生物炭施加对矿区土壤养分及植物生长的影响

贾雪莹[1,2],田志杰[3*],张淼[1,2],贺任强[1,2]
(1. 太原师范学院地理科学学院,山西　晋中　030619;2. 太原师范学院汾河流域地表过程与资源生态安全山西省重点实验室,山西　晋中　030619;3. 忻州师范学院,山西　忻州　034000)

摘　要:以山西忻州—吕梁带典型废弃铁尾矿库土壤为实验对象,施加 5%比例的稻壳生物炭、椰壳生物炭、玉米秸秆生物炭和竹子生物炭,探究其对苜蓿种植后土壤养分含量、种子发芽率、生物量及重金属富集的影响。结果表明:施加生物炭可显著提升土壤全磷、全氮、有机质、速效磷、碱解氮含量,其中椰壳和玉米秸秆生物炭的改良效果更为显著;生物炭施加显著提高了苜蓿发芽率和生物量累积,降低了植物对 Pb、Cr、As 的富集,相关性分析进一步揭示土壤养分提升是降低植物重金属富集的重要因素。

关键词:生物炭;土壤养分;植物生长;重金属;铁矿区
中图分类号:X53　　**文献标志码**:B　　**文章编号**:1006-2009(2025)06-0094-04

Effects of Biochar Application on Soil Nutrients and Plant Growth in Mining Areas

JIA Xueying[1,2], TIAN Zhijie[3*], ZHANG Miao[1,2], HE Renqiang[1,2]
(1. *School of Geographical Sciences*, *Taiyuan Normal University*, *Jinzhong*, *Shanxi* 030619, *China*; 2. *Shanxi Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology Security in Fenhe River Valley*, *Taiyuan Normal University*, *Jinzhong*, *Shanxi* 030619, *China*; 3. *Xinzhou Teachers University*, *Xinzhou*, *Shanxi* 034000, *China*)

Abstract: Taking the soil from typical abandoned iron tailings ponds in Xinzhou-Lvliang area of Shanxi Province as the experimental object, alfalfa was planted after adding 5% rice husk biochar, coconut shell biochar, corn straw biochar and bamboo biochar to the soil, the effects of the application of these biochar on soil nutrient content, seed germination rate, biomass and heavy metal enrichment were studied. The results showed that the application of biochar significantly increased the contents of total phosphorus, total nitrogen, organic matter, available phosphorus and alkali-hydrolyzable nitrogen in the soil, among them, the improvement effects of coconut shell and corn straw biochar were the most remarkable. It also significantly increased the germination rate and biomass accumulation of alfalfa, and significantly reduced the enrichment of Pb, Cr and As by plants. Correlation analysis further indicated that the improvement in soil nutrients was an important factor in reducing the enrichment of heavy metals in plants.

Key words: Biochar; Soil nutrient; Plant growth; Heavy metals; Iron mining area

矿产资源开采形成了大量的尾矿库,占用大量土地资源,引发土壤污染和生物多样性丧失等问题[1-3]。矿业虽是国民经济的支柱产业之一,但矿山开采也带来了严峻的生态环境问题,实施有效的生态修复已成为一项重要任务[4]。寻求有效的土

收稿日期:2024-07-29;**修订日期**:2025-10-30
基金项目:国家自然科学基金资助项目(42301236);山西省高等学校科技创新基金资助项目(2020L0508);山西省回国留学人员科研基金资助项目(2021-146);山西省基础研究计划基金资助项目(202303021222215)

作者简介:贾雪莹(1989—),女,吉林松原人,副教授,博士研究生,研究方向为生态学。
*通信作者:田志杰,副教授 E-mail: tianzhijie12@mails.ucas.ac.cn

壤重金属污染修复材料对于改良矿区土壤环境、降低污染危害具有重要意义。生物炭是农业废弃物再利用材料中极具前景的环境修复材料，具有丰富的官能团、较大的比表面积和较高的孔隙度，作为改良剂被广泛应用于土壤修复[5-6]。生物炭根据材料来源主要分为 3 类，分别是木质类、秸秆类和壳类生物炭，特征不同对环境修复效果存在差异性[7]。生物炭可以改善酸性土壤环境、提高有机碳含量、减少重金属污染及提高作物产量[8-10]。

山西忻州—吕梁带[11]铁尾矿库周围存在土壤重金属污染现象，对其展开土壤生态修复研究具有一定意义。今选取稻壳生物炭、椰壳生物炭、玉米秸秆生物炭和竹子生物炭，探究生物炭施加对尾矿库土壤养分和植物生长的影响，以期为典型铁矿区土壤环境治理提供支撑。

1　材料与方法

1.1　实验材料

稻壳生物炭、椰壳生物炭、玉米秸秆生物炭和竹子生物炭（购自河南立泽环保科技有限公司），工艺为高温裂解，炭化温度为 500 ℃，pH 值为 8 ~ 10，含水率为 5%，粒度为 100 目。实验所用土壤为 2021 年 7 月采集的山西忻州—吕梁带内 10 个典型废弃铁尾矿库土壤，位于山西省五台县东北部（E113° 20′ 42″ ~ E113° 26′ 40″，N39° 02′ 21″ ~ N39°04′32″）。采用五点法采集土壤，采样深度为 0 cm ~ 20 cm，去除杂质后混合均匀带回实验室备用，室内风干、压碎、磨细过 2 mm 筛，用于测定土壤基础理化性质和培养实验。

1.2　实验设计

采用盆栽实验人工气候箱培养法，土壤中分别施加稻壳、椰壳、玉米秸秆和竹子 4 种生物炭，进行苜蓿培养试验。生物炭施加比例为 5%，称取 285 g 过 2 mm 筛的风干土样和 15 g 的生物炭置于洗净透明的 PVC 培养杯中，实验共 4 个处理组，各组分别设 4 个平行，共计 16 盆。每个 PVC 培养杯中放入 25 颗苜蓿种子，加入去离子水 100 g，置于人工气候箱中进行培育，培养温度为 25 ℃、相对湿度为 60%、光照时间为 7:00—19:00。每 2 d 补充土壤和人工气候箱加湿器的水分，保持 60% 田间持水量，观察每组植物生长状况并做好记录。实验周期为 60 d，结束后采集苜蓿地上和地下部分在 85 ℃ 下烘干处理，土壤自然风干，过 2 mm 筛待测。

1.3　指标测定与数据处理

土壤常规理化性质分析测定参照文献[12]，土壤全磷采用硫酸-高氯酸消煮后，用钼锑抗比色法测定；土壤全氮和有机碳采用燃烧氧化滴定法，使用碳氮分析仪在 850 ℃ 下测定；土壤碱解氮采用扩散法测定；土壤速效磷用 0.5 mol/L $NaHCO_3$ 溶液浸提-钼锑抗比色法测定；植物中 Fe、Pb、Cr 和 As 采用混酸（20 mL HNO_3、2 mL $HClO_4$ - 2.5 mL HNO_3）湿法消解，用电感耦合发射光谱法测定。

土壤全磷、全氮、有机质、速效磷、碱解氮测定值，以及植物中 Fe、Pb、Cr、As 统计分析采用 SPSS 22.0，制图采用 Origin 2022 软件，各指标数据呈现为平均值±标准差。

2　结果与讨论

2.1　生物炭施加对矿区土壤养分改良效果分析

生物炭施加后，土壤养分均有所提高，各处理组土壤全磷、全氮、有机质、碱解氮、速效磷含量具有显著性差异（$P < 0.05$），结果见表 1。

表 1　生物炭施加对矿区土壤养分的影响①

Table 1　Effects of biochar application on soil nutrients in mining areas①

生物炭类型	$w_{全磷}$/(mg·kg^{-1})	$w_{全氮}$/(mg·kg^{-1})	$w_{有机质}$/(g·kg^{-1})	$w_{碱解氮}$/(mg·kg^{-1})	$w_{速效磷}$/(mg·kg^{-1})
空白对照	510.20±68.36b	281.69±33.51b	7.33±1.15b	140.86±20.55b	15.37±2.08c
稻壳	410.28±18.25b	340.59±50.11b	11.17±0.80b	154.47±24.25b	46.37±5.46b
椰壳	523.37±83.53b	940.47±83.46a	15.03±4.32a	275.33±58.74a	114.34±17.32a
玉米秸秆	775.38±69.61a	909.33±144.53a	18.63±1.75a	177.26±21.39ab	69.71±14.10b
竹子	689.40±78.48a	335.23±31.14b	7.67±0.95b	154.96±28.53b	55.19±3.24b

①a、b、c 表示不同生物炭施加对矿区土壤养分含量的显著性差异。

由表 1 可知，椰壳和玉米秸秆生物炭对土壤养分促进作用最为显著。椰壳生物炭施加后，土壤全氮、有机质、速效磷和碱解氮含量分别达到空白对照组的 3.34 倍、2.05 倍、7.44 倍和 1.95 倍。玉米

秸秆生物炭施加组土壤全磷、全氮、有机质、碱解氮和速效磷是空白对照组土壤的 1.52 倍、3.23 倍、2.54 倍、1.26 倍和 4.54 倍。有研究表明,生物炭本身高含碳量不仅增加了土壤的肥力,还可提高土壤持水保肥的能力[13-14]。此外,生物炭提升土壤肥力效果和土壤类型相关。云南弱酸性红壤实验结果表明,生物炭可显著提高土壤 pH 值和有机质含量[15],山西省土壤为碱性,pH 值为 8.21~8.72[16],故生物炭施加修复效果与酸性土壤有所不同。

2.2　生物炭施加对矿区植物生长的影响

生物炭施加显著促进了植物发芽率($P<0.05$)。按 1.2 所述培养 4 周后稻壳、椰壳、玉米秸秆、竹子施加组和空白对照组发芽率分别为 62.67%、52.00%、73.34%、78.67%和 50.00%。竹子生物炭施加组植物发芽率相对较高,第 1 周发芽率为 40.00%,第 4 周为 78.67%;椰壳生物炭施加组植物发芽率相对较低,第 1 周发芽率为 6.67%,第 4 周为 52.00%。空白对照组在第 4 周发芽率有所降低,部分植株出现死亡的现象。该结果印证了其他学者研究的结论,土壤重金属污染对植物种子发芽和幼苗生长具有一定的抑制作用[17-18]。生物炭施加对矿区植物生物量的影响见图 1。由图 1 可见,稻壳生物炭施加对于植物生物量累积的效果最好,椰壳生物炭生物量累积最小,仅为空白对照组的 90.38%。表明生物炭施加对植物生物量提高效果显著($P<0.05$),主要是由于生物炭施加改善了土壤理化性质和土壤肥力[19]。

2.3　生物炭施加对矿区植物富集重金属的影响

生物炭施加对矿区植物重金属富集的影响见表 2。由表 2 可知,矿区土壤中生物炭施加对植物 Fe、Pb、Cr 和 As 富集具有显著性影响($P<0.05$),竹子生物炭施加组植物 Fe 含量与空白对照差别不大,其他 3 组均显著性减少($P<0.05$)。生物炭施加后,植物富集 Pb、Cr 和 As 含量均有所降低,其中竹子生物炭施加显著降低了植物对 Pb 和 As 的富集,椰壳生物炭施加显著降低了植物对 Pb、Cr 和 As 富集。土壤中生物炭可通过络合、静电和离子交换等固定重金属,重金属由酸可提取态和可还原态向更加稳定的可氧化态和残渣态转化,从而达到钝化修复效果,逐步实现矿区废弃地再利用[20]。生物炭通过引发土壤中重金属的形态转化,有效实现了其钝化与稳定化,显著降低了植物富集风险,展现出在矿区重金属污染治理中的良好应用前景。

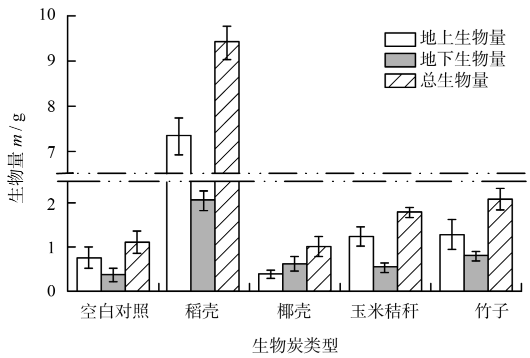

图 1　生物炭施加对矿区植物生物量的影响

Fig. 1　Effects of biochar application on plant biomass in mining areas

2.4　土壤养分与植物重金属吸收的相关性分析

Pearson 相关性分析表明,土壤养分含量之间为正相关关系,其中土壤全氮与速效磷、有机质之间为显著正相关(* 为 $P<0.05$),植物 Fe 与 Pb 含量为极显著负相关(** 为 $P<0.01$),见图 2。

表 2　生物炭施加对矿区植物重金属富集的影响①

Table 2　Effects of biochar application on heavy metal enrichment in plants in plants in mining areas①

生物炭类型	w_{Fe}/(g·kg^{-1})	w_{Pb}/(mg·kg^{-1})	w_{Cr}/(mg·kg^{-1})	w_{As}/(mg·kg^{-1})
空白对照	73.45±9.45a	21.43±2.04a	246.52±21.54a	14.25±2.36a
稻壳	25.9±4.23c	19.33±1.74ab	191.83±22.68b	12.83±1.26a
椰壳	56.57±3.25b	16.17±1.40bc	203.17±7.65b	8.67±1.04b
玉米秸秆	24.57±3.63c	17.50±1.11ab	217.33±28.41ab	2.33±0.76c
竹子	80.58±11.11a	12.67±1.57c	227.83±18.23ab	2.74±0.52c

①a、b、c 表示不同生物炭施加对矿区土壤养分含量的显著性差异。

研究表明,矿种类型会影响土壤质量和植物生长状态,Fe 矿山土壤中存在大量的 Fe 矿物,植物体内 Fe 稳态调控系统可避免植物出现 Fe 毒害现象[21]。当植物 Fe 中毒时,表现为抑制根系生长和

营养元素的吸收利用,其中抑制营养元素吸收利用对植物的影响最为明显[22]。此外,植物对重金属的富集量与土壤中过量 Fe 相关,由于金属间的拮抗作用,土壤中 Fe 过量时植物也会减少对 Mn、Pb、Cr、As、Cu 等元素的吸收利用[23],这与本研究的结果一致,植物 Fe 与 Pb 含量为极显著负相关($P < 0.01$)。有关稻米的研究表明,土壤中全氮、全磷、全钾等养分元素与稻米重金属富集系数呈负相关,合理施肥可降低金属元素迁移[24],与本研究中土壤全磷与植物富集 As 极显著负相关($P < 0.01$)的结果一致。

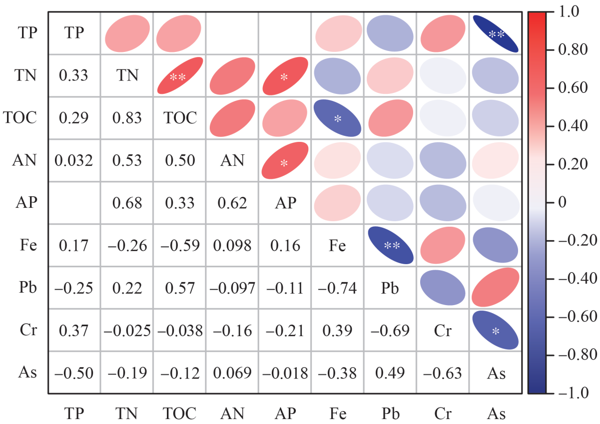

图 2　矿区土壤养分与植物重金属富集相关性分析

Fig. 2　Correlation analysis between soil nutrients and heavy metal enrichment in plants in mining areas

3　结语

4 种生物炭施加后,矿区土壤全磷、全氮、有机质、碱解氮、速效磷含量整体显著提高,其中椰壳和玉米秸秆生物炭施加对土壤的改良效果更为显著。生物炭施加可显著提高植物发芽率和生物量累积,显著降低植物对 Pb、Cr、As 的富集。生物炭施加通过提升矿区土壤全磷等养分水平,显著抑制植物对 As 的富集,可降低 As 通过植物链传递的风险,对保障矿区农产品安全具有重要意义。

[参考文献]

[1]　李如忠,刘宇昊,黄言欢,等. 铜陵某废弃硫铁矿区土壤重金属污染特征及来源解析[J]. 环境科学,2024,45(1):407-416.

[2]　陈能场,郑煜基,何晓峰,等.《全国土壤污染状况调查公报》探析[J]. 农业环境科学学报,2017,36(9):1689-1692.

[3]　ZHONG X, CHEN Z W, LI Y Y, et al. Factors influencing heavy metal availability and risk assessment of soils at typical metal mines in eastern China[J]. Journal of Hazardous Materials,2020(400):123289.

[4]　董文龙,白涛,杨旭,等. 矿区生态修复研究[J]. 环境科学与管理,2016,41(1):146-148.

[5]　武新玥,沈亦豪,张理群,等. 不同改性生物炭对污染土壤 As 形态及土壤环境因子的修复研究[J]. 环境监测管理与技术,2025,37(5):83-88.

[6]　宗莉,林红霞,苗宁涛,等. 矿物生物炭对马铃薯品质与土壤肥力的影响[J]. 农业环境科学学报,2025,44(4):1056-1065.

[7]　刘青松,白国敏. 生物炭及其改性技术修复土壤重金属污染研究进展[J]. 应用化工,2022,51(11):3285-3291.

[8]　高静,徐明岗,李然,等. 整合分析生物炭施用对土壤 pH 的影响[J]. 中国农业科技导报,2023,25(9):186-196.

[9]　李尚珂,胡嘉源,陈岩,等. 稻壳和稻壳生物炭对镉污染土壤肥力及镉有效性的影响[J]. 中国土壤与肥料,2023(12):78-85.

[10]　张春鑫,魏勇,钟卫红,等. 生物炭在农业土壤重金属污染修复中的应用研究[J]. 农业技术与装备,2022(11):65-67.

[11]　胥瑾. 山西省铁矿资源概况[J]. 中国金属通报,2024(2):97-99.

[12]　鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社,2000:205-226.

[13]　WANG D, JIANG P, ZHANG H, et al. Biochar production and applications in agro and forestry systems: A review[J]. Science of the Total Environment,2020,723:137775.

[14]　邝曦芝,邓伟明,唐乐乐,等. 不同磷水平配施生物炭对土壤磷有效性和大豆磷吸收的影响[J]. 应用生态学报,2022,33(7):1911-1918.

[15]　张晓凤,马珮瑶,邓志华,等. 农林基质生物炭联合香根草对铜镉铅复合污染土壤的修复研究[J]. 西南林业大学学报(自然科学),2024,44(11):107-115.

[16]　中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京:中国环境科学出版社,1990.

[17]　鱼小军,张建文,潘涛涛,等. 铜、镉、铅对 7 种豆科牧草种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 草地学报,2015,23(4):793-803.

[18]　保琼莉,唐一然,保万魁,等. 镉对不同品种苜蓿种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 生态学杂志,2020,39(5):1695-1705.

[19]　钟振宇,姜苹红,崔啸川,等. 改性凹凸棒土复配秸秆生物炭对生菜镉吸收的影响及机理[J]. 农业现代化研究,2024,45(4):702-710.

[20]　李飞跃,沈皖豫,吴旋,等. 生物炭复配矿物质钝化修复重金属复合污染土壤的研究[J]. 土壤通报,2020,51(1):195-200.

[21]　李俊成,于慧,杨素欣,等. 植物对铁元素吸收的分子调控机制研究进展[J]. 植物生理学报,2016,52(6):835-842.

[22]　黄洁雪,闫明科,薛彩雯,等. 外界铁浓度调控缺磷植物铁吸收相关基因的表达量[J]. 土壤,2018,50(5):866-873.

[23]　JIA X Y, OTTE M L, LIU Y, et al. Performance of iron plaque of wetland plants for regulating iron, manganese, and phosphorus from agricultural drainage water[J]. Water,2018,10(1):42.

[24]　曹宁,孙彬彬,曾道明,等. 珠江三角洲西部典型乡镇稻米与根系土重金属元素含量关系研究[J]. 岩矿测试,2020,39(5):739-752.