

DOI:10.12171/j.1000-1522.20240303

生物炭添加阻控河岸林地氮污染

马玉祥¹ 安兆龙²

(1. 中国船级社质量认证有限公司贵州分公司, 贵州 贵阳 550000; 2. 中国地质工程集团有限公司新疆分公司, 新疆 乌鲁木齐 830000)

摘要:【目的】探究不同生物炭添加量对河岸林土壤化学性质、酶活性、微生物群落组成的影响,明晰生物炭添加对河岸林地氮污染削减的影响机制,为流域面源污染阻控及生态修复提供科学依据。【方法】以河北省保定市清水河沿岸毛白杨人工林为研究对象,采用单因素方差分析和相关性分析方法,分析不同生物炭添加量(0、3、6 t/hm²)对河岸林地阻控氮污染的效果。【结果】(1)不同生物炭添加量的毛白杨林地土壤化学性质具有显著性差异($P < 0.05$)。同对照相比,3 t/hm²生物炭添加组全氮(TN)、铵态氮(NH₄⁺-N)、硝态氮(NO₃⁻-N)、有机质(SOM)、有机碳(SOC)分别提高10.39%、46.15%、8.57%、38.03%和51.23%。6 t/hm²生物炭添加组TN、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、SOM、SOC分别提高26.62%、92.31%、65.00%、78.05%和135.47%。(2)不同生物炭添加量的毛白杨林地土壤酶活性具有显著性差异($P < 0.05$)。与对照相比,3 t/hm²生物炭添加组脲酶(S-UE)、硝酸还原酶(S-NR)、亚硝酸还原酶(S-NIR)活性分别提高35.00%、69.41%和85.71%。6 t/hm²生物炭添加组S-UE、S-NR、S-NIR活性分别提高63.33%、104.31%和77.92%。(3)高通量测序结果表明,生物炭添加提高了变形菌门、未分类菌门、拟杆菌门的相对丰度,降低了放线菌门的相对丰度。(4)土壤化学性质、酶活性与细菌优势门的相关性分析表明,SOC、SOM、S-NR、S-NIR是影响土壤微生物群落门水平的主要因子。【结论】生物炭添加能提高毛白杨林地土壤对氮素的截留能力,并且增强土壤氮循环相关酶活性,改善土壤微生物群落结构,进而影响土壤中氮素的转化与去除。在不同处理组中,6 t/hm²的添加量表现出最为显著的效果。

关键词: 河岸缓冲带; 农业面源污染; 毛白杨; 生物炭; 微生物群落; 氮污染

中图分类号: S714 文献标志码: A 文章编号: 1000-1522(2025)02-0040-09

引文格式: 马玉祥, 安兆龙. 生物炭添加阻控河岸林地氮污染[J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(2): 40-48. Ma Yuxiang, An Zhaolong. Biochar addition to control nitrogen pollution in riparian forests[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(2): 40-48.

Biochar addition to control nitrogen pollution in riparian forests

Ma Yuxiang¹ An Zhaolong²

(1. China Classification Society Quality Certification Company Guizhou Branch, Guiyang 550000, Guizhou, China;

2. China Geo-Engineering Corporation Xinjiang Branch, Urumchi 830000, Xinjiang, China)

Abstract: [Objective] This paper explores the effects of different biochar additions on soil chemical properties, soil enzyme activity and microbial community composition of riparian forest, and understands the removal mechanism of nitrogen pollution reduction in riparian forest by biochar addition, so as to provide scientific basis for the prevention and control of non-point source pollution in watershed and ecological restoration technology. [Method] Using one-way ANOVA and correlation analysis, the effects of different biochar levels (0, 3, 6 t/ha) on nitrogen pollution control were analyzed in *Populus tomentosa* along Qingshui River in Baoding, Hebei Province of northern China. [Result] (1) There were significant differences in soil chemical properties of forest with different biochar levels ($P < 0.05$). Compared with

收稿日期: 2024-09-10 修回日期: 2024-11-02

基金项目: 河北省摩天岭省级自然保护区总体规划编制项目(ZCMJBD-2024-0116)。

第一作者: 马玉祥。主要研究方向: 林业碳汇、退化植被恢复。Email: 849670687@qq.com 地址: 550000 贵州省贵阳市花溪区万科大都会北区3栋。

责任作者: 安兆龙, 高级工程师。主要研究方向: 生态修复。Email: 523478969@qq.com 地址: 830000 新疆乌鲁木齐市新市区南纬路。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

control group, total nitrogen, ammonium nitrogen, nitrate nitrogen, organic matter and organic carbon in 3 t/ha biochar addition group increased by 10.39%, 46.15%, 8.57%, 38.03% and 51.23%, respectively. In the 6 t/ha biochar addition group, total nitrogen, ammonium nitrogen, nitrate nitrogen, organic matter and organic carbon increased by 26.62%, 92.31%, 65.00%, 78.05% and 135.47%, respectively. (2) There were significant differences in soil enzyme activities of forest with different biochar levels ($P < 0.05$). Compared with control group, the activities of urease, nitrate reductase and nitrite reductase in 3 t/ha biochar addition group were increased by 35.00%, 69.41% and 85.71%, respectively. The activities of urease, nitrate reductase and nitrite reductase in 6 t/ha biochar addition group increased by 63.33%, 104.31% and 77.92%, respectively. (3) The results of high-throughput sequencing showed that the addition of biochar increased the relative abundance of Proteobacteria, unclassified bacteria and Bacteroidota, while decreased the relative abundance of Actinobacteriota. (4) The correlation analysis of soil chemical properties, enzyme activities and bacterial dominant phyla showed that organic matter, organic carbon, nitrate reductase and nitrite reductase were the main factors affecting the level of soil microbial community. [Conclusion] Biochar addition could improve nitrogen retention and enzyme activities related to soil nitrogen cycle, improve soil microbial community structure, and further affect the transformation and removal of nitrogen in soil. Among different treatment groups, the application rate of 6 t/ha showed the most significant effect.

Key words: riparian buffer zone; agriculture non-point source pollution; *Populus tomentosa*; biochar; microbial community; nitrogen pollution

化肥过量施用、土壤侵蚀、河岸植被破坏等易使面源污染物通过地表径流和地下渗流进入河湖水体中^[1-2]。全球范围内近 50% 的地表水资源已经受到面源污染的影响。然而,面源污染具有很大的随机性,分布面积广,时间和空间变化幅度较大,所以在监测、控制和治理上存在诸多困难和复杂性,这使得减轻农业面源污染成为一项艰巨的任务,也使面源污染治理逐渐成为水环境保护与水资源利用中的重点和难点^[3]。

河岸植被缓冲带是一个由土壤、水、植被等构成的生态系统,通过植物吸收、土壤吸附等一系列物理、化学和生物过程,截留、吸收和转化污染物,阻止径流水中的污染物进入水体,被认为是面源污染防治的有效管理措施^[4]。黄斌斌等^[5]研究发现,森林的水质净化率最高,达 91%,其次是灌丛(87.80%)和草地(82.28%)。Haukos 等^[6]研究发现,40 ~ 60 m 宽的植被缓冲带可以显著减少地表径流中的养分、重金属和其他污染物的负荷。农业区河流失去河岸植被,可能会对河流生态系统的结构和功能产生深远的影响^[3, 6]。因此,恢复和重建河岸缓冲带以减少农业活动对河流的污染负荷,应受到重视并成为流域治理的重要途径。

生物炭是由生物质在低氧或无氧、高温条件下裂解产生的一种富碳物质^[7-8]。由于生物炭化学性质稳定,具有碱性、多孔的结构、良好的阳离子交换能力以及大的比表面积等特点,在土壤污染修复、提高土壤肥力、增加土壤碳封存等方面都有重要意义^[9]。

特别是生物炭通过改善土壤物理性质,改变土壤微生物群落结构和功能,影响土壤养分循环和有机质分解,并可能减少氮的淋溶,提高氮的滞留^[10]。因此,生物炭作为一种环境功能性材料在改善土壤、净化水质、物质循环、土壤固碳等方面得到了广泛的应用。但生物炭的生态效益因植被类型、生物炭性质、土壤类型和土地利用类型而异^[10]。以往的研究表明^[11],河岸缓冲带的植被类型对污染物截留去除效果差异显著,但也有研究^[6]表明缓冲带的植被类型对污染物去除差异不大。生物炭通过影响土壤微生物群落和土壤酶活性对土壤微生物产生影响,但生物炭对微生物群落的影响仍存在争议。一些研究认为生物炭对微生物群落有促进作用或抑制作用,而另一些研究认为生物炭对微生物群落没有影响。因此,生物炭对污染物截留去除的效果,对土壤微生物群落变化的影响尚不完全清楚,有待进一步的研究。同时,现有的研究更多关注生物炭对农田的影响,且多室内盆栽试验,野外研究相对匮乏,生物炭添加对河岸林地影响的研究相对较少。

白洋淀的生态环境是雄安新区健康发展的重要保障,而入淀河流的水质影响着白洋淀的水环境质量。近年来,白洋淀流域通过减少外源污染排入、建立人工湿地、清淤和生态补水等方式进行了综合治理,但入淀河流仍然存在热点污染区域^[12]。研究发现,白洋淀流域水体和沉积物的氮污染一直处于较高水平,是影响白洋淀流域水质的主要污染因子^[13]。由于白洋淀流域河岸缓冲带存在生态功能脆弱、破

碎化程度高的特点,且流域农业种植面积广、化肥施用量高,农业面源污染物很容易通过地表径流进入河流生态系统,影响流域污染治理效果^[14]。因此,本研究选择白洋淀流域毛白杨林地作为研究对象,探究不同生物炭添加量对河岸林土壤化学因子、微生物群落组成的影响,以及生物炭添加对河岸林地氮污染的阻控机制。研究旨在通过添加生物炭,强化河岸植被缓冲带的截留去污能力,减轻农业面源污染对流域水环境的威胁,为流域面源污染阻控及生态修复技术提供依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区域

白洋淀流域属海河流域大清河水系(113°39′~116°11′E, 38°12′~39°54′N),跨山西和河北两省以及北京市,流域面积31200 km²。属典型的温带大陆性季风气候,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥,雨热同期,年平均气温7℃,多年平均降水量564 mm,年内降水量分配不均,70%~80%集中在6—8月份,且多以暴雨形式出现^[15]。流域地形地貌复杂,地势西高东低,其中山区占43%,平原占57%,山区的土地利用类型主要是林地和草地等,土壤为褐土,平原地区主要是农田、城镇用地,土壤为潮土^[16]。该流域农业种植面积广、化肥施用量高,氮肥和磷肥的平均施用量分别为100~300 kg/hm²和50~150 kg/hm²^[17]。2017年雄安新区成立,围绕白洋淀而建,建设定位是中国未来生态与经济协调发展的先进新区,这对白洋淀流域生态环境提出了更高要求。由于其独特的自然条件和社会因素,白洋淀流域对维护华北地区生态环境具有不可替代的作用^[18]。

1.2 样地概况和样地布设

白洋淀流域平原地区的河岸林基本都为毛白杨(*Populus tomentosa*),因此选择毛白杨河岸林为研究对象。于2023年5月18日,在白洋淀流域府河沿

岸选择毛白杨人工林布设试验(图1a)。毛白杨行距为4 m,株距为3 m,密度为840株/hm²,林地郁闭度为0.75,林下植被稀少,偶见平车前(*Plantago depressa*)、艾(*Artemisia argyi*)、藜(*Chenopodium album*)等草本植物。林下稀疏生长毛白杨更新幼苗。

1.3 试验设计

所用的生物炭原材料为板栗壳。管式炉(型号KJ-T1200-S80-800S,规格为80 mm×800 mm)通入高纯氮气30 min,以排净管中的空气。当管式炉温度升到指定温度(500℃)时,将装有板栗壳的石英管放入管式炉中进行炭化,炭化停留时间为2 h,自然冷却获得本试验所用生物炭。其表面积15.6 m²/g,容重0.23 g/cm³,pH8.56,全碳485.30 g/kg,全氮4.56 g/kg,全磷0.82 g/kg。

设置3种处理:未添加生物炭的对照(BC0)、添加生物炭3 t/hm²(BC3)、添加生物炭6 t/hm²(BC6)。每种处理3次重复,共设置9个样地,各处理组样地条件基本一致。样地设置在河流和农田之间的林地内(图1b),起始段和末端分别距农田、河流3~5 m,呈长方形布局,面积为2 m×10 m。样地土壤为潮土,坡度为25°,坡长28 m。9块样地平行排列,间隔5 m。

在样地内开横沟施加生物炭,横沟长2 m,宽20 cm,深20 cm。每块样地开10条沟,沟与沟之间间距1 m。生物炭沟渠与地表径流方向垂直。在每块样地起始端(靠近农田处)添加氮肥(尿素,含N量为46%),添加带长3 m,宽0.5 m。模拟农业面源氮污染(图2),氮肥按照1 t/hm²,30 m²面积添加,每块样地的总添加量为3 kg。每月添加一次,连续添加4个月(5—8月),每次添加量为0.75 kg。

1.4 样品采集及指标测定

2023年9月中旬,采用五点取样法,清除地表枯枝落叶,采集样地中部0~20 cm表层土壤,装入



a 毛白杨样地概貌



b 生物炭沟布设图

图1 样地概况及生物炭沟

Fig. 1 Overview of sample plots and biochar ditch

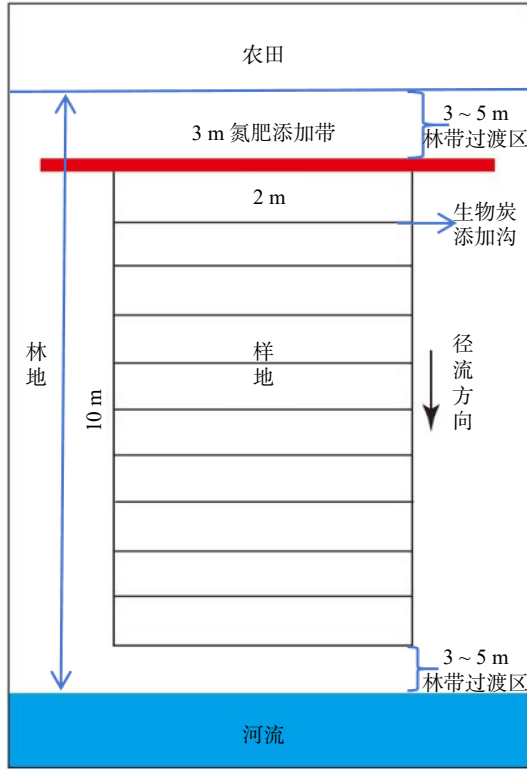


图 2 生物炭添加示意图

Fig. 2 Biochar addition diagram

塑封袋后放入保温箱中带回实验室。样品分为两部分,一份置于 4 °C 冰箱用于土壤化学性质和土壤酶指标的测定;一份置于-80 °C 冰箱用于土壤微生物多样性的测定。

参照鲍士旦^[19]提到的方法,进行土壤化学性质和酶的测定。土壤养分指标全氮的测定采用凯氏定氮法(Kjeltec 8400);用重铬酸钾氧化加热法测定土壤有机质。土壤 pH 值使用玻璃电极 pH 计进行测定(水土比 5:1);铵态氮和硝态氮采用流动分析仪测定(Smartchem 200)。土壤脲酶活性采用苯酚-次氯酸钠法测定,土壤硝酸还原酶活性采用酚二磺酸比色法测定,土壤亚硝酸还原酶活性用格里试剂显色与酶促反应前后NO₂-N 变化表征。

1.5 细菌群落结构分析

采用高通量测序分析土壤细菌群落结构,在北京百迈克生物科技有限公司进行测序分析。采用 E.Z.N.A.® Soil DNA Kit 提取土壤总 DNA,以土壤总 DNA 为模板,采用 341F(5'-ACTCCTACGGGAG GCAGCAG-3')和 806R(5'-GGACTACHVGGGTWT CTAAT-3')对细菌 16S rRNA 基因的 V3-V4 高变区片段进行 PCR 扩增,扩增后的 PCR 产物用 2% 琼脂糖凝胶回收 PCR 产物,使用 AxyPrep DNA Gel Extraction kit 进行纯化,Tris-HCl 洗脱,2% 琼脂糖电泳检测。利用 QuantiFluor™-ST 检测定量,然后根据测序量需求将各样品按相应比例混合,构建 Miseq

文库,使用 Illumina MiSeq 平台测序。

1.6 数据处理和分析

采用 SPSS26.0 进行数据处理和分析,数据由平均值 ± 标准误表示,对土壤化学性质、土壤酶活性进行单因素方差分析和相关性分析。优势菌门与环境因子之间进行相关性热图分析,确定影响土壤细菌群落的关键环境因子。使用 R、Origin 2021 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 不同处理组毛白杨林地土壤化学性质和酶活性

不同生物炭添加量的毛白杨林地土壤化学性质具有显著性差异($P < 0.05$)(表 1),其中 BC6 的土壤养分含量多高于 BC3。与对照相比,BC3 生物炭添加组全氮(TN)、铵态氮(NH₄⁺-N)、硝态氮(NO₃⁻-N)、有机质(SOM)、有机碳(SOC)分别提高 10.39%、46.15%、8.57%、38.03% 和 51.23%。BC6 生物炭添加组 TN、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、SOM、SOC 分别提高 26.62%、92.31%、65.00%、78.05% 和 135.47%。

不同生物炭添加量的毛白杨林地土壤酶活性具有显著性差异($P < 0.05$),BC6 生物炭添加组土壤酶活性高于 BC3。同对照相比,BC3 生物炭添加组脲酶(S-UE)、硝酸还原酶(S-NR)、亚硝酸还原酶(S-NIR)活性分别提高 35.00%、69.41% 和 85.71%。BC6 生物炭添加组 S-UE、S-NR、S-NIR 活性分别提高 63.33%、104.31% 和 77.92%(表 1)。

2.2 土壤酶活性与理化因子的相关性分析

表 2 显示:NO₃⁻-N 与 NH₄⁺-N、SOC、SOM 之间呈现出极其显著正相关($P < 0.001$)。TN 与 NO₃⁻-N、

表 1 生物炭添加量对土壤养分和酶活性的影响

Tab. 1 Effects of biochar addition on soil nutrients and enzyme activities

指标	处理		
	BC0	BC3	BC6
全氮/(g·kg ⁻¹)	1.54 ± 0.05c	1.70 ± 0.1b	1.95 ± 0.02a
铵态氮/(mg·kg ⁻¹)	0.13 ± 0.04b	0.19 ± 0.03a	0.25 ± 0.07a
硝态氮/(mg·kg ⁻¹)	1.40 ± 0.21b	1.52 ± 0.23b	2.31 ± 0.60a
有机质/(g·kg ⁻¹)	8.02 ± 0.66c	11.07 ± 1.23b	14.28 ± 1.11a
有机碳/(g·kg ⁻¹)	4.06 ± 0.30c	6.14 ± 0.46b	9.56 ± 0.43a
pH值	6.63 ± 0.21a	6.61 ± 0.29a	6.72 ± 0.19a
脲酶/(mg·g ⁻¹)	0.60 ± 0.03b	0.81 ± 0.06a	0.98 ± 0.07a
硝酸还原酶/(μg·g ⁻¹)	2.55 ± 0.64c	4.32 ± 1.01b	5.21 ± 1.35a
亚硝酸还原酶/(mg·g ⁻¹)	0.77 ± 0.15b	1.43 ± 0.19a	1.37 ± 0.25a

注:不同处理BC0、BC3、BC6的生物炭添加量分别为0、3、6 t/hm²。不同小写字母表示同一指标不同处理间差异显著($P < 0.05$)。下同。

SOC、SOM之间呈现极显著或显著正相关($P < 0.01$ 或 $P < 0.05$)。S-NR与S-NIR呈极其显著正相关($P < 0.001$)。S-UE与pH呈极其显著正相关($P < 0.001$)。S-NR、S-NIR分别与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、SOC、SOM呈极显著正相关($P < 0.01$)。

2.3 生物炭对毛白杨林地土壤细菌群落结构的影响

2.3.1 土壤细菌 OTU 数量分析

对不同处理组细菌操作性分类单元(operational taxonomic unit, OTU)进行韦恩分析。3个处理9个样品得到812706个细菌有效序列,对土壤样品序列通过拆分、去冗余后,在97%相似度下进行OTU聚类共得到36720个细菌OTU,不同处理土壤样品中共有的细菌OTU总数有1023个。其中BC0处理14923个OTU,BC3处理12469个OTU,BC6处理13344个OTU。BC0、BC3、BC6所特有的OTU数目分别为12616、10130、10981个,占比分别为34.36%、27.59%、29.91%。与BC0相比较,2种生物炭添加量都降低了土壤细菌中的OTU数量。

2.3.2 微生物群落 α 多样性分析

表3显示:土壤样本的覆盖率均在99%以上,且无显著差异($P > 0.05$),这表明各组测得的数据都具有代表性,测序结果能够准确反应供试土样真实情况。各处理间Ace、Chao指数、Shannon多样性指数和Simpson多样性指数均无显著性差异($P > 0.05$),

生物炭添加对土壤细菌的 α 多样性影响较小。

2.3.3 土壤微生物门水平群落结构组成

在相似性水平97%的条件下,对OTU的代表序列做分类分析,共得到42个门,105纲,314个目,624个科,1105个属,1343个种的土壤细菌(图3)。不同处理下土壤中主要的细菌群落组成相似,但相对丰度却有差异。在门分类水平上,相对丰度前10的细菌门包括变形杆菌门(Proteobacteria)、酸杆菌门(Acidobacteriota)、放线菌门(Actinobacteriota)、未分类菌门、绿弯菌门(Chloroflexi)、拟杆菌门(Bacteroidota)、芽单胞菌门(Gemmatimonadota)、黏球菌门(Myxococcota)、甲基微菌门(Methylomirabilota)、疣微菌门(Verrucomicrobiota)。

前六大优势菌门的相对丰度占总群落的比重接近80%,各处理变形杆菌门的相对丰度分别为BC6(27.86%) > BC3(27.52%) > BC0(26.76%);酸杆菌门:BC3(23.84%) > BC0(22.28%) > BC6(21.37%);放线菌门为BC0(13.09%) > BC3(9.61%) > BC6(8.12%);未分类菌门为BC6(9.15%) > BC0(6.64%) > BC3(4.86%);绿弯菌门为BC0(7.06%) > BC3(6.29%) > BC6(5.22%);拟杆菌门为BC6(7.19%) > BC3(4.84%) > BC0(4.36%)。

总体来看,生物炭添加提高了变形杆菌门、未分类菌门和拟杆菌门的相对丰度;降低了酸杆菌门的

表2 土壤酶活性与养分因子相关分析

Tab. 2 Correlation analysis of soil enzyme activity and nutrient factors

指标	TN	$\text{NO}_3^-\text{-N}$	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	SOC	SOM	S-NR	S-NIR	S-UE	pH
TN	1	0.65**	0.21	0.55*	0.55*	0.41	0.41	0.42	0.42
$\text{NO}_3^-\text{-N}$		1	0.78***	0.72***	0.72***	0.69**	0.69**	0.18	0.18
$\text{NH}_4^+\text{-N}$			1	0.37	0.37	0.60**	0.60**	-0.10	-0.10
SOC				1	1.00***	0.64**	0.64**	-0.06	-0.06
SOM					1	0.64**	0.64**	-0.06	-0.06
S-NR						1	1.00***	-0.21	-0.21
S-NIR							1	-0.21	-0.21
S-UE								1	1.00***
pH									1

注: *表示相关性在0.05水平显著, **表示相关性在0.01水平极显著, ***表示相关性在0.001水平极显著。TN.全氮; $\text{NO}_3^-\text{-N}$.硝态氮; $\text{NH}_4^+\text{-N}$.氨态氮; SOC.有机碳; SOM.有机质; S-NR.硝酸还原酶; S-NIR.亚硝酸还原酶; S-UE.脲酶。下同。

表3 不同处理生物覆盖度和多样性指数

Tab. 3 Biological coverage and diversity indices under different treatments

处理	Ace	Chao指数	Shannon多样性指数	Simpson多样性指数	覆盖度/%
BC0	2 802.2 ± 45.62	2 796.4 ± 45.58	10.12 ± 0.04	0.99 ± 0.00	99.96 ± 0.00
BC3	2 093.6 ± 125.69	2 089.1 ± 123.69	9.76 ± 0.39	0.99 ± 0.00	99.97 ± 0.00
BC6	2 587.6 ± 228.70	2 581.2 ± 226.47	10.14 ± 0.02	0.99 ± 0.00	99.96 ± 0.00

注: 数值为均值 ± 标准误差。

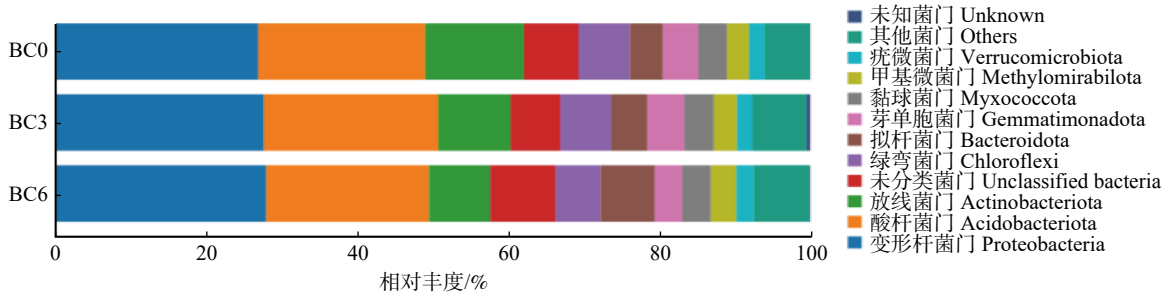


图 3 土壤细菌门水平群落结构组成

Fig. 3 Composition of community structure of soil bacterial phylum level

相对丰度。变形杆菌门在生物炭添加组的相对丰度占比较高,其中含有大量的反硝化细菌,是影响反硝化效果的重要因素。反硝化作用是土壤中氮素转化与去除的主要方式之一。因此,生物炭添加通过影响土壤主要细菌门的相对丰度(如变形杆菌门),进而影响土壤中氮素的转化与去除。

2.4 环境因子与微生物群落结构相关性

土壤化学性质、酶活性与相对丰度前 10 的细菌门的相关性分析如图 4 所示。 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N、SOC、SOM、S-NR、S-NIR 分别与变形杆菌门、拟杆菌门、疣微菌门正相关,其中 SOC、SOM、S-NR、S-NIR 分别与变形杆菌门、拟杆菌门、疣微菌门显著正相关($P < 0.05$), NO_3^- -N、 NH_4^+ -N 与变形杆菌门显著正相关($P < 0.05$)。

NO_3^- -N、 NH_4^+ -N、SOC、SOM、S-NR、S-NIR 分

别与芽单胞菌门、酸杆菌门、绿弯菌门负相关,其中 SOC、SOM、S-NR、S-NIR 分别与芽单胞菌门、酸杆菌门、绿弯菌门显著负相关($P < 0.05$), NO_3^- -N、 NH_4^+ -N 与芽单胞菌门显著负相关($P < 0.05$),SOC、SOM 还与放线菌门显著负相关($P < 0.05$)。

可见,SOC、SOM、S-NR、S-NIR 是影响土壤微生物群落门水平的主要因子。

3 讨 论

3.1 生物炭添加对毛白杨林地土壤养分和酶活性的影响

河流和河岸林地联系密切,通过物质循环、能量流动、动植物栖息、洪水和光照等相互作用高度交织在一起^[3]。根据流域治理中的“源头减排-过程阻断-末端治理”模式,通过对污染物迁移、转化、扩散

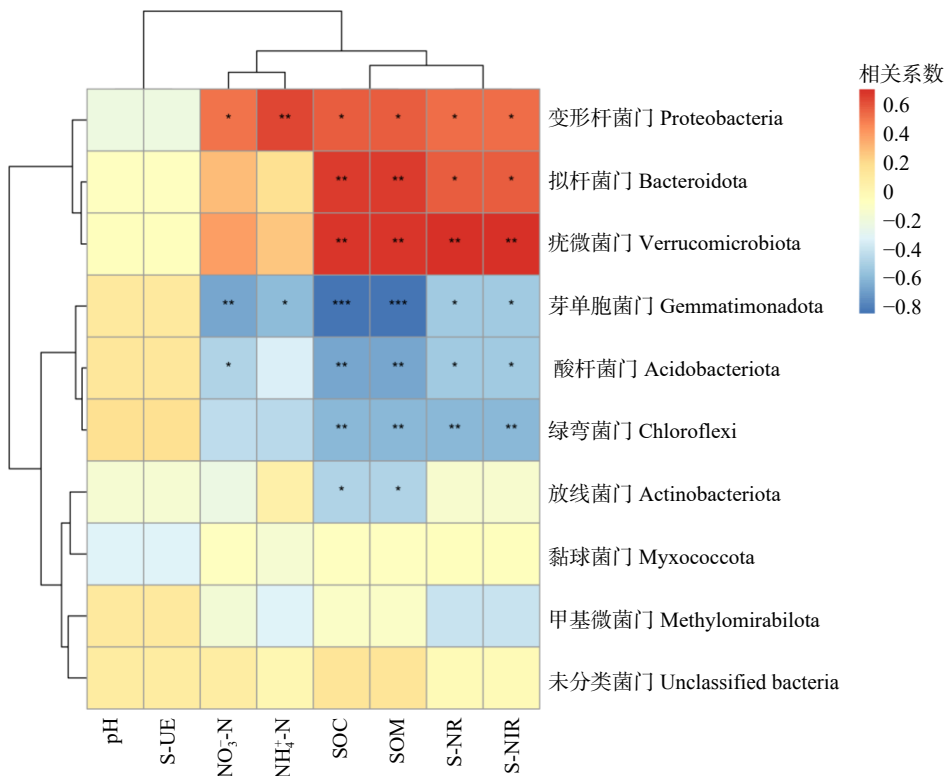


图 4 土壤细菌群落结构和土壤化学性质相关性分析

Fig. 4 Correlation analysis of soil bacterial community structure and soil chemical properties

过程的拦截和阻断,能够有效减少污染物进入河湖水体^[20]。研究^[21-22]表明,生物炭对土壤水分和营养元素有较强吸持能力,能提高土壤保水能力,改良土壤质量,减少土壤养分淋失。本研究发现,6 t/hm² (BC6)处理组对氮素的截持能力更强,这可能是由于生物炭能够通过改善土壤结构来增强土壤的持水能力和吸附点位^[23]。生物炭富含碳元素,能够提升土壤中的无机碳含量,从而增强土壤的养分保持能力和水分保持能力。此外,它还可以促进林地表面及土壤内部木质素的分解^[24]。张晗芝^[25]研究发现,生物炭施于土壤中能显著提高土壤碳含量。与对照组相比,6 t/hm² (BC6)处理组林地 SOC、SOM 分别提高了 78.05%、135.47%。生物炭不仅增加了林地土壤有机质含量,还有助于降低土壤压实和侵蚀、增强土壤持水能力,并维持立地生产力^[26]。同时,乔木叶片木质素含量高,分解有限^[27],导致微生物可利用碳源不足,生物炭添加使林地土壤碳含量提高,为微生物提供充足的碳源。

微生物群落及其产生的胞外酶在有机质分解和养分循环等过程中扮演着重要的调节角色,能够反映生物炭等土壤添加剂对土壤养分循环的潜在长期影响^[28]。与赵蕊蕊等^[24]研究结果一致,本研究中生物炭处理组林地土壤酶活性显著高于对照($P < 0.05$)。土壤硝酸还原酶能够将硝酸还原成亚硝酸,而亚硝酸还原酶能将亚硝酸还原成氮气,进而影响土壤中氮素的转化与去除。因此,随生物炭添加量增加,毛白杨林地土壤氮循环相关酶活性也随之提高,有助于土壤中氮素被还原成氮气并从土壤中去除。

3.2 生物炭添加对毛白杨林地土壤细菌群落结构的影响

生物炭添加在改变土壤化学性质的同时,也可影响土壤微生物群落结构和多样性^[29]。有研究^[30]表明,随着稻壳生物炭添加浓度的增加,樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)的细菌群落总数和丰度出现了下降。本研究发现,生物炭添加不同处理的 Ace、Chao 指数、Shannon 多样性指数和 Simpson 多样性指数均无显著性差异($P > 0.05$),生物炭添加对毛白杨林地土壤细菌群落 α 多样性的影响小。这可能与生物炭添加时间较短有关,有待进一步长期观测研究。本研究中随着生物炭添加浓度的增高,毛白杨林地土壤细菌 OTU 总数有所下降,且微生物群落结构发生了明显变化。优势门水平上,生物炭添加提高了变形菌门、拟杆菌门的相对丰度;降低了放线菌门的相对丰度。

河岸植被缓冲带的土壤干湿交替频繁,有利于土壤中微生物的生长,也有利于好氧硝化作用和厌

氧反硝化作用的进行。在微生物作用下,铵态氮被氧化成亚硝态氮和硝态氮,然后再被反硝化细菌还原成 N₂ 或 N₂O 等气体排入空气中,反硝化作用被认为是清除土壤里氮素的最佳途径^[31]。变形菌门在反硝化过程中起着主导作用,其相对丰度的多少是影响反硝化效果的重要因素。本研究中,变形菌门在生物炭添加组的相对丰度占比较高。Zhang 等^[8]研究也发现生物炭的添加能显著提高系统中的变形杆菌门的比例,强化系统脱氮性能,并通过优化生物炭的添加量,使系统中全氮的最终去除率达 67%。与此同时,BC6 和 BC3 的拟杆菌门的相对丰度较高,这是由于该菌门是一种典型的兼性厌氧菌,能适应交替的好氧缺氧环境,将亚硝酸盐还原为 NO,有利于高效脱氮^[32]。

生物炭比表面积大于土壤,为微生物提供附着表面和栖息环境,从而影响土壤微生物活性和群落结构,进而影响胞外酶的活性^[33-34]。本研究中生物炭添加对毛白杨林地土壤养分提高和土壤酶活性增加也具有显著的促进作用,这可能与相关土壤微生物的活性增大和生物量增加有关。相关性分析表明,SOC、SOM、S-NR、S-NIR 是影响土壤微生物群落门水平的主要因子,SOC、SOM 与 S-NR、S-NIR 极显著正相关($P < 0.01$),这与土壤微生物多为异养有关,生物炭添加会为微生物提供碳源和能量,从而提高了土壤氮循环相关酶活性^[34]。

4 结 论

(1)生物炭添加能够显著提升毛白杨林地土壤对氮素的截留能力以及氮循环相关酶活性。生物炭处理组土壤养分均高于对照,其中 6 t/hm² 处理效果更好。

(2)高通量测序结果表明,随着生物炭添加量的增大,毛白杨林地土壤细菌 OTU 总数有所下降,但对土壤细菌多样性影响较小。生物炭添加影响了毛白杨林地土壤优势细菌门的相对丰度,促进了河岸林地氮素的转化与去除。

(3)相关性分析表明,土壤化学性质(SOC、SOM)以及酶活性(S-NR、S-NIR)是影响土壤微生物群落门水平结构的主要因素。

参 考 文 献

- [1] Wang Y, Liang J, Yang J, et al. Analysis of the environmental behavior of farmers for non-point source pollution control and management: an integration of the theory of planned behavior and the protection motivation theory[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 237: 15-23.
- [2] Cole L J, Stockan J, Helliwell R. Managing riparian buffer strips

- to optimise ecosystem services: a review [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020, 296(6): 106891.
- [3] Turunen J, Markkula J, Rajakallio M, et al. Riparian forests mitigate harmful ecological effects of agricultural diffuse pollution in medium-sized streams[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 649: 495–503.
- [4] 张钰荣, 吴永波, 茆安敏. 两种河岸缓冲带对径流水中磷的截留效果 [J]. *森林与环境学报*, 2023, 43(2): 139–144.
Zhang Y R, Wu Y B, Mao A M. Effect of two riparian buffer strips on phosphorus elimination from runoff water[J]. *Journal of Forest and Environment*, 2023, 43(2): 139–144.
- [5] 黄斌斌, 李若男, 李睿达, 等. 雄安新区上游白洋淀流域水质净化提升目标下的生态恢复格局优化 [J]. *生态学报*, 2020, 40(20): 7143–7152.
Huang B B, Li R N, Li R D, et al. Optimization of ecological restoration pattern targeted for water purification improvement in the Baiyangdian Watershed, Xiong'an New Area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(20): 7143–7152.
- [6] Haykos D A, Johnson L A, Smith L M, et al. Effectiveness of vegetation buffers surrounding playa wetlands at contaminant and sediment amelioration[J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, 181: 552–562.
- [7] Guo F, Xu F, Cai R, et al. Enhancement of denitrification in biofilters by immobilized biochar under low-temperature stress[J]. *Bioresource Technology*, 2022, 347: 126664.
- [8] Zhang Y, Li M, Dong L, et al. Effects of biochar dosage on treatment performance, enzyme activity and microbial community in aerated constructed wetlands for treating low C/N domestic sewage[J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2021, 24: 101919.
- [9] Yi S S, Chang N Y, Imhoff P T. Predicting water retention of biochar-amended soil from independent measurements of biochar and soil properties[J]. *Advances in Water Resources*, 2020, 142: 103638.
- [10] Chen P, Liu Y, Mo C, et al. Microbial mechanism of biochar addition on nitrogen leaching and retention in tea soils from different plantation ages[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 757: 143817.
- [11] 王琼, 范康飞, 范志平, 等. 河岸缓冲带对氮污染物削减作用研究进展 [J]. *生态学杂志*, 2020, 39(2): 665–677.
Wang Q, Fan K F, Fan Z P, et al. Nitrogen pollutant removal by riparian buffer zone: a review[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(2): 665–677.
- [12] Guo C, Chen Y, Xia W, et al. Eutrophication and heavy metal pollution patterns in the water supplying lakes of China's south-to-north water diversion project[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 711: 134543.
- [13] Yao X, Wang Z, Liu W, et al. Pollution in river tributaries restricts the water quality of ecological water replenishment in the Baiyangdian Watershed, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(18): 51556–51570.
- [14] Zhao Y, Wang S, Zhang F, et al. Remote sensing-based analysis of spatial and temporal water colour variations in Baiyangdian Lake after the establishment of the Xiong'an New Area[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(9): 1729.
- [15] Zhang Y L, Wang X, Li C H, et al. NDVI dynamics under changing meteorological factors in a shallow lake in future metropolitan, semiarid area in North China[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 15971.
- [16] 胡莹莹, 王义成, 周毓彦, 等. 基于综合水质指数的白洋淀流域水质评价 [J]. *水利水电技术*, 2022, 53(3): 145–154.
Hu Y Y, Wang Y C, Zhou Y Y, et al. Water quality assessment of Baiyangdian Watershed based on a comprehensive water quality index[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2022, 53(3): 145–154.
- [17] 魏月莹, 杨紫薇, 杨见进, 等. 白洋淀流域种植业氮磷投入-盈余-排放时空特征 [J]. *农业环境科学学报*, 2024, 43(8): 1824–1837.
Wei Y Y, Yang Z W, Yang J J, et al. Spatiotemporal characteristics of nitrogen and phosphorus input, surplus, and emission during crop production in the Baiyangdian Basin[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024, 43(8): 1824–1837.
- [18] 程伍群, 薄秋宇, 孙童. 白洋淀环境生态变迁及其对雄安新区建设的影响 [J]. *林业与生态科学*, 2018, 33(2): 113–120.
Cheng W Q, Bo Q Y, Sun T. Baiyangdian environmental and ecological changes and impact on the construction of Xiongan New Area[J]. *Forestry and Ecological Sciences*, 2018, 33(2): 113–120.
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
Bao S D. Soil agrochemical analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2020.
- [20] Xie H Y, Li Y M. An ecological water replenishment model of urban lake riparian plant restoration based on the groundwater-vegetation interactions[J]. *Ecological Engineering*, 2022, 176: 106510.
- [21] Alotalk K D, Schoenau J J. Addition of biochar to a sandy desert soil: effect on crop growth, water retention and selected properties[J]. *Agronomy*, 2019, 9(6): 327.
- [22] Yang C D, Lu S G. Effects of five different biochars on aggregation, water retention and mechanical properties of paddy soil: a field experiment of three-season crops[J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 205(10): 4798.
- [23] Song L, Hou L, Zhang Y, et al. Regular biochar and bacteria-inoculated biochar alter the composition of the microbial community in the soil of a Chinese fir plantation[J]. *Forests*, 2020, 11(9): 951.
- [24] 赵蕊蕊, 刘勇, 王凯. 生物炭和有机肥对毛白杨人工林地木质分解及土壤养分循环相关酶活性的影响 [J]. *林业科学*, 2023, 59(11): 1–11.
Zhao R R, Liu Y, Wang K. Effects of biochar and manure on wood decomposition and soil enzyme activities related soil nutrient cycling in a triploid *Populus tomentosa* plantation[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2023, 59(11): 1–11.
- [25] 张晗芝. 生物炭对土壤肥力、作物生长及养分吸收的影响 [D]. 重庆: 西南大学, 2011.

- Zhang H Z. Effects of biochar amendment on soil fertility, nutrient uptake and crop growth[D]. Chongqing: Southwest University, 2011.
- [26] Bhattacharyya S S, Ros G H, Furtak K, et al. Soil carbon sequestration: an interplay between soil microbial community and soil organic matter dynamics[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 10(15): 2928.
- [27] Ren H, Warnock D D, Tiemann L K, et al. Evaluating foliar characteristics as early indicators of plant response to biochar amendments[J]. *Forest Ecology and Management*, 2021, 10(11): 9047.
- [28] Elzobair K A, Stromberger M E, Ippolito J A, et al. Contrasting effects of biochar versus manure on soil microbial communities and enzyme activities in an Aridisol[J]. *Chemosphere*, 2016, 142: 145–152.
- [29] 王梦洁, 蒋文婷, 徐有祥, 等. 长期生物炭添加对稻田土壤细菌和真菌反硝化 N₂O 排放的影响 [J]. *环境科学*, 2024, 45(8): 4923–4931.
- Wang M J, Jiang W T, Xu Y X, et al. Effects of long-term biochar addition on denitrification N₂O emissions from bacteria and fungi in paddy soil[J]. *Environmental Science*, 2024, 45(8): 4923–4931.
- [30] 宋小双, 遇文婧, 邓勋. 稻壳生物炭不同添加量对樟子松 1 年生苗生长和根围土壤养分及细菌群落结构的影响 [J/OL]. *吉林农业大学学报*, 2021, 1–12[2024–02–21]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/22.1100.S.20210602.1100.002.html>.
- Song X S, Yu W J, Deng X. Effects of rice husk biochar on growth, rhizosphere soil nutrients and bacterial community structure of *Pinus syhestris* var. *mongolica* annual seedlings [J/OL]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2021, 1–12[2024–02–21]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/22.1100.S.20210602.1100.002.html>.
- [31] 王鸿浩, 谭梦怡, 王紫君, 等. 不同水管理条件下添加生物炭对琼北地区水稻土 N₂O 排放的影响 [J]. *环境科学*, 2021, 42(8): 3943–3952.
- Wang H H, Tan M Y, Wang Z J, et al. Effects of biochar addition under different water management conditions on N₂O emission from paddy soils in northern Hainan[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(8): 3943–3952.
- [32] Zhu X, Chen B, Zhu L, et al. Effects and mechanisms of biochar-microbe interactions in soil improvement and pollution remediation[J]. *Environmental Pollution*, 2017, 227: 98–115.
- [33] 樊容源, 叶绍明, 吴昊, 等. 不同林龄桉树人工林土壤细菌群落结构与功能多样性变化特征 [J]. *北京林业大学学报*, 2024, 46(12): 41–52.
- Fan R Y, Ye S M, Wu H, et al. Characteristics of changes in soil bacterial community structure and functional diversity in *Eucalyptus* sp. plantation of different ages[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2024, 46(12): 41–52.
- [34] 李厚春, 李君剑, 张红, 等. 植被类型对煤矿区复垦土壤根际微生物的影响 [J]. *土壤学报*, 2023, 61(5): 1455–1465.
- Li H C, Li J J, Zhang H, et al. Effect of vegetation type on rhizosphere microorganisms of reclaimed soils in coal mining areas[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2024, 61(5): 1455–1465.

(责任编辑 孟瑶 李契
责任编辑 臧润国)