



重金属污染土壤的植物修复技术研究

李氏禾对铬的超富集特征、机制及修复潜力研究

张学洪 刘 杰 朱义年 著



科学出版社

重金属污染土壤的植物 修复技术研究

——李氏禾对铬的超富集特征、机制及修复潜力研究

张学洪 刘 杰 朱义年 著

科 学 出 版 社

北 京

前 言

随着城市化、工业化的进程加速,土壤重金属污染不断加剧。重金属污染已成为全球面临的重大环境问题,2011年全国环境保护工作会议中明确提出,重金属污染是“十一五”凸显的重大环境问题,国务院已经批复《重金属污染综合防治“十二五”规划》,重金属污染综合防治列为环境保护的头等大事,力争到2015年,进一步优化涉重金属产业的结构,完善重金属污染防治体系、事故应急体系及环境与健康风险评估体系。可见,重金属污染的防治将是未来我国环境保护工作的重点。

植物修复技术是重金属污染治理的重要手段。而超富集植物则是实现植物修复的重要材料和首要前提。但目前超富集植物种类数量偏少、已知超富集植物生物量偏低以及富集过程中富集效果不明显都限制了该技术的应用和改良。李氏禾(*Leersia hexandra* Swartz)是在我国西部某电镀厂附近河流中首次发现的铬超富集植物,也是国际上发现的为数不多的铬超富集植物之一,而且对铜、镍等重金属也表现出较强的耐性和富集能力。为了在了解李氏禾铬富集特征及相关机制的基础上,探讨李氏禾在铬污染修复中的作用并对其作用进行评价,我们连续申报了国家自然科学基金项目“李氏禾对铬的超富集特征及机制研究”(40663002)、“李氏禾对铬超富集机制及其分析化学方法研究”(20665003)、“草酸在超富集植物李氏禾铬耐性中的作用及其代谢调控”(41063004)以及教育部重点项目“李氏禾对铬的超积累特征及在植物修复中的应用”(教科司 206116),并获准立项。这些课题都围绕李氏禾富集特征和机制以及修复潜力等核心任务展开并基本完成。作为总结,我们完成了《重金属污染土壤的植物修复技术研究》的编研工作。其初衷在于为广大环境科学工作者提供一部体现当前环境治理要求、富于理论创新、注重实际应用的学术著作。编研中我们在注重和国际先进理论相衔接的同时,结合国内相关领域的研究实际。专著探讨了李氏禾的富集特征和机理及生化指标的变化,也分析了外源物质如氮肥和有机酸等对其富集铬的影响,最后对李氏禾修复潜力和效果作了详细分析。

在本书编研的过程中,我们参阅了大量文献,其中大部分已经作为参考文献列于各章之后。在此,我们向所有参阅文献的作者致谢,对各位支持本书编研和出版发行的朋友致谢。同时欢迎专家和读者对本书反馈意见,多加指正。

本书的出版得到了桂林理工大学广西环境工程与保护评价重点实验室的资助,谨致衷心感谢。

张学洪

2011年5月5日

目 录

第一篇 李氏禾铬富集特征及相关机制

第一章 李氏禾对 Cr 的超富集特征	(3)
1.1 引言	(3)
1.2 材料和方法	(3)
1.2.1 野外调查和采样	(3)
1.2.2 李氏禾的室内培养	(4)
1.2.3 样品的分析	(5)
1.2.4 数据统计与处理	(5)
1.3 结果与分析	(5)
1.3.1 电镀工业区优势植物及其体内重金属含量	(5)
1.3.2 自然条件下李氏禾对 Cr 的富集作用	(7)
1.3.3 温室培养条件下 Cr 对李氏禾生长的影响	(8)
1.3.4 温室培养条件下李氏禾对 Cr 的富集作用	(8)
1.4 讨论	(11)
1.5 结论	(13)
参考文献	(13)
第二章 李氏禾根对 Cr^{3+} 的吸收机理的探讨	(15)
2.1 引言	(15)
2.2 材料和方法	(16)
2.2.1 植物的培养	(16)
2.2.2 代谢抑制剂对 Cr^{3+} 吸收的影响	(16)
2.2.3 低温对 Cr^{3+} 吸收的影响	(16)
2.2.4 离子通道抑制剂对 Cr^{3+} 吸收的影响	(17)
2.2.5 铁对 Cr^{3+} 吸收的影响	(17)
2.2.6 数据处理与统计分析	(17)
2.3 结果与分析	(17)
2.3.1 代谢抑制剂对李氏禾吸收 Cr^{3+} 的影响	(17)
2.3.2 低温对李氏禾吸收 Cr^{3+} 的影响	(18)
2.3.3 离子通道抑制剂对李氏禾吸收 Cr^{3+} 的影响	(20)
2.3.4 缺 Fe 和 Fe^{3+} 对李氏禾吸收 Cr^{3+} 的影响	(20)

2.4 讨论	(22)
2.5 结论	(23)
参考文献	(23)
第三章 李氏禾体内 Cr 的分布特征	(25)
3.1 引言	(25)
3.2 材料和方法	(26)
3.2.1 植物的培养	(26)
3.2.2 Cr 在植物不同器官的分布	(26)
3.2.3 Cr 在植物根和叶亚细胞组分中的分布	(26)
3.2.4 TEM-EDX 分析	(26)
3.2.5 统计分析	(27)
3.3 结果与分析	(27)
3.3.1 Cr 在李氏禾器官水平上的分布	(27)
3.3.2 Cr 在李氏禾亚细胞组分中的分布	(29)
3.3.3 TEM-EDX 分析	(30)
3.4 讨论	(33)
3.4.1 Cr 在李氏禾中的移动性	(33)
3.4.2 李氏禾体内 Cr 的亚细胞分布特征	(34)
3.4.3 李氏禾 Cr 富集与亚细胞分布特征的关系	(35)
3.5 结论	(35)
参考文献	(36)
第四章 草酸与李氏禾 Cr 耐性的关系	(38)
4.1 引言	(38)
4.2 材料和方法	(39)
4.2.1 植物的培养	(39)
4.2.2 李氏禾体内 Cr 的形态分析	(39)
4.2.3 李氏禾体内草酸含量的测定	(39)
4.2.4 外源草酸对李氏禾 Cr 耐性的影响	(40)
4.2.5 统计分析	(40)
4.3 结果与分析	(41)
4.3.1 李氏禾体内 Cr 的化学形态	(41)
4.3.2 Cr 诱导下李氏禾体内的草酸含量	(42)
4.3.3 外源草酸对 Cr 胁迫下李氏禾电解质外渗率的影响	(42)
4.3.4 外源草酸对 Cr 胁迫下李氏禾叶绿素含量的影响	(43)
4.3.5 外源草酸对 Cr 胁迫下李氏禾根长、株高的影响	(44)
4.3.6 外源草酸对 Cr 胁迫下李氏禾生物量的影响	(44)

4.3.7 外源草酸对李氏禾 Cr 富集的影响	(46)
4.4 讨论	(47)
4.4.1 李氏禾体内 Cr 的化学形态	(47)
4.4.2 草酸与李氏禾 Cr 耐性的关系	(47)
4.4.3 Cr 对李氏禾的毒性	(48)
4.5 结论	(48)
参考文献	(48)
第五章 Cr 胁迫下李氏禾抗氧化系统酶活性和显微结构的变化	(50)
5.1 引言	(50)
5.2 材料和方法	(51)
5.2.1 植物培养与实验处理	(51)
5.2.2 抗氧化酶活性的测定	(51)
5.2.3 李氏禾的组织结构观察试验	(51)
5.3 结果与分析	(52)
5.3.1 不同浓度 Cr 处理对李氏禾分蘖数的影响	(52)
5.3.2 不同浓度 Cr 处理对李氏禾耐性指数的影响	(52)
5.3.3 Cr 胁迫对李氏禾超氧化物歧化酶(SOD)活性的影响	(52)
5.3.4 Cr 胁迫对李氏禾超过氧化氢酶(CAT)活性的影响	(54)
5.3.5 Cr 胁迫对李氏禾超过氧化物(POD)活性的影响	(55)
5.3.6 Cr 胁迫下李氏禾组织显微结构的变化	(55)
5.4 讨论	(57)
5.5 结论	(59)
参考文献	(60)
第六章 李氏禾干粉生物吸附 Cr⁶⁺ 电子转移机制的研究	(61)
6.1 引言	(61)
6.2 材料和方法	(62)
6.2.1 材料	(62)
6.2.2 X 射线光电子能谱和傅里叶变换红外线光谱分析	(62)
6.2.3 静态吸附实验	(62)
6.2.4 Cr 含量分析	(63)
6.3 结果与讨论	(63)
6.3.1 生物干粉表面官能团的特性	(63)
6.3.2 原位 Cr ⁶⁺ 的还原吸附	(65)
6.3.3 吸附还原的机理	(66)
6.4 结论	(68)
参考文献	(68)

第七章 氮肥形态对李氏禾富集 Cr 的影响及其生化分析	(71)
7.1 引言	(71)
7.2 材料与方法	(71)
7.2.1 供试植物和土壤	(71)
7.2.2 李氏禾生物量和各部分 Cr 含量测定	(72)
7.2.3 数据处理	(72)
7.2.4 生化分析	(72)
7.3 结果与讨论	(72)
7.3.1 不同氮肥形态对李氏禾生物量的影响	(72)
7.3.2 不同氮肥形态对李氏禾吸收 Cr 的影响	(73)
7.4 结论	(75)
参考文献	(76)
第八章 外源有机酸对李氏禾富集 Cr 的影响	(77)
8.1 引言	(77)
8.2 材料与方法	(77)
8.2.1 供试植物和土壤	(77)
8.2.2 试验设计与分析方法	(77)
8.3 结果与讨论	(78)
8.3.1 不同有机酸对李氏禾生长发育的影响	(78)
8.3.2 不同有机酸对交换态 Cr 的影响	(79)
8.3.3 不同有机酸对李氏禾根系吸收 Cr 的影响	(79)
8.3.4 不同有机酸对 Cr 迁移能力的影响	(79)
8.4 结论	(81)
参考文献	(81)

第二篇 李氏禾在铬污染修复中的作用

第九章 李氏禾对土壤 Cr 污染修复潜力的评价	(85)
9.1 引言	(85)
9.2 材料和方法	(85)
9.2.1 李氏禾 Cr 修复效率的评价	(85)
9.2.2 连续收获对李氏禾修复 Cr 的影响	(86)
9.2.3 施肥对李氏禾修复 Cr 的影响	(86)
9.2.4 EDTA 对李氏禾修复 Cr 的影响	(86)
9.2.5 统计分析	(86)
9.3 结果与分析	(87)
9.3.1 李氏禾对土壤 Cr 污染的修复效率	(87)

9.3.2 连续收获对李氏禾修复土壤 Cr 污染的影响	(88)
9.3.3 施肥对李氏禾修复土壤 Cr 污染的影响	(90)
9.3.4 EDTA 对李氏禾修复土壤 Cr 污染的影响	(92)
9.4 讨论	(94)
9.4.1 李氏禾对土壤 Cr 污染植物修复的可行性	(94)
9.4.2 提高李氏禾对土壤 Cr 污染修复潜力的方法	(95)
9.5 结论	(96)
参考文献	(97)
第十章 李氏禾人工湿地的设计与启动	(99)
10.1 引言	(99)
10.2 人工湿地的设计	(99)
10.2.1 设计依据	(99)
10.2.2 实验装置设计	(102)
10.3 人工湿地的启动	(104)
10.3.1 启动方式	(104)
10.3.2 启动过程	(104)
10.4 讨论	(107)
10.5 结论	(108)
参考文献	(108)
第十一章 李氏禾人工湿地处理电镀废水的运行条件研究	(110)
11.1 引言	(110)
11.2 材料与方法	(110)
11.2.1 试验水质	(110)
11.2.2 试验装置	(110)
11.2.3 试验方法	(110)
11.2.4 测定方法	(111)
11.2.5 数据处理	(111)
11.3 结果与分析	(111)
11.3.1 水力负荷对人工湿地处理电镀废水效果的影响	(111)
11.3.2 进水浓度对人工湿地处理电镀废水效果的影响	(114)
11.3.3 人工湿地处理电镀废水的沿程动态变化	(116)
11.4 讨论	(118)
11.5 结论	(120)
参考文献	(120)
第十二章 重金属在人工湿地基质中残留分布的研究	(121)
12.1 引言	(121)

12.2	材料与方法	(121)
12.2.1	基质吸附静态试验	(121)
12.2.2	重金属在人工湿地基质中的残留分布	(122)
12.3	结果与分析	(123)
12.3.1	pH 对吸附效果的影响	(123)
12.3.2	初始浓度对吸附效果的影响	(124)
12.3.3	等温吸附模型	(124)
12.3.4	接触时间对吸附效果的影响	(126)
12.3.5	吸附动力学方程	(127)
12.3.6	结果与分析	(128)
12.4	讨论	(132)
12.5	结论	(134)
	参考文献	(134)
第十三章	重金属在人工湿地植物中残留分布的研究	(135)
13.1	引言	(135)
13.2	材料与方法	(135)
13.2.1	试验内容	(135)
13.2.2	测定方法	(135)
13.2.3	数据处理	(135)
13.3	结果与分析	(136)
13.3.1	植物生长性状的变化	(136)
13.3.2	重金属在人工湿地植物中的残留分布	(136)
13.3.3	植物对重金属的富集能力	(139)
13.4	讨论	(139)
13.5	结论	(141)
	参考文献	(141)
第十四章	李氏禾叶细胞干粉对 Cr^{6+} 的吸附特性研究	(142)
14.1	引言	(142)
14.2	材料和方法	(142)
14.2.1	植株的预处理及重金属储备液的配制	(142)
14.2.2	pH 对 Cr^{6+} 吸附影响分析	(143)
14.2.3	吸附动力学实验	(143)
14.2.4	吸附等温线测定	(143)
14.2.5	解吸实验	(143)
14.3	结果与讨论	(143)
14.3.1	pH 的影响	(143)
14.3.2	吸附动力学实验	(146)
14.3.3	吸附等温线	(147)

14.3.4 红外谱图分析	(148)
14.4 结论	(150)
参考文献	(151)
第十五章 李氏禾修复重金属(Cr、Cu、Ni)污染水体的潜力研究	(152)
15.1 引言	(152)
15.2 材料与方法	(152)
15.2.1 植物材料	(152)
15.2.2 培养方法	(152)
15.2.3 样品的处理及测定	(153)
15.2.4 数据处理	(153)
15.3 结果与分析	(153)
15.3.1 李氏禾对水中重金属的去除效果	(153)
15.3.2 重金属对李氏禾生长的影响	(155)
15.3.3 李氏禾对重金属的富集	(156)
15.4 讨论	(156)
15.5 结论	(157)
参考文献	(157)
第十六章 水分、光照和肥料交互作用对李氏禾生长的影响	(159)
16.1 引言	(159)
16.2 材料与方法	(159)
16.2.1 供试植物和土壤	(159)
16.2.2 水分、光照和肥料交互作用试验	(160)
16.2.3 生理指标测定方法	(160)
16.2.4 数据处理	(160)
16.3 结果与分析	(160)
16.3.1 水分和光照交互作用对李氏禾生长速度的影响	(160)
16.3.2 水分和肥料交互作用对李氏禾生长速度的影响	(160)
16.3.3 肥料和光照交互作用对李氏禾生长速度的影响	(161)
16.3.4 李氏禾叶片中叶绿素浓度和蛋白质含量	(162)
16.4 讨论	(163)
16.5 结论	(163)
参考文献	(163)

第一篇

李氏禾铬富集特征及相关机制

第一章 李氏禾对 Cr 的超富集特征

1.1 引言

植物超富集重金属已引起了人们极大的兴趣,但超富集植物较少,还不到整个被子植物的 0.2%^[1]。目前已经发现的超富集植物约有 400 多种,绝大多数是镍(Ni)的超富集植物^[2]。植物对铬(Cr)的超富集更是稀少的现象,究其原因可能是 Cr 是植物的非必需元素,普通植物对 Cr 缺乏相应的吸收系统。国际上报道的 Cr 超富集植物大约只有两种,即在非洲发现的尼科菊(*Dicoma niccolifera* Wild)和线蓬(*Sutera fodina* Wild)^[3],但仅限于野外植物样品的含量分析,而缺乏实验室控制条件下的富集特征研究。近年来,中国也广泛地开展了超富集植物的发掘工作,并先后发现了砷(As)超富集植物蜈蚣草(*Pteris vittata* L.)和大叶井口边草(*Pteris cretica* L.),锌(Zn)超富集植物东南景天(*Sedum alfredii* H.),锰(Mn)超富集植物商陆(*Phytolacca acinosa* Roxb),镉(Cd)超富集植物宝山堇菜(*Viola baoshanensis*)和龙葵(*Solanum nigrum* L.)^[4~9]。但迄今为止,在中国境内尚未有 Cr 超富集植物的报道。

李氏禾(*Leersia hexandra* Swartz),禾本科,多年生草本植物,广泛地分布于中国南部,多生长于湿地、水田边或沙岸。该植物在中国广西壮族自治区某电镀工业区附近的池塘边大量地生长,表现出对 Cr 较强的耐性。在本研究中,我们对该电镀工业区的 8 种高等植物进行了调查采样并分析了体内重金属含量,发现李氏禾叶片中 Cr 含量极高。为进一步验证其对 Cr 的富集能力,采集了李氏禾幼苗进行实验室控制条件下的水培试验,研究该植物对三价铬(Cr^{3+})和六价铬(Cr^{6+})的富集特征。

1.2 材料和方法

1.2.1 野外调查和采样

经遴选,野外调查样地设定在广西北部某电镀工业区。该工业区于 1996 年投产,距桂林市区约 110km(东经 110.38 度,北纬 24.51 度),属于亚热带季风气候区,

高温多雨,降水量变化大,干湿季节明显。年平均气温为 $19\sim 20^{\circ}\text{C}$, 7 月份最热, 1 月份最冷; 年均降水量为 1424mm , 多集中在 4~8 月份; 平均年蒸发量为 1514.7mm ; 年平均相对湿度为 79%。该工业区产生的废水主要含有 Cr、铜(Cu)、Ni 等重金属污染物, 经化学法分类处理后排入厂区旁的池塘中(池塘面积约 $40\,000\text{m}^2$), 然后再流入附近的一条小河。长期以来, 在池塘中沉积了大量的含 Cu、Cr 和 Ni 的淤泥, 水中的 Cu、Cr 和 Ni 含量也较高。2004 年 7 月对池塘及小河边的优势植物进行了综合调查, 分析了 8 种植物体内的重金属含量。2004 年 10 月重点对池塘边的李氏禾进行调查, 分别采集植物、底泥、水体和土壤(0~30cm)样品, 并分析其中 Cr 的含量。采样点如图 1.1 所示。每个李氏禾样品均包括 15~25 株植物。

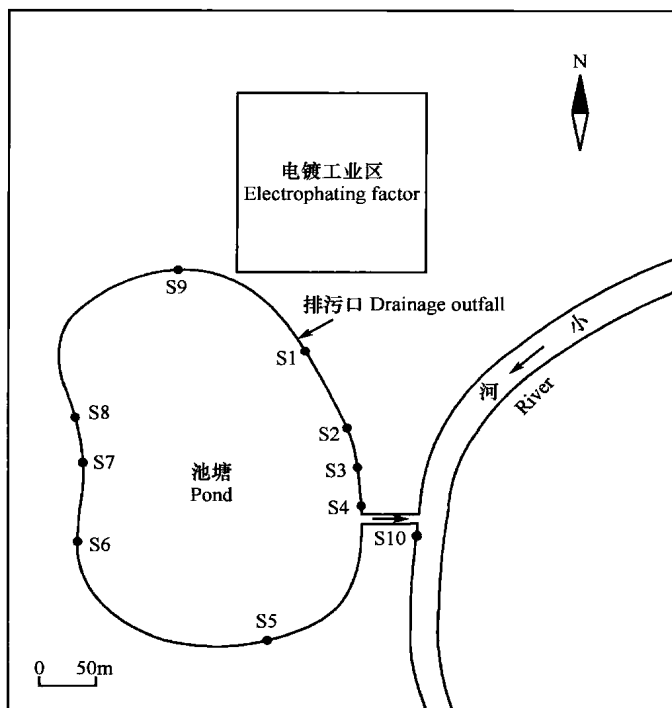


图 1.1 采样点分布图

Fig. 1.1 Sketch map of the sampling locations

1.2.2 李氏禾的室内培养

为避免污染区李氏禾幼苗中本身的 Cr 浓度对实验结果的干扰, 选择桂林市桃花江边的李氏禾幼苗(该地区土壤中的 Cr 含量为 $9.17\sim 41.5\text{mg/kg}$, 李氏禾体内的 Cr 含量低于火焰原子吸收法的检出限)作为室内培养的材料。选取生长一致的幼苗用去离子水洗净, 放入直径 15cm 装有 1.5L 1/2 浓度的 Hoagland 溶液的塑料盆中培养。Hoagland 营养液配方如下: 5mmol/L KNO_3 , $5\text{mmol/L Ca}(\text{NO}_3)_2$ 。

H₂O, 2mmol/L MgSO₄ · 7H₂O, 1mmol/L KH₂PO₄, 0.02mmol/L FeSO₄ · 7H₂O, 0.02mmol/L Na₂-EDTA, 0.045mmol/L H₃BO₃, 0.01mmol/L MnCl₂ · 4H₂O 和 0.8μmol/L ZnSO₄, 0.3μmol/L CuSO₄ · 5H₂O, 0.1μmol/L NaMoO₄ · 2H₂O, 溶液 pH 用 0.1mol/L 的 NaOH 或 0.1mol/L 的 HCl 调节到 5.5±0.3。15d 后, 对植物进行 Cr 处理。Cr³⁺ 处理浓度(由 CrCl₃ · 6H₂O 配制)为 0、5、10、20、40、60mg/L, Cr⁶⁺(由 K₂Cr₂O₇ 配制)处理浓度为 0、5、10、15、20、30mg/L, 每个浓度设 3 个重复, 每个重复含有 25~30 株植物。培养期间每天光照约 12h, 光周期温度 25℃, 暗周期温度 18℃, 相对湿度 70%~75%。每天加入蒸馏水保持培养液的总体积不变, 并调节 pH 到 5.5±0.3。每 3d 更换一次培养液, 使培养液中 Cr 浓度保持稳定, 60d 后收获李氏禾。

1.2.3 样品的分析

采集的植物样品和收获的李氏禾样品, 分离根、茎、叶或地上和地下部分, 用去离子水洗净。植物的根用 5mmol/L 的 Ca(NO₃)₂ 溶液浸泡 15min 以交换去掉其表面吸附的金属离子, 取出后用去离子水冲洗 2 或 3 次。洗净的植物材料转入烘箱在 105℃ 下杀青 30min, 紧接着在 80℃ 烘干 24h。其后将植物样粉碎并称取 0.5g 置于锥形瓶中, 加入 10ml 浓硝酸(HNO₃)和 2.5ml 高氯酸(HClO₄)后低温加热消解。在体积减至 2~5ml 时, 加入 5ml 去离子水, 再加热 10~15min, 冷却后移入 50ml 容量瓶中, 用 0.2% 的硝酸稀释至刻度, 摇匀, 用原子吸收光谱仪(PE-AA700)测定重金属含量。采集的土壤和底泥样品自然风干, 过 2mm 尼龙筛, 充分混匀后用四分法取 2.5g, 以 HF+HNO₃+HClO₄ 消解, 用原子吸收法测定 Cu、Cr、Ni 和 Zn 的浓度。水样直接用 0.2% 的硝酸稀释后, 用原子吸收法测定 Cu、Cr、Ni 和 Zn 的浓度。分析时插入国家标准物质(土壤 GBW07405、杨树叶 GBW07604)进行质量控制。

1.2.4 数据统计与处理

数据之间的显著差异用最小显著差数法(LSD)分析^[10]($p < 0.05$)。

1.3 结果与分析

1.3.1 电镀工业区优势植物及其体内重金属含量

对电镀工业区排污口附近受纳污水的池塘和小河边的高等植物进行调查, 发现共有 8 种优势植物: 李氏禾(*Leersia hexandra*)、马唐(*Digitaria sanguinalis*)、蒲公英(*Taraxacum officinale*)、蕨(*Pteridium aquilinum*)、凤尾竹(*Bambusa multiplex*)、白花败酱(*Patrinia villosa*)、铺地黍(*Panicum repens*)、香根草(*Vet-*

veria zizanioides), 分属于禾本科 (Gramineae)、菊科 (Asteraceae)、蕨科 (Pteridaceae) 和败酱科 (Valerianaceae) 4 个科。其中李氏禾大量地生长于电镀厂排污口附近的池塘四周, 大部分根生长在水塘岸边的土壤中或浅水区的淤泥中, 其枝状节茎浮于水面或平卧于淤泥上 (图 1.2)。该植物长势茂密, 显示出对含重金属的电镀废水有较高的耐受能力。



图 1.2 生长在广西电镀厂附近池塘边的李氏禾

Fig. 1.2 *L. hexandra* growing near an electroplating factory in Guangxi

通过采集不同植物样品分析其重金属含量, 发现在电镀工业区附近的 8 种优势植物 (干物质, 下同) 中 Cr、Ni、Zn 和 Cu 的含量差异很大。如表 1.1 所示, 生长在电镀污泥上的蒲公英根中的 Cr、Cu 和 Ni 的含量都很高, 但叶片和茎中的含量却低于其他植物, 表明有较强的限制重金属向地上部分运输的能力。除李氏禾外, 其他植物的地上部分重金属含量均较低 ($\text{Cr} < 80\text{mg/kg}$, $\text{Ni} < 100\text{mg/kg}$, $\text{Zn} < 70\text{mg/kg}$, $\text{Cu} < 80\text{mg/kg}$)。值得注意的是李氏禾叶片中的 Cr 浓度在 $767.4 \sim 1274.8\text{mg/kg}$, 平均浓度达到 1023.6mg/kg , 高于 Baker 和 Brooks^[11] 提出的 Cr 超富集植物的参考值 1000mg/kg 。该植物具有明显的 Cr 超富集特征。

表 1.1 电镀工业区优势植物中 Cr、Ni、Zn 和 Cu 含量

Table 1.1 Concentrations of Cr, Ni, Zn and Cu in plants near the electroplating factory

植物	部位	样品数	重金属含量/(mg/kg DW)			
			Cr	Ni	Zn	Cu
李氏禾	根	2	1411.2	533.4	60.4	210.6
<i>Leersia hexandra</i>	茎	3	146.5	85.2	73.6	111.2
	叶	3	1023.6	310.7	86.8	396.6

续表

植物	部位	样品数	重金属含量/(mg/kg DW)			
			Cr	Ni	Zn	Cu
马唐	地上	4	37.1	31.4	65.4	16.8
<i>Digitaria sanguinalis</i>	地下	4	73.1	62.4	133.8	18.6
蒲公英	根	3	3227.1	1472.0	258.6	1244.3
<i>Taraxacum officinale</i>	茎	3	13.9	8.4	4.6	17.3
	叶	3	4.6	5.4	29.2	38.9
蕨	地上	2	7.3	16.6	17.6	0.6
<i>Pteridium aquilinum</i>	地下	2	243.1	188.4	119.2	96.8
凤尾竹	叶	3	7.9	15.4	28.6	78.6
<i>Bambusa multiplex</i>	茎	3	27.8	39.9	59.5	112.2
白花败酱	叶	3	18.6	28.0	38.2	0.5
<i>Patrinia villosa</i>	茎	3	7.9	25.3	37.0	41.9
铺地黍	地上	3	59.0	53.5	40.6	72.4
<i>Panicum repens</i>	地下	3	668.4	361.4	70.6	245.1
香根草	地上	3	66.3	80.0	25.9	58.0
<i>Vetiveria zizanioides</i>	地下	3	310.4	136.0	39.1	401.1

1.3.2 自然条件下李氏禾对 Cr 的富集作用

为进一步确认李氏禾对 Cr 的富集特征,2004 年 10 月采集了池塘边不同地点的李氏禾、土壤和水,分析了其中的 Cr 含量,结果见表 1.2。由于池塘长期受到电镀废水的污染,水和底泥中的 Cr 含量都较高。水中 Cr 的含量为 5.55~6.70mg/L,平均值为 5.90mg/L。底泥中的 Cr 平均含量为 114.3mg/kg,最高含量为 186.2mg/kg。各采样点李氏禾中对 Cr 均有极强的富集作用。其叶片中 Cr 含量最高可达 2977.7mg/kg,平均 Cr 含量为 1635.8mg/kg。除 S10 外,所有样品叶片中的 Cr 含量都超出植物对 Cr 超积累临界值(1000mg/kg)。茎中 Cr 含量在 135.2~514.3mg/kg,平均为 236.6mg/kg。此外,李氏禾对 Cr 有极高的富集系数。叶片相对底泥中 Cr 的富集系数最高可达 56.83(S5),最低也有 5.82(S1)。叶片相对水中 Cr 的富集系数最高可达 517.86(S5),平均可达 306.8。