

蘑菇渣作为改良剂对铅锌尾矿改良效果研究

张晓君, 杨胜香*, 段 纯, 刘 芬, 李凤梅

(吉首大学生物资源与环境科学学院, 湖南 吉首 416000)

摘 要: 采用盆栽试验, 在铅锌尾矿中分别加入 0、1%、5%、10% 和 20% 的蘑菇渣, 研究不同比例蘑菇渣对黑麦草(*Lolium perenne* L.) 生长及铅锌尾矿基质改良效果的影响。结果表明, 添加蘑菇渣改良处理后, 尾矿基质中铵态氮、速效磷和有机质分别增加了 0.4~5.1、0.3~3.4 和 0.4~4.7 倍; 尾矿重金属 DTPA-Cd、DTPA-Pb 和 DTPA-Zn 分别下降了 52.6%~81.6%、25.5%~35.4% 和 25.4%~60.2%; 土壤脱氢酶活性增长了 1.2~8.0 倍, β -葡萄糖苷酶活性增长了 2.7~5.6 倍, 脲酶活性增长了 1.1~2.2 倍, 磷酸酶活性增长了 0~0.8 倍。尾矿理化性质的改善促进了黑麦草的生长, 与对照相比, 黑麦草总生物量分别增长了 0.8、2.3、2.6、2.7 倍。统计分析表明, 蘑菇渣添加量为 5%~10% (相当于 30~60 t·hm⁻²) 时尾矿改良效果较好、植物生物量大, 可作为蘑菇渣改良铅锌尾矿基质的配比模式。总体来看, 将蘑菇渣作为改良剂用于尾矿废弃地的生态恢复, 不仅降低了尾矿治理修复成本, 而且实现了固体废弃物的资源化利用, 应用前景广阔。

关键词: 铅锌尾矿; 基质改良; 蘑菇渣; 生态修复

中图分类号: X753 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2014)03-0526-06 **doi:** 10.11654/jaes.2014.03.019

Amelioration of Lead-zinc Tailings by Spent Mushroom Compost: Effects on Growth of *Lolium perenne* L. and Physico-chemical Properties of Tailings

ZHANG Xiao-jun, YANG Sheng-xiang*, DUAN Chun, LIU Fen, LI Feng-mei

(College of Biology and Environmental Science, Jishou University, Jishou 416000, China)

Abstract: A pot experiment was conducted to evaluate the effects of different proportions of spent mushroom compost (SMC) on growth of *Lolium perenne* L. and physico-chemical properties of lead-zinc mine tailings. SMC was incorporated into tailings at rates of 0, 1%, 5%, 10%, and 20%, with 4 replicates per treatment. Addition of SMC improved tailings properties and thus facilitated growth of *L. perenne*. Compared with the control, SMC applications increased NH₄⁺-N, available P and organic matter by 0.4~5.1, 0.3~3.4, 0.4~4.7 times, decreased DTPA-extractable Cd, Pb and Zn by 52.6%~81.6%, 25.5%~35.4% and 25.4%~60.2%, respectively. Dehydrogenase, β -Glucosidase, and urease and phosphatase activities increased by 1.2~8.0, 2.7~5.6, 1.1~2.2, 0~0.8 times, respectively, in the treatments with SMC. Biomass of *L. perenne* was 0.8, 2.3, 2.6, 2.7 times higher in SMC treatments than in the control, respectively. In conclusion, SMC could be used for amelioration of lead-zinc tailings, and utilization of SMC also provides an alternative way for recycling these waste materials.

Keywords: lead-zinc mine tailings; amelioration; spent mushroom compost; ecological restoration

尾矿是开采出的矿石利用各种分选方法选取精矿后而排放的固体废弃物。据中国环境年鉴资料, 尾矿是我国排放量最高的工业固体废弃物, 占工业固体废弃物排放总量的近 30%^[1]。尾矿排出后一般堆放在

尾矿库内, 弃置后形成尾矿废弃地, 尾矿库是金属矿山最常见并且最难恢复的废弃地。尾矿不是真正意义上的土壤, 颗粒较细、结构松散、无土壤团粒结构、保水能力差, 且重金属含量 (如 Pb、Zn、Cu、Cd、As、Ni 等) 很高, 养分贫乏、极端 pH 等^[2-3], 其环境影响具有普遍性、严重性、持久性和区域性等特点。我国尾矿占地面积已超过 90 万 hm², 而复垦率只有 5%, 与矿业先进国家的恢复率 (50%~80%) 相差甚远^[4]。传统的尾矿废弃地修复方式主要包括覆土法、物理稳定法、化

收稿日期: 2013-07-18

基金项目: 国家自然科学基金 (41101532); 湖南省自然科学基金 (12JJ3036); 吉首大学大学生创新性实验项目 (JSU-CX-2012-41)

作者简介: 张晓君 (1990—), 女, 硕士研究生, 主要从事矿山污染治理及生态恢复研究。

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

学稳定法和植物稳定技术^[5]。覆土法简单有效,但土源越来越难以获得;物理稳定和化学稳定方法易破坏土壤结构,产生二次污染,稳定效果差,常常是暂时性的;植物稳定技术以其潜在的高效、廉价及环境友好性被世界各国政府、科技界、企业界所关注,具有很好的应用前景^[6]。尾矿对植物来讲是一种非常恶劣的生长环境,存在着许多限制植物生长的因素,因此,采用人工辅助措施,如添加改良剂和利用重金属耐性植物来进行植被重建等植物稳定技术进行生态恢复是控制其污染扩散的一个重要手段。

近年来,河塘底泥、生活垃圾、作物秸秆、动物粪便、堆肥等被广泛地应用于尾矿废弃地植被重建时的基质改良^[7-8]。这类物质富含有机质和养分,在进行基质改良时主要发挥了如下功能:(1)改善基质的物理结构、提高持水保肥能力;(2)养分释放缓慢,可供植物较持久利用;(3)螯合、固定部分重金属离子,缓解其毒性^[9]。此外,这类物质本身也是一类固体废弃物,这种以废治废的做法具有较好的综合效益。蘑菇渣是栽培各种食用菌以后剩下的有机固体废物,富含有机质、氮、磷、钾等营养成分,还具有数量庞大的微生物群落^[10]。国内外学者一直在探索蘑菇渣的合理利用途径,当前蘑菇渣的利用主要集中在农业方面:一是用作农作物基肥,对蘑菇渣进行自然堆制发酵,将发酵产物还田,改良土壤;二是用作栽培基质,对蘑菇渣进行简单发酵处理后,将发酵产物与其他无机基质通过一定比例混合进行蔬菜或者花卉栽培^[11]。有研究报道菇渣表面存在大量羟基、磷酸基、酚基等吸附性官能团,对Cd、Pb、Cr等重金属离子具有较强的吸附能力^[12],但利用蘑菇渣作为改良剂用于环境污染修复领域的报道却很少。本研究以蘑菇渣作为铅锌尾矿的改良材料,通过室内盆栽实验种植耐性植物黑麦草(*Lolium perenne* L.),研究蘑菇渣不同施用量对黑麦草生长、铅锌尾矿理化性质的影响,探讨蘑菇渣作为尾矿改良剂的可行性及合适的添加剂量,为蘑菇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 盆栽试验

1.1.1 试验材料

铅锌尾矿采自湘西花垣县太丰矿业有限公司铅锌尾矿库,尾矿的堆存方式为干式堆存,尾矿库闭库时间约为1年,面积约15 hm²,地表裸露,无任何植被生长。蘑菇渣取自湖南湘泉制药厂的蘑菇种植场,黑麦草购自当地种苗公司。尾矿、蘑菇渣基本理化性质见表1。铅锌尾矿呈碱性,蘑菇渣为中性,尾矿、蘑菇渣电导率均较高。总体来看,尾矿重金属Pb、Zn、Cd含量很高,有机质、氮、磷含量很低;蘑菇渣有机质、氮、磷含量很高,重金属含量很低,其中有机质、N、P含量分别为尾矿的180、19倍和196倍。

1.1.2 盆栽方法

尾矿和蘑菇渣自然风干,尾矿过2 mm的尼龙筛,蘑菇渣碾碎。盆栽基质总量为800 g,将蘑菇渣以0、1%、5%、10%、20%的比率添加于尾矿中,分别记作CK、SMC1、SMC5、SMC10、SMC20,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20盆。装盆后每盆加水200 mL(水:土=25% W:W,最大田间持水量),平衡2周。

2周后,选择颗粒饱满、成熟度一致的黑麦草种子,用自来水冲洗后再用蒸馏水冲洗3次,播种于盆中,播种深度为0.5~1.0 cm,播种量为30粒·盆⁻¹,种子萌发1周后间苗,每盆保留10棵健壮的幼苗。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,每天浇水30 mL,种植4个月。

1.2 样品处理与分析

1.2.1 土壤、植物样品处理

收获时小心将植株与盆栽基质分离开。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,4℃储存用于土壤酶活性的测定,另一份风干,过100目的

表 1 尾矿和蘑菇渣的基本理化性质

Table 1 Physico-chemical properties of mine tailings and spent mushroom compost

基质	pH	EC/dS·m ⁻¹	OM/g·kg ⁻¹	TN/mg·kg ⁻¹	TP/mg·kg ⁻¹	Zn/mg·kg ⁻¹	Pb/mg·kg ⁻¹	Cd/mg·kg ⁻¹
尾矿	8.7±0.09	1.7±0.14	2.8±0.17	0.04±0.01	11.9±2.3	713±54	1951±228	15±0.38
菌糠	7.2±0.03	2.6±0.14	513±39	0.77±0.10	2344±143	6.34±0.90	120±27	0.75±0.04
土壤环境质量三级标准(pH>7.5) ^[13]						500	500	1.0

尼龙筛,用于基本理化性质及重金属含量分析。

1.2.2 样品分析

尾矿基本性质参照鲁如坤^[14]土壤农业化学分析方法测定:pH和电导率分别采用电位法和电导法(土:水=1:2.5,W:V),有机质采用高温外加热重铬酸钾氧化-容量法,总氮采用半微量凯氏定氮法,铵态氮采用靛酚蓝比色法,总磷采用酸溶-钼锑抗比色法,有效磷采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法。

土壤酶活性测定参照关松荫^[15]土壤酶及其研究方法:脱氢酶采用 TTC(三苯基氯化四氮唑)比色法测定,活性以 $\mu\text{g triphenylformazan(TPF)} \cdot \text{g}^{-1}$ 表示, β -葡萄糖苷酶采用硝基苯水杨酸比色法,活性以 $\mu\text{g saligenin(水杨苷)} \cdot \text{g}^{-1}$ 表示,脲酶采用靛酚蓝比色法测定,活性以 $\mu\text{g NH}_4^+-\text{N} \cdot \text{g}^{-1}$ 表示,碱性磷酸酶采用对硝基苯磷酸钠比色法测定,活性以 $\mu\text{g p-nitrophenol(PNP)} \cdot \text{g}^{-1}$ 表示。

尾矿重金属含量测定:总量采用硝酸-盐酸-高氯酸消化法^[16],有效态含量采用 DTPA 浸提法测定^[17],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℃振荡器 180 次·min⁻¹ 振荡 2 h,过滤。消解液和浸提液中的重金属元素(Cd、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。

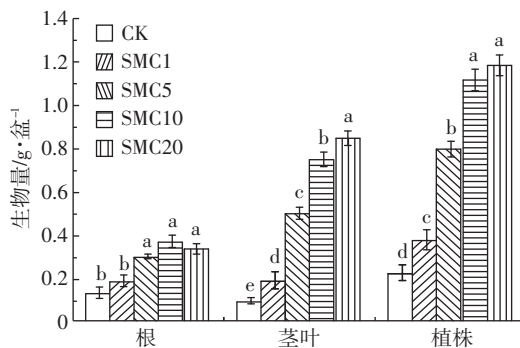
1.3 数据的处理和分析

数据的统计分析采用 Excel 2003 和 SPSS 16.0,采用单因素方差分析法(one-way ANOVA)分析不同处理间的差异,用最小显著差数法进行显著性检验,差异显著水平设为 $P < 0.05$ 。作图采用 Origin7.5。

2 结果与分析

2.1 蘑菇渣改良处理对黑麦草生长的影响

蘑菇渣改良处理对黑麦草根、茎叶及总生物量的影响见图 1。添加蘑菇渣促进了黑麦草的生长。从黑麦草根生物量来看,各添加蘑菇渣处理组黑麦草根生物量是对照组的 1.4~2.8 倍,其中 SMC1 处理组和对照组没有显著性差异,SMC5、SMC10 和 SMC20 处理组间没有显著性差异。从黑麦草茎叶生物量来看,随着蘑菇渣添加剂量的增加黑麦草茎叶生物量呈显著增加趋势,各添加蘑菇渣处理组黑麦草茎叶生物量是对照组的 2.1~9.4 倍,从植株生物量来看,SMC1、SMC5、SMC10、SMC20 处理组黑麦草总生物量分别是对照组的 1.8、3.3、3.6、3.7 倍。



图中不同字母表示各处理间差异显著 $P < 0.05$ 。下同
Different letters within the same group indicate significant difference at $P < 0.05$ according to LSD test. The same below

图 1 蘑菇渣改良处理对黑麦草根、茎叶及总生物量的影响

Figure 1 Effects of spent mushroom compost on root, shoot and the total biomass of *P. ryegrass*

2.2 蘑菇渣改良处理对尾矿营养状况的影响

添加蘑菇渣改良处理对尾矿营养状况的影响见图 2。总体来看,添加蘑菇渣显著增加了尾矿铵态氮、有效磷和有机质含量,尤其是 SMC5、SMC10 和 SMC20 处理组。各添加蘑菇渣处理组基质中铵态氮是对照组(CK)的 1.4~6.1 倍,速效磷是对照组的 1.3~4.4 倍,有机质是对照组的 1.4~5.7 倍。统计分析表明,SMC1 处理组与对照组间铵态氮、有效磷和有机质差异不显著($P > 0.05$),SMC5、SMC10、SMC20 处理组间无显著差异($P > 0.05$)。

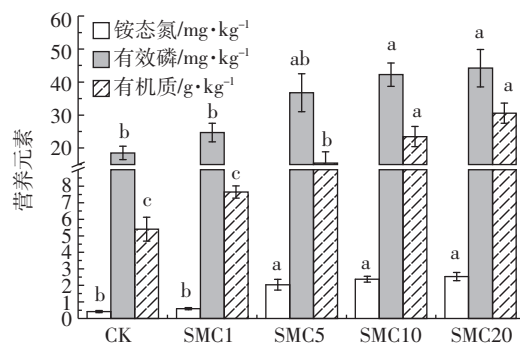


图 2 蘑菇渣改良处理对尾矿养分的影响

Figure 2 Effects of spent mushroom compost on organic matter, NH_4^+-N and available P in lead-zinc tailings

2.3 蘑菇渣改良处理对尾矿 pH、EC 及重金属有效态含量的影响

蘑菇渣改良处理对尾矿 pH、EC 及重金属有效态含量的影响见表 2。添加蘑菇渣对尾矿基质 pH 没有显著性影响,尾矿的电导率随着蘑菇渣添加剂量的增加呈上升趋势。从重金属有效态含量来看,添加蘑菇渣

显著降低了 DTPA-Cd、DTPA-Pb、DTPA-Zn 的含量,且随着蘑菇渣添加剂量的增加,尾矿重金属有效态含量下降幅度逐渐增加。与对照组(CK)相比,DTPA-Cd 下降了 52.6%~81.6%,DTPA-Pb 下降了 25.5%~35.4%,DTPA-Zn 下降了 25.4%~60.2%。统计分析表明,各添加蘑菇渣改良处理组基质中 DTPA-Cd、DTPA-Pb、DTPA-Zn 与对照组差异显著($P<0.05$),但 SMC10 和 SMC20 处理组间无显著差异($P>0.05$)。

2.4 蘑菇渣改良处理对尾矿土壤酶活性的影响

蘑菇渣改良处理对尾矿土壤酶活性的影响见图 3。

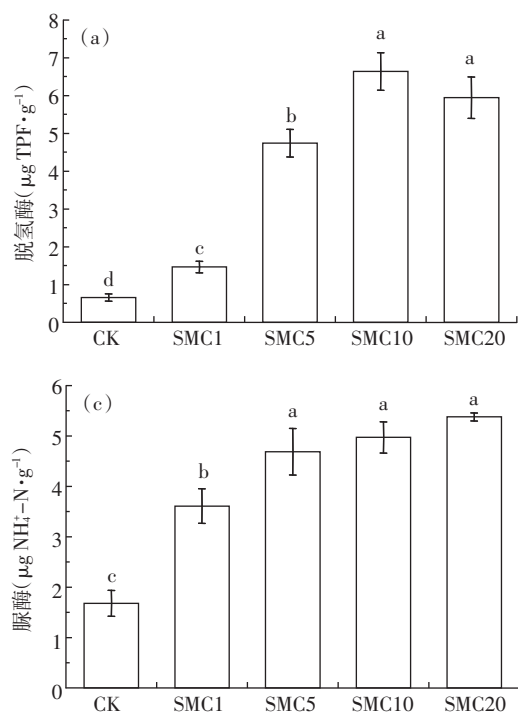
表 2 蘑菇渣改良处理对尾矿 pH、EC 及重金属有效态含量的影响

Table 2 Effects of spent mushroom compost on pH, EC and DTPA-extractable heavy metal concentrations

处理	pH	EC/dS·m ⁻¹	DTPA-Cd/ mg·kg ⁻¹	DTPA-Pb/ mg·kg ⁻¹	DTPA-Zn/ mg·kg ⁻¹
CK	8.7±0.01a	1.23±0.06d	0.38±0.03a	27.4±1.96a	116.5±7.46a
SMC1	8.6±0.01a	1.30±0.06d	0.18±0.02b	21.8±0.65b	86.9±6.39b
SMC5	8.4±0.01a	3.24±0.15c	0.09±0.00c	20.4±1.15b	80.4±6.72b
SMC10	8.5±0.02a	5.30±0.21b	0.07±0.00c	18.6±0.32bc	51.2±1.91c
SMC20	8.5±0.01a	6.59±0.45a	0.07±0.01c	17.7±0.91c	46.4±4.26c

注:表中同列内不同字母表示各处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different letters within a column indicate significant difference at $P<0.05$ according to LSD test.



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 0.66 μg TPF·g⁻¹,β-葡萄糖苷酶为 8.30 μg 水杨苷·g⁻¹,脲酶为 1.68 μg NH₄-N·g⁻¹,磷酸酶为 49.27 μg PNP·g⁻¹。添加蘑菇渣改良处理后尾矿基质中 4 种酶活性均显著增加。与对照组(CK)相比,脱氢酶活性增长了 1.2~8.0 倍,β-葡萄糖苷酶活性增长了 2.7~5.6 倍,脲酶活性增长了 1.1~2.2 倍,磷酸酶活性增长了 0~0.8 倍。统计分析表明,SMC5、SMC10 处理组间脱氢酶活性无显著差异($P>0.05$),SMC5、SMC10、SMC20 处理组间 β-葡萄糖苷酶和脲酶活性无显著差异($P>0.05$),SMC1 和 SMC5 处理组间,SMC10 和 SMC20 处理组间磷酸酶活性无显著差异($P>0.05$)。

3 讨论

尾矿基质条件恶劣,存在着许多限制植物生长和定居的因素,如高浓度的残留重金属、大量营养元素(如 N、P)及有机质的缺乏、极差的土质结构及表层不稳定性^[18]。这些特征导致尾矿即使经过多年废弃之后,绝大部分还是缺乏自然植被生长。一般来说,采用人工辅助措施,如添加改良剂和利用耐性植物进行植被重建等植物稳定技术对尾矿废弃地进行生态恢复是控制其污染的有效途径。本研究中,添加蘑菇渣促

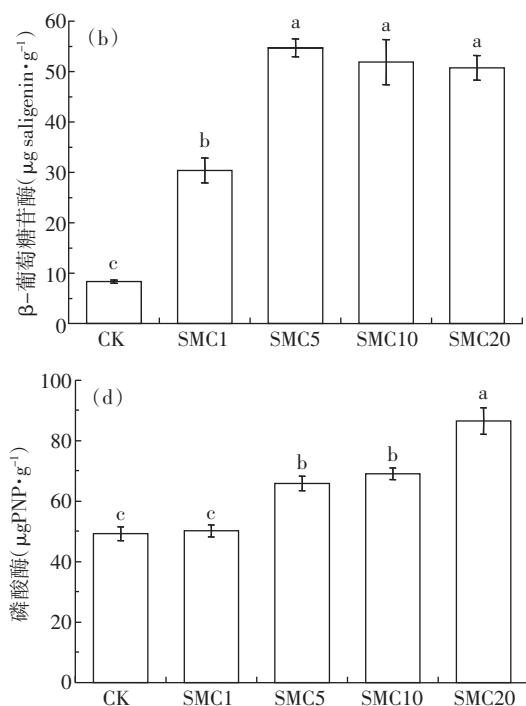


图 3 蘑菇渣改良处理对尾矿土壤酶活性的影响

Figure 3 Effects of spent mushroom compost on enzymatic activities in Pb/Zn mine tailings

进了黑麦草种子的萌发和幼苗的生长,尤其是蘑菇渣添加剂量为5%、10%和20%的处理组,黑麦草幼苗长势一直良好,茎叶健壮。未添加蘑菇渣的对照组和添加剂量1%的处理组黑麦草幼苗长势较差,生长缓慢,茎叶比较纤细,泛黄,表现出明显的养分不足和中毒症状。与对照相比,黑麦草生物量增长了1.8~3.7倍(图1)。这可能有两方面原因:一是蘑菇渣中富含N、P等营养元素(表1),添加蘑菇渣直接补充了尾矿基质中的营养物质;二是蘑菇渣疏松的结构和高含量的有机质改善了尾矿基质的物理结构,降低了有效态重金属含量(表2),从而促进了黑麦草的生长。

大量研究表明,在尾矿中添加有机废弃物改良成本低,改良效果好。Chiu等^[19]用粪肥和生活污泥改良铅锌尾矿,种植耐性植物香根草(*Vetiveria zizanioides* L.)和大棕叶芦(*Phragmites australis* Roxb.),结果发现,改良处理后明显减少了尾矿基质中有效态Pb、Zn和Cu的含量,增加了基质中N、P、K等积累,促进了植物生长。高宏等^[20]采用室内盆栽试验,在铜尾矿中加入腐熟鸡粪作为改良剂,研究不同比例腐熟鸡粪改良铜尾矿后对菊科植物串叶松香草(*Silphium perfoliatum* L.)生长及尾矿基质性质的影响。结果表明,在铜尾矿基质中添加鸡粪改良后,尾矿基质中总氮、总磷含量增加,有效态Cu、Zn含量有所降低,土壤微生物量C、脲酶和脱氢酶活性提高。本研究发现,添加蘑菇渣显著提高了尾矿铵态氮、有效磷和有机质含量,显著降低了DTPA-Cd、DTPA-Pb和DTPA-Zn的含量(表2),其作用机理可能是蘑菇渣含有大量有机质,能够通过络合、螯合反应固定离子态重金属,从而降低了基质中有效态重金属积累^[21]。大量研究表明,土壤酶活性对重金属高度敏感,是评价土壤健康状况的一个重要指标^[22]。本研究发现,添加不同剂量的蘑菇渣处理后尾矿基质中脱氢酶、 β -葡萄糖苷酶、脲酶和磷酸酶活性均大幅度提高(图3),这与尾矿基质中有机质、铵态氮、有效磷增加,有效态重金属毒性降低是一致的。

我国是世界上食用菌生产大国和出口大国,生产实践表明:每100 kg培养料,收获100 kg鲜菇后,还可以得到60 kg菇渣废物^[10]。据中国食用菌协会统计,2010年我国食用菌总产量达到了 2.2×10^7 t,菌渣总产量约为 5.57×10^7 t,且食用菌和菌渣产量逐年增加^[11]。每年大量的蘑菇渣就地堆置或焚烧处理,一方面造成了农业有机资源的巨大浪费;另一方面导致周围环境的恶化,细菌繁殖,疾病传播,这已成为很多农村地区

不容忽视的环境问题。将蘑菇渣作为改良剂用于尾矿废弃地的生态恢复,不仅降低了尾矿治理修复成本,而且实现了固体废弃物的资源化利用,可以达到“以废治废”的双赢目的。从添加剂量来看,与对照相比,添加剂量为1%的处理对尾矿的改良效果不显著,添加剂量为5%、10%和20%的处理基质理化性质显著提高,但添加剂量为10%和20%的处理间差异不显著。因此,利用蘑菇渣改良铅锌尾矿添加剂量选择5%~10%为宜(相当于 $30 \sim 60 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)。

4 结论

铅锌尾矿废弃地重金属含量高,营养元素(N、P等)及有机质含量低,不利于植物生长和定居。将蘑菇渣作为改良剂明显改善了铅锌尾矿基质的理化状况,增加了尾矿中铵态氮、有效磷和有机质含量,降低了DTPA-Cd、DTPA-Pb、DTPA-Zn的含量,提高了土壤酶活性,促进了植物的生长。因此,可以将蘑菇渣作为改良剂用于尾矿废弃地的生态恢复。蘑菇渣施用剂量选择5%~10%(相当于 $30 \sim 60 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)为宜。

参考文献:

- [1] 中国环境年鉴编委会. 中国环境年鉴 2003[M]. 北京: 中国环境年鉴社, 2003.
China Environmental Yearbook Editorial Committee. China environment yearbook 2003[M]. Beijing: China Environment Yearbook Publishing House, 2003.
- [2] 周连碧. 铜尾矿废弃地重金属污染特征与生态修复研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2012.
ZHOU Lian-bi. Study on the characteristic of heavy metal contamination and ecological restoration in copper tailing wasteland[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2012.
- [3] Li M S. Ecological restoration of mineland with particular reference to the metalliferous mine wasteland in China: A review of research and practice[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 357: 38–53.
- [4] 黄铭洪. 环境污染与生态恢复[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
WONG Ming-Hong. Environmental pollution and ecological restoration[M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [5] 王克华, 刘胜祥. 金属尾矿废弃地的生态恢复[J]. 四川环境, 2003, 22(1): 13–17.
WANG Ke-hua, LIU Sheng-xiang. Eco-restoration on metal mine tailing dumps[J]. *Sichuan Environment*, 2003, 22(1): 13–17.
- [6] 薛生国, 周菲, 叶晨, 等. 金属尾矿废弃地植物稳定技术研究进展[J]. 环境科学与技术, 2009, 32(8): 101–104.
XUE Sheng-guo, ZHOU Fei, YE Sheng, et al. Progress on phytostabilization of tailing wasteland from metalliferous mines[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 32(8): 101–104.

- [7] Kumpiene J, Lagerkvist A, Maurice C. Stabilization of As, Cr, Cu, Pb and Zn in soil using amendments: A review[J]. *Waste Management*, 2008, 28:215-225.
- [8] 朱佳文, 邹冬生, 向言词, 等. 钝化剂对铅锌尾矿砂中重金属的固化作用[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(5):920-925.
ZHU Jia-wen, ZOU Dong-sheng, XIANG Yan-ci, et al. Effects of passivators on stabilization of Pb, Zn and Cd in lead and zinc mine tailings[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(5):920-925.
- [9] Alvarenga P, Gonçalves A P, Fernandes R M, et al. Organic residues as immobilizing agents in aided phytostabilization: (I) Effects on soil chemical characteristics[J]. *Chemosphere*, 2009, 74:1292-1300.
- [10] 卫智涛, 周国英, 胡清秀. 食用菌菌渣利用研究现状[J]. 中国食用菌, 2010, 29(5):3-6.
WEI Zhi-tao, ZHOU Guo-ying, HU Qing-xiu. Research and utilization of edible fungi residue[J]. *Edible Fungi of China*, 2010, 29(5):3-6.
- [11] 刁清清, 毛碧增. 蘑菇渣处理现状及在农业生产上的应用[J]. 浙江农业科学, 2012(12):1710-1712.
DIAO Qing-qing, MAO Bi-zeng. Disposal of mushroom residue and its application in agricultural production[J]. *Zhejiang Agricultural Sciences*, 2012(12):1710-1712.
- [12] Chen G G, Zeng G M. 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.
- [13] GB 15618—1995. 中华人民共和国土壤环境质量标准[S].
- [14] 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. Soil agricultural chemical analysis method[M]. Beijing: China's Agricultural Science and Technology Press, 1999.
- [15] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 中国农业出版社, 1986.
GUAN Song-yin. Soil enzyme and research methods[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1986.
- [16] 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, 36:794-798.
- [17] 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, 42:421-428.
- [18] Mendez M, Maier R. Phytoremediation of mine tailings in temperate and arid environments[J]. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 2008, 7:47-59.
- [19] Chiu K K, Ye Z H, Wong M H. Growth of *Vetiveria zizanioides* and *Phragmites australis* on Pb/Zn and Cu mine tailings amended with manure compost and sewage sludge[J]. *Bioresource Technology*, 2006, 97:158-170.
- [20] 张宏, 沈章军, 阳贵德, 等. 鸡粪改良铜尾矿对菊科植物串叶松香草生长及基质性质的影响[J]. 西南农业学报, 2011, 24(5):1792-1798.
ZHANG Hong, SHEN Zhang-jun, YANG Gui-de, et al. Effect of chicken manure-amended copper mine tailings on growth of composite *Silphium perfoliatum* and substrate properties[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2011, 24(5):1792-1798.
- [21] 吴清清, 马军伟, 姜丽娜, 等. 鸡粪和垃圾有机肥对苋菜生长及土壤重金属积累的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(7):1302-1309.
WU Qing-qing, MA Jun-wei, JIANG Li-na, et al. Effect of poultry and household garbage manure on the growth of *Amaranth tricolor* L. and heavy metal accumulation in soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(7):1302-1309.
- [22] 龙健, 黄昌勇, 滕应. 矿区重金属污染对土壤环境质量微生物学指标的影响[J]. 农业环境科学, 2003, 22(1):60-63.
LONG Jian, HUANG Chang-yong, TENG Ying. Effects of heavy metal pollution on microbial indicators in soil of a mining[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(1):60-63.