

◇ 研究报告 ◇

温盐深剖面仪与 Argo 数据的冬季印度洋 声速剖面分析*

李宏琳 李倩倩[†] 周康颖 严 娴 曹守莲 马志川

(山东科技大学测绘与空间信息学院 青岛 266590)

摘要: 通过某一次在东南印度洋调查工作中获得的 17 站位温盐深剖面仪 (CTD) 数据, 因其表层 0 ~ 10 m 数据缺失, 选择利用卫星遥感的海表面温度产品与中国 Argo 实时资料中心提供的全球海洋 Argo 网格数据集 (BOA_Argo) 中逐年月平均数据做比较, 发现 BOA_Argo 数据集反推得到的表层温度是比较准确的。再将 CTD 数据与对应时间和测区内的 BOA_Argo 数据集的两种数据进行对比, 对缺失的 CTD 数据进行合理的外延。因此, 该文首先对缺失的 4 个站位的温度和盐度进行外延, 然后根据 Dell Grosso 声速经验公式计算声速剖面, 再外延到与 BOA_Argo 网格资料数据等深。研究结果表明 CTD 数据与 BOA_Argo 数据集中逐年月平均数据的声速剖面吻合得更好, 其总体均方根误差为 0.7544 m/s。

关键词: 声速剖面; 拟合; BOA_Argo 数据集

中图法分类号: P733.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2021)05-0738-07

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2021.05.012

Indian Ocean sound velocity profile analysis of CTD and Argo data in winter

LI Honglin LI Qianqian ZHOU Kangying YAN Xian CAO Shoulian MA Zhichuan

(College of Geodesy and Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: The conductance temperature depth (CTD) data are obtained from a survey in 17 stations of Southeast Indian Ocean. Due to the missing data of 0–10 meters shallow water depth, the sea surface temperature (SST) product of satellite remote sensing and the global ocean Argo grid provided by the Chinese Argo real-time data center were selected. The data set (BOA_Argo) is compared with the average data year by year and month, and it is found that the surface temperature obtained by the inverse calculation of the BOA_Argo data set is more accurate. Then the CTD data is compared with two data of the BOA_Argo data set in the corresponding time and the measurement area, and the missing CTD data needs to be reasonably extended. Therefore, this article first extended the temperature and salinity of 4 stations, then calculated the sound velocity profile according to the Dell Grosso sound velocity empirical formula, and then extended it to the same depth as the BOA_Argo grid data. The research results show that the CTD data is more consistent with the sound velocity profile of the annual and monthly average data in the BOA_Argo data set, and the overall root mean square error is 0.7544 m/s.

Keywords: Sound speed profile; Polynomial fitting; “BOA_Argo” grid data

2020-12-29 收稿; 2021-04-07 定稿

*中国博士后科学基金 (2020M670891), 山东省高等学校青年创新团队人才引育计划
作者简介: 李宏琳 (1995–), 女, 河北石家庄人, 硕士研究生, 研究方向: 海洋声学。

[†]通信作者 E-mail: lqq@mail.ioa.ac.cn

0 引言

随着海洋声学的发展,人们越来越认识到研究海洋中声速对于水下目标探测和水声通信具有重要意义。海洋的声速结构对水声传播有非常重要的影响,海水的声速随温度、盐度以及静压力在不断变化,难以用解析表达式来表示它们之间的关系,通常用经验公式来表示它们之间的关系^[1]。

在声学中,可以使用直接法和间接法来获取所需要的水中声速剖面。直接法简单,但是有时只能获得某些深度上的声速。间接法能够获得大面积范围的声速,但是计算量大,理论基础复杂^[2]。除上述测量法外,还有应用较广泛的声速重构法,它只要测量少量若干个点的声速数据即可重构全海深的声速剖面。声速重构最大的优势就是不必进行声场计算,计算量极小^[3],但是很难找出与实测剖面拟合较好的重构剖面的函数。本文是将BOA_Argo数据集^[4]作为真值,测量温盐深剖面仪(Conductance temperature depth, CTD)数据,对测量数据进行回归分析,获取测量数据更加接近的BOA_Argo数据集的类型,为日后进行测量数据集类型的选取提供一种比较准确、快速的方法。对于东南印度洋调查工作中的CTD数据,由于深海声速测量的难度和海底深度的不同,一些测量站位的声速测量深度存在较大差异,出现部分数据缺失。基于以上问题,本文先对CTD数据进行合理的外推,再利用声速经验公式计算17个站位的声速,然后使用17个站位的CTD声速剖面与2004年-2019年的BOA_Argo数据集中对应位置点的声速剖面进行对比分析。又因为CTD数据在0~10 m范围内部分缺失,利用最大角度法^[5]反推表面温度、盐度误差较大,因此选用测区内分辨率成像光谱仪(Moderate-resolution imaging spectroradiometer, MODIS)的海表面温度(Sea surface temperature, SST)与全球海洋实时观测网计划(Array for real-time geostrophic oceanography, Argo)网格数据集(BOA_Argo)中的表面温度进行比较,提高反推精度。

1 数据和方法

1.1 CTD数据预处理

数据来源于东南印度洋调查工作中采集到的17个站位的CTD数据,如图1所示,利用SBE Data Processing-win32软件对实测的原始数据进行初步

处理。主要数据处理过程包括数据转换、修正电导率、去除由于船只的起伏造成的数据“打结”以及利用电导率、温度、压力来计算盐度和温度等,最终根据实验需要将17个站位的CTD数据在深度上按1 m进行等间距插值并按.asc格式输出,便于后续处理。

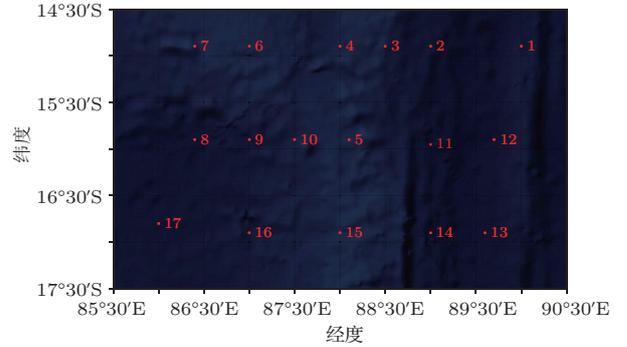


图1 CTD 站位分布图

Fig. 1 The distribution map of CTD stations

BOA_Argo数据集的测量深度数据均达到1975 m,而CTD数据由于测量点所在的深度并不统一,最深的达到5000 m,最浅的只有1500 m,测量位置点的深度间隔也不同,所对应的温度、盐度也不在同一深度上,因此需要将原始数据外推到与BOA_Argo数据集等深度处。

由于海水的声速主要是关于温度、盐度、深度的函数,直接拟合海水声速产生的误差比较大,但是海水的温度和盐度变化关系简单,同时变化范围也小,因此对温度以及盐度进行合理的拟合外推。Dell Grosso^[6]是目前应用最广的声速算法,并且Meinen等^[7]的研究结果表明,在海水中Dell Grosso的声速算法要比Chen和Millerer的好^[8],所以采用Dell Grosso^[6]声速经验公式(1)来计算完整的声速剖面:

$$C = C' + C_p, \quad (1)$$

式(1)中,

$$\begin{aligned} C' = & 1448.66 + 4.618T - 0.0523T^2 + 0.00023T^3 \\ & + 1.25(S - 35) - 0.11(S - 35)T \\ & + 2.7 \times 10^{-8}(S - 35)T^4 \\ & - 2 \times 10^{-7}(S - 34)^4(1 + 0.577T - 0.0072T^2), \\ C_p = & 0.160518D + 1.0279 \times 10^{-7}D^2 \\ & + 3.451 \times 10^{-12}D^3 - 3.503 \times 10^{-16}D^4, \end{aligned}$$

其中, T 是温度(单位: $^{\circ}\text{C}$), S 是盐度(用千分数表示), D 是深度(单位: m)。

从图2可以看到,在海水表层的部分,由于风浪的搅拌以及阳光照射等的作用,温度随着深度的增加而降低,并且各站位间差异也比较大;而在深海1000 m深度之后,温度变化就比较缓慢,各站位之间的差异也非常小。因此在深海部分选用两种方法拟合并且判断其拟合效果,一种是可以利用各深度温度平均值作为外推结果,然后结合已经实测的表层温度数据按多项式公式(2)进行拟合。拟合多项式的阶数要合理选择,在实验中可以将多项式拟合次数绘图,通过观察拟合的点进行判断,使其对表层温度分布曲线既不能因多项式阶数取得过多产生“过拟合”也不能取简单线性函数产生“欠拟合”。对于深度1000 m以下温度可近似看成随深度线性变化函数进行线性拟合。

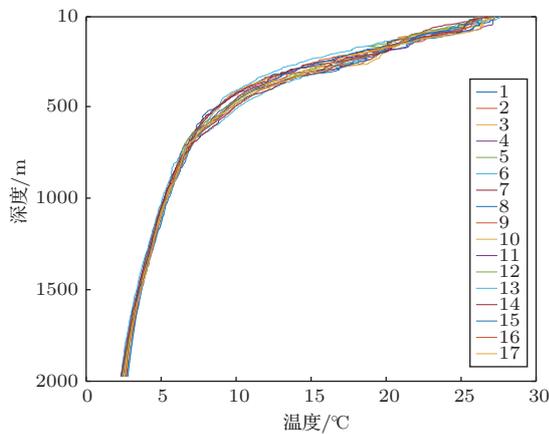


图2 CTD 站位温度

Fig. 2 The temperature of CTD stations

多项式拟合:

$$Y = a_n X^n + a_{n-1} X^{n-1} + \dots + a_1 X + a_0, \quad (2)$$

其中, n 为多项式的次数; Y 为拟合部分的实测声速(单位: m/s); X 为对应 Y 的水深值(单位: m)。

线性拟合:

$$T = \frac{p_1 \times Z + p_2}{Z^2 + q_1 \times Z + q_2}, \quad (3)$$

其中, T 为温度(单位: °C), Z 为深度(单位: m), p_1 、 p_2 、 q_1 以及 q_2 为参数。

拟合均方根(Root mean square, RMS)误差:

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M [T_{(Z_i)} - T'_{(Z_i)}]}, \quad (4)$$

式(4)中, M 为深度点数, $T_{(Z_i)}$ 为CTD测量温度, $T'_{(Z_i)}$ 为拟合温度。

4条温度曲线拟合的均方根误差如图3所示。对比两种方法发现将温度看作线性函数的拟合效果远好于多项式拟合,均方根误差只有0.12 °C。

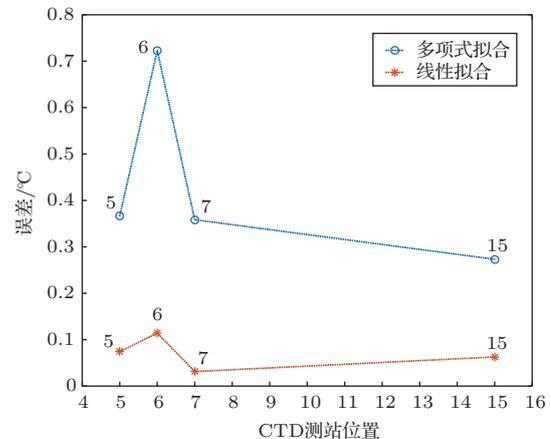


图3 拟合均方根误差

Fig. 3 The root mean square error of temperature fitting

从图4可以得到,在整个测区内盐度变化范围都很小,因此在对盐度进行外推时,可以利用各深度盐度均值作为外推的盐度数据^[2]。最后采用式(1)计算声速剖面。

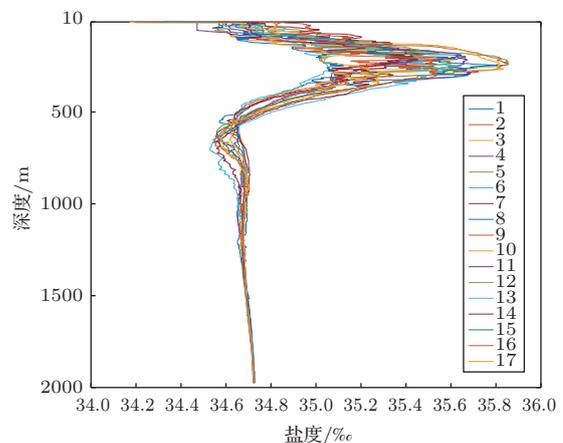


图4 CTD 站位盐度

Fig. 4 The salinity of CTD stations

1.2 BOA_Argo数据集

近几十年来,国际上出现了许多大范围、大规模的海洋观测计划及系统,其中覆盖范围最广、规模最大、数据最完善当属全球海洋实时观测网计划(Argo)^[9]。这个项目由美国、英国、法国等国家的大气和海洋科学家在1998年提出,并迅速得到其他国家的积极响应。Argo计划推出是为了实现快速测

量深度在2000 m内的全球各海洋温度和盐度的剖面实时资料数据,为海洋学科研究等提供数据支持。经过多年来的努力与多方合作,Argo计划已经形成了一个庞大的全球海洋观测体系。

本文研究中使用的是中国Argo实时资料中心(<http://www.argo.org.cn/>)^[10]提供的2004年–2019年的全球海洋Argo网格数据集(BOA_Argo)。BOA_Argo数据集格式如表1所示。选取BOA_Argo数据集中14.5S~17.5S、85.5E~90.5E范围数据,时间分辨率选择月平均数据和逐年月平均数据,空间分辨率为经纬度水平 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$,深度为0~1975 m,其中,0~10 m间隔5 m,10~180 m间隔10 m,180~460 m间隔20 m,460~500 m间隔40 m,500~1300 m间隔50 m,1300~1900 m间隔100 m,1900~1975 m间隔75 m。处理之后垂直方向0~1975 m空间间隔1 m。

表1 “BOA_Argo”数据集

Table 1 “BOA_Argo” data set

数据文件	数据介绍
BOA_Argo_YYYY_MM.mat	逐年逐月数据文件
BOA_Argo_annual.mat	年平均数据文件
BOA_Argo_monthly_*.mat	月平均数据文件

1.3 卫星遥感SST产品

SST可以通过遥感卫星的手段获取,其中MODIS是美国国家航空航天局(NASA)对地观测系统(Earth observing system, EOS)计划中最具有特色的传感器之一,可免费下載^[11]。MODIS同搭载在平台上的其他仪器一起通过轨道追踪和数据传播卫星系统(Tracking and data relay satellite system, TDRSS),向位于新墨西哥WhiteSand地面接收站传送数据,然后这些数据被发送到Goddard空间飞行中心的EOS数据和操作系统(EDOS)^[12]。系统经过0级数据处理之后,将资料分发至存档中心生成L1-A等产品,L2、L3及产品由MODIS应用处理系统(MODIS adaptive processing system, MODAPS)生成,然后再分发到3个NASA数据中心。

本文选用AQUA卫星获取的日平均SST产品和逐年逐月平均SST产品为研究对象,研究区域位于14.5S~17.5S、85.5E~90.5E之间,属于印度洋的东南部。选取2018年12月27日–2019年1月3日的日平均数据、2018年12月平均和2019年1月

平均数据,水平空间分辨率约为9 km。下载海洋产品中心(L3级SST产品,存储格式为.nc文件,通过读取文件中的属性数据、经纬度、SST等信息,最终确定以平均值的方法得到所需要的SST数据。

2 对比分析

在17个站位的CTD数据中,1~12站位的观测时间是2018年12月,13~17站位的观测时间是2019年1月。因此,为了比较以上CTD数据和BOA_Argo网格资料、遥感表层数据和BOA_Argo网格资料的差异,根据观测时间和地理位置,在就近原则下,本文首先在0~10 m,将卫星遥感SST数据看作等温的,然后和BOA_Argo网格资料进行误差分析,再分别选取“BOA_Argo”网格资料中的月平均(2004年–2019年1月和12月)和逐年逐月平均(2018年12月和2019年1月)进行分析。

2.1 SST对比

选用了相应时段由中国Argo资料中心提供的Argo网格数据集(BOA_Argo),其温度剖面顶层数据可以用来与MODIS的SST产品相互检验,提取BOA_Argo网格资料数据的顶层温度数据和相应的经纬度,作为MODIS的逐年月平均SST产品的检验数据。分析可知,MODIS日平均SST数据比逐年逐月平均SST数据的整体误差偏大,原因可能是选择的对比数据是BOA_Argo数据集中逐年逐月平均数据中的温度。表2列出了BOA_Argo数据集中逐年逐月平均表层温度数据与MODIS日温度平均数据、逐年逐月温度平均数据之间的差异。从表2中可以发现,相比于MODIS获取的日平均SST数据,MODIS逐年逐月SST数据与BOA_Argo数据集中逐年逐月平均表层的温度数据具有很好的一致性,两者的均方根误差为 0.5600°C ,平均绝对偏差为 0.4426°C ,误差和偏差较小,从平均意义上

表2 MODIS与BOA_Argo的SST误差

Table 2 SST errors of MODIS and BOA_Argo

(单位: $^{\circ}\text{C}$)		
误差	MODIS 逐年逐月	MODIS 逐日平均
最大误差	1.3021	1.3372
最小误差	0.0212	0.2689
平均绝对偏差	0.4426	0.7322
均方根误差	0.5600	0.8347

来看,BOA_Argo 网格资料数据反推表层温度数据的处理方法是基本可行的。

2.2 对比 BOA_Argo 数据集

选择“BOA_Argo”数据集中的月平均数据(2004年-2019年的1月和12月)和逐年月平均数据(2018年12月和2019年1月)与CTD数据进行对比,为了分析哪一种数据与CTD数据更加接近的问题,首先需要对各个站位进行合理的选取。根据调查工作中17个CTD的位置和测量时间的关系,按照时间和空间上的就近原则选取“BOA_Argo”

数据集中的网格点。

通过计算17个站位的CTD数据与“BOA_Argo”数据集中的2004年-2019年的1月和12月平均、2018年12月平均和2019年1月平均的残差,如图5~8所示,从整体上可以发现,“BOA_Argo”数据集中的两种数据得到的声速与CTD数据计算得到的声速具有较好的一致性,这也从侧面反映了Argo 浮标工作的稳定性。但是逐年月平均数据的残差明显差别更小,所以“BOA_Argo”数据集中逐年月平均数据得到的声速剖面明显比一年的月平均数据吻合得更好。

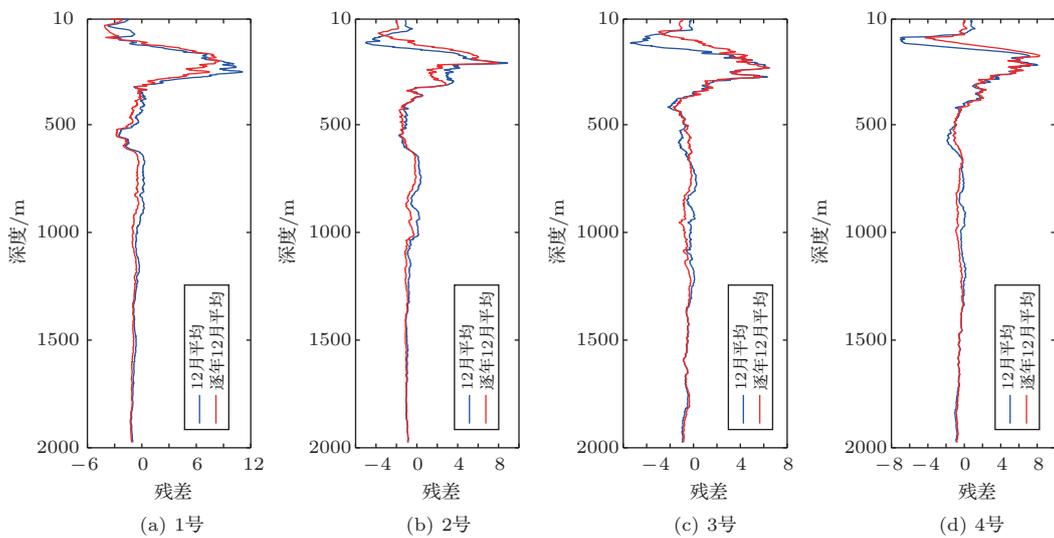


图5 1~4号站位12月平均、逐年12月平均与BOA_Argo的残差

Fig. 5 The residuals between the average of December and the average of December year by year of Station 1~4 and BOA_Argo

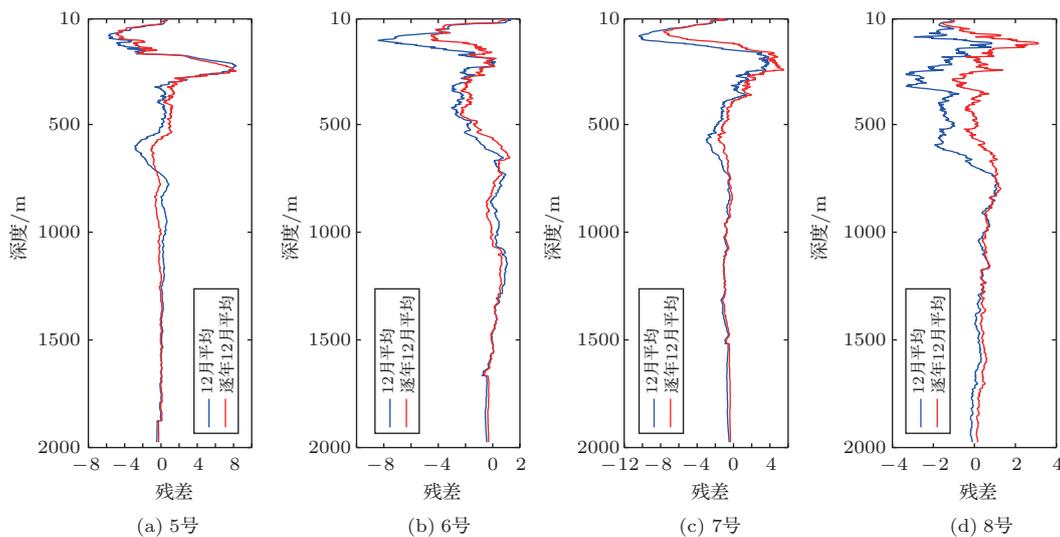


图6 5~8号站位12月平均、逐年12月平均与BOA_Argo的残差

Fig. 6 The residuals between the average of December and the average of December year by year of Station 5~8 and BOA_Argo

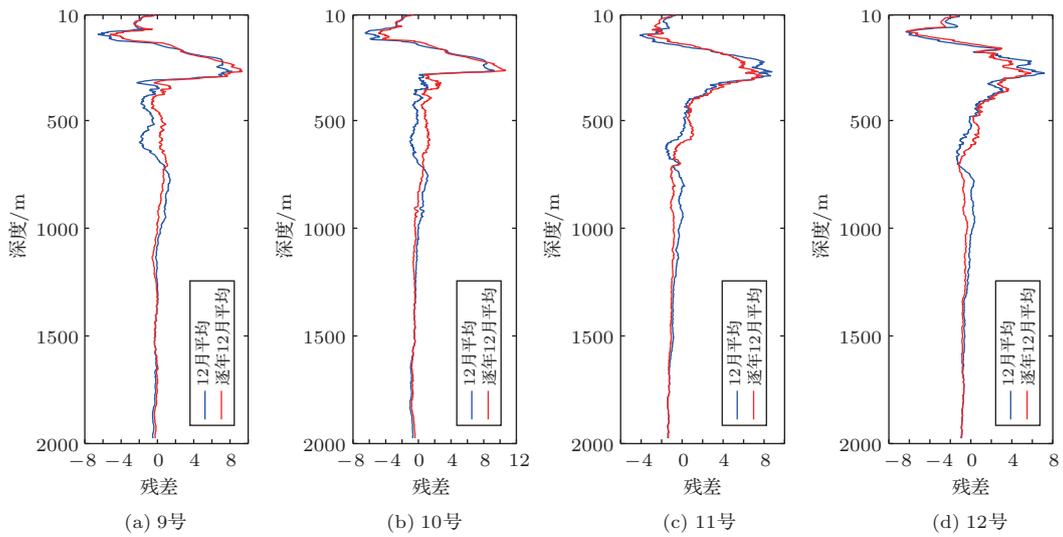


图7 9~12号站点12月平均、逐年12月平均与BOA_Argo的残差

Fig. 7 The residuals between the average of December and the average of December year by year of Station 9~12 and BOA_Argo

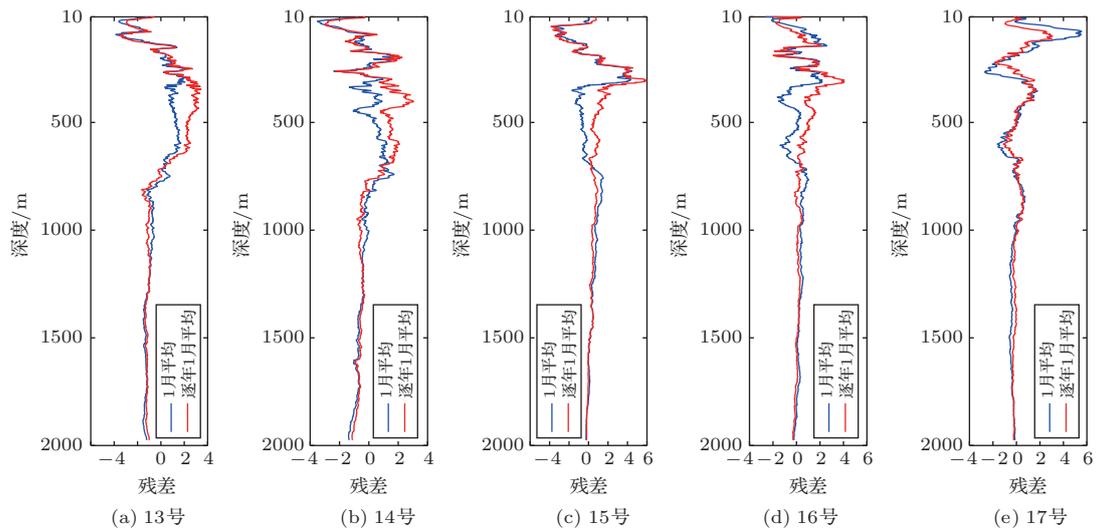


图8 13~17号站点1月平均、逐年1月平均与BOA_Argo的残差

Fig. 8 The residuals between the average of December and the average of December year by year of Station 13~17 and BOA_Argo

“BOA_Argo”数据集与CTD数据的温度误差在 $-3.5^{\circ}\text{C} \sim 3.2^{\circ}\text{C}$ 范围之内，盐度误差在 $-0.8\text{‰} \sim 0.7\text{‰}$ 之间。从17个残差图中可以发现，在10~300 m深度之间，声速出现两次比较大的波动，一次是在100 m附近，另一次在200~250 m附近，造成这种结果的原因主要是在浅水区，温度的变化比较显著，由于海水声速跟海水的温度、盐度以及静水压力有关，所以，海水中的温度、盐度跃层会直接影响声速跃层的变化。结果发现两次波动比较大的原因是海水温度突然发生了变化。

在深度达到1000 m以下的深水区，由于海水的环境相对稳定，以此“BOA_Argo”网格资料数据和CTD数据比对的结果误差也更小，得到的声速几乎一致。又通过计算与两种数据的均方根误差(见表3)，发现CTD数据的17个站点中，逐年月平均的均方根误差普遍比月平均小，也有3号站位的月平均略小但是整体相差不大，以及11号站位的均方根误差稍大一些。综合均方根误差得到逐年月平均数据计算的声速剖面略优于月平均数据吻合的效果。

表3 不同数据下均方根误差

Table 3 RMS error for different data

(单位:m/s)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
月平均	0.8269	0.8019	0.4891	0.5945	0.5241	0.7760	0.7791	0.5520	0.5747
逐年月平均	0.6448	0.7243	0.5365	0.6258	0.7022	1.0436	1.0878	0.8468	0.7828
	10	11	12	13	14	15	16	17	
月平均	0.6642	1.2794	0.9074	1.4218	0.9468	0.8768	0.7936	0.4465	
逐年月平均	0.4710	1.1057	0.7761	0.9422	0.5838	0.7765	0.6624	0.5129	

3 结论

本文利用某一次在东南印度洋调查工作中17个站位的CTD数据与中国Argo资料中心提供的“BOA_Argo”网格资料数据集进行了比对分析,得出以下主要结论:

(1) 在深度1000 m范围内,温度数据用线性拟合比用多项式拟合进行外推的效果好,再利用声速经验公式计算声速剖面误差要小得多。

(2) 因CTD的表层0~10 m数据缺失,选择利用卫星遥感的SST产品与BOA_Argo网格资料数据集中逐年月平均数据作比较,发现BOA_Argo数据集反推得到的表层温度在平均意义上是比较准确的。

(3) 逐年逐月和月平均的网格资料数据,它们在一定程度上都能反映出Argo数据的精确性,其中逐年逐月的网格资料数据的声速剖面与本次CTD测量的声速剖面要符合得更好。

参 考 文 献

- [1] 刘伯胜,雷家煜.水声学原理[M].哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2010.
- [2] 张维,黄益旺,王延意,等.利用残缺样本声速重构声速剖面[J].声学技术,2012,31(4):371-374.
Zhang Wei, Huang Yiwang, Wang Yanyi, et al. Sound speed profile reconstruction from incomplete sample data[J]. Technical Acoustics, 2012, 31(4): 371-374.
- [3] 张镇迈,李整林,戴琼兴.利用有限深度声速数据重构全海深声速剖面[C]//2008年全国声学学术会议论文集,2008.

- [4] 卢少磊,刘增宏,李宏,等.全球海洋Argo网格资料集(BOA_Argo)用户手册[EB/OL].<http://ftp.argo.org.cn/uploadfile/2020/1102/20201102023354308.pdf>.
- [5] 张春玲,许建平,鲍献文,等.基于海温参数模型推算Argo表层温度[J].海洋通报,2014,33(1):16-26.
Zhang Chunling, Xu Jianping, Bao Xianwen, et al. Estimation of Argo sea subsurface temperature based on a thermal parametric model[J]. Marine Science Bulletin, 2014, 33(1): 16-26.
- [6] Chen C T. Speed of sound in seawater at high pressures[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1977, 62(5): 1129-1135.
- [7] Meinen C S. Further evidence that the sound-speed algorithm of Del Grosso is more accurate than that of Chen and Millero[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1998, 102(4): 2058-2062.
- [8] Del Grosso V A. New equation for the speed of sound in natural waters (with comparisons to other equations)[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1974, 56(4): 1084-1091.
- [9] 李博.基于Argo数据的海洋时空声速预测方法研究[D].长春:吉林大学,2020.
- [10] 李宏,刘增宏,许建平,等.全球海洋Argo网格数据集(BOA-Argo)用户手册[R].杭州:中国Argo实时资料中心,2017.
- [11] 霍文娟,韩震.印度洋北部海域垂直剖面温度结构的参数模型[J].海洋环境科学,2013,32(3):368-372,380.
Huo Wenjuan, Han Zhen. Parametric model of seawater temperature profile in the Northern Indian Ocean[J]. Marine Environmental Science, 2013, 32(3): 368-372, 380.
- [12] 丁静,唐军武,林明森.MODIS水体遥感数据的获取与产品处理综述[J].遥感技术与应用,2003,18(4):263-268.
Ding Jing, Tang Junwu, Lin Mingsen. Acquisition of MODIS ocean color satellite data and its data processing[J]. Remote Sensing Technology & Application, 2011, 18(4): 263-268.