

引用格式:

张海锋, 张靖, 王伟, 李粤丰, 王娟, 吴金水, 沈健林. 减氮配施生物炭和炭基肥对红壤设施菜地 N₂O 排放和 NH₃ 挥发的影响 [J]. 农业现代化研究, 2025, 46(3): 590-599.

ZHANG H F, ZHANG J, WANG W, LI Y F, WANG J, WU J S, SHEN J L. Effects of reduced nitrogen application combined with biochar and biochar-based fertilizer application on N₂O emissions and NH₃ volatilization from protected vegetable fields in red soil regions [J]. Research of Agricultural Modernization, 2025, 46(3): 590-599.

DOI: 10.13872/j.1000-0275.2025.0067

CSTR: 32240.14.1000.0275.2025.0067



减氮配施生物炭和炭基肥对红壤设施菜地 N₂O 排放和 NH₃ 挥发的影响

张海锋^{1,2}, 张靖², 王伟^{1*}, 李粤丰², 王娟², 吴金水², 沈健林^{2*}

(1. 西藏农牧学院资源与环境学院, 西藏 林芝 860000; 2. 中国科学院亚热带农业生态研究所亚热带农业生态过程重点实验室, 长沙农业环境观测研究站, 湖南 长沙 410125)

摘要: 过量施用氮肥不仅影响作物生长, 还导致 N₂O 排放和 NH₃ 挥发, 造成环境污染。生物炭和炭基肥作为减排材料, 在土壤改良和减排方面具有潜力。本研究探讨不同秸秆炭化还田方式配施化肥对红壤设施菜地 N₂O 排放和 NH₃ 挥发的影响。以湖南长沙设施菜地为研究对象, 设置不施肥 (CK)、常规施肥 (CON)、减氮 20%+ 炭基肥 (BF)、减氮 20%+ 生物炭 (BC) 四个处理, 采用气相色谱法监测 N₂O 排放, 密闭室法采集 NH₃, 测定土壤氮含量和作物产量。结果显示, BF 和 BC 处理 N₂O 排放量分别显著减少 27.80% 和 12.27%, BF 比 BC 减少 17.70%; BF 的 N₂O 排放因子较 CON 处理降低 33.56%, 比 BC 低 33.10%。BF 和 BC 的 NH₃ 挥发分别减少 20.47% 和 14.26%, 且 BF 的 NH₃ 挥发排放因子降低 25.40%, 比 BC 减少 16.81%。BF 处理氮肥利用率提高 50.91%。BF 和 BC 处理的土壤 NH₄⁺-N 分别降低 18.03% 和 11.40%, NO₃⁻-N 含量无显著差异。随机森林分析表明, 土壤 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 和温度是 N₂O 排放和 NH₃ 挥发的重要因素。各处理间鲜重产量无显著差异。BF 处理使单位产量的 N₂O 排放减少 28.12%。综上, 减氮配施生物炭和炭基肥有效减少设施菜地 N₂O 排放和 NH₃ 挥发, 炭基肥的减排效果优于生物炭。

关键词: 生物炭; 炭基肥; 氧化亚氮; 氮挥发; 设施菜地

中图分类号: S154.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-0275 (2025) 03-0590-10

Effects of reduced nitrogen application combined with biochar and biochar-based fertilizer application on N₂O emissions and NH₃ volatilization from protected vegetable fields in red soil regions

ZHANG Haifeng^{1,2}, ZHANG Jing², WANG Wei¹, LI Yuefeng², WANG Juan²,
WU Jin-shui², SHEN Jianlin²

(1. College of Resources and Environment, Xizang Agricultural and Animal Husbandry University, Linzhi, Xizang 860000, China; 2. Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Regions, Changsha Research Station for Agricultural & Environmental Monitoring, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha, Hunan 410125, China)

Abstract: Excessive nitrogen fertilization not only inhibits crop growth but also induces N₂O emissions and NH₃ volatilization, contributing to environmental pollution. Biochar and biochar-based fertilizers show potential in soil improvement and emission reduction. This study investigated the impacts of different straw-derived biochar application methods combined with chemical fertilizer reduction on N₂O emissions and NH₃ volatilization in a red soil vegetable greenhouse in Changsha, Hunan Province. Four treatments were established: no fertilization (CK), conventional fertilization (CON), 20% nitrogen reduction + biochar-based fertilizer (BF), and 20% nitrogen reduction + biochar (BC). N₂O emissions were monitored via gas chromatography, NH₃ was collected using the closed chamber method, and soil nitrogen content and crop yield were measured. Results demonstrated that BF and BC treatments significantly reduced N₂O emissions by 27.80% and 12.27%, respectively, with BF exhibiting a 17.70% greater reduction than BC. The N₂O emission factor of BF decreased by 33.56% compared to CON, outperforming BC by 33.10%. NH₃ volatilization under BF and BC declined by 20.47% and 14.26%, respectively, with BF reducing the NH₃ volatilization emission

收稿日期 Received: 2025-01-13; 接收日期 Accepted: 2025-03-17

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFD1900902); 国家自然科学基金项目 (42477378)。Supported by the National Key Research and Development Program Project (2023YFD1900902); National Natural Science Foundation of China (42477378).

* 通信作者 Corresponding author (xzwangwei@xza.edu.cn; jlshen@isa.ac.cn)

factor by 25.40%, 16.81% lower than BC. BF increased nitrogen use efficiency by 50.91%. Soil NH₄⁺-N decreased by 18.03% and 11.40% under BF and BC, respectively, while NO₃⁻-N showed no significant variation. Random forest analysis identified soil NH₄⁺-N, NO₃⁻-N, and temperature as key drivers of N₂O and NH₃ emissions. Fresh weight yields remained consistent across treatments. BF reduced N₂O emissions per unit yield by 28.12%. In conclusion, nitrogen reduction combined with biochar or biochar-based fertilizer effectively mitigates N₂O emissions and NH₃ volatilization in greenhouse vegetable systems, with biochar-based fertilizer demonstrating superior performance.

Keywords : biochar; biochar-based fertilizer; nitrous oxide; ammonia volatilization; protected vegetable fields

过量氮肥施用促进了农田温室气体氧化亚氮(N₂O)排放以及氨(NH₃)挥发^[1]。N₂O是环境中的一种重要的温室气体,也是平流层臭氧消耗的主要物质,其增温潜势是CO₂的298倍^[2]。农业排放的N₂O占全球人类活动总排放的60%以上^[3]。此外,NH₃挥发也是农田氮肥损失的一个重要途径^[4]。自1980年以来的40年间,农业活动NH₃挥发增加了78%^[5]。进入大气的NH₃通过干湿沉降返回陆地和水体,导致土壤酸化等一系列生态问题^[6]。因此,优化氮肥施用、减少农田N₂O排放和NH₃挥发是当前农业生产中亟待解决的关键问题。

近年来,秸秆炭化还田逐渐受到广泛关注,将秸秆炭化为生物炭施入农田,既能固碳减排,又可减少秸秆焚烧和直接还田所带来的大气污染及病虫害等问题。生物炭具有较大的比表面积和高孔隙度,能够增加土壤的孔隙度和通气性,从而改善土壤结构,增强土壤的保水能力和养分保持能力。研究表明,添加生物炭能够有效降低农田的N₂O排放和NH₃挥发^[7-8]。生物炭施入土壤后,通过增加土壤的通气性,抑制反硝化途径中的N₂O排放^[9];生物炭还能提高土壤的pH值,促进微生物过程将N₂O转化为N₂^[10];同时,生物炭能够提升土壤吸附固持NH₃的能力,从而减少NH₃的挥发^[11]。此外,生物炭的特殊结构能够吸附氨态氮(NH₄⁺-N)和NH₃,从而进一步减少NH₃的挥发^[12-13]。作为一种兼具减排和土壤改良功能的可持续农业技术,生物炭的规模化应用仍需进一步优化生产工艺以降低成本。秸秆炭化还可用于生产炭基肥料。将秸秆生物炭与肥料混合并造粒成炭基肥,不仅能发挥生物炭的减排功能,还能利用化肥提供养分和便于施用的优点。与单独施用尿素相比,炭基肥能缓慢释放氮素,延长氮肥的有效期,并保持较高的氨硝比^[14],从而提高氮肥的利用率。炭基肥还可以固定尿素分解过程中释放的NH₃,避免其以NH₃的形式流失^[15]。此外,施用炭基肥有助于减少氮肥的使用量^[16]。因此,研究生物炭和炭基肥对农田N₂O排放及NH₃挥发的影响,对推动农业绿色生产具有重要意义。

亚热带区域占我国国土面积的四分之一,是重要的农业生产基地。亚热带红壤区农田酸性较强,

氮素投入量大,但氮肥的利用率相对较低,导致严重的大气和水体氮污染^[17-18]。因此,提高亚热带红壤区氮肥的利用效率并减少氮污染尤为重要。本研究选取湖南省长沙县奶白菜地作为研究对象,对N₂O排放和NH₃挥发进行原位观测,探讨不同秸秆炭化还田方式(生物炭和炭基肥)对亚热带红壤区设施菜地N₂O排放和NH₃挥发的影响,为有效促进秸秆资源利用和氮肥高效利用提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本研究大田试验位于湖南省长沙市长沙县金井镇湘丰村(112°80'N, 28°37'E, 海拔80 m),选择了耕作近十年的典型设施菜地作为试验样地。该地区属于亚热带季风气候,全年平均温度为17.5℃,年降水量为1370 mm,降水主要集中在3至8月份,年均无霜期为300 d。试验地的土壤为花岗岩红壤发育而成的水稻土,土壤质地为砂壤土(砂砾、粉粒和黏粒的质量分数分别为58.25%、40.57%和1.18%)。该地区土壤的基本理化性质为:pH值为4.29,土壤有机碳(SOC)为20.9 g/kg,全氮(TN)为2.03 g/kg, NH₄⁺-N为1.574 mg/kg,硝态氮(NO₃⁻-N)为8.345 mg/kg,全磷(TP)为1.27 g/kg,全钾(TK)为38.9 g/kg。

1.2 供试材料

本试验所种植的蔬菜为矮脚奶白菜,品种为“雪冠100”。施用的生物炭由玉米秸秆在500℃条件下高温热解制成,购自湖北金日生态能源股份有限公司,其基本理化性质为:pH值为9.59, TN为8.87 g/kg, TK为100.5 g/kg,含碳量为48.4%。氮肥为尿素,含氮量为46%。

本研究所使用的秸秆炭基肥是通过以下方法自行制备的:先将玉米秸秆生物炭过2 mm筛后烘干,再以凹凸棒土作为粘结剂,将生物炭与氮肥(以纯氮计算)的比例设为4:1,生物炭和氮肥合计占72%,凹凸棒土占20%,水占8%。将计算好的秸秆生物炭、氮肥和凹凸棒土按比例充分混合均匀,加入水后再次混合均匀,经过造粒机挤压造粒,得到直径约8 mm、长度约2 cm的圆柱体肥料,

冷却并风干待用。炭基肥的基本性质为：含水率 13.55%、pH 值 9.36、TC 22.82 g/kg、TN 11.62 g/kg（假定未考虑造粒过程中的氮损失，数据以实际检测结果为准）。

1.3 试验设计

田间试验于 2021 年 10 月至 2022 年 1 月进行，共设置 4 个处理：不施肥处理（CK）、常规氮肥处理（CON）、减氮 20%+ 生物炭处理（BC，施用量 24 t/hm²）、减氮 20%+ 炭基肥处理（BF，施用量 24 t/hm²）。

BC 处理的生物炭施用方法为：在设施菜地翻耕前，将生物炭均匀撒施于土壤表面，并通过翻耕与土壤混匀，一次性施入。BF 处理中，基肥施用时将炭基肥掺混后穴施；磷钾肥作为基肥一次性穴施，施肥深度为 7 cm。氮肥的基追肥比为 4:3:3，基肥为尿素，采用穴施，深度为 7 cm，追肥则采用尿素溶于水后均匀撒施。各处理的施氮量见表 1。每个处理设 3 个重复，小区面积为 9.18 m²（2.7 m × 3.4 m）。CON 处理中的施肥量为：氮肥 260 kg/hm²、五氧化二磷（P₂O₅）120 kg/hm²、氧化钾（K₂O）160 kg/hm²。种植密度为 25 cm × 35 cm。奶白菜的播种时间为 2021 年 10 月 20 日，收获时间为 2022 年 1 月 4 日。播种当天施用基肥，两次追肥时间分别为 2021 年 11 月 28 日和 12 月 12 日。灌溉通过高架微喷系统进行，灌水频率根据奶白菜各生育期的水分需求调整。

表 1 各处理的施氮量（kg/hm²）

Table 1 Nitrogen application rates for each treatment (kg/hm²)

| 处理 | 基肥 | 追肥 | 追肥 | 总施氮量 |
|-----|------|------|------|------|
| CK | 0 | 0 | 0 | 0 |
| CON | 104 | 78 | 78 | 260 |
| BF | 83.2 | 62.4 | 62.4 | 208 |
| BC | 83.2 | 62.4 | 62.4 | 208 |

注：BC 处理中生物炭和 BF 处理中炭基肥中的氮不计入氮肥投入量，因为其速效氮含量较低，对试验的影响结果较小。

1.4 样品采集与测定

1.4.1 气体样品采集与测定 采用静态暗箱法^[19]采集 N₂O 样品：使用注射器抽取 30 mL 气体样品，注入 30 mL 顶空瓶中，连续采样 4 次，每次间隔 10 分钟。采样时间为 9:00~11:00，采样频率为每 3 d 采集一次，施肥后连续 7 d 采样。气体样品中的 N₂O 浓度通过气相色谱仪（Agilent 7890A，美国）测定。采用密闭室间歇抽气法^[20]收集土壤中挥发的 NH₃：抽气泵将密闭室内挥发的 NH₃ 吸入稀硫酸吸收瓶中（浓度为 0.05 mol/L，100 mL）。NH₃ 挥发采样时间为 9:00~11:00 和 15:00~17:00，采集频率与

N₂O 采样同步。NH₃ 的浓度通过流动分析仪（SEAL Analytical AA3，德国）测定。同时，在气体样品采集过程中，使用水银温度计和便携式温度计（天津今明 JM624，中国）记录采样箱内以及土壤 5 cm 深度的温度。

1.4.2 土壤样品采集与测定 采用五点法收集各处理的表层土壤（0~20 cm），采集频率为每周一次，施肥期间为每周两次。通过烘干法测量土壤含水率/%。土壤中 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 的含量通过流动分析仪（SEAL Analytical AA3，德国）进行测定。

1.4.3 植物样品采集与分析 采用五点取样法采集植物样品，并统计作物的鲜重产量。奶白菜植物样本中的氮含量通过流动注射分析仪进行测定。

1.5 计算公式

N₂O 排放通量（ F_{N_2O} , g/(m²·h)）的计算公式如下：

$$F_{N_2O} = \frac{M}{V_0} \times H \times \frac{P}{P_0} \times \frac{T}{T_0} \times \frac{dc}{dt} \quad (1)$$

式中： M 表示 N₂O 相对分子质量 / (g/mol)； T_0 为标准大气温度 / (273 K)； P_0 为标准大气压力 / kPa； T 和 P 为采集 N₂O 时静态暗箱内的气温 / K 和压力 / kPa； V_0 为气体标准摩尔体积 / (22.4 L/mol)； H 表示采样箱的高度 / m； dc/dt 为 N₂O 浓度 / (cm³/m³) 随时间变化的回归曲线斜率。

N₂O 累积排放量（ E_{N_2O} , kg/hm²）的计算公式为：

$$E_{N_2O} = \sum_{i=1}^n (F_{N_2O,i} + F_{N_2O,i+1}) / 2 \times (t_{i+1} - t_i) \times 24 \times 0.01 \times a \quad (2)$$

式中： n 为观测次数； $F_{N_2O,i}$ 和 $F_{N_2O,i+1}$ 为第 i 次和第 $i+1$ 次采样时 N₂O 的排放通量； t_i 和 t_{i+1} 分别为第 i 次和 $i+1$ 次的采样日期； a 为单位换算系数（ $a=10^3$ ）。

NH₃ 挥发通量（ F_{NH_3} , kg/(hm²·d)）的计算公式如下：

$$F_{NH_3} = C \times V \times 10^{-3} \times 10^{-6} \times \frac{10^4}{\pi \times r^2} \times 6 \quad (3)$$

式中： 10^{-3} 、 10^{-6} 和 10^4 分别表示体积转换系数、质量转换系数和面积转换系数； V 为稀硫酸吸收液的体积 / mL； C 为稀硫酸吸收液中 NH₄⁺-N 的浓度 / (mg/L)； r 为气室的半径 / m。

NH₃ 累积挥发通量（ E_{NH_3} , kg/hm²）计算公式为：

$$E_{NH_3} = \left[\frac{F_1 + F_n}{2} + \sum_{i=1}^n \left(\frac{F_{NH_3,i} + F_{NH_3,i+1}}{2} \right) \right] \times (t_{i+1} - t_i) \quad (4)$$

式中： t_i 和 t_{i+1} 为第 i 和 $i+1$ 次采样的间隔时间 / d； $F_{\text{NH}_3, i}$ 和 $F_{\text{NH}_3, i+1}$ 分别表示为第 i 和 $i+1$ 次采样的 NH₃ 挥发通量 / (kg/(hm²·d))； F_1 和 F_n 分别为第一次和最后一次采样时 NH₃ 的挥发通量 / (kg/(hm²·d))； n 为观测次数。

气体损失率 (EF, %) 的计算公式如下：

$$EF = (F_x - F_0) / Q \quad (5)$$

式中： F_x 为施肥措施处理气体累计排放总量 / (kg/hm²)， F_0 为土壤背景排放量 (即 CK 处理气体累计排放总量)； Q 为单位面积施氮量 / (kg/hm²)。

氮肥利用率 (NUE, %) 计算公式如下：

$$NUE = \frac{U - U_0}{Q} \times 100 \quad (6)$$

式中： U 和 U_0 分别为施氮处理和不施氮处理的植物吸氮量 / (kg/hm²)； Q 为施氮量 / (kg/hm²)。

总增温潜势 (GWP) 计算公式如下：

$$GWP = \left[298(E_{\text{N}_2\text{O}} + 0.01E_{\text{NH}_3}) \times \frac{44}{28} \right] / 1000 \quad (7)$$

式中：298 表示百年尺度下 N₂O 的增温潜势与 CO₂ 的倍数关系；0.01 为沉降的 NH₃ 转化为 N₂O 的比例 [21]。

1.6 数据处理

本研究使用 Microsoft Excel 2021 进行数据统计

和整理；采用 Origin 2022 软件进行绘图及单因素方差分析 (one-way ANOVA, $P < 0.05$)；随机森林模型的运行通过 R 软件进行。

2 结果与分析

2.1 土壤温湿度、土壤 NH₄⁺-N 含量及 NO₃⁻-N 含量动态变化

试验期间，各处理之间的土壤温度未出现显著差异 (图 1d)，土壤温度波动范围为 6.7~20.6 °C，呈现逐渐下降的趋势。土壤含水率波动范围为 17.39%~27.87% (图 1b)，不同处理之间的土壤含水率无显著差异，且波动主要受灌溉活动的影响。三个施肥处理的土壤 NH₄⁺-N 含量均在施肥后迅速增加，随后缓慢下降。CON、BF 和 BC 处理的 NH₄⁺-N 含量分别在 28.69~103.92 mg/kg、30.58~91.34 mg/kg 和 35.08~99.68 mg/kg 之间波动，均值分别为 68.18 mg/kg、55.89 mg/kg 和 60.42 mg/kg (图 1a)。相比之下，CK 处理的 NH₄⁺-N 含量变化较为平缓。土壤 NO₃⁻-N 含量的变化趋势与 NH₄⁺-N 相似 (图 1c)。CON、BF 和 BC 处理的 NO₃⁻-N 均值分别为 286.27 mg/kg、256.82 mg/kg 和 256.24 mg/kg。追肥后，各处理的土壤 NO₃⁻-N 含量呈现先增加后降低的趋势。整个观测期内，CON 处理的土壤 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量均高于其他处理，这与 CON 处理的最高施氮量有关。

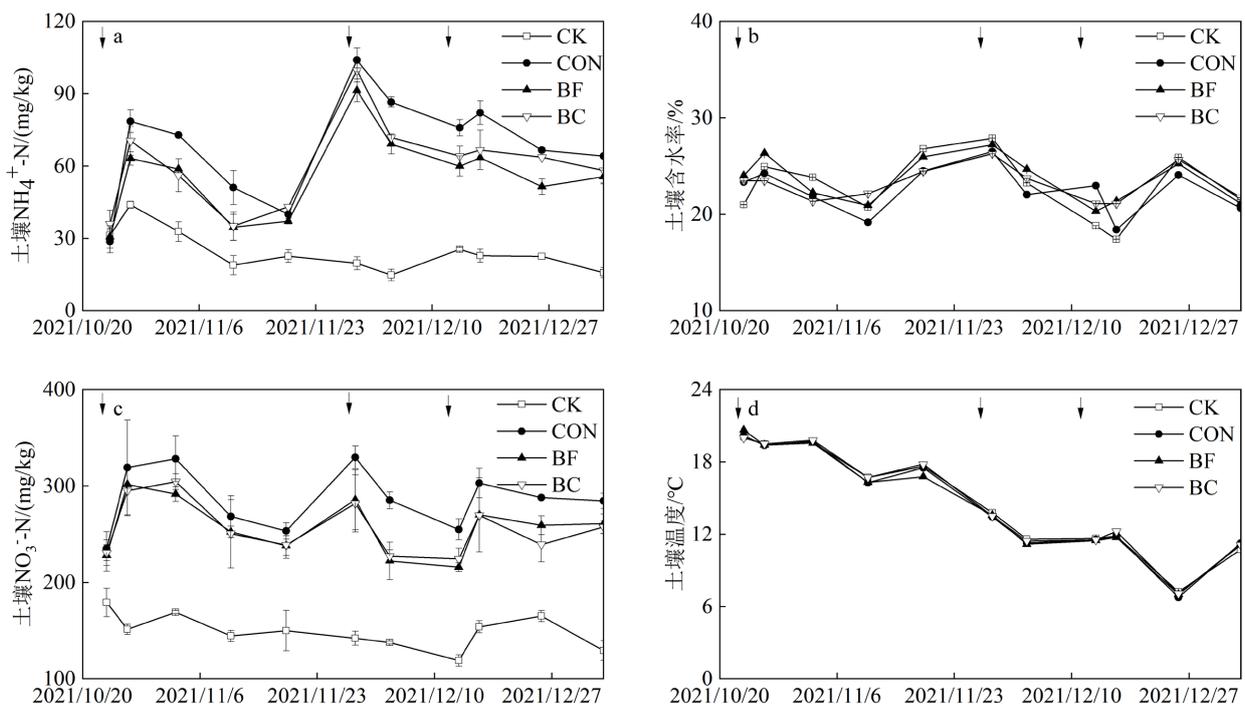


图 1 不同处理土壤温度、湿度、NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量变化

Fig. 1 Changes in soil temperature, humidity, and NH₄⁺-N, and NO₃⁻-N concentrations under different treatments

注：箭头表示氮肥施用，下图同。

2.2 N₂O 排放和 NH₃ 挥发动态变化

在整个观测周期中,不同施肥处理的土壤 N₂O 排放通量呈现相似的变化趋势(图 2)。基肥施用后 3~4 d, BF 和 BC 处理的 N₂O 排放通量分别达到峰值,分别为 0.44 mg/(m²·h) 和 0.52 mg/(m²·h),随后逐渐降低。10 月 26 日进行灌溉后,各处理的 N₂O 排放通量均有所升高,表明土壤含水率的增加促进了 N₂O 的排放。11 月 7 日,CON、BF 和 BC 处理的 N₂O 排放分别达到峰值,分别为 0.67 mg/(m²·h)、0.43 mg/(m²·h) 和 0.44 mg/(m²·h)。两次追肥后 3 d,施肥处理的 N₂O 排放通量均达到峰值。

如图 3 所示,各处理的 NH₃ 挥发动态变化趋势基本一致,施肥后均出现明显升高。基肥施用后, NH₃ 挥发通量在 1~3 d 达到峰值,随后逐渐下降。CON 处理的峰值最高,为 0.35 kg/(hm²·d),BF 和 BC 的峰值分别为 0.32 kg/(hm²·d) 和 0.33 kg/(hm²·d)。

第一次追肥后,各处理的 NH₃ 挥发通量在第 1~2 d 达到峰值。追肥期间,峰值差异不显著,主要受到施肥方式的限制,追肥方式为兑水后撒施。整个奶白菜生长季节,CON 处理的 NH₃ 挥发通量变化范围为 0.02~0.35 kg/(hm²·d)。BF 处理的 NH₃ 挥发排放通量变化范围为 0.02~0.33 kg/(hm²·d),BC 处理的 NH₃ 挥发通量变化范围为 0.02~0.32 kg/(hm²·d)。两次追肥期间的 NH₃ 挥发排放峰值远低于基肥,主要与作物生长吸收养分和温度降低有关。

2.3 N₂O 和 NH₃ 累积排放量、排放因子及总增温潜势

不同施肥处理的 N₂O 累积排放量存在显著差异 ($P < 0.05$)。各处理的 N₂O 累积排放量依次为 CON > BC > BF > CK, 分别为 6.44 kg/hm²、5.65 kg/hm²、4.65 kg/hm² 和 2.64 kg/hm²。与 CON 处理相比, BF 处理的 N₂O 累积排放量减少了 27.80%, BC 处理减少了 12.27%。BF 处理相较于 BC 处理的 N₂O 累积排

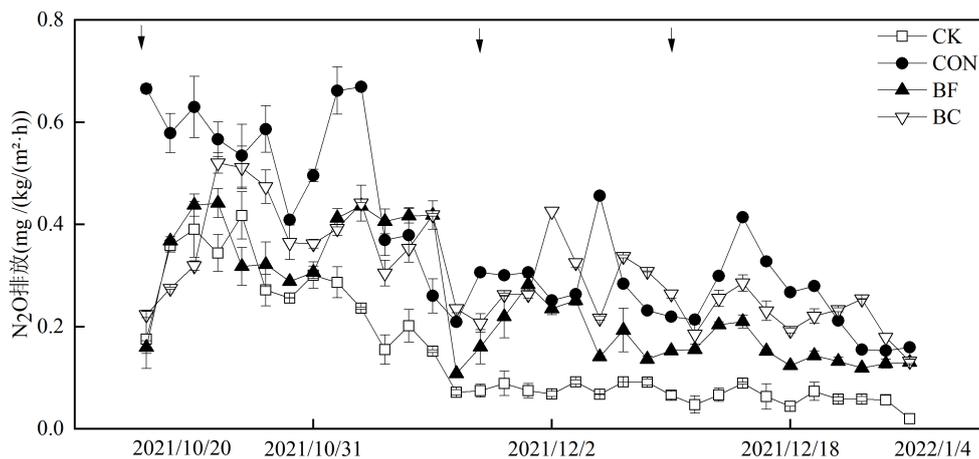


图 2 不同处理 N₂O 排放日动态变化

Fig. 2 Daily dynamic changes of nitrous oxide emissions under different treatments

注:散点图表示采样当天 N₂O 排放量均值,误差线为标准差 ($n=3$)。

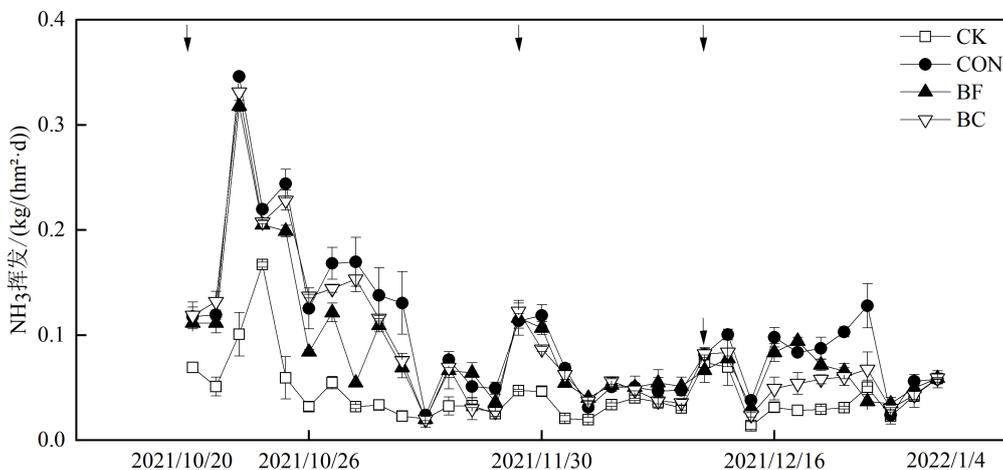


图 3 不同处理的 NH₃ 挥发日动态变化

Fig. 3 Daily dynamic changes of ammonia volatilization under different treatments

注:散点图表示采样当天 NH₃ 挥发均值,误差线为标准差 ($n=3$)。

放量减少了 17.70%。CON、BF 和 BC 处理的 N₂O 排放因子分别为 1.46%、0.97% 和 1.45%。BF 处理的 N₂O 排放因子与 CON 处理相比有显著差异 ($P < 0.05$), 减少了 33.56%, 而 BC 处理则无显著差异。BF 与 BC 处理的 N₂O 排放因子相比, 存在显著差异 ($P < 0.05$), 减少了 33.10%。

不同施肥处理的 NH₃ 挥发累积排放量分别为 CON 处理 6.45 kg/hm²、BF 处理 5.13 kg/hm²、BC 处理 5.53 kg/hm² 和 CK 处理 3.01 kg/hm²。CON 处理与 BF、BC 处理的 NH₃ 挥发累积排放量存在显著差异 ($P < 0.05$)。与 CON 处理相比, BF 处理的 NH₃ 挥发累积排放量减少了 20.47%, BC 处理减少了 14.26%。尽管 BF 处理的 NH₃ 挥发累积排放量低于 BC 处理, 但二者之间未见显著差异。各处理的 NH₃ 排放因子分别为: CON 处理 1.26%、BF 处理 0.94% 和 BC 处理 1.13%。在 NH₃ 排放因子方面, BF 处理与 CON 和 BC 处理相比存在显著差异 ($P < 0.05$)。

如表 2 所示, N₂O 排放和 NH₃ 挥发的总增温潜势介于 0.8~1.96 t/hm²。不同处理的增温潜势表现为: CON > BC > BF > CK ($P < 0.05$)。与 CON 处理相比, BF 和 BC 处理的增温潜势分别降低了 28.06% 和 12.24%。

2.4 N₂O 排放及 NH₃ 挥发与环境因子相关性分析

通过随机森林模型 (图 4、图 5) 评估了土壤环境因子 (土壤含水率、土壤温度、NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N) 对土壤 N₂O 排放和 NH₃ 挥发的重要性。结果表明: 土壤温度的“均方差比”和“节点纯度贡献”值最高, 表明土壤温度是影响土壤 N₂O 排放和 NH₃ 挥发的最重要因子; 土壤 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量的排名相近, 说明这两者对 N₂O 排放和 NH₃ 挥发的影响也较为接近; 土壤含水率的影响则相对较低。

2.5 奶白菜鲜重产量、氮肥利用率、成熟期土壤 pH 及单位氮排放

CK、CON、BC 和 BF 处理的鲜重产量分别为 15.50、20.54、20.16 和 19.92 t/hm² (图 6)。CK 与 CON、BC、BF 各施肥处理之间存在显著差异 ($P < 0.05$), 而 CON 与 BC、BF 处理的鲜重产量没有显著差异。如表 3 所示, BF 处理的氮肥利用率较 CON 和 BC 处理显著提高, 分别提高了 50.91% 和 45.61%。BF 处理与 CON 处理的单位产量 N₂O 排放存在显著差异 ($P < 0.05$), 减少了 28.12%。各施肥处理在单位产量 NH₃ 挥发方面未见显著差异。表 3 中显示, CON、BF、BC 及 CK 处理的成熟期土壤 pH 值分别为 4.3、4.34、4.60 和 4.27, BC 处理与其他处理

表 2 不同处理的 N₂O 和 NH₃ 累计排放量、排放因子及增温潜势

Table 2 Cumulative emissions of N₂O and NH₃, emission factors, and global warming potential under different treatments

| 处理 | N ₂ O 累积排放量 / (kg/hm ²) | NH ₃ 挥发累积排放量 / (kg/hm ²) | N ₂ O 排放因子 / % | NH ₃ 排放因子 / % | 增温潜势 / (t/hm ²) |
|-----|---|--|------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|
| CK | 2.64±0.04 d | 3.01±0.03 c | - | - | 0.80±0.02 d |
| CON | 6.44±0.07 a | 6.45±0.15 a | 1.46±0.03 a | 1.26±0.06 a | 1.96±0.02 a |
| BF | 4.65±0.07 c | 5.13±0.12 b | 0.97±0.03 b | 0.94±0.06 b | 1.41±0.02 c |
| BC | 5.65±0.06 b | 5.53±0.14 b | 1.45±0.03 a | 1.13±0.07 a | 1.72±0.03 b |

注: 同列小写字母表示各处理间的显著差异 ($P < 0.05$), 下表同。

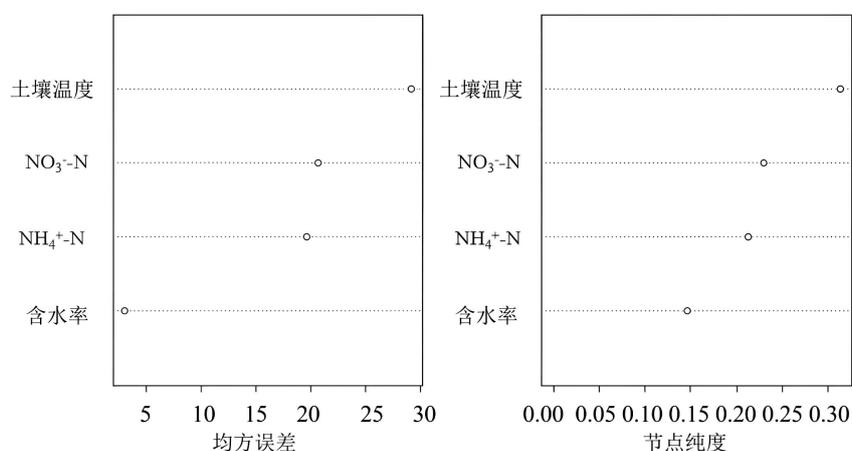


图 4 随机森林模型分析环境因子对土壤 N₂O 排放的相对重要性

Fig. 4 Random forest model analysis of the relative importance of environmental factors on soil N₂O emissions

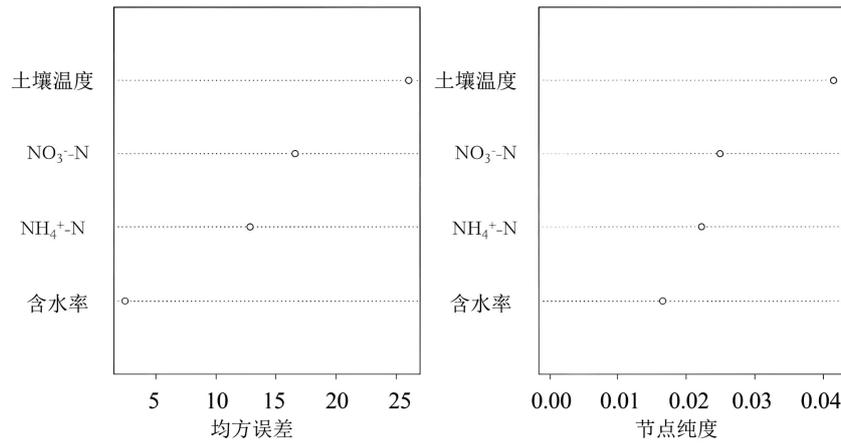


图 5 随机森林模型分析环境因子对土壤 NH₃ 挥发的相对重要性

Fig. 5 Random forest model analysis of the relative importance of environmental factors on soil NH₃ volatilization

相比存在显著差异 ($P < 0.05$)。

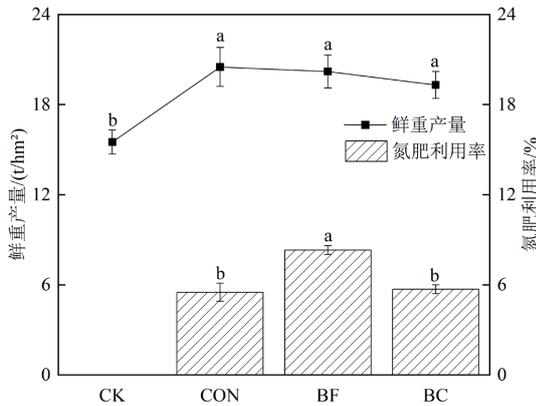


图 6 鲜重产量和氮肥利用率

Fig. 6 Fresh weight yield and nitrogen fertilizer use efficiency

表 3 成熟期土壤 pH 值及单位产量氮排放

Table 3 Nitrogen absorption and partial productivity of nitrogen fertilizer

| 处理 | 成熟期土壤 pH 值 | 单位产量 N ₂ O 排放 / (kg/t) | 单位产量 NH ₃ 挥发 / (kg/t) |
|-----|------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| CK | 4.27 b | 0.17±0.0 c | 0.21±0.02 a |
| CON | 4.30 b | 0.32±0.02 b | 0.32±0.03 a |
| BF | 4.34 b | 0.23±0.01 a | 0.26±0.02 a |
| BC | 4.60 a | 0.29±0.01 ab | 0.29±0.02 a |

3 讨论

3.1 减氮配施生物炭和炭基肥对 N₂O 排放的影响

本研究中, BF 和 BC 处理较 CON 处理的 N₂O 累积排放量显著减少 ($P < 0.05$), 这与减少氮肥施用量有关。氮肥是促进 N₂O 排放的主要影响因子, 合理施用氮肥能够降低 N₂O 排放量^[22]。以往研究发现, 生物炭施用可提高 pH, 增加土壤反硝化 *nosZ* 基因丰度, 促进 N₂O 转化为 N₂, 从而减少 N₂O 排放^[23]。李君薇^[24]的研究表明, 长期施用生物炭降

低了花生地 N₂O 排放。然而, 在本研究中, 生物炭施用并未减少单位施氮量的 N₂O 排放。这可能是由于研究中的土壤酸性较强, 生物炭施用后未能显著提升土壤 pH, 并且氮肥基肥采用穴施, 氮肥与生物炭的接触面积相对有限, 进而未能发挥生物炭的减排效应。相较而言, 炭基肥显著降低了单位施氮量的 N₂O 排放, 且以往研究发现, 在等氮条件下, 炭基肥显著减少了 N₂O 排放。例如, 陈红卫等^[25]的研究发现, 施用 20 t/hm² 炭基肥可降低 23.03% 的 N₂O 排放量。这主要是由于炭基肥中的氮肥缓慢释放, 作物利用率高, 从而减少了土壤中硝化 - 反硝化的底物, 有利于实现 N₂O 排放的减少。

3.2 减氮配施生物炭和炭基肥对 NH₃ 挥发的影响

本研究中, BF 和 BC 处理的 NH₃ 挥发累积排放量显著低于 CON 处理 ($P < 0.05$)。然而, BF 和 BC 处理之间的 NH₃ 挥发累积量无显著差异, 这与李占台等^[26]在设施生菜的研究结果一致, 研究发现减少 15% 氮肥施用量能降低 21.6% 的 NH₃ 挥发损失。在 CON 处理中, 由于施氮量较高, 氮肥施用量会改变 NH₃ 挥发的速率, 导致峰值较大。在基肥期间, NH₃ 挥发较为显著, 两次追肥分别占总施氮量的 30%, 且 NH₃ 挥发的峰值相近, 这与乔丹等^[27]的研究一致。基肥期间的较高温度促进了土壤脲酶活性及微生物活性; 同时, 由于奶白菜在基肥施用后的发芽至苗期阶段所需氮素较少, 未被吸收的无机氮易被排放到环境中。追肥排放量低于基肥是因为奶白菜处于生育后期, 所需氮素较高, 未被利用的氮素较基肥阶段减少。

以往的研究表明, 生物炭施用通常会大幅提高土壤 pH, 进而增加氮素的 NH₃ 挥发损失^[28]。然而, 也有研究表明, 生物炭可通过提高土壤 pH 和阳

离子交换量,降低田面水 NH₄⁺-N 浓度,最终减少 NH₃ 挥发^[29]。在本研究中,由于生物炭施用未能显著提升 pH,并且由于氮肥基肥采用穴施,氮肥与生物炭的接触面积较小,生物炭施用对单位施氮量下的 NH₃ 挥发没有显著影响。而炭基肥由于其缓释特性,氮肥缓慢释放,从而减少了 NH₃ 挥发。如赵杭等^[30]的研究发现,在水稻土中施用炭基肥, NH₃ 挥发排放因子减少 20.38%~53.18%。考虑到生物炭在一次性施用后,长期耕作可能导致其老化,从而影响其减排效应的持续性;而炭基肥通过长期施用增加土壤中的生物炭含量,从而改变土壤的理化性质,并对减排效应产生长期影响。此外,生物炭和炭基肥在减少 20% 氮肥用量的处理下,长期氮肥减量是否会影响作物产量仍不明确。因此,开展生物炭和炭基肥施用的长期减排效应研究仍具有重要意义。

3.3 环境因子对 N₂O 排放和 NH₃ 挥发的影响

基肥期间, N₂O 排放量和 NH₃ 挥发量较高,主要由于土壤温度较奶白菜生长发育后期更高,以及多次灌溉的影响。温度是影响 N₂O 排放的重要因素,增温会促进 N₂O 的排放^[31]。同时,温度与 NH₃ 的挥发呈正相关^[32]。过饱和的土壤水分会导致土壤中氧气含量减少,从而促进反硝化过程^[33]。土壤温度升高、灌溉量增加以及干湿交替加剧,均会导致 N₂O 排放速率的增加^[34]。虽然两次追肥的施氮量和施肥方法相同,但第二次追肥时, N₂O 的排放量较低,可能与温度和土壤含水率的变化有关。12 月份, BC 处理的 N₂O 排放量高于 CON 处理,这可能是由于添加生物炭提高了 NH₄⁺-N 浓度^[7]。BF 和 BC 处理的土壤 NH₄⁺-N 含量显著低于 CON 处理 ($P < 0.05$),分别降低了 18.03% 和 11.40%,但两者之间无显著差异。此外, BF 和 BC 处理的土壤 NO₃⁻-N 含量亦低于 CON 处理。这表明, N₂O 排放和 NH₃ 挥发的减少与反应底物的减少密切相关^[35]。

3.4 减氮配施生物炭和炭基肥对产量和氮肥利用率的影响

在减氮 20% 的条件下,本研究发现 BF 和 BC 处理的奶白菜产量与 CON 处理无显著差异,说明减少氮肥施用并未显著降低奶白菜鲜重产量。这一现象部分归因于设施菜地土壤本身的有效氮含量较高。此外,生物炭的施用改善了土壤的理化性质,炭基肥则有利于氮素的缓慢释放,二者共同有助于维持作物的产量。在本研究中, BC 处理的氮肥利用率未显著高于 CON 处理,这表明生物炭的直接施用对提升氮素吸收的作用有限。宋世龙^[36]的研

究也表明,生物炭施用未显著增加春小麦的氮肥利用率。相比之下, BF 处理显著提升了氮肥利用率,这可能是由于炭基肥中的氮素缓慢释放,有助于减少氮肥的损失,提高作物对氮素的吸收,从而提高氮肥的利用率。李大伟等^[37]的研究也表明,稻壳炭基肥的施用使辣椒的产量提升了 26.3%,氮肥利用率提高了 138.1%。

在农田氮素减排措施中,与化学措施(如硝化抑制剂、脲酶抑制剂)和农艺管理措施(如覆膜、肥料分次深施等)相比,生物炭和炭基肥在秸秆资源化利用方面具有更大的优势。它们能够将农田废弃物转化为稳定的碳载体,同时兼具温室气体减排和土壤改良功能。生物炭具有长效性,而炭基肥通过养分缓释进一步减少氮素的损失。从成本效益的角度来看,生物炭和炭基肥有助于降低化肥的依赖,具备显著的经济效益。未来,应根据不同土壤类型优化施用措施,以最大化减排效益。

4 结论

1) 在减氮 20% 的基础上,设施菜地配施生物炭或炭基肥,与常规施肥相比,虽然奶白菜的产量未显著减少,但显著降低了 N₂O 排放和 NH₃ 挥发。

2) 炭基肥显著降低了单位氮肥下的 N₂O 排放和 NH₃ 挥发,并显著提高了氮肥利用率。

3) 研究表明,炭基肥施用不仅能减少设施菜地中的气体氮损失,还能提高氮肥利用效率,且其减排效果优于生物炭的直接施用。

参考文献:

- [1] 陈津赛,孙玮皓,王广帅,等. 不同施氮量对麦田土壤水稳性团聚体和 N₂O 排放的影响[J]. 应用生态学报, 2021, 32(11): 3961-3968.
CHEN J S, SUN W H, WANG G S, et al. Effects of different nitrogen application rates on soil water stable aggregates and N₂O emission in winter wheat field[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(11): 3961-3968.
- [2] SHANG Q Y, GAO C M, YANG X X, et al. 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.
- [3] 董星丰,陈强,李浩,等. 全球气候变化对我国高寒地区冻土温室气体排放的影响[J]. 土壤与作物, 2019, 8(2): 178-185.
DONG X F, CHEN Q, LI H, et al. Effects of climate change on permafrost greenhouse gas flux in alpine region of China[J]. Soils and Crops, 2019, 8(2): 178-185.
- [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.
ZHU Z L. Loss of fertilizer N from plants-soil system and the strategies and techniques for its reduction[J]. Soil and Environmental Sciences, 2000, 9(1): 1-6.

- [5] LIU L, XU W, LU X K, et al. Exploring global changes in agricultural ammonia emissions and their contribution to nitrogen deposition since 1980[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2022, 119(14): e2121998119.
- [6] 刘伯顺, 黄立华, 黄金鑫, 等. 我国农田氨挥发研究进展与减排对策[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2022, 30(6): 875-888. LIU B S, HUANG L H, HUANG J X, et al. Research progress toward and emission reduction measures of ammonia volatilization from farmlands in China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, 30(6): 875-888.
- [7] SHEN J L, TANG H, LIU J Y, et al. Contrasting effects of straw and straw-derived biochar amendments on greenhouse gas emissions within double rice cropping systems[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 188: 264-274.
- [8] 郭傲瑜, 金文, 刘志涛, 等. 秸秆与生物炭对棉田碱性土壤 NH_3 挥发与 N_2O 排放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2024, 43(2): 442-451. GUO J Y, JIN W, LIU Z T, et al. Effects of straw and biochar on NH_3 volatilization and N_2O emission from alkaline soils planted with cotton[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024, 43(2): 442-451.
- [9] FAN C H, CHEN H, LI B, et al. Biochar reduces yield-scaled emissions of reactive nitrogen gases from vegetable soils across China[J]. *Biogeosciences*, 2017, 14(11): 2851-2863.
- [10] MØRKVED P T, DÖRSCH P, BAKKEN L R. The N_2O product ratio of nitrification and its dependence on long-term changes in soil pH[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(8): 2048-2057.
- [11] 张水清, 张博, 岳克, 等. 生物质炭对华北平原 4 种典型土壤冬小麦生育前期氨挥发的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2021, 38(1): 127-134. ZHANG S Q, ZHANG B, YUE K, et al. Effects of biochar on NH_3 volatilization from four typical soils during early growth stage of winter wheat in the North China Plain[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(1): 127-134.
- [12] THANGARAJAN R, BOLAN N S, KUNHIKRISHNAN A, et al. The potential value of biochar in the mitigation of gaseous emission of nitrogen[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 612: 257-268.
- [13] 胡林松, 达布希拉图, 杨宇, 等. 施用生物炭和有机肥对新垦红壤氮素气态排放的影响[J]. *土壤通报*, 2024, 55(5): 1366-1375. HU L S, DABU X L T, YANG Y, et al. Effect of biochar and organic fertilizer application on nitrogen loss in gaseous state in newly reclaimed red soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2024, 55(5): 1366-1375.
- [14] SHI W, JU Y Y, BIAN R J, et al. Biochar bound urea boosts plant growth and reduces nitrogen leaching[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 701: 134424.
- [15] ZHANG A F, LIU Y M, PAN G X, et al. Effect of biochar amendment on maize yield and greenhouse gas emissions from a soil organic carbon poor calcareous loamy soil from Central China Plain[J]. *Plant and Soil*, 2012, 351: 263-275.
- [16] 乔志刚, 陈琳, 李恋卿, 等. 生物质炭基肥对水稻生长及氮素利用率的影响[J]. *中国农学通报*, 2014, 30(5): 175-180. QIAO Z G, CHEN L, LI L Q, et al. Effects of biochar fertilizer on growth and nitrogen utilizing rate of rice[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30(5): 175-180.
- [17] ZHU X, SHEN J L, LI Y, et al. Nitrogen emission and deposition budget in an agricultural catchment in subtropical central China[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 289: 117870.
- [18] SHEN J L, LI Y, WANG Y, et al. Soil nitrogen cycling and environmental impacts in the subtropical hilly region of China: evidence from measurements and modeling[J]. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 2022, 9(3): 407-424.
- [19] 张靖, 朱潇, 沈健林, 等. 生物有机肥与化肥配施对稻田氨挥发的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2022, 30(1): 15-25. ZHANG J, ZHU X, SHEN J L, et al. Effects of combined application of microbial organic fertilizer and chemical fertilizer on ammonia volatilization in a paddy field with double rice cropping[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, 30(1): 15-25.
- [20] 王朝辉, 刘学军, 巨晓棠, 等. 田间土壤氨挥发的原位测定: 通气法[J]. *植物营养与肥料学报*, 2002, 8(2): 205-209. WANG Z H, LIU X J, JU X T, et al. Field in situ determination of ammonia volatilization from soil: venting method[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8(2): 205-209.
- [21] 闫鹏, 张靖, 沈健林, 等. 有机无机肥配施对设施菜地 N_2O 排放和 NH_3 挥发的影响[J]. *农业现代化研究*, 2023, 44(4): 701-711. YAN P, ZHANG J, SHEN J L, et al. Effects of combined application of organic and chemical fertilizers on N_2O emission and NH_3 volatilization in protected vegetable soils[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2023, 44(4): 701-711.
- [22] 巨晓棠, 张翀. 论合理施氮的原则和指标[J]. *土壤学报*, 2021, 58(1): 1-13. JU X T, ZHANG C. The principles and indicators of rational N fertilization[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58(1): 1-13.
- [23] WANG F E, HE Z L, ZHANG X L, et al. Comparative effects of straw and biochar on N_2O emissions from acidic soils[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2024, 24(2): 2080-2090.
- [24] 李君薇. 长期施用生物炭和炭基肥对土壤 N_2O 排放及氮素固持的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2022. LI J W. Effects of long-term application of biochar and biochar-based fertilizer on soil N_2O emission and nitrogen fixation[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2022.
- [25] 陈红卫, 黄玲, 冯露, 等. 生物质炭基肥对农田土壤温室气体排放年际变化的影响[J]. *浙江农业学报*, 2017, 29(6): 977-981. CHEN H W, HUANG L, FENG L, et al. Effects of biochar based fertilizer on seasonal variation of greenhouse gas emissions[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2017, 29(6): 977-981.
- [26] 李占台, 李长青, 李艳梅, 等. 不同施肥模式对设施生菜产量和氮损失的影响[J]. *土壤通报*, 2022, 53(1): 135-143. LI Z T, LI C Q, LI Y M, et al. Effects of different fertilization patterns on yield and nitrogen loss of lettuce in greenhouse[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2022, 53(1): 135-143.
- [27] 乔丹, 张树清, 陈延华, 等. 基施控释氮肥提高华北露地大白菜产量并减少土壤 NH_3 和 N_2O 排放[J]. *植物营养与肥料学报*, 2022, 28(6): 1122-1133. QIAO D, ZHANG S Q, CHEN Y H, et al. Basal application of

- controlled-release nitrogen fertilizer increases Chinese cabbage production and decreases soil NH₃ and N₂O emissions in Northern China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, 28(6): 1122-1133.
- [28] 薛建文, 庞桂斌, 丛鑫, 等. 不同灌水和生物炭量对夏玉米农田氨挥发的影响 [J]. *节水灌溉*, 2022(7): 29-35.
XUE J W, PANG G B, CONG X, et al. Effects of different irrigation and biochar amounts on NH₃ volatilization in summer maize fields[J]. *Water Saving Irrigation*, 2022(7): 29-35.
- [29] Sun X, Zhong T, Zhang L, et al. Reducing ammonia volatilization from paddy field with rice straw derived biochar[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 660: 512-518.
- [30] 赵杭, 周旋, 王艺折, 等. 芦荻生物质炭基肥研制及其对水稻土氮损失的影响 [J]. *水土保持学报*, 2022, 36(03): 319-326.
ZHAO HANG, ZHOU X, WANG Y Z, et al. Effect of biochar fertilizer prepared by reeds with different techniques on nitrogen loss in paddy soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(03): 319-326.
- [31] 韩雪, 陈宝明. 增温对土壤 N₂O 和 CH₄ 排放的影响与微生物机制研究进展 [J]. *应用生态学报*, 2020, 31(11): 3906-3914.
HAN X, CHEN B M. Progress in the effects of warming on soil N₂O and CH₄ emission and the underlying microbial mechanisms[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(11): 3906-3914.
- [32] 杨国英, 郭智, 刘红江, 等. 稻田氨挥发影响因素及其减排措施研究进展 [J]. *生态环境学报*, 2020, 29(9): 1912-1919.
YANG G Y, GUO Z, LIU H J, et al. Research progress on factors affecting ammonia volatilization and its mitigation measures in paddy fields[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, 29(9): 1912-1919.
- [33] 曹文超, 宋贺, 王娅静, 等. 农田土壤 N₂O 排放的关键过程及影响因素 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(10): 1781-1798.
CAO W C, SONG H, WANG Y J, et al. Key production processes and influencing factors of nitrous oxide emissions from agricultural soils[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(10): 1781-1798.
- [34] 胡春胜, 张玉铭, 秦树平, 等. 华北平原农田生态系统氮素过程及其环境效应研究 [J]. *中国生态农业学报*, 2018, 26(10): 1501-1514.
HU C S, ZHANG Y M, QIN S P, et al. Nitrogen processes and related environmental effects on agro-ecosystem in the North China Plain[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(10): 1501-1514.
- [35] 李粤丰, 闫鹏, 沈健林, 等. 有机无机肥配施对城郊设施甜玉米地 N₂O 排放的影响 [J]. *农业现代化研究*, 2024, 45(2): 326-335.
LI Y F, YAN P, SHEN J L, et al. Effect of combined application of organic and inorganic fertilizers on N₂O emissions from a peri-urban protected vegetable field with sweet corn planting[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2024, 45(2): 326-335.
- [36] 宋世龙. 减氮配施生物质炭对土壤有机碳、春小麦氮素利用及产量的影响 [D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2022.
SONG S L. Effects of nitrogen reduction combined with biochar on soil organic carbon, nitrogen utilization and yield of spring wheat[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2022.
- [37] 李大伟, 周加顺, 潘根兴, 等. 生物质炭基肥施用对蔬菜产量和品质以及氮素农学利用率的影响 [J]. *南京农业大学学报*, 2016, 39(3): 433-440.
LI D W, ZHOU J S, PAN G X, et al. Effect of biochar-based compound fertilizer on the yield, fruit quality and N use efficiency of vegetables[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2016, 39(3): 433-440.

(责任编辑: 孟岑)