

不同芥菜品种(系)对镉胁迫的响应

冯慧敏¹, 李海渤^{1*}, 万正杰², 吴昊¹, 林昌华¹, 陈晓远¹

(1. 韶关学院英东生物与农业学院, 韶关市芥菜工程技术研究开发中心, 广东 韶关 512005;

2. 华中农业大学园林园艺学院, 湖北 武汉 430070)

摘要: 为了解不同芥菜品种对 Cd 的响应和富集特征, 为芥菜安全生产和 Cd 污染土壤修复提供理论依据, 通过水培镉胁迫试验, 在 143 个芥菜品种(系)中筛选出 9 种长势较好的芥菜进行土壤盆栽试验, 分析不同 Cd 浓度(CK、处理 1、处理 2、处理 3 分别为 0、5、25、50 mg·kg⁻¹)对芥菜株高、鲜重、叶绿素的影响, 总结 Cd 在芥菜根和地上部的分布特征。研究发现, (1) 品种 5 在 3 个处理均未存活, 其他 8 个品种在处理 1 均可存活, 在处理 2 多数品种(品种 6、9 除外)可以存活, 在处理 3 均未存活; 与 CK 相比, 其株高、鲜重在处理 1 无显著变化, 在处理 2 显著下降。8 种芥菜叶绿素对 Cd 的响应规律不一致, 但多数品种(1、3、7、8、9)叶绿素 a 有下降趋势, 且处理 2 与 CK 相比, 下降显著。(2) 土壤 Cd 浓度在 5 mg·kg⁻¹ 以上时, 8 种芥菜均可富集 Cd, 不能作为低 Cd 吸收品种种植; 其地上部 Cd 富集系数均 >1、转运系数均 <1, Cd 的主要富集部位在根部, 品种 3、7、8 在处理 2 时地上部 Cd 含量(干重)接近 100 mg·kg⁻¹, 品种 2、4 在处理 1、处理 2 地上部 Cd 提取量高于 140 μg·株⁻¹。(3) 8 种芥菜均不属于 Cd 超积累植物, 但其在土壤中 Cd 浓度为 5 mg·kg⁻¹ 时生物量未受影响, 富集系数均 >1, 具备富集 Cd 的能力。可选品种 2、3、4、7、8 [即高 9、2017442297 (血经芥菜)、2017442241、澳洲清甜香油芥菜、香港甜脆竹芥] 修复 5 mg·kg⁻¹ 以下的 Cd 污染土壤。

关键词: 芥菜; 土壤; 镉; 胁迫; 污染; 响应

《全国土壤污染状况调查公报》显示, 我国耕地土壤污染物点位超标率达 19.4%, Cd 是主要污染物之一。土壤污染会进一步影响蔬菜的安全生产。据报道, 我国农田有多种蔬菜 Cd 超标, 如广东大宝山等地土壤 Cd 超标, 导致蔬菜等作物安全性降低, 大宝山矿附近的上坝村农田番薯叶、芥菜等 8 种蔬菜 Cd 超标率为 100.0%, 其地上部 Cd 含量平均超标 4.6 倍^[1]。土壤中 Cd 污染会影响植物的正常生长发育, 导致植株根部发黑腐烂、叶片萎蔫及发黄、植株生长发育缓慢甚至植株死亡^[2], 土壤中镉浓度为 6 mg·kg⁻¹ 时芥菜的生长和光合参数降低^[3]。因此, 研究芥菜对 Cd 的响应及富集特征, 对芥菜安全生产具有重要的意义。

不同蔬菜品种对 Cd 的吸收、富集能力及敏

感程度有所不同。Smigiel^[4]发现, 蔬菜对 Cd 富集能力大小为叶菜类蔬菜 > 根茎类蔬菜 > 瓜果类蔬菜。叶菜类蔬菜生长快、生物量大, 所以比其他蔬菜对 Cd 的吸收、富集能力高^[5]。印度芥菜因此优势被定义为 Cd 等重金属的超积累植物, 其地上部重金属浓度虽然没有重金属超积累代表植物遏蓝菜(*Thlaspi caerulescens*)高, 但其生物量大(在同样条件下, 其生物量是遏蓝菜的 10 倍以上), 重金属总吸收量和修复效率远高于遏蓝菜^[6-7]。郭瞻宇等^[8]对 21 种芥菜研究发现特选九头鸟大叶芥菜对 Cd 最敏感, 而包心芥菜耐性最高, 其地上部富集系数、转运系数均大于 1, 地上部 Cd 积累量最高可达 156.03 μg·株⁻¹, 具有修复 Cd 污染土壤的潜力。此外, 部分学者对重金属低吸收作物进行了一些研究, 旨在筛选出对重金属吸收能力弱的作物品种, 在污染土壤进行种植。如邹素敏等^[9]发现, 在 Cd 浓度为 0.859 mg·kg⁻¹ 的土壤上, 水东红灯笼脆甜芥菜、大坪铺大肉包心芥菜、大坪铺中迟熟包心芥菜均处于安全污染程度; Liu 等^[10]发现耐性白菜品种对 Cd 吸收能力较弱, 可作为低积累安全品种种植。

收稿日期: 2020-05-27; 录用日期: 2020-09-01

基金项目: 广东省自然科学基金(2018F030307006); 韶关市科技计划项目(2018sn056); 韶关学院校级科研项目(SY2018KJ04); 韶关市科技计划项目(2017sgtyfz401)。

作者简介: 冯慧敏(1981-), 女, 辽宁凌源人, 硕士, 农艺师, 从事土壤环境质量评价与土壤改良工作。E-mail: 3486017663@qq.com。

通讯作者: 李海渤, E-mail: lihai-bo@163.com。

我国芥菜种质资源丰富,作为印度芥菜的近源植物,从芥菜安全生产和Cd超积累植物筛选等方面考虑,有必要掌握芥菜对Cd的吸收、富集特征。目前对该方面报道的芥菜品种有限。本研究拟通过水培Cd胁迫试验从146种芥菜品种(系)中筛选出部分优势品种,进而开展土壤盆栽试验,研究不同芥菜对Cd的响应及富集能力,筛选出Cd富集或Cd低吸收芥菜品种,为土壤Cd污染修复及芥菜安全生产提供理论指导。

表1 供试土壤理化性质

pH	含水量 (%)	<0.01 mm 土粒 含量 (%)	有机质 (g · kg ⁻¹)	全氮 (g · kg ⁻¹)	碱解氮 (mg · kg ⁻¹)	有效磷 (mg · kg ⁻¹)	速效钾 (mg · kg ⁻¹)	全铜 (mg · kg ⁻¹)
4.52	5.73	62.01	16.46	0.83	130.13	78.63	237	0.07

1.2 水培试验

在韶关学院温室内搭建了可容纳146 L液体的水培池,采用漂浮种植方式进行水培试验,Cd浓度为2 mg · L⁻¹。2018年6月1日播种,首先在穴盘底铺一层纸巾防止种子漏入水中。种植至芥菜有5片真叶时,加入3 CdSO₄ · 8H₂O,水培28 d,每4 d更换一次溶液。营养液配方如下:KNO₃ (252.78 g · L⁻¹)、MgSO₄ (308.09 g · L⁻¹)、NaNO₃ (212.53 g · L⁻¹)、MgCl₂ (119.01 g · L⁻¹)、Na₂SO₄ (117.55 g · L⁻¹)、CaCl₂ (277.45 g · L⁻¹)、Ca(NO₃)₂ (590.38 g · L⁻¹)、KH₂PO₄ (136.09 g · L⁻¹)、NaH₂PO₄ (119.98 g · L⁻¹)、MoO₃ · H₂O (0.18 g · L⁻¹)、H₃BO₃ (2.86 g · L⁻¹)、ZnSO₄ (0.44 g · L⁻¹)、CuSO₄ (0.158 g · L⁻¹)、MnSO₄ (1.136 g · L⁻¹)、NaFeEDTA(8.422 g · L⁻¹)。

1.3 盆栽试验

2019年11月10日播种。首先在育苗盘中加入去离子水和一层纸巾,播入芥菜种子,于温室内加盖发芽36 h。土壤盆栽试验设置CK、处理1、处理2、处理3,共4个处理,Cd浓度依次为0、5、25、50 mg · kg⁻¹,每盆装风干土1.5 kg,复合肥(N-P₂O₅-K₂O=15-5-25)10 g,与3CdSO₄ · 8H₂O粉末混匀,加入去离子水使含水量为田间持水量的60%,静置3 d后移栽芥菜幼苗6~8株。生长7 d后间苗,每盆留下长势均匀的4株;芥菜生长期间保持土壤含水量为田间持水量的60%,每天观察植株长势、茎叶颜色变化,生长60 d后收获。

1.4 样品采集、处理及保存

土壤样品:除去土壤表面落叶等杂物后,将土

1 材料与方法

1.1 试验材料

芥菜品种为我国常见的143个芥菜品种(系);供试土壤采自广东省韶关学院英东生态园菜地耕层土壤(0~20 cm),风干、去杂物后,过2 mm筛,土壤理化性质见表1。水培试验泡沫穴盘规格为61.5 cm × 37 cm,84孔;盆栽试验用盆上缘直径为20 cm、底部直径为14 cm、高度为17 cm。

壤整盆倒出、橡皮锤敲碎后平铺置于阴凉干燥处风干后,研磨过2、0.15 mm尼龙筛,四分法取样,测定土壤含水量及Cd含量。

蔬菜样品:按照《GB/T 8855-2008 新鲜水果和蔬菜 取样方法》取样,采集蔬菜样品地上部及根部,用自来水洗出根系,洗净后用去离子水冲洗。用滤纸吸干表面水分后,测量株高、鲜重,并将地上部与根部切开后分别测定二者鲜重,在105℃下杀青30 min后,经80℃烘干8 h,称量地上部及根的干重,用食品加工器粉碎,装入自封袋中保存。

1.5 样品测定

测定方法:土壤pH采用电位法测定(水土比为2.5:1),土壤含水量采用烘干法测定,土壤碱解氮采用碱解扩散法测定,土壤有效磷采用碳酸氢钠浸提-紫外分光光度法测定,土壤速效钾采用NH₄OAc浸取-火焰光度法测定,土壤有机质采用油浴加热重铬酸钾氧化-容量法测定^[11],土壤中Cd采用硝酸-氢氟酸-高氯酸熔融-原子吸收分光光度法测定;芥菜中Cd的测定采用HNO₃-HClO₄消解,原子吸收分光光度法^[12]。

仪器设备:火焰原子吸收分光光度计、pH计、超纯水机、分析天平、离心机、植物粉碎机陶瓷研钵、不锈钢加热平板、电热鼓风干燥箱。

1.6 数据评价与处理

芥菜Cd含量的评价参照《GB2762-2017 食品安全国家标准 食品中污染物限量》^[13];富集系数(Bioaccumulation factor, BCF)和转运系数(Translocation factor, TF)计算公式如下:

富集系数 = 植物地上部 Cd 浓度 / 基质中 Cd 质量分数

转运系数 = 植物地上部 Cd 浓度 / 植物地下部 Cd 浓度

试验数据采用 Excel 2010 以及 SPSS 19.0 进行处理和统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同品种芥菜对水中 Cd 的吸收转运能力

通过水培 Cd 胁迫试验, 根据芥菜的株高和长势, 在 143 个芥菜品种中筛选出 9 个 Cd 耐性较好的品种: 高 19、高 9、2017442297 (血经芥菜)、2017442241、2017441467、丰成桂甜芥菜、澳洲清甜香油芥菜、香港甜脆竹芥、科研-日本光头芥菜, 分别编号为 1-9, 9 种芥菜地上部、地下部 Cd 的含量分别为 21.05 ~ 61.5、70.3 ~ 263 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (干重) (表 2), 均超过了《GB 2762-2017》中的标准值 0.2 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。初步证明 9 个芥菜品种具备一定的吸收 Cd 的能力, 不适宜作为低 Cd 吸收芥菜品种。9 个品种芥菜的转运系数为 0.018 ~ 0.051, 即芥菜地上部的 Cd 浓度均低于地下部, 说明其对 Cd 的主要富集部位在地下部。我国芥菜一般采用土培, 有必要设置不同浓度梯度, 开展土壤盆栽试验深入研究。

表 2 水培试验芥菜体内 Cd 浓度及其转运系数
(以干基计)

编号	品种	地上部 Cd 含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	地下部 Cd 含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	转运系数
1	高 19	50.73	477.74	0.106
2	高 9	61.50	246.67	0.249
3	2017442297 (血经芥菜)	25.75	319.25	0.081
4	2017442241	29.25	317.65	0.092
5	2017441467	52.05	338.56	0.154
6	丰成桂甜芥菜	21.05	470.71	0.045
7	澳洲清甜香油芥菜	52.05	978.94	0.053
8	香港甜脆竹芥	25.60	289.80	0.088
9	科研-日本光头芥菜	57.19	583.33	0.098

2.2 不同芥菜品种生长指标对土壤中 Cd 的响应

2.2.1 不同芥菜品种生长及存活情况对土壤中 Cd 的响应

对上述 9 个品种进行土壤盆栽试验。随着 Cd 浓度的增加, 各品种芥菜生长情况逐渐变差, 表现为叶片卷曲、枯黄、植株矮小, 甚至萎蔫死亡。其中, 品种 5 在处理 1、2、3 下均不能存活, 其他 8 个品种在处理 3 下均不能存活、在处理 2 下有大部分品种可以存活 (品种 6、9 死亡), 在处理 1 下均可存活 (表 3)。

表 3 各品种芥菜成活情况

编号	处理	是否存活	编号	处理	是否存活	编号	处理	是否存活
1	CK	是	4	CK	是	7	CK	是
	处理 1	是		处理 1	是		处理 1	是
	处理 2	是		处理 2	是		处理 2	是
	处理 3	否		处理 3	否		处理 3	否
2	CK	是	5	CK	是	8	CK	是
	处理 1	是		处理 1	否		处理 1	是
	处理 2	是		处理 2	否		处理 2	是
	处理 3	否		处理 3	否		处理 3	否
3	CK	是	6	CK	是	9	CK	是
	处理 1	是		处理 1	是		处理 1	是
	处理 2	是		处理 2	否		处理 2	否
	处理 3	否		处理 3	否		处理 3	否

2.2.2 不同芥菜品种生物量 (株高和鲜重) 对土壤中 Cd 的响应

株高和鲜重是衡量蔬菜生长状况的重要指标。随着 Cd 浓度的增加, 各品种的株高、鲜重均有所

下降, 处理 1 与 CK 相比差异不显著, 但处理 2 与 CK 相比显著下降 (表 4)。说明浓度为 5 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的 Cd 没有显著影响芥菜的生长, 而浓度为 25 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的 Cd 则显著影响其生长。

表 4 各品种芥菜株高、鲜重对 Cd 的响应

编号	处理	株高 (cm)	鲜重 (g)	编号	处理	株高 (cm)	鲜重 (g)
1	CK	18.30 ± 0.33a	20.40 ± 0.45a	6	CK	40.60 ± 0.23a	99.79 ± 0.78a
	处理 1	17.80 ± 0.43a	18.81 ± 0.34a		处理 1	38.00 ± 0.45a	97.45 ± 0.33a
	处理 2	13.70 ± 0.56b	12.10 ± 0.27b		处理 2	—	—
2	CK	24.20 ± 0.89a	65.62 ± 0.88a	7	CK	34.50 ± 1.23a	31.25 ± 0.48a
	处理 1	22.80 ± 0.55a	62.82 ± 0.67a		处理 1	32.90 ± 0.78a	30.50 ± 0.45a
	处理 2	20.60 ± 0.69b	46.80 ± 0.45b		处理 2	18.00 ± 0.45b	9.10 ± 0.99b
3	CK	31.80 ± 0.23a	39.94 ± 1.01a	8	CK	31.20 ± 1.02a	31.60 ± 0.78a
	处理 1	29.30 ± 0.12a	37.30 ± 0.71a		处理 1	28.90 ± 0.67a	29.40 ± 0.56a
	处理 2	16.20 ± 0.45b	14.01 ± 1.09b		处理 2	19.80 ± 0.45b	20.80 ± 0.41b
4	CK	26.50 ± 0.68a	47.23 ± 0.55a	9	CK	29.10 ± 0.46a	35.10 ± 0.45a
	处理 1	25.80 ± 0.89a	43.22 ± 0.97a		处理 1	26.10 ± 0.77a	33.70 ± 0.33a
	处理 2	17.10 ± 0.78b	36.35 ± 0.66b		处理 2	—	—

注：不同小写字母代表处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

2.2.3 不同芥菜品种叶绿素含量对土壤中 Cd 的响应

随着土壤 Cd 浓度的增加,各品种芥菜叶绿素 a 变化趋势不同:品种 6 显著增加,品种 2、4 变化不显著,其他品种(1、3、7、8、9)呈下降趋势,品种 1、8 在处理 1、2 均显著减少,品种 3、7、9 在处理 1 时未显著减少,在处理 2 时则显著减少;随着 Cd 浓度的

增加,叶绿素 b 和叶绿素总量的变化显著:品种 4、6 显著增加,品种 1、2 先下降后有所增加,品种 3、7、8、9 则显著下降;叶绿素 b 主要影响了叶绿素总量的变化趋势。随着 Cd 浓度的增加,叶绿素 a/b 的变化显著,品种 1、2、7 先增加后下降,品种 4、6 则显著降低,品种 3、8、9 显著增加(表 5)。

表 5 各品种芥菜叶绿素含量对 Cd 的响应

编号	处理	叶绿素 a ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	叶绿素 b ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	叶绿素总量 ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	叶绿素 a/b
1	CK	23.478 ± 0.005a	37.054 ± 0.004b	60.531 ± 0.001b	0.634 ± 0.000b
	处理 1	14.640 ± 0.001b	4.8390 ± 0.001c	19.479 ± 0.001c	3.026 ± 0.000a
	处理 2	10.444 ± 0.002c	52.613 ± 0.001a	63.057 ± 0.003a	0.199 ± 0.000c
2	CK	29.058 ± 0.038a	29.120 ± 0.023a	58.178 ± 0.034a	0.998 ± 0.002c
	处理 1	27.408 ± 0.001a	17.187 ± 0.001c	44.595 ± 0.001c	1.595 ± 0.000a
	处理 2	28.575 ± 0.000a	22.738 ± 0.001b	51.313 ± 0.001b	1.257 ± 0.000b
3	CK	27.243 ± 0.006a	44.024 ± 0.003a	71.266 ± 0.009a	0.619 ± 0.000c
	处理 1	28.186 ± 0.003a	17.648 ± 0.003b	45.834 ± 0.003b	1.597 ± 0.001b
	处理 2	9.142 ± 0.006b	2.855 ± 0.001c	11.997 ± 0.000c	3.202 ± 0.002a
4	CK	28.803 ± 0.006a	26.486 ± 0.004c	55.289 ± 0.008c	1.088 ± 0.020c
	处理 1	29.826 ± 0.057a	33.743 ± 0.099b	63.569 ± 0.151b	0.884 ± 0.001b
	处理 2	28.202 ± 0.004a	45.306 ± 0.007a	73.508 ± 0.011a	0.622 ± 0.022c
6	CK	12.450 ± 0.023b	6.445 ± 0.024b	18.894 ± 0.039b	1.932 ± 0.061b
	处理 1	27.847 ± 0.034a	18.561 ± 0.023a	46.409 ± 0.033a	1.500 ± 0.021a
	处理 2	—	—	—	—
7	CK	28.203 ± 0.015a	45.300 ± 0.017a	73.503 ± 0.032a	0.623 ± 0.002c
	处理 1	27.548 ± 0.000a	13.767 ± 0.004b	41.316 ± 0.004b	2.001 ± 0.001a
	处理 2	14.720 ± 0.001b	8.146 ± 0.001c	22.866 ± 0.020c	1.807 ± 0.003b
8	CK	27.845 ± 0.007a	44.375 ± 0.003a	72.220 ± 0.010a	0.627 ± 0.030c
	处理 1	16.160 ± 0.040b	7.647 ± 0.050b	23.807 ± 0.005b	2.113 ± 0.012b
	处理 2	10.886 ± 0.003c	3.285 ± 0.047c	14.171 ± 0.006c	3.315 ± 0.046a
9	CK	28.345 ± 0.043a	38.904 ± 0.008a	67.248 ± 0.060a	0.729 ± 0.019a
	处理 1	26.782 ± 0.009a	31.465 ± 0.017b	58.247 ± 0.009b	0.851 ± 0.087b
	处理 2	—	—	—	—

2.3 不同品种芥菜对土壤中 Cd 的富集特征

2.3.1 不同品种芥菜对土壤中 Cd 的吸收能力

植物体内 Cd 的含量是筛选 Cd 超积累植物的重要指标之一。供试芥菜地上部干重 Cd 含量为 $27.0 \sim 95.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (表 6), 鲜重 Cd 含量为 $2.70 \sim 9.55 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

不同芥菜品种的地上部和地下部 Cd 含量均随着土壤中 Cd 浓度的增大而显著增加, 即处

理 2> 处理 1>CK (品种 6、9 为处理 1>CK)。其中品种 7、8 的地上部 Cd 含量最高, 高达 $90 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。不同品种芥菜的地下部 Cd 含量均大于地上部, 也就是说各品种芥菜对 Cd 的富集部位均在地下部, 这一点同水培试验结果一致。

各品种不同处理地上部 Cd 含量大小为, 处理 1: $8>7>1>3>9>2>4>6$, 处理 2: $7>8>3>4>2>1$ 。从地上部 Cd 含量看, 品种 7、8、3 富集 Cd 的能力较强。

表 6 不同品种芥菜体内 Cd 含量、富集系数与转运系数

编号	处理	地上部含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	地下部含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	富集 系数	转运 系数	地上部提取量 ($\mu\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$)	地下部提取量 ($\mu\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$)	整株提取量 ($\mu\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$)
1	CK	ND	ND	—	—	—	—	—
	处理 1	$42.91 \pm 0.01\text{b}$	$98.74 \pm 0.45\text{b}$	3.93a	0.43a	$77.41 \pm 0.06\text{b}$	$14.77 \pm 0.08\text{b}$	$92.18 \pm 0.34\text{b}$
	处理 2	$43.16 \pm 0.05\text{a}$	$207.22 \pm 0.77\text{a}$	1.44b	0.21b	$210.67 \pm 0.04\text{a}$	$34.14 \pm 0.12\text{a}$	$244.81 \pm 0.23\text{a}$
2	CK	ND	ND	—	—	—	—	—
	处理 1	$33.90 \pm 0.23\text{b}$	$73.02 \pm 0.55\text{b}$	4.62a	0.46a	$178.71 \pm 0.08\text{b}$	$29.34 \pm 0.43\text{b}$	$208.05 \pm 0.34\text{b}$
	处理 2	$53.92 \pm 0.44\text{a}$	$313.62 \pm 0.67\text{a}$	1.60b	0.17b	$194.89 \pm 0.06\text{a}$	$76.72 \pm 0.12\text{a}$	$271.61 \pm 0.23\text{a}$
3	CK	ND	ND	—	—	—	—	—
	处理 1	$40.30 \pm 0.56\text{b}$	$55.41 \pm 0.77\text{b}$	4.23a	0.73a	$223.40 \pm 0.56\text{a}$	$36.14 \pm 0.89\text{a}$	$259.55 \pm 0.06\text{a}$
	处理 2	$87.57 \pm 0.67\text{a}$	$623.39 \pm 0.39\text{a}$	3.11b	0.14b	$82.66 \pm 0.67\text{b}$	$32.14 \pm 0.67\text{b}$	$114.81 \pm 0.04\text{b}$
4	CK	ND	ND	—	—	—	—	—
	处理 1	$33.54 \pm 0.09\text{b}$	$66.84 \pm 0.67\text{b}$	4.24a	0.50a	$399.74 \pm 0.22\text{a}$	$80.00 \pm 0.18\text{a}$	$479.75 \pm 0.09\text{a}$
	处理 2	$58.86 \pm 0.06\text{a}$	$165.16 \pm 0.33\text{a}$	1.58b	0.36b	$188.36 \pm 0.17\text{b}$	$54.83 \pm 0.06\text{b}$	$243.19 \pm 0.09\text{b}$
6	CK	ND	ND	—	—	—	—	—
	处理 1	$26.99 \pm 0.07\text{a}$	$43.58 \pm 0.77\text{a}$	2.35a	0.62a	$227.79 \pm 0.16\text{a}$	$42.66 \pm 0.09\text{a}$	$270.45 \pm 0.08\text{a}$
	处理 2	—	—	—	—	—	—	—
7	CK	ND	ND	—	—	—	—	—
	处理 1	$46.88 \pm 0.07\text{b}$	$177.98 \pm 0.66\text{b}$	7.04a	0.26a	$90.95 \pm 0.02\text{a}$	$30.08 \pm 0.03\text{a}$	$121.03 \pm 0.05\text{a}$
	处理 2	$95.53 \pm 0.13\text{a}$	$333.37 \pm 0.78\text{a}$	2.98b	0.29a	$60.19 \pm 0.01\text{b}$	$18.34 \pm 0.05\text{b}$	$78.52 \pm 0.04\text{b}$
8	CK	ND	ND	—	—	—	—	—
	处理 1	$57.35 \pm 0.56\text{b}$	$79.59 \pm 0.45\text{b}$	8.39a	0.72a	$82.79 \pm 0.02\text{b}$	$7.11 \pm 0.09\text{b}$	$89.90 \pm 0.04\text{b}$
	处理 2	$93.75 \pm 0.78\text{a}$	$180.09 \pm 0.67\text{a}$	3.29b	0.52b	$149.03 \pm 0.03\text{a}$	$33.14 \pm 0.04\text{a}$	$179.39 \pm 0.05\text{a}$
9	CK	ND	ND	—	—	—	—	—
	处理 1	$36.51 \pm 0.68\text{a}$	$63.17 \pm 0.23\text{a}$	5.20a	0.58a	$184.48 \pm 0.03\text{a}$	$64.37 \pm 0.02\text{a}$	$248.86 \pm 0.01\text{a}$
	处理 2	—	—	—	—	—	—	—

注: ND 表示未检出。

2.3.2 不同品种芥菜对 Cd 的富集系数及转运系数

供试芥菜品种地上部 Cd 的富集系数存在显著差异性, 且所有品种的富集系数在处理 1、处理 2 均大于 1 ($1.44 \sim 8.39$) (表 6), 说明不同品种芥菜地上部均具备富集 Cd 的能力。另外, 不同品种芥菜的富集系数均为处理 1> 处理 2, 即随着 Cd 浓度的增加, 地上部富集 Cd 的能力有所下降。

供试芥菜品种的转运系数均小于 1, 其范围为 $0.14 \sim 0.73$ (表 6), 即各品种芥菜富集 Cd 的部分主要为地下部。不同品种芥菜对 Cd 的转运系数变化规律为处理 1> 处理 2 (品种 7 处理 1、处理 2 间差异不显著), 即随着 Cd 浓度的增加, 芥菜对 Cd 的转运能力有所下降。

不同品种芥菜的富集系数在处理 1、处理 2 的大小顺序分别为: $8>7>9>2>4>3>1>6$ 、 $8>3>7>$

2>4>1; 转运系数在处理 1、处理 2 的大小顺序分别为: 3>8>6>9>4>2>1>7、8>7>4>1>2>3; 据此分析, 品种 3、7、8 富集 Cd 的能力较强。

2.3.3 不同品种芥菜对土壤中 Cd 的提取量

衡量植物对重金属的累积能力的另一个指标是植物单株提取重金属的量。供试芥菜地上部 Cd 的提取量为 60.2 ~ 399.7 $\mu\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$, 地下部 Cd 的提取量为 7.11 ~ 80.0 $\mu\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$, 整株提取量为 78.5 ~ 479.8 $\mu\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$, 且地上部提取量均大于地下部。其中, 品种 1、7、8 在处理 1 和品种 7 在处理 2 时均低于 140 $\mu\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$, 其他均高于 140 $\mu\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$ (表 6)。

随着土壤中 Cd 浓度的增加, 品种 1、2、8 对土壤中 Cd 的提取量也显著增加, 即处理 2>处理 1; 其他品种则呈现显著下降趋势, 即处理 1>处理 2, 原因是受生物量影响。

不同处理各芥菜品种的地上部提取量大小顺序为, 处理 1: 4>6>3>9>2>7>8>1; 处理 2: 1>2>4>8>3>7; 不同处理各芥菜品种的整株提取量大小顺序为, 处理 1: 4>3>6>9>2>7>1>8; 处理 2: 2>1>4>8>3>7。相对来说, 在处理 1 下品种 4、3、6、9、2 和处理 2 下品种 1、2、4、8 均大于 140 $\mu\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$, 综合来看, 品种 2、4 较占优势。

3 讨论

3.1 不同品种芥菜对水中 Cd 的吸收转运能力

超积累植物的重要特征: (1) 生长快、生物量大; (2) 对高浓度重金属污染有很好的耐受性; (3) 在地上部分积累金属的能力强; (4) 易收获^[14-15]。供试芥菜均具备生长周期短 (一般 60 d 左右可收获)、生物量大 (500 ~ 1000 g)、易收获等特点。水培试验中芥菜地上部 Cd 的含量均低于 100 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (Cd 超积累植物应达到的标准 100 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[16]), 试验设置的 Cd 浓度 2 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 较低, 使芥菜积累 Cd 的含量难以达到 100 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

3.2 不同芥菜品种生长指标对土壤中 Cd 的响应

据报道, 印度芥菜、东南景天对土壤中 Cd 的耐性均可高达 400 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[15, 17]; 龙葵对土壤中 Cd 的耐性可高达 200 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[18]。相比之下, 供试芥菜在土壤中 Cd 浓度为 50 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时均无法存活, 25 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时只有部分品种可以存活, 说明其对土

壤中 Cd 的耐性低于这些超积累植物。但除品种 5 外, 其他 8 个品种在 Cd 浓度为 5 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时均可存活, 有一定的耐性。

Cd 对芥菜生长有一定的影响。据报道, 土壤施用 6 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的 Cd^{2+} 45 d 后, 印度芥菜 (*Brassica juncea* L. cv. Varuna) 的根和地上部的长度、鲜重和干重分别比对照降低 28%、13.5% 和 18%^[3], 在 CdCl_2 浓度为 25、50、100、200 和 400 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理下, 印度芥菜根长、茎长、组织生物量总体呈下降趋势^[15]。如果在一定污染浓度下植物的生物量没有降低, 则说明该植物对该浓度污染具有一定的耐性^[17]。本研究供试 8 种芥菜的株高和鲜重对 5 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Cd 污染有一定的耐性, 在 Cd 浓度为 25 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时则受到显著影响而下降。虽然供试芥菜 Cd 耐性低于龙葵、东南景天和印度芥菜, 但 Cd 环境背景值通常为 0.02 ~ 2 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[15], 我国土壤 Cd 污染一般为 0.5 ~ 2 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[19], 其中 90% 以上属于中轻度污染 ($\text{Cd} \leq 1.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 见《全国土壤污染状况调查公报》)。在此情况下, 供试芥菜均可正常生长。

叶绿素是光合作用的物质基础, 其直接影响植物光合作用及物质合成速率, 进而影响植物长势和生长量。据报道, 土壤 Cd^{2+} 浓度为 6 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 芥菜叶绿素含量降低约 17%^[3]; 随着 Cd 浓度的增加, 叶片叶绿素总体呈下降趋势^[15]; 1 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Cd 处理下, 二道眉芥菜叶绿素含量降低 16.3%^[20]。Cd 可导致叶绿素 a 和叶绿素 b 浓度下降, Cd 浓度较高时 (2 ~ 12 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 叶绿素 a 降幅较大, 下降显著 ($P < 0.05$), 最大降幅 24.42%, 叶绿素 b 降幅较小, 最大降幅 16.67%, 且叶绿素 a/b 与 Cd 含量呈极显著负相关 ($P < 0.01$)^[21]; Cd 浓度为 50 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 印度芥菜叶绿素 a 水平稳定, 而叶绿素 b 水平显著下降^[22]。杨卓等^[23]对印度芥菜进行 Cd 胁迫 (0、40、80、120、160、200 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 研究发现, 叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素总量、叶绿素 a/b 均未呈现明显的规律性。综上, 多数研究表明, 叶绿素含量随着 Cd 浓度的增加有所下降, 但叶绿素 a 和叶绿素 b 的变化规律却不尽一致。本研究中 Cd 对叶绿素的影响规律不尽一致, 这点与杨卓等^[23]的研究结果相同。

3.3 不同品种芥菜对土壤中 Cd 的富集特征

供试芥菜地上部和地下部的 Cd 含量均超过《GB 2762-2017》中 0.2 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的标准, 说明

土壤 Cd 浓度高于 $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 供试芥菜均受到污染, 不能作为低 Cd 吸收品种种植, 是否适宜在 Cd 浓度低于 $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土壤上种植, 则需另外进行研究。目前对超积累植物评价标准之一是 Baker 等^[24] 的参考值, 即把植物叶片或地上部(干重)中含 Cd 量达到 $100 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 以上的植物称为超积累植物。印度芥菜地上部 Cd 含量可达 $376 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[25], 龙葵 Cd 含量可达 $387 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[26], 在浓度为 $400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的 Cd 处理下, HE- 东南景天 (*Sedum alfredii*) 地上部 Cd 含量接近 $3000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[17]。与之相比, 供试芥菜 Cd 含量较低, 未达到 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 原因之一是本试验设计的 Cd 浓度低于这些报道。杨卓等^[27] 研究发现 Cd 浓度为 $5.34 \sim 50.92 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 印度芥菜地上部 Cd 的含量为 $2.77 \sim 38.56 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 但当 Cd 浓度为 $40 \sim 200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 印度芥菜地上部 Cd 含量高达 $7.82 \sim 102.67 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[23]。因此, 土壤 Cd 的浓度是影响芥菜地上部 Cd 含量的重要因素。在 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时 8 种芥菜虽未存活, 但 $25 \sim 50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时它们是否能存活尚需研究。另外, 虽然 8 种芥菜地上部 Cd 含量低于 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 但部分品种(1、3、7、8) ($40.3 \sim 95.53 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 在处理 1、处理 2 均要超过同等浓度梯度下印度芥菜地上部 Cd 的最大含量 ($38.56 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[27], 且品种 3、7、8 在处理 2 时含量为 $87.57 \sim 95.53 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 已接近 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 因此, 这些品种 Cd 的富集能力也不容忽视。

在筛选超积累植物时一般以地上部的富集系数作为参考标准。植物的富集系数是该植株内某元素的浓度与该植株所生活环境中此种元素的浓度之比^[28]。一般地上部 Cd 富集系数大于 1, 则表示该品种是 Cd 超积累植物^[18, 29]。植物的 Cd 富集能力还包括对 Cd 的转移能力, 即植物根部从基质中吸收 Cd, 借助新陈代谢将 Cd 转运至地上部分的能力, 一般以转运系数衡量^[30]。一般认为, 超积累植物的富集系数与转运系数均应大于 1^[15], 所以本研究的 8 种芥菜均不满足这个条件。另外, 杨卓等^[27] 研究发现, 当土壤中 Cd 浓度为 $5.34 \sim 50.92 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 印度芥菜的 Cd 富集系数为 $0.35 \sim 1.20$, 即本研究富集系数均高于杨卓等报道的印度芥菜。另外, 郭瞻宇等^[8] 研究发现, Cd 浓度为 $1.23 \sim 43.90 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 包心芥菜 Cd 的富集系数为 $1.45 \sim 3.25$, 这个结

果也要高于杨卓等对印度芥菜的研究结果。陈院华等^[30] 在 $0.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Cd 浓度下筛选出 Cd 超积累品种: 精品棒菜、广西大肉甜芥菜富集系数分别为 1.07、1.69, 转运系数分别为 1.68、1.07。也就是说, 在我国芥菜中筛选出富集 Cd 能力高于印度芥菜的品种有很大可能性, 而印度芥菜因受地域限制, 在我国未大面积种植^[31]。随着 Cd 浓度的增加, 芥菜的富集能力和转运能力均有所下降, 分析可能是 Cd 浓度的增加影响了植株的正常生长发育, 生物量降低所致。这一点与印度芥菜的转运特征相同^[27]。

据报道, 包心芥菜地上部 Cd 累积量可达到 $156.03 \mu\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$ (土壤 Cd 浓度 $43.90 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 超过了龙葵单株提取量 ($142 \mu\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$)^[8], 而精品棒菜及广西大肉甜芥菜的地上部 Cd 提取量为 $1.713 \sim 1.501 \text{ mg} \cdot \text{株}^{-1}$ (土壤 Cd 浓度 $0.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[30]。本研究大部分品种地上部单株提取量较高 ($>140 \mu\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$), 但未超过低浓度的精品棒菜及广西大肉甜芥菜, 分析除了品种之间的差异外, 另一个主要原因是 Cd 浓度较高, 芥菜生物量降低, 影响了 Cd 的总累积量, 而精品棒菜及广西大肉甜芥菜的供试土壤 Cd 浓度仅为 $0.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 芥菜的生物量相对较大。

4 结论

Cd 胁迫可导致芥菜叶片皱缩、出现白斑、变暗绿色或逐渐失绿发黄, 甚至死亡, 8 种芥菜(1、2、3、4、6、7、8、9) 在土壤 Cd 浓度为 $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时均能存活, 在 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时均未存活, 大部分品种(品种 6、9 除外) 在 $25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时能存活; 在 Cd 浓度为 $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 8 种芥菜的株高、鲜重未显著减小, 对 Cd 有一定的耐性; 在 $\geq 25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时显著减小。随着土壤 Cd 浓度的增大, 大部分品种(1、3、7、8、9) 叶绿素 a 有下降趋势, 在 $25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时下降显著。

土壤 Cd 浓度高于 $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 8 种芥菜 Cd 含量均超标, 不属于低 Cd 吸收品种; 其地上部 Cd 含量(干重) 低于超积累植物的限值 $100 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$, 富集系数均大于 1, 转运系数均小于 1, 不属于真正的 Cd 超积累植物。虽未满足富集系数、转运系数同时大于 1 的条件, 但 8 种芥菜富集系数均大于 1, 且部分品种地上部 Cd 含量接近 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 地上部 Cd 提取量大于 $140 \mu\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$, 说明其具备

一定的Cd富集能力,与其他杂草类超积累植物相比,芥菜生长周期短、生物量大、易收获,与印度芥菜相比,8种芥菜在我国更易存活。因此,在土壤Cd浓度小于 $5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,可以选种部分品种[2、3、4、7、8,即高9、2017442297(血经芥菜)、2017442241、澳洲清甜香油芥菜、香港甜脆竹芥]进行Cd修复。

参考文献:

- [1] 曹春,张松,张鹏,等. 大宝山污灌区土壤-蔬菜系统重金属污染现状及其风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(7), 1521-1531.
- [2] Zhang D G, Liu Y H, Yang R P, et al. Influence of compound heavy metal pollution on three kinds of vegetables growth status and physiological and biochemical characteristics[J]. Applied Mechanics & Materials, 2013, (295-298): 100-103.
- [3] Shamsul H, Abrar A, Arif S W, et al. Regulation of growth and photosynthetic parameters by salicylic acid and calcium in *Brassica juncea* under cadmium stress[J]. Zeitschrift für Naturforsch C., 2014, 69(11-12): 452-458.
- [4] Smigiel D. Accumulation of heavy metals (Pb, Cd) in selected varieties of vegetables[J]. Roczniki Pfnstwowego Zfkfdu Higieny, 1994, 45(4): 279-284.
- [5] 欧阳喜辉,赵玉杰,刘凤枝,等. 不同种类蔬菜对土壤镉吸收能力的研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(1): 67-70.
- [6] 苏德纯,黄焕忠,张福锁. 印度芥菜对土壤中难溶态镉、铅的吸收差异[J]. 土壤与环境, 2002, 11(2): 125-128.
- [7] Blaylock M J, Salt D E, Dushenkov S, et al. Enhanced accumulation of pb in Indian Mustard by soil-applied chelating agents[J]. Environ. Sci. Technol., 1997, 31: 860-865.
- [8] 郭瞻宇,张子杨,蒋亚辉,等. 不同品种芥菜对镉胁迫的敏感性分布及抗氧化特征[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(12): 2660-2668.
- [9] 邹素敏,杜瑞英,文典,等. 不同品种蔬菜重金属污染评价和富集特征研究[J]. 生态环境学报, 2017, 26(4): 714-720.
- [10] Liu W, Zhou Q, An J, et al. Variations in cadmium accumulation among Chinese cabbage cultivars and screening for Cd-safe cultivars[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 173(1/2/3): 737-743.
- [11] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. 12-14, 275-288.
- [12] 宋静,钟继承,吴龙华,等. EDTA与EDDS螯合诱导印度芥菜吸取修复重金属复合污染土壤研究[J]. 土壤, 2006, 38(5): 619-62.
- [13] GB 2762-2017, 食品安全国家标准食品中污染物限量[S].
- [14] Alves S, Pinto A P, De Varennes A, et al. Phytoremediation potential of tobacco and *Brassica juncea* exposed to Cd stress[R]. 2nd International congress Energy and Environment Engineering and Management, 2007.128.
- [15] Sunayana G, Suchismita Das. A study on cadmium phytoremediation potential of Indian Mustard, *Brassica juncea* [C]. International Journal of Phytoremediation, 2015, 17: 583-588.
- [16] 魏树和,周启星,王新,等. 一种新发现的镉超积累植物龙葵(*Solanum nigrum* L.)[J]. 科学通报, 2004, 49(24): 2568-2573.
- [17] Xiong Y H, Yang X E, Zheng-qian Y E, et al. Characteristics of cadmium uptake and accumulation by two contrasting ecotypes of *Sedum alfredii* Hance [J]. Journal of Environmental Science and Health, 2005, 39(11/12): 2925-2940.
- [18] 魏树和,周启星,王新. 超积累植物龙葵及其对镉的富集特征[J]. 环境科学, 2005, 26(3): 167-171.
- [19] 康红,杨卓,王海林,等. 印度芥菜对土壤中重金属Pb、Cd、Zn的吸收与积累特性研究[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(34): 19378-19381.
- [20] 常鹏云,谢英荷,程红艳,等. 镉对6种根菜类蔬菜生长状况及品质的影响研究[J]. 天津农业科学, 2012, 18(1): 126-130.
- [21] 寇世伟,倪高风,马岚婷,等. Cd-Pb-Cu复合污染对芥菜生长及生理特性的影响[J]. 环境科学研究, 2011, 24(3): 281-286.
- [22] Kutrowska A, Arleta M, Aneta P, et al. Effects of binary metal combinations on zinc, copper, cadmium and lead uptake and distribution in *Brassica juncea* [J]. Journal of Trace Elements in Medicine and Biology, 2017, 44: 32-39.
- [23] 杨卓,陈婧,李博文. 印度芥菜生理生化特性及其根区土壤中微生物对Cd胁迫的响应[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(12): 2428-2433.
- [24] Baker A J M, Brooks R R. Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements: a review of their distribution, ecology and phytochemistry[J]. Biorecovery, 1989, 1(1): 811-826.
- [25] Salt D E, Prince R C, Pickering I J, et al. Mechanisms of cadmium mobility and accumulation in Indian mustard[J]. Plant Physiology, 1995, 109(4): 1427-1433.
- [26] Sun Y B, Zhou Q X, Diao C Y. Effects of cadmium and arsenic on growth and metal accumulation of Cd-hyperaccumulator *Solanum nigrum* L.[J]. Bioresource Technology, 2008, 1103-1110.
- [27] 杨卓,韩德才,李博文. 不同栽培条件下印度芥菜对重金属的吸收比较[J]. 环境科学研究, 2014, 27(3): 295-300.
- [28] 吴迪. 贵州典型铅锌矿区土壤-植物体系中重金属污染特征研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2010.
- [29] 董林林,赵先贵,张素娟,等. 污染土壤中植物富集重金属的差异性研究[J]. 土壤通报, 2009, 40(2): 374-377.
- [30] 陈院华,吕贵芬,杨涛,等. 镉污染土壤中不同芥菜品种镉富集能力研究[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(36): 125-127.
- [31] 苏德纯,黄焕忠. 油菜作为超积累植物修复镉污染土壤的潜力[J]. 中国环境科学, 2002(1): 48-51.

Response of different mustard varieties to cadmium stress

FENG Hui-min¹, LI Hai-bo^{1*}, WAN Zheng-jie², WU Hao¹, LIN Chang-hua¹, CHEN Xiao-yuan¹ (1. Henry Fok College of Biology and Agriculture, Shaoguan University, Shaoguan Mustard Engineering Technology Research and Development Center, Shaoguan Guangdong 512005; 2. College of landscape and Horticulture, Huazhong Agricultural University, Wuhan Hubei 430070)

Abstract: In order to understand the response and enrichment characteristics of different mustard varieties to Cd, and to provide theoretical basis for the safety production of mustard and the remediation of Cd contaminated soil, through the experiment of Cd stress in hydroponics, 9 mustard varieties with better growth were selected from 143 mustard varieties for pot experiment in soil. The effects of different Cd concentrations (0, 5, 25, 50 mg · kg⁻¹ for CK, treatment 1, treatment 2 and treatment 3, respectively) on plant height, fresh weight and chlorophyll of mustard were analyzed, and the distribution characteristics of Cd in mustard root and shoot were summarized. The results showed that: (1) Variety 5 did not survive in the three treatments with Cd, the other 8 varieties could survive in treatment 1, most of them (except for varieties 6 and 9) could survive in treatment 2, and none of them survived in treatment 3; their plant height and fresh weight did not change significantly in treatment 1, but decreased significantly in treatment 2. The responses of chlorophyll a to Cd in 8 varieties of mustard were not consistent, but most varieties (1, 3, 7, 8, 9) showed a downward trend, and it decreased significantly in treatment 2. (2) When Cd in soil was more than 5 mg · kg⁻¹, 8 kinds of mustard could enrich Cd, which can't be planted as low Cd absorbing varieties. Their shoot Cd bioaccumulation factor (BCF) was more than 1 and the translocation factor (TF) was less than 1, and their main enrichment site of Cd was root. The shoot Cd content (dry weight) of varieties 3, 7 and 8 was close to 100 mg · kg⁻¹ in treatment 2. The shoot Cd extraction amounts of varieties 2 and 4 were higher than 140 μg · plant⁻¹ in treatments 1 and 2. (3) All of the 8 mustard plants were not really Cd super accumulating plants, but their biomass was not affected when the Cd concentration was 5 mg · kg⁻¹ in the soil, and the BCF were more than 1, which had a certain Cd enrichment ability. So, varieties 2, 3, 4, 7 and 8 can be selected to remediate Cd polluted soil below 5 mg · kg⁻¹.

Key words: *Brassica juncea*; soil; Cd; stress; pollution; response