

海底表层沉积物腐蚀性环境特征与评估 ——以三亚湾为例

卞培旺¹, 陈法锦¹, 张叶春², 周欣¹,
刘兴健², 徐玉芬²

(1. 广东海洋大学 广东省近海海洋变化与灾害预警重点实验室, 广东 湛江 524088; 2. 中国科学院南海海洋研究所, 广东 广州 510301)

摘要: 随着海底管线工程建设的日益增多, 海底沉积物的腐蚀环境越来越受到关注。本文根据 2017 年 3 月在三亚湾内采集的海底沉积物, 对其类型、pH、Eh(氧化还原电位)、有机碳含量、全盐量、 Fe^{3+}/Fe^{2+} 、硫化物和硫酸盐还原菌等腐蚀因子的综合分析, 判定了三亚湾沉积物的氧化还原环境, 评价了沉积物的腐蚀性。综合评价认为, 三亚湾海底沉积物整体上呈现较强氧化环境, 局部表现为弱氧化环境, 腐蚀强度较弱, 比较适合海底管线工程项目的建设。

关键词: 沉积物; 腐蚀因子; 氧化环境; 三亚湾

中图分类号: P736.41 文献标识码: A 文章编号: 1007-6336(2020)04-0563-07

Characteristics and evaluation of corrosive environment of surface sediments: a case study of the Sanya bay

BIAN Pei-wang¹, CHEN Fa-jin¹, ZHANG Ye-chun², ZHOU Xin¹,
LIU Xing-jian², XU Yu-fen²

(1. Guangdong Province Key Laboratory for Coastal Ocean Variation and Disaster Prediction Technologies, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China; 2. South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China)

Abstract: With the increasing construction of submarine pipeline projects, the corrosive environment of submarine sediments has attracted more and more attention. The sediments collected in Sanya bay In March 2017, according to the comprehensive analysis of corrosion factors such as type, pH, Eh(Redox potential), organic carbon content, total salt content, Fe^{3+}/Fe^{2+} , sulfides and sulfate reducing bacteria of the sediments. determined the redox environment of the sediment and evaluated the corrosivity of the sediment. According to the evaluation, the sediments in the seabed of the Sanya bay as a whole show strong oxidizing environment, a weak oxidizing environment locally, and weak corrosion intensity, which is more suitable for the construction of a submarine pipeline project.

Key words: sediment; corrosion factor; oxidation environment; Sanya bay

随着经济的高速发展, 人为活动的加剧, 生活污水排放的与日俱增, 以及海洋渔业、海洋运输业和海水养殖业对海洋环境的影响越来越大, 尤其是海洋工程建设项目的扩大, 海洋环境受到

收稿日期: 2019-01-10, 修订日期: 2019-05-20

基金项目: 广东省自然科学基金项目(2016A030312004); 广东海洋大学创新强校项目(GDOU2014050201, GDOU2013050201, GDOU2013050215, GDOU2013050315, GDOU2016050260)

作者简介: 卞培旺(1982-), 男, 安徽宣城人, 硕士研究生, 主要从事海洋生物地球化学的研究, E-mail: bpw156@sina.com

通讯作者: 陈法锦(1981-), 男, 广东湛江人, 教授, 主要从事海洋生物地球化学方面的研究, E-mail: fjchen04@163.com

了前所未有的压力。作为重要的近岸港口,近几年来,三亚市委、市政府多次投入巨资对三亚湾进行大规模的建设改造,尤其是海底管线工程的建设项目得到更进一步的发展。然而,敷设在海底的管线,会遇到各种复杂的海洋环境,其中海底沉积物的腐蚀性就是其中关键的因素之一,无论管线是埋设或是放置在海底,都与海底沉积物直接接触,海底沉积物中的腐蚀性因子会与海底管线外护层发生化学反应而对其进行腐蚀破坏。因此,对该海域表层沉积物环境的研究与评价具有重要的实践意义。

目前,针对三亚湾的研究大多集中于沉积环境和水体生态方面,比如,2007年,毛龙江等利用沉积物粒度的分析结果,讨论了三亚湾现代沉积环境^[1];2010年,孙文凭等研究了三亚河与三亚湾溶存 N_2O 分布特征与影响因素^[2];2013年,杨顶田分析了三亚湾近 10 a pH 的时空变化特征及对珊瑚礁石影响^[3];刘建波等对三亚湾表层沉积物中重金属污染特征及生态风险作了相关评价^[4];2014年,张光星等分析讨论了春季三亚湾浮游动物生态特征与环境因子的关系^[5];而针对该海区沉积物腐蚀性影响因子的综合研究鲜有报道,本文主要利用海底沉积物的类型、pH、Eh、有机碳、全盐量、 Fe^{3+}/Fe^{2+} 、硫化物和硫酸盐还原菌等 8 项腐蚀因子的联合研究来讨论该海域的海底腐蚀性环境。

1 材料与方法

1.1 研究区域

三亚湾属于热带海湾,降水量较大,使之地表径流量较大。海湾东、西两端分别有三亚河和肖旗河注入湾内,陆地径流流域面积约为 337 km^2 ,是目前受人类活动影响相对较小的热带海湾之一^[6],但是随着岁月的变迁、社会的发展,地表径流和生活污水都给三亚湾带来了不小的环境压力。尤其,自 2004 年以来,对西瑁洲岛进行了旅游开发,旅游业的发展给岛上的居民增加就业机会,同时,旅游活动持续的开展,也给西瑁洲海域的环境带来一定的影响。本研究基于“三亚供电局天涯供电所 10 千伏西岛 II 电缆支线新建工程”项目,于 2017 年 3 月在拟建路由断面上选

取 16 个表层沉积物样品,取样站位位于三亚市肖旗港与三亚西瑁洲之间的海域,如图 1 所示。

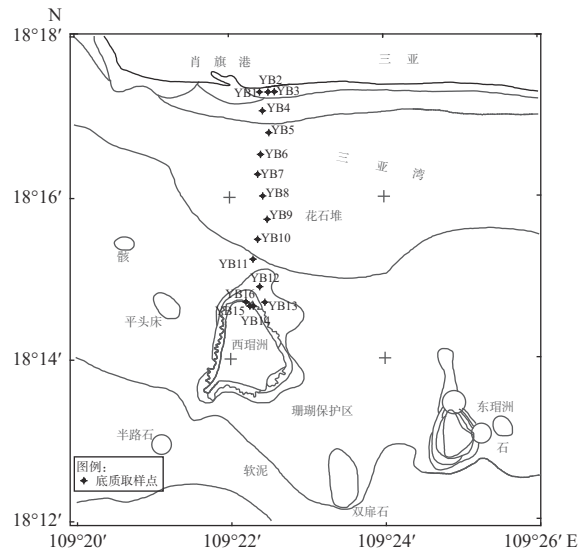


图 1 取样站位

Fig. 1 Sampling station

1.2 研究方法

BY01、BY02 和 BY03 位于肖旗港东边入海沙滩,东西向取样,取样间隔为 150 m; BY14、BY15 和 BY16 位于西瑁洲西侧登陆沙滩,东西向取样,取样间隔为 150 m;其余 10 个站位沿拟建路由方向,由北往南依次取样,取样间隔为 500 m。海底沉积物样品的取样方法按照《海洋调查规范 第 11 部分:海洋工程地质调查》(GB/T 12763.11-2007)中“6.12 表层取样”所规定的内容进行,使用蚌式采泥器取得,采样深度在 2~8 cm 范围之间。研究内容主要包括沉积物类型、硫化物的含量、全盐量、Eh、pH、有机碳含量、 Fe^{3+}/Fe^{2+} 和硫酸盐还原菌等 8 项环境因子进行检测。

沉积物类型:采用 Mastersizer2000G 型激光衍射粒度分析仪,测定出沉积物样品的粒度含量,并参照《海洋调查规范 第 8 部分:海洋地质地球物理调查》(GB/T12763.8-2007),对砾石含量较高的样品,参照优势粒级法对沉积物类型进行命名,见表 1; pH: 依据《土壤检测 第 2 部分:土壤 pH 的测定》(NY/T 1121.2-2006)中的方法,直接用 pH 计测定,精度为 $\pm 0.01 \text{ pH}$; 有机碳:依据《土壤有机碳的测定 重铬酸钾氧化-分光光度法》(HJ615-2011)测定,设备选用紫外分光光度计,检出限为 0.06%; 硫化物:依据《海洋检测规

表1 沉积物样品粒组含量及命名(测定时间:2017-04-03)

Tab.1 Sediment sample grain group content and nomenclature

样品号	砾/(%)	砂/(%)	粉砂/(%)	粘土/(%)	命名
BY01	9.466	90.534	0.000	0.000	粗砂
BY02	0.000	100.000	0.000	0.000	中砂
BY03	17.188	82.812	0.000	0.000	粗砂
BY04	8.174	91.826	0.000	0.000	粗砂
BY05	17.192	53.751	24.000	5.056	粗砂
BY06	45.606	45.588	7.613	1.192	砾砂
BY07	72.628	19.872	6.242	1.258	砾砂
BY08	62.421	34.068	3.174	0.337	砾砂
BY09	31.532	68.468	0.000	0.000	砾砂
BY10	14.543	80.680	4.162	0.616	砾砂
BY11	38.538	54.389	5.958	1.114	砾砂
BY12	29.910	67.929	2.121	0.041	砾砂
BY13	42.662	44.137	9.998	3.203	砾砂
BY14	60.525	39.475	0.000	0.000	砾砂
BY15	62.946	37.054	0.000	0.000	砾砂
BY16	51.224	48.776	0.000	0.000	砾砂

范第5部分:沉积物分析》(GB 17378.5-2007)中“17.1 亚甲基蓝分光光度法”测定,设备选用紫外可见分光光度计,检出限为 0.30 mg/kg; Eh: 依据《海洋检测规范 第5部分:沉积物分析》(GB 17378.5-2007)中“20 氧化还原电位-电位计法”测定;全盐量:依据《森林土壤水溶性盐分分析》(LY/T 1251-1999)中“3.1 质量法测定”,设备选用万位分电子天平,检出限为 0.1 g/kg; Fe^{3+}/Fe^{2+} : 依据《海洋调查规范 第8部分:海洋地质地球物理调查》(GB/T12763.8-2007)中“6.7.4 Fe^{3+}/Fe^{2+} 比值测定(EDTA 容量法)”测定;硫酸盐还原菌:依据《工业循环冷却水中菌藻的测定方法第5部分:硫酸盐还原菌的测定》(GB/T 14643.5-2009) MPN 法测定,设备选用 SHP-080 型生化培养箱和 BSC-1360IIA2 型生物安全柜,检出限:0 个。

2 结果与讨论

2.1 检测结果

2.1.1 腐蚀因子

沉积物样品腐蚀参数的测定分析主要在广东省近海海洋变化与灾害预警重点实验室内完成,各项沉积物腐蚀因子分析测试结果见表2。

2.1.2 沉积物类型

根据对沉积物的粒度分析,靠近肖旗港一侧沉积物主要以中粗砂为主,逐渐向南过渡为细砂和粉砂。研究区域受到肖旗河的泥沙供应,自该河口向东南,沉积物粒径由粗变细,分布区域向海延伸到 10 m 等深线以下,反映泥沙运动有东移趋势,这与南向优势波浪的绕射和 SW 向波浪作用有一定的关系^[7]。

在靠近西瑁洲东北侧为“花石礁”砂砾质堆积体,该处系古海岸沉积,包括河口堆积与部分海蚀物质^[8]。靠近西瑁洲潮间带一侧主要是珊瑚礁盘,底质是含有珊瑚碎枝的砾砂,往水深的区域含有少量粉砂和粘土。海底沉积物总体上表现为由西往东变细,由海向岸变粗。海底沉积物因粒度和土层结构的差异,使得该海域沉积物的氧化还原电位偏高,区域总体呈较强氧化性。

2.1.3 Fe^{3+}/Fe^{2+}

活性铁是组成海洋沉积物氧化还原体系中最重要元素之一, Fe^{2+} 易存在于缺氧的环境中,而 Fe^{3+} 在氧化环境中处于稳定状态,用 Fe^{3+}/Fe^{2+} 比值在一定程度上来表征沉积物的氧化还原环境^[9]。该海域的 Fe^{3+}/Fe^{2+} 比值范围为 1.28 ~ 19.0,

表2 海底沉积物腐蚀因子参数值(2017-03-06—2017-04-06)

Tab.2 Value of corrosive factors in marine bottom sediment

站位	水深/m	沉积物类型	硫化物/mg·kg ⁻¹	全盐量g·kg ⁻¹	Eh/mV	有机碳/(%)	Fe ³⁺ /Fe ²⁺	pH	硫酸盐还原菌/个
BY01	1.0	粗砂	<0.30	10.3	449	0.10	6.76	9.06	0
BY02	0.8	中砂	<0.30	10.4	474	0.09	10.3	9.02	0
BY03	0.7	粗砂	<0.30	9.9	440	0.10	13.1	8.96	0
BY04	3.8	粗砂	0.617	8.8	305	0.28	12.5	9.08	0
BY05	7.6	砾砂	26.3	12.0	195	0.44	1.40	9.10	35
BY06	9.0	砾砂	2.43	10.8	305	0.50	14.4	9.11	3
BY07	9.9	砾砂	57.3	12.3	20	0.52	5.80	9.06	3
BY08	9.5	砾砂	1.12	11.5	401	0.76	19.0	9.13	0
BY09	7.3	砾砂	<0.30	2.0	418	0.31	10.7	9.10	3
BY10	9.1	砾砂	20.8	8.8	248	0.38	14.0	9.10	0
BY11	12.6	砾砂	45.3	9.1	377	0.55	9.17	9.15	16
BY12	10.9	砾砂	7.33	10.9	459	0.55	5.63	9.30	0
BY13	9.9	砾砂	38.1	18.2	201	0.70	1.28	9.03	6
BY14	1.1	砾砂	<0.30	6.5	472	0.38	5.30	9.56	0
BY15	0.2	砾砂	<0.30	8.1	444	0.25	6.00	9.53	0
BY16	0.5	砾砂	<0.30	6.8	425	0.14	4.00	9.56	0

均大于1,且Fe³⁺/Fe²⁺值大于5的样品数占81.3%,显示该海区沉积物的氧化性环境。

2.1.4 Eh

氧化还原电位 Eh 是用来表征海洋沉积物氧化还原特性的最基本参数,值的大小反映了沉积物氧化还原性的强弱,电位为正表示沉积物显示出一定的氧化性,氧化还原电位越高,氧化性越强;电位越低,氧化性越弱;电位为负则说明沉积物显示出还原性。本研究海区的 Eh 变化范围为 20 mV ~ 474 mV,均为正值,其中 Eh 值大于 300 mV 的样品数占 75%,显示调查区整体呈强氧化性,局部呈弱氧化性。

2.1.5 硫化物

海洋环境中最常见的强腐蚀性硫化物为 H₂S,一般情况下 H₂S 在淤泥和其他污染沉积物中的含量较高。研究区两端为砂质潮间带,硫化物含量较少,但随着水深变化,海底沉积物中硫化物的含量变高。其中,样品 BY9 中硫化物的含量出现了异常,含量低于仪器的检测限,主要原因是 BY9 站位处于“花石礁”砂砾质堆积体,样品中砾、砂含量较高;且海底起伏不平,受海底水动力影响较大,淤泥质和其他污染沉积物被冲刷至他处所致。其余站位硫化物的含量无明

显分布特征,硫化物含量范围为 0.3 mg/kg ~ 57.3 mg/kg,除个别样品含量较高之外,总体样品硫化物的含量偏低,显示出该海域的腐蚀性较弱。

2.1.6 全盐量

全盐量指海底沉积物及其间隙水的含盐量以及存在于沉积物矿物晶格中的总盐量。含盐量愈高,氧化还原电位也越高,腐蚀速率越大^[10]。对比《森林土壤水溶性盐分分析》(LY/T1251-1999)规范,采用质量法对样品进行全盐量的测定,全盐量大于 2.0 g/kg 为盐渍化土,对钢铁材料具有较强的腐蚀性。本次采集的样品中的全盐量均大于 2.0 g/kg,且整体含量偏高,全盐量的测定结果表明,该区域底质环境具有一定的腐蚀性。

2.1.7 有机碳

有机碳主要用来表征沉积物或岩石中含有的与有机质有关的碳素。沉积物氧化还原性的强弱与有机物的赋存有密切联系,一方面沉积物中有机物的矿化为氧化态物质提供了还原能量,另一方面强氧化环境能加速有机物的分解^[11]。由表 2 可知,有机碳含量与沉积物结构的关系较为密切。世界近岸海洋沉积物的有机碳浓度一般高于 0.3%,而低于 3%(沉积物干重)^[12],该海域有机碳含量的变化范围为:0.09% ~ 0.76%,平

均含量为 0.378%, 含量大于 0.3% 的样品占 62.5%, 显示该海域有机碳含量较其他近岸海域偏低。

2.1.8 硫酸盐还原菌 (SRB)

有研究表明, 在无氧或极少氧情况下, 硫酸盐还原菌 (sulfate-reducing bacteria, SRB) 能利用金属表面的有机物作为碳源, 并利用细菌生物膜内产生的氢, 将硫酸盐还原成硫化氢, 从氧化还原反应中获得生存的能量。SRB 代谢产生的硫化氢是强还原剂, 具有强腐蚀性, 所以 SRB 是主要的金属腐蚀微生物^[13]。SRB 并不是严格的厌氧菌, 而应该归类到兼性厌氧菌, 能适应较低浓度的溶解氧。在海洋环境中, SRB 一般为低温种类, 最适的 pH 为 7.0~7.8。在硫酸盐还原菌的催化作用下, 腐蚀过程的阴极去极化反应更容易进行, 从而大大加速了对金属的腐蚀。在硫酸盐还原菌大量繁殖下, 腐蚀速度可增加 6 倍~7 倍, 甚至 15 倍以上^[14]。但本海区沉积物样品中硫酸盐还原菌的测定结果显示, 只有 BY5 和 BY11 样品中测得的 SRB 数量较多, 其余样品中的含量很少, 甚至没有, 其主要原因可能在于 BY5 站位处于水下岸坡处, 海底地形突变, 陆源物质在此处沉积较多, 比较适合硫酸盐还原菌的生长;

BY11 站位处于珊瑚礁盘附近, 水深变化明显, 海底地形变化较大, 沉积物中含有适合硫酸盐还原菌生长的有机物。总的测定结果显示, 该海域整体属于轻度污染海区。

2.1.9 pH

根据 2010 年, 杨顶田等关于三亚湾近 10 a pH 的时空变化特征的分析结果^[3], 三亚湾表层海水 pH 的变化范围为: 8.01~8.23, 平均为 8.14; 底层海水 pH 的变化范围为: 8.01~8.24, 平均为 8.14, 显示出三亚湾水体的碱性状态。本研究测定的海底沉积物 pH 变化范围为 8.96~9.56, 平均值为 9.18, 站位间数值差异较小。样品 pH 的测定结果表明, 该研究海区内沉积物有较强的碱性环境。

2.2 统计分析

为了分析本海区各因子间的关系, 用 SPSS17.0.0 软件计算了它们间的相关系数, 如表 3 所列; 并将它们对应的相关性用曲线图展现出来, 见图 2。

由表 3 中各因子相关系数及图 2、图 3 和图 4 的曲线图可知, 图 2 中沉积物中硫化物含量高低直接影响 Eh 值, 并表现出极显著的负相关; 图 3 中 Eh 与有机碳表现为相反趋势变化, 在氧化环

表 3 各因子相关矩阵

Tab.3 The relative matrix of the factors

	有机碳	硫化物	Eh	全盐量	硫酸盐还原菌	Fe ³⁺ /Fe ²⁺
有机碳	1	0.519*	-0.45	0.486	0.254	0.047
硫化物	-	1	-0.785**	0.495	0.465	-0.354
Eh	-	-	1	-0.501*	-0.388	0.199
全盐量	-	-	-	1	-0.223	-0.236
硫酸盐还原菌	-	-	-	-	1	-0.42
Fe ³⁺ /Fe ²⁺	-	-	-	-	-	1

注: *在0.1水平上显著相关; **在0.05水平上极显著相关

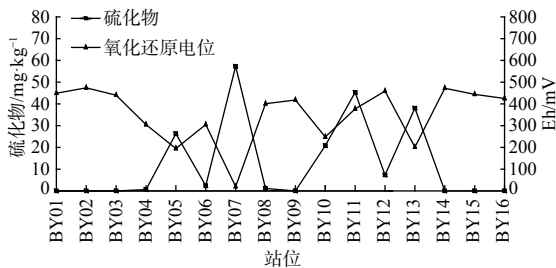


图 2 Eh 与硫化物的相互关系

Fig. 2 Relationship between Eh and sulfides

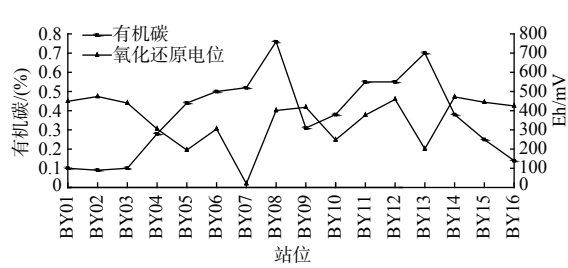


图 3 Eh 与有机碳的相互关系

Fig. 3 Relationship between Eh and organic carbon

境下, Eh 值越大, 有机碳含量越低; 在有机碳存在的情况下, 还原条件可能导致化学作用, 使硫酸盐还原菌将硫酸盐还原成硫化物^[15], 也有研究发现, 颗粒物粒径 $<2\ \mu\text{m}$ 的累积百分比在 25% 以上、富含有机碳的沉积物中酸可挥发性硫化物含量较高^[16], 图 4 中硫化物与有机碳表现为相同趋势变化, 表明在这一海区, 两者表现出比较明显的正相关性。

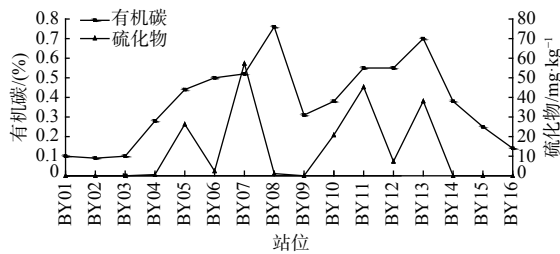


图 4 硫化物与有机碳的相互关系

Fig. 4 Relationship between sulfide and organic carbon

2.3 腐蚀性评价

2.3.1 沉积物环境判定

沉积物的氧化还原环境与腐蚀性密切相关, 氧化还原性的强弱直接影响海底管线的腐蚀作用大小^[1]。腐蚀因子中有机物的含量、Eh 和 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 是指示沉积物氧化还原环境的可靠指标, 且与 SBR 腐蚀密切相关。根据该海区沉积物多项数据测定的结果, 适当调整了卞培旺等对大亚湾海区表层沉积物提出的氧化-还原环境划分标准^[17], 表 4 为调整后的氧化-还原环境划分标准。对照表 2 中海底沉积物腐蚀因子参数可知, 有机碳含量小于 0.5% 的样品占 62.5%; Eh 值

表 4 氧化-还原环境划分标准

Tab.4 Standard for dividing oxidation-reduction environment

环境类型	有机碳/(%)	Eh/mV	$\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$
I-弱还原环境	1.0 ~ 1.5	20 ~ 100	0.5 ~ 0.7
II-弱氧化环境	0.5 ~ 1.0	100 ~ 300	0.7 ~ 1.5
III-较强氧化环境	<0.5	>300	>1.5

表 5 三亚湾海底沉积物腐蚀性评价指标

Tab.5 Evaluation indexes of corrosive quality of submarine sediments in the Sanya bay

得分	沉积物类型	pH	Eh/mV	$\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$	有机碳/(%)	硫化物/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	硫酸盐还原菌/个
0	黏土<20%,黏土+粉砂<55%	>8	>0	>1	<1	<0.3	<1
2	黏土>20%,黏土+粉砂>55%	-	<0	<1	>1	0 ~ 20	1 ~ 3
4	-	-	-	-	-	>20	>3

大于 300 mV 的样品占 75%; $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 值大于 1.5 的样品占 87.5%。由此可知, 该海区整体上呈现较强氧化环境。

2.3.2 沉积物腐蚀性评价

1997 年, 李祥云等在对珠江口东部海底沉积物腐蚀性研究时, 提出了腐蚀性强度评价指标^[18], 但有研究表明沉积物颗粒越粗, 透水性越好, 海水交换容易, 腐蚀性也较强^[7], 且 Eh 值越高, 氧化性越强, 相应腐蚀性也越强^[10], 因此, 本研究对该评价指标进行了适当的修正 (见表 5)。并且, 将 16 个样品分别累积得分列于表 6。从表 6 中各站得分情况可见, 除了 BY05、BY11 和 BY13 等 3 个样品, 总得分偏高之外, 其余样品得分较少, 表明该海区的腐蚀性较弱。

2.3.3 沉积物腐蚀行为

通过对沉积物样品腐蚀性的评价可知, 研究区域总体上呈现弱腐蚀性。因此, 沉积物对海底管线的腐蚀性行为主要考虑宏观电偶腐蚀和生物腐蚀。

宏观电偶腐蚀是金属材料在海洋腐蚀中的一个重要腐蚀行为。底层海水与海泥区之间的交换界面、沉积物类型的差异、以及沉积层之间的差异等都会产生电偶腐蚀。三亚湾海底沉积物主要为砂质, 但在水深大于 7 m 的区域, 沉积物组分发生了变化, 沉积物中部仅含有砾砂, 还含有一定数量的粉砂、粘土和其他陆缘物质, 不同沉积物类型之间存在电位差, 在氧化还原环境的差异下增加了产生宏观电池的可能性, 但粉砂、粘土和其他陆缘物质的含量很少, 所以造成管线的宏观电偶腐蚀的可能性很小, 有产生宏观电池的可能性, 从而有可能会对管线造成宏观电偶腐蚀。

生物腐蚀也是海底管线在缺氧的环境中遭受腐蚀的主要因素之一。据报道地下金属的损坏因生物腐蚀引起的约占 80%, 其中最主要的是

硫酸盐还原菌 SRB 引起的腐蚀, SRB 对海底管线工程材料的腐蚀方式主要有阴极去极化腐蚀和代谢产物腐蚀^[19]。本研究区沉积物中的 SRB 的丰度低于其他海区水平, 但对海底管线的腐蚀速率依然有一定的加速作用。

表6 各站各因子得分

Tab.6 The scores of each factor in all stations

站位	沉积物类型	pH	Eh	Fe ³⁺ /Fe ²⁺	有机碳	硫化物	硫酸盐还原菌	总分
BY01	0	0	0	0	0	0	0	0
BY02	0	0	0	0	0	0	0	0
BY03	0	0	0	0	0	0	0	0
BY04	0	0	0	0	0	2	0	2
BY05	2	0	0	0	0	4	4	10
BY06	0	0	0	0	0	2	2	4
BY07	0	0	0	0	0	4	2	6
BY08	0	0	0	0	0	2	0	2
BY09	0	0	0	0	0	0	2	2
BY10	0	0	0	0	0	4	0	4
BY11	0	0	0	0	0	4	4	8
BY12	0	0	0	0	0	2	0	2
BY13	0	0	0	0	0	4	4	8
BY14	0	0	0	0	0	0	0	0
BY15	0	0	0	0	0	0	0	0
BY16	0	0	0	0	0	0	0	0

3 结论

(1) 研究区沉积物含沙量较高, 有机碳和硫化物的含量较少, Eh 值较大, 沉积物的 Fe³⁺/Fe²⁺ 比值较大, 沉积物的 pH 较高, 硫酸盐还原菌数量较少, 表明该区沉积物的较为明显的氧化环境, 腐蚀性较弱。

(2) 研究表明, 三亚湾海区沉积物, 整体上研究区沉积物属较强氧化环境, 局部为弱氧化环境。腐蚀性较弱, 区域地质环境较好, 有利于海底管线工程的建设。但是在海底管线工程防腐设计时, 应针对三亚湾海区的腐蚀环境特征选取合适的防腐措施。

参考文献:

- [1] 毛龙江, 张永战, 张振克, 等. 海南岛三亚湾现代沉积环境[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2007, 27(4): 17-22.

- [2] 孙文凭, 徐继荣, 殷建平, 等. 三亚河与三亚湾溶存N₂O分布特征与影响因素研究[J]. 海洋与湖沼, 2010, 41(2): 266-273.
- [3] 杨顶田, 单秀娟, 刘素敏, 等. 三亚湾近10年pH的时空变化特征及对珊瑚礁石影响分析[J]. 南方水产科学, 2013, 9(1): 1-7.
- [4] 刘建波, 刘洁, 陈春华, 等. 三亚湾表层沉积物中重金属污染特征及生态风险评价[J]. 环境科学与管理, 2012, 37(7): 106-109.
- [5] 张光星, 吴钟解, 陈石泉, 等. 春季三亚湾浮游动物生态特征与环境因子的关系[J]. 福建水产, 2014, 36(3): 176-184.
- [6] 王汉奎, 董俊德, 张 德, 等. 三亚湾氮磷比值分布及其对浮游植物生长的限制[J]. 热带海洋学报, 2002, 21(1): 33-39.
- [7] 王文介. 华南沿海和近海现代沉积[M]. 北京: 科学出版社, 1991: 74-84.
- [8] 王 颖. 海南潮汐汉道港湾海岸[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1996.
- [9] ALLER R C. Mobile deltaic and continental shelf muds as suboxic, fluidized bed reactors[J]. Marine Chemistry, 1998, 61(3/4): 143-155.
- [10] 曹楚南. 腐蚀电化学原理[M]. 北京: 化学工业出版社, 1985: 316.
- [11] 金相灿. 沉积物污染化学[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1992: 26-28.
- [12] 霍 兰. 大气和海洋化学[M]. 初汉平, 译. 北京: 科学出版社, 1986: 220.
- [13] 李新荣, 沈德中. 硫酸盐还原菌的生态特性及其应用[J]. 应用与环境生物学报, 1995, 5(S1): 10-13.
- [14] FISCHER K P, BRYHN O R. Corrosion and corrosion evaluation of superficial sediments on the Norwegian continental shelf[C]//Proceedings of Effects of Soil Characteristics on Corrosion. Philadelphia, USA: ASTM, 1989: 119-132.
- [15] ZHUANG W, GAO X L. Acid-volatile sulfide and simultaneously extracted metals in surface sediments of the southwestern coastal Laizhou Bay, Bohai Sea: concentrations, spatial distributions and the indication of heavy metal pollution status[J]. Marine Pollution Bulletin, 2013, 76(1/2): 128-138.
- [16] VAN GRIETHUYSEN C, GILLISSEN F, KOELMANS A A. Measuring acid volatile sulphide in floodplain lake sediments: effect of reaction time, sample size and aeration[J]. Chemosphere, 2002, 47(4): 395-400.
- [17] 卞培旺, 曾 珍, 张叶春, 等. 大亚湾海区沉积物腐蚀性环境参数的探讨[J]. 广东海洋大学学报, 2018, 38(5): 21-26.
- [18] 李祥云, 陈虹勋, 古森昌, 等. 南海珠江口东部海底沉积物腐蚀性研究[J]. 热带海洋, 1997, 16(3): 90-98.
- [19] 苑海涛, 弓爱君, 高 瑾, 等. 硫酸盐还原菌的微生物腐蚀及其防护研究进展[J]. 化学与生物工程, 2009, 26(1): 11-14.