

## ◆研究类◆

广西铁山港围填海导致的高岭土快速沉积致红树林死亡原因分析<sup>\*</sup>潘良浩<sup>1,2</sup>,史小芳<sup>1,3</sup>,范航清<sup>1\*\*</sup>,李斌<sup>1</sup>,陶艳成<sup>1,3</sup>,宋超<sup>1</sup>,苏治南<sup>1</sup>,谭星儒<sup>1</sup>

(1.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;2.复旦大学生物多样性科学研究所,生物多样性和生态工程教育部重点实验室,上海 200438;3.厦门大学环境与生态学院,滨海湿地生态系统教育部重点实验室(厦门大学),福建厦门 361102)

**摘要:**为查明广西北海市合浦县白沙镇榄根村龙港新区铁山港东港产业园范围内红树林大面积死亡的原因,对调查区域外源淤积物进行来源分析,并监测沉积物的理化性质,同时结合稳定同位素技术进行溯源。结果表明,在红树林死亡区域和严重退化区域存在大量的白色外源淤积物,越靠近死亡区域中心位置,外源淤积物厚度越大;外源淤积物层平均厚度为 7.5–11.1 cm,判定受损红树林区沉积速率高达 4.84–6.22 cm/a,外源淤积物以高岭土为主要成分;2017 年 12 月至 2020 年 3 月滩涂高程提高 10.9–14.0 cm,并由上而下形成“悬浮物+高岭土沉积层→高岭土痕迹层→正常底质层”的土壤垂直结构,该剖面结构表明,沉积过程早期为高岭土主导,后期为吹填悬浮物主导。尽管围填海工程未直接掩埋红树林,但工程导致高岭土及后期悬浮物的快速沉积,改变了红树林受损斑块的表层沉积物理化性质,推测是引发项目区红树林死亡的主要触因。

**关键词:**红树林 外源淤积物 高岭土 悬浮物 快速沉积

中图分类号:Q148 文献标识码:A 文章编号:1002-7378(2021)03-0270-09

DOI:10.13657/j.cnki.gxkxyxb.20210928.012

## 0 引言

红树林由于具有安全屏障、生物多样性、海洋牧场、净化水质、蓝色碳汇、休闲旅游、科学教育等独特

功能与特殊作用,因此吸引了全球的目光<sup>[1-4]</sup>,甚至可以说,红树林是人类命运共同体的战略资源<sup>[5-7]</sup>。党中央高度重视红树林保护与生态修复工作,2017 年 4 月 19 日习近平总书记在北海金海湾红树林考察时指

收稿日期:2021-06-07

\* 国家重点研发计划科技基础资源调查专项(2017FY100704),广西自然科学基金项目(2017GXNSFBA198009,2018GXNSFBA050011),北海科技计划项目(北科合 201995027,北科合 201995075)和合浦县林业局项目(GXZC2020-J3-HXHP-001)资助。

## 【作者简介】

潘良浩(1986-),男,在读博士研究生,助理研究员,主要从事红树林及滨海盐沼湿地生态学研究,E-mail:panlh86@163.com。

## 【\*\*通信作者】

范航清(1964-),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事典型滨海湿地生态系统生态学,典型滨海生态系统保护、恢复与利用研究,E-mail:fan-hq666@126.com。

## 【引用本文】

潘良浩,史小芳,范航清,等.广西铁山港围填海导致的高岭土快速沉积致红树林死亡原因分析[J].广西科学院学报,2021,37(3):270-278.

PAN L H,SHI X F,FAN H Q,et al. Analysis of Mangrove Mortality Due to Rapid Kaolinite Deposition Caused by Reclamation in Tieshan Bay, Guangxi [J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences,2021,37(3):270-278.

出:“一定要尊重科学、落实责任,把红树林保护好”。红树林已经成为中国海洋生态文明建设的重要部分,红树林的保护与利用水平,已经成为一个国家或地区生态文明建设水平的标志。

尽管红树林的重要性已得到公认,但是长期以来不合理的海洋资源和海岸带开发如围填海工程、海堤修建等人类活动仍然对红树林等滨海湿地生态系统造成生态威胁<sup>[8]</sup>。在党和国家高度重视红树林后,围填海工程需要直接避开或绕开红树林等重要滨海湿地生态系统,但是对于在红树林周边进行围填海工程是否会间接导致红树林退化甚至死亡的情况,尚未见报道。

2019年11月,位于广西北海市合浦县白沙镇榄根村龙港新区北海铁山港东港产业园范围内的红树林出现大面积死亡现象。根据现场包括陆域部分填土及海域部分抽沙填海的围填海工程历史及现状,初步判断红树林死亡与围填海工程有关。但由于围填海工程非直接掩埋红树林而造成红树林死亡的情况存在特殊性,为查明具体死因,在项目区进行了多项生态因子的调查与分析。本研究拟通过项目区红树林死亡现状、外源沉积物的来源及定量分析,结合课题组其他研究,共同说明红树林的具体死亡原因,为红树林的保护、管理和恢复提供指导。

## 1 材料与方 法

### 1.1 预实验及站位布设

对项目区可能的影响范围进行沉积物柱状样的试采集,根据各斑块采集到的沉积物柱状样颜色判断

表 1 沉积物指标测定方法

Table 1 Measurement method of sediment index

序号 No.	测定指标 Measurement index	测定方法 Measurement methods
1	外源淤积物厚度/深度 Thickness/depth of exogenous silt	目视+尺子测量 Visual+ruler measurement
2	容重 Bulk density	使用注射器采集后(记录体积)烘干测量干重 Dry weight was measured by drying after collecting with register (recording volume)
3	粒度 Granularity	Mastersizer 激光粒度仪 Mastersizer laser particle sizer analyzer
4	碳氮稳定同位素比值( $\delta^{13}\text{C}/\delta^{15}\text{N}$ ) Carbon and nitrogen stable isotope ratios ( $\delta^{13}\text{C}/\delta^{15}\text{N}$ )	同位素质谱-元素联用仪(EA-IRMS, Isoprime precision)
5	铝 Aluminum	《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) Determination of burn loss of mineral beam elements (silicon, iron, aluminum, titanium, manganese, calcium, magnesium, and phosphorus) in forest soil (LY/T 1253-1999)

是否有外源物输入,然后根据各点采集到的白色痕迹层(以下统称外源淤积物层)的深度确定采样点站位及具体分层。预实验采样点及沉积物柱状样中白色外源淤积物的示意图如图 1 所示。

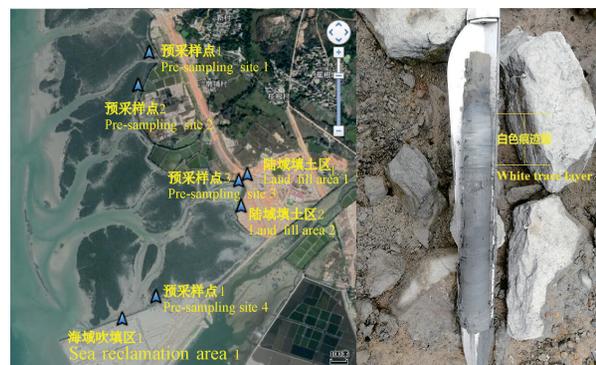


图 1 预采样点及预采样点 3 中白色痕迹层示意图

Fig. 1 Schematic diagram of white trace layer at pre-sampling site and pre-sampling site 3

根据项目区红树林死亡现状以及围填海遗留的痕迹推断(详见预实验部分),红树林死亡区域外来的沉积物可能来自于围填海工程(包括陆域填土和海域吹填),因此设置 3 个分项进行溯源分析,包括水文监测、外源淤积物来源分析、水质及沉积物监测。本研究重点分析外源淤积物的来源和沉积物理化性质检测,其中,外源淤积物来源分析包括外源淤积物厚度/深度、容重、粒度、碳氮稳定同位素比值  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{15}\text{N}$ 、铝元素分析与测定。元素分析选择铝元素,是基于广西合浦地区高岭土铝含量较高<sup>[9]</sup>,明显区别于原生红树林底质层的特征而定,同时结合稳定同位素技术进行溯源。各指标测定方法如表 1 所示。

为判断受损红树林区是否受围填海工程影响并确定影响范围,分别在陆域填土区(L1-L3)和海域吹填区(Y1-Y3)设置采样点各3个,红树林死亡区站位6个(D1-D6,以下简称D组),严重退化红树林区站位6个(ED1-ED6,以下简称ED组),项目监测范围内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调查站位3个(尚存活样方AL1-AL3,以下简称AL组),正常红树林对照站位3个(对照组CK1-CK3,以下简称CK组)。各站位示意图如图2所示。

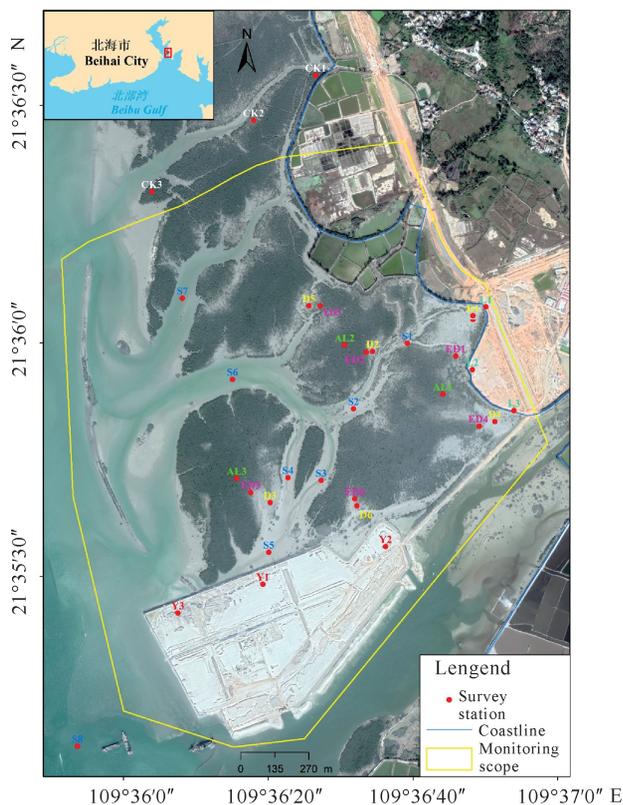


图2 站位布设示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the setting of stations

### 1.2 红树林植物群落特征测定

在样方布设示意图中选择D1-D6、ED1-ED6、AL1-AL3、CK1-CK3进行红树林植物群落调查(图2),每个站位设置1个10 m×10 m的样方,共计18个样方。

植物群落特征调查内容包括红树植物种类、胸径、高度、冠幅、盖度、构件数,以及更新层幼苗的种类、数量和高度等常规特征值,调查及数据处理按《红树林生态健康监测技术规程》DB45/T 832-2012进行。鉴于项目区红树林死亡现状,增加测定死亡红树林的参数值:叶片残留比例、断顶株数及比例、白骨壤呼吸根密度及高度值。

### 1.3 沉积物采样站位

沉积物采集样点及站位选择如图2所示,共布设18个站位,其中位于潮间带的红树林站位12个(红树林死亡区站位仅选择典型的D1-D3进行采样),沉积物柱状样采集深度为0-50 cm;陆域填土区和海域吹填区采样点共计6个,采样深度为0-30 cm。

### 1.4 外源淤积物厚度/深度

在红树林站位中进行沉积物柱状样采集,采集前先去沉积物表面凋落物层和活体组织,使用Eijkkamp螺旋形土钻(C040903,荷兰)进行半圆柱体柱状样采集及拍照,拍照后回实验室进行处理。使用目测方法根据沉积物颜色、质地地区分记录表层、外源淤积物以及未受干扰的红树林底层沉积物的具体厚度/深度(图3),其中外源淤积物层是指颜色偏白且显著区别于原生沉积物的部分,其厚度即为白色痕迹层的高度(图1),而外源淤积物层的深度是指该层所达到的深度,数值上为表层土+外源淤积物厚度。每个站位进行5个柱状样采集拍照。



图3 各分组典型沉积物柱状样表层土、外源淤积物层及原底质层对比示意图

Fig. 3 Schematic comparison of topsoil, exogenous silt layer and original substrate layer in typical sediment column sample in each group

### 1.5 沉积物样品采集及分层

另外采集柱状样测定沉积物元素,并按照0-5 cm、5-10 cm、10-15 cm、15-20 cm、20-35 cm、35-50 cm分层;陆域填土区和海域吹填区站位沉积物取表层0-30 cm,共采集78个样品。

### 1.6 统计方法

统计分析采用SPSS17.0、MS Excel 2020,采用单因素方差分析(ANOVA)检验各组别直接差异。

## 2 结果与分析

### 2.1 铁山港红树林概况

死亡红树林所在的铁山港是我国目前面积最大的天然白骨壤 *Avicennia marina* 纯林生长地<sup>[10-12]</sup>。群落类型为白骨壤群落,偶见红海榄 *Rhizophora stylosa*、桐花树 *Aegiceras corniculatum*、秋茄 *Kan-*

*delia obovata*、海漆 *Excoecaria agallocha* 植株分布。根据科技部基础资源调查专项《广西红树林生物资源调查(项目编号 2017FY100704)》于 2019 年 11 月在铁山港内湾布设的 3 条典型红树林调查断面穿越高、中、低 3 个潮间带的 36 个 10 m×10 m 群落样方数据统计,铁山港内湾白骨壤群落平均覆盖度为 57%,平均密度为 58 株/100 m<sup>2</sup>,平均高度 2.08 m。

铁山港的红树林有 95.3% 属于人为干扰严重的次生红树林,一旦丧失将很难恢复<sup>[13]</sup>。而基于脆弱性域图模型进行的铁山港湾红树林生态系统脆弱性评价,则从暴露程度、敏感性、适应能力等 3 个方面显示铁山港湾红树林生态系统脆弱性呈逐渐增强趋势<sup>[14]</sup>。随着时间推移,红树林生态系统面临的暴露程度不断增大,其最主要的胁迫因子从十几年前的林下挖掘、海平面上升转变为滩涂围垦、临港工业废水污染,生态环境敏感性也越来越强,海洋生物质量综合指数和各生物的多样性指数均有所下降,其中潮间带生物多样性指数下降最大<sup>[14,15]</sup>。因此,铁山港红树林特点可概括为群落单一、生态脆弱。

### 2.1.1 红树林死亡面积及分布

根据高清遥感影像及无人机航拍,结合大量野外勘测校正得出榄根村红树林死亡情况<sup>[16]</sup>:现榄根村红树林监测范围内共有红树林面积 111.01 hm<sup>2</sup>,其中受损红树林总面积为 17.18 hm<sup>2</sup>,含完全死亡红树林面积 7.81 hm<sup>2</sup>,严重退化红树林面积 9.37 hm<sup>2</sup>,监测范围内暂未受损红树林总面积为 93.83 hm<sup>2</sup>(图 4)。红树林死亡斑块特征如下:(1)受损红树林分布区主要位于围填海区红树林潮沟两侧;(2)死亡斑块在监测范围内的各红树林大斑块中几乎均有分布,形态上呈灰白斑块状,结合红树林历史景观演变过程,红树林受损呈“多点开花”特点,有由斑块局部受损往斑块内部区域受损的蔓延趋势,不排除红树林死亡及严重退化区面积继续扩大的可能性。

### 2.1.2 物种组成及死亡现状

项目所在范围内榄根村真红树植物种类共计 4 科 5 属 5 种,出现死亡的种类有 3 科 4 属 4 种(表 2),死亡红树林具体表现为植株全株干枯,叶片全掉落,部分植株断顶、易折断,指状呼吸根消失;沉积物散发恶臭。死亡面积和株数均以白骨壤为主,少数死亡区域的红海榄、桐花树、秋茄植株也出现全株死亡现象(图 5a-f)。在项目监测区范围内沉积物及红树林茎干、呼吸根和叶片上能观察到大量的白色粘性物质粘

附(图 5g-i)。同时,根据白骨壤植株断顶比例推测,项目区红树林死亡已有一段时间。受损红树林区(包括死亡和严重退化两种程度)植被覆盖度低于 15%。

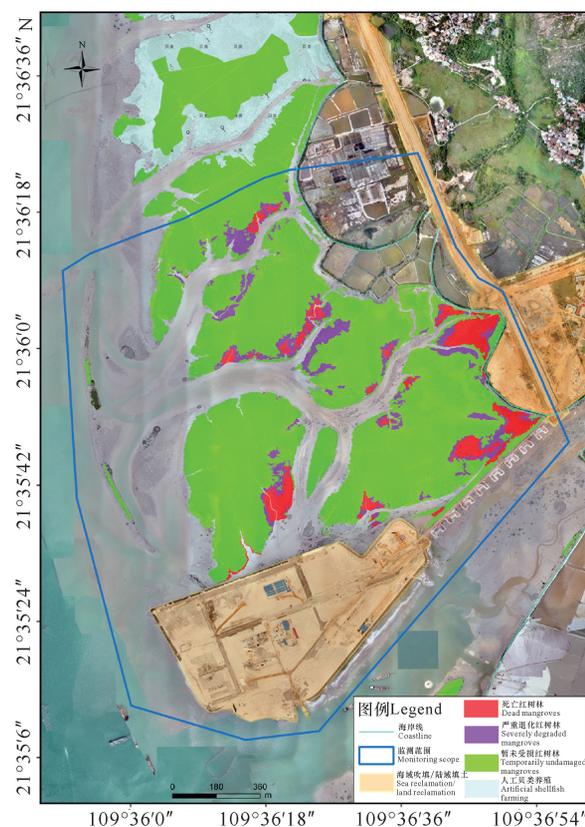


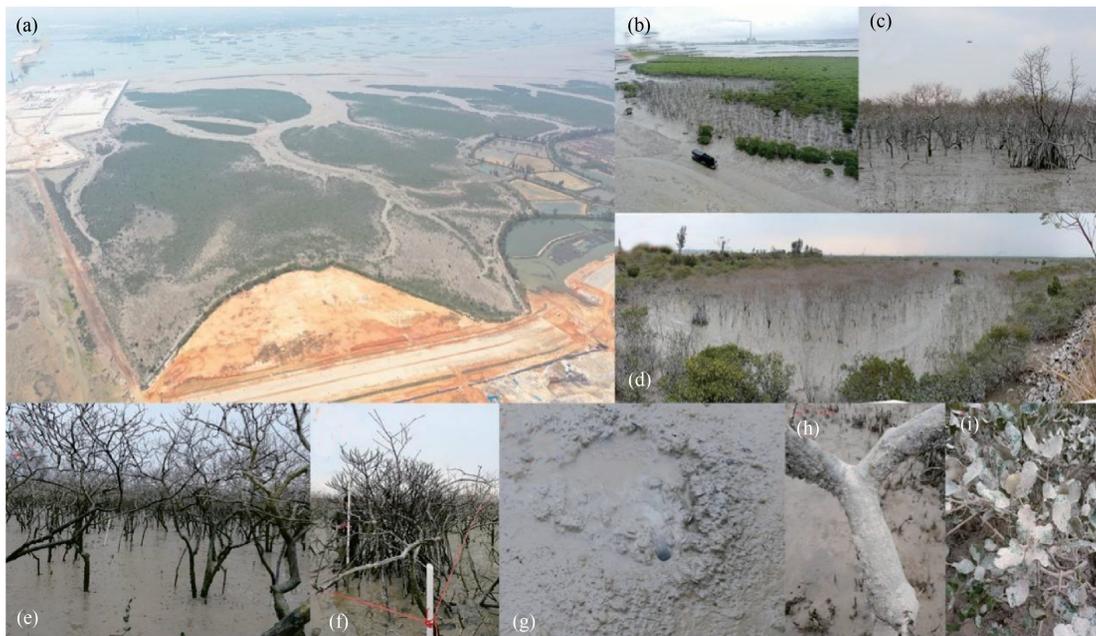
图 4 合浦县白沙镇榄根村红树林受损现状(航拍时间 2020 年 4 月 21 日)

Fig. 4 Damage status of mangrove forest in Lan'gen Village, Baisha Town, Hepu County (Aerial photography time April 21st, 2020)

表 2 项目区真红树植物种类

Table 2 Exclusive mangrove species in project area

科名 Family	种名 Species	备注 Note	是否出现 死亡 Death or not
马鞭草科 Verbenaceae	白骨壤 <i>Avicennia marina</i>	灌木 Shrub	是 Yes
红树科 Rhizophoraceae	红海榄 <i>Rhizophora stylosa</i>	大灌木 Large shrubs	是 Yes
	秋茄 <i>Kandelia obovata</i>	灌木 Shrub	是 Yes
紫金牛科 Myrsinaceae	桐花树 <i>Aegiceras corniculatum</i>	灌木 Shrub	是 Yes
大戟科 Euphorbiaceae	海漆 <i>Excoecaria agallocha</i>	乔木 Macrophanerophytes	否 No



(a) - (d) 红树林死亡现状图(2020年3月); (e) (f) 死亡的白骨壤群落及红海榄植株; (g) - (i) 沉积物及红树林茎干、叶片上附着有大量的白色粘性物质

(a) - (d) Current status of dead mangroves (March 2020), (e) (f) Dead *Avicennia marina* community and *Rhizophora stylosa* plant, (g) - (i) Sediment and mangrove stems and leaves with large amounts of white sticky material

图5 合浦县白沙镇榄根村红树林死亡现状

Fig. 5 Death status of mangrove in Lan'gen Village, Baisha Town, Hepu County

## 2.2 受损红树林区外源淤积层厚度/深度

如表3所示,外源淤积物厚度  $D > ED > AL = CK$  组, D组外源淤积物厚度为6.5 - 15.0 cm, 平均厚度达到11.1 cm; ED组外源淤积物厚度为4.0 - 11.0 cm, 平均值为7.5 cm, 两者之间存在显著差异 ( $P < 0.05$ ); 而在AL和CK组则无明显的外源淤积物。这一结果充分表明了红树林死亡区域和严重退化区域存在大量的外源淤积物, 并且越靠近死亡区域中心位置, 外源淤积物厚度越大, 在死亡区域边缘外源淤积物厚度较小; AL和CK组没有受到明显的外源淤积物影响。各站位外源淤积物厚度/深度示意图详见图6。

同时, 表3中D和ED组外源淤积物以上的表层土深度之间差异不显著 ( $P > 0.05$ ), 表明在外源淤积物影响红树林后, 已经有一个相对稳定的无明显大量外源淤积物影响时期, 结合码头围堰形成时间, 可以大致推断出外源淤积物影响红树林的时间。而沉积物分层容重值在各分组之间差异不显著。

根据卫星影像, 2017年12月海域吹填区围堰封闭成型, 同时红树林开始出现小面积死亡现象。根据以白色高岭土痕迹线为基准形成的外源淤积物厚度数据, 并根据沉积物柱状样采样时间2020年3月, 即

自2017年12月起历时2.25年, 计算出受损红树林区的沉积速率高达4.84 - 6.22 cm/a; 2.25年以来滩涂高程提高10.9 - 14.0 cm, 并由上而下形成“悬浮物 + 高岭土沉积层 → 外源淤积物层 → 原底质层”的沉积物垂直结构。

表3 各区域外源淤积物厚度

Table 3 Thickness of exogenous silt in each area

采样区 Sampling site	外源淤积物平均厚度 Average thickness of exogenous silt (cm)	表层土深度 Depth of topsoil (cm)	外源淤积物深度 Depth of exogenous silt (cm)
D	11.1 ± 2.0 <sup>A</sup>	2.9 ± 1.9	14.0 ± 2.4
ED	7.5 ± 1.8 <sup>B</sup>	3.4 ± 1.8	10.9 ± 2.2
AL	0 <sup>C</sup>	颜色质地无明显区别 No significant difference in color and texture	-
CK	0 <sup>C</sup>	颜色质地无明显区别 No significant difference in color and texture	-

注: 不同大写字母 A、B 和 C 表示各组间存在显著差异 ( $P < 0.05$ )

Note: Different capital letters A, B and C indicate significant differences between the groups ( $P < 0.05$ )

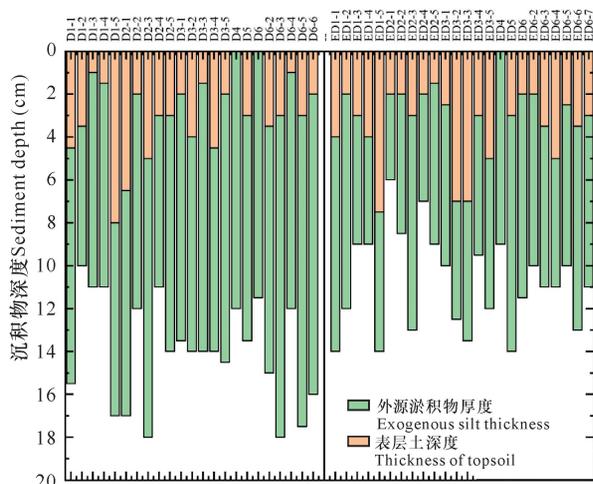
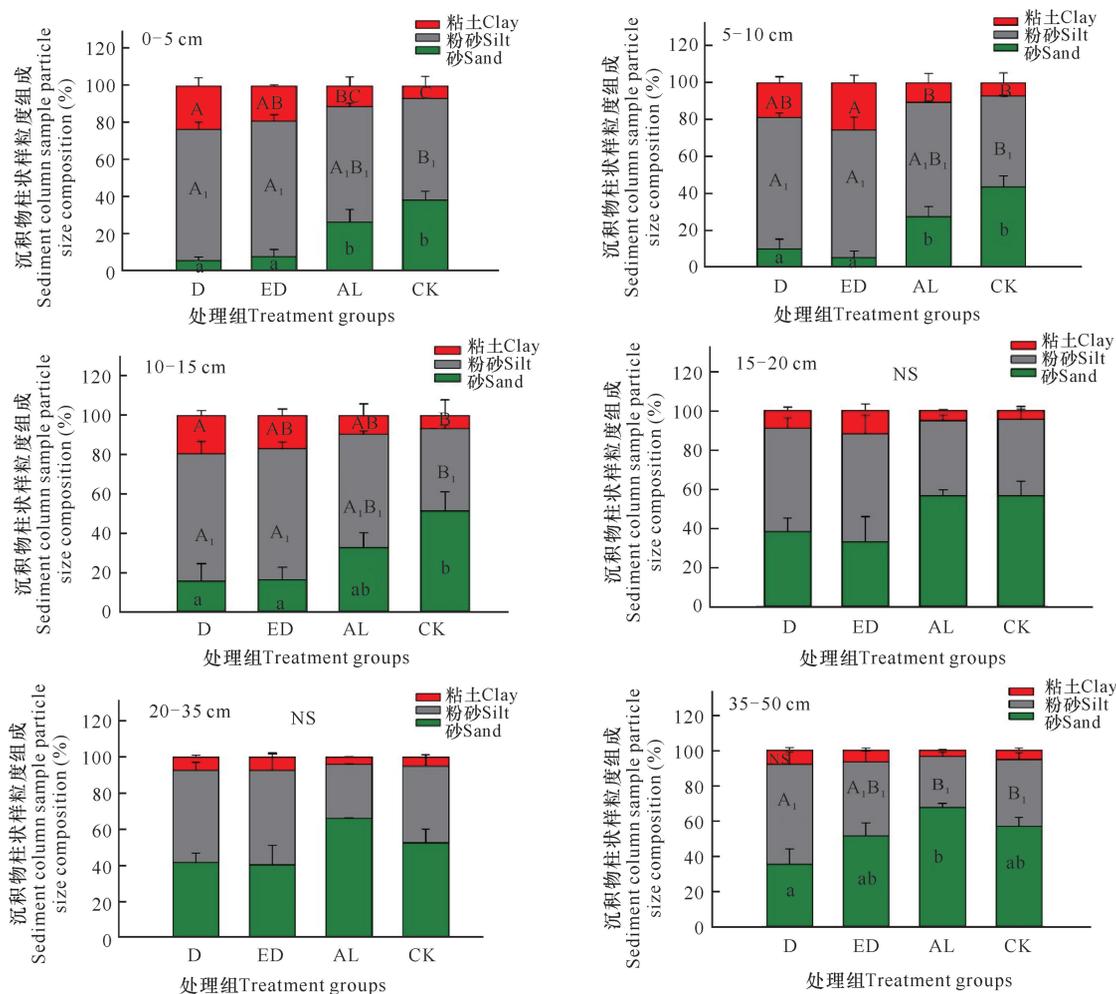


图6 外源淤积物厚度/深度示意图

Fig. 6 Schematic diagram of exogenous silt thickness/depth

### 2.3 粒度

如图7所示,随着沉积物深度增加,不同土层的沉积物粒度分布构成有所不同。在表层0-5 cm中, D、ED、AL 和 CK 组沉积物中砂的含量分别为 5.71%, 7.98%, 26.60%, 38.30% (图7), 呈逐渐增加趋势, 经多重比较后发现 D、ED 两组与 AL、CK 两组分别具有显著差异 ( $P < 0.05$ ); D、ED、AL 和 CK 沉积物中粉砂的含量分别为 70.74%、73.03%、62.20%、55.07%, 4 组沉积物中粘土的含量依次为 23.54%、18.99%、11.20%、6.63%; 粉砂和粘土呈现出递减趋势, 与砂含量的趋势相反, 且 D、ED 两组与 AL、CK 两组分别具有显著差异 ( $P < 0.05$ )。在 5-10 cm、10-15 cm 土层中, 同样具有与 0-5 cm 表层



不同字母之间表示差异显著 ( $P < 0.05$ ), 大写字母 A、AB、B、C, 下标大写字母  $A_1$ 、 $A_1B_1$ 、 $B_1$ , 小写字母 a、ab、b 分别代表粘土、粉砂、砂在各处理组之间的显著性, NS 表示各组别之间无显著差异

Different letters indicate significant differences ( $P < 0.05$ ), capital letters, subscripts in capital letters, lowercase letters represent the significance of clay, silt and sand among the treatment groups, respectively, NS indicates no significant difference between groups

图7 各分组沉积物柱状样粒度垂直分布

Fig. 7 Vertical distribution of sediment column sample size for each group

一致的粒度构成变化趋势 ( $P < 0.05$ )。在 15–20 cm、20–35 cm 两层土样中, 沉积物粒度分布无显著差异。35–50 cm 土层中, 粘土在 D、ED、AL 和 CK 组沉积物中的含量分别为 8.14%, 6.59%, 3.62% 和 5.49%, 无显著差异。

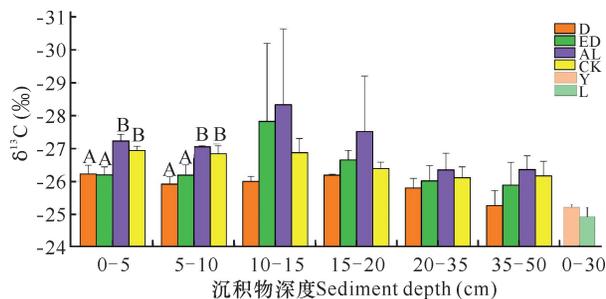
同时, 对照组 3 个站位柱状样偏态值为 0–0.23  $\phi$ , 均为正值, 从粒度系数偏态值的含义和生态学意义<sup>[17]</sup>来看, 沉积物的沉积均以粗粒为主。D、ED 和 AL 组沉积物粒度偏态值为 -0.34–0.41  $\phi$ , 总体趋势由底层到上层呈现由正到负的变化, 表明沉积物开始以粗粒为主沉积, 后面以细粒为主沉积。分选系数表明沉积物颗粒大小的均匀程度<sup>[18]</sup>, 从采集的各柱状样总体来看, 沉积物的分选程度为较差到差, 表明粒度分布不均。红树林正常生长组 AL1、AL2、AL3 和对照组 CK1、CK2、CK3 分选系数变化较小, 其值为 1.91–2.59  $\phi$ ; 而死亡组 D1、D2、D3 和严重退化组 ED1、ED2、ED3 中 0–15 cm 和 15–50 cm 差别较大, 其值为 1.30–2.50  $\phi$ , 体现出从底层到上层分选程度变好的趋势, 这与沉积物组分中砂含量减少、粘土和粉砂含量增加有关, 表明死亡和严重退化红树林组相对于正常生长组有新的沉积物来源<sup>[19]</sup>。

以上结果显示, D、ED 组的红树林表层沉积物 (0–15 cm) 细颗粒的粉砂和粘土含量明显比存活组和对照组要高, 而深层次沉积物中的含量对比不明显, 充分表明在死亡和死亡边缘红树林组表层覆盖了更多由细颗粒 (粉砂和粘土) 组成的外源淤积物。

## 2.4 稳定同位素

如图 8 所示, 根据表层沉积物 (0–15 cm) 的  $\delta^{13}\text{C}$  值差异, 可将 6 种沉积物分为 3 组, 其中 D 和 ED 一组, AL 和 CK 一组, Y 和 L 一组, 组内无显著差别。D 和 ED 组表层沉积物 0–5 cm 和 5–10 cm  $\delta^{13}\text{C}$  值显著小于 AL 和 CK 组 ( $P < 0.05$ ), 其余层次的差异不显著。从数值来看, D 和 ED 组的表层沉积物  $\delta^{13}\text{C}$  值处于 AL 和 CK 组、L 和 Y 组的  $\delta^{13}\text{C}$  值之间。

如图 9 所示, D 和 ED 组 0–5 cm 表层沉积物的  $\delta^{15}\text{N}$  显著高于 AL 和 CK 组, Y 组的  $\delta^{15}\text{N}$  值与 D、ED 组更接近, 显著高于 AL、CK 组。但由于 L1–L3、Y2、Y3 土壤样品的  $\delta^{15}\text{N}$  样品值未能成功测定 (低于仪器检测限, 无数据), 故无法通过沉积物样品  $\delta^{15}\text{N}$  数据分析外源淤积物的潜在来源。

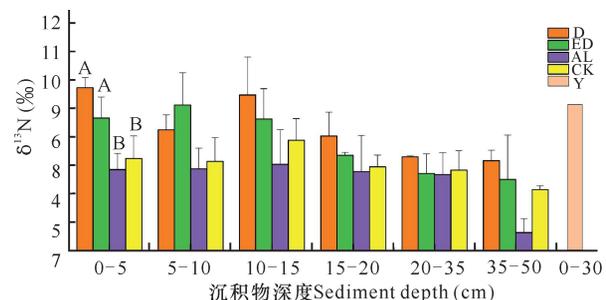


大写字母 A, B 表示差异显著 ( $P < 0.05$ )

Capital letters A, B indicate significant differences ( $P < 0.05$ )

图 8 稳定同位素比值  $\delta^{13}\text{C}$  (平均值  $\pm$  标准误差)

Fig. 8 Stable isotope ratio  $\delta^{13}\text{C}$  (mean value  $\pm$  standard error)



大写字母 A, B 表示差异显著 ( $P < 0.05$ )

Capital letters A, B indicate significant differences ( $P < 0.05$ )

图 9 稳定同位素比值  $\delta^{15}\text{N}$  (平均值  $\pm$  标准误差)

Fig. 9 Stable isotope ratio  $\delta^{15}\text{N}$  (mean value  $\pm$  standard error)

## 3 讨论

### 3.1 高岭土为外源淤积物主要成分

根据红树林各区域沉积物柱状样中外源淤积物外观、厚度及深度, 沉积物分层容重值, 粒度、稳定同位素、铝元素含量 (详见本刊李斌等《高岭土悬浮物对榄根村红树林湿地底质环境的影响》具体研究), 排水口和潮沟形态的改变, 排水口的封口痕迹等各项证据, 表明红树林死亡区域 D 组和严重退化红树林区 ED 组均明显含有高岭土成分的外源淤积物, 且外源淤积物对死亡区域 D 组的影响主要在 0–15 cm 层, 而对边缘区 ED 组的影响则稍浅 (另见本刊本期李斌等《高岭土悬浮物对榄根村红树林湿地底质环境的影响》具体研究)。此外, 位于高潮痕迹线 (平均高 1.57 m) 以下的红树林叶片几乎全部呈灰白色。富含铝、白色、高粘性、易分散悬浮于水等是高岭土的重要特征, 因此可以认定, 沉积物中外源淤积物层和植物体白色附着物均为外源输入的高岭土。由于 L1–L3、

Y2、Y3 土壤样品的  $\delta^{15}\text{N}$  值未检出,不能采用常用的混合模型<sup>[20]</sup>计算红树林区沉积物来源的贡献率。单从 C 稳定同位素比值推算,受损红树林区 0-15 cm 沉积物的 38% 为外源输入。

### 3.2 高岭土快速沉积的影响

根据外源淤积物沉积速率的数值可以看出,大量的外源淤积物进入红树林区是在一个较为短暂的时期,滩涂高程的快速变化对红树林的消长有着深远的影响。根据傅海峰<sup>[21]</sup>整合 2019 年前发表的数据表明,全球 16 篇文献 95 个数据条目中的港湾型、碳酸盐岩礁和河口三角洲型红树林的地表沉积速率分别为 0.79、0.26 和 3.53 cm/a。本项目区所在地是典型的港湾红树林区,在此次死亡事件中的外源淤积物的沉积速率远大于文献统计值。另有研究表明,白骨壤可以承受虾塘排出的固体沉积物最高沉积速率达 6 cm/a<sup>[22]</sup>。但是,本研究中的外源淤积物主要成份为粘性极大的高岭土,与虾塘排出的固体沉积物性质完全不同,高岭土( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )在酸环境中会使悬浮颗粒的粘度增大<sup>[23,24]</sup>,较牢固地附着在植物枝叶上或者凝聚造成土层缺氧,导致红树植物无法正常进行  $\text{CO}_2/\text{O}_2$  气体交换,生长衰退以至枯萎死亡。

自 2017 年 10 月陆域填土基本推进到海堤陆侧,码头围堰封闭成型,2017 年 12 月红树林开始出现死亡。以高岭土痕迹线为基准,判定受损红树林区沉积速率高达 4.84-6.22 cm/a,2.25 年(自 2017 年 12 月至 2020 年 3 月)以来滩涂高程提高 10.9-14.0 cm,并由上而下形成“悬浮物+高岭土沉积层→高岭土痕迹层→正常底质层”的土壤垂直结构。该剖面结构表明,沉积过程早期为高岭土主导,后期为吹填悬浮物主导。从红树林死亡和受损斑块的“多点开花”特点可推断(详见本刊同期陶艳成等《遥感技术在受损红树林资源调查与监测中的应用》相关研究),这种沉积理化性质的改变大都发生在高程较低、沉积物易堆积的红树林潮沟两侧,进一步说明早期高岭土主导的溢流和沉积是主因。

根据植物群落调查特征表现,致死应该是一个持续的过程,至 2020 年 3 月初进行调查时,大部分死亡的白骨壤植株仍然矗立在滩涂之上。根据项目调查组针对红树林致死机理的研究<sup>[15]</sup>,由于高岭土的快速沉积和后期吹填悬浮物共同组成的高粘性沉积层对红树林尤其是白骨壤根系的掩盖,致使白骨壤指状呼吸根缺氧死亡,红树植物根际供氧的蟹洞通道被破

坏,以及高粘性沉积物粘附于植物叶片、茎枝导致的光合作用受阻,是造成榄根村白骨壤红树林死亡的主要原因。如果外源淤积物来源得不到有效控制,白骨壤的死亡可能仍会继续。

## 4 结论

广西北海市合浦县白沙镇榄根村龙港新区榄根作业区的围填海工程所导致的早期以高岭土为主要成分,后期以吹填悬浮物为主的快速沉积,致使红树林地表高程的迅速提升所形成的“悬浮物+高岭土沉积层→高岭土痕迹层→正常底质层”的土壤垂直结构,直接改变了红树林受损斑块表层沉积物的理化性质,推测这是引发项目区红树林死亡的主要触因。尽管类似的围填海工程未直接填埋红树林,但是由于工程施工导致的外源物质所引发的红树林沉积物理化性质改变致红树林大面积死亡和退化的现象,值得深思,也需要政策制定者在进行规划和设计时加强顶层审计,通盘考虑,科学规划红树林保护与经济开发关系。

### 参考文献

- [1] VIERROS M. Communities and blue carbon: The role of traditional management systems in providing benefits for carbon storage, biodiversity conservation and livelihoods [J]. *Climatic Change*, 2017, 140(1): 89-100.
- [2] 范航清. 红树林——海岸环保卫士[M]. 南宁: 广西科学技术出版社, 2000.
- [3] 范航清, 王文卿. 中国红树林保育的若干重要问题[J]. *厦门大学学报: 自然科学版*, 2017, 56(3): 323-330.
- [4] 王文卿, 王瑁. 中国红树林[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [5] 范航清. 红树林[M]. 南宁: 广西科学技术出版社, 2018.
- [6] DAHDOUTH-GUEBAS F, AJONINA G N, AMIR A A, et al. Public perceptions of mangrove forests matter for their conservation [J]. *Frontiers in Marine Science*, 2020, 7: 603651. DOI: 10.3389/fmars.2020.603651.
- [7] DUKE N C, MEYNECKE J O, DITTMANN S, et al. A world without mangroves? [J]. *Science*, 2007, 317(5834): 41-42.
- [8] MA Z J, MELVILLE D S, LIU J G, et al. Rethinking China's new great wall [J]. *Science*, 2014, 346(6212): 912-914.
- [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] 国家林业局森林资源管理司. 中国红树林资源调查报告[M]. 北京: [s. n.], 2002.
- [11] 范航清, 黎广钊, 周浩郎, 等. 广西北部湾典型海洋生态系统: 现状与挑战[M]. 北京: 科学出版社, 2015.

- [12] 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.
- [13] 广西红树林研究中心. 铁山港生态多样性极限调查报告[R]. 北海:[s. n.], 2009.
- [14] 李小维, 黄子眉, 陈剑锋, 等. 基于 VSD 模型的铁山港湾红树林生态系统脆弱性初步评价[J]. 热带海洋学报, 2018, 37(2): 47-54.
- [15] 胡文佳. 典型海洋生态系统评价研究——以北部湾铁山港为例[D]. 厦门: 厦门大学, 2013.
- [16] 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[R]. 北海:[s. n.], 2020.
- [17] 乔淑卿, 石学法, 王国庆, 等. 渤海海底质沉积物粒度特征及输运趋势探讨[J]. 海洋学报, 2010, 32(4): 139-147.
- [18] 李富祥, 张春鹏, 王路, 等. 基于表层沉积物粒度特征的鸭绿江口沉积环境分析[J]. 海洋科学, 2014, 38(5): 100-106.
- [19] 蒋信忠. 砂的中值粒径与分选系数的经验关系及其对沉积环境的反映[J]. 沉积学报, 1985, 3(1): 128-137.
- [20] 王丹, 张荣, 熊俊, 等. 互花米草入侵对滨海湿地土壤碳库的贡献——基于稳定同位素的研究[J]. 植物生态学报, 2015, 39(10): 941-949.
- [21] 傅海峰. 中国红树林地表高程变化以及海平面上升对红树林的影响[D]. 厦门: 厦门大学, 2019.
- [22] VAIPHASA C, DE BOER W F, SKIDMORE A K, et al. Impact of solid shrimp pond waste materials on mangrove growth and mortality: A case study from Pak Phanang, Thailand [J]. Hydrobiologia, 2007, 591(1): 47-57.
- [23] 赵丽红, 何北海, 李军荣, 等. 阴离子对高岭土分散作用的影响[J]. 纸和造纸, 2008, 27(S0): 53-56.
- [24] 黄亮国, 朱燕娟, 赵韦人, 等. 高岭土最佳分散条件的确定与探讨[J]. 中国造纸, 2009, 28(6): 18-21.

## Analysis of Mangrove Mortality Due to Rapid Kaolinite Deposition Caused by Reclamation in Tieshan Bay, Guangxi

PAN Lianghao<sup>1,2</sup>, SHI Xiaofang<sup>1,3</sup>, FAN Hangqing<sup>1</sup>, LI Bin<sup>1</sup>, TAO Yancheng<sup>1,3</sup>, SONG Chao<sup>1</sup>, SU Zhinan<sup>1</sup>, TAN Xingru<sup>1</sup>

(1. Guangxi Key Lab of Mangrove Conservation and Utilization, Guangxi Mangrove Research Center, Guangxi Academy of Sciences, Beihai, Guangxi, 536000, China; 2. Ministry of Education Key Laboratory for Biodiversity Science and Ecological Engineering, Institute of Biodiversity Science, Fudan University, Shanghai, 200438, China; 3. Key Laboratory of the Coastal and Wetland Ecosystems (Xiamen University), Ministry of Education, College of the Environment & Ecology, Xiamen University, Xiamen, Fujian, 361102, China)

**Abstract:** In order to find out the causes of large area death of mangrove forest in Donggang Industrial Park of Tieshan Bay, Longgang New District, Lan'gen Village, Baisha Town, Hepu County, Beihai City, Guangxi Province, the source of exogenous sediment in the survey area was analyzed, and the physical and chemical properties of sediment were monitored. At the same time, stable isotope technology was used to trace the source. The results showed that there was a large number of white exogenous sediment in the dead area and severely degraded area of mangrove. The closer to the center of the dead area, the greater the thickness of exogenous sediment was. The average thickness of exogenous sediment layer was 7.5–11.1 cm, and the sedimentation rate in the damaged mangrove area was judged to be as high as 4.84–6.22 cm/a. Kaolinite was the main component of exogenous sediment. From December 2017 to March 2020, the beach elevation increased by 10.9–14.0 cm, and the vertical soil structure of "suspended substance + kaolinite sediment layer → kaolinite trace layer → normal sediment layer" was formed from top to bottom. The profile structure showed that the sedimentary process was dominated by kaolinite in the early stage and by reclaimed suspension in the later stage. Although the reclamation project did not directly bury the mangrove forest, the project led to the rapid deposition of kaolinite and the suspended substance in the later stage, which changed the physical and chemical properties of the surface sediment of the damaged patches of mangrove forest, which was speculated to be the main trigger of mangrove death in the project area.

**Key words:** mangrove, exogenous sediment, kaolinite, suspended substance, rapid deposition

责任编辑: 米慧芝