

铜污染对蚯蚓体重的影响与其铜富集特征

李志强, 王彬彬, 聂俊华*

(山东农业大学资源与环境学院, 山东 泰安 271018)

摘要:将筒育湿润淋溶土和有机物料以体积分数 1:1 混合, 加入硫酸铜模拟成 Cu^{2+} 0 ~ 200mg/kg 的污染土壤。投入赤子爱胜蚓, 以研究铜污染对蚯蚓生长和铜富集特征的影响。结果表明: 蚯蚓体重与土壤铜污染浓度呈抛物线关系, 低浓度的铜对蚯蚓生长有促进作用, Cu^{2+} 浓度 > 60mg/kg 时对其生长有抑制作用, 超过 100mg/kg 后铜污染浓度提高与污染接触时间延长均会加剧抑制程度, 严重时出现负增长。蚯蚓表皮及肠道中铜含量与其铜吸收总量都随外源铜浓度的增加与污染暴露时间的延长而增加, 且铜在肠道的积累速率大于表皮。土壤中铜浓度增加时肠道铜向表皮脂肪系统的运输增加, 各处理肠道中铜含量与表皮的比值都随着土壤中铜浓度的增加呈下降趋势, 但随着时间的推移有所提高。蚯蚓对污染土壤铜的有较强的富集能力, 在 Cu^{2+} 200 mg/kg 处理培养 21d 后, 蚯蚓肠道的铜浓度是土壤环境铜浓度的 2.65 倍, 铜富集总量达到最高值 0.674 毫克每 10 条。该结果对于探讨蚯蚓在铜污染土壤的适应机理, 提高其对污染土壤的修复能力有重要意义。

关键词: 蚯蚓; 铜污染; 肠道; 表皮; 富集

文章编号: 1000-0933(2009)03-1408-07 中图分类号: Q959, S154 文献标识码: A

Effects of copper on earthworm in body weight and its copper accumulating characteristics

LI Zhi-Qiang, WANG Bin-Bin, NIE Jun-Hua*

College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(3): 1408 ~ 1414.

Abstract: The tolerant mechanism of earthworm to copper was studied in a mixed medium of soil and organic material with a volume ratio of 1:1. The medium was contaminated with $\text{CuSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ and five levels of Cu^{2+} (0, 20, 60, 100, 200) mg $\cdot \text{kg}^{-1}$ were designed. Each treatment was replicated three times and 10 earthworms (*Eisenia fetida*) were added for each replicate. The effect of Cu on the weight of earthworm and its copper accumulation characteristics in epidermis and the gut was studied. Result showed that: the weight of earthworm had a parabola changing tendency with the increase of soil copper concentration. The growth of earthworm was enhanced by copper at low copper concentration and was restrained when Cu^{2+} concentration > 60mg/kg. If Cu^{2+} > 100 mg/kg, with the lengthening of the exposure period and the increasing of copper concentration, the restraining effect was more significant or even causing decline in body weight. Both of Cu content and Cu total accumulation in epidermis and gut were increased with the increasing of copper concentration and culturing time. The accumulating rate in gut was higher than that in epidermis. The increase of Cu concentration in medium could stimulate the transportation Cu from gut to epidermis sebum system. The ratio of Cu concentration in epidermis to that in gut was declined with the increase in copper dosage, but was risen by time. Earthworm had strong copper accumulation ability. The gut was 2.65 times the content of the environment when exposed in a medium with copper concentration of 200 mg/kg for 21 days, and the total accumulation reached to 0.674 mg per 10bar. The result should has an important significance in the research of the tolerant mechanism and the remediation ability of earthworm for polluted soil.

收稿日期: 2008-10-06; 修订日期: 2008-11-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jhnie@sdau.edu.cn

Key Words: earthworm; copper pollution; gut; epidermis; accumulation

含重金属的污染物通过各种途径进入土壤,引起农作物产量和质量的下降,并通过食物链危害人类的健康,导致大气和水环境质量恶化。利用蚯蚓修复重金属污染土壤是当前本领域的研究热点。蚯蚓可以通过其生命活动及与微生物的相互作用提高土壤中重金属的生物有效性^[1,2]。Ma. Y 等研究表明蚯蚓将 Pb、Zn 尾矿土壤有效态 Pb、Zn 含量分别提高了 48.2% 和 24.8%^[3]。在 Pb/Zn 尾矿种植木本豆科植物的同时引入蚯蚓,使产量提高了 10%~30%,植物吸收金属比率提高 16%~53%^[4]。成杰民^[5]指出 Cd 污染土壤上引进蚯蚓显著增加了黑麦草地上部的生物量,同时促进了黑麦草对 Cd 的吸收。

目前,中国北方大城市的蔬菜基地和部分商品粮基地因为长期施用化肥与农药,存在着不同程度的铜污染。王丹丹,胡锋等^[6]研究表明接种蚯蚓显著影响了黑麦草对铜的吸收,提高土壤有效态重金属(DTPA-Cu)含量、促进黑麦草地上部生长。戈峰,刘向辉等^[7]探讨蚯蚓在德兴铜矿废弃地生态恢复中的作用,发现蚯蚓对铜矿中的铜元素富集可达体内组织的 82.5~1218.4 mg/kg,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。本研究将硫酸铜加入到供试人工土壤中,用模拟试验方法研究不同浓度铜污染对蚯蚓体重、铜富集总量的影响及铜在蚯蚓肠道和表皮的富集特征,为深入研究蚯蚓对重金属污染土壤的适应机理及提高其富集能力提供依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

1.1.1 人工土壤

供试土壤为简育湿润淋溶土,质地轻壤,采自山东农业大学南校区教学基地,采样深度 0 到 10cm,土壤有机质含量 12.1 g/kg,全氮含量 7.1 g/kg,全磷含量 1.3 g/kg, pH6.8, 碱解氮 68.98mg/kg,有效磷 25.22 mg/kg,速效钾 81.73mg/kg。风干磨碎,过 2mm 筛。添加有机物料取自山东农业大学蚯蚓养殖基地,由羊粪秸秆混合物发酵腐熟而成。添加料及土壤均经高温灭菌锅压力 1.05kg/cm²,温度 120℃,灭菌 5 min。有机物料各组分养分状况列于表 1,风干后按照添加料和土壤体积分数 = 1:1 的比例混和。

表 1 有机物料营养成分

Table 1 The physical and chemical properties of organic material

有机物料 Organic material	含水量 (%) Water content	有机碳 (mg/g) Organic C	全钾 (g/kg) Total K	全氮 (g/kg) Total N
羊粪 Manure	22.0	180.3	6.98	10.2
秸秆 Straw	3.60	443.8	14.5	8.98

1.1.2 供试蚯蚓

蚯蚓(*Eisenia fetida*) 选用赤子爱胜蚓,为 OECD 推荐试验蚓种,由山东农业大学蚯蚓养殖基地(大齐牧业有限公司)提供,前期发育阶段以羊粪为饲料。蚯蚓规格为单条(0.35±0.05)g。试验前将其放在铺有一层喷湿棉花的瓷盘中进行脱粪处理,上覆一层湿润单层纱布作遮光,后置于恒温箱中 20℃吐泥 24h。

1.2 试验方案

选取 30cm×30cm×20cm 的聚乙烯材料的反应容器,底部留有排水孔,放入混合好的供试人工土壤 2kg,加入 CuSO₄·7H₂O,混匀。设 5 个处理,Cu²⁺ 浓度分别为 0、20、60、100、200 mg/kg,每个处理 3 次重复,以 0 mg/kg 的处理为对照 CK。

每个反应器中投入混合后的人工土壤 2kg,蚯蚓 10 条。分别于第 14 天,第 21 天采样测定。

1.3 测定方法

1.3.1 生长率

生长率(%) = [(培养后蚯蚓的体重 - 培养前蚯蚓的体重) / 培养前蚯蚓的体重] × 100

1.3.2 蚯蚓体中铜的测定

从反应器中取出蚯蚓,在白瓷盆中进行脱粪处理,使蚯蚓吐泥 24h,水洗,蜡盘中解剖,切掉尾部,分离出表皮及肠道物,用蒸馏水漂洗 1min 后在 70℃ 下烘干 12h,称重取样。(每个重复中抽取 5 条,即每个处理共解剖 15 条)

样品消化 每处理加 5 ml 硝酸-高氯酸混合物(4:1),沿瓶壁加 5ml 浓硫酸,加热,再沿瓶壁不断加硝酸-高氯酸混合物至蚯蚓完全分解,加热至产生白烟,加蒸馏水 20 ml,加热除去硝酸和高氯酸,定容为 50 ml。

铜的测定采用原子吸收分光光度法测定。

1.4 数据处理

试验数据经 EXCEL 整理,回归分析和相关分析采用 SPSS13.0

2 结果与分析

2.1 不同铜污染浓度对蚯蚓体重的影响

整个污染培养过程中,各处理都有明显蚯蚓活动迹象,土壤疏松,表面有蚓粪堆积。试验结束时,蚯蚓全部存活。污染培养第 14 天与 21 天取样测定了蚯蚓的体重并计算了生长率(图 1)。图中折线表示蚯蚓体重的变化趋势,柱形表示相应的生长率。可以看出铜污染培养下蚯蚓体重与污染浓度的关系是抛物线关系,低浓度铜污染处理下(0~60 mg/kg)范围内,14d 与 21d 的蚯蚓体重都随着土壤铜浓度的增加而增加,在 Cu^{2+} 60mg/kg 处理出现最高值,高于此浓度后处理蚯蚓体重则开始下降,在 200mg/kg 浓度时呈负增长,蚯蚓体重低于空白处理与 0 天的数值。说明低浓度的铜对蚯蚓生长有促进作用, Cu^{2+} 浓度高于 60mg/kg 时则对蚯蚓的生长有抑制作用。

土壤 Cu^{2+} 0~100 mg/kg 范围内蚯蚓生长率均高于空白,最高增长率出现在 Cu^{2+} 60mg/kg 处理,第 21 天与第 14 天该处理的蚯蚓体重与相应的 Cu^{2+} 0mg/kg 处理的体重相比分别高出 56.18% 和 55.09%。在 100 mg/kg 时,增长率有所下降,但是仍然在 40% 以上。21d 与 14d 200mg/kg 浓度处理的蚯蚓体重生长率为负值。

在铜污染 0~100 mg/kg 范围内,蚯蚓体重按照时间的大小排序是:21d > 14d > 0d,高于 Cu^{2+} 100mg/kg 处理后 21d 与 14d 的蚯蚓体重基本相同,并且按照相同的速率下降,在 Cu^{2+} 200mg/kg 浓度时已经都低于 0d 与对照的。说明在 Cu^{2+} 100mg/kg 处理下,前 14d 蚯蚓还保持生长,体重增加,14d 后则停止了生长,然后体重开始急剧下降。以上结果表明本研究条件下 Cu^{2+} 100mg/kg 与 200mg/kg 之间存在一个临界点,超过此浓度,铜污染浓度提高与污染培养时间延长均会加剧铜对蚯蚓生长的抑制程度。

2.2 不同处理对蚯蚓肠道和体表铜含量的影响

图 2 是蚯蚓培养第 14 天与 21 天测定的其表皮与肠道中 Cu 的含量。结果表明:同一铜污染浓度下,第 21 天的蚯蚓表皮和肠道铜含量大于第 14 天的,说明随着时间的延长蚯蚓表皮和肠道铜含量在不断增加。在铜污染培养时间相同时,蚯蚓表皮及肠道中 Cu 含量则都随铜污染浓度的增加而增加,肠道的增加速率大于表皮,增加的幅度高浓度处理大于低浓度处理。 Cu^{2+} 200 mg/kg 处理下培养 21d 与 14d 的蚯蚓表皮和肠道的含铜量均达最大值,空白处理蚯蚓表皮铜含量没有变化,肠道中铜含量略微提高。蚯蚓肠道的铜含量均高于外部环境含铜量,并表现出随时间推移而增加。

表 2 是对蚯蚓体内铜含量与铜浓度的回归分析。结果表明,在本文研究的土壤铜污染浓度范围内,蚯蚓

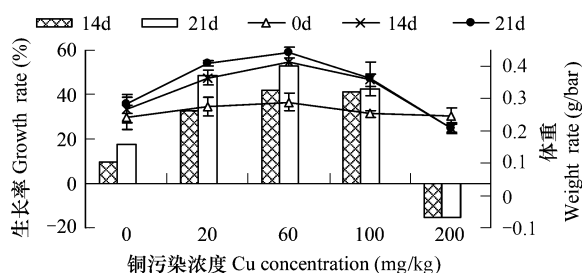


图 1 铜污染浓度对蚯蚓体重和生长率的影响

Fig. 1 Effect of different copper concentration on earthworm weight

图中折线表示蚯蚓体重的变化趋势,柱形表示相应的生长率

The line shown the weight of earthworm and column shown its growth rate

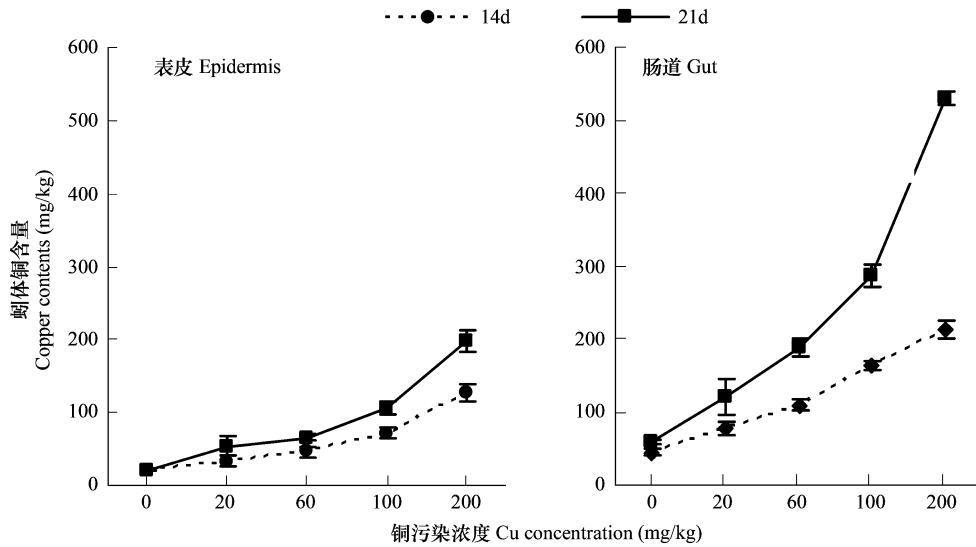


图2 不同处理蚯蚓表皮及肠道中铜的含量

Fig.2 The accumulation of Cu of different treatments in earthworm epidermis and intestine

肠道和表皮中的铜含量与铜污染浓度的关系都可以用一元回归方程表示,二者之间有非常显著的正相关关系,相关系数都在 0.97 以上,达到极显著水平($p < 0.01$)。

表2 蚯蚓体内铜含量与人工土壤铜浓度的回归分析 ($n = 15$)

Table 2 Regressing analysis of the copper concentration between artificial soil and earthworm tissue

项目 Item	回归方程 Regressing equation	相关系数 Correlation coefficient	显著水平 Significant level
表皮 14d epidermis 14d	$Y = 20.13 + 0.5281X$	0.9971	0.0002
表皮 21d epidermis 21d	$Y = 24.47 + 0.8524X$	0.992	0.0009
肠道 14d gut 14d	$Y = 58.08 + 0.8269X$	0.9768	0.0042
肠道 21d gut 21d	$Y = 60.39 + 2.323X$	0.9986	0.0001

2.3 铜在蚯蚓肠道和体表的分配及其富集系数

以肠道中铜浓度与表皮的比值作为“分配指数”来说明铜在蚯蚓体中的富集特征和分配状况(表3)。分配指数变大表示蚯蚓肠道中铜的增加速率大于表皮增加速率,反之表示表皮增加速率大于肠道中的增加速率。结果表明:分配指数随着土壤中铜浓度的增加呈下降趋势。但随着时间的推移都有所提高。通过对分配指数的分析,可以看出肠道中的铜的累积速度大于表皮,推断出铜离子进入蚯蚓体的主要途径是通过取食通道;分配指数随着土壤中铜浓度的增加呈下降趋势则说明蚯蚓自身可能有一套应激的机理,将重金属运输到表皮脂肪系统中,提高适应性,减少重金属对消化系统和神经系统的毒害。

分别以蚯蚓体内肠道与表皮铜浓度与土壤铜浓度的比值作为“富集系数”来判断蚯蚓对污染土壤铜的富集能力。富集系数大于1说明蚯蚓对土壤铜有富集,小于1则说明只是一般的吸收,起不到富集铜的作用。从表3可以看出:蚯蚓污染培养14d与21d后肠道的富集系数都大于1,表皮则不然,污染培养14天只有最低浓度 $Cu^{2+} 20 \text{ mg/kg}$ 处理的大于1;21d的则大部分处理都大于1,只有 $Cu^{2+} 200 \text{ mg/kg}$ 处理的小于1。同一污染浓度下,肠道与表皮的富集系数都随着培养时间的延长而增大;同一培养时间下,肠道与表皮的富集系数都随着污染浓度的增加而下降。尽管如此,在 $Cu^{2+} 200 \text{ mg/kg}$ 处理培养21d后,蚯蚓肠道的富集系数仍然比较高,其肠道内的铜浓度是土壤环境铜浓度的2.65倍。

2.3 蚯蚓铜富集总量

蚯蚓肠道与表皮干重与其含铜量的乘积为各部分的铜吸收量,加和后得蚯蚓的铜吸收总量,是蚯蚓富集

铜能力的重要指标,代表了蚯蚓从土壤中迁移铜的总量。图 3 为不同铜污染处理下蚯蚓铜迁移总量计算结果。从中可以看出,铜污染水平与污染时间的长短都明显影响蚯蚓铜迁移总量。在同一铜处理浓度下,所有 21d 污染处理的蚯蚓铜吸收总量均高于 14d 处理的。在相同的污染培养天数时则是污染浓度越高蚯蚓的铜吸收总量也越高。在第 21 天 Cu^{2+} 20mg/kg 处理时富集总量达到最高值 0.674 毫克每 10 条。但是 14d Cu^{2+} 200mg/kg 处理时富集总量则低于 Cu^{2+} 100mg/kg 处理的,其原因是蚯蚓体重下降太快,而肠道中的 Cu^{2+} 浓度上升速度又比较小造成。

表 3 不同处理对蚯蚓体铜分配指数与富集系数的影响

Table 3 Distribution index and magnification index of different copper treatments

项目 Item	污染培养天数 Exposure time(d)	Cu^{2+} 浓度 concentration (mg/kg)				
		0	20	60	100	200
分配指数 Distribution index	14	2.00	2.33	2.33	2.26	1.66
	21	2.81	2.88	2.84	2.70	2.67
富集系数 Magnification index	表皮 Epidermis	14	—	1.66	0.78	0.72
		21	—	2.09	1.11	1.04
	肠道 Gut	14	—	3.86	1.81	1.63
		21	—	6.03	3.14	2.87

分配指数 = 肠道铜浓度/表皮铜浓度 富集系数 = 蚯蚓体铜浓度/土壤中铜浓度 Distribution index = Cu^{2+} concentration in gut/ Cu^{2+} concentration in epidermis; Magnification index = Cu^{2+} concentration in earthworm tissue/ Cu^{2+} concentration in soils

3 讨论

成杰民等通过环毛蚓 (*Pheretima* sp.) 对黑麦草生长影响的研究表明在外源加入 0 ~ 400 mg/kg 的 CuSO_4 情况下,蚯蚓生长率均成负增长^[5]。戈峰对赤子爱胜蚓在德兴铜矿废弃地生态恢复中的作用研究表明,含铜量为 2524 mg/kg 铜矿复垦地中,蚯蚓生长率在不同的取样时间,均表现出负增长,随着时间推移表现出加速^[7]。本试验得出的部分结论与以上结果不完全相同,其原因可能是供试蚯蚓的品种和食源不同。赤子爱胜蚓喜食有机质丰富的腐烂物,环毛蚓喜食土壤中枯枝

落叶,两者食性不同。现有的研究侧重蚯蚓在土壤中直接修复污染,对其提供食源则重视不够,在贫瘠铜矿废弃地因土壤食源缺乏与污染物双重影响,使其生长率为负数。本试验供试土壤中添加的有机物料提供给蚯蚓充足的食源,所以在外源加入 100mg/kg 的 CuSO_4 情况下仍保持比较高的生长率,在加入 CuSO_4 200mg/kg 时才出现负增长。说明充足的有机营养可以提高蚯蚓对铜污染的耐性,增加其生物量。曹志平,乔玉辉^[8]与 Wolters V^[9]等研究过低肥力土壤上施用化肥对蚯蚓数量的影响,没有有机物投入条件下,发现施用化肥会对土壤中蚯蚓的种群数量产生负面影响。王丹丹,胡锋等在室内培养蚯蚓, Cu^{2+} 0 ~ 400 mg/kg 的高沙土中加入秸秆显著提高了威廉腔环蚓的生物量,缓解了铜对蚯蚓的毒害^[6],以上试验结果支持了本文提出的观点。

Langston and Spence^[10]的研究发现生物体测得重金属含量包括体表吸附和体内吸收两部分。Fleming and Richards^[11]利用螯合剂 EDTA 把富集在寡毛蚓 (*Tubifex tubifex*) 中的 Zn 洗出 90%。Fleming and Richards^[12]研究了 Pb 和 Fe 在蚯蚓 (*Eisenia fetida*) 体表中的吸附,表明利用螯合剂洗涤后,80% 测定量来自吸附的贡献,并推测蚯蚓通过外部黏液通道吸附了可观数量的 Pb 和 Fe。以上观点得到 Martina G. vijver 等人^[13]的质疑,指出其暴露试验只有 1h 和高浓度的外部条件,必须设更长时间的暴露实验,才能公正的研究持续增长的吸收量。Martina G. vijver^[13]选取了蚯蚓 (*Lumbricus rubellus*) 和等脚类甲虫 (*Porcellio scaber*),将其暴露在染毒环境下饲喂放射标记的¹⁰⁹Cd 和⁶⁵Zn 有机物料 14d,通过截切面荧光扫描定位和自动射线显微技术区分定位体内和体表

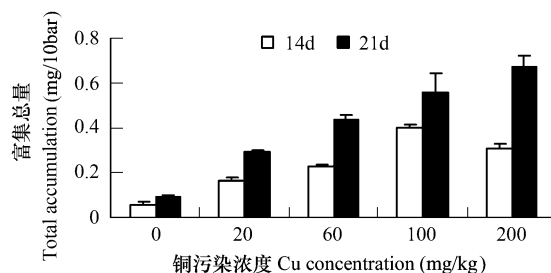


图 3 铜污染水平对蚯蚓铜富集总量的影响

Fig. 3 Effects of copper level on the total accumulation in earthworm body

各组织中吸收和吸附的重金属,研究表明吸附在两种生物体表的重金属与吸收在体内的量相比无关紧要,可以忽略。Prinsloo^[14]指出 Cd 在蚯蚓体表浓度低于其他组织器官。本研究中的结果有相似规律,在铜污染培养情况下,蚯蚓肠道中的铜的富集速度大于表皮。由此推断出铜离子进入蚯蚓体的主要途径是通过取食通道,而且表明蚯蚓自身可能有一套应激的机理,随着土壤中铜浓度的增加重金属向表皮脂肪系统运输增加,以提高自身适应性,减少重金属对消化系统和神经系统的毒害。蚯蚓表皮及肠道中 Cu 含量则都随铜污染浓度的增加而增加,随着时间的延长蚯蚓表皮和肠道的铜含量也在不断增加。

S. Monni^[15]于 2000 年提出以植物的重金属吸收总量作为土壤修复植物的重金属迁移总量,用作评价植物修复重金属污染潜力的指标。富集植物的重金属迁移总量除与遗传特性有关外,还与土壤溶液中的 Pb 浓度及土壤营养状况有关。本研究提出以蚯蚓的铜吸收总量作为其富集铜能力的指标,代表了蚯蚓从土壤中迁移铜的总量,可以看出蚯蚓重金属迁移总量除与遗传特性有关外,也与土壤的铜浓度及土壤营养状况有关。

4 结论

4.1 铜污染培养下蚯蚓体重与污染浓度的关系是抛物线关系,低浓度的铜对蚯蚓生长有促进作用,Cu²⁺浓度高于 60mg/kg 时则对蚯蚓的生长有抑制作用。0~60 mg/kg 铜污染处理范围,21d 内的蚯蚓体重都随着土壤铜浓度的增加而增加,在 Cu²⁺ 60mg/kg 处理出现最高值,高于此浓度后处理蚯蚓体重则开始下降。

4.2 污染土壤中加入一定量的蚯蚓营养物有利于蚯蚓生长率的提高。土壤铜在 0~100 mg/kg 范围内蚯蚓生长率均高于空白,最高增长率出现在 Cu²⁺ 60mg/kg 处理,在 100 mg/kg 时,增长率有所下降,但是仍然在 40% 以上。21d 与 14d 200mg/kg 浓度处理的蚯蚓体重生长率均为负值。本研究条件下 Cu²⁺ 100mg/kg 与 200mg/kg 之间存在一个临界点,超过此浓度,铜污染浓度提高与污染培养时间延长均会加剧铜对蚯蚓生长的抑制程度,出现负增长,蚯蚓体重低于空白处理与 0d 的数值。

4.3 本文研究的土壤铜污染浓度范围内,蚯蚓肠道和表皮中的铜含量与铜污染浓度的关系都可以用一元回归方程表示,二者之间有非常显著的正相关关系,相关系数都在 0.97 以上,达到极显著水平($p < 0.01$)。铜离子进入蚯蚓体的主要途径是通过取食通道。蚯蚓表皮及肠道中 Cu 含量则都随铜污染浓度的增加与铜污染培养时间的延长而增加,但是肠道的增加速率大于表皮。

4.4 分配指数即肠道中铜含量与表皮的比值,本研究中各处理的分配指数都随着土壤中铜浓度的增加呈下降趋势,但随着时间的推移有所提高。结果表明蚯蚓自身可能有一应激机制,在土壤中铜浓度的增加时其向表皮脂肪系统的运输增加,以提高自身适应性,减少重金属对消化系统和神经系统的毒害。

4.5 蚯蚓对污染土壤铜有较强的富集能力。以富集系数即蚯蚓体内铜浓度与土壤铜浓度的比值作为其富集能力的指标,在 Cu²⁺ 200 mg/kg 处理培养 21d 后,蚯蚓肠道的富集系数为 2.65。肠道与表皮的富集系数都随着培养时间的延长而增大,随着污染浓度的增加而下降。所有处理肠道的富集系数都大于表皮。

4.6 蚯蚓的铜吸收总量是蚯蚓富集铜能力的重要指标,代表蚯蚓从土壤中迁移铜的总量。铜污染水平与污染时间的长短都明显影响蚯蚓铜迁移总量。本研究条件下蚯蚓铜吸收总量随着土壤铜污染浓度的升高与污染培养时间的延长而增加,在第 21 天 Cu²⁺ 20mg/kg 处理时富集总量达到最高值 0.674 毫克每 10 条。

References:

- [1] Gao Y, Luo Y M. Earthworms As Bioindicators of Soil Pollution And Their Potential for Remediation of Contaminated Soils. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 1(42): 140—148
- [2] Li D Y, Pan G X, Xiang C G, *et al.* Study and progress of Exploitability and Application of Earthworm Resource in Soils. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2005, 21(10), 340—347
- [3] Ma Y, Dickinson N M, Wong M H. Toxicity of Pb/Zn mine tailings to the earthworm *Pheretima* and the effects of burrowing on metal availability. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, 36(1): 72—78.
- [4] Ma Y, Dickinson N M, Wong M H. Interactions between earthworm, trees, soil nutrition and metal mobility in amended Pb/Zn mine tailings from Guangdong, China. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35(10): 1369—1379.
- [5] Cheng J M, Yu X Z, Huang M H. Roles of earthworm-mycorrhiza interactions on phytoremediation of Cd contaminated soil. *Acta Ecologica Sinica*,

- 2005,25(6):1256—1263.
- [6] Wang D D, Li H X, Hu F, *et al.* Roles of earthworm-straw interactions on phytoremediation of Cu contaminated soil by ryegrass. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(4):1292—1299.
- [7] Ge F, Liu X H, Pang W D. The role of earthworm in the ecological restoration of mining wasteland of Dexing Copper Mine in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(11):1790—1795.
- [8] Cao Z P, Qiao Y H, Wang B Q, *et al.* Impact of soil fertility maintaining practice on earthworm population in high production agro-ecosystem in North China. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(10):2302—2306.
- [9] Wolters V, Scheu S. Changes in bacterial numbers and hyphal lengths during the gut passage through *Lumbricus terrestris* (Lumbricidae, Oligochaeta). *Pedobiologia*, 1999, (43): 891—900.
- [10] Langston W J, Spence S K. Biological factors involved in metal concentrations observed in aquatic organisms. In: Tessier A, Turner DR, editors. *Metal speciation and bioavailability in aquatic systems*, vol. 3. New York: John Wiley, 1995. 407—478.
- [11] Fleming T P, Richards K S. A technique to quantify surface adsorption of heavy metals by soft-bodied invertebrates. *Comp Biochem Physiol*, 1981, 69C:391—394.
- [12] Fleming T P, Richards K S. Localization of adsorbed heavy metals on the earthworm body surface and their retrieval by chelation. *Pedobiologia*, 1982, (23):415—418.
- [13] Martina G, Vijvera, B, Hubert T H, Wolterbeekc. Surface adsorption of metals onto the earthworm *Lumbricus rubellus* and the isopod *Porcellio scaber* is negligible compared to absorption in the body. *Science of the Total Environment*, 2005, (340): 271—280.
- [14] Prinsloo M W, Reinecke S A, Przybylowicz W J, *et al.* Micro-PIXE studies of Cd distribution in the nephridia of the earthworm *Eisenia fetida* (Oligochaeta). *Nucl Instrum Methods Phys Res*, 1999, 158:317—322.
- [15] Monni S, Salemaa M, White C, *et al.* Copper resistance of *Calluna vulgaris* originating from the pollution gradient of a Cu-Ni smelter in southwest Finland. *Environmental Pollution*, 2000, (109):211—219.

参考文献:

- [1] 高岩, 骆永明. 蚯蚓对土壤污染的指示作用及其强化修复的潜力. *土壤学报*, 2005, 1(42):140~148.
- [2] 李典友, 潘根兴, 向昌国, 等. 土壤中蚯蚓资源的开发应用研究及展望. *中国农学通报*, 2005, 21(10):340~347.
- [5] 成杰民, 俞协治, 黄铭洪. 蚯蚓-菌根在植物修复镉污染土壤中的作用. *生态学报*, 2005, 25(6): 1256~1263.
- [6] 王丹丹, 李辉信, 胡锋, 等. 蚯蚓-秸秆及其交互作用对黑麦草修复 Cu 污染土壤的影响. *生态学报*, 2007, 27(4):1292~1299.
- [7] 戈峰, 刘向辉, 潘卫东, 等. 蚯蚓在德兴铜矿废弃地生态恢复中的作用. *生态学报*, 2001, 11(21):1790~1795.
- [8] 曹志平, 乔玉辉, 王宝清, 等. 不同土壤施肥措施对华北高产农田生态系统蚯蚓种群的影响. *生态学报*, 2004, 24(10):2302~2306.