

# 蚯蚓和有效微生物群对果园土壤镉吸附—解吸及苹果镉含量的影响

申为宝<sup>1,2</sup>, 杨洪强<sup>1,3\*</sup>, 申洁<sup>4</sup>, 乔海涛<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>山东农业大学园艺科学与工程学院, 山东泰安 271018; <sup>2</sup>山东省临沂市农业局, 山东临沂 276001; <sup>3</sup>作物生物学国家重点实验室, 山东泰安 271018; <sup>4</sup>浙江大学竺可桢学院, 杭州 310058)

**摘要:** 以果园棕壤土和 3 年生盆栽苹果 (*Malus domestica* Borkh) 为试验材料, 研究引入蚯蚓和有效微生物群 (EM) 后, 土壤对镉离子 ( $Cd^{2+}$ ) 的吸附—解吸行为及苹果根系和果实镉含量的变化。结果表明, 随着土壤  $Cd^{2+}$  含量增加, 土壤对  $Cd^{2+}$  的吸附率降低, 解吸率提高; Langmuir 方程显示, 经过蚯蚓和 EM 处理的土壤对  $Cd^{2+}$  的吸附强度和对  $Cd^{2+}$  的最大缓冲容量 (MBC) 下降; 在土壤  $Cd^{2+}$  含量较高时, 蚯蚓和 EM 降低了土壤对  $Cd^{2+}$  的吸附率, 提高了解吸率, EM 效果更明显。苹果根系和果实镉含量随着土壤施  $Cd^{2+}$  而增加, 蚯蚓和 EM 明显促进根系对镉的吸收及镉在果实中的积累, 在土壤镉含量较高时, 蚯蚓和 EM 的作用更显著。

**关键词:** 苹果; 蚯蚓; 微生物; 镉; 吸附; 解吸

中图分类号: S 661.1 文献标识码: A 文章编号: 0513-353X (2008) 11-1561-06

## The Effects of Earthworms and Effective Microorganisms on the Adsorption - Desorption of Cadmium in Orchard Soils and Cadmium Accumulation in Apple

SHEN Wei-bao<sup>1,2</sup>, YANG Hong-qiang<sup>1,3\*</sup>, SHEN Jie<sup>4</sup>, and QIAO Hai-tao<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>College of Horticulture Science and Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018, China; <sup>2</sup>Linyi Agricultural Bureau, Linyi, Shandong 276001, China; <sup>3</sup>State Key Laboratory of Crop Biology, Tai'an, Shandong 271018, China; <sup>4</sup>Chu Kochen Honors College, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

**Abstract:** The  $Cd^{2+}$  adsorption - desorption in soil and the content of  $Cd^{2+}$  in roots and fruits were studied by treatment with the earthworm and effective microorganisms (EM), using the orchard brown soils and potted three-year-old apple trees (*Malus domestica* Borkh) as materials. The results showed that the adsorption ratio of the  $Cd^{2+}$  in the soils reduced and the desorption ratio of  $Cd^{2+}$  enhanced as the soil  $Cd^{2+}$  concentration increasing. According to the Langmuir equation, the adsorption strength and the maximum buffering capacity (MBC) of the soil to  $Cd^{2+}$  decreased after the soil was treated with the earthworm and EM. The earthworm and EM reduced the adsorption ratio of the soil for  $Cd^{2+}$  and increased  $Cd^{2+}$  desorption ratio in the soil of higher  $Cd^{2+}$  concentration. And the EM had more obvious effect compared with earthworm. In the root and fruit, Cd content increased with  $Cd^{2+}$  concentration increasing in the soil. The earthworm and EM significantly promoted the uptake of  $Cd^{2+}$  in the root and the accumulation of  $Cd^{2+}$  in the fruit, and the effect was more remarkable when the  $Cd^{2+}$  concentration was higher in the soil.

**Key words:** apple; earthworm; microorganism; cadmium; adsorption; desorption

收稿日期: 2008 - 06 - 16; 修回日期: 2008 - 09 - 16

基金项目: 国家自然科学基金项目 (30671452; 30571285)

\* 通讯作者 Author for correspondence (E-mail: hqyang@sdau.edu.cn)

镉是一种毒性很强的重金属,易为植物吸收并可通过食物链危及人体健康。镉在土壤中的吸附和解吸行为控制了镉的迁移及其在生物链中的传递(陈怀满,1998)。关于土壤中镉的研究主要集中在pH值、温度、土壤胶体以及有机质等物理和化学因素对 $Cd^{2+}$ 吸附—解吸规律的影响(焦文涛等,2005;丁永祯等,2006),而土壤生物因素尤其是蚯蚓对镉吸附—解吸行为的影响尚未见报道。蚯蚓是土壤中的有益动物,可以改善土壤结构,转化有机物料,促进养分周转等(Basker et al,1992; Edwards,2004)。有效微生物群(effective microorganisms, EM)是一种活体微生物制剂,能增加土壤有机质和氮素含量,提高土壤养分有效性等(同小娟等,2003)。在农田中引入蚯蚓和EM,是一项改善土壤结构,调控土壤养分的重要技术(Basker et al,1992;同小娟等,2003),但也可能对土壤重金属的生物有效性产生影响。

由于环境污染、肥料和农药的不当使用,果园土壤重金属含量不断提高,已开始威胁果品安全生产。有报道显示,我国部分地区生产的苹果,其果实Cu、Zn、Hg、Cr、Pb、Cd等重金属的检出率达93.55%~100%,个别果园Cd超标1.3倍(冯建国等,1998;聂继云和董雅凤,2002)。果树为多年植物,长期生长在含重金属的土壤,更容易富积,因此,果园土壤重金属污染研究应引起足够的重视。本研究中以果园棕壤土和3年生盆栽苹果为试材,探讨蚯蚓和EM对土壤 $Cd^{2+}$ 的吸附—解吸行为及苹果根系与果实 $Cd^{2+}$ 积累的影响,以期为果园土壤管理提供依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料

试验于2006年9月至2007年10月在山东农业大学果树生物学实验室和山东临沂果茶示范园进行。试验树为长势相近的3年生盆栽‘冬红果’苹果(*Malus domestica* ‘Winter Red Fruit’),砧木为‘平邑甜茶’(*M. hupehensis* Rhed)。盆口直径为30 cm,高30 cm。蚯蚓品种为‘进农6号’;有效微生物群(EM)由山东临沂意康有机农业科技园有限公司提供,菌液pH值 $3.25 \pm 0.04$ ,乳酸菌( $2.40 \pm 0.36$ ) $\times 10^8$  cfu·mL<sup>-1</sup>,酵母菌( $1.20 \pm 0.20$ ) $\times 10^7$  cfu·mL<sup>-1</sup>,光合菌( $4.00 \pm 0.80$ ) $\times 10^6$  cfu·mL<sup>-1</sup>,放线菌( $9.60 \pm 0.80$ ) $\times 10^5$  cfu·mL<sup>-1</sup>。试验土壤为棕壤土,采自山东临沂果茶示范园,有机质含量 $16.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,CEC  $20.83 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,镉背景值为 $0.115 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,pH 6.15;加入EM前后土壤pH值差异不显著。

### 1.2 蚯蚓和EM对土壤的处理

取果园土壤去除杂质,过20目筛,用水湿润,每700 g接种吐土后的蚯蚓50条,48 h(处理A)和96 h(处理B)后捞出蚯蚓,土样混匀风干,进行等温吸附—解吸试验;同时,在等温吸附试验吸前向风干土样加EM(处理C),以未经蚯蚓和EM处理的果园风干土样为对照(处理D)。

### 1.3 蚯蚓和EM对盆栽苹果树的处理

按照添加剂量0、5和15 mg·kg<sup>-1</sup>,将氯化镉溶液与棕壤土混匀。秋季换盆时,用水冲去原土,用上述土壤装填,每盆15 kg,翌年春季每盆引入蚯蚓10条或EM菌液10 mL。定植后第2年8月采样,样品洗净,105℃杀青,70℃烘干,粉碎后待测。单株小区,5次重复。

### 1.4 土壤 $Cd^{2+}$ 等温吸附试验

取土样每份0.5 g,置于100 mL塑料离心管中,其中处理C加入EM 3.5 μL。每只离心管按1:20土水质量比,分别加入 $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaNO<sub>3</sub>配制的系列 $Cd^{2+}$ 溶液中,土壤 $Cd^{2+}$ 的含量分别为2.5、5、10、15、20、25、50和100 mg·kg<sup>-1</sup>。25℃振荡2 h,静置24 h,离心,取上清液测定 $Cd^{2+}$ 的浓度。离心管中沉淀土样,留作解吸试验。

按公式 $X = (C_0 - C) \times V / m$ 计算土壤 $Cd^{2+}$ 吸附量。其中,X为平衡时土壤对 $Cd^{2+}$ 的吸附量, $C_0$ 为加入液中 $Cd^{2+}$ 浓度,C为平衡液中 $Cd^{2+}$ 浓度,V为平衡液体积,m为干土质量。土壤中 $Cd^{2+}$ 的吸

附率为土壤中  $\text{Cd}^{2+}$  吸附量与添加量比值的百分数。

### 1.5 土壤 $\text{Cd}^{2+}$ 等温解吸试验

将上述等温吸附试验离心后的土样, 用  $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  的  $\text{NaNO}_3$  溶液做解吸剂, 按 1:20 土水质量比, 经充分混匀后, 25℃ 振荡 2 h, 离心, 测定上清液  $\text{Cd}^{2+}$  浓度。土壤中  $\text{Cd}^{2+}$  解吸率为土壤中  $\text{Cd}^{2+}$  解吸量和吸附量比值的百分数。

### 1.6 数据处理方法

镉含量按照国家标准 GB/T17141 用原子吸收分光光度计测定, 由山东农业大学中心实验室完成。差异显著性检验采用 Duncan's 法, 数据处理和 Langmuir 方程拟合采用 SPSS15.0 软件, 作图用 Microsoft Excel 2003 进行。

## 2 结果与分析

### 2.1 蚯蚓和 EM 对土壤 $\text{Cd}^{2+}$ 吸附行为的影响

在  $2.5 \sim 100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  范围内, 随着土壤  $\text{Cd}^{2+}$  含量的提高, 不论蚯蚓还是 EM 处理或对照, 土壤对  $\text{Cd}^{2+}$  的吸附率呈降低趋势 (表 1), 尤其是在土壤  $\text{Cd}^{2+}$  含量达到  $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  及其以上时, 土壤对  $\text{Cd}^{2+}$  的吸附率下降更为显著。

与对照比较, 当土壤  $\text{Cd}^{2+}$  含量低于  $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  时, 蚯蚓对土壤  $\text{Cd}^{2+}$  吸附率影响不显著, 但当土壤  $\text{Cd}^{2+}$  含量达到  $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  时, 蚯蚓处理显著降低了土壤对  $\text{Cd}^{2+}$  的吸附率。对于 EM 处理, 当土壤  $\text{Cd}^{2+}$  含量大于或等于  $15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  时, 土壤  $\text{Cd}^{2+}$  的吸附率显著降低。

表 1 蚯蚓及 EM 对土壤  $\text{Cd}^{2+}$  吸附率的影响

Table 1 The effects of earthworms and EM on  $\text{Cd}^{2+}$  adsorption ratio in the soil

/%

| 土壤 $\text{Cd}^{2+}$ 含量 / ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )<br>$\text{Cd}^{2+}$ content in soil | A<br>蚯蚓处理 48 h<br>Earthworms 48 h | B<br>蚯蚓处理 96 h<br>Earthworms 96 h | C<br>有效微生物群处理<br>EM | D<br>对照<br>Control |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------------|--------------------|
| 2.5                                                                                               | 99.00 a (a)                       | 99.12 a (a)                       | 98.60 a (a)         | 99.08 ab (a)       |
| 5                                                                                                 | 99.38 a (a)                       | 99.36 a (a)                       | 98.74 a (b)         | 99.12 a (ab)       |
| 10                                                                                                | 97.16 b (ab)                      | 96.85 c (bc)                      | 96.63 bc (c)        | 97.38 cd (a)       |
| 15                                                                                                | 98.23 ab (ab)                     | 97.85 b (ab)                      | 97.11 b (b)         | 98.53 abc (a)      |
| 20                                                                                                | 97.69 b (a)                       | 97.67 bc (a)                      | 96.30 bc (b)        | 97.81 bcd (a)      |
| 25                                                                                                | 97.04 b (a)                       | 97.22 bc (a)                      | 95.47 c (b)         | 97.22 d (a)        |
| 50                                                                                                | 93.20 c (a)                       | 93.40 d (a)                       | 90.60 d (b)         | 93.60 e (a)        |
| 100                                                                                               | 81.35 d (b)                       | 81.50 e (b)                       | 79.80 e (c)         | 83.00 f (a)        |

注: 同一列 (同一行) 数据后字母不同表示在  $P < 0.05$  水平差异显著。括号内为横向比较。下同。

Note: Values followed by different letters indicate significant differences at  $P < 0.05$  level in columns (rows). It was horizontal comparison in the bracket. The same below.

由表 2 得知, 通过 Langmuir 方程  $[Y = X_m \cdot k \cdot c / (k \cdot c + 1)]$  对各处理的土壤  $\text{Cd}^{2+}$  吸附过程进行拟合, 拟合方程相关系数  $r$  值均大于 0.97, 达到极显著水平。由 Langmuir 方程求得的有关参数得知, 蚯蚓处理 48 h (处理 A) 和处理 96 h (处理 B) 后, 土壤对镉的最大吸附量 ( $X_m$ ) 分别比对照 (处理 D) 低 2.6% 和 1.8%, 而 EM 处理后, 最大吸附量比对照降低 38%。

Langmuir 方程中的  $k$  为吸附—解吸平衡常数, 表征土壤对  $\text{Cd}^{2+}$  的吸附强度;  $X_m$  与  $k$  的乘积可反映土壤对  $\text{Cd}^{2+}$  的最大缓冲容量 ( $\text{MBC} = X_m \cdot k$ ),  $k$  及  $\text{MBC}$  的数值越大, 表明土壤对  $\text{Cd}^{2+}$  的吸附能力越强。

由表 2 可算出, 各处理  $\text{MBC}$  值由大到小为: 对照 > 蚯蚓处理 48 h > 蚯蚓处理 96 h > EM 处理。表明蚯蚓处理后, 土壤对  $\text{Cd}^{2+}$  的吸附能力减弱, 蚯蚓处理时间越长, 吸附能力越弱; 而 EM 处理减弱土壤吸附  $\text{Cd}^{2+}$  的作用更强。

表 2 土壤吸附  $Cd^{2+}$  的 Langmuir 方程参数Table 2 Parameters and correlation coefficients of adsorption of  $Cd^{2+}$  in different tested soils with respect to Langmuir equation<sup>\*</sup>

| 代号<br>Code | 处理<br>Treatment         | 最大吸附量 / ( $mg \cdot kg^{-1}$ )<br>$X_m$ | 平衡常数<br>k | 最大缓冲容量<br>MBC | 相关系数<br>r           |
|------------|-------------------------|-----------------------------------------|-----------|---------------|---------------------|
| A          | 蚯蚓 48 h Earthworms 48 h | 1745.9                                  | 0.471     | 827.3         | 0.976 <sup>**</sup> |
| B          | 蚯蚓 96 h Earthworms 96 h | 1761.0                                  | 0.465     | 818.9         | 0.979 <sup>**</sup> |
| C          | 有效微生物群 EM               | 1795.6                                  | 0.296     | 531.5         | 0.978 <sup>**</sup> |
| D          | 对照 Control              | 1792.5                                  | 0.482     | 864.0         | 0.973 <sup>**</sup> |

\* Langmuir方程: 吸附量  $Y (mg \cdot kg^{-1}) = X_m \times k \times c / (k \times c + 1)$ ; \*\*表示在  $P < 0.01$  水平相关显著。

\* Langmuir equation: Absorption quantity  $Y (mg \cdot kg^{-1}) = X_m \times k \times c / (k \times c + 1)$ ; \*\* indicate significantly correlation at  $P < 0.01$  level

## 2.2 $Cd^{2+}$ 解吸行为的影响

蚯蚓和 EM 对土壤重金属解吸量反映了重金属对环境以及作物吸收重金属的潜在影响 (焦文涛等, 2005)。

由表 3 可知, 随着土壤  $Cd^{2+}$  含量的增加, 各处理的土壤镉解吸率总体上呈逐渐增大趋势。在土壤  $Cd^{2+}$  达到  $100 mg \cdot kg^{-1}$  时, A (蚯蚓 48 h) 及 B (蚯蚓 96 h) 处理显著提高了土壤  $Cd^{2+}$  的解吸率。EM 处理在  $5 \sim 100 mg \cdot kg^{-1}$  时均显著提高了土壤  $Cd^{2+}$  的解吸率。

表 3 蚯蚓及 EM 对土壤  $Cd^{2+}$  解吸率的影响Table 3 Effects of earthworms and EM added on desorption ratio of  $Cd^{2+}$  in the soils

/%

| 土壤 $Cd^{2+}$ 含量 / ( $mg \cdot kg^{-1}$ )<br>$Cd^{2+}$ content in soil | A<br>蚯蚓处理 48 h<br>Earthworms 48 h | B<br>蚯蚓处理 96 h<br>Earthworms 96 h | C<br>有效微生物群处理<br>EM | D<br>对照<br>Control |
|-----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------------|--------------------|
| 2.5                                                                   | 0.85 e (b)                        | 1.17 ef (a)                       | 0.89 d (b)          | 0.85 e (b)         |
| 5                                                                     | 0.89 e (b)                        | 0.97 f (ab)                       | 1.02 d (a)          | 1.01 e (a)         |
| 10                                                                    | 1.73 de (b)                       | 1.86 def (b)                      | 2.19 cd (a)         | 1.69 de (b)        |
| 15                                                                    | 1.64 de (c)                       | 2.17 de (b)                       | 2.62 cd (a)         | 1.96 de (b)        |
| 20                                                                    | 2.55 d (c)                        | 2.58 cd (c)                       | 4.13 cd (a)         | 3.12 cd (b)        |
| 25                                                                    | 4.08 c (bc)                       | 3.65 c (c)                        | 5.67 c (a)          | 4.32 c (b)         |
| 50                                                                    | 13.35 b (b)                       | 12.48 b (b)                       | 16.00 b (a)         | 13.10 b (b)        |
| 100                                                                   | 21.51 a (ab)                      | 21.10 a (b)                       | 24.94 a (a)         | 14.94 a (d)        |

## 2.3 土壤 $Cd^{2+}$ 吸附量与解吸量的关系

由图 1 可以看出, 随着  $Cd^{2+}$  吸附量的增加, 解吸量随之提高。

当土壤  $Cd^{2+}$  的吸附量大于  $500 mg \cdot kg^{-1}$  时,  $Cd^{2+}$  解吸量的增加尤为显著, 而此时, 蚯蚓和 EM 处理土壤的  $Cd^{2+}$  解吸量随着  $Cd^{2+}$  吸附量的增加幅度高于对照, 吸附量越大, 增幅也越大。

## 2.4 蚯蚓和 EM 对苹果根系和果实 Cd 含量的影响

从表 4 可以看出, 苹果根系和果实镉含量均随土壤镉含量的提高而增加。

在未施用镉的土壤中, 蚯蚓和 EM 处理后, 主根及果实中 Cd 含量均有所提高, 但与对照差

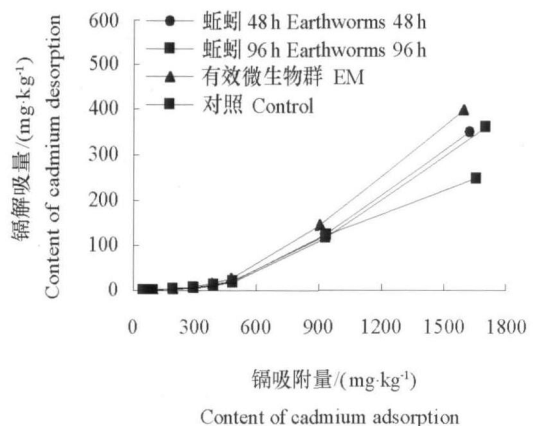


图 1 蚯蚓和 EM 处理下土壤镉吸附和解吸的关系  
Fig 1 Relationship of adsorption and desorption of cadmium in soil treated by earthworms and EM

异不显著。

在土壤外加镉剂量为  $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  时, 蚯蚓和 EM 处理均显著提高果实 Cd 含量, EM 提高幅度更大; 主根中 Cd 含量在处理后虽然略有提高, 但差异不显著。

在土壤外加镉剂量为  $15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  时, 蚯蚓及 EM 处理后, 主根及果实中 Cd 含量均显著提高。

这些结果表明蚯蚓和 EM 能够明显增进根系对镉的吸收及镉在果实中的积累, 尤其在土壤镉含量较高时, 作用更显著。

表 4 蚯蚓和 EM 对苹果根系和果实 Cd 含量的影响

Table 4 Effects of earthworms and EM on the content of Cd in apple's root and fruit

| 土壤外加 $\text{Cd}^{2+}$ 剂量 /<br>( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )<br>Content of $\text{Cd}^{2+}$ added to soil | 处理<br>Treatment | 镉含量 / ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) Cd content |             |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-------------------------------------------------------|-------------|
|                                                                                                                 |                 | 主根<br>Main root                                       | 果实<br>Fruit |
| 0                                                                                                               | 蚯蚓 Earthworms   | 0.032 d                                               | 0.023 e     |
|                                                                                                                 | 有效微生物群 EM       | 0.034 d                                               | 0.025 e     |
|                                                                                                                 | 对照 Control      | 0.029 d                                               | 0.019 e     |
| 5                                                                                                               | 蚯蚓 Earthworms   | 0.763 c                                               | 0.563 cd    |
|                                                                                                                 | 有效微生物群 EM       | 0.713 c                                               | 0.688 b     |
|                                                                                                                 | 对照 Control      | 0.688 c                                               | 0.532 d     |
| 15                                                                                                              | 蚯蚓 Earthworms   | 1.688 a                                               | 0.738 b     |
|                                                                                                                 | 有效微生物群 EM       | 1.113 b                                               | 0.900 a     |
|                                                                                                                 | 对照 Control      | 0.775 c                                               | 0.600 c     |

### 3 讨论

土壤对  $\text{Cd}^{2+}$  的吸附分为两个类型, 一类是专性吸附, 结合能较高, 吸附牢固, 具有吸附饱和性; 另一类是非专性吸附, 结合能较低, 易解吸 (宗良纲和徐晓炎, 2003)。本试验结果显示, 当土壤镉含量较低时 ( $2.5 \sim 25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), 土壤对镉的吸附率较高而解吸率较低, 说明  $\text{Cd}^{2+}$  主要被土壤专性吸附在高能位点, 难于解吸。

由于蚯蚓及 EM 菌处理的影响, 部分  $\text{Cd}^{2+}$  未被土壤吸附, 或被从结合能低的位点上解吸下来, 从而降低了土壤对镉的吸附率而提高了解吸率。随着土壤镉含量的提高, 特别是土壤镉含量达到  $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  以上时, 出现了低吸附率和高解吸率的现象, 说明专性吸附渐趋饱和, 非专性吸附所占的比例逐渐增加, 并且由于蚯蚓及 EM 的作用, 将部分非专性吸附的  $\text{Cd}^{2+}$  解吸下来, 从而使土壤对镉吸附率的降低和解吸率的提高达到显著水平。

蚯蚓对土壤镉吸附—解吸的影响, 与蚯蚓分泌和排泄过程中所产生的物质含有大量的  $-\text{COOH}$ 、 $-\text{NH}_2$  等活性基团 (Lavelle et al, 1983) 有关, 这些基团通过络合或螯合作用促进了土壤重金属的活化, 从而使土壤对  $\text{Cd}^{2+}$  的吸附能力降低而解吸能力提高。EM 含有细菌、酵母菌等多种有效微生物, 在吸附和解吸过程中, 重金属离子与微生物细胞壁表面的一些基团如  $-\text{COOH}$ 、 $-\text{OH}$ 、 $-\text{NH}_2$ 、 $-\text{SH}$  等通过络合、螯合、离子交换、静电吸附、共价吸附以及无机微沉淀 (Strandberg et al, 1981) 等一种或几种方式相结合, 与土壤中的其他组分竞争吸附重金属离子。土壤引入 EM 后, 由于微生物的大量增加而降低了土壤对  $\text{Cd}^{2+}$  的吸附率, 提高了解吸率。

作物从土壤中吸附  $\text{Cd}^{2+}$  的多少取决于土壤溶液中  $\text{Cd}^{2+}$  含量, 而土壤溶液中  $\text{Cd}^{2+}$  含量主要受吸附和解吸的制约。

在本试验中, 蚯蚓和 EM 降低了土壤对 Cd 的吸附, 增进了解吸, 因而提高了土壤溶液中  $\text{Cd}^{2+}$  含

量,促进了苹果根系的吸收,增加了果实中的Cd含量。因此,在果园管理过程中,应区分果园重金属污染情况与污染程度,采取不同的土壤管理措施。在没有重金属污染的果园,通过引入或其他措施增加蚯蚓或微生物数量与活性,改善土壤结构、提高养分有效性等,但在受重金属污染的果园,引入蚯蚓和EM菌会提高土壤重金属的生物有效性,增进根系对镉的吸收及镉在果实的积累。因此,在重金属含量较高的果园,不宜引入更多的蚯蚓或施用微生物制剂。

## References

- Basker A, Macgregor A N, Kirkman J A. 1992. Influence of soil ingestion by earthworms and the availability in soil: An incubation experiment. *Biol Fertil Soils*, 14: 300 - 303.
- Chen Huai-man. 1988. Cadmium adsorption and desorption in soils. *Acta Pedologica Sinica*, 25 (1): 65 - 74. (in Chinese)
- 陈怀满. 1998. 土壤对镉的吸附与解吸. *土壤学报*, 25 (1): 65 - 74.
- Ding Yong-zhen, Li Zhi-an, Zou Bi. 2006. Effects of organic acids on Cd desorption of South China red soil. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 17 (9): 1688 - 1692. (in Chinese)
- 丁永祯, 李志安, 邹碧. 2006. 红壤中镉在有机酸作用下的解吸行为. *应用生态学报*, 17 (9): 1688 - 1692.
- Edwards C A. 2004. The importance of earthworms as key representatives of the soil fauna // Edwards C A. *Earthworm ecology*. Boca Raton: CRC Press LLC: 3 - 9.
- Feng Jian-guo, Tao Xun, Zhang An-sheng, Yu Yi. 1998. The pollution of pesticides and heavy metal in apple orchards and its control countermeasures. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 14 (3): 29 - 31. (in Chinese)
- 冯建国, 陶训, 张安盛, 于毅. 1998. 苹果园农药和重金属污染及其治理对策. *中国农学通报*, 14 (3): 29 - 31.
- Jiao Wen-tao, Jiang Xin, Yu Gui-fen. 2005. Effects of organic matter on cadmium adsorption - desorption in three soils. *Environmental Chemistry*, 24 (5): 545 - 549. (in Chinese)
- 焦文涛, 蒋新, 余贵芬. 2005. 土壤有机质对镉在土壤中吸附-解吸行为的影响. *环境化学*, 24 (5): 545 - 549.
- Lavelle P, Rangel P, Kanyonyo J. 1983. Intestinal mucus production by two species of tropical earthworm: *Millsonia lamtoiana* (*Megascolecidae*) and *Pontoscolex corethrinus* (*Glossoscolecidae*) // Lebrun P, André H M, Medts A De, Grégoire-Wibo C, Wauthy G. Proc 8th Intl Colloq Soil Zoology, Louvain (Belgium): Université Catholique de Louvain Press: 405 - 410.
- Lu Ru-kun. 1999. Analysis method of soil agro-chemistry. Beijing: China Agricultural Technology Press. (in Chinese)
- 鲁如坤. 1999. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社.
- Nie Ji-yun, Dong Ya-feng. 2002. Harm and defence of heavy metals in orchards. *China Fruits*, (1): 44 - 47. (in Chinese)
- 聂继云, 董雅凤. 2002. 果园重金属污染的危害与防治. *中国果树*, (1): 44 - 47.
- Strandberg G W, Shumate S E, Parrott J R. 1981. Microbial cells as biosorbents for heavy metals: Accumulation of uranium by *Saccharomyces cerevisiae* and *Pseudomonas aeruginosa*. *Appl Environ Microbiol*, 41: 237 - 245.
- Tong Xiao-juan, Li Wei-jiong, Ni Yong-zhen. 2003. Effects of effective microorganisms (EM) compost on summer maize growth and development. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 11 (4): 18 - 20. (in Chinese)
- 同小娟, 李维炯, 倪永珍. 2003. EM堆肥对夏玉米生长发育的影响研究. *中国生态农业学报*, 11 (4): 18 - 20.
- Zong Liang-gang, Xu Xiao-yan. 2003. Advance in studies of cadmium sorption and desorption in soils. *Ecology and Environment*, 12 (3): 331 - 335. (in Chinese)
- 宗良纲, 徐晓炎. 2003. 土壤中镉的吸附解吸研究进展. *生态环境*, 12 (3): 331 - 335.