

纳米碳溶胶配施尿素对土壤 N_2O 排放的影响

纪程, 孙玉香, 孟圆, 徐聪, 汪吉东, 张永春

引用本文:

纪程, 孙玉香, 孟圆, 徐聪, 汪吉东, 张永春. 纳米碳溶胶配施尿素对土壤 N_2O 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(6): 1406–1413.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-1023>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

添加玉米秸秆及其生物质炭对砖红壤 N_2O 排放的影响

潘凤娥, 胡俊鹏, 索龙, 王小淇, 季雅岚, 孟磊

农业环境科学学报. 2016(2): 396–402 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016.02.026>

不同水分条件下海南红壤 N_2O 排放对不同碳源添加的响应

朱启林, 刘丽君, 何秋香, 刘金霞, 曹明, 伍延正, 汤水荣, 孟磊, 柯用春

农业环境科学学报. 2022, 41(4): 898–908 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0733>

添加不同类型秸秆对土壤 CO_2 排放和化学性质的影响

李欢, 赵平, 陈林康, 李连华, 向蕊, 龙光强

农业环境科学学报. 2022, 41(4): 909–918 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1007>

蚯蚓作用下不同C/N秸秆还田对土壤 CO_2 及 N_2O 排放的影响

王争妍, 雷紫烟, 叶志雄, 伍玉鹏

农业环境科学学报. 2017, 36(9): 1908–1915 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0187>

不同生物质炭对酸化茶园土壤 N_2O 和 CO_2 排放的影响

孙贇, 何志龙, 林杉, 张水清, 柳维扬

农业环境科学学报. 2017, 36(12): 2544–2552 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0845>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

纪程, 孙玉香, 孟圆, 等. 纳米碳溶胶配施尿素对土壤 N_2O 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(6): 1406–1413.

Ji C, Sun Y X, Meng Y, et al. Effects of nano-carbon sol and urea on soil N_2O emissions[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(6): 1406–1413.

纳米碳溶胶配施尿素对土壤 N_2O 排放的影响

纪程^{1,2}, 孙玉香^{1,3}, 孟圆^{1,3}, 徐聪^{1,2}, 汪吉东^{1,2,3*}, 张永春^{1,2,3}

(1. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 南京 210014; 2. 江苏大学环境与安全工程学院, 江苏 镇江 212013; 3. 南京农业大学, 南京 210095)

摘要:为研究纳米碳材料对土壤 N_2O 排放的影响, 选用纳米碳溶胶(一种纳米级材料, 利用电解石墨制备而成)作为供试材料, 以未经秸秆还田改良(秸秆离田)和秸秆还田改良的潮土为供试土壤, 通过培养试验探讨纳米碳溶胶对潮土 N_2O 排放的影响, 培养条件为 25 °C 和 80% 田间持水量。结果表明: 施氮条件下, 添加纳米碳溶胶显著增加了秸秆离田土壤 N_2O 排放, 但显著降低了秸秆还田土壤 N_2O 排放, 减排效率达 63%。纳米碳溶胶显著提高了两种处理土壤的硝化潜势(PNR), 但降低了秸秆还田土壤反硝化潜势(PDR)。然而, 秸秆离田土壤 PDR 对纳米碳溶胶无显著响应。纳米碳溶胶通过促进秸秆离田土壤的硝化作用提高 N_2O 排放。对于秸秆还田土壤, 纳米碳溶胶减排 N_2O 的机理可能是土壤可溶性有机碳含量的增加一方面激发了土壤异养微生物对底物无机氮的固持, 另一方面促进了土壤彻底反硝化过程。

关键词: 纳米碳; N_2O ; 硝化作用; 反硝化作用; 土壤

中图分类号: S153 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2023)06-1406-08 doi:10.11654/jaes.2022-1023

Effects of nano-carbon sol and urea on soil N_2O emissions

Ji Cheng^{1,2}, Sun Yuxiang^{1,3}, Meng Yuan^{1,3}, Xu Cong^{1,2}, Wang Jidong^{1,2,3*}, Zhang Yongchun^{1,2,3}

(1. Institute of Agricultural Resources and Environmental Sciences, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 2. School of Environment & Safety Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 3. Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: Nano-carbon improves fertilizer utilization and reduces nitrogen residue in soils; however, its effects on soil N_2O emissions still remain unclear. In this study, nano-carbon sol (a kind of nano-carbon material prepared via electrolytic graphite) and soils without and with straw returning were selected for comparison. We conducted an incubation experiment to study the effects of nano-carbon on soil N_2O emissions, with soil microcosm exhibiting a temperature of 25 °C and water-holding capacity of 80%. Results showed that the nano-carbon amendment significantly increased N_2O emissions from the straw-removed soil, but significantly decreased N_2O emissions from the straw-returned soil, with the mitigation efficiency of 63%. The nano-carbon also significantly increased potential nitrification rates (PNR) from the straw-removed and -returned soils and decreased potential denitrification rate (PDR) from the straw-returned soil. The PDR value of

收稿日期: 2022-10-13 录用日期: 2023-01-11

作者简介: 纪程(1991—), 女, 黑龙江人, 博士, 助理研究员, 从事土壤碳氮循环与微生物驱动机制研究。E-mail: chengji11@126.com

*通信作者: 汪吉东 E-mail: jdwang66@163.com

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(42007088, 41907069); 江苏省自主创新资金项目(CX(21)-1009); 江苏省重点研发计划项目(BE2019378, BE2021378); 江苏省碳达峰碳中和科技创新专项资金项目(BE2022304); 国家甘薯产业技术体系项目(CARS-10); 水稻生物学国家重点实验室开放课题(20210404)

Project supported: The Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (42007088, 41907069); The Jiangsu Agricultural Science and Technology Innovation Fund (CX (21) - 1009); The Key Research and Development Project of Jiangsu Province (BE2019378, BE2021378); The Carbon Peak and Neutrality Special Funding for Science and Technology Innovation Project of Jiangsu Province (BE2022304); The Earmarked Fund for CARS-10-Sweetpotato; The Open Project Program of State Key Laboratory of Rice Biology (20210404)

the straw-removed soil showed no significant response to the nano-carbon amendment. Nano-carbon increased N₂O emissions due to the enhanced nitrification in the straw-removed soil. The mechanism of decreased N₂O emissions from the straw-retained soil amended with nano-carbon sol might be that the amendment increased the contents of dissolved organic carbon, thus inducing the immobilization of inorganic nitrogen by soil heterotrophic microorganisms and promoting the complete denitrification process.

Keywords: nano-carbon; N₂O; nitrification; denitrification; soil

氧化亚氮(N₂O)是大气中重要的温室气体之一,大气中N₂O浓度的空前升高是全球气候变化的重要驱动因素^[1]。当前大气中N₂O体积分数已达到 3.32×10^{-7} ,与1750年工业革命前相比,增长率达23%^[2]。农业、工业、生物质燃烧以及活性氮淋溶和大气沉降的间接排放是N₂O的主要人为排放源^[3]。其中,农业土壤N₂O排放占重要地位,氮肥的广泛使用推动了土壤N₂O排放量的增长。据估算,农业源排放的N₂O可占全球人为排放的60%~70%^[4]。

国内外科研工作者一直致力于探索如何通过农田氮管理实现土壤N₂O减排。一方面通过优化氮肥管理实现N₂O减排^[5-6],另一方面通过提高氮肥利用率减少气态氮(N₂O和NO等)损失^[7-8]。近年来纳米碳材料在改良土壤、提高肥料利用率以及节肥增产上表现出较好效果^[9-11]。纳米材料配施氮肥可以发挥其表面效应和小尺寸效应,既能够增强肥料的吸附性能,减少肥料的流失,又可以改善土壤理化性质,尤其是在碱性土壤pH和养分的改良方面^[12-13]。学者们也逐渐关注到纳米碳材料对土壤N₂O排放的影响。研究发现,纳米碳可以通过吸附土壤中的铵态氮而降低N₂O排放^[14]。然而,也有研究表明添加纳米碳能够提高土壤N₂O排放,可能的原因是纳米碳促进了土壤微生物活性^[15]。这些有关纳米碳材料对N₂O排放影响相互矛盾的结果可能与纳米碳和土壤之间复杂的相互作用有关。

土壤硝化和反硝化作用是产生N₂O的关键过程,施加纳米碳材料既可以影响土壤硝化过程,也可以影响反硝化过程。我们推测施加纳米碳材料条件下土壤N₂O的排放取决于其对硝化和反硝化过程的净效应。因此,检测纳米碳材料作用下土壤硝化和反硝化

潜势的变化有助于揭示纳米碳材料对N₂O排放的影响。本文选用纳米碳溶胶为供试材料,研究其对两种处理土壤N₂O排放的影响,以期为纳米碳溶胶的推广应用以及减少农业源N₂O排放提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

纳米碳溶胶采用通电电解双石墨电极板制成,由沈阳美华农业有限公司提供,纳米碳粒子粒径为10~100 nm。供试土壤采集于江苏省滨海界牌镇的小麦-玉米轮作种植区(33°43'N, 119°37'E),该地区处于暖温带和亚热带季风气候的过渡地带,年平均气温和降水量分别为14.1℃和942.6 mm,土壤类型为黄河冲积物发育而来的潮土。秸秆还田是改善该地区农田土壤质量的重要措施之一,且已在该种植区大面积推广。目前已实行麦玉双季秸秆还田2 a,获取上一季作物的全量秸秆后,将秸秆机械粉碎至5~10 cm,再用旋耕机旋入土壤耕层(0~20 cm)。每年小麦秸秆的还田量约为5 000 kg·hm⁻²,玉米秸秆的还田量约为6 000 kg·hm⁻²。同时设置秸秆离田处理,该田块收获的秸秆不还田。本试验土壤样品采集于秸秆还田和秸秆离田田块。根据S点法布点,每个田块采集5份耕层土壤(0~20 cm),土样混匀后带回实验室,自然风干后过2 mm筛,去除可见的根和有机残留物。取部分风干土样测定土壤基本理化性质,其余风干土样用于开展培养实验。初始土壤性质及纳米碳溶胶的性质详见表1。

1.2 培养实验设计

称取80 g土样(按干土计)置于250 mL培养瓶,

表1 供试土壤及纳米碳溶胶的基本理化性质

Table 1 Basic physico-chemical properties of soils used in the study

项目 Item	pH	电导率 EC/($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	有机质 SOM/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	碱解氮 AN/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	有效磷 AP/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	速效钾 AK/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
秸秆离田土壤	8.7	139.7	4.22	26.2	7.23	85.5
秸秆还田土壤	8.4	347.5	5.51	36.8	4.38	96.0
纳米碳溶胶	2.6	1 355.0				

用去离子水调节土壤水分至50%最大持水量(WHC),在25℃黑暗条件下预培养一周,以恢复土壤微生物活性。秸秆离田和秸秆还田土壤均设置4个处理,分别是:①不施尿素和纳米碳溶胶的对照(CK);②单施纳米碳溶胶(C);③单施尿素(N);④混施尿素和纳米碳溶胶(NC)。每个处理设置3次重复。尿素(以N计)施用量为每千克土200 mg,纳米碳溶胶施用量为2%(干土质量)。正式培养时,用去离子水将土壤水分调节至80%WHC,此时为兼性厌氧环境,土壤硝化和反硝化反应均可发生,具有最大的 N_2O 净排放潜力^[16-18],每隔2 d通过称重法用去离子水补充培养瓶内损失的水分。所有培养瓶(4个处理×2种土壤类型×5个时间点×3个重复=120个培养瓶)采用完全随机区组排列,于25℃黑暗环境中培养21 d。此外,在正式培养开始的第1、3、8、15、21天破坏性采集土壤,用于测定土壤理化性质和硝化、反硝化潜势。

1.3 气体与土壤样品分析

正式培养前8 d每天收集和分析气体一次,之后的第9天到第21天取气频率为每隔3 d一次。每次采气前去掉保鲜膜用吹风机通空气5 min,之后用橡胶塞密封培养瓶,使用注射器采集瓶内气体作为 N_2O 的初始浓度。密封培养瓶2 h后再次采集瓶内气体。气体中的 N_2O 浓度利用配有电子捕获检测器(ECD)的安捷伦7890A(Agilent 7890A,美国)气相色谱仪测定,载气为含95%氩气和5%甲烷的混合气。 N_2O 排放通量由密封前后2 h内累积的气体浓度计算,具体公式为:

$$F=(\rho \times V/W) \times (\Delta C/\Delta t) \times [273/(273+T)]$$

其中: F 是指 N_2O 排放通量, $\mu g \cdot kg^{-1} \cdot h^{-1}$; ρ 是指在标准温度和压力下 N_2O 的密度, $kg \cdot m^{-3}$; V 是指锥形瓶的容积, m^3 ; W 是指培养所用土壤的干质量, kg ; $\Delta C/\Delta t$ 是指在给定时间(2 h)内密封锥形瓶后 N_2O 浓度的变化, $10^{-9} h^{-1}$; T 是指锥形瓶内的温度, $^{\circ}C$ 。

利用密封2 h前后的 N_2O 浓度计算得到的 N_2O 排放量代表采样当天的 N_2O 日平均排放量。根据每两个相邻采样日的排放通量,按顺序累积计算得到培养期内 N_2O 排放总量。

利用紫外分光光度计(HITACHI,UV-2900,Tokyo,日本)测定土壤硝态氮(NO_3^- -N)和铵态氮(NH_4^+ -N)含量,分别利用双波长紫外分光光度法和靛酚蓝法。采用复合玻璃电极仪(PHS-3C mv/pH detector, Shanghai,中国)测定土壤pH值,测定时的土水比为1:5。土壤可溶解性有机碳(DOC)含量由TOC分析仪

(TOC Vcph, Shimadzu, Kyoto, 日本)测定。土壤硝化潜势利用氯酸盐抑制法测定^[19],具体步骤:称取5 g鲜土于100 mL培养瓶,向瓶中加入含20 mL $1 mmol \cdot L^{-1}$ 硫酸铵 $[(NH_4)_2SO_4]$ 的磷酸盐缓冲液($NaCl$ $8.0 g \cdot L^{-1}$, KCl $0.2 g \cdot L^{-1}$, Na_2HPO_4 $0.2 g \cdot L^{-1}$, NaH_2PO_4 $0.2 g \cdot L^{-1}$, pH 7.4),并加入5 mL $10 mmol \cdot L^{-1}$ 氯酸钾($KClO_3$)溶液抑制亚硝酸盐的氧化;将培养瓶放入恒温(25℃)振荡培养箱中遮光培养24 h,然后加入5 mL $2 mol \cdot L^{-1}$ 氯化钾(KCl)溶液浸提亚硝态氮(NO_2^- -N); NO_2^- -N含量用紫外分光光度计在540 nm波长下测定,显色剂为N-(1-萘基)-乙二胺;硝化潜势根据单位时间内单位土壤样品增加的 NO_2^- -N含量计算。土壤反硝化潜势利用乙炔抑制方法测定^[20],具体步骤:称取5 g鲜土于250 mL培养瓶,向瓶中加入25 mL溶液[$1 mmol \cdot L^{-1}$ 葡萄糖和 $1 mmol \cdot L^{-1}$ 硝酸钾(KNO_3)],斡旋混匀,盖上橡胶塞,用真空泵抽真空后充入高纯氮气,反复抽洗3次,再用乙炔将瓶内10%的氮气置换,并使瓶内外气压一致;将培养瓶放入恒温(25℃)培养箱中培养3 h,3 h后用注射器采集瓶内气体;利用气相色谱仪分析气体样品中 N_2O 浓度,土壤反硝化潜势根据单位时间内 N_2O 的产生量计算。

1.4 数据统计分析

所有数据基于烘干土质量计算。利用配对分析 T 检验分析两种土壤各处理间理化性质、硝化和反硝化潜势的显著性差异。利用双因素方差分析检验纳米碳溶胶与尿素施用对两种处理土壤 N_2O 排放量的影响(LSD检验, $P<0.05$)。本研究所有数据结果以平均值加减标准误差(Mean $\pm$ SE)表示, $n=3$ 。所有数据处理与分析使用SPSS 20.0软件进行。

2 结果与分析

2.1 尿素与纳米碳溶胶作用下的土壤理化性质

秸秆还田显著改变了土壤理化性质,主要表现为秸秆还田显著提高了土壤电导率、有机质和碱解氮含量,同时显著降低了土壤pH($P<0.05$)。

施加尿素短期内显著增加了土壤 NH_4^+ -N含量,秸秆离田和秸秆还田土壤的 NH_4^+ -N含量均在培养的第3天最高,之后持续下降,到第14天左右下降到较低水平(图1a和图1c)。施加尿素后土壤的 NO_3^- -N含量在整个培养期内呈上升趋势(图1b和图1d)。配对 T 检验结果表明(表2),施加纳米碳溶胶显著增加了施氮条件下秸秆离田土壤的 NH_4^+ -N含量,而显著降低了秸秆还田土壤的 NH_4^+ -N含量。同时,施加纳米

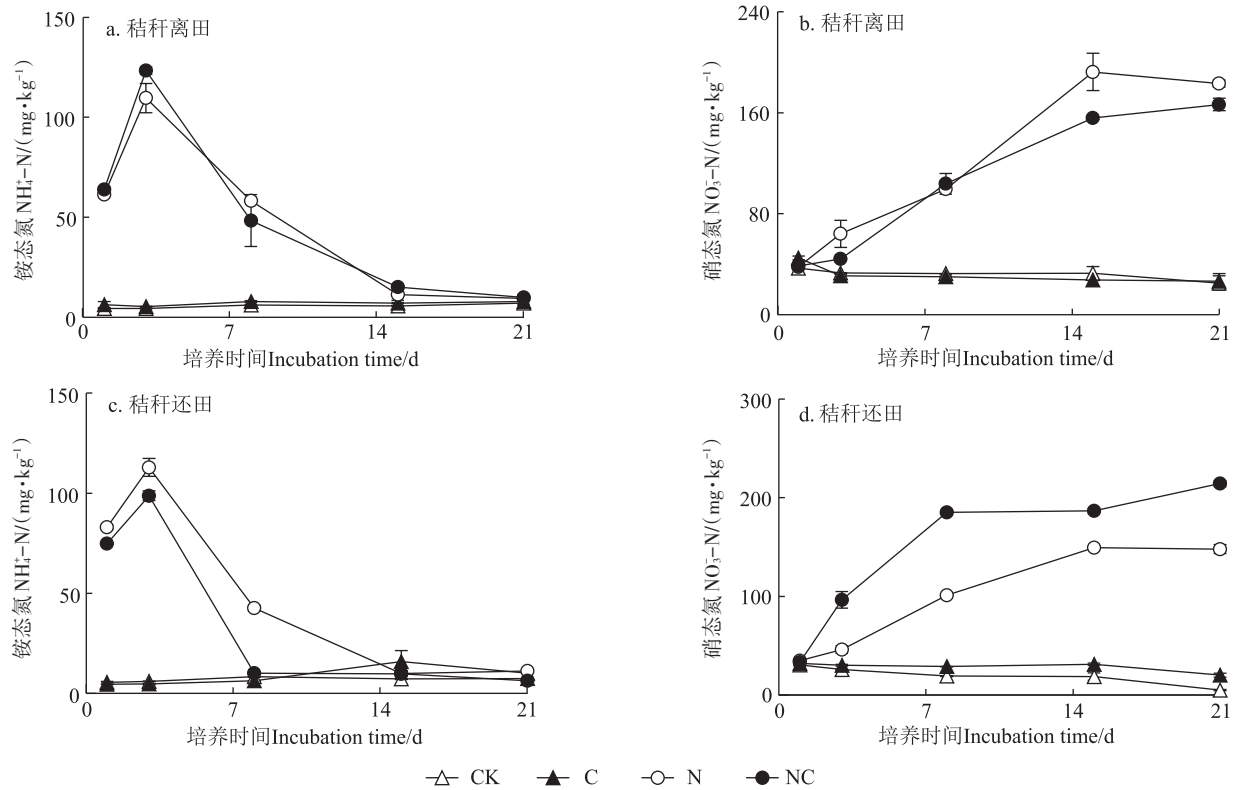


图1 秸秆离田和秸秆还田土壤铵态氮和硝态氮含量的动态变化
Figure 1 Dynamic variations of NH₄⁺-N and NO₃⁻-N contents from the straw-removal and straw-return soils

碳溶胶显著降低了施氮条件下秸秆离田土壤的NO₃⁻-N含量,显著提高了秸秆还田土壤的NO₃⁻-N含量($P<0.05$)。如图2a和图2c所示,培养期内土壤pH呈现下降趋势。施加尿素处理的土壤pH在培养初期增加。同时,施加纳米碳溶胶显著降低了秸秆还田土壤的pH($P<0.05$,表2)。如图2b和图2d所示,施加尿素显著增加了两种土壤的DOC含量,施加纳米碳溶胶显著增加了秸秆还田土壤第3天的DOC含量,但对第21天的DOC含量无显著影响。

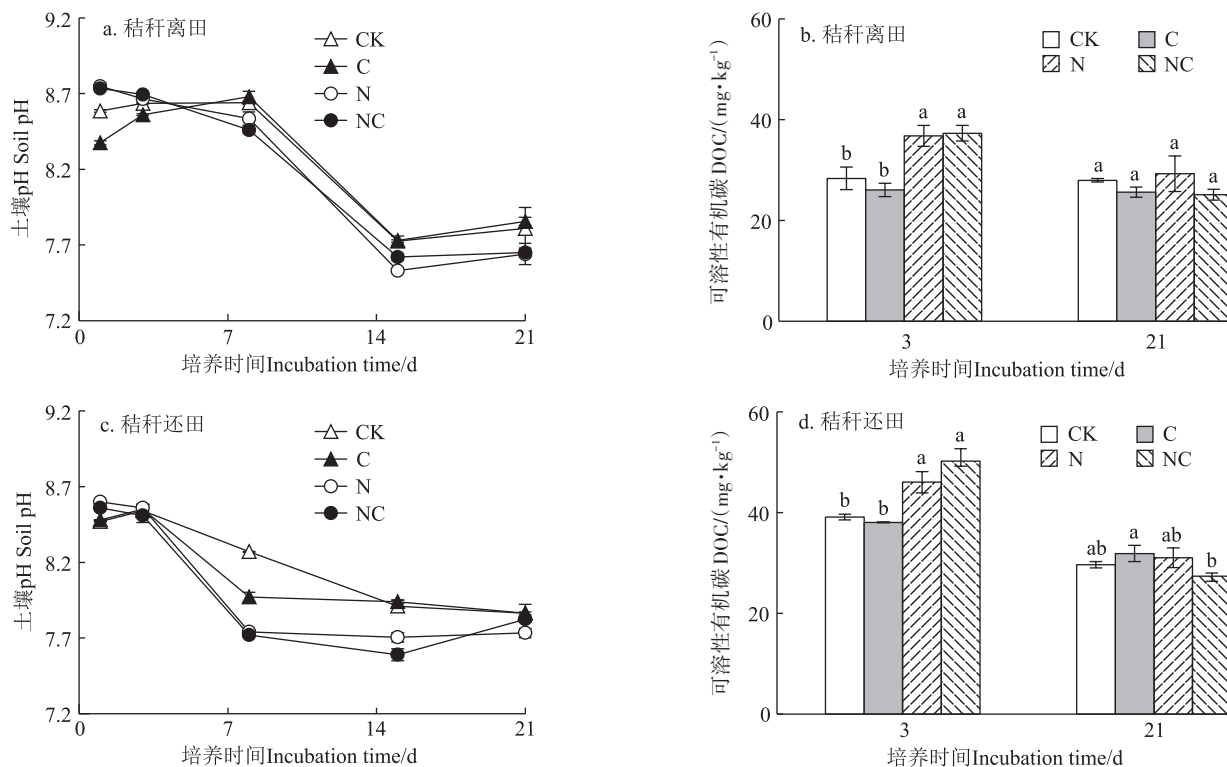
2.2 尿素与纳米碳溶胶作用下的土壤N₂O排放

如图3所示,尿素施用下秸秆离田与秸秆还田土壤的N₂O排放速率均在第一周内迅速升高,直至出现峰值后下降,然后趋于平稳。纳米碳溶胶和尿素对土壤N₂O排放具有显著的交互作用($P<0.05$),且对不同处理土壤的影响结果不同。与CK相比,单施纳米碳溶胶对土壤N₂O排放无显著影响。施氮条件下,添加纳米碳溶胶显著增加了秸秆离田土壤的N₂O排放,而显著降低了秸秆还田土壤的N₂O排放,减排效率达

表2 两种处理土壤不同处理间理化性质及硝化、反硝化潜势的配对T检验
Table 2 Results of the paired-analysis T-test for the soil physicochemical properties, rates of potential nitrification and denitrification for the two soils

项目 Item	铵态氮 NH ₄ ⁺ -N		硝态氮 NO ₃ ⁻ -N		酸碱性 pH		可溶性有机碳 DOC	
	秸秆离田	秸秆还田	秸秆离田	秸秆还田	秸秆离田	秸秆还田	秸秆离田	秸秆还田
CK-C	-4.329/0.001	-0.924/0.371	0.057/0.955	-5.487/0.0001	1.055/0.309	2.194/0.046	4.354/0.007	-0.657/0.540
N-NC	-0.687/0.503	3.929/0.002	2.640/0.019	-6.036/0.0001	-0.338/0.741	1.484/0.160	0.931/0.395	-0.135/0.898
CK-N	-4.350/0.001	-4.078/0.001	-4.742/0.0001	-5.055/0.0001	1.116/0.293	2.481/0.026	-1.689/0.152	-2.166/0.083
C-NC	-3.977/0.001	-2.808/0.014	-4.381/0.001	-6.046/0.0001	0.130/0.899	2.508/0.025	-1.810/0.130	-0.969/0.377

注:表中为T值和检验概率P值(95%置信水平上)。
Note: T-/P-values are shown in Table(at the 95% confidence level).



不同字母表示在 $P<0.05$ 水平上具有显著差异。下同。
Significant differences are indicated by different letters ($P<0.05$). The same below.

图2 秸秆离田和秸秆还田土壤pH和可溶性有机碳含量的动态变化

Figure 2 Dynamic variations of pH and DOC contents from the straw-removal and straw-return soils

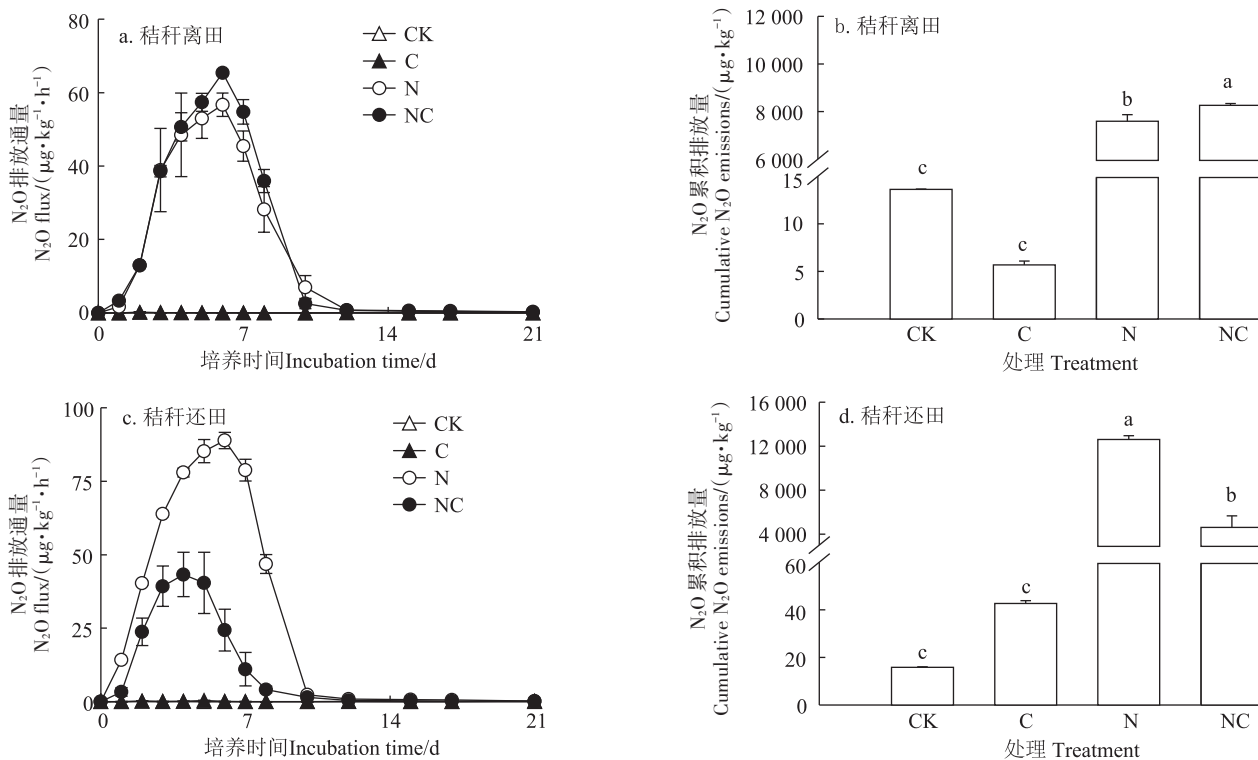
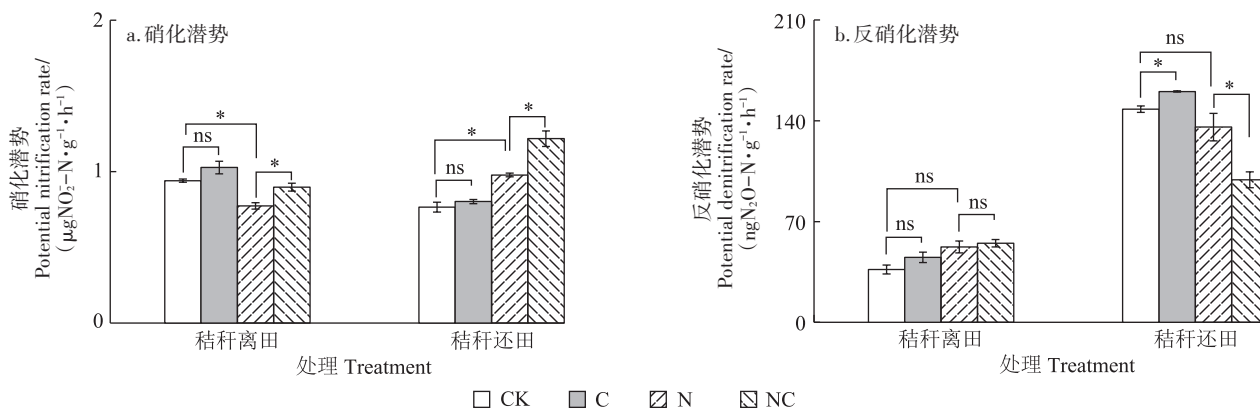


图3 秸秆离田和秸秆还田土壤N₂O排放通量和累积排放量

Figure 3 Dynamic variations of N₂O fluxes and cumulative N₂O emissions from the straw-removal and straw-return soils



*表示两处理在 $P<0.05$ 水平上具有显著差异;ns表示处理间差异不显著。
* indicates significance at the 0.05 probability level; ns indicates no significant difference between treatments.

图4 秸秆离田和秸秆还田土壤的硝化潜势和反硝化潜势

Figure 4 Rates of the potential nitrification and denitrification from the straw-removal and straw-return soils

63% ($P<0.05$, 图3d)。

2.3 尿素与纳米碳溶胶作用下的土壤硝化和反硝化潜势

本研究中,纳米碳溶胶显著提高了施氮条件下秸秆离田土壤和秸秆还田土壤的硝化潜势($P<0.05$, 表2),比例提高16%和25%(图4a)。然而,两种土壤的反硝化潜势对纳米碳溶胶的响应不同,施氮条件下添加纳米碳溶胶显著降低了秸秆还田土壤的反硝化潜势,但秸秆离田土壤的反硝化潜势对纳米碳溶胶无显著响应(图4b)。

3 讨论

3.1 纳米碳溶胶对土壤理化性质的影响

纳米碳材料对土壤养分具有一定的固持或活化作用^[21]。本研究中,施用纳米碳溶胶能够显著增加秸秆离田土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量和秸秆还田土壤的 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 含量,显著降低秸秆离田土壤的 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 和秸秆还田土壤的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量,表明纳米碳溶胶可以活化和固持土壤中的无机氮。纳米碳溶胶作为一种高C/N的碳源,可以同时微生物的同化作用和矿化作用产生刺激,因此,纳米碳溶胶引起土壤氮素的变化取决于两种作用的净效应。研究发现,施用纳米碳溶胶能够降低碱性土壤的pH^[13],这可能与纳米碳的特殊性能——外包膜带有的负电荷以及本身的笼形芳香结构有关^[22]。在本研究中,施加纳米碳溶胶显著降低了秸秆还田土壤的pH,但秸秆离田土壤的pH对纳米碳溶胶无显著响应。培养第3天时,在施用尿素基础上添加纳米碳溶胶显著提高了秸秆离田和秸秆还田土壤

的DOC含量,这与生物质炭对土壤DOC含量的影响类似。外源碳投入能够提高土壤微生物活性,导致土壤有机养分被微生物快速分解^[23]。同时,添加外源碳可能促进了土壤中老碳的分解,从而增加了土壤DOC含量。

3.2 纳米碳溶胶对土壤硝化和反硝化潜势及 N_2O 排放的影响

本研究中,在施用尿素基础上添加纳米碳溶胶显著增加了秸秆离田土壤的 N_2O 排放量,这可能与纳米碳施入对土壤硝化反应的促进作用有关(图4)。氨氧化过程是土壤硝化反应的关键步骤,该过程主要由氨氧化微生物驱动。一般情况下,氨氧化细菌在碱性土壤的硝化反应中占据主导地位,尤其是本研究的高铵环境^[24]。原因是氨氧化古菌普遍适宜生长在 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量较低且酸性环境,而氨氧化细菌更偏向于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 底物丰富的环境^[25]。本研究中,纳米碳溶胶施加后土壤C/N的升高可能会增加土壤氨氧化细菌数量。研究表明,氨氧化细菌与土壤C/N具有显著正相关关系^[26],土壤C/N可以通过改变氮的相对可利用性影响氨氧化微生物丰度,从而调控硝化作用^[27]。此外,纳米碳溶胶的施入提高了土壤有效碳含量,这可能会造成异养微生物和自养硝化菌之间对 NH_4^+ 的竞争^[28],而在氮底物充足的条件下,这种竞争关系会促进硝化反应,导致 N_2O 排放量升高。然而,也有研究发现,纳米碳材料可能通过吸附无机氮底物而抑制土壤硝化作用^[15]。以上研究结果表明,纳米碳材料对土壤氮素转化的影响具有一定的复杂性,并且表现出土壤特异性。

尽管施用纳米碳溶胶显著提高了秸秆还田土壤的硝化潜势,但其显著降低了施氮条件下该土壤的 N_2O 排放,表明纳米碳溶胶对土壤硝化反应的促进作用不是其减排 N_2O 的原因。我们推测纳米碳溶胶对秸秆还田土壤反硝化过程的抑制作用是其减少 N_2O 排放的原因之一。相比于秸秆离田土壤,秸秆还田土壤的有机碳含量较高,土壤中异养微生物活性较高,土壤有效碳含量的提高将促进微生物对无机氮的同化作用^[29-30]。因此,施加纳米碳溶胶可能通过激发秸秆还田土壤异养微生物对底物无机氮的同化而降低土壤反硝化速率。此外,纳米碳的输入还可能通过促进土壤彻底反硝化过程而降低 N_2O 排放。研究表明,土壤碳含量能够改变反硝化过程还原剂和氧化剂的相对有效性,反之也会影响反硝化的最终产物,即 NO 、 N_2O 和 N_2 ^[31-32]。外源碳输入通过刺激微生物代谢,增加对 O_2 的消耗,进而为彻底反硝化创造有利条件^[33]。此外,碳底物组分的复杂性也会显著影响土壤反硝化作用及其 N_2O 产物^[34]。本研究中,纳米碳溶胶对两种处理土壤 N_2O 排放影响的不一致性可能与土壤本底碳含量有关。此外,该条件下有机碳组分与 N_2O 排放的耦联效应需进一步探究。

4 结论

纳米碳溶胶对土壤 N_2O 排放的影响与氮肥添加和土壤类型有关。氮肥施用条件下,施加纳米碳溶胶能够显著增加秸秆离田土壤的 N_2O 排放,而显著降低秸秆还田土壤的 N_2O 排放。因此,将施加纳米碳溶胶作为调控土壤氮素水平的措施时,应考虑到其增加 N_2O 排放的可能性。

参考文献:

- [1] THOMPSON R L, LASSALETTA L, PATRA P K, et al. Acceleration of global N_2O emissions seen from two decades of atmospheric inversion [J]. *Nature Climate Change*, 2019, 9(12):993-998.
- [2] MASSON-DELMOTTE V, ZHAI P, PIRANI A. Climate change 2021: the physical science basis[C]//Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, Cambridge University Press, 2021.
- [3] 赵光影, 刘景双, 王洋. 陆地生态系统 N_2O 排放源研究进展[J]. 土壤通报, 2008(5):1192-1197. ZHAO G Y, LIU J S, WANG Y. Research progresses on nitrous oxide emission in terrestrial ecosystem[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008(5):1192-1197.
- [4] DOMEIGNOZ-HORTA L A, PHILIPPOT L, PEYRARD C, et al. Peaks of in situ N_2O emissions are influenced by N_2O -producing and reducing microbial communities across arable soils[J]. *Global Change*

- Biology*, 2018, 24(1):360-370.
- [5] 邹建文, 黄耀, 宗良纲, 等. 不同种类有机肥施用对稻田 CH_4 和 N_2O 排放的综合影响[J]. 环境科学, 2003, 24(4):7-12. ZOU J W, HUANG Y, ZONG L G, et al. Integrated effect of incorporation with different organic manures on CH_4 and N_2O emissions from rice paddy[J]. *Environment Science*, 2003, 24(4):7-12.
- [6] 李燕青, 唐继伟, 车升国, 等. 长期施用有机肥与化肥氮对华北夏玉米 N_2O 和 CO_2 排放的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(21):4381-4389. LI Y Q, TANG J W, CHE S G, et al. Effect of organic and inorganic fertilizer on the emission of CO_2 and N_2O from the summer maize field in the North China Plain[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(21):4381-4389.
- [7] 蒋文婷, 田立斌, 朱高荻, 等. 不同形态氮添加对毛竹林土壤 N_2O 排放的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(5):857-868. JIANG W T, TIAN L B, ZHU G D, et al. Effects of different forms of nitrogen addition on N_2O emissions from the soil of Moso bamboo (*Phyllostachys edulis*) forest[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, 28(5):857-868.
- [8] 李方敏, 樊小林, 刘芳, 等. 控释肥料对稻田氧化亚氮排放的影响[J]. 应用生态学报, 2004, 15(11):2170-2174. LI F M, FAN X L, LIU F, et al. Effects of controlled release fertilizers on N_2O emission from paddy field[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(11):2170-2174.
- [9] 许欢欢. 施用有机肥对农田 N_2O 排放和氮肥利用率的影响:Meta分析及长期定位施肥试验[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2021. XU H H. Effects of applying organic fertilizers on N_2O emissions and nitrogen fertilizer use efficiency from farmland: Meta-analysis and long-term located fertilization experiment[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2021.
- [10] 怀宝东, 隋文志, 田艳洪, 等. 基于纳米碳添加的减量施肥模式对寒地水稻产量及氮肥效率的影响[J]. 中国农学通报, 2020, 36(1):6-13. HUAI B D, SUI W Z, TIAN Y H, et al. Nanocarbon-based fertilization reduction mode: the effect on rice yield and efficiency of nitrogen fertilizer in cold region[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2020, 36(1):6-13.
- [11] 田艳飞, 黄占斌, 刘丹, 等. 纳米碳及其复合材料对油菜生长和土壤氮素保持效应的影响[J]. 环境科学学报, 2016, 36(9):3339-3345. TIAN Y F, HUANG Z B, LIU D, et al. Effect of nano-carbon and its composites on rape growth and soil nitrogen holding efficiency [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(9):3339-3345.
- [12] 王宝林, 梁太波, 张艳玲, 等. 纳米碳溶胶对烤烟生长发育及养分吸收积累的影响[J]. 烟草科技, 2013(9):72-75, 86. WANG B L, LIANG T B, ZHANG Y L, et al. Effects of nano-carbon sol on growth, development, nutrient absorption and accumulation of flue-cured tobacco[J]. *Tobacco Science & Technology*, 2013(9):72-75, 86.
- [13] 王健阳, 郑海春, 高娃, 等. 纳米碳溶胶改良盐碱地初探[J]. 现代农业, 2018(5):95-96. WANG J Y, ZHENG H C, GAO W, et al. Preliminary study on improvement of saline-alkali soil by nano-carbon sol[J]. *Modern Agriculture*, 2018(5):95-96.
- [14] 吴敏, 赵延伟, 马阳, 等. 氮素调控对玉米氮素利用和温室气体排放的影响[J]. 河北农业大学学报, 2019, 42(5):33-38. WU M,

- ZHAO Y W, MA Y, et al. Effects of nitrogen regulations on maize yields and greenhouse gas emissions from soil[J]. *Journal of Hebei Agricultural University*, 2019, 42(5):33–38.
- [15] 李青山, 王德权, 高政绪, 等. 氮肥配施纳米碳对植烟土壤氮素转化及N₂O排放的影响[J]. 土壤, 2021, 53(2):258–264. LI Q S, WANG D Q, GAO Z X, et al. Effects of nano-carbon on nitrogen transformation and N₂O emissions from tobacco planting soils[J]. *Soils*, 2021, 53(2):258–264.
- [16] 刘泓杉. 不同土地利用类型土壤N₂O吸收与排放过程及对土地管理的启示[D]. 长春: 吉林大学, 2022. LIU H S. Soil N₂O uptake and emission under different land-use types and its enlightenment for land management[D]. Changchun: Jilin University, 2022.
- [17] DOBBIE K E, SMITH K A. Nitrous oxide emission factors for agricultural soils in Great Britain: the impact of soil water-filled pore space and other controlling variables[J]. *Global Change Biology*, 2003, 9(2):204–218.
- [18] KHALIL M I, BAGGS E M. CH₄ oxidation and N₂O emissions at varied soil water-filled pore spaces and headspace CH₄ concentrations [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37(10):1785–1794.
- [19] HU H W, MACDONALD C A, TRIVEDI P, et al. Effects of climate warming and elevated CO₂ on autotrophic nitrification and nitrifiers in dryland ecosystems[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, 92:1–15.
- [20] PETERSEN D G, BLAZEWICZ S J, FIRESTONE M, et al. Abundance of microbial genes associated with nitrogen cycling as indices of biogeochemical process rates across a vegetation gradient in Alaska [J]. *Environmental Microbiology*, 2012, 14(4):993–1008.
- [21] 赵楚, 王霖娇, 盛茂银. 纳米碳对土壤理化性质及其微生物的影响 [J]. 环境科学与技术, 2019, 42(4):71–81. ZHAO C, WANG L J, SHENG M Y. Effects of nanocarbon on soil physical and chemical properties and microorganism[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 42(4):71–81.
- [22] 梁太波, 赵振杰, 王宝林, 等. 纳米碳溶胶对碱性土壤pH和养分含量的影响[J]. 土壤, 2017, 49(5):958–962. LIANG T B, ZHAO Z J, WANG B L, et al. Effects of nano carbon sols(NCS) on pH and nutrient contents of alkaline soil[J]. *Soils*, 2017, 49(5):958–962.
- [23] GUL S, WHALEN J K, THOMAS B W, et al. Physico-chemical properties and microbial responses in biochar-amended soils: mechanisms and future directions[J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2015, 206:46–59.
- [24] DI H J, KEITH C, SHEN J P, et al. Ammonia-oxidizing bacteria and archaea grow under contrasting soil nitrogen conditions[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2010, 72(3):386–394.
- [25] OUYANG Y, NORTON J M, STARK J M, et al. Ammonia-oxidizing bacteria are more responsive than archaea to nitrogen source in an agricultural soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, 96:4–15.
- [26] SONG Y, ZHANG X, MA B, et al. Biochar addition affected the dynamics of ammonia oxidizers and nitrification in microcosms of a coastal alkaline soil[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2014, 50(2):321–332.
- [27] 肖蕊. 不同碳氮比的基质对土壤氨氧化微生物的影响机制[D]. 南京: 南京农业大学, 2019. XIAO R. Effects of different carbon and nitrogen ratio of substrate additions on soil ammonia oxidizers and their underlying mechanisms[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2019.
- [28] KUROIWA M, KOBAYASHI K, ISOBE K, et al. Gross nitrification rates in four Japanese forest soils: heterotrophic versus autotrophic and the regulation factors for the nitrification[J]. *Journal of Forest Research*, 2011, 16(5):363–373.
- [29] 程宜, 张金波, 蔡祖聪. 土壤中无机氮的微生物同化和非生物固定作用研究进展[J]. 土壤学报, 2012, 49(5):1030–1036. CHENG Y, ZHANG J B, CAI Z C. A research progress on biotic and abiotic inorganic N immobilization in soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(5):1030–1036.
- [30] FARRELL M, PRENDERGAST M M, JONES D L, et al. Soil microbial organic nitrogen uptake is regulated by carbon availability[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 77(7):261–267.
- [31] MILLER M N, ZEBARTH B J, DANDIE C E, et al. Crop residue influence on denitrification, NO emissions and denitrifier community abundance in soil[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2008, 40(10):2553–2562.
- [32] 王翰琨, 吴永波, 刘俊萍, 等. 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, et al. 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.
- [33] WANG X Y, LI Y J, CIAMPITTI I A, et al. Response of soil denitrification potential and community composition of denitrifying bacterial to different rates of straw return in north-central China[J]. *Applied Soil Ecology*, 2022, 170.
- [34] 张楠. 黑土氧化亚氮排放与有机碳组分特征的耦合效应研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2022. ZHANG N. Coupling effects of nitrous oxide emission and organic carbon chemical compositions in black soils[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2022.