

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2021.02.006

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. 土壤, 2021, 53(2): 258–264.

氮肥配施纳米碳对植烟土壤氮素转化及 N₂O 排放的影响^①

李青山^{1,2}, 王德权³, 高政绪³, 杜传印³, 管恩森³, 王刚³, 李现道⁴, 张国超⁴, 王慎强^{1*}

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 2 中国科学院大学, 北京 100049; 3 山东潍坊烟草有限公司, 山东潍坊 261205; 4 山东省烟草研究院, 济南 250098)

摘要: 采用实验室静态培养方法, 通过氮肥配施不同量纳米碳来探究纳米碳对植烟土壤氮素转化以及 N₂O 排放的影响。试验在等氮条件下共设置 5 个处理: CK, 硝酸铵(N 200 mg/kg, 下同); NC1, 硝酸铵+纳米碳(2.5 g/kg); NC2, 硝酸铵+纳米碳(5 g/kg); NC3, 硝酸铵+纳米碳(10 g/kg); NC4, 硝酸铵+纳米碳(15 g/kg)。结果表明: NC3 和 NC4 处理较 CK 处理显著降低了土壤 pH($P<0.05$); 与 CK 处理相比, NC1、NC2、NC3 和 NC4 处理在培养前期增加了土壤 NH₄⁺-N 含量, 相应降低了 NO₃⁻-N 含量; 在培养结束时, 与 CK 处理相比, 添加纳米碳处理显著降低了无机氮含量, 而显著增加了 CO₂ 累积排放量 ($P<0.05$); 另外, 添加纳米碳处理较 CK 处理增加了 N₂O 累积排放量, 但仅 NC4 处理与 CK 处理间差异显著($P<0.05$), N₂O 累积排放量与 CO₂ 累积排放量呈显著正相关关系 ($R^2 = 0.50, P<0.001$)。可见, 添加纳米碳能够降低土壤 pH 和无机氮含量, 抑制土壤硝化作用, 同时还可以提高微生物活性和增加 N₂O 排放量。

关键词: 纳米碳; 植烟土壤; 氮素转化; N₂O; CO₂

中图分类号: S156.2 文献标志码: A

Effects of Nano-carbon on Nitrogen Transformation and N₂O Emissions from Tobacco Planting Soils

LI Qingshan^{1,2}, WANG Dequan³, GAO Zhengxu³, DU Chuanyin³, GUAN Ensen³, WANG Gang³, LI Xiandao⁴, ZHANG Guochao⁴, WANG Shenqiang^{1*}

(1 *State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China*; 2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*; 3 *Shandong Weifang Tobacco Co., Ltd., Weifang, Shandong 261205, China*; 4 *Shandong Tobacco Academy, Jinan 250098, China*)

Abstract: A laboratory static culture was conducted in order to better understand the effects of different amounts of nano-carbon on nitrogen transformation and N₂O emission of tobacco-planting soil. The experiment included five treatments on equivalent N basis: CK, ammonium nitrate (N 200 mg/kg); NC1, ammonium nitrate + nano-carbon (2.5 g/kg); NC2, ammonium nitrate + nano-carbon (5 g/kg); NC3, ammonium nitrate + nano-carbon (10 g/kg); NC4, ammonium nitrate + nano-carbon (15 g/kg). The results showed that NC3 and NC4 treatments significantly decreased soil pH value compared with CK ($P<0.05$). Compared with CK, treatments amended with nano-carbon increased the concentrations of NH₄⁺-N in the early period of incubation and decreased the concentrations of NO₃⁻-N accordingly. At the end of the incubation, treatments amended with nano-carbon significantly decreased the concentrations of inorganic nitrogen compared to CK ($P<0.05$). Addition of nano-carbon treatment significantly increased the cumulative CO₂ emissions compared to CK ($P<0.05$). Compared with CK, NC4 treatment significantly increased the cumulative N₂O emissions ($P < 0.05$). In addition, there was a significant positive correlation between cumulative N₂O emissions and cumulative CO₂ emissions ($R^2 = 0.60, P<0.001$). The above results indicate that the addition of nano-carbon can decrease soil pH value and the concentrations of inorganic nitrogen, inhibit soil nitrification, improve microbial activity and increase N₂O emissions.

Key words: Nanocarbon; Tobacco-plantation soils; Nitrogen transformation; N₂O; CO₂

①基金项目: 山东潍坊烟草有限公司项目(2019370700270458)资助。

* 通讯作者(sqwang@issas.ac.cn)

作者简介: 李青山(1990—), 男, 山东潍坊人, 博士研究生, 主要研究方向为植烟土壤氮营养调控。E-mail: lqs@issas.ac.cn

我国是农业大国，也是肥料生产量和使用量最大的国家。据报道，2012 年我国化肥消费量已达 5 838.8×10⁴ t^[1]。在农业生产上，大量施用化学肥料以及肥料利用率低将导致一系列问题，比如能源巨大浪费、土壤质量下降、水体污染、臭氧层破坏和温室效应加剧等^[2-3]，这已成为低碳经济时代一个不容忽视和亟待解决的难题。上述问题的出现，首先与农业生产中普遍存在的氮肥施用不合理现象密不可分，而另一个不容忽视的重要方面仍是普通氮肥施入土壤后的转化过程^[4]。为此，许多学者通过增大肥料颗粒大小、肥料包膜或添加不同生物化学调控剂等技术手段来改善氮肥在土壤中的转化过程和养分释放过程。近些年来，在缓/控释肥料和稳定肥料的研究上已取得初步成果^[5-7]。然而，如何更有效地提高氮肥利用率进而减少氮肥用量，仍是实现现代农业高产高效及可持续发展的重大课题。

纳米技术这项新技术兴起于 20 世纪 80 年代，基本涵义是在纳米(10⁻⁹~10⁻⁷ m) 尺度范围内对物质进行认识和改造。纳米材料具有许多传统材料不具备的特性^[8-9]，比如，小尺寸效应、表面界面效应和量子尺寸效应等。纳米碳作为一种常见的纳米材料，将其应用在土壤中，对土壤结构、土壤中元素迁移及化学生物反应等方面有一定影响^[10-11]。另外，纳米碳广泛存在于土壤及土壤-植被-大气循环体中，因此，使用纳米碳可避免给土壤及植被带来不良影响^[12]，这一点优于其他金属纳米材料。有研究表明，纳米碳遇水可提升土壤电动位，降低土壤 pH，提升土壤离子浓度，促进养分释放^[13]。近年来，许多中国学者将纳米材料逐步应用于农业生产领域，有关纳米碳材料对作物生长、产量和品质、氮素利用率和减少氮损失等方面的研究已逐渐成为新热点。研究表明，纳米材料能够调节植物基因表达，刺激种子萌发^[14-15]。同时，纳米材料也能调节植物体内多种酶活性，改善叶片光合性能，促进根系和植株生长，提高作物产量和品质^[16-18]。另外，纳米碳在改善土壤水分入渗和土壤养分保持等方面也展现出良好应用前景^[19-20]。

烟草是我国的重要经济作物之一，我国烟叶生产量及成品烟销售量均据全世界首位。而与津巴布韦和美国等先进烤烟生产国相比较，我国烟叶仍存在整体香气量不足，上部烟叶烟碱含量较高和叶片过厚等问题^[21]。在烤烟生产中，氮素对烤烟烟叶的产量和质量的影响比其他任何营养物质都大。氮素供应不足和过多都会对烟叶产量和品质起负作用^[22]。对比国外优质烤烟吸氮曲线，其差异为：在我国烤烟生产中

烟株在打顶后仍有大量氮素吸收^[23]。另外，李春俭等^[21]也研究表明，我国上部烟叶整体质量得不到提升的重要原因就在于打顶后烟株仍奢侈吸收氮素。因此，获得优质烤烟烟叶的关键所在就是如何有效调控烤烟生育期内土壤氮素供应契合优质烤烟的吸氮规律^[24-25]。目前，有关纳米碳影响烤烟生长发育及品质的研究早已展开。有研究发现，在常规肥料中添加纳米碳能够增加烤烟植株干物质积累量，显著提高氮肥利用率，有效降低氮素土壤残留和损失^[26]，并且施用纳米碳还可以优化烤烟田间农艺性状和提高烤后烟中上等和上等烟比例^[27]。然而，目前有关纳米碳与氮肥配施影响植烟土壤中氮素转化以及 N₂O 排放的研究较少。为此，本文采用室内培养的方法，设置氮肥配施不同量纳米碳处理，来探讨配施纳米碳对植烟土壤氮素转化及 N₂O 排放的影响。这对于明确纳米碳如何影响氮素转化过程具有重要意义，同时也可作为纳米碳合理应用于烤烟或其他作物生产提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 供试材料

供试土壤采样地点及理化性质见文献^[28]。

本试验所用纳米碳由上海芳甸生物科技有限公司提供(全氮 7.75 g/kg, 全碳 333.62 g/kg, 以干基计), C/N 为 43.05。分别快速称取 4.17、8.33、16.77 和 33.54 g 的纳米碳溶于 250 ml 的去离子水中，然后在超声波振荡器内振荡 30 min，使其溶解均匀，配成不同浓度的纳米碳溶液。

1.2 试验设计

试验共设 5 个处理：① CK(对照)，只添加硝酸铵；②NC1，硝酸铵+纳米碳(2.5 g/kg)；③NC2，硝酸铵+纳米碳(5 g/kg)；④ NC3，硝酸铵+纳米碳(10 g/kg)；⑤NC4：硝酸铵+纳米碳(15 g/kg)。硝酸铵施用量为 N 200 mg/kg。

具体培养步骤参照文献^[28]中的方法进行。

1.3 测定项目与方法

土壤中可溶性全氮(DTN)、NO₃-N 和 NH₄⁺-N 含量，N₂O 和 CO₂ 排放，土壤 pH 的测定均参照文献^[28]。

1.4 数据处理

氮素净矿化速率、氮素净硝化速率、可溶性有机氮(DON)、无机氮、CO₂ 和 N₂O 排放速率及累积排放量参照文献^[28]中的公式进行计算。

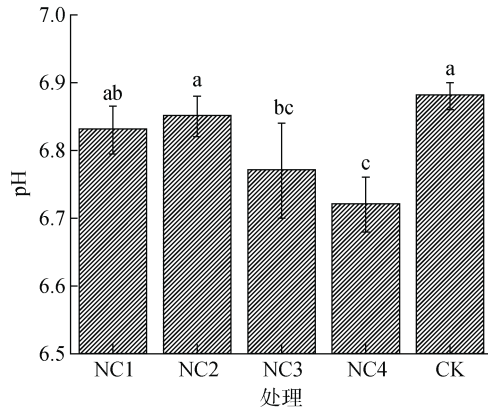
文中给出的 pH、可溶性氮组分、N₂O 和 CO₂ 排放数据均为 3 次重复数据。采用 SPSS 24.0 软件对数据进行单因素方差分析，用 LSD 方法分析处理间

平均数的差异显著性($P < 0.05$), 用 OriginPro2018 进行作图和线性拟合。

2 结果

2.1 pH

由图 1 可知, 在培养结束时, NC1 和 NC2 处理与 CK 处理间土壤 pH 差异不显著; NC3 和 NC4 处理的 pH 却显著低于 CK 处理($P < 0.05$), 说明纳米碳添加量达到一定值后将降低土壤 pH。



(图中误差线长短表示标准差大小($n=3$);不同小写字母代表处理间差异在 $P < 0.05$ 水平显著;下同)

图 1 添加纳米碳对植烟土壤 pH 的影响

Fig. 1 Effects of application of nano-carbon on pH values of tobacco-planting soils

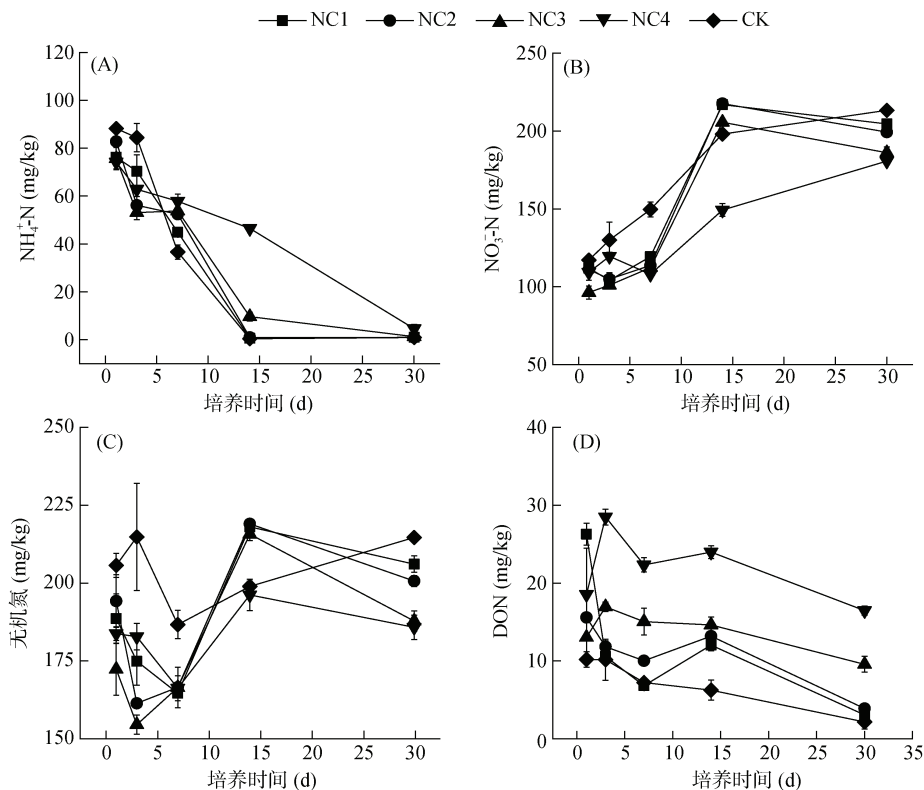


图 2 植烟土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (A)、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ (B)、无机氮(C)和 DON(D)含量的动态变化

Fig. 2 Dynamic changes of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (A), $\text{NO}_3^-\text{-N}$ (B), inorganic nitrogen (C) and DON (D) in tobacco-growing soil

2.2 可溶性氮

由图 2A 可以看出, 与 CK 处理相比, NC1、NC2、NC3 和 NC4 处理在前 3 d 降低了土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量, 随后又增加了 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量, 其中以 NC4 处理的增加幅度最大。在培养结束时, NC4 处理的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量仍明显高于其他处理, 而其他处理间差异不明显。

由图 2B 可以看出, 各处理的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量均呈不断增大的趋势, 而 NC1、NC2、NC3 和 NC4 处理在前 7 d 内的增大幅度显著小于 CK 处理的增大幅度。在培养结束时, 与 CK 处理相比, NC1、NC2、NC3 和 NC4 处理明显降低 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量。由图 3A 可知, 氮肥配施纳米碳降低了氮素的净硝化速率, 各处理净硝化速率大小依次为: $\text{CK} > \text{NC1} > \text{NC2} > \text{NC3} > \text{NC4}$ (图 3A), 且各处理间差异显著($P < 0.05$)。

与 CK 处理相比, NC1、NC2、NC3 和 NC4 处理在前 7 d 明显降低土壤无机氮含量, 而 NC1、NC2 和 NC3 处理在试验 14 d 时明显提高了土壤无机氮含量。在培养结束时, NC1、NC2、NC3 和 NC4 处理较 CK 处理显著降低了无机氮含量($P < 0.05$, 图 2C)。由图 3B 可以看出, 与 CK 处理相比, NC1、NC2、NC3 和 NC4 处理显著降低了土壤氮素净矿化速率($P < 0.05$), 其中 NC1 处理降低幅度最小, NC4 处理降低幅度最大。

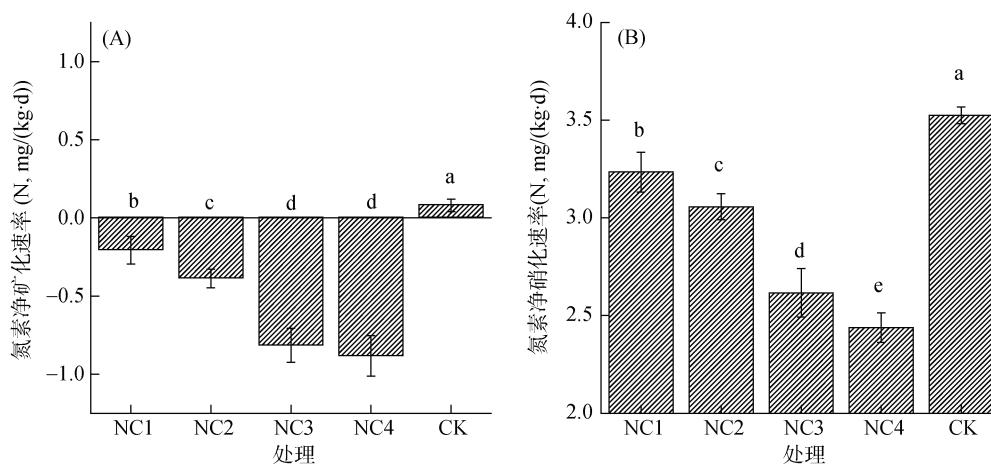


图 3 配施纳米碳对植烟土壤净矿化速率(A)和净硝化速率(B)的影响

Fig. 3 Effects of application of nano-carbon on net mineralization rates (A) and net nitrification rates (B) of tobacco-planting soils

由图 2D 可以看出,在培养过程中,CK 处理的 DON 含量呈不断减小的趋势。与 CK 处理相比,NC1 和 NC2 处理在培养初期显著提高了 DON 含量;而 NC3 和 NC4 处理在整个培养过程中均显著提高了土壤 DON 含量($P<0.05$)。

2.3 CO₂ 排放

由图 4A 可以看出,与 CK 处理相比,NC1、NC2、

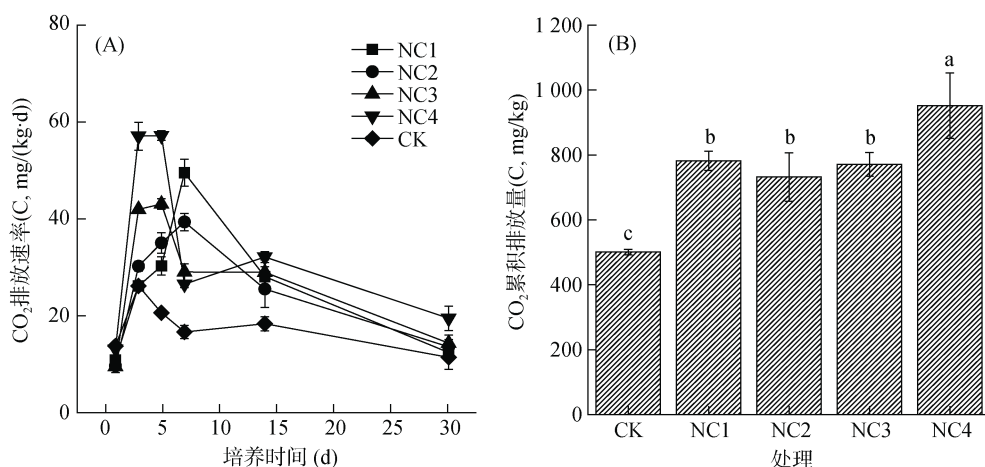


图 4 添加纳米碳对植烟土壤 CO₂ 排放速率(A)和累积排放量(B)的影响

Fig. 4 Effects of application of nano-carbon on CO₂ emission rates (A) and cumulative emissions (B) of tobacco-planting soils

2.4 N₂O 排放

与 CK 处理相比,NC1 处理在前 5 d 明显降低了土壤 N₂O 排放速率,随后又提高了 N₂O 排放速率(图 5A);而 NC2、NC3 和 NC4 处理在培养前期明显提高了土壤 N₂O 排放速率,NC4 处理的提高幅度最大,NC2 处理的提高幅度最小(图 5A)。在培养结束时,NC1 处理的 N₂O 累积排放量仅比 CK 处理增加了 0.01 mg/kg,NC2、NC3 和 NC4 处理较 CK 处理增加较多,但仅 NC4 处理与 CK 处理间差异显著($P<0.05$)(图 5B)。

NC3 和 NC4 处理显著提高了土壤 CO₂ 排放速率。NC1 和 NC2 处理的 CO₂ 排放峰值出现在试验 7 d 时,而 NC3 和 NC4 处理的 CO₂ 排放峰值出现在试验 5 d 时。在培养结束时,NC1、NC2、NC3 和 NC4 处理较 CK 处理显著增加 CO₂ 累积排放量($P<0.05$, 图 4B),其中 NC4 处理的累积排放量最高,并显著高于 NC1、NC2 和 NC3 处理,但 NC1、NC2 和 NC3 处理间差异不显著。

由图 6 可以看出,N₂O 累积排放量与净硝化速率呈显著负相关关系($R^2=0.6$, $P<0.001$),而与 CO₂ 累积排放量呈显著正相关关系($R^2=0.5$, $P=0.003$)。

3 讨论

研究发现,添加纳米碳溶胶可以明显降低碱性土壤的 pH,且随着纳米碳溶胶浓度的增加,其降低 pH 的效果越明显^[29]。在本试验中得出了相似结果,与 CK 处理相比,NC3 和 NC4 处理显著降低了土壤 pH

($P < 0.05$), 说明随着纳米碳添加量的增大降低 pH 的效果越明显。这可能因为纳米碳是一种非导电的改性

碳, 可以从 NH_4^+ 中吸出氮元素, 同时释放 H^+ ^[30], H^+ 浓度的增加, 导致了 pH 下降。

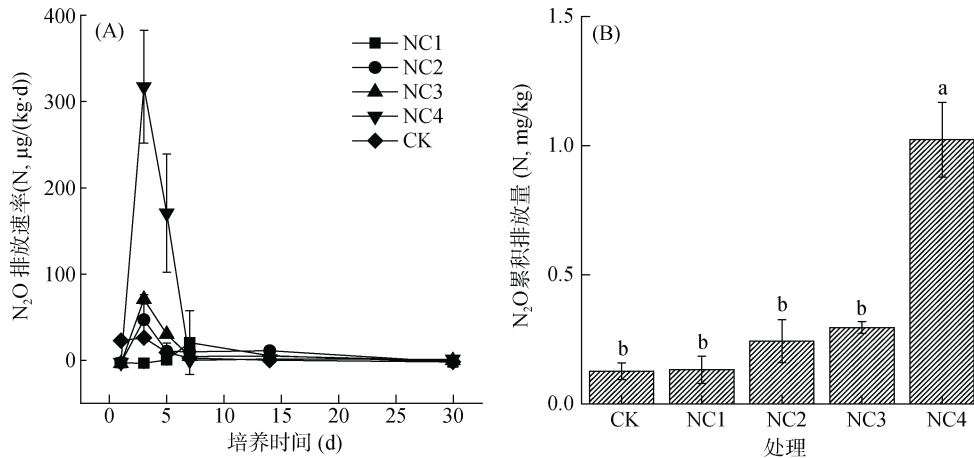


图 5 添加纳米碳对植烟土壤 N_2O 排放速率(A)和累积排放量(B)的影响

Fig. 5 Effects of application of nano-carbon on N_2O emission rates (a) and cumulative emissions (b) of tobacco-planting soils

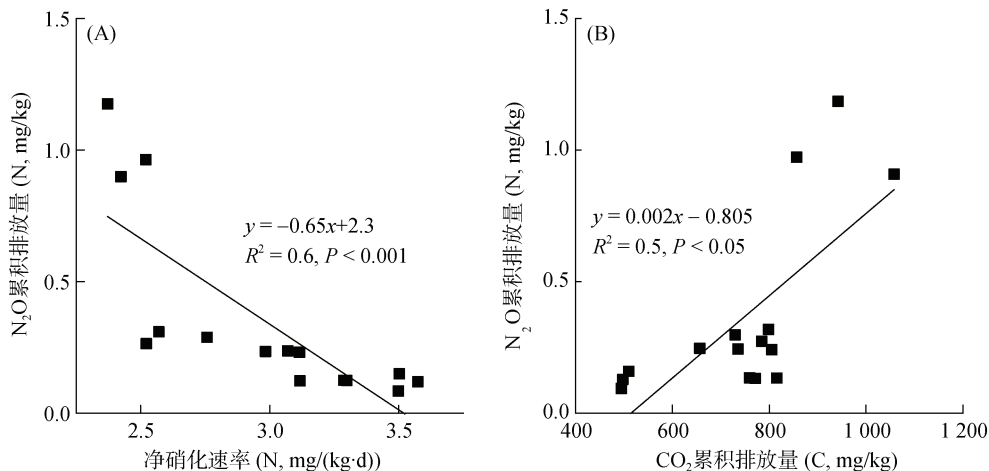


图 6 N_2O 累积排放量与氮素净硝化速率(A)和 CO_2 累积排放量(B)的相关关系

Fig. 6 Correlation of cumulative N_2O emissions and nitrogen net nitrification rates (A) and cumulative CO_2 emissions (B)

与 CK 处理相比, NC1、NC2、NC3 和 NC4 处理在培养前 3 d 明显降低了土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量, 这一方面可从纳米碳是一种非导电的改性碳, 能够从 NH_4^+ 中吸出氮元素, 从而减小 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量得到解释; 另一方面也可能是纳米碳作为一种高 C/N 比的碳源对微生物同化作用的刺激大于对矿化作用的刺激, 表现为微生物对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的净固持, 从而降低了 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量。CK 处理中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量从培养 3 d 后急剧下降, 说明此阶段的硝化作用较强。而与 CK 处理相比, NC1、NC2、NC3 和 NC4 处理在培养 3 d 后明显提高了土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量(图 2A), 相应地降低了土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量(图 2b), 这说明纳米碳抑制了土壤硝化作用。在其他研究中也得到了相似的结果: 向土壤添加纳米碳会抑制硝化细菌的活性, 从而降低 $\text{NO}_3^-\text{-N}$

的含量^[31-32]。另外, 由图 3A 可以看出, 添加纳米碳显著降低了氮素净硝化速率 ($P < 0.05$), 且氮素净硝化速率随纳米碳添加的增加而减小, 说明纳米碳对硝化的抑制作用随纳米碳添加量的增加而增大。 N_2O 和 N_2 排放量增加通常与土壤中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量增加有关^[33], 而添加纳米碳显著降低了氮素净硝化速率, 降低了 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量, 这就解释为什么 N_2O 累积排放量与氮素净硝化速率呈显著负相关关系 (图 6A)。

向土壤中添加外源碳会刺激微生物同化作用, 也会刺激反硝化作用。在培养结束时, NC1、NC2、NC3 和 NC4 处理的无机氮含量分别比 CK 处理降低了 8.59、14.03、26.85 和 28.88 mg/kg (图 2C); 而 NC1、NC2、NC3 和 NC4 处理的 N_2O 累积排放量分别比 CK 处理增加了 0.01、0.12、0.17 和 0.90 mg/kg, 说

明反硝化作用所消耗的无机氮仅占无机氮降低量中的很小比例。综上所述,说明纳米碳作为一种高 C/N 比的外源碳对微生物同化作用的刺激大于对矿化作用的刺激,在培养结束时表现为微生物对无机氮的净固持。由图 3B 也可以看出,添加纳米碳显著降低了氮素净矿化速率 ($P<0.05$),且氮素净矿化速率随纳米碳添加量的增加显著减小,说明纳米碳对微生物同化作用的刺激随纳米碳添加量的增加而增强。

配施纳米碳可提高土壤中 DON 含量。在培养结束时,添加纳米碳处理分别比 CK 处理增加了 0.89 (NC1)、1.72 (NC2)、7.4 (NC3)和 14.29 (NC4) mg/kg (图 2D),这可从外源碳的加入使土壤中微生物活性增大,大量的碳水化合物被微生物快速分解,甚至外源碳添加促进土壤中顽固性老有机碳的分解得到解释^[34-35]。本试验中的 CO₂ 主要来自土壤微生物呼吸,CO₂ 排放可以表征微生物活性的强弱。从图 4A 可看出,添加纳米碳显著提高了土壤 CO₂ 排放速率。与 CK 处理相比,添加纳米碳处理显著提高了 CO₂ 累积排放量($P<0.05$,图 4B),说明配施纳米碳可显著提高微生物活性。

配施纳米碳还可刺激反硝化作用。与 CK 处理相比,NC1、NC2、NC3 和 NC4 处理增加了 N₂O 累积排放量,NC1、NC2 和 NC3 处理与 CK 处理间差异不显著,而 NC4 处理较 CK 处理显著增加了 N₂O 累积排放量 ($P<0.05$,图 5A),这与其他人的研究结果不同。周鹏等^[36]研究发现,在田间条件下施用纳米增效尿素比纯尿素能减少华北平原春玉米田的 N₂O 排放,并认为这是由于添加纳米碳放缓了肥料释放速率,提高了作物对养分的吸收,相应地也就减少了农田的 N₂O 排放量。另外,杜亚琴等^[37]研究也发现,包膜复合肥比不包膜的氮肥利用率高,从而能显著降低土壤 N₂O 排放量。而在室内培养条件下,没有植物吸收氮素,也没有径流和渗漏影响氮素含量,因此添加纳米碳对植烟土壤 N₂O 排放的影响还应进一步在大田试验中验证。本试验中,添加纳米碳提高了 N₂O 累积排放量,这也可能与本试验在开始时向土壤加入大量 NO₃⁻-N 有关。N₂O 和 N₂ 排放量多少通常与土壤中 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量的高低有关^[33],因为 NO₃⁻-N 是反硝化过程中生成 N₂O 的重要电子受体。另外,添加纳米碳显著提高了 CO₂ 累积排放量,加快了土壤中氧气的消耗,易导致土壤中厌氧环境的形成而间接地促进反硝化作用^[35]。反硝化作用加强,N₂O 排放自然会增加。本研究还发现,N₂O 累积排放量与 CO₂ 累积排放量呈显著正相关

关系($R^2 = 0.5, P<0.05$,图 6B),这与 Huang 等^[38]研究结果基本一致。

综上所述,在室内培养条件下,氮肥配施纳米碳对植烟土壤氮素转化具有一定影响。纳米碳具有一定的抑制硝化作用、降低无机氮含量和提高可溶有机氮含量的能力,但具有增加 N₂O 排放的风险。然而,在烤烟实际生产中,烟株生长发育会吸收利用一部分氮素,其根系分泌物也会影响氮素转化^[39],因径流和淋洗等途径还会导致氮素损失。因此,在大田试验条件下,氮肥配施纳米碳对植烟土壤氮素转化、氮素利用率和温室气体排放的影响需做进一步深入研究。另外,全面评价人工纳米材料影响生态效应的关键是将植物-微生物-土壤作为一个整体^[40],因此,在大田试验条件下,还应将纳米碳对土壤微生物群落结构的影响统筹在一起探究。

4 结论

1) 添加纳米碳可以降低植烟土壤 pH,且随着纳米碳添加量的增大,其降低土壤 pH 的效果越明显。

2) 添加纳米碳能够一定程度上抑制硝化作用,即提高土壤 NH₄⁺-N 含量的同时降低 NO₃⁻-N 含量。另外,氮肥配施纳米碳可降低土壤中无机氮含量,但能够提高土壤可溶性有机氮含量。

3) 添加纳米碳不仅可以提高植烟土壤微生物活性,增加 CO₂ 累积排放量;而且当纳米碳添加量达到一定值后将显著提高 N₂O 累积排放量。另外,CO₂ 累积排放量与 N₂O 累积排放量呈显著的正相关关系 ($R^2 = 0.5, P<0.05$)。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 2012 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2012.
- [2] Ju X T, Kou C L, Zhang F S, et al. Nitrogen balance and groundwater nitrate contamination: Comparison among three intensive cropping systems on the North China Plain[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 143(1): 117-125.
- [3] 张玉铭, 张佳宝, 胡春胜, 等. 华北太行山前平原农田土壤水分动态与氮素的淋溶损失[J]. *土壤学报*, 2006, 43(1): 17-25.
- [4] 王敬国. 植物营养的土壤化学[M]. 北京: 北京农业大学出版社, 1995.
- [5] 侯朋福, 薛利祥, 俞映惊, 等. 缓控释肥侧深施对稻田氨挥发排放的控制效果[J]. *环境科学*, 2017, 38(12): 5326-5332.
- [6] 斯林林, 周静杰, 吴良欢, 等. 生物炭配施缓控释肥对稻田田面水氮素动态变化及径流流失的影响[J]. *环境科学*, 2018, 39(12): 5383-5390.

- [7] 白由路. 我国肥料产业面临的挑战与发展机遇[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(1): 1-8.
- [8] Borm P J A, Robbins D, Haubold S, et al. The potential risks of nanomaterials: A review carried out for ECETOC[J]. Particle and Fibre Toxicology, 2006, 3: 11.
- [9] 张中太, 林元华, 唐子龙, 等. 纳米材料及其技术的应用前景[J]. 材料工程, 2000, 28(3): 42-48.
- [10] 刘秀梅, 冯兆滨, 张树清, 等. 纳米-亚微米级复合材料对褐潮土有机无机复合体含量及各粒级复合体中 C、N、P 含量与分布的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(1): 57-63.
- [11] 陈军辉, 尹华强, 刘勇军, 等. 纳米碳材料及在环境保护中的应用前景[J]. 化工环保, 2004, 24(S1): 120-122.
- [12] 肖强, 孙焱鑫, 王甲辰, 等. 纳米材料在土壤与植物营养领域的应用进展[J]. 中国土壤与肥料, 2009(4): 10-15.
- [13] 刘键, 张志明, 金攻. 纳米碳长效环保复合肥料: CN101362659[P]. 2009-02-11.
- [14] Servin A D, Castillo-Michel H, Hernandez-Viezcas J A, et al. Synchrotron micro-XRF and micro-XANES confirmation of the uptake and translocation of TiO₂ nanoparticles in cucumber (*Cucumis sativus*) plants[J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46(14): 7637-7643.
- [15] Khodakovskaya M V, Kim B S, Kim J N, et al. Carbon nanotubes as plant growth regulators: effects on tomato growth, reproductive system, and soil microbial community[J]. Small (Weinheim an Der Bergstrasse, Germany), 2013, 9(1): 115-123.
- [16] 肖强, 张夫道, 王玉军, 等. 纳米材料胶结包膜型缓/控释肥料对作物产量和品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(5): 951-955.
- [17] 陆长梅, 张超英, 温俊强, 等. 纳米材料促进大豆萌芽、生长的影响及其机理研究[J]. 大豆科学, 2002, 21(3): 168-171, 241.
- [18] 王国栋, 肖元松, 彭福田, 等. 尿素配施不同用量纳米碳对桃幼树生长及氮素吸收利用的影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51(24): 4700-4709.
- [19] 谭帅, 周蓓蓓, 王全九. 纳米碳对扰动黄绵土水分入渗过程的影响[J]. 土壤学报, 2014, 51(2): 263-269.
- [20] 胡伟, 向建华, 向言词, 等. 氮掺杂碳纳米粒子施用对稻田氮素径流和渗漏损失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(7): 1378-1385.
- [21] 李春俭, 张福锁, 李文卿, 等. 我国烤烟生产中的氮素管理及其与烟叶品质的关系[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(2): 331-337.
- [22] 刘青丽, 张云贵, 焦永鸽, 等. 西南烟区氮素供应与烤烟氮素吸收的关系[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(3): 757-764.
- [23] 巨晓棠, 晁逢春, 李春俭, 等. 土壤后期供氮对烤烟产量和烟碱含量的影响[J]. 中国烟草学报, 2003, 9(z1): 48-53.
- [24] 谷海红, 刘宏斌, 王树会, 等. 应用(15)^N 示踪研究不同来源氮素在烤烟体内的累积和分配[J]. 中国农业科学, 2008, 41(9): 2693-2702.
- [25] 刘青丽, 任天志, 李志宏, 等. 植烟黄壤供氮特征研究[J]. 中国农业科学, 2010, 43(1): 87-95.
- [26] 梁太波, 尹启生, 张艳玲, 等. 施用纳米碳对烤烟氮素吸收和利用的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(6): 1429-1435.
- [27] 李小龙, 孙占伟, 过伟民, 等. 纳米碳增效肥料对烟草农艺性状和经济指标的影响[J]. 土壤, 2016, 48(4): 831-834.
- [28] 李青山, 王德权, 高政绪, 等. 黄腐酸钾对植烟土壤氮素转化及 N₂O 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(5): 1130-1139.
- [29] 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.
- [30] 马筠, 刘键, 张志明. 纳米增效肥料在冬小麦上的应用研究[J]. 腐植酸, 2009(2): 14-20.
- [31] 李琳慧. 纳米 TiO₂ 对土壤氮转化相关微生物和酶的影响[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
- [32] 胡伟, 杨玉兰, 王燕. 氮掺杂碳纳米粒子对土壤氮素转化及油菜苗期生长的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2016(4): 108-112, 149.
- [33] Gillam K M, Zebarth B J, Burton D L, et al. Nitrous oxide emissions from denitrification and the partitioning of gaseous losses as affected by nitrate and carbon addition and soil aeration[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2008, 88 (2): 133-143.
- [34] Miao S J, Ye R Z, Qiao Y F, et al. The solubility of carbon inputs affects the priming of soil organic matter[J]. Plant and Soil, 2017, 410(1/2): 129-138.
- [35] 朱霞, 韩晓增, 乔云发, 等. 外加可溶性碳氮对不同热量带土壤 N₂O 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12): 2637-2644.
- [36] 周鹏, 李玉娥, 万运帆, 等. 华北春玉米田施用纳米增效氮肥的增产减排作用初探[J]. 中国农业气象, 2013, 34(5): 532-537.
- [37] 杜亚琴, 郑丽行, 樊小林. 三种控释肥在赤红壤中的氧化亚氮排放[J]. 应用生态学报, 2011, 22(9): 2370-2376.
- [38] Huang Y, Zou J W, Zheng X H, et al. Nitrous oxide emissions as influenced by amendment of plant residues with different C: N ratios[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2004, 36(6): 973-981.
- [39] 俞慎, 李振高. 稻田生态系统生物硝化-反硝化作用与氮素损失[J]. 应用生态学报, 1999, 10(5): 630-634.
- [40] 曹际玲, 冯有智, 林先贵. 人工纳米材料对植物-微生物影响的研究进展[J]. 土壤学报, 2016, 53(1): 1-11.