

# 湛江高桥红树林沉积物理化性质与金属元素的空间分布

朱耀军<sup>1</sup> 郭菊兰<sup>1</sup> 武高洁<sup>1</sup> 林广旋<sup>2</sup> 吴晓东<sup>2</sup>

(1 中国林业科学研究院湿地研究所, 国家林业局湿地研究中心 2 广东湛江国家级红树林自然保护区管理局)

**摘要:**以广东湛江国家级红树林自然保护区高桥核心区为研究区,在2条垂直于海岸的样线A和样线B上,根据潮汐淹没时间各选择3个样点进行沉积柱取样,用于解析沉积物理化性质与金属元素空间分布特征。结果表明:沉积物为粉-砂型质地,其中黏粒、粉粒和砂粒含量分别为 $(13 \pm 4)\%$ 、 $(39 \pm 12)\%$ 和 $(48 \pm 16)\%$ ;有机质含量范围为 $0.2\% \sim 3.7\%$ ,pH值为 $2.5 \sim 7.3$ ,交换性盐基总量为 $1.4 \sim 16.4 \text{ cmol/kg}$ ,总氮含量 $0.01\% \sim 0.2\%$ ,总磷含量 $130 \sim 435 \text{ mg/kg}$ ;A、B样线的沉积物粒度、pH值、盐基总量、有机质含量、总氮含量、总磷含量等理化性质差异不显著。沉积物中11种金属的含量从高到低分别为Al( $4.5\% \sim 19.2\%$ )、Fe( $1.0\% \sim 4.7\%$ )、Mn( $50.4 \sim 163.4 \text{ mg/kg}$ )、Cr( $24.4 \sim 43.0 \text{ mg/kg}$ )、Zn( $14.4 \sim 52.1 \text{ mg/kg}$ )、Pb( $11.3 \sim 34.9 \text{ mg/kg}$ )、Ni( $3.5 \sim 19.4 \text{ mg/kg}$ )、Co( $3.0 \sim 7.7 \text{ mg/kg}$ )、Cu( $1.4 \sim 9.6 \text{ mg/kg}$ )、As( $1.4 \sim 5.8 \text{ mg/kg}$ )、Mg( $0.2 \sim 0.9 \text{ mg/kg}$ ),除Co、Cu、As、Fe平均含量差异不显著外,其他金属元素间差异显著;A样线上Cr、Cu、Mn含量显著高于B样线,其他金属的含量差异不显著。沉积物基本理化性质呈现明显的空间分布差异,低潮位沉积物的含砂量、pH值更高;垂向梯度上,细颗粒(黏粒、粉粒)含量、pH值、盐基总量、有机质含量、总磷含量、总氮含量均以表层值最高,自表层向下逐渐降低,而含砂量则相反。金属含量表现为更低潮位点的金属含量低,但也因金属元素而异,潮位因素对不同金属分布的影响存在差异;各样点金属含量垂向上均以表层最高,随着深度增加而降低。相关性分析表明:有机质与pH值、含砂量负相关,而与细颗粒含量正相关;金属元素含量除了与含砂量显著负相关、与pH值之间相关性不显著外,其与盐基总量、有机质、黏粒、粉粒含量均呈显著正相关关系;金属元素含量之间的相关性均达到极显著水平,反映了其相互伴生和同源的特征。

**关键词:**红树林;柱状沉积物;理化性质;金属

中图分类号:S759.9 文献标志码:A 文章编号:1000-1522(2014)02-0001-09

ZHU Yao-jun<sup>1</sup>; GUO Ju-lan<sup>1</sup>; WU Gao-jie<sup>1</sup>; LIN Guang-xuan<sup>2</sup>; WU Xiao-dong<sup>2</sup>. **Spatial distribution of physicochemical properties and metal concentration in mangrove sediments from Gaoqiao in Zhanjiang, Guangdong of Southern China.** *Journal of Beijing Forestry University* (2014)36(2) 1-9 [Ch, 32 ref.]

1 Research Institute of Wetland, Chinese Academy of Forestry, Wetland Research Centre of State Forestry Administration, Beijing, 100091, P. R. China;

2 Zhanjiang Mangrove National Nature Reserve, Guangdong, 524033, P. R. China.

Taking Gaoqiao mangrove of Zhanjiang Mangrove National Nature Reserve as the study area, six sediment cores were sampled along two sample lines A and B, which were perpendicular to the coastline, and spatial distribution features of physicochemical properties and enrichment pattern of metal trace in sediment cores were analyzed. The content of metals, including major metals (Al, Fe and Mg) and trace metals (As, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb and Zn) and their possible relationships with physicochemical properties (particle size, pH, exchangeable base cations, total nitrogen, total phosphorus, and organic matter) in core sediment samples were evaluated. Analysis of physicochemical properties revealed that an overall predominance of silt and sand in the study area, the concentration of clay, silt and sand of sediment were  $(13 \pm 4)\%$ ,  $(39 \pm 12)\%$  and  $(48 \pm 16)\%$ , respectively, organic matters varied from  $0.2\%$  to  $3.7\%$ ,  $2.5 \sim 7.3$  for pH value,  $1.4 \sim 16.4 \text{ cmol/kg}$  for exchangeable base cations,  $0.01\% \sim$

收稿日期:2013-08-15 修回日期:2013-11-15

基金项目:国家自然科学基金项目(31100413)、中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(CAFINT2011C10)。

第一作者:朱耀军,博士,助理研究员。主要研究方向:湿地生态。Email: yaojunzhu@gmail.com 地址:100091 北京市颐和园后中国林业科学研究院湿地研究所。

本刊网址: <http://journal.bjfu.edu.cn>

0.2% for total nitrogen, and 130 – 435 mg/kg for total phosphorus. The sediment quality parameters including grain size, pH value, exchangeable base cations, organic matter, total nitrogen and phosphorus were not significant ( $P > 0.05$ ) between A and B sample lines. The metal concentrations in sediment obtained in this study decreased in the following order, Al (4.5% – 19.2%), Fe (1.0% – 4.7%), Mn (50.4 – 163.4 mg/kg), Cr (24.4 – 43.0 mg/kg), Zn (14.4 – 52.1 mg/kg), Pb (11.3 – 34.9 mg/kg), Ni (3.5 – 19.4 mg/kg), Co (3.0 – 7.7 mg/kg), Cu (1.4 – 9.6 mg/kg), As (1.4 – 5.8 mg/kg), Mg (0.2 – 0.9 mg/kg). The difference was significant ( $P < 0.05$ ) among contents of metals excluding Co, Cu, As and Fe. The concentrations of Cr, Cu and Mn on line A were much higher than on line B. Spatial distribution varied markedly in physicochemical properties. The sand content and pH value increased with increasing distance from the seawall. Organic matter, total nitrogen and total phosphorus were affected by mangrove community type and hydrodynamics. Physicochemical properties varied obviously in vertical direction, parameters of physicochemical properties (not including sand content in surface layer) were the highest, and decreased gradually from top to bottom layer. With increasing distance from the seawall, the metal concentration in core sediment decreased gradually with the tidal level but varied with metals; therefore, tidal level was not the solo factor affecting metal distribution in horizontal level. Similar to the trends of physicochemical properties, hierarchical variation in metal concentration was presented in a vertical direction; concentrations of metals were the highest in surface layer, and decreased gradually from top to bottom layer. Correlation analysis showed that organic matters were positively correlated with finer particles ( $P < 0.01$ ), but negatively correlated with pH value and sand content ( $P < 0.01$ ). A significantly negative correlation was detected between metal content and sand content, and metal concentration had no correlation with pH value. The metal concentration was positively correlated with exchangeable base cations, organic matter and fine particles ( $P < 0.01$ ). The associated or homologous features were detected according to the significant correlation among the metals.

**Key words** mangrove; core sediment; physicochemical properties; metal

红树林分布于热带、亚热带低能海岸的潮间带,能够提供多种生态系统服务<sup>[1-3]</sup>。红树林在全球生物地球化学循环中起着重要作用,能够持续沉积来自于潮汐、河流、大气沉降和人类活动所带来的金属元素,而成为其存储库和缓冲区<sup>[3-4]</sup>。众所周知,有些金属元素是海洋生物所必需的,但 Ag、Cu、Cd、Pb 等重金属元素超过一定浓度会产生生物毒性。金属元素尤其是重金属元素能够在红树林生态系统中被固定、转移以及生物富集,如果通过食物链放大,影响到生态系统的结构与功能,进而威胁到陆地生物及人类的健康<sup>[5-7]</sup>。

国内外对于红树林沉积物中金属元素的研究较多。人们对红树林沉积物中的 22 种痕量元素进行了研究,发现金属元素含量与分布特征在不同地区间差别大,对相同金属元素的分布特征的观察结果有时截然相反<sup>[8]</sup>。表层沉积物经常与水体中悬浮物质进行交换,能够反映当前状态,而底层沉积物则相对稳定地记录着人为和自然生态过程对于环境的影响历史<sup>[9]</sup>。目前学者们多基于表层沉积物<sup>[10-14]</sup>和沉积柱<sup>[15-18]</sup>进行金属污染评价的相关研究。广东湛江国家级红树林自然保护区自 2002 年成为国

际重要湿地以来,受到国内外红树林研究者的广泛关注。有学者在这片区域选择表层或单个样点进行沉积物中重金属的相关研究<sup>[10,14]</sup>,取得了一些成果。本研究从由海向陆、由表层到底层的空间梯度上对红树林沉积物的基本理化性质及金属元素的时空分布特征进行解析,旨在为这块国际重要湿地的健康评价、污染防治和红树林资源保育提供参考。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

高桥红树林地处广东湛江国家级红树林自然保护区的核心区,位于两广界河—洗米河在北部湾入口处的英罗湾内,其红树林面积近 800 hm<sup>2</sup>。红树林多呈灌木状且呈现明显的分带特征,主要树种包括桐花树 (*Aegiceras corniculatum*)、木榄 (*Bruguiera gymnorhiza*)、秋茄 (*Kandelia obvolata*)、红海榄 (*Rhizophora stylosa*)、白骨壤 (*Avicennia marina*) 等优势种以及海漆 (*Excoecaria agallocha*) 和无瓣海桑 (*Sonneratia apetala*) 等,高潮位地带生长着黄槿 (*Hibiscus tiliaceus*) 等半红树植物以及一些伴生植物。研究区属南亚热带季风型海洋性气候,年平均

气温 23 ℃ 左右, 极端最高气温 38 ℃, 极端最低气温 15 ℃。年平均降水量 1 700 ~ 1 800 mm, 主要集中在 5—9 月。潮汐属于不正规日潮为主的混合潮型, 大潮汛期为全日潮, 月平均 22 d, 小潮为半日潮, 月平均为 8 d; 平均潮差 2.53 m, 最大潮差 6.25 m。海水年均温 23.5 ℃。

## 1.2 材料与方法

### 1.2.1 沉积物取样

取样时间为 2011 年 7—8 月。在低潮时沿样线 (A、B) 进行 (图 1), 2 条样线均沿陆地—海洋方向, 根

据与海堤距离的远近分别选取 3 个样点并用 GPS 进行定位。A 样线位于研究区的北部, 潮位相对较高, 样点的潮汐淹没先后顺序为 A<sub>3</sub>、A<sub>2</sub>、A<sub>1</sub>, 分别距离北部海堤 1 700、900 和 300 m, 其中: A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub> 样点分别位于样线上更高的潮位带, 分别是桐花树、木榄纯林为主的群落类型; 而 A<sub>3</sub> 样点位于低潮位带, 距离北部海堤 1 700 m, 群落组成为白骨壤和桐花树混交。B 样线上 3 个样点均在低潮位带, 潮汐淹没先后顺序为 B<sub>3</sub>、B<sub>2</sub>、B<sub>1</sub>, 分别距离北部海堤 1 320、340 和 70 m, 以白骨壤纯林群落为主; B<sub>2</sub> 样点靠近潮沟, 有红海榄分布。

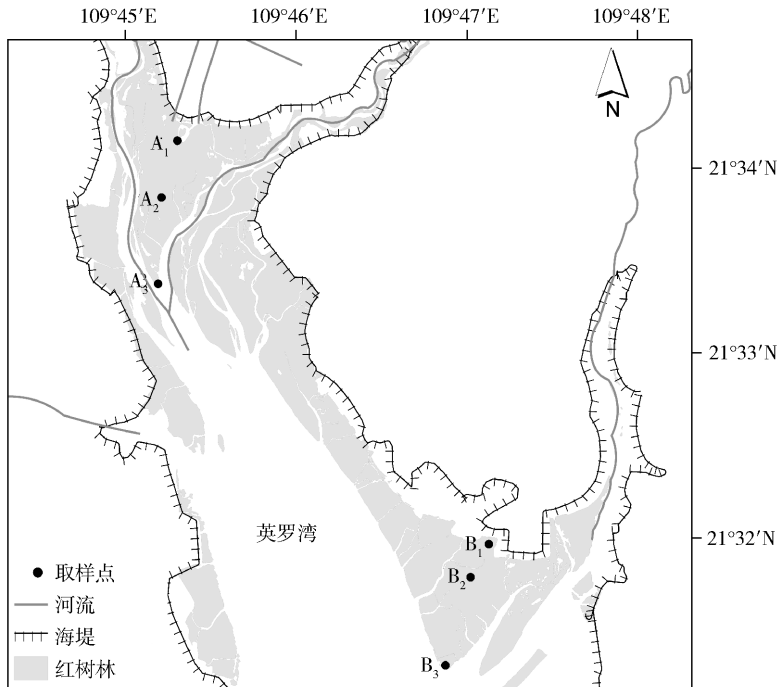


图 1 红树林研究区及采样点位置

Fig. 1 Location of mangrove study area and sample sites

采用自制重力采样器取样, 材质为透明 PVC 管, 内径 4.0 cm, 长度 1.2 m, 钻头为尼龙材质。每个样点附近随机采 3 个沉积柱, 在野外以 10 cm 间隔进行分样, 从顶层向下进行编号, 底层分样不足 10 cm 的测量其实际长度, 样品装入密封袋, 带回实验室自然风干备用。

### 1.2.2 样品分析指标及分析方法

将采集到的土壤样品自然风干并充分混合, 保留大约 500 g 用于实验室分析。所有分析项目均采用干基计算 (将一定质量的风干样品烘至恒质量, 便可计算每个风干样品的吸湿水含量。因而, 待测样品质量 = 风干样品质量 × (1 - 吸湿水含量)。采用电位法测定 pH 值; 用重铬酸钾氧化-外加热法测定有机碳, 通过系数换算有机质含量; 阳离子交换性盐基总量采用乙酸铵交换-中和滴定法; 全磷含量测定用氢氟酸-高氯酸消煮-钼锑抗比色法; 全氮含

量用扩散法测定<sup>[19]</sup>。金属元素分析采用电感耦合等离子体发射光谱法 (ICP) 测定<sup>[20]</sup>。为便于比较, 参照相关文献 [8—10] 选择 Al、Mn、Cr、Zn、Pb、Ni、Co、Cu、As、Fe、Mg 等 11 种元素进行分析。沉积物粒度采用 Malvern 公司生产的 Mastersizer 2000 型激光粒度分析仪, 粒度标准参照国际制土壤粒度分级, 即砂粒 (sand) > 20 μm、粉粒 (silt) 20 ~ 2 μm、黏粒 (clay) < 2 μm 的标准进行分析。

## 1.3 数据处理

采用 SigmaPlot 10.0 软件作图。相关性分析和显著性检验通过 SPSS18.0 软件进行。

## 2 结果与分析

### 2.1 沉积物理化性质与金属元素含量

研究区沉积物的质地为粉-砂型, 其中黏粒、粉粒和砂粒的含量分别为 (13 ± 4)%、(39 ± 12)% 和

(48 ± 16)%。沉积物各层次之间的理化性质范围较大,其中有机质(organic matter, OM)含量为0.2% ~ 3.7%。2条样线上6个样点的pH值范围为2.5 ~ 7.3,交换性盐基总量(exchangeable base cations, EBC)为1.4 ~ 16.4 cmol/kg,总氮(TN)、总磷(TP)含量分别为0.01% ~ 0.2%、130 ~ 435 mg/kg。*t*检验结果表明,A、B样线之间的粒度特征、有机质含量、pH值、盐基总量、总氮含量、总磷含量等理化性质的差异不显著( $P > 0.05$ )。

研究区内2条样线上沉积物中金属元素的含量从大到小顺序依次为Al(4.5% ~ 19.2%)、Fe(1.0% ~ 4.7%)、Mn(50.4 ~ 163.4 mg/kg)、Cr(24.4 ~ 43.0 mg/kg)、Zn(14.4 ~ 52.1 mg/kg)、Pb(11.3 ~ 34.9 mg/kg)、Ni(3.5 ~ 19.4 mg/kg)、Co(3.0 ~ 7.7 mg/kg)、Cu(1.4 ~ 9.6 mg/kg)、As(1.4 ~ 5.8 mg/kg)、Mg(0.2 ~ 0.9 mg/kg),其中,除Co、Cu、

As、Fe元素平均含量差异不显著外,其他金属元素间差异显著( $P < 0.05$ )。*t*检验结果表明,A样线上Cr、Cu、Mn含量显著高于B样线,其他金属元素的含量在2条样线上差异不显著( $P > 0.05$ )。

## 2.2 基本理化性质与金属元素含量的水平分布

### 2.2.1 基本理化性质水平分布特征

A、B样线上各样点的理化性质在水平方向上存在空间差异(图2)。A样线上A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub>、A<sub>3</sub>样点的潮位逐渐降低,沉积物含砂量增加,粉粒降低,且A<sub>1</sub>、A<sub>3</sub>点砂粒的含量差异显著;A<sub>3</sub>点的pH值显著高于A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub>样点,而有机质含量显著低于A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub>样点;A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub>、A<sub>3</sub>样点的黏粒含量、盐基总量、总氮含量、总磷含量差异不显著。B样线上B<sub>2</sub>样点的黏粒、粉粒、有机质、总氮、总磷含量显著高于B<sub>1</sub>、B<sub>3</sub>,含砂量则相反;B<sub>3</sub>样点的pH值显著高于B<sub>1</sub>、B<sub>2</sub>;B<sub>1</sub>样点的盐基总量显著低于B<sub>2</sub>、B<sub>3</sub>样点。

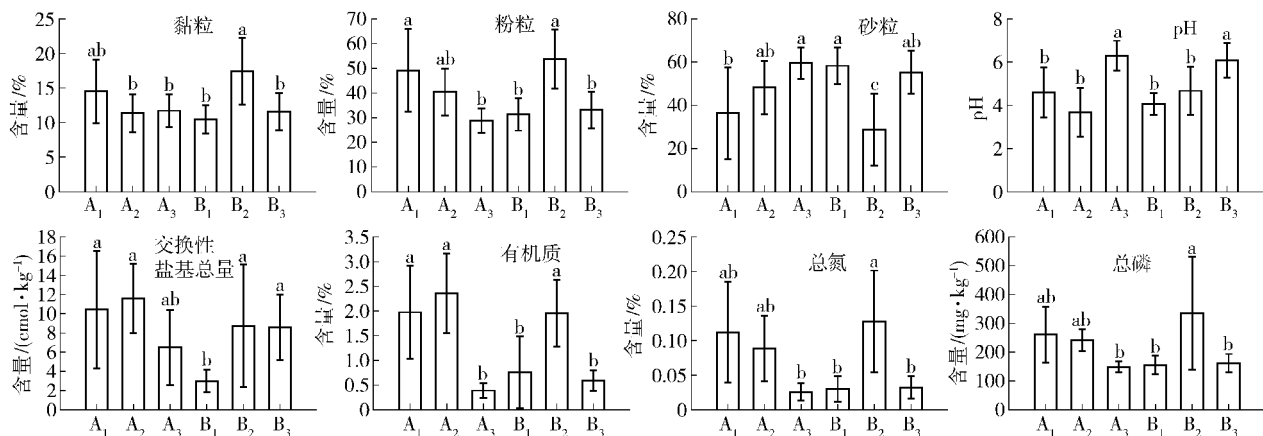


图2 A、B样线上沉积物理化性质的水平变化

Fig. 2 Horizontal variations of physicochemical properties from A and B sample lines

### 2.2.2 金属元素含量的水平分布

A、B样线上金属元素含量在水平方向上存在差异(图3)。由图3可以看出:A样线上,A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub>样点的As、Co、Cu、Fe、Zn含量显著高于A<sub>3</sub>样点;A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub>样点各金属元素含量的差异不显著;A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub>、A<sub>3</sub>样点的Al、Cr、Mg、Mn含量间差异不显著。B样线上,Cr含量在B<sub>1</sub>点显著低于B<sub>2</sub>、B<sub>3</sub>样点;Fe含量在B<sub>2</sub>点显著高于B<sub>1</sub>、B<sub>3</sub>样点;其他金属元素含量在B<sub>1</sub>、B<sub>2</sub>、B<sub>3</sub>之间的差异不显著。

## 2.3 理化性质与金属元素含量的垂向分布

### 2.3.1 理化性质垂向变化

A、B样线6个样点的沉积柱在垂直方向上均呈现自表层向下砂粒含量逐渐增加,而黏粒和粉粒含量递减的规律(图4A)。其中:A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub>样点自表层向下由粉粒为主变为砂粒占优,而A<sub>3</sub>点位各层次均以砂粒为主;A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub>、A<sub>3</sub>样点的pH值和有机质含量

均以表层最高,向下渐低,其中A<sub>2</sub>沉积柱则表现为先减后增再减的趋势;盐基总量、总磷、总氮与有机质表现出相似分布特征。

B样线位于低潮位带,各样点理化性质垂向变化规律明显,其中B<sub>2</sub>点位各指标在垂向上波动性变化明显(图4B)。B<sub>1</sub>、B<sub>3</sub>样点垂向上各层次均以砂粒为主,随深度而增加,B<sub>2</sub>点以粉粒为主,自表层向下含砂量渐增。B样线沉积物的pH值为3.1 ~ 7.3,酸度随深度增加;有机质自表层向下渐减,其中B<sub>2</sub>点位的有机质和总氮含量以地下40 cm处为拐点,自表层向下先减后增;各样点的交换性盐基总量、总氮和总磷含量自表层向下逐渐降低。

### 2.3.2 金属元素含量垂向分布

A、B样线上各样点均以表层金属元素含量最高,随深度增加而降低(图5)。A样线上,各样点Cr、Cu、Ni、Pb的分布规律相对一致,自表层向下递

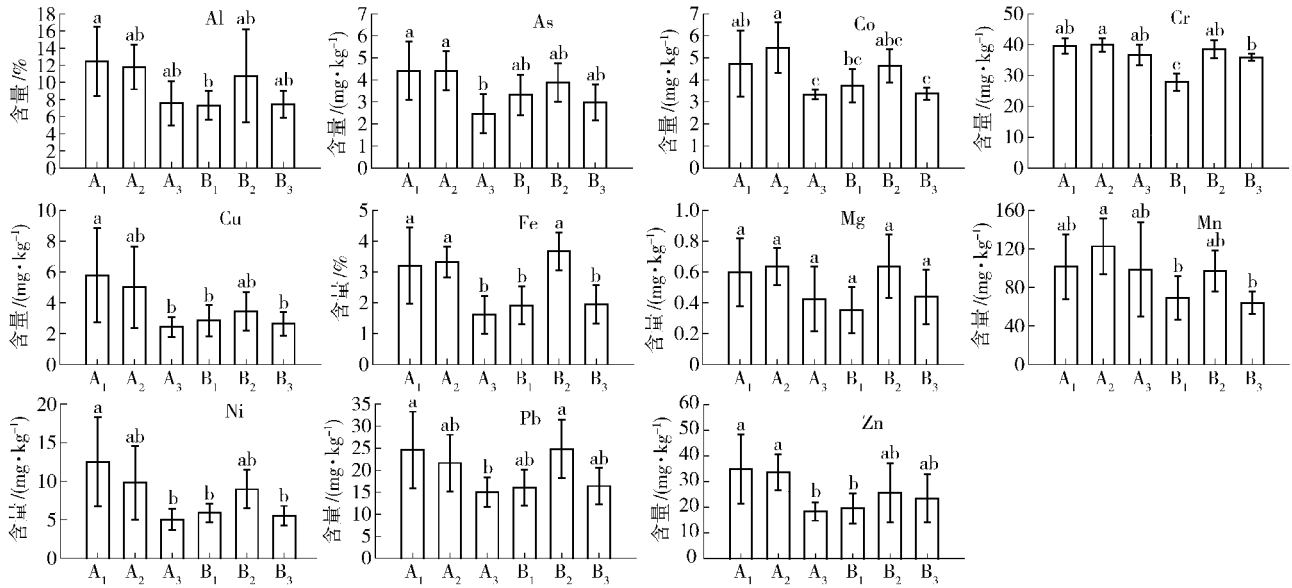


图3 A、B样线上沉积物金属含量的水平变化

Fig. 3 Horizontal variations of metal concentration in core sediment from A and B sample lines

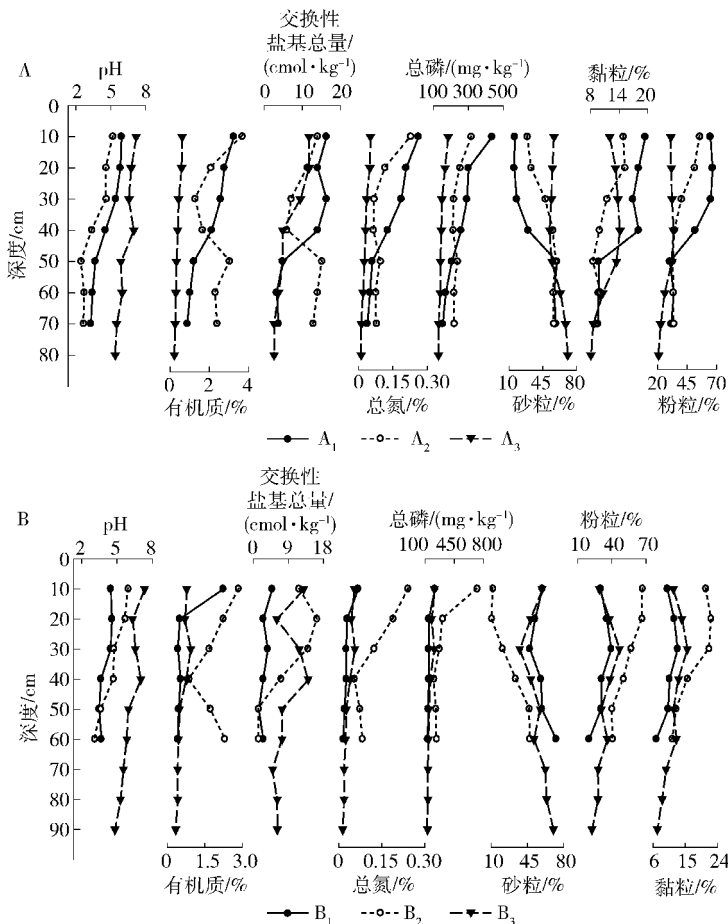


图4 沉积物理化性质的垂向变化

Fig. 4 Down core variations of physicochemical properties from A and B sample lines

减;其他金属元素含量在 A<sub>2</sub>点垂向上呈现波动性,在地下 50 cm 处出现拐点,在 0~40 cm 深度各层金属的含量自表层向下递减,表现为 A<sub>1</sub> > A<sub>2</sub> > A<sub>3</sub>,而

40 cm 深度以下则 A<sub>2</sub> > A<sub>1</sub> > A<sub>3</sub> (图 5A)。B 样线上, B<sub>2</sub> 样点各金属元素含量的垂向变化波幅较大, B<sub>2</sub> 样点垂向各层次金属的含量相对较高,总体上除 Fe 显

著高于  $B_1$ 、 $B_3$  外,其他金属的含量差异不显著 ( $P > 0.05$ ); Fe、Co、Cr、Mg、Ni、Mn 的含量在 0 ~

40 cm 深度自表层向下降低,40 cm 深度以下渐增 (图 5B)。

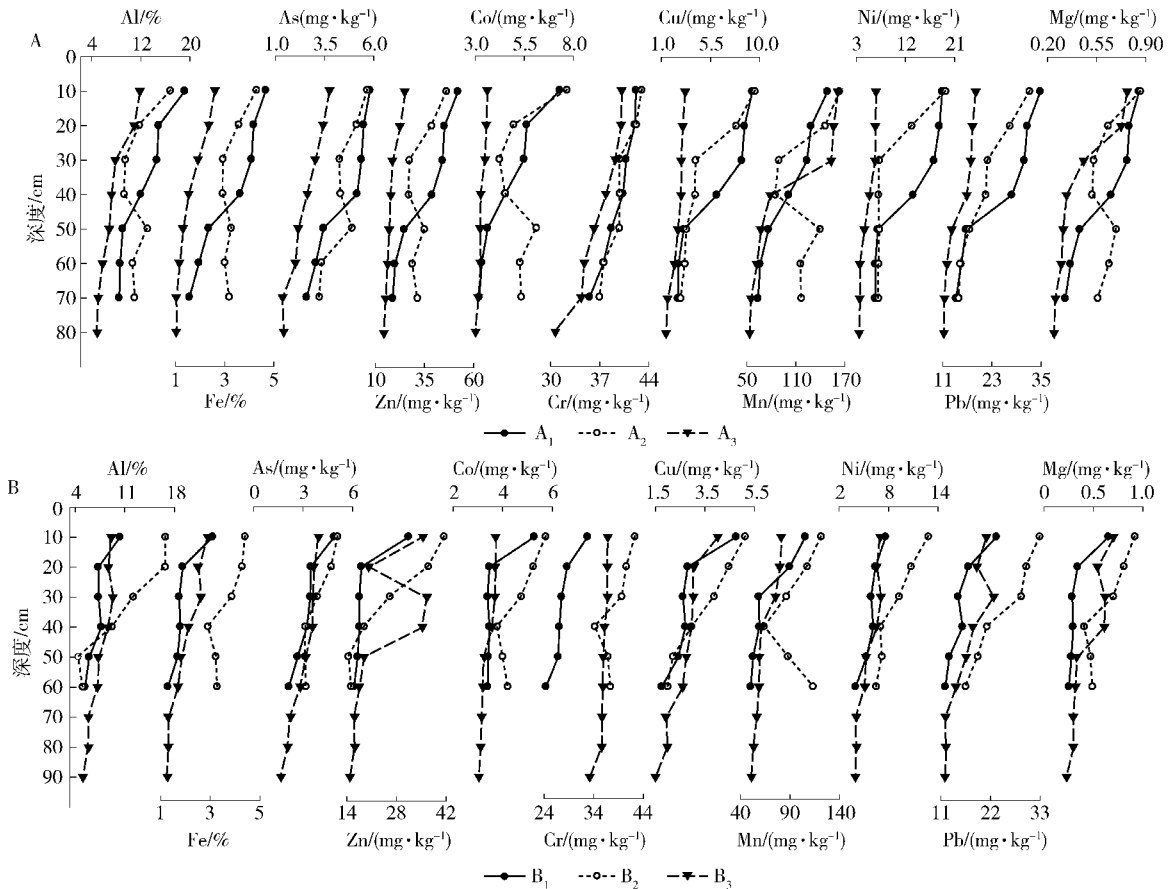


图5 A、B 样线上沉积柱中金属含量的垂向变化

Fig.5 Down core variations of metal concentration in core sediment from A and B sample lines

## 3 讨论

### 3.1 沉积物基本物理性质分布特征

与陆地森林不同,红树林林下沉积物的剖面类型多样,其理化性质受树种组成、根系结构、母岩类型、地形、潮汐以及降水等影响<sup>[5,21]</sup>。就沉积物粒度特征而言,本研究中更低潮位的样点沉积物含砂量更高。柱状沉积物的 pH 值受沉积物组分、潮位、含水量、微生物活性、粒度和人类干扰程度等因素影响<sup>[2]</sup>。 $A_3$ 、 $B_3$  样点位于更低潮位带,其 pH 值显著高于同一样线上更高潮位带的样点,6 个样柱的 pH 值自表层向下逐渐降低。尽管  $A_1$ 、 $A_2$  样点的 pH 值差异不显著,但样线上 3 个样点各层次的 pH 值表现为  $A_3 > A_1 > A_2$ , B 样线表现为  $B_3 > B_2 > B_1$ ,可见同一样点垂向上 pH 值随深度递减,而水平梯度上的影响因素相对复杂。红树林沉积物有机质含量与林龄呈正比,理化性质受群落结构与水动力的综合影响<sup>[22]</sup>。本研究中,  $A_3$  样点有机质含量显著低于 A 样线上更高潮位点;而  $B_2$  样点有机质含量显著高于

$B_1$ 、 $B_3$  样点,可能与  $B_2$  样点靠近潮沟,群落类型与  $B_1$ 、 $B_3$  样点不同有关,受红海榄-白骨壤混交群落复杂的根系与水动力条件综合作用的影响。A、B 样线上总氮、总磷含量的水平和垂向分布与有机质相似。与其他指标相比,2 条样线上可交换性盐基总量在水平方向上的规律性不强,垂向波动性大;总体上  $B_1$  样点的可交换盐基总量显著低于其他样点, A 样线上各样点差异不显著;B 样线上的  $B_1$  样点的可交换盐基总量显著低于  $B_2$ 、 $B_3$  样点。

### 3.2 金属元素含量及空间分布

受区域土壤背景值的影响,红树林沉积物中金属的含量在不同地区间的差别大<sup>[11]</sup>。对照国家海洋沉积物质量标准<sup>[23]</sup>和土壤环境背景值<sup>[24]</sup>,研究区 A、B 样线上各采样点沉积物样品中的 Cr、Pb、Zn、Cu、As 的含量均低于海洋沉积物 I 类标准。红树林可以通过吸附、沉淀和生物作用来转移和固定金属离子,成为物质元素沉积库<sup>[4]</sup>。沉积物中金属的空间分布特征与形成不同群落类型的沉积环境、水动力条件有关<sup>[12,17,25]</sup>,红树林沉积

物中金属元素的含量随潮位下降而逐渐降低<sup>[26-27]</sup>。本研究中, As、Co、Cu、Fe、Zn 含量在 A 样线上位于更低潮位的 A<sub>3</sub> 样点显著低于更高潮位的 A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub> 样点, 这与前人的研究结果一致, 但其在 A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub> 样点间的差异不显著; 而位于低潮位带的 B 样线上, 处在更高潮位的 B<sub>1</sub> 样点的 Cr 含量显著低于更低潮位的 B<sub>2</sub>、B<sub>3</sub> 样点, 在中间潮位上 B<sub>2</sub> 点的 Fe 含量显著高于 B<sub>1</sub> 和 B<sub>3</sub> 样点。研究表明, 潮位只是影响金属元素分布的一个因素。从金属元素含量在各样点的垂向分布看, 各样点的金属含量总体表现为随深度的增加而降低, 以沉积物表层的金属含量最高, 且呈上升趋势。这与近年来的海洋污染物排放量增加, 以及流域内使用无机肥料、人口增加、城市化和工业排放等因素都有关联。

但也有研究认为, 沉积物中的金属元素主要富集在表层, 只有当表层达到饱和状态时才可能向下层转移<sup>[28-29]</sup>。

### 3.3 金属元素含量与沉积物理化性质的相关性

沉积物基本理化性质与金属元素含量之间的相关分析表明(表1): pH 值与有机质含量负相关而与黏粒正相关; 交换性盐基总量与有机质、黏粒、粉粒含量显著正相关, 而与含砂量显著负相关; 有机质含量与黏粒、粉粒含量正相关, 而与含砂量显著负相关。金属含量除了与 pH 值相关性不显著、与砂粒含量显著负相关外, 其与沉积物中盐基总量, 有机质、黏粒、粉粒含量均呈现显著正相关。本研究中的金属含量与粒度、有机质均存在显著相关性, 这与前人的研究<sup>[10,14-15]</sup>相似。

表1 沉积柱中各金属元素含量间及其与沉积物基本理化性质的相关矩阵

Tab.1 Correlation coefficient matrix showing the relationships between metal content and other parameters in sediment

	pH	交换性盐基总量	有机质	黏粒	粉粒	砂粒	Al	Fe	As	Zn	Co	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Mg
pH	1.00																
交换性盐基总量	0.24	1.00															
有机质	-0.33*	0.61**	1.00														
黏粒	0.41**	0.55**	0.42**	1.00													
粉粒	0.14	0.59**	0.68**	0.89**	1.00												
砂粒	-0.20	-0.59**	-0.63**	-0.93**	-0.99**	1.00											
Al	0.13	0.83**	0.75**	0.66**	0.76**	-0.75**	1.00										
Fe	-0.05	0.72**	0.88**	0.69**	0.83**	-0.81**	0.86**	1.00									
As	0.04	0.70**	0.80**	0.63**	0.77**	-0.75**	0.87**	0.90**	1.00								
Zn	0.11	0.84**	0.79**	0.57**	0.72**	-0.70**	0.90**	0.84**	0.88**	1.00							
Co	-0.20	0.65**	0.95**	0.45**	0.67**	-0.63**	0.82**	0.86**	0.81**	0.83**	1.00						
Cr	0.24	0.66**	0.60**	0.54**	0.59**	-0.59**	0.66**	0.67**	0.61**	0.64**	0.57**	1.00					
Cu	0.11	0.65**	0.75**	0.60**	0.76**	-0.73**	0.82**	0.80**	0.87**	0.87**	0.81**	0.60**	1.00				
Mn	-0.01	0.64**	0.70**	0.35*	0.46**	-0.45**	0.69**	0.69**	0.68**	0.65**	0.73**	0.65**	0.64**	1.00			
Ni	0.04	0.66**	0.82**	0.65**	0.84**	-0.81**	0.84**	0.85**	0.86**	0.87**	0.84**	0.61**	0.96**	0.66**	1.00		
Pb	0.20	0.70**	0.74**	0.81**	0.89**	-0.89**	0.88**	0.91**	0.90**	0.86**	0.77**	0.66**	0.88**	0.61**	0.90**	1.00	
Mg	0.19	0.84**	0.76**	0.63**	0.70**	-0.70**	0.89**	0.90**	0.86**	0.88**	0.78**	0.73**	0.74**	0.78**	0.77**	0.86**	1.00

注: \* 为显著相关( $P < 0.05$ ), \*\* 为极显著相关( $P < 0.01$ )。

沉积物的粒度特征反映了水动力条件。处在较高潮位的 A<sub>1</sub>、B<sub>1</sub> 样点的水动力条件较弱, 水流交换时间短, 比 A<sub>3</sub>、B<sub>3</sub> 样点更容易形成细颗粒(黏粒、粉粒)沉积, 而低潮位区域的水动力作用强, 则沉积物含砂量更高。B 样线上各样点均处于低潮位带, B<sub>1</sub>、B<sub>3</sub> 样点的群落类型均为白骨壤纯林, B<sub>2</sub> 样点靠近潮沟, 群落类型为红海榄和白骨壤的混交林, 其沉积物的含砂量低, 但各样点垂向上自表层向下砂粒渐增,

而黏粒和粉粒含量递减, 是高程抬高下水动力条件减弱的表现。黏粒有更大的比表面积, 更容易从水体中捕捉有机质和无机离子<sup>[30]</sup>, 因而本研究中金属元素的含量与有机质和黏粒的含量正相关。在水动力作用下, 细颗粒沉积物向水动力较弱的高潮位堆积, 因此与中、低潮位相比, 高潮位的细颗粒含量高, 重金属含量相对富集。研究区 A、B 样线上各样点表层金属含量高, 以及 B<sub>2</sub> 样点的金属含量更高可能

与黏粒含量高有关。也有研究表明,Pb、Zn与粒度不相关<sup>[10]</sup>,Cu、Zn与有机质含量显著负相关,而Cr、Ni与有机质含量不相关<sup>[15]</sup>,Cu、Zn含量与pH显著正相关<sup>[13]</sup>等。因此,影响金属元素含量的因素不单取决于理化性质,也可能受其他生物过程如干扰等的影响。取样方式如分样密度、取样点的代表性等主观因素也可能会对分析结果产生影响。

对照当地土壤金属元素背景值,并与其他地区的研究结果<sup>[9,31]</sup>进行比较可知,本研究区沉积物中金属的含量相对较低,但表层沉积物中金属的含量呈上升趋势。本研究中金属元素含量之间的相关性均达到极显著水平,反映了其相互伴生性的特点或具有相同的来源。我国近海环境的金属污染与近年来经济的快速增长不无关系<sup>[32]</sup>,表层沉积物中金属元素含量的上升趋势不能排除人类活动带来的影响,因此有必要把痕量金属的含量检测纳入该地红树林生态系统健康的常规监测之中。

## 4 结 论

研究区沉积物基本理化性质呈现明显的空间梯度。水平方向上,随着与海堤距离的增加,粒度差异明显,更低潮位带上沉积物的含砂量、pH值更高,群落类型和水动力条件影响营养物质如有机质、总磷、总氮含量的水平分布。沉积物理化性质的垂向分布上,粒度梯度明显,除含砂量自表层向下逐渐增加外,黏粒含量、粉粒含量增加,沉积物的pH值、可交换盐基总量、有机质含量、总磷含量、总氮含量均以表层值最高,自表层向下逐渐降低。

沉积物中金属元素的含量表现出显著的空间异质性。从水平分布来看,沿陆地—海洋方向上随着与海堤距离的增加,更低潮位点的金属含量低,但也因金属元素而异,潮位对不同金属分布的影响程度存在差异。各样点金属元素含量垂向分布呈明显的分层差异,均以表层最高,随深度增加而降低;从沉积过程看,表层沉积物中金属的含量呈上升趋势。

沉积物理化性质间以及与金属含量间的相关分析表明,pH值与有机质含量负相关而与黏粒含量正相关;有机质与细颗粒含量正相关,而与砂粒显著负相关。金属含量除了与含砂量显著负相关、与pH值之间相关性不显著外,其与盐基总量、有机质含量、黏粒含量、粉粒含量均呈显著正相关。金属含量之间的相关性均达到极显著水平,反映了其相互伴生和同源的特征。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] WALTERS B B, RONBÄCK P, KOVACS J M, et al. Ethnobiology, socioeconomics and management of mangrove forests; a review[J]. *Aquatic Botany*, 2008, 89(2): 220-236.
- [ 2 ] NAGELKERKEN I, BLABER S J M, BOUILLON S, et al. The habitat function of mangroves for terrestrial and marine fauna; a review [J]. *Aquatic Botany*, 2008, 89(2):155-185.
- [ 3 ] ALONGI D M. The energetics of mangrove forest [M]. New York: Springer, 2009:126-160.
- [ 4 ] HARBISON P. Mangrove muds; a sink and a source for trace metals [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 1986, 17(6): 246-250.
- [ 5 ] WANG C, WANG X. Spatial distribution of dissolved Pb, Hg, Cd, Cu and As in the Bo Sea [J]. *Journal of Environmental Science*, 2007, 19(9): 1061-1066.
- [ 6 ] ESSIEN J P, ANTAI S P, OLAJIRE A A. Distribution, seasonal variations and ecotoxicological significance of heavy metals in sediments of cross river estuary mangrove swamp[J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 2009, 197(1-4):91-105.
- [ 7 ] 程皓,陈桂珠,叶志鸿. 红树林重金属污染生态学进展[J]. *生态学报*, 2009,29(7):3893-3900.
- [ 8 ] LEWIS M, PRYOR R, WILKING L. Fate and effects of anthropogenic chemicals in mangrove ecosystems; a review [J]. *Environmental Pollution*, 2011, 159(10):2328-2346.
- [ 9 ] CHEN T R, YU K F, LI S, et al. Heavy metal pollution recorded in Porites corals from Daya Bay, northern South China Sea [J]. *Marine Environmental Research*, 2010, 70(3):318-326.
- [ 10 ] 李柳强,丁振华,刘金玲,等. 中国主要红树林表层沉积物中重金属的分布特征及影响因素[J]. *海洋学报*, 2008, 30(5): 159-164.
- [ 11 ] 朱颖,吴纯德,余英华. 淇澳岛潮间带沉积物及红树植物中重金属分布[J]. *生态科学*, 2009,28(1):19-24.
- [ 12 ] MUKHERJEE D P, KUMAR B. Evaluation of metal contamination in freshly deposited sediment of Hugli Estuary, India [J]. *Archives of Applied Science Research*, 2012, 4(2):1155-1168.
- [ 13 ] EL-SAID G F, YOUSSEF D H. Ecotoxicological impact assessment of some heavy metals and their distribution in some fractions of mangrove sediments from Red Sea, Egypt [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, 185(1): 393-404.
- [ 14 ] 何斌源,戴培建,范航清. 广西英罗港红树林沼泽沉积物 and 大型底栖动物中重金属含量的研究[J]. *海洋环境科学*, 1996, 15(1):35-41.
- [ 15 ] 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1):100-104.
- [ 16 ] 丘耀文,余克服. 海南红树林湿地沉积物中重金属的累积[J]. *热带海洋学报*, 2011,30(2):102-108.
- [ 17 ] 张弛,王树功,朱远辉,等. 红树林湿地沉积物中 AVS-SEM 与重金属分布特征;以珠江口淇澳岛为例[J]. *环境科学学报*, 2011,31(4):805-815.
- [ 18 ] BANERJEE K, SENTHILKUMAR B, PURVAJA R, et al. Sedimentation and trace metal distribution in selected locations of Sundarbans mangroves and Hooghly estuary, Northeast coast of India [J]. *Environ Geochem Health*, 2012, 34(1):27-42.
- [ 19 ] 张万儒,杨光耀,屠星南. 森林土壤分析方法[M]. 北京:中国标准出版社,1999.

- [20] 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,2000.
- [21] ALONGI D M, CLOUGH B F, ROBERTSON A I. Nutrient-use efficiency in arid-zone forests of the mangrove *Rhizophora stylosa* and *Avicennia marina*[J]. Aquatic Botany, 2005, 82(2): 121-131.
- [22] MARCHAND C, ALLENBACH M, LALLIER-VERGÈS E. Relationships between heavy metals distribution and organic matter cycling in mangrove sediments (Conception Bay, New Caledonia) [J]. Geoderma, 2011, 160(3):444-456.
- [23] GB 18668—2002 海洋沉积物质量[S]. 北京:中国标准出版社,2002.
- [24] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京:中国环境科学出版社,1990: 87-256.
- [25] TAM N F Y, WONG Y S. Spatial and temporal variations of heavy metal contamination in sediments of a mangrove swamp in Hong Kong [J]. Marine Pollution Bulletin, 1995, 31(4): 254-261.
- [26] KRUITWAGEN G, PRATAP H B, COVACI A, et al. Status of pollution in mangrove ecosystems along the coast of Tanzania [J]. Marine Pollution Bulletin, 2008, 56(5):1022-1030.
- [27] 戴纪翠,倪晋仁. 红树林湿地环境污染地球化学的研究评述[J]. 海洋环境科学, 2009, 28(6): 779-784.
- [28] TAM N F Y, WONG Y S. Retention and distribution of heavy metals in mangrove soils receiving wastewater [J]. Environmental Pollution, 1996, 94(3): 283-291.
- [29] 陈振楼,许世远,柳林,等. 上海滨岸潮滩沉积物重金属元素的空间分布与累积[J]. 地理学报, 2000, 55(6):641-651.
- [30] FERNANDES L, NAYAK G N. Distribution of sediment parameters and depositional environment of mudflats of Mandovi estuary, Goa, India [J]. Journal of Coastal Research, 2009, 25(2): 273-284.
- [31] VANE C H, HARRISON I, KIM A W, et al. Organic and metal contamination in surface mangrove sediments of South China [J]. Marine Pollution Bulletin, 2009, 58(1):134-144.
- [32] PAN K, WANG W X. Trace metal contamination in estuarine and coastal environments in China [J]. Science of the Total Environment, 2012, 421: 3-16.

(责任编辑 冯秀兰)