

舟山群岛表层沉积物粒度和黏土矿物分布特征与物源指示

沈昆明¹, 蒋玉波^{2*}, 李安龙¹, 翟 滨³

(1. 中国海洋大学 河口海岸研究所 海底科学与探测技术教育部重点实验室, 山东 青岛 266100;
2. 盐城师范学院 城市与规划学院, 江苏 盐城 224007; 3. 中国地质调查局 青岛海洋地质研究所, 山东 青岛 266071)

摘 要:通过对舟山群岛表层沉积物样品的粒度分析和黏土矿物含量测定,研究了表层沉积物的粒度分布特征及黏土矿物组成。利用 Flemming 三角图示法分析了研究区域的沉积动力环境,并探讨了沉积物的物质来源。结果表明,舟山群岛表层沉积物共有 5 种类型,其中粉砂含量最高,呈片状广泛分布于舟山群岛东部宽阔海域;研究区表层沉积物分选性较差,以正偏为主;沉积物样品在 Flemming 三角图上投影显示,粉砂沉积物集中在 D-II, E-II, E-III 区,砂质粉砂等沉积物零星分布在 D-II, C-II 及 S 区,表明研究区沉积物整体粒径较细、岛屿间水动力较强,开阔水域水动力较弱。研究区黏土矿物中伊利石为优势矿物,质量分数均值为 61.5%;其次为绿泥石,质量分数均值为 15.0%;高岭石和蒙脱石含量较少,质量分数均值分别为 12.7% 和 10.9%。黏土矿物组合类型以伊利石-绿泥石-高岭石-蒙脱石为主,伊利石-绿泥石-蒙脱石-高岭石次之,具有类长江型沉积物特征。舟山群岛表层沉积物以陆源成因为主,物质来源以长江为主、浙江河流入海输沙以及舟山群岛岩石风化产物为补充。

关键词:舟山群岛;粒度分析;黏土矿物;沉积动力环境;物质来源

中图分类号:P736

文献标识码:A

文章编号:1002-3682(2020)01-0024-10

doi:10.3969/j.issn.1002-3682. 2020.01.003

引用格式:SHEN K M, JIANG Y B, LI A L, et al. Distributions of grain size and clay minerals in the surface sediments of Zhoushan Islands and their material source indication[J]. Coastal Engineering, 2020, 39(1): 24-33. 沈昆明, 蒋玉波, 李安龙, 等. 舟山群岛表层沉积物粒度和黏土矿物分布特征与物源指示[J]. 海岸工程, 2020, 39(1): 24-33.

表层沉积物的粒度特征是海洋地质学中判断自然地理环境及水动力条件的重要标志,粒径参数广泛应用于沉积物的物质来源分析、沉积特征研究及沉积环境鉴别^[1-3]。因此,大量学者利用粒度数据反演沉积环境,并对表层沉积物的粒度分布特征、沉积动力环境和运移趋势等进行了深入研究。

舟山群岛及邻近海域位于东海陆架区西北部、长江口东南侧、杭州湾外缘。该海域海流主要由东海沿岸流、长江冲淡水、台湾暖流等组成,季节性变化显著。受沿岸流影响,长江口入海泥沙经舟山群岛向东南搬运到水深小于 60 m 的内陆架区域^[6-8]。舟山群岛及邻近海域海底地形较为平坦,整体自西北向东南缓倾,岛屿密布,潮流作用复杂,岛屿间以峡道沉积作用为主,泥沙输运具有北进南出特征^[9-10]。分析该海域表层沉积物的物质来源及分布规律,可为海洋资源可持续开发利用提供指导。

前人对舟山群岛表层沉积物的研究主要集中在沉积动力特征、沉积物输运通量、泥沙运移趋势等^[4]。研究表明舟山群岛及附近海域为典型往复流,岛屿间泥沙输运沿水道方向。目前对于研究区域的沉积物类型及粒度参数分布特征、沉积动力环境分区、沉积物物质来源分析研究尚有不足。本文则利用粒度数据,运用 Flemming 三角分类法,更全面分析沉积环境,同时选取部分站位样品进行黏土矿物和黏土矿物组合类型分析,探讨研究区域的物质来源^[5]。

收稿日期:2019-11-16

资助项目:江苏省高等学校自然科学研究面上项目——构造运动对苏北晚古生代页岩气的控制作用(18KJB170021)

作者简介:沈昆明(1996-),男,硕士研究生,主要从事海岸带开发利用及海洋沉积方面研究。E-mail:kunmingshen@stu.ouc.edu.cn

*** 通讯作者:**蒋玉波(1987-),男,讲师,博士,主要从事海洋地质方面研究。E-mail:jyb0317@163.com

(陈 靖 编辑)

1 材料与方法

表层沉积物样品于 2006 年采集,每个站位均采用 DGPS 差分定位,误差 ≤ 5 m。使用箱式取样器和柱状取样器取得 152 个表层沉积物样品,取样位置见图 1,其中柱状取样器所取的柱状样选取表层样,取 149 个样品和 50 个样品分别进行粒度与黏土矿物分析。

含砾沉积物样品采用筛析法,无砾沉积物样品采用激光法。无砾沉积物先进行预处理:取适量样品混合均匀后,先后加入适量 30% 的双氧水、浓度为 3 mol/L 的盐酸,以去除样品中的有机质与碳酸盐,然后用蒸馏水进行离心清洗(设置转速 4 000 转/min,时间为 10 min,离心 2~3 次),之后添加 0.5 mol/L $\text{Na}_6\text{P}_{10}\text{O}_{18}$ 溶液浸泡样品。粒度分析工作在南京大学海岸与海岛开发教育部重点实验室粒度分析室完成,使用的仪器为英国 Malvern 公司生产的 Mastersizer 2000 型激光粒度仪,其中仪器测量范围为 0.02~2 000 μm ,多次测量的相对误差不大于 3%。黏土矿物分析工作在国土资源部海洋地质实验检测中心完成,使用的仪器为日本理学 D/Max-rA 型 X 射线衍射仪,Cu 靶,仪器工作管压 40 KV,管流 70 mA,步进长度(2 θ)0.02°,选用经乙二醇处理样品的定向片的 X 射线衍射图谱对黏土矿物进行分析。

表层沉积物粒度分析中沉积物粒级采用 Udden-Wentworth 的 ϕ 粒级标准,利用 MaMcnus 的矩值法得出粒度参数(平均粒径、分选系数、偏态、峰态),沉积物的分类和定名采用利用 Folk 三端元分类法^[11]。黏土矿物的半定量分析是采用 Biscaye 方法(1965)计算 4 种黏土矿物(蒙脱石、伊利石、高岭石和绿泥石)的相对含量,蒙脱石(17Å):伊利石(10Å):高岭石+绿泥石(7Å)强度因子取 1:4:2。

利用 Flemming 三角分类图划分研究区沉积动力环境,采用 Flemming 三角图解法对研究区域表层沉积物的动力环境特征进行分析,依据沉积物中砂、粉砂和黏土相对含量大小及其粒度参数特征将三角图划分为 25 个不同区域,以区分其沉积动力环境和亚环境。沉积动力分区由两部分组成,以砂的质量分数为节点作为水平结构分类标志线,依次为 5%,25%,50%,75%和 95%,构成 S-E 共 6 个区域,从 S 到 E 粒径逐渐变细;以黏土和粉砂质量分数为节点作为三角结构分类标志线,依次为 10%,25%,50%,75%和 90%,构成 I~VI 六个水动力分区,投影点离黏土和粉砂端越近表明水动力越弱^[12-14]。

2 结 果

2.1 表层沉积物粒度特征

2.1.1 沉积物类型及其分布特征

采用 folk 三角分类命名法将研究区域表层沉积物进行分类,沉积物类型及其含量见表 1。其中,共有 5 个

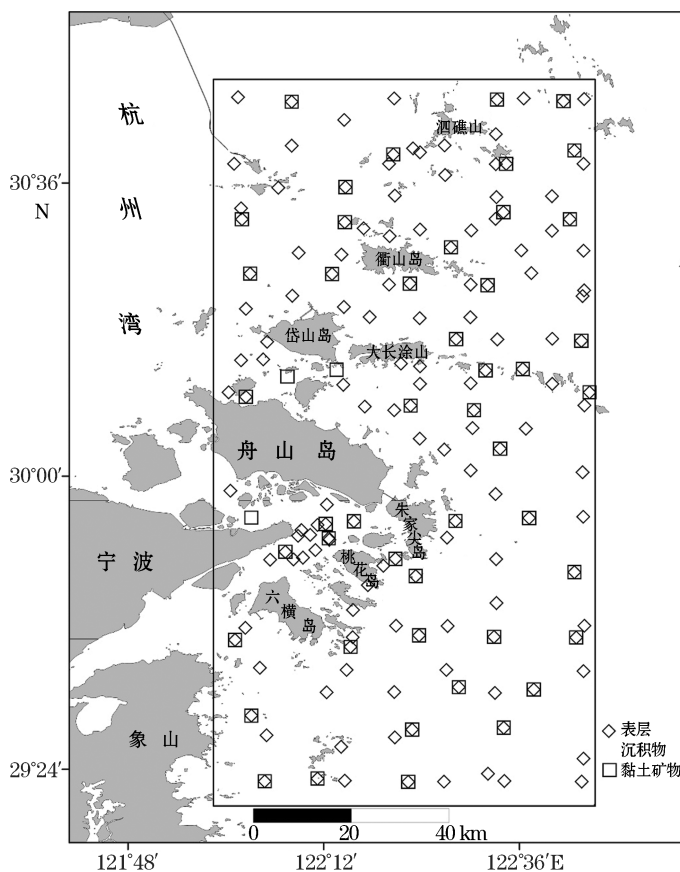


图 1 舟山群岛周边海域表层沉积物取样站位分布

Fig.1 Location of the surface sediment sampling stations in the sea areas around Zhoushan Islands

站位含砾,含砾站位的砂的含量均远高于粉砂、砾和黏土含量总和,含砾表层沉积物分为砂(S)和砾质砂(gS)两种类型。共有 144 个站位不含砾,多数站位的粉砂含量高于砂和黏土含量,无砾表层沉积物分为粉砂(Z)、砂质粉砂(sZ)、粉砂质砂(zS)和砂(S)四种类型,其中粉砂和砂质粉砂分别占样品总数高达 80.5%和 14.1%。

表 1 表层沉积物类型及质量分数
Table 1 Types and contents of the surface sediments

类 型	样品数量	质量分数/%	类 型	样品数量	质量分数/%
砾质砂(gS)	1	0.67	粉砂质砂(zS)	2	1.344
粉砂(Z)	120	80.54	砂(S)	5	3.36
砂质粉砂(sZ)	21	14.094			

研究区域内沉积物分布具有较大的空间异质性(图 2),其中粉砂分布范围最广,砂质粉砂和砂次之,砾分布范围最小:

1)粉砂主要分布于舟山群岛的开阔海域,呈片状分布在舟山群岛海域,如北部、东部和南部海域,而在岛屿附近分布较少,反映了该海域水动力较强。平均粒径为 $6.1\phi\sim7.3\phi$,均值为 6.77ϕ ;分选系数为 $1.38\sim1.90$,均值为 1.66;偏态为 $-0.82\sim1.61$,均值为 1.22,以正偏为主。

2)砂质粉砂主要分布在衢山岛至桃花岛岛屿之间的附近海域,如衢山岛西部和南部、岱山岛南部、大长涂山南部和桃花岛南部小范围海域,在岛屿附近分布广泛。平均粒径为 $5.19\phi\sim6.27\phi$,均值为 5.92;分选系数为 $1.8\sim2.1$,均值为 1.93;偏态在 $0.91\sim1.93$,均值为 1.56,以正偏态为主。

3)砂主要分布于舟山岛与桃花岛之间的峡道区域。表层沉积物平均粒径为 $0.84\phi\sim1.64\phi$,均值为 1.36;分选系数为 $0.79\sim1.20$,均值为 0.95;偏态为 $-0.58\sim0.97$,均值为 0.57,以正偏态为主。

2.1.2 粒度参数及其分布特征

舟山群岛表层沉积物平均粒径多介于 $5.5\phi\sim7.5\phi$,平均值为 6.4ϕ ,泥沙颗粒总体较细,沉积动力较弱(图 3a)。平均粒径 $<5.5\phi$ 反映的是砾质砂粗颗粒沉积物分布,主要分布在小洋山、舟山岛与桃花岛之间的峡道及部分在朱家尖岛东北区域,其水动力较强,且峡道内水流具有往复流特征,潮流作用下发生峡道沉积。平均粒径 $5.5\phi\sim6.5\phi$ 反映的是以粉砂为主,砂质粉砂次之的细颗粒沉积物分布,主要分布在研究区域的东部岛屿附近区域。平均粒径 $>6.5\phi$ 反映的是粉砂为主的细颗粒沉积物分布,主要分布在研究区域的东部和南部开阔海域,呈南北走向分布,具有一定的沉积分异特征。

潮流、入海径流及物质来源等是影响舟山群岛海域沉积物粒度分选差异的重要因素。舟山群岛表层沉积物分选系数多介于 $1.5\sim2.2$,分选为差—很差,自西向东呈阶梯状分布特征,研究区东部分选较好(图 3b)。分选系数小于 1.6,分布在舟山岛与六横岛之间的峡道内,与砂粒级富集区域范围相对应,这与岛屿岩石遭受外地质作用形成碎屑物入海沉积及较好的沉积分选作用有关。大部分研究区域分选系数介于 $1.6\sim$

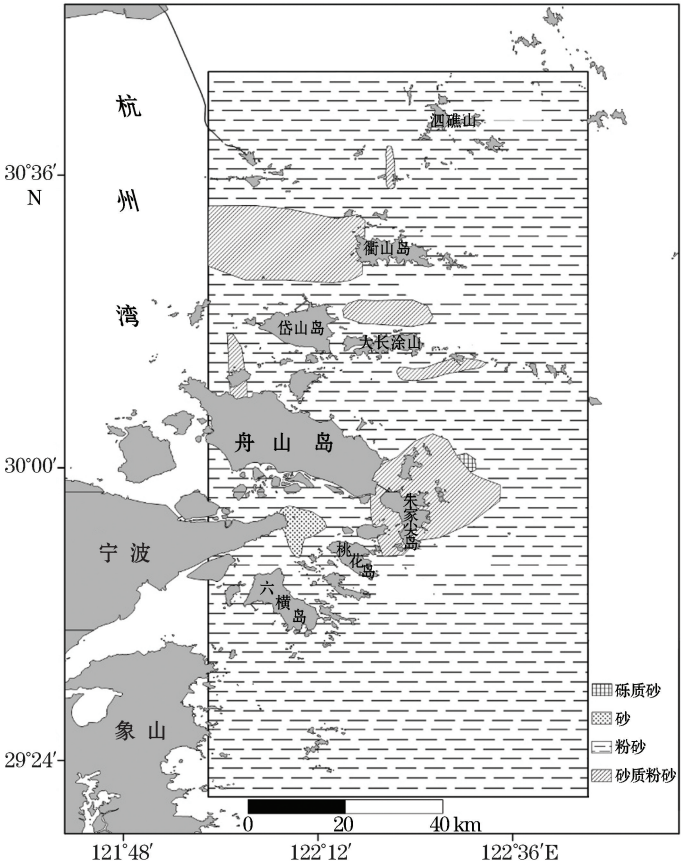


图 2 研究区沉积物类型及分布

Fig.2 Sediment types and their distributions in the study area

2.2,反映了研究区水动力条件复杂及物质来源多样性特征。分选系数 >2.2 零星分布在桃花岛南部和朱家尖岛东南部,大致分布在砂质粉砂富集区域范围内,位于砂与粉砂粒级之间的过渡混合地段。

舟山群岛海域表层沉积物偏态为 $-0.8\sim3.1$,以正偏为主。研究区偏态与其分选系数对应关系良好,自西向东呈阶梯状分布,同时由岸向海偏态值逐渐减小。呈负偏态的沉积物零星分布在舟山岛南部峡道及研究区东南部。研究区分选系数与偏态关系表明沉积物介于河流砂与海滩砂之间,以河流砂为主,是入海径流及潮汐共同作用的结果(图 3c)。

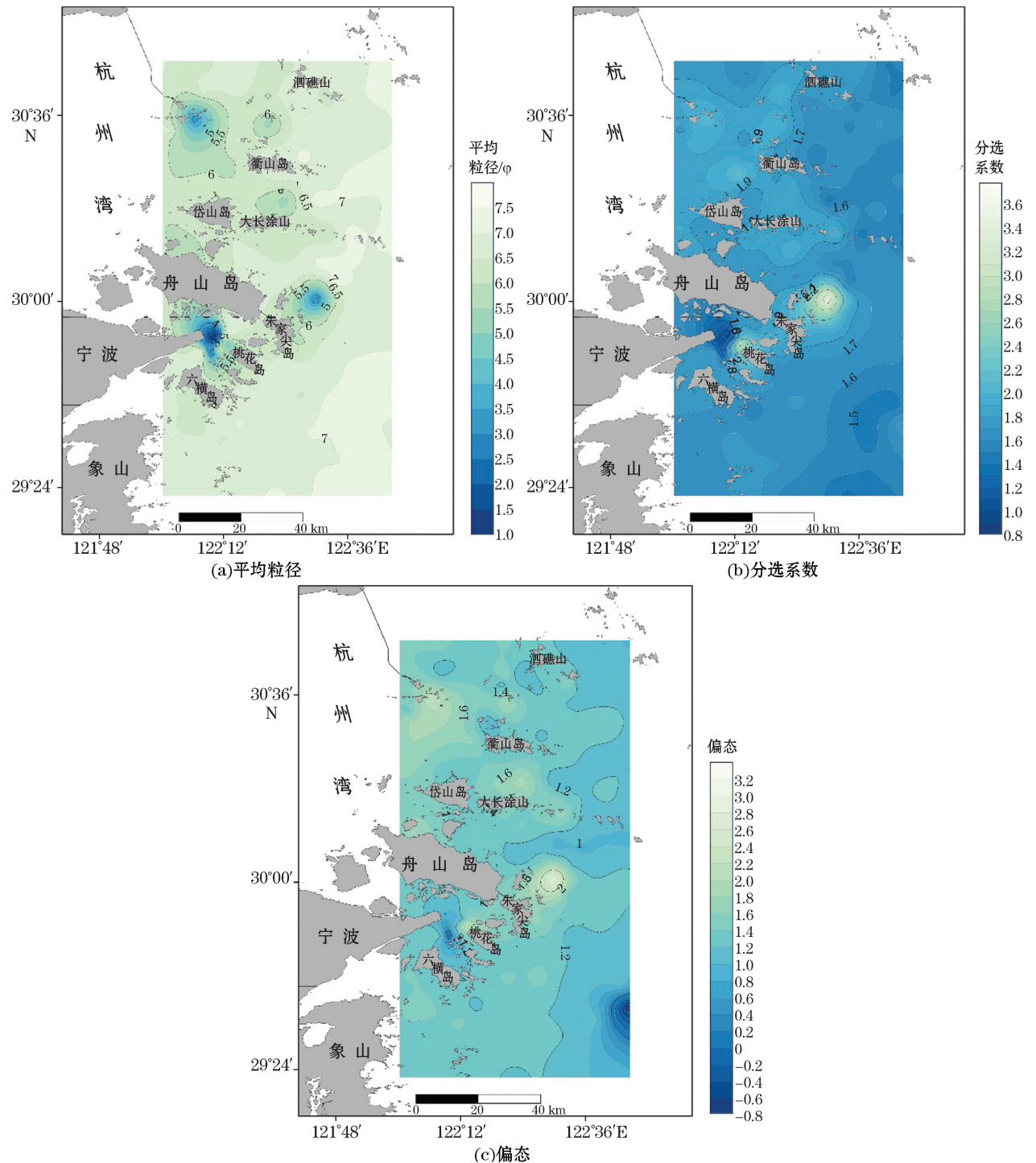


图 3 表层沉积物粒度参数平面展布特征

Fig.3 Horizontal distributions of grain-size parameters of the surface sediments

2.2 表层黏土矿物组成

舟山群岛海域黏土矿物类型为蒙脱石、伊利石、高岭石和伊利石。黏土矿物质量分数相差显著,总体上伊利石族为优势矿物,平均值为 61.5%;其次为绿泥石,平均值为 15.0%;高岭石和蒙脱石含量较少,平均值依次为 12.7%和 10.9%,统计结果见表 2^[15-18]。

表 2 黏土矿物质量分数^[15-18]
Table 2 Contents of clay minerals^[15-18]

黏土矿物	质量分数/%			
	最大值	最小值	平均值	变异系数
蒙脱石	16.3	5.4	10.9	23.5
伊利石	72.0	56.4	61.5	4.35
高岭石	15.7	9.0	12.7	11.04
绿泥石	19.6	12.0	15.0	9.12

2.2.1 黏土矿物分布特征

伊利石在黏土矿物中含量最高,质量分数为 56.4%~72.0%,均值为 61.5%。高值区(>64.5%)零星分布在研究区东北部和朱家尖岛南部海域,受岛屿水动力较强影响,伊利石经搬运易沉积在开阔海域;低值区(<60.0%)集中在舟山岛北部和大长涂山附近海域。其分布规律为研究区由北向南高低值呈间隔分布特征(图 4a)。

高岭石在黏土矿物中含量较低,质量分数为 9.0%~15.7%,均值为 12.7%。高值区(>15.0%)零星分布在舟山岛北部、研究区南部和北部海域;低值区(<12.0%)主要集中朱家尖岛南部和四礁山东北部海域。其分布规律为研究区由东向西高低值呈间隔分布特征(图 4b)。

绿泥石在黏土矿物中含量次之,质量分数为 12.0%~19.6%,均值为 15.0%。高值区(>16.5%)零星分布在在研究区的西南部及舟山岛北部海域;低值区(<15.5%)条带状分布在研究区东南和北部海域。其分布规律为研究区由东向西高低值呈间隔分布特征(图 4c)。

蒙脱石在黏土矿物中含量最低,质量分数为 5.4%~16.3%,均值为 10.9%。高值区(>14.0%)集中在研究区西南及舟山岛北部海域;低值区(<10.0%)零星分布在朱家尖岛及衢山岛东西两侧海域。其分布规律为研究区由南向北高低值呈间隔分布特征(图 4d)。

2.2.2 黏土矿物组合类型

根据表层沉积物中各黏土矿物相对含量的大小可分为 5 种组合类型(图 5):伊利石-绿泥石-高岭石-蒙脱石(I 型);伊利石-绿泥石-蒙脱石-高岭石(II 型);伊利石-蒙脱石-绿泥石-高岭石(III 型);伊利石-高岭石-绿泥石-蒙脱石(IV 型);伊利石-绿泥石-高岭石(V 型)。表层沉积物以 I 型含量最高,达到 66%,II 型含量次之,III 型、IV 型和 V 型含量占比很小。

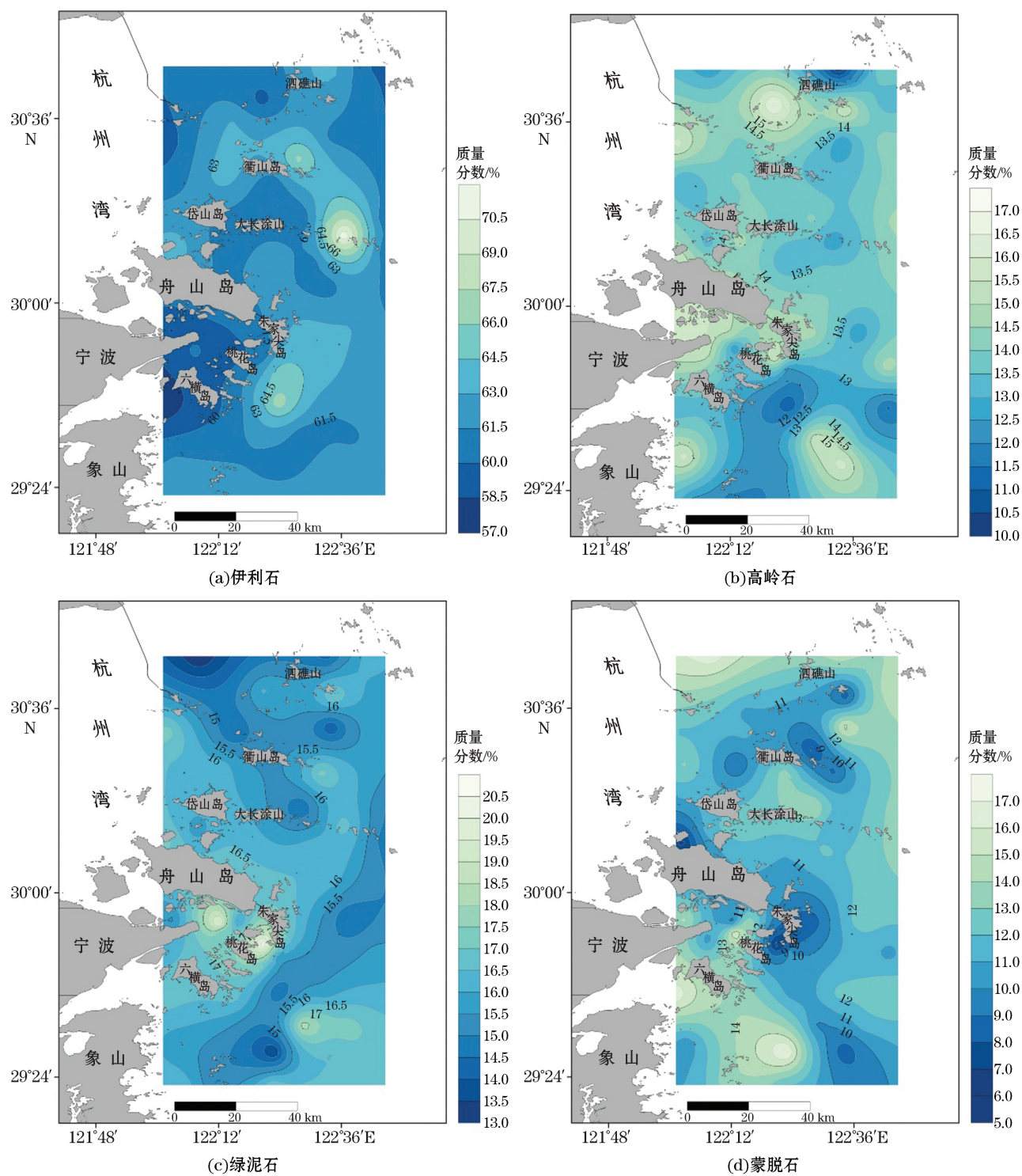


图4 黏土矿物平面展布特征

Fig.4 Horizontal distributions of clay minerals in the surface sediments

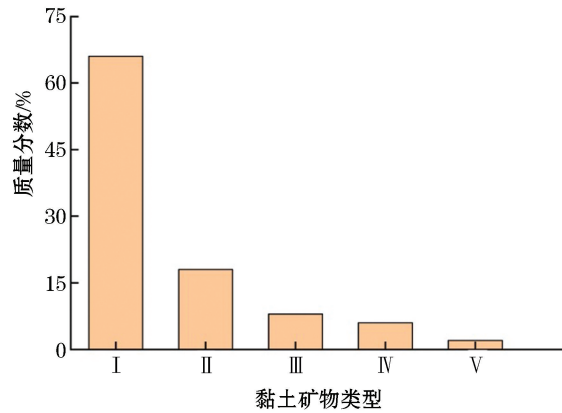


图5 黏土矿物组合类型比例

Fig.5 Ratio of the types of clay mineral assemblage

3 讨论

3.1 沉积动力分区

研究区域沉积物样品投影点主要分布在D-II、E-II、E-III区域,表明研究区域沉积物粒径较细,水动力较弱,与已有研究较为一致(图6)。粉砂投于D-II、E-II、E-III区域,砂质粉砂投于D-II、C-II区域,砂投于S区域。该区域受到波浪与潮流共同作用影响,群岛内为往复流,涨潮平均流速最大可达82 cm/s,落潮平均流速最大可达96 cm/s,结合岛屿峡道特征,形成高能沉积环境下的粗粒沉积物,集中于舟山岛附近^[4]。开阔海域由于水深较大,波浪能与潮流能影响有限,水动力变弱,从而沉积物粒径逐渐变细,形成片状分布的细粒沉积物^[19](图6)。

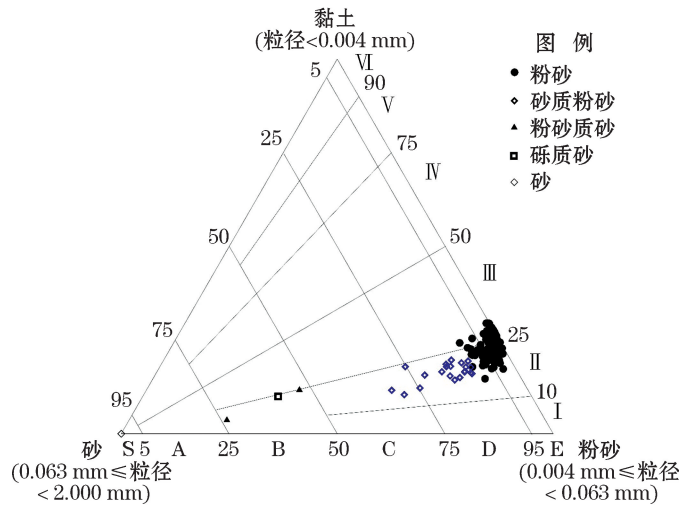


图6 沉积动力分区

Fig.6 Districts of sedimentary dynamics

3.2 表层沉积物物源探讨

已有的大量研究表明,东海陆架区黏土矿物分为3种类型:1)类黄河型沉积物,物源来自于废黄河口及部分特定黄海区域,黏土矿物组合类型为伊利石-蒙脱石-高岭石-绿泥石和伊利石-蒙脱石-绿泥石-高岭石(III型);2)类长江型沉积物,物源来自于长江、浙江杭州湾、瓯江口及东海内陆架沉积物,黏土矿物组合类型为伊利石-绿泥石-高岭石-蒙脱石(I型)和伊利石-绿泥石-蒙脱石-高岭石(II型);3)类台湾河流型沉积物,物源来自于中国大陆及台湾西部河流沉积物^[20-21]。东海陆架表层黏土矿物含量空间变化主要受入海物源及海流等水动力条件因素影响^[22]。

黏土矿物类型及其含量主要受源岩和气候条件的影响。研究区东部为杭州湾外缘,杭州湾入海径流属于山溪性强潮河流,主要有钱塘江、飞云江等,具有流域短、入海通量小特点,且受到海流作用会引起回淤现象^[23]。研究区北部紧邻长江口,长江裹挟大量泥沙入海,其径流作为东海沿岸流一部分,向南流动过程中杭州湾径流不断加入,最后同长江冲淡水汇合一起将泥沙输运到舟山群岛海域。同时舟山群岛海域岛屿分布广泛,峡道众多,岛屿岩石发生风化、剥蚀、搬运入海,在潮汐作用下抵达适宜场所后,发生峡道沉积^[24]。

黏土矿物组合类型中 I 型含量最高,达到 66%;II 型含量次之,即类长江型沉积物占比最大。长江流域面积达 180 万 m^2 ,广泛发育支流,区域构造复杂,主要位于扬子地台之上,流域内岩石类型复杂,导致沉积物物源复杂,难以找到一种或几种特征性岩石与沉积物组成对应^[25-26]。气候以暖温带湿润、潮湿气候为主,物理侵蚀与化学侵蚀比为 2~5,域内以化学风化为主,物理风化为辅,这是由于 Na、Ga 和 Mg 易遭受淋失及迁移到水体中,而 Fe、Al、K 和 Mn 等元素则易富集在表层带中。这种环境导致高岭石含量相对较高,蒙脱石含量相对较低,代表了弱酸-弱碱性黏土矿物形成条件,形成类长江型沉积物^[27-29]。

4 结 论

本文运用粒度分析及 X 射线衍射分析方法,对研究区域的表层沉积物的沉积物类型、粒度参数分布特征和黏土矿物组合类型进行分析研究,同时利用 Flemming 三角图分类法对沉积环境分区,并结合已有研究讨论了表层沉积物的物源,主要结论如下:

1) 舟山群岛海域表层沉积物类型共有 5 种:粉砂、砂质粉砂、砂、粉砂质砂、砾质砂。其中以粉砂为主,呈片状广泛分布于研究区域的东部及南部开阔海域。砂质沉积物多分布于舟山岛北部,具有峡道沉积特征。总体上沉积物粒径由陆向海逐渐变细,分选性整体较差,大部分区域以正偏为主。

2) 根据表层沉积物样品在 Flemming 三角图投影发现,采样点主要落在 D-II、E-II、E-III 沉积动力分区,以粉砂沉积物为主;部分落在 D-II、C-II 和 S 分区,以砂质粉砂沉积物为主。表明研究区岛屿间以潮流作用为主,往复流作用显著,岛屿间水动力明显强于开阔海域,峡道水动力条件较强。整体沉积物粒径较细,水动力较弱。

3) 研究区域的黏土矿物按质量分数由大到小排列依次为伊利石(56.4%~72.0%,均值为 61.5%)、绿泥石(12.0%~19.6%,均值为 15.0%)、高岭石(9.0%~15.7%,均值为 12.7%)和蒙脱石(5.4%~16.3%,均值为 10.9%)。伊利石集中在研究区域东部及西南海域;绿泥石集中在研究区域的西南岛屿处及东南开阔海域;高岭石集中在舟山岛南部及研究区域的西南部;蒙脱石集中在衢山岛西部及桃花岛西部海域。表层沉积物黏土矿物组合类型以伊利石-绿泥石-高岭石-蒙脱石为主,其次为伊利石-绿泥石-蒙脱石-高岭石。研究区域物质来源以长江入海泥沙为主,浙江入海径流输沙,以及舟山群岛岩石风化产物为补充。

参考文献(References):

- [1] GAO S. Sediment size trends and marine sediment dynamics[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 1998(4): 241-245. 高抒. 沉积物粒径趋势与海洋沉积动力学[J]. 中国科学基金, 1998(4): 241-245.
- [2] CHENG P, GAO S. Net sediment transport patterns over the northwestern Yellow Sea, based upon grain size trend analysis[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2000, 31(6): 604-615. 程鹏, 高抒. 北黄海西部海底沉积物的粒度特征和净输运趋势[J]. 海洋与湖沼, 2000, 31(6): 604-615.
- [3] WANG W, LI A C, XU F J, et al. Distribution of surface sediments and sedimentary environment in the north Yellow Sea[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2009, 40(5): 525-531. 王伟, 李安春, 徐方建, 等. 北黄海表层沉积物粒度分布特征及其沉积环境分析[J]. 海洋与湖沼, 2009, 40(5): 525-531.
- [4] HU R J, WU J Z, ZHU L H, et al. Preliminary study on economic characteristics and agar characteristics of two new strains of gracilaria lemaneiformis[J]. Periodical of Ocean University of China, 2009, 39(3): 495-500. 胡日军, 吴建政, 朱龙海, 等. 东海舟山群岛海域表层沉积物运移特性[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2009, 39(3): 495-500.
- [5] FENG L, FENG X L, SONG Y, et al. Surface sediment grain size and clay minerals distribution and transport in the Laizhou Bay[J]. Marine Sciences, 2018, 42(2): 1-9. 冯利, 冯秀丽, 宋涅, 等. 莱州湾表层沉积物粒度和黏土矿物分布特征与运移趋势分析[J]. 海洋科学, 2018, 42(2): 1-9.
- [6] SHEN H T, LI J F, ZHU H F, et al. Transport of the suspended sediment in the Changjiang Estuary[J]. Journal of East China Normal University (Natural Science), 1986(1): 82-83. 沈焕庭, 李九发, 朱慧芳, 等. 长江河口悬沙输移特性[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 1986(1): 82-83.
- [7] LIU J P, XU K H, LI A C, et al. Flux and fate of Yangtze River sediment delivered to the East China Sea[J]. Geomorphology, 2007, 85

(3-4): 208-224.

- [8] MILLIMAN J D, HUANG T S, ZUO S Y, et al. Transport and deposition of river sediment in the Changjiang estuary and adjacent continental shelf[J]. *Continental Shelf Research*, 1985, 4(1-2): 37-45.
- [9] YANG Z S, GAO W B. Macro pattern of transport of the Yellow Sea east coast shelf suspension to its eastern deep sea area[J]. *Haiyang Xuebao*, 1992, 14(2): 82-90. 杨作升, 高文兵. 黄东海陆架悬浮体向其东部深海区输送的宏观格局[J]. *海洋学报*, 1992, 14(2): 82-90.
- [10] SUN Y, HUANG W S. The siltation process and silt sources of the Zhejiang coast[J]. *Donghai Marine Science*, 1984(4): 38-46. 孙英, 黄文盛. 浙江海岸的淤涨及其泥沙来源[J]. *东海海洋*, 1984(4): 38-46.
- [11] 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.
- [12] SONG H Y, LIU J Q, YIN P, et al. Grain size characteristics of the surface sediment and sedimentary environment in Rizhao Offshore [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2016, 46(3): 96-104. 宋红瑛, 刘金庆, 印萍, 等. 日照近海表层沉积物粒度特征与沉积环境[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2016, 46(3): 96-104.
- [13] JIANG F, LI A L, ZHUANG Z Y. Seafloor topography and surface sediment characteristics in the western sea area of the Rizhao Port [J]. *Coastal Engineering*, 2016, 35(3): 32-42. 江飞, 李安龙, 庄振业. 日照港西部海域海底地形与表层沉积特征[J]. *海岸工程*, 2016, 35(3): 32-42.
- [14] FLEMMING B W. A revised textural classification of gravel-free muddy sediments on the basis of ternary diagrams[J]. *Continental Shelf Research*, 2000, 20(10): 1125-1137.
- [15] PARK B K, HAN S J. The distribution of clay minerals in recent sediments of the Korea Strait[J]. *Sedimentary Geology*, 1984, 41(2-4): 173-184.
- [16] YU Y Y, WANG Y H, LI R H. Clay minerals distribution pattern in surface sediments of western Bohai and their provenance implications[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2017, 37(1): 57-64. 虞义勇, 王永红, 李日辉, 等. 渤海西部表层沉积物中黏土矿物分布特征及物源指示[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2017, 37(1): 57-64.
- [17] LAN X H, ZHANG Z H, LI R H, et al. Distribution of clay minerals in surface sediments off Yangtze River Estuary[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2012, 14(2): 56-69. 蓝先洪, 张志珣, 李日辉, 等. 长江口外表层沉积物黏土矿物分布特征[J]. *海洋地质前沿*, 2012, 14(2): 56-69.
- [18] QIU Y. Distribution characteristics and controlling factors of clay minerals in surface sediments from the central and southern South China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2007(5): 1-7. 邱燕. 南海中南部表层沉积物黏土矿物分布及控制因素[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2007(5): 1-7.
- [19] TANG B G. Preliminary study on the modern sedimentary environment and sedimentary characteristics in the western part of the East China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1992, 3(4): 31-42. 唐保根. 东海西部海域现代沉积环境分区及沉积特征的初步研究[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1992, 3(4): 31-42.
- [20] LIANG X L, YANG S Y, YIN P, et al. Distribution of clay mineral assemblages in the rivers entering Yellow Sea and East China Sea and the muddy shelf deposits and control factors[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2015, 35(6): 1-15. 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.
- [21] ZHOU X J, LI A C, WAN S M, et al. Clay minerals in surficial sediments of the East China Sea Shelf: distribution and provenance[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2010, 41(5): 667-675. 周晓静, 李安春, 万世明, 等. 东海陆架表层沉积物粘土矿物组成分布特征及来源[J]. *海洋与湖沼*, 2010, 41(5): 667-675.
- [22] ZHU F G, LI X Z, GAO S T. Research of clay minerals of sediments on the continental shelf of the East China Sea[J]. *Donghai Marine Science*, 1988(1): 44-55. 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(1): 44-55.
- [23] JIANG G J, FENG H Z. The Characteristics of hydro-sediment of Jinqing tidal flat in Taizhou Bay, Zhejiang[J]. *Journal of Zhejiang University (Science Edition)*, 1992, 19(2): 215-222. 蒋国俊, 冯怀珍. 浙江台州湾金清滩水力泥沙特性[J]. *浙江大学学报(理学版)*, 1992, 19(2): 215-222.
- [24] YANG S Y, LI C X. Characteristic element compositions of the Yangtze and the Yellow River sediments and their geological background [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1999, 19(2): 19-26. 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): 19-26.
- [25] JIANG G J. The characteristics of hydro-dynamics and sediments in the strait channels of Zhoushan Islands area[J]. *Journal of Zhejiang University (Science Edition)*, 2001, 28(1): 82-91. 蒋国俊. 舟山群岛水道水动力及沉积特性[J]. *浙江大学学报(理学版)*, 2001, 28(1): 82-91.
- [26] FAN D J, YANG Z S, MAO D, et al. Clay minerals and geochemistry of the sediments from the Yangtze and Yellow Rivers[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2001, 21(4): 7-12. 范德江, 杨作升, 毛登, 等. 长江与黄河沉积物中粘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.

- [27] CHEN J S. Physical and chemical erosion of rivers in China[J]. Chinese Science Bulletin, 1984, 29(15): 932-936. 陈静生. 我国河流的物理与化学侵蚀作用[J]. 科学通报, 1984, 29(15): 932-936.
- [28] SAWYER E W. The influence of source rock type, chemical weathering and sorting on the geochemistry of clastic sediments from the Quetico Metasedimentary Belt, Superior Province, Canada[J]. Chemical Geology, 1986, 55(1-2): 0-95.
- [29] GUO Z G, YANG Z S, FAN D J, et al. The geochemical characteristics of Ca, Sr, Ba in the surface sediments of the middle continental shelf mud area and its ambient areas in the East China Sea[J]. Periodical of Ocean University of China, 1998, 28(3): 481-488. 郭志刚, 杨作升, 范德江, 等. 东海中陆架泥质区及其周边底质中钙、锶、钡的地球化学特征[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 1998, 28(3): 481-488.

Distributions of Grain Size and Clay Minerals in the Surface Sediments of Zhoushan Islands and Their Material Source Indication

SHEN Kun-ming¹, JIANG Yu-bo², LI An-long¹, ZHAI Bin²

(1. Ocean University of China, Institute of Estuarine and Coastal Studies,

Key Lab of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, Ministry of Education, Qingdao 266003, China;

2. Yancheng Teachers University City and Planning Institute, Yancheng 224002, China;

3. Qingdao Institute of marine geology, China Geological Survey, Qingdao 266003, China)

Abstract: Grain-size distribution and clay mineral composition in the surface sediments from the sea areas of Zhoushan Islands are studied through grain-size analysis and clay mineral identification. The sedimentary dynamic environment in the study area is analyzed by means of Flemming triangle diagram and the material sources of the sediments are discussed. The results show that there are five types of surface sediments in the sea areas of Zhoushan Islands, of which silt is the highest in content and is widely distributed in the eastern broad sea area of Zhoushan Islands. The surface sediments in the study area are poorly sorted and dominant with a positive skewness. On the Flemming triangle diagram, silt is mainly concentrated in D-II, E-II, E-III areas and sandy silt is scattered in D-II, C-II and S areas, indicating that in the study area the overall sediments are relatively fine and the hydrodynamics is strong between the islands and weak in the open waters. Clay minerals in the study area are dominant by illite, with an average content of 61.5%, followed by chlorite, with an average content of 15.0%. Kaolinite and montmorillonite are less in their contents, with the average values being 12.7% and 10.9% respectively. The dominant type of clay mineral assemblage is illite-chlorite-kaolinite-montmorillonite, followed by illite-chlorite-montmorillonite-kaolinite, showing the characteristics of Changjiang-like sediments. The surface sediments in the sea areas of Zhoushan Islands are dominantly terrestrial in origin and their material sources are mainly from the Changjiang River, and then the materials delivered by the rivers in Zhejiang and the weathered rocks in Zhoushan Islands.

Key words: Zhoushan Islands; grain-size analysis; clay minerals; sedimentary dynamic environment; material sources

Received: November 16, 2019