

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2020.06.011

王启, 兰婷, 赖晶晶, 等. 生物质炭添加对不同 pH 紫色土硝化作用及 N₂O 排放的影响. 土壤, 2020, 52(6): 1170–1178.

生物质炭添加对不同 pH 紫色土硝化作用及 N₂O 排放的影响^①

王 启¹, 兰 婷^{1,2}, 赖晶晶¹, 高雪松^{1,2*}

(1 四川农业大学资源学院, 成都 611130; 2 四川农业大学资源与地理信息技术研究所, 成都 611130)

摘 要: 生物质炭施用可能对土壤中氮素硝化过程和 N₂O 排放产生影响。本研究通过室内培养试验, 研究铵态氮肥与玉米秸秆生物质炭施用量(0、1%、2%、5%、10%, *m/m*)对酸性(pH 5.10)和石灰性紫色土(pH 8.15)氮素硝化率、净硝化速率及 N₂O 排放特征的影响。结果表明: ①酸性和石灰性紫色土生物质炭处理平均净硝化速率相比对照分别降低了 33.7% ~ 93.7% 和 7.5% ~ 40.9%, 生物质炭添加抑制了酸性和石灰性紫色土硝化作用, 在酸性紫色土中生物质炭对氮素硝化作用的抑制作用随施用量的增加而增强, 在石灰性紫色土中无明显规律。②与对照相比, 酸性紫色土 N₂O 累计排放量在 1% 生物质炭和 2% 生物质炭处理下降幅分别为 15.9% 和 27.7%, 在 5% 和 10% 生物质炭处理下增幅分别为 60.1% 和 93.2%。石灰性紫色土生物质炭各处理 N₂O 累积排放量均显著高于对照。③综合考虑酸性紫色土 1%、2% 生物质炭量施用下对硝化作用抑制和 N₂O 减排综合效果最好, 在石灰性紫色土中无明显抑制和减排效果。

关键词: 生物质炭; 紫色土; 净硝化速率; 硝化率; N₂O

中图分类号: S19 文献标志码: A

Effects of Biochar Application on Nitrification and N₂O Emission in Purple Soils with Different pH

WANG Qi¹, LAN Ting^{1,2}, LAI Jingjing¹, GAO Xuesong^{1,2*}

(1 College of Resources, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; 2 Institute of Resources and Geography Information Technology, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

Abstract: Biochar can influence soil nitrogen nitrification and N₂O emission. An indoor incubation experiment was conducted to study the net nitrogen nitrification rates and N₂O emission in acidic (pH 5.10) and calcareous (pH 8.15) upland purple soils under different application rates of maize straw biochar (0, 1%, 2%, 5%, and 10% dry soil weight) with ammonium nitrogen fertilizer. The results showed that: 1) biochar addition inhibited net nitrogen nitrification rate in purple soils, compared with control treatment (no biochar application), biochar application reduced the average net nitrogen nitrification rate by 33.7%–93.7% in acidic purple soil and 7.5%–40.9% in calcareous purple soil. With the increase of biochar application rate, the inhibition was enhanced in acidic purple soil but irregular in calcareous purple soil. 2) Biochar addition significantly increased N₂O emission, compared with the control treatment, cumulative N₂O emission in acid purple soil decreased by 15.9% and 27.7% with 1% and 2% biochar addition rates, respectively. But cumulative N₂O emission in calcareous purple soil increased by 60.1% and 93.2% with 5% and 10% biochar addition rates, respectively, and cumulative N₂O emission of all biochar addition treatments in calcareous purple soil were significantly higher than that of the control treatment. 3) In general, biochar has no positive effect for calcareous purple soil in inhibiting nitrification and mitigate N₂O emission, while 1% and 2% biochar addition rates are optimal for in acidic purple soil.

Key words: Biochar; Purple soil; Net nitrogen nitrification rate; Nitrification rate; N₂O

我国农田每年氮肥施用量高达 3 000 万 t 纯氮, 约占全球总用量的 1/3, 氮肥消费量远超作物需求量,

肥料利用效率却不到 50%^[1]。低水平氮肥利用率不仅经济效益低下, 同时导致土壤酸化^[2]、水体富营养

①基金项目: 国家自然科学基金项目(41501243)资助。

* 通讯作者(gxs80@126.com)

作者简介: 王启(1994—), 男, 四川雅安人, 硕士研究生, 研究方向为紫色土氮素循环和温室气体排放。E-mail: wangqibilly@sohu.com

化^[3]、温室气体排放^[4]等一系列生态环境问题。土壤硝化作用是土壤氮素转化的重要环节,也是生态系统中氮素损失和影响生态环境的潜在途径^[5]。硝化作用过程受土壤 pH、水分、温度、有机质等诸多土壤性质的综合影响^[6]。N₂O 被认为是最主要的温室气体之一,其增温潜力是 CO₂ 的 298 倍^[7],主要产生来源是土壤硝化和反硝化作用,农田土壤排放的 N₂O 占全球 N₂O 排放总量的 60%^[8],到 2030 年农业 N₂O 排放将预期增长 35%~60%^[9]。

生物质炭是生物质缺氧热解炭化成的难溶性芳香族化合物,对全球碳氮生物地球化学循环和调节气候变化具有重要影响^[10]。有研究表明生物质炭能通过影响土壤净硝化速率^[11]、提高氮的利用效率^[12]、减少 N₂O 排放^[13-15]等影响土壤氮循环。生物质炭的施用量及类型均会对土壤氮转化过程产生影响,土壤类型和土壤性质不同也是影响生物质炭作用效果的重要因素^[16]。季雅岚等^[17]发现在对酸性土壤分别施入 12 种不同生物质炭后均能显著促进土壤硝化作用,相反 Yang 等^[18]发现在酸性土壤施入生物质炭抑制了硝化作用,也有研究指出外源碳源的施入对土壤硝化活性没有显著影响^[19]。Sun 等^[20]在对碱性土壤施用不同用量麦秆生物质炭的研究中发现,0.5% 和 1% 低量生物质炭对土壤保氮能力有提升,但高量生物质炭添加下提升能力减弱。有学者综合统计分析近几年相关文献得出,生物质炭施用下对土壤 N₂O 平均减排率为 54%^[21]。但也有报道认为生物质炭对 N₂O 排放没有明显影响,甚至会促进 N₂O 排放^[22-24],不同施用量的生物质炭在不同土壤中甚至会分别表现出促进和抑制 N₂O 排放效果^[25]。由此可见,不同用量生物质炭对于不同性质土壤中氮素转化及 N₂O 排放的影响和机制尚需进一步研究。

四川紫色土耕地占全省耕地面积的 36.5%^[26],其发育程度浅、结构疏松、氮素含量低、保氮能力

弱,硝酸盐淋溶强烈^[27]。随着近年来紫色土垦殖率和复种指数提高,加速了紫色土中氮素的流失,使得氮素成为限制紫色土农业生产的营养元素。虽然已有生物质炭对土壤氮素和 N₂O 排放等方面的相关研究,但针对紫色土的研究鲜有报道,而酸碱度不同的土壤微生物群落结构及活性的差异会影响氮素转化进程,尤其是在不同生物质炭添加量下对氮转化和 N₂O 排放效果可能不尽相同。因此,本试验以西南地区典型的酸性和石灰性紫色土为研究对象,通过短期培养试验研究生物质炭添加量对紫色土氮素净转化速率及 N₂O 排放的影响,以期理解生物质炭对紫色土氮素转化的影响及制定 N₂O 减排措施提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤为四川盆地内的酸性和石灰性旱地紫色土,酸性紫色土取自乐山市市中区平兴乡(103°31'56"~103°59'25" E, 29°28'00"~29°45'45" N),碱性紫色土取自遂宁市安居区玉丰镇(105°4'0"~105°43'45" E, 30°10'30"~30°34'10" N),耕地农作物均为玉米。乐山市市中区属中亚热带湿润季风气候,无霜期长达 300 d 以上,年平均气温为 16.5~18.0 °C,气候湿润、雨量充沛,土壤类型为酸性紫色土,母质为白垩纪夹关组。遂宁市安居区属亚热带季风气候,气候温和、四季分明,无霜期长达 283~300 d,年平均气温为 16.7~17.4 °C,雨量充沛、湿度大,土壤类型为石灰性紫色土,母质为侏罗纪中统遂宁组。分别在两地耕地相邻范围内采集 10 个表层 0~20 cm 土壤,将其混合均匀为一个土样。每个样本新鲜土过 2 mm 筛,分为两个子样本,一个子样本放入 4 °C 冰箱冷藏或立即用于实验室培养;另一个风干后测定理化性质,其基本理化性质见表 1。

表 1 供试土壤基本理化性质
Table 1 Physiochemical properties of tested soils

土壤类型	pH	总碳(g/kg)	全氮(g/kg)	C/N	<2 μm 黏粒(%)	CEC (cmol/kg)
酸性紫色土	5.10	16.72	0.70	23.89	17.60	7.04
石灰性紫色土	8.15	13.25	0.82	16.16	29.60	26.25

1.2 供试生物质炭

供试生物质炭由玉米秸秆在 450 °C 无氧条件下热解制得,生物质炭过 2 mm 筛备用,其基本理化性

质见表 2。

1.3 试验设计

试验在酸性和石灰性紫色土中分别设置 5 个生

表 2 供试生物质炭基本理化性质
Table 2 Physiochemical properties of tested biochar

生物质炭类型	pH	全碳(g/kg)	全氮(g/kg)	C/N	CEC((cmol)/kg)	BET 比表面积(m ² /g)	平均孔径(nm)
玉米秸秆	10.20	532.70	7.25	73.48	15.60	79.57	2.86

物质炭添加水平(0、1%、2%、5%、10%, *m/m*): ①酸性土无生物质炭施入(AB₀); ②酸性土 1% 生物质炭施入处理(AB₁); ③酸性土 2% 生物质炭施入处理(AB₂); ④酸性土 5% 生物质炭施入处理(AB₅); ⑤酸性土 10% 生物质炭施入处理(AB₁₀); ⑥石灰性土无生物炭输入(CB₀); ⑦石灰性土 1% 生物质炭施入处理(CB₁); ⑧石灰性土 2% 生物质炭施入处理(CB₂); ⑨石灰性土 5% 生物炭输入处理(CB₅); ⑩石灰性土 10% 生物质炭施入处理(CB₁₀)。每个处理设置 7 个采样时间点, 每个时间点 3 次重复。试验时, 称取 40 g(干土重)鲜土样于 400 ml 塑料瓶中, 分别向培养瓶中加入相应磨碎的生物质炭(0.2 mm)。所有样品在 25℃ 恒温培养箱内预培养 1 d, 然后用移液枪向瓶内土样均匀加入 2 ml 含氮(N)50 mg/kg 的 NH₄Cl 溶液, 使其尽可能均匀分布于土壤; 并用去离子水调节所有样品含水量至 60% 田间持水量, 盖上盖子在 25℃ 恒温培养 14 d。试验过程中, 每天打开盖子通气 30 min, 保证培养在好气条件下进行, 每隔 3 d 通过称重法补充因蒸发而损失的水分。

1.4 样品采集与分析

在培养试验开始后的 2 h、1 d、2 d、4 d、7 d、12 d 和 14 d, 随机选取 3 个重复破坏性采样, 加入 200 ml 2 mol/L 的 KCl 溶液, 在 25℃、250 r/min 下振荡 1 h, 过滤后储存于 4℃ 冰箱, 采用 CleverChem 380 全自动间断化学分析仪测定土壤浸提液中的 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 浓度。

气体样本采集在培养试验开始后的 1、2、4、7、12、14 d 进行。在采气前 12 h 进行换气, 盖上连有三通阀的盖子, 使其完全密闭。采气时用 20 ml 注射器接上三通阀, 推拉 5 次使培养瓶内空气充分混合后精确采集 20 ml 气体, 并转移入 20 ml 用真空泵已抽真空的小玻璃气瓶中保存, N₂O 气体浓度采用安捷伦 7890A 气象色谱测定, N₂O 标准气体由中国国家标准物质中心提供。

土壤基本理化性质测定参照鲁如坤《土壤农业化学分析方法》^[28], 其中土壤 pH 采用 METTLER-S220-K pH 计测定(2.5 : 1 水土质量比浸提), 土壤颗粒组成采用比重计法测定, CEC 采用乙酸铵-EDTA 交换法测定; 土壤有机质含量采用重铬酸钾-浓硫酸外加热法测定; 土壤全氮采用半微量凯氏定氮法测定; 碱解氮采用碱解扩散法测定。

1.5 试验数据处理

1) 土壤硝化率计算公式^[29]:

$$\text{硝化率}(\%) = \frac{[\text{NO}_3^- - \text{N}]}{([\text{NH}_4^+ - \text{N}] + [\text{NO}_3^- - \text{N}])} \times 100 \quad (1)$$

2) 氮素净硝化速率计算公式^[30]:

$$R_N = \frac{(\text{NO}_3^- - \text{N})d_n - (\text{NO}_3^- - \text{N})d_{n-1}}{(d_n - d_{n-1})} \quad (2)$$

式中: R_N 为土壤净硝化速率, 单位 mg/(kg d); n 为培养天数。

3) N₂O 排放速率计算公式^[30]:

$$F = \rho \times \frac{V}{W} \times \frac{\Delta C}{\Delta t} \times \frac{273}{273 + T} \quad (3)$$

式中: F 为 N₂O 排放速率, 单位 mg/(m³ h)(N₂O-N); ρ 为标准状态下 N₂O 的密度, 单位 1.25 kg/m³(N₂O-N); V 为培养瓶中气体的有效空间, 单位 m³; W 为置于培养瓶内的烘干土重, 单位 kg; ΔC 为二次采样时间间隔的气体浓度差, 单位 μg/L; Δt 为两次采样的时间间隔, 单位 h; T 为培养时的温度, 单位 ℃。N₂O 排放速率为每次测得的 3 个重复计算平均值所得。

(2) N₂O 累积排放量计算公式^[30]:

N₂O 的累积排放量是通过相邻两次采样的气体平均排放通量与排放时间的乘积累加计算得出, 计算公式如下:

$$C = \sum_{i=1}^n (F_i + F_{i+1}) / 2 \times 24 \times d \quad (4)$$

式中: C 代表土壤 N₂O 的累积排放量, 单位为 g/m³; F 代表土壤 N₂O 排放速率, 单位 mg/(m³ h)(N₂O-N); i 代表采样次数; d 为相邻两次采气所间隔的天数。

本文试验数据采用 Excel 2010 进行数据整理, 采用 SPSS 19.0 进行相关性分析(Pearson)检验不同生物质炭添加量下硝化率和 N₂O 气体排放之间的关系, 采用单因素方差分析(one-way ANOVA)检验各处理间差异的显著性水平, 采用最小显著差异法(LSD, $P < 0.05$)进行不同处理间均值的显著性差异比较。

2 结果与分析

2.1 添加生物质炭对土壤铵态氮动态变化的影响

在整个培养期内, AB₀ 处理下 NH₄⁺-N 含量均始终呈下降趋势, 生物质炭处理下土壤中 NH₄⁺-N 含量存在明显的阶段性特征(图 1)。各生物质炭处理 NH₄⁺-N 含量在培养 0 ~ 1 d 略微上升, 此后至 12 d 各处理 NH₄⁺-N 含量降低, 12 ~ 14 d 含量呈上升趋势。

至培养结束时,酸性紫色土添加生物质炭处理 NH₄⁺-N 含量为 28.17 ~ 38.80 mg/kg, 下降了 23.8% ~ 48.0%, AB₁₀ 处理 NH₄⁺-N 含量降幅最小(23.8%), AB₀ 处理 NH₄⁺-N 含量仅为 6.06 mg/kg, 下降了 90.2%, 与添加生物质炭处理含量差异显著。

同酸性紫色土,在整个培养期内, CB₀ 处理下石

灰性紫色土 NH₄⁺-N 含量均始终呈下降趋势, 生物质炭各处理在 0 ~ 2 d 时 NH₄⁺-N 含量急剧下降, 此后变化较小, 在 12 ~ 14 d 时 NH₄⁺-N 含量呈上升趋势。培养结束时,石灰性紫色土各处理 NH₄⁺-N 含量为 2.81 ~ 9.84 mg/kg, CB₀ 处理 NH₄⁺-N 下降了 95.1%, CB₂ 处理下 NH₄⁺-N 含量降幅最小(81.2%)。

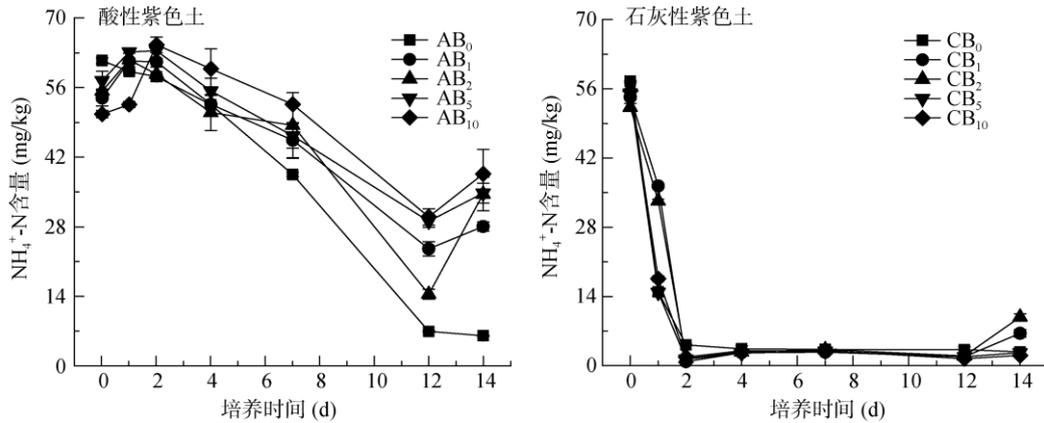


图 1 生物质炭不同添加量对酸性和石灰性紫色土 NH₄⁺-N 含量的影响

Fig.1 Soil NH₄⁺-N contents in acidic and calcareous purple soils under different biochar application rates

2.2 添加生物质炭对土壤硝态氮动态变化的影响

从图 2 可知,各处理酸性紫色土 NO₃⁻-N 含量总体随时间均呈上升趋势。在整个培养期间,酸性紫色土 AB₀ 处理下 NO₃⁻-N 含量持续增加。在培养前 4 d,酸性紫色土生物质炭处理 NO₃⁻-N 含量变化较小,此后 NO₃⁻-N 含量均显著上升,在培养期间 NO₃⁻-N 含量均小于 AB₀ 处理。培养结束时,低量生物质炭处理 AB₁、AB₂ 的 NO₃⁻-N 含量与 AB₀ 处理间差异不显著,高量生物质炭处理 AB₅、AB₁₀ 与 AB₀ 处理则差异显著, AB₁₀

处理 NO₃⁻-N 含量最低,相比与 AB₀ 处理减少了 47.7%。

石灰性紫色土生物质炭各处理在 1 ~ 14 d 培养期间, NO₃⁻-N 含量均小于 CB₀ 处理。在培养前 2 d,石灰性紫色土各处理 NO₃⁻-N 含量显著增加,此后 CB₀ 处理 NO₃⁻-N 含量略微上升,其余各处理 NO₃⁻-N 含量总体呈下降趋势。至培养结束时,与 CB₀ 处理相比,石灰性紫色土添加生物质炭处理 NO₃⁻-N 含量下降了 6.8% ~ 26.4%, CB₁₀ 处理下石灰性紫色土 NO₃⁻-N 含量降幅最大(26.4%)。

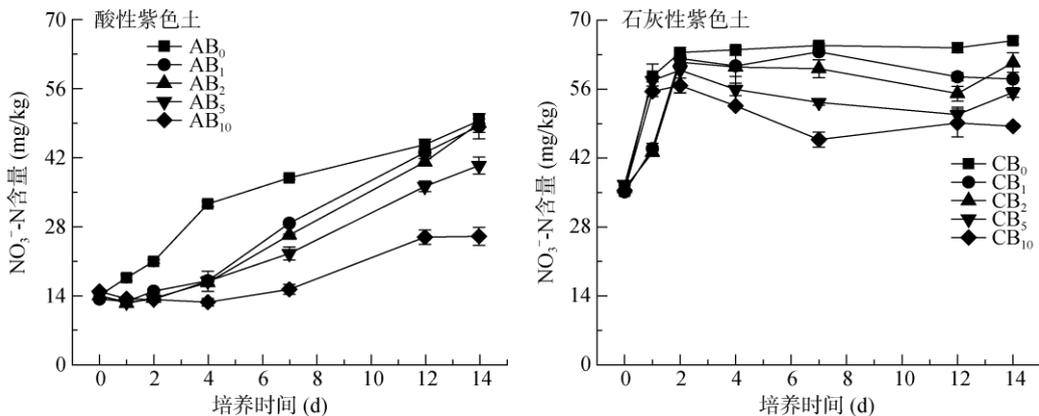


图 2 生物质炭不同添加量对酸性和石灰性紫色土 NO₃⁻-N 含量的影响

Fig. 2 Soil NO₃⁻-N contents in acidic and calcareous purple soils under different biochar application rates

2.3 添加生物质炭对土壤硝化率的影响

培养期间酸性紫色土 AB₀ 处理下硝化率始终呈

上升趋势,各生物质炭处理土壤硝化率 0 ~ 1 d 先降低, 1 ~ 12 d 逐渐升高, 12 ~ 14 d 再下降(图 3)。在培

养结束时,酸性紫色土 AB_0 处理硝化率最高(89.1%),各生物质炭处理硝化率为 40.0% ~ 63.1%,且硝化率随生物质炭添加量增多而降低, AB_{10} 处理下培养结束时硝化率最低(40.0%)。石灰性紫色土硝化率呈现先增加后稳定再略下降的趋势。在 0 ~ 2 d,石灰性紫色土各处理硝化率显著上升,此后变化较小且处于同一显著水平,在 12 ~ 14 d 时各处理(除 AB_0)硝化率均有略微下降趋势。在培养结束时,石灰性紫色土 CB_0

处理硝化率为 95.9%,生物质炭各处理硝化率为 86.2% ~ 95.5%, CB_2 处理下石灰性紫色土硝化率最低(86.2%);在 2 ~ 12 d 期间各处理硝化率无显著差异,各处理硝化率均在 93.8% ~ 98.7%,基本完成硝化作用。

生物质炭添加可显著降低酸性紫色土硝化率,且硝化率随生物质炭施入量的增多而降低;生物质炭添加对石灰性紫色土硝化率影响不大, CB_2 处理下石灰性紫色土硝化率降低相对最多。

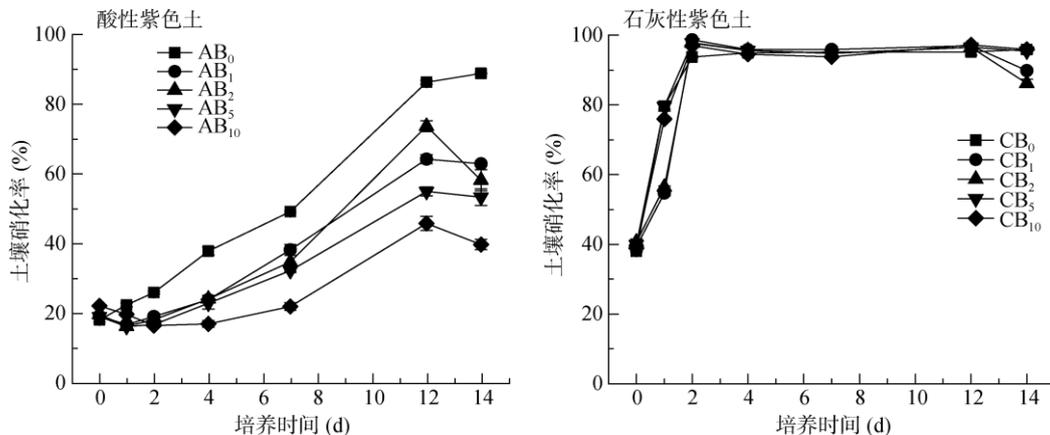


图 3 酸性和石灰性紫色土不同生物质炭添加量下硝化率变化

Fig. 3 Soil nitrification rates in acidic and calcareous purple soils under different biochar application rates

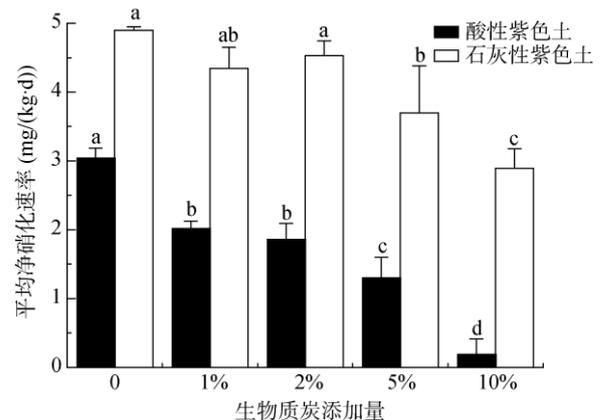
2.4 添加生物质炭对紫色土氮素净硝化速率的影响

酸性紫色土氮素平均净硝化速率随生物质炭添加量的增多呈下降趋势(图 4)。酸性紫色土 AB_0 处理平均净硝化速率最高(3.05 mg/(kg d)),酸性紫色土生物质炭处理平均净硝化速率相比 AB_0 处理降低了 33.7% ~ 93.8%。 AB_{10} 处理平均净硝化速率最低(0.19 mg/(kg d)),与 AB_0 处理相比下降了 93.8%。石灰性紫色土各处理氮素平均净硝化速率均处于较高水平,且随生物质炭施入的增多而降低(CB_2 处理除外)。石灰性紫色土 CB_0 处理平均净硝化速率最大(4.90 mg/(kg d)),添加生物质炭各处理平均净硝化速率为 2.89 ~ 4.53 mg/(kg d),相比 CB_0 处理降低了 7.5% ~ 40.9%。 CB_{10} 处理平均净硝化速率最低(2.89 mg/(kg d)),与 CB_0 处理相比下降了 40.9%。

因此,添加生物质炭可抑制酸性和石灰性紫色土氮素净硝化速率,且高量(10%)生物质炭添加下紫色土氮素平均净硝化速率最低。总体来看,酸性紫色土平均净硝化速率小于石灰性紫色土。

2.5 土壤 N_2O 排放速率与累积排放量的变化

由图 5 可知,在酸性紫色土试验中,在试验开始



注:不同大小写字母表示不同处理间差异达显著水平($P < 0.05$)。

图 4 不同处理紫色土氮素平均净硝化速率

Fig. 4 Average net nitrogen nitrification rates in acidic and calcareous purple soils under different biochar application rates

时(1 d),土壤迅速产生 N_2O ,在培养的 1 ~ 4 d 排放速率逐渐降低。培养 1 d 时,相比 AB_0 处理, AB_5 处理 N_2O 排放速率增加 31.1%, AB_1 和 AB_{10} 处理分别降低 26.0% 和 70.9%。添加生物炭各处理在培养 7 d 时 N_2O 排放速率均较培养 4 d 时增加。培养期间, AB_1 和 AB_2 处理 N_2O 排放速率除在培养 7 d 时高于 AB_0 处理,其余均小于 AB_0 处理。培养结束时(14 d),相比 AB_0 处理, AB_1 和 AB_2 处理 N_2O 排放速率分别

降低 73.5% 和 75.1%，AB₁₀ 处理增加了 48.0%。

石灰性紫色土 N₂O 排放速率在试验开始显著大于酸性紫色土。在培养 1 d 时，除 CB₂ 处理其余生物质炭处理外 N₂O 排放速率均大于 CB₀ 处理。添加生物质炭各处理在培养 2 d 和 14 d 天时的 N₂O

排放速率均增加，且在 2 d 时增加显著，各处理增幅分别为 283.0%、350.4%、130.1% 和 266.3%；培养结束时(14 d)，生物质炭各处理较 CB₀ 处理 N₂O 排放速率分别增加 50.8%、73.7%、45.9% 和 143.8%。

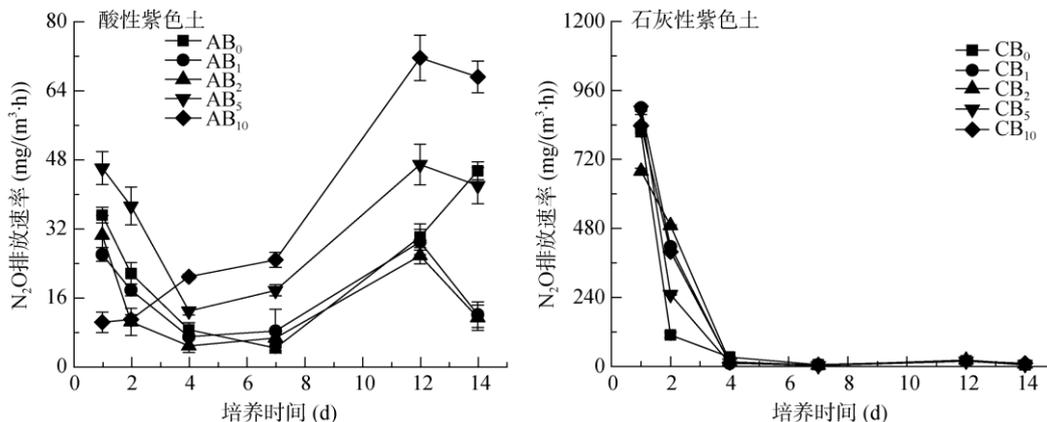


图 5 酸性和石灰性紫色土不同生物质炭添加量下 N₂O 排放速率变化

Fig. 5 N₂O emission fluxes in acidic and calcareous purple soils under different biochar application rates

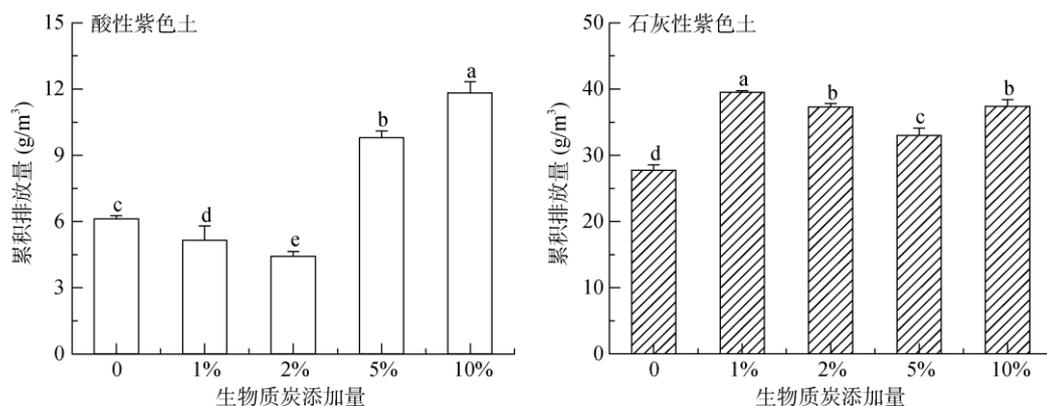
由图 6 可知，在酸性紫色土中与 AB₀ 处理相比，AB₁ 和 AB₂ 处理 N₂O 累积排放量降幅分别为 15.9% 和 27.7%；AB₅ 和 AB₁₀ 处理 N₂O 累积排放量分别增加 60.1% 和 93.2%。相比 AB₀ 处理，添加生物质炭在 1% 和 2% 低量时对 N₂O 的排放具有抑制作用，而随着添加量的提高，当添加量为 5% 和 10% 时，促进了土壤 N₂O 的排放。在酸性紫色土中较低量生物质炭添加能显著降低 N₂O 排放，但高量添加条件下显著促进了 N₂O 排放。

石灰性紫色土生物质炭各处理的 N₂O 累积排放量均显著高于 CB₀ 处理，CB₁、CB₂、CB₅ 和 CB₁₀ 处

理的石灰性紫色土 N₂O 累积排放量分别增长了 42.3%、34.4%、18.8% 和 34.7%。添加生物质炭促进了石灰性紫色土 N₂O 的排放。

2.6 土壤硝化率与 N₂O 排放的相关分析

由表 3 可知，酸性和石灰性紫色土中，各处理土壤硝化率与 N₂O 累积排放量均有正相关关系。其中在酸性紫色土中，硝化率与 N₂O 累积排放量在各处理中均呈极显著正相关性；在石灰性紫色土中，硝化率与 N₂O 累积排放量在 CB₀ 处理中呈极显著正相关性，在 CB₁、CB₅ 和 CB₁₀ 处理中呈显著正相关性。



注：图中不同字母表示不同处理间差异达显著水平(P<0.05)，“-”表示参比。

图 6 生物质炭对酸性和石灰性紫色土 N₂O 累积排放量的影响

Fig. 6 Cumulative N₂O emission in acidic and calcareous purple soils under different biochar application rates

表 3 土壤硝化率与 N₂O 累积排放量的相关性分析

Table 3 Correlation analysis between nitrification rate and N₂O cumulative emission

相关系数	酸性紫色土					石灰性紫色土				
	AB ₀	AB ₁	AB ₂	AB ₅	AB ₁₀	CB ₀	CB ₁	CB ₂	CB ₅	CB ₁₀
	0.968**	0.975**	0.923**	0.971**	0.922**	0.964**	0.847*	0.782	0.880*	0.869*

注：“*”和“**”表示在 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 水平显著相关。

3 讨论

3.1 生物质炭不同添加量对紫色土硝化作用的影响

在不同量生物质炭的施用处理下,至培养结束酸性和石灰性紫色土 NH₄⁺-N 含量降幅显著低于对照,10%生物质炭处理降幅最低,生物质炭可能提高了土壤对 NH₄⁺ 的固持能力,尤其是酸性紫色土中 NH₄⁺-N 降幅随生物质炭施用量的增加而减小。生物质炭的多孔结构、高比表面积会增加土壤中离子交换位点,使其表面交换活性升高,增加了土壤对 NH₄⁺ 的吸附^[31]。针对紫色土的 NH₄⁺ 吸附动力学研究表明,随土壤 pH 升高,土壤对 NH₄⁺ 吸附量增加^[32]。生物质炭施入增加了土壤 pH,也促进了土壤对 NH₄⁺ 的吸附能力。酸性紫色土在培养 12~14 d 时 NH₄⁺-N 含量开始上升,李娜等^[33]在施用生物质炭对黑土作用培养试验中也发现类似现象,并推测,当土壤铵态氮含量降低到一定水平,生物质炭固定的非交换性氮释放到土壤所导致。石灰性紫色土在培养 0~2 d 时土壤 NH₄⁺-N 含量急剧下降,可能主要由生物质炭施入后土壤 pH 升高带来的氨挥发造成,同时 pH 的升高也降低了矿化速率且抑制了土壤氨氧化微生物的活性^[34]。生物质炭添加对紫色土 NH₄⁺ 的“吸附-解吸”过程及机制还有待进一步研究。

培养期间,酸性和石灰性紫色土 NO₃⁻-N 含量和硝化率随着生物质炭添加量的增加而降幅越大(CB₂ 处理除外),这与陈玉真等^[35]研究结果一致。生物质炭添加量对硝化作用的影响随土壤 pH、培养时间不同而有差异。在酸性土壤中,生物质炭添加对硝化作用有明显的抑制作用,且随添加量增多硝化率越低。这些可能是因为:①生物质炭本身的物质组成会抑制土壤硝化作用,存在着一种硝化抑制剂 α -松萘或酚类物质^[22],会改变土壤氨化或者硝化微生物活性,从而抑制硝化作用。②由于生物质炭一般呈碱性^[36](pH 范围 8.2~13.0),施用后能显著提高紫色土 pH,研究认为参与硝化作用的氨氧化细菌(AOB)和氨氧化古菌(AOA)在酸性条件下丰度与 pH 呈负相关关系^[37]。且 AOA 属酸性古菌,在酸性环境中 AOA

比 AOB 活性更强,与硝化势能的关联度更高^[38]。因此,在酸性紫色土中,AOA 对生物质炭施入后提升 pH 的响应更为显著,将会抑制硝化作用。③生物质炭施入作为较高含量碳源,对土壤的异化还原反应(DNRA)过程有利,从而降低 NO₃⁻ 含量^[39]。④Cheng 等^[40]研究指出,当外源有机碳含量丰富(大于 500 mg/kg)时,土壤微生物主导下的 NO₃⁻ 固定作用会增强,进而降低 NO₃⁻ 含量。总体来看,石灰性紫色土硝化率高于酸性紫色土,与高 pH 土壤硝化作用较强结论一致^[41]。由于施入生物质炭对土壤 pH 的增加作用以酸性土壤较为明显,在石灰性土壤中的增幅较小,可能导致了生物质炭对酸性紫色土硝化率的影响远大于石灰性紫色土。

3.2 生物质炭不同添加量对紫色土 N₂O 排放的影响

本试验结果表明,酸性紫色土在低量生物质炭(1%、2%)添加条件下,抑制了 N₂O 排放速率,2%生物质炭添加量下 N₂O 累积排放量降低了 27.7%,与高德才等^[42]和何志龙等^[43]的研究结论相似。首先可能由于生物质炭对 NH₄⁺ 的吸附减少了硝化底物,从而减少 N₂O 排放。适量的生物质炭添加也增加了土壤通透性,不利于厌氧条件下氮素微生物的反硝化进程^[44],从而减少 N₂O 累积排放量。本研究中土壤 N₂O 排放量与 NO₃⁻-N 含量呈正相关关系(表 3),且本研究是进行好氧培养,则推测大部分 N₂O 的产生可能由硝化作用引起,且 60% 田间持水量培养条件是 N₂O 产自硝化或反硝化过程的临界值^[45],但有研究表明在 60% 田间持水量的好氧条件下,反硝化过程对 N₂O 的贡献率仍达到 28.0%~46.9%,好气培养条件下反硝化过程仍是土壤 N₂O 排放的一个重要过程^[46]。在酸性土壤中适量生物质炭的施入能提高土壤 pH,提高 N₂O 功能还原酶(nosZ)活性,促进 N₂O 还原为 N₂^[47]。而在酸性紫色土 5% 和 10% 生物质炭添加量下促进了 N₂O 排放,推测可能原因为:①较高量生物质炭输入可能会通过显著增加土壤有机碳含量,为反硝化微生物提供充足底物,显著提高土壤 *nirK*、*nirS*、*nosZ* 型反硝化功能基因丰度促进反硝化进程^[48]。Wang 等^[49]的研究也证明,在好氧条件下,如果可利用的有机碳含量充足,反硝化过程是产生 N₂O 的主要过

程。②高量生物质炭的施入也可能促进了硝化细菌反硝化过程(即硝化细菌驱动下的 NO₂⁻ 还原过程), 在整个过程只有氨氧化细菌参与, 没有 NO₃⁻-N 的生成^[50]。而无生物质炭添加的对照处理低 pH 限制了土壤硝化作用的进行, 导致生物质炭处理的土壤 N₂O 排放速率在前期 1 ~ 2 d 高于对照。石灰性紫色土中生物质炭处理 N₂O 排放累积排放量均高于对照, Prommer 等^[51]研究指出在石灰性耕作土壤中, 生物质炭能提高土壤氨氧化细菌的数量促进反硝化进程, 在石灰性土壤上反硝化过程对 N₂O 产生的贡献大于硝化作用^[52]。本研究石灰性紫色土 N₂O 排放集中在前 4 d, 是因为在碱性条件适宜硝化与反硝化作用的进行, 氨氧化菌丰度较大, 施入氮肥后促进其生长繁殖, 造成 NH₄⁺-N 含量迅速下降, 同时释放大量 N₂O^[53]。生物质炭不同用量在不同 pH 紫色土中 N₂O 产生途径和机制还需利用 ¹⁵N 同位素示踪技术和微生物学方法进一步验证研究。

4 结论

1) 生物质炭施入抑制了酸性和石灰性紫色土硝化作用, 对酸性紫色土抑制效果更明显。在酸性紫色土中生物质炭对硝化率和氮素净硝化速率的抑制作用随施用量的增加而增强; 在石灰性紫色土中 1% 和 2% 生物质炭处理硝化率低于对照, 10% 生物质炭处理氮素净硝化速率最低。

2) 在酸性紫色土中低量(1% 和 2%) 生物质炭处理对 N₂O 的排放具有抑制作用, 高量(5% 和 10%) 生物质炭处理对 N₂O 排放具有促进作用。在石灰性紫色土中, 各生物质炭处理均促进了 N₂O 排放总量。

3) 在酸性紫色土中 1%、2% 生物质炭施用下对硝化作用抑制和 N₂O 减排综合效果最好, 在石灰性紫色土中无明显效果。生物质炭施用下对紫色土 N₂O 产生途径和影响机制还需利用 ¹⁵N 同位素示踪法结合微生物学方法进一步验证研究。

参考文献:

[1] Liu X, Zhang Y, Han W, et al. Enhanced nitrogen deposition over China[J]. *Nature*, 2013, 494(7438): 459.
 [2] Sheng Y Q, Zhan Y, Zhu L Z. Reduced carbon sequestration potential of biochar in acidic soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 572: 129–137.
 [3] Cui Z L, Chen X P, Zhang F S. Current nitrogen management status and measures to improve the intensive wheat–maize system in China[J]. *Ambio*, 2010, 39(5/6): 376–384.

[4] Qu Z, Wang J G, Almøy T, et al. Excessive use of nitrogen in Chinese agriculture results in high N₂O/(N₂O+N₂) product ratio of denitrification, primarily due to acidification of the soils[J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(5): 1685–1698.
 [5] 鲍俊丹, 石美, 张妹婷, 等. 中国典型土壤硝化作用与土壤性质的关系[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(7): 1390–1398.
 [6] 范晓晖, 朱兆良. 旱地土壤中的硝化-反硝化作用[J]. *土壤通报*, 2002, 33(5): 385–391.
 [7] IPCC. *Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*[C]. UK: Cambridge University Press, 2007.
 [8] Smith P, Martino D, Cai Z C, et al. Policy and technological constraints to implementation of greenhouse gas mitigation options in agriculture[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2007, 118(1/2/3/4): 6–28.
 [9] Reay D S, Davidson E A, Smith K A, et al. Global agriculture and nitrous oxide emissions[J]. *Nature Climate Change*, 2012, 2(6): 410.
 [10] Lehmann J. *Biochar for environmental management*[M]. London: Routledge, 2012.
 [11] Ulyett J, Sakrabani R, Kibblewhite M, et al. Impact of biochar addition on water retention, nitrification and carbon dioxide evolution from two sandy loam soils[J]. *European Journal of Soil Science*, 2014, 65(1): 96–104.
 [12] 武爱莲, 王劲松, 董二伟, 等. 施用生物炭和秸秆对石灰性褐土氮肥去向的影响[J]. *土壤学报*, 2019, 56(1): 176–185.
 [13] Singh B, Hatton B J, Singh B, et al. Influence of biochars on nitrous oxide emission and nitrogen leaching from two contrasting soils[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2010, 39(4): 1224–1235.
 [14] Yanai Y, Toyota K, Okazaki M. Effects of charcoal addition on N₂O emissions from soil resulting from rewetting air-dried soil in short-term laboratory experiments[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2007, 53(2): 181–188.
 [15] Nelissen V, Saha B K, Ruyschaert G, et al. Effect of different biochar and fertilizer types on N₂O and NO emissions[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 70: 244–255.
 [16] Qayyum M F, Steffens D, Reisenauer H P, et al. Kinetics of carbon mineralization of biochars compared with wheat straw in three soils[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2012, 41(4): 1210–1220.
 [17] 季雅岚, 索龙, 解钰, 等. 不同生物质炭对海南砖红壤性质及 N₂O 排放的影响[J]. *土壤*, 2017, 49(6): 1172–1178.
 [18] Yang F, Cao X D, Gao B, et al. Short-term effects of rice straw biochar on sorption, emission, and transformation of soil NH₄⁺-N[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(12): 9184–9192.
 [19] 徐杰, 韩成, 张金波, 等. 有机碳氮添加对酸性森林土壤氨氧化过程的影响[J]. *土壤学报*, 2017, 54(4): 1029–1037.

- [20] Sun H J, Lu H Y, Chu L, et al. Biochar applied with appropriate rates can reduce N leaching, keep N retention and not increase NH_3 volatilization in a coastal saline soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 575: 820–825.
- [21] Cayuela M L, van Zwieten L, Singh B P, et al. Biochar's role in mitigating soil nitrous oxide emissions: a review and meta-analysis[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 191: 5–16.
- [22] Clough T J, Bertram J E, Ray J L, et al. Unweathered wood biochar impact on nitrous oxide emissions from a bovine-urine-amended pasture soil[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2010, 74(3): 852–860.
- [23] Karhu K, Mattila T, Bergström I, et al. Biochar addition to agricultural soil increased CH_4 uptake and water holding capacity—Results from a short-term pilot field study[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2011, 140(1–2): 309–313.
- [24] Scheer C, Grace P R, Rowlings D W, et al. Effect of biochar amendment on the soil-atmosphere exchange of greenhouse gases from an intensive subtropical pasture in northern New South Wales, Australia[J]. *Plant and Soil*, 2011, 345(1–2): 47–58.
- [25] Yoo G, Kang H. Effects of biochar addition on greenhouse gas emissions and microbial responses in a short-term laboratory experiment[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2012, 41(4): 1193–1202.
- [26] 黄成敏, 何毓蓉, 文安邦. 四川紫色土退化的分类与分区[J]. *山地研究*, 1993, 11(4): 201–208.
- [27] 杨佳嘉. 紫色土氮素初级转化速率与氮去向的关系及其调控措施研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2014.
- [28] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [29] 张垚, 索龙, 潘凤娥, 等. 生物质炭对砖红壤性质与养分及硝化作用的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2016, 33(1): 55–59.
- [30] 崔静雅, 颜明娟, 吴晓荣, 等. 林地改为茶园对土壤净硝化速率及 N_2O 排放的影响[J]. *土壤*, 2017, 49(4): 738–744.
- [31] Sarkhot D V, Berhe A A, Ghezzehei T A. Impact of biochar enriched with dairy manure effluent on carbon and nitrogen dynamics[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2012, 41(4): 1107–1114.
- [32] 张迪男, 蒋先军. 不同 pH 值紫色土对 NH_4^+ 的吸附动力学[J]. *江苏农业科学*, 2014, 42(11): 375–377.
- [33] 李娜. 不同用量生物质炭对黑土硝化作用和呼吸作用的影响研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2016.
- [34] 田冬, 高明, 徐畅. 土壤水分和氮添加对 3 种质地紫色土氮矿化及土壤 pH 的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(1): 255–261.
- [35] 陈玉真, 王峰, 吴志丹, 等. 添加生物质炭对酸性茶园土壤 pH 和氮素转化的影响[J]. *茶叶学报*, 2016, 57(2): 64–70.
- [36] 彭文龙. 生物质炭表面物质对微生物的影响研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- [37] 潘逸凡. 生物质炭对稻田土壤氨氧化微生物的影响研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [38] Zhang L M, Hu H W, Shen J P, et al. Ammonia-oxidizing Archaea have more important role than ammonia-oxidizing bacteria in ammonia oxidation of strongly acidic soils[J]. *The ISME Journal*, 2012, 6(5): 1032.
- [39] Pett-Ridge J, Silver W L, Firestone M K. Redox fluctuations frame microbial community impacts on N-cycling rates in a humid tropical forest soil[J]. *Biogeochemistry*, 2006, 81(1): 95–110.
- [40] Cheng Y, Wang J, Wang J Y, et al. The quality and quantity of exogenous organic carbon input control microbial NO_3^- immobilization: a meta-analysis[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 115: 357–363.
- [41] 佟德利, 徐仁扣. 三种氮肥对红壤硝化作用及酸化过程影响的研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(4): 853–859.
- [42] 高德才, 张蕾, 刘强, 等. 生物黑炭对旱地土壤 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 排放及其环境效益的影响[J]. *生态学报*, 2015, 35(11): 3615–3624.
- [43] 何志龙, 夏文建, 周维, 等. 添加秸秆生物质炭对酸化茶园土壤 N_2O 和 CO_2 排放的短期影响研究[J]. *环境科学学报*, 2016, 25(7): 1230–1236.
- [44] Zhang A, Cui L Q, Pan G X, et al. Effect of biochar amendment on yield and methane and nitrous oxide emissions from a rice paddy from Tai Lake plain, China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, 139(4): 469–475.
- [45] Bateman E J, Baggs E M. Contributions of nitrification and denitrification to N_2O emissions from soils at different water-filled pore space[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2005, 41(6): 379–388.
- [46] 李平, 郎漫. 硝化和反硝化过程对林地和草地土壤 N_2O 排放的贡献[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(22): 4726–4732.
- [47] Taghizadeh-Toosi A, Clough T J, Condon L M, et al. Biochar incorporation into pasture soil suppresses *in situ* nitrous oxide emissions from ruminant urine patches[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2011, 40(2): 468–476.
- [48] 李双双, 陈晨, 段鹏鹏, 等. 生物质炭对酸性菜地土壤 N_2O 排放及相关功能基因丰度的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(2): 414–423.
- [49] Wang L F, Cai Z C, Yang L F, et al. Effects of disturbance and glucose addition on nitrous oxide and carbon dioxide emissions from a paddy soil[J]. *Soil and Tillage Research*, 2005, 82(2): 185–194.
- [50] 兰婷. 水稻土氮转化过程速率及其生产与环境效应[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
- [51] Prommer J, Wanek W, Hofhansl F, et al. Biochar decelerates soil organic nitrogen cycling but stimulates soil nitrification in a temperate arable field trial[J]. *PLoS One*, 2014, 9(1): e86388. DOI: 10.1371/journal.pone.0086388.
- [52] 李君, 刘涛, 褚贵新. 脲酶抑制剂对石灰性土壤尿素转化及 N_2O 排放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(9): 1866–1872.
- [53] 白雪, 夏宗伟, 郭彦玲, 等. 硝化抑制剂对不同旱地农田土壤 N_2O 排放的影响[J]. *生态学杂志*, 2012, 31(9): 2319–2329.