011, **19**(1): 32–36.
- [14] Gill J S, Bijay-Singh, Khind C S, *et al.* Efficiency of N-(n-butyl) thiophosphoric triamide in retarding hydrolysis of urea and ammonia volatilization losses in a flooded sandy loam soil amended with organic materials [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1999, **53**(3): 203–207.
- [15] 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.
- [16] 夏文建, 周卫, 梁国庆, 等. 优化施氮下稻-麦轮作体系氮肥氨挥发损失研究 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, **16**(1): 6–13.
- [17] Fenn L B, Malstrom H L, Wu E. Ammonia losses from surface-applied urea as related to urea application rates, plant residue and calcium chloride addition [J]. *Fertilizer Research*, 1987, **12**(3): 219–227.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] Stevenson F J, Dhariwal A P S. Distribution of fixed ammonium in soils [J]. *Soil Science Society of American Journal*, 1959, **23**: 121–125.
- [21] Hayashi K, Hayakawa A, Akiyama H, *et al.* Measurement of ammonia volatilization loss using a dynamic chamber technique: a case study of surface-incorporated manure and ammonium sulfate in an upland field of light-colored Andosol [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2009, **55**(4): 571–581.
- [22] De Ruijter F J, Huijsmans J F M, Rutgers B. Ammonia volatilization from crop residues and frozen green manure crops [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**(28): 3362–3368.
- [23] Van der Stelt B, Temminghoff E J M, Van Vliet P C J, *et al.* Volatilization of ammonia from manure as affected by manure additives, temperature and mixing [J]. *Bioresource Technology*, 2007, **98**(18): 3449–3455.
- [24] Tian G M, Cai Z C, Cao J L, *et al.* Factors affecting ammonia volatilization from a rice-wheat rotation system [J]. *Chemosphere*, 2001, **42**(2): 123–129.
- [25] 宋勇生, 范晓晖, 林德喜, 等. 太湖地区稻田氨挥发及影响因素的研究 [J]. *土壤学报*, 2004, **41**(2): 265–269.
- [26] 黄进宝, 范晓晖, 张绍林. 太湖地区铁渗水耕人为土稻季上氮肥的氨挥发 [J]. *土壤学报*, 2006, **43**(5): 786–792.
- [27] 李慧琳, 韩勇, 蔡祖聪. 运用 Jayaweera-Mikkelsen 模型对太湖地区水稻田稻季氨挥发的模拟 [J]. *环境科学*, 2008, **29**(4): 1045–1052.
- [28] 王德建, 张刚, 汪军, 等. 水稻基肥尿素干施与湿施对氮素损失及水稻氮素吸收的影响 [J]. *土壤学报*. 2010, **47**(3): 483–489.
- [29] Kissel D E, Brewer H L, Arkin G F. Design and test of a field sampler for ammonia volatilization [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1977, **41**(6): 1133–1138.
- [30] Fillery I R P, De Dote S K. Ammonia volatilization from nitrogen volatilization as an N loss mechanism in flooded rice fields [J]. *Fertilizer Research*, 1986, **9**: 78–98.
- [31] 朱兆良, 蔡贵信, 徐银华, 等. 种稻下氮肥的氨挥发及其在氮素损失中的重要性的研究 [J]. *土壤学报*, 1985, **22**(4): 320–328.
- [32] 苏成国, 尹斌, 朱兆良, 等. 稻田氮肥的氨挥发损失与稻季大气氮的湿沉降 [J]. *应用生态学报*, 2003, **14**(11): 1884–1888.
- [33] 张静, 王德建. 太湖地区乌栅土稻田氨挥发损失的研究 [J]. *中国生态农业学报*, 2007, **15**(6): 84–87.
- [34] Van Asten P J A, Van Bodegom P M, Mulder L M, *et al.* Effect of straw application on rice yields and nutrient availability on an alkaline and a pH-neutral soil in a Sahelian irrigation scheme [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2005, **72**(3): 255–266.
- [35] 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): 893–890.