

罗 柱,林武辉,王一潼,等.多核素联合示踪珊瑚礁区颗粒物动力学过程 [J]. 中国环境科学, 2025,45(3):1576-1586.

Luo Z, Lin W H, Wang Y T, et al. Multi-radionuclides for quantifying marine particle dynamic processes in coral reef ecosystem [J]. China Environmental Science, 2025,45(3):1576-1586.

## 多核素联合示踪珊瑚礁区颗粒物动力学过程

罗 柱<sup>1</sup>,林武辉<sup>2\*</sup>,王一潼<sup>1</sup>,黄思宇<sup>1</sup>,余克服<sup>1</sup> (1.广西大学海洋学院,广西南海珊瑚礁研究重点实验室,广西 南宁 530004; 2.集美大学,港口与海岸工程学院,福建 厦门 361021)

**摘要:** 利用高纯锗  $\gamma$  谱仪对北部湾涠洲岛珊瑚礁区的沉降物、表层沉积物、柱状沉积物中多种放射性核素开展联合分析.在利用  $^{40}\text{K}$ 、颗粒活性核素  $^{234}\text{Th}_{\text{ex}}$  和  $^7\text{Be}$  以及  $^{238}\text{U}$ - $^{232}\text{Th}$ ( $^{228}\text{Ra}$ )- $^{40}\text{K}/10$  三角图解等多核素示踪手段共同证实涠洲岛西侧沉降物来源于表层沉积物再悬浮的基础上,联合使用过剩  $^{210}\text{Pb}$  的恒定通量恒定沉积速率模式定量计算了涠洲岛西侧海域两柱样(WZ16 和 WZ20)沉积速率分别为  $1.46\times 10^{-3}$  和  $2.25\times 10^{-3}$  cm/d,该结果仅为相邻站位沉降速率( $295\times 10^{-3}$  和  $252\times 10^{-3}$  cm/d)的 0.50%和 0.89%,表明 99%以上的沉降物会经历多次强烈的再悬浮过程,最终才能埋藏进入沉积柱样.此外,本研究发现具有较高沉降通量的涠洲岛西侧珊瑚礁区仍有较高的珊瑚幼体补充量,推测是由于强烈的生源沉积物再悬浮为珊瑚虫提供了丰富的异养能量来源.

**关键词:** 珊瑚礁; 放射性核素; 物源识别; 沉积速率; 再悬浮

中图分类号: X55 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2025)03-1576-11

**Multi-radionuclides for quantifying marine particle dynamic processes in coral reef ecosystem.** LUO Zhu<sup>1</sup>, LIN Wu-hui<sup>2\*</sup>, WANG Yi-tong<sup>1</sup>, HUANG Si-yu<sup>1</sup>, YU Ke-fu<sup>1</sup> (1.Guangxi Laboratory on the Study of Coral Reefs in the South China Sea, School of Marine Sciences, Guangxi University, Nanning 530004, China; 2.College of Harbor and Coastal Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China). *China Environmental Science*, 2025,45(3): 1576~1586

**Abstract:** The naturally occurring radionuclides in the sinking particle, surface sediments, and sediment cores near the Weizhou Island in the Beibu Gulf were simultaneously analyzed by high purity germanium  $\gamma$  spectrometer in this study. The sinking particle at the west station of the Weizhou Island was mainly attributed to the strong sediment resuspension that was demonstrated by the combined evidences of  $^{40}\text{K}$ ,  $^{234}\text{Th}_{\text{ex}}$ ,  $^7\text{Be}$ , and  $^{238}\text{U}$ - $^{232}\text{Th}$ ( $^{228}\text{Ra}$ )- $^{40}\text{K}/10$  ternary diagram. Sediment accumulation rates (SAR) of two sediment cores (WZ16 and WZ20) at the west stations of the Weizhou Island were calculated to be  $1.46\times 10^{-3}$  and  $2.25\times 10^{-3}$  cm/d using the constant flux and constant sedimentation rate model of excess  $^{210}\text{Pb}$ . These  $^{210}\text{Pb}$  derived-sediment accumulation rates were only 0.50% and 0.89% of the sediment sinking rates ( $295\times 10^{-3}$  and  $252\times 10^{-3}$  cm/d) derived from sediment trap, quantitatively indicating strong sediment resuspension before the ultimate burial in sediment. Additionally, a high recruitment of coral larvae was observed at the west station with strong sediment resuspension. It was speculated that the strong biogenic sediment resuspension would provide sufficient heterotrophic energy for coral polyps.

**Key words:** coral reefs; radionuclide; source identification; sedimentation accumulation rate; resuspension

珊瑚礁是海洋中重要的生态系统,为许多海洋生物提供了赖以生存的环境.受气候变化和人类活动的影响,全球范围内的珊瑚礁在 2009~2018 年消失了 14%,超过了目前澳大利亚所有的珊瑚礁之和<sup>[1]</sup>.我国南海的珊瑚礁覆盖度也在近 50a 来下降了接近 80%<sup>[2]</sup>,其中位于北部湾海域的涠洲岛珊瑚礁平均活珊瑚覆盖度从 1984 年的 50%退化至 2015 年的 6%<sup>[3]</sup>.

海洋中的悬浮物和泥沙沉降是影响珊瑚生长的重要因素<sup>[4]</sup>.陆地来源的沉降物会携带多种污染物损害珊瑚的健康<sup>[5]</sup>,高浊度的海水会抑制珊瑚共

生虫黄藻的光合作用<sup>[6]</sup>,高沉降通量的沉降物也会造成珊瑚窒息死亡等<sup>[7]</sup>.而部分研究则发现生源沉降物中的有机组分能给珊瑚提供异养营养的能量<sup>[8]</sup>,碳酸盐组分也能为珊瑚虫提供钙化的材料<sup>[9]</sup>.因此,沉降物的物质组成、沉降通量等是造成其对珊瑚生长影响有所差异的关键因素,也是目前珊瑚礁生态保护领域研究的热点话题<sup>[10-14]</sup>.

收稿日期: 2024-08-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42276044);广西自然科学基金资助项目(2024GXNSFAA010449);广西南海珊瑚礁研究重点实验室开放基金联合资助项目(GXLSCRSCS2023003)

\* 责任作者, 教授, linwuhui8@163.com

针对珊瑚礁区沉降颗粒物的研究中,宋金明等<sup>[15]</sup>在 1998 年首次报道利用沉积物捕捉器收集南沙群岛珊瑚礁潟湖中的沉降颗粒物,分析其中主要元素通量,并发现有部分元素可通过再循环进入水体;赵美霞等<sup>[16]</sup>利用沉积物捕捉器收集海南三亚鹿回头珊瑚岸礁区的礁坡沉降物,同时利用高温灼烧、酸碱溶液分离和 X 射线衍射分析矿物等手段对沉降物来源进行分析;Godiva 等<sup>[17]</sup>收集近海珊瑚表面的沉积物并测量其中放射性核素、矿物质和稀土元素含量,利用  $^{232}\text{Th}$ 、 $^{238}\text{U}$  和  $^{40}\text{K}$  的活度分布以及多种地球化学指标聚类分析追溯珊瑚礁区物质的来源。

珊瑚礁区沉积物拥有极低的放射性核素活度水平(等当量镭指数仅为 3.97Bq/kg,不到全球土壤平均值的 5%)和特殊的核素指纹特征(低  $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}$  活度比值),这是由于珊瑚虫生长和钙化形成珊瑚骨骼过程中对不同放射性核素的吸收富集机制不同,珊瑚骨骼破碎形成的珊瑚礁区沉积物保留了珊瑚骨骼中放射性核素的活度特征<sup>[18-21]</sup>。因此,放射性核素是海洋珊瑚礁区很好的示踪剂,同时也可应用于构建地质年代学<sup>[22]</sup>、指示沉积与再悬浮过程<sup>[23]</sup>等研究。目前,珊瑚礁区放射性核素的相关研究仍比较匮乏,且主要为对物质来源进行示踪的定性研究,缺少定量研究。因此,

本研究系统采集北部湾涠洲岛周边海域珊瑚礁区的沉降物(sinking particles)、表层沉积物(surface sediments)以及柱状沉积物(sediment cores),在利用多种核素示踪技术共同验证珊瑚礁区沉降物来源的基础上,将不同时间尺度的沉降物沉降速率与沉积柱沉积速率进行对比,定量沉积与再悬浮过程。同时调查相应站位的珊瑚幼体补充量,分析海洋再悬浮对珊瑚礁的影响,为珊瑚礁资源保护提供借鉴与帮助。

## 1 材料与方法

### 1.1 涠洲岛沉降物和沉积物

于 2021 年 10 月 24 日~11 月 17 日利用沉降物采集装置(图 1)在涠洲岛周围海域采集 8 个站位的海洋沉降物(图 2)。通过水肺潜水作业方式定点放置底部密封的 PVC 管,并保证 PVC 管垂直于调查底面,PVC 管放置 20d 后将顶部密封好带回实验室分析。两个沉积柱样分别于 2016 年和 2020 年在涠洲岛西侧海域采集,采集 8 个站位的表层沉积物样品,所有样品均使用冰箱冷冻保存并带回实验室。进行分析前,先取出样品解冻并剔除贝壳、砂砾等杂物,再使用烘箱以 60℃ 烘至恒重。烘干后的沉降物研磨过筛(100~150 目),取 20g 沉积物粉末装盒密封。

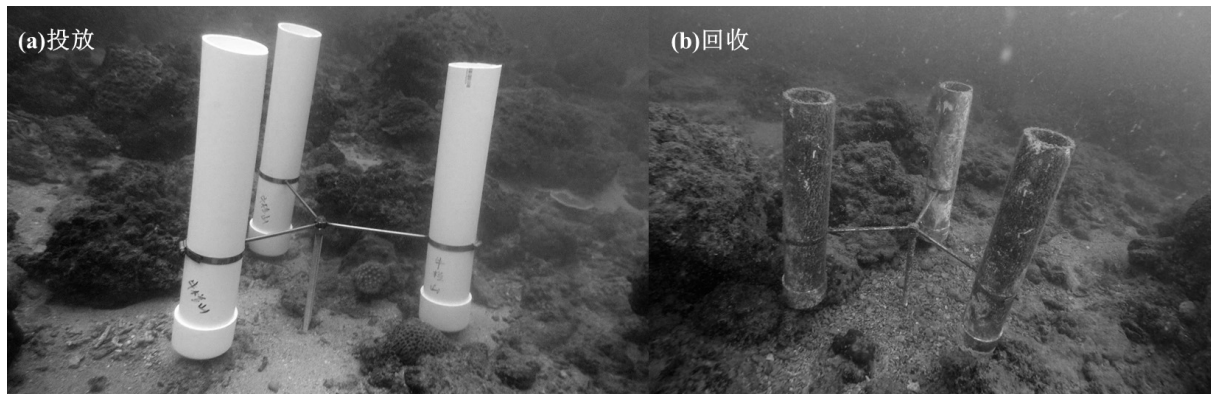


图 1 沉降物采集装置投放和回收

Fig.1 Sampling device of sinking particle at the seafloor

利用 HPGe- $\gamma$  谱仪(Canberra BE6530)对所有样品中的放射性核素活度进行测量。沉积物样品密封后静置 30d,使其中  $^{226}\text{Ra}$  及其子体核素达到平衡状态后再进行测量。 $^{210}\text{Pb}$  的活度选择 46.5keV 的峰面积来计算, $^{228}\text{Ra}$  选择其子体  $^{228}\text{Ac}$ (911.1keV)的  $\gamma$  全能峰进行计算, $^{226}\text{Ra}$  采用其子体  $^{214}\text{Pb}$ (351.9keV)和  $^{214}\text{Bi}$ (609.3keV)能量峰进行分析, $^{40}\text{K}$  选择 1460.8keV

的能量峰计算。放射性核素的活度( $A$ )和不确定度( $\delta A$ )分别由式(1)和式(2)计算。

$$A = \frac{(n_T - n_0)}{\epsilon m} e^{\lambda(t_1 - t_0)} \quad (1)$$

$$\delta A = A \cdot \sqrt{\frac{(n_{-GT} - n_{-G0})}{T(n_T - n_0)^2}} \quad (2)$$

式中: $n_T$ 和 $n_0$ 分别代表核素对应的 $\gamma$ 全能峰的样品净

计数率和仪器本底净计数率; $n_{GT}$ 和 $n_{G0}$ 分别代表样品谱图中核素 $\gamma$ 全能峰的总计数率和本底计数率; $\lambda$ 代表衰变常数; $\varepsilon$ 和 $m$ 分别代表相对探测效率和样品质量;

$t_1$ 和 $t_0$ 分别代表测量时刻和采样时刻; $T$ 代表仪器的测量时间.不确定度主要来源于衰变过程中 $\gamma$ 粒子计数统计涨落,并用1个标准差(1 $\sigma$ )展示.

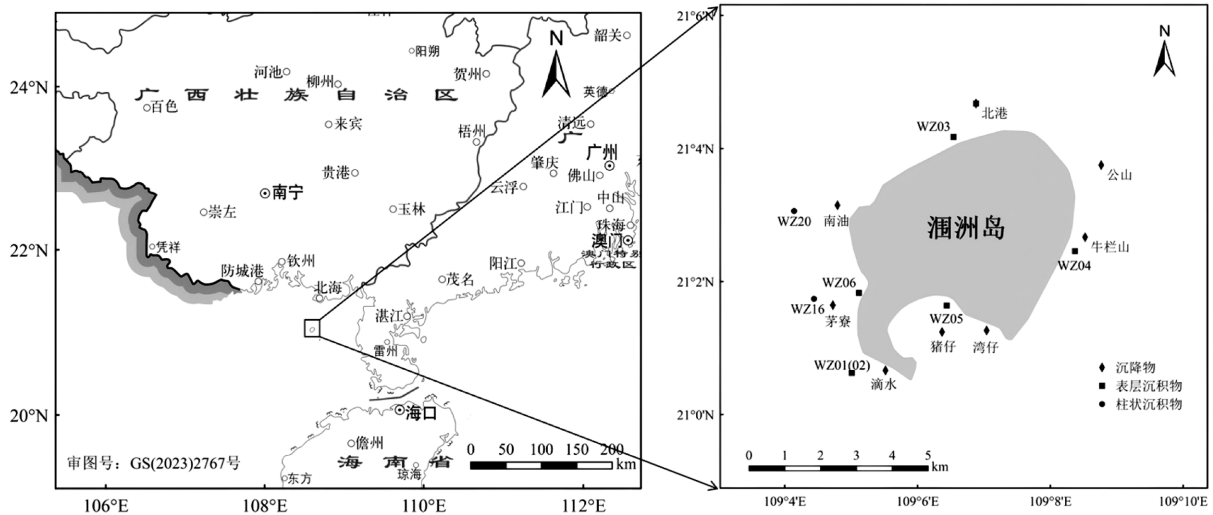


图2 涠洲岛采样站位

Fig.2 Sampling stations around the Weizhou Island

## 1.2 涠洲岛造礁石珊瑚幼体补充量

仪器设备:25cm×25cm 样方框,并以5cm为单位标记.水下数码照相机,水下闪光灯,100m皮尺.

野外照片采集:按照调查站位,平行于岸方向布设调查样带皮尺100m,保证深度一致.潜水员水下数码相机和样方框沿样带两侧寻找造礁石珊瑚幼体(小于5cm)珊瑚群落,并布放样方框进行拍照.每条样带拍摄样方照片50张.

室内判读:将拍摄照片在电脑上进行放大,统计小于5cm珊瑚群落,并依据拍摄样方总个数和面积计算珊瑚幼体补充量,计算公式如下:

$$C_r = \frac{\sum C_s}{S} \quad (3)$$

式中: $S$ 代表样方框的面积, $m^2$ ;  $C_s$ 为样方框内小于5cm的造礁珊瑚个体/群落数量,ind;  $C_r$ 代表造礁珊瑚幼体补充量,ind/ $m^2$ .

## 1.3 数据的处理与表示方式

本研究使用Excel对数据进行整理,放射性核素活度分布特征、三角图解、衰变拟合以及核素关系拟合等图均使用Origin2018进行绘制.采样站位图从标准地图服务系统(<http://bzdt.ch.mnr.gov.cn/>)下载并使用ArcGIS10.2进行绘制,同时使用ArcGIS10.2将各站位沉降物沉降速率及沉积柱沉积速率利用

柱状图表示在地图上,利于相邻地理位置上的对比.

## 2 结果与讨论

### 2.1 基于核素活度和 $^{238}\text{U}$ - $^{232}\text{Th}$ ( $^{228}\text{Ra}$ )- $^{40}\text{K}$ /10三角图解的沉降物来源解析

将涠洲岛沉降物的站位按照地理位置划分为东、西、南、北4个区域,公山、牛栏山位于东侧,湾仔和猪仔位于南侧,茅寮、滴水、南油位于西侧,北港位于北侧.4个区域沉降物中放射性核素的活度如图3所示,总体而言,涠洲岛沉降物中 $^{238}\text{U}$ 、 $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{228}\text{Ra}$ 活度水平较为接近,而西侧沉降物中 $^{40}\text{K}$ 活度水平(81.7~214.8Bq/kg)显著低于东、南、北3侧沉降物(243.6~403.9Bq/kg),推测西侧沉降物主要来源于珊瑚礁区表层沉积物的再悬浮.珊瑚岸礁区的沉降物可分为陆源组分和海洋生源组分,陆源组分包含大量钾长石、伊利石等矿物<sup>[16]</sup>,矿物中含有较高的K元素,也导致陆源沉降物中有较高的 $^{40}\text{K}$ 活度(~400Bq/kg)<sup>[24]</sup>.沉降物中的海洋生源组分主要由珊瑚礁区生源沉积物的再悬浮形成,珊瑚礁系统中造礁生物对海水中不同放射性核素的富集能力不同(例如,对 $^{40}\text{K}$ 的富集能力较低),吸收放射性核素进入珊瑚骨骼后,珊瑚死亡破碎风化形成的沉积物拥有极低的 $^{40}\text{K}$ 活度水平<sup>[25]</sup>,如南海环礁海域沉积物中 $^{40}\text{K}$ 活度仅为4.90Bq/kg<sup>[19]</sup>,涠洲岛珊瑚礁

区属于岸礁,测得其表层沉积物中  $^{40}\text{K}$  活度范围为 9.38~127.42Bq/kg.因此,涠洲岛东、南、北三侧沉降物属于陆源物质的输入,西侧沉降物主要来源于珊瑚礁区表层沉积物的再悬浮.

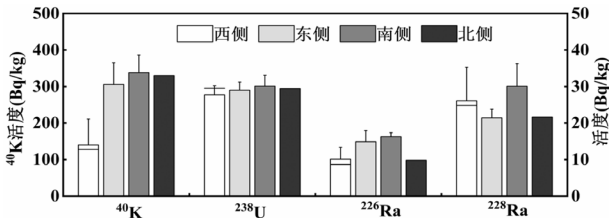


图 3 涠洲岛沉降物中放射性核素活度

Fig.3 Radioactivity in sinking particles of the Weizhou Island

$^{238}\text{U}$ 、 $^{232}\text{Th}$ 、 $^{40}\text{K}$  均属于原生放射性核素,半衰期均超过 1 亿 a,在地壳中含量均较为稳定,其核素活度分布特征可用于指示沉积物的来源<sup>[26]</sup>.当沉积物中核素达平衡状态时,其中的  $^{232}\text{Th}$  活度与其子体  $^{228}\text{Ra}$  活度相等.基于这 3 种放射性核素的特点,本文以  $^{238}\text{U}$ 、 $^{232}\text{Th} (^{228}\text{Ra})$ 活度和  $^{40}\text{K}/10$  为 3 个端元,建立  $^{238}\text{U}-^{232}\text{Th} (^{228}\text{Ra})-^{40}\text{K}/10$  三角图解,可对沉积物的来源进行解析<sup>[27]</sup>.本研究进一步将  $^{238}\text{U}-^{232}\text{Th} (^{228}\text{Ra})-^{40}\text{K}/10$  三角图解应用于对涠洲岛沉降物及表层沉积物的来源解析,结果如图 4 所示.

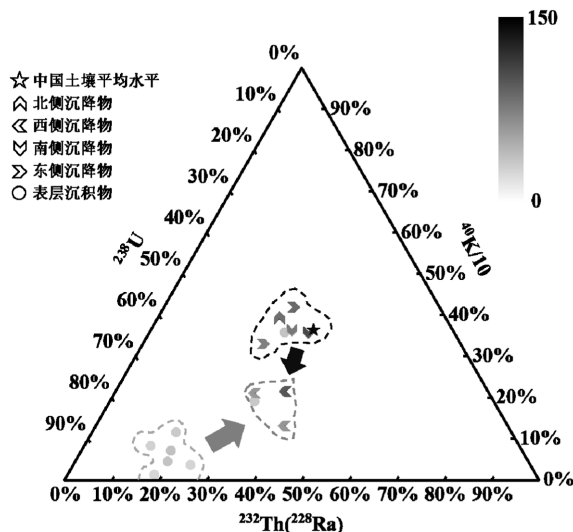


图 4 涠洲岛沉降物、表层沉积物和中国土壤的  $^{238}\text{U}-^{232}\text{Th} (^{228}\text{Ra})-^{40}\text{K}/10$  三角图解

Fig.4 Ternary diagram of  $^{238}\text{U}-^{232}\text{Th} (^{228}\text{Ra})-^{40}\text{K}/10$  for the sinking particles and surface sediments from Weizhou Island and Chinese soil

在  $^{238}\text{U}-^{232}\text{Th} (^{228}\text{Ra})-^{40}\text{K}/10$  三角图解中,珊瑚礁区沉积物具有显著区别于非珊瑚礁区沉积物的特征,总体表现为高  $^{238}\text{U}$ 、低  $^{232}\text{Th} (^{228}\text{Ra})$  和低  $^{40}\text{K}/10$ .涠洲岛表层沉积物为珊瑚礁区沉积物,因此主要集中于三角图中的左下角蓝色虚线区域.涠洲岛沉降物的来源相对复杂,主要分为陆源物质的输入和珊瑚礁区表层沉积物的再悬浮.陆源物质中放射性核素的活度特征有别于珊瑚礁生源物质,总体表现为较低  $^{238}\text{U}$ 、较高  $^{232}\text{Th} (^{228}\text{Ra})$  和较高  $^{40}\text{K}/10$  (位于三角图的中间区域)<sup>[27]</sup>.涠洲岛沉降物(除西侧)中较多的陆源物质使其在三角图中位于中间区域,与中国土壤在  $^{238}\text{U}-^{232}\text{Th} (^{228}\text{Ra})-^{40}\text{K}/10$  三角图解的分布位置相近,而西侧沉降物在三角图中的位置介于珊瑚礁区沉积物和陆源沉降物之间,这是由于西侧沉降物中的珊瑚礁表层沉积物再悬浮组分较高,使得其在三角图的位置偏向于左下角绿色虚线区域.

2.2 强颗粒活性核素  $^{234}\text{Th}$  和  $^7\text{Be}$  指示再悬浮过程

$^{234}\text{Th}$  为  $^{238}\text{U}$  衰变产生的子体核素,半衰期为 24.1d,且具有较强的颗粒活性,会在海洋沉降物悬浮和沉降的过程中从海水吸附到沉降物,造成沉降物中  $^{234}\text{Th}$  活度相对于  $^{238}\text{U}$  过剩的现象<sup>[22,28-29]</sup>. $^7\text{Be}$  是一种宇生放射性核素,半衰期为 53.3d,具有较强的颗粒活性,会吸附在空气中的颗粒物上并随着颗粒物的沉降进入到海水且进一步沉降进入海洋沉积物中<sup>[30]</sup>.短半衰期且强颗粒活性的  $^{234}\text{Th}$  和  $^7\text{Be}$  可以指示短期时间尺度内的再悬浮过程.

本研究根据两种放射性核素的半衰期设计时间梯度进行同一样品多次测量,第一次测量时间为距离样品回收时刻 21~55d,第二次测量时间为距离样品回收时刻 127~149d,第三次测量时间为距离样品回收时刻 210~230d. $^{234}\text{Th}$  的活度选择 63.3keV 的峰面积来计算,并利用式(4)拟合  $^{234}\text{Th}$  的指数衰变曲线来校正样品回收时刻沉降物中过剩  $^{234}\text{Th} (^{234}\text{Th}_{\text{ex0}})$  的活度以及  $^{238}\text{U}$  的活度,部分拟合曲线如图 5 所示. $^7\text{Be}$  的活度选择 477.61keV 的峰面积来计算,并利用式(5)校正至样品回收时刻的活度 ( $^7\text{Be}_0$ ), $^{234}\text{Th}_{\text{ex0}}$  和  $^7\text{Be}_0$  的拟合校正结果如表 1 所示.

$$A_{-234\text{Th}} = A_{-234\text{Th}_{\text{ex0}}} \cdot e^{-\lambda_1 t} + A_{-234\text{Th}_{\text{sup}}} \quad (4)$$

$$A_{-7\text{Be}} = A_{-7\text{Be}_0} \cdot e^{-\lambda_2 t} \quad (5)$$

式中:  $A_{-234\text{Th}}$ 、 $A_{-7\text{Be}}$  代表不同测量时刻获得的  $^{234}\text{Th}$ 、

$^7\text{Be}$  活度,  $\text{Bq/kg}$ ;  $A_{-234\text{Th}_{\text{ex}0}}$ 、 $A_{-7\text{Be}0}$  代表样品回收时刻的过剩  $^{234}\text{Th}$  和  $^7\text{Be}$  活度;  $A_{-234\text{Th}_{\text{sup}}}$  代表由  $^{238}\text{U}$  持续

衰变支持的  $^{234}\text{Th}$  活度, 即等于  $^{238}\text{U}$  活度;  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  分别为  $^{234}\text{Th}$ 、 $^7\text{Be}$  的衰变常数;  $t$  为样品测量的时间,  $\text{d}$ .

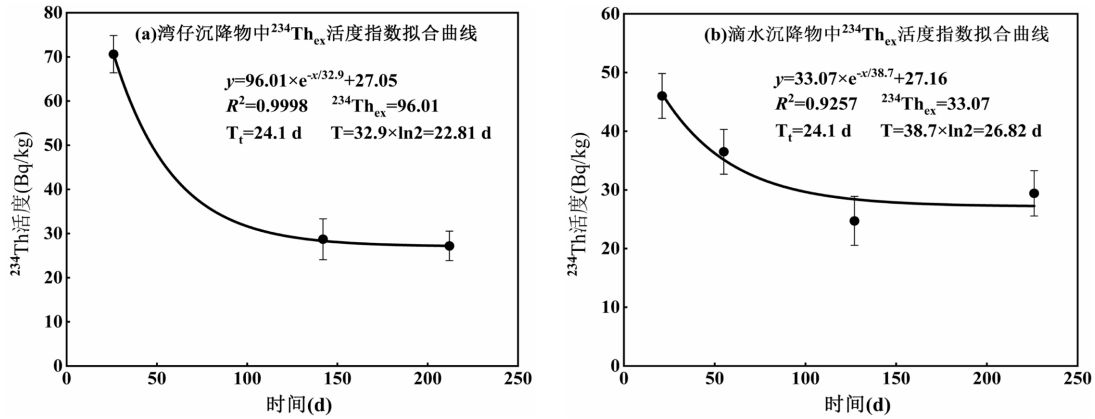


图 5 涠洲岛沉降物中  $^{234}\text{Th}_{\text{ex}}$  拟合曲线

Fig.5 The decaying curve of  $^{234}\text{Th}_{\text{ex}}$  in sinking particles of the Weizhou Island

表 1 涠洲岛沉降物中  $^{234}\text{Th}_{\text{ex}0}$  和  $^7\text{Be}_0$  拟合校正结果

Table 1 The decay correction results of  $^{234}\text{Th}_{\text{ex}}$  and  $^7\text{Be}_0$  in sinking particles of the Weizhou Island

沉降物		$^{234}\text{Th}_{\text{ex}0}$	$^{238}\text{U}$	$^{234}\text{Th}$	$^7\text{Be}_0$	沉降物	$^{234}\text{Th}_{\text{ex}0}$	$^{238}\text{U}$	$^{234}\text{Th}$	$^7\text{Be}_0$	
南侧	猪仔	131.45	33.09	164.54	24.73	北侧	北港	42.07	23.42	65.49	9.37
	湾仔	96.01	27.05	123.06	17.98		滴水	33.07	27.16	60.23	1.12
东侧	公山	109.95	28.20	138.15	11.66	西侧	南油	42.07	23.42	65.49	9.30
	牛栏山	73.54	31.21	104.75	12.15		茅寮	37.40	30.18	67.58	1.30

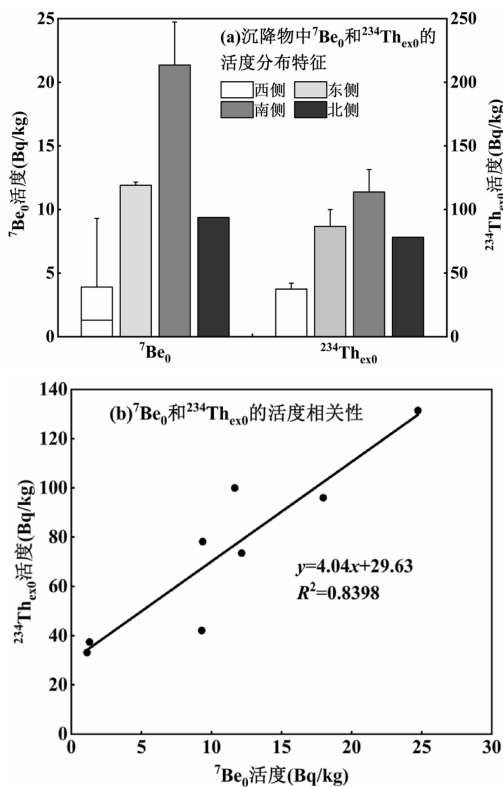


图 6 涠洲岛沉降物中  $^7\text{Be}_0$  和  $^{234}\text{Th}_{\text{ex}0}$  的分布特征及其相关性  
Fig.6 Distribution characteristics and linear correlation of  $^7\text{Be}_0$  and  $^{234}\text{Th}_{\text{ex}0}$  in sinking particles of the Weizhou Island

从图 6(a)中可以发现,拟合校正的结果中,涠洲岛西侧沉降物中的  $^7\text{Be}_0$  与  $^{234}\text{Th}_{\text{ex}0}$  的活度均小于其他站点,且如图 6(b)所示,两种颗粒性核素之间具有较强的正相关关系,说明能联合示踪颗粒物的沉降过程.本研究对所有表层沉积物中放射性核素的测量结果中,  $^7\text{Be}$  的活度均低于检测限,  $^{234}\text{Th}$  与  $^{238}\text{U}$  活度基本平衡,说明表层沉积物中的  $^7\text{Be}$  和  $^{234}\text{Th}_{\text{ex}}$  几乎衰变殆尽.陆源颗粒物的沉降可以吸附清除海水中具有颗粒活性的  $^7\text{Be}$  和  $^{234}\text{Th}_{\text{ex}}$ , 获得高活度的  $^7\text{Be}_0$  与  $^{234}\text{Th}_{\text{ex}0}$  (东、南、北 3 侧沉降物中  $^7\text{Be}_0$  的活度范围为 9.37~ 24.73  $\text{Bq/kg}$ ,  $^{234}\text{Th}_{\text{ex}0}$  的活度范围为 78.78~ 131.43  $\text{Bq/kg}$ ).而西侧表层沉积物的再悬浮稀释了陆源颗粒物中的高活度  $^7\text{Be}$  与  $^{234}\text{Th}_{\text{ex}}$ , 导致沉降物中  $^7\text{Be}_0$  与  $^{234}\text{Th}_{\text{ex}0}$  显著下降(西侧沉降物中  $^7\text{Be}_0$  的活度范围为 0.76~10.59  $\text{Bq/kg}$ ,  $^{234}\text{Th}_{\text{ex}0}$  的活度范围为 33.07~ 42.07  $\text{Bq/kg}$ ), 同时也增加了总沉降物的通量.因此,涠洲岛西侧沉降物的通量较高以及  $^7\text{Be}$  与  $^{234}\text{Th}_{\text{ex}}$  活度较低均是因为表层沉积物的强烈再悬浮.

### 2.3 基于 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的沉积速率

$^{210}\text{Pb}$  是天然放射性同位素,半衰期为 22.3a.海洋沉积物中的  $^{210}\text{Pb}$  来源包括  $^{226}\text{Ra}$  衰变所支持的  $^{210}\text{Pb}$ ( $^{210}\text{Pb}_{\text{sup}}$ )和颗粒物、沉降物在进入沉积物之前所吸附的过剩  $^{210}\text{Pb}$ ( $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ ).在理想的沉积环境中, $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  随着沉积物的向下沉积不断衰变,沉积物年龄越老,其中的  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  活度越低.因此, $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  是研究百年尺度上海洋沉积过程良好的测年工具<sup>[31]</sup>,同时也可应用于计算海洋沉积速率<sup>[32-34]</sup>.

目前,海洋沉积物中  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  测年和计算沉积速率中常用恒定补给速率(CRS)、恒定初始浓度(CIC)以及恒定通量恒定沉积速率(CFCS)3 种模式.CRS 模式的前提是输入的沉积物  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  通量是恒定的,但沉积速率随时间改变<sup>[35]</sup>.据通量可获得柱状样每一层的年龄,可用下式表示<sup>[23]</sup>:

$$I_{-1} = A_{-1} \cdot D_{-1} \times \rho_{-1} \cdot 10 \quad (6)$$

$$I_{-i} = \frac{1}{2} \cdot (A_{-i} + A_{-i-1}) \times (D_{-i} - D_{-i-1}) \cdot \rho_{-i} \cdot 10 \quad (7)$$

$$I_{-x} = \sum_{i=1}^x I_{-i} \quad (8)$$

$$t = -\frac{1}{\lambda} \cdot \ln \left( 1 - \frac{I_{-x}}{I_{-\infty}} \right) \quad (9)$$

式中: $I_{-i}$ 为第  $i$  层蓄积量, $\text{Bq}/\text{m}^2$ , $A_{-i}$ 为  $i$  层  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  的活度, $\text{Bq}/\text{kg}$ ; $\rho$  为沉积物干密度, $1.7\text{g}/\text{cm}^3$ ; $D$  为深度, $\text{cm}$ ; $I_{-x}$ 为  $x$  深度以上  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  的总蓄积量, $\text{Bq}/\text{m}^2$ ; $I_{-\infty}$ 为整个沉积柱状样中  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  的总蓄积量, $\text{Bq}/\text{m}^2$ ; $\lambda$  为  $^{210}\text{Pb}$  的衰变常数, $\text{a}^{-1}$ ; $t$  为每一层的沉积时间, $\text{a}$ .由此可计算对应层段的沉积速  $S(\text{cm}/\text{a})$ :

$$S = \frac{D_{-i} - D_{-i-1}}{t_{-i} - t_{-i-1}} \quad (10)$$

CIC 模式假设输入的沉积物中初始  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  活度恒定, $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  的沉积通量与沉积速率成正比<sup>[36]</sup>,则每层沉积物中  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  的活度均为时间的指数函数<sup>[31-33]</sup>:

$$A_{-i} = A_{-0} \cdot e^{-\lambda t} \quad (11)$$

$$\ln A_{-i} = \ln A_{-0} - \frac{\lambda \cdot D}{S} \quad (12)$$

沉积速率为:

$$S = -\frac{\lambda \cdot D}{\ln A_{-i} - \ln A_{-0}} = \frac{\lambda}{-\frac{\ln A_{-i} - \ln A_{-0}}{D_{-i} - D_{-0}}} \quad (13)$$

CFCS 模式假设  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  的沉积通量与沉积物的沉积速率保持恒定,则式(13)中的  $\frac{\ln A_{-i} - \ln A_{-0}}{D_{-i} - D_{-0}}$  可由  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  活度取对数值( $\ln(^{210}\text{Pb}_{\text{ex}})$ )并与深度进行线性拟合(图 7(c)、(d))的斜率求出,沉积速率和不确定度

可由线性拟合直线的斜率和不确定度求出<sup>[32]</sup>,相关计算公式如下:

$$S = -\frac{\lambda}{k} \quad (14)$$

$$\delta S = S \cdot \frac{\delta k}{|k|} \quad (15)$$

式中: $k$  为  $\ln(^{210}\text{Pb}_{\text{ex}})$ 和深度之间线性拟合直线的斜率; $\delta S$  为沉积速率的不确定度.

因此,求得 WZ16 柱样的沉积速率和不确定度:

$$S_{-16} = -\frac{\lambda}{k} = \frac{0.693}{22.3 \times 0.0584} = 0.53 \text{ cm/a} = 1.46 \times 10^{-3} \text{ cm/d}$$

$$\delta S_{-16} = S_{-16} \cdot \frac{\delta k}{|k|} = 0.53 \times \frac{0.0092}{0.0584} = 0.08 \text{ cm/a} = 0.22 \times 10^{-3} \text{ cm/d}$$

通过观察发现 WZ20 沉积过程存在“双层”结构,即柱样 0~12cm 部分  $\ln(^{210}\text{Pb}_{\text{ex}})$ 值随深度增加而下降的趋势较平缓,而 13~18cm 部分  $\ln(^{210}\text{Pb}_{\text{ex}})$ 值随深度增加而下降的趋势较陡峭(图 7(d)),因此将该沉积柱样的沉积速率分“双层”来计算:

$$S_{-20(0\sim 12\text{cm})} = -\frac{\lambda}{k} = \frac{0.693}{22.3 \times 0.0375} = 0.82 \text{ cm/a} = 2.25 \times 10^{-3} \text{ cm/d}$$

$$S_{-20(13\sim 18\text{cm})} = -\frac{\lambda}{k} = \frac{0.693}{22.3 \times 25.29} = 0.12 \text{ cm/a} = 0.33 \times 10^{-3} \text{ cm/d}$$

$$\delta S_{-20(0\sim 12\text{cm})} = S_{-20} \cdot \frac{\delta k}{|k|} = 0.82 \times \frac{0.0172}{0.0379} = 0.37 \text{ cm/a} = 1.02 \times 10^{-3} \text{ cm/d}$$

$$\delta S_{-20(13\sim 18\text{cm})} = S_{-20} \cdot \frac{\delta k}{|k|} = 0.12 \times \frac{0.1299}{0.2529} = 0.06 \text{ cm/a} = 0.17 \times 10^{-3} \text{ cm/d}$$

WZ16 柱样的沉积速率为  $(0.53 \pm 0.08) \text{ cm/a}$ , WZ20 柱样 0~12cm 上层部分沉积速率为  $(0.82 \pm 0.37) \text{ cm/a}$ , 13~18cm 下层部分沉积速率为  $(0.12 \pm 0.06) \text{ cm/a}$ , 该结果与许冬等<sup>[37]</sup>在北部湾采集的沉积柱样沉积速率范围为  $0.10 \sim 0.59 \text{ cm/a}$  结果相似,但低于庞国涛等<sup>[38]</sup>在防城港海域的结果  $(0.61 \sim 1.18 \text{ cm/a})$ . WZ20 柱样 0~12cm 上层部分沉积速率约为 2005~2020 年间,这期间涠洲岛人类活动剧增,例如 2004~2014 年,上岛游客由 9 万人/a 增至 59.3 万人/a,增长率为  $5.03 \text{ 万人/a}$ <sup>[39]</sup>;涠洲岛以西海域油田群是我国南海最大油田群,2004 年得益于勘探开发一体化,多处油田获得“重

生”<sup>[40]</sup>,并且在 2018 年取得产油 5000 万 m<sup>3</sup> 的历史性突破<sup>[41]</sup>,而 WZ20 柱样位于涠洲油田群和涠洲终端之间,且靠近北海至涠洲西角码头的航线,因此推测

在 WZ20 的 12cm 处(对应时间为 2005 年左右)沉积速率显著增高的原因是受到涠洲岛人为活动(客运船和油气运输)的影响。

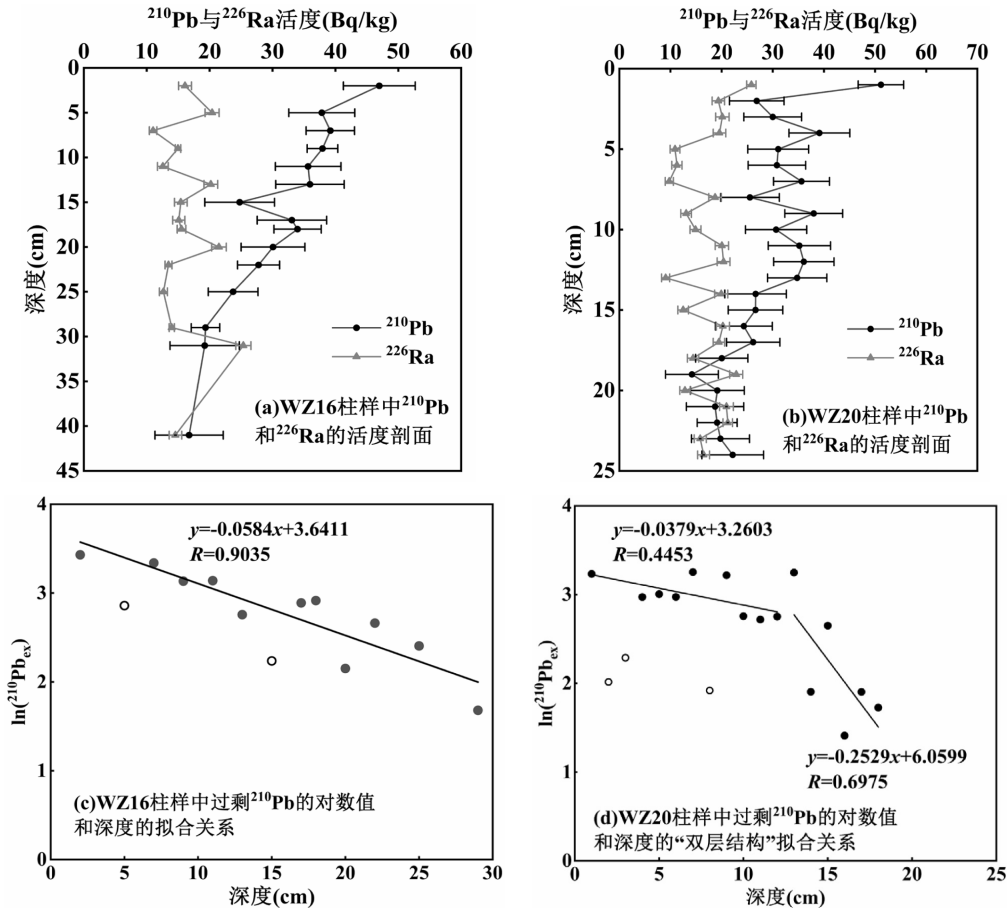


图 7 WZ16、WZ20 柱样中 <sup>210</sup>Pb 与 <sup>226</sup>Ra 的活度剖面图以及过剩 <sup>210</sup>Pb 的对数值和深度的线性拟合关系

Fig.7 Vertical profiles of <sup>210</sup>Pb and <sup>226</sup>Ra activities in WZ16 and WZ20 sediment cores and linear fitting relationships of excess <sup>210</sup>Pb

#### 2.4 基于沉降物捕集装置获得的沉降速率

涠洲岛各调查站位沉降物沉降通量如表 2 所示,其中西侧沉降物沉降通量显著高于其他站位,为 113.12~501.23mg/(cm<sup>2</sup>·d),除西侧外,其他站位平均沉降通量为 20.05mg/(cm<sup>2</sup>·d)。总体而言,涠洲岛沉降物沉降通量存在西侧>东侧>北侧>南侧的规律。

国家海洋科学数据中心的海洋数据显示,在 2021 年 10 月,涠洲岛周围的海流方向为南偏东 51.79°,总体海流速度为 0.02m/s;11 月的海流方向为南偏东 64.76°,在西南海域海流速度为 0.02m/s,其余海域海流速度较小,为 0.01m/s。即采样期间涠洲岛周围海域海流总体为自西北向东南方向,且西侧海域海流流速较大<sup>[42]</sup>。西侧站位附近的海流在流经采样

点后流向陆地,接触到海岸线后迂回,与原方向的海流产生混合,引起该处海域表层沉积物的再悬浮。同时,较快海流产生的波浪也能引起海洋表层沉积物的再悬浮<sup>[4]</sup>。因此,西侧站位沉降物沉降通量较高。猪仔和湾仔站位位于涠洲岛南湾,三面环陆地,仅东南方向有出海口,海流速度慢,因此南侧站位沉降物沉降通量较低。

#### 2.5 沉降与沉积过程联合定量再悬浮过程

本研究利用沉降物捕集装置获取了涠洲岛海域在 2021 年 10 月 24 日~11 月 17 日期间近一个月的沉降通量,为了解该海域的沉降与再悬浮情况,本研究根据式(16)将沉降通量转换为日际尺度下的沉降速率,同时利用放射性核素定年和计算沉积速率

方法,通过涠洲岛沉积柱中的  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  活度计算年际尺度下的实际沉积情况,并将两个时间尺度下的沉降与沉积情况进行对比(WZ20 选取 0~12cm 上层部分的沉积速率),结果如表 2 和图 8 所示。

$$S_{\text{-sink}} = \frac{F}{\rho} \cdot \frac{1}{1000} \quad (16)$$

式中: $S_{\text{-sink}}$  代表沉降速率,cm/d; $F$  代表沉降通量, mg/( $\text{cm}^2 \cdot \text{d}$ ); $\rho$  为沉降物的干密度, $1.7\text{g}/\text{cm}^3$ 。

表 2 涠洲岛沉降物沉降速率( $S_{\text{-sink}}$ )和沉积柱沉积速率( $S$ )

Table 2 Sinking rate( $S_{\text{-sink}}$ ) of sinking particles and sedimentation accumulation rate ( $S$ ) of sediment cores near the Weizhou Island

沉降物	站点	$F[\text{mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})]$	$S_{\text{-sink}}(10^{-3}\text{cm}/\text{d})$	沉降物	站点	$F[\text{mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})]$	$S_{\text{-sink}}(10^{-3}\text{cm}/\text{d})$
南侧沉降物	猪仔	9.27	5.46	西侧沉降物	滴水	113.12	66.54
	湾仔	15.09	8.88		南油	428.85	252.27
东侧沉降物	公山	19.59	11.52	茅寮	501.23	294.84	
	牛栏山	33.58	19.76	柱状沉积物	WZ16	0~25	$1.46 \pm 0.22$
北侧沉降物	北港	22.73	13.37		WZ20	0~12	$2.25 \pm 1.02$

注: $F$ 表示通量, $D$ 表示沉积柱垂直深度。

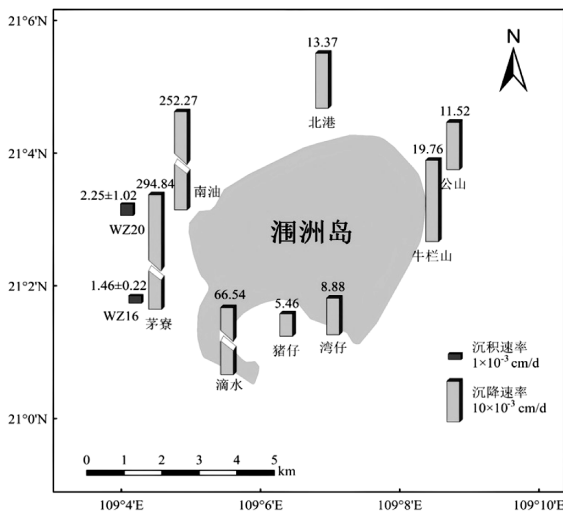


图 8 涠洲岛沉降物沉降速率与沉积柱沉积速率对比  
Fig.8 Sinking rate of sinking particles and sedimentation accumulation rates of sediment cores near the Weizhou Island

基于  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  法计算的沉积速率反映了涠洲岛百年尺度上,物质通过多次沉降—再悬浮—再沉降的净沉积结果,而利用沉降物捕获装置获得的沉降速率则表示该区域月际尺度内沉降的结果.通过对邻近站位的沉积柱和沉降物(WZ16 和茅寮、WZ20 和南油),本研究发现,利用  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  法计算的 WZ16、WZ20 沉积柱沉积速率仅为利用沉降物捕获装置获取的茅寮、南油沉降物沉降速率的 0.50% 和 0.89%,表明西侧 99% 以上的沉降物会经历再悬浮过程,才能最终埋藏进入沉积柱样,定量反映了涠洲岛近岸海域强烈的再悬浮过程.再悬浮过程定量研究对于有机碳再矿化和埋藏,以

及其他物质的降解和埋藏都有重要意义。

### 2.6 海洋再悬浮过程促进珊瑚生长

造礁石珊瑚幼体补充量是评价珊瑚生长情况的重要指标<sup>[43]</sup>.如图 9(a)所示,本研究调查发现涠洲岛西侧(南油、茅寮、滴水)珊瑚礁区的珊瑚幼体补充量( $5\sim 8\text{inds}/\text{m}^2$ )显著大于东侧(公山、牛栏山)珊瑚幼体补充量( $2\text{inds}/\text{m}^2$ ),且西侧沉降物的沉降速率( $66.5\sim 294.8 \times 10^{-3}\text{cm}/\text{d}$ )也显著大于东侧( $11.5\sim 19.8 \times 10^{-3}\text{cm}/\text{d}$ ).

涠洲岛西侧珊瑚礁区在沉降物沉降速率较大的情况下仍有较高的珊瑚幼体补充量(图 9(a)),为更深入了解涠洲岛珊瑚的生长发育情况,本研究进一步收集了前人工作中涠洲岛西侧和东侧历年活珊瑚覆盖度情况<sup>[3, 43-45]</sup>(图 9(b)),结果表明 2015~2019 年间涠洲岛西侧的活珊瑚覆盖率呈上升趋势,对应着西侧较高的珊瑚幼体补充量;涠洲岛东侧活珊瑚覆盖率呈下降趋势,对应着东侧较低的珊瑚幼体补充量。

造礁石珊瑚的营养来源包括通过共生虫黄藻进行光合自养和通过触手、粘液等结构捕获食物进行异养营养<sup>[8]</sup>,且珊瑚食性非常广泛,能够捕获包括颗粒有机质、溶解有机质和浮游生物等多种物质进行异养营养<sup>[46]</sup>.再悬浮的生源沉积物除了拥有较高的有机组分含量,可为珊瑚提供异养能量,还可能含有较多自由生活的藻类,可与珊瑚虫形成稳定共生体.同时,再悬浮过程可能会使原本处于沉积物内部的珊瑚幼虫悬浮并沉降到礁石上,增加了珊瑚幼虫附着的几率,从而得到了更好的发育<sup>[47]</sup>。

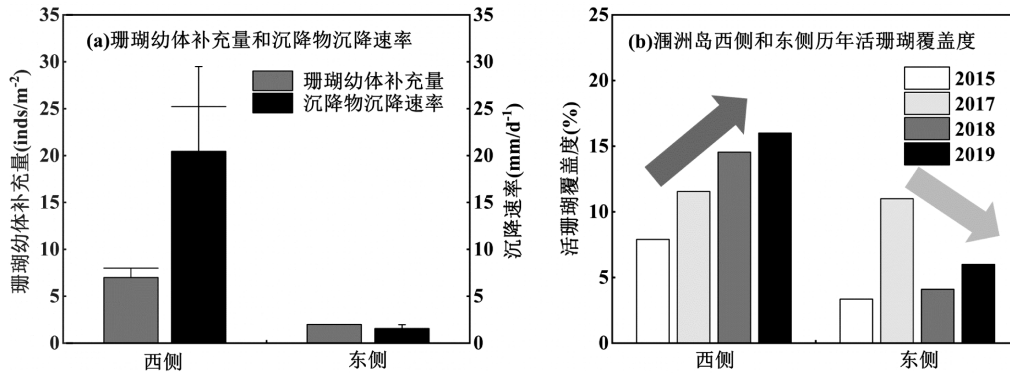


图9 涠洲岛珊瑚幼体补充量和沉降物沉降速率、西侧和东侧历年活珊瑚覆盖度

Fig.9 Coral larva recruitment and sinking rate of the sinking particles and annual lived coral cover of the west and east sea areas near the Weizhou Island

近年来,涠洲岛珊瑚礁海域水质大部分符合国家第一类海水水质标准,满足珊瑚礁的正常生长要求<sup>[48]</sup>,且随着各项珊瑚礁生态修复方案的实施<sup>[49-51]</sup>和保护条例的出台<sup>[52]</sup>,涠洲岛平均活珊瑚覆盖度恢复良好(从2015年的6.02%恢复至2018年的7.95%)<sup>[3]</sup>。在此基础上,西侧活珊瑚覆盖度上升趋势最好(从2015年的7.9%至2019年的16.0%)<sup>[3, 43-45]</sup>,可能是该区域水动力较强,引起表层沉积物的再悬浮,促进了珊瑚生长。

因此,涠洲岛西侧珊瑚礁区沉积物的再悬浮不仅稀释了陆源颗粒物对珊瑚造成的伤害,同时给珊瑚提供了异养能量,有效促进了珊瑚的生长。而放射性核素可对海洋物质来源以及表层沉积物再悬浮过程进行示踪,在一定程度上也可作为监测珊瑚礁区污染物来源的工具,为珊瑚礁生态保护提供科学借鉴。

### 3 结论

3.1 在放射性核素 $^{238}\text{U}$ - $^{232}\text{Th}$ ( $^{228}\text{Ra}$ )- $^{40}\text{K}/10$ 三角图解中,涠洲岛西侧沉降物介于珊瑚礁区表层沉积物和陆源沉降物之间,同时西侧沉降物拥有较低的 $^{40}\text{K}$ 、颗粒性核素 $^{234}\text{Th}_{\text{ex}}$ 和 $^7\text{Be}$ 活度,多核素示踪手段均验证了西侧沉降物主要来源于珊瑚礁表层沉积物的再悬浮。

3.2 利用沉降物捕集装置获取的沉降速率范围为 $5.46\sim 294.84\times 10^{-3}\text{cm/d}$ ,其中西侧沉降物平均沉降速率为 $204.55\text{cm/d}$ ,其他站位平均为 $11.80\text{cm/d}$ 。基于 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的CFCS模式计算的涠洲岛沉积柱(WZ16、WZ20)沉积速率为 $1.46\times 10^{-3}$ 和 $2.25\times 10^{-3}\text{cm/d}$ ,约为

相邻站位(茅寮、南油)沉降速率的0.50%和0.89%,表明西侧99%以上的沉降物会经历再悬浮过程,最终才能埋藏进入沉积柱样。

3.3 近年来随着涠洲岛珊瑚礁保护力度的增强,涠洲岛平均珊瑚礁覆盖度已从2015年开始恢复,而西侧的珊瑚礁在高浊度的环境中生长发育情况仍相对较好,可能是生源沉积物再悬浮为珊瑚提供了异养营养等利于生长的条件。

### 参考文献:

- [1] Souter D, Planes S, Wicquart J, et al. Status of coral reefs of the world: 2020 report [R]. 2021.
- [2] 余克服.南海珊瑚礁及其对全新世环境变化的记录与响应 [J]. 中国科学:地球科学, 2012,42(8):1160-1172.  
Yu K F. Coral reefs in the South China Sea: Their response to and records on past environmental changes [J]. Sci China Earth Sci, 2012, 55:1217-1229.
- [3] 王文欢.近30年来北部湾涠洲岛造礁石珊瑚群落演变及影响因素 [D]. 南宁:广西大学, 2018.  
Wang W H. Evolution and influential factors of coral community over past three decades in Weizhou island reef, Beibu gulf [D]. Nanning:Guangxi University, 2018.
- [4] Bothner M H, Reynolds R L, Casso M A, et al. Quantity, composition, and source of sediment collected in sediment traps along the fringing coral reef off Molokai, Hawaii [J]. Marine Pollution Bulletin, 2006, 52(9):1034-1047.
- [5] 胡敏修.雷州半岛造礁珊瑚保护区悬浮物与重金属污染分析及风险评估 [D]. 湛江:广东海洋大学, 2020.  
Hu M X. Analysis and risk assessment of suspended matter and heavy metal pollution in Leizhou peninsula reef-building coral reserve [D]. Zhanjiang:Guangdong Ocean University, 2020.
- [6] Fabricius K E. Effects of terrestrial runoff on the ecology of corals and coral reefs: review and synthesis [J]. Marine Pollution Bulletin, 2005, 50(2):125-146.
- [7] Jones R, Bessell-Browne P, Fisher R, et al. Assessing the impacts of

- sediments from dredging on corals [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2016,102(1):9–29.
- [8] 罗 勇,俞晓磊,黄 晖.悬浮物对造礁石珊瑚营养方式的影响及其适应性研究进展 [J]. *生态学报*, 2021,41(21):8331–8340.  
Luo Y, Yu X L, Huang H. Effect of suspended sediment on the nutritional mode of scleractinian corals and their adaptability: state of knowledge and research [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021,41(21): 8331–8340.
- [9] Shaghude Y, Wannas K O, Mahongo S B. Biogenic assemblage and hydrodynamic settings of the tidally dominated reef platform sediments of the Zanzibar channel [J]. *Western Indian Ocean journal of marine science*, 2002,1:107–116.
- [10] Tuttle L J, Donahue M J. Effects of sediment exposure on corals: A systematic review of experimental studies [J]. *Environmental Evidence*, 2022,11(1):1–33.
- [11] Tuttle L J, Johnson C, Kolinski S, et al. How does sediment exposure affect corals? A systematic review protocol [J]. *Environmental Evidence*, 2020,9(1):1–7.
- [12] Moeller M, Nietzer S, Schils T, et al. Low sediment loads affect survival of coral recruits: The first weeks are crucial [J]. *Coral Reefs*, 2016,36(1):39–49.
- [13] Bessell-Browne P, Negri A P, Fisher R, et al. Impacts of turbidity on corals: The relative importance of light limitation and suspended sediments [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017,117(1/2):161–170.
- [14] Perez K, Rodgers K S, Jokiel P L, et al. Effects of terrigenous sediment on settlement and survival of the reef coral *Pocillopora damicornis* [J]. *PeerJ*, 2014,2:1–11.
- [15] 宋金明,李鹏程.南沙群岛珊瑚礁潟湖垂直沉降颗粒物中主要元素的生物地球化学过程研究 [J]. *海洋学报*, 1998,(4):52–59.  
Song J M, Li P C. Biogeochemical process of major elements in sinking particulate of Nansha coral reef lagoons, the South China Sea [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1998,(4):52–59.
- [16] 赵美霞,余克服,施 祺,等.三亚鹿回头珊瑚礁区沉降物的来源、分布及影响因素 [J]. *科学通报*, 2013,58(17):1583–1589.  
Zhao M X, Yu K F, Shi Q, et al. Source, distribution and influencing factors of sediments on Luhuitou fringing reef, Northern South China Sea [J]. *Chin Sci Bull (Chin Ver)*, 2013,58:1583–1589.
- [17] Godiva D, Evangelista H, Kampel M, et al. Combined use of aerogamma spectrometry and geochemistry to access sediment sources in a shallow coral site at Armação dos Búzios, Brazil [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2010,87(4):526–534.
- [18] 林武辉,余克服,邓芳芳,等.南海现代珊瑚骨骼中放射性核素特征指纹 [J]. *中国环境科学*, 2019,39(10):4279–4289.  
Lin W H, Yu K F, Deng F F, et al. Fingerprints of radionuclides in modern coral skeletons in the South China Sea [J]. *China Environmental Science*, 2019,39(10):4279–4289.
- [19] 林武辉,余克服,王英辉,等.珊瑚礁区沉积物的极低放射性水平特征与成因 [J]. *科学通报*, 2018,63(21):2173–2183.  
Lin W H, Yu K F, Wang Y H, et al. Extremely low radioactivity in marine sediment of coral reefs and its mechanism [J]. *Chin. Sci. Bull.*, 2018,63:2173–2183.
- [20] 林武辉,余克服,王英辉,等.罕见的地表低辐射水平区域:珊瑚礁区 [J]. *辐射防护*, 2018,38(4):287–292.  
Lin W H, Yu K F, Wang Y H, et al. Unusual low radiation area on the surface of the earth: coral reefs [J]. *Radiation Protection*, 2018,38(4): 287–292.
- [21] 林武辉,陈肖霞,余克服,等.南海岛礁工程中建筑材料的天然放射性核素含量及辐射水平评价 [J]. *辐射防护*, 2020,40(1):23–30.  
Lin W H, Chen X X, Yu K F, et al. Natural radionuclides and radiological assessment for building materials used in reef engineering in the South China Sea [J]. *Radiation Protection*, 2020,40(1):23–30.
- [22] 林武辉,余锦萍,余克服,等.北部湾涠洲岛海域沉积物中物质来源解析——来自元素、稳定同位素、放射性核素的证据 [J]. *沉积学报*, 2021,39(3):621–630.  
Lin W H, Yu J P, Yu K F, et al. Source identification in a  $^{210}\text{Pb}$ -dated sediment core near Southwest Weizhou Island, Beibu Gulf: Evidence from elements, Stable isotopes and radionuclides [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2021,39(3):621–630.
- [23] 林武辉,余克服,王英辉,等.海洋沉积过程的铀系放射性核素示踪技术:物源识别、沉积、再悬浮 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2020, 40(1):60–70.  
Lin W H, Yu K F, Wang Y H, et al. Using uranium-series radionuclides as tools for tracing marine sedimentary processes: Source identification, sedimentation rate, and sediment resuspension [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2020,40(1):60–70.
- [24] UNSCEAR. Sources, effects of ionizing radiation. [R]//Unsear, ed. Report to the general assembly with annex B [R]. New York: United Nations, 2000.
- [25] Lin W H, Yu K F, Wang Y H, et al. Radioactive level of coral reefs in the South China Sea [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2019,142:43–53.
- [26] 杨鹏玉,杨迪松,南海明,等.黄河中下游悬浮颗粒物多核素时空分布特征及其指示意义 [J]. *海洋环境科学*, 2021,40(2):215–220,227.  
Yang P Y, Yang D S, Nan H M, et al. Spatio-temporal distributions and indications of multi-nuclides on suspended particulate matters in the middle and lower reaches of the Yellow River [J]. *Marine Environmental Science*, 2021,40(2):215–220,227.
- [27] 林武辉,杜隕峰,余克服,等.基于放射性核素的沉积物源识别技术探索与优化——以红树林-海草床-珊瑚礁系统为例 [J]. *海洋学报*, 2023,45(12):58–66.  
Lin W H, Du Y F, Yu K F, et al. Exploring and optimizing characterization of radionuclide fingerprint for tracking sediment source: Comparison of mangrove, seagrass, and coral reef ecosystems [J]. *Haiyang Xuebao*, 2023,45(12):58–66.
- [28] Roca-Martí M, Puigcorbó V. Combined use of short-lived radionuclides ( $^{234}\text{Th}$  and  $^{210}\text{Po}$ ) as tracers of sinking particles in the ocean [J]. *Annual Review of Marine Science*, 2024,16(1):551–575.
- [29] Joseph M S, Willard S M, Thunell R C, et al. Comparison of  $^{234}\text{Th}$ ,  $^{228}\text{Th}$ , and  $^{210}\text{Pb}$  fluxes with fluxes of major sediment components in the Guaymas Basin, Gulf of California [J]. *Marine Chemistry*, 1999, 65:177–194.
- [30] Jweda J, Baskaran M, van Hees E, et al. Short-lived radionuclides ( $^7\text{Be}$  and  $^{210}\text{Pb}$ ) as tracers of particle dynamics in a river system in southeast Michigan [J]. *Limnology and Oceanography*, 2008,53(5): 1934–1944.
- [31] Sanchez-Cabeza J A, Ruiz-Fernández A C.  $^{210}\text{Pb}$  sediment radiochronology: An integrated formulation and classification of

- dating models [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2012,82:183–200.
- [32] 林武辉,陈立奇,余雯,等.白令海和楚科奇海陆架区的生源物质埋藏通量研究 [J]. *极地研究*, 2016,28(2):194–202.  
Lin W H, Chen L Q, Yu W, et al. Burial fluxes of biogenic materials in the Bering sea and Chukchi sea [J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2016,28(2):194–202.
- [33] 吴亚妮,陈旸,王野,等.<sup>210</sup>Pb 同位素在人类世沉积物定年中的应用 [J]. *地球科学进展*, 2024,39(1):71–81.  
Wu Y N, Chen Y, Wang Y, et al. Application of <sup>210</sup>Pb isotope in dating anthropocene sediments [J]. *Advances in Earth Science*, 2024, 39(1):71–81.
- [34] 顾家伟.基于 <sup>210</sup>Pb 和 <sup>137</sup>Cs 计年法的黄河下游湿地沉积速率研究初探 [J]. *地球与环境*, 2020,48(6):698–703.  
Gu J W. Preliminary Study on the Sedimentation rate of wetlands in the lower yellow river based on the <sup>210</sup>Pb and <sup>137</sup>Cs dating techniques [J]. *Earth and Environment*, 2020,48(6):698–703.
- [35] 王晓慧,吴伊婧,范代读.福建兴化湾外近海 <sup>210</sup>Pb 法沉积速率及校正方法 [J]. *古地理学报*, 2019,21(3):527–536.  
Wang X H, Wu Y J, Fang D D. <sup>210</sup>Pb derived sedimentation rates in offshore area of the Xinghua Bay, Fujian Province, and proposed calibration method [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2019,21(3):527–536.
- [36] Krishnaswami S, Benninger L, Aller R, et al. Atmospherically-derived radionuclides as tracers of sediment mixing and accumulation in near-shore marine and lake sediments: evidence from <sup>7</sup>Be, <sup>210</sup>Pb, and <sup>239,240</sup>Pu [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1980,47(3):307–318.
- [37] 许冬,初凤友,杨海丽,等.北部湾现代沉积速率 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2012,32(6):17–26.  
Xu D, Chu F Y, Yang H L, et al. Modern sedimentation rates in the Beibu gulf [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*. 2012,32(6): 17–26.
- [38] 庞国涛,杨源祯,张晓磊,等.广西防城港海域沉积物粒度时空变化特征及沉积速率 [J]. *中国地质调查*, 2023,10(4):89–97.  
Pang G T, Yang Y Z, Zhang X L, et al. Spatiotemporal variation characteristics and sedimentation rate of sediment grain size in Fangchenggang Sea of Guangxi [J]. *Geological Survey of China*, 2023,10(4):89–97.
- [39] 王文欢,余克服,王英辉.北部湾涠洲岛珊瑚礁的研究历史、现状与特色 [J]. *热带地理*, 2016,36(1):72–79.  
Wang W H, Yu K F, Wang Y H. A review on the research of coral reefs in the Weizhou Island, Beibu Gulf [J]. *Tropical Geography*, 2016, 36(1):72–79.
- [40] 张光明,吴讯达.是什么让一个油田群重获新生? [EB/OL]. 2021–03–29. [https://m.thepaper.cn/baijiahao\\_11945248](https://m.thepaper.cn/baijiahao_11945248).  
Zhang G M, Wu X D. What brings an oilfield complex back to life? [EB/OL]. 2021–03–29. [https://m.thepaper.cn/baijiahao\\_11945248](https://m.thepaper.cn/baijiahao_11945248).
- [41] 牟雪江.涠洲终端 20 年谱写生态建设新篇章 [J]. *中国石油企业*, 2018,(11):22–7,109.  
Mu X J. To build Weizhou terminal for 20 years and compose a new chapter of ecological Construction [J]. *China Petroleum Enterprise*, 2018,(11):22–27,109.
- [42] 国家科技资源共享服务平台—国家海洋科学数据中心.Regional Reanalysis data – Ocean current [EB/OL]. 2021–11. <https://mds.nmdis.org.cn/>.  
National Science & Technology Infrastructure—National Marine Data Center. Regional reanalysis data – ocean current [EB/OL]. 2021–11. <https://mds.nmdis.org.cn/>.
- [43] 杨振雄,张敬怀,吕向立,等.涠洲岛造礁石珊瑚群落变化特征及其环境影响因子 [J]. *生态学报*, 2021,41(18):7168–79.  
Yang Z X, Zhang J H, Lv X L, et al. The ecological succession of scleractinian coral communities and their environmental factors in Weizhou Island. *Acta Ecologica Sinica*, 2021,41(18):7168–7179.
- [44] 何精科,黄振鹏.广西涠洲岛珊瑚分布状况研究 [J]. *海洋开发与与管理*, 2019,36(1):57–62.  
He J K, Huang Z P. The distribution of Corals in Weizhou Island, Guangxi [J]. *Ocean Development and Management*, 2019,36(1):57–62.
- [45] 于婉君.涠洲岛珊瑚礁区的底质特征及其对珊瑚分布的影响 [D]. 南宁:广西大学, 2023.  
Yu W J. Substrate characteristics of the area of Weizhou Island reef and its effects on the distribution of corals [D]. Nanning:Guangxi University, 2023.
- [46] Houlbrequé F, Ferrier-Pages C. Heterotrophy in tropical scleractinian corals [J]. *Biol Rev Camb Philos Soc*, 2009,84(1):1–17.
- [47] Jones R, Ricardo G F, Negri A P. Effects of sediments on the reproductive cycle of corals [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2015,100 (1):13–33.
- [48] 梁鑫,彭在清.广西涠洲岛珊瑚礁海域水质环境变化研究与评价 [J]. *海洋开发与与管理*, 2018,35(1):114–119.  
Liang X, Peng Z Q. Analysis and appraisal of seawater quality in coral reef water, Weizhou Island, Guangxi [J]. *Ocean Development and Management*, 2018,35(1):114–119.
- [49] 蓝军南,杨艳华,王欣,等.涠洲岛珊瑚礁生态恢复可行性评估及其恢复策略 [J]. *应用海洋学学报*, 2023,42(2):235–245.  
lan J N, Yang Y H, Wang X, et al. Feasibility assessment and strategies of coral reef ecological restoration in Weizhou Island [J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2023,42(2):235–245.
- [50] 王欣,高霆炜,陈骁,等.涠洲岛园艺式珊瑚苗圃的架设计与移植 [J]. *广西科学*, 2017,24(5):462–467.  
Wang X, Gao T W, Chen X, et al. The construction and transplantation of coral gardening nursery in Weizhou Island [J]. *Guangxi Sciences*, 2017,24(5):462–467.
- [51] 周浩郎,王欣,梁文.涠洲岛珊瑚礁特点、演变及保护与修复对策的思考 [J]. *广西科学院学报*, 2020,36(3):228–236.  
Zhou H L, Wang X, Liang W. Reflections on the characteristics, evolution and protection and rehabilitation strategies of the coral reefs at Weizhou Island [J]. *Journal of Guangxi Academy of Sciences*, 2020,36(3):228–236.
- [52] 北海市涠洲岛旅游区管理委员会.北海市涠洲岛生态环境保护条例 [N]. 2018–06–08.  
Beihai Weizhou Island Tourism Zone Management Committee. Regulations on the ecological environmental protection of Weizhou Island in Beihai City [N]. 2018–06–08.

作者简介: 罗柱(1999–),男,壮族,广西河池人,广西大学硕士研究生,主要从事海洋珊瑚礁区的同位素示踪研究.2637716182@qq.com.