

Doi :10.11840/j.issn.1001-6392.2013.03.006

基于 Argo 观测资料的南海北部海域声速场 时空特征分析

张伟涛¹, 张韧¹, 王辉瓚¹, 安玉柱¹, 陈建¹, 段志刚²

(1. 解放军理工大学 气象海洋学院 全军海洋水文环境数值模拟研究中心, 江苏 南京 211101;
2. 61828 部队, 新疆 喀什 844200)

摘 要: 利用近 5 年的 Argo 剖面序列, 通过经验正交函数 (EOF) 分析, 分析了南海北部海域声速垂直结构的时空变化特征和声速场水平分布特征。分析表明: EOF 的前 6 个模态反映了海区声速结构的主要变化, 可以很好地表示声速剖面。第 1 模态具有明显的年变化周期, 主要受海洋混合层季节性变化影响; 第 2 模态与第 1 模态时间函数具有明显的反向变化特征, 主要对次表层进行调制; 第 3 模态主要影响次表层以下声速变化; 表层声速分布与深层声速分布有明显的差异, 表层声速主要受海水温度变化的影响, 深层声速分布与南海环流系统关系密切; 冷涡的存在会引起声速场的低值中心。

关键词: 南海北部海域; 声速; 时空特征; 经验正交函数 (EOF); Argo 数据

中图分类号: P733.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-6932(2013)03-0275-06

Analysis on the characteristics of sound speed in the northern South China Sea based on Argo data

ZHANG Wei-tao¹, ZHANG Ren¹, AN Yu-zhu¹, CHEN Jian¹, DUAN Zhi-gang²

(1. PLA Research Center of Ocean Environment Numerical Simulation, College of Meteorology and Oceanography,
PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China; 2. No. 61828 Army, Kashi 844200, China)

Abstract: Based on the Argo profile data of nearly 5 years, the spatial-temporal variation characteristics of sound speed profiles in northern South China Sea were analyzed by Empirical Orthogonal Function (EOF), and then the sound speed characteristics for different depths were obtained by interpolating the scattered Argo sound speed data into regular gridded data. The results were shown as follows: The first 1-6 modes reflected the main features of the sound speed structure. The first mode, with an obvious year cycle, was closely related to the mixed layer. The second mode, with a phase contrary to the first mode, mainly worked in the subsurface. The third mode mainly affected the layers beneath the subsurface. The horizontal distributions of sound speed were different at each depth, and the sound speed at surface was notably influenced by water temperature while the sound speed below the surface was closely relative to the circulation system and water mass displacement. Cold eddy caused low sound speed zones. Both the Luzon cold eddy and the Vietnam cold eddy caused low sound speed zones.

Keywords: northern South China Sea; sound speed; spatial-temporal characteristics; Empirical Orthogonal Function (EOF); Argo data

声速指海水中声波的传播速度, 声速剖面反映的是声速在海水中的垂直分布, 如何准确描述海洋声速剖面的结构和变化特征是海洋声学研究的

重要问题, 有重要的军事意义。Le 等(1980) 指出经验正交函数 (EOF) 是描述声速剖面最有效的基函数, Tolstoy 等 (1991) 证明了利用 EOF 描述深

收稿日期: 2012-03-08; 修订日期: 2012-10-23

基金项目: 国家自然科学基金 (41276088)。

作者简介: 张伟涛 (1987-), 男, 河北藁城人, 硕士研究生, 主要从事物理海洋学研究。电子邮箱: weitaos466@163.com。

通讯作者: 张韧 (1963-), 男, 四川峨眉人, 博士, 教授 (博导), 主要从事海气相互作用研究。电子邮箱: zren63@126.com。

<http://hytb.nmdis.gov.cn>

海声速剖面的可行性,沈远海等(2000;1999)证明了利用 EOF 描述浅水声速剖面的可行性和对声速剖面的分层经验正交函数(EOF)表示,何利等(2006)对东中国海声速剖面进行了 EOF 分解和匹配场反演,研究了该海域声速剖面用经验正交函数表示的可行性,张旭等(2010)对台湾以东海域声速剖面序列进行了 EOF 分析,邱章(2001)、陈汉权(1999)分别用调查资料对南海不同海区的声速特征进行了研究,但调查资料较为稀疏。南海是我国最大的边缘海,海域辽阔,总面积相当于渤海、黄海、东海面积总和的 3 倍,资源丰富,具有十分重要的经济和军事意义,然而由于南海海底地形复杂多变,大陆坡陡峭,同时受季风和黑潮影响,海区内环流系统复杂多变,缺乏长期连续观测资料,以往对南海声速剖面时空变化特征的研究较少。

Argo 全球观测网于 2007 年宣布建成,随着 Argo 观测剖面资料的不断增多,为南海提供了长期的连续观测资料,从而为研究南海声速剖面变化特征打下了良好的基础。为此,本文采用近 5 年的 Argo 资料对南海北部海域声速场进行特征分析。

1 资料与预处理

选用中国 Argo 资料中心发布的全球 Argo 资料数据集,数据时间范围为 2000 年 1 月 1 日–2011 年 1 月 31 日,采用王辉赞等(2010)提出的质量控制方法,对数据进行了盐度漂移、偏移、毛刺剔除等质量控制后,挑选出研究海区(109–120°E, 10–22°N)的所有观测剖面,共计 3 042 个,剖面位置分布如图 1 所示,可以看出剖面位置虽然分布不均匀,但基本覆盖了整个研究海区,只在 113–120°E, 10–11°N 这一区域内分布较为稀疏,这主要是由此区域内浮标个数较少造成的。由于 Argo 观测剖面的时间不连续,本文采用张旭等(2010)使用的方法,以 5 d 作为一个时间段,每个时间段在时间序列中代表一个节点,用位于每个时间段内的所有声速剖面的平均值代表该时间节点的声速剖面值,从而保证了时间的连续性。图 1 显示了所选取的 Argo 剖面样本数量随时间变化情况,可以看出,2000 年 3 月–2006 年 10 月这段时间内,研究海域几乎没有观测数据,只在 2001 年和 2006 年 5 月有少量的观测数据,每个时间节点剖面数量不大

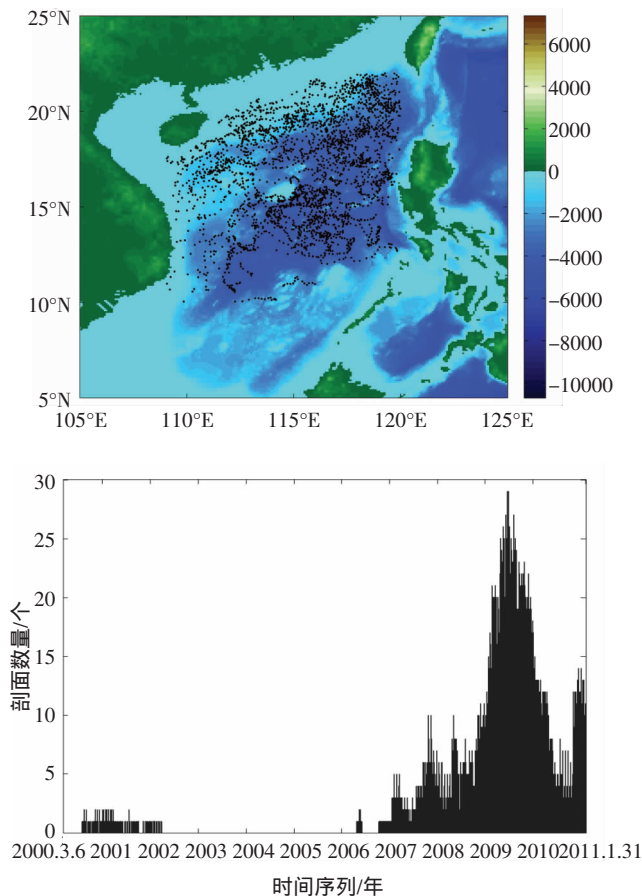


图 1 Argo 观测剖面空间分布情况和样本数量随时间变化图
(时间节点间隔为 5 d)

于 5 个。因此,本文选取 2006 年 11 月至 2011 年 1 月这段时间内的连续观测剖面进行分析。在这期间,少量个别时间节点仍存在缺少观测剖面的现象,由相邻的前、后两个时间节点上的观测剖面做线性插值代替。

采用 UNESCO 推荐的 Chen 和 Millero 提供的计算声速的经验公式(1983),利用 Argo 观测的压强、温度、盐度剖面数据计算得出声速剖面,然后利用 Akima 插值法,将声速剖面插值到垂直标准层进行 EOF 分析,标准层深度为 0、10、20、30、50、75、100、125、150、200、250、300、400、500、600、700、800、900、1 000、1 100、1 200、1 300、1 400、1 500、1 750、2 000 m。

2 EOF 拟合结果及误差

对插值到标准层的声速剖面进行 EOF 分解,得到了空间函数和时间函数,并计算得出了 EOF

各模态的方差贡献率和累积方差贡献率（表 1）。由表 1 可知，第 1 模态、第 2 模态方差贡献率分别为 59.85%、23.54%，前 6 个模态的累积方差贡献率可达 96.37%，可以反映出海区声速剖面的主要变化。为检验 EOF 拟合声速剖面的效果，随机选取一个声速剖面（2900391 号 Argo 浮标第 15 号剖面，时间：2006 年 10 月 20 日，位置：20.317°N，119.548°E），分别利用第 1 个、前 3 个和前 6 个模态对其进行拟合，拟合结果如图 2 所示。由图 2 可知，对 500 m 以深的海洋，第 1 模态的拟合效果已与实际观测相似较好，拟合结果差异主要表现在上层声速变化较大的地方；EOF 拟合结果准确性随着模态数的增加而增加，前 3 个模态拟合的均方根误差（RMSE）为 $1.64\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，前 6 个模态拟合的 RMSE 可减小到 $0.27\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，故应用前 6 个模态可以很好地表示声速剖面。

表 1 EOF 6 个主要模态的方差贡献和累积方差贡献

EOF 模态	方差贡献率	累积方差贡献率
1	59.847	59.847
2	23.537	83.385
3	5.215	88.601
4	3.541	92.142
5	2.927	95.069
6	1.299	96.369

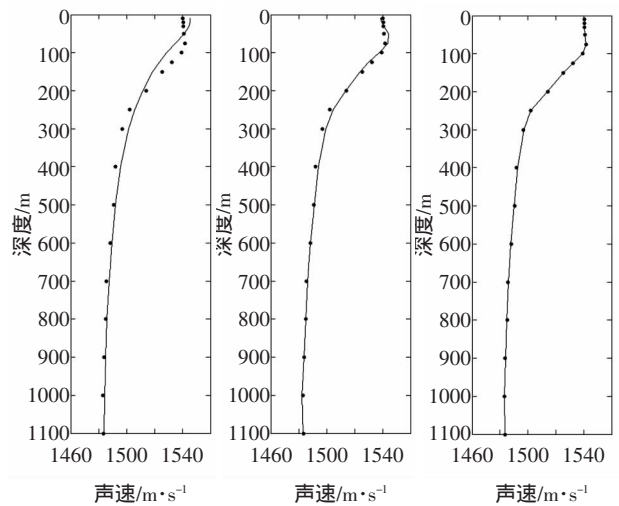


图 2 EOF 第 1 个、前 3 个、前 6 个模态拟合的声速剖面图
(实线为拟合值，点为观测值)

3 声速场分布特征

3.1 声速场垂直分布

图 3 依次给出了 EOF1-6 模态的空间函数和时间函数，左侧为空间函数，右侧为时间函数。采用吴洪宝（2005）的方法对时间函数和空间函数进行预处理，分别乘上和除去对应特征值的平方根，将时间函数标准化，空间函数的量值大小就是这个模态表示出的分析对象的一般大小。从上一节图 2 的分析已经看出，第 1 模态可以反映出声速整体变化的趋势，表层变化大，深层变化小；第 1 模态空间函数从表层至深层都为正值（图 3（a）左），海表附近最大，为 3.47 m/s ，随着深度的增加逐渐减小，到达 400 m 左右趋近于 0，此后随着深度的增加变化不大；从时间函数（图 3（a）右）可以看出，该模态具有明显的年周期变化特征：正值一般在每年的 5-10 月，最大值位于 8-9 月，11-4 月为负值，最小值位于 2-3 月，与季节变换对应较好，春季、夏季海洋升温，声速不断增大，秋季、冬季声速逐渐减小，主要是受海洋混合层季节变化的影响（张旭，2010）。第 2 模态空间函数随着深度的

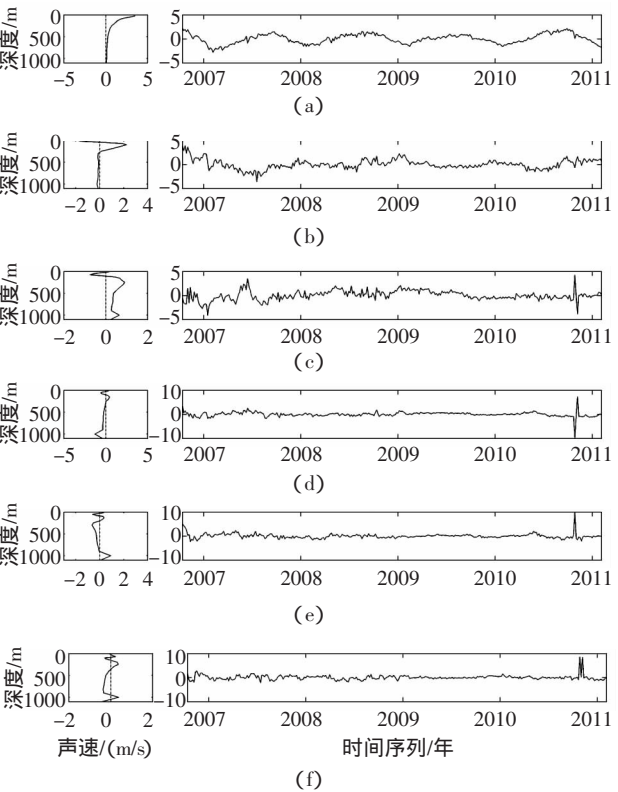


图 3 EOF 前 6 个模态的空间函数和时间函数

增加出现正、负变化(图3(b)左),表明表层与次表层呈反位相变化。表层为负,最小值为 -1.72 m/s ,然后迅速增加;次表层为正,最大可达 2.23 m/s ,在 300 m 左右又减小为负值,此后随着深度的增加不断趋近于0,可知第2模态主要对次表层起调制作用。从两个主要模态的空间函数都可以看出,声速变化主要集中在深度较浅的水层,深层变化很小,这也是图2中表层拟合结果误差较大的原因。第2模态时间函数也呈现出一定年周期变化(见图3(b)),与第1模态时间函数具有明显的反向变化特征,峰值超前第1模态1-2月。第3模态空间函数不同于前两个模态(图3(c)左),变化较大值位于次表层以下,主要影响次表层以下声速变化。4-6模态时间函数和空间函数都比较复杂,没有明显的周期变化。值得注意的是3-6模态的时间函数在2011年前都存在一异常值,这可能是由该时刻声速剖面值偏高(见图5,该时刻剖面值都经过质量控制)造成的,不影响结果准

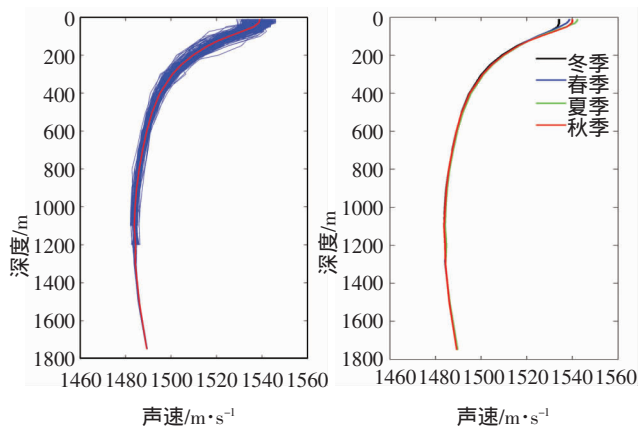


图4 所选海区声速观测剖面垂直结构图和各季节平均剖面图

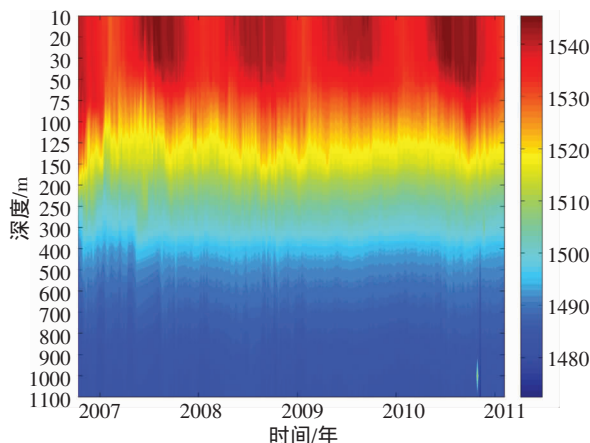


图5 各标准层声速时间变化图

确性。

深海声速剖面主要分为3层(刘芳兰等, 2010): 表面层(混合层)、跃变层和深海等温层, 其中跃变层又可分为季节性跃层和主跃层。研究海区属于典型的深海声速垂直结构(图4左所示)。表面混合层主要受动力及热力因素的作用, 强烈的湍流混合使得海水物理性质分布均匀, 垂直梯度很小(冯士筭等, 1999)。混合层具有明显的季节变化, 与第1模态时间函数变化对应较好, 冬季由于降温增密使混合层加深、声速减小(图4右冬季); 夏季混合层下界出现季节性温跃层, 混合层变浅、声速增大(图4右夏季)。跃变层位于混合层之下, 层中声速随深度增加逐渐减小, 呈现出较大的负梯度结构。声速极小值所在的深度为声道轴(约在 1000 m 左右)。深海等温层, 温度和盐度梯度很小, 声速随深度增加而逐渐增大。从各标准层声速的时间变化(图5)也可以看出, 声速的变化主要集中在水深较浅的混合层和季节性跃层, 声速变化除了显著的高频特征以外, 具有明显的年周期变化; 位于深度较深的主跃层、深海等温层结构较为稳定, 变化相对较小。

3.2 声速场水平分布

将各标准层上的Argo散乱声速剖面数据水平插值到网格点($0.25^\circ \times 0.25^\circ$), 然后将每一格点上声速值减去该标准层多年声速平均值, 分析得到了研究海域不同标准层上声速距平值, 以此来研究声速场的变化特征。季节划分以3-5, 6-8, 9-11月和12-2月分别代表春、夏、秋、冬4个季节。图6、图7分别是 10 m 、 100 m 深度声速年距平场, 等值线间隔为 2 m/s 和 3 m/s , 在同一深度, 不同季节声速年距平值的分布和变化可反映出该海区这一水层上声速的季节分布和年际变化。由于Argo浮标观测特点, 在近岸水深较浅的地方观测资料较少。从图6可以看出, 与表层海水的温度分布和变化相似(Tolstoy et al, 1991), 声速距平等值线的走向趋势与岸线平行, 成东北-西南走向, 近岸一侧声速较小, 等值线较为密集, 声速水平分布梯度大, 也是温度锋常出现的地方, 声速自近岸向外海逐渐增加, 但水平梯度逐渐减小。冬季, 海区声速主要为负距平, 最低可达 -10.53 m/s , 只在菲律宾西侧海区存在一正值区域, 最大值为 2.24 m/s 。近

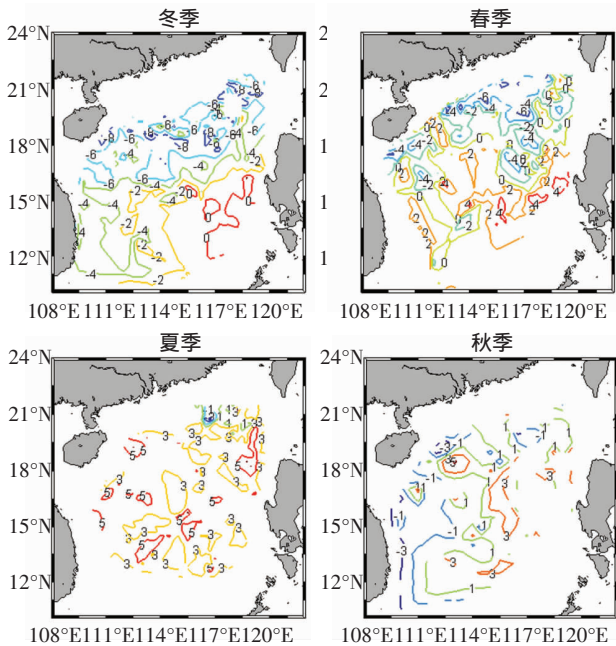


图6 表层 10 m 深度声速距平水平分布

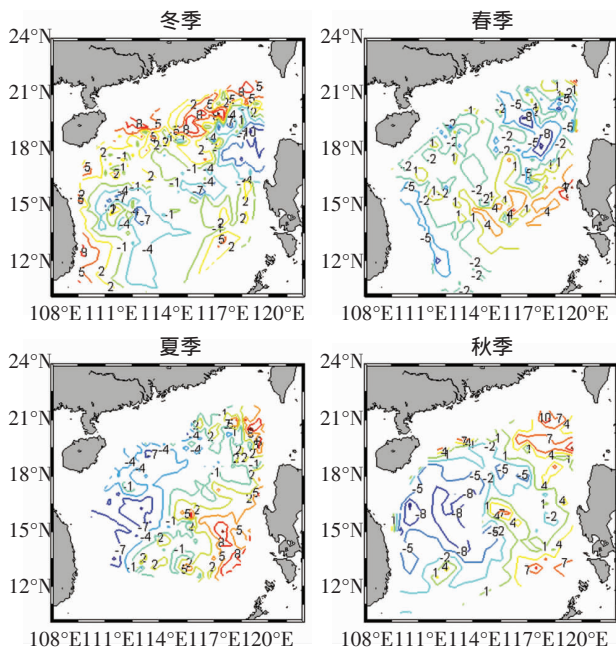


图7 表层 100 m 深度声速距平水平分布

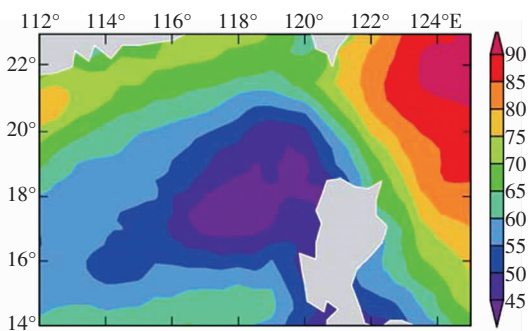


图8 1999–2007 年冬季海平面高度场的平均分布图 (单位: cm)

岸一侧海水声速较低主要是受大陆降温和低温、低盐沿岸水等影响(南海北部陆架邻近水域十年水文断面调查报告编委会, 1990), 使得海水声速偏低。到了春季, 海水开始升温, 声速距平值也逐渐增大, 正距平值增多, 但总体趋势与冬季相比变化不大。夏季海水进一步增温, 声速距平转为正值, 最大可达 7.38 m/s, 同时在西南季风的作用下, 温盐分布相对均匀的外海水不断进入研究海区, 使得整个海区声速水平分布比较均匀。秋季, 海水开始降温, 声速距平值减小, 逐渐向冬季的距平场分布过渡, 完成四季的循环。

随着水深的加深(图 7), 声速距平值水平分布与表层有明显差异。冬季, 距平分布仍成东北–西南走向, 但在近岸海区声速距平与表层相反, 变为高值区, 声速自近岸向外海逐渐减小, 在菲律宾西侧海区又逐渐增大, 形成一个两侧高、中间低的结构, 在吕宋岛西北侧 (119°E, 19°N) 位置有一个低值中心, 最小距平可达 -13.40 m/s, 该低值中心与吕宋冷涡(孙成学等, 2011) 对应较好, 主要受吕宋冷涡的影响(图 8)。春季, 声速距平值分布与表层分布相似, 吕宋冷涡附近的声速低值中心仍然得以维持, 但是强度有所减小, 最小值为 -11.87 m/s。夏季和秋季距平场分布相似, 海区西侧为声速低值区, 东侧为声速高值区, 在中南半岛东侧靠近越南冷涡位置, 始终存在一个低值区, 在秋季表现最为明显, 最小距平可达 -11.62 m/s; 海区东侧为高值区, 在吕宋海峡西侧 (120°E, 19.5°N) 位置附近存在一个高值区, 秋季最大可达 13.68 m/s, 反映了西太平洋黑潮暖水经吕宋海峡入侵南海并向西推进的趋势。从这一层声速距平的水平分布来看, 声速变化的主要影响因素不再是海表温度的变化, 而应与南海环流系统关系更为密切。

由于 Argo 浮标观测深度的不同和 Argo 浮标分布不均的特性, 将 Argo 散乱声速剖面数据水平插值到网格点时, 一些格点上并不存在观测值, 并且随着深度的增加, 这种现象表现更为明显, 导致重构的声速水平场不够平滑。另外值得一提的是, 重构的声速水平场除了不够平滑还存在一些小的涡旋, 可能与本研究采用散乱 Argo 剖面资料插值处理方法、各剖面对应时间存在差异以及南海自身存在的涡旋有关, 但其对声场较大尺度特征分析结果

影响不大。

4 结论

利用近 5 a 的 Argo 观测资料, 分析了南海北部海区声速垂直结构的时空特征和声速场的水平分布特征, 主要结论如下:

(1) EOF 分析能够反映出声速剖面变化的时空信息。第 1 模态方差贡献率为 59.85%, 可以反映出声速整体变化趋势, 具有明显的年周期特征, 主要受海洋混合层的季节性变化影响。第 2 模态方差贡献率为 23.54%, 也具有年周期变化特征, 第 2 模态时间函数与第 1 模态时间函数具有明显的反向变化特征, 峰值超前第 1 模态 1-2 月, 与第 1 模态相比, 第 2 模态主要对次表层进行调制。第 3 模态主要影响次表层以下声速变化。应用前 6 个模态可以很好地表示声速剖面变化。

(2) 声速变化主要集中在深度较浅的混合层和季节性跃层, 而位于深度较深的主跃层和深海等温层变化较小。

(3) 声速分布随深度增加具有明显的差异。表层声速主要受海水温度变化的影响, 距平等值线与岸线平行, 成东北—西南走向。近岸一侧声速距平较小, 主要受大陆降温和沿岸水的影响。深层声速分布与南海环流系统关系密切, 海区西侧为距平高值区, 东侧为距平低值区, 反映出了西太平洋黑潮暖水经吕宋海峡入侵南海并向西推进的趋势。

(4) 冷涡的存在会引起声速场的低值中心。在中南半岛东部越南冷涡附近存在一个声速低值中心, 在秋季表现最为明显, 最小距平可达 -11.62 m/s, 吕宋冷涡的存在也引起一个声速低值中心, 冬季、春季表现明显, 最低可达 -10.53 m/s, 且与吕宋冷涡的时间、空间变化对应较好。

由于 Argo 浮标自身的限制, 不同的浮标观测的最大深度不同, 有的浮标观测能达到 1 900 m 左右, 而有的浮标最大观测深度仅为 1 000 m 左右。剖面数据观测深度的不同, 导致在进行 EOF 分析时, 只能对 1 100 m 以上海洋进行研究, 对较深层

海洋没有进行很好的分解。随着 Argo 浮标深层剖面数据的不断增多, 将有利于对本文研究的进一步改进与完善。

致谢: 感谢中国实时 Argo 资料中心提供的 Argo 观测数据。

参 考 文 献

- Fofonoff p, Millard R C, 1983. Algorithms for computation of fundamental properties of seawater. Paris: UNESCO Tech. Pap. In Mar. Sci. No.44: 1-53.
- Le B L R, Middleton F H, 1980. An underwater acoustic sound velocity data model. J. Acoust. Soc. Am., 67: 2055-2062.
- Tolstoy A, Diachok O, Frazer L N, 1991. Acoustic tomography via matched field processing. J. Acoust. Soc. Am., 89: 1119-1127.
- 陈汉权, 1999. 南海深海区的海水声速特征. 南海研究与开发, 1 (总 141 期): 24-30.
- 冯士筭, 李凤歧, 李少菁, 1999. 海洋科学导论. 北京: 高等教育出版社, 83-93.
- 何利, 李整林, 张仁和, 等, 2006. 东中国海声速剖面的经验正交函数表示与匹配场反演. 自然科学进展, 16(3): 351-355.
- 刘芳兰, 罗伟东, 于宗则, 等, 2010. 西沙海槽海域声速特点分析. 海洋通报, 29(6): 608-612.
- 南海北部陆架邻近水域十年水文断面调查报告编委会, 1990. 南海北部陆架邻近水域十年水文断面调查报告. 北京: 海洋出版社, 184-214.
- 邱章, 朱良生, 许建林, 等, 2001. 南海北部海区上层水体平均声速场的变化. 海洋学报, 23(5): 42-48.
- 沈远海, 马远良, 屠庆平, 2000. 声速剖面的分层经验正交函数表示. 西北工业大学学报, 18(1): 90-93.
- 沈远海, 马远良, 屠庆平, 等, 1999. 浅水声速剖面用经验正交函数(EOF)表示的可行性研究. 应用声学, 18(2): 21-25.
- 孙成学, 刘秦玉, 2011. 卫星高度计资料揭示的冬季南海吕宋冷涡的双涡结构. 热带海洋学报, 30(3): 9-15.
- 王辉赞, 张韧, 王桂华, 等, 2010. 全球 Argo 浮标剖面观测资料质量再控制数据集用户手册.
- 吴洪宝, 吴蕾, 2005. 气候变率诊断和预测方法. 北京: 气象出版社: 25-33.
- 张旭, 张永刚, 张健雪, 等, 2010. 台湾以东海域声速剖面序列的 EOF 分析. 海洋科学进展, 28(4): 498-506.

(本文编辑: 郭箬)