

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2017.03.2016071801

吴谨, 陈孟鹏, 李旭, 等. 聚丙烯酸钾对矿区先锋植物重金属富集能力的影响[J]. 环境化学, 2017, 36(3): 549-556.

WU Jin, CHEN Mengpeng, LI Xu, et al. Effects of potassium polyacrylate on the enrichment of heavy metals by mining pioneer plants [J]. Environmental Chemistry, 2017, 36(3): 549-556.

聚丙烯酸钾对矿区先锋植物重金属富集能力的影响*

吴 谨¹ 陈孟鹏¹ 李 旭¹ 蒋建宏¹ 赵 莉¹ 雷华平¹ 魏得良^{1,2,3**}

(1. 湘南学院化学生物与环境工程学院, 郴州, 423000; 2. 湘南稀贵金属化合物及其应用湖南省重点实验室, 郴州, 423000;
3. 郴州环科湘南检测有限责任公司, 郴州, 423000)

摘 要 本文探究不同浓度聚丙烯酸钾对矿区先锋植物重金属富集能力的影响. 选定柿竹园尾砂坝与高斯贝尔尾砂坝中的植物小飞蓬、花叶水葱与苦菜为研究对象, 通过添加 0.20%、0.40%、0.60% 的聚丙烯酸钾种植培养 4 个月, 经微波消解后采用火焰原子吸收光谱法直接测定植物地上部分、地下部分与土壤中 Cu、Zn、Pb、Cd 的含量, 分析聚丙烯酸钾浓度与富集能力的关系. 实验结果表明, 通过添加聚丙烯酸钾植物对 Cu、Zn、Pb 和 Cd 的富集能力有所增强. 两处砂坝的花叶水葱对 Cu、Zn、Pb、Cd 的转移系数及富集系数均以 0.6% 浓度的聚丙烯酸钾提高最多, 高斯贝尔砂坝的小飞蓬则以 0.2% 浓度的提高最多, 其余植物以 0.4% 浓度的提高最多. 原因为不同植物的最佳生长条件不同且矿区之间的环境也有所差别, 这些都导致栽培植物最适合的聚丙烯酸钾浓度不同. 且植物苦菜对 Cu 的富集能力低于对 Zn、Pb、Cd 的富集能力表明同种植物对不同金属的富集能力也有所不同. 因此根据土壤土质添加适合浓度的聚丙烯酸钾及土壤中金属含量的不同采取多种植物的混合搭配种植, 可用于 Cu、Zn、Pb 和 Cd 尾矿废弃地的复垦.

关键词 微波消解, 火焰原子吸收光谱仪, 聚丙烯酸钾, 富集能力, 重金属.

Effects of potassium polyacrylate on the enrichment of heavy metals by mining pioneer plants

WU Jin¹ CHEN Mengpeng¹ LI Xu¹ JIANG Jianhong¹ ZHAO Li¹
LEI Huaping¹ WEI Deliang^{1,2,3**}

(1. Department of Chemistry and Life Science, Xiangnan University, Chenzhou, 423000, China;
2. Province Key Laboratory of Xiangnan Rare and Precious Metal Chemical Compound and Application of Hunan, Chenzhou, 423000, China; 3. Chenzhou Huanke Xiangnan Testing Limited Liability Company, Chenzhou, 423000, China)

Abstract: This paper investigated the effects of potassium polyacrylate on the enrichment of heavy metals by mining pioneer plants. Plants (canadensis, mosaic Shuicong and bitter herbs) growing in Shizhuyuan tailings dam and Gospell tailings dam were selected as the objects of this study. Different concentrations of potassium polyacrylate (namely 0.20%, 0.40%, 0.60%) were added during the four-month cultivation. After microwave digestion, the contents of Cu, Zn, Pb, and Cd of both aboveground part and underground part of the plants and those in soil were measured by flame atomic

2016 年 7 月 18 日收稿 (Received: July 18, 2016).

* 湖南省科技计划项目 (S2013F1022), 湘南稀贵金属化合物及其应用湖南省重点实验室项目 (湘科计字 [2014] 73 号) 和湖南省重点学科湘南学院应用化学学科项目 (湘教发 [2011] 76 号) 资助.

Supported by the Science and Technology Project of Hunan Province, China (S2013F1022), Key Laboratory of Xiangnan Rare and Precious Metal Compound and Its Application of Hunan Province (湘科计字 [2014] 73 号), and Discipline Program of Applied Chemistry of Xiangnan University-Key Discipline of Hunan Province (湘教发 [2011] 76 号).

** 通讯联系人, Tel: 13975532465, E-mail: weideliang22@163.com

Corresponding author, Tel: 13975532465, E-mail: weideliang22@163.com

absorption spectrometry, and the relationship between the concentration of potassium polyacrylate and the capacity of bioconcentration was analyzed. The TP and BCF of Cu, Zn, Pb and Cd of mosaic Shuicong increased the most in both dams when the concentration of added potassium polyacrylate was 0.6%. While for Canadensis, the concentration of 0.2% worked the best in increasing the TP and BCF in Gospell tailing dam. For the other plants, the concentration of 0.4% increased the most. This resulted from the differences in growing conditions and environments. The enrichment capacity of bitter herb for Cu was lower than for Zn, Pb and Cd, which showed that the of enrichment capacity of the same plant varied for different metals. The abandoned Cu, Zn, Pb and Cd tailing area can be reclaimed if suitable concentrations of potassium polyacrylates are added according to the soil property, and different plants are grown by mix-and-match according to the soil metal contents.

Keywords: microwave digestion, flame atomic absorption spectrometry, potassium polyacrylate, enrichment capacity, heavy metal.

随着工业的快速发展,土壤重金属污染已成为突出环境问题.由于矿产开采和冶炼“三废”的排放,导致湖南省湘江流域和资江流域土壤重金属污染比较严重,并产生严重的生态环境风险^[1].近年来植物修复技术受到较大的重视.植物修复技术是指利用植物对土壤有毒有害污染物的提取、吸收、分解、转化.利用超积累植物吸收污染土壤中的重金属并在地上部积累,收割植物地上部分从而达到去除污染物的目的^[2].植物修复技术较传统的物理、化学修复技术具有技术和经济上的双重优势,不仅可以同时对污染土壤及其周边污染水体进行修复,而且可以通过后置处理进行重金属回收.但是植物修复技术也有缺点,尾沙库由矿场选下的废料用管道输送到山沟内贮存起来而形成,土质松软,保水性和保肥性较差,不利于超富集植物生长.存在植物个体矮小,生长缓慢,修复土壤周期较长,难以满足快速修复污染土壤的要求等问题^[3-4].

本研究通过添加具有改良土壤保水性、保肥性的聚丙烯酸钾来解决植物尾沙库生长问题.通过这种方法使植物重金属富集系数变大,甚至成为超富集植物^[5].为探究最适合矿区植物生长的聚丙烯酸钾的浓度.选定柿竹园尾砂坝与高斯贝尔尾砂坝中的植物小飞蓬、花叶水葱与苦菜为研究对象,通过添加不同浓度的聚丙烯酸钾,进行盆栽培养,测定土壤、植物地上部分与地下部分重金属 Cu、Zn、Pb、Cd 的含量,计算分析数据得到结论.从而为冶金工业区的土壤重金属污染治理提供一定的参考依据.

1 实验部分(Experimental section)

1.1 材料

植物采自郴州市柿竹园尾砂坝(113°09'23"E, 25°47'36"N)与高斯贝尔尾砂坝(113°07'04"E, 25°46'33"N).在每个尾砂坝区内,记录并采集先锋植物小飞蓬、花叶水葱、苦菜.小心挖取其完整根系,并挖取植物根系表层土壤(土壤0—20 cm内),每种植物4组.

1.2 实验仪器及试剂

AA-7000 原子吸收分光光度计(日本岛津有限公司);AA-530A 无油空气压缩机(北京同州维普有限公司);干燥箱;AY-220 型电子天平(日本岛津有限公司);微波消解仪(北京盈安美诚科学仪器有限公司).

硝酸(优级纯,国药集团化学试剂有限公司);氢氟酸(优级纯,西陇化工股份有限公司);Cu、Zn、Pb、Cd 国标液(国家钢铁材料测试中心钢铁总院);硫脲(分析纯,天津市永大化学试剂有限公司);抗坏血酸(分析纯湖南省南化化学品有限公司);高纯氩气;高纯乙炔;聚丙烯酸钾.

1.3 实验盆栽处理

将采集好的植物栽植于大小适中的容器中,装盆的同时添加不同浓度的聚丙烯酸钾对土壤进行相同的施肥处理.土壤不同处理的设置见表1.其中,1、2、3为实验组,10为对照组.先将聚丙烯酸钾加水稀释成凝胶状后,再与土壤混匀^[6].装盆时,先在容器最下层铺置一层草木灰,再铺3 cm厚的风干土,然后

将采集的植物栽入,与此同时加入土壤和介质的均匀混合物,最后覆土,浇水.施用 4 个月后对盆栽的植物和土壤进行处理供实验测定之用.

表 1 盆栽实验土壤改良介质的配方设置

Table 1 Medium formulation set to pot experiment soil improvement

编号 No.	配方 Formula	聚丙烯酸钾浓度 Concentration of potassium polyacrylate/%	容器内干土质量 Weight of dry soil in container/kg	聚丙烯酸钾质量 Weight of potassium polyacrylate/g
1	聚丙烯酸钾	0.20	4	8
2	聚丙烯酸钾	0.40	4	16
3	聚丙烯酸钾	0.60	4	24
10	对照	0	4	0

1.4 植物与土壤样品的前处理

1.4.1 植物样品前处理

将每棵植物清洗干净(根部、茎部、叶部不含泥土),烘干至恒重,再将植物地上部分与地下部分分开,分别研磨成粉状,过 100 目筛,放入编好号的封装袋中,将其放到干燥器中保存.

1.4.2 土壤样品前处理

将采集回来的样品自然风干,用研钵磨细后过 200 目筛,用烧杯装好后在干燥箱中低温干燥至恒重,放入编好号的封装袋中,将其放到干燥器中保存^[7].

1.5 植物与土壤样品的消解

1.5.1 植物的消解

称取植物粉末 0.2000 g(精确至 0.0001 g),置于消解罐中,滴加 5 mL 硝酸与 1 mL 双氧水.拧罐置于微波消解器中,按表 2 微波溶样程序消解.消解完全后,将消解液转移至 100 mL 容量瓶中加入混酸(5%的硫脲、5%的抗坏血酸组成)5 mL 用 2%的硝酸定容,转移至广口瓶中,贴好标签,密封保存待测.

表 2 微波溶样程序

Table 2 Microwave digestion procedure

样品类型 Sample type	工步 Step	温度 $T/^\circ\text{C}$	保持时间 t/min	斜率 Slope
植物粉末	1	120	3	8
	2	150	3	8
	3	180	3	8
土壤粉末	1	150	3	8
	2	180	5	8
	3	180	5	8

1.5.2 土壤的消解

称取土壤粉末 0.2000 g(精确至 0.0001 g),置于消解罐中,滴加 4 mL 硝酸、1 mL 双氧水与 1 mL 氢氟酸.拧罐置于微波消解器中,按表 2 微波溶样程序消解.消解完全后,将消解液转移至 100 mL 容量瓶中加入混酸(5%的硫脲、5%的抗坏血酸组成)5 mL 用 2%的硝酸定容,转移至广口瓶中,贴好标签,密封保存待测.

1.6 样品重金属含量测定

1.6.1 标准曲线

将 1000 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 的 Cu 国标液稀释得到 0、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 的 Cu 元素标准溶液.按表 3 设定好仪器工作条件进行测定并绘制 Cu 标准曲线.同法绘制 Zn、Pb、Cd 的标准曲线.Cu、Zn、Pb、Cd 的相关系数 r 为 0.9996、0.9994、0.9996、0.9996.

1.6.2 方法的检出限、精密度和回收率

在上述优化条件下,根据 IUPAC 的定义,本法测定 Cu、Zn、Pb 和 Cd 的检出限分别为 0.0009、

0.0012、0.0006、0.0018 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$, 相对标准偏差 (RSD) 均小于 7%. 整个实验测量的加标回收率稳定在 90%—110%.

表 3 仪器工作条件及测量参数

Table 3 Instrument working conditions and measurement parameters

元素 Element	波长 Wavelength/nm	狭缝宽 Slit width/nm	灯电流 Lamp current/mA	空气压力 Air pressure/MPa	乙炔压力 Acetylene pressure/MPa
Cu	324.8	0.7	7.5	0.35	0.09
Zn	213.9	0.5	7.5	0.35	0.09
Pb	283.3	0.5	10	0.35	0.09
Cd	228.8	0.7	8	0.35	0.09

1.6.3 样品测定

取样品按仪器工作条件平行测定 10 次, 得到 Cu、Zn、Pb、Cd 的含量, 并计算转移系数及富集系数. 转移系数为植物地上部与地下部重金属含量比值. 富集系数为地上部分与土壤重金属含量的比值^[8].

2 结果与讨论 (Results and discussion)

重金属富集系数是指植物某一部位的元素含量与土壤中相应元素含量之比, 转移系数是指植物地上部分元素含量与植物地下部分相应元素含量之比. 它们在一定程度上反映着植物对重金属富集程度的高低或富集能力的强弱. 根据实验测量数据计算得到富集系数及转移系数见表 4. 由表 4 可以看出, 两个尾沙坝的 Cu、Zn、Pb、Cd 的含量均较高, 其中柿竹园以 Zn 最高, 高斯贝尔则以 Zn、Pb 最高. 两个尾沙坝比较发现, 土壤中的 Zn、Cd 的含量相近, 但高斯贝尔的 Cu、Pb 含量均大于柿竹园尾沙坝, 其中 Pb 的含量相差最大.

图 1、图 2、图 3 分别为柿竹园矿区和高斯贝尔矿区植物小飞蓬、花叶水葱、苦菜对 Cu、Zn、Pb、Cd 的转移系数、富集系数与聚丙烯酸钾浓度关系图.

由图 1 可见, 通过添加聚丙烯酸钾植物小飞蓬对 Cu、Zn、Pb、Cd 的转移系数、富集系数均有提高, 且转移系数与富集系数呈正相关. 在柿竹园矿区以添加 0.4% 浓度的聚丙烯酸钾对其转移系数与富集系数提升最多, 而高斯贝尔则以添加 0.2% 浓度的聚丙烯酸钾对其转移系数与富集系数提升最多. 原因为高斯贝尔矿区与柿竹园矿区的土质结构有所差异, 与柿竹园相比高斯贝尔矿区的土中含水量较高.

由图 2 可见, 通过添加聚丙烯酸钾植物花叶水葱对 Cu、Zn、Pb、Cd 的转移系数、富集系数均有提高, 且转移系数与富集系数呈正相关. 在两处矿区均以添加 0.6% 浓度的聚丙烯酸钾对其转移系数与富集系数提升最多.

由图 3 可见, 通过添加聚丙烯酸钾植物苦菜对 Zn、Pb、Cd 的转移系数、富集系数均有提高, 且转移系数与富集系数呈正相关. 在两处矿区均以添加 0.4% 浓度的聚丙烯酸钾对其转移系数与富集系数提升最多. 但苦菜对 Cu 的转移系数、富集系数唯有添加 0.4% 浓度的聚丙烯酸钾的提升较大, 添加 0.2% 与 0.6% 浓度的聚丙烯酸钾对其转移系数与富集系数的影响并不大. 原因同一植物对不同元素的吸附能力并不相同.

对比图 1、图 2 和图 3 分析可得, 在柿竹园矿区内植物小飞蓬与苦菜以添加 0.4% 浓度聚丙烯酸钾提升最大, 而花叶水葱以添加 0.6% 浓度聚丙烯酸钾提升最大. 原因为花叶水葱性喜温暖湿润, 更适合生长在水分充足处^[9]. 而小飞蓬与苦菜常生于荒地中, 在需要水的同时对土壤要求排水性良好^[10].

综上所述, 不同种植物的生长习性不同导致最佳生长条件不同, 同一种植物对不同重金属的吸附能力也不同, 不同矿区的环境与重金属的含量也不同. 因此要根据矿区的环境与重金属含量选择相对应的植物并施以合适浓度的聚丙烯酸钾以达到植物修复的目的.

表 4 样品中 Cu、Zn、Pb、Cd 含量及相关转移系数及富集系数 ($n=10$)
Table 4 The contents of Cu, Zn, Pb, Cd in the samples and their relative transfer coefficients and enrichment coefficients ($n=10$)

尾沙坝名称 Tail dam Names	植物名称 Plants names	聚丙烯酸钾浓 Concentration of potassium polyacrylate	Cu/(mg·kg ⁻¹)				Zn/(mg·kg ⁻¹)					
			地上部分 Above- ground	地下部分 Underground part	土壤 Soil	富集系数 Bioconcentration factors	转移系数 Transfer payment	地上部分 Above- ground	地下部分 Underground part	土壤 Soil	富集系数 Bioconcentration factors	转移系数 Transfer payment
柿竹园	小飞蓬	0.20%	75.2	80.9	85.3	0.88	0.93	1775	2255	2028	0.88	0.79
		0.40%	89.3	92.0	79.9	1.12	0.97	2277	1701	2129	1.07	1.34
		0.60%	70.1	101	68.1	1.03	0.69	1715	2110	1830	0.94	0.81
		对照	51.0	60.2	96.6	0.53	0.85	1538	2155	1849	0.83	0.71
		0.20%	55.4	70.3	87.3	0.63	0.79	1598	2087	2128	0.75	0.77
		0.40%	81.6	89.8	78.8	1.04	0.91	1906	1577	2221	0.86	1.21
高斯贝尔	花叶水葱	0.60%	84.3	79.6	65.8	1.28	1.06	2142	1607	1930	1.11	1.33
		对照	51.1	71.1	116	0.44	0.72	1474	1994	2112	0.7	0.74
		0.20%	58.5	108	61.9	0.94	0.54	1676	1610	1718	0.98	1.04
		0.40%	144	117	97.4	1.48	1.23	2304	1601	2114	1.09	1.44
		0.60%	55.6	63.9	80	0.69	0.87	1662	2085	2134	0.78	0.80
		对照	54.6	50.2	70.7	0.77	1.09	1282	1671	2060	0.62	0.77
高斯贝尔	小飞蓬	0.20%	337	219	375	0.9	1.54	2144	1913	1924	1.11	1.12
		0.40%	311	277	395	0.79	1.12	1887	1857	1858	1.02	1.02
		0.60%	281	254	398	0.71	1.11	1761	1997	2153	0.82	0.88
		对照	189	224	390	0.48	0.84	1693	2328	2208	0.77	0.73
		0.20%	227	271	351	0.65	0.84	1705	1683	1958	0.87	1.01
		0.40%	264	292	369	0.72	0.9	1916	1551	2121	0.9	1.23
高斯贝尔	花叶水葱	0.60%	342	233	352	0.97	1.47	2511	1718	2193	1.14	1.46
		对照	227	279	384	0.59	0.81	1416	1904	2246	0.63	0.74
		0.20%	212.6	215	361	0.59	0.99	1311	1491	1813	0.72	0.88
		0.40%	312	191	357	0.87	1.63	2360	1638	2162	1.09	1.44
		0.60%	198	195	363	0.55	1.02	1663	1440	1790	0.93	1.15
		对照	202	193	362	0.56	1.05	1269	1715	2203	0.58	0.74

续表4

尾沙坝名称 Tail dam Names	植物名称 Plants names	聚丙烯酸钾浓 Concentration of potassium polyacrylate	Pb/(mg·kg ⁻¹)			Cd/(mg·kg ⁻¹)			转移系数 Transfer payment	富集系数 Bioconcentration factors	转移系数 Transfer payment
			地上部分 Above- ground	地下部分 Underground part	土壤 Soil	地上部分 Above- ground	地下部分 Underground part	土壤 Soil			
柿竹园	小飞蓬	0.20%	447	396	615	52.6	92.3	58.0	0.91	0.57	
		0.40%	775	588	574	67.8	52.5	67.0	1.01	1.29	
		0.60%	481	488	764	67.2	62.8	99.5	0.67	1.07	
		对照	456	595	811	47.8	65.1	93.5	0.51	0.73	
	花叶水葱	0.20%	687	764	1018	53.4	52.8	87.5	0.61	1.01	
		0.40%	475	479	661	101	91.0	120	0.84	1.11	
		0.60%	846	676	856	157.5	102.9	140	1.12	1.53	
		对照	469	699	761	54.2	93.8	99.6	0.54	0.58	
	苦菜	0.20%	881	1226	939	98.0	105.7	104	0.94	0.93	
		0.40%	728	678	633	107	95.5	97.2	1.10	1.12	
		0.60%	677	676	834	64.8	60.8	75.5	0.86	1.07	
		对照	568	923	827	78.7	112.6	136	0.58	0.70	
高斯贝尔	小飞蓬	0.20%	3636	2607	3196	75.1	52.8	56.7	1.33	1.42	
		0.40%	2374	2124	2711	68.1	55.4	59.8	1.14	1.23	
		0.60%	3049	2636	2711	62.8	67.8	66.1	0.95	0.93	
		对照	2961	3351	3467	41.1	68.9	46.6	0.88	0.60	
	花叶水葱	0.20%	2612	2688	3188	40.2	45.5	40.7	0.99	0.88	
		0.40%	2554	1851	2938	52.3	47.5	46.5	1.12	1.10	
		0.60%	3142	1726	2932	78.3	58.1	61.9	1.27	1.35	
		对照	2136	2485	3043	53.5	63.7	69.3	0.77	0.84	
	苦菜	0.20%	2561	2136	3167	51.3	47.9	54.3	0.95	1.07	
		0.40%	3339	2653	3078	58.1	50.2	48.4	1.20	1.16	
		0.60%	2678	2554	2619	47.9	52.6	52.9	0.91	0.91	
		对照	2423	2606	3211	36.3	59.4	49.8	0.73	0.61	

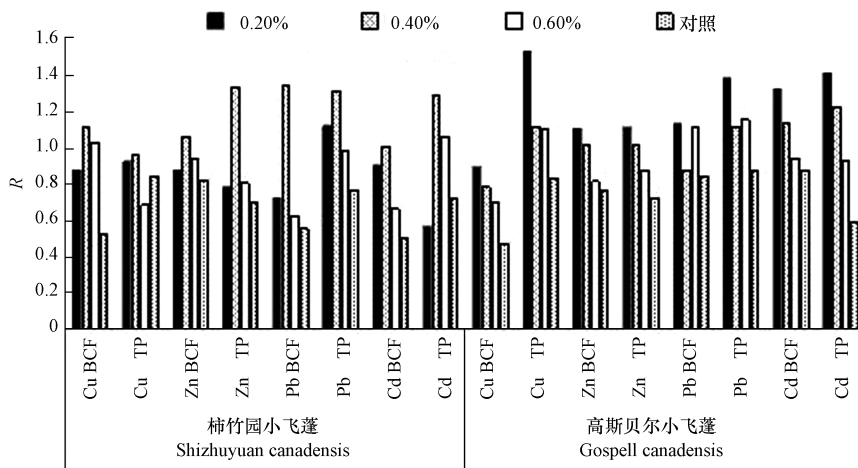


图1 植物小飞蓬对 Cu、Zn、Pb、Cd 的转移系数、富集系数与聚丙烯酸钾浓度关系图

Fig.1 The transfer coefficient and enrichment coefficient of Cu, Zn, Pb and Cd of plant canadenis onions with different concentration of potassium polyacrylate

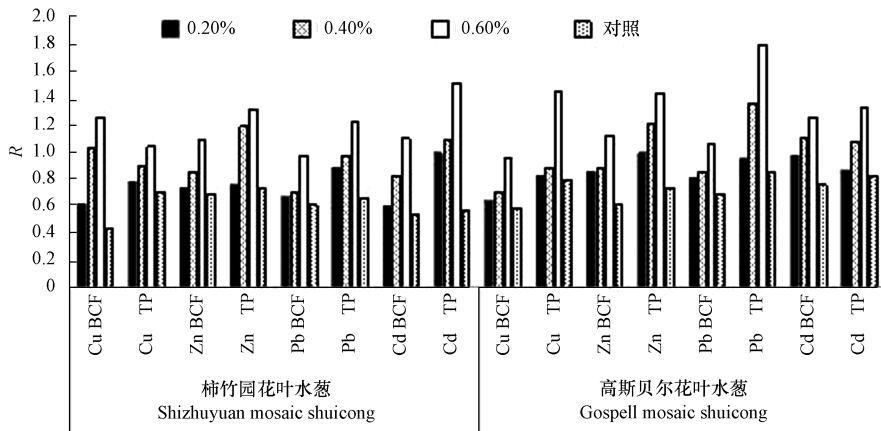


图2 植物花叶水葱对 Cu、Zn、Pb、Cd 的转移系数、富集系数与聚丙烯酸钾浓度关系图

Fig.2 The transfer coefficient and enrichment coefficient of Cu, Zn, Pb and Cd of plant mosaic Shuicong with different concentration of potassium polyacrylate

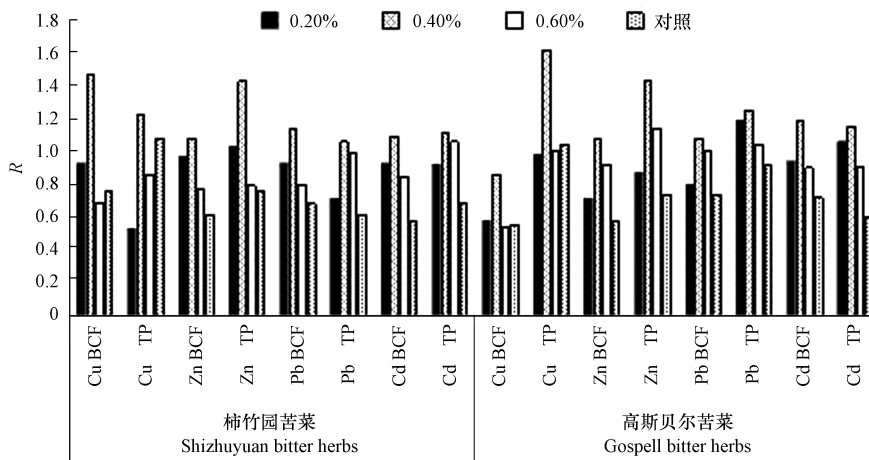


图3 植物苦菜对 Cu、Zn、Pb、Cd 的转移系数、富集系数与聚丙烯酸钾浓度关系图

(BCF:富集系数 Bioconcentration Factors, TP:转移系数 Transfer Payment)

Fig.3 The transfer coefficient and enrichment coefficient of Cu, Zn, Pb and Cd of plant bitter herbs with different concentration of potassium polyacrylate

3 结论 (Conclusion)

通过实验数据分析两处砂坝的花叶水葱对 Cu、Zn、Pb、Cd 的转移系数及富集系数均以 0.6% 浓度的聚丙烯酸钾种植提高最多, 原因为高斯贝尔尾砂坝的土壤含水量较大. 其中高斯贝尔砂坝的小飞蓬对 Cu、Zn、Pb、Cd 的转移系数及富集系数以 0.2% 浓度的聚丙烯酸钾种植提高最多. 结果表明, 通过添加聚丙烯酸钾植物对 Cu、Zn、Pb 和 Cd 的转移系数及其富集系数均有提高, 富集能力增强. 因为尾砂矿土质疏松、不易保水. 通过添加聚丙烯酸钾能提高土壤保水性, 有利于植物生长. 但不同植物的最佳生长条件不同且矿区之间的环境也有所差别, 这些都导致栽培植物最适合的聚丙烯酸钾浓度不同. 植物苦菜对 Cu 的富集能力低于对 Zn、Pb、Cd 的富集能力, 这种现象表明同种植物对不同金属的富集能力的表现也有所不同. 因此根据矿区的环境及土壤中金属含量添加适合浓度的聚丙烯酸钾同时采取多种植物的混合搭配种植, 可用于 Cu、Zn、Pb 和 Cd 尾矿废弃地的复垦, 以达到植物修复土壤的目的.

参考文献 (References)

- [1] 郭伟, 赵仁鑫, 张君, 等. 内蒙古包头铁矿区土壤重金属污染特征及其评价[J]. 环境科学, 2011, 32(10): 3099-3105.
GUO W, ZHAO R X, ZHANG J, et al. Distribution characteristic and assessment of soil heavy metal pollution in the iron mining of baotou in inner mongolia[J]. Environmental Science, 2011, 32(10): 3099-3105 (in Chinese).
- [2] 彭渤, 唐晓燕, 余昌训, 等. 湘江入湖河段沉积物重金属污染及其 Pb 同位素地球化学示踪[J]. 地质学报, 2011, 82(2): 282-299.
PENG B, TANG X Y, YU C X, et al. Heavy metal contamination of inlet sediments of the Xiangjiang River and Pb isotopic geochemical implication[J]. Geological Journal, 2011, 82(2): 282-299 (in Chinese).
- [3] 刘慧军, 刘景辉, 于健, 等. 土壤改良剂对土壤紧实度及燕麦生长状况的影响[J]. 水土保持通报, 2013, 33(3): 130-134.
LIU H J, LIU J H, YU J et al. Effects of soil amendments on soil comp action and growth status of oat[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 33(3): 130-134 (in Chinese).
- [4] 王大勇, 苏林, 陈敏, 等. 聚丙烯酸钠缓释作用及其在砂土中吸液性能的探讨[J]. 安徽化工, 2006, 142(4): 32-35.
WANG D Y, SU L, CHEN M, et al. Discussing about the slow release of the polyacrylate sodium to fer tilizer and the liquid absorbency in sandy soil[J]. Anhui Chemical Industry, 2006, 142(4): 32-35 (in Chinese).
- [5] 杨帆, 高俊发. 聚丙烯酸钠吸附含铜废水的研究[J]. 应用化工, 2012, 41(4): 602-605.
YANG F, GAO J F, Study on copper(II) adsorption by sodium polyacrylate in wastewater[J]. Applied Chemical Industry, 2012, 41(4): 602-605 (in Chinese).
- [6] 靳思佳. 几种介质对土壤的改良作用及彩叶树种的生长生理响应[D]. 上海: 华东师范大学, 2008.
JIN S J. Effects of several media on soil improvement and growth and physiological response of color-leaf tree species[D]. Shanghai: East China Normal University, 2008 (in Chinese).
- [7] 黄益宗, 郝晓伟, 雷鸣, 等. 重金属污染土壤修复技术及其修复实践[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(3): 409-417.
HUANG Y Z, HAO X W, LEI M, et al. Heavy metal contaminated soil remediation technology and its remediation practice[J]. Journal of Agricultural Environmental Science, 2013, 32(3): 409-417 (in Chinese).
- [8] 吴浩, 卢志军, 黄汉东, 等. 三种植物对土壤磷吸收和富集能力的比较[J]. 植物生态学报, 2015, 39(1): 63-71.
WU H, LU Z J, HUANG H D, et al. Comparison of phosphorus uptake and accumulation of three plants in soil[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2015, 39(1): 63-71 (in Chinese).
- [9] 任立民, 刘鹏, 蔡妙珍, 等. 水蓼、小飞蓬、杠板归和美洲商陆对锰毒的生理响应[J]. 水土保持学报, 2007, 21(3): 81-85.
REN L M, LIU P, CAI M Z, et al. Physiological response of polygonum hydropiper, *Comnyza canadensis*, *Polygonum perfoliatum* and *Phytolacca americana* to manganese toxicity[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2007, 21(3): 81-85 (in Chinese).
- [10] 施雪良, 张金锋, 朱兴娜. 优良的水生植物新品种——花叶水葱[J]. 现代园林, 2006(5): 64-65.
SHI X L, ZHANG J F, ZHU X N, Excellent new aquatic plant-water flower onion[J]. Modern Garden, 2006(5): 64-65 (in Chinese).