

# 海南新村港红树林区域沉积物和海水质量调查与评价

龙军桥, 符钉辉, 丁伟品, 黄赞慧, 陈泽恒,  
张小海, 王佳翰

(中国地质调查局海口海洋地质调查中心, 海南 海口 571127)

**摘要:**为研究海南新村港红树林区域沉积物和海水质量, 本文对该区域沉积物的粒度、重金属、营养盐、有机碳、硫化物、全盐量以及海水中的溶解氧、氮、磷进行了分析, 并采用潜在生态风险指数、隶属度模糊综合评价等评价方法对沉积物及海水质量进行评价。结果表明, 与其他地区相比, 新村港红树林区域沉积物中重金属元素含量较低, 且分布相对均匀; 沉积物中总氮、总磷含量在各断面无显著性差异, 但少数调查点的总磷含量比其他调查点略高; 相比周边海域, 有机碳含量相对较高, 但硫化物含量则很低; 从全盐量结果来看, 该区域属于中度或强度盐化土。海水的溶解氧、氨氮、总磷浓度部分断面有显著性差异, 总氮、无机氮、硝酸盐则分布均匀。从评价结果来看, 沉积物中重金属、营养盐均不具有生态风险效应, 且有机碳、硫化物、石油类、重金属等指标均符合第一类海洋沉积物质量标准, 但是, 调查区海水氮污染特征较明显。

**关键词:**红树林; 沉积物; 海水; 重金属; 营养盐

中图分类号: P734; P736

文献标识码: A

文章编号: 1007-6336(2023)02-0185-08

## Investigation and evaluation of sediment and seawater quality in mangrove area of Xincungang, Hainan

LONG Jun-qiao, FU Ding-hui, DING Wei-pin, HUANG Zan-hui, CHEN Ze-heng,  
ZHANG Xiao-hai, WANG Jia-han

(Haikou Marine Geological Survey Center of China Geological Survey, Haikou 571127, China)

**Abstract:** In order to study the quality of sediments and seawater in the mangrove area of Xincungang, Hainan province, the particle size, heavy metals, nutrients, organic carbon, sulfide and total salt of sediments, as well as the dissolved oxygen, nitrogen and phosphorus of seawater in this area were analyzed. The potential ecological risk index method, membership fuzzy comprehensive evaluation method and other evaluation methods were used to evaluate the sediments and seawater. The results showed that the content of trace elements in the sediments was relatively low and uniform. The content of total phosphorus in a few points and the content of organic carbon was relatively high, while the content of sulfide was very low, and the area belongs to medium or strong saline soil. The contents of dissolved oxygen, ammonia nitrogen and total phosphorus in seawater had significant differences in some sections, and the contents of total nitrogen, inorganic nitrogen and nitrate had nothing to do with the sections. According to the evaluation results, Heavy metals and nutrients in sediments had no ecological risk effect, Organic carbon, sulfide, petroleum, heavy

收稿日期: 2022-02-11, 修订日期: 2022-05-12

基金项目: 中国地质调查局地调项目: 海南棠湾-崖州湾海岛(礁)综合地质调查 (ZD20220609); 海南岛湿地资源现状试点调查 (DD20208061)

作者简介: 龙军桥 (1990—), 男, 广西百色人, 工程师, 主要从事自然资源调查研究工作, E-mail: 303820842@qq.com

通讯作者: 王佳翰 (1989—), 男, 海南海口人, 工程师, 主要从事地质样品分析研究工作, E-mail: wangjiahanhao@163.com

metals and other indicators meet the quality standard of class I marine sediments, but the characteristics of seawater nitrogen pollution were obvious.

**Key words:** mangrove; sediment; sea water; heavy metals; nutrients

红树林是自然生长在热带、亚热带的陆地与海洋交界处的海岸潮间带或海潮能到达的河流入海口的植物群落,可抵抗潮汐和洪水冲击,保护堤岸,为木材、食物、药材及化工材料提供原料,塑造旅游城市的自然人文特色景观等,有很高的生态、经济、景观价值<sup>[1]</sup>。红树林易受海水和特殊的土壤条件等因素影响,因此,红树林生长区域,尤其是受人类活动影响较大的海湾区域,其沉积物和海水的质量调查非常必要。

沉积物方面,重金属因为其毒性、持久性和生物累积性已经造成了严重的环境问题<sup>[2-3]</sup>。此外,沉积物是氮、磷等生源要素的重要储存库,对水体富营养化具有重要贡献<sup>[4]</sup>。硫化物、有机碳、全盐量等也是衡量沉积环境质量优劣的重要指标<sup>[5-7]</sup>。因此,红树林区域沉积物中重金属、营养盐、硫化物、有机碳、全盐量等调查十分重要。海水方面,海南海产品养殖业发达,近岸人口居住密集,容易造成养殖水域氮、磷富集,可能会引发水质恶化、渔业减产等一系列连锁反应。因此,海水中营养盐的调查有十分现实的意义。

新村港位于海南省陵水县新村镇东南部,为海南省重点渔港之一。新村港红树林系统是新村港海洋生态系统的重要组成部分,其独特的生态功能可为新村港提供显著的经济效应。目前,国内鲜有对红树林区域海水和沉积物同时调查且评价的研究。为了解海水和沉积物质量并掌握其污染程度,本文对新村港红树林区域的海水和沉积物质量进行了调查评价,调查结果可为该区域的养殖活动、旅游开发、海上交通运输及海洋生态保护提供一定的参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况及调查点设置

新村港面积约为 13.10 km<sup>2</sup>,港内南北长 4 km,东西宽 6 km,新村港实质为中等规模的沙坝—潮汐汉道—潟湖体系,潟湖面积约 22 km<sup>2</sup>,

涨潮三角洲、落潮三角洲比较发育,汉道长约 3~4 km。新村港口窄内宽,北岸为码头堤岸,南岸为南湾猴岛生态景区。新村港红树林系统调查围绕新村港潟湖及岸滩开展,调查时间为 2020 年 10 月,调查工作安排在低潮位时间段,沿 7 条断面共布设 22 个调查点,其中,潟湖北侧布设 4 条断面共计 16 个调查点,潟湖南侧布设 3 条断面共计 6 个调查点。各调查点分布情况见表 1。

### 1.2 样品采集与测试方法

表层沉积物及海水样品的采集和保存分别按《海洋调查规范 第 1 部分:总则》(GB/T 12763.1—2007)及《海洋监测规范 海水分析》(GB 17378.4—2007)规定的相关方法进行。采样完毕后,将沉积物样品运回实验室,挑出杂物后分成两份,一份新鲜冷冻保存,用于粒度分析;另一份经自然风干后研磨过 80 目筛,用于总氮、总磷和重金属的测定。沉积物总氮(TN)采用碱性过硫酸钾消解—紫外分光光度法测定;总磷(TP)采用钼酸铵分光光度法测定;重金属元素 Cr、Cu、Pb 采用赛默飞 ICAP-Q 电感耦合等离子体质谱仪测定;As 和 Hg 采用海光 AFS-9800 双通道原子荧光分光光度计测定;粒径采用 Malvern Mastersizer 2000 激光粒度仪测定。海水中溶解氧(DO)、TP(TN)、氨氮(NH<sub>4</sub>-N)、硝酸盐氮(NO<sub>3</sub>-N)、亚硝酸盐氮(NO<sub>2</sub>-N)分别使用碘量法、过硫酸钾氧化法、次溴酸盐氧化法、锌—镉还原法、萘乙二胺分光光度法测定。无机氮(DIN)浓度为氨氮(NH<sub>4</sub>-N)、硝酸盐氮(NO<sub>3</sub>-N)、亚硝酸盐氮(NO<sub>2</sub>-N)浓度的加和。为保证结果的准确性,每个沉积物和海水样品均测试 3 次,分析误差<5%,取平均值作为最后结果。

### 1.3 沉积物评价

#### 1.3.1 重金属评价

瑞典科学家 Hakanson 在 1980 年提出了潜在生态风险指数法,该评价方法基于沉积学原理,同时将重金属的含量、环境效应以及毒理学

表 1 调查点位置及各成分含量

Tab.1 Sample location and content of each component

调查点	经度	纬度	Hg/ mg·kg <sup>-1</sup>	Cr/ mg·kg <sup>-1</sup>	Cu/ mg·kg <sup>-1</sup>	As/ mg·kg <sup>-1</sup>	Pb/ mg·kg <sup>-1</sup>	总氮/ mg·kg <sup>-1</sup>	总磷/ mg·kg <sup>-1</sup>	有机碳/ (%)	硫化物/ mg·kg <sup>-1</sup>	全盐量/ g·kg <sup>-1</sup>
S0101	109°59'3.816"E	18°25'31.306"N	<0.0020	14	8.6	7.1	7.8	248	254	1.48	<0.3	4.04
S0102	109°59'0.827"E	18°25'33.707"N	0.0030	17	8.3	7.9	9.4	426	321	2.08	<0.3	2.08
S0103	109°58'57.091"E	18°25'36.750"N	<0.0020	14	7.8	7.2	6.1	361	313	2.77	<0.3	4.95
S0104	109°58'54.070"E	18°25'39.858"N	<0.0020	14	7.6	7.3	8.7	342	343	3.13	<0.3	3.84
S0105	109°58'51.711"E	18°25'41.790"N	<0.0020	16	7.7	7.2	7.4	377	279	4.13	<0.3	2.11
S0201	109°59'20.429"E	18°26'2.919"N	0.0020	12	9.2	6.7	6.9	445	313	2.55	<0.3	3.21
S0202	109°59'20.494"E	18°26'6.433"N	0.0030	13	12	8.0	7.6	291	266	1.64	<0.3	3.57
S0203	109°59'20.509"E	18°26'10.126"N	0.0030	14	8.8	7.6	7.2	330	269	1.57	<0.3	3.93
S0301	110°0'0.014"E	18°25'47.096"N	<0.0020	14	5.9	6.3	7.1	263	302	3.34	<0.3	3.68
S0302	109°59'58.633"E	18°25'51.515"N	<0.0020	20	8.9	8.9	10	305	307	3.53	<0.3	1.97
S0303	109°59'57.422"E	18°25'55.884"N	<0.0020	17	5.4	6.7	8.1	328	326	3.79	<0.3	2.77
S0304	109°59'56.625"E	18°26'0.228"N	<0.0020	18	7.3	6.8	10	302	312	4.01	<0.3	3.75
S0305	109°59'56.208"E	18°26'3.110"N	<0.0020	22	7.8	7.4	9.8	330	238	3.67	<0.3	3.47
S0401	110°0'31.594"E	18°25'49.744"N	<0.0020	14	6.0	6.1	7.3	314	299	3.77	<0.3	3.16
S0402	110°0'32.029"E	18°25'53.848"N	<0.0020	14	6.5	6.5	8.1	361	287	4.15	<0.3	1.74
S0403	110°0'32.376"E	18°25'57.484"N	0.0020	25	12	11	12	409	305	3.36	<0.3	1.99
S0501	110°0'23.712"E	18°23'49.127"N	<0.0020	12	7.4	5.7	8.0	305	295	2.93	<0.3	2.61
S0502	110°0'22.535"E	18°23'50.654"N	<0.0020	11	8.4	6.0	9.2	380	263	3.56	<0.3	2.87
S0601	110°0'37.894"E	18°24'3.323"N	<0.0020	15	5.6	6.9	7.2	431	288	3.48	<0.3	3.04
S0602	110°0'35.561"E	18°24'1.551"N	<0.0020	14	6.4	7.0	7.5	340	319	3.40	<0.3	3.38
S0603	110°0'39.202"E	18°24'4.965"N	<0.0020	16	6.6	7.4	6.8	306	353	3.54	<0.3	3.35
S0701	110°1'22.037"E	18°25'4.410"N	<0.0020	18	9.1	4.6	15	356	261	4.29	<0.3	3.68

等潜在因素联系在一起, 利用指数分级进行评价, 其可比性、等价性兼具, 可综合反映沉积物中重金属的生态影响。潜在生态风险指数法的分级标准主要是单因子潜在生态风险指数( $E_r^i$ )和综合潜在生态风险指数( $RI$ ), 具体计算公式如下:

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

$$E_r^i = T_r^i P_i \quad (2)$$

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i \quad (3)$$

式中:  $C_s^i$ 为样品重金属含量的实测值;  $C_n^i$ 为该种重金属的评价标准值(背景值), 海南土壤背景值见参考文献 [8];  $P_i$ 为该金属的富集系数;  $T_r^i$ 为重金属的毒性响应系数, 数据见表 2;  $E_r^i$ 和  $RI$  分别为单种重金属的潜在生态风险指数和多因子综合潜在生态风险指数, 其和污染程度的关

系见表 3。

表 2 重金属的毒性响应系数

Tab.2 Toxicity response coefficient of heavy metals

元素	Hg	Cr	Cu	As	Pb
背景值/mg·kg <sup>-1</sup>	0.0755	222.2	42.5	2.6	24.1
毒性响应系数	40	2	5	10	5

表 3 潜在生态风险指数和污染程度的关系

Tab.3 Relationship between potential ecological risk index method and pollution

$E_r^i$	潜在生态风险程度	$RI$	潜在生态风险程度
≤40	低微	≤150	低微
40 ~ 80	中等	150 ~ 300	中等
80 ~ 160	较强	—	
160 ~ 320	强	300 ~ 600	强
≥320	极强	≥600	极强

1.3.2 营养盐评价

本文参考了加拿大安大略省环境和能源部(1992)发布的指南,能引起最低级别生态风险效应的 TN 和 TP 的评价标准分别为 550 mg/kg 和 600 mg/kg,由此计算各调查点 TN 和 TP 的标准指数。

1.3.3 海洋沉积物质量分类

调查区海洋沉积物质量参照《海洋沉积物质量》(GB 18668—2002)中的标准进行分类。

1.4 海水评价

选取 TN、TP 和 DO 为评价指标,运用以模糊数学理论为基础的隶属度模糊综合评价法,对新村港红树林海水营养盐水平进行评价。评价标准参考《海水水质标准》(GB3097—1997)及文献 [9],具体见表 4。

表 4 海水营养评价标准

Tab.4 The evaluation criteria of seawater nutrition

指标	DO/mg·L <sup>-1</sup>	TP/mg·L <sup>-1</sup>	TN/mg·L <sup>-1</sup>
I(贫营养)	6	0.03	0.4
II(中营养)	5	0.06	0.6
III(富营养)	4	0.08	0.8

2 结果与讨论

2.1 沉积物粒度组成与分布

海洋沉积物颗粒按粒径可分为砂粒、粉粒和黏土。调查区各调查点粒度统计结果见图 1。

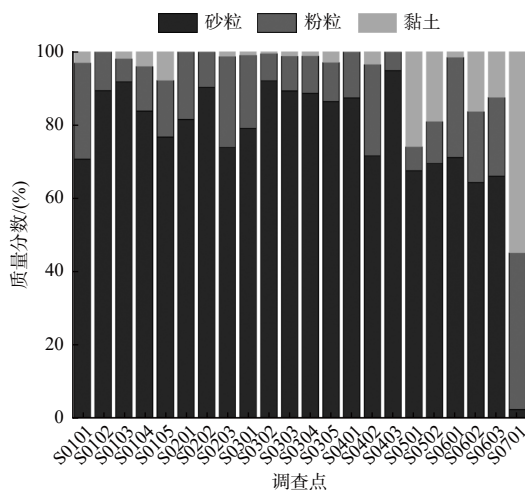


图 1 各调查点粒度统计

Fig. 1 Particle size statistics of each point

结果表明,黏土组(<4 μm)、粉粒组(4~64 μm)、砂粒组(>64 μm)的质量分数变化均较大,其中黏土组变幅为 0.01%~54.9%,粉粒组变幅为 5.26%~42.8%,砂粒组变幅为 1.97%~94.7%,说明新村港红树林沉积物主要由砂粒组成,其次是粉粒,除少量调查点外,其他调查点的黏土含量相对较少。

2.2 沉积物重金属元素分布特征

调查区沉积物中重金属元素含量列于表 1。作为参考,其他地区的重金属元素含量列于表 5。

表 5 部分地区重金属元素参考值(mg/kg)

Tab.5 Reference values of trace elements in some areas

地区	As	Cr	Cu	Hg	Pb	参考文献
琼东北土壤背景值	3.7	222	43	0.076	26	[8]
海南水系沉积物	2.6	39	14	—	24	[8]
中国南方砖红壤	6.7	65	20	—	29	[10]
广西潮间带	6.9	31	14	0.0080	26	[11]
中国主要红树林区	8.2	18	23	—	76	[12]
中国浅海沉积物	7.7	60	15	0.025	20	[13]
中国土壤背景值	11	61	23	0.065	26	[14]
大陆地壳	—	90	54	—	13	[13]
页岩	13	90	45	0.35	20	[15]
新村港红树林沉积物(平均值)	7.4	16	8.1	0.0020	8.6	本文

注:—表示未查到此数据

结合表 1 和表 5 可以看出,新村港红树林沉积物中重金属元素含量相对较低,远低于页岩含量。该区域沉积物除 Hg 外,重金属平均含量相差不大,各元素平均含量顺序为 Cr>Pb>Cu>As>Hg。Hg 的含量不超过 0.0030 mg/kg, Cu 的含量变幅为 5.4~12 mg/kg, Pb 的含量变幅为 6.1~15 mg/kg, 3 种元素平均含量与表 5 所列地区相比,均为最低;Cr 的含量变幅为 11~24 mg/kg,平均含量与中国主要红树林区的平均值相当,但是远低于其他地区;As 的含量变幅为 4.6~11 mg/kg,平均含量与中国南方砖红壤、广西潮间带、中国红树林、中国浅海沉积物相当,高于琼东北土壤背景值、海南水系沉积物,低于中国土壤背景值和页岩含量。除 Cr( $F=3.068, P=0.032$ )外, Cu( $F=2.552, P=0.060$ )、As( $F=0.535, P=0.775$ )、Pb( $F=2.109, P=0.106$ )的含量在 7 个

断面中均无显著性差异( $P>0.05$ ), 这表明几种重金属含量在各调查点的分布相对均匀。虽然如此, S0302、S0403 等调查点可能受人类生活影响, Cr、Pb、Cu、As 含量均偏高。

新村港红树林地区附近没有大型工矿企业, 沉积物中重金属主要为自然来源, 但是该区域 As 含量又高于琼东北土壤背景值、海南水系沉积物, 这可能是由周边的农业污染导致的。此外, Cr、Cu 平均含量较低的原因, 除海南地区工业污染较小外, 还可能是这些元素易被红树林吸附净化。

### 2.3 沉积物营养盐分布特征

#### 2.3.1 总氮特征

各调查点沉积物营养盐、有机碳、硫化物、全盐量等数据见表 1。调查区沉积物中 TN 含量范围为 248 ~ 445 mg/kg, 平均值为 343 mg/kg, 7 个断面的 TN 含量均无显著性差异( $F=0.562$ ,  $P=0.754$ ), 说明潟湖两侧的 TN 分布较均匀, 但调查点 S0102、S0201、S0601 的 TN 含量稍高。有文献表明, 沉积物颗粒越细, 对营养元素的吸附能力就越强<sup>[4]</sup>, 但是该区域 TN 含量稍高的调查点, 沉积物颗粒并不细, 属砂质沉积物, 因此, 个别调查点 TN 含量偏高可能是受人为排污的影响。

#### 2.3.2 总磷特征

调查区沉积物中 TP 含量范围为 238 ~ 353 mg/kg, 平均值为 292 mg/kg, 分布比较均匀, 其中 S0102、S0104、S0303、S0603 几个调查点含量略高, 但是各断面间没有显著性差异( $F=1.709$ ,  $P=0.179$ )。含量较高的几个调查点同 TN 类似, 与粒度没有显著性关系, 可能也是受人类生活排污的影响。

### 2.4 有机碳

有机碳能显著影响湿地生态系统的生产力以及碳平衡。调查区沉积物中有机碳含量为 1.48% ~ 4.29%, 平均值为 3.24%, 与周边南海东北部区域<sup>[16]</sup>及三亚湾区域<sup>[6]</sup>有机碳含量相比较。原因可能有两个方面, 一是该区域沉积物粒径较周边海域细, 从而影响有机碳含量; 二是红树林、海草等植被的存在对该区域沉积物中有机碳的含量起着决定性影响。

### 2.5 硫化物

硫化物可沉积在水底淤泥中, 造成水体变

质。调查区沉积物中硫化物含量不超过 0.3 mg/kg, 接近海口湾未被污染的区域<sup>[17]</sup>, 远低于网箱养殖海域沉积物中硫化物含量<sup>[18]</sup>。

### 2.6 全盐量

调查区沉积物全盐量为 1.74 ~ 4.95 g/kg, 平均值为 3.20 g/kg, 沉积物全盐量均较高。除少数几个调查点属轻度盐化土外, 其他调查点全盐量都高于 2 g/kg, 属于中度或强度盐化土, 但是未达到盐土标准<sup>[19]</sup>。这说明该区域受到海水一定程度的侵蚀, 但是尚不严重, 植被仍可存活。

### 2.7 海水溶解氧和营养盐分布特征

#### 2.7.1 溶解氧分布及意义

海水中 DO、营养盐浓度数据列于表 6。海洋中 DO 不仅影响海洋浮游植物的生长繁殖, 还影响大多数海洋生物的生存状态。由表 6 可知, 调查区海水中 DO 浓度为 4.5 ~ 5.7 mg/L, 平均值

表 6 溶解氧、营养盐浓度(mg/L)

Tab.6 Dissolved oxygen and nutrient content

调查点	DO	TP	TN	DIN	NH <sub>4</sub> -N	NO <sub>3</sub> -N	NO <sub>2</sub> -N
S0101	4.5	0.010	6.42	1.225	0.088	1.11	0.027
S0102	5.2	0.0090	6.72	0.326	0.040	0.278	0.0080
S0103	5.4	0.018	8.75	0.468	0.10	0.359	0.0090
S0104	5.3	0.021	6.67	0.273	0.079	0.185	0.0090
S0105	5.4	0.018	5.66	0.358	0.11	0.241	0.0070
S0201	5.4	0.020	5.76	0.205	0.088	0.110	0.0070
S0202	5.4	0.018	4.32	0.365	0.063	0.293	0.0090
S0203	5.6	0.0090	3.06	0.229	0.061	0.155	0.013
S0301	5.5	0.010	4.76	0.166	0.069	0.0930	0.0040
S0302	5.6	0.018	7.73	0.227	0.089	0.130	0.0080
S0303	5.2	0.020	6.61	0.354	0.12	0.225	0.0090
S0304	5.3	0.029	6.37	0.311	0.083	0.220	0.0080
S0305	4.8	0.027	4.04	0.272	0.11	0.155	0.0070
S0401	5.4	0.025	6.35	0.268	0.11	0.148	0.010
S0402	5.7	0.036	4.86	0.300	0.13	0.163	0.0070
S0403	5.6	0.030	4.50	0.250	0.12	0.125	0.0050
S0501	5.6	0.016	5.22	0.323	0.12	0.197	0.0060
S0502	5.3	0.027	4.37	0.290	0.10	0.180	0.010
S0601	4.5	0.018	6.92	0.553	0.097	0.452	0.0040
S0602	4.7	0.016	6.94	0.394	0.069	0.315	0.010
S0603	5.1	0.029	5.45	0.453	0.083	0.362	0.0080
S0701	5.1	0.018	2.66	0.928	0.067	0.842	0.019

为 5.2 mg/L, 其中断面 S04 和 S06 有显著性差异, 这种差异可能是藻类和有机质导致的, 两个断面不同的富营养化程度造成海水中耗氧情况不同。

### 2.7.2 氮、磷分布及意义

氮、磷等营养物质富集会引发藻类及其他浮游生物大量繁殖, 打破原有的生态平衡。由表 6 可知, 调查区海水中 TN 浓度范围为 2.66 ~ 8.75 mg/L, 平均值为 5.72 mg/L, SPSS 分析表明, 各调查点没有显著性差异 ( $F=1.153, P=0.376 > 0.05$ )。DIN 浓度范围为 0.166 ~ 1.22 mg/L, 平均值为 0.404 mg/L, 各调查点差距较大, 但是与断面无关 ( $F=2.318, P=0.081$ )。NH<sub>4</sub>-N 浓度范围为 0.040 ~ 0.13 mg/L, 平均值为 0.090 mg/L, 各断面有显著性差异 ( $F=3.494, P=0.019$ ), 其中 S02、S04、S05、S07 四条断面差异较大。NO<sub>3</sub>-N 浓度范围为 0.0930 ~ 1.11 mg/L, 平均值为 0.288 mg/L, NO<sub>2</sub>-N 浓度范围为 0.0040 ~ 0.027 mg/L, 平均值为 0.0093 mg/L, NO<sub>3</sub>-N 和 NO<sub>2</sub>-N 在各断面均不

具有显著性差异。

调查区海水 TP 浓度范围为 0.0090 ~ 0.036 mg/L, 平均值为 0.021 mg/L, SPSS 分析结果表明, 断面 S04 中的 3 个调查点和其他断面有显著性差异 ( $F=2.899, P=0.039 < 0.05$ ), 其 TP 浓度略高于其他调查点, 这可能是由该断面附近生活污水排放导致的。

## 2.8 沉积物评价

### 2.8.1 重金属评价

调查区沉积物重金属的潜在生态风险指数  $E_r^i$  和综合潜在生态风险指数  $RI$  计算结果列于表 7。结果表明, 调查区综合潜在生态风险指数均小于 150, 按照分级标准, 其重金属综合潜在生态风险水平属于低微生态风险。从单种重金属的潜在生态风险指数  $E_r^i$  来看, 除个别调查点的 As 外, 各重金属的生态风险程度均较低。从各元素对生态风险的贡献上来说, As 的生态风险贡献率最高, 达到 77% ~ 89%, 其余重金属的贡献率均低于 13%。

表 7 潜在生态风险指数和综合潜在生态风险指数计算结果

Tab.7 The results of potential ecological risk coefficient and comprehensive potential ecological risk index

调查点	$E_r^i$					$RI$	调查点	$E_r^i$					$RI$
	Hg	Cr	Cu	As	Pb			Hg	Cr	Cu	As	Pb	
S0101	1.06	0.130	1.01	27.3	1.62	31.1	S0304	1.06	0.170	0.867	26.2	2.07	30.3
S0102	1.59	0.149	0.990	30.4	1.95	35.1	S0305	1.06	0.211	0.927	28.5	2.03	32.7
S0103	1.06	0.129	0.930	27.7	1.27	31.1	S0401	1.06	0.145	0.721	23.5	1.51	26.9
S0104	1.06	0.130	0.891	28.1	1.80	32.0	S0402	1.06	0.137	0.763	25.0	1.68	28.6
S0105	1.06	0.139	0.904	27.7	1.53	31.3	S0403	1.06	0.247	1.41	42.3	2.49	47.5
S0201	1.06	0.110	1.07	25.8	1.43	29.5	S0501	1.06	0.118	0.871	21.9	1.66	25.6
S0202	1.59	0.119	1.42	30.8	1.58	35.5	S0502	1.06	0.111	0.991	23.1	1.91	27.1
S0203	1.59	0.129	1.04	29.2	1.49	33.5	S0601	1.06	0.153	0.664	26.5	1.49	29.9
S0301	1.06	0.129	0.692	24.2	1.47	27.6	S0602	1.06	0.143	0.762	26.9	1.56	30.4
S0302	1.06	0.179	1.05	34.2	2.07	38.6	S0603	1.06	0.157	0.786	28.5	1.41	31.9
S0303	1.06	0.150	0.651	25.8	1.68	29.3	S0701	1.06	0.173	1.07	17.7	3.11	23.1

### 2.8.2 营养盐评价

各点位 TN 和 TP 的标准指数计算结果见表 8。由结果可知, 调查区沉积物中 TN 和 TP 标准指数都小于 1, 说明 TN 和 TP 含量水平较低, 不具有生态风险效应, 对环境的危害较小。

### 2.8.3 海洋沉积物质量分类

新村港红树林沉积物中有机碳、硫化物、石油类、Cu、Cr、Pb、As、Hg 等指标均符合《海洋沉积物质量》(GB 18668—2002) 中的第一类海洋沉积物质量标准, 表明该区域沉积物质量良好。

表8 TN和TP标准指数计算及海水评价结果

Tab.8 The results of TN, TP standard indexes and seawater assessment

调查点	TN/mg·kg <sup>-1</sup>	标准指数	TP/mg·kg <sup>-1</sup>	标准指数	DO等级	TP等级	TN等级	评价结果
S0101	248	0.45	254	0.42	Ⅲ	I	Ⅲ	富营养
S0102	426	0.77	321	0.54	Ⅱ	I	Ⅲ	富营养
S0103	361	0.66	313	0.52	Ⅱ	I	Ⅲ	富营养
S0104	342	0.62	343	0.57	Ⅱ	I	Ⅲ	富营养
S0105	377	0.69	279	0.47	Ⅱ	I	Ⅲ	富营养
S0201	445	0.81	313	0.52	Ⅱ	I	Ⅲ	富营养
S0202	291	0.53	266	0.44	Ⅱ	I	Ⅲ	富营养
S0203	330	0.60	269	0.45	Ⅱ	I	I	中营养
S0301	263	0.48	302	0.50	Ⅱ	I	Ⅲ	富营养
S0302	305	0.55	307	0.51	Ⅱ	I	Ⅲ	富营养
S0303	328	0.60	326	0.54	Ⅱ	I	Ⅲ	富营养
S0304	302	0.55	312	0.52	Ⅱ	Ⅱ	Ⅲ	富营养
S0305	330	0.60	238	0.40	Ⅲ	Ⅱ	Ⅲ	富营养
S0401	314	0.57	299	0.50	Ⅱ	Ⅱ	Ⅲ	富营养
S0402	361	0.66	287	0.48	Ⅱ	Ⅱ	Ⅲ	富营养
S0403	409	0.74	305	0.51	Ⅱ	Ⅱ	Ⅲ	富营养
S0501	305	0.55	295	0.49	Ⅱ	I	Ⅲ	富营养
S0502	380	0.69	263	0.44	Ⅱ	Ⅱ	Ⅲ	富营养
S0601	431	0.78	288	0.48	Ⅲ	I	Ⅲ	富营养
S0602	340	0.62	319	0.53	Ⅲ	I	Ⅲ	富营养
S0603	306	0.56	353	0.59	Ⅱ	Ⅱ	Ⅲ	富营养
S0701	356	0.65	261	0.44	Ⅱ	I	I	中营养

## 2.9 海水评价

调查区海水模糊综合评价结果列于表8。结果表明,7个调查点的TP为中营养,占比为31.82%,20个调查点的TN为富营养,占比为90.91%,可见调查区氮污染特征比较明显,原因有以下两个方面:一是该地区人类活动较为频繁,区域内有大量渔排、网箱养殖区,加之虾塘排污、农业化肥、畜禽养殖等因素,都会对红树林区域海水造成氮污染;二是该地区仅海湾西部有一窄口与陵水湾相通,与湾外水交换极为不畅。

## 3 结论

(1)新村港红树林区域的沉积物主要由砂粒组成,沉积物中重金属元素含量相对较低,除Cr外,其他元素分布均匀。营养盐方面,少数调

查点的TP含量偏高。沉积物中有机碳含量较高,硫化物含量则很低,属中度或强度盐化土。从风险评价结果看,重金属、营养盐、有机碳、硫化物、石油类等指标对环境产生的危害较小,均不具备生态风险。

(2)新村港红树林区域部分断面的海水DO、NH<sub>4</sub>-N、TP浓度有显著性差异,但TN、DIN、NO<sub>3</sub>-N浓度与断面无关。隶属度模糊综合评价结果表明,整个红树林区域海水氮污染特征较为明显,应当引起重视。

## 参考文献:

- [1] 辛欣,宋希强,雷金睿,等.海南红树林植物资源现状及其保护策略[J].热带生物学报,2016,7(4):477-483.
- [2] ALENGEBAWY A, KHALEK S T, QURESHI S R, et al. Heavy metals and pesticides toxicity in agricultural soil and plants: ecological risks and human health implications[J].

- Toxics*, 2021, 9(3): 42.
- [3] REDHA A, AL-HASAN R, AFZAL M. Synergistic and concentration-dependent toxicity of multiple heavy metals compared with single heavy metals in *Conocarpus lancifolius*[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(18): 23258-23272.
- [4] 岳维忠, 黄小平, 孙翠慈. 珠江口表层沉积物中氮、磷的形态分布特征及污染评价[J]. *海洋与湖沼*, 2007, 38(2): 111-117.
- [5] 甘居利, 林 钦, 李纯厚, 等. 珠江口沉积环境中硫化物分布特征与污染评价[J]. *海洋环境科学*, 2008, 27(2): 149-152.
- [6] 卞培旺, 陈法锦, 张叶春, 等. 海底表层沉积物腐蚀性环境特征与评估——以三亚湾为例[J]. *海洋环境科学*, 2020, 39(4): 563-569.
- [7] 高焕君. 衡水湖周边土壤中全盐量、碳酸根、碳酸氢根及氯离子含量的测定[J]. *安徽化工*, 2021, 47(5): 96-98.
- [8] 廖香俊, 丁式江, 吴 丹, 等. 琼东北地区土壤微量元素地球化学特征[C]//2004年全国学术年会农业分会论文集. 北京: 中国农学会, 2004.
- [9] 吴 锐, 雷永乾, 王 畅, 等. 粤东柘林湾养殖区海水富营养化评价[J]. *环境科学与技术*, 2015, 38(10): 210-215.
- [10] 王军广, 李晨晨, 赵志忠, 等. 海南岛砖红壤中微量元素含量及其分布特征研究[J]. *海南师范大学学报:自然科学版*, 2010, 23(2): 188-192, 228.
- [11] 唐璐璐. 广西典型海岛潮间带表层沉积物中重金属的分布及环境质量评价[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008.
- [12] 李柳强, 丁振华, 刘金铃, 等. 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[J]. *海洋学报(中文版)*, 2008, 30(5): 159-164.
- [13] 赵一阳, 鄢明才. 中国浅海沉积物地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1994: 211-214.
- [14] 王军广, 赵志忠, 赵广儒, 等. 海南岛西部地区砖红壤中重金属元素含量及其分布特征[J]. *安徽农业科学*, 2010, 38(6): 3072-3074.
- [15] 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: 201-320.
- [16] 杨天宇, 邹 立, 赵彦彦, 等. 南海东北部上层沉积物有机碳的沉积特征[J]. *海洋环境科学*, 2022, 41(1): 16-23.
- [17] 曾广锐, 吴 瑞. 海口湾沉积环境中的硫化物分布特征与污染评价[J]. *热带农业工程*, 2018, 42(5): 24-27.
- [18] 王文强, 韦献革, 温琰茂. 哑铃湾网箱养殖海域沉积物中的硫化物[J]. *海洋环境科学*, 2006, 25(3): 13-16.
- [19] 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: 119.

~~~~~

(上接第 184 页)

- [11] 李 宁. 长江口与胶州湾海水有机碳的分布、来源及与氮、磷的耦合关系[D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2006.
- [12] 林 晶, 吴 莹, 张 经, 等. 最大浑浊带对长江口有机碳分布的影响初探[J]. *海峡科学*, 2009 (6): 150-151, 159.
- [13] 王江涛, 于志刚, 张 经. 鸭绿江口溶解有机碳的研究[J]. *青岛海洋大学学报*, 1998, 28(3): 132-136.
- [14] 张向上. 黄河口碳输运过程及其对莱州湾的影响[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2007.
- [15] CHEN Z Q, LI Y, PAN J M. Distributions of colored dissolved organic matter and dissolved organic carbon in the Pearl River Estuary, China[J]. *Continental Shelf Research*, 2004, 24(16): 1845-1856.
- [16] 刘笑茜, 张运林, 殷 燕, 等. 三维荧光光谱及平行因子分析法在CDOM研究中的应用[J]. *海洋湖沼通报*, 2012, 34(3): 133-145.
- [17] 蔡文良, 许晓毅, 杜 娟, 等. 嘉陵江重庆段DOM三维荧光光谱的平行因子分析[J]. *环境科学研究*, 2012, 25(3): 276-281.
- [18] BAKER A. Fluorescence properties of some farm wastes: implications for water quality monitoring[J]. *Water Research*, 2002, 36(1): 189-195.
- [19] COBLE P G. Characterization of marine and terrestrial DOM in seawater using excitation-emission matrix spectroscopy[J]. *Marine Chemistry*, 1996, 51(4): 325-346.
- [20] LEENHEER J A, WERSHAW R L, BROWN G K, et al. Characterization and diagenesis of strong-acid carboxyl groups in humic substances[J]. *Applied Geochemistry*, 2003, 18(3): 471-482.
- [21] 卜鸡明, 何 佳, 焦立新, 等. 滇池流域入湖河流溶解性有机质的分布及来源[J]. *环境科学学报*, 2020, 40(8): 2795-2804.
- [22] OHNO T. Fluorescence inner-filtering correction for determining the humification index of dissolved organic matter[J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, 36(4): 742-746.