

蚯蚓在德兴铜矿废弃地生态恢复中的作用

戈 峰¹, 刘向辉¹, 潘卫东¹, 高 林², 曾以平³, 江炳真⁴

(1. 中国科学院动物研究所, 北京 100080; 2. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100083; 3. 江西井冈山企业集团大井林场, 江西 343600; 4. 江西省吉安市农业局, 江西 340000)

摘要:为探讨蚯蚓在德兴铜矿废弃地生态恢复中的作用,系统地研究了蚯蚓在不同处理尾砂土、复垦土上生长发育状况,蚯蚓对铜离子富集作用及植物生长影响。结果表明:1)不同比例的铜矿尾砂土中的蚯蚓的存活率差异很大,尾矿砂含量越高,存活率越低,而且同一类型尾砂土中的蚯蚓随着时间的推移,存活率降低。2)不同类型的复垦土中的蚯蚓的存活率也有类似现象,只是变化幅度较小。3)不同类型的尾砂土和复垦土中的蚯蚓体重变化,随着时间的推移,体重逐渐变轻,而且尾矿砂含量越高,体重下降幅度越大。(4)蚯蚓对铜矿中的铜元素富集能力很强,可达体内组织的 82.5~1218.4 mg/kg。(5)尾砂土和复垦土中加入蚯蚓和蚓粪后,西红柿的茎长、根长和干重均明显高于对照。由此还进一步讨论了矿山废弃地生态恢复的生物(蚯蚓)技术理论和方法。

关键词:蚯蚓; 矿山废弃地; 生态恢复

The role of earthworm in the ecological restoration of mining wasteland of Dexing Copper Mine in China

GE Feng¹, LIU Xiang-Hui¹, PAN Wei-Dong¹, GAO Lin², ZENG Yi-Ping³, JIANG Bing-Zhen⁴ (1. Institute of Zoology, CAS, Beijing 100080, China; 2. Research Center for Eco environment Sciences, CAS, Beijing 100080, China; 3. Enterprise Group of Jinggangshan City, Jiangxi 343600, China; 4. Agricultural Department of Ji'an City, Jiangxi 340000, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(11): 1790~1795.

Abstract: In order to approach the role of earthworm in the ecological restoration of mining wasteland of Dexing Copper Mine in China, the survival rate and biomass of earthworms *Eisenia foetida* sarrigny raised in reclamation soil and reclamation soil with tailing sand in Dexing Copper Mine were studied. The results showed the higher mortality and lower weight were found in earthworm population which raised in reclamation soil with higher content of sands. The copper content of earthworm tissue were 82.5~1218.4 mg/kg after earthworm raised in 90 days. The highest copper content of earthworm tissue accounted for 0.122% of total earthworm tissue. The length of roots and stems and biomass of tomato planted in reclamation soil or reclamation soil with tailing sand which added with earthworms or earthworm casts were higher than that without earthworm nor earthworm casts. The principles and methods of earthworm technology in the ecological restoration of mine wasteland were also discussed in this paper.

Key words: earthworm; mining wasteland; ecological restoration

文章编号: 1000-0933(2001)11-1790-06 中图分类号: Q958.1 文献标识码: A

矿山废弃地不但占据了大量土地,而且引起了环境污染。迄今,国内外已对多种类型的矿山废弃地进行了生态恢复^[1],但由于复垦后土壤保水保肥能力迅速下降,常出现生态恢复后又退化的现象。为此,迫切需要应用新的技术,使矿山废弃地在尽快恢复的同时,又能持久地保持其恢复后的功能。

基金项目: 国家“九五”科技攻关资助项目(96-920-13-03)。

收稿日期: 2001-02-14; **修订日期:** 2001-09-05

作者简介: 戈 峰(1963~),男,博士,研究员。主要从事生态学和害虫生态调控研究。

江西德兴铜矿是亚洲最大的铜矿之一,每年都有大量的尾矿砂排出。由于这些尾矿砂仅是一些细砂粒状混合物,其物理结构不良,持水保肥能力差,且 N、P、K 及有机质含量极低,土壤极端贫瘠,其中重金属(尤其是铜离子)浓度过高,植物难以在此生长。目前,常用的方法是在尾矿砂上面覆上一层 30~50 cm 的土(通称为复垦土)。但由于这层土取自于尾矿库周边山上,其土质及肥力都较差,尚需要通过一系列手段加以改良,才有利于植物生长发育。

蚯蚓是世界上最有益动物之一。早在 1881 年,英国科学家达尔文曾经进行了“蚯蚓与土壤形成”的关系研究,认为蚯蚓在改良土壤结构和肥力方面有重要作用,称它为“农业的犁手”和“改良土壤的能手”。近年来,随着可持续发展的需要,国外有关蚯蚓生物学、生态学有大量研究报告^[3]。尤其是 Vimmersted & Finney^[4]率先将蚯蚓引入到煤矿山的土壤复垦之中,并取得了满意结果;Curry^[5]系统地研究了蚯蚓在退化土壤生态恢复中的作用,Butt 等^[6]进一步发展了“蚯蚓繁殖盒”技术,更好地将蚯蚓应用到退化土壤恢复之中。研究表明,蚯蚓对土壤的机械翻动起到疏松、拌和土壤效应,改造了土壤结构性、通气性和透水性,使土壤迅速熟化;同时排出的粪便,不但含有丰富的有机质和微生物群落,而且具有很好的团粒结构,保水保肥能力能,促进了植物的生长发育,是目前很好的土壤改良剂之一^[7]。但有关蚯蚓在铜矿废弃地生态恢复中的作用尚未见有报道。

本文针对江西德兴铜矿废弃地土壤理化性质差和重金属含量高的特点,研究蚯蚓在不同类型的铜矿尾矿砂和复垦土上生长发育状况,以及蚯蚓对铜矿尾矿砂中铜的富集作用,观察蚯蚓对铜矿尾矿砂和复垦土上植物生长发育的协同作用,以期通过蚯蚓改良土壤理化性质和肥力,同时又富集其中的重金属含量,减少重金属污染,达到矿山废弃地生态恢复持续利用的目的。

1 材料与方法

1.1 矿区概况

德兴铜矿位于江西省上饶地区的德兴市,北纬 28°41',东经 117°44',全矿总面积 100 km²。矿区内地貌为低山、丘陵,海拔 65~500 m,地势起伏,沟岭相间。本试验地设在德兴铜矿 1 号尾矿库。该库面积为 209.98 hm²。其中坝体面积 173.3 hm²,库内尾砂沉积面积 23.49 hm²,库内水面 16.19 hm²。该库 1965 年投入使用,1987 年闭库,堆积尾矿 2 150 万 m³,坝体绝对高度 87 m。

1.2 试验材料

1.2.1 蚯蚓 赤子爱胜蚓 *Eisenia foetida* sarigny 大平 2 号,蚯蚓粪系实验室饲养获得。

1.2.2 试验土壤 ①复垦土 A 和复垦土 B 分别取自于德兴铜矿尾矿库左右两边山上 0~10 cm 深度的土壤 ②尾矿砂来自于德兴铜矿选矿后的 0.05 mm 以下的粉粒,其速效 N、P、K 分别为 1.7 mg/kg、0.84 mg/kg 和 18.6 mg/kg,含铜量为 2524 mg/kg。

1.2.3 植物 西红柿

1.3 试验方法

1.3.1 蚯蚓在不同类型的铜矿尾矿砂土和复垦土上生长发育状况 将德兴铜矿库的尾矿砂与尾矿库周围山上的土壤(即复垦土 A)按 100:0,90:10,50:50,0:100 相混而成组成不同类型的尾矿砂土,并加入 1%~5%左右的有机肥(牛粪)。

在上面不同处理的尾矿砂土、复垦土内接入一定密度蚯蚓(赤子爱胜蚓大平 2 号),每 7d 观察各处理蚯蚓的生长速率、死亡率及体重变化。

1.3.2 蚯蚓对尾矿山中铜元素的富集作用 在饲养蚯蚓的牛粪饵料中加入不同比例的德兴铜矿尾矿砂,形成如下的试验处理:(1)对照,不加德兴铜矿的尾矿砂;(2)加 1%的尾矿砂;(3)加 2%的尾矿砂;(4)加 3%的尾矿砂;(5)加 5%的尾矿砂。

取口径为 12 cm、底部有透气孔的塑料盆,在盆底垫一层纱布,保证透气性良好;再铺一层潮湿的泥土,防止蚯蚓从底部钻出;然后分别装入不同比例的德兴铜矿尾矿砂处理的牛粪各 300g,每个处理梯度做 3 个重复。之后在各盆中分别放入 100 条蚯蚓,盆上做好标记。将它们放在阴凉的暗处培养,定期喷射少量的水以保持饵料的湿度。实验在室温下进行。每隔两周换一次蚯蚓的饵料,并记录每个盆中的蚯蚓现存条数,在

万分之一的电子天平上称重,同时从每盆中随机取出 5 条蚯蚓样品留做测铜用。采用二乙基二硫代氨基甲酸钠比色法测定蚯蚓体内铜。

1.3.3 对植物(西红柿)生长发育影响 将一定密度蚯蚓(每处理 2 条),或将蚓体及蚓粪微生物复合体按不同浓度(5%的蚯蚓粪)接或拌在尾砂土(尾矿砂:复垦土 A=8:1)、复垦土 A 和复垦土 B 上,再盆栽植物西红柿,观测西红柿的根系、茎叶生长发育及生物量状况。

2 结果分析

2.1 蚯蚓在不同类型的铜矿尾砂土和复垦土上生长发育状况

在不同处理的尾砂土、复垦土内接入一定密度蚯蚓(赤子爱胜蚓大平 2 号),观察各处理蚯蚓的生长速率、死亡率及体重变化的结果表明:不同类型的尾砂土中的蚯蚓的存活率变化不同,尾矿砂含量越高,存活率越低,而且同一类型尾砂土中的蚯蚓随着实验时间的延长,存活率降低。饲养在 100%和 95%的纯尾矿和尾砂土中的蚯蚓,90 d 内全部死亡,在 90%尾砂土中的蚯蚓,则 105 d 内全部死亡,但 85%以下的尾砂土,105 天内还有一定的蚯蚓存活率(表 1 和图 1)。

表 1 不同类型的尾砂土和复垦土中每 15d 内蚯蚓死亡的平均数值(条数)

Table 1 The mean died earthworms in different types of reclamation soil and reclamation soil with tailing sand

处理 Treatments	实验天数 Survey days(d)							
	15	30	45	60	75	90	105	
尾砂土 1(100%MT*)		0.6	1.8	3	1	0.8	0	0
尾砂土 2(95%MTS+5%RS**)	0	0.4	1	1.2	3.4	0	0	
尾砂土 3(90%MTS+10%RS)	1.25	0	0.5	1.125	2.375	0.375	0	
尾砂土 4(85%MTS+15%RS)	0.25	0	0.375	0.625	1.125	2.25	0.375	
尾砂土 5(80%MTS+20%RS)	0	0	1.375	0.375	0.875	1.25	1.375	
尾砂土 6(75%MTS+25%RS)	0.125	0.25	0.375	0.375	0.875	1.375	1.125	
尾砂土 7(50%MTS+50%RS)	0	0.125	1.125	0.25	0.25	0.625	0.2	
复垦土 A1(RSA+5%C)	0.1	0	0.4	0.2	0.1	0.1	0.1	
复垦土 A2(RSA)	0.2	0.3	0.5	0.4	0	0.4	0.3	
复垦土 B1(RSB+5%C)	0.3	0.4	0.5	0	0.2	0.3	0.9	
复垦土 B2(RSB)	0.1	0.8	0.2	0	0.1	0.2	0.5	

* MTS 为尾矿砂 Mine tailing sand, RS 为复垦土 Reclamation soil, C 为蚓粪 Casts

生活在不同类型复垦土中的蚯蚓存活率高于尾矿砂,且复垦土 A 高于复垦土 B,加了蚯蚓粪的复垦土比未加蚯蚓粪的复垦土的蚯蚓存活率略低(图 2)。

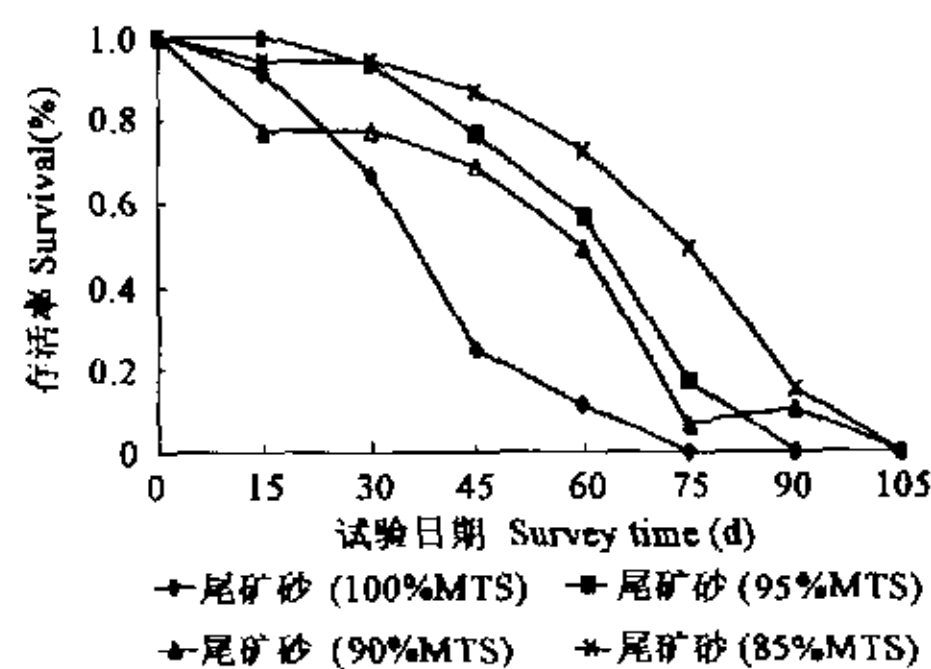


图 1 不同类型的尾矿砂中的蚯蚓的存活率

Fig. 1 The survival rate of earthworms in different types of reclamation soil with tailing sand

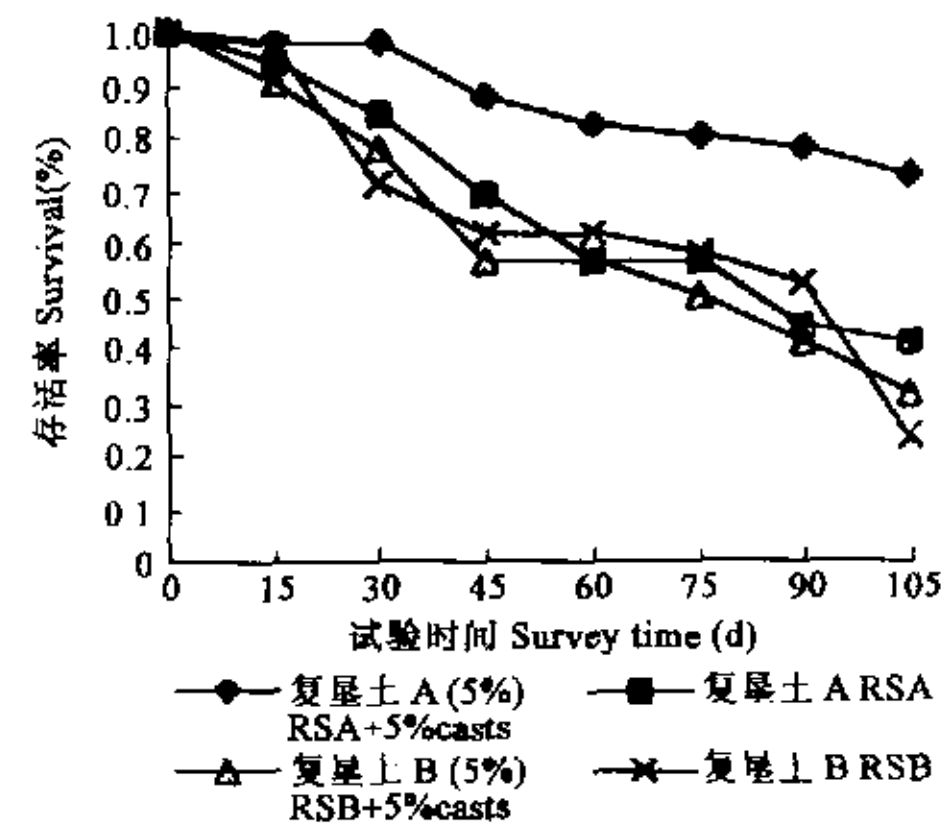


图 2 不同类型复垦土中蚯蚓的存活率

Fig. 2 The survival rate of earthworms in different reclamation soil

在不同类型的尾砂土和复垦土中饲养的蚯蚓体重变化,结果见表 2 和图 3。由于培养体内有机质含量有限,因此随着试验时间的延长,蚯蚓体重逐渐变轻,而且尾矿砂含量越高,体重减少幅度越大(表 2),复垦土中饲养的蚯蚓体重变化呈直线下降(图 3)。

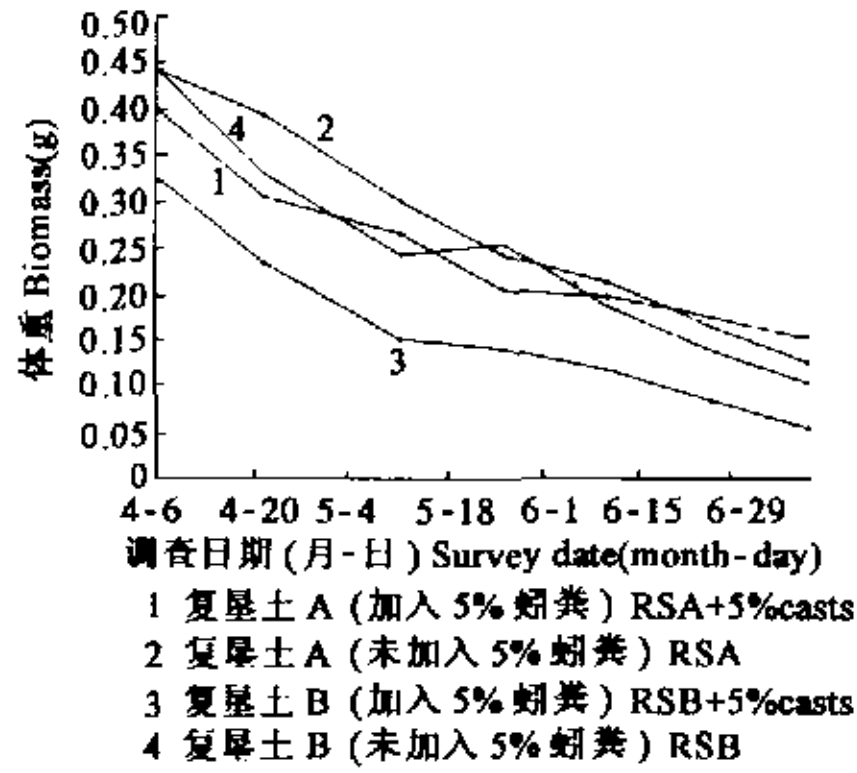


图 3 不同类型复垦土中的体重变化
Fig. 3 The change of earthworm weight in different reclamation soil

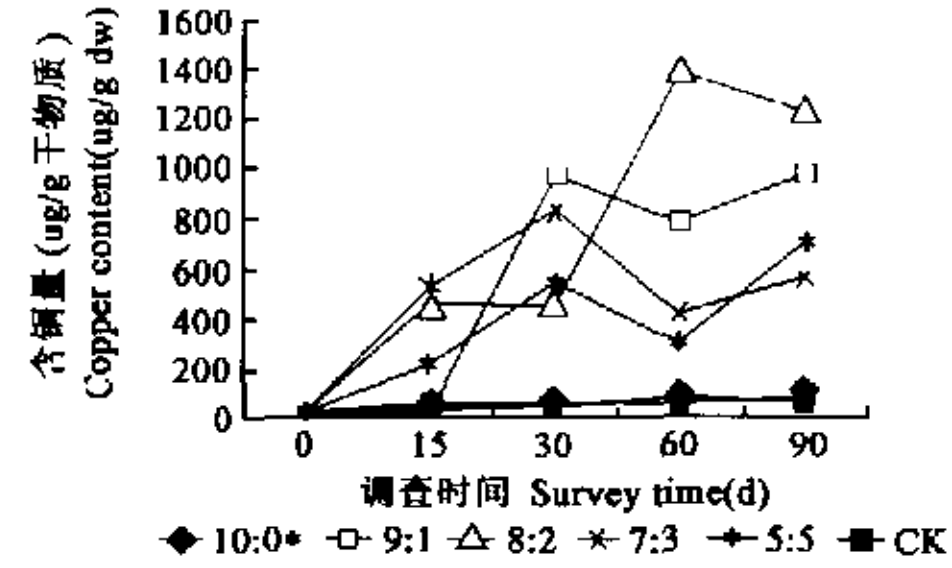


图 4 饲养在不同处理尾矿砂中的蚯蚓体内含铜量变化
Fig. 4 The copper change in earthworm tissue when earthworms were raised in different treatment of tailing sand (* is cattle waste to mine tailing sand)

表 2 不同类型的尾矿砂和复垦土中的蚯蚓单位时间内体重变化(g/15 d)

Table 2 The change of earthworm weight with treatment days when earthworms were raised in reclamation soil and reclamation soil with tailing sand

处理 Treatments	实验天数 Days(d)						
	15	30	45	60	75	90	105
尾砂土 1 (100%MTS)	-0.169	-0.098	-0.03	-0.094	0.143	0	0
尾砂土 2 (95%MTS+5%RS)	0.12	-0.054	-0.127	0.001	-0.042	0	0
尾砂土 3 (90%MTS+10%RS)	-0.127	-0.068	-0.04	0.068	-0.029	-0.013	0
尾砂土 4 (85%MTS+15%RS)	-0.078	-0.114	0.046	-0.021	-0.059	0.083	0
尾砂土 5 (80%MTS+20%RS)	-0.068	0.141	-0.087	-0.051	-0.059	0.043	-0.001
尾砂土 6 (75%MTS+25%RS)	-0.032	-0.119	0.043	-0.058	-0.033	-0.03	0.033
复垦土 A (RSA+5%C)	0.032	0.092	-0.004	-0.061	-0.007	-0.021	-0.022
复垦土 A (RSA)	0.017	-0.048	-0.093	-0.059	-0.028	0.047	-0.039
复垦土 B (RSB+5%C)	0.055	-0.089	-0.082	0.01	-0.023	-0.033	-0.031
复垦土 B (RSB)	0.016	-0.11	-0.088	0.011	-0.066	-0.046	-0.036

* MTS,RS,C are the same as table 1

2.2 蚯蚓对铜的富集作用

在蚯蚓饵料牛粪中加入不同比例的尾矿砂饲养蚯蚓,经过一段时间后,发现蚯蚓对尾矿砂铜的富集能力很强,90 d 的测定结果表明:蚯蚓的富集系数(即现有的含铜量与初始含铜量之比)为 3.5~51.2,体内含铜量为 82.5~1218.4 mg/kg,若以组织内最大含铜量 1218.4 mg/kg 计算,相当于体重的 0.12%(表 3,图

4). 可见用蚯蚓来富集矿山废弃地内的铜作用是明显的。

表 3 饲养在不同处理尾矿砂中的蚯蚓体内含铜量

Table 3 The copper contents in earthworm tissue when earthworms were raised in different treatment of tailing sand

处理 Treatments	实验天数 Survey days(d)					富集系数 Biological magnification index
	0	15	30	60	90	
10:0 牛粪(CW):尾矿砂(MTS)	23.8	59.3	62.0	59.9	82.5	3.5
9:1 牛粪(CW):尾矿砂(MTS)	23.8	28.8	975.0	782.3	972.5	10.9
8:2 牛粪(CW):尾矿砂(MTS)	23.8	458.8	453.0	1376.9	1218.4	51.2
7:3 牛粪(CW):尾矿砂(MTS)	23.8	526.3	833.1	416.7	562.5	23.6
5:5 牛粪(CW):尾矿砂(MTS)	23.8	221.3	545.1	296.8	700.0	29.4

* CW is cattle wastes, MTS is the same as table 1.

表 4 尾矿砂和复垦土内加入蚯蚓和
蚓粪后的根长、茎长和干重比较

Table 4 Comparison of length of roots and stems and biomass of tomato in reclamation soil and reclamation soil with or without earthworm and earthworm casts

处理 Treatments	类型 Types	根长 (cm) Root length	茎长 (cm) Stem length	干重 (g) Biomass
尾矿砂 MTS				
1(ck)		1.6	2.8	0.027
2(2 条蚯蚓)	MTS+2worms	1.9	5.5	0.075
3(5% 蚓粪)	MTS+5%casts	2.6	3.8	0.048
4(2 条蚯蚓 + 5% 蚓粪)	(MTS+2worms+5%casts)	6.2	13.7	0.375
复垦土(RSA)				
A1(ck)		2.7	5.9	0.07
A2(2 条蚯蚓)	RSA+2worms	6.2	11.4	0.592
A3(5% 蚓粪)	RSA+5%casts	5.4	12.2	0.415
A4(2 条蚯蚓 + 5% 蚓粪)	RSA+2worms+5%casts	14.7	21.2	1.69
RSB				
B1(ck)		7.5	8.7	0.498
B2(2 条蚯蚓)	RSB+2worms	5.1	11.7	0.566
B3(5% 蚓粪)	RSB+5%casts	10.4	10.5	1.765
B4(2+5%)	RSB+2worms+5%casts	12.6	16.5	0.866

2.3 蚯蚓对铜矿尾矿砂和复垦土上植物生长发育的协同作用

在尾矿土、复垦土 A 和复垦土 B 中接入一定密度蚯蚓或蚯蚓粪后盆栽西红柿,对其根系、茎、叶生长发育及生物量的测定结果表明,无论是尾矿土和还是复垦土中加入蚯蚓和蚓粪后,西红柿的茎长、根长和干重均高于对照。而且增加的顺序呈现出 2 条蚯蚓+5% 蚓粪>5% 蚓粪>2 条蚯蚓>对照的趋势。表明了蚯蚓及其蚓粪在改良土壤、促进作物生长发育中的作用。

3 讨论

3.1 蚯蚓在矿山生态恢复的作用

由于德兴铜矿尾矿砂有机质含量极低,且重金属(铜含量 2524 mg/kg)浓度过高,因此,直接影响着蚯蚓的生长发育。通过亚显微结构观察表明,蚯蚓富集有毒物质后,其体壁细胞收缩,纵肌拉紧,体腔细胞疏松,体内充满了黑色颗粒等变化,说明了重金属铜等对蚯蚓的生理毒性作用。

本文研究表明,蚯蚓在铜矿纯尾矿砂上不能生存,但在复垦土上或加了一定的复垦土的尾矿

山上却能成活。为此,根据 Butt 等^[6]提出的“蚯蚓繁殖盒”技术,进一步改进为“蚯蚓的接种-蚯蚓投放于尾矿砂上-富集有毒物质-改良土壤和去除有毒物质”的接种投放技术,并在德兴铜矿 1 号尾矿库试验成功。经过接种半年后,发现了一定数量的蚯蚓已在矿山废弃地上定居下来,因此蚯蚓可作为矿山恢复地生态恢复的一个重要生物手段,有关它的进一步应用还需要研究。

研究结果表明,蚯蚓对尾矿砂中铜元素富集作用很强,可达到体重的 0.12%,因此可以将蚯蚓接种投入尾矿废弃地,让其在矿山废弃地中富集一定数量的有害元素,然后采用化学方法将蚯蚓取出,进行适当的处理,将有毒物质去除,以达到有毒物质去除目的。

3.2 矿山生态恢复的生物技术理论探讨

3.2.1 限制因子定律 生物的生长发育受多种因子的影响。在诸多的生态因子中,使生物的耐受性接近或达到极限,使生物的生长发育、生殖、活动以及分布等直接受到限制,甚至死亡的因子称为限制因子。对于矿山废弃地,由于:①尾矿仅是细砂粒状混合物,持水保肥能力差;②N、P、K 及有机质含量极低;③重金

属(如铜元素)浓度过高;① pH 值过高或是过低^[8]等因子,都是矿山恢复的限制因子。因此通过各种手段(包括生物手段)使各限制因子转变为非限制因子,从而有利于矿山植物的生长发育和繁殖。

3.2.2 生物富集作用原理 在生态系统中,生物与生物之间通过取食与被取食的关系而形成食物链,某些有机元素、重金属及其化合物,通过食物链,就会逐渐地在生物体内浓缩,呈现出营养级越高,浓度越来越大的现象,这种随食物链浓缩的作用称为生物富集作用或生物扩大作用(biological magnification) 蚯蚓的富集能力很强,据测定,对铜的富集系数为 2.4~51.2 倍,有些蚯蚓组织含铜量为 1462×10^{-3} ,相当于体重的 0.11%。因此,通过蚯蚓的富集作用,可以去除或减轻重金属的污染。

3.2.3 土壤生物持续利用原理 生态系统的可持续利用,关键是土壤的可持续性,而衡量其可持续性的指标是土壤中的微生物含量和土壤中的动物丰富度,其中蚯蚓在里面又起着非常重要的作用^{[9][10]}。

针对矿山废弃地土壤理化性质差和重金属含量高的特点,可以通过“蚯蚓的接种-蚯蚓投放于尾砂上-富集有毒物质-改良土壤和去除有毒物质”的接种投放技术,改良土壤理化性质,增加土壤通气和保水能力,同时又富集其中的重金属含量,减少重金属污染,达到矿山废弃地生态恢复持续利用的目的。因此,蚯蚓作为矿山废弃地中的一个重要生物手段,将发挥着越来越重要的作用。

参考文献

- [1] 周树理. 矿山废弃地复垦与绿化. 北京:中国林业出版社, 1995. 23~46.
- [2] Edwards C A, Bohlen P J. Biology and Ecology of Earthworm. London: Chapman Hall, 1996. 151~168.
- [3] Edwards C A. The use of earthworm in the breakdown and management of organic wasters. In: Edwards, C. A. ed. *Earthworm Ecology*. St. Lucie Press, 1998. 327~351.
- [4] Vimmerstedt J P. and Finney J H. Impact of earthworm introduction on litter burial and nutrient distribution in Ohio stripmine spoil banks. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 1973, **37**:388~391.
- [5] Curry J P. The ecology of earthworms in reclaimed soils and their influence on soil fertility. In: Edwards, C. A. ed. *Earthworm Ecology*. St. Lucie Press, 1998, 253~261.
- [6] Butt K R, Rederickson J F, Morris R M. An earthworm cultivation and soil inoculation technique for land restoration. *Ecological Engineering*, 1995, (4):1~9.
- [7] Edwards C A, Abe T, Striganova B R. Structure and Function of Soil Community. Kkyoto: Kyoto University Press, 1995. 86~72.
- [8] 蓝崇钊, 束文圣. 采矿废弃地植被保护重建中的基质改良. *生态学杂志*, 1996, **15**(2):55~59.
- [9] Ge Feng, Shuster W D, Edwards C A, et al. The Aggregate stability of casts produced by earthworm in animal manure and inorganic fertilizer amended soil agroecosystem. *Pedobiologia* 2001, **45**(1):12~26.
- [10] Marinissen J C Y. and de Ruiter P C. Contribution of earthworms to carbon and nitrogen cycling in agro-ecosystems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 1993, **47**:59~74.