

DOI: 10.11766/trxb202301180026

CSTR: 32215.14.trxb202301180026

朱彤, 李红, 周艳萍, 郑继成, 尹斌, 姚元林. 肥料深施、红萍和土壤 pH 对稻田氨挥发的影响[J]. 土壤学报, 2025, 62 (1): 223–232.
ZHU Tong, LI Hong, ZHOU Yanping, ZHENG Jicheng, YIN Bin, YAO Yuanlin. The Influence of Root Zone Fertilization in Combination with *Azolla* and soil pH on Ammonia Volatilization [J]. Acta Pedologica Sinica, 2025, 62 (1): 223–232.

肥料深施、红萍和土壤 pH 对稻田氨挥发的影响*

朱彤¹, 李红², 周艳萍², 郑继成³, 尹斌⁴, 姚元林^{1†}

(1. 南京信息工程大学生态与应用气象学院江苏省农业气象重点实验室, 南京 210044; 2. 桐庐县农业技术推广中心, 杭州 311599; 3. 海南大学南繁学院, 海口 570228; 4. 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210018)

摘要: 红萍具有高效的生物固氮能力, 然而其生长对水体铵态氮敏感, 且易受水体 pH 影响。肥料集中深施可有效降低田面水铵态氮浓度, 但肥料集中深施模式下稻田养萍对不同酸碱度稻田土壤是否具有稳定的抑制氨挥发和增产效果, 目前未知。为明确肥料集中深施模式下稻田养萍对不同酸碱度稻田土壤氨挥发和水稻产量的影响, 采用盆栽实验, 选取三种水稻土(酸性、中性和碱性)、两种施肥方式(表施和肥料集中深施)以及是否放养红萍, 共 15 个处理, 检测整个稻季的氨挥发日通量及总量、水稻的籽粒和生物量。实验结果表明:(1)同一施氮水平下, 三种土壤中, 肥料集中深施的稻季氨挥发总量仅 1.0~1.8 kg·hm⁻² (以 N 计), 与表施相比, 降幅达 96%; 表施模式下放养红萍可使氨挥发总量降低 17%~50%; (2)放养红萍的各组水稻籽粒产量显著高于不放养各组, 其中肥料集中深施结合稻田养萍在黑土上的水稻增产效果最大, 与黑土表施不放养红萍的籽粒产量相比增幅达 41%。综上所述, 不同 pH 稻田土壤下, 肥料集中深施均能大幅减小稻田氨挥发, 肥料集中深施结合稻田养萍具有更好的增产效果。

关键词: 红萍; 稻田养萍; 氨挥发; 肥料集中深施

中图分类号: S5-33 文献标志码: A

The Influence of Root Zone Fertilization in Combination with *Azolla* and Soil pH on Ammonia Volatilization

ZHU Tong¹, LI Hong², ZHOU Yanping², ZHENG Jicheng³, YIN Bin⁴, YAO Yuanlin^{1†}

(1. Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology, School of Ecology and Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. Agricultural Technology Popularization Center of Tonglu County, Hangzhou 311599, China; 3. Nanfan College of Hainan University, Haikou 570228, China; 4. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210018, China)

Abstract: [Objective] *Azolla* has a highly biological nitrogen fixation ability, however, the growth of *Azolla* is sensitive to ammonium nitrogen in water and is easily affected by water pH. Research suggests that root zone fertilization of fertilizers can effectively reduce the concentration of ammonium nitrogen in floodwater. However, it is unknown whether culturing *Azolla* under root zone fertilization of

* 国家自然科学基金青年科学基金项目(42007210)和江苏省碳达峰碳中和科技创新专项(BE2022425)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 42007210) and the Special Funds for Scientific and Technological Innovation of Jiangsu Province, China (No. BE2022425)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: 002969@nuist.edu.cn

作者简介: 朱彤(2002—), 女, 湖北武汉人, 主要研究领域为生态农业及共生固氮分子机制。E-mail: 874774214@qq.com

收稿日期: 2023-09-22; 收到修改稿日期: 2024-02-29; 网络首发日期(www.cnki.net): 2024-07-16

fertilizers can stably inhibit ammonia volatilization and increase yield for paddy soils with different pH values. This study aimed to determine the effect of root zone fertilization of fertilizers in combination with *Azolla* on ammonia volatilization and rice yield in paddy soils with different pH values. 【Method】 A pot experiment was conducted with three types of paddy soil (acid, neutral, alkaline), two methods of fertilization (broadcasting and root zone fertilization of fertilizers), and two modes of rice cultivation (with or without *Azolla*). The ammonia volatilization potential and grain yields of rice were determined for these 15 treatments. 【Result】 The results showed that: (1) Under the same nitrogen application rate, root zone fertilization of fertilizers treatments only volatilized $\text{NH}_3\text{-N}$ 1.0-1.8 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (calculated by nitrogen), which were 96% lower than surface application of nitrogen fertilizer for the three types of paddy soil, and *Azolla*-rice co-culture treatments lowered the ammonia volatilization by 17%-50% when compared with those of rice mono-culture treatments; (2) Compared with rice mono-culture treatments, *Azolla*-rice co-culture treatments produced higher rice yield. Moreover, root zone fertilization of fertilizers combined with *Azolla* reached the highest rice yield in black soil, increased by 41% compared with the grain yield of black soil surface application without *Azolla*. 【Conclusion】 In conclusion, root zone fertilization of fertilizers can significantly reduce ammonia volatilization for paddy soils with different initial pHs while root zone fertilization of fertilizers combined with *Azolla* has greater potential for increasing rice yield.

Key words: *Azolla*; *Azolla*-rice co-culture; Ammonia volatilization; Root zone fertilization

据世界粮农组织统计,目前中国氮肥用量占全球氮肥用量的 30%,已成为世界第一氮肥消费大国^[1],氨排放的 95%来自农业活动^[2]。化学氮肥施入土壤后,作物吸收利用的只占其施入量的 30%~35%^[3]。在水稻生产中,氮肥的损失多为 40%~50%^[4],研究表明,在有利于氨挥发的条件下,通过氨挥发损失的氮可达施入量的 10%~60%,成为氮损失的主要途径^[5]。大量的氨挥发进入大气,造成大气污染,对人类健康造成危害;氨气与大气中其他成分发生反应后,使雨水中含酸性物质,通过降水等途径进入陆地生态系统后,将导致水体富营养化或土壤酸化等负面效应^[6],同时氨气可通过氧化反应生成氮氧化物,氮氧化物身为温室气体,将加剧温室效应,影响地球气候变化。因此,在我国水稻生产中,迫切需要减少氨挥发并提高作物产量,实现农业的高产高效和低排放刻不容缓^[7]。

红萍具有很强的生物固氮能力,红萍可作为优质生物绿肥放养于稻田,红萍每个稻季的生物固氮量为 30~100 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (以 N 计)^[8]。据测定,养萍后土壤紧实度降低、总孔隙增多、容重变轻,且杂草减少,病虫害减轻,有助于水稻增产^[9]。使用红萍作为生物绿肥不仅能替代部分化学氮肥,还可减少氨挥发。因此稻田养萍具有较高的生态效应。但红萍对水体铵态氮敏感,高浓度铵态氮会强烈抑制红萍生长和固氮,且红萍生长易受水体 pH 的影响,不同酸碱度稻田土壤下以及不同施肥方式下,稻田养萍是否具有稳定的抑制氨挥发和增加水稻产量效果,目前未知。

肥料集中深施是将氮肥施入土表以下一定深度,可在一定程度上减少氮素损失,提高作物的氮肥利用效率^[10]。王书伟等^[6]研究表明,基肥深施可显著降低基肥期田面水 pH,在南方典型稻田中采用基肥深施可降低基肥期 78.2%~85.2%的氨排放量。另有研究表明,肥料集中深施的土壤有机质含量显著提高、氮肥利用效率提高、产生了更高的水稻总生物量和分蘖数^[11]。红萍对水体的铵态氮浓度极为敏感,水体的铵态氮浓度越高,红萍的生物固氮能力越弱。肥料集中深施可有效降低田面水铵态氮浓度,但肥料集中深施模式下稻田养萍是否具有更好的增产效果,目前未知。

为探明肥料集中深施模式下稻田养萍对不同酸碱度稻田土壤氨挥发和水稻产量的影响,本研究采用盆栽实验,设置 3 种典型酸碱度梯度的水稻土(红壤、乌栅土、黑土)、两种施肥方式(氮肥表施和肥料集中深施)和是否放养红萍,通过监测整个稻季的氨挥发日通量及总量、水稻的籽粒产量及生物量,旨在明确肥料集中深施模式下稻田养萍对不同酸碱度稻田土壤氨挥发和水稻产量的影响幅度,为未来水稻绿色低碳生产提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2014 年在中国科学院常熟农业生态实

验站开展, 该实验站地处长江三角洲腹地, 属亚热带中部湿润季风气候区, 年平均气温 15.5 °C, 年平均降雨量 1 038 mm, 年日照 2 203 h, 无霜期 242 d。

供试土壤为江苏常熟的典型水稻土乌栅土、江西鹰潭的红壤, 以及黑龙江哈尔滨的黑土, 理化性质见表 1。

表 1 供试土壤理化性质

Table 1 The physicochemical properties of tested soil

| 土壤类型 Soil type | 土壤有机碳 Soil organic carbon/ (g·kg ⁻¹) | 全氮 Total nitrogen/ (g·kg ⁻¹) | 有效磷 Available phosphorus / (mg·kg ⁻¹) | pH |
|-------------------|---|---|--|------|
| 乌栅土 Wushan soil | 34.2 | 2.0 | 23.6 | 7.36 |
| 红壤 Red soil | 25.7 | 1.5 | 28.5 | 6.03 |
| 黑土 Black soil | 34.4 | 2.0 | 38.5 | 8.05 |

本试验共设置 15 个处理 (表 2), 3 个重复。盆栽桶高度 15 cm、直径 30 cm, 装土 12 kg。水稻品种为南粳 46。使用的氮肥为尿素, 氮肥施用量为 N 300 kg·hm⁻² (桶中装入 12 kg 土后对应高度的直径为 28 cm, 以此高度处的面积折算)。对于肥料集中深施处理, 基肥期将尿素一次性施在土下 10 cm,

偏离稻秧 5 cm。氮肥表施处理, 7 月 18 日、7 月 25 日和 8 月 24 日将尿素按基肥、分蘖肥和穗肥 4 : 2 : 4 的比例均匀撒在土壤表面。所有处理磷肥 (90 kg·hm⁻²) 和钾肥 (120 kg·hm⁻²) 作为基肥一次性施入土壤表层。对于放养红萍处理, 水稻插秧结束后, 立即放入红萍, 每盆的放养量为 10 g (鲜重), 新鲜红萍的含水率为 97.3%, 全氮含量为 47.1 g·kg⁻¹ (干重), 田面水里红萍的覆盖度为 90%, 红萍选用当地品种羽叶满江红。

表 2 各处理的土壤类型、红萍放养情况、施肥方式与施氮量

Table 2 Soil type, *Azolla* culture, fertilization method and N application amount of each treatment

| 处理 Treatment | 土壤类型 Soil type | 放养红萍 <i>Azolla</i> culture | 施肥方式 Fertilization method | 施氮量 N application amount/g |
|-----------------|-------------------|----------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| WH0 | 乌栅土 | 否 | 表施 | 1.85 |
| WH0A | 乌栅土 | 放养 | 表施 | 1.85 |
| WH1 | 乌栅土 | 否 | 肥料集中深施 | 1.85 |
| WH1A | 乌栅土 | 放养 | 肥料集中深施 | 1.85 |
| CKW | 乌栅土 | 否 | — | 0 |
| RH0 | 红壤 | 否 | 表施 | 1.85 |
| RH0A | 红壤 | 放养 | 表施 | 1.85 |
| RH1 | 红壤 | 否 | 肥料集中深施 | 1.85 |
| RH1A | 红壤 | 放养 | 肥料集中深施 | 1.85 |
| CKR | 红壤 | 否 | — | 0 |
| BH0 | 黑土 | 否 | 表施 | 1.85 |
| BH0A | 黑土 | 放养 | 表施 | 1.85 |
| BH1 | 黑土 | 否 | 肥料集中深施 | 1.85 |
| BH1A | 黑土 | 放养 | 肥料集中深施 | 1.85 |
| CKB | 黑土 | 否 | — | 0 |

1.2 样品采集与分析

NH₃ 挥发采用密闭室抽气法测定, 密闭罩 (直径 20 cm、高 15 cm) 顶部有 2 个通气孔, 分别连接采气杆 (2.5 m 高) 及洗气瓶, 通过与洗气瓶连接的真空泵抽气减压, 使挥发的 NH₃ 被洗气瓶里的稀硫酸 (0.05 mol·L⁻¹, 60 mL) 捕获。7 月 18 日至 7 月 30 日及 8 月 24 日至 9 月 1 日, 每间隔一天采集上午 7: 00—9: 00 和下午 15: 00—17: 00 段 4 h 的 NH₃ 挥发量作为每日的平均挥发通量。吸收液中的 NH₄⁺ 用靛酚蓝比色法进行测定。NH₃ 挥发通量计算公式为:

$$F_{\text{NH}_3} = C \times V \times \frac{24}{t} \times \frac{10^{-2}}{\pi \times r^2}$$

式中, F_{NH_3} 为 NH₃ 挥发通量 (N kg·hm⁻²·d⁻¹); C 为吸收液中 NH₄⁺-N 浓度 (mg·L⁻¹); V 为吸收液体积 (L); t 为 NH₃ 收集时间 (h); r 为密闭室半径 (m)。

作物成熟后, 收获地上部作物, 装入尼龙网袋里, 待样品自然干燥后分为籽粒和秸秆, 进行烘干和称重, 记录不同处理的样品植株籽粒和秸秆的产

量及生物量。

水稻生物量=籽粒产量+秸秆产量

红萍的生物固氮速率原位进行测定,采用乙炔还原法(acetylene reduction activity, ARA),测定时间为上午的8:00—11:00。在放养红萍的小区里,用透明塑料瓶倒置于稻田田面水,使塑料瓶上部留出100 mL的体积,先抽出塑料瓶内10 mL空气,再向塑料瓶内注入10 mL乙炔气体(塑料瓶体积的10%)。培养3 h后,从塑料瓶内抽出5 mL气体储存于真空采血管内,用气象色谱(Agilent 6890N)石英毛细管柱(30 mm×0.53 mm×15 μm)测定乙烯气体的含量。红萍的生物固氮速率的计算公式为:

$$R = C \times V \times t \times \frac{28 \times 10^{-2}}{S \times 3}$$

式中, R 为红萍的生物固氮速率($\text{N kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); C

为乙烯的浓度($\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$); V 为培养红萍的体积(L); t 为培养红萍的时间(h); S 为测样面积(m^2)。

1.3 数据处理

本研究采用 Excel 15.11.2 进行基本数据处理,用 Origin 2021 进行相关性分析,用 IBM SPSS Statistics 26 进行显著性差异分析和多因素方差分析。

2 结果

2.1 氨挥发日通量及总量

如图1所示,施肥方式对稻季氨挥发日通量的影响最为强烈,与传统氮肥表施相比,肥料集中深施大幅降低了施肥后一周的氨挥发日通量。肥料集中深施处理与不施肥的对照处理(CKW、CKR、CKB)氨挥发日通量始终维持在较低水平。氮肥表施模式下,每次施肥后, NH_3 挥发日通量均随时间呈先增长后下降的趋势,稻田养萍可显著降低氨挥发日通量峰值。

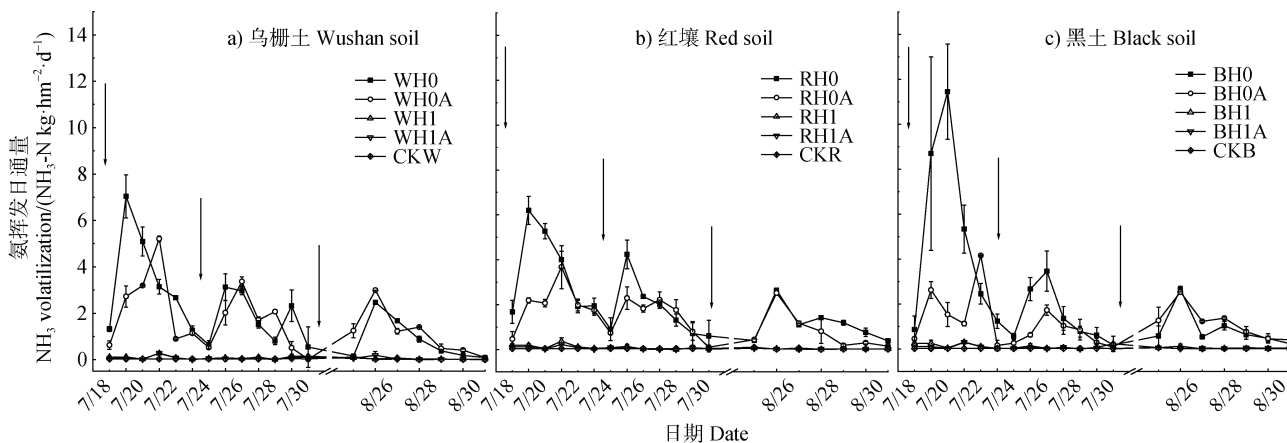


图1 各处理的稻季氨挥发动态

Fig. 1 Ammonia volatilization dynamics in rice season under different treatments

表施模式下,每次施肥后,三种土壤下的稻田氨挥发日通量均在一周内达到峰值后下降至接近初始水平。与传统的表施氮肥不养红萍相比,施基肥后,稻田养萍可显著降低红壤及黑土下的稻田氨挥发日通量,而对乌栅土下的稻田氨挥发日通量无显著下降作用;第二次追肥后,稻田养萍对氨挥发日通量影响不显著。传统的氮肥表施不养萍模式下,黑土的氨挥发日通量峰值最高。氮肥表施模式下,放养红萍可使氨挥发总量降低17%~50%(W17%、

R33%、B50%),显著低于不放养红萍处理($P < 0.05$)。表施不养红萍时,氨挥发总量由高到低依次为黑土、红壤、乌栅土。

三种土壤类型中,肥料集中深施大幅减少了氨挥发损失,肥料集中深施的氨挥发总量与不施肥的对照处理之间无显著差异($P > 0.05$)(表3)。肥料集中深施的氨挥发总量仅占施氮量的0.3%~0.6%。与传统的氮肥表施不养萍处理相比,肥料集中深施可使氨挥发总量降低96%。

施基肥后,三种土壤深施模式下的基肥期氨挥

发量与不施肥的对照处理间无显著差异 ($P>0.05$)。表施模式下, 放养红萍的基肥期氨挥发量显著低于不养红萍的 ($P<0.05$) (表 3)。表施不加红萍时, 基肥期氨挥发量黑土高于红壤及乌栅土。表施加红萍时, 基肥期氨挥发量由高到低依次为乌栅土、红壤、黑土。三种土壤下各处理对基肥期氨挥发量的影响规律相似: 表施不加红萍处理>表施加红萍处理>深施不加红萍处理=深施加红萍处理=对照处理。

二次追肥后, 三种土壤类型中表施氮肥不养红萍和养红萍的 WH0 和 WH0A、RH0 和 RH0A、BH0

和 BH0A 之间的氨挥发值有显著差异 ($P<0.05$), 三种土壤中深施模式下的氨挥发量与不施肥的对照处理间无显著差异 ($P>0.05$), 且均显著低于表施模式下的氨挥发量 ($P<0.05$)。第一次追肥后, 表施氮肥时, 不放养和放养红萍均由高到低依次为乌栅土、红壤、黑土。第二次追肥后, 表施不加红萍时, 氨挥发上由高到低依次为红壤、黑土、乌栅土。表施加红萍时, 氨挥发由高到低依次为黑土、乌栅土、红壤。多因素方差分析显示 (表 4), 土壤类型以及土壤类型与施肥方式两者的交互效应对稻季氨挥发总量无显著影响 ($P>0.05$)。

表 3 稻季各处理的氨挥发值

Table 3 Ammonia volatilization value of each treatment in rice season (Calculated by N)

| 处理 Treatment | BF/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) | T1/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) | T2/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) | SUM/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) | 占总施肥量比值 Ratio to total fertilization amount |
|-----------------|---|---|---|--|--|
| WH0 | 21.2a | 11.3a | 5.8b | 38.2a | 12.7% |
| WH0A | 14.3b | 9.7b | 7.9a | 31.9b | 10.6% |
| WH1 | 0.7c | 0.5c | 0.3c | 1.4c | 0.5% |
| WH1A | 0.5c | 0.3c | 0.4c | 1.2c | 0.4% |
| CKW | 0.2c | 0.2c | 0.2c | 0.7c | |
| RH0 | 21.9a | 11.2a | 7.9a | 40.6a | 13.5% |
| RH0A | 12.8b | 9.0b | 5.6b | 27.4b | 9.1% |
| RH1 | 1.0c | 0.3c | 0.1c | 1.4c | 0.5% |
| RH1A | 0.7c | 0.2c | 0.2c | 1.0c | 0.3% |
| CKR | 0.3c | 0.2c | 0.2c | 0.7c | |
| BH0 | 30.6a | 9.0a | 6.1b | 45.7a | 15.2% |
| BH0A | 10.3b | 4.6b | 8.0a | 22.9b | 7.6% |
| BH1 | 1.0c | 0.5c | 0.2c | 1.8c | 0.6% |
| BH1A | 0.7c | 0.2c | 0.3c | 1.1c | 0.4% |
| CKB | 0.2c | 0.1c | 0.2c | 0.5c | |

2.2 田面水铵态氮浓度

如图 2, 施肥方式对稻季田面水铵态氮浓度的影响最为强烈, 与传统的氮肥表施相比, 肥料集中深施大幅降低了施肥后一周的田面水铵态氮浓度。肥料集中深施处理与不施肥的对照处理 (CKW、CKR、CKB) 田面水铵态氮浓度始终维持在较低水平。氮肥表施模式下, 每次施肥后, 田面水铵态氮浓度均随时间呈逐渐下降的趋势, 放养红萍使田面水铵态氮浓度增加, 但氨挥发下降。

2.3 水稻生物量、产量及吸氮量

如表 5, 三种土壤中, 深施加红萍组的籽粒产量最高, 均显著高于其他组 ($P<0.05$), 分别为各自传统表施氮肥不加红萍处理的 1.40 倍 (乌栅土)、1.18 倍 (红壤) 和 1.30 倍 (黑土); 对照组籽粒产量最低, 其余三种处理组籽粒产量间无显著差异。深施加红萍组中, 黑土的水稻籽粒产量显著高于其他两种土壤 ($P<0.05$), 分别为乌栅土的 1.14 倍、红壤的 1.28 倍。

表 4 稻季氨挥发总量的多因素方差分析

Table 4 Multivariate analysis of variance of ammonia volatilization in rice season

| 主效应或交互作用 The main effect or interaction | 稻季氨挥发总量 Total ammonia volatilization in rice season (<i>P</i> -value) |
|---|--|
| 土壤类型 Soil type | 0.87 |
| 放养红萍 Stocking <i>Azolla</i> | < 0.01 |
| 施肥方式 Fertilization method | < 0.01 |
| 土壤类型×放养红萍 Soil type×Stocking <i>Azolla</i> | < 0.01 |
| 土壤类型×施肥方式 Soil type×Fertilization method | 0.89 |
| 放养红萍×施肥方式 Stocking <i>Azolla</i> ×Fertilization method | < 0.01 |
| 土壤类型×放养红萍×施肥方式 Soil type×Stocking <i>Azolla</i> ×Fertilization method | < 0.01 |

注: BF: 施基肥; T1: 第一次追肥; T2: 第二次追肥; SUM: 稻季氨挥发总量。针对每一种土壤类型, 同一列中, 小写字母不同: 处理间存在显著性差异 ($P < 0.05$); 同一列中, 小写字母相同: 处理间无显著性差异 ($P > 0.05$)。下同。Note: BF: base fertilizer application; T1: the first topdressing; T2: the second topdressing; SUM: Total ammonia volatilization in rice season. For each type of soil, in the same column, the lowercase letters were different: there were significant differences among treatments ($P < 0.05$); otherwise, there was no significant difference between treatments ($P > 0.05$). The same below.

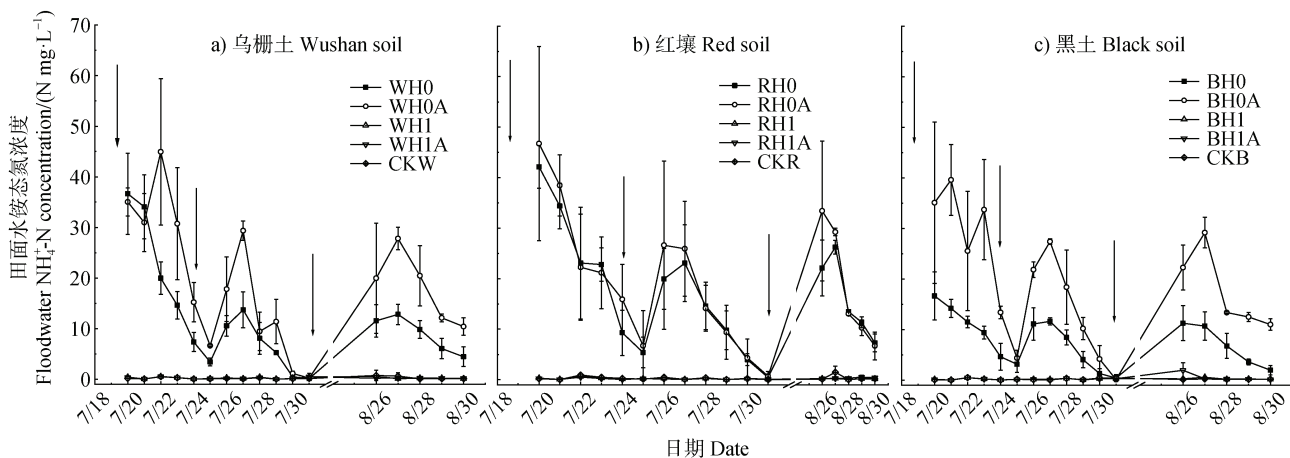


图 2 各处理的稻季田面水铵态氮浓度

Fig. 2 Ammonium nitrogen concentration in surface water of rice field under different treatments

收获指数上, 各处理组间的收获指数的显著性差异规律不同, 部分处理组间收获指数没有显著性差异, 其中氮肥表施或肥料集中深施处理中, 加红萍组相对应不加红萍组, 收获指数略增; 红壤种植的水稻组中, 不加红萍时, 深施组相对应表施组, 收获指数略增, 加红萍时, 深施组相对应表施组, 收获指数显著增加 ($P < 0.05$); 乌栅土种植的水稻组中, 不加红萍时, 深施组相比表施组, 收获指数降低, 加红萍时, 深施组相比表施组, 收获指数略增; 黑土种植的水稻组中, 不加红萍或加红萍处理时, 深施组相对应表

施组, 收获指数显著降低 ($P < 0.05$)。

生物量和水稻吸氮量上, 乌栅土肥料集中深施加红萍组显著高于其他各组 ($P < 0.05$), 与传统的表施氮肥不加红萍相比, 生物量提高约 37.5%, 吸氮量提高约 52.7%; 红壤肥料集中深施处理各组的生物量和水稻吸氮量显著高于其他组 ($P < 0.05$), 与传统表施氮肥不加红萍相比, 生物量提高约 19.7%, 吸氮量提高约 77.5%; 黑土肥料集中深施加红萍组的生物量显著高于其他组 ($P < 0.05$), 与传统表施氮肥不加红萍相比, 生物量提高约 41.5%; 三种土壤

中对照组生物量和水稻吸氮量均显著低于其他组 ($P<0.05$)。三种土壤培育的最高生物量组和最高水稻吸氮量组均为肥料集中深施加红萍处理组, 其中 $BH1A>WH1A>RH1A$ 。氮肥利用率上, 三种土壤培育的水稻中均表现为: 肥料集中深施加红萍组的氮肥利用率显著高于其他各组 ($P<0.05$), 其中 $BH1A>RH1A>WH1A$ 。

如表 6, 施肥方式对籽粒产量、地上部生物量、水稻吸氮量和氮肥利用率均有显著影响 ($P<0.05$); 放养红萍对籽粒产量、生物量、水稻吸氮量和氮肥利用率有显著影响 ($P<0.05$); 土壤类型对籽粒产量、

生物量、水稻吸氮量和氮肥利用率均有显著影响 ($P<0.05$); 土壤类型与放养红萍两者的交互效应对籽粒产量、生物量、水稻吸氮量和氮肥利用率均无显著影响 ($P>0.05$); 土壤类型与施肥方式两者的交互效应对籽粒产量无显著影响 ($P>0.05$), 对生物量、水稻吸氮量和氮肥利用率有显著影响 ($P<0.05$); 放养红萍与施肥方式两者的交互效应对籽粒产量、生物量、水稻吸氮量和氮肥利用率有显著影响 ($P<0.05$); 土壤类型、放养红萍和施肥方式三者的交互效应对籽粒产量、生物量、水稻吸氮量和氮肥利用率均无显著影响 ($P>0.05$)。

表 5 供试土壤各处理的水稻籽粒产量、生物量、收获指数、水稻吸氮量和氮肥利用率

Table 5 Rice yield, biomass, harvest index, total N uptake and NRE for tested soil

| 处理 Treatment | 籽粒产量 Grain yield/g | 生物量 Biomass/g | 收获指数 Harvest index | 水稻吸氮量 N uptake/g | 氮肥利用率 NRE/%* |
|-----------------|-----------------------|------------------|-----------------------|---------------------|-----------------|
| WH0 | 83.4 b | 141.4 c | 0.59 a | 1.31 c | 42 c |
| WH0A | 88.3 b | 150.2 bc | 0.59 a | 1.57 b | 56 bc |
| WH1 | 90.1 b | 164.8 b | 0.55 a | 1.45 bc | 50 b |
| WH1A | 116.9 a | 194.4 a | 0.60 a | 2.00 a | 79 a |
| CKW | 52.4 c | 91.9 d | 0.57 a | 0.53 d | — |
| RH0 | 78.8 c | 146.7 b | 0.54 c | 1.23 d | 44 d |
| RH0A | 82.4 bc | 150.1 b | 0.55 bc | 1.42 c | 54 c |
| RH1 | 92.6 b | 164.3 ab | 0.56 abc | 1.45 b | 56 b |
| RH1A | 104.1 a | 175.6 a | 0.59 a | 1.93 a | 82 a |
| CKR | 41.1 d | 71.4 c | 0.58 a | 0.42 e | — |
| BH0 | 102.3 b | 162.3 c | 0.63 a | 1.29 c | 38 c |
| BH0A | 112.1 b | 172.6 c | 0.65 a | 1.52 b | 50 b |
| BH1 | 115.0 b | 203.1 b | 0.57 b | 1.81 b | 66 b |
| BH1A | 133.6 a | 229.6 a | 0.58 b | 2.29 a | 92 a |
| CKB | 53.9 c | 94.9 d | 0.57 b | 0.59 d | — |

*注: 氮肥利用率为表观氮回收率, 即: (施氮处理的水稻吸氮量-不施氮处理的水稻吸氮量)/施氮量。下同。Note: NRE is apparent N recovery efficiency, the difference in the total N uptake between the N treatment and the control treatment as a percentage of the total fertilizer N input. The same below.

2.4 红萍的生物固氮速率

如图 3, 插秧后 26 d (8 月 11 日), 在乌栅土和黑土上种植的水稻中, 肥料集中深施处理 (WH1A 和 BH1A) 的红萍固氮速率分别显著高于的氮肥表施处理 (WH0A 和 BH0A), 分别为氮肥表施处理的 1.39 倍和 2.1 倍; 红壤两种施肥方式处理下的红萍固氮速

率没有显著差异。同为肥料集中深施处理, 乌栅土处理中的红萍固氮速率显著高于红壤处理, 约为其 1.63 倍。而插秧后 71 d (9 月 25 日), 红壤和黑土氮肥表施处理 (RH0A 和 BH0A) 的红萍固氮速率显著高于肥料集中深施处理 (RH1A 和 BH1A), 乌栅土两种处理的红萍固氮速率没有显著差异。

表 6 籽粒产量、生物量、水稻吸氮量与氮肥利用率的多因素方差分析

Table 6 The multivariate analysis of variance for rice yield, biomass, total N uptake and NRE

| 主效应或交互作用 | 籽粒产量 | 生物量 | 水稻吸氮量 | 氮肥利用率 |
|---|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| The main effect or interaction | Grain yield | Biomass | N uptake | NRE |
| | (<i>P</i> -value) | (<i>P</i> -value) | (<i>P</i> -value) | (<i>P</i> -value) |
| 土壤类型 Soil type | < 0.01 | < 0.01 | < 0.01 | < 0.05 |
| 放养红萍 Stocking <i>Azolla</i> | < 0.01 | < 0.01 | < 0.01 | < 0.01 |
| 施肥方式 Fertilization method | < 0.01 | < 0.01 | < 0.01 | < 0.01 |
| 土壤类型×放养红萍 Soil type×Stocking <i>Azolla</i> | 0.4 | 0.32 | 0.23 | 0.23 |
| 土壤类型×施肥方式 Soil type×Fertilization method | 0.99 | < 0.05 | < 0.01 | < 0.01 |
| 放养红萍×施肥方式 Stocking <i>Azolla</i> ×Fertilization method | < 0.05 | < 0.05 | < 0.01 | < 0.01 |
| 土壤类型×放养红萍×施肥方式 Soil type×Stocking <i>Azolla</i> ×Fertilization method | 0.49 | 0.75 | 0.81 | 0.79 |

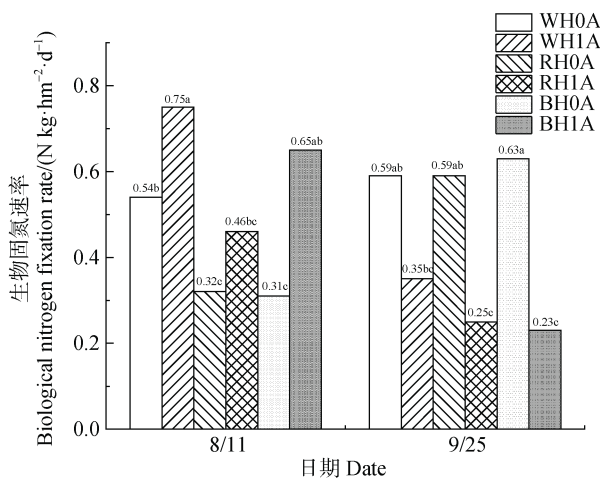


图 3 红萍的生物固氮速率

Fig. 3 Biological nitrogen fixation rate of *Azolla*

3 讨论

肥料集中深施能显著降低氨挥发日通量、稻季氨挥发总量及田面水铵态氮浓度,有效减少稻田氨挥发损失,显著提高水稻产量、水稻吸氮量和氮肥利用率。肥料集中深施将氮肥集中深施于土下 10 cm,由于土壤胶体带负电荷,使得大量的由尿素水解产生的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 被土壤颗粒吸附,使其难以扩散

至土壤表层^[12],从而降低田面水中铵态氮的浓度,使氮肥损失率降低^[13],在水稻苗期维持施肥点附近的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的浓度,而水稻根系在高浓度 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的诱导下将生长得更加繁茂,且具有良好的吸收能力^[14],因此肥料集中深施还能通过诱导促进水稻根系生长,增强水稻对营养物质的吸收能力,从而提高水稻的吸氮量和氮素利用率,使产量上升。土壤温度随深度增加而降低,而温度是影响尿素水解速率的重要因素,因此肥料集中深施可降低尿素的水解速率^[15]。研究指出,氨挥发通量与土壤 pH 呈正相关关系^[16],田面水中,铵态氮以铵根形式存在,带正电荷,若田面水为碱性,则促进铵根离子与氢氧根结合,转变为氨气从而挥发;若田面水为酸性,则抑制氨挥发,本研究中,黑土的 pH 偏碱性,因此表施模式下,黑土的氨挥发量最高。

在不同酸碱度稻田土壤下以及不同施肥方式下,稻田养萍具有稳定的抑制氨挥发的效果。红萍可以吸收固定尿素水解产生的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$,且红萍覆盖田面水,形成物理隔膜,阻挡了铵态氮的挥发,同时挡住阳光,降低田面水的温度,减缓了尿素的分解速率和铵态氮的扩散速度,使氨挥发的速度减缓,因此稻田养萍后田面水中的铵态氮浓度无显著下降

或上升并维持时间更长, 并降低稻田的氨挥发日通量。许和水^[17]研究指出, 氨挥发通量与田面水中溶解氧含量及土壤氧化还原电位呈负相关关系, 稻田养萍增加了田面水溶解氧含量, 提高土壤氧化还原电位, 从而降低了田面水氨挥发。

肥料集中深施模式下稻田养萍具有更好的增产效果, 且能提高水稻吸氮量和氮肥利用率。红萍为蕨类与固氮鱼腥藻的共生体^[18], 在叶片共生腔内生有 5 万至 8 万个丝状蓝藻-满江红鱼腥藻, 它具有较强的固氮能力, 能将空气中氮素固定, 变成含氮量高、肥效好的有机质肥。同时, 稻田养萍减少了肥料氮的氨挥发损失, 使得作物可利用的氮更加充足, 进而提高作物产量; 陈炳焕等^[19]利用 ¹⁵N 示踪技术研究表明, 红萍可排出体内 12% 的氮素, 红萍的固氮和排氮有助于调节稻田的氮素平衡, 不仅增加了水稻植株对氮的利用效率, 还确保了对水稻植株生长期的氮的持续供应^[20], 提供了良好的氮素环境, 有助其增产; 红萍是一种高氮富钾的优质绿肥^[21], 研究表明, 增施有机肥有利于提高水稻的籽粒产量和植株吸氮量, 并提高氮肥利用率及氮肥利用农学效率^[22], 而稻田养萍过程中, 红萍不断脱落的残体或自然凋谢死亡的残体恰好作为一种良好的生物绿肥分解解释放养分, 供作物吸收利用。王孝推^[23]研究指出, 稻田养萍能提高土壤有机物含量、减少杂草、提高土壤肥力、改变土壤的结构质地, 改善了水稻的正常环境, 提高了水稻对氮肥的利用率, 从而提高水稻产量。

应指出的是, 本研究中的施肥深度为 10 cm, 因此氨挥发的抑制效果优于大田实际测深施肥, 施肥深度越浅, 氨挥发总量越大。我国当前生产实践中侧深施肥机械设计深度一般为 5 cm, 田间操作时由于受秸秆还田等的影响, 实际施肥深度还会略浅, 一般在 3~5 cm^[16], 该深度对氨挥发的削减幅度有限。因此, 当前亟须设计深施深度 10 cm 的施肥机械。对于产量构成而言, 根据前人的研究, 可能的趋势为: 稻田养萍主要增加了水稻中后期的营养供应^[24], 提高产量的作用机制为增加了每穗粒数和单粒重; 肥料集中深施促进水稻苗期根系生长^[25], 提高了叶片中过氧化氢酶和过氧化物酶的活性, 提高了水稻抽穗期后的叶面积指数, 从而提高了叶片光合作用速率, 增加水稻生物量^[26]。

4 结 论

稻田养萍在不同酸碱度稻田土壤及不同施肥方式下均表现出稳定的抑制氨挥发和增加水稻产量效果。而肥料集中深施 10 cm 能降低稻季氨挥发 90% 以上, 显著提高氮肥利用率并增产; 结合稻田养萍后增产效果更好。

参考文献 (References)

- [1] Zhang X, Guo Y H, Zhu C Y. Effects of low N fertilizer on relation of source-sink and grain filling on Shennong 702[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2006, 22 (3): 221-224. [张雪, 郭玉华, 朱彩云. 低氮对沈农 702 的库源关系及灌浆进程的影响[J]. 中国农学通报, 2006, 22 (3): 221—224.]
- [2] Gu B J, Ge Y, Ren Y, et al. Atmospheric reactive nitrogen in China: Sources, recent trends, and damage costs[J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46 (17): 9420—9427.
- [3] Zhu Z L. Transformation of nitrogen in paddy soil and rational application of nitrogen fertilizer[J]. Chemistry, 1994, 57 (9): 15—17, 22. [朱兆良. 稻田土壤中氮素的转化与氮肥的合理施用[J]. 化学通报, 1994, 57 (9): 15—17, 22.]
- [4] Zhu Z L. Research on soil nitrogen in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45 (5): 778—783. [朱兆良. 中国土壤氮素研究[J]. 土壤学报, 2008, 45 (5): 778—783.]
- [5] Shen S M. Contribution of nitrogen fertilizer to the development of agriculture and its loss in China[C]//. Album “Nitrogen cycle and agriculture and environment” —Proceedings of the symposium on nitrogen cycle and agriculture and environment. Beijing: Science Press, 2001: 14. [沈善敏. 氮肥在中国农业发展中的贡献和农业中氮的损失[C]. 《氮素循环与农业和环境》专辑——氮素循环与农业和环境学术讨论会论文集. 北京: 科学出版社, 2001: 14.]
- [6] Wang S W, Lin J H, Wu Z G, et al. The effects of nitrogen fertilizer deep placement on the ammonia volatilization from paddy fields in the Taihu Lake Region of China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29 (12): 2002—2012. [王书伟, 林静慧, 吴正贵, 等. 氮肥深施对太湖地区稻田氨挥发的影响[J]. 中国生态农业学报, 2021, 29 (12): 2002—2012.]
- [7] Yin J, Fei L J, Tian J C, et al. Research advance of nitrogen fertilizer losses from paddy field[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21 (6): 189—191. [尹娟, 费良军, 田军仓, 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.]

- [8] Kollah B, Patra A K, Mohanty S R. Aquatic microphylla *Azolla* : A perspective paradigm for sustainable agriculture, environment and global climate change[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23 (5): 4358—4369.
- [9] Wang Z D, Wang P. The effect of *Azolla* on rice and paddy soil[J]. Acta Agriculturae Universitatis Pekinensis, 1987, 13 (1): 19—26. [王在德, 王璞. 红萍对水稻及土壤的作用[J]. 北京农业大学学报, 1987, 13 (1): 19—26.]
- [10] Mohanty S K, Singh U, Balasubramanian V, et al. Nitrogen deep-placement technologies for productivity, profitability, and environmental quality of rainfed lowland rice systems[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 1998, 53 (1): 43—57.
- [11] Jahan I. Deep placement of fertiliser leads to increased soil quality[J]. Appropriate Technology, 2013, 40 (2): 19—20.
- [12] Liu T Q, Fan D J, Zhang X X, et al. Deep placement of nitrogen fertilizers reduces ammonia volatilization and increases nitrogen utilization efficiency in no-tillage paddy fields in central China[J]. Field Crops Research, 2015, 184: 80—90.
- [13] Das S, Islam M R, Sultana M, et al. Effect of deep placement of nitrogen fertilizers on rice yield and N use efficiency under water regimes[J]. SAARC Journal of Agriculture, 2016, 13 (2): 161—172.
- [14] Li S Q, Li S X. Some factors affecting urea hydrolysis rates in soils[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 1999, 5 (2): 156—162. [李世清, 李生秀. 影响土壤尿素水解速率的一些因子[J]. 植物营养与肥料学报, 1999, 5 (2): 156—162.]
- [15] Wang J F, Sheng D, Duan L Z. Study on affecting factors of hydrolysis rate of urea added in soil[J]. Journal of Anhui Technical Teachers College, 2004, 18 (5): 15—20. [汪建飞, 盛蒂, 段立珍. 土壤外源尿素水解速率影响因素研究[J]. 安徽技术师范学院学报, 2004, 18 (5): 15—20.]
- [16] Khatun A, Sultana H, Zaman M, et al. Urea deep placement in rice as an option for increasing nitrogen use efficiency[J]. Open Access Library Journal, 2015, 2 (4): 1—11.
- [17] Xu H S. Investigation on soil carbon sequestration and mitigation of greenhouse gas emission by the integrated rice-azolla cropping system in double rice cropped region[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017. [许和水. 双季稻区“稻萍”共生系统固碳减排效应研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.]
- [18] Zheng W W. Research progress of *Azolla-Anabaena* symbiosis nitrogen fixation[J]. Fujian Agricultural Science and Technology, 1985 (3): 35—37. [郑伟文. 红萍—鱼腥藻共生固氮研究进展[J]. 福建农业科技, 1985 (3): 35—37.]
- [19] Chen B H, Weng B Q, Tang J Y, et al. The effect of *Azolla* on nitrogen balance in paddy field[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 1994, 8 (2): 97—102. [陈炳煊, 翁伯琦, 唐建阳, 等. 红萍在稻田氮素平衡中的作用[J]. 核农学报, 1994, 8 (2): 97—102.]
- [20] Fosu-Mensah B Y, Vlek P L G, Manske G, et al. The influence of *Azolla pinnata* on floodwater chemistry, grain yield and nitrogen uptake of rice in Dano, southwestern Burkina faso[J]. Journal of Agricultural Science, 2015, 7 (8): 118—130.
- [21] Deng S F, Huang S Z, Zheng X L, et al. Quality evaluation of *Azolla* Lam. as organic manure[J]. Acta Agrestia Sinica, 2020, 28 (4): 932—939. [邓素芳, 黄水珍, 郑向丽, 等. 满江红属植物的有机肥品质评价[J]. 草地学报, 2020, 28 (4): 932—939.]
- [22] Li Y, Tang L L, Chen Y, et al. The effects of nitrogen application rates on uptake, utilization and losses of nitrogen for rice[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2015, 46 (2): 392—397. [李艳, 唐良梁, 陈义, 等. 施氮量对水稻氮素吸收、利用及损失的影响[J]. 土壤通报, 2015, 46 (2): 392—397.]
- [23] Wang X T. *Azolla* fertilize the soil, increase the production of rice[J]. Soils, 1960, 3 (3): 24—22. [王孝推. 红萍肥田, 水稻增产[J]. 土壤, 1960, 3 (3): 24—22.]
- [24] Chen R G, Hu Z H, Zeng K, et al. Influence of nitrogen application rates on biological nitrogen fixation and ammonia volatilization under rice-azolla cropping system[J]. Soils, 2023, 55 (2): 245—253. [陈若谷, 胡正华, 曾科, 等. 稻田养萍模式下不同施氮量对稻田氨挥发及红萍生物固氮作用的影响[J]. 土壤, 2023, 55 (2): 245—253.]
- [25] Hu R, Xiao D K, Ding Z J, et al. Impacts of nitrogen application in root zone on root growth and distribution of rice at seedling stage[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2022, 50 (22): 93—99. [胡仁, 肖大康, 丁紫娟, 等. 根区施氮对水稻苗期根系生长及分布的影响[J]. 江苏农业科学, 2022, 50 (22): 93—99.]
- [26] Pan S G, Wen X C, Wang Z M, et al. Benefits of mechanized deep placement of nitrogen fertilizer in direct-seeded rice in South China[J]. Field Crops Research, 2017, 203: 139—149.

(责任编辑: 卢 萍)