

青檀生物炭强化吊兰修复铜铅复合污染土壤的效果

姜利园, 孙明慧, 王波, 刘文婷, 王友保

(安徽师范大学生态与环境学院, 安徽 芜湖 241000)

摘要: [目的] 为探究施用青檀生物炭对吊兰修复Cu、Pb复合污染土壤的影响。[方法] 以铜陵市老鸦岭铜尾矿周边Cu、Pb复合污染农田土壤为研究对象, 采用盆栽种植试验方法设置添加不同质量比(1%、3%、5%、7%和10%)青檀生物炭的吊兰盆栽试验, 以不添加青檀生物炭的处理为空白组, 同时设置不种吊兰的处理为对照, 研究不同质量比青檀生物炭对吊兰修复Cu、Pb污染土壤的影响, 评价青檀生物炭强化吊兰修复Cu、Pb污染的潜力。[结果] 施加青檀生物炭显著增加吊兰的株高、根长和地下部鲜重; 显著提高土壤pH、有机质、全氮、速效磷和速效钾质量分数; 显著降低土壤有效态Cu、Pb质量分数, 显著提升吊兰对Cu、Pb的吸收量, 地上部的Cu和Pb最大增幅分别为51.39%和59.77%, 地下部的Cu和Pb最大增幅分别为15.63%和45.46%; 提高吊兰的富集和转移系数, Cu的最大富集和转移系数分别为0.61和0.40, Pb的最大富集和转移系数分别为0.37和0.68; 降低土壤酸杆菌门和变形菌门的相对丰度, 提高绿弯菌门和拟杆菌门的相对丰度, 促进土壤养分代谢。[结论] 青檀生物炭与吊兰联合应用修复效果更佳。

关键词: 青檀生物炭; 吊兰; Cu、Pb污染; 修复效果

中图分类号: X53; X173

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)02-0357-08

Effectiveness of *Pteroceltis tatarinowii* Biochar in Enhancing *Chlorophytum comosum* for Remediation of Soil with Combined Contamination of Cu and Pb

JIANG Liyuan, SUN Minghui, WANG Bo, LIU Wenting, WANG Youbao

(College of Ecology and Environment, Anhui Normal University, Wuhu, Anhui 241000, China)

Abstract: [Objective] To investigate the effect of applying *Pteroceltis tatarinowii* biochar on the remediation of soil with combined contamination of Cu and Pb by *Chlorophytum comosum*. [Methods] Taking the farmland soil with combined contamination of Cu and Pb around the copper tailings in Laoyaling, Tongling City as the research object, pot planting test method was used to grow *C. comosum* in the soil with different mass ratios of *Pteroceltis tatarinowii* biochar (1%, 3%, 5%, 7% and 10%). The pots without adding *P. tatarinowii* biochar were taken as the blank group, and the pots without planting *C. comosum* were set as the control group. The effects of different mass ratios of *P. tatarinowii* biochar on remediation of Cu- and Pb-contaminated soil by *C. comosum* were studied, and the potential of *P. tatarinowii* biochar in enhancing the remediation of Cu- and Pb-contaminated soil was evaluated. [Results] Plant height, root length and underground fresh weight of *C. comosum* were significantly increased by adding *P. tatarinowii* biochar. Soil pH, organic matter, total nitrogen, available phosphorus and available potassium were significantly increased. The mass fractions of available Cu and Pb in soil were significantly decreased, and the uptake of Cu and Pb by *C. comosum* was significantly increased. The maximum increases of Cu and Pb in the above-ground part are 51.39% and 59.77%, respectively, and the maximum increases of Cu and Pb in the underground part are 15.63% and 45.46%, respectively. The maximum enrichment and transfer coefficients were 0.61 and 0.40 for Cu and 0.37 and 0.68 for Pb, respectively. The relative

收稿日期: 2024-10-08

修回日期: 2024-11-10

录用日期: 2024-11-15

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-01-20

资助项目: 国家自然科学基金项目(31070401); 安徽省高校自然科学基金重大项目(KJ2018ZD033)

第一作者: 姜利园(1996—), 女, 硕士研究生, 主要从事污染生态研究。E-mail: 2221012699@ahnu.edu.cn

通信作者: 王友保(1974—), 男, 博士, 教授, 主要从事植物生态与污染生态研究。E-mail: wyb74@126.com

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

abundances of Acidobacteria and Proteobacteria were decreased, while the relative abundances of Chloromycetes and Bacteroidetes were increased, and the soil nutrient metabolism was promoted. [Conclusion] Combined application of *P. tatarinowii* and *C. comosum* has better remediation effect.

Keywords: *Pteroceltis tatarinowii* biochar; *Chlorophytum comosum*; contamination of Cu and Pb; remediation effect

Received: 2024-10-08

Revised: 2024-11-10

Accepted: 2024-11-15

Online(www.cnki.net): 2025-01-20

青檀树皮是制作宣纸的主要原料,随着宣纸产业的发展,青檀剥皮造纸后产生大量的废弃枝条,造成资源浪费和环境污染。青檀属于青檀属乔木,青檀废弃物转化为生物炭用于重金属污染土壤修复,既可实现废弃物的资源转化利用,又具有环保应用价值,是一种绿色可持续性的废弃物处理方法。青檀是我国特有的石灰岩和钙质土壤植物群落中的先锋树种^[1],作为喜钙植物,其钙含量比较高,而钙作为生物炭改性的常用物质,可以增强生物炭的吸附能力。ISLAM等^[2]和CHO等^[3]研究发现,将富钙植物炭化后,由于钙矿物的催化作用,能够获得丰富表面官能团、高比表面积和吸附性能的生物炭。由于青檀本身富含钙元素,无需额外添加外源性钙,不仅节约成本,还简化操作流程,使其成为一种具有显著优势的材料。植物生物量和对重金属的富集效率是影响土壤中重金属去除效果的主要因素,然而,目前报道的许多富集型植物虽具有强大的重金属富集特性,但却存在生物量 and 环境适应能力偏低的问题^[4-5]。吊兰是百合科多年生常绿草本植物,生长速度较快,生物量较大,养护简单,因具有较强的适应性和抗性、较高的观赏价值及空气净化能力,常被用于园林绿化^[6]。吊兰对Cd和Pb等重金属均具有一定的抗性,能够在短时间内高效积累土壤或水体中的重金属,作为常见观赏植物应用于土壤重金属污染修复时既不会进入食物链威胁人体健康,其死亡残体也可通过热解法等技术进行无害化处理,不会引起土壤的二次污染^[6-8],被认为是一种理想的植物修复材料。但有关利用富钙生物炭与吊兰相结合的联合修复研究鲜有报道。本研究针对铜陵市老鸦岭铜尾矿区周边Cu-Pb污染的农田土壤,通过添加不同质量比青檀生物炭,探究其对吊兰生长、重金属积累、土壤养分、Cu和Pb的有效态质量分数,及土壤细菌群落结构特征的影响,来评估其对重金属污染土壤的修复潜力,为利用青檀生物炭强化吊兰对铜矿区农田土壤的生态修复提供理论依据与实践参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料

土壤:采自铜陵市老鸦岭铜尾矿边Cu-Pb复合污

染的农田(0~20 cm)表层土壤,去除杂物后,自然风干、磨碎过2 mm筛备用,试验土壤pH为6.63,有机质15.06 g/kg,全氮为1.08 g/kg,碱解氮76.07 mg/kg,速效磷22.29 mg/kg,速效钾112.40 mg/kg。Cu和Pb分别为179.60、285.00 mg/kg,均超过GB 15618—2018《国家农用地土壤污染》^[9]风险筛选值。

生物炭的制备:以青檀剥皮后的废弃枝条为原材料,纯水洗净,105℃烘干至恒重,500℃限氧热解2 h,冷却后研磨过200目筛,用去离子水反复抽滤洗净,干燥后得到青檀生物炭。采用BET表面积分析仪(Bettersize 2000,中国)、电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)分析技术对青檀生物炭的表征进行分析。结果表明,青檀生物炭比表面积为226.00 m²/kg, Ca、K、Na、Mg、Mn分别为4.081 1、2.164 5、1.266 3、1.090 0、0.078 9 mg/g,其中Ca质量分数较高,与青檀是喜钙植物有关。

供试植物:吊兰幼苗均取自吊兰母枝,剪下带有气生根的幼苗后土培1周,待生根稳定后选取生长情况相近的幼苗作为试验材料。

1.2 试验设计

盆栽试验于2023年6月10日至8月9日进行,共设12个处理。花盆尺寸为35 cm×20 cm×15 cm(长×宽×高),每盆装土3 kg,每个处理设置3个重复。青檀生物炭分别按质量比1%、3%、5%、7%、10%与供试土壤混匀,以不添加青檀生物炭的处理为空白,记作BC1、BC3、BC5、BC7、BC10和BCK,土壤平衡1周后,每盆种9株吊兰幼苗;同时设置相应不种植吊兰组为对照,记作C1、C3、C5、C7、C10和CK,不种吊兰组的培养条件与种吊兰组的相同,于组培室(25℃)内培养。试验期间土壤体积分数保持为田间最大持水量的60%。2个月后采集植物和土壤样本。

1.3 研究方法

将吊兰植株用去离子水清洗干净后,用刻度尺测量株高和根长,用电子天平称量吊兰地上部和地下部的生物量。称重后105℃杀青1 h,75℃烘干至恒重。

土壤理化性质测定参照《土壤污染生态修复实验技术》^[10]。pH采用电位法测定(水土比为2.5:1),

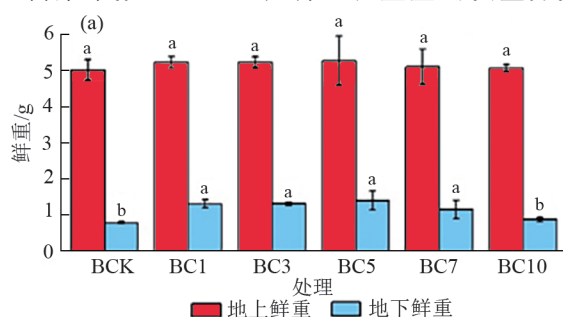
有机质采用重铬酸钾氧化比色法测定,有效氮采用碱解扩散法测定,全氮采用半微量开氏法测定,土壤有效磷采用钼锑抗比色法测定,速效钾采用醋酸铵-火焰光度法测定,重金属有效态经乙二胺四乙酸二钠提取,重金属全量经 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ 溶浸法消化提取,采用AA-320N型火焰型原子吸收分光光度计(日本岛津)测定。

参照E.Z.N.A.® Soil 试剂盒(Omega Bio-Tek)提取土壤细菌基因组DNA,1%琼脂糖凝胶电泳和Nano Drop 2 000超微量分光光度计分别检测DNA的完整性、浓度和纯度。使用27F-1492R引物对16S rDNA的V1-V9区进行扩增并构建文库,引物序列为27F(5'-AGAGTTTGATCMTGGCTCAG-3')和1492R(5'-CRGYTACCTTGTTACGACTT-3')。于上海凌恩生物科技有限公司PacBio sequel IIe平台进行测序分析。

1.4 数据处理与分析

使用Excel 2021和SPSS 19软件处理数据,运用Origin 2021软件绘图。富集系数(BCF)和转运系数(TF)计算公式为:

富集系数(BCF)=植物组织重金属质量分数/



注:图柱上方不同字母表示不同处理间差异显著($p < 0.05$)。下同。

图1 青檀生物炭对吊兰生长的影响

Fig. 1 Effects of *Pteroceltis tatarinowii* biochar on the growth of *Chlorophytum comosum*

2.2 青檀生物炭施用对土壤pH和养分的影响

各处理土壤pH、有机质、全氮、速效磷和速效钾质量分数随青檀炭添加量的增加整体呈上升趋势,而碱解氮质量分数则呈降低趋势(图2)。青檀生物炭单施组中,各处理土壤pH、有机质、全氮和速效钾质量分数均显著高于CK($p < 0.05$),其中有机质、全氮和速效钾质量分数在各处理间差异显著($p < 0.05$)。与CK相比,各处理土壤pH提升0.09~0.57个单位,有机质、全氮和速效钾增幅分别为77.49%~239.11%、30.90%~144.72%、20.39%~120.53%。各处理土壤速效磷质量分数均高于CK,其中C3~C10处理显著高于CK($p < 0.05$),各处理土壤碱解氮质量分数与之相反,速效磷增幅为0.38%~66.74%,碱解氮降幅为0.51%~28.86%。在青檀生物炭-吊兰联合应用组中,各处理均

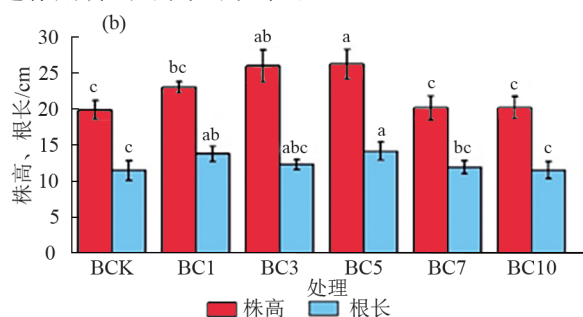
土壤重金属质量分数

转运系数(TF)=植物地上部重金属质量分数/植物地下部重金属质量分数

2 结果与分析

2.1 青檀生物炭施用对吊兰生长的影响

青檀生物炭添加量不同,对吊兰生长的影响程度也不同(图1)。各处理吊兰地上部鲜重和对照组(CK)相比均有提高,但无显著性差异($p > 0.05$),各处理间也无显著性差异($p > 0.05$);除BC10处理外,其余处理吊兰地下部鲜重均显著高于BCK($p < 0.05$)。吊兰地上、地下部鲜重在BC5处理下最大,较BCK分别增加5.08%和76.82%,表明青檀生物炭对吊兰地下部鲜重影响较大。各处理吊兰株高和根长均高于BCK,吊兰株高仅在BC3和BC5处理下显著高于BCK($p < 0.05$),而根长仅在BC1和BC5处理下显著高于BCK($p < 0.05$),表明BC5处理对吊兰株高和根长的促进效果最佳,较BCK分别显著提高31.94%和22.77%($p < 0.05$)。由此可见,中低添加量的青檀炭(BC1~BC5)对吊兰生长的促进效果较大,而高添加量生物炭(BC7、BC10)对吊兰生长虽有促进作用,但提升效果欠佳。



能提高土壤pH,其中BC1、BC7和BC10处理达显著性水平($p < 0.05$),土壤pH提高0.03~0.26个单位。各处理土壤有机质、全氮和速效钾质量分数均显著高于BCK($p < 0.05$),速效磷质量分数在BC3~BC10处理下表现为显著高于BCK($p < 0.05$),各处理土壤碱解氮质量分数均显著低于BCK($p < 0.05$)。土壤有机质、全氮、速效磷和速效钾增幅分别为72.75%~137.17%、15.89%~127.60%、40.99%~70.95%、36.36%~155.50%,碱解氮降幅为6.56%~33.60%。综上,青檀生物炭的施用,增加有机质,提升土壤pH,不同养分元素也有相应变化。

2.3 青檀生物炭施用对土壤有效态Cu、Pb的影响

由图3可知,青檀生物炭单施或与吊兰联合应用均能显著降低土壤EDTA-Cu和EDTA-Pb质量分数

($p < 0.05$)。单施青檀生物炭时,与 CK 相比,各处理 EDTA-Cu 和 EDTA-Pb 降低幅度分别为 22.32%~29.63% 和 5.63%~20.29%,其中土壤 EDTA-Cu 和 EDTA-Pb 分别在 C5 和 C7 处理下最低。青檀生物炭与吊兰联合应用时,各处理土壤 EDTA-Cu 和 EDTA-Pb

随青檀生物炭添加量增加呈先降低后升高趋势,在 BC5 处理下,EDTA-Cu 和 EDTA-Pb 均降至最低,降幅分别为 21.23% 和 27.33%。青檀生物炭施用降低土壤 Cu 和 Pb 的有效态质量分数,且青檀生物炭-吊兰联合组对土壤 Cu 和 Pb 的钝化效果优于相应青檀生物炭单施。

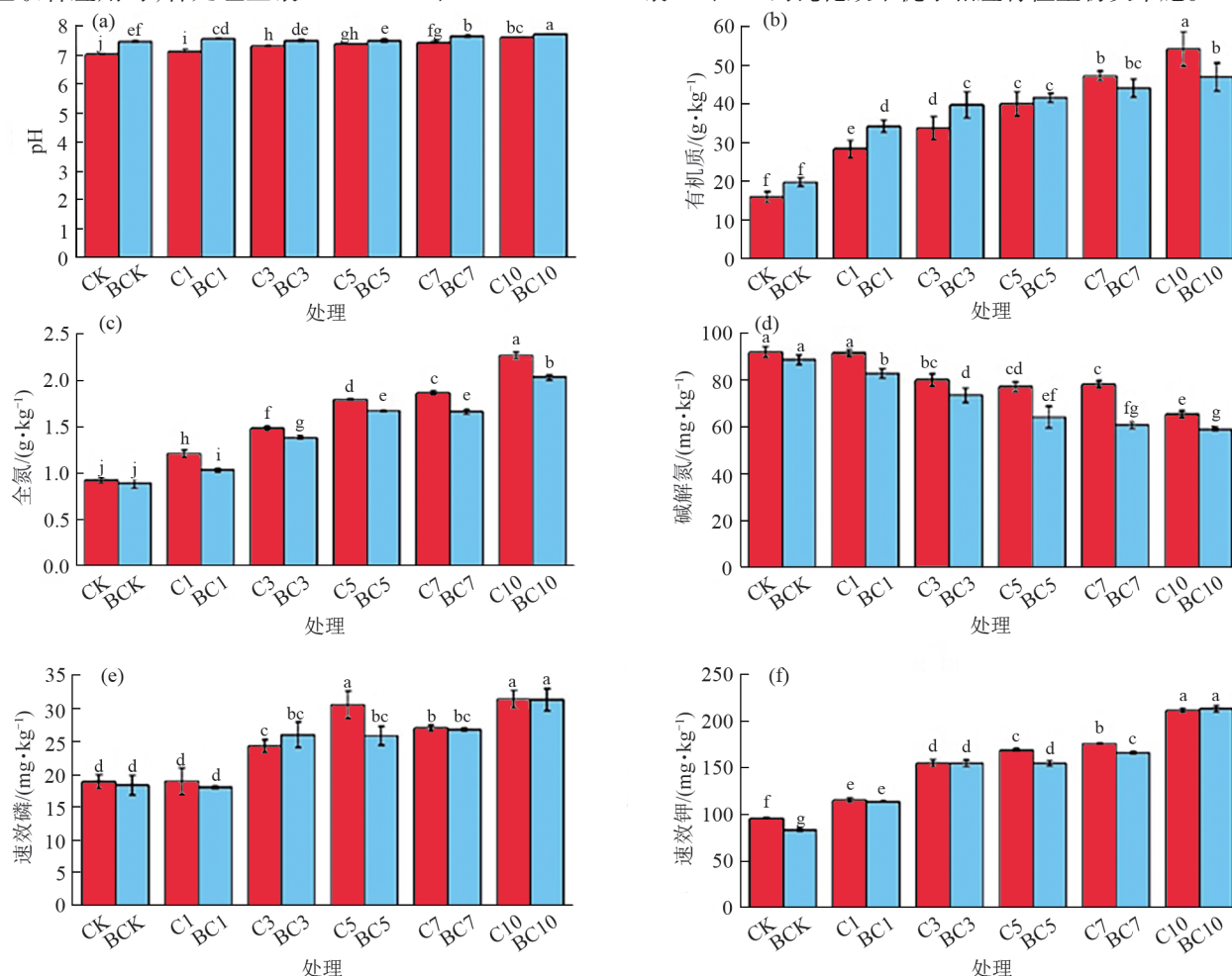


图 2 青檀炭对土壤 pH 和养分的影响

Fig. 2 Effects of *Pteroceltis tatarinowii* biochar on soil pH and nutrients

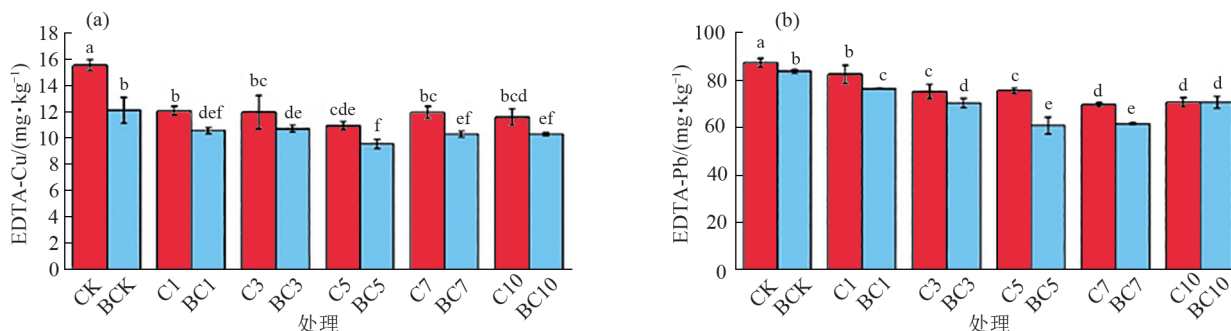


图 3 青檀生物炭对土壤有效态 Cu、Pb 的影响

Fig. 3 Effects of *Pteroceltis tatarinowii* biochar on available Cu and Pb in soil

2.4 青檀生物炭施用对吊兰富集 Cu、Pb 的影响

青檀生物炭添加量不同,导致吊兰不同组织部位对 Cu 和 Pb 的富集产生差异(表 1)。与 BCK 相比,青檀生物炭施用均能提高吊兰地上部的 Cu 和 Pb 质量分数,但高添加量青檀生物炭(BC7、BC10)却抑制

吊兰地下部对 Cu 的吸收。吊兰地上部和地下部 Cu 质量分数均在 BC5 处理下增幅最大,相较 BCK 分别提升 51.39% 和 15.63%;各处理吊兰地上部和地下部 Pb 质量分数均显著高于 BCK($p < 0.05$),地上、地下部分别在 BC5 和 BC7 处理下增幅最大,较 BCK 分别

增加 59.77% 和 45.46%。虽然地下部是 Cu 和 Pb 的主要积累部位,但从平均增幅来看,各处理吊兰组织中 Cu 和 Pb 增幅表现为地上部大于地下部,说明施加适量青檀生物炭能够促进吊兰对 Cu 和 Pb 的吸收,并增加 Cu 和 Pb 向地上部分的转移。

吊兰地上部和地下部对 Cu 和 Pb 的富集系数与青檀生物炭添加量密切相关(表 2)。与 BCK 相比,各处理吊兰地上部对 Cu 的富集系数均有显著差异($p<0.05$),而地下部仅在 BC3 和 BC5 处理下达到显著水平($p<0.05$),吊兰地上部和地下部在 BC5 处理下对 Cu 的富集系数增幅最大,分别为 84.03% 和

40.55%;吊兰地上部和地下部对土壤 Pb 的富集随青檀生物炭添加量增加呈先升后降的趋势,且均显著大于 BCK($p<0.05$)。吊兰地上部和地下部分别在 BC5 和 BC7 处理下对 Pb 的富集系数最大,相较于 BCK,增幅分别达 115.02% 和 99.38%。各处理对 Cu 的转移系数均大于 BCK,除 BC3 处理外,吊兰各处理对 Pb 的转移系数均大于 BCK,且除 BC3 处理外,其余处理 Cu 转移系数均达到显著性水平($p<0.05$);而 Pb 转移系数仅在 BC1 和 BC5 处理下达到显著性水平($p<0.05$),表明青檀生物炭施用能够增强吊兰对土壤 Cu 和 Pb 的富集和转运能力。

表 1 施用青檀生物炭对吊兰不同部位吸收 Cu、Pb 的影响

Table 1 Effects of application of *Pteroceltis tatarinowii* biochar on Cu and Pb absorption in different parts of *Chlorophytum comosum* mg/kg

处理	Cu		Pb	
	地上部	地下部	地上部	地下部
BCK	19.20±1.60e	68.27±3.33b	30.45±0.79d	50.15±1.80d
BC1	25.20±1.60b	68.80±4.80b	39.00±0.79c	57.30±2.03c
BC3	22.40±1.60cd	78.67±8.08a	37.20±2.85c	65.30±2.59b
BC5	29.07±1.01a	78.93±4.03a	48.65±1.88a	72.35±1.09a
BC7	24.27±1.15bc	60.80±1.60bc	45.00±1.87b	72.95±0.74a
BC10	20.67±1.80de	57.60±1.60c	35.95±1.39c	58.55±2.33c

注:表中数据为平均值±标准差;同列数据后不同小写字母表示不同处理间差异显著($p<0.05$)。下同。

表 2 吊兰对 Cu、Pb 富集系数和转移系数

Table 2 Enrichment coefficient and transfer coefficient of Cu and Pb in *Chlorophytum comosum*

处理	Cu 富集系数		Cu 转移系数	Pb 富集系数		Pb 转移系数
	地上部	地下部		地上部	地下部	
BCK	0.122±0.010d	0.435±0.021c	0.282±0.036b	0.109±0.003c	0.183±0.003e	0.608±0.030b
BC1	0.162±0.010bc	0.443±0.031c	0.366±0.002a	0.150±0.003b	0.220±0.008d	0.681±0.011a
BC3	0.154±0.011c	0.540±0.056b	0.288±0.046b	0.151±0.012b	0.265±0.011c	0.570±0.040b
BC5	0.225±0.008a	0.612±0.031a	0.369±0.031a	0.234±0.009a	0.347±0.005b	0.673±0.027a
BC7	0.177±0.008b	0.445±0.012c	0.399±0.011a	0.225±0.009a	0.365±0.004a	0.617±0.032b
BC10	0.153±0.013c	0.428±0.012c	0.358±0.021a	0.158±0.006b	0.257±0.010c	0.615±0.035b

2.5 青檀生物炭施用对土壤细菌群落结构的影响

施用 5% 的青檀生物炭,对吊兰修复 Cu-Pb 复合污染土壤的强化作用较好,选取 CK、BCK、C5 和 BC5 处理组进行土壤微生物的 16srRNA 基因测序。由图 4 可知,4 个处理组共检出 35 个细菌门,本研究展示各处理在门水平上相对丰度前 10 的优势菌门,其中各处理土壤的主要优势菌门均为酸杆菌门(Acidobacteriota)、变形菌门(Proteobacteria)、放线菌门(Actinobacteriota)、绿弯菌门(Chloroflexi)、拟杆菌门(Bacteroidota)和浮霉菌门(Planctomycetota)(相对丰度>5%),共占土壤细菌相对丰度的 80.81%~83.73%。与 CK 相比,各处理的酸杆菌门和变形菌门

的相对丰度均降低,其中 BCK 和 BC5 处理酸杆菌门的相对丰度分别显著降低 2.86% 和 3.57% ($p<0.05$),C5 和 BC5 处理变形菌门的相对丰度分别显著降低 3.75% 和 2.17% ($p<0.05$);而各处理的绿弯菌门和拟杆菌门的相对丰度均升高,其中 BCK、C5 和 BC5 处理绿弯菌门相对丰度分别显著升高 1.60%、2.34% 和 2.07% ($p<0.05$),BC5 处理拟杆菌门相对丰度显著升高 4.31% ($p<0.05$)。4 个处理间在放线菌门和浮霉菌门的相对丰度上表现为无显著差异($p>0.05$),表明无论是施加青檀生物炭、种植吊兰抑或二者联合应用都对土壤主要优势菌门组成没有影响,但可改变其相对丰度。

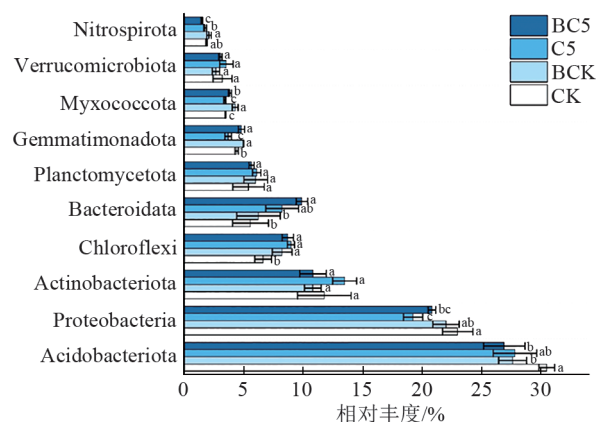


图4 土壤细菌门水平相对丰度

Fig. 4 Relative horizontal abundance of soil bacteriophyla

3 讨论

土壤质量在一定程度上影响植物的生长发育,而生物炭的施用能改善土壤质量^[11]。REN等^[12]研究发现,添加生物炭能改善土壤的团聚结构,提升土壤的疏松性与保水性,促进烟草根系生长;姜凌等^[13]研究发现,添加生物炭能显著降低土壤有效态Cd质量分数,提升黑麦草生物量,促进黑麦草生长。本研究中,吊兰的株高、根长、地上部分和地下部分鲜重随着青檀生物炭施用量的增加均呈不同程度的增加。生物炭施用影响植物生长与多种因素有关,一方面添加生物炭提升土壤有机质和有效磷质量分数,增强土壤阳离子交换能力,提高土壤肥力和质量,促进植物生长^[14];另一方面,生物炭具有较强的吸附能力,能降低土壤营养离子的迁移,减少淋失,同时还能长期持续释放养分,有利于植物生长^[15]。高添加量青檀生物炭对吊兰的生物量并未产生显著影响,可能是因为高添加量生物炭影响土壤结构,导致植物营养失衡,从而对植物生长产生不利影响^[16]。

适量的生物炭施用能够增加土壤养分,改善土壤理化性质^[17]。本研究发现,适量的青檀生物炭施用可不同程度地提高土壤pH、有机质、全氮、速效磷和速效钾质量分数。其中,土壤pH升高和生物炭自身含有碳酸盐、-OH和-COOH等含氧官能团成分,以及通过增加土壤中Ca²⁺、K⁺和Mg²⁺等碱性基团来降低土壤Al³⁺有关^[17-18]。生物炭可通过向土壤输入有机碳的方式提高土壤有机质^[19]。有研究^[20-21]表明,土壤pH和有机质质量分数增加可降低土壤重金属有效性,与本研究结果一致。在营养方面,生物炭灰分富含大量氮、磷、钾元素,且由于其高比表面积和多孔结构特征,在吸附和保持养分方面具备优势,可长期提供养分^[17]。本研究中,青檀生物炭施用降低碱解氮质量分数,可能是因为碱解氮包括无机态氮(铵态氮、硝

态氮)及易水解的有机态氮(氨基酸、酰胺和易水解的蛋白质),该部分氮素可被植物直接吸收利用。有机态氮在酸性条件下容易水解,由于生物炭施用提高土壤pH,不利于有机态氮的水解,致使碱解氮降低,与由乐林等^[22]的研究结果一致。总体来看,在影响养分总量方面,可能与生物炭所携带的营养成分数量有关;对于有效性,则既与携带有效营养成分相关,又与其吸附能力相关^[23]。

本研究中,施用不同比例青檀生物炭均能不同程度降低土壤有效态Cu和有效态Pb质量分数,表明青檀生物炭可能促使土壤中的重金属从有效态向稳定态转变。其中,添加生物炭能够影响土壤Pb的水解平衡,增加土壤吸附和固定重金属的能力,故使土壤有效态Pb质量分数降低^[24-25];而生物炭对Cu的固定主要表现在羧基和酚羟基官能团络合Cu,其次再通过静电作用对其进行修复^[26]。施用青檀生物炭增加吊兰地上部和地下部对Cu和Pb的吸收和富集,进而提高其对Cu和Pb的富集和转运系数。可能是由于添加青檀生物炭提高土壤养分,降低Cu和Pb有效态质量分数,降低土壤重金属对吊兰产生的可能伤害,促进吊兰生长。而吊兰本身对Cu、Pb等重金属具有很好的吸收、富集特性^[6-8],旺盛的生长带动吊兰对土壤中重金属的吸收和积累,反过来进一步促进土壤中Cu和Pb有效态质量分数的降低,提升土壤污染的修复效果。

本研究发现,添加青檀生物炭降低土壤酸杆菌门和变形菌门的相对丰度,提高绿弯菌门和拟杆菌门的相对丰度。添加生物炭可改善土壤养分状态,改变土壤环境条件,然而这种改变对寡营养类群的酸杆菌门细菌生长不利^[27]。由于酸杆菌属于嗜酸菌,添加生物炭使土壤pH升高,进一步抑制该类细菌的生长,使其相对丰度降低。变形菌门是富营养型微生物,尽管添加生物炭提高土壤养分,但由于生物炭中含有一定量的苯酚等有毒化学物质,可能毒害细菌使其相对丰度降低^[13,28]。有研究^[29-32]表明,绿弯菌门和拟杆菌门细菌均可存活于极端的土壤环境,促进磷素的转化,加强植物对磷的吸收和利用,为植物生长创造适宜的土壤环境。拟杆菌门细菌具有较多重金属抗性基因和还原基因,能较好适应重金属污染环境,与土壤中复杂有机物的降解密切相关,是土壤中碳水化合物的重要降解者^[33-35]。添加青檀生物炭后,绿弯菌门和拟杆菌门细菌的相对丰度增加,推动土壤养分的代谢进程,特别是碳源和磷源的变化,促进吊兰的生长,表明添加青檀生物炭,能够强化吊兰对Cu-Pb复合污染土壤的修复效果,提升土壤质量。

4 结 论

1)施用青檀生物炭显著增加Cu-Pb复合污染土壤的pH、有机质、全氮、有效磷和速效钾质量分数,降低土壤Cu、Pb有效态质量分数,改善Cu-Pb复合污染土壤质量。

2)施用青檀生物炭促进吊兰在Cu-Pb复合污染土壤中生长,促进吊兰对Cu和Pb的吸收、富集和转运,其中,5%的施用比例最佳。

3)施用青檀生物炭降低土壤酸杆菌门和变形菌门的相对丰度,提高绿弯菌门和拟杆菌门的相对丰度,促进土壤养分的代谢进程。

4)与单施用青檀生物炭相比,青檀生物炭-吊兰联合修复对Cu-Pb复合污染土壤具有更强的修复潜力,添加青檀生物炭能够强化吊兰对铜矿区农田土壤的生态修复。

参考文献:

- [1] 乔谦,程甜甜,燕语,等.青檀叶片饲用营养价值分析与优良无性系筛选[J].林业科学,2024,60(2):55-64.
QIAO Q, CHENG T T, YAN Y, et al. Analysis of nutritional value of *Pteroceltis tatarinowii* leaves for feeding and selection of the elite clones[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2024, 60(2): 55-64.
- [2] ISLAM M S, KWAK J H, NZEDIEGWU C, et al. Biochar heavy metal removal in aqueous solution depends on feedstock type and pyrolysis purging gas[J]. Environmental Pollution, 2021, 281: e117094.
- [3] CHO D W, KWON E E, KWON G, et al. Co-pyrolysis of paper mill sludge and spend coffee ground using CO₂ as reaction medium[J]. Journal of CO₂ Utilization, 2017, 21: 572-579.
- [4] 叶萍,崔红标,程洁钰,等.不同植物对污染土壤中铜和镉的生物移除效率[J].生态与农村环境学报,2024,40(8):1113-1120.
YE P, CUI H B, CHENG J Y, et al. Biological removal efficiency of different plants of copper and cadmium in contaminated soil[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2024, 40(8): 1113-1120.
- [5] 左慧,尹淑霞,李亚明,等.黑麦草氮素吸收利用的调控机制研究进展[J].中国草地学报,2021,43(4):96-106.
ZUO H, YIN S X, LI Y M, et al. Research progress on physiological and molecular mechanism of nitrogen absorption and utilization of ryegrass[J]. Chinese Journal of Grassland, 2021, 43(4): 96-106.
- [6] 王菲,肖雨,程小毛,等.镉胁迫对吊兰及银边吊兰生长及镉富集特性的影响[J].应用生态学报,2021,32(5):1835-1844.
WANG F, XIAO Y, CHENG X M, et al. Effects of cadmium stress on growth and cadmium enrichment of *Chlorophytum comosum* and *Chlorophytum comosum* var. *variegatum* [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(5): 1835-1844.
- [7] 潘芳慧,张晓玮,王友保.施磷对吊兰修复镉污染土壤及土壤酶活性的影响[J].水土保持学报,2018,32(3):346-351.
PAN F H, ZHANG X W, WANG Y B. Effects of phosphate fertilizer on phytoremediation of *Chlorophytum comosum* and soil enzyme activity in Cd-contaminated soils[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(3): 346-351.
- [8] 唐莹莹,桂亚男,王友保,等.吊兰对水体铅污染的耐受性和吸收特性研究[J].上海交通大学学报(农业科学版),2018,36(4):89-94.
TANG Y Y, GUI Y N, WANG Y B, et al. Tolerance and uptake ability of *Chlorophytum comosum* in Pb-polluted water[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University (Agricultural Science), 2018, 36(4): 89-94.
- [9] 中华人民共和国生态环境部.土壤环境质量-农用地土壤污染风险管控标准:GB 15618—2018[S].北京:中国标准出版社,2018.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Soil environmental quality risk control standard for soil contamination of agricultural land: GB 15618—2018 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.
- [10] 王友保.土壤污染生态修复实验技术[M].北京:科学出版社,2018.
WANG Y B. Experimental technology for ecological remediation of soil pollution[M]. Beijing: Science Press, 2018.
- [11] 刘可慧,王乐怡,刘世玲,等.硫酸盐对镉污染下南美天胡荽生长、镉富集及生理生化特性的影响[J].环境科学学报,2022,42(9):475-484.
LIU K H, WANG L Y, LIU S L, et al. Effects of sulfate on growth, cadmium enrichment, physiological and biochemical properties of *Hydrocotyle vulgaris* L. under cadmium contamination [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022, 42(9): 475-484.
- [12] REN T B, WANG H H, YUAN Y, et al. Biochar increases tobacco yield by promoting root growth based on a three-year field application [J]. Scientific Reports, 2021, 11(1): e21991.
- [13] 姜凌,岳小琼,安靖玥,等.改性生物炭对Cd污染农田土壤的钝化修复机制及其对土壤细菌群落的影响[J].环境科学,2024,45(9):5557-5569.
JIANG L, YUE X Q, AN J Y, et al. Remediation mechanism of chitosan-modified biochar on Cd-contaminated farmland soil and its effect on bacterial community [J]. Environmental Science, 2024, 45(9): 5557-5569.

- [14] SUN H J, JEYAKUMAR P, XIAO H D, et al. Biochar can increase Chinese cabbage (*Brassica oleracea* L.) yield, decrease nitrogen and phosphorus leaching losses in intensive vegetable soil[J]. *Phyton*, 2022, 91(1): 197-206.
- [15] ZHANG Q Q, SONG Y F, WU Z, et al. Effects of six-year biochar amendment on soil aggregation, crop growth, and nitrogen and phosphorus use efficiencies in a rice-wheat rotation [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 242: e118435.
- [16] 南江宽, 王浩, 王劲松, 等. 不同水分条件下秸秆生物炭对高粱生长和养分含量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(4): 1027-1038.
- NAN J K, WANG H, WANG J S, et al. Effects of straw biochar application on sorghum growth and nutrient contents under different water condition [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(4): 1027-1038.
- [17] 樊洪, 谢珊, 龙天雨, 等. 刺梨果渣生物炭对白菜产量及品质和土壤性质的影响[J]. *环境科学*, 2024, 45(6): 3543-3552.
- FAN H, XIE S, LONG T Y, et al. Effects of *Rosa roxburghii* pomace biochar on yield and quality of Chinese cabbage and soil properties [J]. *Environmental Science*, 2024, 45(6): 3543-3552.
- [18] YUAN J H, E S, CHE Z X. Base cation-enhancing role of corn straw biochar in an acidic soil [J]. *Soil Use and Management*, 2022, 38(2): 1322-1336.
- [19] XU H, CAI A D, WU D, et al. Effects of biochar application on crop productivity, soil carbon sequestration, and global warming potential controlled by biochar C:N ratio and soil pH: A global meta-analysis [J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 213: e105125.
- [20] 孙煜臻, 方明智, 张冰, 等. 水铁矿-人工合成类腐植酸复合材料的土壤重金属钝化效果及机制[J]. *农业环境科学学报*, 2023, 42(8): 1710-1720.
- SUN Y C, FANG M Z, ZHANG B, et al. Heavy metal passivation effect and mechanism of ferrihydrite-synthetic humic-like acid composite in farmland [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(8): 1710-1720.
- [21] ZHANG J, YANG X N, WANG S S, et al. Immobilization of zinc and cadmium by biochar-based sulfidated nanoscale zero-valent iron in a co-contaminated soil: Performance, mechanism, and microbial response [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 902: e165968.
- [22] 由乐林, 谢永红, 王子芳, 等. 改性酒糟生物炭对紫色土养分及酶活性的影响[J]. *环境科学*, 2023, 44(8): 4530-4540.
- YOU L L, XIE Y H, WANG Z F, et al. Effects of modified distiller's lees biochar on nutrients and enzyme activities in purple soil [J]. *Environmental Science*, 2023, 44(8): 4530-4540.
- [23] HAMID Y, TANG L, SOHAIL M I, et al. An explanation of soil amendments to reduce cadmium phytoavailability and transfer to food chain [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 660: 80-96.
- [24] 刘娟, 张乃明, 袁启慧. 不同钝化剂对铅镉复合污染土壤钝化效果及影响因素研究[J]. *生态环境学报*, 2021, 30(8): 1732-1741.
- LIU J, ZHANG N M, YUAN Q H. Passivation effect and influencing factors of different passivators on lead-cadmium compound contaminated soils [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021, 30(8): 1732-1741.
- [25] 李衍亮, 黄玉芬, 魏岚, 等. 施用生物炭对重金属污染农田土壤改良及玉米生长的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36(11): 2233-2239.
- LI Y L, HUANG Y F, WEI L, et al. Impacts of biochar application on amelioration of heavy metal-polluted soil and maize growth [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(11): 2233-2239.
- [26] WEI J, TU C, YUAN G D, et al. Pyrolysis temperature-dependent changes in the characteristics of biochar-borne dissolved organic matter and its copper binding properties [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2019, 103(1): 169-174.
- [27] 冯慧琳, 徐辰生, 何欢辉, 等. 生物炭对土壤酶活和细菌群落的影响及其作用机制[J]. *环境科学*, 2021, 42(1): 422-432.
- FENG H L, XU C S, HE H H, et al. Effect of biochar on soil enzyme activity and the bacterial community and its mechanism [J]. *Environmental Science*, 2021, 42(1): 422-432.
- [28] GODLEWSKA P, OK Y S, OLESZCZUK P. The dark side of black gold: Ecotoxicological aspects of biochar and biochar-amended soils [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 403: e123833.
- [29] 刘慧, 焦岩, 李禹韬, 等. 生物炭和氮肥联合施用对水稻生产中土壤细菌群落的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2024(7): 88-100.
- LIU H, JIAO Y, LI Y T, et al. Effects of combined application of biochar and nitrogen fertilizer on soil bacterial community in rice production [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2024(7): 88-100.
- [30] 苏倩倩, 李莲芳, 朱昌雄, 等. 蚯蚓/铈锰改性生物炭对 As 污染红壤中细菌多样性和群落结构的影响[J]. *环境科学*, 2022, 43(3): 1630-1640.
- SU Q Q, LI L F, ZHU C X, et al. Effects of earthworms/biochar on bacterial diversity and community in As-contaminated red soil [J]. *Environmental Science*, 2022, 43(3): 1630-1640.

- water loss to land use and precipitation changes on the Loess Plateau[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(4): 95-10.
- [30] 姚楠, 刘广全, 姚顺波, 等. 基于 InVEST 模型的黄土丘陵沟壑区退耕还林还草工程对生态系统碳储量的影响评估[J]. *水土保持通报*, 2022, 42(5): 329-336.
- YAO N, LIU G Q, YAO S B, et al. Evaluating on effect of conversion from farmland to forest and grassland project on ecosystem carbon storage in loess hilly-gully region based on InVEST model[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(5): 329-336.
- [31] 安健吉, 员学锋, 杨悦, 等. 退耕还林还草工程对陕北地区生态系统服务的影响[J]. *环境科学*, 2025, 46(4): 2410-2427.
- AN J J, YUAN X F, YANG Y, et al. Effect of the grain for green program on ecosystem services in northern Shaanxi, China[J]. *Environmental Science*, 2025, 46(4): 2410-2427.
- [32] 庞彩艳, 文琦, 丁金梅, 等. 黄河上游流域生态系统服务
- (上接第 337 页)
- [28] 张建鹏, 陈诗一. 金融发展、环境规制与经济绿色转型[J]. *财经研究*, 2021, 47(11): 78-93.
- ZHANG J P, CHEN S Y. Financial development, environmental regulations and green economic transition[J]. *Journal of Finance and Economics*, 2021, 47(11): 78-93.
- [29] 张军, 吴桂英, 张吉鹏. 中国省际物质资本存量估算: 1952—2000[J]. *经济研究*, 2004, 39(10): 35-44.
- ZHANG J, WU G Y, ZHANG J P. The Estimation of China's provincial capital stock: 1952—2000[J]. *Economic Research Journal*, 2004, 39(10): 35-44.
- [30] 郭沛, 梁栋. 低碳试点政策是否提高了城市碳排放效率: 基于低碳试点城市的准自然实验研究[J]. *自然资源学报*, 2022, 37(7): 1876-1892.
- (上接第 364 页)
- [31] 郭晓雯, 向贵琴, 张发朝, 等. 生物炭和秸秆还田对咸水滴灌棉田土壤微生物群落特征及功能差异的影响[J]. *环境科学*, 2024, 45(6): 3571-3583.
- GUO X W, XIANG G Q, ZHANG F C, et al. Effects of biochar and straw return on soil microbial community characteristics and functional differences in saline water drip irrigation cotton fields[J]. *Environmental Science*, 2024, 45(6): 3571-3583.
- [32] RAN T S, LI J, LIAO H K, et al. Effects of biochar amendment on bacterial communities and their function predictions in a microplastic-contaminated *Capsicum annuum* L. soil[J]. *Environmental Technology and Innovation*, 2023, 31: e103174.
- [33] CHEN Y, JIANG Y M, HUANG H Y, et al. Long-term and high-concentration heavy-metal contamination
- 变化及其权衡协同关系[J]. *生态学报*, 2024, 44(12): 5003-5013.
- PANG C Y, WEN Q, DING J M, et al. Ecosystem services and their trade-offs and synergies in the upper reaches of the Yellow River basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(12): 5003-5013.
- [33] 钟绍卓, 孙浩源. 不同情景下祁连山国家级自然保护区生态系统服务时空变化及权衡与协同关系[J]. *水土保持研究*, 2023, 30(5): 358-369.
- ZHONG S Z, SUN H Y. Assessment on spatiotemporal variation and synergies/tradeoffs relationships of ecosystem services in Qilian Mountain national nature reserve under different scenarios[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(5): 358-369.
- [34] 陈登帅, 李晶, 杨晓楠, 等. 渭河流域生态系统服务权衡优化研究[J]. *生态学报*, 2018, 38(9): 3260-3271.
- CHEN D S, LI J, YANG X N, et al. Trade-offs and optimization among ecosystem services in the Weihe River basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(9): 3260-3271.
- GUO P, LIANG D. Does the low-carbon pilot policy improve the efficiency of urban carbon emissions: Quasi-natural experimental research based on low-carbon pilot cities[J]. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(7): 1876-1892.
- [31] 国家统计局. 中国城市统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2007—2021.
- National Bureau of Statistics. China urban statistics yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2007—2021.
- [32] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 中国城市建设统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2007—2021.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. China urban construction statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2007—2021.
- strongly influences the microbiome and functional genes in Yellow River sediments[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 637: 1400-1412.
- [34] 郎乾乾, 李艳梅, 夏宇, 等. 玉米秸秆水热生物炭施用对土壤重金属 Cd 生物有效性和微生物群落的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2024, 43(6): 1303-1311.
- LANG Q Q, LI Y M, XIA Y, et al. Effects of corn stalk hydrothermal biochar application on the Cd bioavailability and microbial community in soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024, 43(6): 1303-1311.
- [35] KRUCZYŃSKA A, KUŹNIAR A, PODLEWSKI J, et al. Bacteroidota structure in the face of varying agricultural practices as an important indicator of soil quality: A culture independent approach[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2023, 342: e108252.