

江苏如东近岸海域表层沉积物粒度特征及其环境意义

黄润秋, 赵一飞, 刘 晴, 徐 敏

(南京师范大学海洋科学与工程学院, 江苏 南京 210023)

[摘要] 基于江苏如东近岸海域 32 个表层沉积物粒度参数分析,探讨了沉积物类型、粒级组分及粒度参数分布特征。在此基础上,结合 Folk 三角图示法、Q 型系统聚类法和研究区潮流动力特征,将如东近岸海域划分为 3 个分区,即近岸潮滩-沙脊区、潮流通道区和辐射沙洲外缘区。研究结果表明,受物质来源和沉积动力变化的影响,江苏如东近海表层沉积物粒度分布具有明显的空间差异。如东海域表层沉积物类型主要有 3 种,以砂质粉砂为主,平均含量为 50%;粉砂质砂次之,平均含量为 46.87%;砂含量最少,为 3.13%。平均粒径介于 25.65~171.72 μm 之间,均值为 70.61 μm ,其分布与砂含量具有一致的变化趋势。分选性、偏度和峰态分别具有较差-差、近对称-极负偏、尖锐-很尖锐的特征。空间分布上,(1)近岸潮滩-沙脊区,水深较浅,地形冲淤动态变化复杂,沉积物砂含量较多,粒径整体较粗;(2)潮流通道区,水道内部深度大,底部受水动力影响较小,黏土含量较多,粒径变细;(3)辐射沙洲外缘区,水深大,受潮流动力作用小,沉积环境相对稳定。

[关键词] 江苏近岸,表层沉积物,粒度特征,沉积环境,沉积动力

[中图分类号] P736.2 [文献标志码] A [文章编号] 1001-4616(2020)01-0091-09

Grain Size Characteristics and Environmental Significance of Surface Sediments in the Coastal Areas of Rudong in Jiangsu Province, China

Huang Runqiu, Zhao Yifei, Liu Qing, Xu Min

(College of Marine Science and Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: Based on the datas of grain size composition and parameter analysis of 32 surface sediments in the coastal areas of Rudong in Jiangsu Province, the distribution characteristics of sediment types, grain size components and grain size parameters were analyzed. In addition, combined with the Folk & Ward's nomenclature, the Q-type system cluster analysis method and the tidal dynamic characteristics of the study area, the coastal areas of Rudong were divided into three sub-areas, namely the near-shore tidal flat and sand ridge area, the tidal channel area and the edge region of sand ridge, respectively. The results indicated that the distribution of grain size in surface sediments has obvious spatial differences in the coastal areas of Rudong by the influence of material source and sedimentary dynamics environmental. There are three sediment types in surface sediments in the coastal areas of Rudong, with sandy silt as the main content, the average content of 50%; followed by silty sand, the average content of 46.87%; the sand content have least proportion, the average content of 3.13%. The mean grain size of surface sediment are between 25.65-171.72 μm , and the average of 70.61 μm . In addition, the trend of spatial distribution is consistent with the change of sand content. Sorting coefficient, skewness, and kurtosis are characterized by poor-difference, near-symmetry-extremely negative, sharp-very sharp, respectively. Spatially, (1) The nearshore tidal flat-sand ridge area, there are abundance of sand content and coarser of grain size in sediments by water depth of shallow, sedimentary and erosion dynamic changes of complex; (2) The tidal channel area, there are more clay content and finer grain size in sediments by the channel's depth of large, the bottom affected by hydrodynamics of less; (3) The edge region of sand ridge, there are deep water depth and little effected by tidal current of relatively stable sedimentary environment.

Key words: coastal areas of Jiangsu, surface sediments, grain size characteristics, sedimentary environment, sedimentary dynamics

收稿日期: 2019-09-09.

基金项目: 国家自然科学基金项目(41373112、41801005)、江苏省海洋科技创新专项项目(HY2018-3).

通讯作者: 徐敏, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向: 海洋资源与环境. E-mail: xumin0895@njnu.edu.cn

海洋沉积物是物源供应、水动力环境和生物活动等多因素共同作用的结果. 沉积物粒度与沉积物来源、搬运过程和沉积环境密不可分, 沉积物的粒径参数是研究沉积特征及鉴别沉积环境的常见方法^[1-3]. 现代陆架海域表层沉积物粒度分布与所在海域现代海洋动力环境特征相适应^[4], 沉积物粒度中蕴含着丰富的沉积物运移及沉降的信息. 因此, 沉积物粒度分布可用来反演海洋动力环境, 对于揭示沉积物的运移和沉降等规律具有重要意义^[5-8].

江苏地处江淮下游、黄海之滨, 位于我国沿海地区中部(图 1), 岸外分布着巨大的水下沙脊群, 在辐聚辐散的潮流动力作用下, 沉积动力环境复杂. 作为世界上特有的大型海岸地貌沉积体, 一直以来是众多学者研究和关注的热点区域. 历史上, 在黄河、长江物源供应的变化下, 这一沉积体处于不断的动态变化中. 目前, 对江苏近岸海域沉积环境变迁^[9-13]、沉积物粒度特征^[4,14-19]、沉积物搬运规律^[20]和岸滩演变^[21]等方面问题都进行了广泛研究和探讨, 并取得了重要的成果. 然而, 随着经济的发展, 江苏沿海地区大开发的实施及港口开发建设, 特别是近 30 年来江苏沿海围垦工程的大规模实施, 改变了研究区域的沉积动力环境及边界条件^[13], 进而对该区域沉积环境产生影响. 目前, 开展的相关研究主要集中于较大尺度沉积环境和基于粒径趋势的沉积物输运等方面^[16,20,22-24], 缺乏围垦工程建成后、物质供应减少和水动力变化影响下该区域沉积环境的系统研究. 本研究旨在通过分析江苏如东近岸海域表层沉积物粒度组分和参数, 结合该区域波浪、潮流和地形地貌资料, 对其沉积环境进行分区, 探讨不同区域沉积环境特征及其指示意义, 进一步指导江苏如东近海空间的开发活动.

1 研究区概况

江苏如东近岸海域(32°15'N~33°00'N, 120°50'E~122°10'E)位于南黄海辐射沙脊群南翼(图 1), 属于北亚热带海洋性季风气候, 处于东亚季风控制区. 该区域常年以风浪为主, 常浪向为 N, 次浪向为 NNW, 出现频率分别为 19.6%和 10.5%.

如东近岸海域主要受黄海沿岸流的作用, 一部分在长江口北 32°N 附近转向东南加入黄海暖流, 另一部分越过长江浅滩进入东海. 因不同季节的风场驱动形成了不同环流体系^[14], 即夏季风场驱动作用下

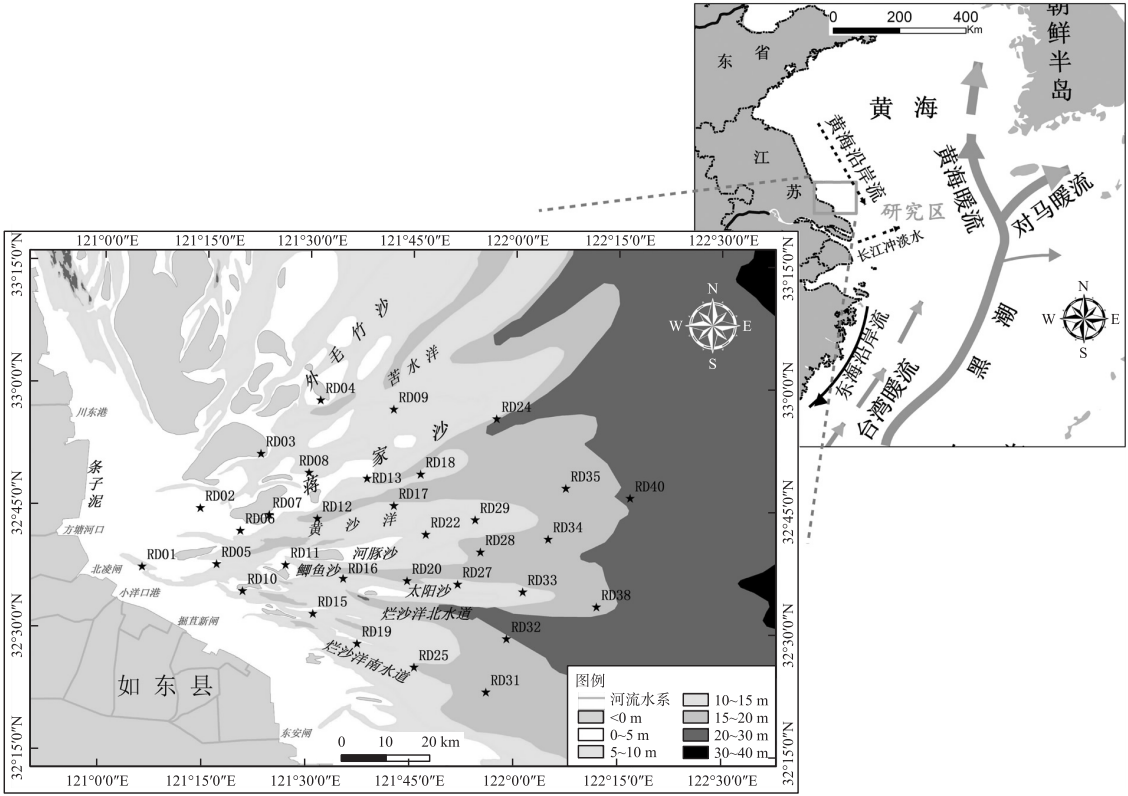


图 1 研究区及采样点分布
Fig. 1 The study area and sampling locations

40 m 以浅海域存在一支北向流,以南向的苏北沿岸流为主导。此外,受到东海前进潮波和南黄海旋转潮波组合成的潮波系统影响,两大潮波呈现出方向相反的特点,其中涨潮流向湾顶辐聚,落潮流向岸外辐散。潮汐属于正规半日潮,日平均潮差大,平均潮差在 2.5~4 m^[25],弼港和小洋口一带达到最大,在洋口港外黄沙洋水道实测最大潮差达到 9.28 m。该区域内主要的潮汐通道有小洋口外的黄沙洋水道和烂沙洋水道,基本为往复流,涨潮流呈 WNW 向,落潮流呈 ESE 向,平均大潮流速超过 1.5 m/s。

2 材料与方法

2018 年 8 月,在如东近岸海域使用抓斗取样器采集了 32 个表层沉积物样品(图 1),所取样品采样深度为 5 cm,属于活动层内的现代沉积物表层样。每个样品约取 500 g,迅速放入聚乙烯自封袋于-20 ℃ 储存,并且使用 Trimble 手持 GPS 进行定位。沉积物粒度分析在南京师范大学环境演变和生态建设重点实验室完成,采用 Mastersizer 2000 激光粒度仪进行测定,该仪器测量的粒度范围为 0.01~2 000 μm,粒径分辨率为 0.1 μm,重复测量的误差小于 3%。具体步骤如下:为充分去除样品中杂质使得实验数据更加准确,取约 5 g 的样品(干样)放入 100 mL 烧杯,加入蒸馏水并使用搅拌棒使样品充分溶解,静置 24 h 后用虹吸法把上清液吸出以达到洗盐作用;在烧杯中加入 10 mL 10% 双氧水去除有机质;加入 10 mL 10% HCl 在 50 ℃ 条件下去除碳酸盐及钙胶结物;待蒸馏水对样品液中和后加入 10 mL 0.6% 六偏磷酸钠溶液,超声波振荡 10 min 后使用激光粒度仪进行粒度分析。沉积物平均粒径、分选系数、偏度和峰态等粒度参数依据沃克—福德图解法公式。

3 结果与讨论

3.1 沉积物类型及分布特征

Folk 沉积物分类能更好反映黏土、粉砂和砂组分在沉积过程中的行为和动力学特征^[26]。根据 Folk 三角图法对江苏如东近岸海域表层沉积物进行分类(图 2)。结果表明:沉积物主要以砂质粉砂为主(50%),其次是粉砂质砂(46.87%),砂含量最少(3.13%)(表 1)。通过与研究区地形叠加对比发现,砂主要分布于沙脊上,是组成沙脊的主体成分;粉砂质砂主要分布在蒋家沙及其沙脊斜坡上、近岸的潮间带区域;砂质粉砂则主要分布于黄沙洋、烂沙洋等潮流通道,沙脊间的沟槽及辐射沙洲外缘区。

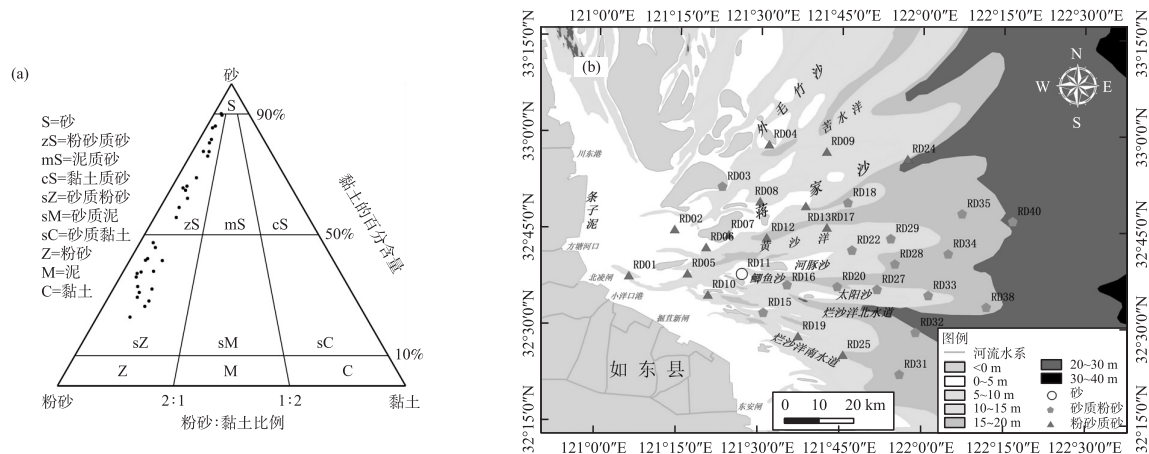


图 2 Folk 沉积物类型(a)及其不同沉积物类型的空间分布(b)

Fig. 2 Sediment types based on Folk's nomenclature(a) and their distribution(b)

砂质粉砂的粒径介于 25.65~62.86 μm,平均值为 40.72 μm;分选系数介于 1.16~2.21,平均值 1.65,均呈现较差的分选性;偏度范围-0.40~-0.06,平均值-0.27,呈负偏和极负偏,具有粗粒尾端;峰态范围 1.05~1.68,平均值 1.37,有 25% 站位呈中等峰态,其余均有一个很窄的峰。

粉砂质砂的粒径介于 58.44~169.27 μm,平均值为 95.74 μm;分选系数介于 0.97~1.97,平均值 1.53,超过 90% 属于分选性较差,只有少数分选性中等;偏度介于-0.62~-0.30,平均值-0.45,呈极负偏,整体向粗端偏移;峰态介于 0.99~2.18,平均值为 3.46,超过 86% 含有很窄的峰。砂质沉积较少,主要分布于沙脊上,砂作为沙脊的主体成分,也可能与采样点的分布有关。在本次调查的 32 个站位中,只有一个站位为砂质沉积物,粒径 171.72 μm,分选系数 1.05,属于中等的峰态,偏度呈极负偏。

表 1 不同沉积物类型的组分及粒度参数特征值

Table 1 Composition and grain size parameters of different sediment types

沉积物类型	特征值	平均粒径/ μm	分选系数	偏度	峰态	黏土含量/%	粉砂含量/%	砂含量/%
砂	最大值	171.72	1.05	-0.35	1.95	2.07	7.89	90.04
	最小值	171.72	1.05	-0.35	1.95	2.07	7.89	90.04
	平均值	171.72	1.05	-0.35	1.95	2.07	7.89	90.04
粉砂质砂	最大值	169.27	1.97	-0.30	2.18	6.36	38.04	89.58
	最小值	58.44	0.97	-0.62	0.99	1.88	7.96	55.69
	平均值	95.74	1.53	-0.45	1.55	4.16	22.79	73.05
砂质粉砂	最大值	62.86	2.21	-0.06	1.68	12.26	67.80	47.39
	最小值	25.65	1.16	-0.40	1.05	3.82	48.79	22.72
	平均值	40.72	1.65	-0.27	1.37	7.42	57.01	35.57

3.2 沉积物粒级组分分布特征

江苏如东近岸海域沉积物粒级组分主要是由砂、粉砂和黏土组成,其中砂含量(54.84%)最多,其次是粉砂(39.43%)和黏土(5.73%),表明该区域沉积物颗粒较粗. 沉积物粒级各组分百分含量的空间分布如图 3. 砂组分百分含量介于 22.72%~90.04%,均值为 54.84%,标准偏差>20,其变化幅度较大,高值区(>60%)主要分布在等深线小于 10 m 的辐射沙洲水下沙脊区域,沿等深线呈现环抱趋势,沙脊处出现砂含量的峰值;低值区(<30%)分布在辐射沙洲外缘区. 粉砂组分百分含量介于 7.89%~67.8%,均值为 39.43%,标准偏差为 18.9,变化幅度也较大,高值区与低值区与砂含量分布相反,即高值区分布在辐射沙洲外缘区及大型潮流通道的区域,如蒋家沙水道和黄沙洋. 黏土组分百分含量介于 1.88%~12.26%,均值为 12.26%,其空间分布与粉砂相似. 然而,黏土组分含量分布存在明显的界限,即在外缘区迅速上升,而在大型潮流通道区域表现出较低的百分比(<5%),RD15 发现一个黏土占比相对高值,而在水下沙脊区域则占比明显较低,尤其在沙脊处出现明显低值(2.07%).

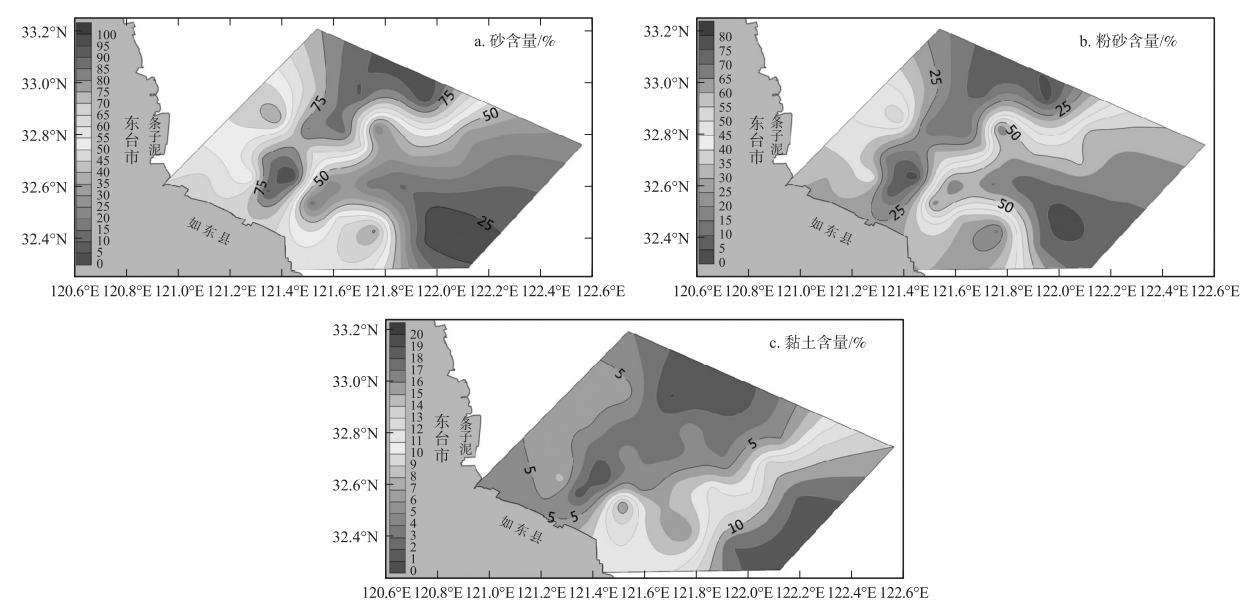


图 3 沉积物各粒级组分分布(a.砂含量/%,b.粉砂含量/%,c.黏土含量/%)

Fig. 3 The percentages of sand(a), silt(b), clay(c) in the surface sediments

3.3 沉积物粒度参数分布特征

研究区表层沉积物粒度参数分布如图 4 所示,平均粒径变化范围为 25.65~171.72 μm 之间,平均值为 70.61 μm (图 4(a)). 空间分布上,黄沙洋、烂沙洋和蒋家沙之间的潮流通道及辐射沙洲外缘区的沉积物平均粒径<50 μm ;蒋家沙及近岸的潮间带地区平均粒径>70 μm . 分选系数变化范围为 0.97~2.21 之间,平均值为 1.58,总体分选较差(图 4(b)). 其中,分选性较好的位于蒋家沙及沙脊斜坡、近岸潮间带区域,而分选较差的主要分布在黄沙洋、烂沙洋水道等潮流通道及辐

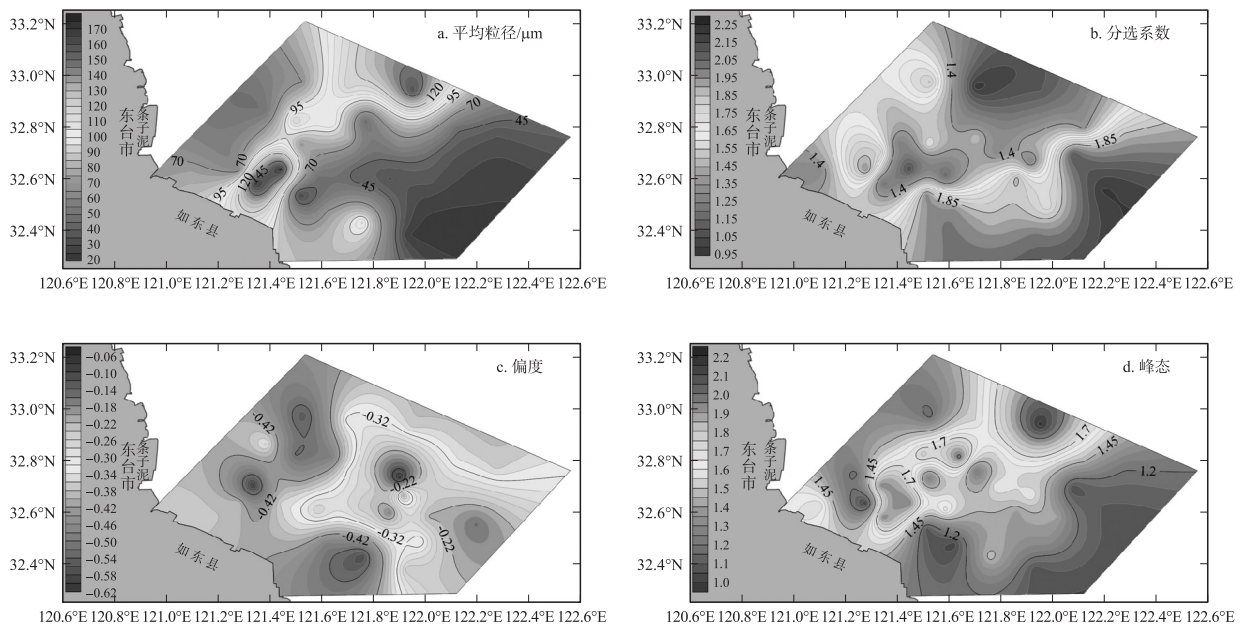


图 4 沉积物粒度参数分布

Fig. 4 The pattern of distribution of the grain size parameters

射沙洲外缘区. 而处于蒋家沙、河豚沙、鲫鱼沙之间的黄沙洋在分选系数上出现不明显的梯度,分选系数先增后减小,在黄沙洋附近变差. 分选系数与平均粒径(Φ)二者存在弱负相关关系($R^2=0.371$,图 5(a)),结果表明沉积物分选系数在潮流通道及辐射沙洲外缘区表现出差的分选性,这可能是由于水深较大,导致该区域发生混杂堆积,黏土含量增加,因此分选较差;而近岸及地形相对较高的区域则表现出较好的分选性,这可能是因为水深浅、地形相对高的区域受到较强的动力作用,细颗粒的泥沙被水流带走,剩下较粗的粉砂及砂,因此分选相对较好,这与其他学者在邻近区域的研究结果具有一致性^[16,22,27-28].

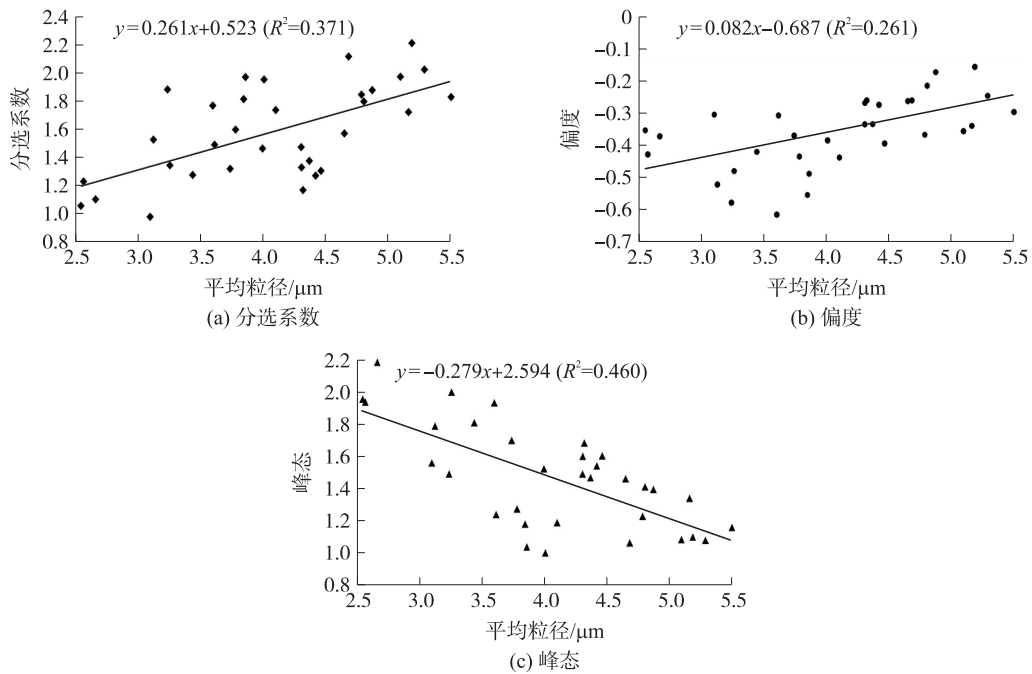


图 5 沉积物平均粒径(Φ)与分选系数(a)、偏度(b)和峰态(c)之间关系

Fig. 5 The relationship between mean grain size(Φ) and sorting coefficient(a), skewness(b) and kurtosis(c) of sediment

偏度变化范围介于-0.62~-0.06 之间,平均值为-0.36,总体呈负偏和极负偏(图 4(c)). 相关关系显示偏度与平均粒径存在较差的相关性($R^2=0.261$,图 5(b)). 表现在辐射沙洲外缘区呈负偏,蒋家沙、近岸

潮间带区域及潮流通道区域呈极负偏. 空间分布上, 偏度从蒋家沙近岸潮间带区域到潮流通道呈现下降趋势, 从潮流通道至辐射沙洲外缘区呈现偏度上升趋势.

峰态变化介于 0.99~2.18 之间, 平均值为 1.47(图 4(d)), 峰态与平均粒径相关关系表明二者之间存在较弱的负相关($R^2=0.460$, 图 5(c)), 其分布特征表现为蒋家沙水下沙脊区峰态偏窄, 且呈现不明显双峰, 次峰的峰态宽平, 出现这一特征的原因可能是滩槽所处沉积环境不同, 滩面因潮沟的摆动发生淤蚀变化, 而由于细颗粒多被冲刷, 呈现出极负偏; 而深槽因水深较大, 底质受潮流影响较小, 沉积的黏土颗粒相对稳定, 难以造成纵向输沙^[21].

3.4 讨论

江苏如东近岸海域沉积物物质来源丰富、水动力条件复杂^[29-31]. 为了综合反映研究区不同区域的沉积动力环境的差异, 结合 32 个站位沉积物的粒度参数及不同组分的含量, 采用 Q 型聚类中的 Ward 法进行分析. 在聚类分析时, 为了消除量纲和数级差异对距离的判断产生的影响, 对数据进行标准化处理^[32], 结果如图 6 所示. 根据聚类分析结果, 将如东近岸海域划分为 3 个分区, 即(1)近岸潮滩-沙脊区; (2)潮流通道区; (3)辐射沙洲外缘区, 其分别代表不同的沉积动力环境(图 7), 各沉积区表层沉积物的粒度参数及组分特征见表 2.

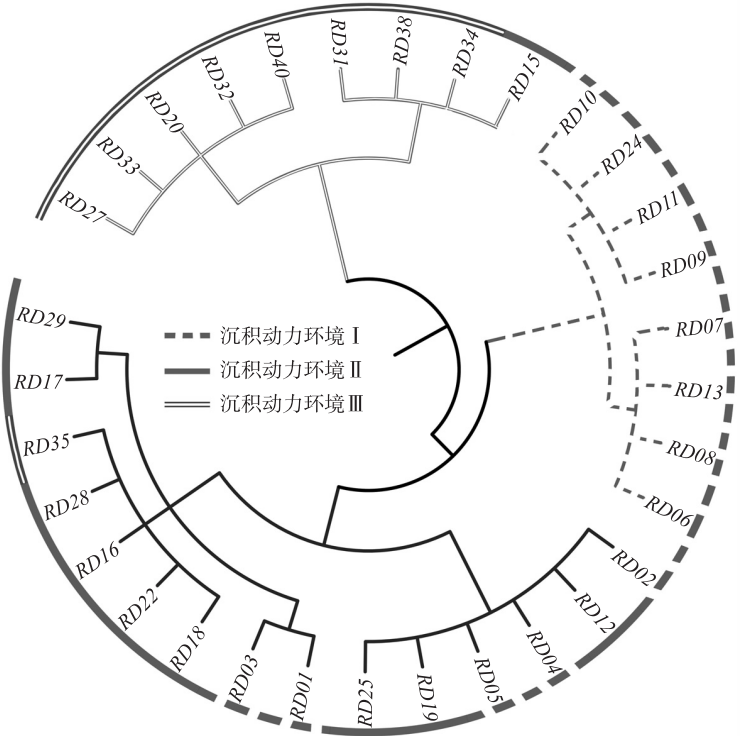


图 6 沉积物 Q 型聚类分析结果及分区示意图
Fig. 6 Q-type cluster analysis and distribution pattern of sediments

表 2 如东近岸海域表层沉积物粒度参数及组分特征表

Table 2 The grain size parameters and composition characteristics of surface sediments in the coastal areas of Rudong in Jiangsu Province								
沉积动力环境分区	特征值	平均粒径/ μm	分选系数	偏度	峰态	黏土含量/%	粉砂含量/%	砂含量/%
I	最大值	171.72	1.95	-0.30	2.18	6.27	48.97	90.04
	最小值	50.77	0.97	-0.62	0.99	1.88	7.89	45.76
	平均值	94.73	1.43	-0.43	1.66	3.88	22.02	74.10
II	最大值	106.58	1.97	-0.06	1.68	11.15	59.34	76.00
	最小值	29.36	1.16	-0.58	1.03	3.32	18.84	32.03
	平均值	58.31	1.54	-0.34	1.40	5.30	44.70	50.00
III	最大值	48.70	2.21	-0.16	1.46	12.26	67.80	42.08
	最小值	25.65	1.37	-0.37	1.05	4.92	49.13	22.72
	平均值	34.43	1.83	-0.26	1.27	8.86	58.74	32.39

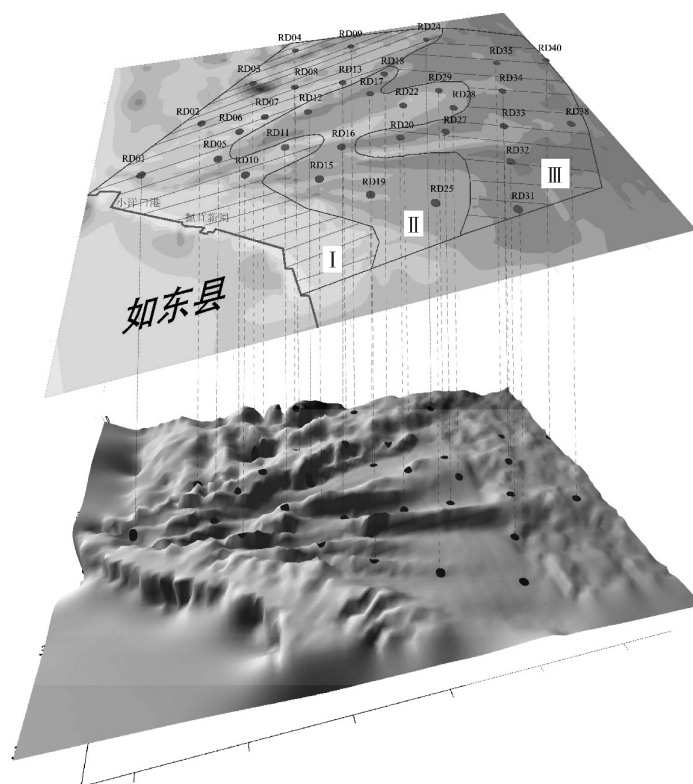


图7 如东近岸海域表层沉积物沉积动力环境分区

Fig. 7 The sedimentary dynamic environmental zones of surface sediments in the coastal areas of Rudong in Jiangsu Province

(I) 近岸潮滩-沙脊区,分布在以蒋家沙为主的水下沙脊区及其沙脊斜坡、近岸的潮间带区域,整体水深较浅,地形及动力条件复杂. 沉积物粒度参数表现为:平均粒径介于 $50.77 \sim 171.72 \mu\text{m}$ 之间,平均值为 $94.73 \mu\text{m}$;分选系数均值为 1.43,分选较差;偏度介于 $-0.62 \sim -0.3$ 之间,均呈现极负偏;峰态呈中等至尖窄. 黏土、粉砂和砂的平均含量分别为 3.88%、22.02% 和 74.10%. 总体而言,沉积物粒度参数表征的粒级整体较粗,较好的分选性反映出当前的动力环境较稳定,中等峰态的分布反映出物源较为稳定且水动力作用较强,偏度粗偏、高含砂量以及低黏土含量说明其受到比较一致的水动力作用. 同时,通过对比近岸的潮间带区域沉积物粒径谱(图 8(a))和潮流通带内沉积物粒径谱(图 8(b))的变化趋势,发现近岸潮间带区域的粒径谱出现不明显双峰与“细尾”,该特征被认为是潮流对细颗粒分选不明显导致,并且受不同物源的影响^[33]. 该区域因其水深较浅,表层沉积物受潮流作用频繁,细颗粒悬移物质被淘洗,较粗颗粒物质得以沉积.

(II) 潮流通带区,主要是指分布在黄沙洋、烂沙洋等潮流通带的区域,该区域整体上属于水深流急,但底部潮流作用小,黏土成分含量相对较多的区域. 沉积物粒度参数表现为:平均粒径介于 $29.36 \sim 106.58 \mu\text{m}$ 之间,平均值为 $58.31 \mu\text{m}$;分选系数均值为 1.54,分选性较差;偏度介于 $-0.58 \sim -0.06$ 之间,均值为 -0.34 ,偏度分布于近对称、负偏和极负偏,粒级主峰波动较大;峰态较窄,均值为 1.40. 黏土、粉砂和砂的平均含量分别为 5.30%、44.70% 和 50.00%. 表层沉积物的平均粒径相比近岸潮滩-沙脊区(I)变细,分选性表现小幅下降,偏度呈现波动幅度变大,砂含量大幅减少,粉砂含量大幅增加,同时黏土的含量出现了一定比例的上升. 潮流通带强动力水流会使沙脊及其边坡遭受显著的侵蚀,辐射沙脊区粗颗粒沉积物因净冲刷作用被淘洗出^[34-35],然而该区域深槽因水深较大,沉积的细颗粒物质不易启动,难以造成纵向输沙^[21]. 此外,该区域的泥沙会通过烂沙洋等潮汐通道与长江口泥沙进行交换,也可能造成黏土、粉砂含量的上升^[36].

(III) 辐射沙洲外缘区,整体水深较大,底部动力较小,底质沉积物受潮流作用微弱,因此会引起较细颗粒物质沉积. 该区域沉积物粒度参数表现为:平均粒径介于 $25.65 \sim 48.70 \mu\text{m}$ 之间,平均值为 $34.43 \mu\text{m}$;分选系数介于 1.37~2.21 之间,分选性较差;偏度呈负偏,峰态呈中等到窄的特征,介于 1.05~1.45 之间. 该区域沉积物平均粒径相对较细,分选性变差,偏度值整体出现上升趋势,表征其粒级主峰由粗颗粒

物逐渐向细颗粒物偏移,峰态也由窄变宽平. 沉积物组分中黏土、粉砂和砂的含量分别为 8.86%、58.74% 和 32.39%,与 I 和 II 区相比较,该分区的粉砂含量出现了明显上升,其粉砂含量高于砂含量. 结合粒度参数与沉积物组分的特征值,该区域表层沉积物的粒径谱(图 8(c))与偏峰态表征该分区由不明显双峰转变为单峰,且峰由粗端向细端偏移,“细尾”中细颗粒成分不断上升,峰态逐渐下降,表明颗粒物逐渐细化,物源趋向单一,这可能是该区域虽然受到辐射沙洲辐聚-辐散场的影响,但因其水深较大,含砂量较小^[36],且受到辐射沙洲的阻挡作用,岸外辐射沙洲侵蚀物、废黄河三角洲悬浮物的影响减弱,使该分区的沉积物物源多样性降低,研究表明辐射沙脊群南翼主要受长江物质影响,因长江口南移后,其分布格局已逐渐与潮流场相适应^[34];结合该区域的沉积动力学特征,该区域沉积物以粉砂含量为主,且主要受潮流作用控制,然而一定波流作用下泥沙的悬移与扩散通常无法达到水体的上部,仅限临近底层一定的高度之内,其沉积环境短期内难以发生改变^[21];同时与受长江口细颗粒物在长江冲淡水 and 台湾暖流顶托作用发生西北向运移^[31,37]有关.

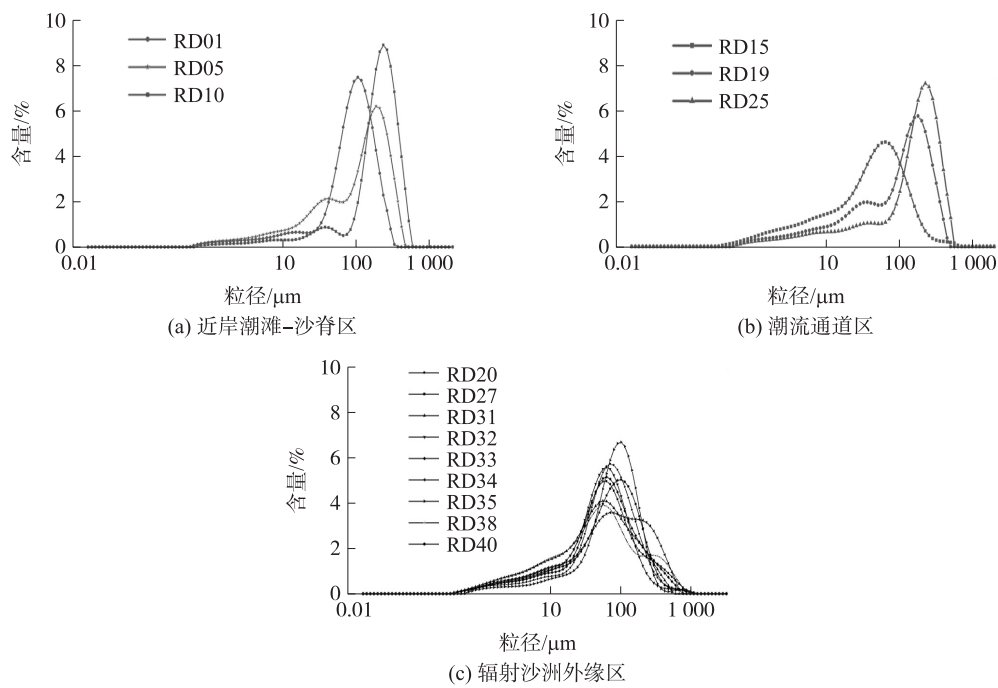


图 8 不同分区沉积物粒径谱
Fig. 8 Grain size spectra of sediments in three zones

4 结论

(1) 江苏如东近岸海域表层沉积物主要包括砂质粉砂、粉砂质砂和砂三种类型,分别占 50%、46.87% 和 3.13%,其中砂主要分布于沙脊上,粉砂质砂主要分布在蒋家沙及其沙脊斜坡上、近岸的潮间带区域,砂质粉砂则主要分布于黄沙洋、烂沙洋等潮流通道和沙脊间的沟槽及辐射沙洲外缘区. 平均粒径介于 25.65 ~ 171.72 μm 之间,平均值为 70.61 μm ,沙脊区及近岸的潮间带区域粗粒组分含量高,平均粒径大,潮流通道区域及辐射沙洲外缘区粗粒组分含量低而细粒组分含量高,平均粒径较小.

(2) 表层沉积物的分选系数介于 0.97~2.21 之间,平均值为 1.58,呈由岸到海、等深线从低值区向高值区逐渐变差的趋势;偏度的变化范围介于 -0.62 ~ -0.06 之间,平均值为 -0.36,呈由岸到海、等深线从低值区到高值区粒级向细端偏移;峰态的变化范围介于 0.99~2.18 之间,平均值为 1.47,同沉积物平均粒径有一致的空间分布趋势.

(3) 结合 Folk 三角图示法、Q 型系统聚类法和研究区潮流动力特征,将如东近岸海域划分为 3 个沉积动力环境区:①近岸潮滩-沙脊区,水深较浅,地形冲淤动态变化复杂,沉积物砂含量较多,粒径整体较粗;②潮流通道区,水深较大,底部受水动力影响较小,黏土含量较多,粒径变细;③辐射沙洲外缘区,水深大,受潮流动力作用小,沉积环境相对稳定.

[参考文献]

- [1] RIJN L C V. Sediment transport, part I: bed load transport[J]. Journal of hydraulic engineering, 1985, 110(10): 1431-1456.
- [2] FRIEDMAN G M. Address of the retiring president of the international association of sedimentologists: differences in size distributions of populations of particles among sands of various origins[J]. Sedimentology, 2010, 26(1): 3-32.
- [3] 汪亚平,高抒,贾建军. 胶州湾及邻近海域沉积物分布特征和运移趋势[J]. 地理学报, 2000, 67(4): 449-458.
- [4] 张晓东,季阳,杨作升,等. 南黄海表层沉积物粒度端元反演及其对沉积动力环境的指示意义[J]. 中国科学(D辑:地球科学), 2015, 45(10): 1515-1523.
- [5] 孙千里,周杰,肖举乐. 岱海沉积物粒度特征及其古环境意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2001, 21(1): 93-95.
- [6] 杨阳,高抒,周亮,等. 海南新村港潟湖表层沉积物粒度特征及其沉积环境[J]. 海洋学报, 2016, 38(1): 94-105.
- [7] 陈敬安,万国江,张峰,等. 不同时间尺度下的湖泊沉积物环境记录:以沉积物粒度为例[J]. 中国科学(D辑:地球科学), 2003, 33(6): 563-568.
- [8] 黄慧珍. 长江口外沉积物的分布规律[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1981, 1(2): 81-85.
- [9] 凌晰,刘文新,陈江麟,等. 黄海近岸表层沉积物中 PAHs 的分布特征与潜在风险[J]. 环境科学学报, 2008, 28(7): 1394-1399.
- [10] 刘文新,胡璟,陈江麟,等. 黄海近岸底栖贝类体内典型有机污染物分布[J]. 环境科学, 2008, 29(5): 1336-1341.
- [11] 王建. 江苏省海岸滩涂及其利用潜力[M]. 北京:海洋出版社, 2012.
- [12] 张长宽. 江苏省近海海洋环境资源基本现状[M]. 北京:海洋出版社, 2013.
- [13] 徐敏. 淤长型潮滩适宜围填规模研究:以江苏省为例[M]. 北京:海洋出版社, 2012.
- [14] 苏纪兰,袁业立. 中国近海水文[M]. 北京:海洋出版社, 2005.
- [15] 张忍顺,王雪瑜. 江苏省淤泥质海岸潮沟系统[J]. 地理学报, 1991, 58(2): 195-206.
- [16] 程珺,高抒,汪亚平,等. 苏北近岸海域表层沉积物粒度及其对环境动力的响应[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 29(1): 7-12.
- [17] 杨群慧,李木军,杨胜雄,等. 南海西南部表层沉积物粒度特征及输运趋势[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2013, 33(6): 1-7.
- [18] 石学法,申顺喜,陈志华,等. 南黄海现代沉积环境及动力沉积体系[J]. 科学通报, 2001, 46(S1): 1-6.
- [19] 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.
- [20] 邹欣庆,施丙文,许叶华,等. 黄海辐射沙洲砾石的分布及海底沉积性质的研究[J]. 古生物学报, 1999, 38(2): 125-129.
- [21] 徐敏,陆培东. 波流共同作用下的泥沙运动和海岸演变[M]. 南京:南京师范大学出版社, 2005.
- [22] 彭修强,程知言,孙祝友,等. 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[J]. 海洋与湖沼, 2018, 49(2): 290-300.
- [23] 陈君,冯卫兵,张忍顺. 苏北岸外条子泥沙洲潮沟系统的稳定性研究[J]. 地理科学, 2004, 24(1): 98-100.
- [24] 朱大奎,柯贤坤,高抒. 江苏海岸潮滩沉积的研究[J]. 黄渤海海洋, 1986, 4(3): 19-27.
- [25] 李峭. 中国东部近海夏季环流特征及其动力机制[D]. 青岛:中国科学院研究生院(海洋研究所), 2010.
- [26] 王中波,何起祥,杨守业,等. 谢帕德和福克碎屑沉积物分类方法在南黄海表层沉积物编图中的应用与比较[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2008, 28(1): 1-8.
- [27] 高建华,欧维新,杨桂山,等. 苏北潮滩不同生态带沉积物分布特征[J]. 东海海洋, 2005, 23(1): 40-47.
- [28] 陈君,陈宏友,徐国华,等. 江苏条子泥沙洲内缘区潮滩粒度特征及其影响因素[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2011, 31(6): 21-26.
- [29] 任美镔,张忍顺,杨巨海,等. 风暴潮对淤泥质海岸的影响:以江苏省淤泥质海岸为例[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1983, 3(4): 1-24.
- [30] 王颖,朱大奎. 南黄海辐射沙脊群沉积特点及其演变[J]. 中国科学(D辑:地球科学), 1998, 28(5): 385-393.
- [31] 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.
- [32] 何清. 模糊聚类分析理论与应用研究进展[J]. 模糊系统与数学, 1998, 12(2): 89-94.
- [33] 蔡国富,范代读,尚帅,等. 图解法与矩值法计算的潮汐沉积粒度参数之差异及其原因解析[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2014, 34(1): 195-204.
- [34] 刘涛. 南黄海辐射沙脊群现代沉积环境研究[D]. 青岛:中国科学院研究生院(海洋研究所), 2012.
- [35] 王颖,朱大奎. 中国的潮滩[J]. 第四纪研究, 1990, 10(4): 291-300.
- [36] 黄惠明,王义刚,尚进,等. 冬季苏北辐射沙洲水域悬沙分布及输运特征分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2011, 39(2): 201-205.
- [37] 王晓磊,冯秀丽,刘潇,等. 冬、夏季渤海表层沉积物粒度特征差异及其成因分析[J]. 海洋科学, 2015, 39(8): 63-69.

[责任编辑:丁 蓉]