

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2009.04.020

河口海岸潮流速分布研究进展

倪志辉^{1,2}, 宋志尧³

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098 ;

2. 河海大学交通学院、海洋学院, 江苏 南京 210098 ; 3. 南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室, 江苏 南京 210097)

摘要 :总结了在水流加减速作用、水流密度和悬沙浓度造成的水流分层、地形变化、风、波浪、底沙等因素影响下国内外河口海岸潮流速分布研究现状。分析了现有潮流速分布模式及修正模式存在的问题,指出潮汐水流垂向结构的研究关键是潮流剪切应力垂线分布公式的合理性,对潮流速分布模式进行了研究展望。

关键词 :潮流 ;剪切应力 ;流速分布 ;对数分布 ;对数线性分布

中图分类号 :TV135.6 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2009)04-0078-06

Developments of research of tidal velocity profiles in estuary and along coast//NI Zhi-hui¹, SONG Zhi-yao² (1. *State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China* ; 2. *College of Traffic, College of Oceans, Hohai University, Nanjing 210098* ; 3. *Key Laboratory of Virtual Geographic Environment (Ministry of Education), Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China*)

Abstract : The research status of the effects of flow, layer phenomena caused by water density and suspended sediment concentration, topographical variation, wind, waves, and bottom sediment on the tidal velocity profile in an estuary and along the coast are summarized. The distribution patterns of tidal velocity and its modification are studied. It is pointed out that the reasonableness of the shear stress vertical distribution formula is the key problem in the study of the vertical structure of tidal currents. The research prospects for tidal velocity profiles are discussed.

Key words : tidal current ; shear stress ; velocity profile ; logarithmic profile ; logarithmic linear profile

流速分布是剪切紊流运动相关研究的基本问题。紊流的内部结构、能量传递过程及阻力特性等各种动力要素均与流速分布相关或以流速分布体现。在一定程度上说,掌握了某种流动的流速分布,则与该流动相关的各种问题都迎刃而解。纵观流体力学的发展,流速分布一直是广大学者研究和争论的热点^[1]。河口海岸垂线流速分布规律也是大家比较关心的问题。在河口和海岸水域,岸线曲折,地形多变,潮汐、波浪和海流共存并相互作用,水流运动十分复杂,但因潮汐引起的潮流在海水运动中起主导作用,而近底层水流因床面摩擦而产生的紊动及流速滞后效应对近底泥沙的侵蚀和沉积、悬浮和输送,乃至污染物的吸附和释放、迁移和扩散以及底床管线冲刷等产生重要影响。因此,近底层水流垂直结构及床面紊动剪切应力的研究,对海岸海洋学及工程应用具有重要意义。

因床面摩擦作用,近岸浅海中潮流速度沿水深

分布不均匀,越接近海底潮流速度越小。潮流速的这种变化趋势主要取决于反映近底层水流运动特性的 2 个重要物理量,即床面摩阻流速和粗糙高度,如果近底层潮流速的垂向分布有精确的测量值,那么关键问题就是潮流速分布模式。目前,由于潮流速分布主要受水流加减速作用、水流密度和悬沙浓度造成的水流分层现象、地形变化、风、波浪等因素的影响,流速剖面往往偏离传统的对数分布。故潮流速分布模式也多种多样,如指数分布函数、对数线性和对数抛物等形式,没有形成统一的模式。为此,笔者拟对这方面的已有成果进行归纳,并指出存在的问题和发展方向。

1 流速分布研究现状

1.1 理论理想状态模式及其改进模式

汪亚平等^[2]指出 :在小型潮汐汉道、潮沟、浅水河口、海湾、泻湖中,水深较小,潮流、波浪等动力活

基金项目 :国家自然科学基金重点基金(50339010)

作者简介 :倪志辉(1980—),男,湖南衡阳人,博士研究生,从事河口海岸水动力学、环境及数值模拟研究。E-mail :benny251@hhu.edu.cn

跃,整个水层可视为底边界层。在水深较大的陆架及大洋区域,海底边界层只占整个水层的一小部分。对于一个发育完整的潮流边界层,从下向上可划分为黏滞亚层、过渡层、对数层和外边界层,黏滞亚层和过渡层的厚度很小,只有几毫米,对数层可占到边界层厚度的 10%~20%。对数层内,流速在垂向上呈对数分布,符合卡门-普朗特模型。在没有风浪,水流密度和悬沙浓度所造成的分层现象不明显,边界层的水流可以看成是完全紊动的,这样就可以假设边界层的水流符合对数分布:

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \frac{z}{z_0} \quad (1)$$

式中: $u(z)$ 为 z 处潮流速; u_* 为床面摩阻流速; κ 为卡门常数, $\kappa = 0.4$; z 为距离海床底面的高度; z_0 为底面粗糙高度。

流速对数分布研究始于 20 世纪 50 年代,之后人们对各种海洋环境进行了大量研究,包括海湾、大陆架、河口、潮汐水道等^[3-16],并使用流速对数剖面模型进行沉积物输运研究^[17-19]以及边界层参数摩阻流速和粗糙高度的求解^[20-21]。

陈宗镛^[22]根据紊流理论,通过 Bowden 和 Fairbairn 的实测数据,确定高潮位和随后 1/4 周期时刻紊动剪切应力的剖面结构,得到潮流速分布公式,其中高潮后 1/4 周期时刻的分布符合对数律。Dyer^[5],Heathershaw 等^[21]认为近底流速测点高度的不正确也会使对数分布出现偏离,并给出改进表达式:

$$u = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left(\frac{z + \Delta z}{z_0} \right) \quad (2)$$

式中 Δz 为与床面粗糙单元高度相当的数。

Gross 等^[23]在研究海底高程均匀时认为潮流速分布受到水深的影响,建议在距离海底 1.5 m 以上时加入尾流函数,并给出表达式:

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \frac{z}{z_0} + \frac{u_*}{\kappa} \Pi \left(1 - \cos \frac{\pi z}{\delta} \right) \quad z_0 \leq z \leq \delta \quad (3)$$

式中: Π 为常数,约为 0.55; δ 为边界层厚度。但是,Heathershaw 等^[21]在用实测资料验证公式(3)时发现流速分布并不受水深的影响。吴德安等^[24]通过对实测流速资料进行分析和研究,建议增加尾流函数项,并给出了流速垂线分布关系式:

$$u(z) = u_s - \frac{u_*}{\kappa} \ln \frac{h}{z} + f \quad (4)$$

式中: u_s 为表面流速; f 为一个与摩阻流速有关的尾流函数项。

1.2 考虑水流加速度的影响

在自然条件下,受水流加速度、水流分层、地形

变化以及风、波浪等因素的影响,流速垂向剖面往往会偏离对数分布^[5,25]。惯性和底部摩擦作用是造成水流加减速时流速剖面偏离对数分布的原因。

Soulsby 等^[4]研究发现处于加减速进程中的近底层潮流速偏离对数分布。水流加速时,流速分布比传统对数分布计算结果(图 1 中 A)往里偏(图 1 中 B),水流减速时往外偏(图 1 中 C)。尽管这种偏离程度可能并不大,但重要的是对计算床面粗糙高度和剪切应力有影响,为此他们通过引入加速长度对对数分布进行改进,获得了对数线性分布公式:

$$u = \frac{u_*}{\kappa} \left[\ln \left(\frac{z}{z_0} \right) - \frac{z - z_0}{\gamma \Lambda} \right] \quad (5)$$

式中: $\gamma \approx 0.04$; Λ 为加速长度, $\Lambda = \frac{|u_*| u_*}{\partial u_* / \partial t}$,其中 t 为时间。

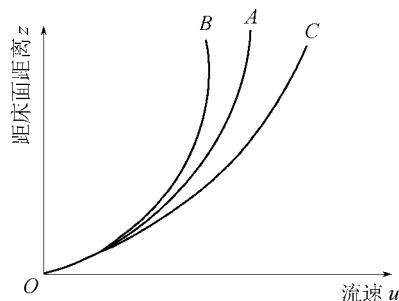


图 1 水流加减速流速分布示意图

Lavelle 等^[26]从黏滞性角度研究了水流加减速对流速剖面 and 边界层的影响。李浩麟^[27]分析了浅海潮流运动的特点,在运动方程中忽略对流扩散项,并假定垂向紊动黏滞系数为常数,得到了随时间变化的潮流速垂向分布公式,其形式不同于对数分布,但结构复杂,应用不便。Kuo 等^[28]通过理论分析,得出了非恒定潮流模型底部剪切力边界条件的公式。宋志尧等^[29]认为 Soulsby 等^[4]引入的加速长度缺乏明确的物理意义。对此,他们基于近底层潮流方程,应用普朗特混合长度和卡门自相似理论,推导了新的对数线性分布公式:

$$u = \frac{u_*}{\kappa} \left[\ln \left(\frac{z + z_0}{z_0} \right) - az \right] \quad (6)$$

其中

$$a \approx \frac{1}{4} \left(\frac{1}{D} + \frac{\frac{dU}{dt}}{|u_*| u_*} \right)$$

式中: a 为反映潮流加减速对流速剖面影响的参数; D 为水深; U 为水深平均流速。

此外,考虑潮流加减速对流速剖面影响的学者还有很多^[5,30-31]。

1.3 考虑水流分层的影响

潮流一般分为中性水流(充分混合水流)和分层

水流。中性水流流速分布见图 2 中 A。而水流分层包括稳定分层和非稳定分层 2 类。稳定分层是指上层为轻质液体、下层为重质液体的分层水流(图 2 中 C),反之为非稳定分层水流(图 2 中 B)。

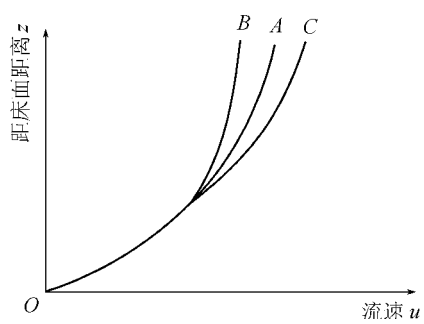


图 2 分层水流流速分布示意图

Schiller 等^[32]在较宽明渠中进行了稳定分层水流流速分布的测量,得出流速分布曲线较传统对数分布曲线往外偏(图 2 中 C),亦即离开床面一段距离后流速较对数分布大的结论。French^[33]在窄水槽中进行盐水稳定分层和热稳定分层水流的研究,实测流速分布曲线较传统对数分布曲线往里偏(图 2 中 B),与 Schiller 等^[32]的结果恰好相反。Kantha 等^[34]曾在环状水池中进行分层水流特性的研究,其成果表明,当理查德逊数(Richardson 数)达 36 时几何边界影响可以忽略。由此可见,水流分层状况和几何边界条件是 2 个比较重要的影响因素。

Monin 等^[35]、Taylor 等^[36]对分层水流也进行了研究,并给出了分层水流的垂向流速分布计算公式:

$$u = \frac{u_*}{\kappa} \left[\ln\left(\frac{z}{z_0}\right) + \beta \frac{z - z_0}{L} \right] \quad (7)$$

式中: β 为常数; L 为莫宁(Monin-Obukov)长度比尺。

McCutcheon^[37]通过莫宁分层水流长度比尺的定义,考虑水流密度的影响,采用无量纲形式研究分层水流流速分布,推导得出垂向流速分布公式(式(8)),该公式与试验数据拟合较好。

$$u = \frac{u_*}{\kappa} \int_{z_0}^z z^{-1} \left(1 + \frac{g a_0}{\bar{\rho} u_*} \kappa^2 z^2 \frac{\partial \rho}{\partial z} \right)^{-1} dz \quad (8)$$

式中: a_0 为常数; $\bar{\rho}$ 为水流平均密度; $\frac{\partial \rho}{\partial z}$ 为密度梯度。当 $\frac{\partial \rho}{\partial z} = 0$ 时,式(8)可简化为式(1)。

Anwar^[38]基于分层和充分混合河口水流的现场观测,结合试验研究发现非恒定性对水流紊动及相关参数具有强作用。Anwar^[39]所进行的流速剖面研究表明,充分混合河口水流符合对数分布,而分层河口水流需引入大气边界层中对数线性分布。Friedrichs 等^[40]指出热盐密度分层能显著改变经典的近底对数流速剖面。忽略热盐的分层拟合对数剖面可能导致高估底部应力和粗糙高度(分别约为实

际底部应力和粗糙高度的 130% 和 600%)。他们提出了分层(强分层或弱分层)与加(减)速单独作用及联合作用下的对数线性流速分布公式。

由于悬沙密度大于水体密度,当悬沙浮于水中时需要消耗水体的垂向紊动能量,使紊动性能和水层之间的动能及物质交换减弱,悬沙能够使流速剖面一定程度地偏离对数分布,使水流与底床之间的作用力及边界层厚度减小^[41-43]。当需要考虑近底水流密度和悬沙浓度所造成的分层现象时,垂向流速分布计算可以采用 Adams 模型^[44]:

$$u = \frac{u_*}{\kappa} \left[\ln\left(\frac{z}{z_0}\right) + A \int_{z_0}^z \frac{R_f}{z} dz \right] \quad (9)$$

其中

$$R_f = \frac{g K_z \frac{\partial \rho}{\partial z}}{\rho N_z \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2} \quad (10)$$

式中: A 为常数,通常取 5.5; R_f 为水体分层参数,代表密度梯度对紊动作用的抑制强度; g 为重力加速度; K_z 为紊动切应力; ρ 为水沙混合体的密度; N_z 为垂直涡动黏性系数。由式(10)可知 R_f 与 $\frac{\partial \rho}{\partial z}$ 成正比,与 $\frac{\partial u}{\partial z}$ 成反比。当 $R_f = 0$ 时,式(10)可简化为式(1)。

Soulsby 等^[45]考虑了悬沙浓度所造成的分层影响,在模型中加入分层因素,得到近底流速分布:

$$u = \frac{u_*}{\kappa} \left\{ \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) + \frac{1}{b} \ln \left[1 + \frac{A_0 b}{1 - b} \left(\left(\frac{z}{z_0} \right)^{1-b} - 1 \right) \right] \right\} \quad (11)$$

其中

$$b = \frac{w_s}{\kappa u_*} \quad A_0 = \beta \zeta_a$$

式中: w_s 为泥沙沉速; β 约为 4.7; ζ_a 为河床泥沙最高点的莫宁长度比尺。

Schauer^[46]在考虑悬沙浓度时,将线性掺混长度公式 $l = \kappa z$ 修正为 $l = \kappa z / (1 + k z / L)$,其中 L 为最大掺混长度,得到流速分布公式:

$$u = \frac{u_*}{\kappa} \left[\ln\left(\frac{z}{z_0}\right) + \frac{\kappa}{L} z \right] \quad (12)$$

此外,悬沙浓度对流速分布的影响还受到众多学者的关注^[47-49]。

1.4 考虑风、波浪等因素的影响

由于实际河口过程受到表面风浪等作用,表面存在一个流速梯度,从而存在一个表面边界层。有学者通过使用耦合波-流模型系统调查了南大西洋海湾海岸水体中表面波对海流的影响。模拟结果表明风浪能显著影响海岸海流,不仅能增加风应力,还会改变辐射应力。风引起的风应力增强了表面和靠近海底的水流,另一方面,波浪引起的辐射应力减弱

了海洋表面和海底的水流。因此表面风浪对水流的净影响依赖于风应力和辐射应力对水流的相对重要性。Nielsen^[50]认为在潮流边界层可以认为湍动能和切应力只受潮流控制。当波浪和潮流同时存在时,波动增强了壁面切应力和湍流强度。周济福等^[51]根据振荡边界层理论和波浪分解方法,导出了河口往复水流的流速垂向分布廓线。郝嘉凌等^[52]在式(6)的基础上,采用6点法实测资料,引入表面实际流速梯度,提出了对数线性扩展模式:

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \left(\ln \frac{z+z_0}{z_0} - \frac{1}{2} z^2 \right) + az + \left(\frac{1}{2} \frac{u_6 - u_5}{z_6 - z_5} - \frac{a}{2} \right) z^2 \quad (13)$$

式中: u_5 为第5层(0.8D处)流速; u_6 为第6层(1.0D处)流速,即表层流速。表面流速梯度 $\left. \frac{\partial u}{\partial z} \right|_{z=D} = \frac{u_6 - u_5}{z_6 - z_5} = \frac{1}{D} \frac{u_6 - u_5}{z_6 - z_5}$ 。

1.5 考虑地形变化的影响

地形对流速剖面具有重要影响,地形变化能够引起流速剖面的改变,并使流速强度发生变化。地形对流速剖面的影响程度取决于它的形状、规模和尺度,较小的地形能够使近底层流速发生变化,形成内边界层,内边界层之上的流速剖面基本不受影响;地形较大时,整个水层的流速都可能受到影响,各部位的流速剖面具有明显差异。Dyer^[5]研究发现在不同地形处会产生水流加减速和分流现象。Dyer^[20]发现在沙波不同部位上存在4种类型的流速剖面。Lawless等^[53]、Villard等^[54]认为影响流速剖面的地形分为大、小地形。小地形叠加在大地形之上时,水流在垂向形成上下2个边界层,下边界层的流速主要受小地形控制,上边界层的流速主要受大地形控制。

1.6 考虑底沙的影响

底沙对水流结构的影响同样是不可忽视的。Ishihara等^[55]、Yano等^[56]在水槽中实测了近底沙运动区域的流速分布,发现当存在底沙运动时,近壁区流速分布偏离对数分布。杨永荻等^[57]初步探讨了底沙运动对流速分布的影响,认为底沙输移对流速分布的影响主要反映在近壁区附近,并使该区流速偏离对数分布,而远离壁面的核心区域则影响不大。

2 研究中存在的问题

2.1 流速分布模式尚未能反映潮流运动机理

从 Monin 等^[35]、Taylor 等^[36]、Soulsby 等^[4]、Adams 等^[44]、Schauer^[46]、宋志尧等^[29]学者的公式来

看,可以统一用以下对数线性模式来表达流速分布:

$$u = \frac{u_*}{\kappa} \left[\ln \left(\frac{z}{z_0} \right) + Bz \right] \quad (14)$$

$$\text{Soulsby 等}^{[4]} \text{的公式中 } B = - \frac{|u_*|}{\frac{\partial u_*}{\partial t}};$$

宋志尧等^[29]基于近底层潮流方程推导得出 $B = - \frac{1}{4} \left(\frac{1}{D} + \frac{\frac{dU}{dt}}{|u_*|} \right)$; Monin 等^[35]、Taylor 等^[36]的公

式中 $B = \frac{\beta}{L}$; Schauer^[46]的公式中 $B = \frac{\kappa}{L}$ 。

比较式(1)和式(14),可以看出后者较前者多了 $\frac{u_*}{\kappa} Bz$ 项,因此与实测数据拟合通常较传统对数公式更好。但上述这些公式都没有反映出公式机理,例如,在 Soulsby 等^[4]和宋志尧等^[29]的公式中,当潮流处于加速阶段时, B 为负;减速阶段时, B 为正。然而,Lueck 等^[10]在加拿大 Cordova 水道应用实测资料验证式(14)时,发现不管潮流处在加速阶段还是减速阶段 B 大多为负。而 Taylor 等^[36]、Schauer^[46]、宋志尧等^[29]应用实测资料分析时,发现不管潮流处在加速阶段还是减速阶段 B 大多为正。此外,从分层的角度和修正掺混长度公式也不能反映出 B 的物理意义。由此看来,考虑单一的因素(加减速或分层等)的修正公式还不能从公式本身反映潮流的运动机理。

2.2 影响流速分布公式的主要因素

紊流中的流速分布主要受流体的紊动交换影响。由于紊动交换过程非常复杂和剧烈,因此,水流垂线流速分布公式也就更为复杂而多样。潮流运动是一种紊流运动,剪切应力是水层间动量交换的主要产物。潮汐水流的边界层有一个共同点就是要得到充分的发育,扩展到整个水深,因而在全水深上水流流速垂向分布受剪切应力的控制。由此可见,剪切应力垂线分布是影响流速分布公式的主要因素。

在明渠恒定流中,常假定剪切应力垂线分布为线性分布,即

$$\tau = \tau_b (1 - \sigma) \quad (15)$$

其中

$$\tau_b = \rho |u_*| |u_*|$$

$$\sigma = \frac{z}{D}$$

式中 τ_b 为床面阻力; ρ 为水流密度; σ 为相对水深。

在式(15)的基础上,应用普朗特混合长度和卡门自相似理论,可以很容易得到流速垂线分布的对数分布式(式(1))。另外,对数线性分布公式也是建立在式(15)的基础上,具体推导过程见文献[29]。

由于潮流运动是一种非恒定非均匀的周期性运动,不同于明渠恒定流,因此公式(15)是否适用潮汐水流还有待于更多的现场实测资料和试验数据的验证。

3 展 望

综上所述,可以看出潮流速分布主要受水流加减速作用、水流密度和悬沙浓度造成的水流分层、地形变化、风、波浪等因素的影响,潮流速剖面往往偏离传统的对数分布。也有学者研究指出,受水流中挟带泥沙的影响,流速垂向结构也会出现偏离对数分布的现象。目前,有待进一步研究的问题如下:

a. 寻求统一的潮流速分布模式,可以更好地反映潮流加减速作用、水流分层等因素的影响。

b. 关于潮汐水流垂向结构的研究,关键是公式(15)是否适用潮汐水流还有待于更多的现场实测资料和试验数据的验证或改进。

c. 潮流数值模拟是通过采用数值离散方法近似求解潮流运动的控制(偏微分)方程来模拟潮流运动,它了解潮流场提供了一种有效手段。由于潮汐河口中的水流运动具有三维特征,越来越多的学者对我国河口及其临近海域的三维水流泥沙运动提出了基本数值模式和计算方法,使得我国的三维模型得到了一定的发展。随着计算机的高速发展,较详细地模拟三维潮流以了解潮流垂直结构已成为可能。因此可以通过开发高效率、高稳定、高精度、高保真的三维潮流数学模型研究潮流的三维结构。

d. 目前,工程中应用的各种流速分布都应当看做是紊流运动的基本方程(Navier-Stokes 方程)在不同条件下的近似解,虽然目前普适的流速分布还没有找到,但有不少的学者试图从标度指数出发寻求流速分布的规律。Karman^[58]从流体运动相似性出发导出的流速分布公式可以认为是把相似性应用于寻求流速分布规律的体现。因此,寻找标度和流速分布之间的关系是一个值得研究的方向。

参考文献:

[1] 刘春晶,王兴奎,曹文洪,等.明渠均匀流流速分布的指数、对数公式对比[C]//刘恒.中国水利学会第二届青年科技论坛论文集.郑州:黄河水利出版社,2006:276-281.

[2] 汪亚平,高抒,贾建军.海底边界层水流结构及底移质搬运研究进展[J].海洋地质与第四纪地质,2000,20(3):101-106.

[3] JACKSON P S. On the displacement height in the logarithmic velocity profile [J]. J Fluid Mech,1981,111:15-25.

[4] SOULSBY R L, DYER K R. The form of the near-bed velocity profile in a tidally accelerating flow [J]. J of Geophysical Research,1981,86(C9):8067-8074.

[5] DYER K R. Costal and estuarine sediment dynamics[M]. New York:Wiley-Interscience,1986:55-81.

[6] WRIGHT L D, GAMMISCH R A, BYRNE R J. Hydraulic roughness and mobility of three oyster-bed artificial substrate materials[J]. Journal of Coastal Research,1990,6:867-878.

[7] CACCHIONE D A, DRAKE D E, LOSADA M A, et al. Bed-boundary-layer measurements on the continental shelf off the Ebro River, Spain [J]. Marine Geology,1990,95:179-192.

[8] HUNTLEY D A, NICHOLLS R J, LIU Chun-lei, et al. Measurements of the semi-diurnal drag coefficient over sand waves [J]. Continental Shelf Research,1994,14(5):437-456.

[9] WIBERG P L, DRAKE D E, CACCHIONE D A. Sediment resuspension and bed armoring during high bed stress events on the northern California inner continental shelf: measurements and predictions [J]. Continental Shelf Research,1994,14(10):1191-1219.

[10] LUECK R G, LU You-yu. The logarithmic layer in a tidal channel [J]. Continental Shelf Research,1997,17(14):1785-1801.

[11] KAWANISI K, YOKOSI S. Characteristics of suspended sediment and turbulence in a tidal boundary layer [J]. Continental Shelf Research,1997,17(8):859-875.

[12] WRIGHT L D, SHERWOOD C R, STERNBERG R W. Field measurements of fair-weather bed boundary layer processes and sediment suspension on the Louisiana inner continental shelf [J]. Marine Geology,1997,140:329-345.

[13] SONG Zhi-yao, LIU Yi-fan. Corrected formula of bed resistance coefficient for plane numerical simulation of tidal current [J]. Chine Ocean Eng,2000,14(2):221-227.

[14] SONG Zhi-yao, YAN Yi-xin, SHEN Hong-yan, et al. A computational model for velocity separation in shallow sea [J]. Chine Ocean Eng,2002,16(3):407-413.

[15] ELLIOTT A J. The boundary layer character of tidal current in the Eastern Irish Sea [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science,2002,55(3):465-480.

[16] BURCHARD H, CRAIG P D, GEMMICH J R, et al. Observational and numerical modeling methods for quantifying coastal ocean turbulence and mixing [J]. Progress in Oceanography,2008,76:399-442.

[17] HARRIS P T, COLLINS M. Estimation of annual bedload flux in a macro-tidal estuary: Bristol Channel, U K [J]. Marine Geology, 1988, 83:237-252.

[18] VINCENT C E, GREEN M O. Field measurements of the suspended sand concentration profiles and fluxes and of the resuspension coefficient over a rippled bed [J]. Journal of Geophysical Research,1990,95:11591-11601.

[19] CLARKE S, ELLIOTT A J. Modelling suspended sediment concentrations in the Firth of Forth [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science,1998,47(3):235-250.

[20] DYER K R. Current velocity profiles in a tidal channel [J]. Geophysical Journal of the Royal Astro Society,1970,22:153-161.

[21] HEATHERSHAW A D, LANGHORNE D N. Observations of near-bed velocity profiles and seabed roughness in tidal currents flowing over sandy gravels [J]. Estuarine, Coastal

- and Shelf Science,1988,26(5) 459-482.
- [22] 陈宗铺. 浅海潮流(分量)铅直分布的一种类型[J]. 海洋与湖沼,1964,6(3) 252-258.
- [23] GROSS T F, NOWELL A R. Mean flow and turbulence scaling in a tidal boundary layer [J]. Continental Shelf Research, 1983,2(2) 109-126.
- [24] 吴德安,张忍顺. 西洋东大港水道流速垂线分布研究[J]. 海洋工程,2005,23(1) 38-96.
- [25] COLLINS M B, KE X, GAO Su. Tidally-induced flow structure over intertidal flats [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science,1998,46(2) 233-250.
- [26] LAVELLE J W, MOFJELD H O. Effects of time-varying viscosity on oscillatory turbulent channel flow [J]. J Geophys Res,1983,88 7607-7616.
- [27] 李浩麟. 潮汐水流垂线流速分布与河床阻力研究[J]. 水利学报,1992(11) 57-62.
- [28] KUO A Y, SHEN J, HAMRICK J M. Effect of acceleration on bed shear stress in tidal estuaries [J]. J Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering,1996,122(2) 75-83.
- [29] SONG Zhi-yao, YAN Yi-xin, HAO Jia-ling, et al. Study on the log-linear velocity profile of near-bed tidal current in estuarine and coastal waters [J]. China Ocean Engineering, 2006, 20 (4) 573-584.
- [30] GROSS T F, ISLEY A E, SHERWOOD C R. Estimation of stress and bed roughness during storms on the Northern California Shelf [J]. Cont Shelf Res,1992,12 389-414.
- [31] CACCHIONE D A, DRAKE D E, KAYEN R W, et al. Measurements in the bottom boundary layer on the Amazon subaqueous delta [J]. Marine Geology,1995,125 235-257.
- [32] SCHILLER E J, SAYRE W W. Vertical mixing of heated effluents in open-channel flow [R]. Iowa University of Iowa, 1973.
- [33] FRENCH R H. Stratification and open channel flow [J]. J Hydraulics Division, ASCE,1978,104 21-32.
- [34] KANTHA L H, PHILLIPS O M, AZAD R S. On turbulent entrainment at a stable density interface [J]. J Fluid Mechanic, 1977,79(4) 753-768.
- [35] MONIN A S, YAGLOM A M. Statistical fluid mechanics : mechanics of turbulence [M]. Third Edition. Cambridge, MA : The MIT Press,1977.
- [36] TAYLOR P A, DYER K R. Theoretical models of flow near the bed and their implications for sediment transport [R]. New York :Wiley-Interscience,1977.
- [37] McCUTCHEON S C. The modification of vertical velocity profiles by density stratification [D]. Nashville, Tenn :Vanderbilt University,1979.
- [38] ANWAR H O. A study of the turbulent structure in a tidal flow [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science,1981,13(5) 373-387.
- [39] ANWAR H O. Turbulent measurements in stratified and well-mixed estuarine flows [J]. Coastal and Shelf Science,1983, 17 243-260.
- [40] FRIEDRICHS C T, WRIGHT L D. Sensitivity of bottom stress and bottom roughness estimates to density stratification, Eckernforde Bay, southern Baltic Sea [J]. J of Geophysical Research,1997,102(C3) 5721-5732.
- [41] SHENG Y P, VILLARET C. Modeling the effect of suspended sediment stratification on bottom exchange processes [J]. J Geophys Res,1989,94 14429-14444.
- [42] TROWBRIDGE J H, KINEKE G C. Structure and dynamics of fluid muds on the Amazon continental shelf [J]. J Geophys Res,1994,99 865-874.
- [43] MYRHAUG D, SLAATTELID O H. Bottom shear stresses and velocity profiles in stratified tidal planetary boundary layer flow from similarity theory [J]. Journal of Marine Systems,1998, 14 167-180.
- [44] ADAMS C E, WEATHERLY G L. Some effects of suspended sediment stratification on an oceanic bottom boundary layer [J]. J Geophys Res,1981,86 4161-172.
- [45] SOULSBY R L, WAINWRIGHT B L S A. A criterion for the effect of suspended sediment on near-bottom velocity profiles [J]. J Hydraulic Res,1987,25 341-355.
- [46] SCHAUER U. Determination of bottom boundary layer parameters at two shallow sea sites using the profile method [J]. Continental shelf Research,1987,7(10) 1211-1230.
- [47] GUST C Z, WALGER E. The influence of suspended cohesive sediments on boundary-layer structure and erosive activity of turbulent seawater flow [J]. Marine Geology, 1976, 22 :189-206.
- [48] AMOS C L, DABORN G R, CHRISTIAN H A, et al. In situ erosion measurement of fine-grained sediments from the bay of fundy [J]. Marine Geology,1992,108 175-196.
- [49] LI M Z, GUST C L. Boundary layer dynamics and drag reduction in flows of high cohesive sediment suspension [J]. Sedimentology,2000,47 71-86.
- [50] NIELSEN P. Coastal bottom boundary layer sand sediment transport [M]. Singapore : World Sci Pub,1992.
- [51] 周济福,李家春. 河口混合与泥沙输运 [J]. 力学学报, 2000,32(5) :523-531.
- [52] 郝嘉凌,宋志尧,严以新,等. 河口海岸潮流速分布模式研究 [J]. 泥沙研究,2007,4 34-41.
- [53] LAWLESS M, ROBERT A. Scales of boundary resistance in coarse-grained channels : turbulent velocity profiles and implications [J]. Geomorphology,2001,39 221-238.
- [54] VILLARD P, KOSTASCHUK R. The relation between shear velocity and suspended sediment concentration over dunes : Fraser Estuary, Canada [J]. Marine Geology,1998,148 71-81.
- [55] ISHIHARA T, IWAGAKI Y, SUEISHI T. On the effect of bed-load movement in thin sheet flow [C]//Proc 3rd Japan national congress for applied Mechanics. Leuven, Japan :Kyoto University,1953 265-269.
- [56] YANO K, DAIDO A. The effect of bed-load movement on the velocity distribution of flow [C]//IAHR Proc 13th Congress of IAHR. Leuven, Japan :Kyoto University,1969 69-72.
- [57] 杨永荻,陈国祥. 底沙运动对流速分布影响的初步探讨 [J]. 水文,1990,4 41-43.
- [58] KARMAN V. Fastigkeits problem in Maschinbau, Encycl [J]. der Math Wissenschaften,1910,4 348-352.

(收稿日期 2008-10-20 编辑 骆超)