

## 菰对南洞庭湖湿地土壤中Cu、Sb、Cd、Pb的吸收与富集

彭晓赞<sup>1</sup>, 赵运林<sup>2</sup>, 雷存喜<sup>2</sup>, 戴枚斌<sup>3</sup>, 易合成<sup>3</sup>

(<sup>1</sup>湖南农业大学生物科学技术学院, 长沙 410128; <sup>2</sup>湖南城市学院, 湖南益阳 413000;

<sup>3</sup>益阳市林业局, 湖南益阳 413000)

**摘要:**采集南洞庭湖生长的优势种菰(*Zizania latifolia*)及其根际土壤样品。分析菰对土壤中Cu、Sb、Cd、Pb重金属的吸收与富集。结果表明:南洞庭湖土壤中4种重金属污染情况是Sb>Cd>Cu, Pb未超标。在这4种重金属污染条件下, 植株不同部位对Sb均无富集作用, 对其他3种重金属元素的吸收积累能力均是根>叶>茎; 不同采样区菰对重金属的富集能力存在明显差异, 四季红2区菰根中Cu的富集系数显著性高于其他6个采样区( $P<0.05$ ), 鹵马湖2区与四季红2区菰根中重金属Cd之间没有显著性差异( $P>0.05$ ), 但显著性高于其他5个采样区( $P<0.05$ )。因此, 菰对南洞庭湖重金属Cd、Cu污染具有较好的修复作用。

**关键词:**菰; 重金属; 吸收; 富集

中图分类号: Q142, Q948 文献标识码: A

### Absorption and Accumulation of Cu, Sb, Cd, Pb in wetland soils by *Zizania latifolia* From the South Dongting Lake

Peng Xiaoyun<sup>1</sup>, Zhao Yunlin<sup>2</sup>, Lei Cunxi<sup>2</sup>, Dai Meibin<sup>3</sup>, Yi Hecheng<sup>3</sup>

(<sup>1</sup>College of Biology and Technology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128;

<sup>2</sup>Hunan City University, Yiyang Hunan 413000;

<sup>3</sup>Yiyang forestry bureau, Yiyang Hunan 413000)

**Abstract:** To study the regulations on absorption and accumulation of heavy metals in *Zizania latifolia*. We had collected some specimens of the dominant species of *Z. latifolia* which live in heavy metal polluted area of the South of Dongting Lake and its rhizosphere soil, then we analysed the content of Cu, Sb, Cd, Pb in them. Results showed that the pollution level in soil was Sb>Cd>Cu, but the content of Pb did not exceed the stipulated standards. Living in this heavy metal polluted soils, each part of *Z. latifolia* had no enrichment of Sb. However, the ability of absorption and accumulation of other three kinds of heavy metals was root > leaf > stem. For different areas of the South Dongting Lake, the of heavy metals in *Z. latifolia* was different. In Si Jihong2 area, the enrichment factor of Cu in roots of *Z. latifolia* was significantly higher than that of other six areas ( $P<0.05$ ). The enrichment factor of Cu in roots of *Z. latifolia* which live in Lu Mahu2 area and those of *Z. latifolia* which live in Si Jihong2 area had no significant differences( $P>0.05$ ), but their enrichment factor both were significantly higher that of other five areas ( $P<0.05$ ). As a result, *Z. latifolia* has good prospect of application for remediating the region of the heavy metal pollution in the South Dongting Lake.

**Key words:** *Zizania latifolia*, heavy metal, absorption, enrichment biography

**基金项目:**湖南省科技厅重点资助项目“洞庭湖滨岸带受损生态系统的植物修复优化模式研究”(2008SK4013)。

**第一作者简介:**彭晓赞,女,1983年出生,湘西吉首人,硕士研究生,从事环境污染与生态修复研究。通信地址:413000 湖南省益阳市湖南城市学院新校区化学与环境工程系, E-mail: bsfnhd@163.com。

**通讯作者:**赵运林,男,1959年出生,湖南衡山人,教授,博导,主要从事环境污染与生态修复研究。通信地址:413000 湖南省益阳市湖南城市学院, Tel: 0737-6353035, E-mail: zyl8291290@163.com

收稿日期:2009-03-03。修回日期:2009-04-03。

近年来人们对南洞庭湖的不合理利用对其生态系统造成了严重的危害。目前,湖内湿地受铜(Cu)、锑(Sb)、镉(Cd)、铅(Pb)等重金属污染严重<sup>[1]</sup>。由于重金属可在植物体内积累,并通过食物链富集到人体和动物体,给人类和动物健康带来危害<sup>[2-3]</sup>。因此,利用生物技术对重金属污染的土壤进行修复已成为国内外研究热点。有研究表明,一些水生植物对水体中的重金属有吸收富集作用<sup>[4-6]</sup>。寻找富集重金属能力强的水生植物应用于重金属污染水体的修复具有重要意义。

菰是禾本科多年生挺水植物,在南洞庭湖湿地中分布广泛。周守标等<sup>[7]</sup>通过盆栽试验研究了Cd复合污染条件下菰的生长状况、生理特性及吸收和富集重金属的能力。结果表明菰适用于低、中浓度重金属污染水体的生态修复。为进一步研究生活于重金属污染区的菰对重金属的吸收与富集规律,笔者对南洞庭湖周边湿地Cu、Sb、Cd、Pb在土壤—菰系统中的吸收、富集进行了测定和分析,为菰修复湿地的研究提供一定的科学依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

南洞庭湖湿地位于洞庭湖西南,处于中亚热带向北亚热带的过渡地带,属亚热带季风湿润气候,光热充足,年平均气温17.0℃,1月平均气温4.1℃,7月平均气温29℃,年平均降水量1300~1400 mm。多年平均蒸发量1150~1500 mm,年日照时数1200~1800 h,无霜期260~280天,全年≥10℃的活动积温为5300~5400℃,较高的活动积温和较长的无霜期为湖区湿地生态系统提供了有利的气候条件。南洞庭湖属长江中下游洞庭平原堆积而成的沼泽地貌,主要湿地土壤为潮土、沼泽土、水稻土和沼泽化草甸土。卤马湖、车便湖、四季红渔场、西畔山洲、南嘴铺湿地分别位于南洞庭湖的中心与周边,是研究南洞庭湖境内菰对Cu、Sb、Cd、Pb重金属的吸收与富集的理想区域。

### 1.2 研究方法

1.2.1 样品采集 试验于2008年5月选取卤马湖、车便湖、四季红渔场、西畔山洲、南嘴铺境内的菰(生长期)及其根际土壤共80组样品。其中卤马湖2组、四季红渔

场2组、其他地区各1组。每组由5~7个单样混合而成。

1.2.2 样品处理 植物样品取回后,分离成根(须根和根状茎)、茎、叶,反复用自来水清洗干净,然后用去离子水冲洗3次,105℃杀青30 min,80℃下烘干至恒重,用植物粉碎机粉碎,用封口袋分别盛装。将土样置于塑料袋运回实验室后,去除植物根系和石块等杂物,自然风干,研磨,过0.15 mm孔径尼龙筛,装塑料袋封口待用。

1.2.3 样品分析 对植物不同部位样品采用硝酸-高氯酸消煮<sup>[8]</sup>,土壤样品用硝酸-盐酸-氢氟酸消煮<sup>[9]</sup>,制备成待测液,使用日本岛津A-6300石墨炉原子吸收分光光度计测定植物和土壤样品中Cu、Sb、Cd、Pb含量。每个样品均设置平行样,以其算术平均值为结果,平行测定结果允许相差≤10 mg/kg。

### 1.2.4 数据分析统计

污染指数=研究区土壤中重金属平均含量/国家土壤环境质量标准 …………… (1)

地积累指数( $I_{geo}$ )= $\log_2 C_n/1.5B_n$  …………… (2)

(2)式中: $C_n$ 为元素n的实测质量分数,mg/kg; $B_n$ 为元素n的背景质量分数,mg/kg。

富集系数BCF(Bioconcentration factor)=植株不同部位重金属含量/土壤中重金属含量 …………… (3)

试验数据用Microsoft Excel 2003和SPSS for Windows 14.0软件进行方差分析和多重比较(LSD)。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤重金属污染特征

研究区土壤样品重金属含量见表1。由表1可知,研究区土壤重金属Cu、Sb、Cd和Pb平均含量分别为116.82 mg/kg、19.67 mg/kg、2.31 mg/kg和7.39 mg/kg。Sb的污染指数为6.6~51.76,呈现出极强烈富集,明显受到强扰动;Cd和Cu的污染指数分别为11.55、3.34,呈现出强烈富集;Pb的污染指数为0.21,表现为极弱的富集。从应用国家土壤环境质量标准中重金属自然背景值计算的平均地积累指数来看,研究区土壤中Sb达到中等—强污染或极严重污染;Cd达到中等—强污染,Cu为中等污染,Pb未受到污染。

表1 研究区土壤中重金属污染特征

元素	含量值/(mg/kg)	一级自然背景/(mg/kg)	污染指数	$I_{geo}$ 平均值	分级	污染程度
Cu	116.82±15.59	35	3.34	1.16	2	中等污染
Sb	19.67±15.23	0.38~2.98	6.6~51.76	2.16~5.11	3~6	中等—强污染或极严重污染
Cd	2.31±0.59	0.2	11.55	2.94	3	中等—强污染
Pb	7.39±0.95	35	0.21	-2.83	0	无污染

注:(1)一级自然背景为国家土壤环境一级标准(GB 15618-1995);(2)中国对Sb的自然背景值为一范围<sup>[10]</sup>;(3)污染指数为土壤平均值比背景值之比。

2.2 蒜不同部位对Cu、Sb、Cd、Pb的吸收与富集  
蒜不同部位重金属积累量分布特征见表2。从表2中可以看出,整个植株对Cu、Cd、Pb这3种重金属的

吸收能力存在极显著差异( $P<0.01$ ),其积累量大小为Cu>Pb>Cd;而Sb在植物体的根、茎、叶中均未检测出。从表2还可以看出,蒜不同部位对重金属的积累量

表2 蒜各部位重金属积累量分布特征

部位	Cu 积累量/(mg/kg)	Sb 积累量/(mg/kg)	Cd 积累量/(mg/kg)	Pb 积累量/(mg/kg)
根	96.39±19.76a	未检出	13.41±7.88a	26.38±6.70a
茎	60.75±6.25b	未检出	1.94±0.62c	15.13±6.16b
叶	80.62±34.29ab	未检出	2.78±0.41bc	26.35±8.11a
整个植株	237.77±20.20**	未检出	18.13±8.67	67.85±12.35

注:表中数值为平均值标准差;同列中a、b、c表示差异显著水平( $P<0.05$ );同行中\*\*表示极显著差异( $P<0.01$ )。

具有明显差异。根对Cu、Cd的积累量分别显著性的高于茎( $P<0.05$ );而根对Cu、Pb的积累量与叶中都没有达到显著性差异( $P>0.05$ )。根对Cu的吸收能力远高于Cd、Pb的原因可能是由于Cu是植物必需元素。根对Cd、Pb等重金属的积累量比较强,这很可能是因为蒜根系比较发达,将有害离子积累于根部从而阻止有害离子对植株光合作用及新陈代谢活性毒害。叶对3种重金属元素的吸收都高于茎,这可能是由于植物蒸腾作用的拉力将一部分重金属元素由根中转运到叶中<sup>[11]</sup>。

植物对重金属的积累量与植物的积累能力不尽相同,而富集系数能更好的反映植物对重金属的吸收与富集能力。为此,比较蒜不同部位对重金属的富集系数,试验结果见图1。

由图1看出,土壤中Cu、Cd、Pb这3种重金属元素在蒜不同部位的富集系数存在较大差异。总体说来,根中富集能力大小关系为Cd>Pb>Cu,而Cu与Cd的重金属富集能力、Cu与Pb的重金属富集能力、Cd与Pb的重金属富集能力均达到极显著性差异( $P<0.01$ );在

茎和叶中,其富集能力大小关系为Pb>Cd>Cu,Pb的富集能力比其他两种重金属强( $P<0.05$ );在根、茎、叶中,Sb则没有富集能力。这可能与重金属元素在作物体内吸收和运输的机制及生物化学过程相关。

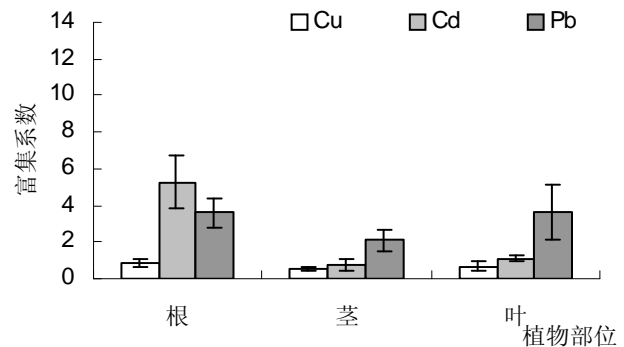


图1 蒜不同部位对重金属的富集系数

2.3 不同采样区蒜不同部位对Cu、Cd的吸收与富集

考虑到整个湖区土壤中Pb含量未超标,对环境没造成严重危害,而植物体内对Sb无富集作用,下面对不同采集区蒜不同部位对Cu、Cd的富集情况做一个比较,见表3。

表3 不同采样区蒜不同部位对Cu、Cd的富集系数

元素	地区	土壤重金属含量/(mg/kg)	富集系数		
			根	茎	叶
Cu	卤马湖1	126.99±1.94 <sup>d</sup>	0.76±0.01 <sup>d</sup>	0.56±0.01 <sup>b</sup>	0.47±0.02 <sup>f</sup>
	卤马湖2	131.26±1.24 <sup>b</sup>	0.82±0.02 <sup>e</sup>	0.47±0.02 <sup>e</sup>	0.52±0.01 <sup>e</sup>
	车便湖	102.94±0.52 <sup>e</sup>	0.81±0.01 <sup>e</sup>	0.62±0.02 <sup>a</sup>	0.56±0.004 <sup>d</sup>
	四季红1	101.58±2.41 <sup>c</sup>	1.07±0.02 <sup>b</sup>	0.61±0.02 <sup>a</sup>	0.62±0.01 <sup>c</sup>
	四季红2	101.31±1.56 <sup>e</sup>	1.26±0.07 <sup>a</sup>	0.55±0.01 <sup>b</sup>	0.55±0.02 <sup>d</sup>
	西畔山洲	138.66±1.84 <sup>d</sup>	0.56±0.03 <sup>f</sup>	0.43±0.01 <sup>c</sup>	0.96±0.01 <sup>b</sup>
	南嘴铺	115.00±1.38 <sup>d</sup>	0.64±0.07 <sup>e</sup>	0.45±0.01 <sup>c</sup>	1.12±0.01 <sup>a</sup>
	Cd	卤马湖1	2.12±0.14 <sup>e</sup>	7.06±0.19 <sup>a</sup>	1.38±0.18 <sup>a</sup>
卤马湖2		2.96±0.07 <sup>a</sup>	6.14±0.16 <sup>e</sup>	0.91±0.05 <sup>b</sup>	1.18±0.05 <sup>c</sup>
车便湖		2.03±0.08 <sup>e</sup>	6.66±0.15 <sup>b</sup>	0.89±0.04 <sup>b</sup>	1.56±0.08 <sup>b</sup>
四季红1		2.42±0.11 <sup>b</sup>	4.23±0.16 <sup>e</sup>	0.61±0.03 <sup>c</sup>	0.96±0.03 <sup>d</sup>
四季红2		3.12±0.11 <sup>a</sup>	4.38±0.15 <sup>e</sup>	0.45±0.01 <sup>d</sup>	0.90±0.09 <sup>d</sup>
西畔山洲		1.38±0.03 <sup>d</sup>	3.47±0.24 <sup>f</sup>	1.26±0.02 <sup>a</sup>	1.88±0.10 <sup>a</sup>
南嘴铺		2.11±0.1 <sup>c</sup>	5.46±0.19 <sup>d</sup>	0.72±0.02 <sup>e</sup>	1.17±0.04 <sup>c</sup>

注:图中数值为平均值标准差(n=3);a、b、c、d、e、f表示同一列中肩标小写字母不同差异明显( $P<0.05$ )。

由表3可以看出,不同采样区菰的同一部位对重金属的富集系数有一定的差异。另外,不同采样区土壤中重金属含量与菰重金属的富集系数并不存在简单的线性关系。车便湖、四季红1区、四季红2区3个采样区土壤中Cu的含量没有显著性差异( $P>0.05$ ),但是四季红2区根中Cu的富集系数显著性高于其他6个采样区( $P<0.05$ ),这可能与四季红2区土壤的理化性质及根际间的微生物等微环境有关<sup>[12]</sup>。四季红1区、四季红2区土壤中Cd的含量有显著性差异( $P<0.05$ ),但是菰根中Cd却不存在显著性差异( $P>0.05$ )。

结合表1、表3可看出,土壤中重金属Cu含量是Cd的50.57倍,但是植物体中Cd的富集系数却是Cu的2.75~11.03倍,这表明菰对Cd的相对吸收能力明显强于Cu。所以用菰来修复重金属Cd污染地具有现实意义。

### 3 讨论

通过对南洞庭湖实地取样分析,土壤中4种重金属含量表现为Cu>Sb>Cd>Pb。这可能是由于南洞庭湖上游锑矿区的不合理开采、周边化工厂、造纸厂以及生活垃圾等的直接排放,导致了湖区土壤中重金属Cu、Sb、Cd含量偏高。地积累指数作为一种评价土壤污染指数的指标已得到广泛的应用<sup>[13]</sup>,笔者通过地积累指数的测定,得出土壤中4种重金属的污染程度为Sb>Cd>Cu>Pb。由此可知,土壤中重金属毒害程度不能由单一的重金属含量来判断,应结合地积累指数来综合考虑。

Levitt<sup>[14]</sup>指出植物对重金属的耐受性可通过回避或忍耐来达到。回避是指植物具有防止过量金属吸收到体内的一种保护机制,而忍耐是指植物具有应付体内过量积累重金属的能力。土壤中重金属Sb含量表现出中等—强污染或极严重污染,可是在植物的根、茎、叶中却未检测出,这可能与菰对重金属Sb污染采用的回避方式有关;也有可能是因为Sb是植物非必需元素,且移动性小,故在植物体根中含量极低,很难再转移到地上部分。Hammel等<sup>[15]</sup>的研究也表明,在锑矿山废弃地中分析其中19种蔬菜和粮食作物中的锑含量,植物组织器官中的锑含量并不高。目前,国内外对于植物吸收Sb特性的研究起步较晚<sup>[16-17]</sup>,具体机理还有待进一步研究。

菰根中累积Cd的浓度远大于茎叶,研究认为根系具有阻止Cd向地上部运输的过滤机制。与杨超光等<sup>[18]</sup>试验结果相一致。这与Stoltz E和Gregor M<sup>[19]</sup>研究认为重金属在湿地植物体内的分布趋向于根部积累的研究结果一致。在野外采样发现重金属Cd浓度在

18.17 mg/kg下长势良好,与周守标等<sup>[7]</sup>研究的菰在重金属Cd浓度为6.43 mg/kg的复合污染条件下不能存活不相符,这有可能是从外地取样到室内盆栽试验这个过程对植物体本身有所损伤以及试验在4种重金属的复合污染条件下所导致的结果。曹莹等<sup>[8]</sup>研究指出植物在二元甚至多元重金属的复合污染条件下吸收积累机制有别于单因子重金属污染。通过对南洞庭湖湿地中4种重金属含量进行两两相关分析得出四者之间未达到复合污染的程度,故离子间的相互作用不强。长期生活于重金属污染区的菰,逐渐适应对环境的胁迫条件,通过长期积累与自然选择,对高浓度重金属Cd耐受性强的菰生存下来,引起这种优良性状稳定的遗传下来。这与Bradshaw<sup>[20]</sup>研究认为植物对金属的耐受性是自然选择的结果而非先天的生理性继承的理论相符合。

根据Brooks<sup>[21]</sup>提出的植物叶片或地上部分(干重)中Cu含量达到1000 mg/kg,且满足S/R>1(S和R分别指植物地上部和根部重金属的含量)的标准,则定义该种植物为超积累植物。在个别采样区内发现菰体内重金属Cu的S/R>1,虽未完全达到Cu超富集植物要求,但其对Cu的累积能力与普通植物相比要强的多。因而,菰对南洞庭湖重金属Cd、Cu污染具有较好的生物修复。

### 参考文献

- [1] 杨国兵,段一平.洞庭湖水污染现状及防治对策[J].湖南水利水电,2007,(2):51-55.
- [2] Farmer A A, Farmer A M. Concentration of cadmium, lead and zinc in livestock feed and organs around a metal production center in eastern kazakhstan[J]. Science of the Total Environment, 2000, 257 (1):53-60.
- [3] Pichtel J, Kuroiwa K, Sawyerrh T. Distribution of Pb, Cd and Ba in soils and plants of two contaminated sites [J]. Environmental Pollution,2000.110 (1):171-178.
- [4] 阳承胜,蓝崇钰,束文圣.重金属在宽叶香蒲人工湿地系统中的分布与积累[J].水处理技术,2002,28(2):101-104.
- [5] Baldantoni D, Alfrani A, Tommasi PD. Assessment of macro and microelement accumulation capability of two aquatic plants [J]. Environ Pollut, 2004, 130:149-156.
- [6] Panich-pat T, Pokethitiyook P, KruatrachueM, et al. Removal of lead from contaminated soils by *Thypha angustifolia*[J]. Water Air Soil Pollut, 2004, 155:159-171.
- [7] 周守标,王春景,杨海军,等.菰和菖蒲对重金属的胁迫反应及其富集能力[J].生态学报,2007,27(1):281-287.
- [8] 曹莹,黄瑞冬,李建东,等.铅和镉复合胁迫下玉米对镉吸收特性[J].生态学杂志,2006,25(11):1425-1427.
- [9] 郭观林,周启星.中国东北北部黑土重金属污染趋势分析[J].中国

- 科学院研究生院学报,2004,21(3):386-392.
- [10] 何孟常,季海冰,赵承易,等. 镉矿区土壤和植物中重金属污染初探[J]. 北京师范大学学报:自然科学版,2002,38(3):417-420.
- [11] 杨肖娥,龙新宪,倪吾钟,等. 超积累植物吸收重金属的生理及分子机制[J]. 植物营养与肥料学报,2002,8(1):8-15.
- [12] 申进玲,陈蕾,李晓蕙,等. 固氮菌及其共生体系修复土壤重金属污染[J]. 农业资源与环境,2006,6:68-69.
- [13] 许中坚,邱喜阳,刘文华,等. 复合污染条件下莴苣对Zn、Cd的吸收与富集[J]. 生态与农村环境学报,2008,24(2):71-75.
- [14] Levitt J. Response of plants to environmental Stress [M]. New York: Academic Press, 1980.
- [15] Hammel W, Debus R, Steubing L. Mobility of Antimony in Soil and Availability to Plants [J]. Chemosphere, 2001, 41:1791-1798.
- [16] Shotyck W, Krachler M, Chen B. Antimony: Global environmental contaminant [J]. Journal of Environmental Monitoring, 2005, 7: 1135-1136.
- [17] 吴丰昌,郑建,潘响亮,等. 镉的环境生物地球化学循环与效应研究展望[J]. 地球科学进展,2008,23(4):350-356.
- [18] 杨超光,豆虎,梁永超,等. 硅对土壤外源镉活性和玉米吸收镉的影响[J]. 中国农业科学,2005,38 (1):116-121.
- [19] Stoltz E, Gregor M. Accumulation properties of As, Cd, Cu, Pb and Zn by four wetland species growing in submerged mine tailings [J]. Environ Exp Bot, 2002, 47:271-280.
- [20] Bradshaw A D. Pollution and evolution in: Mansfield T A.ed. Effects of air pollutants on plants [M]. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1976:135-139.
- [21] Brooks R R, Lee J, Reeves R D, et al. Detection of nickeliferous rocks by analysis of herbarium species of indicator plants [J]. J Geochem Explor, 1977, (7):49-71.