胡梦茜, 崔振昂, 吴自军, 等. 三亚湾海滩泥黑化空间差异与形成条件[J]. 海洋地质前沿, 2022, 38(7): 23-30. HU Mengxi, CUI Zhen'ang, WU Zijun, et al. Spatial differences and formation conditions of beach mudding and blackening in Sanya Bay[J]. Marine Geology Frontiers, 2022, 38(7): 23-30.

三亚湾海滩泥黑化空间差异与形成条件

胡梦茜¹, 崔振昂^{1*}, 吴自军², 刘文涛¹, 贾磊¹

(1中国地质调查局广州海洋地质调查局,广州 510760;2同济大学海洋地质国家重点实验室,上海 200092)

摘 要:三亚湾海滩泥黑化问题由来已久,严重影响了三亚市旅游资源可持续发展,受到社会 各界的广泛关注。通过水动力数值模拟、现场原位观测和取样分析等手段,系统地研究海滩 泥黑化空间差异及形成条件,可为海滩综合整治提供科学依据。三亚湾海流主要为 EW 向往 复流,海湾中部与外部均以落潮优势为主,最大流速可达 1.0 m/s,湾内涨落潮流速均<0.1 m/s, 最大余流流速更是低至 0.02 m/s,局部地区如天涯海角与鹿回头南侧存在流速高值区,其中天 涯海角处余流为离岸运动。基于野外实地踏勘与室内测试分析结果发现,三亚湾东、西部海 滩的泥黑化程度相对中部较高。可将整个海湾划分为东部条带黑化区、中部正常区和西部斑 状黑化区,由东至西各分区钛铁矿平均含量分别为 0.35%、0.58% 和 2.08%,有机碳平均含量 为 0.20%、0.10% 和 0.07%,总氮平均含量为 0.011%、0.006% 和 0.004%。三亚湾海滩西部黑 化主要是由于重有色矿物钛铁矿的机械搬运与分选富集,其物质来源于马岭滨海钛铁砂矿, 该处波浪能集中,钛铁矿经波浪悬扬后在 EW 向潮流的往复搬运下到达周边岸滩引起海滩黑 化;有机质在厌氧菌作用下与细颗粒泥沙胶结后形成腐泥,使三亚湾东部海滩变黑变硬,污染 物主要来源于局地生活污水排放与海底污泥再悬浮搬运,该海域海水自净能力低下是海滩黑 化的重要促进因素。

关键词: 三亚湾海滩; 黑化; 数值模拟; 钛铁矿; 腐泥 中图分类号: P736 文献标识码: A DOI: 10.16028/j.1009-2722.2021.078

0 引言

三亚湾位于海南岛南部,为典型的砂质弧形海岸,其东起鹿回头半岛,西至马岭-天涯海角,海湾延伸距离约 18 km。随着三亚市城市发展建设的推进, 人类活动对海洋环境与海滩景观产生较大负面影响。早在 2005 年,国家海洋局海口海洋环境监测 中心站通过实地调查发现三亚湾大桥至天涯度假 村岸段的滩面明显变黑,呈灰褐色,间有垃圾散落。

收稿日期: 2021-04-06

实际上,三亚湾海滩表层沉积物中基本无泥质成分,即并未出现泥化,而是由于城市污水排放导致的黑化污染^[1-2]。三亚湾海滩东段临近三亚市区与三亚港,游人相对西部更多,有机质分解富存形成的腐殖质可导致海滩黑化。2014年,三亚市原海洋与渔业局在三亚湾东段开展第1轮海滩养护软质工程,对受污染的海滩砂进行掩埋,此外,经城市污水综合整治,海滩环境质量恶化趋势得到有效遏制。但近年来,三亚湾东段滩面重新覆盖条带状或片状黑灰色沉积物,严重影响到其旅游资源的可持续发展。

目前国内报道有多处海滩受到不同程度的泥 黑化,包括海南三亚湾、福建同安湾人工沙滩、漳州 南太武海滩和北海银滩,针对海滩泥黑化物质及其 成因的相关研究文献较少。龚玉萌^[3]通过波浪与 输沙模型发现,宁波新鹤沙滩变黑是由于波浪减弱 和缺少粗颗粒物质来源导致的颗粒变细泥质化;付 博新等^[4]在漳州南太武海滩取样测试发现,沙滩变 黑不是由于发生泥化,而是由于腐殖质产生的假泥

资助项目:三亚崖州湾科技管理局 2020 年度科技计划项目(SKJC-2020-01-008);中国地质调查局项目"海南岛东北部沿海地区综合地质调查" (DD20190308)

作者简介: 胡梦茜(1993-), 女, 硕士, 助理工程师, 主要从事海岸带水文数值模拟方面的研究工作. E-mail: carlyhu@163.com

^{*}通讯作者: 崔振昂(1974-), 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事海洋环 境地质方面的研究工作. E-mail: cuizhenang@163.com

化。海滩泥黑化的成因不尽相同,即使同一区域范 围内的沙滩也可能具有不同的泥黑化性质。崔振 昂等^[5]发现三亚湾海滩东段与西段表现出截然不 同的黑化现象,并对其形成机制作了简要分析。

本文通过对海滩与近岸表层沉积物采样结果 的对比分析,结合模拟的流场,系统阐明三亚湾海 滩泥黑化空间差异及其形成的动力与环境条件,有 助于加深对海滩泥黑化成因机制与源汇过程的理 解,为海滩综合整治提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 野外调查与样品采集

在现场踏勘基础上,开展水动力调查、近岸与 海滩表层沉积物取样分析、海水化学取样分析。自 凤凰岛到肖旗港大致均匀布设海滩沉积物取样站 位,对局部泥黑化严重岸段进行加密,对于未出现 明显泥黑化的岸段采集潮间带表层沉积物样。近 岸表层沉积物取样站位水深范围为 5~35 m,覆盖 整个研究海域,共采集海滩表层沉积物样品 31 件, 近岸表层沉积物样品 228 件,表、底层海水化学样 品各 51 件。对表层沉积物样本主要分析其暗色矿 物、有机碳氮含量,其中,有机碳氮的测定采用元素 分析仪-稳定同位素比率质谱(EA-IRMS)联用分析 仪;海水样本主要分析化学需氧量(COD)、五日生 化需氧量(BOD₅),严格按照《海洋监测规范》(GB 17378.4)执行;水动力调查主要包括1个潮位观测 站与2个海流观测站,潮位站选在靠近凤凰岛的避 风避浪点,采用 RTK 联合潮位仪进行观测,观测周 期包含一个完整大小潮,将潮位基准面校正至当地 平均海平面,海流观测采用 600 kHz 声学多普勒流 速剖面仪(RDI-ADCP)。工作站位部署如图1所示, 根据踏勘调查的海滩泥黑化特征可将三亚湾海滩 划分为东部条带黑化区(①区)、中部正常区(②区) 和西部斑状黑化区(③区),各区典型海滩照片如 图1右侧照片所示。

1.2 水动力数值模拟

1.2.1 控制方程

使用 Delft3D 模拟研究区的流场,其二维平面 模型的控制方程为:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial (hu)}{\partial x} + \frac{\partial (hy)}{\partial y} = 0 \qquad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + A_{\rm h} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - R_{\rm b} \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{H} u + fv + \tau_{\rm sx} \qquad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} + A_{\rm h} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - R_{\rm b} \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{H} v - fu + \tau_{\rm sy} \qquad (3)$$



后侧海滩照片序号对应左图分区位置:①位于东部海滩,典型特征为条带状黑化;②位于中部海滩,无明显泥黑化 ③位于西部海滩,典型特征为斑状黑化

> 图 1 站位部署图与现场照片 Fig.1 Site deployment map and field photos

式中: Ah为水平方向扩散系数, m²/s;

H=η+h 为总水深,其中,h 为平均海平面起算的 水深,η 为平均海平面起算的海面高度,m;

u、v分别为垂向平均流的东和北分量, m/s;

f为体现地球自转效应的科氏参数, s⁻¹;

R_b为海底摩擦系数;

g 为重力加速度, m/s²;

 τ_{sx} 、 τ_{sy} 为风对自由水面的剪切力在*X*、*Y*方向的分量,计算式为:

$$\tau_{\rm sx} = f_{\rm s} \rho_a u_{\rm w} \sqrt{u_{\rm w}^2 + v_{\rm w}^2} \tag{4}$$

$$\tau_{\rm sy} = f_{\rm s} \rho_a v_{\rm w} \sqrt{u_{\rm w}^2 + v_{\rm w}^2} \tag{5}$$

式中: fs为风阻力系数;

 $\rho_{\rm a}$ 为空气密度, kg/m³;

 $u_{\rm w}$ 、 $v_{\rm w}$ 为风速在X、Y方向的分量, m/s。

1.2.2 网格与水深

考虑到研究区所在海域受岛屿、浅海地形等影响,在无边界实测水位与潮流数据的条件下,需采 用模型嵌套的方式来模拟该海域的潮流场,本文采 用大、小2层计算域嵌套:大模型计算域涵盖整个 北部湾,经度范围为104°-112°E,纬度范围为17°-22°N,水平方向模型网格数为163×240,从外海至近 岸海域区网格尺寸逐渐减小。小模型范围包含三 亚湾-红塘湾区域,水平方向网格数为182×353。构 建数学模型时,大模型水深采用美国国家海洋与大 气管理局(NOAA)发布的全球水深 ETOPO1数据, 小模型水深主要由单波束实测资料确定,港口附近 参考海军航海保证部出版的相关海图,将水深统一 换算至当地平均海平面,采用三角插值的方法将高 程散点插值到各网格节点,模型水深如图 2 所示。





1.2.3 模型参数设置

北部湾大模型东、南外海开边界由 TMD (Tide Model Driver)全球潮汐数据库中的 S2、M2、N2、K2、K1、P1、O1、Q1 这八大主要分潮的调和分析 常数计算得出。小模型潮位与流速边界由大模型 计算结果提供。模拟时间为 2019 年 6 月 1 日-7 月 26 日,大模型时间步长 10 min,小模型时间步长 为 2 min。初始水位设置为 0。

大模型径流参考南流江、鉴江、南渡江、万泉 河、昌化江、钦江和红河的多年平均入海流量,小模 型内东侧有三亚河径流注入,肖旗河径流量过小故 不考虑。水面上采用 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)的再分析产品 CFSR (Climate Forecast System Reanalysis)的风场与气压 资料,其空间精度为 0.5°×0.5°,数据时间间隔为 6 h。

近岸海域浅水海洋模型中的床底糙率对水流 计算有较大的影响,因而糙率的选择是水流计算的 一个关键问题。近岸海域糙率受床底组成、床底形 状、河滩覆盖情况以及流量、含沙量等多种因素影 响,不同海域的糙率一般不相同。河床糙率值(即 曼宁系数)经率定后设置为 0.025 m^{1/3}/s。水平涡黏 系数经率定后取 10 m²/s。

2 三亚湾海域水动力模拟结果

2.1 模拟结果验证

潮位与流速验证结果显示,实测潮位与模拟潮 位基本一致,小潮期较大潮与中潮期差异略大,总 体误差不超过10%(图3)。此外,模拟的潮流流速





与实测值相近,速度差值一般<0.2 m/s,个别时段 计算的流速与实测流速的误差稍大,主要集中在 HLDD1 站落潮期,且实测流向与模拟流向验证吻 合,潮流相位基本无差异(图 4),因此,所建水动力 模型能够较好反映三亚湾海域潮流的变化特征。



Fig.4 Current verification results in Sanya Bay

2.2 潮流特征分析

模拟的三亚湾-红塘湾海域涨急与落急时刻流 场如图 5 所示,外海潮流涨潮时流向均指向偏 WN向,近岸流向受地形影响,在鹿回头岬角处产生 分流,部分潮流向北绕流进入三亚湾湾内,在东岛 与西岛附近流速较高,内湾区域流速极低,部分潮 流继续向偏 W 向运动。三亚湾中部涨急时流向为 WN 向,红塘湾中部涨急时流向为 W 向,落急时两



Fig.5 The vector diagrams of the flood tide (top) and ebb tide (bottom) in Sanya Bay

湾中部流向主要为 ES 向,湾外临海区域流向为 E 向。整体上海湾中部与外部均以落潮优势为主, 最大流速可达 1.0 m/s, 三亚湾内潮流流速 < 0.1 m/s, 局部地区如三亚新机场填海区、天涯海角、鹿回头 南侧存在流速高值区。

余流场为扣除周期性潮流后的海水流动,具有 单向流动特点,对污染物与泥沙输移具有重要指示 作用,图 6 为三亚湾余流场分布。湾外为涨落潮不 对称产生的潮致余流,余流方向为 E 向,具有最大 余流流速,约为 0.3 m/s。海湾中部与内部的余流流 速较低,大部分区域<0.05 m/s,尤以凤凰岛西侧近 岸水域为典型,余流<0.02 m/s。研究区域存在多 个小型余流环流,主要位于鹿回头岬角西侧、红塘 湾新机场填海区东南侧以及东、西岛的两侧,其中 东、西岛南北两侧的余流为离岛运动,东西两侧水 流向岛上汇聚。此外,三亚湾与红塘湾湾内余流均 指向天涯海角,汇聚后形成离岸流向南流动。





三亚湾东、西部海滩的泥黑化程度相对中部较 高。东部主要为片状或条带状黑化,沉积物为灰黑 色,靠近海月广场处黑化最为严重,该处主要为较 粗颗粒的海滩养护砂,在粗中砂表面出现一层薄膜 状黑色物质,黏结程度高,表观上近似泥质化;西部 海滩沉积物粒度较粗,表现为斑状黑化,黑化位置 集中于水边线附近,潮间带零星分布。根据样品测 试分析结果,天涯海角与西岛间近岸海域水下分布 的钛铁矿含量最高(达10%),对应的黑化海滩砂钛 铁矿含量可达 7.4%, 远远高于中部与东部海滩砂钛 铁矿的平均含量(0.46%)(图7)。与之相反,沉积物 中有机碳含量总体显示出"东高西低"的特征,靠近 凤凰岛黑化严重海滩的有机碳含量平均值为0.20%, 其临近水下岸坡海底表层沉积物同样出现高值,含 量最高接近1.0%,约为中部与西部岸段有机碳平均 值的 2~3 倍(图 8)。一般来说,近岸海洋沉积物中 的有机碳浓度为 0.3%~3%^[6]。卞培旺等^[7] 测得肖 旗港与西瑁岛间有机碳含量变化范围为 0.09%~ 0.76%, 平均 0.378%, 含量>0.3% 的样品占总样品 数的 62.5%, 显示该海域有机碳含量较其他近岸海 域偏低,与图 8 中该区有机碳含量基本一致。整个 三亚湾西部有机碳为全三亚湾海域最低,东部最高。 统计的三亚湾海滩各区表层沉积物中钛铁矿与有 机碳氮含量如表1中所示,沉积物总氮含量范围为 0.002%~0.014%,同样表现为"东高西低"的特征, 且与有机碳含量具有较强的线性相关性,表明区域 有机污染来源相同。



表 1 三亚湾海滩各分区表层沉积物测试结果 Table 1 Surface sediments sample analysis results in each sub-district of Sanya Bay Beach

	-						_		%α
分区	有机碳			总氮			钛铁矿		
	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
东部	0.25	0.11	0.20	0.014	0.007	0.011	1.25	0.16	0.35
中部	0.16	0.06	0.10	0.009	0.003	0.006	2.34	0.15	0.58
西部	0.11	0.04	0.07	0.006	0.002	0.004	7.41	0.16	2.08

4 讨论

三亚湾海滩黑化空间差异结果显示,海滩东 部为有机污染引起的"假泥化",西部为致黑矿物 钛铁矿引起的黑化。根据潮流模拟结果,三亚湾 东部肖旗河至天涯海角海域涨落潮急流流速约为 0.4 m/s,流速中等,可起动搬运细粉砂级的沉积物 颗粒至周边弱能海域后沉降,图5显示该处余流 方向为离岸方向;因此,天涯海角至西帽岛连线上 沉积物中富含钛铁矿,且含量逐渐降低,海底表层 沉积物中钛铁矿为南北分布,东西侧海域含量较低,<2%。三亚湾湾内东部近凤凰岛海域最大流速约 0.1 m/s,余流流速≤0.02 m/s,表明该处为滞水环境,十分不利于泥沙与污染物的输运扩散。

潮汐引起的海水周期性升降以及随之产生的 海水运动,对塑造海岸形貌及海水环境有着重要影 响。除潮汐作用之外,三亚湾海岸形貌更大程度地 受波浪营力的控制。海岸西段面临开敞大海,风浪 大,激浪作用活跃,泥沙来源丰富,海滩泥沙颗粒粗, 主要为中粗砂;而海岸东段有东瑁洲、西瑁洲与鹿 回头半岛障蔽,外海传来的波浪经过岛屿折射后, 至岸边动力减弱,海滩泥沙颗粒细,主要为细 砂^[8]。基于海滩黑化空间差异与波流特征,进一步 探讨海滩黑化的形成条件。

海南岛陆上存在巨大的锆钛高值背景区,广 泛分布有锆钛高值异常区,异常区面积较大,异常 幅值高,钛最高达 64 655×10⁻⁶,一般为(10 000~ 60 000)×10⁻⁶,呈带状与现代海岸线平行展布,属滨、 浅海相沉积,韵律层明显,机械沉积作用清晰^[9]。

海南岛属热带岛屿季风性气候,受东北和西南 季风影响,气候高温多雨,基岩易于风化,形成大面 积的含锆英石、钛铁矿风化壳,经暴雨冲刷和水流 搬运作用,在潮间带和浅海区沉积下来,并在潮流 与波浪作用下,经过不断分选沉降,形成滨海水下 锆、钛砂矿沉积矿床。钛铁砂矿主要富集在东南部 滨海沉积阶地,北起文昌木栏头经琼海、万宁、陵水 直至南部的三亚市马岭^[10],其中三亚市马岭为三亚 湾弧形海岸的西侧岬角,紧邻肖旗河口。

马岭为三亚湾的西侧控制岬角,波浪能量在此 处汇聚^[11],较两侧具有更强的波能,易将滨海钛铁 砂矿悬扬,并在 EW 向潮流的往复搬运下到达周边 海岸。在受到波浪破碎产生的上冲流影响下,进入 海滩,由于上冲水流下渗,能量消散,回流动力减弱, 这部分钛铁矿重矿物无法被重新搬运返回海里,在 海滩上沉积导致海滩黑化,位置一般靠近水边线, 随涨落潮变化。近年来,天涯海角附近岸线受到强 烈侵蚀^[12-14],意味着波能显著增强,更是加剧了其 周边海滩的黑化。

与西部海滩黑化成因不同,三亚湾东部海滩主 要为有机质污染导致的黑化。有机质与水体中的 悬浮物产生絮凝作用,在随水流输移扩散过程中持 续在海滩上落淤,并在厌氧细菌参与下分解,经聚 合作用和缩合作用逐渐形成暗褐色或黑灰色的泥 状沉积物(即"腐泥"),经历一定时间的累积固结后, 使沙滩发生黑化和硬化。颗粒大小将影响有机质 的赋存与埋藏,较细的沉积物颗粒更易吸附有机质, 泥质沉积物中有机质最为丰富[15]。三亚湾自西向 东不同海滩断面相同地貌部位滩面物质逐渐变细, 且东部具有更高的有机质来源,利于海滩黑化。根 据海水化学测试结果,三亚湾生物与化学需氧量整 体符合一类海水水质标准,仅在靠近三亚河的底层 海水化学需氧量超一类水质标准,达到 2.42 mg/L, 且附近水体中的 BOD5/COD 为 0.1~0.4, 该比值表 征海水有机污染中可被生物消耗的比重,比值越小, 说明该区有机污染物越难通过生物降解自净^[16]。

此外, 三亚湾潮流数值模拟结果也显示三亚湾东部 水动力较弱, 污染物扩散范围有限, 且湾内余流流 速极小, 不超过 0.02 m/s, 污染物的物理自净能力非 常差。三亚湾东部海域有机污染的生化自净能力 与物理自净能力低, 使得有机质不容易稀释降解而 在局地滞留, 这是海滩腐泥形成的重要促进因素, 但其污染物来源可能是多方面的。

利用沉积物 C/N 比值可判断有机质来源,海洋 藻类植物由于富含蛋白质,所以其典型 C/N 比值为 4~10,而陆地植物由于植物体内含有大量纤维素 成分,C/N 比值通常高于 20。C/N 比值为 10 时内 源和外源有机质基本平衡。一般而言,沉积物中 C/N 比值<8 为典型的海洋有机质来源,而>12 为陆源 性有机质^[17],人为排污可造成近岸沉积物中 C/N 比 值的增加^[18]。近岸海底表层沉积物测试结果显示, 研究区 C/N 值为 2~18,平均 8.98,表明沉积物中有 机质受到海陆的共同影响。调查区近岸 C/N 较高, 以陆源输入的有机质为主,局部地区如鹿回头南部、 三亚港与凤凰岛可达 18,C/N 低值区主要集中在海 湾中部岛屿周围以及天涯海角区域。

三亚湾海滩东部陆源排污是海滩黑化的主要 物质来源,由于早期污水排放管网建设不完善,加 上城市开发建设与人口激增,使得三亚这座著名的 滨海度假旅游城市遭受污水之患,三亚湾大桥到天 涯度假村之间近 10 km 长的海滩出现不同程度地 颜色发暗,尤其是在几个雨污水排放口附近最明显。 据报道,截至2015年,三亚市每天产生的污水约 23万t,目前建设的10个污水处理厂每天只能负 荷 15 万 t^[19],部分生活污水将通过三亚河或由海滩 直排入海,严重威胁着三亚湾海域生态环境,造成 沙滩泥沙流失。随着污水处理厂的逐步建成与城 市雨污水分流改造工程的落实,污水直排入海问题 得到有效缓解。在 2020 年的野外踏勘中发现, 三 亚湾海滩中、东部遗留多处连续的废弃冲沟,冲沟 处海滩存在掩埋底部的腐泥,表层约 20 cm 厚度内 沉积物颜色均为黄色,未发生明显黑化(图9)。暴 雨过后,临近海月广场岸段发现大片黑色物质随雨 水溢出管道,说明三亚市雨、污水混排问题尚未得 到根治,应进一步加强污水排放监测,将沿岸污水 全部纳入市政污水收集系统。此外,三亚港至海月 广场局部海域海底表层沉积物中有机碳含量高 (图 8),其污染物一般有重金属、氮磷等营养盐以及 难降解有机物,含量可达水体中的上百倍^[20],波浪

破碎导致的沉积物再悬浮会加剧底泥中污染物向 上覆水的迁移释放与搬运^[21],从而引起海滩复黑。



上图为三亚湾中部海滩废弃冲沟,下图为冲沟处海滩垂向剖面, 可见深度约 20 cm 处出现埋藏腐泥

图 9 废弃冲沟处海滩沉积物底部埋藏腐泥

Fig.9 Buried sapropel at the bottom of beach sediments in abandoned gullies

5 结论

本文通过野外实地踏勘、室内测试分析和潮流 数值模拟,系统研究了三亚湾海滩泥黑化空间差异 与形成条件,主要结论如下:

(1)三亚湾海湾中部与外部均以落潮优势为主, 最大流速可达 1.0 m/s, 余流最大为 0.2 m/s, 方向为 E 向; 三亚湾内涨落潮流速均<0.1 m/s, 最大余流流 速更是低至 0.02 m/s, 局部地区如天涯海角与鹿回 头南侧存在流速高值区, 其中天涯海角处余流为离 岸运动。

(2) 三亚湾东、西部海滩的泥黑化程度高于中部。东部主要为极薄层的片状或条带状黑化,靠近海月广场处最为严重,黑化物质黏结程度高,表观上近似泥质化,对应的钛铁矿、有机碳与总氮平均含量分别为0.35%、0.20%与0.011%。西部海滩沉积物粒度较粗,主要为斑块状黑化,黑化位置集中于水边线附近,潮间带零星分布,对应的钛铁矿、有机碳与总氮平均含量为2.08%、0.07%与0.004%。

(3) 三亚湾海滩西部黑化主要是由于重有色矿 物钛铁矿的机械搬运与分选富集,其物质来源于马 岭滨海钛铁砂矿,位于三亚湾西侧控制岬角,波浪 能集中,钛铁矿经波浪悬扬后在 EW 向潮流的往复 搬运下到达周边岸滩引起海滩黑化;三亚湾东部海 滩黑化主要是由于水体中有机污染的扩散输运与 生物化学沉积作用,有机质在厌氧菌作用下与细颗 粒泥沙胶结后形成腐泥使海滩变黑变硬,污染物主 要来源于局地生活污水排放与污泥再悬浮搬运,该 海域海水生化自净能力与物理自净能力低是海滩 黑化的重要促进因素。

参考文献:

- 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] 王俊强,施浩,王沛政.三亚湾沙滩沙子黑化研究分析[J]. 技术 与市场, 2016, 23(11): 31-32.
- [3] 龚玉萌. 泥化沙滩的修复研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019: 86.
- [4] 付博新,刘林. 漳州南太武海滩泥化综合整治[J]. 水运工程, 2016(10): 50-56.
- [5] 崔振昂,吴自军,李亮,等.三亚湾海滩泥黑化调查评价[J].地 质评论,2020,66(S1):157-158.
- [6] 霍兰. 大气和海洋化学[M]. 初汉平, 译. 北京: 科学出版社, 1986: 343.
- [7] 卞培旺,陈法锦,张叶春,等.海底表层沉积物腐蚀性环境特征 与评估:以三亚湾为例[J].海洋环境科学,2020,39(4):563-569.
- [8] 李力,李占钊. 海南三亚湾海岸地貌与沉积环境研究进展[J].
 自然科学, 2016, 4(4): 392-400.
- [9] 林明坤,林川善,潘燕俊,等.海南省东部浅海锆钛砂矿物特征 及成矿条件浅析[J].西部探矿工程,2016,28(11):141-143.
- [10] 佚名.海南钛铁矿占全国70%矿产资源优势明显[J]. 钛工业 进展, 2007, 24(3): 28.
- [11] 毛龙江, 张永战, 魏灵, 等. 海南岛三亚湾海滩研究[J]. 第四纪 研究, 2006, 26(3): 477-484.
- [12] 李喜海,梁海燕.三亚湾海岸侵蚀原因分析及防治对策[J].海 洋开发与管理,2008,12:105-108.
- [13] 段依妮, 腾骏华, 蔡文博. 基于潮位观测的三亚湾海岸侵蚀遥 感提取与分析[J]. 海洋预报, 2016, 33(3): 57-64.
- [14] 刘文涛,杨永鹏.海南三亚湾-红塘湾海岸地形季节性变化和 极端天气下变化特征[J].中国海洋大学学报(自然科学版), 2021,51(S1):60-67.
- [15] WEISS A. Organic Derivatives of Clay Minerals, Zeolites, and Related Minerals[M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 1969: 737-781.
- [16] PAPADOPOULOS A, PARISSOPOULOS G, PAPADO-POULOS F, et al. Variations of COD/BOD₅ ratio at different units of a wastewater stabilization pond pilot treatment facility[C]//Proceeding of 7th international conference on environmental science and technology ermoupolis, 2001: 16-19.
- [17] MULLER A, ULRIKE M. The palaeoenviron-ments of coastal lagoons in the southern Baltic Sea: the application of sedimentary C/N ratios as source indications of organic matter[J]. Palaeogeography Palaeoclimatology, Palaeoecology, 1999, 145: 1-

16.

- [18] ANDREWS J E, GREENAWAY A M, DENNIS P F. Combined carbon isotope and C/N ratios as indicators of source and fate of organic matter in a poorly flushed, tropical estuary: Hunts Bay, Kingston Harbour, Jamaica[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1998, 46(5): 743-756.
- [19] 甘华阳,何海军,张卫坤,等.三亚河沉积物中重金属生态风险 评价与污染历史[J].生态环境学报,2015,24(11):1878-1885.
- [20] 唐艳, 胡小贞, 卢少勇. 污染底泥原位覆盖技术综述[J]. 生态 学杂志, 2007, 26(7): 1125-1128.
- [21] 段余杰,刘小宁,陈光耀,等.底泥再悬浮对上覆水水质的影响研究[J]. 生态环境学报, 2017, 26(5): 837-842.

Spatial differences and formation conditions of beach mudding and blackening in Sanya Bay

HU Mengxi¹, CUI Zhen'ang^{1*}, WU Zijun², LIU Wentao¹, JIA Lei¹

(1 Guangzhou Marine Geological Survey, China Geological Survey, Guangzhou 510760, China;
 2 State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The beach mudding and blackening in Sanya Bay, Hainan Island, South China has been a problem for a long time, which seriously affected the sustainable development of local tourism resort and caused widespread public concern. Through hydrodynamic numerical simulation, on-site in-situ observation, and sample analysis, we conducted a systematic research on the spatial differences and formation conditions of beach mudding and blackening to remediate the beach. The numerical simulation of tidal currents showed that the currents in Sanya Bay are mainly east-west reciprocating. Both the central and outer parts of the bay are dominated by ebb tides, and the maximum flow velocity can reach 1.0 m/s, whereas the fluctuating tidal velocity inside the bay is less than 0.1 m/s, where the maximum residual current is as low to 0.02 m/s. In some areas, such as Tianya Haijiao and the south side of Luhuitou, there are areas with high flow velocity, and the residual current is offshore movement in Tianya Haijiao. In addition, field survey and lab analysis showed that the degree of blackening in the east and west beaches of Sanya Bay is relatively higher than that in the central part. The entire bay can be divided into eastern stripped blackening zone, central normal zone, and western patchy blackening zone. The average content of ilmenite from east to west zone is 0.35%, 0.58%, and 2.08%, and the average content of organic carbon is 0.20%, 0.10%, and 0.07%, the average total nitrogen content is 0.011%, 0.006%, and 0.004%, respectively. The blackening of the west beach is mainly due to the mechanical transportation, sorting, and enrichment of non-ferrous mineral ilmenite. The material comes from the Maling coastal ilmenite placer, where the wave energy is concentrated. Under the strong waves, ilmenite grains could reach and blacken the surrounding beaches under the reciprocating movement of east-west tidal currents. The organic matter is attached to fine-grained sand to form sapropel under the works of anaerobic bacteria, which makes the eastern beaches of Sanya Bay black and stiff. Pollutants are mainly from the local domestic sewage discharge and the resuspension of submarine sludge; the low self-purification ability of sea water in this coastal area is an important factor in aggravating beach blackening. Key words: Sanya Bay Beach; blacken; numerical simulation; ilmenite; sapropel