

中国主要红树林湿地沉积物中汞的分布特征

丁振华, 刘金铃, 李柳强, 林慧娜, 吴浩, 虎贞贞

(厦门大学生命科学学院, 厦门 361005)

摘要: 通过对我国主要红树林区表层沉积物中总汞含量和环境因素的测定, 研究了红树林湿地沉积物中汞的分布规律和影响因子之间的关系. 结果表明, 我国红树林湿地沉积物中总汞的含量范围是 2.3~903.6 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均值为 $(197\pm 137.6)\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 福建洛阳桥 $(467.5\pm 68.8)\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 、浮宫 $(438.2\pm 147.0)\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 、鹅湾 $(264.3\pm 89.2)\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 、姚家屿 $(125.4\pm 27.1)\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 海南三亚 $(164.8\pm 143.9)\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 、东寨港 $(314.1\pm 335.7)\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 广东深圳 $(179.9\pm 7.7)\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 等 7 个红树林区的汞含量均显著高于当地土壤背景值, 汞污染严重; 而福建云霄 $(63.3\pm 43.9)\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 、广东高桥 $(178.6\pm 127.0)\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 、广西大冠沙 $(26.1\pm 18.8)\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 、山口 $(73.8\pm 21.1)\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 、北仑河口 $(117.8\pm 51.4)\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 、钦州湾 $(147.5\pm 107.6)\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 等红树林区汞含量接近于背景值, 基本无污染. 红树林湿地中汞含量的差异是众多环境因素和人类活动相互交叉影响的结果. 红树林湿地中, pH 值、粒度、有机质、 $\text{F}\phi/\text{Hg}$ 、 Mn/Hg 与总汞含量显著相关. 其中, 黏粒和 $\text{F}\phi/\text{Hg}$ 是影响沉积物中汞含量最显著的因素. 环境因素对总汞含量的综合影响作用, 可以用线性回归方程表示.

关键词: 红树林; 汞; 沉积物; 湿地; 分布

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)08-2210-06

Distribution of Mercury in Surficial Sediments from Main Mangrove Wetlands of China

DING Zhen-hua, LIU Jin-ling, LI Liu-qiang, LIN Hui-na, WU Hao, HU Zhen-zhen

(School of Life Science, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: Surficial sediment samples were collected from main mangrove wetlands of China, mercury, pH, salinity, organic matters, grain size, $\text{F}\phi/\text{Hg}$, Mn/Hg were analyzed. Mercury content ranges from 2.3 to 903.6 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, with a average of $(197\pm 137.6)\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$. Compared with local background level, serious Hg pollution with high Hg content was found in 7 areas, including Luoyangqiao $(467.5\pm 68.8)\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, Fugong $(438.2\pm 147.0)\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, Ewan $(264.3\pm 89.2)\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, Yaojiayu $(125.4\pm 27.1)\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, Fujian Province; Sanya $(164.8\pm 143.9)\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, Dongzhaigang $(314.1\pm 335.7)\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, Hainan Province, Shenzhen $(179.9\pm 7.7)\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, Guangdong Province. Hg content was similar with background value in the other 6 areas, including Yunxiao $(63.3\pm 43.9)\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, Fujian Province; Gaoqiao $(178.6\pm 127.0)\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, Guangdong Province; Daguansha $(26.1\pm 18.8)\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, Shankou $(73.8\pm 21.1)\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, Beilun estuary $(117.8\pm 51.4)\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, Qinzhou Bay $(147.5\pm 107.6)\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, Guangxi Autonomous Region. Discrepancy of total Hg concentrations in mangrove wetlands is due to many environmental factors and human activities. Parameters such as grain size, pH, organic matter, $\text{F}\phi/\text{Hg}$, Mn/Hg are significantly correlated with total Hg respectively. Clay and $\text{F}\phi/\text{Hg}$ are obvious factors influencing total Hg concentration. Impact of environmental factors on mercury can be showed by regression equation.

Key words: mangrove; mercury; sediment; wetland; distribution

汞(Hg)及汞的化合物都具有很强的毒性, 可以富集并长期存在于环境和生物体内. 无机汞可以转化为甲基汞, 甲基汞具有亲脂性、生物积累效应和生物放大效应, 通过食物链传递进入人体, 严重危害人类健康. 自日本水俣病事件后, 汞的地球化学行为受到世界广泛关注. 近十年来, 科学家们一直在关注汞污染以及它对环境和人类健康的危害. 目前, 对高纬度地区汞的研究已经开展了很多工作, 而低纬度地区的汞研究尚待进行.

湿地土壤和沉积物中汞含量较高^[1], 湿地生态系统是汞重要的源和汇, 湿地在汞的迁移和循环中扮演重要的角色^[2,3]. 红树林湿地是热带亚热带地区水生生物和鸟类的重要栖息地和食物来源, 形成并

维持着一个食物链关系复杂的高生产力生态系统. 而水体中的汞和汞的化合物, 尤其是甲基汞在鱼类和其它水生生物体中具有极高的生物富集系数^[4], 并且容易通过食物链传递危害人类健康. 同时在潮汐作用和海水浸泡作用下, 红树林内植物残体在厌氧状态下分解, 释放的汞可以被沉积物保持或者转化成移动性更强的形态(如甲基汞), 造成湿地中汞的迁移, 并可能进入食物链^[3,5], 威胁人类的健康.

尽管目前对红树林生态系统中的重金属污染进

收稿日期: 2008-09-03; 修订日期: 2008-11-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(40676064, 30530150); 厦门大学创新团队项目

作者简介: 丁振华(1966~), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为污染生态学, E-mail: dzh@xmu.edu.cn

行了大量的研究, 但关于汞的研究却较少. 因此, 本实验对我国主要红树林区表层沉积物中总汞的分布特征和影响因素进行了系统研究.

1 研究区概况

红树林发育在热带亚热带的滨海潮间带, 其分布的海岸潮滩的宽度和长度, 因地形、潮差、底质的不同, 变化很大. 我国的红树林自然分布介于海南的榆林港($18^{\circ}09'N$) 至福建福鼎的沙埕湾($27^{\circ}20'N$) 之间, 主要分布于北部湾海岸(广东湛江、广西沿海及海南的西海岸) 和海南东海岸. 海南、广东、广西、福建共占了全国红树林总面积的 94.2%^[6].

2006 年 10~11 月和 2007 年 7~8 月, 选择海南(三亚、海口)、广东(湛江、深圳)、广西(大冠沙、山口、北仑河口、钦州湾)、福建(云霄、洛阳桥、浮宫、鹅湾、姚家屿) 共 4 个省(区) 13 个红树林自然保护区为实验地区, 各采样区分布见图 1.



图 1 采样区分布示意

Fig. 1 Distribution of sample sites

2 材料与方法

2.1 样品采集和制备

2006 年 10~11 月和 2007 年 7~8 月进行了 2 次重复采样. 在各红树林区沿河流方向选择样地随机采样. 按照梅花采样法采集表层沉积物样品(0~20 cm), 所有沉积物样品置于密封的封口袋中, 保存在 $0^{\circ}C$ 的冰盒中, 样品运回实验室后, 表层沉积物自然风干后, 研磨过筛(过 100 目筛), 密封备用.

2.2 样品分析

采用浓硝酸-浓硫酸-高锰酸钾消解, F732-V 智能型冷原子吸收测汞仪测定总汞^[7], $HCl+HClO_5-HNO_3$ 消解后利用 ICP-MS 测定铁(Fe)、锰(Mn)含量, 同样的方法测定标准和空白. 每个样品 3 个平行

样, 取平均值. 质量由河系沉积物标准样品 GSD-3 控制.

沉积物的 pH 值用 pH 计直接测定(土水比为 1:1.25); 沉积物有机质的测定用外加热重铬酸钾容量法; 盐度采用电导法测定, 水土比为 5:1^[8]. 沉积物粒度用 Mastersizer 2000 型激光粒度分析仪测定, 粒度分级按照前苏联卡庆斯基土壤粒度分级标准^[9], 分析了砂粒、粉粒、黏粒 3 个粒级.

实验结果进行数理统计; 采用 SPSS 对结果进行相关性分析, $p < 0.05$ 表示相关性显著; $p < 0.01$, 表示相关性极显著.

3 结果与讨论

3.1 中国红树林湿地沉积物中总汞含量

从中国红树林分布的最南端三亚到最北端的姚家屿, 沉积物中汞含量和当地土壤汞背景值见表 1. 我国红树林湿地沉积物中汞的含量为 $(197 \pm 137.6) \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$. 整体来看, 在广西自治区, 无论是山口、大冠沙还是北仑河口和钦州湾, 汞含量普遍较低, 其平均值分别为 (73.8 ± 21.1) 、 (26.1 ± 18.8) 、 (117.8 ± 51.4) 、 $(147.5 \pm 107.6) \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 其中以大冠沙的汞含量最低. 而福建除云霄汞含量 $[(63.3 \pm 43.9) \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}]$ 较低外, 其他地区汞含量都普遍很高, 福建浮宫、洛阳桥、鹅湾和姚家屿的总汞含量分别为 (438.2 ± 147.0) 、 (467.5 ± 68.8) 、 (264.3 ± 89.2) 和 $(125.4 \pm 27.1) \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$. 海南和广东省汞含量居中. 其中, 三亚总汞含量为 $(164.8 \pm 143.9) \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 东寨港总汞含量为 $(314.1 \pm 335.7) \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 深圳福田总汞含量为 $(179.9 \pm 7.7) \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 湛江高桥总汞含量为 $(178.6 \pm 127.0) \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$. 从表 1 可以看出, 福建省福建洛阳桥、浮宫、鹅湾、姚家屿, 海南三亚、东寨港, 广东深圳等 7 个红树林区的汞含量, 均显著高于当地土壤背景值, 汞污染严重; 而福建云霄、广东高桥、广西大冠沙、山口、北仑河口、钦州湾红树林区汞含量接近于背景值, 基本无污染.

与其他湿地生态系统沉积物中总汞含量比较(表 2), 我国红树林湿地沉积物中总汞含量与其它河口海湾地区总汞含量保持一致, 且变化幅度大致一样. 各种湿地比较而言, 湖泊湿地中总汞含量低于河口海湾, 而潮间带地区总汞含量最高.

运用 SPSS 软件对各采样地区的汞含量进行方差分析, $F = 4.080$, $p = 0.00 < 0.01$, 说明这 13 个地区汞平均含量差异极显著.

红树林沉积物对重金属有着很强的保持力, 是

表 1 各采样区汞含量与土壤背景值的比较¹⁾

Table 1 Comparison of total mercury content in samples and in soil background

省份	地区	汞含量/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$			背景值 ¹⁰⁾ / $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$	<i>t</i> 检验结果
		范围	平均值	标准偏差		
海南	三亚(8)	47.2~465.9	164.8	143.9	40	0.044
	东寨港(19)	7.7~903.6	314.1	335.7	40	0.022
广东	深圳福田(5)	172.3~192.9	179.9	7.7	71	0
	湛江高桥(10)	67.8~432.6	178.6	127.0	99	0.064
广西	山口(6)	51.6~107.9	73.8	21.1	99	0.033
	大冠沙(17)	2.3~52.8	26.1	18.8	99	0
	北仑河口(14)	102.5~217.6	117.8	51.4	99	0.518
	钦洲湾(3)	57.7~266.8	147.5	107.6	99	0.517
福建	云霄(10)	31.3~168.6	63.3	43.9	74	0.512
	浮宫(6)	248.1~591.4	438.2	147.0	74	0.002
	洛阳桥(3)	409.6~543.6	467.5	68.8	74	0.01
	鹅湾(6)	147.4~394.3	264.3	89.2	74	0.001
	姚家屿(8)	97.6~177.3	125.4	27.1	74	0.001
	平均值	2.3~903.6	197.0	137.6		

1) 括号内为样品数

表 2 中国红树林湿地沉积物中总汞含量与其他湿地生态系统比较

Table 2 Comparison of Hg concentrations in sediments of mangrove wetlands with other aquatic systems

区域	总汞/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$	文献
Lake Valenja (Slovenia)	53~166	[11]
Lake Balaton	9~160	[12]
North Sea	4~701	[13]
Lavaca Bay (Texas)	5~789	[14]
Scheldt Estuary	7~730	[13]
intertidal flat, Scheldt Estuary	144~1192	[15]
三江平原湿地	88.4	[16]
中国红树林湿地	26.1~467.5	本研究

重金属污染的潜在储库^[17-20]。尽管导致红树林区汞污染程度的原因很多,但主要可分为人为和自然两大因素:①人为因素包括到生活区和工业区的距离、经济发展水平和陆源污染程度。越靠近生活区和工业区的红树林区,汞污染较严重。三亚、福田、浮宫、洛阳桥、鹅湾和姚家屿等地区均是靠近生活区和工业区的红树林区,由于生活污水、工业废水的排入,导致这些地区汞污染严重;经济发展水平,经济发达地区的污染水平相对较高。经济发展较慢的广西,几乎不存在汞污染。而经济快速发展的深圳,工业繁荣,尤其是电子产业的迅猛发展,大量的电子产品不断被淘汰和废弃,加上没有很好的处理技术,导致深圳红树林汞污染严重。陆源污染是红树林区汞污染的主要来源。如广东省湛江港临港工业飞速发展,大量的工业废水、农业生产和城市生活污水的排入,使得汞不断积累。从港内往港外,湛江港湾表层沉积物汞含量逐渐减少。靠近码头和排污口的站点含量偏

高。这显然是陆源污染所致^[21]。广东大亚湾表层沉积物的汞含量分布也具有同样的特征^[22]。②自然因素。各地区的地貌和水文特征影响汞的累积程度。东寨港属于溺谷型海湾,口小腹大,有利于汞在该地区的累积,导致汞含量较高。而大冠沙属于开阔海岸地貌,地势平缓,使得汞容易流失,汞含量较低。而浮宫靠近金鼎油码头,受岛屿影响,九龙江水和潮流在此形成逆流回旋区^[23],有利于汞在该地区的沉积。除上述几个原因之外,环境因子的影响也不容忽视。

3.2 红树林湿地中汞分布的影响因素

红树林是低纬度区(热带、亚热带)海岸潮间带的木本植物群落,处于海洋生态系统和陆地生态系统的动态交界面^[24],具有其独特的环境特征:高温潮湿、高盐高硫、富含有机质的酸性海滩以及周期性的海水浸淹^[25]。这些独特的环境因子对总汞的分布有着不同程度的影响。汞的空间分布受到各种环境因子的影响,包括沉积物质地、pH 值、有机质和盐度等因素。总汞与各种环境因子的相关关系、线性回归方程, *p* 值见表 3。红树林湿地中, pH 值、粒度、有机质、Fe/Hg、Mn/Hg 与总汞含量显著相关,其中, pH 值、有机质、粉粒和黏粒与总汞含量呈显著正相关,而砂粒、Fe/Hg、Mn/Hg 与总汞含量呈显著负相关;但盐度对汞影响不明显。

沉积物 pH 值对沉积物中汞的可溶性和汞的氧化还原、沉淀溶解、吸附等反应有着很重要的影响,同时 pH 值还可以通过影响沉积物中微生物的活动来影响汞的形态。中国红树林区表层沉积物中 pH 值最小为 2.98,最大为 7.68。大多数地区都是微酸

性,少数为强酸性和微碱性。

沉积物粒度分布是物质来源、沉积区水动力环境、输移能力和输移路线的综合反映,也是影响金属含量的一个重要因素^[26]。一般认为,红树林湿地重金属含量与有机质含量及沉积物机械组成有关,大量重金属存在于沉积物细微颗粒中^[19,27]。砂粒含量与总汞含量呈一定的负相关,而粉粒和黏粒则分别与总汞含量呈正相关,这主要是因为砂粒本身的特性,对汞及汞的化合物吸附能力很弱。黏粒的颗粒小,比表面积大,具有很高的表面能^[28],不利于汞的挥发。黏粒具有很强的黏结性、黏着性和吸附性,可以吸附汞及汞的化合物,使得沉积物中的汞不易流失。粉粒的粒径大小介于黏粒和砂粒之间,粉粒的许多性质也介于黏粒和砂粒之间,具有一定的黏结性、黏着性和吸附性。同时沉积物粒度间接反映了沉积环境的水动力学条件,这从侧面说明水动力学条件是决定汞含量的一个重要因素。

表 3 汞与环境因子之间的相关系数(r)、线性回归方程和 p 值

Table 3 Correlation coefficient (r), regressive linear equation and p value

项目	r	线性方程	p
pH	0.329	$y = 70.331x - 223.38$	0.004
砂粒	-0.275	$y = -1.9942x + 293.12$	0.025
粉粒	0.273	$y = 2.0698x + 93.931$	0.027
黏粒	0.299	$y = 42.293x + 118.86$	0.015
有机质	0.246	$y = 31.004x + 112.53$	0.036
盐度	0.111	$y = 3.7746x + 158.34$	0.367
Fe/Hg	-0.474	$y = -0.3129x + 306.67$	0
Mn/Hg	-0.304	$y = -18.007x + 275.4$	0.018

有机质是影响沉积物中重金属含量的重要因素。沉积物的总有机碳含量和汞浓度密切相关,强烈

$$y(\text{总汞含量}) = 234.405 - 7.022(\text{pH 值}) - 19.313(\text{盐度}) + 22.471(\text{有机质}) + 0.428(\text{粉粒}) + 27.905(\text{黏粒}) - 0.231(\text{Fe/Hg}) - 5.518(\text{Mn/Hg})$$

$$y(\text{总汞含量}) = 232.074 - 5.406(\text{pH 值}) - 16.919(\text{盐度}) + 21.475(\text{有机质}) + 34.711(\text{黏粒}) - 0.230(\text{Fe/Hg}) - 5.509(\text{Mn/Hg})$$

$$y(\text{总汞含量}) = 197.937 - 15.767(\text{盐度}) + 21.037(\text{有机质}) + 33.770(\text{黏粒}) - 0.225(\text{Fe/Hg}) - 5.399(\text{Mn/Hg})$$

$$y(\text{总汞含量}) = 187.212 + 15.196(\text{有机质}) + 31.342(\text{黏粒}) - 0.226(\text{Fe/Hg}) - 5.882(\text{Mn/Hg})$$

$$y(\text{总汞含量}) = 178.811 + 17.135(\text{有机质}) + 29.801(\text{黏粒}) - 0.265(\text{Fe/Hg})$$

$$y(\text{总汞含量}) = 224.958 + 32.666(\text{黏粒}) - 0.273(\text{Fe/Hg})$$

从回归模型上看,有机质、Mn/Hg、盐度、pH 值、粉粒、砂粒和总汞含量的显著性依次递减,并且不能满足 $F = 4$, Sig. ≥ 0.1 和 95% 置信区间,因此逐步从模型中被剔除。砂粒对汞及汞的化合物吸附能力很

影响着沉积物中汞的迁移和富集^[29-31]。红树林地区含有较丰富的腐殖质,腐殖质可以影响沉积物结构的形成和物质的转化,它本身的胶体性质和结构表面有较多的官能团和电荷,在不同介质中的溶解和絮凝程度不同等,也对汞的迁移有着重要的影响。有机质对汞具有较强的吸附能力,所以,沉积物中有机质含量与总汞之间有着相同的变化规律^[12]。

湿地的水文与生态条件对于汞的迁移与转化具有独特的影响^[31]。湿地中氧化还原条件对沉积物中汞的迁移率有明显影响,Meili 等^[32]通过研究 Hg/Fe 比值,发现湖泊中的汞循环与对氧化还原敏感的铁循环有密切联系,从侧面反映了氧化还原条件对总汞含量的影响。沉积物中 Fe、Mn 含量及存在形态是 pH 值与氧化还原电位综合作用的结果。酸性条件下,Fe、Mn 主要以离子态存在,容易发生迁移。Fe/Hg 与总汞之间存在极显著负相关关系。

3.3 环境因子的多元回归模型分析

红树林湿地中汞的分布特征受到很多因素的影响。由前面的分析可知,各种环境因子与红树林表层沉积物中汞含量有着密切的联系,为了考察这些影响因子对红树林表层沉积物中总汞含量的影响程度,通过 SPSS 统计软件采用向后剔除法,结合徐海量等^[33,34]建立回归方程的方法,对红树林中各环境因子和总汞含量的关系进行多元回归统计和分析。

根据多元回归理论,选择影响因变量的自变量,将不显著的自变量剔除,最终达到模型中只包含显著变量且变量间构成最优组合,即总体模型的 F 值最大化。在此,采用向后剔除变量法。根据 SPSS 分析,砂粒首先在系统中被剔除,只有余下的 7 个变量进入,这样得出 6 个回归模型如下:

弱,对沉积物中总汞含量影响非常微弱。所以,砂粒首先从回归模型中被剔除。而粉粒的性质介于黏粒和砂粒之间,只具有一定的黏结性、黏着性和吸附性,能够吸附一定的汞化合物;盐度和 pH 值等理化

性质也在一定程度上影响着总汞含量,也从回归模型中剔除.有机质有着较强的吸附汞和汞化合物的能力,对汞的含量影响相对重要,但是有机质也在一定程度上影响着汞的形态转化,如可溶性有机物(DOM)的络合作用能够提高汞溶解和抑制汞形成硫化物沉淀,限制甲基化细菌对 Hg^{2+} 可利用程度和甲基汞的生物积累效率^[35,36],使得汞容易进入到植物体内和大气、水中,造成沉积物中总汞含量的降低.有机质这种对汞含量的双重影响,使得它对总汞含量的影响并不十分明显,所以从回归模型中剔除.而黏粒具有很高的表面能,可以吸附汞及汞的化合物,并且不利于汞的挥发使得沉积物中的汞很难流失,因此,在这 8 个环境影响因子中,Fe/Hg、黏粒对总汞含量的影响最为显著.大颗粒沉积物(如砂粒)中的重金属多数来自原生矿物,细粒沉积物中重金属含量反映了人类活动等因素的影响结果^[37-40].

环境因子的相互作用对总汞含量也有着重要的影响,可以用回归方程表示:

$$y(\text{总汞含量}) = 234.405 - 7.022(\text{pH 值}) - 19.313(\text{盐度}) + 22.471(\text{有机质}) + 0.428(\text{粉粒}) + 27.905(\text{黏粒}) - 0.231(\text{Fe/Hg}) - 5.518(\text{Mn/Hg})$$

4 结论

(1) 福建省福建洛阳桥、浮宫、鹅湾、姚家屿,海南三亚、海口,广东深圳等 7 个红树林区的汞含量均显著高于当地土壤背景值,汞污染严重;而福建云霄、广东高桥、广西大冠沙、山口、北仑河口、钦州湾红树林区汞含量接近于背景值,基本无污染.

(2) 汞的空间分布受到各种环境因子的影响,除盐度外,沉积物粒度组成、pH 值、有机质、Fe/Hg、Mn/Hg 与总汞含量显著相关或极显著相关,其中砂粒、Fe/Hg、Mn/Hg 与总汞含量呈显著负相关.环境因素对总汞含量的综合影响作用,可以用线性回归方程表示:

$$y(\text{总汞含量}) = 234.405 - 7.022(\text{pH 值}) - 19.313(\text{盐度, \%}) + 22.471(\text{有机质, \%}) + 0.428(\text{粉粒, \%}) + 27.905(\text{黏粒, \%}) - 0.231(\text{Fe/Hg}) - 5.518(\text{Mn/Hg})$$

致谢:在野外采样期间得到了红树林研究中心的范航清研究员、何斌源副研究员、莫竹承副研究员、邱广龙工程师,东寨港红树林自然保护区的黄仲琪副局长、钟才荣工程师,湛江红树林自然保

护区的林康英局长、陈粤超工程师、林广旋工程师,漳江口红树林自然保护区的吴秋诚工程师的热心帮助和支持.此外,厦门大学生命科学学院实验中心的蔡剑怀老师在样品测定过程中给予了详尽的指导和帮助,在此一并致谢!

参考文献:

- [1] Paterson M J, Rudd J W M, Louis V S T. Increase of total and methylmercury in zooplankton following flooding of peat land reservoir [J]. *Environ Sci Technol*, 1998, **32**: 3869-3874.
- [2] 王起超, 刘汝海, 吕宪国, 等. 湿地汞环境过程研究进展[J]. *地球科学进展*, 2002, **17**: 881-885.
- [3] 刘金铃, 丁振华. 汞的甲基化研究进展[J]. *地球与环境*, 2007, **35**: 215-222.
- [4] 刘永懿, 翟平阳. 甲基汞在水生生物体内富集倍数的研究[J]. *水资源保护*, 1996, **3**: 1-9.
- [5] Louis S V, Rudd J W M, Kelly C A, *et al.* Importance of wetlands as sources of methylmercury boreal forest ecosystem [J]. *Can J Fish Aqua Sci*, 1994, **51**: 1065-1076.
- [6] 林鹏. 红树林研究论文集(1980~1989) [M]. 厦门: 厦门大学出版社, 1990. 31-40.
- [7] 丁振华, 王文华. 不同消解方法对土壤样品中汞含量测定的影响[J]. *生态环境*, 2003, **12**(1): 1-3.
- [8] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1987. 57-58.
- [9] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1998. 272-288.
- [10] 王云, 魏复盛. 土壤环境元素化学[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1995. 1-394.
- [11] Kotnik J, Horvat M, Mandic V, *et al.* Influence of the Sostanj coal-fired thermal power plant on mercury and methyl mercury concentrations in Lake Velenje, Slovenia [J]. *Science Total Environment*, 2000, **259**: 85-95.
- [12] Nguyen H L, Leermakers M, Kununzi S, *et al.* Mercury distribution and speciation in Lake Balaton, Hungary [J]. *Science Total Environment*, 2005, **340**: 231-246.
- [13] Leemakers M, Galletti S, De Galan S, *et al.* Mercury in the southern North Sea and Scheldt Estuary [J]. *Marine Chemistry*, 2001, **75**: 229-48.
- [14] Bloom N S, Gill G A, Cappellino S, *et al.* Speciation and cycling of mercury in Lavaca Bay, Texas, sediments [J]. *Environ Sci Technol*, 1999, **33**: 7-13.
- [15] Muhaya B, Leermakers M, Baeyens W. Total mercury and methylmercury in sediments and polychaete *Nereis Diversicolor* at Groot Buiterschoor (Scheldt estuary, Belgium) [J]. *Water, Air, Soil Pollution*, 1997, **94**: 109-123.
- [16] 刘汝海, 王起超, 吕宪国, 等. 三江平原湿地汞的化学特征[J]. *环境科学学报*, 2003, **22**(5): 661-663.
- [17] Lacerda L D, Carvalho C E V. The biogeochemistry and trace metals distribution of mangrove rhizospheres [J]. *Biotropica*, 1993, **25**: 252-257.
- [18] Tam N F Y, Wong Y S. Retention and distribution of heavy metals in

- mangrove soils receiving wastewater [J]. *Environmental Pollution*, 1996, **94**: 283-291.
- [19] Harbison P. Mangrove muds: a sink and a source for trace metals [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 1986, **17**: 246-250.
- [20] Clark M W, McConchie D M, Saenger P, *et al.* Hydrological controls on copper, cadmium, lead and zinc concentrations in an anthropogenically polluted mangrove ecosystem, Wynnum, Brisbane, Australia [J]. *J Coastal Research*, 1997, **13**: 1150-1158.
- [21] 张才学, 孙省利, 陈春亮. 湛江港湾表层沉积物重金属的分布特征及潜在生态危害评价[J]. *湛江海洋大学学报*, 2006, **26**(3): 45-49.
- [22] 李学杰. 广东大亚湾底质重金属分布特征与环境质量评价[J]. *中国地质*, 2003, **30**(4): 429-435.
- [23] 陈金泉, 傅子琅, 何发祥, 等. 厦门湾潮、余流及其对泥沙、污染物迁移的影响[J]. *台湾海峡*, 1985, **4**(1): 16-20.
- [24] Ong J E. The ecology of mangrove conservation and management [J]. *Hydrobiologia*, 1995, **295**: 243-351.
- [25] 林鹏. 中国红树林生态系[M]. 北京: 科学出版社, 1997. 297-316.
- [26] Loring D H, Rantala T T. Manual for the geochemical analyses of marine sediments and suspended particulate matter [J]. *Earth Science Reviews*, 1992, **32**: 235-283.
- [27] Soto-Jiménez M F, Paez-Osuna F. Distribution and normalization of heavy metal concentrations in mangrove and lagoonal sediments from Mazatlán Harbor (SE Gulf of California) [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2001, **53**: 259-274.
- [28] 吕贻忠, 李保国. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006. 1-382.
- [29] Igeyoshi G. Volcanic Influence on Mercury in Soils of Kagoshima, Southern Kyushu, Japan [J]. *Soils Sci Plant Nul*, 1979, **25**(4): 523-5371.
- [30] Wang D Y, Qing C L, Guo T Y, *et al.* Effects of humic acid on transport and transportation of mercury in soil-plant system [J]. *Water, Air Soil Pollution*, 1997, (95): 34-431.
- [31] 丁振华, 王文华, 庄敏. 汞的界面地球化学研究进展[J]. *海洋科学*, 2005, **29**(10): 54-57.
- [32] Meili M, Skarp J, Bergman R. Mobility of mercury in lake sediments exposed to redox changes [A]. In: *6th International Conference on Mercury as a Global Pollutant* [C]. Minamala Japan, 2001. BG-9.
- [33] 徐海量, 陈亚宁, 李卫红. 塔里木河下游环境因子与沙漠化关系多元回归分析[J]. *干旱区研究*, 2003, **20**(1): 39-43.
- [34] 徐海量, 陈亚宁. 塔里木河下游荒漠化多元回归模型分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2003, **17**(4): 78-82.
- [35] Choi M H, Cech J J J, Lagunas-Solar M C. Bioavailability of Methylmercury to Sacramento Blackfish (*Orthodon microlepidotus*): Dissolved Organic Carbon Effects [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1998, **17**(4): 695-701.
- [36] Cai Y, Jaffe A R, Jones R D. Interactions Between Dissolved Organic Carbon and Mercury Species in Surface Waters of the Florida Everglades [J]. *Applied Geochemistry*, 1999, **14**: 395-407.
- [37] 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.
- [38] Chen J S, Wang F Y, Li X D. Geographical variations of trace elements of the major rivers in eastern China [J]. *Environment Geology*, 2000, **39**(12): 1334-1340.
- [39] Lorenzo G. Heavy metal contamination of brown seaweed and sediments from the UK coastline between the Wear River and the Tees River [J]. *Environment International*, 2001, **26**: 275-286.
- [40] Huang K M, Lin S. Consequences and implication of heavy metal spatial variations in sediments of the Keelung River drainage basin, Taiwan [J]. *Chemosphere*, 2003, **53**: 1113-1121.