

曾维主, 郑兆勇. 港珠澳大桥海域表层沉积物中有机质分布与来源分析[J]. 海洋地质前沿, 2025, 41(5): 80-89.

ZENG Weizhu, ZHENG Zhaoyong. Distribution and sources of organic matter in surface sediment near the Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge[J]. Marine Geology Frontiers, 2025, 41(5): 80-89.

港珠澳大桥海域表层沉积物中有机质分布与来源分析

曾维主^{1,2}, 郑兆勇^{3*}

(1 岭南师范学院生命科学与技术学院, 湛江 524048; 2 广东省粤西蓝碳资源开发与利用工程技术研究中心, 湛江 524048;

3 自然资源部南海发展研究院, 广州 510310)

摘要: 为了研究港珠澳大桥附近沉积有机质 (SOM) 的分布及来源, 于 2021 年 5 月在港珠澳大桥附近水域采集了 58 个表层沉积物样品, 并对它们的粒度、总有机碳 (TOC)、总氮 (TN) 含量和有机碳同位素组成 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$) 数据进行了分析, 对沉积有机质的空间分布规律及来源进行了研究。结果显示, 研究区 TOC 含量介于 0.17%~1.19%, TOC/TN 比值为 8~18, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值为 -31‰~-22‰。综合利用 TOC/TN 比值与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值将沉积有机质划分为 3 种类型: 第 1 类为伶仃洋现代河口沉积有机质, 来源于流域土壤、淡水藻类和海洋藻类, 平均占比分别为 61%、11% 和 28%; 第 2、3 类沉积有机质来源于第四纪陆相地层, 随着大桥海底隧道基坑开挖被搬运至其北侧附近和大桥中西部局部, 呈斑块状分布。相关性分析表明, 粒度是沉积有机质富集的主控因素, 但对第 1 类沉积物中不同来源有机质的富集控制存在空间差异。大桥施工等人为活动导致表层沉积物中有机质类型由海相向陆源转变, 建议未来更多地关注伶仃洋表层沉积物变化对海域生态环境产生的影响。

关键词: 表层沉积物; 有机碳; 来源; 粒度; 港珠澳大桥

中图分类号: P736.4

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2024.129

0 引言

沉积物中有机质含量与组成能够有效反映沉积环境和物源信息。常见的有机地球化学参数包括总有机碳 (TOC) 含量、总氮 (TN) 含量和有机碳同位素组成 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值等, 其中, TOC/TN 比值和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 参数由于具有生物特性, 能够有效指示有机质类型和沉积物来源^[1-2]。河口沉积物中有机质比较复杂, 同时受到径流输入和潮流环境的影响, 通

常 TOC 含量随着水动力条件的减弱、沉积物粒度的减小而增大^[3], 而有机质类型具有陆源和海源混合属性。

珠江口伶仃洋表层沉积物中 TOC、TN 含量整体呈现向东南递减的趋势, 并且内伶仃洋以陆源有机质为主, 外伶仃洋以海源有机质为主^[4]。近年来由于强烈人为活动的干扰, 伶仃洋表层沉积物中有机质的分布规律被破坏, 高陆源有机质含量沉积物主要呈斑块状分布在伶仃航道附近和中滩海域, 并且沉积物中陆源有机质占比相比之前明显增大^[5]。前人研究表明, 港珠澳大桥对整个伶仃洋沉积环境的影响不大, 对水动力和悬浮物影响主要限制在上下游 5 km 范围的海域^[6-8]。然而, 目前缺乏针对该海域大桥建成后表层沉积物分布的研究报道。

本研究详细调查了大桥海域表层沉积物中 TOC、TN 含量及 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 等的分布特征, 划分了沉积有机质类型, 揭示了不同沉积物有机质的主要来

收稿日期: 2024-05-29

资助项目: 广东省自然科学基金(2025A1515010228); 广东省人才发展战略专项资金(粤东粤西粤北地区人才发展帮扶计划); 广东省海洋经济发展重点项目(GDNRC[2020]050)

第一作者: 曾维主(1989—), 男, 博士, 讲师, 主要从事海洋沉积地质方面的研究工作。E-mail: zengweizhu@lingnan.edu.cn

* 通讯作者: 郑兆勇(1979—), 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事海洋资源和环境评价方面的研究工作。E-mail: 49169896@qq.com

源和控制因素,明确大桥建设对附近海域沉积物产生的影响。该研究有助于准确评估大桥对海域环境产生的影响,丰富了伶仃洋沉积环境的研究,具有重要的工程和科学意义。

1 研究区概况

珠江口伶仃洋水下地貌总体上呈“三滩两槽”格局,自西向东依次为西滩、西槽(伶仃水道)、中滩、东槽(矾石水道)和东滩(图 1)。径流泥沙自虎门、蕉门、洪奇门和横门输入,年均径流量为 $1.79 \times 10^{11} \text{ m}^3/\text{a}$,约占整个珠江的 63.5%,年均泥沙输入量为 $3.80 \times 10^7 \text{ t/a}$,约占整个珠江的 56.8%^[9]。潮汐类型为不规

则半日潮,平均潮差介于 0.9~1.6 m,虎门属于潮控型河口,潮差较大,径流输入较小,其他 3 个属于河控型河口,潮差较小,径流输入量较大^[10]。伶仃洋第四纪沉积地层变化显著,更新统及下全新统主要为河流相和滨海潮滩相,以砂质、粉砂沉积物和陆源有机质为主;上全新统主要是河口湾相和三角洲前缘相,以泥质、粉砂沉积物为主,为陆源和海源混有机质^[11-12]。港珠澳大桥位于外伶仃洋海域(淇澳岛和内伶仃岛以南),连接香港、澳门和珠海,大桥主体由桥梁、人工岛和海底隧道(桥岛隧)组成,海底隧道跨越大桥东部伶仃水道,大桥于 2009 年开工建设,于 2018 年完成主体工程。



图 1 伶仃洋水下地貌与表层沉积物采样位置

Fig.1 The topographical map of Lingdingyang Bay (LDB) and surface sediment sampling stations

2 材料与方法

于 2021 年 5 月在港珠澳大桥海域获取 58 个表层沉积物(图 1),样品站位均匀分布在大桥上下游 2 km 海域范围,水深介于 1~20 m。利用抓斗采样器获得表层(埋深 10 cm 以内)沉积物,并选取新

鲜(无明显扰动)的沉积物样品约 2 kg 装于 PE 塑料袋中。采集的沉积物样品冷藏运输,并尽快在实验室中冷冻干燥保存,以避免沉积物发生明显改变。

冷冻干燥后的沉积物样品混合均匀后,取约 0.1 g 做粒度分析。分析前使用 0.5 mol/L 的六偏磷

酸钠浸泡样品 24 h, 并利用超声波震荡 15 min。分析仪器为马尔文 3000 型激光粒度仪, 其测量范围为 0.01~3500 μm , 重复测量偏差控制在 1% 以内。沉积物粒度组分可划分为泥(<4 μm)、粉砂(4~63 μm)和砂(63~2000 μm), 平均粒径(Mz)按照福克和沃德公式^[13]计算得到。

冷冻干燥后的沉积物样品研磨粉碎并过 100 目筛子, 粉末样品进一步做 TOC 和 TN 含量分析。沉积物样品 TOC 和 TN 含量测试由德国生产的 Vario Macro CN 型元素分析仪完成^[14]。对于 TOC 含量分析, 粉末样品需要进行酸处理以去除无机碳, 使用浓度为 10% 的稀盐酸在 60 $^{\circ}\text{C}$ 温度下浸泡 24 h, 取 20~30 mg 酸处理后的干燥样品进行 TOC 含量上机测试。对于 TN 含量分析, 直接取粉末样品进行测试, 无需做酸处理。重复样品的 TOC 和 TN 含量的分析结果偏差分别控制在 $\pm 0.02\%$ 和 $\pm 0.005\%$ 以内。

沉积物样品的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 分析在英国生产的 Sercon 20-22 稳定同位素质谱仪上完成^[14]。测试粉末样品需进行酸处理以去除无机碳干扰, 酸处理溶液和流程与 TOC 分析相同, 并根据 TOC 含量称量适当质量样品上机测试。 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 计算公式如下:

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{org}} = \left(\frac{R_{\text{sample}}}{R_{\text{reference}}} - 1 \right) \times 1000 \quad (1)$$

式中: R_{sample} 和 $R_{\text{reference}}$ 分别为样品和参照样品的 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 值, $R_{\text{reference}}$ 为国际标准物(PeeDee Belemnite, PDB), 重复样品测量偏差控制在 $\pm 0.2\%$ 以内。

3 结果

3.1 表层沉积物粒度分布特征

港珠澳大桥海域表层沉积物的泥、粉砂、砂含量和平均粒径分布如图 2 所示, 总体上沉积物以泥、粉砂为主, 砂质沉积物呈斑块状分布在伶仃航道和中西部局部海域。泥含量高值区(>20%)主要分布在大桥西部和中部局部海域, 东部海域含量较低, 最低值在海底隧道北侧海域。粉砂含量在大桥海域分布较均匀, 含量主要在 60%~70%, 为研究区的主要粒度组分。砂含量在大部分海域<20%, 含量高值区位于海底隧道北侧海域。研究区表层沉积物平均粒径主要介于 6 Φ ~7 Φ , 分布规律与砂含量基本一致。

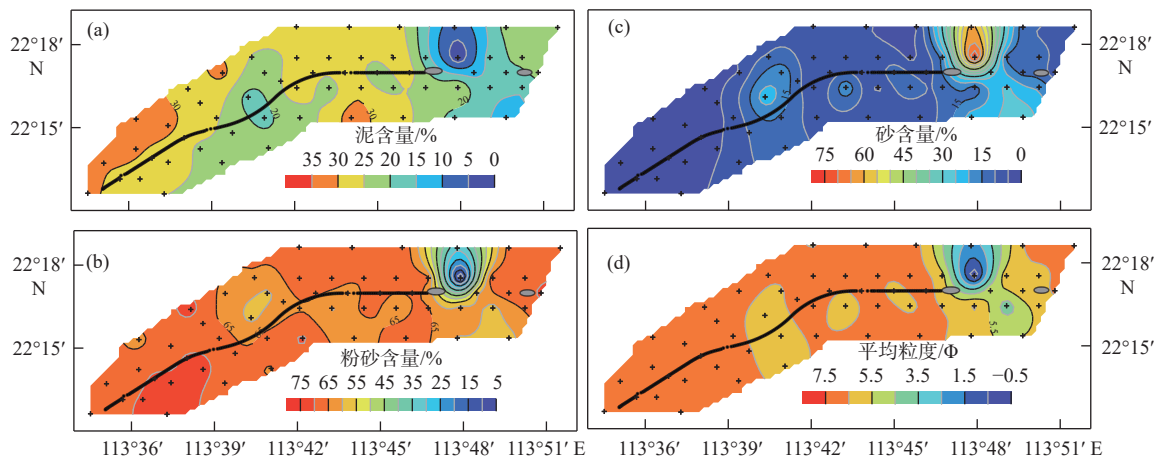


图 2 港珠澳大桥海域表层沉积物粒度分布

Fig.2 Distribution of grain size of surface sediments near the Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge

3.2 表层沉积物有机质分布特征

港珠澳大桥海域表层沉积物的 TOC 和 TN 含量分布模式基本一致(图 3a, b)。TOC 含量为 0.17%~1.19%, 平均为 0.91%; TN 含量为 0.01~0.14%, 平均为 0.09%。沉积物中有机质含量分布与泥含量基本一致, TOC 含量与泥含量之间呈现很好的正线性关系(图 4a, $R^2=0.7388$), 表明 TOC 分布

受沉积物粒度控制。有机质含量高值区主要分布在大桥西部、中部南北两侧和东北部局部海域; 有机质含量低值区主要分布在东部伶仃航道海域, 特别是海底隧道北侧, 和中西部沿着大桥轴线分布。TOC 与 TN 含量之间呈现很好的正线性关系(图 4b, $R^2=0.8028$), 并且经过坐标零点, 这与 2013 年珠江口表层沉积物结果一致^[15], 说明二者来源大致相同, 表层沉积物中总氮基本为有机质氮。

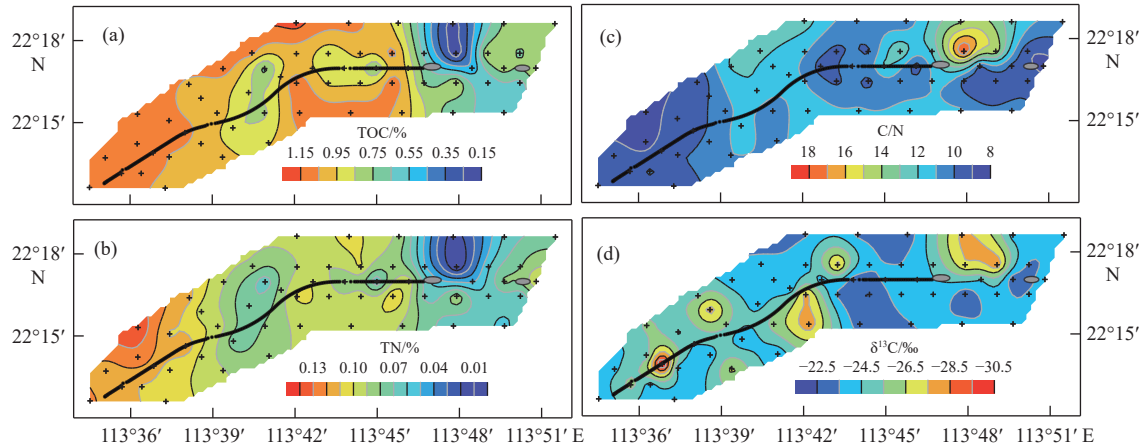
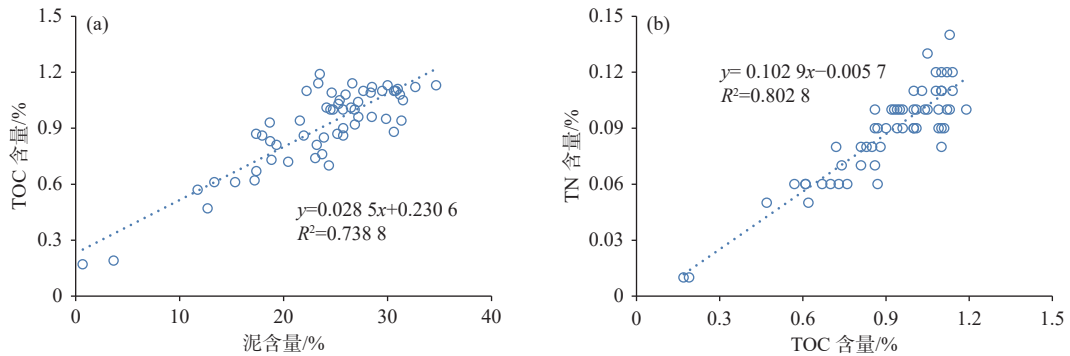


图 3 港珠澳大桥海域表层沉积物中有机质分布

Fig.3 Distribution of organic matter in the sediment near the Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge



(a) TOC 与泥含量的相关关系, (b) TOC 与 TN 含量的相关关系

图 4 表层沉积物样品中 TOC 与泥含量和 TN 含量之间的相关关系

Fig.4 Correlations between TOC and clay content and TN content

表层沉积物的 TOC/TN 比值介于 8~18, 平均为 11; 有机质碳同位素组成 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值介于 -31‰ ~ -22‰ , 平均为 -25‰ (图 3c, d)。这 2 个参数之间的相关性较差, 说明研究区沉积物有机质来源复杂。特别在海底隧道北侧和大桥中西部局部出现了 6 个斑块状分布的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值低值区, 其中海底隧道北侧斑块的 TOC/TN 比值偏高, 而大桥中西部海域 5 个斑块的 TOC/TN 比值偏低。另外, 这 2 个参数分布与 TOC 含量分布明显不同, 说明研究区表层沉积物中有机质类型与含量分布的控制因素存在差异。

4 讨论

4.1 表层沉积物中有机质来源分类

不同类型植物的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值存在明显差异。一般陆源 C3 植物的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值介于 -30‰ ~ -26‰ , C4

植物的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值约为 -14‰ ; 而海洋藻类的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值介于 -22‰ ~ -20‰ [16]。本文样品的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值主要介于 -31‰ ~ -22‰ , 表明属于陆源和海源混合沉积有机质。同时, 不同类型植物具有不同的 TOC/TN 比值, 水生藻类具有较低 TOC/TN 比值, 一般 <6 ; 而陆地高等植物具有较高的 TOC/TN 比值, 一般 >15 [17]。本文样品的 TOC/TN 比值介于 8~18, 表明属于藻类与高等植物混合有机质。若是简单的陆源 C3 植物和海源藻类混合, 沉积物的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值和 TOC/TN 比值之间应呈现负相关关系。然而, 本文样品 TOC/TN 比值与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值之间不存在明显的负相关关系, 说明其他类型有机质对其产生了干扰, 单一参数无法有效区分沉积有机质类型和来源。因此, 本文综合利用 TOC/TN 比值与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值来区分沉积物中有机质类型 [18], 并且按区域分别讨论沉积有机质的来源和控制因素。研究区表层沉积物中有机质可划分为 3 种类型 (图 5a), 第 1 类是陆源和海源混合沉积有机质类型, 研究区 80% 的样

品属于此类型;第2类沉积有机质属于陆源 C3 植物,为海底隧道北侧附近的3个样品;第3类沉积

有机质是淡水藻类和 C3 植物混合类型,为大桥中西部呈斑块状分布的9个低 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值样品(图 5b)。

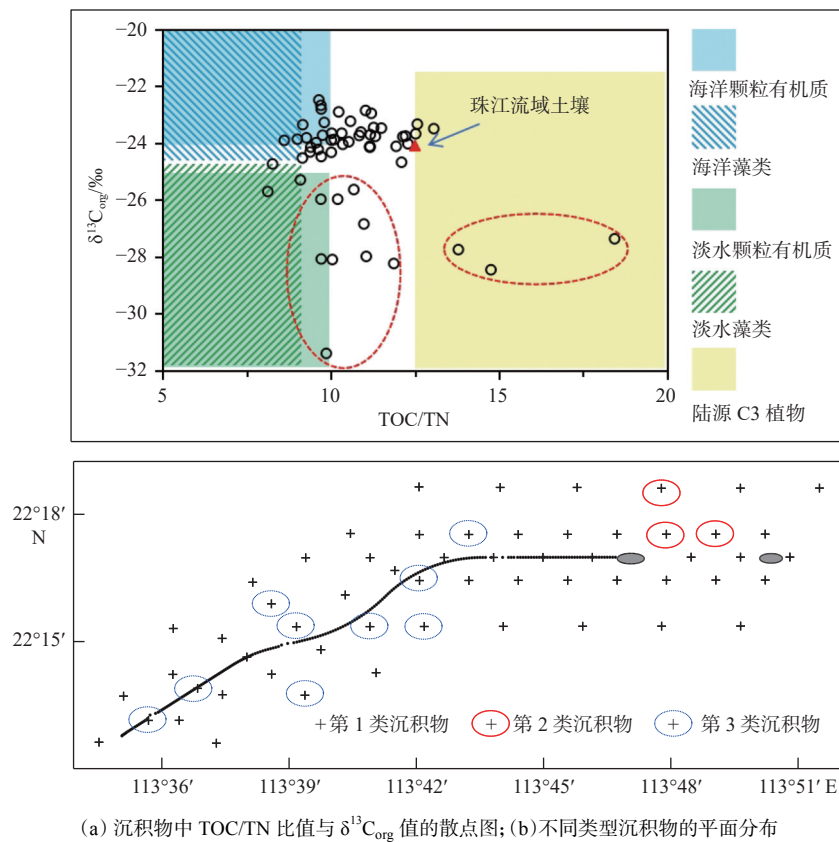


图5 表层沉积物的有机质类型划分与平面分布特征

Fig.5 Types and distribution of organic matter in the sediment near the Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge

4.2 第1类沉积有机质组成及控制因素

本文第1类沉积物的 TOC/TN 比值与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值与前人报道的多个年份的数据基本一致(表 1)^[4,19-21],说明此类沉积有机质在伶仃洋广泛分布,属于伶仃洋现代河口沉积物,为陆源和海源混合有机质类型。虽然,近年来伶仃洋表层沉积物粒度呈现一定的粗化^[22],但沉积物有机质类型整体上保持不变。沉积物 TOC 含量随着泥含量的增加而增大(图 4a),这与黏土矿物-有机质复合体的形成有利于沉积有机质的保存有关^[3],说明黏土矿物-有机质复合体是伶仃洋沉积有机质的主要赋存形态。珠江流域土壤的 TOC/TN 比值和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值分别为 12.5 和 -24.1‰^[19],其中 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值相对 C3 植物偏重,分析可能是土壤中 C3 植物有机质降解导致同位素分馏以及 C4 植物的加入导致的^[23]。这与伶仃洋沉积有机碳同位素值非常接近,经过长途搬运和复杂的生物地球化学过程,这类有机质结构组成相对稳定,很难被生物降解^[20],为伶仃洋初始沉积有机质类型端元。随

着沉积物被搬运至伶仃洋海域,流域土壤沉积物会增加一些淡水藻类或海洋藻类组分,使得沉积有机质的 TOC/TN 比值降低, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值分别偏轻或偏重(图 5a)。因此,假设沉积有机质的 3 个端元分别是:端元 1 流域土壤、端元 2 淡水藻类和端元 3 海洋藻类,各端元的 TOC/TN 比值与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值分别设为 12.5 和 -24.1‰^[19]、7 和 -28‰^[21]、7 和 -22‰^[21],按照多元线性混合方程进行计算:

$$X+Y+Z=1 \quad (2)$$

$$a=a_1X+a_2Y+a_3Z \quad (3)$$

$$b=b_1X+b_2Y+b_3Z \quad (4)$$

式中:未知数 X 、 Y 、 Z 分别为各端元占比,已知数为样品和端元的 TOC/TN 比值与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值,分别为样品 (a , b)、端元 1 (a_1 , b_1)、端元 2 (a_2 , b_2)、端元 3 (a_3 , b_3)。

计算过程中部分端元占比为负值,将其设为零,其余 2 个端元占比进行归一化处理,得到各样品的沉积有机质端元比例如图 6 所示。总体上沉积有

表 1 不同年份伶仃洋表层沉积物有机质 TOC/TN 比值与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值
Table 1 TOC/TN ratios and $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ values of surface sediments collected in different years in the Lingdingyang Bay

区域	样品数量/个	采样时间	TOC/TN比值(平均值)	$\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值(平均值)/‰	来源
伶仃洋混合区	44	2005—2006年	10 ~ 14(11)	-23 ~ -24(-23)	[19]
虎门至万山岛	9	2013年	9 ~ 12(10)	-22 ~ -25(-24)	[20]
外伶仃洋	60多	2016—2017年	5 ~ 12(9)	-22 ~ -26(-24)	[21]
内伶仃洋	8	2020年	9 ~ 10(10)	-23 ~ -25(-24)	[4]
港珠澳大桥海域	46	2021年	8 ~ 13(10)	-22 ~ -26(-24)	本研究

机质以端元 1 和端元 3 组成为主, 端元 2 占比变化较大。其中, 端元 1 占比介于 20%~97%, 平均为 61%; 端元 2 占比介于 0~55%, 平均为 11%; 端元 3 占比介于 0~56%, 平均为 28%。这与前人利用有机碳同位素估算得到的伶仃洋表层沉积物中土壤和浮游植物两端元占比结果基本一致^[20]。

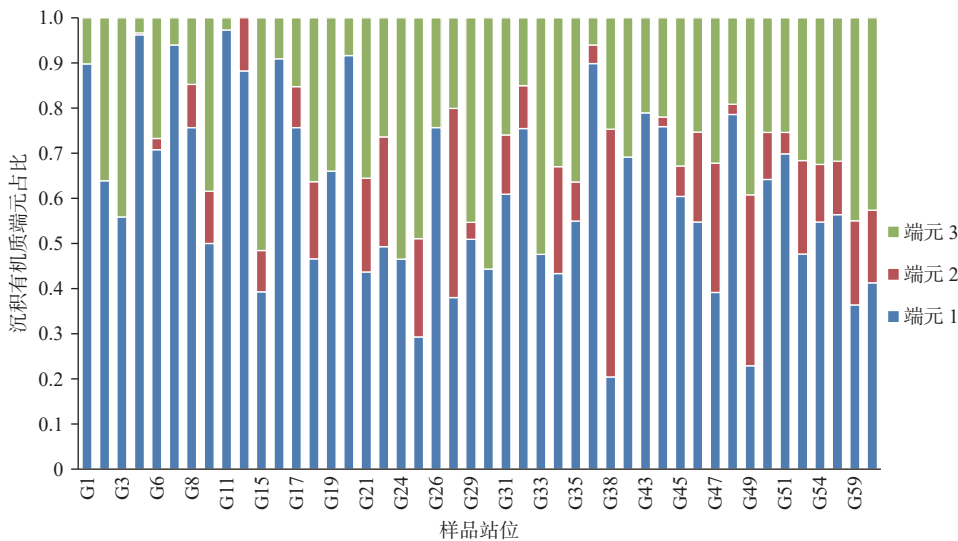


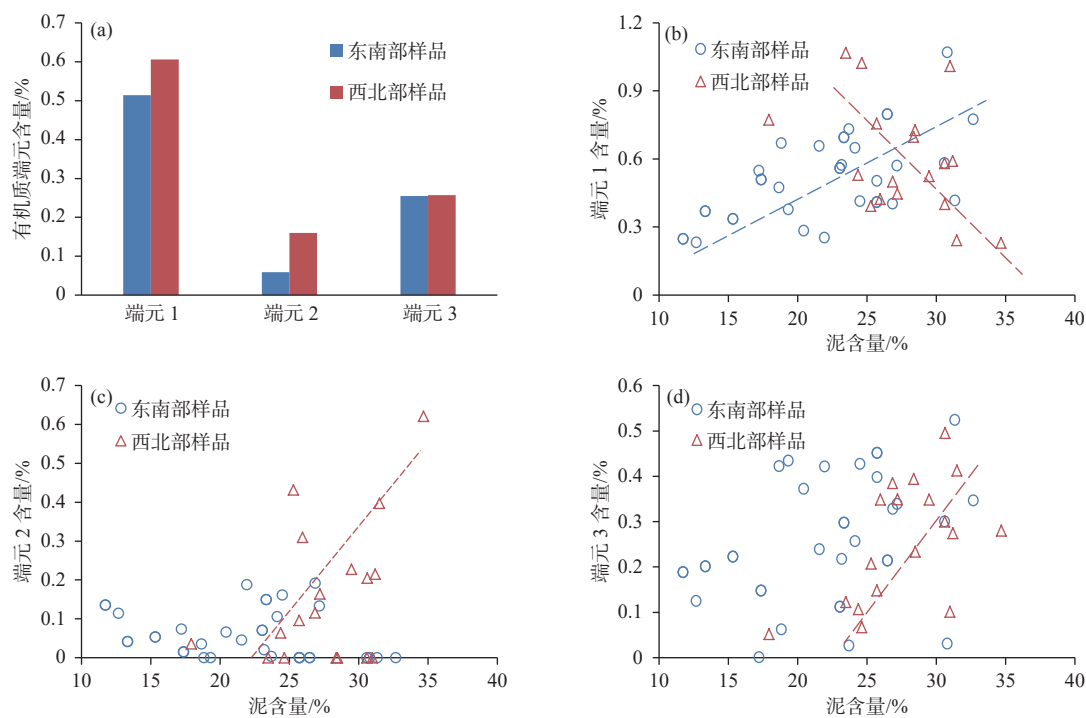
图 6 第 1 类沉积有机质中各端元组成占比
Fig.6 The proportion of each end member in the type I of sedimentary organic matter

为了分析第 1 类沉积有机质的空间分布规律, 将样品分为西北部样品和东南部样品(图 1)。表层沉积物中有机质端元组成的空间分布呈现一定差异, 西北部样品中端元 1 和端元 2 平均含量要高于东南部样品, 而端元 3 平均含量在这 2 个区域基本一致(图 7a)。前人通过不同方法研究表明外伶仃洋西滩为径流泥沙输入的沉降中心, 包括表层沉积物粒径趋势分析^[22]、模拟不同口门径流输入影响范围^[24]、利用遥感影像反演悬浮物分布^[8]。因此, 大桥西北部海域表层沉积物由于受径流泥沙输入影响明显, 陆源有机质含量相对较高。不同海域表层沉积物中泥含量与有机质端元含量的相关关系明显不同(图 7b—d), 表明粒度对不同端元沉积有机质富集控制作用存在空间差异, 这与不同海域沉积环境的差异有关^[25]。大桥西北部受径流泥沙输入影响较大, 水体悬浮泥沙含量较高, 对端元 1 有机质稀释作用明显, 导致沉积物中泥含量与端元 1 含

量之间呈负相关。大桥东南部远离珠江入海口门, 受径流泥沙输入影响较小, 悬浮物浓度较低, 径流输入的端元 1 有机质能够以黏土-有机质复合体的形式搬运沉积于此, 因此, 表层沉积物中泥含量与有机质端元 1 含量之间呈正相关关系。大桥西北部淡水藻类输入较多, 端元 2 有机质可能主要以黏土-有机质复合体的形式随径流输入搬运沉积于此。受水体透明度影响^[26], 研究区海洋藻类可能主要分布在大桥东南部海域, 海洋藻类以颗粒有机质的形式沉积, 因此东南部沉积物样品中端元 3 有机质含量与泥含量之间无明显相关关系。部分海洋藻类与水体中的黏土矿物形成复合体, 随潮流作用搬运至大桥西北部, 导致该海域沉积物中泥含量与端元 3 有机质含量之间呈现一定的正相关关系。

4.3 第 2、3 类沉积有机质分布及控制因素

表层沉积物中第 2、3 类有机质的碳同位素



(a) 为第 1 类沉积有机质端元含量空间分布; (b—d) 分别为泥含量与端元 1—3 含量的相关关系

图 7 第 1 类沉积有机质端元分布及其与泥含量的相关关系

Fig. 7 Distribution of end-members of the type I sedimentary organic matter and their correlations with clay content

值与伶仃洋现代沉积物相比明显偏轻, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值 $< -26\text{‰}$, 属于陆源沉积有机质, 包括 C3 植物和淡水藻类, 这与伶仃洋现代沉积环境显然不符。另外, 这类沉积有机质主要以斑块状分布在大桥轴线附近, 特别是海底隧道北侧局部, 但在大桥建设前并未出现^[5]。因此, 本文推测这类沉积物很可能与大桥施工等人为活动有关。为克服全新统海洋泥质沉积物地基不稳问题, 大桥东部沉管隧道基坑开挖深度达 50 m, 以更新统陆相砂质沉积物为地基^[27]。基坑开挖暴露了更新统和下全新统陆相地层, 包括河流相砂质沉积物、河口湾浅滩泥质粉砂等, 这些沉积物的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值 $< -26\text{‰}$ ^[12]。其中, 河流相砂质沉积物 TOC/TN 比值较大, 有机物属于为陆源 C3 植物, 这些粗粒沉积随着基坑开挖在涨潮流的作用下在海底隧道北侧附近沉积, 形成第 2 类沉积有机质; 河口湾浅滩泥质粉砂的 TOC/TN 比值较小, 沉积物粒度较小, 随着基坑开挖在径流、潮流共同作用下能够搬运至大桥中西部, 形成第 3 类沉积有机质。前人通过调查 2016 年伶仃洋表层沉积物粒度和有机碳分布特征发现, 一些粗粒和高陆源有机质含量沉积物呈斑块状分布在中滩采砂区和伶仃航道附近, 认为与采砂活动和航道疏浚使得第四纪陆相沉积物暴露有关^[5]。这些古老沉积物的暴露使得

表层沉积物中有机质类型由海源向陆源转变、沉积物粒度变粗, 可能会改变沉积物-水界面的生物地球化学过程^[28-29], 进而对伶仃洋生态环境产生的潜在影响。因此, 接下来需要进一步研究人为活动导致的伶仃洋表层沉积物变化产生的生态环境效应, 以便为伶仃洋资源开发、工程建设和海洋管理提供科学依据。

5 结论

(1) 港珠澳大桥海域表层沉积物的 TOC 含量为 0.17%~1.19%, TOC/TN 比值为 8~18, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值介于 -31‰ ~ -22‰ 。整体上沉积有机质分布规律不明显, 特别是在大桥海底隧道北侧和中西部海域出现了 6 个斑块状分布的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值低值区。

(2) 综合利用 TOC/TN 比值与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值将研究区的沉积有机质划分为 3 种类型: 第 1 类是陆源和海源混合有机质类型, 80% 的样品属于此类型; 第 2 类属于陆源 C3 植物, 分布于海底隧道北侧附近; 第 3 类是淡水藻类和 C3 植物混合类型, 呈斑块状分布于大桥中西部。

(3) 第 1 类沉积有机质属于伶仃洋现代河口沉积物, 按照多元线性混合方程计算得到端元 1 流域

土壤、端元 2 淡水藻类和端元 3 海洋藻类平均占比分别为 61%、11% 和 28%。不同区域样品中泥含量与各端元有机质含量的相关关系明显不同, 表明粒度对不同端元沉积有机质富集控制作用存在空间差异。

(4)第 2、3 类沉积有机质的形成与大桥沉管隧道基坑开挖有关, 基坑开挖暴露了更新统和下全新统陆相地层, 其中, 河流相砂质沉积物随着基坑开挖在涨潮流的作用下在海底隧道北侧沉积, 河口湾浅滩泥质粉砂随着基坑开挖在径流、潮流共同作用下能够搬运至大桥中西部。

参考文献:

- [1] HU J F, SUN X S, PENG P A, et al. Spatial and temporal variation of organic carbon in the northern South China Sea revealed by sedimentary records[J]. *Quaternary International*, 2009, 206: 46-51.
- [2] 韩永强, 夏嘉, 谭靖千, 等. 环雷州半岛近海表层沉积物有机碳分布及其控制因素分析[J]. *海洋科学*, 2020, 44(3): 93-103.
HAN Y Q, XIA J, TAN J Q, et al. Distribution and controlling factors of organic carbon in surface sediments of the coastal region surrounding Leizhou Peninsula[J]. *Marine Sciences*, 2020, 44(3): 93-103.
- [3] BOCK M J, MAYER L M. Mesodensity organo-clay associations in a near-shore sediment[J]. *Marine Geology*, 2000, 163: 65-75.
- [4] 商博文, 吴云超, 江志坚, 等. 珠江口沉积物有机质特征、来源及其对碳存储的意义[J]. *热带海洋学报*, 2022, 41(3): 16-28.
SHANG B W, WU Y C, JIANG Z J, et al. Characteristics and sources of organic matter in sediments of the Pearl River Estuary: carbon storage implications[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2022, 41(3): 16-28.
- [5] YUAN X Q, YANG Q S, LUO X X, et al. Distribution of grain size and organic elemental composition of the surficial sediments in Lingding Bay in the Pearl River Delta, China: a record of recent human activity[J]. *Ocean and Coastal Management*, 2019, 178: 104849.
- [6] LI M G, YAN Y, HAN X J, et al. Physical model study for effects of the Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge on harbors and channels in Lingdingyang Bay of the Pearl River Estuary[J]. *Ocean and Coastal Management*, 2019, 177: 76-86.
- [7] 刘大召, 李卓, 陈仔豪, 等. 基于高分 1 号遥感数据港珠澳大桥对珠江口海域悬浮泥沙分布的影响[J]. *广东海洋大学学报*, 2020, 40(6): 89-95.
LIU D Z, LI Z, CHEN Z H, et al. Influence of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge on the distribution of suspended sediment in the Pearl River Estuary[J]. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2020, 40(6): 89-95.
- [8] GUO J, MA C L, AI B, et al. Assessing the effects of the Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge on the total suspended solids in the Pearl River Estuary based on Landsat time series[J]. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 2020, 125(8): e2020JC016202.
- [9] 黄镇国, 张伟强. 珠江三角洲河道近期冲淤特征初步分析[J]. *台湾海峡*, 2005, 24(4): 417-425.
HUANG Z G, ZHANG W Q. Preliminary study on the characteristics of scouring and sedimentation of river channels in recent decades in the Zhujiang Delta[J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 2005, 24(4): 417-425.
- [10] CHEN K L, DONG H Y, JIA L W, et al. Depocentre transfer in the Lingdingyang Estuary: interferences from natural and anthropogenic forcings[J]. *Ocean and Coastal Management*, 2020, 185: 105064.
- [11] 时翠, 甘华阳, 马胜中, 等. 晚更新世以来内伶仃洋河口湾的地层层序和沉积演化[J]. *海洋地质前沿*, 2015, 31(10): 8-18.
SHI C, GAN H Y, MA S Z, et al. Late quaternary evolution and sequence stratigraphy of the Lingdingyang Estuary in South China[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2015, 31(10): 8-18.
- [12] 陶慧, 王建华, 陈慧娴, 等. 伶仃洋 ZK19 孔全新统有机物 $\delta^{13}\text{C}$ 和 C/N 值特征及东亚季风演变记录[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2019, 58(3): 1-12.
TAO H, WANG J H, CHEN H X, et al. Characteristics of $\delta^{13}\text{C}$ and C/N in the Holocene organic material of borehole ZK19 in Lingdingyang Bay and the records of east Asian Monsoon variation[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2019, 58(3): 1-12.
- [13] FOLK R L, ANDREWS P B, LEWIS D W. Detrital sedimentary rock classification and nomenclature for use in New Zealand[J]. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 1970, 13: 937-968.
- [14] XIA J, HAN Y Q, TAN J Q, et al. The characteristics of organic carbon in the offshore sediments surrounding the Leizhou Peninsula, China[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2022, 10: 648337.
- [15] 连忠廉, 江志坚, 黄小平, 等. 珠江口表层沉积物有机碳不同浸提组分的空间分布特征[J]. *海洋环境科学*, 2019, 38(3): 391-398.
LIAN Z L, JINAG Z J, HUANG X P, et al. Distribution of labile organic carbon using different extract method in the surface sediments of Pearl River Estuary[J]. *Marine Environmental Science*, 2019, 38(3): 391-398.
- [16] MEYERS P A. Preservation of elemental and isotopic source identification of sedimentary organic matter[J]. *Chemical Geology*, 1994, 144: 289-302.
- [17] MEYERS P A. Organic geochemical proxies of paleoceanographic, paleolimnologic, and paleoclimatic processes[J]. *Organic Geochemistry*, 1997, 27: 213-250.
- [18] LANB A L, WILSON G P, LENG M J. A review of coastal palaeoclimate and relative sea-level reconstructions using $\delta^{13}\text{C}$ and C/N ratios in organic material[J]. *Earth-Science Reviews*, 2006, 75: 29-57.
- [19] YU F L, ZONG Y Q, LLOYD J M, et al. Bulk organic ^{13}C and C/N as indicators for sediment sources in the Pearl River Delta

- and Estuary, southern China[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2010, 87: 618-630
- [20] 郭威. 珠江口水体和沉积物有机碳的来源及其生物地球化学特征 [D]. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所, 2016.
- GUO W. Source and biogeochemical properties of organic carbon in water column and sediments of Pearl River Estuary[D]. Guangzhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2016.
- [21] 苑秀全. 珠江口伶仃洋现代沉积特征及其对人类活动的指示 [D]. 上海: 华东师范大学, 2022.
- YUAN X Q. Modern sedimentary characteristics of Lingding Bay, Pearl River Estuary and its implications for human activities[D]. Shanghai: East China Normal University, 2022.
- [22] WEI X, CAI S Q, ZHAN W K, et al. Changes in the distribution of surface sediment in Pearl River Estuary, 1975-2017, largely due to human activity[J]. *Continental Shelf Research*, 2021, 228: 104538.
- [23] 时硕, 吉俊熹, 王张华. 珠江三角洲全新世沉积物 C/N 和 $\delta^{13}\text{C}$ 变化及对甘蔗种植业的指示 [J]. *第四纪研究*, 2022, 42(2): 397-411.
- SHI S, JI J X, WANG Z H. Holocene variability of bulk organic C/N and $\delta^{13}\text{C}$ and implications for the sugarcane cultivation[J] *Quaternary Sciences*, 2022, 42(2): 397-411.
- [24] ZHANG G, CHENG W C, CHEN L H, et al. Transport of riverine sediment from different outlets in the Pearl River Estuary during the wet season[J]. *Marine Geology*, 2019, 415: 105957.
- [25] ZENG W Z, ZHENG Z Y, ZHANG C P, et al. Sedimentary records of the dramatic environmental changes in the Lingdingyang Bay of the Pearl River Estuary in southern China[J]. *Ocean Science Journal*, 2023, 58: 12.
- [26] 马玉, 张伟杰, 李锐祥, 等. El Niño 影响下珠江口及其邻近海域营养盐时空变化及其生态效应 [J]. *环境科学学报*, 2023, 43(5): 36-46.
- MA Y, ZHANG W J, LI R X, et al. The spatiotemporal variations of nutrients and its ecological response in the Pearl River Estuary and its adjacent sea areas under the influence of El Niño[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2023, 43(5): 36-46.
- [27] YUE X B, XIE Y L, ZHANG H G, et al. Study on geotechnical characteristics of marine soil at Hong Kong-Zhuhai-Macao Tunnel[J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2019, 38(6): 647-658.
- [28] 施玉珍, 陈树鸿, 赵辉, 等. 珠江口海域沉积物-水界面营养盐释放特征研究 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2020, 39(3): 517-524.
- SHI Y Z, CHEN S H, ZHAO H, et al. Release characteristics of nutrients at the sediment-water interface of the Pearl River Estuary[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2020, 39(3): 517-524.
- [29] 赵春宇, 谭烨辉, 柯志新, 等. 珠江口赤潮爆发过程中水体及表层沉积物间隙水中营养盐与叶绿素的变化特征 [J]. *海洋通报*, 2016, 35(4): 457-466.
- ZHAO C Y, TAN Y H, KE Z X, et al. Distribution characteristics of Chlorophyll and the nutrient release flux in the sediments during the algal blooms[J]. *Marine Science Bulletin*, 2016, 35(4): 457-466.

Distribution and sources of organic matter in surface sediment near the Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge

ZENG Weizhu^{1,2}, ZHENG Zhaoyong^{3*}

(1 Life Science and Technology School, Lingnan Normal University, Zhanjiang 524048, China; 2 Engineering Technology Research Center for Development and Utilization of Blue Carbon Resources in Western Guangdong Province, Zhanjiang 524048, China;

3 South China Sea Development Research Institute, Ministry of Natural Resources, Guangzhou 510310, China)

Abstract: To study the distribution and sources of sedimentary organic matter (SOM) near the Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge (HZMB), 58 surface sediment samples were collected in the waters of the HZMB in the Lingdingyang Bay (LDB) in May 2021. The grain size, total organic carbon (TOC), total nitrogen (TN) contents, and organic carbon stable isotope ($\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$) composition of the samples were analyzed. The spatial distribution and sources of SOM were studied. Results show that the TOC content ranged from 0.17% to 1.19%, TOC/TN ratio was between 8 and 18, and $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ value was $-31\text{‰} \sim -22\text{‰}$. The SOM could be divided into three types based on the TOC/TN ratio and $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ value. Type I SOM belonged to the recent sediment in LDB, derived from soil organic matter, freshwater algae, and marine algae in the proportion of 61%, 11%, and 28%, respectively. Type II and type III SOM were likely derived from the Quaternary terrestrial strata. As the foundation pit of the undersea tunnel for immersed tube of the bridge was excavated, types II and III SOM were transported to the northern side and the central-western parts of the bridge, showing a patchy distribution. Correlation analysis indicates that grain size was the controlling factor on the enrichment of SOM. However, there were spatial differences for SOM of different sources in Type I sediment. The construction of HZMB and other human activities have changed the SOM types from marine to terrestrial sources. It is suggested that the impact of surface sediment changes on the marine ecological environment in the LDB should be evaluated in future studies.

Key words: surface sediment; organic carbon; source; grain size; Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge