

用于修复土壤超积累镉的油菜品种筛选

王激清 茹淑华 苏德纯

(中国农业大学 农业部植物营养学重点实验室,教育部植物-土壤相互作用重点实验室,北京 100094)

摘要 以锌、镉超积累植物印度芥菜为对照,通过镉处理水培试验,从22个芥菜型油菜品种中筛选出了3个修复能力较高的品种。通过模拟镉污染土壤的土培试验,研究3个上述品种的累积镉特征及对镉污染土壤的修复效率。结果表明:在土壤镉含量为 $40\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 条件下,油菜川油-10的地上部生物量、相对生物量、地上部吸镉量及对土壤的净化率均高于对照植物印度芥菜和其他筛选出的油菜品种;当土壤镉含量为 $80\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,油菜川油-10的地上部镉含量达 $120\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以上,显著高于印度芥菜,具有明显的镉超积累特征和修复镉污染土壤的能力。

关键词 镉;污染;油菜;植物修复

中图分类号 S 634. 3

文章编号 1007-4333(2003)01-0067-04

文献标识码 A

Selection of a hyperaccumulator for phytoremediation of cadmium contaminated soil

Wang Jiqing, Ru Shuhua, Su Dechun

(Key Laboratory of Plant Nutrition, MOA, Key Laboratory of Plant-Soil Interactions, MOE, China Agricultural University, Beijing 100094, China)

Abstract The aim of this study was to select Cd accumulating oilseed rape varieties for phytoremediation of Cd contaminated soil. $3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd hydroponic culture experiment showed that three cultivars of oilseed rape had high above-ground biomass, Cd concentration and ability of absorbing Cd. Greenhouse pot trails using artificial Cd contaminated loam soil showed that the variety Chuanyou -10 had markedly higher above-ground biomass, relative biomass, Cd uptake amount and soil purification rate than Indian mustard and other oilseed rape varieties when soil Cd concentration was $40\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Cd concentration in the above-ground part of Chuanyou -10 was up to $120\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ when soil Cd concentration was $80\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. The results indicated that Chuanyou -10 was a potential phytoremediation cultivar for phytoremediating Cd contaminated soil.

Key words cadmium; contamination; oilseed rape; phytoremediation

土壤镉以移动性大、毒性高成为重金属污染中最受关注者,我国约有 $1.3\text{万}\text{ hm}^2$ 耕地受到镉污染^[1]。为降低镉的土壤污染,曾提出了隔离、客土、土壤淋洗、玻璃化、固体化处理等可行的物理、化学方法,但是障碍在费用高昂、有效作用时间短、效果不能达到安全水平,而且需专门技术^[2]。因此近几年提出采用特殊的超积累植物来提取修复镉污染土壤,然后移走植物体(主要是地上部)降低土壤镉含量。与上述传统的修复技术相比更简便、成本低、不造成二次污染^[3]。

目前公认超积累镉的植物只有1种即十字花科的遏蓝菜属(*Thlaspi caerulescens*),但它生长缓慢、植株矮小、地上部生物量小,应用受限。近几年发现印度芥菜(*Brassica junica*)对镉有一定的忍耐和积累能力,而且生物量较大,吸镉总量大大高于*Thlaspi caerulescens*^[4]。但印度芥菜有很强的地域性,我国很难大面积种植。从长期研究中发现印度芥菜所在的十字花科芸苔属植物中有很多种或品种具有上述特性^[5]。油菜(oilseed rape)是中国主要农作物之一,其中芥菜型油菜(*Brassica junica*)和印度芥菜是同属同

收稿日期:2002-07-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(20277045)

作者简介:王激清,硕士研究生;苏德纯,副教授,导师,主要从事重金属环境行为及植物修复研究,E-mail:dcsu@cau.edu.cn

种植物,又有迹象表明某些油菜在修复镉污染土壤的能力有可能超过印度芥菜,因此筛选这些中国油菜种质资源有很好的应用前景^[6]。

本试验目的是以印度芥菜为对照,通过水培研究几个油菜品种对镉的反应,作初步筛选,并进行模拟镉污染土壤修复土培试验,研究其生长及对镉的净化能力。

1 材料与方法

1.1 水培营养液配制

标准营养液组成 ($\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$): K_2SO_4 500、 KH_2PO_4 250、 MgSO_4 325、 NaCl 5.0×10^{-4} 、 H_3BO_3 8.0×10^{-6} 、 MnSO_4 10^{-6} 、 ZnSO_4 0.4×10^{-6} 、 CuSO_4 0.4×10^{-6} 、 Na_2MoO_4 10^{-7} 、 Fe-EDTA 4.0×10^{-6} 、 CaSO_4 10^{-3} 、 NH_4NO_3 10^{-3} ,每盆加入 CaCO_3 缓冲剂,以使维持 pH6.5。

1.2 供试材料

印度芥菜为对照,供筛选用有 22 个芥菜型油菜品种(表 1)。

试验用土壤采自本校科学园:中壤土,pH 值(水土比 5:1)为 7.66,土壤阳离子交换量为 $20.1 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$,有机碳含量为 1.26%,全镉含量为 $0.06 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效镉(DTPA-Cd) $0.02 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.3 试验方法

1.3.1 水培植株反应试验 从育苗盘中取 3 片真叶健康苗,转入营养液预培养 3 周,每周更换营养液,其含量:1/4、1/2 至全营养液,每天补充光照 14 h,24 h 连续通气。3 周后对油菜幼苗进行镉处理(CdSO_4 作为镉源),参考 Salt 等^[4]方法设加镉水平为 $3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,对照为不加镉的培养液,每个处理 3 次重复。42 d 后收获,进行植株镉含量分析。

1.3.2 土壤镉净化能力试验 采用土培盆栽试验,土壤设 CdSO_4 40、80 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 2 个镉水平,配成溶液,分别与过 2 mm 筛土壤反复混匀,在温室中稳定 7 d,并施入底肥,3 次重复。对照不加镉。待油菜和印度芥菜出苗后,每盆装土 400 g,保留 4 株。生长中用自来水浇灌,42 d 后收获,进行植株分析。

1.4 植株分析

沿植株基部切取,分为地上部(叶片及茎)和根,然后烘干、称重。为了观察镉在植株体内的累积规律,土培盆栽植株样品地上部分上、下两部分,下部为 4 片真叶和茎,未充分展开的叶片和茎作为上部

茎叶,分别测定镉含量。烘干样品用 $\text{HNO}_3 - \text{HClO}_4$ 消化,原子吸收光谱法测定其镉含量,计算各处理的地上部吸镉量和土壤净化率,数据用 SAS 软件进行统计检验。

表 1 镉处理油菜地上部的相对生物量、镉含量和吸镉量
Table 1 Shoot relative weight yield, Cd concentration and Cd uptake amount of oilseed rapes and Indian mustard grown in Cd culture solution Cd SO_4 $3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$

编号	品种名称	相对生物量* / %	镉含量/ ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	吸镉量/ ($\mu\text{g} / \text{株}$)
1	中双四号	16	336.8 l	8.98 j
2	中双五号	75	1 200 gh	108.0 hij
3	川油 92 - 021	37	1 461 cd	496.4 cd
4	川油 92 - 052	33	1 052 ij	340.0 defg
5	川油 93 - 002	65	1 163 hi	255.8 efghi
6	川油 93 - 005	83	747.5 k	39.86 ij
7	川油 93 - 0015	39	1 604 ab	146.7 ghij
8	川油 93 - 0030	75	1 417 cde	295.1 defgh
9	川油 932 下 - 9	66	1 021 j	263.6 efgh
10	川油 932 下 - 18	94	1 312 efg	196.8 fghij
11	川油 933029	74	1 355 def	396.5 def
12	川油 933029 (171)	65	1 053 ij	278.4 defgh
13	川油 - 10	82	1 677 a	1 005 b
14	川油 - 60	17	1 001 j	471.1 cde
15	蓬菜芥菜	88	1 262 fgh	189.3 fghij
16	白芥	81	970.2 j	2 397 a
17	SC94006	84	996.0 j	211.9 fghij
18	绵阳蚕油菜	81	1 255 ghf	309.0 defgh
19	南充红叶洋油菜	15	1 163 hi	301.4 defgh
20	江津马尾丝	19	1 363 cdef	677.1 c
21	威远马尾丝	11	1 495 bc	350.7 defg
22	北川黄菜籽	61	954.7 j	105.0 hij
23	印度芥菜,CK	80	1 330 defg	261.6 efghi

注:用 LSD 法检验处理间差异程度,品种之间无共同字母者表示差异达到 5% 显著水平,下同。

* 相对生物量是指植株在 $3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 镉营养液中的地上部干物重占 $0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 镉时的百分比。

2 结果与分析

2.1 高吸收累积镉油菜品种的筛选

植物提取修复的应用有 2 个前提,第一是植物组织能积累高含量的该种元素,其次是植物的生物量高^[7]。因此,该筛选试验主要从地上部相对生物量、镉含量、吸镉量 3 方面考虑。从表 1 中可以看出,相对生物量高于印度芥菜的品种有 7 个;镉含量高于印度芥菜的品种有 7 个,其中显著高出的为品

种 7、13、21 号,品种间吸镉量差异很大,高于印度芥菜的品种有 13 个,其中品种 3、13、16、20 显著高。综合 3 者考虑,可以得出:油菜品种 13、16、18 号的耐镉和吸镉的能力较高。

通过水培试验筛选出的油菜品种表现出了一定的耐镉和吸镉的能力,但筛选超积累镉品种的最终目的是为了净化镉污染的土壤,因此需进一步进行模拟镉污染土壤土培修复试验。

2.2 筛选油菜对镉污染土壤的修复及镉累积

2.2.1 供试植物地上部生物量及体内镉含量

印度芥菜和水培试验筛选出的 3 种油菜干重均随着土壤镉含量的增加呈现降低趋势,其中印度芥菜和川油 - 10 在土壤镉含量 $40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时降低均不显著,白芥却显著降低,可见白芥的耐镉能力较低,且在该条件下,川油 - 10 地上部干重高于印度芥菜、白芥和绵阳蛮油菜,这表明川油 - 10 在低含量的镉土壤条件下有比印度芥菜更强的耐镉毒的能力。当土壤镉含量达到 $80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,印度芥菜地上部生物量高于其他 3 种油菜,表现出更强的耐镉性(图 1)。

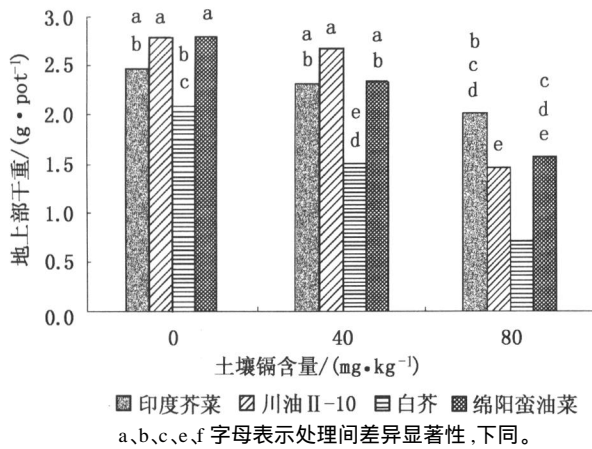


图 1 不同土壤镉含量油菜和印度芥菜地上部干重的变化
Fig. 1 Shoot dry weight yield of oilseed rapeseed and Indian mustard grown in different Cd concentration soil

随着土壤镉含量增加,印度芥菜和 3 种油菜上部茎叶镉含量显著增加。土壤镉含量为 $40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,3 种油菜上部茎叶镉含量均高于印度芥菜,其中白芥的差异达到显著性水准。当土壤镉含量增加为 $80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,这种趋势更明显,川油 - 10 显著高于白芥和绵阳蛮油菜,地上茎叶含镉量为 $123.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,高出印度芥菜 1 倍以上(图 2)。

从图 2 还可以看出印度芥菜和 3 种油菜下部茎

叶和上部茎叶的规律相同,但随着土壤镉含量的增加,下部茎叶镉含量显著增加。土壤镉含量为 $40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,川油 - 10 下部茎叶镉含量高于印度芥菜,而白芥、绵阳蛮油菜镉含量低于印度芥菜,但差异均不显著。当土壤镉含量增加为 $80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,川油 - 10、绵阳蛮油菜镉含量显著高于印度芥菜,此时川油 - 10 的含量高达 $171.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

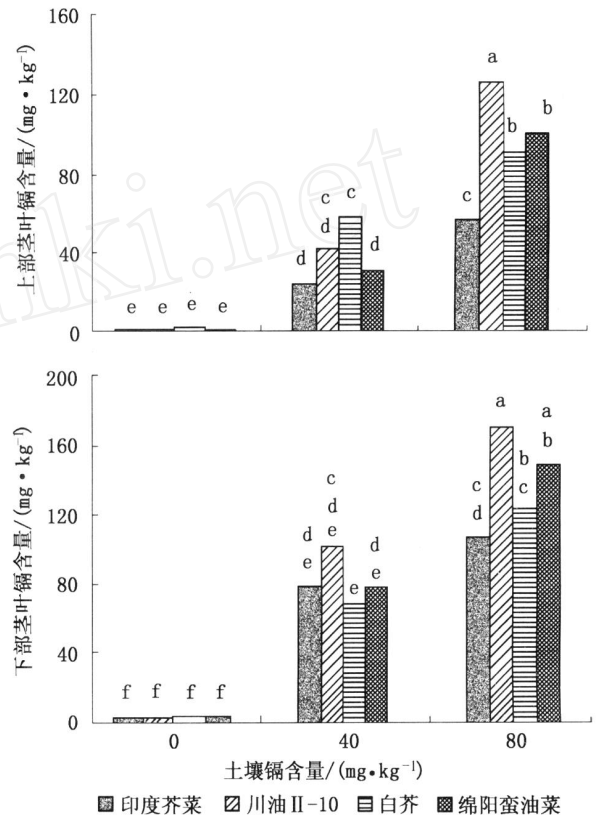


图 2 不同土壤镉含量油菜和印度芥菜上、下部茎叶镉含量
Fig. 2 Upper and lower shoot Cd concentration of oilseed rapeseed and Indian mustard grown in different Cd concentration soil

再者,在相同土壤镉含量处理下,印度芥菜和 3 种油菜下部茎叶的镉含量均高于上部茎叶,表明油菜吸收到体内的镉在下部茎叶积累量较大,这与前人的研究结果一致^[8]。

2.2.2 油菜和印度芥菜吸镉特征及对土壤净化率的比较

随着土壤镉含量的增加,3 种油菜和印度芥菜的吸镉量显著增加,在相同土壤镉含量处理条件下,川油 - 10 和绵阳蛮油菜的吸镉量均高于印度芥菜和白芥,其中在土壤镉含量为 $40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,川油 - 10 的吸镉量显著高于印度芥菜和另外 2 种油菜,达到 $204 \mu\text{g} \cdot \text{pot}^{-1}$,为印度芥菜的 1.6 倍

(表2)。

在土壤镉含量为 $40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,川油 - 10 的地上部相对生物量为 97%,高于印度芥菜、白芥和绵阳蛮油菜。这表明在该处理条件下,川油 - 10 有比印度芥菜和其他 2 种油菜更强的耐镉能力。

超积累植物吸收修复被重金属污染土壤的综合指标是净化率,即植物地上部吸收某种重金属的量与土壤中此种重金属总量的百分比^[6]。试验中土壤镉的背景值很低,所以每盆中投加的镉量视为总镉量。由 3 种油菜和印度芥菜生长 6 星期后对盆栽模拟镉污染土壤的净化率可看出,在此试验条件下,川油 - 10 在各镉含量土壤条件下均高于印度芥菜,土壤镉含量 $40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时达 1.2%。从表 2 还可以看出,随着土壤镉含量的增加,3 种油菜和印度芥菜的净化率明显降低,这是由于土壤镉含量太高,生物量显著下降所致。

表 2 不同土壤镉含量下油菜和印度芥菜吸镉特征和净化率
Table 2 Cd uptake and shoot removal rate of oilseed rapes and Indian mustard grown in different Cd concentration soil

土壤镉含量/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	品 种	地上部吸镉量/ ($\mu\text{g pot}^{-1}$)	地上部相对 生物量/ %	净化 率/ %
0(CK)	印度芥菜	4(ck).25 d	100	—
	川油 - 10	4.63 d	100	—
	白芥	5.52 d	100	—
	绵阳蛮油菜	5.36 d	100	—
40	印度芥菜	125 bc	94	0.8
	川油 - 10	204 a	97	1.2
	白芥	97.6 c	72	0.6
	绵阳蛮油菜	131 bc	83	0.8
80	印度芥菜	170 ab	82	0.5
	川油 - 10	217 a	53	0.7
	白芥	78.0 c	35	0.2
	绵阳蛮油菜	205 a	57	0.6

3 结 论

水培试验结果表明在筛选的 22 个油菜品种中,川油 - 10、白芥和绵阳蛮油菜无论地上部相对生物量、镉含量、还是吸镉量都高于或相当于目前公认的对照植物印度芥菜,具有超积累镉的能力。

进一步的土培试验结果表明,在川油 - 10、白芥和绵阳蛮油菜这 3 个芥菜型的油菜品种中,川油 - 10 的耐镉、吸镉能力及修复效率均明显高于印度芥菜和另外 2 个品种,是一种较好的用于修复镉污染土壤的植物种质资源。

参 考 文 献

- [1] 张从,夏立江. 污染土壤生物修复技术 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2000. 47~56
- [2] Black H. Absorbing possibilities: phytoremediation [J]. Environ Health Perspec, 1995, 103(17): 1106~1108
- [3] 骆永明. 金属污染土壤的植物修复 [J]. 土壤, 1999, 31(5): 261~265
- [4] Salt D E, Prince R C, Pickering I J, et al. Mechanisms of cadmium mobility and accumulation in Indian Mustard [J]. Plant Physiol, 1995, 109: 1427~1433
- [5] Ebbs S D, Lasat M M, Brady D J, et al. Phytoextraction of cadmium and zinc from a contaminated soil [J]. J Environ Quality, 1997, 26(5): 1424~1430
- [6] 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, 22(1): 48~51
- [7] 蒋先军,骆永明,赵其国. 土壤重金属污染的植物提取修复技术及其应用前景 [J]. 农业环境保护, 2000, 19(3): 179~183
- [8] McKenna I M, Chaney R L, Williams F M. The effects of cadmium and zinc interactions on the accumulation and tissue distribution of zinc and cadmium in lettuce and spinach [J]. Environ Pollution, 1993, 79: 113~120