

蚯蚓粪作为土壤重金属污染修复剂的潜力分析

李 扬, 乔玉辉, 莫晓辉, 孙振钧

(中国农业大学 资源与环境学院, 北京 100193)

摘 要:随着工农业的发展,重金属对土壤和农作物的污染问题越来越突出,对土壤重金属的修复研究也越来越重要。蚯蚓作为土壤环境中最常见的无脊椎动物在生活过程中的摄食、做穴、移动、排便等行为都会对土壤重金属产生影响。通过对蚯蚓粪作为土壤重金属污染修复剂的潜力进行总结、分析,对蚯蚓粪修复土壤重金属污染的研究方向提出了建议与展望。

关键词:土壤重金属污染;重金属生物有效性;蚯蚓粪;钝化;活化

中图分类号:X53 文献标识码:A 文章编号:1672-2043(2010)增刊-0250-06

Analysis for Earthworm Feces as One of Potential Repair Agents of Heavy Metal Contamination in Soil

LI Yang, QIAO Yu-hui, MO Xiao-hui, SUN Zhen-jun

(China Agricultural University, College of Resources and Environmental Sciences, Beijing 100193, China)

Abstract: With the development of industry and agriculture, heavy metal contamination of soil and cropper is more and more serious. And the studies about the remediation of soils become more and more important. Earthworm as one of universal invertebrates in soil, its acts including food-intake, burrow and excretion can influence the activity of heavy metals. In this review, we consider whether the earthworm cast can change heavy metal bioavailability and make some proposals on the remediation of soils.

Keywords: heavy metal; soil contamination; bioavailability; earthworm feces; immobility; activation

随着工农业的发展,重金属对土壤和农作物的污染问题越来越突出,这是由于采矿、冶炼、电镀、化工、电子、染料等工业产生的三废以及农药、污灌等在农业生产中不合理使用引起的,长期进行污泥施用也造成了土壤中重金属污染的日益严重。

大量重金属元素进入土壤中,引起环境质量严重恶化。由于重金属不易在生物物质循环和能量交换中分解^[1],土壤重金属污染不仅抑制作物生长发育,促成作物早衰,降低产量,并且还会通过食物链的富集、传递,危害人体健康^[2-3]。尤为严重的是,有毒重金属在土壤系统所产生的污染过程具有隐蔽性、长

期性和不可逆性等特点,一旦有毒污染物进入土壤,则极难清理出来^[4]。因此,土壤重金属污染与修复一直是国内外的难点与热点研究课题。

1 土壤重金属污染修复与生物有效性

目前有效的土壤重金属污染的修复主要有两种途径。一种是使重金属在土壤中产生沉淀、吸附等一系列反应,改变重金属在土壤中的存在状态,降低其生物有效性,使其钝化,脱离食物链,减小其毒性^[5]。另一种是找寻重金属超累积植物,利用植物吸收,降低土壤中重金属含量;或者通过一些物理化学手段,例如添加浸提剂将土壤中大部分重金属提取出来再进行集中处理,从而达到修复土壤重金属污染的目的^[6]。

两种修复重金属污染的途径,其关键都在于如何增加或者降低重金属的生物有效性。重金属的生物有效性是指重金属能被生物吸收或对生物产生毒性

收稿日期:2009-09-03

基金项目:科技部 863 资助项目(2007AA10Z407);北京市生态重点学科资助项目(XK10019440)

作者简介:李 扬(1985—),女,甘肃兰州人,硕士,主要从事土壤污染生态研究。E-mail:Yangl-85@126.com

通讯作者:乔玉辉 E-mail: qiaoyh@cau.edu.cn

的性状,可由间接的毒性数据或生物体浓度数据评价,所用评价方法有生物试验法、指标评价法、化学形态分析法等。生物有效性指标 BI (Bioavailability Index) 指土壤被提取而导致植物中微量元素含量降低的幅度, BI 越大,表示土壤被提取部分对植物中元素的富集影响越大,土壤中被提取的部分越能代表生物有效性部分^[7]。

1.1 影响重金属生物有效性的因素

重金属在土壤中是以各种不同形态存在的,且这些形态的数量比例也会随着土壤理化性质等的变化而变化,并直接影响重金属在土壤中的迁移、转化以及其对动、植物的毒性。研究重金属在土壤中的各种形态及其生物有效性具有重大的意义,影响重金属生物有效性的因素有很多,主要包括土壤 pH 值、土壤氧化还原电位、土壤微生物、有机质等。

土壤 pH 值是影响重金属元素形态、含量及其在不同形态间转化的重要因素。Castilho 等研究表明: pH 值的变化会改变镉的溶解状况,当土壤 pH 值为 7.6 时,浓度达 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 镉离子就会形成沉淀,此时, pH 值每升高一个单位,镉浓度就下降 100 倍。

土壤氧化还原电位可以从两个方面影响重金属的生物有效性。首先,土壤氧化还原电位可以改变某些重金属价态,从而影响其有效性;其次,土壤氧化还原电位能够使土壤溶液中水溶性重金属形态发生变化,从而影响重金属在土壤中的迁移和对植物的有效性。水溶性镉随着土壤的氧化还原电位的增大而增大^[8]。

土壤中的微生物数量众多,代谢活动旺盛,表面活性强,微生物本身以及微生物与各种有机、无机胶体的相互作用对重金属进行生物吸附、富集、沉淀、溶解、氧化还原等行为,对重金属的生物有效性及重金属的毒性都会产生深刻的影响。微生物对土壤中重金属活性的影响主要体现在以下 3 个方面:微生物对重金属的生物固定^[9];细菌真菌细胞壁的吸附作用^[10-11];微生物可通过氧化-还原作用、甲基化作用和脱羟作用等将重金属离子转化为无毒或低毒的化合物形式^[12]。

进入环境中的重金属离子会同土壤中的有机质发生物理或化学作用而被固定、富集,从而影响它们在环境中的形态、迁移、转化和毒性^[13]。土壤有机质对重金属生物有效性的影响主要有两个方面:第一,天然有机质是一种有效的吸附剂,能够吸附重金属,极大地降低重金属的活性;第二,土壤中有有机质的增

加改变土壤中重金属元素的化学形态分布,从而改变土壤中重金属的移动性。

1.2 土壤重金属污染修复剂的种类

重金属的生物有效性受到这么多因素的影响,而且改变重金属的生物有效性对土壤重金属污染的修复具有关键作用。因此,国内外广大学者大多花费大量时间和精力来寻找某种可以显著改变重金属生物有效性的添加剂,根据重金属污染的修复途径,所找寻的材料主要集中在重金属钝化剂和活化剂这两个方面,且以化学制剂为主。

钝化剂的种类很多,大致可分为有机型、无机型和有机-无机复合型 3 类。有机固化剂包括鱼粉、马粪、蘑菇糟渣、猪粪^[14]、秸秆等;无机固化剂包括石灰石^[15]、羟磷灰石、粉煤灰、磷酸盐等;无机-有机复合固化剂包括泥炭、活性土、海泡石、污水污泥等。大量研究表明,这些固化剂对土壤中多种重金属都有明显的降低毒性的作用。例如,石灰或者生石灰能够作用于 Cd、Cu、Ni、Pb、Zn、Cr、Hg 等多种重金属^[5, 16-18],并使它们在土壤中离子的淋溶迁移性降低而达到降低毒性的目的。

活化剂主要是一些螯合剂^[19],常见的有 EDTA (乙二胺四乙酸)、柠檬酸、NTA (氨基三乙酸)、EGTA (乙二醇二乙醚二胺四乙酸)、DTPA (二乙基三胺五乙酸)、EDDS (乙二胺二琥珀酸) 等。这些螯合剂之所以能够活化重金属,主要是因为它们具有多齿状的配位基,能与单一金属离子形成杂环化学复合物,能够从有机物中将金属离子解吸出来,增加土壤中重金属的溶解度,促进重金属自根系向地上部转运^[20]。

2 蚯蚓粪的性质及其修复重金属污染的潜力

2.1 蚯蚓粪的基本性质

蚯蚓食性广、食量大,能利用各种有机物作食物,在土壤生活过程中,蚯蚓把食料中的有机质分解转化为氨基酸、聚酚等较简单的化合物,最后排出粪便。蚯蚓粪具有独特的物理、化学、生物性质,因此具有多方面的作用。

2.1.1 蚯蚓粪的物理性质

蚯蚓粪是一种黑色、均一、有自然泥土味的细碎类物质,其物理性质由原材料的性质及蚯蚓消化的程度决定。蚓粪也是一种团聚体,大多为粒径 $0.5 \sim 3 \text{ mm}$ 的椭圆形及长圆形的团聚体,尤以 $1 \sim 2 \text{ mm}$ 者为多,有时也可再粘结成团块状;蚯蚓粪的水稳定性往往比非蚯蚓形成的团聚体高^[21]。蚯蚓在其生活过程

中,摄取土壤中大量有机质并将其分解转化为氨基酸、聚酚等较简单的化合物,在肠细胞分泌的酚氧化酶及微生物分泌酶的作用下,缩合形成腐殖质^[22]。

因此,蚓粪中含有大量的腐殖质。腐殖质固有的胶体特性,可以改善土壤的结构,有利于土壤的通气、保水、提高土壤的缓冲能力。有研究表明蚯蚓粪能够增加土壤的孔隙度,增加土壤为团聚体的数量,具有良好的物理性质^[23]。此外,蚯蚓粪因有很大的表面积,使许多有益微生物得以生存并具有良好的吸收和保持营养物质的能力^[24]。

2.1.2 蚯蚓粪的化学性质

与其他物质相比,蚯蚓粪中含有丰富的化学成分。据测定,其中有机质含量为19.47%~42.20%,腐植酸含量11.7%~25.8%,氮磷钾总养分>3%。蚓粪中还含有许多营养成分,粗灰分含量高达74.55%,作为畜禽饲料,是矿物质饲料的来源之一。此外,还含有蛋白质6.23%,其中富含谷氨酸、天门冬氨酸和缬氨酸等多种必需氨基酸^[25]。植物必需的16种营养元素中,有些在植物内的含量较低,约占植物干重的千分之几到万分之几,称为微量元素,如铁、锰、锌、铜、钼、硼等,但它们对于植物生长发育都担负着不同的生理功能,这些元素在蚯蚓粪中都有分布。蚯蚓在分解有机质的同时,也分解其中的矿物质元素,因而在某种程度上提高了蚓粪矿物元素的含量,并对其有效性也有相应的提高。畜禽粪便一般呈碱性,而大多数植物喜好的生长介质偏酸性(pH6~6.5),在蚯蚓消化的过程中,由于微生物新陈代谢过程中有机酸的产生使蚯蚓粪的pH值降低^[26],而趋于中性^[27]。此外,有研究表明蚯蚓粪中还具有刺激植物生长的植物激素,如赤霉素、生长素、细胞分裂素等,这些激素在植物的新陈代谢中发挥着重要作用,能影响植物的生长和作物的品质^[28-29]。

2.1.3 蚯蚓粪的生物性质

蚯蚓消化道是许多细菌和放线菌等微生物生长繁殖的一个小型的“培养室”。当蚯蚓摄入含有大量微生物的有机质后,微生物和食物随着消化道的作用最终排放入蚯蚓粪中,使蚯蚓粪中也富含细菌、放线菌和真菌等大量多种微生物类群,并且由于蚯蚓粪中营养物质丰富,排出的蚯蚓粪在第一周内细菌的数量还会成倍增加^[30]。这样,带有保持旺盛活力微生物的蚯蚓粪便成了土壤微生物的传播中心,也是土壤有机物的分解中心。

不同粪龄的蚓粪中,所含的微生物量不同。新排

出体外3h的蚓粪中,细菌数量低于原土壤,以后随时间的增加,细菌的数量开始增加,在86h时蚯蚓粪便中细菌数量最多,以后开始出现下降的趋势,下降到与原土壤中细菌数量相接近时,开始小范围上下波动。蚓粪中放线菌、真菌数量变化不大^[31]。

蚓粪中固氮菌能固定空气中的氮,合成蛋白质,在土壤中积累大量氮素,利于植物吸收利用;好气菌分解腐殖质也可供植物消化利用;硝化细菌对腐生菌有辅助和配合作用,把腐生菌分解有机肥料时产生的氨转化成对植物有效的硝酸盐,大大提高植物养分的利用率。此外,微生物不仅使一些复杂的物质转化作物易吸收的成分,其新陈代谢产生的次生代谢物与激素一起会促进作物的生长^[29]。可以说蚓粪作为一种能够促进植物生长的肥料和其中所含有的大量微生物是分不开的。

2.2 蚯蚓粪作为土壤重金属污染修复剂的潜力分析

随着对蚯蚓粪研究的深入,发现有关蚯蚓粪的应用并不仅仅局限于作为肥料促进植物生长^[32]和抑制土传病害^[33]。近年来的研究中,发现蚯蚓粪还有去除臭味、用作肉鸡饲料添加剂等作用。但是最重要的是在蚯蚓、蚓粪的研究历史中,根据一些研究结果,可以推测出蚯蚓粪有作为土壤重金属污染修复剂的潜力,集中体现在以下两个方面。

2.2.1 蚯蚓粪对土壤重金属的钝化作用潜能

钝化重金属的钝化剂,通过调节和改变重金属在土壤中的物理化学性质,能使重金属产生沉淀、吸附、络合等一系列反应,降低其在土壤环境中的生物有效性和可迁移性,从而减少这些重金属元素的毒性,起到钝化作用。我们推测蚯蚓粪具有钝化重金属的潜能,可作为修复土壤重金属污染的钝化剂,主要基于以下事实:

(1)与蚯蚓粪相似的畜禽类粪便鸡粪、牛粪、猪粪等,添加到土壤中后,作为有机固化剂都或多或少地降低了土壤中重金属的生物有效性。

例如,高山等^[34]运用连续提取法研究猪粪对潮土中外源镉的形态的影响。结果表明,猪粪显著增加了土壤有机碳、活性氧化物的含量并且显著地增加了紧有机结合态镉含量,而显著地降低了交换态镉的含量。并随着时间的增长,影响更显著。这一结论与张秋芳等^[14]的研究结果一致。

(2)蚯蚓在其生活过程中,摄取土壤中大量有机质并将其分解转化为氨基酸、聚酚等较简单的化合物,在肠细胞分泌的酚氧化酶及微生物分泌酶的作用

下,缩合形成腐殖质。腐殖质中主要活性部分为腐植酸,因此蚯蚓粪中含有大量的腐植酸,占到11.7%~25.8%。

大量研究表明腐植酸本身是很强的吸附剂,能够吸附可溶态重金属,影响重金属生物有效性。例如王晶等^[35]讨论了腐植酸及其数量在棕壤土上对重金属Cd的赋存形态的影响作用,其研究表明,随腐植酸投入比例加大,可溶态Cd含量明显下降,有机态Cd则反之,铁铝(锰)氧化态Cd与有机态Cd雷同。吕福荣等^[36]采用碱溶酸沉法提取土壤中的腐植酸,研究其对 Co^{2+} 、 Cd^{2+} 的吸附作用,结果表明该土壤中腐植酸对 Co^{2+} 、 Cd^{2+} 有较强的吸附作用且腐植酸对 Co^{2+} 、 Cd^{2+} 的吸附是通过两级络合反应形成配合物的方式结合的。国内外许多学者对这方面的研究也得到了相似的结果,大量研究表明,植物吸收的Cd的量随着土壤中腐植酸、阳离子交换量、pH值的增加而降低^[37]。

此外,腐植酸具有酚羟基、羧基、羰基、氨基等多种官能团,这些基团能够与土壤中重金属发生络合反应,从而改变重金属的活性。未解离羧基和酚羟基是腐植酸与Cd的主要络合位点,该络合物的稳定性随腐植酸芳构化程度的增加而增加。陈盈等^[38]将草炭、褐煤和风化煤中的腐植酸与Mn和Zn络合并测定络合稳定常数,说明腐植酸的腐殖化程度越高,与金属离子形成络合物的稳定程度越大。

(3) 蚯蚓粪表面积大,且增加了土壤的孔隙度,吸附能力较强,因此可以较大程度地吸附重金属。Ridvan Kizilkaya^[39]对污水污泥处理的土壤中投放*Lumbricus terrestris* L. 蚯蚓,一段时间后收集蚯蚓个体和蚯蚓粪便测定其中不同形态重金属Cu、Zn的含量,发现蚯蚓粪中含有高量的重金属且有机结合态金属含量最高,交换态和可溶性金属都较少。此外,Sulata Maity^[40]的研究也发现,蚯蚓处理重金属Zn和Pb污染的土壤后排出的蚯蚓粪中DTPA-Pb和DTPA-Zn的含量也显著降低。因此,可以看出蚯蚓粪能够吸附重金属并且还可以降低重金属的生物有效性。

(4) 蚯蚓粪中富含细菌、放线菌和真菌等大量多种微生物类群。微生物本身以及微生物与各种有机、无机胶体的相互作用对重金属进行生物吸附、富集、沉淀等行为都会降低重金属的生物有效性。

细菌的细胞壁富含羧基阴离子和磷酸阴离子,使得细菌表面具有阴离子的性质,很容易与金属发生反应,因而金属很容易结合到细菌的表面而被固定,从

而降低了重金属的生物有效性。例如Robinson对4种根际荧光假单胞菌对富集与吸收Cd的研究发现,根际细菌对Cd的富集达到环境中的100倍以上^[9]。Beveridge等^[41]研究发现从芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)上分离下来的细胞壁可以从溶液中螯合大量的 Mg^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Cu^{2+} 、 Na^{+} 和 K^{+} ,中量的 Mn^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Au^{3+} 和 Ni^{2+} 以及少量的 Hg^{2+} 、 Sr^{2+} 、 Pb^{2+} 和 Ag^{+} 。

真菌对重金属也有吸附固定作用。其吸附的方式主要有两种:一是细胞壁上的活性基团(如巯基、羧基、羟基等)与重金属离子发生定量化合反应(如离子交换、配位结合或络合等)而达到吸收的目的;二是物理性吸附或形成无机沉淀而将重金属污染物沉积在自身细胞壁上^[10-11]。如姜华等^[42]采用微生物学法,从污水处理厂活性污泥中分离到了能抗重金属镉、铬、砷、汞和铅的4株霉菌,分别为变幻青霉、桔黑青霉、淡紫拟青霉和链格孢霉,对重金属都有较强的吸附能力。Suh等^[43]研究发现,当茁芽短梗霉分泌一些胞外聚合物时, Pb^{2+} 便积累于整个细胞的表面,且随着细胞的存活时间增长,胞外聚合物的分泌量增多,积累于细胞表面的 Pb^{2+} 水平就越高,从最初的 $56.9 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 上升到 $215.6 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ (干重)。

(5) 蚯蚓粪中含有丰富的营养成分,其中氮、磷、钾总养分>3%。土壤中养分的增加对重金属的生物有效性也有一定的影响。

有研究表明钾肥的施入能够降低土壤中交换态镉的含量^[44],且显著降低了小麦对镉的吸收^[45]。还有研究表明,在有重金属污染的土壤中,添加一定比例的蚓粪与不加蚓粪处理相比,植物的成活率高。例如张烨等^[46]以紫花苜蓿为材料,在铁尾矿中添加蚯蚓粪,研究蚯蚓粪对紫花苜蓿生长的影响,发现在基肥相同条件下,紫花苜蓿的成活率与蚓粪添加量呈正比,因此推测可能因蚓粪钝化了土壤中重金属、降低了毒性而使植物的成活率提高。说明蚓粪不仅能促进植物生长,还能在一定程度上用于重金属污染土壤中植被的恢复。

2.2.2 蚯蚓粪对土壤重金属的活化作用潜能

在近年来的研究中,虽然大多数学者都认为与蚯蚓粪相似的畜禽类粪便鸡粪、牛粪、猪粪等作为有机固化剂,能够钝化重金属,但是仍然有小部分学者的研究表明添加这类粪便后反而增加了重金属的生物有效性。例如,Krebs等^[47]对十年前施入鸡粪和猪粪的土壤中的重金属Zn、Cu、Cd得含量进行测定,

发现植物对重金属的吸收以及可溶性重金属的含量相比较对照都较高。郝秀珍等^[48]在研究不同改良剂对铜矿尾矿砂与菜园土混合土壤 pH、有效态重金属含量、脲酶和磷酸酶活性以及混合土壤上种植的黑麦草生长的影响时,发现使用鸡粪处理明显增加了土壤中包括铜、铅和锌等有效态重金属的含量。

这种研究结果的不一致性,也引起了我们对蚯蚓粪与重金属间作用的进一步思考,推测蚯蚓粪可能还有活化重金属的作用。林淑芬等^[49]向重金属 Cu 污染的土壤中添加蚯蚓粪并种植黑麦草,结果发现黑麦草的地上部和地下部的生物量显著增加,而且黑麦草地上部 Cu 的含量也明显增加了,他们推测蚯蚓粪是通过促进黑麦草根系的生长和活性而影响根系周围环境,从而进一步影响 Cu 的生物有效性。但林淑芬的文章只是看到了蚯蚓粪作用下联合黑麦草对重金属的影响,并没有说明蚓粪自身对重金属到底是活化还是钝化的作用。

综上所述,蚯蚓粪自身独特的物理、化学、生物性质以及近些年的相关研究结果表明,蚯蚓粪能够改变土壤中重金属的生物有效性,具有修复土壤重金属污染的潜能。但是蚯蚓粪的作用究竟是能够增加还是降低土壤重金属的生物有效性,目前还没有直接的证据。

3 小结与展望

采用物理化学技术修复重金属污染土壤,不仅费用昂贵,难以用于大规模污染土壤的改良,而且常常导致土壤结构破坏、土壤生物活性下降和土壤肥力退化等。新兴的、高效的生物修复途径现已被科学界和政府部门认可和选用,并逐步走向商业化。蚯蚓作为土壤环境中最常见的无脊椎动物在生活过程中的摄食、做穴、移动、排便等行为都会对土壤重金属产生影响,造成重金属生物多样性的改变。

本文对近些年关于蚯蚓粪对土壤重金属的影响研究进行了搜集、归纳。目前还没有直接的证据来证明它对土壤重金属生物有效性有影响。但是,由于蚯蚓粪具有的特殊的物理、化学、生物性质,结合近些年的相关研究,我们推测蚯蚓粪能够改变重金属的生物有效性,具有修复土壤重金属污染的潜力。尽管有诸多方面都指蚯蚓粪能够钝化重金属,我们也不能排除蚯蚓粪具有活化重金属的作用。那么蚯蚓粪究竟是能够增加还是降低土壤重金属的生物有效性,目前还没有直接的证据,在这方面还有待于深入研究,以便

进一步开发蚯蚓粪作为有机肥料以外另一个重要功用。

参考文献:

- [1] Lasat M M. Photoextraction of metals from contaminated soil: A review of plant/soil/metal interaction and assessment of pertinent agronomic issues[J]. *Hazard Subst Res*, 2000, 2: 1 - 25.
- [2] 张 民, 龚子同. 我国菜园土壤中的某些重金属的含量与分布[J]. *土壤学报*, 1996, 33(1): 85 - 92.
- [3] Smith S R. Effects of soil pH on availability to crops of metal in sewage sludge - treated soils: II. Cd uptake by crops and implications for human dietary intake [J]. *Environ Pollut*, 1993, 86: 5 - 13.
- [4] Haimi J, Huhta V. Effect of earthworms on decomposition process in raw humus forest soil: A microcosm study[J]. *Biol Fertil Soils*, 1990, 10: 178 - 183.
- [5] Bolan N S, Adriano D C, Mani A P, et al. Immobilization and phytoavailability of cadmium in variable charge soils: II. Effect of lime compost[J]. *Plant Soil*, 2003b, 251: 187 - 198.
- [6] 沈振国, 刘友良, 陈怀满. 螯合剂对重金属超量积累植物 *Thlaspi caerulescens* 的锌、铜、锰和铁吸收的影响[J]. *植物生理学报*, 24(4): 340 - 346.
- [7] 姜利兵, 张建强. 土壤重金属污染的形态分析及生物有效性探讨[J]. *工业安全与环保*, 2007, 33(2): 4 - 6.
- [8] Reddy C N, et al. The effect of redox potential and pH on the uptake of cadmium and lead by rice plants[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1977, 6: 259 - 262.
- [9] 于瑞莲, 胡恭任, 采矿区土壤重金属污染生态修复研究进展[J]. *中国矿业*, 2008, 17(2): 40 - 43.
- [10] 沈薇等, 杨树林, 李校垫, 等. 木霉 (*Trichoderma* sp.) HR - 1 活细胞吸附 Pb(II) 的机理[J]. *中国环境科学*, 2006(1): 101 - 105.
- [11] Tyler G. Metal accumulation by wood - decaying fungi[J]. *Chemosphere*, 1982, 11(11): 1141 - 1146.
- [12] 陈玉成. 污染环境生物修复工程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [13] Haghir F. Plant uptake of cadmium as influenced by cation exchange capacity, organic matter, zinc, and soil temperature[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1974, 3(2): 180 - 183.
- [14] 张秋芳, 王 果, 杨佩艺, 等. 有机物料对土壤镉形态及其生物有效性的影响[J]. *应用生态学报*, 2002, 13(12): 1659 - 1662.
- [15] Sparrow L A, Salardini A A. Effects of residua of lime and phosphorus fertilizer on cadmium uptake and yield of potatoes and carrots[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1997, 20(1): 1333 - 1349.
- [16] Dermatas D, Meng X. Stabilization/Solidification(S/S) of heavy metal contaminated soils by means of a quicklime - based treatment approach. // *Stabilization and Solidification of Hazardous, Radioactive and Mixed Wastes*, ASTM STP 1240, Vol. 1. Philadelphia: American Society for Testing and Materials. 1996: 449 - 513.
- [17] Gray C W, McLaren R G, Roberts AHC, et al. Effect of soil pH on cadmium phytoavailability in some New Zealand soils[J]. *N Z J Crop Hort*, 1999, 27: 169 - 179.
- [18] Jang A, Choi Y S, Kim I S. Batch and column tests for the development

- of an immobilization technology for toxic heavy metals in contaminated soils of closed mines[J]. *Water Sci Technol*, 1998, 37(8): 81–88.
- [19] Komárek M, Tlustofa P, Száková J, et al. The use of maize and poplar in chelant 2 enhanced phytoextraction of lead from contaminated agricultural soil[J]. *Chemosphere*, 2007, 67: 640–651.
- [20] Alkortal, Hemndez – Allica J, Becerril J M, et al. Chelate – enhanced phytore – mediation of soils polluted with heavy metals[J]. *Environmental Science and Biotechnology*, 2004, 3: 55–70.
- [21] 王新谋. 家畜粪便学[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1997.
- [22] Elvira C, Goicoechea M, Sampedro L, et al. Bioconversion of solid paper – pulp mill sludge earthworms[J]. *Bioresource Technology*, 1996, 57: 173–177.
- [23] 胡艳霞, 孙振均, 程文玲. 蚯蚓养殖及蚓粪对植物土传病害抑制作用的研究进展[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(2): 296–300.
- [24] 孙振钧, 孙永明. 蚯蚓反应器与废弃物肥料化技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 59.
- [25] 陈宝书, 陈本建, 张惠霞, 等. 蚯蚓粪营养成分的研究[J]. *四川草原*, 1998(3): 22–24.
- [26] Ndegwa P M, Thompson S A, Das K C. Effects of stocking density and feeding rate on vermicomposting of biosolids[J]. *Bioresource Technology*, 2000, 71: 5–12.
- [27] 张宝贵. 蚯蚓与微生物的相互作用[J]. *生态学报*, 1997, 17(5): 556–560.
- [28] Tomati U, Grappelli A, Galli E. The presence of growth regulators in earthworm – worked wastes [M]//Bonvicini Paglioi, A M and P Omodeo(eds) On Earthworms. Proceedings of International Symposium on Earthworms. Selected Symposia and Monographs, Unione Zoological Italiana, 2, Mucchi, Modena, 1987: 423–435.
- [29] 胡 佩, 刘德辉, 胡 锋, 等. 蚓粪中的植物激素及其对绿豆插条不定根发生的促进作用[J]. *生态学报*, 2002, 22(8): 1211–1214.
- [30] 王凤艳. 蚯蚓粪对土壤的影响[J]. *土壤肥料*, 2005(10): 25–28.
- [31] 张立宏, 许光辉. 微生物与蚯蚓的协同作用对土壤肥力影响的研究[J]. *生态学报*, 1990, 10(2): 116–120.
- [32] Atiyeh R M, Arancon N Q, Edwards C A, et al. Influence of earthworm – processed pig manure on the growth and yield of greenhouse tomatoes[J]. *Bioresource Technology*, 2000, 75: 175–180.
- [33] Arancon N, Edwards C A, Yardim F, et al. Management of plant parasitic nematodes by use of vermicomposts[J]. *Proceedings of Brighton Crop Protection Conference – Pests and Diseases*, 2002, 2: 705–710.
- [34] 高山, 陈建斌, 王 果. 淹水条件下有机物料对潮土外源镉形态及化学性质的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2003, 9(1): 102–105.
- [35] 王 晶, 等. 腐植酸对土壤中 Cd 形态的影响及利用研究[J]. *土壤通报*, 2002(3): 185–187.
- [36] 吕福荣, 刘 艳. 腐植酸对钴、镉作用的研究[J]. *大连大学学报*, 2002(4): 63–67.
- [37] 李光林, 魏世强, 青长乐, 等. 镉在腐植酸上的吸附与解吸特征研究[J]. *农业环境科学学报*, 2003, 22(1): 34–37.
- [38] 陈 盈, 等. 不同来源腐植酸与 Mn^{2+} 和 Zn^{2+} 络合稳定常数的确定[J]. *辽宁工程技术大学学报*, 2008, 27(3): 478–480.
- [39] Ridvan Kizilkaya. Cu and Zn accumulation in earthworm lumbricus terrestris L. in sewage sludge amended soil and fractions of Cu and Zn in casts and surrounding soil[J]. *Ecological Engineering*, 2004, 22: 141–151.
- [40] Sulata Maity, Pratap Kumar Padhy, Shibani Chaudhury. The role of earthworm *Lampito mauritii* (Kinberg) in amending lead and zinc treated soil[J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99: 7291–7298.
- [41] Beveridge T J. The response of cell walls of *Bacillus subtilis* to metals and electron microscopic strains[J]. *Can J Microbiol*, 1978, 24: 89–104.
- [42] 姜 华, 魏晓晴, 胡晓静. 抗重金属霉菌的筛选鉴定及其特性研究[J]. *辽宁师范大学学报*, 2007, 30(1): 100–103.
- [43] Suh J H, Yun J W, Kim D S. Effect of extracellular polymeric substances (EPS) on Pb^{2+} accumulation by *Aureobasidium pullulans* [J]. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 1999, 21(1): 1–4.
- [44] 陈 苏, 孙丽娜, 孙铁珩, 等. 钾肥对镉的植物有效性的影响[J]. *环境科学*, 2007, 28(1): 182–188.
- [45] 杨 锚. 不同氮钾肥对铅镉污染土壤铅镉有效性的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2004: 45–65.
- [46] 张 烨, 雷晓柱, 代 进. 铁尾矿生态恢复中蚯蚓粪对植物生长的影响[J]. *安徽农业科学*, 2008, 36(14): 5954–5956.
- [47] Krebs R, Gupta S K, Furrer G, et al. Solubility and plant uptake of metals with and without liming of sludge – amended soils[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1998, 27: 18–23.
- [48] 郝秀珍, 周东美, 钱海燕. 改良剂对铜矿尾矿砂与菜园土混合土壤性质及黑麦草生长的影响[J]. *农村生态环境*, 19(2): 38–42.
- [49] 林淑芬, 李辉信, 胡 锋. 蚓粪对黑麦草吸收污染土壤重金属铜的影响[J]. *土壤学报*, 2006, 43(6): 911–918.