

污泥有机肥改良铅锌尾矿对 4 种草本植物生长和重金属积累的影响

张凯, 李军, 魏忠义, 刘影

(沈阳农业大学 土地与环境学院, 辽宁 沈阳 110866)

摘要: [目的] 研究添加不同量的污泥有机肥对生长在铅锌尾矿中的黑麦草、白三叶、草木樨、沙打旺 4 种植物生长状况和对 Pb, Zn, Cu, Cr, Cd 累积的影响, 以期为合理利用污泥有机肥改良、修复尾矿库提供理论依据。[方法] 采用盆栽试验的方法。[结果] 20 g/kg 处理水平下, 4 种植物株高、根长、地上鲜重、根鲜重均达到最大。施肥处理下, 供试的 4 种植物叶绿素 a+b 含量均比对照高。随着改良剂含量的增加, 黑麦草、白三叶丙二醛含量呈下降趋势。黑麦草、白三叶、草木樨体内 Pb, Zn, Cd 含量在 10 g/kg 处理水平下达到最大, 在 20 g/kg 水平下降低。[结论] 随着有机肥添加量的增加, 重金属量向植物体内转移减少, 有利于缓解重金属的毒害作用。

关键词: 铅锌尾矿; 黑麦草; 白三叶; 污泥有机肥

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2015)02-0167-06

中图分类号: X171.5

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2015.02.033

Effect of Lead-Zinc Mine Tailings Amended with Sewage Sludge Organic Fertilizer on Growth of Four Herbaceous Plants and Heavy Metal Accumulation

ZHANG Kai, LI Jun, WEI Zhongyi, LIU Ying

(College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, Shenyang, Liaoning 110866, China)

Abstract: [Objective] This paper aimed to understand the effects of sewage sludge organic fertilizer application on the amendment of lead-zinc mine tailings through the measurements of growth responses of four potted plants and heavy metal accumulation in them, in order to provide a theoretical basis for the repairing and improving of tailings by rational utilization of sludge organic fertilizer. [Methods] We adopted pot experiment and used four plants named *Lolium multiflorum*, *Trifolium repens*, *Melilotus suaveolens* and *Astragalus adsurgens*, as materials. [Results] It showed that the height, root length, biomass of plants reached the maximum when 20 g/kg fertilizer was applied. The chlorophyll a+b contents in the four plants with fertilization treatment were higher than that of the control without fertilization. The more sludge organic fertilizer was applied, the lower content of MDA in *Lolium multiflorum*, *Trifolium repens* were measured. The contents of Pb, Zn, Cd in *Lolium multiflorum*, *Trifolium repens*, *Melilotus suaveolens* reached the maximum when fertilizer was 10 g/kg, and decreased when fertilizer was 20 g/kg. [Conclusion] It indicates that with the increased application of sludge organic fertilizer, the amount of heavy metals in plants will decrease. Sludge organic fertilizer can help to alleviate the poisoning effects of heavy metals on plants.

Keywords: lead-zinc tailings; *Lolium multiflorum*; *Trifolium repens*; sludge organic fertilizer

尾矿是采选矿产生的工业固体废物,其堆积形成的尾矿库占有和破坏了大量的土地资源。尾矿基质不良的物理性质、贫瘠的营养环境、高浓度的重金属积累对植物的生长造成了严重的影响^[1-3]。由于地表植物种类稀少,水土流失严重,重金属等污染物随雨水和扬尘容易扩散,尾矿库已成为严重的重金属污染

源。目前对尾矿治理的方法主要有覆土造田、有机废弃物改良及植被重建 3 种。其中覆土方式已得到肯定,其缺点是土源缺乏,添加有机肥工程量大。利用有机废弃物改良的方法可以克服占用大量土层、受尾矿性状所限治理不便等弊端。而植被重建是控制尾矿重金属污染,恢复矿山生态的最长效手段^[4]。其方

收稿日期: 2014-03-21

修回日期: 2014-04-14

资助项目: 国土资源部公益性行业科研专项“典型工业区重金属污染场地再利用技术与规范”(201111016-03)

第一作者: 张凯(1988—),男(汉族),山西省潞城市人,硕士研究生,研究方向为土壤修复。E-mail: zk512599269@163.com。

通信作者: 李军(1962—),男(汉族),辽宁省盘锦市人,博士,教授,主要从事环境工程领域研究。E-mail: syau_lj@163.com。

法是通过选取适当种子和改良剂使植物迅速发芽、成长以达到植被修复的目的。有研究^[5]证明,污泥有机肥是一种优良的土壤改良剂,可以改良尾矿的营养环境,改变重金属活性,影响植物对重金属的吸收和积累,有机肥改良尾矿成为种植重金属耐性植物的一种经济有效的措施。随着我国城市污水处理厂越来越多,由此产生的污泥也越来越多。若不能有效处理这些污泥不仅造成大量的资源浪费,还会带来严重的环境问题。近年来,将污泥堆肥化处理制成有机肥、研究其效果及应用范围的有关研究受到了广泛的关注。钟熹光^[6]等研究表明,污泥应用于养分水平低的砂质土效果较好。郭媚兰^[7]等试验表明,污泥肥效相当于优质农家肥。陈同斌^[8]等盆栽试验表明,城市污泥堆肥不仅可以明显提高栽培基质的有效氮、磷含量,提供植物生长所需的养分,而且可以增强栽培基质的保水性能和植物的抗旱能力。若将这种有机肥用于尾矿库改良修复,不仅可以减少土壤的用量,还能使污泥得到合理的利用。

尾矿库恶劣的生态环境,依靠自然恢复困难大、

周期长。要快速恢复植被覆盖就要选择播种、栽植容易,根系发达,生长速度快,生命力强,具有较强的抗逆性的植被。草本植物符合这些要求,能快速形成群落。为此,本试验通过盆栽试验研究尾矿中添加不同量污泥有机肥对 4 种植物生长状况及某些生理指标的影响,以期为合理利用污泥有机肥改良、修复尾矿库提供一定的理论依据。

1 材料与方 法

1.1 供试材料

供试作物分别为黑麦草(*Lolium multiflorum*),白三叶(*Trifolium repens*),草木樨(*Melilotus suaveolens*),沙打旺(*Astragalus adsurgens*) 4 种植物。

尾矿产自辽宁省某铅锌矿;污泥有机肥来自沈阳市某污泥堆肥处理厂,粉碎过 60 目筛。尾矿、污泥有机肥重金属含量和 pH 值情况详见表 1。污泥有机肥碱解氮含量 5 049.02 mg/kg,速效磷含量 1 081.48 mg/kg,速效钾含量 1 265.30 mg/kg。

表 1 尾矿砂和污泥有机肥的重金属含量和 pH 值

供试材料	Zn/(mg · kg ⁻¹)	Pb/(mg · kg ⁻¹)	Cu/(mg · kg ⁻¹)	Cd/(mg · kg ⁻¹)	Cr/(mg · kg ⁻¹)	pH 值
尾矿砂	7 980.57	3 732.41	366.52	50.26	29.13	7.67
污泥有机肥	528.42	40.81	309.52	1.28	119.69	6.51

1.2 试验设计

盆栽试验设 4 个处理(表 2),分别种植黑麦草、白三叶、草木樨、沙打旺 4 种植物,每个处理 3 次重复。用污泥有机肥作尾矿改良剂,将 2 kg 尾矿砂及相应的污泥有机肥装入直径 15 cm、高 20 cm 的盆钵,混匀后加水平衡 1 周。试验于 2013 年 6 月 14 日播种,每盆播种 30 粒。种子萌发后每盆保留 20 株健壮植株,于每天早上浇水 1 次,每次 500 ml。60 d 后收取植物样品,每盆选取 5 株具有代表性的植株测定 Cu, Pb, Zn, Cr 含量、株高、根长、叶绿素含量、地上部生物量、地下部生物量以及黑麦草、白三叶的丙二醛含量(由于草木樨和沙打旺两种植物生物量较低,无法测定丙二醛含量,因此只测定黑麦草和白三叶中的丙二醛含量)。

表 2 盆栽试验方案

组别	尾矿砂/kg	污泥有机肥/(g · kg ⁻¹)
CK	2	0
Q ₅	2	5
Q ₁₀	2	10
Q ₂₀	2	20

1.3 分析与测定方法

植物样重量采用天平称重;叶绿素含量采用 96%乙醇提取比色法测定^[9];pH 值采用砂水比为 1:2.5 的 pH 计测定^[10];丙二醛采用硫代巴比妥酸比色法测定^[11];植物体重金属含量采用硝酸—高氯酸(4:1)消煮,ICP-OES 测定。

2 结果与分析

2.1 铅锌尾矿添加改良剂对 4 种植物生长的影响

经过 60 d 的生长期,对照组中 4 种植物均可以生长。各植物株高、根长、生物量测定结果详见表 3。从表 3 中可以看出,随着污泥有机肥施入量增加,黑麦草各指标不同程度增大。在 Q₂₀ 处理下生物量中各指标达到最大值,株高和对照比较增加了 186%,根长增加了 443%,地上鲜重增加了 5 520%,根鲜重增加了 10 067%。和对照比较,Q₅ 水平下株高、根长差异显著;Q₁₀ 和 Q₂₀ 水平下株高、根长、地上鲜重和根鲜重差异显著。与 Q₅ 比较,Q₁₀ 水平下根长、地上鲜重和根鲜重差异显著;Q₂₀ 水平下各指标差异显著。Q₁₀ 与 Q₂₀ 比较各指标差异均显著。白三叶株高、根

长、生物量随污泥有机肥施入量增加逐渐增大。 Q_{20} 处理下白三叶生物量中各指标达到了最大。 Q_{20} 处理和对照相比,白三叶株高增加了 650%,根长增长了 140%,地上鲜重增加了 3 094%,根鲜重升高了 1 889%。与 CK 比较, Q_5 水平下,株高差异显著; Q_{10} 水平下株高、根长差异显著; Q_{20} 水平下株高、根长、地上鲜重差异显著。与 Q_5 相比, Q_{10} 处理下根长差异显著, Q_{20} 处理下株高、根长差异显著。 Q_{10} 与 Q_{20} 比较株高差异显著。草木樨株高、地上鲜重和根鲜重在 Q_{20} 水平下达到最高。和对照比较,株高增加了 584%,

地上鲜重增加了 1 953%,根鲜重增加了 291%。草木樨根长在 Q_5 处理下达到最长,比对照增加了 17%。CK, Q_5 , Q_{10} , Q_{20} 这 4 种处理之间株高差异显著。沙打旺 Q_{20} 处理下各指标达到最大。和对照比较,株高增加了 67%,根长增长了 10%,地上鲜重增加了 79%,根鲜重升高了 11%。CK, Q_5 , Q_{10} , Q_{20} 这 4 种处理之间各指标差异不显著。 Q_{20} 处理下黑麦草株高、根长和生物量显著高于其他 3 种植物,白三叶、草木樨和沙打旺之间株高差异显著;白三叶和草木樨根长差异不显著,但与沙打旺差异显著。

表 3 不同处理对植物株高、根长、生物量的影响

植物	处理编号	株高/cm	根长/cm	地上鲜重/g	根鲜重/g
黑麦草	CK	6.3±2.0 ^{cde}	4.0±0.5 ^{eh}	0.234±0.141 ^d	0.149±0.023 ^c
	Q_5	14.0±1.0 ^b	12.3±0.9 ^c	1.296±0.402 ^{cd}	0.949±0.467 ^c
	Q_{10}	14.3±2.5 ^b	17.3±2.1 ^b	6.303±1.650 ^b	6.700±1.250 ^b
	Q_{20}	18.0±1.0 ^a	21.7±1.5 ^a	13.152±2.053 ^a	15.149±4.467 ^a
白三叶	CK	1.0±0.2 ^g	3.0±0.4 ^b	0.062±0.014 ^d	0.045±0.007 ^c
	Q_5	4.5±0.6 ^{ef}	4.3±0.3 ^{eh}	0.647±0.127 ^{cd}	0.214±0.019 ^c
	Q_{10}	5.3±1.9 ^{de}	6.2±0.3 ^{def}	0.766±0.149 ^{cd}	0.550±0.034 ^c
	Q_{20}	7.5±0.5 ^c	7.2±0.6 ^d	1.980±1.091 ^c	0.895±0.329 ^c
草木樨	CK	1.9±0.2 ^g	6.5±0.2 ^{de}	0.059±0.009 ^d	0.089±0.010 ^c
	Q_5	4.2±0.7 ^{ef}	7.6±0.4 ^d	0.073±0.013 ^d	0.085±0.004 ^c
	Q_{10}	7.0±1.7 ^{cd}	7.0±1.0 ^d	0.618±0.275 ^d	0.197±0.069 ^c
	Q_{20}	13.0±1.5 ^b	7.3±0.6 ^d	1.211±0.164 ^{cd}	0.348±0.124 ^c
沙打旺	CK	1.5±0.2 ^g	4.9±0.3 ^{fg}	0.070±0.006 ^d	0.046±0.010 ^c
	Q_5	1.6±0.2 ^g	4.8±0.6 ^{fg}	0.076±0.002 ^d	0.044±0.006 ^c
	Q_{10}	1.8±0.1 ^g	5.4±0.3 ^{efg}	0.072±0.009 ^d	0.044±0.012 ^c
	Q_{20}	2.5±0.2 ^{fg}	5.4±0.4 ^{efg}	0.125±0.009 ^d	0.051±0.004 ^c

注:地上鲜重和根鲜重均为 5 株植物鲜重,不同的小写字母表示处理间差异达 5% 显著水平。下同。

2.2 铅锌尾矿添加改良剂对植物体内叶绿素的影响

对 4 种植物叶绿素含量检测(表 4)发现,对照中黑麦草叶绿素 a 含量为 0.50 mg/g,叶绿素 b 为 0.08 mg/g,添加有机肥后叶绿素 a 为 0.53~0.71 mg/g,叶绿素 b 为 0.10~0.18 mg/g。 Q_{10} 处理下黑麦草叶绿素 a,b,a+b 值最大,CK 与 Q_5 比较差异不显著; Q_5 与 Q_{10} 比较叶绿素 a,b,a+b 含量差异显著; Q_{10} 与 Q_{20} 叶绿素各指标差异不显著。说明在 Q_{10} 处理下植物叶绿素受胁迫最低。对照中白三叶的叶绿素 a 含量 0.69 mg/g,叶绿素 b 为 0.09 mg/g,添加有机肥后叶绿素 a 为 1.03~1.13 mg/g,叶绿素 b 为 0.20~0.27 mg/g。CK 与 Q_5 相比较叶绿素 a,a+b 差异显著。 Q_5 与 Q_{10} 比较叶绿素含量差异不显著。 Q_{10} 与 Q_{20} 比较叶绿素 b 差异显著。白三叶在 Q_{20} 处理下受

害最低。对照中草木樨的叶绿素 a 含量为 0.77 mg/g,叶绿素 b 为 0.04 mg/g,添加有机肥后叶绿素 a 为 0.72~0.83 mg/g,叶绿素 b 为 0.11~0.13 mg/g。叶绿素 a,a+b 在 Q_{10} 处理下含量最高,叶绿素 b 在 Q_{20} 处理下含量最高。CK, Q_5 , Q_{10} , Q_{20} 之间叶绿素各指标差异不显著。 Q_{10} 最适合草木樨生长。对照中沙打旺叶绿素 a 含量为 0.53 mg/g,叶绿素 b 为 0.11 mg/g,添加有机肥后叶绿素 a 为 0.61~0.72 mg/g,叶绿素 b 为 0.14~0.19 mg/g。 Q_{20} 处理下叶绿素 a,a+b 含量最高。CK 与 Q_5 比较叶绿素各指标差异不显著; Q_5 与 Q_{10} 比较叶绿素各指标差异不显著;CK 与 Q_{10} 比较叶绿素 a,a+b 差异显著。CK 与 Q_{20} 两处理比较叶绿素 a,a+b 差异显著; Q_{10} 与 Q_{20} 比较各指标差异不显著。

表 4 不同植物在不同处理下的叶绿素含量 mg/g

植物	处理编号	叶绿素 a	叶绿素 b	a+b
黑麦草	CK	0.50±0.03 ^b	0.08±0.03 ^b	0.60±0.04 ^b
	Q ₅	0.53±0.03 ^b	0.10±0.01 ^b	0.63±0.03 ^b
	Q ₁₀	0.71±0.09 ^a	0.18±0.03 ^a	0.88±0.12 ^a
	Q ₂₀	0.67±0.08 ^a	0.15±0.04 ^a	0.83±0.12 ^a
白三叶	CK	0.69±0.02 ^b	0.09±0.01 ^c	0.79±0.01 ^b
	Q ₅	1.03±0.07 ^a	0.20±0.02 ^{bc}	1.21±0.05 ^a
	Q ₁₀	1.13±0.05 ^a	0.27±0.05 ^b	1.34±0.06 ^a
	Q ₂₀	1.09±0.18 ^a	0.23±0.07 ^a	1.40±0.24 ^a
草木樨	CK	0.77±0.10 ^a	0.04±0.04 ^a	0.86±0.06 ^a
	Q ₅	0.80±0.04 ^a	0.11±0.03 ^a	0.88±0.04 ^a
	Q ₁₀	0.83±0.02 ^a	0.12±0.01 ^a	0.95±0.02 ^a
	Q ₂₀	0.72±0.08 ^a	0.13±0.02 ^a	0.84±0.10 ^a
沙打旺	CK	0.53±0.06 ^b	0.11±0.04 ^a	0.61±0.09 ^c
	Q ₅	0.61±0.06 ^{ab}	0.14±0.04 ^a	0.73±0.03 ^{bc}
	Q ₁₀	0.66±0.05 ^a	0.19±0.06 ^a	0.80±0.06 ^{ab}
	Q ₂₀	0.72±0.08 ^a	0.18±0.13 ^a	0.93±0.09 ^a

2.3 铅锌尾矿添加改良剂对黑麦草、白三叶体内丙二醛含量的影响

丙二醛是膜脂过氧化的产物,丙二醛含量间接反映了植物的受损程度。不同处理下,黑麦草、白三叶中丙二醛含量如图 1 所示。由图 1 可以看出,随着改良剂含量增加,黑麦草和白三叶草中丙二醛含量呈下降趋势。黑麦草丙二醛含量 CK 与 Q₅ 比较差异不显著, Q₅ 与 Q₁₀ 比较差异显著, Q₁₀ 与 Q₂₀ 比较差异不显著,说明 Q₁₀ 和 Q₂₀ 处理水平的污泥有机肥有助于缓解重金属对植物的胁迫,但 Q₁₀ 和 Q₂₀ 处理对缓解黑麦草生长重金属胁迫没有显著差异。白三叶中丙二醛含量 CK 与 Q₅, Q₁₀, Q₂₀ 比较差异显著。加改良剂的 3 个处理比较无显著差异。说明污泥有机肥缓解了重金属对白三叶的胁迫作用,但施肥量对于缓解效果影响不大。相同处理中,白三叶丙二醛含量要高于黑麦草,说明黑麦草更能适应逆境。

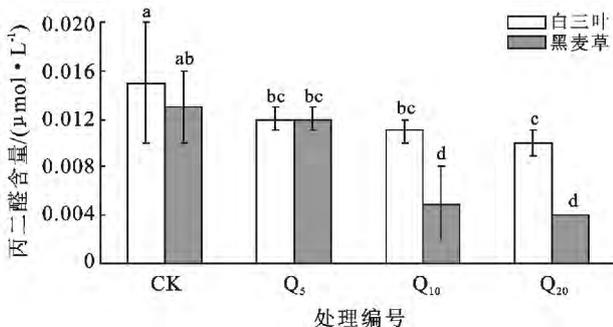


图 1 不同处理下,黑麦草、白三叶中丙二醛含量

2.4 铅锌尾矿添加改良剂对 4 种植物体内重金属含量的影响

由图 2—6 可知,黑麦草中 Zn 最大累积量为 1 912.11 mg/kg, Pb 最大吸收量为 385.58 mg/kg,

Cu 最大量为 55.80 mg/kg, Cr 最大量 3.19 mg/kg, Cd 最大量 7.75 mg/kg,随着污泥有机肥含量增加,黑麦草中锌、铅、镉的积累量在 Q₁₀ 处理下达到最大,在 Q₂₀ 处理下降低, Q₁₀ 与 Q₂₀ 比较 Zn 累积量显著下降。Cu 和 Cr 的含量随污泥有机肥含量增加不断升高。白三叶 Zn 最大累积量为 2 034.19 mg/kg, Pb 最大吸收量为 452.69 mg/kg, Cu 最大量为 59.54 mg/kg, Cr 最大量 8.58 mg/kg, Cd 最大量为 16.09 mg/kg,随着污泥有机肥施入量增加,5 种重金属在白三叶体内富集量呈先增高后降低的趋势, Zn, Pb, Cu, Cr 在 Q₁₀ 处理下含量达到最大,在 Q₂₀ 处理下累积量下降,其中 Zn 累积量差异显著,其余 4 种重金属差异不显著,说明有机肥含量加大有助于降低白三叶对 Zn 的吸收。草木樨 Zn 最大累积量为 1 691.66 mg/kg, Pb 最大吸收量为 487.80 mg/kg, Cu 最大量为 75.86 mg/kg, Cr 最大量 8.33 mg/kg, Cd 最大量 10.87 mg/kg,随着污泥有机肥含量增加,5 种重金属在其植物体内富集量先增高后降低,且都在 Q₁₀ 处理下达到最大值。Q₁₀ 与 Q₂₀ 两处理比较 Zn, Pb, Cu, Cd 累积量显著下降。沙打旺中 Zn 最大累积量 1559.59 mg/kg, Pb 最大吸收量 529.37 mg/kg, Cu 最大量为 88.99 mg/kg, Cr 最大量 15.55 mg/kg, Cd 最大量 10.18 mg/kg,随着污泥有机肥含量增加, Zn, Pb, Cr 这 3 种重金属在其体内富集量不断增高,在 Q₂₀ 处理下达到最大值。Cu 在 Q₁₀ 处理下累积量最大,在 Q₂₀ 处理下显著降低。

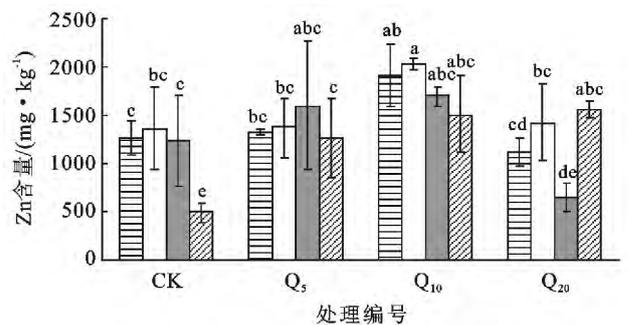


图 2 不同处理水平下, Zn 在 4 种植物体内含量

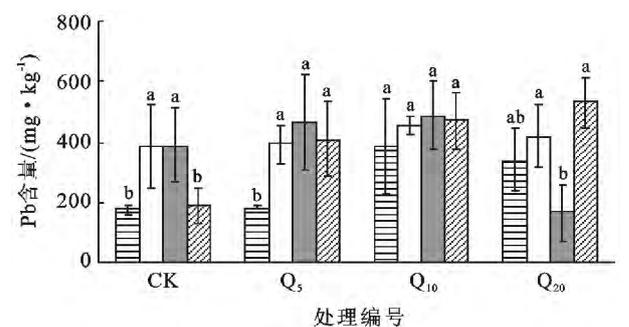


图 3 不同处理水平下, Pb 在 4 种植物体内含量

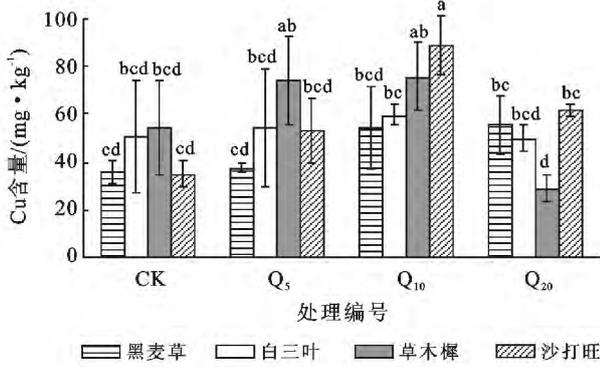


图 4 不同处理水平下, Cu 在 4 种植物体内含量

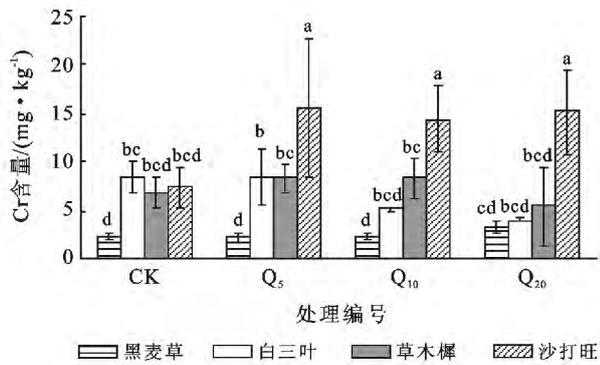


图 5 不同处理水平下, Cr 在 4 种植物体内含量

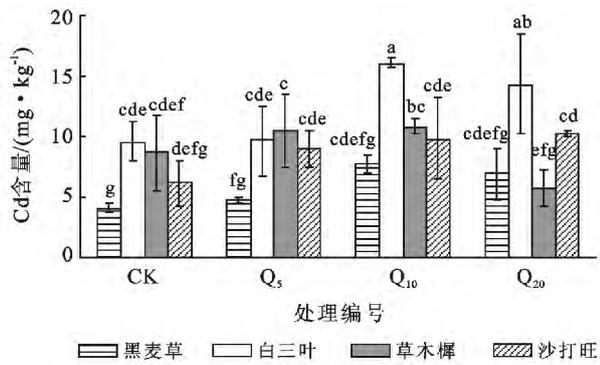


图 6 不同处理水平下, Cd 在 4 种植物体内含量

3 结果讨论

污泥有机肥是在城市废水处理过程中所产生的一种有机肥料,含有大量的有机质和矿物质,可以提供植物生长过程中所需要的养分。本试验结果表明施加污泥有机肥可以促进植物生长,且在 Q₂₀ 处理水平下,植物黑麦草、白三叶和沙打旺的株高、根长、鲜重等指标均达到试验的最大值。金树权^[12]等研究发现,草坪草马尼拉的生长势随污泥堆肥添加比例提高而增加,与本试验结果相似。从试验结果可以看出,黑麦草在 CK, Q₅, Q₁₀, Q₂₀ 这 4 种处理下,根长差异显著,根长的生长促进了植物对营养物质的吸收利用,促进植物生长。铅锌尾矿中重金属 Zn 和 Pb 含量很高,在植物生长过程中很容易产生毒害作用。Pb 进

入植株后会在营养器官根茎叶中累积。Pb 对植物生长影响主要是抑制根部生长。Q₁₀ 处理下草木樨植株中 Pb 含量高于其他 3 个处理,进而造成草木樨 Q₁₀ 处理下根长小于 Q₅,这是由于有机肥在促进植物生长过程中吸收了过量的 Pb,从而导致根部受损。植物在尾矿中生长根部受害最直接,由于重金属浓度高致使根尖分生区细胞分裂受阻,根部吸收重金属量最高,直接影响根的生长,表现为根长度的差异。根系的生长又会直接影响到植物的正常生长^[13]。

本次试验结果显示, Q₅, Q₁₀, Q₂₀ 与 CK 比较,黑麦草、白三叶、沙打旺叶绿素 a 和叶绿素 b 较增高。说明添加污泥有机肥有利于提高植物的叶绿素含量。李艳霞^[14]等试验也得出城市污泥堆肥没可以明显提高黑麦草叶绿素含量。丙二醛是膜脂氧化的产物,丙二醛含量间接反应了植物的受损程度^[15]。试验研究结果显示,随污泥有机肥含量增加,黑麦草、白三叶中丙二醛的含量下降,污泥有机肥降低了尾矿的毒害作用。

有机肥改良不仅可以改良尾矿理化性质,还可以增加土壤肥力,一定程度上影响了植物根系的生长,其中腐殖质通过络合、螯合反应降低有效态重金属的含量^[16-18]。污泥有机肥降低了重金属的毒害作用,促进了铅、锌、铜、镉、铬的累积。随着有机肥含量增加,黑麦草、白三叶、草木樨铅、锌、镉含量在 Q₁₀ 处理达到最大值,在 Q₂₀ 处下降。白三叶、草木樨、沙打旺吸收铜的量在 Q₂₀ 处达到最大。这可能是达量污泥有机肥增加了尾矿中铅、锌、镉重金属结合态含量,重金属有效态含量降低抑制了植物的吸收。祖艳群^[18]等研究发现,猪粪能减少 Zn 向植物体内转移,和本研究结果相似。

4 结论

污泥有机肥可以改良尾矿,促进草本植物的生长。随着有机肥含量增高,4 种植物的生物量,株高和根长都有不同程度的增加。Q₂₀ 处理下黑麦草、白三叶和草木樨的生物量、株高提高程度最显著。施加污泥有机肥可以提高植物体中的叶绿素 a+b 含量,还可以降低黑麦草白车轴草中的丙二醛含量。Q₂₀ 处理水平下降低了黑麦草、白三叶、草木樨 3 种植物对铅和锌的富集量,降低了铅锌尾矿中的重金属对植物的毒害作用。

[参 考 文 献]

[1] Conesa H M, Robinson B H, Schulin R, et al. Growth of *Lygum spartum* in acid mine tailings: Response of

- plants developed from seedlings, rhizomes and at field conditions[J]. *Environmental Pollution*, 2007, 145(3): 700-707.
- [2] Teng Ying, Luo Yongming, Huang Changyong, et al. Tolerance of grasses to heavy metals and microbial functional diversity in soils contaminated with copper mine tailings[J]. *Pedosphere*, 2008, 18(3):363-370.
- [3] 郝秀珍,周东美,薛艳,等.天然蒙脱石和沸石改良对黑麦草在铜尾矿砂上生长的影响[J].*土壤学报*,2005,42(3):434-439.
- [4] 杨先伟,张满满,王润沛,等.矿山重金属污染及植物修复研究进展[J].*科技信息*,2010(21):44.
- [5] 余贵芬,蒋新,孙磊,等.有机物质对土壤镉有效性的影响研究综述[J].*生态学报*,2002,22(5):770-776.
- [6] 钟熹光,吴启堂,林毅.城市污泥直接施用对农田的生态效应研究初报[J].*热带亚热带土壤研究*,1992,1(2):91-98.
- [7] 郭娟兰,王逢,张青喜,等.太原市污水污泥农业利用研究[J].*农业环境保护*,1993,12(6):254-262.
- [8] 陈同斌,高定,李新波.城市污泥堆肥对栽培基质保水能力和有效养分的影响[J].*生态学报*,2002,22(6):802-807.
- [9] 孔祥生,易现封.植物生理学实验技术[M].北京:中国农业出版社,2008:78-79.
- [10] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2005.
- [11] 史树德,孙亚卿,魏磊.植物生理学实验指导[M].北京:中国林业出版社,2011.
- [12] 金树权,周金波,陈若霞,等.污泥堆肥草坪基质利用对草坪生长及土壤和水环境的影响[J].*环境科学*,2013,34(10):3969-3974.
- [13] 田胜尼,刘登义,王峥峰,等.铜尾矿对 5 中豆科植物根系生长的影响[J].*生态环境*,2005,14(2):199-203.
- [14] 李艳霞,赵莉,陈同斌.城市污泥堆肥用作草皮基质对草坪草生产的影响[J].*生态学报*,2002,22(6):797-801.
- [15] 何冰,叶海波,杨肖娥.铅胁迫下不同生态型东南景天叶片抗氧化酶活性及叶绿素含量比较[J].*农业环境科学学报*,2003,22(3):274-278.
- [16] 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.
- [17] 唐明灯,艾绍英,罗英健,等.有机无机配施对生菜生长及其 Cd, Pb 含量的影响[J].*农业环境科学学报*,2012,31(6):1104-1110.
- [18] 祖艳群,李元,赵娜,等.施用有机肥对小花南芥和中华山蓼生长生理和 Pb/Zn 累积特征的影响[J].*农业环境科学学报*,2013,32(3):508-516.

(上接第 166 页)

(2) 在 -4 和 -8 cm 土层处,4 种材料(无机性沙化土地改良材料,综合性沙化土地改良材料,石膏性沙化土地改良材料,高碳性沙化土地改良材料)按不同比例(5%,9%,12%)的添加整体上对沙化土壤的传热速度有不同程度的促进作用,总体影响没有 0 ~ -4 cm 显著。

(3) 在 -4 cm 土层石膏性和高碳性沙化土地改良材料的施加比例越低,混合土壤的导热率越小,综合性沙化土地改良材料组则结果相反;在 -8 cm 土层综合性沙化土地改良材料随施加比例的增高,土壤导热率降低。在 -4 ~ -8 cm 土层,4 种材料对沙化土壤导热率的促进效果由大至小依次为:石膏性沙化土地改良材料 > 无机性沙化土地改良材料 > 高碳性沙化土地改良材料 > 综合性沙化土地改良材料。可见,综合性沙化土地改良材料和高碳性沙化土地改良材料是对沙化土壤很好的改良材料。

(4) 在施加单一的沙化土地改良材料时,需要特别关注土壤埋深与混合比例,对于不同程度的沙漠地区改良与植被修复具有重要的意义。综合性沙化土地改良材料在 -4 ~ -8 cm 土层深度最适宜的添加比例为 9%,在该比例下对降低沙化土壤的导热率效果较佳。

[参 考 文 献]

- [1] 张顺谦,郭海燕,罗勇.气候变化和载畜量对若尔盖草地沙化的驱动力评价[J].*中国草地学报*,2007,29(5):64-71.
- [2] 高志球,姜冬梅.土壤热传导方程解析解和那曲地区土壤热扩散率研究[J].*气象学报*,2002,60(3):352-360.
- [3] Wierenga P J, Nielsen D R, Hagan R M. Thermal properties of a soil based upon field and laboratory measurements[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1969, 33(3): 354-360.
- [4] 李毅,邵明安,王文焰,等.质地对土壤热性质的影响研究[J].*农业工程学报*,2003,19(4):62-65.
- [5] Chen Yongping, Shi Mingheng, Li Xiaochuan. Experimental investigation on heat, moisture and salt transfer in soil[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2006, 33(9): 1122-1129.
- [6] Bird R B, Stewart W E, Lightfoot E N. Transport phenomena[M]. John Wiley & Sons, 2007.
- [7] 秦耀东.土壤物理学[M].北京:高等教育出版社,2003.
- [8] 吴竟仑,李永丰,张志勇,等.土层深度对稻田杂草种子出苗及生长的影响[J].*江苏农业学报*,2003,19(3):170-173.