

胶州湾流速场的声层析反演研究

刘旭东¹, 林 巨¹, 王 欢¹, 朱小华²

(1. 中国海洋大学 信息科学与工程学院, 山东 青岛 266100; 2. 国家海洋局第二海洋研究所, 浙江 杭州 310012)

摘要: 采用结合匹配法和经验正交函数法的射线声层析反演方法, 针对流场水平分布不均匀特点, 使用距离等效分段方法对反演算法进行改进, 利用三个断面声层析数据, 对胶州湾口潮流场的垂直和水平分布进行反演。与传统方法比较, 大大降低与实测流速垂直分布间的偏差, 平均偏差小于 0.02 m/s, 流场垂直分布间的相关系数提高到 0.85 以上。分析了声传播断面上不同的流场结构, 以及涨潮期间在胶州湾团岛附近出现的涡流现象, 并计算得到湾口海水流量变化。结果表明, 改进的射线声层析反演方法可有效地用于水平分布不均匀流场监测, 仅采用少量声学观测站位, 即可获得大范围的复杂流场三维信息, 有利于近海海洋资源开发、海洋环境保护和船舶航行安全。

关键词: 射线走时声层析; 经验正交函数; 匹配方法; 距离等效分段; 胶州湾

中图分类号: P733.23 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2016)01-0101-11
doi: 10.11759/hyxx20130510003

胶州湾位于山东半岛南部, 黄海西部, 是一个总面积约 380 km²、平均水深 7 m 的半封闭海湾, 拥有内外两个湾口, 内湾口位于黄岛至团岛一线, 宽约 4 km, 最大水深达 60 m, 外湾口位于薛家岛至团岛一线, 宽约 3 km, 胶州湾通过此湾口与黄海相连。胶州湾地理位置复杂, 涨潮时海水通过内外湾口的狭长水道涌入胶州湾, 落潮时又涌出至黄海, 因湾口附近海岸线和海底地形复杂, 形成以潮流为主的复杂的多涡流场结构^[1]。

随着环胶州湾经济和胶州湾水产养殖的迅速发展, 胶州湾环境变化巨大, 近年来人们加大对胶州湾海洋动力环境场、地形地貌、沉积物结构、水交换、水质、湿地变迁等方面的研究^[2-7], 其中对流场结构的研究尤其重要, 对于评估湾内生态环境、海水自净能力, 保障船只航行安全都有非常重要的意义。目前获取胶州湾海水流速场信息的方法主要通过船载或悬挂式 ADCP 测流仪和流速计, 受航道上船舶来往频繁及禁止泊船等因素影响, 难以进行同步、大尺度空间的流速观测。

海水是声波传播的良好介质, 随着声层析概念的提出^[8], 利用声波收发装置获取声传播信号, 对其逆推反演能够获取需要的海洋参数。本文探讨采用声层析反演方法来获取胶州湾口的流场数据, 其关键之处即是采用何种逆推反演方法处理声信号信息得到流场结构, Shang^[9]提出了简正波相位扰动法,

得到了垂直于声传播断面的流速; 其余的方法还有声线走时声层析方法、匹配场层析算法、简正波水平折射层析法等^[10], 其主要缺点是只能获得沿声传播断面方向上的距离平均流速信息, 未能获得断面上的总流速矢量, 并且未考虑流速分布水平不均匀情况下的反演。

经典的声层析方法一般假设声传播路径上的海洋环境参数空间分布是均匀的, 但是实际情况下温度、盐度和流速等海洋环境参数的空间分布往往是不均匀的, 采用传统方法将带来较大的反演误差。本文以声线走时声层析方法为基础, 考虑了传播路径上流速分布的不均匀性, 结合匹配场方法、经验正交函数(EOF)分析方法和等效分段法, 提出了改进的声线走时声层析方法。该方法可以用于海水流速水平分布不均匀的流场反演, 与传统流场监测方法相比,

收稿日期: 2013-05-10; 修回日期: 2014-01-03

基金项目: 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开放基金项目(SOED1001); 国家自然科学基金项目(41176033); 国家重点基础研究发展计划项目(2007CB411803); 国家高技术研究发展计划(863 计划)(2006AA09Z114)

[Foundation: Open Project of State Key Laboratory of Satellite Ocean Environment Dynamics (Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration), No. SOED1001; National Natural Science Foundation of China, No. 41176033; National Program on Key Basic Research Project of China, No. 2007CB411803; The National High Technology Research and Development Program of China, No. 2006AA09Z114]

作者简介: 刘旭东(1987-), 男, 山东日照人, 硕士, 研究方向为海洋声学, E-mail: liuxudong02013@126.com; 林巨, 通信作者, E-mail: julin97@gmail.com

仅布设少数站位即可同步获得大范围的复杂流场分布,在难以布设较多观测站位的海域如海湾湾口、航道等海域有广泛应用价值。

1 改进的声线走时匹配反演方法

声线走时匹配反演是基于射线声学理论,采用声线传播时间的扰动量来反演声线所经过路径的海洋环境参数。声传播时间不仅受声速扰动影响,也受到海水流速影响,当使用两个站点进行双向互易声传播时,由于海水流速为矢量,可得到沿声线方向的流速引起的声传播时间扰动^[11]。

$$d\tau_i^+ - d\tau_i^- = 2d\tau_i^u = -\frac{2}{c_0} \int_{\Gamma_i} u \cdot n ds \quad (1)$$

式中, $2d\tau_i^u$ 为声传播路径 Γ_i 上由海水流速 u 引起的第 i 条声线双向互易声传播时间差。上式积分核不便于求解,考虑到流速在垂直方向上是分层结构,设为数列 $u(z)$, 同时在已知声线路径的情况下,每层深度上声线经过的路径长度可表示为数列 $s_i(z)$, 则可将式(1)中的积分核变为两个数列相乘

$$2d\tau_i^u = -\frac{2}{c_0} \sum_{z=1}^M u(z) \cdot ns_i(z) \quad (2)$$

虽然式(1)得到简化,但是深度上层数 M 可任意设置,求解过程仍然很复杂,可配合匹配算法:建立一个流速拷贝场 $u_1(z)$, 计算得到在这个流速场环境下,两站点的第 i 条声线的互易传播时间差 $2d\tau_i^{u_1}$; 当拷贝场下全部 N 条声线对应的互易传播时间差 $2d\tau_i^{u_1} (i=1, \dots, N)$ 与实测的 N 条声线的互易时间差 $2d\tau_i^u$ 相同时,建立的流速拷贝场就是待求的流速场,从而反演得到流速垂直剖面数据。

经验正交函数(EOFs)分解能够简化处理复杂数据,体现出所处理数据的时间和空间规律^[12-13]。为了进一步减少反演参数个数,可采用 EOFs 函数构建拷贝场 $u_1(z)$ 。对某定点实测流速剖面数据矩阵 T , 去均值后得到一个新的矩阵 T' , 求其协方差矩阵:

$$R = \frac{1}{M} [T'(T')^T] \quad (3)$$

存在正交矩阵 E , 使矩阵 R 对角化:

$$E^T R E = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n) \quad (4)$$

则 E 矩阵正是我们需要的特征向量矩阵,第 n 列反映了流速场第 n 阶特征模态在深度上的变化,可用于构建流速拷贝场, λ_n 是对应特征值,其值的大小反映了对应第 n 阶模态在构建原流速场中的方差贡

献大小。

通过对一段时间内某垂直剖面上测量的流速数据进行 EOF 分解,获得构建流速拷贝场的向量矩阵 E , 拷贝场建立如下

$$\begin{cases} u_1(z) = u_0(z) + \Delta u(z) \\ \Delta u(z) = \sum_n \alpha_n E_n(z) \end{cases} \quad (5)$$

改变各阶 EOF 模态的系数 α_n 能够得到不同垂直结构的流速拷贝场 $u_1(z)$, 从而将反演各深度上的流速参数转变为反演各阶 EOF 模态对应的系数 α_n , 极大地减少了待反演参数个数。

为寻求最匹配系数 α_n , 通过比较由式(2)求得的拷贝场下各声线互易传播时间差与实验测量的互易时间差间差值,最小差值对应的流速拷贝场即为最匹配的流速场,因此建立描述匹配度的评价函数:

$$f(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) = \frac{1}{\sum_i [d\tau_i - d\tau_i^r(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)]^2}, \quad (i=1, \dots, N) \quad (6)$$

式中, $d\tau_i$ 是实测的第 i 条本征声线互易传播时间差, $d\tau_i^r(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$ 是拷贝场中第 i 条声线的互易传播时间差。遍历所有时间系数,当评价函数达到最大时,即认为流速拷贝场最接近真实流速场。

某条声线对应的互易传播时间差反应了该声线经过路径上海水流速的距离积分效果,当反演断面流速水平分布的不均匀性较强时,通过经典声线走时匹配反演方法难以准确获取流速分布。根据流速本身特点和反演断面流速的不均匀性,可作如下改进:

(1) 由于其矢量性特点,流速不同于温度和盐度等其他标量型海洋环境参数,在忽略上升流和下降流的情况下,水平方向上的总流速可以分为两个相互垂直的流速分量。反演得到这两个流速分量,就得到声传播断面上总流速的大小及方向。将总的互易传播时间差 $d\tau$ 进行等效分段处理,即第一方向流速分量 $u_{EW}(z)$ 引起的时间差 $d\tau_{EW}$ 和第二方向流速分量 $u_{SN}(z)$ 引起的时间差 $d\tau_{SN}$, 设两站点间的连线与第一方向的夹角为 θ , 则得到,

$$\begin{cases} d\tau_{EW} = -\frac{2}{c_0} \sum_{z=1}^M u_{EW}(z) s(z) \sin \theta \\ d\tau_{SN} = -\frac{2}{c_0} \sum_{z=1}^M u_{SN}(z) s(z) \cos \theta \\ d\tau = d\tau_{EW} + d\tau_{SN} \end{cases} \quad (7)$$

设传播时间差等效分段比例系数为 $\gamma = d\tau_{EW} / d\tau$, 并将其增设为反演参数,则式(6)的评价函数改进为,

$$f(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n, \gamma) = \frac{1}{\sum_i \{ [d\tau_{EWi} - d\tau_{EWi}^r(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)]^2 + [d\tau_{SNI} - d\tau_{SNI}^r(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n)]^2 \}} \quad (8)$$

式中, $d\tau_{EWi}^r(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$ 和 $d\tau_{SNI}^r(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n)$ 分别为流速拷贝场中第一方向和第二方向流速分量引起的互易传播时间差。

(2) 由于流速在声传播断面上的水平分布不均匀特点, 同一断面上的不同水平距离处的流场结构不同。将一个断面分成多个子断面, 每个子断面的流速对于总互易传播时间差都有贡献, 每个子断面流速引起的互易传播时间差也增加到反演参数中: 假设总互易传播时间差包含 L 个子断面上的互易传播时间差, 每个子断面的互易传播时间差中又包含两

$$f(d\tau_{EW1}, \dots, d\tau_{EWL}, d\tau_{SNI1}, \dots, d\tau_{SNI}) = \frac{1}{\sum_i [(d\tau_{EW1} - d\tau_{EW1}^r)^2 + (d\tau_{SNI1} - d\tau_{SNI1}^r)^2 + \dots + (d\tau_{EWL} - d\tau_{EWL}^r)^2 + (d\tau_{SNI} - d\tau_{SNI}^r)^2]} \quad (10)$$

当评价函数值最大时, 得到最优的距离分段点和最优的时间差分段点, 进而反演得到各个子断面的第一方向和第二方向的垂直剖面流速。

2 实验及观测数据介绍

2010年7月25~26日, 国家海洋局第二海洋研究所与中国海洋大学在青岛胶州湾联合进行了浅海声层析实验, 测量站点见图1, 布设了C1~C7七个声层析站位, 为便于反演和比测, 另外布设了M0~M3四个船载锚定式ADCP测流仪, 进行定点流速测量, 并沿C2C7、C5C3和M0C2断面采用船载ADCP进行流速测量。在C1~C7站点水下3m处安装有收发合置水声换能器, 每隔3min发射载波频率为5000Hz的伪随机序列声信号。

经过20h的测量和数据采集, 在C1、C2和C3站点获得了较好的互易传输声信号, 可用于反演C1C2, C1C3和C2C3断面的流速。但受胶州湾复杂的海底地形和夏季湾内存在锋面影响, 其余四个声层析站位未接收到声信号。因C1C2, C1C3和C2C3三个断面位于胶州湾内湾口, 可通过声学数据反演获得湾口位置的流速结构变化。

实验期间在C7站位同步布设了一个海底锚定温深仪, 图2为测量时段内的水位变化情况, 可见声层析实验经历了一个完整的半日潮。湾口位置的涨潮时长短于落潮时长, 测点处水位落差为3m左右。

图3为实验期间在湾口位置采用CTD测的温度

个方向流速分量引起的互易传播时间差 $d\tau_{EW}$ 和 $d\tau_{SN}$, 则式(7)改进为:

$$d\tau_{EWi} = -\frac{2}{c_0^2} \sum_{z=1}^M u_{EWi}(z) s_l(z) \sin \theta$$

$$d\tau_{SNI} = -\frac{2}{c_0^2} \sum_{z=1}^M u_{SNI}(z) s_l(z) \cos \theta \quad (9)$$

$$d\tau = \sum_{l=1}^L (d\tau_{EWi} + d\tau_{SNI})$$

将 $d\tau_{EWi}$ 、 $d\tau_{SNI}$ 和 $s_l(z)$ 增设为反演参数, 则评价函数改进为:

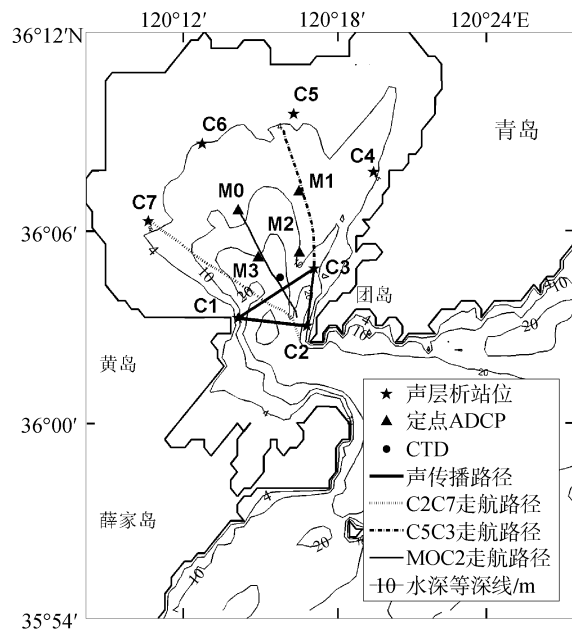


图1 胶州湾实验站点和走航路线图

Fig. 1 Site location of the Jiaozhou Bay experiment

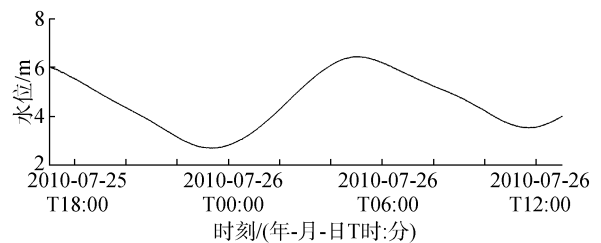


图2 实验期间胶州湾水位图

Fig. 2 Time series showing changes in sea level during the experiment

和盐度的垂直剖面变化图(该测点位于声层析站位 C1、C3 连线中间位置附近, 具体位置见图 1, 测量时间为 7 月 26 日 13:35 左右), 可见在 15 m 以下水层温度和盐度几乎不随深度增加而改变, 15 m 以上水层温度随深度增大而减小, 这主要是受夏季昼间日照影响, 而盐度随深度增加而增大, 则是受胶州湾北部各河流流入淡水影响。在湾口附近, 因潮流流速较大, 且存在多个涡旋, 海水混合强烈, 温盐水平分布差异不大, 因此本文声传播数值模拟及反演中采用上述测点得到的温盐数据。且 15 m 以下水层温盐几乎不变, 水深大于 25 m 时对应温盐值采用 25 m 水层处数据。通过射线声传播模型进行数值模拟, 可得到本征声线路径(如图 4 所示), C1、C2 间存在三条本征射线, 其到达时间可用于辨别实测声信号中的多途峰值及其对应到达时间范围。

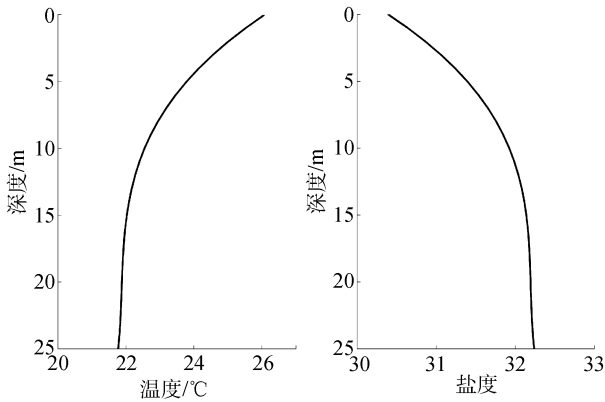


图 3 实验期间胶州湾口温度和盐度垂直剖面图

Fig. 3 Temperature and salinity vertical profile throughout experiment period

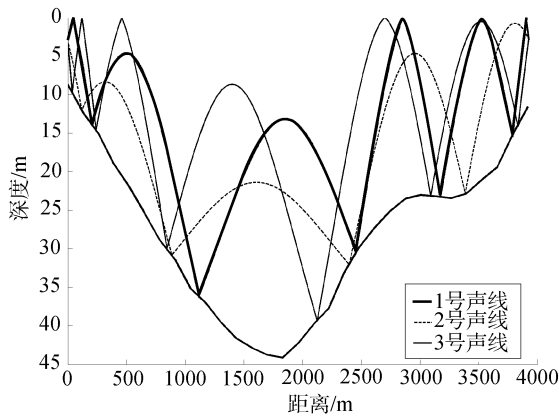


图 4 C1C2 断面本征声线

Fig. 4 Eigenrays along the C1C2 section

图 5 为 7 月 26 日 1:00 到 2:00 间 C1 站点和 C2 站点相互发射和接收到的到达声信号相关波形瀑布图

图。在信号到达时, 大部分时间点均存在明显的三个较大峰值, 每个峰值对应一条本征声线信号到达, 而峰值在到达时间上的扰动, 则主要是受水体温盐、流速变化以及船舶位置漂移影响。

图 6a 为 M2 站点定点 ADCP 测流仪获取的垂直剖面南北流速数据(向北为正, 向南为负), 测量的流

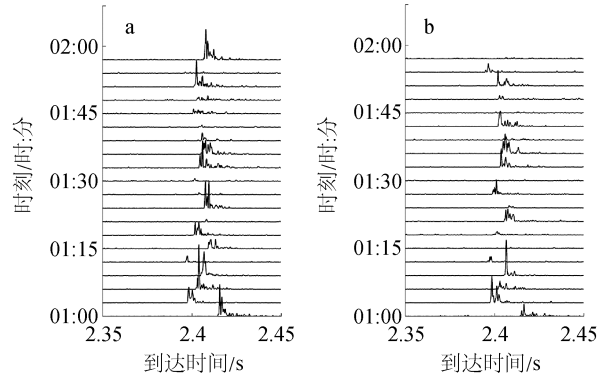


图 5 C2 站点接收的 C1 站点(a)和 C1 站点接收的 C2 站点(b)声信号瀑布图

Fig. 5 Stack diagram of received signal at (a) St.C2 transmitted from St.C1 and (b) at St.C1 transmitted from St.C2

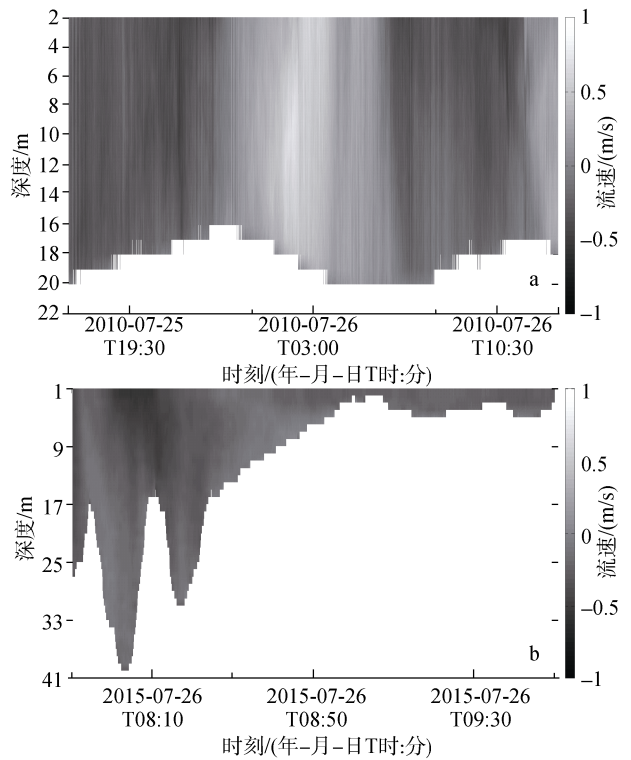


图 6 M2 站点 ADCP(a)和 C2C7 断面走航 ADCP(b)测量的南北流速图

Fig. 6 North-south component of current measured by (a) mooring ADCP at St.M2 and (b) shipboard ADCP along the C2C7 section

速有效深度会因水位的变化而变化,其变化趋势与图 2 的水位变化几乎一致;且可见流速变化与涨落潮时间有关,在涨潮时流速向北,落潮时流速向南,涨落潮的平潮时间流速大小到达最大值,涨潮时流速最大值大于落潮时的流速最大值。

图 6b 为 C2 至 C7 间船载走航 ADCP 测流仪获取的流速垂直剖面南北分量结果,测量时间为 7 月 26 日 7:50~9:50,流速变化与水平位置有关,在湾口附近流速存在较大的垂直梯度,而在湾内流速垂直梯度几乎为零。

通过对定点 ADCP 流速数据进行 EOF 分解(如图 7 所示),可获取声层析反演中构建流速拷贝场的各阶垂直向量。第一阶 EOF 是主成分,代表正压流分量,描述流速深度平均值的大小,第二阶和第三阶 EOF 代表斜压流分量,描述流速随深度的变化。流速东西和南北分量的 EOF 分析结果十分相似,前三阶 EOF 占总方差比重达到 95%以上,因此反演中使用前三阶 EOF 描述流速深度变化。根据文献[1-3]等的胶州湾潮流场结构分布研究成果及所获取的流速观测数据,各声层析断面流速反演时所采用的 EOF 模式来自于其邻近定点 ADCP 数据分析结果,其中 C1C3、C2C3 断面采用 M2、M3 站位数据分析结果,C1C2 断面则采用 2010 年 11 月在 C1 站位附近获取的定点 ADCP 观测数据分析结果。

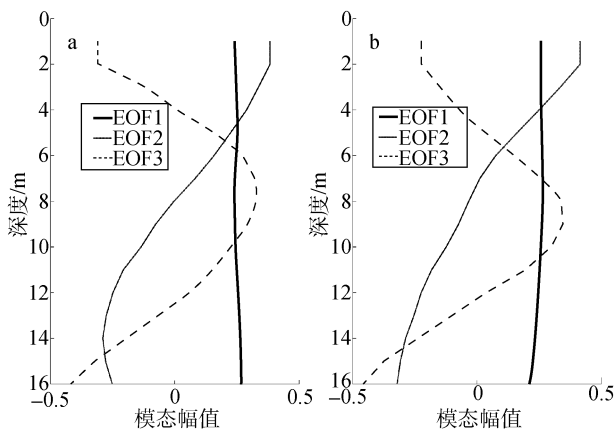


图 7 M2 站位流速东西分量(a)和南北分量(b)的前三阶 EOF 向量

Fig. 7 First three EOFs of (a) eastward component and (b) northward component of current at St.M2

3 流速反演结果和误差分析

采用前面介绍的反演算法,对 C1C2 断面,C1C3 断面和 C2C3 断面水平流速进行声学反演计算,将海

水流速方向分为东西和南北方向分量(本文中东西流速分量反演结果以向东为正,南北流速分量反演结果以向北为正)。

3.1 距离未等效分段反演

C1C2 断面位于团岛至黄岛一线的湾口位置,反演结果反映湾口流速结构变化特点,并便于计算湾口流量。

图 8 是 C1C2 断面未考虑距离等效分段的流速垂直分布反演结果,由结果可见东西分量幅值要远小于南北分量幅值,在涨潮期间,南北流速朝向北,流速方向在涨潮和落潮期间相反。C2C7 段船载 ADCP 走航路径经过 C1C2 断面,通过 GPS 数据,将走航路径与断面交叉处时段的走航 ADCP 实测流速与反演流速对比,结果如图 9 所示。

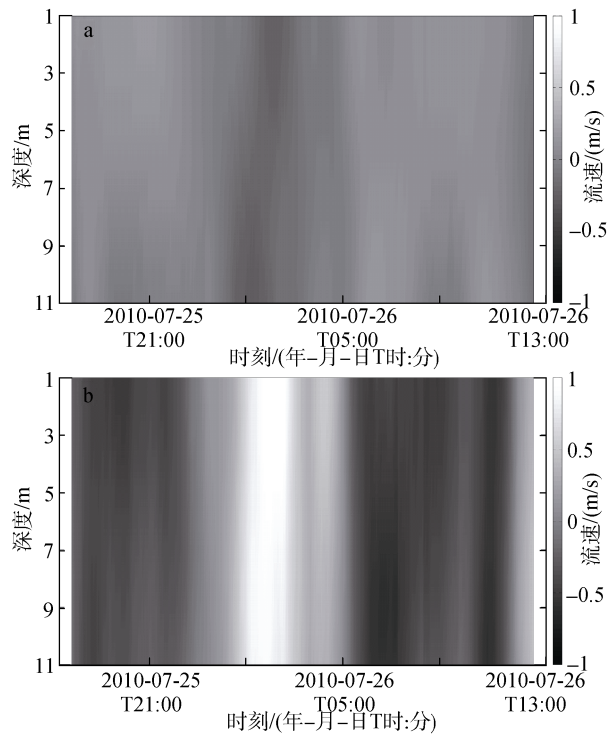


图 8 C1C2 断面反演流速东西分量(a)和南北分量(b)时间变化图

Fig. 8 Variation in (a) eastward component and (b) northward component of inversion current along the C1C2 section

反演流速尤其是东西分量在深度上的变化趋势与实测流速基本相同,但是有一定的偏差值,东西分量偏差小于南北分量偏差。C1C2 断面反演流速东西分量垂直分布与 ADCP 实测流速间的平均误差为 0.022 m/s,相关系数为 0.825;而对南北分量而言,对应平均误差为 0.050 m/s,相关系数为 0.247,这主

要是因为断面上流速水平分布不均匀的结果,在以下反演中将考虑其影响。

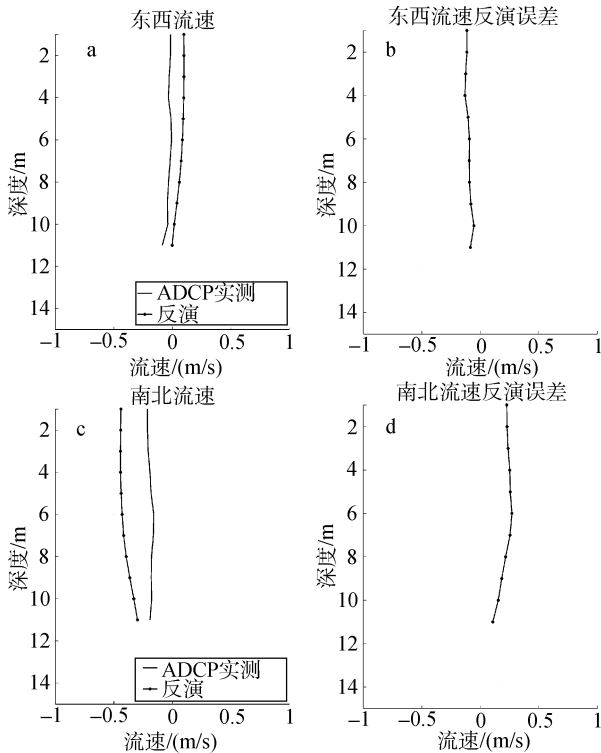


图9 C1C2断面反演流速与实测流速东西分量(a, b)和南北分量比较(c, d)

Fig. 9 Comparison between the inversion results and the measurements along the C1C2 section for (a, b) eastward component of current and (c, d) northward component of current

3.2 距离等效分段反演

将C1C2断面分为两个等效子断面,将最优距离分段点位置参数加入到反演参数中,采用遍历法寻找最优解, C1C2断面中邻近C1站位子断面的东西和南北分量垂直剖面反演结果见图10,邻近C2站位子断面的反演结果见图11。

在C1C2断面,因为湾口朝向为南北方向,潮流涨潮落潮时从湾口涌入或涌出,流速东西分量的变化幅值要小于南北分量的变化幅值。两个子断面的流速有着明显区别,邻近C1站位子断面与邻近C2站位子断面的流速变化在时间上并不同步,邻近C2站位子断面的流速南北分量在涨潮期间的转向要早于邻近C1站位子断面,且落潮最大流速大于涨潮最大流速,与邻近C1站位子断面正好相反;邻近C1站位子断面的流速东西分量在涨潮期间的转向略早于邻近C2站位子断面;涨潮期间邻近C2站位子断

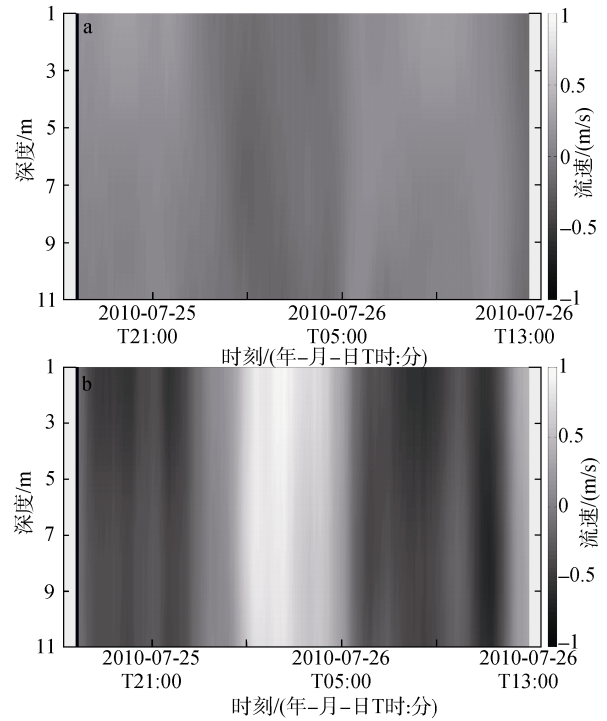


图10 邻近C1站位的子断面反演流速东西分量(a)和南北分量(b)垂直分布时间变化图

Fig. 10 Variation of (a) eastward component and (b) northward component in the vertical profile of inversion current for the subsection near St.C1 along the C1C2 section

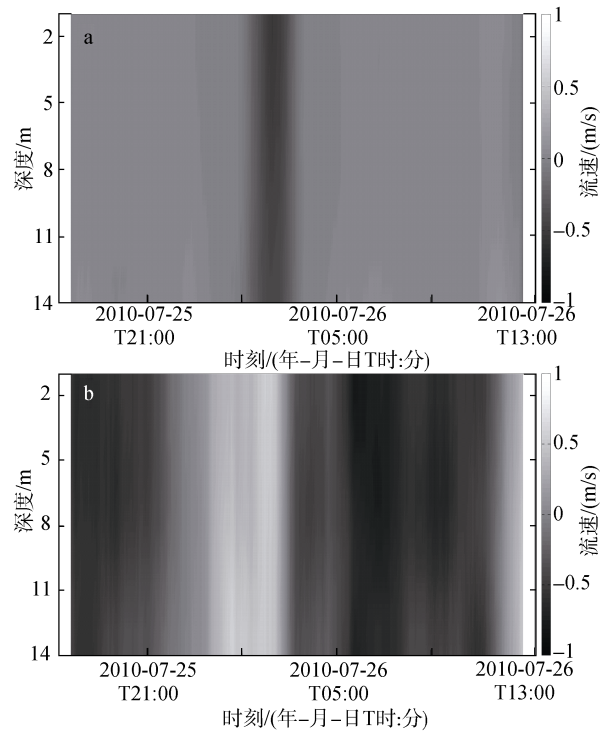


图11 邻近C2站位的子断面反演流速东西分量(a)和南北分量(b)垂直分布时间变化图

Fig. 11 Variation of (a) eastward component and (b) northward component in the vertical profile of inversion current for the subsection near St.C2 along the C1C2 section

面的流速南北分量最大值出现时段早于东西分量。

C2C7 段船载 ADCP 走航路径与 C1C2 断面的交叉点距离 C1 站位 2960 m, 此时刻反演得到的最优距离分段点距离 C1 点为 2400 m, 交叉点位于邻近 C2 站位子断面中, 使用该子断面的反演流速与 C2C7 段实测 ADCP 走航流速进行比较, 如图 12 所示。

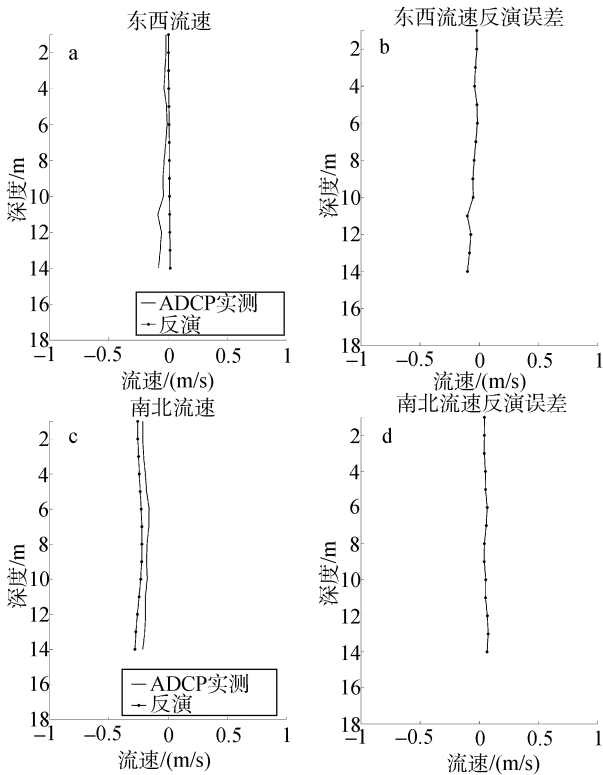


图 12 C1C2 断面反演流速东西分量(a, b)和南北分量(c, d)与 ADCP 实测结果比较

Fig. 12 Comparison between the inversion results and the measurements along the C1C2 section for the (a, b) eastward component of current and (c, d) northward component of current

与图 9 中未考虑距离等效分段的反演结果相比, 采用等效距离分段后 C1C2 断面反演的流速垂直分布尤其是南北分量更加接近于 ADCP 实测结果, 两者间偏差值进一步缩小。反演东西分量与 ADCP 实测流速的平均偏差为 0.019 m/s, 相关系数为 0.852, 两者间在深度上的变化趋势更为接近, 相关性略增强, 偏差更小; 南北分量的平均偏差为 0.011 m/s, 相关系数为 0.911, 两者间垂直变化趋势基本相同, 相关程度得到极大提高, 且偏差也大大减小, 反演结果更加准确。可见使用距离等效分段后的反演结果与实测流速更为接近, 更能反映流速在水平距离上的不均匀性。

为进一步说明结合距离等效分段的反演方法的优点, 对 C1C3 断面反演进行分析。C1 点位于青岛附近的湾口位置, C3 点位于湾内东岸位置, 能够反演湾内和湾口的流速差异以及胶州湾东岸和西岸的流速差异。C1C3 断面距离未等效分段反演结果如图 13。反演结果显示 C1C3 断面流速南北分量变化幅值较东西分量大; 在涨潮时, C1C3 断面平均流速东西分量朝东, 南北分量朝北, 落潮时则相反。

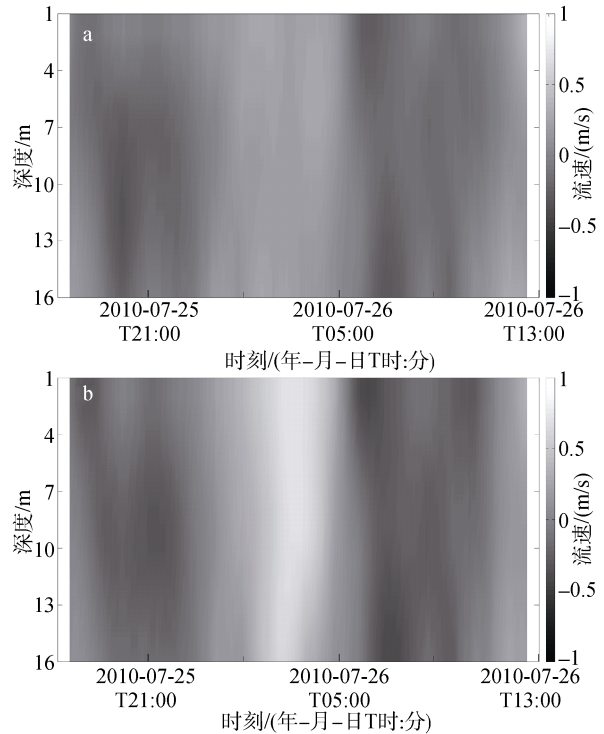


图 13 C1C3 断面反演流速东西分量(a)和南北分量(b)垂直分布变化图

Fig. 13 Variation in (a) eastward component of current and (b) northward component of current along the C1C3 section

采用距离等效分段反演算法, 将 C1C3 分为两个子断面, 计算两个子断面的东西流速和南北流速, 如图 14 和图 15 所示。

从分段反演结果中看出, C1C3 断面两个子断面的流速变化有明显差异: 邻近 C1 站位子断面的流速东西分量在涨潮时流向西, 与邻近 C3 站位子断面相反, 因为 C3 和 C1 点分别位于胶州湾东岸和西岸, 表明潮流流入湾口后通潮通道影响, 分别向东、西向流动; 邻近 C1 站位子流速南北分量幅值变化大于邻近 C3 站位子断面, 这主要是由于 C1 站位子位于湾口, 湾口窄湾内宽, 海流在湾口处流速大。距离等效分段反演的结果体现了 C1C3 断面流速水平分布不均匀特点, 更符合胶州湾流场规律。

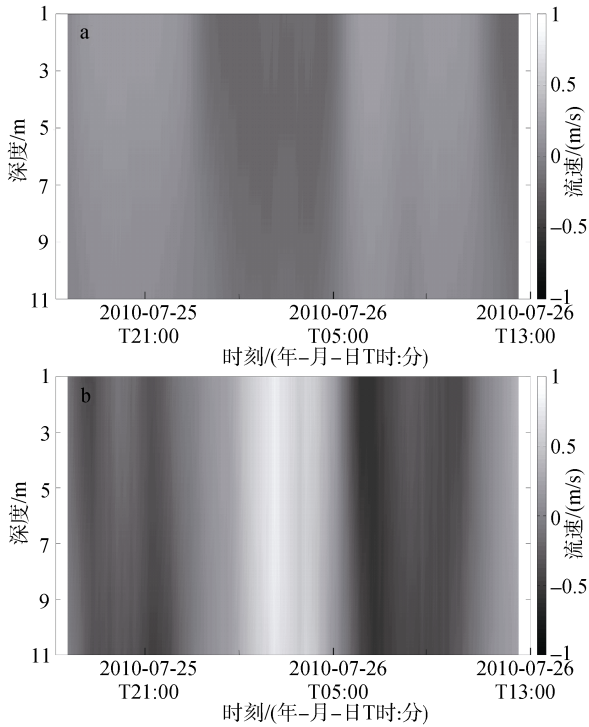


图 14 C1C3 断面邻近 C1 站位子断面的反演流速东西分量(a)和南北分量(b)变化图

Fig. 14 Variation of (a) eastward component and (b) northward component in the vertical profile of the subsection near St.C1 along the C1C3 section

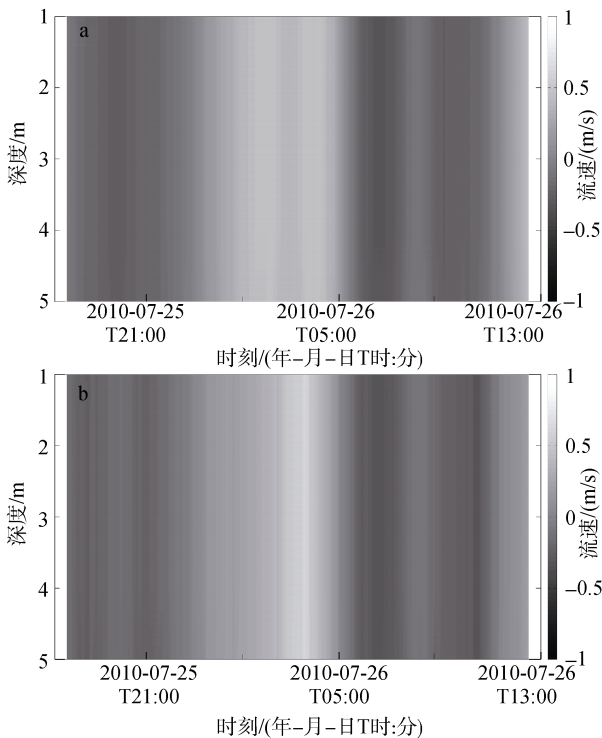


图 15 C1C3 断面邻近 C3 站位子断面的反演流速东西分量(a)和南北分量(b)变化图

Fig. 15 Variation of (a) eastward component and (b) northward component in the vertical profile of the subsection near St.C3 along the C1C3 section

C2C7 段车载 ADCP 走航路径与 C1C3 断面的交叉点的位置距离 C1 站位 1707 m, 反演的最优距离分段点为距离 C1 站位 3900 m, 所以将邻近 C1 站位子断面的距离等效分段和 C1C3 断面距离未等效分段反演结果与实测流速进行比较, 如图 16 所示。

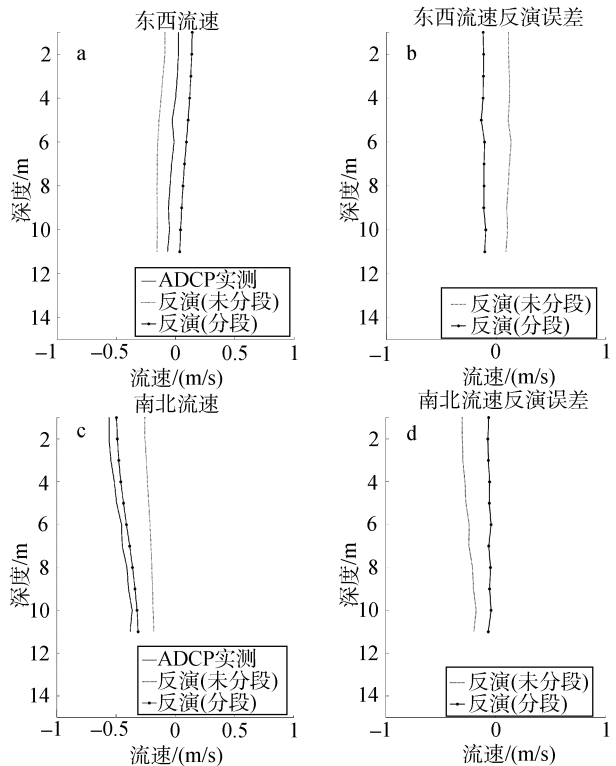


图 16 C1C3 断面反演流速东西分量(a, b)和南北分量(c, d)与 ADCP 实测结果比较

Fig. 16 (a, b) Eastward component, and (c, d) northward component of inversion current compared with ADCP observations

等效分段反演流速东西分量与实测流速的平均偏差为 0.010 m/s, 相关系数为 0.969, 南北分量的平均偏差为 0.010 m/s, 相关系数为 0.992, 未等效分段反演流速东西结果与实测流速的均方误差为 0.025 m/s, 相关系数为 0.882, 南北分量的均方误差为 0.034 m/s, 相关系数为 0.657。可见等效分段反演后的结果与实测流速更为接近, 精确度提高, 很好的体现流速水平不均匀特点。

4 水平流场和流量变化分析

有前述流速垂直分布反演结果可见, 除了在涨潮和落潮流速最大值出现时段附近流速东西和南北分量存在略大的垂直梯度, 在其余时段垂直深度上变化不大。为更直观的观察胶州湾口的流场变化, 取

流速在深度上的平均值, 将 C1C2 断面, C1C3 断面和 C2C3 断面流速反演结果画成流速水平矢量图。7 月

26 日 3:00~8:00 间涨潮期、平潮期、落潮期胶州湾口水平流速矢量图如图 17 所示。

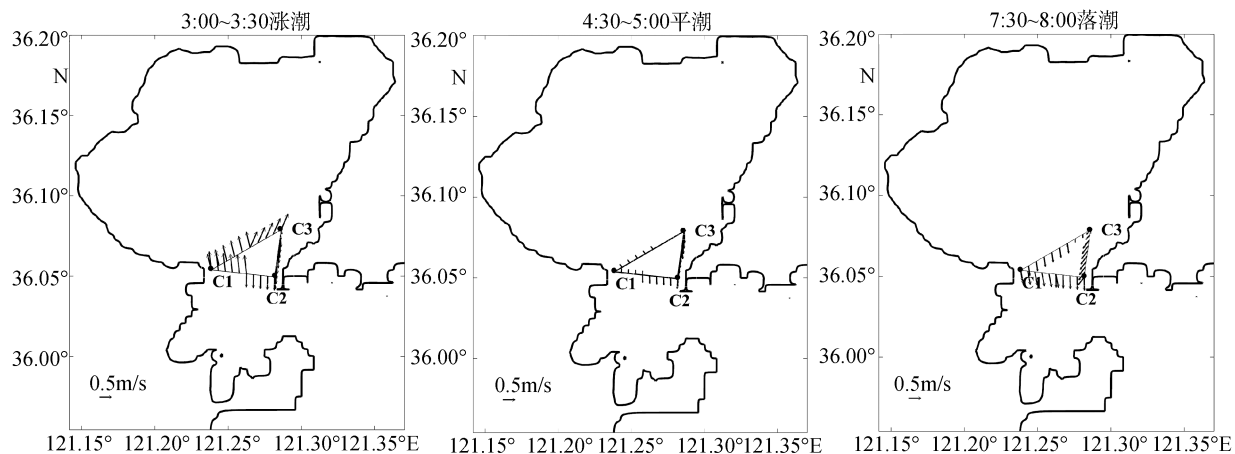


图 17 胶州湾口涨潮、平潮和落潮时反演流速矢量图

Fig. 17 Vector plot of inversion current during flood tidal, slack tidal, and ebb tidal stages at the mouth of Jiaozhou Bay

在涨潮中间时刻往后, 胶州湾口形成一顺时针涡旋^[2-3], 在黄岛附近, 海水流入胶州湾, 在团岛附近, 海水流出胶州湾, 在文献[2]中的大潮期间的数值模拟和实际 ADCP 测量结果中, 团岛至黄岛湾口位置处稳定的涡旋现象持续近 2 h, 与本文中反演结果相同。

进入涨潮后的平潮阶段即转流阶段, 湾口西岸海域的流速流向湾内并基本接近零, 团岛附近的流速流出湾外并且也适量减小。实验结果与文献[2]中的数值模拟和实测结果相同。

进入落潮, 3 个断面的流速都流向湾外, 没有明显的部分海域流速提前逆转的现象, 也没有涡旋出现。与文献[7]中大潮落潮时段内数值模拟和实测结果相似。

通过 C1C2 断面距离等效分段流速反演结果求出实验阶段流过 C1C2 断面的流量变化(图 18), 规定海水流入时流量为正, 流出为负。由反演结果可见, 大潮期间通过胶州湾口最大涨潮流量 $11 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$, 最大落潮流量为 $8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$, 与文献[2]中实测的大潮期间流量范围(-8×10^4 至 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$)大致相同。落潮期间流量有明显的抖动, 即在落潮中间时刻, 流量减小, 之后又增大的现象, 与文献[2]中的模拟和实测结果相同。对比 C1C2 断面流速反演结果, 在落潮时间内, 南北流速和东西流速存在流速值减小的现象, 造成落潮流量的抖动现象。

5 结论

与传统的锚定或船载测流方式相比, 声层析方

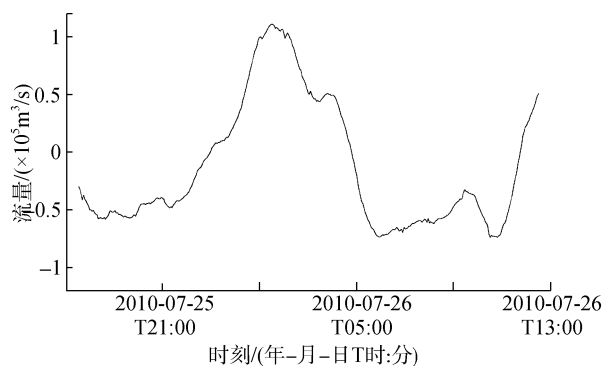


图 18 C1C2 断面流量变化图

Fig. 18 Time series of inversion current transport at the C1C2 section

法仅需布设较少数量的声学站位, 即可获得大范围的复杂流场垂直和水平分布, 适合于港湾、航道等浅海海洋环境监测。本文在传统的射线走时声层析反演方法中引入经验正交函数, 使用匹配方法, 针对流场水平不均匀特性, 结合距离等效分段方法, 反演胶州湾流场的垂直和水平变化, 得到以下结论: (1)对断面距离等效分段, 并考虑流速两个垂直分量的等效影响, 可获得子断面流速变化。与距离不等效分段反演流速比较, 等效分段反演结果更接近实测流速, 适合于处理流场水平分布不均匀的场合。(2)利用胶州湾口 3 个断面声层析数据获得流速场的垂直和水平分布, 可见涨潮期间湾口位置团岛边涡流的出现; 得到大潮期间湾口的流量在 $8 \times 10^4 \sim 11 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$, 涨潮流量大于落潮流量。与文献中观测数据吻合。

致谢: 感谢国家海洋局第二海洋研究所吴清松、廖光洪、樊孝鹏、张传正、李博、骆鹏参加了海上实验工作。感谢两位评审专家专业性的评审意见。

参考文献:

- [1] 国家海洋局第一海洋研究所. 胶州湾自然环境[M]. 北京: 海洋出版社, 1984.
First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration. Natural Environment of the Jiaozhou Bay[M]. Beijing: China Ocean Press, 1984.
- [2] 乔贯宇. 通过 POM 模式对胶州湾纳潮量的数值模拟研究[D]. 青岛: 国家海洋局第一海洋研究所, 2008.
Qiao Guanyu. Numerical modal research of storage capacity for tidal water of the Jiaozhou Bay by POM[D]. Qingdao: First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, 2008.
- [3] 吕新刚, 赵昌, 夏长水. 等. 胶州湾水交换及湾口潮流余流特征的数值研究[J]. 海洋学报, 2010, 32(2): 21-29.
Lü Xingang, Zhao Chang, Xia Changshui, et al. Numerical study of water exchange in the Jiaozhou Bay and the tidal residual currents near the bay mouth[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2010, 32(2): 21-29.
- [4] 边淑华, 夏东兴, 李朝新. 胶州湾潮汐通道地貌体系[J]. 海洋科学进展, 2005, 23(2): 144-151.
Bian Shuhua, Xia Dongxing, Li Chaoxin. Geomorphologic system in the Jiaozhou Bay tidal inlet[J]. Advances in Marine Science, 2005, 23(2): 144-151.
- [5] 杨世伦, 孟翊, 张经, 等. 胶州湾悬浮体特性及其对水动力和排污的响应[J]. 科学通报, 2003, 48(23): 2493-2498.
Yang Shilun, Meng Yi, Zhang Jing, et al. Characteristics of suspended particles and its response to hydrodynamics and pollution discharge in the Jiaozhou Bay[J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(23): 2493-2498.
- [6] 吴玉霖, 孙松, 张永山. 环境长期变化对胶州湾浮游植物群落结构的影响[J]. 海洋与湖沼, 2005, 36(6): 487-498.
Wu Yulin, Sun song, Zhang Yongshan. Long-term change of environment and it's influence on phytoplankton community structure in Jiaozhou Bay[J]. Oceanologia Etlimnologia Sinica, 2005, 36(6): 487-498.
- [7] 刘哲. 胶州湾水体交换与营养盐收支过程数值模型研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2004.
Liu Ze. Research on modelling water exchange and nutrient budget in Jiaozhou Bay[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2004.
- [8] Munk W H, Wunsch C. Ocean acoustic tomography, A scheme for large scale Monitoring [J]. Deep Sea Research Part A: Oceanographic Research Papers, 1979, 26(2): 123-161.
- [9] Shang E C. Ocean acoustic tomography based on adiabatic mode theory[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1989, 85: 1531-1537.
- [10] 廖光洪, 朱小华, 林巨, 等. 海洋声层析观测技术和方法[J]. 海洋学报, 2010, 32(3): 14-22.
Liao Guanghong, Zhu Xiaohua, Lin Ju, et al. Observation technology and methods of ocean acoustic tomography[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2010, 32(3): 14-22.
- [11] 朱芸, 吕连港. 海洋声层析的基本原理和应用[J]. 海洋科学进展, 2002, 20(4): 70-75.
Zhu Yun, Lü Liangang. Basic principle and application of ocean acoustic tomography[J]. Advances in Marine Science, 2002, 20(4): 70-75.
- [12] Janice D B, Eileen P K, Pavel P. Estimation of EOF expansion coefficients for incomplete data[J]. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 1994, 41: 1479-1488.
- [13] 张立峰, 许建平, 何金海. 热带太平洋次表层三维海温距平场的 EOF 分析[J]. 海洋学研究, 2008, 26(3): 36-42.
Zhang Lifeng, Xu Jianping, He Jinhai. EOF analysis of three-dimensional subsurface temperature anomaly field of the tropical Pacific Ocean[J]. Journal of Marine Sciences, 2008, 26(3): 36-42.
- [14] 孙军平. 等效声速剖面的反演研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.
Sun Junping. The inversion of equivalent sound speed profiles[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010.

Determination of inversion current field in the Jiaozhou Bay based on coastal acoustic tomography data

LIU Xu-dong¹, LIN Ju¹, WANG Huan¹, ZHU Xiao-hua²

(1. College of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, China)

Received: May, 10, 2013

Key words: ray time-of-flight acoustic tomography; empirical orthogonal function; matching field method; subsection-equivalent method; the Jiaozhou Bay

Abstract: Based on coastal acoustic tomography data, the ray time-of-flight acoustic tomography method is combined with the matching field method and empirical orthogonal function analysis to invert the current field along three sections. The inversion method is improved using the subsection equivalent method to invert the vertical and horizontal distributions of the current in a current-range-dependent case. The deviation between the inversion results and the current measurements are considerably reduced compared with the use of the traditional inversion method; the average deviation is below 0.02 m/s, and the correlation coefficient of current vertical profile is increased to over 0.85. According to the inversion results, the current field in the acoustic experiment domain near the mouth of the Jiaozhou Bay is analyzed, and the transport volume is calculated. The results show that the modified ray time-flight acoustic tomography method can be applied to monitor current fields that have a range-dependent horizontal distribution, and the large-scale three dimensional information of the complicated current field can be obtained by deploying a small number of acoustic stations, which are useful in the studies of coastal marine resource exploitation, marine environment conservation, and shipping traffic safety.

(本文编辑: 刘珊珊)