

文章编号: 1000-0550(2016)03-0506-10

doi: 10.14027/j.cnki.cjxb.2016.03.008

海南四更沙海域沉积物分布及其受控机制

周乐 陈沈良 陈晴 钟小菁 郑蔚恒 刘小喜

(华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062)

摘要 基于海南西部四更沙及其邻近海域 185 个底质的粒度数据,并结合研究区动力状况和水深地形特征,研究表层沉积物的组分和类型分布、粒度参数及其沉积环境分区。结果表明:①研究区沉积物类型多样,包括 12 种沉积类型,以砂质粉砂、粉砂、粉砂质砂和含砾砂为主,沉积物平均粒径变化范围较大($-0.70\sim 7.13\phi$),且大体呈现由北向南逐渐变细的分布趋势;②运用 Fleming 的三角图式,结合物源状况及地形地貌条件,对沉积环境进行划分,将研究区划分为四更沙岸外海滨沉积区、北黎湾中部沉积区和八所港近岸沉积区等 3 个沉积区;③研究区沉积物分布特征受沉积物来源和水动力及地形条件共同影响。横向分布上,西部主要受强潮流输沙影响,东部近岸则主要受波浪掀沙和搬运作用影响,表现为两侧粗,中间相对较细的特征。纵向上,四更沙岸外海滨沉积区,沉积物主要受昌化江影响,粒径粗,表现为河口沉积特征;北黎湾中部沉积区,沉积物粒径分布范围广,表现为较强的过渡区特性;八所港近岸沉积区,沉积物粒径最细,泥沙来源主要为外海带来的泥沙。

关键词 沉积物组分 粒度参数 沉积分区 受控因素 四更沙

第一作者简介 周乐女 1991 年出生 硕士研究生 港口、海岸及近海工程 E-mail: lzhou_ecnu@163.com

通讯作者 陈沈良男 教授 E-mail: slchen@sklec.ecnu.edu.cn

中图分类号 P736.21 **文献标识码** A

近岸海域是海岸带的重要组成部分,受海陆双重影响,地理位置独特,在资源开发和环境保护等方面具有重要的社会经济意义^[1-2]。了解沉积环境是研究海岸带陆海相互作用的重要基础^[3]。粒度作为沉积物最基本要素,是沉积动力学研究的主要对象^[4]。沉积物的粒度受到源与汇的制约,其粒度参数是探究沉积物与沉积环境之间动力学联系的重要纽带^[5-13],可以标识沉积物输运扩散的方式^[14-15],反映沉积过程中的水动力条件^[16-21],判别沉积物的来源^[22-23]。以往研究表明,沉积物分布特征受物源、沉积动力环境的制约。然而,不同区域的沉积物来源和沉积动力环境具有显著差异,其沉积物分布和受控机制存在明显的区域性特点。

四更沙海域具有物源多样、动力复杂、地形多变等特点,南部岸外发育典型的潮流沙脊^[24-26],北部近岸则受昌化江影响发育一系列水下沙洲堆积体^[27]。四更沙滨海海域独特的地形演变特征与该区特定的沉积环境密切相关。本文试图通过研究四更沙海域的沉积物分布特征和规律,探讨其沉积物分布的受控机制。研究将有助于深入了解该区域的沉积环境和

地形演变趋势,为维护我国重要的领海基点之一——四更沙角的岸滩稳定性提供参考;同时,对丰富我国山地中小河流影响的岛屿近岸沉积特征的认识有所帮助。

1 研究区概况

四更沙海域地处热带,位于海南岛西部,包括昌化江三角洲南翼和整个北黎湾(或称墩头湾)海域。北黎湾位于海南岛西部东方市八所镇北部,濒临北部湾,面积 1 429 km²,属于开敞型原生河口湾。该海湾南侧受基岩岬角(鱼鳞角)所控制,北侧则受四更沙反曲沙嘴(四更沙角)动态变化影响。整个北部湾的全日分潮流和半日分潮流基本上属于往复流^[28]。四更沙海域是北部湾的组成部分,潮汐性质为规则全日潮。根据东方海洋站 1978—2007 年验潮资料统计,该区最大潮差为 3.40 m,平均潮差为 1.48 m。而潮流性质则为不规则全日潮流,无论涨潮流还是落潮流,近岸流速均较小,岸外流速逐渐增大,流向基本与岸线平行^[29]。波浪受季风影响,冬季盛行 NE 偏 N 风,夏季盛行 SE 和 SW 风。根据东方站 1988~2007 年波浪要

收稿日期: 2015-02-02; 收修改稿日期: 2015-03-29

基金项目: 海洋公益性行业科研专项经费项目(201405037); 河口海岸学国家重点实验室自主课题(SKLEC-2012KYYW06) [Foundation: Public Science and Technology Research Funds Projects of Ocean, No.201405037; State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, ECNU, No. SKLEC-2012KYYW06]

素统计,全年常浪向为SSW,平均波高为0.69 m。

2 资料与方法

2013年1月对四更沙及其邻近海域,按1 km×1 km 网格进行底质取样,采样深度控制在约5 cm 的表层,采样点位置如图1所示,此次现场调查共采集沉积物样品185个。

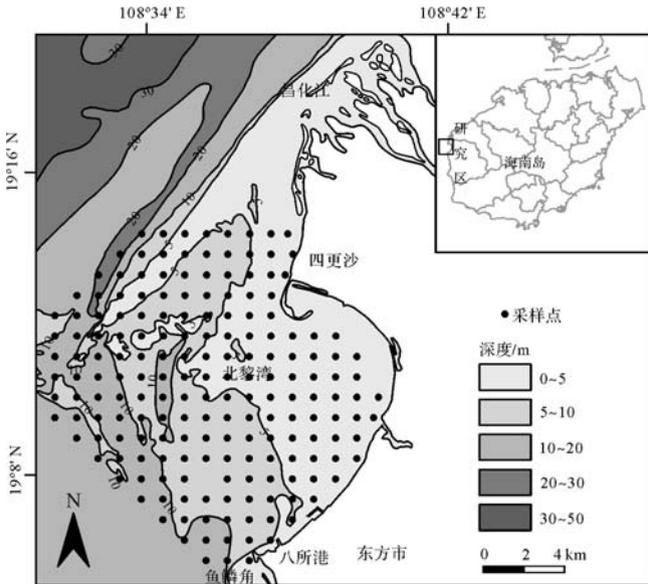


图1 研究区域概况及沉积物采样点位置

Fig.1 Sketch map of the study area and location of sediment sampling

对获取的沉积物样品进行粒度分析,其中粒径均小于2 mm 的沉积物采用 Mastersize2000 型激光粒度仪测试,而对于含有大于2 mm 的样品则采用筛析法和激光粒度仪相结合的综合分析法^[30],由于两种分析成果之间会出现粒径级交混复杂的情况,参照《河流泥沙分析规程》(SL42—2010)对综合分析法级配序列进行调整综合。

沉积物类型的划分及其命名采用 Folk (1970) 沉积物分类方法^[31]。粒度参数计算,包括平均粒径 Mz 、分选系数 σ 、偏态 Sk 和峰态 Kg ,采用 Folk & Ward^[32]的方法。将上述计算结果通过 Kriging 插值,高斯低通滤波过滤,从而得到整个研究区域粒度参数的空间分布图。此过程采用 Golden Software Surfer 12.0 软件处理实现。

3 结果

3.1 沉积物组分及分布

研究区沉积物以砂和泥(粉砂和黏土组分之和)

组分为主。185个样品的各粒级百分含量,砾为0.01%~59.85%,在67个站位出现;砂为1.52%~100%,均值为47.11%;粉砂为0.02%~80.35%,均值为35.83%;黏土为0.01%~33.46%,均值为10.43%。

研究区沉积物组分存在显著的分区特征。砾石主要分布于研究区的北部,其含量高值区(>20%)大致呈带状分布,其他区域不含或含极少量的砾石(图2a)。砂含量高值区(>60%)主要位于昌化江三角洲南翼、北黎湾北部,且砂含量自西向东具有两边高中间低的特征,南侧鱼鳞角附近区域的砂含量也较高;砂含量的低值区(<15%)主要分布于北黎湾湾顶以南区域(图2b)。粉砂含量分布趋势大致与砂含量分布趋势相反,其含量高值区(>60%)主要位于研究区南部,其含量低值区(<15%)主要位于研究区北部,而研究区中部则为不规则过渡区(图2c)。黏土含量高值区(>20%)主要分布于研究区的西南角和北黎湾南部的部分区域,其低值区(<5%)主要位于北黎湾北部岸外海滨区(图2d)。

3.2 沉积物类型及分布

根据 Folk (1970) 沉积物分类方法,研究区沉积物类型多样,共有12种类型。其中,砂质粉砂、粉砂、粉砂质砂、含砾砂居多(图3),分别占总的类型的23.2%、15.1%、14.6%、11.9%。

沉积物平均粒径变化范围较大(-0.70~7.13 ϕ),由北向南,沉积物分布依次为含砾砂、砂质砾、砾质砂、粉砂质砂、砂质粉砂、粉砂,大体呈现逐渐变细的分布特征(图4)。东西向分布则具有两侧较粗,中间较细的分布特征。各沉积物的组分和粒度参数见表1。

砂质粉砂(sZ):平均粒径 $\phi = 4.50 \sim 6.65$,主要粒级是粉砂,占38.76%~72.72%,其次是砂,占10.07%~49.81%,黏土含量占15%左右。分选系数为1.88~2.59,平均2.22,分选较差或差,偏态的均值为0.05,属于近对称。主要分布在研究区中部海域,研究区南部海域也有少量分布,分布最为广泛。

粉砂(Z):平均粒径 $\phi = 6.25 \sim 7.13$,主要粒级是粉砂,占66.40%~80.35%,其次是砂,占15.50%~28.73%,黏土含量较少,约为5%。分选系数为1.88~2.59,平均1.72,分选较差,正偏。主要分布在研究区南部海域,分布较为集中。

粉砂质砂(zS):平均粒径 $\phi = 2.79 \sim 4.62$,主要粒级是砂,占50.40%~88.78%,其次是粉砂,占25%左右,黏土含量约占8%。分选系数为1.06~2.73,平均2.12,分选较差或差,正偏。其分布和砂质粉砂类似,

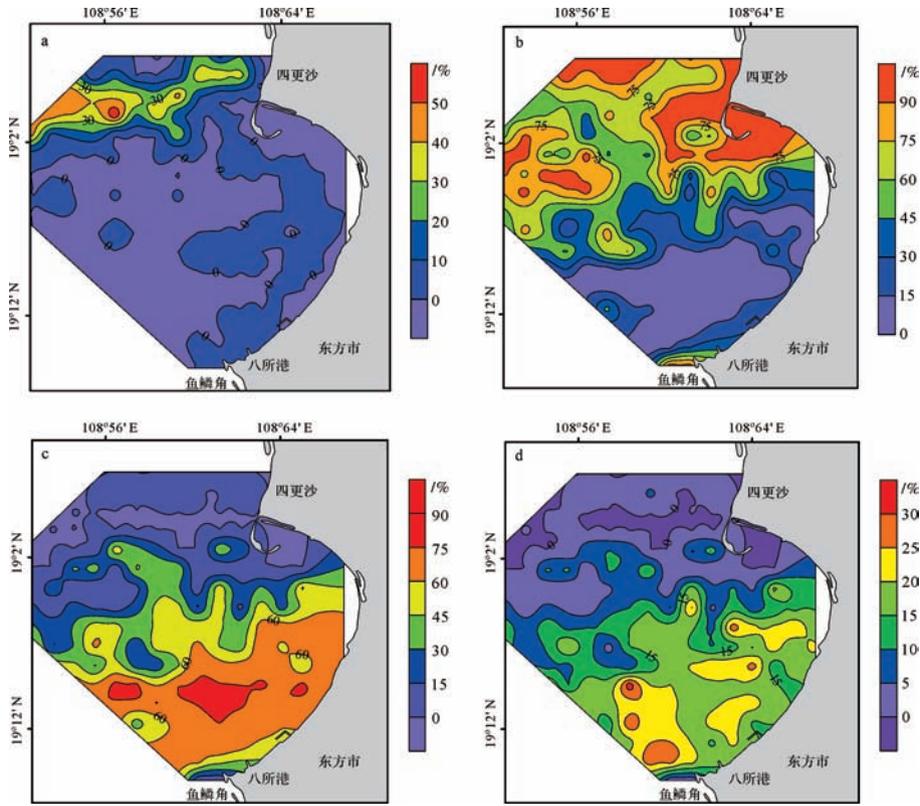


图2 四更沙海域表层沉积物砾石、砂、粉砂、黏土百分含量分布
a.砾石含量;b.砂含量;c.粉砂含量;d.黏土含量

Fig.2 Composition distribution of gravel, sand, silt and clay

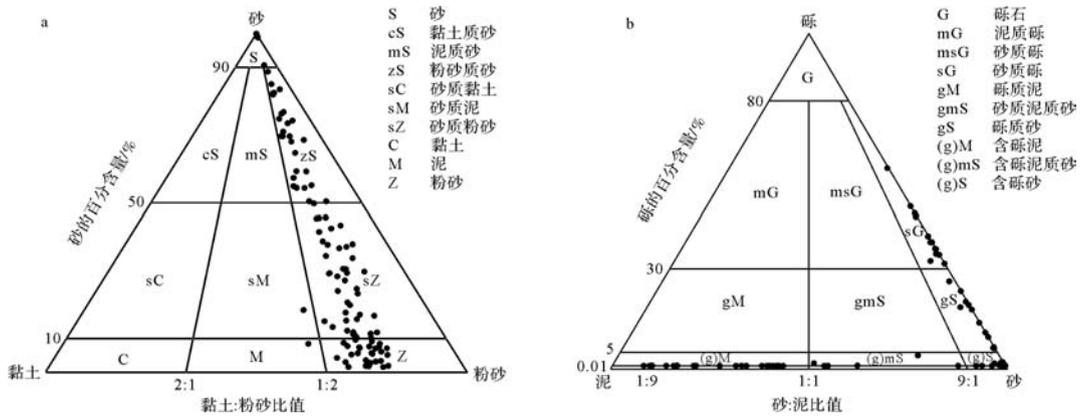


图3 四更沙海域表层沉积物 Folk 分类

a.含砾碎屑沉积物;b.无砾碎屑沉积物

Fig.3 Textural classification of sediments based on Folk method

a. Gravel-bearing sediments; b. Clastic sediments without gravels

也主要分布在研究区中部海域,且与砂质粉砂交错分布。

含砾砂((g)S):平均粒径 $\phi=1.47\sim 3.23$,主要粒级是砂,其平均含量达到了98.12%。砾石、黏土和粉砂的平均含量均小于1%。分选系数为0.3~1.29,平

均0.67,分选较好,偏态均值为-0.19,属于负偏。主要分布在研究区北部的海滨堆积区。

3.3 沉积物粒度参数特征

平均粒径(M_z):平均粒径反映了沉积物颗粒的粗细,在一定程度上也反映了源区物质和搬运介质的

表1 四更沙海域沉积物的组分含量及其粒度参数

Table 1 Sediment compositions and grain size parameters of Sigengsha littoral zone

名称	样品数		黏土/%	粉砂/%	砂/%	砾石/%	平均粒径/ ϕ	分选系数	偏态	峰态
砂质粉砂	43	平均	16.02	57.75	26.23	—	5.68	2.22	0.05	0.94
		最大	26.29	72.72	49.81	—	6.65	2.59	0.48	1.35
		最小	8.25	38.76	10.07	—	4.50	1.88	-0.19	0.71
粉砂	28	平均	21.05	73.61	5.34	—	6.64	1.72	0.12	1.06
		最大	28.73	80.35	9.62	—	7.13	2.00	0.24	1.20
		最小	15.50	66.40	1.52	—	6.25	1.43	0.02	0.95
粉砂质砂	27	平均	7.64	23.57	68.79	—	3.78	2.12	0.60	1.37
		最大	13.75	41.38	88.78	—	4.62	2.73	0.73	2.90
		最小	2.69	8.34	50.40	—	2.79	1.06	0.26	0.69
含砾砂	22	平均	0.34	0.85	98.12	0.68	2.47	0.67	-0.19	1.42
		最大	2.93	4.46	99.81	2.07	3.23	1.29	0.50	2.30
		最小	—	—	92.55	0.02	1.47	0.30	-0.67	0.67
砂质砾	15	平均	0.10	0.30	59.25	40.35	-0.09	1.49	0.14	0.81
		最大	0.89	2.30	68.40	59.85	1.08	1.97	0.71	1.11
		最小	0.01	0.03	39.84	31.53	-0.70	1.00	-0.60	0.52
含砾泥	12	平均	17.74	61.93	20.28	0.05	5.99	2.25	-0.07	1.11
		最大	27.12	73.50	40.79	0.11	7.00	2.72	0.05	1.87
		最小	12.08	46.78	7.97	0.02	5.12	1.88	-0.27	0.69
砾质砂	12	平均	0.13	0.34	84.64	14.89	0.61	1.19	-0.21	1.38
		最大	0.89	1.70	93.56	26.23	2.03	1.83	0.18	4.35
		最小	0.00	0.02	72.27	6.23	-0.24	0.85	-0.77	0.60
砂	10	平均	0.41	1.21	98.38	—	2.41	0.52	-0.04	1.33
		最大	2.81	6.47	100	—	3.19	1.07	0.40	2.90
		最小	—	—	90.72	—	1.78	0.30	-0.29	0.96

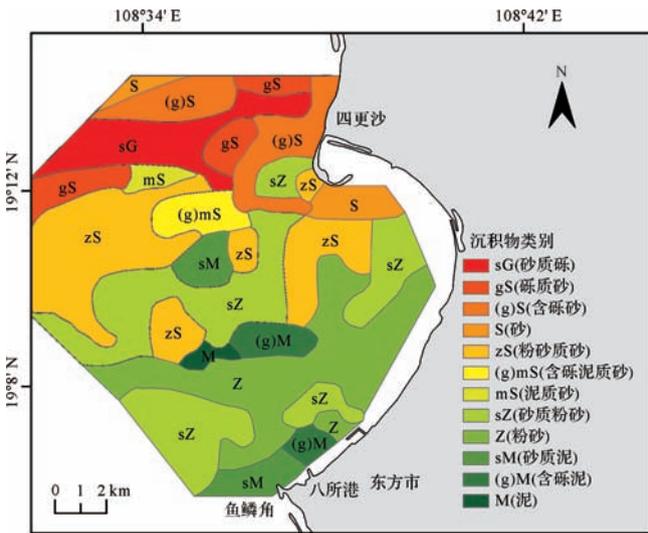


图4 沉积物类型分布图

Fig.4 Distribution of sediment types

分选系数(σ_1):分选系数反映了粒径频率曲线的扩散程度,用来衡量相对于平均粒径而言粒径分布范围的大小。研究区沉积物分选系数变化于0.30~2.73,均值为1.75(图5b)。根据Folk和Ward(1957)分选性等级表,四更沙海域沉积物中43%分布于分选较差的区间(1.00~2.00),40%分布于分选差的区间(2.00~4.00),这与研究区复杂的水动力条件有关。而分选较好的区域则零星分布于靠近四更沙嘴南部的区域和研究区的西北部。

偏态(Sk_1):偏态反映了粒径分布曲线的不对称性。表层沉积物偏态变化于-0.77~0.73,均值为0.09(图5c)。其中,极正偏($Sk_1 > 0.3$)约占23%,主要分布于研究区的中部,并在整个研究区域都有零星分布。正偏($0.1 < Sk_1 < 0.3$)约占23%,主要分布于极正偏的外围呈条带状分布。近对称($-0.1 < Sk_1 < 0.1$)约占31%并主要分布于研究区南部。负偏和极负偏占比相对较小,极负偏主要分布于研究区北部的近岸区域,负偏主要在八所港附近。

峰态(Kg):峰态反映了粒径频率分布曲线的尖锐程度,用以衡量样品中主要粒级相对集中的程度。研究区表层沉积物峰态变化于0.52~4.35,均值为

动力。研究区表层沉积物 Mz 变化于-0.70~7.13 ϕ ,均值为4.13 ϕ (图5a)。沉积物平均粒径变化范围较大,且平均粒径等值线的分布和底质沉积物粒级分布趋势基本一致,由北向南逐渐增高,而东西向则为中间高,两侧较低。

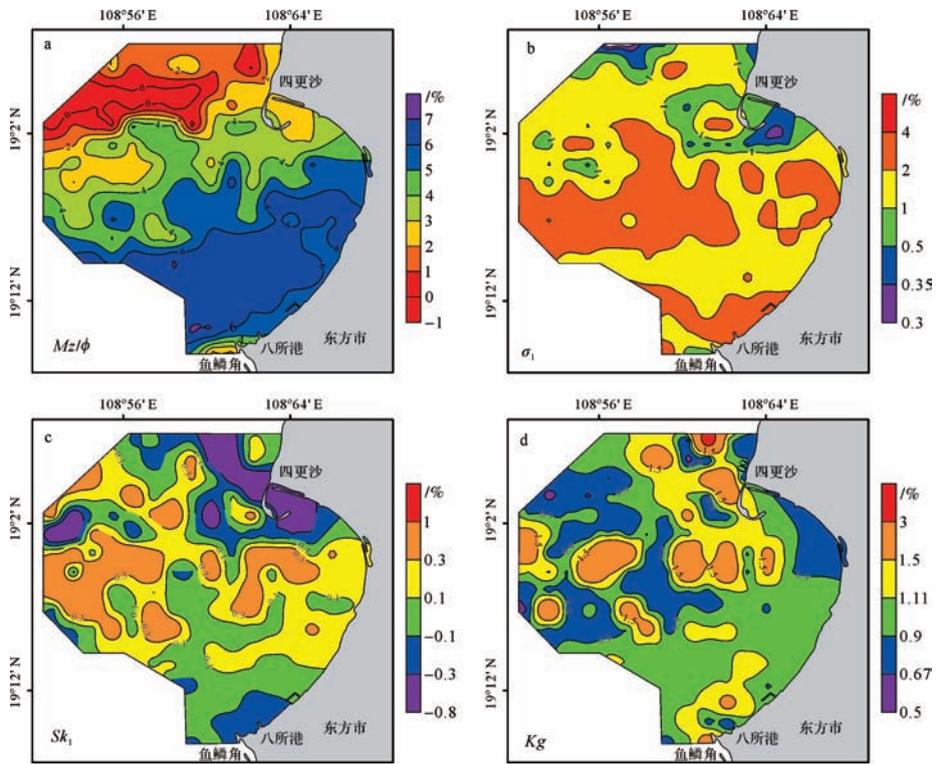


图5 研究区表层沉积物各粒度参数分布

a.平均粒径;b.分选系数;c.偏态;d.峰态

Fig.5 Distribution of grain size parameters

1.13(图5d)。沉积物峰态呈现中等偏宽平特征,中等峭度以宽($Kg < 1.11$)约占74%,表明粒度分布较为分散,沉积物的组成比较复杂,同样也表明研究区水动力环境比较复杂。

3.4 沉积动力环境分区

Flemming三角图式共分为25个区,分别指示不同的沉积动力环境。根据沉积物中砂的含量分成S、A、B、C、D、E等6个组分,从S到E,离粉砂端元越近,沉积物粒径越细;按黏土在泥质成分中的含量分为6个不同的水动力区(I~VI),从I到VI,离黏土端元越近,水动力越弱^[33]。研究区沉积物主要分布在II区,部分分布在I区和III区(图6),反映四更沙海域的水动力总体较强。

根据不同的沉积动力环境,结合物源状况及地形地貌条件,研究区可以大致分为3个亚沉积环境:四更沙岸外海滨沉积区、北黎湾中部沉积区和八所港沉积区(图7)。

四更沙岸外海滨沉积区主要位于研究区北部,自昌化江三角洲南翼至四更沙嘴。该沉积环境分区三角图式(图8a)显示,本区样品参数点主要分布在S、A-I和B-I区。表明该区域沉积物粒径粗,水动力强。

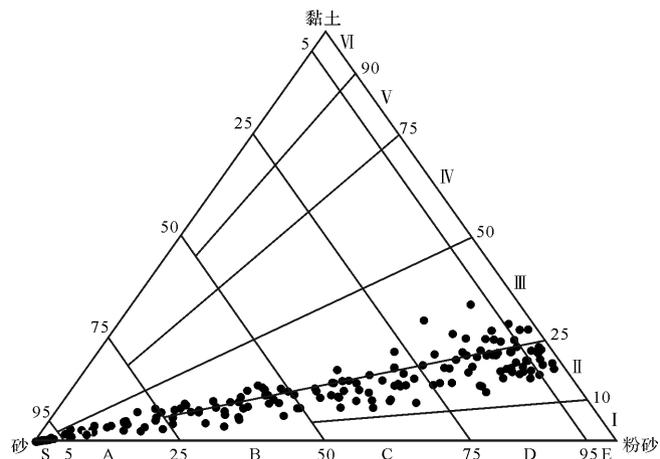


图6 四更沙海域沉积物三角图式

Fig.6 The ternary diagram of sediments

北黎湾中部沉积区主要包括北黎湾中部区域及其邻近海域。该沉积环境分区三角图式显示(图8b),本区样品参数点分布较为分散,在S、A-I、B-I、B-II、C-II、D-II、D-III均有分布,表明沉积区动力较为复杂,呈现较强的过渡区性质。

八所港近岸沉积区主要包括从湾顶南部到鱼鳞角邻近海域。该沉积分区三角图式中显示(图8c),

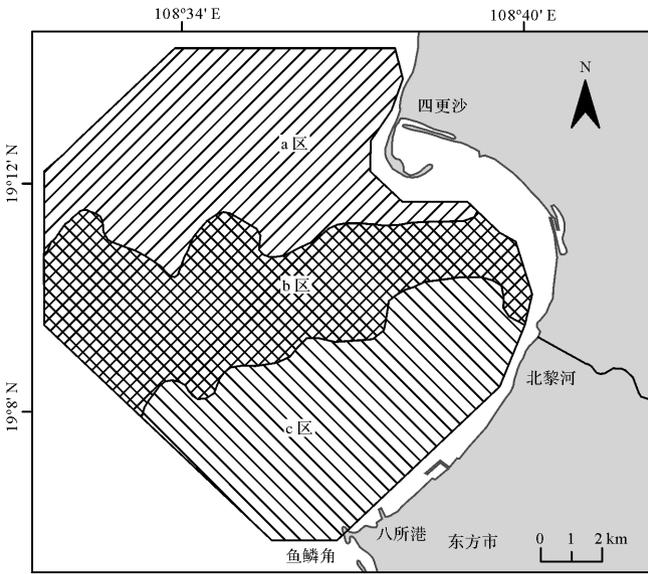


图7 四更沙海域沉积分区图

Fig.7 Deposition district in the Sigengsha littoral zone

样品参数点分布在 D-II、D-III 区,表明该沉积区沉积物粒径较细,水动力较强,但相对前两个沉积区较弱。

4 讨论

北黎湾是一个开敞型海湾。冰后期海侵,北黎湾所处的低洼地带被海水入侵,成为向陆凹进的弧形海湾^[34]。沉积物的粒度分布特征主要受控于物源和沉积动力环境。该研究区沉积物主要来源为河流供沙,外海来沙和沿岸输沙等,由于受北部昌化江入海泥沙及沿岸波流等动力作用,加上独特的地形特征,相应沉积物的组成、粒度分布较为复杂。

从横向来看,研究区沉积物平均粒径具有两侧粗,中间相对较细的分布特征。近岩区域受波浪掀沙和搬运作用的影响,较粗的沙滩沉积物被搬运到近岸并沉积,近岸沉积物偏度多为负偏和近对称(图5),也表明该区域搬运介质动力强,细粒沉积物在此处沉积少而亏损,表现为沙滩沉积物物源特征^[35]。随着水深的增加,风浪掀沙和搬运作用减弱,潮流输沙作用逐渐占主导。潮流最大流速等值线与岸线平行,且岸边流速较小,离岸流速大^[29],尤其在研究区西边,流速可达 0.8 m/s 以上,是该区域的强流区。水深大于 10 m 的区域即研究区西部的沉积物受到强潮流的影响,粒径略粗于水深小于 10 m 的区域。受波浪和潮流的共同影响,研究区沉积物平均粒径横向上表现出两侧粗,中间相对较细的分布特征。西部沉积物粒径分布曲线多为双峰或多峰,东部则多为单峰,这与

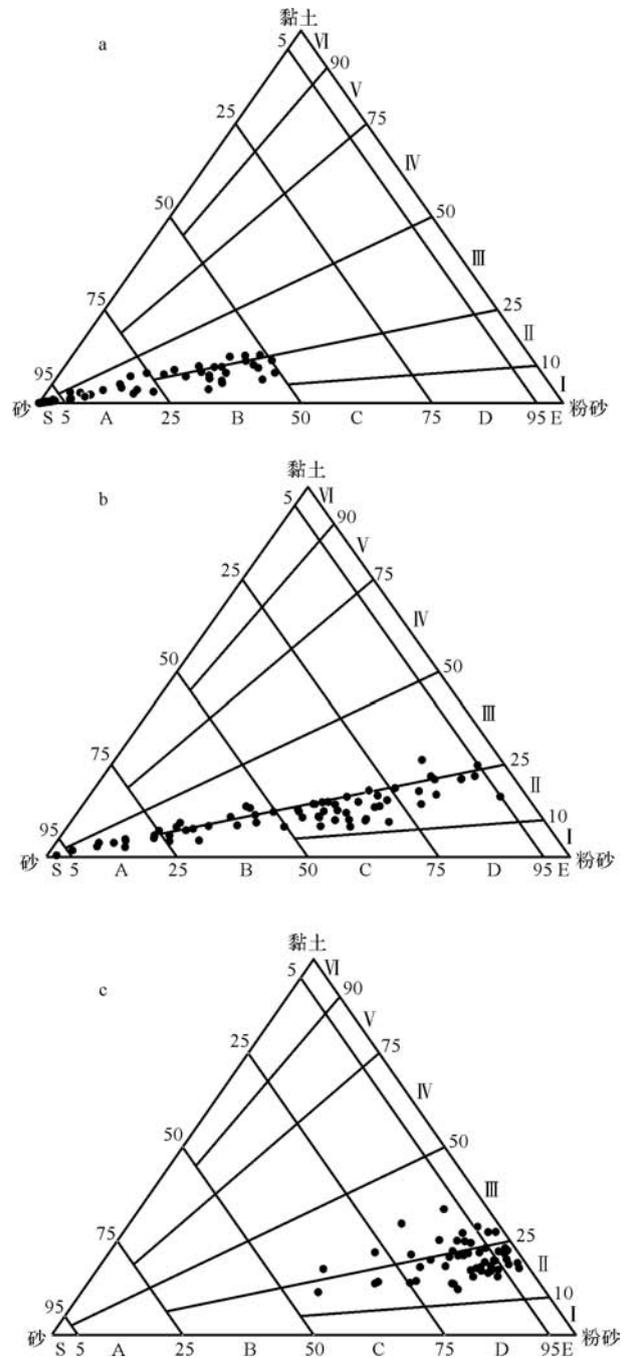


图8 四更沙近岸海域各分区沉积物三角图式

a.四更沙岸外海滨;b.北黎湾中部;c.八所港近岸

Fig.8 Ternary diagrams of different deposition division in Sigengsha littoral zone

西部地形浅滩深槽相间,而东部地形则比较平坦相关。

从纵向来看,根据沉积动力环境,将四更沙海域分为以下3个典型沉积区。

4.1 四更沙岸外海滨沉积区

该区域为高能砂质粗粒沉积区,砂组百分比含量

高达 78.68%, 同时也是砾石分布的主要区域, 沉积物平均粒径为 1.42 ϕ , 主要分布有砂质砾、砾质砂、含砾砂和砂(表 2)。该区沉积物主要来源于昌化江入海的粗颗粒陆源物质。昌化江是海南第二大河, 其年均径流量约为 36.3 亿立方米, 年输沙量约为 77.7 万吨, 年平均含沙量为 0.22 kg/m³, 径流量和输沙量年内分配极不均匀, 洪季径流量占全年的 71.4%, 输沙量占全年的 89.3%^[36]。洪季, 尤其是台风暴雨等极端天气条件下, 昌化江向海输送大量泥沙。黏土、粉砂等细颗粒物, 则随着波浪和潮流主要以悬移方式向西南方输移。砾石、粗砂、中砂、砂等粗颗粒物, 受北部湾顺时针密度环流的影响, 向西南方向推移^[37], 受水下地形的摩阻和消能作用, 于昌化江入海口至北黎沙嘴近岸一带沉积, 发育一系列堆积地貌: 昌化江口外海滨北黎沙嘴、北黎湾北侧的四更沙嘴以及水下沙洲堆积体^[27], 地形起伏较大。一系列堆积地貌的形成, 反过来又阻止粗颗粒泥沙进一步向西南运移, 尤其是两个反曲沙嘴的阻挡, 使得粗颗粒泥沙在两个沙嘴附近迅速堆积, 加速沙嘴的动态变化。枯季, 昌化江入海泥沙较少, 沙嘴及水下堆积体则受到侵蚀, 侵蚀下来的泥沙受 NW 向风浪的影响向南输运。

4.2 北黎湾中部沉积区

该区为中能粉砂质砂和砂质粉砂过渡区, 主要为砂组和粉砂组, 百分比含量分别为 47.89% 和 40.15%, 黏土占 11.93%, 与岸外海滨沉积区相比砂含量减少, 粉砂含量增高明显, 黏土含量也有一定的增高, 平均粒径变细, 分选性变差(表 2)。沉积区主要分布有粉砂质砂和砂质粉砂。沉积物来源比较复杂, 既有昌化江入海的较细颗粒的细砂和粉砂, 也有岸外滨海沉积区水下堆积体侵蚀带来的泥沙, 还有随波浪和潮流从外海带来的悬浮泥沙沉积。沉积物主要以跳跃搬运和悬移搬运为主。该区域波浪作用开始减弱, 潮流作用加强。北向浪受四更沙嘴的阻挡, 进入北黎湾中部沉积物波能减弱; 南向浪则受鱼鳞洲的阻隔产生折射, 波能也减弱。沉积区西部主要为粉砂质砂, 中东部则主要为砂质粉砂, 沉积物分布与潮流场西部强、东部弱的分布一致。

4.3 八所港近岸沉积区

该区为低能粉砂和黏土细粒沉积区, 水下地形平缓, 粉砂组百分含量占 64.43%, 黏土和砂组含量则相对较小, 分别占 19.06% 和 16.49%, 沉积物平均粒径最细为 6.13 ϕ , 主要分布有粉砂及部分砂质粉砂和砂质泥(表 2)。北黎湾南北两侧的地貌, 虽在同一波浪

环境下, 却形成了不同的地貌类型, 从其沉积物分布和粒度参数上也可以得到明显的反映。该区域岸段的走向大致呈 NNE—SSW 方向, 冬季盛行的 NNE 风对该岸滩的侵蚀作用较弱, 夏季盛行 SE 和 SW 风时, 外海波浪向海湾传播时受到鱼鳞角阻挠, 导致北上的沿岸泥沙向海湾外侧方向输运。因为海湾南部鱼鳞洲基岩岬角向西突出, 阻拦了南侧沿岸泥沙继续北移。可见保护鱼鳞角岸段的稳定对维护该海域水深和减少八所港泥沙回淤有重要的作用^[34]。该分区的主要水动力为波浪, 全年常浪向和强浪向为 SSW。昌化江来沙对该区影响很小, 沉积物主要是来自外海细颗粒悬移质随潮流途经该区域, 由于水动力环境减弱, 部分落淤于此。

表 2 亚沉积环境各组分含量及其粒度参数

Table 2 Sediment compositions and grain size parameters of sub-sedimentary environments

分区	平均粒径	分选系数	偏态	峰态	黏土	粉砂	砂	砾
	/ ϕ				/%	/%	/%	/%
a 区	1.42	1.27	-0.01	1.15	1.24	3.71	78.68	16.36
b 区	4.73	2.10	0.27	1.13	11.93	40.15	47.89	0.04
c 区	6.13	1.92	0.05	1.07	19.06	64.43	16.49	0.02

5 结论

(1) 四更沙海域地形独特复杂, 沉积物类型多样, 包括了 12 种沉积物类型, 以砂质粉砂、粉砂、粉砂质砂和含砾砂为主; 沉积物平均粒径变化范围较大 (-0.70~7.13 ϕ), 且总体呈现由北向南逐渐变细的分布趋势; 分选程度表现为较差—差—较差的变化特征。

(2) 基于 Fleming 三角图式, 结合研究区沉积物来源、水动力特征及地形条件, 将四更沙海域分为 3 个沉积环境: 四更沙岸外海滨沉积区、北黎湾中部沉积区、八所港近岸沉积区。

(3) 研究区沉积物分布特征受沉积物来源和水动力及地形条件共同影响。横向分布上, 西部主要受强潮流输沙影响, 东部近岸则主要受波浪掀沙和搬运作用影响, 表现为两侧粗, 中间相对较细的特征。纵向上, 四更沙岸外海滨沉积区, 沉积物主要受昌化江影响, 粒径粗, 表现为河口沉积特征; 北黎湾中部沉积区, 沉积物粒径分布范围广, 表现为较强的过渡区特性; 八所港近岸沉积区, 沉积物粒径最细, 泥沙来源主要为外海带来的泥沙。

参考文献(References)

- 1 陈吉余,陈沈良. 河口海岸环境变异和资源可持续利用[J]. 海洋地质与第四纪地质,2002,22(2):1-7. [Chen Jiyu, Chen Shenliang. Estuarine and coastal environment changes and resource sustainable utilization[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2002, 22(2): 1-7.]
- 2 史经昊,李广雪,周春艳. 海湾沉积环境对人类活动的响应[J]. 海洋地质与第四纪地质,2010,30(4):11-18. [Shi Jinghao, Li Guangxue, Zhou Chunyan. Preliminary study on human influence on sedimentary environment of a bay[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2010, 30(4): 11-18.]
- 3 沈焕庭,朱建荣. 论我国海岸带陆海相互作用研究[J]. 海洋通报,1999,18(6):11-17. [Shen Huanting, Zhu Jianrong. The land and ocean interactions in the coastal zone of China[J]. Marine Science Bulletin, 1999, 18(6): 11-17.]
- 4 陈沈良,杨世伦,吴瑞明. 杭州湾北岸潮滩沉积物粒度的时间变化及其沉积动力学意义[J]. 海洋科学进展,2004,22(3):299-305. [Chen Shenliang, Yang Shilun, Wu Ruiming. Temporal changes in tidal flat sediment grain size along the North Bank of the Hangzhou Bay and their implication of sedimentation dynamics[J]. Advances in Marine Science, 2004, 22(3): 299-305.]
- 5 Halls J R. Significance of statistical parameters for distinguishing sedimentary environments in New South Wales, Australia[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1967, 37(4): 1059-1069.
- 6 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, 1979, 26(1): 3-22.
- 7 肖志建,李团结,廖世智. 伶仃洋表层沉积物特征及其泥沙运移趋势[J]. 热带海洋学报,2011,30(4):58-65. [Xiao Zhijian, Li Tuanjie, Liao Shizhi. Surface sediment characteristics and transport trend in Lingdingyang Bay of the Pearl River Estuary[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2011, 30(4): 58-65.]
- 8 刘苍宇,贾海林,陈祥锋. 闽江河口沉积结构与沉积作用[J]. 海洋与湖沼,2001,32(2):177-184. [Liu Cangzi, Jia Hailin, Chen Xiangfeng. Sedimentary texture and sedimentation in the Minjiang River Estuary[J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 2001, 32(2): 177-184.]
- 9 Wang L, Sarnthein M, Erlenkeuser 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(1/2/3/4): 245-284.
- 10 Visher G S. Grain size distributions and depositional processes[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1969, 39(3): 1074-1106.
- 11 王爱军,陈坚. 厦门吴冠海岸潮间带沉积物粒度特征及其沉积动力学涵义[J]. 热带海洋学报,2006,25(6):28-32. [Wang Aijun, Chen Jian. Grain size characteristics and sedimentary dynamic significance of surface sediments in intertidal flat of Wuguan, Xiamen[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2006, 25(6): 28-32.]
- 12 王伟,李安春,徐方建,等. 北黄海表层沉积物粒度分布特征及其沉积环境分析[J]. 海洋与湖沼,2009,40(5):525-531. [Wang Wei, Li Anchun, Xu Fangjian, et al. Distribution of surface sediments and sedimentary environment in the North Yellow Sea[J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 2009, 40(5): 525-531.]
- 13 徐东浩,李军,赵京涛,等. 辽东湾表层沉积物粒度分布特征及其地质意义[J]. 海洋地质与第四纪地质,2012,32(5):35-42. [Xu Donghao, Li Jun, Zhao Jingtao, et al. Grain-size distribution of surface sediments of the Liaodong Bay, Bohai and sedimentary environment restoration[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2012, 32(5): 35-42.]
- 14 Middleton G V. Hydraulic interpretation of sand size distributions[J]. Journal of Geology, 1976, 84(4): 405-426.
- 15 杨世伦. 长江口沉积物粒度参数的统计规律及其沉积动力学解释[J]. 泥沙研究,1994(3):23-31. [Yang Shilun. Statistic features for grain-size parameters of the Yangtze River Estuary and their hydrodynamic explanation[J]. Journal of Sediment Research, 1994(3): 23-31.]
- 16 彭晓彤,周怀阳,叶琰,等. 珠江河口沉积物粒度特征及其对底层水动力环境的指示[J]. 沉积学报,2004,22(3):487-493. [Peng Xiaotong, Zhou Huaiyang, Ye Ying, et al. Characteristics of sediment grain size and their implications for bottom hydrodynamic environment in the Pearl River Estuary[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2004, 22(3): 487-493.]
- 17 周连成,李军,高建华,等. 长江口与舟山海域柱状沉积物粒度特征对比及其物源指示意义[J]. 海洋地质与第四纪地质,2009,29(5):21-27. [Zhou Liancheng, Li Jun, Gao Jianhua, et al. Comparison of core sediment grain-size characteristics between Yangtze River Estuary and Zhoushan Islands and its significance to sediment source analysis[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2009, 29(5): 21-27.]
- 18 陆勤,陈沈良. 废黄河三角洲海域表层沉积物分布特征[J]. 上海国土资源,2011,32(1):14-19. [Lu Qin, Chen Shenliang. Distribution of surface sediments on the subaqueous delta of the abandoned Yellow River Delta[J]. Shanghai Land & Resources, 2011, 32(1): 14-19.]
- 19 陈小英,陈沈良,刘勇胜. 黄河三角洲滨海区沉积物的分异特征与规律[J]. 沉积学报,2006,24(5):714-721. [Chen Xiaoying, Chen Shenliang, Liu Yongsheng. Sediment differentiation along nearshore zone of the Yellow River Delta[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2006, 24(5): 714-721.]
- 20 李九发,李为华,应铭,等. 黄河三角洲飞雁滩沉积物颗粒度分布和粒度参数特征及水动力解释[J]. 海洋通报,2006,25(3):38-44. [Li Jiufa, Li Weihua, Ying Ming, et al. Characteristic and hydrodynamic explanation of distribution and parameters of sediment granularity in Feiyan Shoal of Yellow River Delta[J]. Marine Science Bulletin, 2006, 25(3): 38-44.]
- 21 王伟伟,付元宾,李树同,等. 渤海中部表层沉积物分布特征与粒度分区[J]. 沉积学报,2013,31(3):478-485. [Wang Weiwei, Fu Yuanbin, Li Shutong, et al. Distribution on surface sediment and sedimentary divisions in the middle part of Bohai Sea[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2013, 31(3): 478-485.]
- 22 Bui E N, Mazzullo J M, Wilding L P. Using quartz grain size and

- shape analysis to distinguish between aeolian and fluvial deposits in the Dallol Bosso of Niger (West Africa)[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1989, 14(2): 157-166.
- 23 唐诚,赵艳,张华,等. 珠江口近30年海底表层沉积物粒度分布及其环境变化[J]. *海洋科学*, 2013, 37(5): 61-70. [Tang Cheng, Zhao Yan, Zhang Hua, et al. The changes of sea surface grain size distribution and its sedimentary environment during the last 30 years in the Zhu-jiang River Estuary[J]. *Marine Sciences*, 2013, 37(5): 61-70.]
- 24 王文介. 南海北部的潮波传播与海底沙脊和沙波发育[J]. *热带海洋*, 2000, 19(1): 1-7. [Wang Wenjie. Propagation of tidal waves and development of sea-bottom sand ridges and sand ripples in northern south China sea[J]. *Tropic Oceanology*, 2000, 19(1): 1-7.]
- 25 夏东兴,吴桑云,刘振夏,等. 海南东方岸外海底沙波活动性研究[J]. *黄渤海海洋*, 2001, 19(1): 17-24. [Xia Dongxing, Wu Sangyun, Liu Zhenxia, et al. Research on the activity of submarine sand waves off Dongfang, Hainan island[J]. *Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas*, 2001, 19(1): 17-24.]
- 26 王伟伟,范奉鑫,李成钢,等. 海南岛西南海底沙波活动及底床冲淤变化[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2007, 27(4): 23-28. [Wang Weiwei, Fan Fengxin, Li Chenggang, et al. Activity of submarine sand waves and seafloor erosion and deposition in the sea area to the southwest of Hainan island[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2007, 27(4): 23-28.]
- 27 王宝灿,陈沈良,龚文平,等. 海南岛港湾海岸的形成与演变[M]. 北京:海洋出版社,2006:32-114. [Wang Baocan, Chen Shenliang, Gong Wenping, et al. Formation and evolution of embayment coasts around Hainan Island[M]. Beijing: China Ocean Press, 2006: 32-114.]
- 28 曹德明,方国洪. 北部湾潮汐和潮流的数值模拟[J]. *海洋与湖沼*, 1990, 21(2): 105-113. [Cao Deming, Fang Guohong. A numerical model of the tides and tidal currents in Beibu Bay[J]. *Oceanologia Et Limnologia Sinica* 1990, 21(2): 105-113.]
- 29 孙长青,赵可胜,郭耀同. 北黎湾及邻近海域潮流数值计算[J]. *海洋科学*, 2004, 28(11): 44-48. [Sun Zhangqing, Zhao Kesheng, Guo Yaotong. Numerical computation of tidal current for Beili Bay and near sea area[J]. *Marine Sciences*, 2004, 28(11): 44-48.]
- 30 冷伟,范代读. 联用筛析法与激光法进行粒度接序分析的界点选择[J]. *沉积学报*, 2014, 32(3): 478-484. [Leng Wei, Fan Daidu. Selecting nodal size for the application of combined using sieving and laser methods in grain-size analysis[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2014, 32(3): 478-484.]
- 31 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.
- 32 Folk R L, Ward W C. Brazos River Bar; a study in the significance of grain size parameters[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1957, 27(1): 3-26.
- 33 Flemming B W. A revised textural classification of gravel-free muddy sediments on the basis of ternary diagrams[J]. *Continental Shelf Research*, 2000, 20(10/11): 1125-1137.
- 34 邱立国,陈海洲,陈春华. 海南岛海湾的特征分析和开发利用探讨[J]. *海洋开发与管理*, 2013(5): 38-42. [Qiu Ligu, Chen Haizhou, Chen Chunhua. Characteristic analysis and the development and utilization of bays around Hainan Island[J]. *Ocean Development and Management*, 2013(5): 38-42.]
- 35 金秉福. 粒度分析中偏度系数的影响因素及其意义[J]. *海洋科学*, 2012, 36(2): 129-135. [Jin Bingfu. Influencing factors and significance of the skewness coefficient in grain size analysis[J]. *Marine Sciences*, 2012, 36(2): 129-135.]
- 36 杨志宏,贾建军,王欣凯,等. 近50年海南三大河入海水沙通量特征及变化[J]. *海洋通报*, 2013, 32(1): 92-99. [Yang Zhihong, Jia Jianjun, Wang Xinkai, et al. Characteristics and variations of water and sediment fluxes into the sea of the top three rivers of Hainan in recent 50 years[J]. *Marine Science Bulletin*, 2013, 32(1): 92-99.]
- 37 高婕. 基于遥感分析的海南省昌化江河口泥沙运移模式研究[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2014. [Gao Jie. Research of sediment transport model of Changhua river estuary in Hainan Province based on the analysis of remote sensing[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2014.]

Sediment Distribution and Its Controlling Mechanism in the Littoral Zone of Sigengsha, Hainan, China

ZHOU Le CHEN ShenLiang CHEN Qing ZHONG XiaoJing

ZHENG WeiHeng LIU XiaoXi

(State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Abstract: Owing to the interaction between land and ocean, littoral zones present unique sedimentation. Grain size, as a basic attribute of sediment, is an essential question of sediment dynamics. Grain size is controlled by sediment source and sink, and its parameters play a significant role in determining dynamic relationship between sediment and depositional environment. Sigengsha littoral zone is located in the west of Hainan Island, the second largest island of China, extending from the Changhua River delta on the north to the Beili Bay on the south. This zone shows diverse sediment sources, complicated hydrodynamics and variable morphology, where special coastal evolution process is closely connected with its sedimentary environment. A field sampling was conducted in the study area on January 2013 with 185 surface samples collected. Mastersize 2000 laser particle sizer was applied to measure grain sizes all less than 2 mm and the sediments with sizes larger than 2 mm were tested by a comprehensive method, utilizing both sieve analysis and laser particle sizer. Sediment classification and nomenclature were based on Fork method and grain-size parameters were calculated including mean grain size M , standard deviation σ , skewness Sk and kurtosis K . The distribution of grain size parameters in the study area was then acquired by Kriging interpolation. Combined with sediment sources and bathymetric information, the sedimentary environment was divided by using the ternary diagram of Fleming. At last, the controlling mechanism of sediment distribution was investigated combined with hydrodynamic factors and morphology.

The results suggest that the entire study area comprise 12 sediment types, mainly including sandy silt, silt, silty sand and gravel-bearing sand. Sandy silt, the mostly distributed sediment, mainly occurs in the central study area. Silt mainly distributed in the southern study area. Similar to sandy silt, silty sand is also distributed in the central study area. Gravel-bearing sand mostly distributed in the nearshore of the northern study area. Overall, the mean grain size of the study area ranges widely (-0.70ϕ to 7.13ϕ) and presents a fining trend from north to south. The standard deviation of sediment ranges from 0.30 to 2.73 with mean value of 1.75. It is characterized by a worse-worst-worse trend from north to south. The skewness changes from -0.77 to 0.73 with average of 0.09. The kurtosis range from 0.52 to 4.35 with average of 1.13 and shows mesokurtic to platykurtic pattern. Based on Fleming ternary diagram, combined with sediment sources, hydrodynamic and topographic condition, the study area was divided into three sedimentary districts: Sigengsha nearshore zone, middle Beili Bay zone and Basuo port nearshore zone. In the sediment distribution pattern, the western study area was mainly influenced by strong tidal currents. The nearshore was mostly impacted by wave winnowing and transport and was characterized by fine sediment distributed in the middle and coarse sediment in the two sides. Laterally, the Sigengsha nearshore zone is a high-energy coarse-grained sand area, where sand content is as large as 78.68%, mainly affected by sediments from Changhua River. The Beili Bay zone is a medium-energy transitional area of silty sand and sandy silt, where the grain sizes range widely. The Basuo port nearshore zone is a low-energy area, where silt content occupies 64.43%, and where the sediment is the finest and most likely comes from open sea.

Key words: sediment component; grain size parameter; sedimentary environment; controlling mechanism; Sigengsha littoral zone