水土保持学报

第27卷第5期

2013年10月

Journal of Soil and Water Conservation

动植物联合修复技术在重金属复合污染土壤修复中的应用 田伟莉**1，**柳 丹**2，**吴家森**2，**王立江**1，**陈昆柏**3 (**1．浙江博世华环保科技有限公司**，**杭州310015**；**2．浙江农林大学 环境与资源学院**，** 浙江 临安311300**；**3．浙江固体废物处理与资源化重点实验室**，**杭州310012**)** 摘要**：**以台州重金属复合污染土壤为研究对象**，**通 过大 田 试 验 方 法 **，**综合考察动植物联合修复技术在该复 合污染土壤修复中的应用**。**结果表明：经过18个月的修复**，**土壤Cd**、**Cu**、**Pb含量分别降低92. 3% **,** 42.0% **,**24.7%**。**动植物联合修复效果优于单个动物修复和植物修复的简单叠加**，**其中Cd**、**Cu**、**Pb修复效 果分别较单个动物修复和植物修复的简单叠加效果高11 5%**，**7 2%**，**5 0%**，** 说明在重金属复合污染土壤 修复中 **，**该动植物联合修复技术是可行的**，**具有较强的推广应用前景**。**

关键词**：**复合污染土壤**；**植物**；**动物**；**微生物**；**联合修复

中图分类号：X53 文献标识码:A 文章编号：1009-2242**(**2013**)**05-0188-05

Application of Animal and Plant Combination Remediation  
Technology in Complex Heavy Metals Contaminated Soil

TIAN Wei-li1 , LIU Dan2, WU Jia-sen2, WANG Li-jiang1, CHEN Kun-bai3

(1. ***Zhejiang Bestzva Envitech Co. , Ltd, Hangzhou*** 310015 ；. ***School of Environmental and***

***Resource Sciences , Zhejiang Agricultural and Forestry University Lin7 an ,Zhejiang*** 311300**；**

3. ***Zhejiang Provincial Key Laboratory of Solid Waste Treatment and Recycling , Hangzhou*** 310012**)**

**Abstract**: A field experiment was carried out to survey the application of animal and plant combination remediation technology in local heavy metal contaminated soils. The results showed that , after 18 months remediation thecontentofCd Cuand Pbreducedby92．3% 42．0% and24．7% respectively which indicatedthatanimalandplantcombinationremediationhadbe**t**erremediatione**f**ectthantheirsimpleadded together andtheexcesse**f**ectincreasedby11 5% 72% and50% respectively．It**'**sprovedthatanimal andplantcombinationremediationtechnologywasfeasibleforheavymetalcontaminatedsoilsandhadstrong applicationprospects．

**Key words**： complex contaminated soil； plants； animals； microorganisms； combination remediation

土壤重金属污染主要是由汞、镉、铅、铬、砷、锌、铜、镍8 种金属元素引起, 由于它具有普遍性、复杂性、隐蔽 性、长期性及不可降解等特点, 其治理工作一直是国内外研究的重点问题之一**［**1**-**2**］**。国内土壤污染主要表现在 污染面积不断扩大, 且污染多为多元素的复合污染, 特性更为复杂, 实际污染场地与实验室人工污染土壤又存 在一定差异, 故治理难度更大**［**3**-**4**］**。目前常用的物理和化学治理技术均无法从根本上解决问题, 故具有成本低、 不造成二次污染的生物修复技术便引起了各学者的广泛关注**［**5**］**。

生物修复技术主要有植物修复技术、动物修复技术及微生物修复技术, 现实中通常是其中的一种或几种联 合使用。近年来, 植物修复技术以成本低廉、不破坏土壤生态环境、无 二次 污 染 等优 点, 受到学术界的广泛关 注亙。但植物的富集量相对较低，实际应用过程中修复效果不够明显、修复年限较长。动物修复技术中以对蚯 蚓的研究为多**［**7**-**8**］**。但蚯蚓喜阴暗, 常在土壤表层以下活动, 采用蚯蚓修复常会出现在土壤表层重金属含量高 于其他部位的情况。微生物对重金属具有较强的亲和吸附能力, 能提高土壤重金属的生物有效性, 但通常单独 使用较少, 常与植物修复或动物修复中的1 种或2种联合进行**［**9**］**。本文将动植物联合, 展开针对重金属污染土 壤的修复, 不仅能解决植物修复年限过长的问题, 还能避免动物修复后土壤重金属分布不均匀的状况, 有效修 复中低复合污染的土壤。

收稿日期：2013**-**06**-**18

基金项目：浙江省自然科学基金项目(LY12C16004)

作者简介：田伟莉(1984 — ),女，又族，折江上虞人，硕士，工程师，主要从事园林植物开发利用与土壤修复技术研究。E**-**mail： [147230910](mailto:147230910@qq.com)**[@](mailto:147230910@qq.com)**[qq.com](mailto:147230910@qq.com) 通讯作者：陈昆柏(1965 — )男，汉族，浙江台州人，学士，高级工程师，主要从事固体废物管理、处理处置技术开发及综合利用技术等研究。 E**-**mail： bestwal@ 163. com

1材料与万法

1. 1 试验地概况

试验地点设在浙江省台州。台州属中亚热带季风区，四季分明，受海洋水体调节和西北高山对寒流的阻 滞，境内夏少酷热，冬无邪寒，热量丰富，雨水充沛，气候温和湿润。年均日照时间1 800-2 037 h,全年°C 的活动积温5 790. 7〜6 321. 6 C，持续时间363. 4〜359. 4 d,年降水量1 185〜2 029 mm0本试验位于台州一 电子废物长期堆放地块，该地块面积约为280 m**2,**水稻土，土层厚度10〜25 cm, pH 5-7**,**有机质含量4. 5 g/kg,碱解氮含量52 mg/kg,速效磷含量40 mg/kg,速效钾含量105 mg/kg,主要为镉、铜、铅复合污染,其含 量分别为2. 6,11 & 7,122. 9 mg/kg。本文所有重金属含量均为全量。

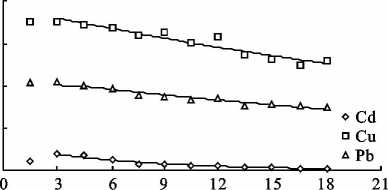
12 试验方法

修复之前,在修复区场地上搭建简易连栋大棚,并将修复区域做成垄状,方便投放蚯蚓和种植植物。 试验 选用的植物为白三叶、黑麦草。 这2 种植物均为分布广泛且栽培繁育技术成熟的牧草,均为多年试验研究筛选 出来的对重金属富集有显著作用的种类。 根据植物生长特性,整个试验共分为6 个试验阶段,试验时间为 2011 年1 月17 日－2012年7 月16 日。 第1 阶段：与第3 和第5 修复阶段相同,均为动物修复过程,持续时间 为1.5个月。在翻耕好的土壤中施入适量蚯蚓食物一一柠檬渣，并投放密度为1 kg/m2的大平二号蚯蚓蚓种， 进行喂养,结束时采用自然光照法收集蚓体,收获的蚯蚓作为危废处理。 第2 阶段：与第4 和第6 修复阶段相 同,均为动物和植物联合修复过程,持续时间为45 个月。（1）动物修复,土壤处理及蚯蚓投放同第1 阶段。 修 复期间蚯蚓每1 5 个月收集1 次,收集方法参照野外蚯蚓收集法**［**10**］**,收集后原土回圃,并投放一定量的蚓种 使土壤中蚓种数量与第2周期初期投放量相等。 待第2 阶段修复结束后,采用自然光照法收集蚓体（同第1 阶 段）。 （2）植物修复,采用间隔条植的方式,将拌入根瘤菌白三叶种子播入沟中,待白三叶生长至1 5 个月左右 的时候刈割1 次,刈割后随即追肥,生长至3 个月即进行第2 次刈割,后继续追肥。 其中第4阶段选用植物为 黑麦草，刈割留茬高度6-8 cm。待该阶段修复结束后将植株整体移除，所有收获的植物残体采用焚烧 处理［11］。

设对比试验,对比试验分为2 组：1 组为整个修复过程不种植植物；2 组为整个修复过程中不投放蚯蚓。 对 比试验土壤降低效果为动物修复（1 组）和植物修复（2 组）效果的简单叠加。

1 3 重金 属含量检测

在试验开始前及开始后每1 5 个月采样1 次,用于了解土壤修复进展情况。 以面积9 m2 为1 个样点,每 个土样采用梅花式布点法采集,在选取的中心点周围再以辐射状取4 个点,将五点土壤混合均匀,作为1 个土 样,每个样点重复取样3 次,取其平均值,作为该样点的重金属含量,而整个试验区的重金属含量为各个样点重 金属含量的平均值。土样带回后风干，过2 mm筛后备用。测定方法参照GB 15618-1995（（ 土壤环境质量标 准》。动植物每次收获时，对收获部分取样进行检测，用以了解动植物的修复效果，样品采用HNO3—HF — HC1O4法消解，使用原子吸收分光光度计测定。

2结果与分析

0 5 0 5

2 11

(~.兰• 8目誠如澳<ffiw

2.1蚯蚓体内重金属含量变化

试验期间，蚯蚓生长良好，在污染土壤中无任何不良反 应，生长速度较快，污染土壤中蚯蚓的产量比对比试验平均 高2%〜7%。蚯蚓投放后，土壤孔隙明显增多，疏松度转 好。试验过程中通过每1. 5个月对蚯蚓进行Cd.Cu.Pb含

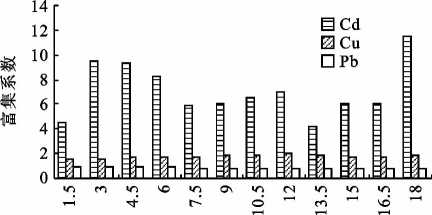
量测定，以了解蚯蚓对土壤重金属的富集状况，发现随着时 时间/月

间的推移，蚓体内的重金属含量均呈先上升后下降趋势，第 图1蚯蚓体内重金属含量

2周期重金属含量升高，达到最高点，之后逐渐下降。对污染土壤重金属Cd、Cu、Pb修复情况采用Excel软件 进行非线性拟合，得出重金属在修复过程中的下降趋势曲线，具体情况见图1。 图1 修复曲线符合指数方程 ***y*** = 曲线拟合方程分别为：Cd,***y*** = 29.47e—0152***s***；Cu,***y*** = 192. 79e—00234***’***；Pb ,***y***=109. 11e—0023***"***。由图 1 可

知，第1周期修复效果未达到预期，之所以出现该情况，是由于蚓种的培养土壤为仅含Cu 18 mg/kg的无污染 土壤，而投放的土壤为Cd.Cu.Pb复合污染的土壤，两者环境差距过大，蚯蚓适应该环境需要一定时间，第1阶 段很有可能为其适应期。随着适应期的结束，蚯蚓蚓体对重金属的富集量达到最高，Cd、Cu、Pb含量分别达到20.1,174.8,104. 5 mg/kg，之后随着修复时间的延长、土壤重金属含量的降低，蚓体重金属的富集量也逐渐降 低，修复结束时，蚓体重金属含量仅为2 3 129 1 74 1 mg/kg。 土壤重金属含量降低的幅度也随修复时间的 延长逐渐减小，从第2 周期开始的起初几个修复周期，各重金属含量下降较快，但随着修复周期的增加，重金属 含量下降幅度逐渐变小，最终趋于平缓。 可见，随着修复时间的延长，修复效果逐渐减弱，土壤中重金属移除难 度逐渐加大，这完全符合土壤重金属移除规律，也与拟合曲线表达的下降趋势吻合。 从拟合曲线中可知，修复 初期曲线斜率较大，说明蚓体内重金属富集量下降幅度较大，各检测周期Cd、Cu、Pb含量下降最多分别可达 26 4%，7 2%，8 6%，随着时间的延长，下降幅度逐渐减小，减小量分别为4 5%，3 4%，1 1%，最终达到稳 定。试验中蚓体对各重金属的富集量高低为：Cu〉Pb〉Cd,说明该试验中蚯蚓对Cu的富集量最高，Cd的富 集量最低。

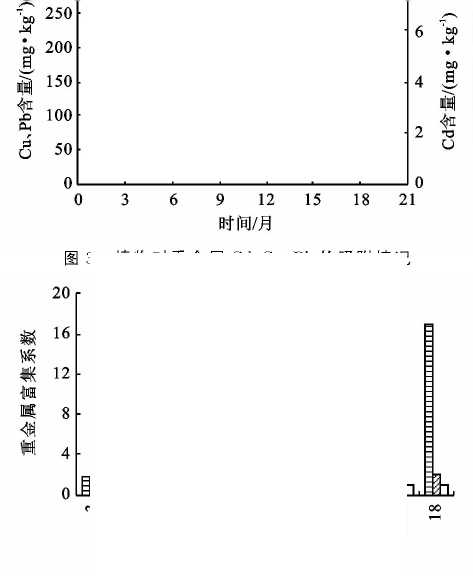
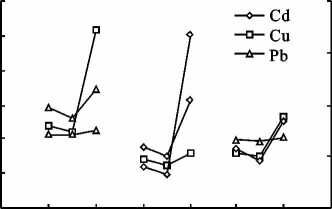
重金属富集系数是指植物某一部位的元素含量与土壤 中相应元素含量之比，能反映植物对土壤中某种重金属元 素的富集能力。富集系数越大，表明其对土壤中某种重金 属的富集能力越强。本修复过程中蚯蚓的富集系数情况见 图2。图2表明蚯蚓蚓体内重金属平均富集系数高低顺序 均为：Cd〉Cu〉Pb，说明蚯蚓蚓体对Cd的富集效果较好， 对Pb的富集效果较差。从各阶段重金属富集系数趋势看， 蚓体对Cd、Cu、Pb的富集效果均表现为动、植物联合修复

阶段中蚯蚓的重金属富集系数均高于单纯动物修复阶段，注15,7.5,13. 5月为动物修复，其余均为动、植物联合修复。 由此说明，植物生长对动物重金属富集具有促进作用，动、 图2 蚯蚓体内重金属富集系数

植物联合修复阶段中动物的修复效果较单个动物修复阶段效果好。 这有可能是由于第2和第6试验阶段中以 根瘤菌对白三叶进行拌种，拌种的根瘤菌有增强白三叶的固氮能力，促进其快速生长及繁殖的作用；且白三叶 根系发达，根系的生长能促使土壤中的重金属转变成可交换态，或使高毒的重金属形态转变成低毒状态，利于 植物和动物富集。 另外，土壤本身含有丰富的微生物群系，能对重金属化合物进行降解，蚯蚓的活动在改善土 壤结构和肥力、促进植物根系生长的同时，还可通过体外分泌物和蚓粪提高土壤中生物的有效性，提高土壤微 生物的活性，加速降解。 第4试验阶段中虽没有根瘤菌作用，但黑麦草根系发达，几乎布满整个土层表面，植物 根系的生长及土壤微生物的活动对蚯蚓重金属的富集也起到了促进作用。

2 植物体内重金属含量变化

试验期间，植物生长状况良好，生长势强，未出现任何 重金属中毒现象，污染土壤中植物的产量与对比试验的比 值均为0 97〜1 05，说明土壤中的重金属并未对植物的产 量产生影响。每次刈割及整体收获后测定植物体重金属含 量，植物体重金属含量具体情况见图3。由图3 可知，每个 动、植物联合修复阶段的植物重金属富集量情况均呈 *“* 形，在同一修复阶段第2 次刈割期重金属含量最低，植物体 整体的重金属含量最高，第2 次刈割期植物重金属含量较 第1 次刈割期低，主要由于经过第1 次刈割期的修复，土壤 重金属含量已经有了一定程度的降低，而植物对土壤重金 属的富集有随着土壤重金属含量降低而降低的特性，故出 现重金属含量较前一期低的情况。植物整体收获期的植物 体内重金属含量最高，黑麦草和白三叶的Cd、Cu、Pb含量 分别可达4 6，257 9，113 2 mg／kg 和6 7，79 6，156 7 mg/kg,这是由于该期为动、植物联合修复末期，收获的植物 体包含地下部分，由于植物地下部分对重金属的吸附能力 较地上部分强，故该期植物体的重金属含量相对于前两 期高。

图4为黑麦草和白三叶各个收获时期的植物体内重金属的富集系数。由图可知，植物体重金属平均富集系数高低顺序基本为：Cd〉Cu〉Pb,这与蚯蚓体内重金属的 富集趋势一致。 植物体对 Cd 的富 集 效果最好，富集系数均 大于1，其中黑麦草 Cd 的富集系 数最高可达17。 从不同植物种类看，黑麦草各部分Cd、Cu的富集系数均大于1,Pb的富集系数均接近1,而白三叶整个植物体 的各重金属含量及地上部分 Cd 含量大于1 外， 其余均小于1。 说明 黑 麦草的修复效果较白三叶强， 且适合不

3 植物对重金属Cd、Cu、Pb的吸附情况

图4植物体内重金属富集系数

寻 Z 6 — 山 I G

T—< »—< »—<

时间/月

300

8

Bn. Bn

目Cd SCu

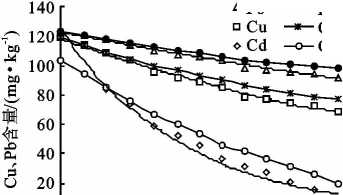
□ Pb

fL

Tl

T

断刈割。



23 土壤 动、植物联合 修复情 况

在修复过程中 , 通过蚯蚓 的 活动和植物的 生长, 土壤中 的重金属被蚯蚓和植物富集, 再经过蚯蚓、 蚓粪的收集 及植 物的收获, 使土壤中重金属 的 含量逐渐降低, 达到彻底移除 土壤中重金 属 的 目的, 这 是一种 安全、 绿色的土壤修复方 法, 它不但不会破坏土壤结构, 还能改善土壤状况。 经过6 个阶段的土壤 修复, 该地块 Cd、Cu、Pb 含量已有较大程度 的降低, 分别降低了92．3% ,42．0% ,247% , 具体情况见图 5。 由图 5可见, 修复之后, 试验土壤重金属 Cd 的含量已降 至0. 2 mg/kg, Cu和Pb的含量也分别降至6& 8, 92. 6 mg/kg,较对比试验分别低0. 3, &6,6.1 mg/kg,说明动、植 物联合修复的效果较动物修复和植物修复效果的单纯叠

**&Pb T-Pb** 对比 **Cu**对比 **Cd）**甘比

❖

01 •

0 3 6

**3.5**

**3.0**

**2.5**

**2.0**

**1.5**

**1.0**

**0.5**

**0**

**9 12 15 18 21**

时间/月

注：对比试验的土壤重金属下降量=同一修复阶段对比试验1

组的土壤重金属下降量＋同一修复阶段对比试验2 组的土 壤重金属下降量。

图5 不同修复阶段土壤重金属污染修复情况

加强。

对污染土壤重金属 Cd、Cu、Pb 修复情况进行非线性拟合, 得出土壤重金属含量在修复过程中的下降趋势 曲线，修复曲线符合指数方程***y*** = ***A***e*"*。曲线拟合方程分别为:Cd,***y*** = 3. 13e-0m ； Cu, ***y*** = 11 & 04e-00*「*Pb, ***y*** = 122.点厶。-00*"*。图5显示，修复初期，土壤重金属含量下降幅度较大，随着修复时间的延长，下降幅度逐渐减 小, 土壤重金属移除难度逐渐加大, 这与拟合曲线表达的下降趋势吻合, 虽然随着土壤重金属含量的 降低重金 属移除难度逐渐增加, 但如继续用本方案进行修复, 相信不久即可进行农业生产。

24 动、植物联合修复效果分析

通过对比试验对动、植物联合修复的实际效果进行分析, 发现动、植物联合修复效果均较动物修复或植物 修复强, 具体修复效果见表1。 由表1 可知 , 任何一个动、 植物联合修复阶段的任何一个刈割期或整体收获期 的修复效果均高于对比试验, 经过3 个阶段的动、 植物联合修复, 污染土壤 Cd、Cu、Pb 含量分别 降低了1 87, 40 2,24 9 mg/kg, 较动物修复和植物修复效果简单叠加高0 3,8 8,6 3 mg/kg, 说明 动、 植物联合修复效果 优于动物修复和 植物修复的叠加效果, 即动、植物联合修复中的动物修复和植物修复效果优于单个动物修复和 植物修复, 说明动物、植物、微生物三方各自的活动对任何一方均具有促进作用。 植物根系 的生长及微生物的 活动, 促进了蚯蚓对重金属的富集, 蚯蚓、微生物的活动又促进了植物根系的生长及生物量的增加, 蚯蚓的活动 及植物的生长又为微生物的繁殖和生存提供了适宜的环境条件。 可见, 该试验选用的动、植物联合修复技术在 实际操作中是切实可行的。

表1 土壤重金属含量降低效果比较 mg**/**kg

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 修复  阶段 | 时间**/**  月 | 联合  修复 | Cd  对比试验  1组 | 对比试验  2组 | Cu | | | Pb | | |
| 联合  修复 | 对比试验  1组 | 对比试验  2组 | 联合  修复 | 对比试验  1组 | 对比试验  2组 |
| 第2 修 | 3 | 0 25 | 0 15 | 0 06 | 5 1 | 4 3 | 0 7 | 2 6 | 2 3 | 0 2 |
|  | | | | | | | | | |
|  | 45 | 0 26 | 0 19 | 0 05 | 6 0 | 3 9 | 0 6 | 3 2 | 2 1 | 0 4 |
| 复阶段 |  | | | | | | | | | |
| 6 | 0 38 | 0 18 | 0 08 | 7 5 | 3 6 | 0 9 | 5 0 | 2 0 | 0 9 |
|  | 9 | 0 17 | 0 13 | 0 03 | 3 7 | 3 2 | 0 4 | 2 1 | 1 7 | 0 3 |

第4 修

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 复阶段 | 10 5 | 0 22 | 0 14 | 0 04 | 3 6 | 2 8 | 0 5 | 2 7 | 1 8 | 0 4 |
| 12 | 0 12 | 0 09 | 0 03 | 5 9 | 2 9 | 0 8 | 4 1 | 1 4 | 1 0 |
| 第6修 | 15 | 0 14 | 0 12 | 0 01 | 2 4 | 2 0 | 0 3 | 1 4 | 0 9 | 0 3 |
| 复阶段 | 16 5 | 0 15 | 0 11 | 0 02 | 2 5 | 1 9 | 0 4 | 1 6 | 1 0 | 0 3 |
| 18 | 0 18 | 0 09 | 0 05 | 3 5 | 1 5 | 0 7 | 2 2 | 0 8 | 0 8 |
| 总计 |  | 1 87 | 12 | 0 37 | 402 | 261 | 5 3 | 249 | 140 | 4 6 |

3 结论与讨论

由于土壤环境的复杂性**，**重金属污染土壤的修复必须结合多种方法才能达到预期效果**。**以动**、**植物修复为 主**，**辅以物理化学方法以及各种农业生态措施**，**通过各种渠道增加土壤重金属的生物有效性**，**采用植物和动物 转移土壤中的重金属**，**以此降低土壤重金属含量**。**本研究表明**，**以动**、**植物联合修复的土壤修复技术修复重金 属污染土壤效果较好，经过18个月的修复，土壤Cd、Cu、Pb含量分别降低了 92. 3% **,**2. 0% **,**4. 7%**。**在整个 土壤修复过程中，动、植物联合修复效果优于动物修复和植物修复的单纯叠加，其中Cd、Cu、Pb修复效果分别 较动物修复和植物修复的单纯叠加效果高11 5%**，**7 2%**，**5 0%**。** 究其原因**，**主要有两点**：**

1. 植物根系的生长促进了蚯蚓对土壤重金属的富集**。** 在动**、**植物联合修复阶段中植物根系的发展为蚯蚓 创造了良好的生长环境**，**蚯蚓一方面通过蠕动**、**取食改善土壤结构**、**肥力**、**水分**、**养分和通气状况**，**促进植物根系 生长**，**另一方面通过体外分泌物和蚓粪提高土壤微生物的数量和活性**。** 经初步试验发现**，**大平二号蚯蚓对重金 属具有富集特性**，**在重金属含量较高的土壤中蚯蚓蚓体和蚓粪重金属含量较高**，**具有较好的重金属污染土壤修 复潜力**。** 在土壤中养殖蚯蚓**，**蚯蚓通过被动扩散作用和摄食作用富集重金属**，**定期收集成蚓**、**蚓粪**，**再进行灰化 处理**，**即可去除土壤中的重金属**。**
2. 蚯蚓活动对植物生长及重金属富集具有促进作用**。** 有研究发现**，**蚯蚓体内携带各种微生物**，**能提高土 壤中活性微生物量，微生物能借助有机酸的分泌活化重金属离子**[**12**]0**蚯蚓能增加土壤Cd、Cu、Pb的生物有效 性**，**通过蚯蚓活动及根瘤菌作用下的植物根系生长有效提高了本土微生物的活性**，**使其加快繁殖与活动**，**改善 植物根系微环境，改变土壤重金属的存在形态「13**—**14**。**本试验中所选用的植物均为根系发达，并对Cd、Cu、Pb具 有富集作用的植物**，**在生长过程中通过动物的活动**，**改善了植物根系的生长环境**，**提高了重金属的富集能力**，**促 进了植物生长及生物量的提高**，**这与杨柳等研究结果**[**9**]**较为一致**。**

综上可知**，**动物**、**植物任何一方的活动**(**生长**)**均能促进对方的修复效率**，**说明在实际工程中**，**动**、**植物联合 修复的土壤修复技术是完全可行的**，**适合大范围推广**。**

参考文献**：**

1. 黄益宗，郝晓伟，雷鸣，等.重金属污染土壤修复技术及其修复实践[J**]**.农业环境科学学报，2013,32(3):409-417.
2. 李安婕，全向春，陶锟，等.基于PROMETHEE II法的污染场地土壤修复技术筛选及应用**[J]**.环境工程学报，2012,6(10**)：** 3767—3773
3. 高陈玺，李川，彭娟，等.植物提取修复矿区重金属污染土壤研究现状[J**]**.重庆工商大学学报：自然科学版，2013,30(4**)**55-

71

1. 闫艳，高杰，李莉.污染土壤修复有多难？ [N**]**.中国环境报,2012-4-27(008**)**.
2. 孙铁珩，周启星，李培军，等.土壤污染形成机理与修复技术[M**]**.北京：科学出版社,2005:100-101.
3. 郑小东，荣湘民，罗尊长，等.土壤重金属污染及修复方法研究进展[J**]**.农学学报**,**011(8):37-43.
4. 白向玉，刘汉湖，韩宝平，等.蚯蚓对剩余污泥中重金属Cu、Zn的活化实验研究[J**]**.环境污染与防治，2010,2(10):51-61.
5. 范敏，郭端华，王震，等.竹浆造纸污泥蚯蚓生物处理的培养条件与重金属富集[J**]**.贵州大学学报：自然科学版，2010,27

**(**5**):**113-116

1. 杨柳，李广枝，童倩倩，等.Pb**2+**、Cd**2+**胁迫作用下蚯蚓、菌根菌及其联合作用对植物修复的影响[J**]**.贵州农业科学,2010,38

**(**11**):**156-158

1. 晨曦.野外蚯蚓集中收集方法[EB/OL**]**. (2005-12-2)[2013-2-21**]**. http**：/**www. dzyzw. com/qyyz/yzzs/200512/54. html.
2. Arao T,Ishikawa S,Murakam I M,t al. Heavy metal contamination of agricultural soil and counter measures in Japan[J].

Paddy and Water Environment**,**010,8(3**)** ：247**—**257.

1. 凌辉，谢水波，唐振平，等.重金属污染土壤的修复方法及其在几类典型土壤修复中的应用四川环境**,**012**,**1(1)： 118-

122

1. 陈旭飞，张池，高云华，等.蚯蚓在重金属污染土壤生物修复中的应用潜力生态学杂志**,**012**,**1(11):2950-2957.

[14] Wen B,Hu X,Wang W S,t al. The role of earthworms(***Eisenia foetida)*** in influencing bioavailability of heavy metals in soils**[**J**]** BiologyandFertilityofSoils**，**2004**，**40**:**181-187