北黄海定点连续观测站海流资料分析*

庄 园 刘子洲 翟方国①

(中国海洋大学海洋与大气学院 青岛 266100)

摘要 本文利用 2009 年 6 月至 11 月期间的 ADCP 海流资料,研究了獐子岛附近一个固定观测点处的时间平均流及潮流特征。结果表明, 该海区的平均流大致沿等深线方向, 从黄海流向渤海, 整个观测期间纬向平均流大于经向平均流, 经向 1m 宽度范围内的纬向净水体输运量为 0.67m³/s, 而纬向 1m 宽度内的经向净水体输运量为 0.16m³/s; 垂向上可以 15m 和 47m 为节点分为三层, 15m 大致为温跃层深度, 而 47m 以下为底摩擦影响显著的范围。夏季的温盐层化结构对于余流的垂直分布存在显著影响。潮流调和分析表明, 该海区的潮汐类型为正规半日潮, M_2 和 K_1 分潮在整个深度范围内的平均振幅分别为 27.9cm/s 和 9.2cm/s, 半日潮流由表及底均为旋转流, 而全日潮流更趋向于往复流。在垂向上, 各个分潮的潮流椭圆均随深度发生小幅度的旋转, 半日潮流椭圆随深度逆时针旋转, 倾角变化小于 30°, 全日潮流椭圆随深度顺时针旋转, 倾角变化小于 40°。潮流在近底层受到底摩擦的影响十分显著, 其中全日潮流受到底摩擦的影响较半日潮流大。本次观测是进一步研究北黄海区域潮流、近惯性流动与水体交换输运的直接参考, 其结果加深了对该区域流场特性的认识和理解。

关键词 北黄海; 潮流; 调和分析; 垂直模态

中图分类号 P717 doi: 10.11693/hyhz20170100001

黄海位于太平洋西部边缘, 中国大陆和朝鲜半岛之间, 平均水深 44m, 是一片半封闭的海域。以成山头和朝鲜长山串的连线为界, 黄海可划分为南北两部分, 分别为南黄海和北黄海。黄海的中央略偏东处存在一片狭长的水下洼地, 被称为黄海海槽, 该海槽呈不对称的“V”字形, 东面地势较陡而西面较平缓。受东亚季风的影响, 黄海的风场、水文结构与环流等均具有明显的季节变化特征: 冬季与夏季截然不同, 春季和秋季则为转换期(郭炳火, 1993)。在冬季, 黄海海面上盛行偏北风, 风力较大, 对流混合与风力搅拌使混合层加深, 尤其是在近岸浅海区域混合层可直达海底。该季节黄海环流的一个重要特征是在海区中部存在一支逆风而上、高温高盐的海流——黄海暖流, 该海流基本沿着海区中部的黄海海槽北上, 流轴略偏向海槽西侧, 进入北黄海后转向西可流入渤海。黄海暖流区域会存在微弱的跃层(Lin *et al*, 2011)。黄海两侧的沿岸区域均存在顺岸南下的沿岸流, 包括海区北部的辽南沿岸流, 海区西部的鲁北沿岸流和苏北沿岸流, 以及海区东部的朝鲜沿岸流(韦钦胜等, 2011)。在夏季, 黄海海面上的风力较弱, 风对海洋上层的搅拌作用有限, 且由于太阳辐射增强海表吸热增温使得对流混合消失, 因此该季节海水的混合主要依靠潮流作用, 浅水区混合均匀, 而较深水区则出现显著层结。研究表明, 整个黄海在夏季除沿岸浅水区外均出现强盛的温、盐跃层, 尤其是中部的海槽区域, 下层水体保留着冬季水的特性, 形成庞大的冷水团(赫崇本等, 1959)。该冷水团可在黄海表层诱生出大尺度的气旋式环流(苏纪兰, 2001)。前人的研究指出, 黄海大部分海区以半日潮为主, 潮流以逆时针旋转为主, 海区内存在 2 个 M_2 半日分潮的无潮点, 分别位于成山角外和苏北浅滩北部(于华明, 2008; 朱学明, 2009)。

* 国家自然科学基金项目, 41476002 号; 国家重点研发计划项目, 2016YFC1402304 号; 山东省重点研发计划项目, 2016ZDJS09A02 号。庄园, 硕士研究生, E-mail: zhuangyuan1108@126.com

① 通讯作者: 翟方国, 硕士生导师, 副教授, E-mail: gfzhai@ouc.edu.cn

收稿日期: 2017-01-03, 收修改稿日期: 2017-03-01

虽然前人已经对黄海的水文结构、环流与潮流等方面做了许多研究工作(修日晨等, 1989; 缪经榜等, 1989; 臧家业等, 2001; 魏泽勋等, 2003; Niwa *et al*, 2001; Ichikawa *et al*, 2002), 但是这些工作大部分都是基于模式输出或是少量的大面与断面观测结果, 而基于海流观测资料, 特别是在固定点获得的长期连续观测资料的研究较少(于华明等, 2008;鲍献文等, 2010)。本文拟利用 2009 年 6 月—11 月在獐子岛附近获得的长期连续海流观测资料, 分析该海域海流和潮流的时间变化和垂向结构特征。

1 资料与方法

本文分析的资料为利用锚定浮标悬挂的 ADCP 所观测得到的海流资料, 浮标位置为 38°45′N, 122°45′E, 如图 1 中红星所示。观测的时间范围为 2009 年 6 月 3 日 12:00 至 2009 年 11 月 20 日 16:00, 采样的时间间隔为 1h。观测的深度范围为 5m 到 53m, 共 25 层, 每层的间隔为 2m。在分析前, 作者根据 ADCP 的工作参数以及当地的实际流速特征值对原始流速进行质量控制, 由于当地流速一般不超过 1m/s, 因此大于这个阈值的流速视为奇异值进行剔除, 仪器观测误差为±1cm/s。对于部分时次存在的缺测进行线性插值, 插值前后对比分析显示差异不大。

本文首先分析了整个观测期间的平均流、标准差, 逐月平均流、标准差以及日平均流特征; 其次运用功率谱分析的方法, 讨论了流动中存在的主要显著周期; 然后通过潮流的调和分析对潮流特征进行了研究; 最后对海流数据进行了 EOF 分解, 探讨了该处海流的垂向模态特征。

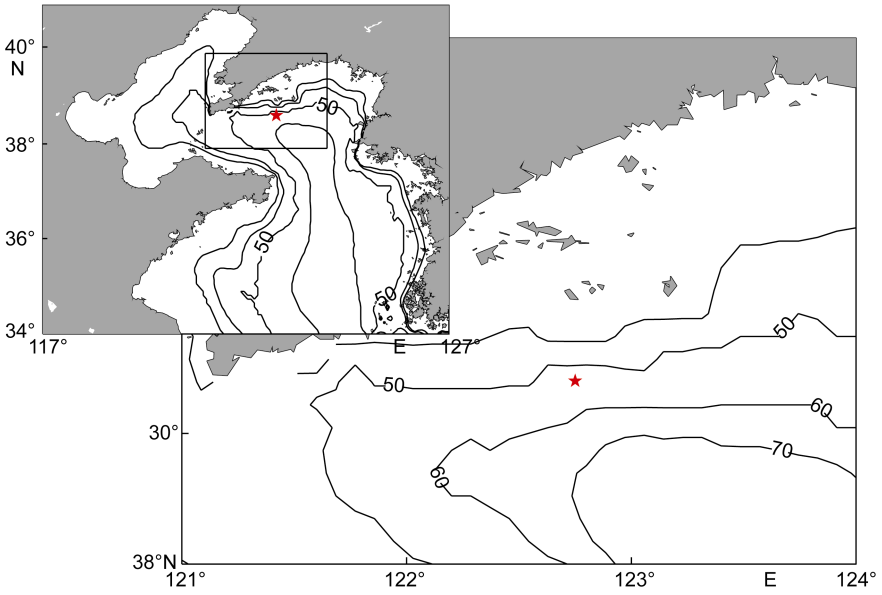


图 1 黄海地形图(红色星号为观测点)

Fig.1 Topography of the Yellow Sea and location of the observation site

2 流速特征

2.1 平均流特征

为了描述观测点附近海流的平均流动特征, 本文从整个观测期间平均、月平均和日平均三个时间尺度上进行了分析。

对原始流速进行 48h 低通滤波去掉潮流后, 再对余流场进行时间平均, 于是得到了整个观测期间的平均余流(见图 2)。图 2a 显示了整个观测期间的平均余流随深度的分布, U、V 分别指纬向流与经向流, 纬向流和经向流呈现完全不同的垂向结构。纬向流在整个深度范围内基本为西向流, 而仅在 45—49m 为东向流, 通过计算可得整层水体在 1m 经向宽度内的净水体输运量向西为 0.67m³/s。与纬向流不同, 经向流在 10—35m 的深度范围内为北向流, 而在其他深度为南向流, 计算可得整层水体在 1m 纬向宽度内的净水体输运量向南为 0.16m³/s。因此, 整层水体的净流动方向为偏西向, 与 50m 等深线走向(指向渤海方向)基本一致。

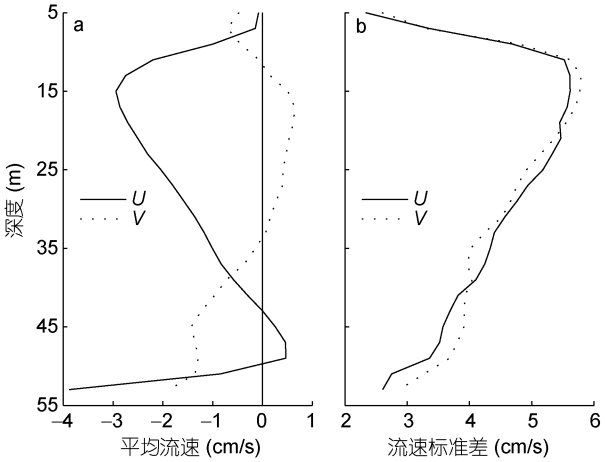


图 2　观测期间平均流和流速标准差的垂向分布
Fig.2　Vertical distribution of the mean current velocity and standard deviation during the whole observation period

按照平均流的垂向分布特征, 可将整个水体自上而下分为三层: 上层为 5—15m, 中层为 15—47m, 底层为 47—53m, 根据一个准同时同地的水文观测结果可知, 15m 大致为温跃层深度(尹洁慧, 2013)。上层纬向流向西, 且强度随深度增加而增大, 在 15m 达到最大为 2.94cm/s; 经向流在近表层为南向流, 随深度增加逐渐减小转变为北向流, 且流速在 17m 附近达到最大为 0.64cm/s。中层纬向流向西, 流速随深度增加逐渐减小并在 45m 附近转变为东向流, 东向流在 47m 附近达到最大为 0.47cm/s; 同时, 中层经向流向北, 流速随深度增加逐渐减小, 在 35m 附近转变为南向流。底层纬向流向西, 经向流向南, 且两者均随深度增加逐渐增大, 最大流速分别为 3.88cm/s 和 1.87cm/s。由于南向流远小于西向流, 所以底层净流动方向为偏西向, 关于这支流动, 后文将继续分析。作者计算了不同深度余流的标准差, 结果如图 2b 所示。*U*、*V* 分量在整个深度上的余流标准差差异不大, 标准差的最大值均出现在 15m 附近, *U*、*V* 分量标准差的最大值分别为 5.62cm/s、5.79cm/s, 说明 *U*、*V* 分量流速变化最剧烈的地方均位于温跃层附近, 而在表层和底层的变化均较小, 低于 3cm/s。*U*、*V* 分量标准差在整个深度上的变化范围为 2.33—5.79cm/s, 在整个深度上的平均值分别为 4.35cm/s、4.41cm/s。

图 3 显示了各月平均流(图 3a、图 3c)和余流标准差(图 3b、图 3d)随深度的分布。如图 3a, 各月纬向流的垂向变化趋势比较一致, 与整个观测期间的平均流具有类似的三层结构, 中上层除 11 月外均可以 15m 作为分界, 而中下层均可以 47m 作为分界。在 11 月, 中上层之所以没有显著的分界很可能由于冬季风力较大, 且对流混合增强, 从而使得混合层加深, 温跃层消失。在上层, 大部分月份中的纬向流均为西向流(仅在 6 月份 10m 以浅为东向流), 且流速随深度增加逐渐增大, 其中 7 月份为最大, 在 15m 深度处达到最大为 5.98cm/s。前人的研究也曾经指出, 北黄海夏季余流流核所在深度恰好为温跃层附近, 而在冬季, 海表失热导致的强对流混合与风搅拌作用使得其温盐结构在垂向上比较均一, 余流分布在垂向上也比较均匀, 区别于夏季的强流核模式, 因此夏季温盐强层化结构的存在对余流影响重大(鲍献文等, 2010)。在中层, 大部分月份中纬向流为西向流, 而仅在 11 月份为东向流, 且随深度增加西向流减弱、东向流增强。到 45m 左右, 11 月份的东向流速可达 3.61cm/s, 而其他月份的纬向流速则接近 0。在底层, 各个月份中纬向平均流随着深度增加具有相似的变化趋势, 即东向流减弱、西向流增强。在 10 月和 11 月, 纬向流随着深度增加逐渐由东向流转变为西向流, 而在其他月份纬向流均为西向流。另外值得指出的是, 底层西向流从夏季到秋冬季逐渐减小, 在 7 月份最大, 最大流速位于观测的最大深度处约为 5cm/s。如图 3c, 与月平均纬向流的垂直分布不同, 月平均经向流的垂直分布在不同月份有很大差异。在 9 月、10 月和 11 月(秋季)中, 月平均经向流在整个深度上均有明显变化: 在 9 月份, 40m 以浅流动向北, 而 40m 以深流动向南; 在 10 月与 11 月, 整个深度上流动均向南。其中 11 月份的经向流比较稳定, 流速在整个深度上均为 5cm/s 左右。在 6 月、7 月和 8 月(夏季)中, 月平均经向流速均较小, 垂向变化也不大。值得注意的是, 月平均经向流虽然在不同月份有不同的垂直分布, 但是其在 50m 以深均为南向流, 而且流速在 10 月份以外的其他月份均随深度逐渐增大, 在 11 月份最大, 约为 5cm/s。图 3b 和图 3d 分别显示了 *U*、*V* 分量余流标准差随深度的分布。计算结果表明, *U*、*V* 分量余流的标准差在 6 月、7 月和 8 月(夏季)均较小, 变化范围为 1.29—5.39cm/s, 余流标准差的最大值均位于 15m 附近。30m 以浅余流标准差变化较大, 而 30m 以深余流标准差的变化趋于平缓。这是由于受到温跃层的阻隔, 风力搅拌作用只能影响到海洋上层, 且夏季对流混合基本消失, 海洋下层受到的强迫较弱, 因此其流速的变化很弱, 相对海洋上层较小。*U*、*V* 分量余流标准差的垂向平均在夏季分别

达到了 3.23cm/s、2.95cm/s, U 分量余流标准差的垂向平均在 8 月最小, 为 2.71cm/s, V 分量余流标准差的垂向平均在 6 月最小, 为 2.48cm/s。U、V 分量余流标准差在 9 月、10 月和 11 月(秋季)的变化范围为 1.72—8.13cm/s, 余流标准差的垂向平均分别达到了 6.05cm/s、5.18cm/s, 远大于夏季, 且在整个深度上, 余流标准差的变化相对于夏季都比较剧烈。这是由于秋季风力增加, 对流混合作用增强, 混合层加深, 温跃层逐渐遭到破坏, 外界的强迫作用逐渐影响到海洋下层的水体。U 分量余流标准差的垂向平均在 9 月达到最大, 为 6.36cm/s, V 分量余流标准差的垂向平均在 10 月达到最大, 为 5.42cm/s。9—11 月, 余流标准差最大值的位置逐渐下移, 9 月在 15m 附近, 11 月则在 45m 附近, 这种变化也可以反映出, 由于外界强迫的增强, 其影响范围逐渐深入直至海底, 夏季的温盐层化结构破坏, 逐渐向冬季的上下层水体均匀混合过渡。

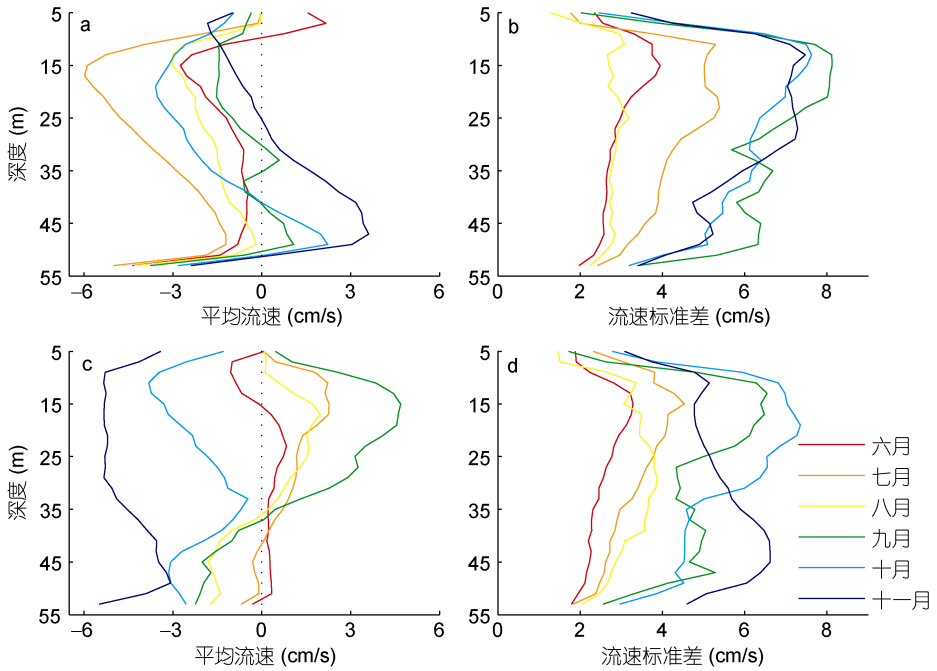


图 3 6 月—11 月 U、V 的月平均流速和流速标准差的垂向分布

Fig.3 Vertical distribution of the monthly mean U、V and standard deviation in June-November

图 4 显示了在观测期间不同深度处的日平均流矢量随时间的变化。考虑到流矢量随深度的分布特征, 此处选取了 5, 15, 31, 47, 53m 这 5 个深度。总体来说, 47m 以浅的日平均流速较小而 53m 日平均流速较大; 秋季(9 月、10 月、11 月)的流矢量大小相对夏季(6 月、7 月、8 月)的流矢量大小偏大且方向变化也较复杂。另外, 图 4 比图 2 和图 3 更直观地显示, 该海域底层存在一支显著的较为稳定的偏西向流动, 关于这支流动, 前人研究结果并未提及。有学者认为黄海暖流终年存在, 冬强夏弱, 夏季在温跃层下面的水体中, 高盐水舌的尖锐度与暖流流速密切相关, 水舌愈尖锐, 流速愈强(管秉贤, 1985), 但目前对此尚没有深入详细的研究, 此处底层的显著流动可能与之有关。另外, 考虑到该站位的地理位置位于渤海海峡的北侧出口附近, 以及渤海海峡北进南出的水交换模式(缪经榜等, 1989), 该支流动也可能与渤海和北黄海之间的水交换有关, 但其真正原因仍需要进一步研究予以确定。

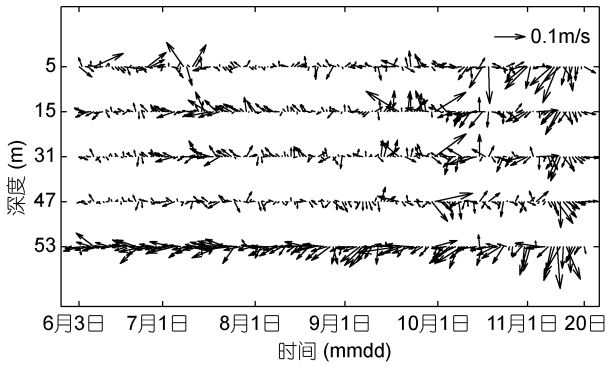


图 4 不同深度处日平均流矢量随时间的变化

Fig.4 Temporal variations of the daily averaged current vectors at different depth levels

2.2　频谱分析

用谱分析方法分析海水流速的时间序列来发现其中的显著周期变化，谱分析结果揭示了功率谱值在周期短于 28h 的高频部分较大，而在较长周期的低频部分则相对很小。图 5a、b 分别给出了 U、V 分量周期范围在 7h 到 50h 的功率谱值随深度的分布情况。

如图 5 所示，U 和 V 分量的功率谱均在 12h 和 24h 附近出现显著峰值，即 U、V 分量均呈现出显著的半日潮流和全日潮流信号，其中半日潮流信号更为显著。V 分量的半日潮流信号强于 U 分量的半日潮流信号，而其全日潮流信号则弱于 U 分量的全日潮流信号，经计算发现 U、V 分量的全日与半日信号功率谱值之和在 45m 以深大小相当，在 45m 以浅 U 分量弱于 V 分量，也就是说，在 45m 以深，经向的半日与全日潮流能量之和与纬向相当，而在 45m 以浅，经向的半日与全日潮流能量之和大于纬向的能量之和；在 0—15m 范围，U、V 分量的功率谱值基本均随深度增加而逐渐增大，表明潮流能量随深度逐渐增加；在 15—45m 范围内，U 分量的全日与半日周期信号谱值基本不变，45m 以深逐渐减小，最大值出现在 45m 附近；在 15—35m 范围内，V 分量的全日与半日周期信号谱值基本不变，35m 以深 V 分量的半日周期信号谱值随深度增加逐渐减小，而 V 分量的全日周期信号谱值随深度增加逐渐增大，呈现出不同的垂向变化趋势。另外，U、V 速度分量的功率谱均在 19h 附近存在一个相对显著的信号，计算可知观测点处的惯性周期为 19.12h，与观测吻合，表明观测点附近的近惯性运动也比较显著。前人的数值实验指出，夏季黄海的近惯性运动主要是由当地的高频风场导致(孟庆军, 2015)。与半日潮流和全日潮流信号相比，近惯性运动的强度较弱，其功率谱值约比全日与半日潮流信号功率谱值低一到两个量级。

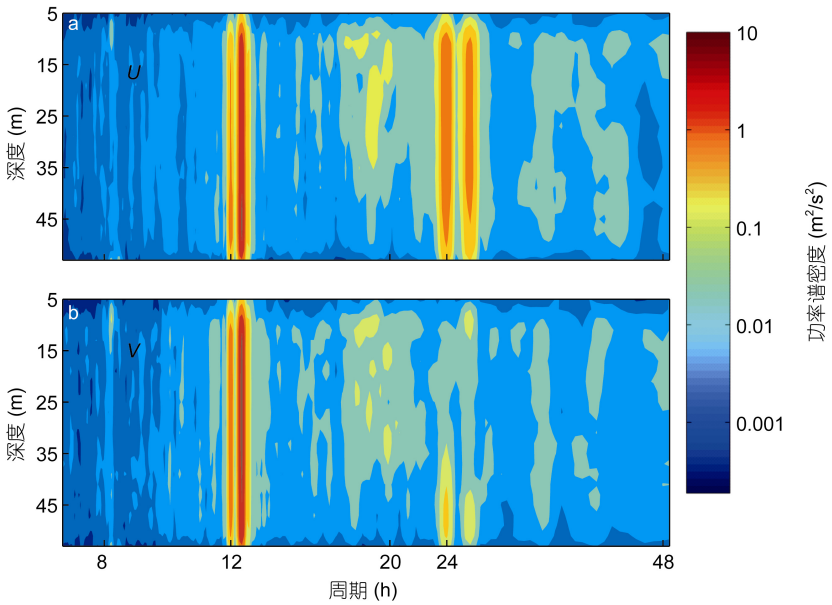


图 5　海流功率谱分析结果

Fig.5　Power spectra of observed currents

2.3　潮流特征

为了分析实测海流中的潮流特征，本文利用 T-Tide 调和分析程序包对各层实测流速进行了调和分析，计算得到了主要分潮的椭圆要素，包括长轴、短轴和倾角。程序根据实测海流数据长度和采样频率自动选取了 35 个分潮，本文选取其中最为显著的 5 个分潮进行分析。按照其椭圆长轴(即最大分潮流)从大到小的顺序，这五个分潮依次为 M_2，S_2，K_1，O_1 和 N_2，说明该处潮流以半日潮族和全日潮族为主，这与上节功率谱分析的结果一致。计算得到，M_2 和 K_1 在整个深度范围内的平均椭圆长轴分别为 27.9cm/s 和 9.2cm/s。

为了确定当地的潮流类型，需要计算观测点处的潮流类型特征值。根据我国《港口工程技术规范》(中华人民共和国交通部，1988)的规定，潮流类型特征值可以按照下式计算得到

$$A=\frac{U_{K_1}+U_{O_1}}{U_{M_2}} \tag{1}$$

其中，A 为潮型特征值，U_{O_1}，U_{K_1}，U_{M_2} 分别为 O_1，K_1，M_2 的最大分潮流。潮流类型判别标准如下：$A \leq 0.5$ 为正规半日潮，$0.5 < A \leq 2.0$ 为不正规半日潮，$2.0 < A \leq 4.0$ 为不正规全日潮，$A > 4.0$ 为正规全日潮。经过计算得到 A 在整个深度上均小于 0.5，因此该海区潮汐类型属于正规半日潮。

潮流椭圆短轴的正负可以指示其旋转方向，正值代表逆时针旋转，负值代表顺时针旋转。如图 6 所示，三个半日分潮的潮流椭圆在整个水体范围内均为逆时针旋转。两个全日分潮潮流椭圆的旋转方向稍有不同，K_1 分潮潮流椭圆仅在表层附近出现了顺时针旋转，其余深度皆为逆时针旋转，O_1 分潮潮流椭圆在整个深度范围内均为逆时针旋转，这也与现有的研究结果“北黄海夏季主要分潮的潮流椭圆基本均呈逆时针旋转”相符(鲍献文等, 2010)。经过计算，三个半日分潮的椭圆率均大于 0.4，表现出比较明显的旋转流特征；两个全日分潮除了在近底层附近表现出一定的旋转流特征外，在 45m 以浅的椭圆率均小于 0.4，表现为比较显著的往复流特征，这与前人的结论有所差异，前人在北黄海南部的观测结果显示，全日潮流 K_1，O_1 表现为旋转流的特征，半日潮流 M_2, S_2 表现为比较明显的往复流特征(于华明等,2008；鲍献文等，2010)。图 6 显示往复全日潮流的方向大致沿东西方向，这也可以解释为什么前文谱分析结果中 U 分量的全日信号明显强于 V 分量的全日信号。

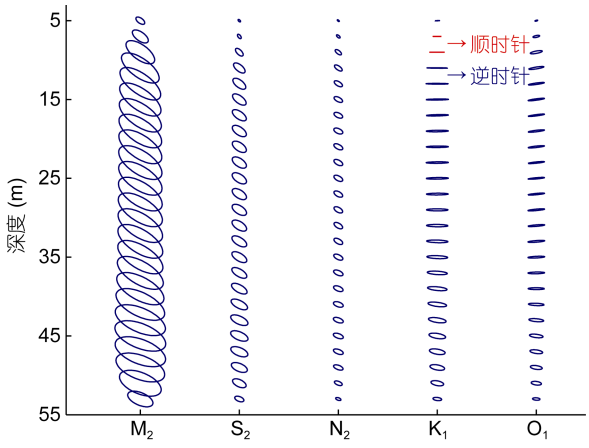


图 6 主要分潮潮流椭圆随深度的变化

Fig.6 Vertical distribution of tidal current ellipses of 5 main constituents

图 7a—d 分别显示了 M_2, S_2, K_1 和 O_1 的椭圆长轴和倾角随深度的变化。M_2, K_1 的椭圆长轴最大值分别为 31.66cm/s、11.28cm/s，前人根据大量实测资料与数值实验结果绘制的潮汐潮流图显示，北黄海北部 M_2、K_1 分潮流的最大值分别可达 20—40cm/s、10—20cm/s(Fang, 1986)，本文的结果与其给出的最大值范围相符。M_2、K_1 的椭圆长轴在整个深度上的平均值分别为 27.9cm/s、9.2cm/s。图 7 显示，M_2、S_2 的椭圆长轴随深度的变化趋势基本一致，在上层随深度增加而增大，在中层随深度增加基本不变，而在底层则随深度增加而减小。椭圆长轴在上层和底层随着深度增加而增加或者减小可能是由于上下两个边界层摩擦的影响，两个边界层的显著影响节点在 15m 与 47m 附近。两个全日分潮的椭圆长轴随深度的变化趋势也基本一致，在上层与半日分潮的特征相似，随深度增加逐渐增大，分层节点位于 15m 附近，在下层随深度增加逐渐减小，但下层分层节点的位置与半日分潮不同，大约位于 35m 附近，这种明显的区别是因为全日分潮与半日分潮受到底摩擦的影响有差异。前人的研究表明，潮流在浅水中易受到底摩擦的影响。对于单个分潮，底摩擦效应与潮流的振幅成正比，对于振幅相同的不同分潮，全日分潮比半日分潮更易受到底摩擦的影响(Prandle, 1982, 1997)。图 7 中，S_2 与 K_1 椭圆长轴大小相当，但 K_1 受到底摩擦影响的深度范围明显大于 S_2，K_1 与 O_1 两个全日分潮受到底摩擦影响的深度范围也明显大于 M_2，表明全日分潮受到底摩擦的影响更甚于半日分潮，与前人的理论结果一致(Prandle, 1997)。

M_2、S_2 的倾角均随深度增加而逐渐减小，在局部有小幅震荡，表明潮流椭圆随深度增加顺时针旋转。倾角变化范围为 40°—70°，变化幅度不超过 30°，主轴基本沿东北-西南方向，表明两个半日分潮水平结构的垂直差异较小。在这两个分潮中，M_2 分潮的椭圆倾角随深度增加变化最小，不超过 18°。K_1、O_1 的椭圆倾角变化范围为 150°—20°，主轴大致沿东西方向。其中 K_1 分潮的椭圆倾角在 5—30m 范围内几乎不变，大小为 0°(或者 180°)，而在 30m 以深倾角随深度增加逐渐增大，这表明潮流椭圆随深度增加逆时针旋转；O_1 分潮的椭圆倾角随深度增加逐渐增大，潮流椭圆随深度增加逆时针旋转，倾角变化不超过 40°。另外，各分潮的椭圆倾角在底层均有一段小幅增加再减小的过程(如 S_2 分潮，47—53m)，表明潮流椭圆在底层随深度的变化发生了微弱的偏转，其原因有待于进一步的研究。

另外，根据如下公式，

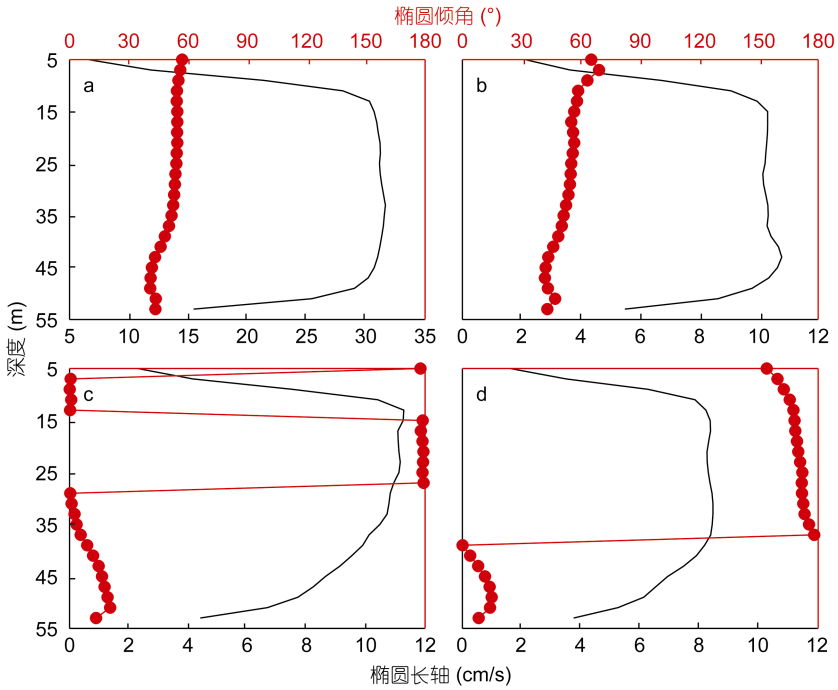


图 7　主要分潮的椭圆长轴和倾角

Fig.7　Major semi-axes and inclination of 4 main constituents

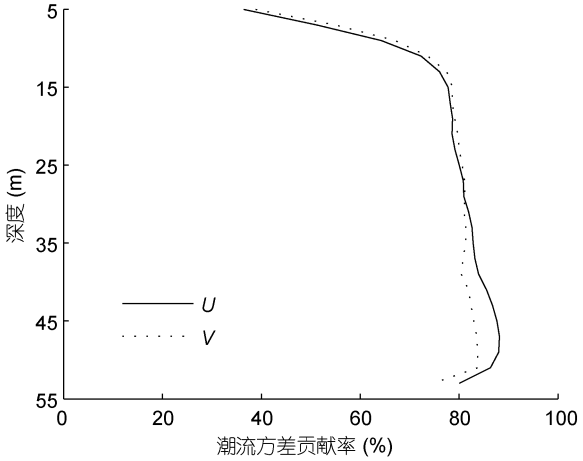


图 8　潮流方差贡献率随深度的变化

Fig.8　Vertical distribution of variance contribution of tidal currents

$$\gamma = 1 - \frac{\left\langle \left(\eta' - \eta'_t\right)^2 \right\rangle}{\left\langle \eta'^2 \right\rangle} \tag{2}$$

计算了调和分析结果中各分潮潮流的方差贡献率，尖括号表示求平均运算，其中 γ 为潮流的方差贡献率，η' 为观测流距平值，η_t 为潮流距平值。将调和分析结果的所有分潮均考虑在内，计算海流中潮流所占的总方差贡献率，图 8 显示了 U、V 分量中潮流总方差贡献率随深度的变化。如图所示，两个速度分量的潮流方差贡献率在 0—15m 范围内，均随深度增加迅速增大，在 15—47m 范围内，随深度增加缓慢增大，而在 47m 以深则随深度增加逐渐减小，其最大值出现在 47m 附近，分别为 88.1%和 83.7%。潮流方差贡献率随深度变化的两个显著节点分别在 15m 与 47m 附近，与平均流的垂向分层位置相似。

2.4　垂向模态

经验正交函数分解(EOF 分解)能够有效处理大量时空场数据，将一个时空场分解为一个不随时间变化的空间函数和一个不随空间变化的时间系数，达到时空分离的效果，从而揭示时空变量场的基本特征和演变规律(胡基福, 1996)。

本文在进行 EOF 分解之前，先对流速数据进行了标准化处理, EOF 分解后得到整个观测期间流动的垂向结构以及对应的时间系数。图 9a、b 分别显示了 U、V 速度分量前 4 个模态的垂向结构。如图 9 所示，左图为 U 分量的前 4 个模态，其方差贡献率分别为 88.00%, 5.26%, 2.27%, 1.27%; 右图为 V 分量的前 4 个模态，其方差贡献率分别为 88.57%, 4.94%, 1.99%, 1.36%。另外，我们还对前四个空间模态对应的时间系数进行了功率谱分析，结果如图 10 所示，图 10a—d、e—h 分别显示了 U、V 前四个空间模态对应时间系数的功率谱结果。

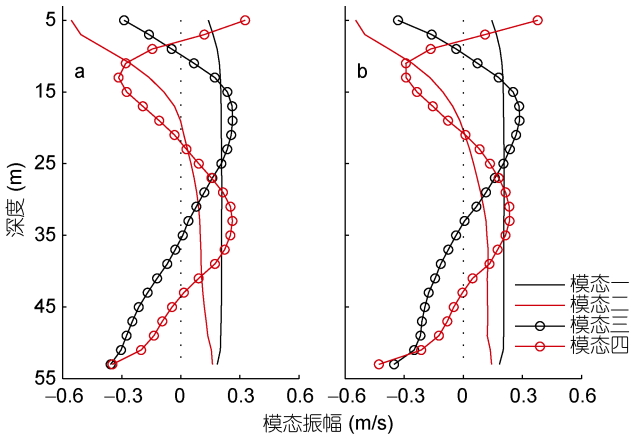


图 9 U、V 前 4 个空间模态的垂直变化

Fig.9 Vertical variations of first 4 EOF modes of U and V

结果显示，U、V 分量的垂向模态具有高度的一致性。根据方差贡献率可知，U、V 分量均为第一模态占优，方差贡献率超过 88%。第一模态的垂向模态随深度基本保持不变，因此为零阶模态，体现了流动的正压特征，其余模态分别为一阶模态及更高阶模态，体现了流动的斜压特征，各高阶模态的总方差贡献率约为 12%，表明流动的斜压性较弱。如图 10 所示，第一时间系数的显著周期位于 12h 和 24h，表明正压流动主要为正压潮流，各高阶模态对应的时间系数还显示了一些更高频(6h，8h)的潮流分量以及近惯性周期信号(19.12h)，这表明观测点所在海域的斜压流动主要包括斜压潮流和近惯性流动。已有的观测研究指出，夏季南黄海西部海域也存在较强的近惯性斜压流(张志欣等, 2008)。

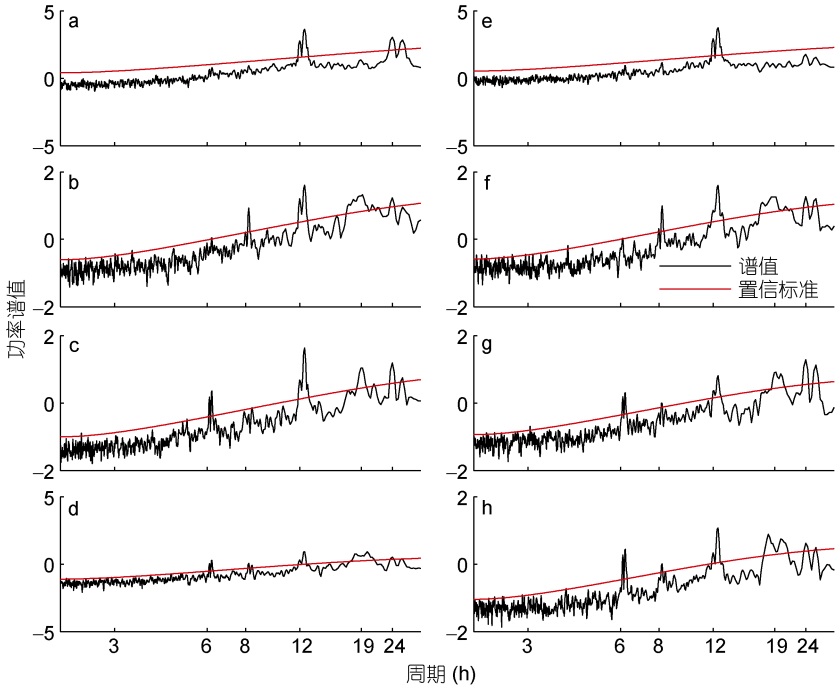


图 10 U、V 前四个时间系数的功率谱

Fig.10 Spectra of the principal components of first 4 EOF modes

3 结论

本文通过多种方法对北黄海一个固定观测点近半年的 ADCP 海流资料进行了分析，得出如下结论:

(1) 该海区夏秋季(6—11 月)的纬向平均流向西(指向渤海)，经向平均流向南，且纬向平均流大于经向平均流，净流动方向与 50m 等深线方向基本一致。夏季的温盐层化结构对余流的垂直分布存在显著影响。

(2) 该海区潮汐类型为正规半日潮，半日潮流为旋转流，主轴沿东北-西南方向，而全日潮流更趋向于往复流，主轴沿东西方向。

(3) 浅水潮流易受到底摩擦影响，其中全日潮流受底摩擦影响较半日潮流更为显著。

(4) 该海区夏秋季(6—11 月)流动以正压流为主，斜压性较弱，正压流主要为正压潮流，斜压流包括斜压潮流和近惯性流动。

本文同时也发现了一些问题。分析结果显示海区底层存在一支稳定的偏西向流动，至于该支流动是黄海暖流夏季在海区底层的余脉，还是北黄海与渤海通过渤海海峡北部通道水交换的一部分，目前尚

无定论。本文探究了观测点处的流动特征及变化, 但是其机制尚需要进一步分析确定, 未来拟开展数值实验进行研究。另外, 考虑到该海域存在显著的季节变化, 因此未来还需要获取全季节的时间序列进行剖分对比。

参 考 文 献

于华明, 鲍献文, 朱学明等, 2008. 夏季北黄海南部定点高分辨率实测海流分析. 海洋学报, 30(4): 12—20

中华人民共和国交通部, 1988. 港口工程技术规范. 北京: 人民交通出版社

韦钦胜, 于志刚, 冉祥滨等, 2011. 黄海西部沿岸流系特征分析及其对物质输运的影响. 地球科学进展, 26(2): 145—156

尹洁慧, 2013. 獐子岛海域浮游动物群落时空变化特征及其与环境因子之间的关系. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所)博士学位论文, 47—48

朱学明, 2009. 中国近海潮汐潮流的数值模拟与研究. 青岛: 中国海洋大学硕士学位论文, 43—66

苏纪兰, 2001. 中国近海的环流动力机制研究. 海洋学报, 23(4): 1—16

张志欣, 于　非, 郭景松等, 2008. 南黄海西部夏季流的观测与分析. 水动力学研究与进展, 23(4): 404—411

孟庆军, 2015. 黄海温度和环流对不同频率风场响应的数值模拟研究. 青岛: 中国海洋大学硕士学位论文, 25—29

胡基福, 1996. 主成分分析. 见: 气象统计原理与方法. 青岛: 青岛海洋大学出版社, 141—160

修日晨, 李繁华, 孔祥德, 1989. 渤海及北黄海潮流场的基本特征. 海洋科学, (5): 1—7

郭炳火, 1993. 黄海物理海洋学的主要特征. 黄渤海海洋, 11(3): 7—18

鲍献文, 宋　军, 姚志刚等, 2010. 北黄海潮流、余流垂直结构及其季节变化. 中国海洋大学学报, 40(11): 11—18

赫崇本, 汪圆祥, 雷宗友等, 1959. 黄海冷水团的形成及其性质的初步探讨. 海洋与湖沼, 2(1): 11—15

臧家业, 汤毓祥, 邹娥梅等, 2001. 黄海环流的分析. 科学通报, 46(S): 7—15

管秉贤, 1985. 黄、东海浅海水文学的主要特征. 黄渤海海洋, 3(4): 1—10

缪经榜, 刘兴泉, 1989. 北黄海和渤海冬季环流动力学的数值实验. 海洋学报, 11(1): 15—22

魏泽勋, 李春雁, 方国洪等, 2003. 渤海夏季环流和渤海海峡水体输运的数值诊断研究. 海洋科学进展, 21(4): 454—464

Fang G H, 1986. Tide and tidal current charts for the marginal seas adjacent to China. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 4(1): 1—16

Ichikawa H, Beardsley R C, 2002. The current system in the yellow and East China Seas. Journal of Oceanography, 58(1): 77—92

Lin X P, Yang J Y, Guo J S *et al*, 2011. An asymmetric upwind flow, Yellow Sea Warm Current: 1. New observations in the western Yellow Sea. Journal of Geophysical Research: Oceans, 116(C4): C04026

Niwa Y, Hibiya T, 2001. Numerical study of the spatial distribution of the M_2 internal tide in the Pacific Ocean. Journal of Geophysical Research: Oceans, 106(C10): 22441—22449

Prandle D, 1982. The vertical structure of tidal currents and other oscillatory flows. Continental Shelf Research, 1(2): 191–207

Prandle D, 1997. The influence of bed friction and vertical eddy viscosity on tidal propagation. Continental Shelf Research, 17(11): 1367—1374

ANALYSIS ON CONTINUOUS CURRENT OBSERVATION IN THE NORTHERN YELLOW SEA

ZHUANG Yuan,　LIU Zi-Zhou,　ZHAI Fang-Guo

(*College of Ocean and Atmosphere Sciences*, *Ocean University of China*, *Qingdao* 266100, *China*)

Abstract　Several analysis methods are adopted in this paper to study direct continuous current measurements in the northern Yellow Sea during the year of 2009, including power spectrum analysis, harmonic analysis and Empirical Orthogonal Function (EOF) analysis. The results show that the average flow in the station area is roughly southwestern along the 50m isobaths, and the zonal mean flow is greater than the meridional mean flow over the whole observation period, with the zonal and meridional water transport being 0.67m³/s and 0.16m³/s, respectively. The thermohaline stratification in summer has significant effects on the vertical distribution of residual current. The tide harmonic analysis shows that the tidal type of this area is regular semi-diurnal tide, and the average amplitudes of M_2 and K_1 are 27.9cm/s and 9.2cm/s, respectively. Semi-diurnal tide systems are rotary tidal current and diurnal tide systems are inclined to reciprocate. Semi-diurnal ellipses vary anticlockwise with depth increasing with inclination change less than 30°, and diurnal ellipses vary clockwise with inclination change less than 40°. Bottom friction influences dramatically, and it affects diurnal tide more than semi-diurnal tide to larger depth scope. This observation is a direct reference to the further study of tidal flow, inertial flow and water exchange in the northern Yellow Sea, and the current results deepen the understanding of current field characteristics.

Key words　the Yellow sea;　tidal flow;　harmonic analysis;　vertical mode