

汪辰, 鲍佩佩, 纪娱, 孙乔, 李青山, 于海洋, 张震. 2025. 生物炭施用对植烟系统土壤氧化亚氮排放的影响. 生态学杂志, 44(9): 2948–2955.

Wang C, Bao PP, Ji Y, Sun Q, Li QS, Yu HY, Zhang Z. 2025. Effects of biochar application on nitrous oxide emissions from tobacco-planted soils. *Chinese Journal of Ecology*, 44(9): 2948–2955.

生物炭施用对植烟系统土壤氧化亚氮排放的影响

汪辰¹ 鲍佩佩^{1,2} 纪娱¹ 孙乔¹ 李青山³ 于海洋^{1*} 张震¹

(¹安徽农业大学资源与环境学院, 合肥 230036; ²中山大学生态学院, 深圳 518000; ³安庆师范大学资源环境学院, 安徽安庆 246003)

摘要 采用室内培养和荟萃分析方法探究生物炭施用对植烟系统土壤氧化亚氮(N_2O)排放的影响及其机制。室内培养试验共设置 6 个处理, 分别为不施用氮肥和生物炭(N0B0)、不施用氮肥但施用生物炭(N0B100)、施用氮肥但不施用生物炭(N100B0)、减少 20% 氮肥施用但不施用生物炭(N80B0)、施用氮肥同时施用生物炭(N100B100)和减少 20% 氮肥施用同时施用生物炭(N80B100), 并测定 N_2O 排放通量、铵态氮(NH_4^+)和硝态氮(NO_3^-)含量; 荟萃分析 10 篇已发表的野外试验文章数据, 以期寻找最佳施肥量和生物炭施用量, 减少植烟系统土壤 N_2O 排放。结果表明: (1) 室内培养试验各处理土壤 N_2O 排放速率随培养时间呈快速下降并趋于平缓趋势。与 N0B0 处理相比, 施用氮肥处理显著增加 N_2O 累积排放量; 与 N100B0(或 N100B100)处理相比, N80B0(或 N80B100)处理显著减少 N_2O 累积排放量; (2) 整个培养试验期间, 相同氮肥施用水平下, 施用生物炭处理显著降低土壤 N_2O 排放; (3) 各处理土壤 N_2O 排放与土壤 NH_4^+ 含量呈显著正相关, 而与土壤 NO_3^- 含量呈显著负相关; (4) 对比其他作物系统, 植烟系统土壤 N_2O 排放系数(EFs)相对较小, 且减氮措施和生物炭施用均可有效降低植烟系统 N_2O 排放。研究结果可为合理施肥与生物炭施用以减少植烟系统 N_2O 排放提供理论依据和数据参考, 对助力实现农业生态系统“碳中和”以及农业可持续发展具有重要意义。

关键词 生物炭; 温室气体; 烟田; 荟萃分析; 农业碳中和

Effects of biochar application on nitrous oxide emissions from tobacco-planted soils. WANG Chen¹, BAO Peipei^{1,2}, JI Yu¹, SUN Qiao¹, LI Qingshan³, YU Haiyang^{1*}, ZHANG Zhen¹ (¹College of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China; ²School of Ecology, Sun Yat-Sen University, Shenzhen 518000, China; ³School of Resource and Environment, Anqing Normal University, Anqing 246003, Anhui, China).

Abstract: We investigated the effects of biochar application on nitrous oxide (N_2O) emission in tobacco-planted soils by laboratory incubation experiment and meta-analysis. There were six treatments in the incubation experiment: no nitrogen fertilizer and no biochar application (N0B0), no nitrogen fertilizer but biochar application (N0B100), nitrogen fertilizer but no biochar application (N100B0), reducing nitrogen fertilizer by 20% and no biochar application (N80B0), nitrogen fertilizer and biochar application (N100B100), and reducing nitrogen fertilizer by 20% and biochar application (N80B100). N_2O fluxes, ammonium (NH_4^+) and nitrate (NO_3^-) contents were measured. Furthermore, a meta-analysis was performed to explore the optimal fertilization and biochar application rates to reduce N_2O emissions from tobacco-planted soils using data from 10 peer-reviewed papers. Results showed that: (1) N_2O fluxes of each treatment decreased rapidly and tended to be stable during the incubation duration. Compared with N0B0 treatment, nitrogen fertilization significantly increased cumulative N_2O emissions. Compared with N100B0 (or N100B100) treatment, N80B0 (or N80B100) treatment significantly reduced the cumulative N_2O emission. (2) During the whole incubation period, biochar application significantly reduced N_2O emission under the same nitrogen fertilizer application level. (3) N_2O emissions positively correlated with NH_4^+ content, and negatively correlated with NO_3^- content. (4) Compared with other crop systems, N_2O emission factors (EFs) in the tobacco-planted system are relatively smaller. Nitrogen fertilizer reduction and biochar application

国家自然科学基金项目(42307389)资助。

收稿日期: 2024-08-23 接受日期: 2025-05-26

* 通信作者 E-mail: hyyu@ahau.edu.cn

could significantly mitigate N_2O emission from tobacco-planted soils. These findings provide a theoretical basis for optimizing fertilization strategies and biochar implementation to reduce N_2O emissions from tobacco-planted systems, with important significance for realizing carbon neutrality and sustainable agricultural development in agricultural ecosystems.

Keywords: biochar; greenhouse gas; tobacco field; meta-analysis; agricultural carbon neutrality

氧化亚氮(N_2O)是大气中一种重要的温室气体,单分子 N_2O 百年尺度增温潜势为二氧化碳(CO_2)的 273 倍(IPCC,2021)。农业土壤是重要的 N_2O 排放源,据统计,农田 N_2O 年排放量占全球人为 N_2O 排放总量的 35% 以上(Davidson,2009)。烟草是我国重要的经济作物,通常情况下,烟农为了获得更高的烟草产量和品质往往投入较多化学肥料(赵伟东等,2023)。过量氮肥施用使得植烟系统土壤氮素大量损失和 N_2O 排放增加,同时还会导致农田面源污染、加剧土壤酸化和板结等系列环境问题。烟草种植是农业活动的重要组成部分,厘清和揭示植烟系统土壤 N_2O 排放及其机制对实现生态健康和农业可持续发展具有重要意义。此外,不影响烟叶产量和品质的情况下,减少氮肥施用、优化管理措施实现植烟系统土壤 N_2O 减排也至关重要。

生物炭施用已被认为是一种有效改善土壤性质、提高固碳功能的重要手段(Liu *et al.*,2024)。研究表明(Baggs *et al.*,2010; Cayuela *et al.*,2014; Ameloot *et al.*,2016),生物炭施用可减少农田土壤 N_2O 排放,且生物炭施用介导的土壤 pH 值升高可能是减少 N_2O 排放的重要原因之一。此外,生物炭施用还可能通过降低基质有效性(如溶解性有机碳(DOC))来限制反硝化作用,减少 N_2O 排放(Ameloot *et al.*,2016)。然而,以往的研究结果并不统一:有研究发现,生物炭施用对土壤 N_2O 排放无显著影响(He *et al.*,2017,2021b),甚至可能增加 N_2O 排放(Wei *et al.*,2020),其原因可能是生物炭施用对土壤产 N_2O 基质的影响不明显或者可显著增加硝化和反硝化作用关键功能菌群落丰度(He *et al.*,2021b; Tang *et al.*,2021)。植烟系统中,生物炭施用对土壤 N_2O 排放的影响也并不一致(Huang *et al.*,2019; Zhang *et al.*,2021; Tang *et al.*,2023),且相关机制亟需进一步深入探究。更重要的是,实际生产中如何规范施肥量、生物炭施用量使得植烟系统土壤 N_2O 排放最少的系统研究尚未报道。

本研究通过室内培养试验和数据荟萃分析的方法,探究植烟系统土壤 N_2O 排放对生物炭施用的响应及其机制,旨在:(1)探究不同施肥措施下生物炭

施用对植烟系统土壤 N_2O 排放的影响;(2)阐明植烟系统土壤 N_2O 排放对生物炭施用的可能响应机制;(3)评估植烟系统土壤 N_2O 排放的减氮效应和生物炭施用效应。结果可为减少植烟系统土壤 N_2O 排放提供理论依据和数据参考,对助力农业生态系统“双碳”目标的实现、减缓全球气候变暖以及生态环境保护等具有重要的实践意义。

1 材料与方法

1.1 供试土壤和试验处理

供试土壤取自中国农业科学院烟草研究所宣城试验基地周边一烟草种植田($30^{\circ}46'N$, $119^{\circ}36'E$)。供试土壤(0~20 cm)按照五点法采集于同一田块,剔除小石子和根系后遮荫风干,过 2 mm 筛备用。供试土壤基础理化性质为:土壤 pH 6.15、有机质 $18.46 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全氮 $1.16 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全磷 $0.68 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全钾 $11.63 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、碱解氮 $102.49 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、有效磷 $59.34 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效钾 $187.74 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。室内培养试验共设 6 个处理,分别为不施用氮肥和生物炭(N0B0)、不施用氮肥但施用生物炭(N0B100)、施用氮肥但不施用生物炭(N100B0)、减少 20%氮肥施用但不施用生物炭(N80B0)、施用氮肥同时施用生物炭(N100B100)和减少 20%氮肥施用同时施用生物炭(N80B100),每个处理共设置 15 个重复。

室内培养试验具体步骤:将 20 g 风干土转移至体积为 120 mL 的血清瓶中,加入去离子水(所有添加溶液均用移液管均匀滴入,使其尽可能均匀分布于土壤中),保持水分状况与野外施肥后平均水平一致(约为 60%田间持水量),于暗箱培养,培养周期为 30 d,培养温度为 25°C 。培养中,每隔 2 d 去塞通气 0.5 h,并补水 1 次以补充因蒸发导致的水分损失。氮肥采用尿素颗粒,正常氮肥处理添加 $3.75 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (对应野外大田试验氮肥施用量 $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),供试生物炭为水稻秸秆炭,购于南京市智融联科技有限公司,热裂解炭化温度为 500°C ,生物炭施用量为 $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (对应野外大田试验生物炭施用量 $5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)。

1.2 气体 N₂O 采样和监测

室内培养试验于第1、3、5、7、9、12、15、18、24和30 d进行气体采集,共计10次。每次气体采集前,需提前6 h进行换气与密封操作。首先,利用704硅胶将瓶塞与瓶口缝隙紧密封闭,待硅胶完全干燥后,使用注射器尽可能排空血清瓶内气体,随后立即引入新鲜空气,并使瓶内气体与外界达到平衡状态。此换气过程需重复3次,以确保血清瓶内充满新鲜空气。随后,将血清瓶密封6 h,之后固定选取每组处理3个血清瓶作为重复样本,用注射器快速反复抽提5次以混匀血清瓶内气体,然后使用带有三通阀的注射器迅速采集20 mL气体,并立即进行N₂O浓度的测定。

N₂O浓度采用安捷伦气相色谱仪(7890B, USA)测定。检测器为⁶³Ni电子捕获器(ECD),检测器温度为350℃,载气为氩甲烷(95%氩气+5%甲烷),流速为55 mL·min⁻¹。N₂O标准气体由国家标准物质中心提供。

1.3 土壤理化性质分析

N₂O气体样品采集后,每组处理均需测定铵态氮(NH₄⁺)和硝态氮(NO₃⁻)含量。随机从各处理组中剩下的12个血清瓶中取出3个(作为3次重复,每3次采样共用相同的3个血清瓶土壤)。取出5 g土壤,按水土比5:1的比例加入25 mL的2 mol·L⁻¹ KCl溶液,随后在25℃的恒温振荡器上振荡1 h(转速为250 r·min⁻¹)。振荡20 min后静置过滤,用流动分析仪(San++ System, Skalar Analytical BV, Breda, Netherlands)测定所得滤液中NH₄⁺和NO₃⁻浓度。

1.4 数据处理与挖掘

1.4.1 N₂O排放速率和累积排放量的计算 N₂O排放速率和累积排放量的计算公式如下:

$$F = \frac{(C_s - C_a) \times \rho(N_2O) \times V}{mT}$$

式中, F 为培养瓶内N₂O排放速率($\mu\text{g N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$); C_s 为N₂O浓度($\text{cm}^3 \cdot \text{m}^{-3}$); C_a 为室外新鲜空气中N₂O浓度(空白培养瓶内N₂O浓度)($\text{cm}^3 \cdot \text{m}^{-3}$); $\rho(N_2O)$ 为N₂O在25℃时的密度,其值为 $1.12 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; V 为培养瓶体积(mL); m 为培养瓶内相当于干土的土壤质量(g); T 为两个相邻采样时间间隔(d)。

N₂O累积排放通量公式计算为:

$$E_{N_2O} = \sum_{i=1}^n (F_i + F_{i+1})/2 \times (t_{i+1} - t_i) \times 10^{-3}$$

式中, E_{N_2O} 表示N₂O累积排放量($\text{mg N} \cdot \text{kg}^{-1}$), F 为

N₂O排放速率($\mu\text{g N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$), i 表示第 i 次气体采样, $t_{i+1}-t_i$ 表示两相邻测定间隔时间(d), n 为测定次数, 10^{-3} 为单位转换系数。

1.4.2 以往研究数据的挖掘 利用Web of Science和中国知网(CNKI)期刊数据库,以“烟草”和“N₂O”为关键词,检索2024年4月前已发表的关于植烟系统土壤N₂O排放的野外或盆栽试验性文献,进行荟萃分析(Meta分析)。筛选标准为:(1)研究结果必须同时包含施肥(或生物炭添加)和不施肥(或正常施肥)两个处理;(2)观测数据必须是一个完整的烟草生长周期;(3)文献需给出明确的田间管理措施(施肥量)、环境因子(土壤理化性质和气候因素)以及N₂O排放系数(emission factors, EFs)(%)=(施肥处理N₂O排放-不施肥处理N₂O排放量)/施肥量×100%)值等具体信息。基于以上筛选标准,最终获得10篇有效文献(Huang *et al.*, 2019; Yan *et al.*, 2019; 蒋雨洲等, 2020; 孟祥瑞, 2021; Yao *et al.*, 2021; 殷全玉等, 2021; He *et al.*, 2021a; He *et al.*, 2023; Tang *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2023),共计32组相互独立的有效数据。

采用Metawin 2.0分析施肥条件下生物炭添加对植烟系统土壤N₂O排放的效应值(Effect size),具体步骤为:(1)计算每一组试验组数据值/对照组数据值的自然对数;(2)计算权重,即试验组和对照组标准偏差(Sd)的平方/数据值(Mean)的平方乘以各自处理的平行数量(n)的倒数之和(Meng *et al.*, 2023)。采用拔靴法(Rosenberg *et al.*, 2000)通过4999次迭代计算效应值的95%置信区间(95% CIs),若95% CIs与0不相交,则表明效应值显著;反之,不显著(于海洋等, 2022)。

1.5 统计分析

试验所得数据用SPSS软件包(SPSS Inc., Chicago, IL, USA)进行处理分析,利用Origin 2024(OriginLab, USA)软件制图。所有处理间N₂O累积排放量用单因素方差分析(one-way ANOVA)检验,线性回归用最小显著性差异法(LSD)($P < 0.05$)检验。氮肥和生物炭施用及其交互作用对N₂O累积排放量用双因素方差分析(two-way ANOVA)进行分析。

2 结果与分析

2.1 N₂O累积排放量

整体而言,各处理土壤N₂O排放速率随培养时间呈快速下降并趋于平缓趋势(图1A)。各处理土

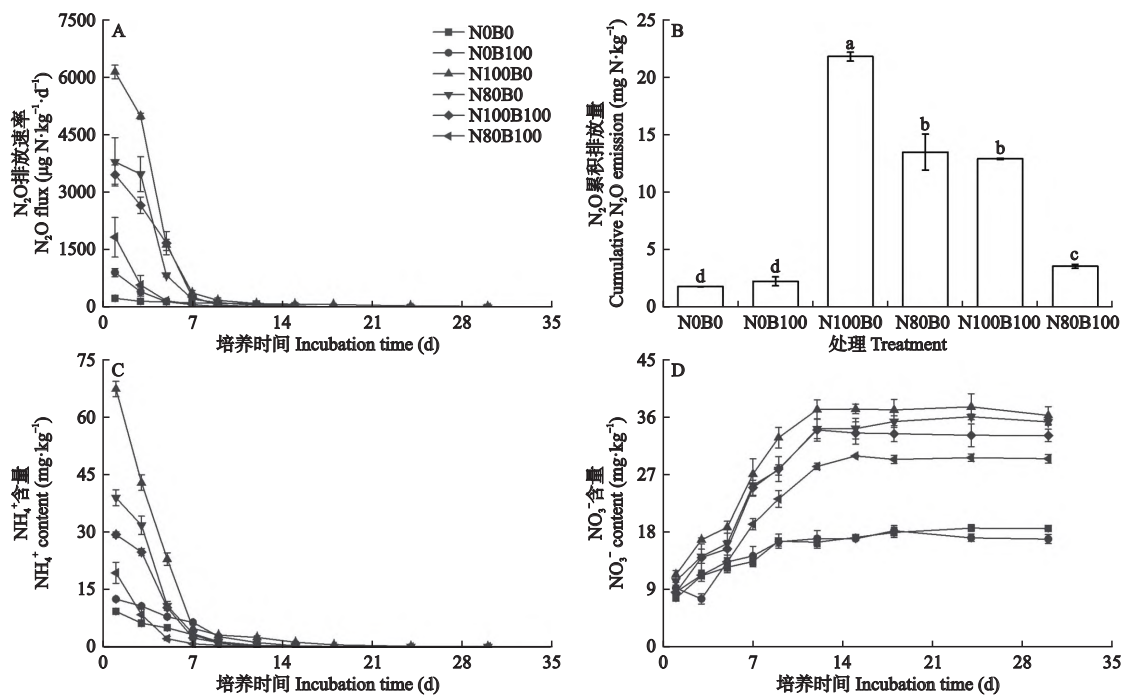


图1 不同施肥条件下生物炭施用对植烟系统土壤 N₂O 排放速率(A)、N₂O 累积排放量(B)、铵态氮(NH₄⁺)含量(C)以及硝态氮(NO₃⁻)含量(D)的影响

Fig.1 Effects of biochar application on N₂O flux (A), cumulative N₂O emission (B), ammonium nitrogen (NH₄⁺) content (C), and nitrate nitrogen (NO₃⁻) content (D) in tobacco-planted soil under different fertilization conditions

注: 图B中不同小写字母含义表示处理间存在显著差异($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters in Fig. B denote significant differences between treatments ($P<0.05$).

壤 N₂O 排放速率均在第 1 天达到最大值: N100B0 处理土壤 N₂O 排放速率最高, 为 6138 μg N · kg⁻¹ · d⁻¹, 而 N0B0 处理土壤 N₂O 排放速率最低, 为 239 μg N · kg⁻¹ · d⁻¹ (图 1A)。整个培养时段内, 与 N0B0 相比, N0B100 处理并未显著增加土壤 N₂O 累积排放量 ($P>0.05$), 施氮处理 (N100B0 和 N80B0) 显著增加土壤 N₂O 累积排放量, 增幅为 652% ~ 1115% ($P<0.05$) (图 1B)。对比 N100B0 处理, N80B0 处理使得土壤 N₂O 累积排放量显著降低了 38%; 相较于 N100B0 处理, N100B100 处理显著降低土壤 N₂O 累积排放量, 降幅达 41%; 对比 N80B0 处理, N80B100 处理使得土壤 N₂O 累积排放量显著降低了 74% ($P<0.05$, 图 1B)。双因素方差分析表明, 氮肥和生物炭施用对植烟系统土壤 N₂O 累积排放量具有显著的交互作用 (表 1)。

2.2 NH₄⁺ 和 NO₃⁻ 含量

培养期间, 各处理土壤 NH₄⁺ 含量随培养时间呈快速下降并趋于平缓趋势 (图 1C)。培养结束时, 各土壤 NH₄⁺ 含量的减少量表现为 N100B0>N80B0>N100B100>N80B100>N0B100>N0B0 (图 1C)。与 NH₄⁺ 含量变化趋势相反, 在培养前期 (1~14 d), 各

处理土壤 NO₃⁻ 含量呈快速增加, 并在培养后期 (14~30 d) 趋于平缓 (图 1D)。各土壤 NO₃⁻ 含量整体呈现: N100B0>N80B0>N100B100>N80B100>N0B0>N0B100 (图 1D)。线性回归分析结果表明, 土壤 NH₄⁺ 含量与 N₂O 排放速率呈极显著正相关 ($P<0.0001$; 图 2A), 而 NO₃⁻ 含量与 N₂O 排放速率呈极显著负相关 ($P<0.0001$; 图 2B)。

2.3 植烟系统 N₂O 排放系数和生物炭施用条件下 N₂O 的减排效果

通过分析以往研究数据发现, 植烟系统土壤

表 1 室内培养试验中氮肥和生物炭施用对植烟系统土壤 N₂O 累积排放量的双因素方差分析

Table 1 Two-way ANOVA testing effects of nitrogen and biochar application on N₂O emissions in tobacco-planted soils in the incubation experiment

影响因素 Influencing factor	自由度 df	N ₂ O 累积排放量 Cumulative N ₂ O emission		
		均方 DS	F	P
氮肥 Nitrogen	2	355.73	511.73	<0.001
生物炭 Biochar	1	168.79	242.81	<0.001
氮肥×生物炭 Nitrogen×biochar	2	49.16	70.73	<0.001
模型 Model	5	195.72	281.54	<0.001
误差 Error	12	0.70	-	-

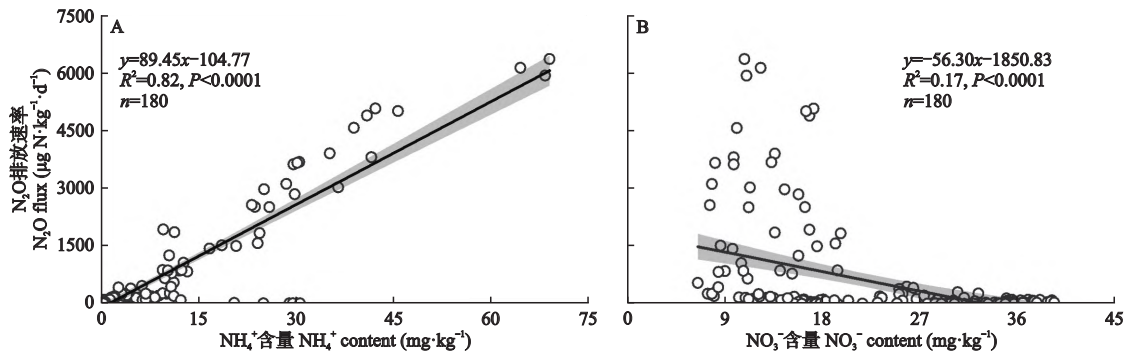


图2 植烟系统土壤 N_2O 排放与铵态氮 (NH_4^+) 含量 (A) 以及硝态氮 (NO_3^-) 含量 (B) 的线性关系

Fig.2 Linear relationship between N_2O emission and ammonium nitrogen (NH_4^+) content (A) and nitrate nitrogen (NO_3^-) content (B) in tobacco-planted soils

NOB0 处理平均 N_2O 排放量为 $0.51 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$, 而 N100B0 处理平均 N_2O 排放量为 $2.24 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$; 可见, 施肥显著增加 N_2O 排放 ($P < 0.001$, 图 3)。植烟系统 N_2O 排放系数 EF 为 0.45% ($0.29\% \sim 0.98\%$), 对比粮食作物或其他经济作物, 植烟系统土壤 N_2O 排放系数最低, 这些作物系统 N_2O 排放系数排序大小为: 茶树 > 小麦 > 玉米 > 蔬菜 > 水果 > 水稻 > 烟草 (表 2)。

Meta 分析结果表明, 氮肥施用导致的 N_2O 排放效应值为 0.52 (95% CIs: $0.42 \sim 0.81$), 这表明氮肥施用显著增加植烟系统土壤 N_2O 排放 ($P < 0.05$, 图 4A)。对于不同氮肥施用量而言, 小于 $50 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ 氮肥投入时, 氮肥施用导致的 N_2O 排放效应值为 0.42 (95% CIs: $0.35 \sim 0.51$); 而当氮肥投入为 $50 \sim 80 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和大于 $80 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 氮肥施用导

致的 N_2O 排放效应值分别为 1.48 (95% CIs: $1.08 \sim 1.72$) 和 1.74 (95% CIs: $1.49 \sim 2.01$)。可见, 高氮肥量对植烟系统土壤 N_2O 排放的效应显著高于低氮肥量 ($P < 0.001$)。

生物炭施用显著降低植烟系统土壤 N_2O 排放 ($P < 0.05$, 图 4B), 效应值为 -0.30 (95% CIs: $-0.35 \sim -0.19$)。不同生物炭施用量情况下, N_2O 排放均显著降低 ($P < 0.05$), 其中生物炭施用量为小于 10 和 $10 \sim 20 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 效应值分别为 -0.37 (95% CIs: $-0.50 \sim -0.32$) 和 -0.36 (95% CIs: $-0.52 \sim -0.01$), 而大于 $20 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 效应值仅为 -0.04 (95% CIs: $-0.12 \sim -0.03$)。可见, 不同生物炭施用量导致的 N_2O 排放效应值存在显著差异 ($P < 0.01$)。

3 讨论

3.1 生物炭施用对植烟系统土壤 N_2O 排放的影响及其机制

培养试验结果表明, NOB0 与 NOB100 处理植烟系统土壤 N_2O 排放未达显著差异水平 ($P > 0.05$, 图 1B)。这与以往研究结果并不一致 (Ameloot *et al.*, 2016; Wei *et al.*, 2020)。以往研究表明, 生物炭施用可明显降低土壤 N_2O 排放 (Ameloot *et al.*, 2016), 或显著增加土壤 N_2O 排放 (Wei *et al.*, 2020); 造成生物炭施用效应不同的原因可能与生物炭类型、土壤理化性质以及环境因子存在差异密切相关 (Tang *et al.*, 2021)。本研究中, NOB0 处理和 NOB100 处理土壤 NH_4^+ 和 NO_3^- 含量并未有明显差异 (图 1C 和 1D), 表明单施生物炭并未明显增加或降低植烟系统土壤 N_2O 排放的机制可能是生物炭施用既可以提供 N_2O 产生所需的可利用碳氮含量, 又能够吸附土壤可溶性有机碳和产 N_2O 底物, 导致

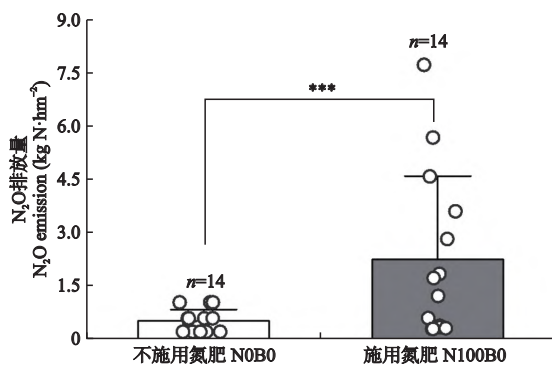


图3 施肥对植烟系统土壤 N_2O 排放的影响

Fig.3 Effects of nitrogen fertilization on N_2O emission from tobacco-planted soils

注: *** 表示施用氮肥处理 (N100B0) 和不施用氮处理 (NOB0) 之间在 $P < 0.001$ 水平上差异显著。n 表示样本量。

Note: The triple asterisks (***) denote a statistically significant difference ($P < 0.001$) between the nitrogen fertilizer treatment (N100B0) and the non-nitrogen fertilizer treatment (NOB0). The n values represent the number of independent observations.

表 2 不同作物系统 N₂O 排放系数 (N₂O EFs) 的比较
Table 2 Comparison of N₂O emission factors (N₂O EFs) among different crop systems

作物系统 Crop systems	样本量 <i>n</i>	施氮量 Nitrogen application rate (kg N · hm ⁻²)	N ₂ O 排放系数 N ₂ O EFs (%)	95%置信 区间下限 95% CIs Min.	95%置信 区间上限 95% CIs Max.	参考文献 Reference
水稻 Rice	17	193	0.68	—	—	Yu <i>et al.</i> , 2023
小麦 Wheat	20	101	1.21	—	—	
玉米 Maize	20	119	1.06	—	—	
蔬菜 Vegetable	78	233	0.94	0.89	0.99	
水果 Fruit	208	403	0.84	—	—	
茶树 Tea	221	427	1.72	0.25	5.09	本研究 This study
烟草 Tobacco	14	66	0.45	0.29	0.98	

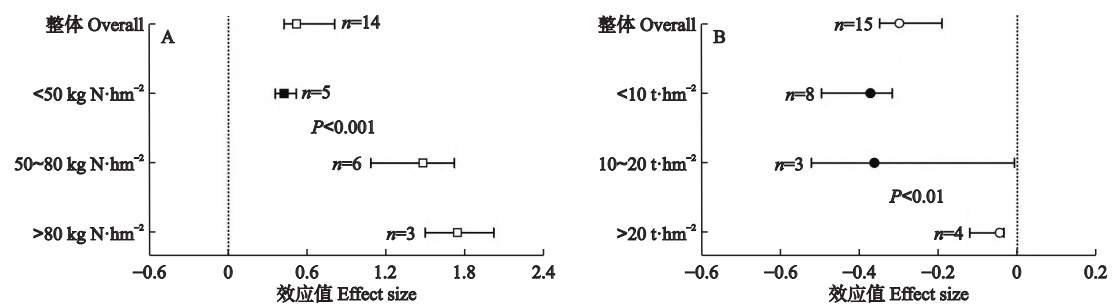


图 4 不同氮肥 (A) 和生物炭施用量 (B) 对植烟系统土壤 N₂O 排放的差异影响
Fig.4 Effects of different nitrogen fertilization (A) and biochar application rates (B) on N₂O emissions from tobacco-planted systems
注: 实心形状表示该情景与其他情景存在显著差异 (A: $P<0.001$; B: $P<0.01$)。
Note: Solid shape indicates a significant difference between this scenario and the others (A: $P<0.001$; B: $P<0.01$)。

硝化和反硝化作用相关微生物可利用的能量和底物含量并未发生明显改变 (He *et al.*, 2017; 李青山等, 2020)。

与单施氮肥处理 (N100B0 或 N80B0) 相比, 生物炭施用 (N100B100 或 N80B100) 显著降低植烟系统土壤 N₂O 累积排放量 ($P<0.05$, 图 1B), 且氮肥和生物炭施用对植烟系统土壤 N₂O 累积排放量具有显著的交互作用 ($P<0.001$, 表 1)。这说明施氮条件下, 生物炭施用能够显著降低植烟系统土壤 N₂O 排放 (Huang *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2023)。生物炭施用降低农田土壤 N₂O 排放的可能原因有: (1) 生物炭多孔结构能够吸附和固定游离的有效态氮, 使得硝化作用的底物含量降低, 从而抑制 N₂O 排放 (Kammann *et al.*, 2012); (2) 土壤有机碳含量低是反硝化作用发生的限制因子之一, 生物炭的吸附作用导致土壤 DOC 浓度明显降低 (Rogovska *et al.*, 2011), 使得关键功能微生物所需能量受限、活性降低, 从而降低了土壤反硝化潜力和 N₂O 排放 (Felber *et al.*, 2014); (3) 生物炭较大的比表面积和多孔特性还能吸附 N₂O、NO 等气体, 减缓 N₂O 排放 (Wan *et al.*, 2009); (4) 生物炭会在土壤表面形成一层高

密度层, 进而抑制 N₂O 排放 (Feng *et al.*, 2022)。本研究中, N₂O 排放与土壤 NH₄⁺ 含量呈显著正相关, 与 NO₃⁻ 含量呈显著负相关 ($P<0.0001$, 图 2), 表明氮素直接底物是植烟系统土壤 N₂O 产生和排放的重要因素 (李青山等, 2020)。土壤 NH₄⁺ 和 NO₃⁻ 含量是硝化和反硝化作用的直接底物, 生物炭施用可能会通过影响底物含量进而介导植烟系统土壤 N₂O 产生和排放 (Zhang *et al.*, 2023)。本研究结果表明, 对应施用氮肥处理下, 生物炭施用降低了土壤 NH₄⁺ 和 NO₃⁻ 含量, 其原因可能与生物炭独特的性质增强了对 NH₄⁺ 和 NO₃⁻ 的吸附有关。

然而, 也有与本研究相左的研究结果 (Chen *et al.*, 2015; Agegnehu *et al.*, 2016; Wei *et al.*, 2020), 即生物炭施用也有可能增加植烟系统土壤 N₂O 排放, 其原因可能是: (1) 生物炭施用可衍生出高浓度的不稳定有机碳, 促进土壤反硝化作用 (李青山等, 2021; Feng *et al.*, 2022); (2) 生物炭施用能够提高土壤中可溶性有机氮含量, 显著提高了氨氧化菌的丰度、加速硝化作用, 进而也提升了为反硝化作用提供 NO₃⁻ 含量的能力 (Tang *et al.*, 2023)。因此, 生物炭施用对植烟系统土壤 N₂O 排放的影响机制还亟需

进一步系统地深入研究,特别是大田条件下,不确定因素较多的情况下生物炭是否能够有效减少土壤 N_2O 排放还需进一步验证。需要注意的是,生物炭施用需保证烟叶产量和品质不受损,进而实现经济产出和生态环境效益双收。

3.2 不确定性与未来的研究方向

Meta 分析发现,施氮显著增加植烟系统 N_2O 排放,这与本培养试验结果相一致(图 1B 和图 3)。对比不同作物系统,植烟系统 N_2O 排放系数较小,这可能是由于植烟系统中氮肥施用总量较少的原因(表 2)。我国是烟草种植和消费大国,截至 2021 年,中国烟草种植面积达 100 万 hm^2 (殷全玉等, 2021)。通过分析植烟系统 N_2O 排放系数、施氮总量和种植总面积,发现我国植烟系统 N_2O 年平均排放 3.0 Gg, 约为茶园 N_2O 排放的 7% (Yu *et al.*, 2023), 占农业土壤 N_2O 排放的 0.43% (黄耀, 2006), 整体排放量较少。但这并不意味着植烟系统 N_2O 排放可以忽视。此外,本研究估算具有较大的不确定性,例如:不同地区植烟系统施氮量、水分含量等土壤性质、气候环境因子等差异显著,可能导致 N_2O 排放系数差异明显。

在施氮情况下生物炭施用显著降低植烟系统 N_2O 排放(图 4B), 这进一步验证了培养试验结果。Meta 分析结果表明,在施氮量不超过 $50 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、生物炭施用量不超过 $20 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的大田野外情况下, N_2O 排放量可控制在较低范围(图 4), 有利于植烟系统 N_2O 减排。尽管本研究表明合理施肥与生物炭施用可减少植烟系统 N_2O 排放,但仍存在一些局限性:

(1) 室内培养试验的结果需进一步在大田试验中验证。烟草生长过程中会吸收利用一部分氮素,如何提高氮素利用率,减少施氮水平还需进一步研究。

(2) 本研究收集的大田试验数据量较少,应加强我国烟草种植大省,如云南、贵州和河南等 N_2O 排放的研究,以减少结果不确定性,准确评估植烟系统 N_2O 排放量。

(3) 生物炭施用条件下参与 N_2O 产生的关键微生物群落丰度、结构和活性可能会发生改变(Tang *et al.*, 2023), 因此未来还需系统深入植烟系统土壤 N_2O 排放的微生物机制研究(何美霞等, 2023), 并结合不同氮肥和生物炭施用比例等合理的优化田间管理,为实现植烟系统烟草产量、品质提升协同 N_2O 的进一步减排提供理论依据和数据参考。

4 结 论

室内培养结果表明,对比不施肥处理,单施生物炭并未改变植烟系统土壤 N_2O 排放;相同氮肥施用水平下,施用生物炭处理显著降低土壤 N_2O 排放。线性回归分析表明,各处理土壤 N_2O 排放与土壤 NH_4^+ 含量呈显著正相关,与土壤 NO_3^- 含量呈显著负相关。Meta 分析结果发现,植烟系统土壤 N_2O 排放系数相对较小,且减氮和生物炭施用均可显著降低植烟系统 N_2O 排放。因此,为减少植烟系统土壤 N_2O 排放,不影响产量和品质的情况下,适量减少施肥以及施用生物炭是行之有效的措施。研究结果可为合理施肥与生物炭施用以减少植烟系统 N_2O 排放提供理论依据和数据参考,对助力农业生态系统“双碳”目标的实现具有重要意义。

参考文献

- 何美霞, 段鹏鹏, 李德军. 2023. 土壤氧化亚氮产生路径及其研究方法进展. 生态学杂志, **42**(6): 1497–1508.
- 黄 耀. 2006. 中国的温室气体排放、减排措施与对策. 第四纪研究, **26**(5): 722–732.
- 蒋雨洲, 刘青丽, 李志宏, 等. 2020. 不同种植模式对黄壤烟田 N_2O 排放的影响. 中国土壤与肥料, (4): 26–31.
- 李青山, 王德权, 杜传印, 等. 2020. 外源碳添加对植烟土壤氮素转化及 N_2O 排放的影响. 中国烟草科学, **41**(4): 13–19.
- 李青山, 王德权, 杜传印, 等. 2021. 碳源类型和添加量对植烟黄壤氮素同化的影响. 植物营养与肥料学报, **27**(6): 1091–1103.
- 孟祥瑞. 2021. 氮肥配施对烟田 N_2O 释放特征及烟叶化学品质的影响(硕士学位论文). 郑州: 河南农业大学.
- 殷全玉, 孟祥瑞, 赵世民, 等. 2021. 有机无机氮肥配施下洛阳烟田土壤 N_2O 排放特点及其控制因素. 水土保持学报, **35**(2): 330–337.
- 于海洋, 王天宇, 黄 琼, 等. 2022. CO_2 浓度升高对稻田 CH_4 和 N_2O 排放的影响: Meta 分析. 中国科学: 地球科学, **52**(3): 517–527.
- 赵伟东, 郭宝玲, 郑祥洲, 等. 2023. 烟-稻轮作不同施肥土壤 N_2O 排放对水分的响应. 农业环境科学学报, **42**(7): 1655–1665.
- Agegneh G, Bass AM, Nelson PN, *et al.* 2016. Benefits of biochar, compost and biochar-compost for soil quality, maize yield and greenhouse gas emissions in a tropical agricultural soil. *Science of the Total Environment*, **543**: 295–306.
- Ameloot N, Maenhout P, De Neve S, *et al.* 2016. Biochar-induced N_2O emission reductions after field incorporation in a loam soil. *Geoderma*, **267**: 10–16.
- Baggs EM, Smales CL, Bateman EJ. 2010. Changing pH shifts the microbial source as well as the magnitude of N_2O emission from soil. *Biology and Fertility of Soils*, **46**: 793–805.

- Cayuela ML, van Zwieten L, Singh BP, *et al.* 2014. Biochar's role in mitigating soil nitrous oxide emissions: A review and meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **191**: 5–16.
- Chen J, Kim H, Yoo G. 2015. Effects of biochar addition on CO₂ and N₂O emissions following fertilizer application to a cultivated grassland soil. *PLoS ONE*, **10**: e0126841.
- Davidson EA. 2009. The contribution of manure and fertilizer nitrogen to atmospheric nitrous oxide since 1860. *Nature Geoscience*, **2**: 659–662.
- Felber R, Leifeld J, Horák J, *et al.* 2014. Nitrous oxide emission reduction with greenwaste biochar: Comparison of laboratory and field experiments. *European Journal of Soil Science*, **65**: 128–138.
- Feng YY, Feng YF, Liu Q, *et al.* 2022. How does biochar aging affect NH₃ volatilization and GHGs emissions from agricultural soils? *Environmental Pollution*, **294**: 118598.
- He F, Hu W, He F, *et al.* 2023. An appraisal of the utility of biochar in a rotation involving tobacco-rice in southern China. *Global Change Biology Bioenergy*, **15**: 979–993.
- He T, Yun F, Liu T, *et al.* 2021a. Differentiated mechanisms of biochar- and straw-induced greenhouse gas emissions in tobacco fields. *Applied Soil Ecology*, **166**: 103996.
- He Y, Yao Y, Jia Z, *et al.* 2021b. Antagonistic interaction between biochar and nitrogen addition on soil greenhouse gas fluxes: A global synthesis. *Global Change Biology Bioenergy*, **13**: 1636–1648.
- He Y, Zhou X, Jiang L, *et al.* 2017. Effects of biochar application on soil greenhouse gas fluxes: A meta-analysis. *Global Change Biology Bioenergy*, **9**: 743–755.
- Huang Y, Wang C, Lin C, *et al.* 2019. Methane and nitrous oxide flux after biochar application in subtropical acidic paddy soils under tobacco-rice rotation. *Scientific Reports*, **9**: 17277.
- IPCC. 2021. The physical science basis. Working group I contribution to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. United Kingdom.
- Kammann C, Ratering S, Eckhard C, *et al.* 2012. Biochar and hydrochar effects on greenhouse gas (carbon dioxide, nitrous oxide, and methane) fluxes from soils. *Journal of Environmental Quality*, **41**: 1052–1066.
- Liu R, Hu Y, Zhan X, *et al.* 2024. The response of crop yield, carbon sequestration, and global warming potential to straw and biochar applications: A meta-analysis. *Science of the Total Environment*, **907**: 167884.
- Meng XT, Yu HY, Zhang XC, *et al.* 2023. Fertilization regimes and the nitrification process in paddy soils: Lessons for agricultural sustainability from a meta-analysis. *Applied Soil Ecology*, **186**: 104844.
- Rogovska N, Laird D, Cruse R, *et al.* 2011. Impact of biochar on manure carbon stabilization and greenhouse gas emissions. *Soil Science Society of America Journal*, **75**: 871–879.
- Rosenberg MS, Adams DC, Gurevitch J. 2000. Metawin: Statistical software for meta-analysis, version 2.1. Sunderland, MA: Sinauer Associates.
- Tang Y, Gao W, Cai K, *et al.* 2021. Effects of biochar amendment on soil carbon dioxide emission and carbon budget in the karst region of southwest China. *Geoderma*, **385**: 114895.
- Tang Y, Gao W, Chen Y, *et al.* 2023. Effects of biochar amendment on nitrous oxide emission, bacterial and fungal community composition in a tobacco-planting soil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, **23**: 3106–3119.
- Wan YJ, Ju XT, Ingwersen J, *et al.* 2009. Gross nitrogen transformations and related nitrous oxide emissions in an intensively used calcareous soil. *Soil Science Society of America Journal*, **73**: 102–112.
- Wei W, Yang H, Fan M, *et al.* 2020. Biochar effects on crop yields and nitrogen loss depending on fertilization. *Science of the Total Environment*, **702**: 134423.
- Yan S, Niu Z, Yan H, *et al.* 2019. Biochar application significantly affects the N pool and microbial community structure in purple and paddy soils. *PeerJ*, **7**: e7576.
- Yao P, Pan H, Qin Y, *et al.* 2021. Greenhouse gas emissions and net ecosystem carbon budget from tobacco-planted soil with different organic amendments. *Soil Research*, **59**: 452–462.
- Yu H, Han X, Zhang X, *et al.* 2023. Fertilizer-induced N₂O and NO emissions in tea gardens and the main controlling factors: A recent three-decade data synthesis. *Science of the Total Environment*, **871**: 162054.
- Zhang B, Yin R, Tan Y, *et al.* 2021. Evaluation of maturity and greenhouse gas emission in co-composting of chicken manure with tobacco powder and vinasse/mushroom bran. *Processes*, **9**: 2105.
- Zhang T, Tang Y, Gao W, *et al.* 2023. Combined effects of biochar and inhibitors on greenhouse gas emissions, global warming potential, and nitrogen use efficiency in the tobacco field. *Sustainability*, **15**: 6100.

作者简介 汪 辰,女,2001年生,硕士研究生,主要研究方向为土壤生态学。E-mail: 17856019312@163.com
责任编辑 牟 琳