田元,曹珂,印萍,等. 三门湾表层沉积物矿物分布特征及物源分析[J]. 海洋地质前沿, 2023, 39(8): 49-59. TIAN Yuan, CAO Ke, YIN Ping, et al. Mineral distribution characteristics and provenance of surface sediments in Sanmen Bay[J]. Marine Geology Frontiers, 2023, 39(8): 49-59.

# 三门湾表层沉积物矿物分布特征及物源分析

田元,曹珂<sup>\*</sup>,印萍,高飞,段晓勇,吕胜华,仇建东,陈彬,陈小英,刘晓凤 (中国地质调查局青岛海洋地质研究所,青岛 266237)

摘 要:由于沉积环境和物质来源的差异,不同海域矿物组成及分布各异。为查明三门湾海 域表层沉积物碎屑矿物和黏土矿物的含量、分布特征,在三门湾海域采集了25个海域表层沉 积物、5个河流沉积物和2个潮滩沉积物样品,对沉积物样品进行63~125μm 粒级颗粒的碎 屑矿物鉴定分析和<2μm 粒级颗粒的黏土矿物含量分析。结果显示,海域表层沉积物中共鉴 定出 27 种重矿物、11 种轻矿物。金属矿物、绿帘石、岩屑、普通角闪石、片状矿物含量占据重 矿物的 93.0%。轻矿物中 81.1% 为岩屑、斜长石、石英和片状矿物。三门湾黏土矿物以伊利 石为主(平均61.1%),绿泥石和高岭石次之(19.3%和15.8%),含少量蒙脱石(3.8%)。 根据Q型聚类,可将三门湾沉积物分为河口矿物区(Ⅰ区)、潮流通道矿物区(Ⅱ区)和浅 水水下平原矿物区(Ⅲ区)。Ⅰ区以绿帘石、金属矿物和斜长石含量高为特征,受到河流输 入直接影响,碎屑矿物与河流沉积物类似;Ⅱ区以金属矿物含量极高、片状矿物含量低为特征 (80.6%),指示湾内潮汐通道的强水动力状况;Ⅲ区以金属矿物和片状矿物含量高为主要特 征,显示出陆架碎屑矿物的重要影响。矿物物源分析结果表明,研究区内细颗粒沉积物以长 江来源为主,沿岸河流输入影响较小,未改变以伊利石为主的黏土矿物组合格局;而粗颗粒沉 积物主要受到湾外内陆架和沿岸河流输入沉积物的共同影响,沿岸河流输入使得研究区内岩 屑和绿帘石含量高,在靠近基岩海岸的区域,还可能受到部分基岩风化输入的影响。 关键词:三门湾;表层沉积物;碎屑矿物;黏土矿物;物源

中图分类号:P736.2 文献标识码:A DOI:10.16028/j.1009-2722.2022.191

# 0 引言

近岸和陆架沉积物区是陆源物质重要的汇,其 形成受到河流物质供给、海平面变化、季风和环流 等的影响,针对其开展研究具有重要的地质和环境

作者简介: 田元(1989-),博士,主要从事海洋地质与海岸带环境地质方 面的研究工作. E-mail: yuantian@ouc.edu.cn

\*通讯作者: 曹珂(1983-),博士,高级工程师,主要从事海洋地质与海岸 带环境地质方面的研究工作. E-mail: cdutck@163.com 意义<sup>[1-3]</sup>。东海内陆架泥质区形成于全新世高海平 面以来,其物质主要来源于冬季沿岸流携带的再悬 浮长江沉积物<sup>[4]</sup>,浙闽沿岸小河流物质贡献有限<sup>[5-6]</sup>。 长江向南传输的沉积物中细颗粒占绝对优势,粗颗 粒沉积物相对有限,而在沿岸海湾,小河流有着距 离优势,入海沉积物可能为沉积区提供一定的贡献, 但是相关的研究开展相对较少,区域内沉积物的主 要来源还不甚清晰。

黏土矿物是细颗粒沉积物的重要组成部分,其 组合和分布特征受到源区气候、水动力条件等因素 的影响,可作为判断物源和重建沉积物环境的重要 参数<sup>[7-10]</sup>。碎屑矿物(63~125 μm)是近海沉积物中 砂粒级颗粒的主要组成,其含量特征、特征矿物组 合和分布、单矿物形态和化学特征是指示沉积输运 模式和物源的有效手段之一<sup>[6,11-12]</sup>。

三门湾为狭长型半封闭海湾,位于浙江中部沿

收稿日期: 2022-06-26

资助项目:国家重点研发计划政府间/港澳台重点专项"河口三角洲生态 环境地球观测应用研究"(SQ2019YFE012389);中国地质调查局项目"浙 江中部海岸带综合地质调查"(DD20190276);科技基础性工作专项重点 项目"典型中小入海河流河口动力沉积地貌与环境本底数据调查" (2013FY112200);青岛市博士后应用研究项目"基于铅稳定同位素对瓯 江口及邻近海域物源识别"

海,象山湾与台州湾之间,开口朝向东南,水深一般为5~10 m。沿岸周边地势以低山丘陵为主,海积平原和潮滩分布于海湾沿岸。岸线以人工岸线、基岩海岸和淤泥质海岸为主<sup>[13]</sup>。三门湾为强潮海湾,平均潮差4.25 m,波浪作用弱,潮流作用强。海域和潮滩沉积物多为细颗粒的粉砂和黏土。入海河流为典型的山溪性小河流,受季节性降水影响,泥沙入海集中在3-9月的丰水期。多年平均径流量为26.8 亿 m<sup>3</sup>,入海泥沙多为砂粒级<sup>[14]</sup>。

为此,针对沿岸入海泥沙粗而海域主体沉积物 细的特点,开展三门湾粒度、碎屑矿物和黏土矿物 研究,以查明矿物分布和组合特征,分析其可能来 源,以厘清沿岸河流输入和长江物质供给对近岸海 湾沉积形成的作用和贡献。

1 材料和方法

#### 1.1 样品采集

本研究样品依托于浙江中部海岸带综合地质 调查项目,搭载"浙平湖渔 00866"船,通过蛤式沉 积物取样器抓取三门湾海域底质沉积物样品 25 个(B01-B25,图1)。此外,采集入海河流沉积物样品 5 个(R01-R05,其中,R01、R02 和 R04 为河道沉积物,R03、R05 为河漫滩沉积物),潮滩沉积物样品 2 个(T01-T02)。所有样品现场取表层 0~5 cm,装袋,常温保存。采样站位如图 1 所示,坐标范围为 28°46'9.42"-29°22'42.72"N、121°18'40.18"-122°2'11.85"E。

## 1.2 测试方法

#### 1.2.1 粒度测试

采用激光粒度分析仪进行沉积物的粒度分析。 以浓度为 30% 的双氧水去除有机质, 0.5 mol/L 的 六偏磷酸钠溶液作为分散剂, 超声 30 min, 确保沉 积物分散后上机测试。实验仪器为英国 Malvern 公 司的 Mastersizer 3000 型激光粒度分析仪。该仪器 测量范围为 0.02~2 000 μm, 粒级分辨率为 0.01Φ, 重复测量的相对误差<3%。粒度测试在自然资源 部海洋地质实验检测中心完成。粒度分级采用"伍 登-温德华-Φ 值"标准<sup>[16-18]</sup>, 数据以 0.25Φ 的采集间 隔导出, 粒度参数采用 McManus 矩法公式计算<sup>[19]</sup>。



#### 1.2.2 碎屑矿物鉴定

取沉积物湿样 25~50 g, 浸泡 24 h 后, 过水筛 提取 63~125 μm 粒级样品, 烘干后用三溴甲烷(比 重 2.89)进行轻重矿物分离, 分离后烘干、称重。利 用双目显微镜和偏光显微镜进行鉴定, 每个样品轻 重矿物分别鉴定 300~500 颗, 最后统计每种轻重 矿物的相对百分含量<sup>[6,20]</sup>。鉴定时, 将赤铁矿和褐 铁矿合并统计。碎屑矿物鉴定在自然资源部海洋 地质实验检测中心完成。

#### 1.2.3 黏土矿物分析

用 X 射线衍射对黏土粒级的矿物定性薄片进 行测试分析。样品用 30% 浓度的双氧水去有机质。 根据 Stoke 原理用沉降法提取 < 2 μm 的黏土粒级 组分,并制成定向薄片。经 60 ℃ 乙二醇饱和后上 机测试。仪器为德国产 D/Max-2500 型 X 射线衍射 仪(Cu Kα 辐射,管压为 40 kV,管流 150 mA)。测 量范围为 3°~30°(2θ),步长 0.02°,对 24°~26° (2θ)按步长 0.01°重复测量一次。根据 BISCAYE 方法,使用峰面积计算出蒙皂石、伊利石、高岭石和 绿泥石的相对百分含量<sup>[21]</sup>。平均重复测试误差 <5%。样品测试在自然资源部海洋地质实验检测 中心完成。

# 2 结果

#### 2.1 粒度组成特征

测试结果显示(表 1),三门湾海域表层沉积物 除 B04 为细砂之外均为黏土质粉砂,沉积物组成以 粉砂为主(9.7%~77.71%,平均64.32%),黏土其次 (5.38%~37.72%,平均27.11%),砂最少(1.34%~ 84.82%, 平均 8.58%)。除南田岛东部海域和白溪河 口外,其他区域砂含量<10%(图2)。平均粒径为 1.89Φ~7.56Φ, 平均值为 6.70Φ。沉积物粒径呈现 湾顶汊道细、湾口相对粗的特征。最粗的沉积物在 力洋水道顶部的白溪河口区,平均粒径为1.89Φ,砂 含量达到 85%。此外,相较于湾内,南田岛南部和 东部海域沉积物略粗,平均粒径>6.5Φ。三门湾沿 岸河流沉积物中, R01 和 R02 为中砂, R03 为细砂 质粉砂, R04 为细砂, R05 为黏土质粉砂; 平均粒径 分别为 5.480、0.890、4.580、2.030 和 7.480。潮 滩沉积物均为黏土质粉砂, T01、T02 平均粒径分别 为 5.14 印 和 7.46 印。

	表1 三门湾表层沉积物粒度特征
Table 1	Grain size of surface sediments in the Sanmen Bay

		-		-		
	砂/%	粉砂/%	黏土/%	平均粒径/Φ	63~125 μm体积百分含量/%	63~125 μm重量百分含量/%
最小值	1.34	9.70	5.48	7.56	1.34	0.13
最大值	84.82	77.71	37.72	1.89	9.33	11.47
平均值	8.58	64.32	27.11	6.70	3.82	1.07
变异系数/%	189.0	19.5	30.5	16.5	57.9	207

#### 2.2 碎屑矿物组成及分布特征

#### 2.2.1 重矿物

沉积物中重矿物质量百分含量与沉积环境有密切的关系<sup>[22-33]</sup>。三门湾海域沉积物重矿物质量百分含量 0.6%~18.8%,平均 4.2%,变异系数为113%。重矿物含量相对高值区(>6%)呈斑块状分布于海湾西部青山水道、健跳水道、浦坝港水道以及花岙岛南部海域。

海域沉积物鉴定出的重矿物共有 27 种。平均 颗粒百分含量>5% 的重矿物依次为赤/褐铁矿 (35.8%)、绿帘石(15.1%)、岩屑(10.8%)、普通角闪 石(9.8%)、白云母(8.4%)、风化云母(5.1%),共占 总重矿物含量的 79.8%。赤/褐铁矿(9.1%~88.2%), 含量高值区在青山水道及研究区南部海域。绿帘 石(1.5%~38.8%,平均15.1%)高值区分布于白礁 水道、力洋水道、蛇盘水道、浦坝港东部海域和南 田岛南部海域(>20%)。岩屑(0~27.6%)高值区在 蛇蟠水道、健跳水道和浦坝港水道(>60%),白溪 河口和湾外海域通常<20%。普通角闪石含量 (0.9%~30.1%)高值区集中在浦坝港东部、高塘岛 南部东部海域(>15%),湾顶汊道及研究区南部海 域含量较低(<5%)。平均含量 5%~1%的重矿物 依次为钛铁矿、自生黄铁矿、碳酸盐矿物及阳起石-透闪石。平均含量<1%的重矿物包括(斜)黝帘石、 磁铁矿、榍石、石榴子石、磷灰石、单斜辉石、白钛 矿、锆石等,这些矿物只在少部分站位出现。

稳定矿物(锆石、榍石、电气石、石榴子石、磷



Fig.2 Distribution of sediment components and average grain size

灰石)含量低(0~3.8%,平均1.0%),除浦坝港东部、 南田岛南部和蛇蟠水道外,其余海区含量均<2%, 甚至未出现(图3)。自生矿物(自生黄铁矿)只在部 分站位出现,且含量分布不均(0~16.67%)。片状矿物 (白云母、黑云母、风化云母及绿泥石)含量为 0.8%~55.3%,平均含量16.5%。在浦坝港水道和 南田岛南部湾口含量>40%,而其他区域普遍 <20%。金属矿物(赤/褐铁矿、钛铁矿、磁铁矿、白 钛矿)含量为13.6%~89.4%,平均为40.8%。高值 区(>60%)分布在青山水道、蛇蟠水道、健跳水道 以及湾口南部海域。

三门湾沿岸河流沉积物重矿物以绿帘石 (40.8%)、岩屑(26.2%)、钛铁矿(11.1%)和赤/褐铁 矿(10.8%)为主,共占总重矿物的89.0%。相比于海 域,河流沉积物中有更高的岩屑、绿帘石占比,更低 的普通角闪石、片状矿物占比。

2.2.2 轻矿物

三门湾海域表层沉积物中共鉴定出 11 种轻矿物,以岩屑、斜长石和石英为主,含量分别为 6%~ 83.5%(平均 38.3%)、8.9%~78.2%(平均 32.9%)和 1.2%~25.6%(平均 9.9%),共占总轻矿物的 81.1%。 片状矿物(白云母、黑云母、风化云母)含量为 0.3% ~55.7%(平均 10.6%)。空间分布上(图 4),石英高 值区(>15%)分布于湾口附近海域,湾顶各汊道含 量相对较低(<5%);斜长石高值区(>40%)分布于 南田岛东部和南部海域,除力洋水道外(>70%),其 他湾顶汊道斜长石含量通常<20%;钾长石含量较 少(0.1%~2.6%,平均 1.0%),空间分布趋势和石英 类似。

三门湾河流沉积物轻矿物同样以岩屑(33.1%~ 91.1%,平均51.6%)、斜长石(6.1%~51.1%,平均 35.7%)和石英(2.8%~12.6%,平均10.5%)为主,三 者之和平均占比达97.8%。相比于海域,片状矿物 含量极少(0.3%~0.9%,平均0.7%)。

#### 2.3 黏土矿物组成及分布特征

根据 X 射线粉晶衍射分析结果(图 5),三门湾 河流、潮滩及海域沉积物<2μm的颗粒中,黏土矿 物有伊利石、高岭石、绿泥石及少量蒙脱石;非黏土 矿物有石英、斜长石、钾长石。定量分析结果显示 (表 2),海域沉积物黏土矿物以伊利石为主(54.0%~ 65.9%,平均 61.1%),高岭石(13.2%~18.5%,平均





15.8%)和绿泥石(16.2%~22.1%,平均19.3%)含量 相对较少,含少量蒙脱石(2.0%~5.9%,平均3.8%)。 河流沉积物黏土矿物以绿泥石(20.0%~36.0%,平 均26.6%)和高岭石(21.2%~45.9%,平均31.4%)含 量高为特征,伊利石(18.1%~55.7%,平均41.0%) 含量少于海域沉积物,蒙脱石含量极少(0~2.7%, 平均1.0%)。湾顶潮滩沉积物黏土矿物组成和海域 沉积物类似,以伊利石为主(59.2%),高岭石(16.7%) 和绿泥石(20.7%)含量相对较少,含少量蒙脱石 (3.4%)。海域黏土矿物变化空间变化不明显。可 能受到沿岸河流输入影响,高岭石和绿泥石在湾顶 水道中含量略高于湾内海域(图 6)。

3 讨论

### 3.1 矿物分区

作为一种多元数据统计分析方法,聚类分析被 广泛应用于海洋沉积物碎屑矿物研究中<sup>[6,20,24-26]</sup>。 Q型聚类是层次聚类的一种,将有相似特征点的样 本(沉积物样品)聚集一起,进行分类分区。本研究 选择了3类共15种变量,包含了沉积物组成相关



图 4 三门湾海域表层沉积物主要轻矿物颗粒含量分布

Fig.4 Distribution of major light minerals in surface sediments of the Sanmen Bay



Fig.5 X-ray diffraction spectral lines of the sediments

的变量:砂含量、平均粒径;碎屑矿物相关的变量 (扣除岩屑):金属矿物、稳定矿物、片状矿物、闪石 类矿物、辉石类矿物、帘石类矿物、石英、斜长石和 钾长石的颗粒百分含量;黏土矿物相关的变量:伊 利石、高岭石和绿泥石含量。样本包括了全部的河 流、潮滩和海域沉积物站位。结果显示,研究区可 分为3个矿物区,根据各区矿物含量变化又分为5 个亚区(图7)。

Table 2      Content of clay minerals in the surface sediments								
	蒙脱石/%	伊利石/%	高岭石/%	绿泥石/%	样品个数	数据来源		
河流	1.0	41.0	31.4	26.6	5	本研究		
湾顶潮滩	3.4	59.2	16.7	20.7	2	本研究		
海域	3.8	61.1	15.8	19.3	25	本研究		
长江沉积物	5	67	9	19	5	XU等 <sup>[27]</sup>		
长江沉积物	7	71	9	13	7	范德江等[28]		
瓯江沉积物	4	53	27	16	4	薛成凤等[29]		

表 2 沉积物黏土矿物组成





(1)河口矿物区(I)处于力洋水道顶部的白 溪河口,以及白礁水道和健跳水道的顶部,包括海 域 B01、B04 和潮滩的 T01、T02 站位。区域内碎 屑矿物中,帘石类矿物、金属矿物及斜长石含量高, 而片状矿物低于海域平均值。此区域距离河口近, 受到河流输入的影响程度高,碎屑矿物特征与河流 沉积物类似。河口矿物区可分为白溪河口亚区(I-1)和白礁水道-健跳水道亚区(I-2),主要受到河流 输入的差异影响,白溪河流输入的沉积物具有相对 较高的金属矿物,相对较低的岩屑、帘石类矿物及 片状矿物。

(2)潮流通道矿物区(Ⅱ)位于湾内主要的潮 流通道路径之上,包括 B06、B09、B10、B17、B20 和 B19 站位。此区碎屑矿物中金属矿物含量极高 (扣除岩屑后平均占比 80.6%),重矿物占比也为研 究区中最高。潮流通道内为区内水动力最强的区 域。一方面,强的水动力条件有利于密度较大的金 属矿物富集;另一方面,赤铁矿、褐铁矿是海洋中广 泛分布的次生矿物,通常指示较强的氧化作用<sup>[30]</sup>。 这些湾内水交换的通道为沉积物提供了良好的氧 化环境,但强水动力条件不利于片状矿物的沉积<sup>[31]</sup>, 因而片状矿物为除 I 区外最低。

(3)浅水水下平原矿物区(Ⅲ)在湾内分布最 广,碎屑矿物以金属矿物、片状矿物为主。此区可 分为基岩海岸亚区(Ⅲ-1)和淤泥海岸亚区(Ⅲ-2)。 Ⅲ-1区沉积物相对较粗,砂含量为区域内除 I-1 外



Fig.7 Zonation of sediment minerals in the Sanmen Bay

最高。这些区域邻近的海岸通常为基岩海岸,在波 浪的侵蚀冲刷下,可为邻近海域沉积物提供碎屑矿 物。相对而言, Ⅲ-2 区重片状矿物更高, 轻片状矿 物含量低,与内陆架沉积物接近。

#### 3.2 矿物的物源指示

三门湾沉积物潜在来源主要包括湾外输入、河 流输入及海岸基岩风化输入,本研究将沉积物分为 粗颗粒和细颗粒两部分来进行讨论,分别以碎屑矿 物和黏土矿物进行物源分析。

3.2.1 海域粗颗粒沉积物物源

三门湾海域表层沉积物重矿物以金属矿物-片 状矿物-帘石类矿物-普通角闪石组合占绝对地位 (表 3), 与长江沉积物重矿物组合有一定的相似性。 东海内陆架泥质区多为长江携带入海的陆源沉积 物,长江沉积物多以中酸性碎屑矿物为主,呈现普 通角闪石-片状矿物-帘石类矿物型。此外,研究区 海域沉积物轻矿物以岩屑-斜长石-片状矿物-石英 组合占绝对优势,这与长江和东海内陆架沉积物中 轻矿物优势矿物组合类似[6,20,25]。轻、重矿物均显示 出长江沉积物对三门湾内粗颗粒沉积物的贡献。

值得注意的是,虽然组合相似,但是三门湾海 域沉积物重矿物中绿帘石含量(15.1%)显著高于内 陆架沉积物(8.0%),而角闪石和片状矿物却显著低 于内陆架沉积物,这表明还有其他来源的贡献。高 含量的赤铁矿、褐铁矿及绿帘石是浙江河流沉积物 的主要特征<sup>[30, 32]</sup>,研究区内也不例外。三门湾沿岸 小河流沉积物重矿物组合为帘石类矿物-岩屑-金属 矿物,小河流沉积物中绿帘石平均含量高达40.8%。 这些证据表明小河流输入对三门湾重矿物含量和 分布有着重要影响。而小河流的普通角闪石和片 状矿物含量极低(2.8% 和1%),随着河流粗颗粒的 输入,表明海域沉积物中的普通角闪石和片状矿物 被稀释。

海域轻矿物中,石英也显著低于内陆架区域。 河流轻矿物组合为岩屑-斜长石-石英,但石英含量 明显低于陆架区域,河流的输入同样影响了海域沉 积物中石英的含量。虽然河流沉积物中片状矿物 低(0.7%),但由于轻片状矿物易于搬运的特点,使 得其在湾内海域含量与内陆架区域差别不大。

三门湾沿岸均为山溪性小河流,流域面积小、 流程短。由于极短的搬运距离,河流沉积物中岩屑 的含量占比相对陆架区高,且重矿物成熟度低。这 使得入海沉积物碎屑矿物组合具有其独特特征,从 而影响了海域内粗颗粒沉积物中矿物的分布。

此外,研究区东北海域与其他水下平原矿物区 相比,碎屑矿物组成中有更高的片状矿物。考虑到 该区以基岩海岸为主,在波浪的侵蚀作用下,甚至

#### 表 3 沉积物主要碎屑矿物含量

Table 3 Contents of major detrital minerals in the sediments

									/0
	海域	河流	I -1	I -2	II	III-1	III-2	内陆架 <sup>6</sup>	长江 <sup>[33]</sup>
碎屑矿物	0.9(0.1~11.4)	34.5(0.8~64.7)	0.8	11.4	0.5	0.4	0.6		
重矿物	4.2(0.6~18.8)	4.6(0.6~12.7)	0.9	3.4	8.6	2.2	3.2	8.8	12.6
岩屑(重)	10.8(0~27.6)	26.2(8.5~52.8)	14.3	23.8	5.7	7.0	14.1		
金属矿物	40.8(13.6~89.4)	24.5(15.6~37.5)	36.9	57.8	80.6	45.7	24.6		
稳定矿物	1(0~3.8)	1.7(0.4~3.7)	1.2	0.9	0.9	0.8	1.7		
片状矿物(重)	16.5(0.8~55.3)	1(0~2.9)	7.7	1.9	9.5	16.0	26.6	26.4	28.0
绿帘石	15.1(1.5~38.8)	40.8(20~65.7)	45.2	35.7	4.4	17.0	20.6	8.0	8.0
普通角闪石	9.8(0.9~30.1)	2.8(0~4.5)	3.0	1.5	3.6	14.7	14.6	30.5	24.4
辉石类	0.3(0~1.2)	0.5(0.3~0.8)	0.0	0.4	0.0	0.3	0.4	2.0	2.1
岩屑(轻)	38.3(6~83.5)	51.6(33.1~91.1)	59.4	7.7	45.7	23.2	43.4		
石英	9.9(1.2~25.6)	10.5(2.8~12.6)	20.9	13.9	20.4	12.4	17.7	32.9	42.3
斜长石	32.9(8.9~78.2)	35.7(6.1~51.1)	70.3	84.7	58.4	43.8	62.1	44.9	31.5
钾长石	1(0.1~2.6)	1.4(0.1~2.5)	2.2	0.7	1.6	1.6	1.9	5.6	14.1
片状矿物(轻)	10.6(0.3~55.7)	0.7(0.3~0.9)	5.5	0.3	9.1	36.1	13.3	14.6	9.6

注:表中海域和河流沉积物矿物含量,在括号前为平均值,括号内为含量范围;各分区(I-1-III-2)和参考文献中的碎屑矿物含量为去除岩屑后的百分含量。

形成了研究区中少有的砂质海岸。区域岩石类型 以西山头组中酸性火山凝灰岩为主<sup>[14]</sup>,其风化和侵 蚀产物可为近岸海域提供近缘矿物来源。

3.2.2 细颗粒沉积物物源

黏土矿物组成常用于定性和半定量识别沉积物主要物质来源。三门湾河流沉积物黏土矿物 (表3)平均高岭石、绿泥石含量(31.4%、26.6%)同 伊利石含量(41.0%)接近,蒙脱石(1.0%)极低。其 中 R5 站位高岭石和绿泥石含量(45.9%和36.0%) 远高于伊利石含量(18.1%)。长江沉积物以伊利石 为主(>65%),绿泥石含量(约15%)次之,高岭石含 量(约10%)低,蒙脱石含量(约5%)最少。相比之 下,海域以伊利石为主(含量超过60%),绿泥石和 高岭石含量(19.3%和15.8%)较少,含少量蒙脱石 (3.8%)。海域伊利石含量略小于长江沉积物,但远 大于沿岸小河流沉积物,绿泥石和高岭石反之。在 黏土矿物组成三角端元图中(图8),海域沉积物黏 土矿物靠近长江沉积物分布区,其组成和长江物质



57

更相似。在靠近河流入海口的湾顶汊道和潮滩区 域,伊利石含量有所降低,而高岭石和绿泥石含量 略微增加,显示出这些区域一定程度上受到沿岸河 流输入的黏土矿物的影响。因此,研究区细颗粒沉 积物以长江来源为主,略微受到沿岸河流输入影响, 但贡献不大。

## 4 结论

(1)三门湾表层沉积物中重矿物平均质量百分 含量为 4.2%。共鉴定出 27 种重矿物,其中金属矿 物、绿帘石、岩屑、普通角闪石和片状矿物含量占 据绝大部分。轻矿物 11 种,岩屑、斜长石、石英、 片状矿物含量较高。三门湾黏土矿物以伊利石为 主(平均 61.1%),绿泥石和高岭石次之(19.3% 和 15.8%),含少量蒙脱石(3.8%)。

(2)三门湾沿岸河流沉积物中重矿物质量百分 含量平均为4.6%。以绿帘石、岩屑、金属矿物为主, 占重矿物的89%。轻矿物以岩屑、斜长石和石英为 主,占总轻矿物的97.8%。虽然河流黏土矿物平均 含量以伊利石为主(41%),但高岭石(31.4%)和绿泥 石(26.6%)含量明显高于长江沉积物。

(3)根据Q型聚类,可将三门湾沉积物分为3 个区,5个亚区。其中,Ⅰ区为河口矿物区,区内帘 石类矿物、金属矿物和斜长石含量为主;Ⅱ区为潮 流通道区,受水动力分选影响,此区重矿物含量 (8.6%)和金属含量(80.6%)为区内最高;Ⅲ区为浅 水水下平原矿物区,该区占据研究区的大部,金属 矿物和片状矿物含量为主。

(4)矿物物源分析结果显示,区内细颗粒沉积 物以长江来源为主,受到沿岸河流输入影响,但影 响十分有限,未改变以伊利石为主的黏土矿物组合 格局。而粗颗粒沉积物主要受到湾外内陆架和沿 岸河流输入沉积物的共同影响,沿岸河流输入使得 区内岩屑和绿帘石含量高,靠近基岩海岸的区域, 还受到部分基岩风化输入的影响。

#### 参考文献:

- [1] 李安春,张凯棣.东海内陆架泥质沉积体研究进展[J].海洋与 湖沼,2020,51(4):705-727.
- [2] 高抒. 中国东部陆架全新世沉积体系: 过程-产物关系研究进展 评述[J]. 沉积学报, 2013, 31(5): 845-855.
- [3] LIM D, CHOI J, JUNG H, et al. Recent sediment accumulation and origin of shelf mud deposits in the Yellow and East China Seas[J]. Progress in Oceanography, 2007, 73(2): 145-159.

- [4] 郭志刚,杨作升,张东奇,等.冬、夏季东海北部悬浮体分布及 海流对悬浮体输运的阻隔作用[J].海洋学报(中文版),2002(5): 71-80.
- [5] ZHANG K K, LI A C, ZHANG J, et al. Recent sedimentary records in the East China Sea inner shelf and their response to environmental change and human activities[J]. Journal of Oceanology and Limnology, 2018, 36(5): 1537-1555.
- [6] 张凯棣,李安春,董江,等.东海表层沉积物碎屑矿物组合分布 特征及其物源环境指示[J].沉积学报,2016,34(5):902-911.
- [7] 周晓静,李安春,万世明,等.东海陆架表层沉积物黏土矿物组成分布特征及来源[J].海洋与湖沼,2010,41(5):667-675.
- [8] 周晓静.浙江沿岸黏土矿物与长江物质示踪标记的初步研究[D].青岛,中国科学院研究生院(海洋研究所),2003.
- [9] NAIDU A S, HAN M W, MOWATT T C, et al. Clay minerals as indicators of sources of terrigenous sediments, their transportation and deposition: Bering Basin, Russian-Alaskan Arctic[J]. Marine Geology, 1995, 127(1/4): 87-104.
- [10] PETSCHICK R, KUHN G, GINGELE F. Clay mineral distribution in surface sediments of the South Atlantic: sources, transport, and relation to oceanography[J]. Marine Geology, 1996, 130(3/4): 203-229.
- [11] 张尧,韩宗珠,艾丽娜,等.黄海全新世泥质体表层沉积物重 矿物特征及其指示意义[J].中国海洋大学学报(自然科学版), 2018,48(11):108-118.
- [12] 刘金庆,张勇,印萍,等.青岛近岸海域表层沉积物重矿物分 布及物源[J].海洋地质与第四纪地质,2016,36(1):69-78.
- [13] 林明祥,蔡廷禄,王欣凯,等.近百年来浙江三门湾海岸线时 空演变特征[J].海洋学研究,2021,39(1):47-55.
- [14] 中国海湾志编纂委员会.中国海湾志(第五分册)[M].北京: 海洋出版社,1992.
- [15] 应超, 王乐乐, 黄世昌. 三门湾猫头深潭对"烟花"台风的冲淤 响应[J]. 水利水运工程学报, 2021, 190(6): 43-50.
- [16] KRUMBEIN W C. Size frequency distributions of sediments[J]. Journal of Sedimentary Research, 1934, 4(2): 65-77.
- [17] UDDEN J A. Mechanical composition of clastic sediments [J].
  Bulletin of the Geological Society of America, 1914, 25(1): 655-744.
- [18] WENTWORTH C K. A scale of grade and class terms for clastic sediments [J]. The Journal of Geology, 1922, 30(5): 377-392.
- [19] MCMANUS J. Grain size determination and interpretation [M]//TUCKER M E. Techniques in Sedimentology. Oxford, UK: Blackwell Scientific Publications, 1988.
- [20] 陆凯,秦亚超,王中波,等.东海中南部海域表层沉积物碎屑 重矿物组合分区及其物源分析[J].海洋地质前沿,2019, 35(8):20-26.
- [21] BISCAYE P E. Mineralogy and sedimentation of recent deepsea clay in the Atlantic Ocean and adjacent seas and oceans[J]. Geological Society of America Bulletin, 1965, 76(7): 803-832.
- [22] 李艳,李安春,黄朋.大连湾近海表层沉积物重矿物组合分布 特征及其物源环境指示[J].海洋地质与第四纪地质,2011, 31(6):13-20.
- [23] 张凯棣. 东海陆架近代泥质沉积源汇过程的矿物学响应 [D].

青岛,中国科学院大学(中国科学院海洋研究所),2017.

- [24] 刘勇,李广雪.东海北部陆架表层沉积物重矿物组合、迁移路
  径对底层水团的示踪响应研究[J].地学前缘,2021,29(5):1 14.
- [25] 王中波,杨守业,张志珣,等.东海西北部陆架表层沉积物重 矿物组合及其沉积环境指示[J].海洋学报(中文版),2012, 34(6):114-125.
- [26] 韩宗珠, 王一冰, 孙苑高, 等. 黄海表层沉积物的矿物组成特 征及其物源分析[J]. 海洋地质前沿, 2022, 38(4): 10-19.
- [27] XU K, MILLIMAN J D, LI A, et al. Yangtze- and Taiwan-derived sediments on the inner shelf of East China Sea[J]. Continental Shelf Research, 2009, 29(18): 2240-2256.
- [28] 范德江,杨作升,毛登,等.长江与黄河沉积物中黏土矿物及

地化成分的组成[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2001, 21(4): 7-12.

- [29] 薛成凤,贾建军,高抒,等.中小河流对长江水下三角洲远端 泥沉积的贡献:以椒江和瓯江为例[J].海洋学报,2018,40(5): 75-89.
- [30] 王昆山,王国庆,蔡善武,等.长江水下三角洲沉积物的重矿物分布及组合[J].海洋地质与第四纪地质,2007,105(1):7-12.
- [31] 陈丽蓉, 申顺喜, 徐文强, 等. 中国海的碎屑矿物组合及其分 布模式的探讨[J]. 沉积学报, 1986, 4(3): 87-96, 145.
- [32] ZHANG X, DALRYMPLE R W, YANG S Y, et al. Provenance of Holocene sediments in the outer part of the Paleo-Qiantang River estuary, China[J]. Marine Geology, 2015, 366(8): 1-15.
- [33] 陈丽蓉. 中国海沉积矿物学[M]. 北京: 海洋出版社, 2008.

# Mineral distribution characteristics and provenance of surface sediments in Sanmen Bay

TIAN Yuan, CAO Ke<sup>\*</sup>, YIN Ping, GAO Fei, DUAN Xiaoyong, LV Shenghua, QIU Jiandong, CHEN Bin, CHEN Xiaoying, LIU Xiaofeng (Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266237, China)

**Abstract:** To identify the content and distribution characteristics of detrital and clay minerals in surface sediments of Sanmen Bay, Zhejiang, East China, where 25 surface sediments, 5 river sediments, and 2 tidal flat sediments were collected. Detrital mineral grains in size of  $63 \sim 125 \,\mu\text{m}$  and clay mineral particles of  $< 2 \,\mu\text{m}$  were analyzed, from which 27 heavy minerals and 11 light minerals were identified. Among heavy minerals, metal minerals, epidote, rock debris, hornblende, schistose mineral accounted for 93.0%; and among light minerals, 81.1% were rock debris, plagioclase, quartz, and flaky minerals. Clay minerals were dominated by illite (61.1%), followed by chlorite (9.3%), kaolinite (15.8%), and a small amount of smectite (3.8%). According to Q-type clustering, the sediments in Sanmen Bay could be divided into estuary mineral area (I), tidal channel mineral area (II), and shallow underwater plain mineral area (III). The mineral provenance analysis showed that fine-grained sediments in the area are mainly from the Yangtze River and are affected by the input of coastal rivers. However, the influence of rivers is very limited as clay mineral pattern dominated by illite has not been changed. The coarse-grained sediments are mainly affected by inner shelf sediments and coastal rivers sediments. The input of coastal rivers increased the content of rock debris and epidote in the study area. In addition, the areas near the bedrock coast in the study area were also affected by some bedrock weathering inputs.

Key words: Sanmen Bay; surface sediment; detrital mineral; clay mineral; provenance