

· 专论与综述 ·

# 生物炭修复与改良矿区重金属污染土壤的研究进展

罗唯叶<sup>1</sup>, 朱靖宜<sup>1</sup>, 陈涛<sup>2</sup>, 龚正君<sup>1</sup>, 李承鸿<sup>1</sup>, 王东梅<sup>1\*</sup>

(1. 西南交通大学地球科学与环境工程学院, 四川 成都 611756;

2. 云南省生态环境厅驻大理州生态环境监测站, 云南 大理 671000)

**摘要:**概述了生物炭制备的关键影响因素及对矿区重金属污染土壤修复与改良作用的研究进展,在此基础上分析了生物炭修复与改良矿区重金属污染土壤的机理,提出了开展生物炭在实际矿区污染场地的长期性与稳定性行为研究,以及探讨生物炭与不同土壤改良剂的优化组合等建议。

**关键词:**生物炭;重金属污染;修复;改良;矿区土壤

中图分类号:X53 文献标志码:A 文章编号:1006-2009(2021)04-0008-05

## Research Progress on Remediation and Improvement of Heavy Metal Contaminated Soil in Mining Area with Biochar

LUO Wei-ye<sup>1</sup>, ZHU Jing-yi<sup>1</sup>, CHEN Tao<sup>2</sup>, GONG Zheng-jun<sup>1</sup>, LI Cheng-hong<sup>1</sup>, WANG Dong-mei<sup>1\*</sup>

(1. School of Earth Science and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 611756, China; 2. Dali Prefecture Ecological Environment Monitoring Station of Yunnan Provincial Ecological Environment Department, Dali, Yunnan 671000, China)

**Abstract:** The research progress of the key factors of biochar preparation and the remediation and improvement effects of different biochar on heavy metal contaminated soil in mining area were summarized. On this basis, the mechanism of the remediation and improvement of heavy metal contaminated soil by biochar was analyzed. Suggestions were made on studying long-term and stable behavior of biochar in actual contaminated mining area, and the optimal combination of biochar with different soil amendments.

**Key words:** Biochar; Heavy metal pollution; Remediation; Improvement; Mining area soil

矿产资源的开发利用导致了较为突出的土壤重金属污染问题<sup>[1]</sup>,大约10%受重金属污染的中国农用土壤位于矿区<sup>[2]</sup>。农用土壤污染不仅导致粮食减产,影响国家粮食安全,而且其生产的农作物重金属超标问题也影响着人体健康<sup>[3]</sup>。矿区重金属污染土壤污染重金属的种类多、含量大,土壤酸碱度失衡、肥力低下<sup>[4-5]</sup>,其修复策略不仅要解决污染土壤重金属的修复问题,还要改善土壤营养结构,实现污染土壤重金属修复与生态系统的重建<sup>[6-7]</sup>。

生物炭作为一种环境友好、来源广泛、廉价易得的多孔富碳固体<sup>[8]</sup>,在重金属污染土壤修复等领域有着广泛的研究与应用<sup>[9]</sup>,而针对矿区重金属污染土壤修复与改良的归纳总结尚不多见。今

在对生物炭的制备与改性进行系统总结的基础上,对生物炭在特定类型矿区重金属污染土壤中的修复与改良作用作对比,并分析其中的作用机理,期为生物炭修复与改良矿区重金属污染土壤的实际应用提供一定的科学依据和参考。

### 1 生物炭修复与改良矿区重金属污染土壤

#### 1.1 生物炭制备过程的影响因素

原料种类和热解温度是生物炭制备过程的关

收稿日期:2020-09-23;修订日期:2021-04-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(22006121)

作者简介:罗唯叶(1996—),女,四川乐山人,硕士,主要研究方向为污染土壤修复与治理。

\*通信作者:王东梅 E-mail: dongmeiwang@swjtu.edu.cn

键影响因素<sup>[10]</sup>,对生物炭的产率与性能有很大影响,进而影响其对矿区土壤的修复与改良效果。

原料种类对生物炭的碳含量、阳离子交换容量(CEC)、灰分组成、固碳能力、矿物浓度等性能有很大影响,在实际应用中可根据处理对象的特征和需求来筛选合适的生物炭原料。动物粪便生物炭比农业废弃物生物炭具有更高的灰分含量和pH值,碳含量和热值相对较低,适用于酸性土壤与矿区重金属污染土壤的修复。竹子、松木等森林残渣的高木质素原料和农业废弃物原料热解能获得固定碳含量高、孔隙度大的生物炭<sup>[11]</sup>,可用来提高土壤中水分和养分的保持能力<sup>[12]</sup>。选用包括城市固体废物在内的原料能产生富含高芳香族化合物、低氧碳比的生物炭,可用来长期储存土壤碳<sup>[13]</sup>。

热解温度是生物炭制备过程中的关键因素。低温下制备的生物炭具有产率高、孔隙量少、矿质

元素含量高等特点,随着热解温度升高,原料中的二氧化碳、氨气等挥发性物质逐渐释放,生物炭产量逐渐下降,制备的生物炭孔隙和比表面积越来越大。在应用时应根据实际需求选择适宜的热解温度,通常高温热解可获得吸附性能最优的生物炭,而在兼顾改良矿区土壤的需求时,低温热解则是一个折中的选择。鞠天琛等<sup>[14]</sup>利用低温(300℃)下产生的鸡粪生物炭有效固定了土壤中的重金属,同时将其作为肥料向土壤中缓释营养物质,提高了土壤肥力。

## 1.2 生物炭的应用

施加生物炭在有效去除矿区污染土壤中重金属的同时,还可以通过提高土壤pH值、EC值及有机质含量等方式改善矿区土壤理化性质。国内外近年来的相关研究成果见表1。

表1 生物炭在矿区重金属污染土壤修复与改良中的应用

Table 1 Application of biochar on remediation and improvement of soil contaminated by heavy metals in mining areas

种类与温度	土样来源	土样特征	土质改良效果	重金属修复效果	参考文献
600℃鱼骨炭和300℃牧豆树炭	沙特阿拉伯金矿	pH值7.84;EC值2.89 dS/m; SOM值1.03 g/kg;主要污染物为Cd、Cu、Zn、Pb	600℃鱼骨炭和300℃牧豆树炭分别增加土壤EC值和SOM值至4.93 dS/m和17.21 g/kg	600℃鱼骨炭对土壤中NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> 可萃取HMs还原率分别为: Cd 33.8%; Cu 66.2%; Zn 55.6%; Pb 43%	[15]
500℃竹炭	安徽省淮南市采煤土壤	pH值6.85;EC值0.32 dS/m;主要污染物为Cd、Cu、Zn、Pb、Cr	土壤pH值、EC值和SOC值均增加	EDTA生物有效态HMs分别降低: Cd 62.98%; Zn 41.35%; Pb 42.93%; Cu 52.29%; Cr 66%	[16]
600℃蚯蚓粪便炭	四川省西南某铅锌矿区土壤	pH值8.6;CEC值0.89 cmol/kg;主要污染物为Cd、Cu、Zn、Pb	生物炭能在相当长时间内保持土壤pH值的稳定,以及土壤内部水分与肥力	添加30%的蚯蚓粪便炭对矿区污染土壤中弱酸提取态HMs去除率分别为: Cd 15.68%; Cu 65.39%; Zn 13.16%; Pb 96%	[17]
600℃竹炭	潼关冶炼矿山地表污染土壤	pH值8.06;EC值2.013 dS/m;主要污染物为Cd、Cu、Zn、Pb	添加5%的竹炭可显著提高土壤pH值和EC值	DTPA可提取含量分别降低: Cd 23%; Cu 16%; Zn 14%; Pb 11%	[18]
500℃污泥炭和木炭	巴西瓦赞特锌矿区	pH值5.8;SOM值1.4 g/kg;主要污染物为Cd、Zn、Pb	土壤pH值升至8,EC值增加	DTPA可提取含量分别降低: Cd 24.88%; Zn 34.4%; Pb 17.4%	[19]
450℃和600℃兔粪炭	西班牙里奥廷托矿区	pH值4.34;EC值0.09 dS/m;CEC值3.6 cmol/kg;主要污染物为Cu、Zn、Pb、As	添加600℃兔粪炭后土壤pH值和EC值分别增至8.3和2.26 dS/m	显著降低土壤中Co、Cr、Cd、Cu、Ni、Zn、Pb和As的转运因子	[20]
550℃杨树木和甘蔗渣生物炭	巴基斯坦铬铁矿附近农田污染土壤	pH值7.2;EC值0.328 dS/m;SOM值2.8%;CEC值6.02 cmol/kg	提高了土壤pH值和EC值,7%施用率的甘蔗渣生物炭增加了生菜7%的新鲜生物量	增强了土壤中Cr和Pb的固定性,莴苣对Cr和Pb的吸收率分别降低69.8%和73.7%	[21]
500℃苹果树炭	凤县冶炼厂/矿山	pH值8.4;EC值0.19 dS/m;SOM值14.9 g/kg	添加10%的苹果树炭使SOM值增加4倍	分别降低了26%和35%的酸溶性Zn和Cd	[22]

(1) 生物炭修复矿区污染土壤中的重金属。由表1可见,矿区重金属污染土壤呈现出多种重金属超标现象,主要受到Cd、Cu、Zn、Pb 4种金属共同污染,它们之间会相互竞争生物炭上有限的活性位点,最终导致同一生物炭对不同重金属具有不同的治理效果。因此,矿区土壤重金属的修复不仅取决于生物炭本身的特性,还取决于其中共存重金属的性质。不同来源生物炭的添加对矿区污染土壤中不同重金属的稳定化和修复效果有差异,这与生物炭的原料种类、制备过程及污染土壤的特性有关。总体而言,对Zn的修复效果劣于其他重金属。

(2) 单一生物炭改良矿区重金属污染土壤的土质。矿区重金属污染土壤呈酸性或碱性,EC值、CEC值普遍偏低,有机质含量低,氮和磷营养元素缺乏,微生物活性低,养分周转受限,直接影响了作物的生产力<sup>[23]</sup>。由表1可见,添加了森林残渣生物炭的矿区土壤EC值与SOM值显著提高;农业废弃物和动物粪便生物炭提高了土壤CEC值;生物炭改良后的土壤具有更高的保水性、有机质含量、CEC值和pH值<sup>[24]</sup>。因此,生物炭的施用可以改善土壤土质的基本特性,从而提高污染土壤肥力和作物生产力,在农业可持续发展和降低人类健康风险方面发挥作用。

(3) 生物炭与不同土壤改良剂组合对矿区污染土壤土质的改善。在养分极其匮乏的矿区土壤环境中,往往需要施入多种有机添加物来满足矿区土壤肥力改善和植被恢复生长的需求<sup>[25]</sup>。众多研究表明<sup>[26-28]</sup>,生物炭与不同土壤改良剂组合施用会产生不同的土质改良效果,对贫瘠矿区土壤复垦具有重要作用。

## 2 生物炭修复与改良矿区重金属污染土壤的机理

### 2.1 修复机理

生物炭修复矿区重金属污染土壤的机理主要包括静电吸附、物理吸附、离子交换、络合和沉淀。在矿区多金属污染土壤的竞争体系中,不同种类重金属的稳定性不仅取决于生物炭的特性,还取决于金属离子的性质。

在多种重金属共存的矿区污染土壤中,Pb表现出良好的竞争性,这是由于Pb具有较大的原子量、较小的水合半径,以及能与生物炭颗粒表面Lewis碱(主要包含羧酸和酚类)结合的较强的Lewis酸性<sup>[29]</sup>。Pb还可以与生物炭释放的 $\text{PO}_4^{3-}$

通过沉淀作用形成难溶物 $\text{Pb}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$ ,因而更具亲和性的Pb能在众多重金属共存的情况下优先被生物炭吸附。Cu具有更大的水解常数,可以通过静电吸附、内球面表面络合反应及沉淀来固定Cu所形成的水氧化络合物 $[\text{MOH}^+$ 和 $\text{M}(\text{OH})_2]$ 。此外,低温热解的生物炭含有更多的有机官能团,可以增强Cu的络合能力<sup>[30]</sup>。带正电荷的Cu对含有大量负电荷的有机质有很强的吸附亲和力,因而其与土壤有机质的络合也是一种重要的作用机制。

在多种重金属污染共存的情况下,生物炭处理的土壤对Cd和Zn的固定化偏好小于Pb和Cu<sup>[15]</sup>。若想实现多种重金属的同步修复,则需要通过增加土壤pH值和增强石灰效应来固定土壤中的Zn和Cd。土壤pH值在修复Zn和Cd的过程中发挥着重要作用,因为pH值会影响土壤中金属离子的水解、有机物的溶解性及土壤表面电荷,较高pH值的矿区土壤在金属固定化过程中能促进金属与生物炭或沉淀中的一OH和 $\pi$ 电子相结合<sup>[31]</sup>。因此,生物炭中高含量的无机碳、碱和磷会作用于Cd,以 $\text{CdCO}_3$ 和 $\text{Cd}_3(\text{PO}_4)_2$ 的形式在土壤中沉淀<sup>[32]</sup>。另外,生物炭引起的土壤EC值增加及表面活性基团对重金属的吸附能有效降低矿区土壤中Zn和Cd的溶解度和潜在迁移率,生物炭表面的静电相互作用也是土壤中Zn和Cd固定化的原因之一<sup>[33]</sup>。

综上所述,生物炭对矿区污染土壤中多种重金属的主导作用机制包括静电吸附、沉淀和络合作用。在多种重金属共存的情况下,污染土壤中重金属的含量和形态,以及生物炭的来源和特性等会影响修复效果。加入高碱性的生物炭,或与其他具有增强石灰效应的材料联合施用,将有利于多种重金属污染土壤的同步修复。

### 2.2 改良机理

生物炭可以通过非生物因素和生物因素介导实现对矿区重金属污染土壤的改良。非生物因素的改良包括提高土壤EC值、pH值、CEC值,以及改变土壤的孔隙结构等;生物因素的改良包括降低重金属生物有效性、促进植物生长,以及提升微生物群落丰度等。

生物炭通过提高土壤EC值、pH值、CEC值等非生物因素来稳定矿区污染土壤中的重金属,而重金属的稳定对于土质改善具有积极作用。研究发现,受重金属污染而呈酸性的矿区土壤pH值在生

物炭作用下得到大幅提高,土质得到有效改善,从而降低了土壤酸性条件下重金属的迁移风险<sup>[21]</sup>。此外,生物炭的多孔性可以增加土壤水分滞留时间、渗流模式和路径,改变土壤的孔隙结构,从而提高土壤的持水能力,降低土壤中肥料养分的淋洗损失。生物炭通过向土壤中直接输入芳香族稳定有机碳和一些以低分子量有机化合物的含氧官能团为代表的非稳定溶解性有机质来提高土壤总有机碳含量,保留了土壤微生物所需的关键碳源和必要营养物质,对于保持土壤肥力和农业可持续发展至关重要。生物炭还能通过影响土壤团聚体数量和结构稳定性向土壤中间接输入有机碳。

生物炭的添加有利于提高土壤微生物丰度和矿区土壤重金属胁迫下生态系统的功能恢复<sup>[34]</sup>。生物炭的多孔性不仅为微生物提供了一个良好栖息地,还能吸附和解吸易分解有机化合物,为微生物提供营养源并扩大生态位,从而增加细菌群落的丰富度和多样性<sup>[35]</sup>。研究表明,在农业土壤中施用生物炭后,微生物群落发生了显著变化,包括在植物营养中起重要作用的丛枝菌根和外生菌根等真菌,对于群落结构有着积极影响<sup>[36]</sup>。其作用机理一是很多真菌物种可以通过产生一系列能够分解各种化合物的胞外酶,从生物炭中获取食物<sup>[37]</sup>;二是生物炭可以通过富集对病原菌具有拮抗活性的有益细菌来抑制病原菌,从而缓解土壤污染状况和植物-土壤负反馈效应(NPSF),促进作物生长。此外,生物炭的施入会通过机械干扰增加土壤曝气,促进硝化作用,使 $\text{NH}_4^+$ 迅速转化为硝酸根<sup>[38]</sup>,从而提高土壤中有效氮、磷和钾等营养元素含量,降低重金属溶解度和生物有效性,促进作物增产和土质改善<sup>[39]</sup>。

### 3 结论与展望

生物炭作为一种低成本的环境友好型材料,不仅能够高效修复矿区污染土壤中多种共存重金属,还能实现对肥力极低的矿区土壤的显著改良,促进植物生长,提高作物产量,在环境效益和经济效益方面具有一定潜力。然而,生物炭对矿区重金属污染土壤修复与改良的实际应用案例还较少。生物炭施入复杂多变的土壤环境是一个长期性相互作用的过程,期间生物炭的稳定性降低、自身组分和重金属等内源污染物的释放,以及与多种内外源污染物的相互作用机制等老化行为对土壤环境的潜

在风险尚不明确,故今后需要开展生物炭在实际矿区污染场地的长期性与稳定性行为研究。此外,为提高同步改良与修复效果,还应在生物炭与不同土壤改良剂的优化组合方面给予更多关注。

#### [参考文献]

- [1] KARCZEWSKA A, BOGDA A, KRYSIAK A, et al. Arsenic in soils in the areas of former mining and mineral processing in Lower Silesia, southwestern Poland[J]. *Trace Metals and Other Contaminants in the Environment*, 2007, 9: 411 - 440.
- [2] 党志,姚谦,李晓飞,等. 矿区土壤中重金属形态分布的地球化学机制[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2020, 39(1): 1 - 11.
- [3] ARIAS-ESTÉVEZ M, LÓPEZ-PERIAGO E, MARTÍNEZ-CARBALLO E, et al. The mobility and degradation of pesticides in soils and the pollution of groundwater resources[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2008, 123(4): 247 - 260.
- [4] 王建坤,张小平,周薇,等. 铅锌矿区土壤微生物区系及酶活性调查[J]. *环境监测管理和技术*, 2009, 21(4): 23 - 27.
- [5] PUGA A P, MELO L C A, DE ABREU C A, et al. Leaching and fractionation of heavy metals in mining soils amended with biochar[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 164: 25 - 33.
- [6] PATHY A, RAY J, PARAMASIVAN B, et al. Biochar amendments and its impact on soil biota for sustainable agriculture[J]. *Biochar*, 2020, 2(3): 287 - 305.
- [7] PALANSOORIYA K N, WONG J T F, HASHIMOTO Y, et al. Response of microbial communities to biochar-amended soils: a critical review[J]. *Biochar*, 2019, 1(1): 3 - 22.
- [8] THOMAS E, BORCHARD N, SARMIENTO C, et al. Key factors determining biochar sorption capacity for metal contaminants: a literature synthesis[J]. *Biochar*, 2020, 2(2): 151 - 163.
- [9] HU B, AI Y, JIN J, et al. Efficient elimination of organic and inorganic pollutants by biochar and biochar-based materials[J]. *Biochar*, 2020, 2(1): 47 - 64.
- [10] LIU J, HUANG S, CHEN K, et al. Preparation of biochar from food waste digestate: Pyrolysis behavior and product properties[J]. *Bioresource Technology*, 2020, 302: 12284101 - 12284107.
- [11] VIJAYARAGHAVAN K. Recent advancements in biochar preparation, feedstocks, modification, characterization and future applications[J]. *Environmental Technology Reviews*, 2019, 8(1): 47 - 64.
- [12] LI S, CHEN G. Thermogravimetric, thermochemical, and infrared spectral characterization of feedstocks and biochar derived at different pyrolysis temperatures[J]. *Waste Management*, 2018, 78: 198 - 207.
- [13] MAJUMDER S, NEOGI S, DUTTA T, et al. The impact of biochar on soil carbon sequestration: Meta-analytical approach to evaluating environmental and economic advantages[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 250: 10946601 - 10946611.
- [14] 鞠天琛,於斯,李晓军,等. 低温鸡粪生物质炭的制备及其对土壤理化性质的影响[J]. *吉林农业大学学报*, 2020, 42

- (16):55–61.
- [15] ABDIN Y, USMAN A, OK Y S, et al. Competitive sorption and availability of coexisting heavy metals in mining-contaminated soil: Contrasting effects of mesquite and fishbone biochars [J]. *Environmental Research*, 2020, 181:10884601–10884614.
- [16] MUJTABA MUNIR M A, LIU G J, YOUSAF B, et al. Synergistic effects of biochar and processed fly ash on bioavailability, transformation and accumulation of heavy metals by maize (*Zea mays* L.) in coal-mining contaminated soil [J]. *Chemosphere*, 2020, 240:12484501–12484512.
- [17] 罗唯叶, 徐伟健, 张志鹏, 等. 铅锌矿区土壤中有效态重金属的稳定化研究 [J]. *环境工程*, 2020, 38(12):1–8.
- [18] ALI A, GUO D, ZHANG Y, et al. Using bamboo biochar with compost for the stabilization and phytotoxicity reduction of heavy metals in mine-contaminated soils of China [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1):23840701–23840712.
- [19] PENIDO E S, MARTINS G C, MENDES T B M, et al. Combining biochar and sewage sludge for immobilization of heavy metals in mining soils [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 172:326–333.
- [20] GASCÓ G, ÁLVAREZ M L, PAZ-FERREIRO J, et al. Combining phytoextraction by *Brassica napus* and biochar amendment for the remediation of a mining soil in Riotinto (Spain) [J]. *Chemosphere*, 2019, 231:562–570.
- [21] KHAN A Z, KHAN S, AYZ T, et al. Popular wood and sugarcane bagasse biochars reduced uptake of chromium and lead by lettuce from mine-contaminated soil [J]. *Environmental Pollution*, 2020, 263:11444601–11444609.
- [22] ALI A, SHAHEEN S M, GUO D, et al. Apricot shell- and apple tree-derived biochar affect the fractionation and bioavailability of Zn and Cd as well as the microbial activity in smelter contaminated soil [J]. *Environmental Pollution*, 2020, 264:11477301–11477312.
- [23] JALILI B, SADEGH-ZADEH F, JABARI-GIASHI M, et al. Lead bioimmobilization in contaminated mine soil by *Aspergillus niger* SANRU [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 393:12237501–12237507.
- [24] 侯艳伟, 池海峰, 毕丽君, 等. 生物炭施用对矿区污染农田土壤上油菜生长和重金属富集的影响 [J]. *生态环境学报*, 2014, 23(6):1057–1063.
- [25] ZHOU Z, GAO T, ZHU Q, et al. Increases in bacterial community network complexity induced by biochar-based fertilizer amendments to karst calcareous soil [J]. *Geoderma*, 2019, 337:691–700.
- [26] LIAN T, MA L, ZENG Y, et al. Earthworm rather than biochar and sodium silicate addition increased bacterial diversity in mining areas subjected to chemical fertilization [J]. *Biochar*, 2019, 1(4):365–374.
- [27] RODRÍGUEZ-VILA A, ASENSIO V, FORJÁN R, et al. Carbon fractionation in a mine soil amended with compost and biochar and vegetated with *Brassica juncea* L. [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2016, 169:137–143.
- [28] DE SOUZA E S, DIAS Y N, DA COSTA H S C, et al. Organic residues and biochar to immobilize potentially toxic elements in soil from a gold mine in the Amazon [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 169:425–434.
- [29] SHEN Z, ZHANG Y, JIN F, et al. Qualitative and quantitative characterization of adsorption mechanisms of lead on four biochars [J]. *The Science of the Total Environment*, 2017, 609:1401–1410.
- [30] WEI J, TU C, YUAN G, 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*, 2018, 103(1):169–174.
- [31] NOVAK J M, IPPOLITO J A, DUCEY T F, et al. Remediation of an acidic mine spoil: *Miscanthus* biochar and lime amendment affects metal availability, plant growth, and soil enzyme activity [J]. *Chemosphere*, 2018, 205:709–718.
- [32] BASHIR S, ZHU J, FU Q L, et al. Cadmium mobility, uptake and anti-oxidative response of water spinach (*Ipomoea aquatica*) under rice straw biochar, zeolite and rock phosphate as amendments [J]. *Chemosphere*, 2018, 194:579–587.
- [33] PALANSOORIYA K N, SHAHEEN S M, CHEN S, et al. Soil amendments for immobilization of potentially toxic elements in contaminated soils: A critical review [J]. *Environment International*, 2020, 134:10504601–10504629.
- [34] 唐静, 袁访, 宋理洪, 等. 施用生物炭对土壤动物群落的影响研究进展 [J]. *应用生态学报*, 2020, 31(7):2473–2480.
- [35] YU Z, CHEN L, PAN S, et al. Feedstock determines biochar-induced soil priming effects by stimulating the activity of specific microorganisms [J]. *European Journal of Soil Science*, 2018, 69(3):521–534.
- [36] NOYCE G L, BASILIKO N, FULTHORPE R, et al. Soil microbial responses over 2 years following biochar addition to a north temperate forest [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2015, 51(6):649–659.
- [37] LIU L, CHEN S, WU J. Phosphoenolpyruvate: glucose phosphotransferase system modification increases the conversion rate during *L*-tryptophan production in *Escherichia coli* [J]. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, 2017, 44(10):1385–1395.
- [38] ABUJABHAH I S, DOYLE R, BOUND S A, et al. The effect of biochar loading rates on soil fertility, soil biomass, potential nitrification, and soil community metabolic profiles in three different soils [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, 16(9):2211–2222.
- [39] FANG W, SONG Z, TAO S, et al. Biochar mitigates the negative effect of chloropicrin fumigation on beneficial soil microorganisms [J]. *The Science of the Total Environment*, 2020, 738:13988001–13988012.