

# 海南红树林湿地沉积物中重金属的累积\*

丘耀文, 余克服

热带海洋环境国家重点实验室(中国科学院南海海洋研究所), 广东 广州 510301

**摘要:** 于 2008 年在海南典型红树林湿地东寨港、三亚湾和亚龙湾采集沉积物样品, 使用原子吸收分光光度法(SOLAAR M6)分析沉积物中 Cu、Pb、Zn、Cd 和 Cr 的含量, 原子荧光光度法(AFS-8130)分析 Hg 和 As 的含量。表层沉积物中 Cu、Pb、Zn、Cd、Cr、Hg 和 As 的平均含量分别为  $14.8 \pm 9.2$ 、 $24.1 \pm 9.2$ 、 $57.9 \pm 36.5$ 、 $0.17 \pm 0.10$ 、 $29.6 \pm 20.4$ 、 $0.08 \pm 0.04$  和  $9.7 \pm 4.4 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  干重(DW), 目标化合物(除 Cd 外)的含量均具有东寨港高、三亚湾次之而亚龙湾低的特点, Cd 的含量各区域相近。与国内外其他典型红树林沉积物中重金属的含量相比, 本研究区域沉积物重金属含量处于中偏低的水平, 这与海南目前开发程度较低、人类活动影响较小相一致。柱状沉积物中 Cu、Pb、Zn、Cd、Cr 和 Hg 含量的剖面分布均具有表层稍低、中上层较高和底层相对低的特征, 而 As 的含量呈现表层较高、中上层低和底层相对高的特点。潜在风险分析显示, 本研究区域沉积物中重金属(As 除外)目前污染较轻, 对生态环境影响较小。

**关键词:** 重金属; 沉积物; 红树林; 湿地; 海南

中图分类号: P734.42; P736.41; X503.225 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2011)02-0102-07

## Accumulation of heavy metals in sediment of mangrove wetland from Hainan Island

QIU Yao-wen, YU Ke-fu

State Key Laboratory of Oceanography in the Tropics (South China Sea Institute of Oceanology, CAS), Guangzhou 510301, China

**Abstract:** Sediment samples were collected in 2008 from the Dongzhai Harbor, Sanya Bay, and Yalong Bay, typical mangrove wetlands of Hainan Island. The concentrations of Cu, Pb, Zn, Cd, and Cr were analyzed using the Atomic Absorption Spectrometer (SOLAAR M6), and Hg and As, using the Atomic Fluorescence Spectrometer (AFS-8130). The average concentrations of Cu, Pb, Zn, Cd, Cr, Hg, and As in surface sediments are  $14.8 \pm 9.2$ ,  $24.1 \pm 9.2$ ,  $57.9 \pm 36.5$ ,  $0.17 \pm 0.10$ ,  $29.6 \pm 20.4$ ,  $0.08 \pm 0.04$ , and  $9.7 \pm 4.4 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  dry weight, respectively. The levels of target chemicals except for Cd in sediments show the following order: Dongzhai Harbor > Sanya Bay > Yalong Bay, while the levels of Cd were generally similar among the studying areas. Compared with those from other typical mangrove wetlands of the world, heavy metal levels in sediments from these studying areas are in low- to median-levels, which is consistent with the factors that Hainan Island is still in low exploitation and its mangroves suffer little impact from human activities. The vertical profiles of Cu, Pb, Zn, Cd, Cr, and Hg concentrations in core sediments show the highest values in the middle-upper layers and the lowest values in the bottom layers, with the in-between values in the surface layers; while the vertical profiles of As have the highest concentrations in the bottom-layer sediments and the lowest concentrations in the middle- to upper-layer sediments, and the concentrations of surface sediments are in between the two. Potential risk assessment shows that the pollution status of all target heavy metals except As is still low and therefore their ecological and environmental effects are also low.

**Key words:** heavy metal; sediment; mangrove; wetland; Hainan Island

收稿日期: 2010-03-29; 修订日期: 2010-04-20. 孙淑杰编辑

基金项目: 海洋公益性行业科研专项(200705026)

作者简介: 丘耀文(1965—), 广东省平远县人, 博士, 研究员, 从事海洋环境生态污染研究。Email: yqiu@scsio.ac.cn

\*中国科学院南海海洋研究所的张乔民研究员、张江涛博士和海南东寨港红树林保护站的陈元海护林员在现场采集样品过程中大力协助, 谨致谢忱。

红树林生态系统是地球上生产力最高的海洋四大自然生态系统之一(红树林、珊瑚礁、盐沼、上升流),也是世界上最濒危的生态系统之一<sup>[1]</sup>。据报道,全球超过 35% 的红树林已经消失,且以每年 1%—2% 的速度在减少<sup>[2]</sup>;海南岛红树林面积也由解放初期约  $1 \times 10^4 \text{hm}^2$  减少为目前的  $4772 \text{hm}^2$ <sup>[3]</sup>。红树林地处河口与海岸带,是陆地与海洋之间的过渡带,因此通常是陆源污染物质的汇集地。红树林独特的性质诸如高生产力(产生大量的有机碎屑)和沉积物中缺氧的还原状态(硫酸盐还原为硫化物),使红树林成为人类产生的很多污染物(如高营养盐、重金属和持久性的有机污染物质)理想的吸收和储存场所,红树林湿地俨然成为天然的污水处理厂;而随着污染物质的大量汇集,红树林湿地也可由陆源污染物的汇转变为污染物的源。对海南岛红树林湿地中毒害物质的相关研究,将有助于认识海南岛红树林的生态环境现状,为海南红树林生态系统及其沿岸海洋生态系统的可持续利用提供科学依据。

国内外红树林中毒害物质的研究,主要集中在红树林湿地沉积物中重金属与持久性有机污染物质(POPs)的分布特征、红树植物中污染物质的生物累积规律、环境因素(如 pH、Eh、溶解氧 DO、总硫、总有机碳 TOC 和营养物质等)对红树植物生长和污染物累积的影响等方面,毒害物质对红树植物生长与污染物生物累积的胁迫试验也见诸报道。研究还发现,微生物活动对毒害物质的赋存形式有重要影响(如分解有机质使其易与毒害物质络合形成稳定络合物),某些微生物亦可直接降解 POPs。目前,海南有关红树林生态系统中重金属的相关研究很少<sup>[4-6]</sup>,而 POPs 的相关研究仅见海南岛东寨港表层沉积物中有机氯农药的分布<sup>[7]</sup>以及最近海口与文昌附近红树林湿地沉积物中多环芳烃的研究报道<sup>[6]</sup>。

本研究针对红树林生态系统这一国际生态环境科学所关注的重点领域,考虑海南岛是我国红树林生态系统重要的保护区域,选择典型重金属(Cu、Pb、Zn、Cd、Cr、Hg 和 As)为研究对象,分析海南岛红树林湿地沉积物中重金属含量及其时空分布特征,评估重金属污染对海南红树林的潜在生态危害,为海南红树林的保护与可持续利用提供科学依据。本研究开展于大规模开发海南国际旅游岛前夕,因此也希望研究结果可作为海南红树林湿地沉积物中重金属的本底参考值。

## 1 研究区域和研究方法

### 1.1 研究区域

海南岛拥有全国红树林面积的 33%( $4772 \text{hm}^2$ )和我国 37 种红树、半红树植物中的 35 种<sup>[3,8]</sup>;海南东寨港 1986 年建立了第一个国家级红树林湿地自然保护区,1992 年其被列入国际重要湿地名录。海南东寨港红树林保护区位于海南省海口市境内,属热带海洋性气候,年均气温  $23.8^\circ\text{C}$ ,最冷月均温  $12.1^\circ\text{C}$ ,极端最低温度  $2.8^\circ\text{C}$ ,海水表层年平均温度  $24.5^\circ\text{C}$ ,年平均降雨量 1676mm,潮汐为不规则全日潮,平均潮差约 1m,其中红树林面积  $1733 \text{hm}^2$ ,主要植物种类有白骨壤 *Avicennia marina*、桐花树 *Aegiceras corniculatum*、木榄 *Bruguiera gymnorhiza*、秋茄 *Kandelia candel*、角果木 *Ceriops tagal*、海莲 *Bruguiera sexangula*、海漆 *Excoecaria agallocha*、榄李 *Lumnitzera racemosa*、红海榄 *Rhizophora stylosa*、老鼠筋 *Acanthus ilicifolius* 等<sup>[8-11]</sup>。三亚湾红树林区位于穿越三亚市区注入三亚湾湾顶的三亚河下游,是我国分布最南和热带特性典型的红树林区,红树林面积  $14 \text{hm}^2$ ,红树 *Rhizophora apiculata* 和白骨壤是群落的优势树种,1990 年设立三亚河红树林市级自然保护区,作为三亚市热带滨海旅游城市独特的自然风景资源而受到保护<sup>[8, 12-13]</sup>。亚龙湾红树林受人类活动影响较小,目前仅有一些酒店。随着海南旅游岛的加速开发,该区生态环境可能发生显著变化。目前成立了亚龙湾红树林市级自然保护区,其中红树林面积为  $50 \text{hm}^2$ ;主要红树植物有榄李、角果木和红海榄<sup>[8, 14]</sup>。

### 1.2 样品采集与研究方法

于 2008 年 10 月在海南岛典型红树林区东寨港、三亚湾和亚龙湾选取 10 个站点(DZ1、DZ2、DZ3、DZ4、DZ5、DZ6、SY1、SY2、SY3 和 YL2),采集 10 个柱状沉积物样品,采样位置见表 1 与图 1。柱状沉积物使用重力柱状采样器(采样器内径 8cm),采样时注意防止沉积物扰动,柱状沉积物现场每隔 5cm 切片分装于密封的 PTFE 塑料袋并放入冰壶,带回实验室,  $-20^\circ\text{C}$  下保存。沉积物经干燥、研磨、过筛(100 目尼龙筛)备用,采样和分析方法参照《海洋监测规范》(GB17378.5—2007)<sup>[15]</sup>。沉积物中 Cu、Pb、Zn、Cd 和 Cr 的含量采用原子吸收分光光度法(SOLAAR M6, UK)分析, Hg 和 As 的含量采用原子荧光光度法(AFS-8130, 北京)分析,同时分析中国近海沉积物标样(GBW07314);沉积物中 TOC 的含量则采用 CHN 元

素分析仪(Carlo-Erba model 1108, Perkin Elmer, USA)分析, 其中沉积物(46 个样品)预先用 10% HCl 处理并

在 60 °干燥 1d, 去除无机碳。采用统计软件 SPSS 计算沉积物中重金属之间及其与 TOC 之间的相关性。

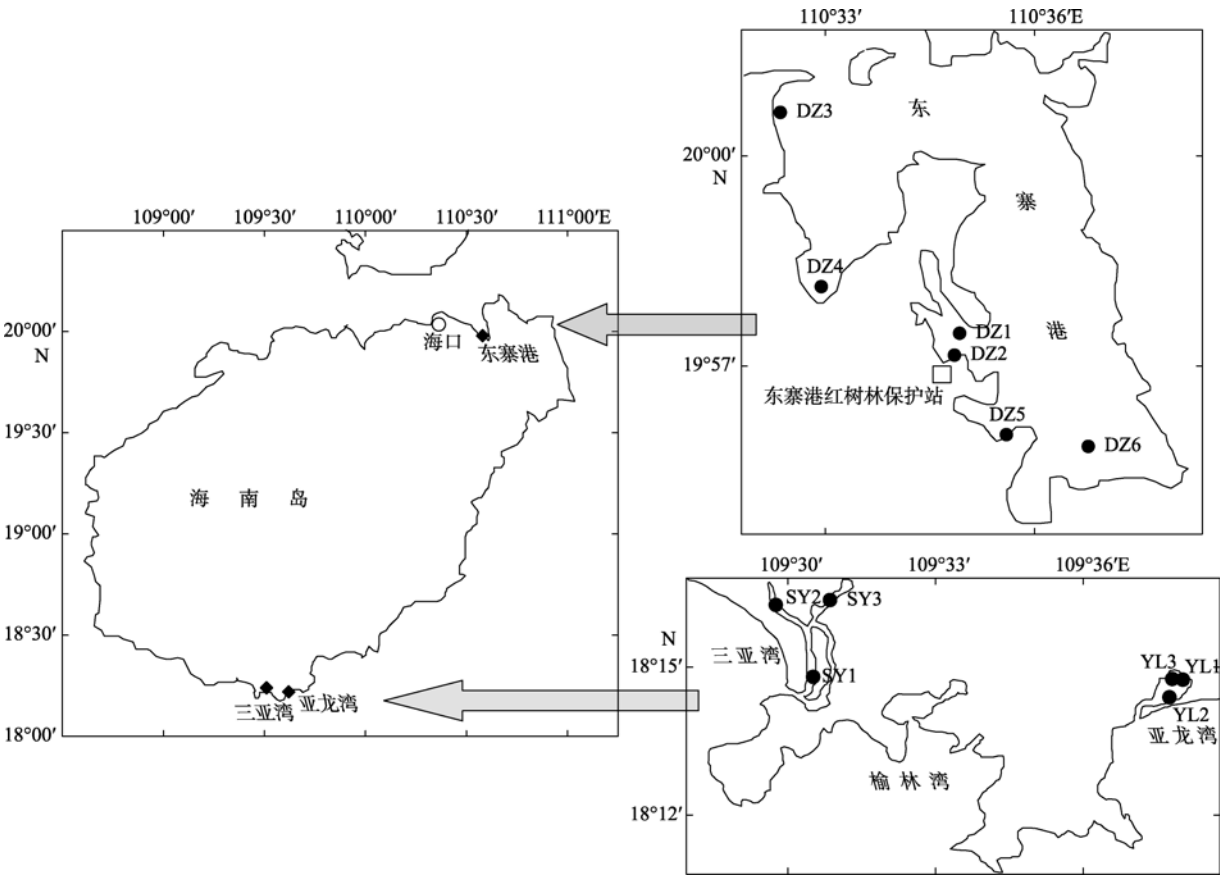


图 1 海南红树林湿地采样站位  
Fig. 1 Sampling sites in mangrove wetlands of Hainan Island

表 1 海南红树林沉积物采样位置、沉积物类型及表层沉积物中总有机碳含量  
Tab. 1 Sampling locations of mangrove sediment, sediment types and TOC contents of surface sediments in Hainan Island

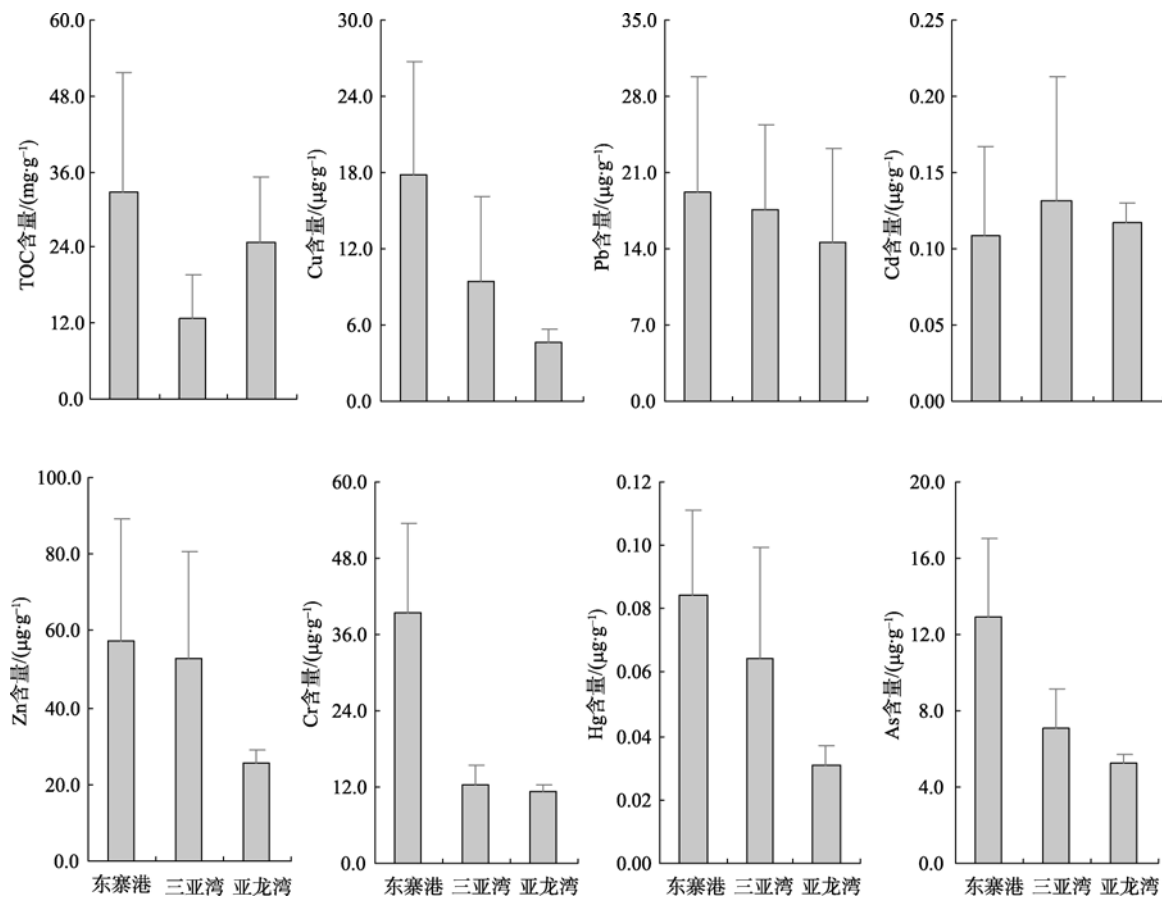
地点	样品数	东经	北纬	沉积物类型	TOC 含量/(mg · g <sup>-1</sup> )	
东寨港	DZ1	9	110°34'12"	19°56'15"	粉砂	51.1
	ZD2	7	110°34'10"	19°56'12"	粉砂	55.1
	DZ3	7	110°32'04"	20°00'08"	粉砂	7.4
	DZ4	9	110°32'16"	19°57'14"	黏土质粉砂	59.0
	DZ5	5	110°35'06"	19°55'12"	黏土质粉砂	30.9
	DZ6	8	110°36'13"	19°55'14"	黏土质粉砂	13.1
三亚湾	SY1	3	109°30'09"	18°14'07"	砂质粉砂	25.6
	SY2	5	109°29'11"	18°16'04"	黏土质粉砂	8.8
	SY3	5	109°30'14"	18°16'05"	粉砂质砂	18.5
亚龙湾	YL2	6	109°37'01"	18°13'05"	砂质粉砂	39.0

2 结果与讨论

2.1 沉积物中重金属含量的空间分布特征

海南东寨港、三亚湾和亚龙湾典型红树林区表层沉积物中 Cu、Pb、Zn、Cd、Cr、Hg 和 As 的平均含量分别为 14.8±9.2、24.1±9.2、57.9±36.5、

0.17±0.10、29.6±20.4、0.08±0.04 和 9.7±4.4μg · g<sup>-1</sup> 干重(DW)。海南 3 个典型红树林区域沉积物中重金属与 TOC 的平均含量见图 2, 其中 Cu、Pb、Zn、Cr、Hg 和 As 的平均含量均具有东寨港高、三亚湾次之、亚龙湾低的特点; Cd 的含量各区域相近。

图2 海南红树林湿地沉积物中重金属与有机碳含量变化( $n=46$ )Fig. 2 Variations of heavy metals and TOC contents in the mangrove sediments of Hainan Island ( $n=46$ )

海南与国内外典型红树林沉积物中重金属的平均含量汇总于表 2。与国内外其他典型红树林沉积物中重金属的含量相比, 本研究区域重金属含量处于中偏低的水平, 这与海南目前开发程度较低、人类活动影响较小相一致。海南东寨港、三亚湾和亚龙湾沉积物中 Cu、Pb、Zn、Cr 和 As 的平均含量均低于海南海口与文昌红树林区域中重金属的含量, Hg 的含量基本持平, 主要原因是海口与文昌临近海口市, 工农业废水废气和生活污水排放量相对较大, 导致海口与文昌红树林沉积物中目标污染物含量较高。从表 2 可见, 本研究区域中目标重金属的含量比广西北海与英罗湾红树林区域沉积物中重金属的含量高<sup>[6, 18]</sup>, 但比福建漳江口、九龙江与厦门<sup>[6, 16-17]</sup>以及广东湛江与福田红树林区域沉积物中的重金属含量低<sup>[6, 19]</sup>; 本研究区域中多数重金属的含量稍高于国外如澳大利亚与哥伦比亚典型红树林沉积物中重金属的含量<sup>[21-22]</sup>, 但远低于香港 Mai Po、印度与巴西红树林沉积物中的重金属含量<sup>[20, 23-24]</sup>。

## 2.2 柱状沉积物中重金属含量的剖面分布

海南东寨港红树林保护站附近区域 DZ1 号站

(110°34.744 E, 19°56.927 N)柱状沉积物中重金属含量的剖面分布见图 3, 对比附近红树林区域沉积物的沉积速率( $4.1\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$ )<sup>[25]</sup>, 本研究 45cm 的柱状沉积物相对应沉积时间约为 110a。从图 3 可看出, Cu、Pb、Zn、Cd、Cr 和 Hg 的含量均具有最表层稍低、中上层较高和底层相对低的特征, 而 As 的含量具有最表层较高、中上层低和底层相对高的特点; 柱状沉积物中 TOC 含量与沉积物深度呈现明显的负相关, 其与目标重金属(除 As 外)垂直分布规律(图 3)存在一定的正相关性, 即 TOC 含量高、重金属含量相应也较高。

## 2.3 沉积物中重金属之间及其与环境参数的相关性分析

沉积物中重金属之间及其与 TOC 之间的相关系数见表 3, 重金属元素 Cu、Zn、Cr、Hg 和 As 之间均存在显著的相关性, 是具有同源性的证据之一; Pb 和 Cd 与其他重金属元素的相关性稍弱。沉积物中重金属的含量主要受环境背景值、人类活动输入和特定环境因素的影响。海南目前尚处于开发初期, 工业污染相对较轻。海南东寨港、三亚湾和亚龙湾

表 2 海南与国内外典型红树林沉积物中重金属的平均含量( $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  干重)  
Tab. 2 Average concentrations of heavy metals in the mangrove sediments of Hainan Island and some typical regions of the world ( $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ , DW)

地 点	Cu	Pb	Zn	Cd	Cr	Hg	As	参考文献
海南东寨港	17.9	19.1	57.3	0.11	39.6	0.08	12.9	本研究
海南三亚湾	9.5	17.5	53.1	0.13	12.4	0.06	7.1	本研究
海南亚龙湾	4.7	14.7	25.7	0.12	11.4	0.03	5.2	本研究
海南文昌	27	30	89	ND	109	0.06	15	[6]
海南海口	27	33	92	ND	122	0.06	13	[6]
福建漳江口	56.93	ND	259.1	ND	61.82	ND	ND	[16]
福建九龙江	26.6	101	138	0.12	ND	ND	ND	[17]
福建厦门	37	95	194	ND	56	0.12	14	[6]
广西北海	3	7	9	ND	9	<0.04	<3	[6]
广西英罗湾	18.9	10.0	46.6	0.077	9.27	ND	ND	[18]
广东湛江	19	36	69	ND	68	0.04	16	[6]
广东福田	42.02	70.60	139.1	2.00	ND	ND	ND	[19]
广东福田	93	77	252	ND	81	0.17	15	[6]
Mai Po, 香港	78.5	79.2	240	2.62	39.2	ND	ND	[20]
Queensland, 澳大利亚	1.0—12	36	23—56	0.6	1—72	ND	ND	[21]
Cienaga Grande, 哥伦比亚	23.3	12.6	91	ND	13.2	ND	ND	[22]
Pichavaram, 印度	43.4	11.2	93	6.6	141.2	ND	ND	[23]
巴西沿海	98.6	160.8	483	1.32	42.4	ND	1.28	[24]

注：ND 表示未测。

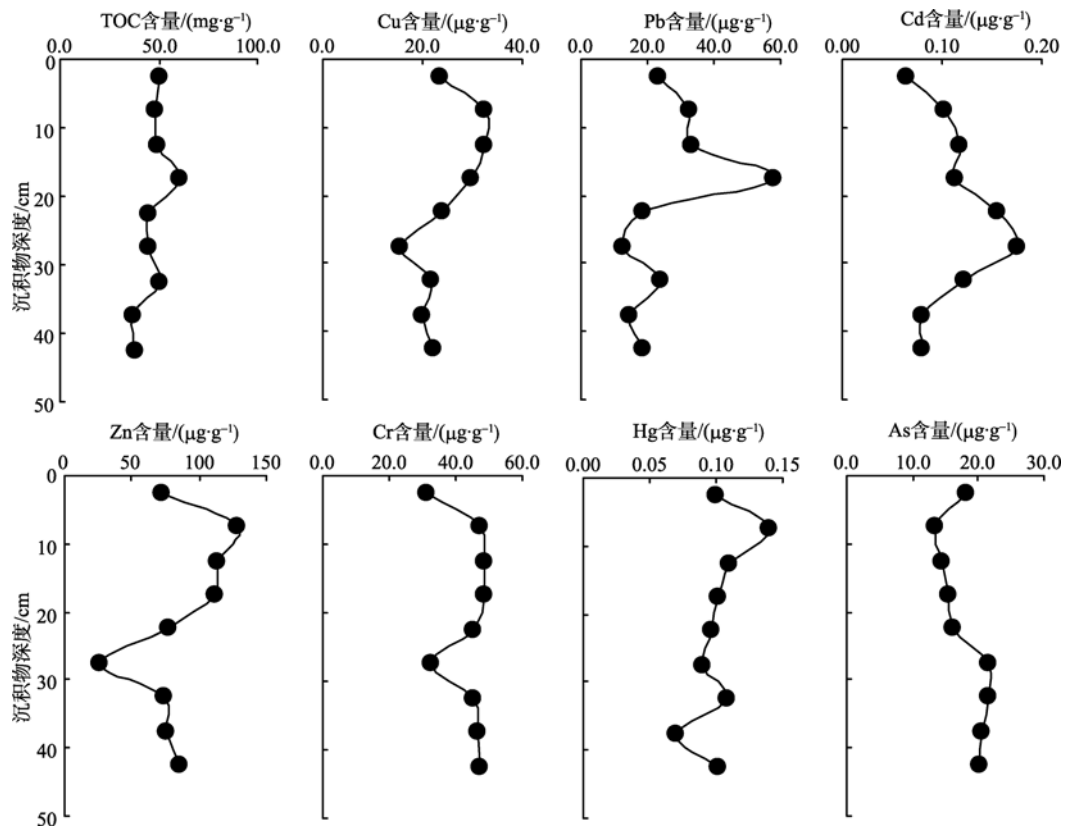


图 3 海南东寨港红树林湿地柱状沉积物中重金属含量分布  
Fig. 3 Profiles of heavy metals in the core sediment of the mangrove wetland in the Dongzhai Harbor of Hainan Island

红树林沉积物中重金属的污染主要来自农业生产中 使用的含重金属的化肥和农药，其中东寨港养殖业

发达，饵料和排泄物对沉积物中重金属的含量有重要贡献，而三亚河流经三亚市区，城市污水是重金属的来源之一。此外，海南船舶往来较多，船体防护漆中重金属的不断释放可能是另一个重要来源。自

20 世纪 90 年代有机锡化合物(TBT)被禁止使用以来，铜粉和氧化亚铜等被大量在防护漆中使用。有研究报道，船体防护漆中的 Cu 和 Zn 的含量分别高达 300 和 100g · kg<sup>-1</sup>[26]。

表 3 沉积物中重金属含量与总有机碳间相关系数  
Tab. 3 Correlation coefficients between the concentrations of heavy metals and TOC in the sediment

	Cu	Pb	Cd	Zn	Cr	Hg	As	TOC
Cu	1.000							
Pb	0.387*	1.000						
Cd	0.233	0.234	1.000					
Zn	0.752*	0.596*	0.312	1.000				
Cr	0.713*	0.210	0.078	0.482*	1.000			
Hg	0.775*	0.407*	0.337	0.761*	0.728*	1.000		
As	0.522*	0.225	-0.007	0.513*	0.632*	0.601*	1.000	
TOC	0.601*	0.296	0.196	0.385*	0.618*	0.545*	0.398*	1.000

注：“\*”表示  $p<0.01$ ,  $n=46$ 。

红树林区域沉积物中 TOC 的含量与红树植物的凋落量密切相关。海南东寨港、三亚湾和亚龙湾典型红树林区沉积物中 TOC 含量(28.8±18.0mg · g<sup>-1</sup>DW)与珠江沉积物中有机碳平均值(26.2mg · g<sup>-1</sup>DW)相近，低于中国东部河流沉积物的有机碳平均含量(11.6mg · g<sup>-1</sup>DW)[27]。本研究区域沉积物中重金属元素与 TOC 之间具有显著的相关性(表 3)，环境中的重金属易与有机碳(主要为腐殖质)通过表面吸附、阳离子交换反应和螯合反应，形成金属有机络合物而从水体中移出[28-29]。沉积物中重金属的含量还与沉积物的组成密切相关，黏土含量越高，吸附金属的量也越多。本研究区域中沉积物多为粉砂或黏土质粉砂(经验判断，见表 1)，变化不大；对金属的吸附能力虽然较弱，但影响一致。

2.4 重金属对红树林生态环境的影响分析

许多微量(金属)元素(统称为重金属)在低浓度下是生物的营养元素，但浓度过高又对生物有毒害作用，尤其是对生物幼体(如鱼卵、仔鱼)的生存、发育有重大影响。重金属的毒害作用多数通过与生物体中含巯基、羟基及氨基的蛋白质分子结合以及金属元素间的取代(如镉取代锌)，从而抑制一些酶系统的活性，最终导致生物体中毒[30-31]。重金属中毒事件时有发生，如 1947、1953、1958 年在日本分别因镉、汞、砷引起的中毒事件，1958 年在加拿大发生的铅中毒事件，引起公众的极大关注。重金属由于只能从一种形态转化为另一种形态而不能去除，且具有生物富集和放大作用而一直备受国内外环境

学家的关注。尤其是近年来，各种工业废水固体废物浸出液直接排入水体，其中有毒重金属的含量越来越高，重金属污染越来越严重。

海南红树林湿地沉积物中重金属可能对生态环境造成的影响，采用美国国家海洋与大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)推荐的沉积物中重金属生物安全浓度基准，其中，小于 ERL(effects range-low)和大于 ERM (effects range-median)分别定义为对生物较少(20%—30%)和经常(40%—60%)产生负效应的某一(类)化合物的含量指标，介于两者之间则表示对生物可能产生负效应。其中，沉积物中 Cu、Pb、Zn、Cd、Cr、Hg 和 As 的 ERL 和 ERM 值分别为 34、46.7、150、1.2、81、0.15、8.2 和 270、218、410、9.6、370、0.71、70μg · g<sup>-1</sup>DW[32]。结果显示，位于本研究区域的海南红树林湿地沉积物样品中所有的重金属含量均小于 ERM 值，样品中 Pb、Zn、Cd、Cr 和 Hg 的含量均小于 ERL 值，2%与 70%的样品中 Cu 和 As 超过 ERL 值，表明本研究区域沉积物中重金属(As 除外)目前污染较轻，对生态环境影响较小。As 的污染主要位于东寨港，三亚湾次之，而亚龙湾 As 的污染较小。东寨港红树林区域水产养殖较密集，沉积物中 As 污染部分可能来自养殖饵料，潜在的其他污染源有待进一步查明。

3 小结

海南东寨港、三亚湾和亚龙湾典型红树林湿地沉积物中的重金属含量与国内外其他典型红树林区

沉积物中重金属的含量相比,处于中偏低的水平。本研究区域沉积物中重金属(As 除外)目前污染较轻,对生态环境影响较小。海南红树植物(根、茎、叶和

果)重金属生物累积的相关研究(分析数据正在处理中),对深入理解海南红树林重金属的污染及其迁移转化规律有重要意义。

## 参考文献

- [1] TERCHUNIAN A, KLEMAS V, ALVAREZ A, et al. Mangrove mapping in Ecuador: The impact of shrimp pond construction [J]. *Environmental Management*, 1986, 10: 345–350.
- [2] ELLISON A M. Mangrove ecology — applications in forestry and costal zone management [J]. *Aquatic Botany*, 2008, 89: 77–78.
- [3] 莫燕妮, 庚志忠, 苏文拔. 海南岛红树林调查报告[J]. *热带林业*, 1999, 27(1): 19–22.
- [4] 广东省海岸带和海涂资源综合调查组. 广东省海岸带和海涂资源综合调查报告[M]. 北京: 海洋出版社, 1987: 267–333.
- [5] 辛琨, 赵广孺, 孙娟, 等. 红树林土壤吸附重金属生态功能价值估算——以海南省东寨港红树林为例[J]. *生态学杂志*, 2005, 24(2): 206–208.
- [6] VANE C H, HARRISON I, KIM A W, et al. Organic and metal contamination in surface mangrove sediments of South China [J]. *Mar Pollut Bull*, 2009, 58: 134–144.
- [7] 刘华峰, 祈士华, 苏秋克, 等. 海南岛东寨港表层沉积物中有机氯农药组成特征[J]. *中国环境科学*, 2007, 27(1): 97–101.
- [8] 林鹏. 中国红树林生态系[M]. 北京: 科学出版社, 1997: 184, 212.
- [9] 刘美龄, 叶勇, 曹长青, 等. 海南东寨港红树林土壤粒径分布的分形特征及其影响因素[J]. *生态学杂志*, 2008, 27(9): 1557–1561.
- [10] 王文卿, 王瑁. 中国红树林[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 1–30.
- [11] 廖宝文. 海南东寨港红树林湿地生态系统研究[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2009: 2–9.
- [12] 晏光勇, 周小飞, 黎军, 等. 三亚河红树林现状及保护[J]. *三亚环境资源*, 1998(1/2): 21–23.
- [13] 张乔民, 陈永福. 海南三亚河红树凋落物产量与季节变化研究[J]. *生态学报*, 2003, 23(10): 1977–1983.
- [14] 王勇. 三亚重设亚龙湾红树林保护区[N]. *海南日报*, 2009-04-16(2).
- [15] 国家质量技术监督局. 中华人民共和国国家标准. 海洋监测规范(GB17378.5—2007) [S]. 2007.
- [16] 谢陈笑, 丁振华, 高卫强, 等. 漳江口红树林区沉积物中 Cu、Zn、Cr 的分布及形态特征[J]. *厦门大学学报: 自然科学版*, 2006, 45(增刊): 100–104.
- [17] 郑文教, 王文卿, 林鹏. 九龙江口桐花树红树林对重金属的吸收与累积[J]. *应用与环境生态学报*, 1996, 2(3): 207–213.
- [18] 郑文教, 连玉武, 郑逢中, 等. 广西英罗湾红海榄林重金属元素的累积及动态[J]. *植物生态学报*, 1996, 20(1): 20–27.
- [19] 章金鸿, 李玟, 潘南明. 深圳福田红树林对重金属 Cu、Pb、Zn、Cd 的吸收、累积与循环[J]. *云南环境科学*, 2000, 19: 53–56.
- [20] TAM N F Y, WONG W S. Spatial variation of heavy metals in surface sediments of Hong Kong mangrove swamps [J]. *Environmental Pollution*, 2000, 110: 195–205.
- [21] PREDA M, COX M E. Trace metal occurrence and distribution in sediments and mangroves, Pumicestone region, southeast Queensland, Australia [J]. *Environment International*, 2002, 28: 433–449.
- [22] PERDOMO L, ENSMINGER I, ESPINOS L F, et al. The mangrove ecosystem of the Ciénaga Grande de Santa Marta (Colombia): Observations on regeneration and trace metals in sediment [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 1999, 37: 393–403.
- [23] RAMANATHAN A L, SUBRAMANIAN V, RAMESH R, et al. Environmental geochemistry of the Pichavaram mangrove ecosystem (tropical), southeast coast of India [J]. *Environmental Geology*, 1999, 37: 223–233.
- [24] GEHRIG H A, PINTO F N, MOREIRA I, et al. Heavy metals and methylmercury in a tropical coastal estuary and a mangrove in Brazil [J]. *Organic Geochemistry*, 2003, 34: 661–669.
- [25] 张乔民, 温孝胜, 宋朝景, 等. 红树林潮滩沉积速率测量与研究[J]. *热带海洋*, 1996, 15(4): 57–62.
- [26] SINGH N, TURNER A. Trace metals in antifouling paint particles and their heterogeneous contamination of coastal sediments [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2009, 58: 559–564.
- [27] 陈静生, 王飞越, 宋吉杰, 等. 中国东部河流沉积物中重金属含量与沉积物主要性质的关系[J]. *环境化学*, 1996, 15(1): 8–14.
- [28] ROUTER J H, RERDUE E M. Importance of heavy metal-organic matter interactions in natural waters[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1977, 41: 325–334.
- [29] QIU Y W, ZHU L S, LI M Q. Distribution characteristics of heavy metals and grain size of sediments from Hailing Bay, China [J]. *Marine Science Bulletin*, 2005, 17(1): 69–76.
- [30] 廖自基. 微量元素的环境化学及生物效应[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1992: 1–520.
- [31] TELIŠMAN S, CVITKOVIĆ P, JURASOVIĆ J, et al. Semen quality and reproductive endocrine function in relation to biomarkers of lead, cadmium, zinc and copper in men [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2000, 108: 45–53.
- [32] 丘耀文, 颜文, 王肇鼎, 等. 大亚湾海水、沉积物和生物体中金属元素分布及其生态危害[J]. *热带海洋学报*, 2005, 24(5): 69–76.