

香薷的重金属耐性与吸收性研究^①

宓彦彦^{1,2}, 吴龙华^{2*}, 谭长银¹, 赵冰³, 周守标³, 骆永明²

(1 湖南师范大学资源与环境学院, 长沙 410081; 2 中国科学院土壤环境与污染修复重点实验室(南京土壤研究所), 南京 210008;

3 安徽师范大学生命科学学院, 重要生物资源保护与利用安徽省重点实验室, 安徽芜湖 241000)

摘要: 采用温室土培盆栽试验和水培试验方法, 研究了重金属复合污染条件下香薷的 Cu、Zn、Cd、Pb 耐性和吸收性。结果表明, 土培试验中, 各重金属处理条件未对香薷造成毒害, 香薷均生长良好, 且各处理间生物量无显著差异; 香薷地上部 Cu、Zn、Cd、Pb 浓度最高分别为 12.1、100、0.83、11.3 mg/kg。水培试验条件下, Cu 50 μmol/L、Zn 200 μmol/L+Cd 10 μmol/L 及 Pb 100 μmol/L 处理时香薷均生长良好, 且生物量与对照均无显著差异, 根部 Cu、Zn、Cd、Pb 浓度最高为 2 270、1 648、1 029、25 331 mg/kg; Cu 100 μmol/L 处理时香薷生物量显著低于对照, 但并未死亡, 该处理下香薷叶片丙二醛、还原型谷胱甘肽、可溶性糖浓度均显著高于对照。两组试验表明, 香薷对 Cu、Zn、Cd、Pb 有极强的耐性, 是一种良好的可栽种于重金属污染土壤的经济作物。

关键词: 香薷; 重金属; 耐性; 吸收性

中图分类号: X53

随着采矿、冶金业的不断发展, 土壤重金属污染问题日趋严重, 已经受到环境、土壤科学家们的广泛关注^[1]。植物修复以其成本低、不破坏土壤和河流生态环境、不引起二次污染等优点表现出了广阔的市场前景^[2-4]。黄铭洪等^[5]认为在重金属污染土壤上种植金属耐受性植物可降低金属的移动性, 并减少进入食物链的金属生物有效性。

香薷(*Elsholtzia ciliata*)是香薷属一年生草本植物, 其生物量大, 生长快, 是赏食皆宜的药用植物^[6]。香薷属植物重金属耐性较早即有研究, 目前已证实海州香薷(*Elsholtzia splendens*)是 Cu 的高耐性植物^[7-8]。鉴于土壤重金属污染呈多元素复合型, 且对香薷属其他植物的多种重金属耐性和吸收性的研究较少。因此, 本文拟以海州香薷近缘种香薷为供试材料, 研究其 Cu、Zn、Cd、Pb 耐性和吸收特性, 旨在为重金属复合污染土壤提供植物修复资源, 并为香薷作为药用植物在重金属污染土壤上进行大面积种植提供新的思路和参考依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤(普通黏化湿润富铁土)采自浙江省杭

州市郊区某金属冶炼厂附近重金属污染农田, 将采集的 0~20 cm 表层土壤风干后过 2 mm 筛, 备用。供试土壤全氮为 1.92 g/kg、全磷 0.83 g/kg、全钾 13.1 g/kg、阳离子交换量(CEC)为 7.56 cmol (+)/kg、有机碳 19.9 g/kg、pH 7.50。土壤全量 Cu、Zn、Cd、Pb 分别为 944、5 059、2.62 和 955 mg/kg。供试香薷种子采自浙江绍兴某铅锌矿区, 于中国科学院南京土壤研究所植物生长室培养育苗, 温度 25°C(光照)/20°C(黑暗), 相对湿度 65%~70%, 光照时间 14 h, 光强 1.5 × 10⁴ lx; 培养基为蛭石。待苗长出 4 片真叶后选择大小一致、长势良好的幼苗移栽, 进行盆栽试验和水培试验。

1.2 试验设计与实施

1.2.1 香薷土培盆栽试验 试验于 2009 年 3 月 30 日至 10 月 15 日在中国科学院南京土壤研究所温室进行, 向供试土壤中外加 200 mg/kg Cu、300 mg/kg Zn +10 mg/kg Cd、600 mg/kg Pb 进行盆栽试验, 试验处理见表 1。重金属分别采用硝酸盐溶液形式加入, 其中 Zn+Cd 处理先添加 Zn, 待幼苗无中毒症状, 长势良好的情况下再加入 Cd, 5 月 20 日添加完全部重金属。试验每处理 4 次重复, 每盆 4 株苗。在开花末期(10 月 15 日)收获。

基金项目: 国家自然科学基金项目(40821140539, 40871155)和科技部国际科技合作项目(2010DFA92360)资助。

* 通讯作者(lhwu@issas.ac.cn)

作者简介: 宓彦彦(1986—)女, 山东聊城人, 硕士研究生, 主要从事土壤污染与植物修复研究。E-mail: miyanyan1987@126.com

表 1 土培盆栽试验各处理重金属浓度(mg/kg)
Table 1 Heavy metal concentrations of pot experiment treatments

处理	Cu	Zn	Cd	Pb
CK	944	5 059	2.62	955
Cu	1 144	5 059	2.62	955
Zn+Cd	944	5 359	12.6	955
Pb	944	5 059	2.62	1 555

1.2.2 香薷水培试验 试验于 2011 年 4 月 3 日至 6 月 3 日在中国科学院南京土壤研究所玻璃温室进行。预培养一周后,选取根系发达、长势一致的香薷幼苗进行水培试验,试验采用 1.8 L 塑料桶盛装 1.6 L 的 Hoagland 全营养液,用有孔的塑料板作为桶盖载体,植株用海绵固定。重金属处理如下: CK: 正常 Hoagland 营养液,不外加重金属; Cu50: 外加 Cu 50 $\mu\text{mol/L}$; Cu100: 外加 Cu 100 $\mu\text{mol/L}$; Zn+Cd: 外加 Zn 200 $\mu\text{mol/L}$ 、Cd 10 $\mu\text{mol/L}$; Pb: 外加 Pb 100 $\mu\text{mol/L}$ 。Cu、Zn、Cd、Pb 分别以 CuSO_4 、 $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ 、 $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$ 、 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 溶液形式加入,不同处理间的硝态氮以硝酸铵平衡。试验每处理 4 次重复,每盆 5 株苗,保证通气良好,每 3 天更换一次营养液;2011 年 6 月 3 日收获。

1.3 样品处理与测定

收获后,水培香薷每组处理取叶片鲜重 3 g,各用 1 g 测定生理指标丙二醛(MDA)和可溶性糖、游离脯氨酸(Pro)、还原型谷胱甘肽(GSH)。MDA 和可溶性糖含量采用硫代巴比妥酸(TBA)法测定,GSH 含量采用巯基试剂(DTNB)法测定,Pro 含量采用磺基水杨酸提取茚三酮显色法测定。将剩余水培香薷和收获的土培盆栽香薷分为地上部和根两部分,依次用自来水和去离子水洗净,105 $^{\circ}\text{C}$ 杀青 30 min,80 $^{\circ}\text{C}$ 下烘干至恒重,测定植物干重生物量后用不锈钢粉碎机粉碎,

样品经 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ 消解,原子吸收分光光度计(Varian SpectrAA220FS(火焰)、220Z(石墨炉))测定香薷地上部和根中 Cu、Zn、Cd、Pb 浓度。

1.4 数据分析与统计

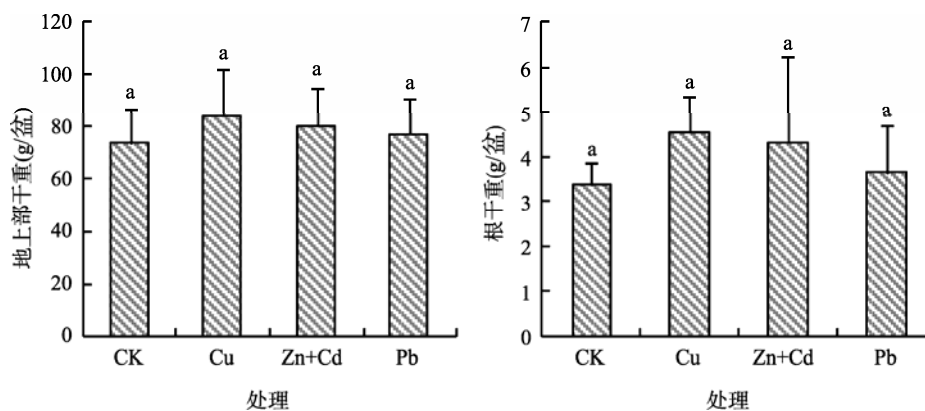
采用 Microsoft Excel 软件和 SPSS13.0 进行相关数据统计,用最小显著差异法(LSD)进行差异显著性比较($P<0.05$)。

2 结果与讨论

2.1 土培盆栽条件下香薷生物量及体内重金属浓度变化

2.1.1 不同重金属处理对香薷地上部和根生物量的影响 土培试验供试土壤 Cu、Zn、Cd、Pb 4 种元素含量分别为 944、5 059、2.62 和 955 mg/kg,均高出《土壤环境质量标准》(GB15618-1995)^[9]的三级标准数倍,但长期污染后土壤中重金属的有效性不高,因此本试验采用外加 Cu 200 mg/kg、Zn 300 mg/kg 和 Cd 10 mg/kg、Pb 600 mg/kg 处理。结果表明,各外加重金属处理条件下香薷均生长良好,4 组处理香薷地上部干重和根干重均无显著差异($P>0.05$),表明香薷对 Cu、Zn、Cd、Pb 具有较强的耐性,添加重金属处理未对植物造成毒害(图 1)。

2.1.2 不同重金属处理对香薷地上部和根重金属浓度的影响 外源添加重金属条件使香薷地上部重



(图中字母不同表示处理间差异达到 $P<0.05$ 显著水平,下同)

图 1 土培条件下不同重金属处理对香薷生物量的影响

Fig. 1 Effects of different treatments on plant biomass of *Elsholtzia ciliata* at pot experiment

金属浓度显著上升, 但不同重金属的处理效应不同(表 2)。植物 Pb 浓度增加量最大, 是对照的 4.69 倍; Cu 浓度增加量最小, 是对照的 1.50 倍; 这可能与重金属有效性不同和香薷对重金属吸收能力不同有关。地上部 Cu、Zn、Cd、Pb 浓度最高分别为 12.1、100、0.83、11.3 mg/kg, 相比于海州香薷和紫花香薷, 香薷地上部对重金属的富集性较低^[8, 11], 且与未受污染土壤上香薷植物体内重金属浓度无显著差异^[12]。

香薷根中 Cu、Zn、Cd、Pb 浓度最高分别为 282、188、9.92 和 362 mg/kg, 处理间差异显著($P < 0.05$), 其中 Pb 处理浓度增加量最大, 是对照的 14.7 倍。Song 等^[8]研究发现, 在土壤 Cu 最高浓度(8 645 mg/kg)条件下, 海州香薷根部 Cu 浓度达 6 000 mg/kg, 表明海州香薷对 Cu、Zn、Cd、Pb 具有较高的耐性, 其根可有效阻滞重金属的吸收和向地上部的转移(表 2), 为典型排斥植物^[13], 本试验香薷的重金属耐性与吸收性结果与此相似。此外, Zn+Cd 处理中地上部和根中 Cu 浓度显著高于对照, Cu、Pb 处理均显著增加了根中 Zn 浓度, 表明元素间存在明显交互作用, Zn 和 Cd 处理促进植物对 Cu 的吸收, Cu 或 Pb 过高也将促进植物对 Zn 的吸收。

2.1.3 香薷的重金属富集系数与转移系数 香薷的生物富集系数(BCF)(即植物地上部重金属浓度与土壤中该重金属浓度的比值)列于表 3。外源添加重金属处理下, 相应重金属的富集系数与对照相比未显著增加。香薷对 4 种重金属的 BCF 大小顺序是 Cd > Zn > Cu > Pb, Cd 的 BCF 最大为 0.146, Pb 的 BCF 最大为 0.007, 可见香薷在 Cu、Zn、Pb、Cd 复合污

染下对重金属的富集能力较弱。Cd 的 BCF 在 Pb 处理下最大(表 2), 表明外源 Pb 显著促进了植物地上部对 Cd 的吸收。

香薷的重金属转移系数(TF)(即植物地上部重金属浓度与根中该重金属浓度的比值)列于表 3。外源添加重金属处理下, 相应重金属的 TF 增加不显著, 除 Cd 以外, Cu、Zn、Pb 的 TF 均在对照处理下最大。香薷对 Pb 的 TF 最高为 0.098。这表明香薷从根部向地上部运输重金属的能力较低, 从而可减少植物光合作用及新陈代谢过程的毒害^[12, 14-15]。香薷对 Pb 的 TF 在 Pb 处理下最小, 这可能与该处理显著增加了植物根部 Pb 浓度有关。香薷地上部富集 Cu、Zn、Cd、Pb 浓度较低(表 2), 且对 4 种元素的 TF 均小于 1(表 3), 所以根据 Baker 等^[16]提出的超积累植物参考标准, 香薷不属于超积累植物, 是一种耐性植物。

2.2 水培条件下香薷生物量与重金属浓度和生理指标变化

2.2.1 不同重金属处理对香薷地上部和根生物量的影响 水培试验条件下, CK、Cu50、Zn+Cd、Pb 处理香薷均长势良好, 叶色浓绿, 且 4 组处理之间地上部和根干重均无显著差异($P > 0.05$)(图 2)。Cu100 处理香薷明显较对照矮小, 叶片偏黄, 根系发黑, 但并未死亡, 地上部和根干重均显著低于其他处理, 相比对照均下降 44.9%, 差异显著($P < 0.05$)。这表明香薷对 Cu、Zn、Cd、Pb 具有较强的耐性, 同时对重金属有一定的耐受范围, 即随着 Cu 浓度增加, 香薷生物量呈先增大后降低趋势, 高浓度 Cu(100 $\mu\text{mol/L}$)抑制香薷生长。李华等^[17]研究发现, 低浓度 Cu(25 ~ 50

表 2 土培条件下香薷地上部和根部重金属浓度(mg/kg)

Table 2 Heavy metal concentrations in *Elsholtzia ciliate* shoot and root at pot experiment

处理	地上部				根			
	Cu	Zn	Cd	Pb	Cu	Zn	Cd	Pb
CK	8.05 ± 1.54 b	49.4 ± 6.9 b	0.18 ± 0.08 b	2.41 ± 0.65 b	123 ± 23 c	87.9 ± 35.4 b	3.10 ± 1.05 c	24.6 ± 13.4 b
Cu	12.1 ± 2.5 a	57.2 ± 11.6 b	0.25 ± 0.09 b	3.26 ± 0.81 b	282 ± 44 a	167 ± 73 a	4.07 ± 0.68 bc	36.2 ± 11.9 b
Zn+Cd	9.66 ± 2.63 ab	100 ± 28 a	0.83 ± 0.18 a	2.69 ± 0.40 b	205 ± 39 b	188 ± 25 a	9.92 ± 0.94 a	27.9 ± 12.4 b
Pb	7.45 ± 3.02 b	48.3 ± 6.7 b	0.38 ± 0.51 b	11.3 ± 1.1 a	181 ± 63b c	182 ± 56 a	5.51 ± 1.69 b	362 ± 40 a

注: 表中数值为平均值±标准差($n=4$), 同列中不同字母表示处理间差异达到 $P < 0.05$ 显著水平, 下同。

表 3 香薷的重金属富集系数与转移系数

Table 3 Heavy metal bio-concentration factor and transfer factor of *Elsholtzia ciliate*

处理	富集系数				转移系数			
	Cu	Zn	Cd	Pb	Cu	Zn	Cd	Pb
CK	0.009	0.010	0.068	0.003	0.065	0.561	0.057	0.098
Cu	0.011	0.011	0.096	0.003	0.043	0.342	0.062	0.090
Zn+Cd	0.010	0.019	0.097	0.003	0.047	0.535	0.084	0.097
Pb	0.008	0.009	0.146	0.007	0.041	0.265	0.070	0.031

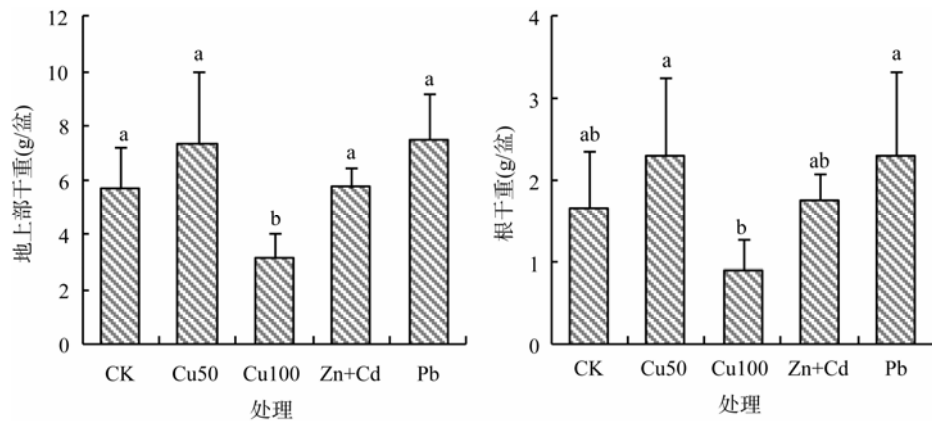


图 2 水培条件下不同处理对香薷地上部和根部生物量的影响

Fig. 2 Effects of different treatments on *Elsholtzia ciliate* biomass at hydroponics experiment

$\mu\text{mol/L}$)可促进海州香薷生长,高浓度 Cu(75~100 $\mu\text{mol/L}$)时植物出现生长受抑,在 50 $\mu\text{mol/L}$ Cu 处理时生物量达最大值;Yang 等^[18]的海州香薷 Cu 耐性试验中,最高 Cu 浓度达 100 $\mu\text{mol/L}$,在此浓度下植物出现叶片萎黄中毒症状。本试验结果与以上相似,即香薷与海州香薷相似,对重金属具有较高的耐性,但重金属尤其是 Cu 处理过高则产生明显毒害,生物量显著下降。

2.2.2 不同重金属对香薷叶片生理指标的影响

重金属胁迫导致植物体内产生大量活性氧自由基,对植物产生毒害,损伤生物大分子以及引起膜脂过氧化,从而引起细胞的衰老和死亡^[19]。丙二醛(MDA)是膜脂过氧化程度的重要指标。从表 4 可以看出,CK、Cu50、Zn+Cd、Pb 处理之间 MDA 浓度无显著差异,Cu100 处理 MDA 浓度相比对照增加 72.8%,差异极显著($P < 0.01$),说明 Cu100 处理下香薷 MDA 积累,膜脂过氧化作用加剧,膜透性增大^[20-21],表现为植株矮小、叶片黄化(生物量下降(图 2))。

植物体内存在多种抗氧化防卫系统,还原型谷胱甘肽(GSH)是植物体内重要的抗氧化剂,它可防止膜脂过氧化,清除自由基和重金属。由表 4 可知,Cu100、Zn+Cd 和 Pb 处理 GSH 浓度相比对照分别增加 197%、45.9% 和 35.1%,其中 Cu100 处理与对照差异极显著($P < 0.01$),Zn+Cd 和 Pb 处理与对照差异显著

($P < 0.05$)。这表明在重金属胁迫条件下,香薷通过提高 GSH 在内的含硫代谢物来清除自由基和重金属,增强植物在重金属胁迫下的生存能力^[10],表现了自身较强的耐性。比较 Qian 等^[22]对海州香薷 Cu 耐性的研究发现,同在对照处理下(0.32 $\mu\text{mol/L}$ Cu),香薷叶片 GSH 浓度(0.37 mg/g)高于海州香薷叶片(0.14 mg/g),这表明香薷比海州香薷具有更强的抗逆性;随着 Cu 浓度的升高,在同一浓度下香薷叶片 GSH 浓度高于海州香薷叶片,这可能与处理时间不同有关。

可溶性糖和脯氨酸(Pro)是植物重要的渗透调节物质,有助于提高植物的抗逆性。从表 4 可以看出,Cu100 处理可溶性糖浓度相比对照增加 44.4%,差异极显著($P < 0.01$),表明香薷通过提高体内可溶性糖含量以增加细胞渗透势和功能蛋白的数量,从而提高植物的抗逆性^[23]。水培试验各处理之间香薷的 Pro 浓度无显著差异($P > 0.05$)。

香薷体内 MDA、GSH、可溶性糖浓度均随着 Cu 浓度的增加而增大(表 4),表明随着 Cu 浓度增大,香薷受胁迫程度增大,100 $\mu\text{mol/L}$ Cu 浓度时香薷出现中毒症状。

2.2.3 不同处理对香薷地上部和根重金属浓度的影响

外源添加重金属显著提高了香薷地上部与根相应重金属浓度,且根部重金属浓度显著高于地上部(Zn 除外)(表 5)。各重金属处理中,香薷地上部重金

表 4 水培条件下不同处理对香薷植物叶片生理指标的影响

Table 4 Effects of different treatments on leaf physiological characteristics of *Elsholtzia ciliate* at hydroponics culture

处理	MDA(nmol/g FW)	GSH(mg/g FW)	可溶性糖(mmol/g FW)	Pro($\mu\text{g/g}$ FW)
CK	4.52 \pm 0.69 bc	0.37 \pm 0.03c	0.09 \pm 0.01bc	277 \pm 114 a
Cu50	5.20 \pm 0.35 b	0.37 \pm 0.05 c	0.11 \pm 0.02ab	274 \pm 5 a
Cu100	7.81 \pm 0.04 a	1.10 \pm 0.11 a	0.13 \pm 0.01 a	302 \pm 66 a
Zn+Cd	3.87 \pm 0.05 c	0.54 \pm 0.01 b	0.07 \pm 0.00 c	286 \pm 25 a
Pb	4.47 \pm 0.53 bc	0.50 \pm 0.04 b	0.10 \pm 0.02b	254 \pm 45 a

表 5 水培条件下香薷地上部和根部重金属浓度(mg/kg)
Table 5 Plant heavy metal concentrations by *Elsholtzia ciliata* at hydroponics experiment

处理	地上部				根			
	Cu	Zn	Cd	Pb	Cu	Zn	Cd	Pb
CK	2.91 ± 0.46 c	104 ± 10 b	0.96 ± 0.12 b	4.39 ± 1.90 b	28.3 ± 7.2 b	69.0 ± 1.7 b	13.8 ± 1.1 b	13.0 ± 2.2 b
Cu50	26.1 ± 3.0 b	121 ± 19 b	0.81 ± 0.04 b	5.55 ± 0.68 b	517 ± 14 b	109 ± 25 b	6.71 ± 0.58 b	39.1 ± 25.0 b
Cu100	49.6 ± 2.7 a	124 ± 20 b	1.97 ± 0.07 b	2.76 ± 0.67 b	2270 ± 311 a	160 ± 17 b	6.51 ± 0.73 b	16.6 ± 6.9 b
Zn+Cd	2.64 ± 0.40 c	1859 ± 234 a	79.6 ± 0.8 a	2.48 ± 0.13 b	14.5 ± 1.1 b	1648 ± 552 a	1029 ± 87 a	17.1 ± 5.5 b
Pb	3.29 ± 0.32 c	107 ± 5 b	1.09 ± 0.12 b	570 ± 47 a	17.7 ± 1.4 b	138 ± 27 b	5.08 ± 0.16 b	25 331 ± 164 a

属浓度与普通植物无明显差异;但根部显著高于对照,差异极显著($P < 0.01$),其中 Zn+Cd 处理中 Cd 浓度是对照的 74.6 倍;Pb 处理中 Pb 浓度达 25 331 mg/kg,是对照的 1949 倍。随着 Cu 浓度增加,香薷 Cu 浓度呈增加趋势,即 Cu100>Cu50>CK,同样根中高于地上部。与海州香薷比较发现,相同重金属浓度处理下,香薷根和地上部富集 Cu 均低于海州香薷^[24],表明香薷根系对 Cu、Zn、Cd、Pb 均有极强的耐性和排斥滞留性,且其能力较海州香薷更高。Zn+Cd 处理下植物地上部 Zn 浓度(1 859 mg/kg)高于根部(1 648 mg/kg),转移系数为 1.13,这可能与 Zn 处理浓度较高或植物不同部位对 Zn 的需求不同有关^[11],有待深入研究。

香薷对 Cu、Zn、Cd、Pb 的耐性可能与重金属在香薷细胞中的区域化分布相关,即重金属存在于细胞壁和液泡中,从而降低其毒性^[25]。植物细胞壁含有大量羟基、羧基、醛基、胺基或磷酸基等亲金属离子的配位基团,它们通过与金属离子配位结合降低原生质体中的金属离子浓度^[26-27]。液泡中含有多种蛋白质、有机酸、有机碱等物质,能与重金属结合使重金属区隔化,是植物内部解毒的重要途径^[28-29]。重金属处理下植物叶片 GSH 浓度显著上升(表 4),表明重金属与富含硫醇的 GSH 螯合,之后被运到液泡贮藏或解毒^[27, 30]。

香薷虽不属于超积累植物,但其生长快,生物量大,周期短,对 Cu、Zn、Cd、Pb 具有较强的耐性,因此可作为重金属复合污染土壤的潜在修复材料。此外,香薷对 Cu、Zn、Cd、Pb 的生物富集系数与转移系数均小于 1(表 3),体内积累重金属小于海州香薷,可以考虑收获后将植物根部焚烧处理,地上部用于中草药或食用,修复重金属污染土壤的同时可产生经济效益。但种植于重金属污染土壤是否对香薷药用和食用成分质量有影响,还有待进一步研究和探索。

3 结论

在长期重金属复合污染土壤上添加 Cu、Zn+Cd、

Pb 处理,各处理香薷均生长良好,香薷地上部与根部生物量均高于对照;外源添加重金属处理未对香薷造成毒害,地上部重金属浓度未显著增加。水培试验条件下,除 Cu100 处理生物量显著低于对照外,其余处理香薷生物量均高于对照;重金属处理显著增加了香薷地上部和根中重金属浓度,其中根部 Cu、Zn、Cd、Pb 浓度最高为 2 270、1 648、1 029、25 331 mg/kg。Cu50、Zn+Cd 和 Pb 处理 MDA 与对照均无显著差异,香薷对 50 $\mu\text{mol/L}$ Cu、200 $\mu\text{mol/L}$ Zn+10 $\mu\text{mol/L}$ Cd、100 $\mu\text{mol/L}$ Pb 处理具有耐性;Cu100、Zn+Cd 和 Pb 处理 GSH 浓度显著高于对照,GSH 作为抗氧化剂参与活性氧代谢,可通过螯合重金属参与植物体内解毒过程。随着 Cu 处理浓度的增加,香薷生物量呈现先增加后降低的趋势,100 $\mu\text{mol/L}$ 高 Cu 处理对香薷造成了毒害,两组试验表明香薷对 Cu、Zn、Cd、Pb 4 种元素均具有较高的耐性,且向地上部的转移系数很低,是一种适于重金属复合污染土壤种植的经济植物。

参考文献:

- [1] 廖晓勇,陈同斌,武斌,阎秀兰,聂灿军,谢华,翟丽梅,肖细元. 典型矿业城市的土壤重金属分布特征与复合污染评价——以“镍都”金昌市为例[J]. 地理研究, 2006, 25(5): 843-852
- [2] 鲍桐,廉梅花,孙丽娜,孙铁珩,苏磊,雷刚. 重金属污染土壤植物修复研究进展[J]. 生态环境, 2008, 17(2): 858-865
- [3] 赵胡,李裕红. 植物对重金属耐性机理的研究进展[J]. 阜阳师范学院(自然科学版), 2008, 25(3): 35-40
- [4] 沈振国,陈怀满. 土壤重金属污染生物修复的研究进展[J]. 生态与农村环境学报, 2000, 16(2): 39-44
- [5] 黄铭洪,骆永明. 矿区土地修复与生态恢复[J]. 土壤学报, 2003, 40(2): 161-169
- [6] 王松岳. 赏食皆宜的药用植物——香薷[J]. 中国花卉盆景, 2006, 23(5): 13
- [7] 唐明灯,胡锋,吴龙华,骆永明. 香薷属植物在重金属修复中的应用进展[J]. 土壤, 2008, 40(5): 698-705
- [8] Song J, Zhao FJ, Luo YM, McGrath SP, Zhang H. Copper uptake by *Elsholtzia splendens* and *Silene vulgaris* and

- assessment of copper phytoavailability in contaminated soils[J]. *Environmental Pollution*, 2004, 128: 307–315
- [9] 国家环境保护局. 土壤环境质量标准(GB15618–1995) [S]. 北京: 中国标准出版社, 1995
- [10] 胡嫣然, 周守标, 吴龙华, 谭维娜, 黄玉娟, 骆永明. 朝天委陵菜的重金属耐性与吸收性研究[J]. *土壤*, 2011, 43(3): 476–480
- [11] 翁高艺, 孙小峰, 吴龙华, 骆永明. 铜锌铅复合污染土壤上香薷植物的生长和重金属吸收动态[J]. *土壤*, 2006, 38(5): 602–608
- [12] Stoltz E, Greger M. Accumulation properties of As, Cd, Cu, Pb and Zn by four wetland plant species growing on submerged mine tailings[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2002, 47: 271–280
- [13] Baker AJM. Accumulators and excluders-strategies in the response of plants to heavy metals[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1981, 3: 643–654
- [14] Coughtrey PJ, Martin MH. Cadmium uptake and distribution in tolerant and nontolerant populations of *Holcus lanatus* grown in solution culture[J]. *Oikos*, 1978, 30: 555–560
- [15] Zurayk R, Sukkariyah B, Baalbaki R. Common hydrophytes as bioindicators of nickel, chromium and cadmium pollution[J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 2001, 127: 373–388
- [16] Baker AJM, Brooks RR, Pease AJ, Malaisse F. Studies on copper and cobalt tolerance in three closely related taxa within the genus *Silene* L. (*Caryophyllaceae*) from Zaïre[J]. *Plant and Soil*, 1983, 73(3): 377–385
- [17] 李华, 骆永明, 宋静. 不同铜水平下海州香薷的生理特性和铜积累研究[J]. *土壤*, 2002, 34(4): 225–228
- [18] Yang MJ, Yang XE, Romheld V. Growth and nutrient composition of *Elsholtzia splendens* Nakai under copper toxicity[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2002, 25: 1 359–1 375
- [19] 田生科. 超积累东南景天(*Sedum alfredii* Hance)对重金属(Zn/Cd/Pb)的解毒机制(博士学位论文) [D]. 杭州: 浙江大学, 2010: 13–20
- [20] Baker AJM, McGrath SP, Sidoli CMD, Reeves RD. The possibility of in situ heavy metal decontamination of polluted soils using crops of metal-accumulating plants[J]. *Resources Conservation and Recycling*, 1994, 11(1/4): 1–49
- [21] 王玉林, 韦美玉, 陈世军. Cr⁶⁺对皱叶留兰香生长及生理生化的影响[J]. *安徽农业科学*, 2008, 36(17): 7 100–7 102
- [22] Qian M, Li XD, Shen ZG. Adaptive copper tolerance in *Elsholtzia haichowensis* involves production of Cu-induced thiol peptides[J]. *Plant Growth Regulation*, 2005, 47: 65–73
- [23] Mathys W. Enzymes of heavy-metal-resistant and non-resistant populations of *Silene cucubalus* and their interaction with some heavy metals *in vitro* and *in vivo*[J]. *Physiologia Plantarum*, 2006, 33(2): 161–165
- [24] Xia Y, Shen ZG. Comparative studies of copper tolerance and uptake by three plant species of the genus *Elsholtzia*[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2007, 79: 53–57
- [25] Chaney RL, Malik M, Li YM, Brown SL, Brewer EP, Angle JS, Baker AJM. Phytoremediation of soil metals. *Current Opinion in Biotechnology*, 1997, 8(3): 279–284
- [26] Allan DL, Jarrell WM. Proton and copper adsorption to *Maize* and *Soybean* root cell walls[J]. *Plant Physiology*, 1989, 89(3): 823–832
- [27] 郭智. 超富集植物龙葵(*Solanum nigrum* L.)对镉胁迫的生理响应机制研究(博士学位论文) [D]. 上海: 上海交通大学, 2009: 10–14
- [28] Verkleij JAC, Schat H. Mechanisms of metal tolerance in higher plants// Shaw AJ. *Heavy Metal Tolerance in Plants: Evolutionary Aspects*[C]. Boca Raton: CRC Press, 1990: 179–194
- [29] Brune A, Urbach W, Dietz KJ. Compartmentation and transport of zinc in barley primary leaves as basic mechanisms involved in zinc tolerance[J]. *Plant, Cell and Environment*, 1994, 17(2): 153–162
- [30] Cobbett CS. Phytochelatins and their roles in heavy metal detoxification[J]. *Plant Physiology*, 2000, 123(3): 825–832

Heavy Metal Tolerance and Uptake of *Elsholtzia ciliate*

MI Yan-yan^{1,2}, WU Long-hua^{2*}, TAN Chang-yin¹, ZHAO Bing³, ZHOU Shou-biao³, LUO Yong-ming²

(1 College of Resources and Environmental Science, Hunan Normal University, Changsha 410081, China;

2 Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3 Anhui Provincial Key Lab. of the Conservation and Exploitation of Biological Resources,

College of Life Sciences, Anhui Normal University, Wuhu, Anhui 241000, China)

Abstract: Glass house pot experiment and hydroponics culture were conducted to study the tolerance and uptake of Cu, Zn, Cd and Pb under mixed heavy metal contaminated conditions by *Elsholtzia ciliate*. The results showed that *E. ciliate* grew well in all the pot treatments, and there was no significant difference in shoot and root biomass. Concentrations of Cu, Zn, Cd and Pb in the shoot were 12.1, 100, 0.83 and 11.3 mg/kg, respectively, which did not show any toxic symptom of plant. In hydroponics culture, *E. ciliate* also grew normally in Cu 50 $\mu\text{mol/L}$, Zn 200 $\mu\text{mol/L}$ +Cd 10 $\mu\text{mol/L}$ and Pb 100 $\mu\text{mol/L}$ treatments, no significant difference existed in shoot and root biomass, and Cu, Zn, Cd and Pb concentrations in root were up to 2270, 1648, 1029 and 25331 mg/kg, respectively. In Cu 100 $\mu\text{mol/L}$ treatment, *E. ciliate* plant biomass were lower than that of the control, but plant was still alive; in this heavy metal treatments, MDA, GSH and soluble sugar concentrations in plant leaves were all higher than that of control. The above results proved that *E. ciliate* has a strong tolerant ability to Cu, Zn, Cd and Pb and is a kind of good economic plant growing on heavy metal contaminated soil.

Key words: *Elsholtzia ciliate*, Heavy metal, Tolerant, Uptake