

蜈蚣菊对污泥重金属的响应、吸收与富集作用

林茂兹^{1,2}, 林能文³, 邱雪芬^{1,2}, 张美燕¹

(1. 福建师范大学福清分校生化系, 福清 350300; 2. 福建师范大学福清分校环境保护研究所, 福清 350300;
3. 福建省福清市环境保护局, 福清 350300)

摘要: 植物修复 (phytoremediation) 是解决越来越突出的重金属污染问题的一种较好方法, 成为生态学和环
境学研究的重要课题。而植物对重金属的响应、吸收与富集作用是该课题的科学基础。为此, 本研究采用盆栽实验
方法, 设定污泥与砂壤土的不同体积配比 (0%污泥、10%污泥、20%污泥和40%污泥) 作为生长基质, 测定在含重
金属基质中生长不同时间 (3、4、5 和 6 个月) 的蜈蚣菊 (*Wedelia trilobata*) 叶片的生理指标 (叶绿素含量、POD
活性、SOD 活性) 和在含重金属基质中生长 6 个月后的蜈蚣菊根、茎、叶中重金属 (Cd、Cr、Mn、Ni、Pb、Cu
和 Zn) 含量。研究结果显示, 总体上, 蜈蚣菊叶片中叶绿素含量随着生长基质中污泥体积比例升高而显著 ($P < 0.05$)
升高; 随着生长基质中污泥体积比例升高, 蜈蚣菊叶片中 SOD 活性、POD 活性变化显著 ($P < 0.05$), 在含重金属
的生长基质中生长 5 个月后, SOD 活性和 POD 活性都显著 ($P < 0.05$) 下降; 在含较高浓度的污泥重金属的生长基
质 (20%污泥和 40%污泥处理) 中生长 6 个月后, 蜈蚣菊叶片中 Ni、Cu、Cr 含量较高。研究结果说明污泥对蜈蚣
菊叶绿素含量有促进作用; 蜈蚣菊对污泥重金属有较强的耐受性, 叶片对 Ni、Cu、Cr 具有超富集作用。

关键词: 蜈蚣菊; 重金属污染; 植物修复; 生物富集

中图分类号: X703

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2012)02-0286-06

Wedelia trilobata's response to heavy metals and heavy metal absorption and enrichment in its body with sludge as a part of growth substrate

LIN Mao-zi^{1,2}, LIN Neng-wen³, QIU Xue-fen^{1,2}, ZHANG Mei-yan¹

(1. Department of Biology and Chemical Engineering, Fujian Normal University, Fuqing 350300;

2. Institute of Environmental Protection, Fuqing Branch of Fujian Normal University, Fuqing 350300;

3. Fuqing Environmental Protection Bureau of Fujian Province, Fuqing 350300)

Abstract: Phytoremediation is a good method for solving more and more prominent heavy metal problems. However, plant's response to heavy metals and heavy metals accumulation in the plant's body are the basic scientific issues in this field. In order to reveal the response of *Wedelia trilobata* to heavy metals and its accumulation effect in sludge, a soil experiment was designed and carried out. The physiological indexes in the leaves of *W. trilobata*, including chlorophyll content, peroxidase (POD) activity, and superoxide dismutase (SOD) activity after planting in different ratios of sludge (containing heavy metals) to sandy soil for three, four, five and six months, were detected respectively. The metals content (Cd, Cr, Mn, Ni, Pb, Cu, Zn) in the leaves, roots, and stems of *W. trilobata* after planting in different ratios of the above growth substrate for six months, were also detected respectively. The results showed that the chlorophyll content in the leaves of *W. trilobata* significantly ($P < 0.05$) ascended with the increase of sludge proportion; the POD activity and SOD activity significantly ($P < 0.05$) changed with the increase of sludge proportion, and both significantly ($P < 0.05$) decreased after growth in the growth substrate; it also showed that the content of Ni, Cu and Cr in the leaves of *W. trilobata* were higher when grown in substrate with higher proportional sludge added (20% and 40% sludge). Our experiment suggest that the sludge is helpful to increase chlorophyll content in the leaves of *W. trilobata*, which has strong tolerance to sludge heavy metals, and it is a hyperaccumulator of Ni, Cu and Cr.

收稿日期: 2011-09-19

基金项目: 国家自然科学基金 (30901151), 福建省自然科学基金 (2011J05062) 和福建省教育厅项目 (JA11284 和 JB10200) 共同资助。

作者简介: 林茂兹, 男, 博士, 讲师。E-mail: dragonlmz@163.com

Key words: *Wedelia trilobata*; heavy metal pollution; phytoremediation; bioaccumulation

随着我国污水处理技术的推广, 污泥产量日益增加。污泥处理不完善, 导致日益严重的二次污染问题。我国现已建成的大中城市污水处理厂 90% 污泥处理设施不配套, 一些中小城市 70% 以上的污泥未经处理就直接农用^[1]。除了含水量高, 体积庞大, 成分复杂, 有机质含量高, 以及含有病原微生物、寄生虫卵等特点外, 含有有毒有害的重金属是污泥引起二次污染的重大潜在危害因素。这也对生态安全造成巨大的潜在威胁。近年来, 我国重金属污染产生严重的负面作用, 去年至今, 就发生了 16 起血铅事件^[2]。所以, 重金属综合防治技术受到各级领导和专家学者的高度重视。其中污泥重金属污染土壤的植物修复是污泥无害化、资源化处置中必须重视的环节。

蟛蜞菊属于菊科植物, 易生长繁殖, 耐旱耐瘠, 病虫害较少, 姿形柔美, 叶色青绿, 花色淡黄, 在园林绿化中运用极为广泛, 常作地被植物, 装点墙隅, 丰富植物景观, 常作护坡植被, 发挥固坡作用, 也可做盆景^[3]。蟛蜞菊对城市垃圾渗滤液有较强的耐性, 对渗液污染的土壤有较好的净化恢复能力, 可作为垃圾填埋场的植被重建材料^[4]。蟛蜞菊对有毒有害金属元素的吸附积累作用较强^[5], 可能是土壤重金属污染植物修复较好的植物材料, 值得深入研究。本文以蟛蜞菊为研究对象, 根据污泥作为肥料农用的实际情况, 选择污水处理厂产生的污泥与土壤进行配比作为其生长基质, 进行盆栽试验, 为土壤重金属污染防治提供理论和实验参考。

1 材料与方 法

1.1 试验设计

供试土壤为福建师范大学福清分校后山砂壤土, 经自然风干, 含水量为 12.8% (烘干法测定)。供试土壤 pH 6.4, 总氮 2.24 g·kg⁻¹, 速效氮 24.2 mg·kg⁻¹, 全磷 1.15 g·kg⁻¹, 有效磷 9.03 mg·kg⁻¹, 全

钾 68 mg·kg⁻¹, 粘粒含量 21.7%。污泥由福清市融元污水处理厂提供。污泥经自然风干, 含水量为 18.5% (烘干法测定), 按表 1 试验设计表中比例分别均匀混合, 得到每个处理的污泥体积配比分别为 0%、10%、20% 和 40%。各重复 2 次。

表 1 试验设计

Table 1 Experimental design

处理 Treatment	供试污泥与土壤的体积比例 The ratio of sludge to sandy soil in volume
0% 污泥 0% sludge	0:10
10% 污泥 10% sludge	1:9
20% 污泥 20% sludge	2:8
40% 污泥 40% sludge	4:6

供试土壤和污泥的重金属含量如表 2。土壤与污泥 (均经自然风干) 混合均匀后装入 60 cm×40 cm×30 cm 的塑料泡沫箱中, 作为蟛蜞菊生长基质。每个塑料泡沫箱中的生长基质约 25 kg。生长基质混匀后, 在各个泡沫箱四周和对角线交叉处各取样, 并混匀为 1 个样。分别取各种污泥配比的基质少量保存于室温条件下, 以备重金属含量测定用。

从福建师范大学福清分校花圃路旁边的阴湿地块采摘的蟛蜞菊, 捡取幼嫩的蟛蜞菊 2 个茎节长度。扦插入上述处理的基质中, 扦插深度为一个茎节点埋入生长基质, 另一个茎节点恰好露出生长基质。每箱平行扦插 5×6 株。

扦插种植于 2010 年 5 月 9 日进行。扦插后, 各处理等量、适量浇水拔草管理, 拔除蟛蜞菊以外的杂草。3 个月后将开始对蟛蜞菊叶片进行叶绿素含量、超氧化物歧化酶 (SOD) 活性和过氧化物酶 (POD) 活性等生理指标测定。生理指标每个月测定 1 次, 连续测定 4 次 (2010 年 8 月至 11 月每个月 10 日取样测定)。生理指标测定时, 从相应的处理中随机取样, 每个取样取叶片约 3 g。每个指标测定重复 3 次。

表 2 供试土壤和污泥的重金属含量

Table 2 Contents of heavy metals in the tested soil and sludge

重金属 Heavy metal	Cd	Mn	Ni	Cu	Cr	Pb	Zn
供试土壤 Soil for test	6.07	598.72	115.16	117.27	298.32	222.62	195.68
污泥 Sludge	15.11	1 717.38	159.51	3 902.78	387.71	285.08	411.06

1.2 蟛蜞菊生理指标的测定方法

叶绿素含量测定采用 80% 丙酮提取法^[6], 再用

722 型分光光度计 (上海精密科学仪器有限公司生产) 分别测定 663 nm 和 645 nm 处的吸光值 OD₆₆₃

和 OD_{645} 。

$$\text{叶绿素 a 含量}(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}) = \frac{C_a}{1000 \times w}$$

$$\text{叶绿素 b 含量}(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}) = \frac{C_b}{1000 \times w}$$

其中: $C_a = 12.7 \times OD_{663} - 2.69 OD_{645}$; $C_b = 22.9 \times OD_{645} - 4.68 OD_{663}$, w 为准确称取的植物叶片质量 (g)。

超氧化物歧化酶 (SOD) 活性测定采用氮蓝四唑 (NBT) 法^[7], 过氧化物酶 (POD) 活性的测定采用愈创木酚法^[8]。

1.3 蜈蚣菊对重金属的吸附作用

1.3.1 样品重金属含量测定 于 2010 年 11 月 10 日, 取烘干后的蜈蚣菊的根、茎、叶和备用的生长基质各约 0.2 g, 进行重金属含量测定。

样品消解: 称取适量待测样品于坩埚中, 加入 5 mL 的浓硝酸在加热炉中低温加热, 蒸发至约剩下 2 mL 溶液, 再加入 3 mL 盐酸, 5 mL 硝酸, 中温加热直至冒白烟停止加热, 冷却后加入 2 mL 高氯酸, 2 mL 氢氟酸继续加热直至坩埚内样品呈白色或淡黄色粘稠状物质为止。放置冷却至常温, 再加入 2 mL 10% 的硝酸溶液溶解后倒入 50 mL 的容量瓶中用蒸馏水定容, 再倒入试剂瓶保存。

消解后的样品用 Analyst 300 原子吸收分光光度计 (PE 系统责任有限公司, 华盛顿州, 美国) 测定。各种重金属测定条件分别如下, Cu: 波长 324.7 nm, 电流 10 mA, 狭缝宽度 0.2 nm, 乙炔流量 3 L·min⁻¹, 空气流量 10 L·min⁻¹; Pb: 波长 217 nm, 电流 15 mA, 狭缝宽度 0.7 nm, 乙炔流量 2 L·min⁻¹, 空气流量 10 L·min⁻¹; Cd: 波长 228.8 nm, 电流 15 mA, 狭缝宽度 0.7 nm, 乙炔流量 3 L·min⁻¹, 空气流量 10 L·min⁻¹; Cr: 波长 357.9 nm, 电流 15 mA, 狭缝宽度 0.7 nm, 乙炔流量 3.6 L·min⁻¹, 空气流量 10 L·min⁻¹; Ni: 波长 232 nm, 电流 12.5 mA, 狭缝宽度 0.2 nm, 乙炔流量 2.2 L·min⁻¹, 空气流量 10 L·min⁻¹; Mn: 波长 279.5 nm, 电流 7.5 mA, 狭缝宽度 0.2 nm, 乙炔流量 3 L·min⁻¹, 空气流量 10 L·min⁻¹; Zn: 波长 213.8 nm, 电流 15 mA, 狭缝宽度 0.7 nm, 乙炔流量 2 L·min⁻¹, 空气流量 10 L·min⁻¹。每个样品每种重金属指标测定重复 3 次。

1.3.2 数据处理 数据处理采用 SPSS 11.5 分析软件, 先进行数据的方差齐次性检验, 达到齐次性 ($P > 0.05$), 用 Duncan 多重比较, 否则选用 Dunnett T3 两两比较。作图采用 origin 8.0 软件。

1.3.3 重金属富集系数计算 重金属富集系数按下式计算:

$$BCF = C_{ij} / C_{ik}$$

BCF (bioconcentration factor) 表示重金属富集系数; C_{ij} 表示第 i 种重金属在植物 j 部位中的浓度; C_{ik} 表示第 i 种重金属在第 k 种生长基质中的浓度; i 为 Cd, Mn, Ni, Cu, Cr, Pb 或 Zn; j 为根部, 茎部或叶片; k 为 0% 污泥, 10% 污泥, 20% 污泥或 40% 污泥。

2 结果与分析

2.1 污泥对蜈蚣菊叶片叶绿素含量的影响

不同时期不同污泥配比处理下蜈蚣菊叶绿素含量测定结果如图 1。

由图 1 可见, 除了 8 月份测定的 40% 污泥体积比处理的叶绿素 b, 蜈蚣菊在含污泥基质中生长 3、4、5 及 6 个月后, 其叶片的叶绿素含量分别随着污泥体积比例升高而升高。经 Duncan 多重比较, 不同时间测定的各个处理间蜈蚣菊叶片叶绿素含量差异性大多数达显著 ($P < 0.05$) 水平, 仅少数未达显著水平 ($P > 0.05$), 这些未达显著水平差异的是 11 月份测定的 10% 污泥和 20% 污泥之间的叶绿素 a 含量, 9 月份测定的 0% 污泥, 10% 污泥和 20% 污泥处理之间的叶绿素 b 含量。这说明污泥对蜈蚣菊叶片叶绿素含量总体上有促进作用。

2.2 污泥对蜈蚣菊叶片 SOD 和 POD 活性的影响

不同时期不同污泥配比处理下蜈蚣菊叶片中 POD 和 SOD 活性测定结果如图 2。

从 POD 活性可见, 蜈蚣菊在含污泥的基质中生长 3、4 个月后, 其 POD 活性随着污泥比例升高而先升高再下降, 经 Duncan 多重比较, 不同测定时间的各处理之间差异性均分别达显著 ($P < 0.05$) 水平, 9 月份测定的各处理之间差异性达极显著 ($P < 0.01$) 水平。在含污泥基质中生长 5 个月后, 其 POD 活性随污泥比例升高而升高, 经 Duncan 多重比较, 除了 10 月份的 10% 污泥和 40% 污泥处理之间未达到显著水平 ($P > 0.05$), 其余各处理的不同时间测定值的差异性均达显著 ($P < 0.05$) 水平。在含污泥基质中生长 6 个月后, 其 POD 活性随污泥比例升高而降低, 再略有升高, 经 Duncan 多重比较, 各处理之间差异性达显著 ($P < 0.05$) 水平。

从 SOD 活性可见, 蜈蚣菊在含污泥基质中生长 3 个月后, 其 SOD 活性随污泥比例升高而先下降再上升, 生长 4 个月后, 其 SOD 活性随污泥比例升高而先上升再下降, 生长 5 个月后, 其 SOD 活性随着污泥比例升高而升高, 但是和前期相比, 除了 10 月份的 40% 污泥处理和 11 月份的 10% 污泥处理,

SOD 活性都大幅下降。经 Duncan 多重比较, 不同测定时间的各处理之间差异性多数达显著 ($P < 0.05$) 水平, 少数未达显著差异 (图 2, 8 月份的 0% 和 10% 处理之间, 9 月份的 10% 和 20% 之间, 10 月份的 0% 和 10% 之间, 11 月份的 20% 和 40% 之间)。

POD 和 SOD 活性变化能反应植物体受外界环境胁迫的程度, 而重金属含量升高将对植物体产生

不同的胁迫作用, 反过来植物体将对这类作用产生一系列的反应。蟛蜞菊叶片的 POD 和 SOD 活性的这些变化, 说明它对重金属毒性有一定的耐受性。

2.3 蟛蜞菊对污泥重金属的吸附与富集作用

各处理下蟛蜞菊的不同部位和各处理生长基质的重金属含量如表 3。

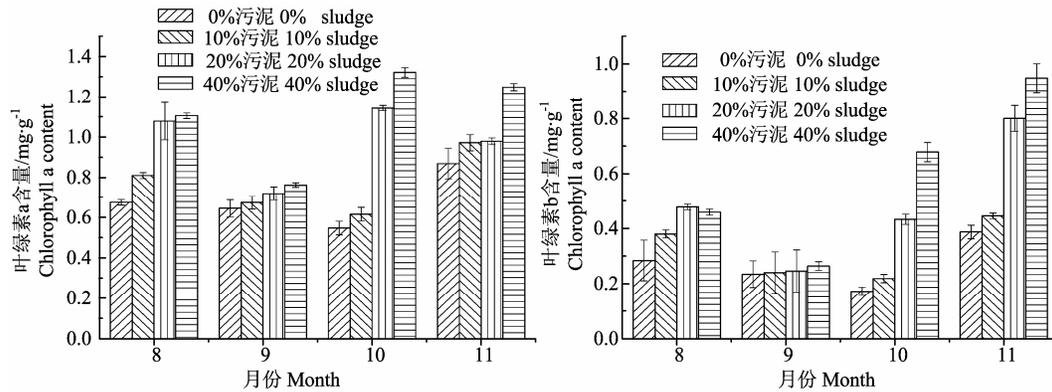


图 1 不同时期不同处理下蟛蜞菊叶片叶绿素含量 ($n=3$)

Figure 1 Chlorophyll contents in the leaves of *W. trilobata* in different periods under different treatments ($n=3$)

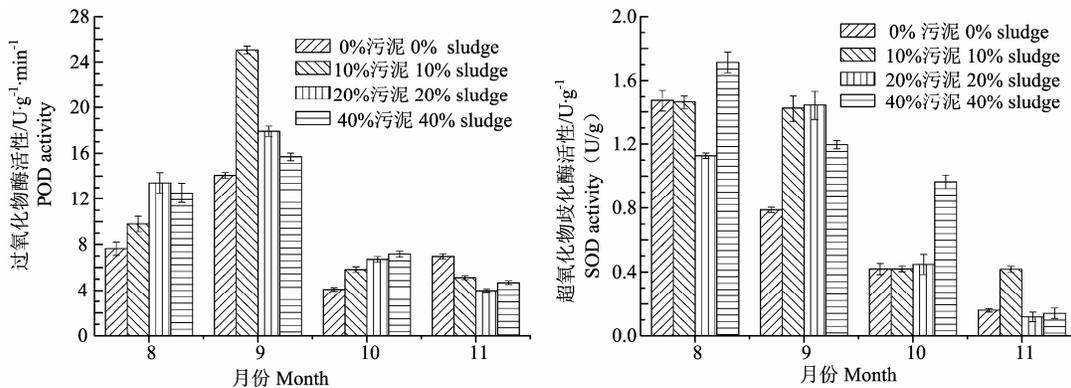


图 2 不同时期不同处理下蟛蜞菊叶片中 POD 和 SOD 活性 ($n=3$)

Figure 2 POD and SOD activities in the leaves of *W. trilobata* in different periods under different treatments ($n=3$)

可见在 0% 污泥处理下, 蟛蜞菊根、茎、叶中也含有重金属, 这和供试土壤环境背景值有关, 也和蟛蜞菊生长需要吸收一些微量元素有关。各处理下, 各种重金属在蟛蜞菊叶片中的含量均高于茎和根中的。这说明蟛蜞菊对各种重金属吸收后, 主要转运到叶片部位。在 10% 污泥配比处理下, 蟛蜞菊叶片中 Ni、Cr、Pb、Zn 的含量超过生长基质的含量, 但富集作用尚不明显, 富集系数 (BCF) 仅略大于 1 (分别为 1.3、1.2、1.1 和 1.1)。在 20% 污泥配比处理下, 相对于根和茎, 蟛蜞菊叶片中 Ni、Cu 的含量较高, 富集系数较高, 分别达 7.7 和 5.2。在 40% 污泥配比处理下, 相对于根和茎, 蟛蜞菊叶片中 Ni、Cu、Cr 含量较高, 富集系数较高, 分别达

12.2、15.3 和 3.3。这说明蟛蜞菊对 Ni、Cu 和 Cr 有较好的吸收富集作用。

3 讨论

3.1 蟛蜞菊对污泥及其重金属的响应

3.1.1 污泥与叶绿素含量 叶绿素含量高低是植物生长的重要指标之一。关于青萍水培条件下铜、镉、铅 3 种重金属对其叶绿素影响的研究结果表明: 总体上, 3 种重金属都使青萍叶绿素和类胡萝卜素含量降低, 低浓度 ($0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 的铜可以使青萍叶绿素和类胡萝卜素含量轻微升高^[9]。污泥中含有重金属, 污泥配比较高的生长基质本应对蟛蜞菊叶片叶绿素含量有抑制作用, 但本研究表明污泥浓度升

高对蜈蚣菊叶片叶绿素含量有促进作用。这是因为污泥中含有有机质、氮、磷、钾等各种养分^[10],对植物生长有促进作用,且促进作用大于污泥中重金

属对叶绿素的抑制作用。污泥含有各种养分是污泥可以作为肥料进行农用的理论基础。

表 3 各处理下蜈蚣菊不同部位和各处理生长基质的重金属含量

Table 3 Contents of heavy metals in different tissues of *W. trilobatas* and growth matrix under different treatments mg·kg⁻¹

		Cd	Mn	Ni	Cu	Cr	Pb	Zn
0%污泥	叶 Leaf	2.02 ^{bb}	82.87 ^{bb}	92.00 ^{cc}	57.42 ^{bb}	297.50 ^{cc}	157.60 ^{bb}	77.00 ^{cc}
0% sludge	茎 Stem	0 ^{aa}	82.63 ^{bb}	28.44 ^{aa}	9.50 ^{aa}	74.44 ^{aa}	3.62 ^{aa}	23.80 ^{bb}
	根 Root	0 ^{aa}	25.64 ^{aa}	51.53 ^{bb}	12.54 ^{aa}	138.58 ^{bb}	0 ^{aa}	14.56 ^{aa}
	基质 Matrix	6.07 ^{cc}	598.72 ^{cc}	115.16 ^{dd}	117.27 ^{cc}	298.32 ^{cc}	222.62 ^{cc}	195.68 ^{dd}
10%污泥	叶 Leaf	1.29 ^{bb}	627.82 ^{cc}	169.92 ^{dd}	168.97 ^{bb}	364.49 ^{dd}	263.24 ^{cc}	233.76 ^{cc}
10% sludge	茎 Stem	0 ^{aa}	135.61 ^{bb}	19.77 ^{bb}	29.94 ^{aa}	93.49 ^{bb}	0 ^{aa}	220.72 ^{bbc}
	根 Root	0 ^{aa}	67.17 ^{aa}	0 ^{aa}	32.17 ^{aa}	62.44 ^{aa}	0 ^{aa}	44.56 ^{aa}
	基质 Matrix	7.99 ^{cc}	705.21 ^{dd}	129.66 ^{cc}	491.81 ^{cc}	304.69 ^{cc}	229.73 ^{bb}	211.42 ^{bb}
20%污泥	叶 Leaf	0 ^{aa}	173.40 ^{cc}	1 034.97 ^{dd}	4 569.86 ^{dd}	261.87 ^{cc}	10.55 ^{bb}	134.63 ^{bb}
20% sludge	茎 Stem	0 ^{aa}	4.92 ^{aa}	187.46 ^{cc}	1 068.55 ^{bb}	177.33 ^{aa}	0 ^{aa}	90.49 ^{aa}
	根 Root	0 ^{aa}	115.48 ^{bb}	15.26 ^{aa}	1 713.63 ^{cc}	187.37 ^{bb}	0 ^{aa}	92.26 ^{aa}
	基质 Matrix	8.00 ^{bb}	820.68 ^{dd}	134.34 ^{bb}	873.79 ^{aa}	319.07 ^{dd}	240.02 ^{cc}	233.37 ^{cc}
40%污泥	叶 Leaf	0 ^{aa}	280.57 ^{bb}	1 763.84 ^{dd}	25 332.37 ^{dd}	1 117.57 ^{dd}	13.75 ^{ba}	176.24 ^{cc}
40% sludge	茎 Stem	0 ^{aa}	137.25 ^{aa}	264.21 ^{cc}	273.26 ^{aa}	136.46 ^{bb}	5.61 ^{abA}	58.43 ^{aa}
	根 Root	0 ^{aa}	138.36 ^{aa}	0 ^{aa}	3 923.23 ^{cc}	108.90 ^{aa}	0 ^{aa}	143.56 ^{bb}
	基质 Matrix	9.66 ^{bb}	1 047.08 ^{cc}	143.87 ^{bb}	1 654.72 ^{bb}	338.09 ^{cc}	246.04 ^{cb}	282.24 ^{dd}

注:数据为平均值,同一列中不同的大小写字母分别表示各种处理内不同的样品之间的差异分别达到极显著($P<0.01$)或显著($P<0.05$)水平,用Duncan比较, $n=3$ 。

Note: The data are mean values, different capital letters or different small letters in the same column show significant different ($P<0.01$ or $P<0.05$ each) results among the different samples of every treatment by Duncan comparison. $n=3$.

3.1.2 重金属与抗氧化系统 重金属进入植物体内,对植物有毒害作用,植物也对此产生一系列的反应。例如镉进入植物体,通过原生质流动和胞间连丝,逐个细胞迁移进入导管,然后输送到植物各部。镉在植物体内可以螯合态和毒性更大的可溶态形式存在。在分子水平上,镉可以破坏沉水植物的保护酶系统,从多方面影响其生理、生化功能,最终可导致整株植物的死亡^[9,11-12]。而植物对重金属的耐受则表现为在一定的程度上,相应的酶活性指标上升,以缓解毒害^[13]。植物体内SOD与POD,过氧化氢酶(CAT)、谷胱甘肽还原酶、维生素E、维生素C、辅酶Q及巯基化合物等组成了防御过氧化系统,能有效地消除活性氧,防止细胞膜系统过氧化作用的发生,从而抵御外界环境胁迫或重金属等的毒害。SOD可催化对毒害生物细胞的氧自由基的歧化反应,生成过氧化氢,再由CAT催化转化为无

害的分子氧和水。本研究中由于生长基质中含有不同种类的重金属,这些重金属进入蜈蚣菊体内后,蜈蚣菊体内产生POD和SOD发生相应变化,达到抵御毒害的作用,但是过高的重金属浓度(40%污泥处理,图2)或者过长时间的重金属接触时间(10、11月份,图2)对植物抗性不利,其抗性指标将在前期升高之后再趋向下降。

3.2 蜈蚣菊对污泥重金属的吸收与富集

重金属污染有关的问题受到广大专家学者的广泛关注。已有的报道涉及的内容和层面如:Cd对植物的毒性研究^[12]及高等植物对Cd毒性的响应^[13],转基因植物在植物修复中的应用分析^[14],不同表型的生物对重金属的吸附作用分析^[15],土壤和水体中有毒痕量元素的植物修复^[16],水体受重金属污染的植物吸特性和机制^[17],燕麦,菘蓝,苍耳等草本植物对Cd、Pb和Zn等金属的耐受性评估^[18]。显然寻

找高效的重金属富集植物是植物修复技术研究领域的重要方面。能用于植物修复的植物应具有以下几个特征: 一是即使在污染物浓度较低时也有较高的积累率; 二是能在体内富集高浓度的污染物; 三是能同时吸收几种重金属; 四是生长快、生物量大; 五是具有抗虫、抗病能力^[19]。Baker 和 Brooks 较早于 1983 年提出超富集植物的参考值, 即把植物叶片或地上部(干质量)中含 Cd 达到 $100 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 含 Co、Cu、Ni、Pb 达到 $1000 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, Mn、Zn 达到 $10000 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以上的植物称为超富集植物, 同时这些植物还应满转运系数大于 1 的条件^[20]。本研究结果表明蜈蚣菊叶片对 Ni (20% 处理、40% 处理)、Cu (20% 处理, 40% 处理)、Cr (40% 处理) 都有超富集作用。蜈蚣菊植物叶片容易收割处理, 对土壤重金属污染的植物修复后期处理与处置更具有可行性。

4 结论

本研究可得出结论: 污泥对蜈蚣菊生长具有较好的促进作用; 蜈蚣菊对含重金属的污泥具有较好的耐受能力; 蜈蚣菊对 Ni、Cu、Cr 等重金属有超富集作用, 其富集作用主要表现在叶片部位。

参考文献:

- [1] 张水英, 张辉, 周军, 等. 我国污泥处理处置现状与发展[J]. 建设科技, 2007, 17: 33-35.
- [2] 杨华云. 环保部: 中国重金属污染严重连发 16 起血铅事件[N]. 新京报, 2011-06-04.
- [3] 王发祥, 梁惠波, 罗蒙, 等. 深圳园林植物[M]. 北京: 中国林业出版社, 1998.
- [4] 林学瑞, 廖文波, 蓝崇钰, 等. 垃圾填埋场植被恢复及其环境影响因子的研究[J]. 应用与环境生物学报, 2002, 8(6): 571-577.
- [5] Qian J H, Terry N, Yu M, et al. Phytoaccumulation of trace elements by wetland plants: III Uptake and accumulation of ten trace elements by twelve plant species[J]. Journal of Environmental Quality, 1999, 28(5): 1448-1455.
- [6] 张志良, 瞿伟菁. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- [7] 林素英, 吴新建. 四氮唑蓝(NBT)法检测 SOD 条件的探讨[J]. 海峡药学, 2009, 21(5): 43-45.
- [8] 李忠光, 龚明. 愈创木酚法测定植物过氧化物酶活性的改进[J]. 植物生理学通讯, 2008, 44(2): 323-324.
- [9] 侯文华, 宋关铃, 汪群慧, 等. 3 种重金属对青萍毒害的研究[J]. 环境科学研究, 2004, 17(增刊): 40-44.
- [10] 刘敬勇, 孙水裕, 许燕滨. 广州市污水污泥中的重金属及其农用探讨[J]. 环境科学研究, 2010, 23(11): 1441-1446.
- [11] Ding B Z, Shi G X, Xu Y, et al. Physiological responses of *alternanthera philoxeroides* (Mart.) Griseb leaves to cadmium stress [J]. Environmental Pollution, 2007, 147(3): 800-803.
- [12] Das P, Samantary S, Rout G R. Studies on cadmium toxicity in plants: a review[J]. Environmental Pollution, 1997, 98(1): 29-36.
- [13] Toppi L S, Gabbrielli R. Response to cadmium in higher plants[J]. Environmental and Experimental Botany, 1999, 41: 105-130.
- [14] Cherian S, Oliveira M M. Transgenic plants in phytoremediation: recent advances and new possibilities [J]. Environmental Science & Technology, 2005, 39(24): 9377-9390.
- [15] Chaney R L, Malik M, Li Y M, et al. Phytoremediation of soil metals [J]. Environmental Biotechnology, 1997, 8: 279-284.
- [16] LeDuc D L, Terry N. Phytoremediation of toxic trace elements in soil and water[J]. Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology, 2005, 32: 514-520.
- [17] Arief V O, Trilestari K, Sunarso J, et al. Recent progress on biosorption of heavy metals from liquids using low cost biosorbents: characterization, biosorption parameters and mechanism studies[J]. Clean, 2008, 36(12): 937-962.
- [18] Sonmez O, Bukun B, Kaya C, et al. The assessment of tolerance to heavy metals (Cd, Pb and Zn) and their accumulation in three weed species[J]. Pakistan Journal of Botany, 2008, 40(2): 747-754.
- [19] 高晋华. 土壤重金属污染的植物修复技术[J]. 科技情报开发与经济, 1999(6): 64-65.
- [20] Baker A J, Brooks R R, Pease A J, et al. Studies on copper and cobalt tolerance in three closely related taxa with in the genus *Science L.* from Zaire[J]. Plant and Soil, 1983, 73: 377-385.