

表面活性剂对长柔毛委陵菜 (*Potentilla griffithii* var. *velutina*) 修复重金属污染的促进作用

周小勇¹, 仇荣亮^{1,2,*}, 胡鹏杰¹, 李清飞¹, 张 涛¹, 应蓉蓉¹

(1. 中山大学环境科学与工程学院, 广州 510275; 2. 广东省环境污染控制与修复技术重点实验室, 广州 510275)

摘要:研究了十二烷基苯磺酸钠(SDBS)、十六烷基三甲基溴化铵(CTAB)、聚乙二醇辛基苯基醚(TritonX-100)等不同离子类型的表面活性剂对水稻土中重金属的解吸效果,并采用盆栽实验研究了上述3种表面活性剂对Zn超富集植物长柔毛委陵菜(*Potentilla griffithii* var. *velutina*)的生物量、吸收和富集重金属的影响。结果表明:CTAB对水稻土中Zn、Pb、Cd和Cu的解吸效果好于SDBS和TritonX-100,而且3种表面活性剂对各重金属的解吸率大小都为Cd > Zn > Cu > Pb。3种表面活性剂促进长柔毛委陵菜叶、柄和根的生物量增加了0.2~2.5倍,并且长柔毛委陵菜各部位的生物量大小为叶 > 柄 > 根。3种表面活性剂都增加了长柔毛委陵菜各部位对Zn、Cd吸收及其叶和柄对Pb、Cu的吸收,同时显著促进Zn、Pb、Cd和Cu从植物根部向地上部转运,从而增加了Zn、Pb、Cd和Cu在长柔毛委陵菜地上部的提取量和分布以及长柔毛委陵菜对Zn、Pb、Cd和Cu的富集能力;因此3种表面活性剂都提高了长柔毛委陵菜修复重金属污染土壤的效率。

关键词:表面活性剂;长柔毛委陵菜;解吸;重金属;超富集植物

文章编号:1000-0933(2009)01-0283-08 中图分类号:Q142, Q948, X171, X53 文献标识码:A

Surfactants enhance phytoremediation of heavy metal contamination by *Potentilla griffithii* var. *velutina*

ZHOU Xiao-Yong¹, QIU Rong-Liang^{1,2,*}, HU Peng-Jie¹, LI Qing-Fei¹, ZHANG Tao¹, YING Rong-Rong¹

1 School of Environmental Science and Engineering, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China

2 Guangdong Provincial Key Laboratory for Environmental Pollution Control and Remediation Technology, Guangzhou 510275, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(1): 0283 ~ 0290.

Abstract: The effect of three surfactants, sodium dodecylbenzene sulphonate (SDBS), cetyltrimethylammonium bromide (CTAB), and polyethylene glycol octylphenyl ether (TritonX-100), on desorption of heavy metals in paddy soil, plant biomass, and uptake and accumulation of heavy metals by the Zn hyperaccumulator *Potentilla griffithii* var. *velutina* was investigated in pot experiments. CTAB caused greater desorption of Zn, Pb, Cd and Cu from paddy soil than did SDBS or TritonX-100. Desorption of heavy metals was in the order Cd > Zn > Cu > Pb in all surfactant treatments. Biomass of various parts of *P. griffithii* var. *velutina* treated by these surfactants was 0.2–2.5 times higher than that in the control, and the biomass was in the order leaf > leafstalk > root. Moreover, the surfactants increased concentration of Zn and Cd in all parts of the plant, and increased the concentration of Pb and Cu in the leaf and the leafstalk. At the same time, the surfactants markedly improved translocation of Zn, Pb, Cd and Cu from root to shoot, resulting in an increased shoot/root ratio. All three surfactants enhanced the phytoremediation efficiency of *P. griffithii* var. *velutina*, as measured by its bioaccumulation of heavy metals from contaminated soil.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40571144);广东省自然科学基金重点资助项目(05101824);广东省自然科学基金团队资助项目(06202438);国家教育部“新世纪优秀人才支持计划”资助项目(NCET-04-0790);国家985二期“环境与污染控制技术创新平台”资助项目

收稿日期:2007-09-27; 修订日期:2008-04-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: eesqrl@mail.sysu.edu.cn

Key Words: surfactant; *Potentilla griffithii* var. *velutina*; desorption; heavy metal; hyperaccumulator

植物修复技术由于其经济、绿色、环保等特点而倍受人们青睐,成为非常有发展前途的土壤重金属污染治理技术^[1, 2]。提高植物修复效果有两个主要途径:一是寻找或培育富集能力更强的超富集植物;二是通过各种物理、化学、生物和农艺的方法来强化生物量大的植物对重金属的吸收和富集^[3, 4]。目前由于大多数超富集植物存在生长慢、周期长、生物量小等不足,因此通过强化措施提高超富集植物的修复效率是植物修复技术应用的重要发展方向。其中化学强化是植物修复中最活跃、最有效的技术,已受到越来越多人的关注^[5]。

表面活性剂因其对有机物质的增溶、增流作用在土壤和水体的有机污染修复中应用广泛^[6],并且近年来开始使用于土壤重金属污染治理的研究^[7, 8]。表面活性剂除了促进土壤中重金属的解吸、增溶和提高其生物利用性外^[7],还可以通过增大细胞膜的透性来增加对重金属的吸收^[9, 10]。目前,有关表面活性剂对植物修复重金属污染的研究大多集中于植物的生长、生理特征的变化等方面^[10-12],而影响植物吸收重金属的研究较少^[13],其中涉及强化超富集植物吸收重金属的研究还未见报道。因此,为了更好地了解表面活性剂对土壤重金属的解吸作用及其对超富集植物吸收重金属的影响,本文选取 3 种不同离子类型的表面活性剂十二烷基苯磺酸钠(SDBS)、十六烷基三甲基溴化铵(CTAB)和聚乙二醇辛基苯基醚(TritonX-100),研究它们对土壤重金属的解吸效果及其对 Zn 超富集植物长柔毛委陵菜吸收和富集重金属的促进作用,为表面活性剂强化超富集植物修复重金属污染土壤提供理论依据和实践参考。

1 材料与方法

1.1 实验材料

供试植物为 Zn 超富集植物长柔毛委陵菜(*Potentilla griffithii* var. *velutina*)^[14]。实验用土采自广东省韶关市上坝村的由大宝山矿山重金属酸性废水污染的水稻土,其基本理化性质见表 1。其中 Zn、Pb、Cd 和 Cu 的含量分别为土壤环境质量二级标准(GB15618-1995, pH < 6.5)的 1.9、1.2、7.2 和 8.8 倍,可见水稻土中的 Cd 和 Cu 的污染比较严重。

表 1 供试水稻土基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of paddy soil tested

重金属全量 (mg·kg ⁻¹) Heavy metal concentration				pH	速效磷 Available phosphorus (mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available kalium (mg·kg ⁻¹)	全氮 Total nitrogen (%)	有机质 Organic matter (%)
Zn	Pb	Cd	Cu					
389.25 ± 40.90	297.60 ± 1.33	2.15 ± 0.08	438.17 ± 23.88	4.27 ± 0.02	1.18 ± 0.20	72.30 ± 5.52	0.15 ± 0.02	2.14 ± 0.29

1.2 实验设计

采用盆栽试验。水稻土风干后过 2mm 筛,充分混匀,每个塑料盆装土 1.0kg,然后从营养土中移取长势基本一致的长柔毛委陵菜幼苗栽入盆中,每盆 3 株,待生长 4 个月后,进行表面活性剂处理。所用的 3 种表面活性剂分别为阴离子型的十二烷基苯磺酸钠(SDBS)、阳离子型的十六烷基三甲基溴化铵(CTAB)和非离子型的聚乙二醇辛基苯基醚(TritonX-100)。每种表面活性剂设 3 个处理:0、0.5mmol·kg⁻¹和 5mmol·kg⁻¹,其中共用一个对照(CK),每处理 3 次重复,随机排列于温室中。表面活性剂按所需剂量用去离子水配成相应溶液浇灌土壤,对照用等量的去离子水浇灌;15d 后收获。收获的植物样品先用自来水冲洗,后用去离子水浸泡,再用吸水纸吸干植株表面的水分,分叶、柄和根 3 个部位,在 105℃ 下杀青 30min,70℃ 下烘至恒重,计算各部位的生物量。

1.3 测定方法

(1)表面活性剂解吸重金属测定 称取一定量的 SDBS、CTAB 和 TritonX-100,加去离子水分别配成 0.5 和 5mmol·L⁻¹两种浓度。准确称取过 20 目尼龙筛的水稻土 3.00g,按液土比 10:1 添加 30ml 表面活性剂溶液,放入 50ml 离心管,250r·min⁻¹恒温振荡 4h,然后以 3500r·min⁻¹离心 10min,测定上清液中重金属含量,以

去离子水代替表面活性剂溶液解吸土壤重金属的上清液为对照。以上试验均重复 3 次。并根据表面活性剂解吸重金属量与水稻土中重金属总量之比来计算解吸率。

(2) 水溶态重金属含量测定 植物收获后,把盆中水稻土碾开、风干,称取过 20 目尼龙筛的土壤样品 2.00g,加入 20ml 去离子水,放入 50ml 离心管,250r·min⁻¹ 恒温振荡 4h 后,在 3500r·min⁻¹ 下离心 10min,取上清液测定水溶态重金属含量。

(3) 重金属含量测定 植物样品采用 HNO₃-HClO₄ 法消化,然后用 ICP-OES (Optima 5300 DV) 测定植物和上清液中 Zn、Pb、Cd 和 Cu 等重金属含量。

1.4 数据分析

用 SPSS11.5 软件包中的 Duncan's 新复极差法 (SSR) 在显著水平 0.05 时作多重比较分析;相关性分析用 Pearson 系数,并用双尾 (Two-tailed) 进行检验。

2 结果与分析

2.1 对水稻土中重金属解吸的影响

3 种表面活性剂对水稻土中重金属的解吸效果如表 2 所示。对 Zn 和 Cd 而言,只有阳离子型表面活性剂 CTAB 能显著提高它们的解吸量,并随处理浓度的增加而增加,Zn 和 Cd 的解吸量在 0.5 和 5mmol·L⁻¹ 处理浓度时分别是对照的 1.5、3.2 倍和 2.0、3.3 倍;而 SDBS 和 TritonX-100 对 Zn 和 Cd 的解吸没有显著效果,甚至在其低浓度 (0.5mmol·L⁻¹) 时促进水稻土对 Zn、Cd 的吸附。对 Pb 和 Cu 而言,只有高浓度 (5mmol·L⁻¹) 的 SDBS 和 CTAB 能显著增加它们的解吸量,分别为对照的 6.6、17.8 倍和 5.1、13.9 倍,其它处理都没有显著效果。总的来看,CTAB 对 Zn、Pb、Cd 和 Cu 的解吸效果要强于 SDBS 和 TritonX-100。

表 2 3 种表面活性剂对水稻土中重金属的解吸效果*

Table 2 Desorbing efficiency of heavy metals in paddy soil with three kind of surfactants 处理 Treatment

处理 Treatment (mmol·L ⁻¹)	重金属解吸量 Desorbing concentration of heavy metal (mg·kg ⁻¹)			
	Zn	Pb	Cd	Cu
CK	6.82 ± 0.60 (1.75) c	0.33 ± 0.13 (0.11) c	0.04 ± 0.01 (2.02) cd	1.23 ± 0.24 (0.28) cd
S-0.5	3.04 ± 0.39 (0.78) e	0.38 ± 0.16 (0.13) c	0.03 ± 0.00 (1.52) e	0.76 ± 0.10 (0.17) d
S-5	6.70 ± 0.53 (1.72) c	2.18 ± 0.57 (0.73) b	0.05 ± 0.01 (2.26) c	6.29 ± 0.91 (1.43) b
C-0.5	10.35 ± 0.48 (2.66) b	0.33 ± 0.05 (0.11) c	0.08 ± 0.00 (3.68) b	2.08 ± 0.31 (0.47) c
C-5	21.95 ± 1.13 (5.64) a	5.89 ± 0.85 (1.98) a	0.13 ± 0.00 (5.82) a	17.04 ± 0.74 (3.89) a
T-0.5	4.54 ± 0.16 (1.17) d	0.07 ± 0.02 (0.02) c	0.03 ± 0.00 (1.35) e	0.98 ± 0.04 (0.22) d
T-5	6.22 ± 0.59 (1.60) c	0.20 ± 0.01 (0.07) c	0.04 ± 0.00 (1.74) de	1.36 ± 0.16 (0.31) cd

* 表中数值为平均值 ± 标准差 (n=3), 括号内数值为解吸率 (%); 同列数据中的不同的字母表示有显著差异 (P < 0.05); S-0.5、C-0.5、T-0.5 和 S-5、C-5、T-5 分别表示表面活性剂 SDBS、CTAB、TritonX-100 的 0.5 和 5mmol·L⁻¹ 的处理水平 Number in table represents the Mean ± SD (n=3), and number in bracket represents desorption rate (%); Values with different letter in same element and same column indicate a significant difference (P < 0.05); S-0.5, C-0.5, T-0.5 and S-5, C-5, T-5 represent 0.5 and 5mmol·L⁻¹ of SDBS, CTAB and TritonX-100, respectively

从表 2 还可以看出,3 种表面活性剂对重金属的解吸率都非常低,Zn、Pb、Cd 和 Cu 分别介于 0.78% ~ 5.64%、0.02% ~ 1.98%、1.35% ~ 5.82% 和 0.17% ~ 3.89% 之间,这表明表面活性剂不适于用来强化水稻土中重金属的解吸;并且在所有处理中,表面活性剂对重金属的解吸率呈现 Cd > Zn > Cu > Pb 的格局,说明水稻土对 Cu 和 Pb 的吸附能力较强。

2.2 对植物生物量的影响

由图 1 可知,表面活性剂使长柔毛委陵菜叶、柄和根的生物量较对照分别增加了 0.5 ~ 1.9、0.2 ~ 1.9 和 0.4 ~ 2.5 倍。除低浓度 (0.5mmol·kg⁻¹) 处理时 TritonX-100 对植物叶、柄和 CTAB 对植物根的生物量增加未达到显著水平外,其它表面活性剂处理的植物各部位的生物量都显著增加。与对照一样,表面活性剂处理的植株各部位的生物量都呈现叶 > 柄 > 根的特征,这有利于利用刈割植物地上部的方式来修复土壤重金属污染。

2.3 对植物吸收重金属的影响

表面活性剂处理的长柔毛委陵菜各部位的重金属含量如图2所示。与对照相比,3种表面活性剂都促进长柔毛委陵菜的叶、柄和根对Zn、Cd的吸收,除C-0.5处理的柄和T-0.5处理的根中Zn含量外,其它处理的增幅都达到显著水平;其中S-5处理对Cd的强化效果最明显,叶、柄和根的Cd含量分别为对照的7.3、4.3和4.5倍;而C-5处理对长柔毛委陵菜各部位吸收Zn的强化效果最好,叶、柄和根的Zn含量分别是对照的2.9、2.9倍和1.6倍,这可能与在表2中相同CTAB浓度下解吸水稻土中的Zn最多有关,故植物根系能吸收更多的Zn,并转运到地上部。同样,所有表面活性剂处理都增加了植物叶和柄对Pb和Cu的吸收,除S-0.5和T-0.5处理的叶中Cu含量外,其它处理都达到显著水平;其中以C-0.5处理的叶和柄的Pb含量增幅最大,分别是对照的2.8和4.7倍;而叶中Cu含量以S-5处理时最高,为对照的2.2倍,这可能与该处理对水稻土中Cu的解吸效果较好(表2)有关,柄中Cu含量以C-0.5处理的最高,为对照的5.8倍。除S-5处理显著增加根中Pb含量和3种表面活性剂低处理(0.5 mmol·kg⁻¹)显著降低根中Cu含量外,其它处理对根中Pb、Cu含量无显著影响。

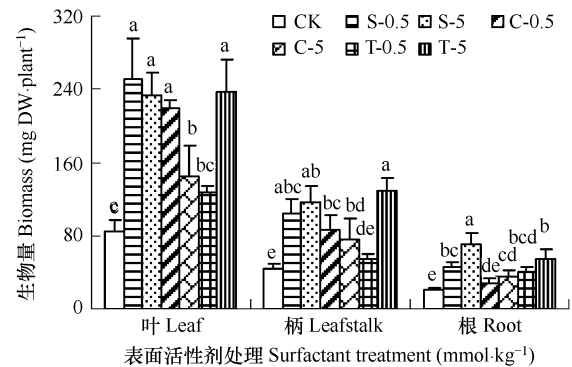


图1 表面活性剂对长柔毛委陵菜的叶片、叶柄和根生物量的影响

Fig. 1 Effect of Surfactants on biomass of leaves, leafstalks and roots in *Potentilla griffithii* var. *velutina*

图中同一部位中不同字母表示有显著差异($P < 0.05$); S-0.5、C-0.5、T-0.5和S-5、C-5、T-5分别表示表面活性剂SDBS、CTAB、TritonX-100的0.5和5 mmol·kg⁻¹的处理水平;下同 Values with different letter in same part indicate a significant difference ($P < 0.05$); S-0.5, C-0.5, T-0.5 and S-5, C-5, T-5 represent 0.5 and 5 mmol·kg⁻¹ of SDBS, CTAB and TritonX-100, respectively; The same below

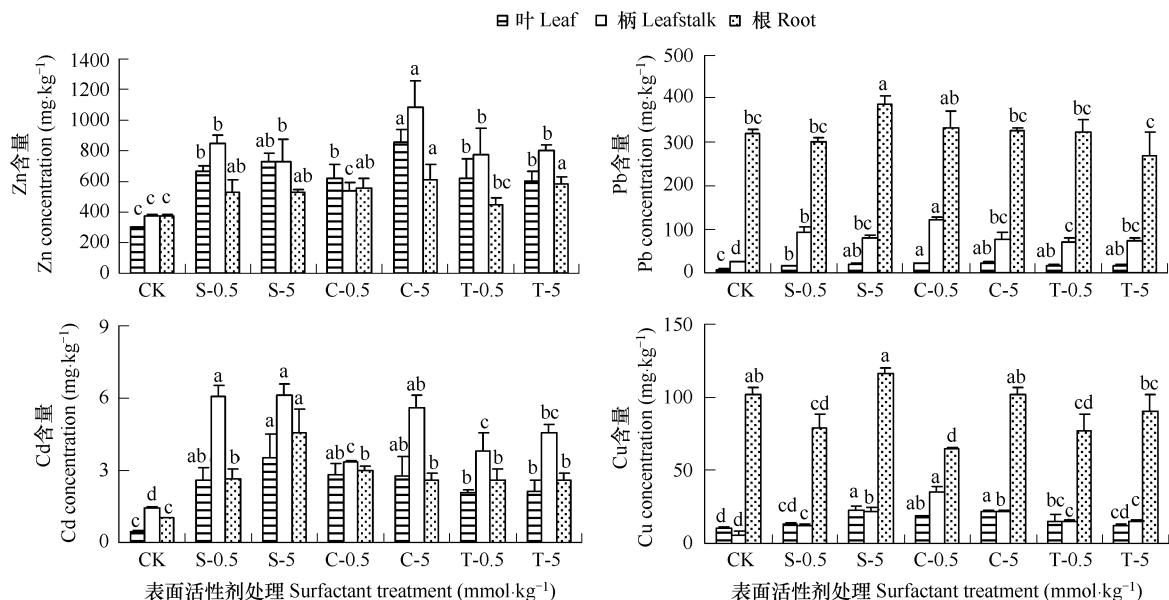


图2 表面活性剂对长柔毛委陵菜各部位吸收重金属的影响

Fig. 2 Effect of surfactants on uptake of heavy metals of different parts in *Potentilla griffithii* var. *velutina*

2.4 对植物提取和富集重金属效果的影响

从表3可知,表面活性剂显著增加了长柔毛委陵菜地上部对Zn、Pb、Cd和Cu的提取量,分别较对照平均增加4.0、5.6、3.7倍和8.7倍。这是表面活性剂促进植物地上部生物量及其重金属含量增加的结果。整体

而言,S-5 处理对提取 4 种重金属的强化效果较好,而 T-0.5 处理的强化效果较差。

同时,表面活性剂还促进重金属从植物根部向地上部的转运,使更多的重金属向地上部富集(表 3)。其中表面活性剂使地上部 Zn 和 Cd 的含量高于根部,即转运系数不小于 1;在所有处理中,C-5 处理效果最好,Zn 和 Cd 的转运系数分别较对照增加了 0.67 和 0.62,C-0.5 处理效果最差,都只增加了 0.20。Pb 和 Cu 的含量表现出根部远大于地上部,其中 C-0.5 处理对 Pb 和 Cu 的转运效果最高,分别提高了 0.10 和 0.28;这些结果反映 CTAB 的处理水平的差异对不同重金属的转运系数产生不同影响。

由于转运系数的增加和植物根部的生物量小于地上部,因此提高了重金属在地上部的累积(表 3)。除 S-5 和 T-0.5 处理对地上部 Zn 和 Cd 的累积率没有显著影响外,其它处理都显著增加了 Zn、Pb、Cd 和 Cu 在地上部的分布,其中 C-0.5 处理的增加效果最明显,即地上部的 Zn、Pb、Cd 和 Cu 所占比例较对照分别增加了 8%、42%、8% 和 44%,而 T-0.5 处理的增幅最小。

表 3 表面活性剂对长柔毛委陵菜的重金属提取量、累积率、转运系数和生物富集系数的影响*

Table 3 Effects of surfactant on extraction amount of heavy metals, percentage of accumulating amount, translocation factor and bioaccumulation factor in *Potentilla griffithii* var. *velutina*

处理 Treatment (mmol·kg ⁻¹)	重金属提取量(μg·plant ⁻¹) Heavy metal accumulation				转运系数(S/R) Translocation factor			
	Zn	Pb	Cd	Cu	Zn	Pb	Cd	Cu
CK	42.21d	1.79e	0.11e	1.13d	0.87e	0.05d	0.80e	0.09e
S-0.5	255.39a	13.33a	1.31ab	4.58b	1.38a	0.13abc	1.38ab	0.17cd
S-5	263.86a	14.11a	1.53a	7.77a	1.43a	0.11bc	1.01c	0.19bc
C-0.5	182.63bc	15.33a	0.91c	7.19a	1.07bc	0.15a	1.00e	0.37a
C-5	203.23ab	9.03b	0.80c	4.72b	1.54a	0.12bc	1.42a	0.21b
T-0.5	120.60c	5.85b	0.47d	2.77c	1.47a	0.10c	1.02bc	0.20bc
T-5	244.57ab	13.50a	1.09bc	4.96b	1.15b	0.14ab	1.14abc	0.15d

处理 Treatment (mmol·kg ⁻¹)	地上部重金属累积率(%) Heavy metal distribution in shoot				生物富集系数 Bioaccumulation factor			
	Zn	Pb	Cd	Cu	Zn	Pb	Cd	Cu
CK	84.48d	21.56e	83.29b	35.49c	0.84d	0.05c	0.38d	0.02c
S-0.5	91.24ab	49.28b	91.36a	55.95b	1.84b	0.13b	1.70ab	0.03b
S-5	87.56bcd	34.23cd	82.79b	48.74b	1.94b	0.13b	2.05a	0.05a
C-0.5	91.99a	62.15a	91.47a	79.77a	1.53c	0.17a	1.39bc	0.05a
C-5	89.98abc	42.29bc	89.40a	55.94b	2.40a	0.13b	1.73ab	0.05a
T-0.5	86.99cd	31.59d	82.09b	47.49b	1.70bc	0.11b	1.21c	0.03b
T-5	88.49abc	48.33b	88.43a	50.56b	1.71bc	0.12b	1.38bc	0.03b

* 重金属提取量 = 地上部金属含量 × 地上部生物量,地上部重金属累积率(%) = 地上部重金属累积量 / 植株重金属累积总量 × 100%,转运系数(S/R) = 地上部重金属含量 / 根部重金属含量,生物富集系数 = 地上部重金属含量 / 土壤中重金属含量 Heavy metal accumulation = Concentration of heavy metal in shoot × Biomass in shoot, Heavy metal distribution in shoot (%) = Heavy metal accumulation in shoot / total accumulation of heavy metal in plant 100%, Translocation factor = Heavy metal concentration in shoot / Heavy metal concentration in root, Bioaccumulation factor = Heavy metal concentration in shoot / Heavy metal concentration in soil

此外,由于长柔毛委陵菜的地上部重金属含量增加,从而导致植物对 Zn、Pb、Cd 和 Cu 的生物富集系数都显著增加,即表面活性剂增强了长柔毛委陵菜对水稻土中重金属的累积能力。除 S-5 处理外,各金属的生物富集系数都呈现 Zn > Cd > Pb > Cu 的关系,这说明植物对 Zn 和 Cd 富集能力较强,而对 Pb 和 Cu 的富集能力较弱,这除与长柔毛委陵菜是 Zn 超富集植物有关外,还与它们的转运系数有关:Zn、Cd 的转运系数不小于 1,而 Pb、Cu 却表现根部的含量远大于地上部的含量,从而导致植物对其富集能力变弱。

总之,表面活性剂提高了长柔毛委陵菜对重金属污染土壤的修复效率,缩短修复时间。

3 讨论

表面活性剂对土壤中微量重金属阳离子具有增溶作用和增流作用^[15],其去除土壤中重金属的作用机理是表面活性剂与土壤中的重金属离子络合,然后通过降低表面张力使重金属从土壤中解吸出来^[8, 16]。在3种表面活性剂中,CTAB对水稻土中重金属的解吸效果高于SDBS和TritonX-100,这与叶和松等人的研究结果相似^[17];同时,该结果可能与水稻土的酸性较强($\text{pH} = 4.27$)有关,因为在酸性环境中阳离子型表面活性剂对重金属的去除率高于阴离子型和非离子型表面活性剂^[7]。

表4 水稻土中重金属解吸量及其水溶态重金属含量与植物各部位重金属含量的相关性分析($n = 9$)

Table 4 Pearson correlation coefficients between heavy metal concentration of desorbing and water soluble in paddy soil and concentration of heavy metals of different parts in the plant

表面活性剂 Surfactant	土壤重金属 Heavy metal in soil	叶 Leaf				柄 Leafstalk				根 Root			
		Zn-Zn	Pb-Pb	Cd-Cd	Cu-Cu	Zn-Zn	Pb-Pb	Cd-Cd	Cu-Cu	Zn-Zn	Pb-Pb	Cd-Cd	Cu-Cu
SDBS	解吸量 Desorption content	0.163	-0.057	0.552	0.846**	-0.103	0.030	0.281	0.813*	-0.022	-0.403	0.729*	0.831*
	水溶态 Water soluble	0.203	-0.736*	-0.018	0.633	0.353	-0.275	0.145	0.751*	0.198	-0.766*	-0.165	-0.048
CTAB	解吸量 Desorption content	0.066	0.285	0.057	0.662	0.375	-0.272	0.337	-0.118	-0.103	-0.095	-0.190	0.578
	水溶态 Water soluble	0.591	-0.701	0.354	0.982**	0.681	-0.786*	0.572	0.671	0.486	-0.215	0.301	-0.199
TritonX-100	解吸量 Desorption content	0.534	0.563	-0.602	0.992**	0.519	-0.476	-0.216	0.667	0.690	-0.537	-0.081	0.992**
	水溶态 Water soluble	0.542	-0.105	0.053	0.358	0.362	-0.009	0.210	0.926**	0.794*	-0.448	0.024	-0.529

* 和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上相关性显著 Pearson correlation is significant at the 0.05 and 0.01 level (Two-tailed), respectively

表面活性剂处理使长柔毛委陵菜各部位生物量增加了 0.2 ~ 2.5 倍,这可能与长柔毛委陵菜对重金属较强耐性有关,因为长柔毛委陵菜在单 Zn 水培时地上部和根部的生物量随处理浓度增加而增加,在 $\text{Zn} = 160 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时的生物量比对照高出 66.6%^[14],即在一定范围内生长介质上重金属含量的增加能刺激重金属超富集植物生物量的显著增加^[18, 19],因此被表面活性剂活化的重金属可能会促进植物生物量增加。同时,被表面活性剂解吸的土壤中的养分元素也可能会促进长柔毛委陵菜的生长,导致生物量增加;其中被 SDBS、CTAB 和 TritonX-100 的 $0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理浓度解吸的 K 含量分别比对照增加 38.37%、32.52%、13.09%、195.75%、77.70% 和 22.70%。此外,一定浓度的表面活性剂处理可以增加植物的生物量。如低浓度的 LAS 不但能显著促进黄豆的生长,而且能部分缓解 Cd 对黄豆的毒害,并且在高浓度 ($100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 处理时的生物量也显著高于对照^[12],这说明表面活性剂可能部分缓解重金属对长柔毛委陵菜的毒害,促进生长,导致生物量大多显著增加;这也表明长柔毛委陵菜对 SDBS、CTAB 和 TritonX-100 有很好的耐性,即 $0.5 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $5 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的处理浓度对长柔毛委陵菜的生长不会造成毒害;由于表面活性剂会被土壤颗粒吸附^[20]、生物降解^[21],因此实际作用于长柔毛委陵菜根系的表面活性剂浓度比处理浓度低,关于长柔毛委陵菜耐受上述 3 种表面活性剂的具体浓度还需进一步的研究和探讨。

表面活性剂大多显著促进了长柔毛委陵菜叶、柄和根各部位对 Zn、Cd 和地上部对 Pb、Cu 的吸收(图 2);而从表 2 可知,3 种表面活性剂对水稻土中 Zn、Cd、Cd 和 Cu 的解吸率都较小,最高的较对照只增加了 3.89%,最小的甚至较对照减少了 0.97%,这说明表面活性强化水稻土中重金属有效性的能力非常有限;但同时从表 4 可知,除植物中的 Cu 含量与水稻土中的被表面活性剂解吸的 Cu 含量及其水溶态 Cu 含量的相关性较多达到显著正相关外,其它 3 种重金属在植物中的含量与在土壤中的含量之间绝大多数没有显著相关性,甚至呈现负相关;这表明表面活性剂促进长柔毛委陵菜对重金属的吸收除与其对土壤重金属的增溶、增流作用有关外,还可能与其增加植物细胞膜的透性有关。表面活性剂是一种可溶性、两亲性的特殊脂类化合物,

与构成生物膜成分的不溶性和具膨胀性的脂类化合物不同,表面活性剂在水中有较高的单体溶解度,其两亲性使之能与膜中成分的亲水和亲脂基团相互作用,从而改变膜的结构和增加膜的透性^[10, 22],促进植物对重金属的吸收^[10, 13]。有研究表明表面活性剂 CTAB、LAS 和 Tween-80 都能促进小麦的细胞膜透性增大及其对 Cd 的积累^[10];同样,随着 CTAB 浓度的增加,玉米根细胞膜内形成的胶团越多及细胞膜电位过极化,增加了细胞膜对 Al^{3+} 的透性,使玉米吸收 Al^{3+} 增多^[11]。此外,低于临界胶束浓度(CMC)的 CTMA 和高于此浓度的 TritonX-100 可以改变大麦根质膜透性,引起大麦离体根 K^+ 和可溶糖等溶质的外流^[9]。因此,表面活性剂可能增加长柔毛委陵菜细胞膜透性,从而促使植物体内的重金属含量升高。

References:

- [1] Brown S L, Chaney R L, Angle J S, *et al.* Zinc and cadmium uptake by hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* grown in nutrient solution. *Soil Science Society of America Journal*, 1995, 59: 125 – 133.
- [2] Richard B. Phytoremediation of toxic elemental and organic pollutants. *Current Opinion in Plant Biology*, 2000, 3: 153 – 162.
- [3] Lombi E, Zhao F J, Dumham S J, *et al.* Phytoremediation of heavy metal-contaminated soils: Natural hyperaccumulation versus chemically enhanced phytoextraction. *Environmental Quality*, 2001, 30: 1919 – 1926.
- [4] Chen Y C, Xiong S L, Xiong Z T. Feasibility of surfactants-enhanced phytoremediation of heavy metal contamination. *Ecology and Environment*, 2004, 13(2): 243 – 246.
- [5] Xiong Z T, Feng T. Enhanced accumulation of lead in *Brassica pekinsis* by soil applied chloride salts. *Bulletin Environmental Contamination Toxicology*, 2001, 67(1): 67 – 74.
- [6] Kile D E, Chiou C T. Water Solubility enhancements of DDT and trichlorobenzene by some surfactants below and above the critical micelle concentration. *Environmental Science and Technology*, 1989, 23(7): 832 – 838.
- [7] Doong R A, Lei W G, Wu Y W. Surfactant enhanced remediation of cadmium contaminated soils. *Water Science and Technology*, 1998, 37(2): 65 – 71.
- [8] Mulligan C N, Yong R N, Gibbs B F, *et al.* Metal removal from contaminated soil and sediments by the biosurfactant surfactin. *Environmental Science and Technology*, 1999, 33: 3812 – 3820.
- [9] Luan S, Ni J S. Effects of surfactants and Ca^{2+} on membrane permeability of barley roots. *Acta Phytophysiological Sinica*, 1987, 13(2): 168 – 173.
- [10] Luo L X, Sun T H. Effect of cadmium-surfactant combined pollution on physiological characteristics of wheat leaf. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1998, 9(1): 95 – 100.
- [11] Shu L Y, Zhu X Y. Effect of combined pollution of aluminum (Al^{3+}) and cationic surfactant (CTAB) on maize seedlings. *Rural Eco-Environment*, 2001, 17: 50 – 52, 65.
- [12] Zhang Y, Liao B H, Zeng M, *et al.* Complex effects of LAS and Cd on growth of soybean. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(6): 1070 – 1072.
- [13] Chen Y C, Dong S Y, Xiong Z T. Effect of surfactants and EDTA on cadmium bioaccumulation by *Brassica juncea* var. *multiceps*. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2004, 10(6): 651 – 656.
- [14] Qiu R L, Fang X H, Tang Y T, *et al.* Zinc hyperaccumulation and uptake by *Potentilla griffithii* Hook. *International Journal of Phytoremediation*, 2006, 8(4): 299 – 310.
- [15] Xia X H, Chen J S. Advances in methods about remediating heavy metal-contaminated soil. *Environmental Science*, 1997, 18(3): 72 – 76.
- [16] Miller R M. Biosurfactant-facilitated remediation of metal contaminated soils. *Environmental Health Perspectives*, 1995, 103(1): 59 – 62.
- [17] Ye H S, Sheng X F, Jiang C Y, *et al.* The isolation of biosurfactant-producing bacteria and their effect on the availability of lead in soil. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(10): 1631 – 1636.
- [18] Karen P, Christophe S, Emilie G, *et al.* Availability of cadmium and zinc accumulated in the leaves of *Thlaspi caerulescens* incorporated into soil. *Plant and Soil*, 2000, 227: 257 – 263.
- [19] K pper H, Lombi E, Zhao F J, *et al.* Cellular compartmentation of nickel in the hyperaccumulators *Alyssum lesbiacum*, *Alyssum bertolonii* and

Thlaspi goesingense. Journal of Experimental Botany, 2001, 52: 2291—2300.

- [20] Li K B, Liu H J, Ma Y, *et al.* Adsorption characteristics of three types of surfactants in soils. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15 (11): 2067—2071.
- [21] Guan J Q, Li J S. Biodegradation of surfactants in the environment. Environmental Science, 1994, 15(2): 81—85.
- [22] Liu H Y, Liao B H, Zhou P H, *et al.* Toxicity of linear alkylbenzene sulfonate and alkylethoxylate to aquatic plants. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicity, 2004, 72(4): 866—872.

参考文献:

- [4] 陈玉成, 熊双莲, 熊治廷. 表面活性剂强化重金属污染植物修复的可行性. 生态环境, 2004, 13(2): 243~246.
- [9] 栾升, 倪晋山. 表面活性剂和 Ca^{2+} 对大麦根质膜透性的作用. 植物生理学报, 1987, 13(2): 168~173.
- [10] 罗立新, 孙铁珩. Cd 和表面活性剂复合污染对小麦叶片若干生理性状的影响. 应用生态学报, 1998, 9(1): 95~100.
- [11] 束良佐, 朱育晓. Al^{3+} 和阳离子型表面活性剂复合污染对玉米幼苗的影响. 农村生态环境, 2001, 17: 50~52, 65.
- [12] 张永, 廖柏寒, 曾敏, 等. 表面活性剂 LAS 与重金属 Cd 复合污染对黄豆生长的影响. 农业环境科学学报, 2004, 23(6): 1070~1072.
- [13] 陈玉成, 董姗姗, 熊治廷. 表面活性剂与 EDTA 对雪菜吸收镉的影响. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(6): 651~656.
- [15] 夏星辉, 陈静生. 土壤重金属污染治理方法研究进展. 环境科学, 1997, 18(3): 72~76.
- [17] 叶和松, 盛下放, 江春玉, 等. 生物表面活性剂产生菌的筛选及其对土壤重金属铅的活化作用. 环境科学学报, 2006, 26(10): 1631~1636.
- [20] 李克斌, 刘惠君, 马云, 等. 不同类型表面活性剂在土壤上的吸附特征比较研究. 应用生态学报, 2004, 15(11): 2067~2071.
- [21] 官景渠, 李济生. 表面活性剂在环境中的生物降解. 环境科学, 1994, 15(2): 81~85.