

## ◆研究类◆

高岭土悬浮物对榄根村红树林湿地底质环境的影响<sup>\*</sup>

李 斌, 巫冷蝉, 宋 超, 刘成辉

(广西科学院广西红树林研究中心, 广西红树林保护与利用重点实验室, 广西北海 536000)

**摘要:**为探明高岭土悬浮物的影响范围及其对榄根村红树林底质环境的影响, 2020年3月在榄根村死亡红树林的林内、林缘、附近正常红树林、对照林区及潮沟开展底质环境调查采样。结果表明:死亡红树林的林内、林缘和附近正常红树林内的高岭土悬浮物主要沉积在表层10-20, 5-10和0-5 cm内, 对应层次的平均铝含量分别为9.15%, 10.8%和7.10%, 而对照林区沉积物柱状样的平均铝含量为3.60%。靠近陆域填土区的潮沟(S1-S3站位)底质平均铝含量为5.94%, 其他监测潮沟(S4-S7站位)的平均铝含量为1.86%。调查区域各监测指标基本满足一类海洋沉积物质量标准, 但靠近陆域填土区的潮沟、死亡红树林及其附近正常红树林内的底质平均pH值均低于相应的对照区;死亡红树林的林内、林缘和附近正常红树林底质中的铜、铅和铬含量是对照林区的2倍左右, 靠近陆域填土区的潮沟底质铅亦是对照潮沟区的2倍。死亡红树林底质的综合肥力系数为0.59, 低于对照林区的0.69。综上所述, 高岭土悬浮物主要影响榄根村红树林湿地表层20 cm以内的底质环境, 并以陆域填土区为中心, 在半径约540 m的范围内大量沉积, 在半径540-1 075 m的扇形区域内少量沉积, 导致死亡红树林及靠近陆域填土区的潮沟底质pH值降低, 加重了附近正常林区的底质酸化。高岭土悬浮物富含铜、铅和铬, 影响湿地底质环境质量, 并存在重金属富集的风险。

**关键词:**高岭土悬浮物 榄根村 红树林 底质环境 铝

中图分类号: P76 文献标识码: A 文章编号: 1002-7378(2021)03-0279-09

DOI: 10.13657/j.cnki.gxkxyxb.20210928.006

## 0 引言

红树林是生长在热带、亚热带海岸潮间带的木本植物群落, 其在维持滨海生物多样性、海岸防护、促淤造陆和碳固定等方面起到重要作用<sup>[1-4]</sup>。但受到海岸带开发利用及全球气候变化的影响, 红树林正面临着

巨大压力。广西北海市铁山港湾分布着我国连片面积较大的典型沙生原生白骨壤群落, 具有重要的生态学意义, 2019年11月该区域的榄根村出现大面积红树林死亡现象, 主要原因是铁山港东港榄根作业区的建设过程导致高岭土悬浮物沉积林内, 黏附植物叶片和堵塞呼吸根, 引发生态损害<sup>[5]</sup>。为摸清高岭土悬浮

收稿日期: 2021-06-02

\* 合浦县林业局项目(GXZC2020-J3-HXHP-001)资助。

## 【作者简介】

李 斌(1985-), 男, 硕士, 助理研究员, 主要从事近岸海洋环境研究, E-mail: lihshang1@163.com。

## 【引用本文】

李斌, 巫冷蝉, 宋超, 等. 高岭土悬浮物对榄根村红树林湿地底质环境的影响[J]. 广西科学院学报, 2021, 37(3): 279-287.

LI B, WU L C, SONG C, et al. Influences of Kaolinite Suspended Substances on the Sediment Environment of Mangrove Wetland in Lan'gen Village [J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 2021, 37(3): 279-287.

物的影响范围及其对底质环境的影响,本研究拟在受损红树林及其周边区域开展调查,分析底质环境的高岭土空间分布以及理化状况,以为该区域的生态修复提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 调查区域概况

如图 1a 所示,榄根村红树林位于铁山港东岸,白沙镇的西南侧,沙田镇西北部,其底质以黏土质砂为主<sup>[6]</sup>;林内共有真红树植物 3 科 4 属 4 种,白骨壤 (*Avicennia marina*) 为优势种群,零星分布着红海榄 (*Rhizophora stylosa*)、秋茄 (*Kandelia obovata*) 和桐花树 (*Aegiceras corniculatum*)<sup>[7]</sup>。2017 年 12 月起陆续发现该区域出现红树林死亡现象,至 2019 年 6 月死亡面积达到了 9.42 hm<sup>2</sup><sup>[5]</sup>。

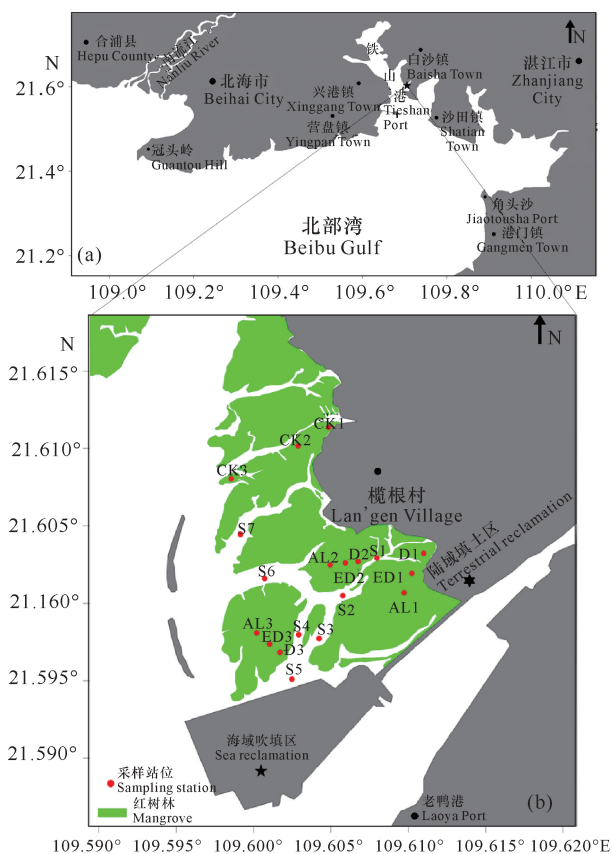


图 1 调查采样站位

Fig. 1 Sampling station

### 1.2 站位布设

为判断高岭土悬浮物的影响范围及对底质环境的影响,2020 年 3 月在死亡红树林林内(D1 - D3)、死亡红树林林缘(ED1 - ED3)、红树林大斑块中暂未显示枯亡现象仍然正常生长的红树林(AL1 - AL3)

和正常红树林对照样地(CK1 - CK3)各设置调查采样站位 1 个,红树林外的潮沟内布设 7 个站位(S1 - S7),共 19 个调查采样站位,详见图 1b。

### 1.3 样品采集与分析

#### 1.3.1 高岭土悬浮物的影响范围

广西的高岭土资源丰富,储量约  $4.5 \times 10^9$  t,主要分布在合浦清水江等<sup>[8]</sup>近海区域,该区域的高岭土原矿 Al 含量在 7.21% 以上<sup>[9]</sup>,是铁山港潮间带表层底质 Al 的本底含量(2.37%)的 3 倍以上<sup>[10]</sup>,因此通过分析红树林底质的 Al 含量,可判断是否受到高岭土的污染。为此,退潮时在 D1 - D3、ED1 - ED3、AL1 - AL3 和 CK1 - CK3 站位,使用柱状采泥器,每个站位均随机采集 3 个沉积物柱状样(0 - 50 cm),每个柱状样分成 6 层样品,表层 0 - 20 cm 以内每 5 cm 取一个样品,表层以下 20 - 50 cm 每 15 cm 取一个样品,相同层次的样品混合均匀。由于 S1 - S7 站位位于潮沟,常年的潮流冲刷,底质高程低于林内,在每个站位仅随机采集 3 个 0 - 30 cm 的表层沉积物样品,并混合均匀。沉积物样品干燥后,剔除贝壳、根系等杂物,磨粉过 100 目筛,测定铝元素含量。铝的测定依据《森林土壤矿质全量元素(硅、铁、铝、钛、锰、钙、镁、磷)烧失量的测定》(LY/T 1253 - 1999)<sup>[11]</sup>中的方法。

#### 1.3.2 底质环境的理化性质

D1 - D3、ED1 - ED3、AL1 - AL3、CK1 - CK3 和 S1 - S7 采样站位,每个站位随机采集 3 个表层沉积物(0 - 30 cm),封闭混合成均一样品,依据《海洋监测规范 第 5 部分:沉积物分析》(GB 17378.5 - 2007)<sup>[12]</sup>方法分析硫化物含量。按四分法取适量湿样晾干,干燥后剔除贝壳和根系等杂物,磨粉过 160 目筛,按《海洋监测规范 第 5 部分:沉积物分析》(GB 17378.5 - 2007)<sup>[12]</sup>方法分析有机碳、油类、铜、锌、铅、镉、铬、汞和砷的含量,pH 值的测定依据《土壤检测 第 2 部分:土壤 pH 的测定》(NY/T 1121.2 - 2006)<sup>[13]</sup>。

红树林 D1 - D3、ED1 - ED3、AL1 - AL3 和 CK1 - CK3 站位的底质环境,除测定上述环境因子外,还须测定其中的总氮和总磷,测定依据《海洋监测规范 第 5 部分:沉积物分析》(GB 17378.5 - 2007)<sup>[12]</sup>。

### 1.3 数据处理

#### 1.3.1 底质肥力评价

采用总氮、总磷和有机碳评价红树林底质肥力状

况。为消除各监测指标的量纲差异,运用四折线型无量纲化方法进行标准化处理<sup>[14]</sup>:

当指标测定值属“极差”等级时,即: $C_i \leq X_a$ ,

$$P_i = \frac{C_i}{X_a}, (P_i \leq 1);$$

当指标测定值属“差”等级时,即  $X_a < C_i \leq X_c$ ,

$$P_i = 1 + \frac{C_i - X_a}{X_c - X_a}, 1 < P_i \leq 2;$$

当指标测定值属“中”等级时,即  $X_c < C_i \leq X_p$ ,

$$P_i = 2 + \frac{C_i - X_c}{X_p - X_c}, 2 < P_i \leq 3;$$

当指标测定值属“良好”等级时,即  $C_i > X_p$ ,  $P_i = 3$ 。

式中: $P_i$  是分肥力系数,即第  $i$  个指标的肥力系数; $C_i$  为第  $i$  个指标的测定值; $X_a$ 、 $X_c$ 、 $X_p$  为底质属性分级标准(表 1),参考第 2 次全国土壤普查标准。

表 1 土壤属性分级标准

Table 1 Classification standard of soil property

土壤属性 Soil property	$X_a$	$X_c$	$X_p$
有机碳 TOC (%)	1.0	2.0	3.0
总氮 Total nitrogen (g/kg)	0.75	1.50	2.00
总磷 Total phosphorus (g/kg)	0.4	0.6	1.0

综合肥力系数采用修正的内梅罗公式计算<sup>[15]</sup>:

$$P = \sqrt{\frac{P_{iav}^2 + P_{imin}^2}{2}} \times \frac{n-1}{n},$$

式中: $P$  是底质综合肥力系数,  $P_{iav}$  和  $P_{imin}$  分别是底质各属性分肥力系数的平均值和最小值,  $n$  为参与评价的底质属性个数。底质肥力分级标准参见文献<sup>[15]</sup>。

### 1.3.2 主要环境因子的差异分析

采用单因子方差分析法,分析过程均在 SPSS 19.0 软件完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 红树林及附近潮沟底质中铝的空间分布

由图 2 可知,榄根村死亡红树林沉积物柱状样的最大铝含量均出现在近表层,其中 D1 在 15-20 cm 层, D2 和 D3 在 10-15 cm 层,对应层次的铝含量为 6.38% - 11.9%,平均 9.15%,基本比同柱状样的其他层次高 1-3 倍。ED1-ED3 的铝含量最大值出现在 5-10 cm 层,对应层次的铝含量为 5.65% -

15.6%,平均 10.8%,是同柱状样其他层次的 2-13 倍。AL1-AL3 的最大铝含量均在 0-5 cm 层出现,对应层次的铝含量为 5.14% - 8.83%,平均 7.10%,是同柱状样其他层次的 4-6 倍。CK1-CK3 的铝含量为 1.46% - 6.73%,平均 3.60%,与同一柱状样其他层次的差异较小。

由图 3 可知, D1-D3 沉积物柱状样含铝量最高的土层铝含量以 D2 最高, D1 次之, D3 最小。ED1-ED3 中含铝量最高的土层的铝含量水平分布是离陆域填土区越远,含量越低。AL1-AL3 中含铝量最高的土层以 AL2 的铝含量最高, AL1 次之, AL3 最低。CK1-CK3 中含铝量最高的土层以 CK3 的铝含量最高, CK1 次之, CK2 最低。潮沟内 S1 站位的铝含量最高, S2 和 S3 站位的含量居次且比较接近,其余站位的含量较低。总体而言,离陆岸越远,红树林及其周边潮沟的沉积物铝含量越低。

### 2.2 潮沟底质的主要环境状况

红树林湿地的潮沟底质环境偏酸性,但总体质量较好,除个别监测站位的硫化物和油类含量稍高于海洋沉积物一类标准外,其余监测指标有机碳和重金属含量均在标准范围内。如图 3 所示,高岭土悬浮物主要影响潮沟的 S1-S3 站位,对 S4-S7 站位的影响较小,为此将潮沟底质监测站位划分为高岭土影响区(S1-S3 站位)和对照潮沟区(S4-S7 站位)。其中,高岭土影响区的 pH 值、硫化物和油类平均值低于对照潮沟区,而铅的平均含量则高于对照潮沟区,其余监测指标的结果相近。单因子方差分析表明(表 2),高岭土悬浮物影响区的主要环境因子(pH 值、硫化物、油类、有机碳、汞、砷、铜、锌、铅、镉和铬)与对照潮沟区的差异不显著( $P > 0.05$ )。

### 2.3 红树林底质的主要环境状况

如表 3 所示, D1-D3 底质的主要环境因子均满足海洋沉积物一类标准, ED1-ED3 和 AL1-AL3 部分测站的硫化物、有机碳、油类和铬稍劣于海洋沉积物一类标准,其余环境因子均在标准范围内。单因子方差分析结果显示(表 4), D1-D3 的铅、铬与 CK1-CK3 差异显著, ED1-ED3 的铜、铅和铬与 CK1-CK3 差异显著, AL1-AL3 的 pH 值、铜和铅与 CK1-CK3 差异显著。受损红树林底质环境偏酸性,其中 D1-D3 和 AL1-AL3 底质的 pH 值平均值低于 CK1-CK3, ED1-ED3 则与 CK1-CK3 的接近。死亡红树林的林内、林缘和附近正常红树林底质中的铜、铅和铬含量接近,但高于对照林区的 1 倍

左右。

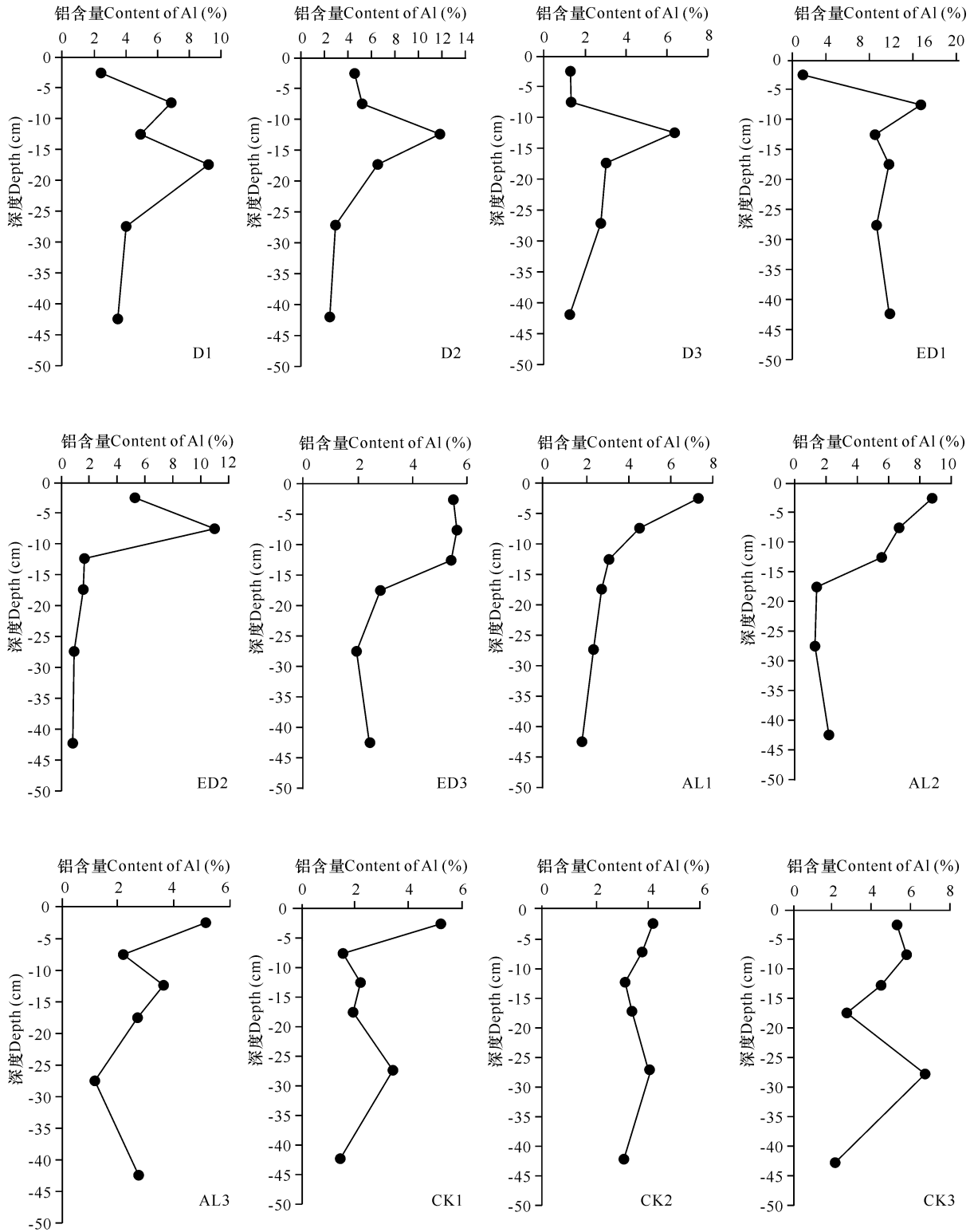


图 2 底质环境中铝的垂直分布

Fig. 2 Vertical distribution of the content of Al in sediment environment

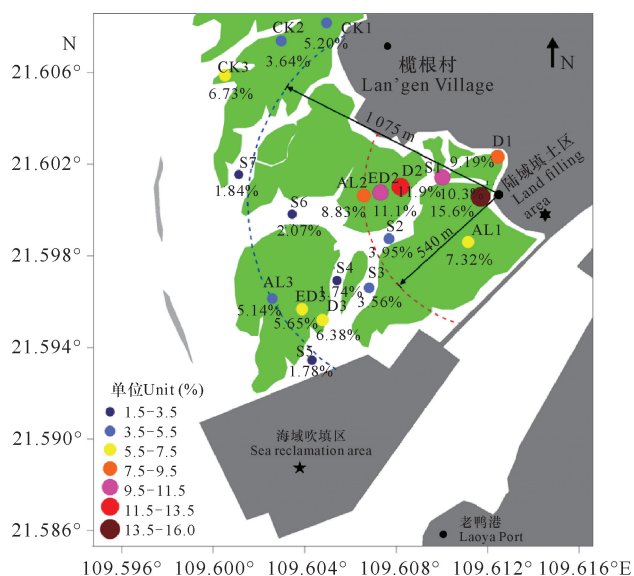


图3 沉积物柱状样中铝含量极值的水平分布

Fig. 3 Horizontal distribution of extreme values of aluminum content in sediment cores

## 2.4 红树林底质的肥力状况

如表5, AL1 - AL3 和 ED1 - ED3 的底质综合肥力系数均高于 CK1 - CK3, 分别为 1.10 和 0.76; D1 - D3 则低于 CK1 - CK3, 仅 0.59。按照肥力等级标准, D1 - D3、ED1 - ED3 和 CK1 - CK3 的综合肥力系数均小于 0.9, 肥力等级为贫瘠, AL1 - AL3 的综合肥力系数为 1.10, 肥力等级为一般。各评价指标中, 有机碳的分肥力系数最高, 其次是总氮, 总磷最低。该区域的有机碳、总氮和总磷的分肥力系数均以 AL1 - AL3 的最高, ED1 - ED3 居次, D1 - D3 和 CK1 - CK3 的总氮分肥力系数接近, 但 D1 - D3 的有机碳和总磷的分肥力系数最低。

表2 潮沟底质环境主要环境因子现状(干质量)及单因子方差分析

Table 2 Status of main environmental factors (dry weight) and single factor analysis of variance in tidal creek sediment environment

项目 Item	主要环境因子 Main environmental factors										
	pH 值 pH value	硫化物 Sulfides ( $\times 10^{-6}$ )	油类 Oil ( $\times 10^{-6}$ )	有机碳 TOC (%)	汞 Hg ( $\times 10^{-6}$ )	砷 As ( $\times 10^{-6}$ )	铜 Cu ( $\times 10^{-6}$ )	锌 Zn ( $\times 10^{-6}$ )	铅 Pb ( $\times 10^{-6}$ )	镉 Cd ( $\times 10^{-6}$ )	铬 Cr ( $\times 10^{-6}$ )
一类标准 <sup>[16]</sup> First category standard of sediment quality	/	$\leq 300.0$	$\leq 500.0$	$\leq 2.0$	$\leq 0.20$	$\leq 20.0$	$\leq 35.0$	$\leq 150.0$	$\leq 60.0$	$\leq 0.50$	$\leq 80.0$
高岭土悬浮物 影响区 Kaolinite suspended substances af- fected area	S1 - S3 6.56 - 6.88	10.0 - 56.7	30.2 - 115	0.73 - 1.22	0.006 - 0.035	2.85 - 8.19	nd - 8.70	9.79 - 30.3	2.70 - 22.2	nd - 0.091	7.85 - 8.14
均值 Average	6.73 ± 0.16	29.7 ± 24.2	74.6 ± 42.5	1.00 ± 0.25	0.022 ± 0.015	5.93 ± 2.76	5.20 ± 3.90	22.2 ± 10.9	12.8 ± 9.77	0.066 ± 0.04	7.90 ± 0.224
对照潮沟区 Control area of tidal creek	S4 - S7 6.89 - 7.02	63.6 - 305	89.9 - 513	0.17 - 1.34	0.007 - 0.064	1.06 - 4.99	nd - 6.71	nd - 36.2	1.88 - 10.9	nd - 0.086	5.21 - 17.5
均值 Average	6.95 ± 0.06	145 ± 113	245 ± 199	0.80 ± 0.49	0.028 ± 0.026	4.69 ± 2.61	4.30 ± 2.40	20.8 ± 13.7	5.40 ± 4.02	0.053 ± 0.031	8.70 ± 5.88
方差齐性检验(k) Homogeneity of variance (k)	0.173	0.170	0.089	0.412	0.375	0.835	0.399	0.918	0.239	0.571	0.061
F	6.511	2.882	2.045	0.411	0.155	0.368	0.144	0.022	1.964	0.249	0.054
P	0.051	0.150	0.212	0.550	0.710	0.571	0.720	0.889	0.220	0.639	0.825

注:  $k > 0.05$  表明方差齐, 方差结果有效, 反之则无效;  $P < 0.05$ , 显著差异;  $P < 0.01$ , 极显著差异; "nd" 表示未检出

Note:  $k > 0.05$  indicates homogeneity of variance, the variance result is valid, otherwise, it is invalid.  $P < 0.05$ , significant difference;  $P < 0.01$ , extremely significant difference; "nd" means not detected



表 3 红树林底质主要环境因子现状(干质量)

Table 3 Main environmental factors status of mangrove sediment (dry weight)

项目 Item	主要环境因子 Main environmental factors											
	pH 值 pH value	硫化物 Sulfides ( $\times 10^{-6}$ )	油类 Oil ( $\times 10^{-6}$ )	有机碳 TOC (%)	汞 Hg ( $\times 10^{-6}$ )	砷 As ( $\times 10^{-6}$ )	铜 Cu ( $\times 10^{-6}$ )	锌 Zn ( $\times 10^{-6}$ )	铅 Pb ( $\times 10^{-6}$ )	镉 Cd ( $\times 10^{-6}$ )	铬 Cr ( $\times 10^{-6}$ )	
一类标准 <sup>[16]</sup> First category standard of sediment quality	/	$\leq 300.0$	$\leq 500.0$	$\leq 2.0$	$\leq 0.20$	$\leq 20.0$	$\leq 35.0$	$\leq 150.0$	$\leq 60.0$	$\leq 0.50$	$\leq 80.0$	
D1-D3	范围 Range	6.10- 7.07	225- 298	240- 385	1.58- 1.80	0.036- 0.047	9.07- 9.90	13.4- 14.1	35.5- 37.9	28.8- 31.7	0.167- 0.189	57.6- 78.7
	均值 Average	6.51	267	335	1.71	0.041	9.44	13.7	36.8	30.4	0.178	65.0
ED1-ED3	范围 Range	6.47- 6.78	78.9- 337	229- 522	1.54- 2.07	0.038- 0.071	7.42- 15.9	14.3- 17.7	39.3- 60.2	27.7- 33.6	0.202- 0.338	63.3- 103
	均值 Average	6.62	177	369	1.82	0.055	10.8	15.6	47.1	29.9	0.253	82.9
AL1-AL3	范围 Range	6.36- 6.38	168- 496	408- 606	2.45- 3.85	0.034- 0.040	9.06- 12.1	13.3- 16.0	40.4- 49.8	25.3- 31.2	0.206- 0.271	46.7- 120
	均值 Average	6.37	384	528	2.95	0.037	10.1	14.8	46.4	27.9	0.231	78.2
CK1-CK3	范围 Range	6.51- 6.69	159- 261	307- 475	1.22- 2.49	0.016- 0.043	5.67- 9.56	4.63- 11.2	22.8- 43.9	10.5- 18.2	0.131- 0.279	25.0- 45.3
	均值 Average	6.59	218	390	1.81	0.029	6.99	7.11	31.0	13.5	0.189	35.1

表 4 高岭土悬浮物影响区与对照林区的单因子方差分析

Table 4 Single factor variance analysis of kaolinite suspended substances affected area and control mangrove area

项目 Item	pH 值 pH value			铜 Cu			铅 Pb			铬 Cr		
	D1- D3	ED1- ED3	AL1- AL3	D1- D3	ED1- ED3	AL1- AL3	D1- D3	ED1- ED3	AL1- AL3	D1- D3	ED1- ED3	AL1- AL3
方差齐性检验( $k$ ) Homogeneity of variance ( $k$ )	0.067	0.555	0.052	0.027	0.183	0.099	0.097	0.561	0.474	0.602	0.408	0.113
$F$	0.068	0.123	16.126	10.227	13.244	12.122	44.818	29.749	23.694	11.064	13.741	3.836
$P$	0.808	0.743	0.016*	0.033	0.022*	0.025*	0.003**	0.005**	0.008**	0.029*	0.021*	0.122

注:表中仅列显著差异的环境因子; $k > 0.05$  表明方差齐,方差结果有效,反之则无效;“\*”表示显著差异, $P < 0.05$ ;“\*\*”表示极显著差异, $P < 0.01$

Note: Only environmental factors with significant differences are listed in the table.  $k > 0.05$  indicates homogeneity of variance, the variance result is valid, otherwise, it is invalid. “\*” indicates significant difference,  $P < 0.05$ . “\*\*” indicates extremely significant difference,  $P < 0.01$

表 5 红树林底质的肥力状况

Table 5 Fertility status of mangrove sediment

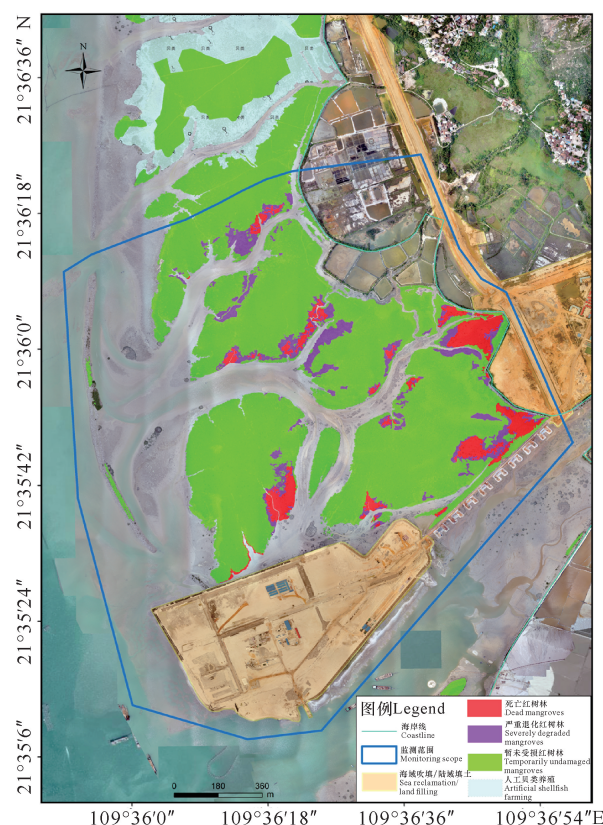
站位 Sampling station	总氮 Total nitrogen (mg/g)		总磷 Total phosphorus (mg/g)		分肥力系数 Fertility coefficient			综合肥力 系数 Integrated fertility index <sup>[15]</sup>	肥力等级 <sup>[15]</sup> Levels of fertility <sup>[15]</sup>
	范围 Range	平均 Average	范围 Range	平均 Average	有机碳 TOC	总氮 Total nitrogen	总磷 Total phosphorus		
D1 - D3	0.980 - 1.14	1.07	0.122 - 0.231	0.169	1.71	1.43	0.42	0.59	贫瘠 Barren ( $P < 0.9$ )
ED1 - ED3	1.11 - 1.69	1.40	0.191 - 0.311	0.271	1.82	1.87	0.68	0.76	贫瘠 Barren ( $P < 0.9$ )
AL1 - AL3	1.55 - 2.26	1.89	0.293 - 0.353	0.323	2.95	2.78	0.81	1.10	一般 Ordinary ( $0.9 \leq P < 1.8$ )
CK1 - CK3	0.634 - 1.65	1.06	0.257 - 0.276	0.263	1.81	1.42	0.66	0.69	贫瘠 Barren ( $P < 0.9$ )

### 3 讨论

#### 3.1 高岭土悬浮物的沉积过程及影响范围分析

沉积物柱状样铝的垂直分布反映了高岭土悬浮物的沉积过程,而沉积物柱状样中铝含量最高的土层则反映了该时段是否曾发生过规模较大的高岭土悬浮物沉积。本研究中离陆域填土区或潮沟的距离越近,高岭土悬浮物沉积的量基本越大,铝含量最高的土层也基本越深。D1 - D3 贴近陆域填土区或潮沟,高岭土悬浮物影响柱状样的平均厚度约为 20.0 cm,主要沉积在 15 - 20 cm 土层;而离陆域填土区或潮沟渐远的 ED2 - ED3 和 AL1 - AL3,高岭土悬浮物影响柱状样的平均厚度约为 12.5 cm 和 11.7 cm,主要沉积在 5 - 10 cm 和 0 - 5 cm 土层。相比 ED2 - ED3, ED1 更靠近陆源填土区和潮沟,其沉积物柱状样沉积了大量高岭土悬浮物,影响厚度高达 45 cm,主要沉积在 5 - 10 cm 土层。

假定水文动力条件均匀一致,红树林湿地内的高岭土悬浮物扩散沉积将呈梯度分布。根据底质环境铝含量的实际分布情况:高岭土悬浮物大量沉积在以陆域填土区为中心,半径为中心至 AL2 的范围内(约 540 m,图 3),主要包括死亡红树林(D1 - D2)及周边林内;少量沉积在半径为 AL2 至 AL3 的扇形区域内(540 - 1 075 m,图 3),包括靠近海域吹填区的死亡红树林(D3)及周边的林内。高岭土悬浮物的这一影响范围推断恰好与红树林死亡斑块分布边界基本吻合(图 4)。由于海域吹填区及施工便道的建设,水文动力条件变弱,陆域填土区附近的潮沟变淤,S1 站位沉积了较多的高岭土悬浮物,S2 和 S3 站位则有少量沉积,但离陆域填土区较远的 S4 - S7 站位未受到高岭土悬浮物的影响。

图 4 榄根村受损红树林的分布(2020年4月)<sup>[5]</sup>Fig. 4 Distribution of the damaged mangrove in Lan'gen Village (Apr. 2020)<sup>[5]</sup>

#### 3.2 高岭土悬浮物对红树林湿地底质环境的影响

红树林底质环境呈酸性,这主要是含硫红树植物残体在厌氧条件下经微生物分解产生酸性的  $H_2S$  引起<sup>[1]</sup>。本研究中死亡红树林的植被凋亡,形同光滩,原底质中积累的  $H_2S$  逐步被氧化,底质 pH 值应升高。但围填海施工过程揭露的高岭土偏酸性(pH 值为 4.62)<sup>[5]</sup>,直接导致高岭土悬浮物大量沉积的死亡红树林林内(D1 - D3)和靠近陆域填土区的部分潮沟(S1 - S3)的底质 pH 值较低。本研究中死亡的红树

植物残体在凋落后部分会随潮流移动, 阻滞在仍正常生长的红树林内, 并会被微生物利用, 产生酸性的 $H_2S$ 等物质, 再加上酸性高岭土悬浮物的沉积, 导致了正常林区 AL1 - AL3 的底质 pH 值明显低于对照林区。文献[17, 18]研究显示, 不同地区高岭土的铜、铅和铬含量较高, 分别为  $1.24 \times 10^{-4} - 20.0 \times 10^{-4}$ 、 $0.42 \times 10^{-4} - 41.00 \times 10^{-4}$  和  $1.98 \times 10^{-4} - 16.5 \times 10^{-4}$ , 可造成受高岭土悬浮物影响的死亡红树林林内、林缘、附近正常红树林内和靠近陆域填土区的部分潮沟的底质铜、铅和铬含量高于相应的对照区。此外, 高岭土可通过离子交换和表面配位 2 种模式吸附重金属离子<sup>[19]</sup>, 长期的潮水交换会提高高岭土悬浮物沉积区底质富集重金属的风险。而对照潮沟区的底质硫化物和油类较高, 则可能是其靠近海域吹填区, 受吹填海过程的颗粒物沉积和船舶油污影响。

### 3.3 高岭土悬浮物对红树林底质肥力状况的影响

高岭土中的铝离子、铁离子可分别与磷酸根生成磷酸铁、磷酸铝沉淀物, 其水解产物可以和磷酸盐形成络合絮凝沉淀。此外, 高岭土中的钙离子和镁离子还可与铵根离子发生置换反应, 置换出钙离子和镁离子, 并进一步与磷酸根离子发生沉淀<sup>[20]</sup>。研究表明, 高岭土可有效抑制沉积物总氮和总磷的释放, 抑制率可达 71% 和 94%<sup>[21]</sup>。可见, 高岭土特殊的理化性质会降低底质环境中可利用氮磷的含量, 影响红树植物的生长。高岭土对有机质同样存在吸附作用<sup>[22, 23]</sup>, 增加了微生物和底栖生物利用有机质的难度, 导致有机物质循环受阻。本研究区域的红树林底质肥力水平较低, 但高岭土特殊的理化性质可能会进一步加剧底质中可利用氮磷的流失, 导致死亡红树林底质的肥力水平低于对照林区。死亡后的红树林会形成大量凋落物, 在潮流的作用下, 滞留于死亡红树林林缘 (ED1 - ED3) 与附近正常红树林内 (AL1 - AL3), 反而造成这些区域底质环境中的氮、磷和有机碳高于对照林区 (CK1 - CK3)。

## 4 结论

(1) 高岭土悬浮物主要沉积在表层 20 cm 的底质环境中, 并在以陆域填土区为中心, 半径约 540 m 范围内大量沉积, 在半径 540 - 1 075 m 的扇形区域内少量沉积。

(2) 高岭土悬浮物导致死亡红树林及高岭土悬浮物沉积的潮沟底质 pH 值降低, 并加重了正常林区的底质酸化。

(3) 高岭土悬浮物富含铜、铅和铬, 影响湿地底质环境的质量, 并存在重金属富集的风险。高岭土的黏结性强<sup>[24]</sup>, 容易引起底质结块, 形成缺氧环境, 影响红树植物的呼吸作用及其他底栖生物的生存, 而且长期的海水冲刷扰动会扩大高岭土的影响范围。建议物理清除死亡红树林内表层至少 20 cm 的底质, 降低高岭土的影响; 开展专题研究, 探寻降低高岭土黏性的环保分散剂, 改善受高岭土影响仍正常生长红树林区的底质环境。

### 参考文献

- [1] 林鹏. 中国红树林生态系[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- [2] 王文卿, 王瑁. 中国红树林[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [3] 何斌源, 范航清, 王瑁, 等. 中国红树林湿地物种多样性及其形成[J]. 生态学报, 2007, 27(11): 4859-4870.
- [4] ALONGI D M. Carbon sequestration in mangrove forests [J]. Carbon Management, 2012, 3(3): 313-322.
- [5] 广西红树林研究中心. 合浦县白沙镇榄根村红树林死因及生态恢复方案技术报告[R]. 北海: 广西红树林研究中心, 2020.
- [6] 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志 第十二分册(广西海湾)[M]. 北京: 海洋出版社, 1993.
- [7] 但新球, 廖宝文, 吴照柏, 等. 中国红树林湿地资源、保护现状和主要威胁[J]. 生态环境学报, 2016, 25(7): 1237-1243.
- [8] 罗在明, 韦灵敦. 广西优质高岭土的开发与展望[J]. 广西地质, 2002, 15(1): 11-14.
- [9] 杜杰, 韦丛中, 韦月艳, 等. 广西合浦地区高铁低品级高岭土矿物组成研究[J]. 矿产保护与利用, 2012(4): 22-25.
- [10] 付文超, 孟范平, 王志峰, 等. 北部湾潮间带沉积物和双壳类动物中的重金属: 污染特征与生物积累[J]. 环境科学学报, 2013, 33(5): 1401-1409.
- [11] 中国林业科学研究院林业研究所森林土壤研究室. 森林土壤矿质全量元素(硅、铁、铝、钛、锰、钙、镁、磷)烧失量的测定: LY/T 1253 - 1999 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- [12] 国家海洋环境监测中心. 海洋监测规范 第 5 部分: 沉积物分析: GB 17378. 4 - 2007 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [13] 全国农业技术推广服务中心, 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 上海市农业技术推广服务中心, 等. 土壤检测 第 2 部分: 土壤 pH 的测定: NY/T 1121. 2 - 2006 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [14] 张连金, 赖光辉, 孙长忠, 等. 北京九龙山不同林分土壤肥力诊断与综合评价[J]. 中南林业科技大学学报, 2017, 37(1): 1-6.
- [15] 阎文杰, 吴启堂. 一个定量综合评价土壤肥力的方法初探[J]. 土壤通报, 1994, 25(6): 245-247.
- [16] 国家海洋局国家海洋环境监测中心. 海洋沉积物质量:



- GB 18668-2002 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [17] 聂西度, 符靛. 高岭土化学组成的 ICP-AES 和 ICP-MS 准确测定[J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32(8): 33-36.
- [18] 黄冬根, 周文斌, 刘雷, 等. ICP-MS 法测定高岭土中微量成分及杂质元素的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(2): 504-508.
- [19] 吴宏海, 刘佩红, 张秋云, 等. 高岭石对重金属离子的吸附机理及其溶液的 pH 条件[J]. 高校地质学报, 2005, 11(1): 85-91.
- [20] 闫茂群, 龙焙, 熊冰清, 等. 高岭土同步去除农村生活污水中氮磷的机理及应用研究[J]. 应用技术, 2011(4): 157-159.
- [21] 师路远. 百花湖沉积物氮、磷释放的原位覆盖控制研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2015.
- [22] 刘秀梅, 张夫道, 张树清, 等. 纳米级高岭土对氮、磷、钾和有机碳的吸附及解吸特性的研究[J]. 中国农业科学, 2005, 38(1): 102-109.
- [23] 马宇晨. 有机质对粘性泥沙絮凝和粒间作用力影响[D]. 天津: 天津大学, 2017.
- [24] 印航. 广西合浦某高岭土特性及选矿试验研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009.

## Influences of Kaolinite Suspended Substances on the Sediment Environment of Mangrove Wetland in Lan'gen Village

LI Bin, WU Lengchan, SONG Chao, LIU Chenghui

(Guangxi Key Lab of Mangrove Conservation and Utilization, Guangxi Mangrove Research Center, Guangxi Academy of Sciences, Beihai, Guangxi, 536000, China)

**Abstract:** In order to investigate the influence range of kaolinite suspended substances and its influence on the mangrove sediment environment in Lan'gen Village, sediment environment investigation and sampling were carried out in the dead mangroves, the edge of the dead mangroves, the nearby normal mangroves, control mangroves and the tidal ditch in March 2020. The results showed that in the dead mangroves, the edge of the dead mangroves and the nearby normal mangroves, kaolinite suspended substances were mainly deposited in the surface layer of 10-20, 5-10 and 0-5 cm, respectively. The average contents of aluminum in the corresponding layers were 9.15%, 10.8% and 7.10%, while the average aluminum content of the sediment core in the control mangrove area was 3.60%. The average content of aluminum in the tidal creek (S1-S3) near the land filling area was 5.94%, while the average aluminum content in the other tidal creek (S4-S7) was 1.86%. The monitoring indicators in the survey area basically met the quality standard of the first-class marine sediments. But the average pH value of sediment in the tidal creek, dead mangroves and normal mangroves near the land fill area was lower than that in the corresponding control mangroves. The contents of Cu, Pb and Cr in the sediment of the dead mangroves, the edge of the dead mangroves and the nearby normal mangroves were about twice as much as that in the control mangroves, and the content of Pb in the tidal creek near the land filling area was also twice as much as that in the control tidal creek. The coefficient of comprehensive fertility of the dead mangrove sediment was 0.59, which was lower than 0.69 in the control mangroves. In summary, kaolinite suspended substances mainly affected the sediment environment within 20 cm of the surface layer of the mangrove wetland in Lan'gen Village. Taking the land filling area as the center, a large number of sediment was deposited in the range with radius of 540 m, and a small amount of sediment was deposited in the sector area with radius of 540-1 075 m. This led to the decrease of pH value in the sediment of dead mangroves and tidal creek near the land filling area, and aggravated the sediment acidification of the nearby normal forest area. Kaolinite suspended substances are rich in Cu, Pb and Cr, which affects the quality of wetland sediment environment and has the risk of enrichment of heavy metals.

**Key words:** kaolinite suspended substances, Lan'gen Village, mangrove, sediment, aluminum

责任编辑: 陆雁