

不同有机废弃物对铅锌尾矿基质性质和植物生长的影响

王璐, 杨胜香, 赵东波, 彭禧柱, 李凤梅, 陈功锡

引用本文:

王璐, 杨胜香, 赵东波, 等. 不同有机废弃物对铅锌尾矿基质性质和植物生长的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(9): 1946-1956.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0283>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

尿素混合生物质炭穴施对土壤氮含量及酶活性的影响

张莉, 任建新, 韩国君, 马乐元, 孙小妹

农业环境科学学报. 2020, 39(9): 1974-1982 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0135>

三种黏土矿物对蚕豆生长和重金属含量的影响

张金秀, 何永美, 李博, 王灿, 李天国, 秦丽, 湛方栋, 李元

农业环境科学学报. 2019, 38(4): 845-854 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0897>

黑麦草对铀胁迫的光合响应及铀吸收特性研究

赵继武, 罗学刚, 王焯, 黄强

农业环境科学学报. 2019, 38(11): 2456-2464 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0235>

铀对蚕豆幼苗光合特性和呼吸代谢的毒害机理

刘泽伟, 赖金龙, 李俊柯, 丁峰, 张宇, 罗学刚

农业环境科学学报. 2020, 39(9): 1916-1924 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0390>

微囊藻毒素对水稻幼苗营养吸收的影响

刘洪月, 申泽辉, 梁婵娟

农业环境科学学报. 2019, 38(11): 2449-2455 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0429>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

王璐, 杨胜香, 赵东波, 等. 不同有机废弃物对铅锌尾矿基质性质和植物生长的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(9): 1946–1956.

WANG Lu, YANG Sheng-xiang, ZHAO Dong-bo, et al. Effects of different organic wastes on plant growth and tailings properties of a Pb-Zn mine[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(9): 1946–1956.



开放科学 OSID

不同有机废弃物对铅锌尾矿基质性质和植物生长的影响

王璐^{1,2}, 杨胜香^{2*}, 赵东波², 彭禧柱¹, 李凤梅¹, 陈功锡¹

(1. 吉首大学生物资源与环境科学学院, 湖南 吉首 416000; 2. 遵义师范学院资源与环境学院, 贵州 遵义 563006)

摘要:为研究有机废弃物作为改良剂对铅锌尾矿污染基质修复效果的影响,采用原位基质改良方法,开展野外田间试验,研究不同处理对尾矿基质营养元素、DTPA提取态重金属、酶活性以及植被盖度、生物量、植物体内重金属含量的影响。结果表明,尾矿基质的营养元素、酶活性以及植被盖度、生物量均最低,而尾矿基质DTPA提取态重金属、植物体内重金属最高;与尾矿相比,添加不同有机废弃物后尾矿基质有机质、有效磷、铵态氮、有效钾含量分别增加了0.68~5.52、1.50~14.46、1.62~4.59、0.16~1.08倍;尾矿基质DTPA-Cd、DTPA-Cu、DTPA-Pb、DTPA-Zn分别降低了27.33%~62.06%、6.98%~35.19%、0.50%~32.41%、19.37%~43.98%;尾矿基质脱氢酶、葡萄糖苷酶、脲酶、磷酸酶分别增加了0.08~11.00、0.05~1.72、0.59~17.38、1.71~6.74倍;植被盖度、生物量分别增加了12.75~84.75、1.59~215.57倍;植物体内Cd、Cu、Pb、Zn分别降低了23.18%~82.76%、3.30%~39.52%、67.30%~81.46%、44.98%~75.60%;总体上鸡粪组、污泥组提升尾矿基质营养元素、酶活性以及植被盖度、生物量效果最明显,且均达到显著水平($P<0.05$)。其中鸡粪组有机质、有效磷、有效钾分别增加了5.52、14.46、1.08倍,污泥组铵态氮增加了4.59倍;鸡粪组、污泥组脱氢酶分别提高了11.00、10.12倍,脲酶分别提高了17.38、16.74倍,磷酸酶分别提高了6.74、5.94倍;鸡粪组、污泥组生物量分别增加了214.80、215.57倍,植被盖度分别增加了84.75、80.25倍。8种有机废弃物均有助于植物在铅锌尾矿基质上的定居与生长,其中鸡粪、污泥在尾矿基质的改良实践中具有较大的修复潜力。

关键词:有机废弃物;铅锌尾矿;重金属;基质性质;植物生长

中图分类号:X753 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2020)09-1946-11 doi:10.11654/jaes.2020-0283

Effects of different organic wastes on plant growth and tailings properties of a Pb-Zn mine

WANG Lu^{1,2}, YANG Sheng-xiang^{2*}, ZHAO Dong-bo², PENG Xi-zhu¹, LI Feng-mei¹, CHEN Gong-xi¹

(1. College of Biology and Environmental Science, Jishou University, Jishou 416000, China; 2. College of Resources and Environment, Zunyi Normal University, Zunyi 563006, China)

Abstract: The effects of different organic wastes to amend the physio-chemical properties of Pb-Zn mine tailings were studied. A field experiment was conducted on Pb-Zn mine tailings to evaluate the efficiency of different treatments on nutrients, diethylene-triamine-pentaacetic acid (DTPA)-extracted heavy metal, enzyme activity, plant biomass and coverage, and heavy metal content in plants. The principal findings were as follows: the mine tailings had the lowest nutrient elements, enzyme activity, vegetation coverage, and biomass, whereas the DTPA-extracted heavy metal in the tailings and the heavy metal content in plants were the highest. The application of different organic wastes significantly increased the organic matter content, available phosphorus, ammonium nitrogen, and available potassium,

收稿日期:2020-03-15 录用日期:2020-06-11

作者简介:王璐(1994—),女,贵州纳雍人,硕士研究生,从事矿山重金属污染治理与生态修复研究。E-mail:15286040470@163.com

*通信作者:杨胜香 E-mail:yangsx1998@163.com

基金项目:国家自然科学基金项目(41561076,41967020);贵州省自然科学基金项目(黔科合基础[2019]1322);贵州省教育厅科技拔尖人才计划项目(黔教合KY字[2018]065);贵州省科技合作计划项目(黔科合LH字[2015]7051号);遵义师范学院博士启动基金(遵师BS[2017]13)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China (41561076, 41967020); Guizhou Natural Science Foundation (Qian Ke He Jichu [2019]1322); Science and Technology Top-notch Talent Project of Guizhou Province (Qian Jiao He KY[2018]065); Science and Technology Cooperation Project of Guizhou Province (Qian Ke He LH [2015]7051); Doctor Start Project of Zunyi Normal University (Zun Shi BS[2017]13)

which were 0.68~5.52, 1.50~14.46, 1.62~4.59, and 0.16~1.08 times higher, respectively, than those in the tailings. Compared with the tailings, the DTPA-Cd, DTPA-Cu, DTPA-Pb, and DTPA-Zn concentrations in organic waste-amended plots decreased by 27.33%~62.06%, 6.98%~35.19%, 0.50%~32.41%, and 19.37%~43.98%, respectively. Dehydrogenase, glucosidase, urease, and phosphatase increased by 0.08~11.00, 0.05~1.72, 0.59~17.38, and 1.71~6.74 times, respectively. Plant biomass and coverage increased by 1.59~215.57 and 12.75~84.75 times, respectively. Cd, Cu, Pb, and Zn in plants decreased by 23.18%~82.76%, 3.30%~39.52%, 67.30%~81.46%, and 44.98%~75.60%, respectively. Chicken manure and municipal sludge had the highest effect on nutrient elements, dehydrogenase, urease and phosphatase activity, and plant biomass and coverage with a significance level of $P<0.05$. Organic matter and available phosphorus and potassium in the chicken manure-amended plots increased by 5.52, 14.46, and 1.08 times, respectively, and ammonium nitrogen in the municipal sludge-amended plots increased by 4.59 times. Dehydrogenase, urease, and phosphatase in the chicken manure-amended and municipal sludge-amended plots increased by 11.00 and 10.12, 17.38 and 16.74, and 6.74 and 5.94 times, respectively. The plant biomass and coverage of the chicken manure-amended and municipal sludge-amended plots increased by 214.80 and 215.57, 84.75 and 80.25 times, respectively. Overall, these eight organic wastes favor plant survival and growth. The chicken manure-amended and municipal sludge-amended plots have potential to greatly improve Pb-Zn mine tailing practices.

Keywords: organic wastes; Pb-Zn mine tailings; heavy metals; tailings properties; plant growth

尾矿是矿业部门在开采过程中,将矿石经粉碎、浮选中矿、精选矿后产生的大量固体废弃物^[1]。由于生产方式粗放和经营管理技术落后等原因,采矿产生的尾矿存在诸多危害,比如占用和破坏土地资源、安全隐患^[2]、环境污染^[3]等。其中最为严重的是危害人体健康,尾矿本身含有超标污染物及重金属,通过水土流失、雨水迁移等途径,直接或间接污染土壤、地下水,由于重金属的富集效应,尾矿中重金属物质不断在食物链中累积,严重威胁人体健康^[4]。尾矿对环境的影响具有区域性、普遍性、持久性、严重性等特点。因此,寻求一种较好修复尾矿、治理重金属污染的方法是十分必要的。

尾矿治理方法主要有物理修复法、化学修复法和植物修复法,传统的物理、化学修复方法存在成本高、破坏土壤理化性质、易造成二次污染等弊端^[5],在应用上备受限制。相对而言,辅助植物稳定法是治理矿山尾矿的一种更自然的方法^[6]。这个方法需要调配添加适量各类环境友好型的外源物,以创造适合植物生长的立地条件^[7]。目前,各种各样的工农业有机废弃物材料被广泛应用于重金属尾矿的基质改良和植被重建,包括污泥^[8]、酒糟、中药渣^[9]、蘑菇渣^[10]、牲畜粪便^[11]、秸秆^[12]、木屑^[13]、树木剪枝等。大量研究表明,将有机废弃物作为改良剂修复尾矿,能有效地改善尾矿基质物理结构、补充营养元素、降低重金属活性、提高微生物活性以及提升植物成活率、盖度和生物量^[8-13]。添加改良剂可以改善尾矿基质性质,有效地辅助矿山尾矿的植物稳定性。然而,到目前为止,大部分研究仍然停留在盆栽试验阶段,很少有研究比较工农业有

机废弃物在野外条件下对矿山尾矿的辅助植物稳定作用。

国内部分工业、农业企业在生产过程中会衍生出一些有机废弃物,产生的废弃物一般采取随地堆放、就地焚烧或永久弃置等处理方式,这会给周边环境带来短期或长期污染,弃置或焚烧还会造成资源的浪费。这些有机废弃物的有机质含量丰富,若作为有机改良剂,用于矿山尾矿基质的改良,既可减轻企业处理废弃物的负担,又可实现固体废弃物资源化利用,达到“以废治废”的目的,具有较高实际应用价值。基于此,本研究选取浩宇化工有限公司铅锌尾矿库作为研究地点,添加8种当地工农业企业衍生的有机废弃物对铅锌尾矿库进行原位基质改良,采用乡土耐性植物混合种植,建立植被。测定不同处理的尾矿基质营养元素、DTPA提取态重金属、酶活性以及植被盖度、生物量、植物体内重金属含量,系统分析比较不同有机废弃物对铅锌尾矿的改良效果,以期为挖掘铅锌尾矿基质上添加外源物提升植物修复潜力提供一定理论依据与实践参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究在湖南省湘西州花垣县浩宇化工有限公司铅锌尾矿库进行,地理坐标为东经109°15'~109°38',北纬28°10'~28°38'。该区域属中亚热带山地气候,年平均气温15~16.9℃,年降水量为1250~1500mm,年平均日照时数1291~1406h,海拔高度为300~1800m;原始植被为中亚热带典型山地植被;浩

宇尾矿库闭库时间为3 a,面积约50 000 m²[14]。2014年1月在尾矿库上进行生态调查与立地分析,土质疏松,未形成团粒结构,植物无法定居,处于裸露状态,尾矿基本理化性质见表1。

1.2 试验小区建立过程

2013年10—12月,以浩宇化工有限公司铅锌尾矿库为中心,从附近区域采集土著植物20种(包括豆科植物、非豆科植物、草本植物和小灌木等)。在实验室内进行种子萌发试验,依据发芽情况和千粒重选择出15种植物作为供试植物,供试植物信息及其播种量见表2。2013年10月将收集回来处于湿润状态的有机废弃物放置在双层收集袋(内层塑料膜,外层编织袋)中,扎紧袋口,腐熟3个月左右,取出风干,磨碎备用。2014年3月在尾矿库上建立了约1 000 m²的试验样地,将试验样地(50 m×20 m)分割成36个2 m×2 m的试验小区。在每个样方添加6 kg(相当于15 t·hm⁻²)废弃物作为改良剂,将改良剂与0~30 cm尾矿基质混匀,平衡两周后播种植物,植物采用混合撒播方式播种,设置一个不添加改良剂的尾矿对照处理。各试验小区采用随机区组排列,每个处理4个重复。在试验期间,植物于自然条件下生长,不采取灌溉或其他措施。

本研究改良剂为当地工农业衍生的废弃物,分别为污泥(MS)、酒糟(SSV)、中药渣(MHR)、蘑菇渣

(SMC)、鸡粪(CM)、秸秆(CS)、木屑(WS)、树木剪枝(GR)。其中,污泥来自湘西州污水处理厂,酒糟来自湘泉酒厂,中药渣来自湘泉制药厂,蘑菇渣来自湘西蘑菇种植场,鸡粪来自花垣县养鸡场,秸秆来自花垣县下瓦水村,木屑来自花垣县锯木厂,树木剪枝来自湘西园林公司,其基本性质见表1。

1.3 样品采集与处理

2015年10月对每个试验小区内尾矿基质进行样品采集。采用梅花布点法采集5个点组成一个混合样,采集量为1 kg左右,采集深度为0~30 cm,装入塑料密封袋并做好标记后运回实验室。在实验室内采用四分法将样品分成两份,一份于4℃储存下用于尾矿基质酶活性分析,另一份于室温下自然风干,剔除残留植物,过筛后用于尾矿基质理化性质和重金属含量分析。

2015年10月对每个试验小区进行植被调查以及植物样品采集。采用数码照相机测算各试验小区的植被盖度,记录植物种类[15]。在各试验小区内设置一个小样方(0.5 m×2 m),剪取植物地上部分(距地面5 cm)进行生物量的统计,为避免破坏植被,未对植物地下部分进行取样分析。将植物运回实验室,烘干、称质量。称质量后的植物样品粉碎备用。

1.4 样品分析

尾矿基质理化性质的测定方法参照《土壤农业化

表1 尾矿与改良剂的基本理化性质(n=5,平均值±标准差)

Table 1 General physico-chemical properties of the mine tailings and amendments used in the study (n=5, mean ± SE)

参数 Parameters	尾矿 Tailings	污泥 MS	酒糟 SSV	中药渣 MHR	蘑菇渣 SMC	鸡粪 CM	秸秆 CS	木屑 WS	树木剪枝 GR
黏粒 Clay/%	13±0.25	—	—	—	—	—	—	—	—
粉粒 Silt/%	22±0.30	—	—	—	—	—	—	—	—
砂粒 Sand/%	65±0.42	—	—	—	—	—	—	—	—
酸碱度 pH	7.9±0.02	5.8±0.11	6.3±0.09	5.9±0.09	6.6±0.15	6.9±0.24	6.5±0.15	5.6±0.08	5.7±0.06
电导率 EC/(dS·m ⁻¹)	1.5±0.45	1.9±0.27	2.2±0.57	3.3±0.36	2.6±0.44	2.4±0.15	1.9±0.23	0.40±0.01	2.2±0.01
有机质 OM/%	0.08±0.029	16.7±0.93	13.6±0.74	14.1±0.33	11.9±0.47	13.6±1.33	13.1±0.67	6.9±0.13	6.9±0.12
全磷 TP/(mg·kg ⁻¹)	16±0.89	897±93	740±36	590±23	651±33	977±85	547±13	64.8±2.2	475±26.9
全氮 TN/(g·kg ⁻¹)	0.32±0.01	15±0.28	7.7±0.15	12±0.52	8.8±0.23	19±0.13	8.2±0.14	0.09±<0.01	0.73±0.01
全钾 TK/(mg·kg ⁻¹)	405±32	2 686±100	1 659±97	2 091±66	1 606±345	2 970±138	2 702±146	949±10.7	697±33.2
砷 As/(mg·kg ⁻¹)	2.4±0.08	1.2±0.55	0.45±0.10	0.37±0.20	1.0±0.19	1.4±0.21	0.32±0.10	0.42±0.11	<0.01±<0.01
镉 Cd/(mg·kg ⁻¹)	22±1.3	0.83±0.24	0.29±0.03	0.62±0.25	0.64±0.08	0.95±0.13	0.38±0.20	0.14±0.01	0.01±0.01
铬 Cr/(mg·kg ⁻¹)	24±1.8	13±1.1	1.6±0.12	6.2±0.48	4.9±0.23	8.0±1.2	3.6±0.83	2.2±0.06	0.02±0.01
铜 Cu/(mg·kg ⁻¹)	13±0.40	9.4±0.79	7.5±0.30	4.4±0.52	4.3±0.14	8.9±0.73	5.5±0.27	2.3±0.02	2.6±0.10
锰 Mn/(mg·kg ⁻¹)	412±66	86±14	32±1.9	70±6.8	63±5.4	123±25	54±4.5	<0.01±<0.01	116±3.9
镍 Ni/(mg·kg ⁻¹)	6.4±0.34	3.2±0.45	1.1±0.22	2.9±0.14	1.9±0.20	5.8±0.14	3.8±0.45	0.19±0.03	<0.01±<0.01
铅 Pb/(mg·kg ⁻¹)	600±2.1	114±13	9.9±3.58	4.7±0.53	2.3±0.26	71±0.56	2.7±0.50	3.1±0.13	1.3±0.06
锌 Zn/(mg·kg ⁻¹)	2 452±82.2	185±3.9	78±7.3	131±5.7	103±4.7	176±20	81±3.1	13.5±0.41	10.5±0.56
钙 Ca/(mg·kg ⁻¹)	623±24	354±57	155±11	163±24	326±24	330±48	159±36	2 398±26.4	6 467±102

学分析方法》^[16];其中pH值采用电位法、电导率采用电导法测定(土:水=1:2.5,质量比);有机质采用高温外热重铬酸钾氧化-容量法测定;有效磷采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定;铵态氮采用氯化钾浸提-靛酚蓝比色法测定;有效钾采用乙酸铵提取-电感耦合等离子体发射光谱法测定。

尾矿基质重金属总量采用硝酸-盐酸-高氯酸消化法测定^[17];重金属有效态采用DTPA(二乙基三胺五乙酸)浸提法测定^[18],称取10.00 g样品,加入20 mL DTPA浸提液(0.005 mol·L⁻¹DTPA+0.01 mol·L⁻¹氯化钙+0.1 mol·L⁻¹三乙醇胺,pH=7.3),在25℃振荡器180 r·min⁻¹振荡2 h,过滤。植物体内重金属采用浓硝酸-高氯酸消解法测定^[19],称取0.5 g植物样品放入消化管,加入5 mL浓硝酸浸泡过夜,第2 d放入90℃消化炉内加热30 min,于140℃下加热30 min,于180℃下加热1 h,取下消化管冷却、定容、过滤。植物浸提液和尾矿消解液中Cd、Cu、Pb、Zn含量使用iCAP6300型电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-AES美国,热电)进行测定。

尾矿基质酶活性的测定方法参照《土壤酶及其研究方法》^[20];其中磷酸酶采用对硝基苯磷酸钠比色法测定;脱氢酶采用三苯基氯化四氮唑比色法测定;脲酶采用靛酚蓝比色法测定;葡萄糖苷酶采用硝基苯水杨酸比色法测定。

1.5 数据处理

使用Excel 2010软件对数据的平均值及标准差

进行前期整理。利用SPSS 20.0软件对数据进行分析,利用单因素方差分析(One-way ANOVA)对不同处理间数据的差异性进行检验,并利用最小显著差数法(LSD)对数据进行多重比较,利用Pearson相关分析法对各植物参数与尾矿基质生物化学性质之间的关系进行分析。采用Origin 8.6软件进行科学制图。

2 结果与分析

2.1 不同有机废弃物改良铅锌尾矿基质后营养元素含量变化

由图1可知,尾矿组基质营养元素含量最少,有机质、有效磷、铵态氮、有效钾含量为0.25%、4.50 mg·kg⁻¹、0.60 mg·kg⁻¹、5.27 mg·kg⁻¹,与其相比,添加不同废弃物改良尾矿后均不同程度增加了营养元素含量。有机质增加了0.68~5.52倍;有效磷增加了1.50~14.46倍;铵态氮含量增加了1.62~4.59倍;有效钾增加了0.16~1.08倍。鸡粪组的有机质、有效磷显著高于其他处理组;污泥组的铵态氮显著高于除鸡粪组以外的各处理组;污泥组、鸡粪组的有效钾显著高于其余处理组。总体来看,鸡粪组对有机质、有效磷、有效钾提高效果最好,分别增加了5.52、14.46、1.08倍;对铵态氮增加效果最好的是污泥组,增加了4.59倍。

2.2 不同有机废弃物改良铅锌尾矿基质后DTPA提取态重金属含量变化

如图2所示,尾矿基质DTPA提取态重金属含量最高,DTPA-Cd、DTPA-Cu、DTPA-Pb、DTPA-Zn分别

表2 植物播种情况

Table 2 Plant planting situation

编号 Number	科名 Family name	物种名称 Specific name	拉丁名 Latin name	播种量 Seeding rate/g
1	禾本科	芒	<i>Miscanthus sinensis</i>	2
2	禾本科	狼尾草	<i>Pennisetum alopecuroides</i>	4
3	禾本科	狗牙根	<i>Cynodon dactylon</i>	2
4	豆科	胡枝子	<i>Lespedeza bicolor</i>	4
5	豆科	马棘	<i>Indigofera bungeana</i>	4
6	豆科	刺槐	<i>Robinia pseudoacacia</i>	10
7	菊科	苍耳	<i>Xanthium strumarium</i>	3
8	菊科	黄花蒿	<i>Artemisia annua</i>	3
9	菊科	加拿大飞蓬	<i>Erigeron canadensis</i>	2.4
10	苋科	藜	<i>Chenopodium album</i>	3
11	苋科	土荆芥	<i>Dysphania ambrosioides</i>	2.9
12	荨麻科	苕麻	<i>Boehmeria nivea</i>	3
13	忍冬科	斑花败酱	<i>Patrinia monandra</i>	1.1
14	泡桐科	白花泡桐	<i>Paulownia fortunei</i>	0.4
15	柏科	柏树	<i>Cupressus funebris</i>	6.6

为0.37、1.23、4.64、104.91 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,不同废弃物处理组与尾矿组相比,均不同程度减少了DTPA提取态重金属含量。DTPA-Cd降低了27.33%~62.06%;DTPA-Cu降低了6.98%~35.19%;DTPA-Pb降低了0.50%~32.41%;DTPA-Zn降低了19.37%~43.98%。不同废弃物处理组的DTPA-Cd、DTPA-Zn均显著低于尾矿组。污泥组、酒糟组、蘑菇渣组、秸秆组DTPA-Cu显著低于尾矿组。酒糟组、蘑菇渣组、鸡粪组DTPA-Pb显著低于尾矿组。总体来说,添加蘑菇渣、鸡粪、秸秆对DTPA-Cd降低效果较好,分别降低了62.06%、61.07%、56.74%;添加秸秆、酒糟、污泥降低DTPA-Cu效果较好,分别降低了35.19%、27.44%、26.54%;对DTPA-Pb降低效果较好的是鸡粪组、酒糟组、蘑菇渣组,分别降低了32.41%、29.93%、26.82%;而降低DTPA-Zn效果较好的是蘑菇渣组、酒糟组、秸秆组,分别降低了43.98%、43.04%、40.82%。

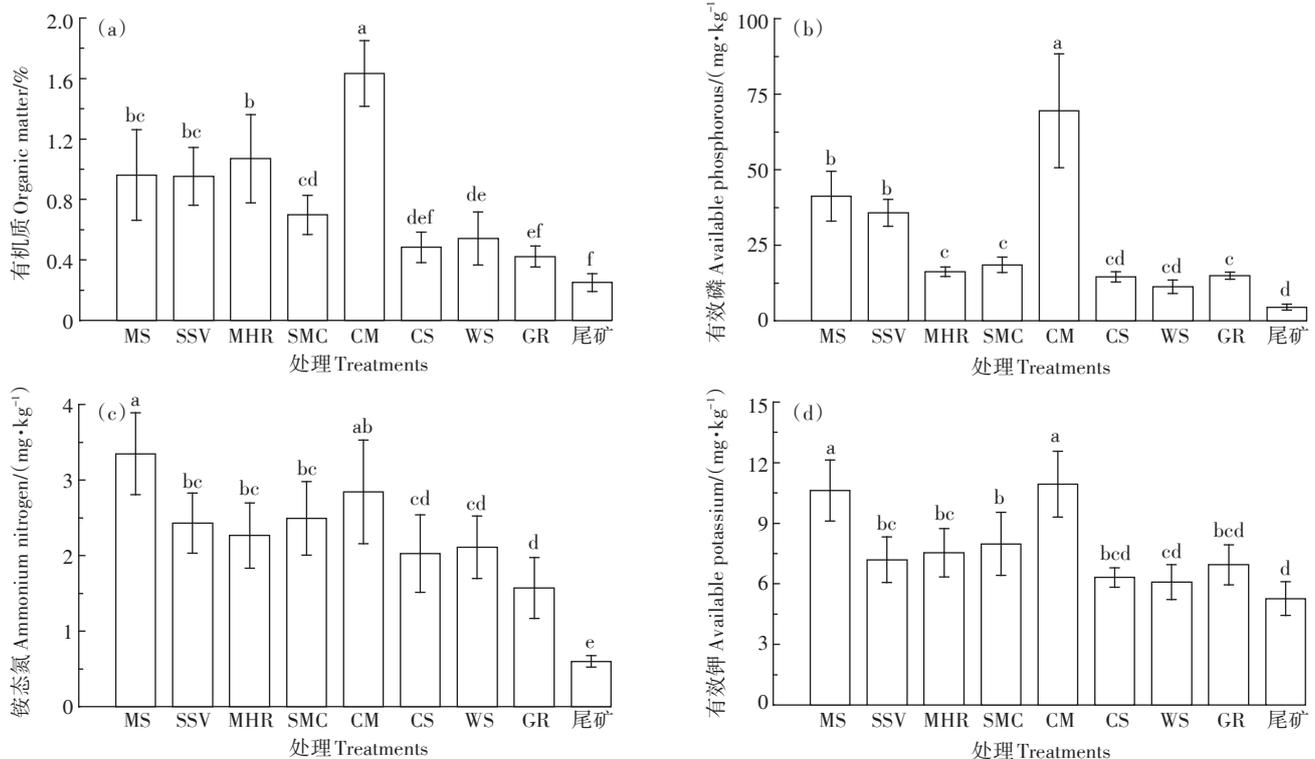
2.3 不同有机废弃物改良铅锌尾矿基质后酶活性变化

由图3可知,尾矿基质酶活性最低,脱氢酶、葡萄糖苷酶、脲酶、磷酸酶活性分别为0.02 $\mu\text{g TPF}\cdot\text{g}^{-1}$ 、40.86 $\mu\text{g saligenin}\cdot\text{g}^{-1}$ 、0.47 $\mu\text{g NH}_4^+-\text{N}\cdot\text{g}^{-1}$ 、25.77 μg

$\text{PNP}\cdot\text{g}^{-1}$,添加不同废弃物改良尾矿后均不同程度增加了酶活性。脱氢酶增加了0.08~11.00倍;葡萄糖苷酶增加了0.05~1.72倍;脲酶增加了0.59~17.38倍;磷酸酶增加了1.71~6.74倍。脱氢酶、脲酶均表现为污泥组、鸡粪组显著高于其余废弃物处理组。葡萄糖苷酶呈现出酒糟组显著高于其余组。磷酸酶为污泥组、酒糟组、鸡粪组显著高于其余组。总体上鸡粪组、污泥组对于脱氢酶、脲酶、磷酸酶活性的提高效果较好,脱氢酶分别提高了11.00、10.12倍,脲酶分别提高了17.38、16.74倍,磷酸酶分别提高了6.74、5.94倍;对葡萄糖苷酶活性的增加效果较好的是酒糟组、秸秆组,分别提高了1.72、1.15倍。

2.4 不同有机废弃物改良铅锌尾矿后植被变化

如图4所示,尾矿上植被盖度(1.00%)、生物量(4.12 g)均最低,与尾矿组比较,添加不同废弃物改良后植被盖度、生物量均表现出不同程度的增加趋势。生物量增加了1.59~215.57倍;盖度增加了12.75~84.75倍。生物量、盖度呈现出污泥组、鸡粪组显著高于其他7个处理组;酒糟组显著高于除污泥组、鸡粪组以外的处理组。其中添加污泥和鸡粪后对植被盖



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
Different lowercase letters indicate significant difference among different treatments of the same index ($P < 0.05$). The same below

图1 不同有机废弃物处理对尾矿基质营养元素含量的影响($n=4$, 平均值 \pm 标准差)

Figure 1 Effects of different organic wastes on nutrient content in Pb-Zn mine tailings ($n=4$, mean \pm SE)

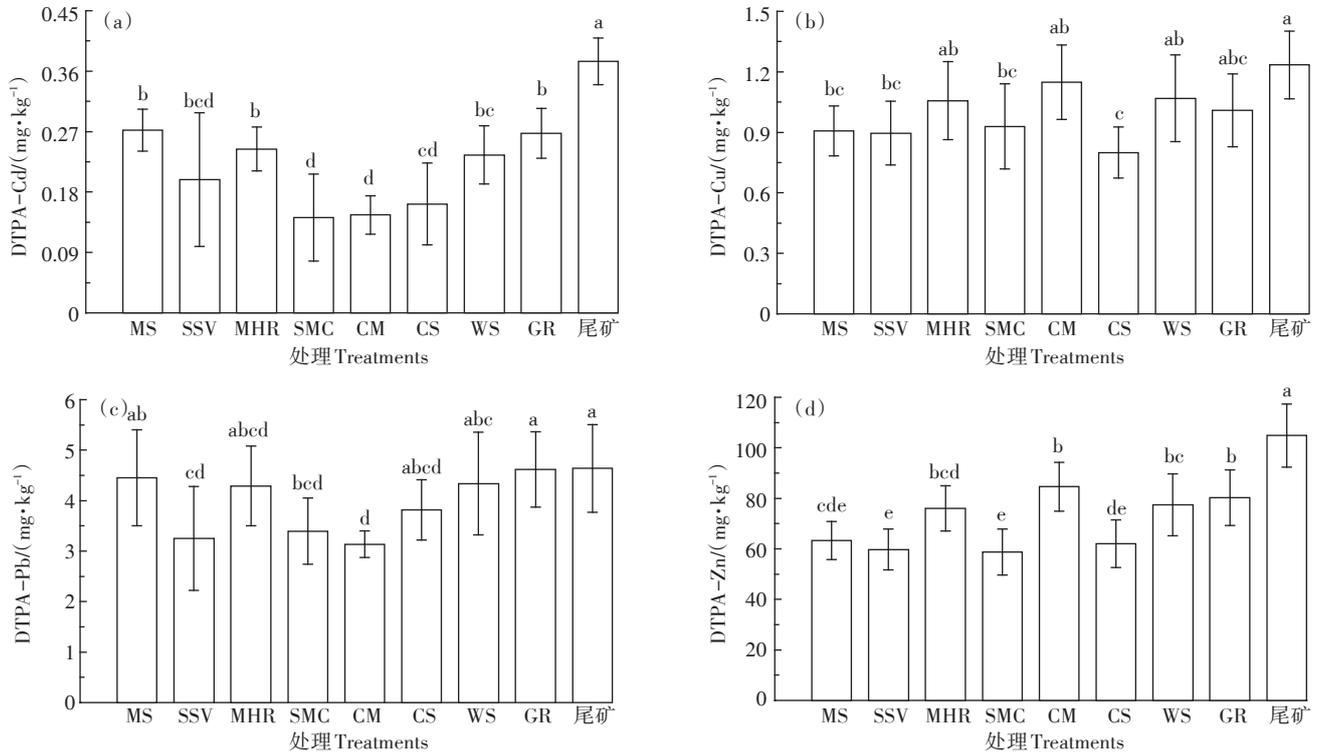


图2 不同有机废弃物处理对尾矿基质DTPA提取态重金属含量的影响($n=4$, 平均值±标准差)

Figure 2 Effects of different organic wastes on DTPA-extracted heavy metal content in Pb-Zn mine tailings ($n=4$, mean \pm SE)

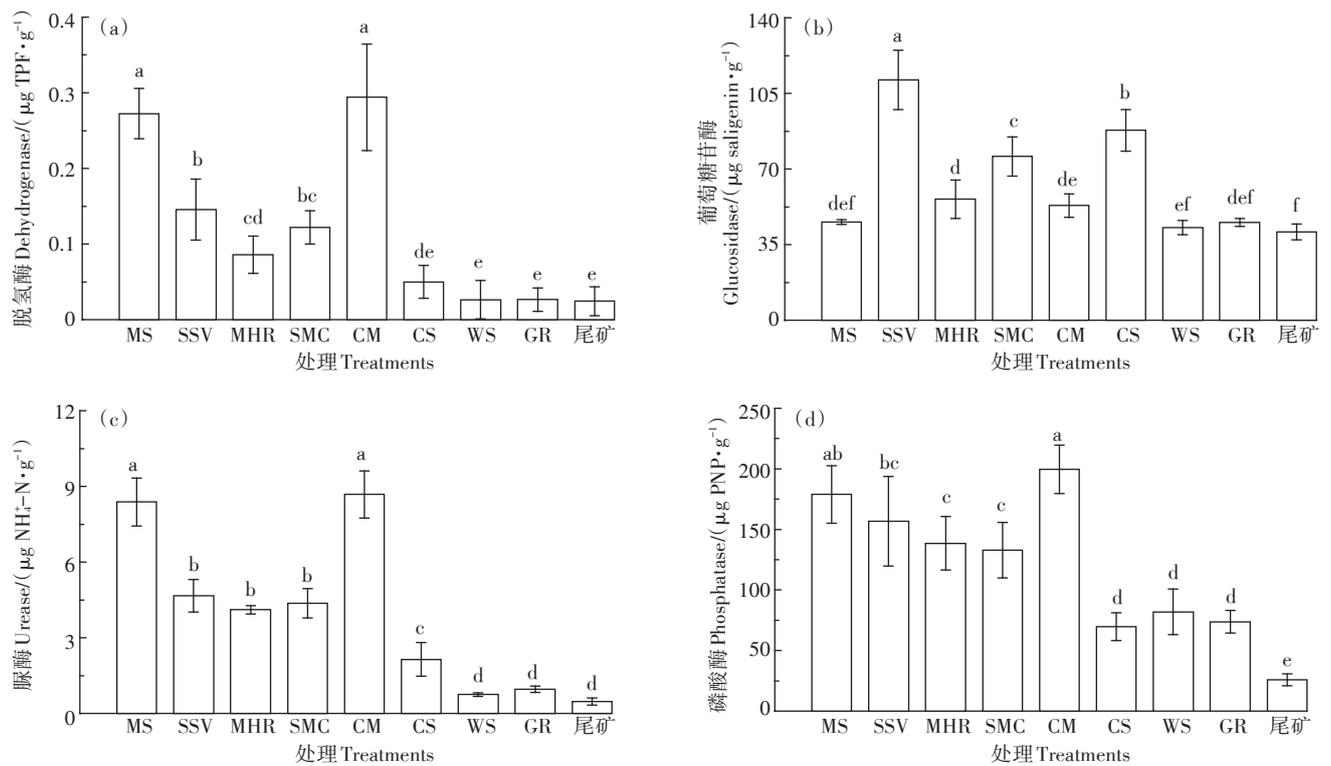


图3 不同有机废弃物处理对尾矿基质酶活性的影响($n=4$, 平均值±标准差)

Figure 3 Effects of different organic wastes on enzyme activity in Pb-Zn mine tailings ($n=4$, mean \pm SE)

度、生物量改良效果最为显著,生物量分别增加了215.57、214.80倍;盖度分别增加了80.25、84.75倍。

2.5 不同有机废弃物改良铅锌尾矿后植物体内重金属含量变化

植物体内重金属含量为采集的多种植物地上部重金属含量的均值。如表3所示,尾矿组植物体内Cd、Cu、Pb、Zn含量均最高,分别为6.73、8.78、23.03、1 114.14 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,而添加不同废弃物改良尾矿后,植物体内各重金属均表现出不同程度的降低趋势。其中Cd降低了23.18%~82.76%;Cu降低了3.30%~39.52%;Pb降低了67.30%~81.46%;Zn降低了44.98%~75.60%。除尾矿组与污泥组、木屑组、鸡粪组植物体内Cu含量不存在显著差异之外,其余废弃物处理组植物体内Cd、Cu、Pb、Zn含量均显著低于尾矿组。总体上酒糟组降低植物体内Cd、Cu、Pb幅度最大,分别降低了82.76%、39.52%、81.46%;污泥组降低植物体内Zn效果最好,酒糟组次之,分别降低了

75.60%、75.28%。

2.6 尾矿基质生物化学性质与植物参数的相关性分析

如表4所示,植被盖度、生物量与尾矿基质脱氢酶、脲酶、磷酸酶、有机质、有效磷、铵态氮、有效钾呈极显著正相关($P<0.01$,下同),植被盖度与尾矿基质DTPA-Cd、DTPA-Zn呈显著负相关($P<0.05$,下同);植物Cd与尾矿基质DTPA-Cd、DTPA-Cu、DTPA-Zn呈极显著正相关,与葡萄糖苷酶呈极显著负相关,与铵态氮呈显著负相关;植物Cu与尾矿基质DTPA-Zn呈极显著正相关,与葡萄糖苷酶呈极显著负相关,与DTPA-Cd呈显著正相关;植物Pb与尾矿基质DTPA-Cd、DTPA-Cu、DTPA-Zn呈极显著正相关,与脲酶、磷酸酶、有机质、铵态氮呈极显著负相关,与脱氢酶、葡萄糖苷酶、有效磷、有效钾呈显著负相关;植物Zn与尾矿基质DTPA-Cd、DTPA-Zn呈极显著正相关,与脱氢酶、葡萄糖苷酶、脲酶、磷酸酶、有机质、有效磷、铵态氮、有效钾呈极显著负相关,与DTPA-Cu呈显著正

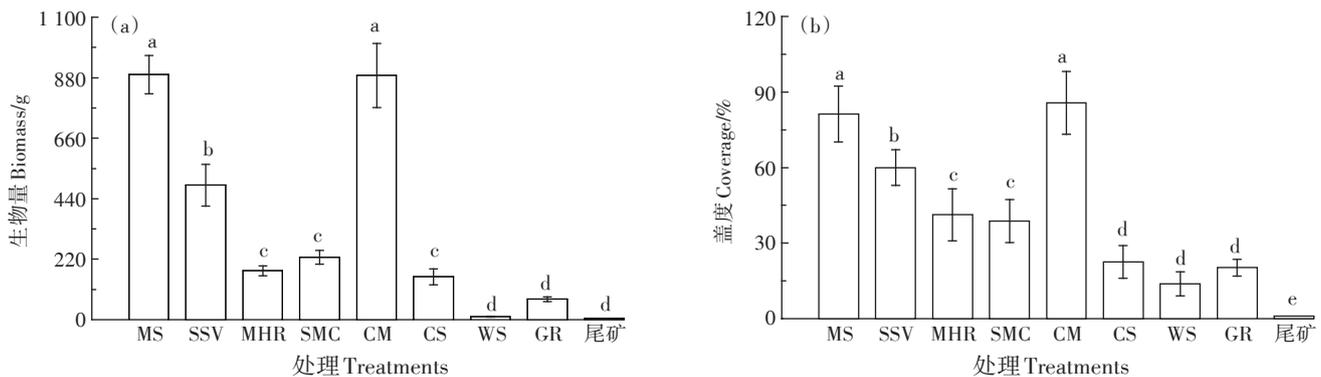


图4 不同有机废弃物处理对植被盖度和生物量的影响($n=4$, 平均值 \pm 标准差)

Figure 4 Effects of different organic wastes on vegetation coverage and biomass ($n=4$, mean \pm SE)

表3 不同有机废弃物处理对植物体内重金属含量的影响($n=4$, 平均值 \pm 标准差)

Table 3 Effects of different organic wastes on heavy metal contents in plants ($n=4$, mean \pm SE)

处理 Treatments	Cd/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	Cu/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	Pb/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	Zn/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
MS	2.46 \pm 1.08cd	7.95 \pm 1.48ab	5.26 \pm 0.33bc	271.82 \pm 26.88c
SSV	1.16 \pm 0.40e	5.31 \pm 0.50d	4.27 \pm 1.26c	275.43 \pm 64.07c
MHR	1.77 \pm 0.45de	7.18 \pm 0.89bc	5.56 \pm 1.22bc	346.84 \pm 111.47c
SMC	1.66 \pm 0.20de	6.42 \pm 0.19cd	6.34 \pm 1.68bc	352.29 \pm 67.63c
CM	5.17 \pm 1.30b	8.49 \pm 1.42ab	6.19 \pm 1.17bc	355.33 \pm 81.25c
CS	1.59 \pm 0.52de	6.23 \pm 0.33cd	5.57 \pm 1.10bc	309.79 \pm 91.18c
WS	3.51 \pm 0.92c	7.13 \pm 0.89bc	6.51 \pm 0.95bc	613.03 \pm 80.79b
GR	2.65 \pm 0.70cd	7.53 \pm 1.42abc	7.53 \pm 1.06b	582.92 \pm 113.42b
尾矿	6.73 \pm 1.20a	8.78 \pm 1.13a	23.03 \pm 4.86a	1 114.14 \pm 147.52a

注:同一列数值后的不同小写字母代表同一测定指标不同处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters after the same column of values represent significant differences among different treatments of the same measurement index ($P<0.05$).

表4 尾矿基质性质与植物参数的相关性分析

Table 4 Pearson's correlation coefficients between tailings properties and plant parameters

尾矿基质性质 Tailings properties	植物参数 Plant parameters					
	生物量 Biomass	盖度 Coverage	Cd	Cu	Pb	Zn
DTPA-Cd	-0.288	-0.390*	0.430**	0.331*	0.606**	0.603**
DTPA-Cu	-0.094	-0.130	0.427**	0.284	0.507**	0.406*
DTPA-Pb	-0.315	-0.291	0.121	0.085	0.314	0.312
DTPA-Zn	-0.228	-0.348*	0.711**	0.518**	0.740**	0.664**
脱氢酶 Dehydrogenase	0.955**	0.905**	0.017	0.220	-0.350*	-0.500**
葡萄糖苷酶 Glucosidase	0.091	0.174	-0.567**	-0.659**	-0.371*	-0.467**
脲酶 Urease	0.935**	0.921**	-0.093	0.115	-0.429**	-0.611**
磷酸酶 Phosphatase	0.827**	0.894**	-0.263	0.011	-0.587**	-0.697**
有机质 OM	0.712**	0.809**	-0.036	0.111	-0.469**	-0.545**
有效磷 AP	0.894**	0.879**	0.022	0.074	-0.367*	-0.488**
铵态氮 NH ₄ -N	0.673**	0.736**	-0.398*	-0.108	-0.683**	-0.749**
有效钾 AK	0.829**	0.813**	-0.009	0.303	-0.399*	-0.495**

注:**极显著相关($P<0.01$),*显著相关($P<0.05$)。

Note:** extremely significant correlation($P<0.01$),* significant correlation($P<0.05$).

相关。

3 讨论

土壤养分是植物生长发育的基础,植被对土壤养分有效性及生物学过程具有重要决定性作用^[21]。尾矿基质缺乏植物生长所需营养元素是限制尾矿修复的一个重要因素^[22]。有研究表明,在铅锌尾矿中添加有机改良剂可补充植物生长所需C、N、P、K等营养元素^[9,13,23],本研究结果与前人研究一致。本研究中,在尾矿上添加不同有机废弃物改良后均增加了尾矿基质营养元素含量。其中鸡粪组改良尾矿基质有机质、有效磷、有效钾的效果最优,污泥组对于尾矿基质铵态氮的改良最好,对于有效磷、有效钾的增加幅度仅次于鸡粪组,说明添加鸡粪、污泥可以显著改善尾矿基质化学性质,为植物生长创造良好的养分条件。原因主要是鸡粪、污泥本身含有较高的C、N、P、K元素,添加入尾矿后,能显著增加尾矿基质肥力,有利于植物的生长。总体上,污泥组、酒糟组、中药渣组、蘑菇渣组、鸡粪组对于尾矿基质营养元素的改良效果优于秸秆组、木屑组、树木剪枝组,产生这一结果可能与改良剂本身的营养元素、凋落物归还尾矿基质的养分以及改良剂与尾矿基质中的微生物等有关。

重金属有效态是重金属中易被植物吸收利用的部分,故一般可用重金属有效态含量来衡量重金属毒性的大小,而重金属毒性也是限制植物在尾矿上定居的主要因素之一^[22]。本研究中,不同废弃物组与尾矿

组相比均减少了尾矿基质DTPA提取态Cd、Cu、Pb、Zn含量,说明添加不同废弃物后均一定程度降低了重金属对植物的毒害作用。蘑菇渣组降低DTPA-Cd、DTPA-Zn效果最好,鸡粪组降低DTPA-Pb效果最好,原因可能与蘑菇渣、鸡粪的性质有关。蘑菇渣表面存在羟基、磷酸基、酚基等吸附性官能团,对重金属离子具有较强的吸附能力^[24]。有研究发现有机质对重金属有效态含量有较大的正向作用^[25],而鸡粪组所含有机质最高,有机质对尾矿基质中重金属离子具有较强的吸附、络合能力,故鸡粪可能会通过影响重金属形态方式来降低重金属活性。对比尾矿组,尾矿基质营养元素、酶活性、植被盖度以及生物量均显著提高的鸡粪组、污泥组对于降低DTPA提取态重金属含量效果不是很好,而其他处理组降低DTPA提取态重金属含量的总体规律也不明显,造成差异的原因可能是DTPA提取态重金属含量降低过程复杂,受影响因素较多,如改良剂本身含有一定量的重金属,添加不同改良剂后发生一系列吸附、络合、沉淀反应,引起不同的土壤理化性质改变等影响,具体原因需要进一步探索研究。

尾矿组植物体内Cd、Cu、Pb、Zn含量最高,主要原因是尾矿基质中Cd、Cu、Pb、Zn有效态含量最高,被植物吸收最多。添加不同废弃物改良尾矿后,植物体内各重金属均呈现出不同程度的降低趋势,一是因为添加废弃物改良剂后减少了尾矿中DTPA提取态重金属含量,降低植物对重金属的吸收;二是因为在尾矿上添

加废弃物改良剂增加了植被生物量,一定程度稀释了植物体内的重金属浓度,减少植物重金属的累积量^[26]。从植被稳定方面考虑,植物体内重金属从地下部分转移到地上部分的量应尽可能少,才能有效防止重金属进入食物链^[27]。本研究在尾矿基质中添加不同改良剂后,除木屑组、树木剪枝组的植物地上部分Zn含量超过家畜类重金属毒性限制标准,其余处理组的植物地上部分重金属Cd、Cu、Pb、Zn含量均明显低于家畜类重金属毒性限制标准($Cd \leq 10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $Cu \leq 40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $Pb \leq 100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $Zn \leq 500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[28]。可以看出,在尾矿中添加污泥、酒糟、中药渣、蘑菇渣、鸡粪、秸秆均有利于植被的稳定,而添加木屑、树木剪枝相对于其余处理方式可能会对周围动物、人类造成潜在危害。木屑组、树木剪枝组植物体内Zn含量超标,亦可能是导致其植被盖度、生物量均比其余处理组低的原因之一。

土壤酶活性代表微生物的活性,同时又是土壤功能最重要的指标^[29],其对营养元素和重金属敏感度高,常被用来评价污染土壤改良的修复效果或重金属污染的土壤质量^[30]。本研究中,尾矿组脱氢酶、葡萄糖苷酶、脲酶、磷酸酶活性均低于各处理组,说明尾矿环境抑制了尾矿基质酶活性。可能是由于尾矿基质中重金属与酶分子活性中心的功能基团(巯基和含咪唑等)配位结合,形成稳定的络合物,与底物间产生竞争性的抑制作用^[31];也可能是尾矿环境破坏后,微生物生长、繁殖被抑制,体内酶的合成、分泌减少,致使酶活性下降。而添加不同废弃物改良尾矿基质后酶活性均不同程度增加了,这主要与废弃物自身含有一部分酶,改良后营养元素增加,重金属毒性减轻,有助于微生物生长繁殖有关。总体上鸡粪组脱氢酶、脲酶、磷酸酶的含量最高,污泥组次之,与尾矿基质营养元素增长呈现出的规律一致,均为鸡粪、污泥改良效果较优。

生物量是植物生长状态的最主要衡量指标,植物生长的好坏可以通过生物量的变化直接表现出来^[32]。本研究添加不同废弃物改良铅锌尾矿基质后,植被盖度、生物量均表现出不同程度的增加趋势,这表明8种改良剂均有助于植物在尾矿上的存活、定居。添加污泥、鸡粪后对植被盖度、生物量改良效果最为显著,可能是添加鸡粪、污泥改良后,尾矿基质养分、酶活性显著增加,植物生长良好,进而植被盖度和生物量也显著提高,本研究相关性分析结果显示,植被盖度、生物量与尾矿基质脱氢酶、脲酶、磷酸酶、有机质、有效磷、铵态氮、有效钾呈极显著正相关,表明植物生长过程中生物量、盖度增长的程度与尾矿基质酶活性、营

养元素含量密不可分,这充分体现了尾矿基质、微生物、植物三者之间的紧密联系。值得注意的是鸡粪组、污泥组在降低尾矿重金属毒性方面不是最好的,但是在尾矿中添加鸡粪、污泥后植物长势最好,可能在该铅锌尾矿上,重金属毒性不是限制植物生长的最主要因素,最主要限制因素可能是尾矿基质养分、酶活性等。一些耐重金属的植物,比如本研究中的狗牙根,可以在具有较高重金属浓度的铅锌尾矿上生长良好^[33],这为本研究结果提供了一种可能的解释。

虽然本研究在短期内减轻了铅锌尾矿的重金属毒性高、养分含量低、植物难以存活和定居等问题,但是有机改良剂的化学稳定性可能导致尾矿基质金属生物有效性降低,而尾矿基质中总金属浓度保持不变,稳定的重金属有可能再次被释放而危害动植物的健康。因此在这方面,需要进行长期监测研究。

4 结论

(1)添加8种废弃物改良剂增加了尾矿基质有机质、有效磷、铵态氮、有效钾、脱氢酶、葡萄糖苷酶、脲酶、磷酸酶含量以及植被生物量、盖度,改善了尾矿基质的生物化学性质,有助于植物在尾矿上定居。其中添加鸡粪、污泥对于尾矿基质营养元素、酶活性以及植被生物量、盖度的改良效果最明显。

(2)添加8种废弃物改良剂均降低了尾矿基质DTPA-Cd、DTPA-Cu、DTPA-Pb、DTPA-Zn及其植物体内Cd、Cu、Pb、Zn含量,缓解了尾矿的重金属毒性,降低对修复植物的毒害作用。其中蘑菇渣组降低DTPA-Cd、DTPA-Zn效果最好,秸秆组降低DTPA-Cu效果最好,鸡粪组降低DTPA-Pb效果最好。酒糟组降低植物体内Cd、Cu、Pb幅度最大,污泥组降低植物体内Zn效果最好。

参考文献:

- [1] 张会敏, 袁艺, 焦慧, 等. 相思谷尾矿8种定居植物对重金属吸收及富集特性[J]. 生态环境学报, 2015, 24(5): 886-891.
ZHANG Hui-min, YUAN Yi, JIAO Hui, et al. Study on heavy metal absorption and enrichment characteristics by 8 plants species settled naturally in Xiangsigu copper tailings[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24(5): 886-891.
- [2] 于广明, 宋传旺, 潘永战, 等. 尾矿坝安全研究的国外新进展及我国的现状和发展态势[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增刊1): 3238-3248.
YU Guang-ming, SONG Chuan-wang, PAN Yong-zhan, et al. Review of new progress in tailing dam safety in foreign research and current state with development trend in China[J]. *Chinese Journal of Rock Me-*

- chanics and Engineering, 2014, 33(Suppl 1): 3238-3248.
- [3] 蔡嗣经, 杨鹏. 金属矿山尾矿问题及其综合利用与治理[J]. 中国工程科学, 2000, 2(4): 89-92.
CAI Si-jing, YANG Peng. Tailings problems and tailings utilization and treatments in the metal mines[J]. *Engineering Science*, 2000, 2(4): 89-92.
- [4] 周科平, 刘福萍, 胡建华, 等. 尾矿库溃坝灾害链及断链减灾控制技术[J]. 灾害学, 2013, 28(3): 24-29.
ZHOU Ke-ping, LIU Fu-ping, HU Jian-hua, et al. Research of tailings dam-break disaster chain and chain-cutting disaster mitigation control technology[J]. *Journal of Catastrophology*, 2013, 28(3): 24-29.
- [5] 余顺慧, 张静, 陈中华, 等. 香根草对镉毒害的生理响应——采用傅里叶变换红外光谱法(FTIR)[J]. 生态学报, 2019, 39(19): 7267-7273.
YU Shun-hui, ZHANG Jing, CHEN Hua-hua, et al. Physiological responses of *Vetiveria zizanioides* to cadmium stress by fourier transform infrared spectroscopy[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(19): 7267-7273.
- [6] Lee S H, Ji W H, Lee W S, et al. Influence of amendments and aided phytostabilization on metal availability and mobility in Pb/Zn mine tailings[J]. *Journal of Environmental Management*, 2014, 139: 15-21.
- [7] 孙清斌, 尹春芹, 邓金锋, 等. 施用外源物对尾矿土壤种植胡枝子修复效应初探[J]. 土壤, 2019, 51(5): 986-994.
SUN Qing-bin, YIN Chun-qin, DENG Jin-feng, et al. Remediation effects of xenobiotic applications on mine tailing soils planted with *Lespedeza* species[J]. *Soils*, 2019, 51(5): 986-994.
- [8] Rodríguez L, Gómez R, Sánchez V, et al. Chemical and plant tests to assess the viability of amendments to reduce metal availability in mine soils and tailings[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(7): 6046-6054.
- [9] 李凤梅, 杨胜香, 彭禧柱, 等. 中药渣配合氮磷肥施用对铅锌尾矿的改良效果研究[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(11): 2114-2119.
LI Feng-mei, YANG Sheng-xiang, PENG Xi-zhu, et al. Effects of medicinal herb residue combined with nitrogen and phosphorus fertilizers on plant growth and physico-chemical properties of a Pb/Zn mine tailings[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(11): 2114-2119.
- [10] 张晓君, 杨胜香, 段纯, 等. 蘑菇渣作为改良剂对铅锌尾矿改良效果研究[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(3): 526-531.
ZHANG Xiao-jun, YANG Sheng-xiang, DUAN Chun, et al. Amelioration of lead-zinc tailings by spent mushroom compost: Effects on growth of *Lolium perenne* L. and physico-chemical properties of tailings[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(3): 526-531.
- [11] 悦飞雪, 李继伟, 王艳芳, 等. 施用秸秆生物炭和鸡粪对镉胁迫下玉米生长及镉吸收的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(10): 2118-2126.
YUE Fei-xue, LI Ji-wei, WANG Yan-fang, et al. Effects of soil amendments with stalk-derived biochar and chicken manure on the growth and Cd uptake of maize under Cd stress[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(10): 2118-2126.
- [12] 朱佳文, 邹冬生, 向言词, 等. 铅锌尾矿重金属胁迫下秸秆对蓖麻生理特性和重金属积累的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2012, 38(3): 325-329.
ZHU Jia-wen, ZOU Dong-sheng, XIANG Yan-ci, et al. Effects of straw addition on physiological parameters and uptake of heavy metals in *Ricinus communis* under the stress of Pb/Zn mine tailing[J]. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences)*, 2012, 38(3): 325-329.
- [13] Li X F, Bond P L, Van Nostrand J D, et al. From lithotroph-to organotroph-dominant: Directional shift of microbial community in sulphidic tailings during phytostabilization[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 12978.
- [14] 杨胜香, 李凤梅, 彭禧柱, 等. 不同碳氮磷源改良剂对铅锌尾矿废弃地植被与土壤性质的影响[J]. 环境科学, 2019, 40(9): 4253-4261.
YANG Sheng-xiang, LI Feng-mei, PENG Xi-zhu, et al. Effects of amendments with different C/N/P ratios on plant and soil properties of a Pb-Zn mine tailings[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(9): 4253-4261.
- [15] 张学霞, 朱清科, 吴根梅, 等. 数码照相法估算植被盖度[J]. 北京林业大学学报, 2008, 30(1): 164-169.
ZHANG Xue-xia, ZHU Qing-ke, WU Gen-mei, et al. Vegetation coverage assessment by digital photos[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2008, 30(1): 164-169.
- [16] 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, 1999.
LU Ru-kun. Chemical analysis of soil agriculture[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999.
- [17] McGrath S P, Cunliffe C H. A simplified method for the extraction of the metals Fe, Zn, Cu, Ni, Cd, Pb, Cr, Co and Mn from soils and sewage sludges[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1985, 36(9): 794-798.
- [18] Lindsay W L, Norvell W A. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1978, 42(3): 421-428.
- [19] Allen S E. Chemical analysis of ecological materials[M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1989.
- [20] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
GUAN Song-yin. Soil enzyme and research methods[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1986.
- [21] 舒媛媛, 黄俊胜, 赵高卷, 等. 青藏高原东缘不同树种人工林对土壤酶活性及养分的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(2): 394-402.
SHU Yuan-yuan, HUANG Jun-sheng, ZHAO Gao-juan, et al. Effects of afforestation with different tree species on soil enzyme activities and nutrient content in eastern Qinghai-Tibetan Plateau, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(2): 394-402.
- [22] Stumbea D, Chicos M M, Nica V. Effects of waste deposit geometry on the mineralogical and geochemical composition of mine tailings[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 368: 496-505.
- [23] Li Z Y, Yang S X, Peng X Z, et al. Field comparison of the effectiveness of agricultural and nonagricultural organic wastes for aided phytostabilization of a Pb-Zn mine tailings pond in Hunan Province, China[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2018, 20(12):

- 1264-1273.
- [24] Chen G Q, Zeng G M, Tu X, et al. A novel biosorbent: Characterization of the spent mushroom compost and its application for removal of heavy metals[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2005, 17(5): 756-760.
- [25] 钟晓兰, 周生路, 李江涛, 等. 土壤有效态Cd、Cu、Pb的分布特征及影响因素研究[J]. *地理科学*, 2010, 30(2): 254-260.
ZHONG Xiao-lan, ZHOU Sheng-lu, LI Jiang-tao, et al. Soil available Cd, Cu, Pb distribution characteristic and its influencing factors [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2010, 30(2): 254-260.
- [26] 张云青, 张涛, 李洋, 等. 畜禽粪便有机肥中重金属在不同农田土壤中生物有效性动态变化[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(1): 87-96.
ZHANG Yun-qing, ZHANG Tao, LI Yang, et al. Bioavailability dynamics of heavy metals in livestock and poultry manure added to different farmland soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(1): 87-96.
- [27] Valente T, Gomes P, Pamplona J, et al. Natural stabilization of mine waste-dumps-evolution of the vegetation cover in distinctive geochemical and mineralogical environments[J]. *Journal of Geochimical Exploration*, 2012, 123: 152-161.
- [28] National Research Council. Mineral tolerance of animals[M]. Washington: National Academies Press, 2005.
- [29] 李华, 贺洪军, 李腾飞, 等. 不同地下滴灌制度下黄瓜根际微生物活性及功能多样性[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(8): 2349-2354.
LI Hua, HE Hong-jun, LI Teng-fei, et al. Microbial activity and functional diversity in rhizosphere of cucumber under different subsurface drip irrigation scheduling[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(8): 2349-2354.
- [30] Li J J, Zhou X M, Yan J X, et al. Effects of regenerating vegetation on soil enzyme activity and microbial structure in reclaimed soils on a surface coal mine site[J]. *Applied Soil Ecology*, 2015, 87(3): 56-62.
- [31] 张飞, 罗学刚, 陈功亮, 等. 铀对土壤微生物数量及酶活性的影响[J]. *安全与环境学报*, 2016, 16(6): 370-376.
ZHANG Fei, LUO Xue-gang, CHEN Gong-liang, et al. Effect of the uranium radiation on the change of the microbial amount in the soil and the enzyme activity[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2016, 16(6): 370-376.
- [32] 杨鑫, 张启超, 孙淑云, 等. 水深对苦草生长及叶片PS II光化学特性的影响[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(6): 1623-1631.
YANG Xin, ZHANG Qi-chao, SUN Shu-yun, et al. Depth of grass growth and leaf PS II photochemical characteristics[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(6): 1623-1631.
- [33] Ye Z H, Wong J W C, Wong M H, et al. Revegetation of Pb/Zn mine tailings, Guangdong Province, China[J]. *Restoration Ecology*, 2000, 8(1): 87-92.