

湛江港潮汐汊道落潮三角洲沉积动力过程^{*}

张乔民 郑德延 李绍宁 陈欣树 于红兵 林 微

(中国科学院南海海洋研究所, 广州 510301)

提 要 湛江港是华南海岸规模最大的中潮溺谷湾型潮汐汊道港湾, 口外发育规模巨大、形态典型的落潮三角洲。依据现场调查资料分析, 落潮三角洲具有马蹄形浅滩包围中央深槽的地貌结构, 由中心至周边为粗砂至极细砂同心半圆带状分布的表层沉积物分布, 中央深槽落潮流动力为主, 周边浅滩波浪动力和涨潮流动力为主的动力场结构。本文讨论了落潮三角洲沉积动力过程, 包括落潮三角洲形成发育的动力条件与泥沙供应条件、落潮三角洲地貌结构、表层沉积物分布和动力场结构之间的一致性, 以及落潮三角洲沉积物运移路径。

关键词 潮汐汊道 落潮三角洲 沉积动力过程 湛江港

落潮三角洲是沙质海岸潮汐汊道口外的马蹄形沙质浅滩, 是潮汐汊道的地貌特征、潮汐汊道动力地貌体系的组成部分^[1]。落潮三角洲研究开拓了潮汐汊道研究的新领域, 对拦门沙航道的开发与整治有实践意义。国外70年代以来开展潮汐汊道落潮三角洲地貌发育与沉积动力过程研究并取得一系列进展^[2]。国内也先后就碣石港^[3]、水东港^[4,5]、沙扒港^[6]等沙坝潟湖型潮汐汊道落潮三角洲地貌结构与演化、动力条件与泥沙运动、拦门沙航道开发与整治等方面开展了研究。湛江港是冰后期海侵淹没遂溪河下游, 并在更新统松散地层组成的台地上切割而成的溺谷湾型潮汐汊道。它是华南规模最大、水深条件优良、港口航道开发前景巨大的潮汐汊道港湾。以往研究偏重于口内水域^[7]。作者等于1989年结合开发龙腾水道深水航道的要求, 首次在口外水域进行全面系统的水文泥沙与动力地貌调查研究^[1]。本文重点讨论落潮三角洲地貌结构、表层沉积物分布和动力场结构, 并进而探讨其地貌发育机制与沉积动力过程。

1 落潮三角洲地貌结构

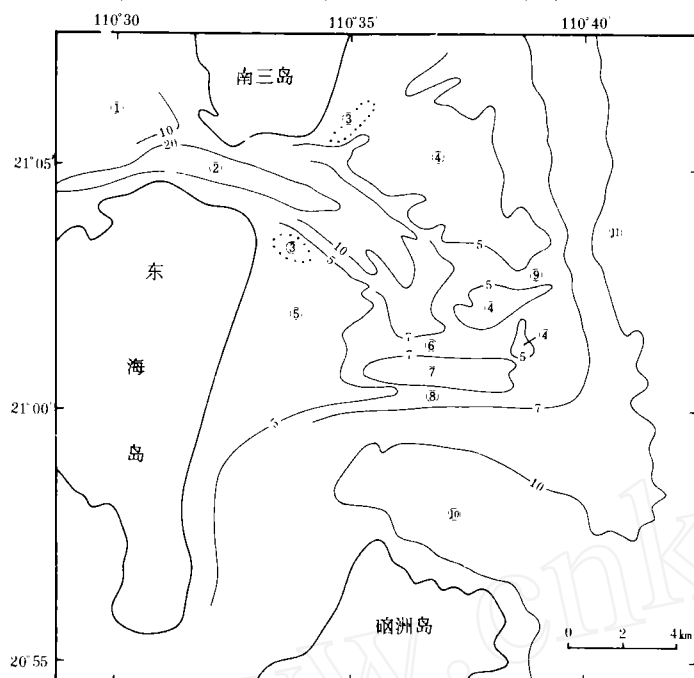
落潮三角洲地貌结构的基本特征是马蹄形浅滩包围中央深槽(图1)。汊道口门位于南三岛与东海岛之间, 最窄处宽2.1km, 平均海面下断面积 $5 \times 10^4 \text{m}^2$, 最大水深约50m。向口门内外伸展的20m深槽长达12km, 是难得的深水航道资源。口内涨潮三角洲发育不良, 大片显露更新统松散地层侵蚀残留的礁滩。口外7m等深线较好地显示了落潮三角洲外缘及拦门沙地貌结构。落潮三角洲西倚口门和南三岛、东海岛沙丘海岸, 东邻内陆架缓坡平原, 南接

* 国家自然科学基金资助项目第4870290号。

① 中国科学院南海海洋研究所, 湛江港外航道水文泥沙调查报告, 1989。

来稿日期: 1994-02; 收到修改稿日期: 1994-09。

硇洲岛北深槽北坡,总面积约140km²,居华南海岸之首。落潮三角洲附近可划分为以下地貌单元,部分名称取自 Hayes^[1]、Oertel^[8]落潮三角洲地貌模式。



①涨潮三角洲 ②口门深槽 ③后缘潮间沙岛 ④东北浅滩 ⑤西南边滩 ⑥拦门沙内浅滩
⑦拦门沙中部凹地 ⑧拦门沙外浅滩 ⑨落潮溢流水道(龙腾水道) ⑩硇洲岛北深槽 ⑪内陆架缓坡平原

图1 湛江港落潮三角洲及其附近地貌结构图

Fig. 1 Morphological structure of the ebb-tidal delta and the nearby area of Zhanjiang Harbor tidal inlet

1.1 落潮主水道

口门深槽的向海延伸部分,主要由口门落潮流形成和维持。轴向由 SEE 逐渐南偏为 SSE,至水道末端拦门沙顶总长约9km,水深由28m 渐减至6m。外侧为马蹄形浅滩所围绕。

1.2 后缘潮间沙岛

位于口门两侧浅滩后缘并与陆地分隔,面积小而形态多变。北沙岛与海岸平行而南沙岛与落潮主水道平行,显示北侧波浪动力优势与南侧潮流动力优势的差异。沙岛与岸线之间通常显示涨潮流优势而称之为边缘涨潮水道^[1]。

1.3 东北浅滩

从南三岛东南角沿 SSE 方向伸出的约14km,与 NNE 向岸线成135°夹角,内外侧有若干横向支汊水道切入。内侧为落潮溢流水道,外侧为涨潮水道^[8]。其中龙腾水道已切穿5m 等深线,有计划开发为湛江港新的通海深水航道。浅滩顶除后缘潮间沙岛外,还有若干小块2m 浅滩,这是较大波浪在浅滩顶部破碎和冲涌形成并不断向岸移动的冲流坝(swash bar)地貌^[9]。横向支汊水道与冲流坝均为易于变动和稳定性较差的地貌。落潮主水道和东北浅滩的走向反映了落潮三角洲整体向南偏转。

1.4 西南边滩

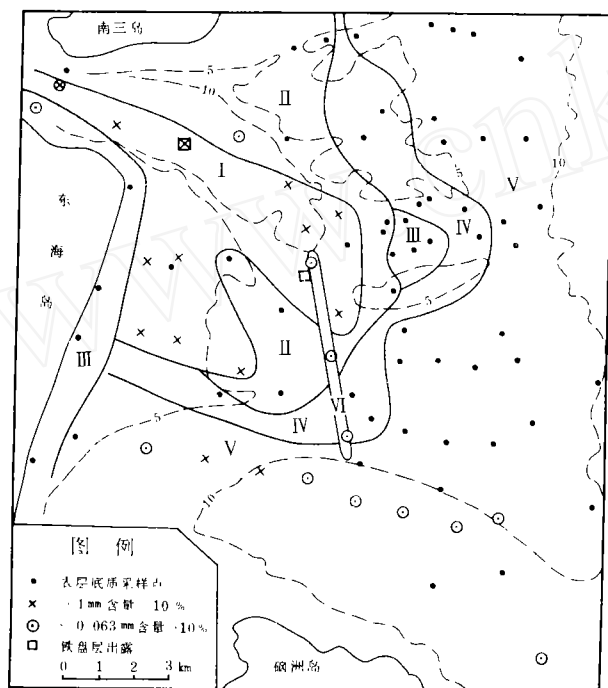
与东海岛北段海岸毗邻的5m浅滩。东北侧顺潮间沙岛发育与落潮主水道平行的SE向水下沙嘴,南侧发育另一条由西向东伸向拦门沙外浅滩的水下沙嘴。

1.5 拦门沙浅滩

由EW向内外浅滩及其间的凹地组成。内外浅滩顶水深6—7m,其上有水深5m,甚至4m的小块浅滩断续分布,是特大暴风浪形成的冲流坝地貌。中部凹地长6km,宽1.5km,最大水深9.6m。这种双峰形拦门沙国内外较少报道,其成因尚待进一步研究。

2 落潮三角洲表层沉积物分布特征

表层沉积物分布可提供沉积动力过程的重要信息。迄今为止,研究落潮三角洲表层沉积物分布的文献甚少^[9]。本文依据84个表层沉积物样品分析资料划分表层沉积物为6个类型(图2),由中心至外缘为由粗砂至极细砂的同心半圆带状分布,并可划分为三个动力沉积区。



I 粗砂 II 粗中砂 III 中细砂 IV 细砂 V 极细砂 VI 砂-粉砂-粘土

图2 湛江港落潮三角洲表层沉积物分布图

Fig. 2 Surface sediment distribution on the ebb-tidal delta of Zhanjiang Harbor tidal inlet

2.1 落潮主水道和西南边滩高能蚀余相粗砂沉积区

口门深槽中部、落潮主水道南部和西南边滩大部(南北水下沙嘴除外)为粗砂分布区,主要为粗砂(平均含量43.9%)、极粗砂(27.9%)、中砂(12.0%)、细砂(9.9%)。除口门深槽中部深水区外,沉积物中极细砂、粉砂和粘土平均含量仅2.1%。分选很好。局部有铁

盘层（铁质胶结砂岩）出露。上述沉积特征反映了高能环境（落潮主水道为强落潮流动力，西南边滩为强波浪动力）和基底地层的影响。落潮三角洲的基底及东海岛、南三岛均为更新统北海组与湛江组地层组成，其侵蚀破坏后的典型产物就是铁盘层、粗砂和细砾等沉积物^[7]。显然，落潮主水道（尤其南半部）及西南边滩大部是侵蚀过程的产物。

2.2 落潮三角洲马蹄形浅滩高能堆积相砂质沉积分布区

马蹄形浅滩（主要为东北浅滩）内坡为粗中砂（中砂61.9%，粗砂21.5%）。龙腾水道中部（及东海岛沿岸海滩）为中细砂（细砂46.0%，中砂34.6%）。浅滩顶（西南边滩为南侧水下沙嘴）为细砂（细砂55.7%，极细砂36.4%）。浅滩外坡（至10m等深线）为极细砂（极细砂占50%—80%）。全部为分选很好、粉砂粘土含量很低（浅滩顶平均含量1.4%，外坡稍有增加，为3.2%）的砂质沉积物。由落潮三角洲中心向外缘，沉积物略呈同心半圆带状分布，由粗砂到极细砂，分选变得更好。这种有规律的分布在龙腾水道尤其显著（图3）。上述沉积特征反映了高能环境下沿岸输沙和口门深槽侵蚀产物被捕获、堆积和改造的过程，沉积物粒度随水深的变化反映了潮流与波浪动力强度的相应变化。

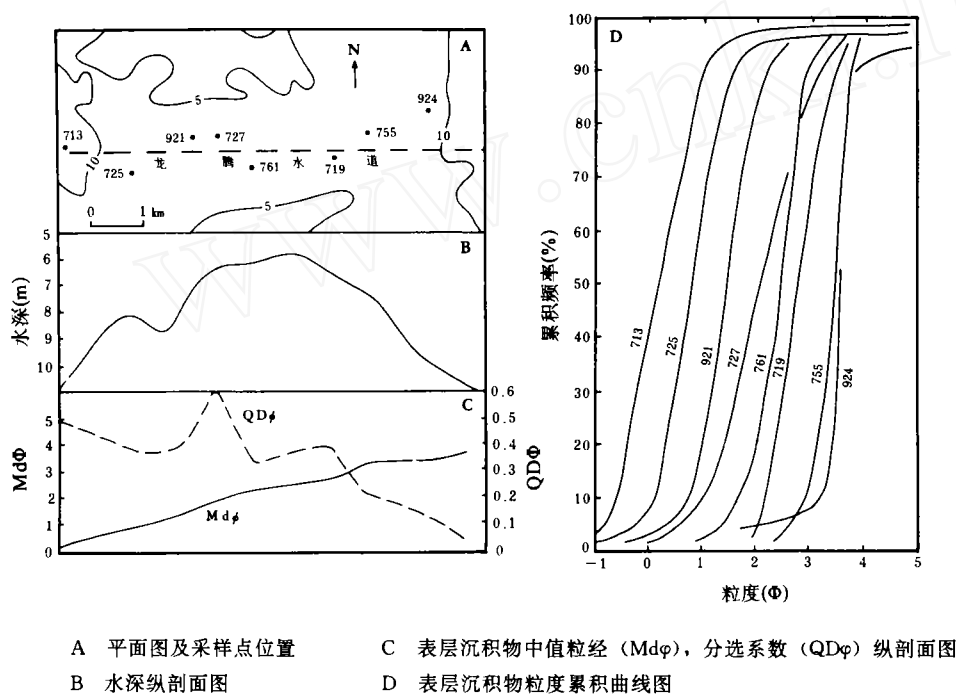


图3 湛江港落潮三角洲龙腾水道地形与表层沉积物特征图

Fig. 3 Topography and surface sediment distribution of Longteng Channel in the ebb-tidal delta of Zhanjiang Harbor tidal inlet

2.3 硇洲岛北深槽和拦门沙人工航道低能堆积相混杂沉积区

硇洲岛北深槽及其向 NWW 延伸部分沉积物以极细砂为主，但粉砂粘土平均含量高达 33.4%。拦门沙人工航道回淤物质以粉砂（36.7%）、粘土（23.8%）、极细砂（32.9%）为主，粗、中、细砂仅占 6.6%。上述沉积物粉砂粘土含量高，分选中等到差，明显的正偏态

($SK\phi$ 0.22—1.82), 与落潮三角洲主体沉积物显示了明显的差异。这是由于潮流作用与波浪作用都较弱的低能环境下, 粉砂粘土物质大量落淤而形成混杂堆积的结果。

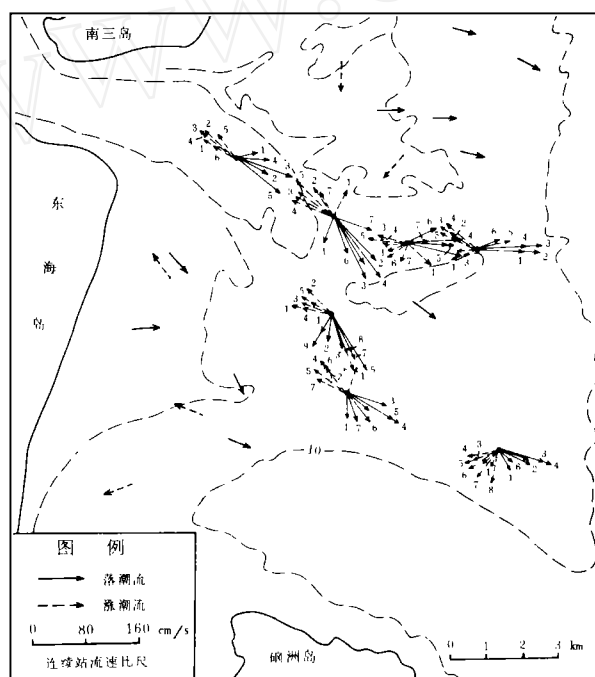
3 落潮三角洲动力场结构特征

潮流、沿岸流和波浪是形成落潮三角洲地貌结构和表层沉积物分布的基本动力。

3.1 流场结构特征

3.1.1 潮汐与潮棱体 本区为不正规半日潮, 平均潮差2.0m, 大潮平均潮差3.40m, 是以中、小潮差为主的华南海岸潮差较大岸段之一。涨潮历时长于落潮历时(平均比值1.24), 最大潮差在落潮段^[7]。港湾纳潮水域面积272km², 平均潮棱体 $5\times 10^8\text{m}^3$, 大潮可达 $10\times 10^8\text{m}^3$, 其量值居华南海岸汊道之首。由于口门深窄, 潮流强劲, 实测最大落潮流速1.93m/s。这是湛江港潮汐汊道口门深槽及口外大规模落潮三角洲得以形成的动力条件。

3.1.2 流场结构(图4) 本区实测水流以往复型正规或不正规半日潮流为主, 高低潮时转流, 最大流速在中潮位附近, 属驻波型。涨潮流向口门辐聚而落潮流向口外辐散。硇洲岛北深槽涨落潮流往返于硇洲岛与东海岛之间的海峡, 显示落潮三角洲流场南边界位于西南边滩南缘沙嘴及拦门沙外浅滩外缘。流速由口门向外海递减, 由落潮主水道深泓线向两侧浅滩区递减。口门咽喉最大涨落潮流速分别达1.54m/s和1.93m/s(据海图标示), 落潮三角洲



* 连续站流矢末端数字表示高(或低)潮后小时数

图4 湛江港落潮三角洲海区流场图

Fig. 4 Tidal current roses for a tidal cycle in the ebb-tidal delta of Zhanjiang Harbor tidal inlet

边缘流速递减了60%。流场结构的另一特点是涨落潮流路在平面上的分异以及涨落潮流时间-速度不对称。落潮主水道及龙腾水道明显地显示落潮流占优势,涨落潮流最大流速比值0.62,平均流速比值0.80,而落潮三角洲外围,相应比值提高到0.84与1.80。这种流场结构与 Oertel (1988) 提出“净落潮三角洲流场”模式^[10]有类似之处。口门两侧潮间沙岛与岸线之间的边缘涨潮水道的涨潮流优势,目前尚缺乏实测资料验证。

3.1.3 沿岸流 粤西沿岸带全年存在SW向沿岸流,流速0.15—0.30m/s^①。本区实测连续站余流亦多偏南,量值0.02—0.29m/s。拦门沙区余流偏北,可能与波浪作用增强涨潮流优势有关^[11]。稳定的偏南沿岸流是落潮三角洲南偏的动力因素之一^[18]。

3.2 波浪场

3.2.1 波浪概况 据硃洲岛东北部海洋站资料,主要为受季风和热带气旋风场制约的风浪,多年平均波高0.9m,平均周期3.5s。年最大波高在无热带气旋影响年份为2.5—3.3m。台风波浪最大可达9.8m。 ≥ 2.0 m波高出现频率仅占2.5%。常浪向与强浪向均为ENE,频率23%,主要出现于冬半年。

3.2.2 波浪输沙 与汉道口门潮流作用助长和扩大落潮三角洲发育相反,波浪是输运沿岸泥沙,制约汉道和落潮三角洲发育规模的动力因素。按波能法输沙公式^[12]计算,NNE—E向波浪向南输沙 30×10^4 t/a,ESE—S向波浪向北输沙 4×10^4 t/a,总输沙率 34×10^4 t/a,净输沙率 26×10^4 t/a,优势输沙方向向南。口门东北20km处鉴江来沙(悬移质输沙率为 190×10^4 t/a)^[7]及汉道两侧长数十公里的沙丘海岸提供主要的粗颗粒泥沙来源。落潮三角洲对波浪的折射影响形成下游侧局部反向输沙^[13],部分进入西南边滩的泥沙会转向口门方向,并增强边缘涨潮水道的涨潮流优势。优势波浪输沙向南也促使落潮三角洲南偏。

3.2.3 波浪对海底沉积物的高频分选 按照线性波理论推算^[12],在波高0.9m、周期3.5s和波高2.0m、周期5.0s情况下,水深5.2m和13.3m的海底波浪水质点最大水平轨道速度达0.30m/s,可以起动砂粒级沉积物。本区平均海面位于理论深度基面以上2.3m,所以上述水深相当于平均海面情况下海图水深2.9m(相当于东北浅滩顶部)和11.0m(相当于落潮三角洲外侧内陆架缓坡平原)。这种在较大波浪下可遍及整个落潮三角洲区的高频振荡水流使海底沉积物均匀纯净,分选很好,极少含粉砂粘土物质,可称之为波场沉积物^[14]。

4 落潮三角洲沉积动力过程特点的讨论

4.1 落潮三角洲形成的动力条件和泥沙条件

落潮三角洲的发育需要较强的潮汐动力(中潮海岸和大潮棱体)和足够的粗颗粒泥沙来源。决定海岸地貌结构特点的海岸动力条件可用潮差或潮差与波高的对比来衡量^[15]。小潮差或浪控海岸的特点是涨潮三角洲发育。大潮差或潮控海岸形成漏斗形河口湾和水下潮流沙脊。中潮(平均潮差1—3.5m)或潮汐作用与波浪作用大致平衡的混合能海岸最有利于潮汐汉道和落潮三角洲发育,而大潮棱体和较小波能可发育大规模落潮三角洲。建造落潮三角洲的粗颗粒泥沙来自沙质海岸沿岸波浪输沙和强潮流对口门深槽的侵蚀产物^[10,16]。我国部分溺谷湾型汉道落潮三角洲不发育^[17],主要原因是口外基岩海岸不能提供足够的粗颗粒

① 中国科学院南海海洋研究所水文气象室海流组。广东沿岸及北部湾表层海流状况。1973。

泥沙来源,海区沉积以粉砂粘土为主。湛江港潮汐汊道发育于中潮海岸,具有华南海岸汊道最大的潮棱体,也有足够的(但不是非常丰富的)粗颗粒泥沙来源,包括深槽侵蚀产物、鉴江来沙、沙丘海岸波浪输沙等,从而发育了华南海岸汊道规模最大的落潮三角洲。

4.2 落潮三角洲地貌结构、沉积物分布和动力场结构的一致性,以及地貌结构的稳定性

湛江港落潮三角洲落潮主水道由强落潮流动力侵蚀而成,分布侵蚀残留的含细砾和铁盘块的粗砂。位于输沙上游侧的东北浅滩是潮流向海输沙与波浪向岸输沙共同建造的堆积体,经受较强潮流(内坡)和波浪(滩顶和外坡)作用,分布均匀纯净的中细砂(内坡)、细砂(滩顶)和极细砂(外坡),地貌、动力和沉积均呈同心半圆带状分布。位于输沙下游侧的西南边滩因汊道强潮流阻隔上游来沙而遭受波浪侵蚀,分布侵蚀残留粗砂沉积,仅南北两端水下沙嘴例外。向南的沿岸流和南向优势输沙,使整个落潮三角洲地貌体系和沉积体系向南偏转。上述地貌结构、沉积物分布和动力场结构之间的一致性,是落潮三角洲长期稳定的沉积动力过程的结果,也是潮汐汊道和落潮三角洲地貌结构稳定性的表现。湛江港是华南海岸稳定性最好的潮汐汊道之一。据 P. Bruun 提出的潮汐汊道稳定性判据 $(Q/M)^{[18]}$, 湛江港有巨大的潮棱体 (Q) 和相对不大的沿岸总输沙率 (M) , 其比值为1000以上。这种汊道具有极高的总体稳定性。加上口门深槽深嵌于夹有抗蚀性较强的铁盘层和粘土层的更新统松散地层之中而难以自由迁移,导致口门和落潮三角洲地貌结构更加稳定。当然,这种稳定性并不排除地貌结构的长周期缓慢演变,以及后缘沙岛、东北浅滩两侧横向支汊水道、东北浅滩顶及拦门沙内外浅滩顶的冲流坝等局部微地貌的变化。

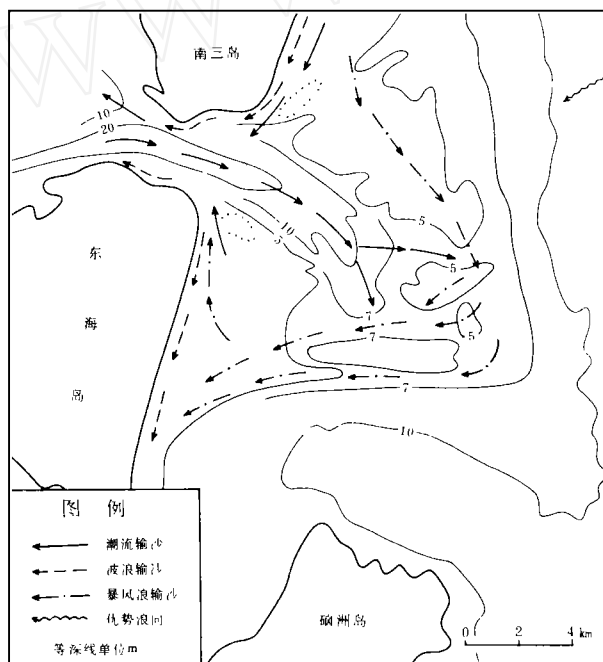


图5 湛江港落潮三角洲泥沙输移路径

Fig. 5 Schematic sand transport pattern in the ebb-tidal delta of Zhanjiang Harbor tidal inlet

4.3 落潮三角洲泥沙输移路径 (图5)

4.3.1 潮流输沙 汉道口门吞吐着巨大潮棱体的同时也输移着大量泥沙,净输沙方向与优势潮流方向一致。落潮主水道与落潮溢流水道净输沙方向向海,口门两侧边缘涨潮水道净输沙方向朝向口门。涨潮流输沙小部分留在口内形成涨潮三角洲,大部分又被落潮流带出口外。悬移质泥沙只落淤在深水弱潮流区。向海的潮流推移质输沙与向岸的波浪输沙一起,在落潮流动力与波浪动力相互作用达到平衡的位置建造落潮三角洲浅滩体系。

4.3.2 波浪输沙 常见波浪(尤其高潮位期间)仅形成口门两侧海滩狭窄的沿岸输沙。净输沙方向与优势波浪方向一致(由北向南)。咽喉岸段输沙向口内并形成内弯沙嘴地貌。上游侧(口门北侧)部分泥沙进入落潮主水道,再由潮流往返搬运而部分进入下游侧,这就是泥沙从汉道上游转移到下游的“潮流越过”(tidal flow bypassing)方式^[18]。由于湛江港汉道潮棱体(及潮流量)大而沿岸输沙量相对较小,潮流越过是其泥沙输移的主要方式。

4.3.3 暴风浪输沙 暴风浪期间(尤其低潮位期间)沿岸输沙扩大到落潮三角洲外围浅滩区,泥沙一部分向岸进入落潮主水道,一部分从东北浅滩顶南下,经拦门沙内外浅滩进入下游一侧。浅滩顶冲流坝地貌就是这一过程的表现。这就是汉道泥沙输移的“沙坝越过”(bar bypassing)方式^[18]。这时的拦门沙成为一座“沙桥”,如果拦门沙不够宽浅或被人工疏浚,沿岸输沙将沉积其中,以重建有效的沙桥,这也是拦门沙人工航道致淤的主要机制之一。进入下游的泥沙一部分继续南下,一部分进入波浪受落潮三角洲折射形成的反向输沙系统,从口门南侧进入落潮主水道,再被落潮流带出,成为南边缘沙岛及其向SE伸延的沙嘴的泥沙来源,并在下游侧西南边滩形成一个顺时针泥沙循环系统。

参 考 文 献

- 1 Hayes MO. General morphology and sediment patterns in tidal inlets. *Sedimentary Geology*. 1980. **26**: 139—156.
- 2 张乔民, 郑德延. 潮汐汉道沉积动力与现代地貌过程国外研究进展. *海洋通报*. 1992. **11** (1): 84-92.
- 3 程明豪, 欧兴进, 张乔民等. 粤东碣石湾河口沉积地貌演变. *热带海洋*. 1987. **6** (3): 30—38.
- 4 应秩甫. 水东潮汐汉道和沿岸泥沙输移. *热带海洋*. 1988. **7** (1): 55—61.
- 5 李春初, 应秩甫, 杨干然等. 粤东水东湾潮汐通道——落潮三角洲的动力地貌过程. *海洋工程*. 1990. **8** (2): 78—88.
- 6 张乔民, 陆铁松, 赵焕庭等. 广东沙扒潮汐汉道口门地貌现代演变. *热带海洋*. 1990. **9** (4): 45—52.
- 7 张乔民, 宋朝景, 赵焕庭. 湛江港溺谷型潮汐水道的发育. *热带海洋*. 1985. **4** (1): 48—57.
- 8 Oertel GF. Ebb-tidal deltas of Georgia estuaries. In: Cronin L E (ed.). *Estuarine Research*, V. 2. Academic Press Inc. 1975. 267-276.
- 9 Boothroyd JC. Tidal inlets and tidal deltas. In: Davis R A (ed.). *Coastal sedimentary environments*. Springer-Verlag. Second Edition. 1985. 445-532.
- 10 Oertel GF. Processes of sediment exchange between tidal inlets, ebb deltas and barrier islands. In: Aubrey DG, Weisner L (eds.). *Hydrodynamics and sediment dynamics of tidal Inlets*. Springer-Verlag. 1988. 297-318.
- 11 Hubbard DK, Oertel GF, Nummedal D. The role of waves and tidal currents in the development of tidal-inlet sedimentary structures and sand body geometry: Examples from North Carolina, South Carolina and Georgia. *Jour Sed Petro*. 1979. **49** (4): 1073—1092.
- 12 美国海岸工程研究中心(梁其荀、方钜译). 海滨防护手册(卷1). 北京: 海洋出版社. 1988.
- 13 Hubbard DK. Morphology and hydrodynamics of the Merrimack River ebb-tidal delta. In: Cronin LE (ed.). *Estuarine Research*. Academic Press Inc. 1975. 253—266.

- 14 Sha LP. Surface sediment and sequence model in the ebb-tidal delta of Texel Inlet, Wadden Sea, The Netherlands. *Sediment Geol.* 1990. **68**: 125—141
- 15 Davis JRA. Hayes MO. What is a wave-dominated coast? In: Greenwood B. Davis JRA (ed.). *Hydrodynamics and Sedimentation in Wave-Dominated Coastal Environments*. *Mar Geol.* 1980. **60**: 313—329.
- 16 李春初, 曾昭璇. 汕头港淤积特征及其发展趋势. *热带地理*. 1983 (3): 1—7.
- 17 高籽. 从地貌学观点看潮汐汊道研究方向. *海洋通报*. 1989. **8** (3): 86—90.

作者简介

张乔民,男,1942年生,1965年毕业于南京大学地理学系。现主要从事海岸河口动力地貌及其在海岸港口工程中应用的研究。已发表“华南海岸潮汐汊道 P-A 关系的分析”、“美国弗吉尼亚东海岸 Gargathy 汊道地貌发育研究(英文)”等论文30余篇。

A STUDY ON THE SEDIMENT DYNAMICS OF EBB-TIDAL DELTA OF ZHANJIANG HARBOR TIDAL INLET

Zhang Qiaomin Zheng Deyan Li Shaoning

Chen Xinshu Yu Hongping Li Wei

(South China Sea Institute of Oceanology, Academia Sinica, Guangzhou 510301)

Key words tidal inlets, ebb-tidal deltas, sediment dynamics, Zhanjiang Harbor

Abstract

Zhanjiang Harbor is the largest tidal inlet along South China coasts and the largest ebb-tidal delta developed in the inlet entrance area. This paper analyzed the basic characteristics of the ebb-tidal delta of Zhanjiang Harbor including the morphological structure (semi-circular shoals around central trough), surface sediment distribution (coarse sand to very fine sand with little silt and clay from center to periphery) and hydrodynamical field structure (ebb tidal current dominant in the main ebb-tidal channel, and wave and flood tidal current dominant in the semi-circular shoals), and discussed the sediment dynamics of the hydrodynamical of ebb-tidal delta, the close interrelation among morphology, sedimentology and hydrodynamics, and the sediment transport pattern of the ebb-tidal delta of Zhanjiang Harbor.