

东大港水道流速垂线分布探讨

吴德安¹, 崔效松², 童朝锋¹, 张忍顺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. 长江水利委员会长江下游水文水资源勘测局, 江苏 南京 210090; 3. 南京师范大学 海洋及滩涂研究所, 江苏 南京 210097)

摘要: 对辐射沙洲海域东大港水道 4 号站位连续 2 个潮次的流速测量资料进行了分析、研究, 拟合给出了流速垂线分布关系, 并根据实际测量资料率定了该站位各时刻 6 个水层的浑水水流的尾流函数项表达式, 这些表达式表明浑水水流的尾流函数项是相对深度和摩阻速度的函数。

关键词: 辐射沙洲; 潮流; 垂线分布; 拟合; 尾流函数

中图分类号: P731.23

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2008)03-0049-06

挟沙水流流速垂线分布规律一直是许多学者努力探讨的问题。Einstein 等^[1]的实验表明挟沙水流流速分布规律在主流区仍符合对数分布, 但卡门常数 k 随含沙浓度或垂线梯度的增加而减小。他们认为近底水层流速分布偏离对数分布规律, 且偏离范围因含沙量的增加而加大。Coleman^[2]在通过水槽试验和重新分析上述作者的资料后, 认为在近底水层 k 与含沙量无关, 即与清水水流 $k=0.4$ 的情况相等。并认为流速分布的对数律只适应于近底水层, 在主流区, 由于存在一个尾流区, 其分布规律偏离对数律。

对于上述含沙量对 k 的影响基本问题, 张红武等^[3]进行了研究, 并根据资料拟合得出 k 与体积含沙量 S_v 的点群关系式^[3,4]:

$$k = k_0 [1 - 4.2 \sqrt{S_v} (0.365 - S_v)]$$

经验证, 上式计算结果与黄河干支流实测资料较为吻合。在此基础上, 张红武引入“涡湍模式”, 得出张红武流速分布公式^[5]:

$$\frac{u_m - u}{u^*} = \frac{\pi}{2C_n} - \frac{1}{C_n} \left[\sqrt{1 - \frac{z}{h}} \frac{z}{h} + \arcsin \sqrt{\frac{z}{h}} \right]$$

该公式克服了对数公式在近底水层出现偏小甚至负值的缺陷。在水体近底层具有较好的适应性。

倪晋仁、惠遇甲^[6]对实测资料进行分析、研究后表明, 两相混合体的浑水流速分布大都较清水时流速分布更不均匀, 他们归纳出两种类型的流速分布, 即 I 型和 II 型。I 型分布指沿整个水深仍可用对数

公式表达但卡门常数 k 值变小的分布。II 型分布则是指主流区仍可用对数公式表达, 且卡门常数 k 值变小在近底水层亦近似符合对数律的分布。两区的卡门常数值有所不同, II 型分布在近底水区其斜率与清水时的大致一样或略小于后者。上述的两种流速分布类型可以用下述表达式来进行表达。

$$\begin{cases} \frac{u_m - u}{u^*} = \frac{1}{k} \ln \frac{h}{z} + f(x_1, x_2, \dots, x_i) \\ f(x_1, x_2, \dots, x_i) \geq 0, k = 0.4 \end{cases} \quad (I)$$

式中, u_m 为水面最大流速; u^* 为水体摩阻流速, x_i 表示影响两相流流速分布的各个变量, $f(x_1, x_2, \dots, x_i)$ 为两相流的尾流函数项。 $f(x_1, x_2, \dots, x_i)$ 的具体表达式主要根据实测资料进行分析、率定, 从理论上求解目前还存在实际的困难。

潮流, 特别是潮沟潮流, 具有很强的方向性, 这些特征与陆地河流较为相似, 因此, 有关河流流速的分布规律对水道潮流流速的垂线分布规律研究具有一定的借鉴意义。

南黄海海域为半日潮型, 涨潮时, 潮流自北、东北、东和东南方向涌向琼港海岸, 落潮时, 潮流以琼港为中心, 呈 150° 的扇面向外逸散, 形成以琼港为中

收稿日期: 2006 11-28; 修回日期: 2007 12-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50709007)

作者简介: 吴德安 (1968), 男, 江苏徐州人, 博士, 主要从事海岸动力和数值模拟方面的研究工作

幅起见,在此只列举部分时刻的流速分布及拟合曲线图。

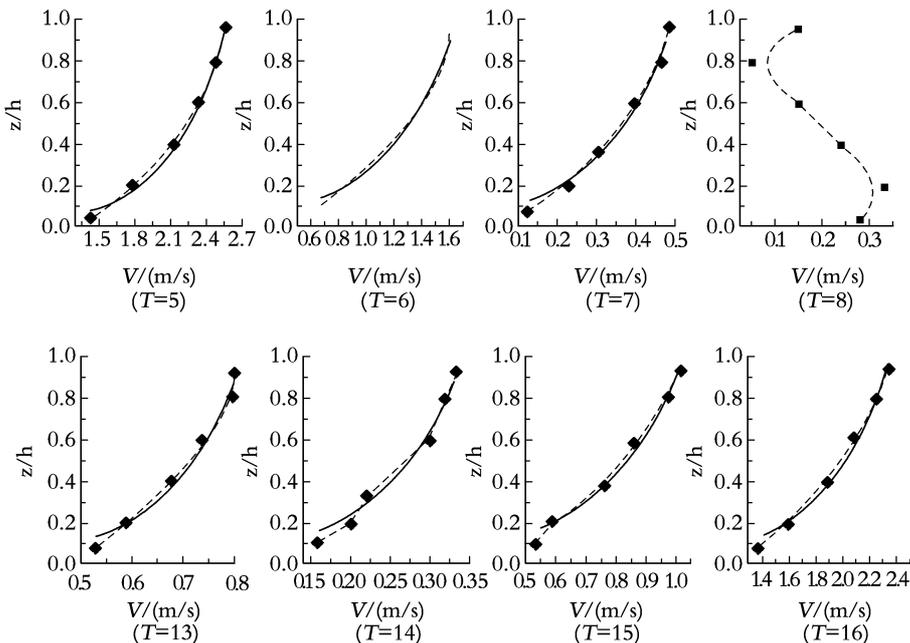


图3 测量流速的垂线分布及其拟合曲线

Fig. 3 The surveyed velocity distribution and its fitting curve of No. 4 station

拟合曲线表达形式为:
$$u = b \ln \left[\frac{z}{ah} \right] \quad (1)$$

其中, a, b 为拟合系数。由(1)式,得: $u = b \ln \left[\frac{z}{h} \right] - b \ln a$ 。设表层流速 u_s , 有 $u_s = -b \ln a$ 。水体次表层流速设为 $u_{0.2}$, 有 $u_{0.2} = b \ln 0.8 - b \ln a$, 得: $b = \frac{u_s - u_{0.2}}{-\ln 0.8}$

有 $u = \frac{u_s - u_{0.2}}{-\ln 0.8} \ln \left[\frac{z}{h} \right] + u_s$, 可转化为:

$$\frac{u_s - u}{u_s - u_{0.2}} = \frac{1}{\ln 1.25} \ln \left[\frac{h}{z} \right] \quad (2)$$

由于流速垂线分布具有规律性,因此表层和次表层的流速之间应该有很好的相关关系(图4),拟合得出 $u_{0.2} = 0.966u_s - 0.03$, 相关系数 $r = 0.998$ 。于是(2)式可化为:

$$\frac{u_s - u}{0.034u_s + 0.03} = \frac{1}{\ln 1.25} \ln \left[\frac{h}{z} \right] \quad (3)$$

根据 Prandtl 混合长度理论, 摩阻速度可以写为^[8]:

$$u^* = \frac{k u_z}{\ln \frac{4h}{z_0} - \frac{8}{3}}$$

其中, h 为水深, k 为卡曼常数, $k \approx 0.4$, z_0 是海底粗糙长度, 由实际测量资料率定而得, u_z 为垂线平均流速。于是, 摩阻流速与表层速度之间可建立图5所示的对应关系, 拟合关系为:

$$u_s = 41.53u^* - 0.0703,$$

相关系数 $r = 0.994$, 代入(3)式得:

$$\frac{u_s - u}{1.411u^* + 0.028} = \frac{1}{\ln 1.25} \ln \left[\frac{h}{z} \right] \quad (4)$$

对(4)进行整理得:

$$u = u_s - \frac{1.411u^* + 0.028}{\ln 1.25} \ln \left[\frac{h}{z} \right] \quad (5)$$

根据(5)式, 可以进行流速分布的实际计算。

对(5)式进行如下处理:

$$\frac{u_s - u}{u^*} = 6.323 \ln \left[\frac{h}{z} \right] + \frac{0.125}{u^*} \ln \left[\frac{h}{z} \right] \quad (6)$$

根据测量资料分析, 水体含沙量较小, 由张红武等的关系式^[3]: $k = k_0 [1 - 4.2 \sqrt{S_v} (0.365 - \sqrt{S_v})]$, 求得 k 取 0.392~0.4 之间, 取 $k = 0.4$ 得:

$$\frac{u_s - u}{u^*} = \frac{1}{k} \ln \left[\frac{h}{z} \right] + \left[3.823 + \frac{0.125}{u^*} \right] \ln \left[\frac{h}{z} \right] \quad (7)$$

(7)式与(1)式的形式相同, 其中,

$$f = \left[3.823 + \frac{0.125}{u^*} \right] \ln \left[\frac{h}{z} \right] \quad (8)$$

(8)式可见, f 值是随相对水深而变化的量, 系数项 3.823 是在 $k = 0.4$ 的情况下取得的, 此式依赖于 k 的取值, 如果以张红武率定关系计算 k 值, 那么上述的 f 也应是悬沙含量及其垂直梯度的函数。计算表明, 由于悬沙含量较小, 其对 k 值的影响可忽略。图3各时刻拟合曲线可以看出, 拟合曲线对于临底层偏离稍大。运用(7)式对该站位进行计算验证表明, 在临底层以上, 计算值和实测值符合得很好。在临底

层处, (7) 式计算值与实测值相比偏小。调整 f 中的系数, 在临底层及其以下, 取 $f = 7.17 \ln \left(\frac{h}{z} \right)$, 各时刻临底层计算结果和实测值符合较好。这说明, 在临底层及其以下也应满足 $\frac{u_s - u}{u^*} = \frac{1}{k} \ln \left(\frac{h}{z} \right) + f$ 分布, 但是 f 表达式中的系数要作相应的调整。流速率定关系式合写如下:

$$\frac{u_s - u}{u^*} = \frac{1}{k} \ln \left(\frac{h}{z} \right) + f \quad (9)$$

其中, $f = \left[3.823 + \frac{0.125}{u^*} \right] \ln \left(\frac{h}{z} \right)$, 在临底层及其以下则取 $f = 7.17 \ln \left(\frac{h}{z} \right)$ 。

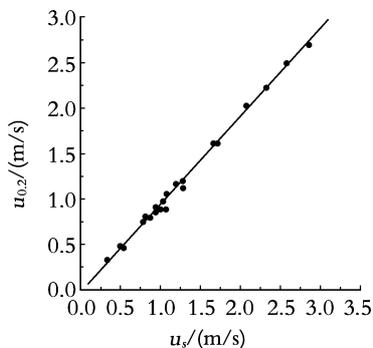


图 4 次表层流速和表层流速之间的关系

Fig. 4 The fitting relationship between $u_{0.2}$ and u_s

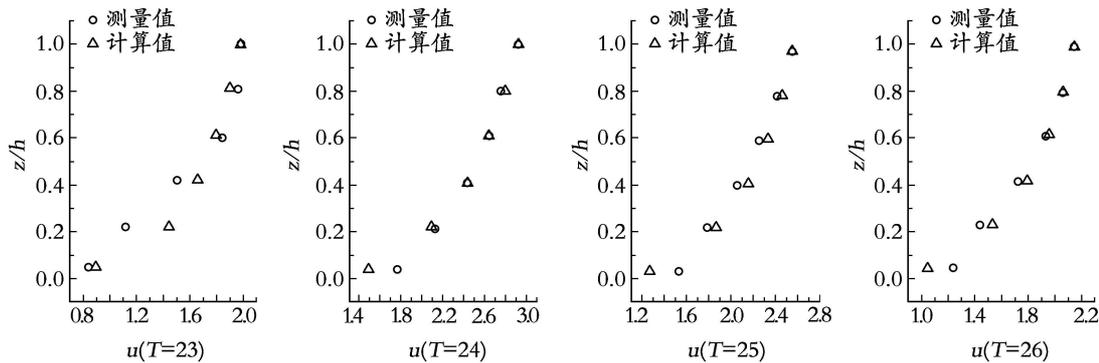


图 6 (9) 式在 7 号站位部分验证

Fig. 6 The validation to formula (9) with the surveyed current velocity data of No. 7 station

表达式(9)是一个平均的、概化的结果, 它可以从总体上反映流速的垂线分布规律。适当率定临底层的 f , 可较为精确地求得速度的垂线分布。

计算和验证表明, 在各潮流时刻, 水体各层的 f 是随相对水深而变化的, 如果能确定水体各层 f 的变化规律, 显然可以进一步准确确定流体流速的垂线分布规律。参照(9)的流速分布形式, 不妨设流速

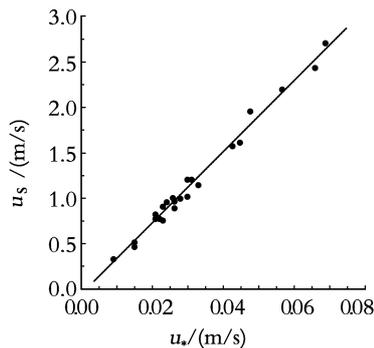


图 5 表层流速与摩擦流速之间的关系

Fig. 5 The fitting relationship between u_s and u^*

图 6 是根据上述拟合、率定的关系式(9)在西洋水道 7 号站位的部分验证情况, 速度单位: m/s 。验证表明计算值和对应实测值吻合较好, 说明拟合关系式(9)可以反映该水道的流速垂线分布。笔者分别用对数流速分布公式和张红武流速分布公式与拟合关系式(9)式在上述 4# 站位进行了计算对比, 结果发现, 在表层、次表层, 各式计算值和实际测量值基本一致, 而在以下各层, 流速对数分布公式和张红武流速分布公式计算值与实际值相比偏大, 但(9)式计算结果与实际值基本一致。

分布形式为:

$$\frac{u_s - u}{u^*} = \frac{1}{k} \ln \left(\frac{h}{z} \right) + \left[A + \frac{B}{u^*} \right] \ln \left(\frac{h}{z} \right) \quad (10)$$

其中, A, B 为待定系数, 可根据实际测量资料率定。把(10)式化为:

$$u = u_s - \frac{u^*}{k} \ln \left(\frac{h}{z} \right) - u^* A \ln \left(\frac{h}{z} \right) - B \ln \left(\frac{h}{z} \right)$$

即得:

$$u = u_s - B \ln\left(\frac{h}{z}\right) - \left[\frac{1}{k} \ln\left(\frac{h}{z}\right) + A \ln\left(\frac{h}{z}\right) \right] u^* \quad (11)$$

或表达为:

$$u = u_s + B \ln\left(\frac{z}{h}\right) + \left[\frac{1}{k} \ln\left(\frac{z}{h}\right) + A \ln\left(\frac{z}{h}\right) \right] u^* \quad (12)$$

建立各层流速和摩阻流速 u^* 的相关关系, 拟合结果如图 7 所示。

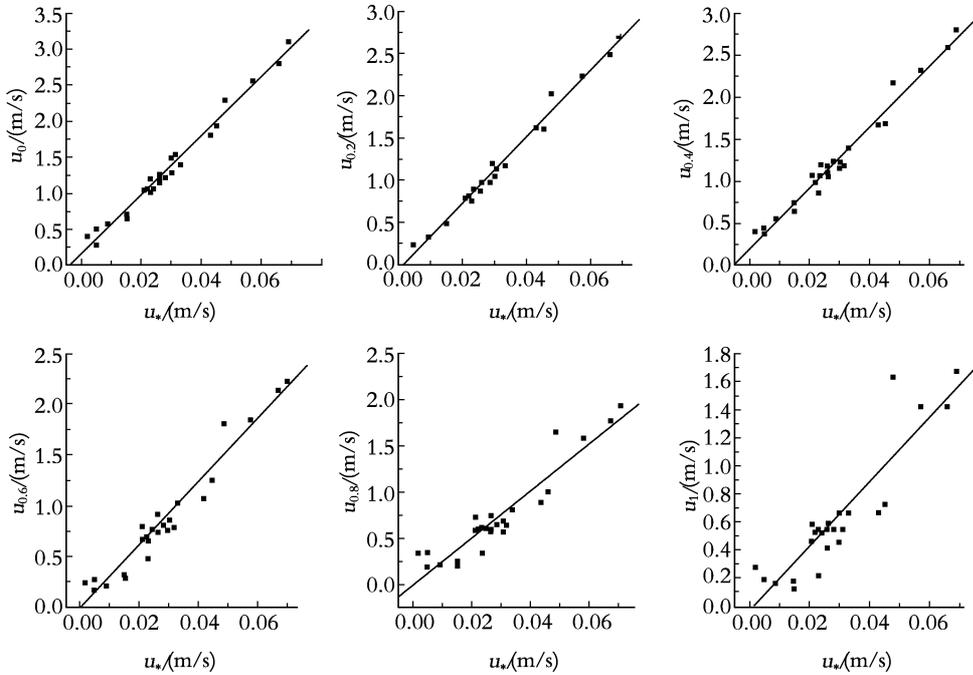


图 7 各层流速与摩阻速度之间的拟合关系

Fig. 7 The fitting relationship between velocity of each water layer and friction velocity

其中, $u_0, u_{0.2}, u_{0.4}, u_{0.6}, u_{0.8}, u_1$ 分别为距表层 0.5 m, 0.2h, 0.4h, 0.6h, 0.8h, ($h-0.5$) 所对应的流速, h 是水深, 单位为 m。 u_s 是指表层流速, 当然, 在实际测量中, 一般用 u_0 来表示表层流速, 实际上它们是有-定差别的。各层流速与摩阻流速 u^* 的拟合关系式及相关系数如下:

$$u_0 = -0.09623 + 41.174u^*, r = 0.991;$$

$$u_{0.2} = -0.0676 + 39.361u^*, r = 0.993;$$

$$u_{0.4} = -0.0501 + 36.328u^*, r = 0.988;$$

$$u_{0.6} = -0.0458 + 31.89u^*, r = 0.970;$$

$$u_{0.8} = -0.0270 + 26.411u^*, r = 0.940;$$

$$u_1 = -0.044 + 23.040u^*, r = 0.910.$$

虽然, 相关系数有向下减小的趋势, 在临底层附近, 相关系数 $r = 0.910$ 足以保证临底层线性关系式的基本成立。与 (11) 或 (12) 式对比, 可求得:

$$f_0 = 0.356 + \frac{1}{k} \ln\left(1 - \frac{1}{2h}\right) - \frac{25.93}{1000u^*};$$

$$f_{0.2} = \left[7.220 - \frac{0.0121}{u^*} \right] \ln\left(\frac{5}{4}\right) = 1.611 - \frac{2.7}{1000u^*};$$

$$f_{0.4} = \left[7.684 - \frac{0.0395}{u^*} \right] \ln\left(\frac{5}{3}\right) = 3.925 - \frac{20.02}{1000u^*};$$

$$f_{0.6} = \left[8.021 - \frac{0.0267}{u^*} \right] \ln\left(\frac{5}{2}\right) = 7.349 - \frac{24.5}{1000u^*};$$

$$f_{0.8} = \left[6.894 - \frac{0.0269}{u^*} \right] \ln\left(\frac{5}{1}\right) = 11.095 - \frac{43.3}{1000u^*};$$

$$f_1 = 18.49 - \frac{1}{k} \ln(2h) - \frac{26.3}{1000u^*};$$

其中, $f_0, f_{0.2}, f_{0.4}, f_{0.6}, f_{0.8}, f_1$ 分别为距表层 0.5 m, 0.2h, 0.4h, 0.6h, 0.8h, ($h-0.5$) 的浑水水流的尾流函数项, 显然 $f_s = 0$ 。

运用上述浑水水流尾流函数项拟合表达式 $f_0, f_{0.2}, f_{0.4}, f_{0.6}, f_{0.8}, f_1$ 在 4 号站位、7 号站位进行速度分布的验证计算, 表明各层速度计算值和实际测量值基本相当, 吻合程度要优于 (9) 式的计算结果。

上述结果表明, 水深 h 是 f_0, f_1 的一个参量, 但二者随水深的变化又有所不同, 在其他条件不变的情况下, f_0 随水深增大而增大, f_1 随水深增大而减小, 如果转换成相对深度来讨论, 水深增大, f_0 对应的相对深度增大, f_1 对应相对深度减小, 即这两层尾流函数对应的相对深度在潮过程中是变化的, 它们随相对深度的增大而增大。其余各层由于相对深度是常数, 尾流函数项的变化只与摩阻速度有关。

各层尾流函数项都是随摩阻速度增大而增大的。实际测量和计算结果表明,在同一时刻, f 在水体中的变化,一般情况下是向下增大的,但这一变化趋势对于非恒定流并不总是成立,在流速较小的憩流附近时刻,水体中 f 向下的变化,有时会出现先增后减等变化情况。

3 总结

作者对辐射沙洲东大港 4# 站位连续 2 个潮次流速测量资料进行了分析、研究,拟合给出了该站位的流速垂线分布关系。对浑水水流的尾流函数项进行了系统的分析与研究,根据实际测量资料拟合给出了该站位的 6 个水层的 $f_0, f_{0.2}, f_{0.4}, f_{0.6}, f_{0.8}, f_1$ 表达关系式,表明它们是相对深度和摩阻流速的函数。

各层流体尾流函数项与 $1/u^*$ 的一次关系是在各层流速与摩阻速度的线性拟合关系基础上推导的。因此,尾流函数项与摩阻速度的一次反比关系对实际的反映准确程度与线性拟合的相关性有关。在相对深度 0.8 以上,线性拟合关系相关性很好,在相对深度 0.8 以下,虽然线性拟合的相关系数在 0.9 以上,速度的计算值与实际测量值也相当吻合,但从图 7 中可以看到,数据点偏离线性分布相对要大些,说明流体水体的尾流函数项有更复杂的表达形式,

$1/u^*$ 的一次关系只不过是此表达形式的近似表达,这一近似表达在流体中上层近似程度较好,在近底层水体,近似程度相对差些。尾流函数项 f 更准确的表达以及尾流函数 f 与悬沙含量、悬沙含量梯度之间的关系需要作进一步的研究。

参考文献:

- [1] 钱宁. 高含沙水流运动[M]. 北京: 清华大学出版社, 1989. 35-40.
- [2] Coleman N L. Velocity profiles with suspended sediment[J]. *J of Hydraulic Research*, 1981, 19(3): 234-243.
- [3] 张红武, 张清. 黄河水流挟沙力计算公式[J]. 人民黄河, 1992, 11: 1-10.
- [4] 张红武. 黄河泥沙基本理论研究进展述评[J]. 人民黄河, 1996, 12: 22-28.
- [5] 张红武. 挟沙水流流速的垂线分布公式[J]. 泥沙研究, 1995, 2: 1-10.
- [6] 倪晋仁, 王光谦, 张红武. 固液两相流理论及最新应用[M]. 北京: 科学出版社, 1991. 36-47.
- [7] 张忍顺, 陈才俊. 江苏岸外沙洲演变与条子泥并陆前景研究[M]. 北京: 海洋出版社, 1992. 54-75.
- [8] Fang G, Ichiye T. On the vertical structure of tidal currents in a homogeneous sea[J]. *Geophys J Roy Astr Soc*, 1983, 73: 65-78.

Vertical distribution character of current velocity in Dongdagang channel

WU De an^{1,2}, CUI Xiao song², TONG Chao-feng¹, ZHANG Ren shun³

(1. The State Key Laboratory of Hydrology and Hydraulic Engineering, Nanjing 210098, China; 2. Lower Yangtze River Hydrology and Water Resources Survey Bureau, Nanjing 332000, China; 3. The Ocean and Mudflat Institute of Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China)

Received: Nov., 28, 2006

Key words: radial sand ridges; tidal current; vertical distributing; fitting; remainder current function term

Abstract: On the basis of analyzing the two tidal periods' successive survey results on the tidal current at No. 4 station in the tidal channel called Dongdagang, the characters of tidal current and space distribution of current vector are further studied. The vertical distribution of current velocity is studied and the surveyed current velocity data are fitted to the relative depth. The vertical distribution relationship between velocity and relative depth is discovered. Based on the surveyed current velocity data, the remainder current functions of six water layers are calibrated by the fitting method. The remainder current function term is the function of friction velocity and relative depth.

(本文编辑: 刘珊珊)