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<sup>1</sup>,张韧<sup>1</sup>,王辉瓒<sup>1</sup>,安玉柱<sup>1</sup>,陈建<sup>1</sup>,段志刚<sup>2</sup>

(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-tao<sup>1</sup>, ZHANG Ren<sup>1</sup>, AN Yu-zhu<sup>1</sup>, CHEN Jian<sup>1</sup>, DUAN Zhi-gang<sup>2</sup>

 $(1. \ PLA \ Research \ Center \ of \ Ocean \ Environment \ Numerical \ Simulation \ , \ College \ of \ Meteorology \ and \ Ocean \ ography \ ,$ 

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一个 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,Tolstooy 等 (1991) 证明了利用 EOF 描述深

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:weitao5466@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。

收稿日期:2012-03-08;修订日期:2012-10-23

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3042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5d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



(时间节点的间隔为5d)

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%, 可以反映出海区内声速剖面的 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 m·s<sup>-1</sup>, 前 6 个模 态拟合的 RMSE 可减小到 0.27 m·s<sup>-1</sup>, 故应用前 6 个模态可以很好地表示声速剖面。

表1 EOF6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



## 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400m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



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



2009

时间/年

图 5 各标准层声速时间变化图

2010

1100 2007

2008

http://hytb.nmdis.gov.cn

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(冯士筰等,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°×0.25°), 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

2011



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,成东北一西南走向。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 , MillardR 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待征. 南海研究与开发,1 (总141期):24-30.
- 冯士筰,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:海洋出版杜, 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:郭筝)