

再论瓯江口拦门沙回淤及治理研究

左利钦, 陆永军, 李浩麟

(南京水利科学研究院 水文水资源及水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要: 分析了瓯江口拦门沙在自然状态下、一期整治工程实施后的泥沙回淤情况, 分析表明影响拦门沙回淤的主要因素为周边滩面上的风浪掀沙和上游洪水来沙. 在泥沙回淤验证的基础上, 应用波流共同作用下的二维泥沙数学模型, 研究了拦门沙航道二期整治工程效果, 预测了正常水文条件下的泥沙回淤及台风期骤淤. 整治工程具有减少风浪掀沙和归顺水流等作用, 取得了较好的整治效果, 正常水文条件下减淤幅度为 14.1% ~ 23.1%, 台风期减淤幅度为 23.3% ~ 35.7%.

关键词: 拦门沙; 回淤; 航道整治; 瓯江口

中图分类号: U617.5

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2012)03-0006-08

河口拦门沙是径流泥沙在输移过程中, 由于能量的释放, 河流海洋双向水流的相互顶托作用下, 径流势能锐减、咸淡水混合、泥沙絮凝沉积而发育隆起于口门的沙体^[1], 其部位常位于河口段与口外海滨段的交汇地区, 即口门附近^[2]. 一般而言, 河口拦门沙的形成动力条件主要包括径流扩散、潮流顶托、波浪动力、盐淡水混合(盐水异重流)、河口环流等. 拦门沙对航运、泄洪等都有很大影响, 因此对拦门沙浅滩的研究一直是河流、海岸动力学及港口航道开发与治理的重要及前沿课题之一^[2]. 瓯江口是我国典型强潮河口, 口门发育有拦门沙. 瓯江口进港航道从中水道经拦门沙浅段过渡到黄大岙水道(图1).

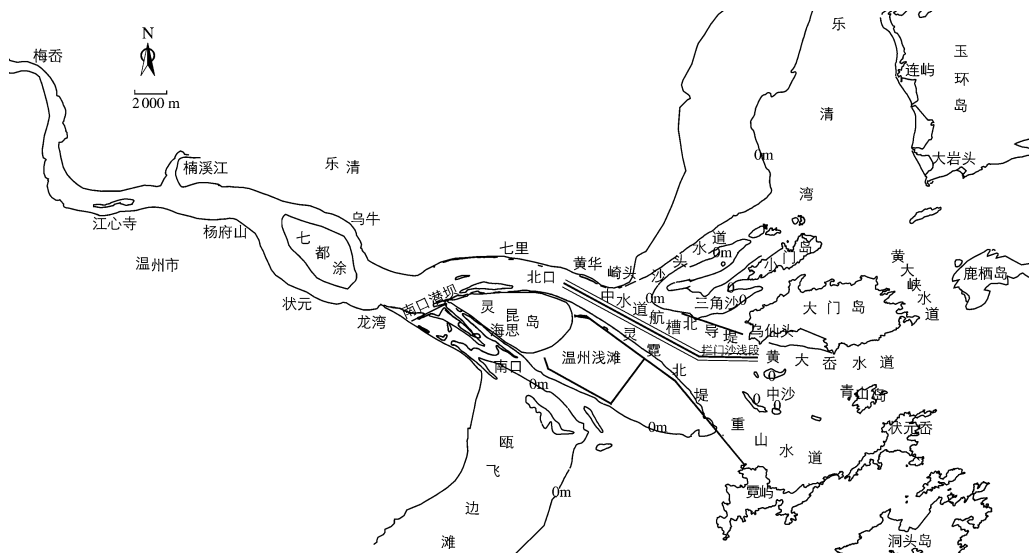


图1 瓯江河口形势

Fig.1 Sketch of the Oujiang estuary

收稿日期: 2011-11-20

基金项目: 国家自然科学基金资助 NSFC-NOW 项目(中荷)(51061130546); 国家自然科学基金资助项目(50879047)

作者简介: 左利钦(1980-), 男, 山东巨野人, 博士研究生, 主要从事河流海岸动力学研究. E-mail: lqzuo@nhri.cn

文献[2-4]研究了瓯江口拦门沙历史演变规律及一期工程治理措施等.本文在以往研究的基础上,回顾了瓯江口拦门沙的成因,根据实测资料分析了一期工程实施前后拦门沙航槽回淤规律,在总结分析成功经验的基础上,应用波浪潮流共同作用下的二维泥沙数学模型研究了二期工程治理措施及回淤强度,为类似强潮河口拦门沙航道开发提供借鉴.

1 瓯江口水文泥沙特征^[2]

瓯江属山溪性潮汐河流,源短流急,多年平均流量为 $446 \text{ m}^3/\text{s}$,实测最大洪峰流量 $22\,800 \text{ m}^3/\text{s}$,最小流量 $10.6 \text{ m}^3/\text{s}$.径流在年内分配悬殊,洪汛期(4—9月)下泄水量占全年70%左右.径流下泄对河口潮流涨入有阻碍作用,20世纪80年代,上游径流超过 $5\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,江心寺已无涨潮流;径流超过 $12\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,龙湾已无涨潮流.近年由于人类活动,潮流上溯, $5\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,涨潮流可达梅岙;径流超过 $12\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,涨潮流可达江心寺.瓯江口潮汐属正规半日潮,潮差大,是我国显著的强潮海区之一,口门附近黄华站最大潮差 7.21 m 、最小潮差 1.14 m ,平均潮差 4.50 m ,平均涨潮历时 5.4 h ,平均落潮历时约 7.0 h .潮差由温州湾向口内逐渐增大,至龙湾附近达最大,然后向上游递减.温州湾受季风影响,冬季盛行偏北风,夏季盛行偏南风,春秋季节为季风交替时期.全年呈现2个主要波浪向,E-SE向波浪频率为52%,N-NE向波浪频率为36%.口外有大小门岛、状元岙、霓屿山、洞头岛等岛屿环抱,对湾内水域形成较好掩护.

瓯江圩仁站年均输沙量为200万t,最大年输沙量为407万t,含沙量随流量增加而增大,枯水期含沙量常不到 $0.02 \text{ kg}/\text{m}^3$,流域来沙主要集中在汛期输入河口.河流中推移质输沙量约为悬移质输沙量的20%~30%.在枯水期上游径流几乎为清水,而下游河口区却出现了高含沙量区,龙湾至梅岙河段,涨落潮含沙量高达 $5 \sim 7 \text{ kg}/\text{m}^3$,近底层出现高含沙量.在河口外拦门沙地区含沙量却很小(无风浪天气),且低平潮时口外含沙量远大于高平潮时.这是由于落潮时口内的高含沙量水体逐渐向口外扩散.因此,海域悬沙和底床沿程泥沙冲刷悬扬成为河口区及拦门沙地区悬沙的物质来源.瓯江口悬沙粒径组成介于 $0.001 \sim 0.025 \text{ mm}$.梅岙以上底床以粗砂和卵石为主,粒径介于 $0.10 \sim 12.50 \text{ mm}$;梅岙以下至河口主槽多为中细砂,粒径介于 $0.05 \sim 0.50 \text{ mm}$;口门及其拦门沙滩顶为细粉沙和黏土,粒径介于 $0.003 \sim 0.050 \text{ mm}$.

2 拦门沙成因及回淤分析

2.1 拦门沙成因^[2-3]

瓯江口拦门沙(乌仙咀)是中水道与乌仙咀深槽之间的过渡段浅滩.中水道分汊使水流分散,流速和输沙能力沿程减小,导致泥沙落淤,是乌仙咀拦门沙形成的主要原因.另一方面,乌仙咀拦门沙是岛间拦门沙,具有河口汊道浅滩的性质.一旦汊道分流量增加,流速和水流输沙能力随之增加,则拦门沙浅滩水深也将增加.涨、落潮动力轴线分离是拦门沙形成的另一重要原因.中水道深槽落潮流向为 105° ,而乌仙咀深槽涨潮流向为 320° ,由于涨、落潮流动轴线不一致,在中间形成明显的缓流区,有利于泥沙落淤.1958年后,乌仙咀深槽动力轴线不断由东南向东偏移,使上、下游深槽动力轴线比较接近一致,浅滩冲刷发展使水深增加,拦门沙长度缩短.瓯江河口属中等(缓)混合型河口,没有明显的盐水楔存在,但盐、淡水混合对滨海浅滩地区水流结构亦会产生显著的影响.实测资料表明,流量为 $1\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,在乌仙咀至崎头航道内,可以形成较大的纵向密度差,涨潮时,底层流速大;落潮时,底层流速小,而面层流速大.结果在拦门沙地区存在净向上游的余流,有利于细颗粒泥沙的淤积,对于拦门沙的形成也有一定的影响.据地形实测资料,1937—1979年共42a间,中沙头下移近 5 km , 2 m 水深的沙滩下移 2.5 km ,1980—1999年又下延 1 km .拦门沙航槽则随着中沙移动而南移,由于中沙头部下移,黄大岙汊道进口断面扩大,落潮分流量增加,促使拦门沙航槽拓宽,水深增加,浅滩长度缩短^[3].

2.2 拦门沙泥沙回淤分析

2.2.1 自然状态下(2002年)拦门沙试挖槽回淤分析 2002年温州港务局在拦门沙浅滩进行了航槽开挖,

开挖高程为理论深度基准面以下 5.5 m. 各测次航槽断面(120 m 航宽)平均水深变化见图 2. 该航槽于 2002 年 2 月竣工, 4—11 月进行了 6 次水深测量. 可见, 至 5 月底航槽内平均水深为 5.60 m, 与 2 月初相比淤积了 0.19 m; 至 7 月中旬, 航槽内平均水深为 5.44 m, 与 2 月初相比淤积了 0.35 m; 至 8 月底航槽内平均水深为 4.34 m, 航槽基本淤平, 最浅的地段(中间地段)水深仅 3.8~3.9 m, 与 2 月初相比淤积了 1.45 m; 至 9 月中旬, 航槽内平均水深为 4.30 m, 与 8 月份大体相同, 仅在航槽前半段比 8 月份多淤了 0.2~0.3 m; 至 11 月中旬航槽内水深变大, 平均为 4.45 m, 主要是因为淤积的浮泥密实所致. 7—8 月间泥沙回淤较快, 该时期瓯江上游没有大的流量过程, 最大流量仅 $2\,760\text{ m}^3/\text{s}$, 洪水来沙不大, 泥沙很快淤积可能与风浪有关, 7 月 16—20 日遇 5~6 级 SSW-S 风, 8 月 6—8 日受 SSW-S 风影响, 平均风力达 6~7 级.

2.2.2 拦门沙航道治理一期工程实施后(2005 年)拦门沙回淤分析 瓯江口进港航道一期治理工程包括航槽疏浚和北导堤两部分(图 3), 设计开挖高程为理论深度基准面以下 5.5 m, 超挖 0.6 m. 北导堤高程略高于中潮位, 可阻挡其三角沙风浪掀沙对拦门沙的影响, 该工程于 2005 年 2 月完工. 与此同时, 灵霓北堤也已建成, 堤顶出水, 可有效阻挡温州浅滩风浪掀沙对拦门沙的影响.

2005 年 1—9 月逐月进行了航槽水深测量, 其中在“海棠”台风前后(7 月 16 日和 27 日)进行了加测. 各测次航槽断面(140 m 航宽)平均水深变化见图 4. 可见, 至 5 月份, 航道水深变化相对较小, 航深约 6.0 m 左右, 除航道转折点前后局部回淤略大外, 航槽平均回淤仅 0.05 m. 至 6 月份回淤增大, 航槽平均水深约 5.7 m, 最浅处水深为 5.5 m, 与 1 月份相比航槽平均回淤 0.36 m, 淤积原因主要与上游径流量增加及开始出现大风有关, 5 月 23—28 日、6 月 19—24 日日日均流量均超过 $1\,000\text{ m}^3/\text{s}$, 最大达到 $5\,090\text{ m}^3/\text{s}$. 6 月末至 7 月中旬出现 SSW-S 大风天气, 平均风速约为 10 m/s , 航槽回淤较大, 至 7 月 16 日航槽平均水深为 5.4 m, 最浅处水深为 5.2 m, 航槽平均回淤 0.66 m. 7 月 19 日 5 号台风“海棠”期间, 该海域出现 ESE-ENE 大风, 最大风速 22.9 m/s , 平均风速约 16 m/s , 航槽出现较大淤积, 至 7 月 27 日航槽平均水深为 5.2 m, 最浅处水深为 5.0 m, 与 1 月份相比航槽平均回淤 0.94 m. 8 月 6 日 9 号台风“麦莎”和 9 月 1 日 13 号台风“泰利”对航槽回淤也有一定影响, 与 1 月份相比航槽平均回淤 1.10 和 1.21 m.

可见, 航槽回淤主要集中在大风期间, 一是 6 月末至 7 月中旬的 SSW-S 大风天气, 二是 7 月下旬的“海棠”台风及 8 月、9 月的“麦莎”“泰利”台风. 仅 6 月末至 7 月中旬大风期间航槽平均回淤了 0.30 m, 这期间上游径流量平均仅为 $320\text{ m}^3/\text{s}$, 主要是风浪引起的淤积, 乌仙头监测站垂线平均含沙量最大达 $1.3\sim 1.8\text{ kg/m}^3$, 另据监测资料分析, 该地区存在浮泥^[5], 浮泥淤积也是重要因素. “海棠”台风期间 8 d 时间拦门沙航槽平均回淤 0.44 m, 同时受台风引起的降雨影响, 圩仁流量为 $4\,950\text{ m}^3/\text{s}$, 乌仙头监测站垂线平均含沙量最大达 $2.5\sim 3.6\text{ kg/m}^3$, 该段时间的淤积主要是风浪引起的悬沙淤积、浮泥淤积及上游洪水来沙造成的淤积.

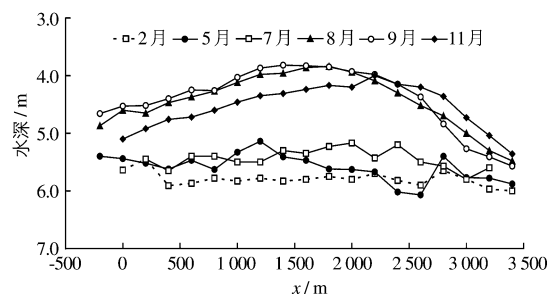


图 2 2002 年拦门沙航槽实测平均水深变化

Fig. 2 The measured average water depth along sand bar channel in 2002

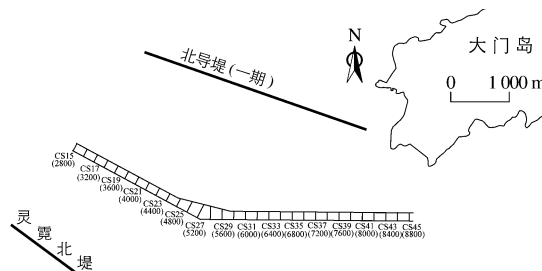


图 3 瓯江口拦门沙航道一期工程及回淤监测范围

Fig. 3 Layout of the first phase of sand bar channel regulation project in Oujiang estuary and sediment deposition monitoring range

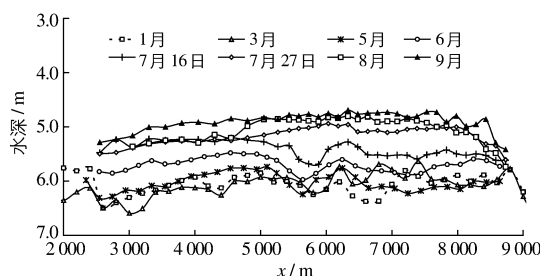


图 4 2005 年拦门沙航槽实测平均水深变化

Fig. 4 The measured average water depth along sand bar channel in 2005

对比一期工程实施前、后的航深图(图2和4)可知,在一期工程实施前,拦门沙开挖至-6 m时经过2—9月份风浪、洪水的淤积过程,开挖槽基本淤平,水深保持在4 m左右,最浅处仅3.8~3.9 m;而一期工程实施后,拦门沙开挖至-6.1 m后经过类似风浪、洪水的淤积过程,水深可保持在5 m左右,说明一期工程起到了明显的减淤作用,这主要与北导堤一期工程、灵霓北堤减少浅滩滩面的风浪掀沙进入拦门沙航槽以及导堤归顺水流作用有关。

2.2.3 拦门沙航道一期工程论证阶段预测结果与实测的比较 南京水利科学研究院于2003年对瓯江口拦门沙航道一期工程治理工程进行了研究^[6],采用数学模型预测了无风天、大风天、台风期间拦门沙航槽的回淤厚度。利用2005年航槽回淤监测资料可对数模的预测精度进行分析。预测的拦门沙航槽回淤厚度包括:(1)中水年无风天回淤厚度为0.48 m;(2)2002年7—8月风况作用下的回淤强度为0.49 m,包括风浪引起的悬沙、底沙及浮泥淤积,2002年7—8月出现2次5~7级SSW-S向大风,平均风速约为10 m/s,根据风速过程概化为前4 d为风浪掀沙作用期,后6 d为风浪作用衰减恢复期;(3)森拉克台风期间(两碰头)引起的骤淤厚度为0.48 m,包括风浪引起的悬沙、底沙及浮泥淤积。森拉克台风为NNE-N向风,平均风速为16.9 m/s,最大风速超过30 m/s。概化为该风连续作用2 d,有近8 d的恢复期。这样,预测计算的拦门沙航槽一年的回淤厚度为0.48 m(无风天)+0.49 m(2002年7—8月风况)+0.48 m(森拉克台风)=1.45 m。

从工程实施后实测资料分析来看,根据瓯江口来水来沙特性,2005年1—9月份包括了全年主要的大风天、洪水等水文气象条件,基本可代表拦门沙2005年全年主要的淤积情况。实测数据中无风天与大风天交织在一起,无法单独得到无风天回淤数据,本文根据总的回淤厚度减去大风天回淤厚度,得到2005年1—9月拦门沙航槽无风天回淤厚度为0.31 m,考虑到9月以后仍可能有一些淤积,推算得到全年回淤0.41 m,与预测的中水年全年无风天淤积厚度0.48 m较接近。2005年6月末至7月中旬出现的SSW-S向大风与预测时采用的2002年7—8月风况很接近;7月19日5号“海棠”台风与预测时采用的森拉克台风平均风速16.3~17.5 m/s也比较接近。实测大风及台风天拦门沙航槽平均回淤0.96 m,计算值为0.97 m(见表1)。总体来说,实测2005年1—9月拦门沙航槽平均回淤厚度为1.27 m,则推算得到2005年全年拦门沙航槽平均回淤1.37 m,与预测值1.45 m非常接近,说明模型精度较高,概化的无风天、大风天及台风过程具有一定的典型性,能代表瓯江口拦门沙航槽回淤的主要影响因素。

表1 一期工程论证阶段预测的拦门沙航槽回淤厚度与2005年实测回淤厚度的比较

Tab.1 Comparison of back silting thickness between the forecasted and measured values

m

工况	预测值	工况	2005年实测值
无风天	0.48	无风天(1—9月)*	0.31
2002年7—8月SSW-S向大风及森拉克台风(两碰头)等	0.97	无风天(全年)*	0.41
合 计	1.45	2005年6—7月SSW-S向大风及海棠台风(两碰头)等	0.96
		实测1—9月	1.27
		推算至全年*	1.37

注:“*”表示实测无风天(1—9月)回淤数据,根据总回淤厚度减去大风及台风回淤厚度得到,无风天全年的回淤厚度根据1—9月的淤积情况推算得到。

3 波浪与潮流共同作用下二维泥沙数学模型及其验证

通过前文拦门沙实测回淤分析可知,波浪和潮流的共同作用是瓯江口拦门沙泥沙运动和岸滩演变的主要动力。本文应用波浪与潮流共同作用下的二维泥沙数学模型进一步研究了拦门沙航道二期工程治理措施,该模型包括贴体正交曲线坐标系下水流运动方程、非均匀泥沙输移方程等^[2,7-8],初始条件给定计算网格点上水位、流速和含沙量初值,上游圩仁给定流量、含沙量过程线,动边界技术采用“冻结法”,这里仅给出关键问题的处理。计算所需波浪场由波浪数学模型提供^[9]。

3.1 几个关键问题的处理

3.1.1 底床冲淤判别条件 采用含沙量与挟沙能力对比的判别条件,即当 $S_L > S_{L*}$, 含沙量大于挟沙能力, 底床淤积; 当 $S_L \leq S_{L*}$, 且 $V \geq V_{CL}$ (V_{CL} 为起动流速), 底床冲刷. 起动流速采用唐存本公式^[10]: $V_{CL} =$

$\frac{m}{m+1} \left(\frac{h}{D_L} \right)^{1/m} \sqrt{3.2 \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} g D_L + \left(\frac{\gamma'}{\gamma_0} \right)^{10} \frac{C}{\rho D_L}}$, 其中: $m=6$, $C=2.9 \times 10^{-4} \text{ g/cm}$, ρ 为水的密度; γ'_0 为泥沙的稳定湿密度, 一般取 1.6 g/cm^3 ; γ' 为淤泥的实际湿密度, 与淤积历时有关, 随时间逐渐增大.

3.1.2 潮流与波浪挟沙能力 波浪与潮流联合作用下的各粒径泥沙挟沙能力为: $S^* = S_t^* + S_w^*$. 对于潮流挟沙能力 S_t^* , 引进前期 (或背景) 含沙量 S_0 的概念, 由实测含沙量与水力因子间的关系回归得到: $S_t^* =$

$k_0 V^2/h + S_0$. 对于波浪挟沙能力 S_w^* , 可采用窦国仁公式^[11]: $S_w^* = \alpha_0 \beta_0 \frac{\gamma \gamma_s}{\gamma_s - \gamma} \frac{H_w^2}{h T_w \omega}$. 其中: 在拦门沙地区, $k_0 = 0.102$, $S_0 = 0.069$, $\alpha_0 = 0.023$, $\beta_0 = 0.0004$.

3.1.3 浮泥流动及回淤强度估算 泥质海岸 (中值粒径 $< 0.01 \text{ mm}$) 大多存在浮泥流动, 如天津新港、连云港、珠海高栏港等. 瓯江口航道地区发现有浮泥, 平均厚度为 0.36 m , 最大厚度 1.1 m , 主要集中在航道转折段, 呈连片分布^[5]. 浮泥的形成及分布与大风天的风浪掀沙作用密切相关. 浮泥刚形成时, 湿密度很小, 仅为 1.05 t/m^3 , 一段时间后大部分流动的泥沙逐渐密实, 湿密度逐渐增大.

浮泥的单宽输沙率采用罗肇森的估算方法^[12]. 这样, 瓯江口航槽回淤计算包括 3 个部分: 一是基本无风天悬沙及底沙运动引起的冲淤; 二是大风天悬沙及底沙运动引起的回淤; 三是大风天浮泥运动引起的回淤.

浮泥的单宽输沙率可表述为: $q_{sf} = \frac{2kM_c T_w V_m}{L} \left(\frac{V_m^2}{V_c^2} - 1 \right) \sin \varphi$, 其中 M_c 为冲刷系数; V_c 为浮泥的起动流速, 由

于资料有限, 本文参照接近于本海区的珠海高栏港 -12.0 m 底高处淤泥 ($d_{50} = 0.007 \text{ mm}$) 资料, 取 $V_c = 0.010 2 \gamma_w^{13.6} h^{0.2}$, $M_c = 4.8 \times 10^{-3} \lambda_w^{-14.75} (\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}))$; L 为波长; T_w 为波周期; V_m 为波浪的平均轨道速度, 有潮流及风吹流时, 是各流速的绝对值之和; φ 为波浪速度方向与航道轴线间夹角; k 为浮泥输沙百分数, 与浮泥密度有关, 当 $\gamma_w \leq 1.2 \text{ t/m}^3$ 时, $k \leq 0.56$, 为安全计, 取 $k = 0.56$. 浮泥的淤积厚度为: $P_{sf} = \frac{q_{sf} T}{\gamma_0 B}$, 其中: B 为航道宽度; T 为作用时间; γ_0 为淤泥的干密度.

3.2 拦门沙航槽回淤的验证

采用新的水沙和边界条件对 2005 年瓯江口拦门沙航道回淤过程进行了验证. 以 2005 年 3 月竣工的地形为起始地形, 对瓯江上游 2005 年 3—7 月末的实测流量过程进行概化, 外海潮型采用 2005 年实测潮型, 包括了大中小潮. 6 月末至 7 月中旬出现的 SSW-S 向风, 概化为 10 m/s 风速作用时间为 4 d , 其后为衰减恢复期 6 d ; “海棠”台风期间概化为 16 m/s 风速作用时间为 2 d , 衰减恢复期为 8 d . 计算得到 3—7 月无风天悬沙及底沙引起的回淤厚度为 0.28 m ; SSW-S 向风期间计算的拦门沙转折点以上航槽回淤 0.34 m , 实测值为 0.35 m , 转折点以下航槽计算回淤 0.25 m , 实测值为 0.28 m , 计算值与实测值比较接近; 计算得到“海棠”台风期间航槽回淤 0.29 m , 接近于实测的 0.28 m . 概括来说, 计算得到 3—7 月末航槽回淤厚度为 0.28 m (无风天悬沙、底沙淤积) $+ 0.30 \text{ m}$ (6—7 月中旬风浪引起的悬沙、底沙回淤、浮泥回淤) $+ 0.29 \text{ m}$ (“海棠”台风期间风浪引起的悬沙、底沙回淤、浮泥回淤) $= 0.87 \text{ m}$, 与实测结果 0.90 m 很接近. 其中转折点以上航槽实测平均回淤 0.90 m , 计算值为 0.84 m , 转折点以下拦门沙航槽实测平均回淤厚度 0.91 m , 计算值为 0.92 m , 计算的淤积厚度及沿航线分布趋势与实测值比较见图 5.

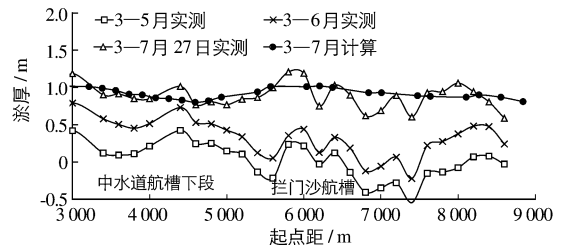


图 5 2005 年拦门沙航槽回淤厚度

Fig. 5 The measured and calculated back silting thickness along the sand bar channel in 2005

4 瓯江口进港航道治理二期工程航槽回淤研究

根据拦门沙航道一期整治工程前后回淤分析可知,影响拦门沙回淤的主要因素是风浪掀沙以及上游洪水来沙.借鉴一期整治工程的成功经验,二期工程整治思路为疏浚与整治工程相结合,归顺水流,进一步限制三角沙泥沙来源.在多组方案比选的基础上形成如图6所示的整治方案,即延长、加高北导堤并实施三角沙西堤、东封堵堤,堤顶出水.为分析工程效果,研究了纯挖槽(疏浚至理论基面7.0 m)、纯挖槽基础上实施整治工程后的航槽回淤情况.

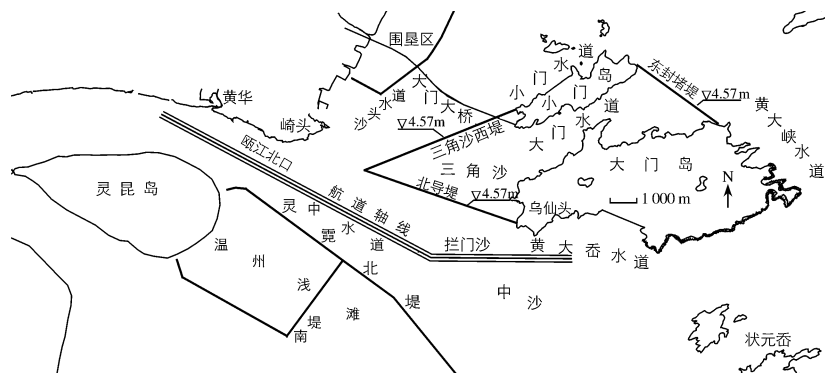


图6 瓯江口拦门沙航道二期整治工程

Fig. 6 Layout of proposed scheme of the second phase of sand bar channel regulation project in Oujiang estuary

4.1 正常水文条件下的回淤强度

2002年垵仁站平均流量为 $465 \text{ m}^3/\text{s}$,与实测站多年平均流量 $446 \text{ m}^3/\text{s}$ 很接近,选择2002水文年的来水过程作为中水年的流量过程,全年流量过程概化为240,446,1000,2000和3000 m^3/s 共5个流量级.口外采用经过验证的大、中、小潮不同潮型组合.若仅挖槽,转折点以上拦门沙航槽无风天年回淤强度为0.29 m,转折点以下为0.34 m,主要是洪水期间的淤积;考虑实施整治工程后,转折点以上拦门沙航槽年回淤强度为0.24 m,回淤厚度减小17.2%,主要因为三角沙导堤实施后该段流速增加所致;转折点以下拦门沙航槽年回淤强度为0.35 m,与纯挖槽方案相比变化不大,主要是因为整治实施后该段潮流动力变化不大.

2002年7—8月、2005年6—7月均出现了SSW—S大风天气,平均风速约为10 m/s左右,2次风浪均造成了航槽大量回淤.从前文2次实测资料来看,SSW—S大风天气在该海域应该是很常见的,并且连续出现,采用该风况作为平常大风天进行航槽的回淤预测是比较符合实际的.风浪概化条件与验证时一致.若仅挖槽,转折点以上航槽悬沙、底沙回淤厚度为0.28 m,浮泥回淤厚度为0.14 m,合计0.42 m;整治工程实施后航槽悬沙、底沙淤积0.17 m,浮泥淤积0.14 m,合计0.31 m,较纯挖槽少回淤28.6%,主要是三角沙导堤对三角沙海域的风浪掀沙有一定的阻挡作用.若仅挖槽,转折点以下拦门沙航道悬沙、底沙淤积厚度平均为0.27 m,浮泥淤积厚度为0.10 m,合计0.37 m;整治工程实施后悬沙、底沙使航槽淤积了0.18 m,浮泥淤积了0.08 m,共淤积了0.26 m,较纯挖槽少回淤29.7%.

概括中水年与平常大风天(2005年6—7月风况)作用下的年回淤强度(图7(a)),纯挖槽方案、整治工程实施后转折点以上航槽平均回淤强度分别为0.71和0.55 m,转折点以下分别为0.71和0.61 m,整治工程的减淤幅度为14.1%~23.9%.从航槽回淤分布来看,转折点附近回淤相对较大.无风天时转折点以下航槽回淤略大,主要是该段航槽与涨落流向有 $15^\circ \sim 20^\circ$ 的偏角,水流斜跨航槽,泥沙易在此处落淤,而转折点以上航槽走向与潮流方向基本一致.

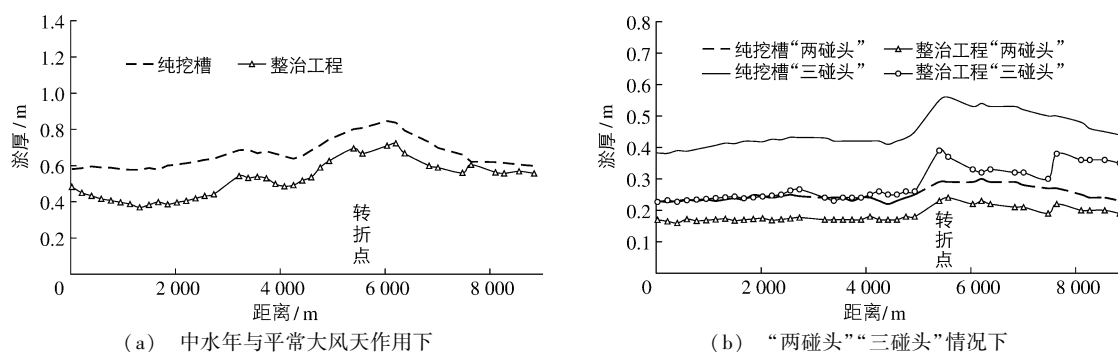


图 7 各工况下沿航槽轴线回淤强度分布

Fig. 7 Distribution of back silting thickness along the channel axis

4.2 航槽骤淤计算

骤淤计算采用对瓯江口影响较大的森拉克台风与口外大潮、上游洪水组合。森拉克台风为 NNE-N 向风,平均风速为 16.9 m/s,最大风速超过 30 m/s。根据实测风速过程,概化为该风连续作用 2 d,但泥沙掀起后在水中悬浮,有近 8 d 的恢复期,在这 8 d 中悬沙大量落淤。

图 7(b) 为“两碰头”情况下沿航槽轴线回淤强度分布,即台风与口外实测大潮遭遇。纯挖槽方案、整治工程方案实施后转折点以上航槽骤淤强度分别为 0.25 m 和 0.18 m,整治工程使骤淤强度减小了 28.0%;转折点以下航槽分别为 0.30 m 和 0.23 m,整治工程使骤淤强度减小了 23.3%。

“三碰头”即为森拉克台风与口外大潮、上游 5 年一遇流量 ($13\,600\text{ m}^3/\text{s}$) 相遇,图 7(b) 给出了“三碰头”情况下沿航槽轴线回淤强度分布。纯挖槽方案、整治工程方案实施后转折点以上航槽骤淤强度为 0.42 m 和 0.27 m,整治工程使骤淤强度减小了 35.7%;转折点以下航槽骤淤强度分别为 0.54 m 和 0.37 m,三角沙围堤进一步减少了三角沙海域泥沙来源,使得航槽回淤较纯挖槽方案减小 28.9%,整治效果比较明显。

5 结 语

根据实测资料,分析了瓯江口拦门沙航道自然状态下、一期整治工程实施后泥沙回淤情况,研究表明影响拦门沙回淤的主要因素为周边滩面上的风浪掀沙和上游洪水来沙。拦门沙整治一期工程论证阶段数学模型研究预测值与实测值的比较表明,模型的控制条件、水文条件的组合是合理的。在进一步回淤验证的基础上,应用波流共同作用下的二维泥沙数学模型进行了拦门沙航道二期整治工程在无风天及 SSW-S 向大风天情况下的回淤,“两碰头”(台风与口外大潮相遇)、“三碰头”(台风、口外大潮及上游洪水相遇)情况下的骤淤研究。研究表明,二期整治工程正常水文条件时的减淤幅度为 14.1%~23.9%,台风期骤淤的减淤幅度为 23.3%~35.7%,具有明显的工程效果。

参 考 文 献:

- [1] 王颖,朱大奎. 海岸地貌学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1991. (WANG Ying, ZHU Da-kui. Coastal geomorphology[M]. Beijing: Higher Education Press, 1991. (in Chinese))
- [2] 陆永军,李浩麟,王红川,等. 强潮河口拦门沙航道回淤及治理措施[J]. 水利学报, 2005, 36(12): 1450-1456. (LU Yong-jun, LI Hao-lin, WANG Hong-chuan, et al. Back silting and regulation of waterway with sand bar in strong tidal estuary [J]. Journal of Chinese Hydraulic Engineering, 2005, 36(12): 1450-1456. (in Chinese))
- [3] 李浩麟,王顺中,徐群. 瓯江口外拦门沙演变及治理措施研究[J]. 水利水运科学研究, 1992(1): 11-24. (LI Hao-lin, WANG Shun-zhong, XU Qun. Study of evolution and regulation for outside sand bar of Oujiang estuary[J]. Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute, 1992(1): 11-24. (in Chinese))

- [4] 王顺中,李浩麟. 瓯江口拦门沙航道回淤分析[J]. 水利水运工程学报, 2006(3): 18-24. (WANG Shun-zhong, LI Hao-lin. Back silting analyses of sandbar-dotted waterway in Oujiang River estuary[J]. Hydro-Science and Engineering, 2006(3): 18-24. (in Chinese))
- [5] 南京水利科学研究所. 用 γ -射线方法观测瓯江口航道治理一期工程后和乐清湾港区浮泥容重分布[R]. 南京: 南京水利科学研究所, 2005. (Nanjing Hydraulic Research Institute. Distribution of fluid mud density after the first phase channel regulation project in Oujiang estuary and Yueqing Port using γ -ray method[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2005. (in Chinese))
- [6] 陆永军,李浩麟. 瓯江口航道治理工程二维潮流波浪泥沙数学模型初步研究[R]. 南京: 南京水利科学研究所, 2003. (LU Yong-jun, LI Hao-lin. Study on 2D tidal current and sediment mathematical model for channel regulation in Oujiang estuary [R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2003. (in Chinese))
- [7] LU Yong-jun, ZUO Li-qin, SHAO Xue-jun, et al. A 2D mathematical model for sediment transport by waves and tidal currents [J]. China Ocean Engineering, 2005, 19(4): 571-586.
- [8] 陆永军,左利钦,王红川,等. 波浪与潮流共同作用下二维泥沙数学模型[J]. 泥沙研究, 2005(6): 1-12. (LU Yong-jun, ZUO Li-qin, WANG Hong-chuan, et al. Two-dimensional mathematical model for sediment transport by waves and tidal currents[J]. Journal of Sediment Research, 2005(6): 1-12. (in Chinese))
- [9] 王红川,左其华. 不规则波折射、绕射共同数值计算[J]. 水运工程, 1996(7): 1-6. (WANG Hong-chuan, ZUO Qi-hua. Numerical simulation for propagation of irregular waves combined refraction and diffraction[J]. Port & Waterway Engineering, 1996(7): 1-6. (in Chinese))
- [10] 唐存本. 泥沙起动规律[J]. 水利学报, 1963(2): 1-12. (TANG Cun-ben. Incipient motion of sediment[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1963(2): 1-12. (in Chinese))
- [11] 窦国仁,董凤舞. 潮流和波浪的挟沙能力[J]. 科学通报, 1995, 40(5): 443-446. (DOU Guo-ren, DONG Feng-wu. Sediment carrying capacity by tidal currents and waves[J]. Chinese Science Bulletin, 1995, 40(5): 443-446. (in Chinese))
- [12] 罗肇森,罗勇. 浮泥挟沙力和输沙规律的研究和应用[J]. 泥沙研究, 1997(4): 42-46. (LUO Zhao-sen, LUO Yong. Study on fluid mud-carrying capacity, sediment transport and their application[J]. Journal of Sediment Research, 1997(4): 42-46. (in Chinese))

Further study on back silting and regulation of mouth bar in Oujiang estuary

ZUO Li-qin, LU Yong-jun, LI Hao-lin

(State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: Siltation under natural conditions and after implementation of the first stage of regulation projects of the mouth bar in the Oujiang estuary is analysed. The results show that the back-silting in the mouth bar is mainly influenced by wave-induced sediment suspension and flood from upstream. Based on verification, a 2D sediment mathematical model under the co-action of waves and tidal currents is employed to study the second stage regulation project of the mouth bar channel. Then the back silting in navigation channel under normal hydrological conditions and the sudden siltation due to typhoon are further predicted. The regulation projects can reduce wave-induced sediment concentration and adjust tidal flow in the mouth bar channel. Back silting in the channel can be reduced by 14.1% ~ 23.1% under normal hydrological conditions, and by 23.3% ~ 35.7% in typhoon days.

Key words: mouth bar; siltation; waterway regulation; Oujiang estuary