

# 荠菜和油菜对镉污染土壤的修复效应研究

周旭丹, 赵春莉, 孙晓刚, 姜大崴, 才燕

(吉林农业大学 园艺学院, 吉林 长春 130118)

**摘要:**以荠菜(*Capsella bursa-pastoris*)和油菜(*Oilseed rape*)为试材,采用盆栽试验研究了荠菜和油菜对不同水平 Cd 污染的耐性及富集效应,并施加不同水平整合剂初步探讨了荠菜和油菜净化重金属污染土壤的应用潜力。结果表明:荠菜和油菜的株高、干重和叶绿素含量等在低水平 Cd 处理时轻微的促进,而在高水平 Cd 处理中受到抑制,在土壤 Cd 添加量为 120 mg/kg 时,荠菜和油菜的株高、干重和叶绿素含量达到最大;荠菜和油菜植株中脯氨酸含量随 Cd 添加量的增加而增加,当土壤 Cd 含量为 200 mg/kg 时,荠菜和油菜体内脯氨酸含量达到最高,分别比对照升高了 16.57、17.95 倍;荠菜和油菜体内 Cd 含量大小均表现为:地下部>地上部>籽实,各部位 Cd 含量均随着土壤 Cd 添加量的增加呈先增加后降低趋势,并在土壤 Cd 添加量为 120 mg/kg 时达到最大值,此后则急剧下降;荠菜和油菜不同部位 Cd 含量与不同水平处理 Cd 浓度之间的回归方程均达到显著性水平( $P<0.01$ ),间接表明添加 Cd 处理后土壤中 Cd 能被植物有效吸收,并且各部位对 Cd 的吸收主要依赖于土壤中 Cd 含量的变化;荠菜和油菜具有修复 Cd 污染土壤的潜力,二者对重金属 Cd 的吸收富集表现出较为一致的特点,但相比之下,荠菜对土壤中 Cd 的吸收富集能力强于油菜;荠菜和油菜地上和地下部 Cd 含量随着整合剂浓度的增加而逐渐增加,添加整合剂能明显提高荠菜和油菜对土壤中 Cd 的转运和吸收。

**关键词:**荠菜;油菜;镉污染;植物修复

**中图分类号:**Q 945.7 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2015)06-0167-06

随着现代化农业生产中各种重金属的农药和化肥的大量使用,土壤重金属污染问题日趋严重,通过食物链危及人类或动物的生命和健康<sup>[1-3]</sup>。因此,重金属污染土壤的修复和治理是全球面临的一个亟待解决的环境问题。镉(Cd)是毒性很强的重金属之一,在土壤中具有稳定、积累和不易消除等特点,通过在食物链中积累对人体及生态环境产生危害<sup>[4-6]</sup>。植物修复技术是目前较为完善的土壤 Cd 污染治理技术,利用超富集植物从土壤中大量富集重金属,通过收割植物后从土壤中带走重金属,以达到清除土壤污染的目的,寻找对 Cd 具有较高吸收能力同时又能够耐受 Cd 的毒性的植物成为植物修复技术的关键<sup>[7-9]</sup>。目前,全世界大约发现了 400 多种超富集植物,大多数超富集植物植株矮小,生物量低,生长缓慢,且大多没有经济效益,限制了植物修复技术的广泛应用<sup>[7-9]</sup>。因此,选择生物量高、对重金属吸收能力强、具有经济效益的植物(如油菜、玉米、向日葵、豌豆、燕

麦、大麦、荞麦、荠菜和白菜等),促进土壤中重金属的溶解并向地上部的运输,提高其修复效率已经成为当前该领域研究的新特点<sup>[1-3]</sup>。荠菜和油菜等十字花科芸苔属植物,荠菜和油菜生活期短、地上部生物量大,如果它们对重金属也具有较强的吸收富集能力,那么将其作为修复植物用于重金属污染土壤的修复具有重要的实际意义<sup>[10-12]</sup>。现采用盆栽土培试验法研究了土壤不同浓度梯度重金属 Cd 污染下荠菜和油菜的生长和累积效应及其对重金属 Cd 污染土壤的修复潜力,并对整合剂辅助下荠菜和油菜的修复效果进行了初步探讨,以期受 Cd 污染土壤的植物修复提供理论参考和科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试土样为采自吉林农业大学南门外的农田土(0~20 cm),土壤类型为黑钙土,自然风干后混合均匀,除去杂物,过 3 mm 筛,室温保存备用。

土壤基本理化性质为:pH 7.9(水土比为 2.5:1),阳离子交换量 172.3 mmol/kg,有机质 37.21 g/kg,全氮 2.56 g/kg,全磷 1.35 g/kg,全钾 48.76 g/kg,碱解氮 65.72 mg/kg,有效磷 597.30 mg/kg,速效钾 1.03 g/kg,全 Cd 含量 13.45 mg/kg。试验所用整合剂为:EDTA+

**第一作者简介:**周旭丹(1980-),女,讲师,研究方向为景观生态恢复。E-mail:xudanzhou1980@163.com

**基金项目:**吉林农业大学校内青年启动基金资助项目(201319);吉林省科技厅科研资助项目(20130206071NY)。

**收稿日期:**2014-11-12

乙酸(浓度比 2:1, pH 4.2), 供试作物为荠菜和油菜, 荠菜为大叶荠菜, 油菜为甘蓝型油菜, 购于长春市霞光种业公司。

## 1.2 试验方法

试验共分 6 个处理水平, 每个处理 3 次重复, 采用直径 48.8 cm、高 35.5 cm 带有托盘的塑料盆进行土培试验, 每盆盛过筛风干土 5.0 kg, 按照盆栽植物对养分的需求比例, 分别加入尿素、磷酸二氢钾和硫酸钾 1 500、350、300 mg/kg 作为底肥, 充分混匀。以分析纯  $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5 \text{H}_2\text{O}$  作为 Cd 污染试剂, 去离子水配成母液, 逐级稀释配成溶液, 其质量浓度分别为 0、40、80、120、160、200 mg/kg 设计 6 个处理, 分别喷洒到盆栽试验的土壤中, 边喷边搅拌, 以保证 Cd 的均匀分布, 保持土壤湿度为田间持水量的 60%~70%, 并在温室中稳定 21 d。

2013 年 3 月 20 日, 在吉林农业大学温室大棚中选取生长健壮, 长势和个体大小一致的荠菜和油菜幼苗分别移栽至盆中, 每盆 6 株。植物在自然光照下生长, 定期以称重法加自来水 (pH 7.0, 水中未检出  $\text{Cd}^{2+}$ ) 浇灌。幼苗移栽生长 40 d 后测定株高, 并采集叶片测定叶绿素、游离脯氨酸含量, 收获每个花盆的一半植株, 蒸馏水洗净整个植株 (分为地上、地下和籽实), 晾干, 在 105℃ 杀青 30 min, 70℃ 烘干至恒重, 电子天平称取各部分干重 (精确到 0.01 g), 烘干样品粉碎过 40 目筛, 用于测定重金属 Cd 含量; 50 d 后添加螯合剂 (共设 0、3、6、9、12、15 mmol/kg) 进行螯合强化试验, 加入螯合剂 15 d 后收获所有植株, 按照上述步骤测定植株各部分重金属 Cd 含量。

## 1.3 项目测定

1.3.1 植物生长及生理指标 直尺测定株高; 烘干称重法测定植物地上、地下和籽实干重; 80% 丙酮提取, 分光光度法测定叶绿素含量; 氨基水杨酸酸性茚三酮比色法测定游离脯氨酸<sup>[13]</sup>。

1.3.2 植物及土壤样品 Cd 含量测定 称取粉碎后的植物或者土壤样品 0.2 g, 放入聚四氟乙烯消解罐中, 润湿后加入混合酸 ( $\text{HNO}_3$  和  $\text{HClO}_4$  体积比为 5:1) 6 mL, 新仪 MDS6 型微波消解仪消解, 消解后的样品经加热赶酸后蒸馏水定容, 日立 Z-5000 型原子吸收分光光度计测

定其中的 Cd 含量 (测定条件为波长 283.3 nm, 狭缝宽 1.3 nm, 灯电流 9.0 mA, 空气流量 15.0 L/min, 燃气流量 2.2 L/min, 测量器高度 7.5 mm)。其中, 植物体内 Cd 含量富集系数 (BCF) = 地上部重金属含量 / 土壤重金属含量<sup>[14]</sup>。

## 1.4 数据分析

采用 Excel 2003 和 SPSS 17.0 软件进行数据统计和检验, 单因素方差分析 (One-way ANOVA), 显著性用 Tukey 法, Origin 7.5 软件作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同水平 Cd 处理对荠菜和油菜生长状况的影响

由表 1 可知, 土壤添加外源 Cd 在一定程度上影响了荠菜和油菜的生长, 其中, 当土壤 Cd 添加水平大于 120 mg/kg 时, 荠菜和油菜逐渐出现了植株矮小、叶片失绿、脱落等症状, 但并没有死亡。土壤添加外源 Cd 浓度不同, 荠菜和油菜的株高、地上部和根部干重都有所不同。不同水平 Cd 处理荠菜和油菜的株高和干重均表现出先增加后降低的趋势, 其中, Cd 浓度为 40 mg/kg 时, 油菜和油菜植株高、地上部和根部干重与对照差异不显著 ( $P>0.05$ ), Cd 浓度高于 40 mg/kg 时, 荠菜和油菜植株高、地上部和根部干重则显著增加 ( $P<0.05$ ), Cd 浓度为 120 mg/kg 时, 荠菜植株高、地上部和根部干重分别比相应对照增加了 13.10%、8.76% 和 13.00%, 油菜植株高、地上部和根部干重分别比相应对照增加了 10.63%、5.65% 和 12.96%。结果显示低水平的 Cd 对荠菜和油菜的生长有促进作用, 这可能是 Cd 的加入促使其它必需营养元素的离子更为有效所致; 当 Cd 的添加量高于 120 mg/kg 时, 荠菜和油菜株高、地上部和根部干重随着土壤 Cd 含量的增加而急剧降低, 且随着 Cd 处理水平的升高, 其下降幅度更大, 其中在 200 mg/kg 时, 荠菜植株高、地上部和根部干重分别比相应对照显著降低了 7.01%、14.14%、18.74%, 油菜植株高、地上部和根部干重分别比相应对照显著降低了 8.35%、16.57%、22.24%, 此时 Cd 对油菜的生长表现出显著抑制作用。

表 1 不同水平 Cd 处理下荠菜和油菜株高和干重

Table 1 Plant height and dry weight of *Capsella bursa-pastoris* and *Oilseed rape* under different Cd treatments

Cd 浓度 (mg·kg <sup>-1</sup> )	荠菜			油菜		
	株高/cm	地上干重/(g·株 <sup>-1</sup> )	地下干重/(g·株 <sup>-1</sup> )	株高/cm	地上干重/(g·株 <sup>-1</sup> )	地下干重/(g·株 <sup>-1</sup> )
0(CK)	54.2±2.4 b	5.02±0.54 b	0.523±0.12 b	52.7±2.9 b	5.13±0.64 b	0.517±0.29 b
40	55.8±3.5 b	5.14±0.32 b	0.533±0.35 b	53.8±3.5 b	5.18±0.35 b	0.522±0.34 b
80	60.7±2.7 a	5.32±0.46 a	0.582±0.21 a	56.7±3.6 a	5.34±0.58 a	0.571±0.28 a
120	61.3±2.9 a	5.46±0.067 a	0.591±0.28 a	58.3±2.7 a	5.42±0.69 a	0.584±0.35 a
160	54.9±3.4 b	4.68±0.52 c	0.531±0.31 b	51.2±3.8 bc	4.53±0.37 c	0.523±0.41 b
200	50.4±3.0 c	4.31±0.43 d	0.425±0.36 c	48.3±4.1 c	4.28±0.34 c	0.402±0.36 c

注: 不同小写字母表示差异显著 ( $P<0.05$ ), 下同。

Note: Different lowercase letters show significant different at 0.05 level, the same below.

## 2.2 不同水平 Cd 处理对油菜叶片叶绿素和脯氨酸含量

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生长能力的强弱<sup>[14-15]</sup>。脯氨酸是植物细胞内最重要的渗透调节物质之一,在正常环境下生长的植物体内脯氨酸含量较低,但在干旱、高盐、高温、冰冻、紫外线以及重金属等胁迫条件下,脯氨酸含量可显著增加,因此可将二者作为油菜对重金属 Cd 污染的耐性指标<sup>[15-16]</sup>。从表 2 可以看出,不同水平 Cd 处理芥菜和油菜叶绿素 a 和 b 含量均表现出先增加后降低的趋势,低水平(40 mg/kg)Cd 处理时,芥菜和油菜叶绿素 a 和 b 含量较对照有所增加但未达到显著水平( $P>0.05$ );当 Cd 的添加量在 40~120 mg/kg 时,芥菜和油菜叶绿素 a 和 b 含量显著增加;当 Cd 的添加量在 120 mg/kg 时,芥菜叶绿素 a 和 b 含量分别比相应对照增加了 11.67%和 13.38%,油菜叶绿素 a 和 b 含量分别比相应对照增加了 11.21%和 14.37%;当 Cd 的添加量高于 120 mg/kg 时,芥菜和油菜叶绿素 a 和 b 含量急剧下降,且随着 Cd 处理水平的升高,其下降幅度更大,当 Cd 的添加量为

200 mg/kg 时,芥菜叶绿素 a 和 b 含量分别比相应对照降低了 65.00%和 17.40%,油菜叶绿素 a 和 b 含量分别比相应对照降低了 62.93%和 15.97%。这表明高浓度的 Cd 胁迫对油菜叶片叶绿素造成严重的破坏,干扰了叶绿素的生物合成,影响了叶片光合能力。从表 3 还可以看出,各浓度 Cd 胁迫下芥菜和油菜叶片叶绿素 b 含量和叶绿素总量与叶绿素 a 含量的变化趋势基本一致,但 Cd 对叶绿素 a 的影响比叶绿素 b 更明显。

芥菜和油菜体内脯氨酸含量随着土壤 Cd 处理浓度的升高而增加,且各处理间及其与对照间均存在显著差异( $P<0.05$ ),当 Cd 的添加量高于 40 mg/kg 时,芥菜和油菜体内脯氨酸含量急剧上升,当 Cd 的添加量为 200 mg/kg 时,比对照相比,芥菜和油菜体内脯氨酸含量分别增加了 15.57、16.95 倍,这也证实油菜体内存在对重金属 Cd 胁迫的耐性机制,主要是由于脯氨酸在叶片中的积累一定程度上缓解了质膜损伤对植物造成的危害,有利于维持植物体内的代谢平衡,保持植物的正常生长。

表 2 不同水平 Cd 处理下油菜叶片的叶绿素和脯氨酸含量

Table 2 Chlorophyll and proline contents in leaves of *Capsella bursa-pastoris* and *Oilseed rape* under different Cd levels

Cd 浓度 (mg · kg <sup>-1</sup> )	芥菜			油菜		
	叶绿素 a (mg · kg <sup>-1</sup> )	叶绿素 b (mg · kg <sup>-1</sup> )	脯氨酸 (mg · kg <sup>-1</sup> )	叶绿素 a (mg · kg <sup>-1</sup> )	叶绿素 b (mg · kg <sup>-1</sup> )	脯氨酸 (mg · kg <sup>-1</sup> )
0(CK)	1.20±0.13 ab	0.523±0.042 b	75.9±9.8 f	1.16±0.07 bc	0.501±0.056 bc	69.4±7.5 f
40	1.23±0.08 b	0.525±0.052 b	100.5±13.6 e	1.17±0.09 b	0.520±0.042 b	93.7±11.8 e
80	1.31±0.07 a	0.582±0.024 a	532.4±24.7 d	1.26±0.14 a	0.564±0.039 a	493.5±21.8 d
120	1.34±0.15 a	0.593±0.062 a	729.7±29.4 c	1.29±0.05 a	0.573±0.049 a	698.3±18.7 c
160	0.93±0.03 c	0.462±0.033 c	1 023.4±35.2 b	0.72±0.07 c	0.446±0.053 c	924.7±25.4 b
200	0.42±0.04 c	0.432±0.029 c	1 257.8±30.1 a	0.43±0.03 d	0.421±0.022 c	1 245.4±39.6 a

## 2.3 油菜对重金属 Cd 的积累作用

由表 3、4 可知,芥菜地上部 Cd 浓度为 3.09~24.15 mg/kg,约为对照的 0.02~6.97 倍,地下部 Cd 浓度为 7.13~66.21 mg/kg,约为对照的 0.14~9.58 倍,籽实 Cd 浓度为 0.56~2.37 mg/kg,约为对照的 0.08~3.56 倍;油菜地上部 Cd 浓度为 2.21~17.80 mg/kg,约为对照的 0.42~10.41 倍,地下部 Cd 浓度为 4.56~53.78 mg/kg,约为对照的 0.92~21.60 倍,籽实 Cd 浓度为 0.59~4.35 mg/kg,约为对照的 1.27~15.73 倍;芥菜和油菜地上、地下部和籽实 Cd 含量均随着 Cd 处理水平

的增加呈先增加后降低趋势,低水平(40 mg/kg)Cd 处理时,芥菜和油菜地上部、地下部和籽实 Cd 含量较对照有所增加但未达到显著水平( $P>0.05$ );当 Cd 的添加量高于 40 mg/kg 时,芥菜和油菜地上部、地下部和籽实 Cd 含量急剧增加,当 Cd 的添加量达到 120 mg/kg 时,芥菜和油菜地上部、地下部和籽实 Cd 含量达到最大,之后略有降;芥菜和油菜土壤 Cd 浓度随着 Cd 处理水平的增加呈逐渐增加趋势,当 Cd 的添加量高于 40 mg/kg 时,芥菜和油菜土壤 Cd 浓度急剧增加,之后其增加幅度逐渐减小;二者对 Cd 的富集系数随着 Cd 处理水平的增加而逐

表 3 不同 Cd 处理水平下芥菜体内含 Cd 量

Table 3 Concentration of Cd in *Capsella bursa-pastoris* under different Cd concentrations

Cd 浓度 (mg · kg <sup>-1</sup> )	地上 Cd 浓度 (mg · kg <sup>-1</sup> )	根部 Cd 浓度 (mg · kg <sup>-1</sup> )	籽实 Cd 浓度 (mg · kg <sup>-1</sup> )	土壤 Cd 浓度 (mg · kg <sup>-1</sup> )	富集系数 (BCF)
0(CK)	3.03±0.52 d	6.26±1.23 d	0.52±0.08 c	36.56±3.45 d	0.083 a
40	3.09±0.24 d	7.13±0.77 d	0.56±0.07 c	67.18±5.28 d	0.046 b
80	8.08±0.78 c	15.78±2.12 c	1.23±0.12 b	197.26±9.79 c	0.041 b
120	24.15±2.34 a	66.21±5.74 a	2.37±0.11 a	635.48±13.56 b	0.038 b
160	19.63±3.13 b	55.78±6.62 b	1.68±0.23 ab	892.45±10.28 a	0.022 c
200	18.88±1.78 b	50.13±5.25 b	1.54±0.31 ab	993.78±16.41 a	0.019 c

表 4

不同 Cd 处理水平下油菜体内含 Cd 量

Table 4

Concentration of Cd in *Oilseed rape* under different Cd concentrations

Cd 浓度 ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	地上 Cd 浓度 ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	根部 Cd 浓度 ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	籽实 Cd 浓度 ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	土壤 Cd 浓度 ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	富集系数 (BCF)
0(CK)	$1.56 \pm 0.23 \text{ c}$	$2.38 \pm 0.54 \text{ c}$	$0.26 \pm 0.07 \text{ b}$	$23.15 \pm 2.45 \text{ e}$	0.067 a
40	$2.21 \pm 0.15 \text{ c}$	$4.56 \pm 0.92 \text{ c}$	$0.59 \pm 0.13 \text{ b}$	$63.25 \pm 5.12 \text{ d}$	0.035 b
80	$6.60 \pm 0.78 \text{ b}$	$18.73 \pm 3.14 \text{ b}$	$0.73 \pm 0.22 \text{ b}$	$235.7 \pm 9.38 \text{ c}$	0.028 bc
120	$17.14 \pm 1.36 \text{ a}$	$49.23 \pm 5.23 \text{ a}$	$3.86 \pm 0.46 \text{ a}$	$685.4 \pm 12.54 \text{ b}$	0.025 c
160	$17.80 \pm 0.97 \text{ a}$	$53.78 \pm 4.74 \text{ a}$	$4.35 \pm 0.52 \text{ a}$	$1\ 105.7 \pm 26.78 \text{ a}$	0.017 d
200	$16.34 \pm 1.78 \text{ a}$	$48.57 \pm 3.78 \text{ a}$	$3.12 \pm 0.31 \text{ a}$	$1\ 257.3 \pm 33.46 \text{ a}$	0.013 d

渐降低,并且均显著低于对照( $P < 0.05$ ),当 Cd 的添加量高于 120  $\text{mg}/\text{kg}$  时,二者对 Cd 的富集系数则急剧下降,当 Cd 添加量为 160、200  $\text{mg}/\text{kg}$  时,荠菜和油菜对 Cd 的富集系数差异并不显著( $P > 0.05$ )。

#### 2.4 Cd 污染下荠菜和油菜的吸收效应

为揭示 Cd 污染下荠菜和油菜对土壤 Cd 的吸收规律,以不同水平处理 Cd 浓度为自变量  $x$ ,荠菜和油菜不同部位(地上和地下)Cd 含量为因变量  $y$ ,将荠菜和油菜各部位 Cd 含量与土壤中 Cd 含量之间的关系,拟合多元线性回归方程,并对数据进行偏相关分析。由表 5 可知,荠菜和油菜不同部位 Cd 含量与不同水平处理 Cd 浓

度之间的回归方程均达到显著性水平( $P < 0.01$ ),荠菜地上部和地下部 Cd 含量与不同水平处理 Cd 浓度的偏相关系数分别为 0.7923\*\* 和 0.8131\*\*,达到极显著正相关( $P < 0.01$ ),油菜地上部和地下部 Cd 含量与不同水平处理 Cd 浓度的偏相关系数分别为 0.9154\*\* 和 0.9387\*\*,达到极显著正相关( $P < 0.001$ )。这表明添加处理后土壤中 Cd 能被植物有效吸收,土壤 Cd 含量在一定程度上代表着土壤中 Cd 的有效量,在这种条件下,研究土壤中重金属 Cd 之间的关系,既能反映它们的植物有效性,又能说明土壤中 Cd 含量,具有较强的代表性。

表 5 荠菜和油菜不同部位 Cd 含量与不同水平处理 Cd 浓度之间的多元回归分析

Table 5 Concentration of different parts of Cd in *Capsella bursa-pastoris* and *Oilseed rape* under different Cd concentrations

物种	自变量(X)	多元回归方程	决定系数 $R^2$	显著性 $P$	偏相关系数 $r$
荠菜	地上 Cd 含量	$y = 40.950x - 54.123$	0.7876	0.000	0.7923**
	地下 Cd 含量	$y = 14.133x - 3.6837$	0.7935	0.000	0.8131**
油菜	地上 Cd 含量	$y = 64.646x - 102.49$	0.8536	0.000	0.9154**
	地下 Cd 含量	$y = 21.116x - 62.057$	0.8720	0.000	0.9387**

注: \*\* 相关性在 0.01 水平上显著(双尾), \* 相关性在 0.05 水平上显著(双尾)。

Note: \*\* Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed), \* Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

#### 2.5 螯合剂对荠菜和油菜吸收 Cd 的影响

由图 1 可知,在不同水平螯合剂处理下的油菜地上部和地下部 Cd 含量均明显高于相应对照(0  $\text{mmol}/\text{kg}$ ),而地上部的 Cd 量又明显高于同浓度的地下含量。其中,3~15  $\text{mmol}/\text{kg}$  螯合剂处理下荠菜的地上部含 Cd 量分别比对照增加了 1.83、5.35、10.81、12.39、15.23 倍,

地下部含 Cd 量分别比对照增加了 0.65、1.81、3.35、4.03、4.61 倍;油菜的地上部含 Cd 量分别比对照增加了 2.47、7.83、17.42、26.17、33.06 倍,地下部含 Cd 量分别比对照增加了 3.03、7.03、8.99、10.52、12.50 倍。相同螯合剂处理下,荠菜地上部和地下部 Cd 含量均高于油菜。

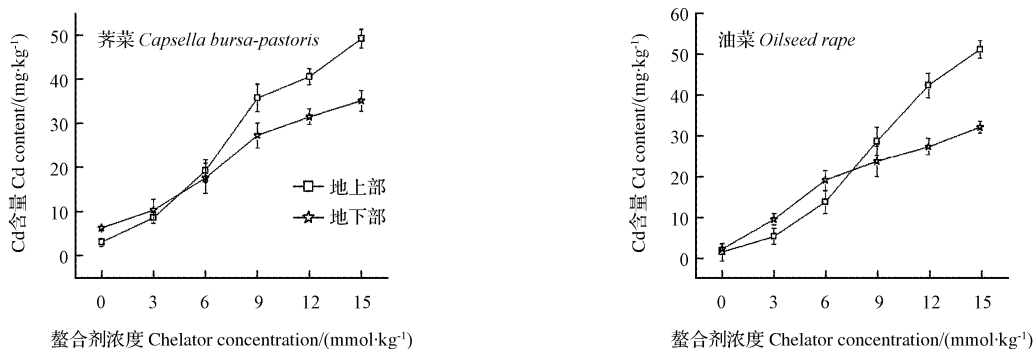


图 1 螯合剂对荠菜和油菜体内 Cd 含量的影响

Fig. 1 Effect of chelator on Cd concentrations in *Capsella bursa-pastoris* and *Oilseed rape*



### 3 讨论与结论

有关重金属植物修复方面的研究,国内外已经取得了重要进展,但有些问题仍待解决。该试验对荠菜和油菜的土壤重金属 Cd 修复效果进行了研究,结果表明,荠菜和油菜对土壤 Cd 污染具有一定的耐性,低浓度的 Cd 处理对油菜的生长表现促进作用,高浓度 Cd 处理抑制荠菜和油菜的生长,这与前人的研究结果相一致<sup>[15,17-19]</sup>。同时,重金属 Cd 可以引起荠菜和油菜的抗性反应,表现在油菜体内的游离脯氨酸含量随 Cd 浓度的升高而上升,二者表现为显著的正相关性。但这种耐性是有一定限度的,高于一定程度则会受到伤害,从而表现出植株矮化、叶片失绿等症状,该研究表明,120 mg/kg 可能是荠菜油菜受 Cd 毒害的临界浓度。

从该研究的结果来看,Cd 在油菜体内分布大小为:根部>地上部>籽实,其含量也随着土壤重金属 Cd 浓度的增加而提高,但这种增加是有限度的,超过限度就会对油菜造成伤害。荠菜和油菜地下部 Cd 含量及其变化幅度均明显高于地上部和籽实,二者吸收的 Cd 大都分布在植株地下部,表现出对 Cd 有较强的转移能力,而地上部和籽实吸收的 Cd 含量较低,对 Cd 的转移能力较低,这对于植物修复来说非常有利,荠菜和油菜对 Cd 的富集系数随着 Cd 处理水平的增加而逐渐降低,这可能是由于随土壤中 Cd 含量增加,其毒性也不断增强,对植物的机能造成损害也逐渐加重,从而抑制了植株对土壤 Cd 的吸收及向地上部转运的能力<sup>[14-15,18-19]</sup>,导致其地下部 Cd 含量相对较高,而荠菜和油菜这 2 种叶菜类植物对土壤 Cd 污染比较敏感,可以视其为重金属极重度累积型植物,也即荠菜和油菜能将重金属大量的富集在地下部,表现出一定的富集重金属的能力<sup>[17,20]</sup>,二者同为十字花科叶菜类植物,在对土壤 Cd 的吸收和富集上呈现出相一致的规律特点。综合结果来看,荠菜和油菜对土壤 Cd 的吸收能力均较强,具备超富集植物的潜能。但相比之下,荠菜的地上、地下和籽实 Cd 含量及其变化幅度均高于油菜,这说明与油菜相比,荠菜具有较强的吸收富集土壤中 Cd 的能力,修复 Cd 污染土壤的应用潜力较大。综上所述,荠菜和油菜均具有修复 Cd 污染土壤的潜力,今后应进一步对不同生长期体内 Cd 的动态变化进行研究,并对添加的螯合剂与常用的螯合剂 EDTA 之间的螯合效果进行对比分析,再进一步对它们的环境风险进行评价研究。

EDTA 是最常见的一种螯合剂,对很多重金属都有很好的螯合作用<sup>[14-15,18,21-22]</sup>,该试验所用的螯合剂为 EDTA 与乙酸的混合试剂,其摩尔比为 2:1,EDTA 与乙酸混合,一方面可以降低土壤 pH 值,有利于植物对 Cd 的吸收;另一方面,乙酸具有解毒作用,可降低重金属离子

对土壤微生物和植物的毒性<sup>[14-15,18,21-22]</sup>。该研究发现,当加入不同水平螯合剂以后,荠菜和油菜地上部 Cd 含量迅速上升,但是与未加螯合剂的对照相比,植株生长状况基本一致,除了少许叶片发黄外并未出现明显伤害,进一步表明了重金属 Cd 经过一定程度的螯合可能会降低它的生物毒性。根部的重金属含量增加远没有地上部明显,这说明螯合剂的施用有效活化了土壤中的 Cd,增强了 Cd 的生物可利用性,使其移动性大大增加。

该试验首次研究了 Cd 在油菜籽实中的分布特性,虽然与油菜其它器官相比油菜籽实积累 Cd 含量很少,但其含量仍高于其它植物,因此建议荠菜和油菜整体采收、晾晒后,进行籽实的分离,最后对焚烧灰分进行安全填埋处理,这样不仅能够对污染土壤进行修复,还能够取得一定经济效益。该研究中荠菜和油菜对 Cd 的修复效率虽然与超富集植物相比有较大差距,但在生物量上有明显的优势,该试验中辅助以螯合强化措施后,明显提高了二者对 Cd 的转运效率,如能应用分子生物学和基因工程技术,将超富集植物的遗传因子克隆给荠菜和油菜这类高产植物,培育重金属积累能力强、生物量大、适应性广的超积累植物是一种有前景的植物修复技术。

### 参考文献

- [1] Bai J, Xiao R, Cui B, et al. Assessment of heavy metal pollution in wetland soils from the young and old reclaimed regions in the Pearl River Estuary, South China[J]. Environmental Pollution, 2011, 159(3): 817-824.
- [2] Nwachukwu M A, Feng H, Alinnor J. Assessment of heavy metal pollution in soil and their implications within and around mechanic villages[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2010, 7(2): 347-358.
- [3] Wei B, Yang L. A review of heavy metal contaminations in urban soils, urban road dusts and agricultural soils from China[J]. Microchemical Journal, 2010, 94(2): 99-107.
- [4] Shi J, Yu X, Zhang M, et al. Potential risks of copper, zinc, and cadmium pollution due to pig manure application in a soil-rice system under intensive farming: a case study of Nanhu, China[J]. Journal of Environmental Quality, 2011, 40(6): 1695-1704.
- [5] Ji P, Sun T, Song Y, et al. Strategies for enhancing the phytoremediation of cadmium-contaminated agricultural soils by *Solanum nigrum* [J]. Environmental Pollution, 2011, 159(3): 762-768.
- [6] Meier S, Borie F, Bolan N, et al. Phytoremediation of metal-polluted soils by arbuscular mycorrhizal fungi[J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2012, 42(7): 741-775.
- [7] Moudouma C F M, Riou C, Gloaguen V, et al. Hybrid larch (*Larix × eurolepis* Henry): a good candidate for cadmium phytoremediation? [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2013, 20(3): 1889-1894.
- [8] Liu W, Zhou Q, Zhang Z, et al. Evaluation of cadmium phytoremediation potential in Chinese cabbage cultivars[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2011, 59(15): 8324-8330.
- [9] Stingu A, Volf I, Popa V I, et al. New approaches concerning the utilization of natural amendments in cadmium phytoremediation[J]. Industrial Crops and Products, 2012, 35(1): 53-60.
- [10] Wu F L, Lin D Y, Su D C. The effect of planting oilseed rape and compost

- application on heavy metal forms in soil and Cd and Cd uptake in rice[J]. Agricultural Sciences in China, 2011, 10(2): 267-274.
- [11] Yu L, Zhu J, Huang Q, et al. Application of a rotation system to oilseed rape and rice fields in Cd-contaminated agricultural land to ensure food safety [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2014, 108: 287-293.
- [12] Laurette J, Larue C, Mariet C, et al. Influence of uranium speciation on its accumulation and translocation in three plant species: Oilseed rape, sunflower and wheat[J]. Environmental and Experimental Botany, 2012, 77: 96-107.
- [13] 邹琦. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [14] 张守文, 呼世斌, 肖璇, 等. 油菜对 Cd 污染土壤的修复效应研究[J]. 西北植物学报, 2009, 29(1): 122-127.
- [15] 张守文, 呼世斌, 肖璇. 油菜对 Cd 污染土壤的植物修复[J]. 西北农业学报, 2009, 18(4): 197-201.
- [16] 刘建新, 王鑫, 王凤琴. 水分胁迫对苜蓿幼苗渗透调节物质积累和保

- 护酶活性的影响[J]. 草业科学, 2005, 22(3): 18-21.
- [17] 朱奇宏, 黄道友, 刘国胜, 等. 石灰和海泡石对镉污染土壤的修复效应与机理研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(1): 111-116.
- [18] 郭艳杰, 李博文, 杨华. 印度芥菜对土壤 Cd 的吸收富集效应及修复潜力研究[J]. 水土保持学报, 2009(4): 130-135.
- [19] 周海霞, 单爱琴, 孙晓非, 等. 甘蓝和油菜对镉污染土壤的修复研究[J]. 江苏环境科技, 2008, 21(1): 17-19.
- [20] 周建斌, 邓丛静, 陈金林, 等. 棉秆炭对镉污染土壤的修复效果[J]. 生态环境, 2008, 17(5): 1857-1860.
- [21] 蒋先军, 骆永明, 赵其国, 等. 镉污染土壤植物修复的 EDTA 调控机理[J]. 土壤学报, 2003, 40(2): 205-209.
- [22] 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.

## Research on Phytoremediation of Cadmium Polluted Soil by *Capsella bursa-pastoris* and Oilseed rape

ZHOU Xu-dan, ZHAO Chun-li, SUN Xiao-gang, JIANG Da-wei, CAI Yan  
(College of Horticulture, Jilin Agricultural University, Changchun, Jilin 130118)

**Abstract:** Taking *Capsella bursa-pastoris* and *Oilseed rape* as test materials, the Cd tolerance, uptake and accumulation of *Capsella bursa-pastoris* and *Oilseed rape* under different Cd concentration in soil, and to enhance the remediation effect by adding chelator was studied. The results indicated that low concentration of Cd could increase the plant height, dry weight and chlorophyll contents of oilseed rape to some extent, while high concentration of Cd restrain the growth of *Capsella bursa-pastoris* and *Oilseed rape*, when Cd concentration was 120 mg/kg, the plant height, dry weight and total chlorophyll content of *Capsella bursa-pastoris* and *Oilseed rape* was the highest. The proline content of *Capsella bursa-pastoris* and *Oilseed rape* increased with the increase of Cd in soil, when Cd concentration was 200 mg/kg, The proline content increased by 16.57 times and 17.95 times respectively compared with control. The accumulation of Cd in roots was much higher than that in shoots and seeds, the Cd contents in different parts of *Capsella bursa-pastoris* and *Oilseed rape* were significantly increased with the increase of Cd in soil, reached the highest content when Cd concentration was 120 mg/kg, after that, the Cd content were decreased sharply. The Cd contents in different parts of *Capsella bursa-pastoris* and *Oilseed rape* were significantly correlated with concentration of Cd in soil, which showed that the concentration of Cd in soil could be absorbed by plants effectively and the Cd contents in different parts were mainly depended on the concentration of Cd in soil. *Capsella bursa-pastoris* and *Oilseed rape* was a promising crop to be used for phytoremediation on Cd contaminated soil, and the characteristics of Cd absorption and accumulation by the two plants were uniform which *Capsella bursa-pastoris* was higher than *Oilseed rape*. The Cd contents of above-ground and under-ground of *Capsella bursa-pastoris* and *Oilseed rape* increased with the increase of chelator which could obviously improve the transshipment and absorption of Cd in soil.

**Keywords:** *Capsella bursa-pastoris*; *Oilseed rape*; Cd pollution; phytoremediation