

北部湾盐沼荇苳盐沼湿地土壤-植物系统重金属污染评价

杨艳¹, 许峻模², 潘良浩^{3*}

1. 南宁学院, 广西 南宁 530200; 2. 广西大学林学院, 广西 南宁 530005;
3. 广西科学院广西红树林研究中心//广西红树林保护与利用重点实验室, 广西 北海 536000

摘要: 滨海湿地是典型的环境脆弱带和敏感带, 重金属污染是其中受关注度较高的一方面。为全面了解北部湾滨海盐沼的重金属污染水平, 以北部湾典型滨海盐沼植被荇苳 (*Cyperus malaccensis*) 所在的南流江入海口和茅尾海钦江入海口湿地为研究对象, 通过对植物和对应土壤进行采样分析, 测定该区土壤及植物中重金属元素 (Cu、Zn、Cr、Pb、Cd 和 Hg) 的含量, 并评价不同潮滩位置 (内滩、中滩和外滩) 重金属的污染程度及其在土壤-植物系统中的富集特性。结果表明, 两区域盐沼湿地土壤综合污染程度处于低污染状态, 南流江口 Zn 的含量 (283.59 ± 132.50) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 接近中度污染, 其次是 Cd (0.10 ± 0.03) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 Hg (0.11 ± 0.05) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 而其他重金属元素含量未超标; 茅尾海受 Zn 轻度污染, 其次是 Cu 和 Hg, Cr、Pb 和 Cd 未达到污染水平。受海洋动力和河流径流混合动力作用, 两区域各滩面盐沼土壤重金属分布规律存在差异, 南流江口 3 个滩面重金属的含量表现为: 内滩 > 中滩 > 外滩, 茅尾海口则表现为: 中滩 > 外滩 > 内滩。两区域盐沼荇苳富集特征表明: 茅尾海盐沼荇苳对 Cd (BCF=1.66) 和 Hg (BCF=0.89) 具有较强的富集作用, 而南流江口盐沼荇苳仅对 Cd (BCF=1.93) 具有较强的富集作用, 其余重金属 Cu、Zn、Cr、Pb 未在荇苳体内显著富集, 因而荇苳可作为富集 Cd、Hg 的天然盐沼植物。进一步研究发现, 两区域荇苳地下茎对重金属的富集能力远大于地上茎, 富集能力因重金属种类及积累部位的不同而表现出一定的差异性和选择性。该研究可为滨海盐沼湿地生态修复和保护提供重要依据。

关键词: 滨海盐沼; 荇苳; 重金属; 南流江口; 茅尾海

DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2017.11.018

中图分类号: X173

文献标志码: A

文章编号: 1674-5906 (2017) 11-1969-08

引用格式: 杨艳, 许峻模, 潘良浩. 2017. 北部湾盐沼荇苳盐沼湿地土壤-植物系统重金属污染评价[J]. 生态环境学报, 26(11): 1969-1976.

YANG Yan, XU Junmo, PAN Lianghao. 2017. Assessment of heavy metal contamination in the soil-plant system of *Cyperus malaccensis* salt marsh wetland in Beibu Gulf [J]. Ecology and Environmental Sciences, 26(11): 1969-1976.

滨海盐沼 (coastal salt marsh) 处于陆地和海洋两大生态系统相互作用的敏感地带, 是生态系统中多种物质的交换场所, 拥有极其丰富的生态资源 (Gao et al., 2014; Wood et al., 2007)。受河口水动力和海洋潮汐的双重作用, 滨海盐沼的物理、化学及生物过程活跃, 不同滩面的物质循环过程极为复杂 (李家兵等, 2016)。近年来, 随着广西北部湾经济区的建设, 大量的工业废水、生活污水及养殖业废水被排入河口, 使附近许多水域受到不同程度的污染, 尤其是重金属污染, 严重影响了滨海湿地功能的发挥 (廖日权等, 2015; 杨静等, 2015; 熊丹等, 2017)。传统的物理、化学修复方法存在成本高、破坏土壤理化性质、易造成二次污染等弊端 (马文超等, 2016), 而盐沼植物作为滨海湿地中最重要的初级生产者, 能吸收重金属并将其积累于体

内, 在促进滨海湿地重金属元素沉降和累积等方面发挥着重要作用 (全为民等, 2006; Carrasco et al., 2006; Duarte et al., 2010; 杨洋等, 2016)。

目前国内外关于淡水沼泽植被和滨海盐沼植被的研究已广泛开展, 主要包括互花米草 (*Spartina alterniflora*) (Peng et al., 2011; Idaszkin et al., 2015; 张龙辉等, 2014)、芦苇 (*Phragmites australis*) (宋创业等, 2016; 温晓君等, 2015)、碱蓬 (*Suaeda salsa*) (Sun et al., 2017; 郑立地等, 2015)、翅碱蓬 (*Suaeda heteroptera*) (刘晓光等, 2006)、宽叶香蒲 (*Typha latifolia*) (Kumari et al., 2015; Gikas et al., 2014) 等。荇苳 (*Cyperus malaccensis*) 是莎草科莎草属的植物, 主要产于江苏、福建、广东、广西等省区, 也是滨海湿地常见的植物 (韦江玲, 2011)。迄今为止, 国内开展了大量关于短叶荇苳 (*Cyperus*

基金项目: 南宁学院科研项目 (2014XJ16); 广西红树林保护与利用重点实验室系统性研究课题 (GKLMC-201405); 广西“红树林和海草系统保育与生态监测”特聘专家岗基金

作者简介: 杨艳 (1984年生), 女, 讲师, 硕士, 主要研究方向为湿地生态学。E-mail: 59832779@qq.com

*通信作者: 潘良浩, 男, 助理研究员, 主要研究方向为滨海湿地生态学。E-mail: 417943884@qq.com

收稿日期: 2017-08-15

malaccensis var. *brevifolius*) 的研究, 但对华南滨海常见的原生盐沼种类茳芏(何斌源等, 2014) 的研究甚少, 仅发现有茳芏对重金属 Cr^{6+} 的抗性机理(韦江玲, 2011)、盐度胁迫对茳芏萌芽的影响(陈元松, 2011)、茅尾海茳芏及沉积物有机碳、全氮、全磷分布特征与季节动态(潘良浩等, 2012) 及茳芏生物量估测模型(潘良浩等, 2015) 的研究报道。植物对重金属的富集系数(Biological concentration factor, BCF, 即植物体内重金属含量与土壤中相应重金属含量之比) 可以作为评价植物对土壤中重金属富集能力水平的重要指标, 富集系数越大, 表明其对重金属的富集能力越强(王鹏等, 2014)。本研究通过对北部湾沿海南流江入海口及钦州茅尾海钦江入海口分布最广的盐沼植物茳芏的重金属污染程度进行评价, 对比研究了不同潮滩位置(内滩、中滩和外滩) 盐沼表层土壤中的重金属污染水平及其在土壤-植物系统中的富集特性, 以期为该区域环境评价和生态恢复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区样地一位于广西北海市合浦县的南流江口(东经 $108^{\circ}50' \sim 109^{\circ}47'28''$, 北纬 $20^{\circ}26' \sim 21^{\circ}55'$), 南流江河道全长 287 km, 是广西南部流程最长、流域面积最广、水量最丰富的河流。该区域属于亚热带季风气候, 气候暖热湿润, 年均温 22.9°C , 年降水量 1670 mm。研究区江水入海处形成网状河系, 地势低平, 水网密布, 形成了广西最大的三角洲——南流江三角洲。桐花树(*Aegiceras corniculatum*)、白骨壤(*Avicennia marina*) 和茳芏(*Cyperus malaccensis*) 群落是该区主要的自然植被类型。

样地二位于广西钦州市南部海域的茅尾海(东经 $108^{\circ}28' \sim 108^{\circ}37'$, 北纬 $21^{\circ}46' \sim 21^{\circ}54'$), 是以钦江、茅岭江为主要入湾径流的共同河口海滨区, 呈口袋状, 是半封闭式海湾, 内宽口窄, 面积约 135 km^2 。该区域属于亚热带海洋性气候, 年平均气温约 22.1°C , 年平均降雨量为 2135 mm。研究区有大片沙质和泥质浅滩, 滩涂广布(田海涛等, 2014)。该区具有典型的红树林生态系统和滨海盐沼生态系统, 桐花树群落、茳芏群落、桐花树-茳芏群落、桐花树-短叶茳芏群落是该区主要的植被群落(潘良浩等, 2015)。

1.2 样方设置与样品采集

通过野外实地考察后, 在每个茳芏盐沼湿地样地中设置 1 条断面, 沿断面的内滩、中滩、外滩各布设 3 个 50 $\text{cm} \times 50 \text{ cm}$ 样方, 具体调查及样品采样地位置见图 1, 采样时间为 2013 年 10 月。植物样品采集采用收获法, 齐地剪下样方内的地上部分并收

集, 地下部分采用挖掘法, 先清除土壤表层的残落物及杂质, 用铁锹将样方内地下部分植物根全部挖出, 土壤样品采集在相对应的植物样方表层(0~30 cm) 进行。植物及土壤样品装入贴好标签的塑料袋中密封, 带回实验室于 4°C 冰箱中保存并处理。调查中样品的采集、保存、运输及其他注意事项均按照《GB 17378.5—2007 海洋监测规范》处理。

1.3 样品处理与测定

植物样品: 用自来水清洗植株表面的泥土, 把植株分成地下茎、地上茎两个部分, 然后用蒸馏水冲洗 3 遍, 自然晾干后装入信封袋, 置于 105°C 烘箱中杀青 2 h, 再于 60°C 下干燥。将样品粉碎后, 过 40 目筛, 经 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ 高温消解定容后, 采用火焰原子吸收分光光度法及原子吸收石墨炉法测定 Cu、Zn、Pb、Cd、Cr 的含量; 采用原子荧光光度法测定 Hg 的含量。

土壤样品: 除去石块、根系等杂物后, 室内风干, 磨碎, 过 100 目筛。土壤样品重金属元素含量测定按照《GB 17378.5—2007 海洋监测规范》第 5 部分: 沉积物分析》进行: Cu、Zn 采用火焰原子吸收分光光度法测定; Pb、Cd、Cr 采用无火焰原子吸收分光光度法测定; Hg 采用原子荧光法测定。

1.4 统计分析

运用单因素方差分析方法(One-way ANOVA) 和邓肯新复全距法(LSR) 分析不同样地、不同滩面土壤及植物不同部位重金属含量差异显著性; 采用 SAS 3.6 和 Excel 2010 对数据进行处理、分析和绘图。

2 结果与分析

2.1 两样地盐沼土壤重金属总量水平

两样地土壤重金属含量测定值和不同地区的土壤、沉积物质量标准值见表 1。南流江口盐沼土壤重金属含量高于茅尾海盐沼土壤(除 Cu 外)。其中, 南流江口盐沼土壤 Zn($P=0.000$) 和 Cd($P=0.002$) 的含量显著高于茅尾海盐沼土壤, 而其他重金属含量差异不显著($P>0.05$)。参照国家土壤质量标准可知, 南流江口盐沼土壤 Zn 含量超过国家土壤质量一级标准且接近二级标准, 值为 $(283.59 \pm 132.50) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 而 Cu、Cr、Pb、Cd 和 Hg 含量均低于国家土壤质量一级标准, 表明南流江口盐沼土壤 Zn 受轻度污染, 而 Cu、Cr、Pb、Cd 和 Hg 未达到污染水平; 就茅尾海盐沼湿地而言, 土壤样品的 Zn 含量超过或接近国家土壤质量一级标准, 而 Cu、Cr、Pb、Cd 和 Hg 含量基本都低于国家土壤质量一级标准, 表明茅尾海口盐沼土壤 Zn 达到轻度污染水平, 而未受到 Cu、Cr、Pb、Cd 和 Hg 污染。

根据广西土壤背景值可知, 南流江口和茅尾海

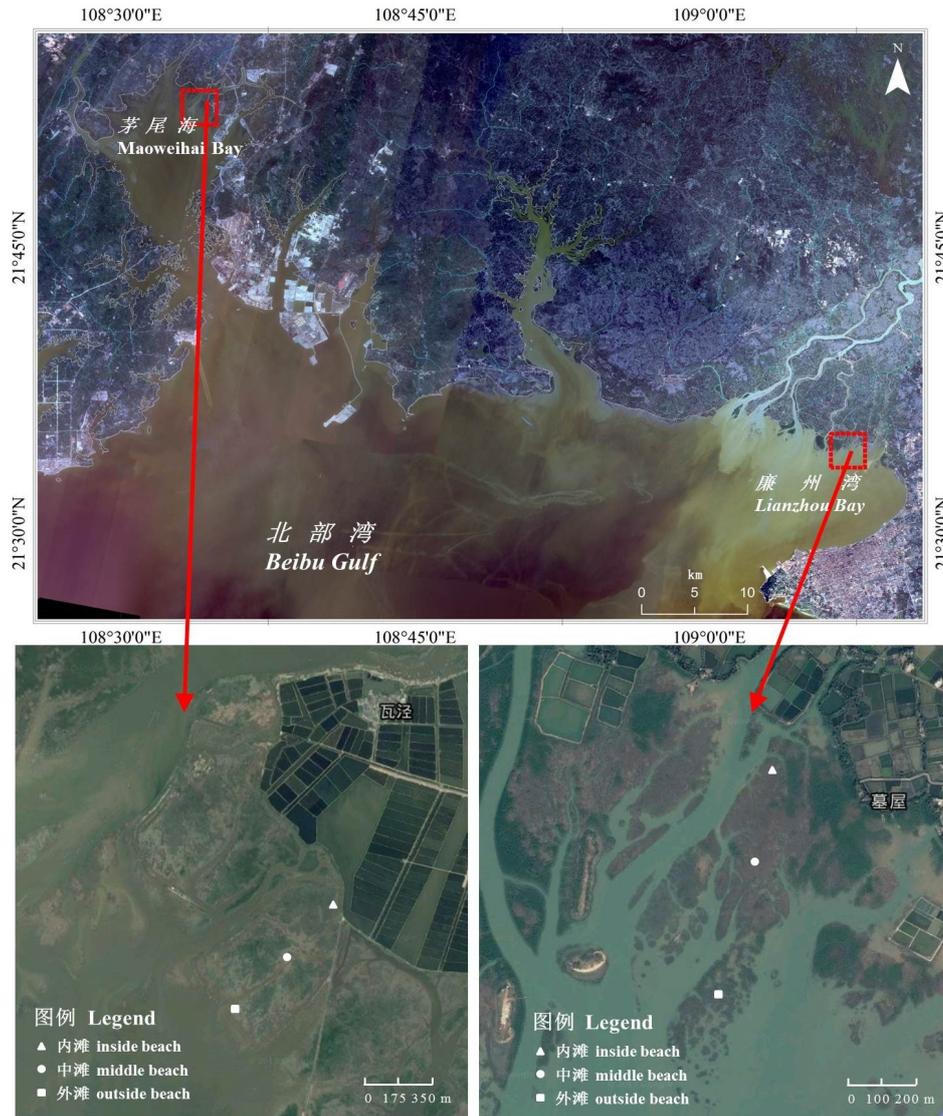


图 1 茆盐沼湿地采样地位位置示意图

Fig. 1 The locations of *Cyperus malaccensis* salt marsh and the sampling sites

表 1 不同样地土壤重金属含量与标准值对比

Table 1 Measured contents of heavy metals and soil/sediment quality guidelines of different sample regions

项目 Item	指标 Indicators	Cu	Zn	Cr	Pb	Cd	Hg
不同样地土壤实测值 Measures heavy metal contents of soils in different regions	北海 Baihai	18.97±9.64	283.59±132.50**	46.85±14.93	21.30±12.22	0.10±0.03**	0.11±0.05
	钦州 Qinzhou	24.30±4.58	100.44±17.46**	37.29±4.11	14.59±3.07	0.06±0.01**	0.10±0.01
国家土壤质量标准 Chinese environmental quality standard for soils	一级 First class	35.00	100.00	90.00	35.00	0.20	0.15
	二级 Second class	100.00	300.00	350.00	350.00	0.60	1.00
	三级 Third class	400.00	500.00	400.00	500.00	1.00	1.50
中国有关土壤背景值 The background values of soils of China	广西土壤背景值 Background soil values in Guangxi	27.80	75.60	82.10	24.00	0.267	0.152
	中国土壤背景值 Background soil values in China	22.60	74.20	61.00	26.00	0.097	0.065
	中国大陆沉积物背景值 Background sediment values in mainland China	20.00	66.00	70.00	25.00	0.10	0.03

“**”表示两个样地之间存在极显著差异 ($P \leq 0.01$, $n=18$)

“***” means there are significant different between two sample regions ($P \leq 0.01$, $n=18$)

土壤样品 Zn 含量均超标, 分别是广西土壤背景值的 3.8 倍和 1.3 倍, 而两个区域土壤 Cu、Cr、Pb、Cd 和 Hg 的含量都未超过广西土壤背景值。参照中

国土壤背景值和中國大陸沉积物背景值可知, 南流江口 Zn、Cd 和 Hg 均属于超标, 其中 Zn 的含量是中国土壤背景值的 3.8 倍, 是中國大陸沉积物背景

值的4.3倍,Cu、Cr和Pb含量均小于中国土壤背景值和中国大陆沉积物背景值;茅尾海的Zn、Cu和Hg均属于超标,其中Zn的含量是中国土壤背景值的1.4倍,是中国大陆沉积物背景值的1.5倍,Cr、Pb和Cd含量均小于中国土壤背景值和中国大陆沉积物背景值。从两区域重金属含量统计表可发现,南流江口盐沼湿地土壤Zn接近中度污染,Cd和Hg也呈现一定程度的污染,而Cu、Cr和Pb则未达到污染水平;茅尾海盐沼湿地土壤Zn受轻度污染,Cu和Hg也呈现不同程度污染,而Cr、Pb和Cd则未达到污染水平。相对而言,南流江口Zn的含量显著高于茅尾海。

2.2 不同滩面盐沼土壤重金属总量水平

两区域不同滩面土壤重金属含量见表2。南流江口不同滩面间Cu(P=0.000)、Zn(P=0.002)、Cr(P=0.000)、Pb(P=0.000)、Cd(P=0.000)和Hg(P=0.038)含量差异均达显著水平。其中内滩和中滩重金属的含量相对较高,而外滩重金属含量普遍较低,3个滩面土壤重金属含量的总体趋势为:内滩>中滩>外滩。

茅尾海口3个滩面的重金属含量则与南江流口的积累规律不一致,不同滩面间重金属含量除Cu(P=0.024)和Cd(P=0.001)差异显著外,Zn(P=0.367)、Cr(P=0.417)、Pb(P=0.159)和Hg(P=0.229)含量差异不显著。其中,中滩的重金属含量相对较高(除Pb外),内滩重金属含量相对较

低,外滩Pb的含量最高,达17.34 mg·kg⁻¹。3个滩面土壤重金属含量的总体趋势为:中滩>外滩>内滩。

两区域中同一滩面的6种重金属累积总量都表现为相似的规律,即南江流口总量基本为Zn>Cr>Pb>Cu>Hg>Cd,茅尾海口总量均为:Zn>Cr>Cu>Pb>Hg>Cd。南流江各个滩面中内滩Zn的含量最高,高达388.80 mg·kg⁻¹;茅尾海口各个滩面中中滩Zn的含量最高,值为119.89 mg·kg⁻¹。

2.3 盐沼荳苳对盐沼土壤重金属的富集作用

南流江口和茅尾海口盐沼荳苳对6种重金属元素的富集系数如图2所示。南流江口荳苳地上部分对Cu、Zn、Cr、Pb、Cd和Hg的富集系数为0.62~1.04、0.05~0.21、0.07~0.19、0.01~0.09、1.30~2.02、0.22~0.88,而茅尾海荳苳地上部分对6种重金属元素的富集系数分别为0.21~0.42、0.24~0.38、0.09~0.28、0.05~0.07、1.10~1.92、0.68~1.15。仅南流江口荳苳对Cd及茅尾海荳苳对Cd、Hg的富集系数大于1,说明一定程度上盐沼植物荳苳能显著富集这两种重金属。

根据富集系数(BCF)的大小可以看出,南流江口盐沼荳苳对6种重金属的富集作用表现为Cd>Cu>Hg>Cr>Zn>Pb,而茅尾海口盐沼荳苳对6种重金属的富集作用表现为Cd>Hg>Zn>Cu>Cr>Pb。两区域对6种重金属的富集规律虽不完全一致,但表现出相似的规律,即对Cd均具有明显的富集作用,且对Hg也具有较强的富集作用,可见荳苳

表2 两区域不同滩面沉积物重金属含量
Table 2 Concentration of heavy metals in different beach surfaces of different regions

位置 Location	北海南流江口						钦州茅尾海					
	Cu	Zn	Cr	Pb	Cd	Hg	Cu	Zn	Cr	Pb	Cd	Hg
内滩 Inside beach	26.33 a	388.80 a	62.03 a	31.79 a	0.12 a	0.16 a	19.72 a	86.11 a	32.68 a	11.28 a	0.05 a	0.09 a
中滩 Middle beach	22.53 a	327.19 a	46.32 b	24.22 b	0.11 a	0.10 ab	28.88 b	119.89 a	40.56 a	15.15 a	0.07 b	0.11 a
外滩 Outside beach	8.05 b	134.79 b	32.19 c	7.88 c	0.06 b	0.05 b	24.31 ab	95.34 a	38.62 a	17.34 a	0.06 ab	0.11 a

n=9; 同一列中,小写字母不同表示差异显著(P<0.05)

n=9; Different letters within the same line show represent significant differences (P<0.05)

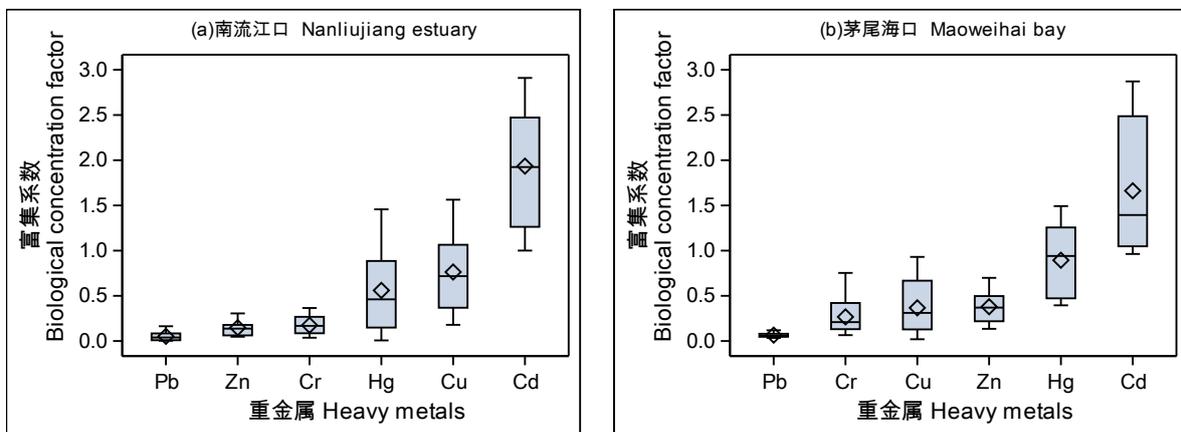


图2 盐沼植物荳苳对湿地土壤重金属的富集系数

Fig. 2 The biological concentration factor of *Cyperus malaccensis* to six heavy metals in different regions

对土壤中重金属Cd和Hg可以起到较显著的富集和清除作用。

2.4 两样地荳芒植株不同部位重金属积累与分布

两样地不同潮滩位置荳芒地上茎和地下茎重金属含量如图3所示。南流江口荳芒地上茎部分重金属积累量在0.01~20.53 mg·kg⁻¹之间变化,地下茎部分重金属积累量在0.06~62.27 mg·kg⁻¹之间变化,其中Cu、Zn和Cr的总积累量明显大于Pb、Cd和Hg。不同滩面间地下茎重金属含量基本大于地上茎(除外滩的Cu及外滩的Cd外),其中地下茎Cu(P=0.037)和Zn(P=0.000)、Cr(P=0.000)、Pb(P=0.000)、Hg(P=0.000)含量显著高于地上茎,地下茎Cd含量与地上茎差异不显著(P=0.465)。

对茅尾海盐沼湿地而言,荳芒地上茎部分重金属积累量在0.04~29.39 mg·kg⁻¹之间变化,地下茎部分重金属积累量在0.08~51.32 mg·kg⁻¹之间变化,其中Cu、Zn和Cr的总积累量普遍高于Pb、Cd和Hg。同时发现,不同滩面间地下茎重金属含量均大于地上茎,其中地下茎Cu(P=0.003)、Zn(P=0.000)、Cr(P=0.000)、Pb(P=0.000)、Cd(P=0.000)和Hg(P=0.030)含量显著高于地上茎。

各重金属元素在荳芒植株的分布呈现相似的规律性,即地下茎>地上茎。两区域荳芒体内Cu、Zn和Cr的总积累量均普遍较高,而Pb、Cd和Hg的总积累量相对较低,说明荳芒的富集能力因重金属种类和积累部位的不同而表现出一定的差异性和选择性。

3 讨论

3.1 两区域盐沼土壤重金属潜在生态风险

两区域盐沼土壤重金属含量分布规律基本一致,南流江口盐沼土壤重金属含量的分布规律为: Zn(283.59 mg·kg⁻¹)>Cr(46.85 mg·kg⁻¹)>Pb(21.30 mg·kg⁻¹)>Cu(18.97 mg·kg⁻¹)>Hg(0.11 mg·kg⁻¹)>Cd

(0.10 mg·kg⁻¹)。南流江2007—2012年期间的COD、石油类、重金属等入海污染物呈明显上升趋势,且2012年南流江携带入海污染物高达36425 t(黎树式等,2014;陈宪云等,2014)。本研究中,南江流口盐沼土壤Zn的含量明显高于其他重金属,主要受沿岸散布的Zn矿石开采与冶炼影响(熊文朋,2016),如Simon et al.(2001)研究表明Zn的硫化矿(如闪锌矿)暴露在空气中容易发生氧化反应,因此Zn易以溶解态、胶体态或吸附在悬浮颗粒上在迁移过程中发生沉积。而陈刚等(2017)对南流江河岸带土壤重金属元素的时空变化规律的调查结果也表明,南流江干流沿岸土壤污染处于重度污染水平,Zn、Pb、Cu污染存在极强等级的生态风险。茅尾海盐沼土壤重金属含量的分布规律为: Zn(100.44 mg·kg⁻¹)>Cr(37.29 mg·kg⁻¹)>Cu(24.30 mg·kg⁻¹)>Pb(14.59 mg·kg⁻¹)>Hg(0.10 mg·kg⁻¹)>Cd(0.06 mg·kg⁻¹)。茅尾海口养殖活动频繁,且海湾北部钦江和茅岭江汇入的工业与采矿废水、生活污水可能是造成Zn污染较高的主要原因(吴文成等,2014)。田海涛等(2014)研究也表明,茅尾海Pb、Cd、Hg的含量大都符合海水水质I类标准,Cu略超标,而Zn含量超II类标准,并指出Zn超标可能与上游水泥厂有关。Zn是植物生长发育必不可少的元素,但Zn含量超过某一限度时,会引起植物代谢紊乱,造成生长不良甚至死亡(孙健等,2006)。此外,人体长期经过食物链积累过量锌盐易引起贫血、生长延迟、肝细胞中细胞色素氧化酶活力降低等中毒现象(徐德福等,2009)。因此,两区域在治理和防治污染方面,应重视对Zn污染源的控制。

3.2 不同滩面盐沼土壤重金属分布的影响因素

从土壤重金属的空间分布含量变化看,南江流

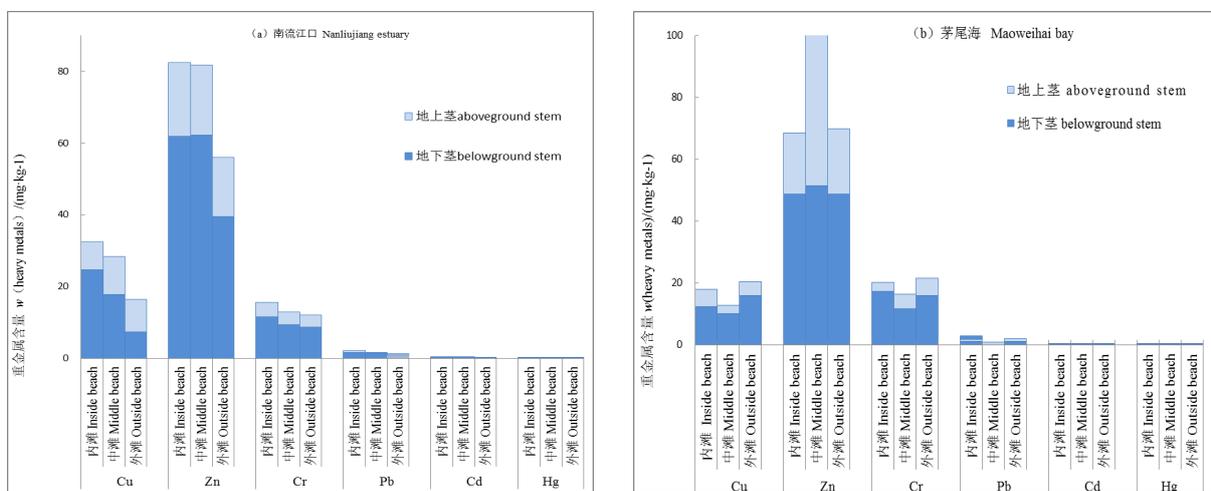


图3 两区域不同滩面荳芒体内重金属含量
Fig. 3 Concentration of heavy metals in different beach surfaces of *Cyperus malaccensis* in different regions

口3个滩面土壤重金属的空间分布总体上呈:内滩>中滩>外滩。沿岸集中的制糖、造纸、石化等企业,上游玉林福绵区的工业排污,中游博白县的造纸排污,下游合浦范围的造纸排污和酒精厂排污等都是构成南流江水质威胁的主要原因(代俊峰等,2011)。其从上游携带的大量的泥沙在入海口处由于受到红树林的阻滞,而在进入滨海区后呈流速降低的规律(甘华阳等,2013),大部分重金属和有机颗粒物在内滩处发生沉积,所以内滩处重金属含量最高。在海岸线方向,南流江口中滩滩宽,受波浪和潮流的作用较小,处于相对平稳状态,导致水动力作用较弱的中滩重金属含量次于内滩。而外滩受到潮汐与波浪的双重作用,形成的湍流减缓了泥沙的沉积,加快了外滩沉积物-水界面向水体扩散的过程(Wang et al., 2012),重金属从内滩到外滩含量逐渐降低,因而外滩重金属的含量最低。

茅尾海3个滩面土壤的重金属含量则表现不一致,总体趋势为:中滩>外滩>内滩。这可能与茅尾海的海湾形状、水动力条件以及污染源排放密切相关。茅尾海内可见大规模的牡蛎养殖筏,沿岸大面积的虾养殖塘,渔船燃用含铅油类燃料及使用化工原料是湾内重金属污染的主要来源(甘华阳等,2012;田海涛等,2014)。且海湾属于半封闭式,内宽口窄,沉积物随海洋的动力作用被波浪簸选,与从湾内北部汇入钦江、茅岭江河流径流作用发生交汇,大量泥沙在中滩处迅速沉积,重金属被沉积物吸附后也随之沉积,导致茅尾海中滩重金属含量最高(吴文成等,2014)。因此,重金属的沉积除了与污染源的扩散及近岸海域的水文特征密切相关外(Placenti et al., 2013),还与外海海洋动力作用和河流径流作用混合动力有关(Pelland et al., 2014;尹艳娥等,2014)。

3.3 盐沼荳苳对湿地土壤重金属的富集特征

研究发现,两区域荳苳对Cd均具有较强的富集作用,虽然其地上部富集量未达到人们常用的参考值 $100 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (John, 2002),但具备了耐镉植物抵御镉毒的某些特征和能力。茅尾海盐沼荳苳对Hg具有较强的富集作用,这可能与茅尾海口土壤Hg含量较高有关(含量超过中国土壤背景值,表1),而上游沿岸村民施用有机汞农药可能是造成江口盐沼土壤含汞量普遍偏高的另一个重要因素;Cu和Zn为生物体必须元素,且两区域土壤Zn均达到污染水平,但并未在荳苳体内富集,这可能与荳苳本身对重金属的选择吸收特性有关;Cr、Pb未在盐沼植物荳苳体内显著富集,原因可能是其为非必要元素,荳苳对其产生了抗性反应。王鹏等(2014)的研究表明,红树植物瓶花木(*Scyphiphora*

hydrophyllacea)对Cr、Zn和Cd的吸收能力较强,其生长和发育过程对湿地修复具有重要控制作用。而马宏瑞等(2009)在长江南京段的野外调查发现,野生茼蒿(*Crassocephalum crepidioides*)和芦蒿(*Artemisia Selengensis*)两种优势植物对Cd富集作用显著,其中桐蒿的BCF平均值高达2.57。Chaturvedi et al. (2012)则利用cDNA末端快速扩增技术从海蓬子(*Salicornia europaea*)中分离出了一条2型金属硫蛋白基因,后将其导入到大肠杆菌中进行特异性表达,结果发现重组细胞对Zn、Cu和Cd具有显著的积累能力,其中对Zn的积累能力最强。Cd和Hg均是环境中对植物具有显著毒性的污染物质(李富荣等,2013),但目前发现能富集Hg的植物相对较少。研究发现,芦竹(*Arundo donax*)在污染或非污染环境中都能较好地富集Cd和Hg(韩志萍等,2007)。本研究中,荳苳对Cd和Hg均具有较好的富集作用,且荳苳为中国华南滨海盐沼的重要原生种类,可以为中国滨海湿地Cd和Hg污染的治理提供生物修复资源。

3.4 荳苳地下茎与地上茎对重金属的富集规律

两区域荳苳体内6种重金属元素的分配模式均表现为地下茎的重金属积累能力显著强于地上茎(除南流江口Cd外),这一规律与阳承胜等(2002)研究韶关凡口人工湿地中荳苳地下茎与地上茎对Cu、Zn、Pb、Cd的积累分布规律相同,同时与杨阳等(2013)、马文超等(2016)研究滨海湿地植物体内重金属分配模式得出的结果一致。这可能是由于植物根系内皮组织(root endodermis)能阻碍重金属向光合作用部位的运输,使得大多数盐沼植物地上部分的重金属的含量相对较低,从而有利于将重金属排出体外,以减轻重金属对光合组织的毒害(Burke et al., 2000; Huang et al., 2006)。同时发现,两区域各滩面荳苳地上茎和地下茎对Cu、Zn和Cr都有较强的吸收和积累,这可能与两区域盐沼表层重金属Cu、Zn和Cr的含量相对较高有关,环境中重金属污染程度越严重,植物体内重金属的含量越高(Weis et al., 2004)。

4 结论

(1)两区域滨海盐沼土壤重金属整体污染程度较轻,其中南流江口土壤Zn为主要污染物,Cd和Hg为次要污染物,而Cu、Cr和Pb含量相对较少;而茅尾海土壤Zn为主要污染物,Cu和Hg为次要污染物,Cd、Cr和Pb含量则未达到污染水平。因此,两区域应加强对Zn污染源的监控与治理。

(2)两区域各滩面盐沼土壤重金属总量规律不同,南流江口3个滩面重金属含量总体差异显著,分布规律为:内滩>中滩>外滩;茅尾海3个滩面重

金属含量总体差异不显著, 分布规律为: 中滩>外滩>内滩。重金属的积累与污染源及水动力作用密切相关。

(3) 两区域滨海盐沼荳苳对重金属的富集能力与重金属种类、积累部位及滩面位置等因素有关。茅尾海口盐沼荳苳对 Cd 和 Hg 具有较强的富集作用, 而南流江口盐沼荳苳仅对 Cd 具有较强的富集作用; 研究区盐沼植物荳苳对 Cu、Zn、Cr、Pb 的富集系数均小于 1, 说明 Cu、Zn、Cr、Pb 未在盐沼植物荳苳体内显著富集。这一结论对于将荳苳用作华南滨海湿地 Cd 和 Hg 污染的修复材料具有一定意义。

(4) 两区域荳苳地上茎和地下茎对 6 种重金属的富集规律一致, 即地下茎显著高于地上茎; 且地上茎和地下茎对 Cu、Zn 和 Cr 具有较强的吸收和富集作用, 而对 Pb、Cd 和 Hg 的吸收和富集相对较弱。可见, 荳苳对 6 种重金属元素的富集既有同一性, 也有选择性。

5 展望

荳苳作为中国华南滨海常见的原生盐沼植物, 不仅能减轻重金属污染, 而且可以起到脱盐作用, 特别是关于其对重金属的富集特性逐渐引起国内学者的广泛关注。虽然目前有关荳苳对重金属耐性特征及其对重金属元素的富集规律研究已取得了一定的进展, 但关于其生理和分子生物学机理方面的研究还较缺乏。相对荳苳群落的定点调查而言, 涉及荳苳对不同重金属胁迫的耐受性、室内模拟实验重金属的富集规律以及影响荳苳重金属富集的因素方面的实验研究仍较少, 对某些种类重金属的耐性和富集特性尚不清楚。加强荳苳对重金属元素的单一或复合污染的响应研究, 将有助于深入了解其富集重金属的特征和机理, 进而更有效地降低滨海湿地生态系统的潜在风险。

参考文献:

BURKE D J, WEIS J S, WEIS P. 2000. Release of Metals by the Leaves of the Salt Marsh Grasses *Spartina alterniflora*, and *Phragmites australis* [J]. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 51(2): 153-159.

CARRASCO L, CARAVACA F, ALVAREZROGEL J, et al. 2006. Microbial processes in the rhizosphere soil of a heavy metals-contaminated Mediterranean salt marsh: a facilitating role of AM fungi [J]. *Chemosphere*, 64(1): 104-111.

CHATURVEDI A K, MISHRA A, TIWARI V, et al. 2012. Cloning and transcript analysis of type 2 metallothionein gene (SbMT-2) from extreme halophyte *Salicornia brachiata*, and its heterologous expression in *E. coli* [J]. *Gene*, 499(2): 280-287.

DUARTE B, CAETANO M, ALMEIDA P R, et al. 2010. Accumulation and biological cycling of heavy metal in four salt marsh species, from Tagus estuary (Portugal) [J]. *Environmental Pollution*, 158(5): 1661-1668.

GAO X, ZHOU F, CHEN C T. 2014. Pollution status of the Bohai Sea: an overview of the environmental quality assessment related trace metals [J]. *Environment International*, 62(4): 12-30.

GIKAS P, RANIERI E, TCHOBANOGLOUS G. 2014. Removal of iron, chromium and lead from waste water by horizontal subsurface flow constructed wetlands [J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 88(10): 1906-1912.

HUANG Y, LIU D, WANG Y, et al. 2006. Heavy metals accumulation by hydrophytes [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 25(5): 541-545.

IDASZKIN Y L, LANCELOTTI J L, BOUZA P J, et al. 2015. Accumulation and distribution of trace metals within soils and the austral cordgrass *Spartina densiflora* in a Patagonian salt marsh [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 101(1): 457-465.

JOHN B WILLIAMS. 2002. Phytoremediation in wetland ecosystems: progress, problems, and potential [J]. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 21(6): 607-635.

KUMARI M, TRIPATHI B D. 2015. Effect of *Phragmites australis*, and *Typha latifolia*, on biofiltration of heavy metals from secondary treated effluent [J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 12(3): 1029-1038.

PELLAND N A, STERLING J T, LEA M A, et al. 2014. Fortuitous encounters between seaglidgers and adult female northern fur seals (*Callorhinus ursinus*) off the Washington (USA) coast: upper ocean variability and links to top predator behavior [J]. *Plos One*, 9(8): e101268.

PENG R H, FANG C M, LI B, et al. 2011. *Spartina alterniflora* invasion increases soil inorganic nitrogen pools through interactions with tidal subsidies in the Yangtze Estuary, China [J]. *Oecologia*, 165(3): 797-807.

PLACENTI F, SCHROEDER K, BONANNO A, et al. 2013. Water masses and nutrient distribution in the Gulf of Syrte and between Sicily and Libya [J]. *Journal of Marine Systems*, 121-122(5): 36-46.

SIMON M, MARTÍN F, ORTIZ I, et al. 2001. Soil pollution by oxidation of tailings from toxic spill of a pyrite mine [J]. *Science of the Total Environment*, 279(1-3): 63.

SUN Z, MOU X, ZHANG D, et al. 2017. Impacts of burial by sediment on decomposition and heavy metal concentrations of *Suaeda salsa* in intertidal zone of the Yellow River estuary, China [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 116(1-2): 103-112.

WANG J N, ZHAO L, WEI H. 2012. Variable diffusion boundary layer and diffusion flux at sediment-water interface in response to dynamic forcing over an intertidal mudflat [J]. *Science Bulletin*, 57(13): 1568-1577.

WEIS J S, WEIS P. 2004. Metal uptake, transport and release by wetland plants: implications for phytoremediation and restoration [J]. *Environment International*, 30(5): 685-700.

WOOD N, HINE A C. 2007. Spatial Trends in Marsh Sediment Deposition Within a Microtidal Creek System, Waccasassa Bay, Florida [J]. *Journal of Coastal Research*, 23(4): 823-833.

陈刚, 赵银军, 胡宝清, 等. 2017. 河岸带重金属时空变化与土壤环境质量分析[J]. *环境污染与防治*, (9): 981-986.

陈宪云, 陆海生, 陈波. 2014. 广西海岸带海洋环境污染现状及防治对策[J]. *广西科学*, (5): 555-560.

陈元松. 2011. 盐度胁迫对荳苳·短叶荳苳萌芽的影响[J]. *安徽农业科学*, 39(17): 10396-10397.

代俊峰, 张学洪, 王敦球, 等. 2011. 北部湾经济区南流江水质变化分析 [J]. *节水灌溉*, (5): 41-44.

甘华阳, 梁开, 林进清, 等. 2013. 北部湾北部滨海湿地沉积物中砷与镉和汞元素的分布与累积[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 33(3): 15-28.

甘华阳, 张顺之, 梁开, 等. 2012. 北部湾北部滨海湿地水体和表层沉积物中营养元素分布与污染评价[J]. *湿地科学*, 10(3): 285-298.

韩志萍, 王趁义. 2007. 不同生态型芦竹对 Cd、Hg、Pb、Cu 的富集与分布[J]. *生态环境学报*, 16(4): 1092-1097.

何斌源, 潘良浩, 王欣, 等. 2014. 乡土盐沼植物及其生态恢复[M]. 北京: 中国林业出版社: 16-20.

黎树式, 戴志军, 葛振鹏, 等. 2014. 北部湾北部生态环境灾害变化研究 [J]. *灾害学*, 29(4): 43-47.

李富荣, 段琳琳, 王富华. 2013. 盐沼植物互花米草的重金属富集特性研究进展[J]. *生态环境学报*, 22(7): 1263-1268.

李家兵, 张秋婷, 张丽娟, 等. 2016. 闽江河口春季互花米草入侵过程对短叶荳苳土壤碳氮分布特征的影响[J]. *生态学报*, 36(12): 3628-3638.

廖日权, 许允厚, 钟秋平, 等. 2015. 茅尾海近岸表层沉积物中邻苯二甲酸酯的组成成分分布特征[J]. *生态环境学报*, 24(8): 1342-1347.

- 刘晓光, 缪锦来, 李光友, 等. 2006. 天津市清静黄河口河岸翅碱蓬的重金属富集特性[J]. 应用与环境生物学报, 12(1): 25-29.
- 马宏瑞, 张茜, 季俊峰, 等. 2009. 长江南京段近岸沉积物中重金属富集特征与形态分析[J]. 生态环境学报, 18(6): 2061-2065.
- 马文超, 刘媛, 孙晓灿, 等. 2016. 镉在土壤-香根草系统中的迁移及转化特征[J]. 生态学报, 36(11): 3411-3418.
- 潘良浩, 史小芳, 范航清. 2015. 荳苳 (*Cyperus malaccensis* Lam.) 生物量估测模型[J]. 广西科学院学报, (4):259-263.
- 潘良浩, 韦江玲, 陈元松, 等. 2012. 茅尾海荳苳及沉积物有机碳、全氮、全磷分布特征与季节动态[J]. 湿地科学, 10(4): 467-473.
- 全为民, 李春鞠, 沈益绿, 等. 2006. 崇明东滩湿地营养盐与重金属的分布与累积[J]. 生态学报, 26(10): 3324-3331.
- 宋创业, 胡慧霞, 黄欢, 等. 2016. 黄河三角洲人工恢复芦苇湿地生态系统健康评价[J]. 生态学报, 36(9): 2705-2714.
- 孙健, 铁柏清, 钱湛, 等. 2006. Cd、Pb、Cu、Zn、As 复合污染对杂交水稻苗的联合生理毒性效应及临界值[J]. 土壤通报, 37(5): 981-985.
- 田海涛, 胡希声, 谢健, 等. 2014. 茅尾海重金属分布特征及污染评价[J]. 海洋湖沼通报, (1): 161-168.
- 田海涛, 胡希声, 张少峰, 等. 2014. 茅尾海表层沉积物中重金属污染及潜在生态风险评价[J]. 海洋环境科学, 33(2): 187-191.
- 王鹏, 赵志忠, 马荣林, 等. 2014. 海南岛北部潮间带红树林对重金属的累积特征[J]. 生态环境学报, 23(5): 842-846.
- 韦江玲. 2011. 镉胁迫对荳苳生理生态特征的影响[J]. 安徽农业科学, 39(20): 12125-12128.
- 温晓君, 白军红, 贾佳, 等. 2015. 黄河三角洲典型潮间带盐沼土壤重金属含量及来源分析[J]. 湿地科学, 13(6): 722-727.
- 吴文成, 任露陆, 蔡信德, 等. 2014. 茅尾海沉积物重金属空间分布特征与生态风险[J]. 环境科学研究, 27(2): 147-156.
- 吴文成, 任露陆, 蔡信德. 2014. 茅尾海沉积物营养物质空间分布特征研究[J]. 农业环境科学学报, 33(1): 162-171.
- 熊丹, 林清, 赵银军, 等. 2017. 北部湾潮间带沉积物总 Hg 含量分布特征研究[J]. 环境科学与技术, 40(2): 195-199.
- 熊文朋. 2016. 北部湾潮间带重金属污染评价及其水环境容量[D]. 南宁: 广西师范学院.
- 徐德福, 李映雪, 李久海, 等. 2009. 几种挺水植物对重金属锌的抗性能力及其影响因素[J]. 生态环境学报, 18(2): 476-479.
- 阳承胜, 蓝崇钰, 束文圣. 2002. 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, 28(2): 101-104.
- 杨静, 张仁铎, 赵庄明, 等. 2015. 近 25 年广西北部湾海域营养盐时空分布特征[J]. 生态环境学报, 24(9): 1493-1498.
- 杨阳, 周正朝, 王欢欢, 等. 2013. 沔阳沿岸土壤和优势植物重金属富集特征和潜在生态风险[J]. 生态学报, 33(21): 6834-6843.
- 杨洋, 陈志鹏, 黎红亮, 等. 2016. 两种农业种植模式对重金属土壤的修复潜力[J]. 生态学报, 36(3): 688-695.
- 尹艳娥, 沈新强, 蒋玫, 等. 2014. 长江口及邻近海域富营养化趋势分析及与环境因子关系[J]. 生态环境学报, 23(4): 622-629.
- 张龙辉, 杜永芬, 王丹丹, 等. 2014. 江苏如东互花米草盐沼湿地重金属分布及其污染评价[J]. 环境科学, 35(6): 2401-2410.
- 赵一阳, 鄢明才. 1994. 中国浅海沉积物地球化学[M]. 北京: 科学出版社: 71-88.
- 郑立地, 肖蓉, 姚新颖, 等. 2015. 黄河三角洲潮汐区和生态恢复区湿地土壤特征和重金属分布[J]. 湿地科学, 13(5): 535-542.
- 郑武. 1993. 广西桂东北地区农业土壤环境若干重金属元素背景值的调查[J]. 农村生态环境, (4): 39-42.
- 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: 330-381.

Assessment of Heavy Metal Contamination in the Soil-plant System of *Cyperus malaccensis* Salt Marsh Wetland in Beibu Gulf

YANG Yan¹, XU Junmo², PAN Lianghao³

1. Nanning University, Nanning 530200, China; 2. College of Forestry, Guangxi University, Nanning 530005, China;

3. Guangxi Key Lab of Mangrove Conservation and Utilization//Guangxi Mangrove Research Center, Guangxi Academy of Sciences, Beihai 536000, China

Abstract: To comprehensively understand the environmental quality of the coastal waters of the Beibu Gulf, the soils of the Nanliu River estuary and Maowehai Bay wetland were selected as the research object. The field sampling of the plant and the corresponding soil was investigated. And the concentrations of heavy metals (Cu, Zn, Cr, Pb, Cd and Hg) in the soil were selected to study the contamination levels of heavy metals in different tidal flats locations (inside beach, middle beach and outside beach) and their accumulation in soil-plant system. The results showed that the concentration of Zn in the salt marshes soils was low in the two areas. The concentrations of Zn in the Nanliu River estuary nearly reached to moderate level of pollution, followed by Cd and Hg, while the other heavy metals did not exceed the standard level. And Maowehai Bay were slightly polluted by Zn, followed by Cu and Hg, while no pollution of Cr, Pb and Cd. The concentration of heavy metals in the different tidal flats locations was significantly different from that of the oceanic and river runoff, the concentration of heavy metals in Nanliu River estuary was inside beach>middle beach>outside beach, and the concentration of heavy metals in Maowehai Bay was middle beach>outside beach>inside beach. The results showed *Cyperus malaccensis* had strong concentrating-accumulating effects on Cd (BCF=1.66) and Hg (BCF=0.89) in Maowehai Bay, while it had strong effects only for enriching Cd (BCF=1.93) in Nanliu River estuary, and the rest of the heavy metals Cu, Zn, Cr, and Pb was not significantly enriched in *C. malaccensis*. Thus the plant *C. malaccensis* could be used for absorption of Cd and Hg elements in salt marshes. We also found that the enrichment ability of the belowground stems for the heavy metals was much higher than that of aboveground stems, the enrichment effects was different due to the identity of heavy metals and the accumulation ability by different tissue.

Key words: coastal salt marsh; *Cyperus malaccensis*; heavy metals; Nanliu River estuary; Maowehai Bay