

铬污染地区植物重金属含量特征与耐性植物筛选研究

郑施雯^{1,2*}, 魏远^{2*}, 顾红波³, 朱建林⁴, 李小明⁴, 江泽平^{2**}

(1. 湖南大学环境科学与工程学院, 湖南长沙 410082; 2. 中国林业科学研究院林业研究所, 北京 100091;
3. 国家林业局调查规划设计院, 北京 100714; 4. 宁波大学建筑工程与环境学院, 浙江宁波 315211)

摘要:通过研究浙江温州某制革区土壤与植物重金属含量及其与土壤污染之间的关系,初步筛选了适合于土壤铬污染生态修复的植物种质资源。调查共记录 25 种高等植物, 分属 13 科。主要优势物种有: 狗牙根、灰绿藜、藿香蓟、牛繁缕、牛筋草、蔊菜、反枝苋和四季竹。狗牙根、灰绿藜、牛筋草、蔊菜和反枝苋宜作为 Cr 污染土壤生态修复的先导植物。污染区 Cr 耐性植物地上部分的 Cr 含量为 110.26 ~ 774.05 mg · kg⁻¹, 平均值为 280.95 mg · kg⁻¹; 根部 Cr 含量为 774.05 ~ 2 334.56 mg · kg⁻¹, 平均值为 1 229.75 mg · kg⁻¹。狗牙根积累的 Cr 含量最高, 地上部分与根分别为 774.05 / 2 334.56 mg · kg⁻¹。植物体中的重金属含量与土壤重金属含量呈弱相关性, 而植物地上部分 Cr 含量与根部 Cr 含量以及地上部分 Cr 富集系数与根 Cr 富集系数均呈显著正相关, 地上部分富集系数越大, 根的富集能力越高。

关键词: Cr; 植物; 重金属; 污染; 筛选; 生态修复

中图分类号: X53

文献标识码: A

Characteristics of Heavy Metals in Plants Growing on Cr Contaminated Area and Cr-Tolerant Plants Screening

ZHENG Shi-wen^{1,2}, WEI Yuan², GU Hong-bo³, ZHU Jian-lin⁴, LI Xiao-ming⁴, JIANG Ze-ping²

(1. College of Environmental Science and Engineering, Hu'nan University, Changsha 410082, Hu'nan, China;

2. Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;

3. Academy of Forest Inventory and Planning, State Forestry Administration, Beijing 100714, China;

4. Faculty of Architectural Civil Engineering and Environment, Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China)

Abstract: The research focused on heavy metal concentrations of soil and plants in Wenzhou's tanning zone in Zhejiang Province of East China and relationship with soil pollution. The available plant germplasm resources for Cr contaminated soil restoration were initially defined. Twenty-five species belonging to 13 families were found in the polluted area, including 8 dominant species: *Cynodon dactylon* (L.) Pers., *Chenopodium glaucum* Linn., *Ageratum conyzoides* Linn., *Malachium aquaticum* (L.) Fries, *Eleusine indica* (Linn.) Gaertn., *Rorippa indica* (Linn.) Hiern, *Amaranthus retroflexus* Linn. and *Oligostachyum lubricum* (Wen) Keng f. The investigation showed that *Cynodon dactylon* (Linn) Pers., *Chenopodium glaucum*, *Eleusine indica* (Linn) Gaertn., *Rorippa montana* (Linn) Hiern, *Amaranthus retroflexus* Linn. were the adaptive pioneer species for soil ecological restoration. Cr concentrations in the aboveground were 110.26 - 774.05 mg · kg⁻¹, and the average value was 280.95 mg · kg⁻¹; concentrations in roots were 774.05 - 2 334.56 mg · kg⁻¹, the average value was 1 229.75 mg · kg⁻¹. Cr

收稿日期: 2009-11-12

基金项目: 国家林业科技支撑计划项目(2006BAD03A0104)

作者简介: 郑施雯(1985—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为修复生态学。

* 同等贡献 · 魏远博士研究生, 主要研究方向为修复生态学。E-mail: weiyuan@caf.ac.cn

** 通讯作者: E-mail: jiangzp@caf.ac.cn

concentrations in the aboveground and root of *Cynodon dactylon* were the highest, $774.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $2\,334.56 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively. According to correlation analysis, the heavy metal content in aboveground plants and the roots had weak correlation with the content in soil. The result of regressive analysis indicated that the root content and bioaccumulation coefficients of Cr was both closely associated with the aboveground plants. The root bioaccumulation coefficients were enhanced with the increased aboveground plants.

Key words: Cr; plant; heavy metal; contamination; screening; ecological remediation

我国是世界皮革的加工中心和制革大国,皮革资源量、皮革毛皮制品产量居世界第一;浙江是我国皮革加工制造业大省,其中温州是全国规模最大的猪皮革加工基地,生皮产量占全国的1/4。铬及其化合物是制革行业常用的基本原料,在生产过程中产生大量含铬废水和废渣。我国制革行业每年约产生140万t皮革废弃物,其大部分被随意丢弃,其中所含的重金属铬对环境造成了严重污染^[1]。铬可以通过食物链在人体内积蓄而对人体构成潜在危害,甚至引起致畸、致癌和致突变等^[2]。因此,对铬污染土壤进行修复和治理是我国面临的重大而紧迫的环境问题。自1983年美国科学家 Chaney^[3]等首次提出运用植物去除土壤重金属污染物的设想以来,植物修复技术已成为土壤重金属污染治理领域的研究热点问题并受到普遍关注。植物修复是利用植物及其根系圈微生物体系的吸收、挥发、转化和降解作用机制来清除环境中污染物质的一项新兴的污染治理技术,也是用于清除土壤重金属污染的绿色生态技术。与传统方法相比,该技术具有高效、经济和生态协调性等优点^[4],但其关键在于寻找到适合于修复各种重金属污染土壤的植物材料。

早期的植物修复技术注重于超累积植物材料的研究^[5]。超累积植物可在其组织中累积到很高的污染物浓度,通常 $>1\,000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[6-7];然而,因为难以找到理想的超累积植物,并且在极端污染区域通常只存在某些适应于该污染环境的先锋植物种类,所以尽管这些先锋植物的污染物累积浓度可能远低于超累积植物标准,但因其可能是特定污染条件下的最佳生态修复植物材料而越来越受到重视^[5]。因此,很多研究都致力于寻找耐重金属污染的本土植物来修复当地的土壤重金属污染。本文试图通过对浙江温州某制革区土壤与植物重金属含量特征及其与土壤污染之间关系的研究,筛选出适合于该地区土壤铬污染生态修复的植物种质资源。

1 研究区域概况

温州位于浙江的东南部,经济发达,制革工业历

史悠久。温州属亚热带海洋季风湿润性气候区,冬夏季风交替显著,温度适中,四季分明,雨量充沛。年平均气温 $16.1 \sim 18.2 \text{ }^\circ\text{C}$,1月份平均气温 $6.8 \sim 8.0 \text{ }^\circ\text{C}$,7月份平均气温 $25.5 \sim 28.2 \text{ }^\circ\text{C}$ 。冬无严寒,夏少酷暑。年降水量 $1\,500 \sim 1\,900 \text{ mm}$ 。春夏之交有梅雨,7—9月间有台风,无霜期为 $260 \sim 280 \text{ d}$ 。全年日照时数 $1\,700 \sim 2\,000 \text{ h}$ 。该地区优越的水热条件为土壤重金属污染的植物修复提供了有利的气候条件。

2 研究方法

2.1 采样

2008年10月对温州某制革区进行了土壤采样和植物调查。将调查采样区域分为7组,分别为:污水处理厂一(1组)、排污口及河边(2组)、废弃制革厂一(3组)、基本未受污染区一(4组)、污水处理厂二(5组)、废弃制革厂二(6组)、基本未受污染区二(7组)。在每个组内按蛇形法或梅花布点法确定5个 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 小样方,采集每个小样方内的所有植物种类样品,再将组内5个小样方的同种植物合并在一起作为该组该种植物的分析样品;组内各小样方的土样混合为1个样,采集深度为 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 。所有样品均用聚乙烯塑料袋封装后运回宁波大学环境实验室。因所采植物基本上为草本,难以将植物茎叶分开,故仅将植物样品区分为地上和根2部分。

2.2 样品处理

土壤样品自然风干后碾碎,过100目尼龙筛,筛下样品装入封口袋中保存在干燥器中备用。采集的植物用自来水浸泡 $15 \sim 30 \text{ min}$,去离子水冲洗3次,洗去表面泥土及自来水,擦干后按地上、地下部分分开,置于恒温干燥箱中 $105 \text{ }^\circ\text{C}$ 下杀青 0.5 h , $70 \text{ }^\circ\text{C}$ 恒温干燥箱中干燥 24 h ,粉碎过100目尼龙筛,分别装入封口袋并保存于干燥器中。精确称取各种材料粉末 0.400 g 左右(精确到 0.000 g)于E-THOS1/A微波消解仪(MDS)消解罐中,土壤样品加 8 mL HNO_3 和 $2 \text{ mL H}_2\text{O}_2$,植物地上部分加 7 mL HNO_3 和 $1 \text{ mL H}_2\text{O}_2$,植物地下部分加 7 mL HNO_3 和

2 mL H₂O₂,运用消解仪设定的消解程序进行消解,结束后开罐赶酸,用超纯水将消解液转入 50 mL 容量瓶中定容,过滤去除杂质,待测。待测溶液视测定条件酌情适当稀释。分析过程分别加入国家标准土壤样品(GSS-1)和国家标准植物样品(GSV-3)进行分析质量控制。每个样品同时作 2 个平行分析样。

2.3 测定方法与数据分析

各种样品的待测溶液通过 TAS-990 原子吸收分光光度计(北京普析)进行测定(实验室:宁波大学材化学院实验室;测定者:实验室相关人员及作者本人)。分别测得各种样品溶液中 Cu、Pb、Zn、Cr 的浓度(c),代入下列公式进行计算:

$$\text{重金属含量(干质量, mg} \cdot \text{kg}^{-1}) = c \times V \times n / m$$

式中: c 为样品溶液中重金属的浓度($\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$); V 为样品溶液定容体积(L); n 为稀释倍数; m 为样品质量(g),将计算结果 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 换算成 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

$$\text{富集系数} = c_1 / c_0$$

式中: c_1 植物中某重金属含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); c_0 土壤

中同种重金属含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

数据分析采用 SPSS13.0 和 MATLAB 完成。

3 结果与分析

3.1 铬污染地区土壤重金属含量

铬污染区土壤 pH 值为 6.51 ~ 7.27,有机质含量为 23.0 ~ 177.2 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。基本未受污染区(4,7组)土壤 pH 值为 5.71 ~ 6.38,有机质含量为 89.7 ~ 101.3 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。土壤重金属含量测定结果见表 1。所有样点的 3 种重金属(Cu、Pb、Cr)的含量均大于全国的土壤背景值,其中,污染地区(1、2、3、5、6组)Cr 含量非常高,是全国背景值的 20 ~ 71 倍。从土壤环境质量二级标准(GB 15618—1995)来看,污染地区 Cr 含量远远超过污染警戒值,是二级标准的 5 ~ 20 倍,已对该地区造成较严重的污染。污染地区的 Cu、Pb、Zn 含量以及对照组的 Cu、Pb、Zn、Cr 含量均在二级标准以内,未造成相应的土壤重金属污染。

表 1 温州某制革区不同组别土壤重金属含量(平均值 ± 标准差)

$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

采样组	采样点	Cu	Pb	Zn	Cr
1	污水处理厂一	81.51 ± 12.13	50.14 ± 12.73	153.09 ± 3.04	2 375.42 ± 519.07
2	废水排出口一	60.77 ± 8.01	43.81 ± 3.41	118.97 ± 25.90	1 477.89 ± 244.46
3	废弃制革厂一	43.73 ± 3.17	31.50 ± 1.83	53.13 ± 3.75	1 091.52 ± 12.86
4	基本未受污染区一	36.83 ± 1.37	30.38 ± 1.05	29.66 ± 0.88	69.82 ± 2.87
5	污水处理厂二	61.39 ± 2.05	51.29 ± 2.89	42.46 ± 17.61	3 844.54 ± 1 122.97
6	废弃制革厂二	92.68 ± 1.53	52.33 ± 0.64	34.35 ± 1.17	1 631.26 ± 7.28
7	基本未受污染区二	59.49 ± 1.25	39.02 ± 1.34	16.43 ± 2.12	139.56 ± 2.31
	全国土壤背景值	20.00	23.6	67.70	53.90
	土壤二级标准	100	300	250	200

3.2 铬污染地区物种分布

通过对温州制革区(铬污染地区)以及基本未受铬污染区的调查,共记录了 25 种高等植物,分属 13 科,其中禾本科 9 种,菊科 3 种,豆科、藜科、牻牛儿苗科、柏科、石竹科、木樨科、伞形科、蓼科、十字花科、荨麻科、大麻科、苋科、莎草科各 1 种。其中主要的优势物种为禾本科、菊科、藜科、石竹科、十字花科和苋科植物,分别为狗牙根、灰绿藜、藿香蓟、牛繁缕、牛筋草、蔊菜、反枝苋和四季竹。各组物种分布情况见表 2。1、2、5 组土壤以及养分条件较好,且有较正规的管理,物种相对较多,而 3、6 组在废弃的制革厂,无管理,条件差,在土壤高 Cr 浓度下能适应环境的物种很少。

3.3 Cr 耐性植物中的重金属含量及富集特征

从表 3 可以看出:铬富集能力大于 100 $\text{mg} \cdot$

kg^{-1} 且较为优势的植物共 15 种,其重金属 Cu、Pb、Zn、Cr 含量分别为 1.56 ~ 42.44、3.97 ~ 72.17、30.71 ~ 192.49、110.26 ~ 2 334.56 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。与植物金属元素正常范围相比,Cu 在正常范围内,Pb 和 Zn 基本在正常范围内,个别植物超标范围均在 1 倍以内;而植物 Cr 含量均超过上限值的 13 倍以上,最高达到 277 倍之多,说明该地区植物已受到土壤 Cr 的污染,且植物中的重金属含量与土壤中 Cr 的含量均呈弱相关性。植物地上部分的 Cr 含量为 110.26 ~ 774.05 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,尚未达到 Cr 超积累植物的临界含量标准,植物根部 Cr 含量为 799.08 ~ 2 334.56 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,均高于地上部分的 3 倍以上。其中 1 组的狗牙根生物量大且长势良好,Cr 含量最高,地上部分为 774.05 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,根部为 2 334.56 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;其次为 2 组的灰绿藜。

表2 温州某制革区不同组别的物种分布及其重金属含量

采样组	植物类型		项目	植物重金属含量/(mg·kg ⁻¹)			
	科	种		Cu	Pb	Zn	Cr
1	禾本科3种 伞形科1种 桑科1种, 柏科1种, 木樨科1种	狗尾草、 狗牙根、 水芹、菴草、 龙柏、四季竹、 女贞	地上部分	17.71~42.22	9.70~69.64	56.11~159.4	21.27~774.05
			根	5.59~23.95	17.89~43.21	61.71~136.74	471.69~2752.41
2	禾本科2种, 十字花科1种 石竹科1种 伞形科1种 藜科1种 菊科1种	狗尾草、葎菜、 牛繁缕、 水芹、 灰绿藜、 野燕麦、 粘糊菜	地上部分	7.61~29.43	9.69~67.96	65.19~170.48	3.71~552.95
			根	4.21~42.44	21.57~47.62	48.89~136.52	930.83~2392.06
3	豆科1种 荨麻科1种 伞形科1种 禾本科1种	槐树、 苎麻、 水芹、 四季竹	地上部分	19.78~24.16	59.56~63.21	57.52~77.35	38.39~242.4
			根	12.83~23.47	60.22~65.56	50.21~110.34	238.12~1321.88
4	禾本科1种 十字花科1种 牻牛儿苗科1种 豆科1种	牛筋草、 葎菜、 老鹤草、 槐树	地上部分	17.88~23.82	51.19~71.48	49.66~124.25	2.18~67.09
			根	7.61~18.32	19.16~43.39	51.91~71.51	99.54~142.07
5	禾本科6种 蓼科1种 苋科1种 十字花科1种 菊科1种 莎草科1种	画眉草、小酸模、 四季竹、反枝苋、 葎菜、藜香蓟、 夏飘拂草、早 熟禾、狗牙根、 茭白、甘蔗	地上部分	2.95~30.43	2.91~53.30	22.36~135.16	10.62~364.17
			根	0.98~43.59	2.05~29.43	2.76~202.35	171.69~1833.05
6	菊科1种 豆科1种 苋科1种	三脉紫菀、 槐树、 反枝苋	地上部分	5.97~10.44	12.21~27.03	65.39~192.49	41.53~110.26
			根	3.15~44.31	23.20~31.86	18.36~124.49	1017.41~1149.12
7	蓼科1种 菊科1种 禾本科3种 苋科1种	小酸模、藜香 蓟、牛筋草、 反枝苋、甘蔗、 四季竹	地上部分	3.67~24.4	0.89~33.52	14.69~156.87	1.99~75.54
			根	3.22~17.39	17.55~25.96	13.46~123.87	107.39~118.76

注:禾本科(Poaceae),伞形科(Umbelliferae),桑科(Cannabinaceae),柏科(Cupressaceae),木樨科(Oleaceae),十字花科(Brassicaceae),石竹科(Caryophyllaceae),藜科(Chenopodiaceae),菊科(Compositae),豆科(Leguminosae),荨麻科(Urticaceae),牻牛儿苗科(Geraniaceae),蓼科(Polygonaceae),苋科(Amaranthaceae),莎草科(Cyperaceae),狗尾草(*Setaria viridis* (Linn.) Beauv.),狗牙根(*Cynodon dactylon* (Linn.) Pers.),水芹(*Oenanthe javanica* (Blume.) DC.),菴草(*Humulus scandens* (Lour.) Merr.),龙柏(*Sabina chinensis* (Linn.) cv. 'kaizuca'),四季竹(*Oligostachyum lubricum* (Wen) Keng f.),女贞(*Ligustrum lucidum* Ait.),葎菜(*Rorippa indica* (L.) Hiern),牛繁缕(*Malachium aquaticum* (L.) Fries),灰绿藜(*Chenopodium glaucum* Linn.),野燕麦(*Avena fatua* Linn.),粘糊菜(*Siegesbeckia orientalis* Linn.),槐树(*Sophora japonica* Linn.),苎麻(*Boehmeria nivea* (Linn.) Gaud.),牛筋草(*Eleusine indica* (Linn.) Gaertn.),老鹤草(*Geranium wilfordii* Maxim.),画眉草(*Eragrostis pilosa* (Linn.) Beauv.),小酸模(*Rumex acetosella* Linn.),反枝苋(*Amaranthus retroflexus* Linn.),藜香蓟(*Ageratum conyzoides* Linn.),夏飘拂草(*Fimbristylis aestivalis* (Retz.) Vahl),早熟禾(*Poa pratensis* Linn. var. *pratensis*),茭白(*Zizania caduciflora* (Turcz. ex Trin.) Hand.),甘蔗(*Saccharum officinarum* Linn.),三脉紫菀(*Aster ageratoides* Turcz.)。

表 3 温州某制革区部分耐性植物的重金属含量

mg · kg⁻¹

植物	采样组	Cu		Pb		Zn		Cr	
		地上	根	地上	根	地上	根	地上	根
狗牙根	1	31.59	13.26	54.75	56.24	143.51	135.24	774.05	2 334.56
葎草	1	28.05	33.99	23.60	15.24	65.37	51.04	216.90	1 235.46
龙柏	1	25.40	35.21	62.04	52.32	63.45	42.52	123.06	1 002.36
四季竹	1	42.22	29.66	69.64	72.17	85.87	71.02	236.23	1 197.22
灰绿藜	2	29.43	35.26	21.27	30.22	104.48	75.21	552.95	1 925.34
焯菜	2	24.47	15.24	9.70	7.56	65.20	75.20	294.07	1 156.35
野燕麦	2	13.82	42.44	58.89	47.62	110.55	136.52	196.85	1 392.62
牛繁缕	2	21.39	20.75	67.96	26.70	113.43	79.51	219.50	983.40
水芹	3	19.78	16.25	61.77	41.86	67.98	60.26	242.40	1 005.22
小酸模	5	30.44	39.58	3.97	18.59	93.11	55.94	218.27	799.08
反枝苋	5	16.52	2.01	53.30	29.44	74.67	36.44	181.70	932.67
藿香蓟	5	18.21	3.57	30.70	18.76	50.25	64.44	242.44	1 035.08
牛筋草	5	19.08	13.25	30.90	24.48	79.97	56.78	241.48	1 178.34
甘蔗	5	21.20	1.56	6.11	25.01	68.38	73.22	364.18	1 251.06
三脉紫菀	6	7.95	3.15	24.96	23.20	192.49	30.71	110.26	1 017.41
正常含量		0.4~45.8		0.1~41.7		1~160		0.2~8.4 ^[10]	

富集系数是指植物体内某种重金属含量与土壤中同种重金属含量的比值^[8],反映植物对土壤重金属元素的修复能力。较优势的 Cr 耐性植物重金属富集系数见表 4。重金属富集系数均为偏态分布,其平均值均大于中位数(图 1)。平均富集系数由大到小为:Zn 地上(1.41) > Zn 根(0.92) > Pb 地上

(0.84) > Pb 根(0.70) > Cr 根(0.60) > Cu 地上(0.35) > Cu 根(0.31) > Cr 地上(0.14);地上部分对 Cr 的富集系数为 0.05~0.37,第 75 百分位数为 0.20,根部对 Cr 的富集系数范围为 0.21~1.30,其第 75 百分位数为 0.92。

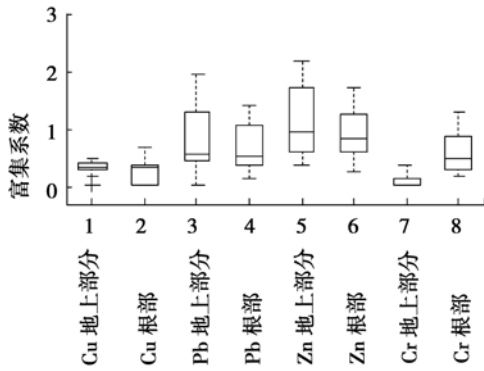
表 4 温州某制革区部分 Cr 耐性植物的富集系数

植物	采样组	Cu		Pb		Zn		Cr	
		地上	根	地上	根	地上	根	地上	根
狗牙根	1	0.39	0.16	1.09	1.12	0.94	0.88	0.33	0.98
葎草	1	0.34	0.42	0.47	0.30	0.43	0.33	0.09	0.52
龙柏	1	0.31	0.43	1.24	1.04	0.41	0.28	0.05	0.42
四季竹	1	0.52	0.36	1.39	1.44	0.56	0.46	0.10	0.50
灰绿藜	2	0.48	0.58	0.49	0.69	0.88	0.63	0.37	1.30
焯菜	2	0.40	0.25	0.22	0.17	0.55	0.63	0.20	0.78
野燕麦	2	0.23	0.70	1.34	1.09	0.93	1.15	0.13	0.94
牛繁缕	2	0.35	0.34	1.55	0.61	0.95	0.67	0.15	0.67
水芹	3	0.45	0.37	1.96	1.33	1.28	1.13	0.22	0.92
小酸模	5	0.50	0.64	0.08	0.36	2.19	1.32	0.06	0.21
反枝苋	5	0.27	0.03	1.04	0.57	1.76	0.86	0.05	0.24
藿香蓟	5	0.30	0.22	0.60	0.37	1.18	1.52	0.06	0.27
牛筋草	5	0.31	0.06	0.60	0.48	1.88	1.34	0.06	0.31
甘蔗	5	0.35	0.03	0.12	0.49	1.61	1.72	0.09	0.33
三脉紫菀	6	0.09	0.03	0.48	0.44	5.60	0.89	0.07	0.62

3.4 Cr 耐性植物的聚类分析

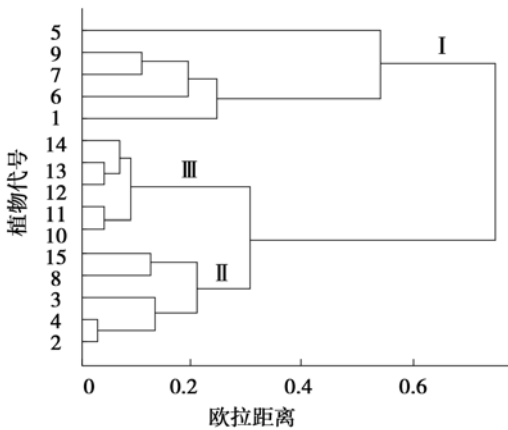
运用 MATLAB 对植物吸收重金属 Cr 的富集系数进行聚类分析,按照欧拉距离为 0.3 的聚类标准,植物大致可以分为 3 类(图 2):

I 类:狗牙根、灰绿藜、焯菜、野燕麦和水芹。这类植物对 Cr 的富集系数最高,地上部分和根部分别为 0.13~0.37 和 0.78~1.30。平均分别为 0.21 和 0.98。



箱图主体上中下3条线分别代表富集系数的75、50、25百分位数,上下截止线表示本体最大最小值。

图1 重金属富集系数的箱图



1-狗牙根,2-葎草,3-龙柏,4-四季竹,5-灰绿藜,6-蕹菜,7-野燕麦,8-牛繁缕,9-小芹,10-小酸模,11-反枝苋,12-藿香蓟,13-牛筋草,14-甘蔗,15-三脉紫菀

图2 植物重金属聚类分析图

II类:葎草、龙柏、四季竹、牛繁缕和三脉紫菀。这类植物Cr富集系数较低,地上部分和根部最低为0.05和0.42。

III类:小酸模、反枝苋、藿香蓟、牛筋草和甘蔗。这类植物Cr富集系数最低。蓼科、苋科和大麻科均属于此类。

图2表明:同科的植物对重金属Cr的富集有一定的相似性,藜科、十字花科和伞形科均在I类,所有桑科、柏科和石竹科均在II类。

4 讨论

4.1 制革地区土壤Cr污染与Cr耐性植物

对制革区土壤以及植物的调查表明,该地区已受到重金属Cr的严重污染。从污染地区植物的生长状况来看,基本没有高大树木,草本植物居多,这

可能由于草本植物更耐金属型污染,在重金属污染地区植被往往以草本植物占优势^[9]。该区域发现了狗牙根、灰绿藜、藿香蓟、牛繁缕、牛筋草、蕹菜、反枝苋、四季竹、甘蔗等植物为优势的耐Cr植物种质(表3),其中甘蔗地上部分和地下部分的铬吸收量分别超过植物中铬正常上限的42、147倍,故该地区生长的甘蔗可能已经受到Cr污染,宜谨慎食用。本研究筛选的禾本科、藜科、菊科和苋科优势植物,可作为该地区土壤Cr污染修复和生态恢复的优良物种。

4.2 土壤Cr污染生态修复的植物组合筛选

随着制革工业日趋发达,土壤铬污染的危害已引起人们的广泛关注,运用植物对铬污染土壤进行生态修复不失为一种经济实用的有效方法。本区发现的相对优势的物种有禾本科、藜科、菊科、苋科、十字花科和石竹科,其中禾本科植物狗牙根和牛筋草、藜科的灰绿藜、苋科的反枝苋以及十字花科的蕹菜为Cr污染地区的优势植物,这些植物生命力强,繁殖能力高且耐重金属毒害,有良好的固定重金属Cr的作用,其中狗牙根和牛筋草的种植有利于保持水土;因此上述5种植物可以作为植物修复的先锋植物;同时狗牙根生物量大且积累Cr浓度最高,可考虑作为建群种出现。四季竹和龙柏长势稳定,生物量大,且可积累较高浓度的Cr,可考虑与上述植物组合栽种。

4.3 植物对重金属Cr的吸收与积累

普通植物或是农作物中Cr含量很低,一般为 $0.2 \sim 8.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[10]。在国内已报道发现的铬超积累植物仅有李氏禾(*Leersia hexandra* Swartz),叶片内平均铬含量达到 $1786.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,最高为 $2977.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,与土壤中铬含量之比最高达56.83,叶片内铬含量与根茎之比最高达11.59倍^[11]。重金属Cr主要存在于各种植物的根部,根部对Cr的富集系数均远大于地上部分对Cr的富集系数。图3及图4显示了植物地上部分与根Cr含量以及富集系数的关系,可以看到,植物地上部分与根部的Cr含量有显著的正相关性(图3, $r=0.91$),植物地上部分与根部的Cr富集系数同样呈显著正相关(图4, $r=0.89$)。

5 结论

(1)研究区域已受到重金属Cr的严重污染,其土壤Cr含量为 $1091.52 \sim 3844.54 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,超过土壤环境质量二级标准的5~20倍。

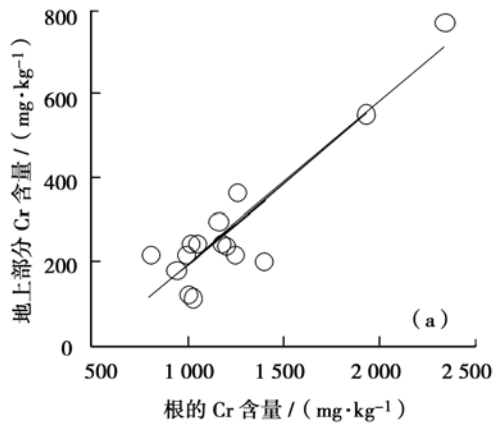


图3 植物地上部分与根 Cr 含量的回归图

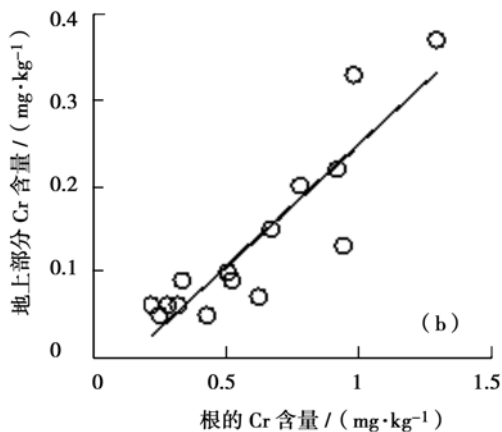


图4 植物地上部分与根 Cr 富集系数回归图

(2) 该区优势植物种质主要为禾本科、藜科、菊科、苋科、十字花科和石竹科的植物。

(3) 狗牙根、牛筋草、灰绿藜、反枝苋和蔊菜在铬污染区长势良好,对重金属 Cr 具有较强的耐性和吸收富集能力,可作为生态修复土壤铬污染的先锋植物,同时狗牙根生物量大且积累 Cr 浓度最高,可考虑作为建群种出现。

(4) 对该区域铬污染土壤进行生态修复时,四季竹和龙柏长势稳定,生物量大,且可积累较高浓度

的 Cr,可考虑与以上先锋植物组合栽种。

(5) 植物地上部分的 Cr 含量和根部 Cr 含量以及地上部分富集系数和根部富集系数呈显著正相关。

参考文献:

- [1] 周加祥,刘 铮. 铬污染土壤修复技术研究进展[J]. 环境污染治理技术与设备,2000,1(4):52-55
- [2] 仲维科,樊耀波,王敏健. 我国农作物的重金属污染及其防止对策[J]. 农业环境保护,2001,20(4):270-272
- [3] Chaney R L, Minnie M, Li Y M, *et al.* Phytoremediation of soil metals[J]. *Current Opinion in Biotechnology*,1997,8:279-284
- [4] 王鸣刚,任小换,刘晓风. 植物修复重金属污染土壤的机理及其应用前景[J]. 甘肃农业大学学报,2007,42(5):108-113
- [5] Baker A J M, Reeves R D, Hajar A S H. Heavy metal accumulation and tolerance in British populations of the metallophyte *Thlaspi caerulescens* J & C Press (Brassicaceae) [J]. *New Phytologist*,1994,127:61-68
- [6] McGrath S P, Shen Z G, Zhao F J. Heavy metal uptake and chemical changes in the rhizosphere of *Thlaspi caerulescens* and *Thlaspi ochroleucum* grown in contaminated soils [J]. *Plant Soil*,1997,188:153-159
- [7] Sebastiani L, Scebba F, Tognetti R. Heavy metal accumulation and growth responses in poplar clones Eridano (*Populus deltoides* × *maximowiczii*) and I-214 (*P.* × *euramericana*) exposed to industrial waste[J]. *Environmental and Experimental Botany*,2004,52:79-88
- [8] Salt E D, Blaylock M B, Kumar NPBA, *et al.* Phytoremediation: A novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants[J]. *Biotechnology*,1995,13:468-474
- [9] Ernst W H O. Mine vegetation in Europe[M]//Shaw A J. *Heavy Metal Tolerance in Plants: Evolutionary Aspects*. Boca Raton, Florida: CRC Press, 1989: 21-38
- [10] Gerber G B, Leonard A, Hantson Ph. Carcinogenicity, mutagenicity and teratogenicity of manganese compounds[J]. *Critical Rev Oncology/Hematology*,2002,42:25-34
- [11] 张学洪,罗亚平,黄海涛,等. 一种新发现的湿生铬超积累植物——李氏禾(*Leersia hexandra* Swartz) [J]. 生态学报,2006,26(3):950-953