

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.

HAN Zongzhu, WANG Yibing, SUN Yuangao, et al. Composition of minerals in surface sediments of the Yellow Sea and their provenance[J]. Marine Geology Frontiers, 2022, 38(4): 10-19.

黄海表层沉积物的矿物组成特征及其物源分析

韩宗珠^{1,2}, 王一冰¹, 孙苑高¹, 艾丽娜³, 吴晓^{1,2}, 杨叶飘²

(1 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266100; 2 海底科学与探测技术教育部重点实验室, 青岛 266100;

3 自然资源部第一海洋研究所, 青岛 266100)

摘要:以黄海 66 个表层沉积物为研究对象, 通过粒度、黏土矿物和碎屑矿物分析, 研究了黄海表层沉积物的粒度分布与矿物组成特征, 探讨了研究区沉积物的矿物组成特征对其物源、沉积环境的指示意义。黄海表层沉积物平均粒径为 5.2Φ , 分选较差; 黏土矿物组合类型为伊利石-高岭石-蒙脱石-绿泥石, 其中伊利石的含量最高, 蒙脱石的含量最低; 碎屑矿物(粒径为 0.063~0.125 mm) 平均含量为 8.07%, 标准偏差为 4.03, 分布趋势与平均粒径分布基本一致, 轻矿物以石英和长石为主; 重矿物以角闪石和绿帘石为主, 其次是不透明矿物和片状矿物, 重矿物主要集中分布于黄海南部。物源识别结果表明: 黄海的东北部海域接受鸭绿江沉积物的供应; 黄海北部主要为黄河源沉积物; 南黄海西部沉积物主要为黄海沿岸流南下带来的现代黄河物质和再悬浮的老黄河沉积物; 南黄海中部沉积物来源复杂以黄河沉积物为主, 长江沉积物的供应较少。

关键词: 黄海; 表层沉积物; 矿物组成特征; 物源分析

中图分类号: P736

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2021.112

0 引言

现代海洋沉积研究的核心问题是沉积物的“源-汇”问题, 其研究贯穿在整个海洋沉积物研究过程中, 包括沉积物的沉积特征和沉积物的物质来源问题^[1-2]。中国东部陆架是世界上主要陆源沉积物质的汇聚区之一, 黄海是其中的典型代表之一, 其物质来源、沉积环境和水动力条件复杂多样, 而沉积物则记录了气候、海平面变化、海陆之间的物质和能量交换等多种信息^[3]。

黄海以山东半岛的成山角和朝鲜长山串之间的连线划分为南黄海和北黄海, 黄海暖流通过北黄海向西进入渤海带来大洋物质, 黄河输入的陆源物质以及渤海的沉积物通过沿岸流携带, 经北黄海向

外海搬运^[4], 所以复杂的水动力环境和物质来源是黄海的一大特征^[5]。黄海和其他陆架浅海相比, 其陆源物质供应来源多样, 包含了长江、黄河、鸭绿江以及朝鲜河流的入海沉积物; 同时黄海洋流环境复杂, 因此对黄海不同来源沉积物特征及其运输路径的研究仍有争议。申顺喜等^[6]判断黄海地区泥质沉积体的主要物质是全新世的海侵作用对黄海南南部母岩风化产物的侵蚀、搬运、再沉积形成的。蓝先洪等^[7-8]分析了黄海地区元素地球化学特征, 认为黄海中部物质来源以黄河源为主。PARK 等^[9-10]对黄海黏土矿物进行研究, 判断南黄海中部泥主要来自于老黄河和现代黄河物质, 长江影响较小。魏建伟等^[11]、赵一阳等^[12]研究了黄海矿物含量及组合特征, 认为南黄海中部泥质区沉积物为多物源沉积, 且很难分出以某个物源为主。

目前海洋沉积物物源分析方法包括沉积物粒度、黏土矿物、元素地球化学特征以及碎屑矿物组合特征矿物的分析等多种方法。沉积物粒度组成和分布受到物源距离、水动力环境、沉积区域的地形等多种因素影响。粒度特征是判断沉积动力环

收稿日期: 2021-04-20

资助项目: 国家自然科学基金“超慢速和快速扩张洋中脊岩浆作用的对比研究”(41376053)

作者简介: 韩宗珠(1964—), 男, 博士, 教授, 主要从事岩石学和地球化学方面的研究工作。E-mail: hanzongzhu@ouc.edu.cn

境分析最直接的依据之一^[13-14], 利用沉积物“粒度趋势分析”方法分析沉积物运输模式与其对应的水动力条件是研究热点之一^[15-16]。黏土矿物是海洋沉积物的重要组成部分, 其沉积特征受多方面条件的影响, 如气候条件、水动力强度、输运距离^[17-19]、黏土矿物组合的变化都可以作为反演沉积环境演化、判断物质来源的重要依据^[20-24]。碎屑矿物是指矿物颗粒大小在 0.063~0.125 mm 的单矿物颗粒, 根据密度大小分为轻、重矿物。碎屑矿物含量、特征矿物、ZTR 指数^[25]、单矿物的化学特征及矿物组合分布情况等是判断物源、指示沉积环境的有效方法^[26-27]。综上所述, 本文以黄海 66 个表层沉积物为研究对象, 通过粒度、黏土矿物和碎屑矿物的综合分析, 研究了黄海表层沉积物的粒度分布与矿物组成特征, 并进一步探究了研究区沉积物的矿物组成特征对其物源、沉积环境的指示意义。

1 研究区概况

黄海总面积为 38 万 km², 是一个典型的半封闭边缘海, 因为山东半岛的成山角和朝鲜长山串之间

的海面最窄, 习惯上以两者之间的连线将黄海分成南黄海和北黄海^[28]。北黄海大体呈 NE 向延长的平行四边形浅洼, 面积为 7.1 万 km², 水下地形整体平缓, 平均水深 38 m, 大部分水深 < 70 m, 北部水深 > 60 m, 南部水深 30~40 m, 北黄海中部是比较平坦的浅海平原。南黄海面积 30.9 万 km², 海底地势由北、西、西南向中部倾斜, 呈“东西不对称、东陡西缓”格局, 平均水深 45.3 m。

黄海的环流系统如图 1 所示, 北上的黄海暖流与南下的沿岸流构成了气旋式环流, 流速通常只有最大潮流速度的十分之一, 具有明显的季节变化特征^[2]。黄海沿岸流主要指来自于江河入海的淡水与近岸海水混合水团, 是流经山东和江苏沿岸的冲淡水。黄海沿岸流的方向不随季节改变永久向南, 沿着中国海岸线冬季南移, 夏季北移, 冬季较强, 夏季较弱。黄海沿岸流的一部分与黄海暖流交汇混合, 大部分则绕过成山角从黄海南部到达苏北沿岸^[29], 有时可达 30°N 附近。黄海暖流是对马暖流的一个支流, 沿黄海槽或黄海槽的西侧向北推进, 呈水舌分布冬季较强, 夏季较弱甚至消失^[30-32]。

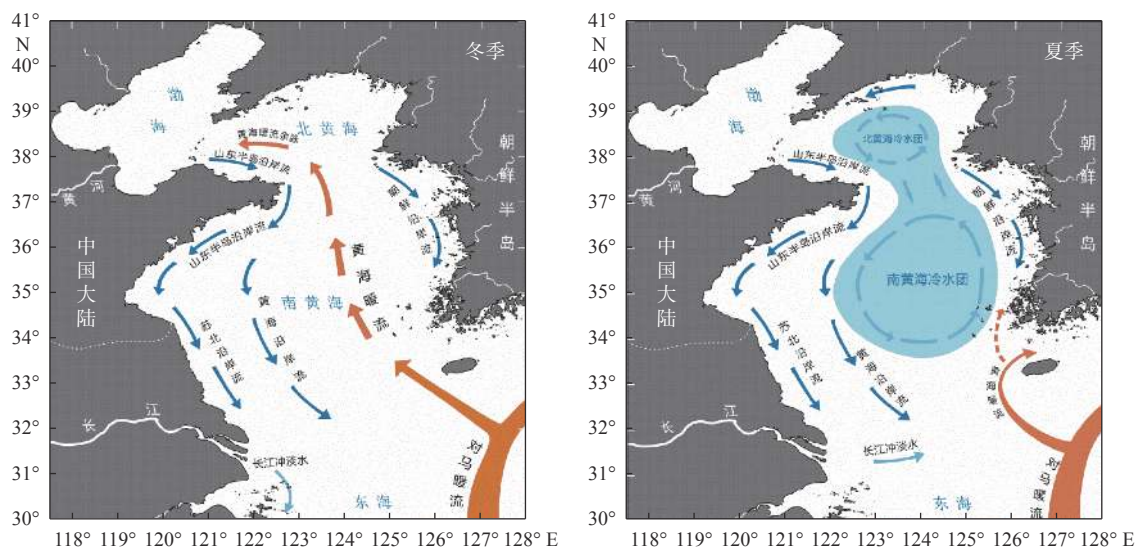


图 1 黄海冬、夏季环流体系^[33]

Fig.1 Winter and summer circulation systems in the Yellow Sea^[33]

黄海中部海域的底层则为著名的“黄海冷水团”, 全年低温高盐, 黄海冷水团具有较弱的水动力环境。南黄海潮流场数值模拟进一步表明, 冷水团环流区是弱潮流区, 只能悬浮细粒 (< 0.063 mm) 物质。黄海冷水团为季节性水团, 夏季海水的上下对流受到温跃层的抑制, 黄海冷水团发育达到最强盛; 冬季黄海冷水团逐渐消亡, 成山角-长山连线将黄海

冷水团分隔开来形成南、北 2 个冷水团^[34-35]。

不同区域的动力环境条件可将黄海大体分为低能沉积环境和高能沉积环境 2 种, 黄海大面积分布的泥质区对应于气旋涡旋区和反气旋涡旋区这些黄海陆架上的低能沉积环境, 北黄海东部、西朝鲜湾以及南黄海两侧沿岸的强潮流环境构成了黄海的高能沉积环境^[36]。

2 样品与方法

2016年与2017年搭载“东方红2号”使用箱式采泥器取得66个黄海表层沉积物样品,取样站位如图2所示。

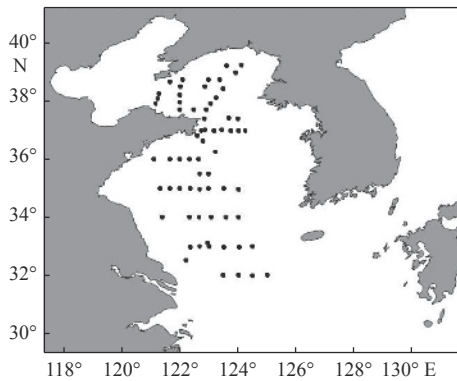


图2 黄海表层沉积物取样站位

Fig.2 Location of surface sediment samples in the Yellow Sea

粒度分析测试在中国海洋大学海底科学与探测技术教育部重点实验室完成,使用仪器为英国Malvern生产的Mastersize2000,粒度分辨率为 0.01Φ 。取绿豆大小沉积物样品,加入5~10 mL 30%的 H_2O_2 溶液,静置直至没有气泡产生,再加入HCl静置,反应完成后离心2次,上机测试。

黏土矿物分析实验在中国地质调查局青岛海洋地质研究所完成。首先提取黏土粒级($<2\ \mu\text{m}$)沉积物。取适量样品首先加蒸馏水稀释,加10%的过氧化氢去除有机质,然后加入蒸馏水搅拌均匀,离心3次洗去盐分,再加入10 mL的0.5 mol/L的六偏磷酸钠,浸泡12 h使样品充分分散,将样品转移至容量为1 L的量筒中,加入蒸馏水定容至1 L,充分洗涤搅拌成悬浮液后静置,按照斯托克沉降定理提取黏土组分。将提取到的黏土组分用胶头滴管均匀涂在载玻片上,静置并自然干燥,在乙二醇饱和蒸汽中加热48 h($56\ ^\circ\text{C}$)以上,然后上机测试。使用Jade5.5软件对衍射图谱进行处理,并计算黏土矿物的相对含量。

碎屑矿物分析在中国海洋大学海底科学与探测技术教育部重点实验室完成。称量10~20 g烘干的沉积物样品,加入六偏磷酸钠溶液分散后,使用水筛法提取碎屑矿物(0.063~0.125 mm、0.125~0.25 mm备用),烘干并称量以上2个碎屑组分质量,计算出各组分的比值;使用密度为 $2.89\ \text{g}/\text{cm}^3$ 的三溴甲烷分离轻、重矿物,烘干后称量、计算;在室内

实验室使用体视镜以及偏光镜确定矿物种类,对每个样品鉴定300~400个矿物颗粒,计算各种矿物的颗粒百分含量。

3 结果

3.1 沉积物粒度特征

根据FOLK等^[37]提出的沉积物分类三角图解法,研究区66个表层沉积物共有5种沉积物类型(图3):砂(S)4个、砂质泥(Sm)1个、粉砂质砂(Zs)17个、砂质粉砂(Sz)31个和粉砂(Z)13个。其中,Sz主要集中在黄海中部,属于主要沉积物类型。

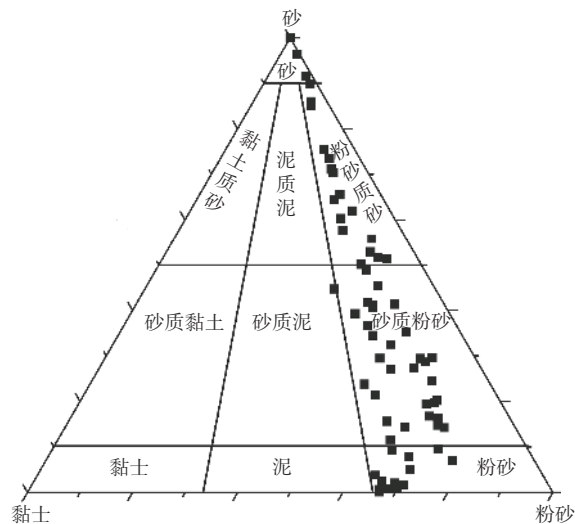


图3 黄海沉积物类型 Folk 图解

Fig.3 Classification of Yellow Sea sediment

图4显示黄海沉积物平均粒径(M_z)为 1.6Φ ~ 7.5Φ ,平均为 5.2Φ 。高值区($M_z > 6\Phi$)指示了低能、还原的沉积环境,中值区($4\Phi < M_z < 6\Phi$)对应着黄海暖流进入渤海的通道。研究区沉积物的分选系数为0.53~2.95,平均为1.95,南黄海沉积物的分选系数自西向东先降低再升高,在北黄海分选系数自北向南逐渐降低。分选系数的分布情况反映出黄海物质来源比较复杂,可能有2个或2个以上物源组成。南黄海中部与北黄海中西部海域的沉积物偏态为负偏,黄海西、南部以及北黄海的中东部海域为正偏。

3.2 黏土矿物特征

黄海黏土矿物包括蒙脱石、伊利石、高岭石和绿泥石,4种矿物相对含量如表1所示。研究区的

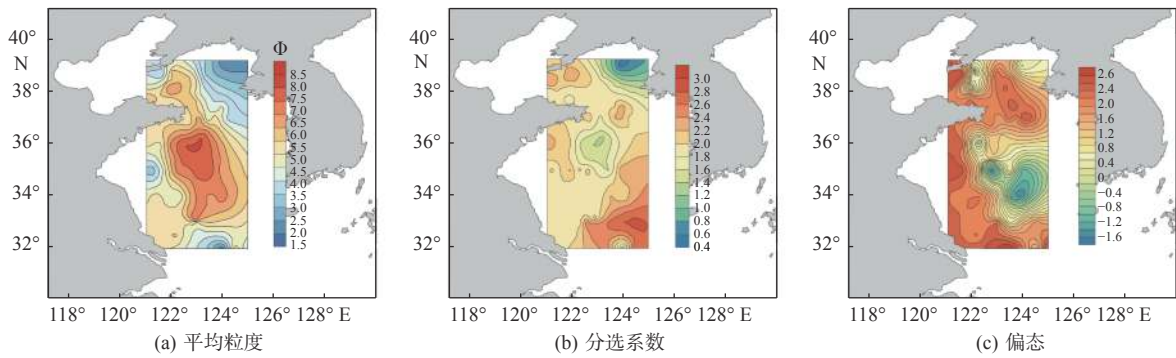


图 4 表层沉积物粒度参数分布

Fig.4 Distribution of grain size parameters of surface sediments

表 1 表层沉积物样品中黏土矿物含量统计表

Table 1 Percentage contents of clay minerals of the surface sediment

物源	蒙脱石	伊利石	高岭石	绿泥石	高岭石+绿泥石	伊利石/蒙脱石	
研究区	最大值/%	9.34	66.67	16.35	24.50	40.17	14.26
	最小值/%	3.82	54.52	12.32	13.55	2.76	7.14
	平均值/%	6.39	59.82	14.60	19.18	33.78	9.81
	标准偏差	1.38	2.17	0.83	2.22	2.76	2.18
	离散系数/%	21.66	3.62	5.67	11.59	8.16	22.22
黄河 ^[38]	平均值	15.20	62.50	9.70	12.50	22.20	4.11
长江 ^[40]	平均值	6.60	70.80	9.40	13.20	22.60	10.73

黏土矿物含量从高到底依次为伊利石、绿泥石、高岭石、蒙脱石,其含量与黄河源物质较为接近。伊利石在研究区内含量最高,变化范围较小,平均含量接近于黄河而略低于长江;蒙脱石的含量在研究区最低,离散系数高达 21.66%,表明其分布不均匀且变化范围大,平均含量接近长江而低于黄河。高岭石与绿泥石平均含量明显高于长江和黄河源的含量。伊利石/蒙脱石其比值接近于长江物质。

伊利石主要为长石的风化产物,是研究区含量

最高的黏土矿物,含量一般 >55%,平均为 59.82%,高值区(图 5)主要集中在黄海北部,呈圆斑状分布,西部地区沿岸分布,低值区位于黄海南部东部地区;蒙脱石主要在碱性环境形成中,高值区主要集中在山东半岛沿岸,黄海东北部,低值区主要集中在黄海中部、南部海域。研究区伊利石/蒙脱石的平面分布变化范围比较大,为 7.14~14.26,平均为 9.81,南黄海中部伊利石/蒙脱石比值较高,西部蒙脱石含量高,伊利石与蒙脱石比值较低。

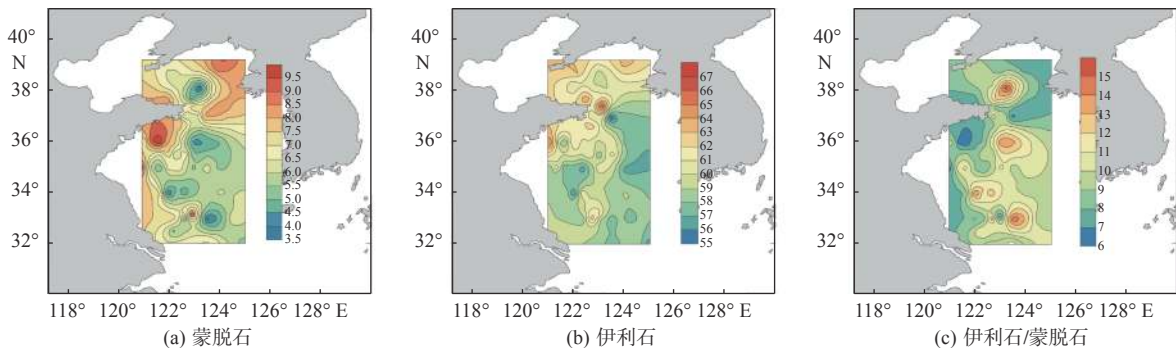


图 5 表层沉积物黏土矿物分布特征

Fig.5 Distribution patterns of clay minerals in surface sediments

3.3 碎屑矿物特征

黄海碎屑矿物(粒径为 0.063~0.125 mm)含量

变化较大(表 2),变化范围为 0.01%~40.9%,平均为 8.07%,标准偏差为 4.03。高值区在南黄海西部,低值区在黄海中部,分布趋势与平均粒径分布基本

表2 研究区表层沉积物碎屑矿物含量

Table 2 Detrital mineral content in surface sediments of the Yellow Sea

矿物含量	平均值	最大值	最小值	标准偏差	变异系数/%
碎屑矿物/%	8.07	40.9	0.01	4.03	49.94
重矿物含量/%	5.84	29.6	0.63	5.92	101.37
闪石类/%	37.3	66.0	0.84	28.5	76.41
帘石类/%	16.8	27.6	0.28	13.7	81.55
不透明矿物/%	14.5	76.8	1.45	20.6	142.07
自生黄铁矿/%	4.21	42.5	0	7.31	173.63
片状重矿物/%	11.9	93.5	0	15.1	126.89
稳定矿物/%	6.34	27.0	0	4.98	78.55
辉石类/%	0.49	2.28	0	0.28	57.14
变质类/%	0.13	0.92	0	0.11	84.62
风化碎屑/%	2.40	7.06	0	1.93	80.42
ZIR含量/%	0.40	2.20	0	0.31	77.50
重矿物成熟度	11.3	42.4	0	10.8	95.58
石英/长石	1.38	2.40	0.74	0.31	22.46
钾长石/%	3.95	10.20	0.78	2.07	52.41
片状轻矿物/%	4.08	41.02	0.00	7.93	194.36

一致。表2显示研究区碎屑矿物分布极度不均匀,变异系数接近50%,重矿物的变异系数高达101.37%。

研究区共有11种碎屑轻矿物,以石英和长石为主,其中钾长石平均含量较低,最小值为0.78%,最大值为10.20%,平均为3.95%,变异系数为52.4%,分布不均,高值区在黄海中西部海域,北黄海中部亦有少量分布;片状矿物(白云母、风化云母和绿泥石)含量最大值为41.2%,最小为0,平均为4.08%,分异系数为194%,主要集中在山东半岛北部北黄海较小的区域内;研究区石英/长石最小值为0.74,最大值为2.40,平均值为1.38,高值区呈圆斑状分布在北黄海中部和南黄海中部,低值区在黄海南部边缘,分异系数为96%(图6)。

黄海中部共鉴定出40余种重矿物,主要集中在黄海南部海域,其余区域含量较低,分异系

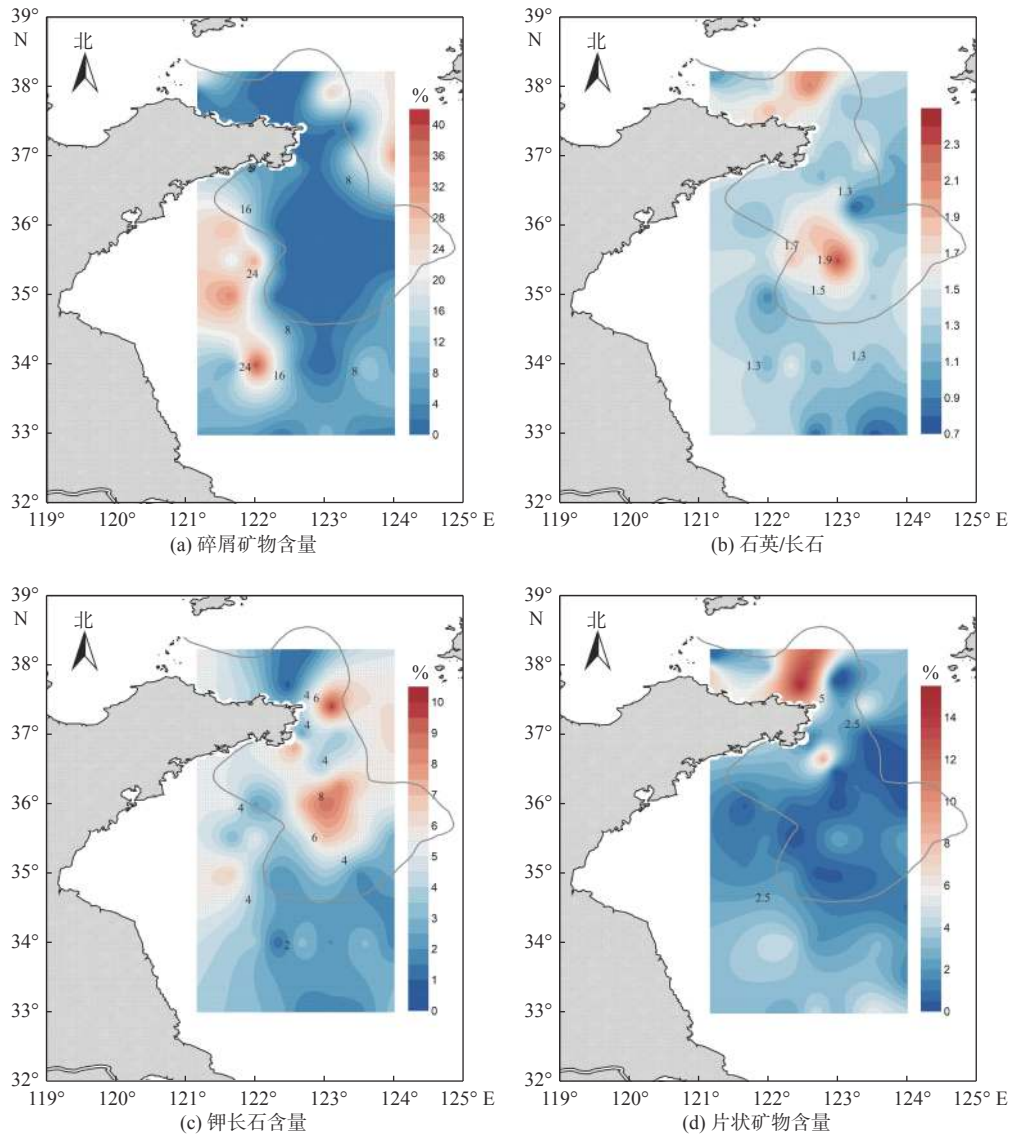


图6 碎屑矿物和轻矿物含量及比值分布

Fig.6 Distribution of detrital and light mineral content and mineral ratio

数高。研究区重矿物以角闪石和绿帘石为主, 两者占了重矿物含量的一半; 其次是不透明矿物和片状矿物, 其含量均在 10% 以上, 分异系数均 > 120%, 分布集中。重矿物及矿物成熟度分布如图 7 所示, 研究区重矿物含量介于 5%~29%, 主要集中在黄海东南部边缘海域, 中部海区亦有少量分布, 重矿物

以自生矿物为主; 矿物的成熟度为稳定矿物(石榴子石、锆石、电气石等)与不稳定矿物(闪石类、帘石类和辉石类)之比, 其高值区主要在研究区中部, 研究区东部矿物成熟度高于西部, 分布较为集中, 分异系数为 95%。研究区自生矿物以黄铁矿为主, 主要集中分布在黄海中部以及北黄海部分海区。

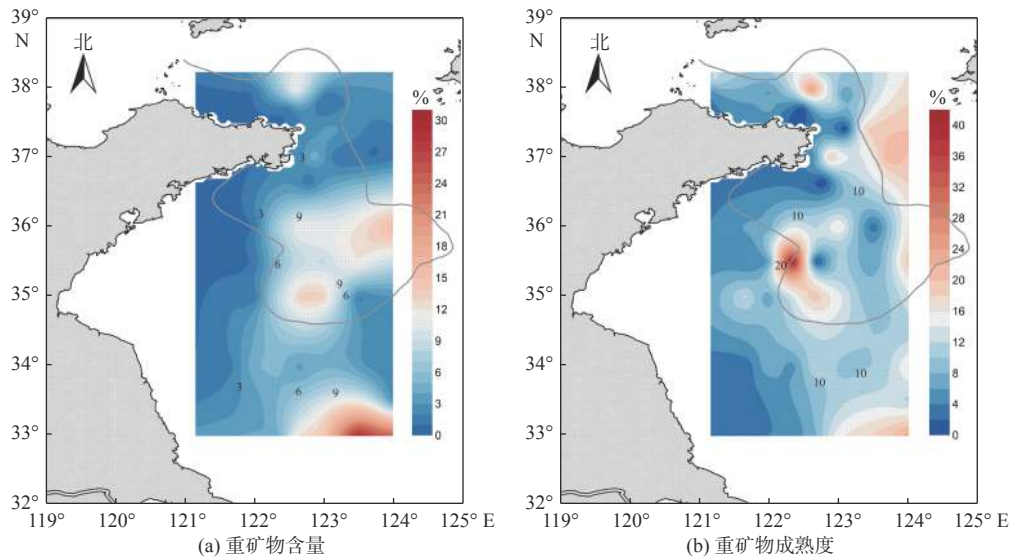


图 7 研究区表层沉积物重矿物含量成熟度^[38]

Fig.7 Maturity of heavy mineral content in surface sediments in the study area^[38]

4 讨论

4.1 黄海沉积环境分区

砂泥是 2 种不同的搬运方式组分, 两者间得比值能够部分反映了水动力条件的强弱^[39]。图 8 显示, 研究区东北部砂泥比值 > 10, 其余海区均 < 10,

说明在黄海大部分海域的沉积物主要以悬移方式进行搬运, 整体的水动力条件较弱; 研究区东部水动力条件较中部地区要强, 而砂泥比值却差别不大, 这可能是长江冲淡水与黄海暖流携带的物质搬运距离较远, 砂质粒级在稍早时已经沉积, 东北部海域可能由于接近鸭绿江的入海口, 水动力条件较强; 研究区西部边缘砂泥比值介于 2~6, 这可能是苏北沿岸流与南下的黄海沿岸流携带的沉积物在南黄

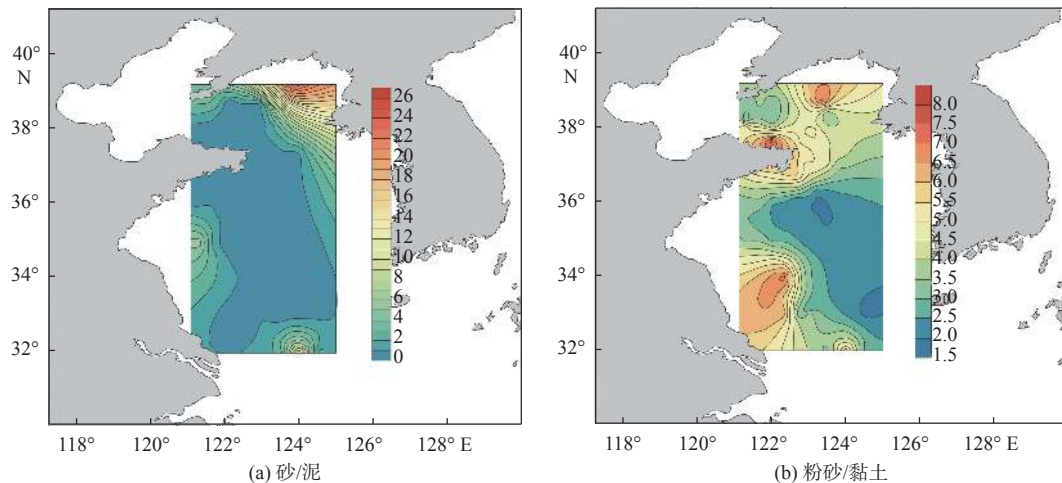


图 8 表层沉积物各组分比值分布

Fig.8 Distribution of the ratios of different components of sediments

海西部沉积;研究区南部等值线分布密集,可能是黄海暖流携带的海底沉积物与长江冲淡水的河流沉积物在此沉积。研究区砂泥比值 <2 的海域分布广泛且连成一片,说明在研究区内存在大范围水动力条件较弱的沉积环境,极少有砂搬运至此。

根据粉砂和黏土比值的不同将黄海划分为2种沉积环境,研究区 36°N 以北、 35°N 以南、 123°E 以西海域,其粉砂黏土比值均 >4 ,沉积环境的水动力条件较强,南部可能受黄海暖流影响,北部可能是鲁北沿岸流以及黄海暖流余脉的影响;南黄海中部粉砂黏土比值介于 $1.5\sim 4$,为水动力环境相对较弱的区域(图8)。

沉积物粒度分析结果显示,黄海东北部沉积物的砂含量最高,分选较好,水动力强。沉积物颗粒的搬运方式主要为推移和跃移,该区沉积物粒度分布特征的主控因素是物源,鸭绿江的物质在附近堆积。山东半岛沿岸、南黄海西部粉砂含量较高,砂的含量次之,粉砂与黏土比值相对较低,沉积物以递变悬浮组分为主,为扰动环境。这是鲁北沿岸流携带大量黄河沉积物沿山东半岛向东南输运,绕过成山头后流速下降,沉积物沿山东半岛东南海岸沉积^[40-41]。鲁北沿岸流南下过程中分成2支,其中一支被称为黄海沿岸流,大致沿 122°E 向南流动^[42-43],受冬季北上的黄海暖流与黄海沿岸流的影响,沉积物在南黄海中西部沉积。南黄海中部海域沉积物以粉砂为主,黏土次之,粉砂黏土比值较低,是全区水动力条件最弱的海区。黄海冷水团的存在起到了水障的作用,沉积物以悬浮组分为主,为较弱的水动力环境。南黄海西南部海域以粉砂为主,粉砂黏土比值较大,该区受到老黄河口三角洲和长江三角洲的共同影响。

4.2 矿物对物源的指示意义

黄海黏土矿物主要由伊利石、高岭石、绿泥石、蒙脱石组成,在研究区内的分布则是受到环流体系的影响,发生混合和再分配。黄海黏土矿物组分与长江黄河都很接近(图9),说明黄海黏土矿物受到长江黄河物源影响。

黄海黏土矿物组合中的高岭石含量较高(表1),范围为 $12.32\%\sim 16.35\%$,平均为 14.60% ,其最小值都超过了长江物质中的高岭石含量(9.4%)以及黄河物质中的高岭石含量(9.7%),说明研究区黏土矿物不仅仅是来源于黄河、长江中的物质,还受其他物源的影响^[44]。本文伊利石/蒙脱石含量等值线显

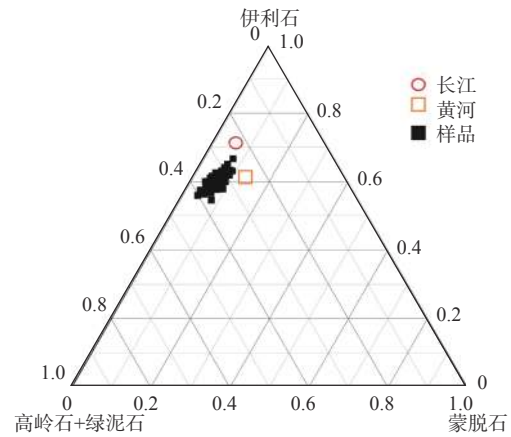


图9 伊利石-蒙脱石-高岭石+绿泥石端元图

Fig.9 The triangular diagram with illite, smectite and kaolinite+chlorite as end members

示(图5),比值 >8 的海区占了大部分区域,东部比值高于西部海域;低值区集中在北黄海东北部、南黄海西部,该低值区可能是受黄河物质影响较大的区域,而南黄海中部则可能是受到长江物源的影响。

综合碎屑矿物含量、片状矿物、自生矿物、稳定矿物等主要变量,参考王昆山等^[45]的研究进行聚类分析,将研究区划为I~V区5个矿物区(图10),各矿物区矿物种类差异明显。

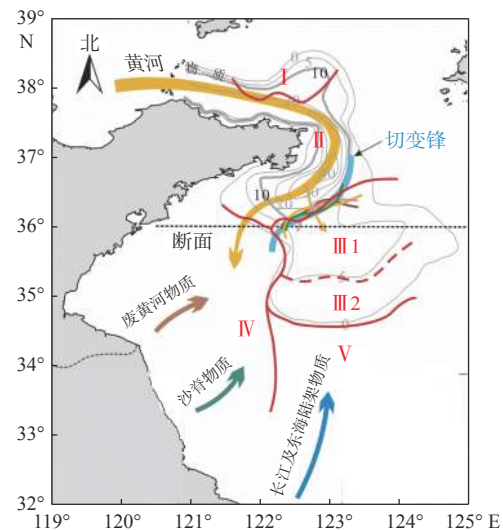


图10 黄海重矿物组合分区^[38,45]

Fig.10 Heavy mineral assemblages in the Yellow Sea^[38,45]

I区碎屑矿物含量很低,重矿物的主要成分是云母、角闪石、金属矿物(自生黄铁矿)、石榴石和帘石类。一般在重矿物中占 85% 以上,云母含量很高,含量 $<15\%$ 的区域主要集中在 123°E 以东,可能是鸭绿江沉积物进入黄海所带来的影响;其余海域均高于 15% ,该区受北黄海冷水团影响,沉积物

力弱, 指示了黄河是该区的主要沉积物来源。

II 区碎屑矿物含量很高, 重矿物含量不高, 角闪石的含量变化为 0~40%, 高值区主要集中在 37°N 以北, 123°E 与 124°E 之间, 向南部递减, 片状矿物的含量较高, 高值区集中在山东半岛附近, 受黄海沿岸流的影响, 虽然该区云母的含量低于 I 区, 但依然可以指示其黄河物源, 刘金庆等^[46]、尹秀珍等^[47]认为该地区物源受黄河影响显著, 沿岸河流和岛屿侵蚀物也有输入。

III 区分为 III₁ 和 III₂ 2 个亚区, 具有重矿物含量较高和自生矿物存在的特征。2 个亚区的差异性体现在 I 区闪石类、帘石类低于 2 区, 自生的黄铁矿高于 2 区。III 区受南黄海冷水团影响, 沉积动力弱, 沉积物主要组分为粉砂和黏土, 分选较好, 粉砂与黏土的比值较低, 均匀悬浮组分较多。蓝先洪等^[20]、王琦等^[48]研究认为该区物质来源是多样的, 以长江、黄河输入物质为主, 古黄河及黄海暖流携带的物质也有一定贡献。

IV 区碎屑矿物含量最高, 平均为 21.3%, 矿物多呈棱角状或次棱角状, 说明该区沉积物主要为近源沉积, 片状矿物含量呈现南高北低的分布趋势, 这与沿岸流自北向南携带黄河物质而来的趋势不一致, 这可能说明 IV 区的片状矿物的主要来自古黄河水道下三角洲, 而来自现代黄河的物质则居于次要地位。该区的物源主要是潮流作用下的沙脊物质与细粒黄河沉积物, 而沙脊的沉积物又主要来自古黄河水下三角洲和古长江沉积物^[38]。

V 区碎屑矿物含量为 6.55%, 重矿物含量较高为 9.24%, 不透明矿物含量增多, 矿物类型与东海北部陆架的沉积物矿物类型相似^[45], 该区的细粒物质可能来源是黄河、长江, 较粗物质可能来自东海北部陆架沉积物。

5 结论

(1) 研究区西北、中西部沉积物以递变悬浮组分为主, 为扰动环境, 主要接受鲁北沿岸流携带的黄河沉积物; 研究区中部是全区水动力条件最弱的地区, 沉积物以悬浮组分为主, 是低能的水动力环境; 研究区西南部为老黄河口三角洲和长江三角洲的影响区。

(2) 黄海表层沉积物黏土矿物高值区在南黄海西部, 低值区在黄海中部, 分布趋势与平均粒径分布基本一致, 反映了水动力条件对碎屑矿物富集的

控制作用。重矿物主要集中在黄海南部, 其余海域含量低。

(3) 综合黏土、碎屑矿物特征对黄海物源的识别结果为: 黄海的东北部接受鸭绿江沉积物的沉积; 黄海北部主要为黄河源沉积物; 南黄海西部主要为黄海沿岸流南下带来的现代黄河沉积物和再悬浮的老黄河沉积物; 南黄海中部沉积物来源复杂, 以黄河沉积物为主, 长江沉积物的供应较少。

参考文献:

- [1] MORTON A C. Geochemical studies of detrital heavy minerals and their application to provenance research[J]. *Geological Society London Special Publications*, 1991, 57(1): 31-45.
- [2] 赵利. 长江、黄河入海沉积角闪石的矿物化学特征及对中国陆架泥质沉积的物源指示意义[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- [3] LIM D I, CHOI J Y, JUNG H S, 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] LIU Z X, XIA D X, BERNE S, et al. Tidal deposition systems of China's continental shelf, with special reference to the eastern Bohai Sea[J]. *Marine Geology*, 1998, 145(3/4): 225-253.
- [5] 王双. 黄渤海表层沉积物磁学特征及其环境指示意义[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- [6] 申顺喜, 陈丽蓉. 南黄海冷涡沉积和通道沉积的发现[J]. *海洋与湖沼*, 1993, 24(6): 563-570.
- [7] 蓝先洪, 申顺喜. 南黄海中部沉积岩心的地球化学特征[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2000, 20(2): 33-38.
- [8] 蓝先洪, 申顺喜. 南黄海中部沉积岩心的稀土元素地球化学特征[J]. *海洋通报*, 2002, 21(5): 46-53.
- [9] PARK Y A, KHIM B K. Clay minerals of the recent fine-grained sediments on the Korean continental shelves[J]. *Continental Shelf Research*, 1990, 10(12): 1179-1191.
- [10] PARK Y A, KHIM B K. Origin and dispersal of recent clay minerals in the Yellow Sea[J]. *Marine Geology*, 1992, 104(1/4): 205-213.
- [11] 魏建伟, 石学法, 辛春英, 等. 南黄海黏土矿物分布特征及其指示意义[J]. *科学通报*, 2001, 46(S1): 30.
- [12] 赵一阳, 鄢明才, 李安春, 等. 中国近海沿岸泥的地球化学特征及其指示意义[J]. *中国地质*, 2002, 29(2): 181-185.
- [13] XIAO S, LI A C, LIU J P, et al. Coherence between solar activity and the East Asian winter monsoon variability in the past 8000 years from Yangtze River-derived mud in the East China Sea[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2005, 237(2): 293-304.
- [14] WANG L, SARNTHEIN M, ERLLENKEUSER H, et al. East Asian monsoon climate during the Late Pleistocene: high-resolution sediment records from the South China Sea[J]. *Marine Geology*, 1999, 156(1): 245-284.
- [15] 李真祥. 南黄海西部表层沉积物粒度分布特征及其对沉积环境的指示[D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所),

- 2010.
- [16] 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.
- [17] HATHON E G, UNDERWOOD M B. Clay mineralogy and chemistry as indicators of hemipelagic sediment dispersal south of the Aleutian arc[J]. *Marine Geology*, 1991, 97(1/2): 145-166.
- [18] 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.
- [19] UNDERWOOD M B, PICKERING K T. Clay-mineral provenance, sediment dispersal patterns, and mudrock diagenesis in the Nankai accretionary prism, Southwest Japan[J]. *Clays and Clay Minerals*, 1996, 44(3): 339-356.
- [20] 蓝先洪,张训华,张志珣.南黄海沉积物的物质来源及运移研究[J].*海洋湖沼通报*,2005(4):53-60.
- [21] 陈忠,颜文.海洋沉积黏土矿物与古气候、古环境演化响应的研究进展[J].*海洋科学*,2000,24(2):25-27.
- [22] 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.
- [23] 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(4):38-48.
- [24] 何良彪,刘秦玉.黄河与长江沉积物中黏土矿物的化学特征[J].*科学通报*,1997,42(7):730-734.
- [25] UDDIN A, LUNDBERG N. Unroofing history of the eastern Himalaya and the Indo-Burman ranges; heavy-mineral study of Cenozoic sediments from the Bengal Basin, Bangladesh[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1998, 68(3): 465-472.
- [26] 宋友桂.沉积矿物学在古环境恢复中的应用进展[J].*东华理工大学学报(自然科学版)*,2009,32(4):17-27.
- [27] 侯孟孜,衣华鹏,孙志高,等.渤海北部海域碎屑矿物组成特征研究[J].*干旱区资源与环境*,2017,31(4):118-123.
- [28] 秦蕴珊,赵一阳,陈丽蓉,等.黄海地质[M].北京:海洋出版社,1989.
- [29] 皮仲.中全新世以来季风背景下黄海暖流的演化[D].北京:中国科学院大学,2016.
- [30] 薛春汀,张勇.中国近岸海区沿岸流和海岸流对沉积物的搬运[J].*海洋地质与第四纪地质*,2010,30(1):1-7.
- [31] 臧家业,汤毓祥,邹娥梅,等.黄海环流的分析[J].*科学通报*,2001,46(S1):7.
- [32] TEAGUE W J, JACOBS G A. Current observations on the development of the Yellow Sea Warm Current[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2000, 105(C2): 3401-3411.
- [33] 王琳森.南黄海中部泥质区全新世以来古环境沉积记录及其对东亚季风的响应[D].青岛:中国海洋大学,2014.
- [34] LEONARD B P. The ULTIMATE conservative difference scheme applied to unsteady one-dimensional advection[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1991, 88(1): 17-74.
- [35] 翁学传,张以慧,王从敏,等.黄海冷水团的变化特征[J].*海洋与湖沼*,1988(4):368-379.
- [36] 苏纪兰,黄大吉.黄海冷水团的环流结构[J].*海洋与湖沼*,1995,26(S1):1-7.
- [37] 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.
- [38] 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):111-121.
- [39] 何起祥,李绍全,刘健.海洋碎屑沉积物的分类[J].*海洋地质与第四纪地质*,2002,22(1):118-124.
- [40] 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.
- [41] YANG Z S, LIU J P. A unique Yellow River-derived distal subaqueous delta in the Yellow Sea[J]. *Marine Geology*, 2007, 240(1/4): 169-176.
- [42] 申顺喜.南黄海陆架沉积学研究[J].*海洋科学*,1993,17(5):24-28.
- [43] 李凡,张秀荣,李永植,等.南黄海埋藏古三角洲[J].*地理学报*,1998,65(3):238-243.
- [44] 张宪军.南黄海中西部全新世沉积特征及物源分析[D].青岛:中国海洋大学,2008.
- [45] 王昆山,石学法,林振宏.南黄海和东海北部陆架重矿物组合分区及来源[J].*海洋科学进展*,2003,21(1):31-40.
- [46] 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.
- [47] 尹秀珍,刘万沫,蓝先洪,等.南黄海表层沉积物的碎屑矿物、地球化学特征及物源分析[J].*吉林大学学报(地球科学版)*,2007,37(3):491-499.
- [48] 王琦,曹立华,杨作升,等.黄河水下三角洲的动力沉积特征[J].*中国科学(B辑 化学 生命科学 地学)*,1991,21(6):659-665.

Composition of minerals in surface sediments of the Yellow Sea and their provenance

HAN Zongzhu^{1,2}, WANG Yibing¹, SUN Yuangao¹, AI Li'na³, WU Xiao^{1,2}, YANG Yepiao²

(1 College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

2 Key Laboratory of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, Ministry of Education, Qingdao 261000, China;

3 The First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 261000, China)

Abstract: Based on the grain size, clay mineral and detrital mineral data of 66 surface sediment samples collected from the Yellow Sea, this paper is devoted to the grain size distribution and mineral composition characteristics of the samples with a detailed discussion on sediment provenance. The results suggest that the average grain size of surface sediments in the Yellow Sea is around 5.2Φ , with poor sorting. Clay minerals are characterized by the assemblage of illite-kaolinite-smectite-chlorite. Illite dominates and smectite is the lowest. The distribution of detrital minerals shows a similar pattern as the mean grain size. The light minerals mainly consist of quartz and feldspar. Heavy minerals mainly occur in the southern part of the Yellow Sea, dominated by hornblende and epidote. Study of material sources suggest that the sediments in the northeastern Yellow Sea are mainly from the Yalu River, while the provenance of the northern part is the modern Yellow River. In the western South Yellow Sea, sediments are mainly from the modern Yellow River either transported by coastal currents, or resuspended from the abandoned Yellow River delta in the northern Jiangsu Province. In the central South Yellow Sea, sediments are mainly from the Yellow River, followed by some supplement of sediments from the Yangtze River.

Key words: Yellow Sea; surface sediment; mineral composition; provenance analysis