

朱泽南, 朱小华, 张传正等. 2015. 三门湾沿海声层析潮流观测实验. 地球物理学报, 58(5):1742-1753, doi:10.6038/cjg20150524.  
Zhu Z N, Zhu X H, Zhang C Z, et al. 2015. An observational experiment of coastal acoustic tomography to map the structure of tidal currents in Sanmen Bay, China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 58(5):1742-1753, doi:10.6038/cjg20150524.

## 三门湾沿海声层析潮流观测实验

朱泽南<sup>1,2</sup>, 朱小华<sup>2,1\*</sup>, 张传正<sup>2</sup>, 樊孝鹏<sup>2</sup>, 廖光洪<sup>2</sup>, 宣基亮<sup>2</sup>,  
龙钰<sup>2</sup>, 马云龙<sup>2</sup>, 赵瑞祥<sup>2</sup>, 贺治国<sup>1</sup>, 张涛<sup>2</sup>, 章向明<sup>2</sup>

1 浙江大学海洋学院, 杭州 310058

2 国家海洋局第二海洋研究所卫星海洋环境动力学国家重点实验室, 杭州 310012

**摘要** 2009年9月6日至9日在三门湾进行了沿海声层析(Coastal Acoustic Tomography, CAT)潮流观测实验. 实验由7台沿海声层析仪组网进行, 并分别由渔船定点抛锚于7个站点. 实验期间, 还进行了定点 ADCP(Acoustic Doppler Current Profiler)观测. 通过建立逆模式对声传播时间差进行解析, 引入权重因子, 用 L-curve 法确定阻尼因子的最佳值, 继而根据阻尼最小二乘法得到流速的最佳解. 根据逆模式得到的流速分布可知该海区的潮流以半日潮(M2)为主, M2潮流椭圆呈东南-西北走向, 潮流基本都是顺着水道, 即涨潮为西北流向, 退潮为东南流向. 西北向与东南向最大流速分别为  $1.03 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  和  $1.09 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . 实验期间该区域的余流是从湾外流入湾内, 平均流速约为  $0.05 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . CAT 与定点 ADCP 流速的东分量和北分量的均方差均小于  $0.18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . 这样大面积的潮流和余流水平分布的同步观测, 用传统观测手段很难实现. 通过以上结果可以得出, 沿海声层析技术可以作为一种新的测流方法对强潮海区进行大面积潮流观测, 可在我国沿海的海洋环境监测等方面发挥重要作用.

**关键词** 沿海声层析; 潮流分布; 三门湾; 逆方法

doi:10.6038/cjg20150524

中图分类号 P738

收稿日期 2014-04-10, 2014-10-12 收修定稿

## An observational experiment of coastal acoustic tomography to map the structure of tidal currents in Sanmen Bay, China

ZHU Ze-Nan<sup>1,2</sup>, ZHU Xiao-Hua<sup>2,1\*</sup>, ZHANG Chuan-Zheng<sup>2</sup>, FAN Xiao-Peng<sup>2</sup>, LIAO Guang-Hong<sup>2</sup>,  
XUAN Ji-Liang<sup>2</sup>, LONG Yu<sup>2</sup>, MA Yun-Long<sup>2</sup>, ZHAO Rui-Xiang<sup>2</sup>, HE Zhi-Guo<sup>1</sup>,  
ZHANG Tao<sup>2</sup>, ZHANG Xiang-Ming<sup>2</sup>

1 Ocean College, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

2 State Key Laboratory of Satellite Ocean Environment Dynamics, Second Institute of Oceanography, SOA, Hangzhou 310012, China

**Abstract** Synchronous tidal current data are usually difficult to collect in regions disturbed by fishery activity, such as Sanmen Bay, China. Coastal Acoustic Tomography (CAT) is a promising technique to solve this problem, with which we measure tidal data can be recorded continuously even in busy coastal regions. To observe the tidal currents in Sanmen Bay using CAT, we set up seven CAT stations in the bay in September, 2009 (6<sup>th</sup> to 9<sup>th</sup>). The transducer

**基金项目** 国家重点基础研究发展规划(2011CB403503), 国家自然科学基金(41276095, 41476020, 41321004, 41306025, 41176021), 国家海洋局第二海洋研究所基本科研业务费专项(JT1402, JT1207), 全球变化和海气相互作用项目(GASI-03-01-01-02), 以及卫星海洋环境动力学国家重点实验室自主项目(SOEDZZ14034)联合资助.

**作者简介** 朱泽南, 男, 1987年生, 博士生, 主要从事海洋观测研究. E-mail: zzn2612@126.com

\* 通讯作者 朱小华, 男, 1963年生, 研究员, 主要从事海洋观测与研究. E-mail: xhzhu@sio.org.cn

was suspended at a depth of 3~5 m. Acoustic signals (5 kHz), modulated by the 10<sup>th</sup> order *M* sequence were transmitted synchronously every 3 min. Meanwhile, the transducer received transmission signals from the six other stations to obtain the reciprocal travel time of each station pair. At night, an Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) was deployed to measure the current velocity and so verify the CAT results. In addition, conductivity-temperature-depth (CTD) casts were performed to generate the sound-speed profile. Inverse analysis was performed to the travel-time differences between each station pair, to obtain the horizontal distribution of the tidal currents. The inverse solution was obtained by the tapered least squares method, and the weighting factor (appearing in the inverse analysis) was determined using the *L*-curve method.

The travel-time differences of the 21 station pairs show a typical semidiurnal oscillation. However, some of the data are missing due to an instrument failure. This failure also affects the subsequent inverse analysis. Missing data are interpolated using values predicted by harmonic analysis. The mean root mean square difference (RMSD) between the raw data and the predicted values is 0.49 ms, which indicates that the predicted values are very close to the raw data. The time series of the velocity fields (obtained by the inverse analysis) shows that the tidal currents flow mainly along the channel, i. e., toward northwest during the flood tide and southeast during the ebb tide. The maximum northwestward and southeastward current velocities are  $1.03 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  and  $1.09 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , respectively. The harmonic analysis of the tidal currents shows that the semidiurnal tidal constituent (M<sub>2</sub>) is dominant. The semi major axes of its tidal ellipses are directed southeast-northwest. The residual currents flow mainly northwestward, with an average velocity of  $0.05 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . The time series of the volume transport across the peripheral transects of the observed region during 5 periods of M<sub>2</sub> shows that the mean inflow volume transport across all transects is  $4735 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . This inflow volume transport is approximately equal to the outflow of  $4371 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

The current velocities obtained by the inverse method agree with those obtained using the ADCP. The RMSD between the two measurements of the eastward and northward velocity components are  $0.18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  and  $0.16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , respectively. Thus, using CAT, we measured the continuous distribution of tidal currents over an area of about 58 km<sup>2</sup> in Sanmen Bay. The tidal and residual current structures we obtained supported previous numerical modeling results. Furthermore, our data agreed better with ADCP measurements than that data from previous CAT experiments, because we used the harmonic analysis method to interpolate the missing travel-time difference data. Our study suggests that CAT is a powerful tool to map tidal current structures. In addition, CAT could play an important role in the environmental monitoring of Chinese coastal regions.

**Keywords** Coastal acoustic tomography; Tidal current distribution; Sanmen Bay; Inverse analysis

## 1 引言

沿海声层析 (Coastal acoustic tomography, 简称 CAT) 是海洋声层析 (Munk et al., 1995) 在沿海的应用, 它是为了不受船舶交通、渔业活动等干扰而对港口、海湾、半封闭海和内陆海实行长期、连续监测的一个具有突破性的创新技术. 与外洋相比, 近岸环境噪声远大于外洋, 其海洋过程时空尺度更为短

小、海底地形以及复杂的岸线和岛屿分布对观测的影响更大, 这就要求 CAT 观测必须具备很强的抗噪声能力、更好的时空分辨率和更高的观测精度.

CAT 技术研究起步比外洋声层析晚, 从 Chester 等 (1994) 于 1994 年第一次将海洋声层析技术应用于近海开始, 国际上运用 CAT 对近海流场观测技术才有了较快的发展. 日本广岛大学从 1994 年开始致力于沿海声层析技术的研究开发, 多次成功在濑户内海、关门海峡、广岛湾以及东京湾等地进行

了沿海声层析测流实验(Zheng et al., 1997, 1998; Nguyen et al., 2009; Adityawarman et al., 2011). 这些研究通过对站位对之间的声传播时间差进行逆分析,很好地展现了来自狭窄的海峡的强大的潮汐射流和相关潮流漩涡的发生、成长、移动和消亡的过程,并且通过理论误差估算及沿海声层析与 ADCP 流速观测结果的比较验证,证明了沿海声层析测流的可行性(Park and Kaneko, 2001; Yamaoka et al., 2002; Yamaguchi et al., 2005; Kaneko et al., 2005; Park and Kaneko, 2000).

我国沿海声层析技术发展较晚,已在大陈岛、钱塘江和舟山(张传正等, 2010; Zhu et al., 2012, 2013)成功实现了双向声传播测流. 本文将介绍三门湾多点沿海声层析观测实验,并对观测区域内的潮流场水平分布进行分析.

## 2 实验地点和方法

### 2.1 实验地点

三门湾地处浙中沿海,三面环山,是一个西北-东南方向的半封闭式海湾(图 1). 本次实验位于三门湾内约  $58 \text{ km}^2$  的海区,该海域除了东南方向以及通过石浦水道和珠门港两个通道与外海相通外,其余则被陆地及海岛所包围,湾内水深为  $5 \sim 10 \text{ m}$ ,有满山水道和猫头水道两个主要水道,在该实验海区内有一个面积约为  $0.02 \text{ km}^2$  的小岛(图 1 中的五角星边).

从 2009 年 9 月 6 日到 9 月 9 日历时 69 个小时,对 7 个沿海声层析站位所围成的海区进行了测流实验. 这次实验的主要目的是观测三门湾的潮流结构及其变化. 声层析站位由 7 条 80 吨级的渔船定点抛锚,分别停泊于图 1 中 C1-C7 的位置. 沿海声层析系统放置在船上,信号发送和接收的换能器由铁杆和绳索设置于水下  $3 \sim 5 \text{ m}$  处. 实验采用  $5 \text{ kHz}$  的 10 阶  $M$  序列信号(Zheng et al., 1997),信号长度  $0.614 \text{ s}$ . 每 3 min 同时向各个站位发送信号,并接收其他 6 个站位发送的声信号. 考虑到渔船的偏移,我们加大了时间的采样窗口,各个站位设定在第一个信号到达前  $1 \text{ s}$  开始采样,直到最后一个信号到达后  $1 \text{ s}$  停止采样. 数据存储于其内部的 SD 卡. 声层析各站位的信号代码分别设为  $0 \sim 6$ ,可通过对各自编码的相关处理来得到声信号到达的准确时间.

在沿海声层析实验期间,还在观测区域内进行

了定点 ADCP(Acoustic Doppler Current Profiler)流速观测. 如图 1 所示,晚间将 ADCP 设置于抛锚停泊在实验区域内的渔船上进行流速观测,ADCP 观测的层厚为  $0.5 \text{ m}$ ,共 50 层,采样频率为  $10 \text{ s}$ . 实验期间,还进行了一次 CTD (conductivity-temperature-depth)剖面观测.

### 2.2 反演问题的构建和求解

通过双向声传播所得的双向传播时间差可得到两个站位连线方向上的平均流速(Munk et al., 1995):

$$u_m = \frac{L}{2} \left( \frac{1}{\tau_1} - \frac{1}{\tau_2} \right) \approx \frac{c_m^2}{2L} \Delta\tau, \quad (1)$$

其中  $L$  为站位间的距离,  $\tau_1$ 、 $\tau_2$  分别为双方向传播时间,  $\Delta\tau = (\tau_2 - \tau_1)$  是双向声传播时间差,  $c_m$  是观测站位间的平均声速. 在实现高精度的传播时间观测条件下,船的漂移引起的位置误差对平均流速的观测影响很小,因此可以通过观测得到的传播时间差准确反应断面平均流速(Zheng et al., 1997).

为了得到观测区域内的流场分布,如图 1 所示构建了二维的坐标系统,并建立反演问题模型. 为了减少解的周期性影响,本次反演问题模型选取的反演问题区域边长是沿海声层析区域边长的两倍(Park and Kaneko, 2001). 图 1 中  $L_x = L_y = 20 \text{ km}$ ,沿海声层析区域  $L_x/2 \times L_y/2 = 100 \text{ km}^2$ ,反演问题区域为  $L_x \times L_y = 400 \text{ km}^2$ . 下面简要说明反演问题模型反演流场的简要步骤.

首先将流函数用截断 Fourier 级数来表示(Park and Kaneko, 2001):

$$\Psi(x, y) = \sum_{k=0}^N \sum_{l=0}^N \left\{ A_{kl} \cos 2\pi \left( \frac{kx}{L_x} + \frac{ly}{L_y} \right) + B_{kl} \sin 2\pi \left( \frac{kx}{L_x} + \frac{ly}{L_y} \right) \right\}, \quad (2)$$

其中  $A_{kl}$  和  $B_{kl}$  是位置系数.  $N$  是截断 Fourier 级数的个数,本实验取  $N=3$ .

(2)可以化简为

$$\Psi(x, y) = \sum_{j=1}^{(N+1)^2} P_j Q_j(x, y), \quad (3)$$

其中

$$P = [A_{00}, B_{00}, A_{01}, B_{01}, \dots, A_{NN}, B_{NN}], \quad (4a)$$

$$Q(x, y) = \left[ 1, 0, \cos \frac{2\pi y}{L_x}, \sin \frac{2\pi y}{L_x}, \dots, \cos 2\pi \left( \frac{Nx}{L_x} + \frac{Ny}{L_y} \right), \sin 2\pi \left( \frac{Nx}{L_x} + \frac{Ny}{L_y} \right) \right], \quad (4b)$$

传播时间差可以表示为

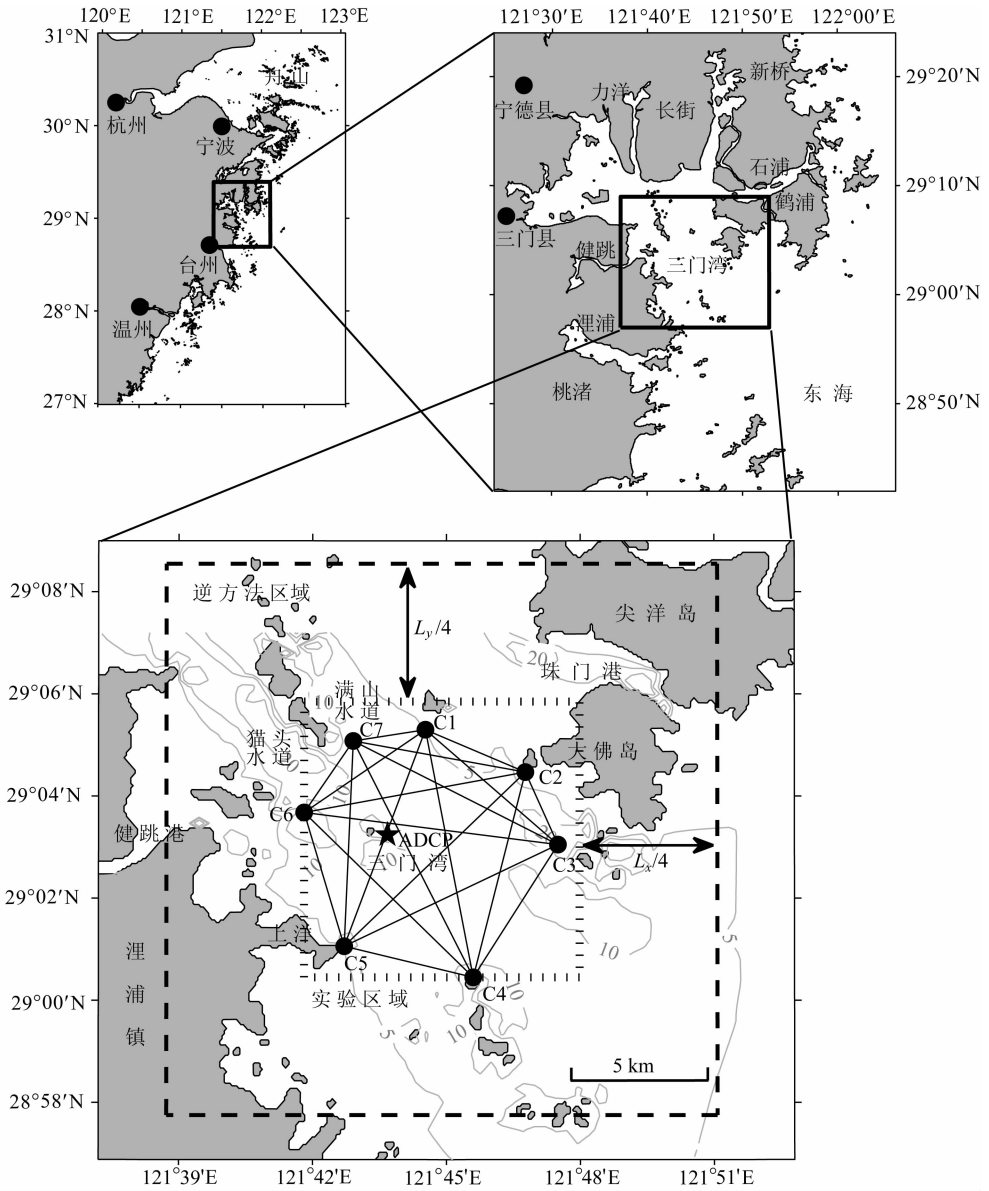


图 1 实验站位图

C1-C7 为声层析站位, 站位间的连线表示声传播路线的水平投影。★表示定点 ADCP 的站位。

水深等深线间隔为 5 m。图中虚线表示的方框分别代表沿海声层析和逆问题求解的区域。

Fig. 1 Location map of the experimental site

The locations of seven acoustic stations C1-C7 are indicated with the dots in the magnified map on the bottom panel. The solid lines connecting the acoustic stations indicate the horizontal projection of sound propagation route. A star mark indicates the position of the moored ADCP. The interval of bathymetric contours is 5 m. Two boxes with dotted lines indicate the observational domain and inverse domain, respectively.

$$\Delta t_i = \frac{2 \sum_{n=1}^{(N+1)^2} P_n \int_0^{R_m} \frac{\partial Q_n(m, n)}{\partial y} - \frac{\partial Q_n(m, n)}{\partial x} \tan \phi_m}{C_0^2} dx, \quad (5)$$

其中  $\phi_m$  是东向  $x$  轴与第  $m$  个声线之间的角度,  $R_m$  是两个站在  $x$  轴上的投影。

将式(5)用矩阵的形式表示为

$$\mathbf{y} = \mathbf{E}\mathbf{x} + \mathbf{n}, \quad (6)$$

$\mathbf{y}$  是由传播时间差组成的数据向量,  $\mathbf{x}$  是包括决定流场被积函数变量的解向量,  $\mathbf{E}$  是把解向量  $\mathbf{x}$  映射到数据向量  $\mathbf{y}$  的算子矩阵。噪声矢量  $\mathbf{n}$  是用来表现模型中测量误差和其他误差的。

我们用阻尼最小二乘法去求得最佳解。引进权重参数  $\alpha^2$ , 应用阻尼最小二乘法, 目标函数可写成

$$\mathbf{J} = (\mathbf{y} - \mathbf{E}\mathbf{x})^T (\mathbf{y} - \mathbf{E}\mathbf{x}) + \alpha^2 \mathbf{x}\mathbf{x}^T, \quad (7)$$

目标函数最小时, 解的期望值  $\bar{\mathbf{x}}$  为

$$\bar{x} = E^T(E^T E + \alpha^2 I)^{-1} E^T y. \quad (8)$$

有很多方法确定阻尼因子  $\alpha$  的最佳值. 本文采用 Hansen 和 O'leary(1993)开发的 L 曲线法简单地得到最佳  $\alpha$ .

### 3 结果

#### 3.1 CAT 观测结果

图 2 是 C1 和 C2 接收到的对方站位声信号噪声比(Signal-to-Noise Ratio,以下简称 SNR)的时间序列. SNR 在 1.85 s 附近有非常明显的峰值出现,这与预计声信号到达的时间基本一致( $2850 \text{ m} / 1530 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 1.86 \text{ s}$ ). 图 2a 中 C1 收到 C2 最大的信噪比为 4183(为更清晰地分辨出峰值,信噪比取为声信号和噪声的振幅比值),图 2b 中 C2 收到 C1 信号的最大信噪比为 3313. 图 2c 是 2009 年 9 月 7 日 20:30 分时 C1、C2 收到对方站位的信噪比图. 通

过观测站位之间相互接收到声信号的 SNR,可确定声信号的传播时间,由图中可以看出,C1 和 C2 站位间有非常明显的双方向传播时间差.

图 3 是 21 对站位间双向传播时间差的时间序列. 9 月 7 日晚上,换能器的电线被锚绳绞坏,缺失 C5 相关站位之间的声传播时间. 由于西南区域站位(C4, C5, C6)设置稀,东北区域站位(C1, C2, C3, C7)设置密,故将 7 号站的仪器移动到 5 号站,所以最后时段 C7 相关站位之间的传播时间缺失.

数据的欠缺通常采用线性内插来补足,当欠缺时间间隔太长时,其内插的误差增大. 因传播时间差序列显示了典型的半日潮特性,而且观测时间(整个数据长度)为 69 h,大于一个日潮流周期,故本文中用 K1, M2, M3, M4, 2MK5, M6, 3MK7, M8 八个潮流周期进行调和与分析,对数据进行内插、平滑和预报. 图 3 中灰点是原始数据,黑线是调和分析的预报值. 其中 C3-C4、C2-C5 和 C6-C7 三个垂直于潮流方

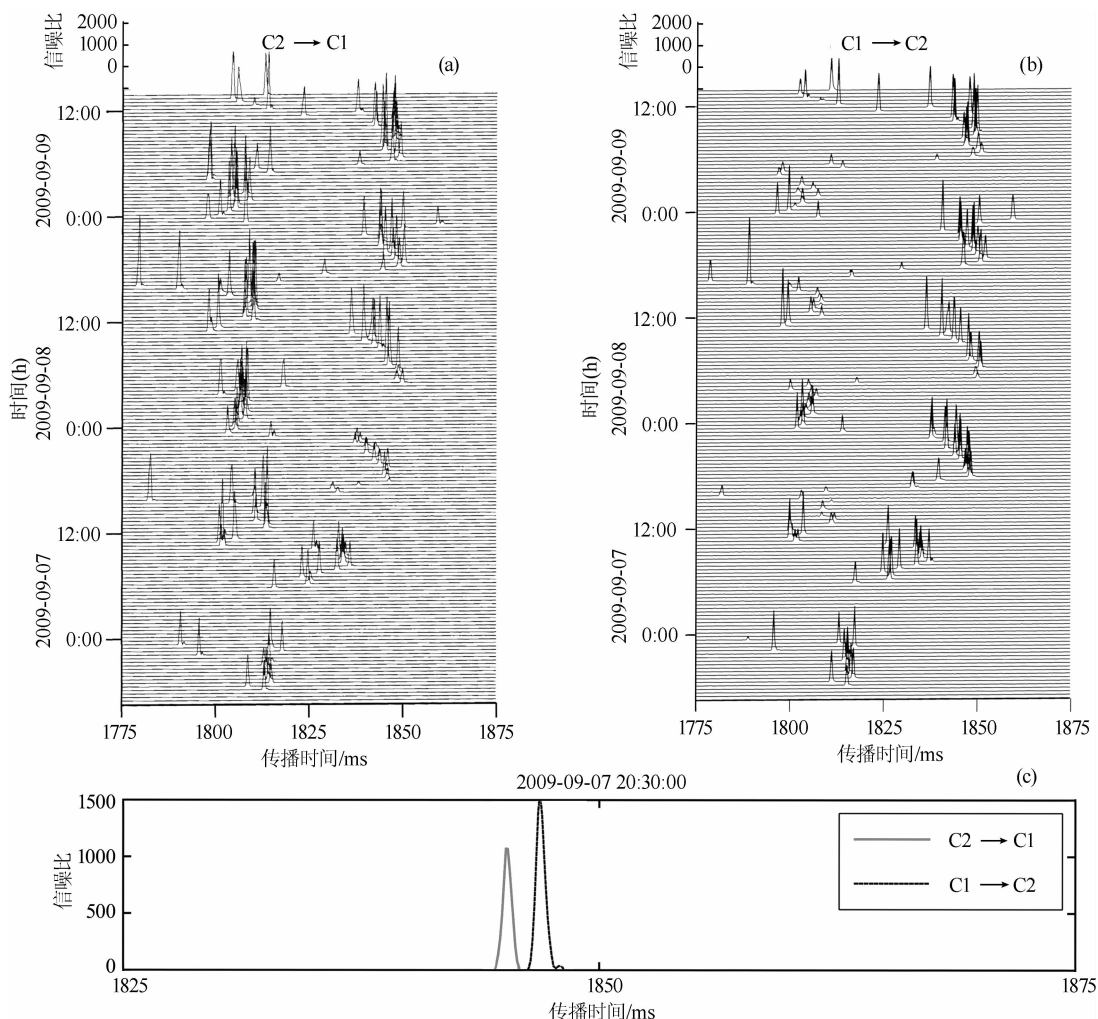


图 2 C1、C2 站间声传播信号噪声比

Fig. 2 Signal-to-noise ratio(SNR) between stations C1 and C2

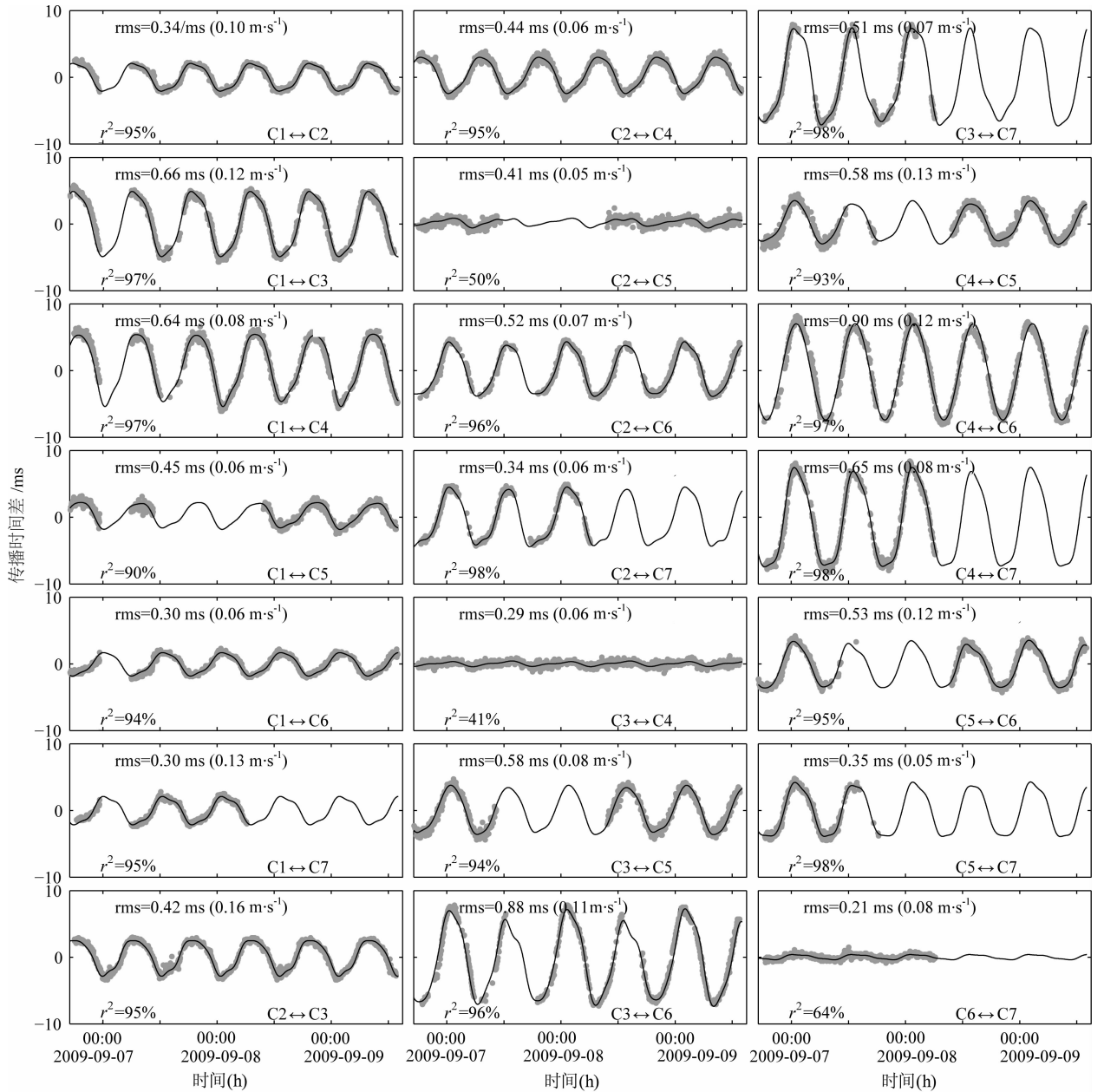


图3 传播时间差的时间序列

灰点和黑线分别表示原始数据和调和分析的预报值。两者的均方差(rms)以及所对应的流速,传播时间差所对应的流速值(由公式(1)计算所得),表示在每个图的上部,两者相关系数表示在每个图的左下部。

Fig. 3 Time series of travel time difference between each station pair

Gray dots and black lines indicate the raw data and the predicted value using harmonic analysis, respectively. The root mean square (rms) between them and corresponded velocity are shown in the top of each panel, the correlation coefficient between them are shown in the bottom left of each panel.

向的断面相关性较差,原因在于沿声线方向的流与潮流相关性较小,导致调和分析前后相关性较差。总体来看,调和分析的预报值和观测值非常吻合,两者整体的相关系数达 0.97。因此,用调和分析预报的传播时间来对缺失数据进行插值,并将其用于流场反演。

### 3.2 逆方法结果

利用逆方法对传播时间差数据进行反演,可得

到每 3 min 间隔的潮流分布。限于篇幅,这里仅给出 3 h 间隔的潮流分布图(图 4)。将 9 月 6 日 18:00 到 7 日 18:00 的流场进行分析,18:00—21:00 和 6:00—9:00 是很强的西北向流,00:00—02:00 和 12:00—14:00 则是很强的东南向流。这样的大规模的东南—西北向流的变化在观测的 24 h 里发生了 2 次。西北向流速在 9 月 6 日 18 点的时候达到最大,平均流

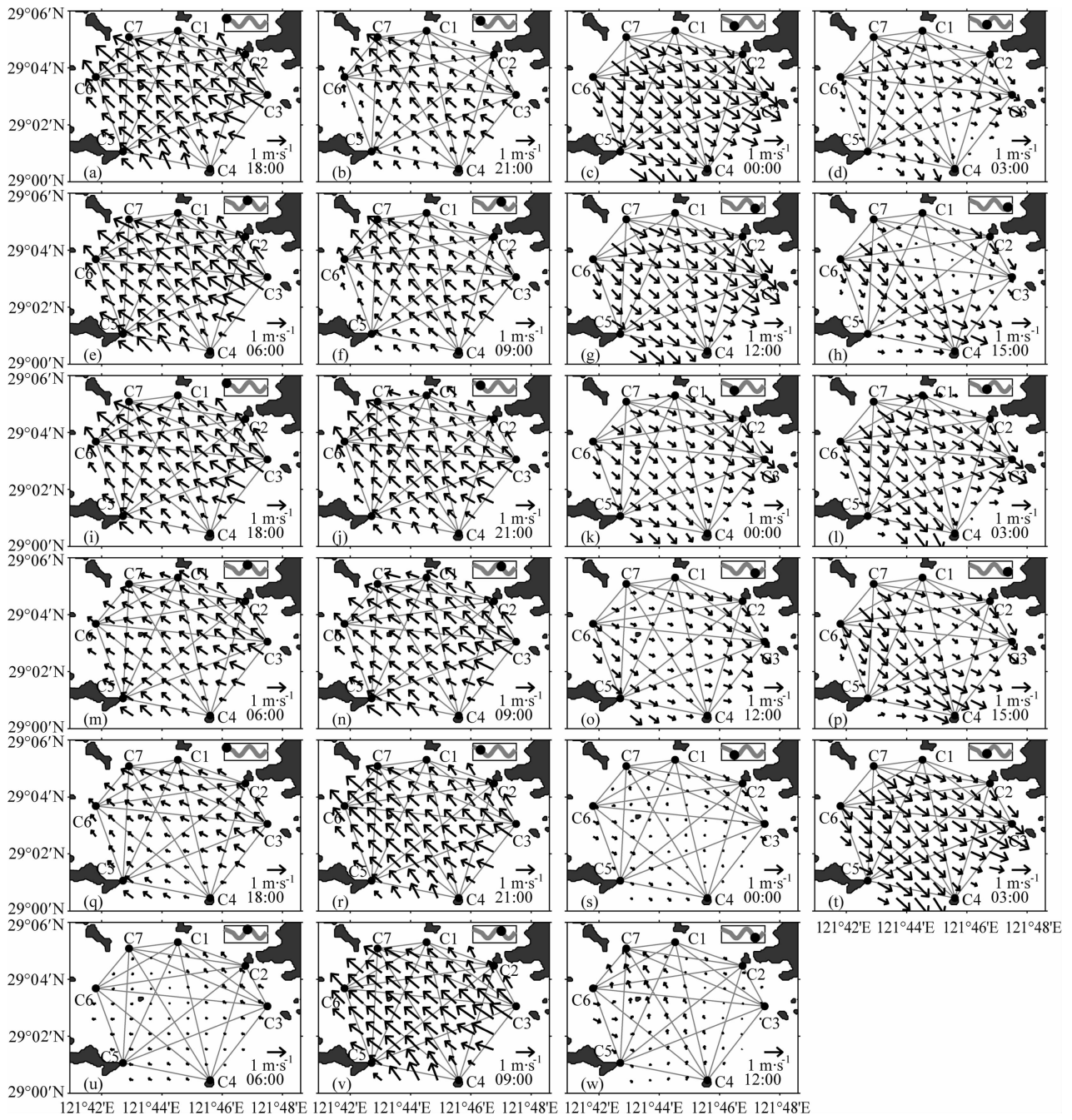


图4 9月6日18:00至9月9日12:00的潮流分布图

箭头表示观测得到的潮流水平分布. 右上角为健跳的潮位图. 时间表示在图的右下角.

Fig. 4 Horizontal tidal current distributions from 18:00 of September 6 to 12:00 of September 9

The arrows indicate the horizontal tidal current calculated by the inverse analysis. The tidal level at Jiantiao is shown at the top-right corner in each panel. Time is shown at the bottom-right corner in each panel.

速为  $1.03 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 东南向流速在9月7日1点的时候达到最大, 平均流速为  $1.09 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . 潮流分布显示了观测区域内典型的半日潮特性. 在观测区域内不同位置的流速大小基本一致, 方向基本平行. 观测区域内的潮流方向基本都是沿着水道流进流出.

调和分析得到观测区域内半日潮(M2)的潮流

椭圆见图5a, 潮流椭圆呈东南-西北向分布, 并呈现顺时针旋转的特点. M2潮流椭圆扁平, 其长半轴最大达  $0.97 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 而短半轴最大仅  $0.04 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 可见潮流主要是沿水道的往复流. 剔除 K1, M2, M3, M4, 2MK5, M6, 3MK7, M8 八个分潮潮流的余流分布见图5b, 余流整体是从湾外流向湾内的, 平均流速为  $0.05 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

### 4 声层析结果验证

#### 4.1 观测区域流量平衡和散度

图 6 统计了 5 个完整的 M2 潮周期内(9 月 6 日 18:00—9 日 00:05)通过整个观测区域外围垂直于各断面(C1-C2,C2-C3,C3-C4,C4-C5,C5-C6,C6-C7 和 C7-C1)的流量的时间序列,以及观测区域内总散度( $\gamma = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}$ )的时间序列图.图 6a 中垂直于

C3-C4 和 C6-C7 断面的流明显大于其他断面的.涨潮时,东海的潮水主要从东南方向进入观测区域,并沿着 C3-C7 和 C4-C5 断面之间的水道流入猫头水道;落潮则反之,变化周期约为半日,整个观测区域总散度的最大值和最小值分别是  $2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  和  $-1.5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ .

5 个完整的 M2 潮周期内每个断面流入、流出的最大值以及平均值见表 1. 所有断面的平均流入量合计为  $4735 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ,与流出量  $4371 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  基

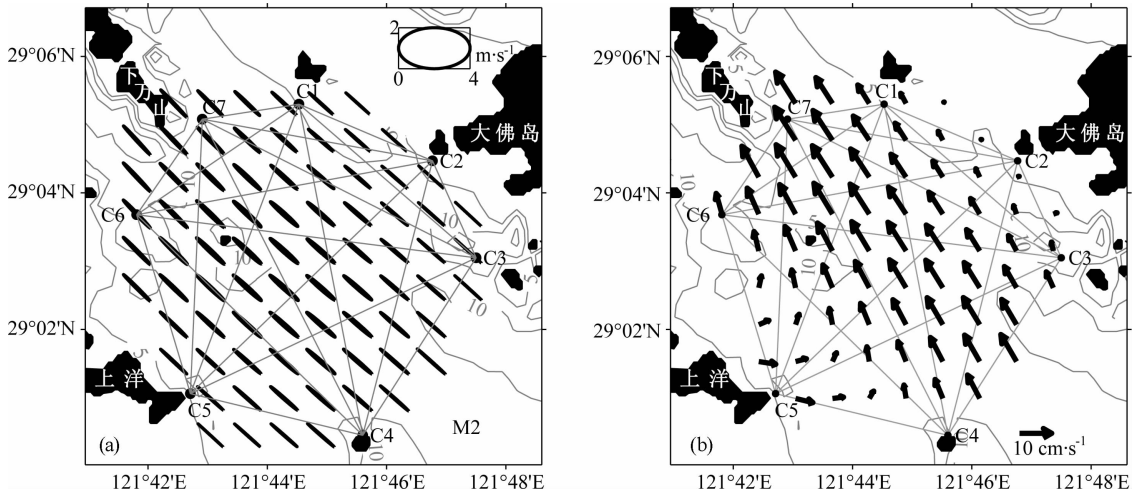


图 5 M2 潮流椭圆和余流分布

Fig. 5 Horizontal distributions of M2 tidal ellipse and residual current

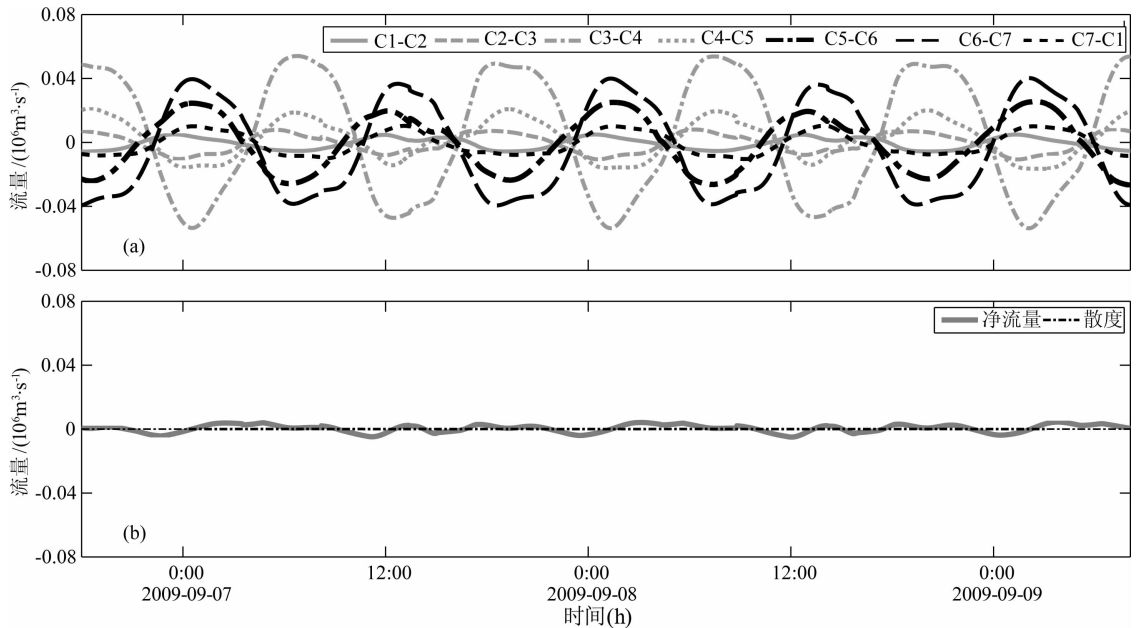


图 6 断面流量的时间序列

(a) 断面流量; (b) 断面净流量和整个观测区域的散度.

Fig. 6 The time series of cross sectional volume transport

(a) Cross sectional volume transport; (b) The net volume transport and the divergence for the entire tomography domain.



表 1 5 个 M2 分潮周期内断面流入、流出流量的最大值以及平均值

Table 1 The maximum and average values of inflow and outflow volume transport during 5 cycles of M2 tide

断面	观测期间流入最大		观测期间流出最大		观测期间流量平均值 ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )
	时间 (月-日 时)	流量 ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	时间 (月-日 时)	流量 ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	
C1-C2	09-06 23:30	5010	09-06 18:15	-5706	-571
C2-C3	09-09 07:09	8235	09-09 01:24	-10679	-882
C3-C4	09-07 06:51	54039	09-09 02:06	-53729	3079
C4-C5	09-06 18:30	21317	09-09 02:51	-16634	1597
C5-C6	09-09 00:27	25494	09-08 07:24	-26347	59
C6-C7	09-09 02:09	40203	09-06 18:00	-39473	-2295
C7-C1	09-08 13:54	10380	09-08 09:18	-10907	-623

本保持平衡. 两者残差平均为  $246 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , 约占流入量的 7.7%.

9 月 7 日 6:51, C3-C4 断面流入最大, 9 月 9 日 2:06, C3-C4 断面流出最大, 这两个时刻各个断面的流入、流出, 以及所占总流入、流出量的比例见表 2.

总体来看, 整个区域计算得到的净的体积输运和总的散度(图 6b) 几乎为 0, 这个结果表明 CAT 测流具有足够的精度.

#### 4.2 CAT 与 ADCP 结果比较

CAT 反演的是一个水平面的流场, 与 ADCP 的观测空间不同, 我们先将 CAT 的结果进行空间插值得到与 ADCP 站位对应空间点的流速结果. 另外 CAT 反演的流速近似于全水深层的平均流速, 因此用表层至海底(15.5 m) 的 ADCP 平均流速和 CAT 结果进行比较. 图 7 是观测期间两者的流速矢量比较图. 两者流速方向基本一致, 但部分时间段 ADCP 的观测值小于 CAT 的观测值, 我们认为这是因为 ADCP 站位附近的流场受附近小岛的影响

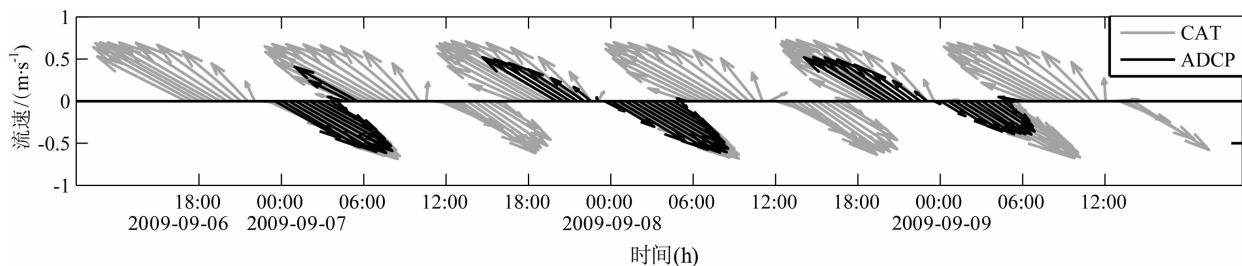


图 7 CAT 与定点 ADCP 流速矢量

上和右分别表示北方向和东方向.

Fig. 7 The vectors plot of tidal current velocity obtained by CAT (gray) and moored ADCP (black)

The upward and rightward indicate the northward and eastward, respectively.

表 2 断面的流入流出流量以及所占总流入流出量的比  
Table 2 The inflow and outflow volume transport and their rates in total transport during experimental period

断面	流量( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) (比例)	流量( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) (比例)
	时间 09-07 06:24	时间 09-09 8:09
C1-C2	-5330 (7.22 %)	4045 (5.09 %)
C2-C3	4832 (6.25 %)	-9632 (12.07 %)
C3-C4	-54039 (69.90 %)	-53729 (68.60 %)
C4-C5	18394 (23.91 %)	-16421 (20.58 %)
C5-C6	-24923 (32.55 %)	25244 (31.79 %)
C6-C7	-37891 (49.49 %)	40198 (50.63 %)
C7-C1	-8414 (10.99 %)	9910 (12.48 %)
总流入	77265	79397
总流出	-76558	-79782

比较大, 而逆方法计算流场的过程中并未考虑到观测区域内小岛的影响. 图 8 是 CAT 观测结果与定点 ADCP 结果的均方差以及相关比较. 流速东分量和北分量的均方差分别为  $0.18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  和  $0.16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 分别占其最大流速的 27% 和 26%. 东分量和北分量的相关性分别为 0.94 和 0.95. 从整体看, 沿海声层析的结果基本能反映定点 ADCP 流速与流向的变化过程.

#### 5 讨论

根据 CTD 观测得到的声速分布(图 9) 模拟得到每个站位对之间声线传播形态示意图(图 10). 声线模拟时采用的条件是发射角度在  $-5^\circ \sim 5^\circ$  之间, 以  $0.01^\circ$  为间隔, 海面和海底的反射次数都不超过 5 次. 声线分布都是向下弯曲, 这与声速垂直分布的负梯度特性吻合. 模拟声线的平均传播时间与实际观测的传播时间基本吻合, 所有断面中传播时间的标准偏差范围为  $0.005 \sim 0.211 \text{ ms}$ , 这说明多路径的

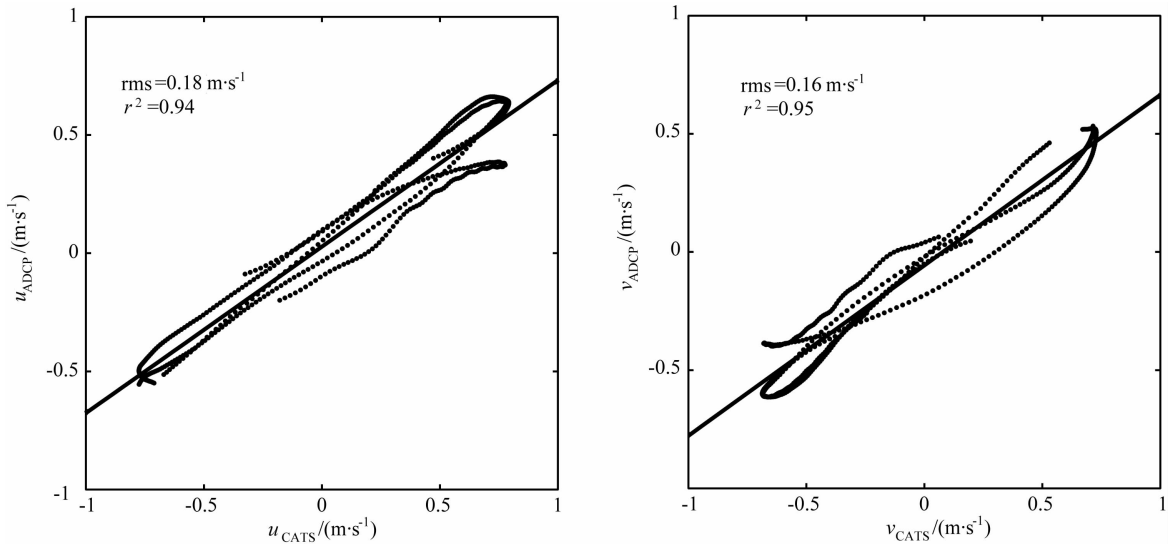


图 8 CAT 与定点 ADCP 流速的东分量( $u$ )和北分量( $v$ )结果对比  
两者的均方差和相关系数表示在图的左上角。

Fig. 8 The comparison between of the velocity components ( $u$  and  $v$ ) CAT and moored ADCP results  
The rms and correlation coefficient are shown at the top-left corner in each panel.

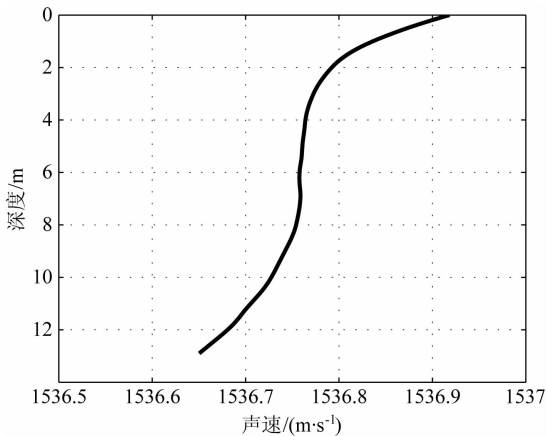


图 9 声速的垂直分布

Fig. 9 The vertical profile of sound speed

声信号并不是同时到达,而是在极短时间内持续到达。但是传播时间的标准偏差远小于 M 序列一个数位的时间分辨率(0.6 ms),也就是说现有的观测条件无法分辨出多路径的信号到达。这样观测得到的声信号是所有路径声信号的一个叠增加值。由于声线基本贯穿了整个剖面深度,因此,观测得到的潮流分布近似于全深度的平均值。

本文运用沿海声层析观测得到了三门湾近 58 km<sup>2</sup> 区域的潮流分布的时间序列,像这样大面积长时间的同步观测在三门湾这样渔业活动极其活跃的海区,用常规的观测手段很难实现。本实验得到的流速分布验证了以往模式结果,三门湾的潮流都是顺着水道沿东南-西北方向涨潮时流进,退潮时流出,是典型的往复流结构(许雪峰和羊天柱,2006)。

三门湾的地形造成三门湾潮流的特殊性,而潮流又是塑造三门湾地貌发育的主导动力因素(胡方西和曹沛奎,1981;杨士瑛和陈波,2007)。以 C4-C7 断面为界将观测区域划分为两部分,断面东区域的往湾内的流入流速大于西区域的,西区域的流出流速较大,换言之,东区的满山水道的涨潮流要大于西区猫头水道的涨潮流,落潮时猫头水道的流速比满山水道大(图 4)。本次实验的海域相对开阔、海底地形变化较小,因此得到的余流结果相对简单,基本是顺着水道指向湾内。由于受地形和科氏力的影响,使得湾口东靠近大佛岛的余流流速要大于靠近上洋山的湾口西区域,靠近大佛岛的余流从外海指向湾内,靠近上洋山的余流从湾内指向湾外(见图 5),形成一个小尺度气旋环流。

本实验与以往沿海声层析测流实验相比,首次利用定点 ADCP,进行了 ADCP 与 CAT 的流速长时间序列的比测。两种方法观测得到的东分量和北分量的流速大小差为 0.16~0.18 m·s<sup>-1</sup>,且 ADCP 流速小于 CAT 流速。两者之间的差值可能主要是由于 ADCP 受附近小岛影响,而逆方法反演的流场无法考虑到小岛的在所至。

日本广岛大学在关门海峡(Yamaguchi et al., 2005)和濑户内海(Park and Kaneko, 2000)利用 CAT 进行过大面积的流场结构观测。关门海峡实验中 CAT 与 ADCP 观测流速东分量和北分量分别相差 0.47 m·s<sup>-1</sup>和 0.48 m·s<sup>-1</sup>,大约是 ADCP 最大流速的 26%和 32%,东分量和北分量的相关性分别

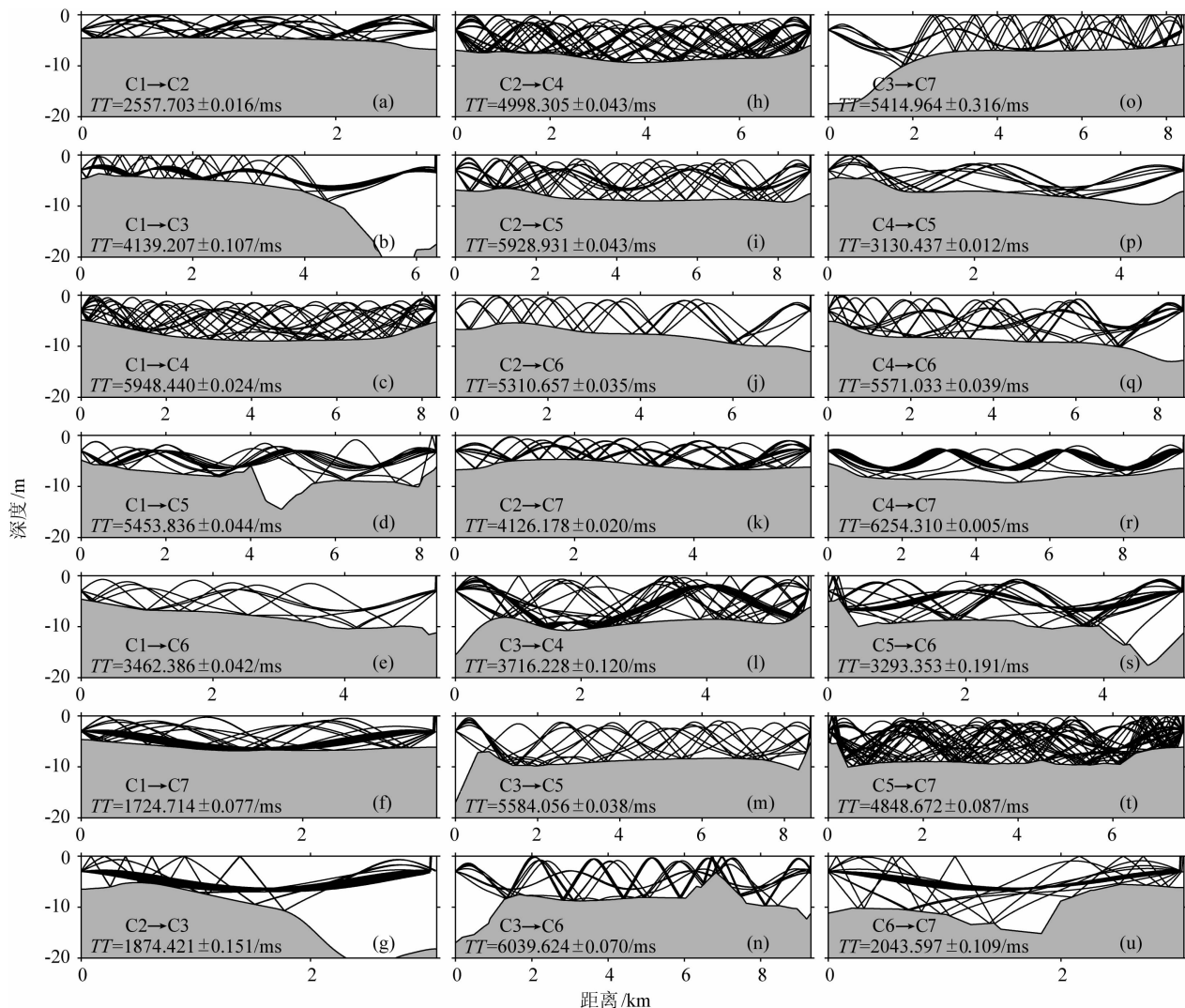


图 10 每个站位对之间的声线分布  
 TT 表示平均传播时间和正负的标准偏差.

Fig. 10 Ray pattern between each CAT station pair

The mean travel times (TT) and their standard deviation are shown in the bottom of each panel.

为 0.84 和 0.82. 濑户内海实验中 CAT 与 ADCP 观测流速的东分量和北分量分别相差  $0.50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  和  $0.34 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 大约是 ADCP 最大流速的 50% 和 45%. 综合相关性、均方差和相对偏差的结果(表 3)来看, 本次实验的观测结果明显更好, 主要原因是本实验成功传播的声线较多, 并利用调和分析方法将缺失的声线进行预报和平滑, 保证逆方法反演时的声线数为 21 条, 大大提高了流速反演精度, 可以说本次 CAT 实验的流速观测精度是迄今为止最高的.

## 6 结论

由 7 个声信号发送与接收站位组成的沿海声层析实验在浙江省三门湾附近海域成功进行. 本文用

表 3 各实验 ADCP 和 CAT 流速分量的相关性、均方差和相对偏差比较

Table 3 Comparison of correlation coefficient, rms and relative deviation of velocity components between ADCP and CAT for each experiment

实验 流速分量	关门实验		濑户实验		三门湾实验	
	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>
相关性	0.84	0.82	/	/	0.94	0.95
均方差 ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	0.47	0.48	0.50	0.34	0.18	0.16
相对偏差	26%	32%	50%	45%	27%	26%

逆方法反演得到了观测海域的流场分布并对其进行了分析, 得到如下结果:

(1) 7 个沿海声层析站位在观测的大部分时间

里成功地实现了声信号的发射和接收. 通过调和和分析对数据进行内插, 得到了全观测时间段的传播时间差的时间序列.

(2) 利用逆方法对传播时间差数据进行反演, 成功得到观测区域内的水平流速分布的时间序列. 根据阻尼最小二乘法确定流速的最佳解时, 引入了权重因子并使用 L-curve 法确定阻尼因子的最佳值.

(3) 沿海声层析观测得到了该海区的潮流分布特性, 西北流(涨潮)时, 潮流基本都是顺着水道流的. 涨潮时往湾内流, 退潮时流向湾外. 潮流以 M2 为主, M2 潮流椭圆半轴呈东南-西北向分布, 潮流基本顺着水道往返流动. 西北向与东南向最大流速分别为  $1.03 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  和  $1.09 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

(4) 逆方法得到的 CAT 流速结果与定点 ADCP 基本一致. 流速东分量和北分量的均方差分别为  $0.18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  和  $0.16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . 东分量和北分量的相关性分别为 0.94 和 0.95.

通过以上结论可以得出, 沿海声层析技术可以作为一种新的测流方法对强潮海区进行大面积潮流观测, 可在我国沿海的海洋环境监测等方面发挥重要作用.

**致谢** 感谢国家海洋局第二海洋研究所吴清松、李博、张涛参加了部分野外实验工作, 感谢审稿人对本文提出的意见和建议.

## References

Adityawarman Y, Kaneko A, Nakano K, et al. 2011. Reciprocal sound transmission measurement of mean current and temperature variations in the central part (Aki-nada) of the Seto Inland Sea, Japan. *Journal of Oceanography*, 67(2): 173-182.

Chester D, Malanotte-Rizzoli P, Lynch J, et al. 1994. The eddy radiation of the Gulf Stream as measure by ocean acoustic tomography. *Geophysical Research Letters*, 21(3): 181-184.

Hansen P C, O'leary D P. 1993. The use of the L-curve in the regularization of discrete ill-posed problems. *SIAM Journal on Scientific Computing*, 14(6): 1487-1503.

Hu F X, Cao P K. 1981. Characteristics of the tidal wave movement in the Sanmen Bay and its relationship with the topographic development. *Oceanologia et Limnologia Sinica* (in Chinese), 12(3): 225-234.

Kaneko A, Yamaguchi K, Yamamoto T, et al. 2005. A coastal acoustic tomography experiment in Tokyo Bay. *Acta Oceanologica Sinica*, 24(1): 86-94.

Munk W H, Worcester P F, Wunsch C. 1995. *Ocean Acoustic Tomography*. Cambridge: Cambridge University Press, 1-433.

Nguyen H Q, Kaneko A, Lin J, et al. 2009. Acoustic measurement

of multi sub-tidal internal modes generated in Hiroshima Bay, Japan. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 34(2), 103-112.

Park J H, Kaneko A. 2000. Assimilation of coastal acoustic tomography data into a barotropic ocean model. *Geophysical Research Letters*, 27(20): 3373-3376.

Park J H, Kaneko A. 2001. Computer simulation of the coastal acoustic tomography by a two-dimensional vortex model. *Journal of Oceanography*, 57(5): 593-602.

Xu X F, Yang T Z. 2006. Mathematical model study on overall impact of Sanmenwan Bay reclamation project. *Journal of Marine Sciences* (in Chinese), 24(S): 49-59.

Yamaguchi K, Lin J, Kaneko A, et al. 2005. A continuous mapping of tidal current structures in the Kanmon Strait. *Journal of Oceanography*, 61(2): 283-294.

Yamaoka H, Kaneko A, Park J H, et al. 2002. Coastal acoustic tomography system and its field application. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 27(2): 283-295.

Yang S Y, Chen B. 2007. The transportation characteristics of suspended load in Sanmen Bay. *Transactions of Oceanology and Limnology* (in Chinese), (4): 21-29.

Zhang C Z, Zhu X H, Wu Q S. 2010. Experimental study of reciprocal sound transmission for current measurement in the Qiantang River. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 53(7): 1741-1748, doi:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.07.026.

Zheng H, Gohda N, Noguchi H, et al. 1997. Reciprocal sound transmission experiment for current measurement in the Seto Inland Sea, Japan. *Journal of Oceanography*, 53: 117-127.

Zheng H, Yamaoka H, Gohda N, et al. 1998. Design of the acoustic tomography system for velocity measurement with an application to the coastal sea. *Journal of Acoustic Society of Japan*, 19(3): 199-210.

Zhu X H, Zhang C Z, Wu Q S, et al. 2012. Measuring discharge in a river with tidal bores by use of the coastal acoustic tomography system. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 104-105: 54-65.

Zhu X H, Kaneko A, Wu Q S, et al. 2013. Mapping tidal current structures in Zhitousang Bay, China, using coastal acoustic tomography. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 38(2): 285-296.

## 附中文参考文献

胡方西, 曹沛奎. 1981. 三门湾潮汐运动特征及其与地貌发育的关系. *海洋与湖沼*, 12(3): 225-234.

许雪峰, 羊天柱. 2006. 三门湾多个围垦工程的整体影响数学模型研究. *海洋学研究*, 24(增刊): 49-59.

杨士瑛, 陈波. 2007. 三门湾悬移质输运特征. *海洋湖沼通报*, (4): 21-29.

张传正, 朱小华, 吴清松. 2010. 钱塘江双向声传播测流实验研究. *地球物理学报*, 53(7): 1741-1748, doi:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.07.026.