

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2020.06.010

阙华礼, 杨文亮, 王书伟, 等. 基于激光吸收光谱技术的太湖流域稻田氨挥发研究. 土壤, 2020, 52(6): 1164–1169.

基于激光吸收光谱技术的太湖流域稻田氨挥发研究^①

阙华礼^{1,2,3}, 杨文亮¹, 王书伟¹, 丁世杰^{1,2}, 邵玲玲¹, 朱安宁^{1*}

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室/封丘农业生态实验站(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 2 中国科学院大学, 北京 100049; 3 铜陵市环境保护科学研究所, 安徽铜陵 244000)

摘要: 氨挥发是太湖流域农田氮肥损失的重要途径之一。本试验采用高时间分辨率的 TDLAS-BLS 技术研究太湖流域稻田追肥期氨挥发规律及其影响因素。结果表明: 追肥后稻田上方空气中氨浓度白天明显大于夜间, 而且瞬时波动较大。稻田氨挥发速率呈现先上升后下降的趋势, 峰值出现在施肥后的 2~3 d, 且氨挥发仅持续 1 周左右。分蘖期氨挥发速率和损失率均大于抽穗期, 两个时期氨挥发损失率分别为 36.6%、23.0%。氨挥发集中在较短时间内, 分蘖期、抽穗期施肥后前 4 d 的累积氨挥发量分别占总氨挥发损失的 80%、84%。分蘖期风速、光照、气温对稻田氨挥发均具有明显的促进作用, 其中光照的作用更为显著; 抽穗期风速和气温对氨挥发的影响较低。降雨对氨挥发具有强烈的抑制作用, 降雨期间是影响氨挥发产生的主要因素。

关键词: 激光吸收光谱; 反向拉格朗日随机扩散模型; 氨挥发; 稻田; 影响因素

中图分类号: X511 **文献标志码:** A

Ammonia Emission from Paddy Field Measured by Laser Absorption Spectroscopy in Taihu Lake Region

QUE Huali^{1,2,3}, YANG Wenliang¹, WANG Shuwei¹, DING Shijie^{1,2}, SHAO Lingling¹, ZHU Anning^{1*}

(1 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture / Fengqiu Agro-ecological Experimental Station, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3 Tongling Institute of Environmental Sciences, Tongling, Anhui 244000, China)

Abstract: Ammonia emission is one of the important pathways of nitrogen fertilizer loss from farmland in the Taihu Lake region. In order to study ammonia emission dynamics and influencing factors of paddy field in the Taihu Lake region, the TDLAS-BLS method with high-temporal resolution was used in this experiment. The results showed that, compared with the night time, the concentration and variability of ammonia above the rice canopy were significantly higher in daytime after fertilization. Ammonia emission increased rapidly, reached a maximum value in 2–3 days after fertilization, and then decreased rapidly. Ammonia emission loss in tillering stage (36.6%) were higher in panicle stage (23.0%), which was mainly concentrated in the initial four days after fertilization, and accounted for 80% and 84% of total ammonia losses for tillering and panicle stages, respectively. In tillering stage, wind speed, solar radiation and air temperature obviously promoted ammonia emission, and solar radiation influenced most. The effects of wind speed and temperature on ammonia emission in panicle stage were low. Precipitation significantly decreased ammonia emission rate, and was the main factor influencing ammonia emission during the rainfall.

Key words: Laser absorption spectroscopy; Backward Lagrangian stochastic diffusion model; Ammonia emission; Paddy field; Influencing factor

氨挥发是农田氮素的重要损失途径,也是我国大气中氨气的主要来源。据估算,2010 年我国农田施肥引起的氨挥发损失达 448 万 t, 约占全国氮肥使用

总量的 15%^[1]。氨气作为空气中重要的活性氮组分,与 SO₂、NO_x 等反应生成各种大气气溶胶细粒子,这些气溶胶粒子是构成大气环境中细颗粒污染物的主

①基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0200304)、江苏省重点研发计划项目(BE2017343-1)、国家自然科学基金项目(41501327)和江苏省自然科学基金青年项目(BK20151055)资助。

* 通讯作者(anzhu@issas.ac.cn)

作者简介: 阙华礼(1993—), 男, 河南信阳人, 硕士研究生, 主要从事农田氮素循环及高效利用研究。E-mail: hlque@issas.ac.cn

要组成部分。研究发现氨气的排放量比 SO_2 和 NO_x 的排放量与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的时空变化具有更强的相关性^[2], 对我国城市 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度贡献率高达 29.8%^[3]。

太湖流域是我国重要的粮食生产基地, 流域内水田面积约占总耕地面积的 80% 以上^[4], 粮食高产长期依赖于高化肥投入。王海等^[5]调查发现该地区 43.3% 的区域水稻季施氮量介于 270~360 kg/hm^2 , 远高于本地区维持水稻高产的氮肥适宜施肥量 210 kg/hm^2 。高氮肥投入势必给农业生产及生态环境带来负面效应。于飞和施卫明^[6]总结我国近 10 年来主要粮食作物氮肥利用率时发现过量施肥会导致水稻氮肥利用率下降。太湖流域也是我国农田氨挥发损失最严重的区域之一。宋勇生等^[7]研究发现太湖地区稻田氨挥发约占施肥量的 29.9%。Zhang 等^[8]研究表明我国施肥引起的氨挥发主要集中在华北平原和太湖地区, 其中江苏省农田氨挥发约占全国的 8.5%。此外, 2010 年入湖污染物调查数据表明, 该流域农业面源污染对太湖污染物中铵氮贡献高达 46%^[9]。

目前太湖流域农田氨挥发研究主要集中在不同农艺措施下的农田氨挥发研究。如 He 等^[10]研究表明生物质炭与脲酶抑制剂、硝化抑制剂同时施用可以减少稻田氨挥发损失 19.8%。Zhao 等^[11]研究发现稻田氮肥比常规施肥量(N, 300 kg/hm^2)减施 25% 时, 可降低氨挥发损失 65%。胡安永等^[12]研究表明休闲-水稻轮作下氨挥发损失显著高于稻麦轮作和紫云英-水稻轮作。但这些研究所涉及的监测方法多以动态箱式法为主, 也有部分研究人员采用微气象法和通气法等其他方法研究该地区稻田氨挥发^[7,13]。由于这些方法需要长时间连续采集田间氨气进行分析, 难以获取氨挥发日内变化动态。激光吸收光谱技术目前广泛用于各种痕量气体监测, 其中开放光程可调谐二极管激光吸收光谱技术(tunable diode laser absorption spectroscopy, TDLAS)不需要采样即可无干扰快速获取田间空气中氨浓度数据, 再结合反向拉格朗日随机扩散模型(backward Lagrangian stochastic model, BLS)可准确估算氨挥发通量, 为精准研究稻田氨挥发日内变化规律、总氨挥发损失及气象因素对氨挥发的影响提供了可靠的技术支撑。本研究拟采用 TDLAS-BLS 技术对太湖地区水稻不同追肥期农田氨挥发进行连续在线监测, 并同步测定气温、风速、光照、降雨等气象参数和田面水中的 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 浓度, 以分析稻田氨挥发日内动态变化及气象因素和田面水性质对其的影响。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于江苏省常熟市辛庄镇中国科学院常熟农业实验站(31°32' N, 120°41' E)附近, 属于太湖流域(隶属长江中下游平原), 为北亚热带湿润季风气候, 年平均降水量为 1 038 mm, 年平均气温为 15.5 °C, $\geq 10^\circ\text{C}$ 的天数约为 267 d, $\geq 10^\circ\text{C}$ 有效积温在 4 933.7 °C 以上, 无霜期约为 242 d, 年均日照时间为 1 800.7 h, 年均日照总辐射量 4704.6 MJ/m^2 。冬小麦-夏水稻一年两熟制是该地区主要的作物种植模式。土壤为湖积物上发育的潜育型水稻土(乌栅土, 普通潜育型水耕人为土), 耕作层(0~20 cm)土壤基本理化性质为: 黏粒含量 330 g/kg, 粉粒含量 450 g/kg, 砂粒含量 220 g/kg, 有机质含量 34.7 g/kg, 全氮含量 2.03 g/kg, 全磷含量 0.88 g/kg, 全钾含量 18.4 g/kg, 碱解氮含量 166 mg/kg, 有效磷含量 9.1 mg/kg, 速效钾含量 148 mg/kg, $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ 7.4, 阳离子代换量 20.2 cmol/kg 。

1.2 试验设计

试验于 2017 年 7—8 月在实验站附近水稻田中进行。试验地地势平坦, 周围无明显干扰风场的障碍物。设置东西长 120 m、南北宽 40 m 的水稻田作为试验施肥区。水稻生长季氮肥施用量 N 270 kg/hm^2 , 按基肥、分蘖肥、穗肥(35% : 40% : 25%)施用, 基肥采用复合肥(15-15-15), 追肥均采用尿素(含 N 464 g/kg)。为避免周围农田追肥对本次试验监测结果的影响, 试验区追肥时间与周围农田相隔 15 d 左右。分蘖肥、穗肥分别在 7 月 13 日和 8 月 21 日 16:00—18:00 均匀撒施, 随后使用 TDLAS 光谱仪连续在线监测稻田氨挥发, 直至挥发烟羽氨浓度与背景氨浓度相近为止。分蘖期水稻植株高度在 30~35 cm, 抽穗期水稻植株高度在 80~85 cm。由于夏季稻田水蒸发量较大, 定于每天 5:00 左右开始向试验区灌水至水深 8 cm。

1.3 TDLAS-BLS 法测定稻田追肥期氨挥发

TDLAS-BLS 法测定氨挥发原理是由 BLS 模型模拟氨气粒子运动轨迹估算监测点处氨浓度增值(即监测点氨浓度与背景氨浓度差值)与氨挥发速率的比值, 再结合 TDLAS 法测定的挥发源上、下风向的氨气线浓度数据估算氨挥发速率:

$$Q = \frac{(C_L - C_b)}{(C_L / Q)_{\text{sim}}} \quad (1)$$

式中: Q 为氨挥发速率; C_L 是试验区下风向挥发烟羽处氨气浓度; C_b 是试验区上风向背景氨气浓度。

BLS 模型基于 MOST(Monin-Obukhov similarity theory)理论,该理论认为短时间内(15~60 min)内近地面气流特性可由摩擦风速 u_* (m/s)、大气稳定度 L (m)、表面粗糙度 z_0 (m)与风向 β 表征,然后通过软件 WindTrax2.0(Thunder Beach Scientific, Halifax, Nova Scotia, Canada)输入风速、风向、气温等数据计算气流特性参数即可反向模拟氨气粒子运动轨迹。并由该软件统计气体粒子逆风轨迹的触地点和受垂向风速影响的垂向触地速度 w_0 ,则挥发源内触地点总数与触地速率 w_0 的加权值,除以 M 点释放的粒子总数 N ,为 M 点气体浓度增值 $(C-C_b)$ 与挥发速率 Q 的比值 $(C/Q)_{sim}^{[14]}$ 。但由于本试验中测定的氨浓度为线平均浓度,模型假设监测线存在 P 个监测点,公式即为:

$$(C_L/Q)_{sim} = \frac{1}{P} \sum_{i=1}^P \left(\frac{1}{N} \sum \left| \frac{2}{w_0} \right| \right) \quad (2)$$

本研究在软件 WindTrax 2.0 运行中设置粒子数 N 为 50 000,监测点 P 为 50。

田间氨浓度监测如图 1 所示,在试验地施肥区中间横向布置一套开放式 TDLAS 氨气监测系统(中国科学院安徽光学精密机械研究所研制),用来监测挥发烟羽氨气浓度。测线距离 100 m,分蘖期和抽穗期光路高度分别为 1.2、1.5 m。同时在试验区的正西方向 70 m 处,相同高度处布置另一套氨气监测系统监测背景氨浓度。系统设置为 2 s 记录一次氨浓度数据。分蘖期从 7 月 13 日 18:30 开始至 7 月 20 日 18:30 连续监测 168 h,抽穗期从 8 月 21 日 18:30 开始至 8 月 28 日 18:30 连续监测 168 h,直至挥发烟羽空气氨浓度与背景值接近为止。BLS 模型模拟氨挥发所需的 u_* 、 L 、 z_0 与 β 由三维超声风速仪(CSAT3, Campbell Scientific, Inc., Logan, Utah)测定的风速、风向、气温等气象数据计算得到。三维超声风速仪安装在试验地附近距地面 1.8 m 高度处,数据采集频率为 10 Hz,并由数据采集器中软件处理为 30 min 平均值。光照和降雨数据取自常熟实验站气象观测场。

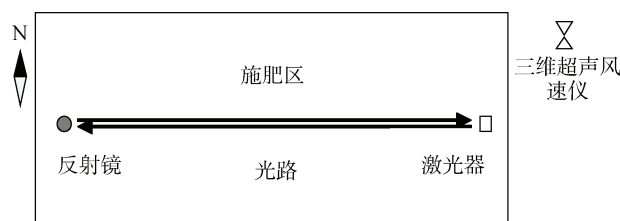


图 1 田间监测的试验设计

Fig. 1 Schematic diagram of field monitoring

1.4 田面水样采集分析

为明确田面水理化性质对稻田氨挥发的影响,氨挥发监测期间定于每天 6:30 在田间多点采集灌溉水和试验区田面水,带回实验室过滤后,分别使用靛酚蓝比色法、双波长比色法测定水样中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度。

1.5 数据处理

采用 Office 2016 进行数据整理及绘图, SPSS 19.0 进行数据统计分析。

2 结果与讨论

2.1 不同追肥期氨浓度日内变化

传统的酸吸收法采样时间长,尤其在氨浓度非常低的情况下,完成一次氨浓度测定需要数小时之久,不便于研究农田氨浓度日内动态变化规律。而本研究采用的激光吸收光谱技术测定氨浓度数据仅需 2 s,因此基于 TDLAS 技术连续长时间测定获得的高时间分辨率氨浓度数据,可以准确研究施肥后农田上方空气中的氨浓度变化。本文选取氨浓度最高的一天分析其日内动态变化规律。图 2A 和图 2B 分别表示本试验水稻分蘖期 2017 年 7 月 15 日和抽穗期 8 月 22 日的氨浓度动态。从图 2A 和图 2B 中可以看出,氨浓度呈先上升后下降的趋势,峰值出现在中午 12:00 左右,且日内波动较大。这是因为随着光照增强、气温升高, NH_4^+ 向 NH_3 的转化速率加快,导致空气中氨浓度升高,而风速的变化是导致氨浓度瞬时波动较大

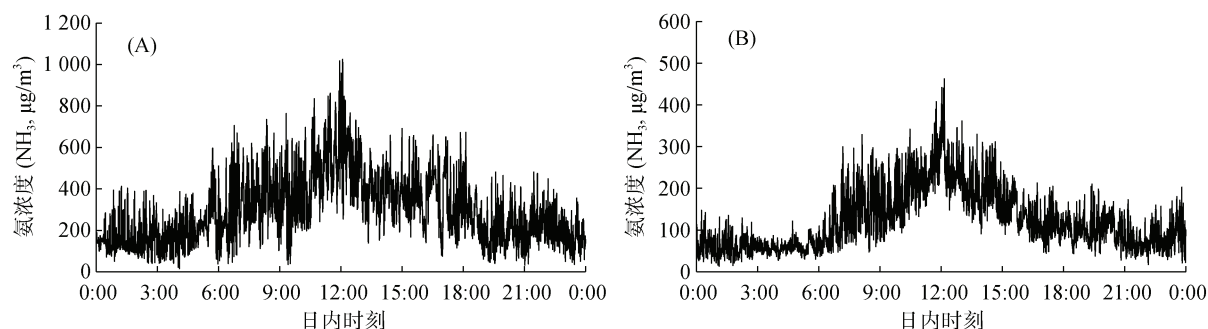


图 2 水稻分蘖期(A)和抽穗期(B)的氨浓度日内动态

Fig. 2 Intra-day dynamic change of NH_3 concentration during tillering (A) and panicle (B) stages of rice

的主要原因。此外, 白天(6:00—18:00)由于温度高、光照强等因素影响, 导致该时段的氨浓度值明显大于夜间。由于抽穗期施肥量减少及水稻生长情况不同, 该时期空气中氨浓度明显低于分蘖期。

2.2 不同追肥期氨挥发速率

由 TDLAS 技术测定的高时间分辨率氨浓度数据结合 BLS 模型计算的氨挥发速率(30 min 均值)动态如图 3 所示。稻田追肥期气温较高, 氨挥发速率高且持续时间长, 仅持续 1 周左右, 该结果与赵森等^[25]及熬玉琴等^[16]研究结果相似。氨挥发速率在施肥后呈先上升后下降的趋势, 且日内氨挥发速率波动较大, 白天氨挥发速率明显大于夜间。此外分蘖期氨挥发速率明显大于抽穗期。其中分蘖期由于施肥次日阴天导致光照较弱, 氨挥发速率于追肥后第 3 天 12:00—12:30 达到峰值 23.3 kg/(hm²·d)(以纯 N 计), 而抽穗期氨挥发速率因为施肥初期温度较高和光照较强, 于追肥后第 2 天 12:00—12:30 即达到峰值 11.7 kg/(hm²·d)。氨挥发速率峰值出现的日内时间与田玉华等^[13]研究结果一致, 这可能与该段时间内高温和强烈的光照有关。

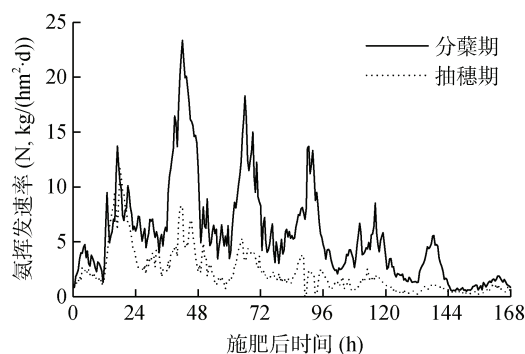


图 3 水稻分蘖期和抽穗期的氨挥发速率

Fig. 3 Ammonia emission rates during tillering and panicle stages of rice

2.3 不同追肥期氨挥发损失量

受水稻生长情况、气象条件、田间管理共同影响, 不同时期的氨挥发损失有所不同。如图 4 所示, 分蘖期氨挥发损失量大于抽穗期, 连续监测 168 h 后, 分蘖期、抽穗期的累积氨挥发量分别为 39.5、15.5 kg/hm² (以纯 N 计), 分别占施肥量的 36.6%、23.0%。该结果与宋勇生等^[7]采用微气象质量平衡法测定的分蘖期(36.8%)与抽穗期(22.0%)稻田氨挥发损失率相似, 同时与田玉华等^[17]采用微气象质量平衡法测定分蘖期氨挥发损失率(33%)相近。研究发现随着氮肥用量的增加, 氨挥发损失率相应增加^[18]。抽穗期水稻生长茂盛, 挥发的氨气被水稻冠层更多吸收^[19], 因此抽穗期测定的稻田氨挥发损失

率比分蘖期偏低。此外, 分蘖期、抽穗期的稻田氨挥发主要集中在施肥后的前 4 d, 分别占总损失的 80%、84%, 这是由于追肥期高温下脲酶活性高, 淹水条件下尿素快速水解, 导致了追肥期氨挥发损失率高且集中发生在较短时间内^[20]。

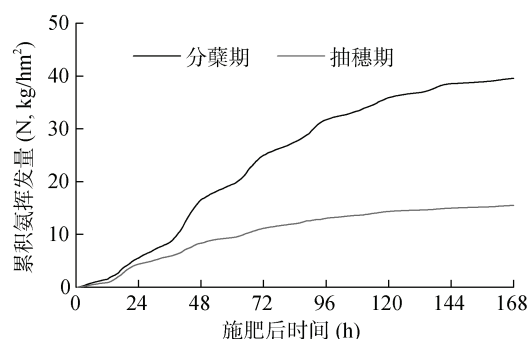


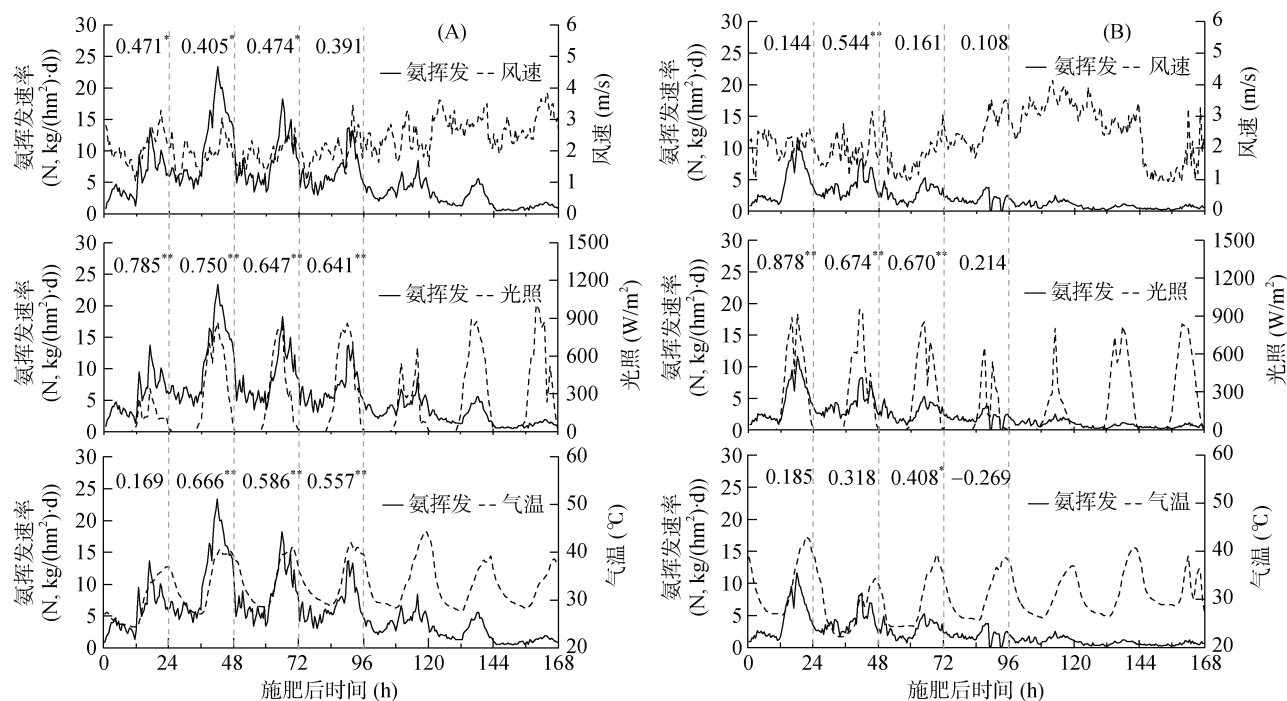
图 4 水稻分蘖期和抽穗期的累积氨挥发量

Fig. 4 Cumulative ammonia losses during tillering and panicle stages of rice

2.4 气象条件对氨挥发的影响

农田氨挥发受土壤性质、管理措施、气象条件等多种因素共同作用^[18,21]。本试验主要研究气象条件、田面水性质对稻田氨挥发的影响。图 5 显示了水稻不同追肥期氨挥发速率与风速、光照、气温的变化动态及相关分析结果。由于夜间和监测后期氨挥发速率较低, 研究氨挥发速率与各气象因素之间的相关性意义不大。因此仅对水稻追肥后 12~24、36~48、60~72、84~96 h 的白天氨挥发速率与风速、光照、气温进行相关分析。从图 5 可以看出, 分蘖期氨挥发速率与风速、光照、气温均具有一致的变化规律, 相比风速和气温, 光照与氨挥发速率的相关系数更大且更显著。说明风速、光照、气温对氨挥发有不同的促进作用, 光照对氨挥发的影响最大。而抽穗期由于水稻植株高度较高, 风速、气温对氨挥发的影响降低, 而光照仍然是影响该时期氨挥发的主要气象因素。

在追施穗肥后的第 5 天(84~96 h), 气温与氨挥发速率呈现负相关关系, 为对出现的异常值进行解释, 本文进一步分析了该段时间内降雨和氨挥发动态之间的关系。如图 6 所示, 在抽穗期施肥后 84~96 h, 由于降雨对空气中氨气的吸收及对田面水 NH₄⁺-N 浓度的稀释作用^[16], 导致氨挥发速率急剧下降。降雨成为该段时间氨挥发的主导因素, 风速、光照和气温的作用减小, 所以氨挥发速率与气温的相关分析结果出现异常。但降雨之后, 氨挥发速率又迅速升高, 降雨后光照、温度和风速不同程度的增加是导致氨挥发速率快速回升的主要原因。



(图中数字为相关系数, * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$)

图 5 分蘖期(A)、抽穗期(B)氨挥发速率与风速、光照、气温的动态变化

Fig. 5 Ammonia emission rates and wind speeds, solar radiation, air temperatures during tillering (A) and panicle (B) stages of rice

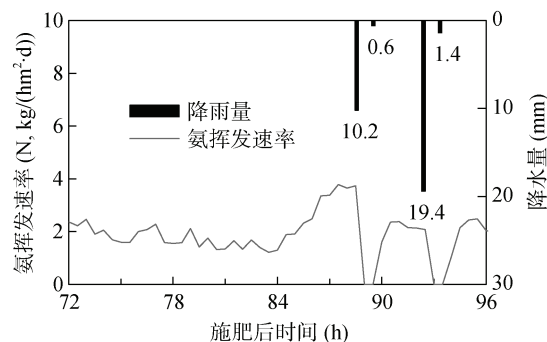


图 6 降雨对稻田氨挥发的影响

Fig. 6 Effect of rainfall on ammonia emission from paddy field

2.4 田面水质对氨挥发的影响

很多研究表明稻田氨挥发速率与田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$

浓度相关^[22-23]。图 7 表明,分蘖期(A)和抽穗期(B)施肥后稻田日平均氨挥发速率与田面水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度呈极显著正相关关系。这是因为田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度与气相氨分压维持动态平衡,高的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度会引起液面气相氨分压增大并促进氨挥发,所以田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度可能是影响稻田氨挥发的主要因素之一。本试验同时测定了田面水中的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度,然而 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的浓度在整个监测期间变化较小,且一直维持较低水平,这与稻田淹水条件下的缺氧环境不利于硝化反应进行有关^[24]。持续淹水条件下, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 是田面水中氮素主要的矿形态且不易淋溶^[25],使田面水较长时间维持高 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度水平,这也是稻田氨挥发损失率较高的原因。

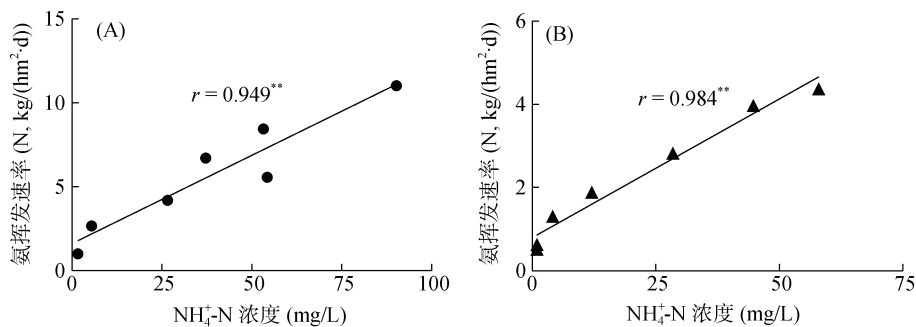


图 7 水稻分蘖期 (A)和抽穗期(B)氨挥发速率与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的关系

Fig. 7 Correlation between ammonia volatilization and ammonium concentration during tillering (A) and panicle (B) stages of rice

3 结论

利用高时间分辨率、高灵敏度的 TDLAS-BLS 技术,对太湖流域稻田追肥期氨挥发进行更加精准测定和分析研究,发现追肥后稻田上方空气中氨浓度受风速影响,瞬时波动较大。氨挥发速率于追肥后的 2~3 d 即达到峰值,氨挥发损失主要集中在施肥后的前 4 d,分蘖期氨挥发速率和损失率均明显大于抽穗期。风速、光照、气温都促进稻田氨挥发损失,其中光照的影响最大,降雨对氨挥发具有短时抑制作用。相比传统箱式法的分时段采样分析,TDLAS-BLS 技术通过无干扰连续在线监测可研究农田氨挥发日内动态变化及影响因素,同时准确定量氨挥发损失。

参考文献:

- [1] Xu P, Zhang Y S, Gong W W, et al. An inventory of the emission of ammonia from agricultural fertilizer application in China for 2010 and its high-resolution spatial distribution[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 115: 141–148.
- [2] Wu Y Y, Gu B J, Erisman J W, et al. PM_{2.5} pollution is substantially affected by ammonia emissions in China[J]. *Environmental Pollution*, 2016, 218: 86–94.
- [3] 薛文博, 许艳玲, 唐晓龙, 等. 中国氨排放对 PM_{2.5} 污染的影响[J]. *中国环境科学*, 2016, 36(12): 3531–3539.
- [4] 席运官, 王涛. 太湖流域发展有机农业控制面源污染的可行性分析[J]. *农业环境与发展*, 2008, 25(5): 5–8.
- [5] 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, 26(3): 10–15.
- [6] 于飞, 施卫明. 近 10 年中国大陆主要粮食作物氮肥利用率分析[J]. *土壤学报*, 2015, 52(6): 1311–1324.
- [7] 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.
- [8] Zhang Y S, Luan S J, Chen L L, et al. Estimating the volatilization of ammonia from synthetic nitrogenous fertilizers used in China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2011, 92(3): 480–493.
- [9] 洪燕婷, 仇蕾. 太湖流域农业面源污染防治措施研究分析[J]. *环境科技*, 2015, 28(3): 17–21, 26.
- [10] He T H, Liu D Y, Yuan J J, et al. A two years study on the combined effects of biochar and inhibitors on ammonia volatilization in an intensively managed rice field[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, 264: 44–53.
- [11] Zhao M, Tian Y H, Ma Y C, et al. Mitigating gaseous nitrogen emissions intensity from a Chinese rice cropping system through an improved management practice aimed to close the yield gap[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015, 203: 36–45.
- [12] 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.
- [13] 田玉华, 曾科, 姚元林, 等. 基于不同监测方法的太湖地区水稻穗肥期氨排放研究[J]. *土壤学报*, 2019, 56(3): 693–702.
- [14] 杨文亮. 基于开放光程 TDLAS 技术的农田氨挥发实时监测方法研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2014.
- [15] 赵森, 田玉华, 张敏, 等. 改善农学管理措施减少太湖稻麦轮作 NH₃ 和 NO 排放[J]. *土壤*, 2015, 47(5): 836–841.
- [16] 敖玉琴, 张维, 田玉华, 等. 脲胺氮肥对太湖地区稻田氨挥发及氮肥利用率的影响[J]. *土壤*, 2016, 48(2): 248–253.
- [17] 田玉华, 曾科, 尹斌. 基于不同监测方法的太湖地区稻田基肥期氨排放研究[J]. *土壤学报*, 2019, 56(5): 1180–1189.
- [18] Wang H Y, Zhang D, Zhang Y T, et al. Ammonia emissions from paddy fields are underestimated in China[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 235: 482–488.
- [19] Katata G, Hayashi K, Ono K, et al. Coupling atmospheric ammonia exchange process over a rice paddy field with a multi-layer atmosphere-soil-vegetation model[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 180: 1–21.
- [20] 田昌, 周旋, 谢桂先, 等. 控释尿素减施对双季稻田氨挥发损失和氮肥利用率的影响[J]. *中国水稻科学*, 2018, 32(4): 387–397.
- [21] Xu J Z, Peng S Z, Yang S H, et al. Ammonia volatilization losses from a rice paddy with different irrigation and nitrogen managements[J]. *Agricultural Water Management*, 2012, 104: 184–192.
- [22] Sun L Y, Wu Z, Ma Y C, et al. Ammonia volatilization and atmospheric N deposition following straw and urea application from a rice-wheat rotation in southeastern China[J]. *Atmospheric Environment*, 2018, 181: 97–105.
- [23] 赵蒙, 曾科, 姚元林, 等. 聚脲甲醛缓释肥对太湖稻麦轮作体系氨挥发及产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(1): 55–63.
- [24] Yang Y, Ni X Y, Liu B M, et al. Measuring field ammonia emissions and canopy ammonia fluxes in agriculture using portable ammonia detector method[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 216: 542–551.
- [25] Froes de Borja Reis A, Estevam Munhoz de Almeida R, Cocco Lago B, et al. Aerobic rice system improves water productivity, nitrogen recovery and crop performance in Brazilian weathered lowland soil[J]. *Field Crops Research*, 2018, 218: 59–68.