

蚯蚓在土壤重金属污染及其修复中的应用研究进展^①

唐浩^{1,2}, 朱江¹, 黄沈发¹, 邱江平^{2*}

(1 上海市环境科学研究院, 上海 200233; 2 上海交通大学农业与生物学院, 上海 200240)

摘要: 蚯蚓作为主要的大型土壤动物类群, 对土壤环境改善起到了重要的作用, 本文在系统分析、归纳总结国内外相关领域研究成果的基础上, 综述了蚯蚓在土壤重金属污染及其修复中的应用研究进展, 主要包括: 蚯蚓作为土壤重金属污染的指示生物, 蚯蚓对重金属的富集与释放, 重金属对蚯蚓生理生态的影响研究, 蚯蚓在土壤重金属污染修复中的作用机制, 蚯蚓与植物、微生物的协同作用, 以及蚯蚓粪作为重金属污染修复剂的潜力分析等。在此基础上, 概括提出了蚯蚓在重金属污染土壤修复领域面临的主要问题。

关键词: 蚯蚓; 重金属污染; 修复技术; 研究进展; 土壤

中图分类号: X53

土壤是生态环境的重要组成部分, 是人类社会赖以生存的主要资源之一。过去数十年间, 城市与现代工业快速发展, 矿床过度开采和冶炼等导致大量污染物进入环境, 土壤重金属污染日益严重。重金属可以通过植物的吸附作用进入植物体内, 还可能通过径流和淋洗等作用污染地表水和地下水, 最终通过食物链或直接接触等途径危害人们身体健康^[1]。据报道, 我国受重金属污染土壤面积约 2 000 万 hm^2 , 占全部耕地面积的 1/5, 每年因土壤重金属污染带来的粮食减产达 1 000 多万 t, 被重金属污染的粮食每年约 1 200 万 t, 年经济损失在 200 亿以上^[2]。我国华南地区有的城市有 50% 的农地遭受 Cd、As、Hg 等有毒重金属和石油类的污染。长江三角洲地区有的城市有万亩连片农田受 Cd、Pb、As、Cu、Zn 等多种重金属污染, 致使生态环境和农业生产受到极大破坏^[3]。

土壤重金属污染具有隐蔽性、长期性和不可逆性等特点, 加上土壤中的重金属具有生物不可降解性和相对稳定性, 重金属污染土壤的修复治理比较困难。目前, 常用的重金属污染土壤修复方法主要有物理化学修复和生物修复等方法。物理化学法和微生物修复对于重金属污染土壤的修复适用性较差, 治理成本高, 容易造成二次污染, 不能从根本上解决大面积的土壤环境污染问题。与传统的物理化学修复方法相比, 植物修复、动物修复等生物修复技术在重金属污

染治理中具有不可替代的优势, 并以其治理过程的原位性、治理成本的低廉性、管理与操作的简易性及环境美学的兼容性日益受到人们的重视, 并成为污染土壤修复研究的热点之一^[4]。蚯蚓作为大型土壤动物, 是土壤中的主要动物类群, 其生物量占据土壤动物生物总量的 60% 以上^[5], 在维持土壤生态系统功能中起着不可替代的作用。蚯蚓活动可使土壤疏松, 促进植物残枝落叶的降解, 促进有机物质的分解和矿化, 增加土壤中 Ca、P 等速效成分, 促进土壤中硝化细菌的活动, 从本质上改善了土壤的化学成分和物理结构^[6]。因此, 近年来蚯蚓在土壤重金属污染及修复中的应用也日益受到人们重视。

蚯蚓是属于环节动物门寡毛纲(Oligochaeta)的一类低等动物, 在自然界已经存在 6 亿年之久^[7], 世界上的蚯蚓约有 2 500 多种, 我国已记录的有近 300 种。所以, 达尔文认为蚯蚓是地球上的“第一劳动者”^[1]。蚯蚓是土壤中最常见的杂食性陆生环节动物, 对环境变化具有较强的适应能力, 可利用皮肤呼吸, 在氧分压低于 21 533 kPa 时也能维持正常呼吸, 在暂时缺氧条件下还能利用体内糖元的嫌气进行分解, 为生命活动提供能源。蚯蚓消化能力强、食性广, 在生态系统中担当着分解者的角色, 人们也利用蚯蚓来处理城市生活垃圾、工业污泥、废渣, 以及农作物秸秆、沼气废渣等有机废物^[3]。

基金项目: 国家公益性行业(农业)科研专项项目(200903056)和国家自然科学基金项目(41071170)资助。

* 通讯作者(jpq@sjtu.edu.cn)

作者简介: 唐浩(1979—), 男, 四川广安人, 高级工程师, 博士研究生, 研究方向为农业面源污染防治与农村生态环境保护。E-mail: tangh@saes.sh.cn

1 蚯蚓作为土壤重金属污染指示生物

自 20 世纪 90 年代以来,用蚯蚓的分子、生物化学和生理反应(生物标志物)来监测土壤污染的变化情况已越来越受到人们的关注,生物标志物为田间条件下指示土壤污染情况提供了有效的工具^[8]。传统的生态毒理学研究通常只测量蚯蚓体内污染物的残留量或环境中化学物质的残留量,生物标志物的主要优势就在于它们弥补了传统环境毒理学方法的一些局限性^[9]。蚯蚓通常被视为土壤动物区系的代表类群而被用于指示、监测土壤污染,蚯蚓在陆地生态系统中的特殊地位及其毒理学特性使它成为土壤有害化学物质的理想指示生物,近 30 年来,国际上几乎将蚯蚓用于所有重要土壤污染物的指示研究^[10],蚯蚓的种群数量、种类丰度、多样性等参数都是评价污染物环境危害的有用工具。从生态学的角度来看,蚯蚓处于食物链的底端,与土壤中的各种污染物接触密切,利用蚯蚓作为指示物监测、评价土壤污染,可为保护整个土壤动物区系提供一个相对安全的污染物浓度阈值^[5]。

Abudul Rida 和 Bouch^[11]在一项研究中的大量分析证实,土壤重金属含量与蚓体含量的相关关系很密切,蚯蚓对 Cd、Pb、Zn 具有极强的富集能力。Paoletti^[12]的研究指出,农业用地、城市及工业区土壤中的蚯蚓是监测各种污染的良好指示者。早期 Bengtsson^[13]对瑞士东南部某黄铜制造厂附近土壤中正蚓科蚯蚓(Lumbricidae)的种类、种群密度进行了调查,得到了相同的规律:蚯蚓的密度和数量与污染源的距离成比例,离制造厂越近,污染越严重,蚯蚓的数量及种类越少。此外,近年来 Maria 等人^[14]对蚯蚓体 DNA 甲基化和重金属污染胁迫的潜在关系进行了探索,研究指出蚯蚓 DNA 甲基化作为土壤重金属污染生物标志物的可能性,还可用于评估 DNA 甲基化的表观遗传变化风险。

国内学者也在该领域进行了一定的研究,袁方曜等^[15]对华北地区代表性重金属污染农田与洁净农田蚯蚓群落比较发现,污染农田中灰暗异唇蚓、湖北远盲蚓和日本杜拉蚓 3 个当地潮土农田的建群种消失,而威廉腔蚓的种群密度大大增加,说明蚯蚓群落中的污染敏感种消失后,同时改变了耐受性种的生态位,耐受性种可以代替敏感种在土壤生态系统中的功能。王振中等^[16]对湖南株洲市某金属冶炼区附近土壤中的蚯蚓种群结构、数量进行了调查,结果表明:随着 Cd、As、Pb、Zn、Cu、Hg 污染程度的增加,蚯蚓种类减少,污染严重的地区优势种表现出更强的优势

度,重污染区 3 个种均为巨蚓科种类。朱江等^[17]报道了以蚯蚓的死亡率和细胞的凋亡率等敏感生物标志物评估土壤中重金属 Cd 和多环芳烃菲单一与复合污染的方法。常忠连等^[18]的研究指出,蚯蚓不仅可以监测土壤重金属总量,而且可以与土壤因素相结合监测重金属的生态有效性。

2 蚯蚓对重金属的富集与释放

相关研究表明,蚯蚓对重金属有一定的忍耐和富集能力,蚯蚓对重金属的富集主要是通过被动扩散作用(passive diffusion)和摄食作用(resorption) 2 种途径,前者是污染物从土壤溶液穿过体表进入蚯蚓体内,而后者则是污染物由土壤通过吞食作用进入蚯蚓体内,并在内脏器官内完成吸收作用^[19]。有些蚯蚓种类能存活于重金属污染土壤(包括一些金属矿区),并能在体内富集一定量的重金属而不受伤害或伤害较轻^[20-21]。蚯蚓体内富集的重金属可以在食物链中传递和生物放大,其过程取决于重金属化合物的持久性和可富集性^[22]。在蚯蚓的忍受范围内,当蚯蚓吸收的重金属积累到一定程度就会通过粪便和分泌物排出;如果蚯蚓吸收的重金属超过了蚯蚓的忍受范围,则会直接毒害蚯蚓。

Hendriks 和 Ma^[23]通过室内模拟试验和田间试验,均证明了蚯蚓对 Cd 具有极强的富集能力,这与寇永纲等^[24]的研究结论一致,随着 Pb 浓度的增加,蚯蚓体内的富集量也增加;单位质量蚯蚓培养期内吸收 Pb 量与 Pb 浓度梯度表现出极显著差异。Edwards 等^[25]研究了蚯蚓体对 Cu 和 Hg 的生物可利用性,认为蚯蚓对两者均有富集作用。吴国英等^[26]采用室内接种法的研究结果表明,赤子爱胜蚓(*Eisenia foetida*)对猪粪中重金属 Cu、Zn 具有一定的吸收能力,富集系数分别为 0.43、0.73。戈峰等^[27]的研究揭示了蚯蚓对 Se、Cu 有很强的富集作用,体内最高富集量分别可达 33 215 和 136 719 mg/kg,分别相当于体重的 0.03% 和 0.12%,这些都表明蚯蚓对重金属均有较强的富集能力。郭永灿等^[28]的研究证明重金属在蚯蚓体内富集量随污染程度增加而上升,重污染区为中污染区的 2.27 倍,轻污染区的 7.30 倍。

同时,蚯蚓对重金属的忍耐和富集能力是有选择性的,对不同重金属最大富集量的出现时间也不相同,对各种重金属的富集量随着培养时间的增加而变化。牛明芬和崔玉珍^[29]通过蚯蚓处理垃圾及纳污河流底泥实验研究发现,蚯蚓可选择吸收并富集垃圾及底泥中的 Cd,但对其他重金属元素 Pb、Cu、Zn 等

并无此种富集吸收现象。通过对富集系数 K 的比较研究,王振中等^[16]发现蚯蚓体对重金属吸收顺序为 $Cd > Hg > As > Zn > Cu > Pb$,其中 Cd 的富集系数大于 1,表现为强烈富集作用。Gregor 等^[30]对 8 种不同蚯蚓在森林土壤中对 Hg 、 Cd 、 Pb 的富集情况进行了系统研究,结果表明蚯蚓对重金属的富集能力依次为 $Cd > Hg > Pb$,与上述研究结果一致。伏小勇等^[31]对微小双胸蚯蚓的研究表明,蚯蚓对 Cu 、 Pb 富集量在第 2 周时达到最大,而对 Zn 的富集量在第 4 周时达到最大。陈玉成等^[32]研究表明,重金属富集系数与转化方式之间没有明显相关性,蚯蚓最易富集的金属元素是 As 和 Cd ,而不易富集 Hg 。此外,对于重金属在蚯蚓体内的富集形态也进行了一定的研究, Anita 等^[33]的研究表明,土壤中的 As 主要以砷酸盐形态存在,而蚯蚓体内的 As 除了砷酸和亚砷酸盐两种主要形态外,还有二甲砷酸检出。尽管蚯蚓富集重金属后不能像超富集植物那样容易移除,但其对重金属的富集与释放对于土壤重金属污染修复具有积极意义,蚯蚓活动及其生理过程将能有效地促进重金属在土壤中的迁移,并能提高其生物可利用性。

3 重金属污染对蚯蚓的生态毒理研究

3.1 重金属对蚯蚓的急性毒性

有关学者对蚯蚓的急性毒性进行了大量的研究,宋玉芳等^[34]的报道表明,蚯蚓个体对重金属毒性的耐受程度差别较大,其毒性阈值分别为: Cu 300 mg/kg, Zn 1 300 mg/kg, Pb 1 700 mg/kg, Cd 300 mg/kg; 蚯蚓的半数致死浓度(LC50)分别为: Cu 400 ~ 450 mg/kg, Zn 1 500 ~ 1 900 mg/kg, Pb 2 350 ~ 2 400 mg/kg, Cd 900 mg/kg,这与郭永灿等^[35]的报道结果基本一致,各重金属元素 48 h 的 LD50 分别为: Cd 1 000 mg/kg, Pb 81 mg/kg, Cu 633 mg/kg, Hg 304 mg/kg, Zn 528 mg/kg, Cr 428 mg/kg。赵丽等^[3]采用滤纸接触法测得 Cd 、 Cu 对蚯蚓的 LC50 分别为 1 612.57 mg/L 和 584.93 mg/L,人工土壤法测得 Cd 、 Cu 对蚯蚓的 LC50 分别为 875.05 mg/kg 和 116.91 mg/kg,表明 Cu 对该蚯蚓的毒性强于 Cd 。

同时,有关研究人员对复合污染的急性毒性也进行了研究,宋玉芳等^[34]的研究还表明,在 Cu 、 Zn 、 Pb 、 Cd 单一污染引起大于 10% 蚯蚓死亡浓度下,复合污染导致 100% 蚯蚓死亡,表明复合污染极强的协同效应。贾秀英等^[36]测定了 Cu 、 Zn 单一与复合污染对蚯蚓的急性致死及亚致死效应,结果表明,蚯蚓个体对 Cu 、 Zn 的耐受程度不同,其毒性阈值 $Zn >$

Cu ,此结果与宋玉芳等^[34]的研究结果相符合。 Cu 、 Zn 浓度与蚯蚓死亡率显著正相关,与体重增长率显著负相关。赵作媛等^[37]对镉-菲复合污染影响下蚯蚓的急性毒性进行了系统研究,结果表明,14 天时镉、菲对蚯蚓的 LC50 分别为 788.71 mg/kg、42.51 mg/kg,菲的毒性大于镉毒性。镉在各浓度下与菲复合,对蚯蚓的毒性都产生拮抗作用,且随镉浓度升高其降低菲毒性的程度降低,说明复合污染物的组成及各污染物的不同浓度组合是决定混合物毒性的重要因素。

3.2 重金属对蚯蚓机体组织的影响

郭永灿等^[38]对重金属污染胁迫下蚯蚓机体组织破坏进行了系统研究,对株洲冶炼厂附近重金属污染区采回的白颈环毛蚓(*Pheretima californica*)电镜观察表明,蚯蚓胃肠道粘膜上皮细胞均发生不同程度的损伤,主要表现为胃肠道粘膜层出血、背血管肿胀,上皮细胞产生萎缩或溃疡灶。这些病变随污染程度的不同而不同,重污染区比轻污染区要严重,在重污染区的蚯蚓胃肠道粘膜上皮细胞核周腔扩大甚至解体,同时可见到线粒体肿胀、凝聚及线粒体嵴消失,甚至空泡化或解体;高尔基复合体膨大,内质网扩张,溶酶体增生;细胞核膜间隙肿胀、断裂、核质外溢,胞质自溶。此外,重金属污染还会引起蚯蚓的体表溃疡甚至产生肿瘤,同时蚯蚓特有的黄色细胞也会因污染程度的不同而显示出消长规律,重金属污染程度与上皮细胞超微结构病变大小呈正相关^[35]。

王盛权等^[39]采用滤膜法研究了 Hg 和 Cd 单一污染对赤子爱胜蚓血细胞微核的影响,结果表明,重金属污染能使其蚯蚓血细胞产生一定数量的微核,具有一定的遗传诱变效应,微核产生率随污染浓度的增加呈现先上升后下降的趋势。其中, Hg 在 0 ~ 25.5 mg/L 的浓度范围内,微核率与处理浓度呈极显著正相关;在 25.5 ~ 63.75 mg/L 浓度范围内,微核率与处理浓度呈极显著负相关。 Cd 在 0 ~ 115 mg/L 浓度范围内,微核率与处理浓度呈极显著正相关;在 115 ~ 143.75 mg/L 浓度范围内,微核率与处理浓度呈极显著负相关。

3.3 重金属对蚯蚓体内酶活性的影响

有关研究表明,重金属污染对蚯蚓体内酶活性有重要影响。王振中等^[16]的研究表明, Cd 中毒后蚯蚓过氧化物同工酶活性增加,脂酶同工酶活性减弱; Pb 中毒后蚯蚓过氧化物酶和脂酶同工酶活性均增加。郭永灿等^[35]的报道也证明重金属对蚯蚓酯酶同工酶有抑活作用,而重金属对蚯蚓过氧化物酶同工酶有激活作用。郭永灿等^[28]还对株洲工业区蚯蚓酯酶及过氧

化物酶同工酶进行比较研究,结果证明重金属污染土壤中蚯蚓体内酯酶同工酶酶带减少,酶活性降低,而其过氧化物酶酶带和酶活性有所增加。

吴国英和贾秀英^[40]研究了猪粪基质中重金属 Cu、Cr 和 Cd 对赤子爱胜蚓体重和体内纤维素酶活性的影响,结果显示 Cu、Cr 和 Cd 污染均可导致蚯蚓体重下降,并且降幅和各污染物浓度的增加和暴露时间呈正相关性,同时蚯蚓体内纤维素酶活性受到抑制,但不同重金属、不同暴露浓度对蚯蚓纤维素酶活力的作用效应不同。林少琴和兰端芳^[41]报道了金属离子在体内外对蚯蚓 SOD、CAT 及 GSH-Px 酶活性的影响,不同金属粒子在体内、体外对蚯蚓体内主要酶类活性表现出不同的效应,Zn²⁺、Fe³⁺、Mn²⁺、Hg²⁺等在体外对蚯蚓 SOD 表现为强烈抑制作用,抑制率达 0 ~ 30%,在体内不同程度地表现为激活作用;Zn²⁺、Fe³⁺、Mn²⁺在体外对蚯蚓 CAT 有抑制作用,Mg²⁺、Hg²⁺、Cd²⁺则对 CAT 表现为激活作用,但在体内 Zn²⁺、Fe³⁺则转变呈现出激活作用;Zn²⁺、Fe³⁺、Mn²⁺等在体外对蚯蚓 GSH-Px 表现出抑制作用,在体内 1 天内表现出抑制作用,但 2 天后表现为激活作用。Andrea 等^[42]的研究还证实,在 Hg 污染土壤短期(2 天)和长期(44 天)暴露下,蚯蚓谷胱甘肽还原酶会产生随时间变化的氧化应激,谷胱甘肽还原酶的氧化还原可用于土壤 Hg 污染评估。

3.4 重金属污染对蚯蚓种群的影响

土壤重金属污染会对蚯蚓造成毒害作用,同时生存在重金属污染土壤中的蚯蚓会对此有所反应,重金属污染会引起土壤动物群落结构、生物种类和生物数量的变化。有关研究^[43]表明,不同品种蚯蚓对重金属污染的反应有差别,一些品种蚯蚓对重金属很敏感,重金属会严重影响种群的个体数量和生育繁殖,如赤子爱胜蚓(*Eisenia foetida*)就对土壤中 Cd 污染敏感。邓继福等^[44]报道了土壤重金属污染对土壤动物群落的生态影响,其中也专门提及了土壤大型动物蚯蚓,研究结果表明随着重金属污染程度的增加,土壤中蚯蚓种类迅速减少。

Maboeta 等^[45-46]的田间试验研究结果表明,施用氯化铜(杀真菌剂)对蚯蚓 *Microchaetus* sp. 和 *Aporrectodea caliginosa* 的生物量和种群数量产生了较大影响,两种蚯蚓数量明显降低。同时,对两种蚯蚓溶酶体膜完整性进行了检测,结果表明溶酶体膜在蚯蚓种群变化之前,已发生了变化。Svendsen 和 Week^[47]在研究 Cu 污染条件下蚯蚓腔胞溶酶体膜完整性的同时,也从生态学的角度系统研究了重金属污

染与蚯蚓个体、种群水平变化的关系,结果表明仅在 Cu 浓度超过了标志物所能承受的极限浓度时,蚯蚓个体、种群水平才发生变化。通过上述研究,逐步建立了细胞反应与蚯蚓在种群水平变化的关系。

重金属污染对蚯蚓的生态毒理研究取得了一定的研究成果,但是需要特别指出的是,目前大部分生态毒理实验所采用的蚯蚓均为表居型蚯蚓,该类蚯蚓主要以土表残落物为食,不同生态型蚯蚓在土壤中所处位置不同,食性各异,在以后的生态毒理研究中应增加耕层及以下土壤蚯蚓品种的相关毒理研究,使研究结果更客观真实。

4 蚯蚓对重金属污染土壤修复的机理

蚯蚓在重金属污染土壤修复中的作用,一方面体现在蚯蚓自身对重金属的耐性及富集吸收,另一方面则可归结为蚯蚓活动对土壤重金属的活化作用。

4.1 蚯蚓对土壤重金属的耐性机制

很多研究表明蚯蚓对重金属具有耐性,蚯蚓对土壤重金属的富集和活化建立在其对重金属的耐性基础上,但对其耐性机理认识还不很清楚,各派学者对耐性机制的认识也不统一,以后应加强耐性机制的研究。有学者认为^[41,48],蚯蚓体内含有丰富的酶类,包括过氧化氢酶、谷胱甘肽还原酶、谷胱甘肽过氧化物酶及超氧化物歧化酶等酶类构成的脂质过氧化保护酶系统,当蚯蚓暴露于重金属后,产生了氧化胁迫,激发了这些酶的活性。Morgan 等^[49]认为分隔、固定作用是蚯蚓耐受重金属的机制,他发现蚯蚓体后消化道组织集中了蚯蚓所累积的大部分的 Cd、Pb、Zn,主要富集部位为细胞内的泡囊,并且重金属离子与磷键相结合,形成难溶性的金属磷酸钙盐,从而阻止了金属向其他组织扩散。

Sterzenbaum 等^[50]研究者认为,蚯蚓耐受重金属也可能是由于重金属与富含半胱氨酸的小分子蛋白质或金属硫蛋白相结合,进而降低其毒性。Dallinger^[51]研究了蚯蚓对体内重金属的解毒机制和抗性机制,其中包括产生金属结合蛋白络合金属元素。Ireland^[52]对金属结合蛋白络合重金属元素、蚯蚓体腔内腔胞的溶酶体和细胞质粒抑制重金属活性等机制也进行了系统研究,Morgan 等^[53]的研究也证实蚯蚓还可以通过体腔内腔胞的溶酶体和细胞质粒抑制重金属活性来进行解毒。此外,也有研究认为蚯蚓体内黄色组织中的黄色细胞具有蓄积某些重金属的作用^[54]。

4.2 提高土壤重金属的生物有效性

蚯蚓的取食、作穴和代谢等生命活动能大大提高土壤中重金属元素的生物有效性,进而促进植物吸收。同时,蚯蚓还能改善土壤条件,促进土壤养分循环,提高植物产量,进而影响植物对重金属的修复效率。Devliegher 和 Verstraete^[55]研究发现蚯蚓通过肠道消化和养分富集两个过程可以提高土壤中植物养分(Mg、Ca、Fe、Mn)和金属元素(Cr、Co)的有效性。白建峰等^[56]的报道也表明,接种蚯蚓能显著增加玉米生物量,提高根际土壤中结合态的 As 含量。Maboeta^[57]在用某 Pb、Zn 尾矿土壤培养蚯蚓,发现蚯蚓活动使土壤有效态 Pb、Zn 含量分别提高 48.2%、24.8%。Cheng 和 Wong^[58]研究发现,加入蚯蚓可显著提高红壤中 DTPA 提取态 Zn 和黄泥土中的有机结合态 Zn。俞协治和成杰民^[59]研究证实,蚯蚓活动显著增加红壤中 DTPA 提取态 Cu 的含量。刘德鸿等^[60]研究证实蚯蚓活动能显著提高高沙土和高丹草中碳酸盐结合态 Cu、Cd 和铁锰氧化物结合态 Cu 及 Cd 的含量。

蚯蚓活动可以改变土壤的酸碱度,土壤 pH 也是影响重金属生物有效性的重要因素。Cheng 和 Wong^[58]研究表明,红壤接种蚯蚓后,土壤 pH 降低 0.03 ~ 0.18,而高砂土的 pH 则略有升高,不同类型土壤引入不同种类蚯蚓后,土壤 pH 改变有一定差异。同时,蚯蚓活动可以分泌大量含有 -COOH、-NH₂、-C=O 等活性基团的胶黏物质,能络合、螯合重金属,提高土壤中重金属的活性,同时胶黏物质又是微生物的生活基质,会不断被微生物分解。胶黏物质处于不断分泌-不断络合、螯合重金属-不断分解的动态过程中,这将比静态过程更为有力地推动土壤重金属的活化^[61]。

5 蚯蚓与植物、微生物的协同作用

5.1 蚯蚓和植物的协同作用

大量研究证实,蚯蚓能改善重金属污染土壤条件,增强养分循环,促进植物生长,在一定程度上弥补了超积累植物生物量小这一不足^[61]。Basker^[62]的研究结果表明,蚯蚓作用后土壤有机物 C/N 比逐渐降低,可以提高土壤养分的有效性和养分周转率,刘宾等^[63]的研究也取得了类似的结果。Abdul 等^[64]研究证实蚯蚓活动显著增加了重金属污染土壤中黑麦草中 Zn、Cu、Pb 含量,黑麦草产量提高明显,俞协治和成杰民^[59]的模拟研究也证实了这一点,接种蚯蚓显著提高了 Cd、Cu 污染红壤中浓度低于 400 mg/kg Cu

和 10 mg/kg Cd 处理上的黑麦草的产量。胡锋等^[65]报道,蚯蚓工作过的红壤中矿质总氮、无机磷、有效 SiO₂、Mo、Zn 都明显高于对照土壤。同时,死亡的蚯蚓也能为土壤提供大量的氮磷养分,据 Amador^[66]估算,死亡蚯蚓释放的易利用态有机氮约 21.1 ~ 38.6 t/(hm²·y)。

同时,蚯蚓在降解土壤有机废物过程中还能提高土壤中腐殖质和有机酸含量,并促进植物生长^[10]。Ma 等^[67]在对某 Pb、Zn 尾矿土壤修复研究中发现,在种植大本豆科植物 *Leucaena leucocephala* 的同时引入蚯蚓,植物产量提高了 10% ~ 30%,由此植物吸收重金属的比率提高了 16% ~ 53%。刘玉真等^[68]的研究发现,蚯蚓活动还可以增加水溶态重金属的含量,降低其有机态含量,蚯蚓活动能提高土壤微生物活性,增加植物生物量。Zhang 等^[69-70]的研究表明,蚯蚓黏液中含有大量的可溶性有机碳(DOC)、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、P 和 K 等植物可利用营养成分,促进了植物生长及对重金属的富集。在 Cd 污染胁迫下,蚯蚓黏液分别使番茄幼苗根系、茎和叶的鲜重增加 123.9%、16.2% 和 32.0%,植物体中 Cd 浓度升高 22.5%、14.4% 和 28.9%,Cd 富集量增加 173.2%、14.5% 和 75.4%。

5.2 蚯蚓和微生物的协同作用

蚯蚓和微生物的联合作用对有机质的分解以及矿物营养的释放起着非常重要的作用,蚯蚓活动不仅对微生物种群结构和数量产生影响,而且还对微生物的活性产生影响^[1]。王丹丹等^[71]的报道表明,接种蚯蚓可以显著增加 Cu 污染土壤细菌、放线菌数量,但对真菌数量影响不大,可在一定程度上减缓 Cu 污染对土壤微生物数量和活性的影响。Kumar^[72]的研究证明,微生物的存在可以促进矿物营养的释放,增加肥效。张宝贵等^[73]以及 Devliegher 和 Verstraete^[55]的研究证实蚯蚓促进了土壤中被微生物固持养分的释放和增强土壤微生物种群活性,增强了微生物的代谢墙和纤维素分解活性。

成杰民等^[74-76]也对蚯蚓-菌根的协同作用进行了系统研究,结果表明蚯蚓能传播微生物并影响微生物的活性和数量,存在着促进菌根侵染植物根系的潜力。接种蚯蚓或菌根菌均能显著提高土壤中速效 N、P 的含量,菌根与蚯蚓不存在增加土壤中速效 N、P、K 的协同作用;蚯蚓活动增加了黑麦草根部分 Cd 的积累,而菌根则促进 Cd 从黑麦草根部分向地上部转移,两者均能促进黑麦草对 Cd 的吸收,接种蚯蚓可以提高菌根的侵染率,所以表现出促进 Cd 向地上部分转移的协同作用;黑麦草吸收 Cd 含量与土壤和蚓粪中

DTPA 提取态 Cd 含量之间呈显著正相关, 蚓粪中 DTPA-Cd 含量显著高于土壤中的 Cd 含量, 蚓粪中有效态 Cd 是植物吸收 Cd 的重要供源。此外, 蚯蚓体内存在着各种各样的酶, 已发现的有纤维素酶、几丁质酶、蛋白酶、脂肪酶、淀粉酶、过氧化物酶以及糖酶等, 这些天然酶活性极高, 能够与微生物协同分解腐烂有机物^[7]。

6 蚯蚓粪作为重金属污染土壤的修复剂

蚯蚓粪具有很好的通气性、排水性和高持水量, 能够增加土壤的孔隙度和团聚体数量, 同时蚯蚓粪具有很大的表面积, 吸附能力较强, 可以较大程度地吸附重金属, 同时也给许多有益微生物创造良好的生境, 具有良好的吸收和保持营养物质的能力。李扬等^[77]在综合相关领域研究的基础上, 报道了蚯蚓粪能够通过钝化作用或活化作用机制, 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。

蚯蚓能把有机质分解转化为氨基酸、聚酚等简单化合物, 进而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^[1,78], 腐殖质中主要活性部分为腐植酸, 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, 蚯蚓粪中腐植酸含量约 11.7% ~ 25.8%。腐植酸还具有酚羟基、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^[79]。蚯蚓粪中还含有大量的细菌、放线菌和真菌, 这些微生物不仅使复杂物质矿化为植物易于吸收的有效物质, 而且还合成一系列有生物活性的物质^[77]。此外, 有学者^[80-81]研究发现蚯蚓粪中还含有某些固氮微生物和硫化细菌, 在促进作物生长、抑制病原菌活性和改善土壤肥力等方面具有重要作用。

7 讨论与展望

生物修复技术因其生态、高效等特性, 在土壤重金属污染修复领域获得广泛认可, 蚯蚓作为土壤环境中最常见的大型无脊椎动物, 对土壤重金属活性产生着重要的影响, 蚯蚓对土壤重金属污染修复有着极好的促进作用。但是, 蚯蚓活动也存在一定的环境风险, 方婧等^[82]通过对流-弥散模型(CDE)拟合研究表明, 蚯蚓孔能够形成明显的优势流现象, 增加了重金属污染地下水的风险。如何进一步开展相关研究工作, 实现蚯蚓在重金属污染土壤修复中的利益最大化, 是以后该领域的主要努力方向。为此, 结合相关研究成果, 笔者认为蚯蚓在土壤重金属污染及其修复领域应重

点开展以下几个方面的研究:

(1) 微生物对蚯蚓具有非常重要的意义, 蚯蚓、蚯蚓黏液和土壤微生物存在密切的共生关系, 深入研究蚯蚓与微生物的相互作用及其共生机制, 微生物在蚓粪中的演替过程, 以及微生物丰度、类型随时间的变化模式等。

(2) 筛选敏感的生物标志物作为土壤重金属污染的早期预警信号, 建立生物标志物的响应情况与重金属污染胁迫下蚯蚓个体、种群变化之间的关系。同时, 系统研究典型重金属污染胁迫下不同蚯蚓类群的群落行为变化。

(3) 研究重金属污染胁迫下蚯蚓体内特异性蛋白的表达, 如金属硫蛋白、热休克蛋白及 P₄₅₀ 红细胞色素等的特异性表达, 建立其与土壤重金属污染水平的“剂量-效应”关系, 进而筛选特异性基因, 从基因水平探求重金属污染引起的 DNA 变异及表达。

参考文献:

- [1] 金亚波, 韦建玉, 屈冉. 蚯蚓与微生物、土壤重金属及植物的关系[J]. 土壤通报, 2009, 40(2): 439-445
- [2] 韦朝阳, 陈同斌. 金属超富集植物及植物修复技术研究进展[J]. 生态学报, 2001, 21(7): 1 196-1 204
- [3] 赵丽, 邱江平, 沈嘉林, 王雷. 重金属镉、铜对蚯蚓的急性毒性试验[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2005, 23(4): 366-370
- [4] 肖鹏飞, 李法云, 付宝荣, 王效举. 土壤重金属污染及其植物修复研究[J]. 辽宁大学学报(自然科学版), 2004, 31(3): 279-283
- [5] Schröder D. Bodenkunde in Stichworten. 5 auflage[M]. Berlin, Stuttgart: Ferdinand Hirt, 1992: 36
- [6] 郝桂玉, 黄民生, 徐亚同. 蚯蚓及其在生态环境保护中的应用[J]. 环境科学研究, 2004, 17(3): 75-77
- [7] 邱江平. 蚯蚓及其在环境保护中的应用 I. 蚯蚓及其在自然生态系统中的作用[J]. 上海农学院学报, 1999, 17(3): 227-232
- [8] Vasseur P, Cossu LC. Biomarkers and community indices as complementary tools for environmental safety[J]. Environment International, 2003, 28(8): 711-717
- [9] 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[J]. 土壤学报, 2005, 42(1): 140-148
- [10] Klein R, Paulus M. Umweltproben Fuer Die Schadstoffanalytik in Biomonitoring[M]. Jeno, Stuttgart: Gustav Fischer Verlag, 1995: 183-202
- [11] Abudul Rida AMM, Bouch MB. Heavy metal linkages with mineral, organic and living soil compartment[J]. Soil Biology & Biochemistry, 1997, 27(3): 649-655
- [12] Paoletti GM. The role of earthworms for assessment of sustainability and as bioindicators[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 1999, 74(1): 137-155
- [13] Bengtsson G. Population density and tissue metal

- concentration of lumbricids in forest soils near a brass mill[J]. Environmental Pollution Series A, Ecological and Biological, 1983, 30(2): 87-108
- [14] Maria MS, Crescencio RF, Adolfo LT, Kazimierz W, Katarzyna W. Global DNA methylation in earthworms: A candidate biomarker of epigenetic risks related to the presence of metals/metalloids in terrestrial environments[J]. Environmental Pollution, 2011, 159(10): 2 387-2 392
- [15] 袁方曜, 王玢, 牛振荣, 王峰. 华北代表性农田的蚯蚓群落与重金属污染指示研究[J]. 环境科学研究, 2004, 17(6): 70-72
- [16] 王振中, 张友梅, 胡觉莲, 郑云有, 胡朝阳, 郭永灿, 赖勤, 颜亨梅, 邓继福. 土壤重金属污染对蚯蚓 (*Opisthopora*) 影响的研究[J]. 环境科学学报, 1994, 14(2): 236-243
- [17] 朱江, 杨道丽, 王振旗, 毛俊亚. 作为土壤污染生物标志物的蚯蚓体腔细胞提取方法比较[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2011, 29(3): 1-5
- [18] 常忠连, 谭振军, 范俊岗. 环境重金属污染监测研究的指示物: 小型哺乳动物和土壤动物[J]. 辽宁林业科技, 2004(5): 24-27
- [19] 王学锋, 曹静. 蚯蚓在植物修复重金属污染土壤中的应用前景[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(17): 7 415-7 416
- [20] Spurgeon DJ, Hoplin SP. Tolerance to zinc in populations of the earthworm *Lumbricus rubellus* from uncontaminated and metal-contaminated ecosystems[J]. Arch. Environ. Contam. Toxicol., 1999, 37: 332-337
- [21] Langdon CJ, Pearce TG, Meharg AA, Semple KT. Survival and behavior of the earthworms *Lumbricus rubellus* and *Dendrodrilus rubidus* from arsenate-contaminated and non-contaminated sites[J]. Soil Biol. Biochem., 2001, 33: 1 239-1 244
- [22] Bruns E, Egeler P, Rombke J, Scheffczyk A, Spoerlein P. Bioaccumulation of lindane and hexachlorobenzene by *Tubificid sludgeworms* (*Oligochaeta*) under standardized laboratory conditions[J]. Chemosphere, 1997, 35: 835-852
- [23] Hendriks AJ, Ma WC. Modelling and monitoring organochlorine and heavy metal accumulation in soils, earthworms and shrews in Rhinedelta Floodplains[J]. Arch. Environ. Contam. Toxicol., 1999, 37(1): 70-77
- [24] 寇永纲, 伏小勇, 侯培强, 展宗城, 白炜, 姚毅. 蚯蚓对重金属污染土壤中铅的富集研究[J]. 环境科学与管理, 2008, 33(1): 62-64
- [25] Edwards SC, Macleod CL, Lester JN. Bioavailability of copper and mercury to the common nettle (*Urtica dioica*) and the earthworm *Eisenia fetida* from contaminated dredge spoil[J]. Water Air Soil Pollut., 1998, 102(1/2): 75-90
- [26] 吴国英, 贾秀英, 郭丹, 来凯凯, 姜洪芳. 蚯蚓对猪粪重金属 Cu、Zn 的吸收及影响因素研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(6): 1 293-1 297
- [27] 戈峰, 刘向辉, 江炳缜. 蚯蚓对金属元素的富集作用分析[J]. 农业环境保护, 2002, 21(1): 16-18
- [28] 郭永灿, 王振中, 赖勤, 张友梅, 夏卫生, 颜亨梅, 邓继福. 株洲工业区土壤重金属污染与蚯蚓同工酶的研究[J]. 应用生态学报, 1995, 6(3): 317-322
- [29] 牛明芬, 崔玉珍. 蚯蚓对垃圾与底泥中镉的富集现象[J]. 农村生态环境, 1997, 13(3): 53-54
- [30] Gregor E, Stefan Z, Peter C, Beat F. Mercury, cadmium and lead concentrations in different ecophysiological groups of earthworms in forest soils[J]. Environmental Pollution, 2008, 156(3): 1 304-1 313
- [31] 伏小勇, 秦赏, 杨柳, 陈学民, 黄魁, 侯培强. 蚯蚓对土壤中重金属的富集作用研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(1): 78-83
- [32] 陈玉成, 皮广洁, 黄伦先, 丁德蓉, 杨勇. 城市生活垃圾蚯蚓处理的因素优化及其重金属富集研究[J]. 应用生态学报, 2003, 14(11): 2 006-2 010
- [33] Anita G, Walter G, Doris K, Kevin F, Walter K. Determination of arsenic compounds in earthworms[J]. Environ. Sci. Technol., 1998, 32(15): 2 238-2 243
- [34] 宋玉芳, 周启星, 许华夏, 任丽萍, 孙铁珩. 土壤重金属污染对蚯蚓的急性毒性效应研究[J]. 应用生态学报, 2002, 13(2): 187-190
- [35] 郭永灿, 王振中, 张友梅, 赖勤, 颜亨梅, 夏卫生, 邓继福. 重金属对蚯蚓的毒性毒理研究[J]. 应用与环境生物学报, 1996, 2(1): 132-140
- [36] 贾秀英, 罗安程, 李喜梅. 高铜、高锌猪粪对蚯蚓的急性毒性效应研究[J]. 应用生态学报, 2005, 16(8): 1 527-1 530
- [37] 赵作媛, 朱江, 陆贻通, 周培. 镉-菲复合污染对蚯蚓急性毒性效应的研究[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2006, 24(6): 553-557
- [38] 郭永灿, 赖勤, 颜亨梅, 王振中, 张友梅, 邓继福. 重金属对蚯蚓胃肠道上皮细胞超微结构损伤的研究[J]. 生态学报, 1997, 17(3): 282-287
- [39] 王盛权, 周汝敏, 张云峰. 蚯蚓血细胞微核试验对汞、镉遗传毒性的研究[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(6): 2 449-2 451, 2 695
- [40] 吴国英, 贾秀英. 猪粪重金属对蚯蚓体重及纤维素酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(增刊): 219-221
- [41] 林少琴, 兰端芳. 金属离子对蚯蚓 CAT、GSH-Px 及 SOD 酶活性的影响[J]. 海峡药学, 2001, 13(2): 23-25
- [42] Andrea C, María JS, Francesca B, Rocio M, Juan CS. Oxidative stress in earthworms short- and long-term exposed to highly Hg-contaminated soils[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 194(10): 135-143
- [43] Spurgeon DJ, Hoplin SP, Jones DT. Effects of cadmium, copper, lead and zinc on growth, reproduction and survival of the earthworm *Eisenia fetida* (Savigny): Assessing the environmental impact of point - source metal contamination in terrestrial ecosystems[J]. Environ. Pollut., 1994, 84: 123-130
- [44] 邓继福, 王振中, 张友梅, 胡觉莲, 郑云有, 夏卫生, 郭永灿, 颜亨梅, 赖勤. 重金属污染对土壤动物群落生态影响的研究[J]. 环境科学, 1996, 17(2): 1-6
- [45] Maboeta MS. The relation between lysosomal biomarker

- and population responses in a field population of *Microchaetus* sp. (Oligochaeta) exposed to the fungicide copper oxychloride[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2002, 52(3): 280–287
- [46] Maboeta MS, Reinecke SA, Reinecke AJ. Linking lysosomal biomarker and population responses in a field population of *Aporrectodea caliginosa* (Oligochaeta) exposed to the fungicide copper oxychloride[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2003, 56(3): 411–418
- [47] Svendsen C, Weeks JM. Relevance and applicability of a simple earthworm biomarker of copper exposure I. Links to ecological effects in a laboratory study with *Eisenia andrei*[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 1997, 36(1): 72–79
- [48] Saint Denis M, Narbonne JF, Arnaud C, Thybaud E, Ribera D. Biochemical responses of the earthworm *Eisenia foetida* andrei exposed to contaminated artificial soil: Effects of lead acetate[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2001, 33(7/8): 395–404
- [49] Morgan JE, Morgan AJ. The distribution and intracellular compartmentation of metals in the endogeic earthworm *Aporrectodea caliginosa* sampled from an unpolluted and a metal contaminated site[J]. *Environmental Pollution*, 1998, 99(2): 167–175
- [50] Sterzenbaum SR, Kille P, Morgan AJ. The identification, cloning and characterization of earthworm metallothionein[J]. *FEBS Letters*, 1998, 431(3): 437–442
- [51] Dallinger R. Metallothioneins in terrestrial invertebrates: Structural aspects and biological significance and implications for their use as biomarkers[J]. *Cell Mol. Biol.*, 2000, 46: 331–346
- [52] Ireland MP. Heavy metal binding properties of earthworm chloragosomes[J]. *Acta Biol. Acad. Sci. Hung.*, 1998, 29: 385–394
- [53] Morgan JE, Norey CG, Morgan AJ, Kay J. A comparison of the cadmium-binding proteins isolated from the posterior alimentary canal of the earthworms *Dendrodrilus rubidus* and *Lumbricus rubellus*[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology, Part C: Comparative Pharmacology and Toxicology*, 1989, 92(1): 15–21
- [54] 李许明, 李福燕, 郭彬, 陈柳燕, 漆智平. 蚯蚓对土壤重金属的影响[J]. *安徽农业科学*, 2007, 35(13): 3 940–3 941
- [55] Devliegher W, Verstraete W. *Lumbricus terrestris* in a soil core experiment: Effect of nutrient enrichment processes (NEP) and gut-associated processes (GAP) on the availability of plant nutrients and heavy metals[J]. *Soil Biol. Biochem.*, 1996, 28: 489–496
- [56] 白建峰, 林先贵, 尹睿, 张华勇, 王俊华, 陈雪民, 李江元. 蚯蚓(*Eisenia foetida*)对玉米根际 As、P 形态转化及其吸收的影响[J]. *环境科学*, 2007, 28(7): 1 600–1 606
- [57] Maboeta MS. The effects of low lead levels on the growth and reproduction of the African earthworm *Eudrilus eugeniae* (Oligochaeta)[J]. *Biol. Fertil. Soils*, 1999(30): 113–116
- [58] Cheng JM, Wong MH. Effects of earthworms on Zn fractionation in soils[J]. *Bio. Fertil. Soils*, 2002, 36: 72–78
- [59] 俞协治, 成杰民. 蚯蚓对土壤中铜、镉生物有效性的影响[J]. *生态学报*, 2003, 23(5): 922–928
- [60] 刘德鸿, 成杰民, 刘德辉. 蚯蚓对土壤中铜、镉形态及高丹草生物有效性的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2007, 13(2): 209–214
- [61] 冯凤玲, 成杰民, 王德霞. 蚯蚓在植物修复重金属污染土壤中的应用前景[J]. *土壤通报*, 2006, 37(4): 809–814
- [62] Basker A. Influence of soil ingestion by earthworms and the availability in soil: An incubation experiment[J]. *Biol. Fertil. Soils*, 1992, 14: 300–303
- [63] 刘宾, 李辉信, 朱玲, 焦加国, 陈小云, 胡锋. 接种蚯蚓对潮土氮素矿化特征的影响[J]. *土壤学报*, 2007, 44(1): 99–105
- [64] Abdul MM, Abdul R. Effect des lombriciens sur L'Absorption dupotassium par le raygrass dans des sols contaminés par cinq éléments traces[J]. *Soil Biol. Biochem.*, 1996, 28 (8) : 1 045–1 051
- [65] 胡锋, 吴珊眉, 李辉信. 蚯蚓和蚁类活动对红壤性质的影响(C)//何园球, 杨艳生. 红壤生态系统研究. 第 5 集. 北京: 中国农业科技出版社, 1998: 276–285
- [66] Amador JA. Carbon and nitrogen dynamics in *Lumbricus terrestris* (L) burrow soil: Relationship to plant residues and macropores[J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2003, 67: 1 755–1 762
- [67] Ma Y, Dickinson NM, Wong MH. Toxicity of Pb/Zn mine tailings to the earthworms *Pheretima* and the effects of burrowing on metal availability[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, 36(1): 79–86
- [68] 刘玉真, 朱宇恩, 成杰民. 赤子爱胜蚓(*Eisenia foetida*)对三种土壤 Zn、Pb 有效态含量的影响[J]. *生态环境*, 2006, 15(4): 739–742
- [69] Zhang SJ, Tang C, Li HX, Wei ZG, Hu F. Earthworm mucus enhanced cadmium accumulation of tomato seedlings[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2009, 12(1): 24–33
- [70] Zhang SJ, Hu F, Li HX, Li XQ. Influences of earthworm mucus and amino acids on tomato seedlings growth and cadmium accumulation[J]. *Environmental Pollution*, 2009, 157(10): 2 737–2 742
- [71] 王丹丹, 李辉信, 魏正贵, 刘满强, 王霞, 胡锋. 蚯蚓和秸秆对铜污染土壤微生物类群和活性的影响[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(5): 1 113–1 119
- [72] Kumar V. Enriching vermicompost by nitrogen fixing and Phosphate solubilizing bacteria[J]. *Biores. Technol*, 2001, 76: 173–175
- [73] 张宝贵, 李贵桐, 申天寿. 威廉环毛蚯蚓对土壤微生物量及活性的影响[J]. *生态学报*, 2000, 24(1): 168–172
- [74] 成杰民, 俞协治, 黄铭洪. 蚯蚓-菌根相互作用对 Cd 污染土壤中速效养分及植物生长的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2006, 25(3): 685–689
- [75] 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[J]. *生态学报*, 2005, 25(6): 1 256–1 262
- [76] 成杰民, 俞协治, 黄铭洪. 蚯蚓-菌根相互作用对土壤-

- 植物系统中 Cd 迁移转化的影响[J]. 环境科学学报, 2007, 27(2): 228–234
- [77] 李扬, 乔玉辉, 莫晓辉, 孙振钧. 蚯蚓粪作为土壤重金属污染修复剂的潜力分析[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(增刊): 250–255
- [78] Elvira C, Goicoechea M, Sampedro L, Mato S, Nogales R. Bioconversion of solid paper-pulp mill sludge earthworms[J]. Bioresource Technology, 1996, 57: 173–177
- [79] 王彦青, 廉振民. 蚯蚓与重金属污染治理及蚓粪应用的研究进展[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2003, 31(专辑): 59–63
- [80] Kumar V, Singh KP. Enriching vermicompost by nitrogen fixing and phosphate solubilizing bacteria[J]. Bioresource Technology, 2001, 76(2): 173
- [81] Arancon N, Edwards CA, Lee SS, Yardim F. Management of plant para-sitic nematodes by use of vermicomposts[J]. Proceedings of Brighton Crop Protection Conference-Pests and Diseases, 2002, 2: 705–710
- [82] 方婧, 温蓓, 单孝全, 裴志国. 蚯蚓活动对重金属在土柱中淋溶行为的影响[J]. 环境化学, 2007, 26(6): 768–773

Review on Application of Earthworm in Soil Heavy Metal Pollution and Remediation

TANG Hao^{1,2}, ZHU Jiang¹, HUANG Shen-fa¹, QIU Jiang-ping^{2*}

(1 Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233, China;

2 School of Agriculture and Biology, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: As the major soil macro-fauna, earthworm plays an important role in the improvement of soil environment. Based on the systematic analysis and summarizing on the researches in related fields, the application of earthworm in the remediation of heavy metal contaminated soil was reviewed, which included: earthworm as the biological indicator of heavy metal contaminated soil, the enrichment and release of heavy metals in earthworms, the physiological and ecological impact of heavy metals on earthworms, the mechanism of the remediation by earthworm for heavy metal polluted soil, the synergy between earthworms and plants, microbial activities, and the potential of vermin-compost applied in the remediation of heavy metal polluted soil. The main problems encountered in remediation of heavy metal contaminated soil by earthworms were also proposed.

Key words: Earthworms, Heavy metal pollution, Remediation technologies, Research advances, Soil