

海洋底边界层中实测海流的垂直分布 I. 余流边界层*

乐肯堂 庄国文

(中国科学院海洋研究所 青岛 266071)

提要 海底以上 1—2m 水层的海流垂直分布和变化, 对于海底泥沙运动和海洋工程设计具有十分重要的意义。迄今为止, 研究者分别从实测资料、实验室实验和理论等方面对底边界层中稳定流动的垂直分布进行了研究, 其结果均难以直接满足工程需要。本文基于现有的理论和实验结果, 发展了现有海底边界层理论, 运用把稳定流的底 Ekman 层与对数层相匹配的方法确定了实测余流的垂直分布, 并给出了在渤海石油平台区的应用实例。结果表明, 本文给出的原理和方法在应用中与实测结果符合良好, 可以直接满足工程需要。

关键词 余流, 海底边界层, 垂直分布

中图分类号 P731

为了满足海底管线的敷设和维护工程的要求, 在近海石油工程中, 需要了解工程区中底层流的垂向分布与变化。因为底层流场结构对于研究海底泥沙运动进而对于海洋工程设施的安全设计具有十分重要的意义。为了获得工程设计所需的工程海区海流的分布和变化, 首先要获得在底边界层内的多层测流资料。但对于工程海区而言, 这一底边界层指的是海底以上 1—2m 的水层。因此要获得厚度仅为 2 m 的底边界层内的流速分布, 在这一底边界层内至少要有 4—5 个层次的测流资料。从目前市场上已有的各种海流计的性能看, 最有可能满足这一要求的海流计只有多普勒声学海流计, 但即使使用船用多普勒剖面海流计(ADCP), 由于盲区的存在, 要获得离底 2 m 层内 4—5 个层次的流速资料也有困难。1998 年, 利用 2 台新型的 Aanderraa 多普勒海流计(RCM9 型)[内含 Doppler 流速传感器(DCS3620)] 测量了 AA 站离底 0.5m 和 2m 流速。在目前的条件下仅利用这两个层次的流速资料, 要给出离底 0—2 m 层内的实测流速的剖面, 若用经验曲线进行线性拟合, 显然不妥, 但如用非线性曲线进行拟合, 则难以确定拟合曲线的线型。因为以往的理论研究表明, 在近岸浅海区的海底附近, 存在着多种边界层。这些边界层的交叉存在不仅给理论研究带来了困难, 而且也给利用实测资料进行经验分析带来了困难。

鉴于近底层流场结构对于海洋工程设计的重要性, 迄今为止已有许多作者从不同角度对它进行了研究。这些研究大致有三种方法, 即现场实验(Weatherly, 1972); 理论研究, 如各种底边界层理论的提出(Soulsby, 1983) 和模拟实验室实验(Jonsson *et al.*, 1976)。显而

* “九五”中国科学院资源与环境研究重大资助项目, KZ95F-A1-405 号。乐肯堂, 男, 出生于 1939 年 9 月, 研究员,

E-mail: le-kentang@sina.com

收稿日期: 2000-09-14, 收修改稿日期: 2001-06-26

易见,在上述条件下,只有把现场观测资料与已有的理论研究和实验研究的结果结合起来进行分析研究,才能获得对于特定海区底边界层流速结构的了解。本研究目的就是基于前人的理论和实验结果,结合海洋中的实测海流资料,对此问题作进一步探讨。

1 原理

我国浅海陆架中的海流包括潮流和余流。由于潮流是周期性运动的海流,而余流在一定时期内则视为稳定的流动,亦即可以把它作为一定时间内的平均流动。关于海洋中稳定流的边界层结构的框架,现有的理论结果已较为一致。在稳定理论中,可以把深海的海底边界层分为两个区,上区为较厚的湍流 Ekman 层,下区为对数层。此外,如果海底是流体动力学光滑面,那么在对数层与海底之间还存在一个片流子层(Weatherly, 1972)。深海的这种边界层结构,主要基于如下假定:(1) 边界层之上的海流是地转的和稳定的;(2) 海底是水平的;(3) 边界层中密度的变化是由水温变化产生的;(4) 在对数层中层化可以忽略。

在近岸浅海中,海底边界层的结构要比深海的复杂得多。这是因为从理论上讲,上述4个假定都难以得到满足。因此上述的经典理论结果既不能应用于浅海,更不能满足工程设计的需要。为了满足海洋管线工程设计的要求,必须对上述理论加以发展。这里必须要解决两个问题:(1) 底 Ekman 层与对数边界层的衔接和匹配问题;(2) 模式在工程海区的应用问题。因此本文首先导出能用于浅海的余流底边界层模式,然后把它与渤海的实测资料相结合,给出工程区的余流底边界层结构的示例。根据渤海中实测流场的基本特征,把海流分解成潮流和余流两部分,用矢量形式表示:

$$v(t, z) = \hat{v}(t, z) + v(z) \quad (1)$$

其中, $v = (u, v)$, $\hat{v} = (\hat{u}, \hat{v})$, $v = (u, v)$ 分别为合成海流的流速、潮流流速和余流(平均流)流速,而 (u, v) , (\hat{u}, \hat{v}) 和 (u, v) 则分别对应于笛卡尔坐标系 (x, y, z) 中的 (x, y) 分量,这里 z 轴垂直向上为正。因此在底边界层之外,它满足方程:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + 2 \Omega \times v + \frac{1}{\rho} \Delta_2(p, \hat{p}) = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} K_v \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} K_v \frac{\partial \hat{v}}{\partial z} \quad (2)$$

其中, p 和 \hat{p} 分别表示对应于平均流和潮流的压力; K_v 为涡动粘性系数; Δ_2 为矢量算子 $(= E_1 \partial / \partial x + E_2 \partial / \partial y)$, t 为时间。严格说来,由于潮流是非非常的运动,涡度粘性系数 K_v 亦应是 t 的函数,但本文将假定为常量。

2 理论和方法

2.1 余流 Ekman 边界层

为讨论方便仅考虑 M_2 分潮。对方程(2)在一个分潮周期内取平均值,便可得合成流动中平均流动的方程:

$$2 \Omega \times v + \frac{1}{\rho} \Delta p = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} (K_v \frac{\partial v}{\partial z}) \quad (3)$$

假定在底 Ekman 层之上,流动是地转的, U 为内区平均流的流速,将方程(3)改写成 Ekman 层中的坐标变量 (ξ_1, η_1, ζ_1) , 其中 ξ_1 的方向与 U 一致,那么在 Boussinesq 近似下, Ekman 层中的运动方程和连续方程可写为:

$$-f v_1 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p_1}{\partial \xi_1} + \frac{K_v}{\rho} \frac{d^2 u_1}{d \xi_1^2} \quad (4)$$

$$-fu_1 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p_1}{\partial \eta_1} + \frac{K_v d^2 v_1}{\rho d \xi_1^2} \quad (5)$$

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p_1}{\partial \xi_1} - g = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial u_1}{\partial \xi_1} + \frac{\partial v_1}{\partial \eta_1} = 0 \quad (7)$$

其中, $f = 2\omega \sin \varphi$, $\omega = 7.292 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 为地球自转角速度; φ 为地理纬度。对于满足式(7)

的均匀不可压缩流体, $\rho =$ 常数, 故由(6)得: $\frac{\partial}{\partial \xi_1}(\cdot \cdot \cdot 2p_1) = 0$ (8)

边界条件为: 当 $\xi_1 \rightarrow \infty$ 时, $u_1 \rightarrow U \cos \vartheta$, $v_1 = U \sin \vartheta$, (9)

当 $\xi_1 = 0$ 时, $u_1 = u_0$, $v_1 = v_0$ (10)

考虑到边界条件(9)和(10), 可得: $\frac{\partial p_1}{\partial \xi_1} = fU \sin \vartheta$ (11)

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p_1}{\partial \eta_1} = -fU \cos \vartheta \quad (12)$$

这里假定底 Ekman 层之上的内区流速与 ξ_1 轴的夹角为 ϑ 。将(11)、(12)分别代入(4)、(5)得:

$$-fv_1 = \frac{K_v d^2 u_1}{\rho d \xi_1^2} \quad (13)$$

$$fu_1 = \frac{K_v d^2 v_1}{\rho d \xi_1^2} \quad (14)$$

其中, $u_1 = u_1 - U \cos \vartheta$, $v_1 = v_1 - U \sin \vartheta$ 。方程(13)和(14)与边界条件(9)和(10)构成了典型的 Ekman 问题, 其解是熟知的。在本文的条件下, 其解可写为:

$$u_1 = U \cos \vartheta + \exp\left(-\frac{\xi_1}{\delta_E}\right) \left[(u_0 - U \cos \vartheta) \cos \frac{\xi_1}{\delta_E} + (v_0 - U \sin \vartheta) \sin \frac{\xi_1}{\delta_E} \right] \quad (15)$$

$$v_1 = U \sin \vartheta + \exp\left(-\frac{\xi_1}{\delta_E}\right) \left[(v_0 - U \sin \vartheta) \cos \frac{\xi_1}{\delta_E} + (u_0 - U \cos \vartheta) \sin \frac{\xi_1}{\delta_E} \right] \quad (16)$$

其中, $\delta_E = \sqrt{\frac{2K_v}{\rho g}}$, 为 Ekman 层的厚度。如设 $\vartheta = 0$, 即 u_1 的方向与 U 一致, 那么(15)和(16)可简化为:

$$u_1 = U + (u_0 - U) \exp\left(-\frac{\xi_1}{\delta_E}\right) \cos \frac{\xi_1}{\delta_E}, \quad (17)$$

$$v_1 = (U - u_0) \exp\left(-\frac{\xi_1}{\delta_E}\right) \sin \frac{\xi_1}{\delta_E}, \quad (18)$$

对于(17)和(18), 在 $\xi_1 = \delta_E$ 处, 有: $u_1 \approx 0.8U$, $v_1 \approx 0.31U$ (19)

2.2 余流对数边界层

在一平底非层化海洋中, 在底 Ekman 层之下的稳态的单向流具有如下形式的分布:

$$u_2 = \frac{u^*}{K} \ln \frac{z}{z_0} \quad (20)$$

$$v_2 = 0$$

其中, u^* 为平均流的摩擦速度, 定义为:

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \quad (21)$$

式中, τ_0 为平均流的海底剪切应力, 而 z_0 定义为海底粗糙长度; κ 为 Von-Karman 常数 ($= 0.4$)。由于对数层的上界即为 Ekman 层的下界, 且设对数层的厚度为 $\delta_L = O(\delta_E/\pi)$, 那么:

$$u_1 \Big|_{z_1 = \delta_E/\pi} = u_2 \Big|_{z = \delta_L} = u_0 \quad (22)$$

由此可得:

$$u^* = \frac{0.272 \kappa U}{\ln \delta_L - \ln z_0} \quad (23)$$

3 结果应用和讨论

3.1 现场观测资料简析

为了了解石油平台作业区海底附近的流速分布, 1998 年 8—9 月用两台 RCM9 型安德拉海流计在渤海 AA 站(观测期间的平均水深为 12.01m)进行了为期 1 个月的观测。图 1 给出了该站离底 0.5m 和离底 2m 处实测海流资料的示例。

从图 1 和表 1 可以看出, 在离底 0.5m 处, 该站的实测流场具有下述特征。

表 1 AA 站流速计算值和实测值 (cm/s)

Tab. 1 Calculated and observed velocities at station AA (in cm/s)

离海底距离 (m)	东分量 (u)			北分量 (v)		
	计算	实测	误差	计算	实测	误差
2	-5.88	-5.72	-0.16	5.77	5.57	0.20
0.5	-1.24	-1.02	-0.22	0.80	-0.55	1.35

(1) 调和分析表明, 最大可能流速为 11.2cm/s。它与其上层的 39.8cm/s 相比, 看来比较符合对数递减规律。

(2) 把图 1a 与图 1b 相比较, 可以看出, 在离底 0.5m 处, 尽管从量值上看图 1a 所显示的实测流速已显著减小, 但整个观测时段的流速过程曲线却显示出显著的脉动性质。尤其是在若干时段上这种湍流脉动已表现出 bursting(湍流猝发)现象。例如在 9 月 7—8 日中出现湍流猝发, 其最大脉冲速度已大于 30cm/s。这种现象的出现, 已与对数递减律相悖, 但由于资料的限制, 尚难解释其成因。不过, 这一现象在工程设计中是不能忽视的, 特别是对于工程海区的海滩冲刷过程应值得重视。

(3) 调和分析结果表明, 在离底 0.5m 的层次上, 尽管潮流的性质仍为正规半日潮流 [$(W_{O_1} + W_{K_1})/W_{M_2} = 0.4$], 其主流向仍呈东北—西南向, 但因 M_2 分潮的最大涨潮流速仅为 5.7cm/s, 同时 S_2 分潮、 O_1 分潮和 K_1 分潮的最大涨潮流速仅为 1 cm/s 的量级, 而浅水分潮(M_4 和 MS_4) 的最大涨潮流速仅为 0.2—0.3 cm/s, 因此可以认为, 在这一层次上, 潮流对于海上工程建筑物的作用已退居次要地位。

3.2 模式的应用和讨论

利用 AA 站的余流资料来讨论底边界层中海流的性质。

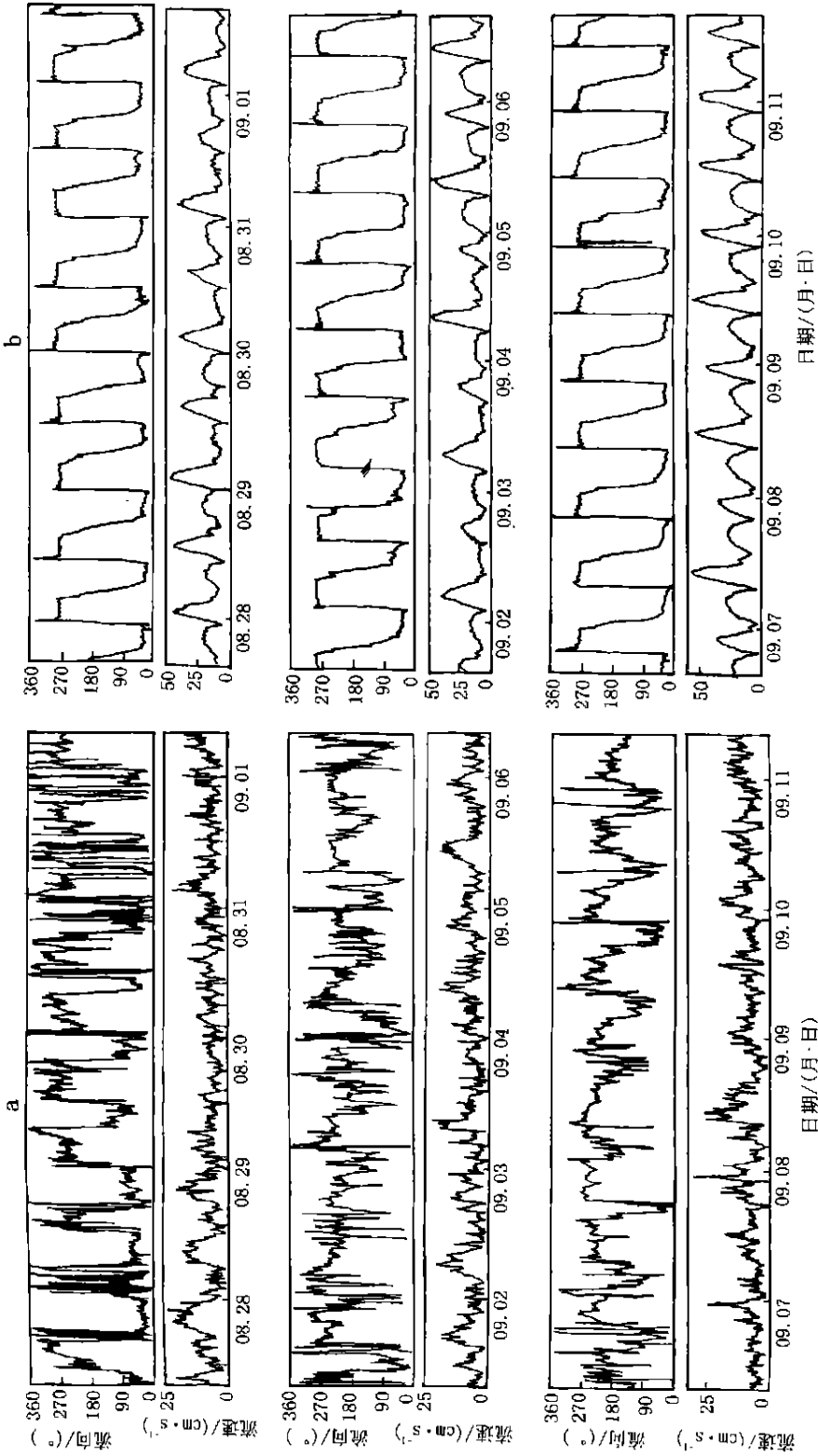


图 1 渤海海底 0.5m(a) 和 2m(b) 实测流速
 Fig. 1. Observed current velocities at Station AA, at: (a) 0.5m above the bed; and (b) 2m above the bed

由于底 Ekman 层的高度是涡动粘滞系数 K_V 的函数, 故 K_V 的取值之合理与否便直接关系到整个边界层的垂向尺度的量级。在渤海已有的三维数值模式中, K_V 的取值也不一致(江文胜等, 2000)。考虑到: (1) 在海洋中 K_V 可有三个数量级的变化, 且 K_V 量级的变化取决于海洋的状态和水深; (2) 一般说来, K_V 随着深度的增加而迅速减少; (3) 渤海为几乎全封闭的内海; 因此在不考虑大浪且对于底边界层的情况下, 可以认为 POM 模式中使用的 $K_V = 2\text{gcm}^{-1}\text{s}^{-1}$ 适用于本论题。取用这一数值, 有 $\delta_E \approx 2.06\text{m}$ 。

由于 $\xi_L = 0$, $(\xi_E/\pi) \approx 0.66\text{m}$, 这就是说, 该测站离底 0.5m 的海流计位于该站对数边界层的上界附近。故该层次的实测余流资料是位于该站对数边界层中的资料。因此, 根据 AA 站上述层次的实测余流资料, 作为该测区底 Ekman 层之上界处的流速资料。可以获得其底边界层中余流垂直分布, 即:

$$\begin{cases} \bar{u} = -5.72 + e^{-z/\delta_E}(5.16\cos\frac{z}{\delta_E} - 4.05\sin\frac{z}{\delta_E}) \\ \bar{v} = 5.57 - e^{-z/\delta_E}(4.05\cos\frac{z}{\delta_E} + 5.16\sin\frac{z}{\delta_E}) - 0.95 \end{cases} \quad (0.66 \leq z \leq 2\text{m}) \quad (24)$$

$$\begin{cases} \bar{u} = (\bar{u}^*/K)\ln\frac{z}{z_0} + 1.7 \\ \bar{v} = (\bar{v}^*/K)\ln\frac{z}{z_0} - 2.3 \end{cases} \quad (0.033\text{cm} < z \leq 0.66\text{m}), \quad (25)$$

其中, $K = 0.4$; $\bar{u}^* = -0.056\text{cm/s}$; $\bar{v}^* = 0.030\text{cm/s}$; $z_0 = 0.33\text{cm}$ (26)

表 1 为计算值与实测值的比较。从表 1 可见, 按本文方法给出的计算值与实测值之间的误差很小。图 2 给出了由式 (24) 和 (25) 表示的 AA 站流速垂向分布。从图 2 可以看出, u 的分布与实测资料的符合程度极佳, v 的计算值与实测值也相当符合。但 v 的分布则在 0.66m 附近出现严重的转折。这种情况的可能原因是, 在 0.5m 处的实测余流之北分量为 -0.55cm/s , 其流向恰好与 2m 处的实测北分量余流相反, 故使在 0.66m 处该分量的流速出现拐点。但由于该点绝对流速很小, 所以这种情况很可能是仪器误差所致。

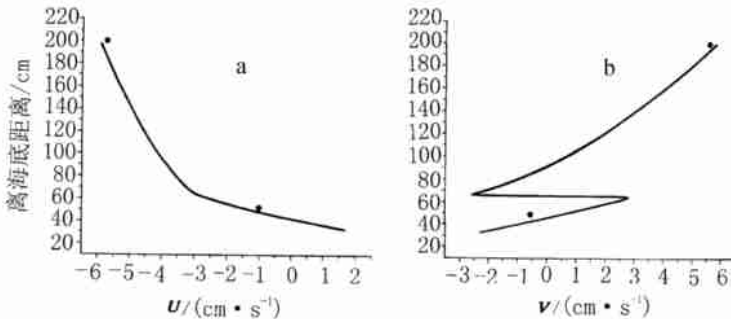


图 2 东分量 (a) 和北分量 (b) 流速分布 (cm/s)

Fig. 2 Current velocity profile at Station AA, showing:
 a. the east-west component; b. the north-south component
 ⋅ 实测值 (observed); — 计算值 (calculated)

应当指出,在 AA 站的计算例子中,本研究并未使用最小二乘法来调整参数,以使理论计算值与实测值之间的符合程度达到最佳值。实际上仅根据两点资料给出的分布曲线,除了直线外,并无更佳的拟合方案。但直线方法显然不符合边界层中的流速分布规律,也不能满足工程设计的要求。本文提出了以现有的边界层理论为基础并根据有限的实测资料来构造满足海底管线工程需要的底层海流垂直分布的尝试。但由于在管线工程要求的范围内,现有的理论基础和实测资料均十分匮乏,尤其是计算结果的验证十分困难,使本文提出的方法不能用更多的资料进行验证。值得注意的是,在近底边界层中的 bursting 现象给理论研究和资料处理均带来了巨大困难。同时由于理论上对于湍流研究的不足,湍流粘性系数的取值没有相应的理论基础,因而造成了 Ekman 层与对数层之间在匹配和衔接处理上有一定困难。因此本文提出的方法在参数化和边界层匹配技术上尚需进一步改进。

致谢 沈宁同志进行现场观测,丁文兰、魏泽勋、于康玲、杜湄山、王新怡、朱兰部等同志参与资料分析等工作,谨致谢忱。

参 考 文 献

- 江文胜,孙文心,2000. 渤海悬浮颗粒的三维输运模式 I. 模式. 海洋与湖沼, 31(6): 682—688
- Jonsson I G, Carlsen N A, 1976. Experimental and theoretical investigations in an oscillatory turbulent boundary layer. J Hydr Res, 14:45—60
- Soulsby R L, 1983. The bottom boundary layer of shelf seas. In: B Johns ed. Physical Oceanography of Coastal and Shelf Seas. Elsevier, 1—470
- Weatherly G L, 1972. A study of the bottom boundary layer of the Florida Current. J Phy Ocean, 2(1): 54—72

VERTICAL DISTRIBUTION OF OCEAN CURRENTS IN THE BOTTOM BOUNDARY LAYER OF SHELF SEAS PART I. BOTTOM BOUNDARY LAYER OF RESIDUAL CURRENTS

LE Ken-Tang, ZHUANG Guo-Wen

(Institute of Oceanology, The Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071)

Abstract In the maritime civil engineering and in particular the placement of such engineering structures on bed as cables and pipelines, oil and gas platforms, jetties and breakwaters, it is essential to understand the vertical distribution of bottom currents and their variations at the engineering site. In the stationary theory, the boundary layer is divided into two regions, a logarithmic layer overlain by a thicker, turbulent Ekman layer. A third region, the laminar sublayer, may exist immediately above the bottom, provided that the bottom is hydrodynamically smooth. Practically, it is difficult to meet the needs of the placement of engineering structure on the bed if the vertical distribution of the bottom current within the 1—2m layer above bed was obtained from the current meter records at a few levels. This paper studies how the Ekman layer links the logarithmic layer using the residual current data obtained from Station AA of the Bohai Sea. Some typical values at this station were found as follows:

$$\delta_E = 2.06\text{m}, \quad \delta_L = 0.66\text{m}, \quad u_* = -0.056\text{m/s}$$

$$v_* = 0.030\text{cm/s}, \quad z_0 = 0.33\text{cm}$$

where δ_E is the thickness of the bottom Ekman layer for the residual current; δ_L , the thickness of the logarithmic layer, (u_*, v_*), the east and north components of friction velocity and z_0 , roughness length.

Key words Residual currents, Bottom boundary layer, Vertical distribution, Bohai Sea

欢迎订阅《中国水产科学》

《中国水产科学》是中国水产科学研究院主办的国家级学术期刊, 主要报道水产生物学基础研究、水产生物病害及其防治、水产生物营养及饲料、渔业生态保护及渔业水域环境保护、水产品保鲜与加工综合利用、水产资源、海淡水捕捞、水产养殖与增殖以及渔船、渔业机械与仪器等方面的最新进展、最新成果、最新技术和方法; 主要服务对象是科研、教学、科技管理人员以及大专院校师生; 是反映水产科研创新成果的窗口和培养人才的园地。它面向水产业, 为水产业的持续发展和水产经济建设服务。

《中国水产科学》为双月刊, A4 开本, 每期 88 页, 双月出版, 国内外公开发行。国内定价 14 元/期, 全年 84 元(含邮费)。邮发代号: 18-250, 国内统一刊号: CN11-3446/S, 国际标准刊号: ISSN 1005-8737, 国外代号 4639Q。全国各地邮电局(所)均办理订阅手续(可破季订阅)。漏订或补订当年和过期刊, 请直接向编辑部订阅。另备有少量合订本, 欢迎购买。

编辑部地址: 北京市丰台区青塔村 150 号, 邮政编码: 100039, 联系电话: 010-68673921, 传真: 010-68673931; E-mail: jfishok@publica.bj.cninfo.net