

季一诺,赵志忠,吴 丹,等. 东寨港红树林沉积物中铜、锌、镉、铅的空间分布特征[J]. 江苏农业科学,2015,43(11):462-465.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2015.11.144

东寨港红树林沉积物中铜、锌、镉、铅的空间分布特征

季一诺, 赵志忠, 吴 丹, 王姝杰

(海南师范大学地理与旅游学院,海南海口 571158)

摘要:使用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定东寨港红树林湿地沉积物不同剖面中铜(Cu)、铅(Pb)、锌(Zn)、镉(Cd)重金属元素总量及有效态含量。结果表明,沉积物中 Cu、Zn、Cd、Pb 4 种重金属元素总量平均值依次为 13.50、54.80、1.32、16.20 mg/kg;表层(0~5 cm)沉积物中重金属总含量大小为:菠萝岛>保护站>铺前村,其中菠萝岛受到海水养殖、船舶运输活动的双重影响,沉积物表层重金属含量最高。不同深度上重金属有效态含量及生物有效性系数的分布表明,与保护站、菠萝岛采样区对比,铺前村有效态含量偏低,各剖面 Cd 生物有效性系数大于另外 2 个区,这说明在沉积环境发生改变时,铺前村秋茄林可能面临一定的 Cd 污染潜在风险。

关键词:重金属;有效态;红树林沉积物;东寨港

中图分类号: S718.51⁺6

文献标志码: A

文章编号: 1002-1302(2015)11-0462-03

红树林生态系统是介于海洋和陆地环境之间独特的沿海过渡生态系统,是热带、亚热带海岸重要的潮间带河口湿地,因为地处河口与海岸带交界处,通常成为陆源污染物质的汇聚地^[1-2]。红树林独特的性质如高生产力(产生大量的有机碎屑)和沉积物中缺氧的还原状态,使得红树林成为很多污染物(如营养盐、重金属、有机污染物质)理想的吸收储存场所,红树林湿地是天然的污水处理厂^[3]。不同于有机污染物,重金属不能被生物或化学降解,通常在本地积聚或向外界输送^[4]。因此,红树林湿地可以由重金属的汇转变为重金属的源。铜(Cu)、锌(Zn)是植物生长所必需的微量营养元素,植物缺乏 Cu、Zn 会导致生长发育不良,Cu、Zn 浓度过高也会对植物生长产生毒害作用。镉(Cd)、铅(Pb)作为植物生长非必需元素,对植物生长具有毒害作用^[5]。目前,关于东寨港红树林湿地沉积物中重金属分布及评价研究很多,但仅局限于沉积物表层重金属含量或重金属总量的空间分布^[6-8]。笔者以湿地重金属(Cu、Zn、Cd、Pb)总含量以及有效含量的空间分布为切入点,了解东寨港红树林的生态环境现状,旨在为海南省红树林生态系统保护及可持续利用提供科学依据。

1 研究区域和研究方法

1.1 研究区概况

海南岛红树林现存面积为 4 772 hm²,其中东北部的东寨港和清澜港红树林面积之和为 3 900 hm²,占 81.7%^[9]。我国已发现的 27 种真红树植物中,26 种在海南省有分布^[10]。1980 年,东寨港成为中国第一个红树林自然保护区,1986 年升级为国家级保护区,1992 年被列入国际重要湿地名录中的

7 块中国湿地之一^[11]。东寨港红树林自然保护区位于海南省东北部的海口市美兰区与文昌市交界处,属热带海洋性季风气候,年均气温 23.8℃,海水表层年平均温度 24.5℃,年平均降水量 1 676 mm,不规则全日潮,平均潮差约 1 m,区内沉积物表层呈酸性,pH 值 5~6^[12-14]。东寨港 3 个采样区概况见表 1。

1.2 样品采集、预处理和实验室分析

2013 年 8 月收集湿地沉积物,首先在研究区内选取主要采样区域,利用全球定位系统(GPS)进行准确定位。为了避免金属工具对样品产生影响,用塑料铲取中央未受干扰的(分别距地表 0~5 cm、20~30 cm、40~50 cm)红树覆盖下沉积物,采集完成后装入干净的聚乙烯袋中,迅速密封。在实验室去除沉积物样品中的动植物残体、石粒,进行风干、研磨,过 150 目尼龙筛,备用。对沉积物样品进行消解处理:准确称取 0.100 0 g 干燥样品,放入对应编号的内衬杯中;向每个内衬杯中分别加入 6 mL HNO₃、3 mL HF,将内衬杯加盖密封置于微波消解仪中升温至 200℃,时间为 20 min;将得到的消解液定量转移至烧杯中,加入 0.5 mL H₂O₂,蒸干剩余酸;用 0.02 mL HNO₃ 洗涤消解后的盐类,用超纯水定容至 50 mL,待测。络合剂能同大多数金属离子形成稳定的水溶性络合物,所以常用它来提取土壤中有有效态重金属元素^[15]。络合剂提取沉积物样品有效态步骤如下:首先配制提取液,组成为 0.5 mol/L NH₄Ac + 0.5 mol/L HAc + 0.02 mol/L Na₂EDTA;然后称取 1.000 g 干燥样品,加入 10 mL 提取液,振荡 1 h,以 3 500 r/min 离心 25 min,过滤,取滤液 3 mL,用超纯水定容至 10 mL,待测。使用 Agilent 7700x 型电感耦合等离子体质谱仪绘制标准曲线,标准曲线的线性相关系数均在 0.999 5 以上。测定标准物质中各元素含量,最后测定沉积物中 Cu、Pb、Zn、Cd 重金属元素总量及有效态含量。

2 结果与分析

2.1 沉积物重金属元素总量对比

东寨港红树林沉积物样品质地略有差异,大部分样点为

收稿日期:2014-11-14

基金项目:国家自然科学基金(编号:41261062);海南省重点科技计划(编号:2DXM20130021)。

作者简介:季一诺(1991—),男,硕士研究生,主要从事热带地表海岛屿过程与环境评价研究。E-mail:jiyinuo1991@163.com。

通信作者:赵志忠,博士,研究员,主要从事自然地理学、地球化学研究。E-mail:zhizhong@hainnu.edu.cn。

表 1 采样区概况

采样区	地理位置	主要植被类型
保护站	距入海口约 4 km	尖瓣海莲 (<i>Bruguiera sexangula</i>)、木榄 (<i>Bruguiera gymnorrhiza</i>)
菠萝岛	距入海口约 2 km, 为河心洲	角果木 (<i>Ceriops tagal</i>)、海桑 (<i>Sonneratia caseolaris</i>)
铺前村	距入海口约 0.5 km	秋茄 (<i>Kandelia candel</i>)

淤泥或黏土质沉积物,呈黑色或浅棕色。从整个研究区来看,重金属总含量的波动范围比较明显。将 Cu、Zn、Cd、Pb 在各采样点的不同深度取平均值,然后再把各个均值进行平均,变异系数(CV)分别是 63.62%、45.05%、91.57%、44.55%。

表 2 重金属元素在东寨港红树林湿地沉积物和全国其他红树林湿地中的平均含量

地点	平均含量(mg/kg)				参考文献
	Cu	Zn	Cd	Pb	
海南省东寨港	13.50	54.80	1.32	16.20	本研究
海南省三亚湾	9.50	53.10	0.13	17.50	[3]
海南省亚龙湾	4.70	25.70	0.12	14.70	[3]
广东省深圳市	38.30	11.40	0.14	28.70	[16]
香港特别行政区米埔	78.50	240.00	2.62	79.20	[17]
广东省珠江口	77.70	229.00	0.43	72.80	[18]
广东省湛江市	19.00	69.00		36.00	[19]
广西壮族自治区钦州港	40.91	104.01	0.25	111.62	[20]
福建省泉州市	42.50	184.00	0.629	73.70	[21]
福建省九龙江	26.60	138.00	0.12	101.00	[22]
海洋沉积物质量标准 I 类	35.00	150.00	0.50	60.00	[18]
海洋沉积物质量标准 II 类	100.00	350.00	1.50	130.00	[18]
荷兰沉积物环境质量标准	36.00	140.00	0.80	85.00	[23]

由表 2 可以看出,东寨港红树林沉积物中各重金属的平均含量大小顺序依次为:Zn > Pb > Cu > Cd。与海南升另 2 处红树林相比,除三亚湾 Pb 含量略大于东寨港外,4 种重金属含量最大值均出现在东寨港,原因可能是海南红树林沉积物中重金属主要来源于农业生产中使用的含重金属的化肥、农药,东寨港潮间带海水养殖业发达,饵料、排泄物对沉积物中重金属的含量有重要贡献^[3]。与国内其他地区红树林沉积物相比较,东寨港 Cu、Zn、Pb 3 种重金属元素含量均处于中等偏下水平;Cd 含量仅次于香港米埔。东寨港红树林沉积物中 Cu、Zn、Pb 平均含量低于国家海洋沉积物 I 类标准,Cd 平均含量超过海洋沉积物 I 类标准,但尚未超过 II 类标准。若根据荷兰制定的沉积物环境质量标准^[23],则东寨港红树林沉积物中仅有 Cd 含量明显超标,Cu、Zn、Pb 均在标准值以下,这说明 Cd 可能有不同的自然或人为富集来源。与全国不同河口、海湾红树林湿地相比,东寨港红树林沉积物 4 种目标重金属由于本底值较低、环境容量较大,因而重金属元素含量处于中等偏低水平,这也与海南岛开发过程中对工业发展进行限制有关。

2.2 沉积物重金属元素总量垂向分布

由表 3 可知,东寨港不同区域沉积物中重金属含量有所不同。在重金属最易富集的沉积物表层(0~5 cm),重金属含量由高到低依次为:菠萝岛 > 保护站 > 铺前村。重金属主要在红树林沉积物的表层富集,只有在表层饱和后才会逐渐向下迁移^[24]。本研究中 4 种目标金属的总含量基本上从表层向下层递减,说明由于环境污染冲击,沉积物表层显示出重金属元素积累,以海洋沉积物质量标准为参考,除 Cd 外,表层重金属总含量均低于国家海洋沉积物 I 类标准,说明区内沉积物中重金属尚未在表层形成严重富集。在保护站、菠萝

表 3 重金属总量平均值在东寨港 3 个主要采样区沉积物中的垂向分布

采样区	深度 (cm)	平均含量(mg/kg)			
		Cu	Zn	Cd	Pb
保护站	0~5	21.31	71.64	3.79	23.79
	20~30	14.36	48.81	2.46	15.85
	40~50	14.30	39.77	0.98	18.02
菠萝岛	0~5	25.64	83.62	1.27	23.81
	20~30	18.81	51.84	1.27	21.96
	40~50	16.32	46.59	0.63	16.30
铺前村	0~5	3.38	53.78	0.55	9.95
	20~30	2.80	53.24	0.49	8.76
	40~50	4.33	43.46	0.42	7.45

岛,4 种目标金属总含量在各层均比较接近,铺前村目标金属在各层的总含量则明显低于前两者。区内红树林沉积物重金属来源可以分为 2 大类:一是由地球化学活动作用的自然过程;二是受人类活动影响。保护站距离生活区约 100 m,周边地区农田、水产养殖业较密集,农业生产活动使用的含重金属的化肥、农药等随潮水直接进入湿地,同时养殖饵料、排泄物等也导致保护站周围沉积物中有机质含量丰富,对重金属也有一定的吸附作用。位于码头附近的菠萝岛不仅有虾塘分布,同时也是红树林咸水鸭的主要放养区,同时船舶往来频繁。Singh 等研究已证明,船体防护漆中的 Cu、Zn 含量分别高达 300、100 g/kg,船体防护漆及燃油中不断释放的重金属可能是附近重金属的来源之一^[25]。铺前村位于东寨港与琼州海峡交汇处,旅游开发程度低,海水养殖规模较小,潮汐作用较强。研究表明,相对于其他红树林植被,秋茄对沉积物中的重金属具有良好的吸收作用,并且重金属富集能力会随林龄的增长而增强^[26]。

2.3 重金属有效态含量的垂向分布

由于重金属-沉积物-生物间存在复杂的动态相互作用,只有部分重金属能被生物吸收利用。目前沉积物中重金属污染风险评价中大多假设重金属总量都可被生物吸收利用,因此难以准确评价沉积物中重金属污染风险。重金属有效态能提供重金属移动性、毒性与生物有效性信息,是沉积物污染风险评估的重要手段^[27-28]。重金属生物有效性系数是重金属有效态含量占重金属总量的比例,能更清楚地指示环境污染对沉积物或土壤的冲击^[29]。沉积物全深度重金属有效态含量变异系数(CV)分别是 69.42%、52.23%、97.71%、50.56%,说明有效态含量与重金属总量类似,受外界干扰比较显著,空间分异性较强。有效态重金属含量变异系数比总量大,这是因为有效态重金属在不同形态中的含量、化学组成不同^[27]。由此可以认为,红树林周边的水产养殖类型、旅游行为、生活排污等人类活动都会对沉积物中重金属有效态含量产生深刻的影响。

由表 4 可知,整体来看,保护站的 Cu、Zn、Cd 在沉积物中的有效态含量均随深度增加逐渐降低,Pb 含量随深度增加呈

先降后升趋势,最小值出现在 20~30 cm 层。菠萝岛采样区中 4 种金属在 0~5 cm 含量最高,随深度不断加大,元素含量递减幅度比较均匀。铺前村目标金属有效态含量在垂向上均呈递减趋势。

表 4 东寨港 3 个主要采样区 4 种重金属有效态及生物有效性系数在不同深度沉积物中含量

区域	深度 (cm)	重金属有效态含量(mg/kg)				生物有效性系数(%)			
		Cu	Zn	Cd	Pb	Cu	Zn	Cd	Pb
保护站	0~5	5.06	11.66	1.30	3.13	23.75	16.28	34.25	13.17
	20~30	2.68	7.43	0.74	1.98	18.68	15.22	29.88	12.51
	40~50	2.28	4.95	0.26	2.23	15.98	12.46	26.85	12.37
菠萝岛	0~5	4.61	14.39	0.43	3.09	17.96	17.21	33.59	12.98
	20~30	3.30	8.70	0.39	2.67	17.52	16.78	30.48	12.14
	40~50	2.79	7.03	0.16	1.86	17.13	15.09	25.27	11.38
铺前村	0~5	0.81	9.23	0.21	1.28	23.94	17.16	38.27	12.90
	20~30	0.53	8.18	0.16	0.97	18.81	15.37	31.76	11.02
	40~50	0.50	5.12	0.13	0.66	11.54	11.79	30.79	8.89

4 种目标元素的生物有效性系数为 8.89%~38.27%,生物有效性系数从表层到底层呈依次降低趋势,表明沉积物出现了不同程度的重金属污染现象,也证实了沉积物环境对重金属迁移具有一定的栅栏作用。保护站、菠萝岛受到农业活动、旅游运输活动的影响,重金属总含量、重金属有效态含量高于铺前村,但 3 个区域重金属生物有效性系数差异并不明显。Cd 在铺前村各剖面的生物有效性系数大于保护站、菠萝岛,这可能是因为铺前村红树植被类型以秋茄(*Kandelia candel*)为主,其根系能够分泌低分子量有机酸(如草酸、柠檬酸、苹果酸等),低分子量有机酸在秋茄根际区域通过络合方式结合铁锰氧化物,能释放锰(Mn)、铁(Fe),导致铁锰氧化物结合态重金属总量减少,其他形态如可交换态的重金属总量增加^[30-31]。因此,当周围环境发生变化,沉积物理化性质改变时,铺前村秋茄林中 Cd 的生物有效性系数可能会升高,导致重金属 Cd 潜在风险增加。

3 结论

本研究结果表明,东寨港红树林沉积物中 Cu、Zn、Cd、Pb 重金属元素总量平均值分别为 13.5、54.8、1.32、16.2 mg/kg。沉积物中 4 种目标金属在垂向上的总含量均从表层向下层递减。受农业活动、旅游运输活动等影响,表层(0~5 cm)沉积物中重金属总含量大小为:菠萝岛>保护站>铺前村。沉积物中不同深度上重金属有效态含量及生物有效性系数分布表明,铺前村相对于保护站、菠萝岛,虽然有效态含量较低,但各剖面 Cd 生物有效性系数大于另外 2 个区,说明在沉积环境发生改变时,铺前村秋茄林可能会面临一定潜在的 Cd 污染风险。与全国其他红树林相比,东寨港红树林 Cu、Zn、Pb 3 种重金属元素平均含量处于中等偏下水平并且低于国家海洋沉积物 I 类标准;Cd 可能有不同的自然或人为富集来源,平均含量超过国家海洋沉积物 I 类标准,尚未达到 II 类标准。

参考文献:

[1] Bayen S. Occurrence, bioavailability and toxic effects of trace metals and organic contaminants in mangrove ecosystems: a review [J]. Environment International, 2012, 48: 84-101.

[2] 刘景春, 严重玲. 福建漳江口红树林湿地沉积物中四种重金属的空间分布特征[J]. 亚热带植物科学, 2006, 35(4): 1-5.

[3] 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.

[4] Marchand C, Lallier - Vergès E, Baltzer F, et al. Heavy metals distribution in mangrove sediments along the mobile coastline of French Guiana[J]. Marine Chemistry, 2006, 98(1): 1-17.

[5] 吴沿友, 刘荣成. 泉州湾河口湿地植物的环境适应性[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 83.

[6] 曹玲珑, 王平, 田海涛, 等. 海南东寨港重金属在多种环境介质中污染状况及评价[J]. 海洋通报, 2013, 32(4): 403-407.

[7] 叶心媛, 王鹏, 李香, 等. 海南岛东北部红树林湿地表层重金属富集研究[J]. 生态经济: 学术版, 2014(1): 318-321, 328.

[8] 赵广孺, 王军广, 赵志忠, 等. 海南岛北部红树林区沉积物中微量元素含量及垂直分布特征[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(26): 16097-16099, 16138.

[9] 莫燕妮, 唐志忠, 苏文拔. 海南岛红树林调查报告[J]. 热带林业, 1993, 27(1): 19-22.

[10] 林鹏. 中国红树林研究进展[J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 2001, 40(2): 592-603.

[11] 王胤, 左平, 黄仲琪, 等. 海南东寨港红树林湿地面积变化及其驱动力分析[J]. 四川环境, 2006, 25(3): 44-49.

[12] 王丽荣, 李贞, 蒲杨婕, 等. 近 50 年海南岛红树林群落的变化及其与环境关系分析——以东寨港、三亚河和青梅港红树林自然保护区为例[J]. 热带地理, 2010, 30(2): 114-120.

[13] 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.

[14] 王鹏, 赵志忠, 王军广, 等. 海南岛东北部红树林地区沉积物常量元素的含量及分布特征[J]. 海南师范大学学报: 自然科学版, 2011, 24(1): 96-100.

[15] 陈飞霞, 魏世强. 土壤中有有效态重金属的化学试剂提取法研究进展[J]. 干旱环境监测, 2006, 20(3): 153-158.

[16] Peng L, Wen J Z, Zheng J L, et al. Distribution and accumulation of heavy metals in Avicennia marina community in Shenzhen, China [J]. Environment Science, 1997, 9: 472-479.

[17] Tam N F, Wong Y S. Spatial variation of heavy metals in surface sediments of Hong Kong mangrove swamps [J]. Environmental Pollution, 2000, 110(2): 195-205.

[18] 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.

[19] 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.

[20] 李丽琳, 莫莉萍, 陆媛. 钦州港红树林湿地沉积物重金属含量研究[J]. 西部交通科技, 2014(5): 76-80.

刘宇,董蓉,王晓立,等. 不同群落结构绿地空气负离子浓度与颗粒物的关系[J]. 江苏农业科学,2015,43(11):465-467.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2015.11.145

不同群落结构绿地空气负离子浓度与颗粒物的关系

刘宇¹,董蓉¹,王晓立^{1,2},韩浩章^{1,3},张丽华¹,张池¹

(1. 宿迁学院二系,江苏宿迁 223800;2. 南京林业大学生物与环境学院,江苏南京 210037;3. 南京农业大学园艺学院,江苏南京 210095)

摘要:通过对不同群落结构绿地内空气负离子浓度、PM_{2.5}、PM₁₀以及温湿度进行监测与分析,发现不同群落结构绿地空气负离子浓度日变化均明显,均值按大小排序为黄山栎树-紫薇+金钟花-狗牙根群落、日本晚樱+紫叶李-狗牙根群、垂柳-狗牙根群落、雪松群落、紫叶小檗+火棘-高羊茅群落、高羊茅群落、对照;各绿地内 PM_{2.5}浓度与空气 PM₁₀浓度日变化规律基本相似,空气负离子浓度与两者都呈显著负相关,其中与层次单一的植物群落显著性更明显,且与 PM_{2.5}浓度的相关性略大于 PM₁₀浓度。

关键词:群落结构;空气负离子;PM_{2.5};PM₁₀

中图分类号:S181 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2015)11-0465-03

空气负离子能抑制多种病菌和提高人体免疫力,已成为衡量城市空气质量的重要参数之一^[1-3],城市绿地中的植物能通过尖端放电以及光合作用产生高浓度负离子,从而改善城市环境,提高人体舒适度^[4-5]。目前,国内外关于空气负离子的研究颇多,主要集中在空气质量评价^[6-8]、时空分布^[9-10]、不同绿地类型负离子浓度差异^[11-13]等方面,但关于绿地内负离子浓度与空气颗粒物关系的研究报道较少。为此,本调查从不同群落结构绿地出发,研究空气负离子浓度与可吸入颗粒物(PM₁₀)、细颗粒物(PM_{2.5})的关系,为合理建设城市绿地、引导城市居民休憩提供科学参考。

1 调查与研究方法

1.1 研究区概况

本研究地点位于宿迁市宿迁学院老东门游园、教工餐厅

收稿日期:2015-05-09

基金项目:国家星火计划(编号:2013GA690424);江苏省宿迁市科技项目(编号:z201204)。

作者简介:刘宇(1981—),男,安徽安庆人,硕士,讲师,主要研究方向为城市园林生态。E-mail:718111060@qq.com。

前游园以及1号教学楼前绿地,研究地点相邻。根据样地地形条件和植物分布,将样地大小设置为10 m×10 m~20 m×20 m,选择了雪松[*Cedrus deodara* (Roxb.) G. Don]-狗牙根[*Cynodon dactylon* (Linn.) Pers.]群落、垂柳(*Salix babylonica*)-狗牙根群落、黄山栎树(*Koelreuteria integrifolia*)-紫薇(*Lagerstroemia indica* L.)+金钟花(*Forsythia viridissima* Lindl.)-狗牙根群落、日本晚樱(*Prunus serrulata* var. *lannesiana*)+紫叶李(*Prunus Cerasifera* Ehrhar f. *atropurpurea* (Jacq.) Rehd.)-狗牙根群落、紫叶小檗(*Berberis thunbergii* var. *atropurpurea* Chenault)-火棘[*Pyracantha fortuneana* (Maxim.) Li]+高羊茅(*Festuca elata* Keng ex E. Alexeev)群落、高羊茅群落,以及没有绿化的水泥铺装广场作为对照(表1)。

1.2 研究方法

为消除天气变化可能带来的误差,选择天气晴朗的2014年9月7—13日连续7 d,在常规游憩活动的时间内(7:00—21:00),每隔2 h在7个典型群落中心测定空气负离子浓度、PM_{2.5}浓度、PM₁₀浓度、空气温度、空气湿度。采样高度为1.5 m,每个样地每时间点重复测量3次,取平均值为该群落实测值。采用美国的AIC-1000检测仪检测空气负离子浓度,使用OSEN-1A型粉尘检测仪监测PM_{2.5}浓度和PM₁₀浓

[21]于瑞莲,胡恭任,赵金秀,等. 泉州湾河口湿地秋茄红树林中重金属的分布、迁移和储量[J]. 环境化学,2013,32(1):125-131.

[22]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]. 应用与环境生物学报,1996,2(3):207-213.

[23]陈振楼,许世远,柳林,等. 上海滨海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.

[24]Tam N F, Wong Y S. Retention and distribution of heavy metals in mangrove soils receiving wastewater[J]. Environmental Pollution, 1996,94(3):283-291.

[25]Singh N, Turner A. Trace metals in antifouling paint particles and their heterogeneous contamination of coastal sediments[J]. Marine Pollution Bulletin,2009,58(4):559-564.

[26]朱颖,吴纯德,叶健,等. 淇澳岛红树林生态系统中重金属含量相关性[J]. 环境科学与技术,2009,32(11):95-98.

[27]钟晓兰,周生路,李江涛,等. 土壤有效态Cd、Cu、Pb的分布特征及影响因素研究[J]. 地理科学,2010,30(2):254-260.

[28]钟晓兰,周生路,李江涛,等. 长江三角洲地区土壤重金属生物有效性的研究——以江苏昆山市为例[J]. 土壤学报,2008,45(2):240-248.

[29]潘根兴,高建芹,刘世梁,等. 活化率指示苏南土壤环境中重金属污染冲击初探[J]. 南京农业大学学报,1999,22(2):49-52.

[30]Krishnamurti G S, Cieslinski G, Huang P M, et al. Kinetics of cadmium release from soils as influenced by organic acids: implication in cadmium availability[J]. Journal of Environmental Quality, 1997, 26(1):271-277.

[31]卢豪良,严重玲. 秋茄(*Kandelia candel* L.)根系分泌低分子量有机酸及其对重金属生物有效性的影响[J]. 生态学报,2007, 27(10):4173-4181.