

刘巧,张敏硕,王小敏,等. 镉、铅复合污染条件下印度芥菜的根际特征研究[J]. 江苏农业科学,2020,48(1):272-277.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2020.01.051

# 镉、铅复合污染条件下印度芥菜的根际特征研究

刘巧<sup>1,2,3</sup>, 张敏硕<sup>1,2,3</sup>, 王小敏<sup>1,2,3</sup>, 刘博扬<sup>1</sup>, 高夕彤<sup>1</sup>, 李博文<sup>1,2,3</sup>, 郭艳杰<sup>1,2,3</sup>

(1. 河北农业大学资源与环境科学学院,河北保定 071001; 2. 河北省蔬菜产业协同创新中心,河北保定 071001;

3. 河北省农田生态环境重点实验室,河北保定 071001)

**摘要:**运用 2 因素(Cd、Pb)5 水平回归正交设计,采用根袋试验法,通过对比研究 Cd、Pb 复合污染条件下富集植物印度芥菜和参比植物油菜根际土壤的有效态 Cd、Pb 含量、pH 值和土壤微生物数量,初步揭示富集植物印度芥菜特有的根际特征。结果表明,印度芥菜对石灰性土壤中的难溶态 Cd、Pb 有很强的活化和溶解能力,其根际有效态 Cd、Pb 含量明显高于同处理油菜。随着重金属 Cd、Pb 增加添加,除处理 4 和处理 11 印度芥菜根际土壤 pH 值有所降低外,其余处理土壤 pH 值无明显变化,并且显著低于同处理油菜,各处理印度芥菜根际土壤细菌和真菌的数量也显著高于油菜,放线菌数量二者相差不显著。

**关键词:**植物修复;印度芥菜;土壤污染;Cd、Pb;根际特征

**中图分类号:** X53;X173 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2020)01-0272-06

近年来新兴起的植物修复(phytoremediation)技术,因具有投资少、不破坏场地结构、不引起二次污染等优点,被认为是目前修复重金属污染土壤最有前途和发展前景的治理技术<sup>[1]</sup>。该技术的运用前提是找到对某种或某些重金属有特殊富集能力的超富集植物(hyperaccumulator)。大部分重金属在土壤中的生物有效性较低,能够被植物利用的部分很少,而与一般植物相比,超富集植物具有超常的吸收、转运和富集重金属的能力<sup>[2-3]</sup>,这就意味着超富集植物应该能够强烈活化和溶解根际环境的难溶态重金属。通过一些试验发现,在重金属污染土壤上种植遏蓝菜(*Thlaspi caerulescens*),土壤孔隙应用水溶态锌的降低量仅占 *T. caerulescens* 总吸收量的 1%<sup>[4]</sup>,即 *T. caerulescens* 吸收和积累的 Zn 绝大部分来自土壤中非可溶性部分;铈超富集植物雨衣甘蓝(*Brassica oleracea acephala*)和屈草花属植物(*Iberis intermedia*)地上部吸收的铈 18% 和 21% 来自根际土壤(0~2 cm 土层)的植物有效态部分,而

50% 和 40% 来自非可溶性部分<sup>[5]</sup>。这些研究结果表明,超富集植物确实具有特殊的活化土壤中一般植物不能吸收利用的重金属的能力,因而进一步推测,超富集植物的这种特性是由其本身特殊的根系特性和根际环境造成的。在重金属胁迫下,超富集植物根系分泌特殊的有机物,诱导缓效态或非有效态重金属大量溶解和释放;同时在植物根际,由于有较高浓度的碳水化合物、氨基酸、维生素和其他生长因子存在,成为微生物活动旺盛的区域。Abou-Shanab 等研究发现,Ni 超积累植物香雪球(*Allysum murale*)的根际环境中可培养的细菌、放线菌和真菌数量以及耐 Ni 细菌和产酸细菌的比例均显著高于非根际土壤<sup>[6]</sup>。微生物通过对重金属元素进行价态转化或通过刺激植物根系的生长发育影响植物对重金属的吸收,同时微生物能通过产生有机酸、提供质子及与重金属络合的有机阴离子<sup>[7]</sup>,从而对土壤中重金属的固定活化产生重要影响<sup>[8]</sup>。由于根际环境中的物理、化学、生物学特性或效应直接影响重金属的固定和活化状态,关系到重金属在土壤-植物系统中的迁移转化行为,如今关于根际环境的研究已经成为超富集植物一个新的研究热点<sup>[9]</sup>。

印度芥菜(*Brassica juncea*)是目前筛选出来的一种生长快、生物量较大的 Cd、Zn、Pb 忍耐-富集型植物,在植物修复中具有较大的应用潜力<sup>[10-11]</sup>。有关印度芥菜的研究目前主要集中在其吸收富集

收稿日期:2018-11-13

基金项目:国家自然科学基金(编号:31272253);河北省蔬菜产业技术体系资助项目。

作者简介:刘巧(1993—),女,安徽芜湖人,硕士研究生,研究方向为环境化学与污染控制。E-mail:351117154@qq.com。

通信作者:李博文,博士,教授,博士生导师,主要从事土壤环境科学研究,E-mail:kjli@hebau.edu.cn;郭艳杰,博士,讲师,主要从事土壤环境科学研究,E-mail:guoyanjie928@126.com。

重金属的能力和修复重金属污染土壤效率以及强化吸收措施等方面<sup>[12-13]</sup>。而对于印度芥菜根际环境特征,即印度芥菜吸收富集重金属的机制研究还不够完善。因此,本试验运用 2 因素(Cd、Pb)5 水平回归正交设计,采用根袋试验法,种植对重金属有富集作用的印度芥菜,同时设非富集植物油菜为参比植物,通过对比分析的方法,初步探讨在 Cd、Pb 复合污染碱性土壤条件下印度芥菜的根际环境特征。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 供试植物 供试植物为印度芥菜(*Brassica*

*juncea*),品种为 *Wild Garden Pungent Mix*,从国外购买。参比植物为青帮油菜,购于河北省保定市农资科技市场。

1.1.2 供试土壤 供试土壤为河北农业大学西校区标本园的潮褐土(0~20 cm 土层)。土壤基本理化性质见表 1。

1.2 试验方法

1.2.1 试验方案 试验方案采用 Cd、Pb 2 因素 5 水平回归正交设计,共 11 个处理,每个处理设 3 次重复,重金属 Cd、Pb 分别以(CH<sub>3</sub>COO)<sub>2</sub>Cd·2H<sub>2</sub>O 和(CH<sub>3</sub>COO)<sub>2</sub>Pb·2H<sub>2</sub>O 固体粉末形式施入土壤,具体添加量见表 2。

表 1 供试土壤基本理化性质

土壤类型	pH 值	有机质含量 (g/kg)	全氮含量 (g/kg)	碱解氮含量 (mg/kg)	CaCO <sub>3</sub> 含量 (g/kg)	重金属总量(mg/kg)	
						Cd	Pb
潮褐土	8.28	12.64	0.72	32.63	56.2	0.46	31.12

注:pH 值在水土比为 1 g:2.5 mL 的条件下测定得到。

表 2 供试土壤重金属添加量

处理号	<i>p</i> = 2	<i>m</i> = 3	重金属添加量(mg/kg)	
	<i>x</i> <sub>1</sub>	<i>x</i> <sub>2</sub>	Cd	Pb
1	1	1	187.18	935.92
2	1	-1	187.18	64.08
3	-1	1	12.82	935.92
4	-1	-1	12.82	64.08
5	1.147	0	200.00	500.00
6	-1.147	0	0.00	500.00
7	0	1.147	100.00	1 000.00
8	0	-1.147	100.00	0.00
9	0	0	100.00	500.00
10	0	0	100.00	500.00
11	0	0	100.00	500.00

注:*p* 代表因素数;*m* 代表重复数;*x*<sub>1</sub>、*x*<sub>2</sub> 分别代表各因素的编码值。

1.2.2 试验布置 采用上、下口径分别为 13、10 cm,高 10 cm 的塑料盆盛过 3 mm 筛的风干土,每盆装土 800 g,重金属按照试验方案拟定的处理量装盆,同时每盆施入 0.26 g 尿素和 0.32 g 磷酸二胺作底肥。将重金属、底肥和土壤混匀,用 300 目的尼龙网做成根袋,将 200 g 混匀土装入根袋作为根际土,600 g 混匀土装入塑料盆内,置于根袋外围作为非根际土,在 60% 田间持水量下平衡 1 个月后播入印度芥菜种子,每盆定苗 6 株(植物全部在根袋内定植),生长约 60 d 后收获。参比植物油菜的处理

方式与印度芥菜相同。

1.2.3 样品的采集和处理 采集根袋内土样,取适量风干后过筛备用。

1.3 分析方法

1.3.1 土壤理化指标的测定 供试土壤的基本理化性质采用常规分析方法<sup>[14]</sup>测定。

1.3.2 土壤重金属含量分析 土壤中重金属 Cd、Pb 总量用王水-高氯酸消解,消解液过滤后,原子吸收法<sup>[15]</sup>测定;土壤中有效态 Cd、Pb 含量采用二乙基三胺五乙酸(DTPA)提取剂[0.005 mol/L DTPA+0.1 mol/L 三乙胺(TEA)+0.01 mol/L CaCl<sub>2</sub>]浸提-原子吸收法<sup>[16]</sup>测定。

1.3.2 土壤 pH 值的测定 称取过 2 mm 筛风干土样 10.00 g 于 50 mL 烧杯中,加入 0.01 mol/L CaCl<sub>2</sub> 溶液 25 mL(土水比为 1 g:2.5 mL),搅拌 1~2 min,并放置 30 min 后用 PHS-3C 数字酸度计直接测定 pH 值。

1.3.3 土壤中微生物数量的测定 土壤微生物(细菌、放线菌、真菌)数量采用平板稀释法测定。细菌、放线菌和真菌分别采用牛肉膏蛋白胨培养基、高氏一号培养基和查氏培养基培养<sup>[17]</sup>。

1.4 数据处理

所有结果均为 3 次重复的平均值,采用 Excel 2003 作图,SPSS 11.5 软件进行方差分析、相关分析和多重比较。

2 结果与分析

2.1 Cd、Pb 复合污染处理印度芥菜和油菜根际土壤中有有效态 Cd、Pb 含量

2.1.1 印度芥菜和油菜根际土壤中有有效态 Cd 含量 从表 3 可以看出,在本试验的 11 个处理中,随着土壤中 Cd 添加量的增加,印度芥菜和油菜根际土壤中有有效态 Cd 含量均显著增加( $P<0.05$ ),印度芥菜、油菜根际土壤中有有效态 Cd 含量最大值分别达到了 141.78、117.01 mg/kg。但相比较而言,除处理 5 外,其余处理印度芥菜根际土壤中有有效态 Cd 含量明显高于同处理下油菜根际土壤,是同处理下油菜根际土壤中有有效态 Cd 含量的 1~6 倍,这就表明,与普通植物相比,印度芥菜根系或其根系分泌物对土壤中难溶态 Cd 有很强的活化作用。处理 5 中虽然外源 Cd 的添加量达到了最大值 200 mg/kg,但印度芥菜根际土壤中有有效态 Cd 含量与油菜根际土壤相差不多,从数值上看,印度芥菜根系对土壤中 Cd 并未表现出较强的活化效应。这可能是由于植物根际土壤中 Cd 的生物有效性受到了共存元素 Pb 的影响,Pb 会夺取 Cd 在土壤中的吸附位而提高土壤中 Cd 的生物有效性,或者取代根中吸附的 Cd,提高根中滞留 Cd 的活性,使 Cd 进一步向地上部转移<sup>[18]</sup>。同时研究认为,植物对重金属的吸收及重金属的毒性与其在土壤中存在的有效态含量有密切的相关性<sup>[19]</sup>。印度芥菜是公认的 Cd 富集植物,并且吸收的 Cd 有 71%~82% 富集在地上部<sup>[20]</sup>,这使得土壤中大量有效态 Cd 被印度芥菜吸收并富集在地上部;而油菜对 Cd 的吸收和富集能力相对较差,土壤中有有效态 Cd 不能被油菜大量吸收而留在土壤中。因此在处理 5 下印度芥菜和油菜根际土壤中有

效态 Cd 含量相差不多,同时这间接反映了印度芥菜通过根际效应确实对土壤中难溶态 Cd 具有很强的活化和吸收富集能力,这对于修复重金属 Cd 污染土壤具有重要意义。

2.1.2 印度芥菜和油菜根际土壤中有有效态 Pb 含量

从表 3 可以看出,随着土壤中 Pb 添加量的增加,各处理印度芥菜和油菜根际土壤中有有效态 Pb 含量均显著增加( $P<0.05$ )。当外源 Pb 的添加量为最大值 1 000 mg/kg 时,印度芥菜和油菜根际土壤中有有效态 Pb 含量也都达到了最大值,分别为 828.25 mg/kg 和 601.02 mg/kg。这可能是由于在重金属胁迫下,植物根系分泌了一些物质,如柠檬酸、苹果酸、乙酸、乳酸等,这些可物质与 Pb 离子形成可溶性络合物,进而抑制 Pb 跨膜运输,增加 Pb 在根际土壤中的移动性<sup>[21]</sup>,也可能是由于根际土壤中微生物的活动作用对 Pb 的活化有显著影响,但其作用机制还有待进一步深入研究。除处理 3 外,其余各处理印度芥菜根际土壤中有有效态 Pb 含量都明显高于同处理下油菜根际土壤,是相同处理下油菜根际土壤中有有效态 Pb 含量的 1~3 倍,说明印度芥菜根系对土壤中 Pb 也有较强的活化效应。处理 3 中印度芥菜根际土壤中有有效态 Pb 含量与油菜根际土壤相比低 11.68%,这可能和植物的特性以及 Cd、Pb 在土壤中复杂的相互作用有关。印度芥菜吸收土壤中的有效态 Pb 并将其主要富集在根系<sup>[12]</sup>,而中低浓度的 Cd(Cd 添加量为 12.82 mg/kg)处理对油菜吸收 Pb 具有拮抗作用<sup>[22]</sup>,从而使得根际土壤中有有效态 Pb 含量大于印度芥菜根际土壤。这同样也反映了印度芥菜对土壤中难溶态 Pb 的活化和吸收能力强于普通油菜。

表 3 Cd、Pb 复合污染处理印度芥菜和油菜根际土壤中有有效态 Cd、Pb 含量

处理号	根际有效态 Cd 含量(mg/kg)		根际有效态 Pb 含量(mg/kg)	
	印度芥菜	油菜	印度芥菜	油菜
1	122.29 ± 4.13cd	75.04 ± 1.47c	642.63 ± 4.78b	412.20 ± 5.49c
2	128.50 ± 4.49bc	117.01 ± 2.90a	30.72 ± 0.80h	24.00 ± 2.69g
3	15.50 ± 2.09f	11.15 ± 0.99g	366.76 ± 1.64e	415.25 ± 4.86b
4	17.59 ± 2.34f	10.46 ± 0.48g	40.97 ± 0.20g	30.08 ± 5.32g
5	107.72 ± 4.13e	109.35 ± 4.98b	270.75 ± 10.11f	193.30 ± 1.41e
6	0.97 ± 0.02g	0.18 ± 0.02h	368.68 ± 9.53e	162.58 ± 4.32f
7	133.87 ± 2.14b	76.65 ± 1.28c	828.25 ± 2.31a	601.02 ± 7.51a
8	124.35 ± 3.13cd	67.56 ± 1.97d	20.51 ± 0.86i	8.32 ± 0.31h
9	102.97 ± 3.78e	40.84 ± 4.13f	533.82 ± 2.75c	190.10 ± 4.54e
10	141.78 ± 1.83a	51.18 ± 4.57e	518.75 ± 2.44cd	218.31 ± 6.35d
11	118.48 ± 8.17d	76.77 ± 10.73c	510.64 ± 11.45d	223.77 ± 5.53d

注:同列数据后不同小写字母表示处理间在 5% 水平上差异显著。

## 2.2 Cd、Pb 复合污染处理印度芥菜和油菜根际土壤 pH 值的变化

土壤 pH 值是影响土壤重金属元素生物有效性的主要因子。目前研究认为,根际土壤 pH 值的变化主要是由根系呼吸作用释放  $\text{CO}_2$  以及在离子的主动吸收和根尖细胞伸长过程中分泌质子和有机酸所致<sup>[23]</sup>。从图 1 可以看出,随着 Cd、Pb 的加入,除处理 4 和处理 11 印度芥菜根际土壤 pH 值都有所降低外,其余处理土壤 pH 值无明显变化,这可能是由于试验用的土壤为 pH 值 8.28 的石灰性土壤,对印度芥菜根系分泌的有机酸等有很强的缓冲性。除处理 8 和处理 10 外,油菜根际土壤 pH 值随着 Cd、Pb 的加入有增加趋势,但各处理间差异不明显,

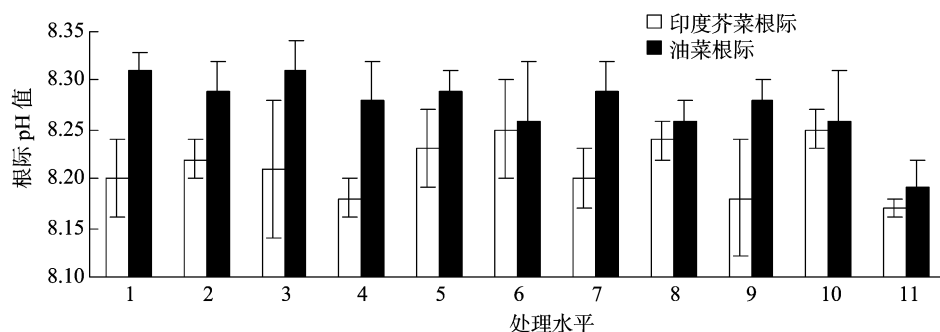


图1 Cd、Pb 复合污染处理印度芥菜和油菜根际 pH 值

## 2.3 Cd、Pb 复合污染处理印度芥菜和油菜根际土壤微生物的数量分析

### 2.3.1 印度芥菜和油菜根际土壤细菌数量的变化

从表 4 可以看出,印度芥菜和油菜根际土壤细菌的数量与 Cd、Pb 复合污染的处理浓度有关。印度芥菜根际土壤细菌数量的变幅为  $1.04 \times 10^8 \sim 3.54 \times 10^8$  个/g,平均为  $2.36 \times 10^8$  个/g;油菜根际土壤细菌数量的变幅为  $0.72 \times 10^7 \sim 4.40 \times 10^7$  个/g,平均为  $2.66 \times 10^7$  个/g。印度芥菜根际土壤细菌数量约为同处理油菜根际土壤的 4 ~ 26 倍,两者差异较大,通过成对  $t$  检验显示,差异达极显著性水平。这可能是由于印度芥菜特有的根际环境效应,造成土壤中细菌生长所需的有机物质增加,从而导致了 Cd、Pb 非敏感性细菌数量的上升,也可能是由于重金属的胁迫效应造成细菌的生理生化特性发生变异,从而使数量增加。

### 2.3.2 印度芥菜和油菜根际放线菌数量的变化

在 Cd、Pb 复合污染处理下,印度芥菜和油菜根际土壤中放线菌的数量明显小于细菌(表 4)。印度芥菜根际土壤中放线菌数量的变幅为  $2.37 \times 10^6 \sim 5.44 \times 10^6$  个/g,平均为  $3.81 \times 10^6$  个/g;油菜根际

这可能是由于在 Cd、Pb 复合污染胁迫下,重金属对油菜根系  $\text{H}^+$  的分泌具有抑制作用<sup>[24]</sup>,使得 pH 值有所升高,降低了重金属的迁移能力,减弱其毒性,同时增强了油菜耐重金属的能力<sup>[25]</sup>。在相同 Cd、Pb 复合污染处理下,印度芥菜根际土壤 pH 值均明显低于油菜根际土壤,成对  $t$  检验结果显示,差异达到极显著性水平。这说明,与一般植物相比,富集植物印度芥菜自身根系能够释放质子和有机酸,导致根际酸化,pH 值有所降低,这对于根际土壤重金属保持较高的生物有效性或促进重金属活化是非常有利的,从“2.1”节的结果分析也可以看出,在大多处理下印度芥菜根际土壤有效态重金属含量明显高于油菜根际土壤。

土壤中放线菌数量的变幅为  $0.89 \times 10^6 \sim 3.37 \times 10^6$  个/g,平均为  $1.69 \times 10^6$  个/g。印度芥菜根际土壤放线菌数量均比同处理油菜根际放线菌数量要高,但二者差异不大。

### 2.3.3 印度芥菜和油菜真菌数量的变化

由表 4 可知,在 Cd、Pb 复合污染处理下,印度芥菜和油菜根际土壤中真菌的数量比细菌、放线菌少。印度芥菜根际土壤中真菌数量的变幅为  $2.25 \times 10^5 \sim 6.50 \times 10^5$  个/g,平均为  $4.46 \times 10^5$  个/g;油菜根际土壤中真菌数量的变幅为  $2.57 \times 10^4 \sim 3.60 \times 10^4$  个/g,平均为  $2.91 \times 10^4$  个/g。印度芥菜根际土壤真菌数量约为同处理油菜根际真菌数量的 3 ~ 24 倍,通过成对  $t$  检验显示,差异达极显著水平。

由表 4 还可以看出,在 Cd、Pb 复合污染处理下,印度芥菜和油菜根际土壤中,均为细菌数量最多,数量级分别为  $10^8$  个/g 和  $10^7$  个/g,其次是放线菌,数量级均为  $10^6$  个/g,真菌数量最小,数量级分别为  $10^5$  个/g 和  $10^4$  个/g。但相比较而言,印度芥菜根际土壤中细菌和真菌的数量显著高于油菜,这是由于富集植物印度芥菜在其根系分泌物作用下,降低了根际土壤环境的 pH 值,促进了细菌和真菌

表 4 不同 Cd、Pb 复合污染处理印度芥菜和油菜根际土壤微生物的数量

处理号	印度芥菜			油菜		
	细菌 ( × 10 <sup>8</sup> 个/g)	放线菌 ( × 10 <sup>6</sup> 个/g)	真菌 ( × 10 <sup>5</sup> 个/g)	细菌 ( × 10 <sup>7</sup> 个/g)	放线菌 ( × 10 <sup>6</sup> 个/g)	真菌 ( × 10 <sup>4</sup> 个/g)
1	1.04f	2.61d	2.25f	2.39cd	1.16c	2.86b
2	1.53ef	3.48bcd	3.45d	4.01a	1.00c	3.05ab
3	2.51cd	2.37d	2.50ef	3.98ab	1.24c	2.57b
4	1.79e	4.23abc	3.15de	2.52cd	3.18a	2.80b
5	2.82bcd	3.62bcd	4.52c	1.41ef	1.29c	3.11ab
6	3.22ab	2.84cd	4.65c	1.25ef	2.25b	3.60a
7	1.58ef	4.19abc	5.12bc	0.72f	1.13c	2.71b
8	3.06abc	3.85bcd	5.15bc	1.71f	0.89c	3.23ab
9	2.42d	4.46ab	6.15a	3.12bc	1.01c	2.81b
10	2.40d	4.80ab	6.50a	4.40a	3.37a	2.74ab
11	3.54e	5.44a	5.65ab	3.70ab	2.06b	2.58b

的生长<sup>[26]</sup>,同时根系分泌物为土壤微生物提供了生长所需的碳源和能源物质,从而促进了根际微生物的生长,并提高了其活性,部分减缓了重金属对土壤微生物的抑制作用<sup>[27]</sup>。这与前人的一些研究结果相类似,如 Delorme 等报道 Zn 超富集植物遏蓝菜 (*Thlaspi caerulescens*) 比非富集植物红车轴草 (*Trifolium pratense*) 根际土壤具有更多的耐重金属细菌和真菌<sup>[28]</sup>。李廷强等的研究结果也表明,超富集生态型东南景天根际土壤中细菌和真菌数量显著高于非超富集生态型<sup>[29]</sup>。这说明印度芥菜特殊的根际特征为土壤中微生物的生长和繁殖提供了适应的生存环境,导致对重金属胁迫适应性强的微生物种群和群落结构形成,这些耐性微生物在印度芥菜根际重金属的活化和溶解过程中起重要作用,并且试验表明,起作用的耐性微生物主要是细菌和真菌,放线菌的作用不是主要的。有关这些耐性微生物的分离鉴定及其在印度芥菜根际土壤重金属活化和溶解过程中的作用机制还需进一步深入研究。

3 结论

本研究中,在 Cd、Pb 复合污染条件下,印度芥菜对土壤中难溶态 Cd、Pb 具有很强的活化和溶解能力。富集植物印度芥菜根际土壤 pH 值显著低于同处理油菜,根际土壤中细菌和真菌的数量显著高于同处理油菜,对于放线菌数量,二者之间差异不大,细菌和真菌在印度芥菜根际重金属的活化和溶解过程中起主要作用。因此,与普通植物相比,富集植物印度芥菜根系向根际分泌一些质子、金属结合体[金属硫蛋白(MTs)、植物螯合肽(PCS)]或有机物如有机酸等,导致根际土壤酸化,pH 值降低,同时在重金属胁迫下,印度芥菜根际土壤中耐性细菌

和真菌的数量增加,甚至可能导致一些特殊的微生物区系存在。在根系分泌物和根际微生物的共同作用下所形成的特殊根际环境,使印度芥菜具有能够强烈活化和溶解土壤中重金属的能力,是其能够超富集重金属的根本原因。

参考文献:

[1]邢艳帅,乔冬梅,朱桂芬,等. 土壤重金属污染及植物修复技术研究进展[J]. 中国农学通报,2014,30(17):208-214.

[2]McMrath S P,Dunham S J,Correll R L. Potential for phytoextraction of zinc and cadmium from soils using hyperaccumulator plants[M]//Terry N. Phytoremediation of contaminated soil and water. Boca Raton,FL,USA:CRC Press,2000,109-128.

[3]聂亚平,王晓维,万进荣,等. 几种重金属(Pb、Zn、Cd、Cu)的超富集植物种类及增强植物修复措施研究进展[J]. 生态科学,2016,35(2):174-182.

[4]Knight B,Zhao FJ,McGrath SP,et al. Zinc and cadmium uptake by the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* in contaminated soils and its effects on the concentration and chemical speciation of metals in soil solution[J]. Plant Soil,1997,197:71-78.

[5]AlNajar H,Schulz R,Romheldtl V. Plant availability of thallium in the rhizosphere of hyperaccumulator plants: a key factor for assessment of phytoextraction[J]. Plant Soil,2003,249:97-105.

[6]Abou-Shanab R I,Delorme T A,Angle J S,et al. Phenotypic characterization of microbes in the rhizosphere of *Alyssum mural*[J]. International Journal of Phytoremediation,2003,5(4):367-379.

[7]Gadd G M. Fungal production of citric and oxalic acid:importance in metal speciation,physiology and biogeochemical processes[J]. Adv Microb Physiol,1999,41:47-92.

[8]陈素华,孙铁珩,周启星,等. 微生物与重金属间的相互作用及其应用研究[J]. 应用生态学报,2002,13(2):239-242.

[9]杨文浩. 镉污染/镉-锌-铅复合污染土壤植物提取修复的根际微生态效应研究[D]. 杭州:浙江大学,2014.

[10]孙涛,张玉秀,柴团耀. 印度芥菜(*Brassica juncea* L.)重金属耐性机理研究进展[J]. 中国生态农业学报,2011,19(1):226-234.

[11] Ebbs S D, Lasat M M, Brady D J, et al. Phytoextraction of cadmium and zinc from a contaminated soil [J]. Journal of Environmental Quality, 1997, 26 (5) : 1424 – 1430.

[12] 陈友媛, 卢爽, 惠红霞, 等. 印度芥菜和香根草对 Pb 污染土壤的修复效能及作用途径 [J]. 环境科学研究, 2017, 30 (9) : 1365 – 1372.

[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] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.

[15] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.

[16] 刘铭, 刘凤枝, 刘保峰. 土壤中有效态铅和镉的测定 [J]. 农业环境科学学报, 2007, 26 (增刊 1) : 300 – 302.

[17] 许光辉, 郑洪元. 土壤微生物分析方法 [M]. 北京: 农业出版社, 1986.

[18] 吕建波, 徐应明, 贾堤, 等. 土壤镉、铅污染对油菜生长行为及重金属累积效应的影响 [J]. 天津城市建设学院学报, 2005, 11 (2) : 107 – 110.

[19] Tessier A, Campbell P, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals [J]. Analytical Chemistry, 1979, 51 (7) : 844 – 851.

[20] 苏德纯, 黄焕忠, 张福锁. 印度芥菜对土壤中难溶态 Cd 的吸收及活化 [J]. 中国环境科学, 2002, 22 (4) : 55 – 58.

[21] 贾夏, 董岁明, 周春娟. Cd、低 Pb/Cd 下冬小麦幼苗根系分泌物酚酸、糖类及与根际土壤微生物活性的关系 [J]. 生态学报, 2012, 32 (13) : 4052 – 4061.

[22] 杨志新, 刘树庆. 土壤重金属复合污染对油菜生长的影响 [J]. 河北农业大学学报, 2000, 23 (3) : 27 – 30.

[23] Xian X. Effect of chemical forms of cadmium, zinc, and lead in polluted soils on their uptake by cabbage plants [J]. Plant and Soil, 1989, 113 (2) : 257 – 264.

[24] Kennedy C D, Gonsalves F A N. The action of divalent Zn, Cd, Hg, Cu, and Pb on the trans – root potential and H<sup>+</sup> efflux of excised roots [J]. Journal of Experimental Botany, 1987, 190 : 800 – 817.

[25] 曹裕松, 李志安, 邹碧. 根际环境的调节与重金属污染土壤的修复 [J]. 生态环境, 2003, 12 (4) : 493 – 497.

[26] 李廷强, 朱恩, 杨肖娥, 等. 超积累植物东南景天根际可溶性有机质对土壤锌吸附解吸的影响 [J]. 应用生态学报, 2008, 19 (4) : 838 – 844.

[27] Brookes P C. The use of microbial parameters in monitoring soil pollution by heavy – metals [J]. Biology and Fertility of Soils, 1995, 19 (4) : 269 – 279.

[28] Delorme T A, Gagliardi J V, Angle I S, et al. Influence of the zinc hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* J. & C. Presl. and the nonmetal accumulator *Thifolium pratense* L. on soil microbial populations [J]. Canadian Journal of Microbiology, 2001, 47 (8) : 773 – 776.

[29] 李廷强, 舒钦红, 杨肖娥. 不同程度重金属污染土壤对东南景天根际土壤微生物特征的影响 [J]. 浙江大学学报 (农业与生命科学版), 2008, 34 (6) : 692 – 698.

(上接第 271 页)

表 4 活性炭制备试验结果极差分析

项目	氯化锌与甘蔗渣质量比	浸泡时间 (h)	甘蔗渣干质量 (g)	微波功率 (W)	热解温度 (℃)	保温时间 (min)	氮气流量 (cm <sup>3</sup> /min)
k <sub>1</sub>	41.14	41.35	42.10	42.58	41.10	37.89	38.33
k <sub>2</sub>	29.41	25.47	27.94	33.99	34.93	34.91	31.98
k <sub>3</sub>	34.40	32.47	34.91	28.38	28.91	32.65	34.63
极差	11.73	15.88	14.16	14.20	12.19	5.24	6.35

氯化锌法制备甘蔗渣基活性炭试验中, 各因素主次顺序依次为浸泡时间、微波功率、甘蔗渣干质量、热解温度、氯化锌与甘蔗渣质量比、氮气流量、保温时间。制备甘蔗渣活性炭的较优条件: 氯化锌与甘蔗渣质量比为 1 : 1, 浸泡时间为 12 h, 蔗渣干质量为 10 g, 微波功率为 500 W, 热解温度为 400 ℃, 保温时间为 10 min, 氮气流量为 100 cm<sup>3</sup>/min。在此条件下, 得到甘蔗渣基活性炭产率为 83%。

参考文献:

[1] Paul W, Wen C, Mario E. Fluorescence analysis of a standard fulvic acid and tertiary treated wastewater [J]. Journal of Environment Quality, 2001, 30 (6) : 2037.

[2] Chen J, Gu B, Lebeuf E J, et al. Spectroscopic characterization of the structural and functional propeties of natural organic matter fractions [J]. Chemosphere, 2002, 48 (1) : 59 – 68.

[3] 符嫦娥. 吸附催化研究进展 [J]. 河北化工, 2009, 32 (11) : 11 – 12.

[4] 罗亚楠, 于丽颖, 于晓洋. 磷酸 – 微波活化法制备秸秆基活性炭 [J]. 广州化工, 2015, 43 (13) : 82 – 84.

[5] 杨晓庆, 陈晓波, 张丹, 等. 甘蔗渣微波活性炭的制备及再生研究 [J]. 江苏农业科学, 2012, 40 (11) : 276 – 278.

[6] 吴文炳, 陈建发, 林小兰, 等. 甘蔗渣微波制备活性炭吸附剂及其再生研究 [J]. 湖北民族学院学报 (自然科学版), 2010, 28 (2) : 201 – 203, 210.

[7] 蒋卉, 蒋文举, 金燕, 等. ZnCl<sub>2</sub> – 微波法制甘蔗渣活性炭工艺条件研究 [J]. 资源开发与市场, 2005, 21 (2) : 93 – 94.

[8] 白晓波, 黄谷亮, 雷程. 微波法制备蔗渣活性炭及其用于糖液脱色的研究 [J]. 广西蔗糖, 2009 (3) : 42 – 44.

[9] 陈燕清, 何春林, 梁玉石. 含砷硫铁矿吸收微波特性研究 [J]. 广东化工, 2012, 39 (12) : 38 – 40.

[10] 苏秀娟, 莫秋红, 何春林, 等. 锰及其化合物微波吸收性能研究 [J]. 矿冶工程, 2015, 35 (5) : 90 – 94.