

吕 华. 生物表面活性剂对芥菜重金属镉和铅的修复效果[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(11): 430–434.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.11.124

生物表面活性剂对芥菜重金属镉和铅的修复效果

吕 华

(泰州学院医药与化学化工学院, 江苏泰州 225300)

摘要:采用盆栽试验研究不同浓度生物表面活性剂对芥菜(*Brassica juncea*)重金属镉(Cd)和铅(Pb)修复效果。结果表明:表面活性剂均显著提高了土壤重金属Cd和Pb的解吸率,而对于不同浓度的表面活性剂,其对重金属的解吸率呈现不同的效果。低浓度的表面活性剂对芥菜的生长表现出促进作用,高浓度的表面活性剂对芥菜的生长有轻微的抑制作用,4~6 g/L可能是其临界值,芥菜地上部生物量反应较为敏感,说明芥菜能够发挥其地上部生物量大的优势,对重金属具有较强的抗耐性。芥菜地上部、地下部和籽实Cd和Pb含量均随着表面活性剂浓度的增加呈先增加后降低趋势,在芥菜体内分布均表现为根部>地上部>籽实;而土壤Cd和Pb含量随着表面活性剂浓度的增加呈先降低后增加趋势,均显著低于对照($P < 0.05$),说明表面活性剂促进了芥菜各器官对于土壤重金属Cd和Pb的吸收。添加表面活性剂后,芥菜对土壤Cd和Pb的吸收能力较强,富集系数和位移系数均高于对照,相比可知,芥菜对Pb的富集效应高于Cd。相关性分析表明,芥菜各部分器官之间Cd和Pb含量均呈显著的线性相关,这表明在表面活性剂处理下芥菜不同器官重金属Cd、Pb含量具有一定的相关性,各个器官之间具备统一性。

关键词:表面活性剂;芥菜;重金属;Cd;Pb;植物修复

中图分类号: X53; X171.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2016)11-0430-05

随着现代化农业的发展,加上城市生活污水和垃圾处理不当以及工业“三废”的不合理排放,导致土壤重金属污染问题日趋突出^[1-2]。土壤重金属主要通过食物链危及人类的生命和健康,而土壤重金属修复成为全球面临的环境问题^[3]。土壤重金属镉(Cd)和铅(Pb)是毒性较强的重金属元素,在土壤中具有稳定、不易分解等性质,通过在食物链中积累对人体及生态环境产生严重危害,治理土壤环境重金属污染问题已成为当今的研究热点^[4-6]。物理化学修复手段显然不能快速高效地解决这一难题,生物修复因其廉价、环境友好的特点而倍受青睐^[7]。传统生物修复主要指植物修复,大多数超富集植物植株矮小、生长缓慢、生物量低并且没有太大经济效益,这些因素限制了植物修复技术的广泛应用,也严重耽误了农业生产,因此,选择生物量高、对重金属吸收能力强、具有经济效益的植物促进土壤中重金属的溶解、运输和转移,提高其修复效率已经成为当前该领域研究的创新点^[8-9]。在环境修复的研究中,由于重金属在土壤环境中的污染过程具有隐蔽性、稳定性及不可逆性等特点,探讨其有效的处理方法已经成为环境科学领域的重要课题^[7]。化学强化是植物修复中最活跃、最有效的技术,但传统的化学修复技术最大的弊端是对环境的危害,易导致二次污染,且不能生物降解^[4-6];生物表面活性剂是由微生物、植物或动物产生的天然表面活性剂,其

分子结构中含有羟基、羧基等特征基团,不仅可以络合重金属离子,还能增溶和促进多环芳烃等有机污染物的降解,具有低毒性、生物可降解性和表面活性等优点,近年来在污染土壤的化学、生物修复研究中得到广泛关注和研究^[8-9]。

十字花科(Cruciferae)芸薹属植物一般具有较强的吸收富集重金属的特性,芥菜(*Brassica juncea*)是十字花科芸薹属1年生或2年生草本植物,是我国著名的特产蔬菜,其生活期短、地上部生物量大、经济价值高^[10-11]。有资料表明,某些芥菜具有修复Cd和Pb污染土壤的能力,且在污染条件下具有高生物量,如果它们对重金属也具有较强的吸收富集能力,那么将其作为特色经济植物用于土壤重金属修复具有重要的实用价值和经济意义^[12-13]。印度芥菜是通过杂交产生的芥菜新品种,地上部生物量较大,将其作为修复植物用于重金属污染土壤的修复具有重要的实际意义^[11-12,14]。因此,本研究从环境友好修复的角度,选用生物表面活性剂皂角苷作为淋洗剂,通过盆栽土培试验法分析生物表面活性剂对芥菜土壤中Cd和Pb的修复效果,以期生物表面活性剂修复土壤中重金属-有机物复合污染提供理论依据和实践参考。

1 材料与方法

1.1 试供材料

供试土壤类型为黑钙土,自然风干后混合均匀,剔除草根、碎石,压碎过2 mm不锈钢筛(供试土壤理化性质为:pH值7.48±0.56,含水量(12.58±2.41)%,有机质含量(17.69±

收稿日期:2016-04-06

作者简介:吕 华(1982—),女,江苏泰兴人,硕士,讲师,研究方向为环境污染治理。E-mail:LVhua82@126.com。

[16] 和文祥,蒋 新,朱茂旭,等. 甲苯对土壤脲酶活性的影响[J]. 环境科学, 2001, 22(6): 123–126.

[17] Zantua M I, Bremner J M. Comparison of methods of assaying urease activity in soils [J]. Soil Biol & Biochem, 1975, 7: 291–295

[18] Dalal R C. Efficient toluene on the energy barriers in urease activity of soils [J]. Soil Science, 1975, 120(4): 256–260.

[19] Tabatabai M I, Bremner J M. Assay of urease activity in soils [J]. Soil Biol & Biochem, 1972, 4: 479–487.

3.04) g/kg, 阳离子交换量 (19.23 ± 2.45) mmol/kg, 全氮含量 (1.23 ± 0.13) g/kg, 全磷含量 (1.47 ± 0.56) g/kg, Pb 含量 (106.78 ± 6.21) mg/kg, Cd 含量 (42.47 ± 4.07) mg/kg。供试作物为印度芥菜, 购于江苏省农业科学院。

1.2 试验设计

2015 年 5 月, 芥菜种子浸种 20 min 后, 在漂盘中繁育幼苗, 待幼苗高 1 cm 左右时, 进行盆栽试验。采用直径 48.8 cm、高 35.5 cm 带有托盘的塑料盆进行土培试验, 每盆盛过筛风干土 5.0 kg, 按照盆栽植物对养分的需求比例, 分别加入尿素、磷酸二氢钾、硫酸钾 1 500、350、300 mg/kg 作为底肥, 充分混匀, 每盆 2 株, 待生长 1 个月后, 进行表面活性剂处理。所用的表面活性剂为鼠李糖脂, 分别设 5 个处理: 0 (CK)、2、4、6、8 g/L, 每个处理重复 3 次, 随机排列于大棚中, 保持土壤湿度为田间持水量的 60% ~ 70%, 并在温室中稳定 3 周, 幼苗移栽生长 80 d 后测定株高、冠幅、叶长和茎粗等生长指标, 120 d 后收获其整个植株 (分为地上部、地下部和籽实)。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, 分地下部、地上部 2 个部位, 在 105 °C 下杀青 30 min, 55 °C 下烘至恒定质量, 电子天平称取各部分干质量 (精确到 0.01 g), 烘干样品粉碎过 40 目筛, 用于测定重金属 Cd 和 Pb 含量。

1.3 测定方法

称取一定量的生物表面活性剂鼠李糖脂和皂角苷, 加去离子水分别配成 0 (CK)、0.25、0.5、5、7.5 g/L 质量浓度, 溶液用 2 mmol/L 的 Mes-Tris 缓冲溶液调节 pH 值至 5.0, 准确称取过 20 目尼龙筛的土样 3.0 g, 按液土比 20 mL : 1 g 添加 60 mL 表面活性剂溶液, 放入 50 mL 离心管, 恒温振荡器中振荡 4 h, 然后于 3 500 r/min 离心 10 min, 测定上清液中重金属质量分数, 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, 根据表面活性剂解吸重金属量与土样中重金属总量之比来计算解吸率。

指标及测试方法: 植株株高、冠幅和生物量采用常规方法测定; 土壤用王水 [$V_{\text{浓硝酸}} : V_{\text{浓盐酸}} = 1 : 3$] - 高氯酸消煮, 植物样品采用 $\text{HNO}_3 - \text{H}_2\text{O}_2$ 法微波消解, 然后用火焰原子吸收分光光度法测定植株和土壤中 Pb、Cd 质量分数^[15]。

累积特征表示方法的计算公式分别为:

富集系数 = 植物地上部 Pb、Cd 质量分数 / 土壤 Pb、Cd 质量分数; 位移系数 = 植物地上部 Pb、Cd 质量分数 / 植物根 Pb、Cd 质量分数; 转运量系数 = (植物地上部 Pb、Cd 质量分数 × 植物地上部生物量) / (植物根 Pb、Cd 质量分数 × 植物根生物量); 滞留率 = (植物根 Pb、Cd 质量分数 - 植物地上部 Pb、Cd 质量分数) / (植物根 Pb、Cd 质量分数) × 100%^[16-17]。

1.4 数据处理

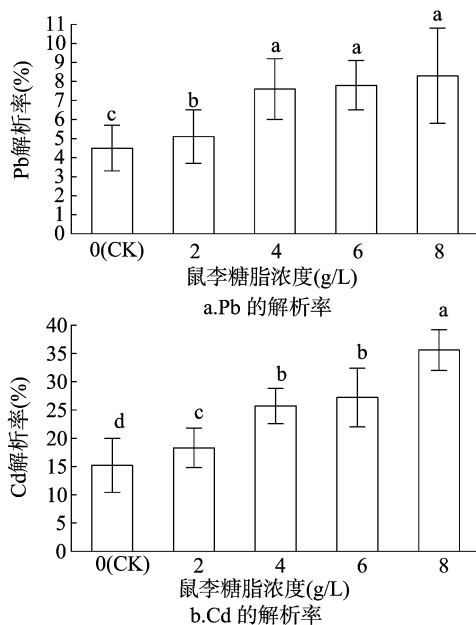
用 Excel 2003 和 SPSS 18.0 进行数据统计和检验, 以及单因素方差分析 (One-Way ANOVA), 显著性分析采用 Tukey 法。

2 结果与分析

2.1 表面活性剂对土壤重金属解吸的影响

如图 1 所示, 不同浓度表面活性剂均能改变土壤重金属 Cd 和 Pb 的解吸率, Pb、Cd 的解吸率分别介于 4.5% ~ 8.3%、

15.6% ~ 38.9% 之间, 对重金属 Pb 而言, 生物表面活性剂能显著提高芥菜对土壤 Pb 解吸量, 并随处理质量浓度的增加而提高, 当表面活性剂浓度分别为 2、4、6、8 g/L 时, Pb 解吸率分别高出对照 13.3%、68.9%、75.6%、84.4%; 对重金属 Cd 而言, 生物表面活性剂能显著提高芥菜对土壤 Cd 解吸量, 并随处理质量浓度的增加而提高, 当表面活性剂浓度分别为 2、4、6、8 g/L 时, Cd 解吸率分别高出对照 19.9%、71.8%、88.5%、149.4%。总体来看, 相同浓度下生物表面活性剂对 Cd 解吸率高于 Pb 解吸率。说明表面活性剂能用来强化土壤中 Cd、Pb 的解吸, 相同条件下对 Cd、Pb 的解吸可能与温度、酸度等有关, 在所有处理中, 表面活性剂设置浓度对重金属的解吸率呈现不同的影响, 说明表面活性剂浓度对 Cd、Pb 的吸附能力有影响。



不同处理间标有不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)

图1 表面活性剂对土壤重金属解吸的影响

2.2 表面活性剂对芥菜生长性状的影响

由表 1 可知, 表面活性剂在一定程度上影响了芥菜的生长, 其中低浓度的表面活性剂促进了芥菜的生长, 而高浓度的表面活性剂对芥菜的影响并不明显; 不同浓度表面活性剂处理芥菜的株高和干质量均表现出先增加后降低的趋势, 在表面活性剂浓度为 4 g/L 或者 6 g/L 时, 芥菜的各项生长指标达到最大值, 并且显著高于其他处理 ($P < 0.05$); 当表面活性剂浓度为 8 g/L 时, 芥菜的各项生长指标急剧降低, 与对照基本没有显著差异。与对照相比, 表面活性剂浓度分别为 2、4、6 g/L 时的芥菜株高分别高出对照 14.75%、27.46%、30.82%, 叶长分别高出对照 4.49%、42.70%、29.21%, 冠幅分别高出对照 8.36%、56.43%、60.08%, 茎粗分别高出对照 16.98%、43.40%、41.51%, 根长分别高出对照 17.61%、14.47%、34.59%, 地上部干质量分别高出对照 10.13%、21.52%、19.62%, 地下部干质量分别高出对照 35.85%、33.96% 和 49.06%。

2.3 表面活性剂处理下芥菜不同器官重金属含量

由表 2 可见, 芥菜地上部 Cd 含量为 2.78 ~ 3.79 mg/kg,

表 1 表面活性剂对芥菜生长性状的影响

活性剂浓度 (g/L)	株高 (cm)	叶长 (cm)	冠幅 (cm)	茎粗 (cm)	根长 (cm)	地上部干 质量(g/株)	地下部干 质量(g/株)
0(CK)	83.4±5.2c	8.9±1.5c	95.7±8.7d	5.3±0.8c	15.9±2.3c	15.8±1.9c	5.3±0.8c
2	95.7±8.3b	9.3±2.3b	103.7±13.5c	6.2±1.3b	18.7±1.9b	17.4±2.4b	7.2±1.6ab
4	106.3±6.4a	12.7±3.6a	149.7±16.4a	7.6±1.6a	18.2±3.5b	19.2±1.6a	7.1±2.1ab
6	109.1±7.5a	11.5±2.7a	153.2±9.2a	7.5±1.0a	21.4±2.7a	18.9±2.0ab	7.9±0.9a
8	83.2±6.1c	8.4±1.9c	108.1±10.5b	5.6±0.9c	16.0±3.8c	15.3±3.4c	6.4±1.5b

注:表中数值为“平均值±标准差”(n=3);同列数据中的不同的字母表示有显著差异(P<0.05)。下表同。

表 2 表面活性剂处理下芥菜不同器官 Cd 含量

活性剂浓度(g/L)	地上部 Cd 含量(mg/kg)	根部 Cd 含量(mg/kg)	籽实 Cd 含量(mg/kg)	土壤 Cd 含量(mg/kg)
0(CK)	2.78±0.35b	7.32±1.52c	0.67±0.13b	39.47±3.58a
2	2.93±0.39b	7.98±2.03c	0.69±0.09b	37.54±2.79b
4	3.56±0.47a	8.97±1.78ab	0.77±0.16a	32.13±1.98c
6	3.79±0.19a	9.03±2.15a	0.78±0.23a	31.17±2.56c
8	2.97±0.24b	8.14±1.38b	0.61±0.17c	34.18±3.45c

根部 Cd 含量为 7.32~9.03 mg/kg,籽实 Cd 含量为 0.61~0.78 mg/kg,土壤 Cd 含量为 31.17~39.47 mg/kg,芥菜地上部、地下部和籽实 Cd 含量均随着表面活性剂浓度的增加呈先增加后降低趋势,低水平(2 g/L)表面活性剂处理下,芥菜地上部、地下部和籽实 Cd 含量较对照有所增加但未达到显著水平;当表面活性剂浓度高于 2 g/L 时,芥菜地上部、地下部和籽实 Cd 含量急剧增加;当表面活性剂浓度达到 6 g/L 时,芥菜地上部、地下部和籽实 Cd 含量达到最大值,之后急剧下降,但仍高于对照(除籽实),局部有所波动;土壤 Cd 含量随着表面活性剂浓度的增加呈先降低后增加趋势,均显著低于对照(P<0.05),当表面活性剂浓度达到 2 g/L 时,土壤 Cd 含量则急剧降低,当表面活性剂浓度达到 6 g/L 时,土壤

Cd 含量最低,之后有所回升。由表 3 可知,芥菜地上部、地下部和籽实 Pb 含量均随着表面活性剂浓度的增加呈先增加后降低趋势,低水平(2 g/L)表面活性剂处理时,芥菜地上部、地下部和籽实 Pb 含量急剧增加,并且显著高于对照(P<0.05),当表面活性剂浓度达到 6 g/L 时,芥菜地上部、地下部和籽实 Pb 含量达到最大值,之后急剧下降,但仍显著高于对照(P<0.05),局部有所波动;土壤 Pb 含量随着表面活性剂浓度的增加呈先降低后增加趋势,均显著低于对照(P<0.05),当表面活性剂浓度达到 2 g/L 时,土壤 Pb 含量急剧降低,当表面活性剂浓度达到 6 g/L 时,土壤 Pb 含量最低,之后有所回升。

表 3 表面活性剂处理下芥菜不同器官 Pb 含量

活性剂浓度(g/L)	地上部 Pb 含量(mg/kg)	根部 Pb 含量(mg/kg)	籽实 Pb 含量(mg/kg)	土壤 Pb 含量(mg/kg)
0(CK)	13.58±1.25c	21.78±2.69c	1.56±0.35d	96.78±9.56a
2	17.17±2.63b	29.56±3.47ab	2.68±0.69b	91.47±8.23b
4	23.56±1.48a	33.47±4.13ab	2.97±0.46ab	83.17±7.69c
6	25.78±2.07a	36.19±3.58a	3.74±0.23a	80.74±8.14c
8	16.31±1.69b	27.14±2.98b	2.13±0.29c	87.56±11.38b

2.4 表面活性剂对芥菜吸收 Cd 和 Pb 的影响

从表 4、表 5 可知,芥菜对 Pb 的富集系数、位移系数和转运量系数均高于 Cd。添加表面活性剂后,芥菜对 Cd 的富集系数变化范围在 0.08~0.12 之间,位移系数在 0.36~0.42 之间,滞留率在 58%~64%之间,转运量系数在 0.87~1.07 之间;芥菜对 Cd 的富集系数和位移系数随表面活性剂浓度的增加呈先增加后降低趋势,并且基本高于对照,对 Cd 的滞留率随表面活性剂浓度增加呈现出波动趋势,Cd 的转运量系数随表面活性剂浓度增加在一定范围内呈降低趋势,均低于

对照(表 4)。由表 5 可知,芥菜对 Pb 的富集系数变化范围在 0.14~0.32 之间,位移系数在 0.58~0.71 之间,滞留率在 29%~42%之间,转运量系数在 1.40~1.90 之间。可以看出,芥菜对 Pb 和 Cd 的富集系数和位移系数大致随表面活性剂浓度的增加呈先增加后降低趋势,并且基本高于对照。

2.5 表面活性剂处理下芥菜不同器官 Cd、Pb 含量之间的关系

为揭示表面活性剂处理下芥菜不同器官 Cd、Pb 含量之间的关系,将芥菜各部位 Cd 和 Pb 含量之间的关系拟合多元

表 4 表面活性剂对芥菜吸收 Cd 的影响

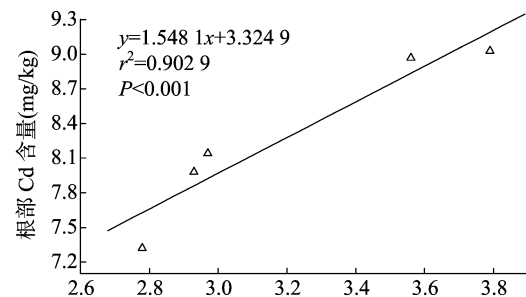
活性剂浓度(g/L)	富集系数	位移系数	滞留率(%)	转运量系数
0(CK)	0.07±0.01b	0.38±0.03b	62±8ab	1.13±0.16a
2	0.08±0.01b	0.37±0.04b	63±13a	0.89±0.12b
4	0.11±0.03ab	0.40±0.02ab	60±9b	1.07±0.13a
6	0.12±0.02a	0.42±0.07a	58±11b	1.00±0.09a
8	0.09±0.01b	0.36±0.06b	64±7a	0.87±0.17b

表 5 表面活性剂对芥菜吸收 Pb 的影响

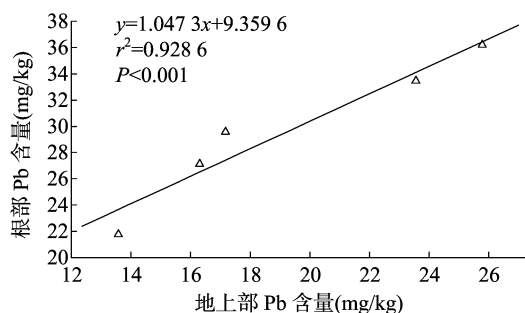
活性剂浓度 (g/L)	富集系数	位移系数	滞留率 (%)	转运量系数
0 (CK)	0.14 ± 0.02b	0.62 ± 0.06b	38 ± 5a	1.86 ± 0.15a
2	0.19 ± 0.03b	0.58 ± 0.09b	42 ± 9a	1.40 ± 0.26c
4	0.28 ± 0.06a	0.70 ± 0.08a	30 ± 3b	1.90 ± 0.17a
6	0.32 ± 0.04a	0.71 ± 0.16a	29 ± 7b	1.70 ± 0.19b
8	0.19 ± 0.08b	0.60 ± 0.07b	40 ± 13a	1.40 ± 0.14c

线性回归方程,筛选出最佳拟合曲线(P 值最小, r^2 最大),并对数据进行相关性分析。由图 2 可知,芥菜不同部位 Cd 和 Pb 含量之间的回归方程均达到显著水平($P < 0.05$)或极显著水平($P < 0.01$)。芥菜地上部与地下部 Cd 含量呈极显著的线性相关,线性回归方程为 $y = 1.548 1x + 3.324 9$, $r^2 = 0.902 9$, $P < 0.001$;地上部与籽实 Cd 含量呈极显著的线性相关,线性回归方程为 $y = 0.141 2x + 0.231 4$, $r^2 = 0.722 2$, $P < 0.01$;地下部与籽实 Cd 含量呈显著的线性相关,线性回归方

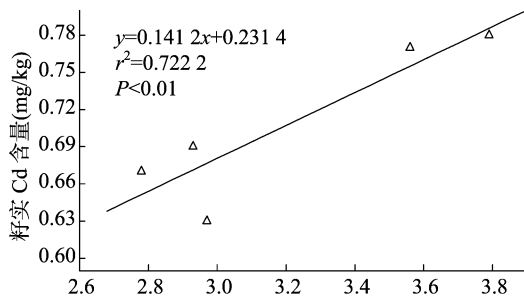
程为 $y = 0.073 4x + 0.075 9$, $r^2 = 0.517 7$, $P < 0.05$ (图 2 - a、图 2 - c、图 2 - e)。芥菜地上部与地下部 Pb 含量呈极显著的线性相关,线性回归方程为 $y = 1.047 3x + 9.435 6$, $r^2 = 0.928 6$, $P < 0.001$;地上部与籽实 Pb 含量呈极显著的线性相关,线性回归方程为 $y = 0.151 9x - 0.312 1$, $r^2 = 0.893 7$, $P < 0.001$;地下部与籽实 Pb 含量呈极显著的线性相关,线性回归方程为 $y = 0.145 1x - 1.683 6$, $r^2 = 0.964 0$, $P < 0.001$ (图 2 - b、图 2 - d、图 2 - f)。



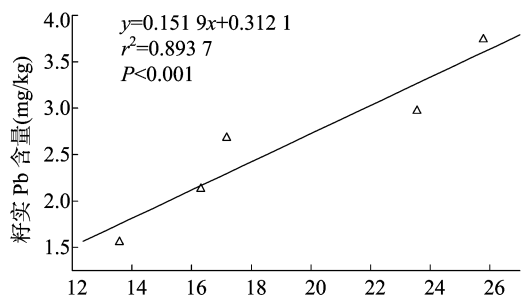
a.地上部与根部 Cd 含量关系



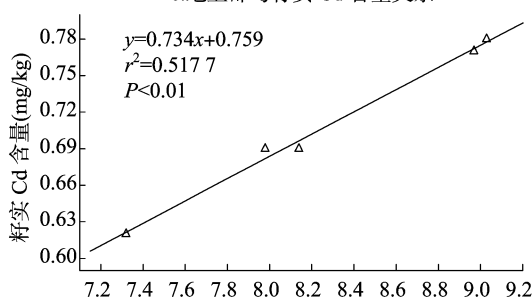
b.地上部与根部 Pb 含量关系



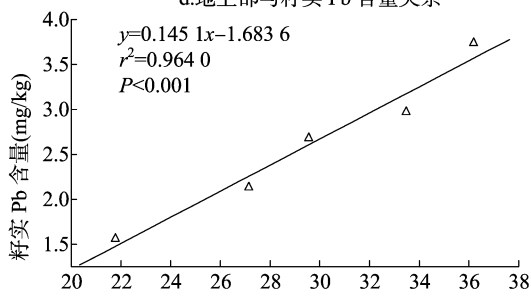
c.地上部与籽实 Cd 含量关系



d.地上部与籽实 Pb 含量关系



e.地下部与籽实 Cd 含量关系



f.地下部与籽实 Pb 含量关系

图2 表面活性剂处理下芥菜不同器官 Cd、Pb 含量之间的关系

3 讨论与结论

本研究中,不同浓度表面活性剂均能改变土壤重金属 Cd 和 Pb 的解吸率,与对照相比,均显著提高了土壤重金属 Cd 和 Pb 的解吸率,而对于不同浓度的表面活性剂,其对重金属

的解吸率呈现不同的影响,在一定程度上说明表面活性剂浓度对 Cd 和 Pb 的吸附能力有影响。从表面活性剂对芥菜生长发育影响的结果来看,表面活性剂促进了芥菜的生长发育,其生长发育各指标均显著高于对照,基本随着表面活性剂浓度的增加呈先增加后降低趋势,当表面活性剂浓度为 4 ~

6 g/L 时,芥菜生长发育各指标达到最大值,因此 4~6 g/L 可能是表面活性剂对芥菜促进作用的临界浓度;当表面活性剂浓度为 8 g/L 时,芥菜生长发育各指标急剧降低。随着表面活性剂浓度的增加,芥菜地上部生物量反应较为敏感,说明芥菜能够发挥其地上部生物量大的优势,对重金属具有较强的抗耐性,这对于修复重金属污染土壤是非常有利的^[12-13]。由此可知,低浓度的表面活性剂对芥菜的生长具有促进作用,高浓度的表面活性剂对芥菜的生长有轻微的抑制作用。

芥菜地上部、地下部和籽实 Cd 和 Pb 含量均随着表面活性剂浓度的增加呈先增加后降低趋势,在芥菜体内 Cd、Pb 含量均表现为根部>地上部>籽实,地下部 Cd 和 Pb 含量增加幅度明显大于地上部,由此可见,表面活性剂对重金属 Cd 和 Pb 的积累主要集中在芥菜地下部,向茎、叶迁移累积的量相对较少,说明芥菜对重金属 Cd 和 Pb 的吸收富集主要体现在地下部位,表现出对 Cd 和 Pb 较强的转移能力,而地上部和籽实中 Cd 和 Pb 的转移能力较低,这对于植物修复来说非常有利^[18-19]。低水平(2 g/L)表面活性剂处理时,芥菜地上部、地下部和籽实中 Cd 和 Pb 含量较对照有所增加,当表面活性剂浓度高于 2 g/L 时,芥菜地上部、地下部和籽实 Cd 和 Pb 含量急剧增加,当表面活性剂浓度达到 6 g/L 时,芥菜地上部、地下部和籽实中 Cd 和 Pb 含量达到最大值,之后急剧下降,由此可知,6 g/L 可能是表面活性剂对芥菜 Cd 和 Pb 含量作用的临界浓度;而土壤 Cd 和 Pb 含量随着表面活性剂浓度的增加呈先降低后增加趋势,均显著低于对照($P<0.05$),与植物体内的 Cd 和 Pb 含量变化趋势相反,说明表面活性剂促进了芥菜各器官对于土壤重金属 Cd 和 Pb 的吸收,随表面活性剂浓度的增加,其吸收作用也逐渐增强,而当表面活性剂浓度为 8 g/L 时,其吸收作用略有降低。本试验首次研究了 Cd 和 Pb 在芥菜籽实中的分布特性,虽然与芥菜其他器官相比芥菜籽实积累 Cd 和 Pb 含量很少,但其实际含量仍较高,因此建议芥菜整体采收、晾晒后,进行籽实的分离,最后对焚烧灰分进行安全填埋处理,这样不仅能够对污染土壤进行修复,还能够取得一定经济效益。

添加表面活性剂后,芥菜对土壤 Cd 和 Pb 的吸收能力增强,一定活性剂浓度下的富集系数和转移系数均显著高于对照,说明芥菜具有很强的吸收富集土壤中难溶态 Cd 和 Pb 能力,在表面活性剂作用下修复 Cd 和 Pb 污染土壤的应用潜力很大。相对比较而言,芥菜对 Pb 的富集效应高于 Cd,主要由于 Cd 和 Pb 元素的性质不同,Cd 在土壤中的生物活性较高,易向植物体内转移,而土壤对 Pb 的吸持能力强于 Cd。本研究的相关性分析表明,芥菜各部分器官之间 Cd 和 Pb 含量均呈显著的线性相关,这表明在表面活性剂处理下芥菜不同器官重金属 Cd、Pb 含量具有一定的相关性,它们之间具备一定的统一性。

参考文献:

- [1] Li Z, Ma Z, van der Kuip T J, et al. A review of soil heavy metal pollution from mines in China: pollution and health risk assessment[J]. Science of the Total Environment, 2014(468): 843–853.
- [2] Gao X, Chen C T A. Heavy metal pollution status in surface sediments of the coastal Bohai Bay[J]. Water Research, 2012, 46(6): 1901–1911.
- [3] Xie Y F, Chen T B, Lei M, et al. Spatial distribution of soil heavy metal pollution estimated by different interpolation methods: accuracy and uncertainty analysis[J]. Chemosphere, 2011, 82(3): 468–476.
- [4] Guo G, Wu F, Xie F, et al. Spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in urban soils from southwest China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2012, 24(3): 410–418.
- [5] Mmolawa K B, Likuku A S, Gaboutloeloe G K. Assessment of heavy metal pollution in soils along major roadside areas in Botswana[J]. African Journal of Environmental Science and Technology, 2011, 5(3): 186–196.
- [6] Baghdadi M E, Barakat A, Sajieddine M, et al. Heavy metal pollution and soil magnetic susceptibility in urban soil of Beni Mellal City (Morocco)[J]. Environmental Earth Sciences, 2012, 66(1): 141–155.
- [7] Zhang X K, Wang H L, He L Z, et al. Using biochar for remediation of soils contaminated with heavy metals and organic pollutants[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2013, 20(12): 8472–8483.
- [8] Park J H, Lamb D, Paneerselvam P, et al. Role of organic amendments on enhanced bioremediation of heavy metal(loid) contaminated soils[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 185(2): 549–574.
- [9] Edwards S J, Kjellerup B V. Applications of biofilms in bioremediation and biotransformation of persistent organic pollutants, pharmaceuticals/personal care products, and heavy metals[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2013, 97(23): 9909–9921.
- [10] Gupta A K, Verma S K, Khan K, et al. Phytoremediation using aromatic plants: a sustainable approach for remediation of heavy metals polluted sites[J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47(18): 10115–10116.
- [11] 苏慧, 魏树和, 周启星. 镉污染土壤的植物修复研究进展与展望[J]. 世界科技研究与发展, 2013, 35(3): 315–319.
- [12] 樊霆, 叶文玲, 陈海燕, 等. 农田土壤重金属污染状况及修复技术研究[J]. 生态环境学报, 2013, 22(10): 1727–1736.
- [13] 杨卓, 韩德才, 李博文. 不同栽培条件下印度芥菜对重金属的吸收比较[J]. 环境科学研究, 2014, 27(3): 295–300.
- [14] 徐良将, 张明礼, 杨浩. 土壤重金属镉污染的生物修复技术研究进展[J]. 南京师范大学学报: 自然科学版, 2011, 34(1): 102–106.
- [15] 曹心德, 魏晓欣, 代革联, 等. 土壤重金属复合污染及其化学钝化修复技术研究进展[J]. 环境工程学报, 2011, 5(7): 1441–1453.
- [16] 王吉秀, 祖艳群, 陈海燕, 等. 表面活性剂对小花南芥(*Arabis alpina* L. var. *parviflora* Franch.) 累积铅锌的促进作用[J]. 生态环境学报, 2010, 19(8): 1923–1929.
- [17] 陈锋, 傅敏. 表面活性剂修复重金属污染土壤的研究[J]. 四川环境, 2012, 31(4): 61–64.
- [18] 可欣, 李培军, 巩宗强, 等. 重金属污染土壤修复技术中有关淋洗剂的研究进展[J]. 生态学杂志, 2004, 23(5): 145–149.
- [19] 孟佑婷, 袁兴中, 曾光明, 等. 生物表面活性剂修复重金属污染研究进展[J]. 生态学杂志, 2005, 24(6): 677–680.