

光霞, 田元, 印萍, 等. 三门湾表层沉积物黏土矿物特征及来源分析[J]. 海洋地质前沿, 2022, 38(12): 40-46.

GUANG Xia, TIAN Yuan, YIN Ping, et al. Clay mineral assemblages and provenance in the surface sediment of the Sanmen Bay[J]. Marine Geology Frontiers, 2022, 38(12): 40-46.

三门湾表层沉积物黏土矿物特征及来源分析

光霞^{1,2}, 田元², 印萍^{2*}, 杨士雄², 褚忠信¹, 曹珂², 高飞², 韩明星^{1,2}, 高斌^{1,2}, 张旭², 田雨晴²

(1 中国海洋大学海洋地球科学学院 海底科学与探测技术教育部重点实验室, 青岛 266100;

2 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266237)

摘 要:利用 XRD 方法分析了三门湾表层沉积物中的黏土矿物组成和含量, 结合沉积物粒径趋势分析及长江和三门湾流域中小河流的黏土矿物组合特征, 开展了三门湾沉积物的来源分析。结果表明, 三门湾表层沉积物中黏土矿物以伊利石为主, 其次为高岭石和绿泥石, 蒙脱石含量最低。其中, 伊利石高值区位于海湾中部, 高岭石和绿泥石高值区分布在港汊附近, 蒙脱石则在近岸呈斑块状分布。三门湾现代表层沉积物主要来源于长江入海物质, 海湾周边短源山溪性河流带来的物质仅影响了河口近岸区。

关键词:三门湾; 黏土矿物; 粒度; 物源; 中小河流

中图分类号:P736.2

文献标识码:A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2022.175

0 引言

三门湾作为浙江省第二大海湾, 海涂宽广, 海域和潮滩沉积物颗粒较细, 以黏土质粉砂和粉砂质黏土为主。细粒沉积物的絮凝作用对海水中重金属、有机物等海洋污染物的迁移和归宿有重要影响^[1]。黏土矿物作为海洋沉积物中的细粒部分, 是影响海洋污染物化学行为的重要载体。海洋沉积物物质组成复杂, 来源众多, 包括来自陆源、火山源、自生源和生物源等不同源区的成分^[2], 河流是陆源物质向海洋搬运的主要通道, 对流域和海洋环境有重要影响^[3]。

前人对三门湾海域的研究主要包括工程建设^[4]、

生态环境^[5-8]、水动力^[9-10]、岸线变迁^[11-13]、生物^[14-15]等方面, 但涉及三门湾沉积物来源的研究不多。通常, 黏土矿物作为不同气候条件下岩石风化的产物, 因其粒径细, 能随河流搬运入海, 并且在海流的作用下发生再悬浮, 再搬运至远海, 是研究沉积物搬运路径的优良指标^[16-18]。黏土矿物的组合、含量变化及晶体特征等为海洋沉积物来源追踪和古环境重建提供了重要线索^[19-20]。本文从黏土矿物角度对三门湾沉积物来源及不同物源的影响范围进行分析, 旨在比较不同区域黏土矿物组成差异, 探讨沉积物物源和动力分选对黏土矿物组合的影响。

1 研究区概况

三门湾位于浙江东部沿岸, 北接象山港, 南邻台州湾, 东部靠近浙闽泥质区, 海域面积 775 km², 是浙江省第二大海湾(图 1)。三门湾地处亚热带季风气候区, 降雨充沛, 汇入三门湾的河流, 流域面积 3 160 km², 均为短小的山溪性溪流, 如珠游溪、白溪、清溪等, 多年平均径流总量为 26.8×10⁸ m³, 相当于 85 m³/s 的流量。湾内港汊密布, 自北向南依次为白礁水道、力洋港、青山港、蛇蟠水道、健跳港、浦坝港。湾内岛屿众多, 面积较大的岛屿有南田岛、高塘岛、花鸟岛等; 潮差较大, 属于强潮海湾, 平均潮差约为 4.3 m, 最大潮差达到 7.8 m^[21]。海域和潮滩

收稿日期: 2022-06-07

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); 中国地调局项目“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甬江口及邻近海域物源识别”

作者简介: 光霞(1997—), 女, 在读硕士, 主要从事海洋地质方面的研究工作。E-mail: 2593377108@qq.com

* 通讯作者: 印萍(1971—), 女, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事海岸带环境地质方面的研究工作。E-mail: pingyin@fio.org.cn

以细粒物质为主, 形成了浙闽海岸典型的港湾淤泥质海岸地貌。三门湾地处浙东南沿海火山活动带

中段, 中生代强烈的火山活动使该地区广泛分布火山岩、火山碎屑岩^[22]。

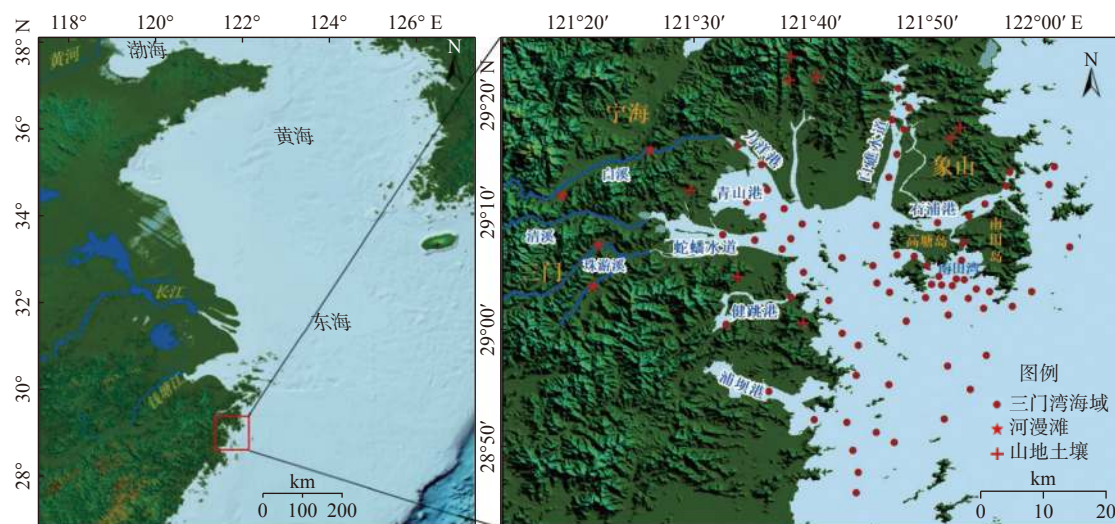


图 1 研究区位置及表层沉积物采样站位

Fig.1 Location of surface sediment samples in the study area

2 材料与方法

2019 年 9 月, 青岛海洋地质研究所在三门湾海域采集 83 个表层沉积物样品, 其中, 海域采集表层沉积物样品 71 个, 河漫滩样品 4 个, 山地土壤样品 8 个, 采样站点见图 1。为了保证样品具有现代代表性, 主要采集表层 0~5 cm 沉积物。本研究严格按照国标《海洋调查规范》(GB/T 12763.8—2007)、《海洋监测规范》(GB 17378.3—2007)和《土壤环境监测技术规范》(HJ/T 166—2004)中规定的方法对样品进行采集、保存、运输和预处理。

黏土矿物测试采用 X 射线衍射分析法(XRD), 在自然资源部海洋地质实验检测中心室完成。在样品中加入 30 mL 15% 的 H_2O_2 , 置于恒温水浴中加热 1 h 以去除有机质, 加入 30 mL 20% 的醋酸去除碳酸盐物质, 用去离子水清洗 3 遍后, 根据 Stokes 沉降原理提取出 $<2 \mu m$ 的颗粒, 制成定向薄片。黏土矿物薄片放在 60 °C 烘箱中经过 12 h 乙二醇饱和, 上机测试。测试采用德国产 D/Max-2500 型 X 射线衍射仪($CuK \alpha$ 辐射, 管压 40 kV, 管流 150 mA)。扫描角度为 $3^\circ \sim 30^\circ (2\theta)$, 步长为 0.02° 。为分离绿泥石($3.54 \text{ \AA}$)和高岭石($3.58 \text{ \AA}$)的混合峰, 按步长 0.01° 对样品重复扫描, 扫描角度为 $24^\circ \sim 26^\circ (2\theta)$ 。

基于 Jade 9.0 软件和 BISCAY(1965)方法^[23], 对黏土矿物进行定性分析和半定量计算。将乙二醇饱和片的 XRD 图谱处理后, 得到蒙脱石($17 \text{ \AA}$)、伊利石($10 \text{ \AA}$)、高岭石+绿泥石($7 \text{ \AA}$)的特征衍射峰

面积, 分别乘以各自的强度因子 1、4、2, 依据绿泥石($3.54 \text{ \AA}$)和高岭石($3.58 \text{ \AA}$)的衍射峰面积比值得到绿泥石和高岭石的含量比例, 4 种黏土矿物加权后总含量为 100%。重复测试平均误差 $<5\%$ 。

沉积物粒度测试采用激光粒度分析法, 测试在自然资源部海洋地质实验检测中心室完成, 取 1 g 沉积物加入双氧水去除有机质, 加入六偏磷酸钠溶液, 经超声波震荡充分分散, 利用英国 Malvern 公司生产的 Mastersizer 2000 型激光粒度仪(测量范围 $0.02 \sim 2000 \mu m$, 偏差 $<1\%$)进行粒度分析。利用矩法公式分别计算表层沉积物的平均粒径、偏态和分选系数^[24]。

为了探讨三门湾表层沉积物黏土矿物组合与分布特征, 本研究借助海域表层沉积物粒度数据(平均粒径、偏态、分选系数), 使用 Gao-Collins 粒径趋势分析方法^[25]研究沉积物的净输运趋势。为消除采样点不均对结果的影响, 将采样点进行克里金插值处理, 选取特征距离 0.2。

3 结果

3.1 粒度特征

三门湾表层沉积物平均粒径数值主要介于 $5.6\Phi \sim 7.6\Phi$, 平均值 6.87Φ ; 分选系数主要在 1.65~2.75, 平均值为 2.04; 偏态值主要在 $-0.14 \sim 0.34$, 平均值为 0.15。相对粗的颗粒物主要分布在南田

岛南侧及石浦镇东侧,细颗粒物分布在湾顶汉道内。总体上三门湾表层沉积物平均粒径自湾口向湾顶逐渐变细。

3.2 黏土矿物含量及组合特征

三门湾海域表层沉积物中黏土矿物以伊利石为主,平均含量为 61.66%;其次为绿泥石,平均含量为 19.15%;高岭石的平均含量为 15.34%;蒙脱石平均含量最低,为 3.85%。黏土矿物组合主要表现为伊利石-绿泥石-高岭石-蒙脱石。河漫滩表层沉积物中黏土矿物伊利石平均含量为 41.26%,远低于三门湾海域,高岭石平均含量为 32.16%,绿泥石的平均含量为 25.36%,蒙脱石平均含量最低,为 1.22%,黏土矿物组合主要表现为伊利石-高岭石-绿泥石-蒙脱石。山地土壤中的黏土矿物以高岭石和绿泥石为主,平均含量分别为 38.46%、30.82%,伊利石平均含量为 29.57%,蒙脱石平均含量最低,为 1.15%,黏土矿物组合主要表现为高岭石-绿泥石-伊利石-蒙脱石(表 1)。

伊利石在三门湾黏土矿物中占主导地位,其含量变化范围为 54.01%~67.89%,在港湾中部形成高值区,在南田湾、蛇蟠水道、白礁水道北部、青山港、

表 1 三门湾表层沉积物黏土矿物组合及相对含量

Table 1 Percentages of clay mineral assemblages in surface sediments of the Sanmen Bay

区域	参数	蒙脱石	伊利石	高岭石	绿泥石
海域	最低值	1.86	54.01	12.39	16.23
	最高值	6.77	67.89	18.47	22.08
	平均值	3.85	61.66	15.34	19.15
河漫滩	最低值	0	18.07	21.24	19.98
	最高值	2.74	55.75	45.89	36.03
	平均值	1.22	41.26	32.16	25.36
山地土壤	最低值	0	11.38	26.58	5.35
	最高值	9.17	44.93	56.08	45.82
	平均值	1.15	29.57	38.46	30.82

浦坝港和健跳港等靠近内陆的河道和港汉中含量较低;高岭石含量变化范围为 12.39%~18.47%,其高值区主要分布于蛇蟠水道、健跳港、浦坝港和石浦水道外东北部海域,三门湾中部含量较低;绿泥石含量变化范围为 16.23%~22.08%,其含量高值区主要分布浦坝港、健跳港、蛇蟠水道、青山港、力洋港和南田湾近岸水域,在三门湾中部含量较低;蒙脱石含量变化范围为 1.86%~6.77%,高值区主要在港汉顶部,呈斑块状分布(图 2)。

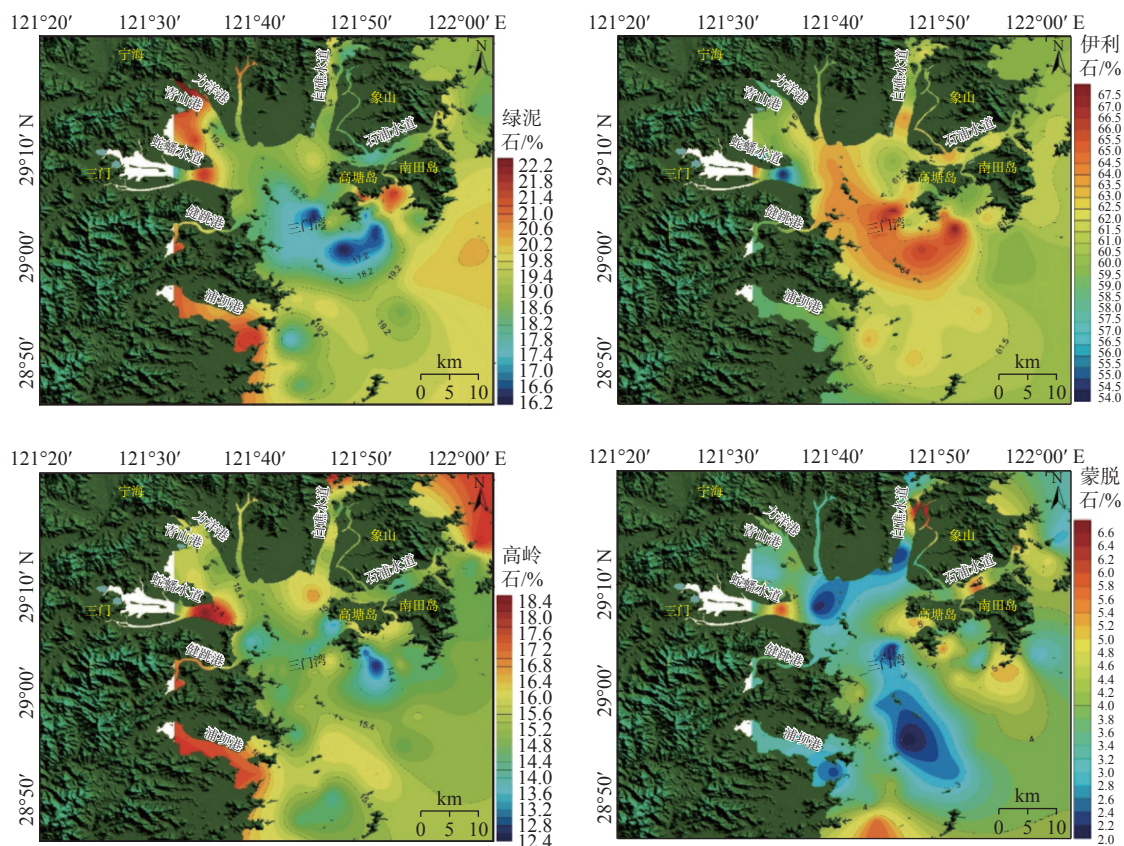


图 2 三门湾表层沉积物中黏土矿物相对含量分布

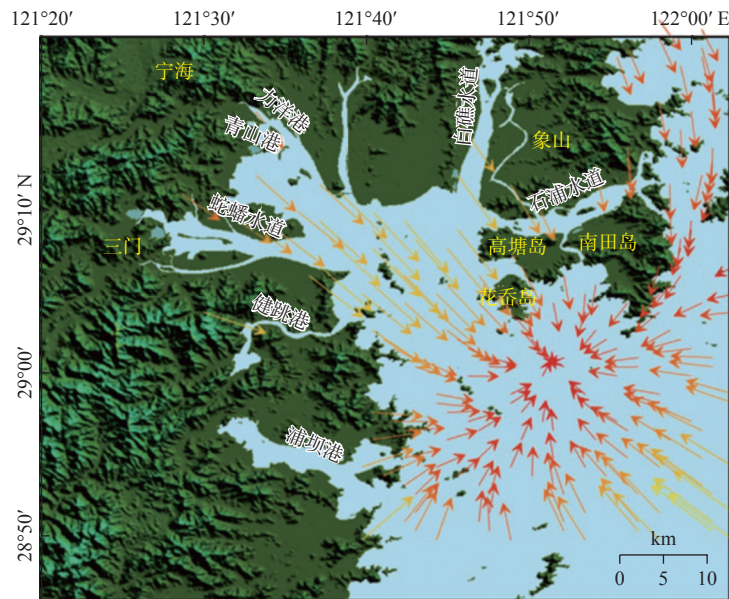
Fig.2 Spatial distribution of clay minerals in the Sanmen Bay

4 讨论

4.1 三门湾表层沉积物运移趋势

海洋沉积物是陆地与海域不同来源物质的混合物,在运移和沉降过程中会受到水动力作用的影响,沉积物粒度蕴含了丰富的海洋沉积学信息,粒度参数常常被用来研究海洋沉积物运移规律^[26]。

沉积物粒径趋势分析,可以从沉积物粒度参数的空间分布变化规律中提取沉积物净输运方向的信息^[27]。近年来,粒度趋势分析方法已广泛应用于海湾、陆架、河口等地区,并取得较好的结果^[28-32]。根据三门湾沉积物粒径趋势分析结果(图 3),在三门湾东北部,受浙闽沿岸流的影响,沉积物自北向南运移;在湾口附近,受涨潮流影响,沉积物自外海向湾内搬运;受落潮流影响,湾顶沉积物向湾口方向搬运,促使三门湾中部成为沉积中心。



图中箭头方向代表沉积物输运方向,箭头大小仅代表趋势的显著性

图 3 三门湾表层沉积物运移趋势

Fig.3 Transport trends of surface sediments in the Sanmen Bay

4.2 三门湾黏土矿物组合及分布的控制因素

海域沉积物黏土矿物组合及分布主要受流域源岩、研究区气候环境、水动力条件等因素控制^[33]。

研究表明,伊利石是由长石、云母等铝硅酸岩在寒冷少雨的气候条件下风化脱钾形成;绿泥石是由含硅、镁、铁、铝等阳离子的硅酸岩或变质岩在碱性条件下形成,常富集于气候寒冷干旱的地区;高岭石是由长石、云母、辉石等在酸性介质下经强烈淋滤作用形成,指示温暖潮湿、风化作用强烈的环境;蒙脱石常形成于干湿交替的气候环境下,是火山岩或各种火山成因的物质在碱性介质下风化变质的产物^[34-38]。

长江流域面积大,岩石类型复杂,上游源区岩石风化产生大量伊利石,中游和下游岩石风化有利于产生绿泥石和高岭石^[35,39],所以长江流域沉积物中黏土矿物以伊利石为主,其次为绿泥石和高岭石,

蒙脱石含量少^[40]。根据三门湾的沉积物运移趋势,湾外的沉积物通过潮汐作用进入湾内,在湾中部形成沉积中心,而前人研究表明湾外浙闽泥质区的沉积物主要来源于长江^[41]。因此,三门湾黏土矿物组成整体以伊利石为主,且在中部形成伊利石的高值区,高岭石、绿泥石和蒙脱石含量较低。浙闽河流域位于扬子和华南板块,中下游地区主要由基性火山岩组成^[42]。注入三门湾的河流多为短小的山溪性河流,其流域范围内的基性火山岩在亚热带季风气候的影响下容易风化形成绿泥石、高岭石和蒙脱石。在三门湾近岸的河口港汊区,沉积物受河流输入物质影响,绿泥石和高岭石含量较高。南田湾附近岛屿以凝灰岩为主,在亚热带季风气候下易风化形成绿泥石,且该地潮流速度小,潮动力弱,所以绿泥石在南田湾附近出现高值。

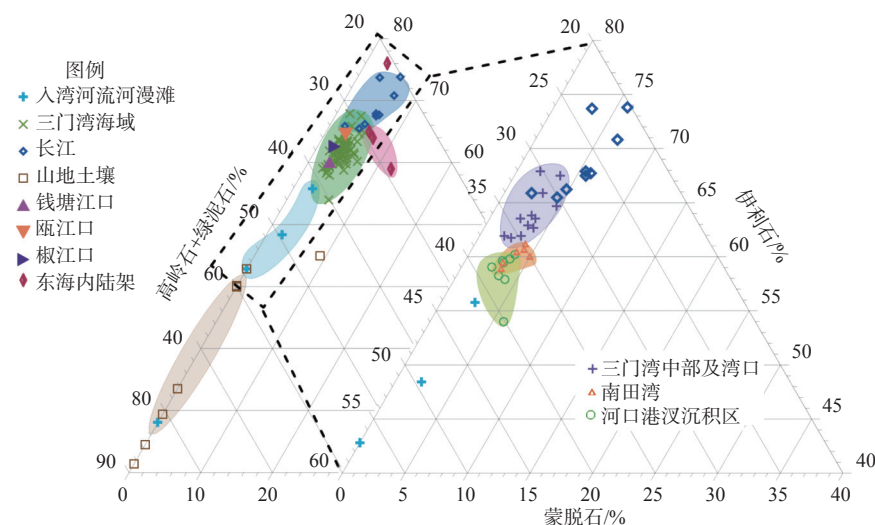
由此说明,流域源岩在不同气候条件下的风化造成三门湾不同区域黏土矿物组合及含量的差异,

海湾水动力条件影响了黏土矿物的分布。

4.3 三门湾沉积物来源分析

本文收集了长江、钱塘江口、椒江口、甌江口和浙闽泥质区的黏土矿物数据^[40, 43-45],与三门湾山地土壤、入湾河流河漫滩和海域黏土矿物数据作对比,绘制了黏土矿物端元分析图(图4),开展三门湾沉积物来源分析。黏土矿物端元分析表明(图4,表1),三门湾山地土壤中的黏土矿物以高岭石+绿泥石为主,其次是伊利石,蒙脱石含量最低。湾区

入海河流河漫滩沉积物中的黏土矿物伊利石含量增加,绿泥石+高岭石含量减少,蒙脱石含量最低。海域表层沉积物中的黏土矿物总体以高伊利石、低蒙脱石含量为主要特征,与椒江口、甌江口、钱塘江口和浙闽泥质区的沉积物黏土矿物组合特征相近。推测为:在浙闽沿岸流作用下,长江入海物质向南搬运,通过潮汐的泵吸作用进入河口和海湾,因而其黏土矿物组成与长江相近,皆具有较高的伊利石含量,因此,三门湾沉积物主要来源于长江。



长江、东海内陆架数据分别来自杨作升^[43]、陈丽蓉^[44];钱塘江口、椒江口、甌江口的数据来自周晓静等^[45]和梁小龙等^[40]

图4 伊利石-蒙脱石-高岭石+绿泥石端元图 (ISKc 图)

Fig.4 Triangular map with illite, smectite and kaolinite + chlorite as end members

三门湾表层沉积物中黏土矿物在不同区域存在差异(图4),在湾顶的河口港汉附近,表层沉积物中黏土矿物高岭石+绿泥石含量高,与入湾河流河漫滩沉积物中黏土矿物组合特征较为接近,表明河口港汉沉积物受本地河流输入的影响。南田湾沉积物中黏土矿物也具有高的高岭石+绿泥石含量,推测南田湾附近的南田岛、高塘岛、花岙岛等以凝灰岩为主,其风化易产生高岭石和绿泥石,且南田湾中潮流速小,潮动力弱,风化物入海后得以在湾内保存,因此,南田湾富绿泥石+高岭石特征受近源基岩风化作用的影响。在三门湾中部至湾口,伊利石含量明显偏高,高岭石+绿泥石含量降低,其黏土矿物组合特征与长江物质更为接近,说明三门湾中部至湾口表层沉积物中的沉积物主要来源于长江。前人根据三门湾潮流及沉积物粒度特征,同样认为湾外海域来沙是三门湾表层沉积物的主要来源,其中,由浙闽沿岸流向南输运的长江入海泥沙是其主

要物源^[22,46-47]。

综上所述,三门湾海域表层沉积物主要来源于长江,在靠近小河流河口位置一定程度受到沿岸河流输入影响,南田湾附近沉积物受到邻近岛屿基岩风化的影响。

5 结论

(1)三门湾表层沉积物黏土矿物中伊利石含量最高,平均含量为 61.66%;其次为绿泥石和高岭石,平均含量分别为 19.15% 和 15.34%;蒙脱石含量最低,平均含量为 3.85%。

(2)受三门湾流域源岩、气候及水动力条件的影响,伊利石高值区主要分布在三门湾中部,绿泥石和高岭石高值区分布在蛇蟠水道、青山港、力洋港、健跳港等靠近陆地的河口港汉和南田湾附近,蒙脱石主要在海湾近岸呈斑块状分布。

(3)黏土矿物端元模型分析表明三门湾沉积物主要来源于长江,山溪性短源入湾河流带来的沉积物仅影响了河口港汊区域,南田湾富绿泥石+高岭石特征受附近海岛凝灰岩风化的影响。

参考文献:

- [1] 刘启贞. 长江口细颗粒泥沙絮凝主要影响因子及其环境效应研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2007
- [2] 张富元, 章伟艳, 张霄宇, 等. 深海沉积物分类与命名[M]. 北京: 海洋出版社, 2013: 39-44.
- [3] 杨守业. 亚洲主要河流的沉积地球化学示踪研究进展[J]. *地球科学进展*, 2006, 21(6): 648-655.
- [4] 黄潘阳, 陈培雄, 来向华, 等. 三门湾2003—2013年间围涂工程对水动力环境的影响研究[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2017, 47(10): 91-98.
- [5] 刘晓凤, 段晓勇, 田元, 等. 三门湾水体营养盐变化及其对人类活动的响应[J]. *海洋地质前沿*, 2021, 37(5): 46-56.
- [6] YANG H Y, XUE B, JIN L X, et al. Polychlorinated biphenyls in surface sediments of Yueqing Bay, Xiangshan Bay, and Sanmen Bay in East China Sea[J]. *Chemosphere*, 2011, 83(2): 137-143.
- [7] 付雅晴, 印萍, 高飞, 等. 浙江省三门湾北部潮滩互花米草遥感研究[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2022, 52(1): 134-144.
- [8] YANG H Y, XUE B, YU P, et al. Residues and enantiomeric profiling of organochlorine pesticides in sediments from Yueqing Bay and Sanmen Bay, East China Sea[J]. *Chemosphere*, 2010, 80(6): 652-659.
- [9] 胡方西, 曹沛奎. 三门湾潮流运动特征及其与地貌发育的关系[J]. *海洋与湖泊*, 1981(3): 225-234.
- [10] 周阳, 叶钦, 施伟勇, 等. 浙江中部三门湾波浪特征统计分析[J]. *海洋学报*, 2021, 43(3): 13-23.
- [11] 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.
- [12] 陈晓英, 张杰, 马毅, 等. 近40 a来三门湾海岸线时空变化遥感监测与分析[J]. *海洋科学*, 2015, 39(2): 43-49.
- [13] 叶梦姚, 李加林, 史小丽, 等. 1990—2015年浙江省大陆岸线变迁与开发利用空间格局变化[J]. *地理研究*, 2017, 36(6): 1159-1170.
- [14] 梁静香, 周永东, 王忠明, 等. 三门湾大型底栖动物群落结构及其与环境因子的关系[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(9): 3187-3193.
- [15] 严润玄, 韩庆喜, 王晓波. 杭州湾和三门湾拖网大型底栖动物群落组成和多样性研究[J]. *海洋与湖泊*, 2020, 51(3): 484-493.
- [16] ZÖLLMER V, IRION G. Clay mineral and heavy metal distributions in the northeastern North Sea. *Marine Geology*, 1993, 111: 223-230.
- [17] 李安春, 张凯棣. 东海内陆架泥质沉积体研究进展[J]. *海洋与湖泊*, 2020, 51(4): 705-727.
- [18] 杨士雄, 叶思源, 何磊, 等. 渤海湾西岸全新世以来沉积物地球化学与黏土矿物特征及其对环境和气候的响应[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2021, 41(2): 75-87.
- [19] LIU Z F, COLIN C, LI X J, et al. Clay mineral distribution in surface sediments of the northeastern South China Sea and surrounding fluvial drainage basins: source and transport[J]. *Marine Geology*, 2010, 277(1/4): 48-60.
- [20] ZHAO Y, ZOU X, GAO J, et al. Clay mineralogy and source-to-sink transport processes of Changjiang River sediments in the estuarine and inner shelf areas of the East China Sea[J]. *Journal of Asian earth Sciences*, 2017, 152: 91-102.
- [21] 许建平, 杨士英. 三门湾海洋生态环境概述[J]. *能源工程*, 1992(2): 28-30.
- [22] 《中国海湾志》编纂委员会. 中国海湾志第五分册: 上海市和浙江省北部海湾[M]. 北京: 海洋出版社, 1992: 234-308.
- [23] BISCAYE P E. Mineralogy and sedimentation of recent deep-sea clay in the Atlantic Ocean and adjacent seas and oceans[J]. *GSA Bulletin*, 1965, 76(7): 803-832.
- [24] MCMANUS J. Grain size determination and interpretation [M]/Tucker M E. *Techniques in sedimentology*. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1988.
- [25] GAO S, COLLINS M. Analysis of grain size trends, for defining sediment transport pathways in marine environments[J]. *Journal of Coastal Research*, 1994, 10(1): 70-78.
- [26] 石学法, 刘升发, 乔淑卿, 等. 东海闽浙沿岸泥质区沉积特征与古环境记录[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2010, 30(4): 19-30.
- [27] GAO S, COLLINS M. The use of grain size trends in marine sediment dynamics: a review[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2001, 19(3): 265-271.
- [28] 石学法, 刘焱光, 任红, 等. 南黄海中部沉积物粒径趋势分析及搬运作用[J]. *科学通报*, 2002, 47(6): 452-456.
- [29] GAO S, COLLINS M, LANCKNEUS J, et al. Grain size trend associated with net sediment transport patterns: an example from the Belgian continental shelf[J]. *Marine Geology*, 1994: 171-185.
- [30] PEDREROS R, HOWA H L, MICHEL D. Application of Grain size trend analysis for the determination of sediment transport pathways in intertidal areas[J]. *Marine Geology*, 1996, 135: 35-49.
- [31] 刘兴兴, 张东, 韩飞. 基于PCA和WNN的潮滩沉积物粒度与运移趋势的遥感研究[J]. *海洋与湖泊*, 2019, 50(6): 1168-1180.
- [32] 汪亚平, 高抒, 贾建军. 胶州湾及临近海域沉积物分布特征和运移趋势[J]. *地理学报*, 2000, 55(4): 449-458.
- [33] 曹珂, 李梅娜, 刘金庆. 滦河三角洲表层沉积物黏土矿物特征[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2016, 36(6): 7-11.
- [34] 陈涛, 王欢, 张祖青, 等. 黏土矿物对古气候指示作用浅析[J]. *岩石矿物学杂志*, 2003, 22(4): 416-420.
- [35] 何梦颖, 郑洪波, 黄湘通, 等. 长江流域沉积物粘土矿物组合特征及物源指示意义[J]. *沉积学报*, 2011, 29(6): 544-551.
- [36] CHAMLEY H. *Clay Sedimentology*[M]. Berlin: Springer, 1989.
- [37] MEUNIER A. Les mécanismes de l'altération des granites et le rôle des microsystems. Etude des arenas du massif granitique de Parthenay(Deux-Sevres)[M]. *Mém. Soc. Geol. Fr.*, 1980.

- [38] CHAMLEY H. Clay formation through weathering[J]. *Clay Sedimentology*, 1989; 21-50.
- [39] 杨守业, 李从先. 长江与黄河沉积物元素组成及地质背景[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1999, 19(2): 21-28.
- [40] 梁小龙, 杨守业, 印萍, 等. 黄海与东海周边河流及泥质区沉积物黏土矿物的分布特征和控制因素[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2015, 35(6): 1-15.
- [41] 朱凤冠, 李秀珠, 高水土. 东海大陆架沉积物中粘土矿物的研究[J]. *东海海洋*, 1988, 6(1): 40-51.
- [42] 游仲华, 唐锦龙. 台湾海峡西部沉积物中粘土矿物的初步研究[J]. *沉积学报*, 1992, 10(4): 130-136.
- [43] 杨作升. 黄河、长江、珠江沉积物中黏土的矿物组合、化学特征及其与物源区气候环境的关系[J]. *海洋与湖沼*, 1988; 19.
- [44] 陈丽蓉. 中国海沉积矿物学[M]. 北京: 海洋出版社, 2008.
- [45] 周晓静, 高抒, 贾建军. 长江粘土矿物示踪标记稳定性的初步研究[J]. *海洋和湖沼*, 2003, 34(6): 683-692.
- [46] 刘晓凤. 三门湾水体营养盐变化及其对人类活动响应研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2021.
- [47] 夏小明. 三门湾潮汐河道系统的稳定性[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.

Clay mineral assemblages and provenance in the surface sediment of the Sanmen Bay

GUANG Xia^{1,2}, TIAN Yuan², YIN Ping^{2*}, YANG Shixiong², CHU Zhongxin¹, CAO Ke²,
GAO Fei², HAN Mingxing^{1,2}, GAO Bin^{1,2}, ZHANG Xu², TIAN Yuqing²

(1 Key Laboratory of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, Ministry of Education, College of Marine Geoscience, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2 Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266237, China)

Abstract: The content and composition of clay minerals from 83 surface samples in the Sanmen Bay were analyzed with XRD. Through grain size trends analysis and clay minerals assemblages characteristics of related rivers, the provenance of clay minerals and sediments resources of the Sanmen Bay were discussed. The results show that the majority of clay mineral in surface sediment in Sanmen Bay are illite, followed by kaolinite and chlorite, and the minority is smectite. The higher abundance of illite is distributed in the middle of the Sanmen Bay, and the higher kaolinite and chlorite located at the upper bay area either near the river estuaries or bay branches, and smectite displayed patchy distributions along the coast. The surface sediment in Sanmen Bay mainly comes from the Changjiang River, while sediments from small local mountainous rivers only affect the estuary area.

Key words: Sanmen Bay; clay minerals; grain size; provenance; small mountainous rivers