

· 航道及通航建筑物 ·



长江口北槽深水航道回淤量计算模型研究*

顾峰峰, 沈 淇, 万远扬, 王 巍, 孔令双

(上海河口海岸科学研究中心, 交通部河口海岸重点实验室, 上海 201201)

摘要: 把长江口北槽深水航道内 2012 年洪枯季两次、大中小潮的观测资料以及对应时段的航道回淤量等实测数据, 引入到常用的近底层泥沙通量计算模型中, 通过选取和率定其中主要的模型计算参数以及率定人工维护条件下航道内底层泥沙的沉降概率, 最终建立了一个适合长江口北槽深水航道回淤量计算的数值模型, 并利用洪枯季航道回淤的实测资料对该计算模型进行验证, 得到较符合的结果。

关键词: 长江口; 北槽; 深水航道; 回淤量

中图分类号: TV 148. 1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)02-0092-07

Calculation model of back-siltation in deep navigation channel of north passage in the Yangtze estuary

GU Feng-feng, SHEN Qi, WAN Yuan-yang, WANG Wei, KONG Ling-shuang

(Key Laboratory of Ministry of Communications, Shanghai Estuarine & Coastal Science Research Center, Shanghai 201201, China)

Abstract: This paper focuses on the relationship between the movement characteristics of flow (and suspended sediment) and erosion (and deposition) near bottom in the deep navigation channel of the north passage in the Yangtze estuary. Based on the model for calculating the sediment flux near the bottom and observation data, the key parameters, such as the settling velocity and settling probability of sediment, are selected and calibrated. Eventually the calculation model for back-siltation in the deep navigation channel of the north passage is established and discussed. The calculated results by this model fit well the measured data.

Keywords: Yangtze estuary; north passage; deep navigation channel; back-siltation

长江口深水航道 2010 年竣工以来一直依赖疏浚以维持 12.5 m 的航道水深, 航道回淤量一直维持在 $7 \times 10^7 \sim 8 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{a}$, 给维护疏浚带来不小的压力和困难。如能正确合理地对长江口北槽航道回淤量进行计算和分析, 将有助于深入分析形成航道淤积的主要原因和进行航道淤积量的高精度预测计算, 因此开展航道回淤量计算模型的研究十分重要。

有关航道回淤的计算分析尤其是在长江口的回淤, 已经有很多学者开展了相关的研究, 窦国仁等^[1-4]在深水航道治理的一、二期中利用二维全沙模型开展了大量的水沙盐数值模拟及航道淤积

量的计算工作; 另外很多学者在航道回淤计算的研究过程中对许多关键计算参数进行了分析研究, 包括长江口的泥沙起动流速^[5-6]、不平衡悬沙挟沙力^[7], 悬沙沉降概率系数^[8-12]和泥沙沉降速度^[13-15]等等, 这些研究对深水航道回淤量的计算研究起到了重要的参考和指导作用。

随着长江口深水航道工程的逐步实施和近年来基于大量观测资料的研究和分析的逐步深入, 沿航道的三维水沙特征越来越受到重视, 越来越多的学者^[16-18]认识到长江口水沙运动及航道淤积问题具有明显的三维特征, 因此基于三维空间尤其是近底

收稿日期: 2015-06-24

*基金项目: 交通运输部科技项目(2011328A0670); 上海市自然科学基金(14ZR1420700); 国家科技支撑计划课题(2013BAB12B03)

作者简介: 顾峰峰(1978—), 男, 博士, 副研究员, 从事河口海岸水沙数值模拟方面研究。

层水沙运动特性研究航道回淤问题显得尤为重要, 其对提升航道回淤量计算精度具有重要作用。

据上所述, 本文着眼于航道近底层的水沙运动特性, 在近底层泥沙通量计算模型和观测资料的基础上, 选取和率定合理的模型计算参数, 研究建立适合长江口北槽深水航道回淤量计算的模型。

1 长江口北槽航道洪枯季回淤特征

本文选取深水航道竣工后、河势较为稳定的 2012 年的航道沿程回淤量资料开展相应的研究, 外海潮动力和多年平均基本相当, 上游大通站的

径流量年内平均值约为 $3.16 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$, 略大于近年来的平均值, 其年内各航道疏浚单元的回淤总量分布见图 1, 航道位置及航道维护疏浚单元的划分见图 2。长江口的航道淤积量习惯上以洪枯季来区分其主要变化特征, 这里的洪季指上游长江径流较大和航道回淤量明显大于其它月份的 6 个月, 即 6—11 月。洪枯季的各航道单元的回淤总量及与年总量的比较见图 1。由图 1 可知, 长江口北槽深水航道回淤有如下特征: 1) 洪季的回淤总量明显大于枯季; 2) 航道淤积主要集中于北槽航道的中下段, 尤其中段出现明显的淤积峰值。

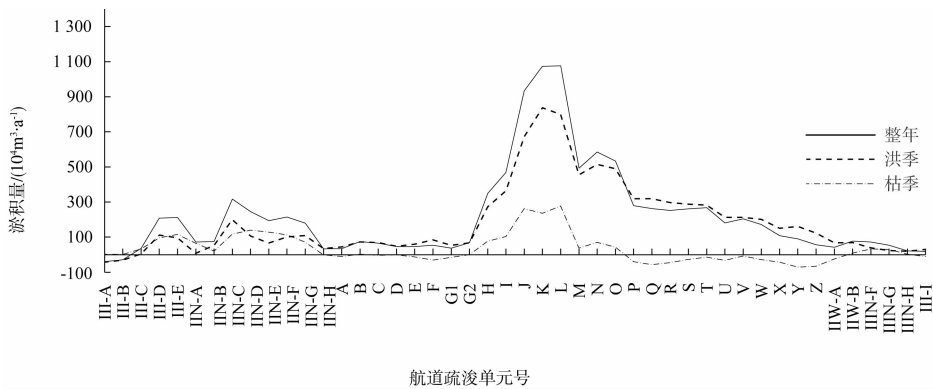


图 1 2012 年北槽航道洪枯季淤积量差异比较及分布

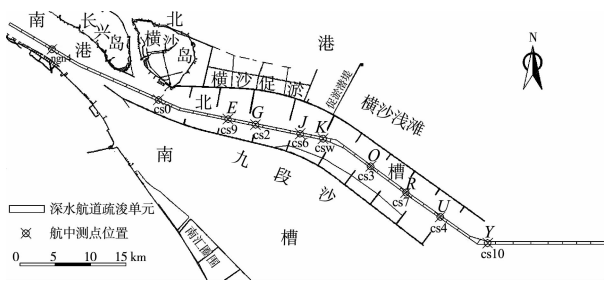


图 2 北槽航道位置及测点位置

2 近底层泥沙通量计算模型

长江口北槽航道回淤量计算通常可用如下底部泥沙通量计算式来表示^[18]:

$$\begin{cases} f_d = \int_{0 < t < T_1} \alpha \omega C_b \left(1 - \frac{\tau_b}{\tau_d}\right) dt & \tau_b < \tau_d \quad \text{淤积} \\ f_e = \int_{0 < t < T_2} m \left(\frac{\tau_b}{\tau_e} - 1\right) dt & \tau_b > \tau_e \quad \text{冲刷} \\ f = f_d - f_e \end{cases} \quad (1)$$

式中: τ_d 、 τ_e 分别为底部的临界淤积和冲刷应力; α 为沉降概率; ω 为底部泥沙沉降速度; m 为冲刷系数; τ_b 为底部切应力; C_b 为底部含沙量; T_1 和 T_2 分别为冲刷及淤积的统计周期; f_d 、 f_e 和 f 分别为单位面积的淤积量、冲刷量和实际回淤量。其中底部切应力的计算如下:

$$\tau_b = C_d |u_b| u_b \quad (2)$$

式中: C_d 为底部阻力系数; u_b 为近底层流速。 C_d 的计算式如下:

$$C_d = \left[\frac{k}{\ln(\delta_b/z_0)} \right] \quad (3)$$

式中: δ_b 为近底层选取的计算厚度; z_0 为底部粗糙长度; k 为卡门系数。

式(1)表明航道底部的泥沙通量(淤积或冲刷)的变化主要与近底层的水动力、泥沙沉速、含沙量及沉降概率系数等参数相关, 为了计算得到

合理的航道回淤量值，需要对它们进行合理的选取和率定。

3 洪枯季典型月份观测资料说明

本次研究选取 2012 年 2 月和 8 月沿长江口北槽航道的定点观测资料^[19-20]，共计 10 个位于航道中的测点，其中 2 月和 8 月分别作为枯、洪季的典型月份进行分析；每个测点在垂线上均采用六点法进行观测，测点位置见图 2。由于测点位置位于航道中间，测量受通航船舶影响，使得部分时段水沙资料缺测，因而对部分时段近底层水沙资料缺测数据进行插补；其中洪季 8 月份大、中、小潮资料基本完整，枯季 2 月份中潮及 cs10 测点的资料缺测。

航道沿程回淤量的统计以疏浚单元来划分，共计 44 个单元，位置见图 2；其中航中 10 个测点所在的疏浚单元在 2012 年的 2 月和 8 月航道淤积量分布见图 3。这里航道回淤量的测量值由天津天科长江口 12.5 m 深水航道维护疏浚工程项目部监理部和交通运输部长江口航道管理局提供，为长江口北槽航道每个单元的船舶月疏浚量和每个月地形变化的测图方量之和，其有别于天然条件下的泥沙淤积，不可避免受到人工疏浚挖深的影响，因此在计算模型中需要对模型计算的主要参数进行专门的率定。

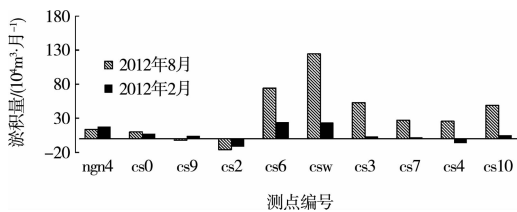


图3 测点位置对应的航道单元淤积量分布

4 航道回淤量计算模型的建立和计算结果

本次计算选取的实测资料包含大中小潮各 3 个 24 h 的过程，实测航道疏浚单元的淤积量 F 是按月进行统计的资料。由于统计月内的上游流量变幅以及不同期大中小潮各自的潮动力差异等影响条件变化都较小，因此通过时间倍乘系数近似换

算到包含完整大中小潮的 30 d 代表一个月(2014 年 7 月 24 日—8 月 24 日)，计算选取的时间倍乘系数 β 为 10；即疏浚单元 i 的月度回淤总量 F_i 的计算式如下：

$$F_i = \beta(f_d - f_e)A_i \quad (4)$$

式中： f_d 和 f_e 分别为实测资料时间段内（大、中、小潮各 24 h）的淤积和冲刷总量； A_i 为疏浚单元的面积。根据式(1)~(4)和实测水沙资料，选取合理的近底层泥沙通量的计算参数即可计算航道淤积量，本文计算部分参数按长江口三维潮流泥沙数学模型的计算参数取值^[21]： $\tau_d = 0.4 \text{ N}$ ， $\tau_e = 0.4 \text{ N}$ ， $m = 0.0002 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ， $\delta_b = 0.1 \text{ h}$ ， h 为总水深。 $z_0 = 0.00001 \text{ m}$ ， $k = 0.35$ 。临界应力的选取基于长江口北槽内进行的坐底观测架实测资料，从临底动力和河床变化的过程线中获取^[17,22]，该值和文献[6]基本一致。

4.1 泥沙沉速选取

泥沙沉速一般和泥沙粒径密切相关，本文选取洪季(8月)和枯季(2月)实测航中测点 csw 的近底层悬沙中值粒径(图 4)^[19-20]，由图 4 可知，北槽航道近底层悬沙平均中值粒径约为 0.01 mm。此类细颗粒泥沙的沉速可近似参考文献 [13-15] 中长江口细颗粒泥沙($d_{50} = 0.008 \text{ mm}$)室内试验结果(图 5)；由图 5 可知，此类泥沙含沙量由低到高($0 \sim 3 \text{ kg}/\text{m}^3$)时沉速有一个增加过程，在 $3 \sim 8 \text{ kg}/\text{m}^3$ 时沉速基本保持恒定值，而当泥沙浓度大于约 $8 \text{ kg}/\text{m}^3$ 时沉速将受到抑制变小，该变化特征与类似研究^[15]的结果基本一致。图 5 中试验在洪季采用的水温和盐度分别为 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 7 度，枯季分别为 $10 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 12 度。

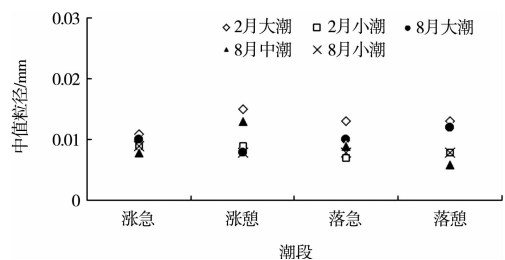


图4 测点 csw 近底层悬沙中值粒径

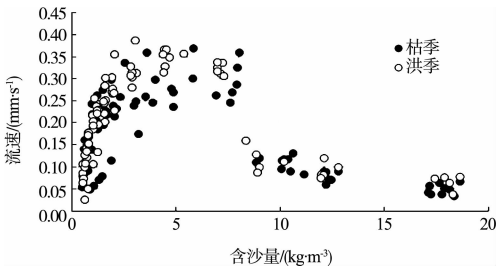


图 5 洪、枯季长江口细颗粒泥沙沉速和含沙量关系

本文选取枯、洪季 (2 月和 8 月) 资料统计淤积条件下的平均近底层含沙量, 根据文献 [13] 沉降试验得到的底层平均泥沙沉速计算公式的计算结果分别绘制于图 6; 由图 6 可知, 洪季 8 月北槽航道中段高淤积强度范围内淤积时的近底层平均泥沙浓度基本都受到抑制, 沉降作用的影响将变小, 这里高淤积区域的底层悬沙平均沉速取值约为 0.15 mm/s; 而枯季泥沙浓度相对较低 (大多处于 0~3 kg/m³), 对应的北槽中段的近底层泥沙沉速枯季大于洪季。

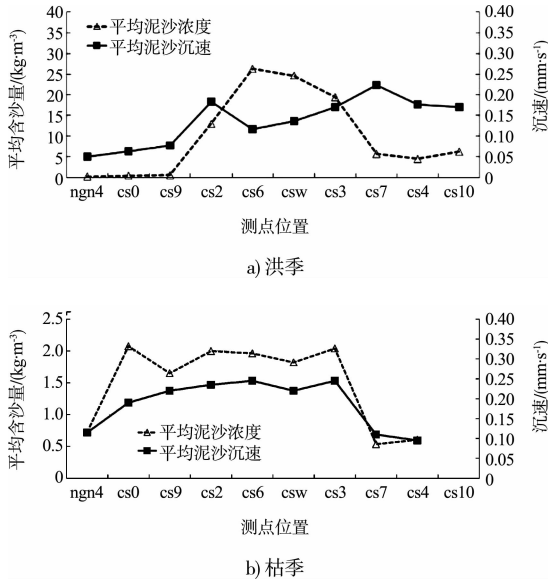


图 6 洪枯季航道沿程满足淤积条件下的平均含沙量分布和泥沙沉速分布

本文主要关注航道底层小流速期的泥沙淤积, 其紊动相对较小且受高浓度泥沙制紊作用影响较大, 因此本文泥沙沉速选取直接参考了静水沉速的试验结果, 没有采用动水沉速^[23-24]; 另外选取沉速时对应的温度和盐度为洪枯季的典型值, 具有一般性。

4.2 沉降概率系数率定和航道回淤量的计算

在式(4)的计算中, 沉降概率是一个影响航道回淤量计算的重要参数^[8-12], 通常情况可通过实测资料来率定。为了分析沉降概率系数变化的一般规律, 根据式(1)~(4), 假定疏浚单元 i 的平均淤积概率 $\bar{\alpha}_i$ 为定值, 则其计算式可表述如下:

$$\bar{\alpha}_i = \frac{F_i / (\beta A_i) + f_e}{\int_{0 < t < T_1} \omega C_b \left(1 - \frac{\tau_b}{\tau_d} \right) dt} \quad (5)$$

一般认为沉降概率是泥沙重力和水流紊动的综合作用下能沉积在床面上的泥沙量与可能下沉的泥沙量之比, 取值范围在 0~1^[12], 表征其关系的特征值可取值如下:

$$\alpha = f\left(\frac{\omega}{ku_*}\right) \quad (6)$$

即沉降概率 α 是 $\omega/(ku_*)$ 的函数, u_* 为底摩阻流速, 其计算式如下:

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_b}{\rho}} \quad (7)$$

利用洪枯季资料计算得到的各航道单元 i 对应的沉降概率 $\bar{\alpha}_i$ 值与满足淤积条件时的 $\omega/(ku_*)$ 平均值以及平均含沙量 \bar{C}_b 的关系见图 7、8。

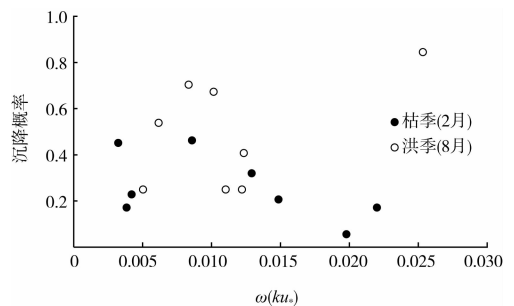


图 7 沉降概率系数与 $\omega/(ku_*)$ 平均值的关系

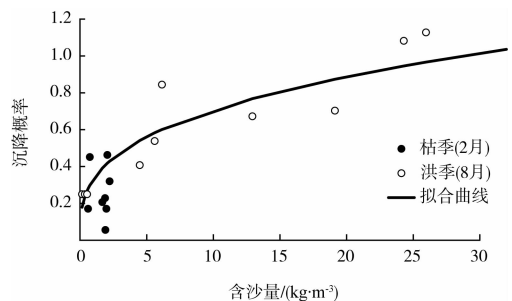


图 8 沉降概率系数与满足淤积条件的平均含沙量的关系

从计算结果来看, 沉降概率 α 和 $\omega/(ku_*)$ 的关系并不密切, 而沉降概率和淤积时的近底层泥沙浓度关系较为密切, 随着泥沙浓度的增大而增大, 尤其当洪季泥沙浓度较高时这种特征更为明显。分析形成上述特征的可能原因如下两个:

1) 沉降概率的计算采用 $\omega/(ku_*)$ 的函数形式时, 其中沉速的取值已经考虑泥沙浓度等的影响, 但利用式(2)和(7)计算摩阻流速时, 所采用的阻力系数同样会受到近底泥沙及盐度分层制紊的影响, 有别于式(3), 其计算式为^[25]:

$$C_{Db} = \left[\frac{k}{(1 + AR_f) \ln(\delta_b/z_0)} \right]^2 \quad (8)$$

式中: A 、 R_f 分别为考虑近底输运物质的密度差异的参数。由于式(9)中 $(1 + AR_f)$ 在底部存在高浓度泥沙时通常是一个大于 1 的数, 因而计算得到的阻力系数将会减小, 由式(7)可知 u_* 也会减小, 从而导致 $\omega/(ku_*)$ 会增大, 并最终导致沉降概率增大, 由于近底层泥沙浓度增大通常会导致密度分层现象和制紊作用加强, 因此这一分析结论和图 8 描述的现象特征基本一致。

2) 另外, 根据 2012 年 2 月和 8 月采用双频测深仪 (高频 200 k、低频 24 k) 测量得到的航道水深数据见图 9, 图中显示洪、枯季均在航道底层存在明显的高低频水深差。利用泥浆密度计测量的结果显示, 高频测深密度界面约为 $1\ 033\ \text{kg/m}^3$ 、低频测深密度界面约为 $1\ 245\ \text{kg/m}^3$ 。目前长江口北槽航道疏浚以高频水深作为水深考核目标, 因而长江口北槽航道的疏浚作业中需要吸入大量密度介于 $1\ 033 \sim 1\ 245\ \text{kg/m}^3$ 的高浓度泥沙, 以保证高频水深满足考核目标水深; 按洪柔嘉等^[26]定义, 此类泥沙大部分处于宾汉体状态而小于新淤土的密度。在航道维护阶段为了维持航道满足 12.5 m 水深的通航要求标准, 长江口北槽航道回淤量主要以疏浚船方的形式体现 (航道回淤量与船方量的比较见图 10), 因而在航道内泥沙浓度较大且淤积强度较强的区域, 当船舶机械疏浚作业吸入较多没有淤积密实形成新淤土的近底高浓度泥沙时, 显然会人为提高航道内泥沙的沉降概率, 导致疏浚条件下航道淤积的沉降概率和近底层泥沙浓度之间密切的相关关系。

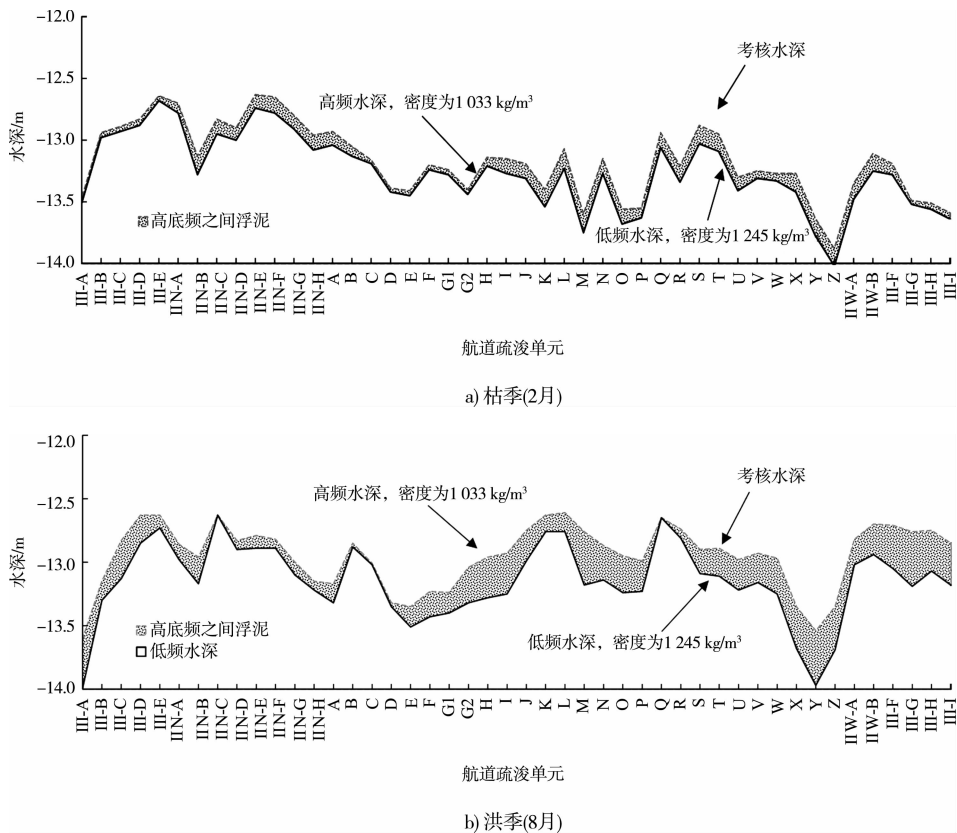


图 9 航道高低频水深差异比较

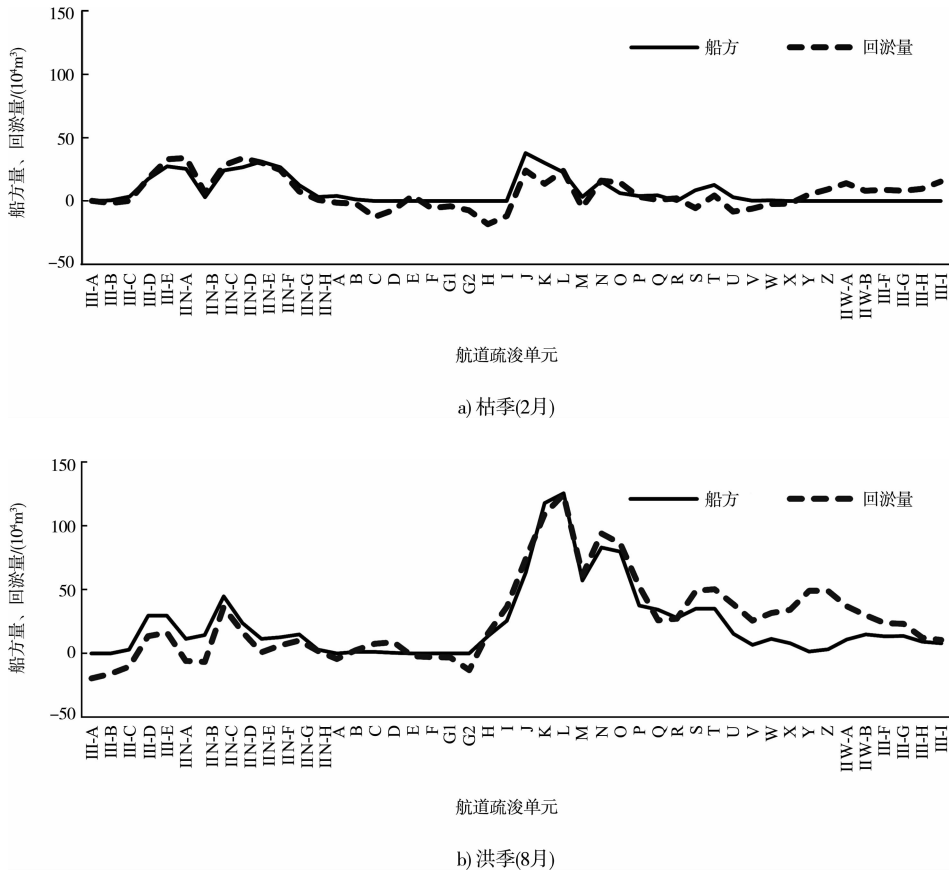


图 10 疏浚船舶方量和航道回淤量比较

根据图 8 可建立平均沉降概率 $\bar{\alpha}$ 与底层平均含沙量的经验关系, 得拟合关系表述如下:

$$\bar{\alpha} = 0.33 \bar{C}_b^{0.33}; \text{ 且满足 } 0 \leq \bar{\alpha} \leq 1 \quad (9)$$

其中满足淤积条件 (T_1 时段内) 的底层平均含沙量计算式如下:

$$\bar{C}_b = \frac{1}{T_1} \int_{0 < t < T_1} C_{bj} dt \quad \tau_b < \tau_d \text{ 淤积} \quad (10)$$

式中: C_{bj} 为 j 时刻近底层含沙量。

式(9)反映了船舶疏浚条件下近底层含沙浓度和淤积概率关系的一般规律, 也表明了 α 不是定值, 因而利用式(9)的关系假定在淤积时段 T_1 内的任意时刻 j 有相似的关系, 即:

$$\alpha_j = 0.33 C_{bj}^{0.33} \quad j = 1, t_1 \quad (11)$$

利用式(11)以及(1)~(4)进行航道淤积量的修正计算。取 2012 年 8 月和 2 月洪枯季的计算结果和实测值进行比较(图 11), 计算结果表明洪枯季的计算和实测值都基本吻合, 反映了北槽航道洪枯季回淤特征, 从而验证了式(11)表征的特征关系在长江口北槽航道回淤计算中的适用性。

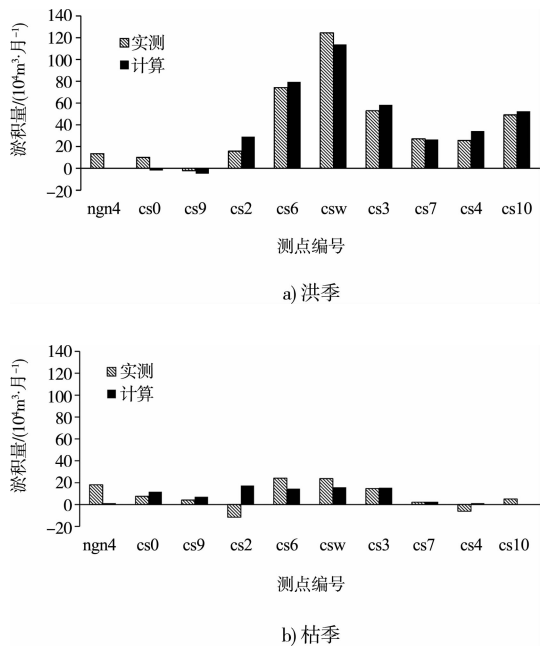


图 11 计算与实测航道淤积量的验证比较

由式(1)~(4)、(11)、长江口三维潮流泥沙数学模型的计算参数及图 6 泥沙沉速取值构成了完整的长江口北槽航道回淤量计算模型。

5 结论

本文着眼于长江口北槽航道近底层的水沙运动特性与航道淤积量的关系,在近底层泥沙通量计算模型和槽内观测资料的基础上,选取了洪枯季不同、和泥沙浓度相关的泥沙沉降速度等关键计算参数,并率定和建立了维护条件下的航道底部泥沙的沉降概率的计算经验公式。

从本文的资料分析可知,长江口北槽航道在人工维护以及存在近底高浓度泥沙层的条件下,沉降概率和近底层的泥沙浓度密切相关,其随着泥沙浓度的增大而增大,尤其当洪季泥沙浓度较高时这种特征更为明显。

本次研究建立了一个适合描述长江口北槽航道回淤的计算模型和一套计算参数;利用该模型得到的洪枯季航道回淤总量及沿程分布结果得到了实测资料的验证,表明了该计算模型的合理性。

参考文献:

- [1] 窦国仁. 长江口深水航道泥沙回淤问题的分析[J]. 水运工程, 1999(10): 36-39.
- [2] 窦希萍, 窦国仁. 长江口全沙数学模型研究[J]. 水利水运科学研究, 1999(2): 136-145.
- [3] 窦希萍. 长江口深水航道回淤量预测数学模型的开发及应用[J]. 水运工程, 2006(S1): 159-164.
- [4] 窦希萍. 长江口深水航道治理工程一、二期工程泥沙回淤预报研究[C]//海洋工程学会. 第十二届中国海岸工程学术讨论会论文集. 北京: 海洋出版社, 2005: 71-76.
- [5] 窦国仁. 论泥沙起动流速[J]. 水利学报, 1960(4): 44-60.
- [6] 窦国仁. 再论泥沙起动流速[J]. 泥沙研究, 1999(3): 1-9.
- [7] 顾峰峰, 戚定满, 牟林, 等. 长江口悬沙挟沙力公式参数的率定与验证[J]. 泥沙研究, 2010(5): 1-6.
- [8] 韩其为, 陈绪坚. 恢复饱和系数的理论计算方法[J]. 泥沙研究, 2008(6): 8-16.
- [9] 窦国仁. 潮汐水流中的悬沙运动及冲淤计算[J]. 水利学报, 1963(4): 13-24.
- [10] 王仁龙. 水利工程泥沙池泥沙沉降计算方法分析与验证[J]. 人民黄河, 2012(9): 130-132.
- [11] 李瑞杰, 罗锋, 周华民, 等. 泥沙沉降机率和冲刷系数分析[J]. 泥沙研究, 2010(1): 63-66.
- [12] 任方方, 郭巨海, 黄惠明, 等. 非均匀沙恢复饱和系数研究综述[J]. 浙江水利科技, 2014(5): 5-12.
- [13] Wan Y Y. Multiscale physical processes of fine sediment in an estuary[M]. USA: Crc Press, 2015.
- [14] 万远扬, 吴华林, 顾峰峰. 长江口细颗粒泥沙沉降速度室内试验研究[J]. 人民长江, 2014(1): 98-101.
- [15] 万远扬, 吴华林, 沈淇, 等. 潮汐环境下细颗粒泥沙沉降速度研究述评Ⅲ——沉速的影响因子[J]. 水运工程, 2014(5): 21-25.
- [16] 顾峰峰, 沈淇, 孔令双, 等. 长江口北槽悬沙垂线分布经验公式研究[J]. 水运工程, 2013(11): 142-146.
- [17] 刘杰. 长江口深水航道冲淤演变与回淤研究[M]. 北京: 海洋出版社, 2014.
- [18] 刘杰, 程海峰, 赵德招. 长江口 12.5 m 深水航道回淤特征[J]. 水科学进展, 2014(3): 358-365.
- [19] 长江委水文局长江口水文水资源勘测局. 2012年2月长江口北槽航槽中动船水流泥沙测验图表集[R]. 上海: 长江委水文局长江口水文水资源勘测局, 2012.
- [20] 长江委水文局长江口水文水资源勘测局. 2012年8月长江口北槽航槽中动船水流泥沙测验图表集[R]. 上海: 长江委水文局长江口水文水资源勘测局, 2012.
- [21] 顾峰峰. 南港—北槽深水航道三维悬沙数模开发和应用研究[R]. 上海: 上海河口海岸科学研究中心, 2014.
- [22] 王元叶, 王钟寅. 北槽近底水沙运动坐底三脚架观测报告[R]. 上海: 上海河口海岸科学研究中心, 2014.
- [23] 彭瑞善, 李慧梅. 泥沙的动水沉速及对准静水沉降法的改进[J]. 泥沙研究, 1997(2): 74-78.
- [24] 王凉, 金鹰. 黏性泥沙动水沉降特性研究[J]. 水道港口, 1994(4): 1-5.
- [25] Wang X H. Tide-induced sediment resuspension and the bottom boundary layer in an idealized estuary with a muddy bed[J]. Journal of Physical Oceanography, 2002, 32: 3 113-3 131.
- [26] 洪柔嘉, 应永良. 水流作用下的浮泥起动流速试验研究[J]. 水利学报, 1988(8): 49-55.

(本文编辑 武亚庆)