

炭基肥和竹炭对土壤氮素淋失和微生物的影响

董达, 王宇婕, 姜培坤, 吴家森

(浙江农林大学环境与资源学院, 浙江省土壤污染生物修复重点实验室, 杭州 311300)

摘要: 为了研究竹炭和炭基缓释肥添加对毛竹林土壤氮素流失和细菌群落结构的影响, 采用室内土柱淋溶试验, 测定了淋溶水中 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 浓度, 分析了细菌群落多样性和组成。结果表明, 与对照相比, 炭基缓释肥的添加可以使土柱 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 累积淋溶量分别降低 12.5% 和 13.6%。此外, 竹炭的添加可以显著降低 NH_4^+-N 累积淋溶量 ($P < 0.05$), 但是对 NO_3^--N 的影响不显著。炭基缓释肥的添加可以增加土壤 *Nitrospira* (硝化螺菌属)、*Nitrosospora* (亚硝化螺菌属) 和 *Nitrobacter* (硝化杆菌属) 细菌的相对丰度, 提高下层淋溶土壤反硝化优势菌群 (丰度 $> 0.1\%$) *Burkholderia* (伯克霍尔德菌属)、*Cupriavidus* (贫铜菌属) 和 *Bradyrhizobium* (慢生根瘤菌属) 的相对丰度。炭基缓释肥添加对土壤 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 的淋溶影响可能与土壤氮素循环微生物密切相关。

关键词: 竹炭; 炭基缓释肥; 氮素流失; 群落结构

中图分类号: S157.9

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)02-0144-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2021.02.020

Effects of Carbon Based Fertilizer and Bamboo Charcoal on Soil Nitrogen Loss and Microorganism

DONG Da, WANG Yujie, JIANG Peikun, WU Jiasen

(Key Laboratory of Soil Contamination Bioremediation of Zhejiang Province, College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300)

Abstract: In order to study the effects of bamboo charcoal and carbon-based slow release fertilizer on soil nitrogen loss and bacterial community structure in Moso bamboo forest soil, the concentrations of NH_4^+-N and NO_3^--N in leaching water were measured by soil column experiment in laboratory, and the diversity and composition of bacterial community were analyzed. The results showed that compared with the control, the cumulative losses of NH_4^+-N and NO_3^--N in the leachate of soil columns with the addition of carbon-based slow-release fertilizer could be reduced by 12.5% and 13.6% ($P < 0.05$), respectively. In addition, the addition of bamboo charcoal could significantly reduce the cumulative losses of NH_4^+-N , but the effect on NO_3^--N was not significant. The addition of carbon based slow-release fertilizer could increase the relative abundance of *Nitrospira*, *Nitrosospora* and *Nitrobacter*, and increase the relative abundance of *Burkholderia*, *Cupriavidus* and *Bradyrhizobium* which is the dominant denitrification bacteria (abundance $> 0.1\%$) in the lower leaching soil. The leaching effect of carbon-based slow release fertilizer on soil NH_4^+-N and NO_3^--N may be closely related to soil nitrogen cycling microorganisms.

Keywords: bamboo charcoal; carbon-based slow release fertilizer; nitrogen loss; community structure

“人说江南风光好, 千顷竹林万亩茶”。中国具有丰富的竹林资源, 据第九次全国森林资源清查数据显示, 全国竹林面积 641.2 万 hm^2 , 占森林面积的 2.94%。然而, 近年来随着林地强度经营模式的实施和推广, 农户为了获得可观的经济效益, 大量使用化肥, 使竹林土壤养分不断积累, 土壤氮磷流失日益严重。据课题组前期

调查显示, 雷竹在栽培过程中, 化肥年均使用量高达 3 375 kg/hm^2 , 是国际农田氮肥限量标准的 3 倍以上, 其周围水体的总氮含量年均高达 4.24 mg/kg ^[1]。陆荣杰等^[2]研究表明, 集约化经营的毛竹林氮素流失风险较大, 总氮年流失量高达 45.3 kg/hm^2 , 主要流失氮素为硝态氮。大量流失的竹林氮素已成为我国水

收稿日期: 2020-10-12

资助项目: 浙江省公益技术应用研究项目(2017C33111); 国家自然科学基金项目(41601234); 浙江省博士后科研项目(ZJ2017122); 校科研发展基金项目(2018FR053)

第一作者: 董达(1987—), 男, 讲师, 主要从事农林土壤氮磷元素周转研究。E-mail: hudadongda@163.com

通信作者: 吴家森(1972—), 男, 正高级工程师, 主要从事森林土壤与环境研究。E-mail: jswu@zafu.edu.cn

体富营养化的重要来源之一。

缓释肥由于可以缓慢释放养分,在提高作物养分利用效率的同时,显著降低土壤氮磷流失,已成为应对农业水体污染的重要技术手段。为此,《国家中长期科学和技术发展规划纲要》(2006—2020)将环保型肥料制备关键技术研发列为环境领域“农业污染控制”优先主题的重要内容。但是,由传统有机高分子材料制备的缓释肥价格昂贵,存在膜污染等问题,一定程度上制约其发展。生物质炭是一类以生物质为原料,缺氧高温热解产生的一类高度芳香化固态物质,具有固碳减排、改良土壤、吸附土壤重金属和缓解土壤养分流失的巨大潜力^[3-6],近年来已成为国内外研究的热点。生物质炭本身的养分含量十分有限,其低剂量单独施加,存在作物减产的风险。因此,根据不同作物生长需求,以传统无机或有机肥料为基质,添加生物质炭制备而成的缓释肥料应运而生^[7-8]。现有的研究已经表明,炭基缓释肥的添加具有影响土壤理化性质^[9]、增加作物产量^[10]、改善作物品质^[11]、缓解土壤氮素养分流失风险^[12]等作用。但是,现有的研究主要集中在炭基缓释肥添加对土壤氮素径流和渗漏流失上,其添加对土壤淋溶流失还鲜有报道;此外,竹林生态系统中毛竹的生长层很厚,其根系有效深度可达 0.5 m 以上。氮素在淋溶的过程中受到土壤微生物,特别是氮素循环微生物的极大影响,有必要考察炭基缓释肥添加对不同深度土壤细菌群落结

构的影响。基于此,本试验拟以竹炭制备的炭基缓释肥为试材,通过室内土柱淋溶试验和 MiSeq 高通量测序技术,考察竹炭和炭基缓释肥添加对毛竹林土壤氮素流失和细菌群落结构的影响,从而为炭基缓释肥的大规模应用提供理论支撑。

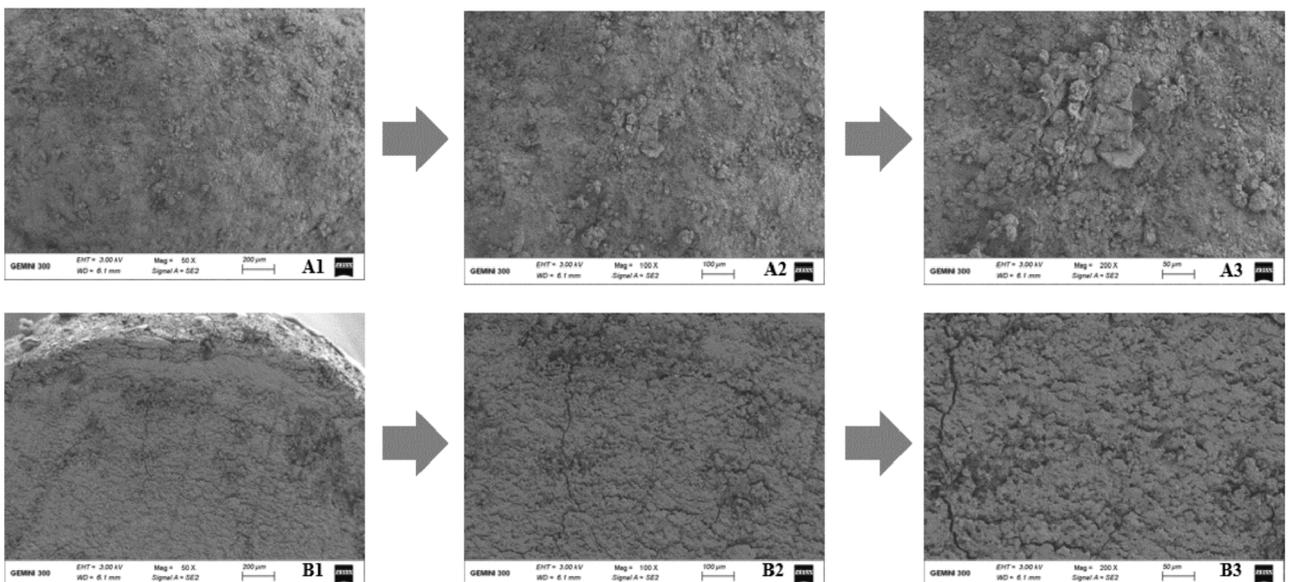
1 材料与方法

1.1 供试材料与装置

供试土壤取至杭州市临安区青南村(30°14'N, 119°42'E)。土壤风干预处理后,过 2 mm 筛,充分混合均匀。竹炭由竹材经固定窑 600 °C 炭化 10 h 所得,粒径 2.0~3.0 mm。供试土壤和竹炭的理化性质见表 1。复合肥的成分主要为 (NH₄)₂HPO₄、NH₄NO₃ 和 KNO₃。炭基缓释肥由复合肥作为肥芯包裹竹炭、腐殖质和黏结剂等材料制备而成。炭基缓释肥膜材料的扫描电镜(SEM)和红外光谱(FT-IR)图谱见图 1 和图 2。试验土柱装置由 PVC 材料制成,装置总高 1.2 m,有效高度 66 cm,内径 10 cm。装置中间布置 2 层滤片(密布小孔),使下渗水流分布均匀,防止侧渗。装置底部布置石英砂和纱布,防止土壤堵塞出水口。具体试验装置见图 3。

表 1 供试土壤和竹炭的基本理化性质

试验材料	pH (1:5 H ₂ O)	总氮/ (g·kg ⁻¹)	NH ₄ ⁺ -N/ (mg·kg ⁻¹)	NO ₃ ⁻ -N/ (mg·kg ⁻¹)
土壤	5.03	1.61	10.5	13.8
竹炭	9.68	5.80	—	50.2



注: A1、A2 和 A3 分别表示放大 50, 100, 200 倍的炭基缓释肥表面 SEM 图; B1、B2 和 B3 分别表示放大 50, 100, 200 倍的炭基缓释肥截面 SEM 图。

图 1 炭基缓释肥表面和截面 SEM 图

1.2 试验设计

试验设 3 个处理: (1) 施加复合肥(CK); (2) 施加炭基缓释肥(BF); (3) 施肥复合肥和竹炭(SC)。其中复合肥和炭基缓释肥 N 的添加量按 100 kg/hm² 测

算,竹炭的添加量为 1.5% (w/w)。设置 3 个重复。土柱土壤采用分层填充的方式。试验开始前,在装置最底层铺设 2 cm 厚的石英砂。然后,把去除碎石、植物残体和根系的毛竹林土壤从下至上分层填充土柱。

其中 SC 处理把竹炭均匀混入土柱内,复合肥和炭基缓释肥则均匀混入 5 cm 表土层,然后把土壤加水湿润。试验开始后每天滴加蒸馏水 150 mL,分别于试验开始后的第 2,3,4,5,6,8,11,14,17,19,21,28 天测定淋滤液 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 浓度。土柱氮素累积淋溶量计算公式为:累积淋溶量 = 淋溶液 (NH_4^+-N 或 NO_3^--N) 浓度 \times 淋溶液体积

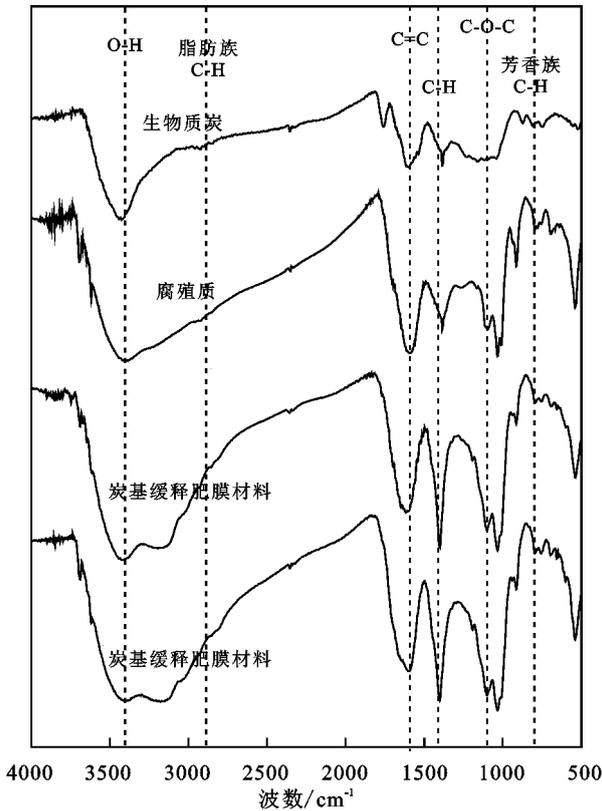


图 2 炭基缓释肥膜材料红外光谱

1.3 试验检测方法

1.3.1 淋溶水中 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 浓度的测定 采用纳氏试剂比色法测定 NH_4^+-N 浓度,酚二磺酸光度法测定 NO_3^--N 浓度。

1.3.2 炭基缓释肥形态结构分析 使用扫描电镜 (GEMINI 300, ZEISS, Germany) 观察炭基缓释肥表面和截面形态特征;使用傅里叶红外光谱仪 (Nico-Let, Ava-tar370DTGS, USA) 分析炭基缓释肥膜材料和竹炭的表面基团。

1.3.3 土壤 DNA 提取和高通量测序 使用 Fast DNA Spin Kit for Soil (MP Biomedicals, USA), 按照说明书进行土壤微生物总 DNA 提取,并通过 0.8% 琼脂凝胶电泳检测 DNA 提取质量。提取样品送往上海派森诺生物科技有限公司,使用带 Barcode 序列的特异性引物 338F (5' - ACTCCTACGGGAG-GCAGCA - 3) 和 806R (5' - GGACTACHVGGGT-WTCTAAT - 3') 对细菌 16S rDNA V3V4 区进行 PCR 扩增,扩增产物使用 AXYGEN 公司的凝胶回

收试剂盒进行回收纯化。纯化产物使用 Illumina MiSeq-PE250 平台进行测序。

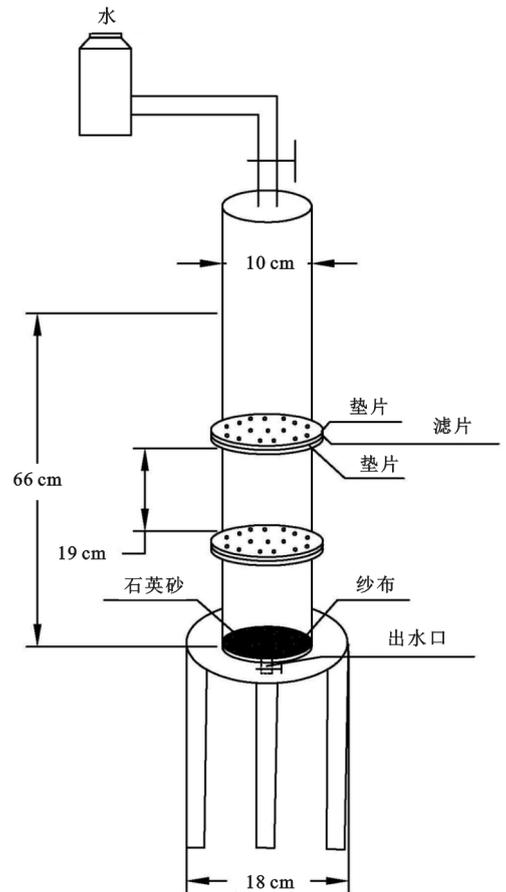


图 3 土柱试验系统示意

1.4 数据处理与分析

采用滑动窗口法对原始双端序列进行质量筛查。筛查后的序列利用 FLASH 软件对通过质量初筛的序列进行碱基配对连接。通过 QIIME 软件检查并剔除疑问序列后,调用 UCLUST 序列比对工具,在 97% 的序列相似度水平上划分操作分类单元 (OTU),将 OTU 代表序列与 Silva 数据库的模板序列进行比对,获得相应的分类学信息^[13]。在此基础上,对 OUT 丰度矩阵中的全部样本进行随机重抽样 (90% 的最低测序深度)。随后,参考 Kim 等^[14] 的研究方法,使用 QIIME 软件计算 Chao1、ACE、Shannon 和 Simpson 指数。使用 SPSS 软件对不同处理的土壤 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 释放量、细菌分类水平的相对丰度进行单因素方差分析。

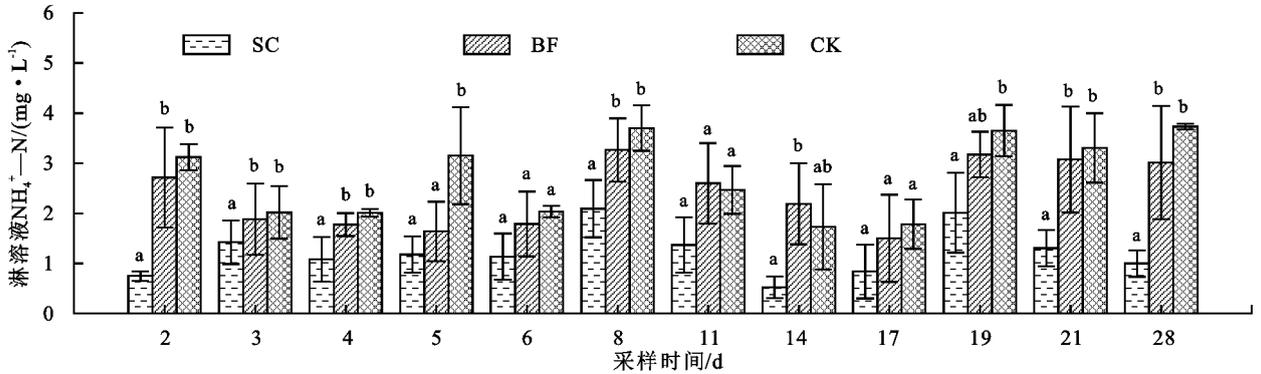
2 结果与分析

2.1 竹炭和炭基缓释肥添加对土壤 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 淋溶的影响

由图 4 和图 5 可知,试验期间,土柱淋溶液中 NH_4^+-N 浓度和累积量比较低,这一方面可能由于复合肥和炭基缓释肥中氮素形态主要以硝态氮为主;

另一方面,土壤胶体带负电荷易于吸附 NH_4^+-N 。因此,在降水或灌溉作用下,旱地土壤施入的肥料大部分以 NO_3^--N 流失, NH_4^+-N 流失量较小^[15]。与对照相比,竹炭的添加可以显著降低土柱淋溶液 NH_4^+-N 浓度($P<0.05$)。随着淋滤的进行,在试验

末期(28天),添加竹炭能使土柱 NH_4^+-N 累积淋溶量显著降低 55.1%($P<0.05$)。与对照 CK 相比,炭基缓释肥的添加也可一定程度上减少淋溶液中 NH_4^+-N 的含量。但是,其淋溶 28 天的累积量仅降低 12.5%,没有达到显著水平($P>0.05$)。



注:不同小写字母表示各处理差异显著($P<0.05$)。下同。

图 4 土柱淋溶液铵态氮浓度变化

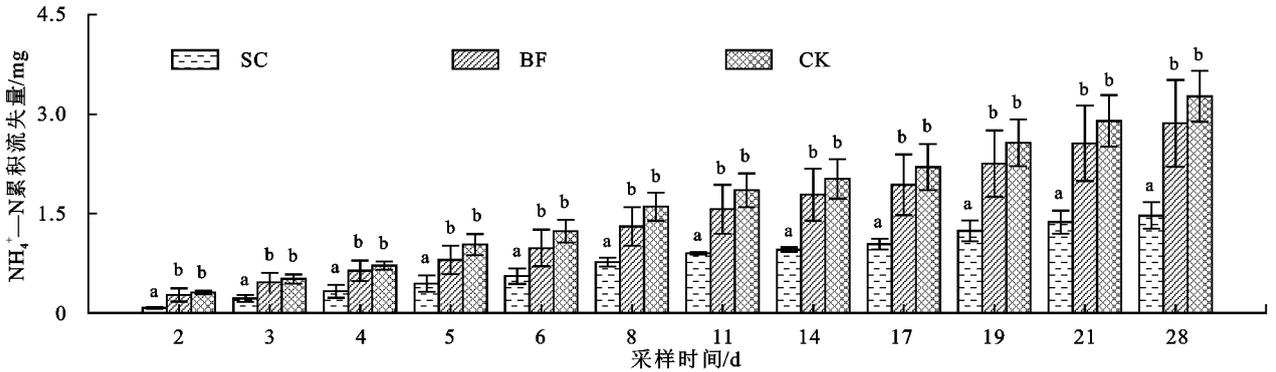


图 5 土柱淋溶液铵态氮累积量

由于复合肥和炭基缓释肥中 N 素形态以硝态氮为主。试验期间,土柱淋溶液 NO_3^--N 浓度和累积量较高(图 6 和图 7)。随着炭基缓释肥和复合肥表面速溶性的 NO_3^--N 迅速溶解,土柱淋溶液 NO_3^--N 迅速降低, NO_3^--N 累积量趋缓。与对照 CK 相比,炭基缓释肥的添加可以显著降低淋溶液

中 NO_3^--N 含量,其中第 14 天和 28 天达到显著性水平($P<0.05$),其 28 天的累积释放量减少 13.6%。与对照相比,竹炭的添加虽然可以降低土柱淋溶液 NO_3^--N 浓度(第 2, 5, 14, 17, 21, 28 天),但影响不明显($P>0.05$)。这可能是由于生物质炭表面带负电荷^[16],对 NO_3^--N 吸附作用不强。

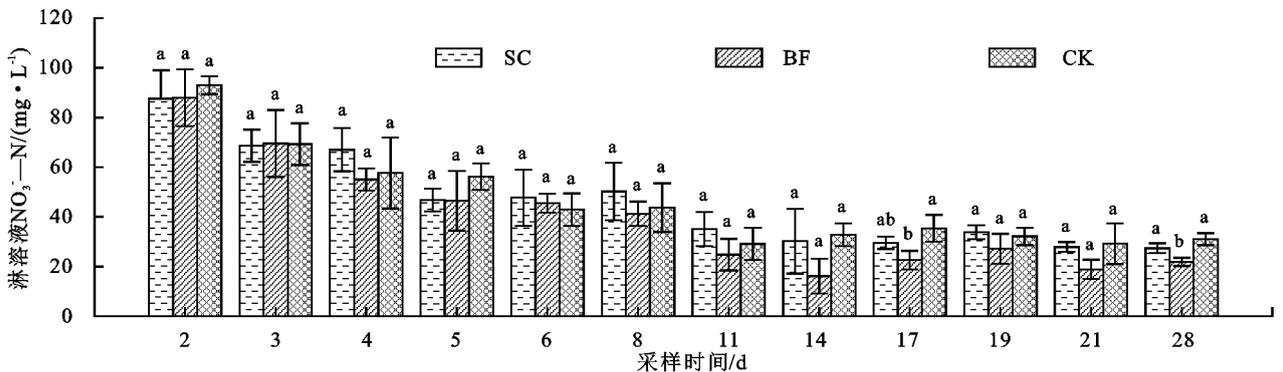


图 6 土柱淋溶液硝态氮浓度变化

2.2 竹炭和炭基缓释肥添加对毛竹林土壤细菌群落结构的影响

由表 2 的 Chao1、ACE 和 Shannon 值可知,与对照相比,竹炭的添加虽然没有显著改变土壤细菌群落多样性,但可以增加土柱上层和下层土壤细菌多样性

指数。这可能是由于竹炭具有巨大的比表面积和孔隙,可以为细菌生长提供更多附着位点^[17]。此外,土壤通气性增加也有助于土壤好氧菌的生长^[18-19]。炭基缓释肥的添加对毛竹林土壤细菌多样性影响并不明显($P>0.05$)。

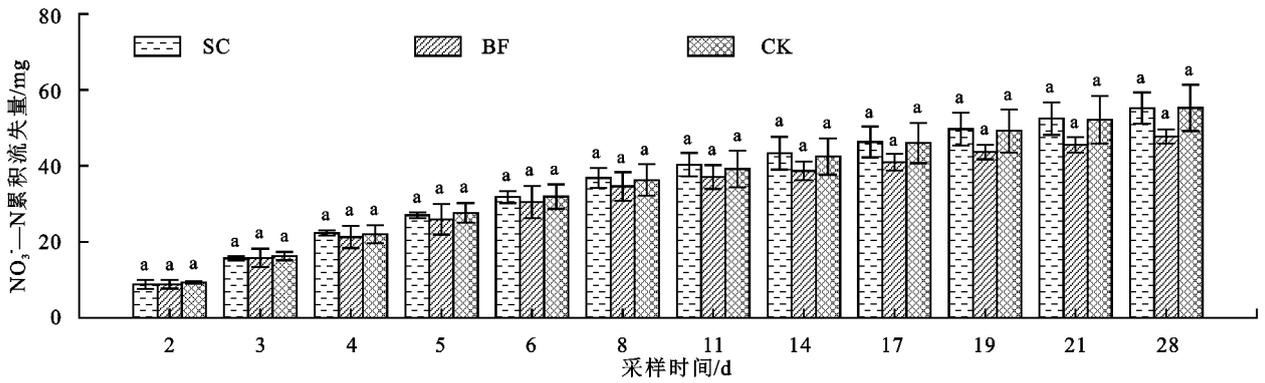


图 7 土柱淋溶液硝态氮累积量

表 2 竹炭和炭基缓释肥添加对毛竹林土壤细菌群落 Alpha 多样性指数的影响

土柱分层	处理	Simpson	Chao1	ACE	Shannon
上层	SC	0.9976±0.0002a	3020.70±311.20a	3105.60±446.6a	10.37±0.04a
	BF	0.9975±0.0006a	2889.70±169.40a	2944.80±264.5a	10.39±0.09a
	CK	0.9975±0.0002a	2872.89±56.01a	2900.74±73.3a	10.34±0.12a
下层	SC	0.9950±0.0042a	3265.20±600.20a	3350.40±601.8a	10.07±0.45a
	BF	0.9963±0.0010a	2689.46±283.60a	2751.70±391.0a	10.09±0.15a
	CK	0.9949±0.0021a	2627.83±142.72a	2727.46±208.0a	9.80±0.24a

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示各处理间差异显著($P<0.05$)。

由图 8 可知,土柱土壤中优势细菌为酸杆菌门(*Acidobacteria*)、变形菌门(*Proteobacteria*)、绿弯菌门(*Chloroflexi*)、放线菌门(*Actinobacteria*)和厚壁菌门(*Firmicutes*)。芽孢杆菌门(*Gemmatimonadetes*)、疣微菌门(*Verrucomicrobia*)、拟杆菌门(*Bacteroidetes*)和浮霉状菌门(*Planctomycetes*)等相对丰度较小。土柱土层深度增加对放线菌门、绿弯菌门和厚壁菌门影响明显。随着土层深度的增加,放线菌门和绿弯菌门相对丰度显著降低,厚壁菌门相对丰度显著增加($P<0.05$)。与复合肥相比,炭基缓释肥的添加显著增加上层土壤厚壁菌门相对丰度和下层土壤放线菌门相对丰度($P<0.05$),降低上层和下层土壤芽孢杆菌门的丰度。竹炭的添加降低下层土壤拟杆菌门和芽孢杆菌门的相对丰度($P<0.05$),但对上层土壤影响并不显著。

进一步分析表明,土柱淋溶土壤中共检测到 3 种硝化菌属,分别为 *Proteobacteria* (变形菌门)中的 *Nitrosospora* (亚硝化螺菌属)和 *Nitrobacter* (硝化杆菌属)、*Nitrospirae* (硝化螺旋菌门)中的 *Nitrospira* (硝化螺菌属)(图 9)。其中,硝化螺菌属是土壤中主要的硝化细菌^[20],亚硝化螺菌属和硝化杆菌属几乎未检出。硝化细菌是一类好氧细菌,在淋溶土柱中的分布与土壤土层深度密切相关,顶部土壤的硝化菌丰度明显高于底部土壤。与硝化细菌相比,潜在的反硝化细菌更为丰富,共测得 19 个属。变形菌门的反硝化菌占绝对的主导地位,主要属于 α -变形菌纲中的

Bradyrhizobium (慢生根瘤菌属)、 γ -变形菌纲中的 *Acidovorax* (食酸菌属)和 *Burkholderia* (伯克氏菌属)、 δ -变形菌纲中的 *Anaeromyxobacter* (厌氧粘细菌)。酸杆菌门和厚壁菌门的反硝化菌几乎未检出。与硝化细菌相反,底部土壤的反硝化菌丰度高于顶部土壤。这可能是土柱底部含氧量较低,有利于反硝化细菌的生长^[21]。硝化细菌和反硝化细菌对于淋溶土柱中的氮素转化过程发挥重要作用。

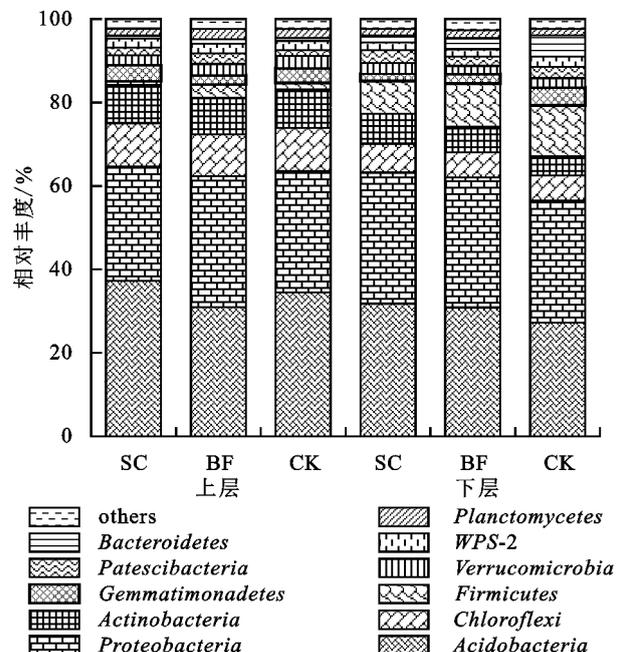


图 8 竹炭和炭基缓释肥添加对毛竹林土壤细菌群落门水平相对丰度的影响

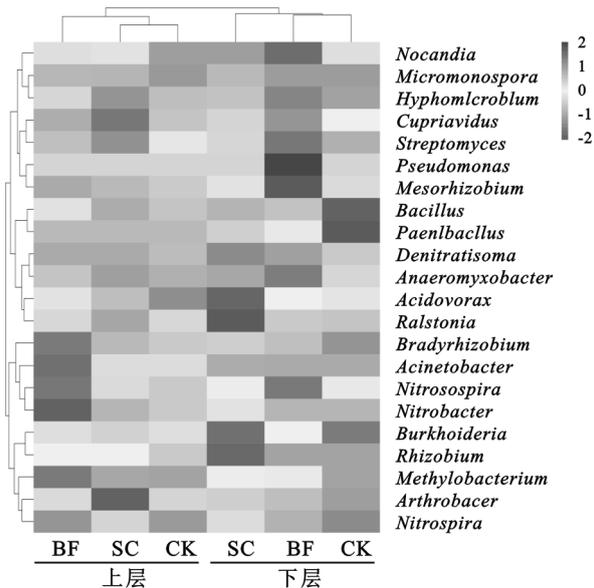


图 9 土柱淋溶土壤硝化属和潜在反硝化属的相对丰度热图

3 讨论

3.1 炭基缓释肥添加对毛竹林土壤氮素流失的影响

炭基包膜肥是以颗粒肥料为核心,通过物理和化学方法包裹生物质炭而制成的缓释肥料,其养分释放能力与膜材料的组成、厚度和膜上孔隙密切相关^[22]。本研究中,通过室内土柱试验发现,与常规肥料相比,炭基缓释肥可以降低土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的淋溶流失量。从扫描电镜(SEM)图谱(图 1)可以发现,炭基缓释肥肥芯表面包裹一层明显的涂层。涂层结构致密,与肥芯之间界面分明。炭基缓释肥的膜材料可以通过物理阻隔的作用,缓解肥芯氮素养分的释放。进一步观察发现,炭基缓释肥膜材料中具有一定的孔隙,这有助于水分穿过炭基缓释肥的膜层,导致膜内养分加速溶解,压力上升,加速后期肥料养分的释放^[23]。从 FT-IR 图谱(图 2)可以发现,与生物质炭相比,炭基缓释肥的膜材料中 C-H 伸缩振动、C-O-C 伸缩振动、C=C 骨架振动均有不同程度的增强。这些表面官能团的增强将有助于炭基缓释肥膜材料的稳定和对氮素养分的吸附^[24]。炭基缓释肥添加对毛竹林的氮素缓释效果还与土壤微生物密切相关。高通量测序结果则表明,与对照相比,炭基缓释肥的添加可以增加淋溶土壤 *Nitrospira* (硝化螺菌属)、*Nitrosospria* (亚硝化螺菌属)和 *Nitrobacter* (硝化杆菌属)细菌的相对丰度(图 9)。大量的研究^[25-26]已表明, *Nitrospira*、*Nitrosospria* 和 *Nitrobacter* 是土壤重要的硝化细菌,其含量的增加有助于淋溶土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 向 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的转化,减少土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 流失。此外,炭基缓释肥添加可以提高下层淋溶土壤反硝化优势菌群(丰度 $> 0.1\%$)

Burkholderia (伯克霍尔德菌属)、*Cupriavidus* (贫铜菌属)、*Anaeromyxobacter* (厌氧黏细菌)和 *Bradyrhizobium* (慢生根瘤菌属)的相对丰度(图 9)。这有助于土壤反硝化过程的顺利进行,削减土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的累积,减少淋溶流失。

3.2 生物质炭添加对毛竹林土壤氮素流失的影响

与空白对照相比,生物质炭的添加可以显著降低 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度。随着淋溶的进行,在试验末期(28 天),添加竹炭能使土柱 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 累积淋溶量显著降低 55.1% ($P < 0.05$)。林婉婷等^[4]研究发现,施用生物质炭可以有效增强茶园土对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的吸附,并随着添加量的增加而增强;高俊莲等^[27]的研究也表明,施加不同剂量的生物质炭可以降低水稻田 100 cm 处 28.86%~52.05% 的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 淋失量。大量的研究^[28-30]表明,生物质炭具有巨大的比表面积、丰富的孔隙、大量的表面负电荷和官能团可以有效吸附土壤中的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$,减少土柱 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的流失。此外,生物质炭添加可以增强土壤的 pH 和 CEC,减弱 H^+ 与 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 对吸附位点的竞争,增强生物质炭对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的吸附^[31]。高通量测序的结果表明,与对照相比,竹炭添加可以增加下层淋溶土壤硝化细菌 *Nitrospira* (硝化螺菌属)、*Nitrosospria* (亚硝化螺菌属)和 *Nitrobacter* (硝化杆菌属)的相对丰度,有助于下层土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的转化。

但是,与对照相比,竹炭的添加没有显著影响土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的累积淋溶量。石钧元等^[32]研究发现,炭化苹果枝条和木材对水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的吸附差异明显,对 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的吸附能力较弱。本试验的生物质炭 pH 较高,高 pH 的生物质炭表面容易被去质子化,其表面呈现负电荷,对 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 吸附能力减弱^[33]。此外,竹炭的存在增加土壤的通气性^[34],削弱土壤反硝化作用,增强土壤硝化作用,有利于 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的转化,不利于 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的消耗。竹炭本身含有的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的也不容忽视。王兵等^[35]的研究发现,玉米秸秆、稻壳和松木制备的生物质炭均含有一定量的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 。本研究中的竹炭也含有 $\text{NO}_3^- - \text{N}$,可能存在淋溶流失的风险。

4 结论

(1)与常规复合肥相比,炭基缓释肥的添加可以使土柱 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 累积淋溶量分别降低 12.5% 和 13.6%。SEM 和 FT-IR 图谱表明,炭基缓释肥的缓释效果与包膜材料的物理和化学性质密切相关。与空白对照 CK 相比,竹炭的添加可以显著降低土柱 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 累积淋溶量 ($P < 0.05$),但对

NO_3^- -N 没有显著影响。

(2)高通量测序结果表明,土柱淋溶系统中细菌群落结构与土层深度密切相关。随着土层深度的增加,放线菌门和绿弯菌门相对丰度显著降低,厚壁菌门相对丰度显著增加。与对照相比,炭基缓释肥的添加显著增加上层土壤厚壁菌门相对丰度和下层土壤放线菌门相对丰度。竹炭的添加显著降低下层土壤拟杆菌门和芽孢杆菌门的相对丰度。

(3)炭基缓释肥对土壤 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 的淋溶影响可能与土壤氮素循环微生物密切相关。炭基缓释肥的添加可以增加淋溶土壤 *Nitrospira* (硝化螺菌属)、*Nitrosospora* (亚硝化螺菌属) 和 *Nitrobacter* (硝化杆菌属) 细菌的相对丰度,提高下层淋溶土壤反硝化优势菌群(丰度 $>0.1\%$) *Burkholderia* (伯克霍尔德菌属)、*Cupriavidus* (贫铜菌属) 和 *Bradryrhizobium* (慢生根瘤菌属) 的相对丰度。

参考文献:

[1] 许开平,吕军,吴家森,等.不同施肥雷竹林氮磷径流流失比较研究[J].水土保持学报,2011,25(3):31-34.

[2] 陆荣杰,王莺,吴家森,等.不同经营方式毛竹林氮流失年动态规律[J].自然资源学报,2019,34(6):1296-1305.

[3] 胡世民,陈效民,景峰,等.添加生物质炭对红壤性水稻 Cd^{2+} 吸附解吸特性的影响[J].水土保持学报,2020,34(2):360-364.

[4] 林婉嫔,夏建国,肖欣娟,等.不同热解温度茶渣生物质炭对茶园土壤吸附解吸 NH_4^+ -N 的影响[J].水土保持学报,2019,33(6):326-331.

[5] 周际海,陈晏敏,袁颖红,等.秸秆与生物质炭施用对土壤温室气体排放的影响差异[J].水土保持学报,2019,33(4):248-254.

[6] 韩召强,陈效民,曲成闯,等.生物质炭施用对潮土理化性状、酶活性及黄瓜产量的影响[J].水土保持学报,2017,31(6):272-278.

[7] 周旻旻.水稻秸秆生物质炭基缓释肥的制备与应用研究[D].杭州:浙江大学,2013.

[8] 廖上强,陈延华,李艳梅,等.生物炭基尿素对芹菜产量、品质及土壤硝态氮含量的影响[J].农业资源与环境学报,2015,32(5):443-448.

[9] 杨劲峰,江彤,韩晓日,等.连续施用炭基肥对花生土壤性质和产量的影响[J].中国土壤与肥料,2015(3):68-73.

[10] 王淑君,夏桂敏,李永发,等.生物炭基肥和水分胁迫对花生产量、耗水和养分吸收的影响[J].水土保持学报,2017,31(6):285-290.

[11] 沙凌杰,林昕,刘兴勇,等.酵素炭基肥对设施番茄产量和品质的影响[J].中国农学通报,2020,36(23):41-45.

[12] 陈蕾,高山雪,George Z.施加炭基缓释肥对土壤氮素流

失的影响[J].水土保持研究,2019,26(6):53-57.

[13] Quast C, Pruesse E, Yilmaz P, et al. The SILVA ribosomal RNA gene database project: Improved data processing and web-based tools[J].Nucleic Acids Research,2013,41:D590-D596.

[14] Kim J S, Sparovek G, Longo R M, et al. Bacterial diversity of terra preta and pristine forest soil from the Western Amazon[J].Soil Biology and Biochemistry,2007,39(2):684-690.

[15] Hobara S, Koba K, Osono T, et al. Nitrogen and phosphorus enrichment and balance in forests colonized by cormorants: Implications of the influence of soil adsorption[J].Plant and Soil,2005,268(1):89-101.

[16] Ahmad M, Rajapaksha A U, Lim J E, et al. Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review[J].Chemosphere,2014,99:19-33.

[17] Ying D, Liu Y X, Wu W X, et al. Evaluation of biochar effects on nitrogen retention and leaching in multi-layered soil columns[J].Water Air and Soil Pollution,2020,213:47-55.

[18] Dong D, Yang M, Wang C, et al. Responses of methane emissions and rice yield to applications of biochar and straw in a paddy field[J].Journal of Soils and Sediments,2013,13(8):1450-1460.

[19] Liu Y, Yang M, Wu Y, et al. Reducing CH_4 and CO_2 emissions from waterlogged paddy soil with biochar[J].Journal of Soils and Sediments,2011,11(6):930-939.

[20] Anne D, Paul L E B, Zheng Y, et al. Interactions between Thaumarchaea, *Nitrospira* and methanotrophs modulate autotrophic nitrification in volcanic grassland soil[J].The ISEM Journal,2014,8:2397-2410.

[21] Benckiser G, Schartel T, Weiske A, et al. Control of NO_3^- and N_2O emissions in agroecosystems: A review [J]. Agronomy for Sustainable Development,2015,35(3):1059-1074.

[22] 牛智有,刘鸣,牛文娟,等.炭肥比和膨润土粘结剂对炭基肥颗粒理化及缓释特性的影响[J].农业工程学报,2020,36(2):219-227.

[23] Sharma P. Nitrogen release characteristics of controlled release fertilizers during a four months soil incubation [J].Journal of the American Society for Horticultural Science,1977,102(3):364-367.

[24] 张雯,耿增超,何绪生,等.生物质炭基氮肥中制备工艺与特性分析[J].农业机械学报,2014,45(3):129-133.

[25] Purkhold U, Pommerening R A, Juretschko S, et al. Phylogeny of all recognized species of ammonia oxidizers based on comparative 16S rRNA and *amoA* sequence analysis: Implications for molecular diversity surveys[J].Applied and Environmental Microbiology,

2000,66(12):5368-5382.

- [26] Ward B B, O'Mullan G D. Worldwide distribution of *Nitrosococcus oceani*, a marine ammonia-oxidizing γ -proteobacterium, detected by PCR and sequencing of 16SrRNA and *amoA* genes[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2002, 68(8): 4153-4157.
- [27] 高俊莲, 王永生, 张爱平, 等. 生物质炭对稻田氮素淋失和氧化亚氮排放的影响[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(6): 87-94.
- [28] Li S L, Zhang Y W, Yan W M, et al. Effect of biochar application method on nitrogen leaching and hydraulic conductivity in a silty clay soil[J]. Soil and Tillage Research, 2018, 183: 100-108.
- [29] Hassan M, Liu Y J, Naidu R, et al. Influences of feedstock sources and pyrolysis temperature on the properties of biochar and functionality as adsorbents: A meta-analysis[J]. Science of the Total Environment, 2020, 744(20): 1-15.
- [30] Dai Y J, Wang W S, Lu L, et al. Utilization of biochar for the removal of nitrogen and phosphorus[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 257(1): 1-15.
- [31] Lu H L, Zhang W H, Yang Y X, et al. Relative distribution of Pb^{2+} sorption mechanisms by sludge-derived biochar[J]. Water Research, 2012, 46(3): 854-862.
- [32] 石钧元, 荀咪, 崔迎宾, 等. 炭化苹果枝皮和木材对水中硝态氮和铵态氮的差异吸附[J]. 水土保持学报, 2020, 34(2): 253-260.
- [33] 赵凌宇, 王延华, 杨浩, 等. 木屑和稻秆基生物质炭对汞的吸附特征比较[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34: 556-562.
- [34] Case S D C, McNamara N P, Reay D S, et al. The effect of biochar addition on N_2O and CO_2 emissions from a sandy loam soil: The role of soil aeration[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2012, 51: 125-134.
- [35] 王兵, 赵闪闪, 秦治家, 等. 生物质炭对黑土吸附—解吸硝态氮性能的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(1): 115-121.
- (上接第 143 页)
- [18] 张欣, 刘静, 郑永刚, 等. 4 种植物直根抗折力和抗折强度的研究[J]. 水土保持研究, 2016, 23(5): 338-342.
- [19] 王博. 半干旱区水土保持灌木根系拉拔损伤后的自修复机制[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019.
- [20] 苑淑娟. 4 种植物单根抗拉力学特性的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2010.
- [21] 刘鹏飞, 刘静, 朱宏慧, 等. 4 种植物生长旺盛期侧根分支处与相邻上级直根抗折特性的差异[J]. 应用生态学报, 2016, 27(1): 33-39.
- [22] 郑永刚. 4 种植物直根抗折力学特性的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2015.
- [23] 李雪松, 刘静, 王博, 等. 黑沙蒿直根的材料力学特性研究[J]. 水土保持学报, 2017, 31(6): 353-358.
- [24] Ropitiaux M, Bernard S, Follet-Gueye M L, et al. Xyloglucan and cellulose form molecular cross-bridges connecting root border cells in pea (*Pisum sativum*) [J]. Plant Physiology Biochemical, 2019, 139(6): 191-196.
- [25] 刘益良, 刘晓立, 付旭, 等. 锦鸡儿、沙打旺根系对边坡土体抗剪强度影响的试验研究[J]. 北华航天工业学院学报, 2016, 26(3): 24-28.
- [26] Arthur G, Marcus S. The role of nutrients in drought-induced tree mortality and recovery[J]. New Phytologist, 2017, 214: 513-520.
- [27] Vincent B, Yves C, Freddy R. Effects of wood chip amendments on the revegetation performance of plant species on eroded marly terrains in a Mediterranean mountainous climate (Southern Alps, France) [J]. Solid Earth, 2016, 7(2): 599-610.
- [28] 刘鹏飞. 4 种植物侧根分支处抗折力学特性的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2016.