

珠江口表层沉积物有机质碳氮丰度及其 同位素组成与来源分析

黎灿明¹, 宋之光^{1,2}, 夏嘉¹, 赵子科³

(1.广东海洋大学 化学与环境学院, 广东 湛江 524088; 2.南宁师范大学 北部湾环境演变与资源利用教育部重点实验室, 广西南宁 530001; 3.广东海洋大学 分析测试中心, 广东 湛江 524088)

摘要:珠江河口的海-陆相互作用及其机制复杂, 识别海-陆相互作用与人类活动在沉积物中的记录, 对海洋生态环境的保护以及人与自然协调共生的认识具有重要意义。本文通过测定珠江口伶仃洋表层沉积物中总有机碳 (TOC)、总氮 (TN) 和稳定碳氮同位素组成 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 与 $\delta^{15}\text{N}_{\text{tot}}$) 多种参数, 结合三端元混合模型研究珠江口海域表层沉积有机质特征与来源输入。结果表明, 伶仃洋沉积有机质的来源主要是陆源、海源与污水来源, 具有多源性。表层沉积物中陆源、海源与污水来源有机质占比的平均值分别为 48.1%、42.3% 和 9.7%; 表明珠江河口区域表层沉积物有机质具有以陆源有机质输入为主的多端元混合特征, 而人为活动产生的污水来源有机质占比较高, 值得进行深入研究。

关键词:表层沉积物; TOC; 碳氮同位素组成; 有机质来源; 珠江口伶仃洋

中图分类号: P736; X142 文献标识码: A 文章编号: 1007-6336(2025)03-0369-08

The carbon/nitrogen abundance of organic matter and their isotope compositions of surface sediments in the Pearl River estuary for source input analyses

LI Canming¹, SONG Zhiguang^{1,2}, XIA Jia¹, ZHAO Zike³

(1.Faculty of Chemistry and Environmental Science, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China; 2.Key Laboratory of Beibu Gulf Environment Change and Resources Utilization of Ministry of Education, Nanning Normal University, Nanning 530001, China; 3.Analytical and Testing Center, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China)

Abstract: The land-sea interaction and its mechanism in the Pearl River estuary are complex. Identifying the land-sea interaction and the recording of human activities in sediments is of great significance for the protection of marine ecological environment and the understanding of coordinated coexistence between humans and nature. Total organic carbon (TOC), total nitrogen (TN) and stable carbon and nitrogen isotope ($\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ and $\delta^{15}\text{N}_{\text{tot}}$) combined with a three-endmember-mixing model were measured to analyze the characteristics and sources of organic matter in surface sediment samples of Lingdingyang bay, the Pearl River estuary. The results indicate that the main sources of organic matter in Lingdingyang bay sediments are terrestrial, marine and sewage sources, with multiple sources. The average percentage contributions for terrestrial, marine and sewage sources in surface sediments are 48.1%, 42.3% and 9.7%. It shows that the organic matter in the surface sediments of the Pearl River estuary has the characteristics of multi endmember mixing dominated by terrestrial organic matter input, while the organic matter from sewage generated by human activities accounts for a

收稿日期: 2024-04-18, 修订日期: 2024-05-13

基金项目: 广东海洋大学博士科研启动项目 (R20033 和 R17001) 联合资助

作者简介: 黎灿明 (1998-), 男, 广东东莞人, 硕士研究生, 主要研究方向为海洋有机地球化学, E-mail: licanming3@stu.gdou.edu.cn

通信作者: 夏嘉 (1989-), 男, 江西九江人, 讲师, 博士, 主要从事海洋有机地球化学研究, E-mail: xiaj@gdou.edu.cn

relatively high proportion, which is worth conducting further research.

Key words: surface sediments; total organic carbon; carbon and nitrogen isotope composition; source inputs of organic matter; Pearl River estuary

海洋是地球上最大的碳库,其中,海洋沉积有机质在海洋碳循环中扮演着关键角色。边缘海作为陆地与海洋的重要连接纽带,也是海陆相互作用最为强烈的区域之一。边缘海面积占全球海洋面积约20%,有超过90%的海洋沉积有机质埋藏于边缘海中。边缘海沉积有机质的来源可分为三类:一是通过地表径流、大气沉降等方式输入海洋中的陆源有机质;二是由浮游生物产生的海源有机质;三是通过人为活动产生的污水来源有机质^[1]。边缘海是受人类活动强烈影响的海域,其有机污染物主要通过污水排放输入,而边缘海受不同强度的人类活动影响,其沉积物中人为污染来源有机质的贡献存在差异。因此,分析沉积有机质的特征并确定其来源,对海洋碳循环机制的理解和保护海洋生态环境具有重要的意义。

沉积物中的有机质丰度和碳氮同位素组成的测定是研究其特征和来源的重要方面^[2-3],总有机碳(TOC)的稳定同位素组成($\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$)可用于区分自然来源有机质中的陆源和海源有机质^[4],陆源沉积有机质的典型值为 $-28\text{‰} \sim -26\text{‰}$,其与陆源C3植物的典型值相近^[5];海源沉积有机质的典型值为 $-22\text{‰} \sim -19\text{‰}$,其与海洋浮游植物的典型值相近^[5];污水来源的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值为 $-30.0\text{‰} \sim -22.7\text{‰}$ ^[6],其与海陆混合来源有机质的特征重合^[6]。总氮(TN)的稳定同位素组成($\delta^{15}\text{N}_{\text{tot}}$)可用于区分自然来源与人为来源的有机质^[2],陆源沉积有机质的典型值为 $-10\text{‰} \sim 10\text{‰}$ (平均 2‰)^[7],海源沉积有机质的典型值为 $4\text{‰} \sim 10\text{‰}$ (平均 6‰)^[7],污水来源的 $\delta^{15}\text{N}_{\text{tot}}$ 典型值为 $-2.5\text{‰} \sim 17\text{‰}$ ^[6,8]。其中,经污水处理厂规范处理的污水碳氮同位素值均偏负,其 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值与 $\delta^{15}\text{N}_{\text{tot}}$ 值分别为 $-30\text{‰} \sim -25.9\text{‰}$ 与 $-2.5\text{‰} \sim -0.9\text{‰}$ ^[6]。此外,C/N也可用于识别沉积有机质的来源,海源有机质C/N通常为 $5 \sim 8$,陆源有机质C/N大于 15 ^[5],污水来源的有机质C/N为 $6.6 \sim 12.6$ ^[9]。同位素结合TOC、TN等指标,可进一步研究有机

质特征及来源^[10]。以往研究在长江口^[11]、万泉河口^[7]与Rodrigo de Freitas潟湖^[12]等地区分析了沉积物中有机质的空间分布特征和来源,以及影响沉积有机质空间分布特征的因素。

随着珠江三角洲城市群的发展壮大,珠江河口伶仃洋的海洋环境受人为活动干扰的程度持续增强^[13],不少学者对珠江口伶仃洋海洋动力、沉积作用、地貌特征等开展了不少研究,主要涉及伶仃洋的水沙运移特征^[14]、地貌特征^[15]、滩槽发育演变以及大气沉降影响^[16]等方面。伶仃洋海底呈“三滩两槽”格局,其输沙来源主要是东四口门的径流输沙以及少量的外海来沙^[14-15]。西滩发育有向东南方向延伸趋势的滩涂,西槽因较强的径流作用以及受西滩滩涂延伸趋势的影响而接受淤积,东槽的主体因受较强的潮流动力影响而使得淤积作用不明显^[15]。此外,珠江口地区大气沉降来源有机质特征与陆源类似^[16]。有关珠江口海域沉积有机质特征及其来源,已有不少学者开展了相关工作,包括通过有机质组成分布、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 与 $\delta^{15}\text{N}_{\text{tot}}$ 等研究珠江口海域沉积有机质特征及其来源,揭示了人为活动的干扰在一定程度上对该河口海域沉积环境、沉积有机质特征及其来源的影响^[5,17-18]。鉴于珠江口区域高度城市化发展对环境带来的影响,需要开展持续性的研究观察。本研究采集了珠江口伶仃洋海域18个站位的表层沉积物样品,测定了这些沉积物样品的TOC、TN、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 及 $\delta^{15}\text{N}_{\text{tot}}$ 组成等,旨在通过多端元分析研究人为影响下珠江口伶仃洋表层沉积有机碳区域分布、来源输入特征以及反映的河口海洋环境变化现状。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

珠江是位于我国东南部的大型河流,其水系由东江、西江、北江以及众多小型河流组成,支流众多且河网密布^[19-20]。珠江口伶仃洋是位于珠江三角洲东部的喇叭型河口湾,其三面环陆,

面积约 2000 km², 最大水深约 30 m^[21]。伶仃洋可分为内伶仃洋与外伶仃洋, 以淇澳岛-内伶仃岛-深圳赤湾为界线, 界线以北为内伶仃洋, 与河口相连; 界线以南为外伶仃洋, 与外海相连^[14]。伶仃洋属于亚热带海洋性季风气候, 夏季高温多雨, 年平均气温较高, 珠江流域径流量受季风气候影响显著。珠江汛期主要集中于 4—9 月, 其年径流量是枯水期径流量的 5 倍左右, 这种季节性径流量的差异对伶仃洋咸淡水的交汇影响显著^[19]。伶仃洋沿岸汇集了众多大小不一的河流形成地表径流, 这些河流冲刷沿岸有机质的同时, 人类活动产生的污水也通过地表径流排放入海^[22], 因此有大量的沉积有机质输入伶仃洋中。

1.2 取样方法及样品分析

2020 年 5 月, 在珠江口伶仃洋海域利用抓斗采集表层 0~5 cm 的沉积物样品, 装入样品袋并储存于冰柜中, 各采样站位的分布如图 1 所示。称取适量经冷冻干燥研磨后的粉末样品, 加入过量 1 mol/L 稀盐酸去除无机碳酸盐, 酸处理样品使用超纯水洗至中性并干燥后用于 TOC 及 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 分析测定; 而 TN 及 $\delta^{15}\text{N}_{\text{tot}}$ 使用未酸处理的原始样品粉末。使用 Elementar vario Micro cube 型有机元素分析仪测定 TOC 和 TN, TOC 与 TN 的精度分别为 $\pm 0.02\%$ 和 $\pm 0.003\%$; 使用 SerCon20-20H 型连续流同位素质谱仪测定 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 和 $\delta^{15}\text{N}_{\text{tot}}$, 碳同位素分析的 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 标准为

Vienna Pee Dee Belemnite (V-PDB), 氮同位素分析的 $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ 标准为 N_2 (AIR), 精度分别为 $\pm 0.1\%$ 和 $\pm 0.2\%$ 。稳定同位素组成表达式为:

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{org}} \text{ 或 } \delta^{15}\text{N}_{\text{tot}} (\%) = (\text{R}_{\text{sample}}/\text{R}_{\text{standard}} - 1) \times 1000\% \quad (1)$$

式中: $\text{R} = ^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 或 $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ 。

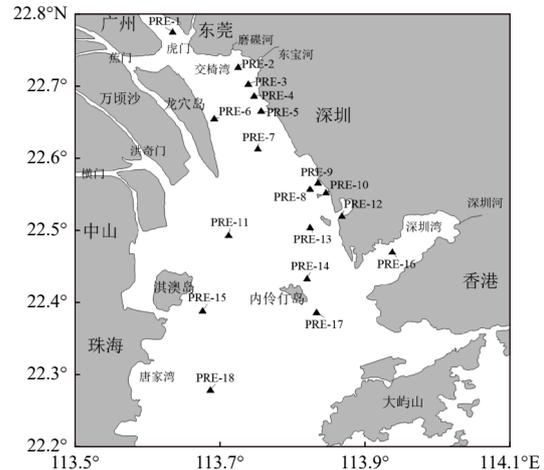


图 1 研究区概况与采样位置

Fig. 1 Study area and the locations of sampling sites

2 结果与讨论

2.1 珠江口伶仃洋表层沉积物 TOC 含量分布及 TN 与 C/N 比值特征

珠江口伶仃洋各站位表层沉积物的 TOC 与 TN 含量分布特征如图 2 所示。其中, TOC 含量

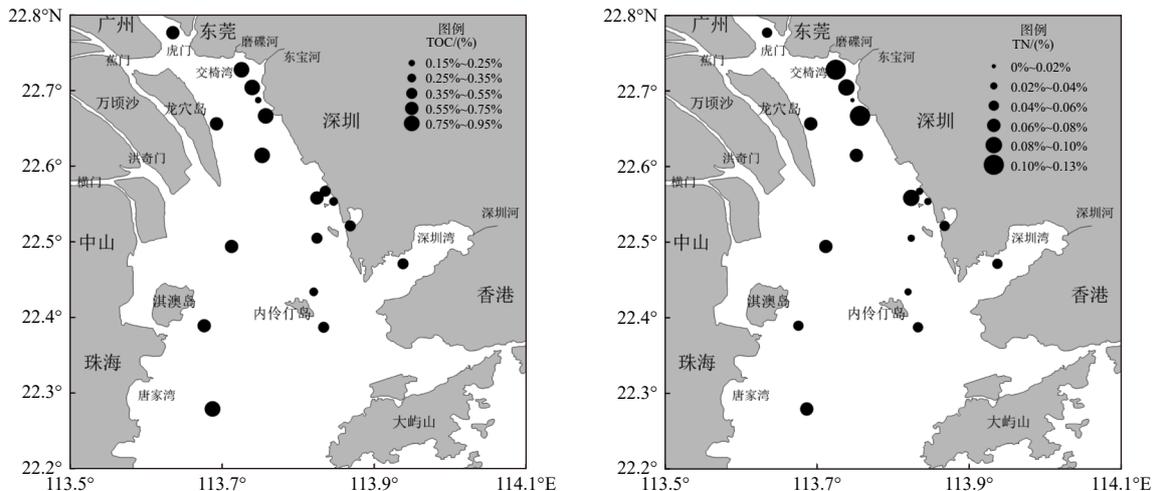


图 2 珠江口伶仃洋表层沉积物 (a) TOC、(b) TN 分布特征

Fig. 2 Distribution characteristics of (a) TOC and (b) TN in the surface sediments of Lingdingyang bay, the Pearl River estuary

为 0.17%~0.92%，平均值为 0.62%；TN 含量为 0.01%~0.12%，平均值为 0.06%。在伶仃洋西部与北部区域中，TOC 与 TN 的含量及分布特征与前人研究具有一致性^[17]。TOC 含量的高值区主要分布在伶仃洋北部近岸的交椅湾、东部深圳西侧沿岸以及南部淇澳岛周边区域，TN 含量高值区的分布特征与 TOC 含量高值区的分布特征相似。由于四大口门的冲淡水输送通量、区域水动力条件以及伶仃洋海底地貌特征的影响，不同区域的沉积有机质含量存在差异，高值区的形成与大量冲淡水携带陆源物质输入河口有关^[17,23]。TOC 与 TN 存在良好的线性关系(图 3)，表明表层沉积物样品中的有机碳与氮来源基本一致，部分站位可能与无机氮以及选择性成岩作用的影响有关^[5,17]。

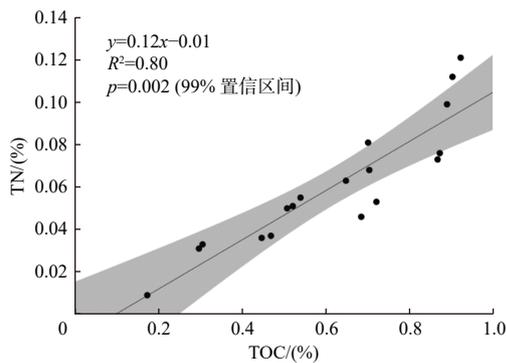


图 3 珠江口伶仃洋表层沉积物 TOC(%) 与 TN(%) 相关性
Fig. 3 The correlation between TOC and TN in the surface sediments of Lingdingyang bay, the Pearl River estuary

C/N 可用于区分不同来源的有机质，在判别海陆来源的沉积有机质方面有着广泛应用。通常情况下，C/N 比值越高，则指示沉积有机质陆地来源的占比越高。珠江口伶仃洋各站位表层沉积物 C/N 分布特征如图 4 所示，C/N 为 8.9~22.7，平均值为 12.9。高值区主要集中于珠江河口虎门以及伶仃洋东岸的区域内，淇澳岛周边也出现较高的 C/N，初步说明了有一定程度的陆源有机质贡献。然而，C/N 的运用存在一定的局限性，沉积物中无机氮产生的影响^[5]，以及沉积物中的有机质在沉积过程中易受的选择性成岩作用影响均会导致 C/N 发生变化^[24]，这增加了对沉积物中有机质特征、组成和来源判别的不确定性。

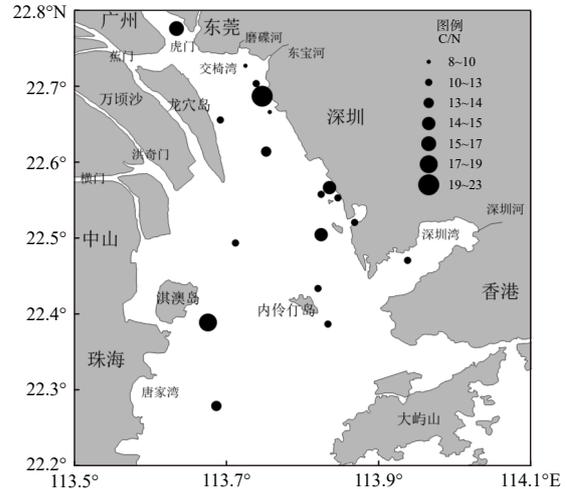


图 4 珠江口伶仃洋表层沉积物 C/N 分布特征

Fig. 4 Distribution characteristics of C/N ratios in the surface sediments of Lingdingyang bay, the Pearl River estuary

2.2 珠江口伶仃洋表层沉积有机碳氮同位素组成分布特征

有机碳和氮的稳定同位素比值通常用于判别沉积有机质的组成、形成过程以及来源^[2-3]。考虑到 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 与 $\delta^{15}\text{N}_{\text{tot}}$ 同位素单独指示区分有机质来源存在的不足，因此可以结合使用 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 和 $\delta^{15}\text{N}_{\text{tot}}$ 来区分陆源、海源和污水来源的有机质^[2,4,7]。如图 5 所示，珠江口伶仃洋表层沉积物中 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值的范围为 $-26.3\text{‰} \sim -22.5\text{‰}$ ，平均值为 -24.4‰ ； $\delta^{15}\text{N}_{\text{tot}}$ 值的范围为 $4.4\text{‰} \sim 7.9\text{‰}$ ，平均值为 6.0‰ 。在区域分布上，伶仃洋北部的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值相对偏负，接近陆源沉积有机质的端元值；内伶仃洋东侧与外伶仃洋的 $\delta^{15}\text{N}_{\text{tot}}$ 值相对偏正，伶仃洋中其他区域的同位素值无明显差异。由此看来，珠江口伶仃洋表层沉积物中的有机质来源组成具有多源性。其中自然来源的沉积有机质以海陆混合来源为主；人为来源的沉积有机质主要是人为活动产生的有机质，这部分有机质随着地表径流排放至伶仃洋中沉积并在沉积过程中发生有机质的选择性降解^[24]。由于水体中有机质转化、微生物活动、人类活动以及沉积有机质在沉积后选择性成岩作用的影响，海洋自生藻类生物在代谢过程中产生的有机质出现了同位素分馏，对伶仃洋沉积有机质来源的判断产生了一定的影响^[2,7,17]。

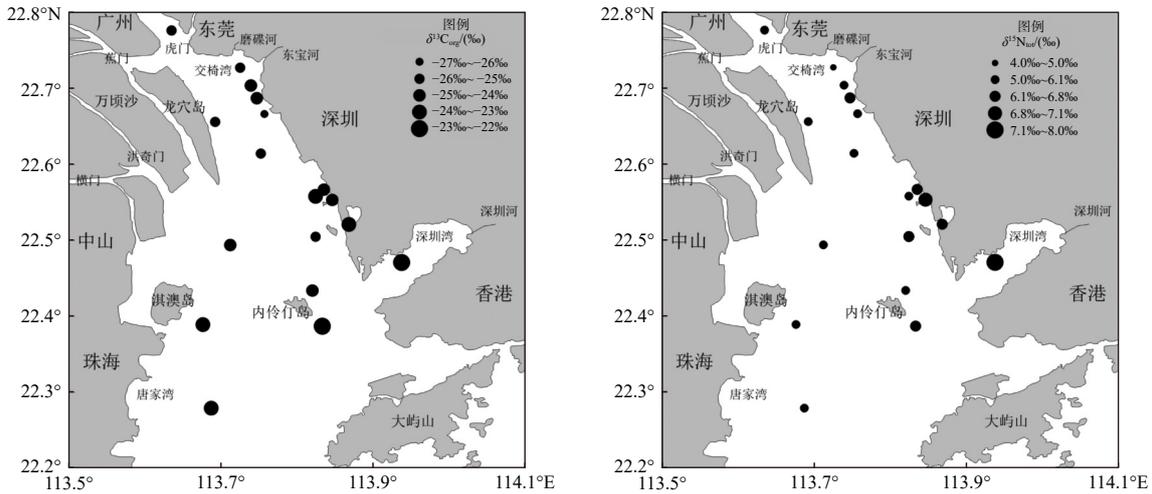


图5 珠江口伶仃洋表层沉积物碳氮稳定同位素分布特征

Fig. 5 Distribution characteristics of $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ and $\delta^{15}\text{N}_{\text{tot}}$ in the surface sediments of Lingdingyang bay, the Pearl River estuary

2.3 珠江口伶仃洋表层沉积物有机质来源及影响因素

珠江口伶仃洋表层沉积物埋藏的有机质具有多源性,如陆源、海源以及污水来源^[1-3]。根据前人研究,通过 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 和 $\delta^{15}\text{N}_{\text{tot}}$ 参数可有效区分沉积有机质中以陆源与海源为主的自然来源有机质,以及以污水来源为主的人为来源有机质^[2,12]。利用基于 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 与 $\delta^{15}\text{N}_{\text{tot}}$ 的三端元混合模型,对伶仃洋表层沉积物不同来源有机质的贡献比例进行判别^[25]。三端元混合模型中,三角形每个角均代表不同端元的输入,样品若落在三角形区域内,可认为该样品中的有机质来源为三个端元的混合;样品若落在两个端元间的连接线上,可认为该样品的有机质来源为两个端元的混合;样品若落在三角形区域外,则可能存在其他来源。适当扩展三角形区域的范围,落在扩展三角形区域内样品的有机质来源仍可被认定为未扩展三角形邻近连接线指代的两个端元混合,落在三角形顶点处以及顶点处与向外扩展三角形对应顶点的连接线上的样品则视为样品来源于该端元,扩展的适当范围为公差区间 τ ^[25-26]。本研究以陆源、海源与污水来源构建了三个端元混合模型,其中公差区间 τ 取 10%^[27]。图6展示了珠江口伶仃洋表层沉积物 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 与 $\delta^{15}\text{N}_{\text{tot}}$ 的关系。在图中,所有样品都位于向外扩展 10% 的公差区间三角形区域内,其中有 78% 的样品落在严格有效性三角形区域内,这部分样品的沉积有机质来

源为陆源、海源与污水来源;22% 的样品落在严格有效性三角形中陆源与海源两端元的连接线上以及向外扩展的公差区间三角形区域内,这部分样品的沉积有机质来源为陆源与海源。表明通过 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 与 $\delta^{15}\text{N}_{\text{tot}}$ 的相关性解析效果较好。

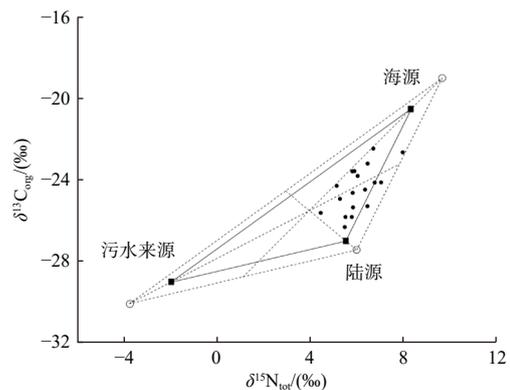


图6 利用 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 与 $\delta^{15}\text{N}_{\text{tot}}$ 相关性识别珠江口伶仃洋沉积物有机质来源

Fig. 6 Correlations between $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ and $\delta^{15}\text{N}_{\text{tot}}$ identifies the organic matter sources in Lingdingyang bay, the Pearl River estuary

如图6所示,落在严格有效性三角形内的样品,沉积有机质的来源为三端元混合输入;落在严格有效性三角形中陆源与海源两端元连接线上及其外扩的公差区间三角形区域中的样品,则为海陆混合输入。为定量评估伶仃洋表层沉积物中陆源、海源和污水来源有机质的贡献比例,本文结合基于 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 的二元混合模型与基于

$\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 和 $\delta^{15}\text{N}_{\text{tot}}$ 的三端元混合模型进行计算^[5,12]。根据前人对珠江口有机质来源与特征的研究,陆源有机质特征与 C3 植物相近,且人为活动产生的污水经严格处理^[5-6]。因此本文设定陆源有机质的碳、氮同位素端元值分别为 -27.0% 与 5.5% ^[5,8],海源有机质的碳、氮同位素端元值分别为 -20.5% 与 8.3% ^[5,28],经处理的污水来源有机质的碳、氮同位素端元值分别为 -29.0% 与 -2.0% ^[6,8]。

二元混合模型计算公式如下^[5]:

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{org}} = f_t \cdot \delta^{13}\text{C}_t + f_m \cdot \delta^{13}\text{C}_m \quad (2)$$

$$f_t + f_m = 1 \quad (3)$$

三端元混合模型计算公式如下^[12]:

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{org}} = f_t \cdot \delta^{13}\text{C}_t + f_m \cdot \delta^{13}\text{C}_m + f_s \cdot \delta^{13}\text{C}_s \quad (4)$$

$$\delta^{15}\text{N}_{\text{tot}} = f_t \cdot \delta^{15}\text{N}_t + f_m \cdot \delta^{15}\text{N}_m + f_s \cdot \delta^{15}\text{N}_s \quad (5)$$

$$f_t + f_m + f_s = 1 \quad (6)$$

以上式中, f_t 、 f_m 和 f_s 分别代表陆源、海源与污水来源有机质的贡献比例; $\delta^{13}\text{C}_t$ 、 $\delta^{13}\text{C}_m$ 与

$\delta^{13}\text{C}_s$ 分别代表陆源、海源与污水来源有机质端元的碳同位素特征值; $\delta^{15}\text{N}_t$ 、 $\delta^{15}\text{N}_m$ 与 $\delta^{15}\text{N}_s$ 分别代表陆源、海源与污水来源有机质端元的氮同位素特征值。

结果表明,在珠江口伶仃洋表层沉积物中,各不同来源有机质的贡献比例如下:陆源有机质占比为 14.6%~82.8%,平均值为 48.1%;海源有机质的占比为 12.1%~73.5%,平均值为 42.3%;污水来源有机质占比为 0~25.2%,平均值为 9.7%(图 7)。在内伶仃洋区域,沉积物中陆源有机质贡献比例相对于海源与污水来源的有机质而言较高。从河口向外海方向至内伶仃洋南部,陆源有机质贡献比例逐渐增加;而在向外海方向至外伶仃洋区域,该比例则逐渐下降。总的来说,从河口向外海方向,陆源有机质贡献比例先增加后减少,海源有机质贡献比例从河口向外海的方向逐渐增加,污水来源有机质贡献比例在伶仃洋区域无明显趋势性变化。

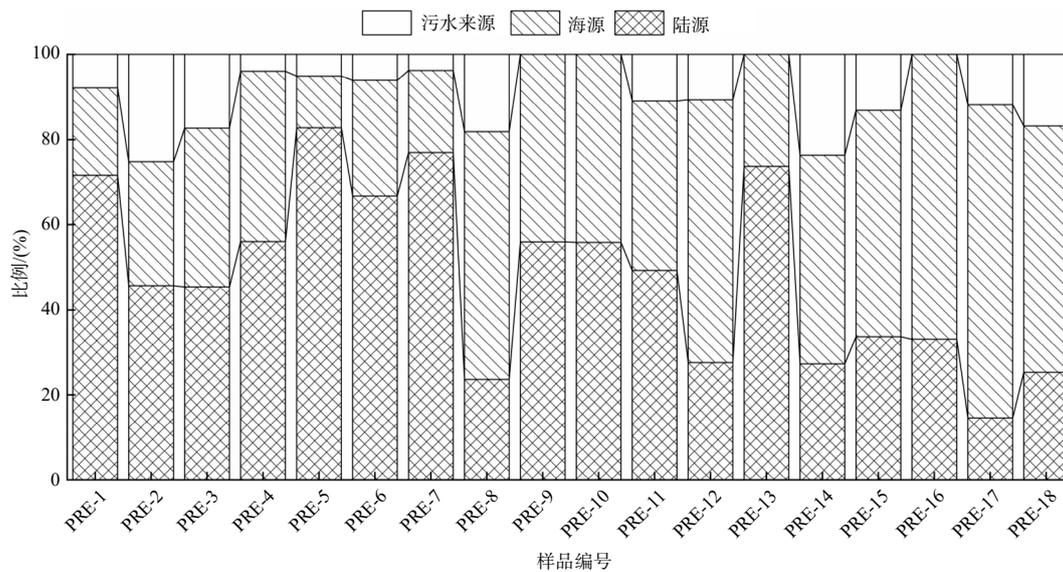


图 7 珠江口伶仃洋表层沉积物各来源有机质贡献比例

Fig. 7 Contribution proportion of organic matter source at sampling sites in the surface sediments of Lingdingyang bay, the Pearl River estuary

珠江经过虎门、蕉门、洪奇门与横门等四大口门注入伶仃洋的年径流量为 1607 亿 m^3 , 占年总径流量的 55%^[20], 巨大的径流量带来了大量的陆源碎屑物质, 是伶仃洋靠河口区陆源有机质比例高的主要原因。如图 8 所示, 珠江口伶仃洋表

层沉积物中, 陆源 TOC 的含量为 0.08%~0.76%, 其中高值区主要集中于内伶仃洋中部与北部区域; 海源 TOC 的含量为 0.07%~0.50%, 高值区主要集中于内伶仃洋北部交椅湾区域以及南部远离河口接近外伶仃洋的区域; 污水来源 TOC

的含量为 0%~0.23%, 高值区主要集中于伶仃洋北部交椅湾区域以及外伶仃洋北部区域, 陆源和 海源 TOC 含量的分布特征与河口区较高的沉积 速率以及伶仃洋不同区域的水动力环境条件有 关^[13]。珠江河口虎门、蕉门、横门与洪奇门均从

伶仃洋的西侧与北侧注入伶仃洋, 携带陆源物质 的河流冲淡水注入伶仃洋后在科里奥利力作用 下向西偏转^[17], 使内伶仃洋西侧的水流流速偏大 于东侧, 进而有利于更多陆源有机质沉积在内伶 仃洋东侧。

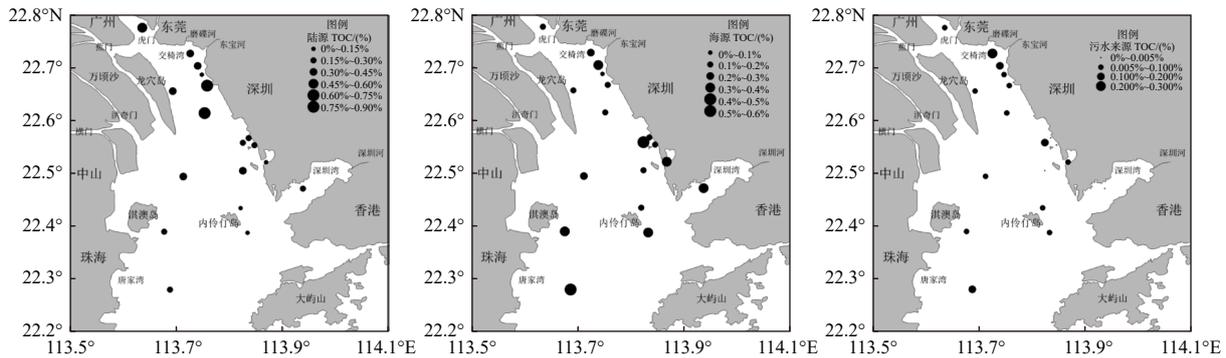


图8 珠江口伶仃洋表层沉积物各来源 TOC 分布特征

Fig. 8 Distribution characteristics of TOC from all organic matter sources at sampling sites in the surface sediments of Lingdingyang bay, the Pearl River estuary

由于水流流速的增大使水体浊度增大, 在水 动力条件较强的区域, 海洋浮游藻类生物的生长 受到了抑制^[17], 因此河口区的海源有机质丰度相 对低于远离河口的区域。在水动力条件较弱的 区域, 沉积物中海源有机质贡献比例通常大于 陆源有机质^[18], 在远离河口区域的深圳西南部沿 岸, 水动力条件的减弱使得输送至此的陆源有机 质比例降低, 与前人研究结论基本一致^[5, 17]。此 外, 随着珠江三角洲城市扩张、人为活动的增 强, 以及珠江口伶仃洋夏季高温多雨的气候, 每 年大约有 $9 \times 10^9 \text{ m}^3$ 的污水排放至河口^[18, 29], 加 剧了对陆源物质的冲刷, 可能导致更多的陆源物 质与人为活动产生的污水通过地表径流被输 送至伶仃洋中, 进而加剧伶仃洋水域的恶化和富 营养化, 从而对伶仃洋的沉积环境产生重大影响 ^[17, 30]。

3 结论

伶仃洋的 TOC 与 TN 含量分布特征相似, 珠 江口四大口门周边与伶仃洋西侧的有机质丰度 相对高于东侧, 主要由陆源有机质贡献。稳定有 机碳、氮同位素分析揭示了沉积有机质来源的 多源性。利用三端元混合模型对陆源、海源和

污水来源有机质的贡献比例进行定量评估, 显示 陆源有机质贡献比例为 14.6%~82.8%, 平均值 为 48.1%; 海源有机质贡献比例为 12.1%~ 73.5%, 平均值为 42.3%; 污水来源有机质贡献 比例为 0~25.2%, 平均值为 9.7%。分析表明, 珠 江河口海域表层沉积物的有机质以陆源为主, 各来 源的有机质贡献比例与人为活动影响存在一定 的关系。

参考文献:

- [1] RAMÍREZ-ÁLVAREZ N, MACÍAS-ZAMORA J V, BURKE R A, et al. Use of $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$, and carbon to nitrogen ratios to evaluate the impact of sewage-derived particulate organic matter on the benthic communities of the Southern California Bight[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2007, 26(11): 2332-2338.
- [2] LU X, ZHOU F X, CHEN F J, et al. Spatial and seasonal variations of sedimentary organic matter in a subtropical bay: implication for human interventions[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(4): 1362.
- [3] ZHANG J Q, HAO Q, LI Q, et al. Source identification of sedimentary organic carbon in coastal wetlands of the western Bohai Sea[J]. *Science of The Total Environment*, 2024, 913: 169282.
- [4] KOZIOROWSKA K, KULIŃSKI K, PEMPKOWIAK J. Sedimentary organic matter in two Spitsbergen fjords: terrestrial

- and marine contributions based on carbon and nitrogen contents and stable isotopes composition[J]. *Continental Shelf Research*, 2016, 113: 38-46.
- [5] HU J F, PENG P A, JIA G D, et al. Distribution and sources of organic carbon, nitrogen and their isotopes in sediments of the subtropical Pearl River estuary and adjacent shelf, southern China[J]. *Marine Chemistry*, 2006, 98(2/3/4): 274-285.
- [6] YE F, GUO W, WEI G J, et al. The sources and transformations of dissolved organic matter in the pearl river estuary, China, as revealed by stable isotopes[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2018, 123(9): 6893-6908.
- [7] 葛晨东, 王颖, PEDERSEN T F, 等. 海南岛万泉河口沉积物有机碳、氮同位素的特征及其环境意义[J]. *第四纪研究*, 2007, 27(5): 845-852.
- [8] XUAN Y X, TANG C Y, LIU G L, et al. Carbon and nitrogen isotopic records of effects of urbanization and hydrology on particulate and sedimentary organic matter in the highly urbanized Pearl River Delta, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 591: 125565.
- [9] MACHIWA J F. Stable carbon and nitrogen isotopic signatures of organic matter sources in near-shore areas of Lake Victoria, East Africa[J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2010, 36(1): 1-8.
- [10] 宋逸群, 王传远, 靳文静, 等. 渤海辽东湾海域表层沉积物有机质特征、来源及环境评价分析[J]. *生态科学*, 2022, 41(2): 84-90.
- [11] 吴丹丹, 葛晨东, 高抒, 等. 长江口沉积物碳氮元素地球化学特征及有机质来源分析[J]. *地球化学*, 2012, 41(3): 207-215.
- [12] VEZZONE M, DOS ANJOS R M, CESAR R G, et al. Using stable isotopes to discriminate anthropogenic impacts of the sedimentary organic matter pollution in the Rodrigo de Freitas Lagoon (RJ, Brazil)[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2021, 28(4): 4515-4530.
- [13] ZHANG L, YIN K D, WANG L, et al. The sources and accumulation rate of sedimentary organic matter in the Pearl River Estuary and adjacent coastal area, southern China[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2009, 85(2): 190-196.
- [14] 李孟国, 韩志远, 李文丹, 等. 伶仃洋滩槽演变与水沙环境研究进展[J]. *海洋湖沼通报*, 2019(5): 20-33.
- [15] 夏真. 珠江口内伶仃洋水下地形地貌特征[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2005, 25(1): 19-24.
- [16] LAO J Y, WU R B, CUI Y S, et al. Significant input of organophosphate esters through particle-mediated transport into the Pearl River Estuary, China[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 438: 129486.
- [17] ZHANG L, YIN K D, YANG Y Q, et al. Distribution characteristics and sources of sedimentary organic matter in the pearl river estuary and adjacent coastal waters, southern China[J]. *Journal of Earth Science*, 2013, 24(2): 262-273.
- [18] JIA G D, PENG P A. Temporal and spatial variations in signatures of sedimented organic matter in Lingding Bay (Pearl estuary), southern China[J]. *Marine Chemistry*, 2003, 82(1/2): 47-54.
- [19] 时翠, 甘华阳, 夏真, 等. 珠江口内伶仃洋表层沉积物粒度特征及其运移趋势[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2015, 35(1): 13-20.
- [20] 唐诚, 赵艳, 张华, 等. 珠江口近30年海底表层沉积物粒度分布及其环境变化[J]. *海洋科学*, 2013, 37(5): 61-70.
- [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: 23-25.
- [22] 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.
- [23] 刘广州, 胡嘉镗, 李适宇. 珠江口夏季海陆源有机碳的模拟研究: 分布特征、贡献比重及其迁移转化过程[J]. *中国环境科学*, 2020, 40(1): 162-173.
- [24] MEYERS P A. Organic geochemical proxies of paleoceanographic, paleolimnologic, and paleoclimatic processes[J]. *Organic Geochemistry*, 1997, 27(5/6): 213-250.
- [25] DITTMAR T, LARA R J, KATTNER G. River or mangrove? Tracing major organic matter sources in tropical Brazilian coastal waters[J]. *Marine Chemistry*, 2001, 73(3/4): 253-271.
- [26] GONNEEA M E, PAYTAN A, HERRERA-SILVEIRA J A. Tracing organic matter sources and carbon burial in mangrove sediments over the past 160 years[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2004, 61(2): 211-227.
- [27] XIA P, MENG X W, LI Z, et al. Organic carbon isotope and pollen evidence for mangrove development and response to human activity in Guangxi (Southwest China) over the last 140 years[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2017, 36(2): 11-21.
- [28] CHEN F R, ZHANG L, YANG Y Q, et al. Chemical and isotopic alteration of organic matter during early diagenesis: evidence from the coastal area off-shore the Pearl River estuary, South China[J]. *Journal of Marine Systems*, 2008, 74(1/2): 372-380.
- [29] PENG X Z, XIONG S S, OU W H, et al. Persistence, temporal and spatial profiles of ultraviolet absorbents and phenolic personal care products in riverine and estuarine sediment of the Pearl River catchment, China[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2017, 323: 139-146.
- [30] HUANG C, CHEN F J, ZHANG S W, et al. Carbon and nitrogen isotopic composition of particulate organic matter in the Pearl River Estuary and the adjacent shelf[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2020, 246: 107003.