

李振良, 谢群, 曾珍, 张际标, 冯宇明, 赖勇平, 林玲玲. 2021. 湛江观海长廊红树林土壤-植物体系重金属富集与迁移规律. 热带地理, 41 (2): 398-409.

Li Zhenliang, Xie Qun, Zeng Zhen, Zhang Jibiao, Feng Yuming, Lai Yongping and Lin Lingling. 2021. Enrichment and Migration of Heavy Metals in Mangrove Soil-Plant System from Sea Promenade in Zhanjiang. *Tropical Geography*, 41 (2): 398-409.

湛江观海长廊红树林土壤-植物体系 重金属富集与迁移规律

李振良^{1a}, 谢群^{1b}, 曾珍^{1b}, 张际标^{1a,2}, 冯宇明^{1a}, 赖勇平^{1c}, 林玲玲^{1d}

(1. 广东海洋大学 a. 化学与环境学院; b. 分析测试中心; c. 管理学院; d. 食品与科学技术学院, 湛江 524088;

2. 南方海洋科学与工程广东省实验室, 湛江 524088)

摘要: 选取湛江市霞山区观海长廊红树林湿地为研究区域, 运用电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS) 测定红树林表层土壤及红树植物根、枝、叶中重金属 (铜 Cu、锌 Zn、铅 Pb、镉 Cd、铬 Cr、镍 Ni、砷 As) 的质量分数; 运用 Hakanson 潜在生态风险指数评估红树林土壤的重金属污染风险水平, 结合相关性分析和聚类分析探讨重金属的影响因素及来源; 应用生物富集系数 (BCF)、转运系数 (TF) 分析重金属在土壤-植物中的富集和迁移能力。结果表明: 1) 研究区表层土壤 7 种重金属分布规律为 Zn (57.48 mg/kg) > Cr (29.31 mg/kg) > Pb (19.23 mg/kg) > Cu (16.62 mg/kg) > Ni (8.18 mg/kg) > As (6.00 mg/kg) > Cd (0.20 mg/kg)。7 种元素平均质量分数均未超过《土壤环境质量标准-农用地土壤风险管控标准》(GB15618-2018) (pH≤5.5) 风险筛选值; Cu、Zn、Cd 和 As 平均质量分数分别为广东省土壤背景值的 2.08、2.74、6.75 和 1.11 倍。2) 重金属中 Cd 的潜在生态风险系数最高, 潜在生态风险程度为很强, 其余元素潜在生态风险程度为轻微。研究区土壤重金属的潜在生态风险程度为中等。重金属与有机质、黏土、粉砂呈正相关关系, 与 pH、砂呈负相关关系。3) Zn、Cr 和 Cu 在红树植物体内质量分数较高, Pb、Ni 和 As 次之, Cd 质量分数最低。除无瓣海桑 Zn 的根-叶转运系数 > 1 外, 重金属在桐花树、木榄和无瓣海桑中的生物富集系数和转运系数均 < 1, 说明桐花树、木榄和无瓣海桑对重金属的富集和转运能力不强, 大部分有毒元素主要积累在根部, 降低了有毒重金属通过食物链传递的风险。

关键词: 红树林; 土壤; 重金属; 生物富集系数 (BCF); 转运系数 (TF)

中图分类号: X53

文献标志码: A

文章编号: 1001-5221(2021)02-0398-12

DOI: 10.13284/j.cnki.rddl.003320

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



红树林是热带和亚热带海湾河口泥滩盐渍化沼泽上的盐生森林植物群落, 是陆地向海洋过渡的特殊生态系统, 具有重要的生态环境服务功能 (李庆芳等, 2006; 谢瑞红等, 2005)。重金属作为典型环境污染物质, 具有毒性、生物累积性以及持久性等特点 (Zhang et al., 2019)。由于红树林湿地地理环境以及湿地生态系统的特殊性, 往往容易成为重金属的汇与源 (Zhou et al., 2010; Ram et al., 2018)。近年来, 沿海城市的工业化导致了一系列的生态污

染问题, 红树林湿地生态系统因而受到广泛关注 (Ding et al., 2011; Hu et al., 2018)。滨海湿地土壤中重金属元素的积累受沉积物颗粒组成、有机质、土壤背景值、红树植株以及人类活动等多种因素的影响 (Marchand et al., 2011; 梅德罡, 2018; EL Turk et al., 2018)。相关研究表明, 红树植物对土壤中重金属具有富集作用, 且与林下土壤的重金属质量分数具有一定相关性 (罗松英等, 2019a)。在一定程度上, 红树植物可以通过物理化学以及生物作

收稿日期: 2020-07-11; 修回日期: 2020-10-14

基金项目: 广东海洋大学冲一流项目 (231419018); 创新强校工程项目 (230420021); 南方海洋科学与工程广东省实验室 (湛江) 资助项目 (ZJW-2019-08)

作者简介: 李振良 (1999—), 男, 广东湛江人, 本科, 主要从事生态环境化学研究, (E-mail) lzl9904130613@163.com;

通信作者: 谢群 (1981—), 女, 江西南昌人, 高级实验师, 硕士, 主要从事海洋环境污染与修复, (E-mail) Xieq@gdou.edu.cn。

用对土壤重金属污染物吸收、积累以及转移,可以起到净化作用,净化效率会随重金属浓度的升高而变大(缪绅裕等,1998;陈桂珠等,2000)。不同的红树植物或是红树植物的不同部位对重金属的富集能力有所不同,如邹烨燊(2014)研究发现红树植物不同部位重金属的分布规律为根>茎>叶。红树植物根系是重金属元素富集的主要部位,重金属元素主要贮存于植物的根、茎等部位可以避免向环境中的扩散。红树植物叶片由于其含有特殊的化学物质,对重金属离子具有很强的吸附力。然而凋落的叶片又以有机碎屑的形式,滞留于红树林区,成为沉积物的一部分,参与重金属元素的沉积作用(宋南等,2009)。因此,重金属在红树植物和土壤之间迁移转化是一种复杂的动态过程,研究其在两者之间的迁移富集规律以及影响因素,对于控制滨海湿地重金属污染具有重要的科学意义。

湛江红树林国家级自然保护区位于中国大陆最南端(20°14′—21°35′N, 109°40′—110°35′E),地跨湛江市徐闻、雷州、遂溪和廉江四县(市)及麻章、坡头、东海、霞山4区,面积约为20278.8 hm²(易小青等,2018)。随着钢铁、化工、石化等项目相继落户湛江,滨海湿地生态环境压力不容忽视。Liu等(2015)对雷州半岛沉积物重金属研究发现重金属污染来源于工业废水、城市生活污水、农业面源污染等。罗松英等(2019b)对湛江湾内红树林湿地沉积物重金属形态分析以及生态风险评估的结果表明,目前湾内典型红树林区域重金属为中度至重度污染。陈碧珊等(2017; 2019)对霞山区特呈岛红树林表层土壤进行生态风险评估,得出其潜在生态风险为轻微至中等水平,其中Hg和Cd两种毒性大的重金属潜在生态风险较大。目前,针对该区域的研究主要集中在土壤的理化性质和土壤重金属污染现状和评估方面,而针对红树植物体内重金属的分布规律以及红树林土壤与红树植物体内重金属之间的相互关系等的研究尚不多见。鉴于此,选择湛江市霞山区观海长廊红树林湿地土壤及其优势的红树植物为对象,通过对土壤和红树植物不同部位重金属的检测分析,再结合土壤有机质、pH和粒度的测定结果,运用相关性分析、生态风险指数等对土壤重金属的积累特征和溯源进行探讨;并运用生物富集系数和转运系数对红树植物吸收重金属的能力进行评估。以期为湛江红树林湿地的保护及管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域

湛江市霞山区位于雷州半岛东北侧,该区红树林面积约为50.7 hm²,主要分布在霞山区观海长廊以及特呈岛(韩维栋等,2003)。霞山区观海长廊红树林湿地位于湛江港的西北岸,湛江市中心,全长1.8 km(21°12′17.29″—21°12′55.40″N, 110°24′53.34″—110°25′06.87″E),该区域为亚热带地区,气候温和,年均温24℃,适宜红树林的生长。潮流具有正规半日潮和不正规半日潮2种,潮流以往复流为主,涨潮流向主要向北,落潮流向主要向南,且落潮流速大于涨潮流速(李志强等,2009)。该区域的红树林主要为人工种植,分布有桐花树(*Aegiceras corniculatum*)、无瓣海桑(*Sonneratia apetala*)、秋茄(*Kandelia candel*)、木榄(*Bruguiera gymnorhiza*)和白骨壤(*Avicennia marina*),其中,以桐花树为优势红树群落。研究区域邻近分布有居民生活区和码头,实地调研发现有地表径流或暗渠排放来自城市居民的生活污水和工厂废水;在调查期间为休渔期有渔船靠岸修整,近海有渔船和客轮往来。

1.2 样品采集和测试

2019年7月采集湛江观海长廊红树林土壤和红树植株样品,沿红树林分布区域由北向南布设8个采样站位(图1)。采样时,先将土壤表层杂物清理干净,在100 cm×100 cm矩形范围内,运用梅花采样法,选取5个样点,使用直径为6 cm的PVC管插入土壤中,采集0~10 cm的表层土壤,混合均匀后装入干净的封口袋中密封保存,每个土壤样品约1 kg,共8份样品。采集得到的土壤有异味,除S5站位土壤稠度偏软,主要是淤泥质土;其余站位稠度较致密粒度较粗,以泥沙沉积为主。为保证数据的代表性,在采集土壤样品的同时也收集相应站位周边的优势红树植物样品,S5站位为木榄,S8站位为无瓣海桑,其余站位优势种均为桐花树,分别采集了红树植物的根、枝、叶部分样品,共24份样品。在实验室内将土壤中动植物残体、石粒等杂物挑出;红树植物样品(根、枝、叶)用超纯水洗净,采用冷冻干燥机(广州吉迪,JIDI-LG12)分别对土壤和植物样品进行冷冻干燥。土壤采用四分法混匀缩分后用玛瑙研钵碾碎,过160目尼龙筛;红树植物样品使用刀式捣磨仪(德国莱驰,GM200)粉碎后过筛。处理好的样品放入封口袋密封保存。称

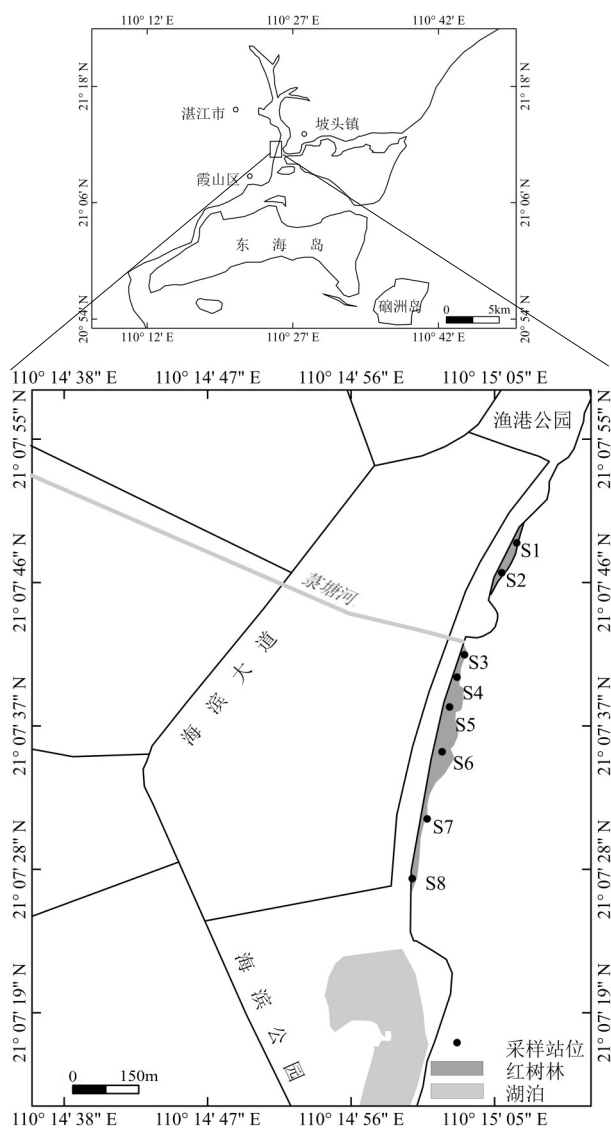


图1 研究区域和采样站位分布

Fig.1 Geographical location and sampling stations of the study area

取大约0.12 g (精确到0.000 1 g) 过筛后的土壤和植物干样, 土壤干样经过王水、氢氟酸微波消解, 植物干样经过硝酸、过氧化氢微波消解, 再使用电感耦合等离子体质谱仪 (美国安捷伦, Agilent 7500Cx) 测定重金属铜 (Cu)、锌 (Zn)、镉 (Cd)、铅 (Pb)、铬 (Cr)、镍 (Ni) 和砷 (As) 的质量分数。为保证样品测定的准确度和精密度, 对每个样品进行三平行测定, 同时加入空白样和标准物质进行质量控制。标准物质为近海沉积物标准物质 (GBW07314), 目标重金属的回收率在 91%~110%。土壤有机质的测定采用重铬酸钾外加热容量

法 (朱海舟, 2000)。土壤 pH 的测定依据国家标准《土壤 pH 值的测定电位法》(HJ962-2018), 水土比例为 2.5 : 1, 放入摇床充分混匀, 使用 pH 计 (美国赛默飞, A221-Orion Star A) 测定。粒度分析依据《海洋调查规范》(GB/T 12763.8-2007), 将样品置于 25 mL 烧杯中加入少量超纯水和 0.5 mol/L 六偏磷酸钠 5 mL 浸泡 24 h, 期间每隔 8 h 摇晃均匀 1 次, 采用激光粒度分析仪 (英国马尔文, Mastersize 2000) 分析。

1.3 评价方法

1.3.1 潜在生态风险指数法 Hakanson 潜在生态风险指数法综合考虑重金属毒性、在土壤中的迁移转化规律和评价区域对重金属污染的敏感性, 以及重金属土壤区域背景值的差异等 (Hakanson, 1980), 反映某一特定环境的全部污染物的影响, 通过潜在生态风险系数的判断, 可为有效管理红树林生态系统提供科学依据 (李柳强等, 2008)。由于雷州半岛的典型地带性土壤为砖红壤性土壤, 采用广东省土壤环境背景值中的砖红壤重金属质量分数作为背景值 (许炼烽等, 1996; 陈碧珊等, 2018)。潜在生态风险指数法计算公式为:

$$C_f^i = C_s^i / C_n^i \quad (1)$$

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \times C_f^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \times C_s^i / C_n^i \quad (2)$$

式中: C_f^i 为某一重金属的污染富集系数; C_s^i 为沉积物中重金属的实测质量分数; C_n^i 为计算所需的参比值; RI 为土壤中多种重金属的潜在生态风险指数; E_r^i 为单个重金属的潜在生态风险参数; T_r^i 为土壤重金属的毒性响应系数, 重金属 Cr、Ni、Zn、Cu、Cd、As 和 Pb 的毒性数据分别为 2、5、1、5、30、10 和 5; 重金属潜在生态风险指数和分级关系如表 1 所示 (温泉等, 2020)。

1.3.2 红树植物富集能力 富集系数 (BCF) 表征红树植物对重金属的富集能力。转运系数 (TF) 表征植物由根部向地上部位运输某种重金属元素能力 (Marchand et al., 2016)。其计算公式为:

生物富集系数 (BCF) = 植物体内重金属元素质量分数 / 土壤重金属质量分数

转运系数 (TF) = 植物地上部分重金属质量分数 / 植物根部重金属质量分数。

2 结果与讨论

2.1 红树林土壤重金属质量分数特征及理化性质

湛江市观海长廊红树林湿地表层土壤中 7 种重

表1 重金属潜在生态风险指标和评价等级

Table 1 Potential ecological risk indicators and classification analysis of heavy metals

污染富集系数 C_f	单个污染物 污染程度	潜在生态风险参数 E_r	单个污染物 生态风险程度	潜在生态风险指数 RI	总潜在生态 风险程度
$C_f < 1$	轻微	$E_r < 40$	轻微	$RI < 150$	轻微
$1 \leq C_f < 3$	中等	$40 \leq E_r < 80$	中等	$150 \leq RI < 300$	中等
$3 \leq C_f < 6$	强	$80 \leq E_r < 160$	强	$300 \leq RI < 600$	强
$C_f \geq 6$	很强	$160 \leq E_r < 320$	很强	$600 \leq RI < 1\ 200$	很强
		$E_r \geq 320$	极强	$RI \geq 1\ 200$	极强

金属质量分数分布规律为 Zn (57.48 mg/kg) > Cr (29.31 mg/kg) > Pb (19.23 mg/kg) > Cu (16.62 mg/kg) > Ni (8.18 mg/kg) > As (6.00 mg/kg) > Cd (0.20 mg/kg) (表2)。7种重金属变异系数为27%~53%，其中Cu和Cr的变异系数最大，说明这2种元素在研究区域不同站位之间差异性较大。研究区域内红树林土壤的有机质含量为0.64%~3.05%，平均值为1.70%。土壤粒度分布呈现砂粒>粉粒>黏粒，根据谢帕德沉积物三角分类法（中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局等，2007）对研究区域表层土壤进行分类和命名，除S5站位土壤类型为砂质粉

砂，其余站位土壤类型均为砂质，土壤颜色偏黑，与陈碧珊等（2019）的研究结果较为一致。土壤pH范围为3.60~6.81，均值为4.49。研究区域7种重金属平均质量分数均未超出《土壤环境质量标准-农用地土壤风险管控标准》（GB15618-2018）土壤重金属风险筛选值（pH≤5.5）。Cu、Zn、Cd和As的平均质量分数均超过广东省土壤背景值，分别为广东省土壤背景值的2.08，2.74，6.75，1.11倍，由此可见Cu、Zn、Cd和As元素在湛江红树林土壤中具有累积效应（罗松英等，2019a），其中以Cd的累积效应最大。

表2 红树林表层土壤重金属质量分数、有机质含量、粒径及pH

Table 2 Mass fraction of heavy metals, organic matter, grain size and pH in mangrove surface soil

项目		重金属质量分数/(mg·kg ⁻¹)							有机质/%	粒径/%			pH
		Cu	Zn	Cd	Pb	Cr	Ni	As		黏土	粉砂	砂	
站 位	S1	35.01	78.76	0.24	21.46	20.47	6.26	4.05	0.64	2.4	10.7	86.9	5.67
	S2	9.06	50.65	0.11	26.60	19.03	5.91	5.55	1.59	6.0	20.1	73.9	6.81
	S3	14.91	53.57	0.15	16.15	24.55	10.95	6.42	1.52	6.3	16.1	77.7	3.77
	S4	14.53	57.62	0.16	16.73	30.16	7.82	5.40	1.64	7.1	24.3	68.6	3.60
	S5	21.50	72.08	0.24	30.44	66.24	17.04	11.02	3.05	16.7	44.6	38.8	3.93
	S6	6.39	27.72	0.07	9.51	18.40	2.74	5.65	0.93	6.4	19.0	74.5	4.19
	S7	16.07	67.02	0.28	21.99	29.88	7.78	5.11	2.34	6.6	24.4	69.0	3.94
	S8	15.46	52.39	0.37	16.59	25.74	6.91	4.81	1.91	7.7	23.6	68.6	4.03
平均值	16.62	57.48	0.20	19.93	29.31	8.18	6.00	1.70	7.4	22.8	69.7	4.49	
变异系数/%	53	27	49	33	53	52	36	45	55	44	20	25	
背景值 ¹⁾	8.00	21.00	0.03	23.40	36.14	10.98	5.40	—	—	—	—	—	
风险筛选值 ²⁾	50	200	0.3	70	150	60	40	—	—	—	—	—	

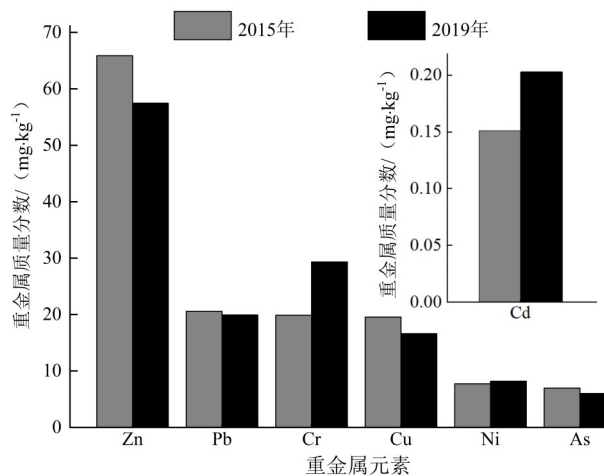
注：1）背景值是指广东省土壤环境背景值中的砖红壤重金属质量分数；2）风险筛选值参照《土壤环境质量标准—农用地土壤风险管控标准》（GB15618-2018）pH≤5.5其他土壤重金属风险筛选值。

将本研究结果与2015年莫莹等（2016）在该区域的重金属调查结果进行对比（图2），不难发现2015—2019年湛江观海长廊红树林表层土壤中Cu、Zn和As质量分数呈降低趋势，下降比例分别为15%、13%和14%，而Cr和Cd则呈升高趋势，上升比例分别为47%和32%，Pb和Ni的质量分数变化较小，Pb降低3%，Ni升高6%。Cu、Zn和As的降低可能与红树植物在其生长过程中对土壤重金属污染净化作用有关（罗松英等，2019a）；Cr、Cd

和Ni的升高，则可能与雷州半岛土壤中的Cr和Ni质量分数母质本体较高，Cd来源与工业生产或农业生产有关（关卉等，2006）。

2.2 红树林土壤重金属潜在生态风险评估

由图3-a可以看出，表层土壤中Cd的富集系数较高，范围为3.67~12.33，均值为6.75，污染程度为很强。Cu、Zn和As的富集系数范围为0.75~4.38，均值分别为2.08、2.74和1.11，污染程度为中等；Cr、Pb和Ni的富集系数范围为0.41~1.83，



注：2015年数据引用自文献莫莹等（2016）。

图2 红树林表层土壤不同时间重金属的变化

Fig.2 Changes of heavy metals in mangrove surface soil at different time

均值分别为0.85、0.81和0.74，污染程度为轻微。图3-b显示的是根据毒性的强弱判断不同重金属元素的潜在生态风险程度。表层土壤中Cd的潜在生态风险系数 (E_r^i) 最高，范围为70~370，均值为202，潜在生态风险程度为很强。其余重金属元素

潜在生态风险系数 (E_r^i) 均 <40 ，潜在生态风险程度为轻微。综合所有重金属元素得到每个站位的潜在生态风险指数 RI (图3-b)，结果显示，S2、S6站位的 RI 分别为90和137，总潜在生态风险程度为轻微；S1、S3、S4和S5站位的 RI 范围在183~295，总潜在生态风险程度为中等；S7、S8站位的 RI 分别为312和399，总潜在生态风险程度为强。总体上，湛江观海长廊红树林土壤重金属潜在生态风险指数 RI 均值为236，潜在生态风险程度为中等。

2.3 红树林土壤重金属影响因素及来源分析

为研究红树林土壤重金属与土壤理化性质之间的相互关系，对红树林土壤重金属质量分数与有机质含量、pH、粒度进行Pearson相关性分析 (表3)。根据采样站位土壤重金属检测结果以及现场观察，S1站位邻近码头，在休渔期间受周边大量船舶污染影响，导致表层土壤中重金属质量分数异常升高，该站位的结果不能反映其长期的污染特征，因此在相关性分析中将其剔除。表3显示：1) 重金属Cu与Zn、Ni、Cr；Zn与Ni、Pb；Cr与Ni、As；Ni与As具有显著的相关性，说明这些元素的地球化学特征或影响因子相似，来源可能相同或相近，通过

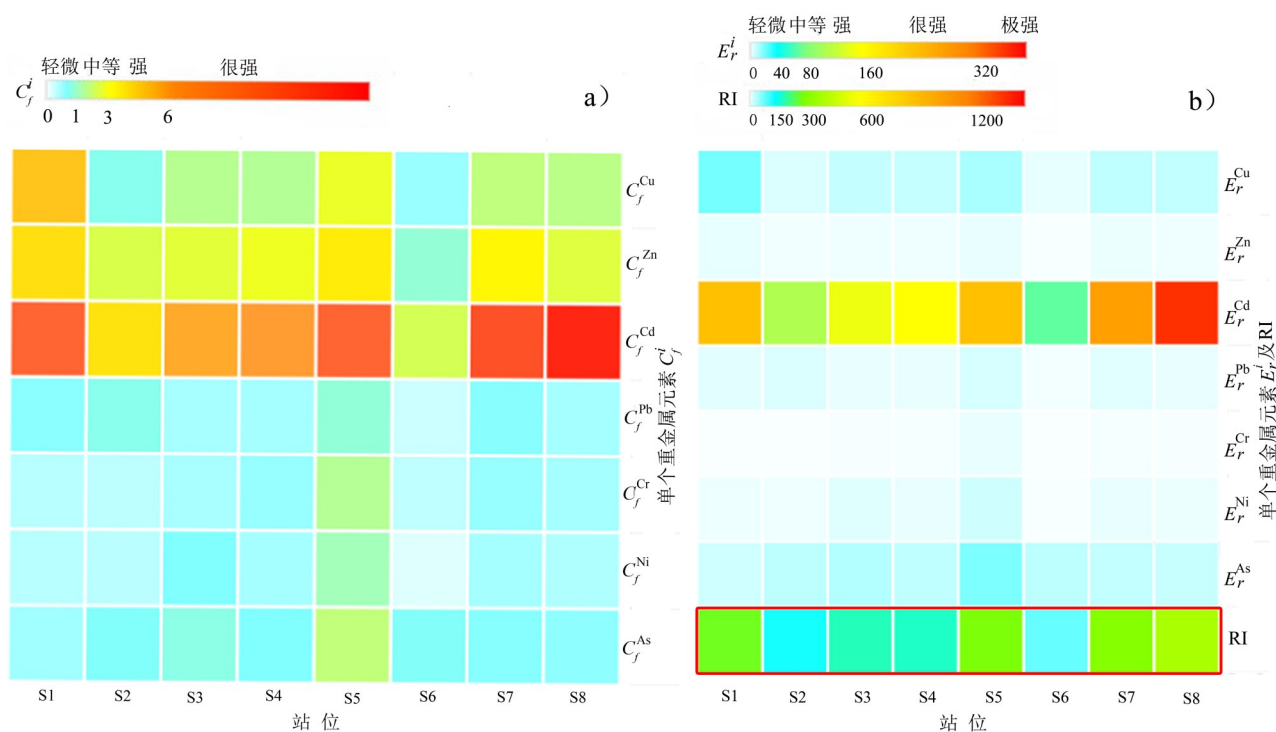


图3 单个重金属富集系数 (C_f^i)、潜在生态风险系数 (E_r^i) 和综合潜在生态风险指数 (RI)

Fig.3 Single heavy metal enrichment factor (C_f^i), potential ecological risk factors for individual heavy metals (E_r^i) and composite potential ecological risk indices (RI)

表3 表层土壤重金属元素与有机质、pH和粒径的相关性

Table 3 Correlation of heavy metals and organic matter, pH, and grain size in surface soil

	Cu	Zn	Cd	Pb	Cr	Ni	As	有机质	pH	黏土	粉砂	砂
Cu	1											
Zn	0.899**	1										
Cd	0.670	0.570	1									
Pb	0.567	0.766*	0.243	1								
Cr	0.830*	0.717	0.338	0.663	1							
Ni	0.888**	0.790*	0.317	0.671	0.897**	1						
As	0.614	0.483	0.016	0.614	0.911**	0.861*	1					
有机质	0.897**	0.907**	0.623	0.803*	0.877**	0.824*	0.680	1				
pH	-0.495	-0.197	-0.350	0.390	-0.326	-0.303	-0.150	-0.190	1			
黏土	0.720	0.562	0.291	0.623	0.970**	0.831*	0.937**	0.800*	-0.234	1		
粉砂	0.740	0.658	0.372	0.688	0.966**	0.772*	0.848*	0.869*	-0.207	0.965**	1	
砂	-0.740	-0.635	-0.351	-0.674	-0.974**	-0.795*	-0.880**	-0.855*	0.217	-0.982**	-0.997**	1

注：**表示在0.01水平（双侧）上显著相关；*表示在0.05水平（双侧）上显著相关。

同种或相似的途径沉淀、吸附和累积在沉积物中（邹烨燊，2014）。2）除Cd和As元素外，有机质与重金属元素均呈现显著的正相关，其中有机质与Cu、Zn和Cr呈极显著正相关（ $p<0.01$ ）。有机质可以通过吸附、阳离子交换以及螯合反应与重金属产生吸附、络合和沉淀作用，有机物的沉积有利于重金属的累积（张起源等，2020）。3）整体上，pH与重金属和有机质呈负相关，但不显著，这可能是由于红树林植物凋落物和根际分泌物无法被微生物完全分解，有机酸累积在土壤中导致土壤pH降低（Deng et al., 2019）。4）粒径方面，黏土和粉砂与重金属、有机质具有正相关关系，其中与Ni、有机质具有显著正相关（ $p<0.05$ ），与Cr、As具有极显著正相关（ $p<0.01$ ）。砂与重金属有机质均为负相关关系，其中与Ni和有机质为显著负相关（ $p<0.05$ ），与Cr和As为极显著负相关（ $p<0.01$ ）。这与陈碧珊等（2019）和李丽琳等（2014）的结果较为一致，说明土壤颗粒愈细，比表面积愈大，表面能愈高，对重金属吸附力愈强。

系统聚类的同一类站位的潜在生态风险往往具有相似的特征，通过SPSS 20.0对研究区域8个站位的潜在生态风险系数进行聚类分析，探讨不同采样站位潜在生态风险的变化规律（谢文平等，2012）。采用欧式距离聚类分析，组间连接的方法得到聚类树状图（图4）。结果表明，研究区域站位可分为3类，第一类以S1、S2、S3、S4、S7和S8站位为代表，主要是Cd的潜在生态风险系数较高，总潜在生态风险程度为轻微至强，其中，S1站位靠近码头，S3和S4站位靠近菴塘河，S7和S8站位靠近海滨公园和湛江海湾水上巴士海滨码头，受人为活动

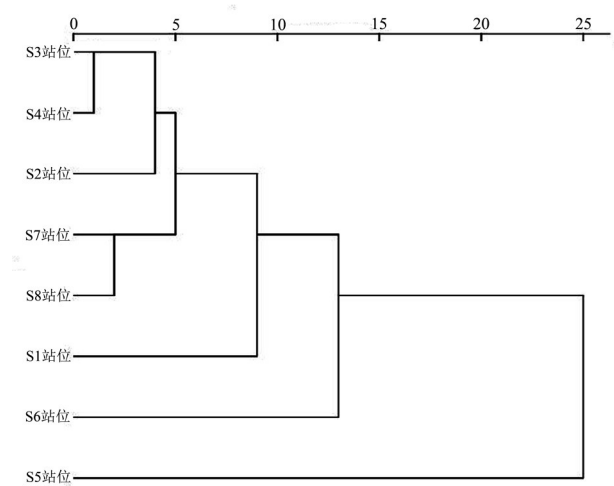


图4 红树林土壤潜在生态风险聚类

Fig. 4 Clusters of potential ecological risk factors (E_i) in mangrove soil

影响较大；第二类以S5站位为代表，相对于其他站位，各个元素的潜在生态风险系数均较高，总潜在生态风险程度为中等，S5站位土壤的黏土和粉砂比例较高且有机质含量高，有利于重金属的累积；第三类为S6站位，距离污染源较远无明显的重金属累积，总潜在生态风险程度为轻微。

重金属的来源主要有有人为源和自然源两种，其中人为源是湿地重金属污染的主要来源，包括工农业活动、交通、生活垃圾等；自然源主要有地质构造运动、岩石风化物、残落生物体等自然活动（徐明露等，2015）。本文研究区域靠近湛江市区，人口居住密集，车流量大，附近的菴塘河有城市生产和生活污水汇入，周边还有较多的生活垃圾，易导致重金属在红树林土壤中累积，例如一次性塑料和

包装纸等是 Cu、Zn 的主要来源（罗松英等，2019a）；车辆废气排放进入大气后通过淋溶作用沉降进入土壤，造成 Cd、Pb 和 Zn 污染（杨忠平等，2009），而且重金属质量分数高低与车流量密度密切相关（唐荣莉等，2013）。研究区域水上交通频繁，且周边有码头供渔船停靠修整，船舶柴油机排放的大气污染物以及船舶油漆脱落均会造成重金属污染（马铭璐，2016；方平等，2017）。陈雅丽等（2019）对近 10 年广东地区土壤中重金属的主要污染来源分析以及孙慧等（2018）对广东省 1000 个土壤样本进行重金属的溯源分析结果均显示，红树林土壤中重金属 Cr、Ni 和 As 主要与土壤母质有关，受到地质影响大于人为活动影响。综上所述，研究区域的重金属主要来自于城市生产、生活排污、城区交通运输、船舶污染等人为活动以及受土壤母质的控制。

2.4 红树植物中重金属的分布特征

表 4 显示，各元素在同一植物的不同部位积累的程度有所不同，不同红树植物体内同一种重金属质量分数也存在差异。总体而言，Zn、Cr 和 Cu 在红树植物体内质量分数普遍较高，Pb、Ni 和 As 次之，Cd 质量分数最低，这与王军广等（2018）结论较为一致。Cu、Zn、Pb、Cr、Ni 和 As 在桐花树不同部位的分布规律为根>叶>枝；Zn、Pb、Cr 和 As 在木榄不同部位的分布规律为根>叶>枝；Ni 和 Cu 在木榄的不同部位分布为根>枝>叶；Cu、Pb、Cr、Ni 和 As 在无瓣海桑不同部位的分布规律为根>叶>枝，Zn 在无瓣海桑不同部位的分布规律为叶>根>枝；Cd 在 3 种红树植物的不同部位的质量分数较低

表 4 重金属元素在红树植物不同部位质量分数

Table 4 Mass fraction of heavy metals in different parts of

mangrove plants		mg/kg					
红树植物	部位	Cu	Zn	Cd	Pb	Cr	As
桐花树	根	7.84	21.26	0.07	4.10	15.93	5.59
	叶	3.44	16.50	0.04	2.14	9.09	2.32
	枝	3.10	13.77	0.03	0.95	4.62	1.23
	总	14.38	51.53	0.14	7.19	29.64	9.14
木榄	根	4.29	12.82	0.04	3.01	9.73	3.06
	叶	2.53	7.28	ND	1.09	3.96	0.83
	枝	2.67	4.47	ND	0.80	3.21	1.18
	总	9.49	24.57	0.04	4.90	16.90	5.07
无瓣海桑	根	9.85	26.32	0.03	3.88	8.50	2.90
	叶	5.36	30.53	ND	0.80	7.69	1.89
	枝	5.13	12.51	0.03	0.63	1.39	0.62
	总	20.34	69.36	0.06	5.31	17.58	5.41

注：ND 代表未检出。

且无显著差异，主要集中于根部。桐花树和木榄重金属质量分数分布规律为 Zn>Cr>Cu>Ni>Pb>As>Cd，无瓣海桑重金属质量分数分布规律为 Zn>Cu>Cr>Ni>Pb>As>Cd。综上所述，除 Zn 在无瓣海桑的叶片积累最多，绝大部分重金属元素主要积累在根部。根部为不易被次级消费者取食的器官，可减少向食物链传递有毒重金属的可能性（咎启杰等，2002）。Cu 和 Zn 作为植物生长必需的微量元素，在植株叶片和枝条两个部位质量分数差异不显著，相对其他元素质量分数较高，反映了植物在生长过程中的生理需求（Macfarlane et al., 2007）。而植株对土壤中 As、Cd 和 Pb 元素的吸收富集能力较弱，与红树植物对有毒非必需重金属的抗性有关。

2.5 土壤-植物体系重金属的富集及转运能力

红树植物体内的重金属主要来自土壤，为分析不同种红树植物，以及同种红树植物不同部位的富集能力，计算了生物富集系数（BCF）。表 5 显示，桐花树对不同重金属的富集表现为 Ni>Cr>Cu>Zn>As>Cd>Pb；木榄表现为 Cu>Zn>Ni>Cr>As>Cd>Pb；无瓣海桑表现为 Cu=Zn>Ni>Cr>As>Pb>Cd。总体来看，桐花树、木榄及无瓣海桑的重金属富集能力不强，生物富集系数（BCF）值均<1。植物生长必需元素 Cu 和 Zn 的富集能力要高于其他非必需元素，而对植物毒性较强的 Cd、Pb 和 As 的富集能力较弱。相对于木榄和无瓣海桑，桐花树对 Cr、Ni 的富集能

表 5 红树植物的富集系数（BCF）和转运系数（TF）

Table 5 Bioconcentration factors (BCF) and Translocation factors

(TF) of mangrove plants

项目	红树植物	部位	Cu	Zn	Cd	Pb	Cr	Ni	As
富集系数	桐花树	根	0.53	0.35	0.41	0.19	0.66	0.69	0.55
		叶	0.20	0.29	0.20	0.11	0.41	0.44	0.18
		枝	0.22	0.25	0.13	0.05	0.21	0.17	0.09
		总	0.95	0.89	0.74	0.35	1.28	1.30	0.82
	木榄	根	0.20	0.18	0.17	0.10	0.15	0.18	0.15
		叶	0.12	0.10	—	0.04	0.06	0.05	0.04
		枝	0.12	0.06	—	0.03	0.05	0.07	0.02
		总	0.44	0.34	0.17	0.17	0.26	0.30	0.21
	无瓣海桑	根	0.64	0.50	0.08	0.23	0.33	0.42	0.47
		叶	0.35	0.58	—	0.05	0.30	0.27	0.04
		枝	0.33	0.24	0.08	0.04	0.05	0.09	0.04
		总	1.32	1.32	0.16	0.32	0.68	0.78	0.55
转运系数	桐花树	叶	0.44	0.78	0.57	0.52	0.57	0.42	0.27
		枝	0.40	0.65	0.43	0.23	0.29	0.22	0.15
	木榄	叶	0.59	0.57	—	0.36	0.41	0.27	0.24
		枝	0.62	0.35	—	0.27	0.33	0.39	0.10
	无瓣海桑	叶	0.54	1.16	—	0.21	0.91	0.65	0.09
		枝	0.52	0.48	1	0.16	0.15	0.21	0.09

注：“—”表示无数据。

力更强,这与王军广等(2018)的研究结论较为一致,这可能和重金属形态或生物有效性相关(陈英旭等,1994a;1994b;Marchand et al.,2016)。毒性较大非必需重金属Pb、Cd虽然在土壤的质量分数较高,但3种植物体内富集系数(BCF)却很低,主要在根部富集。其原因可能为受有机质的影响,土壤对Pb、Cd的吸附作用增大,尤其对Pb的吸附作用显著,因而降低了Pb、Cd生物有效性(吴曼等,2011)。7种重金属在3种红树植物不同部位的富集系数与不同部位的质量分数分布基本一致,除无瓣海桑Zn在叶片富集系数最高,其余重金属主要富集在根部,呈现根>叶>枝的分布规律。红树植物叶表面的盐腺以及具有类似腺体功能的组织可将重金属排出体外,并通过衰老叶片脱落的形式减少植株体内重金属的富集,从而减轻重金属对植株的毒害(Macfarlane et al.,2003);而植株根部表面形成富含铁的沉淀化合物可吸附重金属,并降低有毒重金属向地上部位迁移的能力(Qiu et al.,2011)。

重金属的迁移能力通常采用转运系数表示,它的定义是植物地上部分重金属质量分数与地下根部重金属质量分数之比,反映植物由根部向地上部位运输重金属元素的能力。从红树植物转运系数看(见表5),除Cd和As外,均呈现从根部运输到叶部的能力大于从根部运输到枝条的能力,这与邱彭华等(2018)在海南岛对红树林研究的结论较为一致。Cu、Zn作为植物生长必需的微量元素,在植株叶片和枝条2个部位转运系数较高且差异不显著,比非必需元素表现出更强的迁移能力(Macfarlane et al.,2007)。当红树植物不同部位转运系数>1时,可认为该金属在这种植物体内转移能力较好,同时也说明该金属在红树植物体内具有一定富集能力(王军广等,2018)。无瓣海桑Zn的转移能力很强,这可能与其生长特点有关,无瓣海桑(*Sonneratia apetala*)是从孟加拉国引入中国的速生真红树植物,生长快、生产力高,能在短时间内迅速郁闭成林(李斌等,2018)。因此,植物生长过程中对Zn的需求能力较大。除无瓣海桑Zn的叶-根转运系数>1,其余重金属的转运系数均<1,说明这3种红树植物的重金属主要积累在根部。重金属污染物被固化在植物的根部,有利于减少其对外释放以及食物链的二次转移。

3 结论

通过对湛江市霞山区观海长廊红树林湿地表层

土壤的重金属分布规律、污染风险水平,以及红树林植物中重金属的富集和迁移能力进行探讨,得到以下主要结论:

1) 研究区红树林表层土壤7种重金属分布规律为Zn>Cr>Pb>Cu>Ni>As>Cd。Cu、Zn、Cd和As在土壤中具有累积效应,其中Cd累积效应最大。

2) 重金属中Cd的潜在生态风险系数最高,潜在生态风险程度为很强,其余元素潜在生态风险程度为轻微。研究区域红树林土壤重金属的潜在生态风险程度为中等。

3) Pearson相关性分析表明重金属与有机质、粒度和pH具有相关性,说明土壤有机质、粒度和pH是影响重金属累积的重要因素。

4) 研究区红树林植株中Zn、Cr和Cu的质量分数较高,Pb、Ni和As次之,Cd质量分数最低。除无瓣海桑Zn的根-叶转运系数>1外,重金属在桐花树、木榄和无瓣海桑中的生物富集系数和转运系数均<1,桐花树、木榄及无瓣海桑对重金属的富集和转运能力不强,绝大部分重金属元素主要积累在植物根部。

本文主要探讨红树林土壤重金属总量的累积以及重金属在红树植株体内的富集和转移,但重金属的总量分析还不足以阐明重金属的迁移行为和潜在生物利用度。重金属的迁移率、生物利用度和毒性通常取决于其化学形态组分。重金属的危害性与生物可获得性是相关的,只有被生物吸收才可能对生物造成危害。因此,环境中重金属的潜在生态风险评估不仅是总量生态风险评价,还要结合生物有效性进行综合评定。未来可以对红树林土壤中重金属的形态以及影响因素做进一步分析。

参考文献 (References):

- 陈碧珊,苏文华,罗松英,吴增聪,莫莹,李秋琴,黄仁儒. 2017. 湛江特呈岛红树林湿地土壤重金属含量特征及污染评价. 生态环境学报, 26 (1): 159-165. [Chen Bishan, Su Wenhua, Luo Songying, Wu Zengcong, Mo Ying, Li Qiuqin and Huang Renru. 2017. The Features and the Pollution Assessments of Heavy Metals in the Surface Sediments of Mangrove in Techeng Island, Zhanjiang. *Ecology and Environmental Sciences*, 26(1): 159-165.]
- 陈碧珊,苏文华,罗松英,莫莹,刘朝明. 2018. 雷州半岛红树林土壤重金属空间分布特征及来源分析. 海洋环境科学, 37 (6): 922-928. [Chen Bishan, Su Wenhua, Luo Songying, Mo Ying and Liu Chaoming. 2018. Distribution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Soils from Mangrove Forest

- in Lezhou Peninsula. *Marine Environmental Science*, 37(6): 922-928.]
- 陈碧珊, 陈诗敏, 何炽鹏. 2019. 雷州半岛红树林湿地表层沉积物粒度分布特征. 现代地质, 33 (1): 198-205. [Chen Bishan, Chen Shimin and He Chipeng. 2019. Grain Size Distribution Features of Surface Sediments from Mangrove Wetland of Leizhou Peninsula. *Geoscience*, 33(1): 198-205.]
- 陈桂珠, 陈桂葵, 谭凤仪, 黄玉山. 2000. 白骨壤模拟湿地系统对污水的净化效应. 海洋环境科学, 19 (4): 23-26. [Chen Guizhu, Chen Guikui, Tan Fengyi and Huang Yushan. 2000. Purifying Effects of *Avicennia marina* Simulated Wetland System on Sewage. *Marine Environmental Science*, 19(4): 23-26.]
- 陈雅丽, 翁莉萍, 马杰, 武晓娟, 李永涛. 2019. 近十年中国土壤重金属污染源解析研究进展. 农业环境科学学报, 38 (10): 2219-2238. [Chen Yali, Weng Liping, Ma Jie, Wu Xiaojuan and Li Yongtao. 2019. Review on the Last Ten Years of Research on Source Identification of Heavy Metal Pollution in Soils. *Journal of Agro-Environment Science*, 38(10): 2219-2238.]
- 陈英旭, 何增耀, 吴建平. 1994a. 土壤中铬的形态及其转化. 环境科学, 15 (3): 53-56. [Chen Yingxu, He Zengyao and Wu Jianping. 1994a. Forms and Transformation of Chromium Species in Soil. *Environmental Science*, 15(3): 53-56.]
- 陈英旭, 骆永明, 朱永官, 朱祖祥, 何增耀. 1994b. 土壤中铬的化学行为研究V. 土壤对Cr(III)吸附和沉淀作用的影响因素. 土壤学报, 31 (1): 77-85. [Chen Yingxu, Luo Yongming, Zhu Yongguan, Zhu Zuxiang and He Zengyao. 1994b. Study on Chemical Behavior of Chromium in Soils. *Acta Pedologica Sinica*, 31(1): 77-85.]
- Deng J, Guo P Y, Zhang X Y, Shen X B, Su H T, Zhang Y X, Wu Y M and Xu C. 2019. An Evaluation on the Bioavailability of Heavy Metals in the Sediments from a Restored Mangrove Forest in the Jinjiang Estuary, Fujian, China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 180: 501-508.
- Ding Z H, Wu H, Feng X B, Liu J L, Liu Y, Zhang L, Lin G H and Pan J Y. 2011. Distribution of Hg in Mangrove Trees and Its Implication for Hg Enrichment in the Mangrove Ecosystem. *Applied Geochemistry*, 26(2): 205-212.
- EL Turk M, Abdullah R, Rozainah M Z and Abu Bakar N K. 2018. Evaluation of Heavy Metals and Environmental Risk Assessment in the Mangrove Forest of Kuala Selangor Estuary, Malaysia. *Marine Pollution Bulletin*, 136: 1-9.
- 方平, 陈雄波, 唐子君, 黄建航, 曾文豪, 吴海文, 唐志雄, 岑超平. 2017. 船舶柴油机大气污染物排放特性及控制技术现状. 化工进展, 36 (3): 1067-1076. [Fang Ping, Chen Xiongbo, Tang Zijun, Huang Jianhang, Zeng Wenhao, Wu Haiwen, Tang Zhixiong and Cen Chaoping. 2017. Current Research Status on Air Pollutant Emission Characteristics and Control Technology of Marine Diesel Engine. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 36(3): 1067-1076.]
- 关卉, 万洪富, 王洗民, 杨国义, 朱永安. 2006. 雷州半岛土壤重金属分布特征及其污染评价. 环境污染与防治, 28 (10): 757-760. [Guan Hui, Wan Hongfu, Wang Xianmin, Yang Guoyi and Zhu Yong'an. 2006. Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Soil Samples of Leizhou Peninsula. *Environmental Pollution & Control*, 28(10): 757-760.]
- Hakanson L. 1980. An Ecological Risk Index for Aquatic Pollution Control: A Sedimentological Approach. *Water Research*, 14(8): 975-1001.
- 韩维栋, 高秀梅, 卢昌义, 林鹏. 2003. 雷州半岛的红树林植物组成与群落生态. 广西植物, (2): 127-132. [Han Weidong, Gao Xiumei, Lu Changyi and Lin Peng. 2003. Mangrove Flora and Associations of Leizhou Peninsula. *Guihaia*, (2): 127-132.]
- Hu C Y, Shui B N, Li W T, Yang X L and Zhang X M. 2018. Assessing the Ecological Quality Status of Transplanted Mangrove Wetland in the Oujiang Estuary, China. *Marine Pollution Bulletin*, 133: 1-8.
- 李斌, 庞碧剑, 张瑜斌. 2018. 人工无瓣海桑对土壤重金属分布和累积的影响. 环境科学与技术, 41 (3): 47-55. [Li Bin, Pang Bijian and Zhang Yubin. 2018. Influence of *Sonneratia Apetala* Plantations on the Distribution and Accumulation of Heavy Metals in Intertidal Sediments. *Environmental Science & Technology*, 41(3): 47-55.]
- 李丽琳, 莫莉萍, 陆媛. 2014. 钦州港红树林湿地沉积物重金属含量研究. 西部交通科技, (5): 76-80. [Li Lilin, Mo Liping and Lu Yuan. 2014. Heavy Metal Content Studies in Sediments of Qinzhou Port Mangrove Wetlands. *Western China Communications Science & Technology*, (5): 76-80.]
- 李柳强, 丁振华, 刘金铃, 林慧娜, 吴浩. 2008. 中国主要红树林表层沉积物中重金属的分布特征及其影响因素. 海洋学报(中文版), 30 (5): 159-164. [Li Liuqiang, Ding Zhenhua, Liu Jinling, Lin Huina and Wu Hao. 2008. Distribution of Heavy Metals in Surficial Sediments from Main Mangrove Wetlands of China and Their Influence Factors. *Acta Oceanologica Sinica*, 30 (5): 159-164.]
- 李庆芳, 章家恩, 刘金苓, 唐国玲. 2006. 红树林生态系统服务功能研究综述. 生态科学, 25 (5): 472-475. [Li Qingfang, Zhang Jia'en, Liu Jinling and Tang Guoling. 2006. Reviews on Ecosystem Services of Mangrove Wetlands. *Ecological Science*, 25(5): 472-475.]
- 李志强, 谢石昌, 张会领, 杜健航, 王亚奇, 邹北妹, 李映林, 胡东波, 罗浩斌. 2009. 湛江市观海长廊红树林种植对岸滩影响初步研究//中国海洋学会海洋工程分会. 第十四届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(上册). 呼和浩特: 海洋出版社, 757-759. [Li Zhiqiang, Xie Shichang, Zhang Huiling, Du Jianhang, Wang Yaqi, Zou Beimei, Li Yinglin, Hu Dongbo and Luo Haobin. 2009. A Preliminary Study on the Effects of Mangrove Planting in Guanhai Promenade on Shore Beach in Zhanjiang City. In: Ocean Engineering Branch of China Ocean Society. Proceedings of the 14th China Ocean (Shore) Engineering

- Colloquium. Hohhot: Maritime Press, 757-759.]
- Liu J, Ma K and Qu L. 2015. Ecological Risk Assessments and Context-dependence Analysis of Heavy Metal Contamination in the Sediments of Mangrove Swamp in Leizhou Peninsula, China. *Marine Pollution Bulletin*, 100(1): 224-230.
- 罗松英, 梁艺琼, 陈碧珊, 林梦婷, 梁家新, 邱锦坤. 2019a. 徐闻南山镇红树林沉积物及红树植物中重金属的累积特征与迁移规律. 热带地理, 39 (3): 347-356. [Luo Songying, Liang Yiqiong, Chen Bishan, Lin Mengting, Liang Jiaxin and Qiu Jinkun. 2019a. Accumulation and Migration of Heavy Metals in Mangrove Sediments and Plants in the Nanshan Town, Xuwen. *Tropical Geography*, 39(3): 347-356.]
- 罗松英, 邢雯淋, 梁绮霞, 邓子艺, 刘显兰, 全晓文. 2019b. 湛江湾红树林湿地表层沉积物重金属形态特征、生态风险评价及来源分析. 生态环境学报, 28 (2): 348-358. [Luo Songying, Xing Wenlin, Liang Qixia, Deng Ziyi, Liu Xianlan and Quan Xiaowen. 2019b. Speciation, Ecological Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in the Surface Sediments of Mangrove Wetland in Zhanjiang Bay. *Ecology and Environmental Sciences*, 28(2): 348-358.]
- Macfarlane G R, Koller C E and Blomberg S P. 2007. Accumulation and Partitioning of Heavy Metals in Mangroves: A Synthesis of Field-based Studies. *Chemosphere*, 69(9): 1454-1464.
- Macfarlane G R, Pulkownik A and Burchett M D. 2003. Accumulation and Distribution of Heavy Metals in the Grey Mangrove. *Avicennia marina* (Forsk) Vierh: Biological Indication Potential. *Environmental Pollution*, 123(1): 139-151.
- 马铭璐. 2016. 珠海码头内铜污染现状及生态风险分析. 环境监控与预警, 8 (3): 43-47. [Ma Minglu. 2016. Analysis on Current Status and Ecological Risk of Copper Pollution in Zhuhai Ports. *Environmental Monitoring and Forewarning*, 8(3): 43-47.]
- Marchand C, Allenbach M and Lallier-Verges E. 2011. Relationships between Heavy Metals Distribution and Organic Matter Cycling in Mangrove Sediments (Conception Bay, New Caledonia). *Geoderma*, 160(3/4): 444-456.
- Marchand C, Fernandez J M and Moreton B. 2016. Trace Metal Ecochemistry in Mangrove Sediments and Their Transfer to Mangrove Plants (New Caledonia). *Science of the Total Environment*, 562: 216-227.
- 梅德罡. 2018. 红树林湿地溶解性有机质对典型重金属生态行为的影响和机理研究. 厦门: 厦门大学. [Mei Degang. 2018. Study on Effects and Mechanism of Dissolved Organic Matter in Mangrove Wetland on the Ecological Behavior of Heavy Metals. Xiamen: Xiamen University.]
- 缪绅裕, 陈桂珠. 1998. 模拟秋茄湿地系统中Pb的分配与迁移. 中国环境科学, 18 (1): 49-52. [Miao Shenyu and Chen Guizhu. 1998. Allocation and Migration of Lead in Simulated Wetland System of *Kandelia candel*. *China Environmental Science*, 18(1): 49-52.]
- 莫莹, 陈碧珊, 苏文华, 阮文锋, 朱树林. 2016. 湛江观海长廊红树林湿地土壤重金属污染现状及生态风险评价. 岭南师范学院学报, 37 (6): 156-163. [Mo Ying, Chen Bishan, Su Wenhua, Ruan Wenfeng and Zhu Shulin. 2016. The Present Pollution Situation and the Ecological Risk Assessment of Heavy Metal Contamination in the Sediments of Mangroves Swamp in Sea Promenade of Zhanjiang. *Journal of Lingnan Normal University*, 37(6): 156-163.]
- 邱彭华, 王德智, 谢跟踪, 徐颂军, 曹瑞, 王军广. 2018. 海南岛人工与天然红树林重金属污染、富集与转运能力比较. 热带地理, 38 (6): 836-847. [Qiu Penghua, Wang Dezhi, Xie Genzong, Xu Songjun, Cao Rui and Wang Junguang. 2018. Comparison of Heavy Metal Pollution, Accumulation and Transfer Capacity between Artificial and Natural Mangroves in the Hainan Island. *Tropical Geography*, 38(6): 836-847.]
- Qiu Y W, Yu K F, Zhang G and Wang W X. 2011. Accumulation and Partitioning of Seven Trace Metals in Mangroves and Sediment Cores from Three Estuarine Wetlands of Hainan Island, China. *Hazard Mater*, 190(1/3): 631-638.
- Ram S S, Aich A, Sengupta P, Chakraborty A and Sudarshan M. 2018. Assessment of Trace Metal Contamination of Wetland Sediments from Eastern and Western Coastal Region of India Dominated with Mangrove Forest. *Chemosphere*, 211: 1113-1122.
- 孙慧, 毕如田, 郭颖, 袁宇志, 柴敏, 郭治兴. 2018. 广东省土壤重金属溯源及污染源解析. 环境科学学报, 38 (2): 704-714. [Sun Hui, Bi Rutian, Guo Ying, Yuan Yuzhi, Chai Min and Guo Zhixing. 2018. Source Apportionment Analysis of Trace Metal Contamination in Soils of Guangdong Province, China. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 38(2): 704-714.]
- 宋南, 翁林捷, 关煜航, 陈忍. 2009. 红树林生态系统对重金属污染的净化作用研究. 中国农学通报, 25 (21): 305-309. [Song Nan, Weng Linjie, Guan Yuhang and Chen Ren. 2009. The Study of Purification of Heavy Metal Elements in Mangrove Ecosystems. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 25(21): 305-309.]
- 唐荣莉, 马克明, 张育新, 毛齐正. 2013. 北京市道路灰尘中污染物含量沿城乡梯度、道路密度梯度的变化特征. 环境科学, 34 (1): 364-372. [Tang Rongli, Ma Keming, Zhang Yuxin and Mao Qizheng. 2013. Content Trends of Pollutants in Street Dust of Beijing along the Urban-Rural Gradient and Road Density Gradient. *Environmental Science*, 34(1): 364-372.]
- 王军广, 王鹏, 伏箫诺, 赵志忠, 邱彭华, 季一诺, 吴丹. 2018. 东寨港红树林湿地沉积物-植物体系重金属的分布与富集特征. 西南农业学报, 31 (3): 611-618. [Wang Junguang, Wang Peng, Fu Xiaonuo, Zhao Zhizhong, Qiu Penghua, Ji Yinuo and Wu Dan. 2018. Distribution and Enrichment of Heavy Metals in Mangrove Wetland Sediments and Plants from Dongzhai Harbor. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 31(3): 611-618.]

- 温泉, 赵艳民, 曹伟, 杨晨晨, 张雷, 张国宇, 冯军坡. 2020. 潮白河中游沉积物中重金属分布、来源及生态风险评估. 环境科学研究, 33 (3): 599-607. [Wen Quan, Zhao Yanmin, Cao Wei, Yang Chenchen, Zhang Lei, Zhang Guoyu and Feng Junpo. 2020. Distribution Characteristics, Sources and Potential Ecological Risks of Heavy Metal Pollution in the Middle Reaches of Chaobai River. *Research of Environmental Sciences*, 33(3): 599-607.]
- 吴曼, 徐明岗, 徐绍辉, 刘军领, 武海雯, 沈浦. 2011. 有机质对红壤和黑土中外源铅镉稳定化过程的影响. 农业环境科学学报, 30 (3): 461-467. [Wu Man, Xu Minggang, Xu Shaohui, Liu Junling, Wu Haiwen and Shen Pu. 2011. Effects of Organic Matter on Stabilization Process of Add Cadmium and Lead in Red and Black Soils. *Journal of Agro-Environment Science*, 30(3): 461-467.]
- 谢瑞红, 周兆德. 2005. 红树林生态系统及功能研究综述. 华南热带农业大学学报, 11 (4): 48-52. [Xie Ruihong and Zhou Zhao. 2005. A Summary of the Ecosystem and Function of Mangrove. *Journal of Tropical Biology*, 11(4): 48-52.]
- 谢文平, 王少冰, 朱新平, 陈昆慈, 潘德博, 洪孝友, 尹怡. 2012. 珠江下游河段沉积物中重金属含量及污染评价. 环境科学, 33 (6): 1808-1815. [Xie Wenping, Wang Shaobing, Zhu Xinping, Chen Kuncu, Pan Debo, Hong Xiaoyou and Yin Yi. 2012. Residues and Potential Ecological Risk Assessment of Metal in Sediments from Lower Reaches and Estuary of Pearl River. *Environmental Science*, 33(6): 1808-1815.]
- 徐明露, 方凤满, 林跃胜. 2015. 湿地土壤重金属污染特征、来源及风险评价研究进展. 土壤通报, 46 (3): 762-768. [Xu Minglu, Fang Fengman and Lin Yuesheng. 2015. Advances in Source, Pollution Characteristics and Ecological Assessment of Heavy Metals in Wetland Soils. *Chinese Journal of Soil Science*, 46(3): 762-768.]
- 许炼烽, 刘腾辉. 1996. 广东土壤环境背景值和临界含量的地带性分异. 华南农业大学学报, 17 (4): 61-65. [Xu Lianfeng and Liu Tenghui. 1996. The Zonal Differentiation of Soil Environmental Background Values and Critical Contents in Guangdong. *Journal of South China Agricultural University*, 17 (4): 61-65.]
- 杨忠平, 卢文喜, 刘新荣, 辛欣. 2009. 长春市城区表层土壤重金属污染来源解析. 城市环境与城市生态, 22 (5): 29-33. [Yang Zhongping, Lu Wenxi, Liu Xinrong and Xin Xin. 2009. Sources Identification of Heavy Metals in Urban Soil of Changchun Based on Principal Component Analysis. *Urban Environment & Urban Ecology*, 22(5): 29-33.]
- 易小青, 高常军, 魏龙, 蔡坚, 吴琰, 肖石. 2018. 湛江红树林国家级自然保护区湿地生态系统服务价值评估. 生态科学, 37 (2): 61-67. [Yi Xiaoqing, Gao Changjun, Wei Long, Cai Jian, Wu Yan and Xiao Shi. 2018. Evaluation of Wetland Ecosystem Service Value in Zhanjiang Mangrove National Nature Reserve. *Ecological Science*, 37(2): 61-67.]
- 咎启杰, 王勇军, 王伯荪. 2002. 深圳福田红树林无瓣海桑与海桑群落的重金属累积和循环. 环境科学, 23 (4): 81-88. [Zan Qijie, Wang Yongjun and Wang Bosun. 2002. Accumulation and Cycle of Heavy Metal in *Sonneratia Apetala* and *S.caseolaris* Mangrove Community at Futian of Shenzhen, China. *Environmental Science*, 23(4): 81-88.]
- 张起源, 秦颖君, 刘香华, 周雯, 刘谓承, 赵建刚. 2020. 广东红树林沉积物有毒金属分布及生态风险评价. 生态环境学报, 29 (1): 183-191. [Zhang Qiyuan, Qin Yingjun, Liu Xianghua, Zhou Wen, Liu Xucheng and Zhao Jiangang. 2020. Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Toxic Metals in Mangrove Sediments in Guangdong. *Ecology and Environmental Sciences*, 29(1): 183-191.]
- Zhang Z W, Fang Z Q, Li J L, Sui T, Lin L and Xu X R. 2019. Copper, Zinc, Manganese, Cadmium and Chromium in Crabs from the Mangrove Wetlands in Qi'ao Island, South China: Levels, Bioaccumulation and Dietary Exposure. *Watershed Ecology and the Environment*, 1: 26-32.
- Zhou Y W, Zhao B, Peng Y S and Chen G Z. 2010. Influence of Mangrove Reforestation on Heavy Metal Accumulation and Speciation in Intertidal Sediments. *Marine Pollution Bulletin*, 60 (8): 1319-1324.
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 2007. GB/T 12763.10-2007 海洋调查规范 第8部分: 海洋地质地球物理调查. 北京: 中国标准出版社. [General Administration of Quality Supervision and Quarantine of the People's Republic of China. 2007. *GB/T 12763.10-2007 Specifications for Oceanographic Survey Part 8: Marine Geology and Geophysics Survey*. Beijing: China Standard Press.]
- 朱海舟. 2000. 土壤有机物质的分析//鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 107-108. [Zhu Haizhou. 2000. Analysis of Soil Organic Matter. In: Lu Rukun. *Methods for Chemical Analysis of Soil Agriculture*. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 107-108.]
- 邹烨燊. 2014. 海南岛北部潮间带红树林沉积物-孔隙水-植物系统中重金属元素迁移富集规律研究. 海南: 海南师范大学. [Zou Yefan. 2014. Study on the Enrichment and Migration of Heavy Metals in Mangrove Sediments - Pore Water -Mangrove Plant Systems in Northern Hainan Island Intertidal Zone. Hainan: Hainan Normal University.]

Enrichment and Migration of Heavy Metals in Mangrove Soil-Plant System from Sea Promenade in Zhanjiang

Li Zhenliang^{1a}, Xie Qun^{1b}, Zeng Zhen^{1b}, Zhang Jibiao^{1a,2}, Feng Yuming^{1a}, Lai Yongping^{1c} and Lin Lingling^{1d}

(1. a. College of Chemistry and Environmental Science; b. Analytical and Testing Center; c. College of Management, Guangdong Ocean University;

d. College of Food Science and Technology, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China;

2. Southern Laboratory of Ocean Science and Engineering, Zhanjiang 524088, China)

Abstract: To explore the distribution, accumulation, and migration characteristics of mangrove soils and mangrove plants, the mass fraction of heavy metals (Cu, Zn, Pb, Cd, Cr, Ni, and As), the source thereof, and factors influencing their presence in the surface soil and different parts of mangrove plants (roots, branches, and leaves) were determined via inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) in the Sea Promenade mangrove wetland in Xiashan District of Zhanjiang. The potential ecological risk index proposed by Hakanson was employed to evaluate the soil risk level. The influencing factors and sources of heavy metals were investigated using correlation and cluster analyses. The enrichment and migration ability of the heavy metals in soil plants were analyzed using the bioconcentration and translocation factors. The results showed that: 1) The order of concentrations (in $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) of seven heavy metals in surface soil of the mangrove wetland was $\text{Zn} (57.48) > \text{Cr} (29.31) > \text{Pb} (19.23) > \text{Cu} (16.62) > \text{Ni} (8.18) > \text{As} (6.00) > \text{Cd} (0.20)$. Moreover, the average mass fraction of the seven elements did not exceed the risk screening values for soil contamination regarding soil environmental quality, according to the risk control standard for soil contamination of agricultural land (GB15618-2018) ($\text{pH} \leq 5.5$). The average values of Cu, Zn, Cd, and As were 2.08, 2.74, 6.75, and 1.11 times higher than the soil background values in Guangdong Province. Compared with the results of the investigation on heavy metals in 2015, the present results indicated increases in the concentrations of Cr, Cd, and Ni by 47%, 32%, and 6%, respectively; conversely, the concentrations of Cu, As, Zn, and Pb decreased by 15%, 14%, 13%, and 3%, respectively. 2) The highest potential ecological risk coefficient (E_r^i) values of Cd were in the range of 70-370, with an average value of 202, indicating a strong degree of potential ecological risk. The E_r^i values of the other elements were less than 40, indicating a slight degree of potential ecological risk. The mean value of the total potential ecological risk index (RI) of soil heavy metals investigated in the study area was 236, with a medium potential ecological risk degree. 3) The correlation analysis of heavy metals and soil physical and chemical properties showed that, except for Cd and As, there was a significant positive correlation between the heavy metal and organic matter contents, while a correlation between heavy metals and pH was negative but not statistically significant. Heavy metals were positively correlated with clay and silt but negatively correlated with sand. Organic matter, pH, and particle size are important factors that affect heavy metal accumulation in soil. 4) Concentrations of heavy metals in different mangrove plants were different. The order of heavy metal concentrations in *Aegiceras corniculatum* and *Aegiceras corniculatum* was $\text{Zn} > \text{Cr} > \text{Cu} > \text{Ni} > \text{Pb} > \text{As} > \text{Cd}$. The order of heavy metal concentrations in *Sonneratia apetala* was $\text{Zn} > \text{Cu} > \text{Cr} > \text{Ni} > \text{Pb} > \text{As} > \text{Cd}$. 5) The bioconcentration and translocation factors of heavy metals were less than 1 in *Aegiceras corniculatum*, *Sonneratia apetala*, and *Bruguiera gymnorhiza*, indicating that the enrichment and translocation capacity of heavy metals was not high, except for the root-leaf translocation factor of Zn in *Sonneratia apetala*, which was greater than 1. Most of the toxic heavy metals were mainly accumulated in the roots, which reduced the risk of their delivery by the food chain.

Keywords: mangrove; soil; heavy metal; Bio-Concentration Factor (BCF); Translocation Factor (TF)