

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2020.028>



中国东部海域表层沉积物粒度组成及影响因素

王中波^{1,2}, 陆凯^{1,2}, 温珍河^{1,2}, 张志珣^{1,2}, 李日辉^{1,2}, 梅西^{1,2}, 蓝先洪^{1,2}

1. 青岛海洋地质研究所, 自然资源部天然气水合物重点实验室, 山东青岛 266071

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, 山东青岛 266071

摘要: 基于海洋区域地质调查获取的1438个粒度数据, 利用Folk分类方法将中国东部海域表层沉积物划分为砂质粉砂、粉砂质砂、粉砂、砂、砂质泥、泥质砂、泥7种沉积物类型, 阐述了不同沉积物类型的粒度组成和参数特征。其中, 砂质粉砂、粉砂质砂和粉砂是3种最主要的沉积物类型, 分别占样品总数的34.70%、24.20%和15.51%。粉砂质砂呈条带状分布在研究区的南部且向北延伸。粉砂主要分布在长江口—浙闽沿岸、渤海西部和南黄海中部。砂主要分布在东海外陆架、扬子浅滩和苏北浅滩、朝鲜湾等海区, 其中在东海外陆架海区分布最广。影响沉积物分布的主要因素有物源、水动力环境以及水深、地形、地貌等。晚第四纪冰期旋回中海平面变化和海洋环流控制陆源沉积物入海通量和陆架沉积体系的发育过程。综合沉积物物源供给、海洋环流、冰后期海平面变化过程, 基于Folk分类的动力学属性和表层沉积物类型分布, 将中国东部海域表层沉积物分布划分为河口沉积、陆架泥质沉积、潮流沉积以及残留沉积等分区。不同沉积分区的形成机制和影响因素差异显著, 反映出在中国东部陆架的特殊地形影响下, 不同海平面时期陆源碎屑物质的运移过程。

关键词: 中国东部海域; 表层沉积物; 粒度组成; 沉积物类型; 沉积分区; 影响因素; 海洋地质。

中图分类号: P736.21

文章编号: 1000-2383(2020)07-2709-13

收稿日期: 2020-02-18

Grain Size Compositions and Their Influencing Factors of the Surface Sediments in Eastern China Seas

Wang Zhongbo^{1,2}, Lu Kai^{1,2}, Wen Zhenhe^{1,2}, Zhang Zhixun^{1,2}, Li Rihui^{1,2}, Mei Xi^{1,2}, Lan Xianhong^{1,2}

1. Key Laboratory of Gas Hydrate of Ministry of Natural Resources, Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China

2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China

Abstract: Based on 1438 grain size data obtained by marine regional geologic survey, surface sediments of the eastern China Seas are divided into seven types including sandy silt, silty sand, silt, sand, sandy mud, muddy sand and mud by Folk nomenclature. Meanwhile, the grain size features and their parameters are well described. Among them, sandy silt, silty sand, and silty sand are the three main sediment types, accounting for 34.70%, 24.20% and 15.51% respectively. The distribution of silty sand is strip-shaped in the south area. Silty sand is mainly distributed in Zhejiang and Fujian coastal zones, the western Bohai Sea, the central and northern areas of the southern Yellow Sea. Sand is mainly distributed on the East China Sea shelf, Yangtze Shoal, Subei Shoal and western Korea Bay. The influence factors of the sediments distribution include provenance, hydrodynamic environment, water depth, topography and geomorphology, etc. The sea level changes and ocean circulations during the Late Quaternary control the sediment flux into the seas and the sedimentary system on the shelves. Based on the dynamic properties of Folk classification and the type distributions, four kind of sedimentary areas are mainly identified in the eastern China Seas, such as estuarine deposition areas, shelf muddy deposition areas, tidal deposition areas and residual deposition areas. The formation mechanism and influence

基金项目: 中国地质调查局海洋区域地质调查项目 (Nos. DD20190377, DD2016137, GZH201400201, DD20190205, DD20190208, DD20190236); 国家自然科学基金项目 (No. 41876059); 中国—东盟海洋地质研究与减灾防灾倡议项目 (No. 121201005000151110)。

作者简介: 王中波 (1979—), 男, 博士, 主要从事海洋地质和第四纪地质研究。ORCID: 0000-0000-3426-1335. E-mail: my_zhongbo@163.com

引用格式: 王中波, 陆凯, 温珍河, 等, 2020. 中国东部海域表层沉积物粒度组成及影响因素. 地球科学, 45(7): 2709—2721.

factors of different sedimentary areas are significantly different, which reflects the process of clastic sediment migration with the sea level changes affected by the special topography of the eastern China Seas.

Key words: eastern China Seas; surface sediments; grain size; sediment types; deposition areas; influence factors; marine geology.

中国东部海域包括渤海、黄海、东海及周边海区。其中,渤海是中国的内海,以辽东半岛南端老铁山角经庙岛群岛至山东半岛北端蓬莱角一线与黄海分界。黄海与东海的分界是长江口北角至济州岛西南角间的连线。渤海是我国的半封闭内海,由辽东湾、渤海湾、莱州湾、中央浅海盆地和渤海海峡五个海区组成,仅由东面的渤海海峡与黄海相通。渤海周边入海河流有黄河、海河、滦河和辽河等。渤海海峡位于辽东半岛老铁山和山东半岛蓬莱角之间,是现代黄河沉积物向外海扩散的通道,也是黄海暖流进入渤海的通道所在。黄海为西太平洋边缘岛弧与亚洲大陆之间的边缘海,位于中朝准地台和扬子准地台两大构造单元之间。大别—临津断裂带将黄海分为南北两部分,北部为北黄海,是在胶辽古隆起的基础上形成的新生代断陷盆地;南部为南黄海,是由中、新生代发展起来的断拗盆地(金翔龙, 1992)。黄海地形比较复杂,沉积物受到潮汐、黄海暖流和沿岸流等影响,沉积环境多变。东海是西太平洋典型的开放型边缘海,地形平坦开阔,接纳了长江和黄河等入海河流携带的大量陆源碎屑物质。末次冰盛期,大部分陆架暴露成陆;冰后期海侵期间,在太平洋潮流的强烈作用下,陆架沉积物被冲刷改造,形成广泛分布的潮流沉积(Berné *et al.*, 2002; Chough *et al.*, 2002)。

海底表层沉积物的粒度组成是直接反映沉积物特征、沉积动力环境变化的指标之一,主要受控沉积物物源、地形地貌、水动力强度等,相关粒度参数分析可以有效解释沉积物扩散搬运的过程(程鹏和高抒, 2000; 乔淑卿等, 2010; 石学法等, 2010; 王中波等, 2012)。

目前,中国东部各海域的表层沉积物粒度组成研究获得不少认识,并在此基础上编制了海底沉积物类型图(刘锡清, 1996; 李广雪等, 2005; 乔淑卿等, 2010; 王中波等, 2016)。早在 1991 年,刘锡清就中国海区表层沉积物的分布,编制了底质类型图,并随后基于底质类型、区域水动力环境,对比矿物、地球化学和生物组成等,对整个东部陆架沉积物进行了分区,粗略地划分为大河口外泥质沉积区、沿岸流泥质沉积区和混合沉积区(刘锡清, 1996)。近年来,李广雪等(2005)通过大量的资料分析,采用

Shepard(1954)沉积物分类方法,编制了我国东部海域的沉积物类型图,揭示出研究区沉积物主要是黏土质粉砂、粉砂质砂、粉砂、砂质粉砂、砂及砂—粉砂—黏土等。同时,李广雪等(2005)综合表层沉积物类型、沉积物特征,对沉积物的成因进行分析,提出滨岸带和陆架地区的沉积相分区。程鹏和高抒(2000)和乔淑卿等(2010)等学者运用 Gao-Collins 粒径趋势分析方法分别对渤海、东海和黄海等陆架海底沉积物粒度组成进行研究,揭示出不同海区各粒级沉积物的分布特征及其受控因素。此外,也有学者通过对表层沉积物粒度数据进行端元分析模型反演,发现存在两个端元,分别反映出海洋动力过程对陆源沉积物的控制和对残留沉积物的改造(Zhang *et al.*, 2016)。

综上所述,已有研究对中国东部海域表层沉积物的粒度组成、沉积物类型、动力环境都取得许多认识,但由于条件限制,且存在研究区范围、取样间隔、不同时期测试精度和分类方法的差异,以及关注的研究区和目的不同,相关成果未能反映出整个中国东部海域沉积物粒度组成特征。本文拟通过 1:100 万海洋区域地质调查获取的覆盖中国东部大部分海域的表层沉积物样品,采用统一的沉积物分析处理和 Folk 分类方法(Folk *et al.*, 1970),对中国东部海域沉积物的粒度组成及其影响因素进行研究。已有研究表明,Folk 沉积物分类方法可以更好地反映出海洋沉积物的成因及其沉积动力环境(Folk *et al.*, 1970)。

1 样品来源和分析方法

研究样品来自青岛海洋地质研究所近年来在中国东部海域实施的 6 个国际标准分幅“1:100 万海洋区域地质调查”项目获得的 1 438 个表层沉积物样品(图 1),样品采集方法按照《1:1 000 000 海洋区域地质调查规范》(DZ/T 0247-2009)执行。样品采集的网格间距约为 20 km×20 km,箱式取样厚度约为 25 cm,样品重量大于 2 kg,将取得样品顶部 5 cm 样品装入塑料袋,并标识站位号和样品号,样品密封保存。

粒度分析时,取不低于 10 g 样品,先后加 10%

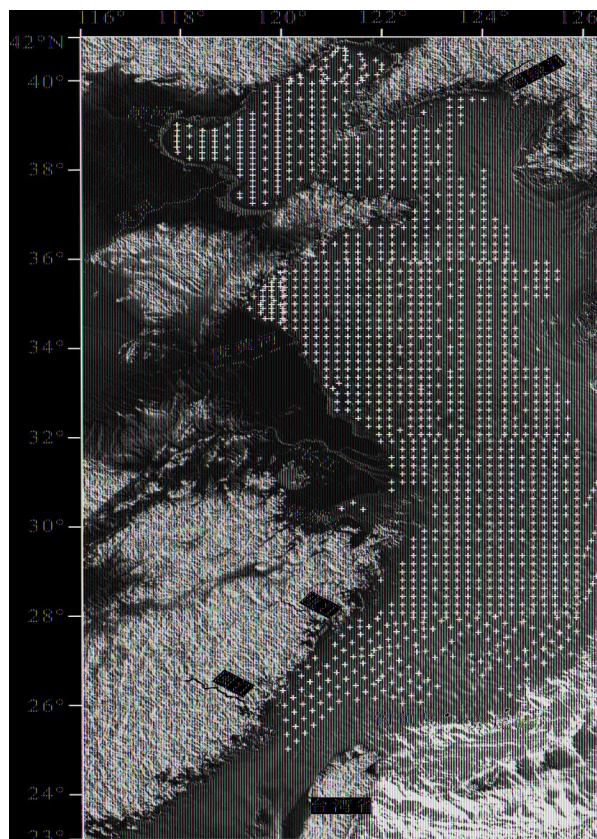


图1 中国东部海域表层沉积物取样位置

Fig.1 The sampling locations of surface sediment in the eastern China Seas

的 H_2O_2 和0.1 mol/L的盐酸浸泡处理以分别消除有机质和自生碳酸盐的影响,用去离子水冲洗至中性,然后使用自动进样器自带的超声发生器将样品充分分散,再进入英国MALVERN公司产的Mastersizer 2000型激光粒度仪进行测试,测试范围为0.02~2 000 μm ,准确率优于2%。此外,61个沉积物采用筛析法和沉降法进行粒度分析。本文粒度分析测试由青岛海洋地质研究所测试中心完成。

采用Folk and Ward(1957)粒度参数计算公式对样品进行粒度参数计算,包括沉积物的粒度组分(砾石: $<-1\Phi$;砂: $-1\sim 4\Phi$;粉砂: $4\sim 8\Phi$;黏土: $>8\Phi$)、平均粒径(M_z)、标准偏差(σ_1)、偏度(sk_1)和峰度(kG)。其中,平均粒径是沉积物的主要粒度特征参数,指示沉积物粒径频率分布的中心趋向,大小反映了沉积物的平均动能情况。标准偏差是沉积物粒径的分选程度,即颗粒大小的均匀性。偏态可以表现沉积环境的变化,能反映沉积过程的能量变异。峰态反映粒度频率曲线两端的分选与曲线中央分选的比率。

沉积物类型的命名原则参照Folk *et al.*(1970)

三角形图解分类方法。

2 粒度特征及沉积物类型

中国东部海域表层沉积物粒度分析结果如表1所示,沉积物粒度组成及粒度参数分布如图2和图3所示。

中国东部海域表层沉积物砾石组分呈斑状分布,主要分布在海州湾和辽东湾海区,多数沉积物含量低于20%,最高含量出现在海州湾的中部,超过60%。此外,南黄海中南部也有零星样品中有砾石组分出现(图2)。砂组分主要分布在台湾海峡、东海中外陆架、苏北浅滩、海州湾、渤海海峡和朝鲜湾西部等,含量普遍高于50%,最高含量可达100%,出现在东海外陆架的南部;低含量区呈块状分布,出现在浙闽沿岸、废黄河口外、南黄海中北部、济州岛南部以及渤海西部等,最低含量为零,出现在南黄海中南部海区(图2)。粉砂组分高值区分布在长江口—浙闽沿岸、黄海中北部和渤海西南部,含量超过50%,低值区主要分布在东海外陆架和朝鲜湾地区,含量普遍在20%以下(图2)。黏土组分多低于40%,高值区分布在长江口—浙闽沿岸、南黄海中中部和渤海西部,呈条带状、块状,其他海区含量基本低于15%(图2)。

研究区表层沉积物的平均粒径(M_z)分布区间介于0~8 Φ 之间,细粒级沉积物主要分布在长江口—浙闽沿岸、南黄海中中部、渤海西部及废黄河口外海区,粒径区间介于5~8 Φ 之间;粗粒级沉积物主要分布在东海外陆架、长江口外—苏北浅滩和朝鲜湾西部海区,粒径区间分布在1~3 Φ 之间(图3)。

根据Folk *et al.*(1970)三角形图解命名方法,该区沉积物类型为砂质粉砂、粉砂质砂、粉砂、砂、砂质泥、泥质砂、泥和少数砾石类沉积物,其中以砂质粉砂、粉砂质砂和粉砂为主,样品数量含量分别为34.70%、24.20%和15.51%,覆盖了东部海域的大部分地区(表1和图4)。

砂质粉砂:在东部海区纵贯南北,占据了研究区的大部分海区,其砂、粉砂和黏土组分平均含量分别是30.15%、53.90%和15.96%,平均粒径是5.45 Φ ,标准偏差是2.22 Φ 。

粉砂质砂:呈条带状分布在研究区的南部向北延伸,其砂、粉砂和黏土组分平均含量分别是65.55%、26.07%和8.38%,平均粒径平均值是3.81 Φ ,标准偏差是2.13 Φ 。

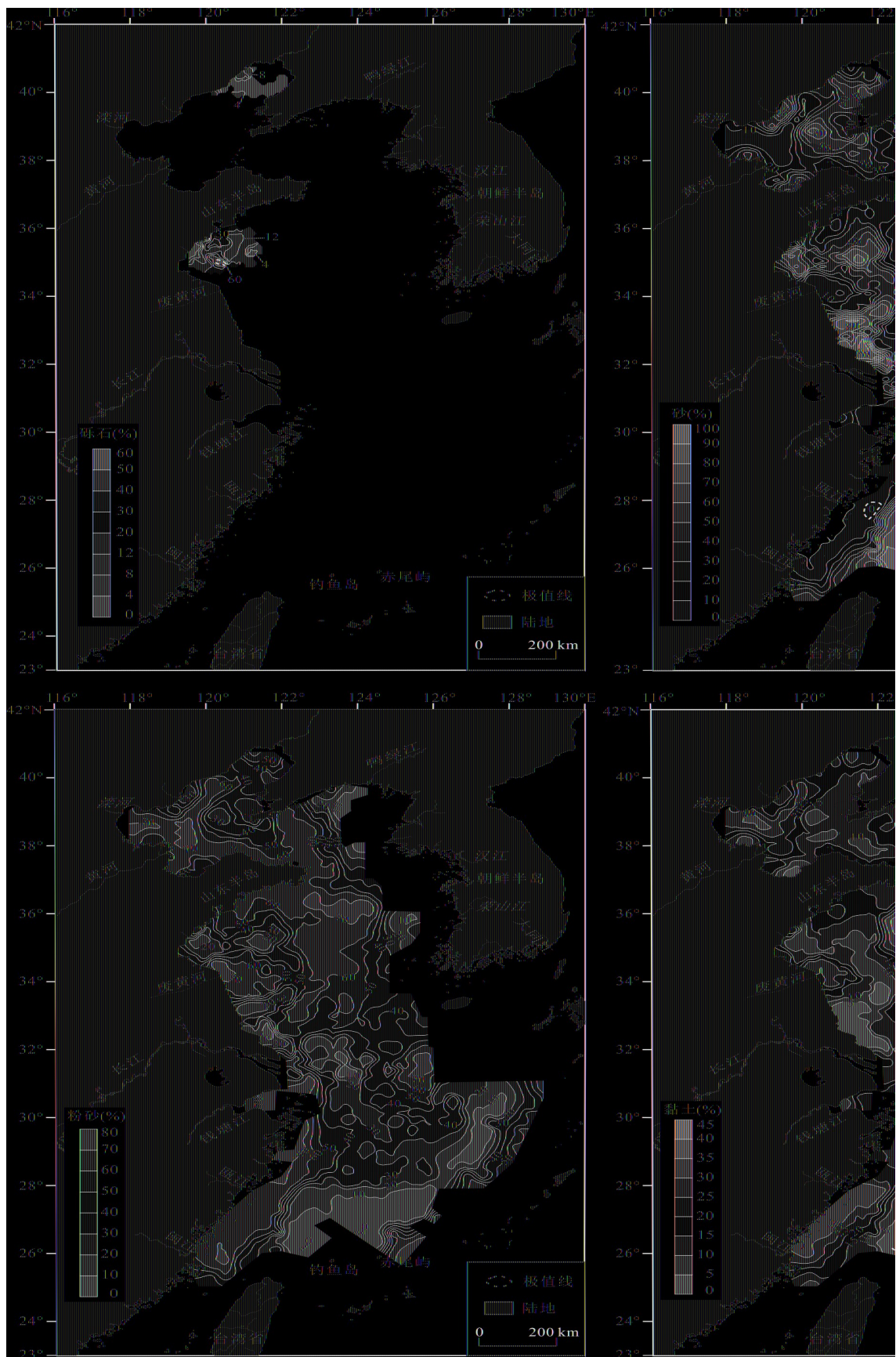


图2 中国东部海域表层沉积物粒度组分分布

Fig.2 The grain size compositions' distribution of the surface sediments in the eastern China Seas

表 1 中国东部海域表层沉积物粒度组成及参数										
Table 1 The grain size compositions and their parameters of the surface sediments in the eastern China Seas										
沉积物类型	数量(占比%)	参数	砾(%)	砂(%)	粉砂(%)	黏土(%)	Mz(Φ)	σ1(Φ)	sk1	kG
砂质粉砂(sZ)	499 (34.70%)	平均值		30.15	53.90	15.96	5.45	2.22	0.13	0.93
		最大值		49.83	72.80	32.14	7.00	3.09	0.63	2.46
		最小值		6.65	34.33	2.38	4.04	0.82	-0.39	0.61
粉砂质砂(zS)	348 (24.20%)	平均值		65.55	26.07	8.38	3.81	2.13	0.51	1.15
		最大值		89.78	44.38	17.33	5.13	2.83	0.78	3.71
		最小值		43.40	7.13	0.38	1.85	0.62	0.05	0.61
粉砂(Z)	223 (15.51%)	平均值		3.81	69.80	26.40	6.96	1.67	0.05	1.05
		最大值		13.71	79.22	37.34	7.53	2.23	0.29	1.58
		最小值		0.03	59.77	15.08	5.96	1.31	-0.20	0.83
砂(S)	102 (7.09%)	平均值		94.84	3.86	1.29	2.24	0.77	0.14	1.46
		最大值		100	66.67	33.13	2.83	1.65	0.42	3.28
		最小值		90.30	0	0	1.14	0.44	-0.17	0.92
砂质泥(sM)	101 (7.02%)	平均值		29.02	44.56	26.43	6.06	2.64	-0.16	0.83
		最大值		49.83	58.62	36.48	7.07	3.14	0.50	1.47
		最小值		10.02	29.83	15.17	4.85	2.02	-0.35	0.61
泥质砂(mS)	66 (4.59%)	平均值		72.96	16.88	10.16	3.58	2.28	0.56	1.54
		最大值		94.04	44.76	27.70	6.20	2.99	0.73	2.75
		最小值		27.55	3.87	2.09	2.21	1.12	-0.24	0.63
泥(M)	38 (2.64%)	平均值		1.49	63.00	35.51	7.44	1.55	0.05	1.08
		最大值		8.10	75.27	43.21	7.80	2.12	0.21	1.21
		最小值		0	56.74	18.18	6.24	1.20	-0.07	0.91
砾石类	61 (4.24%)	平均值	12.20	44.27	31.86	11.66	3.16	3.03	0.18	1.27
		最大值	62.39	76.59	68.97	27.33	6.41	4.32	1.12	3.91
		最小值	0.25	4.21	13.50	3.81	-0.70	1.76	-0.44	0.52

粉砂:主要分布在长江口—浙闽沿岸、渤海西部和南黄海中部,其砂、粉砂和黏土组分平均含量分别是 3.81%、69.80% 和 26.40%,平均粒径是 6.96 Φ,标准偏差是 1.67 Φ.

砂:主要分布在在东海外陆架、长江口外和苏北浅滩、朝鲜湾海区,其中东海外陆架海区分布最广,该类型中砂、粉砂和黏土组分的平均含量分别是 94.84%、3.86% 和 1.29%,平均粒径平均值是 2.24 Φ,最小值大于 2.83 Φ,呈块状分布. 标准偏差平均值是 0.77 Φ,分布趋势与平均粒径基本一致.

砂质泥:主要分布在南黄海中东部近朝鲜半岛海区,其砂、粉砂和黏土组分平均含量分别是 29.02%、44.56% 和 26.43%,平均粒径是 6.06 Φ,标准偏差是 2.64 Φ.

其他沉积物类型分布面积较少,在研究区呈斑块状零星分布.

研究区表层沉积物粒度的平均粒径和标准偏差分布如图 2 所示. 标准偏差的分布呈明显的两种趋势,浙闽沿岸内陆架、废黄河河口和南黄海中部

呈细粒级极值分布趋势,而东海外陆架、长江口外和苏北浅滩、朝鲜湾西部和海州湾海区呈粗粒级极值分布趋势. 标准偏差的分布与平均粒径分布略有不同,低值区集中在东海外陆架、南部沿岸自闽江河口直到北部废黄河口外、南黄海中部直到鸭绿江河口,分布范围是 0.50~2.00 Φ,表明该区沉积物分选相对较好,动力环境较为稳定. 高值区主要分布在南黄海和东海的中部和渤海北部,分布范围是 2.50~3.50 Φ,表明沉积物分选相对较差.

3 中国东部陆架海表层沉积物分布及影响因素

影响沉积物分布的主要因素有物源、水动力环境以及水深、地形、地貌等,其中沉积物的物源属性是首要因素,其次是区域沉积动力条件. 除渤海是中国内海之外,东部海域的黄海和东海是西太平洋较为典型的开放型边缘海,是世界上最宽阔、平缓的陆架海之一,东海陆架盆地是中国近海规模最大

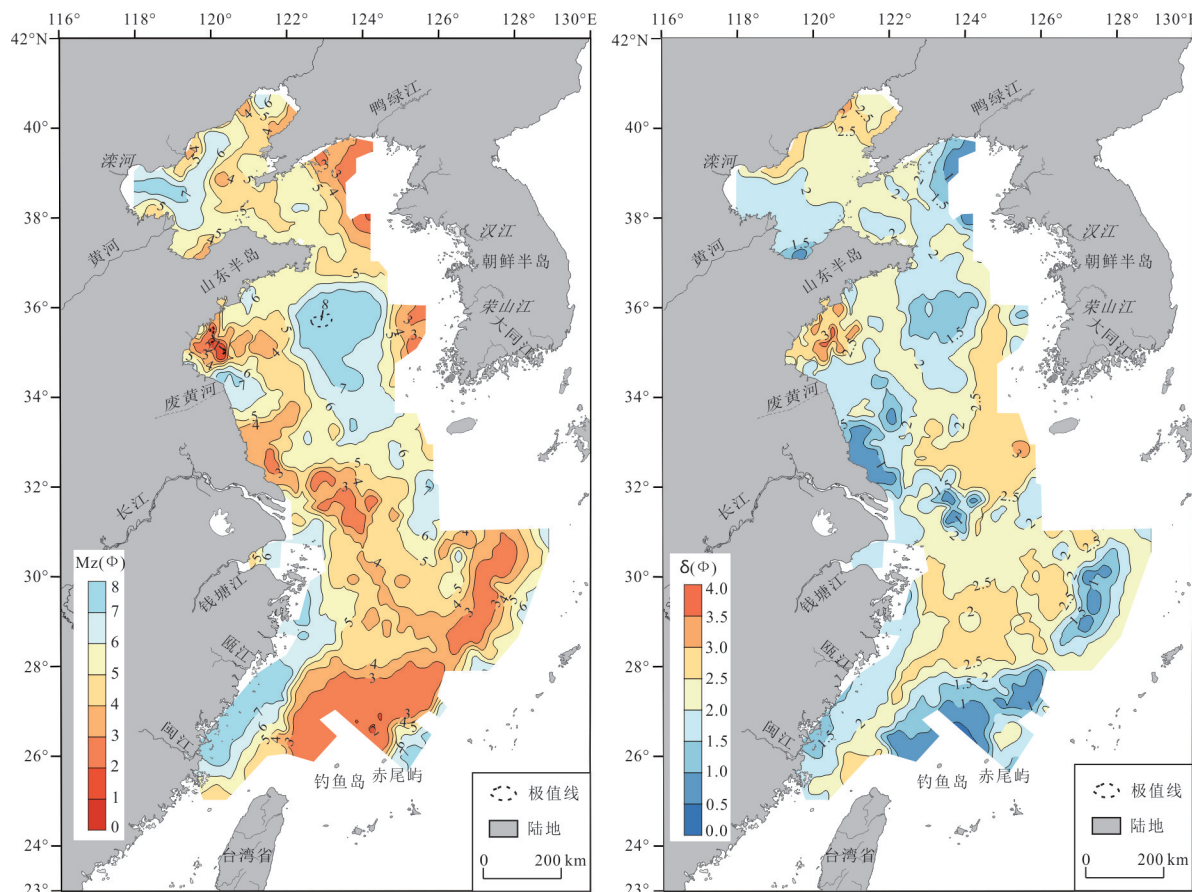


图3 中国东部海域表层沉积物粒度平均粒径 $Mz(\Phi)$ 和标准偏差 $\delta(\Phi)$ 分布

Fig. 3 The grain size parameters' distribution of the surface sediments in the eastern China Seas

的边缘海盆地(钟锺等,2018),陆架每年接纳长江和黄河等携带的大量陆源碎屑物质,使其成为我国东部大陆边缘主要的陆源沉积汇.第四纪冰期和间冰期旋回中季风气候、海平面变化和海洋环流控制陆源沉积物的入海通量和陆架沉积体系的发育过程.综合沉积物物源供给、海洋环流、冰后期海平面变化过程,基于Folk *et al.*(1970)沉积物分类方法的动力学属性以及表层沉积物类型分布,将中国东部海域表层沉积物分布划分为河口沉积、陆架泥质沉积、潮流沉积以及残留沉积等分区,并对不同沉积区的形成机制和影响因素进行讨论.

3.1 河口沉积区(I区)

研究区主要有滦河和现代黄河等渤海入海河流,鸭绿江、废黄河等黄海入海河流,以及长江和闽江等东海入海河流,河流物质大部分在河口沉积,沉积速率相对较高,也有相当一部分在沿岸流的作用下向南沉积,如山东半岛沿岸流沉积和浙闽沿岸流沉积,其主要为细粒级的沉积物,如砂质粉砂和粉砂等,为现代沉积(图4).

渤海环流具有北进南出的特点,进入渤海的黄海暖流余脉分成两支,北支和南下的辽东湾沿岸流共同构成渤海中部和辽东湾内的顺时针环流;南支进入渤海湾和莱州湾,于渤海海峡南部流出渤海.渤海沿岸水团,主要是黄河、滦河及辽河等入海径流冲淡水,在冬季和夏季表现形式不尽相同,渤海环流组成也不相同(图5).渤海表层沉积物主要是粉砂和砂质粉砂等细颗粒沉积物,呈现出明显的河流控制的特点.辽东湾是一个半封闭的海湾,其沉积物主要来源于辽河、六股河和大凌河等(乔淑卿等,2010).河流输入物质的迁移受到海洋水动力条件(潮流和环流)的制约.黄河多年平均入海泥沙约为 8×10^8 t,70%以上堆积在河口附近形成三角洲,其他部分向外的沿岸区和陆架区扩散.高海平面以来,黄河入海物质控制了渤海湾至海峡南部以及北到渤海中央的区域,是对渤海物质贡献最显著的河流(杨吉龙等,2018),大部分物质在渤海中部沉积,一部分经山东半岛沿岸流向东搬运,形成细粒的山东半岛沿岸流沉积,沉积物为粉砂和砂质粉砂(图

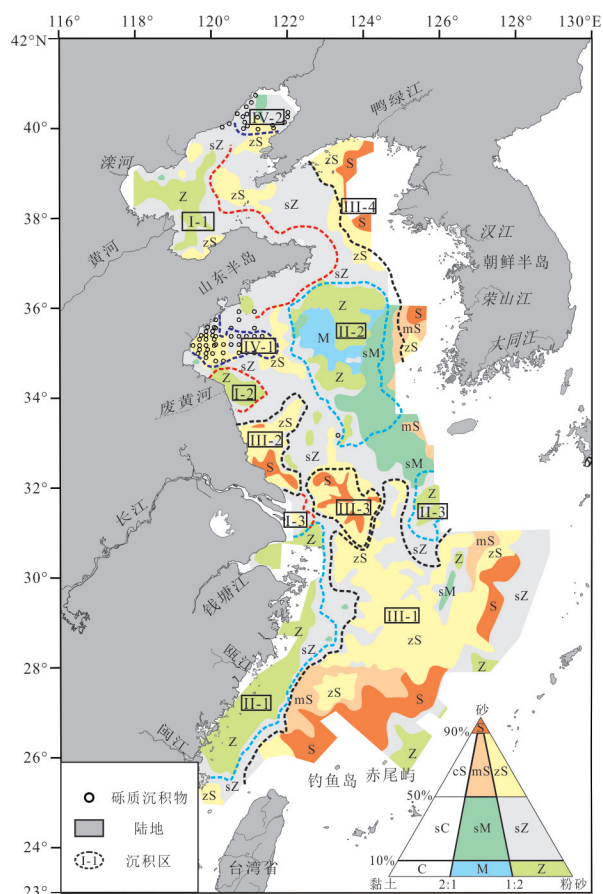


图4 中国东部海域表层沉积物类型分布及其沉积区

Fig.4 The surface sediments' types distribution and their deposition areas of the eastern China Seas

4, I-1区). 滦河输沙量较小, 入海泥沙大多沉积在滦河口曹妃甸一带沿岸区域. 总体来说, 环渤海河流年均输沙量约 1.3×10^8 t 泥沙, 绝大部分沉积在河口及前缘浅海海域, 沉积速率极高. 部分的细粒沉积物通过环流悬浮搬运, 形成零星泥质沉积, 沉积速率相对不高

废黄河河口沉积分布在 122.5°E 以西的以苏北废黄河入海口为辐射中心的海区, 水深介于 10~20 m, 沉积物主要是粉砂(图4, I-2区). 废黄河从 1128 年至 1855 年夺淮入海, 入海泥沙量大, 1855 年后, 黄河自山东入渤海, 造成陆源物质输入中断, 三角洲开始侵蚀. 水动力以潮流冲刷为主, 但由于海底为出露为原三角洲黏土粒级物质, 抗冲刷能力相对较强, 因此侵蚀程度较小. 目前, 该区处于冲淤相对平衡的沉积环境, 仅少量生物沉积, 近岸物质则直接运到苏北浅滩(秦亚超, 2017).

长江是中国第一大河, 多年入海泥沙量平均为 4.175×10^8 t(汪亚平等, 2006). 水下三角洲由长江

入海物质直接沉积, 河口悬浮泥沙在絮凝作用沉降, 形成长江水下前三三角洲泥质沉积(图4, I-3区). 沉积物粒度较细, 主要是粉砂和砂质粉砂, 平均粒径在 $5.00 \sim 6.00 \Phi$ 之间(图2), 具有高沉积速率特点, 南支口外水下三角洲最高沉积速率可达 6.3 cm/a . 研究表明, 长江河口沉积物物源单一, 主要来自长江物质, 沉积物粒度的各种属性比较一致(王中波等, 2012).

3.2 陆架泥质沉积区(II区)

中国东部陆架现代泥质沉积主要分布在近岸的浙闽沿岸流沉积区、南黄海中北部沉积区, 以及济州岛西南泥质沉积区(图4, II区), 此外渤海黄河口外、废黄河口及东海东南角海区也有斑状分布. 其主要特点是沉积物类型多为粉砂或泥, 平均粒径在 6.00Φ 以上, 大部分区域沉积物平均粒径细于 7.00Φ , 砂组分含量几乎全区最低, 少于 10%, 而黏土含量则多高于 20%, 粒度标准偏差小于 2.00Φ , 说明以粉砂和黏土为主要粒级, 且含量高, 沉积动力环境稳定, 分选性相对较好(图2~图3).

浙闽沿岸流泥质沉积区则由于距离长江河口较远, 因此沿岸流作用携带的物质在搬运过程中, 由于粒度重力分异作用, 较粗粒级的沉积物先沉积, 因此在长江口东南部分存在一个砂组分含量超过 40% 的沉积区, 而由河口随沿岸流南下的沉积物粒度相对较细, 平均粒径在 6.00Φ 以上, 且南部变细, 达到 7.00Φ , 沉积物沿岸向南分别是砂质粉砂和以粉砂(图4, II-1区). 高分辨率地震剖面研究揭示出浙闽沿岸流泥质沉积呈透镜体状分布, 其分布形态受沿岸流的强弱变化而呈现中间厚边缘薄(Liu *et al.*, 2007a, 2007b). 沉积物物源分析揭示出从长江口到南部闽江口大片海域沉积物主要来自长江(石学法等, 2010). 已有研究认为沿岸流在 4.9~2.0 ka 时期最为强盛, 期间形成泥质沉积区的范围最广(王中波等, 2012), 南部钻孔 MZ01 孔揭示出自中全新世 8 000 a 以来泥质区古环境经历了四个演化阶段, 分别是沉积速率变化频繁阶段、弱稳定阶段、强频繁阶段和强稳定阶段(石学法等, 2010). 此外, 北上的台湾暖流对该区沉积也有一定的影响(Liu *et al.*, 2007a, 2007b)

南黄海中北部泥质区是在中国陆架海中分布面积最大的现代泥质沉积, 水深分布在 50~80 m 之间, 沉积物多呈灰绿色, 且含水量高, 沉积物以粉砂、泥和砂质泥为主(图4, II-2区). 平均粒径在 6.00

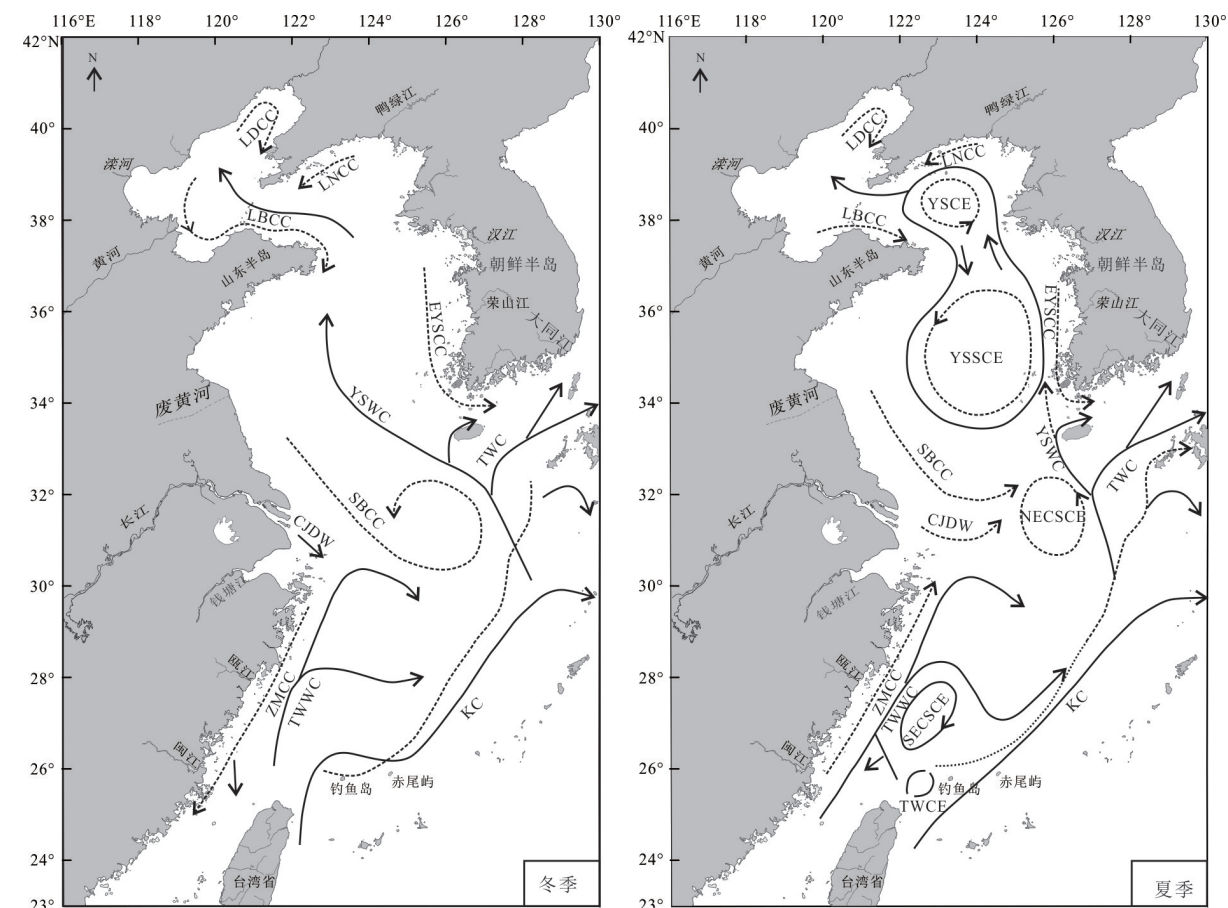


图5 中国东部海域海洋环流示意图

Fig.5 The ocean current distribution of the eastern China Seas

KC. 黑潮;TWC. 对马暖流;YSWC. 黄海暖流;TWWC. 台湾暖流;LBCC. 鲁北沿岸流;SBCC. 苏北沿岸流;ZMCC. 浙闽沿岸流;CJDW. 长江冲淡水;LDCC. 辽东湾沿岸流;LNCC. 辽南沿岸流;EYSCC. 东黄海沿岸流;SYSCE. 南黄海冷水团环流;NYSCE. 北黄海冷水团环流;SESCCE. 东海南部气旋式冷涡;NECSCE. 东海北部气旋式涡旋;据苏纪兰和袁业立(2005)修改

Φ 以上,向北变细,极值超过 8.00Φ . 黏土组分含量超过 25%,中心区域砂组分含量为零(图 2). 粒度频率分布研究表明,该区域沉积物粒度组成几乎不存在滚动及跃移搬运形式,均是典型的悬浮态搬运特征,即主要是悬浮物质絮凝而成(王中波等,2012). 南黄海环流组成显示,黄海环流是由中部北上的黄海暖流与其两侧向南运移的沿岸流组成(图 5),黄海暖流表层与黄海海槽的基本走向一致(刘健等,2007),在黄海中部派生两个分支,将黄海分成东、西两部分,分别与两侧的黄海沿岸流、朝鲜半岛沿岸流相互作用,形成气旋型涡旋(冷涡)和反气旋型涡旋(图 5). 西侧的冷水团呈气旋型涡流形式,体系相对庞大,气旋边缘的水平流速约为 5 cm/s ,只能影响细粒悬浮物质. 物源研究表明,该区沉积物的物质组成比较复杂,除黄河物质之外,长江和废黄河及黄海暖流携带北上沉积物均有物质贡献(张尧

等,2018). 此外,南黄海中部泥质区出现的暖水种 *Hanzawaia nipponica* (Asano),多见于东海中陆架,而在渤海和黄海其他区域少见,为黄海暖流携带的东海陆架悬浮体受环流控制沉降(李日辉等,2014). 同时,该区大量自生黄铁矿的出现说明,环流条件下的泥质沉积为还原环境(王中波等,2012;张尧等,2018).

济州岛西南的泥质区沉积物为性质均一的青灰色细粉砂(图 4, II-2 区),平均粒径大于 6.00Φ ,粉砂含量超过 60%,中心区域高于 70%,黏土含量超过 20%,砂含量多低于 10%. 标准偏差低于 2.00Φ ,表明其沉积环境稳定. 前人研究发现,该泥质区细颗粒物来源于东海环流搬运,物源为黄河物质扩散,通过苏北沿岸流南下,进而被黄海环流作用进行搬运(Milliman *et al*, 1986; 杨作升等,1992)(图 5). 调查表明,影响该区的冷水旋涡发育于冬季,形

成于春季,夏季最强,秋季消失(苏纪兰和袁业立, 2005). 黄东海陆架呈明显的“夏储冬输”特征(杨作升等, 1992), 在冬季风作用下, 黄海沿岸流向东扩散作用增强, 通过黄河沿岸流向东输送, 直至济州岛西南海域(杨作升等, 1992), 供应充足的悬浮泥沙在环流—涡旋动力作用下沉降形成济州岛西南泥质区(图5).

3.3 潮流沉积区(III区)

中国东部陆架潮流沉积主要分布在东海中外陆架、苏北浅滩、长江口外扬子浅滩、西朝鲜湾和渤海海峡及周边地区, 沉积物以砂、粉砂质砂为主, 平均粒径粗于 4.00Φ , 标准偏差小于 2.00Φ , 反映出较强的水动力环境(图2~图4).

东海中外陆架砂质沉积分布在东海陆架水深50~120 m间的大部分地区(图4, III-1区), 该区除黑潮、台湾暖流等海洋环流外, 主要水动力控制因素是强大的太平洋潮波系统. 沉积物类型主要以呈近三角形分布的粉砂质砂和砂, 砂组分含量超过50%, 多数沉积物中含贝壳碎片, 呈灰黑色—灰色, 平均粒径在 5.00Φ 以下(图2), 几乎覆盖了整个东海中外陆架. 由冲绳海槽向陆方向呈现一个明显变细的趋势, 反映出该区沉积为冰后期海侵成因, 其物质输送方向也是由海向陆(Berné *et al.*, 2002; 王中波等, 2012; Wang *et al.*, 2014). 早期研究, 认为东海陆架潮流砂沉积为残留沉积(Emery, 1968; 刘锡清, 1991), 多数学者认为该沉积主要是潮流沉积, 为末次冰盛期以来的海侵作用(15~6 ka), 在太平洋潮波作用下, 将低海平面时期的滨岸沉积进行冲刷改造形成潮流沙脊(Liu *et al.*, 1998; Berné *et al.*, 2002; 吴自银等, 2010), 但现在部分地区仍被现代潮波系统控制和改造(Liu *et al.*, 2007), 并未完全处于之前认为的消亡状态. 除此之外, 也有学者通过东海陆架的地震相地层和地质钻孔的对比分析, 提出东海陆架砂体是末次冰期海退期的三角洲体系, 后被冰后期海侵形成的席状砂体所覆盖, 并非潮流成因, 也未发现沙脊迁移的迹象(杨文达, 2002); 或是早全新世海侵对冰消期海侵砂体的改造沉积. 总体可以认为, 由于该区沉积物多源性强, 动力变化频繁, 地形平坦, 受海平面波动明显等因素, 因此其沉积环境具有复杂多变的特征.

李广雪等(2005)通过海平面变化和海岸移动过程的分析, 提出东海陆架潮流沙脊的多期性及多成因性, 对不同分布位置、形态和动力特征的潮流

沙脊进行分类, 提出辐射状潮流沙脊、通道型沙脊和发散型沙脊3种体系. 但Berné *et al.* (2002)认为该研究区的潮流沙脊主要低海平面发育的三角洲及河口相沉积物, 而只有少量20%左右的沙脊为海侵过程中形成的. 吴自银等(2010)对比全球海平面变化以及快速融冰事件, 进一步认为东海外陆架潮流沙脊明显受到LGM以来的多次融冰事件的影响, 沙脊发育的时间应该介于14.0~9.5 ka, 3次海平面跃升事件MWP-1A、MWP-1B和MWP-1C间的2次间歇期是沙脊发育的主要时间段. 陆地冰川的快速融化形成大量融水入海使海洋的沉积动力环境发生快速变化是致使核心沙脊的形成原因之一(Berné *et al.*, 2002).

苏北浅滩砂质沉积主要分布长江口以北、废黄河三角洲以南海区, 其砂组分含量超过80%, 部分区域超过9%, 水深在10~15 m之间, 沉积物类型主要是粉砂质砂和砂(图4, III-2区), 以琼港为中心向外辐射状分布, 已有研究获取沉积物 ^{14}C 年龄为 $6\,760\pm 240\text{ a BP}$ (王中波等, 2012). 该区水动力变化比较复杂, 受到苏北沿岸流、台湾暖流顶托、长江径流以及潮流的影响(图5). 其中, 潮流对该区沉积的影响最大, 接受太平洋潮波和黄海旋转潮波的共同控制, 二者在琼港附近汇合, 形成强潮区. 其特征为潮差大、潮流往复性强, 平均潮流速度为2 kn左右, 潮流沉积以堆积作用为主(Liu *et al.*, 1998), 石英等轻矿物含量高, 沉积物成熟度很高, 沉积物经历复杂的水动力改造(王中波等, 2012). 物源分析揭示沉积物来源主要是来自废黄河的陆源碎屑, 辐射沙洲的南部则同时接受长江三角洲物质沉积, 整个苏北浅滩下部沉积物主要是晚更新世古长江物质(彭修强等, 2018). 在强潮流和环流作用下, 冲刷的细粒物质被长江冲淡水运移到南黄海 125°E 以东海域(石学法等, 2010; 蓝先洪, 2016; 彭修强等, 2018).

扬子浅滩砂质沉积主要分布在长江口外 30°N 以北 123°E 与 124°E 之间海域, 水深在25~55 m之间, 海底平坦开阔, 沉积物类型主要是粉砂质砂和砂(图4, III-3区), 平均粒径在 4.00Φ 以下, 砂组分含量多超过70%, 局部超过90%, 标准偏差小于 2.00Φ , 微体古生物鉴定发现有孔虫壳体破碎严重(图3~图5). 区内水动力环境复杂, 除潮汐影响外, 还有苏北沿岸流、浙闽沿岸流、长江冲淡水、东海外部气旋式涡旋和台湾暖流(图5), 各种流系和潮流

同时作用,海底发育分布较广的波痕和沙波地貌(叶银灿等,2004).潮汐底流速度可达 40 cm/s,最大涨落潮流速可达 55~71 cm/s,沿岸流一般 20~30 cm/s,台湾暖流为 30~40 cm/s,(叶银灿等,2004).此外,还有热带风暴等共同影响,其中热带风暴可以引起高达 100 cm/s 的底流流速.因此,该区沉积物粒度特征与水动力环境基本一致,主要为现代沉积(Liu *et al.*, 1998;叶银灿等,2004).目前,关于扬子浅滩砂质沉积的成因还有争议.有学者通过对潮流作用、地貌形态、物质成分及全新世沉积厚度分析,认为其是典型的现代潮流砂席沉积(Liu *et al.*, 1998),不是古长江水下三角洲(金翔龙,1992)或陆架残留沉积以及冰后期古滨岸砂沉积(Emery, 1968;刘锡清,1991;田珊珊等,2009).叶银灿等(2004)通过地球物理和沉积学研究发现扬子浅滩分布有大量的沙波地貌,提出扬子浅滩沉积形成于冰消期晚期,即全新世初期,并在全新世中、晚期继续接受砂质沉积,目前沙波地貌仍处于发育和运移状态.有孔虫组成分析揭示出,该区以滨岸浅水、广盐性有孔虫为主,主要组合是 *Ammonia tepida*、*Elphidium advenum*、*Florilus decorus* 等,间接证明了现代近岸环境、强水动力沉积作用的存在(王中波等,2012).

西朝鲜湾砂质沉积是较为典型的潮流沙脊,主要沉积物类型是粉砂质砂和砂(图 4, III-4 区),砂组分含量平均超过 70%,且在多数区域超过 90%,平均粒径为 3.00 Φ 以下,标准偏差在 1.50 Φ 以下,表明强水动力环境且较稳定.数十条沙体呈梳状平行排列,形成大规模的水下沙脊群.该区北部以往复流为主,最大潮流流速介于 2~3 kn,南部除多以旋转潮流为主,最大流速 1~2 kn(Liu *et al.*, 1998).其中,波状沙体高约 3~5 m,长度多分布在 150~500 m,内部剖面呈现为对称和准对称形态,沉积构造以交错层理为主.已有研究揭示沉积物形成于距今 8 000 a 左右(王中波等,2016),是在冰后期海侵时期的强潮流作用下形成(Chough *et al.*, 2002;Jine *et al.*, 2002).同时,受到鸭绿江入海的冲淡水影响,形成如今的粗粒沉积物,且低温、低盐环境,微体古生物生长缓慢,丰度极低(李日辉等,2014).物源研究也揭示出鸭绿江物质对西朝鲜湾沉积物有较大的影响(蓝先洪等,2016).

此外,渤海海峡,即老铁山水道也是一个主要砂质沉积区,是东部黄海水团进出渤海的重要通

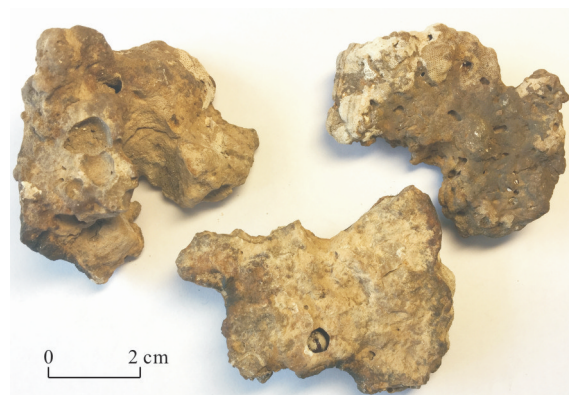


图 6 海州湾砾石(钙质结核)照片

Fig.6 The gravel photos in Haizhou Bay sediments (calcareous concretion)

道,沉积物主要是粉砂质砂.研究表明,该区为典型的潮流侵蚀—沉积体系(Liu *et al.*, 1998),但由于地形影响,潮流冲刷强烈,沉积物来源为晚更新世侵蚀改造的沉积物(王中波等,2016).

3.4 残留沉积区(IV区)

中国东部陆架残留沉积主要分布在海州湾以及南黄海东南部部分地区,沉积物中出现大量的砾石(表 1, 图 4),最高含量超过 60%,主要是钙质结核,呈不规则块状、姜结石状和蜂窝状,中有虫孔,部分孔洞内有生物壳体,一般大小为 1~4 cm,部分大块砾石超过 10 cm(图 6).其他沉积物以砂质粉砂和粉砂质砂为主,平均粒径粗于 4.00 Φ ,标准偏差大于 2.00 Φ ,反映出水动力环境的复杂性(图 2~图 4).

海州湾残留沉积分布在海州湾海域(图 4, IV-1 区),水深在 30~50 m 之间,沉积物类型主要是分选很好的粉砂质砂和砂质粉砂,还分布大量的钙质结核.沉积物有孔虫 *Elphidium magellanicum* 和介形虫 *Sinocythere* 组合反映的近岸浅水环境与现在的水深条件不符(王中波等,2016).秦亚超等(2017)通过微体古生物组合、浅部钻孔分析,认为该沉积为全新世早期海侵作用的产物,其物源为晚更新世古湖沼或古河流沉积物,同时由于鲁南丘陵河流较小,只有渤海—南黄海沿岸流携带的少量泥质物质有所影响,现代物质供应很少,形成了残留改造沉积(刘锡清,1991).此外,该区沉积水动力复杂,主要以波浪、南黄海沿岸流、潮汐等外力综合作用,因此出现砾质沉积物夹杂泥质物质分布现象,分别形成砾质泥质砂、含砾泥、泥质砂质砾及泥质砾等沉积物类型(王中波等,2016).

需要注意的是,辽东湾也出现大量的砾质沉积

物(表1和图2、图4, IV-2区),但其成因与黄海海州湾砾质沉积物不同。早期研究也认为其为全新世早期或晚更新世晚期的残留沉积,而随着海底沉积动力的观察,当潮流流速在1~3 kn之间,该区潮流以堆积作用为主(Liu *et al.*, 1998)。辽东浅滩潮汐作用较强,流速经常达到2~3 kn,潮汐往返性强,而且底层潮流的往返性比表层更为显著,因此该区砂质沉积物是典型的现代潮流沙脊,其物质来源主要是老铁山水道通过强潮流冲刷携带过来的粗粒物质(王中波等, 2016)。

4 结论

中国东部海域表层沉积物类型为砂质粉砂、粉砂质砂、粉砂、砂、砂质泥、泥质砂、泥和少数砾石类沉积物,其中以砂质粉砂、粉砂质砂和粉砂为主,分别为34.70%、24.20%和15.51%,覆盖了东部海域的大部分地区。砂质粉砂在东部海区纵贯南北,占据了研究区的大部分海区。粉砂质砂呈条带状分布在研究区的南部向北延伸。粉砂主要分布在长江口—浙闽沿岸、渤海西部和南黄海中北部。砂分布在东海外陆架、长江口外和苏北浅滩、朝鲜湾海区,其中东海外陆架海区分布最广。砂质泥主要分布在南黄海中东部近朝鲜半岛海区。其他沉积物类型分布面积较少,在研究区呈斑块状零星分布。

影响沉积物分布的主要因素有物源、水动力环境以及水深、地形、地貌等,其中沉积物的物源属性是首要因素,其次是区域沉积动力条件。晚第四纪冰期旋回中海平面变化和海洋环流控制陆源沉积物的入海通量和陆架沉积体系的发育过程。综合沉积物物源供给、海洋环流、冰后期海平面变化过程,基于Folk *et al.* (1970)沉积物分类方法的动力学属性以及表层沉积物类型分布,将中国东部海域表层沉积物分布划分为河口沉积、陆架泥质沉积、潮流沉积以及残留沉积等分区。不同沉积分区的形成机制和影响因素差异显著,这反映出在中国东部陆架特殊地形的影响下,碎屑物质在不同的海平面阶段、物源供给和海洋环流等多因素共同作用下的运移结果。

References

Berné, S., Vagner, P., Guichard, F., et al., 2002. Pleistocene Forced Regressions and Tidal Sand Ridges in the East China Sea. *Marine Geology*, 188(3/4): 293—315. [https://doi.org/10.1016/s0025-3227\(02\)00446-2](https://doi.org/10.1016/s0025-3227(02)00446-2)

- Cheng, P., Gao, S., 2000. Net Sediment Transport Patterns over the Northwestern Yellow Sea, Based upon Grain Size Trend Analysis. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 31(6): 604—615 (in Chinese with English abstract).
- Chough, S. K., Kim, J. W., Lee, S. H., et al., 2002. High-Resolution Acoustic Characteristics of Epicontinental Sea Deposits, Central-Eastern Yellow Sea. *Marine Geology*, 188(3/4): 317—331. [https://doi.org/10.1016/s0025-3227\(02\)00379-1](https://doi.org/10.1016/s0025-3227(02)00379-1)
- Emery, K. O., 1968. Relict Sediment on Continental Shelves of the World. *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists*, 52: 445—464.
- Folk, R. L., Andrews, P. B., Lewis, D. W., 1970. Detrital Sedimentary Rock Classification and Nomenclature for Use in New Zealand. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 13(4): 937—968. <https://doi.org/10.1080/00288306.1970.10418211>
- Folk, R. L., Ward, W. C., 1957. Brazos River Bar (Texas) A Study in the Significance of Grain Size Parameters. *Journal of Sedimentary Research*, 27(1): 3—26. <https://doi.org/10.1306/74d70646-2b21-11d7-8648000102c1865d>
- He, Q. X., Li, S. Q., Liu, J., 2002. Classification of Marine Clastic Sediments. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 22(1): 105—121 (in Chinese with English abstract).
- Jin, J. H., Chough, S. K., 2002. Partitioning of Transgressive Deposits in the Southern Yellow Sea: A Sequence Stratigraphic Interpretation. *Marine Geology*, 149: 79—92.
- Jin, X. L., 1992. *Maine Geology of the East China Sea*. Ocean Press, Beijing, 127—143 (in Chinese).
- Lan, X. H., Li, R. H., Mi, B. B., et al., 2016. Distribution Characteristics of Rare Earth Elements in Surface Sediment and Their Provenance Discrimination in the Eastern Bohai and Northern Yellow Seas. *Earth Science*, 41(3): 463—474 (in Chinese with English abstract).
- Li, G. X., Yang, Z. G., Liu, Y., 2005. Formation Environment of the Seafloor Sediment in the East China Seas. Science Press, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Li, R. H., Sun, R. T., Xu, Z. K., et al., 2014. Distribution of Benthic Foraminifera in Surface Sediments in the Junction of Bohai Sea and Yellow Sea and Environmental Constraints. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 34(3): 93—103 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J., Qin, H. F., Kong, X. H., et al., 2007. Comparative Researches on the Magnetic Properties of Muddy Sediments from the Yellow Sea and East China Sea Shelves and the Korea Strait. *Quaternary Sciences*, 27(6): 1031—1039 (in Chinese with English abstract).

- Liu, J. P., Xu, K. H., Li, A. C., et al., 2007a. Flux and Fate of Yangtze River Sediment Delivered to the East China Sea. *Geomorphology*, 85(3/4): 208–224. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.03.023>
- Liu, X.Q., 1991. Original Types of the Sediments and Their Distribution Law in China Offshore Shelf. In: Liang, M.S., Zhang, J.L., eds., *The Contrast Study of the Quaternary Sediments in Chinese Land and Sea*. The Science Press, Beijing, 61–67 (in Chinese).
- Liu, X.Q., 1996. Sedimentary Division in Marginal Seas of China. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 16(3):1–11 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Z. X., Berné, S., Saito, Y., et al., 2007b. Internal Architecture and Mobility of Tidal Sand Ridges in the East China Sea. *Continental Shelf Research*, 27(13): 1820–1834. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2007.03.002>
- Liu, Z. X., Xia, D. X., Berne, S., et al., 1998. Tidal Deposition Systems of China's Continental Shelf, with Special Reference to the Eastern Bohai Sea. *Marine Geology*, 145(3/4): 225–253. [https://doi.org/10.1016/s0025-3227\(97\)00116-3](https://doi.org/10.1016/s0025-3227(97)00116-3)
- Milliman, J. D., Li, F., Zhao, Y. Y., et al., 1986. Suspended Matter Regime in the Yellow Sea. *Progress in Oceanography*, 17(3/4): 215–227. [https://doi.org/10.1016/0079-6611\(86\)90045-5](https://doi.org/10.1016/0079-6611(86)90045-5)
- Peng, X.Q., Cheng, Z.Y., Sun, Z.Y. et al., 2018. Modern Sedimentation and Grain Size Distribution in the Southwest of the South Yellow Sea: Dynamic Environmental Constraint. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 49(2): 290–300 (in Chinese with English abstract).
- Qiao, S.Q., Shi, X.F., Wang, G.Q., et al., 2010. Discussion on Grain Size Characteristics of Seafloor Sediment and Transport Pattern in the Bohai Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 32(4): 139–147 (in Chinese with English abstract).
- Qin, Y.C., 2017. Grain Size Characteristics of Bottom Sediments and Its Implications Offshore between Rizhao and Lianyungang in the Western South Yellow Sea. *Quaternary Sciences*, 37(6): 1412–1417 (in Chinese with English abstract).
- Qin Y.S., 1992. Global Changes and Sedimentation on Continental Shelf. *Acta Sedimentologica Sinica*, 10(3): 40–46 (in Chinese with English abstract).
- Shepard, F.P., 1954. Nomenclature Based on Sand-Silt-Clay Ratios. *Journal of Sedimentary Geology*, 24(3): 151–158.
- Shi, X.F., Chen, C.F., Liu, Y.G., et al., 2002. The Analysis of the Grain Size Trend and Their Transport of the Sediments in the Middle Southern Yellow Sea. *Chinese Science Bulletin*, 47(6): 452–456 (in Chinese with English abstract).
- Shi, X.F., Liu, S.F., Qiao, S.Q., et al., 2010. Depositional Features and Paleoenvironmental Records of the Mud Deposits in Min-Zhe Coastal Mud Area, East China Sea. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 30(4):19–30 (in Chinese with English abstract).
- Su, J.L., Yuan, Y.L., 2005. Offshore Hydrology of China. Ocean Press, Beijing, 167–250 (in Chinese).
- Tian, S.S., Zhang, F.Y., Yan, L.N., et al., 2009. Distribution Characteristics of Granularities of Surface Sediments in the Southwestern Shelf of the East China Sea. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 29(5): 13–20 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y.P., Pan, S.M., Wang, H.V., 2006. Measurements and Analysis of Water Discharges and Suspended Sediment Fluxes in Changjiang Estuary. *Acta Geographica Sinica*, 61(1):35–46 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Z.B., Li, R.H., Zhang, Z.X., 2016. Grain Size Composition and Distribution Pattern of Seafloor Sediments in Bohai and Adjacent Areas. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 36(6): 101–109 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Z. B., Yang, S. Y., Wang, Q., et al., 2014. Late Quaternary Stratigraphic Evolution on the Outer Shelf of the East China Sea. *Continental Shelf Research*, 90: 5–16.
- Wang, Z.B., Yang, S.Y., Zhang, Z.X., et al., 2012. The Grain Size Compositions of the Surface Sediments in the East China Sea: Indication Sedimentary Environments. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 43(6): 1039–1049 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Z. Y., Jin, X. L., Cao, Z. Y., et al., 2010. Distribution, Formation and Evolution of Sand Ridges on the East China Sea Shelf. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 53(1): 101–112(in Chinese with English abstract).
- Yang, J.L., Xu, Q.M., Hu, Y.Z., et al., 2018. The Sedimentary Evolution Process, Weathering Intensity and Provenance Reconstruction insight from Borehole Records of Bohai Bay. *Earth Science*, 43(Suppl. 1):287–300 (in Chinese with English abstract).
- Yang, W.D., 2002. Structure and Sedimentary Environment for Submarine Dune Ridges in the East China Sea. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 22(1):9–16 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Z.S., Guo, Z.G., Wang, Z.X., 1992. Macroscopical Pattern of Transport of Suspended Matter from the Shelf of the Yellow Sea and East China Sea to the Deep Sea Area Eastern. *Acta Oceanologica Sinica*, 14: 81–90 (in Chinese with English abstract).

- Ye, Y.C., Zhuang, Z.Y., Lai, X.H., et al., 2004. A Study of Sandy Bed Forms on the Yangtze Shoal in the East China Sea. *Periodical of Ocean University of Qingdao*, 34(6): 1057—1062 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, X. D., Ji, Y., Yang, Z. S., et al., 2016. End Member Inversion of Surface Sediment Grain Size in the South Yellow Sea and Its Implications for Dynamic Sedimentary Environments. *Science China Earth Sciences*, 59(2): 258—267. <https://doi.org/10.1007/s11430-015-5165-8>
- Zhang, Y., Han, Z.Z., Ai, L.N., et al., 2018. Characteristics and Significance of Heavy Minerals in the Surface Sediments of the Holocene Mud of the Yellow Sea. *Periodical of Ocean University of China*, 48(11): 108—118 (in Chinese with English abstract).
- Zhong, K., Zhu, W.L., Gao, S.L., et al., 2018. Key Geological Questions of the Formation and Evolution and Hydrocarbon Accumulation of the East China Sea Shelf Basin. *Earth Science*, 43(10): 3485—3497 (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献:
- 程鹏,高抒,2000. 北黄海西部海底沉积物的粒度特征和净输运趋势. 海洋与湖沼, 31(6): 604—615.
- 金翔龙,1992. 东海海洋地质. 北京:海洋出版社,127—143.
- 蓝先洪,李日辉,密蓓蓓,等,2016. 渤海东部和黄海北部表层沉积物稀土元素的分布特征与物源判断. 地球科学, 41(3): 463—474.
- 李广雪,杨子庚,刘勇, 2005. 中国东部海域海底沉积物成因环境图. 北京:科学出版社.
- 李日辉,孙荣涛,徐兆凯,等,2014. 黄海与渤海交界区附近表层沉积物中的底栖有孔虫分布与环境因素制约. 海洋地质与第四纪地质, 34(3): 93—103.
- 刘健,秦华峰,孔祥怀,等,2007. 黄东海陆架及朝鲜海峡泥质沉积物的磁学特征比较研究. 第四纪研究, 27(6): 1031—1039.
- 刘锡清,1991. 中国近海陆架沉积物成因类型及分布规律. 见: 梁明胜,张吉林,著,中国海陆第四纪对比研究. 北京:科学出版社,61—67.
- 刘锡清,1996. 中国边缘海的沉积物分区. 海洋地质与第四纪地质, 16(3): 1—11.
- 彭修强,程知言,孙祝友,等, 2018. 南黄海西南部海域表层沉积物粒度特征及其对沉积动力环境的指示意义. 海洋与湖沼, 49(2): 290—300.
- 乔淑卿,石学法,王国庆,等, 2010. 渤海底质沉积物粒度特征及其输运趋势探讨. 海洋学报, 32(4): 139—147.
- 秦亚超,2017. 南黄海西部日照至连云港海域表层沉积物粒度特征及其指示意义. 第四纪研究, 37(6): 1412—1417.
- 石学法,刘升发,乔淑卿,等,2010. 东海浙闽沿岸泥质区沉积特征与古环境记录. 海洋地质与第四纪地质, 30(4): 19—30.
- 苏纪兰,袁业立, 2005. 中国近海水文. 北京:海洋出版社, 167—250.
- 田珊珊,张富元,阎丽妮,等,2009. 东海西南陆架表层沉积物粒度分布特征. 海洋地质与第四纪地质, 29(5): 13—20.
- 汪亚平,潘少明,Wang H.V., 等, 2006. 长江口水沙入海通量的观测与分析. 地理学报, 61(1): 35—46.
- 王中波,李日辉,张志珣,等,2016. 渤海及邻近海区表层沉积物粒度组成及沉积分区. 海洋地质与第四纪地质, 36(6): 101—109.
- 王中波,杨守业,张志珣,等, 2012. 东海陆架中北部沉积物粒度特征及其沉积环境. 海洋与湖沼, 43(6): 1039—1049.
- 吴自银,金翔龙,曹振铁,等,2010. 东海陆架沙脊分布及其形成演化. 中国科学:地球科学, 40(2): 188—198.
- 杨吉龙,胥勤勉,胡云壮,等,2018. 渤海湾西岸钻孔记录的沉积演化过程和沉积物风化强度、物源重建. 地球科学, 43(增刊1): 287—300.
- 杨文达,2002. 东海海底沙脊的结构及沉积环境. 海洋地质与第四纪地质, 22(2): 9—20.
- 杨作升,郭志刚,王兆祥,等,1992. 黄东海陆架悬浮体向东部深海区输送的宏观格局. 海洋学报, 14: 81—90.
- 叶银灿,庄振业,来向华,等,2004. 东海扬子浅滩砂质底形研究. 中国海洋大学学报, 34(6): 1057—1062.
- 张尧,韩宗珠,艾丽娜,等,2018. 黄海全新世泥质体表层沉积物重矿物特征及其指示意义. 中国海洋大学学报, 48(11): 108—118.
- 钟锴,朱伟林,高顺莉,等,2018. 东海陆架盆地形成演化及油气成藏关键地质问题. 地球科学, 43(10): 3485—3497.