

浮泥水域水流挟沙力公式初探

马进荣^{1,2}, 张行南¹

(1. 河海大学, 江苏 南京 210098; 2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘要: 浮泥发育水域水体的含沙量通常变幅较大,无法与水流流速建立良好关系. 在分析浮泥水域含沙量时空变化特征及常用挟沙力公式的基础上,提出了以浮泥重度为参数的挟沙力公式. 该公式建立了浮泥水域水体含沙量与浮泥床面泥沙条件的关系,使泥沙数学模型中泥沙输运过程的数值模拟结果更加符合实际情况,有助于提高泥沙数值模拟精度.

关键词: 浮泥; 挟沙力; 数值模拟

中图分类号: TV148:0242

文献标识码: A

文章编号: 1009-640X(2010)01-0050-06

浮泥是淤泥质海岸河口地区特有的一种泥沙运动形态. 早在20世纪50年代,我国在天津新港回淤研究中就有所发现,之后在黄河口、长江口、连云港、珠江口及其他淤泥质海岸河口地区也相继发现^[1]. 监测资料表明,河口航道的底部往往存在一层流动的悬移质,特别是在疏浚的航槽内,浮泥运动更加普遍. 通过对浮泥的形成、发展和运移特性研究,较好地分析了浮泥运动水域港口、航道的骤淤现象;成功地解释了疏浚抛泥对周围环境及港口回淤的影响;也证明了淤泥质海岸河口的海底演变过程与浮泥运动有着密切联系. 针对如何利用浮泥增加航深、减少疏浚工程量也开展了一系列的研究,但浮泥水域的泥沙数值模拟工作还处在起步阶段,目前并无有效的模式提出.

制约浮泥水域泥沙数学模型的因素是多方面的,除了浮泥床面泥沙交换机理外,水流挟沙力公式也是主要因素之一. 在浮泥水域,通常随着潮涨潮落,水体含沙量会有大幅度的变化,这种变化幅度是难以单纯依靠水流流速的2次方或3次方建立关系的,而目前常用的水流挟沙力公式大都是建立与水流流速的指数关系式. 本文以浮泥发育的椒江口为例,通过实测资料的分析研究,探求一种适应浮泥床面条件的水流挟沙力关系式,使其适用于泥沙数学模型模拟研究.

1 浮泥水域含沙量时空变化特征

浮泥密度约为 $1.05 \sim 1.2 \text{ t/m}^3$,具有一定的流动性,受扰动较易悬浮进入上层水体,使得上层水体含沙量骤增,这也是河口区最大浑浊带的形成原因之一. 在平面二维泥沙数学模型中,计算含沙量为沿垂线水深的平均含沙量. 为研究浮泥水域适用的挟沙力公式,有必要先分析浮泥水域垂线平均含沙量的时空变化特征. 以椒江河口为例,河口水域共布置15条垂线,于2003年9月和2004年4月分别进行了两季全潮测验. 测验结果表明,椒江口含沙量由高到低依次为河口、河口浅滩、河口边滩、外海域. 位于河口区的1#垂线平均含沙量达 10 kg/m^3 ,外海垂线约 0.2 kg/m^3 . 各垂线含沙量随潮动力强弱有所差别,一般大潮最大,中潮次之,小潮最小. 水域含沙量,一般冬季大于夏季,外海区垂线的这一特征尤为明显.

收稿日期: 2009-04-10

作者简介: 马进荣(1971-),男,江苏高淳人,高级工程师,硕士,主要从事河口海岸水动力、水环境及工程泥沙研究.

E-mail: jrma@nhri.cn

垂线含沙量大小随潮涨潮落也有明显的变化,以夏季大潮为例,选取部分垂线含沙量特征值见表 1. 可见,含沙量随潮时变化幅度因位置的不同而不同,河口浅滩水域最大含沙量与最小含沙量的最大比值为 35.1,外海区最小为 4.5. 椒江口含沙量在一个潮周期内的变化与其床面泥沙条件密切相关,椒江口及其附近水域的底质中值粒径相对较小,一般介于 0.004 ~ 0.021 mm,大部分为 0.008 mm,与悬沙粒径基本一致.

表 1 垂线含沙量特征值

Tab.1 Characteristics of suspended loads

点 号	垂线平均含沙量/ (kg · m ⁻³)			含沙量极值比	点 号	垂线平均含沙量/ (kg · m ⁻³)			含沙量极值比
	平 均	最 大	最 小			平 均	最 大	最 小	
1	5.564	10.027	1.732	5.8	9	0.226	0.437	0.071	6.2
2	2.691	9.026	0.257	35.1	10	0.174	0.458	0.050	9.2
3	1.880	4.541	0.206	22.0	11	0.198	0.351	0.071	4.9
4	0.413	0.805	0.107	7.5	12	0.215	0.414	0.080	5.2
5	0.345	0.714	0.094	7.6	13	0.138	0.237	0.052	4.6
6	0.345	0.714	0.094	7.6	14	0.204	0.452	0.054	8.4
7	0.190	0.443	0.058	7.6	15	0.125	0.246	0.055	4.5
8	0.257	0.586	0.087	6.7					

2 常用挟沙力公式回顾

张瑞瑾^[2]利用能量平衡及悬移质制紊假说,推导出挟沙能力公式:

$$S_* = k \left(\frac{V^3}{gD\omega} \right)^m \tag{1}$$

该公式具有较普遍的代表性,基于河流(单向流)理论推导的挟沙力公式基本都类同于上式. 式中的两个参数 k 和 m ,可利用实测资料进行回归分析率定;但在进行数值模拟计算时,一般很难有足够多的实测资料可供率定参数,往往需要依靠经验给出.

目前常用于泥沙数学模型中的挟沙力公式很多,其基本形式为:

$$S_* = f(V, D, \omega, d, g, \nu, S_t, \dots) \tag{2}$$

式中: V 为水流流速; D 为水深; ω 为悬沙沉速(需考虑絮凝影响); d 为悬沙平均粒径; g 为重力加速度; ν 为水的运动黏性系数; S_t 为水体盐度. 影响挟沙力的诸多因素中以流速和水深最为主要,按这两个主要因素组合可大致将目前常用公式分为两类,即挟沙力与水流流速 2 次方成比例(刘家驹^[3]、辛文杰^[4]、陆永军^[5]、赵冲久^[6]等)或与水流流速 3 次方成比例(沙玉清^[7]、窦国仁^[8]等).

椒江口以浮泥发育著称,河口水域的泥沙特征具有浮泥水域泥沙输运代表性. 选取几个有代表性的挟沙力公式(见表 2),根据椒江口实测资料计算挟沙力过程与实测过程的比较见图 1.

表 2 选用的常用挟沙力公式及其参数取值

Tab.2 Some sediment carrying capacity formulas and their parameters

序 号	公 式	参 数	备 注
1	$S_* = k \frac{V^2}{gD\omega}$	$k=0.07,$ $\omega=0.0005$ (各式相同)	辛文杰公式
2	$S_* = \alpha \frac{\gamma\gamma_s}{\gamma_s - \gamma} \frac{n^2 V^3}{D^{4/3} \omega}$	$\alpha=0.023, n=0.018$ $\gamma_s=2650, \gamma=1000$	窦国仁公式
3	$S_* = k \left(\frac{V^3}{gD\omega} \right)^m$	$k=0.02$	沙玉清公式

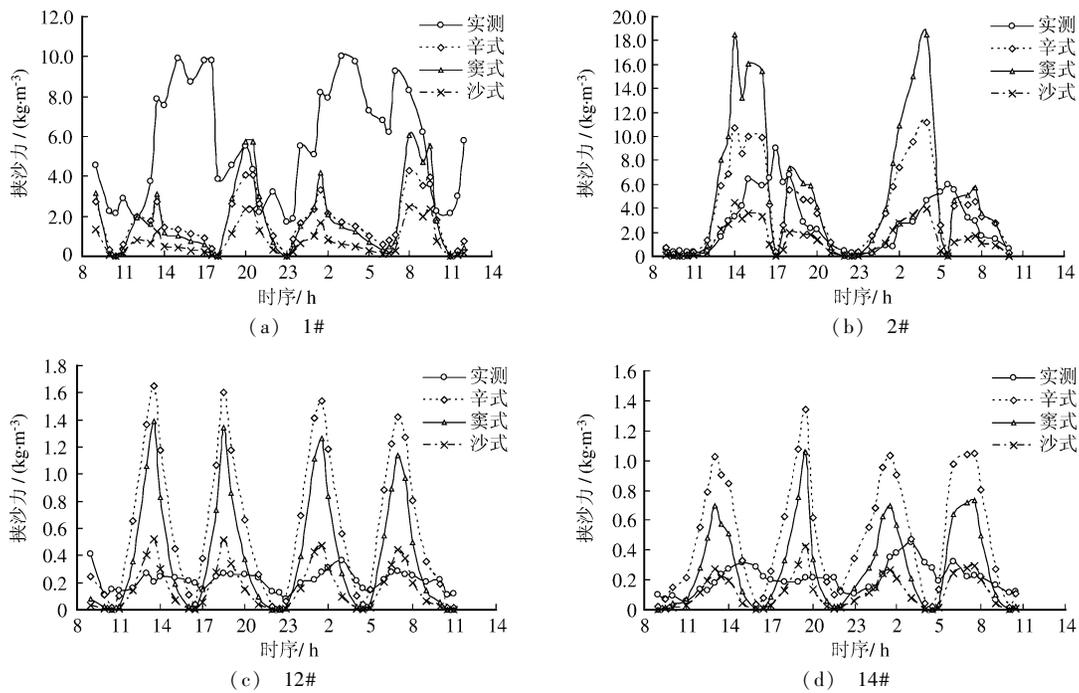


图1 椒江口2003年大潮实测含沙量与常用挟沙力计算比较

Fig. 1 Comparison of measured sediment concentration with calculated sediment-carrying capacity in Jiaojiang Estuary in 2003

可见,各挟沙力公式计算的挟沙力过程线均与实测的不能吻合.外海区计算挟沙力峰值均大于实测值,河道及河口边滩实测含沙量峰值均大于计算值.说明无论采用何种常用挟沙力公式进行计算,如果挟沙力公式中系数取为常数,则可能使河道和河口边滩模拟含沙量偏小而外海模拟值偏大.

各计算挟沙力过程线在一个潮周期内均有4个峰谷,挟沙力峰值出现在涨、落急时刻,谷值出现在涨、落憩流时刻.而实测含沙量过程一般只有2个峰谷,峰值出现在落憩附近,浅水区在落憩过后的初涨期,深水区往往在落憩前;谷值往往并不明显,一般涨憩后含沙量较小.

计算的挟沙力与水深有关,在椒江口河口拦门沙及河口边滩区域,理论基面下水深较潮差小,计算挟沙力在该浅水区有明显的涨、落潮区别,落潮期计算挟沙力峰值明显大于涨潮期,这一现象与实测过程不符,实测涨、落潮含沙量峰值差别并不明显,最大实测含沙量往往并非落急或落憩时刻,而是初涨阶段.

当流速趋于零时,计算挟沙力也趋于零,而实测含沙量过程最小值并不接近于零,离河口及近岸边滩越近,实测含沙量的最小值越大,水域似乎存在一个基础含沙量场,位置不同则基础含沙量不同.

上述比较表明,要想根据实测资料确定计算域的挟沙力公式,似乎只有陆永军的模式^[5]能够较好胜任,即随水域位置取不同的系数值及基础含沙量值.陆永军挟沙力公式往往需要有大量的实测资料来确定不同位置的挟沙力系数和基础含沙量值,而实际工作中的资料往往不能满足需要.

3 经验挟沙力公式回顾

应用基于理论和试验推导的挟沙力公式所计算的含沙量过程与实测含沙量过程有诸多不相吻合的地方,说明浮泥水域悬沙输运有其复杂性.由于含沙量过程相位与流速相位有明显的滞后,而且不同水域含沙量峰值差别较大,从理论上推导出符合椒江口的挟沙力公式相当困难,根据实测资料利用回归分析等方法建立经验公式一度成为研究的重要手段.

赵龙保等^[9]于 1991 年提出了椒江段河道及近口的经验公式:

$$S_f = \alpha V_f^m S_e^n; \quad S_e = \alpha V_e^m S_f^n \quad (3)$$

式中: V 为半潮平均流速; S 为含沙量, 当其处于等式右端时为前期含沙量; 下标 e, f 分别表示落潮和涨潮; α, m, n 为公式参数, 不同断面的取值不同, 涨、落潮取值也各不相同. 上述公式虽然不适用于数值模拟计算, 但表明椒江河口水体含沙量随空间位置和潮流不同阶段而存在系统性差别. 张鹰^[10]根据 1989 年 10 月水文测验资料提出了类似形式的椒江口断面(白沙至黄琅)含沙量计算式, 大潮时计算式为

$$S = 2.132 S_{前}^{0.209} h^{-0.65} \quad (4)$$

取 2003 年靠近白沙站的 4# 垂线, 采用 (4) 式计算的大潮含沙量过程与实测过程比较见图 2. 可见计算含沙量明显小于实测值, 含沙量计算峰值仅为实测的 1/3. 一方面, 根据少量组次含沙量实测资料采用经验方法率定的含沙量估算式可能会缺乏足够代表性; 另一方面说明椒江口含沙量分布影响因素较复杂, 可能由于浮泥运动改变床面泥沙条件, 影响了水体含沙量的分布.

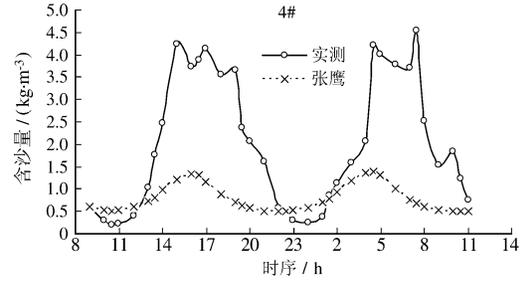


图 2 经验含沙量计算式的一个检验

Fig. 2 A test for empirical formula

4 推荐的浮泥水域水流挟沙力公式

目前泥沙数学模型中常用的几个挟沙力计算式, 均不能正确反映浮泥水域水体含沙量的大幅变化, 即使是根据椒江口若干组实测资料率定的包含前期含沙量和潮动力因子的经验挟沙力计算式也不具有代表性, 在不同的水文和气象条件下, 所反映的挟沙力与实际水体含沙量有很大的差别. 为此, 必须弄清楚决定浮泥水域水体含沙量的关键性因素. 论文作者在椒江口的数值模拟过程中, 曾尝试了几乎所有常用挟沙力计算式, 但数值试验均以失败告终. 这些挟沙力公式不能体现浮泥水域含沙量分布特征的关键因素是其参数确定和相关概化不符合浮泥床面的泥沙交换机理. 因此, 需要构建正确反映浮泥特征的挟沙力计算式.

水流输运的挟沙力需建立在浮泥的特征指标上, 通过浮泥层指标的修正来反映水体含沙量的变化, 满足泥沙数学模型的调试计算. 上世纪 50 年代, 在塘沽新港进行了较为系统的细颗粒水域含沙量与流速观测, 观测资料有不同的床面泥沙条件, 依据该资料, 黄建维等^[11]分析整理得到了浮泥水域挟沙力的基本式:

$$S_{max} = K \frac{V_{max}^2}{gD} \quad (5)$$

式中: S_{max} , V_{max} 分别为涨、落潮的最大含沙量 (kg/m^3) 和最大流速 (m/s); D 为平均水深 (m). 并给出了 3 种浮泥重度条件下的 K 值. 罗肇森等^[12]在此基础上, 为了找出规律并考虑泥沙研究常用平均流速、平均含沙量的情况, 重新整理并采用最小二乘法拟合后得到如下公式:

$$S_* = 784 \gamma_w^{-12.8} \frac{V^2}{gD} \quad (6)$$

式中: S_* 为浮泥挟沙力 (kg/m^3); γ_w 为床面浮泥的湿密度 (t/m^3); V 为全潮平均流速 (m/s); D 为平均水深 (m); g 为重力加速度 (m/s^2).

取泥沙干密度 $\gamma_s = 2650 \text{ kg}/\text{m}^3$, 水的密度为 $\gamma = 1.0 \text{ t}/\text{m}^3$, 上式可改写成如下形式:

$$S_* = 0.296 \gamma_s \left(\frac{\gamma}{\gamma_w} \right)^{12.8} \frac{V^2}{gD} \quad (7)$$

罗肇森浮泥挟沙力公式引进了浮泥密度, 认为同一种类的细颗粒泥沙的黏性及其他一些特性可以通过泥沙密度来反映, 新港实测资料与公式的计算值吻合程度很高, 说明通过浮泥密度反映挟沙力参数随床面泥沙条件不同而改变是可行的. 浮泥密度变幅通常介于 $1.05 \sim 1.30 \text{ t}/\text{m}^3$ 之间, 对应挟沙力系数变幅介于

420~27 之间,即通过调试浮泥密度可使水体挟沙能力相差 10 倍以上.浮泥密度对挟沙力的影响很大,这与天然情况是吻合的^[13].

罗肇森浮泥挟沙力公式的结构形式与辛文杰等在近海水域泥沙数值模拟计算中采用的挟沙力形式是相同的,罗肇森浮泥挟沙力公式可以推广应用于泥沙数值模拟,公式中的平均流速推广应用为流场的瞬时流速,需要确定的就是浮泥密度,当浮泥密度取 1.15 t/m^3 时,罗肇森挟沙力公式与辛文杰^[4]在伶仃洋海域采用的挟沙力计算式很接近.

5 结 语

(1)以椒江口为例分析了浮泥水域含沙量分布的典型特征,结合传统挟沙力公式推导理论选取目前常用于泥沙数值模拟的挟沙力典型表达式,计算了一个潮周期的含沙量过程,并与实测含沙量过程进行了比较分析,论证了目前常用挟沙力公式用于浮泥水域的缺陷;对椒江口经验挟沙力公式也进行了验证计算,分析了经验挟沙力不具代表性的原因;

(2)浮泥水域的泥沙输运特征与浮泥运动密不可分,不能正确反映床面浮泥运动的挟沙力公式就不能正确反映浮泥水域的泥沙输运.从浮泥改变床面的供沙条件出发,整理分析了基于浮泥密度的挟沙力计算式,并在实际工程计算中证明了该公式在浮泥水域的适用性,也验证了该浮泥挟沙力公式与常用挟沙力公式的相容性.

参 考 文 献:

- [1] 曹祖德. 浮泥特性研究进展[J]. 天津大学学报, 2002(3): 34-40. (CAO Zu-de. A review on fluid mud behavior study [J]. Journal of Tianjin University, 2002(3): 34-40. (in Chinese))
- [2] 张瑞瑾. 长江中下游水流挟沙力研究[J]. 泥沙研究, 1959(2): 54-73. (ZHANG Rui-jin. Study on sediment carrying capacity in the middle and down stream of Yangtze River[J]. Journal of Sediment Research, 1959(2): 54-73. (in Chinese))
- [3] 刘家驹. 在风浪和潮流作用下淤泥质浅滩含沙量的确定[J]. 水利水运工程学报, 1988(2): 69-73. (LIU Jia-ju. Determination of the silt concentration on shoal under the action of wind waves and tidal currents[J]. Hydro-Science and Engineering, 1988(2): 69-73. (in Chinese))
- [4] 辛文杰. 潮流波浪综合作用下河口二维悬沙数学模型[J]. 海洋工程, 1997, 15(1): 30-47. (XIN Wen-jie. Numerical model of 2D estuarial suspended sediment motion under the interaction of tidal flow and waves[J]. The Ocean Engineering, 1997, 15(1): 30-47. (in Chinese))
- [5] 陆建宇, 陆永军, 李浩麟. 瓯江河口挟沙能力的初步探讨[J]. 海洋工程, 2002, 20(1): 46-51. (LU Jian-yu, LU Yong-jun, LI Hao-lin. A primary research for sediment carrying capacity in Oujiang Estuary[J]. The Ocean Engineering, 2002, 20(1): 46-51. (in Chinese))
- [6] 赵冲久, 秦崇仁, 杨 华, 等. 波流共同作用下粉沙质悬移质运动规律的研究[J]. 水道港口, 2003, 24(3): 101-108. (ZHAO Chong-jiu, QIN Chong-ren, YANG Hua, et al. Study on moving patterns of suspended load over fine sand bed under wave-current co-existent conditions[J]. Journal of Waterway and Harbour, 2003, 24(3): 101-108. (in Chinese))
- [7] 沙玉清. 泥沙运动学引论[M]. 北京: 中国工业出版社, 1965. (SHA Yu-qing. Introductory theory on sediment transportation[M]. Beijing: China Industry Press, 1965. (in Chinese))
- [8] 窦国仁, 董凤舞, 窦希滨. 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, DOU Xi-bin. Sediment transport carrying capacity under wave and tide[J]. Chinese Science Bulletin, 1995, 40(5): 443-446. (in Chinese))
- [9] 赵龙保, 祝永康. 椒江口挟沙力经验关系初步分析[J]. 泥沙研究, 1991(4): 69-75. (ZHAO Long-bao, ZHU Yong-kang. Pilot study on sediment transport carrying capacity by experience relationship in Jiaojiang Estuary[J]. Journal of Sediment Research, 1991(4): 69-75. (in Chinese))

- [10] 张 鹰. 椒江河口悬沙回归模式及其应用[J]. 河海大学学报, 1992, 20(4): 118-122. (ZHANG Ying. A regression model applied on suspended load in Jiaojiang Estuary[J]. Journal of HoHai University, 1992, 20(4): 118-122. (in Chinese))
- [11] 黄建维, 冯玉林. 新港泥沙回淤研究[R](第一辑). (HUANG Jian-wei, FENG Yu-lin. Pilot analyzing of fluid mud filed data in fairway of Tianjin New Port. Sedimentation Silting Research at Tianjin New Port(1st.))
- [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))
- [13] 马进荣, 罗肇森, 张晓艳. 有浮泥水域的平面二维泥沙数学模型研究[J]. 泥沙研究, 2008(5): 49-53. (MA Jin-rong, LUO Zhao-sen, ZHANG Xiao-yan. 2D numerical model for suspended sediment transport in tidal area with fluid mud[J]. Journal of Sediment Research, 2008(5): 49-53. (in Chinese))

A study of sediment-carrying capacity in fluid mud area

MA Jin-rong^{1,2}, ZHANG Xing-nan¹

(1. Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: The sediment concentration of suspended load always varies in large scale and its relationship with the current velocity in fluid mud area can not be well established. A formula of sediment-carrying capacity based on fluid mud density is recommended for numerical model of sediment. The formula combines the suspended load with bed sediment conditions well in fluid mud area. It is possible to insure sediment transport process according to natural phenomenon and increase the accuracy of sediment simulation in the numerical model by this way.

Key words: fluid mud; sediment-carrying capacity; numerical model