

文章编号:1000-0550(2014)05-0884-09

海南岛南渡江河口动力沉积模式^①

谢华亮^{1,2} 戴志军¹ 吴莹¹ 陈炜³ 林益帆¹ 魏稳¹ 葛振鹏¹ 高近娟¹

(1.华东师范大学河口海岸学国家重点实验室 上海 200062;2.交通运输部天津水运工程科学研究院 天津 300456;

3.乌特列支大学海洋与大气研究所 荷兰 乌特列支 3584CC)

摘要 河口是一个迅速变化的、动态的海岸巨系统。作为陆地河流和海洋过程的重要链接,河口的动力沉积过程一直是陆海相互作用研究的核心和焦点内容。本文基于2011年8月在南渡江河口采集的大范围表层沉积物样品,利用经验正交函数分析技术(EOF)对河口的动力沉积特征进行研究。结果表明:南渡江河口海床表层沉积物主要以砂为主,沉积物总体偏粗;河口的动力沉积特征自陆向海可分为三种动力沉积模式:①波控模式,该模式主要分布在河口地区10 m以浅的近岸区域,呈与岸线平行的带状分布,其表层沉积物以粉砂质砂为主,分选较差;②径、潮流耦合作用下的沉积模式,在径流和潮流的共同控制作用下,沉积物主要表现为粒径较粗,该模式呈扇形分布,其中20 m以浅河口海床受控于径流和潮流的共同作用,20 m以深海床表现为潮流控制的沉积模式;③台风或风暴潮控制的沉积模式,即整个河口海床都表现出受控于台风或者风暴潮作用的沉积特征,沉积物主要是以粗砂为主。常态作用下,河口以径、潮流控制的沉积模式为主,波浪、径流和潮流以及潮流控制的沉积模式自陆向海的规律性分布体现出南渡江河口近岸以波浪作用为主,而离岸则受河口尤其是洪水作用形成的喷射流以及沿岸潮流的影响。此外,尽管南渡江河口在过去的成果中将其归纳为波控河口,但目前的研究发现,该河口区域沉积类型变化明显受控于不同的动力作用,河口形态以及琼州海峡的障蔽和“狭管效应”为河口沉积环境变化的主要控制因素。

关键词 粒度特征 河口喷射流 沉积模式 南渡江河口 EOF分析

第一作者简介 谢华亮 男 1987年出生 硕士 河口海岸动力沉积 E-mail: xh-liang@foxmail.com

通讯作者 戴志军 男 教授 E-mail: zjdai@sklec.ecnu.edu.cn

中图分类号 P737 **文献标识码** A

0 引言

河口位居陆海相互作用的敏感地带。作为重要的滩涂和水运资源中心,河口一直是人类聚居和活动的重要场所。然而,由于人类活动的影响不断加强,由此叠加在耦合多变的径流、潮汐和波浪等各种过程上,致使河口的沉积演变机制日趋复杂,并形成了不同类型的河口沉积模式^[1,2]。考虑到河口变化过程的迅速多变,河口地貌和沉积特征对外在驱动作用的响应极其敏感,河口或三角洲已成为深入理解当前全球面临的气候变化、海洋环境生态演变和高强度人类活动效应等的理想研究载体^[2]。近年来不少学者对河口区域的地貌变化及泥沙运动和周边水域水动力特征进行了调查和研究,如 Galloway^[2]提出了河流、潮汐和波浪控制的河口分类;同时期以 Wright *et al.*^[3,4]为代表对以波浪作用为主的河口进行过专门研究。Dalrymple *et al.*^[5]建立了河口—三角洲发育

类型的连续谱系;Walsh *et al.*^[6]划分出入海河流泥沙扩散体系的5种基本类型。国内亦对河口的研究主要集中在长江河口、黄河河口以及珠江河口等大型河口,戴志军、李春初等^[7,8]则对国内外河口进行了总结。就南渡江河口而言,则多集中在其动力特征^[9]、沿岸泥沙转运^[10]、波浪作用下的海岸演变分析^[11]、近几十年三角洲冲淤变化及主控因素^[12]等。但较少涉及河口动力沉积过程。本文以南渡江河口滨海海域的表层沉积物资料为基础,结合粒度特征与河口过程分析,利用经验正交函数(EOF)技术探讨该河口的动力沉积模式及其控制因素,这对深化南渡江河口的研究以及河口开发与保护能提供科学理论认识。

1 研究区域概况

南渡江河口位于海南岛北部、海口湾的东侧,属于南渡江河流的尾间。该河口是我国热带地区唯一开口向北的河口,而南渡江是海南岛最大的河流,属

^①国家自然科学基金(批准号:41376097)与科技部河口海岸学国家重点实验室科研业务费(编号:2010RCDW04,2010RCDW03)资助
收稿日期:2013-07-24;收修改稿日期:2013-10-10

于为山区性河流,河流径流丰富,多年平均径流量 $68.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。南渡江河流因新埠岛、海甸岛而形成三口入海的局势,其中北支干流和西北支横沟河注入琼州海峡,西支海甸溪注入海口湾(图1来自海军航海保证部出版海图,原图比例尺 1:150 000)。南渡江河口的分流河道中,每年约 70% 的水沙是通过干流河口排泄入海,横沟河口占 30% 左右,海甸溪的水沙则表现为净进^[9,10]。

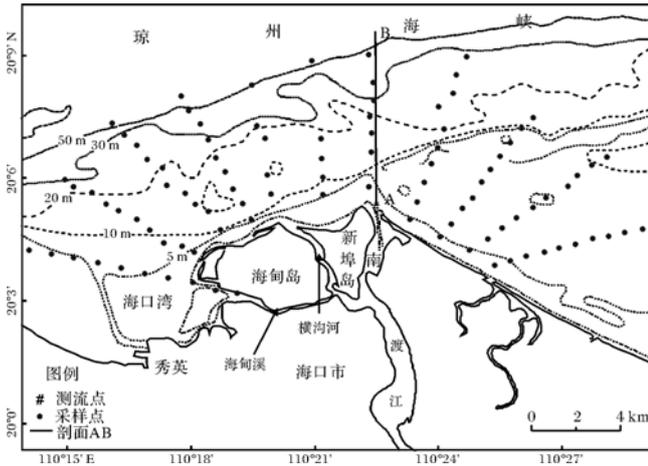


图1 研究区域和采样点位置

Fig.1 Study area and sediment sampling locations

此外,研究区处于热带季风北缘,风向和风速具有显著的季节性变化,夏季为 S—SE 风,风速较小,冬季盛行 NNE—ENE 风,风速较大。受风的季节性影响,海域波浪以风浪为主,其频率为 86%,显著特征是周期短,平均周期在 4 s 以内,NE 向波浪为优势波浪,季节性变化显著,区域的平均波高为 0.6 m,河口地区的多年平均潮差 1.21 m,为不正规日潮混合潮^[13]。由于南渡江三角洲地区近岸坡度较陡,入射波可传播到近岸线处才破碎,故波能主要集中在岸线附近,这对河口地貌形态发育与演变具有较强的驱动作用^[11,12]。

2 材料和方法

2.1 样品采集与处理

为较全面和系统的研究南渡江河口的动力沉积特征,课题组在河口布设 11 条断面,每条断面采集样品 5~11 个,覆盖河口自 0 m 水深到 75 m 水深,大概 160 km² 的范围。样品于 2011 年 8 月 4 日至 8 月 7 日采用蚌式采泥器采集,共 99 个表层沉积物样,采集厚度 5~10 cm(该区平均沉积速率为 1.43 cm/a^[12])。

样品在实验室内均匀取 10 g 左右放入 50 mL 烧杯中,加 10 mL 浓度 10% 双氧水去除有机质并静置 24 小时,随后加入 10% 盐酸 10 mL 去除碳酸钙物质后,再加入 10 mL 偏磷酸钠溶液经超声波震荡使样品充分分散后,采用激光粒度分析法进行分析,仪器采用英国 Malvern 公司生产的 MasterSizer 2000 型激光粒度仪(测量范围 0.02~2 000 μm,重复测量相对误差小于 3%),再利用仪器配套软件导出粒度分布数据。同时根据美国地球物理学会(AGU)泥沙分类标准^[14]对沉积物进行粒度分类;对所有样品均采用 McManus 矩法参数公式计算沉积物的粒度参数,即平均粒径(Mz)、分选系数($S\sigma$)、偏态(Sk)和峰态(Kg)^[15],分析沉积物样品的总体特征;沉积物的分类则利用砂、粉砂和黏土的百分含量做标准进行命名^[16],测流点(图1)数据来源于海南省海洋规划设计研究院在 2006 年 5 月进行的 25 小时实测流速资料。

2.2 经验正交函数分析(EOF)

经验正交函数分析方法(EOF),也称特征向量分析(Eigenvector Analysis),是一种从 20 世纪早期开始发展起来用于分析矩阵数据中的结构特征,提取主要数据特征量的方法。Lorenz 在 20 世纪 50 年代首次将其引入气象和气候研究^[17],它的优点是不受空间站点、地理位置、区域范围的限制,其收敛速度快,能浓缩资料的信息量,简化数据处理过程,前几个主模态不仅集中并提取了场的主要信息,而且反映一定的物理学意义,具有良好的效果。EOF 分析方法的具体计算步骤为:

设有实测粒度数据序列 P_{ij} ($i=1,2,3,\dots,m; j=1,2,3,\dots,n$); m 为空间观测点数, n 是粒度分级序列的长度。

(1) 对要进行分析的数据进行数据预处理,标准化处理后得到一个数据矩阵 $X_{m \times n}$ 。

(2) 计算相关系数阵

$$C_{m \times m} = \frac{1}{n} X \times X^T \quad (1)$$

(3) 用雅可比方法做旋转变换求矩阵 $C_{m \times m}$ 的特征根 λ_i 和空间特征向量 $V_{m \times m}$ 。一般将特征根 λ 按从大到小顺序排列,即 $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3 > \dots > \lambda_m \geq 0$ 。每一个特征根对应一列特征向量值,也称 EOF, λ_k 对应的特征向量值称第 k 个 EOF 模态,即 $EOF_k = V(:, k)$ 。

(4) 将 EOF 投影到矩阵 X 上,就得到所有空间特征向量对应的特征权重或时间特征函数,即,

$$T_{m \times n} = V_{m \times m}^T \times X_{m \times n} \quad (2)$$

(5) 求取每一个模态对原始场的相对贡献率

$$\alpha_k = \frac{\lambda_k}{\sum_{i=1}^m \lambda_i} \times 100\% \quad (3)$$

求取累计贡献率

$$\beta_k = \sum_{j=1}^k \alpha_k \quad (4)$$

如果前 k 个模态的累计贡献率 β_k 超过了 85%，那么这前 k 个模态便能大致反映原始场的主要信息^[18]。

本研究中,实测数据矩阵为 99×13,即共有 99 个表层沉积物样品,每个样品分成 13 个粒级。

2.3 河口喷射流计算

河口过程实际上是河口输出的水流与海洋动力条件之间的相互作用过程。河口出流的扩散形式在不同程度上受波浪和潮流作用的影响^[3]。南渡江河口在洪季时节,强劲的洪水径流流速较大,大量的泥沙输出口外,在口门以湍流喷射流态冲向口外,并在口外迅速扩散。而对均质水体来说,水流结构取决于惯性力和黏滞力之比,即雷诺数为:

$$Re = \frac{u_0(h_0 * b_0)^{1/2}}{\nu} \quad (5)$$

上式中 u_0 为口门平均流速, h_0 和 b_0 则分别为口门深度和半宽度, ν 是运动黏滞系数,此处 ν 取 $0.8 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 。根据 Pearce 研究^[19], $Re > 3\ 000$ 时为完全湍流喷射。

河口喷射流从河口喷射出去后,可以分成起始段和主体段,起始段的流速较大,较能反映喷射流的强度。起始段的长度采用公式^[20]:

$$L_0 = 5.2(2b_0) \quad (6)$$

进行计算。

射流半宽度 b_e 计算公式为

$$b_e = 0.154 L_0 \quad (7)$$

3 结果

3.1 沉积物类型分布

沉积物类型及区域分异综合反映了动力、泥沙颗粒性质和地貌冲淤状态对沉积过程的影响,并能在较大程度上反映区域底床的沉积变化过程。基于此,根据粒度分析结果,绘成表层沉积物类型分布和谢帕德三角图示(图 2)。由图 2 可知,南渡江河口海床表层沉积物共有 5 种类型,所有沉积物样中,砂占 48%,分布最为广泛,粉砂质砂占 29%,其余为黏土质粉砂、砂—粉砂—黏土、砂质粉砂,含量分别为 12%、7%、4%,这与我国长江^[21]和黄河^[22]河口地区的表层沉积物存在明显差别。沉积物中,砂主要分布在南渡江河口向海方向 10 m 等深线以深区。沉积物类型整体由陆向海差异明显,而且沉积物类型的粗细变化呈自东向西延伸的趋向,研究区域中部位置沉积物类型较东、西部区域要粗,砂含量居多。

3.2 粒度参数分布

表层沉积物粒度特征受水动力条件、地貌类型及物源等控制,隐含了丰富的沉积动力变化条件以及沉积物运移等方面的重要信息,粒度参数主要反映沉积物来源和沉积环境^[23]。将各表层沉积物的四种粒度参数分布绘制图 3。据图 3A 显示,南渡江河口表层沉积物的平均粒径 Mz 分布范围为 $0.26 \sim 7.18 \phi$,平均值为 3.53ϕ (0.087 mm),总体泥沙颗粒较粗,其中海口湾内泥沙粒径较小,颗粒较细。采样区域内,泥沙粒径存在明显差异,总体上河口干流以及横沟河口水流扩散所处位置沉积物粒径较海甸溪出海口及其河口东、西部海岸要粗,这与沉积物组分含量分布结

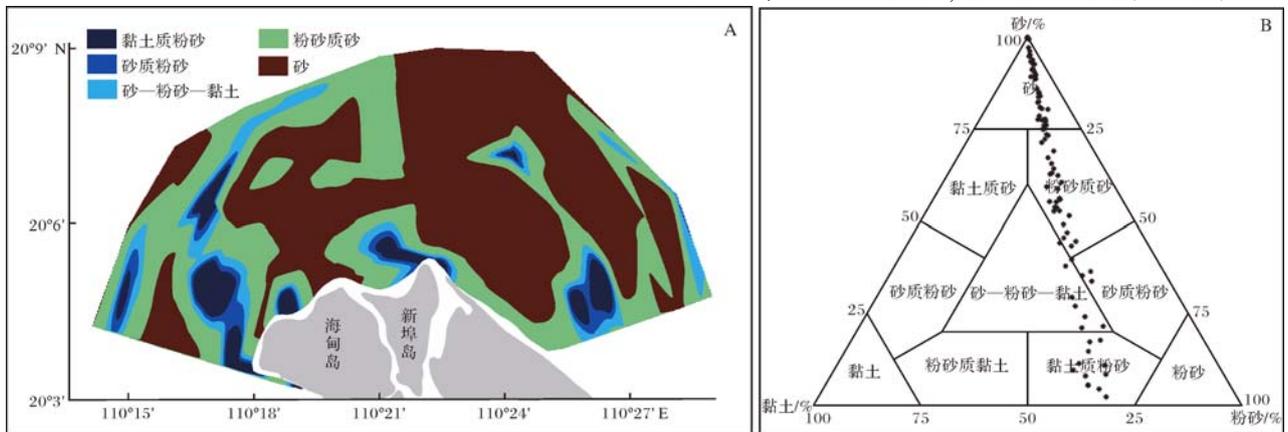


图 2 南渡江河口表层沉积物类型及三角分类

Fig.2 Classification and triangular diagram of surface sediment of the Nanduijiang Estuary

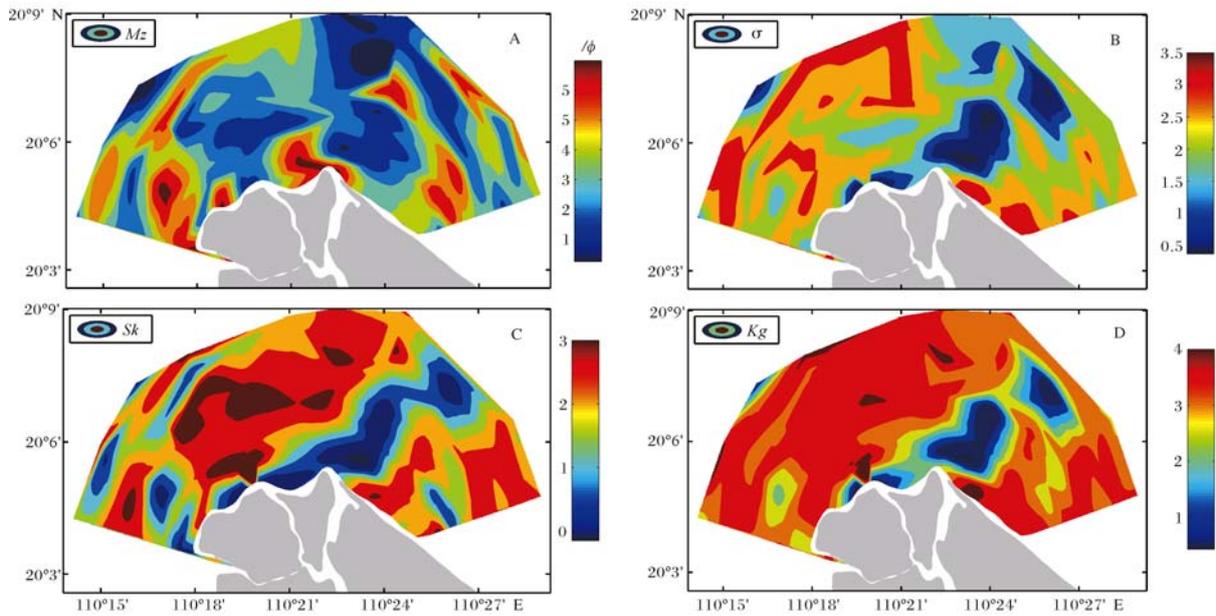


图 3 沉积物粒度主要参数

Fig.3 Characteristics of grain-size parameters in sediments

果一致。表层沉积物的分选系数(σ)介于 0.48~3.33 之间,所采集的沉积物中约 70%样品分选性差(σ 介于 2.0~4.0 间),有 19 个样品属分选较差(σ 介于 1.0~2.0 间),占 19%,其余为分选较好、好和中等,总体上以分选差为主,分选性较好的区域主要集中在距南渡江干流河口 1 km 到 3 km 范围(水深大致在 5~20 m 之间),即采样区域的中部,而河口东部、西部以及琼州海峡所处位置沉积物的分选系数较大,分选性差。此外,所有样品的偏态(Sk)值均为正值,整个区域呈正偏,反映了沉积物具有以陆源物质为主的性质,表明沉积物样品粒径偏粗,以粗颗粒为主,形成一条明显的 NE—SW 向分隔带,分隔带以东和以西偏态值均较大。峰态(Kg)的分布情形大致等同于偏态分布,大部分峰态呈尖锐的形态(图 3D),同时,峰态值较小区域内,粒径较粗,分选性较好,偏态值也较小。

3.3 EOF 分析结果

由南渡江河口表层沉积物样品粒度数据标准化处理后的 99×13 矩阵,经 EOF 方法分析,将其前 3 个特征值的贡献率及其累计贡献率绘制成表 1。

从表 1 中看出经 EOF 分解后的前 3 个特征值的累计贡献率为 92%,已经超过了 85%,从而前 3 个模态基本涵盖了泥沙运输的主要信息,在此绘出特征权重和空间特征向量分布图(图 4)。

表 1 EOF 分析的前 3 个模态贡献率及其累计贡献率

Table 1 Associated contributions of the first three modes by EOF analysis

标准化矩阵	贡献率/%	累计贡献率/%
第一模态	62	62
第二模态	19	81
第三模态	11	92

第一模态的贡献率为 62%,反映了研究区河口沉积物的主要沉积特征。据图 4A,极细黏土至极细砂的范围以及极粗砂粒径特征权重为负值,细砂、中砂和粗砂粒级为正值,权重值最大的粒级是中砂。结合平均粒径变化图(图 3A),相应的第一模态的空间特征向量系数(图 4B)表明,第一模态的空间特征向量分布中的正值部分恰为平均粒径较粗的区域,而粒径较细区域的空间特征向量为负值;同时,正值部分的区域覆盖范围明显大于负值覆盖区,呈明显扇形状,10 m 等深线以深至琼州海峡区域则基本均为正值。鉴于南渡江河流为山区性河流,其径流挟带的泥沙颗粒即使进入河口分区,颗粒成分亦较粗,而琼州海峡内的沉积物运移主要受控于强劲的潮流作用,沉积物主要以中砂、粗砂为主^[24],因此第一模态代表河流径流和潮流作用为主的河口沉积类型。

第二模态的贡献率为 19%,表征河口沉积类型的次要模式。由图 4C 中,特征权重曲线有两个正的

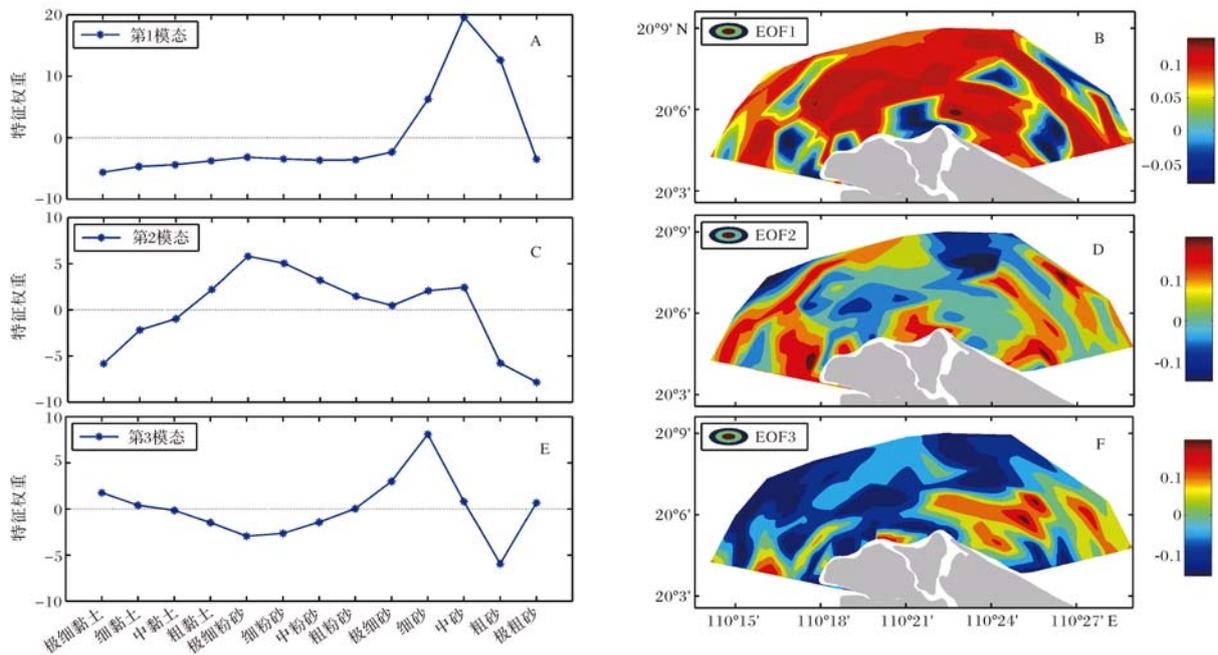


图 4 前 3 个模态的特征权重和空间特征向量

Fig.4 Eigenweightings and eigenvectors of the first three modes

峰值,即分别为极细粉砂和中砂。主要表现在:粗黏土至中砂的范围为正,其余粒径成分为负值,图 4D 空间特征向量分布有与等深线平行的趋势。考虑到波浪在近岸破碎后导致近岸泥沙悬浮和推移都比较激烈^[9],平均波高 0.6 m 的波浪扰动水深在 10 m 以浅^[11]。此外第二空间特征向量在 10 m 以浅的区域,即主要在岸线附近为正值,因此第二模态主要反映了波浪作用为主的沉积类型。

第三模态的贡献率为 11%,特征权重主要表现在:自粗粉砂至中砂部分、极粗砂为正值,而低于粗粉砂的粒径成分基本为负值,粗砂亦为负值,对应的空间特征向量除河口东部部分海岸外,大范围区域都为负值,即该模式下的沉积物主要是以粗砂为主。而在采样前夕,2011 年 7 月 29 日第 8 号强热带风暴“洛坦(Nock-ten)”在海南文昌市龙楼镇登陆,自东向西影响全岛,即在台风的影响下,河口东部海区细颗粒的物质被大规模的输送到河口以西区域,导致东部海区沉积物颗粒明显变粗(图 3A),而西部海区的物质普遍变细,因此,第三模态很可能反映了台风等瞬时的强动力作用控制的沉积类型。

4 讨论

4.1 动力环境对沉积物变化的影响

南渡江为山区性河流,在洪季将携带大量粗颗粒

的物质入海,据图 5 南渡江下游龙塘站月均流量和输沙率^[10,12]显示,南渡江的径流和输沙季节分配不均,二者均主要集中在洪季,其中洪季径流量占到全年的 80%左右,输沙占到全年的 90%左右。

以南渡江干流河口来讲,喷射口的平均水深 h_0 为 5 m,河口断面宽度 $2b_0$ 为 435 m,平均流速 0.88 m/s(图 1 中测流点流速特征值),将这些数据带入雷诺数计算公式(5)中得 Re 值为 3.6×10^7 ,远远大于 3 000。因此,干流河口入海径流为完全湍流扩散。由此绘制南渡江干流河口湍流扩散的概化模式图(图 6)。起始段为轴向喷射,计算得出的长度 L_0 为 2 262 m,喷射流向大致推进到达 15 m 等深线位置,此处扩散宽度为 697 m。喷射流出流的扩散范围和干流河口近海区域的粗颗粒沉积分布基本一致。由此可见,在南渡江干流和分支横沟河入海径流喷射流的影响下,河流径流挟带粗颗粒泥沙进入琼州海峡,形成明显两条粗颗粒分带(图 3A),并在琼州海峡东西向潮流作用下,经反复淘选,呈现中部颗粒较东、西部为粗,分选较好的情况。此外,干流河口北向粗颗粒条带长于横沟河口北向条带,这也说明洪季时期干流河口形成更强劲的喷射流;在干流河口—新埠岛北部区域,来自南渡江干流和横沟河口的两股入海喷射流相互排挤,同时受潮流顶托作用致流速减慢,径流挟带的颗粒较细的悬移质部分来不及输送到外

海就在该区域内发生沉降,并在常浪向作用下向西运动,形成偏西向“尖角”状细颗粒沉积区(图 3A)。海口湾内特别是其东南侧沉积物颗粒较细,这与其地处常浪向 NE 向风浪的波影区以及海甸溪河口较弱的喷射流受涨潮作用顶托有关,故该区域成为细颗粒泥沙的主要沉积环境,海口湾西侧近岸主要受波浪、离岸较远受琼州海峡强劲的潮流动力作用,导致该区域的沉积物颗粒分布较粗。同时,EOF 分析所得三个模态的空间特征向量分布图(图 4)显示,海口湾内与南渡江干流及横沟河口门处特征向量分布情况大致接近,说明了海口湾的泥沙来源与南渡江外泄泥沙有紧密联系,说明在三角洲近岸存在由东向西的沿岸输沙,这与前人研究结果相似^[10,11,24]。

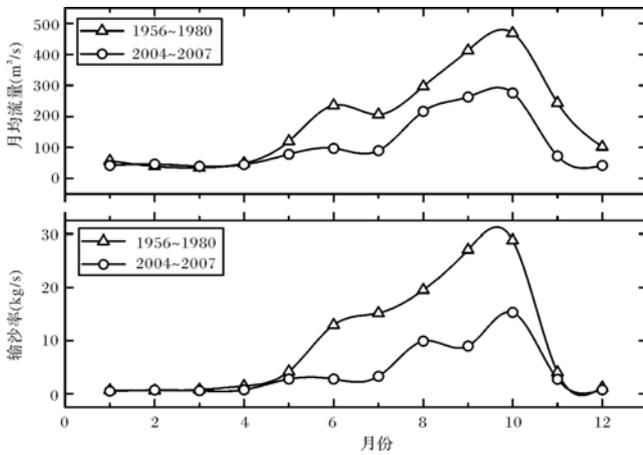


图 5 南渡江龙塘站 1956~1980 年和 2004~2007 年
月均流量和输沙率的变化

Fig.5 Monthly runoff discharge and sediment load at Longtang Station between 1956~1980 and 2004~2007

4.2 河口的主要动力沉积模式

在上述计算河口喷射过程中,未考虑潮流与波浪对南渡江干流河口下泄径流的影响,计算得喷射流起始段到达 15 m 等深线左右,而南渡江河口水下三角洲向北推进至琼州海峡边缘,0~5 m 水下地形较为平缓,5 m 以下即逼近海峡深槽,尤其在 5~20 m 间水下地形坡度较大(图 6 剖面 AB 所示),故,结合地形的坡度效应,南渡江河口下泄径流在自身的重力下将向海推进的更远。结合 EOF 分析结果,第一模态表征径流和潮流共同作用,并以 20 m 等深线为界较为合理;同时,5~11 m 间的三角洲前缘水下斜坡已属海峡潮流冲刷深槽的槽壁,潮流流速随着向琼州海峡方向水深增加而逐渐增大,加之岸坡较陡,波浪一般到近岸才破碎,因此近岸 10 m 以浅的范围内波浪起

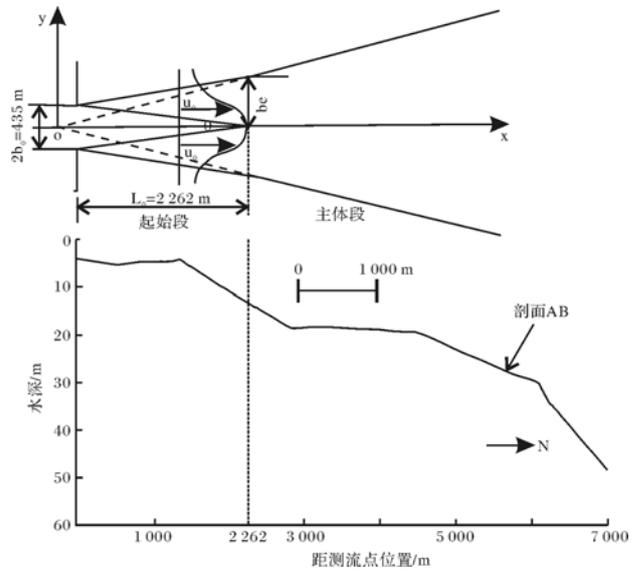


图 6 南渡江河口湍流喷射扩散模式
Fig.6 The pattern of fully turbulent axial river-mouth of the Nanduijiang Estuary

主要作用,即 EOF 中第 2 模态表征的波浪作用主要作用范围在 10 m 等深线以浅。

南渡江径流和输沙的季节分配不均性,导致南渡江河口的河流动力和波浪动力在时间上错开,分别在洪、枯季对河口过程和泥沙运动施加不同作用,EOF 分析中,波浪作用在三角洲近岸区域,控制着三角洲北部沿岸的泥沙转运与岸滩变化,对地貌形态发育与演变具有较强的驱动作用,符合波浪作用下塑造的三角洲地貌形态^[11]。

由此,进一步根据径流、潮流和波浪作用的范围形势,可概化南渡江河口的沉积模式(图 7A),如图在近岸 10 m 等深线以浅,以波浪作用为主,悬浮和推移都比较激烈,沉积物以粉砂质砂和黏土质粉砂居多;20 m 等深线以浅径流和潮流共同作用,沉积物主要类型是砂和粉砂质砂;20 m 等深线以深向琼州海峡则以潮流作用为主,沉积物类型主要以砂为主。同时,如根据 Galloway^[3](1975)提出的三种基本动力作用下的河口三角洲分类图(图 7B),南渡江河口的发育经历了河流作用为主到波浪作用为主的过程,其相应的地貌结构和沉积特征具有典型波控型三角洲特征,属波控河口三角洲。但很显然,该河口尽管近岸为波浪控制,但因河流为山区季节性河流以及河口三角洲前缘受往复潮流超过 1 m/s 的琼州海峡的“狭管效应”,因而河口的沉积环境又有别于波浪控制的河口沉积类型。故而对于河口的现代沉积环境研究,

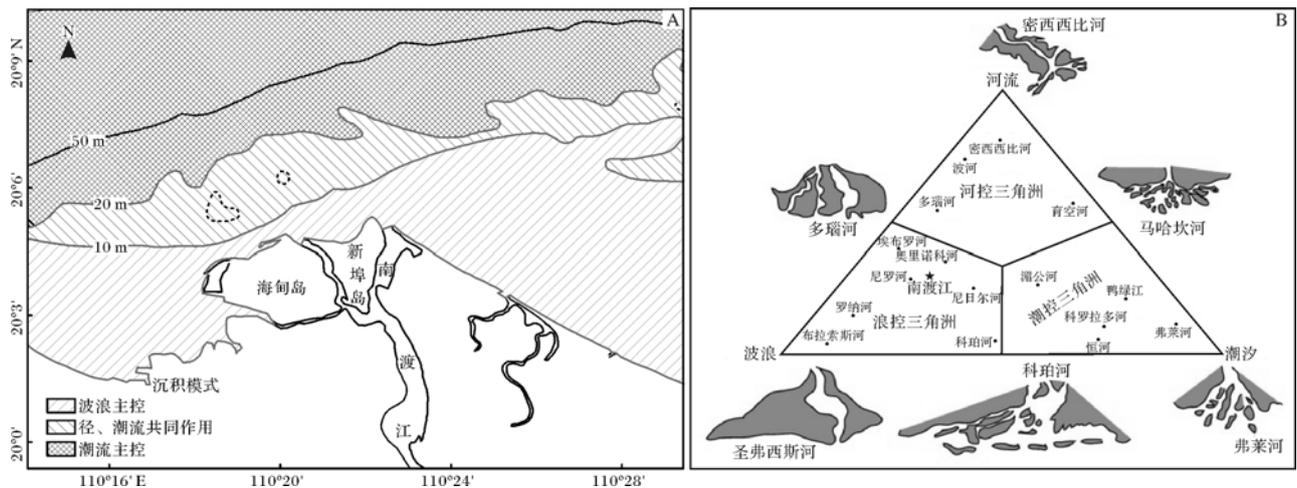


图7 南渡江河口沉积模式和三角洲分类图(B:修改自 Galloway, 1975)

Fig.7 The depositional modes of Nanduijiang Estuary and the tripartite classification (B: after Galloway, 1975)

不仅需要考虑河口近岸的波浪、潮流和径流的相对作用强弱,更要区分河口的动力,譬如径流,就具有明显的洪枯季节性差异,将对河口的沉积环境有着不可估摸的驱动作用。同时需要着重强调的是,地貌因素如南渡江河口通道狭窄地形的影响,致使其出流的效应非常明显,而海峡的障壁和“狭管效应”,致使河口进入海峡或其边缘的沉积物明显变粗。

5 结论

本文采用粒度参数方法、经验正交函数(EOF)对南渡江河口滨海海域表层沉积物进行研究,结合河口过程分析,结果表明:南渡江河口滨海海域共有5种沉积物类型:黏土质粉砂、砂质粉砂、粉砂质砂、砂—粉砂—黏土、砂。其中以砂的分布最为广泛,总体泥沙颗粒较粗;整个区域分选性差异较为明显,从东向西呈现差—好—差的趋势,同时沉积物偏向以陆源物质为主,峰态多为非常尖的窄峰。河口表层沉积物样的分布体现出三种沉积模式,其中主要模式为径流和潮流共同作用的沉积类型,沉积物类型以砂和粉砂质砂等较粗颗粒为主,结合河口喷射流过程分析,两者大致以20 m等深线为界,20 m以浅为径流、潮流共同作用,20 m以深向琼州海峡推进为潮流作用为主的沉积特征,次要模式为波浪作用下的河口沉积类型,沉积物粒径相对较细,以粉砂质砂为主,作用范围在10 m以浅的近岸区域;第三模态为台风短期强动力作用控制的沉积类型,台风自东向西影响整个海域,以粗砂为主。

参考文献 (References)

- 1 吴加学. 现代三角洲动力沉积过程与沉积体系发育机制评述:以珠江三角洲为例[J]. 气候研究快报, 2012(1): 113-120 [Wu Jiaxue. Reviews on sediment dynamics and depositional system in the Modern delta, with a particular emphasis on the Pearl River Delta [J]. Climate Change Research Letters, 2012(1): 113-120]
- 2 Galloway W E. Process framework for describing the morphologic and stratigraphic evolution of deltaic depositional systems [C]// Broussard M L. Delta: Models for exploration. Houston: Houston Geological Society, 1975: 87-98
- 3 Wright L D. Sediment transport and deposition at river mouths: A synthesis [J]. Bulletin of the American Geological Society, 1977, 88: 857-868
- 4 Wright L D, Thom B G, Higgins R J. Wave influences on river-mouth depositional process: Examples from Australian and Papua New Guinea [J]. Estuarine and Coastal Marine Science II, 1980: 263-277
- 5 Dalrymple R W, Zaitlin B A, Boyd R. Estuarine facies models: Conceptual basis and stratigraphic implications [J]. Journal of Sedimentary Research, 1992, 62(6): 1130-1146
- 6 Walsh J P, Nittrouer C A. Understanding fine-grained river-sediment dispersal on continental margins [J]. Marine Geology, 2009, 263(1/2/3/4): 34-45
- 7 戴志军,任杰,周作付. 河口定义及分类研究的进展[J]. 台湾海峡, 2000, 19(2): 254-260 [Dai Zhijun, Ren Jie, Zhou Zuofu. Research advance in definition and classification of estuaries [J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 2000, 19(2): 254-260]
- 8 李春初. 论河口体系及其自动调整作用——以华南河流为例[J]. 地理学报, 1997, 52(4): 353-360 [Li Chunchu. On the estuarine system and its automatic adjustment [J]. Acta Geographica Sinica, 1997, 52(4): 353-360]
- 9 王文介,欧兴进. 南渡江河口的动力特征与地形发育[J]. 热带海洋, 1986, 5(4): 80-88 [Wang Wenjie, Ou Xingjin. The dynamics and

- topographic development of the Nanduijiang Estuary [J]. *Tropic Oceanology*, 1986, 5(4): 80-88]
- 10 田明,李春初. 海南岛南渡江干流河口泥沙转运与现代地貌过程[J]. *热带地理*, 1994, 12(2): 105-112 [Tian Ming, Li Chunchu. Sediment bypassing and present geomorphic processes at the main stream estuary of the Nanduijiang River in Hainan[J]. *Tropical Geography*, 1994, 14(2): 105-112]
 - 11 戴志军,陈子燊,欧素英. 海南岛南渡江三角洲海岸演变的波浪作用分析[J]. *台湾海峡*, 2000, 19(4): 413-418 [Dai Zhijun, Chen Zishen, Ou Suying. Analysis of wave actions on coast evolution in Nanduijiang River Delta, Hainan Island [J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 2000, 19(4): 413-418]
 - 12 吴创收. 华南流域人类活动和气候变化对入海水沙通量和三角洲演化的影响[D]. 上海:华东师范大学, 2012 [Wu Chuangshou. Impacts of human activities and climate change on sediment flux and delta evolution in Southern China basin[D]. Shanghai: East China Normal University, 2012]
 - 13 龚文平,吴家信,莫李帅. 用 EOF 法分析海口湾东部浅滩区的泥沙来源与泥沙运动[J]. *泥沙研究*, 2004(1): 63-69 [Gong Wenping, Wu Jiaxin, Mo Lishuai. Using EOF method to analyze the sediment sources and transport in the east shallow area of Haikou Bay [J]. *Journal of Sediment Research*, 2004(1): 63-69]
 - 14 Subcommittee on the sediment terminology, AGU. Report on the Subcommittee on Sediment Terminology, American Geophysical Union [J]. *Trans of AGU*, 1947, 28(6): 936-938
 - 15 马菲,汪亚平,李炎,等. 地统计法支持的北部湾东部海域沉积物粒径趋势分析[J]. *地理学报*, 2008, 63(11): 1207-1217 [Ma Fei, Wang Yaping, Li Yan, *et al.* The application of geostatistics to analysis of grain size trend in the Eastern Beibu Gulf [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(11): 1207-1217]
 - 16 Shepard Francis P. Nomenclature based on sand-silt-clay ratios [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1954, 24(3): 151-158
 - 17 Lorenz E N. Empirical Orthogonal Functions and Statistical Weather Prediction [M]. Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Meteorology, Cambridge, 1956: 49-50
 - 18 Dai Zhijun, Liu James T, Fu Gui, *et al.* A thirteen-year record of bathymetric changes in the North Passage, Changjiang (Yangtze) estuary [J]. *Geomorphology*, 2013, 187: 101-107
 - 19 Pearce A F. Critical Reynolds Number for Fully-developed Turbulence in Circular Submerged Water Jets [M]. Pretoria, South Africa: National Mechanical Engineering Research Institute, 1966
 - 20 余常昭. 环境流体力学导论[M]. 北京:清华大学出版社, 1992: 187-206 [Yu Changzhao. Introduction to Environmental Fluid Dynamics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1992: 187-206]
 - 21 陈沈良,严肃庄,李玉中. 长江口及其邻近海域表层沉积物分布特征[J]. *长江流域资源与环境*, 2009, 18(2): 152-156 [Chen Shenliang, Yan Suzhuang, Li Yuzhong. Characteristics of surface sediment distribution in the Yangtze Estuary and its adjacent waters [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2009, 18(2): 152-156]
 - 22 任韧希子,陈沈良. 黄河下游至三角洲滨海区表层沉积物分异特征和规律[J]. *海洋科学进展*, 2010, 28(1): 24-31 [Ren Renxizi, Chen Shenliang. The differentiation of bottom sediment from the downstream of the Yellow River to the delta nearshore area [J]. *Advances in Marine Science*, 2010, 28(1): 24-31]
 - 23 张富元,章伟艳,杨群慧. 南海东部海域沉积物粒度分布特征[J]. *沉积学报*, 2003, 21(3): 452-460 [Zhang Fuyuan, Zhang Weiyan, Yang Qunhui. Characteristics of grain size distribution of surface sediment in the Eastern South China Sea [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2003, 21(3): 452-460]
 - 24 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: 32-43 [Wang Baocan, Chen Shenliang, Gong Wenping, *et al.* The Formation and Evolution of the Embayment Coasts of Hainan Island [M]. Beijing: Ocean Press, 2006: 32-43]

Sedimentation Dynamic Modes of the Nanduijiang Estuary, Hainan Island

XIE Hua-liang^{1,2} DAI Zhi-jun¹ WU Ying¹ CHEN Wei³ LIN Yi-fan¹
WEI Wen¹ GE Zhen-peng¹ GAO Jin-juan¹

(1. State Key Laboratory of Estuarine & Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062;

2. Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Ministry of Transport, Tianjin 300456;

3. Institute for Marine and Atmospheric Research Utrecht, Utrecht University, Princetonplein 5, 3584CC Utrecht, The Netherlands)

Abstract: Estuaries are naturally dynamic coastal systems that are unique in their close links to both land-based fluvial and coastal ocean process. Based on the collected large-scale sediment samples of Nanduijiang Estuary in August 2011, the characteristics of grain size and associated sediment dynamic process of the Nanduijiang Estuary were analyzed, and then depositional modes of the Nanduijiang Estuary were further researched by empirical orthogonal function (EOF) method.

The studied results show that: surface sediments of the Nanduijiang Estuary were mainly composed of sand component. Three distinct depositional modes of the Nanduijiang Estuary from land to sea can be seen as follows: ① Mode

controlled by dominant wave action with main distribution is limited to the shallow area below 10m isobaths, where the surface sediments are basically composed of silt-sand with poor sorting. ②Mode controlled by coupling actions of runoff and tidal current with main distributed region is ranged from 10m to 20m isobaths, and offshore zone below 20 m isobaths was mainly controlled by the tidal forcing. The depositional mode is composed of coarse sediment component, which is presented as fan appearance. ③Mode controlled by Typhoon or storm tidal actions is distributed over the whole studied area, where the sediments are mainly composed of coarse sand.

The first two depositional modes represent commonly sediment dynamics features of the Nanduijiang Estuary. The basic pattern is the mode controlled by coupling actions of runoff and tidal current. Moreover, distributed depositional modes from land to sea show that the wave action is dominant in the nearshore zone, and offshore zone is mainly influenced by jet current due to flood action and alongshore tide current. In addition, although Nanduijiang Estuary was attributed to wave-dominated estuary in the previous researches, present results reveal that depositional mode of the Nanduijiang Estuary could be obvious controlled by different dynamic actions. Estuarine geometry appearance and impacts of barrier actions and narrow tub of the Qiongzhou Strait could be one of the dominant factors on depositional environment changes of the Nanduijiang Estuary.

Key words: characteristics of grain size; river-mouth jet; sedimentation modes; Nanduijiang Estuary; EOF analysis