



东海东北部陆架表层沉积物碎屑矿物分布及其物源分析

宁 泽, 徐 磊, 林学辉, 密蓓蓓, 丛静艺, 张 勇, 毕世普

Distribution and provenance of detrital minerals in surface sediments of the northeastern East China Sea

NING Ze, XU Lei, LIN Xuehui, MI Beibei, CONG Jingyi, ZHANG Yong, and BI Shipu

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2022062301>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

宁泽, 徐磊, 林学辉, 等. 东海东北部陆架表层沉积物碎屑矿物分布及其物源分析 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2022, 42(5): 58-69.
NING Ze, XU Lei, LIN Xuehui, et al. Distribution and provenance of detrital minerals in surface sediments of the northeastern East China Sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2022, 42(5): 58-69.

东海东北部陆架表层沉积物碎屑矿物分布及其物源分析

宁泽^{1,2}, 徐磊^{1,2}, 林学辉^{1,2}, 密蓓蓓^{1,2}, 丛静艺^{1,2}, 张勇^{1,2}, 毕世普^{1,2}

1. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266237

2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266237

摘要:为深入了解东海外陆架表层沉积物物质来源及沉积环境特征,运用粒度和矿物学研究手段,对济州岛西南海域 180 个表层沉积物样品进行沉积物类型和碎屑矿物组成分析,探讨了矿物分布特征与沉积环境的相互关系,进一步明确表层沉积物的运输模式、物质来源及环流系统对其分布的影响。结果表明,研究区重矿物共 34 种,以普通角闪石、绿帘石和钛铁氧化物类矿物为主,橄榄石和变质岩矿物是区别内陆架沉积的标志性矿物。轻矿物共 13 种,以普遍发育的海绿石为特征。根据碎屑矿物组合分布特征,将研究区分为 I、II 两个矿物组合区,并进一步将 II 区划分为两个矿物组合亚区。中部现代沉积区 (I 区) 矿物组合为普通角闪石-绿帘石-自生黄铁矿-钛铁氧化物类矿物-片状矿物,表现为现代陆源沉积特征,物质来源以黄河为主,生物沉积和自生沉积也是该区重要的沉积方式。外围残留沉积区 (II 区) 为沉积作用缓慢的弱还原环境,II-1 亚区矿物组合为普通角闪石-绿帘石-钛铁氧化物类矿物-石榴石-橄榄石,认为是以古长江的残留前积沉积为基底,受到 I 区影响,接受了少量悬浮再悬浮的现代陆源沉积,同时又具有区域独特性。II-2 亚区矿物组合为绿帘石-普通角闪石-钛铁氧化物类矿物-石榴石,认为是古长江的残留沉积,在中部冷涡作用下,很少有现代物质的加入,区内不排除在当地环境生长的生物体作用下与 I 区互相调整的物质。本研究为今后在东海外陆架深入开展沉积学、矿物学及环境演化研究提供了新的参考。

关键词:碎屑矿物组合;物源分析;运输模式;沉积环境;东海陆架

中图分类号:P736.21

文献标识码:A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2022062301

Distribution and provenance of detrital minerals in surface sediments of the northeastern East China Sea

NING Ze^{1,2}, XU Lei^{1,2}, LIN Xuehui^{1,2}, MI Beibe^{1,2}, CONG Jingyi^{1,2}, ZHANG Yong^{1,2}, BI Shipu^{1,2}

1. Qingdao Institute of Marine Geology, CGS, Qingdao 266237, China

2. Key Laboratory of Marine Hydrocarbon Resources and Environmental Geology, Ministry of Land and Resources, Qingdao 266237, China

Abstract: In order to understand the source of surface sediments and the characteristics of the depositional environment on the East China Sea Shelf, 180 surface sediment samples from the southwest waters of Jeju Island were analyzed in terms of sediment types and detrital mineral compositions by means of grain size and mineralogy. The relationship between the distribution characteristics of minerals and the depositional environment was discussed. Based on the sedimentary dynamics method, the influence of the transport mode, material source and circulation system of the surface sediments on its distribution was clarified. Thirty-four heavy minerals were identified, mainly common amphibole, epidote, and metallic minerals. Olivine and metamorphic rock minerals are the landmark minerals distinguished from inland shelf deposits. Thirteen light minerals were identified, which are characterized by commonly developed glauconite. According to the distribution characteristics of clastic mineral assemblage, the study area could be divided into two mineral assemblages named as Zone I and Zone II, correspondingly. Zone I occupied in the central modern sedimentary zone characteristic of ordinary amphibole, epidote, authigenic pyrite, metallic minerals, and sheet minerals, showing colors of modern terrigenous sediments from mainly the Yellow River, biological, and authigenic sediments. Zone II covered the peripheral residual sedimentary zone characteristic of weak reductive environment with slow sedimentation rate. Zone II could be divided into two subzones. Subzone II-1 features ordinary amphibole, epidote, metallic minerals, garnet, and olivine, indicating the origin of the ancient Yangtze River on the basement of foreset sediments with the influence of Zone I, receiving a small amount of modern terrigenous

资助项目:国家自然科学基金“浙闽沿岸流与台湾暖流界面过程及沉积响应”(42176078);中国地质调查局地质调查二级项目(DD20190205, DD20221710)

作者简介:宁泽(1992—),女,硕士,从事矿物学研究, E-mail: 353511791@qq.com

通讯作者:张勇(1970—),男,博士,正高级工程师,从事海洋地质研究, E-mail: qimgzy@163.com

收稿日期:2022-06-23; 改回日期:2022-07-13. 张现荣编辑

suspended or resuspended sediments with own regional uniqueness. Subzone II-2 contains epidote, ordinary hornblende, metal minerals, and garnet etc, reflecting residual sediments of the ancient Yangtze River. Under the action of the central cold vortex, few modern materials could be added. Meanwhile, local organic substances in local environment that are mutually exchanged with zone I cannot be excluded from the area. The research content of this paper provides a new reference for further studies on sedimentology, mineralogy and environmental evolution on the East China Sea Shelf.

Key words: detrital mineral assemblage; provenance analysis; transportation mode; sedimentary environment; East China Sea shelf

海洋碎屑沉积物是物质源与汇的环境综合作用产物,碎屑矿物的组成受物质来源、风化、搬运、沉积和成岩等多种因素控制,也是搬运营力对沉积物长期作用的结果,矿物组合特征可有效地揭示沉积物的来源、搬运途径、矿物组分分异规律等信息,从而对沉积环境、水动力条件和气候变化等研究提供重要依据,是反演其形成环境特征与物质来源的依据^[1-4]。

中国东部陆架海是世界上最宽广的陆架边缘海之一,海底地形宽浅。济州岛西南海域处于东海外陆架,物质来源和水动力环境复杂。水动力是沉积物搬运活动的基础,东海流系受沿岸流系和黑潮两大流系控制,对沉积物的搬运和沉积格局起着重要作用。数年来研究者对东海陆架碎屑矿物做了大范围调查和分析,认为东海外陆架表层沉积物重矿物含量较高且碎屑矿物组合与长江矿物组合相似,陆架区的物质由长江供给,但在地质年代上有差别,长江从晚更新世早期到现代对东海陆架起着主要作用^[1,5-8]。碎屑矿物和元素地球化学方面的部分研究认为,全新世以来济州岛西南泥质区及周边海域的沉积物主要是黄河源的细颗粒沉积物,由黄海沿岸流搬运到该区并沉积^[9-13]。部分研究者通过地球化学和碳酸盐粒度分析认为外陆架沉积物与现代黄河、长江沉积物均具有亲缘关系,济州岛西南泥质区沉积物为黄河、长江物质以及泥质区周边的再悬浮物质的混合产物^[14-15]。东海外陆架沉积物特征分布和物质来源虽然已取得大量研究成果,研究区涵盖济州岛西南泥质区、东海潮流沙脊等多个沉积单元,不同沉积单元间沉积物的年代、物质来源、动力环境非常复杂,需要高分辨率的数据进行详细剖析。

本文通过对济州岛西南海域的碎屑矿物分布规律进行详细分析,从中探索沉积物来源、碎屑矿物的运移趋势和沉积环境的影响程度,更好地认识矿物在搬运过程中的变化规律和沉积作用,有助于加深对海陆相互作用的认识,深化对中国海区碎屑矿物分布的研究。

1 研究区概况与分析方法

1.1 研究区概况

研究区位于东海外陆架济州岛西南部海域(图 1),水深约 40~130 m,海底地貌为陆架平原,地形由西北向东倾斜,西部分布有数列 NW-SE 走向砂脊,背槽相对高度差约 10 m。研究区受到黄海沿岸流、对马暖流、黄海暖流、台湾暖流的影响,不同的水团在东海北部相遇、混合,混合后的冷水团可到达济州岛西南,形成冷涡^[9,16],动力环境复杂。

1.2 测试方法

2019 年中国地质调查局青岛海洋地质研究所开展东海外陆架北部 1:25 万海洋区域地质调查工作,用“海洋地质七号”调查船获取了 180 个站位的沉积物样品,每个站位选取表层 0~2 cm 部分。

沉积物粒度分析测试在青岛海洋地质研究所实验测试中心完成。使用激光粒度仪(Mastersizer-2000)上机分析,仪器测量范围为 0.02~2 000 μm ,分辨率 0.01 Φ 。将适量的沉积物样品中加入 5 mL

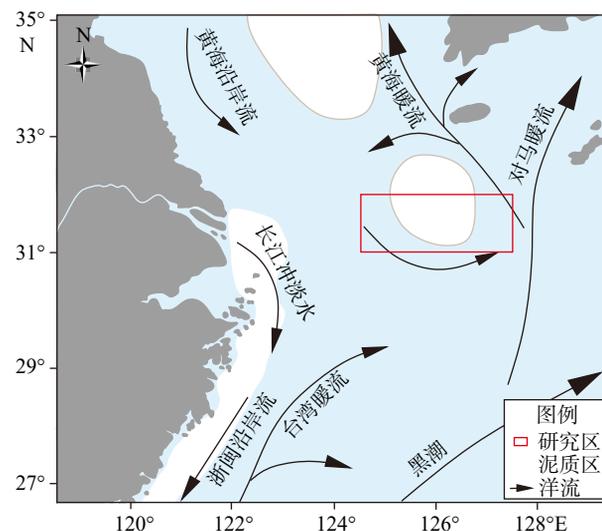


图 1 研究区及地质背景^[9]

Fig.1 Geological background and sampling stations of the study area^[9]

30%的 H₂O₂ 和 0.25 mol/L 的 HCl, 去除有机质和碳酸盐, 搅拌并静置加满蒸馏水的溶液以去除盐分至呈中性, 超声波振荡分散后上机测试。

碎屑矿物鉴定在青岛海洋地质研究所实验测试室完成。取适量样品充分浸泡后, 依次经过 0.25 mm 和 0.063 mm 粒级水筛, 得到粒径 0.063~0.25 mm 的样品, 烘干称重后用三溴甲烷 (CHBr₃, 密度为 2.89 g/mL) 作为介质分离轻、重矿物, 烘干称重后在实体显微镜和偏光显微镜下进行鉴定, 每个样品的轻、重矿物分别鉴定不少于 300 颗粒数, 分别计算轻、重矿物的颗粒百分含量。

2 结果与分析

2.1 粒级组分和沉积物类型分布特征

研究区沉积物平均粒径几乎都大于 3Φ, 中部平

均粒径较细 (>6Φ), 砂含量少, 粉砂和黏土含量高, 平均粒径以环带状向四周逐渐减小, 粒径变粗, 砂含量占比增高 (图 2)。区内沉积物不含砾石, 沉积物类型的命名依据 Folk (1954) 分类方案, 按黏土 (>8Φ)、粉砂 (4~8Φ)、砂 (<4Φ) 进行类型划分。研究区中部以砂质粉砂和砂质泥分布最广, 东部和西部以粉砂质砂为主, 东北部各种沉积物类型混杂, 有含砾泥、砾质泥、砂质粉砂、粉砂质砂、泥质砾 (图 3)。

2.2 重矿物特征

研究区内沉积物中重矿物含量为 0.12%~14.76%, 平均含量为 4.22% (图 4 i)。沉积物重矿物富集程度与沉积类型密切相关, 在分选良好的细砂、中砂中含量高, 在分选不好的粉砂沉积物中次之, 在分选不好的软泥沉积物中含量最低, 中部海域为重矿物含量低值区 (<5%), 对应细粒泥质沉积区, 西部和

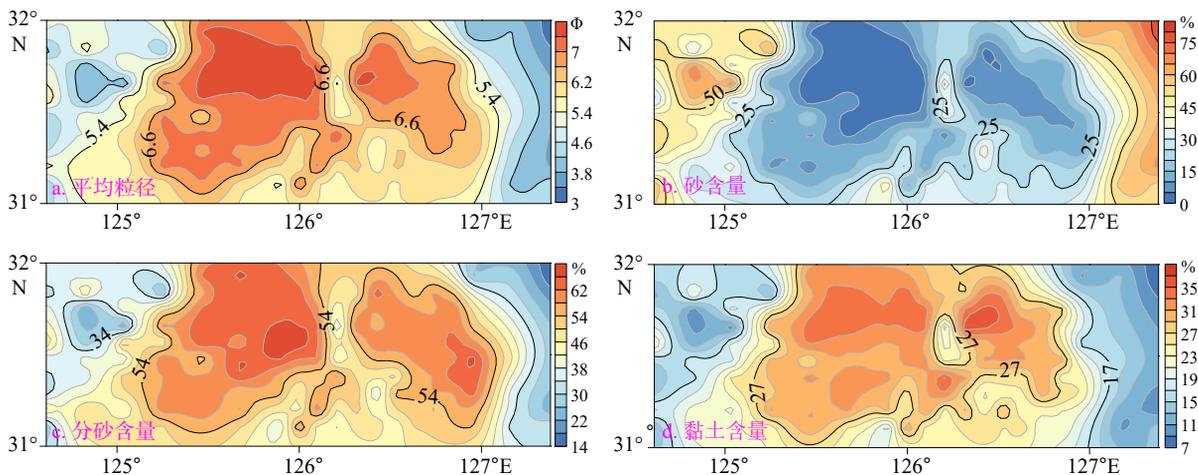


图 2 表层沉积物粒度参数及组分

Fig.2 Particle size parameters and components of the surface sediment

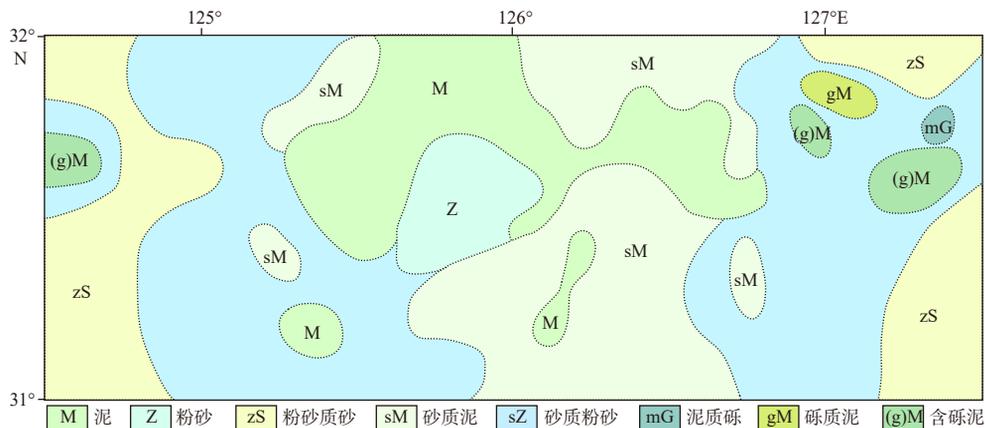


图 3 表层沉积物类型

Fig.3 Types of the surface sediments

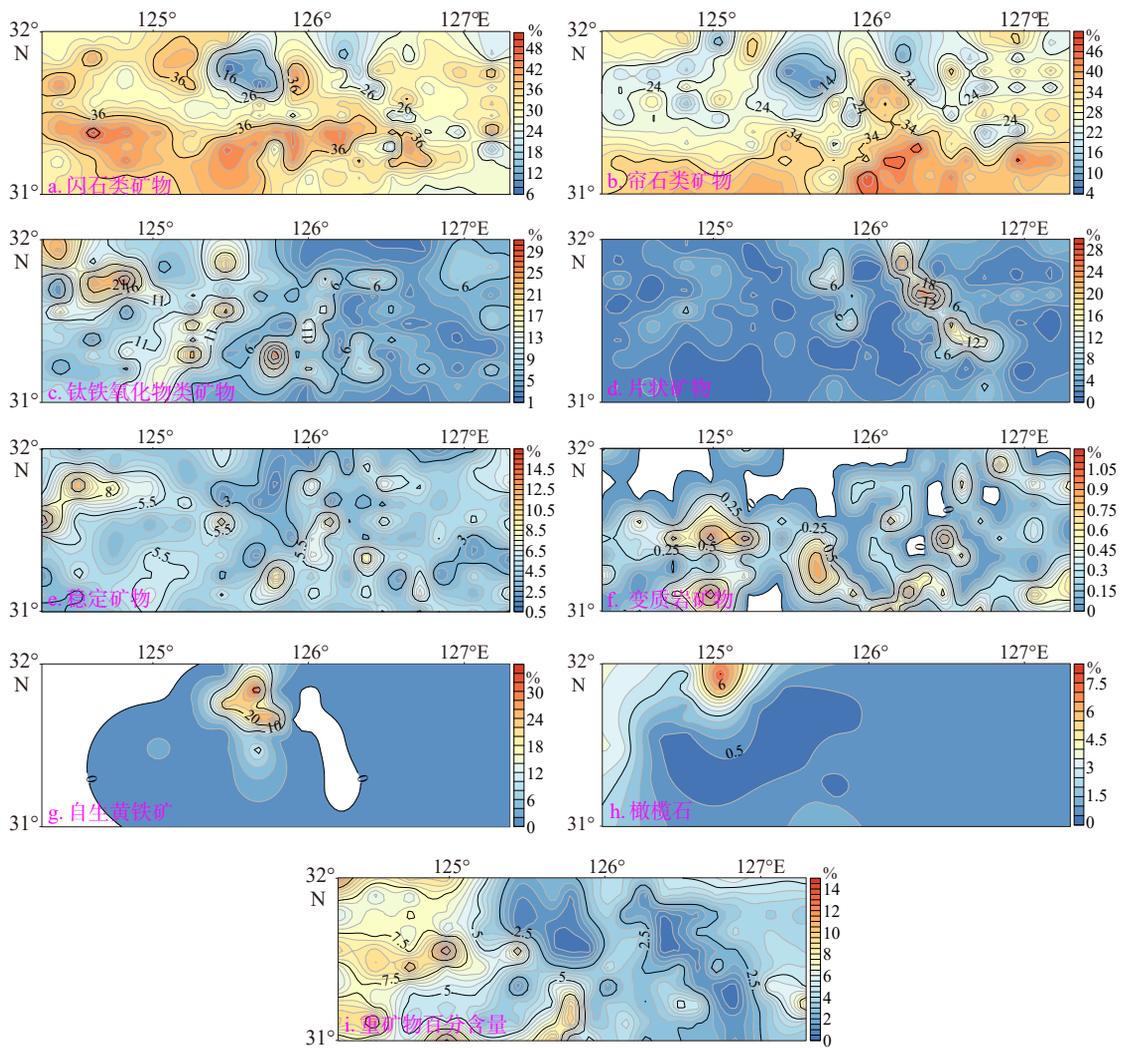


图 4 主要重矿物平面分布和重矿物百分含量

Fig.4 Distribution of major heavy minerals and the percentage of them

东南部海域为重矿物高含量区(>10%), 对应砂质沉积区。

区内共鉴定出闪石类矿物、帘石类、金属类、片状矿物、辉石类、石榴石、楣石、电气石、金红石和自生黄铁矿等重矿物 34 种, 其中以闪石类(平均含量 31.84%)和帘石类(28.63%)为主(表 1), 钛铁氧化物类矿物(7.70%)次之, 自生黄铁矿平均含量为 5.23%, 片状矿物 3.25%。石榴石、楣石、锆石、电气石分布较广, 但含量不高, 总和不足 4.6%。橄榄石为区内特征矿物, 平均含量虽不高(1.67%), 但出现率达到 14.44%。其他矿物如磷灰石、锐钛矿、蓝晶石、十字石、矽线石、宇宙尘等含量甚微, 仅在局部海区或者个别站位出现, 平均含量的总和仅为 2.26%。现将主要矿物和特征重矿物的分布状况进行简述。

研究区以闪石类矿物为主(图 4a), 包括普通角闪石、阳起-透闪石、直闪石, 在重矿物中平均占比

31.84%。本区普通角闪石出现率为 100%, 多为暗绿色至黑色, 少量为绿色和褐色, 部分新鲜矿物为长柱状, 透明, 具玻璃—沥青光泽, 部分矿物经风化作用, 磨圆度较高, 棱角钝化或圆化, 半透明。闪石类矿物属不稳定矿物, 研究区大部分为中等含量(30%~50%), 局部海域为低含量区(5%~30%)。闪石类虽然为优势矿物类型, 但由于普通角闪石等密度较大的矿物受本身物理化学特征的制约, 一般在河流入海口处开始沉积, 在向海输运过程中含量显著减少, 且闪石类属于不耐风化物, 较不稳定, 因此相对于内陆架海域, 本区含量普遍偏低。帘石类矿物为第二优势矿物类型(图 4b), 含量为 4.69%~49.22%, 其中绿帘石、(斜)黝帘石出现率分别为 100%、96.67%, 偶见褐帘石。区内绿帘石多为黄绿色、浅黄绿色, 少部分新鲜未蚀变, 透明, 呈不规则棱角状、短柱状, 具玻璃—油脂光泽, 大部分经风化蚀变后呈不规则粒状, 半透明, 光泽暗淡, 硬度降低。研

表1 研究区沉积物中主要重矿物含量统计
Table 1 Statistics of major heavy minerals in sediment of the study area

矿物种类	矿物颗粒百分比/% (180)						
	平均值	最大值	最小值	出现率	I (75)	II-1 (90)	II-2 (15)
普通角闪石	29.25	47.80	2.64	100	25.97	32.34	27.07
绿帘石	25.63	44.11	3.81	100	23.62	26.85	28.34
闪石类	31.84	51.26	4.99	100	28.41	35.23	28.61
帘石类	28.63	49.22	4.69	100	26.11	30.52	29.93
钛铁氧化物	7.70	33.87	1.26	100	6.11	9.50	4.78
片状矿物	2.95	28.75	0.20	91.11	5.15	1.26	2.03
辉石类	0.42	1.23	0.25	33.89	0.40	0.44	0.41
锆石	0.71	11.18	0.22	4.44	0.57	0.86	0.36
榍石	1.36	3.87	0.19	98.33	1.18	1.56	1.03
石榴石	1.95	5.06	0.29	98.33	1.75	2.07	2.26
橄榄石	1.67	7.67	0.20	14.44	0.55	2.01	0.00
ZTR	1.31	12.06	0.21	96.11	1.10	1.43	1.00
变质岩矿物	0.48	1.24	0.23	41.67	0.16	0.23	0.25
自生黄铁矿	5.24	34.59	0.21	21.67	6.58	0.75	0.00

注：表内除全区列出最小值、最大值和平均值外，其余各列均为平均值；I、II-1和II-2代表研究区分区号，在本文2.4章节阐述了分区依据；括号内代表各列样品个数。

究区大部分海域为高值(>20%)，低值(<10%)主要分布于中部和西北部的部分海域。钛铁氧化物类矿物稳定性较高，能较好地指示沉积物的原始组成，钛铁氧化物类矿物在重矿物中占比约7.70%(图4c)，主要包括稳定铁矿物(磁铁矿和钛铁矿)和氧化铁矿物(赤铁矿和褐铁矿)。研究区氧化铁矿物含量略高于稳定铁矿物，赤-褐铁矿出现率为100%，含量最高值达22.58%，钛铁矿出现率达96.67%，含量最高值为11.54%，磁铁矿出现率为37.22%，含量变化范围为0.25%~5.59%。钛铁氧化物类矿物含量在西部海域出现高值(>20%)，沉积环境倾向于氧化环境，东部海域含量相对较低(<10%)。自生黄铁矿是区内重矿物中含量较高的海相自生矿物，出现率为21.67%，研究区中部出现高值(>30%)，西部出现大面积的零值区，平均含量为5.24%。该类矿物往往明显地受到细粒沉积物控制，在富含Fe和有机质含泥量高于30%的地区出现率较高。片状矿物高值区位于中部(图4d)，包括黑云母、白云母、绿泥石，在重矿物中出现率为88.67%，平均含量2.38%，个别站位高达25.69%，其中主要以白云母(2.16%)占比最高，其次为黑云母(1.01%)，绿泥石出现率为6.11%，含量占比为0.28%~1.20%。橄榄石为区内特征矿物(图4h)，最高值达7.67%，主要分

布在研究区西北部。研究区辉石类矿物含量普遍为0.30%~1.00%，均值为0.42%左右。辉石类矿物极易被风化，在重矿物中比重相对较小。稳定矿物组合包括石榴石、锆石、榍石、金红石和电气石等，它们在研究区含量不高但是分布较为广泛，主要以石榴石和榍石为主，两种矿物出现率均为98.33%，电气石出现率也较高，为91.11%，平均含量0.90%，锆石出现率为57.78%，含量为0.22%~11.18%，金红石出现率为11.67%。石榴石、榍石控制了稳定矿物组合的分布，高值(>3%)含量区面积不规则，呈斑块串珠状斑杂相间分布。变质岩矿物包括十字石、蓝晶石和红柱石，区内以十字石为主，出现率为37.22%，含量为0.23%~1.21%，其次为蓝晶石，出现率为6.67%，含量为0.25%~0.80%。高值区(>1%)分布在31.5°N以南(图4f)，以斑块状分布，呈串珠状排列，可能与海底地形起伏相关。

2.3 轻矿物特征

轻矿物的高含量区(>95%)位于研究区中部，低含量区(<90%)呈斑块状散布在西部海区，其余海区均为中等含量(90%~95%)(图5e)。研究区共鉴定出轻矿物13种，有石英、斜长石、钾长石、黑云母、白云母、风化云母、海绿石、绿泥石、碳酸

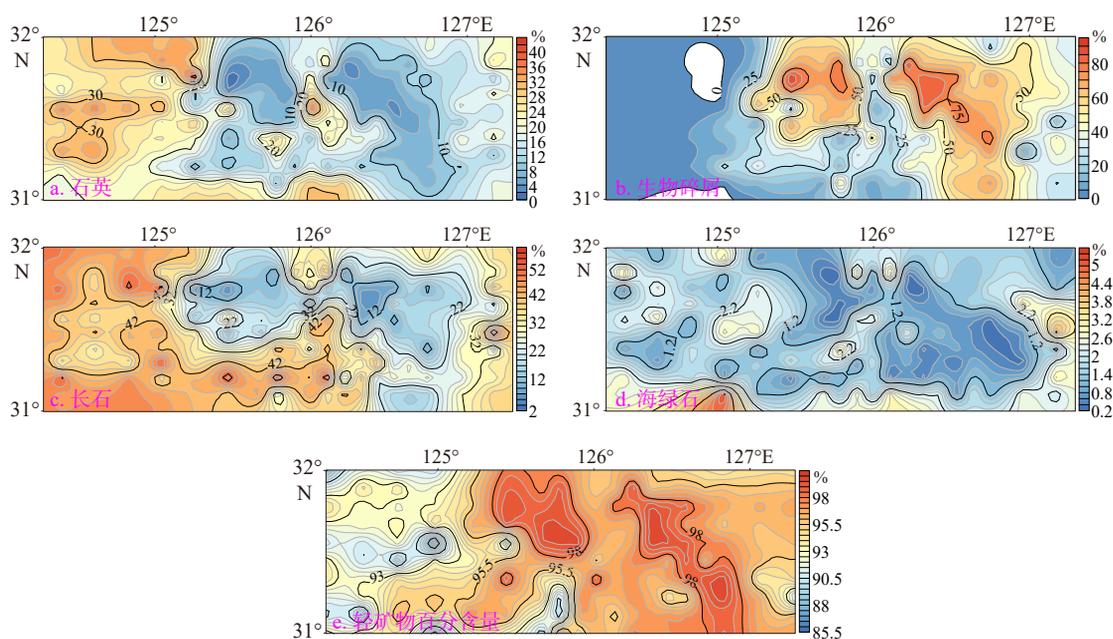


图 5 主要轻矿物平面分布和轻矿物百分含量

Fig.5 Distribution of major light minerals and the percentage of them

盐、石墨和生物碎屑等,各矿物种类颗粒百分含量见表 2。

石英为海砂的主要成分,在各站位含量较高,分布较广(图 5a)。石英分布与底质类型呈对应关系,主要在粗粒沉积物中富集,与沉积物平均粒径值呈负相关,泥质区石英含量很低,但泥质区中部石英含量较高,可能与冷涡有关。西部为含量高值区,最高可达 45%。长石主要为斜长石和钾长石,在各站位为含量最高的轻矿物,最高可达 59%,平均含量 31%左右,与石英含量分布特征相似,中部都为低值区。西部长石高值区与石英高值区大致

表现为此消彼长的关系。区内生物碎屑平均值达到 40.16%,出现率为 93.33%,分布较广(图 5b),含量较高,其分布特征与石英大致相反,中部泥质沉积的大片海域出现生物碎屑含量高值,达到 90% 以上,周围为生物碎屑低值区,基本低于 5%。海绿石是区内轻矿物中典型的自生矿物,出现率达到 88%,分布广泛(图 5d),含量为 0.26%~5.37%,中部泥质沉积区含量较低,东部、南部及西部高值区呈斑块状分布。海绿石富集区对应沉积类型为分选良好的细砂和中砂。

表 2 研究区沉积物中主要轻矿物含量统计

Table 2 Statistics of major light minerals in sediment of the study area

矿物种类	矿物颗粒百分比(180)						
	平均值	最大值	最小值	出现率	I (75)	II-1 (90)	II-2 (15)
石英	16.42	45.05	0.94	100	9.06	22.47	16.95
斜长石	29.92	59.26	3.44	98.89	18.04	39.28	31.57
钾长石	1.63	11.76	0.30	77.78	1.26	1.89	1.54
黑云母	1.01	36.44	0.25	41.67	1.37	0.40	0.31
白云母	0.94	6.65	0.25	70.56	1.26	0.55	0.50
风化云母	0.82	4.44	0.25	70.56	0.99	0.67	0.52
海绿石	1.47	5.37	0.26	87.78	1.02	1.71	1.85
生物碎屑	39.68	91.82	0.29	93.33	62.94	18.02	38.49

注:表内除全列出最小值、最大值和平均值外,其余各列均为平均值; I、II-1和II-2代表研究区分区号;括号内代表各列样品个数。

2.4 矿物组合分区

矿物组合分区能反映控制矿物区域性分布的物源、水动力、地形地貌等因素,因此本文运用SPSS软件对研究区碎屑矿物组成进行分区分析。以闪石类矿物、帘石类矿物、钛铁氧化物类矿物等16个主要矿物种类含量作为参数变量,进行Q型聚类分析,聚类方法采用ward法,距离计算选取欧氏距离平方,数据经标准化后得到聚类谱系图,将研究区划分为3个矿物组合区(图6)。每个分区矿物特征与底质沉积物类型密切相关,具有不同的优势矿物和特征矿物组合,表1和表2综合了各分区碎屑矿物的基本数据。

I区:样品数75个,位于研究区中北部,底质类型主要为黏土和粉砂,本区重矿物含量为研究区最低,平均占比2.23%。主要优势矿物组合为普通角闪石-绿帘石-自生黄铁矿-钛铁氧化物类矿物-片状矿物,其次为(斜)黝帘石、阳起-透闪石,其平均含量分别为25.97%、23.62%、6.58%、6.11%、4.26%、2.55%、2.43%。I区以高含量的自生黄铁矿、片状矿物和生物碎屑为特征,重矿物中生物碎屑含量最高达53.67%,远远高于II-1亚区和II-2亚区(表1)。轻矿物优势组合为长石-石英-片状矿物-碳酸盐,海绿石(0.81%)含量为研究区最低,片状矿物黑云母(1.37%)、白云母(1.26%)含量为研究区最高,轻矿物中生物碎屑平均含量达62.94%。

II-1亚区:样品数90个,位于研究区西部,底质类型为粉砂质砂和砂质粉砂,本区重矿物含量在整个研究区为最高,平均占比5.79%。主要优势矿物组合为普通角闪石-绿帘石-钛铁氧化物类矿物-石榴石-橄榄石,其次为榍石和磁铁矿,其平均含量分别为32.34%、26.85%、9.50%、2.07%、2.01%。本区的闪石类(35.23%)、帘石类(30.52%)、钛铁氧化物类矿物(9.50%)、稳定矿物(4.00%)和橄榄石(2.01%)含量均为研究区最高,片状矿物(0.94%)和

自生黄铁矿(0.75%)不占优势。重矿物中生物碎屑(2.45%)明显低于I区、II-2亚区。轻矿物优势组合为长石-石英-碳酸盐-海绿石,片状矿物(0.74%)含量很低,轻矿物中生物碎屑平均含量为18.02%。

II-2亚区:样品数15个,位于研究区东部,底质类型复杂多样,以砂质粉砂和粉砂质砂为主,东北部存在含砾泥、砾质泥、泥质砾呈斑块状分布,分选较差,本区重矿物含量在整个研究区属中等,平均占比4.75%。主要优势矿物组合为绿帘石-普通角闪石-钛铁氧化物类矿物-石榴石,其次为(斜)黝帘石、阳起-透闪石、钛铁矿,其平均含量分别为28.34%、27.06%、3.34%、2.26%、1.71%、1.66%、1.39%。本区帘石类矿物(29.93%)略高于闪石类矿物(28.61%),自生黄铁矿、橄榄石、直闪石、矽线石等矿物均未出现。重矿物中生物碎屑平均含量达14.30%。轻矿物优势组合为长石-石英-海绿石-碳酸盐,该区海绿石(1.92%)含量为研究区最高,为特征自生矿物。轻矿物中生物碎屑平均含量为38.49%,明显低于I区。

3 讨论

3.1 重矿物特征指数及其指示意义

在一定的水动力条件下,稳定重矿物的比值可以较好的反映沉积物的物源特征,本文选取UM/SM、钛铁氧化物类矿物与普通角闪石和绿帘石的比值用于探讨沉积物输运过程中物质来源、动力系统、沉积环境等控制因素的变化^[17-18]。不稳定矿物(UM)选取闪石类、帘石类、辉石类矿物和橄榄石,这些矿物化学性质不稳定,易发生蚀变。稳定矿物(SM)选取变质岩矿物、钛铁氧化物类矿物、榍石、石榴石、自生黄铁矿,这类矿物化学性质稳定,抗磨蚀能力强,不易被风化。

不稳定矿物/稳定矿物(UM/SM)可以代表矿物

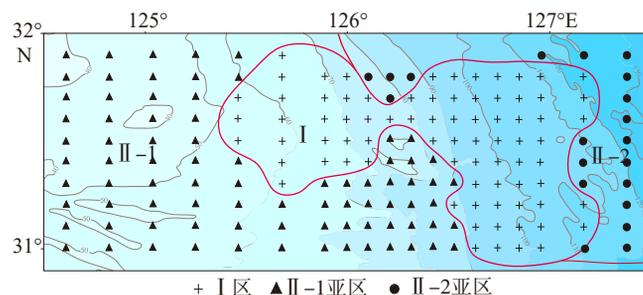


图6 碎屑矿物组合分区

Fig.6 Zonation of clastic mineral assemblage in the study area

的风化程度,反映沉积物的搬运距离和沉积动力环境^[19]。研究区 UM/SM 分布受海底地形影响明显(图 7a),比值都在 50 以下,大部分海域低于 12,说明本区矿物风化程度高,在长距离输运过程中遭受较强水动力的冲刷磨蚀,部分不稳定矿物未能保存。钛铁氧化物类矿物稳定性较高,能较好地指示沉积物的原始组成,普通角闪石、绿帘石稳定性较低但含量较高,且普通角闪石易风化为绿帘石,钛铁氧化物类矿物/(普通角闪石+绿帘石)可以用来判别物质输运方式的变化^[20]。研究区该判别值均较低(图 7b),西部相对较高,向东逐渐减小,表明河流物质对西部海域影响略大,陆源物质输入较丰富,东部为低值区,受河流影响明显减弱。

3.2 碎屑矿物物源分析

陆架沉积作用有两个物源,即陆源和架源,在低位体系域和高位体系域沉积时期,陆架沉积物的源区在陆地,地表径流将风化产物搬运到海区,再由海流输运到远处,即陆源物质;海侵体系域沉积时期,沉积物的源区转为外陆架的残留砂,沉积物随海流由外陆架向陆地输运,即架源物质^[21]。根据碎屑矿物特征对分区成因和物质输运模式进行讨论。

(1) 中部现代沉积区(I 区)

本区位于研究区中北部的大面积区域,受低能涡旋环流控制,水动力条件较弱,细粒物质得以存留,沉积物粒度较细。重矿物特征指数指示本区沉积物受河流影响相对较大,搬运距离较远,成熟度相对较高,优势矿物组合总体表现为现代陆源沉积特征。I 区高含量的片状矿物和自生黄铁矿均指示局部为水动力微弱、较平静的微还原沉积环境。

重矿物含量均值为 2.23%,白云母和黑云母含量占显著优势,与黄海沉积物重矿物含量偏低(均值 3%)、片状矿物含量高的特点相一致。黄海东南部矿物区以普通角闪石、绿帘石、片状矿物为主^[5],与本区优势矿物组合相似。126.5°E 以东外陆架为悬浮物质浓度低值区($<5 \text{ mg/L}$),但悬浮物质次级高浓度区经常出现在本研究区海域^[22-24],且 31.83°N、126°E 处百年来沉积速率为 0.29 cm/a ^[25],相比较残留沉积区,沉积速率较高,为现代沉积。黄海东南部矿物区与 I 区相连,认为本区在环流作用下受到黄海东南部矿物区的影响。此外, I 区生物碎屑含量在研究区占绝对优势,可能是受到黄海环流影响,冷涡控制下的冷水种繁盛,也可能是外海水涌升造成生物体的富集,使细粒沉积层中富含现代有孔虫壳体,生物沉积和自生沉积是该区重要的沉积方式。

(2) 外围残留沉积区(II 区)

II 区位于中部现代沉积区的外围,黏土和粉砂含量降低,砂含量增高,底质类型以砂质粉砂和粉砂质砂为主,局部存在含砾泥、砂质泥、泥,分选差,可能与东海大陆架晚更新世以来海退缓慢、海进迅速的环境特点相关,慢速的海退使本区保留着浅海相矿物组合特征,重矿物仍以普通角闪石、绿帘石、钛铁氧化物类矿物为主,而快速的海进过程中海水无法将泥沙均匀分散,很难对低海面时的沉积物进行充分分选和改造。该区有高含量的钛铁氧化物类矿物、ZTR、橄榄石、石榴石、榍石等稳定矿物,自生黄铁矿、生物碎屑和片状矿物含量远低于 I 区。自生海绿石普遍发育,镜下观察海绿石为褐绿色至黑色,不规则圆粒状,表面具有白色网格

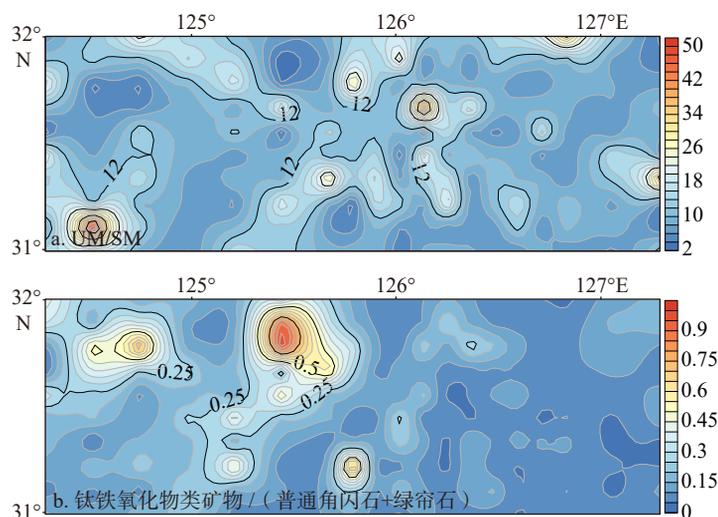


图 7 研究区重矿物特征指数分布

Fig.7 Distribution of characteristic indices of heavy mineral

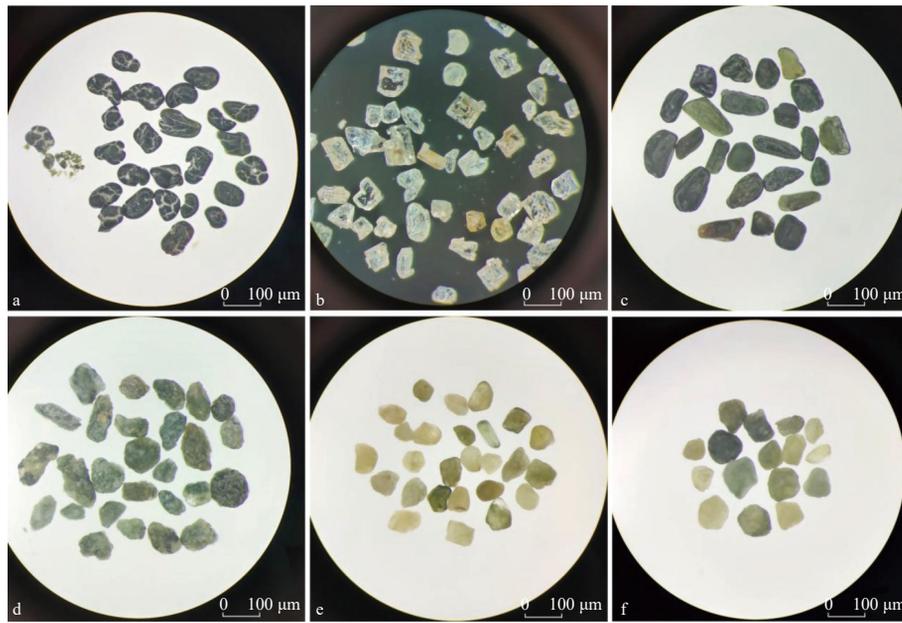


图8 体式显微镜下矿物照片

a. 海绿石, b. 橄榄石, c. 普通角闪石(棱角钝化或圆化), d. 普通角闪石(已蚀变), e. 绿帘石(磨圆度较高), f. 绿帘石(已蚀变)。

Fig.8 Mineral photos under stereo microscope

a. Glauconite, b. olivine, c. ordinary amphibole (corner passivation or rounding), d. ordinary amphibole (altered), e. epidote (high roundness), f. epidote (altered).

状龟裂(图8a),指示Ⅱ区沉积底质环境透气性好、水体交换好,有充足的Fe、K来源,少有现代陆源沉积的干扰,为沉积作用缓慢的弱还原环境^[5]。变质岩矿物虽然没有广布,但仍不乏含量高值区(>1%),此类矿物在内陆架大部分海域含量均为零。以上碎屑矿物特征明显区别于现代沉积,更符合残留沉积的特点。古生物学和年代研究证实东海北部是晚更新世低海平面时期的残留沉积,确定其为古长江物质,虽然有些地区形成了潮流沙脊,但基本保留着原来的沉积特征,相当于古长江三角洲的前积层,可称为残留前积沉积^[5,20,26]。区内钛铁氧化物类矿物和ZTR等稳定矿物硬度大,耐受海流等强水动力的长期冲刷淘洗,不易被水流磨蚀搬运,而片状矿物等硬度低的矿物易破碎不耐侵蚀,易被水流搬运,在物源供应不足的情况下,导致含量低。Ⅱ区东部和西部的碎屑矿物分别表现出独特的区域性特征,因此根据优势重矿物的差异,将该区分为Ⅱ-1区和Ⅱ-2区两个亚区。

Ⅱ-1亚区:本区位于研究区西部,所占范围较大,约为研究区的一半。重矿物含量5.79%,与东海大陆架重矿物含量高(均值6.9%)的特点^[5]较一致。轻矿物组合与东海外陆架轻矿物组合(长石-石英-碳酸盐-海绿石)相同,优势重矿物组合(普通角闪石-绿帘石-钛铁氧化物类矿物-石榴石-橄榄石)在

东海外陆架重矿物组合(普通角闪石-绿帘石-钛铁氧化物类矿物-片状矿物-石榴石)^[21]的基础上,又具备区域性特色,以高含量的橄榄石为特征。镜下观察区内橄榄石物理特征略带有黄绿色调,透明,普遍含有黑色钛铁氧化物类矿物包裹体,大部分具有完整的柱状晶形,部分晶形虽破碎,但未经磨蚀,柱边平直、尖锐(图8b),说明未经远距离搬运,认为是受到附近火山物质的影响。本区沉积物频率曲线为双峰态(图9),表明沉积物不是同一时期的产物。根据¹⁴C测年获取到31.5°N、125.5°E处30 ka以来沉积速率为4.8 cm/ka^[25],明显低于高速率的现代沉积区,高于低速率的残留沉积区。综合以上认为Ⅱ-1亚区沉积物是以古长江的残留前积沉积为基底,受到中部沉积区的影响,接受了少量悬浮再悬浮的现代陆源沉积,同时又具备区域性特点。

Ⅱ-2亚区:该亚区位于研究区东北部,所占范围较小,但坡降增大。轻矿物组合为长石-石英-海绿石-碳酸盐,海绿石平均含量为研究区最高,优势重矿物组合为绿帘石-普通角闪石-钛铁氧化物类矿物-石榴石,未见橄榄石和自生黄铁矿,片状矿物含量为研究区最低,与东海外陆架晚更新世沉积物中优势重矿物组合(普通角闪石-绿帘石-钛铁矿和磁铁矿)^[27-28]有相似性,但也有所差异。区内绿帘石含量高,显微镜下观察到普通角闪石和绿帘石风化

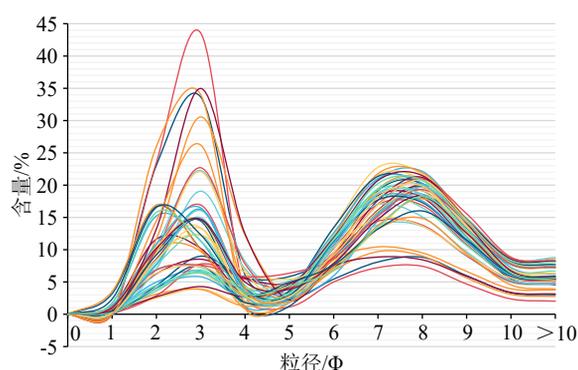


图 9 II-1 亚区沉积物粒度频率分布曲线

Fig.9 Frequency distribution curve of sediment particle size in sub-region

程度较高,磨圆度高,表面颜色不均匀,半透明至不透明(图 8c—f),且本区岩屑含量较高,推测是沉积物经过水流长期的冲刷淘洗,矿物风化破碎,失去了原本形貌,普通角闪石在长期风化作用下蚀变为绿帘石。根据 ^{14}C 测年获取到 127.5°E 、 31.5°N 处 30 ka 以来沉积速率为 2.0 cm/ka ^[25],沉积速率很低。一般来说,残留沉积物以高含量的钛铁矿、磁铁矿为特征,而本区钛铁氧化物类矿物中钛铁矿和磁铁矿含量低于赤-褐铁矿,可能是钛铁矿在变质作用过程中分解成赤铁矿,磁铁矿也可遇到热液作用转变成假象赤铁矿,导致赤-褐铁矿含量增高,或钛铁矿受到热液蚀变转变为白钛石,含量降低^[29]。钛铁氧化物类矿物含量比 II-1 亚区低,水动力条件是影响重矿物分布的重要因素,可能由于入海沉积物以及黄海东南部矿物区再悬浮物质在输运过程中,受到波浪和潮流等水动力的作用,密度较大的金属类稳定矿物进行差异性沉降,受到中部冷涡的阻隔,到达本区的钛铁氧化物类矿物减少。重矿物中生物碎屑占一定的比例,可能是残留种属软体动物和有孔虫壳体较多。综合认为 II-2 亚区为古长江的残留沉积,在中部冷涡作用下,很少有现代物质的加入,区内不排除在当地环境生长的生物体作用下与 I 区互相调整的物质。

3.3 物质输运模式及来源的探讨

长江连接了最大大陆亚欧大陆和最大海洋太平洋,其携带的大量陆源碎屑是东海大陆架及邻近海区沉积物的重要来源^[8],苏北老黄河口外泥质区因侵蚀每年约 5 亿吨沉积物进入东部南黄海和东海^[8],对陆架的物质贡献也不可忽略。3 个矿物分区重矿物含量和矿物特征表现出黄海与东海沉积物之间的过渡现象。已有研究表明,黄东海陆架区受

季风的影响呈明显的“夏储冬输”特征,老黄河物质控制了连云港到长江口以北的沿海地区,在强烈的西北季风影响下,废黄河水下三角洲物质发生侵蚀再悬浮,黄海沿岸流在冬季风的驱使下向东扩散作用也增强,黄河沿岸流将废黄河口再悬浮物质向东输送,直至济州岛西南海域^[29-32]。

通过分析研究区碎屑矿物分布特征,并结合前人的研究成果认为,在冬季风作用下,黄海沿岸流携带废黄河口被侵蚀物质南下,在 $32^{\circ}\sim 33^{\circ}\text{N}$ 附近转向东南方,与长江口向东逸散的部分长江物质一同流向东海,黄海沿岸流与黄海暖流形成环流体系,将黄河-长江混合型入海沉积物以及黄海悬浮再悬浮物质向东输运并沉积。I 区中部泥质沉积与南黄海的泥质沉积相连接,悬浮体浓度等值线走向呈舌状从黄海向东南突出,表明黄海悬浮物质向东海北部运移的趋势^[21]。南黄海涡旋和上升流将黄海东南部沉积区底层沉积物再悬浮,密度较轻且易悬浮的片状矿物、碳酸盐类矿物由于物理形态特征,在水动力作用下经过再悬浮并搬运至研究区,在中部冷涡的作用下不断堆积于海底,形成现在的分布格局,复杂的水动力环境使本区表层沉积物具有“混源性”,在过去的 7 ka 中,长江入海沉积物主要在杭州湾大量堆积,剩余部分向南搬运至内陆架浙闽沿岸沉积,仅有少量长江源沉积物离岸向外陆架方向扩散,一般很难越过内陆架进入 124°E 以东的外陆架海域^[1, 22, 33-36]。尽管一些研究认为,长江海岸带细颗粒沉积物在冬季可以以悬浮体形式从北部陆架边缘的一定区域扩散至中、外陆架地区^[30, 37-39],但这部分跨陆架运输的长江物质并不能构成东海中、外陆架现代沉积物的主要部分,且凡是受黄河物质影响的地区均以高含量片状矿物为特征^[27],因此认为 I 区和 II-1 区上覆的现代沉积物受南黄海东南沉积区影响,主要源自黄河。由于现代长江与古长江沉积物矿物组合基本一致^[5],结合典型矿物三端元判别图综合分析认为, I 区表层沉积物主要为黄河源的现代沉积, II 区表层沉积物以古长江的残留沉积为背景, II-1 亚区上覆部分黄河源现代沉积物, II-2 亚区则很少有现代物质加入。

4 结论

(1) 东海外陆架北部海域共鉴定出重矿物 34 种,优势重矿物种类主要为闪石类、帘石类和钛铁氧化物类矿物,橄榄石和变质岩矿物是区别内陆架沉积的标志性矿物。轻矿物 13 种,以长石、石英、

片状矿物为主,海绿石为特征自生矿物。

(2)根据Q型聚类分析将本区碎屑矿物划分为两个矿物区(I和II区),II区包含两个矿物组合亚区,中部现代沉积区(I区)矿物组合受黄海东南部矿物区影响,在环流体系作用下,主要为黄河源的现代沉积,生物沉积和自生沉积也是该区重要的沉积方式。II区表层沉积物以古长江的残留沉积为背景,II-1亚区上覆部分黄河源现代沉积物,II-2亚区则很少有现代物质加入。

(3)自生黄铁矿和片状矿物指示中部现代沉积区(I区)为水动力微弱、较平静的微还原沉积环境。海绿石指示外围残留沉积区(II区)沉积底质环境透气性好、水体交换好,有充足的Fe、K来源,为少有现代陆源沉积的干扰、沉积作用缓慢的弱还原环境。

致谢: 感谢自然资源部国际合作司项目资助。

参考文献 (References)

- [1] 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. [ZHANG Kaidi, LI Anchun, DONG Jiang, et al. Detrital mineral distributions in surface sediments of the East China Sea: Implications for sediment provenance and sedimentary environment [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2016, 34(5): 902-911.]
- [2] Morton A C, Hallsforth C. Identifying provenance-specific features of detrital heavy mineral assemblages in sandstones [J]. *Sedimentary Geology*, 1994, 90(3-4): 241-256.
- [3] 金秉福, 宫立新, 宋键. 大沽河泥沙来源的重矿物分析及其环境意义[J]. *海洋科学*, 2010, 34(10): 71-76. [JIN Bingfu, GONG Lixin, SONG Jian. Heavy mineral analysis in the sediment originated from the Daguhe River and its environmental significance [J]. *Marine Sciences*, 2010, 34(10): 71-76.]
- [4] 梅西, 李学杰, 密蓓蓓, 等. 中国海域表层沉积物分布规律及沉积分异模式[J]. *中国地质*, 2020, 47(5): 1447-1462. [MEI Xi, LI Xuejie, MI Beibei, et al. Distribution regularity and sedimentary differentiation patterns of China seas surface sediments [J]. *Geology in China*, 2020, 47(5): 1447-1462.]
- [5] 陈丽蓉. 中国海沉积矿物学[M]. 北京: 海洋出版社, 2008: 121-155. [CHEN Lirong. *Sedimentary Mineralogy of the China Sea*[M]. Beijing: China Ocean Press, 2008: 121-155.]
- [6] 王昆山, 石学法, 林振宏. 南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. [WANG Kunshan, SHI Xuefa, LIN Zhenhong. Assemblages, provinces and provenances of heavy minerals on the shelf of the southern Yellow Sea and northern East China Sea [J]. *Advances in Marine Science*, 2003, 21(1): 31-40.]
- [7] 林晓彤. 东海外缘沉积物来源的判别分析[D]. 中国海洋大学硕士学位论文, 2003. [LIN Xiaotong. *Discriminant analysis of the sediment provenance in outer East China Sea*[D]. Master Dissertation of Ocean University of China, 2003.]
- [8] 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*, 2012, 34(6): 114-125. [WANG Zhongbo, YANG Shouye, ZHANG Zhixun, et al. The heavy mineral assemblages of the surface sediments on the northeast shelf of the East China Sea and their environmental implication [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2012, 34(6): 114-125.]
- [9] 戴慧敏. 济州岛西南泥质区不同粒级沉积物的元素地球化学特征及物源分析[D]. 中国海洋大学硕士学位论文, 2005. [DAI Huimin. *Study on geochemistry characteristics and sources in the mud area southwest of Cheju Island*[D]. Master Dissertation of Ocean University of China, 2005.]
- [10] 王中波, 杨守业, 王红霞, 等. 南黄海表层沉积物碎屑石榴石化学组成及物源示踪应用[J]. *地球科学进展*, 2012, 27(S1): 514. [WANG Zhongbo, YANG Shouye, WANG Hongxia, et al. Detrital garnet compositions of the surface sediments in the South Yellow Sea and their tracing implications [J]. *Advances in Earth Science*, 2012, 27(S1): 514.]
- [11] Yuan D L, Hsueh Y. Dynamics of the cross-shelf circulation in the Yellow and East China Seas in winter [J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2010, 57(19-20): 1745-1761.
- [12] Yang Z S, Milliman J D. Fine-grained sediments of Changjiang and Huanghe Rivers and sediment sources of East China Sea [C]//Proceedings of the International Symposium on Sedimentation on the Continental Shelf, with Special Reference to the East China Sea. Beijing: China Ocean Press, 1983: 405-415.
- [13] Milliman J D, Beardsley R C, Yang Z S, et al. Modern Huanghe-derived muds on the outer shelf of the East China Sea: identification and potential transport mechanisms [J]. *Continental Shelf Research*, 1985, 4(1-2): 175-188.
- [14] 李双林, 李绍全, 孟祥君. 东海陆架晚第四纪沉积物化学成分及物源示踪[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2002, 22(4): 21-28. [LI Shuanglin, LI Shaoquan, MENG Xiangjun. Chemical composition and source tracing of late quaternary sediments in the East China Sea shelf [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2002, 22(4): 21-28.]
- [15] 杨作升, 范德江, 郭志刚, 等. 东海陆架北部泥质区表层沉积物碳酸盐粒级分布与物源分析[J]. *沉积学报*, 2002, 20(1): 1-6. [YANG Zuosheng, FAN Dejiang, GUO Zhigang, et al. Distribution of the carbonate clast size and the provenance analyses of the surface sediments in the northern East China Sea [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2002, 20(1): 1-6.]
- [16] 刘健, 李绍全, 王圣洁, 等. 末次冰消期以来黄海海平面变化与黄海暖流的形成[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1999, 19(1): 13-24. [LIU Jian, LI Shaoquan, WANG Shengjie, et al. Sea level changes of the Yellow Sea and formation of the Yellow Sea warm current since the Last Deglaciation [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1999, 19(1): 13-24.]
- [17] 颜彬, 谢敬谦, 黄博, 等. 广东近岸海域矿物特征指数分布及指示意

- 义[J]. 海洋地质前沿, 2017, 33(11): 1-8. [YAN Bin, XIE Jingqian, HUANG Bo, et al. Detrital mineral indexes of the bottom sediments of Guangdong coastal water: distribution and implications [J]. Marine Geology Frontiers, 2017, 33(11): 1-8.]
- [18] 刘金庆, 宋红瑛, 印萍, 等. 威海南部近岸泥质区晚更新世以来的重矿物组合特征及对物源的指示[J]. 海洋学报, 2018, 40(3): 129-140. [LIU Jinqing, SONG Hongying, YIN Ping, et al. Characteristics of heavy mineral assemblage and its indication of provenance in the mud area off the southern coast of Weihai since the Late Pleistocene [J]. Haiyang Xuebao, 2018, 40(3): 129-140.]
- [19] 刘忠诚. 辽东湾海岸带沉积物碎屑矿物分析及其环境意义[D]. 鲁东大学硕士学位论文, 2014. [LIU Zhongcheng. Detrital mineralogy and its environmental indicative significance of the sediments of Coastal zone in Liaodong Bay[D]. Master Dissertation of Ludong University, 2014.]
- [20] 何起祥. 海洋沉积作用的物源控制[J]. 海洋地质前沿, 2011, 27(1): 8-13. [HE Qixiang. Sediment source and its bearing on marine sedimentations [J]. Marine Geology Frontiers, 2011, 27(1): 8-13.]
- [21] 李家彪. 东海区域地质[M]. 北京: 海洋出版社, 2008. [Li Jiabiao. East China Sea Regional Geology[M]. Beijing: China Ocean Press, 2008.]
- [22] 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, 2002, 24(5): 71-80. [GUO Zhigang, YANG Zuosheng, ZHANG Dongqi, et al. Seasonal distribution of suspended matter in the northern East China Sea and barrier effect of current circulation on its transport [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2002, 24(5): 71-80.]
- [23] 孙效功, 方明, 黄伟. 黄、东海陆架区悬浮体输运的时空变化规律[J]. 海洋与湖沼, 2000, 31(6): 581-587. [SUN Xiaogong, FANG Ming, HUANG Wei. Spatial and temporal variations in suspended particulate matter transport on the Yellow and East China Sea shelf [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2000, 31(6): 581-587.]
- [24] 胡敦欣, 韩舞鹰, 章申, 等. 长江、珠江口及邻近海域陆海相互作用[M]. 北京: 海洋出版社, 2001. [HU Dunxin, HAN Wuying, ZHANG Shen, et al. Land-Ocean Interaction in Yangtze River, Pearl River Estuary and Adjacent Waters[M]. Beijing: China Ocean Press, 2001.]
- [25] 金翔龙. 东海海洋地质[M]. 北京: 海洋出版社, 1992. [JIN Xianglong. Marine Geology of the East China Sea[M]. Beijing: China Ocean Press, 1992.]
- [26] 刘振夏, 夏东兴. 中国近海潮流沉积沙体[M]. 北京: 海洋出版社, 2004. [LIU Zhenxia, XIA Dongxing. Tidal Sands in the China Seas[M]. Beijing: China Ocean Press, 2004.]
- [27] 金秉福, 林振宏, 时振波, 等. 东海外陆架晚更新世沉积物中的有用重矿物及其资源潜力[J]. 古地理学报, 2004, 6(3): 372-379. [JIN Bingfu, LIN Zhenhong, SHI Zhenbo, et al. Valuable heavy minerals and their resource potential on outer shelf in East China Sea during the Late Pleistocene [J]. Journal of Palaeogeography, 2004, 6(3): 372-379.]
- [28] 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. [CHEN Lirong, SHEN Shunxi, XU Wenqiang, et al. An approach to the detrital assemblages and their distribution patterns in the sediments of the China Sea [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1986, 4(3): 87-96.]
- [29] 杨作升, 郭志刚, 王兆祥, 等. 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): 81-90. [YANG Zuosheng, GUO Zhigang, WANG Zhaoxiang, et al. The macroscopic pattern of the transport of suspended matter from the Yellow-East China Sea shelf to its eastern deep-sea area [J]. Acta Oceanologica Sinica, 1992, 14(2): 81-90.]
- [30] 郭志刚, 杨作升, 雷坤, 等. 东海陆架北部泥质区沉积动力过程的季节性变化[J]. 青岛海洋大学学报, 1999, 29(3): 507-513. [GUO Zhigang, YANG Zuosheng, LEI Kun, et al. Seasonal variation of the sedimentary dynamic processes for the mud area in the northern East China Sea [J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 1999, 29(3): 507-513.]
- [31] 杨作升, 郭志刚, 王兆祥, 等. 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(中文版), 1992(2): 81-90. [YANG Zuosheng, GUO Zhigang, WANG Zhaoxiang, et al. The macroscopic pattern of the transport of suspended matter from the Yellow-East China Sea shelf to its eastern deep-sea area [J]. Acta Oceanologica Sinica(Chinese Version), 1992(2): 81-90.]
- [32] 秦蕴珊, 李凡, 徐善民, 等. 南黄海海水中悬浮体的研究[J]. 海洋与湖沼, 1989, 20(2): 101-112. [QIN Yunshan, LI Fan, XU Shanmin, et al. Suspended matter in the South Yellow Sea [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1989, 20(2): 101-112.]
- [33] 陈丽蓉, 徐文强, 申顺喜. 东海沉积物的矿物组合及其分布特征[J]. 科学通报, 1979(15): 709-712. [CHEN Lirong, XU Wenqiang, SHEN Shunxi. Mineral composition and their distribution patterns in the sediments of the East China Sea [J]. Chinese Science Bulletin, 1979(15): 709-712.]
- [34] Milliman J D, Shen H T, Yang Z S, 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.
- [35] Zhang J. Heavy metal compositions of suspended sediments in the Changjiang (Yangtze River) estuary: significance of riverine transport to the ocean [J]. Continental Shelf Research, 1999, 19(12): 1521-1543.
- [36] 郭志刚, 杨作升, 范德江, 等. 长江口泥质区的季节性沉积效应[J]. 地理学报, 2003, 58(4): 591-597. [GUO Zhigang, YANG Zuosheng, FAN Dejiang, et al. Seasonal sedimentary effect on the Changjiang estuary mud area [J]. Acta Geographica Sinica, 2003, 58(4): 591-597.]
- [37] 刘世东, 乔璐璐, 李广雪, 等. 东海内陆架悬浮体输运、通量及季节变化[J]. 海洋与湖沼, 2018, 49(1): 24-39. [LIU Shidong, QIAO Lulu, LI Guangxue, et al. Transport and flux of suspended sediment and its seasonal variation over the inner shelf of the East China Sea [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2018, 49(1): 24-39.]
- [38] 徐方建, 李安春, 黄敬利. 东海陆架浙-闽沿岸泥质沉积研究进展[J]. 海洋通报, 2012, 31(1): 97-104. [XU Fangjian, LI Anchun, HUANG Jingli. Research progress in the mud deposits along the Zhe-Min coast of the East China Sea continental shelf [J]. Marine Science Bulletin, 2012, 31(1): 97-104.]
- [39] 王濮, 潘兆楷, 翁玲宝. 系统矿物学[M]. 北京: 地质出版社, 1982. [WANG Pu, PAN Zhaolu, WENG Lingbao. Systematic Mineralogy [M]. Beijing: Geology Press, 1982.]