

根据流速剖面估计海底粗糙长度的研究

柏秀芳^{1, 2}, 龚德俊¹, 李思忍¹, 徐永平¹

(1 中国科学院 海洋研究所, 山东 青岛 266071; 2 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

关键词: 粗糙长度; 摩阻流速; 对数分布; 对数拟合法

中图分类号: P332.4

文献标识码: A

文章编号: 0253-4193(2008)04-0176-05

1 引言

由于底床的摩擦作用, 河口海岸近底层的水体流动与远离海底上层的水体流动产生很大的差别, 形成重要的底边界层。在近底层由于水层与床面有频繁的物质交换, 所以研究河口海岸边界层对水流、泥沙、温度、盐度垂向混合、底沙运动等物质过程有着重要的作用。底床粗糙度是研究河口海岸沉积物运移和水流结构的重要因素, 它由颗粒粗糙度、底形粗糙度和推移质输沙粗糙度组成。目前还没有一个经验公式来计算底床粗糙度, 但是在无波浪的情况下粗糙度可以通过拟合流速的对数分布(卡门-普朗特公式)来求得。

利用对数拟合方法必须满足两个条件: 一是必须测量近海底三个层面以上的流速, 二是测得的流速剖面必须满足对数分布。利用声学多普勒剖面仪即可以测得多个层面的流速, 但当潮汐流发生转向时, 流速却很少能满足对数分布, 因此利用单个流速剖面估计的粗糙长度随时间变化较大。基于此, 国内外研究者提出了多种方法来减少它的数据分布^[1-7]。本文的目的是基于文献[5]提出的扩展的对数拟合方法, 以不同的潮周期为单位, 将该单位内流速剖面进行拟合, 得出该单位内的粗糙长度, 并与由传统对数拟合方法计算得到的单个流速剖面内的粗糙长度进行比较, 得出计算它的更准确方法。

2 研究区域及方法

研究区域位于北部湾西南部, 地处北部湾浅海陆架。北部湾为三面被陆地包围的浅水海湾, 大部分水深在 20~60 m, 等深线走向基本上与岸线走向一致, 投放区域水深约 40 m(图 1)。研究区潮流为正规全日潮型的往复流。

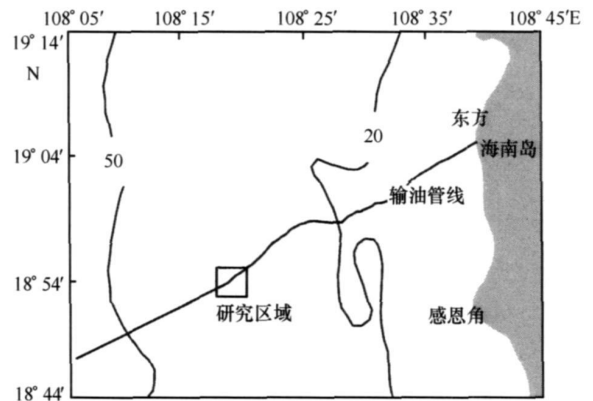


图 1 研究区域位置图^[8]
水深单位为米

本文使用美国 RDI 公司生产的 600 kHz 宽带声学多普勒海流剖面仪(ADCP), 于 2006 年 8 月 13 日至 2007 年 1 月 26 日在该区域测量了近半年的流速剖面数据。ADCP 仪的底座被放在一个四方的框架上, 共设置 59 个测量单元, 测量单元

收稿日期: 2008-01-02; 修订日期: 2008-03-21。

基金项目: 中国科学院重大科研装备研制项目资助(Y20619)。

作者简介: 柏秀芳(1979—), 女, 山东省莱芜市人, 博士研究生, 研究方向为海洋环境监测与系统集成。E-mail: bxf1979@126.com

的分辨率为 0.75 m, 每 3 h 测一次流。根据获得的数据知第 1 层距离 ADCP 仪的探头 1.86 m, 而探头距离海底 1.8 m, 因此第 1 层距离海底 3.66 m。因时间的长短并不影响本文所要阐述的内容, 为了节约篇幅, 选取了 2006 年 8 月 31 日 20:00 至 9 月 9 日 05:00 共 68 个时间序列上的数据进行分析。由测得的数据知, 研究期内海面波高最大达到 1 m, 而研究区域水深为 40 m, 可以不考虑波浪对海底潮流的影响。

3 数据分析及结果

潮流的对数分布通常存在于小于 $(0.1 \sim 0.2) d$ 的海底区域, 其中 d 为测量区域的平均水深, 本研究区域平均水深为 40 m, 因此取底部 6 层 ($z = 3.66, 4.41, 5.16, 5.91, 6.66, 7.41$ m) 的流速进行分析。图 2 为底部 6 个层面 6 个时间序列上的流速分布, P-16 表示第 16 个时间序列上的流速剖面, 其他的意义类同。

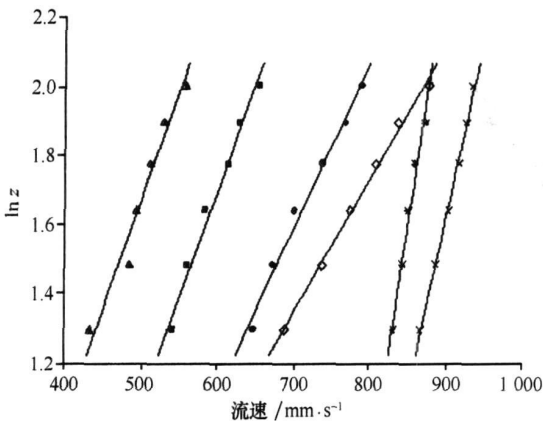


图 2 底部 6 层流速分布

■ P-16, ● P-24, ▴ P-26, ◇ P-40, ✕ P-45, ▲ P-58

由图 2 可以看出, 流速满足对数分布:

$$u_i = \frac{u^*}{K} \ln \frac{z_i}{z_0}, i = 1, 2, \dots, 6, \quad (1)$$

式中, u^* 为摩阻流速; K 为卡门常数, 通常取 0.4; z_i 为第 i 层的深度; z_0 为粗糙长度。根据文献[5], 将第 1 层 ($z_1 = 3.66$ m) 处的速度作为参照流速, 可以将式(1)转换为

$$u_i = k_i u_1, k_i = \frac{\ln(z_i/z_1)}{\ln(z_1/z_0)} + 1, \quad (2)$$

式中, k_i 为第 i 层流速 u_i 与第 1 层流速 u_1 的比例因子。 $k_1 = 1$, i 大于 1 时, $k_i > 1$ 。从式(2)可以看

出, 如果第 1 层的深度和粗糙长度已知, 则比例因子仅仅是第 i 层深度的函数。对于固定的海床, 粗糙长度是不变的, 比例因子仅仅是第 i 层深度的函数, 与流速剖面无关; 对于移动的海床, 因粗糙长度随时间变化较大, 比例因子也会因流速剖面而变化, 但是当海底粗糙度随时间变化不是很大时, 可以假设比例因子仅仅是第 i 层深度的函数, 那么第 i 层的流速 ($i > 1$) 对第 1 层的流速的散点图应当是线性的。图 3 点绘了 u^1 对 u^2, u^3, u^4, u^5, u^6 在整个研究期内的散点图来验证该假设。由图 3 可以看出, 第 1 层的流速与第 2 至第 6 层的流速之间是线性相关的。因此, 粗糙长度可以通过拟合 $[k_i, \ln(z_i)]$ 由 $k(z)$ 等于 $A \ln(z/z_0)$ 来求得。

虽然第 1 层的流速与第 2 至第 6 层流速之间是线性相关的, 但相关系数随层数的增大而减小, 即层数越大, 相关系数越小。为了解决这个问题, You^[5] 提出了点绘第 i 层的流速对第 $i-1$ 层的流速的散点图来求比例因子应该会更精确。本文在计算后发现, 用该方法算出的比例因子并不比由之前的方法算出的比例因子精确, 相反还略微差些, 所以本文仍采用点绘第 2 至第 6 层流速对第 1 层的流速的散点图来求比例因子。由图 3 得到的比例因子对深度的对数的散点图如图 4 所示。确定比例因子后, 根据 $k(z) = A \ln(z/z_0)$ 即可计算出粗糙长度。由图 4 计算的粗糙长度为 33.6 mm。

在本文所取的研究期内共发生 8 次涨潮和 8 次落潮, 33.6 mm 的粗糙长度是以 8 个潮汐周期为单位计算的。图 5a 和 b 为单个流速剖面内的粗糙长度和相关系数的二次方 (r^2) 的变化情况, 即传统对数拟合计算粗糙长度的方法。粗糙长度的变化范围为 0.100~1.600 mm, 因为粗糙长度小于 0.1 mm 的值不符合实际情况, 所以被删除, 相关系数的变化范围为 0.2~1。相邻流速剖面的粗糙长度变化较大。图 5c 和 d 分别为以 1 个潮汐周期、2 个潮汐周期、4 个潮汐周期以及 8 个潮汐周期 (整个研究期间) 为单位所计算的粗糙长度和相关系数的二次方的变化情况。粗糙长度变化为 10~90 mm, 比由单个流速剖面计算出的粗糙长度要小得多。从图中可以看出, 潮汐周期越长, 粗糙长度变化越小。相关系数的二次方大于 0.95, 比由单个流速剖面计算出的相关系数的二次方要高得多。

传统计算摩阻流速的方法是绘制单个流速剖面

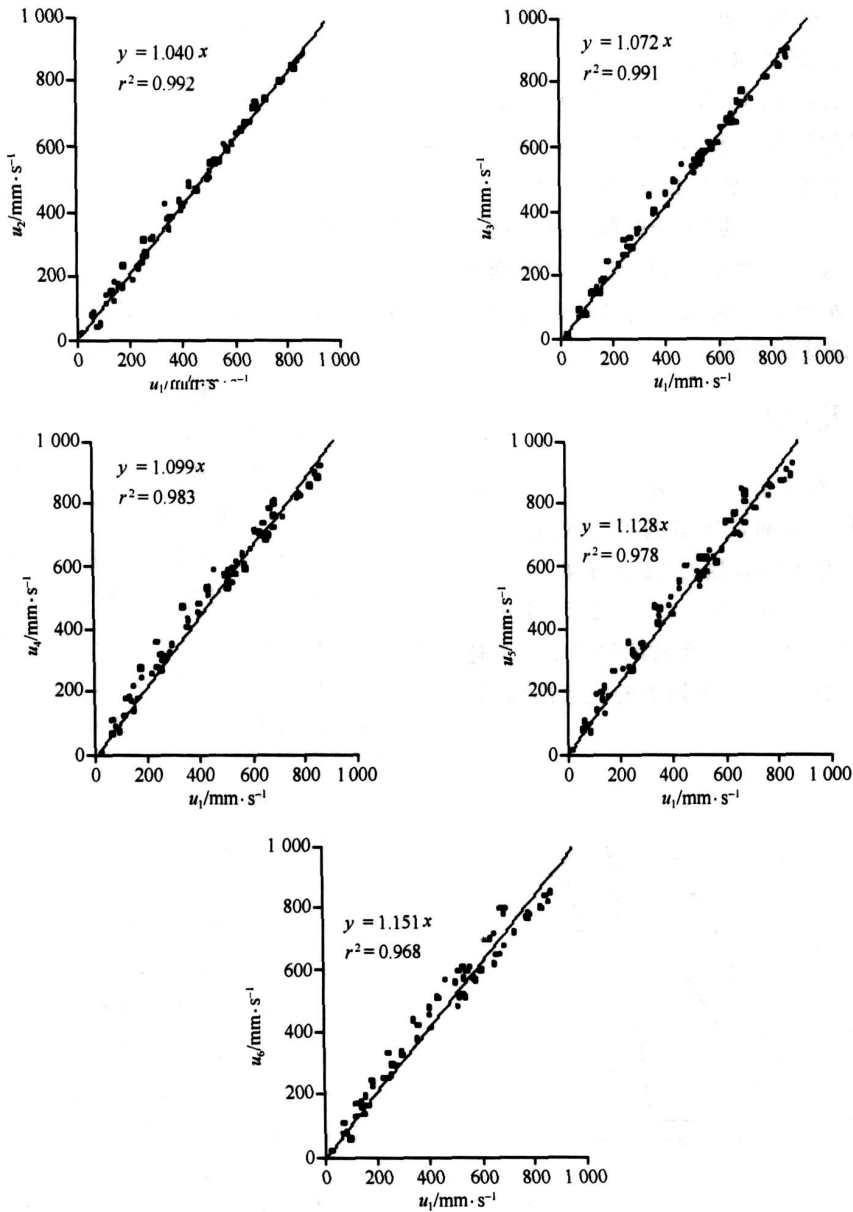


图3 整个潮汐周期内第2至第6层流速对第1层流速的散点图

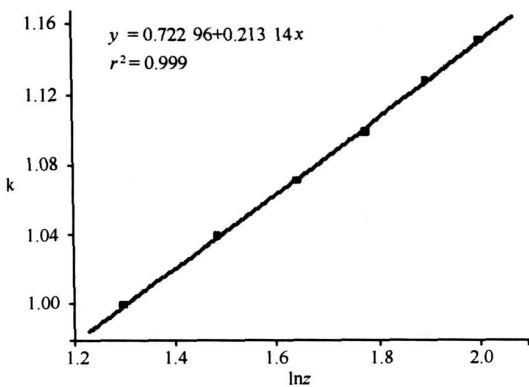


图4 由图3估计的比例因子分布

6个层面的深度的对数与流速的关系图, 拟合流速的对数分布 $u = a \ln z + b$, 则 $u^* = 0.4a_0$ 。不同潮汐周期单位内的摩擦流速 $u^* = 0.4u_{366} / \ln(z_1/z_0)$, 其中 u_{366} 为距离海底 366 m 处的流速; z_0 为 4 个不同潮汐周期单位内的粗糙长度(图 5c)。由单个流速剖面计算的摩擦流速与不同潮汐周期单位内算出的摩擦流速如图 6 所示。从图 6 可以看出, 虽然 4 个潮汐周期单位内的粗糙长度不同, 但由 4 个粗糙长度计算出的摩擦流速却相差不大。摩擦流速与各水层流速通常有较好的线性关系, 根据测得的流速数据知底部 6 个层面上的流速分布相差不

大,因此摩阻流速也就差别不大。单个流速剖面内的摩阻流速与4个潮汐周期单位内的摩阻流速的差异要远远小于粗糙长度之间的差异,这说明

尽管采用不同方法得到的粗糙长度有的精度不同,但由此得到的摩阻流速差别不大。

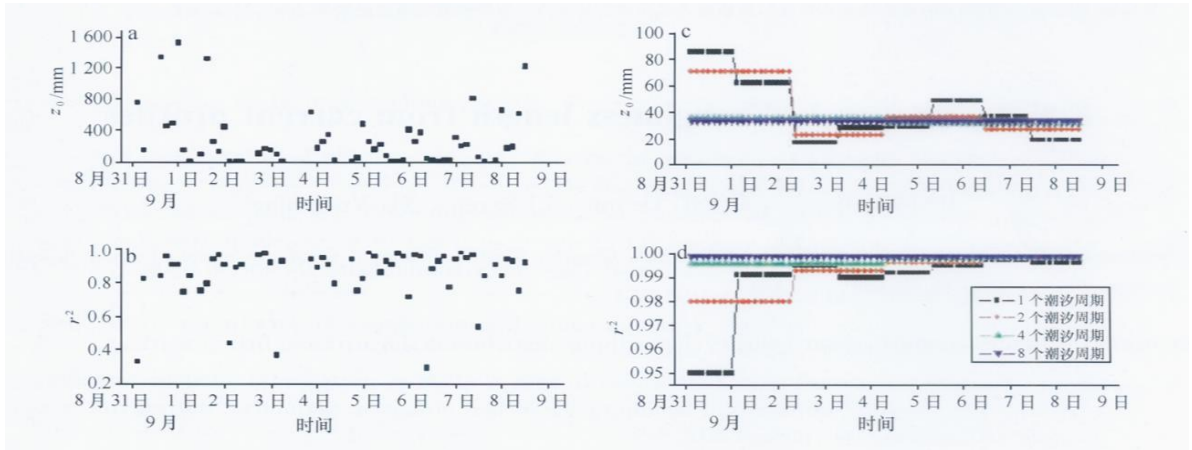


图5 单个流速剖面 and 不同潮汐周期单位内的粗糙长度和相关系数的二次方

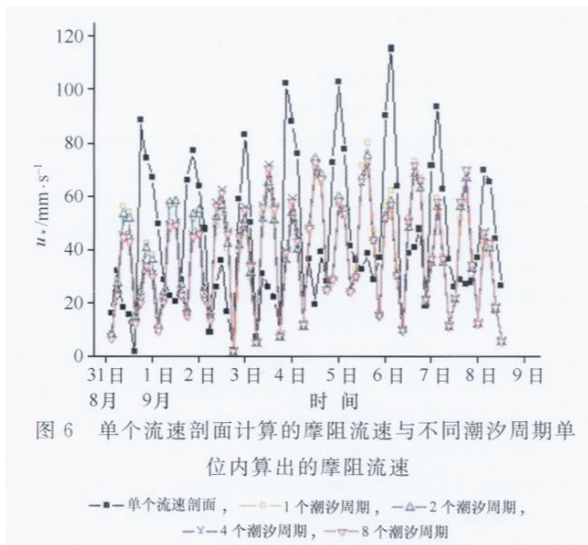


图6 单个流速剖面计算的摩阻流速与不同潮汐周期单位内算出的摩阻流速

4 结论

传统估算粗糙长度的方法是通过拟合单个流速剖面内不同层面上的数据来得到的,但得到的粗糙长度值波动较大,且相关系数的二次方较小。本文在不考虑海面波浪并假定海底粗糙度变化不大的情况下,利用 $u_i = k u_1$ 得到了多个潮汐周期内的 $k(z)$ 分布,通过对数分布 $k(z) = A \ln(z/z_0)$ 来估计粗糙长度。结果表明,与单个流速剖面拟合得到的粗糙长度相比,该方法得到的粗糙长度波动要小得多,并且随着流速剖面拟合的数据点越多,粗糙长度波动越小。此外,摩阻流速受粗糙长度的影响不大,虽然4个潮汐周期单位内的粗糙长度不同,但由4个粗糙长度计算出的摩阻流速却相差不多。

参考文献:

- [1] RALPH T Cheng, LING Chi-hai, JEFFREY W Gartner, et al. Estimates of bottom roughness length and bottom shear stress in South San Francisco Bay, California[J]. Journal of Geophysical Research, 1999, 104(C4): 7715—7728
- [2] LING Chi-hai, UNTERSTEINER Norbert. On the calculation of the roughness parameter of sea ice[J]. Journal of Geophysical Research, 1974, 79: 4112—4114
- [3] 郝嘉凌, 宋志尧, 严以新. 河口海岸近底层潮流速分布模式初步研究[J]. 泥沙研究, 2006, 1: 25—31.
- [4] YOU Za-jin. Estimation of bed roughness from mean velocities measured at two levels near the seabed[J]. Continental Shelf Research, 2005, 25: 1043—1051.
- [5] YOU Za-jin. Estimation of mean seabed roughness in a tidal channel with an extended log-fit method[J]. Continental Shelf Research, 2006, 26: 283—294

- [6] 李占海, 高抒, 陈沈良. 江苏大丰潮滩潮流边界层特征研究[J]. 海洋工程, 2007, 25(3): 53—60
- [7] SUKHODOLOV A, THIELE M, BUNGARTZ H. Turbulence structure in a river reach with sand bed[J]. *Water Resources Research*, 1998, 34(5): 1317—1334
- [8] 王伟伟, 范奉鑫, 李成刚, 等. 海南岛西南海底沙波活动及底床冲淤变化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2007, 27(4): 23—28

Estimating a seabed roughness length from current profiles

BAI Xi-fang^{1, 2}, GONG De-jun¹, LI Si-ren¹, XU Yong-ping¹

(1 *Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2 Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Key words: roughness length; shear velocity; logarithmic distribution; logarithmic fitting method