

球果蔊菜对重金属的超富集特征^{*}魏树和¹ 周启星^{1,2**} 任丽萍¹

1. 中国科学院沈阳应用生态研究所陆地生态过程重点实验室, 沈阳 110016;

2. 南开大学环境科学与工程学院, 天津 300071

摘要 利用室外盆栽试验、小区模拟试验和污染区采样试验的方法, 从22科65种农田杂草植物中筛选重金属超富集植物. 盆栽试验结果表明: 在Cd污染水平为25.0和50.0 mg·kg⁻¹时, 球果蔊菜(*Rorippa globosa*)茎和叶中Cd含量均超过100 mg·kg⁻¹这一Cd超富集植物应达到的临界含量标准, 地上部富集系数大于1, 地上部Cd含量大于根部Cd含量, 而且植物的生长未受抑制, 这些特征完全符合Cd超富集植物的基本特征. 小区试验和污染区采样试验中, 球果蔊菜也表现出Cd超富集植物的基本特征, 可以基本认为是Cd超富集植物.

关键词 球果蔊菜 超富集植物 镉 重金属

自从Chaney于1983年提出利用超富集植物的超量提取作用以去除污染土壤中多余重金属的植物修复思想后^[1], 世界各国对于污染土壤的植物修复都较为重视, 开展了不同程度的研究. 然而, 尽管世界上已发现的超富集植物已有几百种之多, 但比较成熟的植物提取修复技术还很少报道, 大多数研究只是处于盆栽和田间试验阶段, 研究的重点多集中在超积累植物的修复潜力和强化措施, 其中较有代表性的超富集植物有: Ni超富集植物布氏香芥(*Alyssum bertolonii*)^[2]; Zn, Cd超富集植物天蓝遏蓝菜(*Thlaspi caerulescens*)^[3]; As超积累植物蜈蚣草(*Pteris vittata*)^[4,5]; Zn超富集植物东南景天(*Sedum alfredii*)^[6]; Cd超富集植物宝山堇菜(*Viola baoshanensis*)^[7]; Mn超富集植物商陆(*Phytolacca acinosa* Roxb.)^[8]; 多金属(Cd, Pb, Zn)超富集植物圆锥南芥(*Arabis paniculata*)^[9]等. 植物修复技术还不成熟的主要原因在于已发现的超富集植物修复效率比较低, 突出表现在生物量较小、生育期较长等方面^[10]. 同时, 利用生物技术构建理想超富集植物的研究进展也十分缓慢^[11]. 因而, 超

富集植物乃至具有超富集植物某些特征的植物资源的筛选对于植物修复种质资源库的建立甚或是植物修复技术的不断提高都具有重要的现实意义.

杂草特别是农田杂草是介于野生植物和作物之间既有野生植物性状又有某些栽培性状的植物类群. 与作物相比, 杂草抗逆境能力强, 经过长期的自然进化和人工选择, 具有广泛的适应性和顽强的生命力^[12,13], 这些特征可能使杂草对重金属有较强的耐性. 同时杂草也具有较强的争光、争水、争肥能力, 吸收能力很强^[12,13], 这种较强的吸收特征可能利于杂草对重金属的富集. 因此, 以杂草为研究对象, 在超积累植物筛选方面可能会有较大突破. 又由于杂草具有耐不良环境、生长迅速、繁殖能力强, 以及在生长条件得到较大改善时其生物量能够急剧提高等特点^[14], 可以弥补现有修复植物的某些缺点和不足^[15,16]. 再有, 杂草植物具有某些栽培性状, 便于修复管理. 因此, 总体来看杂草对于植物修复来说是一类较理想的植物资源. 因而, 本文以杂草为筛选对象.

Cd是环境中的有毒物质, 是生物体的非必需元

2007-09-14 收稿, 2007-11-06 收修改稿

^{*} 国家高技术研究发展计划(批准号: 2006AA06Z386)和中俄自然资源与生态环境联合研究中心资助项目

^{**} 通信作者, E-mail: zhousqx@iae.ac.cn

©1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

素, 其化合物的毒性很大, 蓄积性很强, 高浓度的镉对大多数动物有致畸、致突变和致癌作用^[17], 又由于 Cd 是辽宁地区具有代表性和急需治理的污染物^[18, 19], 因而也是本文研究的重点。

为此, 以农田杂草为研究对象, 就 22 科 65 种杂草植物的重金属耐性和超富集特征进行了系统研究, 在此基础上进一步对球果蕻菜(*Rorippa globosa*) 是否为 Cd 超富集植物进行了较为全面的验证。

1 材料与方 法

1.1 盆栽筛选试验

盆栽试验参照我国国家土壤环境质量标准^[20] 设计了 Cd 单一污染(T₁)和 Cd-Pb-Cu-Zn 复合污染(T₂) 2 个处理, 其中 T₁ 处理 Cd 投加浓度为 10 mg · kg⁻¹, T₂ 处理 Cd, Pb, Cu 和 Zn 的投加浓度分别为 10, 1000, 400 和 1000 mg · kg⁻¹, 相当于国家土壤环境质量标准三级标准值的 10, 2, 1, 2 倍, 这一污染水平与辽宁地区重金属污染状况和水平大体相符^[18, 19]。投加的重金属形态分别为 CdCl₂ · 2.5H₂O, Pb(CH₃COO)₂ · 3H₂O, CuSO₄ · 5H₂O 和 ZnSO₄ · 7H₂O, 均为分析纯试剂, 分别以固态加入到土壤中。与此同时, 以不投加重金属的处理为对照(CK₁)。试验地点为中国科学院沈阳生态试验站, 该试验站周围没有污染源, 是重金属未污染区^[20]。将取自生态站的供试土壤风干并过 4 mm 筛后, 与一定量的重金属混合, 装入塑料盆(φ=20 cm, H=15 cm)中, 平衡两周后, 选择生长一致的各种农田杂草幼苗分别移栽入 CK₁, T₁ 和 T₂ 处理的盆中。根据植株大小, 每盆各栽 1—6 棵苗, 重复 3 次, 各重复间栽入的苗数一致, 其中球果蕻菜 4 棵/盆。露天栽培, 根据盆栽缺水情况, 不定期浇水(水中未检出 Cd, Pb, Cu, Zn), 使土壤含水量经常保持在田间持水量的 80% 左右。待植物成熟后或下霜之前收获杂草。参试杂草植物均取自生态站及其周围地区, 共有 65 种, 分属 22 科, 其中菊科植物最多, 共 19 种。

1.2 浓度梯度试验

在筛选试验中, 球果蕻菜对 Cd 的富集表现出了超富集特征, 但可能因试验中投加的重金属浓度 10 mg · kg⁻¹ 较低, 难以使植物对 Cd 的积累达到 Cd 超

富集植物应达到的临界含量标准 100 mg · kg⁻¹。因此, 有必要通过浓度梯度试验检验植物对 Cd 的积累潜力, 以确认这种植物是否确为 Cd 超富集植物^[4-9]。盆栽试验共设了 6 个处理, 分别为对照(CK₂), 即未投加 Cd 的处理。Cd 污染处理, 投加浓度分别为: 10 mg · kg⁻¹(R₁), 25 mg · kg⁻¹(R₂), 50 mg · kg⁻¹(R₃), 100 mg · kg⁻¹(R₄), 200 mg · kg⁻¹(R₅)。每盆移栽球果蕻菜幼苗 2 棵, 重复 3 次。待植物成熟后收获, 生长时间为 88 d。试验地点及过程均与上述试验相同。

1.3 小区试验

在进行不同梯度试验的同时, 又进行了小区试验, 以检验田间污染条件下球果蕻菜对 Cd 的超富集特征。小区面积为 4 m × 2 m。小区土壤中 Cd 投加浓度为 50 mg · kg⁻¹。具体的操作如下: 于 6 月下旬将小区土壤挖出, 挖掘深度为 50 cm 能确保球果蕻菜的根系均生长在 Cd 污染土壤中。待挖出的土壤自然风干后过 4 mm 筛, 然后将土壤大体分为两等份, 其中一份投加重金属 Cd, 另一份回填作为未投加 Cd 的对照(CK₃)区。投加重金属时, 先将风干土分成均匀的等份, 每份 3 kg, 按设计的浓度将 Cd 均匀拌入, 然后再将每份投加 Cd 土壤放在一起混匀后回填到小区的另半部分, 小区的两部分土壤中间用塑料隔开。待投加 Cd 土壤平衡 2 周后开始移栽球果蕻菜幼苗。7 月下旬将生长一致的球果蕻菜幼苗 10 棵分别移栽到未投加 Cd 的对照土壤和投加 Cd 的处理土壤, 幼苗高度为 2.5 cm。由于在 9 月末霜期来临之前植物还没有成熟, 因此, 于 9 月下旬整个小区加盖了塑料棚, 棚内高度为 80 cm, 并在植物成熟时同时采集植物及其相应根区土壤样品, 植物生长时间为 106 d。试验地点及过程均与上述试验相同, 小区土壤基本理化性质也与盆栽土壤相同。

1.4 污灌区植物镉超富集特征

盆栽试验结果表明, 球果蕻菜完全具有 Cd 超富集特征, 为确认这种植物在自然污染状态下对 Cd 的超富集特征, 在进行盆栽浓度梯度试验、小区试验的同时, 又以沈阳张士灌区为研究地点, 于杂草植物成熟时采集球果蕻菜植物样品及其相应根区的土壤样品, 目的是进一步确认这种植物的 Cd 超富集特征。

沈阳张士灌区位于沈阳西郊, 距沈阳市区约

3 km, 1962 年以来, 由于不合理引用沈阳卫工明渠含 Cd 工业污水灌溉稻田, 使得灌区大部分农田受到污染, 据 1975 年调查, 土壤主要是受 Cd 污染而且 Cd 主要分布在土壤表层(约 0—35 cm), 土地受污染面积约 2800 hm², 污染较严重的一闸污染区水田面积约有 330 hm², 这些地区土壤 Cd 浓度为 5—7 mg · kg⁻¹, 二、三闸中度污染区水田面积约为 1130 hm², 土壤 Cd 浓度为 3—5 mg · kg⁻¹^[18]. 这些 Cd 污染土壤在之后的几十年中基本未被修复, 因此土壤中 Cd 浓度可能仍然很高, 以这一地区为研究对象可以检验球果蕻菜在自然污染状态下对 Cd 的积累特征. 测定结果表明, 污灌区土壤基本理化性质为 pH 值 6.51—6.79, 有机质 16.07—17.53 g · kg⁻¹, 全 N 0.69—0.82 g · kg⁻¹, 全 P 0.62—0.71 g · kg⁻¹, 有效 P 9.85—10.56 g · kg⁻¹, 速效 K 87.69—90.22 g · kg⁻¹.

1.5 样品测定与数据统计分析

将土壤样品风干后过 100 目筛备用. 收获的植物样品分为根、茎、叶和籽实 4 部分, 分别用自来水充分冲洗, 然后再用去离子水冲洗, 沥去水分, 之后在 70℃ 下于烘箱中烘至恒重(烘干前先在 105℃ 下杀青 5 min). 烘干后的植物样品粉碎备用. 植物及土壤样品均采用 HNO₃-HClO₄ 法消化(二者体积比为 87% : 13%)、原子吸收分光光度计法测定其中的重金属含量^[21], 重复 3 次. 污染区土壤样品中可用 0.1 N HCl 提取镉. 原子吸收分光光度计为日立 180—80, 其波长分别为 Cd 228.8 nm, Pb 283.3 nm, Cu 324.8 nm, Zn 213.8 nm. 土壤的有机质含量等基本理化性质的测定采用常规的测定方法. pH 用 PHS—3B 型 pH 计测定, 土水比为 1 : 2.5. 盆栽试验土壤采自该站表土(0—20 cm), 土壤类型为草甸棕壤. 测定结果表明, 供试土壤 pH 值 6.5, 有机质 1.52%, 重金属元素背景值分别为 Cd 0.2 mg · kg⁻¹, Pb 14.2 mg · kg⁻¹, Cu 12.4 mg · kg⁻¹, Zn 39.9 mg · kg⁻¹. 利用 Microsoft Excel 和 SPSS 11.5 进行统计学分析, 差异显著水平 $p < 0.05$.

2 结果与分析

2.1 具超富集特征植物的筛选

由于本试验中绝大部分参试植物对重金属的富

集特征已发表^[21], 因此, 仅给出球果蕻菜的研究结果.

盆栽筛选试验结果表明, 球果蕻菜在重金属污染(处理 T₁, T₂)条件下, 其叶色均未发生明显变化, 株高变化也不显著($p < 0.05$), 如 CK₁ 平均株高为 37.3 cm, T₁ 和 T₂ 分别为 36.7 和 37.2 cm. 地上部生物量与对照相比(图 1), 均未下降($p < 0.05$), 说明球果蕻菜对 Cd 具有较强的耐性. 因此, 从植物对重金属的耐性来看, 球果蕻菜具有超富集植物所应具有的耐性较强的基本特征^[22].

植物体内重金属含量测定结果表明(表 1), 球果蕻菜对重金属的富集情况(干重, 下同)为: 在 Cd 单一污染处理(T₁)中, 其地上部 Cd 含量为 55.9 mg · kg⁻¹, 大于根部含量(43.7 mg · kg⁻¹), 且其地上部 Cd 富集系数大于 1 为 5.70. 在 Cd-Pb-Cu-Zn 复合污染处理(T₂)中, 球果蕻菜对 Cd 的富集特征与其在 Cd 单一污染条件下对 Cd 的富集特征大体一致.

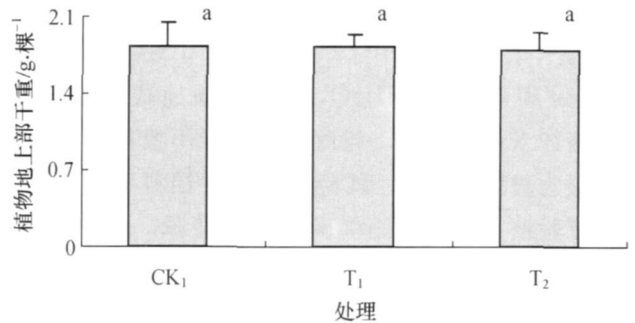


图 1 筛选试验中各处理球果蕻菜地上部生物量

由此可见, 球果蕻菜对 Cd 的富集特征符合超富集植物所应具有的转移特征、耐性特征和富集系数特征, 但对 Pb, Cu 和 Zn 的富集均未表现出上述特征, 因而是 Pb, Cu 和 Zn 的非超富集特征植物^[1, 21—23]. 不过, 表 1 表明, 其茎和叶 Cd 含量分别为 54.9 和 77.2 mg · kg⁻¹(T₁)及 54.7 和 79.1 mg · kg⁻¹(T₂), 均未达到 Cd 超富集植物应达到的临界含量标准 100 mg · kg⁻¹. 造成这一现象的原因, 很大程度上可能是盆栽土壤中 Cd 投加浓度较低而未使该植物对 Cd 的富集达到 Cd 超富集植物应达到的临界含量标准. 因此, 需要进一步采用浓度梯度试验和小区试验进行检验和确认.

表 1 筛选试验中球果蕻菜对重金属的富集特点(单位: $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^{a)}

处理	部位	总 Cd	AC	总 Pb	AC	总 Cu	AC	总 Zn	AC
CK	根	0.3 ± 0.04		1.1 ± 0.11		5.5 ± 0.26		41.7 ± 1.20	
	茎	0.5 ± 0.14		2.7 ± 0.20		3.6 ± 0.22		54.2 ± 1.24	
	叶	0.8 ± 0.09		29.3 ± 1.71		6.7 ± 0.61		132.7 ± 1.22	
	籽实	0.3 ± 0.06		9.3 ± 1.16		5.1 ± 0.40		54.3 ± 2.56	
	地上部	0.6 ± 0.13		11.8 ± 1.30		4.9 ± 0.38		76.2 ± 4.94	
T ₁	根	43.8 ± 1.43c	4.46						
	茎	54.9 ± 2.42b	5.59						
	叶	77.3 ± 1.62a	7.87						
	籽实	24.4 ± 1.38d	2.49						
	地上部	56.0 ± 5.46b	5.70						
T ₂	根	42.1 ± 2.36c	4.28	149.8 ± 7.02a	0.15	48.1 ± 5.87a	0.12	360.5 ± 12.98a	0.35
	茎	54.7 ± 1.12b	5.56	15.2 ± 1.67b	0.02	20.1 ± 2.20l	0.05	147.0 ± 9.20c	0.14
	叶	79.1 ± 2.56a	8.04	17.3 ± 4.78b	0.02	32.5 ± 2.64b	0.08	284.5 ± 12.47b	0.27
	籽实	28.1 ± 1.53d	2.86	10.2 ± 1.32c	0.01	16.1 ± 3.07c	0.04	105.7 ± 8.34d	0.10
	地上部	53.2 ± 2.73b	5.41	13.0 ± 1.15b	0.01	20.0 ± 3.72l	0.05	154.3 ± 7.74c	0.15

a) AC: 富集系数; 同一列同一处理数据后的字母不同表示差异显著($p < 0.05$)

2.2 浓度梯度试验球果蕻菜对 Cd 的耐性及富集特点

盆栽浓度梯度试验中, 不同 Cd 浓度处理条件下, 球果蕻菜的叶色变化不明显, 而且在 Cd 投加浓度为 10, 25 和 50 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的处理 (R₁, R₂) 中, 其株高也没有下降 ($p < 0.05$). 但是, 当 Cd 投加浓度达到 100 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 甚至更高时, 其株高却发生明显变化, 其中处理 R₄, R₅ 的株高分别为 31.5 和 29.0 cm, 与 CK₂ 的株高 39.1 cm 相比, 显著下降 ($p < 0.05$). 从地上部生物量情况来看(图 2), 与对照 (CK₂) 相比, 球果蕻菜在 Cd 投加浓度为 10, 25 和 50 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的处理条件下, 地上部生物量也均未下降 ($p < 0.05$), 对 Cd 表现出很强的耐性; 同样, 当 Cd 污染水平进一步提高即投加浓度为 100 和 200 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 情况下, 地上部生物量也表现为明显的下降 ($p < 0.05$). 说明, 球果蕻菜对 Cd 耐性虽然很强, 但还是有一定的浓度限度的.

由表 2 可知, 在投加 Cd 的各处理中 (R₁-R₅), 球果蕻菜地上部 Cd 含量均大于其根部 Cd 含量. 当土壤中 Cd 投加浓度大于 25 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 球果蕻菜茎和叶中 Cd 含量分别大于 100 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 这一 Cd 超富集植物应达到的临界含量标准, 而且其地上部 Cd 富集系数均大于 1.

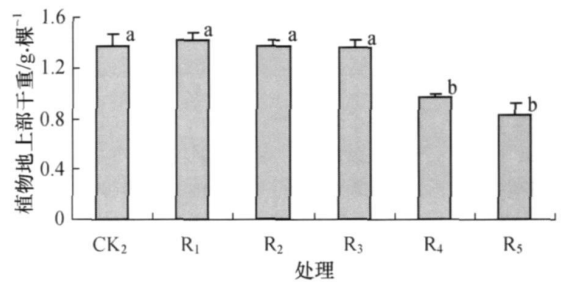


图 2 浓度梯度试验中球果蕻菜地上部生物量的变化

浓度梯度试验结果表明, 球果蕻菜在 Cd 投加浓度为 25 和 50 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 条件下, 其茎和叶中 Cd 含量均达到了 Cd 超富集植物应达到的临界含量标准, 而且其地上部 Cd 含量大于其根部 Cd 含量, 同时对 Cd 耐性较强且其地上部富集系数大于 1, 完全满足 Cd 超富集植物的基本特征^[1, 21-23].

2.3 小区试验球果蕻菜对 Cd 的超富集特征

表 3 列出了小区试验中球果蕻菜各植株的地上部生物量、植物体内 Cd 含量、地上部富集系数. *t* 测验结果表明, 与对照 (CK₃) 相比, 球果蕻菜各植株地上部干重没有下降 ($t = 0.47 < 2.101$, $v = 18$), 对 Cd 表现出很强的耐性. 各植物茎和叶 Cd 含量均大于 100 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 地上部富集系数均大于 1, 同时

其地上部 Cd 含量大于其根部 Cd 含量, 所有这些特征均符合 Cd 超富集植物的基本特征.

2.4 污灌区球果蕈菜对镉的超富集特征

污灌区采集的 7 个土壤样品中 Cd 含量表明(表 4), 土壤中总 Cd 浓度为 $1.8-3.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 提取态 Cd 含量为 $1.5-2.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 有效态占 Cd 总量的 $83.3\%-93.3\%$. 我国土壤环境质量标准规定 GB15618, 1995^[20], 二级标准主要适用于一般农田、蔬菜地、茶园、果园、牧场等土壤, 其中 Cd 的浓度不超过 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 可见采样点土壤中 Cd 污染已十分严重.

植物体内 Cd 含量测定结果表明(表 4), 所采集的 7 棵球果蕈菜地上部 Cd 富集系数也均大于 1. 且地上部 Cd 含量均大于其根部 Cd 含量, 具备了 Cd 超富集植物的主要特征. 从 Cd 在植物体内的分布特征来看, 植物体内 Cd 含量均表现为籽实 < 根 < 茎 < 叶, 说明茎和叶是积累 Cd 的主

要器官. 上述结果与盆栽及小区试验结果较一致, 说明球果蕈菜对 Cd 的富集特征均符合 Cd 超富集植物的基本特征.

综上所述, 盆栽试验、小区试验和污染区采样试验结果均表明球果蕈菜基本具有 Cd 超富集植物的全部特征, 可以基本上认为是 Cd 超富集植物.

3 讨论

超富集植物是指能超量积累一种或同时积累几种重金属元素的植物. 尽管关于超富集植物的衡量标准还不十分明确, 但一般认为应基本具有以下 4 个基本特征: 临界含量特征、转移特征、耐性特征和富集系数特征^[21-23], 其中最重要的是临界含量特征, 即: 植物茎或叶富集重金属的临界含量分别为 Cd $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 以及 Zn, Mn $10000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Pb, Cu, Ni, Co, As 均为 $1000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Au $1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 至于研究方法, 目前已报道的许多超

表 2 浓度梯度试验中球果蕈菜对 Cd 的富集情况($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^{a)}

部位	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅
根	45.6 ± 4.55c	57.5 ± 3.05c	64.0 ± 0.32c	74.9 ± 1.31d	122.4 ± 2.73c
茎	56.1 ± 2.94b	107.7 ± 3.87b	119.3 ± 1.76b	212.8 ± 13.84c	273.7 ± 12.54b
叶	83.9 ± 2.55a	150.1 ± 0.73a	203.6 ± 6.75a	314.0 ± 3.65a	384.4 ± 9.39a
籽实	28.6 ± 2.19d	42.4 ± 2.07d	53.6 ± 7.01d	83.0 ± 1.81d	103.5 ± 5.23c
地上部	57.9 ± 2.29b	104.5 ± 7.14b	128.1 ± 4.80b	232.7 ± 4.99d	277.0 ± 18.16b
地上部 AC	5.8 ± 0.23	4.2 ± 0.29	2.6 ± 0.10	2.3 ± 0.05	1.4 ± 0.09

a) 同一列数据后的字母不同表示差异显著($p < 0.05$)

表 3 小区试验中球果蕈菜 Cd 含量及地上部生物量

植物株	根	茎	叶	籽实	地上部	地上部	地上部干重	对照地上部干重
	$/(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	$/(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	$/(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	$/(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	$/(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	AC	$/(\text{g} \cdot \text{棵}^{-1})$	$/(\text{g} \cdot \text{棵}^{-1})$
1	61.6	122.4	185.3	51.8	138.3	2.82	4.61	4.63
2	69.2	128.5	182.9	56.5	139.4	2.86	3.77	4.51
3	67.9	127.2	186.6	45.5	123.8	2.52	4.14	4.03
4	63.1	122.1	183.4	44.1	120.7	2.45	3.22	3.94
5	62.2	127.2	182.8	53.9	126.6	2.58	2.95	3.31
6	69.3	124.3	189.8	51.3	130.5	2.65	4.45	2.99
7	66.3	118.4	197.9	50.1	130.6	2.67	3.43	3.32
8	67.9	117.3	202.1	56.3	133.4	2.73	3.69	3.17
9	62.9	124.6	189.7	52.7	128.1	2.62	4.62	3.95
10	62.0	125.4	191.3	48.3	132.9	2.70	3.91	3.62
平均	65.2	123.7	189.2	51.1	130.4	2.65	3.87	3.75
标准差(s)	3.17	3.73	6.51	4.17	5.92	0.12	0.57	0.55
变异系数(CV)	4.86	3.01	3.44	8.17	4.53	4.76	14.94	14.92

表 4 污灌区球果蕓菜对 Cd 的超富集特征(mg ° kg⁻¹)^{a)}

植株	根	茎	叶	籽实	地上部	土壤总镉	土壤提取态镉	地上部干重/g ° 棵 ⁻¹
植株 1	3 2±0 4c	8 0±0 9b	14 2±1 1a	2 1±0 1d	9 2±0 7b	2 9±0. 2	2 5±0 1	2 53
AC	1 1	2 7	4 9	0 7	3 1			
植株 2	4 6±0 3c	9 7±0 8b	15 8±1 3a	2 7±0 2d	11 8±1 0b	3 0±0. 2	2 7±0 3	3 81
AC	1 5	3 2	5 3	0 9	3 9			
植株 3	3 9±0 4c	10 4±1 1b	14 0±1 2a	3 1±0 4c	8 0±0 7b	3 0±0. 4	2 8±0 3	5 75
AC	1 2	3 4	4 6	1 0	2 6			
植株 4	3 3±0 4c	6 6±0 7b	10 4±1 1a	1 8±0 2d	6 3±0 5b	2 2±0. 2	2 1±0 2	11 39
AC	1 5	3 0	4 8	0 8	2 9			
植株 5	2 4±0 3c	5 2±0 6b	9 5±0 9a	1 4±0 8c	5 3±0 4b	1 8±0. 1	1 5±0 2	3 95
AC	1 3	2 9	5 3	0 8	3 0			
植株 6	2 1±0 3c	5 4±0 2b	10 4±0 9a	1 9±0 2c	5 9±0 5b	1 8±0. 2	1 7±0 3	2 39
AC	1 1	2 9	5 6	1 0	3 2			
植株 7	3 6±0 4c	7 4±0 6b	11 3±1 2a	2 5±0 3c	7 0±0 8b	1 8±0. 3	1 6±0 2	4 76
AC	2 0	4 2	6 4	1 4	3 9			

a) AC: 富集系数; 同一行同植株不同部位数据后的字母不同表示差异显著($p < 0.05$)

富集植物基本上采用了盆栽试验及污染区采样试验的方法. 例如, Ma 等通过土壤中施加 50, 400, 500, 1500 mg ° kg⁻¹ 的砷的浓度梯度试验后, 报道了采自未污染区的蜈蚣草对砷的超富集特征^[4]. 陈同斌等也报道了蜈蚣草对砷的超富集特征, 结果发现, 在其自然栖息地生长的 13 棵蜈蚣草中, 仅 4 棵羽片中砷含量大于 1000 mg ° kg⁻¹ (砷超富集植物的临界含量标准), 且这 4 棵植物有 3 棵富集系数小于 1. 他们也通过土壤中投加 400 mg ° kg⁻¹ 的砷来表明这种植物对砷的富集特征^[5]. 已报道的锌超富集植物东南景天, 在其自然栖息地生长的植物地上部锌含量仅约 5000 mg ° kg⁻¹ (锌超富集植物的临界含量标准是 10000 mg ° kg⁻¹), 且其富集系数均小于 1. 在水培条件下, 植物地上部锌含量超过 10000 mg ° kg⁻¹^[6]. 其他的超富集植物如宝山堇菜和圆锥南芥也是通过浓度梯度试验检验了植物对重金属的超富集特征^[7,9]. 关于富集系数特征, 已报道的锰超积累植物商陆对锰的富集系数仅 0.14—0.25^[8]. 本研究结果表明, 球果蕓菜基本具有 Cd 超富集植物的全部特征, 是 Cd 超富集植物.

球果蕓菜是一年生草本植物, 株高一般约 35—70 cm, 当生长条件适宜时, 其生物量还能够显著增长. 与已报道的 Cd 超富集植物相比, 球果蕓菜的生物量大于天蓝遏蓝菜, 远大于宝山堇菜和圆锥南芥^[12,24]. 可见, 球果蕓菜用于 Cd 污染土壤修复具

有一定潜力.

参 考 文 献

- Chaney RL. Plant uptake of inorganic waste constituents. In: Parr J F, eds. Land Treatment of Hazardous Wastes. Noyes Data Corporation. Park Ridge, New Jersey, USA. 1983, 48—53
- Robinson BH, Chianucci A, Brooks RR. Hyperaccumulator—*alysium bertolonii*. Journal of Geochemical Exploration, 1997, 57: 75—86
- Brown SL, Chaney RL, Angle JS, et al. Zinc and cadmium uptake by hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* grown in nutrient solution. Soil Sci Soc Am J, 1995, 59: 125—133
- Ma LQ, Kenneth MK, Tu C, et al. A fern that hyperaccumulates arsenic. Nature, 2001, 409(6820): 579
- 陈同斌, 韦朝阳, 黄泽春, 等. 砷超富集植物蜈蚣草及其对砷的富集特征. 科学通报, 2002, 47(3): 207—210
- 杨肖娥, 龙新宪, 倪吾钟, 等. 东南景天 (*Sedum alfredii* H.): 一种新的锌超积累植物. 科学通报, 2002, 47(13): 1003—1006
- 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, 45(19): 2046—2049
- 薛生国, 陈英旭, 林琦, 等. 中国首次发现的锰超积累植物—商陆. 生态学报, 2003, 23(5): 935—937
- 汤叶涛, 仇荣亮, 曾晓雯, 等. 一种新的多金属超富集植物——圆锥南芥 (*Arabis paniculata* L.), 中山大学学报 (自然科学版), 2005, 44(4): 135—136
- 魏树和, 周启星. 重金属污染土壤植物修复基本原理及强化措施探讨. 生态学杂志, 2004, 23(1): 65—72
- Karenlampi S, Schat H, Vangronsveld J, et al. Genetic engi-

- neering in the improvement of plants for phytoremediation of metal polluted soils. *Environmental Pollution*, 2000, 107: 225—231
- 12 肖文一, 陈铁保. 农田杂草及防除. 北京: 农业出版社, 1982
- 13 郭水良, 李扬汉. 杂草的基本特点及其在丰富栽培地生物多样性中的作用. *资源科学*, 1996, 3: 48—53
- 14 陈欣, 唐建军, 赵惠明, 等. 农业生态系统中杂草资源的可持续利用. *自然资源学报*, 2003, 18(3): 340—346
- 15 魏树和, 周启星, 王新, 等. 农田杂草的重金属超积累特性研究. *中国环境科学*, 2004, 24(1): 105—109
- 16 周启星, 宋玉芳. 污染土壤修复原理与方法. 北京: 科学出版社, 2004
- 17 许国章, 樊金明. 重金属中毒发肾脏病. *新医学*, 1996, 2: 232—233
- 18 吴燕玉, 陈涛, 张学询. 沈阳张土灌区镉的污染生态研究. 见: 高拯民编. 土壤—植物系统污染生态研究, 1986, 295—301
- 19 周启星, 任丽萍, 孙铁珩, 等. 某铅锌矿开采区土壤镉的污染及有关界面过程. *土壤通报*, 2002, 33(4): 300—302
- 20 夏家淇. 土壤环境质量标准详解. 北京: 中国环境科学出版社, 1996
- 21 Wei SH, Zhou QX. Identification of weed species with hyperaccumulative characteristics of heavy metals. *Progress in Natural Science*, 2004, 14(6): 495—503
- 22 Chaney RL, Malik M, Li YM. Phytoremediation of soil metals. *Current Opinions in Biotechnology*, 1997, 8: 279—284
- 23 Baker AJM, Brooks RR. Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements: A review of their distribution, ecology and phytochemistry. *Biorecovery*, 1989, 1: 811—826
- 24 王枝荣主编. 中国农田杂草原色图谱. 北京: 农业出版社, 1996