

明湖国家湿地公园 10 种水生植物的重金属富集特征

李金辉¹, 丁 薇¹, 翁贵英², 邓红江¹, 张绪勇¹, 张 旭¹

(1. 六盘水师范学院化学与材料工程学院, 贵州 六盘水 553004;

2. 六盘水师范学院生物科学与技术学院, 贵州 六盘水 553004)

摘要: 采用原子吸收分光光度法, 测定六盘水明湖国家湿地公园 10 种水生植物体内及根部底泥中 Zn、Cr、Ni、Pb、Cd、Mn、Cu 的含量, 对其根部底泥污染状况及重金属吸收与富集特征进行研究。结果显示, 10 种水生植物根部底泥受到重金属不同程度的污染, Cd 的污染最为严重, 污染强度 $Cd > Pb > Zn > Cu > Cr > Mn > Ni$ 。通过 10 种水生植物体内重金属含量分析, 狐尾藻 (*Myriophyllum verticillatum*) 地下部对 Cr、Ni 富集量最高, 为 67.20、57.84 mg/kg; 喜旱莲子草 (*Alternanthera philoxeroides*) 地下部对 Zn、Pb、Cd、Mn、Cu 富集量最高, 分别为 1 804.20、38.83、27.73、11 913.75、13.58 mg/kg。狐尾藻、喜旱莲子草、再力花 (*Thalia dealbata*) 的根部对多种重金属有较强富集作用, 狐尾藻地下部对 Zn、Cd、Mn 的富集系数为 4.28、6.74、10.32; 喜旱莲子草地下部对 Zn、Cd、Mn 的富集系数为 6.13、10.70、8.81; 再力花地下部对 Cd、Mn 富集系数为 4.68、2.69。水葱 (*Schoenoplectus tabernaemontani*)、黄菖蒲 (*Iris pseudacorus*)、芦苇 (*Phragmites australis*)、梭鱼草 (*Pontederia cordata*)、萍蓬草 (*Nuphar pumilum*)、香蒲 (*Typha orientalis*)、花叶芦竹 (*Arundo donax var. versicolor*) 对多种重金属的转移系数超过 1, 具有较强的转运能力, 萍蓬草对 Mn 的转移系数最高, 为 9.82。研究表明, 10 种水生植物对明湖国家湿地公园环境均有一定的净化作用。

关键词: 明湖国家湿地公园; 水生植物; 重金属; 富集特征

中图分类号: X171.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-3075(2020)01-0086-06

随着城市化和工农业的快速发展, 水体中重金属含量日益增高, 进入水体的重金属不像有机物那样可以自然降解或微生物分解, 往往会在水体或水域底泥中积累, 或被水生植物吸收, 通过食物链损害人类健康(潘义宏等, 2010)。水生植物主要通过吸收、挥发、根滤、富集等作用净化去除水体及底泥中重金属, 达到修复作用(王庆海等, 2013; 乔旭等, 2015; Leung et al, 2016; Favas et al, 2018)。合理地进行水生植物种类选择和配置可以提升湿地公园的观赏性和功能性(喻来等, 2016)。目前, 对明湖国家湿地公园的研究主要在生态系统、生态功能、植物种类、动物种类等方面(陈红等, 2013; 秦趣等, 2013; 宁宝权等, 2015; 左经会等, 2017), 尚未见有关明湖国家湿地公园水生植物重金属富集方面的报道。

本研究选取明湖国家湿地公园中 10 种水生植物, 测定其植物体内及根部底泥中 Zn、Cr、Ni、Pb、Cd、Mn、Cu 的含量, 探究其根部底泥污染状况及重金属吸收与富集特征, 筛选出富集能力较强的水生植物, 旨在为明湖国家湿地公园的水生植物种类选择和配置提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

明湖国家湿地公园位于贵州省六盘水市中心城区西郊 ($26^{\circ}34'40'' \sim 26^{\circ}35'38''N$, $104^{\circ}45'29'' \sim 104^{\circ}48'45''E$), 海拔 1 805 m, 东部靠近六盘水师范学院, 西、北部至凉水井一带以明湖路为界, 南部到明湖村一线天峡谷南部山脊。气候为亚热带季风区, 年均气温 $13 \sim 14^{\circ}C$, 冬无严寒, 夏无酷暑, 表现为典型的贵州西部高原气候特征, 年均降水量 1 420.8 mm。明湖国家湿地公园为水城河的源头, 总面积 197.70 hm^2 , 湿地面积 84.65 hm^2 , 湿地率为 42.8%。湿地类型以人工库塘和河流为主体, 是集供水、旅游、灌溉、养殖为一体的多功能水体(陈红等, 2013; 秦趣等, 2013; 宁宝权等, 2015; 左经会等, 2017)。

收稿日期: 2018-03-19

基金项目: 贵州省科学技术厅项目(黔科合 LH 字[2015]7631); 六盘水师范学院科技创新团队(LPSSYKJTD201602); 六盘水师范学院实验教学示范中心(LPSSYsjyxfzx201701)。

作者简介: 李金辉, 1972 年生, 女, 正高级实验师, 主要从事仪器分析化学与环境污染教研工作。E-mail: lpssyljinhui@163.com

通信作者: 翁贵英, 1971 年生, 女, 正高级实验师, 主要从事遗传实验教研工作。E-mail: lpssygy@163.com

1.2 样品采集

2016 年 9 月, 对明湖国家湿地公园生长的水生植物进行系统调查, 选取数量相对较多、单独生长成一定区域且长势良好、具有代表性的 10 种水生植物(表 1)。采集选定区域 1 m² 内水生植物, 将植物整

株挖出, 保证植株完整, 每种植物最少采集 3 株, 植株小的采集多株, 每种植物样品约 1 kg; 同时采集对应植物根区 0~20 cm 厚的底泥样品约 1 kg; 将植物及其根区底泥样品分别装入聚乙烯样袋中, 编号后带回实验室。

表 1 10 种水生植物种类

Tab.1 The ten aquatic plant species analyzed for heavy metal content

植物名称	科	生活型
萍蓬草(<i>Nuphar pumilum</i>)	睡莲科(Nymphaeaceae)	多年生浮叶植物
狐尾藻(<i>Myriophyllum verticillatum</i>)	小二仙草科(Haloragidaceae)	多年生沉水植物
黄菖蒲(<i>Iris pseudacorus</i>)	鸢尾科(Iridaceae)	多年生挺水植物
芦苇(<i>Phragmites australis</i>)	禾本科(Gramineae)	多年生挺水植物
梭鱼草(<i>Pontederia cordata</i>)	雨久花科(Pontederiaceae)	多年生挺水植物
喜旱莲子草(<i>Alternanthera philoxeroides</i>)	苋科(Amaranthaceae)	多年生挺水植物
再力花(<i>Thalia dealbata</i>)	竹芋科(Marantaceae)	多年生挺水植物
水葱(<i>Schoenoplectus tabernaemontani</i>)	莎草科(Cyperaceae)	多年生挺水植物
香蒲(<i>Typha orientalis</i>)	香蒲科(Typhaceae)	多年生挺水植物
花叶芦竹(<i>Arundo donax</i> var. <i>versicolor</i>)	禾本科(Gramineae)	多年生挺水植物

1.3 样品处理与分析

采集的植物样品先用自来水清洗干净, 再用超纯水冲洗, 沥干水分, 然后分为地上部和地下部, 放入烘箱 105℃ 下杀青 30 min, 杀青后 70℃ 烘至恒重, 粉碎, 过 60 目筛, 装入聚乙烯样袋中备用; 底泥样品除去植物根系、石块等杂物, 置于通风和干燥处, 于室温下自然风干, 用玛瑙研钵研细, 过 100 目筛, 装入聚乙烯样袋中备用。植物样品称取 1.0000 g, 采用 HNO₃-HClO₄ (体积比 3 : 1) 混合消解; 底泥样品称取 0.5000 g, 采用 HNO₃-HF-HClO₄ (体积比 3 : 3 : 1) 混合消解; 采用原子吸收分光光度计(iCE 3000 SERIES Thermo Fisher)测定 Zn、Cr、Ni、Pb、Cd、Mn、Cu 的含量, 每个样品 3 次重复。

1.4 富集特征

采用富集系数(BCF)与转移系数(BTF)评价水生植物对重金属的富集特征(杨胜香等, 2012; 高静滢等, 2016)。

富集系数(BCF) = 植物中各部分重金属富集量/底泥中重金属富集量。植物的富集系数越大, 表明其对重金属的富集能力越强, 越有利于植物修复污染土壤。

转移系数(BTF) = 地上部分(茎和叶)重金属富集量/地下部分(根)重金属富集量。植物转移系数越大, 表明植物从根部向地上部分运输重金属能力越强, 越有利于植物从土壤中移除重金属。

1.5 数据分析

实验数据采用 SPSS 19.0 和 Excel 2007 进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 水生植物根部底泥重金属含量

参照贵州土壤背景值(中国环境监测总站, 1990), 10 种水生植物根部底泥 Zn、Cr、Ni、Pb、Cd、Mn、Cu 的含量见表 2($n=3$)。Zn 含量为 80.50~310.80 mg/kg, 除水葱、花叶芦竹, Zn 在其余 8 种水生植物根部底泥含量大于贵州土壤背景值, 其中再力花根部底泥含量最高, 为 3.1 倍; Cr 含量为 67.01~151.38 mg/kg, 黄菖蒲、芦苇、梭鱼草根部底泥 Cr 含量超过贵州土壤背景值, 最大值为 1.6 倍; Ni 含量为 13.90~42.55 mg/kg, 只有黄菖蒲根部底泥 Ni 含量大于贵州土壤背景值, 为 1.1 倍; Pb 含量为 32.16~108.66 mg/kg, 除萍蓬草外, 9 种水生植物根部底泥 Pb 含量均大于贵州土壤背景值, 狐尾藻根部底泥含量最高, 为 3.1 倍; Cd 含量为 1.19~3.38 mg/kg, 10 种水生植物根部底泥 Cd 含量均超出贵州土壤背景值, 其中再力花根部底泥含量最高, 为 5.1 倍; Mn 含量为 67.70~1 352.70 mg/kg, 喜旱莲子草、再力花根部底泥 Mn 含量大于贵州土壤背景值, 最大值为 1.7 倍; Cu 含量为 23.68~80.77 mg/kg, 除萍蓬草、花叶芦竹外, 8 种水生植物根部底泥重金属含量大于贵州土壤背景值, 梭鱼草根部底泥含量最高, 为 2.5 倍。水生植物根部底泥重金属含量大于贵州土壤背景值 Cd 倍数最大, 说明 Cd 的污染最为严重, Pb 次之, Ni 最弱, 明湖国家湿地公园局部区域底泥污染强度 Cd>Pb>Zn>Cu>Cr>Mn>Ni。

2.2 水生植物体内重金属含量

明湖国家湿地公园 10 种水生植物体内重金属含量见表 3。不同水生植物、同种水生植物的不同部位、同种水生植物不同重金属含量存在较大差异。萍蓬草地上部 Pb、Mn 含量最高,分别为 12.90、890.13 mg/kg;狐尾藻地上部 Ni、Cd 含量最高,分别为 4.13、2.05 mg/kg,地下部 Cr、Ni 含量最高,分

别为 67.20、57.84 mg/kg;喜旱莲子草地上部 Zn 含量最高,为 104.05 mg/kg,地下部 Zn、Pb、Cd、Mn、Cu 含量最高,分别为 1 804.20、38.83、27.73、11 913.75、13.58 mg/kg;香蒲地上部 Cu 含量最高,为 8.25 mg/kg;花叶芦竹地上部 Cr 含量最高,为 18.32 mg/kg。重金属含量最大值为喜旱莲子草地下部,Mn 含量达到 11 913.75 mg/kg。

表 2 水生植物根部底泥重金属含量

mg/kg

Tab.2 Heavy metal content of root zone sediments

植物名称	Zn	Cr	Ni	Pb	Cd	Mn	Cu
萍蓬草	180.90±3.12	70.54±1.80	16.77±0.25	32.16±1.12	1.46±0.13	133.00±9.81	23.68±1.05
狐尾藻	266.90±20.35	76.41±2.02	25.07±0.92	108.66±2.98	3.13±0.21	255.90±1.78	38.77±1.14
黄菖蒲	257.00±4.23	151.38±10.61	42.55±2.00	41.71±1.14	1.94±0.12	743.30±26.90	78.38±1.04
芦苇	114.30±10.65	113.31±5.80	24.66±0.88	41.95±1.65	1.44±0.10	191.70±8.21	56.59±1.30
梭鱼草	194.60±8.90	142.39±9.53	38.27±0.48	55.48±2.53	2.31±0.09	341.80±11.83	80.77±2.10
喜旱莲子草	294.50±9.56	86.12±1.96	33.60±1.00	94.41±4.00	2.59±0.16	1352.70±76.23	35.88±0.92
再力花	310.80±9.95	75.51±1.41	26.59±0.53	102.53±7.22	3.38±0.18	886.00±15.12	38.43±0.97
水葱	80.50±0.66	76.16±1.96	19.25±0.78	36.73±1.42	1.19±0.08	67.70±1.04	42.36±1.21
香蒲	182.40±9.04	79.05±1.90	35.70±1.29	42.22±1.93	2.18±0.17	604.40±13.92	40.88±1.17
花叶芦竹	98.70±1.23	67.01±1.31	13.90±0.43	48.32±1.37	1.80±0.13	206.70±7.88	26.44±2.04
土壤背景值	99.50	95.90	39.10	35.20	0.659	794.00	32.00

表 3 水生植物体内重金属的含量

mg/kg

Tab.3 Heavy metal content of each aquatic plant species

植物名称	部位	Zn	Cr	Ni	Pb	Cd	Mn	Cu
萍蓬草	地上	28.71±0.54	4.69±0.11	2.63±0.05	12.90±0.72	0.95±0.03	890.13±39.47	3.27±0.05
	地下	27.52±0.20	5.76±0.31	1.01±0.04	4.51±0.18	0.30±0.05	90.65±2.10	1.89±0.03
狐尾藻	地上	18.98±0.16	2.27±0.10	4.13±0.09	9.84±0.31	2.05±0.07	664.00±23.79	2.57±0.04
	地下	1143.50±47.64	67.20±4.03	57.84±3.08	19.62±0.51	21.11±0.95	2641.00±86.30	7.47±0.04
黄菖蒲	地上	19.78±0.25	1.90±0.06	2.55±0.10	8.37±0.35	0.31±0.03	169.00±5.85	1.18±0.02
	地下	13.49±0.12	1.51±0.13	0.62±0.05	3.86±0.14	0.10±0.01	48.30±2.18	1.19±0.04
芦苇	地上	17.65±0.21	6.21±0.19	2.59±0.08	6.31±0.44	0.03±0.01	62.50±1.35	2.59±0.02
	地下	8.60±0.17	16.33±0.25	0.97±0.05	5.40±0.37	0.01±0.00	36.80±1.29	2.97±0.03
梭鱼草	地上	39.61±0.45	3.61±0.11	2.46±0.12	11.77±0.35	0.52±0.04	170.38±6.75	7.77±0.05
	地下	45.00±0.94	5.98±0.20	3.69±0.12	8.46±0.09	0.77±0.05	42.05±0.92	7.85±0.04
喜旱莲子草	地上	104.05±4.95	2.14±0.08	2.94±0.10	10.18±0.53	1.01±0.04	592.25±17.03	1.55±0.09
	地下	1804.20±54.15	31.36±0.63	31.35±1.30	38.83±0.58	27.73±0.37	11913.75±154.80	13.58±0.47
再力花	地上	27.08±0.29	4.68±0.06	2.96±0.09	8.48±0.49	0.20±0.03	737.38±18.49	3.14±0.06
	地下	83.55±2.01	34.05±0.61	9.04±0.18	23.49±1.18	15.83±0.52	2381.50±118.70	7.06±0.50
水葱	地上	12.34±0.27	2.27±0.09	0.77±0.08	5.06±0.40	0.06±0.01	78.75±2.55	1.33±0.01
	地下	8.54±0.11	4.15±0.13	0.65±0.06	3.30±0.22	0.05±0.01	62.15±3.62	1.38±0.04
香蒲	地上	16.60±0.25	2.32±0.05	1.60±0.05	4.84±0.22	0.43±0.03	246.13±8.72	8.25±0.49
	地下	39.81±0.76	3.86±0.06	1.41±0.04	6.59±0.42	0.42±0.03	189.15±5.59	11.51±0.59
花叶芦竹	地上	17.01±0.19	18.32±0.61	1.79±0.03	8.44±0.34	0.26±0.04	103.88±4.31	3.52±0.06
	地下	16.02±0.27	31.69±0.71	1.68±0.06	9.14±0.48	0.33±0.03	184.70±4.70	4.65±0.05

2.3 水生植物重金属富集系数

从表 4 可知,萍蓬草地上部对 Mn 富集系数为 6.69;狐尾藻地上部对 Mn 的富集系数为 2.59,地下部对 Zn、Ni、Cd、Mn 的富集系数分别为 4.28、2.31、6.74、10.32;喜旱莲子草地下部对 Zn、Cd、Mn 的富集系数分别为 6.13、10.70、8.81;再力花地下部对 Cd、Mn 的富集系数分别为 4.68、2.69;水葱地上部

对 Mn 的富集系数为 1.16;均大于 1。最大值为喜旱莲子草地下部对 Mn 的富集系数达 10.70。

2.4 水生植物重金属转移系数

从表 5 可知,萍蓬草对 Zn、Ni、Pb、Cd、Mn、Cu 的转移系数分别为 1.04、2.60、2.86、3.22、9.82、1.73;黄菖蒲对 Zn、Cr、Ni、Pb、Cd、Mn 的转移系数分别为 1.47、1.25、4.10、2.17、3.26、3.50;芦苇对 Zn、

Ni、Pb、Cd、Mn 转移系数分别为 2.05、2.67、1.17、6.00、1.70;梭鱼草对 Pb、Mn 转移系数分别为 1.39、4.05;水葱对 Zn、Ni、Pb、Cd、Mn 的转移系数分别为 1.45、1.18、1.53、1.33、1.27;香蒲对 Ni、Cd、Mn 的转移系数分别为 1.13、1.02、1.30;花叶芦竹对 Zn、Ni 转移系数分别为 1.06、1.07;均大于 1。萍蓬草对 Mn 的转移系数最大,达到 9.82。

表 4 水生植物对重金属富集系数

Tab.4 Bioconcentration factors (BCF) for each plant, above and below sediment

植物名称	位 置	富集系数(BCF)						
		Zn	Cr	Ni	Pb	Cd	Mn	Cu
萍蓬草	地上	0.16	0.07	0.16	0.40	0.65	6.69	0.14
	地下	0.15	0.08	0.06	0.14	0.20	0.68	0.08
狐尾藻	地上	0.07	0.03	0.16	0.09	0.65	2.59	0.07
	地下	4.28	0.88	2.31	0.18	6.74	10.32	0.19
黄菖蒲	地上	0.08	0.01	0.06	0.20	0.16	0.23	0.01
	地下	0.05	0.01	0.01	0.09	0.05	0.06	0.02
芦苇	地上	0.15	0.05	0.11	0.15	0.02	0.33	0.05
	地下	0.08	0.14	0.04	0.13	0.004	0.19	0.05
梭鱼草	地上	0.20	0.03	0.06	0.21	0.22	0.50	0.10
	地下	0.23	0.04	0.10	0.15	0.33	0.12	0.10
喜旱	地上	0.35	0.02	0.09	0.11	0.39	0.44	0.04
莲子草	地下	6.13	0.36	0.93	0.41	10.70	8.81	0.38
再力花	地上	0.09	0.06	0.11	0.08	0.06	0.83	0.08
	地下	0.27	0.45	0.34	0.23	4.68	2.69	0.18
水葱	地上	0.15	0.03	0.04	0.14	0.05	1.16	0.03
	地下	0.11	0.05	0.03	0.09	0.04	0.92	0.03
香蒲	地上	0.09	0.03	0.04	0.11	0.20	0.41	0.20
	地下	0.22	0.05	0.04	0.16	0.19	0.31	0.28
花叶	地上	0.17	0.27	0.13	0.17	0.14	0.50	0.13
芦竹	地下	0.16	0.47	0.12	0.19	0.18	0.89	0.18

表 5 水生植物对重金属转移系数

Tab.5 Biological transfer factors (BTF) for each aquatic plant

植物名称	转移系数(BTF)						
	Zn	Cr	Ni	Pb	Cd	Mn	Cu
萍蓬草	1.04	0.81	2.60	2.86	3.22	9.82	1.73
狐尾藻	0.02	0.03	0.07	0.50	0.10	0.25	0.34
黄菖蒲	1.47	1.25	4.10	2.17	3.26	3.50	0.99
芦苇	2.05	0.38	2.67	1.17	6.00	1.70	0.87
梭鱼草	0.88	0.60	0.67	1.39	0.67	4.05	0.99
喜旱莲子草	0.06	0.07	0.09	0.26	0.04	0.05	0.11
再力花	0.32	0.14	0.33	0.36	0.01	0.31	0.45
水葱	1.45	0.55	1.18	1.53	1.33	1.27	0.96
香蒲	0.42	0.60	1.13	0.74	1.02	1.30	0.72
花叶芦竹	1.06	0.58	1.07	0.92	0.77	0.56	0.76

3 讨论

3.1 生长位置和根系吸附力影响植物重金属含量

研究发现,明湖国家湿地公园 10 种水生植物根部底泥受到重金属不同程度的污染,污染强度 Cd>

Pb>Zn>Cu>Cr>Mn>Ni,Cd 的污染最严重,污染程度可能与明湖国家湿地公园所处地理位置有关。湿地公园东临六盘水师范学院,西、北部靠明湖路,人为活动频繁,路边受汽车排放尾气、烟尘等影响,Cd 污染还可能与当地高背景值有关,水城 Cd 的平均含量分别是全省背景值的 5.0~5.6 倍,是国家三级土壤临界值的 1.5~1.8 倍(何邵麟等,2004)。10 种水生植物在污染环境中可以正常生长,未出现明显的毒害症状。不同水生植物生长的底泥重金属含量有较大的差异,与所处不同位置有关,也与不同水生植物根系表面对不同重金属吸附能力有关。再力花根部底泥 Zn、Cd 含量最高,分别为 310.80、3.38 mg/kg;黄菖蒲根部底泥 Cr、Ni 含量最高,分别为 1 51.40、42.55 mg/kg;狐尾藻根部底泥 Pb 含量最高,为 108.66 mg/kg;喜旱莲子草根底部底泥 Mn 含量最高,为 1 352.70 mg/kg;梭鱼草根底部底泥 Cu 重金属含量最高,为 80.77 mg/kg。由于本次研究只采集了 10 种水生植物的生长底泥,因此底泥样品数据可能无法全面反映明湖国家湿地公园土壤的重金属污染状况,但能在一定程度上反映其重金属污染水平。

3.2 水生植物的富集特征有利于湿地生态修复

喜旱莲子草地下部 Zn、Cd、Mn 含量分别为 1804.20、27.73、11 913.75 mg/kg;狐尾藻地下部 Ni 含量为 57.84 mg/kg;植物体内 Zn、Cd、Mn、Ni 含量大于底泥中含量 294.5、2.59、1 352.70、25.07 mg/kg,未发现植物体内 Cr、Pb、Cu 含量大于底泥中含量的水生植物,可能与底泥中重金属元素形态有关,只有部分溶解性的重金属才能被植物吸收,而未溶解的重金属不具有生物有效性,不会被植物所吸收(乔旭等,2015);大多数水生植物地下部重金属含量大于地上部,可能是植物对重金属的一种适应,把有害的重金属阻滞在根部,重金属主要积累于根部(黄永杰等,2006)。

富集系数(BCF)在一定程度上可反映植物-土壤系统中重金属元素迁移的难易程度,表明植物体内重金属的富集状况。当富集系数大于 1 时,说明植物对重金属有较强富集能力(黄永杰等,2006)。狐尾藻地下部对 Zn、Ni、Cd、Mn 的富集系数分别为 4.28、2.31、6.74、10.32,喜旱莲子草地下部对 Zn、Cd、Mn 的富集系数分别为 6.13、10.70、8.81,再力花地下部对 Cd、Mn 的富集系数分别为 4.68、2.69,3 种水生植物地下部重金属富集量大于地上部,地下部对多种重金属元素的富集系数均大于 1,属于

根部囤积型植物,最大值为喜旱莲子草地下部对Mn富集系数达10.70,富集量达到超富集植物重金属的临界值(Baker et al, 1989),为11 913.75 mg/kg。

植物转移系数(BTF)越大,表明植物从地下部向地上部运输重金属能力越强,越有利于植物从土壤中移除重金属。植物的转移系数大于1,可以进行植物修复(Shi et al, 2011)。萍蓬草地上部对Mn的富集系数为6.69,转移系数为9.82;水葱地上部对Mn的富集系数为1.16,转移系数为1.27;萍蓬草和水葱对Mn富集系数与转移系数均大于1,满足超富集植物中的两个条件(Baker et al, 1989)。萍蓬草和黄菖蒲对6种重金属转移系数大于1;芦苇和水葱对5种重金属转移系数大于1;香蒲对3种重金属转移系数大于1;梭鱼草和花叶芦竹对2种重金属转移系数大于1。7种水生植物均对多种重金属转移系数超过1,萍蓬草、黄菖蒲、芦苇、水葱具有较强的重金属转移能力,香蒲、梭鱼草、花叶芦竹相对转移能力较弱,但也具有一定的修复作用,7种水生植物可作为明湖国家湿地公园的修复植物。

4 结论

(1)六盘水明湖国家湿地公园的底泥Cd、Pb、Zn污染严重,10种水生植物对多种重金属元素具有富集、囤积和转移作用,对于根部囤积型植物狐尾藻、喜旱莲子草、再力花,可整株收获,然后妥善处理;对于修复植物萍蓬草、黄菖蒲、芦苇、梭鱼草、水葱、香蒲、花叶芦竹,可收获地上部分,然后妥善处理。

(2)喜旱莲子草、芦苇、水葱、花叶芦竹的生物量大,萍蓬草、狐尾藻、黄菖蒲、梭鱼草、再力花、香蒲具有很好的观赏价值。

(3)10种水生植物均可对六盘水明湖国家湿地公园的底泥进行一定的修复,对该公园环境净化有一定的作用,可根据不同区域重金属含量和观赏性合理配置。

参考文献

陈红,李松,熊荣川,等,2013. 贵州省六盘水明湖国家湿地公园脊椎动物资源调查研究[J]. 六盘水师范学院学报,25(6): 1-20.

高静滢,杜方圆,李卫平,等,2016. 黄河湿地小白河片区优势植物重金属的富集特征[J]. 农业环境科学学报,35(11): 2180-2186.

何邵麟,龙超林,刘应忠,等,2004. 贵州地表土壤及沉积物中

镉的地球化学与环境问题[J]. 贵州地质,21(4): 245-250.

黄永杰,刘登义,王友保,等,2006. 八种水生植物对重金属富集能力的比较研究[J]. 生态学杂志,25(5): 541-542.

宁宝权,陈华平,2015. 湿地保护区生态功能综合评价——以六盘水明湖国家湿地公园为例[J]. 节水灌溉,(6): 70-73.

潘义宏,王宏镛,谷兆萍,等,2010. 大型水生植物对重金属的富集与转移[J]. 生态学报,30(23): 6430-6441.

乔旭,王沛芳,郑莎莎,等,2015. 水生植物去除重金属机制及生理响应研究综述[J]. 长江科学院院报,32(5): 15-20.

秦趣,代稳,刘兴荣,2013. 乌蒙山区城市人工湿地生态系统健康评价——以六盘水明湖国家湿地公园为例[J]. 水生态学杂志,34(5): 43-46.

王庆海,却晓娥,2013. 治理环境污染的绿色植物修复技术[J]. 中国生态农业学报,21(2): 261-266.

杨胜香,田启建,梁士楚,等,2012. 湘西花垣矿区主要植物种类及优势植物重金属蓄积特征[J]. 环境科学,33(6): 2038-2045.

喻来,陈舒静,林葳,等,2016. 成都白鹭湾生态湿地公园水生植物应用研究[J]. 四川大学学报(自然科学版),53(1): 221-227.

中国环境监测总站,1990. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社: 330-483.

左经会,陈朝丹,匡其羽,2017. 六盘水明湖国家湿地公园观赏植物配置探讨[J]. 六盘水师范学院学报,29(3): 19-23.

Baker A J M, Brooks R R, 1989. Terrestrial higher plants which hyperaccumulated metallic elements: a review of their distribution, ecology and phytochemistry [J]. Biorecovery,26(1): 81-126.

Favas P J C, Pratas J, Rodrigues N, et al, 2018. Metal (loid) accumulation in aquatic plants of a mining area: Potential for water quality biomonitoring and biogeochemical prospectin[J]. Chemosphere, 194: 158-170.

Leung H M, Duzgoren-Aydin N S, Au C K, et al, 2016. Monitoring and assessment of heavy metal contamination in a constructed wetland in Shaoguan (Guangdong Province, China): bioaccumulation of Pb, Zn, Cu and Cd in aquatic and terrestrial components[J]. Environmental Science and Pollution Research, 24(10): 9079-9088.

Shi X, Zhang X, Chen G, et al, 2011. Seedling growth and metal accumulation of selected woody species in copper and lead/zinc mine tailings[J]. Journal of Environmental Sciences, 23(2): 266-274.

Heavy Metal Accumulation by Ten Aquatic Plant Species in Minghu National Wetland Park

LI Jin-hui¹, DING Wei¹, WENG Gui-ying², DENG Hong-jiang¹, ZHANG Xu-yong¹, ZHANG Xu¹

(1.School of Chemistry and Materials Engineering, Liupanshui Normal University,

Liupanshui 553004, P.R.China;

2.School of Biological Sciences and Technology, Liupanshui Normal University,

Liupaishui 553004, P.R.China)

Abstract: Minghu National Wetland Park is a multifunctional wetland, a tourist destination providing water for irrigation and aquaculture in Liupanshui City, and its ecological/social value is directly related to water quality. Because of their importance in providing ecosystem services, aquatic plants and sediments have attracted increasing attention. In this study, we determined the heavy metal content of ten aquatic plants and their root zone sediments in Minghu National Wetland Park using Atomic Absorption Spectrometry (AAS). The investigation was carried out in September of 2016 and the heavy metals included Cd, Pb, Zn, Cu, Mn, Cr and Ni. The results were used to calculate biological concentration factors (BCF) and biological transfer factors (BTF) of each plant species toward each of the heavy metals. The objectives of the study were to provide a reference for selecting aquatic plants in Minghu National Wetland Park. Results show that metal accumulation in root zone sediments varied by metal, following the order Cd>Pb>Zn>Cu>Cr>Mn>Ni, with Cd posing the highest ecological risk. The heavy metal content of aquatic plants varied by species and the highest concentrations of Cr (67.20 mg/kg) and Ni (57.84 mg/kg) occurred in *Myriophyllum verticillatum*. The concentrations of Zn, Pb, Cd, Mn and Cu were highest in *Alternanthera philoxeroides*, with respective concentrations of 1 804.20, 38.83, 27.73, 11 913.75 and 13.58 mg/kg. Furthermore, the roots of three aquatic plants (*M. verticillatum*, *A. philoxeroides* and *Thalia dealbata*) strongly accumulated heavy metals. For these species, the respective BCF values of Zn, Cd and Mn were 4.28, 6.74 and 10.32 in *M. verticillatum*; 6.13, 10.70 and 8.81 in *A. philoxeroides* and 4.68 and 2.69 (Cd and Mn) in *T. dealbata*. The BTF of most heavy metals in the other seven aquatic plants (*Schoenoplectus tabernaemontani*, *Iris pseudacorus*, *Phragmites australis*, *Pontederia cordata*, *Nuphar pumilum*, *Typha orientalis* and *Arundo donax* var. *versicolor*) exceeded 1, but the BTF (9.82) of *N. pumilum* to Mn was highest, indicating that strong transfer can be achieved by all seven aquatic plants. Our results indicate that all ten aquatic plants play a role in purifying the water of Minghu National Wetland Park.

Key words: Minghu National Wetland Park; aquatic plants; heavy metals; heavy metal accumulation