

台湾以东海域声速剖面序列的 EOF 分析*

张旭¹, 张永刚¹, 张健雪², 聂邦胜¹, 姚忠山¹

(1. 海军大连舰艇学院, 辽宁 大连 116018; 2. 中国海洋大学 海洋环境学院, 山东 青岛, 266003)

摘要: 利用了 4 a 的 Argo 剖面序列, 通过经验正交函数(EOF)分析, 得出了台湾以东海域声速垂直结构的时空变化特征。EOF 拟合声速剖面的精度与选取的模式数有关, 合成剖面时包含的模式数越多, 精度越高; 前 3~6 个模式反映了海区声速结构的主要变化, 累积方差贡献率可达 89.4%~96.6%。第 1 模式描述了声速在垂直方向上的同相变化, 具有年周期, 峰值和谷值分别出现在夏季和冬季; 第 2 模式描述了声速在近表层与次表层和主跃层的反相变化。第 1、2 模式的共同作用是声速垂直结构差异的主导因素, 使近表层声速的季节性变化较大, 而主跃层的变化相对较小; 而第 3 模式及更高阶的模式对声速剖面的调制作用在物理意义上并不明显。

关键词: 声速剖面; 经验正交函数(EOF); 台湾东部海域; Argo

中图分类号: P733.2

文献标识码: A

文章编号: 1671-6647(2010)04-0498-09

海洋声速垂直结构对声传播具有重要影响, 决定着水下声传播特征。因此, 如何准确描述区域性海洋声速剖面的结构及变化特征是海洋声学研究的一个重要问题, 同时也具有重要的军事意义^[1,2]。

LeBlanc 等^[3]的研究表明, 经验正交函数(EOF)是描述声速剖面最有效的基函数。EOF 方法将一定数量的声速剖面样本序列分解成正交的时间向量和空间向量, 只需要用前几个模式就可以较为准确地重构序列中的任一剖面, 大大减少了描述声速垂直结构所需要的参数。很多学者在研究中都证明了这种方法的有效性^[4-7]。然而, 由于缺少长期连续观测资料, 以往对于我国周边海区的声速剖面时空变化特征的研究较少。

Argo 计划的实施为深海区域声场结构的研究提供了新的基础。该计划于 2000 年实施, 目标是在全球深海大洋建立一个由约 3 000 个自律式浮标构成的全球大洋观测网, 观测采样的典型空间分辨率为 $3^\circ \times 3^\circ$ (浮标之间的间隔约为 300 km), 时间分辨率为 10 d, 采样数据主要包括水温、盐度和压力^[8]。到目前为止, 全球海洋 Argo 浮标的观测密度和分辨率已基本达到预期目标, 获取了大量的水文剖面数据。

本研究选取台湾以东海域 $5^\circ \times 5^\circ$ 的区域(范围在 $122^\circ \sim 127^\circ \text{E}$, $19^\circ \sim 24^\circ \text{N}$)对声速剖面序列的时空变化特征进行讨论。所选海区位于菲律宾海盆西部, 北与琉球群岛相接, 南至吕宋岛东南端, 西邻台湾岛及吕宋海峡(包括巴士海峡和巴林塘海峡), 东连北太平洋, 海区内大部分海域水深超过 5 000 m(图 1)。该区域属于副热带海洋性气候, 具有明显的季风变化, 冬季为东北季风, 夏季为西南季风。黑潮是影响这一海区环流结构和水文特征最重要的因素。黑潮起源于菲律宾以东海域, 沿吕宋海峡和台湾东岸向北流动, 从台湾岛东北端进入东海, 转为 NE 向。受季节和黑潮锋面不稳定等因素影响, 黑潮在吕宋海峡经常以流套的形式侵入南海^[9-11]。台湾以东的黑潮冬、夏季流量都比较稳定, 主轴离台湾东岸距离约为 60~100 km, 宽约 112~167 km, 呈现蛇行路径^[12]。在黑潮主流以东经常出现中尺度涡(如兰屿冷涡和彭佳屿冷涡等), 这些涡对黑潮的流态和路径都有较强的影响, 使海区的海洋环境特征呈现出复杂的变化^[13-17]。

本研究的目的是利用 4 a 的 Argo 剖面序列, 应用 EOF 方法对台湾以东 $5^\circ \times 5^\circ$ 区域的上层海洋声速剖面结构及季节性变化进行探讨和分析。

* 收稿日期: 2009-09-15

作者简介: 张旭(1982-), 男, 黑龙江萝北人, 博士研究生, 主要从事军事海洋学方面研究. E-mail: x_zhang04@yahoo.com.cn

(张 骞 编辑)

1 资料与方法

1.1 资料及处理方法

选用中国 Argo 资料中心发布的全球 Argo 资料数据集(第七版),时间范围为 2004 年 1 月 1 日至 2008 年 1 月 1 日(时间间隔约为 10 d),数据通过范围检测、梯度检测、统计学检测以及静力稳定度检测等多种方法进行了质量控制,共包括水温和盐度剖面 997 个,剖面位置分布如图 1 所示(区域范围为 122°~127°E,19°~24°N,区域中的点表示 Argo 数据的分布)。Argo 计划预期的观测精度为压力 $\pm 5 \times 10^4$ Pa,温度 ± 0.005 °C 和盐度 ± 0.01 ^[8]。其中,温度和压力传感器的预期测量精度在 Argo 计划实施之前就已经能达到,但盐度测量因电导率传感器易受到生物污染等因素的影响而产生漂移或偏移,在使用一段时间之后会产生一定的偏差^[18]。中国 Argo 实时资料中心已采用多种方法对盐度资料进行了质量控制,目前基本可以达到国际 Argo 计划提出的 0.01 的精度要求^[19]。

声速的计算采用 UNESCO 推荐的 Chen 和 Millero 提出的经验公式^[20]。根据经验公式计算,声速剖面在 $0 \sim 2\,000 \times 10^4$ Pa 的深度范围内产生的误差范围为 $\pm 0.12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。应用 Akima 插值法将每个剖面的声速值插值到垂直标准层^[21]。需要说明的是,Argo 浮标在海表没有采样,最靠近海表的采样数据一般在 5~10 m 的范围,插值时表层声速值以最靠近海表的第一个采样值表示。

在时间序列的处理方面,为了确保剖面时间序列的连续性,取 5 d 作为一个时间段,每个时间段在序列中代表一个时间节点,对应的声速剖面以该时间段范围内样本的垂直各层声速平均值表示。图 2 显示了本研究所选取的时间序列的样本数量分布,图中以每 5 d 作为一个时间节点,每个时间节点剖面样本数量的平均值为 3.40。由于浮标故障的原因,在 2005 年 10—12 月出现了近 80 d(约 16 个时间节点)的数据缺失。此外,在 2004 年 2—4 月和 2005 年 7 月也有少量不连续的数据缺失。对于样本缺失的时间节点,在计算剖面时由相邻的前、后两个时间节点作线性插值得到。

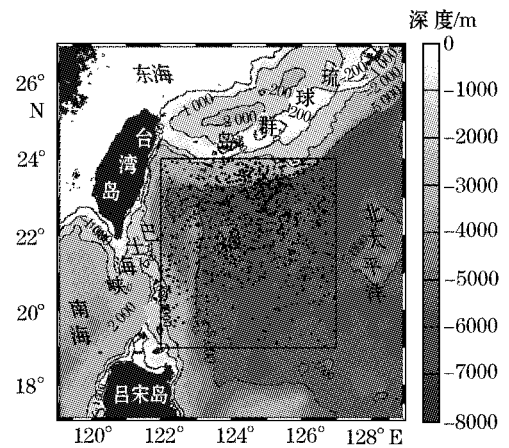


图 1 所选海区地形特征

Fig. 1 Topography in the studied area

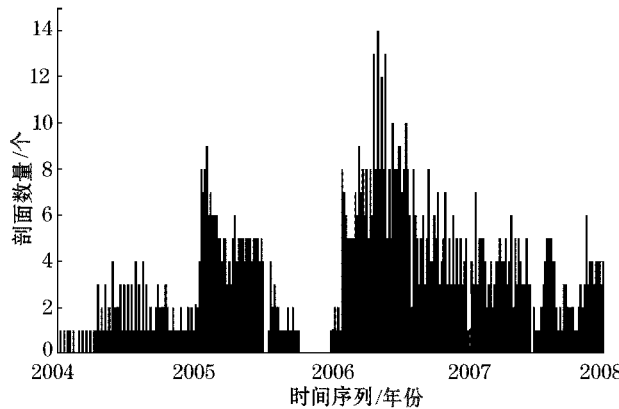


图 2 样本数量时间序列的柱形图(每个时间节点的间隔为 5 d)

Fig. 2 Bar graph for temporal series of sampling number (in every 5 days)

1.2 声速剖面的 EOF 表示

假设采样序列中有 N 个声速剖面, 每个剖面有 M 个垂直层, 可将声速矩阵写为 C_{MN} 。声速矩阵可以进一步表示为平均声速剖面 \bar{C} 与声速扰动 R 的和, 即 $C = \bar{C} + R$ 。声速扰动 R 的协方差矩阵可表示为 $X = RR^T / N$, 对 X_{MM} 进行特征值分解, 得到:

$$XP = PA \quad (1)$$

式中, A_{MM} 为特征根矩阵; P_{MM} 为特征向量矩阵, 即为 EOF 空间函数。将 P_{MM} 投影到 R , 可得到时间函数 Q_{MN} , 其表达式为:

$$Q = P^T R \quad (2)$$

这样, 利用前 k 阶空间函数和时间函数即可描述样本序列中的任一剖面(剖面序号为 j):

$$\begin{bmatrix} C_{1j} \\ C_{2j} \\ \vdots \\ C_{Mj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{C}_1 \\ \bar{C}_2 \\ \vdots \\ \bar{C}_M \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdots & P_{1k} \\ P_{21} & P_{22} & \cdots & P_{2k} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ P_{M1} & P_{M2} & \cdots & P_{Mk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_{1j} \\ Q_{2j} \\ \vdots \\ Q_{kj} \end{bmatrix} \quad (3)$$

2 EOF 拟合结果及误差分析

对所选海区内所有样本组成的声速剖面矩阵进行经验正交分解, 可得出 EOF 各模态的方差贡献率(前 6 个模态的方差贡献率和累积贡献率见表 1)。由表 1 可见, 前 3 个模态的累积贡献率为 89.4%, 前 6 个模态 EOF 累积贡献率可达 96.6%, 应用前 3~6 个模态可反映海区内剖面的主要变化。图 3 比较了应用前 3 个模态和前 6 个模态 EOF 对浮标 2900199 第 48 号剖面(时间为 2004 年 1 月 9 日, 位置在 122.3°E, 19.7°N)的拟合结果, 可见前 6 个模态的拟合结果更为准确: 前 3 个模态 EOF 拟合的 $RMSE$ 为 $0.88 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 而前 6 个模态可使 $RMSE$ 减小到 $0.51 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

表 1 EOF 的方差贡献率和重构声速剖面的 $RMSE$

Table 1 The variance contribution of EOFs and the $RMSE$ of the fitted sound profiles

EOF 模态	方差贡献率/%	累积方差贡献率/%
1	42.8	42.8
2	34.9	77.7
3	11.7	89.4
4	4.1	93.5
5	2.0	95.5
6	1.2	96.6

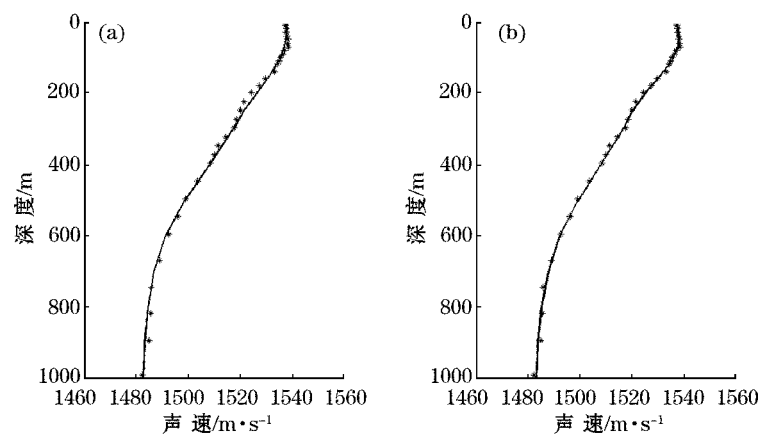


图 3 EOF 前 3 个模态(a)和前 6 个模态(b)拟合的声速剖面比较

Fig. 3 Comparison between fitted SSPs with respective the first 3 EOF modes(a) and the first 6 EOF modes(b)

图 4 给出了序列中声速剖面拟合的 $RMSE$ 与选取 EOF 模态数的变化关系。由图可见, EOF 拟合声速

剖面的精度取决于所选取的模态数。合成时选取的模态数越少,误差越大;模态数越多,误差越小。前 3~6 个模态拟合的最大 $RMSE$ 为 $0.9\sim 1.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,平均 $RMSE$ 为 $0.6\sim 1.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;前 6~10 个模态拟合的最大 $RMSE$ 为 $0.5\sim 0.9\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,平均 $RMSE$ 在 $0.3\sim 0.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;若选取 10 个以上的模态可使最大 $RMSE$ 达到 $0.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下,平均 $RMSE$ 小于 $0.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

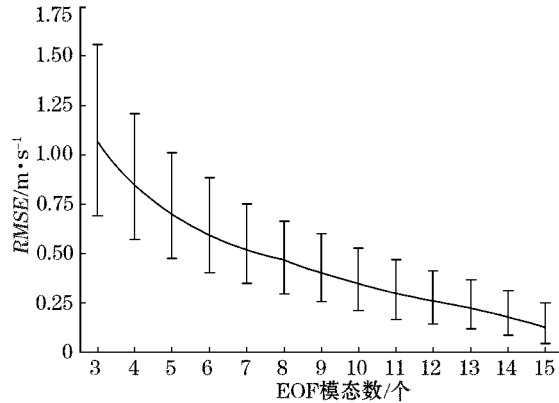


图 4 EOF 拟合的 $RMSE$ 范围与 EOF 模态数的关系(实线表示各模态的平均 $RMSE$)

Fig. 4 The relationship between the $RMSE$ range by EOF fitting and the numbers of EOF mode (The curve denote average $RMSE$ respectively for the total numbers of the related EOF modes)

3 EOF 的时空分布特征

所选海区的声速剖面符合典型深海声速垂直结构,由混合层、季节性跃层、主跃层和深海等温层构成(见图 5)。混合层是近表层由风浪搅拌作用形成的水温较为均一的水层,层中声速因压力随深度增大而呈较弱的正梯度结构。混合层的厚度一般随季节呈现出明显的变化,冬季混合层较深,夏季因出现季节性温跃层导致混合层变浅。混合层之下是季节性跃层和主跃层,层中声速随深度而减小,呈现出负梯度结构。主跃层以下声速达到极小值的深度为深海声道轴(约在 $900\sim 1100\text{ m}$ 的范围),声道轴以下为深海等温层,水温和盐度趋于一致,声速随压力增大而增大,因此呈现出正梯度结构。由图 5 可以看出,声速剖面结构的季节性变化主要出现在上层海洋,而声道轴以下的深海等温层结构较为稳定,变化相对较小。

图 6~图 8 显示了 EOF 前 3 个模态的空间函数和时间函数。由图可见,时间函数体现了声速剖面时间序列的波动变化和周期特性,而空间函数则体现了在垂直方向上对声速量值变化幅度的调制。不同模态 EOF 的影响程度与模态数的方差贡献率有关,第 1 模态影响最大,模态数越大,影响越小。而 2005 年 10—12 月时间函数的线性变化是由数据缺失造成的(图 2)。

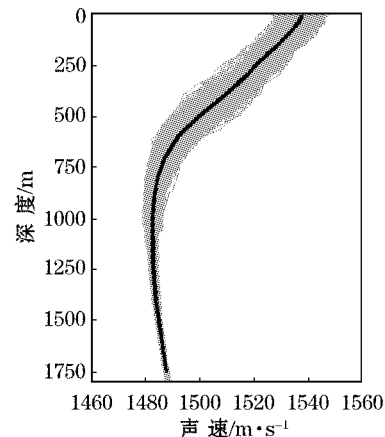


图 5 所选海区声速剖面结构(中细线为实测剖面,粗线为平均剖面)

Fig. 5 Sound speed profiles in the studied area(The thin curves are from the measurements, and the bold curve is for the average)

第 1 模态描述的是声速值的整体变化,空间函数的垂直结构呈现出同相性的变化特征,变化幅度由海表至深海逐渐减小(图 6a)。从时间函数(图 6b)可以看出,该模态具有年周期变化,从每年的 4—10 月为正值,峰值一般出现在 8—9 月,剖面结构呈现出声速值增加的趋势;而负值从 11 月持续到翌年 3 月,谷值一般出现在 2—3 月,表现为声速值减小的趋势。

图 7 显示了海区不同季节的声速剖面结构(季节的划分采用 WOA01 数据集^[21]的划分方法:1—3 月为冬季,4—6 月为春季,7—9 月为夏季,10—12 月为秋季)。图中给出的信息与第 1 模态空间函数和时间函数的变化相一致,从春季到夏季,近表层海洋升温,声速增大,季节性跃层逐渐形成,近表层出现负梯度结构,夏季声速达到最大,跃层最强;从秋季到冬季,近表层水温和声速不断减小,同时近表层混合对流不断加深,声速剖面呈现正梯度结构,冬季近表层声速达到最小,正梯度层深度可达 100 m 以上。图 8 显示了根据水温剖面计算得到的混合层深度及混合层水温的时间序列(混合层计算采用 Monterey 和 Levitus 提出的标准^[22],即以比参考深度温度低 0.5 °C 的温度值计算出的密度值所在的深度作为混合层深度)。比较图 6 与图 8 可以看出,混合层深度和水温在时间序列上与第 1 模态 EOF 的变化有较好的对应性:混合层在夏季达到最浅,水温最高,与第 1 模态时间函数的峰值相对应;混合层在冬季达到最深,水温最低,与第 1 模态时间函数的谷值相对应。因此,海洋混合层的季节性变化是影响第 1 模态 EOF 的主要因素。

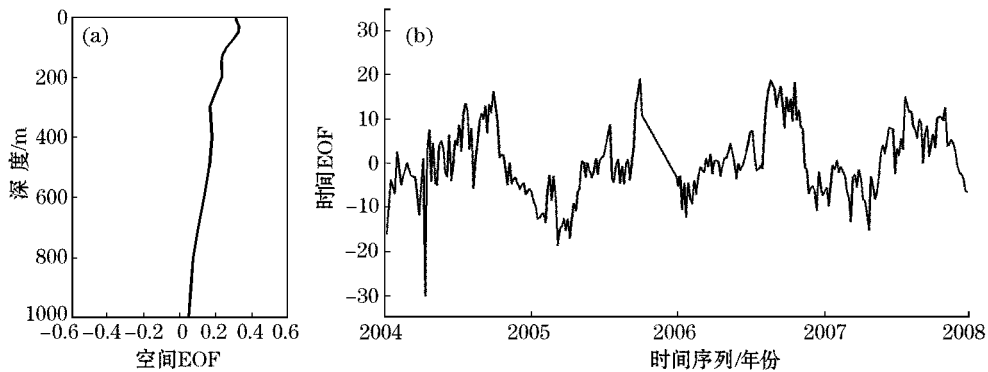


图 6 EOF 第 1 模态的空间函数(a)和时间函数(b)

Fig. 6 The spatial function (a) and temporal function (b) of the 1st EOF mode

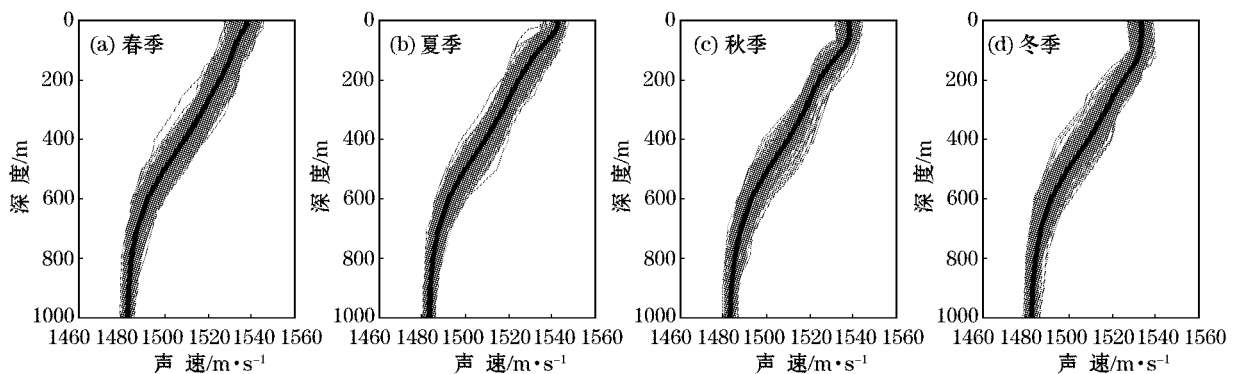


图 7 不同季节的声速剖面结构(细线为实测剖面,粗线为平均剖面)

Fig. 7 The seasonal variation in the SSPs structure (Thin curves denote measured profiles, and bold ones denote the average)

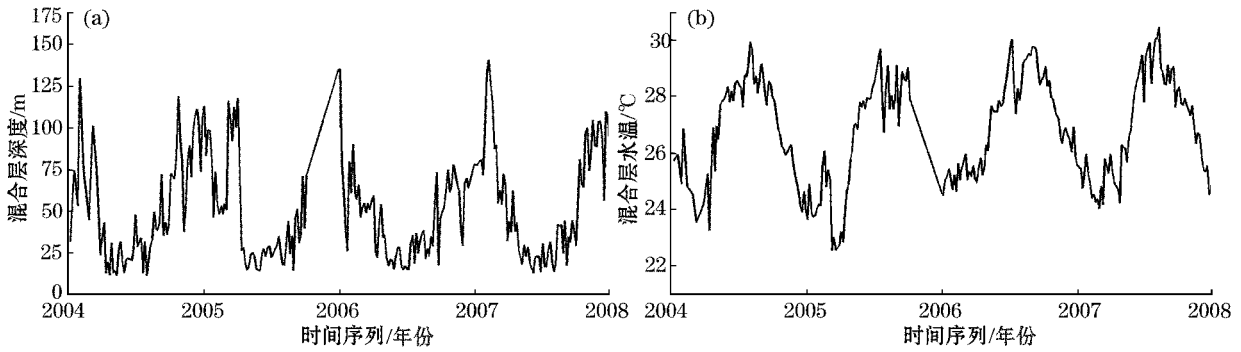


图 8 海区混合层深度(a)及水温(b)的时间序列

Fig. 8 The time serials respectively of mixed-layer depth (a) and temperature (b)

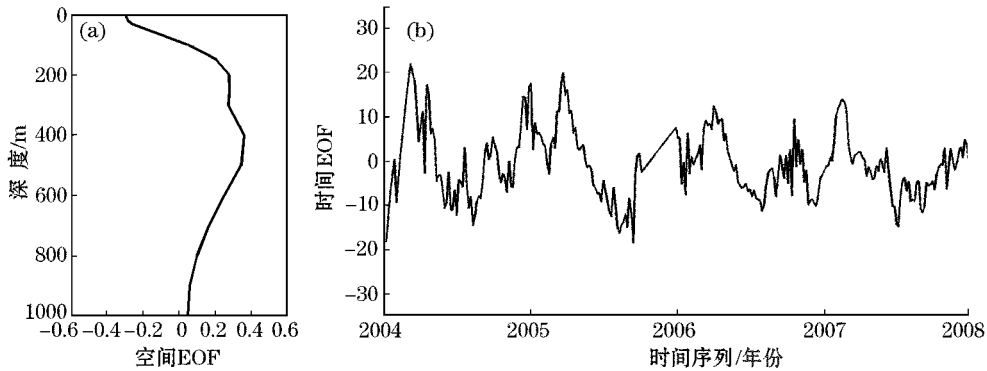


图 9 EOF 第 2 模态的空间函数(a)和时间函数(b)

Fig. 9 The spatial function (a) and temporal function (b) of the 2nd EOF mode

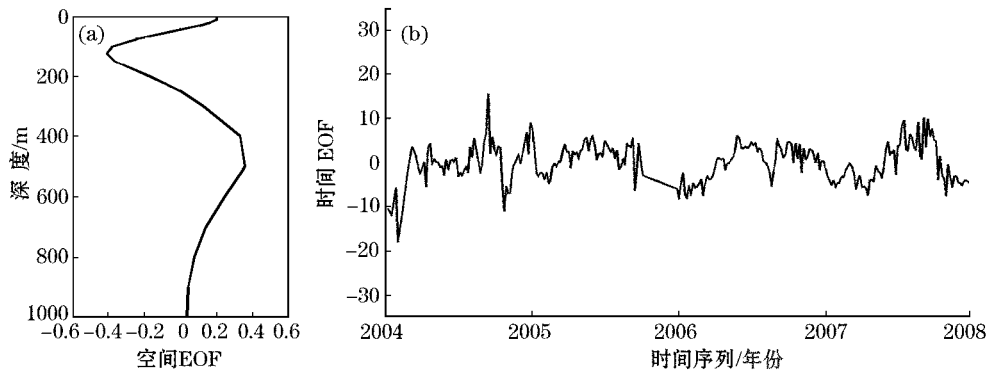


图 10 EOF 第 3 模态的空间函数(a)和时间函数(b)

Fig. 10 The spatial function (a) and temporal function (b) of the 3rd EOF mode

第 2 模态和第 3 模态在不同深度呈现出不同程度的反相变化。第 2 模态描述的是近表层与主跃层的反相变化(见图 9),该模态也呈现出年周期变化,峰值一般出现在 2—3 月,谷值出现在 8—9 月(见图 9b)。第 3 模态描述了更复杂的变化:表层与主跃层呈同相变化,与次表层呈反相变化(见图 10a)。与第 1、2 模态相比,第 3 模态的时间函数的周期性不够明显,在 2005—2008 年呈现出准年周期变化的规律,但变化幅度明显小于前 2 个模态。

图 11 显示了 20 m, 200 m 和 500 m 3 个深度层次水温变化的时间序列(水温变化以序列中各点水温与

该层平均水温的距平差表示)。由图可见,20 m 层与 200 m、500 m 层水温变化趋势差异较大,在 2—3 月和 8—9 月都产生了不同程度的反相变化。通过对这 3 个序列进行相关分析得出,20 m 层与 200 m、500 m 层的相关系数分别为 -0.11 和 -0.08 ,而 200 m 与 500 m 层的相关系数为 0.56 。可见,近表层水温序列与次表层、主跃层都呈一定程度的反相变化,但相关性不高,而次表层与主跃层呈同相变化,这与第 2 模态 EOF 反映出的信息相一致。水温序列的变化中并没有体现出第 3 模态时间函数的特征,说明第 3 模态和更高阶模态对声速剖面的调制作用并不明显。EOF 的方差贡献率也体现出了这一点,前 3 个模态的方差贡献率分别为 42.8% 、 34.9% 和 11.7% ,其中前 2 个模态的累积贡献率占 77.7% ,因此两者的共同作用对于声速垂直结构的变化起主导作用。第 1 模态空间函数在垂直方向上表现为同相,而第 2 模态空间函数表层与次表层反相,且时间函数的峰值与谷值的变化趋势与第 1 模态相反,因此这 2 个模态的共同作用强化了近表层的变化,而弱化了主跃层的变化。

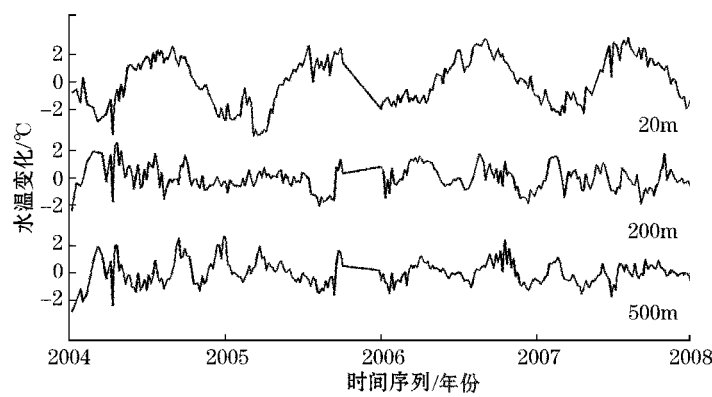


图 11 海区不同深度的水温变化的时间序列

Fig. 11 The time series of temperature dependent upon depth

此外,海洋锋、中尺度涡、内波等中尺度海洋现象的生消及变化对于声速垂直结构有重要影响,这种影响贯穿于 EOF 的各个模态之中,使不同模态的时间函数呈现出复杂的变化。图 6b 中 2004—2006 年夏季出现的负值就可能与黑潮主流以东频繁出现的冷涡有关。

4 结 论

利用 4 a 的 Argo 剖面序列,应用 EOF 方法分析了台湾以东 $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ 海区上层海洋声速垂直结构的时空变化特征。主要结果如下:

1) EOF 方法能较好地描述局地声速剖面结构,拟合精度与选取的 EOF 模态数有关,合成剖面时包含的模态数越多,精度越高;前 3~6 个模态包含了声速结构的主要变化,累积方差贡献率为 $89.4\% \sim 96.6\%$,对海区声速剖面拟合的 RMSE 最大为 $0.9 \sim 1.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,平均为 $0.6 \sim 1.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

2) EOF 的第 1 模态是最重要的模态,方差贡献率为 42.8% 。它描述了声速值在垂直方向上的同相变化特征,变化幅度由海表至深海逐渐减小。该模态具有年周期的变化特征,夏季呈现出声速增加的趋势,冬季为声速减小的趋势。混合层的季节性变化是影响第 1 模态的主要因素。

3) EOF 的第 2 模态和第 3 模态方差贡献率分别为 34.9% 和 11.7% ,它们在不同深度呈现出不同程度的反相变化。不同深度的水温序列变化趋势与第 2 模态的空间函数相一致,近表层与次表层和主跃层呈一定程度的反相变化,而次表层与主跃层为同相变化。

4) 第 1、2 模态的共同作用是声速垂直结构变化的主导因素,使近表层声速的季节性变化较大,而主跃层的变化相对较小。从物理意义上来看,第 3 模态及更高模态 EOF 对声速剖面的调制作用并不明显。

致谢:感谢中国 Argo 资料中心和 中国 Argo 实时资料中心提供的数据支持。

参考文献 (References):

- [1] CSIC. Introduction of Naval Weapons, Equipments and Oceanographic Environment[M]. Beijing: Ocean Press, 2007: 532-600. 中国船舶重工集团公司. 海军武器装备与海战场环境概论[M]. 北京: 海洋出版社, 2007: 532-600.
- [2] ZHANG Y G, LI Q H, NIE B S, et al. Introduction to Military Oceanography[M]. Beijing: Tide Press, 2006: 355-428. 张永刚, 李庆红, 聂邦胜等. 军事海洋学概论[M]. 北京: 海潮出版社, 2006: 355-428.
- [3] LE BLANC L R, MIDDLETON F H. An underwater acoustic sound velocity data model[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1980, 67: 2055-2062.
- [4] TOLSTOY A, DIACHOK O, FRAZER L N. Acoustic tomography via matched field processing[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1991, 89: 1119-1127.
- [5] HE L, LI Z L, ZHANG R H, et al. EOF analyses of sound speed profiles in East China Sea and inversion by matched field[J]. Progress in Natural Science, 2006, 16(3): 351-355. 何利, 李整林, 张仁和, 等. 东中国海声速剖面的经验正交函数表示与匹配场反演[J]. 自然科学进展, 2006, 16(3): 351-355.
- [6] SHEN Y H, MA Y L, TU Q P, et al. Feasibility of description of the sound speed profile in shallow water via empirical orthogonal functions (EOF)[J]. Applied Acoustics, 1999, 18(2): 21-25. 沈远海, 马远良, 屠庆平, 等. 浅水声速剖面用经验正交函数(EOF)表示的可行性研究[J]. 应用声学, 1999, 18(2): 21-25.
- [7] PENG L H, WANG L, QIU X F, et al. Modal wave number tomography for South China Sea front [J]. China Ocean Engineering, 2003, 17(2): 289-294.
- [8] The Argo Science Team. Report of the Argo Science Team 2nd Meeting (AST-2) [R]. U. K.: Southampton Oceanography Centre, 2000: 1-18.
- [9] LI L, WU B Y. A Kuroshio loop in South China Sea? —On circulations of the northeastern South China Sea[J]. Journal of Oceanography In Taiwan Strait, 1989, 8 (1): 89-95. 李立, 伍伯瑜. 黑潮的南海流套? —南海东北部环流结构探讨[J]. 台湾海峡, 1989, 8(1): 89-95.
- [10] LI L, NOWLIN W, SU J L. Anticyclonic rings from the Kuroshio in the South China Sea[J]. Deep-Sea Res: Part I, 1998, 45: 1469-1482.
- [11] SU J L. Overview of the South China Sea circulation and its influence on the coastal physical oceanography outside the Pearl River Estuary[J]. Cont. Shelf. Res, 2004, 24: 1745-1760.
- [12] CHU T Y. The fluctuations of the Kuroshio Current in the eastern sea area of Taiwan[J]. Acta Oceanogr. Taiwan, 1974, 4: 1-12.
- [13] GUANG B X. Current path in a deep layer of the Kuroshio east of Taiwan[J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 1985, 16(4): 253-260. 管秉贤. 台湾以东黑潮深层流的途径[J]. 海洋与湖沼, 1985, 16(4): 253-260.
- [14] YUAN Y C, JIA S J. The 3-D current diagnosis of the Kuroshio east of Taiwan[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1988, 10(1): 1-9. 袁耀初, 郝松筠. 台湾以东黑潮三维海流诊断计算[J]. 海洋学报, 1988, 10(1): 1-9.
- [15] JING C S, LI L. The record of semi-steady Lan-Yu cold eddy southeast of Taiwan[J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(15): 1687-1692. 靖春生, 李立. 台湾岛东南准稳态兰屿冷涡的初次记录[J]. 科学通报, 2003, 48(15): 1687-1692.
- [16] YIN F. Preliminary study of cold water mass near NNE of Taiwan[J]. Acta. Oceanogr. Taiwan, 1973, 3: 157-180.
- [17] SUN X P, XIU S M. Characteristics of the cold water body northeast of Taiwan[J]. Journal of Oceanography of Huanghai and Bohai Seas, 2002, 20(1): 1-10. 孙湘平, 修树孟. 台湾东北海域冷水块的特征[J]. 黄渤海海洋, 2002, 20(1): 1-10.
- [18] LIU Z H, XU J P, XIU Y R, et al. The effect of reference dataset on calibration of Argo profiling float salinity data[J]. Marine Forecasts, 2006, 23(4): 1-12. 刘增宏, 许建平, 修义瑞, 等. 参考数据集对 Argo 剖面浮标盐度观测资料校正的影响[J]. 海洋预报, 2006, 23(4): 1-12.
- [19] LIU Z H, XU J P, ZHU B K. Observing process of an Argo profiling float and discussion on its data application[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2008, 27(4): 66-72. 刘增宏, 许建平, 朱伯康. 一个 Argo 剖面浮标的观测过程及其资料应用探讨[J]. 热带海洋学报, 2008, 27(4): 66-72.
- [20] FOFONOFF P, MILLARD R C. Algorithms for computation of fundamental properties of seawater[R]. Paris: UNESCO Tech. Pap. in Mar. Sci. No. 44: 1-53.
- [21] CONKRIGHT M E, LOCAMINI R A, GARCIA H E, et al. World Ocean Atlas 2001: Objective Analyses, Data Statistics, and Figures

- [R]. Maryland: National Oceanographic Data Center, Silver Spring, 2002: 17.
- [22] MONTEREY G, LEVITUS S. Seasonal variability of mixed layer depth for the world ocean[R]. Wash. D. C: NOAA Atlas NESDIS 14, U. S. Gov. Printing Office, 1997: 100.

EOF Analysis of Sound Speed Profiles in Sea Area East of Taiwan

ZHANG Xu¹, ZHANG Yong-gang¹, ZHANG Jian-xue², NIE Bang-sheng¹, YAO Zhong-shan¹

(1. *Dalian Naval Academy*, Dalian 116018, China; 2. *Marine Environment College*,
Ocean University of China, Qingdao 266003, China)

Abstract: Based on the 4 years' Argo data, the characteristics of temporal and spatial variations in sound speed profiles(SSPs) are acquired from the sea area east of Taiwan by means of empirical orthogonal functions(EOF) method. The accuracy of the sound speed profiles fitted by means of EOF method depends upon the selected EOF modes in the fitting. The more modes are involved in the profile fitting, the better the accuracy of the fitted profile becomes. The main features of the sound speed structures in the studied area can be reflected using the first 3~6 modes. The total variance added up from the modes can be as high as 89.4%~96.6%. The first mode denotes the variations from the surface layer to the bottom layer being in phase with each other, they are seasonal variation with the highest sound speed in summer and the lowest in winter. The second mode denotes the variations in both the surface layer and the subsurface layer being of opposite phase to the variation in the thermoclines. Mode 1 and Mode 2 are the dominant components for expression the variant patterns in the sound speed structures, the significant seasonal variation in the top layer, and the less significant seasonal variation in the thermoclines. The third mode and the others are insignificant for reflecting the patterns in the sound speed profiles.

Key words: sound speed profile(SSP); empirical orthogonal function(EOF); sea area east of Taiwan; Argo

Received: September 15, 2009