

烟秆生物质炭对土壤碳氮矿化的影响

李志刚^{1,2}, 张继光¹, 申国明^{1*}, 高林¹, 王瑞³, 孟贵星³, 张继旭¹, 戴衍晨^{1,2}

(1. 中国农业科学院烟草研究所, 青岛 266101; 2. 中国农业科学院研究生院, 北京 100081; 3. 湖北省烟草公司恩施州公司, 湖北 恩施 445000)

摘要: 为优化烟草废弃物的资源化利用, 采用室内培养试验, 研究了烟秆生物质炭对土壤有机碳、有机氮矿化特征的影响。结果发现, 与对照(生物质炭添加质量分数为 0.0%)相比, 添加烟秆生物质炭后能一定程度促进土壤有机碳的矿化, 且 1.0% 添加量处理的有机碳累积矿化量最高, 其次为 0.5% 及 2.0% 的添加量处理; 与其他处理相比, 2.0% 添加量处理能显著降低土壤总有机碳的累积矿化率, 促进土壤中有机碳的积累; 添加烟秆生物质炭对土壤无机氮含量、有机氮的矿化及硝化速率均无显著影响。说明较高量的烟秆生物质炭(2.0%)添加能提高土壤有机碳含量, 对于烟田土壤的增碳固氮效应及废弃烟秆的资源化利用方面具有重要指导意义。

关键词: 烟秆生物质炭; 土壤; 碳矿化; 氮矿化

中图分类号: S572.062

文章编号: 1007-5119(2016)02-0016-07

DOI: 10.13496/j.issn.1007-5119.2016.02.004

Study on the Effects of Tobacco Stem Biochar on Soil Organic Carbon and Nitrogen Mineralization

LI Zhigang^{1,2}, ZHANG Jiguang¹, SHEN Guoming^{1*}, GAO Lin¹, WANG Rui³,
MENG Guixing³, ZHANG Jixu¹, DAI Yanchen^{1,2}

(1. Tobacco Research Institute of CAAS, Qingdao 266101, China; 2. Graduate School of CAAS, Beijing 100081, China; 3. Enshi Tobacco Company of Hubei Province, Enshi, Hubei 445000, China)

Abstract: The purpose of this study was to provide reference for the resource utilization of tobacco waste. The soils for test were added with different amounts of tobacco stem biochar (mass fraction of 0.0%, 0.5%, 1.0% and 2.0%) and incubated for 84 days to study the effect of tobacco stem biochar on soil organic carbon (SOC) and nitrogen mineralization characteristics. The results indicated that, compared with the control (mass fraction of 0.0% biochar addition), tobacco stem biochar could promote the soil organic carbon mineralization to certain degree. The accumulative mineralization of SOC was the highest in the 1.0 % biochar addition treatment, followed by the 0.5 % biochar treatment and 2.0 % biochar treatment. The 2.0 % biochar treatment could significantly reduce the accumulative mineralization rate of SOC compared with the other treatments, and then promoted the accumulation of SOC. Furthermore, adding tobacco stem biochar in soil had no significant effect on soil nitrogen mineralization rate and nitrification rate. In summary, tobacco stem biochar added to tobacco soil could effectively improve the SOC content at the higher application rate, which would have important implication for the carbon and nitrogen conservation of tobacco soil, and the resource utilization of the waste tobacco stems.

Keywords: tobacco stem biochar; soil; carbon mineralization; nitrogen mineralization

生物质炭(biochar)通常是指由生物质在完全或部分缺氧的情况下经 300~700 °C 热解炭化产生的一类高度芳香化难溶性固态物质。由于其特殊的理化性质, 生物炭作为一种新型农业功能材料施入

土壤中, 能够改良土壤物理性质、持留养分元素、提高土壤有机碳含量等, 并在农业生态系统固碳减排中发挥重要作用^[1-6]。Schmidt 等^[7]发现在生物质炭施用初期, 土壤有机碳会发生损失。Liang 等^[8]

基金项目: 中国烟草总公司科技重点项目“‘清江源’生态富硒特色烟叶生产关键技术研究与应用”(110201202014), 国家自然科学基金项目(41201291)

作者简介: 李志刚, 男, 在读硕士研究生, 研究方向为土壤生态。E-mail: zhiganglee2013@163.com。*通信作者, E-mail: ycsggm@163.com

收稿日期: 2015-07-27

修回日期: 2016-02-22

的研究表明,含黑炭高的土壤比含黑炭低的土壤总有机碳的矿化率低。Spokas 等^[9]也发现添加不同种类生物炭的土壤,其有机碳矿化速率既有提高也有减少,有的甚至无影响。此外,生物质炭还具有很强的吸附能力,可吸附土壤中的铵根离子、硝酸盐,能有效减少氮素的流失^[10-12]。同时土壤中施加生物质炭后会降低氮氧化物的排放^[13-20],但也有研究发现生物质炭能促进土壤中氮氧化物的排放^[21,22]。可见,施用生物质炭对土壤碳氮转化过程的影响尚没有取得一致性规律,这可能与不同土壤的理化性状、生物质炭的来源、热解温度及其性质有关^[23],还需要进一步的深入研究。

烟草作为一种重要叶用经济作物,在农业生产过程中会产生大量烟草废弃物(主要为烟秆),国内外许多烟区处理方式是烟秆拔出焚烧或丢弃腐烂,这不仅造成了养分资源的巨大浪费和损失,而且也产生了较严重的环境污染及病害传播风险,如何开展废弃烟秆的资源化利用变得越来越迫切^[24-25]。目前有关烟秆资源的利用主要涉及提取化学原料、堆肥、生产生物质燃料与饲料等方面^[26],而将废弃烟秆高温热解制作生物质炭,施入烟田中符合我国大力发展绿色循环农业的方针政策,同时在土壤理化性状改善、肥料利用率提升以及固碳减排等方面发挥重要作用,但烟秆生物炭的用量与土壤有机碳氮转化的关系是生产应用中亟需解决的问题。因此,本文通过室内模拟培养试验,研究烟秆生物质炭不同添加量对土壤有机碳、氮矿化的影响,将为烟秆废弃物的资源优化利用、烟秆生物炭的适宜用量及其土壤生态效应提供理论与实践指导。

1 材料与方法

1.1 供试土壤与烟秆生物质炭

试验于 2015 年 4 月在湖北省恩施市“清江源”现代烟草农业科技园进行,当地属于季风性山地气候,年均气温 13.3 °C,多年平均降雨量 1435 mm,供试土壤采自茅坝槽村(30°16'N, 109°21'E,海拔 1223 m)的植烟田,土壤类型为黄棕壤,在施肥起

垄前,采用“S”形多点混合取样采集 0~25 cm 耕层土壤,立即带回实验室,剔除石块和根系后过 2 mm 筛,充分混匀后分成两份,一份鲜土用于室内培养试验,另一份风干后供理化分析。供试土壤基本化学性质为 pH 5.80,有机碳 14.30 g/kg,碱解氮 112.72 mg/kg,有效磷 21.58 mg/kg,速效钾 155.58 mg/kg。

将前一年采集的废弃烟秆,在秸秆炭化炉中以 400 °C 裂解制成烟秆生物质炭,充分混匀过筛后分成两份,一份用作培养试验材料,另一份分析其化学性质。供试烟秆生物质炭基本化学性质为 pH 10.20,灰分含量 13.23%,有机碳 171.00 g/kg、无机氮 85.48 mg/kg,有效磷 720.42 mg/kg、速效钾 17.30 mg/kg。

1.2 培养试验

取上述土壤和生物质炭样品,参照前人研究进行培养试验^[10,17,27-29]。试验共设 4 个处理:0.0%(对照,即不添加生物质炭),0.5%(即添加质量分数为 0.5%的生物质炭),1.0%(即添加质量分数为 1.0%的生物质炭),2.0%(添加质量分数为 2.0%的生物质炭),其质量分数均以干土计,每个处理设置 3 次重复。

1.2.1 土壤有机碳矿化 土壤有机碳矿化参考匡崇婷等^[28]和李淑香等^[30]的试验方法并稍作改进,不同处理的土壤在 25 °C 下恒温培养,并保持 60%田间持水量,分别在第 0、1、3、7、14、21、28、42、56、84 天随机取样,采用碱液吸收法测定 CO₂ 的释放量。

1.2.2 土壤氮矿化 有机氮矿化的具体试验步骤为:称取相当于 10 g 干土的不同生物炭处理鲜土,分别装入 100 mL 塑料瓶中,加盖密封并扎两个小孔保持通气条件,然后在 25 °C 下恒温培养,保持 60%田间持水量。分别在第 0、1、3、7、14、21、28、42、56、84 天随机取样,采用分光光度法测定土壤 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量。

1.3 测定方法

土壤有机质采用重铬酸钾-外加热法测定;pH 采用雷磁 PHS-3C 型 pH 计测定;土壤 NH₄⁺-N 采用

KCl 浸提-靛酚蓝比色法测定；土壤 NO_3^- -N 采用双波长分光光度法测定；土壤有机碳矿化采用 NaOH 吸收 CO_2 - H_2SO_4 标液滴定方法测定；土壤碱解氮采用碱解扩散法测定；土壤有效磷采用 0.05 mol/L HCl-0.025 mol/L ($1/2 \text{H}_2\text{SO}_4$) 法测定；速效钾采用火焰光度法测定。

1.4 计算方法与数据处理

$$(1) M = (V_2 - V_1) \times C_0 \times 44 / m \quad (\text{公式 1})$$

式中 M 为有机碳矿化量 (mg/kg)； V_1 为滴定样品中氢氧化钠所用硫酸的体积 (mL)； V_2 为滴定空白样中氢氧化钠所用硫酸的体积 (mL)； C_0 为硫酸溶液的标准浓度 (mol/L)；44 为 CO_2 的摩尔质量 (g/mol)； m 为土样质量 (kg)。

$$(2) V_{\text{soc}} = M / \Delta t \quad (\text{公式 2})$$

式中 V_{soc} 为有机碳矿化速率 [mg/(kg·d)]； M 为有机碳矿化量 (mg/kg)； Δt 为培养时间 (d)。

$$(3) \sum Mn = M_0 + M_1 + M_2 + \dots + M_n \quad (\text{公式 3})$$

式中 $\sum Mn$ 为某段时间内的有机碳累积矿化量 (mg/kg)； M 为有机碳矿化量 (mg/kg)； n 为测定时间。

$$(4) R = \sum Mn / S \quad (\text{公式 4})$$

式中 R 为有机碳累积矿化率 (%)； $\sum Mn$ 为某时间段内的有机碳累积矿化量 (mg/kg)； S 为土壤初始 (第 0 天) 有机碳含量 (mg/kg)。

$$(5) V_m = (NM_{i+1} - NM_i) / \Delta t \quad (\text{公式 5})$$

式中 V_m 为土壤氮矿化速率 (NMR, mg/(kg·d))； NM 为土壤无机氮含量 (mg/kg)； Δt 为培养时间 (d)； i 为测定次数。

$$(6) V_n = (NN_{i+1} - NN_i) / \Delta t \quad (\text{公式 6})$$

式中 V_n 为土壤氮硝化速率 [NNR, mg/(kg·d)]； NN 为土壤硝态氮含量 (mg/kg)； Δt 为培养时间 (d)； i 为测定次数。

采用 Excel 2003 和 SAS 9.0 软件进行数据处理作图与统计分析。

2 结果

2.1 土壤有机碳的矿化

2.1.1 土壤有机碳矿化速率与累积矿化量 由图 1 可以看出，添加不同质量分数的烟秆生物质炭后，各处理的土壤有机碳矿化速率与对照呈现一致的变化趋势，但生物炭处理的土壤有机碳矿化速率总体高于对照。从第 1 天到第 21 天，有机碳矿化速率迅速下降，生物炭各处理土壤的有机碳矿化速率下降了 79.01%~88.46%；在第 21 天后，矿化速率趋于平稳，至培养结束时各处理与对照之间几乎无差别。可见，与对照相比，添加烟秆生物质炭后能一定程度提高土壤的有机碳矿化速率，但各处理间的矿化速率差异不大。

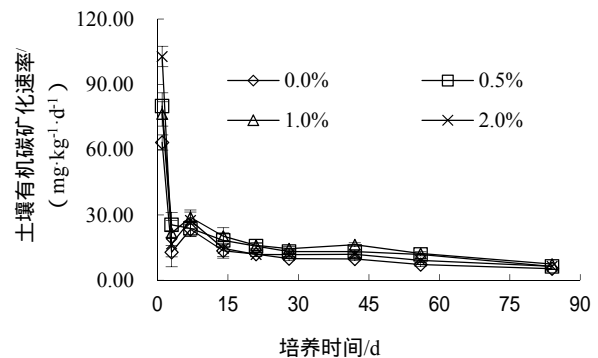


图 1 土壤总有机碳矿化速率随时间的变化

Fig. 1 Mineralization rate of SOC changed with incubation time

从图 2 可以看出，各处理的土壤有机碳累积矿化量随培养时间呈逐渐增加趋势。在培养的中后期，添加 0.5%、1.0% 和 2.0% 烟秆生物质炭处理的有机碳累积矿化量显著高于对照，且从矿化培养的第 21 天开始，1.0% 处理的土壤有机碳累积矿化量最大，其次为 0.5% 和 2.0% 处理。由于有机碳矿化速率与累积矿化量之间存在数量关系，随着矿化培养时间的延长，生物炭各处理与对照之间的土壤有机碳累积矿化量差异逐渐增大。

2.1.2 土壤总有机碳累积矿化率 土壤总有机碳累积矿化率指在整个培养时段内 (84 d) 的有机碳累积矿化量占土壤初始 (第 0 天) 有机碳含量的百分率。添加 0.0%、0.5%、1.0% 和 2.0% 生物炭后，各处理土壤的初始有机碳含量分别为 14304.82、18053.11、20812.57 和 23859.42 mg/kg，经过 84 d

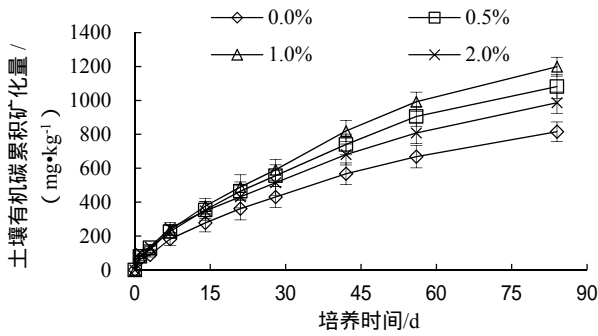
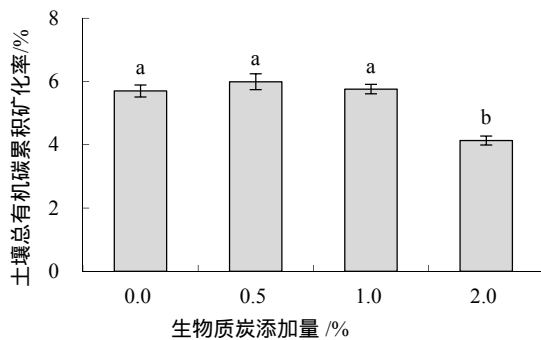


图 2 土壤有机碳累积矿化量随时间的变化

Fig. 2 Accumulative mineralization of SOC changed with incubation time

培养之后各处理存留的有机碳含量分别为 13489.36、16971.44、19613.78 和 22873.06 mg/kg。由图 3 可以看出，添加不同量烟秆生物质炭培养 84 d 后，其土壤总有机碳累积矿化率分别为 5.70%、5.99%、5.76%和 4.13%，其中 2.0%处理的总有机碳累积矿化率显著低于其他 3 个处理。可见，施用烟秆生物质炭显著增加土壤中的有机碳含量，且 2.0%处理土壤的有机碳累积矿化率最低，其固碳效果最佳。



注：不同小写字母表示同一时期不同处理间差异达显著水平 ($P < 0.05$)，下同。

图 3 土壤总有机碳累积矿化率

Fig. 3 Accumulative mineralization rate of SOC

2.2 土壤有机氮的矿化

2.2.1 土壤铵态氮、硝态氮动态变化 从图 4、5 可以看出，土壤中添加不同量的烟秆生物质炭后，各处理土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量随培养时间均与对照呈现一致的变化趋势，且彼此间无显著差异。从第 0 天到第 1 天，土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量急剧下降，各处理的土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量分别下降了

96.65%~98.67%；第 14 天之后， $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量开始趋于稳定，并始终维持在较低水平。而从第 0 天到第 3 天，各处理的土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量就迅速下降，分别降低了 40.70%~41.70%；第 3 天之后，土壤的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量逐渐升高，并在培养的第 56 天左右，各处理土壤的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量再次达到初始值并进一步增加。

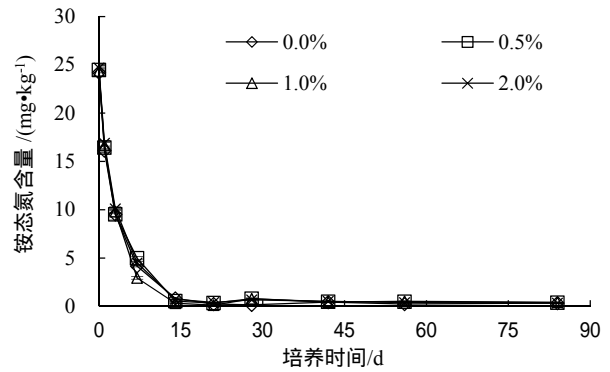


图 4 土壤铵态氮含量随时间的变化

Fig. 4 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ content of soil changed with incubation time

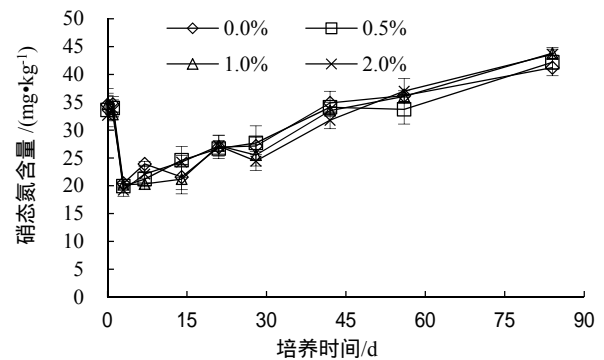


图 5 土壤硝态氮含量随时间的变化

Fig. 5 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ content of soil changed with incubation time

2.2.2 土壤有机氮矿化速率动态变化 从图 6 可以看出，各处理的土壤有机氮矿化速率随培养时间呈先减小后增大并趋于平稳的趋势。从第 1 天到第 14 天，各处理有机氮矿化速率先减小后逐渐增大但均为负值，说明土壤中无机氮含量逐渐降低，可能发生了 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的大量吸附或固持；在第 21 天之后，各处理的有机氮矿化速率逐渐稳定并基本在正值，说明此时土壤中的无机氮含量开始缓慢增加，但生物炭各处理与对照之间无显著差异。

2.2.3 土壤硝化速率动态变化 各处理的土壤硝化速率也随培养时间呈现一致的变化趋势(图7),从第0天到第28天,各处理的硝化速率波动较大,但总趋势是先迅速减小后逐渐增大,即培养开始时,土壤的反硝化作用可能占主导使得 NO_3^- -N含量迅速减少,之后硝化作用增强,土壤 NO_3^- -N含量迅速增加;在第28天之后,各处理的土壤硝化速率逐渐稳定在正值,表示硝化作用继续占据主导位置,使得 NO_3^- -N含量逐渐增加。

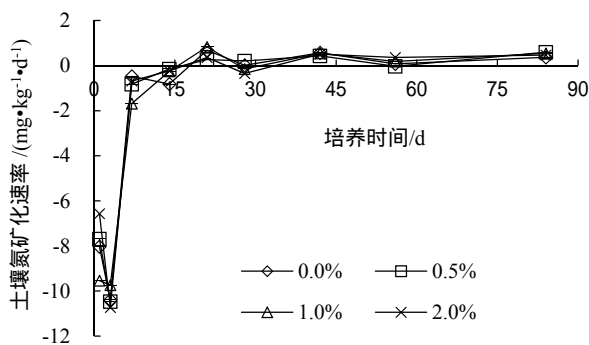


图6 土壤氮矿化速率随时间的变化

Fig. 6 N mineralization rate of soil changed with incubation time

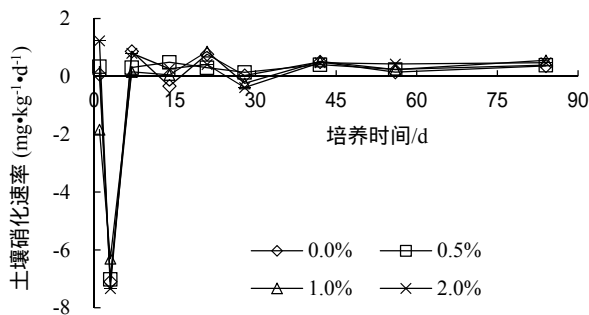


图7 土壤硝化速率随时间的变化

Fig. 7 Nitrification rate of soil changed with incubation time

3 讨论

3.1 烟秆生物质炭对土壤有机碳矿化的影响

土壤有机碳的矿化是烟田土壤碳循环的关键过程之一,有机碳矿化直接关系到土壤中养分的供给、温室气体的排放及其土壤质量的保持等诸多方面。添加生物质炭能改变土壤的有机碳组分^[8],

但添加生物质炭是促进还是抑制土壤有机碳的矿化,目前的研究结论并不一致^[2,7-9,31-33]。Hamer等^[31]和Wardle等^[32]认为生物质炭提高了土壤微生物活性,从而促进了有机碳的分解。Liang等^[8]认为含黑炭高的土壤比含黑炭低的土壤其有机碳矿化率低。Spokas等^[9]研究则发现不同种类生物质炭添加后对土壤有机碳矿化的影响并不一致。

本研究结果表明,添加0.5%、1.0%和2.0%烟秆生物质炭能够一定程度促进土壤有机碳的矿化,但添加量与促进效果之间不呈正相关,当添加量达到2.0%时,土壤有机碳的矿化反而出现降低。由此可见,烟秆生物质炭对土壤有机碳矿化作用的影响是双重的,即在一定范围内,随着烟秆生物质炭量的增加,促进土壤有机碳矿化的作用更加明显,但当超过某一阈值后,其促进土壤有机碳矿化的效果反而降低。由于过多的烟秆生物质炭吸附土壤中简单有机分子,使其聚合成更复杂的有机分子,这在一定程度上保护或减弱了土壤有机碳的矿化作用效果^[8]。0.5%和1.0%处理的土壤有机碳矿化增加,可能与烟秆生物质炭本身含有较多有机碳成分有关,因为生物质炭中易分解物质的分解会造成土壤有机碳矿化量和矿化速率的提高^[34-35]。因此,虽然这两个处理的土壤有机碳矿化速率及累积矿化量明显高于对照,但两者的土壤总有机碳累积矿化率与对照相比无显著差异(图3);2.0%处理虽然土壤有机碳的矿化速率及累积矿化量均高于对照,但由于土壤中随之加入了更多的有机碳成分(土壤初始有机碳含量远大于对照),导致其总有机碳的累积矿化率显著低于对照,最终促进了土壤有机碳的积累,起到了较高量的生物炭增加土壤碳贮存的作用。

3.2 烟秆生物质炭对土壤氮矿化及硝化作用的影响

土壤有机氮矿化在一定程度上可以表征土壤的供氮能力,并且氮矿化过程受外源物质、温湿度、土壤质地、pH及耕作方式等多种因素及其交互作用的影响。目前,外源生物质炭对土壤氮素转化的影响依然存在分歧。赵明等^[36]的研究认为生物质炭能够提高土壤有机氮的矿化量;Dempster等^[38]

则发现生物质炭与氮肥配施能够降低土壤有机氮的矿化作用；Nelissen 等^[37]认为生物质炭能够促进 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 向 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的转化，即促进土壤硝化作用；而 Clough 等^[22]的研究则发现生物质炭能够降低土壤的硝化速率。生物质炭对土壤氮转化的影响主要与生物炭的结构、土壤类型及性质、酚类物质含量、氮转化微生物种群结构及活性等多因素的不同作用有关^[39-40]。

本研究中，添加烟秆生物质炭对土壤无机氮动态、有机氮矿化和硝化作用均无显著影响。在培养前期， $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量大量减少；在培养中后期， $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量基本不变，而 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量却逐渐升高。这可能是在培养前期，由于有机氮的矿化作用弱、微生物的氮固持以及部分氮素通过反硝化以气体形式挥发等原因，导致了土壤中的无机氮含量逐渐降低；在培养中后期，有机氮的矿化作用增强，同时微生物固持的无机氮得到释放，土壤硝化作用逐渐占主导地位，从而造成了土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量升高。但不同添加量的烟秆生物质炭的作用并未显现。DeLuca 等^[41]的研究也表明，在农田和草地两种土壤中添加生物炭后，其对土壤矿化作用及硝化作用均无明显影响，但是由于生物炭对 NH_4^+ 的吸附或固定，土壤氨化作用略有下降。目前，关于生物质炭添加土壤后，究竟如何影响土壤氮素矿化及硝化作用的进程及其机理，尚没有明确的科学解释^[40]。下一步需要从生物炭的制备工艺、结构特性、土壤性质的影响及敏感微生物种群结构与功能的响应等多个方面深入探讨其内在机制。

4 结 论

(1) 添加烟秆生物质炭能一定程度提高土壤有机碳的矿化速率，其有机碳的累积矿化量以 1.0% 生物炭添加量处理最高，其次为 0.5% 和 2.0% 添加量处理；此外 2.0% 生物炭添加处理土壤有机碳的增加最明显，同时显著降低土壤总有机碳的累积矿化率，固碳效果最佳。

(2) 添加不同量的烟秆生物质炭对土壤无机氮、土壤有机氮矿化及硝化速率均无显著影响，因

此烟秆生物质炭添加到土壤中具有一定的固氮效果。

(3) 本研究仅从烟秆生物质炭添加对土壤有机碳/氮矿化的影响上进行了初步分析，下一步应从烟秆生物质炭结构、土壤理化性质、氮转化微生物种群及活性等方面对其作用机理进行深入阐述。

参考文献

- [1] Glaser B, Lehmann J, Zech W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal—a review [J]. *Biol Fertil Soils*, 2002, 35: 219-230.
- [2] Lehmann J, Gaunt J, Rondon M. Biochar sequestration in terrestrial ecosystems—a review [J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2006, 11: 403-427.
- [3] Yazawa Y, Asakawa D, Matsueda D, et al. Effective carbon and nitrogen sequestrations by soil amendments of charcoal [J]. *Journal of Arid Land Studies*, 2006, 15(4): 463-467.
- [4] Liang B, Lehmann J, Solomon D, et al. Black carbon increases cation exchange capacity in soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70: 1719-1730.
- [5] Sombroek W, Ruivo M L, Fearnside P M, et al. Amazonian Dark Earths as carbon stores and sinks. In: Lehmann J, Kern D C, Glaser B, et al. *Amazonian Dark Earths: Origin Properties Management* [M]. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publisher, 125-140.
- [6] Harder B. Smoldered-Earth Policy: Created by ancient Amazonia natives, fertile, dark soils retain abundant carbon [J]. *Science News*, 2006, 169: 133.
- [7] Schmidt M W I, Noack A G. Black carbon in soils and sediments: analysis, distribution, implications, and current challenges [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2000, 14: 777-794.
- [8] Liang B Q, Lehmann J, Sohi S P, et al. Black carbon affects the cycling of non-black carbon in soil [J]. *Organic Geochemistry*, 2010, 41(2): 206-213.
- [9] Spokas K A, Koskinen W C, Baker J M. Impacts of woodchip biochar additions on greenhouse gas production and sorption/degradation of two herbicides in a Minnesota soil [J]. *Chemosphere*, 2009, 77(4): 574-581.
- [10] 张文玲, 李桂花, 高卫东. 生物质炭对土壤性状和作物产量的影响[J]. *中国农学通报*, 2009, 25(17): 153-157.
- [11] 刘伟晶, 刘焯, 高晓荔, 等. 外源生物质炭对土壤中铵态氮素滞留效应的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(5): 962-968.
- [12] Rondon M, Ramirez J A, Lehmann J. Greenhouse gas emission decrease with charcoal additions to tropical soils [R]. 2005.

- [13] 张阿凤. 秸秆生物质炭对农田温室气体排放及作物生产力的效应研究[D]. 南京:南京农业大学, 2012: 29-82.
- [14] Case S C, Mcnamara N P, Reay D S, et al. The effect of biochar addition on N₂O and CO₂ emissions from a paddy loam soil-the role of soil aeration[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 51(9): 125-134.
- [15] Zhang A F, Bian R J, Pan G X, et al. Effects of Biochar Amendment on Soil Quality, Crop Yield and Greenhouse Gas Emission in a Chinese Rice Paddy: A Field Study of Consecutive Rice Growing Cycles[J]. *Journal of Field Crops*, 2012, 127: 153-160.
- [16] Singh B P, Hatton B J, Balwant S, 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.
- [17] 张斌, 刘晓雨, 潘根兴, 等. 施用生物质炭后稻田土壤性质、水稻产量和痕量温室气体排放的变化[J]. *中国农业科学*, 2012, 45 (23) : 4844-4853.
- [18] Zhang A F, 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 and Environment*, 2010, 139: 469-475.
- [19] Liu X Y, Qu J J, Li L Q, et al. Can biochar amendment be an ecological engineering technology to depress N₂O emission in rice paddies?—A cross site field experiment from South China[J]. *Ecological Engineering*, 2012, 42(9): 168-173.
- [20] 彭华, 纪雄辉, 吴家梅, 等. 生物黑炭还田对晚稻 CH₄ 和 N₂O 综合减排影响研究[J]. *生态环境学报*, 2011, 20 (11) : 1620-1625.
- [21] Alho C F, Cardoso A S, Brazao V, et al. Biochar and soil nitrous oxide emissions[J]. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, 2012, 47(5): 722-725.
- [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: 852-860.
- [23] 盖霞普. 生物炭对土壤氮素固持转化影响的模拟研究 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2015: 2-5.
- [24] 董占能, 白聚川, 张皓东. 烟草废弃物资源化[J]. *中国烟草科学*, 2008, 29 (1) : 39-42.
- [25] 崔志军, 孟庆洪, 刘敏, 等. 烟草秸秆气化替代煤炭烘烤烟叶研究初报[J]. *中国烟草科学*, 2010, 31 (3) : 70-77.
- [26] 刘超, 翟欣, 许自成, 等. 关于烟秆资源化利用的研究进展[J]. *江西农业学报*, 2013, 25 (12) : 116-119.
- [27] 曲晶晶, 郑金伟, 郑聚锋, 等. 小麦秸秆生物质炭对水稻产量及晚稻氮素利用率的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2012, 28 (3) : 288-293.
- [28] 匡崇婷, 江春玉, 李忠佩, 等. 添加生物质炭对红壤水稻土有机碳矿化和微生物生物量的影响[J]. *土壤*, 2012, 44 (4) : 570-575.
- [29] 章明奎, Waleign D B, 唐红娟. 生物质炭对土壤有机质活性的影响[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(2) : 127-137.
- [30] 李淑香, 李芳芳. 黑碳不同添加量对土壤有机碳矿化的影响[J]. *安徽农业科学*, 2011, 39(36) : 22395-22396, 22500.
- [31] Hamer U, Marschner B, Brodowski S, et al. Interactive priming of black carbon and glucose mineralization[J]. *Organic Geochemistry*, 2004, 35: 823-830.
- [32] Wardle D A, Nilsson M C, Zackrisson O. Fire-derived charcoal causes loss of forest humus[J]. *Science*, 2008, 39(7): 320-629.
- [33] 赵次娴, 陈香碧, 黎蕾, 等. 添加蔗渣生物质炭对农田土壤有机碳矿化的影响[J]. *中国农业科学*, 2013, 46 (5) : 987-994.
- [34] Smith J L, Collins H P, Bailey V L. The effect of young biochar on soil respiration[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42: 2345-2347.
- [35] Luo Y, Durenkamp M, Nobili M D. Short term soil priming effects and the mineralization of biochar following its incorporation to soils of different pH[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43: 2304-2314.
- [36] 赵明, 蔡葵, 孙永红, 等. 污泥生物质炭的碳、氮矿化特性及其对大棚番茄产量品质的影响[J]. *中国农学通报*, 2014, 30 (1) : 215-220.
- [37] Nelissen V, Rutting T, Huygens D, et al. Maize biochars accelerate short-term soil nitrogen dynamics in a loamy sand soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 55: 20-27.
- [38] Dempster D, Gleeson D, Solaiman Z, et al. Decreased soil microbial biomass and nitrogen mineralization with Eucalyptus biochar addition to a coarse textured soil[J]. *Plant and Soil*, 2012, 354: 311-324.
- [39] 潘逸凡, 杨敏, 董达, 等. 生物质炭对土壤氮素循环的影响及其机理研究进展[J]. *应用生态学报*, 2013(9) : 2666-2673.
- [40] 张星, 张晴雯, 刘杏认, 等. 施用生物炭对农田土壤氮素转化关键过程的影响[J]. *中国农业气象*, 2015, 36 (6) : 709-716.
- [41] DeLuca T H, Mackenzie M D, Gundale M J, et al. Wildfire-produced charcoal directly influences nitrogen cycling in ponderosa pine forests[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70(2): 448-452.