

中药渣配合氮磷肥施用对铅锌尾矿的改良效果研究

李凤梅, 杨胜香*, 彭禧柱, 张晓君, 彭清静

(吉首大学生物资源与环境科学学院, 锰锌矿业重金属污染综合防治技术湖南省工程实验室, “锰锌钒产业技术”协同创新中心, 湖南吉首 416000)

摘要: 采用盆栽实验, 在铅锌尾矿中添加中药渣、氮肥、磷肥及其组合, 从植物生长、营养元素、土壤酶活性、尾矿及植物重金属含量等方面研究其对铅锌尾矿的改良效果。结果表明: 添加中药渣配合氮磷肥不同程度地促进了黑麦草的生长, 增加了有机质、铵态氮、有效磷含量, 提高了土壤酶活性, 降低了尾矿及植物中重金属含量, 其中中药渣、中药渣+氮肥、中药渣+磷肥, 中药渣+氮肥+磷肥处理组效果较好; 典范对应分析表明, 中药渣、中药渣+氮肥、中药渣+磷肥、中药渣+氮肥+磷肥处理与有机质、铵态氮、有效磷、脱氢酶、 β -葡萄糖苷酶、脲酶和磷酸酶有较强的相关性。综合分析表明, 在铅锌尾矿的改良修复中添加中药渣作为改良剂, 配合氮磷肥施用有助于缓解尾矿重金属毒性, 改善营养状况, 促进微生物活性, 有利于尾矿废弃地的生态恢复。

关键词: 铅锌尾矿; 基质改良; 中药渣; 氮肥; 磷肥

中图分类号: X753 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2015)11-2114-06 doi:10.11654/jaes.2015.11.011

Effects of Medicinal Herb Residue Combined with Nitrogen and Phosphorus Fertilizers on Plant Growth and Physico-chemical Properties of a Pb/Zn Mine Tailings

LI Feng-mei, YANG Sheng-xiang*, PENG Xi-zhu, ZHANG Xiao-jun, PENG Qing-jing

(College of Bio-resources and Environmental Science, Hunan Provincial Engineering Laboratory of Control and Remediation of Heavy Metal Pollution from Mn-Zn Mining and the Collaborative Innovation Center of Manganese-Zinc-Vanadium Industrial Technology (the 2011 Plan of Hunan Province), Jishou University, Jishou 416000, China)

Abstract: Medicinal herb residue (MHR) is a waste material after making traditional Chinese medicine. Here we explored its potential to rehabilitate Pb/Zn mine tailings in a pot experiment. Plant growth and physico-chemical properties of a Pb/Zn mine tailings were evaluated after applying medicinal herb residue in combination with nitrogen and phosphorus fertilizers. Results showed that adding medicinal herb residue in combination with nitrogen and phosphorus fertilizers decreased concentrations of diethylene-triamine-pentaacetic acid (DTPA)-extractable Cd, Cu, Pb and Zn in the mine tailings, but increased content of organic matter, ammonium-N and available P and enhanced enzyme (dehydrogenase, β -glucosidase, urease and phosphatase) activities in the tailings. The metal concentrations in plant tissues were reduced by addition of medicinal herb residue. These effects were greater in all treatments with MHR than that without MHR. Canonical correspondence analysis (CCA) revealed that all the treatments were clustered into three groups based on the variation in physico-chemical properties of the mine tailings. The position of CK on the negative part of the Axis 1 indicated a positively correlation with the extractable metal concentrations. In contrast, the treatments of MHR, MHR+N, MHR+P and MHR+N+P were all positioned in the positive part of the Axis 1, suggesting higher organic matter, ammonium-N, available P and soil enzyme activities. In conclusion, our results showed that the application of medicinal herb residues together with nitrogen and/or phosphorus fertilizers should be a practical method to reduce metal bioavailability, increase soil nutrients, and enhance enzyme activities, thereby facilitating ecological restoration of mine tailings.

Keywords: Pb/Zn mine tailing; restoration; medicinal herb residue; nitrogen fertilizer; phosphorus fertilizer

金属采矿和冶炼过程会产生大量的废弃物, 其中, 尾矿因重金属毒性高、营养元素缺乏、物理结构不

良、极端 pH、表层不稳定、昼夜温差变化大等特点对环境的影响最为严重^[1]。一旦处置不当, 尾矿将成为一个持久的污染源, 极易通过风化、风蚀、水蚀、地下渗漏等途径对周边地区的农业生产和人群健康造成严重的影响, 且其环境影响具有普遍性、严重性、持久性和区域性等特点^[2]。

重金属尾矿的治理是世界性的难题^[3-4]。传统的尾矿治理方法主要包括开挖、转移、填埋等。这些方法虽简单有效, 但存在费用高、工程量大、易造成二次污染

收稿日期: 2015-07-06

基金项目: 国家自然科学基金(41561076, 41471257, 21266008); 湖南省高校科技创新团队支持计划“环境能源材料与武陵山区矿产资源精深加工”; “湘西矿业重金属污染治理与生态修复”湖南省研究生培养创新基地项目(201502); 吉首大学研究生科研创新项目

作者简介: 李凤梅(1989—), 女, 湖南娄底人, 硕士研究生, 从事重金属污染治理与生态恢复研究。E-mail: 1670514253@qq.com

* 通信作者: 杨胜香 E-mail: yangsx1998@163.com

等问题⁵。重金属原位基质改良技术因其成本低、见效快、不破坏土壤结构、易于实施、适合大面积推广等优势,在世界范围内得到了广泛的认可。该技术的核心是在尾矿中添加改良剂,因改良剂可改善尾矿基质的物理结构,增加营养成分,促进尾矿土壤的熟化过程,所以有利于植物的定居、生长⁶。

各种各样的无机或有机材料被作为改良剂,用于重金属尾矿治理时的基质改良,主要包括石灰、沸石、粉煤灰、赤泥、禽畜粪便、污水污泥、作物秸秆等⁷⁻⁹。大量研究表明,富含有机质的材料能够有效地改善尾矿基质的物理、化学性质,缓解重金属毒性,可促进尾矿土壤的熟化过程和植物的生长¹⁰。此外,在尾矿改良过程中通常添加氮肥、磷肥⁷,一方面可弥补大量元素(N、P)的不足,另一方面磷肥还具有吸附和沉淀重金属离子的功效。中药渣是中药熬制过程中产生的大量废渣。我国对中药的使用可追溯到远古年代,随着中医药事业的迅速发展,全国各大制药厂的中药渣产生量日益增加,年排放量高达3000万t¹¹。中药渣的处理已成为中药现代化进程中一个不可回避的问题,常规的处理方法一般包括焚烧、填埋、固定区域堆放,不仅要投入大量的资金,而且也造成了资源的浪费和环境的污染。近年来,研究人员就如何有效地综合利用药渣做了大量的研究工作,但利用中药渣作为改良剂用于环境污染修复的研究鲜有报道。

本研究以中药渣作为重金属尾矿的改良材料,配合氮肥、磷肥的施用,通过室内盆栽实验种植耐性植物黑麦草(*Lolium perenne* L.),研究中药渣、氮肥、磷肥及其组合对黑麦草生长及铅锌尾矿理化性质的影响,探讨中药渣配合氮磷肥施用对铅锌尾矿的改良效果,为中药渣的合理利用寻找途径,为尾矿库废弃地人工生态修复提供科学依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 供试材料

铅锌尾矿取自湘西太丰矿业有限公司铅锌尾矿库。中药渣采自湖南湘泉制药厂,其主要成分为中草药植物熬制中药后形成的废渣,有机质含量约为75%。氮肥为尿素[(NH₂)₂CO],磷肥为过磷酸钙[Ca(H₂PO₄)₂],种植植物为耐性植物黑麦草。尿素、过磷酸钙和黑麦草种子均购自当地农资公司。铅锌尾矿、中药渣基本理化性质见表1。

1.2 盆栽实验

尾矿和中药渣自然风干,碾碎。以800g尾矿为

表1 尾矿和中药渣的基本理化性质

Table 1 General physico-chemical properties of mine tailings and medicinal herb residue(mean ±S.E., n=5)

参数	尾矿	中药渣
粘粒/%	13.26±0.25	—
粉粒/%	22.31±0.30	—
砂粒/%	65.19±0.42	—
pH	8.48±0.09	5.01±0.03
电导率/dS·m ⁻¹	1.67±0.14	3.22±0.36
有机质/g·kg ⁻¹	2.85±0.17	831.25±10.4
TN/mg·kg ⁻¹	0.04±0.01	0.38±0.01
TP/mg·kg ⁻¹	12.12±2.34	636.63±109.87
TK/mg·kg ⁻¹	453.87±23.67	2 061.31±151.44
Cd/mg·kg ⁻¹	37.37±0.38	0.44±0.05
Cu/mg·kg ⁻¹	11.46±0.64	8.94±0.60
Cr/mg·kg ⁻¹	22.31±0.42	9.28±0.51
Mn/mg·kg ⁻¹	388.76±51.58	98.21±24
Pb/mg·kg ⁻¹	712.63±53.75	3.20±0.06
Zn/mg·kg ⁻¹	2 652.19±228.43	124.76±15.33

注:“—”为未检测。

植物盆栽基质,分别添加中药渣(MHR)、尿素(N肥)、过磷酸钙(P肥)及其组合,不添加改良剂的尾矿处理作为对照(CK),共设置8个处理,分别记作CK、MHR、N、P、MHR+N、MHR+P、N+P、MHR+N+P。根据我们前期研究及参考相关文献¹²⁻¹³,中药渣、氮肥、磷肥的添加量分别为30 000 g·kg⁻¹、150 g·kg⁻¹和300 g·kg⁻¹。将尾矿与改良剂充分混匀,装入直径为14 cm、高度约为9 cm的白色塑料盆,每组处理设置4个重复,共计32盆。选择颗粒饱满、成熟度一致的黑麦草种子,播于盆中,播种深度为0.5~1.0 cm,播种量为每盆30粒,种子萌发一周后间苗,每盆保留10棵健壮的幼苗,定期浇水。为避免位置效应的影响,盆栽植物按随机区组排列,每周调整一次位置,种植时间为4个月。

1.3 样品处理与分析

收获时将植株与栽培基质小心分离,植物样品按根、茎叶分开,用流动的自来水充分冲洗,然后用去离子水冲洗3次,晾干,于烘箱内70℃下烘至恒重,称量茎叶生物量和根系生物量。盆栽尾矿基质充分混匀,四分法分为两份:一份过20目的尼龙筛,储存于4℃用于土壤酶活性的测定;另一份风干,过100目的尼龙筛,用于营养元素与重金属有效态含量分析。

pH、电导率及重金属含量测定:pH值采用电位

法(土:水=1:2.5, W:V);电导率采用电导法(土:水=1:2.5, W:V)。重金属有效态含量采用 DTPA 浸提法^[14],称取 10.00 g 土样,加入 20 mL DTPA 浸提液 [0.005 mol·L⁻¹ DTPA+0.01 mol·L⁻¹ CaCl₂+0.1 mol·L⁻¹ TEA(三乙醇胺),pH=7.3],于 25 °C 振荡器 180 次·min⁻¹ 振荡 2 h 后过滤。植物重金属含量采用浓硝酸-高氯酸消解法^[15],称取烘干、磨碎、过 70 目筛的植物样品约 0.5 g,倒入消化管内,加 5 mL 浓 HNO₃ 浸泡过夜,第二天放入消化炉内,90 °C 加热 30 min、140 °C 加热 30 min、180 °C 加热 1 h 后冷却,加 1 mL HClO₄,然后 160 °C 加热 20 min、180 °C 加热 2 h,冷却,定容,过滤。尾矿浸提液和植物消解液中的重金属元素(Cd、Cu、Pb、Zn)含量采用 iCAP6300 型电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-AES 美国,热电)测定。

营养元素测定:有机质采用高温外热重铬酸钾氧化-容量法测定^[16];铵态氮采用 KCl 浸提-靛酚蓝比色法测定^[17];有效磷采用 NaHCO₃ 浸提-钼锑抗比色法测定^[18]。

土壤酶活性测定:脱氢酶采用 TTC(三苯基氯化四氮唑)比色法^[19],称取 5 g 鲜土,加入 5 mL 羟甲基氨基甲烷(0.1 mol·L⁻¹),黑暗中 25 °C 下培养 16 h,加入 25 mL 丙酮,在半黑暗情况下过滤,静置 1 h,在波长 546 nm 比色,活性以 μg TPF·g⁻¹ 表示。β-葡萄糖苷酶采用硝基苯水杨酸比色法^[20],称取 5 g 鲜土,加入 20 mL 醋酸缓冲液(2 mol·L⁻¹),37 °C 下培养 3 h,加入 0.5 mL 溴苯醌氯酰亚胺显色剂(0.6 mol·L⁻¹),过滤,放置 1 h 成色,在波长 578 nm 比色,活性以 μg 水杨苷·g⁻¹ 表示。脲酶采用靛酚蓝比色法^[21],称取 5 g 鲜土,加入 20 mL 硼酸缓冲液(0.1 mol·L⁻¹),37 °C 下培养 2 h,加入 2 mL 二氯异氰尿酸钠(3.9 mol·L⁻¹),静置 30 min,在波长 660 nm 比色,活性以 μg NH₄⁺-N·g⁻¹ 表示。磷酸酶采用对硝基苯磷酸钠比色法^[22],称取 1 g 鲜土,加入 4 mL 磷酸酶工作缓冲液,37 °C 下培养 1 h,加入 4 mL NaOH 溶液(0.5 mol·L⁻¹),摇匀,过滤,在波长 400 nm 比色,活性以 μg PNP·g⁻¹ 表示。

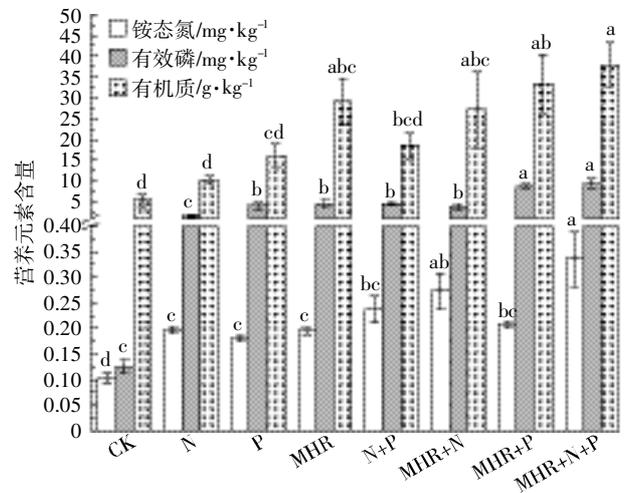
1.4 数据的处理和分析

数据的统计分析采用 SPSS16.0 进行,不同处理间的差异分析采用单因素方差分析法(One way ANOVA),最小显著差数法进行显著性检验,差异显著水平设为 $P<0.05$ 。典范对应分析(Canonical correspondence analysis, CCA)用于各处理组分析与尾矿理化因子的相关关系,比较不同处理组间的相似性和差异性。作图软件采用 Origin 8.0 和 Canoco 4.5。

2 结果与讨论

2.1 中药渣配合氮磷肥施用对尾矿营养元素的影响

营养元素缺乏,尤其 C、N、P 元素的缺乏是影响尾矿废弃地植物定居和生长的主要限制因子^[23]。由图 1 可以看出,铅锌尾矿基质有机质、铵态氮、有效磷含量较低,分别为 5.41、0.10、0.13 mg·kg⁻¹。添加中药渣、氮肥、磷肥及其组合显著增加了尾矿营养元素的含量。与对照(CK)相比,有机质、铵态氮、有效磷含量分别增加了 1.8~3.4、12.9~73.0、1.9~7.0 倍。尾矿营养状况的改善可以促进尾矿基质的土壤熟化过程,加速土壤微生物的活动,最终有利于植物的定居和生长。



不同小写字母表示同一营养元素间差异显著($P<0.05$)

图 1 中药渣配合氮磷肥施用对尾矿营养元素的影响

Figure 1 Effect of medicinal herb residue in combination with nitrogen and phosphorus fertilizers on organic matter, ammonium-N and available P in Pb/Zn tailings

2.2 中药渣配合氮磷肥施用对 pH、电导率及重金属有效态含量的影响

与其他尾矿一样^[3,6],重金属毒性是限制该铅锌尾矿生态重建的主要限制因子。总体来看,铅锌尾矿基质重金属有效态含量相对较高,DTPA-提取态 Cd、Pb、Zn 含量分别为 0.37、40.5、165.13 mg·kg⁻¹。除 N 处理外,添加中药渣、氮肥、磷肥及其组合(MHR、P、N+P、MHR+N、MHR+P、MHR+N+P)不同程度地降低了尾矿基质中 DTPA-Cd、DTPA-Cu、DTPA-Pb、DTPA-Zn 的含量。与对照(CK)相比,DTPA-Cd 下降了 0.16%~59.45%,DTPA-Cu 下降了 3.55%~46.81%,DTPA-Pb 下降了 5.09%~34.72%,DTPA-Zn 下降了 20.63%~32.06%(表 2)。这主要与中药渣、磷肥的特殊性质有关。中药渣表面存在大量的官能团且比表面积较大,

可以通过吸收、沉淀、螯合等过程与重金属离子形成重金属有机络合物,降低重金属的有效性^[7]。磷肥则通过 PO_4^{3-} 对重金属的吸附或共沉淀作用降低重金属的生物有效性^[24]。此外,添加中药渣及配合氮磷肥施用不同程度地降低了尾矿 pH 值,增加了尾矿电导率。

2.3 中药渣配合氮磷肥施用对黑麦草生长及植物重金属累积量的影响

添加中药渣配合氮磷肥施用显著促进了黑麦草的生长,与对照(CK)相比,黑麦草生物量增长了 1.5~5.5 倍。由表 3 可以看出,黑麦草地上部分与根部重金属累积量呈现相同的下降趋势,除 N 处理外,添加中药渣、氮磷肥及其组合不同程度地降低了黑麦草地上部和根部重金属含量。与对照(CK)相比,黑麦草地上部 Cd 含量下降了 38.46%~58.97%,Cu 含量下降了 22.09%~44.38%,Pb 含量下降了 16.40%~44.67%,Zn 含量下降了 19.58%~63.94%;根部 Cd 含量下降了 44.44%~61.90%,Cu 含量下降了 14.40%~38.45%,Pb 含量下降了 15.90%~29.97%,Zn 含量下降了 27.30%~52.11%。其主要作用机制可能体现在以下两个方面:

一是添加中药渣、磷肥及其组合降低了尾矿基质中重金属的有效态含量,从而减少了植物对重金属的吸收(表 2);二是添加中药渣、氮肥、磷肥及其组合增加了植物的生物量,使植株内重金属浓度被稀释,进而减少植物重金属的累积量(表 3)。

2.4 中药渣配合氮磷肥施用对尾矿土壤酶活性的影响

土壤酶活性因对重金属和营养元素高度敏感,近年来逐渐被用作重金属污染土壤质量评价或污染土壤改良修复效果评价的生化指标^[25]。脱氢酶对重金属十分敏感,与土壤微生物数量相关,通常用来评价土壤微生物的代谢活性。 β -葡萄糖苷酶、脲酶和磷酸酶分别与土壤中的碳循环、氮循环和磷循环密切相关,在一定程度上反映土壤碳代谢、氮代谢和磷代谢的水平能力。总体来看,没有添加改良剂的对照组(CK)土壤酶活性较低,其中脱氢酶活性为 $0.43 \mu\text{g TPF}\cdot\text{g}^{-1}$, β -葡萄糖苷酶为 $10.31 \mu\text{g 水杨苷}\cdot\text{g}^{-1}$,脲酶为 $1.93 \mu\text{g NH}_4^-\cdot\text{N}\cdot\text{g}^{-1}$,磷酸酶为 $51.65 \mu\text{g PNP}\cdot\text{g}^{-1}$ (图 2)。添加中药渣、氮肥、磷肥及其组合不同程度地提高了尾矿基质土壤酶活性,尤其是 MHR、MHR+N、MHR+P 和

表 2 中药渣配合氮磷肥施用对 pH、电导率及重金属有效态含量的影响(均值±S.E.,n=4)

Table 2 Effects of medicinal herb residue in combination with nitrogen and phosphorus fertilizers on pH, EC and DTPA-extractable Cd, Cu, Pb and Zn concentrations in Pb/Zn tailings(mean ± S.E., n=4)

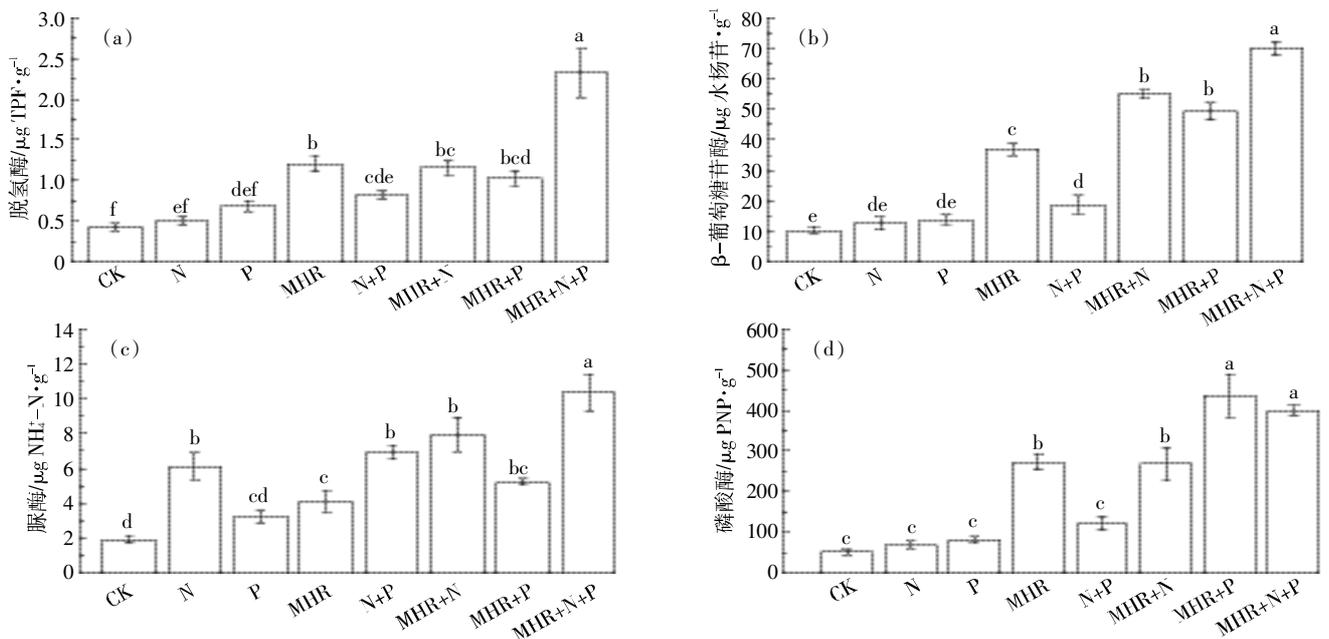
处理	pH	电导率/ $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$	DTPA-Cd/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	DTPA-Cu/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	DTPA-Pb/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	DTPA-Zn/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
CK	8.55±0.01a	1.27±0.08c	0.37±0.02a	1.41±0.08a	40.50±3.36a	165.13±10.93a
N	8.23±0.02bc	2.23±0.10a	0.38±0.04a	1.36±0.11a	38.44±3.37a	129.85±5.38b
P	8.27±0.02bc	1.56±0.11b	0.31±0.02b	1.18±0.12b	32.71±1.05bc	124.32±5.48b
MHR	8.23±0.02bc	0.95±0.05d	0.18±0.01c	0.93±0.12c	29.35±1.03cd	116.21±9.70b
N+P	8.00±0.04c	2.29±0.14a	0.30±0.02b	0.81±0.02c	36.05±1.03ab	131.06±5.87b
MHR+N	8.18±0.03bc	1.52±0.05b	0.15±0.01c	0.75±0.02c	27.30±1.18cd	126.08±6.89b
MHR+P	8.32±0.04b	1.29±0.11c	0.16±0.00c	0.91±0.05c	27.10±1.23d	112.19±11.53b
MHR+N+P	8.20±0.01bc	1.42±0.04b	0.15±0.00c	0.78±0.02c	26.44±0.63d	128.68±13.29b

注:表中同列内不同字母表示各处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

表 3 中药渣配合氮磷肥施用对黑麦草生物量及植物重金属含量的影响(均值±S.E.,n=4)

Table 3 Effects of medicinal herb residue in combination with nitrogen and phosphorus fertilizers on biomass and Cd, Cu, Pb and Zn concentrations in shoots and roots of *L. perenne*(mean±S.E., n=4)

处理	生物量/ $\text{g}\cdot\text{盆}^{-1}$	黑麦草地上部分重金属含量				黑麦草根重金属含量			
		Cd/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	Cu/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	Pb/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	Zn/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	Cd/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	Cu/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	Pb/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	Zn/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
CK	0.22±0.05e	0.78±0.02a	5.07±0.72a	53.48±4.15a	144.15±18.15a	2.52±0.52a	9.65±0.88a	134.87±9.49a	200.52±7.32a
N	0.39±0.02d	0.51±0.10b	4.78±0.37ab	48.21±4.18ab	146.75±13.93a	2.46±0.24a	9.03±0.64a	136.15±11.85a	188.98±25.56b
P	0.64±0.09c	0.44±0.07bc	3.44±0.26bc	44.71±4.21ab	103.28±6.53b	1.34±0.16bc	7.51±0.24bc	107.98±8.83ab	128.14±14.01cd
MHR	0.50±0.02c	0.33±0.03c	3.95±0.62b	35.32±3.77bc	74.65±4.92c	1.20±0.13bc	7.25±0.86bc	98.46±7.81b	130.16±10.39cd
N+P	0.93±0.15b	0.35±0.05c	3.58±0.51bc	40.71±5.58b	115.93±6.68ab	1.69±0.13b	7.84±1.11bc	113.43±8.20ab	145.77±27.34c
MHR+N	0.91±0.05b	0.48±0.06b	3.66±0.43b	39.92±6.64bc	83.94±8.05bc	1.40±0.33bc	8.26±0.48b	96.34±7.19b	112.27±15.37cd
MHR+P	1.18±0.14a	0.37±0.04bc	2.82±0.34c	31.19±4.89bc	77.61±12.10bc	1.00±0.16bc	6.10±0.83c	94.45±5.59b	107.87±9.32cd
MHR+N+P	1.26±0.12a	0.32±0.06c	2.84±0.20c	29.59±3.83c	51.98±4.50d	0.96±0.19c	5.94±0.95c	96.02±10.88b	96.03±11.76d



不同小写字母表示各处理间差异显著($P<0.05$)

图2 中药渣配合氮磷肥施用对尾矿土壤酶活性的影响

Figure 2 Effect of medicinal herb residue in combination with nitrogen and phosphorus fertilizers on enzyme activities in Pb/Zn tailings

MHR+N+P 处理,与对照组(CK)相比,脱氢酶、 β -葡萄糖苷酶、脲酶、磷酸酶活性分别提高了 1.2~5.4、1.2~5.3、1.7~5.4、1.3~8.4 倍。

2.5 中药渣配合氮磷肥施用与尾矿理化因子的 CCA 分析

典范对应分析(CCA)是用来分析植物群落与环境之间生态关系的一种排序手段,近年来也逐渐被应用于重金属污染土壤与环境因子间的相互关系研究^[25-26]。CCA 二维排序图可将研究对象排序和环境因子排序表示在一个图上,直观地反映出各环境因子之间以及研究对象与环境因子之间的关系。环境因子用箭头表示,箭头所处的象限表示环境因子与排序轴之间的正负相关性,箭头连线的长度代表着某个环境因子与研究对象分布相关程度的大小,连线越长,代表这个环境因子对研究对象的分布影响越大。箭头连线与排序轴的夹角代表着某个环境因子与排序轴的相关性大小,夹角越小,相关性越高。从图3可以看出,第一排序轴与有机质、铵态氮、有效磷、脱氢酶、 β -葡萄糖苷酶、脲酶、磷酸酶呈正相关,与 DTPA-Cd、DTPA-Cu、DTPA-Pb、DTPA-Zn、pH 和电导率呈负相关。根据尾矿理化因子的分布特征,CCA 排序将 8 种不同处理较清楚地划分为三组,从左到右依次为对照组(CK),N、P、N+P 处理组和 MHR、MHR+N、MHR+P、MHR+N+P 处理组。对照组(CK)落在第一轴的负半轴,与 DTPA-Cd、DTPA-

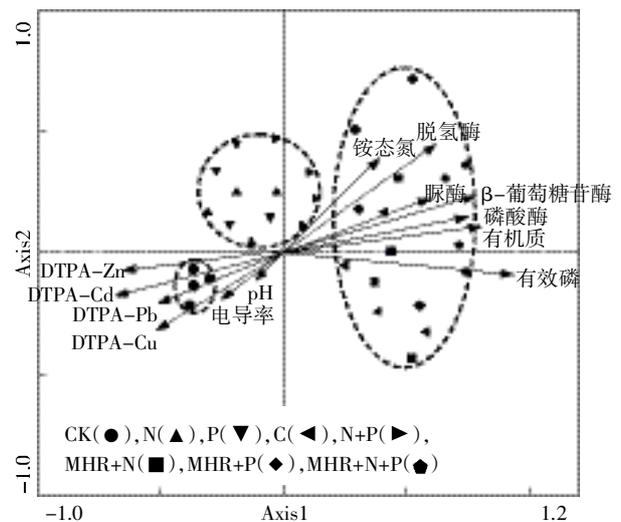


图3 中药渣配合氮磷肥施用与尾矿理化因子关系的 CCA 排序图

Figure 3 CCA ordination biplot between treatments and physico-chemical properties of mine tailings

Cu、DTPA-Pb、DTPA-Zn 表现出较强的相关性;N、P、N+P 处理组落在中间;MHR、MHR+N、MHR+P、MHR+N+P 处理组落在第一轴的正半轴,与有机质、铵态氮、有效磷、脱氢酶、 β -葡萄糖苷酶、脲酶和磷酸酶有较强的相关性。这与我们前面的分析结果一致(图1、图2和表2),进一步说明添加中药渣,配合氮磷肥的施用有效降低了尾矿基质中重金属有效

态含量,增加营养元素含量并提高土壤酶活性,可用于铅锌尾矿生态恢复的基质改良。

3 结论

铅锌尾矿废弃地重金属毒性高,有机质及营养元素(N、P等)含量低,不利于植物定居和生长。添加中药渣配合氮磷肥施用促进了黑麦草的生长,增加了有机质、铵态氮、有效磷含量,降低了尾矿和植物中重金属含量,并提高了土壤酶活性,其中MHR、MHR+N、MHR+P、MHR+N+P处理组效果最好。因此,在铅锌尾矿的改良修复中添加中药渣作为改良材料,配合氮磷肥施用有利于尾矿废弃地的生态恢复。

参考文献:

- [1] 赵武,霍成立,刘明珠,等. 有色金属尾矿综合利用的研究进展[J]. 中国资源综合利用, 2011, 29(3):24-28.
ZHAO Wu, HUO Cheng-li, LIU Ming-zhu, et al. Research progress on the comprehensive utilization of non-ferrous metal mine tailings[J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2011, 29(3):24-28.
- [2] Mendez M O, Maier R M. Phytoremediation of mine tailings in temperate and arid environments[J]. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 2008, 7(1):47-59.
- [3] Zhu Y M, Wei C Y, Yang L S. Rehabilitation of a tailing dam at Shimen County, Hunan Province; Effectiveness assessment[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(3):178-183.
- [4] Wang X, Liu Y G, Zeng G M, et al. Pedological characteristics of Mn mine tailings and metal accumulation by native plants[J]. *Chemosphere*, 2008, 72(9):1260-1266.
- [5] Galende M A, Becerril J M, Gómez-Sagasti M T, et al. Chemical stabilization of metal-contaminated mine soil; Early short-term soil-amendment interactions and their effects on biological and chemical parameters[J]. *Water, Air & Soil Pollution*, 2014, 225(1):1863-1876.
- [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(6):15-21.
- [7] Bolan N S, Duraisamy V P. Role of inorganic and organic soil amendments on immobilization and phytoavailability of heavy metals; A review involving specific case studies[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2003, 41(3):533-555.
- [8] Guo G L, Zhou Q X, Ma L Q. Availability and assessment of fixing additives for the in situ remediation of heavy metal contaminated soils; A review[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2006, 116(1-3):513-528.
- [9] Kumpiene J, Lagerkvist A, Maurice C. Stabilization of As, Cr, Cu, Pb and Zn in soil using amendments; A review[J]. *Waste Management*, 2008, 28(1):215-225.
- [10] Galende M A, Becerril J M, Barrutia O, et al. Field assessment of the effectiveness of organic amendments for aided phytostabilization of a Pb-Zn contaminated mine soil[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2014, 145(10):181-189.
- [11] 谭显东,王向东,黄健盛,等. 中药渣资源化技术研究进展[J]. 中成药, 2010, 32(5):847-848.
- [12] TAN Xian-dong, WANG Xiang-dong, HUANG Jian-sheng, et al. Progress on resource utilization of Chinese medicinal plant residues[J]. *Chinese Traditional Patent Medicine*, 2010, 32(5):847-848.
- [12] 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.
- [13] Yang S X, Liao B, Li J T, et al. Acidification, heavy metal mobility and nutrient accumulation in the soil plant system of a revegetated acid mine wasteland[J]. *Chemosphere*, 2010, 80(8):852-859.
- [14] Lindsay W L, Norvell W A. Development of a DTPA test for zinc, iron, manganese, and copper[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1978, 42(3):421-428.
- [15] Allen S E. Chemical analysis of ecological materials[M]. Blackwell Scientific Publications, Oxford, 1989.
- [16] Nelson D W, Sommers L E. Total carbon, organic carbon and organic matter[M]. Madison: American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, 1982.
- [17] Maynard D G, Kalra Y P, Crumbaugh J A. Soil sampling and methods of analysis[M]. Taylor and Francis, Boca Raton; CRC Press, 2008.
- [18] Bray R H, Kurtz L T. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soil[J]. *Soil Science*, 1945, 59(1):39-45.
- [19] Thalmann A. Zur Methodik der Bestimmung der Dehydrogenaseaktivität im Boden mittels Triphenyltetrazolium chlorid(TTC)[J]. *Landwirt Forsch*, 1968, 21(3):249-258.
- [20] Hoffmann G, Dedeken M. Eine methode zur kolorimetrischen bestimmung der β -glucosidaseaktivität in Böden[J]. *Z Pflanzenernaehr*, 1966, 108(2):195-201.
- [21] Kandeler E, Gerber H. Short-term assay of soil urease activity using colorimetric determination of ammonium[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1988, 6(1):68-72.
- [22] Tabatabai A M, Bremner M J. Use of p-nitrophenyl phosphate for assay of soil phosphatase activity[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1969, 1(3):301-307.
- [23] Santibañez C, de la Fuente L M, Bustamante E, et al. Potential use of organic- and hard-rock mine wastes on aided phytostabilization of large-scale mine tailings under semiarid mediterranean climatic conditions; Short-term field study[J]. *Applied and Environmental Soil Science*, 2012, 1(6):1-15.
- [24] Melamed R, Cao X, Chen M, et al. Field assessment of lead immobilization in a contaminated soil after phosphate application[J]. *Science of the Total Environment*, 2003, 305(1-3):117-127.
- [25] 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.
- [26] 李强,李忠义,靳振江,等. 基于典范对应分析的铅锌矿尾砂坝坍塌污染土壤特征研究[J]. 地质评论, 2014, 60(2):443-447.
LI Qiang, LI Zhong-yi, JIN Zhen-jiang, et al. Relationships between soil and environment in pollution of agricultural soils from a tailing spill at a Pb-Zn mine based on canonical correspondence analysis[J]. *Geological Review*, 2014, 60(2):443-447.