

陈美琪, 王镜宇, 张瑞杰, 等. 南海珊瑚砂中黑碳的赋存特征与碳封存意义—以涠洲岛和永乐环礁为例[J]. 海洋学报, 2026, 48(x): 1–13, doi: 10.1007/s11872-026-0001-13  
Chen Meiqi, Wang Jingyu, Zhang Ruijie, et al. Occurrence and Carbon Sequestration Implications of Black Carbon in Coral Sands of the South China Sea: Evidence from Weizhou Island and Yongle Atoll[J]. Haiyang Xuebao, 2026, 48(x): 1–13, doi: 10.1007/s11872-026-0001-13

# 南海珊瑚砂中黑碳的赋存特征与碳封存意义— 以涠洲岛和永乐环礁为例

陈美琪<sup>1#</sup>, 王镜宇<sup>1#</sup>, 张瑞杰<sup>1\*</sup>, 吴洋<sup>1</sup>, 彭文团<sup>1</sup>, 王敏睿<sup>1</sup>,  
叶全发<sup>1</sup>, 孙卓琰<sup>1</sup>, 贤爱华<sup>1</sup>, 余克服<sup>1,2\*</sup>

(1. 广西大学 广西南海珊瑚礁研究重点实验室/珊瑚礁研究中心/海洋学院, 广西南宁 530004; 2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广东广州 511458)

**摘要:** 黑碳 (BC) 主要是化石燃料或生物质不完全燃烧产生的惰性有机碳, 其在海洋沉积物中的埋藏构成了重要的稳定碳汇。目前对海洋沉积 BC 的研究多集中于泥质或砂质沉积物, 而高钙质珊瑚砂关注较少。本研究采用盐酸预处理去除碳酸盐干扰后, 基于苯多羧酸分子标记物法 (BPCA), 系统分析了南海近岸涠洲岛及远岸永乐环礁珊瑚砂中 BC 的赋存特征。结果表明, BC 在珊瑚砂中普遍存在, 其中涠洲岛珊瑚砂 BC 含量显著高于永乐环礁, 呈现“近岸高、远岸低”的空间分异, 指示陆源输入是涠洲岛 BC 的主要来源。BPCA 组成表明, 生物质燃烧是影响两区域的区域性背景来源; 但涠洲岛受近岸人类活动影响, 叠加了强烈的化石燃料等高温燃烧源输入, 呈现出更高的芳环缩合度。粒径分析表明, BC 在珊瑚砂破碎过程中存在“先释放、后吸附”的动态行为。本研究表明珊瑚砂是 BC 的有效埋藏载体, 初步估算显示其具备可观的黑碳封存通量, 这对于全面评估珊瑚礁生态系统的碳汇功能具有重要意义。

**关键词:** 黑碳; 珊瑚砂; 碳汇; 苯多羧酸; 涠洲岛; 永乐环礁

中图分类号: 文献标志码: A 文章编号: 0253-4193(2026)x-0001-13

## 1 引言

黑碳 (black carbon, BC) 是生物质和化石燃料不完全燃烧产生的一类含碳连续统一体<sup>[1]</sup>, 主要包括焦炭 (Char)、木炭 (Charcoal) 和烟炱 (Soot) 等组分。BC 的来源可分为自然源与人为源<sup>[2]</sup>。自然源以森林或草原火灾、火山喷发<sup>[3]</sup> 及海底热液转化海水有机碳<sup>[2]</sup> 等为主, 具有区域性和偶发性; 人为源则主要来自秸秆焚

烧、垃圾焚烧、燃煤及工业排放等人类燃烧活动<sup>[4-5]</sup>, 具有持续输入的特征。BC 广泛分布于大气、土壤、河流、海洋及沉积物等多种环境介质中<sup>[6]</sup>。工业革命以来, 化石燃料消耗持续增加<sup>[7]</sup>, 叠加全球变暖背景下生物质燃烧事件频发, 共同推动了 BC 排放量的上升<sup>[8]</sup>, 进而强化了其在全球碳循环中的影响<sup>[9]</sup>。

BC 在生成后依其粒径与来源呈现不同的环境行为。大粒径 (微米级) BC (如焦炭、木炭) 多来自生物质

收稿日期: 2026-01-18; 修订日期: 2026-04-07。

基金项目: 广西自然科学基金 (2025GXNSFAA069701); 广西科技基地和人才专项 (桂科 AD25069075); 广西壮族自治区大学生创新创业训练计划项目 (S202410593454 和 S202510593498); 国家自然科学基金 (U25A20824, 42090041 和 42030502)。

作者简介: 陈美琪 (2004—), 女, 广西壮族自治区南宁市人, 本科生, 海洋科学专业, E-mail: 13347607710@163.com; 王镜宇 (1999—), 男, 四川省南充市人, 硕士研究生, 环境工程专业, E-mail: 2215393066@st.gxu.edu.cn

\* 通信作者: 张瑞杰, 副教授, 硕士生导师, 主要从事新污染物与黑碳的海洋环境行为与效应研究工作。E-mail: rzhang@gxu.edu.cn; 余克服, 教授, 主要从事南海珊瑚礁地质和生态环境方面的研究工作。E-mail: kefuyu@scsio.ac.cn

在较低温度(300~600 °C)下的明火或焖烧<sup>[10]</sup>,凝结度较低,粒径较大(约1~100 μm),通常在源区附近沉降或随大气进行短距离输送;而小粒径(亚微米级)BC(如烟炱)主要来源于高温(>600 °C)化石燃料燃烧<sup>[11-12]</sup>或焦炭/木炭的二次燃烧<sup>[13-14]</sup>,凝结度较高,粒径较小(<1 μm),可随大气环流进行长距离传输<sup>[7]</sup>。相当一部分BC将通过大气干湿沉降及河流输入等途径进入海洋环境<sup>[15-17]</sup>。焦炭/烟炱的比值(char/soot)是BC来源解析的重要指标:通常该比值在生物质燃烧排放源中较高,燃煤次之,机动车排放则较低<sup>[18]</sup>。在水体中,BC以溶解态和颗粒态形式存在<sup>[6, 19-20]</sup>,河流作为关键输送通道调节着海洋BC的输入通量与分布<sup>[21]</sup>。BC因较难降解性而具有环境持久性,其参与气候调节、碳循环过程并对环境质量与人体健康产生广泛影响<sup>[22-24]</sup>,这一特性使其成为全球碳收支中一个不可忽视的惰性碳汇,其自然转化与降解过程通常发生在地质时间尺度上<sup>[23]</sup>。

目前,海洋沉积BC的研究多集中于河口、沿海大陆架<sup>[17, 25]</sup>以及部分远海<sup>[26]</sup>和深海<sup>[27, 28]</sup>区域的泥质与砂质沉积物。其中,陆架沉积物作为BC的重要储库,虽仅占海洋面积的10%却埋藏了全球海洋约90%的BC<sup>[29]</sup>。然而,海洋沉积物还包括另一类重要类型,主要由造礁石珊瑚骨骼破碎、风化形成的钙质沉积物,即珊瑚砂。珊瑚砂是珊瑚礁生态系统重要的基质性组成部分。珊瑚礁生态系统以造礁珊瑚的钙质骨骼为主体,由造礁珊瑚与珊瑚藻、仙掌藻、软体动物壳及有孔虫等钙质生物的骨骼或壳体共同堆积构筑而成<sup>[30]</sup>,虽仅覆盖全球海洋面积的0.2%,却拥有极高的生物多样性与初级生产力,被誉为“海洋中的热带雨林”<sup>[31]</sup>。关于珊瑚礁的碳“源-汇”属性目前尚存争议,其净通量可在碳源与碳汇之间转换<sup>[32]</sup>,主要受光合作用、呼吸作用及钙化过程等多重因素调控。值得注意的是,近期研究在珊瑚骨骼中检出了一种BC颗粒飞灰<sup>[33]</sup>,这暗示BC作为一种稳定的外源碳,除直接随颗粒沉降外,亦可能通过珊瑚砂或珊瑚骨骼进行封存,但目前针对珊瑚砂这一高钙质载体中BC的赋存特征与碳汇潜能的研究仍鲜见报道。

为此,本研究选取南海典型珊瑚砂为对象,首次系统探讨高钙质珊瑚砂中BC的赋存规律及其碳封存意义。具体目标包括:(1)揭示涠洲岛(近岸)与永乐环礁(远岸)珊瑚砂中BC的含量、分子组成与空间分布特征,并解析其来源;(2)阐明粒径对珊瑚砂中黑碳赋存、分子组成与缩合度的影响机制,明确黑碳在珊瑚砂破碎过程中的动态行为;(3)初步评估珊瑚砂

作为BC稳定碳汇的能力。研究结果有望为认识珊瑚礁系统在全球黑碳循环中的作用提供新视角。

## 2 材料与方法

### 2.1 研究区域与样品采集

本研究选取南海北部的涠洲岛与西沙群岛永乐环礁作为研究区域(图1)。涠洲岛位于广西北部湾中部,总面积约24.74 km<sup>2</sup><sup>[34]</sup>,其珊瑚礁沉积物以高无机碳含量为特征<sup>[35]</sup>,受陆源输入及旅游活动影响较大。永乐环礁地处南海远岸,远离大陆,受直接人为干扰较小,主要受海洋过程及远距离大气传输的影响。

于2023年10月,在涠洲岛珊瑚礁区布设17个采样站点(WZD-1~WZD-17),在永乐环礁布设6个采样站点(YL-1~YL-6),采集表层(0~5 cm)沉积物样品。采样时记录各站点的经纬度与水深信息,样品采集后立即于-20°C冷冻保存,直至实验室分析。

### 2.2 样品前处理

**整体样品处理:**沉积物样品经冷冻干燥后研磨,过80目筛。称取5 g过筛样品,加入2 mol/L盐酸去除无机碳组分,随后离心、洗涤至中性,再经冷冻干燥后称重。通过差重法计算以CaCO<sub>3</sub>表示的无机碳酸盐(IC)含量。处理后的样品保存于-20°C,待总有机碳(TOC)和BC分析。

**粒径分级处理:**选取涠洲岛北侧、东侧和西南侧的WZD-3、WZD-7、WZD-14及永乐环礁YL-4四个代表性站位的样品,冷冻干燥后依次通过10目、18目、30目、40目、60目和80目筛网,得到以下粒径分级:>2 mm、1~2 mm、0.5~1 mm、0.38~0.5 mm、0.25~0.38 mm、0.18~0.25 mm、<0.18 mm。每个粒径样品称取5 g,按上述酸处理流程去除无机碳,洗涤至中性并冷冻干燥,备用于TOC和BC分析。

### 2.3 总有机碳分析

取200 mg均质化的珊瑚砂干样于50 mL聚乙烯离心管,少量多次滴加过量2 mol/L HCl至无气泡产生,静置一夜后,用转速为4 000 r/min的离心机离心15 min,弃去酸液,用超纯水水洗调节pH至中性,并进行冷冻干燥处理。冷冻干燥的样品进行称重后称量。使用玛瑙研钵再次研磨至无块状颗粒,用锡箔纸包好后使用Elementar Vario cube元素分析仪测定碳的质量含量。使用磺胺苯甲酸作为标准,将结果根据质量进行校正,精度≤0.01%,并使用海洋沉积物参考物质(NIST SRM 1941b)进行方法验证和日常质量监控。

酸化后残留物质的TOC(%)指去除无机碳酸盐后,残余固相物质中的有机碳质量占比;经碳酸盐校

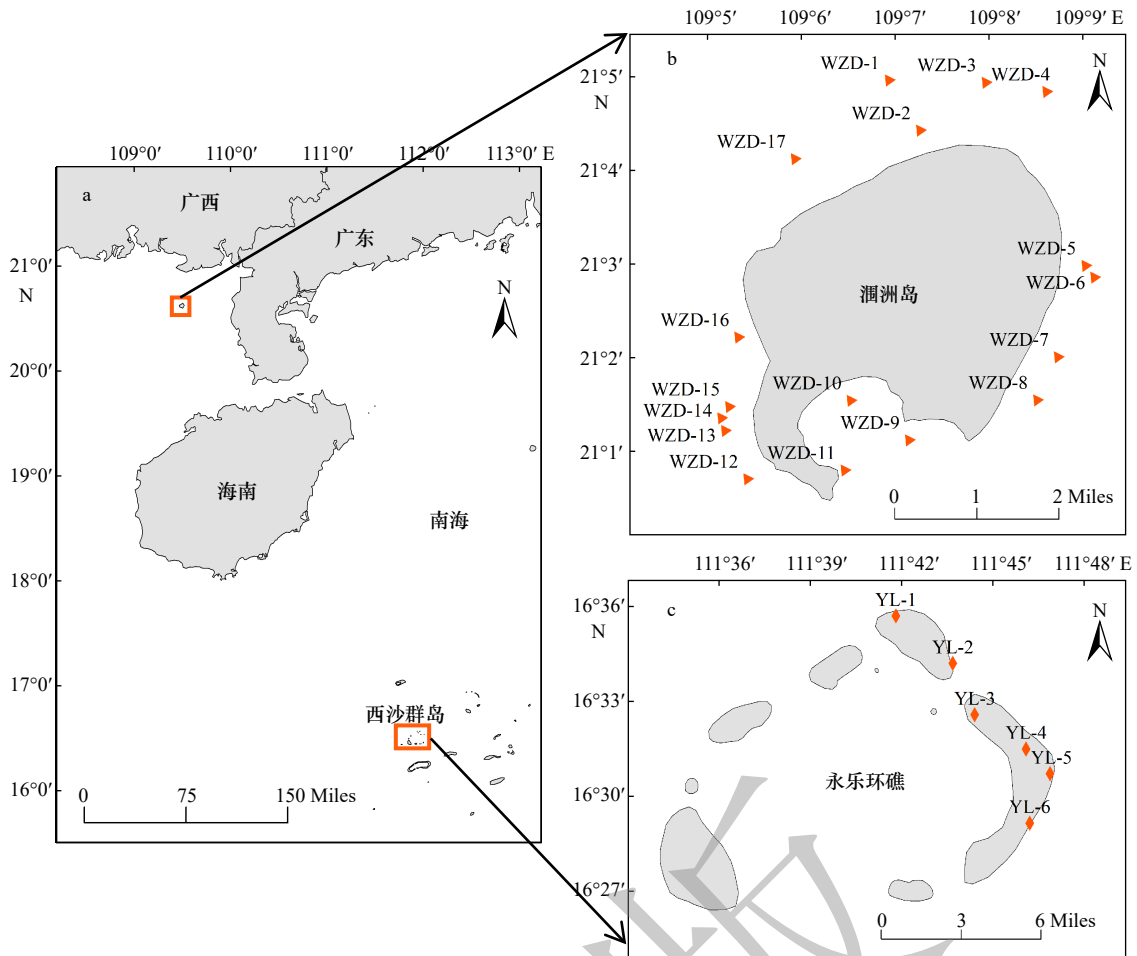


图 1 涠洲岛和永乐环礁珊瑚砂采样站位图

Fig. 1 Sampling stations of coral sands from Weizhou Island and Yongle Atoll

正后的总有机碳( $TOC_{IC}$ , %)指未去除碳酸盐的原始珊瑚砂样品中,有机碳质量占原始样品总质量的比例,二者换算公式为: $TOC_{IC} = TOC \times (1 - IC/100)$ ,其中IC为珊瑚砂中无机碳酸盐的百分含量。

## 2.4 黑碳分析

采用苯多羧酸(BPCA)分子标记法分析黑碳。准确称取预处理后的样品置于5-mL聚四氟乙烯内衬管中,加入2 mL浓硝酸,将反应釜密封后,置于180℃烘箱中消解8小时。消解液转移至鸡心瓶,80℃下旋蒸至干。残渣用1 mL超纯水复溶,经水系滤膜过滤后转移至2-mL色谱进样瓶,采用高效液相色谱(HPLC)进行分离与定量<sup>[27, 36-37]</sup>。

BPCA法通过化学氧化将BC中的芳环结构转化为具有3~6个羧基的苯多羧酸(B3CA~B6CA,以下简称B3~B6),依据其响应值计算BC含量<sup>[38]</sup>,并可基于各组分比例反映芳环缩合程度,进而推断来源特征<sup>[38-40]</sup>。例如,B3占比高,表明BC缩合度低,主要来源于生物质低温不完全燃烧,稳定性相对较差,相对较易在环境中降解;B4占比高,表明BC为中等缩合度,是生物

质燃烧产生的典型产物,为环境中BC的主要组分;B5和B6占比高,则BC的缩合度较高,主要来源于高温燃烧过程(如化石燃料燃烧),缩合度越高则高温燃烧源贡献越大;B6/B5比值越高,表明BC芳环缩合度越高,化石燃料等高温燃烧源的贡献占比越大;B6+5/B4+3即(B6+B5)/(B4+B3)比值升高代表高缩合度BC组分占比增加,指示高温燃烧源贡献增强,反之则低温生物质燃烧源占主导。本研究中,BC表示珊瑚砂酸化后残余物中黑碳的含量(mg/g); $BC_{IC}$ 表示经无机碳校正后的黑碳含量,即单位质量原始珊瑚砂(包含碳酸盐组分)中的黑碳含量( $\mu\text{g/g}$ )。

本研究使用NIST SRM 1941b标准沉积物对BPCA法进行了验证,得到 $9.68 \pm 0.33 \text{ g BC/kg}$ 沉积物( $n=3$ ),与Vaezzadeh等人( $9.88 \pm 0.26 \text{ g BC/kg}$ )<sup>[41]</sup>和Ziolkowski等人( $10.7 \text{ g BC/kg}$ )<sup>[42]</sup>的结果一致。我们通过每10个样品处理1个空白、2个重复和3个2500 ng混合标准品来监测污染和仪器稳定性,空白中未检测到目标化合物污染,回收率超过80%。BPCA浓度的平均分析误差低于5%,B6/B5比值的平均分析误差低于15%。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 珊瑚砂中黑碳的含量与空间分布特征

##### 3.1.1 珊瑚砂中无机碳酸盐、有机碳和黑碳含量

本文同时采用酸化后含量(BC、TOC)与碳酸盐校正后含量(BCIC、TOCIC)两种方式表征。酸化后含量表征去除碳酸盐后的非钙质组分中黑碳与有机碳的相对富集程度,用于对比组分内部差异,而碳酸盐校正后含量可以还原原始珊瑚砂中黑碳与有机碳的真实埋藏浓度,更适合碳汇估算与区域对比。两种表征方式互补,可全面反映珊瑚砂中BC的赋存与埋藏特征。

涠洲岛珊瑚砂IC平均含量为  $84.6\% \pm 17.3\%$  (范围:  $55.0\% \sim 98.5\%$ ), 明显低于永乐环礁的  $99.7\% \pm$

$0.13\%$  (范围:  $99.2\% \sim 99.9\%$ ) (图 2-C1)。这说明涠洲岛珊瑚砂中混有较多非礁源泥质或砂质沉积物。

酸化后残留物质的总有机碳(TOC)含量在永乐环礁 ( $34.0\% \pm 1.17\%$ , 范围  $32.2\% \sim 35.4\%$ ) 也明显高于涠洲岛 ( $0.20\% \pm 0.19\%$ , 范围  $0.03\% \sim 0.66\%$ ) (图 2-C2)。高纯度的永乐环礁珊瑚砂酸化后残留物中有机碳主要来自海洋生物合成过程<sup>[43]</sup>, 而涠洲岛残留物 TOC 较低, 可能受到陆源泥沙等非生物源物质稀释影响。经碳酸盐校正后的  $TOC_{IC}$  含量则显示涠洲岛 ( $0.15\% \pm 0.05\%$ ) 高于永乐环礁 ( $0.093\% \pm 0.001\%$ ) (图 2-C3), 这主要由于永乐环礁极高含量的碳酸盐含量对 TOC 产生了稀释效应。

基于 BPCA 法测得的黑碳含量显示, 未经碳酸盐校正时, 永乐环礁沉积物 BC 含量 ( $3.94 \pm 1.25 \text{ mg/g}$ )

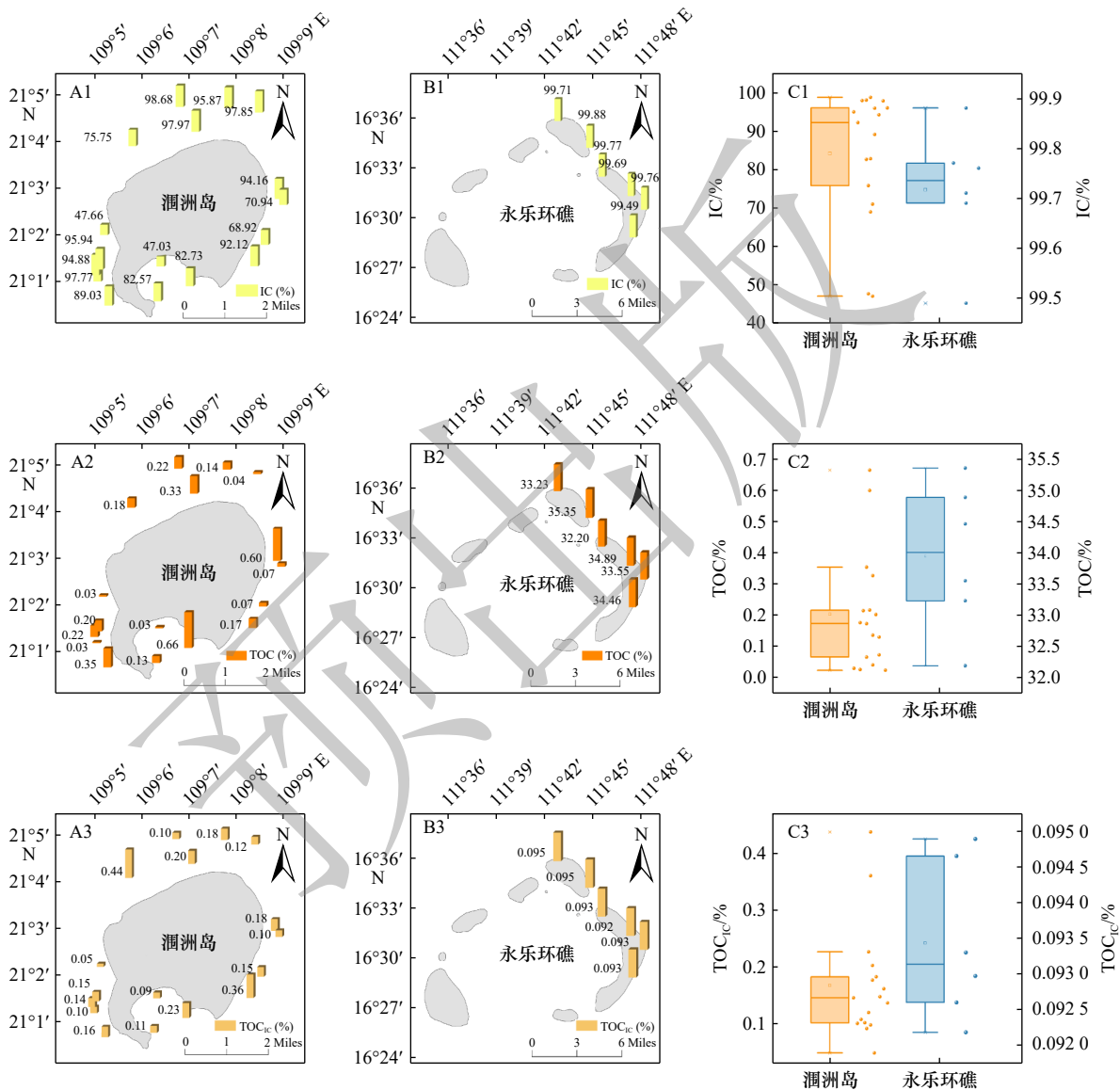


图 2 涠洲岛和永乐环礁珊瑚砂中的碳酸盐(IC)和有机碳(TOC和TOC<sub>IC</sub>)含量

Fig. 2 Contents of carbonate (IC), total organic carbon (TOC and TOC<sub>IC</sub>), in coral sands from Weizhou Island and Yongle Atoll

显著高于涠洲岛 ( $0.967 \pm 0.622 \text{ mg/g}$ ) (t 检验,  $p < 0.001$ ) (图 3-C1), 反映两地在 BC 输入或埋藏条件上存在本质差异, 推测远离大陆的永乐环礁其非碳酸盐组分主要由海洋自生有机质和远源大气颗粒组成, 由于 BC 惰性较高而海源有机碳易降解, 导致 BC 相对富集; 涠洲岛靠近陆源, 受硅酸盐矿物等影响较大, 因而稀释了 BC 的相对含量。

经碳酸盐校正后 ( $\text{BC}_{\text{IC}}$ ), 涠洲岛  $\text{BC}_{\text{IC}}$  含量 ( $85.1 \pm 60.7 \text{ } \mu\text{g/g}$ ) 显著高于永乐环礁 ( $9.57 \pm 2.23 \text{ } \mu\text{g/g}$ ) (t 检验,  $p < 0.001$ ) (图 3-C2), 再次说明高碳酸盐含量对永乐环礁 BC 的显著稀释作用。同时, 两地黑碳输入通量存在显著差异: 涠洲岛近岸受陆源燃烧、船舶排放直接输入, BC 通量更高; 永乐环礁为远岸环境, 主要接收远距离大气沉降 BC, 输入通量更低。此外, 高纯

度的碳酸盐沉积物因其丰富的矿物表面和孔隙结构, 对水体中的 BC 应该具有一定的吸附作用<sup>[44]</sup>, 永乐环礁高纯度钙质沉积物理论上可吸附更多 BC, 但受限于输入通量不足, 最终校正后 BC 含量仍显著偏低。上述关于吸附贡献的判断仍为初步推测, 需要今后的研究进一步证明。涠洲岛各站点  $\text{BC}_{\text{IC}}$  含量差异较大, 如 WZD-17 达  $240 \text{ } \mu\text{g/g}$ , WZD-9 和 WZD-11 分别为  $147 \text{ } \mu\text{g/g}$  和  $111 \text{ } \mu\text{g/g}$ , 而 WZD-1 仅  $19.4 \text{ } \mu\text{g/g}$  (图 3-A2)。这种空间分异可能与局地环境有关: WZD-17 邻近客运码头并位于主航线上, 受船舶排放影响较大; WZD-9、WZD-11 等位于半封闭海湾, 水动力较弱, 有利于颗粒物与 BC 的沉降积累; WZD-1、WZD-4 等处于开阔海域, 较强的水动力可能促使部分 BC 向外海输运。相比之下, 受人为干扰较小的永乐环礁沉积环境

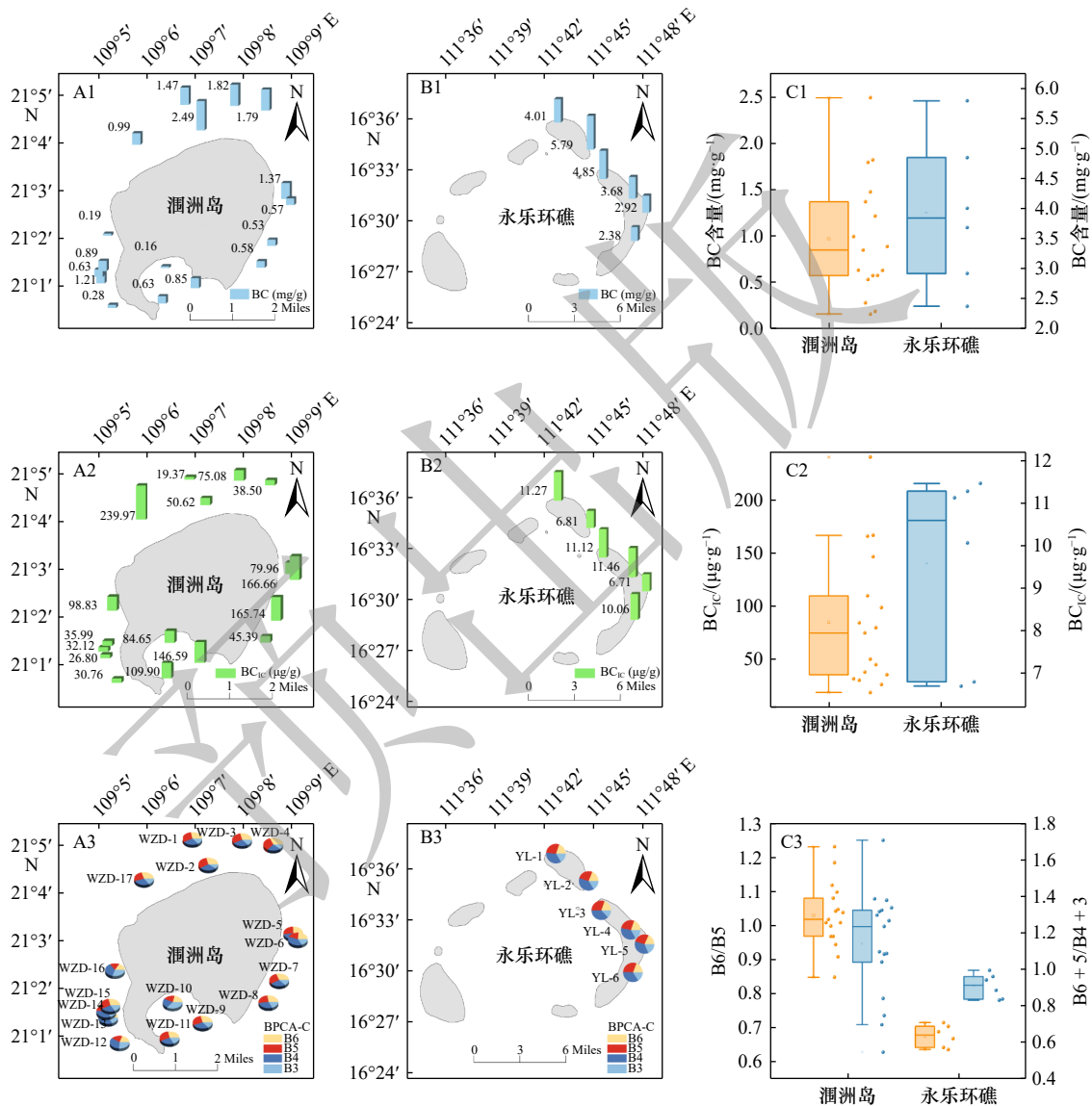


图 3 涠洲岛和永乐环礁珊瑚砂中的黑碳 (BC 和  $\text{BC}_{\text{IC}}$ ) 含量及 BPCAs 组成

Fig. 3 Contents of black carbon (BC and  $\text{BC}_{\text{IC}}$ ) and BPCA composition in coral sands from Weizhou Island and Yongle Atoll

更为均一,  $BC_{IC}$  含量分布也相应稳定。

### 3.1.2 珊瑚砂中黑碳的分子组成

BPCA 分析结果显示, 涠洲岛珊瑚砂中苯多羧酸组成以 B4 (30.7% ± 4.21%) 占比最高, 其次为 B6 (27.3% ± 4.30%)、B5 (25.8% ± 3.02%) 和 B3 (16.2% ± 5.99%) (图 3-A3)。永乐环礁的组成顺序则为 B4 (36.2% ± 1.23%) > B5 (28.4% ± 1.56%) > B6 (19.2% ± 0.53%) > B3 (16.2% ± 1.83%) (图 3-B3)。两区域均以 B4 组分为主, 且 B3 占比最低, 表现出相似的本底组成模式。B4 为 BC 芳环氧化后的典型产物, 其高占比反映沉积物中 BC 以中等缩合芳环结构为主, 指示区域性的生物燃烧是两地共同的基础来源; 而 B3 稳定性较低, 在埋藏或传输过程中易被微生物分解或海水氧化, 导致其最终占比偏低。

尽管在 BPCA 组成模式上(如 B4 占优)体现了南海北部区域性大气沉降的背景共性, 但两地在局部高缩合度组分上差异显著。涠洲岛高缩合度的 B6 组分占比 (27.3%) 明显高于永乐环礁 (19.2%)。这种“共性”之上的“差异”表明, 永乐环礁因远离大陆, 其 BC 特征更多反映了远距离传输的区域背景; 而涠洲岛由于靠近大陆, 在接收区域生物质燃烧本底输入的同时, 叠加了强烈的陆源输入、船舶活动等近岸人为影响(如高温化石燃料燃烧), 这根本上导致了涠洲岛黑碳绝对含量的升高以及高缩合度组分占比的激增。

### 3.1.3 珊瑚砂中 BC 凝结度特征

本研究中 BC 的凝结度通过苯多羧酸组分的特征比值表征, 主要采用 B6/B5 和 B6+5/B4+3 两个比值, 比值越高代表黑碳的芳环结构聚合程度越高, 凝结度越强, 对应的燃烧温度越高、化学稳定性越强。比较涠洲岛与永乐环礁的 B6/B5 和 B6+5/B4+3 比值可见, 涠洲岛沉积物中 BC 的凝结度明显高于永乐环礁(图 3-C3)。这可能是由于涠洲岛受北部湾沿岸工业燃煤、机动车尾气影响更强, 高温燃烧生成的 BC(如烟炱)凝结度更高, 更难降解; 而永乐环礁接收的 BC 可能更多来自低温生物质燃烧, 因而 BC 凝结度相对较低。

## 3.2 粒径对珊瑚砂中黑碳赋存特征的影响

### 3.2.1 不同粒径珊瑚砂中无机碳酸盐、有机碳和黑碳的含量

为探究粒径对珊瑚砂中黑碳赋存特征的影响, 本研究选取涠洲岛北侧(WZD-3)、东侧(WZD-7)、西南侧(WZD-14)及永乐环礁中心区域(YL-4)四个代表性站位开展粒径分级实验, 站位选择综合考虑地理区位、人类活动影响及沉积环境特征: WZD-3、WZD-7、WZD-14 分别代表涠洲岛不同海岸带类型, 其中 WZD-

3 受旅游活动影响显著, WZD-7 处于半封闭海湾且水力较弱, WZD-14 受西南浪侵蚀及陆源泥沙输入影响突出<sup>[45]</sup>, 可反映近岸珊瑚砂粒径效应的空间异质性; YL-4 为永乐环礁典型站位, 珊瑚砂纯度高、沉积环境均一<sup>[43]</sup>, 能代表远岸高钙质珊瑚砂的粒径特征。

在永乐环礁区域, 如图 4 所示, 永乐环礁珊瑚砂(YL-4)整体碳酸盐(IC)含量极高(99.4%~99.8%), 不同粒径间差异极小, 该微小波动不做重点讨论。酸化后残余物的 TOC 含量在中小粒径 (<0.5 mm, 34%~42%) 明显高于大粒径 (>1.0 mm, 27%~29%)。经碳酸盐校正的  $TOC_{IC}$  则随粒径减小先快速下降, 之后波动平缓, 至 <0.18 mm 时再度上升。 $TOC_{IC}$  与 IC 含量呈显著负相关 ( $R^2 = 0.98, p < 0.01$ ) (图 5-B1), 该趋势与上述破碎-释放-吸附的过程相符。

BC 含量(酸化后残余物)随粒径减小逐渐上升, 在 0.18~0.25 mm 时达到峰值 (5.19 mg/g), 随后下降。而经碳酸盐校正的  $BC_{IC}$  随粒径减小而降低, 在 0.38~0.5 mm 处最低, 随后小幅回升, 并在 <0.18 mm 时达到最大值。这表明在破碎过程中, 珊瑚砂内部封存的 BC 会逐步释放至水环境, 并更易被微生物降解, 该机制也得到下文分子组成与凝结度变化的支持(图 6)。对于 <0.18 mm 的细颗粒, 其较大的比表面积有利于吸附水体中的溶解态黑碳<sup>[46]</sup>, 同时该粒径段可能含有较多远源大气沉降颗粒, 从而导致 BC 含量与凝结度均较高。

在涠洲岛, WZD-3 和 WZD-7 的 IC 含量相近(80%~99%), 并随着粒径减小缓慢降至 0.18~0.25 mm 时的约 93%, 之后在 <0.18 mm 急剧下降至最小 80% 左右, 反映细颗粒物中非钙质组分(如陆源泥沙、生物碎屑)占比增加。WZD-14 的 IC 含量整体较低(63%~89%), 且随粒径减少呈下降趋势, 在 0.18~2.0 mm 区间出现小幅波动, 这可能与该站点受西南浪影响强烈、海岸侵蚀显著<sup>[45]</sup>, 陆源及远岸泥沙输入较多、物源更为复杂有关。

酸化后残余物的 TOC 含量整体以大粒径珊瑚砂较高, 尤其在 IC 含量高的站位, 可能与珊瑚砂内部有机质的贡献有关。随着珊瑚砂破碎, 内部有机碳释放与微生物降解加剧, 同时细颗粒中低 TOC 陆源泥沙的混入比例上升, 导致 TOC 含量降低。在受陆源影响显著的 WZD-14, TOC 含量在粒径进一步减小时又转而上升, 呈现类似泥质沉积物的特征, 表明外源泥沙的影响占主导。综合三个站位可见, 酸化后 TOC 含量随 IC 下降先快速降低, 在 IC 约为 78% 处达到最低, 随后随 IC 继续下降而回升, 呈现明显的两段式分

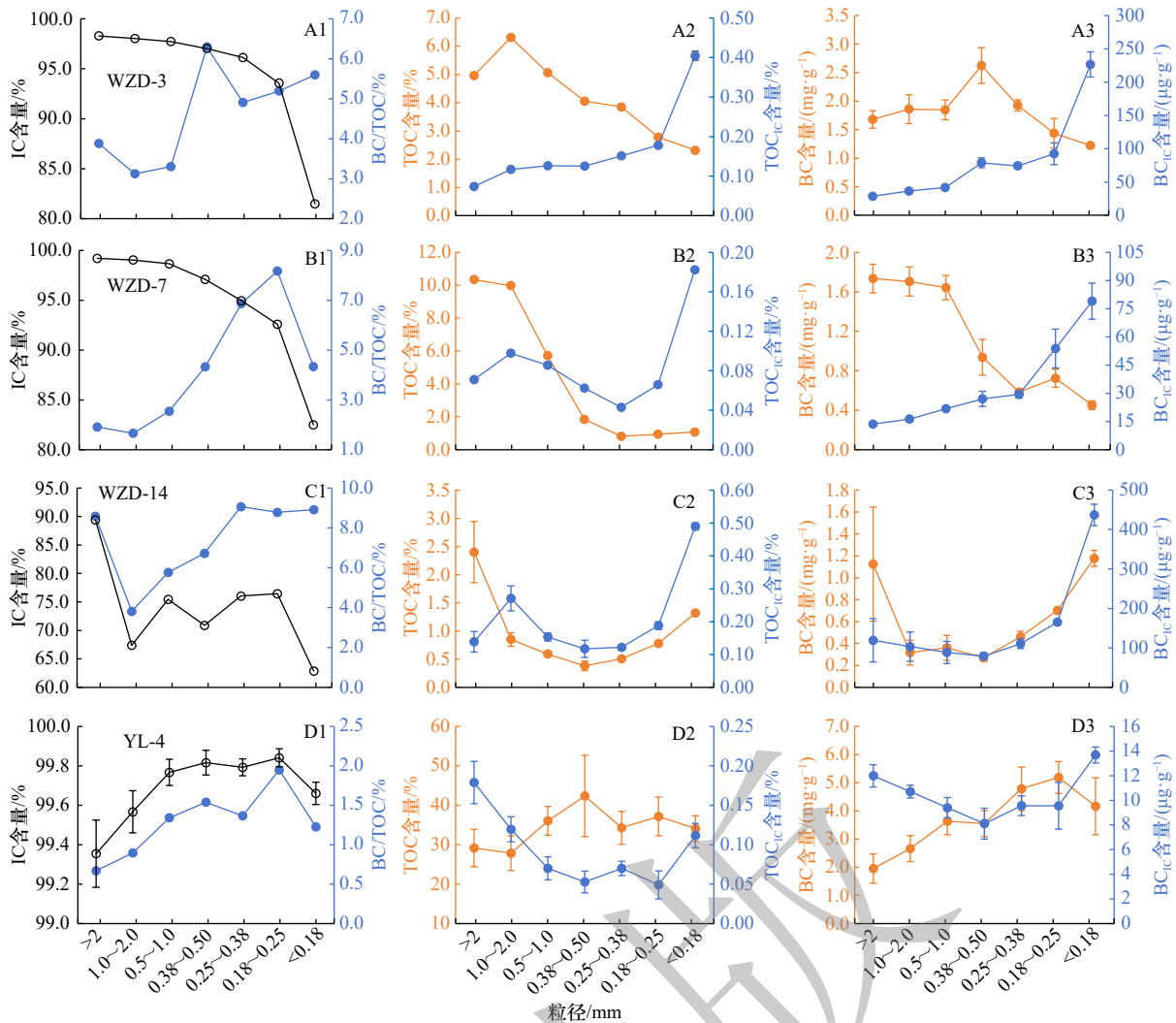


图4 涠洲岛和永乐环礁不同粒径珊瑚砂中无机碳酸盐(IC)、有机碳(TOC和TOC<sub>IC</sub>)和黑碳(BC和BC<sub>IC</sub>)含量

Fig. 4 Contents of inorganic carbonates (IC), total organic carbon (TOC and TOC<sub>IC</sub>), and black carbon (BC and BC<sub>IC</sub>) in coral sands of different particle sizes from Weizhou Island and Yongle Atoll

布模式(图5-A1),分别对应钙质沉积物主控和泥质沉积物主控两种机制。

BC含量(酸化后残余物)随粒径的变化与TOC类似:WZD-3先升后降,WZD-7先缓降后急降,WZD-14则快速下降后趋于平稳再逐步回升至最高。总体仍随IC含量变化呈现抛物线型两段分布(图5-A2):在珊瑚砂纯度较高阶段,破碎导致IC与BC同步下降;而当破碎至一定程度、外源黏土矿物、有机碎屑及燃烧产物输入增加时,IC继续降低,BC含量则转而上升。

比较涠洲岛三个站点,位于西南侧的WZD-14常受西南浪与海岸侵蚀影响,陆源或远岸泥沙输入较强,因而IC、TOC与BC含量均明显低于WZD-3和WZD-7,但TOC<sub>IC</sub>和BC<sub>IC</sub>较高,且BC/TOC比值更高(平均 $7.4\% \pm 1.9\%$ ,范围 $3.8\% \sim 9.1\%$ ),指示该区域有机碳受到更多高强度/高温燃烧过程的影响。WZD-

3和WZD-7的BC/TOC均值分别为 $4.6\% \pm 1.1\%$ 和 $4.3\% \pm 2.3\%$ ,反映其BC主要受低温生物质燃烧过程的影响<sup>[47]</sup>。相比之下,永乐环礁珊瑚砂的BC/TOC比值更低( $1.3\% \pm 0.4\%$ ),说明其有机碳主要来自于本地海洋生物,生物质燃烧来源的贡献较小。

### 3.2.2 不同粒径珊瑚砂中黑碳的分子组成及凝练度变化特征

平均酸数(AveBPCA)是表征黑碳芳环缩合程度的重要参数,计算方式为各苯多羧酸组分的羧基数与其摩尔占比的加权和,公式为: $AveBPCA = 3 \times f_{B3} + 4 \times f_{B4} + 5 \times f_{B5} + 6 \times f_{B6}$ , $f_{B3}$ 、 $f_{B4}$ 、 $f_{B5}$ 、 $f_{B6}$ 分别为B3、B4、B5、B6的摩尔占比(%)<sup>[38]</sup>。AveBPCA值越高,表明黑碳的芳环缩合度越高,对应高温燃烧源贡献越大。如图6所示,BC的分子组成随粒径发生系统性变化。在纯度最高的永乐环礁珊瑚砂中,B6+5/B4+3(B65/B43)比值(1.01~1.42)随粒径减小逐渐上升,B6/B5

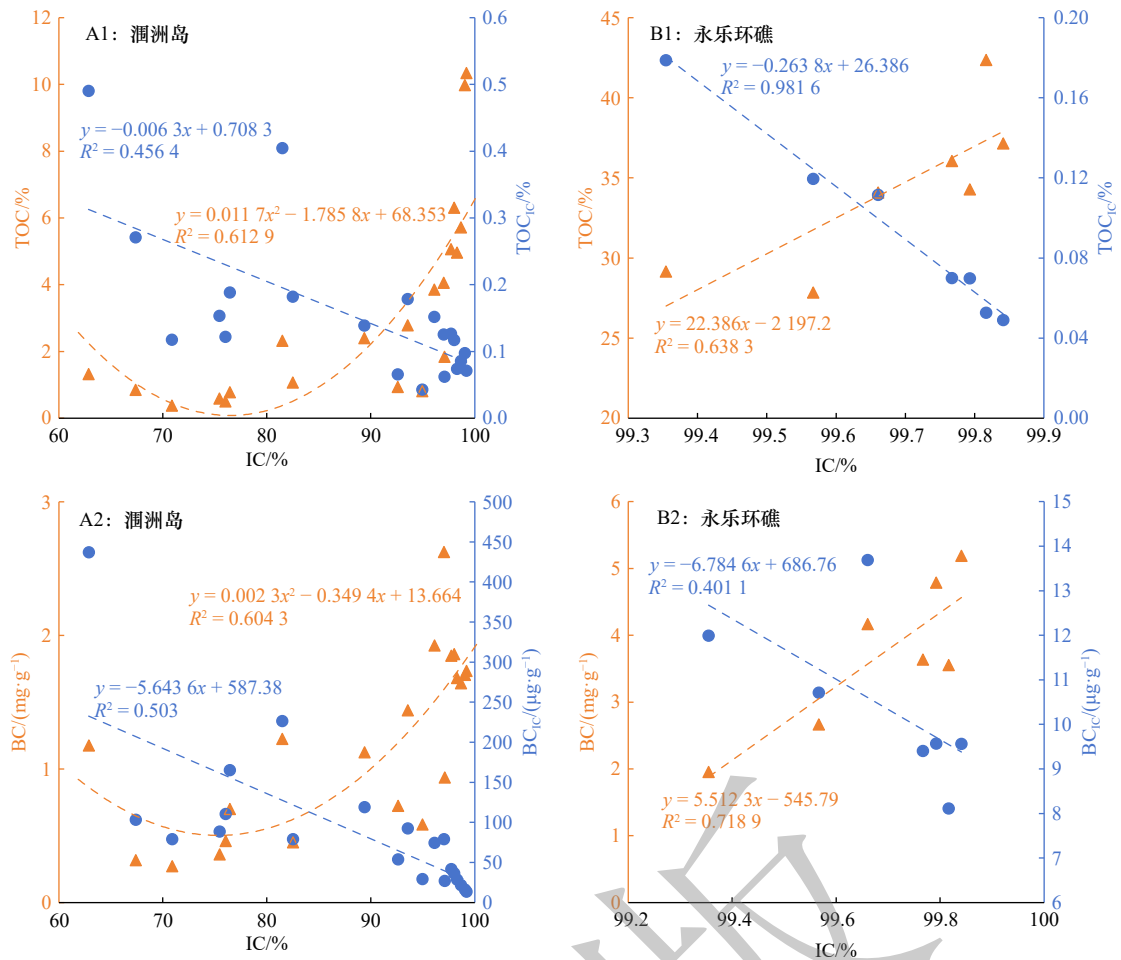


图5 潤洲岛和永乐环礁不同粒径珊瑚砂中无机碳酸盐(IC)与有机碳(TOC和TOC<sub>IC</sub>)和黑碳(BC和BC<sub>IC</sub>)的关系  
 Fig. 5 Relationships between inorganic carbonates (IC) and organic carbon (TOC and TOC<sub>IC</sub>) and black carbon (BC and BC<sub>IC</sub>) in coral sands of different particle sizes from Weizhou Island and Yongle Atoll

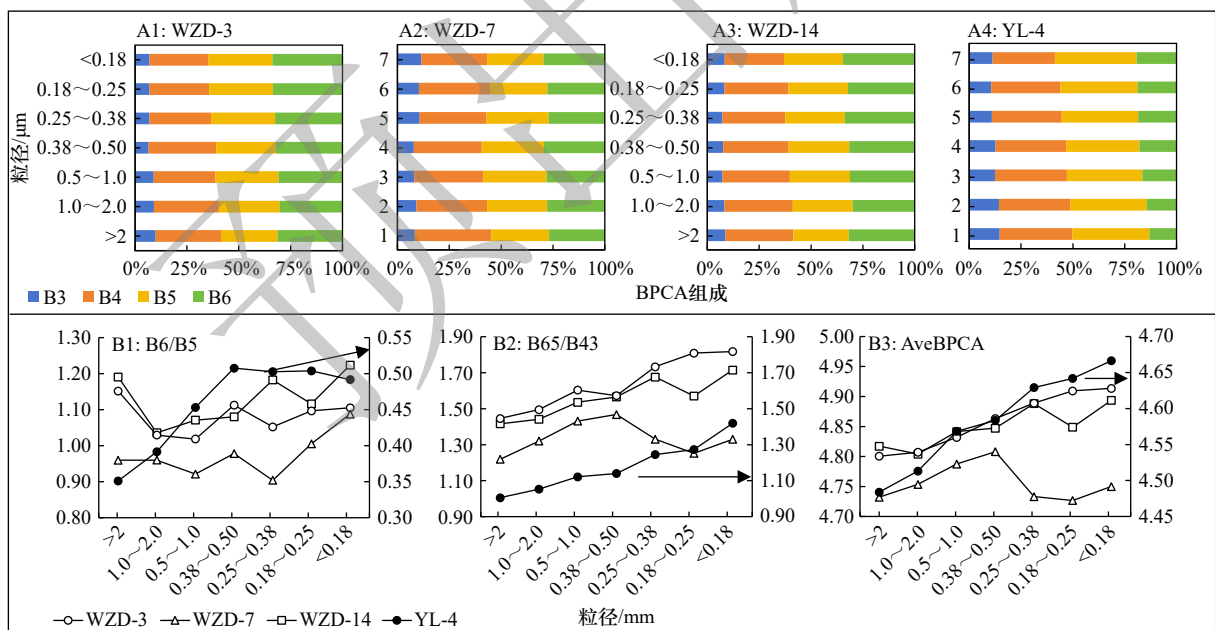


图6 不同粒径珊瑚砂中黑碳的分子组成和凝结核  
 Fig. 6 Molecular composition and coagulation degree of black carbon in coral sands of different particle sizes

(0.35~0.50)则在 0.38~0.5 mm 达到峰值后趋于平稳; AveBPCA(4.48~4.67)与 B65/B43 呈现相似的上升趋势。该 AveBPCA 范围指示该区域 BC 主要来源于典型生物质燃烧(如森林火灾、草原火等)<sup>[10, 48]</sup>。AveBPCA 和 B65/B43 同步升高,表明随着粒径减小,高缩合度的 BC 比例升高,这可能是因为在珊瑚砂破碎过程中低缩合度 BC 更易被微生物降解,使得残留物中高缩合组分相对富集;同时,细颗粒珊瑚砂中远距离迁移的大气沉降颗粒物占比上升,而这类颗粒物中的 BC 通常具有较高的缩合度<sup>[27]</sup>。

与涠洲岛相比,永乐环礁珊瑚砂中的 BC 的凝结度较低,即高缩合组分 B6+5 与 B6 占比较低,这可能是因为西沙海域受到生物质燃烧影响大于化石燃料,且陆源 BC 在长距离大气传输过程中,高缩合度的 B6、B5 较低缩合度的 B3、B4 更易发生光降解<sup>[49]</sup>。

涠洲岛珊瑚砂的 B65/B43(1.22~1.82)、B6/B5(0.90~1.22)和 AveBPCA(4.73~4.91)均明显高于永乐环礁,表明相对于永乐环礁,涠洲岛区域 BC 受到更大的近岸化石燃料燃烧的影响更大,这与耿晓飞等人关于北部湾大气颗粒物黑碳中船舶排放贡献突出的结论一致<sup>[50]</sup>。三个站位 BC 组成随粒径变化的规律不尽相同:在大粒径范围(>0.38 mm), B65/B43 和 AveBPCA 均随着粒径减小而上升,表现出与永乐环礁珊瑚砂相似的趋势及可能机制;但是当粒径进一步减小时,各站位变化出现分异,即 WZD-3 持续上升, WZD-14 继续上升后在 0.18~0.25mm 处小幅下降而后回升, WZD-7 则转为持续下降两次后再小幅上升。这种中小粒径范围内组成变化的差异,可能与各站位的物源组成不同有关,是珊瑚砂与陆源泥质/砂质沉积物共同作用的结果。

### 3.3 珊瑚砂中黑碳的碳封存意义与潜力

#### 3.3.1 基于沉积速率与存量的珊瑚砂黑碳封存量估算

珊瑚砂的沉积速率受珊瑚礁造礁速率、水动力条件及区域沉积环境影响,南海北部珊瑚礁区珊瑚砂的表层沉积速率约为 1.27~3.85mm/a<sup>[43]</sup>,远高于深海泥质沉积物的沉积速率(0.002 8~0.007 5 mm/a)<sup>[51]</sup>,快速的沉积过程可使黑碳迅速被埋藏,减少其在表层环境中的降解与再迁移。结合本研究测得的黑碳含量数据(经碳酸盐校正后,涠洲岛 BC<sub>IC</sub> 含量 85.1 ± 60.7 μg/g,永乐环礁 BC<sub>IC</sub> 含量 9.57 ± 2.23 μg/g),以南海典型珊瑚礁区珊瑚砂干密度 1.3 g/cm<sup>3</sup><sup>[52]</sup>、平均沉积速率 2.56 mm/a<sup>[43]</sup>为基础,初步估算南海近岸与远岸珊瑚砂的黑碳埋藏通量( $F_{BC} = BC_{IC} \times \text{干密度} \times \text{沉积速率}$ ):

近岸涠洲岛珊瑚砂黑碳埋藏通量:

$$F_{BC, Weizhou} = (85.1 \times 10^{-6}) \text{ g/g} \times (1.3 \times 10^6) \text{ g/m}^3 \times (2.56 \times 10^{-3}) \text{ m/a} = 0.283 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$$

远岸永乐环礁珊瑚砂黑碳埋藏通量:

$$F_{BC, Yongle} = (9.57 \times 10^{-6}) \text{ g/g} \times (1.3 \times 10^6) \text{ g/m}^3 \times (2.56 \times 10^{-3}) \text{ m/a} = 0.0318 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$$

我国南海珊瑚礁分布面积约为  $1.4 \times 10^4 \text{ km}^2$ <sup>[53]</sup>,若按近岸珊瑚礁占比 30%、远岸占比 70%,可估算南海珊瑚砂黑碳年封存总量( $M_{BC, South China Sea}$ ):

$$M_{BC, South China Sea} = (0.283 \times 0.3 + 1.4 \times 10^{10} + 0.0318 \times 0.7 \times 1.4 \times 10^{10}) \times 10^{-6} \text{ t/a} = 1500 \text{ t/a}$$

根据最新高分辨率卫星测绘数据<sup>[54]</sup>,全球浅水珊瑚礁(水深 0~20/30 m)总面积约为  $3.48 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,依据南海的封存水平推算,全球珊瑚砂黑碳年封存总量可达 37 300 t/a,成为海洋黑碳封存的重要补充库。需要指出的是,珊瑚礁环境具有极高的空间异质性,本文基于代表性站位的初步估算可能存在一定的不确定性,未来需进一步扩大空间测年与黑碳含量的同步观测,以更精确地约束全球珊瑚砂的黑碳碳汇通量。

#### 3.3.2 珊瑚砂中黑碳封存的稳定性与持久性机制

从封存稳定性角度,BC 本身具有高度惰性,其芳环结构使其在埋藏过程中难以被微生物降解或化学氧化<sup>[55]</sup>。同时,BC 可通过颗粒吸附、孔隙填充等方式进入珊瑚骨骼的孔隙与裂隙中,被钙质基质物理包裹<sup>[33]</sup>。这种包裹作用使黑碳与水体、氧气及微生物降解介质隔绝,减少了黑碳的化学氧化与微生物降解概率<sup>[56]</sup>。本研究中,即使在不同粒径珊瑚砂中,BC 的 BPCA 分子组成总体保持稳定,说明 BC 在珊瑚砂沉积环境中具有较高的化学稳定性。此外,珊瑚砂主要成分为文石和镁方解石( $\text{CaCO}_3$  含量通常>90%)<sup>[57]</sup>,碳酸盐体系的溶解-沉淀平衡使珊瑚礁沉积物孔隙水具有较强的 pH 缓冲能力,对应孔隙水 pH 通常在弱碱性范围(约 8.0)。这种弱碱性环境有利于抑制有机质的微生物降解,为 BC 提供有利的保存条件。

珊瑚砂较高的沉积速率(1.27~3.85mm/a)可使表层沉积的黑碳在短时间内被后续沉积物覆盖,快速进入埋藏环境<sup>[43]</sup>。黑碳在表层环境中的暴露时间越短,受大气氧化、光降解及生物扰动的影响越小,而快速埋藏后的还原环境进一步抑制了黑碳的氧化分解,使其能够长期保存。

#### 3.3.3 珊瑚砂黑碳封存的全球意义与研究展望

珊瑚礁虽仅覆盖全球海洋面积的 0.2%<sup>[31]</sup>,但珊瑚砂的快速沉积与高封存稳定性,使其成为海洋黑碳循环中独特的“惰性碳汇”,丰富了珊瑚礁生态系统的碳汇功能内涵。传统珊瑚礁碳汇主要依靠珊瑚钙化

作用固定无机碳,而珊瑚砂黑碳封存实现了惰性有机碳的长期埋藏,二者相互独立、互补共存,共同构成珊瑚礁生态系统的双重碳汇体系,为海洋碳中和提供了重要的自然途径。

从区域尺度来看,南海作为全球珊瑚礁分布的重要区域,其珊瑚砂黑碳封存不仅是南海碳收支的重要组成部分,还受陆源黑碳输入、大气沉降等过程调控,成为连接陆地、大气与海洋黑碳循环的重要纽带。近岸珊瑚砂的黑碳封存受陆源人类活动影响显著,可作为区域黑碳排放与迁移的“沉积记录载体”;远岸珊瑚砂的黑碳封存则主要受全球大气传输过程影响,其黑碳赋存特征可反映全球生物质燃烧的区域背景特征。总体而言,珊瑚砂凭借快速的沉积速率、独特的钙质保护环境及广泛的分布范围,成为黑碳长期封存的有效载体,其黑碳封存潜力与稳定性在海洋碳循环中具有不可忽视的意义。

## 4 结论

### (1) 赋存特征与来源解析

近岸涠洲岛珊瑚砂中黑碳含量显著高于远岸的

永乐环礁,其空间分异主要受控于陆源输入、水动力条件及局地地貌。分子组成(BPCA)特征表明,生物质燃烧是影响南海北部两区域的区域性背景来源;而受近岸人类活动影响,涠洲岛区域叠加了强烈的化石燃料等高温燃烧源输入,导致其黑碳呈现出更高的芳环缩合度。

### (2) 粒径效应与赋存动态

在高纯度珊瑚砂中,经碳酸盐校正的黑碳( $BC_{IC}$ )含量随粒径减小呈“先降后升”的趋势。这一两阶段分布模式揭示了钙质颗粒破碎风化过程中,黑碳存在“大粒径骨骼破碎释放”与“细微颗粒表面再吸附”的动态转化行为。

### (3) 赋存机制与碳汇潜力

黑碳主要封装于大粒径珊瑚骨骼内部及吸附于细颗粒表面,且在不同粒径珊瑚砂中的分子组成保持相对稳定,证实了高钙质珊瑚砂是黑碳长期有效埋藏的载体。初步的通量估算进一步表明,珊瑚礁生态系统不仅是传统无机碳循环的关键环节,更是长期且稳定的“惰性黑碳封存库”,在区域乃至全球的海洋黑碳收支中具有不可忽视的贡献。

## 参考文献:

- [1] Goldberg E D. Black Carbon in the Environment: Properties and Distribution[M]. New York: John Wiley, 1985.
- [2] 方引. 渤海黑碳的区域地球化学行为[D]. 烟台: 中国科学院大学, 2016.  
Fang Yin. Regional geochemical behavior of black carbon in Bohai and Yellow Seas, China[D]. Yantai: University of Chinese Academy of Sciences, 2016.
- [3] Marques J S J, Dittmar T, Niggemann J, et al. Dissolved black carbon in the headwaters-to-ocean continuum of Paraíba Do Sul River, Brazil[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2017, 5: 11.
- [4] Huang Changchun, Meng Lize, He Yao, et al. Spatial variation of particulate black carbon, and its sources in a large eutrophic urban lake in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 803: 150057.
- [5] Mitra S, Bianchi T S, McKee B A, et al. Black carbon from the Mississippi River: quantities, sources, and potential implications for the global carbon cycle[J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, 36(11): 2296–2302.
- [6] Coppola A I, Wagner S, Lennartz S T, et al. The black carbon cycle and its role in the Earth system[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2022, 3(8): 516–532.
- [7] 张曦. 海沟沉积物中黑碳的来源、分布和埋藏通量[D]. 上海: 上海海洋大学, 2021.  
Zhang Xi. Sources, distribution and burial flux of black carbon in trench sediments[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2021.
- [8] Jones M W, Kelley D I, Burton C A, et al. State of wildfires 2023–2024[J]. *Earth System Science Data*, 2024, 16(8): 3601–3685.
- [9] Santín C, Doerr S H, Preston C M, et al. Pyrogenic organic matter production from wildfires: a missing sink in the global carbon cycle[J]. *Global Change Biology*, 2015, 21(4): 1621–1633.
- [10] Jones M W, Santín C, Van Der Werf G R, et al. Global fire emissions buffered by the production of pyrogenic carbon[J]. *Nature Geoscience*, 2019, 12(9): 742–747.
- [11] Penner J E, Eddleman H, Novakov T. Towards the development of a global inventory for black carbon emissions[J]. *Atmospheric Environment. Part A. General Topics*, 1993, 27(8): 1277–1295.
- [12] Druffel E R M. Comments on the importance of black carbon in the global carbon cycle[J]. *Marine Chemistry*, 2004, 92(1/4): 197–200.
- [13] Santín C, Doerr S H, Kane E S, et al. Towards a global assessment of pyrogenic carbon from vegetation fires[J]. *Global Change Biology*, 2016, 22(1): 76–91.
- [14] Bond T C, Doherty S J, Fahey D W, et al. Bounding the role of black carbon in the climate system: a scientific assessment[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118(11): 5380–5552.
- [15] 汪青. 土壤和沉积物中黑碳的环境行为及效应研究进展[J]. *生态学报*, 2012, 32(1): 293–310.

- Wang Qing. A review of the environmental behavior and effects of black carbon in soils and sediments[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(1): 293–310.
- [16] Bao Hongyan, Niggemann J, Luo Li, et al. Aerosols as a source of dissolved black carbon to the ocean[J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 510.
- [17] Fang Yin, Chen Yingjun, Huang Guopei, et al. Particulate and dissolved black carbon in coastal China seas: spatiotemporal variations, dynamics, and potential implications[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55(1): 788–796.
- [18] 盛雪莹, 刘景富, 赖余建, 等. 黑碳在环境中的赋存、时空分布及迁移转化特征[J]. *环境化学*, 2024, 43(6): 1980–1995.  
Sheng Xueying, Liu Jingfu, Lai Yujian, et al. Occurrence, spatiotemporal distribution, and migration-transformation characteristics of black carbon in the environment[J]. *Environmental Chemistry*, 2024, 43(6): 1980–1995.
- [19] Coppola A I, Wiedemeier D B, Galy V, et al. Global-scale evidence for the refractory nature of riverine black carbon[J]. *Nature Geoscience*, 2018, 11(8): 584–588.
- [20] Wagner S, Jaffé R, Stubbins A. Dissolved black carbon in aquatic ecosystems[J]. *Limnology and Oceanography Letters*, 2018, 3(3): 168–185.
- [21] Raymond P A, Bauer J E. Riverine export of aged terrestrial organic matter to the North Atlantic Ocean[J]. *Nature*, 2001, 409(6819): 497–500.
- [22] Louwies T, Nawrot T, Cox B, et al. Blood pressure changes in association with black carbon exposure in a panel of healthy adults are independent of retinal microcirculation[J]. *Environment International*, 2015, 75: 81–86.
- [23] Masiello C A, Druffel E R M. Black carbon in deep-sea sediments[J]. *Science*, 1998, 280(5371): 1911–1913.
- [24] Wei Jing, Wang Jun, Li Zhanqing, et al. Long-term mortality burden trends attributed to black carbon and PM<sub>2.5</sub> from wildfire emissions across the continental USA from 2000 to 2020: a deep learning modelling study[J]. *The Lancet Planetary Health*, 2023, 7(12): e963–e975.
- [25] Huang Guopei, Chen Yingjun, Tian Chongguo, et al. Spatial distributions and seasonal variations of dissolved black carbon in the Bohai Sea, China[J]. *Journal of Coastal Research*, 2016, 74(S1): 214–227.
- [26] Fossum K N, Ovadnevaite J, Liu Dantong, et al. Background levels of black carbon over remote marine locations[J]. *Atmospheric Research*, 2022, 271: 106119.
- [27] Li Haolan, Zhang Ruijie, Yan Annan, et al. Black carbon in deep-sea seamount sediment cores: vertical variation and non-negligible char black carbon[J]. *Environmental Science & Technology*, 2023, 57(39): 14602–14610.
- [28] Zhang Xi, Xu Yunping, Xiao Wenjie, et al. The hadal zone is an important and heterogeneous sink of black carbon in the ocean[J]. *Communications Earth & Environment*, 2022, 3(1): 25.
- [29] Suman D O, Kuhlbusch T A J, Lim B. Marine sediments: a reservoir for black carbon and their use as spatial and temporal records of combustion[C]//*Sediment Records of Biomass Burning and Global Change*. Berlin: Springer, 1997: 271–293.
- [30] Spalding M D, Grenfell A M. New estimates of global and regional coral reef areas[J]. *Coral Reefs*, 1997, 16(4): 225–230.
- [31] 赵美霞, 余克服, 张乔民. 珊瑚礁区的生物多样性及其生态功能[J]. *生态学报*, 2006, 26(1): 186–194.  
Zhao Meixia, Yu Kefu, Zhang Qiaomin. Review on coral reefs biodiversity and ecological function[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(1): 186–194.
- [32] Cotovicz L C, Chielle R, Marins R V. Air-sea CO<sub>2</sub> flux in an equatorial continental shelf dominated by coral reefs (Southwestern Atlantic Ocean)[J]. *Continental Shelf Research*, 2020, 204: 104175.
- [33] Roberts L R, Kersting D K, Zinke J, et al. First recorded presence of anthropogenic fly-ash particles in coral skeletons[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 921: 170665.
- [34] 薛保铭. 北部湾近海沉积物微塑料污染时空格局及源—汇关系研究[D]. 南宁: 广西大学, 2021.  
Xue Baoming. The study of time-space distribution and source-sink relation of microplastics in coastal sediment from Beibu gulf[D]. Nanning: Guangxi University, 2021.
- [35] 陈宏言, 花育辉, 苏庆. 北海—涠洲岛海底地形地貌特征及成因分析[J]. *南方国土资源*, 2018(2): 45–48.  
Chen Hongyan, Hua Yuhui, Su Qing. Characteristics and genesis analysis of seabed topography and landform in the Beihai-Weizhou island area[J]. *Southern Land and Resources*, 2018(2): 45–48. (查阅网上资料, 未找到本条文献英文翻译信息, 请确认)
- [36] Wagner S, Cawley K M, Rosario-Ortiz F L, et al. In-stream sources and links between particulate and dissolved black carbon following a wildfire[J]. *Biogeochemistry*, 2015, 124(1): 145–161.
- [37] Wiedemeier D B, Lang S Q, Gierga M, et al. Characterization, quantification and compound-specific isotopic analysis of pyrogenic carbon using benzene polycarboxylic acids (BPCA)[J]. *Journal of Visualized Experiments*, 2016(111): 53922.
- [38] Dittmar T. The molecular level determination of black carbon in marine dissolved organic matter[J]. *Organic Geochemistry*, 2008, 39(4): 396–407.
- [39] Glaser B, Haumaier L, Guggenberger G, et al. Black carbon in soils: the use of benzenecarboxylic acids as specific markers[J]. *Organic Geochemistry*, 1998, 29(4): 811–819.
- [40] Brodowski S, Rodionov A, Haumaier L, et al. Revised black carbon assessment using benzene polycarboxylic acids[J]. *Organic Geochemistry*, 2005, 36(9): 1299–1310.

- [41] Vaezzadeh V, Yi Xin, Thomes M W, et al. Use of molecular markers and compound-specific isotopic signatures to trace sources of black carbon in surface sediments of Peninsular Malaysia: impacts of anthropogenic activities[J]. *Marine Chemistry*, 2021, 237: 104032.
- [42] Ziolkowski L A, Chamberlin A R, Greaves J, et al. Quantification of black carbon in marine systems using the benzene polycarboxylic acid method: a mechanistic and yield study[J]. *Limnology and Oceanography: Methods*, 2011, 9(4): 140.
- [43] 高洁, 余克服, 许慎栋, 等. 西沙群岛永乐环礁礁外坡沉积物中有机碳的含量与来源分析[J]. *热带海洋学报*, 2024, 43(3): 131–145.  
Gao Jie, Yu Kefu, Xu Shendong, et al. Content and source analysis of organic carbon in the outer slope sediments of the Yongle Atoll, Xisha Islands[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2024, 43(3): 131–145.
- [44] Zeller M A, Van Dam B R, Lopes C, et al. Carbonate-associated organic matter is a detectable dissolved organic matter source in a sub-tropical seagrass meadow[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2020, 7: 580284.
- [45] 姚子恒, 高伟, 高珊, 等. 广西北海涠洲岛海岸侵蚀特征[J]. *海岸工程*, 2013, 32(4): 31–40.  
Yao Ziheng, Gao Wei, Gao Shan, et al. Coastal erosion of the Weizhou island in Beihai, Guangxi Province[J]. *Coastal Engineering*, 2013, 32(4): 31–40.
- [46] 丁涛. 乌梁素海不同粒径沉积物中黑碳对重金属吸附特征的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2016.  
Ding Tao. The study on adsorption of heavy metals on different grain size natural black carbon extracted from lake sediment, Wuliang-suhai[D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2016.
- [47] He Yue, Zhang Ganlin. Historical record of black carbon in urban soils and its environmental implications[J]. *Environmental Pollution*, 2009, 157(10): 2684–2688.
- [48] Notterpek I, Craig O E, Garberi P, et al. BPChAr—a benzene polycarboxylic Acid database to describe the molecular characteristics of laboratory-produced charcoal: implications for soil science and archaeology[J]. *PLoS One*, 2025, 20(5): e0321584.
- [49] Vaezzadeh V, Zhong Guangcai, Zhang Gan. Benzene polycarboxylic acids as molecular markers of black carbon: progresses and challenges[J]. *Chemosphere*, 2023, 341: 140112.
- [50] Geng Xiaofei, Li Jun, Zhong Guangcai, et al. Ship emissions as the largest contributor to coastal atmospheric black carbon at a receptor island in Southern China[J]. *Environmental Science & Technology Letters*, 2024, 11(7): 723–729.
- [51] Costa K M, Ossa Ossa F, Dunlea A, et al. Calculating sedimentation rates of oxic pelagic clays using core top thorium isotopes[J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2025, 26(1): e2024GC011717.
- [52] 张新康, 贾国东. 沉积物埋藏深度和碳酸钙含量对南海沉积物干密度的影响[J]. *海洋地质前沿*, 2022, 38(6): 25–33.  
Zhang Xinkang, Jia Guodong. Burial depth and calcium carbonate content of sediment: impact on the sediment dry bulk density for the South China Sea[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2022, 38(6): 25–33.
- [53] 黄晖, 陈竹, 黄林韬. 中国珊瑚礁状况报告 2010–2019[M]. 北京: 海洋出版社, 2021.  
Huang Hui, Chen Zhu, Huang Lintao. China Coral Reef Status Report: 2010–2019[M]. Beijing: China Ocean Press, 2021. (查阅网上资料, 未找到本条文献英文翻译信息, 请确认)
- [54] Lyons M B, Murray N J, Kennedy E V, et al. New global area estimates for coral reefs from high-resolution mapping[J]. *Cell Reports Sustainability*, 2024, 1(2): 100015.
- [55] Coppola A I, Wagner S, Lennartz S T, et al. The black carbon cycle and its role in the Earth system[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2022, 3(8): 516–532. (查阅网上资料, 本条文献与第 6 条文献重复, 请确认)
- [56] Ingalls A E, Lee C, Druffel E R M. Preservation of organic matter in mound-forming coral skeletons[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2003, 67(15): 2827–2841.
- [57] Yamamoto S, Kayanne H, Tokoro T, et al. Total alkalinity flux in coral reefs estimated from eddy covariance and sediment pore-water profiles[J]. *Limnology and Oceanography*, 2015, 60(1): 229–241.

## Occurrence and Carbon Sequestration Implications of Black Carbon in Coral Sands of the South China Sea: Evidence from Weizhou Island and Yongle Atoll

Chen Meiqi<sup>1#</sup>, Wang Jingyu<sup>1#</sup>, Zhang Ruijie<sup>1</sup>, Wu Yang<sup>1</sup>, Peng Wentuan<sup>1</sup>, Wang Minrui<sup>1</sup>,  
Ye Quanfa<sup>1</sup>, Sun Zhuolong<sup>1</sup>, Xian Aihua<sup>1</sup>, Yu Kefu<sup>1,2</sup>

(1. *Guangxi Laboratory on the Study of Coral Reefs in the South China Sea/Coral Reef Research Center of China/School of Marine Sciences, Guangxi University, Nanning 530004, China*; 2. *Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou 511458, China*)

**Abstract:** Black carbon (BC), an inert organic carbon primarily produced by the incomplete combustion of fossil fuels or biomass, constitutes an important stable carbon sink when buried in marine sediments. Current research on sedimentary BC largely focuses on muddy or sandy deposits, while highly calcareous coral sands have received limited attention. In this study, using hydrochloric acid pretreatment to remove carbonate interference, the benzene polycarboxylic acid (BPCA) molecular marker method was applied to systematically investigate the occurrence characteristics of BC in coral sands from the nearshore Weizhou Island and the offshore Yongle Atoll in the South China Sea. The results demonstrate that BC is ubiquitous in coral sands. The BC content at Weizhou Island is significantly higher than at Yongle Atoll, exhibiting a spatial pattern of being higher in nearshore and lower in offshore areas, which indicates that terrestrial input is the dominant source of BC at Weizhou Island. BPCA composition reveals that biomass burning serves as a regional background source affecting both areas; however, influenced by nearshore anthropogenic activities, Weizhou Island is superimposed with strong high-temperature combustion inputs, such as fossil fuels, resulting in a higher degree of aromatic condensation. Grain-size analyses suggests a dynamic behavior characterized by “initial release followed by re-adsorption” of BC during the fragmentation of coral sands. This study demonstrates that coral sands serve as an effective burial medium for BC. Preliminary estimates indicate substantial black carbon sequestration fluxes, which is of great significance for comprehensively evaluating the carbon sink function of coral reef ecosystems.

**Key words:** Black carbon; Coral sand; Carbon sink; Benzene polycarboxylic acids (BPCAs); Weizhou Island; Yongle Atoll