

近岸海域水流挟沙力研究进展

张文虎¹, 周长友², 甘申东³

1. 国家海洋局南海环境监测中心, 广州 510300
2. 中交四航局第三工程有限公司, 湛江 524005
3. 中电建水环境治理技术有限公司, 深圳 518100

摘要 泥沙输运过程是研究海洋环境问题的一个基础课题, 水流挟沙力是近岸海域泥沙输运研究的一个关键技术。通过对国内外海洋水流挟沙力研究成果的分析, 分析了各类水流挟沙力公式应用的可能性和局限性, 综述了波、流共同作用下的挟沙力研究进展。

关键词 近岸海域; 悬移质; 挟沙力

中国海岸线漫长, 大部分海岸为淤泥和粉沙覆盖, 在水流作用下极易悬浮并输移, 对港口和航道造成淤积, 因此, 对波、流共同作用下的海洋水流挟沙力的研究在学术和实际工程应用中均有重要的意义^[1-4]。波、流共同作用下的海洋水流挟沙力是一个非常复杂的问题, 波浪和潮流两种不同水动力在力学机理上的耦合至今尚未解决, 国内外许多学者从不同角度对波、流共同作用下的挟沙力进行了研究, 取得了一些成果^[5-13]。曹文洪等^[14]从研究方法的角度, 对国内外波浪和潮流共同作用下悬移质挟沙能力研究成果做了全面系统的总结和分类, 并分析了各类挟沙力公式的优缺点。该研究认为波浪和潮流共同作用下挟沙力研究的主要方法有经验分析法、因次分析法、明渠水流挟沙力移植法、平衡法等, 基于海岸地区动力的复杂性和与内河动力的单一性, 恒定流挟沙能力公式用在近岸海域多有不适应性^[15-16], 本文重点讨论目前近岸海域波、流共同作用下海洋水流挟沙力公式研究进展及应用。

1 研究意义

近岸海域泥沙问题深受人们关注, 其研究不仅集中在岸滩演变、底床冲淤、物质输运等带来的地理形态的变化上, 还涉及泥沙输运时吸附、挟带、释放污染物质以及污染物质本身化学作用所带来的环境污染影响。近岸带是人类活动最频繁的地区, 大量营养物质、泥沙以及污染物质等在海洋水动力的作用下从大陆流入海洋, 对中国近岸海域环境造成重大影响。此外, 泥沙的浓度还影响着水体的浑浊程度, 对水生植物的光合作用以及水生动物的生长都会产生一定的影响。作为泥沙研究的关键之一, 海洋水流挟沙力的研究对于海洋工程、水利工程、环境工程乃至海水、淡水养殖业都非常重要。因此, 研究泥沙入海后的输运机理及泥沙在水体中的浓度分布及其变化规律, 对中国海洋生态环境污染的控制和防治具有十分重要的意义。

中国对泥沙研究最早可追溯到古代的都江堰引水

收稿日期: 2018-06-08; 修回日期: 2018-07-08

基金项目: 南海分局局长基金项目(1603)

作者简介: 张文虎, 工程师, 研究方向为海洋环境动力学, 电子信箱: 343004686@qq.com; 甘申东(通信作者), 工程师, 研究方向为河流海岸, 电子信箱: ganshendong@163.com

引用格式: 张文虎, 周长友, 甘申东. 近岸海域水流挟沙力研究进展[J]. 科技导报, 2018, 36(14): 80-87; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2018.14.011

工程。经泥沙工作者的不懈努力奠定了中国泥沙研究的国际地位,学科体系中西贯通,如钱宁、窦国仁、林秉南、韩其为、张瑞瑾、谢鉴衡、刘家驹等在泥沙运动基本理论的研究上都有开创性的工作,为中国泥沙研究做出了很大的贡献。水流挟沙力作为泥沙研究中一个非常重要的理论问题,一直以来为学术界和工程界所重视。一定的水流泥沙及边界条件下,水流所能挟带和输运泥沙的数量,称为水流的挟沙能力。在实际工程中,无论是涉水建筑物的规划设计,还是分析河道、港口航道和河口海岸的冲淤演变、建立数学模型、确定物理模型的相似比尺、解决渠道与管道的水力输送以及大范围的物质输运问题等,均与水流挟沙力这一根本问题密切相关。因此,有必要对已有的泥沙研究成果进行归纳和分析以获得理论和实践中更为合理的泥沙输沙计算方法,希望能为悬沙运动研究提供一些新的思路,为泥沙研究起到积极的作用。

2 近岸海域水流挟沙力公式研究进展

2.1 明渠移植法

欧美国家的学者通常借用明渠单向水流的研究成果,将单向水流输沙公式中重要的“输沙动力因素”(例如床面剪切应力和摩阻流速等)用波、流共存时相应因子代替,从而得到波、流共存时的输沙率公式。Bijker^[17]在1967年提出了波、流共同作用下的床面剪切应力计算模型,继而在1968年首次提出了在明渠水流挟沙力公式中用波、流共同作用下的剪切力和摩阻流速代替单向流时的剪切力和摩阻流速,从而得到波、流共同作用下的输沙率公式。

波、流共存时床面平均剪切应力为

$$\tau_{wc} = \tau_c \left[1 + \frac{1}{2} \left(\xi \frac{u_m}{u_c} \right)^2 \right] \quad (1)$$

波、流共同作用下的时均摩阻流速为

$$u_{wc^*} = u_{c^*} \left[1 + \frac{1}{2} \left(\xi \frac{u_m}{u_c} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

以拜格诺(Bagnold)和恩格隆-汉森公式为例,其明渠输沙率公式为

$$g_s = 0.01 \tau_c \frac{u_c^2}{\omega} \quad (3)$$

$$g_s = 0.05 C_h u_c \frac{u_{c^*}^4}{g^{\frac{5}{2}} \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right)^2 d} \quad (4)$$

用 τ_{wc} 、 u_{wc^*} 代替上式中的 τ_c 、 u_{c^*} 即可得到波、流共同作用下的输沙率公式

$$g_s' = 0.01 \tau_{wc} \frac{u_c^2}{\omega} \quad (5)$$

$$g_s' = 0.05 C_h u_c \frac{u_{c^*}^4}{g^{\frac{5}{2}} \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right)^2 d} \quad (6)$$

式中, u_c 为潮流的时段平均流速, u_m 为最大流速, τ_{wc} 为平均剪切应力, u_{wc^*} 为波流共存时的摩阻流速, $\xi = \frac{z}{h}$ 为相对水深, d 为海域测点水深, ρ 为流体密度, ρ_s 为泥沙的密度, τ_c 为临界切应力。

借鉴成熟的单向流研究成果对不成熟的波、流共存时泥沙运动规律进行研究是一种有效的途径。波、流共存时泥沙运动力学机制不是十分清楚,简单的借鉴明渠单向流的研究成果,对某些重要因子采取直接代替的方法不太恰当。

2.2 刘家驹公式

刘家驹^[18]选择冲淤平衡的开敞淤泥质海域(泥沙主要来源于近岸浅滩侵蚀),通过分析认为近岸海域水体含沙量与波浪、潮流密切相关,也同泥沙沉速和水深等因素有关。通过因次分析将波动流速、潮流速、水深等以 $\frac{|V_1| + |V_2|}{\sqrt{gd}}$ 具有重力流的弗劳德数性质的形式体现,进而得到淤泥质海岸挟沙力的结构形式

$$S_* = \alpha \frac{\gamma_s \gamma}{\gamma_s - \gamma} \left[\frac{|V_1| + |V_2|}{\sqrt{gd}} \right]^n \quad (7)$$

式中, α 和 n 为待定系数; V_1 为潮流时、空平均流速; V_2 为平均波动流速,波浪不破碎时按公式 $V_2 = 0.2 \frac{H}{d} C$ 计算, H 为波高, C 为波速, d 为海域测点水深,波浪破碎时按 $V_2 = \frac{1}{2} (g H_b^2 / d_b)$ 计算, H_b 为破波波高, d_b 为破波水深; γ_s 为泥沙密度; γ 为水密度,取 $\gamma = 1000 \text{ kg/m}^3$; g 为重力加速度,取 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 。

刘家驹通过对天津新港和连云港观测的资料进行分析,得出结论:取 $\alpha = 0.045$, $n = 2$,该公式在淤泥质海岸工程的实际建设中得到了广泛的应用。式(7)可写为

$$S_* = 0.045 \frac{\gamma_s \gamma}{\gamma_s - \gamma} \frac{(|V_1| + |V_2|)^2}{gd} \quad (8)$$

曹祖德^[19]等对该公式提出:(1)公式的通用性不够。上述公式的建立是利用淤泥质海岸的实测资料进行拟合的,大致适用同种类型的海岸,不一定适合其他类型的海岸;(2)将波浪和水流的作用等同了起来。波浪和水流对泥沙的悬扬和沉降所起的作用不同,对挟沙力的贡献不一样,公式中 V_1 和 V_2 以同样份量出现,认为两者对挟沙力的贡献一样,是不合理的;(3)波浪质点速度公式有适用范围。即公式 $V_2 = 0.2 \frac{H}{d} C$,真实值与理论值的误差随水深的增加而迅速增加,当 $d/L=0.5$ 时,误差为72%。

本公式从物理机理出发,采用经验方法确定相关系数,同时考虑不同类型海岸的泥沙问题特点,该公式在淤泥质海岸、沙质海岸和细粉沙海岸中都取得了较好地、广泛地应用。

2.3 窠国仁公式

窠国仁^[20]根据能量平衡的原理,认为提供泥沙悬浮做功的能量是波浪和潮流的时均能量消耗中的一部分,将波浪和潮流用于悬浮泥沙的能量叠加,进而导出波浪共同作用下的挟沙力公式

$$S_* = \alpha \frac{\gamma_s \gamma}{\gamma_s - \gamma} \left(\frac{V^3}{C^2 h \omega} + \beta \frac{H^2}{h T \omega} \right) \quad (9)$$

式中, α 、 β 为待定系数,由实测资料确定; V 为潮流流速; C 为谢才系数; h 为水深; ω 为泥沙沉速; H 和 T 分别为平均波高和周期。

该公式用锦州海域、天津新港海域、江苏连云港海域、上海长江口等国内一些河口和近岸海域的实测资料进行验证,符合良好。当波浪为风浪时,从公式得出了波浪挟沙力与波周期成反比的结论,也就是波周期愈小,挟沙力愈大,这是不合理的。当波浪为涌浪时,公式计算结果与实际情况符合良好。

2.4 曹祖德公式

曹祖德^[19]从边界层理论建立了床面剪切力,进而以能量理论导出了波浪共同作用下的水体挟沙力公式,并用现场实测资料得出有关系数

$$S_* = \alpha \frac{\gamma_s \gamma}{\gamma_s - \gamma} \frac{(u_c + \beta u_w)^3}{gh \omega_s} \quad (10)$$

式中, α 、 β 的取值和海岸类型有关,淤泥质海岸取 $\alpha = 4.5 \times 10^{-5}$, $\beta = 0.5$,粉沙质海岸取 $\alpha = 5.7 \times 10^{-5}$, $\beta = 0.6$,沙质

海岸取 $\alpha = 6.9 \times 10^{-5}$, $\beta = 0.7$; u_c 为潮流的时段平均流速; u_w 为波浪底部水质点最大水平速度, $u_w = \frac{\pi H}{T \sinh\left(\frac{2\pi h}{L}\right)}$;

泥沙沉降速度 ω_s ,在淤泥质海岸絮凝沉速 $\omega_s = 0.04 \sim 0.05$ cm/s,在粉沙质和沙质海岸^[21-25],泥沙粒径为0.03、0.04、0.05、0.06、0.07、0.08、0.09、0.10、0.15和0.20 mm,对应的沉降速度分别为0.05、0.088、0.137、0.198、0.269、0.352、0.445、0.54、1.18和1.97 cm/s。

从式(10)可以看出,含沙量随着泥沙颗粒(沉降速度)的增大而减小,也就是在其他因素相同的情况下(只有泥沙因素不同),粉沙质海岸的含沙量小于淤泥质海岸的含沙量,这是不合理的。

2.5 曹文洪公式

曹文洪^[14,26]将湍流猝发理论应用于波流共同作用下的挟沙力的研究:从湍流猝发理论出发,基于湍流猝发的时空尺度得到波流作用下床面泥沙上扬通量,然后根据连续定律,当悬移质处于不冲不淤平衡条件下,泥沙上扬和沉降通量相等的条件,建立平衡近底含沙量的理论表达式,再根据潮流输沙过程中含沙量的垂线分布规律得出垂线平衡含沙量,在平衡情况下即为波浪共存挟沙力公式

$$S_* = \frac{\rho_s \delta}{\nu T_B^+} d S_{vm} \frac{u_*^4}{\omega_s u_{*k}^2} \left[\left(1 + \frac{\sqrt{g}}{C_f \kappa} \right) J_1 - \frac{\sqrt{g}}{C_f \kappa} J_2 \right] \left(\frac{1 - s_b}{s_b} \right)^2 \quad (11)$$

式中, ν 为水的运动黏滞系数; T_B^+ 取无量纲常数, $T_B^+ = 100$; δ 为单位面积内的平均猝发面积,取 $\delta = 0.016$; S_{vm} 为单位面积床面层的极限体积含沙量, $S_{vm} = 0.511 + 0.0357 \log d_{50}$; u_* 为波浪和单向流共同作用下的摩阻流速,采用Bijker的研究成果,

$$u_* = u_{*c} \left[1 + \frac{1}{2} \left(s \frac{u_m}{U} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad u_{*c} \text{为单向流的摩阻流速, } U \text{为垂}$$

线平均流速; ω_s 为浑水中泥沙颗粒的沉速; u_{*k} 为临界起动摩阻流速; C_f 为谢才系数; κ 为卡门常数; h 为水深; b 为近底某处距床面的距离; z 为距离床面的距离; Z 为悬浮指标 $Z = \omega_s / \kappa u_*$, $s = z/h$, $s_b = b/h$,

$$J_1 = \int_{s_b}^1 \left(\frac{1-s}{s} \right)^2 ds, \quad J_2 \text{如下式所示:}$$

$$J_2 = \int_{s_b}^1 \left(\frac{1-s}{s} \right)^2 \ln s ds \quad (12)$$

“波浪掀沙,潮流输沙”的结论对于某些强潮海域

是不适用的,强潮流也可以掀起大量泥沙(如杭州湾),故该公式推导的理论依据是值得商榷的。公式仅用黄河口实测资料进行验证,是否适应于其他河口或者海岸地区波浪共同作用下的挟沙力计算有待进一步验证。公式中一个重要因子 u_* 为波浪和单向流共同作用

下的摩阻流速,以此来代表一般情况下不是单向流的潮流和波浪共同作用下的摩阻流速是不合理的。且公式结构不简单,过于繁琐,系数难于确定,不便工程的实际应用,表1为其他一些水流挟沙力公式。

表1 其他一些水流挟沙力公式
Table 1 Some other sediment-carrying capability formula

| 公式推导者 | 挟沙力公式 | 适用范围 |
|-------------------------------|---|--------------|
| 宋志尧(2008) ^[27] | $C_s = K_1 \frac{U^2}{gh} + K_2 \frac{U^3}{gh\omega_s}$ | 悬移质 |
| Bagnold(1966) ^[13] | $C_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_s - \gamma} \tau u \frac{0.01U}{\omega_s}$ | 悬移质 |
| 范家骅(1957) | $C_s = 2.34 \frac{U^4}{\omega_s R}$ | 悬移质 |
| 沙玉清(1956) ^[28] | $C_s = \left(\frac{A_m U - U_{cr1} R^{0.2}}{\omega_s^{1/3} \sqrt{R}} \right)^m \left(\frac{R}{D} \right)^{1/6}$ | 悬移质,明渠,高含沙水流 |
| 李昌华(1980) ^[29] | $C_s = 0.056 \left[\frac{fU^3}{2(\gamma_s/\gamma - 1)gh\omega_s} \right]^{1.25}$ | 悬移质 |
| Larras(1965) | $C_s = 200 \left(\frac{u_*}{\sqrt{gd}} \right)^{10}$ | 悬移质 |
| 李瑞杰(2011) ^[6] | $C_s = a_1 \left[1 - \exp \left(-b_1 \frac{U^2}{gh} \right) \right]$ | 悬移质 |
| 李瑞杰(2012) | $C_s = \frac{\varepsilon_s c_h}{\omega_s h} \left[1 - \exp \left(-\frac{\omega_s U^2}{\varepsilon_s C_s J} \right) \right]$ | 全沙 |
| 陆建宇(2002) | $C_s = K \frac{U^2}{gh} + S_0$ | 悬移质 |
| Samaga等(1986) | $\Phi = 28\theta_2^6$ | 悬移质 |
| 李义天(1988) | $C_s = K \left(0.1 + 90 \frac{\omega_s}{U} \right) \frac{U^3}{gh\omega_s}$ | 悬移质 |
| Velikanov(1955) | $C_s = K \frac{U^3}{gh\omega_s}$ | 悬移质 |
| Wuiff(1985) | $C_s = 0.016 \frac{q^2 \gamma \gamma_s}{(\gamma_s - \lambda)^2 d \omega_s}$ | 悬移质 |
| 张瑞瑾等(1959) | $C_s = K \left(\frac{U^3}{gh\omega_s} \right)^3$ | 悬移质 |
| 吴为明等(2000) | $C_s = 0.0000262 \left[\left(\frac{\tau}{\tau_c} - 1 \right) \frac{U}{\omega_s} \right]^{1.74}$ | 悬移质 |

3 波、流共同作用下挟沙力的构建

与相对较为成熟的河道水流挟沙力研究相比较^[30],国内外学者对于近岸海域泥沙在波浪和潮流共同作用下挟沙力的研究起步比较晚、研究力度不够。研究者

一般采用的是经验分析法、能量平衡法、底部边界层理论、湍流猝发理论、因次分析法和明渠水流挟沙力公式移植等方法来建立波浪和潮流共同作用下的挟沙力公式,取得了一些成果^[31-34]。

然而,由于海岸动力学等学科研究不够充分,波、

流共同作用下挟沙力的研究遇到了很大困难。底部边界层理论中,波、流共同作用下底部边界层研究尚未成熟,故从这角度上来研究波、流共存时的挟沙力也遇到了困难;能量平衡法中,波浪能耗研究不够充分,窦国仁等^[20]取其与单位时间波能成正比($E = \alpha\gamma H^2/T$),导致了其公式的不合理性;湍流猝发理论中,床面泥沙交换的微观机制、近底含沙量理论和波、流共存时含沙量的垂线分布等研究不够成熟,故推导出来的挟沙力公式是值得商榷的;因次分析法中,由于波、流耦合综合速度研究不够成熟,在公式中将波浪和潮流对挟沙力的贡献等同起来,其合理性也值得商榷;明渠水流挟沙力移植法中,波、流共存时泥沙运动力学机制不是十分清楚,简单的借鉴明渠单向流的研究成果,对某些重要因子采取直接代替的方法不太恰当。

目前波、流共存时的挟沙力研究既是难点,也是热点。针对有些学者在研究波、流共存作用下的挟沙力时可能存在的一些问题,给出一些看法与建议,希望能为挟沙力研究进展提供参考。

3.1 挟沙力三大影响因素

对挟沙力进行研究,必须弄清楚影响水体挟沙力大小的主要矛盾是什么,也就是主要影响因素有哪些。悬移质挟沙力的3大影响因素^[35-36]为泥沙因素(包括泥沙组成等)、水动力因素(水流、波浪等)、泥沙运动的环境因素(主要是指近岸海域不同类型的泥沙运动环境等)。三大因素相互独立,故悬移质挟沙力的研究是一项很难的课题。在实际研究过程中,是否考虑其他因素(例如水体中泥沙的存在对水流结构、流态、卡门常数、泥沙沉速的影响^[37],冲泻质对悬移质中的床沙质挟沙力的影响,水温对水流挟沙能力的影响^[38]等),取决于它们对悬移质挟沙力的影响程度。

3.2 实测资料选取

天然海域的波浪和潮流共存,与无浪时的潮流以及无流时的波浪,在水力结构方面都存在某些差别,这是长周期的潮流水体运动和短周期的波浪水体运动在力学机理上的耦合问题^[39]。这种力学耦合机理目前尚未解决,因此波浪和潮流共同作用下挟沙力的理论研究遇到了阻力。然而,刘家驹等认为天然存在的波浪和潮流已经是耦合后的结果,着眼于实际,研究含沙量在波、流天然耦合后的规律也很有实用价值。

现场实测资料的选取是决定挟沙力公式正确与否的一个重要环节。然而许多学者将现场实测得到的含

沙量值直接用于挟沙力公式的拟合或是验证,不管其是否具备挟沙力概念,这是不妥当的。如何选取具有挟沙力概念的实测含沙量是海洋水流挟沙力研究的关键,挟沙力应是指与动力条件相匹配的水体含沙量。刘家驹^[18]认为水动力基本不变,且作用持续时间较长(1 h以上),水体含沙量达到基本不变值时,将这期间几次观测得到的含沙量的平均值认定是达到了挟沙力的含沙量值。

3.3 拟合方法

拟合方法的选择对于挟沙力公式精度的高低有很大影响。不同的拟合方法得到的公式精度有较大区别,寻求具有高精度且能客观反映实际水体挟沙力的拟合公式,故拟合方法是一项需要深入研究的课题。例如,对于形如

$$S_* = k[f(V_1, V_2, h, \omega, \gamma, g \dots)]^m$$

这种结构形式的挟沙力公式,枚举法^[27]比传统的最小二乘法确定系数的方法更为合理,公式精度也更高,也更能客观反映水体挟沙力的实际情况。对于其他结构形式的挟沙力公式,同样也要寻求最佳的拟合方法。随着数学和计算机的发展,未来更先进的拟合方法将会出现,得到的挟沙力公式精度也会越来越高。

4 结论

分析了近岸海域悬移质挟沙力公式,近岸海域悬移质挟沙力公式大部分是半理论半经验公式,有各自的适用性和局限性。公式依据的理论和方法大致可以分为以下几类:能量平衡原理、因次分析法、明渠水流挟沙力移植法、边界层理论、经验分析法和湍流猝发理论等。有些学者将以上2种或者2种以上的理论和方法结合起来进行悬移质挟沙力的研究,取得了一定的成果。

特别指出的是,中国对于河口地区径流(洪水)、潮流、波浪共存时以及近岸海域风暴潮作用时水体挟沙力的研究还比较少,但这两种情况下挟沙力的研究也是最重要的。河口地区“三碰头”和近岸海域(特别是粉砂质海岸)风暴潮^[40-43]时造成的港池和航道的淤积是相当严重的,给当地造成巨大的经济损失。

针对目前国内外波、流共同作用下的挟沙力研究存在的不足提出以下3方面建议。

1) 水流挟沙能力是泥沙运动的基本问题,随着人们的认识、实验水平和研究水平的提高,需要进一步加强挟沙能力基本理论和运动机理的研究,特别是关注破波区泥沙运动机理的研究。

2) 加强波、流耦合作用机制研究,特别是波流对泥沙运动作用及耦合后的综合速度的研究。

3) 加强高含沙水流挟沙力研究,关注高浓度泥沙对水流结构、流动、流态等特性和泥沙沉速的影响。

参考文献(References)

- [1] 陈吉余. 中国海岸侵蚀概要[M]. 北京: 海洋出版社, 2010: 1-2.
Chen Jiyu. Overview of China's coastal erosion[M]. Beijing: China Ocean Press, 2010: 1-2.
- [2] 中华人民共和国水利部. 中国河流泥沙公报 2005[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
The Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. China river sediment bulletin, 2005[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2005.
- [3] 中国水利学会泥沙专业委员会. 泥沙手册[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1989: 231-268.
Sediment Speciality Committee of China Water Conservancy Institute. Handbook of sedimentation engineering[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1989: 231-268.
- [4] 王昌杰. 河流动力学(港口航道与海岸工程专业用)[M]. 北京: 人民交通出版社, 2008: 56-57.
Wang Changjie. River Mechanics(Port Waterway and coastal engineering professional use)[M]. Beijing: China Communications Press, 2008: 56-57.
- [5] 李瑞杰, 郑俊, 丰青, 等. 近岸海域泥沙侵蚀率与水流挟沙力[J]. 泥沙研究, 2013(4): 21-25.
Li Ruijie, Zheng Jun, Feng Qing, et al. Sediment carrying capacity and erosion rate of nearshore sediment[J]. Journal of Sediment Research, 2013(4): 21-25.
- [6] 李瑞杰, 董德信, 郑俊, 等. 近岸水流挟沙力探讨[J]. 泥沙研究, 2011(5): 19-23.
Li Ruijie, Dong Dexin, Zheng Jun, et al. Discussion on coastal sediment carrying capacity[J]. Journal of Sediment Research, 2011(5): 19-23.
- [7] Ruhl C A, Schoellhamer D H, Stmpf R P, et al. Combined use of remote sensing and continuous monitoring to analyse the variability of suspended-sediment concentrations in San Francisco Bay, California: Estuarine[J]. Coastal and Shelf Science, 2001(53): 801-812.
- [8] Keiner L E, Yan X H. A neural network model for estimating sea surface chlorophyll and sediments from thematic mapper imagery[J]. Remote Sensing of Environment, 1998, 66(2): 153-165.
- [9] 黄建维, 夏云峰, 徐华, 等. 粉沙质海岸航道骤淤期悬移质挟沙力研究[J]. 海洋工程, 2010, 28(4): 77-83.
Huang Jianwei, Xia Yunfeng, Xu Hua, et al. Research on suspensions carrying capacity in silt sandy coast during sudden siltation in the channel[J]. The Ocean Engineering, 2010, 28(4): 77-83.
- [10] Gilbert G K. The Transportation of debris by running water [R]. Virginia: United States Geological Survey, 1914.
- [11] Einstein, H A. The Bed-load function for sediment transportation in open channel flows[R]. Washington: Technical Bulletin, U.S. Department of Agriculture, Soil Erosion Conservation Service, 1950.
- [12] Christoffersen J B, Jonson I G. Bed friction and dissipation in a combined current and wave motion[J]. Ocean Engineering, 1985,12(5): 387-423.
- [13] Bagnold, R A. An Approach to the sediment transport problem from general physics[R]. Virginia: United States Geological Survey, 1966.
- [14] 曹文洪, 舒安平. 潮流和波浪作用下悬移质挟沙能力研究述评[J]. 泥沙研究, 1999(5): 74-80.
Cao Wenhong, Shu Anping. Reviews on suspended sediment carrying capacity in combined actions of waves and tidal current[J]. Journal of Sediment Research, 1999(5): 74-80.
- [15] 武汉水利电力学院. 河流动力学[M]. 北京: 工业出版社, 1961.
Wuhan Institute of Water Conservancy and electric engineering. River mechanics[M]. Beijing: China Industry Press, 1961.
- [16] 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.
Li Ruijie, Luo Feng, Zhou Huamin. Study on the flow induced sediment carrying capacity[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2009(1): 88-94.
- [17] Bijker E W. Littoral drift as function of waves and current[J]. Food Hydrocolloids, 2012, 23(3): 577-584.
- [18] 刘家驹. 在风浪和潮流作用下淤泥质浅滩含沙量的确定[J]. 水利水运科学研究, 1988(2): 69-73.
Liu Jiaju. 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.
- [19] 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.
Cao Zude, Li Bei, Kong Lingshuang. Carrying capacity for a wave-current coexistent system[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2001, 22(4): 151-155.
- [20] 窦国仁, 董凤舞. 潮流和波浪的挟沙能力[J]. 科学通报, 2001, 46(12): 1000-1004.

- 1995, 40(5): 443-446.
- Dou Guoren, Dong Fengwu. The sediment carrying capacity of current and wave[J]. Science Bulletin, 1995, 40(5): 443-446.
- [21] Han Zengcui, Chen Hangping. Computation in the Qiantang estuary with consideration of sediment transport in tidal flat [J]. China Ocean Engineering, 1987, 1(2): 76-90.
- [22] Onyx W H. Wai, Fine sediment carrying capacity of combined wave and current flows[J]. International Journal of Sediment Research, 2009(4): 425-438.
- [23] Li R J, Luo F, Zhu W J. The suspended sediment transport equation and its near-bed sediment flux[J]. Science in China (Series E: Technological Sciences), 2009, 52(2): 387-391.
- [24] Shi Wei, Wang Menghua. Satellite observations of the seasonal sediment plume in central East China Sea[J]. Journal of Marine Systems, 2010, 82(4): 280-285.
- [25] Zhu Yurong, Chen Qingqiang. On the origin of the radial sand ridges in the southern yellow sea results from themodeling of the paleo-radial tidal current fields off the paleo-Yangtze River estuary and northern Jiangsu coast[J]. Journal of Coastal Research, 2005, 21(6): 1245-1256.
- [26] 曹文洪, 张启舜. 潮流和波浪作用下悬移质挟沙能力的研究 [J]. 泥沙研究, 2000(5): 16-21.
- Cao Wenhong, Zhang Qishun. A study on suspended sediment carrying capacity in combined actions of waves and tidal current[J]. Journal of Sediment Research, 2000(5): 16-21.
- [27] 孔俊, 宋志尧, 章卫胜. 挟沙能量公式系数的最佳确定[J]. 海洋工程, 2005, 23(1): 93-96.
- Kong Jun, Song Zhiyao, Zhang Weisheng. Optimum approach to determine the coefficients in sediment-carrying capability formula[J]. The Ocean Engineering, 2005, 23(1): 93-96.
- [25] 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.
- Zhang Hongwu, Zhang Qing. Formula of sediment carrying capacity of the Yellow River[J]. Yellow River, 1992, 14(11): 7-10.
- [29] 李昌华. 明渠水流挟沙能力初步研究[J]. 水利水运工程学报, 1980(3): 76-83.
- Li Changhua. A formula of suspended sediment transportation for open channel flows[J]. Hydro-Science and Engineering, 1980(3): 76-83.
- [30] 郭庆超. 天然河道水流挟沙能力研究[J]. 泥沙研究, 2006(5): 45-51.
- Guo Qingchao. Sediment-carrying capacity in natural rivers [J]. Journal of Sediment Research, 2006(5): 45-51.
- [31] 方波. 长江下游大通—镇江河道干流水流挟沙力公式[J]. 人民长江, 2004, 35(12): 42-44.
- Fang Bo. Formula of sediment-laden force in the main stream of Datong-Zhenjiang river in the lower Yangtze River[J]. Yangtze River, 2004, 35(12): 42-44.
- [32] 黄惠明, 王义刚. 长江河口主要汉道水流挟沙能力分析[J]. 水道港口, 2007, 28(6): 381-386.
- Huang Huiming, Wang Yigang. Preliminary study on sediment-carrying capability in main inlets of Yangtze Estuary[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2007, 28(6): 381-386.
- [33] 张红艺, 周赤建, 张欧阳, 等. 高含沙水流挟沙力计算公式研究[J]. 水力发电学报, 2004, 23(1): 74-78.
- Zhang Hongyi, Zhou Chijian, Zhang Ouyang, et al. Study on the formula of silt transport capacity or hyper-concentrated silt-laden flow[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2004, 23(1): 74-78.
- [34] 费祥俊, 舒安平. 多沙河流水流输沙能力的研究[J]. 水利学报, 1998(11): 38-43.
- Fei Xiangjun, Shu Anping. Investigation on sediment transport capacity with high concentration for fluvial river[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998(11): 38-43.
- [35] 沙玉清. 泥沙运动引论[M]. 北京: 工业出版社, 1965.
- Sha Yuqing. Introduction to sediment movement[M]. Beijing: China Industry Press, 1965.
- [36] 谢鉴衡. 河流泥沙工程学[M]. 北京: 水利出版社, 1981.
- Xie Jianheng. River sediment engineering[M]. Beijing: Hydraulic Press, 1981.
- [37] Nakato T. Tests of selected sediment-transport formulas[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1990, 116(3): 362-379.
- [38] Shen Liang, Steven Armfield. Simplified marker and cell method for unsteady flows on non-staggered grids[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluid, 1995, 21(1): 15-34.
- [39] Li Congxian, Zhang Jiaqiang, Fang Da i du, et al. Holocene regression and the tidal radial sand ridge system formation in the Jiangsu coastal zone, East China[J]. Marine Geology, 2001, 73: 97-120.
- [40] Hu Rijun, Ma Fang, Wu Jianzheng, et al. Sediment transport in the nearshore area of phoenix island[J]. Journal of Ocean University of China, 2016(2): 767-782.
- [41] Koh Sung Cheol, Kim In Soo Song Young Chae. Sediment transport capacity—an improved bagnold formula[J]. International Journal of Sediment Research, 2007(1): 27-38.
- [42] Hu Rijun, Ma Fang, Wu Jianzheng, et al. Sediment transport in the nearshore area of phoenix island[J]. Journal of Ocean University of China, 2016(5): 767-782.
- [43] Do Minh Duc, Mai Trong Nhuan, Chu Van Ngoi, et al. Sediment distribution and transport at the nearshore zone of the Red River delta, Northern Vietnam[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2007, 29(4): 558-565.

The sediment-carrying capability in offshore area

ZHANG Wenhui¹, ZHOU Changyou², GAN Shendong³

1. South China Sea Environment Monitoring Center, State Oceanic Administration, Guangzhou 510300, China

2. The Third Engineering Company of CCCC the Fourth Harbor Engineering Co., Ltd., Zhanjiang 524005, China

3. Power China Water Environment Governance, Shenzhen 518100, China

Abstract With a great concern for the marine environment, and the sediment-carrying capacity in the offshore area plays a key role in the study of the sediment transport. This paper reviews the current research achievements with respect to the sediment-carrying capability in the offshore area. Some suggestions are given for the determination of the sediment-carrying capability in a wave-current coexistent system, which is an important topic in the academic area.

Keywords offshore area; suspended load; sediment-carrying capability ●



(责任编辑 傅雪)