

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

韩永强¹, 夏嘉^{1,2}, 谭靖千¹, Abarike Grace Awinmalsim¹, 宋之光¹

(1. 广东海洋大学 化学与环境学院, 广东 湛江 524088; 2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(湛江), 广东 湛江 524013)

摘要: 对环雷州半岛近海 43 个海底表层沉积物的总有机碳(TOC)、总氮(TN)、沉积介质条件(包括沉积物粒度)进行了分析, 探讨了沉积物 TOC、TN 的区域分布特征以及影响有机碳分布的主要因素。结果表明, 环雷州半岛近海海域海底表层沉积物有机碳含量在 0~0.79%之间, 平均值为 0.26%。与中国其它近海海域相比, 环雷州半岛大部分近海区域海底表层沉积物有机碳含量明显偏低, 为有机质贫乏区, 仅雷州半岛西南部流沙湾近海海域为 TOC 相对高值区。总氮含量也不高, 在 0.011%到 0.100%之间, TOC 与 TN 存在较强的正相关性, 且平面上 TOC 与 TN 分布高度重合, 显示氮元素主要以有机化合物形式存在。TOC/TN 比值在 5.1~14.3 之间, 表明沉积有机质具有陆源输入和海洋自生来源的混合特征, 但以雷州半岛西侧北部及东侧中部海域受陆源有机质输入影响更大。大多数站位海底沉积物粒度构成以粉砂为主、粘土次之, 少数站位以砂质沉积为主。沉积物有机碳含量与粘土及粉砂含量呈弱正相关性, 与沉积物 pH 值、Eh 值及砂含量呈弱负相关性, 这表明海底沉积物有机质丰度受有机质来源输入、海底氧化还原状态和沉积水动力条件(沉积物粒度)等因素综合控制。

关键词: 海底表层沉积物; 总有机碳含量; 总氮; 环境因素; 环雷州半岛海域

中图分类号: P736.41 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2020)03-0093-11

DOI: 10.11759/hyhx20191012002

海洋是地球表层最重要的碳库之一, 是全球碳循环系统的一个至关重要的子系统^[1]。海洋碳储量约为大气的 50 倍^[2], 在大气二氧化碳(CO₂)浓度调节中发挥重要的作用。陆架边缘海在全球碳循环中具有重要作用, 也是陆地与大洋的连接过渡带, 占全球海洋总面积的 7.6%。但由于其具有较高的陆源输入和海洋初级生产力, 同时加上人类活动的强烈影响, 其生物地球化学过程比深海远洋更为复杂多变^[3]。因此调查研究近海海底沉积物有机碳含量及区域分布特征, 对于研究和预测未来海洋生态环境及变化有重要科学意义。

有关中国近海海域表层沉积有机质方面的研究多集中于渤海^[4]、黄海^[5-6]、长江口附近海域^[7-8]、东海^[9]、南海北部珠江口附近海域^[10-11]; 而围绕环雷州半岛相关海域如湛江港湾、琼州海峡、北部湾等^[12-16]区域海底沉积环境、沉积物中有机及无机污染物等有一些零星的研究报道, 但缺少对环雷州半岛整个区域沉积有机质大范围系统性的研究。环雷州半岛近海海域作为东亚低纬度海洋性季风影响的重要海陆过渡带, 海底表层沉积物有机碳含量不仅受该海域海洋初级生产力和海洋沉积环境变化控制, 也受

到人为活动的强烈影响。这一海域还是中国重要的红树林生态海域, 红树林的边缘效应对海岸带有机碳库分布格局具有重要意义^[17]。为了整体性研究环雷州半岛近海海域的沉积地球化学环境特征, 本研究通过对环雷州半岛近海海域海底表层沉积物进行系统采样和室内实验分析, 以及海洋沉积环境的现场测试, 试图研究该海域海底沉积有机质的丰度分布特征以及环境控制因素, 探讨这一特殊海域近海碳储存规律与区域海洋环境变化。

1 研究区地质地理概况

雷州半岛是中国第三大半岛, 地处中国大陆最

收稿日期: 2019-10-12; 修回日期: 2019-12-13

基金项目: 广东海洋大学博士科研启动项目(R17001); 南方海洋科学与工程广东省实验室(湛江)项目(ZJW-2019-08)

[Foundation: the Doctoral Scientific Research Foundation of Guangdong Ocean University, No. R17001; Fund of Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhanjiang), No. ZJW-2019-08]

作者简介: 韩永强(1992-), 男, 河南周口人, 硕士研究生, 从事海洋资源与环境研究, 电话: 18666736320, E-mail: yongqianghan_0394@163.com; 夏嘉, 通信作者, 讲师, 主要从事有机地球化学和元素地球化学研究, 电话: 18022664304, E-mail: xiajia_0000@163.com

南端, 半岛南北长约 140 km, 东西宽 60~70 km, 三面环海, 海岸线长约 1 180 km。环雷州半岛海域的入海河流有: 南渡河、西溪河、英利河、通明河、调风河等呈放射状独流入海, 尽管这些河流由于流量小, 但其携带的陆源沉积物对近海沉积有机质应有一定影响。同时半岛岸线曲折, 港湾与岛屿众多, 近海环境条件变化较大。此外, 环雷州半岛有大量的近海养殖区, 这些近海养殖业需要投入大量饵料, 且养殖生物的新陈代谢活动都会对近海海底沉积物有机质丰度组成产生一定影响。雷州半岛东部为台地溺谷湾海岸, 南部为火山台地海岸, 西部为海成阶地和台地溺谷湾海岸。半岛东西两侧潮汐作用不同, 东

侧沿海受不规则半日潮影响, 西侧北部湾海域受规则全日潮影响, 因而其海洋环境存在较大的差异。前人对南海北部粤西近海海域漂流瓶的运动轨迹、海流的定点连续观测研究显示^[18], 粤西沿岸流基本是常年向西南流动, 沿雷州半岛东侧近岸海域南下; 琼州海峡的潮汐情况比较复杂, 潮流涨急时刻自西向东流、落急时刻自东向西流, 流速东向流大于西向流^[19]; 北部湾区域波浪的方向取决于风向, 冬季北部湾北部波浪多为东北向, 夏季以西南向居多^[20]; 因而环雷州半岛近海海域沉积环境比较复杂。研究区为环雷州半岛近海海域, 地理范围介于北纬 20°15'N~21°30'N 和东经 109°30'E~111°45'E 之间(图 1)。

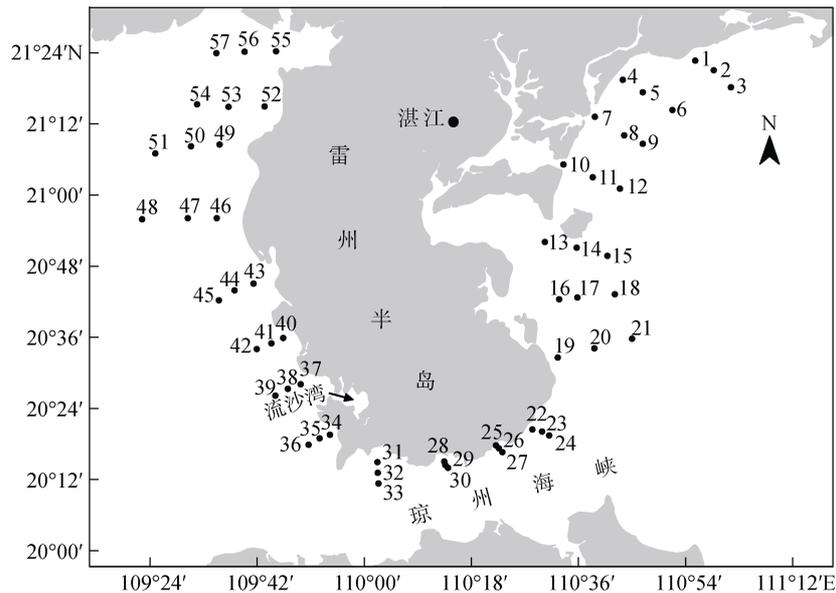


图 1 研究区域及采样站位

Fig. 1 Map of study area and sampling locations

2 样品与方法

2.1 样品采集和参数测定

海底表层沉积物样品是在 2017 年秋季(9 月 29 日~10 月 7 日)广东海洋大学环雷州半岛海洋环境与生态综合科学考察公共航次期间搭载“天龙”号调查船, 通过重力箱式采样器采集获得。在预先设定的 57 个调查采样站位中共获取 43 个站位的表层沉积物样品(图 1、表 1), 未获得沉积物样品的站位主要是砂质海底。沉积物的氧化还原电位(Eh)和 pH 值的现场测定, 仅在箱式采泥斗采取的海底沉积物表层呈完好的切块形状时进行测定, 若沉积物被扰动不成块状则不予测定。Eh 和 pH 值测定所用仪器为高精度便携式氧化还原电位及 pH 值测定仪。表层沉积物

样品采集为现场采集未经扰动的表层 0~10 cm 厚度的沉积物装入 PVC 样品袋中, 排除空气后密封冷冻保存于冰箱中, 回到实验室后一周内对样品进行冷冻干燥及后续实验分析检测。

2.2 沉积物粒度分析

取少量沉积物湿样, 使用 30% 过氧化氢和 1 mol/L 盐酸分别去除有机质和无机碳, 用去离子水洗至中性。以六偏磷酸钠作为分散剂, 充分摇匀后使用 Malvern Mastersizer 2000 激光粒度分析仪进行粒度分析。仪器测量范围为 0.2~1 000 μm, 粒径分辨率小于 0.01 Φ。根据沉积物粒度累计百分含量, 获得粘土(>4 μm)、粉砂(4~63 μm)和砂(>63 μm)^[21]的相对含量。多次重复测定的相对误差小于 1%。

表 1 所有站位表层沉积物 TOC 及相关物性组成分析

Tab. 1 The TOC content and related property composition of the seafloor surface sediments from all sampling location

样品号	底质类型	TOC/%	TN/%	TOC/TN	pH	Eh/mV	粘土/%	粉砂/%	砂/%	中值粒径/ Φ
P1	泥质	0.28	0.055	5.1	7.63	-123.6	23.9	55.9	20.3	6.43
P2	泥质	0.30	0.058	5.2	7.59	-183.8	21.8	59.9	18.4	6.48
P3	泥质	0.59	0.078	7.6	7.63	-145.3	26.3	55.6	18.1	6.64
P4	泥质	0.35	—	—	7.55	-101.3	25.4	62.5	12.2	6.42
P5	泥质	0.31	0.039	7.9	7.89	-172.5	28.7	57.8	13.6	6.86
P6	泥质	0.51	0.067	7.6	7.73	-146.9	24.5	63.9	11.6	6.55
P7	泥质	0.55	0.054	10.2	7.51	-168.0	30.0	65.6	4.4	6.91
P9	泥质	0.43	0.050	8.6	7.78	-109.3	29.4	62.1	8.5	6.91
P10	粉砂质	0.36	0.036	10.0	7.76	-121.7	31.0	64.1	4.9	6.99
P13	泥砂质	0.19	0.021	9.0	7.74	-128.5	31.5	49.1	19.4	6.88
P15	泥质	0.52	0.059	8.8	—	-133.8	29.2	63.5	7.3	6.90
P18	泥质	0.34	0.028	12.1	—	-71.0	32.1	56.2	11.7	6.91
P19	泥质	0.34	0.045	7.6	7.71	-101.7	20.8	48.3	30.9	4.90
P21	粉砂质	0.00	0.011	—	—	10.5	13.6	26.9	59.5	3.55
P22	泥砂质	0.36	0.038	9.5	7.71	-71.2	19.1	66.2	14.7	5.75
P23	泥砂质	0.33	0.040	8.3	7.73	9.5	27.4	62.7	9.9	6.79
P26	泥质	0.45	0.046	9.8	—	-51.2	20.7	50.4	28.9	5.23
P27	泥质	0.59	0.070	8.4	7.5	-129.5	30.1	59.9	10.0	6.90
P28	泥质	0.49	0.050	9.8	—	-146.7	22.5	52.7	24.8	5.71
P29	泥质	0.51	0.058	8.8	7.56	-64.7	29.6	62.3	8.1	6.95
P30	泥质	0.29	0.036	8.1	7.25	-137.0	18.5	53.4	28.1	5.45
P31	泥质	0.33	0.037	8.9	7.45	-122.3	25.5	43.4	31.1	6.17
P32	泥质	0.50	0.041	12.2	7.7	-52.0	22.7	62.7	14.6	5.91
P33	砂砾质	0.34	0.036	9.5	—	-132.5	21.0	55.7	23.4	5.30
P34	泥质	0.43	0.044	9.8	7.63	-176.0	31.1	47.2	21.7	7.00
P35	泥质	0.71	—	—	7.53	-125.0	30.0	66.6	3.4	6.94
P36	泥质	0.52	0.063	8.3	7.67	-85.3	30.2	61.9	7.9	6.93
P37	泥质	0.79	0.100	7.9	7.4	-121.4	36.8	61.6	1.6	7.43
P38	泥质	0.57	0.064	8.9	7.62	-255.1	32.4	58.2	9.4	7.07
P39	泥质	0.70	0.070	10.0	7.75	-130.9	32.9	56.4	10.8	7.04
P40	泥质	0.75	0.093	8.1	7.46	-121.5	34.2	60.1	5.8	7.24
P41	泥质	0.63	0.068	9.3	7.57	-109.5	36.1	53.2	10.7	7.31
P42	泥质	0.50	0.062	8.1	7.66	-100.0	31.9	58.6	9.5	7.01
P43	泥质	0.23	0.016	14.4	7.66	-120.3	39.6	47.1	13.3	7.48
P44	泥质	0.54	0.062	8.7	7.48	-83.6	37.6	54.9	7.5	7.39
P45	泥质	0.55	0.058	9.5	—	-107.8	30.7	59.5	9.8	7.13
P47	砂质	0.20	0.017	11.8	7.68	-93.4	29.0	51.7	19.3	7.09
P48	泥质	0.26	0.024	10.8	7.84	-190.4	24.0	34.2	41.9	6.24
P51	泥质	0.48	0.062	7.7	7.39	-181.2	36.7	54.5	8.8	7.37
P52	砂质	0.23	0.026	8.8	7.61	-83.1	33.5	34.4	32.1	6.82
P54	砂质	0.00	0.021	0.0	7.46	-76.7	21.0	19.8	59.2	3.38
P56	粗砂质	0.00	0.011	0.0	7.55	-97.5	9.4	14.6	76.1	1.57
P57	泥质	0.53	0.054	9.8	7.5	-151.1	36.0	50.7	13.3	7.18

2.3 沉积物 TOC 与 TN 的测定

样品经冷冻干燥后, 研磨过 100 目筛以备用。样品先使用 1mol/L 的盐酸去除无机碳后进行有机碳分析, 而总氮分析使用不经酸化处理的原样直接进行测试。分析使用仪器为德国 Elementar 公司 vario MACRO cube 有机元素分析仪, 样品中的 TOC、TN 的分析误差分别为±0.02%和±0.005%。

3 结果与讨论

3.1 沉积物 TOC、TN 分布特征及影响分析

总计 43 个海底表层沉积物样品 TOC 含量变化范围在 0~0.79%之间, 平均为 0.26%(表 2)。其中, P37 站位有机碳含量最高; P21、P54 和 P56 三个站位的表层沉积物有机碳含量可能低于仪器的检测下限, 故显示为零值。沉积物 TOC 含量平面等值线图(图 2a)显示, 位于雷州半岛西南部的流沙湾外海一带为

有机碳含量较高区域; 同时也存在两个低值区域, 分布在雷州半岛西北部近岸海域和雷州半岛东南部近海海域。除流沙湾附近海域沉积物有机碳含量较高之外, 其它站位的沉积物有机碳含量普遍较低。

从表 2 可以看出, 雷州半岛的流沙湾、粤西海域等这些靠近海岸线的浅海湾区海底沉积有机碳含量相对较高。这主要反映了近岸受人为影响显著的局限性海域与近海开阔性海域在沉积环境方面的差异。与表 2 中其它近海海域相比, 环雷州半岛近海海域表层沉积物中有机碳含量总体偏低。半岛东侧近海受不规则半日潮影响较大, 粤西沿岸流常年向西南向流动^[18], 流动水体含氧量较高, 不利于有机质的保存聚集, 因此可能造成沉积物有机质含量较低。半岛东南部外罗水道即琼州海峡的东入口附近此区域为海流潮汐作用高动能区, 以砂质沉积物为主, 有机质难以在此保存。同时琼州海峡海流方向随

表 2 中国近海海域海底沉积物 TOC 与 TN 分布

Tab. 2 The distribution of TOC and TN in seafloor sediments of the coast of China

研究海域	TOC/%	TN/%	采样时间/(年-月)	参考文献
环雷州半岛近海海域	0.00~0.79(0.26)	0.01~0.10(0.05)	2017-10	本文
渤海海域	0.19~0.81(0.46)	0.02~0.12(0.07)	2012-05	[4]
黄海海域	0.10~1.38(0.50)	0.01~0.20(-)	2010-10	[5]
黄海、东海	0.05~1.64(0.88)	-	2006	[22]
台湾海峡西部	0.01~1.79(0.37)	0.00~0.11(-)	2005-04	[23]
珠江河口	0.36~1.40(0.66)	0.02~0.10(0.04)	2013-07	[10]
湛江港	0.12~1.32(0.54)	-	2009-02	[13]
流沙湾	0.06~3.06(1.43)	-	2008-02	[13]
粤西海域	0.01~8.34(0.9)	0.18~0.37(0.27)	2006-07	[24]

注: 表中数据中括号内为平均值, “-”表示无参数

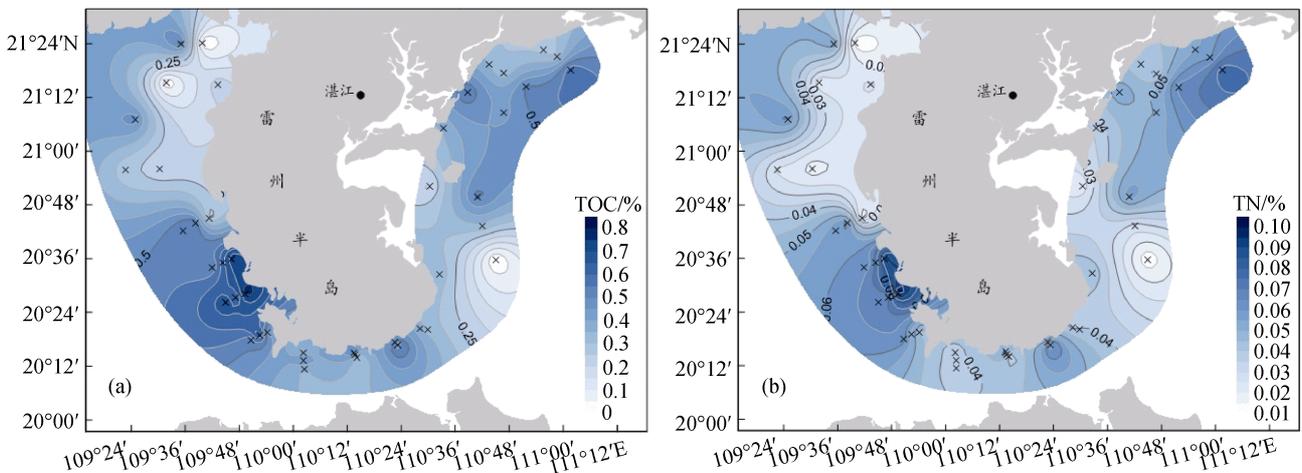


图 2 研究区域海底表层沉积物 TOC (a)和 TN (b)分布

Fig. 2 Distribution of TOC (a) and TN (b) in the seafloor surface sediments in the study area

季节变化, 形成一个复杂的沉积环境, 有机质在此不断沉积悬浮, 更不利于有机质的保存。北部湾处于热带——亚热带季风气候带, 夏华永等^[25]通过分析春夏季冷水团及盐度的分布, 比较夏季风生流与密度流的强弱, 提出北部湾终年为逆时针环流的观点。夏季海洋生产力明显高于冬季且加上受地形的影响, 位于半岛西南部的流沙湾海域因呈葫芦形的半封闭海湾, 在其附近海域有利于沉积物有机质的沉积, 样品测定结果显示此区域的有机质含量最高。整体而言, 环雷州半岛近海海域海流、潮流作用比较强、陆源沉积物输入比较弱, 海底环境不利于有机质的沉积与保存。同时根据采样时的现场观察记录以及底栖生物采样分析发现, 箱式采样器采集的海底表层沉积物中底栖生物量稀少, 尤其是 TOC 低值区域站点, 显示环雷州半岛近海海域存在海底荒漠化的态势, 值得密切关注。海底沉积物有机碳含量低, 表明环雷州半岛近海海域初级生产率低或外源有机质输入量低、或沉积环境不利于有机质的保存。

沉积物总氮含量 TN 变化范围在 0.011%~0.100% 之间, 平均为 0.050%(表 2)。其中, P37 站位 TN 含量最高, 与 TOC 含量最高的站位一致。图 2 显示, 环雷州半岛近海海底表层沉积物 TOC 与 TN 在空间分布上具有较高的一致性, 高值区(TOC>0.5%, TN>0.07%)主要分布在雷州半岛西南部流沙湾附近海域; 高含量的 TOC 和 TN 可能是由于流沙湾为西北向呈葫芦形的半封闭型海湾, 在低纬度海洋性季风的影响下更多的有机质在此区域聚集沉降到沉积物中造成的。沉积物中有机质含量高, 底栖生物活跃, 也有利于各类大型海洋生物的生长繁殖。而流沙湾成为中国海水珍珠“南珠”的生产基地和广东省重要的贝类养殖区也与此不无关系。低值区(TOC<0.3%, TN<0.05%)主要分布在雷州半岛西北部近岸海域及雷州半岛东南部近海海域。此外, 沉积物 TOC 和 TN 呈现出很强的正相关性(图 3, $R^2 = 0.8309$), 说明沉积物中氮主要以有机化合物的形式赋存。

海洋沉积有机质主要有海相和陆相两种来源, 而且在不同的海域或河口, 两种来源有机质的贡献存在明显差异^[26-27]。TOC/TN 比值可以用来识别海洋沉积物中有机质的来源, 有机质的来源不同, 其比值往往呈现不同的特征值; 当 TOC/TN 比值<8 指示海洋自生来源, TOC/TN>12 时指示陆源输入, 而处于 8 至 12 之间则为海相和陆相两者混合来源^[28]。环雷州半岛近海海域海底表层沉积物中 TOC/TN 比值

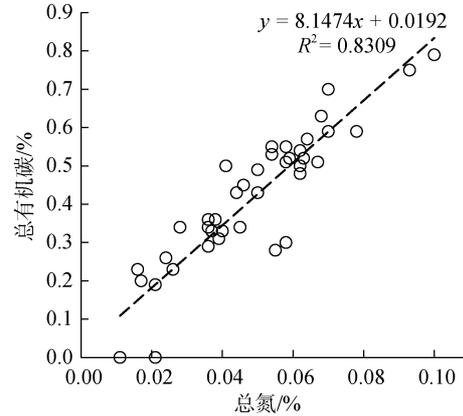


图 3 海底表层沉积物总有机碳与总氮关系图
Fig. 3 Relationship between TOC and TN in the seafloor surface sediments

为 5.1~14.3, 其均值为 9.1。其中 TOC/TN<8 的沉积物占 23.7%, TOC/TN 处于 8~12 之间的沉积物占 71.1%, TOC/TN>12 的占 5.3%(表 1)。该结果表明, 研究区内大部分区域沉积有机质均为海陆混合输入来源; 少部分区域(TOC/TN<8)以海洋自生来源有机质输入为主; 个别站位(TOC/TN>12)以陆源有机质输入为主。以海洋自生有机质输入为主的区域主要分布在雷州半岛东北部的近岸海域; 此区域属于有机碳含量次高值区域, 且沉积物底质类型属于泥质, 海洋自生有机碳可被细颗粒物吸附沉降进入沉积物中, 即使有沿岸流经过, 仍然能体现海洋自生有机碳的特征。而以陆源有机质输入为主的区域主要分布在雷州半岛西侧中部近岸海域; 此区域是中国海水珍珠的生产基地和广东省重要的贝类养殖区, 沉积物有机质含量受养殖饵料投放及生物代谢活动的影响较大。其它区域 TOC/TN 比值处于 8 至 12 之间, 表明沉积有机质具有陆源和海洋自生有机质来源的混合特征。大部分区域的 TOC/TN 比值大于 8 表明陆源有机碳是近海海底表层沉积物总有机碳来源的主体, 同时也揭示近海海域是陆源有机碳重要的汇聚场所。

3.2 沉积物 Eh 和 pH 分布及其影响

海底表层沉积物 Eh 和 pH 参数是在考察船后甲板上现场测定, 相关测定数值列于表 1, 沉积物 Eh 值变化范围在-255.1~10.5 mV 之间。根据宋金明等学者^[29]对沉积物氧化还原电位与氧化还原状态的划分, 环雷州半岛近海海域海底表层沉积物表现弱还原至还原状态。图 4a 显示, Eh 高值区域出现在雷州半岛的东南部近海海域, 此海域也是有机碳含量低

值区之一。Eh 低值区主要分布在靠近北海的近岸海域、流沙湾附近海域和雷州半岛东北部近岸海域, 这些区域海底表层沉积物有机碳含量相对较高, 尤其是流沙湾附近海域。雷州半岛西侧近岸海域海底沉积物氧化还原电位相对比较稳定, 变化较小。近海海洋海底沉积物中时刻都在发生各种各样的复杂化学反应^[30]。而 Eh 作为一项综合性指标, 直接影响了沉积物中各种物质的地球化学行为、包括自生矿物的形成和转化及成岩作用进程等^[31]。海洋沉积物的 Eh 由沉积物中的微生物活动控制, 而表层沉积物中的有机质的存在为微生物提供了必要生存条件^[30]。沉积物 Eh 低值区有机碳含量相对较高, 尤其是流沙湾附近海域。Eh 的高值区主要分布在雷州半岛东南部近海海域和雷州半岛西侧北部近岸海域(流沙湾除外); 这两个区域沉积物有机碳含量较低, 是整个研究海域的有机碳含量低值区。这说明 Eh 与海底表层沉积物有机质丰度成负相关性。宋金明等人的研究也表明, Eh 值的大小与沉积物中有机质含量密切相关, 在平面分布上 Eh 与有机碳含量呈相反趋势变化^[29]。在有机质含量高的沉积物中, 有机质首先被好氧细菌和真菌降解, 消耗溶解的氧气导致沉积物 Eh 降低; 当氧气被耗尽后, 有机物逐渐被硝酸盐、氧化锰、硫酸盐还原菌所降解, Eh 持续降低^[30]。根据整个研究区域的实验结果及相关性分析, 有机碳含量与 Eh 的负相关性较弱(图 5a), 可能是由于研究区域属于近岸海域, 沉积环境复杂且受多种自然因素和人类活动的影响, 从而减弱了有机碳和 Eh 之间的整体负相关性。

研究区内海底表层沉积物 pH 在 7.25~7.89 之间,

沉积介质条件呈弱碱性特征。图 4b 显示, 表层沉积物的 pH 分布具有明显的区域性变化特征。pH 低值区主要出现在琼州海峡、雷州半岛西北部近海海域及流沙湾附近近岸海域, 这些区域的沉积物有机碳含量相对较高。雷州半岛西侧近海沉积物 pH 值由近岸向远岸呈带状逐渐增大。半岛东侧海底表层沉积物 pH 值普遍较高, 在东北部出现一个高值中心。由于海底表层沉积物与底层海水构成一个临界面, 且两者之间存在频繁的物质交换, 因此沉积物的 pH 值的大小直接取决于其上覆海水的性质^[32]。同时, 沉积物中碳酸盐及贝类壳体释放出碳酸根离子结合水体中的氢离子, 造成氢氧根离子过剩, 致使水体偏碱性, 因而表层沉积物也呈弱碱性。pH 低值区域的沉积有机碳含量较高, 尤其是流沙湾附近海域。图 5b 显示, 沉积物 TOC 含量与 pH 之间有较弱的负相关性, 这可能显示 pH 值与有机碳含量之间有较为复杂的相关性, 或者说沉积物 pH 值对沉积有机质丰度影响不明显。

3.3 沉积物粒度特征及其影响

研究区内表层沉积物粒度组成主要以粉砂为主, 含量在 14.6%~66.6%之间, 平均为 53.6%; 其次为粘土, 含量在 9.4%~39.6%之间, 平均为 27.9%; 砂质含量较低, 含量在 3.4%~76.1%之间, 平均值为 18.5%; 中值粒径在 1.57 Φ ~7.48 Φ 之间。粒度是控制海底表层沉积物中有机碳含量和分布的一个很重要的因素, 体现了海底水动力条件对海洋沉积有机质丰度的影响。从沉积物有机碳(TOC)含量与粘土、粉砂、砂和中值粒径的关系图(图 6)中可以看出, 沉积物 TOC 含量与颗粒物中值粒径(Φ)、粘土以及粉砂呈正相关,

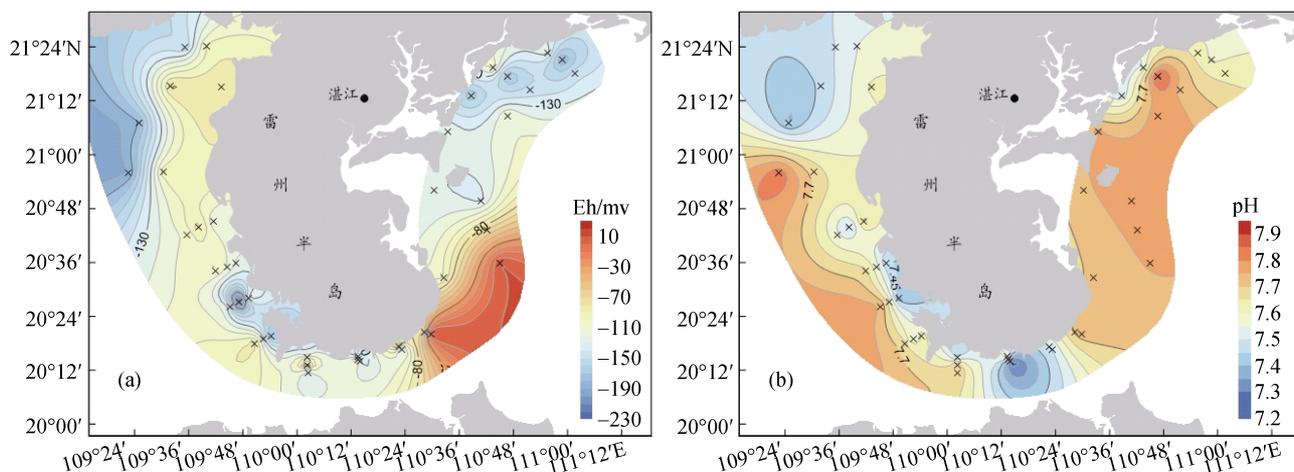


图 4 研究区域海底表层沉积物的 Eh (a) 和 pH (b) 分布

Fig. 4 Distribution of Eh (a) and pH (b) in the seafloor surface sediments in the study area

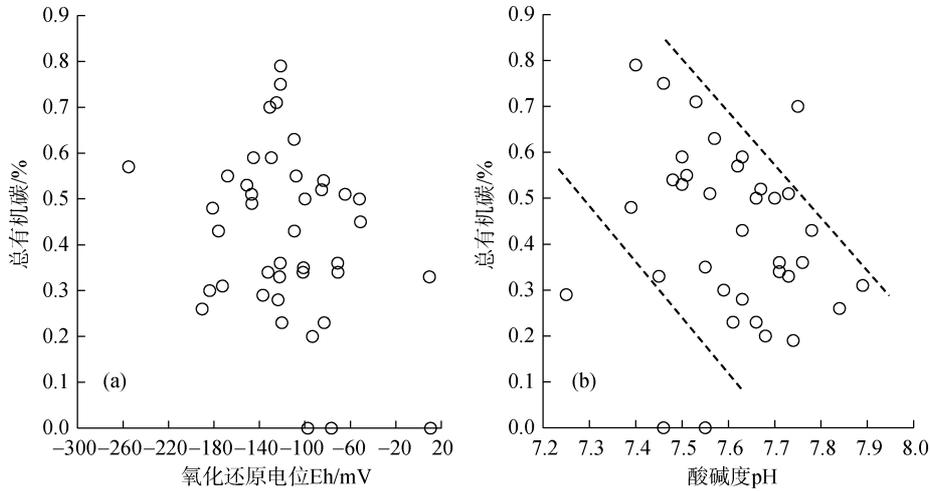


图 5 海底表层沉积物 TOC 与 Eh (a)、pH (b)关系图

Fig. 5 Relationship between TOC and Eh (a), pH (b) in the seafloor surface sediments

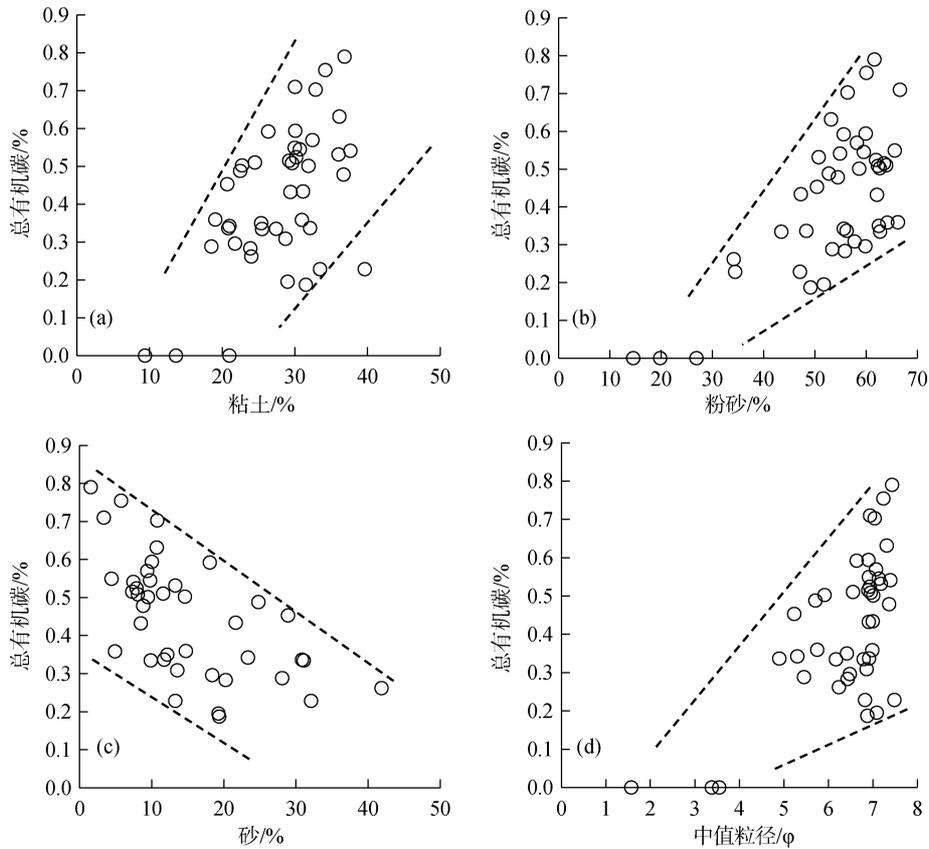


图 6 海底表层沉积物总有机碳与粒度参数之间的关系

Fig. 6 Relationships between TOC content and grain size parameters in the seafloor surface sediments

而与砂质含量呈负相关。环雷州半岛西侧近海海域海底表层沉积物粘土含量普遍高于雷州半岛东侧和琼州海峡海底表层沉积物的粘土含量。环雷州半岛近海表层沉积物有机碳含量分布与粘土含量分布具有一定的重合性。在北部湾东北部近岸海域，出现一

个有机碳低值中心，可能是由于北部湾东部沿岸由更新统松散砂砾组成，海水侵蚀后退形成海底残留砂质平原^[33]。琼州海峡是强侵蚀区，海峡内流速多在 120 cm/s 以上^[34]，不利于来自地表径流的陆源输入及海岸侵蚀产生的碎屑物质在此沉积，因此在该区

域内沉积物 TOC 含量也相对较低。

4 结论

(1) 环雷州半岛近海域采样站位的海底表层沉积物有机碳含量在 0~0.79%之间, 平均值为 0.26%; 与其它近海海域相比, 大部分区域海底表层沉积物有机碳含量明显偏低, 结合现场底栖生物采样观察, 底泥中底栖生物非常稀少, 呈现近海海底荒漠化的状况。

(2) 环雷州半岛近海海底表层沉积物 TOC 与 TN 在空间分布上具有较高的一致性。TOC/TN 值在 5.1~14.3 之间, 多数分布在 8~12 之间, 表明研究海域沉积有机质具有陆源输入和海洋自生的混合来源特征。

(3) 沉积物粒度组成主要以粉砂为主, 含量在 14.6%~66.6%(平均值 53.6%); 其次为粘土, 含量在 9.4%~39.6%(平均值 27.9%); 砂质含量较低, 在 3.4%~76.1%(平均值 18.5%); 中值粒径在 1.57 Φ ~7.48 Φ 之间。有机碳含量与沉积物的粘土含量、粉砂含量以及中值粒径(Φ)呈一定的正相关性, 而与砂质含量呈负相关, 这表明海底表层沉积物 TOC 含量受沉积水动力控制。

(4) 环雷州半岛近海海底表层沉积物 Eh 表现为弱还原至还原状态。Eh 低值区与 TOC 高值区对应、Eh 的高值区和 TOC 的低值区对应, 由于研究区域属于近海海域, 沉积环境复杂且受多种自然因素和人类活动的影响, 从而减弱了有机碳和 Eh 之间的相关性。而沉积物 pH 值与海底表层沉积物 TOC 含量弱的负相关性说明沉积物 TOC 含量不受 pH 值影响或影响很小。

参考文献:

[1] 高学鲁, 宋金明, 李学刚, 等. 中国近海碳循环研究的主要进展及关键影响因素分析[J]. 海洋科学, 2008, 32(3): 83-90.
Gao Xuelu, Song Jinming, Li Xuegang, et al. Analysis on the main progress and key influencing factors of China's offshore carbon cycle research[J]. Marine Sciences, 2008, 32(3): 83-90.

[2] Falkowski P. The global carbon cycle: A test of our knowledge of earth as a system[J]. Science, 2000, 290(5490): 291-296.

[3] McKee B A, Aller R C, Allison M A, et al. Transport and transformation of dissolved and particulate materials on continental margins influenced by major rivers: Benthic boundary layer and seabed processes[J]. Con-

tinental Shelf Research, 2004, 24(7-8): 899-926.

[4] 高立蒙, 姚鹏, 王金鹏, 等. 渤海表层沉积物中有机碳的分布和来源[J]. 海洋学报, 2016, 38(6): 8-20.
Gao Limeng, Yao Peng, Wang Jinpeng, et al. Distribution and sources of organic carbon in surface sediments from the Bohai Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2016, 38(6): 8-20.

[5] 张婷, 李先国, 兰海青, 等. 黄海表层沉积物中木质素的分布特征及其影响因素[J]. 海洋环境科学, 2014, 33(6): 822-829.
Zhang Ting, Li Xianguo, Lan Haiqing, et al. Distribution characteristics and influencing factors of lignin in surface sediments of the yellow sea[J]. Marine environmental science, 2014, 33(6): 822-829.

[6] 熊林芳, 石学法, 邓煜, 等. 南黄海、东海北部陆架区表层沉积物有机质分布特征[J]. 海洋通报, 2013, 32(3): 281-286.
Xiong Linfang, Shi Xuefa, Deng Yu, et al. Distribution characteristics of surface sediments in the continental shelf of the northern East China Sea[J]. Marine Science Bulletin, 2013, 32(3): 281-286.

[7] 樊鑫, 程芳晋, 俞志明, 等. 长江口及其邻近海域表层沉积物粒径及生源要素分布特征[J]. 海洋科学, 2017, 41(7): 105-112.
Fan Xin, Cheng Fangjin, Yu Zhiming, et al. The distribution characteristics of sediment particle size and biogenic factors in the Yangtze estuary and its adjacent waters[J]. Marine Sciences, 2017, 41(7): 105-112.

[8] 亢振军, 于仁成, 孔凡洲, 等. 长江口南部赤潮区春季表层沉积物中色素组成、含量与分布状况[J]. 海洋科学, 2014, 38(10): 30-39.
Kang Zhenjun, Yu Rencheng, Kong Fanzhou, et al. Composition, content and distribution of pigment in spring surface sediments in red tide area south of changjiang estuary[J]. Marine Sciences, 2014, 38(10): 30-39.

[9] 郭志刚, 杨作升, 陈致林, 等. 东海陆架泥质区沉积有机质的物源分析[J]. 地球化学, 2001, 30(5): 416-424.
Guo Zhigang, Yang Zuosheng, Chen Zhilin, et al. Provenance analysis of sedimentary organic matter in the mud area of the East China Sea Continental Shelf[J]. Geochemistry, 2001, 30(5): 416-424.

[10] 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 Zhonglian, Jiang Zhijian, Huang Xiaoping, et al. Spatial distribution characteristics of different extracts of organic carbon in surface sediments from the Pearl River Estuary[J]. Marine Environmental Science, 2019, 38(3): 391-398.

[11] 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 Wei. Sources and biogeochemical characteristics of organic carbon in water bodies and sediments of the Pearl River Estuary[D]. Guangzhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2016.
- [12] 张际标, 谢群, 施玉珍, 等. 湛江港湾表层沉积物的氧化还原特征及其影响因素[J]. 海洋环境科学, 2011, 30(6): 823-826.
- Zhang Jibiao, Xie Qun, Shi Yuzhen, et al. Redox Characteristics of Surface Sediments in Zhanjiang Harbor and Its Influencing Factors[J]. Marine environmental science, 2011, 30(6): 823-826.
- [13] 张才学, 林宏升, 孙省利. 广东省典型海湾表层沉积有机质的来源和分布[J]. 热带海洋学报, 2012, 31(6): 62-68.
- Zhang Caixue, Lin Hongsheng, Sun Xingli. Sources and distribution of sedimentary organic matter in typical bays of Guangdong Province[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2012, 31(6): 62-68.
- [14] 陈亮, 张玉芬, 李团结, 等. 琼州海峡及周边海域沉积环境及近万年以来沉积演化[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2014, 39(6): 696-704.
- Chen Liang, Zhang Yufen, Li Tuanjie, et al. Sedimentary environment in the Qiongzhou Strait and its surrounding waters and sedimentary evolution in the past 10 000 years[J]. Earth Science (Journal of China University of Geosciences), 2014, 39(6): 696-704.
- [15] 崔振昂, 林进清, 甘华阳, 等. 南海北部湾东部海域表层沉积物地球化学特征[J]. 海洋科学, 2015, 39(7): 103-111.
- Cui Zhenang, Lin Jinqing, Gan Huayang, et al. Geochemical characteristics of surface sediments in the eastern waters of the Beibu Gulf of the South China Sea[J]. Marine Sciences, 2015, 39(7): 103-111.
- [16] 靳华龙, 万世明, 张晋, 等. 北部湾表层黏土矿物分布特征及物源研究[J]. 海洋科学, 2019, 43(1): 75-84.
- Jin Hualong, Wan Shiming, Zhang Jin, et al. Distribution characteristics and provenance of surface clay minerals in Beibu Gulf[J]. Marine Sciences, 2019, 43(1): 75-84.
- [17] 杨娟, Jay Gao, 刘宝林, 等. 雷州半岛红树林边缘效应及其对海岸有机碳库的影响[J]. 海洋学报(中文版), 2012, 34(5): 161-168.
- Yang Juan, Jay Gao, Liu Baolin, et al. Mangrove edge effect in Leizhou Peninsula and its impact on coastal organic carbon pool[J]. HaiyangXuebao, 2012, 34(5): 161-168.
- [18] 杨士瑛, 鲍献文, 陈长胜, 等. 夏季粤西沿岸流特征及其产生机制[J]. 海洋学报(中文版), 2003, 25(6): 1-8.
- Yang Shiyang, Bao Xianwen, Chen Changsheng, et al. Characteristics of the coastal stream in western Guangdong in summer and its production mechanism[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2003, 25(6): 1-8.
- [19] 刘臣, 闫建英, 马殿光. 琼州海峡汽车轮渡海口港建设方案水动力特征模拟综合分析[J]. 中国水运(下半月), 2015, 15(9): 273-275.
- Liu Chen, Yan Jianying, Ma Dianguang. Comprehensive analysis of hydrodynamic characteristics simulation of Haikou Port construction plan of Qiongzhou Strait automobile ferry[J]. China Water Transport (the second half of the month), 2015, 15(9): 273-275.
- [20] 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志. 第十二分册, 广西海湾[M]. 北京: 海洋出版社, 1993: 73.
- Editorial Board of China Bay Survey. Survey of China Bays (Vol. 12)[M]. Beijing: China Ocean Press. 1993: 73.
- [21] 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(4): 937-968.
- [22] 蔡德陵, 孙耀, 张小勇, 等. 由东海、黄海沉积物中有机碳含量及稳定同位素组成重建 200a 以来初级生产力历史记录[J]. 海洋学报, 2014, 36(2): 40-50.
- Cai Delin, Sun Yao, Zhang Xiaoyong, et al. History of primary productivity since the reconstruction of organic carbon content and stable isotope composition in the sediments of the East China Sea and the Yellow Sea since 200a[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2014, 36(2): 40-50.
- [23] 叶翔, 陈坚, 王爱军, 等. 台湾海峡西部沉积物中碳的来源及埋藏[J]. 海洋学报(中文版), 2011, 33(5): 73-82.
- Ye Xiang, Chen Jian, Wang Aijun, et al. Sources and burial of carbon in sediments from the western Taiwan Strait[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2011, 33(5): 73-82.
- [24] 谷阳光, 王朝晖, 吕颂辉, 等. 粤西海域表层沉积物生源要素分布与污染评价[J]. 深圳大学学报(理工版), 2010, 27(3): 347-353.
- Gu Yangguang, Wang Chaohui, Lv Songhui, et al. Distribution and pollution assessment of biogenic sediments in surface sediments in western Guangdong[J]. Journal of Shenzhen University (Science and Technology), 2010, 27(3): 347-353.
- [25] 夏华永, 李树华, 侍茂崇. 北部湾三维风生流及密度流模拟[J]. 海洋学报(中文版), 2001, 23(6): 11-23.
- Xia Huayong, Li Shuhua, Shi Maochong. Three-dimensional wind flow and density flow simulation in Beibu Gulf[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2001, 23(6): 11-23.
- [26] Bianchi T S, Allison M A. Large-river delta-front estuaries as natural “recorders” of global environmental change[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2009, 106(20): 8085-8092.

- [27] Blair N E, Aller R C. The fate of terrestrial organic carbon in the marine environment[J]. *Annual Review of Marine Science*, 2012, 4(1): 401-423.
- [28] 刘文臣, 王荣, 李超伦. 东海颗粒有机物中的碳氮比[J]. *海洋与湖沼*, 1998, 29(5): 467-470.
Liu Wenchen, Wang Rong, Li Chaolun. Carbon to nitrogen ratio in the East China Sea particulate organic matter[J]. *Oceans and Lakes*, 1998, 29(5): 467-470.
- [29] 宋金明, 李延, 朱仲斌. Eh 和海洋沉积物氧化还原环境的关系[J]. *海洋通报*, 1990, 9(4): 33-39.
Song Jinming, Li Yan, Zhu Zhongbin. Relationship between Eh and redox environment of marine sediments[J]. *Marine Science Bulletin*, 1990, 9(4): 33-39.
- [30] 吴金浩, 刘桂英, 王年斌, 等. 辽东湾北部海域表层沉积物氧化还原电位及其主要影响因素[J]. *沉积学报*, 2012, 30(2): 333-339.
Wu Jinhao, Liu Guiying, Wang Nianbin, et al. Oxidation-reduction potential of surface sediments in the northern part of Liaodong Bay and its main influencing factors[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2012, 30(2): 333-339.
- [31] 朱而勤, 王琦. 海洋自生矿物[M]. 北京: 海洋出版社, 1980: 12-17.
Zhu Erqin, Wang Qi. *Marine authigenic mineral*[M]. BeiJing: Ocean Press, 1980: 12-17.
- [32] 齐红艳. 长江口及邻近海域表层沉积物 pH、Eh 分布及制约因素[J]. *沉积学报*, 2008, 26(5): 820-827.
Qi Yanhong. pH and Eh distribution and constraints of surface sediments in the Changjiang Estuary and adjacent waters[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2008, 26(5): 820-827.
- [33] 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 Dong, Chu Fengyou, Yang Haili, et al. Modern deposition rate in the Beibu Gulf[J]. *Marine geology & quaternary geology*, 2012, 32(6): 17-26.
- [34] 侍茂崇, 陈春华. 琼州海峡冬末春初潮余流场特征[J]. *海洋学报(中文版)*, 1998, 20(1): 1-10.
Shi Maochong, Chen Chunhua. Characteristics of the tidal residual flow field in the late winter and early spring of Qiongzhou Strait[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1998, 20(1): 1-10.

Distribution and controlling factors of organic carbon in surface sediments of the coastal region surrounding Leizhou Peninsula

HAN Yong-qiang¹, XIA Jia^{1,2}, TAN Jing-qian¹, ABARIKE Grace Awinmalsim¹,
SONG Zhi-guang¹

(1. College of Chemistry and Environment, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China; 2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhanjiang), Zhanjiang 524013, China)

Received: Oct. 12, 2019

Key words: seafloor surface sediments; total organic carbon content; total nitrogen; environmental factor; offshore of surrounding Leizhou Peninsula

Abstract: The total organic carbon (TOC) and total nitrogen (TN), sedimentary redox state and granularity composition of 43 seafloor surface sediments in the coastal region of Leizhou Peninsula were analyzed, and the distribution of TOC, TN and its possible controlling factors were discussed. The results show that the organic carbon content in the surface sediments of the coastal region surrounding Leizhou Peninsula is between 0 and 0.79%, with an average of 0.26%. Compared with other offshore sea area in China, the organic carbon content of seafloor surface sediments in most offshore areas of surrounding Leizhou Peninsula is significantly lower, which is an area with poor organic matter. Only the offshore sea area of Liusha Bay in the southwest of Leizhou Peninsula is an area with relatively high TOC value. The total nitrogen content is also not high, between 0.011% and 0.100%. There is a strong positive correlation between TOC and TN, and the spatial distribution of TOC and TN highly coincide, indicating that nitrogen mainly exists in the form of organic compounds. The ratio of TOC/TN is between 5.1 and 14.3, indicating that the sedimentary organic matter has the mixed characteristics of terrestrial and marine authigenic sources. However, the northern part of the western Leizhou Peninsula and the central part of the eastern Leizhou Peninsula are more affected by the input of terrestrial organic matter. Most of the stations are composed of silt and clay, and a few are composed of sand. The organic carbon content of sediments has a weak positive correlation with the content of clay and silt, and a weak negative correlation with the pH value, Eh value and sand content of sediments, which indicates that the TOC abundance of surface sediments is comprehensively controlled by the input of organic matter sources, the seafloor of redox state and the sedimentary hydrodynamic conditions (sediment grain size).

(本文编辑: 康亦兼)