

文章编号:1000-5641(2013)04-0106-14

长江口横沙浅滩挖入式港池方案泥沙回淤估算

葛建忠¹, 金 鏐², 丁平兴¹, 邵荣顺³, 虞志英¹, 郭文云¹

- (1. 华东师范大学 河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062;
2. 交通运输部长江口航道管理局, 上海 200003;
3. 中交第三航务工程勘察设计有限公司, 上海 200032)

摘要: 针对横沙浅滩挖入式港池建设和维护中核心的泥沙回淤问题, 本文采用海港水文规范、底切应力公式和纳潮总量估算等多种不同方法对横沙挖入式港池规划方案中的港池和外航道泥沙回淤问题进行预估, 其结果较为一致. 若港池出口位于 -7 m 泥沙浓度 0.3 kg/m^3 的区域, 港池年回淤量约为 $2\ 000\text{ 万} \sim 2\ 200\text{ 万 m}^3$, 平均回淤强度约为 $0.3 \sim 0.4\text{ m/a}$; 外航道平均淤积强度约为 $0.3 \sim 0.4\text{ m/a}$, 年回淤 $600\text{ 万} \sim 1\ 200\text{ 万 m}^3$. 且回淤分布主要集中在近靠港池口 $4 \sim 6\text{ km}$ 的区域. 计算表明, 港池口若设于泥沙浓度更低的深水区域, 泥沙回淤将显著降低.

关键词: 挖入式港池; 横沙浅滩; 泥沙回淤

中图分类号: P751 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1000-5641.2013.04.010

Estimation of the sediment siltation in the planned excavated-in harbor in the Hengsha Shoal of the Yangtze Estuary Estuary

GE Jian-zhong¹, JIN Liu², DING Ping-xing¹, SHAO Rong-shun³,
YU Zhi-ying¹, GUO Wen-yun¹

- (1. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China; 2. Administration Bureau of Navigation Channels in Yangtze Estuary, Ministry of Transportation, Shanghai 200003, China;
3. CCCC Third Harbor Consultants, Shanghai 200032, China)

Abstract: Several different methods, including algorithm of siltation estimation in state regulation of port and waterway, bottom shear stress model and tide prism estimation, were used to make prediction for sedimentation siltation in the proposed excavated-in harbor, which would be located in the Hengsha Shoal to improve the shipping capacity in the Changjiang Estuary. The results from these methods turns out to be consistent. The overall load and strength of sediment siltation for condition of basin gate at -7 m depth and 0.3 kg/m^3 sediment concentration is $2.0 \times 10^7 \sim 2.2 \times 10^7\text{ m}^3$ and $0.3 \sim 0.4\text{ m/a}$ in the basin and $0.6 \times 10^7 \sim 1.2 \times 10^7\text{ m}^3$ and $0.3 \sim 0.4\text{ m/a}$ in outer shipping channel. And the maximum siltation mainly centralizes near the basin gate

收稿日期:2013-04

基金项目:华东师范大学河口海岸学国家重点实验室自主课题

第一作者:葛建忠,男,助理研究员,研究方向为河口海岸流体动力学. E-mail: jzge@sklec.ecnu.edu.cn.

通信作者:丁平兴,男,教授,博导,研究方向为陆海相互作用. E-mail: pxding@sklec.ecnu.edu.cn.

with a distance of 4~6 km. And the prediction indicates the siltation will be significantly decreased if the basin gate moves deeper with lower suspended sediment concentration.

Key words: excavated-in harbor; Hengsha Shoal; siltation

0 引言

我国大陆海岸线长超过 18 000 km,海岸类型众多,是我国发展航运的重大基础。而海岸的物质组成也在一定程度上影响了当地航运条件。根据海岸泥沙运动的性质可将海岸分为基本稳定平衡型、侵蚀型和淤积型。对于没有大量河流泥沙输入的海域主要呈现稳定平衡型;在输沙河口附近多属淤积型海岸^[1]。在漫长的海岸线当中,有 4 000 km 以上的淤泥质海岸,分布在长江、黄河、钱塘江、海河等河流入海口的冲积平原地区。而在此类海域,径流和潮流交汇,流场异常复杂;咸淡水混合,平面和垂向梯度大且变化迅速,引起泥沙复杂的絮凝。复杂的流场、波浪场、泥沙和地形的相互作用塑造了滩槽交错的复杂地貌形态。人工开挖的港池航道往往有泥沙回淤的问题。

长江口地处长江冲淡水和东海潮波相互作用的区域,河流泥沙供给充足,潮流作用显著,风浪引起的泥沙冲刷和淤积都较为明显,冲淡水混合引起的泥沙絮凝也加剧了泥沙沉降。因此长江口有非常显著的泥沙淤积情况,在长江口主要港区和航道都受到了泥沙回淤的显著影响,例如外高桥新港区岸段的强烈淤积^[3],长江口深水航道一至三期工程后持续的泥沙回淤^[4-6]。

对于上海国际航运中心横沙浅滩挖入式港池规划方案的前期研究来说,必须对泥沙回淤进行细致研究,对挖入式港池的进沙量、港内泥沙浓度、回淤强度分布和总回淤量须根据方案布置、水文泥沙条件等进行预测。

本文在历次水文泥沙调查资料的基础上,采用我国海港水文规范建议的挟沙能力方法和水流切应力方法等多种方法,对挖入式港池和外航道的泥沙回淤强度、分布及回淤量进行估算。

1 回淤公式的选取

横沙浅滩挖入式港区主要由挖入式内港池及外侧深水航道组成,由于这两部分动力条件、泥沙供给方式不同,需要分开进行计算。

为便于比较,本报告采用多种方法估算回淤量。其中对于挖入式港池,分别采用《JTJ 213-98 海港水文规范》附录 N-淤泥质海岸港池的淤积计算公式、底切应力计算模式^[7]和曹祖德^[8]近期提出的计算公式;对于外侧航道,分别按海港水文规范推荐的挟沙能力公式及底切力模式两种方法计算。

1.1 海港水文规范港池回淤计算公式(刘家驹公式^[2])

按《JTJ 213-98 海港水文规范》附录,对基本处于冲淤平衡状态的淤泥质浅滩水域中开挖的港池,其年淤积强度按下式计算:

$$P_2 = \frac{K_0 \omega S_1 t}{\gamma_0} \left\{ 1 - \left(\frac{d_1'}{d_2'} \right)^3 \right\} \exp \left[\frac{1}{2} \left(\frac{A}{A_0} \right)^{1/3} \right]. \quad (1)$$

式中, P_2 为航道底面的年淤积厚度(m); ω 为细颗粒泥沙的絮凝沉降速度(m/s); K_0 为经验

系数,在缺少现场资料的情况下,可取 $0.14 - 0.17$; S'_1 为相应于口门处平均水深 d'_1 水域的平均含沙量(kg/m^3); d'_1 、 d'_2 为分别代表港口口门外一定范围水域的平均水深和港池开挖后的水深(m); A 为港池内水下浅滩的水域面积(m^2); A_0 为包括港池和港内的水下浅滩的港池内总水域面积(m^2).

对于大型挖入式港池,考虑到进港浑水沿程落淤引起港内含沙量的变化,回淤计算应从口门向里分区块进行.

1.2 底切力模式港池回淤计算方法(金鏐-虞志英方法^[8])

该方法考虑大型半封闭挖入式港池浑水纳潮进港过程中流速及含沙量的沿程变化,港内外含沙量差引起的斜压效应以及在涨潮、落潮过程中的淤积、冲刷及其综合作用,给出港池区域回淤强度的分布.基本原理与方法如下.

如在海湾内的潮波计算中不计摩擦和地转效应,则谐振动波长 $\lambda_{M_2} = T_{M_2}(gh)^{\frac{1}{2}}$, T_{M_2} 为 M_2 分潮周期, h 为平均水深,取 $h = 8 \text{ m}$,得 $\lambda_{M_2} = 400 \text{ km}$,远超海湾长度,即驻波的振动节线在湾外,潮差 Δh 沿纵向不变.通过口门内 x 断面涨潮期间进入的水量为 A_x ,有

$$A_x = \Delta h(l - x). \quad (2)$$

该断面处涨潮流断面平均流速 u_f ,有

$$u_f = \frac{\Delta h(l - x)}{H \cdot T_f}. \quad (3)$$

其中, H 为平均潮位下水深, T_f 为涨潮历时, l 为港池纵向长度.

(1) 浑水密度梯度引起的流动

考虑一端封闭,一端与主河相接的支河.主河为浑水,由于主、支河间的密度梯度,将发生从主河向支河的浑水入侵,范家骅^[10]给出入侵速度在支河入口处为

$$v_0 = 0.65 \sqrt{\frac{\Delta \rho}{\rho} g h'}. \quad (4)$$

其中, h' 为总水深的 $1/2$, $\Delta \rho$ 为主、支河密度差.从口门向里,入侵速度递减:

$$v = v_0 \frac{e^{-\frac{\lambda x}{8h}} + \frac{8v_\eta}{\lambda v_0}}{1 + \frac{8v_\eta}{\lambda v_0}}. \quad (5)$$

式中, $\lambda \approx 0.03$; $v_\eta = 0.02 S_0^{-\frac{2}{3}}$, 为垂向速度, S_0 为进口断面含沙量(kg/m^3).

潮汐引起的流动和密度梯度引起的流动合成为挖入式港池内的实际流速.后面的计算表明,密度梯度引起的流动在合成流速中的比重随港池纵向尺度增加而减小.

(2) 水流切应力和动量交换系数

在二维性质明显的潮流运动中,大部分时间内流速的垂向分布符合对数分布,窦国仁^[11]给出垂线平均流速 \bar{u} 与摩阻流速 u_* 的换算关系:

$$\frac{\bar{u}}{u_*} = 2.5 \ln \left(\frac{H}{\Delta} \right). \quad (6)$$

当粒径 $d \leq 0.5 \text{ mm}$ 时,床面粗糙度 Δ 可取 1 mm .当平均水深 $H = 8 \text{ m}$ 时,有 $u_* \approx 0.045 \bar{u}$,摩阻流速 $u_* = \sqrt{\frac{\tau_b}{\rho}}$, τ_b 为床面水流切应力.

水流的动量交换系数 ϵ , 许多研究给出 $\frac{\epsilon}{Hu_*} = \mu\eta(1-\eta)$, $\eta = \frac{Z}{H}$ 为相对水深. 所以,

$$\bar{\epsilon} = \int_0^1 \epsilon d\eta = 0.0695u_*H. \quad (7)$$

在潮周期中, 当摩阻流速小于泥沙的淤积临界摩阻流速 u_{*i} 时, 发生淤积. 以性质较为相似的连云港淤泥所得实验值作为参考: $u_{*i} = 0.7 \text{ cm/s}$. 取 $H = 8 \text{ m}$, 算得 $\bar{\epsilon} = 0.0695 \times \frac{1}{2} u_{*i} \times 8 = 19.4 \text{ cm}^2/\text{s}$.

(3) 海湾淤积的物理过程

挖入式港池内的净淤积是一潮中淤积量和冲刷量的差值. 由于一潮中进入港区的泥沙量与纳潮量有关, 因此, 港区的净淤积量及其在港区内的分布, 可以用沉沙率及其分布来表示.

(i) 一潮中的冲淤历时

在切应力模式中, 当 $u_* \geq u_{*c}$ 期间, 沉积物发生冲刷; 在 $u_* \leq u_{*i}$ 期间发生淤积, 在 $u_{*i} < u_* < u_{*c}$ 期间不冲不淤. 由此得到一全潮中的淤积历时 $T_{\text{淤}}$ 和 $\frac{1}{2}$ 全潮内冲刷历时 $T_{\text{冲}}$ 分别为

$$T_{\text{淤}} = \frac{4}{\sigma} \arcsin \left[\left(\frac{H_2}{H_1} \right)^{\frac{7}{6}} \cdot \frac{u_{*i}}{u_{*0,\text{滩}}} \right], \quad (8)$$

$$T_{\text{冲}} = \frac{\pi}{\sigma} - \frac{2}{\sigma} \arcsin \left[\left(\frac{H_2}{H_1} \right)^{\frac{7}{6}} \cdot \frac{u_{*c}}{u_{*0,\text{滩}}} \right]. \quad (9)$$

式中, $\sigma = 29^\circ/\text{hr}$ 为潮波圆频率; $u_{*0,\text{滩}}$ 为开挖水域周边自然滩面的水流摩阻流速峰值; H_2 和 H_1 分别为挖槽和天然滩面平均水位下水深.

(ii) 涨潮流期间即挖入式港区纳潮期间的淤积过程

涨潮流期间, 浑水进入港区. 由于港区内各断面水力条件不同, 各断面的涨潮流平均含沙量也不同. 这种不同, 可概括为三种过程的综合: 一是近底含沙量的沿程变化, 它产生于 $T_{\text{淤}}$ 期间, 从前一断面到后一断面水流经过的时段 ΔT ; 二是某一计算断面淤积开始时的垂线含沙量分布在经历 $T_{\text{淤}}$ 后的变化; 三是 $u_* > u_{*c}$ 即 $T_{\text{冲}}$ 期间的冲刷. 具体分述如下.

挖入式港区口门处主流涨潮流阶段平均含沙量分布可表示成

$$S = S_a \exp \left(-\frac{\omega Z}{\epsilon} \right). \quad (10)$$

其中, S_a 为临底含沙量, Z 为离底高度, ϵ, ω 如前述. 垂线平均含沙量

$$\bar{S} = S_0 \int_0^1 \exp \left(-\frac{\omega Z}{\epsilon} \eta \right) d\eta = \frac{S_a \epsilon}{\omega H} \left[1 - \exp \left(-\frac{\omega H}{\epsilon} \right) \right]. \quad (11)$$

a) 从上一断面到下一断面临底含沙量 S_a 的变化

涨潮流水体从 x_1 断面到 x_2 断面, 历时 ΔT 与该区段内平均流速有关,

$$\Delta T = \frac{x_2 - x_1}{\frac{1}{2}(u_2 + u_1)}.$$

考虑泥沙以同样的沉速下沉, 则 x_2 处的临底含沙量 S_{a2} 可认为等于 x_1 断面处临底高度 $Z = \omega \cdot \Delta T$ 上的含沙量, 即

$$S_{a2} = S_{a1} \exp \left(-\frac{\omega^2 \cdot \Delta T}{\epsilon} \right). \quad (12)$$

b) 港区内各断面的含沙量

港区内任一断面涨潮流期间淤积开始时刻的临底含沙量为 S_{a,t_0} , 其垂线平均含沙量 \bar{S}_{t_0} 可由式(11)表示. 该断面从淤积开始经历 $T_{淤}$ 后的临底含沙量

$$S_{a,t_1} = S_{a,t_0} \cdot \exp\left(-\frac{\omega^2 \cdot T_{淤}}{\epsilon}\right). \quad (13)$$

t_1 时刻的垂线平均含沙量

$$\bar{S}_{t_1} = S_{a,t_1} \cdot \frac{\epsilon}{\omega H} \left[1 - \exp\left(-\frac{\omega H}{\epsilon}\right)\right]. \quad (14)$$

进而可计算 $t_2 \rightarrow t_3$ 期间的平均含沙量, 并用类似方法递推之后各时段.

由港区内各断面涨潮流期间的平均含沙量和流速, 可得断面输沙量, 从而得到相邻断面间的淤积量.

c) $T_{冲}$ 内的冲刷量

在 T_f 内当 $u_* > u_{*c}$ 期间, 沉积物将发生冲刷, 通常是在 $T_{淤}$ 期间暂时落淤尚未明显密实的淤泥重新扬起. 单位面积的冲刷量 E' 为

$$E' = M \left[\left(\frac{u_{*0}}{u_{*c}} \right)^2 - 1 \right] \cdot T_{淤}. \quad (15)$$

d) 落潮流期间的淤积量和全潮沉沙率

由于所论港区假定涨、落潮历时相差不大, 即 $T_f \approx T_e$, 所以落潮流期间的水流摩阻流速过程与涨潮流相仿, 只是提供淤积的水体含沙量少了. 因此, 近似地采用 T_f 期间的沉沙率 k_f , 即 $k_e \approx k_f$. 沉沙率 k 定义为

$$k_f = \frac{T_f \text{ 内净淤积量}}{T_f \text{ 内口门总进沙量}},$$

$$k_e = \frac{T_e \text{ 内净淤积量}}{T_f \text{ 内口门总进沙量} - T_f \text{ 内净淤积量}},$$

潮内总淤积率(沉沙率)

$$k = \frac{T_f \text{ 内净淤积量} + T_e \text{ 内净淤积量}}{T_f \text{ 内口门总进沙量}}. \quad (16)$$

1.3 纳潮进沙沉沙率计算方法(曹祖德经验公式^[9])

对于双堤环抱式港池, 曹祖德提出考虑纳潮进沙后的悬沙落淤, 其淤积公式如下式表示:

$$Q = n \frac{A_0 h_{\Delta} S_0}{\gamma_c} \eta. \quad (17)$$

式中, Q 为港内全年淤积量(m^3); n , 全年进港的潮个数, 半日潮海区, $n = 706$; A_0 为港内总水域面积(m^2); h_{Δ} —全年平均潮差; S_0 —口门处年平均含沙量; γ_c 为港内淤积物干容量(kg/m^3); η 为经验沉沙率.

1.4 海港水文规范航道回淤计算公式(刘家驹公式^[2])

按《JTJ 213-98 海港水文规范》附录, 在冲淤平衡状态下的淤泥质浅滩水域中开挖的航道, 其年回淤强度按下式计算:

$$P_1 = \frac{\omega S_1 t}{\gamma_0} \left\{ K_1 \left[1 - \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^3 \right] \sin \theta + K_2 \left[1 - \frac{1}{2} \frac{d_1}{d_2} \left(1 + \frac{d_1}{d_2} \right) \right] \cos \theta \right\}. \quad (18)$$

式中, P_1 为航道底面的年淤积厚度(m); ω 为细颗粒泥沙的絮凝沉降速度(m/s); S_1 为相应于平均水深 d_1 的浅滩水域的平均含沙量(kg/m^3); t 为淤积历时(s); γ_0 为淤积物的干密度(kg/m^3); K_1, K_2 为分别为横流和顺流淤积系数,在缺少现场资料的情况下,可取 K_1 为0.35, K_2 为0.13; d_1, d_2 为分别为浅滩平均水深和航道开挖后的水深(m); θ 为航道走向与水流流向之间的夹角($^\circ$).

1.5 底切力模式航道回淤计算方法

根据金缪等研究^[7],淤泥质海岸浅滩上开挖港池航道后,其回淤量主要取决挖槽区域的水动力条件、供沙条件及泥沙特性、地形和开挖尺度等因素,回淤计算公式的确定应主要考虑这些因素并根据冲淤物理过程构造半经验半理论经验公式,即在一个全潮过程中,当水流切应力(以底切 τ_b 力或者摩阻流速表示)低于泥沙的淤积切应力 τ_c (或淤积临界摩阻流速)时发生落淤,高于沉积物的冲刷临界切应力 τ_c (或冲刷临界摩阻流速)时则发生冲刷和悬扬.在淤泥质海床条件下,冲刷率与沉积物的固结状态有关.挖槽与相邻滩地相比,全潮内水动力降低,淤积历时加长且淤积率增大,冲刷历时缩短,冲刷率减小,从而导致开挖后港池和航槽的回淤.将潮流过程概化为正弦曲线并认为滩、槽单宽流量相等,计算模式为:

1/4 全潮内淤积历时 $T_{\text{槽}}$,

$$T_{\text{槽}} = \frac{1}{\sigma} \sin^{-1} \left[\left(\frac{h_{\text{槽}}}{h_{\text{滩}}} \right)^{7/6} \frac{u_{*1}}{u_{*0}} \right]; \quad (19)$$

1/2 全潮内冲刷历时 $T'_{\text{槽}}$,

$$T'_{\text{槽}} = \frac{\pi}{\sigma} - \frac{2}{\sigma} \sin^{-1} \left[\left(\frac{h_{\text{槽}}}{h_{\text{滩}}} \right)^{7/6} \frac{u_{*1}}{u_{*0}} \right]; \quad (20)$$

1/4 全潮挖槽内淤积量 D_t ,

$$D_t = S_{\text{滩}} \cdot h_{\text{槽}} \left[\frac{1 - \exp\left(-\frac{\omega^2 T_{\text{槽}}}{\epsilon_s}\right)}{\left(-\frac{\omega}{\epsilon_s} h_{\text{槽}}\right)} \right]; \quad (21)$$

1/2 全潮内挖槽冲刷量 E ,

$$E = M \left[\left(\frac{u_{*0\text{槽}}}{u_{*c}} \right)^2 - 1 \right] \cdot T'_{\text{槽}}; \quad (22)$$

全潮挖槽回淤量 = $4D_t - 2E$. (23)

上述各式中, σ —潮波圆频率; $h_{\text{槽}}, h_{\text{滩}}$ —挖槽及两侧滩地平均潮位下水深; u_{*t} —悬沙淤积临界摩阻流速; K —挖槽走向及主流向不一致时挖槽流速折减系数,此处 $k = 1$; u_{*0} —一周期内挖槽附近滩面水流峰值摩阻流速; u_{*c} —挖槽内沉积物的起动摩阻流速; $S_{\text{滩}}$ —挖槽所在海床或海滩的水体含沙量; ϵ_s —水体含沙量垂线分布中的垂向泥沙交换系数; ω —细颗粒泥沙的絮凝沉速; M —沉积物的冲刷系数; $u_{*0\text{槽}}$ —挖槽内水流摩阻流速,与挖槽相对深度和水流夹角有关, $u_{*0\text{槽}} = u_{*c} / \left(\frac{h_{\text{槽}}}{h_{\text{滩}}} \right)^{7/6}$.

2 挖入式港池的回淤估算

2.1 海港水文规范公式计算港池回淤

有关计算参数设置如下: ω 为细颗粒泥沙的絮凝沉降速度(m/s),取 0.0004 m/s ; K_0 为经验系数,取 0.14 ; S'_1 为相应于口门处平均水深 d'_1 范围内水域的平均含沙量(kg/m^3),取 -7 m 处年平均含沙量为 0.3 kg/m^3 ; d'_1 、 d'_2 为港口口门外一定范围水域的平均水深和港池开挖后的水深,分别取 7 m 和 23 m ; A 为港池内水下浅滩的水域面积(m^2),考虑港池内全部挖深,没有浅滩,因此该值取 0 ; A_0 为港池内总水域面积,包括港池和港内的水下浅滩(m^2),南线方案 60 km^2 ,北线方案 68 km^2 。

横沙浅滩挖入式港池为水域面积超大的现代大型港口,可设计多种类型港池,根据初步规划港内具有较深的矿石及原油码头和较浅的散货码头.因此需要分区域进行不同港池的回淤计算.对于港内不同港池的回淤计算,仍采用经验公式(1),但要分区进行,根据分区特点,可写为如下形式:

$$P_{b(i+1)} = \frac{K_0 S_{(i+1)} \omega t}{\gamma_0} \left[1 - \left(\frac{h_1}{h_{2(i+1)}} \right)^3 \right] \exp \left[\frac{1}{2} \left(\frac{A_{(i+1)}}{A_{0(i+1)}} \right)^{1/3} \right], \quad (23)$$

$$S_{i+1} = S_i - \frac{(A_{0i} - A_i) P_{bi} \gamma_0}{(A_0 - \sum A_{0i}) \Delta H N}, \quad i = 0, 1, 2, \dots. \quad (24)$$

式中, S_{i+1} 为计算第 $i+1$ 港池单元的含沙量; $h_{2(i+1)}$ 为第 $i+1$ 港池单元的开挖水深; A_{i+1} 、 $A_{0(i+1)}$ 分别代表第 $i+1$ 港池单元的浅滩水域面积和该单元总水域面积, ΔH 为平均潮差; N 为相应淤积历时内的潮数。

港池水域划分如图1所示,主要分为主槽及航道区域及边侧的港池区域。

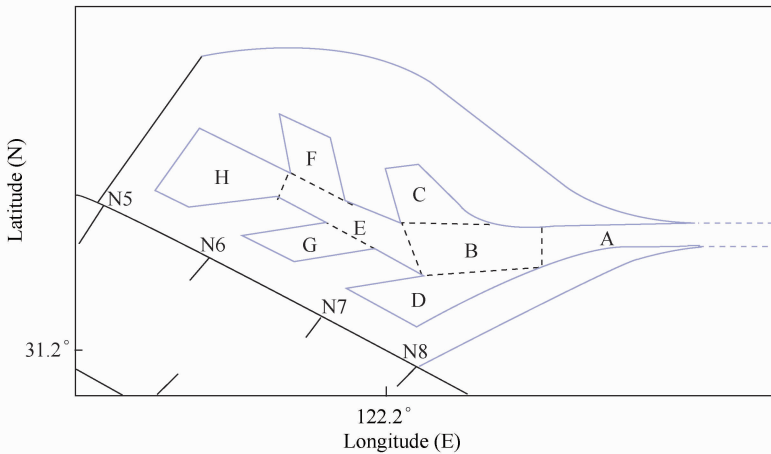


图1 横沙浅滩挖入式港池内区域划分

Fig. 1 Domain decomposition of the planned excavated-in harbor in the Hengsha Shoal

经计算横沙浅滩挖入式港池的淤积强度和年淤积量见表1。

从计算结果看,邻近港区出口的主槽航道区域(A区)淤积强度较大,约为 0.71 m/a ,离口门越远,含沙量浓度逐渐降低,回淤强度逐步减小,在港区中部主槽区域的淤积强度在 $0.3\sim 0.4\text{ m/a}$,统计港区内所有主槽和旁侧港池的淤积量,总约 2175 万 m^3 ,港区内的平均年淤积强度约为 0.35 m/a .可见在一般情况下,横沙浅滩挖入式港池的泥沙回淤强度和回淤量都较小,港池建成后的运行维护费用较省。

表1 横沙挖入式港池年回淤强度预估

Tab.1 Estimation of siltation in the excavated-in harbor in the Hengsha Shoal

港内计算 区域划分	港区面积 A/km ²	东口门外浅 滩水深 h_1 /m	港内开挖 水深 h_2 /m	分区计算含沙量 S_1 /(kg·m ⁻³)	年回淤量 Q/(×10 ⁴ m ³)	年回淤强度 P/(m·a ⁻¹)
A(主槽)	8.57	7	23	0.3	612	0.71
B(主槽)	10.97	7	23	0.25	664	0.61
C(港池)	5.40	7	15	0.19	227	0.42
D(港池)	7.72	7	15	0.19	325	0.42
E(主槽)	7.47	7	23	0.16	288	0.38
F(港池)	4.92	7	15	0.11	116	0.23
G(港池)	5.00	7	15	0.11	118	0.23
H(港池)	10.87	7	20	0.06	147	0.13

注:年回淤总量为2 175万 m³,全港池平均淤积强度为0.35 m/a

2.2 底切力模式(金-虞方法)计算港池回淤

根据模式要求及横沙浅滩挖入式港池实际水深、泥沙及动力条件按(式2至式16)递推计算.计算参数设置如下:

- (1) 摩阻流速根据窦国仁^[10]的方法进行计算;
- (2) 动水絮凝沉速为 $\omega = 0.04$ cm/s;
- (3) 泥沙淤积临界摩阻流速 $u_{*i} = 0.7$ cm/s;
- (4) 新淤泥沙冲刷临界摩阻流速 $u_{*c} = 1.0$ cm/s;
- (5) 新淤海床冲刷系数取 $M = 0.69 \times 10^{-4}$ kg/(m²·s);
- (6) 口门处初始垂向年平均含沙量为 0.3 kg/m³ (-5 m 水深处)和 0.5 kg/m³ (-7 m 水深处),其含沙量值参考徐海根等人的观测研究^[13];
- (7) 平均潮差 2.6 m;
- (8) 涨潮时间为 $T_f = 6.2$ h;
- (9) 挖入式港池口门设置于 -5 m 和 -7 m 水深处.

口门放置在 -5 m 处时,对北线方案,涨潮流期间 1 m 宽,沿整个内港池 23 km 长度的平面空间上的净淤积量(以下简称跨航道方向单宽淤积量)为 12 472 kg,一潮涨潮流期间口门的单宽进沙量 = $(\bar{u}_f + v) \times 0.5$ kg/m³ × 23 m × 6.2 hr = 61 182 kg.

所以,涨潮流期间沉沙率 $k_f = \frac{12\ 472}{61\ 182} = 20.38\%$,假设落潮期沉沙率 $k_c = k_f$,落潮期单

宽回淤量 = $(61\ 182\ \text{kg} - 12\ 472\ \text{kg}) \times 20.38\% = 9\ 929\ \text{kg}$.

因此,全潮单宽淤积量 = 22 401 kg,沉沙率 $k = 36.62\%$.全潮回淤量约为 22 401 kg × 1 000/720 kg/m³ × 706/10 000 m³ = 2 196 万 m³.考虑旁侧港池的淤积,全港池淤积约为 2 196 + 731 × 2 + 239 × 2 = 4 136 万 m³.

由于内航道长度较短,水动力较弱,因此主要的淤积带处于距离港池口 3~4 km 航道段内,潮动力所造成的淤积和冲刷主要发生在港池内距口门 3~4 km 段内(如图 2 所示).在港池内泥沙逐渐沉降,水体含沙量沿程逐步减低,内航道 10~18 km 段内含沙量小于 0.1 kg/m³(如图 3 所示).而其峰值淤积强度达到 5.3 m/a,呈现两头小中间大的分布特征(如图 4 所示).

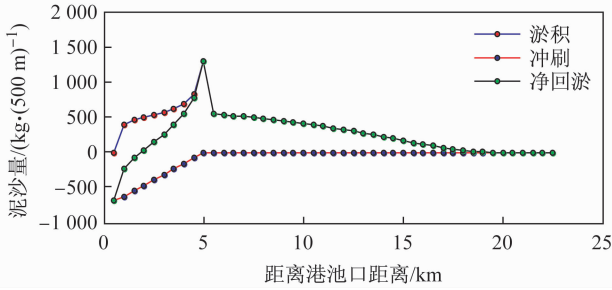


图2 北线方案一个涨潮过程挖入式港池回淤量沿内航道分布

Fig. 2 Distribution of siltation along the middle channel in the planned excavated-in harbor of the Hengsha Shoal in single flood tide

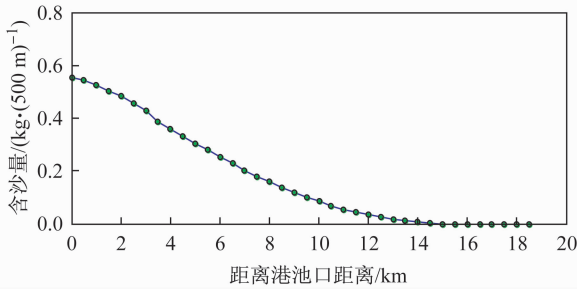


图3 北线方案全潮过程中挖入式港池内平均含沙量沿内航道分布

Fig. 3 Distribution of siltation along the outer shipping channel of the planned excavated-in harbor

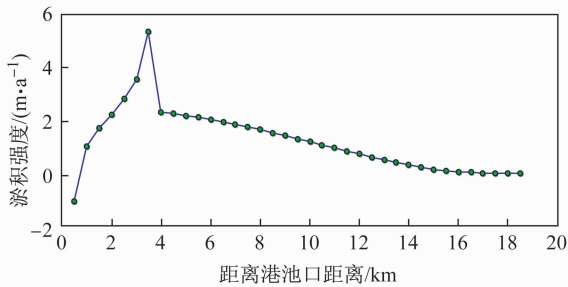


图4 北线方案全潮过程中挖入式港池内淤积强度沿内航道分布

Fig. 4 Distribution of siltation along the inner shipping channel of the planned excavated-in harbor

北线方案在其淤积峰值之后都出现一个回淤显著降低的过程,主要是由于泥沙浓度的斜压效应引起的水体入侵速度达到稳定。

如果将港池出口东移至含沙量更低的-7 m水深处,根据历史调查该处的年平均含沙量为 0.3 kg/m^3 。在此种情况下,涨潮流期间一潮净单宽淤积量为 $7\,503 \text{ kg}$,一潮涨潮期口门的单宽进沙量 $= (\bar{u}_f + v) \times 0.3 \text{ kg/m}^3 \times 23 \text{ m} \times 6.2 \text{ hr} = 41\,535 \text{ kg}$ 。

所以,涨潮流期间沉沙率 $k_f = \frac{7\,503}{41\,535} = 18.07\%$,假设落潮期间沉沙率 $k_c = k_f$,落潮期单宽回淤量 $= (41\,535 \text{ kg} - 7\,503 \text{ kg}) \times 18.07\% = 6\,148 \text{ kg}$ 。

因此,全潮单宽淤积量 $= 13\,652 \text{ kg}$,沉沙率 $k = 32.87\%$ 。全潮回淤量约为 $13\,652 \text{ kg} \times$

$1\ 000/720\ \text{kg}/\text{m}^3 \times 706/10\ 000\ \text{m}^3 = 1\ 338\ \text{万}\ \text{m}^3$. 考虑旁侧港池的淤积,全港池淤积约为 $1\ 338 + 332 \times 2 + 97 \times 2 = 2\ 196\ \text{万}\ \text{m}^3$.

可见当港池口外延至 $-7\ \text{m}$ 水深处时,潮周期回淤量及年平均回淤强度都显著降低,如图 5 和图 6 所示,回淤峰向港池内侧偏移了约 $1.5\ \text{km}$,港区内的平均年淤积强度约为 $0.36\ \text{m}/\text{a}$,最大年平均回淤强度小于 $3\ \text{m}/\text{a}$.

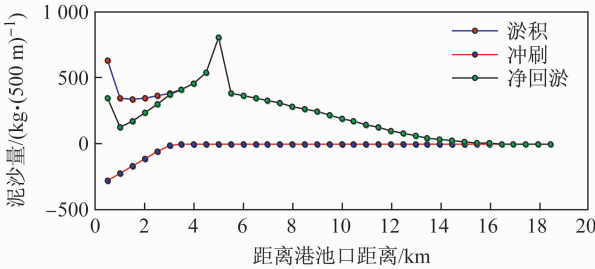


图 5 北线方案一个涨潮过程挖入式港池回淤量沿内航道分布

Fig. 5 Distribution of siltation along the middle channel in the planned excavated-in harbor of Hengsha Shoal in single flood tide

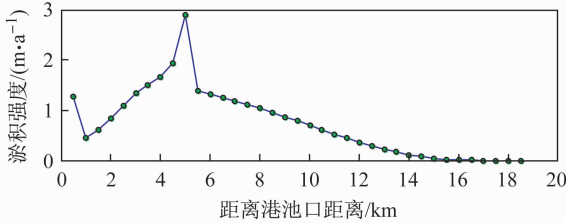


图 6 北线方案全潮过程中挖入式港池内淤积强度沿内航道分布

Fig. 6 Distribution of siltation along the inner shipping channel of the planned excavated-in harbor

2.4 纳潮进沙量沉沙率经验方法(曹祖德方法)

计算参数的选取如下: h_{Δ} —港内年平均潮差用中浚站数据取为 $2.6\ \text{m}$; S_0 —根据多年实测资料统计,对不同的口门位置设置, $-5\ \text{m} \sim -7\ \text{m}$ 水深,可取 $0.5 \sim 0.3\ \text{kg}/\text{m}^3$; γ_c —淤积土干容重,本文计算取 $720\ \text{kg}/\text{m}^3$; η —纳潮回淤率与港内水域总面积 A_0 、泥沙沉降速度 ω 及港池平面形式等多种因素有关,根据本海区及平面布置形态情况,经验系数 η 可取为 $0.40 \sim 0.60$,本报告取平均值 0.5 ; A_0 —港内水域总面积约为南线方案 $60\ \text{km}^2$ 、北线方案 $68\ \text{km}^2$.

根据上述参数代入公式计算,考虑在口门设置在 $-7\ \text{m}$,平均含沙量为 $0.3\ \text{kg}/\text{m}^3$ 的回淤结果如表 2.

表 2 挖入式港池内水域年淤强和淤积量计算结果

特征量	方案	计算结果(口门含沙量取 $0.3\ \text{kg}/\text{m}^3$)
年平均淤积强度	南线方案	$0.30\ \text{m}/\text{a}$
	北线方案	$0.30\ \text{m}/\text{a}$
年淤积量	南线方案	$1\ 800\ \text{万}\ \text{m}^3$
	北线方案	$2\ 040\ \text{万}\ \text{m}^3$

Tab. 2 The siltation rate and total deposition in the planned excavated-in harbor

从进入港池泥沙总量上估算,整个港池内的泥沙回淤强度大致约为 0.3 m/a,年回淤量南北线方案分别为 2 040 和 1 800 万 m^3 。

3 深水航道回淤估算

3.1 海港水文规范(刘家驹公式)计算外航道回淤

计算参数选取如下:

ω —细颗粒泥沙的絮凝沉降速度(m/s),取 0.000 4 m/s; S_1 —相应于平均水深 d_1 的浅滩水域的平均含沙量(kg/m^3),其沿程年平均含沙量分布如表 3; t —淤积历时(s); γ_0 —淤积物的干密度(kg/m^3),取 720 kg/m^3 ; K_1, K_2 —分别为横流和顺流淤积系数,在缺少现场资料的情况下,可取 K_1 为 0.35, K_2 为 0.13; d_1, d_2 —分别为浅滩平均水深和航道开挖后的水深(m); θ —航道走向与水流流向之间的夹角($^\circ$)。

表 3 挖入式港池外航道不同水深处年平均含沙量

Tab.3 Climatological SSC at typical bathymetry out of the planned excavated-in harbor

水深/m	5	8	10	12	15	18	20
年均含沙量/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	0.5	0.25	0.2	0.15	0.1	0.05	0.02

长江口横沙浅滩挖入式港池外航道的回淤结果如图 7 所示。

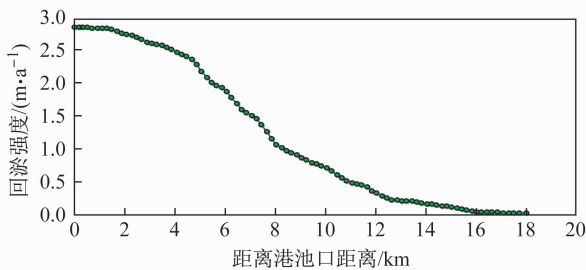


图 7 按海港水文规范计算北线方案挖入式港池外航道回淤强度分布图

Fig.7 Distribution of siltation rate along the outer shipping channel under the north scheme of the planned excavated-in harbor with the Code of Hydrology for Sea Harbor

经计算,北线方案在外航道年回淤量分别为 1 110 万 m^3 ,但是其回淤分布特征差异明显.北线方案在外航道 0~8 km 段泥沙回淤较显著(如图 7),主要由于该段北线方案水深相对较浅,滩槽高差较大,对回淤的影响明显.由于 8~18 km 段北线方案水深梯度较大,其两侧滩地水深与主航槽水深差异较小,而且水体含沙量低,因此回淤开始显著变小.全航道平均年回淤强度为 1.06 m/a.

3.2 底切力模式(金鏐-虞志英方法)计算外航道回淤

水动力及泥沙参数选定如下:

- 1) 摩阻流速根据窦国仁^[11]的方法进行计算;
- 2) 动水絮凝沉速为 $\omega = 0.04 \text{ cm/s}$;
- 3) 泥沙淤积临界摩阻流速 $u_{*i} = 0.7 \text{ cm/s}$;
- 4) 泥沙冲刷临界摩阻流速 u_{*c} 采用区域分布,从港池口 1 cm/s 逐渐过渡到 -20 m 水

深处 2.0 cm/s;

5) 新淤泥沙海床冲刷系数取 $M = 0.69 \times 10^{-4} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;

6) 泥沙垂向扩散系数取 $\epsilon_s = 40 \text{ cm}^2/\text{s}$;

7) 含沙量浓度取值分布如表 3;

8) 外航道底部流速采用第三章中高分辨率三角形 FVCOM 模型计算的流速经过窦国仁(1999)年算法得到底部的平均摩阻流速。

经计算得到沿航道底部摩阻流速分布如图 8 所示,从港池口至外海 -20 m 水深处摩阻流速整体呈现逐步增大的特征,在航道前段 0~6 km 内,摩阻流速小于 2 cm/s,而在 6 km 之外摩阻流速增大并超过 2 cm/s。

运用底切力模式,综合考虑全潮过程中的淤积、冲刷,从而得到沿航道回淤分布(如图 9 所示),在航道近港池口及 4 km 区域段,航道回淤明显,主要是由于港池口区域水体含沙量较大,泥沙供给充足,滩槽水深比较大,从而形成显著泥沙回淤。而在航道 4 km 段位置,由于受北港水道泥沙下泄影响,横流影响显著,水动力垂向差异明显,造成泥沙在该区域较易沉降。在航道外侧水深较大处,由于海床底部较为密实,且水体含沙量较低,水动力较强,从而呈现一定的冲刷特征。

从整体上计算得到航道沿程年回淤总量约 607 万 m^3 ,且主要集中在 0~6 km 航道段内。由于近港池口航道段呈现淤积状态,而航道 8~18 km 段呈现冲刷特征,因此全航道平均回淤强度较小,约为 0.19 m/a。

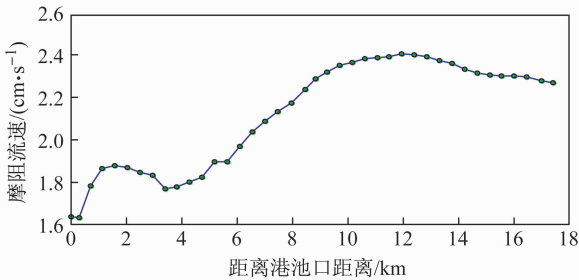


图 8 底切力模式所得近底摩阻流速沿外航道分布

Fig. 8 Distribution of shear velocity along the outer shipping using bottom-shear-stress model

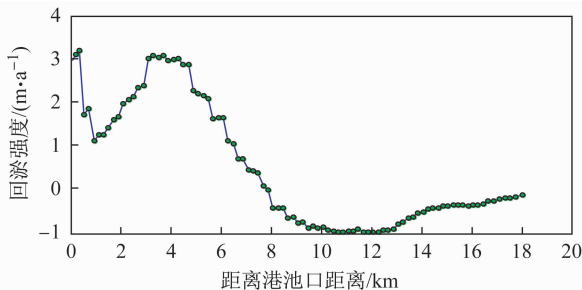


图 9 底切力模式所得沿外航道回淤强度分布

Fig. 9 Distribution of siltation rate along the outer shipping using bottom-shear-stress model

4 大风天气下的回淤估算

夏季台风和冬季寒潮大风侵袭期间,波浪显著增强,水体泥沙浓度急剧增大,从而造成短时间较厚的浮泥层和较高的回淤量.因大风及强浪的直接作用是水体含沙量浓度的显著升高,因此在本文中直接考虑风浪作用之后的含沙量浓度以体现大风强浪的作用,不在模式是另外考虑波浪的计算方程.即直接考虑外航道中在大风大浪情况下的含沙量异常升高,及挖入式港池口门去在大风天气下的含沙量显著增大.在此含沙量情况下采用上述的回淤计算方法进行大风天气下的回淤估算.

4.1 外航道大风回淤估算

考虑大风天气情况下的水体含沙量为平常天气情况下含沙量的 3~10 倍,取平均值为 5 倍.考虑夏季台风和冬季寒潮影响下的大风天气持续影响时间约为 5 d.

采用上述方法估算,大风天气影响 5 d 的外航道回淤量如表 4 所示.

表 4 大风天气影响下外航道回淤量

Tab. 4 Total siltation within the outer shipping channel under strong wind weather		
	南线方案	北线方案
大风回淤/(万 m ³)	95	89

全航道平均回淤厚度为 0.1 m.

4.2 挖入式港池大风回淤估算

采用底切力模式估算大风天气情况下高浓度含沙量水体引起的泥沙回淤.

经估算,北线方案在大风天气作用 5 d 的情况下港池内回淤总量为 183 万 m³,在此期间的沿内航道的淤积厚度如图 10 所示,最大淤积厚度约为 0.7 m,位于距口门 6~7 km 位置处,其余淤积厚度较小,一般小于 0.3 m.而在口门位置,由于水动力较强,还呈现较弱的冲刷特征.

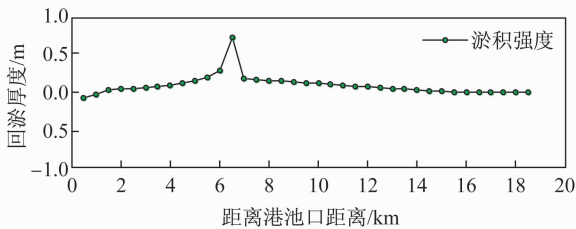


图 10 大风天气影响下内港池航道主槽的回淤厚度分布

Fig. 10 Distribution of siltation thickness along the outer shipping using bottom-shear-stress model

采用纳潮进沙沉沙率回淤公式估算,大风持续作用期为 5 d,口门处的平均含沙量约为平时的 3~10 倍,取平均值 5 倍,为 1.5 kg/m³,经估算大风期间挖入式港池内的泥沙回淤为 165 万 m³.

采用海港水文规范刘家驹公式计算方法,考虑相同的大风情况下的含沙量和持续时间,经分区递推计算得到大风情况下泥沙回淤量为 252 万 m³.

5 结 语

横沙浅滩挖入式港池方案的关键技术之一是回淤问题。通过采用海港水文规范推荐的公式、底切应力方法和经验公式等多种不同方法估算港池与进港航道回淤,结果较为一致,若港池出口门位于 -7 m 处,当地年均含沙量降为 0.3 kg/m^3 ,北线方案港池内平均淤积强度约为 $0.3\sim 0.4\text{ m/a}$,总回淤量约为 $2\ 000\text{ 万}\sim 2\ 200\text{ 万 m}^3$;外航道年平均淤积强度约为 $0.3\sim 0.4\text{ m/a}$,总回淤量约为 $600\text{ 万}\sim 1\ 200\text{ 万 m}^3$ 。

粗步估算大风天气情况下港池与外航道的回淤,取夏季台风和冬季寒潮影响下的大风天气持续影响时间约为 5 d ,水体含沙量浓度比平常天气情况下平均高 5 倍,分别采用海港水文规范计算公式等,对于北线方案, 5 d 港池总回淤量约为 $165\text{ 万}\sim 260\text{ 万 m}^3$,外航道约为 100 万 m^3 。

计算得到港池内淤积分布呈现两头小中间大的特征,在港池口门和内侧淤积较小,而在离港池口 $4\sim 6\text{ km}$ 处为显著回淤区域;而在外航道港池口门 $\sim 4\text{ km}$ 区域为显著回淤区域,长约 $18\sim 20\text{ km}$ 的内航道和外航道,整体平均的回淤强度较小。计算表明,如果将港池出口移至含沙浓度更低的深水区域,港池内和外航道的回淤总量和回淤强度都将显著降低。

进一步的研究应集中于横沙浅滩及邻近区域的泥沙、淤积环境的观测,以为回淤预估提供更加可靠的现场数据,同时深入研究优化横沙浅滩挖入式港池的工程配置,以降低泥沙回淤。

[参 考 文 献]

- [1] 黄建维. 海岸与河口黏性泥沙运到规律的研究和应用[M]. 北京:海洋出版社,2008.
- [2] 刘家驹. 海岸泥沙运动的研究和应用[M]. 北京:海洋出版社,2009.
- [3] 闫龙浩,杨世伦,李鹏,等. 近期(2000-2008年)长江口南港河槽的冲淤变化——兼议外高桥新港区岸段强烈淤积的原因[J]. 海洋通报,2010,29(4):378-384.
- [4] 潘灵芝,丁平兴,葛建忠,等. 长江口深水航道整治工程影响下北槽河床冲淤变化分析[J]. 泥沙研究,2011(5):51-59.
- [5] 谈泽炜,范期锦,郑文燕,等. 长江口北槽航道回淤原因分析[J]. 水运工程,2011(1):29-40.
- [6] 金鏐,虞志英,何青. 深水航道的河势控制和航道回淤问题[J]. 中国港湾建设,2012(1):002.
- [7] 金鏐,虞志英,陈德昌. 淤泥质海岸浅滩人工挖槽回淤率计算方法的探讨[J]. 泥沙研究,1985(2):12-19.
- [8] 金鏐,虞志英,陈德昌. 淤泥质海湾淤积形态的分析[G]//中国海洋湖沼学会. 河口海岸研究论文集. 北京:海洋出版社,1990.
- [9] 曹祖德,杨华,张书庄. 环抱式和挖入式港池的纳潮淤积计算[J]. 水道港口,2008,29(2):77-81.
- [10] 范家骅. 淤泥质海滩引潮沟潮汐挟沙水流模型试验问题[J]. 中国科学:A辑,1986(07):011.
- [11] 窦国仁. 再论泥沙起动流速[J]. 泥沙研究,1989,6(1):9.
- [12] 刘家驹. 粉沙淤泥质海岸的航道淤积[J]. 水利水运工程学报,2004(1):6-11.
- [13] 徐海根,虞志英,钮建定,等. 长江口横沙浅滩及邻近海域含沙量与沉积物特征分析[J]. 华东师范大学学报:自然科学版,2013(4):42-54.