

镉超富集苋菜品种 (*Amaranthus mangostanus* L.) 的筛选

范洪黎, 周 卫

(中国农业科学院农业资源与农业区划研究所 / 农业部作物营养与施肥重点实验室, 北京 100081)

摘要: 【目的】苋菜在中国的分布很广, 品种资源丰富。通过筛选耐镉苋菜品种, 发掘镉污染土壤植物修复资源。【方法】采用溶液培养方法, 来自不同生态区域的 23 个苋菜品种 (*Amaranthus mangostanus* L.) 中筛选出具有镉超富集能力的品种; 采用赤红壤、黄棕壤、菜园土进行盆栽试验, 研究苋菜在土壤 Cd 浓度分别为 5、10、25 mg·kg⁻¹ 时, 对镉污染土壤的修复潜力。【结果】在溶液 Cd 浓度 3 mg·L⁻¹ 条件下培养, 苋菜品种天星米地上部镉含量高达 260 mg·kg⁻¹。在土壤 Cd 浓度 25 mg·kg⁻¹ 条件下, 苋菜天星米地上部镉浓度高达 212 mg·kg⁻¹, 富集系数达到 8.5, 地上部净化率达 3.8%, 各镉处理水平总生物量以及地上部生物量均未显著降低。【结论】苋菜天星米基本具备了镉超富集植物的特征, 可用于镉污染土壤的生物修复。

关键词: 苋菜; 镉; 超富集; 生物修复

Screening of Amaranth Cultivars (*Amaranthus mangostanus* L.) for Cadmium Hyperaccumulation

FAN Hong-li, ZHOU Wei

(Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Ministry of Agriculture Key Laboratory of Crop Nutrition and Fertilization, Beijing 100081)

Abstract: 【Objective】Amaranth (*Amaranthus mangostanus* L.) is widely distributed in China and China has abundant varieties, it can be served as a candidate of cadmium hyperaccumulators for phytoremediation by screening of amaranth cultivars which is tolerant to cadmium. 【Method】To obtain cadmium hyper-accumulator, Cd uptake in 23 amaranth cultivars from different ecological regions was investigated under hydroponic culture condition. Meanwhile, a pot experiment was established to probe phytoremediation potentiality of Cd contaminated soil by amaranth. Three treatments (Cd 5, 10 and 25 mg·kg⁻¹) were conducted using to red soil, yellow brown soil and vegetable soil. 【Result】The results showed that under hydroponic culture with Cd 3 mg·L⁻¹, the cadmium concentration in the shoots of the cultivar Tianxingmi reached 260 mg·kg⁻¹, and its total cadmium uptake was the highest among various cultivars. In the treatment of Cd 25 mg·kg⁻¹, the cadmium concentration in the shoots of the cultivar Tianxingmi reached 212 mg·kg⁻¹, while the bioaccumulation factor and shoot purification rate reached 8.50 and 3.8%, respectively. Further, the total biomass and shoot biomass were not decreased significantly in all Cd treatments. 【Conclusion】These results suggested that cultivar Tianxingmi is a typical Cd hyperaccumulator, and can be used in phytoremediation of Cd contaminated soil.

Key words: amaranth; cadmium; hyperaccumulation; phytoremediation

0 引言

【研究意义】中国土壤重金属污染中, 以镉污染最为严重, 污染面积约 1.4×10^4 hm²[1]。镉在土壤中移

动性大、毒性高, 采用传统的物理或化学方法去治理镉污染不仅成本高, 周期长, 而且容易造成二次污染[2]。植物修复是近十多年来发展起来治理重金属污染的新技术。该技术利用某些植物富集重金属的特性,

收稿日期: 2008-05-23; 接受日期: 2008-11-10

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目 (2002CB410809)

作者简介: 范洪黎 (1969—), 女, 浙江海宁人, 副研究员, 博士, 研究方向为土壤重金属污染生物修复。Tel: 010-82108635; E-mail: honglifan23@yahoo.com.cn。通信作者周 卫 (1966—), 男, 江西湖口人, 研究员, 博士, 研究方向为植物营养生理。Tel: 010-82108671; E-mail: wzhou@caas.ac.cn

通过超富集植物移去土壤中的污染元素, 达到修复环境的目的^[3]。该方法用于修复镉污染土壤的关键是寻找具有镉超富集特性的植物资源。【前人研究进展】目前已知公认的镉超富集植物是遏蓝菜 (*Thlaspi caerulescens*)^[4], 但它生长缓慢, 植株矮小, 地上部生物量小。印度芥菜 (*Brassica junica*) 对镉有较强的耐性和富集能力^[5], 且生物量较大, 但印度芥菜有很强的地域性, 在中国难以大面积种植。近几年又发现拟南芥 (*Arabidopsis halleri*)^[6]、宝山堇菜 (*Viola baoshanensis*)^[7]、东南景天 (*Sedum alfredii* H)^[8]、龙葵 (*Solanum nigrum* L.)^[9] 以及某些油菜品种^[1] 等具有超富集镉的能力。宝山堇菜地上部镉平均含量高达 $1\ 168\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 但镉生物富集系数平均只有 2.38; 东南景天主要是锌的超富集植物, 由于锌、镉化学性质有相似之处, 东南景天也可富集部分镉; 杂草植物龙葵在镉投加浓度为 $25\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 条件下, 茎和叶中镉含量分别为 103.8 和 $124.6\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 而十字花科植物油菜在镉投加浓度为 $80\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 条件下; 地上部茎叶镉

含量达到 $180\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。【本研究切入点】但这些植物种类或由于生物量小而应用受限, 或由于地域性强, 难以在中国大面积推广。国内的镉超富集品种虽然已有一定的应用前景, 但品种资源还相对有限。因此迫切需要发现更多新的种质, 以满足镉污染土壤的植物修复要求。【拟解决的关键问题】苋菜 (*Amaranthus mangostanus* L.) 在中国的分布很广, 品种资源丰富, 生长快且生物量大, 适于作为生物修复资源加以发掘。已有文献报导美国籽粒苋具有较强的镉富集能力, 其转运系数为 0.56 ^[10]。笔者通过水培试验, 对 23 个具有国内地域代表性苋菜品种镉的吸收能力进行筛选, 并用盆栽试验对筛选出来的苋菜品种镉富集能力进行评价, 以筛选典型的超富集镉的苋菜品种。

1 材料与方法

1.1 供试材料

23 个苋菜品种, 来自中国农业科学院蔬菜花卉研究所种质库。供试材料来源的生态区域列于表 1。

表 1 供试苋菜品种

Table 1 Ecological region of amaranth cultivars tested

编号 Cultivar No.	种质库代号 Germplasm No.	品种 Cultivar	生态区域 Ecological region
1	V09C0077	红苋菜 Hongxiancai	海南海口市 Haikou, Hainan
2	V09C0207	红苋菜 Hongxiancai	云南大理县 Dali, Yunnan
3	V09C0248	天星米 Tianxingmi	四川冕宁县 Mianning, Sichuan
4	V09C0303	临汝青叶苋菜 Linru qingyexiancai	河南临汝县 Linru, Henan
5	V09C0181	花园叶苋菜 Huayuanyexiancai	江西南昌市 Nanchang, Jiangxi
6	V09C0279	圆叶苋菜 Yuanyexiancai	广东从化县 Conghua, Guangdong
7	V09C0402	白叶苋菜 Baiyexiancai	湖南邵阳县 Shaoyang, Hunan
8	V09C0184	花尖叶苋 Huajianyexian	江西南昌市 Nanchang, Jiangxi
9	V09C0157	蝴蝶苋 Hudixian	江苏常州市 Changzhou, Jiangsu
10	V09C0262	绿尖叶苋 Lujianyexian	福建福州市 Fuzhou, Fujian
11	V09C0082	花叶苋菜 Huayexiancai	海南儋州 Danzhou, Hainan
12	V09C0183	碗叶苋 Wanyexian	江西南昌市 Nanchang, Jiangxi
13	V09C0050	泉州绿苋菜 Quanzhou luxiancai	福建泉州市 Quanzhou, Fujian
14	V09C0041	紫背阔叶苋 Zibeikuoyexian	福建南平市 Nanping, Fujian
15	V09C0016	红边苋菜 Hongbianxiancai	安徽合肥市 Hefei, Anhui
16	V09C0428	尖叶苋菜 Jianyexiancai	浙江兰溪市 Lanxi, Zhejiang
17	V09C0330	临颖柳叶苋 Lingying liuyexian	河南临颖县 Linying, Henan
18	V09C0385	花叶苋 Huayexian	湖北竹溪县 Zhuxi, Hubei
19	V09C0194	黄叶白米苋 Huangyebaimixian	上海上海市 Shanghai county
20	V09C0406	尖叶花边苋 Jianyehubianxian	江苏常州市 Changzhou, Jiangsu
21	V09C0222	一点红苋菜 Yidianhongxiancai	安徽马鞍山市 Ma'anshan, Anhui
22	V09C0009	绿尖叶苋 Lujianyexian	安徽宁国县 Ningguo, Anhui
23	V09C0424	绿苋菜 Luxiancai	云南东川市 Dongchuan, Yunnan

1.2 水培试验

营养液采用霍格兰营养液，其组成列于表 2。

将 23 个莧菜品种的种子消毒后播种于蛭石-草炭基质中培养，待长出 3~4 片真叶后，取生长一致的种苗移至装有 3 L 营养液的育苗盆中，同时加聚乙烯盖防止营养液见光。幼苗先在营养液中培养 2 周，其含量由 1/4、1/2 至全营养液。培养过程中每隔 2 d 更换 1 次营养液，pH 保持在 6.5，24 h 连续通气。环境温度光照/黑暗为 25℃/20℃，相对湿度（60%~70%），光照/黑暗时间为 14 h/10 h。

幼苗培养 2 周后进行加镉处理，以 $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$ 为镉源，参照 Salt 等方法^[5]，设加镉水平为 $3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，对照

为不加镉营养液，每处理重复 3 次。加镉培养 10 d 后收获，将莧菜分为根和地上部两部分，参照刘威以及 Yang 等方法^[7,11]，根先用蒸馏水洗净，再用 $20 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ $\text{Na}_2\text{-EDTA}$ 交换 15 min，最后用去离子水冲洗干净。地上部先用自来水冲洗，再用去离子水洗净，于 70℃ 烘干，称重，磨碎后测定全镉含量。

1.3 盆栽试验

选用赤红壤、黄棕壤、菜园土作盆栽试验，其中赤红壤和黄棕壤均已发育为水稻土，分别采自广东肇庆和浙江嘉兴，菜园土采自浙江嘉兴。所用土壤均为 0~20 cm 未受污染耕层土壤，盆栽试验时均过 2 mm 筛。供试土壤理化性状见表 3。

表 2 水培试验营养液配方

Table 2 Composition of the nutrient solution

组成 Composition	浓度 Concentration ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	组成 Composition	浓度 Concentration ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$	1.18	H_3BO_3	2.86×10^{-3}
KNO_3	0.51	$\text{MnCl}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$	1.81×10^{-3}
$\text{MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.49	$\text{ZnSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$	2.20×10^{-4}
KH_2PO_4	0.14	$\text{CuSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$	8.00×10^{-5}
FeEDTA	3.46×10^{-2}	$(\text{NH}_4)_6\text{MoO}_{24}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$	1.80×10^{-5}

表 3 盆栽试验土壤的理化性质

Table 3 Physical-chemical properties of the soils tested

土壤类型 Soil types	有机质 Organic matter ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	pH (H_2O)	碱解氮 Alkali-hydrolyzable nitrogen ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	速效磷含量 Available phosphorus ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	速效钾含量 Available potassium ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	阳离子交 换量 CEC ($\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$)	全镉含量 Total Cd ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	有效镉含量 Available Cd ($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)
赤红壤 Red soil	23.0	6.32	86.0	9.30	20.0	10.1	0.03	0.02
黄棕壤 Yellow brown soil	35.6	5.74	140	14.2	90.0	16.1	0.06	0.06
菜园土 Vegetable soil	34.3	5.30	194	16.1	180	19.6	0.06	0.03

供试莧菜品种为水培试验筛选出来的镉超富集品种。参照 Wei 等^[9]方法，3 种土壤均设置对照 Cd0、Cd5、Cd10、Cd25 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 4 个处理（分别用 Cd0、Cd5、Cd10、Cd25 表示），每处理重复 3 次，装盆前加入 $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$ 溶液，每盆装土 750 g。基肥施入量为 N 0.15 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ， P_2O_5 0.15 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ， K_2O 0.1 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。土壤稳定 1 个月后播种，每盆播种 10 粒，定植 5 株。培养期间用去离子水浇灌，每 3 d 浇 1 次，每次浇灌 50 ml，土壤湿度保持在 80% 田间持水量。环境条件同水培试验。

莧菜出苗后 45 d 后收获，植株样品处理同溶液培养试验。

1.4 测定方法

植株全镉采用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ (4 : 1, v : v) 消化^[12]，土壤全镉采用 HCl-HClO_4 (4 : 1, v : v) 消化^[13]，有效态镉采用 DTPA 提取，等离子体发射光谱法 (ICP-AES) 方法测定植株及土壤中镉浓度^[14]。

1.5 数据处理

采用 SAS 软件进行方差 (ANOVA) 统计分析^[14]，Excel 软件拟合图形。

2 结果与分析

2.1 镉超富集莧菜品种的筛选

植物提取修复应用有两个前提，第一是植物组织能积累高含量该元素；其次是有镉环境中植物的生物

量高^[15]。因此, 筛选试验主要从地上部相对生物量(加镉处理地上部干重与无镉处理之比)、镉浓度、镉累积量 3 方面考虑。从图 1 可以看出, 1、2、3、15、16、19 号品种相对生物量接近于 1。

表 4、表 5 结果显示, 不同苋菜品种对镉的反应差异很大, 地上部及根系的镉浓度范围分别为 32.4~260 mg·kg⁻¹ 和 137~633 mg·kg⁻¹, 地上部及全株的镉累积量范围分别为 44.5~962.8 μg/plant 和 114.7~1 315 μg/plant。其中 1、2、3、4 号品种地上部及根系镉浓度均明显高于其它品种, 3 号天星米苋菜地上部镉浓度最高, 其地上部及全株的镉累积量分别达到 962.8 和 1 315 μg/plant, 在所有供试品种均为最高, 并且地上部镉累积量是根系镉累积量的 2.74 倍, 说明吸收的镉大部分转移到地上部。因此苋菜品种天星米具有较强的镉富集能力。

与天星米不同, 14 号品种紫背阔叶苋在加镉条件下不仅生物量低(图 1), 而且地上部镉含量在所有

供试品种中较低, 仅为 48.3 mg·kg⁻¹(表 4), 是典型的耐镉品种。

2.2 镉超富集苋菜对镉污染土壤的修复潜力

2.2.1 镉处理对苋菜天星米生物量的影响

用供试的天星米苋菜在赤红壤、黄棕壤、菜园土 3 种土壤上进行 Cd 0、Cd 5、Cd 10、Cd 25 mg·kg⁻¹ 4 个处理试验。图 2 结果显示, 与对照(Cd 0)比较, Cd 5 和 Cd 10 mg·kg⁻¹ 处理天星米根、茎、叶生物量均未发生显著变化($P < 0.05$); Cd 25 mg·kg⁻¹ 处理菜园土中苋菜天星米根及赤红壤的茎虽显著降低, 但相对生物量均达到 0.8 以上, 其它部位生物量也未发生显著变化。不同土壤培养苋菜生物量有较大差异, 以菜园土培养的生物量最大, 赤红壤最小, 所有处理根系生物量范围为 0.15~0.55 g/plant, 茎生物量范围为 0.34~1.15 g/plant, 叶片生物量范围为 1.22~2.84 g/plant, 这与供试土壤基本理化性质有关。

从图 2 还可看出, 最大生物量多出现在 10 mg·kg⁻¹

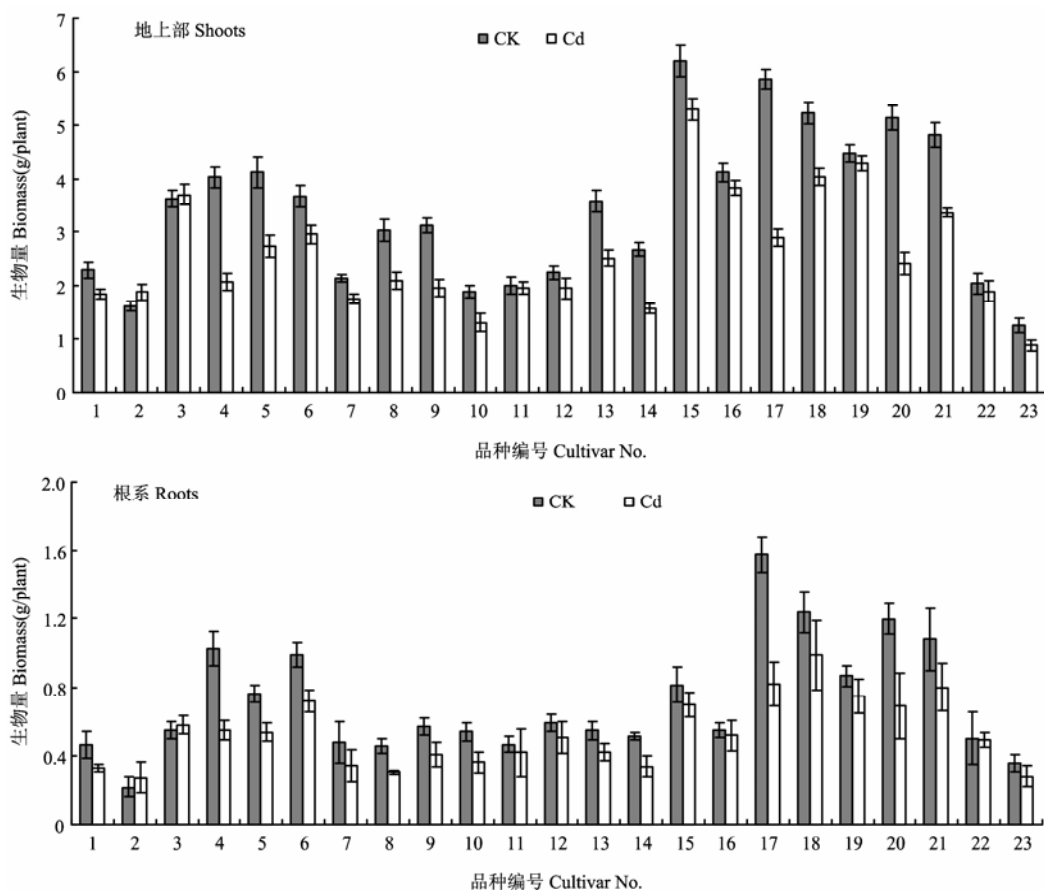


图 1 水培条件下镉处理对不同苋菜品种生物量(干重)的影响

Fig. 1 Effect of Cd treatment on the biomass (DW) of amaranth cultivars in solution culture experiment

表 4 水培条件下不同苋菜品种的镉浓度

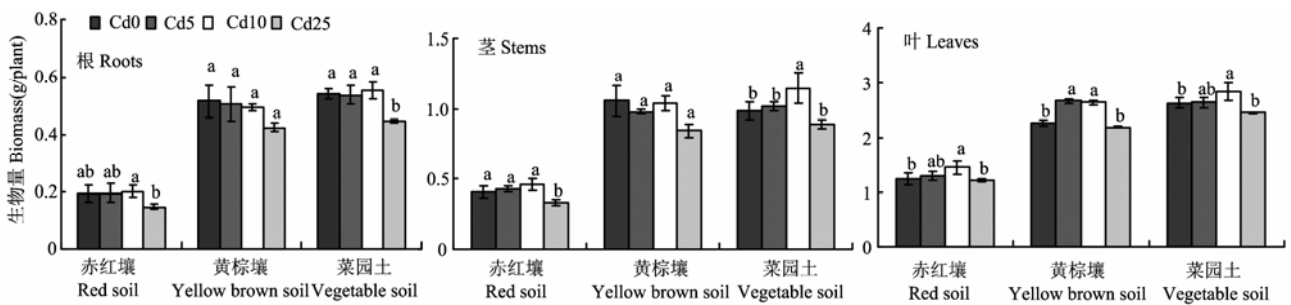
Table 4 Cd concentration of amaranth cultivars in solution culture experiments

编号 Cultivar No.	地上部镉浓度 Cd concentration in shoots (mg·kg ⁻¹)	根系镉浓度 Cd concentration in roots (mg·kg ⁻¹)	冠根浓度比 Ratio of shoot Cd concentration to root Cd concentration
1	230	555	0.41
2	186	598	0.31
3	260	604	0.43
4	235	633	0.37
5	126	257	0.49
6	96.7	210	0.46
7	32.4	189	0.17
8	112	246	0.46
9	58.7	137	0.43
10	53.0	165	0.32
11	57.4	145	0.40
12	114	233	0.49
13	51.0	150	0.34
14	48.3	204	0.24
15	102	243	0.42
16	172	432	0.40
17	79.2	227	0.35
18	156	431	0.36
19	79.8	304	0.26
20	108	306	0.35
21	144	316	0.46
22	158	321	0.49
23	50.2	247	0.20
<i>LSD</i> _{0.05}	19.8	37.9	

表 5 水培条件下不同苋菜品种的镉累积量

Table 5 Cd accumulation of amaranth cultivars in solution culture experiments

编号 Cultivar No.	地上部镉累积量 Cd accumulation in shoots (μg/plant)	根系镉累积量 Cd accumulation in roots (μg/plant)	总镉累积量 Total Cd accumulation (μg/plant)
1	424.8	185.4	610.1
2	351.3	166.2	517.5
3	962.8	352.0	1315
4	488.6	348.9	837.5
5	345.0	138.4	483.4
6	285.7	151.6	437.2
7	56.9	65.6	122.5
8	234.0	76.2	310.2
9	115.2	55.8	171.0
10	69.5	60.3	129.8
11	112.7	61.1	173.8
12	222.5	118.7	341.3
13	128.4	63.9	192.4
14	75.4	69.5	144.9
15	540.1	170.4	710.5
16	659.1	225.1	884.2
17	229.4	186.0	415.4
18	631.2	425.0	1056
19	342.2	228.0	570.2
20	260.8	211.7	472.5
21	483.6	253.1	736.7
22	300.5	158.9	459.4
23	44.5	70.2	114.7
<i>LSD</i> _{0.05}	32.2	18.5	36.4



同一土壤不同小写字母表示差异达到 5% 显著水平 Different small letters in the same soil mean significant at 5% level

图 2 不同土壤镉含量对苋菜天星米生物量的影响

Fig. 2 Effect of soil Cd supply on the biomass of amaranth (cv. Tianxingmi)

加镉处理, 尤其在占生物量最大的叶片部分, 表现出 Cd 10 mg·kg⁻¹ 处理显著高于对照, 进一步证明天星米苋菜品种有较强的耐镉和吸镉能力。

2.2.2 镉处理对苋菜天星米镉浓度及生物富集系数的影响 表 6 显示, 3 种土壤上苋菜天星米的根、茎和叶镉浓度均随着土壤镉浓度的增加而升高, 表现为根>叶>茎。Cd 25 mg·kg⁻¹ 处理条件下, 叶片镉浓度均超过 100 mg·kg⁻¹, 以菜园土上的最高, 达到 234 mg·kg⁻¹; 茎镉浓度只有在菜园土上的超过 100 mg·kg⁻¹,

达到 154 mg·kg⁻¹, 但地上部镉浓度为 107~212 mg·kg⁻¹, 均超过 100 mg·kg⁻¹ (表 7), 达到镉超富集植物地上部镉浓度的临界标准 100 mg·kg⁻¹。不同土壤条件下苋菜镉浓度有一定差异, 可能与土壤基本理化性质有关。菜园土 pH 5.30, 在供试土壤中最低, 低 pH 有利于土壤镉活化, 易于植物吸收。Yanai 等^[16] 发现在 pH 4.4~7.6 的供试土壤中, pH 5.1 的土壤上植株的镉含量较高。这与本文结果相似。

生物富集系数 (EF) 为植物地上部镉浓度/土壤全

表 6 不同土壤镉浓度对苋菜天星米镉浓度的影响

Table 6 Effect of soil Cd supply on Cd concentration of amaranth (cv. Tianxingmi)

处理 Treatments		器官中镉浓度 Cd concentration in organs (mg·kg ⁻¹)		
		根 Roots	茎 Stems	叶 Leaves
Cd5	赤红壤 Red soil	35.8±1.0	21.5±0.8	28.6±1.5
	黄棕壤 Yellow brown soil	41.4±1.0	22.6±1.5	30.8±0.5
	菜园土 Vegetable soil	51.1±1.0	26.5±0.7	31.7±1.0
Cd10	赤红壤 Red soil	79.9±0.8	48.9±1.9	65.7±1.1
	黄棕壤 Yellow brown soil	94.1±1.8	48.0±1.1	66.7±1.8
	菜园土 Vegetable soil	128±2	58.8±1.0	86.0±0.4
Cd25	赤红壤 Red soil	228±6	89.0±1.0	112±2
	黄棕壤 Yellow brown soil	274±6	91.0±1.0	120±1
	菜园土 Vegetable soil	528±10	154±2	234±2

±为标准差 ± represent standard errors

表 7 不同土壤镉浓度对苋菜天星米生物富集系数的影响

Table 7 Effect of soil Cd supply on bioaccumulation factor of amaranth (cv. Tianxingmi)

处理 Treatments	地上部镉浓度 Cd concentration in shoots (mg·kg ⁻¹)	地上部生物富集 系数 Bioaccumulation factor	
Cd5	赤红壤 Red soil	26.9	5.38
	黄棕壤 Yellow brown soil	28.6	5.72
	菜园土 Vegetable soil	30.2	6.04
Cd10	赤红壤 Red soil	61.7	6.17
	黄棕壤 Yellow brown soil	61.4	6.14
	菜园土 Vegetable soil	78.2	7.82
Cd25	赤红壤 Red soil	107	4.28
	黄棕壤 Yellow brown soil	118	4.71
	菜园土 Vegetable soil	212	8.50

镉浓度^[11]。由于 3 种土壤是无污染土壤, 土壤镉背景值很低, 因此土壤全镉浓度采用镉处理浓度, 分别为

5、10、25 mg·kg⁻¹。表 7 结果显示, 赤红壤和黄棕壤在 Cd 10 mg·kg⁻¹ 处理生物富集系数最大, 分别为 6.17 和 6.14, 而菜园土在 Cd 25 mg·kg⁻¹ 处理生物富集系数最大, 达到 8.50。

2.2.3 镉处理对苋菜天星米镉累积量及净化率的影响 图 3 结果显示, 3 种土壤上天星米苋菜根、茎和叶镉累积量均随着土壤镉处理浓度的增加而升高, 其中叶片镉累积量最大, 地上部均大于根系。Cd 25 mg·kg⁻¹ 处理条件下, 全株镉累积量为 200~947 μg/plant, 地上部为 166~711 μg/plant, 以菜园土培养的苋菜镉累积量最大, 且地上部是根系的 3.01 倍。说明土壤培养条件下, 天星米不仅镉的吸收量大, 而且能将吸收的镉大部分转移到地上部, 是一种理想的镉超富集植物。

超富集植物修复重金属污染土壤的综合指标是净化率^[1]。净化率=植物吸镉总量(镉累积量)/土壤总镉量×100%。由于供试土壤的镉背景值很低, 所以每盆投加镉的量视为总镉量。以全株和地上部吸镉总量

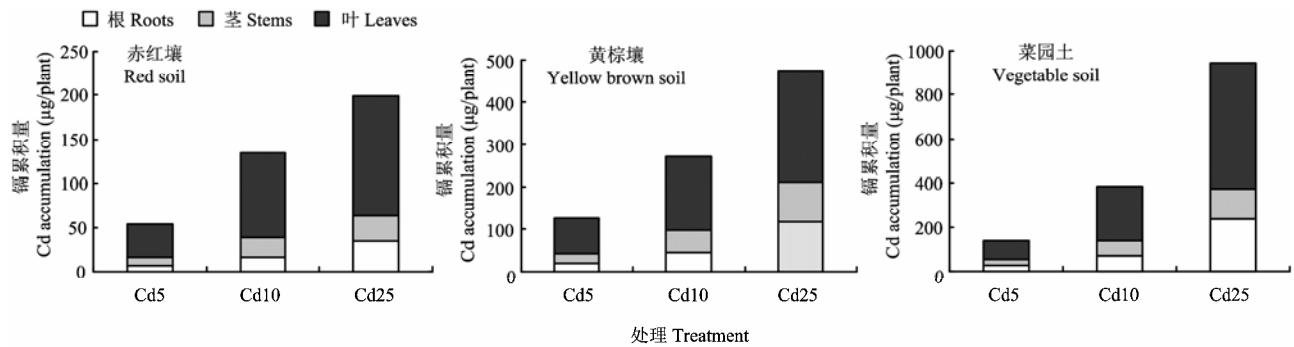


图 3 不同土壤镉浓度对苋菜天星米镉吸收量的影响

Fig. 3 Effect of soil Cd supply on Cd accumulation of amaranth (cv. Tianxingmi)

计算,可分别得出全株和地上部净化率。从表 8 可以看出,3 种土壤上天星米全株和地上部净化率均在 Cd 10 mg·kg⁻¹ 处理下达到最高,其中又以菜园土为最高,全株和地上部净化率分别为 5.1% 和 4.2%。Cd 25 mg·kg⁻¹ 处理天星米苋菜的全株和地上部净化率也分别达到 5.1% 和 3.8%,显示出很好的生物修复潜力。

表 8 苋菜天星米对镉污染土壤的净化能力
Table 8 Purification rate of amaranth (cv. Tianxingmi) against cadmium contaminated soil

处理 Treatments	全株净化率 Purification rate in plant (%)	地上部净化率 Purification rate in shoot (%)	
Cd5 赤红壤 Red soil	1.4	1.2	
	黄棕壤 Yellow brown soil	3.3	2.8
	菜园土 Vegetable soil	3.7	2.9
Cd10 赤红壤 Red soil	1.8	1.6	
	黄棕壤 Yellow brown soil	3.6	3.0
	菜园土 Vegetable soil	5.1	4.2
Cd25 赤红壤 Red soil	1.1	0.9	
	黄棕壤 Yellow brown soil	2.5	1.9
	菜园土 Vegetable soil	5.1	3.8

3 讨论

最初提出的超富集植物的衡量标准只有一个,要求植物地上部分的重金属含量要高于一定的标准值,采用较多的是 Baker 和 Brooks 提出的参考值^[17],即植物叶片或地上部分(干重)中 Cd 含量达到 100 mg·kg⁻¹; As、Co、Cu、Ni、Pb 达到 1 000 mg·kg⁻¹; Mn、Zn 达到 10 000 mg·kg⁻¹。现已发现 400 余种超富集植物基本

是以此标准认定的。而更为严格的标准还要求超富集植物地上部重金属含量大于根部^[18-20]。Wei 等^[12]人最新研究认为,超富集植物还应具有耐性特征和高富集系数特征。耐性特征要求当植物地上部重金属含量达到超富集植物临界含量标准时,其地上部生物量没有下降^[9,12]。富集系数特征是指地上部富集系数大于 1^[6],至少植物地上部重金属含量达到超富集植物临界含量标准时,其地上部富集系数大于 1^[9,12]。实际上,对于植物修复的超富集植物品种来说,植物地上部重金属含量/土壤重金属含量(即富集系数)比单纯植物地上部重金属含量更为重要^[21]。由于植物对重金属的吸收转运受土壤性质影响^[16],某些报道的超富集植物其富集系数并未大于 1^[4,22],实际对污染土壤的修复效率并不高。根据超富集植物衡量标准,天星米苋菜在土壤 Cd 投入浓度 25 mg·kg⁻¹ 条件下,其地上部镉含量最大达到 212 mg·kg⁻¹,超过 100 mg·kg⁻¹ 临界含量标准;总生物量、地上部生物量没有显著降低,对 Cd 有较强耐性;富集系数最大,为 8.5,远大于 1 的标准。天星米苋菜虽然地上部镉浓度低于根系,但由于其镉吸收量远高于根系,且根系的镉可大量运往地上部,可用于镉污染土壤的植物修复。因此,苋菜天星米是镉超富集植物品种。

目前研究最多的镉超富集植物是 *T. caerulescens*,在自然矿业废弃地其种群镉平均含量为 164 mg·kg⁻¹^[4],而生长于法国的两个种群具有很高的镉富集能力,地上部镉含量高达 2 800 mg·kg⁻¹^[23]。Dahmani-Muller 等发现 *A. halleri* 在野外条件下叶片可富集到镉 250 mg·kg⁻¹^[24],而另一研究得出自然条件下其地上部分只可富集到 80.6 mg·kg⁻¹^[25],可见不同植物生态型植物对镉的吸收差异很大^[23,26]。此外, Kupper

等发现, 水培条件下 *A. halleri* 地上部和根系含量分别为 5 722 和 37 350 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 根系是地上部镉含量的 6.5 倍^[27]。镉超富集植物东南景天 (*S. alfredii*) 在营养液镉浓度为 500 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 条件下, 叶片镉含量为 5 677 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[28]; 在土壤镉浓度为 400 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 条件下, 地上部镉含量高达 2 900 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[29]。叶用红苋菜 (*Beta vulgaris* var. *cicla* L.) 在镉污染水平为 20 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 条件下, 地上部镉含量超过了 100 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 这一国际公认的镉超富集植物应达到的临界含量标准^[30]。本文筛选的苋菜品种适合中国生态条件, 生长周期短, 且有较大生物量, 可望能够用于镉污染土壤的植物修复。

4 结论

苋菜品种天星米在加 Cd 3 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的水培条件下, 地上部镉含量为 260 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 总吸镉量及地上部吸镉量在所有供试品种中均最高。天星米苋菜在土壤 Cd 投入浓度 25 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 条件下, 其地上部镉含量最大达到 212 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 富集系数最大达到 8.50, 地上部净化率最大为 3.8%, 基本具备了镉超富集植物特征, 可用于镉污染土壤的生物修复。

References

- [1] 苏德纯, 黄焕忠. 油菜作为超累积植物修复镉污染土壤的潜力. 中国环境科学, 2002, 22(1): 48-51.
Su D C, Huang H Z. The phytoremediation potential of oilseed rape (*B. juncea*) as a hyperaccumulator for cadmium contaminated soil. *China Environmental Science*, 2002, 22(1): 48-51. (in Chinese)
- [2] Baker A J M, McGrath S P, Reeves R D, Smith J A C. Metal hyperaccumulator plants: A review of the ecology and physiology of a biochemical resource for phytoremediation of metal-polluted soils. In: Norman T, Banuelos G. *Phytoremediation of Contaminated Soil and Water*. Florida: Lewis Publishers, 2000: 85-107.
- [3] Robinson B H, Leblanc M, Petit D, Brooks R R, Kirkman J H, Gregg P E H. The potential of *Thlaspi caerulescens* for phytoremediation of contaminated soils. *Plant and Soils*, 1998, 203: 47-56.
- [4] Baker A J M, Reeves R D, Hajar A S M. Heavy metal accumulation and tolerance in British populations of the metallophyte *Thlaspi caerulescens* J. & C. Presl (Brassicaceae). *New Phytologist*, 1994, 127: 61-68.
- [5] Salt D E, Prince R C, Pickering I J, Raskin I. Mechanisms of cadmium mobility and accumulation in India Mustard. *Plant Physiology*, 1995, 109: 1427-1433.
- [6] Dahmani-Muller H, van Oort F, Gelie B, Balabane M. Strategies of heavy metal uptake by three plant species growing near a metal smelter. *Environmental Pollution*, 2000, 109: 231-238.
- [7] 刘威, 束文圣, 蓝崇钰. 宝山堇菜(*Viola baoshanensis*)——一种新的镉超富集植物. 科学通报, 2003, 48(19): 2046-2049.
Liu W, Shu W S, Lan C Y. *Viola baoshanensis* a plant that hyperaccumulates cadmium. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(19): 2046-2049. (in Chinese)
- [8] 叶海波, 杨肖娥, 何冰, 龙新宪, 石伟勇, 陈建. 东南景天对镉锌复合污染的反应及其对镉吸收和积累特性的研究. 农业环境科学学报, 2003, 22(5): 513-518.
Ye H B, Yang X E, He B, Long X Y, Shi W Y, Chen J. Response of *Sedum Alfredii* hance towards Cd/Zn complex-pollution and accumulation of the heavy metals. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(5): 513-518. (in Chinese)
- [9] 魏树和, 周启星, 王新, 张凯松, 郭观林. 一种新发现的镉超积累植物龙葵 (*Solanum nigrum* L.). 科学通报, 2004, 49(24): 2568-2573.
Wei S H, Zhou Q X, Wang X, Zhang K S, Guo G L. A newly-discovered Cd-hyperaccumulator *Solanum nigrum* L. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(24): 2568-2573. (in Chinese)
- [10] 李凝玉, 李志安, 丁永祯, 邹碧, 庄萍. 不同作物与玉米间作对玉米吸收积累镉的影响. 应用生态学报, 2008, 19(6): 1369-1373.
Li N Y, Li Z A, Ding Y Z, Zou B, Zhuang P. Effects of intercropping different crops with maize on the Cd uptake by maize. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(6): 1369-1373. (in Chinese)
- [11] Yang X, Baligar V C, Martens D C, Clark R B. Cadmium effects on influx and transport of mineral nutrients in plant species. *Journal of Plant Nutrition*, 1996, 19(3/4): 643-656.
- [12] Wei S H, Zhou Q X, Kovl P V. Flowering stage characteristics of cadmium hyperaccumulator *Solanum nigrum* L. and their significance to phytoremediation. *Science of the Total Environment*, 2006, 369: 441-446.
- [13] McGrath S P, Cunliffe C H. A simplified method for the extraction of the metals Fe, Zn, Cu, Ni, Cd, Pb, Cr, Co and Mn from soils and sewage sludges. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1985, 36: 794-798.
- [14] Deng D M, Shu W S, Zhang J, Zou H L, Lin Z, Ye Z H, Wong M H. Zinc and cadmium accumulation and tolerance in populations of *Sedum Alfredii*. *Environmental Pollution*, 2007, 147: 381-386.
- [15] Ebbs S D, Lasat M M, Brady D J, Cornish J, Gordon R, Kochian L V. Phytoextraction of cadmium and zinc from a contaminated soil. *Journal of Environmental Quality*, 1997, 26(5): 1424-1430.
- [16] Yanai J, Zhao F J, McGrath S P, Kosaki T. Effects of soil

- characteristics on Cd uptake by the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*. *Environmental Pollution*, 2006, 139: 167-175.
- [17] Baker A J M, Brooks R R, Pease A J. Study on copper and cobalt tolerance in three closely related taxa within the genus *Silene* L. (Caryophyllaceae) from Zaïre. *Plant and Soil*, 1983, 73: 377-385.
- [18] Baker A J M, Brooks R R. Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements—a review of their distribution, ecology and phytochemistry. *Biorecovery*, 1989, 1: 81-126.
- [19] Chaney R L, Malik M, Li Y M, Brown S L, Brewer E P, Angle J S, Baker A J M. Phytoremediation of soil metals. *Environmental Biotechnology*, 1997, 8: 279-284.
- [20] Ma L Q, Komar K M, Tu C, Zhang W H, Cai Y, Kennelley E D. A fern that hyperaccumulates arsenic. *Nature*, 2001, 409: 579.
- [21] Zhao F J, Lombi E, McGrath S P. Assessing the potential for zinc and cadmium phytoremediation with the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*. *Plant and Soil*, 2003, 249: 37-43.
- [22] McGrath S P, Lombi E, Gray C W, Caille N, Dunham S J, Zhao F J. Field evaluation of Cd and Zn phytoextraction potential by the hyperaccumulators *Thlaspi caerulescens* and *Arabidopsis halleri*. *Environmental Pollution*, 2006, 141: 115-125.
- [23] Lombi E, Zhao F J, Dunham S J, McGrath S P. Cadmium accumulation in populations of *Thlaspi caerulescens* and *Thlaspi goesingense*. *New Phytologist*, 2000, 145: 11-20.
- [24] Dahmani-Muller H, van Oort F, Balabane M. Metal extraction by *Arabidopsis halleri* grown on an unpolluted soil amended with various metal-bearing solids: a pot experiment. *Environmental Pollution*, 2001, 114 (1): 77-84.
- [25] Wenzel W W, Jockwer F. Accumulation of heavy metals in plants grown on mineralised soils of the Austrian Alps. *Environmental Pollution*, 1999, 104: 145-155.
- [26] Zhao F J, Hamon R E, Lombi E, McLaughlin M J, McGrath S P. Characteristics of cadmium uptake in two contrasting ecotypes of the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*. *Journal of Experimental Botany*, 2002, 53(368): 535-543.
- [27] Küpper H, Lombi E, Zhao F J, McGrath S P. Cellular compartmentation of cadmium and zinc in relation to other elements in the hyperaccumulator *Arabidopsis halleri*. *Planta*, 2000, 212: 75-84.
- [28] 熊愈辉, 杨肖娥, 叶正钱, 何冰. 东南景天对镉、铅的生长反应与积累特性比较. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2004, 32(6): 101-106.
- Xiong Y H, Yang X E, Ye Z Q, He B. Comparing the characteristics of growth response and accumulation of cadmium and lead by *Sedum alfredii* Hance. *Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry (Natural Science Edition)*, 2004, 32(6): 101-106. (in Chinese)
- [29] 龙新宪, 王艳红, 刘洪彦. 不同生态型东南景天对土壤中 Cd 的生长反应及吸收积累的差异性. 植物生态学报, 2008, 32(1): 168-175.
- Long X X, Wang Y H, Liu H Y. Growth response and uptake differences between two ecotypes of *Sedum alfredii* to soils Cd. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)*, 2008, 32(1): 168-175. (in Chinese)
- [30] 李玉双, 孙丽娜, 孙铁珩, 王洪. 超富集植物叶用红苋菜(*Beta vulgaris* var. *cicla* L.)及其对 Cd 的富集特征. 农业环境科学学报, 2007, 26(4): 1386-1389.
- Li Y S, Sun L N, Sun T H, Wang H. Cadmium hyperaccumulator *Beta vulgaris* var. *cicla* L. and its accumulating characteristics. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(4): 1386-1389. (in Chinese)

(责任编辑 李云霞)