陈靓,黄赞慧,王照翻,等. 万宁潟湖红树林区域海水重金属污染状况评估[J]. 海洋地质前沿, 2025, 41(6): 93-102. CHEN Liang, HUANG Zanhui, WANG Zhaofan, et al. Assessment on heavy metal pollution in mangrove seawater of Wanning Lagoon[J]. Marine Geology Frontiers, 2025, 41(6): 93-102.

# 万宁潟湖红树林区域海水重金属污染状况评估

陈靓<sup>1,2</sup>, 黄赞慧<sup>1,2</sup>, 王照翻<sup>1,2</sup>, 邢子浩<sup>1,2\*</sup>, 李平汝<sup>1,2</sup>, 符钉辉<sup>1,2</sup>, 韦秀<sup>1,2</sup> (1中国地质调查局海口海洋地质调查中心, 海口 571127; 2 海口市海洋污染物监测创新与应用重点实验室, 海口 571127)

摘 要:重金属污染是海洋环境评价的重要内容,为了解万宁潟湖红树林区域海水重金属含量分布及质量现状,于2022年10月采集了调查区红树林区域20个表层海水样品,对7种常见重金属元素(Hg、Cr、Cu、Zn、Pb、Cd、As)进行分析。采用综合污染指数法、Hakanson指数法以及风险商评价法等评估了红树林区域海水重金属分布及污染情况,并基于相关性分析及双向分层聚类分析方法分析了重金属来源。结果表明,研究区Hg、Cu、Pb、Cd元素的平均含量分别为0.044、14.975、0.695、0.628 µg/L,Cr、Zn、As元素在各站位均未达检出限;海水重金属元素分布及污染情况整体呈现出:老爷海潟湖红树林区域优于小海潟湖红树林区域、连片自然林区域优于其他区域、河口区域劣于其他区域的特征;所有重金属元素中以Cu元素超标程度及生物风险程度相对较高;重金属主要来源于渔业养殖和农业生产等陆源人为活动以及港口运输及船舶尾气等的大气沉降,部分区域受到点源状人为活动的影响。相关评价结果可为万宁潟湖周边红树林生态系统保护提供参考。

关键词:万宁潟湖;红树林;表层海水;重金属;风险评价 中图分类号:P736 文献标识码:A DOI:10.16028/j.1009-2722.2024.071

0 引言

海岸潟湖地处陆海过渡带,在维护海岸带生态 安全方面起着重要的作用<sup>[1-2]</sup>。潟湖多具有半封闭 或封闭性的地貌特征,入海口门过窄,内部水体交 换及自净能力较差,在海岸带大规模开发利用及养 殖围垦的情况下,潟湖区域生态环境状况不断恶 化<sup>[3]</sup>。红树林作为热带、亚热带地区陆地生态系统 向海洋生态系统过渡的重要生态系统,是潟湖周边 主要的植物群落之一,具有消浪缓流、防风减灾及 维持生物多样性等重要的生态环境保护服务功 能<sup>[4-5]</sup>。红树林生态系统复杂和动态的水生环境,含 有许多影响生物群落的溶解物质,并伴随着大量可 能影响水质的物理化学过程<sup>[6]</sup>,它有可能在排放到 邻近的沿海海湾/海洋之前改善径流水质,也可能受 到来自陆地的过量污染物的损害<sup>[7]</sup>,影响红树林的 生长。其中,重金属污染物以其在海水中难降解、 易富集和有毒性等特点,成为海洋环境质量评价中 重要的因子<sup>[8-9]</sup>。

海南省万宁市东部沿海分布有小海和老爷海两大半封闭性沙堤-滨海潟湖,具有极高的生物多样性及生态价值,是支撑当地经济社会发展的重要区域<sup>[10]</sup>。20世纪70年代以来,小海受大规模围垦养殖用海、太阳河改道以及北门口封堵等多重因素影响,水体交换速率逐步降低<sup>[11]</sup>,加之排海物质富集,红树林大规模退化。20世纪80年代以来,老爷海开始大规模发展水产养殖,至20世纪90年代,其内部水环境质量急剧恶化,严重影响了红树林的生长。2017年,万宁小海及老爷海被列入《海南省生态保护与建设行动计划(2017—2020年)》关于海洋生态系统修复和利用的重点区域之一,随后开展了一系列退塘还海、红树林修复和内湾疏浚工程。前

收稿日期: 2024-03-25

资助项目:中国地质调查局项目"海南岛东南海域自然资源调查试点" (DD20220993),"福建兴化湾-鉴江湾海岛(礁)综合地质调查评价" (DD20251040);海南省科技专项资助(ZDYF2023GXJS011)

**第一作者:**陈靓(1992—),女,硕士,工程师,主要从事海洋地质及海洋自 然资源调查方面的研究工作. E-mail: clcugb@163.com

<sup>\*</sup>通讯作者:邢子浩(1990—),男,硕士,工程师,主要从事海洋区域地质 调查方面的研究工作. E-mail: 331934024@qq.com

期众多学者对小海和老爷海生态环境情况进行研究,多侧重于潟湖内部海水<sup>[12-13]</sup>、海底沉积物<sup>[1,14-18]</sup>、海洋生物及微生物<sup>[19]</sup>等方面重金属污染情况评价 以及环境破坏与治理等方面,且评价结果大都呈现 出重金属含量对环境具有一定的污染趋势,而作为 潟湖周边重要生态系统的红树林区域却鲜有研究, 本文针对万宁小海和老爷海潟湖红树林区域海水 重金属的分布情况进行研究和综合评价,分析其污 染现状,以期为万宁区域红树林生态系统保护修复 提供依据。

## 1 材料和方法

#### 1.1 调查站位

根据小海及老爷海周边红树林分布情况,选择 20个站位,于2022年10月中旬进行集中采样。各 站位均位于潮间带,S01—S16分布于小海潟湖红树 林区域,S17—S20分布于老爷海潟湖红树林区域。 其中,S06站位为零星分布自然林区域,S18、S19、 S20站位为连片自然林区域,其余站位为人工种植 红树林区域。取样站位具体分布情况见图1。

### 1.2 样品采集与分析

本次海水采样分析测试内容包括 Cu、Zn、Pb、

Cd、As、Cr、Hg 这 7 种主要的重金属元素。海水样 品采集参考《GB 17378.3-2007 海洋监测规范 第 3 部分:样品采集、储存与运输》<sup>[20]</sup>,采用清洗干净的 聚乙烯材质采水器采集水面以下 20 cm 处海水样 品(采集过程避免水面上漂浮物质混入及底部沉积 物扰动),采集完成后立即用 0.45 µm 的微孔滤膜过 滤后(Hg的水样除外)装于聚乙烯样品瓶中,现场 滴加浓硝酸酸化至 pH<2 以保持重金属元素的稳 定性,按照规范低温冷藏并立即运往海之源环境科 技(海南)有限公司进行检测。实验室测试严格参 考《GB 17378.4—2007 海洋监测规范 第4部分:海 水分析》<sup>[21]</sup>, Hg、As 使用 PF32 原子荧光光度计进 行测定, Cu、Zn、Pb、Cd、Cr 使用 TAS-990AFG 原 子吸收分光光度计测定,采用空白样品、10%的平 行样品(相对误差<5%)及现场加标样(加标回收率 在 90%~110%)进行质量控制。Cu、Zn、Pb、Cd、 As、Cr、Hg的方法检出限分别为 0.2、3.1、0.03、 0.01、0.5、0.4 和 0.007 µg/L。

### 1.3 评价方法及标准

本文采用水质综合污染指数法(WQI)评价重 金属污染情况<sup>[13,22]</sup>,用 Hakanson 指数法评价重金 属潜在生态风险,用风险商评价法评价重金属对 海洋生物的生物风险程度,并结合相关性分析评估 水质污染驱动因子,利用聚类分析等判断重金属



图1 海南万宁区域采样站位分布

Fig.1 Sampling sites in Wanning area, Hainan

1.3.1 水质综合污染指数法(WQI)

水质综合指数法(water quality index,WQI)是一种通过对多个水质指标进行加权计算从而综合评价水质状况的量化方法,可直观反应水体的整体质量,其计算公式如下:

WQI = 
$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} P_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \frac{C_i}{C_{k_{\text{F}}/\text{H}}^i}$$
 (1)

式中: Ci为重金属 i 的实测值, µg/L;

 $C^{i}_{\mathrm{标准}}$ 为重金属 *i* 的背景值, µg/L;

Pi为单因子水质指数;

n 为元素种类。

水质综合污染指数评价标准见表 1:

### 表 1 水质综合污染指数评价标准<sup>[22-23]</sup>

 Table 1
 Assessment criterion of water pollution using WQI (water quality index)<sup>[22-23]</sup>

WQI≤1	$1 \le WQI \le 2$	2 <wqi≤3< th=""><th>WQI&gt;3</th></wqi≤3<>	WQI>3
清洁	轻微污染	中度污染	严重污染

### 1.3.2 Hakanson 指数法

Hakanson 指数法(hakanson risk index method) 是基于综合考虑重金属含量条件、数量条件、毒性 条件和敏感性条件等定量评价重金属生态风险的 有效方法<sup>[9]</sup>。

其中,某重金属的潜在生态危害系数(*E<sub>i</sub>*)计算 方法如下:

$$E_i = T_i \times \frac{C_i}{C_{i_{\overline{i}}/i_{\overline{k}}}^i} \tag{2}$$

式中: $T_i$ 为重金属 i 的毒性响应系数(表 2);

 $C_i$ 为重金属 *i* 的实测值, µg/L;

C<sup>*i*</sup><sub>标准</sub>为重金属*i*的评价标准值(表 2), μg/L,本 文采用《海水水质标准(GB 3097—1997)》<sup>[24]</sup>一类 水质标准。

表 2 重金属元素毒性响应系数及评价标准值<sup>[23-25]</sup>

 Table 2
 The metal toxicity coefficient and evaluation standard value

						-	-
元素	Cu	Zn	Pb	Cd	As	Cr	Hg
毒性响应系数T <sub>i</sub>	5	1	5	30	10	2	40
评价标准值C <sup>i</sup> <sub>标准</sub> /(μg/L)	5	20	1	1	20	50	0.05

某站位多种重金属综合潜在生态危害指数(**RI**) 计算方式如下:

$$\mathrm{RI} = \sum_{i=1}^{n} E_i \tag{3}$$

#### 各指数取值及评价标准见表 3:

### 表 3 潜在生态危害系数和指数评价标准[23,25-26]

Table 3Assessment criterion on potential ecological harm<br/>using indices Ei and  $RI^{[23,25-26]}$ 

		-			
潜在生态 危害系数	$E_i \leq 40$	$40 \leqslant E_i \leqslant 80$	$80 \leqslant E_i \leqslant 160$	$160 \leq E_i \leq 320$	$E_i \ge 80$
$E_i$	轻微	中等	强	很强	极强
潜在生态 危害指数	RI<150	150≤ RI<300	300≤ RI<600	RI≥300	
RI	轻微	中等	强	很强	

#### 1.3.3 风险商评价(RQ)

风险商评价(risk quotient, RQ)为重金属元素的 环境暴露值和毒性值的比值,可用于污染物生态风 险评价的初筛<sup>[27]</sup>。当 RQ>1时,认为该污染物有 潜在的生态风险,需进一步评价或采取风险减缓措 施,当 RQ<1时,则认为其风险可接受<sup>[28-29]</sup>,具体的 公式及评价标准如下:

$$RQ = \frac{EEC}{PNEC}$$
(4)

$$PNEC = \frac{HC_5}{SF}$$
(5)

式中: EEC为环境暴露数据,本文采用各重金属元素的实测值, µg/L;

PNEC为预测无效应浓度, µg/L;

HC5为物种毒性敏感性累积模型(SSD)的5%

分位数, µg/L;

SF 为安全毒性因子,取保守值  $5^{[8,30]}$ 。

风险商 RQ 评价标准见表 4:

表 4 HC<sub>5</sub> 取值及风险商评价标准<sup>[8]</sup>

Table 4	Evaluation	criteria o	on HC <sub>5</sub>	value and	l risk o	quotient

				-			-
元素	Cu	Zn	Pb	Cd	As	Cr	Hg
$HC_5/(\mu g/L)$	3.46	25.54	234.06	1.07	0.5	25.43	2.84
 回险商DO	RQ	≤0.1	0.1 <f< th=""><th>RQ≤1</th><th>RÇ</th><th>2&gt;1</th><th></th></f<>	RQ≤1	RÇ	2>1	
风应冏RQ ·	低生活	态风险	中等生	9等生态风险		态风险	

### 2 结果与讨论

#### 2.1 重金属元素含量及分布特征

对调查站位 7 种重金属元素含量进行统计分 析, Cr、Zn、As 元素在各站位均未达检出限, 已检出 元素以 Hg 和 Cd 检出率相对较高。本文主要对达 检出限的 4 种元素(Hg、Cd、Cu、Pb)进行分析, 未 检出站位元素含量参考《近岸海域环境监测规 范》[31],按照检出限的 1/2 量参与统计。

根据表 5 所示, 2022 年 10 月万宁潟湖红树林 区域重金属元素平均含量分别为: Hg(0.044 μg/L)、 Cu(14.975 μg/L)、Pb(0.695 μg/L)、Cd(0.628 μg/L)。 其中,小海红树林区域重金属元素平均含量为: Hg(0.052 μg/L)、Cu(18.119 μg/L)、Pb(0.865 μg/L)、 Cd(0.697 μg/L),老爷海区域重金属元素平均含量 为: Hg(0.014 μg/L)、Cu(2.400 μg/L)、Pb(0.015 μg/L)、Cd(0.348 μg/L),老爷海红树林区域海水水 质整体优于小海红树林区域(图 2)。除 Cu 元素以 外,研究区各重金属元素整体呈现相似的分布特征, 以小海西部—北部以及河口区域相对含量较高,小 海东南部—南部以及老爷海区域相对含量较低。 其中,各站位 Hg、Cd 的平均含量均符合《海水水质 标准》I类海水水质标准,仅在个别站位出现超标 现象,Hg站位超标率达 40%,超标站位主要位于小 海西部 S07—S14站位(图 2a),Cd站位超标率为 15%,超标站位主要分布于小海北部 S14、S15及 S03站位(图 2d);Pb 的平均含量虽符合《海水水质 标准》I类海水水质要求,但所有检出站位的 Pb 元

表 5	万宁潟湖红树林区域重金禹含重	

	Table 5	Heavy metal contents in the mangrove area of Wanning Lagoon							
元素		Hg	Cr	Cu	Zn	Pb	Cd	As	
检出限/(µg/L)		0.007	0.400	0.200	3.100	0.030	0.010	0.500	
检出率/%		80	0	60	0	20	80	0	
范围/(µg/L)		0.0 035~0.124	—	0.1~48.2	—	0.015~4.00	0.005~1.17	—	
算术平均值/(µg/L)		0.044	—	14.975	—	0.695	0.628	—	
标准偏差/(µg/L)		0.041	—	16.754	—	1.415	0.407	_	
变异系数		0.914	—	1.119	—	2.036	0.649	—	
	Ι	0.05	50	5	20	1	1	20	
海水水 医标准((	Π	0.2	100	10	20	5	5	30	
两小小顶标准/(μg/L)	Ш	0.5	200	50	100	10	10	50	
	$\mathbf{N}$	0.5	500	50	500	50	10	50	

注:"一"表示未达检出限。





素含量均处于 II 类水质标准,站位超标率为 20%, 主要分布于小海北部入海口的 S01、S02 站位及河 口区的 S08、S14 站位(图 2c);而 Cu 的平均含量则 超出 I 类水质标准 3.0 倍,所有检出站位 Cu 含量均 超标,站位超标率达 60%,超标站位主要位于小海 南部和北部以及老爷海北部人工种植红树林区域, 处于 III级海水水质标准(图 2d)。此外,各元素变异 系数相差较大,反映了各金属元素的污染程度不尽 相同,这可能与重金属的来源情况、人类活动影响 的大小及方式等因素有关<sup>[32]</sup>。

### 2.2 海水重金属污染风险指数评价

海水水质综合污染评价结果如图 3 所示。单 因子水质指数 Pi 显示万宁潟湖红树林区域海水单 项重金属元素的污染程度依次为 Cu>Hg>Pb>Cd, 相对于其他元素, Cu 的污染指数较大。各站位海水 水质综合污染指数 WQI 范围为 0.05~3.49, 平均值 为 1.30, 整体属于清洁一轻微污染水平。其中, 老 爷海潟湖红树林区域各站位海水重金属污染水平 WQI 均<1, 处于清洁水平; 小海潟湖红树林区域多 数站位海水重金属污染水平处于清洁—轻微污染 区间, 但 S05、S14 站位海水水质为中度污染水平,



S01、S02站位水质为严重污染水平,且在严重污染 区域,Cu的含量相对较高。

#### 2.3 潜在生态风险分析

各站位单项重金属元素潜在生态风险指数 $E_i$ 和综合潜在生态风险指数RI分析结果如图 4 所示。 万宁潟湖红树林区域 Hg、Cu、Pb、Cd 潜在生态风 险指数  $E_i$ 的平均值(最小值~最大值)分别为 35.48 (2.8~99.2)、14.975(0.1~48.2)、3.475(0.075~20)、 18.825(0.15~35.1),从大到小顺序为: Hg>Cu> Cd>Pb,各元素  $E_i$ 平均值均<40,属于轻微生 态风险。其中,Hg元素的含量虽然较低,但是毒 性较高,因此,对调查区的生态风险贡献相对较大, 在 S07、S08、S09、S10、S11 以及 S14 站位  $E_i$  值介 于 40~80,属于中等生态风险,S12、S13 站位  $E_i$  值 >80,属于强生态风险。Cu 在 S01、S02、S05 站位  $E_i$ 值略高,属于中等生态风险。



综合潜在生态风险指数RI均值为 72.755(7.53 ~142.08),所有站位RI均<150,生态危害等级为轻 微,其高值区主要位于龙尾河河口 S12、S13 和 S14 站位。

#### 2.4 生物风险程度评价

红树林区域是重要的生物生活栖息地,但其水体交换能力相对较弱,因此,在该区域进行海水重金属对海洋生物的潜在风险评价显得尤为重要。各重金属元素的风险商评价结果显示,Pb在所有站位的风险商 RQ均<0.1(图 5b),表现出较低的生物敏感性,表明其生物风险较低;Hg在平均情况下的RQ<0.1(图 5b),在龙尾河河口区,Hg在最不利的情况下的生物风险程度(RQ<sub>max</sub>=0.22)依然是可接受的(图 5a);而 Cu、Cd 的 RQ 值除少数站位属于低风险程度外,大部分站位>1,尤其 Cu 处于较高的生物风险级别(图 5a),这可能与 Cu 整体含量较高



图 3 百里亚属儿系风险同计川

Fig.5 Assessment in risk quotient of heavy metal elements

有关(图 2b)。研究表明,本次安全环境因子(SF)取 保守值 5,可能存在一定的过度保护效应<sup>[8,28]</sup>,但在 污染物生态风险评价的初级筛序阶段<sup>[33]</sup>,Cu、Cd 对研究区红树林区域的海洋生物具有一定的生物 风险,需要引起关注。

#### 2.5 重金属来源分析

研究表明,溶解态重金属浓度可能受到海水环 境因子和污染源等多种因素影响<sup>[34-35]</sup>,本文利用 Pearson 相关性分析方法对海水环境因子与达到检 出限的重金属元素质量浓度进行相关性分析(表 6), 以查明海水环境因子对重金属质量浓度的控制情 况,并判断各重金属来源是否一致。结果显示,Hg 和 Cd 与盐度(SAL)呈显著负相关,表明本研究区 盐度对 Hg 和 Cd 的溶解扩散可能有一定的抑制作 用, Cd 在海水中主要以 CdCl<sub>2</sub> 的形式存在, 盐度的 升高促进海水中溶解态 Cd 与 Cl<sup>-</sup>形成络合物, 络合 物通过絮凝、吸附沉降等作用导致海水中溶解态 Cd 浓度降低<sup>[26]</sup>。Cu 的质量浓度和 pH 呈显著正相 关, 同时, pH 与 T 呈显著正相关, 表明 pH 和 T 的升 高可能对 Cu 的扩散有促进作用。Pb 和 Cu 质量浓 度呈显著正相关, 表明二者可能有相似的来源, 但 其余几种重金属元素之间均无明显相关性, 表明研 究区海水重金属可能为多种来源叠加。有机物对 于重金属的吸附作用会导致海水中重金属含量相 对减少<sup>[8,26]</sup>, 而本区域溶解氧(DO)和化学需氧量 (COD)指标与各金属元素的相关性均不大, 反映海 水中重金属的不稳定性, 其易受水动力和环境的作 用发生迁移转换, 也进一步证明了重金属来源的复 杂性。

	pН	Т	SAL	DO	COD	Hg	Cu	Pb	Cd
pH	1								
Т	0.651**	1							
SAL	-0.529*	-0.094	1						
DO	-0.299	-0.154	0.256	1					
COD	0.027	0.250	0.297	-0.246	1				
Hg	-0.043	-0.095	-0.473*	0.128	-0.175	1			
Cu	0.524*	0.338	-0.107	-0.137	0.065	-0.242	1		
Pb	0.223	0.410	-0.102	-0.088	-0.150	0.052	0.443*	1	
Cd	0.159	-0.306	-0.475*	-0.029	-0.312	0.152	-0.092	-0.044	1

	表 6	重金属质量浓度与海水环境因子的相关性分析
Table 6	Correlation analysis	of mass concentration of heavy metals and environmental factors in seawater

注:\*\*表示在0.01水平下(双侧检验)相关性显著;\*表示在0.05水平下(双侧检验)相关性显著。

对各站位重金属的平均浓度进行双向分层聚 类分析,如图 6 所示,垂直树状图显示 2 个聚类: Cu 和 Pb, Hg 和 Cd。与 Pearson 相关性分析结果具有 较好的一致性。采样点分为3组:S01和S02站位; S14和S08站位;其余站位。其中,第1组位于小海 北部入海口处,以Cu元素污染程度最高(图3),综



合评价表现出较高的重金属污染程度;第2组均位 于河口区(S14位于龙尾河河口区,S08位于东山河 河口区),以 Pb元素污染程度相对较高(图3),综合 评价表现出中等污染水平;其余站位表现出低一中 等污染水平。

综合以上分析, Pb 与 Cu 在小海北部入海口及 河流入海河口区域污染程度较高。研究表明,Cu在 一定水平上是水生生物所必需的金属元素,也是合 金船舶、机械制造、生活污水、旅游设施、养殖饲料、 鱼饵、农业杀菌剂、肥料等的成分之一<sup>[23,36-37]</sup>, Cu元 素易于在海水中累积,导致海水中 Cu 的质量浓度 较高[38-39]。一般情况下,金属/合金制造的船舶往往 含有 Cu 和 Zn 两种金属<sup>[36]</sup>, 研究区各调查站位 Zn 元素均未达检出限,而Cu元素的超标程度和生物 风险程度均较高,且其最高值位于小海北部入海口 附近区域,在2021年禁养区养殖池塘和鱼排的清 退工作完成以前,该区域分布大量的鱼排网箱及池 塘养殖区,养殖废水及饵料等污染物可能随水体动 力等因素干扰在附近海水及沉积物中残存; Pb 与 Cu呈现显著正相关关系,表明二者可能具有部分相 似来源,其高值区主要位于东山河、龙尾河河口区 域以及小海北部入海口附近,沿岸以池塘养殖、畜 禽养殖及种植业为主,因此,研究区主要污染源可 能与渔业养殖和农业生产等人为活动关系较大。 此外, Pb 的另一主要来源为工业废水排放<sup>[36, 40-41]</sup>、 船舶尾气等的大气沉降<sup>[23]</sup>、船舶油漆的防腐化合物、 柴油燃料的抗暴剂以及船只漏油等人类活动途径。 小海北部入海口港北港区域是众多往来船舶运输 停靠的地点,因此,船舶运输尾气排放等的大气沉 降为调查区的污染源之一。Hg 和 Cd 主要来源于

化石燃料燃烧、有色金属冶炼、近况开采、生活污水等人为活动<sup>[9,23,29,34]</sup>, 二者之间与其他重金属元素 之间相关性均不大, 仅在调查区部分站位存在超标 现象, 实地勘察显示超标区域附近工业厂区分布相 对较少, 以居民居住、渔业养殖或农业等功能区较 多, 因此, 其受局部区域(如河口区) 点源状人为生 活污水排放影响可能性较大, 加之红树林区域水体 交换能力较差, 红树林净化污染物及海水自净能力 有限, 导致相关元素浓度呈现出较高的水平。

### 3 结论

(1)万宁潟湖红树林区域海水重金属元素分布 受到区域分布、陆地径流、自然环境等多种因素影 响,其重金属污染程度及生态风险在不同区域不同 环境下差异较大,整体呈现出:老爷海潟湖红树林 区域优于小海红树林区域、连片自然林区域优于其 他区域、河口区域劣于其他区域的特征;所有重金 属元素中以 Cu 元素超标程度及生物风险程度相对 较高。

(2)老爷海潟湖红树林区域海水水质综合污染 评价属于清洁水平,潜在生态风险分析为轻微生态 风险,仅在 S17 站位出现 Cu 元素含量超标情况,可 能与该区域新种植人工林水质受人为扰动影响有 关。小海潟湖红树林区域海水水质综合污染评价 情况差异较大,小海北部入海口附近达严重污染水 平,龙尾河河口区域 S13、S14 站位为中度污染水平; 小海潜在生态风险等级为轻微生态风险,其相对高 值区同样位于龙尾河河口区域。

(3)调查区海水重金属主要来源于渔业养殖和 农业生产等陆源人为活动以及港口运输和船舶尾 气等的大气沉降,同时,在河口区域受点源状人为 活动排放影响较大。

红树林具有较好的净化海水水质、降解污染物的作用,以上评价结果仅来源于1期调查数据,小海区域近年来开展了大规模人工红树林种植工作,相关区域海水及底质受人为扰动、水体交换等影响较大,可能导致调查结果污染程度偏高;此外,近年来随着生态修复工程的开展,以及规范化养殖、污水处理排放、退塘还海、港北口门拓宽以及水环境综合治理等重要举措的实施,小海周边环境逐步优化,为红树林生境的改善及生物多样性的维护起到了积极的促进作用,可进一步开展周期性观测。

#### 参考文献:

- 卢振峰, 唐棣, 李乐, 等. 海南老爷海表层沉积物重金属分布 特征及污染评价 [J]. 海洋环境科学, 2023, 42(3): 410-417.
   LU Z F, TANG D, LI L, et al. Distribution characteristics and pollution evaluation of heavy metals in the surface sediment of Laoyehai Lagoon, Hainan Province[J]. Marine Environmental Science, 2023, 42(3): 410-417.
- [2] 范成新,刘敏,王圣瑞,等.近20年来我国沉积物环境与污染 控制研究进展与展望[J].地球科学进展,2021,36(4):346-374.

FAN C X, LIU M, WANG S R, et al. Research progress and prospect of sediment environment and pollution control in China in recent 20 years[J]. Advances in Earth Science, 2021, 36(4): 346-374.

 [3] 吴瑞. 海南岛潟湖环境现状及治理对策 [J]. 热带农业工程, 2020, 44(3): 99-101.
 WU R. Current status and controlling strategies of lagoon environment in Hainan Island[J]. Tropical Agricultural Engineering,

2020, 44(3): 99-101.
[4] 陈新平, 王斌, 尹子祺, 等. 红树林防灾减灾功能研究进展及 保护修复建议 [J]. 海洋通报, 2023, 42(4): 469-480.
CHEN X P, WANG B, YIN Z Q, et al. Research progress on mangrove forest disaster prevention and mitigation functions and suggestions for protection and restoration[J]. Marine Science Bulletin, 2023, 42(4): 469-480.

- [5] 王友绍. 红树林分子生态学 [M]. 北京: 科学出版社, 2019.
   WANG Y S. Molecular Ecology of Mangroves[M]. Beijing: Science Press, 2019.
- [6] INYANG A, ZHOU Y, Y. Characteristics of water quality and their eutrophication assessment on the mangrove ecosystems along the Guangdong coast[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2022, 41(6): 1-11.
- [7] WANG Y, GU J. Ecological responses, adaptation and mechanisms of mangrove wetland ecosystem to global climate change and anthropogenic activities[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2021, 162: 105248.
- [8] 阎琨, 庞国涛, 邢新丽, 等. 广西企沙半岛近岸表层海水重金 属分布、来源及生态风险评价 [J]. 海洋环境科学, 2023, 42(1): 89-96.

YAN K, PANG G T, XING X L, et al. Distribution, source analysis and ecological risk assessment of heavy metals in surface seawater near Qisha Peninsula, Guangxi Province[J]. Marine Environmental Science, 2023, 42(1): 89-96.

[9] 许观嫦,徐颂军,宋焱,等.深圳红树林自然保护区海水重金 属质量评价[J].华南师范大学学报(自然科学版),2015,47(1): 101-108.

XU G C, XU S J, SONG Y, et al. Evaluation on the seawater's heavy metals in Shenzhen mangrove nature reserve[J]. Journal of South China Normal University(Natural Science Edition), 2015, 47(1): 101-108.

[10] 张璐瑶.亚热带潟湖地区生态保育、多元共治的路径探索:以

万宁小海为例 [C]//中国城市规划学会,成都市人民政府.面向高质量发展的空间治理:2021 中国城市规划年会论文集 (16 乡村规划).北京:中国建筑工业出版社,2021:10.

ZHANG L Y. The path research on ecological conservation and multi-governance in the subtropical lagoon area[C]//Chinese Society of Urban Planning, Chengdu Municipal People's Government. Spatial Governance for High-Quality Development - Proceedings of the 2021 China Urban Planning Annual Conference (16 Rural Planning). Beijing: China Building Industry Press, 2021: 10.

[11] 马文超, 王焱, 朱卓毅. 高强度养殖活动下老爷海溶解氧的亏 损及有机质成分的响应 [J]. 华东师范大学学报 (自然科学版), 2021(2): 85-99.

MA W C, WANG Y, ZHU Z Y. Oxygen depletion and the response of organic matter in Laoyehai, a lagoon with strong aquaculture activities[J]. Journal of East China Normal University (Natural Science), 2021(2): 85-99.

- [12] 徐永辉,黄文国,梁泰尔.万宁小海海水增养殖区海域水质状况分析与评价[J].广东化工,2021,48(8):204-207.
  XU Y H, HUANG W G, LIANG T E. Analysis and evaluation of water quality in Xiaohai mariculture area of Wanning[J]. Guangdong Chemical Industry, 2021, 48(8): 204-207.
- [13] 朱志雄, 骆丽珍, 陈石泉, 等. 海南小海海水富营养化和重金 属特征分析与评价 [J]. 海洋湖沼通报, 2020, 5: 131-138. ZHU Z X, LUO L Z, CHEN S Q, et al. Analysis and evaluation of eutrophication of seawater and characteristics of heavy metal in Xiaohai, Hainan Province [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2020, 5: 131-138.
- [14] 宋德卓,薛积彬,孙升升.海南小海潟湖沉积物地球化学揭示的近千年气候环境变化 [J].地球化学,2022,51(2):202-212.
   SONG D Z, XUE J B, SUN S S, et al. Climate and environmental changes revealed by sedimentary geochemical elements of the Xiaohai Lagoon (Hainan) during the last millennium[J]. Geochimica, 2022, 51(2): 202-212.
- [15] 游爱华,薛积彬,谢露华,等.海南东部小海潟湖沉积物地球 化学特征及对古台风活动的指示 [J]. 湖泊科学, 2019, 31(6): 1758-1769.

YOU A H, XUE J B, XIE L H, et al. Geochemical characteristics of sediments in the Xiaohai Lagoon (Eastern Hainan) and implications for the paleo-typhoon activities[J]. Journal of Lake Sciences, 2019, 31(6): 1758-1769.

[16] 骆丽珍,朱志雄,陈石泉,等.万宁小海潟湖表层沉积物时空 分布特征与污染评价[J].海洋湖沼通报,2022,44(2):103-111.

LUO L Z, ZHU Z X, CHEN S Q, et al. Spatial distribution and contamination evaluation of surface sediment in Xiaohai, Wanning[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2022, 44(2): 103-111.

[17] 林钟扬, 倪建宇, 时连强, 等. 海南小海表层沉积环境及重金属污染综合评价 [J]. 海洋学研究, 2011, 29(2): 12-23.
 LIN Z Y, NI J Y, SHI L Q, et al. Comprehensive evaluation of the environment and the heavy metals pollution in the surface

[18] 刘兴健, 葛晨东. 海南岛小海潟湖沉积环境演变研究 [J]. 海洋 通报, 2007(4): 71-79.

> LIU X J, GE C D. Sedimentary environment evolvement of Xiaohai Lagoon in the Hainan Island[J]. Marine Science Bulletin, 2007(4): 71-79.

- [19] 徐阁, 王德鸿, 韩留玉, 等. 海南万宁海域海洋生物重金属分析与评价 [J]. 生态科学, 2023, 42(3): 106-113.
  XU G, WANG D H, HAN L Y, et al. Analysis and evaluation of heavy metals in marine organisms in Wanning ocean area[J].
  Ecological Science, 2023, 42(3): 106-113.
- [20] 全国海洋标准化技术委员会. GB 17378.3—2007, 海洋监测规 范第3部分:样品采集、贮存与运输[S].北京:中国标准出版 社, 2007.

National Technical Committee for Marine Standardization. GB 17378.3-2007, Marine monitoring specifications part 3: sample collection, storage and transportation [S]. Beijing: China Standards Press, 2007.

- [21] 全国海洋标准化技术委员会. GB 17378.4—2007, 海洋监测规范第4部分: 海水分析 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2007. National Technical Committee for Marine Standardization. GB 17378.4-2007, Marine monitoring specifications part 4: seawater analysis [S]. Beijing: China Standards Press, 2007.
- [22] SUN Q B, GAO F, CHEN Z L, et al. The content and pollution evaluation of heavy metals in surface seawater in Dalian Bay[J].
   Earth and Environmental Science, 2019, 227: 062021.
- [23] 赵明杰,孙志佳,闫兴国,等.广东吴川近岸海域表层海水重 金属含量及生态风险分析[J].海洋地质前沿,2023,39(1):70-76.

ZHAO M J, SUN Z J, YAN X G, et al. Analysis of heavy metal content and ecological risk in surface seawater of Wuchuan coastal area, Guangdong Province[J]. Marine Geology Frontiers, 2023, 39(1): 70-76.

- [24] 国家海洋局,国家环境保护局.GB 3097—1997,海水水质标准[S].北京:中国标准出版社,1998.
  State Oceanic Administration, State Environmental Protection Administration. GB 3097-1997, seawater quality standard[S].
  Beijing: China Standards Press, 1998.
- [25] 刘宪斌,朱浩然,郭夏青,等.河北黄骅近岸海域表层海水重 金属污染特征及生态风险评价 [J].安全与环境学报,2020, 20(2):747-755.

LIU X B, ZHU H R, GUO X Q, et al. On situation of heavy metal contaminant residents in seawater along Huanghua coast area and potential ecological risk assessment, Cangzhou, Hebei Province[J]. Journal of Safety and Environment, 2020, 20(2): 747-755.

[26] 刘慧杰,刘文君,刘继平,等.南中国海表层海水重金属含量 及其潜在生态风险分析[J].中国环境科学,2017,37(10): 3891-3898.

> LIU H J, LIU W J, LIU J P, et al. Heavy metals concentration and its potential ecological risk assessment of surface seawater

in South China Sea[J]. China Environmental Science, 2017, 37(10): 3891-3898.

[27] ZOLEZZI M , CATTANEO C, TARAZONA J V . Probabilistic ecological risk assessment of 1,2,4-trichlorobenzene at a former industrial contaminated site[J]. Environmental Science & Technology, 2005, 39(9): 2920-2926.

陈靓,等:万宁潟湖红树林区域海水重金属污染状况评估

- [28] LI X, CHI W Q, TIAN H, et al. Probabilistic ecological risk assessment of heavy metals in western Laizhou Bay, Shandong Province, China[J]. Plos One, 2019, 14: e0213011.
- [29] 崔衍波, 冯永亮, 刘群群, 等. 东营市三个河口区域表层海水 重金属的分布与生态风险评价 [J]. 中国海洋大学学报 (自然 科学版), 2019, 49(1): 93-101. CUI Y B, FENG Y L, LIU Q Q, et al. Distribution and ecologic-

al risk assessment of heavy metals in surface seawater from three estuaries in Dongying[J]. Periodical of Ocean University of China (Natural Science), 2019, 49(1): 93-101.

- [30] WANG Z, DU Y, YANG C, et al. Occurrence and ecological hazard assessment of selected antibiotics in the surface waters in and around Lake Honghu, China[J]. Science of the Total Environment, 2017, 609: 1423-1432.
- [31] 中国环境监测总站,浙江省舟山海洋生态环境监测站.HJ 442—2008,近岸海域环境监测规范[S].北京:中国环境科学 出版社,2008.

China National Environmental Monitoring Center, Zhejiang Provincial Zhoushan Marine Ecological Environment Monitoring Station. HJ 442-2008, specifications for monitoring of coastal waters [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2008.

[32] 王霞. 黄河上游典型地区底泥重金属调查与污染评价 [D]. 兰州: 兰州交通大学, 2014.

WANG X. Investigation and pollution assessment of heavy metals in surface sediments from typical regions in upstream of Yellow River[D]. Lanzhou; Lanzhou Jiaotong University, 2014.

[33] 杜建国,赵佳懿,陈彬,等.应用物种敏感性分布评估重金属 对海洋生物的生态风险 [J]. 生态毒理学报, 2013, 8(4): 561-570.

> DU J G, ZHAO J Y, CHEN B, et al. Assessing ecological risks of heavy metals to marine organisms by species sensitivity distributions[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2013, 8(4): 561-570.

- [34] WANG X Y, ZHAO L L, XU H Z, et al. Spatial and seasonal characteristics of dissolved heavy metals in the surface seawater of the Yellow River Estuary, China[J]. Marine Pollution Bulletin, 2018, 137: 465-473.
- [35] 公金文,陈发荣,郑立,等. 红海湾表层海水重金属含量与污染评价 [J]. 海洋科学进展, 2021, 39(4): 570-580.
  GONG J W, CHEN F R, ZHENG L, et al. The concentrations and pollution assessment of heavy metal in surface seawater in Honghai Bay[J]. Advances in Marine Science, 2021, 39(4): 570-580.
- [36] 罗万次,苏搏,刘熊,等.广西北仑河口红树林保护区表层海 水溶解态重金属时空分布及其影响因素 [J].海洋通报,2014,

33(6): 668-675.

LUO W C, SU B, LIU X, et al. Spatial and temporal distributions and influence factors of the dissolved heavy metals in surface water in the mangrove reserve at the Beilun River Estuary in Guangxi[J]. Marine Science Bulletin, 2014, 33(6): 668-675.

- [37] 李劳钰, 王宗灵, 魏修华, 等. 南黄海西部冬季表层水中的溶 解态重金属分布特征分析 [J]. 海洋科学进展, 2009, 27(2): 201-210.
  LI L Y, WANG Z L, WEI X H, et al. Distribution of dissolved heavy metals in the surface water in the west area of the Southern Yellow Sea in winter[J]. Advances in Marine Science, 2009, 27(2): 201-210.
- [38] HAN X M, WANG J Q, CAI W Q, et al. The pollution status of heavy metals in the surface seawater and sediments of the Tianjin coastal area, North China[J]. IJERPH, 2021, 18(21): 11243.
- [39] 时春景,李红霞,张言,等. 永定河上覆水、间隙水和沉积物中 重金属的分布特征 [J]. 环境化学, 2017, 36(1): 48-61.

SHI C J, LI H X, ZHANG Y, et al. Distribution characteristics of heavy metals in overlying water-pore water-sediment in the Yongding River[J]. Environmental Chemistry, 2017, 36(1): 48-61.

- [40] 孙维萍,潘建明,吕海燕,等. 2006 年夏冬季长江口、杭州湾 及邻近海域表层海水溶解态重金属的平面分布特征 [J]. 海洋 学研究, 2009, 27(1): 37-43. SUN W P, PAN J M, LYU H Y, et al. Distribution of dissolved trace metals in summer and winter of 2006 in Changjiang River Estuary and Hangzhouwan Bay[J]. Journal of Marine Sciences, 2009, 27(1): 37-43.
- [41] 王小静,张帅,简慧敏,等.大辽河口溶解态重金属的变化特征及影响因素研究[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2011,41(10):79-86.

WANG X J, ZHANG S, JIAN H M, et al. Variation characteristics of dissolved heavy metals in the Daliaohe Estuary[J]. Periodical of Ocean University of China (Natural Science), 2011, 41(10): 79-86.

### Assessment on heavy metal pollution in mangrove seawater of Wanning Lagoon

CHEN Liang<sup>1,2</sup>, HUANG Zanhui<sup>1,2</sup>, WANG Zhaofan<sup>1,2</sup>, XING Zihao<sup>1,2\*</sup>, LI Pingru<sup>1,2</sup>, FU Dinghui<sup>1,2</sup>, WEI Xiu<sup>1,2</sup> (1 Haikou Marine Geological Survey Center, China Geological Survey, Haikou 571127, China; 2 Haikou Key Laboratory of Marine Contaminants Monitoring Innovation and Application, Haikou 571127, China)

**Abstract:** Heavy metal pollution is a major issue of marine environmental assessment. To clarify the distribution and concentration of heavy metals (Hg, Cr, Cu, Zn, Pb, Cd and As) in seawater of mangrove areas in Wanning Lagoon, Hainan South China, 20 surface seawater samples were collected in mid-October 2022 for analysis. Comprehensive pollution evaluation method, Hakanson index, and risk quotient were used. The originations of heavy metals were traced based on correlation analysis and bidirectional stratified cluster analysis. Results show that the average contents of Hg, Cu, Pb, and Cd were 0.044, 14.975, 0.695, and 0.628 µg/L, respectively, and Cr, Zn and As were below the detection limits in all stations. In terms of heavy metal pollution status, the Laoyehai area was better than the Xiaohai area, the natural mangrove forest area was better than other areas, and the estuary area was worse than other areas. The content of Cu exceeded the benchmark and so the degree of biological risk was relatively high among all heavy metals. Heavy metals mainly come from land-based anthropogenic activities such as fishery breeding and agricultural production, as well as atmospheric subsidence of port transportation and ship emission, and some areas were affected by point-source anthropogenic activities. This study provided a reference for the protection of mangrove ecosystem around Wanning Lagoon.

Key words: Wanning Lagoon; mangroves; surface seawater; heavy metals; risk assessment