

文章编号: 0254- 5357(2010) 03- 0236- 05

泉州湾洛阳江河口桐花树和秋茄红树植物中 重金属元素的分布与富集特征

胡恭任^{1,2}, 于瑞莲², 赵金秀², 刘小进², 涂湘林¹

(1. 中国科学院边缘海地质重点实验室, 中国科学院广州地球化学研究所, 广东 广州 510640

2. 华侨大学环境科学与工程系, 福建 厦门 361021)

摘要: 通过测定泉州湾洛阳江河口红树林区表层沉积物中酸提重金属元素含量及桐花树、秋茄两种红树植物各部位中重金属元素含量, 分析了重金属元素在两红树植物不同部位的分布特征及其富集和迁移能力, 并初步探讨了两种红树植物体内各重金属元素的主要来源。红树林区各采样点表层沉积物中重金属元素酸提量顺序为: Fe> Mn> Zn> Pb> Cu> Cr> Ni> Co, Cu和Pb的平均酸提量超过第一类海洋沉积物质量标准限值。同种元素在两种红树植物不同部位中的含量顺序一致: Cu为根>枝>叶; Ni为叶>根>枝; Fe, Mn, Cr, Zn, Pb, Co为根>叶>枝。两种红树植物对Ni, Cr, Cu, Zn, Fe, Mn的富集能力高于Co和Pb, 秋茄对Cu, Ni, Mn, Fe, Co的富集能力比桐花树略强些, 而对Zn, Cr, Pb的富集能力则相对弱些; 但两种植物对各元素的富集能力都达不到超富集植物的要求。两种植物对Ni元素的富集能力都大于其他元素, 且都集中在叶部, 其他元素则主要集中在根部。除Ni外, 其余元素在两植物体内的迁移系数均小于1。桐花树中的Cr和秋茄中的Cu, Zn, Mn主要来源于林地沉积物, 其他元素在两植物各部位均有不同的来源。

关键词: 红树植物; 重金属; 沉积物; 分布; 富集; 泉州湾洛阳江河口

中图分类号: P595, Q948.11 文献标识码: A

Distribution and Enrichment of Heavy Metals in the Mangrove Plants of *Aegiceras Corniculatum* and *Kandelia Candel* Collected from Luoyang Estuary in Quanzhou Bay

HU Gong-ren^{1,2}, YU Rui-lian², ZHAO Jin-xiu², LIU Xiao-jin², TU Xiang-lin¹

(1. Key Laboratory of Marginal Sea Geology, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; 2. Department of Environmental Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract The distribution, enrichment and migration characteristics of heavy metals in the mangroves of *Aegiceras corniculatum* and *Kandelia candel* were studied by means of determining the contents of acid extractable heavy metals in surface sediments and in different parts of each mangrove collected from the mangrove swamp in Luoyang estuary of Quanzhou Bay. The main sources of heavy metals in the investigated mangroves were also discussed preliminarily in this article. The contents of heavy metals in the surface sediments showed a sequence of Fe> Mn> Zn> Pb> Cu> Cr> Ni> Co, in which the average contents of Cu and Pb were higher than the

收稿日期: 2009-07-20 修订日期: 2009-11-06

基金项目: 中国科学院边缘海地质重点实验室、广州地球化学研究所开放基金项目资助 (MSG108-02);
泉州市科技计划重点项目资助 (2008Z9)

作者简介: 胡恭任 (1966-), 男, 江西赣州人, 教授, 主要从事环境生物地球化学与同位素地球化学方面的教学与科研工作。E-mail: grhu@hqu.edu.cn

quality standard limit (level I) for marine sediments. The contents of heavy metals in different parts of both mangroves were in the accordant order of root > branch > leaf for Cu, leaf > root > branch for Ni and root > leaf > branch for Fe, Mn, Cr, Zn, Pb and Ca. The enrichment capability for Ni, Cr, Cu, Zn, Fe and Mn in both mangroves was higher than that for Co and Pb. The enrichment capacity of *Kandelia candel* for Cu, Ni, Mn, Fe and Co was higher than that of *Aegiceras corniculatum*, while relatively lower for Zn, Cr and Pb. But the two kinds of the plants can not come up to the requirements of hyper-accumulators according to their accumulation capacity for each element. For both plants, the enrichment capability for Ni was the highest, which concentrated mainly in leaves. While the other elements mainly concentrated in roots. Except for Ni, the migration factors of all other elements in both plants were lower than 1. The content of Cr in *Aegiceras corniculatum* and Cu, Zn and Mn in *Kandelia candel* were mainly derived from the mangrove sediments, and there were different sources for other elements that accumulated in different parts of two plants.

Key words mangrove plant, heavy metal, sediment, distribution, enrichment, Luoyang estuary in Quanzhou Bay

红树林是热带、亚热带海岸潮间带的木本植物群落^[1], 主要分布在江河入海口及沿海岸线的海湾内, 是陆地生态系统向海洋生态系统过渡的最后一道“生态屏障”^[2-3]。随着工农业的发展, 各种富含重金属元素的工业废水和生活污水大量排放, 致使近岸海域重金属污染日趋严重。已有研究表明, 红树植物可通过物理、化学及生物作用对重金属元素加以吸收、积累而起到净化作用, 对降低近海重金属污染有重要意义^[4-9]。

迄今为止, 红树林对泉州湾潮间带沉积物重金属污染修复方面的报道并不多见。作者在泉州湾洛阳江口红树林区展开调查, 通过对红树林区表层沉积物以及林区典型红树植物桐花树和秋茄体内各部位(根、枝、叶)中重金属含量的分析, 探讨红树植物对林区沉积物中重金属元素的富集程度, 以及各重金属元素在两种红树植物体内不同部位的分布规律, 为评估该地区红树林在重金属污染修复方面的价值提供一定的科学依据。

1 实验部分

1.1 样品采集

泉州湾洛阳江口红树林为省级自然保护区, 位于东经 118°38′~118°42′, 北纬 24°52′~24°59′, 现存红树林面积近 400 hm², 其中自然林仅约 17 hm², 其余均为近年来人工种植林, 本文采样点均选在自然分布的桐花树和秋茄林中。在每一个采样点, 从长势良好的红树林中选出约 30 m²的区域, 均匀采集红树植物桐花树和秋茄的叶、枝、根及林地表层沉积物, 分别装入干净的自封塑料袋, 贴好标签, 迅速带回实验室处理。

1.2 沉积物样品预处理

将采回的沉积物放入冰箱中 -20℃ 冷冻 24 h 以上, 取出, 放在干净的实验台上晾干, 用干净的木棒碾碎, 剔除其中大块砾石、贝壳及植物残骸等杂物, 通过 2 mm 尼龙筛除去 2 mm 以上的砂砾, 再用玛瑙研钵将通过 2 mm 尼龙筛的土样研磨, 过 63 μm 尼龙筛, 筛下样混匀后装袋密封, 备用。

称取 0.500 0 g 烘干至恒重的沉积物样品于 50 mL 塑料离心管中, 加入 10 mL 0.5 mol/L HCl, 80 r/min 振荡 16 h, 4000 r/min 离心 10 min, 上清液移入 50 mL 容量瓶中, 残渣用 0.5 mol/L HNO₃ 洗涤并离心 3 次, 上清液合并至 50 mL 容量瓶中, 用 φ=3% (体积分数, 下同) 的 HNO₃ 定容, 于 4℃ 冰箱中冷藏, 待测^[10]。

1.3 植物样品预处理

红树植物各组织样品的预处理包括烘干、灰化和消解过程, 具体操作见文献[11]。

1.4 重金属元素的测定方法

以上沉积物及植物各组织提取液中的重金属元素含量用 2000DV 型电感耦合等离子体发射光谱仪 (ICP-AES, 美国 PerkinElmer 公司) 测定。

2 结果与讨论

2.1 林地表层沉积物中重金属元素含量

红树林地各站点表层沉积物中各重金属元素酸提量见表 1。各元素在不同站点表层沉积物中的酸提量各异。从平均值来看, 研究区红树林地表层沉积物中重金属元素酸提量顺序为: Fe > Mn > Zn > Pb > Cu > Cr > Ni > Co。其中, Cu 和 Pb 的平均酸提量已超过了第一类海洋沉积物质量标准限值 (Cu 和 Pb 的第一类限值分别为 35 mg/kg 和 60

mg/kg), 说明二者污染程度相对其他元素而言更严重些。

表 1 红树林地表层沉积物中酸提重金属的含量
Table 1 Contents of acid extractable heavy metals in surface mangrove sediments

| 采样点 | $w_B / (mg \cdot kg^{-1})$ | | | | | | | |
|-----|----------------------------|-------|-------|-------|-------|------|------|-------|
| | Cu | Zn | Ni | Cr | Mn | Co | Fe | Pb |
| 1#桐 | 82.0 | 45.0 | 10.17 | 20.53 | 1122 | 5.18 | 9558 | 53.52 |
| 2#桐 | 23.0 | 76.6 | 6.30 | 18.70 | 892.2 | 4.00 | 6911 | 58.90 |
| 3#桐 | 27.0 | 87.5 | 8.10 | 21.30 | 1215 | 3.80 | 7020 | 62.20 |
| 4#桐 | 136 | 42.0 | 10.09 | 20.38 | 1052 | 5.19 | 7846 | 41.05 |
| 5#桐 | 70.1 | 45.2 | 10.68 | 21.54 | 858.9 | 5.71 | 8278 | 39.35 |
| 1#茄 | 14.0 | 56.0 | 5.40 | 41.80 | 707.8 | 3.90 | 7531 | 151.4 |
| 2#茄 | 23.6 | 76.9 | 6.39 | 18.78 | 891.8 | 4.10 | 6913 | 58.83 |
| 3#茄 | 18.0 | 82.5 | 6.10 | 16.20 | 777.3 | 3.80 | 6793 | 53.70 |
| 4#茄 | 25.0 | 70.8 | 7.70 | 18.00 | 1058 | 3.90 | 6830 | 57.10 |
| 5#茄 | 71.0 | 44.9 | 10.92 | 21.94 | 858.1 | 5.31 | 8277 | 39.85 |
| 平均值 | 48.97 | 62.74 | 8.19 | 21.92 | 943.3 | 4.49 | 7596 | 61.59 |

2.2 红树植物不同部位各元素含量及富集系数

两种红树植物不同部位中各重金属元素的含量见表 2。各元素在同一植物的不同部位含量存在明显差异, 同种元素在不同植物的相同部位含量亦有所不同。总体而言, 两种红树植物各组织中元素平均含量顺序大体一致: Fe> Mn> Cr> Zn> Cu> Pb> Co 而 Ni 元素比较特殊, 在两种红树植物枝和根中的含量不高 (枝和根中平均含量分别位

于 Pb 和 Cu 之后), 但其在两植物叶中的平均含量要比 Cr 还要高 (桐花树和秋茄叶中 Ni 分别为 136 mg/kg 和 131 mg/kg)。比较各元素在两红树植物不同部位中的含量顺序可以发现, 同种元素在两种红树植物不同部位的含量顺序一致: Cu 在两植物中均为根>枝>叶; Ni 在两植物中均为叶>根>枝; Fe, Mn, Cr, Zn, Pb, Co 在两植物中均为根>叶>枝。

植物对土壤-沉积物中元素的富集能力可用富集系数来表示:

富集系数 = (植物体内某元素含量) / (该元素在土壤或沉积物中的含量)

植物对土壤-沉积物中元素的吸收富集能力与植物对元素的需求量有关, 也与土壤或沉积物中该元素的含量及存在形态等有关^[12]。两种红树植物不同部位对各元素的富集系数见表 3。

由表 3 可见, 两种红树植物不同部位对各元素的富集能力顺序有所不同。桐花树各部位对各元素的富集系数为: 枝 Cr> Zn> Mn> Cu> Ni> Co> Pb= Fe, 叶 Ni> Cr> Mn> Zn> Cu> Pb= Co> Fe, 根 Cr> Zn> Fe> Ni> Cu> Mn> Pb> Co, 整株平均 Ni> Cr> Zn> Fe> Mn> Cu> Pb> Co。秋茄各部位对各元素的富集系数: 枝 Cr> Cu= Mn> Ni> Zn> Co> Fe> Pb, 叶 Ni> Cr> Mn> Zn> Cu> Co> Fe= Pb, 根 Cr> Fe> Cu> Zn> Mn> Ni> Pb> Co, 整株

表 2 红树植物不同部位中重金属元素的含量

| 样元 | | $w_B / (mg \cdot kg^{-1})$ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|------|----------------------------|------|-------|------|-------|-------|------|------|------|------|------|-------|------|-------|-------|------|------|-------|---|---|
| 品素 | 枝 | 叶 | 根 | 1# | | | 2# | | | 3# | | | 4# | | | 5# | | | 平均值 | | |
| | | | | 枝 | 叶 | 根 | 枝 | 叶 | 根 | 枝 | 叶 | 根 | 枝 | 叶 | 根 | 枝 | 叶 | 根 | 枝 | 叶 | 根 |
| 桐花树 | Cu | 10.9 | 6.20 | 83.8 | 6.15 | 7.50 | 34.3 | 6.80 | 3.15 | 42.6 | 7.05 | 3.80 | 67.7 | 2.65 | 5.75 | 58.3 | 6.71 | 5.28 | 57.3 | | |
| | Zn | 9.70 | 12.9 | 106.3 | 13.6 | 22.8 | 50.4 | 16.3 | 24.4 | 58.9 | 9.35 | 40.5 | 44.3 | 6.30 | 16.2 | 154.1 | 11.0 | 23.4 | 82.8 | | |
| | Ni | 1.05 | 91.2 | 7.10 | 0.70 | 68.5 | 4.90 | 0.85 | 258 | 6.40 | 0.80 | 144 | 7.70 | 0.65 | 122.0 | 35.1 | 0.81 | 136 | 12.2 | | |
| | Cr | 22.7 | 25.9 | 118.0 | 23.8 | 31.0 | 101.7 | 26.4 | 32.4 | 95.7 | 22.6 | 20.9 | 81.3 | 23.2 | 36.5 | 99.4 | 23.7 | 29.3 | 99.2 | | |
| | Mn | 81.5 | 271 | 231.3 | 54.3 | 463 | 428.0 | 30.2 | 191 | 166 | 42.3 | 129 | 101 | 468 | 1274 | 2774 | 135 | 466 | 740 | | |
| | Co | 0.10 | 0.20 | 1.00 | 0.15 | 0.15 | 1.50 | 0.10 | 0.30 | 1.00 | 0.15 | 0.70 | 0.30 | 0.10 | 0.20 | 1.70 | 0.12 | 0.31 | 1.10 | | |
| | Fe | 79.1 | 98.4 | 4745 | 190 | 305 | 7549 | 138 | 175 | 4809 | 126 | 203 | 1325 | 103 | 365 | 4667 | 127 | 229 | 4619 | | |
| Pb | 0.05 | 0.40 | 10.9 | 1.30 | 2.45 | 11.8 | 0.30 | 3.40 | 9.00 | 2.60 | 9.50 | 4.80 | 0.30 | 0.40 | 54.4 | 0.91 | 3.23 | 18.2 | | | |
| 秋茄 | Cu | 2.40 | 4.90 | 26.0 | 5.05 | 3.85 | 35.6 | 15.3 | 6.35 | 46.0 | 5.75 | 5.20 | 50.0 | 8.60 | 6.35 | 48.7 | 7.42 | 5.33 | 41.3 | | |
| | Zn | 6.80 | 18.2 | 76.00 | 7.45 | 19.0 | 135.0 | 18.4 | 15.4 | 52.0 | 6.65 | 14.7 | 152.0 | 11.3 | 12.9 | 60.0 | 10.1 | 16.0 | 95.0 | | |
| | Ni | 0.90 | 138 | 3.00 | 0.90 | 181 | 9.00 | 1.90 | 130 | 4.00 | 0.95 | 190 | 14.00 | 0.95 | 18.6 | 4.00 | 1.12 | 131 | 6.80 | | |
| | Cr | 23.4 | 26.3 | 89.0 | 23.4 | 23.6 | 89.0 | 26.0 | 25.7 | 84.0 | 23.1 | 26.2 | 101.0 | 22.5 | 23.0 | 85.0 | 23.7 | 25.0 | 89.6 | | |
| | Mn | 389 | 1328 | 1180 | 404 | 459 | 831.0 | 47.7 | 358 | 220 | 478 | 1103 | 1640 | 56.1 | 172 | 497 | 275 | 684 | 874 | | |
| | Co | 0.15 | 0.15 | 0.40 | 0.15 | 0.30 | 1.00 | 0.10 | 0.25 | 1.00 | 0.10 | 0.30 | 3.00 | 0.20 | 0.20 | 1.00 | 0.14 | 0.24 | 1.28 | | |
| | Fe | 122 | 118 | 38500 | 99.4 | 168 | 19500 | 123 | 176 | 8600 | 91.5 | 335 | 30500 | 223 | 388 | 6910 | 132 | 237 | 20802 | | |
| Pb | 0.15 | 1.80 | 33.0 | 0.05 | 2.05 | 17.00 | 1.55 | 0.20 | 9.00 | 0.35 | 2.65 | 59.0 | 0.55 | 1.60 | 11.0 | 0.53 | 1.66 | 25.8 | | | |

表 3 红树植物不同部位对重金属元素的富集系数

Table 3 Enrichment factors of heavy metals in different parts of mangroves

| 样元 | 1 [#] | | | 2 [#] | | | 3 [#] | | | 4 [#] | | | 5 [#] | | | 平均值 | | | 整株 | |
|-----|----------------|-------|------|----------------|-------|------|----------------|-------|-------|----------------|-------|-------|----------------|------|-------|------|-------|-------|------|------|
| | 枝 | 叶 | 根 | 枝 | 叶 | 根 | 枝 | 叶 | 根 | 枝 | 叶 | 根 | 枝 | 叶 | 根 | 枝 | 叶 | 根 | | |
| 桐花树 | Cu | 0.13 | 0.08 | 1.02 | 0.23 | 0.28 | 1.29 | 0.26 | 0.12 | 1.61 | 0.05 | 0.03 | 0.50 | 0.04 | 0.08 | 0.82 | 0.14 | 0.12 | 1.05 | 0.44 |
| | Zn | 0.22 | 0.29 | 2.36 | 0.16 | 0.26 | 0.58 | 0.19 | 0.28 | 0.67 | 0.22 | 0.96 | 1.05 | 0.14 | 0.36 | 3.43 | 0.18 | 0.43 | 1.62 | 0.74 |
| | Ni | 0.10 | 8.98 | 0.70 | 0.09 | 8.46 | 0.60 | 0.10 | 31.93 | 0.79 | 0.08 | 14.30 | 0.76 | 0.06 | 11.18 | 3.21 | 0.09 | 14.97 | 1.21 | 5.42 |
| | Cr | 1.11 | 1.26 | 5.75 | 1.12 | 1.46 | 4.77 | 1.24 | 1.52 | 4.49 | 1.11 | 1.03 | 3.99 | 1.06 | 1.67 | 4.53 | 1.13 | 1.39 | 4.71 | 2.41 |
| | Mn | 0.07 | 0.24 | 0.21 | 0.04 | 0.38 | 0.35 | 0.02 | 0.16 | 0.14 | 0.04 | 0.12 | 0.10 | 0.55 | 1.48 | 3.23 | 0.15 | 0.48 | 0.80 | 0.48 |
| | Co | 0.02 | 0.04 | 0.19 | 0.04 | 0.04 | 0.39 | 0.03 | 0.08 | 0.26 | 0.03 | 0.13 | 0.06 | 0.02 | 0.04 | 0.32 | 0.03 | 0.07 | 0.25 | 0.11 |
| | Fe | 0.01 | 0.01 | 0.50 | 0.03 | 0.04 | 1.08 | 0.02 | 0.03 | 0.69 | 0.02 | 0.03 | 0.17 | 0.01 | 0.04 | 5.64 | 0.02 | 0.03 | 1.61 | 0.55 |
| | Pb | 0.00 | 0.01 | 0.20 | 0.02 | 0.04 | 0.19 | 0.00 | 0.05 | 0.14 | 0.06 | 0.23 | 0.12 | 0.01 | 0.01 | 1.36 | 0.02 | 0.07 | 0.40 | 0.16 |
| | 秋茄 | Cu | 0.17 | 0.36 | 1.88 | 0.22 | 0.17 | 1.53 | 0.85 | 0.35 | 2.54 | 0.23 | 0.21 | 2.02 | 0.12 | 0.09 | 0.68 | 0.32 | 0.23 | 1.73 |
| Zn | 0.12 | 0.33 | 1.36 | 0.10 | 0.25 | 1.76 | 0.22 | 0.19 | 0.63 | 0.09 | 0.21 | 2.15 | 0.25 | 0.29 | 1.34 | 0.16 | 0.25 | 1.45 | 0.62 | |
| Ni | 0.17 | 25.69 | 0.56 | 0.14 | 28.76 | 1.43 | 0.31 | 21.37 | 0.66 | 0.12 | 24.74 | 1.82 | 0.09 | 1.70 | 0.37 | 0.17 | 20.45 | 0.96 | 7.19 | |
| Cr | 0.56 | 0.63 | 2.13 | 1.25 | 1.26 | 4.76 | 1.61 | 1.59 | 5.19 | 1.29 | 1.46 | 5.61 | 1.03 | 1.05 | 3.87 | 1.15 | 1.20 | 4.31 | 2.22 | |
| Mn | 0.55 | 1.88 | 1.67 | 0.45 | 0.52 | 0.93 | 0.06 | 0.46 | 0.28 | 0.45 | 1.04 | 1.55 | 0.07 | 0.20 | 0.58 | 0.32 | 0.82 | 1.00 | 0.71 | |
| Co | 0.04 | 0.04 | 0.10 | 0.04 | 0.08 | 0.25 | 0.03 | 0.07 | 0.26 | 0.03 | 0.08 | 0.77 | 0.04 | 0.04 | 0.19 | 0.03 | 0.06 | 0.31 | 0.14 | |
| Fe | 0.02 | 0.02 | 5.11 | 0.01 | 0.02 | 2.82 | 0.02 | 0.03 | 1.27 | 0.01 | 0.05 | 4.47 | 0.03 | 0.05 | 0.83 | 0.02 | 0.03 | 2.90 | 0.98 | |
| Pb | 0.00 | 0.01 | 0.22 | 0.00 | 0.03 | 0.29 | 0.03 | 0.00 | 0.17 | 0.01 | 0.05 | 1.03 | 0.01 | 0.04 | 0.28 | 0.01 | 0.03 | 0.40 | 0.14 | |

平均 Ni > Cr > Fe > Cu > Mn > Zn > Pb = Co。总体看来, 两种红树植物对 Ni、Cr、Cu、Zn、Fe、Mn 的富集能力高于 Co 和 Pb, 但两种植物对各元素的富集能力都达不到超富集植物的要求^[13]。相比而言, 秋茄对 Cu、Ni、Mn、Fe、Co 的富集能力比桐花树略强些; 而对 Zn、Cr、Pb 的富集能力则相对弱些。

比较两种植物不同部位对各元素的平均富集系数可以发现, 除了 Ni 在叶中的富集系数最大外, 其余元素都是在根中的富集系数最大, 表明两种红树植物将大多数重金属元素吸收并储存于植物不易消耗的坚硬部位根中, 不易被转移到水体和沉积物中, 同时减少了通过食物链富集作用引起的危害, 能起到一定的修复重金属污染的作用。而对于 Ni 而言, 当红树的叶片枯萎凋落时, 聚集在叶中的 Ni 又可重新返还到水体和沉积物中, 一定程度上不利于红树植物对其进行固定和污染修复。

2.3 重金属元素在植物体内的迁移能力

元素在植株体内的迁移能力可用迁移系数(叶中含量/根中含量)来表达^[7]。两种红树植物对各重金属元素的平均迁移系数见表 4。可见, 各元素在桐花树体内的迁移能力顺序为: Ni > Mn > Cr > Zn = Co > Pb > Cu > Fe。在秋茄体内的迁移能力顺序为: Ni > Mn > Cr > Co > Zn > Cu > Pb > Fe。除 Ni 在桐花树和秋茄体内的迁移系数分别达 11.2 和 19.3 外, 其余元素在两种植物体内的迁移系数均小于 1, 这表明两红树植物大多将各类重金属元

素储存于根中, 可以给林区底栖生物提供较为清洁的植物叶片食物, 避免了毒性较大的重金属元素进入食物链的蓄积过程^[14-15]。

表 4 两种红树植物对重金属元素的平均迁移系数

Table 4 Mean migration factors of heavy metals in different species of mangroves

| 样品 | 平均迁移系数 | | | | | | | |
|-----|--------|------|------|------|------|------|------|------|
| | Cu | Zn | Ni | Cr | Mn | Co | Fe | Pb |
| 桐花树 | 0.09 | 0.28 | 11.2 | 0.30 | 0.63 | 0.28 | 0.05 | 0.18 |
| 秋茄 | 0.13 | 0.17 | 19.3 | 0.28 | 0.78 | 0.19 | 0.01 | 0.06 |

2.4 红树植物中重金属元素来源初探

红树植物富集重金属的途径不一定是从沉积物中吸收而来, 也可能从水体、大气中吸收而来。根据红树植物中重金属元素的含量与林地表层沉积物中该元素酸可提取量的相关性, 可大体判断红树植物体内的重金属是否主要来源于林地沉积物。若为显著正相关, 说明植物体内的重金属主要来源于林地沉积物; 若为负相关, 说明来源于沉积物的可能性很小。桐花树、秋茄各部位中重金属元素含量与林地表层沉积物中该元素酸提量之间的相关系数见表 5。

从表 5 可见, 桐花树中只有 Cr 在各部位的含量与沉积物中酸提量的相关系数为正, Mn、Pb 在各部位的含量与沉积物中酸提量的相关系数全为

负,其他元素有正有负;秋茄中 Cu Zn Mn 与沉积物中酸提量的相关系数全为正,其他元素有正有负。说明桐花树中 Cr 的富集主要来源于沉积物,而 Mn Pb 来源于沉积物的可能性很小;秋茄中 Cu Zn Mn 主要来源于林地沉积物,其他元素在各部位均有不同的来源。

表 5 红树中重金属含量与沉积物中重金属酸提量相关系数^①
Table 5 Correlation coefficients for heavy metals between the contents in mangroves and the acid extractable contents in sediments

| 样品 | 部位 | 相关系数 | | | | | | | | |
|-----|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|
| | | Cu | Zn | Ni | Cr | Mn | Co | Fe | Pb | |
| 桐花树 | 枝 | 0.17 | 0.93 | 0.23 | 0.22 | -0.64 | -0.20 | -0.89 | -0.36 | |
| | 叶 | -0.30 | -0.03 | 0.01 | 0.29 | -0.75 | 0.20 | -0.42 | -0.26 | |
| | 根 | 0.75 | -0.48 | 0.56 | 0.07 | -0.68 | -0.01 | -0.28 | -0.54 | |
| 秋茄 | 枝 | 0.13 | 0.32 | -0.26 | -0.28 | 0.42 | 0.86 | 0.91 | -0.37 | |
| | 叶 | 0.48 | 0.38 | -0.74 | 0.33 | 0.02 | -0.28 | 0.44 | 0.12 | |
| | 根 | 0.51 | 0.33 | 0.03 | -0.08 | 0.53 | -0.17 | -0.21 | 0.26 | |

① $n=5$; $r(0.1)=0.80$ $r(0.05)=0.88$ $r(0.01)=0.96$

3 结语

(1) 泉州湾洛阳江河口红树林区表层沉积物中重金属元素酸提量顺序为: $Fe > Mn > Zn > Pb > Cu > Cr > Ni > Co$, 其中, Cu 和 Pb 的平均酸提量已超过第一类海洋沉积物质量标准限值, 污染程度相对其他元素而言更显严重。

(2) 桐花树和秋茄两种红树植物各组织中元素平均含量顺序大体一致: $Fe > Mn > Cr > Zn > Cu > Pb > Co > Ni$ 较特殊, 在两植物枝、根中含量不高, 但在两植物叶中的平均含量较高。同种元素在两种红树植物不同部位中的含量顺序一致: Cu 为根 > 枝 > 叶; Ni 为叶 > 根 > 枝; Fe, Mn, Cr, Zn, Pb, Co 为根 > 叶 > 枝。

(3) 两种红树植物对 Ni, Cr, Cu, Zn, Fe, Mn 的富集能力高于 Co 和 Pb, 但两种植物对各元素的富集能力都达不到超富集植物的要求。秋茄对 Cu, Ni, Mn, Fe, Co 的富集能力比桐花树略强些; 而对 Zn, Cr, Pb 的富集能力则相对弱些。

(4) 除 Ni 元素在叶中的富集系数最大外, 其余元素都是在根中的富集系数最大, 且除 Ni 外, 其余元素在两植物体内的迁移系数均小于 1, 表明两红树植物将大多重金属元素吸收并储存于不易消耗的坚硬部位根中, 不易被转移到水体和沉积物中, 同时减少了通过食物链富集作用引起的危害, 起到修复重金属污染的作用。

(5) 桐花树中的 Cr 和秋茄中的 Cu, Zn, Mn 主要来源于林地沉积物, 而其他元素在两植物各部位均可能有不同的来源。

4 参考文献

- [1] 林鹏. 红树林 [M]. 北京: 海洋出版社, 1984: 1.
- [2] 李庆芳, 章家恩, 刘金苓, 唐国玲. 红树林生态系统服务功能研究综述 [J]. 生态科学, 2006, 25(5): 472-475.
- [3] 李晓菊, 靖元孝, 陈桂珠, 任延丽. 红树林湿地系统污染生态及其净化效果的研究概况 [J]. 湿地科学, 2005, 12(4): 315-320.
- [4] 张凤琴, 王友绍, 殷建平, 董俊德. 红树植物抗重金属污染研究进展 [J]. 云南植物研究, 2005, 27(3): 225-231.
- [5] 李霞, 莫创荣, 卢杰. 我国红树林净化污水研究进展 [J]. 海洋环境科学, 2005, 24(4): 77-80.
- [6] 陈小勇, 曾宝强, 陈利华. 香港汀角红树植物、沉积物及双壳类动物重金属含量 [J]. 中国环境科学, 2003, 23(5): 480-484.
- [7] 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.
- [8] Machado W, Silva-Filho E V, Oliveira R R, Lacerda L D. Trace metal retention in mangrove ecosystems in Guanabara Bay, SE Brazil [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2002, 44(11): 1277-1280.
- [9] Horsfall M, Oghan F, Akpohonor E E. Biosorption of Pb^{2+} from aqueous solution by waste biomass of aerial roots of *Rhizophora mangle* (red mangrove) [J]. *Chemistry & Biodiversity*, 2005, 2(9): 1246-1255.
- [10] Janak+Raman D, Jonathan M P, Srinivasulu S. Trace metal enrichment in core sediments in muthupet mangroves, SE coast of India. Application of acid leachable technique [J]. *Environmental Pollution*, 2007, 145(26): 245-257.
- [11] 胡恭任, 于瑞莲, 吕斌. 桐花树对水体中铬、镍、铜污染的修复实验研究 [J]. 中国矿业, 2009, 18(1): 68-72.
- [12] 王文卿, 郑文教, 林鹏. 九龙江口红树植物叶片重金属元素含量 [J]. 台湾海峡, 1997, 16(2): 233-238.
- [13] 吴启堂, 陈同斌. 环境生物修复技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 86-87.
- [14] Defew L H, Mair J M, Guzman H M. An assessment of metal contamination in mangrove sediments and leaves from Punta Mala Bay, Pacific Panama [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2005, 50: 547-552.
- [15] Silva C A Ramos e Silva A P da Oliveira S R de. Concentration, stock and transport rate of heavy metals in a tropical red mangrove, Natal, Brazil [J]. *Marine Chemistry*, 2006, 99(1-4): 2-11.