

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2012.02.017

基于 Rouse 方程的河口海岸水域泥沙垂线浓度分析

朱文谨¹, 潘锡山², 孙杰³

(1. 淮海工学院土木工程学院, 江苏 连云港 222006 ; 2. 河海大学物理海洋研究所, 江苏 南京 210098 ;
3. 国家海洋局东海信息中心, 上海 200041)

摘要 : 在 Rouse 方程的基础上 , 结合统计学方法将泥沙质量浓度看作随机变量 , 选取自变量 $\ln \frac{h-z}{z}$, $\ln \frac{c_a}{\rho_s}$ 及 $\ln \frac{u^2}{gd}$, 采用多元线性回归方法分析各自变量对泥沙质量浓度垂向分布的影响 , 并检验它们对泥沙浓度垂向分布的影响程度 . 计算结果表明 , 该方法能够反映复杂动力条件下海安湾细颗粒泥沙质量浓度垂向分布的特征 .

关键词 : Rouse 方程 ; 多元线性回归 ; 海安湾 ; 河口海岸泥沙

中图分类号 : TV148 文献标志码 : A 文章编号 : 1000-1980(2012)02-0215-05

Analysis of vertical distribution of sediment concentration in estuarine and coastal water areas based on Rouse equation

ZHU Wen-jin¹ , PAN Xi-shan² , SUN Jie³

(1. College of Civil Engineering , Huaihai Institute of Technology , Lianyungang 222006 , China ;
2. Institute of Physical Oceanography , Hohai University , Nanjing 210098 , China ;
3. East Sea Information Center , State Oceanic Administration of People 's Republic of China , Shanghai 200041 , China)

Abstract : Based on the Rouse equation , the sediment concentration was regarded as the random variable , and the independent variables , $\ln \frac{h-z}{z}$, $\ln \frac{c_a}{\rho_s}$, and $\ln \frac{u^2}{gd}$, were selected using statistical methods . The multiple linear regression method was used to analyze the influence of the independent variables on the vertical distribution of sediment concentration , and the influence degree was tested . The calculated results show that the method can reflect the characteristics of the vertical distribution of fine granular sediment concentration in response to complex dynamic conditions in Hai 'an Bay .

Key words : Rouse equation ; multiple linear regression ; Hai 'an Bay ; estuarine and coastal sediment

河口海岸泥沙问题难于河流泥沙问题在于其动力条件由恒定流变为非恒定流 , 动力因子由单纯水流作用变成更为复杂的不同时空尺度动力因子的耦合作用 , 泥沙类型由粗颗粒泥沙变为输运过程更加复杂的细颗粒泥沙或黏性泥沙 . 用于描述泥沙垂线分布的 Rouse 方程在河口海岸地区的应用较为广泛^[1-5] , 其表达式如下 :

$$\frac{c(z)}{c_a} = \left[\frac{a(h-z)}{z(h-a)} \right]^{\frac{\omega_s}{\kappa u_*}} \tag{1}$$

式中 : $c(z)$ —— z 处泥沙质量浓度 , kg/m^3 ; c_a ——参考点 $z = a$ 处泥沙质量浓度 , kg/m^3 ; h ——水深 , m ; ω_s ——泥沙沉降速度 , m/s ; κ ——卡门常数 ; u_* ——摩阻流速 , m/s .

基于 Rouse 方程成立的前提 , 其在河口近岸水域使用有着严格的限制 , 但考虑到该方程物理概念清晰、

形式简单,所以许多学者在河口近岸水域常采用该方程或类似的形式确定泥沙浓度垂线分布以及悬沙沉降速率。需要强调的是,使用此种方法时人们常常对 Rouse 方程的适用条件分析较少,造成对野外监测数据的筛选不严格,以至于对得出结果的可靠性产生质疑^[6-12]。

对于非恒定流条件、多动力耦合的细颗粒泥沙浓度垂线分布,采用泥沙运动力学理论结合统计学方法进行多元统计分析似乎较适宜。本文拟将泥沙浓度看作随机变量,借助 Rouse 方程采用多元线性回归方法给出垂线泥沙浓度的计算公式。

1 海安湾区域概况

海安湾位于琼州海峡的北部岸线,海底淤泥层主要是本海岸风化及位于海安湾顶的大水桥河口输移细颗粒泥沙淤积的结果。海岸风化引起的泥沙输移和沉积区域主要在-1.0 m 的浅滨海滩地,水体含沙量(质量浓度)约为 0.1 kg/m^3 ,细颗粒泥沙随水输移,造成湾内近岸水域淤浅。大水桥河上游水库以下的流域面积约为 100 km^2 ,每年向海峡提供约2万t泥沙。该海域无论是大潮还是小潮各测站垂线悬移质颗粒中值粒径均为 0.01 mm 左右,底质颗粒粒径在 $0.007\sim0.014\text{ mm}$ 之间, D_{97} 在 $0.038\sim0.150\text{ mm}$ 之间。

2 Rouse 方程的改进

为了将统计学方法和泥沙运动力学理论进行合理的结合,以获得更好的悬沙浓度垂向分布曲线,将式(1)改写成线性方程的形式^[13-14]:

$$\ln \frac{c}{c_a} = a_0 + a_1 \ln \frac{h-z}{z} \tag{2}$$

即
$$\ln c = a_0 + a_1 \ln \frac{h-z}{z} + \ln c_a \tag{3}$$

式中 a_0, a_1 为待定系数,可以采用实测资料回归分析得出。

采用2008年5月海安湾6个实测点(如图1所示)的泥沙垂线浓度数据对式(3)进行回归分析,结果如图2所示。

由于采用式(3)给出的形式比原 Rouse 方程多出2个可调系数(a_0 和 a_1),所以计算结果的精度有所提高,但其相关系数 $R^2=0.376$,说明公式的计算精度仍然需要进一步提高。

引入待定参数 a_3 改进每层含沙量与参考点含沙量之间的关系(引入泥沙密度 ρ_s 以达到无量纲化),表达式如下:

$$\ln \frac{c}{\rho_s} = a_0 + a_1 \ln \frac{h-z}{z} + a_3 \ln \frac{c_a}{\rho_s} \tag{4}$$

同样采用图1所示的海安湾6个实测点2008年5月的泥沙垂线浓度对式(4)进行回归分析,结果如图3所示。

计算结果表明,式(4)比式(3)的计算精度提高许多,相关系数由原来的0.376提高到0.700。对海安湾6个实测点整个实测期内的数据采用式(4)进行计算,并结合多元线性回归的方法进行分析,结果表明式(4)不再局限于 Rouse 方程的使用条件,可以用其来确定近岸复杂动力条件下的泥沙垂线浓度分布。

影响泥沙垂线浓度分布的因素很多,除了式(4)涉及的 $(h-z)/z$ 和 c_a 这2个因素外,有学者通过试验还发现泥沙垂线浓度的变化规律与其紊动强度变化规律一致,泥沙粒径对泥沙浓度垂线分布产生一定的影响,

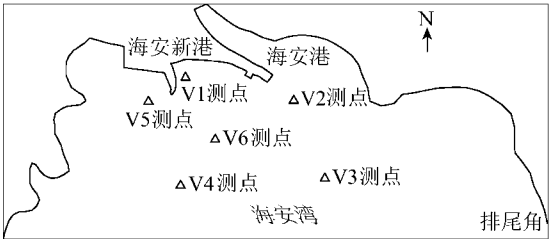


图1 海安湾水文测站位置

Fig. 1 Locations of hydrological stations in Hai'an Bay

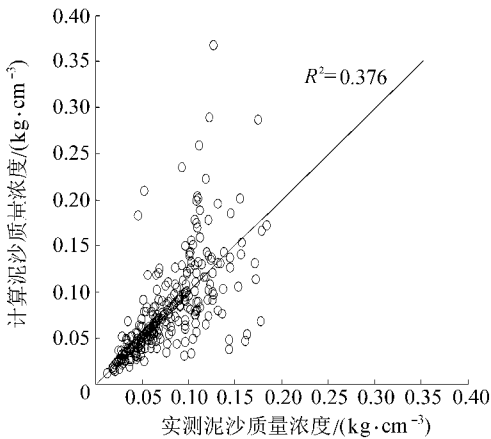


图2 采用式(3)计算的泥沙质量浓度与其实测质量浓度的相关性

Fig. 2 Correlation between measured sediment concentration and computed value using Eq.(3)

泥沙质量浓度与水流流速和流速梯度之间也存在内在联系.此外,实际近岸水域的水动力场为不同时空尺度物理量的耦合(主要是波浪和潮流)驱动,考虑到实际测量时垂线各层的流速均是各动力因素综合作用的结果,只要充分运用实测的流速数据就可以间接地反映波浪的作用以及波浪和潮流的共同作用^[14].以流速为例,实测流速的大小不仅能反映潮流动力的强弱,还可以反映水流所处的阶段(涨潮、落潮或者憩流),这对于进一步修正式(4)有着重要的意义.

在式(4)的基础上仍将泥沙浓度看做是随机变量,把与相对水深、参考点泥沙质量浓度以及流速相关的 3 个物理量 $\ln \frac{h-z}{z}$, $\ln \frac{c_a}{\rho_s}$ 和 $\ln \frac{u^2}{gd}$ (u 为分层流速)看作自变量,参考点的泥沙质量浓度采用容易获取的表层泥沙质量浓度(通过卫星图片或者水面取样等方式获得),这些变量的函数关系可表示为

$$\ln \frac{c}{\rho_s} = a_0 + a_1 \ln \frac{h-z}{z} + a_3 \ln \frac{c_a}{\rho_s} + a_4 \ln \frac{u^2}{gd} \tag{5}$$

采用图 1 所示的海安湾 6 个实测点 2008 年 5 月的泥沙垂线浓度对式(5)进行分析,先分别对每个测点的泥沙垂线浓度分布进行回归分析,然后再对总的泥沙垂线浓度分布进行多元线性回归分析,结果如图 4 所示.

2008 年 5 月份海安湾 6 个实测点泥沙垂线浓度数据拟合得到的多元线性回归方程如下:

$$\ln \frac{c}{\rho_s} = -3.9711 + 0.585 \ln \frac{h-z}{z} + 0.095 \ln \frac{c_a}{\rho_s} + 0.05 \ln \frac{u^2}{gd} \tag{6}$$

采用式(6)计算的泥沙质量浓度与其实测值的相关系数可达到 0.790.从以上各测点及总的泥沙垂向浓度分布计算结果可以看出,随着 3 个无量纲物理量 $\ln \frac{h-z}{z}$, $\ln \frac{c_a}{\rho_s}$ 及 $\ln \frac{u^2}{gd}$ 的引入,公式的计算精度逐渐提高,说明这 3 个物理量与垂向上的泥沙质量浓度分布密切相关.下面仅对总的泥沙数据拟合公式的显著性进行检验,其他测点拟合公式的显著性检验类似.一方面,从相关系数上看,只有 1 个参变量 $\ln \frac{h-z}{z}$ 的 Rouse 方程的相关系数只有 0.610,说明 $\ln \frac{h-z}{z}$ 与 $\ln \frac{c}{\rho_s}$ 的线性关系显著性不高,加入参变量 $\ln \frac{c_a}{\rho_s}$ 后,拟合公式的相关系数显著提高到了 0.830,最后 $\ln \frac{h-z}{z}$, $\ln \frac{c_a}{\rho_s}$, $\ln \frac{u^2}{gd}$ 与 $\ln \frac{c}{\rho_s}$ 的线性关系显著提高,相关系数达到 0.890,说明这 3 个物理量与 $\ln \frac{c}{\rho_s}$ 之间的线性关系是显著的.另一方面,利用 F 检验法对式(6)的显著性进行检验.对于总数据的拟合公式而言,计算得到的 F 值为 288.99,在给定显著水平 $\alpha = 0.05$ 下, $F_{0.95} = 2.6$,显然, $F \gg F_{0.95}$,说明笔者所建立的三参量回归模型是正确的.从以上 2 个方面的检验结果可以看出,笔者建立的泥沙垂向浓度分布回归模型(即式(6))是合理可信的.

3 结 语

Rouse 方程常用来确定泥沙的垂线浓度分布以及泥沙的沉降速度. Rouse 方程成立的条件很苛刻,在河口近岸水域复杂动力条件下使用有着严格的限制.在不明确流速垂线分布之前,其使用往往只能限制在水域风浪较小、泥沙没有密度分层且水流接近稳定的区域.在河口海岸地区确定细颗粒泥沙的浓度垂线分布时能够依赖的基本理论不多,研究中需借助泥沙运动力学理论及其他方法将 Rouse 方程进一步推广.笔者把泥沙质量浓度看作随机变量,借助 Rouse 方程的线性形式以及近岸泥沙输运特性选取 $\ln \frac{h-z}{z}$, $\ln \frac{c_a}{\rho_s}$, $\ln \frac{u^2}{gd}$ 作为自变量,采用多元线性回归方法分析各自变量对泥沙质量浓度的影响,给出了泥沙垂线浓度的计算公式,采用 2 种显著性检验方法(t 检验、 F 检验)检验了选取的自变量对于泥沙质量浓度的影响程度,通过计算出的泥

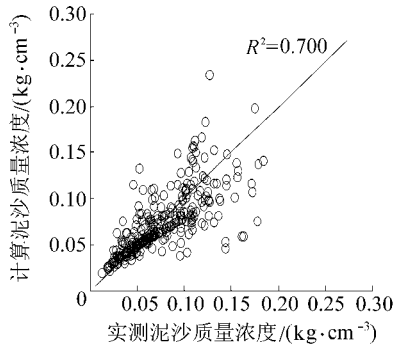


图 3 采用式(4)计算的泥沙质量浓度与其实测质量浓度的相关性
Fig. 3 Correlation between measured sediment concentration and computed value using Eq.(4)

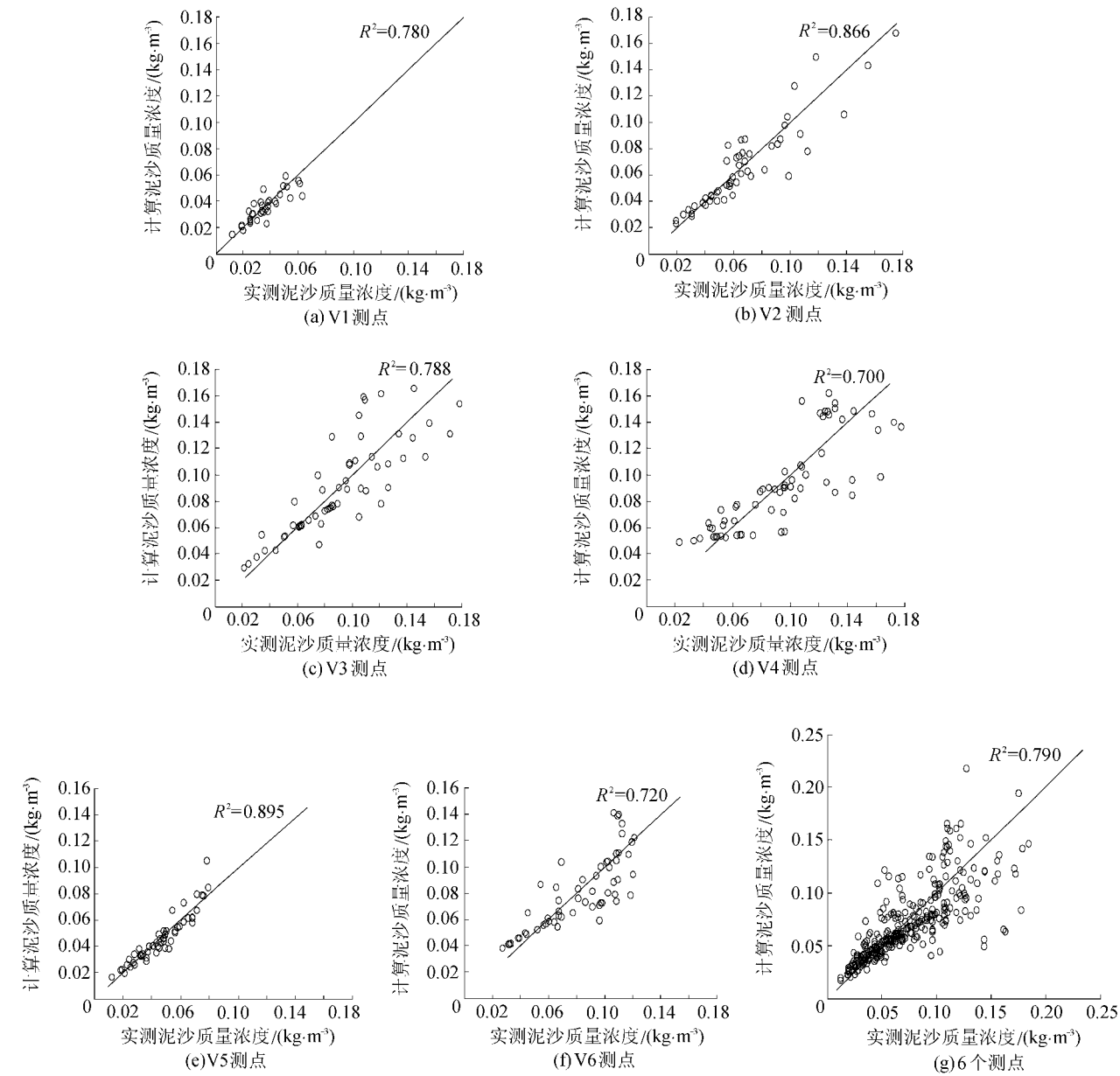


图4 采用式(5)计算的泥沙质量浓度与其实测质量浓度的相关性

Fig. 4 Correlation between measured sediment concentration and computed value using Eq.(5)

沙质量浓度与实测泥沙质量浓度之间的相关性比较,表明采用的变量能够反映在复杂动力条件下海安湾细颗粒泥沙垂线浓度分布的特征.本文方法为确定近岸水域细颗粒泥沙垂线浓度分布提供了新的研究思路.

参考文献:

[1] 李瑞杰,严以新,宋志尧.太平水道悬移质输运数学模型[J].泥沙研究,2008(4):5-7.(LI Rui-jie,YAN Yi-xin,SONG Zhi-yao. Calculation of suspended sediment transport in taiping waterway[J]. Journal of Sediment Research,2008(4):5-7.(in Chinese))

[2] LI Rui-jie,LUO Feng,ZHU Wen-jin.The suspended sediment transport equation and its near-bed sediment flux[J]. Science in China: Series E,2009,52(2):387-391.

[3] MAA J P Y,KWON J I. Using ADV for cohesive sediment setting velocity measurements[J]. Estuarine Coastal and Shelf Science,2007,73(1/2):351-354.

[4] 王昌杰.河流动力学[M].北京:人民交通出版社,2001:59-67.

[5] HENDERSEN F M.Open channel flow[M]. New York:McMillan Co.,1966:85-86.

[6] MUNK W R,ANDERSON H E. Note on the theory of the thermo clin[J]. Marine Geophysical Researches,1948(7):34-35.

[7] 黄克中.环境水力学[M].广州:中山大学出版社,1997:76-77.

- [8] 万新宁 李九发 沈涣庭. 长江口外海滨悬沙分布及扩散特征[J]. 地理研究, 2006, 25(2): 294-302. (WAN Xin-ning , LI Jiu-fa , SHEN Huan-ting. Distribution and diffusion of suspended sediment in the offshore area of Changjiang estuary[J]. Geographical Research , 2006, 25(2): 294-302. (in Chinese))
- [9] 时钟 朱文蔚 周洪强. 长江口北槽口外细颗粒悬沙沉降速度[J]. 上海交通大学学报, 2000, 34(1): 18-23. (SHI Zhong , ZHU Wen-wei , ZHOU Hong-qiang. Settling velocity of fine suspended sediment in the Changjiang estuary[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2000, 34(1): 18-23. (in Chinese))
- [10] 陈沈良 谷国传 张国安. 长江口南汇近岸水域悬沙沉降速度估算[J]. 泥沙研究, 2003(6): 45-51. (CHEN Shen-liang , GU Guo-chuang , ZHANG Guo-an. Settling velocity of suspended sediment in the Nanhui nearshore waters of Changjiang estuary[J]. Journal of Sediment Research , 2003(6): 45-51. (in Chinese))
- [11] 许泰文. 近岸水动力学[M]. 台湾: 土木水利工程学会, 2004: 17-18.
- [12] 吴宋仁 严以新. 海岸动力学[M]. 3 版. 北京: 人民交通出版社, 2000: 24-25.
- [13] 王黎明 陈颖 杨楠. 应用回归分析[M]. 上海: 复旦大学出版社, 2008: 70-90.
- [14] 韩其为 陈绪坚 薛晓春. 不平衡输沙含沙量垂线分布研究[J]. 水科学进展, 2010, 21(4): 512-522. (HAN Qi-wei , CHEN Xu-jian , XUE Xiao-chun. On the vertical distribution of sediment concentration in non-equilibrium transportation[J]. Advances in Water Science , 2010, 21(4): 512-522. (in Chinese))

《水利水电科技进展》征订启事

(邮发代号 28-244 , CN32-1439/TV , ISSN1006-7647 , 双月刊 , A4 开本)

《水利水电科技进展》由河海大学主办 , 是中国科学引文数据库(CSCI)来源期刊 , 全国中文核心期刊 , 中国科技核心期刊 , RCCSE 核心期刊 , 全国水利系统优秀期刊 , 华东地区优秀期刊 , 江苏省优秀期刊 . 主要刊登水科学、水工程、水资源、水环境、水管理方面的科技论文 , 主要栏目有水问题论坛、研究探讨、工程技术、水管理、专题综述、国外动态等 , 适合水科学、水工程、水资源、水环境领域的科研、工程、管理人员以及大专院校师生阅读 .

《水利水电科技进展》由邮局发行 , 邮发代号 28-244 , 2012 年每期定价 12 元 , 全年 6 期共计 72 元 . 可
在全国各地邮局订阅 , 也可直接向编辑部订阅 .

编辑部地址 : 南京市西康路 1 号 《水利水电科技进展》编辑部

邮政编码 210098

电话/传真 025-83786335

E-mail jz@hhu.edu.cn

http://kjb.hhu.edu.cn/web/indexjz.asp?id=5