

## 接种微生物对油菜吸收 Cd 效果的影响研究

贾莹, 李博文, 芦小军, 李燕丽, 李丽丽, 王晓娟

河北农业大学资源与环境科学学院, 河北 保定 071001

**摘要:** 采用盆栽土壤模拟试验方法, 以油菜 (*Brassica campestris*) 为供试植物, 通过向土壤中接种微生物, 研究了四种菌株 JA1, JA2, JA3, JA4 对油菜吸收 Cd 的效果影响。结果表明: 菌株 JA1, JA2, JA4 不仅可以促进植株的生长, 分别使油菜的生物量提高 17%, 28% 和 32%, 而且增强了植株对土壤 Cd 的吸收, 使油菜地上部富集量较对照提高了 26.8%, 48.8% 和 65.9%, 植物提取量较对照增加了 48.9%, 76.1% 和 119%, 并且可有效促进土壤 Cd 的活化, 分别使土壤 Cd 的有效态含量提高了 25.9%, 59.2% 和 41.9%; 菌株 JA3 则使其植株地上部富集量、植物提取量和土壤 Cd 有效态含量降低, 较对照降低了 14.6%, 11.8% 和 13.6%。各处理的叶绿素和可溶性蛋白含量均略高于对照。

**关键词:** 土壤污染; 微生物; 镉; 油菜品质

**中图分类号:** X53

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1674-5906 (2010) 04-0813-04

人类的活动造成了镉、铅、锌和铬等重金属不断地向环境中释放, 在土壤中积累, 并通过食物链对人体产生危害<sup>[1-2]</sup>。土壤重金属污染因其具有隐蔽性、长期性和不可逆性等特点, 治理难度大, 费用高。因此, 修复重金属污染土壤, 恢复土壤原有功能, 一直是国际上的难点和热点研究课题<sup>[3]</sup>。植物修复重金属污染土壤技术由于其显著的优越性而受到人们广泛的关注<sup>[4]</sup>。然而, 植物修复技术受到土壤中重金属的低生物有效性的限制<sup>[3]</sup>。随着生物修复技术不断的发展, 利用土壤中固有的微生物修复重金属污染成为新的热点并已取得了一定的效果。江春玉等<sup>[5]</sup>研究报道从土壤样品中筛选出一株对碳酸铅、碳酸镉活化能力最强的铅镉抗性细菌 WS34, 它能促进印度芥菜和油菜对铅镉的富集。杨卓等<sup>[6]</sup>通过接种巨大芽孢杆菌和胶质芽孢杆菌的混合微生物制剂不仅可以促进超富集植物的生长, 增强超富集植物对土壤 Cd、Pb、Zn 的吸收, 而且大幅度提高了植物的修复效率。

pH 值是影响土壤重金属生物有效性的重要因子<sup>[7]</sup>, 微生物产生的低分子量有机酸能实现不同重金属形态间的转化, 促进土壤中重金属的溶解, 从而有利于超富集植物对重金属的吸收和清除<sup>[8]</sup>。柠檬酸、苹果酸、草酸、天冬氨酸和谷氨酸等作为重金属螯合剂均有报道<sup>[9]</sup>。利用有机酸的这一特性, 可以对重金属污染土壤进行原位修复<sup>[10]</sup>。一般土壤中重金属离子的生物有效性随 pH 的降低而升高<sup>[11]</sup>。潮褐土的 pH 本身比较高, 因此, 其有效态重金属含量较低。加入微生物后, 微生物产生的低分

子量有机酸能降低土壤的 pH, 从而能增加重金属的生物有效性。到目前为止, 文献上很少有关于修复重金属时对蔬菜品质影响的报道。为此, 本文以采自保定多年污灌区的土壤为供试土壤, 加入四种能产生低分子量有机酸的微生物, 研究它对油菜 (*Brassica campestris*) 富集 Cd 及其品质的影响, 为强化植物修复土壤重金属污染提供试验依据。

### 1 材料与方法

#### 1.1 供试作物和土壤

供试土壤采自保定市郊污灌区 (0~20 cm)。土壤基本性质如下: 土壤 pH 8.4, 有机质质量分数 19.04 g·kg<sup>-1</sup>, 全氮质量分数 0.79 g·kg<sup>-1</sup>, 碱解氮质量分数 81.35 mg·kg<sup>-1</sup>, 全磷质量分数 0.83 g·kg<sup>-1</sup>, 全 Cd 质量分数 3.1 mg·kg<sup>-1</sup>。供试植物为青帮油菜, 购于保定市农资科技市场。

#### 1.2 供试菌株筛选

培养基: 单菌落分离培养基 (NA 培养基): 蛋白胨 1%, 牛肉膏 0.3%, NaCl 0.5%, 琼脂 2%, pH 7.2~7.4; 富集培养基 (NA 培养基): 同上; 筛选培养基: NA 或 NB 培养基+新配制的酚红试液; 种子培养基: 蛋白胨 1%, 牛肉膏 0.3%, NaCl 0.5%, pH 7.2~7.4; 发酵培养基: 蛋白胨 1%, 牛肉膏 0.3%, NaCl 0.5%, pH 7.2~7.4。

筛选菌种所用土壤: 安新县北际头乡, 保定纳污河府河末梢入淀口处的底泥, 其有效态 Cd、Pb、Zn 含量分别为 1.70、16.80、61.50 mg·kg<sup>-1</sup>。

将污染土壤按梯度稀释法将制备的菌悬液涂布在固体培养基表面, 30 °C 培养 3 d, 待长出菌落

**基金项目:** 河北省自然科学基金项目 (C2007000459)

**作者简介:** 贾莹 (1984 年生), 女, 硕士研究生, 主要从事土壤重金属污染与植物修复方面的研究。E-mail: jiaying009@sina.com

\*通讯作者: 李博文, 男, 研究员, 博士生导师, 长期从事土壤环境科学研究。E-mail: kjli@hebau.edu.cn

**收稿日期:** 2010-02-19

后选择生长丰满的单菌落进行划线纯化直至出现单菌落, 获得纯培养, 将分离出的细菌于 4℃ 保存于斜面培养基上备用。

在 NA 培养基中加入新配制的酚红试剂, 用划十字法接种微生物后, 在菌落周围出现淡黄色颜色圈, 则表示微生物在代谢过程中产生了能使酚红变色的物质, 则表示该微生物有产酸能力。经过初步筛选得到产酸菌, 将初筛中产酸较好、产生颜色圈较好的试管斜面菌株挑选出来, 同液体发酵的方法对挑选出的菌株再次进行筛选, 保留效果更好的试管斜面菌株。复筛后挑选 4 株活性较强的菌株 JA1、JA2、JA3 和 JA4 挑取斜面保存。

### 1.3 试验设计

盆栽试验在河北农业大学西校区标本园大棚内进行, 用上、下口内径分别为 21 cm, 14 cm, 高 15 cm 的塑料桶作盆, 盛过 3 mm 筛的风干土, 每盆装土 3.0 kg, 同时每盆施入 0.99 g 尿素和 1.20 g 二铵做底肥。底肥和土壤混匀装盆, 在 60% 田间持水量下平衡 10 d 后播入油菜种子, 生长一周后间苗, 每盆定苗 8 株。试验设 A、B、C、D 4 个处理, 每个处理设 3 次重复, 同时设只加培养基的对照。油菜生长 20 d 进行微生物接种处理, 各处理分别接种 JA1、JA2、JA3 和 JA4 四种菌剂各 250 mL, 分两次施入。同时在对照处理中加入 250 mL 培养基, 生长过程中根据植物生长需求用蒸馏水浇灌, 60 d 后收获取样。

### 1.4 样品采集与分析方法

收获时沿土面剪取地上部, 测量株高、鲜质量, 同时洗出根系, 植物样品在 105℃ 条件下, 杀青 30 min, 后在 70℃ 条件下烘至恒质量。烘干样品全部粉碎、混匀并装袋备用。油菜中 Cd 含量采用湿法 ( $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ ) 消解, 土壤重金属元素全量 Cd 分析用王水+高氯酸消化分析, 用岛津 AA-6300 型石墨炉原子吸收光谱仪 (AAS) 测定。同时采用 DTPA 浸提 (0.005 mol/L DTPA-0.01 mol/L  $\text{CaCl}_2$ -0.1 mol/L TEA, 二乙基三胺五乙酸) 测定土壤中有有效态 Cd 含量, 用 pH 计测定土壤 pH (1:2.5 土水比)。油菜可溶性蛋白质含量采用考马斯亮蓝 G-250 染色法; 叶绿素采用手持叶绿素测定仪 (SPAD-502) 测定。

### 1.5 数据处理

所列结果均为 3 次重复的平均值, 数据处理采用 SPSS11.5 软件进行 Duncan 差异显著性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 微生物处理对油菜生长发育的影响

生物量是反映植株生长的最重要的指标。从对油菜生长情况的表观观察结果来看, A、B、C、D 处理下油菜生物量和平均株高均大于对照处理 (表 1)。

与对照相比, 各处理油菜生物量分别提高了 17%、28%、3%、32%。其中 D 处理油菜长势最为旺盛, 其生物量和平均株高均为各处理中最高值, D 处理较对照生物量提高了 32%, 可能是由于 JA4 菌株能够活化土壤矿物中的 P、K 等植物营养元素, 促进了植物的生长; C 处理下, 油菜生物量和平均株高均略高于对照, 低于 A、B、D 处理, C 处理下油菜生物量较对照提高了 3%, 但与对照并无显著差异。

表 1 微生物对油菜生长发育的影响  
Tab 1 Effects of microorganism on growth of rape

| 处理 | 生物量(FW)/(g·盆 <sup>-1</sup> ) | 平均株高/cm      | 长势情况       |
|----|------------------------------|--------------|------------|
| CK | 165.1±2.23a                  | 19.25±0.37a  | 植株正常生长     |
| A  | 193.9±4.88b                  | 22.89±2.21b  | 生长良好       |
| B  | 211.5±5.52c                  | 25.85±1.27b  | 长势旺盛       |
| C  | 170.5±2.53a                  | 21.35±0.88b  | 长势一般       |
| D  | 218.2±1.17c                  | 24.81±1.33bc | 长势旺盛, 植株高大 |

注: 数据之间的显著性差异用 Duncan 检验,  $P < 0.05$ , 同一列字母不同表示处理间有显著差异, 字母相同表示处理间无显著差异, 下同。

### 2.2 微生物处理对油菜重金属 Cd 富集量的影响

有机酸能引起土壤重金属移动性的改变, 对植物吸收重金属产生了极大的影响。由表 2 可以看出, 接种不同菌株对油菜地上部 Cd 富集量产生了显著的影响, A、B、D 各处理较不接菌对照均有所提高, 分别提高了 26.8%、48.8%、65.9%; 但 C 处理油菜地上部 Cd 富集量有所降低, 较对照降低了 14.6%。同时可以看出, A、B、D 各处理下, 植物根系 Cd 富集量分别较不接菌对照提高了 8.5%、63.7%、88.9%; 而 C 处理菌株 JA3 抑制了植株根系对 Cd 的吸收, 较对照降低了 9.7%。可见, 菌株 JA1、JA2、JA4 对油菜吸收重金属 Cd 有较明显的促进作用, JA3 则起到了抑制作用。

表 2 土壤重金属有效态含量和油菜的重金属富集量

Tab 2 Contents of available heavy metals in the soil and heavy metal up take by oilseed rape(DW) mg·kg<sup>-1</sup>

| 处理 | 土壤有效态含量     | 油菜地上部富集量   | 油菜根系富集量    | pH   |
|----|-------------|------------|------------|------|
| CK | 0.81±0.032b | 4.1±0.26a  | 8.3±0.15b  | 8.45 |
| A  | 1.02±0.010c | 5.2±0.44b  | 9.0±0.11c  | 8.06 |
| B  | 1.29±0.028e | 6.1±0.32bc | 13.6±0.1d  | 7.92 |
| C  | 0.70±0.025a | 3.5±0.15a  | 7.5±0.21a  | 7.98 |
| D  | 1.15±0.040d | 6.8±0.17c  | 15.7±0.11e | 7.83 |

各处理间存在一定的差异性, 可能是由于 4 种菌的菌种不同, 产酸的种类及产酸量不同所致。

### 2.3 微生物处理对土壤重金属 Cd 有效态含量的影响

低分子量有机酸在土壤环境中具有特别重要的意义, 它能促进土壤中重金属的溶解<sup>[12]</sup>, 提高土壤中重金属的生物有效性, 有利于植物对重金属的吸收。土壤微生物除分解各类有机物产生多种低分

子量有机酸(如甲酸、乙酸、丙酸和丁酸等)外,还在生命活动中合成一些有机酸。Siegel 等报道,真菌可以通过分泌氨基酸、有机酸以及其它代谢产物溶解重金属及含重金属的矿物<sup>[13]</sup>。有机酸对土壤吸附重金属既有促进作用,又有抑制作用。一般情况下,有机酸能够通过螯合作用而使土壤固态重金属释放出来,增加其移动性<sup>[10,14]</sup>。

DTPA 提取的土壤 Cd 被看作是生物有效态 Cd,与植物吸收的 Cd 有很高的相关性,常用来作为衡量土壤中植物吸收 Cd 数量的指标<sup>[15]</sup>。由表 2 可知,微生物处理使土壤中有效态 Cd 的含量产生了一定的变化。A、B、D 各处理下,土壤有效态 Cd 含量均显著提高,较对照分别提高了 25.9%、59.2%和 41.9%;而 C 处理下土壤有效态 Cd 含量较对照降低了 13.6%。各处理的土壤 Cd 活化率(土壤有效 Cd/土壤全量 Cd)分别为 32.9%、41.6%、22.6%和 37.1%。由此可以看出,菌株 JA2 对土壤 Cd 的活化效果最好。

## 2.4 微生物处理对油菜重金属 Cd 提取量的影响

土壤重金属的植物提取量是描述植物修复效果最直观的指标。植物重金属提取量是印度芥菜地上部干物质质量与该种植物单位干物质质量吸收重金属量的乘积,单位为  $\text{mg} \cdot \text{pot}^{-1}$ 。

A、B、C、D 各处理下,油菜的植物提取量分别为 0.15、0.19、0.09、0.22  $\text{mg} \cdot \text{pot}^{-1}$ 。A、B、D 处理的植物提取量较对照分别提高了 48.9%、76.1%和 119%;C 处理的植物提取量较对照降低了 11.8%。表明菌株 JA1、JA2、JA4 对修复土壤 Cd 均有较好的效果;而菌株 JA3 对土壤 Cd 有一定的固定作用。

## 2.5 接种微生物对土壤 pH 的影响

pH 是一个十分重要的控制  $\text{Cd}^{2+}$  解析的因子<sup>[16]</sup>。人们在研究土壤 pH 和重金属生物有效性的相互关系时发现,随着土壤 pH 的降低,土壤重金属的溶解和有效性增加<sup>[17-18]</sup>。土壤微生物的代谢作用能产生多种低分子量的有机酸,如甲酸、乙酸、丙酸和丁酸等,其次代谢产物也能抑制或刺激植物根系分泌有机酸。这些有机酸都在一定程度上影响土壤环境,参与成土作用、促进矿物溶解等<sup>[19]</sup>。由表 2 可以看出,不接菌对照的土壤 pH 为 8.45,其余各处理下土壤 pH 分别降低了 0.39、0.53、0.47 和 0.62 个单位,其中 D 处理降低的最多。以上结果表明,加入的菌株产生的代谢产物降低了土壤 pH,代谢产物中的低分子量有机酸可使处于沉淀态的重金属 Cd 被活化成为可溶态的 Cd 离子,提高了重金属对植物的有效性。

## 2.6 微生物处理对油菜品质的影响

食品的色泽是决定食品品质和可接受性的重要因素,食品的色泽由它所含有的色素决定。绿色

蔬菜的色泽主要由叶绿素及其衍生物决定。因此,叶绿素含量的高低是衡量蔬菜感官品质的重要指标之一<sup>[20]</sup>。而且叶绿素是植物进行光合作用的重要物质,其含量的多少直接标志着植物生长能力的强弱。本试验结果表明,加入微生物后油菜叶绿素含量升高,A、B、C 和 D 处理分别较对照提高了 2.1、3.9、1.2、2.3 个单位(SPAD)。这是由于加入微生物后,油菜地上部 Cd 的吸收量升高,且低浓度的重金属对叶绿素合成有促进作用,这与前人的研究结果“低促高抑”相似<sup>[21-22]</sup>。

可溶性蛋白是植物所有蛋白质组分中最活跃的一部分,包括各种酶原、酶分子和代谢调节物,并与植物对不良环境的抗性有关,可溶性蛋白的含量部分体现着机体的衰老程度,显示了机体的代谢和叶片的生命活动旺盛程度。本试验各处理下植物组织中可溶性蛋白含量均略高于对照,表明加入微生物后,各处理并没有对植株造成伤害。

表 3 微生物处理下油菜叶绿素和可溶性蛋白含量  
Tab 3 Effects of microorganism on chlorophyll and soluble protein content of rape

| 处理 | 叶绿素 SPAD | w(可溶性蛋白)/( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ) |
|----|----------|----------------------------------------------|
| CK | 45.5     | 3.26                                         |
| A  | 47.6     | 3.61                                         |
| B  | 49.4     | 3.50                                         |
| C  | 46.7     | 3.64                                         |
| D  | 47.8     | 3.37                                         |

## 3 结论

(1) A、B、C、D 处理下,油菜的生物量及株高较对照均有所提高,分别提高了 17%、28%、3%和 32%。

(2) A、B、D 处理下,油菜 Cd 的地上部富集量、根系富集量和 Cd 的植物提取量均高于对照,且  $D > B > A$ ,表明菌株 JA1、JA2 和 JA4 对修复土壤 Cd 具有一定的现实意义,其中菌株 JA4 的效果最好。

(3) A、B、D 处理下土壤有效态 Cd 含量较对照分别提高了 25.9%、59.2%和 41.9%;而 C 处理下土壤有效态 Cd 含量较对照降低了 13.6%。表明菌株 JA1、JA2 和 JA4 对土壤 Cd 具有一定的活化作用,菌株 JA3 对土壤 Cd 产生了钝化作用。

(4) A、B、C、D 处理下土壤 pH 较对照分别降低了 0.39、0.53、0.47 和 0.62 个单位,pH 值由小到大的次序为 D、B、C、A。

(5) A、B、C、D 处理下油菜叶绿素含量较对照均有所提高,分别提高了 2.1、3.9、1.2、2.3 个单位(SPAD);各处理下植物组织中可溶性蛋白含量也略有提高。表明接种微生物对植株的品质并未造成伤害。

## 参考文献:

- [1] 蒋先军, 骆永明, 赵其国. 重金属污染土壤的植物修复研究. 金属富集植物 *Brassica juncea* 对镉的吸收和积累[J]. 土壤学报, 2002, 39(5): 664-670.  
JIANG Xianjun, LUO Yongming, ZHAO Qiguo. Study on Phytoremediation of heavy metal polluted soils III. Cadmium and Zinc uptake and accumulation by Indian Mustard (*Brassica juncea*)[J]. Acta Pedologica Sinica 2002, 39(5): 664-670.
- [2] Jackson P J, Alloway B J. The transfer of cadmium from agriculture soils to the human food chain [M]//Biogeochemistry of metals. Lewis Publishers, 1992:109-152.
- [3] 龙新宪, 杨肖娥, 倪吾钟. 重金属污染土壤修复技术研究的现状与展望[J]. 应用生态学报, 2002, 13(6): 757-762.  
LONG Xinxian, YANG Xiaoe, NI Wuzhong. Current situation and prospect on the remediation of soils contaminated by heavy metals[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(6): 757-762.
- [4] 骆永明. 重金属污染土壤的植物修复[J]. 土壤, 1999, 31(5): 261-265.  
LUO Yongming. Phytoremediation of soils contaminated[J]. Soils, 1999, 31(5): 261-265.
- [5] 江春玉, 盛下放, 何琳燕, 等. 一株铅镉抗性菌株 WS34 的生物学特性及其对植物修复铅镉污染土壤的强化作用[J]. 环境科学学报, 2008, 28(10): 1961-1968.  
Jiang Chunyu, Sheng Xiafang, He Linyan, et al. Isolation and character of heavy metal-resistant strain WS34 and its effects on the phytoremediation of soils contaminated with lead and cadmium[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, 20(10): 1961-1968.
- [6] 杨卓, 王占利, 李博文, 等. 微生物对植物修复重金属污染土壤的促进效果[J]. 应用生态学报, 2009, 20(8): 2025-2031.  
YANG Zhuo, WANG Zhanli, LI Bowen, et al. Promotion effects of microorganisms on phytoremediation of heavy metals-contaminated soil[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(8): 2025-2031.
- [7] 郭学军, 黄巧云, 赵振华, 等. 微生物对土壤环境中重金属活性的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2002, 8(1): 105-110.  
GUO Xuejun, HUANG Qiaoyun, ZHAO Zhenhua, et al. Effects of microorganisms on the mobility of heavy metals in soil environment[J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2002, 8(1): 105-110.
- [8] 丁永祯, 李志安, 邹碧. 土壤低分子量有机酸及其生态功能[J]. 土壤, 2005, 37(3): 243-250.  
DING Yongzhen, LI Zhian, ZOU Bi. Low-Molecular-Weight organic acids and their ecological roles in soil[J]. Soils, 2005, 37(3): 243-250.
- [9] Naidu R, Harter R D. Effect of different organic acids on Cadmium sorption and extractability from soils[J]. Soil Sci Soc Am J, 1998, 62: 644-650.
- [10] Wasay SA, Barrington S, Tokunaga S. Organic acids for the in situ remediation of soils polluted by heavy metals: Soil flushing in columns[J]. Water, Air and Soil Pollution, 2001, 127: 301-314.
- [11] 徐岗, 李菊梅, 张青. pH 对黄棕壤重金属解吸特征的影响[J]. 生态环境, 2004, 13(3): 312-315.  
Xu Minggang, Li Jumei, Zhang Qing. Effect of pH on desorption of heavy metals from yellow brown earth[J]. Ecology and Environment, 2004, 13(3): 312-315.
- [12] Fischer F, Bipp H P. Removal of heavy metals from soil components and soils by natural chelating agents. II. Soil extraction by sugar acids[J]. Water, Air and Soil Pollution, 2002, 138: 271-288.
- [13] Siegel S M, Keller P, Siegel B Z, Galun E. Metal Speciation, Separation and Recovery. Proc Intern Symp[M]. Chicago: Kluwer Academic Publishers, 1986: 77-94.
- [14] Jones D L. Organic acids in the rhizosphere—A critical review[J]. Plant Soil, 1998, 205: 25-44.
- [15] 李新博, 谢建治, 李博文. 印度芥菜-苜蓿间作对镉胁迫的生态响应[J]. 应用生态学报, 2009, 20(7): 1711-1715.  
LI Xinbo, XIE Jianzhi, LI Bowen. Ecological response of Indian Mustard and Alfalfa Intercropping under Cadmium Stress[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(7): 1711-1715.
- [16] 张洪, 赖凡, 吕家格, 等. 氮肥对油菜根-土界面镉迁移及镉组分变化特征的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(2): 169-172.  
ZHANG Hong, LAI Fan, LU Jiake, et al. Effect of nitrogen fertilizer on Cd translocation and changes of Cd fractions at soil-root interface of rape[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(2): 169-172.
- [17] Jauert P, Schumacher T E, Boe A. Rhizosphere acidification and cadmium uptake by strawberry clover[J]. Journal of Environmental Quality, 2002, 31: 627-633.
- [18] Loosmore N, Straczek A, Hinsinger P. Zinc mobilization from a contaminated soil by three genotypes of tobacco as affected by soil and rhizosphere pH[J]. Plant and soil, 2004, 260(1/2): 19-32.
- [19] Interjit K. Plant phenolics in allelopathy[J]. The Bot. Rev, 1996, 62: 186-202.
- [20] 郑艺梅, 胡承孝, 郑晶, 等. 镉对小白菜叶绿素和抗坏血酸含量以及硝酸盐累积的影响[J]. 农产品加工, 2006, 58(3): 7-11.  
ZHENG Yimei, HU Chengxiao, ZHENG Jing, et al. Effects of molybdenum on content of chlorophyll and ascorbic acid and nitrate accumulation in Pakchoi[J]. Academic Periodical of Farm Products Processing, 2006, 58(3): 7-11.
- [21] 杨金凤, 卜玉山, 郭小燕, 等. 土壤外源镉、铅污染对油菜生长的影响研究[J]. 陕西农业科学, 2005(3): 25-28.  
YANG Jinfeng, BU Yushan, Guo Xiaoyan, et al. Effect of addition of Cd and Pb on rape growth in soil[J]. Shanxi Journal of Agricultural Sciences, 2005(3): 25-28.
- [22] 张义贤, 李晓科. 镉、铅及其复合污染对大麦幼苗部分生理指标的影响[J]. 植物研究, 2008, 28(1): 43-47.  
ZHANG Yixian, LI Xiaoke. Effects of Cd, Pb and their combined pollution on physiological indexes in leaf of the *Hordeum vulgare* Seedling[J]. Bulletin of Botanical Research, 2008, 28(1): 43-47.

## Effect of microbial inoculation on cadmium uptake by rape

JIA Ying, LI Bowen, LU Xiaojun, LI Yanli, LI Lili, WANG Xiaojuan

College of Resources and Environmental Sciences, Hebei Agricultural University, Baoding 071001, Hebei, China

**Abstract:** The study was conducted to investigate the effects of microbial inoculation on bioavailability of Cd in soil and Cd uptake by rape (*Brassica campestris*) as a Cd accumulator using a pot experiment. The results showed that strains JA1, JA2, JA4 promoted the biomass of rape, accounting for 17%, 28% and 32% respectively. Furthermore, strain JA1, JA2, JA4 inoculation enhanced the concentrations of available Cd in the soil by 25.9%, 59.2%, 41.9% and also increased the Cd concentrations in rape roots by 48.9%, 76.1%, 119% and in rape shoots by 26.8%, 48.8%, 65.9%, compared with the control (CK). However, strain JA3 decreased the concentrations of Cd in shoot of rape, inhibited Cd uptake and decreased the bioavailability of Cd by 14.6%, 11.8% and 13.6%. Meanwhile all treatments improved the contents of chlorophyll and soluble protein which are indices of rape quality.

**Key words:** soil contamination; microbial inoculation; cadmium; rape quality