

瓯江口水流挟沙力公式探讨

刘金贵¹, 李瑞杰², 刘钦政¹

(1. 国家海洋环境预报中心, 北京 100081; 2. 河海大学 港口、海岸及近海工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 采用瓯江口实测泥沙资料, 对多个典型挟沙力公式进行了系统比较; 对瓯江口同步的平均流速和平均含沙量进行分析, 探讨适合该河口的挟沙力关系, 并引入泥沙因子, 考虑泥沙粒径对水流挟沙力的影响。结果认为: 各挟沙力公式的计算结果过程曲线趋势一致, 只是存在量级上的差别; 结合实测泥沙资料进行分析, 采用河口、海岸适用性较好的水流挟沙力公式, 考虑泥沙粒径对挟沙力的影响, 引入泥沙因子分析拟合瓯江口水流挟沙力公式。旨在揭示不同挟沙力公式之间的联系, 以及河口海域水流挟沙力拟合过程, 为进一步探讨河口海岸含沙量分布和悬浮泥沙输运提供思路。

关键词: 水流挟沙力; 瓯江口; 泥沙因子; 当量粒径

中图分类号: P76 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2013)05-0071-06

我国河口、海岸多为粉沙或淤泥所覆盖, 在潮流和波浪共同作用下, 泥沙极易悬浮和输移, 对潮流和波浪共同作用下的挟沙能力规律的研究, 在科学上和应用上均有重要意义。挟沙力反映了水流挟带悬移质和推移质的能力, 一般仅考虑水流挟带悬移质中床沙质的能力。

对于水流挟沙力, 诸多学者已基于不同理论和假设进行了大量研究, 并取得了丰富的研究成果。张瑞瑾^[1]整理了大量的长江、黄河、渠道及水槽实验资料后, 在“制紊假说”的指导下, 得到了应用广泛的悬移质挟沙力公式。钱宁^[2]在专著中总结了 Einstein, Bagnold, Engelund and Hansen, Ackers and White, 张瑞瑾, 沙玉清等挟沙力公式。其中张瑞瑾^[1]公式既有一定的理论基础, 又考虑经验修正, 体现了对泥沙运动基本问题的研究。20 世纪 70 年代, 窦国仁^[3]从能量概念出发, 导出了悬移质的水流挟沙力公式, 利用长江和黄河各水文站测验资料及水槽资料验证, 并应用于葛洲坝工程坝区泥沙模型设计。基于能量平衡原理、边界层理论、经验关系、泥沙运动基本理论等, 诸多学者针对该问题进行了研究, 并得到了各自较好的成果^[4-9]。

本文在以往研究基础上, 利用典型河口实测泥沙资料, 将两类几个常用的不同挟沙力公式进行了计算比较; 并结合实测含沙量数据, 采用河口、海岸适用性较好的挟沙力公式, 考虑含沙量为半潮平均情况, 讨论水流挟沙力公式。旨在揭示不同挟沙力公

式之间的联系, 以及河口海域水流挟沙力拟合过程, 为进一步探讨河口海岸含沙量分布和悬浮泥沙输运提供思路。

1 水流挟沙力

1.1 基本形式

挟沙力是指海底泥沙在浪、潮、流作用下不断悬浮, 又在重力作用下沉降, 当水体中悬浮泥沙与悬浮功平衡时, 此时的含沙量即为挟沙力^[10]。影响水流挟沙力的因素有以下几个方面^[11]: (1) 水流条件, 包括平均流速 U 、水深 h 、水力坡度 J 、水的容重 γ 等; (2) 泥沙物理特性, 包括容重 γ_s 、颗粒沉降速度 ω 、粒径 D 、断面宽度 B 等; (3) 底床泥沙构成。结合不同的影响因素, 挟沙力 S^* 可以写成如下的函数关系:

$$S^* = F(U, h, g, J, \gamma, \gamma_s - \gamma, \nu, \omega, D, B) \quad (1)$$

通过量纲分析, 可进一步简化为:

$$S^* = F\left(\frac{U^2}{gh}, \frac{U}{\omega}, \frac{D}{h}, \frac{Uh}{\nu}, \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}, \frac{B}{h}\right) \quad (2)$$

1.2 各公式介绍

迄今为止, 用于计算水流挟沙力的诸多公式,

收稿日期: 2012-02-13; 修回日期: 2013-02-28

基金项目: 国家海洋公益性行业科研专项经费资助项目(201005036)

作者简介: 刘金贵(1981-), 男, 甘肃平凉人, 博士, 主要从事近岸泥沙输运与海洋生态动力学研究, E-mail: liujg@nmeqc.gov.cn

从不同影响参数出发都获得了较好的结果。由于各种理论公式、经验或半经验公式所涉及的因素不同,

形式复杂,且受地域限制而导致针对性较强,至今尚未得到一致认可的研究结果。

表 1 公式介绍

Tab. 1 Description of the formula

文献	公式	公式说明
窦国仁 ^[3]	$S^* = \alpha_0 \frac{\gamma_s \gamma}{\gamma_s - \gamma} \left(\frac{U^3}{C^2 h \omega} + \beta_0 \frac{H^2}{h T \omega} \right)$	C 谢才系数, H 为波高, T 为波周期, α_0 和 β_0 由实验和现场资料率定。根据大量河口、海岸海域实测资料率定得: $\alpha_0 = 0.0023$, $\beta_0 = 0.0004$ 。
李义天 ^[5]	$S^* = K_0 \left(0.1 + 90 \frac{\omega}{U} \right) \left(\frac{U^3}{gh\omega} \right)^m$	$K_0 = 0.245$, $m = 1.0$, U 为水体垂线平均流速, h 为水深, ω 为沉降速度(m/s)。
曹祖德 ^[8]	$S^* = \alpha \frac{\gamma_s \gamma (u_c + \beta u_w)^3}{\gamma_s - \gamma gh\omega}$	u_c 为流的速度, u_w 波速。淤泥质: $\alpha = 4.5 \times 10^{-5}$, $\beta = 0.5$; 粉沙质海岸: $\alpha = 5.7 \times 10^{-5}$, $\beta = 0.6$; 沙质海岸: $\alpha = 6.9 \times 10^{-5}$, $\beta = 0.7$ 。
张瑞瑾 ^[1]	$S^* = k \left(\frac{U^3}{gR\omega} \right)^m$	U 为平均流速(m/s), R 为水力半径(m), ω 为泥沙沉速(m/s), k 为包含量纲的系数(kg/m^3), m 为指数。 k 和 m 值由资料检验。
张红武 ^[12]	$S^* = \gamma_s \frac{\lambda^{3/2} \eta \gamma_m}{8^{3/2} k (\gamma_s - \gamma_m) g R \omega} \ln \left(\frac{h}{6d_{50}} \right)$	λ 为水流阻力系数, η 为挟沙效率系数, d_{50} 为泥沙中值粒径, γ_m 为浑水重度, k 为卡门常数。

表中公式均包含了 $U^3/(gR\omega)$ 无因次数,这是由于河道中泥沙颗粒较大,水动力条件较为单一,重力作用 ω/U 较强,基于重力理论的形如 $S^* \propto U^3/(gR\omega)$ 的公式得到了广泛的应用。而刘家驹^[10]结合天津港海区和连云港海区的实测资料,建立了半经验半理论公式:

$$S^* = 0.0273 \gamma_s \frac{(|u_c| + |u_w|)^2}{gh} \quad (3)$$

式中, γ_s 为泥沙颗粒容重(kg/m^3), u_c 为风吹流及潮流的合成流速, u_w 为波动水流的平均流速。在淤泥质海岸,应用效果较好,我国《海港水文规范》JTJ213-98 曾推荐为计算水体挟沙力的公式。

1.3 各挟沙力公式比较分析

基于瓯江口实测数据(站位布置如图 1),利用窦国仁挟沙力公式、谢鉴衡挟沙力公式、张红武公式、曹祖德挟沙力公式和刘家驹公式五个具有一定代表性的挟沙力公式进行计算比较。图 2~图 6 中选取 S1, S5, S9, S14, S19 七个站位分别就相应大、中、小潮条件下的挟沙力进行计算比较^[12]。测验时间:大潮为 2002 年 7 月 12 日 17:00 ~ 13 日 20:00,中潮为 2002 年 7 月 16 日 7:00 ~ 17 日 1:00,小潮为 2002 年 7 月 19 日 11:00 ~ 20 日 14:30。7 个测站最小水深在北水道附近的 S5,为 6.0 m,测验期间避开了较大风期,

观测条件良好。研究中以实测含沙量的垂线加权平均值为挟沙力的研究对象,能正确反映各层含沙量在加权平均中的贡献。

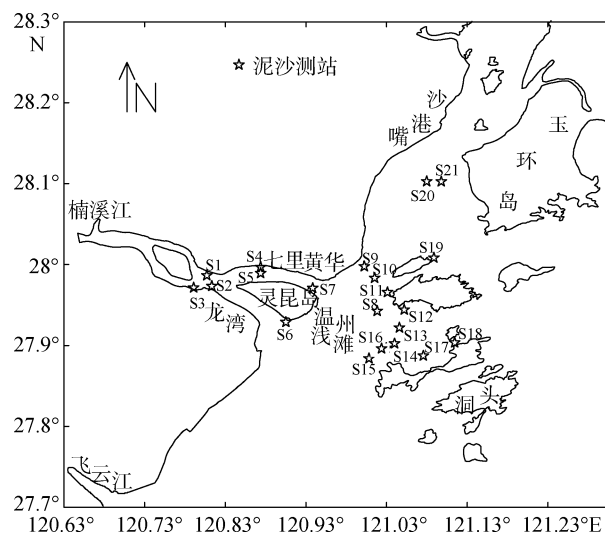


图 1 瓯江河口泥沙测站布置

Fig. 1 The sediment stations of the Oujiang Estuary

可直观看出,各挟沙力公式的计算结果过程曲线趋势一致,说明这些不同挟沙力公式间存在着内在联系,在实际应用时存在量级的差别。上述五个公式均是经过实践检验并且适应性较好的公式,可用于瓯江口挟沙力公式的探讨。

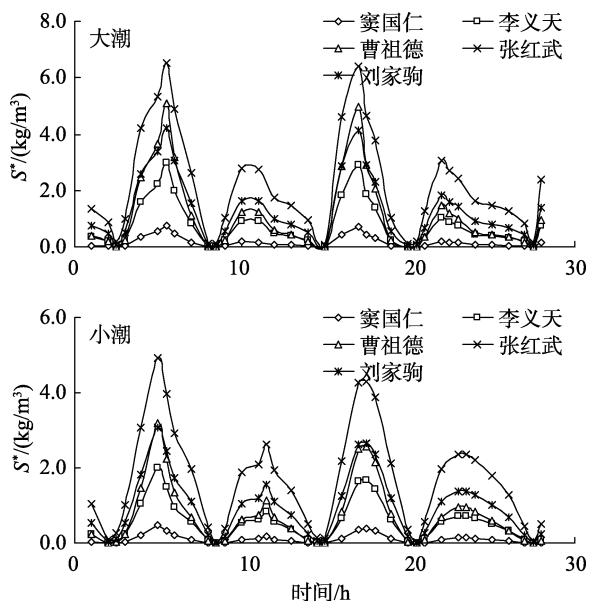


图 2 S1 测站不同挟沙力公式计算结果比较

Fig. 2 Comparison of the results using several sediment carrying capacities at S1

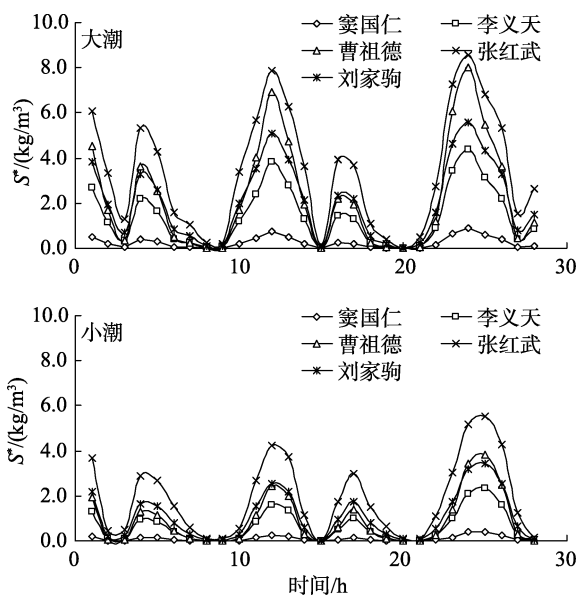


图 3 S5 测站不同挟沙力公式计算结果比较

Fig. 3 Comparison of the results using several sediment carrying capacities at S5

比较五个挟沙力公式计算结果, 挟沙力随流速的增大而增大, 但当流速较大时, 计算结果量级上相差较大。张红武挟沙力公式计算结果最大, 公式考虑阻力系数, 适用于河道情况; 而曹祖德挟沙力公式计算结果相对也较大, 结合曹祖德公式背景, 说明公式适用于淤泥质海岸, 无径流情况; 对于粒径较细的淤泥底质, 刘家驹公式、李义天公式和窦国仁

公式的计算结果较为接近; 而粒径较粗的 S1 和 S5 测站, 刘家驹公式和李义天公式基本接近, 窦国仁公式计算结果偏小。

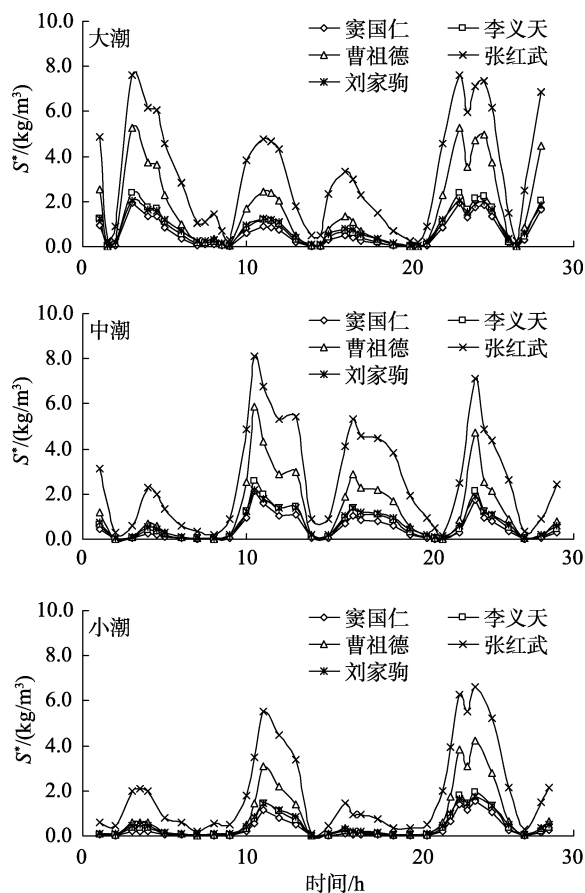


图 4 S9 测站不同挟沙力公式计算结果比较

Fig. 4 Comparison of the results using several sediment carrying capacities at S9

2 瓯江口水流挟沙力公式

通过不同挟沙力公式的系统比较, 结合瓯江口实测含沙量数据分析, 采用河口、海岸适应性较好的水流挟沙能力公式^[11]:

$$S^* = k_2 \frac{U^2}{gh} \quad (4)$$

考虑含沙量为半潮平均情况, 分别就涨潮和落潮条件下进行相关系数的拟合(图 7)。

从相关系数 R 的值可以看出, 涨潮过程拟合较好, 而落潮过程拟合稍差, 但整体具有一定的可靠性, 表明半潮平均含沙量 S 、半潮平均流速 U 及半潮平均水深 h 之间存在相关的函数关系。

对于黏性泥沙, 不管其分散体粒径多小, 在海

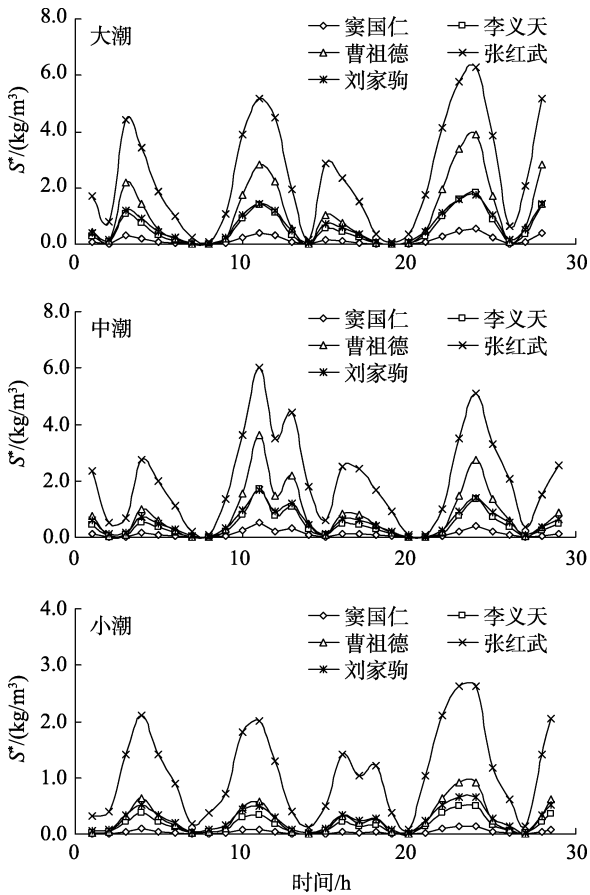


图5 S14 测站不同挟沙力公式计算结果比较

Fig. 5 Comparison of the results using several sediment carrying capacities at S14

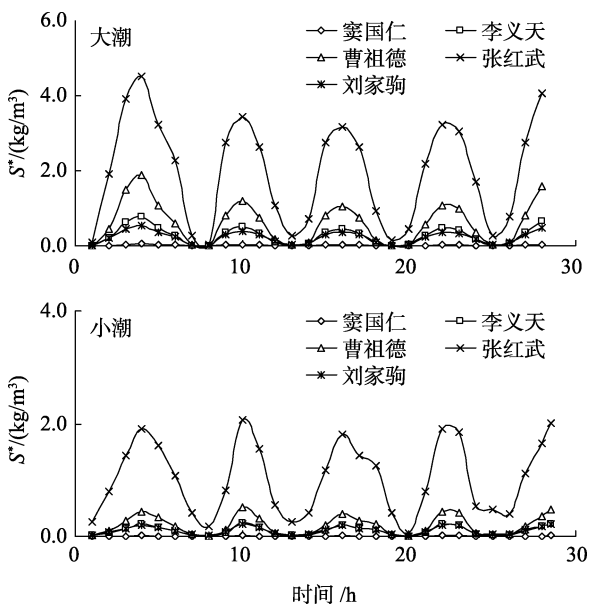


图6 S19 测站不同挟沙力公式计算结果比较

Fig. 6 Comparison of the results using several sediment carrying capacities at S19

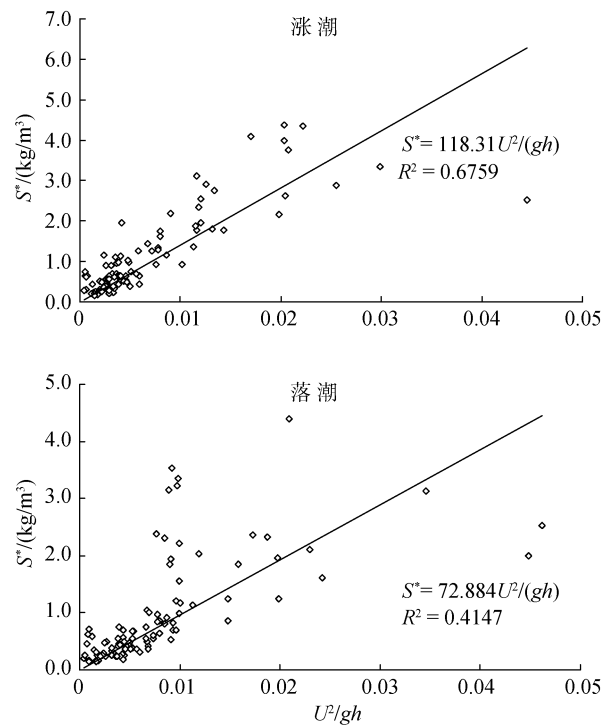


图7 涨、落潮过程的拟合关系

Fig. 7 The fitting relationship during flood or ebb tide

水条件下的絮凝当量粒径,均以 0.03 mm 计^[11]。故在单一淤泥质海岸的挟沙力公式中可以不出现泥沙因子(粒径或沉速)。但当粒径大于 0.03 mm 以后,颗粒之间的黏着力随着粒径的增大而逐渐降低,此时的泥沙起动流速或起动波高都会随之降低。

基于淤泥质泥沙的挟沙力公式(3),通过引入泥沙因子构造了淤泥质泥沙和黏粉质及沙质泥沙挟沙力的统一公式^[11]。泥沙因子的构成形式为:

$$F = \frac{D_0}{D_K + \frac{a}{D_K}} \quad (5)$$

其中 D_0 为特定粒径, $D_0 = 0.11 \text{ mm}$; a 为特定面积, $a = 0.0024 \text{ mm}^2$; D_K 为大于等于 0.03 mm 的泥沙。

在公式(4)中引入泥沙因子 F 后变为:

$$S^* = k_2 \frac{U^2}{gh} F^{1/F} \quad (6)$$

公式(5)中,当 $D_K = 0.03 \text{ mm}$ 时, $F = 1$, 此时的公式即为淤泥质泥沙的挟沙力公式(4)。随着 D_K 的缓慢增大 F 值也略有增大;当 $D_K = 0.05 \text{ mm}$ 时, $F = 1.122$, 达到最大值;当 D_K 再增大时, F 值开始回落, $D_K = 0.08 \text{ mm}$ 时, $F = 1$ 。当 $D_K > 0.08 \text{ mm}$ 以后, F 小于 1。 F 值的变化过程说明在同等动力条件下,则随着粒径的增大含沙

量也随之增大, $D_K = 0.05 \text{ mm}$ 时, 含沙量达到最大, 即大于淤泥质泥沙含沙量的 10.6%; D_K 继续增大到 0.08 mm 时, 含沙量与淤泥质泥沙时相等; D_K 大于 0.08 mm 时, 含沙量比淤泥质泥沙时小。挟沙力随着粒径的变化过程, 说明了泥沙的黏结力与重力作用之间的关系。

考虑泥沙粒径的影响, 将泥沙粒径大于 0.03mm 和小于 0.03mm 的垂线点分别作相关性分析(如图 8)。可以看出泥沙粒径对挟沙力有一定的影响。在引入泥沙因子之前, 公式(4)中的系数 k_2 综合反映泥沙粒径的影响。

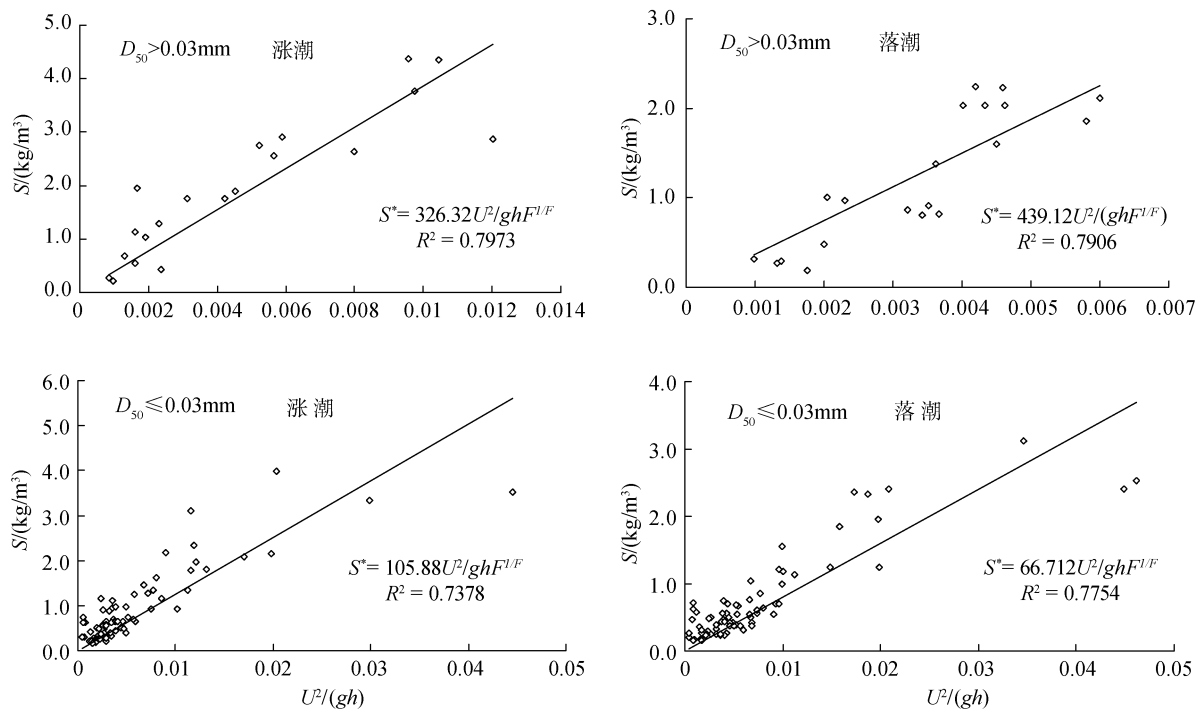


图 8 引入泥沙因子后的拟合关系

Fig. 8 The fitting relationship after introducing sediment factor

3 结论

利用瓯江口实测泥沙资料, 将两类几个常用的不同挟沙力公式进行了计算比较, 各挟沙力公式计算结果过程曲线变化趋势一致, 说明这些不同挟沙力公式间存在着内在联系, 在实际应用时存在量级的差别。对于粒径较细的淤泥底质, 刘家驹公式、李义天公式和窦国仁公式的计算结果较为接近; 而粒径较粗的 S1 和 S5 测站, 刘家驹公式和李义天公式基本接近, 窦国仁公式计算结果偏小。

结合瓯江口实测含沙量数据分析, 采用河口、海岸适用性较好的挟沙力公式, 考虑含沙量为半潮平均情况, 分别在涨潮和落潮过程进行挟沙力公式相关系数的拟合; 引入泥沙因子, 考虑泥沙粒径对挟沙力的影响。拟合公式需要进一步论证其有效性, 并结合数值方法进行模拟, 由水体时、空平均的宏观感念向微观规律展开。

参考文献:

- [1] 张瑞瑾. 河流泥沙动力学[M]. 北京: 水利水电出版社, 1989.
- [2] 钱宁, 万兆惠. 泥沙运动力学[M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- [3] 窦国仁, 董凤舞, 窦希萍. 潮流和波浪的挟沙能力[J]. 科学通报, 1995, 40(5): 443-446.
- [4] 李瑞杰, 罗锋, 周华民. 水流挟沙力分析与探讨[J]. 海洋湖沼通报, 2009, 1: 88-94.
- [5] 李义天. 冲积河道平面变形计算初步研究[J]. 泥沙研究, 1988, 1: 34-44.
- [6] 吴德安, 张忍顺, 严以新, 等. 江苏辐射沙洲潮流水道挟沙力的分析与构建[J]. 水动力学研究与进展, 2007, 22(3): 371-379.
- [7] 刘高峰, 沈焕庭. 非均匀沙水流挟沙力公式改进[J]. 人民长江, 2002, 33(12): 14-15.

- [8] 曹祖德, 李蓓, 孔令双. 波、流共存时的水体挟沙力 [J]. 水道港口, 2001, 22(4):151-155.
- [9] 邢云, 宋志尧, 孔俊. 长江口水流挟沙力公式初步研究[J]. 水文, 2008, 28(1): 64-66.
- [10] 刘家驹. 海岸泥沙运动研究及应用[M]. 北京: 海洋出版社, 2009.
- [11] 刘金贵. 近岸泥沙输运工程及其三维数值模拟研究 [D]. 南京: 河海大学, 2010.
- [12] 张红武, 张清. 黄河水流挟沙力的计算公式[J]. 人民黄河, 1992, 14(11): 7-10.

Investigation on formula of sediment-carrying capacity in the Oujiang Estuary

LIU Jin-gui¹, LI Rui-jie², LIU Qin-zheng¹

(1. National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 100081, China; 2. Hohai University, Nanjing 210089, China)

Received: Feb.,13,2012

Key words: ediment-carrying capacity; the Oujiang Estuary; sediment factor; equivalent particle size

Abstract: Using the sediment data in the Oujiang Estuary, the formulas of sediment-carrying capacity were systematically compared. According to simultaneously averaged velocity and averaged suspended sediment concentration, and also considering the sediment factor, the sediment-carrying capacity in the Oujiang Estuary is discussed. It's concluded that the results of each formula trend to consistency, and there's only difference of value in practice. Applying the more reasonable sediment-carrying formula, and considering the grain size of sediment, the formula at the Oujiang Estuary was analyzed and fitted.

(本文编辑: 刘珊珊)