

间作绿肥下减氮并配施生物炭降低玉米生产氮足迹

吴佳佳¹, 刘蕊¹, 李鑫艳¹, 张久东², 常单娜³✉, 曹卫东³✉

¹ 山西农业大学资源环境学院, 山西太谷 030800; ² 甘肃省农业科学院土壤肥料与节水农业研究所, 兰州 730070; ³ 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/北方干旱半干旱耕地高效利用全国重点实验室, 北京 100081

摘要: 【目的】玉米间作豆科绿肥能够实现节肥增效, 施用生物炭是减少农田气态氮损失的有效措施。然而, 关于间作绿肥下减氮并配施生物炭对氮素气态损失及系统氮足迹的影响尚不明确。为此, 本研究通过田间试验, 明确该模式对氮素气态损失与系统氮足迹的综合影响, 为西北绿洲灌区玉米生产的绿色发展提供技术途径。【方法】于 2021 年在甘肃武威绿洲农业试验站开始设置田间试验, 双因素设计, 主因素为施氮制度, 包括常规施氮 (N100), 减氮 30% (N70), 减氮 30%配施田菁生物炭 (N70S)。副因素为种植模式, 分别为玉米单作 (MM) 和玉米间作箭筈豌豆 (IMC)。共形成 6 个处理: N100-MM、N100-IMC、N70-MM、N70-IMC、N70S-MM、N70S-IMC。测定 2024—2025 年玉米产量、氮素吸收及土壤理化性状, 同步监测氧化亚氮 (N_2O) 排放与氨 (NH_3) 挥发, 并采用生命周期评价法量化系统氮足迹。【结果】相比常规施氮, 减氮 30%玉米籽粒产量、地上部生物量和氮素累积量分别降低 7.9%、6.1%和 4.7%; 而配施田菁生物炭籽粒产量和地上部生物量分别增加 8.6%和 2.7%。玉米间作绿肥较单作增产 3.8%。N70S-IMC 较 N100-MM 处理产量、生物量和氮素累积量分别增加了 12.6%、4.3%和 4.0%。减氮 30%处理的 N_2O 和 NH_3 累积排放量分别降低 16.0%—25.2%和 9.9%—24.7%, 配施田菁生物炭处理分别降低 24.8%—27.7%和 17.6%—43.9%。相比 N100-MM, N70-IMC 处理的 N_2O 和 NH_3 累积排放量分别降低了 12.1%—20.1%和 11.2%—20.1%, N70S-IMC 处理分别降低 15.3%—24.3%和 20.1%—35.8%。N70-IMC 较 N100-MM 处理土壤铵态氮 (NH_4^+-N)、硝态氮 (NO_3^--N) 和微生物量氮 (MBN) 分别降低 17.6%、15.6%和 9.6%, N70S-IMC 处理土壤 NH_4^+-N 和可溶性有机氮 (DON) 分别降低 15.6%和 7.3%, 全氮 (TN) 和 MBN 分别增加 3.9%和 25.0%。随机森林分析表明, 土壤 NO_3^--N 、 NH_4^+-N 、MBN 和 DON 是驱动 N_2O 排放的关键因子, 而 NH_3 挥发主要受 NO_3^--N 、 NH_4^+-N 和全氮驱动。生命周期评价表明, 相比 N100-MM 处理, N70-IMC 和 N70S-IMC 处理的氮足迹分别降低 28.9%和 39.7%, N70S-IMC 较 N70-IMC 处理氮足迹降低了 10.4%。【结论】玉米间作绿肥减氮 30%配施田菁生物炭能够增加玉米产量和氮素吸收, 改善土壤理化性状, 降低 N_2O 排放、 NH_3 挥发及系统氮足迹, 是西北绿洲灌区玉米绿色可持续生产的有效路径。

关键词: 玉米; 绿肥; 间作; 田菁生物炭; N_2O 排放; NH_3 挥发; 氮足迹

Reducing Nitrogen Footprint of Maize Production with Intercropping Green Manure, Nitrogen Reduction, and Sesbania Biochar

WU JiaJia¹, LIU Rui¹, LI XinYan¹, ZHANG JiuDong², CHANG DanNa³✉, CAO WeiDong³✉

¹College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu 030800, Shanxi; ²Institute of Soil Fertilizer and Water-Saving Agriculture, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070; ³Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences/State Key Laboratory of Efficient Utilization of Arable Land in China, Beijing 100081

Abstract: 【Objective】Intercropping maize with leguminous green manure can achieve fertilizer conservation and efficiency

收稿日期: 2025-10-26; 接受日期: 2025-11-22

基金项目: 国家重点研发计划 (2021YFD1700200)、国家绿肥产业技术体系 (CARS-22)、中国农业科学院科技创新工程

联系方式: 吴佳佳, E-mail: 2978594601@qq.com. 通信作者常单娜, E-mail: changdannan@caas.cn. 通信作者曹卫东, E-mail: caoweidong@caas.cn

improvement. Biochar application is an effective measure to mitigate gaseous nitrogen loss from farmland. However, the impacts of nitrogen reduction under intercropping green manure combined with the biochar application on gaseous nitrogen loss and the system's nitrogen footprint remain unclear. This study aimed to evaluate this comprehensive practice to provide a technical approach for the green maize production in oasis irrigation areas of Northwest China. **【Method】** A two-factor field experiment was set up in 2021 at Wuwei Oasis Agricultural Experimental Station in Gansu Province. The experiment employed a two-factorial design. The main factor was nitrogen application system, including conventional nitrogen application (N100), 30% nitrogen reduction (N70), and 30% nitrogen reduction combined with sesbania biochar (N70S). The second factors were cropping patterns, including maize monoculture (MM) and maize intercropping with common vetch (IMC). Six treatments were formed: N100-MM, N100-IMC, N70-MM, N70-IMC, N70S-MM, and N70S-IMC. From 2024 to 2025, maize yield, nitrogen absorption and soil physicochemical properties were measured, nitrous oxide emission and ammonia volatilization were monitored, and the nitrogen footprint of the system was quantified by life cycle assessment method. **【Result】** Compared with N100, N70 decreased maize grain yield, aboveground biomass and nitrogen absorption by 7.9%, 6.1% and 4.7%, respectively. In contrast, N70S increased grain yield and biomass by 8.6% and 2.7%, respectively. IMC increased the yield by 3.8% compared with MM. Notably, N70S-IMC increased grain yield, aboveground biomass and nitrogen absorption by 12.6%, 4.3% and 4.0%, respectively, compared with N100-MM. The N70 reduced cumulative N_2O emissions and NH_3 volatilization by 16.0% to 25.2% and 9.9% to 24.7%, respectively, relative to N100. The N70S further reduced these emissions by 24.8% to 27.7% and 17.6% to 43.9%, respectively. Compared with N100-MM, N70-IMC and N70S-IMC reduced cumulative N_2O emissions by 12.1% to 20.1% and 20.1% to 35.8% and NH_3 volatilization by 15.3% to 24.3% and 11.2% to 20.1%, respectively. Soil analysis showed that, compared with N100-MM, N70-IMC decreased soil ammonium nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$), nitrate nitrogen ($\text{NO}_3^-\text{-N}$), and microbial nitrogen (MBN) by 17.6%, 15.6%, and 9.6%, respectively. While N70S-IMC decreased $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and soluble organic nitrogen (DON) by 15.6% and 7.3%, respectively, but increased total nitrogen (TN) and MBN by 3.9% and 25.0%, respectively. Random forest analysis indicated that soil $\text{NO}_3^-\text{-N}$, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, MBN and DON were the key factors driving N_2O emissions, while NH_3 volatilization was mainly driven by $\text{NO}_3^-\text{-N}$, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and TN. Life cycle assessment indicated that the nitrogen footprint under N70-IMC and N70S-IMC was decreased by 28.9% and 39.7%, respectively, compared with the N100-MM. Furthermore, the nitrogen footprint of the N70S-IMC treatment was 10.4% lower than that under N70-MM. **【Conclusion】** The combination of maize-green manure intercropping, 30% nitrogen reduction, and sesbania biochar application increased grain yield and nitrogen absorption, improved key soil properties, and lowered N_2O emissions, NH_3 volatilization, and the system's nitrogen footprint, which was an effective path for green and sustainable maize production in the Northwest Oasis Irrigation District.

Key words: maize; green manure; intercropping; sesbania biochar; N_2O emissions; NH_3 volatilization; nitrogen footprint

0 引言

【研究意义】集约化农业生产中化学氮肥的过渡施用,导致氮素利用效率降低,并引发土壤氧化亚氮(N_2O)与氨(NH_3)排放增加、硝酸盐淋溶加剧等环境问题^[1],最终导致农田氮足迹升高。在我国西北绿洲灌区,这一矛盾尤为突出。作为重要的玉米生产基地,其高产模式长期依赖于大量氮肥投入,加之该区域普遍采用的覆膜灌溉技术所形成的根区高温高湿微环境,进一步加剧了氮素的气态损失风险^[2]。因此,针对区域生产与生态特点,研发能够协同实现玉米稳产与氮素减排的绿色生产技术,已成为推动该区域农业绿色转型的迫切需求。**【前人研究进展】**合理的农业管理措施,如优化施氮量、调整种植制度和施用土壤改良剂,能减少氮素淋溶

和径流损失^[3],并抑制 NH_3 挥发与 N_2O 排放,在保障作物产量的同时降低农田氮足迹^[4]。其中,豆科绿肥与生物炭的应用是两种极具潜力的策略。豆科绿肥通过根瘤菌共生固氮,可以在减氮20%—40%时保障主作物产量^[5]。其发达的根系能吸收土壤中的残留氮,减少氮素径流损失,并提升土壤氮库稳定性^[6]。在西北绿洲灌区,长期间作豆科绿肥可提高作物年产量15.6%—49.9%^[7]。在玉米间作绿肥模式下,箭筈豌豆替代25%氮肥 NH_3 挥发降低44.0%—47.3%^[8],减氮20%条件下玉米间作豆科绿肥在保持玉米籽粒产量的同时,温室气体减排17.8%^[9]。生物炭因其高吸附性和多孔结构,在提升氮素利用效率方面展现出显著潜力^[10]。在干旱绿洲灌区,减氮30%间作鲜食豌豆配施生物炭提高玉米籽粒产量17.8%^[11]。生物炭的功能受原料来源影响,田菁作为一种优质

豆科绿肥，其资源化利用方式正从传统的翻压还田向水解制炭拓展^[12]。以田菁为原料制备的生物炭，因其富含氮素和发达的孔隙结构，可能在培肥改土方面优于常规秸秆炭^[13]。田菁生物炭对铵态氮的高吸附性能减少了 NH_3 挥发，并能通过调节硝化-反硝化过程影响 N_2O 的排放。【本研究切入点】尽管绿肥与生物炭的单独应用各具潜力，且区域内已有研究探索了绿肥配施玉米生物炭对 N_2O 排放的抑制效果^[14]。但现有研究多局限于单一技术或单一气体排放指标，豆科绿肥间作玉米配合生物炭对农田氮素损失（包括 N_2O 排放和 NH_3 挥发）和氮足迹的协同效应缺乏系统评估。【拟解决的关键问题】为评估玉米间作豆科绿肥配施田菁生物炭模式的综合效益，本研究拟通过田间试验重点阐明以下两个问题：（1）该模式在减氮 30% 条件下对玉米产量、气态氮损失及系统氮足迹的综合影响。（2）土壤无机氮库动态等关键因子如何驱动气态氮排放。通过监测玉米产量、土壤 N_2O 与 NH_3 排放动态及土壤性状变化，并结合生命周期评价法量化系统氮足迹，旨在为构建玉米绿色种植模式提供理论支撑与实践依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本试验在甘肃省农业科学院武威绿洲农业试验站（37°43'N，102°35'E）进行。该区域属寒温带干旱气候，年均气温 7.2 °C，年日照时数 2 800—3 300 h、无霜期 156 d、平均降水量 222 mm、蒸发量 2 021 mm。供试土壤为灌漠土，耕层（0—20 cm）土壤 pH 为 8.2、有机碳含量 12.3 g·kg⁻¹、全氮 1.1 g·kg⁻¹、无机氮 11.4

mg·kg⁻¹、有效磷 18.3 mg·kg⁻¹、速效钾 73.2 mg·kg⁻¹。玉米是当地主栽作物之一，均采用地膜覆盖栽培，为半膜覆膜方式。

1.2 试验设计

采用田间定位试验，裂区设计，主区为施氮制度，包括常规施氮（N100），减氮 30%（N70），减氮 30% 配施田菁生物炭（N70S）^[15]。副区为种植模式，分别为玉米单作（MM）和玉米间作箭筈豌豆（IMC）。共形成 6 个处理：N100-MM、N100-IMC、N70-MM、N70-IMC、N70S-MM、N70S-IMC。每处理 3 次重复，小区面积 39.6 m²（6 m×6.6 m）。

供试玉米品种为利单 295，于 4 月上旬播种，10 月上旬收获。单作和间作，玉米种植带长均为 105 cm，每带种植 3 行，行距 35 cm，株距 20 cm，种植密度为 90 000 株/hm²。箭筈豌豆品种为陇箭 2 号，在玉米播种前 10 天播种，播种量 75 kg·hm⁻²，于盛花期采用秸秆还田粉碎机粉碎后再人工翻压还田，翻压深度 20 cm。间作小区中，绿肥带为 60 cm，行距 15 cm，玉米：绿肥为 3：4 带型（图 1）。

供试氮肥为尿素（含 N 46%），常规施氮量为 330 kg·hm⁻²，70% 常规施氮量为 231 kg·hm⁻²；磷肥为重过磷酸钙（含 P₂O₅ 46%），用量 150 kg·hm⁻²。田菁生物炭的施用量为 3 t·hm⁻²^[16]（将田菁地上部秸秆置于管式炉中在氮气保护下升温至 680 °C 炭化 20 min，制得田菁生物炭，碳、氮、磷、钾含量分别为 58.5%、1.51%、0.26%、2.61%，pH 8.96^[17]）。氮肥按基肥：大喇叭口期：灌浆期=4：3：3 比例施用，磷肥和田菁生物炭作基肥一次性施用。所有处理均不施钾肥。农用地膜宽为 120 cm，厚度为 0.01 mm。

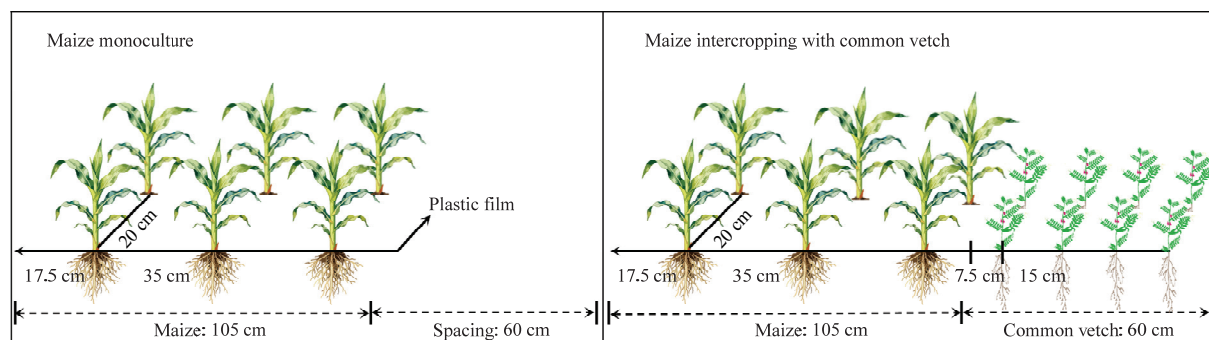


图 1 玉米单作和玉米间作绿肥模式田间布置参数

Fig. 1 Information of spatial arrangement of maize monoculture and maize intercropped with green manure systems

1.3 测定指标和计算方法

1.3.1 玉米籽粒产量、生物量及氮素含量 2024 和 2025 年玉米成熟期,各小区单独收获,果穗风干后脱粒,以 14%标准含水率折算产量,并将小区产量换算为单位面积的玉米籽粒产量,计算公式:

实测产量 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) = 鲜穗重 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) $\times$ 出籽率 (%) $\times [1 - \text{鲜籽粒含水率}(\%)] / (1 - 14\%)$ [18]。

从各小区随机选取有代表性的玉米 10 株,将每株玉米的地上部分为秸秆和籽粒两部分。105 °C 杀青 30 min, 65 °C 烘干至恒重。随后用粉碎机粉碎,过 1 mm 筛。使用元素分析仪 (Elementar Analysensysteme GmbH, Germany) 测定籽粒和秸秆的氮含量。玉米地上部氮素累积量计算公式如下[19]。

地上部氮素累积量 = (籽粒氮含量 $\times$ 籽粒产量) + (秸秆氮含量 $\times$ 秸秆生物量)。

1.3.2 氧化亚氮排放 2024 和 2025 年绿肥种植至玉米收获期,采用静态箱-气相色谱仪法 (7890A, Agilent Technologies, USA) 对 N_2O 气体进行采集并测定其浓度[20]。具体测定方法如下:静态箱由气室 (宽 30 cm、长 40 cm、高 40 cm) 和底座 (宽 30 cm、长 40 cm、高 25 cm) 组成。在施用基肥并完成耕作后,立即在单作和间作小区的玉米行和空闲/绿肥行的中央位置放置静态箱。将底座插入土壤 20 cm,玉米收获前取出。单作和间作小区均布设 2 个静态箱,单作小区在带间和玉米带中各一个,间作小区在绿肥带和玉米带中各一个。气室顶部安装有微型风扇,收集气体时开启保证气体浓度均匀,同时安装温度计,读取静态箱内温度。底座带有水槽,用于在收集气体时与气室密封。使用气泵通过安装在气室顶端的三通阀和硅胶管采集气体样品,收集到铝箔采样袋中。每次取样时间间隔 10 min 抽取一次箱内气体,共抽取 4 次 (0、10、20、30 min)。将采样袋中的气体迅速带回实验室,利用 20 mL 注射器将采集的气体注入到已抽真空的 12 mL 顶空瓶,用带有电子捕获器 (ECD) 的气相色谱测定 N_2O 浓度。于玉米施基肥后的第 1、3、5、10 天和每次追肥后第 1、5、10 天进行取样,待 N_2O 排放平稳后,每隔 10 d 采集 1 次样品。

土壤 N_2O 排放通量 ($F_{\text{N}_2\text{O}}$, $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$) [21]:

$$F_{\text{N}_2\text{O}} = H \times \frac{M \times P \times T_0}{V_0 \times P_0 \times T} \times \frac{dc}{dt}$$

式中, H 是静态箱高度 (m); M 为气体分子摩尔质量 ($\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$); P_0 和 T_0 为理想气体标准状态下的空气压力 (1013.25 kPa) 和气温 (273.15 K); V_0 为目标

化合物在标准状态下的摩尔体积,即 $22.41 \text{ L}\cdot\text{mol}^{-1}$; P 和 T 为采样时箱内实际气压和气温; dc/dt 为箱内目标气体浓度变化率 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ 或 $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)。

N_2O 累积排放量 (E , $\text{kgN}\cdot\text{hm}^{-2}$) [22]:

$$E = \sum_{i=1}^n \left[\frac{(F_i + F_{i-1})}{2} \times d \times 24 \times 10^{-2} \times \frac{28}{44} \right]$$

式中, F_i 为第 i 次测定的 N_2O 的排放通量 ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$); F_{i-1} 为第 $i-1$ 次测定的 N_2O 排放通量 ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$); d 为相邻两次采样的间隔天数 (d); n 为同一生育时期气体测定总次数, 28/44 为 N_2O 中 N 占比。

1.3.3 氨挥发 于基肥和追肥后,采用通气法测定土壤氨挥发。捕获装置由内径 15 cm, 高 10 cm 的聚氯乙烯硬质塑料管制成。将两块厚度均为 2 cm、直径为 16 cm 的海绵均匀浸以 15 mL 的磷酸甘油溶液,置于硬质塑料管中,下层的海绵距管底 5 cm,上层的海绵与管顶部相平[23]。取样时,取出下层海绵,迅速装入塑料袋中密封,并换上新浸过磷酸甘油的海绵。上层的海绵视其干湿情况 3—7 d 更换一次。取下的海绵带回实验室,装入塑料瓶中,加入 150 mL $1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ KCl 溶液,使海绵完全浸于其中,振荡 1 h 后过滤,用流动分析仪 (SEAI Auto Analyzer3, 德国) 测定浸提液中铵态氮含量。玉米基肥和追肥后第 1、2、3、4、5、6、8、10、12、15 天进行取样,每天早晨 9:00 前完成取样,每个周期取样 10 次。

土壤氨挥发速率 ($\text{NH}_3\text{-N}$, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$) [24]:

$$\text{NH}_3\text{-N} = \frac{M}{A \times D} \times 10^{-2}$$

式中, M 为单个装置平均每次测得的 NH_3 量 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$, mg); A 为捕获装置横截面积 (m^2); D 为每次连续捕获的天数 (d)。土壤氨挥发累积量 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) 为测定时期内氨挥发量总和。

1.3.4 土壤性状 玉米收获后,各小区按 5 点取样法采集 0—20 cm 耕层土样,取部分鲜土测定土壤无机氮、微生物量碳氮含量,剩余土样自然风干、过筛后用于测定其他土壤性状[25]。土壤有机质 (Soil organic matter, SOM) 采用重铬酸钾-浓硫酸外加热法测定。土壤全氮 (Soil total nitrogen, TN) 使用凯氏定氮法测定。土壤无机氮 (Mineral N, N_{min}) 采用 KCl 溶液浸提,流动分析仪 (SEAI AutoAnalyzer3, 德国) 测定硝态氮 (Nitrate N, $\text{NO}_3^-\text{-N}$) 和铵态氮 (Ammonia N, $\text{NH}_4^+\text{-N}$) 含量[26]。土壤有效磷 (Soil available P, AP) 采用碳酸氢钠浸提、钼蓝比色法测定。土壤速效钾 (Soil available K, AK) 采用 $1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 醋酸铵浸提、

火焰光度计法测定^[27]。土壤 pH 采用电位法（水土比 2.5 : 1）测定。土壤可溶性碳、氮（DOC、DON）采用超纯水浸提（水土比 2 : 1），总有机碳/总氮分析仪（Multi N/C2100，德国）测定。土壤微生物量碳、氮（MBC、MBN）采用氯仿熏蒸，K₂SO₄ 浸提（水土比为 4 : 1）后总有机碳/总氮分析仪（Multi N/C2100，德国）测定^[28]。

1.3.5 氮足迹 基于生命周期评价法（LCA），评估化肥、农药等农资投入品的生产和运输，灌溉管理、耕作和收获等田间作业对氮足迹的影响。据此，确定氮足迹的系统边界：输入部分包括肥料和农药的生产和运输、肥料的田间施用、农业机械的燃油消耗、地膜和种子的使用。输出为氮肥施用导致的活性氮损失，如 NH₃ 挥发、N₂O 排放以及 NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 淋失^[29]。

查阅中国核心生命周期数据库（CLCD）、IPCC 指南第 1 号、国家发改委（NDRC）、Ecoinvent 数据库及相关经典文献，获取农业投入的排放因子。利用

LCA 法核算玉米生产过程中的温室气体排放和活性氮损失量（表 1）。氮足迹是将不同形态的活性氮为富营养化潜势以便求和计算^[31]：

$$\begin{aligned} \text{NF}_{\text{total}} &= \text{NF}_{\text{inputs}} + \text{NF}_{\text{N}_2\text{O}} + \text{NF}_{\text{NH}_3} + \text{NF}_{\text{NH}_4^+} + \text{NF}_{\text{NO}_3^-} \\ \text{NF}_{\text{inputs}} &= \sum_{i=1}^n m_i \alpha_i \\ \text{NF}_{\text{N}_2\text{O}} &= \text{Total}_{\text{N}_2\text{O}} \times 44/28 \times 0.476 \\ \text{NF}_{\text{NH}_3} &= \text{NH}_3 \text{ volatilization} \times 17/14 \times 0.833 \\ \text{NF}_{\text{NH}_4^+} &= \text{N} \times \gamma \times 18/14 \times 0.786 \\ \text{NF}_{\text{NO}_3^-} &= \text{N} \times \sigma \times 62/14 \times 0.238 \end{aligned}$$

式中，NF_{total} 为整个生命周期内所考虑的活性氮损失（kg N-eq·hm⁻²）；NF_{inputs} 农资投入品在生产运输等过程中造成的间接活性氮损失量（kg N-eq·hm⁻²）；NF_{N₂O}、NF_{NH₃}、NF_{NH₄⁺}、NF_{NO₃⁻} 为作物全生育期损失的活性氮（kg N-eq·hm⁻²）；N 为施氮量（kg）；γ、σ 为玉米生育过程中 NH₄⁺ 和 NO₃⁻ 淋失系数，分别为 0.175 和 0.226；44/28、17/14、62/14 和 18/14 是 N₂O-N、NH₃-N、NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 的质量转换系数；0.476、0.833、0.786 和 0.238 分别为 N₂O、NH₃、NH₄⁺ 和 NO₃⁻ 的富营养化潜势系数^[32]。

表 1 农业投入数据的活性氮损失系数
Table 1 Active nitrogen emission co-efficient of agricultural input data

投入 Input	单位 Unit	活性氮损失系数 Cumulative reactive N losses (kg N-eq·kg ⁻¹)	来源 Source
氮肥 N fertilizer	kg N	7.15×10 ⁻³	[29]
磷肥 P fertilizer	kg P ₂ O ₅	1.83×10 ⁻⁴	
除草剂 Herbicide	kg	4.69×10 ⁻³	
杀虫剂 Insecticide	kg	4.69×10 ⁻³	
农膜 Agricultural film	kg N-eq·kg ⁻¹	1.2×10 ⁻⁴	
柴油 Diesel	L	2.86×10 ⁻²	[30]
灌溉用电 Irrigation electricity	kWh	1.97×10 ⁻³	
生物炭 Biochar	kg N-eq·t ⁻¹	-1.26	

1.4 数据处理与分析

采用 Microsoft Excel 2019 进行试验数据汇总和整理，SPSS 26.0 对数据进行方差和相关性分析，采用最小显著差法（LSD）对处理进行多重比较（P<0.05），运用单因素方差分析检验不同处理之间的差异显著性，多因素方差分析进行主效应分析。采用 Origin 2025 和 R 4.4.2（<https://cran.r-project.org>）绘制图形。

2 结果

2.1 玉米籽粒产量、生物量和氮素累积量

施氮制度和种植模式对玉米籽粒产量、地上部生

物量和氮素累积量有显著影响，两者的交互作用对地上部生物量和氮素累积量有显著影响（P<0.05）（图 2）。相比 N100，N70 处理籽粒产量、生物量和氮素累积量减少 7.9%、6.1%和 4.7%；N70S 处理的籽粒产量和生物量增加 8.6%和 2.7%。相比 N70，N70S 处理籽粒产量和生物量增加 18.0%和 9.4%。相比 MM，IMC 处理的籽粒产量、生物量和氮素累积量增加 3.8%、2.5%和 2.0%。相比 N100-MM，N70-IMC 处理的生物量减少 4.1%，N70S-IMC 处理的籽粒产量、地上部生物量和氮素累积量增加了 12.6%、4.3%和 4.0%。由此可见，与常规施氮玉米单作相比，间作绿肥减氮

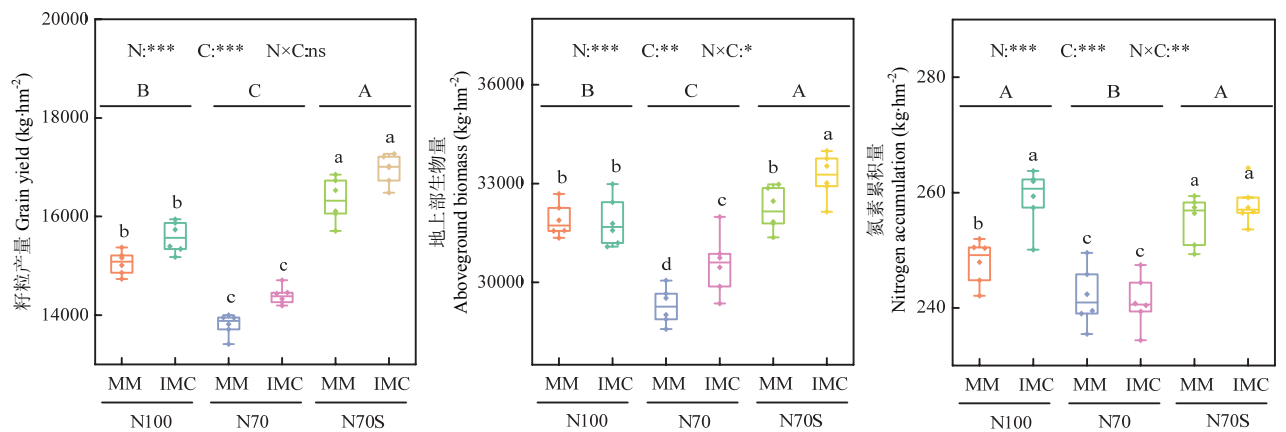
30%及其配施田菁生物炭能够增加玉米籽粒产量、地上部生物量和氮素累积量。

2.2 土壤 N₂O 排放和 NH₃ 挥发量

2.2.1 土壤 N₂O 排放通量和累积量

在玉米的整个生

长季,各处理的土壤 N₂O 排放通量变化规律基本一致,均在施肥后 2—5 d 后出现排放峰值,随后逐渐降低(图 3)。与 N100 处理相比, N70 和 N70S 处理的两年 N₂O 排放通量峰值在基肥、拔节期和灌浆期追肥



MM: 玉米单作; IMC: 玉米间作绿肥; N100: 常规施氮; N70: 减氮 30%; N70S: 减氮 30%配施田菁生物炭; N: 施氮制度; C: 种植模式; N×C: 施氮制度与种植模式间的交互作用。图中不同小写字母表示处理间差异显著 ($n=6$, $P<0.05$), 不同大写字母代表施氮制度间差异显著 ($n=3$, $P<0.05$)。*: $P<0.05$; **: $P<0.01$; ***: $P<0.001$ 。下同
MM: Maize monoculture; IMC: Maize intercropping with green manure; N100: Conventional N; N70: 70% chemical; N70S: 70% chemical N combined with sesbania biochar; N: Nitrogen application regime; C: Cropping pattern; N×C: Interaction between nitrogen application regime and cropping patterns. Significant differences among different lowercase letters represent significant differences among treatments ($n=6$, $P<0.05$), and significant differences among different capital letters represent significant differences among N fertilizer systems ($n=3$, $P<0.05$). *: $P<0.05$; **: $P<0.01$; ***: $P<0.001$. The same as below

图 2 玉米籽粒产量、生物量和氮素累积量 (2024—2025 年)
Fig. 2 Grain yield, biomass and nitrogen accumulation in 2024 and 2025

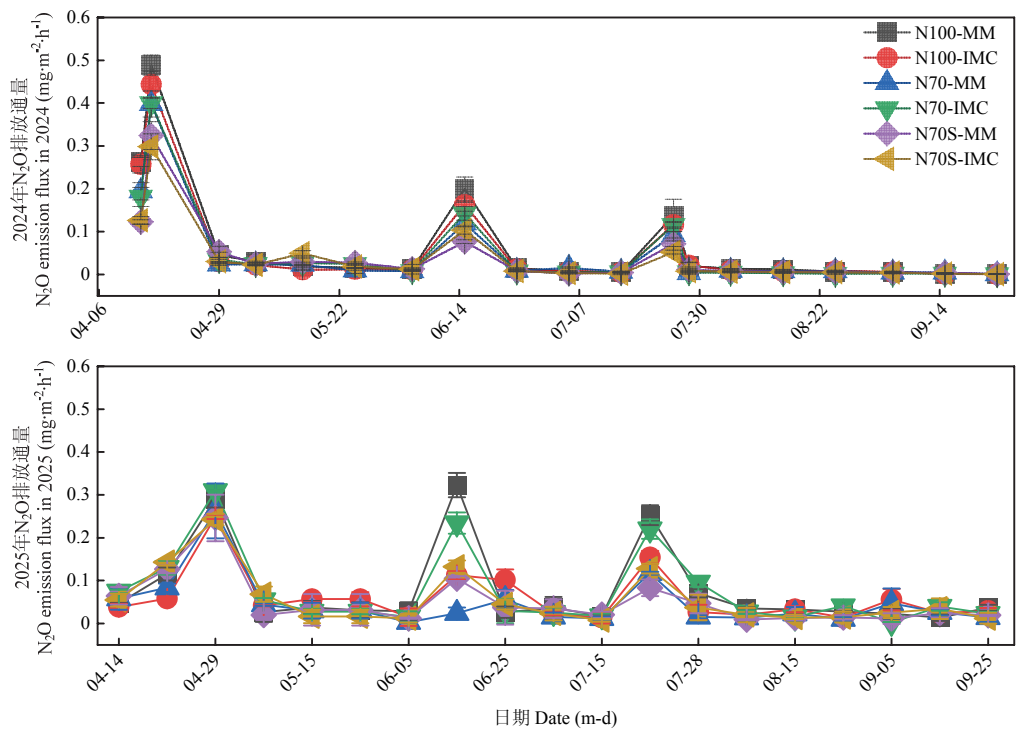


图 3 不同处理下 N₂O 排放通量
Fig. 3 N₂O emission fluxes under different treatments

后分别降低 6.2%—14.4%、9.3%—33.3%；28.0%—40.8%、45.5%—50.3%；17.1%—18.1%、48.2%—51.1%。N70S 较 N70 处理 N_2O 排放通量峰值在基肥、拔节期追肥和灌浆期追肥降低 14.5%—22.0%、7.9%—31.0% 和 37.5%—40.3%。相比 N100-MM，N70-IMC 和 N70S-IMC 处理在基肥、拔节期追肥和灌浆期追肥降低 6.7%—18.3%和 16.4%—39.0%；27.5%—28.8%和 48.1%—59.0%；12.8%—16.2%和 49.4%—62.0%。

施氮制度对 2024 年和两年平均土壤 N_2O 累积排放量有显著影响，施氮制度与种植模式的交互作用对 2025 年和两年平均 N_2O 累积排放量影响显著 ($P < 0.001$) (图 4)。相比 N100，N70、N70S 处理的 2024 年和两年平均 N_2O 累积排放量降低 25.2%、27.7%和 16.0%、24.8%。N70 与 N70S、MM 与 IMC 处理间 N_2O 累积排放量无显著差异。相比 N100-MM，N70-IMC 和 N70S-IMC 处理的两年平均 N_2O 累积排放量降低 12.1%和 27.4%。

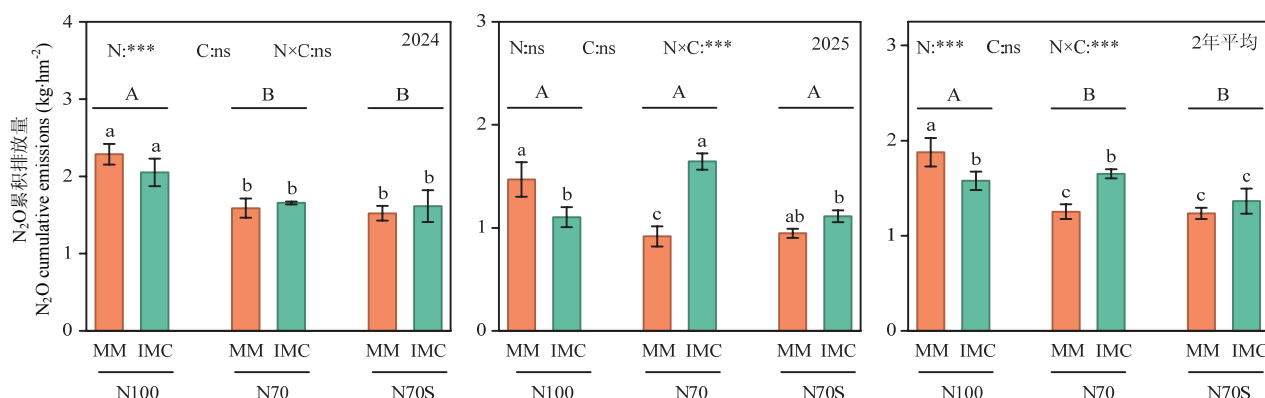


图 4 不同处理 N_2O 累积排放量

Fig. 4 Cumulative N_2O emissions under different treatments

2.2.2 土壤 NH_3 挥发速率和累积量 3 次施肥期间，土壤 NH_3 挥发速率均在施肥后 2—4 d 达到峰值；随后逐渐下降，在第 9 天后基本趋于平稳（图 5）。相比 N100，N70 和 N70S 处理的两年 NH_3 挥发速率峰值在基肥、拔节期追肥和灌浆期追肥分别降低 17.0%—36.9%和 30.2%—40.7%；24.7%—71.6%和 43.9%—80.8%；9.9%—27.8%和 17.6%—53.8%。N70S 较 N70 处理 NH_3 挥发速率峰值在基肥、拔节期追肥和灌浆期追肥降低 6.1%—15.9%、25.5%—32.2%和 8.5%—36.0%。相比 N100-MM，N70-IMC 和 N70S-IMC 处理 NH_3 挥发速率峰值在基肥、拔节期追肥和灌浆期追肥分别降低 20.1%—43.5%和 35.8%—47.7%；29.1%—76.0%和 51.9%—83.4%；11.2%—44.4%和 20.1%—65.6%。

施氮制度和种植模式及二者的交互作用对 2024、2025 年和两年平均 NH_3 累积挥发量影响显著 ($P < 0.001$) (除 2025 年交互作用外) (图 6)。相比 N100，N70 和 N70S 处理的 2024、2025 年和两年平均 NH_3 累积挥发量降低 24.7%、43.9%、9.9%和 17.6%、17.0%、

30.2%，N70S 较 N70 处理降低了 8.5%—25.5%。相比 N100-MM，N70-IMC 和 N70S-IMC 处理的 2024 年和两年平均 NH_3 累积挥发量降低 29.1%、51.9%和 20.1%、35.8%。

综上，与常规施氮玉米单作相比，间作绿肥减氮 30%及其配施田菁生物炭能够降低 N_2O 排放和 NH_3 挥发。

2.3 土壤理化性状及其对 N_2O 排放和 NH_3 挥发的影响

2.3.1 土壤理化性状 如表 2 所示，相比 N100，N70 处理的两年 SOM、TN、AP、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、DOC、DON、MBC 和 MBN 平均含量减少 2.8%—29.5%，pH 减少 0.09 个单位；N70S 各处理的 TN 和 MBC 含量平均增加 1.5%—2.4%和 10.6%—17.0%，pH 增加 0.18 个单位， $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、DOC、DON 和 MBN 含量减少 10.1%—24.0%。相比 N70，N70S 各处理的 SOM、TN、AP、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、MBC 和 MBN 含量平均增加 3.7%—28.0%，pH 增加 0.08 个单位。

相比 MM，IMC 处理两年的 TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、DON、MBC 和 MBN 含量平均增加 1.9%—21.6% (除

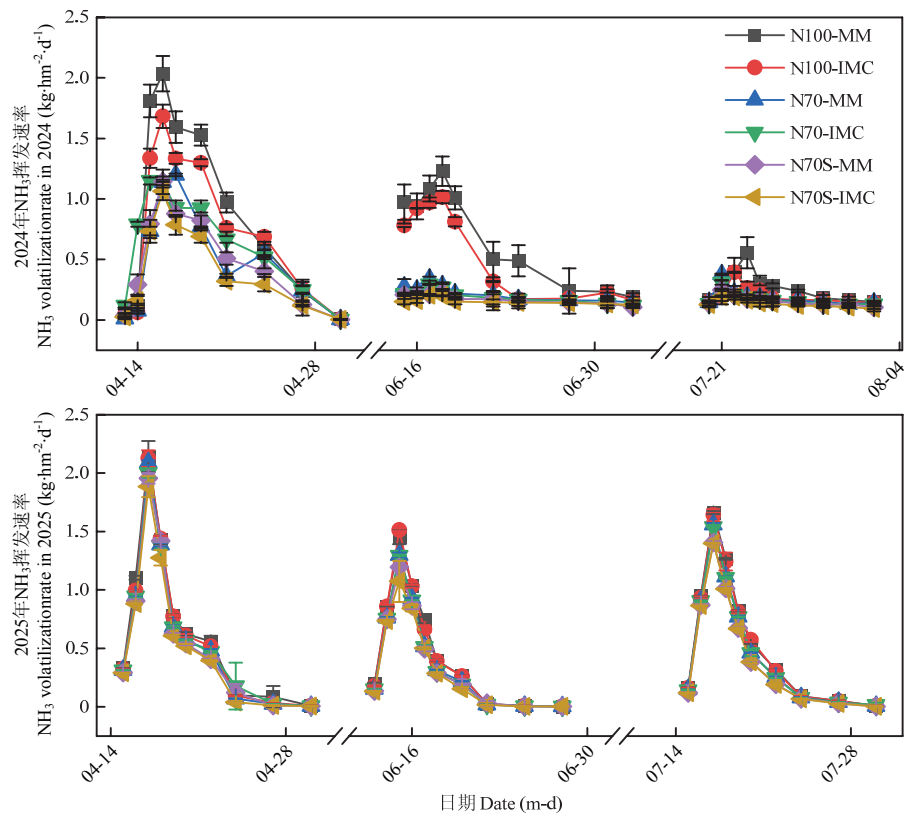


图 5 不同处理 NH_3 挥发速率

Fig. 5 NH_3 volatilization rate under different treatments

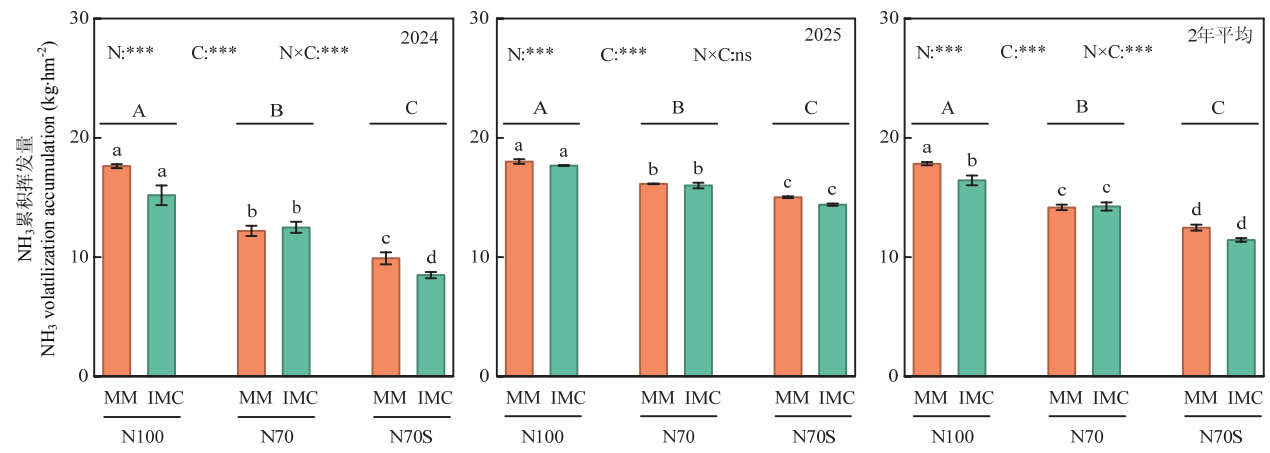


图 6 不同处理 NH_3 累积挥发量

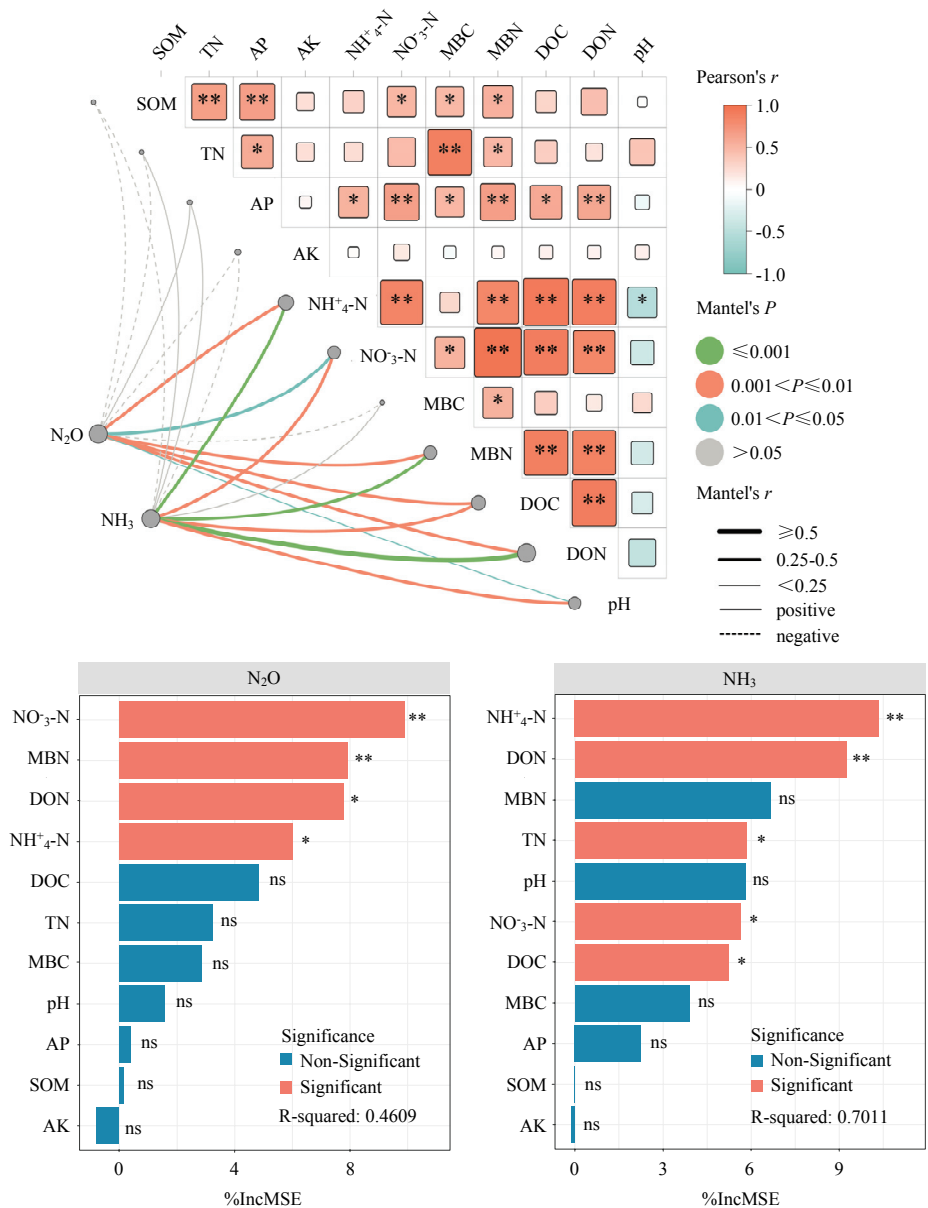
Fig. 6 NH_3 volatilization accumulation under different treatments

2024 年 TN 外)，2024 年 pH 增加 0.03 个单位。相比 N100-MM，N70-IMC 处理的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、DON、MBC 和 MBN 含量降低 3.6%—15.1%，pH 增加 0.14 个单位；N70S-IMC 处理的 TN 和 MBC 增加 3.9%（仅

2024 年）和 23.9%—25.0%，pH 增加 0.14 个单位， $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 DON 含量降低 12.3%和 6.6%。因此，与常规施氮单作相比，玉米间作绿肥减氮 30%配施生物炭增加全氮含量，降低活性碳氮含量。

2.3.2 土壤理化性状对 N₂O 排放和 NH₃ 挥发的影响
Mantel 检验表明, N₂O 排放与 NO₃⁻-N、NH₄⁺-N、DON、DOC、MBN 和 pH 呈显著正相关; NH₃ 挥发与 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、DON、DOC、MBN 和 pH 呈显著正相关 (*P*

<0.05) (图 7)。随机森林模型分析发现, NO₃⁻-N、MBN、DON 和 NH₄⁺-N 是影响 N₂O 排放的主要因子, NH₄⁺-N、DON、DOC、TN 和 NO₃⁻-N 是影响 NH₃ 挥发的主要因子。



土壤养分为两年平均值, N₂O 和 NH₃ 是两年平均累积排放量。SOM: 有机质; TN: 全氮; AP: 有效磷; AK: 有效钾; MBC: 微生物量碳; MBN: 微生物量氮; DOC: 可溶性有机碳; DON: 可溶性有机氮
Soil nutrients represent the two-year average, and the emissions of N₂O and NH₃ are the two-year average cumulative emissions. SOM: Organic matter; TN: Total nitrogen; AP: Available phosphorus; AK: Available potassium; MBC: Microbial carbon; MBN: Microbial nitrogen; DOC: Soluble organic carbon; DON: Soluble organic nitrogen

图 7 N₂O 排放量、NH₃ 挥发量与土壤环境因子之间的 Mantel 分析和随机森林模型
Fig. 7 Mantel Test and Random Forest Model of the relationship between N₂O emissions, NH₃ volatilization and environmental factors

2.4 土壤氮足迹

氮淋溶和氮挥发是土壤氮足迹的主要贡献源，两者合计占氮足迹总量的 90.3%—92.4%（图 8）。施氮制度及其与种植模式的交互作用对土壤氮足迹均有显著影响（ $P<0.001$ ）。相比 N100，N70 和 N70S 处理的氮足迹平均降低 27.8%和 37.5%，

N70S 较 N70 处理氮足迹平均降低 13.4%。相比 N100-MM，N70-IMC 和 N70S-IMC 处理的氮足迹降低 28.9%和 39.7%，N70S-IMC 较 N70-MM 处理氮足迹降低了 10.4%。由此可知，间作绿肥替代 30% 氮肥有效降低氮足迹，配施田菁生物炭进一步降低了氮足迹。

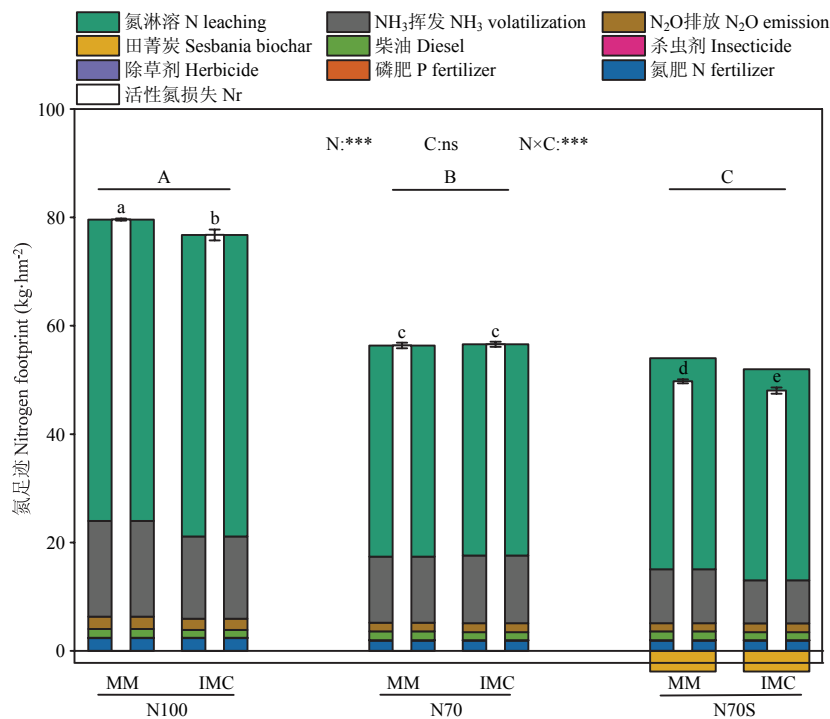


图 8 不同处理中氮足迹（2024—2025 年平均值）
Fig. 8 Nitrogen footprint under different treatments (average for 2024-2025)

3 讨论

3.1 间作绿肥减氮配施生物炭保障玉米产量和氮素吸收

间作利用物种间互补效应，优化光、热、水、肥等资源的利用效率，是实现作物增产的高效集约化模式^[33]。将豆科绿肥纳入间作系统，可充分发挥其生物固氮优势，在减少 20%—40%化学氮肥条件下维持作物产量^[34]。本研究中，相比单作处理，间作显著增加玉米籽粒产量 8.1%，尽管氮素累积量的变化未达到显著水平，但呈现出增加趋势。主要是因为豆科绿肥通过生物固氮及根系互作有效补偿化学氮肥减施带来的氮亏缺，为间作系统提供了可持续的氮素来源^[35]。

与常规施氮相比，减施 30%氮肥，玉米籽粒产量显著降低 7.9%，但配施田菁生物炭玉米籽粒产量增加 8.6%。这一结果主要归因于田菁生物炭对土壤养分的积极影响。在减氮 30%条件下，土壤有机质、全氮和速效磷含量显著降低，而田菁生物炭的施用有效维持了土壤有机质和速效磷的含量，并增加了全氮含量（2024 年，表 2）。这些变化共同促进玉米的生长，从而提高了籽粒产量。前人研究表明，减氮 20%配施生物炭可使玉米产量增产 6.5%^[36]。本研究的发现不仅验证了生物炭在减氮条件下的增产效应，更证明了在间作绿肥的系统中，即使减氮 30%，通过配施田菁生物炭仍能实现玉米的稳产增产。

3.2 间作绿肥减氮配施生物炭降低土壤气态氮损失

本研究结果表明，减少氮肥用量是降低农田气态

氮损失的关键措施。与常规施氮(N100)相比,减氮30%(N70)处理 N_2O 和 NH_3 累积排放量分别降低16.0%—25.2%和9.9%—24.7%。这主要归因于减氮直接降低土壤矿质态氮含量,从而减少硝化、反硝化作用和氨挥发的底物浓度(NH_4^+)^[37-38]。Mantel 分析(图7)进一步证实,土壤无机氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$)和可溶性有机氮(DON)含量是影响气态氮损失的关键驱动因子。

在减氮的基础上,田菁生物炭的施用对 NH_3 挥发表现出显著的抑制效应,N70S 较 N70 处理的 NH_3 累积挥发量降低17.6%—43.9%。这主要归因于田菁生物炭丰富的孔隙结构和表面官能团对铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)的物理吸附和化学固持作用,从而有效减少 NH_3 挥发的底物^[39-40]。尽管在玉米成熟期,田菁生物炭处理的土壤无机氮含量未呈现显著变化(表2),但这可能与采样时间未能反映施肥后或气体排放高峰期田菁生物炭对无机氮的短期固持效应有关。已有研究指出,生物炭可在短期内通过吸附作用降低土壤 NH_4^+ 和 NO_3^- 浓度,影响氮转化路径^[41]。

然而,田菁生物炭对 N_2O 累积排放量无显著影响。这种对 NH_3 和 N_2O 排放的差异化效应,揭示了两者减排机制的差异。田菁生物炭通过物理化学吸附直接固持 NH_4^+ , 能有效地抑制旱地强烈的 NH_3 挥发,但对于 N_2O 的减排通常需要通过表面官能团调控微生物的硝化与反硝化过程。本试验所用田菁生物炭的较高炭化温度(680 °C)可能导致其表面官能团(尤其是含氧官能团)减少,加之 $3\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的施用量相对较低,可能未达到显著干预土壤微生物氮转化过程的阈值^[42-43]。

值得注意的是,间作绿肥为系统引入了外源氮源,其土壤全氮(TN)和微生物量氮(MBN)含量增加,但并未因此显著增加 N_2O 排放和 NH_3 挥发(图3)。这表明豆科绿肥固定的氮素更多地进入了土壤有机库和生物量库,进行了相对缓慢的矿化释放过程,与作物氮需求同步性更高^[44],从而降低了短期内快速损失的风险^[45]。

本研究中气态氮损失的降低,是减氮、绿肥与田菁生物炭分别通过不同机制协同作用的结果:减氮从源头控制底物浓度,构成减排基础;间作绿肥通过促进氮素向土壤有机库转化,其减排效应主要依赖于后续的缓慢矿化过程,从而主导 N_2O 减排;而田菁生物炭则通过吸附固持,针对性地强化了旱地条件下对 NH_3 挥发的阻控。

3.3 间作绿肥减氮配施生物炭降低农田系统氮足迹

本研究基于生命周期评价(LCA)框架,系统评估了农资投入与田间活性氮损失对玉米农田氮足迹的综合影响。与已有研究一致, NH_3 挥发和氮素淋溶是氮足迹的主要构成部分^[46]。结果发现,施氮制度及其与种植模式的交互作用对氮足迹均产生显著影响。本研究主要从农资投入角度看,减氮30%(N70)处理较常规施氮(N100)处理的氮足迹降低了27.8%,这主要源于氮肥生产与运输过程中隐含氮消耗的直接减少。间作绿肥对氮足迹无显著影响,而间作绿肥在减氮30%(N70-IMC)时,较常规单作(N100-MM)氮足迹显著降低28.9%,显示出减氮与间作的协同增效作用。这一结果与紫云英-水稻轮作系统降低氮足迹的报道相一致^[5],主要原因是豆科绿肥的固氮作用可替代部分化学氮肥^[47],减少农资投入氮排放。同时,绿肥还田通过改善土壤生态功能提高氮肥利用效率^[48],从而降低氮足迹。配施田菁生物炭在减氮间作基础上进一步降低氮足迹13.4%,使N70S-IMC处理总体降幅达39.7%,主要是因为田菁生物炭通过其特有的孔隙结构和表面性质吸附土壤铵态氮、硝态氮和可溶性有机氮^[49],有效缓解 NH_3 挥发和 N_2O 排放,在输出端降低氮足迹。

综上,本研究通过减氮(源头减量)、间作绿肥(系统增效)和配施田菁生物炭(末端阻控)的多路径协同,实现了玉米农田氮足迹的显著降低。未来的研究可在此基础上,定量优化减氮比例与田菁生物炭用量等关键参数,旨在形成一套适用于西北绿洲灌区、可推广的标准化技术规程,为该区域玉米生产的绿色转型提供可靠的科技支撑。

4 结论

与常规施氮单作相比,减氮30%下玉米间作箭筈豌豆保障了玉米产量与氮素吸收, N_2O 排放、 NH_3 挥发及氮足迹平均分别降低16.1%、15.7%和28.9%,减氮间作并配施田菁生物炭处理增产12.6%,进一步降低 N_2O 排放、 NH_3 挥发及氮足迹19.8%、28.0%和39.7%。其主要机制是,降低土壤活性氮库(硝态氮、铵态氮)强度,提高了土壤全氮含量,进而减少氮素气态损失与系统氮足迹。综上,玉米间作绿肥减氮30%配施田菁生物炭表现出稳定的增产趋势与持续的环境效益,为西北灌区玉米绿色生产提供了可靠的技术路径。

参考文献 References

- [1] Wang C, Shen Y, Fang X T, Xiao S Q, Liu G Y, Wang L G, Gu B J, Zhou F, Chen D L, Tian H Q, Ciais P, Zou J W, Liu S W. Reducing soil nitrogen losses from fertilizer use in global maize and wheat production [J]. *Nature Geoscience*, 2024, 17(10): 1008-1015.
- [2] 习斌, 翟丽梅, 刘申, 刘宏斌, 杨波, 任天志. 有机无机肥配施对玉米产量及土壤氮磷淋溶的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(2): 326-335.
- Xi B, Zhai L M, Liu S, Liu H B, Yang B, Ren T Z. Effects of combination of organic and inorganic fertilization on maize yield and soil nitrogen and phosphorus leaching [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(2): 326-335. (in Chinese)
- [3] 李欠欠, 李雨繁, 高强, 李世清, 陈新平, 张福锁, 刘学军. 传统和优化施氮对春玉米产量、氮挥发及氮平衡的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(3): 571-579.
- Li Q Q, Li Y F, Gao Q, Li S Q, Chen X P, Zhang F S, Liu X J. Effect of conventional and optimized nitrogen fertilization on spring maize yield, ammonia volatilization and nitrogen balance in soil-maize system [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(3): 571-579. (in Chinese)
- [4] Li P F, Zhang A F, Liu H L, Zhu X Y, Xiao H Y, Shan Z H, Hussain Q, Wang X D, Zhou J B, Chen Z J. Managing trade-offs among yield, carbon, and nitrogen footprints of wheat-maize cropping system under straw mulching and N fertilizer application in China's Loess Plateau [J]. *Field Crops Research*, 2025, 325: 109821.
- [5] Liu D, Mo Q, Zhang W, Lin W, Li W J, Batyrbek M, Ding R X, Li H, Yang B P, Zou Y F, Wang L, Gan Y T, Zhang X D, Han Q F. Adapting to diversified garlic-maize rotation systems by adjusting nitrogen application: Assessing crop yield, nitrogen utilization, and nitrogen footprint [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 461: 142672.
- [6] Liang H, Zhou G P, Gao S J, Nie J, Xu C X, Wu J, Liu C Z, Lv Y H, Huang Y B, Geng M J, Wang J H, He T G, Cao W D. Exploring site-specific N application rate to reduce N footprint and increase crop production for green manure-rice rotation system in Southern China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 347: 119033.
- [7] Chai Q, Nemecek T, Liang C, Zhao C, Yu A Z, Coulter J A, Wang Y F, Hu F L, Wang L, Siddique K H M, Gan Y T. Integrated farming with intercropping increases food production while reducing environmental footprint [J]. *PNAS*, 2021, 118(38): e2106382118.
- [8] 李含婷. 间作绿肥及减氮对玉米氮素高效利用的微生物机制[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2023.
- Li H T. Microbiological mechanism of nitrogen high efficient utilization for maize intercropped with green manure under reduced chemical nitrogen application [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2023. (in Chinese)
- [9] Yang L, Luo Y, Lu B L, Zhou G P, Chang D N, Gao S J, Zhang J D, Che Z X, Cao W D. Long-term maize and pea intercropping improved subsoil carbon storage while reduced greenhouse gas emissions [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2023, 349: 108444.
- [10] Gao S J, Zhou G P, Chang D N, Liang H, Nie J, Liao Y L, Lu Y H, Xu C X, Liu J, Wu J, Han S, Wang H, Liu C Z, Lv Y H, Huang Y B, He C M, Geng M J, Wang J H, He T G, Li Z Y, *et al.* Southern China can produce more high-quality rice with less N by green manuring [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2023, 196: 107025.
- [11] Wei J G, Fan Z L, Hu F L, Mao S F, Yin F, Wang Q M, Chai Q, Yin W. Legume green manure can intensify the function of chemical nitrogen fertilizer substitution *via* increasing nitrogen supply and uptake of wheat [J]. *The Crop Journal*, 2024, 12(4): 1222-1232.
- [12] 李越, 樊志龙, 张刁亮, 董勇杰, 彭建辰, 胡发龙, 殷文, 柴强. 生物炭和间作鲜食豌豆对氮肥减量下玉米产量的促进效应[J]. *干旱地区农业研究*, 2024, 42(4): 178-188.
- Li Y, Fan Z L, Zhang D L, Dong Y J, Peng J C, Hu F L, Yin W, Chai Q. Promotional effects of biochar and intercropping fresh peas on yield of maize with reduced application of nitrogen fertilizer [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2024, 42(4): 178-188. (in Chinese)
- [13] Bai J Z, Song J J, Chen D Y, Zhang Z H, Yu Q, Ren G X, Han X H, Wang X J, Ren C J, Yang G H, Wang X, Feng Y Z. Biochar combined with N fertilization and straw return in wheat-maize agroecosystem: Key practices to enhance crop yields and minimize carbon and nitrogen footprints [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2023, 347: 108366.
- [14] Liu R, Chang D N, Liang H, Zhang J D, Li R, Chai Q, Cao W D. Applying green manure and zeolite and reducing N fertilization in maize mitigates N₂O emission while maintaining yield [J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2025, 45(4): 43.

- [15] Yang X S, Xie Z J, Hu Z Y, Wen G Q, Li S Y, Ke X L, Sun X L, Tao M M, Jiang X. Effects of 3-year biochar application on carbon sequestration, nitrogen retention and nitrate leaching of fluvo-aquic soil profiles in vegetable rotation fields [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2024, 367: 108989.
- [16] Liu R, Yang L, Zhang J D, Zhou G P, Chang D N, Chai Q, Cao W D. Maize and legume intercropping enhanced crop growth and soil carbon and nutrient cycling through regulating soil enzyme activities [J]. *European Journal of Agronomy*, 2024, 159: 127237.
- [17] Zhao Q, Chen T T, Wang S, Sha Y, Zhang F, Sun Y D, Chi D C. Effects of five-year field aged zeolite on grain yield and reactive gaseous N losses in alternate wetting and drying paddy system [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 904: 166279.
- [18] 赵秋, 赵鑫, 张新建, 宁晓光, 曹卫东, 常单娜, 吴迪. 控释氮肥结合减氮对冬绿肥夏玉米轮作体系土壤氧化亚氮排放的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2025, 31(8): 1542-1551.
- Zhao Q, Zhao X, Zhang X J, Ning X G, Cao W D, Chang D N, Wu D. Effects of controlled-release nitrogen fertilizer combined with nitrogen reduction on soil nitrous oxide emissions in winter green manure-summer maize rotation system [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2025, 31(8): 1542-1551. (in Chinese)
- [19] Liu R, Zhou G P, Chang D N, Gao S J, Han M, Zhang J D, Sun X F, Cao W D. Transfer characteristics of nitrogen fixed by leguminous green manure crops when intercropped with maize in northwestern China [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2022, 21(4): 1177-1187.
- [20] 乔远, 杨欢, 雒金麟, 汪思娴, 梁蓝月, 陈新平, 张务帅. 西北地区玉米生产投入及生态环境风险评价[J]. *中国农业科学*, 2022, 55(5): 962-976. DOI: 10.3864/j.issn.0578-1752.2022.05.010.
- Qiao Y, Yang H, Luo J L, Wang S X, Liang L Y, Chen X P, Zhang W S. Inputs and ecological environment risks assessment of maize production in northwest China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(5): 962-976. DOI: 10.3864/j.issn.0578-1752.2022.05.010. (in Chinese)
- [21] 刘洋, 栗岩峰, 李久生, 严海军. 东北半湿润区膜下滴灌对农田水热和玉米产量的影响[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(10): 93-104, 135.
- Liu Y, Li Y F, Li J S, Yan H J. Effects of mulched drip irrigation on water and heat conditions in field and maize yield in sub-humid region of Northeast China [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(10): 93-104, 135. (in Chinese)
- [22] 高洪军, 朱平, 彭畅, 张秀芝, 李强, 张卫建. 等氮条件下长期有机无机配施对春玉米的氮素吸收利用和土壤无机氮的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(2): 318-325.
- Gao H J, Zhu P, Peng C, Zhang X Z, Li Q, Zhang W J. Effects of partially replacement of inorganic N with organic materials on nitrogen efficiency of spring maize and soil inorganic nitrogen content under the same N input [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(2): 318-325. (in Chinese)
- [23] 陈津赛, 王广帅, 张莹莹, 高阳, 刘坤. 玉米大豆间作对农田土壤 N₂O 排放的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2020, 39(9): 32-40.
- Chen J S, Wang G S, Zhang Y Y, Gao Y, Liu K. The effects of soybean-maize intercropping on N₂O emission from soil [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2020, 39(9): 32-40. (in Chinese)
- [24] Zhu Z Y, Liu W, Hu J, Zhao K X, Niu B, Wang S T, Li C Y, Kouzani A Z, Han B. Mechanistic insights into oxychar's role in mitigating ammonia volatilization from fertilised alkaline soils [J]. *Science of the Total Environment*, 2025, 979: 179502.
- [25] 谢勇, 荣湘民, 张玉平, 何欣, 石敦杰, 刘强. 控释氮肥减量施用对春玉米土壤 N₂O 排放和氨挥发的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(3): 596-603.
- Xie Y, Rong X M, Zhang Y P, He X, Shi D J, Liu Q. Effects of reduced CRNF applications on N₂O emissions and ammonia volatilization in spring maize soil [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(3): 596-603. (in Chinese)
- [26] Sha Z P, Ma X, Liu H J, Wang J X, Lü T T, Goulding K, Liu X J. Crop-specific ammonia volatilization rates and key influencing factors in the upland of China - A data synthesis [J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 336: 117676.
- [27] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000. (in Chinese)
- [28] 刘夏璐, 王洪涛, 陈建, 何琴, 张浩, 姜睿, 陈雪雪, 侯萍. 中国生命周期参考数据库的建立方法与基础模型[J]. *环境科学学报*, 2010, 30(10): 2136-2144.
- Liu X L, Wang H T, Chen J, He Q, Zhang H, Jiang R, Chen X X, Hou P. Method and basic model for development of Chinese reference life cycle database [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(10): 2136-2144. (in Chinese)
- [29] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C [J]. *Soil Biology and Biochemistry*,

- 1987, 19(6): 703-707.
- [30] Zuliani F, Manzardo A, Marson A, Fedele A. A life cycle assessment approach for nitrogen footprint quantification: The reactive nitrogen indicator [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 882: 163578.
- [31] 廖启元, 李粤丰, 詹慧秀, 童成立, 方贤滔, 王聪, 吴金水, 沈健林. 生物炭配施硝化/脲酶抑制剂及秸秆覆盖对红壤茶园氮磷淋失影响[J]. *水土保持学报*, 2025, 39(5): 116-127.
- Liao Q Y, Li Y F, Zhan H X, Tong C L, Fang X T, Wang C, Wu J S, Shen J L. Effects of biochar combined with nitrification/urease inhibitor and straw mulching on nitrogen and phosphorus leaching in red soil tea plantations [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2025, 39(5): 116-127. (in Chinese)
- [32] 陈中督, 徐春春, 纪龙, 方福平. 长江中游地区稻麦生产系统碳足迹及氮足迹综合评价[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(7): 1125-1133.
- Chen Z D, Xu C C, Ji L, Fang F P. Comprehensive evaluation for carbon and nitrogen footprints of rice-wheat rotation system in Middle Yangtze River Basin [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(7): 1125-1133. (in Chinese)
- [33] 秦树平, 胡春胜, 张玉铭, 王玉英, 董文旭, 李晓欣. 氮足迹研究进展[J]. *中国生态农业学报*, 2011, 19(2): 462-467.
- Qin S P, Hu C S, Zhang Y M, Wang Y Y, Dong W X, Li X X. Advances in nitrogen footprint research [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(2): 462-467. (in Chinese)
- [34] Zhu Q R, Yang Z Y, Zhang Y P, Wang Y Z, Fei J C, Rong X M, Peng J W, Wei X M, Luo G W. Intercropping regulates plant- and microbe-derived carbon accumulation by influencing soil physicochemical and microbial physiological properties [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2024, 364: 108880.
- [35] Li X F, Wang Z G, Bao X G, Sun J H, Yang S C, Wang P, Wang C B, Wu J P, Liu X R, Tian X L, Wang Y, Li J P, Wang Y, Xia H Y, Mei P P, Wang X F, Zhao J H, Yu R P, Zhang W P, Che Z X, *et al.* Long-term increased grain yield and soil fertility from intercropping [J]. *Nature Sustainability*, 2021, 4(11): 943-950.
- [36] Xing Y, Yu R P, An R, Yang N, Wu J P, Ma H Y, Zhang J D, Bao X G, Lambers H, Li L. Two pathways drive enhanced nitrogen acquisition via a complementarity effect in long-term intercropping [J]. *Field Crops Research*, 2023, 293: 108854.
- [37] Zhang P Y, Liu J Z, Wang M D, Zhang H C, Yang N, Ma J, Cai H J. Effects of irrigation and fertilization with biochar on the growth, yield, and water/nitrogen use of maize on the Guanzhong Plain, China [J]. *Agricultural Water Management*, 2024, 295: 108786.
- [38] Chi W C, Nan Q, Liu Y X, Dong D, Qin Y, Li S J, Wu W X. Stress resistance enhancing with biochar application and promotion on crop growth [J]. *Biochar*, 2024, 6(1): 43.
- [39] 白芳芳, 乔冬梅, 李平, 杜臻杰, 陆红飞, 郭魏, 齐学斌. 减氮对麦玉轮作农田土壤反硝化细菌群落结构和多样性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2024, 43(6): 1338-1349.
- Bai F F, Qiao D M, Li P, Du Z J, Lu H F, Guo W, Qi X B. Effects of nitrogen reduction on community structure and diversity of denitrifying bacteria in wheat-maize rotation farmland [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024, 43(6): 1338-1349. (in Chinese)
- [40] Daba N A, Huang J, Shen Z, Han T F, Alam M A, Li J W, Tadesse K A, Gilbert N, Kebede E, Legesse T G, Liu S J, Liu L S, Liu K L, Zhang H M. Green manure substitution for chemical nitrogen reduces greenhouse gas emissions and enhances yield and nitrogen uptake in rice rice cropping systems [J]. *Field Crops Research*, 2025, 322: 109715.
- [41] 董成, 陈智勇, 谢迎新, 张阳阳, 缙培欣, 杨家蓓, 马冬云, 王晨阳, 郭天财. 生物炭连续施用对农田土壤氮转化微生物及 N₂O 排放的影响[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(19): 4024-4034. DOI: 10.3864/j.issn.0578-1752.2020.19.015.
- Dong C, Chen Z Y, Xie Y X, Zhang Y Y, Gou P X, Yang J H, Ma D Y, Wang C Y, Guo T C. Effects of successive biochar addition to soil on nitrogen functional microorganisms and nitrous oxide emission [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(19): 4024-4034. DOI: 10.3864/j.issn.0578-1752.2020.19.015. (in Chinese)
- [42] 范靖尉, 白晋华, 任寰宇, 韩雪, 刁田田, 郭李萍. 减氮和施生物炭对华北夏玉米-冬小麦土壤 CO₂ 和 N₂O 排放的影响[J]. *中国农业气象*, 2016, 37(2): 121-130.
- Fan J W, Bai J H, Ren H Y, Han X, Diao T T, Guo L P. Effects of reducing nitrogen and biochar application on CO₂ and N₂O emissions from summer maize-winter wheat field in North China [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2016, 37(2): 121-130. (in Chinese)
- [43] 王翰琨, 吴永波, 刘俊萍, 薛建辉. 生物炭对土壤氮循环及其功能微生物的影响研究进展[J]. *生态与农村环境学报*, 2022, 38(6): 689-701.
- Wang H K, Wu Y B, Liu J P, Xue J H. A review of research advances in the effects of biochar on soil nitrogen cycling and its functional microorganisms [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2022, 38(6): 689-701. (in Chinese)

- [44] 郭傲瑜, 金文, 刘志涛, 程照瑞, 赵文青, 孟亚利. 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, Cheng Z R, Zhao W Q, Meng Y L. 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. (in Chinese)
- [45] 刘玉学, 刘微, 吴伟祥, 钟哲科, 陈英旭. 土壤生物质炭环境行为与环境效应[J]. 应用生态学报, 2009, 20(4): 977-982.
- Liu Y X, Liu W, Wu W X, Zhong Z K, Chen Y X. Environmental behavior and effect of biomass-derived black carbon in soil: A review [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(4): 977-982. (in Chinese)
- [46] 樊志龙, 柴强, 曹卫东, 于爱忠, 赵财, 谢军红, 殷文, 胡发龙. 绿肥在我国旱地农业生态系统中的服务功能及其应用[J]. 应用生态学报, 2020, 31(4): 1389-1402.
- Fan Z L, Chai Q, Cao W D, Yu A Z, Zhao C, Xie J H, Yin W, Hu F L. Ecosystem service function of green manure and its application in dryland agriculture of China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(4): 1389-1402. (in Chinese)
- [47] 秦文利, 张静, 肖广敏, 崔素倩, 叶建勋, 智健飞, 张立锋, 谢楠, 冯伟, 刘振宇, 潘璇, 代云霞, 刘忠宽. 绿肥部分替代化肥氮对土壤物理性状的影响[J]. 草业学报, 2025, 34(6): 27-45.
- Qin W L, Zhang J, Xiao G M, Cui S Q, Ye J X, Zhi J F, Zhang L F, Xie N, Feng W, Liu Z Y, Pan X, Dai Y X, Liu Z K. Effects of partial replacement of chemical nitrogen fertilizers with green manure on soil physical properties and maize (*Zea mays*) yield [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(6): 27-45. (in Chinese)
- [48] 刘蕊, 常单娜, 周国朋, 高嵩涓, 柴强, 曹卫东. 农田氧化亚氮减排技术及其与绿肥协同应用分析[J]. 草业学报, 2025, 34(2): 196-210.
- Liu R, Chang D N, Zhou G P, Gao S J, Chai Q, Cao W D. Techniques of N_2O emission reduction in farmland and their synergistic application with green manure [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(2): 196-210. (in Chinese)
- [49] 胡立煌, 史文竹, 项剑, 王艮梅, 张焕朝. 生物炭、秸秆和粪肥对滨海盐碱土氮矿化和硝化作用的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2020, 36(8): 1089-1096.
- Hu L H, Shi W Z, Xiang J, Wang G M, Zhang H C. Effects of biochar, straw and manure fertilizer on nitrogen mineralization and nitrification of coastal saline-alkali soil [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2020, 36(8): 1089-1096. (in Chinese)
- (责任编辑 李云霞)