

# 蚯蚓-甜高粱复合系统对土壤镉污染的修复作用及机理初探

马淑敏, 孙振钧, 王冲

(中国农业大学资源与环境学院, 北京 100094)

**摘要:**为了有效地修复土壤镉污染,解决植物修复的二次污染问题,本试验以北京西南郊衙门口污灌土(土壤全镉含量为  $3.45 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )为供试土壤,采用蚯蚓-甜高粱复合系统对土壤镉污染的修复作用及机理进行了研究。试验设置对照、种植甜高粱(每盆5株)、接种蚯蚓(每盆12条)和种植甜高粱并接种蚯蚓4个处理,研究了杜拉蚓对能源植物甜高粱在镉污染土壤修复中的调控作用。结果表明:杜拉蚓能显著增加甜高粱的生物量,45 d时添加蚯蚓较未加蚯蚓的处理,地上部与地下部干重生物量分别增加了 16.02%和 31.52%;投加蚯蚓的处理提高了甜高粱对 Cd 的吸收量,45 d时添加蚯蚓较未加蚯蚓的处理,地上部与地下部总镉含量平均每盆分别提高了 8.89 和  $43.18 \times 10^{-3} \text{ mg}$ ;蚯蚓处理提高了土壤中  $\text{NH}_4\text{Ac}-\text{Cd}$  的含量,加蚯蚓较未加蚯蚓的处理 45 d 后使土壤有效镉提高了 9.8%。此研究对植物修复重金属污染土壤有重要意义。

**关键词:**杜拉蚓;甜高粱;镉;土壤污染

中图分类号:X53 文献标识码:A 文章编号:1672-2043(2008)01-0133-06

## Remediation of Cd Contaminated Soil and Its Mechanism by Earthworm-Sweet Broomcorn System

MA Shu-min, SUN Zhen-jun, WANG Chong

(College of Resource and Environmental Science, China Agricultural University, Beijing 100094, China)

**Abstract:** A dirt-irrigated soil was used in the laboratory experiment. The concentration of total cadmium in soil was  $3.45 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ . All the pots were divided into four groups, earthworm (12 individual earthworms per pot), sweet broomcorn (5 individual plants per pot), combination of earthworms and sweet broomcorn, and without earthworm and sweet broomcorn. The effect of Drawida on remediation efficiency of energy-plants sweet broomcorn for Cd contaminated soil during different growth periods was studied. The results showed that Drawida significantly increased biomass of sweet broomcorn and the effect on roots was more significant than on aboveground. Inoculation earthworm increased the biomass of aboveground and roots by 16.02% and 31.52%, compared with non-inoculation, and total Cd concentrations in sweet broomcorn shoots and roots increased by  $8.89 \times 10^{-3} \text{ mg}\cdot\text{pot}^{-1}$  and  $43.18 \times 10^{-3} \text{ mg}\cdot\text{pot}^{-1}$ , respectively. The activity of earthworm increased Cd concentration in soil extracted by  $1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ NH}_4\text{Ac}$  in all Cd treatments, and  $\text{NH}_4\text{Ac}-\text{Cd}$  increased 9.8% compared with non-inoculation.

**Keywords:** Drawida; sweet broomcorn; cadmium; soil contamination

由于重金属污染毒性机制和生物效应的复杂性,重金属污染的土壤修复一直是当前研究的热点<sup>[1]</sup>。镉是一种有毒有害重金属,易在食物链中积累后进入人体,严重危害人类健康。20世纪初因食用镉污染大米,日本大面积爆发“痛痛病”,有关镉污染及防治研究引起全世界关注<sup>[2]</sup>。有害重金属在土壤系统中所产

生的污染过程具有隐蔽性、长期性和不可逆性的特点,因此,土壤重金属污染问题与其治理技术一直被国际学术界所研究关注<sup>[3]</sup>。已有大量研究利用各种方法提高植物的修复功能,但随之出现的新的问题是吸收重金属后的植物如何处理,如果处理不当会造成二次污染。美国科学家 Chaney<sup>[4]</sup>首次提出了植物修复方法的思想——即利用某些能够富集重金属的植物来清除土壤重金属污染的设想,其技术应用成功与否除了与植物本身积累重金属能力有关外,还有两个限制因素:第一是超积累植物的生长速度慢和生物量

收稿日期:2007-03-13

作者简介:马淑敏(1981—),女,山东德州人,硕士研究生,主要从事生态系统修复方面的研究。E-mail:ma.shumin@163.com

联系作者:孙振钧 E-mail:sun108@cau.edu.cn

小,第二是土壤中重金属的生物有效性低。所以解决此问题的关键是:一方面筛选生长快、生物量大的超积累植物品种<sup>[5]</sup>,而且要努力改善土壤的水分、养分等条件以提高植物生物量;另一方面就是提高土壤中重金属的生物有效性<sup>[6]</sup>。

蚯蚓在重金属污染土壤中的改良作用,为植物修复技术的第一个限制因素——超积累植物生物量小在一定程度上的解决成为可能<sup>[6]</sup>;某些蚯蚓品种能存活于重金属污染土壤<sup>[7]</sup>,并可通过肠道消化和养分富集两个过程提高土壤中养分(Mg、Ca、Fe、Mn)含量和金属元素(Cr 和 Co)的有效性<sup>[8]</sup>,使解决植物修复技术难题之一——提高土壤中重金属的生物有效性成为可能,种种研究表明,蚯蚓有可能在提高重金属污染土壤的植物修复效率方面发挥重要作用。

本文以北京西南郊污灌土为供试土壤,采用蚯蚓与能源作物甜高粱的复合系统,研究蚯蚓对能源植物甜高粱生物量以及蚯蚓对甜高粱吸收镉的效果的影响,从而为蚯蚓在植物修复重金属中的应用、及解决植物修复重金属二次污染问题提供一条新的有效途径。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

供试土壤取自北京西南郊衙门口污灌土,其理化性质见表 1。

供试植物甜高粱为哈格尼林,购自北京鑫农丰农业技术研究所。

供试蚯蚓为杜拉蚓(*Drawida*),采自山东某菜园地。

### 1.2 试验设计

将污染土过 10 目筛后装入塑料盆中,每盆 4 kg 土,设对照、接种蚯蚓、种植甜高粱、种植甜高粱并接种蚯蚓 4 个处理,每个处理 3 个重复。将甜高粱种子播入盆中,出苗后定植,每盆 5 株,网室内培养,土壤水分保持田间持水量的 60%~70%;接种蚯蚓的处理:每盆投放蚯蚓 12 条,在网室内培养。盆栽试验于 6 月初开始进行,在植物生长的第 15 d、30 d、45 d 分别进行破坏性取样,即将每盆的植株全部取样,然后

进行测定。

### 1.3 试验方法

土壤全镉:采用 HCl-HNO<sub>3</sub>-HF-HClO<sub>4</sub> 消煮,石墨炉原子吸收分光光度法测定(GB/T17471-1997)。

土壤有效镉的测定:称取 10 g 风干过 20 目尼龙筛的土样放入 150 mL 的硬质玻璃三角瓶中,加入 50.00 mL 1 mol·L<sup>-1</sup>NH<sub>4</sub>Ac(用 HAc 调成 pH=5.0),用水平振荡器振荡浸提 1.5 h,振荡器频率为每分钟振荡 180 次,振荡时的温度保持在 25 ℃,振荡后过滤,浸提液用石墨炉原子吸收分光光度法测定 Cd 的含量,并转化成以烘干土计的含量<sup>[9]</sup>。

植物生物量:植物地上部和根洗净,吸干水分后称重即植物鲜重;晾干后装入信封中,90 ℃杀青 30 min 后在 70 ℃的恒温箱中烘至恒重,称重即得到其干重。

植株中镉测定:HNO<sub>3</sub>-HClO<sub>4</sub> 消解,石墨炉原子吸收分光光度法测定(GB/T5009.15-1996)。

微生物测定:细菌,牛肉膏蛋白胨琼脂平板涂布法;真菌,马丁氏培养基平板涂布法;放线菌,改良高氏一号培养基平板涂布法<sup>[10]</sup>。

### 1.4 数据处理

采用 Excel,SPSS 分析软件(SPSS12.0)。

## 2 试验结果

### 2.1 蚯蚓对甜高粱吸收镉效果的影响

#### 2.1.1 蚯蚓对甜高粱生物量的影响

投加蚯蚓的处理使甜高粱的地上部与地下部生物量在各个时间段均有明显增加。15、30、45 d 时,投加蚯蚓较未加蚯蚓处理地上部干重生物量分别增加了 21.72%、22.56%、16.02%;地下部干重分别增加了 38.83%、34.78%、31.52%,加蚯蚓处理前后甜高粱地上部与地下部干重均有极显著性差异(P<0.01)。投加蚯蚓较未加蚯蚓处理地上部鲜重生物量在 30 d 和 45 d 时达极显著性差异(P<0.01),而 15 d 时差异是显著的(P<0.05);地下部鲜重在 15、30 d 和 45 d 时均有显著性差异(P<0.05),见表 2。

#### 2.1.2 蚯蚓对甜高粱地上部和地下部镉含量的影响

甜高粱地上部和地下部镉含量均随着时间的增

表 1 供试土壤基本理化性状

Table 1 The physical and chemical properties of soils for pot test

项目	pH	有机质/g·kg <sup>-1</sup>	有机碳/g·kg <sup>-1</sup>	全氮/g·kg <sup>-1</sup>	速效磷/g·kg <sup>-1</sup>	CEC/cmol·kg <sup>-1</sup>	全镉/mg·kg <sup>-1</sup>	有效镉/mg·kg <sup>-1</sup>
测定值	6.76	24.76	14.37	1.456	0.412	12.6	3.452	0.223

表 2 蚯蚓处理对甜高粱生物量的影响(g·盆<sup>-1</sup>)  
Table 2 Effect of earthworm on sweet broomcorn yield (g·pot<sup>-1</sup>)

时间	处理	鲜重		干重	
		地上部	地下部	地上部	地下部
15 d	甜高粱	22.26±5.11a	11.47±3.81a	3.73±0.20A	1.06±0.15A
	甜高粱+蚯蚓	30.20±2.45b	17.78±2.61b	4.54 ±0.09B	1.47 ±0.20B
30 d	甜高粱	52.56±4.00A	28.98±2.74a	10.33 ±0.57A	3.45±0.31A
	甜高粱+蚯蚓	66.77±1.45B	38.23±4.03b	12.66 ±0.24B	4.65 ±0.56B
45 d	甜高粱	70.33±3.73A	31.03±4.09a	10.80 ±0.14A	3.68±0.01A
	甜高粱+蚯蚓	83.62±1.35B	46.03±7.71b	13.53 ±0.14B	4.84 ±0.03B

注:同一列不同的大写字母表示差异是极显著的 ( $P < 0.01$ ),小写字母表示差异是显著水平上的 ( $P < 0.05$ ),字母相同表示差异不显著,下同。  
Note: Values with different capital letters or small letters indicate very significant or significant different at 0.01 or 0.05 level, values with the same letter are not significantly different, the same as below.

加而增加,且地下部镉含量大大高于地上部。加蚯蚓的处理在各个时期与未加蚯蚓的处理相比,甜高粱地下部镉的含量均有极显著性差异 ( $P < 0.01$ );地上部的镉含量在 15 d 时没有显著影响,而在 30、45 d 时达到极显著性差异 ( $P < 0.01$ )。投加蚯蚓的处理促进了甜高粱对镉的吸收,吸收的镉主要积累于甜高粱根部。在甜高粱生长初期,蚯蚓活动对镉由根部向地上部转移没有明显促进作用,随着时间的增加,蚯蚓活动对镉由甜高粱根部向地上部转移起到显著的促进作用,见表 3。

### 2.1.3 蚯蚓处理对甜高粱地上部和地下部的总镉含量的影响

由甜高粱生物量及其地上和地下部单位重量中所含镉的量,得到表 4 所示的平均每盆甜高粱地上和地下部吸收镉的总量,在试验中投加蚯蚓的处理较未加蚯蚓的处理甜高粱地上部和地下部吸收镉的总量都有极显著增加 ( $P < 0.01$ ),投加蚯蚓处理 15 d 时没有显著增加甜高粱地上部单位重量中镉的含量,但生物

量的极显著提高使每盆甜高粱吸收镉总量也有极显著增加 ( $P < 0.01$ )。

## 2.2 蚯蚓-甜高粱系统对土壤微生物的调控作用

### 2.2.1 土壤微生物数量的变化

如图 1 所示,蚯蚓处理明显增加了土壤中细菌与放线菌的数量,对真菌影响不大;而甜高粱并投加蚯蚓的处理中细菌、真菌、放线菌的数量均高于单一甜高粱处理。各处理中微生物数量都是在 0~30 d 内一直呈增加趋势,30 d 时达到最大,甜高粱的处理中细菌、真菌、放线菌的数量在 30 d 时分别由初始  $8.06 \times 10^6$  cfu·g<sup>-1</sup> 土、 $3.25 \times 10^4$  cfu·g<sup>-1</sup> 土、 $1.40 \times 10^6$  cfu·g<sup>-1</sup> 土增加到  $11.91 \times 10^6$  cfu·g<sup>-1</sup> 土、 $15.25 \times 10^4$  cfu·g<sup>-1</sup> 土、 $3.05 \times 10^6$  cfu·g<sup>-1</sup> 土,而甜高粱并加蚯蚓的处理中细菌、真菌、放线菌的数量在 30 d 时则分别增加到  $17.61 \times 10^6$  cfu·g<sup>-1</sup> 土、 $21 \times 10^4$  cfu·g<sup>-1</sup> 土、 $3.81 \times 10^6$  cfu·g<sup>-1</sup> 土,分别为甜高粱处理的 1.48、1.38、1.25 倍;45 d 时细菌、真菌和放线菌数量均有所下降,这可能是因为蚯蚓活性随着时间增加有所降低及土壤质量随时

表 3 蚯蚓对甜高粱地上、地下部分 Cd 含量的影响(mg·kg<sup>-1</sup>)  
Table 3 Effect of earthworm on Cd concentrations in sweet broomcorn shoots and roots (mg·kg<sup>-1</sup>)

处理	15 d		30 d		45 d	
	地上部	地下部	地上部	地下部	地上部	地下部
甜高粱	2.64±0.02a	12.71±0.08A	3.56±0.03A	19.20±0.06A	3.96±0.04A	22.81±0.04A
甜高粱+蚯蚓	2.67±0.02a	19.43±0.37B	3.70±0.03B	23.78±0.03B	4.12±0.03B	26.23±0.08B

表 4 蚯蚓处理对甜高粱地上、地下部分总镉含量的影响( $\times 10^{-3}$ mg·盆<sup>-1</sup>)  
Table 4 Effect of earthworm on total Cd concentrations in sweet broomcorn shoots and roots ( $\times 10^{-3}$ mg·pot<sup>-1</sup>)

处理	15 d		30 d		45 d	
	地上部	地下部	地上部	地下部	地上部	地下部
甜高粱	9.86±0.51A	10.76±1.94A	36.82±2.04A	66.18±0.60A	42.75±0.54A	83.86±0.13A
甜高粱+蚯蚓	12.11±0.24B	28.50±3.89B	46.82±0.90B	110.66±1.32B	51.64±0.58B	127.04±0.80B

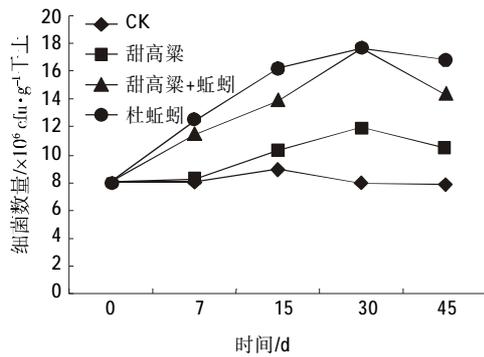


图 1a 细菌数量

Figure 1a The amount of bacteria

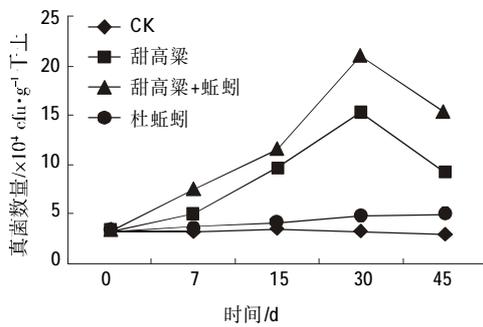


图 1b 真菌数量

Figure 1 b The amount of fungi

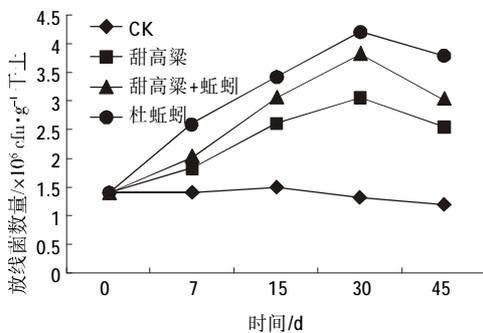


图 1c 放线菌数量

Figure 1c The amount of actinomycete

间增加而发生变化,从而影响了微生物的数量。

### 2.2.2 微生物呼吸强度变化

由图 2 可以看出随着时间增加,各个处理的微生物呼吸强度均逐渐提高,甜高粱加蚯蚓的处理明显高于单一的甜高粱处理,45 d 时甜高粱处理的微生物呼吸由  $52.11 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 24 \text{ h}^{-1}$  提高到  $99.74 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 24 \text{ h}^{-1}$ ,而甜高粱加蚯蚓的处理微生物呼吸提高到  $114.41 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 24 \text{ h}^{-1}$ ,比单一甜高粱处理高出 14.71%。

## 2.3 蚯蚓-甜高粱系统对土壤镉的修复效果

### 2.3.1 蚯蚓-甜高粱对土壤有效镉的影响

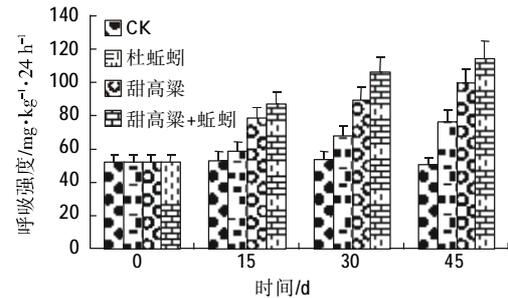


图 2 不同处理对土壤呼吸强度的影响

Figure 2 Effect of different treatments on soil microbial respiration

由图 3 所示,蚯蚓、甜高粱能够提高土壤  $\text{NH}_4\text{Ac-Cd}$  的含量,只加蚯蚓的处理使土壤有效镉含量由本底值  $0.223 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  提高到 45 d 时的  $0.294 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,甜高粱处理 45 d 后使土壤有效镉含量由  $0.223 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  提高到  $0.327 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,而种植甜高粱同时添加蚯蚓处理 45 d 后使土壤有效镉提高到  $0.359 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,种植甜高粱并加蚯蚓较未加蚯蚓的处理 45 d 后使土壤有效镉提高了 9.8%。各个不同处理的土壤有效镉含量均在 0~15 d 增加速率最大,甜高粱处理增加速率为 30.94%,甜高粱加蚯蚓处理为 47.53%。这与蚯蚓活动及植物根际分泌物改变土壤环境从而影响重金属有效性有关,蚯蚓活动促进根际分泌一些弱酸性物质降低土壤 pH 值,以及使土壤阳离子交换量减少等均能够提高镉的生物有效性。

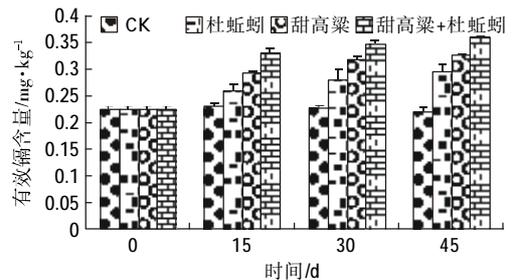


图 3 蚯蚓-甜高粱对土壤有效镉的影响

Figure 3 Effect of earthworm-sweet broomcorn on bioavailability of Cd in soil

### 2.3.2 蚯蚓-甜高粱对土壤全镉的影响

如图 4 所示,种植甜高粱的处理中,土壤全镉含量由最初的  $3.452 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  到 45 d 后下降到  $3.104 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,降低率为 10.08%;而种植甜高粱同时加蚯蚓的处理中,土壤全镉含量由  $3.452 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  到 45 d 后下降到  $2.72 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,降低率为 21.2%,添加蚯蚓后较未加蚯蚓的甜高粱处理土壤中全镉的降低率提高了

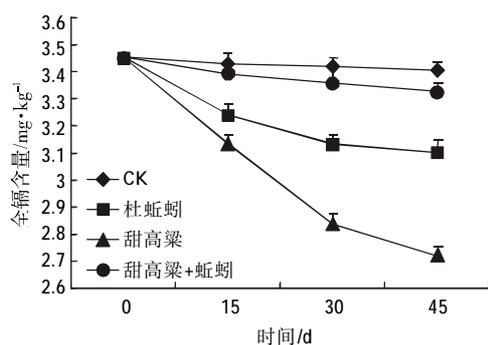


图4 蚯蚓-甜高粱对土壤全镉的影响

Figure 4 Effect of earthworm-sweet broomcorn on total Cd in soil

11.12个百分点。因为每盆种植甜高粱株数较多,而且甜高粱生物量比较大,所以对重金属镉的总吸收量也较大。

#### 2.4 蚯蚓-甜高粱系统对土壤 pH 值的影响

由图5可以看出,蚯蚓和甜高粱处理使土壤pH值均有所降低,蚯蚓处理pH值下降的幅度较大,土壤pH最初为6.76,甜高粱处理45d后下降到6.68,而蚯蚓处理45d后则下降到6.37,分别平均低于对照约0.1和0.4个pH值单位;甜高粱并投加蚯蚓的处理45d后pH下降到6.33,比单一蚯蚓处理的下降幅度仅高出0.04个pH值单位,土壤pH值的下降主要是蚯蚓的活动引起的。

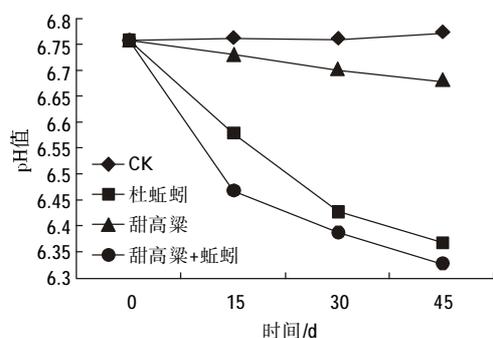


图5 蚯蚓-甜高粱对土壤pH的影响

Figure 5 Effect of earthworm-sweet broomcorn on pH in soil

### 3 讨论与分析

#### 3.1 蚯蚓在蚯蚓-甜高粱系统修复镉污染土壤中的调控作用

##### 3.1.1 蚯蚓对甜高粱的调控作用

大量研究表明,蚯蚓不管在无污染土壤还是重金属污染土壤上都能增强土壤的养分循环,改良土壤条件,促进植物生长,提高植物产量<sup>[3]</sup>。Abdul等<sup>[11]</sup>在3种

不同浓度的Cd、Fe、Zn、Cu、Pb污染土壤上发现,蚯蚓增加了黑麦草产量,并显著增加了黑麦草地上、地下部分的Zn、Cu、Pb含量。本研究发现蚯蚓使甜高粱的地上部与地下部生物量均有明显增加,其中对根部生物量的作用更大,而且研究结果还表明蚯蚓能够显著提高甜高粱地下部镉的含量( $P < 0.05$ );对地上部的镉含量在15d时没有显著影响,而在30、45d时有显著性提高( $P < 0.05$ )。说明蚯蚓活动促进了甜高粱对镉的吸收,吸收的镉主要积累于甜高粱根部。在甜高粱生长初期,蚯蚓活动对镉由根部向地上部转移没有明显促进作用,随着时间的增加,蚯蚓活动对镉由甜高粱根部向地上部转移起到显著的促进作用。

##### 3.1.2 蚯蚓对微生物的调控作用

重金属污染的微生物修复包含两方面的技术即生物吸附和生物氧化还原。微生物本身及其代谢产物都能吸附和转化重金属<sup>[12]</sup>,在重金属污染土壤中,往往富集多种耐重金属的真菌和细菌,微生物可通过多种作用方式影响土壤重金属的毒性及重金属的迁移与释放<sup>[13]</sup>。蚯蚓体内广泛分布着微生物,已有研究从蚯蚓消化道、肾管<sup>[14]</sup>中分离出微生物,而蚯蚓肠道内容物的pH近中性,水分和水溶性糖的含量均高于原土壤,为微生物的繁殖提供了条件<sup>[15]</sup>。本试验研究发现添加蚯蚓的处理明显增加了土壤中细菌、真菌和放线菌的数量,由本试验结果可知,蚯蚓提高了微生物的呼吸强度。已有研究表明,蚯蚓能促进土壤呼吸<sup>[15]</sup>,呼吸活性的提高与蚯蚓消化道内和蚯蚓粪中较高浓度的水溶性碳水化合物有关。

##### 3.1.3 蚯蚓对土壤pH值的影响作用

蚯蚓对土壤pH值的影响已有研究,Edwards(1998)等认为蚯蚓可调节土壤pH值使其趋于中性,俞协治和成杰民(2003)研究表明,重金属污染土壤上蚯蚓活动能够显著降低红壤pH值,刘德鸿(2005)研究表明蚯蚓显著降低了重金属处理过黄泥土的pH值。本试验结果发现蚯蚓活动大幅度降低了土壤的pH值,蚯蚓可以通过降低土壤pH值提高重金属有效性,而对于蚯蚓影响土壤pH值的机理还有待于进一步研究。

#### 3.2 蚯蚓-甜高粱-微生物生态系统对镉污染土壤的修复

目前关于植物修复的研究已有很多报道,有很多传统的物理化学方法能够促进植物对镉污染土壤的修复,在此运用生态系统的理念,即通过土壤本身的动物、微生物与植物的相互作用使植物适应污染的土

壤环境正常生长,同时使土壤环境得到改善,这样不但克服了传统手段昂贵复杂的缺点,而且它不是暂时的缓解污染危害,不会造成环境二次污染,显示出生态协调性的巨大生命力。本研究通过盆栽实验人工建立生态系统,加入土壤大型动物蚯蚓,结果显示蚯蚓活动通过改善土壤性状而改善了甜高粱生长状况,提高土壤微生物数量与活性,而且提高土壤中镉的生物有效性,土壤化学性质是蚯蚓提高土壤中重金属植物有效性的主要影响因素<sup>[16]</sup>,最终达到提高土壤镉污染修复的效果,这为生态系统的发展与进一步优化提供一定理论依据。

### 3.3 能源植物对镉污染土壤修复的应用前景

能源植物作为生物质能源的原料具有广阔的应用前景,能源植物生物量比较大而且在我国资源丰富。杜瑞英等<sup>[17]</sup>研究两种潜在的能源植物象草和亚香茅种植在人工镉污染土壤中的生长状况以及它们对土壤镉的吸取和富集能力。本研究选择能源作物甜高粱,结果发现甜高粱不仅生物量大,而且对重金属镉有一定积累作用,在蚯蚓作用下其富集效果得到提高,所以在镉污染土壤上种植能源作物甜高粱不仅能够解决土壤重金属污染问题,而且还可以利用富集镉后的甜高粱生产工业酒精,这样也避免了吸附重金属的植物难以处理而造成的二次环境污染,这是一种同时解决环境问题与能源问题的新理念,发展前景广阔。

#### 参考文献:

- [1] 刘素纯,等.植物对重金属的吸收机制与植物修复技术[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版),2004,30(5):493.
- [2] 吴双桃.镉污染土壤治理的研究进展[J]. 广东化工,2005,4:40-50.
- [3] 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.
- [4] Chaney R L, Minnie M, Li Y M, et al. Phytoremediation of soil metals [J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 1997, 8:279-284.
- [5] Liu W, Shu W S, Lan C Y. *V. iolabaoshanensis*-a new Cd hyper accumulator plant [J]. *Chinese Science Bulletin*,2003,48(19):2046-2049.
- [6] 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):1257-1258.
- [7] Langdon C J, Pearce T G, Meharg A A, et al. Survival and behavior of the earthworms *Lumbricus rubellus* and *Dendrodrilus rubidus* from arsenate-contaminated and non-contaminated sites [J]. *Soil Biol Biochem*, 2001, 33: 1239-1244.
- [8] Devliegher W, Verstraete W. *Lumbricus* terrestrials 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.
- [9] 史瑞和.土壤农化分析[M].北京:农业出版社,1996.
- [10] 中国科学院南京土壤所微生物室编著.土壤微生物研究法[M].北京:中国科学出版社,1985.
- [11] Abdul M M, Abdul R. Effect des lombriciens sur L'Absorption du potassium par le raygrass dans des sols contaminés par cinq éléments traces[J]. *Soil Biol Biochem*, 1996, 28 (8): 1045-1051.
- [12] 陈素华,等.微生物与重金属间的相互作用及其应用研究[J]. 应用生态学报,2002, 13(2):239-242.
- [13] 孙铁珩,周启星,李培军.污染生态学[M].北京:中国科学出版社,2001.
- [14] Villaro A C, Sesman P, et al. Relationships of symbiotic microorganisms to the nematode: phagocytic activity in the nematode epithelium of two species of *Oligochaeta* [J]. *J M orp hol*, 1985,186: 307-314.
- [15] Barois I, Lavelle P. Changes in respiration rate and some physicochemical properties of a tropical soil during transit through *Pontoscolex corethrus* (Glossoscolecidae, *Oligochaeta*) [J]. *Soil Biol Biochem*, 1986, 18: 539-541.
- [16] 俞协治,等.蚯蚓对土壤中铜、镉生物有效性的影响[J].生态学报,2003,23(5):923-927.
- [17] 杜瑞英,等.镉污染土壤对潜在能源植物生长的影响[J]. 生态环境,2006,15(4): 735-738.