

强潮河口悬浮泥沙浓度垂向结构分析 ——以杭州湾乍浦水域大潮期为例

唐建华¹, 梁斌², 李若华²

(1. 长江勘测规划设计研究院上海分院, 上海 200439; 2. 浙江省水利河口研究院, 浙江 杭州 310020)

摘要: 利用在强潮河口——杭州湾乍浦水域大潮期的现场实测水文、泥沙资料, 分析了悬浮泥沙浓度的垂向结构。结果表明, 在涨落潮周期内, 除落潮前后较短的一段时间外, 由于强潮河口强烈的水动力造成水体垂向混合均匀, 研究区域悬浮泥沙浓度的垂向分布符合 Rouse 公式; 如用六点法实测的底层悬浮泥沙浓度来代替近底悬浮泥沙浓度, 会造成较大的误差; 根据 Rouse 公式拟合, 选取合适的近底距离, 可求出对应的近底悬浮泥沙浓度, 这比利用实测的底层悬浮泥沙浓度代替更为准确和合理; 实测的底层悬浮泥沙浓度对近底悬浮泥沙浓度影响很大; 实测的底层流速对近底悬浮泥沙浓度垂向分布的影响较大。

关键词: 强潮河口; 悬浮泥沙浓度; 垂向结构; Rouse 公式

中图分类号: TV148 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-640X(2009)02-0039-05

悬浮泥沙浓度的垂向分布主要反映水体悬浮泥沙和河床床面泥沙的交换及与水动力的关系, 是研究含沙水流中泥沙运动特性的基本指标, Rouse^[1]经典理论的提出和随后 Vanoni^[2]的实验研究极大地促进了泥沙运动力学理论的发展。此后, 在这两人开创性研究的基础上, 泥沙研究取得了很大进展^[3-7]。悬浮泥沙浓度的垂向分布特性, 不仅直接关系到取、排水, 防、排沙工程的规划设计, 而且也是研究悬浮泥沙运动、输移的重要途径, 因而始终是泥沙运动研究的核心问题之一。

河口、海湾水域因受往复性潮流、波浪、絮凝等因素的影响, 泥沙在潮流、波浪作用下悬浮、输移、沉积、再悬浮, 悬浮泥沙浓度的垂向分布及其运动、输移有其特殊的性质, 较为复杂, 这也是泥沙研究的重要方面^[8-12]。本文利用在强潮河口——杭州湾水域大潮期的现场实测水文、泥沙资料, 对强潮河口悬沙浓度垂向结构进行分析探讨。

1 水文泥沙条件

本文研究中, 采用 2005 年 2 月在杭州湾乍浦附近水域布设的 6 条垂线的大潮水文、泥沙观测数据, 包括流速、流向及含沙量, 按 6 点法施测, 即面层(水面下 0.5 m)、相对水深 0.2 h, 0.4 h, 0.6 h, 0.8 h 及底层(离河底 0.5 m), 现场观测站位分布见图 1。

统计观测期间乍浦站半个月的潮位资料表明, 最高潮位为

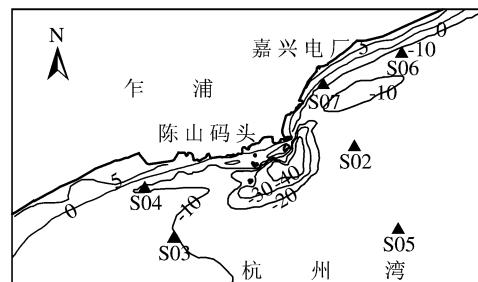


图 1 杭州湾现场观测站位分布

Fig. 1 In-situ sampling sites in Hangzhou Bay

收稿日期: 2008-07-25

基金项目: 浙江省水利河口研究院院长基金资助项目(河口 A07005); 浙江省科技厅公益技术攻关项目(河口 A07014)

作者简介: 唐建华(1981-), 男, 湖北广水人, 工程师, 硕士, 主要从事河口海岸水动力、泥沙运动研究。

E-mail: jianhuatang2004@126.com

3.36 m, 最低潮位为 -2.71 m; 最大潮差达 5.87 m, 最小潮差为 1.70 m, 平均潮差达 4.51 m; 平均涨潮历时为 5.43 h, 平均落潮历时为 6.93 h。可见该水域潮差大, 涨潮历时小于落潮历时。

观测数据还表明, 各测点基本为往复流, 涨落潮流路基本一致, 流向基本与岸线或地形等高线走向一致。各层及垂线平均的涨落潮流统计见表 1。由表 1 可见, 该海域潮流流速很大, 测点最大涨潮流速达 2.50 m/s (S03, 表层), 测点最大落潮流速达 2.20 m/s (S02, 表层); 垂线平均最大涨潮流速达 2.00 m/s (S02), 垂线平均最大落潮流速达 1.68 m/s (S02)。这说明该水域潮流很强, 且涨潮流强于落潮流。

表 1 各测站涨、落潮最大流速统计

Tab. 1 Statistics of tidal current velocity of each sampling site (单位:m/s)

垂线号	潮型	面层	0.2h	0.4h	0.6h	0.8h	底层	垂线平均
S02	涨潮	2.34	2.28	2.14	1.98	1.84	1.54	2.00
	落潮	2.20	2.06	1.92	1.61	1.40	1.01	1.68
S03	涨潮	2.50	2.44	2.32	2.12	1.70	1.30	1.92
	落潮	1.92	1.80	1.66	1.48	1.18	0.92	1.46
S04	涨潮	1.84	1.58	1.64	1.62	1.60	1.14	1.51
	落潮	1.72	1.66	1.64	1.40	1.26	0.94	1.41
S05	涨潮	2.38	2.32	2.24	2.04	1.68	1.08	1.95
	落潮	2.10	2.02	1.84	1.56	1.16	0.82	1.58
S06	涨潮	2.20	1.89	1.80	1.72	1.68	1.26	1.73
	落潮	1.72	1.62	1.48	1.33	1.15	0.89	1.35
S07	涨潮	1.18	1.30	1.52	1.46	1.18	1.08	1.29
	落潮	1.15	1.06	1.06	0.98	0.86	0.68	0.94

根据观测期间(大潮)的含沙量数据统计(表 2), 各测点含沙量较高, 最高达 8.50 kg/m³ (S04, 底层), 垂线平均含沙量最高达 2.05 kg/m³ (S05)。

表 2 各测站测点及垂线平均含沙量统计

Tab. 2 Statistics of SSC of each sampling site (单位:kg/m³)

垂线号	测点			垂线平均		
	最大	最小	平均	最大	最小	平均
S02	2.29	0.28	1.44	1.89	0.69	1.22
S03	5.19	0.30	1.98	2.54	0.75	1.60
S04	8.50	0.33	2.31	4.12	0.48	2.00
S05	6.52	0.12	2.97	3.64	1.10	2.05
S06	2.27	0.44	1.41	1.56	1.05	1.28
S07	1.99	0.43	1.29	1.63	0.66	1.18

2 含沙量的垂向结构分析

2.1 垂线含沙量分布的 Rouse 公式拟合

Rouse 从二维恒定均匀流、平衡情况下的悬移质质量平衡基本方程出发, 通过一系列的假设条件, 推出了著名的 Rouse 公式^[4]:

$$\frac{S}{S_a} = \left[\left(\frac{h}{y} - 1 \right) / \left(\frac{h}{a} - 1 \right) \right]^{\frac{\omega}{\kappa \beta u_*}} \quad (1)$$

式中: S 为距床面 y 处的含沙量; S_a 为离床面 a 处的参考浓度, a 为离床面很近的参考距离; h 为水深; ω 为沉速; κ 为卡门数; β 为泥沙紊动扩散系数与动量紊动扩散系数的比值; u_* 为摩阻流速。

对(1)式两边取自然对数, 整理得: $\ln S = A + Z \ln [(h - y)/y]$ (2)

式中: A 和 Z 为悬浮指标, $A = \ln S_a + Z \ln[a/(h-a)]$, $Z = \omega/\kappa\beta u$. 可见, 如果含沙量的垂向分布符合 Rouse 公式, 那么 $\ln S$ 与 $\ln[(h-y)/y]$ 成线性关系. 下面利用杭州湾乍浦附近水域的实测资料来验证含沙量的垂向分布是否符合 Rouse 公式. 统计表明, 各测站的相关系数在整个观测期间平均大于 0.82, 通过置信度为 95% 的显著性检验的时刻所占的比例大于 69%. 就整个海域来说, 相关系数最大为 0.93, 最小为 0.45, 平均为 0.85, 通过置信度为 95% 的显著性检验的时刻所占的比例为 82%. 可见, 观测期间的大部分时刻, $\ln S$ 和 $\ln[(h-y)/y]$ 具有明显的线性关系, 也就是说含沙量的垂向分布符合 Rouse 公式.

2.2 利用 Rouse 公式拟合的适用性分析

Rouse 公式表达了水沙两相、二维、恒定、均匀流中达到平衡, 以及沉速沿水深为定值的情况下, 含沙量沿水深垂向的分布形态. 实际水流尤其是复杂的河口、海岸水域, 很难满足 Rouse 公式的条件. 因此, 在进行 Rouse 公式拟合时, 并不是所有的时刻都满足要求. 只有当水流流速及悬浮泥沙含沙量水平梯度较小, 且河床底沙同上层水体的悬沙交换达到平衡时, 才可以简化为相对恒定的均匀流, 才可以利用 Rouse 公式来表示悬沙浓度的垂向分布.

比较分析各测站拟合相关系数与垂线平均流速及含沙量的关系(图 2, 以 S07 为例, 下同)表明, 在涨潮期至落急后 1 h 这段时间内, 线性拟合的相关系数大于 0.81, 悬沙浓度(SSC)的垂向分布符合 Rouse 公式, 在这段时间内, 水体垂向混合强烈、均匀, 悬沙浓度垂向分布较为均匀(图 3, 以 S07 为例, 下同), 悬浮泥沙浓度较高, 基本达到平衡, 可以近似为恒定均匀流. 而只有在落急后 1 h 至落憩后 1 h 较短的一段时间内, 流速较低, 水体分层, 悬沙浓度垂向分布呈“L”型(图 3), 水体垂向混合较弱, 不符合 Rouse 公式. 可见, 强潮河口的强动力条件造成的强混合和较高的含沙量是悬沙浓度垂向分布符合 Rouse 公式的先决条件.

为了进一步来说明利用 Rouse 公式进行线性拟合的适用性, 我们根据拟合过程中得到(2)式的截距 A ($A = \ln S_a + Z \ln[a/(h-a)]$), 通过取不同的参考距离 a (如 0.2h, 0.6h 等), 计算得到相应的参考浓度 S_a . 比较计算及实测的含沙量(图 4, 以 S07 为例)表明, 利用截距 A 推求各对应层的悬沙浓度与实测悬沙浓度相差不大, 最大误差为 30%, 最小为 0, 平均误差为 11%. 这表明利用截距 A 来推求各层的含沙量是合理的, 也进一步说明研究区域悬浮泥沙浓度的垂向分布符合 Rouse 公式.

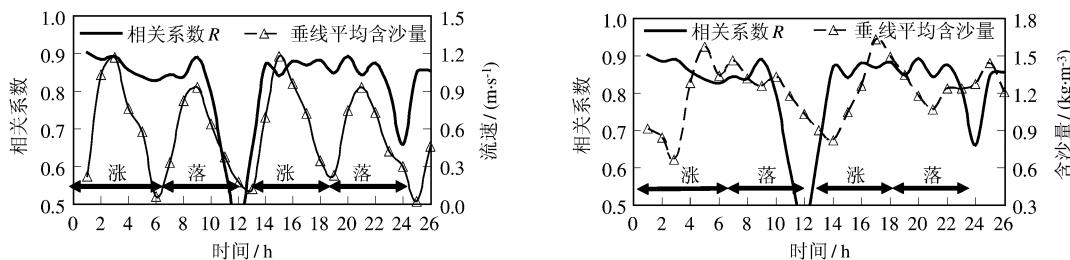


图 2 S07 测站拟合相关系数与垂线平均流速及含沙量的关系

Fig. 2 Relationship between fitting correlation coefficients and vertical averaged current velocity and SSC

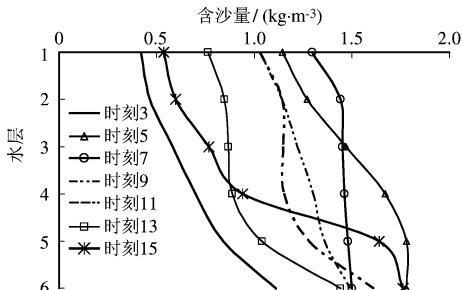


图 3 S07 测站各时刻悬沙浓度垂向分布形式

Fig. 3 Vertical structure of SSC during tidal cycle at S07 site

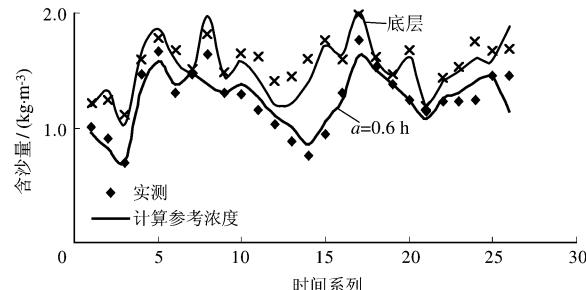


图 4 S07 测站各时刻计算与实测悬沙浓度比较

Fig. 4 Comparison between the calculated and observed SSC during tidal cycle at S07 site

2.3 利用 Rouse 公式推求近底悬浮泥沙浓度

近底悬浮泥沙浓度的确定对于研究床面泥沙的起动、输移具有十分重要的意义,在海底资源的开发利用如海底管道铺设、海底采矿、航道疏浚等工程的规划设计中,近底悬浮泥沙浓度是一个基本参数。但目前的水文泥沙测量一般采用常规六点法,难以获取近底的悬浮泥沙浓度,而往往用实测的底层悬浮泥沙浓度来代替,这势必会产生一定的误差。上述分析表明,大部分时间内,研究区域悬浮泥沙浓度的垂向分布符合 Rouse 公式,利用(2)式的截距 A ,即可求得距床面不同高度处的悬浮泥沙浓度。选取距床面 0.1 m 处悬浮泥沙浓度作为近底的悬浮泥沙浓度,也即取参考距离 $a=0.1$ m,通过截距 A 来求取该处的悬浮泥沙浓度。计算结果表明,当以距床面 0.1 m 处的悬浮泥沙浓度作为近底的悬浮泥沙浓度时,近底悬浮泥沙浓度与常规的六点法实测的底层悬浮泥沙浓度差别较大,两者比值最大达 5.0,平均在 1.2~2.1 之间。可见,若以实测的底层悬浮泥沙浓度来代替近底悬浮泥沙浓度,会造成较大的误差,结果明显偏小。根据截距 A ,通过选取合适的近底距离,便可求得对应的近底悬浮泥沙浓度,这比利用实测的底层悬浮泥沙浓度作为替代更为准确和合理。

为了探讨近底悬浮泥沙浓度的影响因素,比较其与实测的底层流速和悬浮泥沙浓度的关系(图 5,以 S07 为例)表明,实测的底层悬浮泥沙浓度对近底悬浮泥沙浓度影响很大,近底与实测的底层悬浮泥沙浓度的变化趋势基本一致,而底层流速对近底悬浮泥沙浓度的影响不明显。但比较近底与底层悬沙浓度的比值与底层流速的关系(图 6,以 S07 为例)表明,随着底层流速的增大,该比值也随之增大,且两者的相关关系较好,说明底层流速对近底悬浮泥沙浓度的垂向分布也起着重要作用。

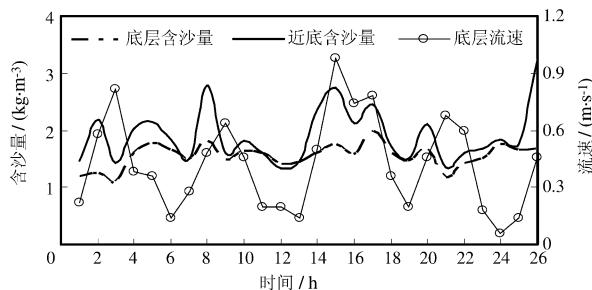


图 5 近底、底层悬沙浓度及底层流速比较(S07)

Fig. 5 Comparison between near bottom SSC, bottom SSC and bottom current velocity (S07)

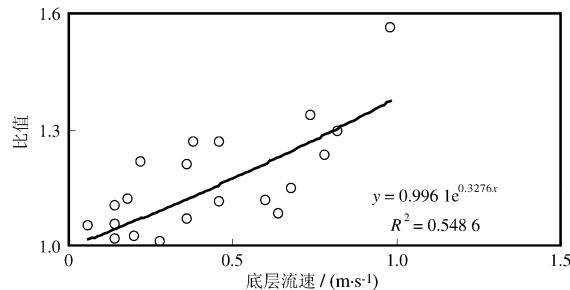


图 6 近底与底层悬沙浓度比值与底层流速关系(S07)

Fig. 6 Relationships between the ratio of near bottom SSC to bottom SSC and bottom current velocity (S07)

3 结语

利用强潮河口——杭州湾水域大潮期的现场实测水文、泥沙资料,分析探讨了悬浮泥沙浓度的垂向结构,结果表明:在涨落潮周期内,除了落潮及其前后较短的一段时间,由于强潮河口强烈的水动力条件造成了水体的垂向混合均匀,大部分时间内,研究区域悬浮泥沙浓度的垂向分布符合 Rouse 公式;以六点法实测的底层悬浮泥沙浓度来代替近底悬浮泥沙浓度,会造成较大的误差。根据 Rouse 公式线性拟合的截距 A ,选取合适的近底距离,可求得对应的近底悬浮泥沙浓度,这比利用实测的底层悬浮泥沙浓度代替更为准确合理;实测的底层悬浮泥沙浓度对近底悬浮泥沙浓度影响很大;实测的底层流速对近底悬浮泥沙浓度垂向分布的影响也较大。

参 考 文 献:

- [1] Rouse H. Experiments on the mechanics of sediment suspension[C]//Proceedings of the 5th international congress for applied mechanics. Cambridge: Massachusetts, 1938: 550~554.
- [2] Vanoni V A. Transport of suspended sediment by water[J]. Trans ASCE, 1946(Ⅲ): 67~113.

- [3] 王光谦. 河流泥沙研究进展[J]. 泥沙研究, 2007, (2): 64–81. (WANG Guang-qian. Advances in river sediment research [J]. Journal of Sediment Research, 2007, (2): 64–81. (in Chinese))
- [4] 张瑞瑾. 河流泥沙动力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998: 1–186. (ZHANG Rui-jin. River Sediment Dynamics [M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 1998: 1–186. (in Chinese))
- [5] 陈吉余, 沈焕庭, 恽才兴, 等. 长江河口动力过程和地貌演变[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1988: 205–290. (CHEN Ji-yu, SHEN Huan-ting, YUN Cai-xing, et al. Processes of Dynamics and Geomorphology of the Changjiang Estuary [M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publisher, 1988: 205–290. (in Chinese))
- [6] 时钟. 长江口北槽细颗粒悬沙絮凝体的沉降速率的近似估算[J]. 海洋通报, 2004, (5): 51–58. (SHI Zhong. Approximate estimations of settling velocities of fine suspended mud flocs at the north passage of the Changjiang Estuary [J]. Marine Science Bulletin, 2004, (5): 51–58. (in Chinese))
- [7] 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-chuan, 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))
- [8] 钱宁, 万兆惠. 泥沙运动力学[M]. 北京: 科学出版社, 1983: 1–250. (QIAN Ning, WAN Zhao-hui. Sediment Movement Mechanics [M]. Beijing: Science Press, 1983: 1–250. (in Chinese))
- [9] 倪晋仁, 王光谦, 张红武. 固液两相流基本理论及其最新应用[M]. 北京: 科学出版社, 1991: 1–91. (NI Jin-ren, WANG Guang-qian, ZHANG Hong-wu. The Basic Theory of Solid-Liquid Two-Phase Flow and Its Latest Application [M]. Beijing: Science Press, 1991: 1–91. (in Chinese))
- [10] 丁君松. 悬移质含沙量沿垂线分布的研究及其应用[J]. 武汉水利电力学院学报, 1981, (4): 44–45. (DING Jun-song. Suspended load sediment concentration along the vertical distribution of research and its application [J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric, 1981, (4): 44–45. (in Chinese))
- [11] 黄胜, 卢启苗. 河口动力学[M]. 北京: 水利电力出版社, 1993: 176–177. (HUANG Sheng, LU Qi-miao. Estuarine Dynamics [M]. Beijing: China Water Conservancy and Electric Power Press, 1993: 176–177. (in Chinese))
- [12] 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. (ZHOU Ji-fu, LI Jia-chun. Mixing and sediment transport in estuaries [J]. Aata Mechanica Sinica, 2000, 32(5): 523–531. (in Chinese))

Discussion on vertical structure of suspended sediment concentration of macro-tidal estuary during spring tide ——taking Zhipu of Hangzhou Bay as an example

TANG Jian-hua¹, LIANG Bin², LI Ruo-hua²

(1. *Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, Shanghai Branch, Shanghai 200439, China*; 2. *Zhejiang Institute of Hydraulics and Estuary, Hangzhou 310020, China*)

Abstract: Based on the field data of hydrodynamics and suspended sediment concentration (SSC) during spring tide in Zhipu sea area of Hangzhou Bay, the vertical structure of SSC of a macro-tidal estuary in Hangzhou Bay was discussed. The results indicate that: because of the strong mixture by macro-tidal estuary's intense hydrodynamics, the vertical structure of SSC can be presented by Rouse formula during the tidal circle except the low current velocity period; the replacement of near bed SSC by the general 6-cell observation's bottom data can lead to errors; using Rouse formula to calculate near bed SSC with appropriate near bed distance may be more reasonable and correct; the general 6-cell observation's bottom SSC has much impact on the actual near bed SSC, and the general 6-cell observation's bottom current velocity has much impact on the vertical structure of SSC.

Key words: macro-tidal estuary; SSC; vertical structure of SSC; Rouse formula