

鱼腥草对土壤中镉的富集及根系微生物的促进作用

侯伶龙^{1, 2}, 黄荣³, 周丽蓉^{1, 2}, 陈文清^{*1, 2}, 刘琛^{1, 4}

1 四川大学建筑与环境学院, 四川 成都 610065; 2 川大-日立环境应用技术研究中心, 四川 成都 610065

3 四川教育学院化学与应用化学系, 四川 成都 610041; 4 四川大学国家烟气脱硫技术研究中心, 四川 成都 610065

摘要: 通过采集自然条件的鱼腥草和未受污染的土壤, 在实验室条件下培育, 以及利用镉的筛选, 培养出土壤菌悬液, 研究了鱼腥草 *Houttuynia cordata* 对土壤中镉的富集作用, 以及经过根系微生物处理后放线菌对富集后转移的促进作用。结果表明, 根部经过微生物处理的鱼腥草地上部(土壤含镉 $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)有最高的含镉浓度和最大的富集量, 分别是是对照组的 20 倍和 50 倍。土壤含镉 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 鱼腥草地上部与地下部镉富集量的比例是 2.5, 高于对照组(1.5)。而当土壤含镉 $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 经过处理的鱼腥草地上部与地下部镉含量之比是未经处理的 2 倍。所以, 鱼腥草对土壤中的镉有很强的富集作用, 且在根系微生物的促进下, 地下部的镉能更有效地转移到地上部, 大大加强植物的修复效率; 且与其他的诸如添加化学整合剂等方法相比, 土壤根系微生物能更好地适应植物根系环境, 更不会对土壤本身的微生态系统造成二次污染。所以研究根系环境中微生物、根系、土壤酶、金属离子等的相互影响关系, 将是土壤重金属植物修复的另一重要领域。

关键词: 镉; 植物修复; 鱼腥草; 超富集植物; 根系微生物

中图分类号: X503.23

文献标识码: A

文章编号: 1674-5906 (2010) 04-0817-05

土壤的金属镉污染由于危害人类健康, 植物毒害, 长期影响土壤质量和土地退化而受到了广泛的关注^[1]。自然环境中, 特别是农田和矿山土壤, 人类活动使镉含量大大提高。目前人类向自然环境中排放的镉已大大超过了从自然界摄取量, 全球达到了 39 000 t, 其中的 56% 是直接排放到了土壤中。

因此, 有效降低土壤中镉的含量就变得很有必要。然而, 传统的清除方法花费太高, 且常常对土壤中其他的必要元素产生不利影响(如植物结构, 有机物^[1])。最近, 研究人员把目光集中到了超富集植物上, 这是一种非常有效的去除土壤重金属污染的方法, 且对土壤理化性质和生态系统没有负面的影响。超富集植物能富集大量的重金属, 其体内浓度大约是耐性非富集植物的 10~100 倍^[2], 到目前为止已发现了 400 余种土壤重金属(或只针对某一种重金属)的超富集植物, 比如商陆 *Phytolacca acinosa* Roxb.^[3]、水葱 *Scirpus tabernaemontani* G.^[4]、美人蕉 *Canna generalis*^[5]、宝山堇菜 *Viola baoshanensis*^[6]等。因而寻找新的超富集植物将大大促进土壤镉污染的修复和人类健康的保护。

孟晓霞^[7]将鱼腥草 *Houttuynia cordata* Thunb 尝试用于土壤中铅的植物修复, 曾宗梁^[8]研究了铅污染土壤中根系的抵抗机制和微生物的影响根系环境物理化学特性以及对富集的促进作用。所以我们尝试着检验鱼腥草对土壤中镉的富集效果, 以及促进富集的条件。

根系微生物(细菌, 放线菌, 霉菌等)在土壤中广泛存在, 即使是在那些受高浓度金属污染的土壤中。研究表明土壤细菌通过产生一种金属螯合物(如 siderophores)来使铁离子的活性大大增强, 同时也能促进普通植物(即非超富集植物)对铁离子的吸收。同样, 也有研究表明, 根系的细菌也能促进普通植物根部硒、镉、汞的浓度。所以, 旨在增强某种植物对土壤中重金属富集能力的方法探索时(前提是未能找到更加高效的超富集植物), 相比于其他的添加外来化合物和土壤酶而言, 促进植物根系的微生物生长繁殖能更高地强化重金属在植物体内的转移分布, 且不会对土壤微生态系统造成二次污染, 也不会滞后植物根系对土壤根系环境的适应期。而土壤微生态系统本身是一个非常复杂的有机系统, 研究其整体的动态变化和创造整个适应性环境极其困难, 而分析单一的影响因素则稍微容易, 通过广大研究人员的通力协作, 相信能更快的找到加强植物对土壤重金属的富集效果。

因此, 我们选择鱼腥草, 测试它对土壤中镉的富集能力, 探讨根系的微生物对富集过程的作用, 以此来研究在根系微生物的促进下加强植物修复在实际土壤治理工程的应用。

1 材料及实验

1.1 供试土壤和鱼腥草来源

供试土壤和鱼腥草均采自成都市郫县安德镇生态农业示范田, 处于东经 104.06° , 北纬 30.67° ,

基金项目: 高等学校学科创新引智计划项目(B08037)

作者简介: 侯伶龙(1985 年生), 男, 硕士研究生, 研究方向为土壤中重金属和有毒物质的植物修复。E-mail:houllong@yahoo.com.cn

***通讯作者:** 陈文清(1969 年生), 女, 副教授。E-mail:cwq69814@126.com

收稿日期: 2010-02-02

这是一个兰草温室大棚，土壤含水率较高，土壤温度随四季变化不大，其土壤理化性质见表。鱼腥草是生长在大棚土壤里的杂草，采集时尽量保证植株根系的完整，用保鲜袋装好，密封。带回实验室后，将鱼腥草植株平放在湿毛巾上，用纯净水喷洒，以保持植株的新鲜。

采集土壤用的是农家锄头，采集时尽可能去掉植物残根、大颗粒泥块、石块等杂物，且尽量是鱼腥草生长较多的区域，土质曾棕黑色，沙粒较细且均匀最好。采集后马上装在 40 L 的保鲜盒内，密封好带回实验室，置于阴暗处。

表 1 背景土壤和鱼腥草植株的各种性质
Table 1 Feathers of Background soil and *H. cordata*

属性		数值
土壤理化性质	w(As)/(mg·kg ⁻¹)	3.41±0.25
	w(Cd)/(mg·kg ⁻¹)	1.67±0.13
	w(Cr)/(mg·kg ⁻¹)	44.44±1.68
	w(Cu)/(mg·kg ⁻¹)	24.35±3.71
	w(Pb)/(mg·kg ⁻¹)	13.46±1.93
	w(交换性钾)/(mg·kg ⁻¹)	82.67±3.61
	w(有效磷)/(mg·kg ⁻¹)	41.42±2.55
	w(全氮)/(g·kg ⁻¹)	1.00±0.04
	阳离子交换量/(cmol·kg ⁻¹)	10.07±0.39
	w(有机质)/(g·kg ⁻¹)	20.32±1.82
土壤微生物含量/ (CFU·g ⁻¹)	pH(水土比 5:1)	7.10±0.10
	细菌/10 ¹⁰	3.4±0.1
	放线菌/10 ⁷	1.3±0.08
鱼腥草	真菌/10 ⁶	1.7±0.06
	地上部	3.78±0.26
	w(镉)/(mg·kg ⁻¹)	6.93±0.35

1.2 高耐镉根系微生物的提取

为了探讨根系微生物在土壤镉富集过程中的作用，需要提取耐镉性强的微生物。取栽种了鱼腥草 10 周的根系土壤 5 g [含 w(镉)为 200 mg·kg⁻¹]，加入 50 mL 去离子水，在 300 r/min、25 ℃条件下振荡 2 h，过滤，取 10 mL 滤液到 500 mL 含镉 200 mg·L⁻¹ 的 BP 培养基中，在 230 r/min、30 ℃的振荡器中培养 1 周。再提取 50 mL 培养液到 500 mL 新鲜的含镉 200 mg·L⁻¹ 无菌 BP 培养基中，再次培养 1 周。扩大培养后，将培养液在 4 000 r/min 离心 15 min，提走上清液，将沉淀溶解在 1 L 的无镉土壤悬浮液中，制成菌悬液 (Microbial suspension, MS)，其中含细菌 7.5×10⁹ 个/mL，放线菌 3.8×10⁸ 个/mL。菌悬液将被用于鱼腥草根部的预处理。

1.3 盆栽试验

鱼腥草和供试土壤均采自成都附近的一个生态农业村，无污染。通过加入 KH₂PO₄ 和 NH₄NO₃ 使土壤中的肥料分别为磷肥 80 mg·kg⁻¹，钾肥 100

mg·kg⁻¹，氮肥 80 mg·kg⁻¹ [9]。土壤分装到 50 个塑料花盆中，每盆 800 g，并往其中 40 盆加入 CdSO₄ 溶液，使 20 盆含镉 50 mg·kg⁻¹，另外 20 盆含镉 200 mg·kg⁻¹。其余 10 盆用做参照。具体设置见表 2。

表 2 实验处理分组及平行样设置
Table 2 Treatments and grouping in experiment

编号	鱼腥草根处理 ¹⁾	土壤 w(镉)/(mg·kg ⁻¹)	平行样数
参照	未 MS 处理	1.67	10
1	MS 处理	50	10
2	未 MS 处理	50	10
3	MS 处理	200	10
4	未 MS 处理	200	10

1) MS 处理表示植物根部在菌悬液(MS)中浸泡。

将新鲜采集的鱼腥草洗净，将根部浸没在体积分数为 75% 的酒精溶液中 10 s，再浸没在 w=0.1% HgCl₂ 溶液中 10 min，再用去离子水清洗 3~4 次。将经过杀菌处理的 20 株鱼腥草浸没在菌悬液中 24 h，同时缓慢摇荡，取出，10 株栽种在含镉 50 mg·kg⁻¹ 的花盆里，另 10 株栽种于含镉 200 mg·kg⁻¹ 的花盆里。其它鱼腥草植株栽种于其余花盆中，每盆一株。将这 50 盆鱼腥草置于阳台上，培养 8 周，气温 20~25 ℃，每天每盆浇水 10 mL，并常松土，除杂草。培养完成后选取平行样中长势最接近的 3 盆鱼腥草及土壤进行检测和统计。

1.4 土壤和鱼腥草中含镉量的测定

每 2 周用一次性竹勺采集一次土壤样品，范围是主根周围 10 mm，表层土以下 100 mm。

土壤 pH 值用 pH 计测定，25 ℃，土壤悬浊液水土比 5:1。土壤细菌数、放线菌数用固体琼脂培养基 [10] 进行平板法测定 [11]。土壤和鱼腥草地上、地下部分别在 60 ℃烘箱中烘干，研磨成粉，全过 2 mm 尼龙筛。鱼腥草样品中加入浓硝酸、氢氟酸和高氯酸，在 250~300 ℃电炉上消解至澄清无色，定容。土样经过浓盐酸、氢氟酸、浓盐酸和高氯酸 [12] 在 280~300 ℃电热板上消解近干，定容。将植株和土壤消解液在原子吸收光谱仪 (PerkinElmer Analyst HGA 800，中国上海) 上测定镉含量 (波长 228.8 nm)。

2 结果与讨论

2.1 根系微生物和镉污染对鱼腥草生长的影响

表 3 表明，经过 8 周的培养，生长在含镉 50 mg·kg⁻¹ 和 200 mg·kg⁻¹ 的土壤中的鱼腥草的生长情况均要好于参照组，平均生物增长量 10.9 g，增长 4.32 倍，远远高于参照组。Dechamps 等 [13] 认为，生长在严重重金属污染土壤上的遏蓝菜 *Thlaspi carulescens* 的生物量要远远高于生长在普通未受污染的土壤上的相同植株。这表明镉污染能促进生长

表 3 鱼腥草的生长和土壤 pH 的变化¹⁾
Table 3 Growth of *H. cordata* and Change of soil pH

编号	鱼腥草物质增加量 ^{2)/g}		土壤 pH (25℃)
	地上	地下	
参照	0.86±0.04(1.39)	0.6±0.04(0.11)	6.42±0.13
1	10.0±0.28(2.56)	3.7±0.45(3.08)	6.51±0.11
2	14.7±0.19(13.25)	4.7±0.52(1.88)	6.74±0.9
3	10.0±0.36(3.70)	1.4±0.06(0.24)	6.53±0.12
4	13.00±0.83(2.37)	4.2±0.19(1.27)	6.61±0.14

1)括号内数据表示培养 8 周后鱼腥草各部鲜质量增加倍数; 2)以鲜质量表示。

于其上的鱼腥草的生物量，且鱼腥草对高镉污染(200 mg·kg⁻¹)的土壤有很强的耐性。但表 3 也同时表明，生长于 200 mg·kg⁻¹ 的鱼腥草生物量要低于生长于 50 mg·kg⁻¹ 的鱼腥草生物量。

对于生长于 200 mg·kg⁻¹ 的鱼腥草而言，根部经菌悬液浸泡后对地上部生长的影响要比未经浸泡处理的更加明显。在根系微生物的作用下，根系的生长受土壤中镉的质量分数影响不大。原因可能是根系微生物能通过阻抗机制降低镉离子的毒性，而这种作用对地上部的影响在高镉土壤条件下尤其明显。表 3 数据显示，根部未经浸泡处理的鱼腥草根部的生长比根部经过浸泡处理的更迅速，这说明相比高镉的毒性压力，根系微生物对根的生长影响更大。

2.2 鱼腥草对镉的富集

表 4 数据表明鱼腥草能从短时间内(8 周)从土壤中富集大量的镉。当土壤中含镉 50 mg·kg⁻¹ 时，根部未经浸泡处理的鱼腥草地上部含镉 47.07 mg·kg⁻¹，是参照的 13.25 倍，同时根部是参照的 12.57 倍。因镉的加入鱼腥草地上部的生物量增加，从而有更多的镉被从土壤中吸收转移到地上部。土壤中镉含量(特别是水溶性镉)越高，植物对镉的富集量就更大^[14]。鱼腥草也不例外(表 4)。在含镉 200 mg·kg⁻¹ 上生长的鱼腥草(根部未作浸泡处理)的地上部含镉达到 74.22 mg·kg⁻¹，是参照的 20.2 倍，而根部则达到了 338.7 mg·kg⁻¹，是参照的 49.76 倍。若假设鱼腥草生长在镉污染很重的矿区，地上部含

表 4 鱼腥草对镉的富集量
Table 4 Cadmium Accumulation by *H. cordata* after 8 weeks

编号	鱼腥草中的 w(镉) ^{1)/(mg·kg⁻¹)}		鱼腥草体内镉含量/ μ g	
	地上	地下	地上	地下
参照	3.51±0.26	6.806±0.35	5.286±0.18	3.607±0.11
1	52.8±3.67(14.9)	86.70±6.72(12.7)	104.7±3.41	43.31±2.51
2	47.04±2.84(13.3)	85.56±3.51(12.6)	99.58±4.16	62.79±2.19
3	74.70±5.71(20.9)	242.7±14.6(35.7)	123.6±8.48	143.5±8.46
4	65.27±6.13(20.2)	338.7±17.3(49.8)	128.9±10.3	258.9±12.6

1)括号内数据表示鱼腥草体内 w(镉)的增加倍数

镉 74.7 mg·kg⁻¹，培养 8 周，每公顷去除镉 90.64 g，且富集速率保持一定(实际上会慢慢减缓)，那么鱼腥草的富集效果比 Kayser 等所列的 7 种超富集植物^[15]还要好。

Jiang 等^[16]报道了温室中生长于添加了 EDTA 的土壤的印度芥菜 *Brassica juncea*，42 d 后其地上部含镉量达到了 160 mg·kg⁻¹。而 Dechamps 等^[13]指出，在不低于 10℃ 的温室中培养 3 个月后，遏蓝菜 *Thlaspi carulescens* 能富集到最高达 380 mg·kg⁻¹ 的镉。本实验中，鱼腥草能在 8 周时间、室外、温度超过 20℃ 条件下根部富集到 338.7 mg·kg⁻¹，植物总体含镉 216.9 mg·kg⁻¹，所以除了对含镉 200 mg·kg⁻¹ 的土壤环境有很强耐性外，鱼腥草同样表现出了与遏蓝菜 *Thlaspi carulescens* 和印度芥菜 *Brassica juncea* 一样的对镉的富集能力。而另外一些研究则表明，遏蓝菜对其他常规金属元素(如锌，铜，镍)的富集效果要好于镉。而本实验中鱼腥草对镉的富集能力不俗，值得重视。

与 Tudoreanu 和 Philips 的研究^[17]相似，本实验中鱼腥草对镉的富集量与 pH 值也有一定的线性相关。土壤 pH 因受根部在菌悬液中浸泡的影响而下降很小，结果反映在土壤中镉的含量越多，pH 值也越低。土壤中因由大量自由镉离子的存在，使氢离子增加，若 pH 值增加，氢离子减少，随即固相稳态镉向自由镉离子转化，根部吸收镉主要是吸收自由镉离子，也就是富集量增加。Lofts^[18]和 Adams^[19]用线性回归分别对 162 株小麦和 215 株大麦谷粒分析发现，土壤中总镉含量与 pH 值反相关，pH 对小麦和大麦对镉的富集起重要作用。Kirham 等^[20]指出，pH 下降能加强土壤中金属水溶性离子的溶出量，也就是说酸性土壤中植物富集作用强于碱性土壤。

2.3 根系微生物对鱼腥草富集作用的影响

当土壤含镉 50 mg·kg⁻¹ 时，根部经过菌悬液浸泡的鱼腥草的地上部镉浓度是参照的 14.87 倍，高于未经浸泡的鱼腥草(是参照的 13.25 倍)，表 5 也显示含镉 200 mg·kg⁻¹ 的土壤也是一样，根部经过浸

表 5 鱼腥草地上/下部镉富集量之比与土壤中细菌和放线菌数量的关系

Table 5 The relationship between Cd accumulation ratio of shoots/roots in *H. cordata* and Bacteria and Actinomycete in soil

编号	细菌数/10 ⁹	放线菌数/10 ⁶	鱼腥草
			w(镉, 地上部): w(镉, 地下部)
参照	34.3±1.0	13.6±0.8	1.465
1	26.6±1.37	15.2±0.86	2.417
2	24.9±1.13	13.7±0.52	1.586
3	8.1±0.64	15.9±0.82	0.867
4	7.7±1.48	8.3±0.25	0.498

泡的鱼腥草地上部含镉量较高。相反的是,土壤含镉 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 根部经过菌悬液浸泡的鱼腥草地下部含镉量反而比未经处理的低, 由此我们可以初步认为, 因为受根部浸泡的微生物的影响, 鱼腥草地下部的镉向地上部转移的更多。

土壤含镉 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 根部经过处理的鱼腥草地上部镉富集量高于未经处理的鱼腥草, 地上部含镉量增加了 2.5 倍, 地下部含镉增加了 1.5 倍; 而土壤含镉 $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 两者的地上部富集量相差不大。这表明当土壤含镉 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时鱼腥草地上部能富集到更多的镉, 根际微生物对镉的向上转移作用明显, 而土壤含镉 $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时根部含镉量很大, 根际微生物对鱼腥草体内镉的转移作用不够明显。这就主要体现在鱼腥草地上、地下部含镉量之比上, 如表 5, 分别比较土壤含镉 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。根部菌悬液处理让它们的地上部、地下部含镉量之比分别提高了 67% 和 100%, 更加说明根系微生物提高了镉的向上转移。Jiang 等^[16] 研究指出, 当土壤中含镉高于 $130 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 添加 EDTA 后, 植株根部的镉含量减少了, 而地上部含镉却增加了, 说明 EDTA 不一定总体上增加了镉在整个植株体内的含量, 却加强了镉向植株地上部的转移。

通常我们认为, 土壤中低浓度重金属能增强微生物活性, 高浓度重金属降低微生物活性, 其受影响的敏感性强弱为放线菌>细菌>真菌^[14]。本实验中(表 5), 放线菌数与鱼腥草地上、地下部含镉量之比呈现一致的变化趋势, 而在高浓度镉的条件下, 细菌受到镉离子的毒性影响较大, 与外界引入的细菌关系不大。从而更加证明, 是根际的放线菌对镉在植物体内的转移起到了重要作用。

这在实际的工程上有深远的影响, 为了治理土壤污染, 研究人员寻找廉价、环保的植物修复方法; 为了提高植株内金属的含量, 研究人员设法改善土壤环境(比如添加一些化学物质, 磷^[21], EDTA^[16, 23], 含氯阴离子^[24, 25], 或是某些微生物, 如细菌^[26]), 创造有利的外界条件, 促进植物生长; 而通过改变土壤结构, 优化根系生态均衡, 使根部金属向地上部转移, 便于收割和后续处理, 而不破坏土层下的根系, 以达到植物的连续性, 同样有其值得探讨的重大意义。向土壤中加入化学螯合物可能会对地下水 and 螯合物本身产生长远的负面影响, 且螯合物亦是不易清除的^[27]; 添加微生物则会避免引起二次污染。所以, 我们认为应用根系中耐性微生物的驯化, 让鱼腥草根达到适应高浓度镉污染的土壤环境, 将大大有利于富集过程。

3 结论

通过我们的研究发现, 鱼腥草对土壤中的镉有

很强的富集作用, 培养 8 周后的鱼腥草体内含镉 $216.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 相比于培养前的平均 $4.15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 而言, 质量分数增加了 50 余倍。根系微生物(主要是放线菌)对镉在鱼腥草体内的分布起了很重要的作用, 它加强了镉在鱼腥草地上部的分布, 就更有利于超富集植物的后续处理; 并且当土壤中镉浓度越高, 这种作用越明显。

致谢: 感谢成都河流研究会的同志在采集鱼腥草时提供的帮助, 感谢四川大学环境系唐亚教授在金属镉的测量上提供的帮助。

参考文献:

- [1] GH H D. Effects of cadmium and sewage-sludge on soil microbial biomass and enzyme activities [J]. *Bioresource Technology*, 1996, 56: 141-145.
- [2] KUKIER U, PETERS C A, CHANEY R L, et al. The effects of pH on metal accumulation in two *Alyssum* species[J]. *Journal of Environmental Quality* 2004, 33:2090-2102.
- [3] 吴双涛, 朱慧. 商陆修复镉污染土壤初探[J]. *河北化工*, 2006, 29(11): 58-60.
WU Shuangtao, Zhu Hui. Study on remediation Cd pollution soil of *Phytolacca acinosa* Roxb[J]. *Hebei Chemical Engineering*, 2006, 29(11): 58-60.
- [4] 李硕, 刘云国, 李永丽, 等. 水葱修复土壤镉污染潜力的研究[J]. *环境污染与防治*, 2006, 28(2): 84-86.
LI Shuo, LIU Yunguo, LI Yongli, et al. The potential of Cd accumulator herb: *Scirpus tabernaemontani* G. for phytoremediation [J]. *Environmental Pollution and Prevention*, 2006, 28(2): 84-86.
- [5] 吴双桃. 美人蕉在镉污染土壤中的植物修复研究[J]. *工业安全与环保*, 2005, 31(9): 13-15.
WU Shuangtao. Studies of phytoremediation on *Canna generalis* for soil cadmium pollution [J]. *Industrial Safety and Environmental protection*. 2005, 31(9): 13-15.
- [6] 刘威, 束文圣, 蓝崇钰. 宝山堇菜-*Viola baoshanensis* 一种新的镉超富集植物[J]. *科学通报*, 2003, 48(19): 2046-2049.
LIU Wei, SHU Wensheng, LAN Chongyu. *Viola baoshanensis*: a new hyper accumulator for cadmium [D]. *Science Bulletin*, 2003, 48(19): 2046-2049.
- [7] 孟晓霞. 鱼腥草对铅的吸收特性及耐性研究[D]. 四川雅安: 四川农业大学, 2005.
MENG Xiaoxia. Lead tolerance and accumulation in *Houttuynia cordata* Thunb[D]. Ya'an, Sichuan Sichuan Agricultural University: 2005.
- [8] 曾宗梁. 铅对鱼腥草根系生理的影响与鱼腥草对铅的抗性机理研究[D].
ZENG Zongliang. Study on effects of lead on root system physiology of *Houttuynia cordata* Thunb and resistance mechanism of it[D]. Ya'an, Sichuan Sichuan Agricultural University: 2007.
- [9] 盛下放, 白雨, 夏娟娟, 等. 镉抗性菌株的筛选及对番茄吸收镉的影响[J]. *中国环境科学*, 2003, 23(5): 467-469.
SHENG Xiafang, BAI Yu, XIA Juanjuan, et al. Screen out of cadmium-resistance strains and their effect on cadmium uptake by tomato [J]. *China Environmental Science*, 2003, 23(5): 467-469.

- [10] 中国科学院南京土壤研究所微生物室. 土壤微生物研究法[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
Department of Microorganism, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Research Method of Soil Microorganism [M]. Beijing: Science Press, 1985.
- [11] DAVID S J, PHILLIP C B, DAVID S P. Measuring soil microbial biomass [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2004 (36): 5-7.
- [12] 国家环境保护总局. GB/T 17141-1997 土壤质量 铅、镉的测定 石墨炉原子吸收分光光度法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1998.
The People's Republic of China State Environmental Protection Administration. GB/T 17141-1997 Soil quality-Determination of Lead, Cadmium-Graphite Furnace Atomic Absorption Spectrophotometry [S]. Beijing: Standards Press of China, 1998.
- [13] DECHAMPS C, ROOSENS N H, HOTTE C, et al. Growth and mineral element composition in two ecotypes of *Thlaspi caerulescens* on Cd contaminated soil [J]. Plant and Soil, 2005, 273: 327-335.
- [14] 孙铁桁, 周启星, 李培军. 环境生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
SUN Tieheng, ZHOU Qixing, LI Peijun. Pollution Ecology [M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [15] KAYSER A, WENGER K, KELLER A, et al. Enhancement of phytoextraction of Zn, Cd, and Cu from calcareous soil: The use of NTA and sulfur amendments[J]. Environ Sci Technol, 2000, 34: 1778-1783.
- [16] JIANG X J, LUO Y M, ZHAO , et al. Soil Cd availability to Indian mustard and environmental risk following EDTA addition to Cd-contaminated soil [J]. Chemosphere, 2003, 50: 813-818.
- [17] TUDOREANU L, PHILLIPS C J C. Modeling cadmium uptake and accumulation in plants[J]. Advances in Agronomy, 2004, 84: 121-157.
- [18] LOFTS S, SPURGEON D J, SVENDSEN C, et al. Deriving soil critical limits for Cu, Zn, Cd, and Pb: a method based on free ion concentrations [J]. Environmental Science and Technology, 2004, 38: 3623-3631.
- [19] ADAMS M L, ZHAO F J, MCGRAT H, et al. Predicting cadmium concentrations in wheat and barley grain using soil properties [J]. Journal of Environmental Quality, 2004, 33: 532-541.
- [20] KIRHAM M B. Cadmium in plants on polluted: Effects of soil factors, hyperaccumulation, and amendments [J]. Geoderma, 2006, 137:19-32.
- [21] TURGUTT C, PEPE M K, CUTRIGHT T J. The effect of EDTA and citric acid on phytoremediation of Cd, Cr, and Ni from soil using *Helianthus annuus* [J]. Environmental Pollution, 2004, 131:147-154.
- [22] PIERZYNSKI G M, HETTIARACHCHI G M. Method for in-situ immobilization and reduction of metal bioavailability in contaminated soils, sediments, and wastes: United States , 6383128 [P]. 2002-05-07.
- [23] LIPHADZI M S, KIRKHAM M B, MANKIN K R, et al. EDTA-assisted heavy-metal uptake by poplar and sunflower grown at a long-term sewage-sludge farm[J]. Plant and Soil, 2003, 257: 171-182.
- [24] SMOLDERS E, LAMBRECHTS R M, McLAUGHLIN M J, et al. Effect of soil solution chloride on Cd availability to Swiss chard [J]. Journal of Environmental Quality, 1997, 27:426-431.
- [25] WEGGLER-BEATON K, McLAUGHLIN M J, GRAHAM R D. Salinity increases cadmium uptake by wheat and Swiss chard from soil amended with biosolids [J]. Australian Journal of Soil Research, 2000, 38: 37-45.
- [26] WHITING S N, et al. Rhizosphere bacteria mobilize Zn for hyperaccumulation by *Thlaspi caerulescens* [J]. Environ Sci Technol, 2001, 35:3144-3150.
- [27] EWA KUREK, MALGORZATA MAJERSKA. *In vitro* remobilization of Cd immobilized by fungal biomass [J]. Geoderma , 2004, 122:235-246.

The accumulation of Cd in *Houttuynia cordata* and its promotion by rhizospheric microbes

HOU Linglong^{1,2}, HUANG Rong³, ZHOU Lirong^{1,2}, CHEN Wenqing^{*1,2}, LIU Chen^{1,4}

1. School of Architecture & Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. SCU-HITACHI Environment Applied Technology Research Center, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

3. Apartment of Chemistry & Applied Chemistry, Sichuan College of Education, Chengdu 610041, China;

4. State Technology Research Center of Flue Gas Desulphuration Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

Abstract: Contaminated in soil with cadmium, which is highly toxicity to humans and animals, is widespread. Plant-microorganism combined bioremediation was used in this study in order to investigate the Cd accumulating capability of *Houttuynia cordata* induced by rhizospheric microbes. In this study, we compared the cadmium biosorption by *H. cordata* which was treated with or without microbes of high tolerance of Cd at different cadmium concentrations (50 and 200 mg·L⁻¹). The Cd concentration of 200 mg kg⁻¹ in the soil had the most important effect on the amount of accumulation in shoots and roots of *H. cordata*, which was approximately 20-fold and 50-fold compared to that of the control, respectively. Moreover, When the concentration of Cd is 50 mg·kg⁻¹ in dry weight soil, the ratio of total Cd accumulation in shoots/roots is 2.5 in the plants with the microbial treatment, while only 1.5 in the control without microbial treatment. Based on our study, the rhizospheric microbes were found to enhance the translocation of Cd from roots to shoots, which would then be multiplied when the concentration of total Cd in soil was much higher. Therefore, our result suggested that, the plant *H. cordata* has a great capacity to accumulate Cd contamination from soil and has a better effect on the Cd uptake enhanced by the rhizosphere microbes. The present study provided a novel, effective and environment-friendly method to cure the contamination. The research of rhizospheric microbes will gain a great development because of its convenient and low-price, and be used widely.

Key words: cadmium; bioremediation; *Houttuynia cordata*; hyperaccumulating plant; rhizospheric microbes