

船载 CTD 仪与自动剖面浮标观测资料质量初探*

吴晓芬¹ 周 慧² 曹敏杰¹ 刘增宏¹ 孙朝辉¹ 卢少磊¹

(1. 卫星海洋环境动力学国家重点实验室 自然资源部第二海洋研究所 杭州 310012; 2. 海洋环流与波动重点实验室 中国科学院海洋研究所 青岛 266071)

摘要 海洋科学的发展离不开精确的数据,然而各种海洋观测仪器在复杂的海洋环境中作业难免产生测量误差,导致观测数据需要进行实时(或延时)质量控制。中国 Argo 计划在搭载多个航次布放剖面浮标的同时,对航次中获取的船载 CTD(conductivity, temperature, and depth)仪观测资料、自动剖面浮标观测资料以及实验室高精度盐度计测量数据进行了实时比对。分析结果显示,利用实验室高精度盐度计对现场观测数据尤其是船载 CTD 仪观测资料进行质量控制,于温盐数据(特别是深层)的实时/延时校正非常重要;如某航次未经标定的船载 CTD 仪所测 1000dbar 以深范围内海水盐度,与实验室高精度盐度计的差值达到 ± 0.1 左右,远远落后于国内海洋调查规范对盐度准确度 ± 0.02 的一级测量要求,该具体实例更加突显了船载 CTD 仪在航次前后送往权威部门进行检测的必要性和重要性,从而确保每个航次获取的 CTD 资料的质量。建议有条件的情况下,在进行深海大洋船载 CTD 仪观测时要进行现场实验室高精度盐度计的质量控制工作及比对试验,以提高我国深海大洋观测数据的质量。

关键词 自动剖面浮标; 船载 CTD 仪; 实验室高精度盐度计; 资料质量

中图分类号 P714+.1 **doi:** 10.11693/hyhz20180400099

对物理海洋现象及其特征和变化规律的认识,往往需要积累较长时间序列的海洋环境要素(如海水温度和盐度等)资料。然而,在漫长的收集和积累过程中,往往会用到不同的观测仪器设备,有机械式的,也有电子感应式的,或者是遥测的,它们也都会因各种因素产生各种不同的测量误差(许建平等, 1999; Owens *et al.*, 2009; Cheng *et al.*, 2014; 奚文洁等, 2014; 李凯峰等, 2018; 陈建等, 2018),需要采用一致公认的观测仪器和方法进行同步或准同步的比较测量(Boyer *et al.*, 2015; 奚萌等, 2017),以便能了解和掌握各种观测仪器的准确度和可能产生的测量误差,并能根据不同的研究目的和要求,决定对观测资料采取实时模式质量控制(对资料准确度要求较低)和延时模式质量控制(资料准确度要求较高)。如国标“GB/T12763.2-2007《海洋调查规范 第 2 部分 海洋水文要素调查》”《之“盐度调查”的规定:“在利用船

载 CTD(conductivity, temperature, and depth)测盐度时,每天至少选择一个比较均匀的水层,与利用实验室高精度盐度计对海水样品的测量结果比对一次。深水区测量盐度时,每天还应采集水样,以便进行现场标定”。中国 Argo 计划在实践这些质量控制工作的过程中,发现在我国海洋界,无论是管理部门还是科研院所,大都缺乏对海上观测资料质量控制重要性的认识,普遍只重视获取某一航次的现场观测资料,而忽视对资料的质量控制,对同一海区不同航次的观测资料进行质量控制更是无人问津,导致观测资料质量不高(即使有朝一日得到重视,但也是无力回天,没有同步或准同步的“标准”测量数据,也就难以补救)。

中国 Argo 自 2002 年加入国际 Argo 计划以来(刘增宏等, 2016; Riser *et al.*, 2016; Liu *et al.*, 2017),依托“国家重点基础研究发展规划(973 计划)项目”、“海洋

* 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目, JG1812 号, JG1710 号, JG1713 号; 国家自然科学基金委青年基金项目, 41406022 号, 41606003 号。吴晓芬, 助理研究员, E-mail: wuxiaofen83@163.com

收稿日期: 2018-04-18, 收修改稿日期: 2018-11-30

公益性行业科研专项经费项目”、“科技基础性工作专项项目”等国家大型科研项目, 搭载 20 多个航次在太平洋、印度洋等海域投放了 400 多个自动剖面浮标(目前仍有 104 个浮标在海上正常工作)。国际 Argo 指导组和资料管理小组要求(Roemmich *et al*, 2001; Kobayashi, 2004; 刘增宏等, 2006a; 卢少磊等, 2014; Bhaskar *et al*, 2017; Coriolis Data Management, 2017) 各国在投放 Argo 剖面浮标的同时, 尽可能借助船载 CTD 仪对浮标观测的温度、盐度资料, 特别是第一条观测剖面进行现场质量控制, 以验证剖面浮标观测资料的质量(孙朝辉等, 2005; 刘增宏等, 2006b, 2007; 王辉赞等, 2012; 卢少磊等, 2016)。故每一航次, 我们会都针对所投放的自动剖面浮标观测资料进行质量控制并出具航次报告, 即利用实验室高精度盐度计对在浮标投放站点采集的海水样品进行盐度测定, 并与 CTD 仪和剖面浮标观测的盐度数据(通常是第一条剖面)进行比对。

海上观测通常是利用船载 CTD 仪或剖面浮标所携带的温度和电导率传感器完成的, 但是温度传感器的性能和可靠性要远优于后者, 其观测的温度的准确度也要明显高于盐度的准确度。所以, 人们在利用上述仪器设备对深海大洋进行温度和盐度测量时, 往往只关注和重视电导率传感器的观测误差。此外, 目前国内广泛利用的船载 CTD 仪, 虽有一部分携带了玫瑰型采水器, 可以通过采集水样进行实验室盐度测定, 但似乎没有同时携带颠倒温度表进行温度同步测量的。所以, 即使人们想要对温度进行现场同步比较观测与资料质量评价, 目前仍缺少有效的比测手段。综上所述, 本文的主要目的是就船载 CTD 仪、自动剖面浮标以及实验室高精度盐度计的比测工作进行总结, 并主要通过盐度比测来检验各观测仪器的质量, 提供给国内海洋界以参考。

1 观测仪器及比测方法

1.1 观测仪器

1.1.1 船载 CTD 仪 各航次船载 CTD 观测通常采用由美国海鸟公司生产的 SeaBird 911 型 CTD 仪, 其主要技术指标如表 1 所示。中国 Argo 计划在投放自动剖面浮标的同时, 一般均会采集浮标投放站位上的 CTD 仪观测数据用于对浮标测量数据进行比对分析, 了解和掌握浮标观测资料的质量。

需要指出的是, 由于受异常天气和恶劣海况(如台风、风浪和涌浪)等环境因素的影响, 船载 CTD 仪

难免也会出现故障, 如基金委 2017 年西太平洋开放共享航次期间, 携带的船载 CTD 仪就曾多次(2017 年 10 月 27 日和 11 月 1 日)出现信号传输错误, 后经对 CTD 仪进行拆卸排查、重新布缆等, 方才排除故障。在这种情况下, 对于 CTD 仪观测资料的质量控制工作就显得尤为重要。

1.1.2 自动剖面浮标 中国 Argo 计划投放的浮标主要有美国引进的 APEX 型和 NAVIS 型、法国引进的 PROVOR 型和 ARVOR 型、国产的 HM2000 型等, 其中投放数量最多的是 APEX 型自动剖面浮标, 而国产剖面浮标虽在近些年才开始小批量投放, 但人们对其观测资料的质量还知之甚少。因此, 这里主要介绍 APEX 和 HM2000 两种类型的自动剖面浮标。

APEX 型浮标(Kobayashi *et al*, 2009; Hsu *et al*, 2018)由美国 Teledyne Webb 公司研制生产(图 1, 其技术指标见表 1), 常规下采用 Argos 卫星传输观测数据, 但近几年开始更多使用铱卫星进行定位和通讯。采用铱卫星通讯的浮标相比常规采用 Argos 通讯, 具有更高分辨率的采样层次, 其采样层数甚至可以达到千余层(垂向间隔约 2dabr, 而常规剖面浮标的观测层次仅为 70 个左右); 使用铱卫星浮标还实现了双向通讯, 即科学家们可以轻松通过地面接收站改变浮标的技术参数设置(如观测周期、漂移深度、高分辨率采样层次等), 这使得在特殊海况下(如观测台风源地的海洋状况等)通过剖面浮标进行加密观测成为可能。

国产的 HM2000 型浮标(沈锐等, 2017)由中船重工第 710 研究所研制(图 2), 其主要技术指标如表 1 所示。这也是目前唯一被国际 Argo 组织认可, 并接纳用于全球 Argo 实时海洋观测网建设与维护的国产海洋观测仪器设备, 可利用我国北斗导航系统提供定位和观测数据的传输服务(也称“北斗剖面浮标”), 以及设立在杭州的“北斗剖面浮标数据服务中心”直接接收、解码和处理来自该类型浮标的观测信息和测量数据, 并可按国际 Argo 资料管理组的要求进行严格质量控制, 随后通过中国气象局的全球通讯系统(Global Telecommunication System, GTS)接口, 与世界气象组织(World Meteorological Organization, WMO)和国际 Argo 计划成员国及时共享。

1.1.3 实验室高精度盐度计 中国 Argo 计划在投放自动剖面浮标的同时, 会采集浮标投放站位上

特定层次上的标准海水样品, 并使用加拿大 Guildline 公司生产的 AUTOSAL 8400B 型实验室高精度盐度计(童明荣等, 2003)进行测定(图 2, 技术指标见表 1), 用于检验船载 CTD 仪观测数据的可靠性。

由表 1 可见, 无论是船载 CTD 仪, 还是自动剖面浮标, 其提供的温度、电导率(盐度)传感器的测量准确度都非常高, 但其在海上的实际观测准确度则

要低得多, 如“GB/T12763.2-2007《海洋调查规范 第 2 部分 海洋水文要素调查》”(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局等, 2007)规定, 水温和盐度观测准确度的一级要求分别为 $\pm 0.02^{\circ}\text{C}$ (分辨率 0.005°C)和 ± 0.02 (分辨率 0.005), 国际 Argo 计划(Coriolis Data Management, 2017)要求的全球海洋温、盐度的观测准确度则分别为 0.005°C 和 0.01 (Liu *et al.*, 2017)。

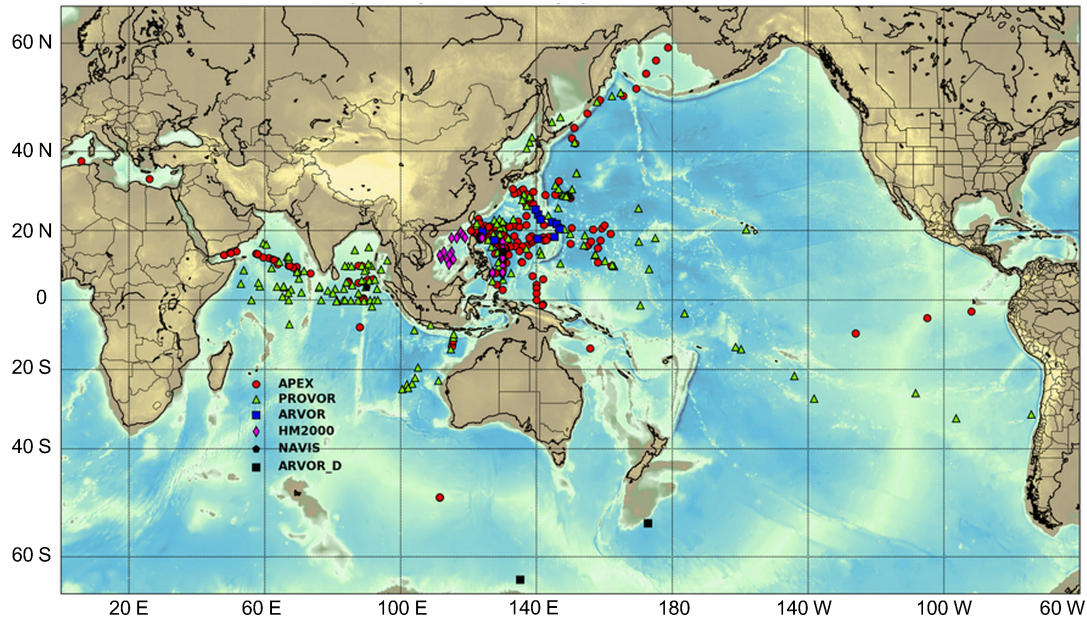


图 1 中国 Argo 投放的自动剖面浮标概位(截止 2018 年 1 月 18 日)

Fig.1 General positions of the floats deployed by China Argo (by Jan 18 in 2018)



图 2 APEX 型(左)、HM2000 型(中)剖面浮标及 AUTOSAL 8400B 型实验室高精度盐度计(右)

Fig. 2 Profiling floats with APEX type(left) and HM2000 type(middle) and AUTOSAL 8400B laboratory salinometer (right)

表 1 CTD 仪、剖面浮标和实验室高精度盐度计的各项指数指标
Tab.1 Index indices of CTD, profiling float and laboratory salinometer

| 技术要素 | CTD 仪 | APEX 型浮标 | HM2000 型浮标 | 实验室高精度盐度计 |
|---------|---------------|------------|---------------|-----------|
| 使用寿命 | / | 最多 5a | 最多 3 年 | / |
| 循环周期 | / | 10d (铱星可调) | 1~10 天, 可更改 | / |
| 漂流深度 | / | 1000dbar | 1000dbar, 可更改 | / |
| 剖面深度 | / | 2000dbar | 2000dbar, 可更改 | / |
| 温度测量范围 | -5—35°C | -5—45°C | -5—45°C | / |
| 温度测量准确度 | 0.001°C | ±0.002°C | ±0.002°C | / |
| 温度分辨率 | 0.0002°C | 0.001°C | 0.001°C | / |
| 盐度测量范围 | 0—70mmho/cm | 10—42 | 2—42 | 2—42 |
| 盐度测量准确度 | 0.003mmho/cm | ±0.005 | ±0.002 | ±0.002 |
| 盐度分辨率 | 0.0004mmho/cm | 0.001 | 0.001 | 高于 0.0002 |
| 压力测量范围 | <15000PSIA | 0—2000dbar | 0—2500dbar | / |
| 压力测量准确度 | 测量最大值的 0.15% | ±2.4dbar | ±2dbar | / |
| 压力分辨率 | 测量程的 0.001% | 0.1dbar | 0.1dbar | / |

1.2 盐度值的比测过程

2017 年 10 月 15 日—11 月 17 日, 中央级大型科研仪器设备购置专项资助的“自动剖面浮标实时海洋观测系统”项目, 搭载由中科院海洋研究所负责的国家自然科学基金委西太平洋开放共享航次(由“科学”号科考船执行), 在该海域布放了 5 个 HM2000 型剖面浮标。我们将以此为例来说明各资料之间的具体比测过程。

按调查计划(参考“GB/T12763.2-2007《海洋调查规范 第 2 部分 海洋水文要素调查》之 6.2 内容), 布放自动剖面浮标的同时, 还需采用船载 CTD 仪进行比较观测, 以及采集特定层次上的水样并进行实验室盐度测定等。其中, 各剖面浮标的第一个剖面信息可以在布放后的 12h 内获取; 在 5 个剖面浮标投放站位, 船载 CTD 仪的剖面观测均为全深度(即表层到底层, 各站位水深基本都超过 4000dbar)观测; 浮标投放站采水层次分别为 2000dbar、1800dbar、1500dbar、1200dbar、1000dbar、750dbar、500dbar、200dbar、50dbar 等 9 层(其中确保采集 2000—1000dbar 深度范围内的水样, 作为比测的重点)。此外, 为了查看 CTD 仪在航次前后是否存在测量误差, 本航次还采集了第一个 CTD 站位和最后一个 CTD 站位 9 个标准层上的水样, 航次结束后, 使用 AUTOSAL 8400B 型高精度盐度计测得了全部海水样品的盐度值。

1.2.1 CTD 仪与实验室高精度盐度计的比测 船载 CTD 仪在运输、安装以及海上测量过程中, 遭遇恶劣海况条件(比如本航次曾遭遇两次台风影响)和周

围电子信号干扰, 甚至电子原器件老化和海面油污污染等因素的影响, 可能会带来自身的测量误差, 故利用船载 CTD 仪携带的玫瑰型采水器收集代表性层次上的海水样品(比测的主要目的是为了对剖面浮标观测资料进行质量控制, 而浮标一般是在 1000m 深度上随波逐流的, 且第一条剖面是投放后 12h 以内才获取到的, 与 CTD 仪和海水水样存在时空上的差异, 考虑到深层海水的盐度一般而言相对比较保守, 在一定时间和范围内基本保持恒定, 且水深越大, 变化越小, 所以比测通常在 1000dbar 深度以下), 再利用实验室高精度盐度计测量出代表性层次上的海水样品盐度值, 通过比较、确定船载 CTD 仪的观测结果正确无误后, 再用来验证自动剖面浮标的观测结果。这一质量控制方法已经普遍被国际物理海洋界所认可, 并被广泛应用于对剖面浮标观测资料质量高低的评判及其对 Argo 数据的延时模式质量控制中。此外, 一般航次收集的 CTD 数据是 CTD 仪下沉至海底过程中观测获得的资料, 然而由于海水样品的采集是在 CTD 仪上升的时候发生的, 所以与样品测定的盐度相比较的应当是上升时候的 CTD 数据, 表 2 中列出的“盐度值(CTD)”正是 CTD 仪上升过程中测量的盐度。

本航次遭遇了 2 次台风, 船载 CTD 仪也曾发生 2 次故障, 那么 CTD 仪的观测准确度是否受到了影响? 为此, 我们首先对第一个(N18-8)和最后一个(N18-10)CTD 站位上观测的盐度剖面与特定层上海水样品测定的盐度, 进行了对比(表 2)分析, 发现

在 1000dbar 以深, 二者的差值均小于 0.02(完全满足“GB/T12763.2-2007《海洋调查规范 第 2 部分 海洋水文要素调查》”对盐度准确度一级(± 0.02)的要求), 而且绝大多数比测层上的差值绝对值都小于

0.01(在 0.0003 ~ 0.0063 范围内变化), 能满足国际上对盐度测量准确度的要求(Annie *et al*, 2018)。由此可见, 本航次获得的船载 CTD 仪观测数据应该是可信的。

表 2 航次首末站位 CTD 仪观测盐度值与实验室高精度盐度计测量盐度值的结果对比
Tab.2 Salinity comparison of the CTD and laboratory salinometer observations at the first and last station

| | 深度(m) | 盐度值(盐度计) | 盐度值(CTD) | 盐度差值(盐度计-CTD) |
|------------------|-------|----------|----------|---------------|
| 航次第一个 CTD 站位 | 4642 | 34.7003 | 34.6841 | 0.0162 |
| | 4000 | 34.6852 | 34.6825 | 0.0027 |
| | 3000 | 34.6737 | 34.6681 | 0.0056 |
| | 2500 | 34.6591 | 34.6546 | 0.0045 |
| | 2000 | 34.6346 | 34.6281 | 0.0062 |
| | 1000 | 34.5862 | 34.5779 | 0.0063 |
| 航次最后一个 CTD 站位 | 5600 | 34.6821 | 34.6818 | 0.0003 |
| | 5000 | 34.6852 | 34.6820 | 0.0032 |
| | 4000 | 34.6811 | 34.6790 | 0.0021 |
| | 3000 | 34.6672 | 34.6642 | 0.0030 |
| | 2000 | 34.6338 | 34.6303 | 0.0035 |
| | 1000 | 34.5034 | 34.5056 | -0.0022 |

注: 粗体表示差值绝对值大于 0.01, 余同

1.2.2 CTD 仪与自动剖面浮标观测数据比对

在确定了本航次 CTD 仪观测数据可靠的基础上, 对 5 个浮标投放站位进行了盐度计测定盐度、CTD 仪观测盐度与剖面浮标观测盐度的比测分析(如表 3 所示, 仅以 E130-7 和 E130-12 为例)。

比较 E130-7 站位的盐度值可以看出, 在 1000dbar 以深范围, 剖面浮标和 CTD 仪与盐度计

相比, 二者的盐度值与盐度计的差值绝对值均小于 0.01(满足国际上盐度测量标准), 各观测资料之间的吻合性较好。E130-12 站位上, 1000dbar 以深, CTD 仪与实验室高精度盐度计的盐度差值绝对值同样都小于 0.01, 而剖面浮标与盐度计盐度差值的绝对值仅在一个层次(1200dbar)上大于 0.01(仍小于 0.02)。

表 3 浮标投放站位 CTD 仪与剖面浮标观测盐度值及实验室高精度盐度计测量盐度值对比表(仅以 E130-7 和 E130-12 为例)

Tab.3 Salinity comparison of the profiling floats, CTD and laboratory salinometer observations at the Argo deploying stations

| | 深度(m) | 盐度值 (CTD) | 盐度值 (浮标) | 盐度值 (盐度计) | 盐度差值 (CTD-盐度计) | 盐度差值 (浮标-盐度计) |
|------------|-------|--------------|-------------|--------------|-------------------|------------------|
| E130-7 站位 | 2000 | 34.6286 | 34.634 | 34.6305 | -0.0019 | 0.0035 |
| | 1800 | 34.6121 | 34.599 | 34.6072 | 0.0049 | -0.0082 |
| | 1500 | 34.5800 | 34.568 | 34.5752 | 0.0048 | -0.0072 |
| | 1200 | 34.5588 | 34.547 | 34.5569 | 0.0019 | -0.0099 |
| | 1000 | 34.5463 | 34.530 | 34.5342 | 0.0121 | -0.0042 |
| E130-12 站位 | 2000 | 34.6358 | 34.628 | 34.6343 | -0.0015 | -0.0063 |
| | 1800 | 34.6215 | 34.618 | 34.6272 | -0.0053 | -0.0092 |
| | 1500 | 34.5960 | 34.583 | 34.5884 | 0.0076 | -0.0054 |
| | 1200 | 34.5632 | 34.552 | 34.5705 | -0.0073 | -0.0185 |
| | 1000 | 34.5424 | 34.533 | 34.5422 | 0.0002 | -0.0092 |

对比发现, 不仅航次第一个和最后一个 CTD 站上船载 CTD 仪观测的盐度与现场采集的海水样品盐度基本吻合, 5 个浮标投放站位上 CTD 仪观测的盐度也与采集的海水样品盐度基本吻合(1000—2000dbar 范围采集 5 层水样, 5 个站位共计 25 个盐度比对层, CTD 仪观测的盐度值与样品盐度之间差值仅在 3 个层次不能满足盐度测量的国际准确度标准(± 0.01), 占 12%)。故此, 我们认为, 虽然 CTD 在航次期间出现过 2 次故障, 但幸运的是, 其观测资料仍然是可信的, 故可以用它们来校正剖面浮标观测资料。

进一步, 我们绘制了 5 个布放浮标站位上的 T-S 曲线和温度(均为现场温度)、盐度垂直分布(这里仅给出 E130-7 站位的图示), 如图 3 所示。其中左图呈现的是各个测站上的温、盐度垂直分布, 红色点划线表示由 CTD 仪观测的温度(注: 此处使用的是 CTD 仪下沉时测量的数据)、红色实线表示由剖面浮标观测的温度, 蓝色点划线为 CTD 仪观测的盐度、蓝色实线为剖面观测的盐度; 右图为各个测站上的 T-S 曲线, 黑色线条表示 CTD 仪观测结果、红色为剖面浮标观测的结果。

由图 3 可以看出, 1000dbar 以深范围, E130-7 站位上 CTD 仪和剖面浮标的盐度曲线吻合的很好(表略, 盐度差值均在 ± 0.01 的范围以内), 而其余 3 个站位 CTD 盐度曲线(图略)均落在剖面浮标盐度曲线的右侧, 也即 CTD 仪观测盐度要略大于剖面浮标观测的盐度, 然而所有的差值绝对值仍然不超过 0.02 的国标盐度测量要求, 说明这些剖面浮标观测获得的盐度值也都是可信的。

2 比测结果分析

2.1 CTD 仪观测数据出现显著偏差事件 I

2016 年 9 月, 科技基础性工作专项——“西太平洋 Argo 实时海洋调查”重点项目搭载基金委南海中部海盆综合调查计划航次(由中科院南海海洋研究所“实验 1”号科考船执行), 在西太平洋海域投放了 8 个 HM2000 型剖面浮标(其中一个因通讯故障未能传回观测剖面); 还获得了 8 个浮标投放站位 0—2000dbar 水深范围的 CTD 仪观测数据, 并累计采集了 54 个海水样品, 然而由于实验室高精度盐度计出现故障需要返厂维修, 从而导致海水样品无法测定, 不得已只能借助历史观测资料进行比较分析, 以此判断 HM2000 型浮标的观测质量及其可靠性, 同时供校正本航次船载 CTD 仪观测资料做参考。

图 4 和图 5 给出了本航次 2 个布放剖面浮标的 CTD 站位上的 T-S 曲线和温盐垂直分布, 并分别计算了 7 个浮标投放站代表层次上的盐度差值(表略)。1000dbar 以深, CTD 和浮标观测的盐度差值绝对值仅在个别测站、个别层次上符合国际 Argo 计划规定的盐度观测准确度(± 0.01), 其它层次上二者差值较大(0.011—0.033); 由其中两个测站(图 4 和图 5)的 T-S 曲线可以看出, 船载 CTD 仪与剖面浮标资料, 甚至与历史观测资料比较, 其温盐度均具有相同的变化趋势, 相互之间十分接近, 尤其在 1000dbar 水深以下, 几乎已经重合。但仔细观察它们之间的重合程度发现, 船载 CTD 仪的观测结果偏离 HM2000 型浮标和历史观测结果较大, 而后二者之间比较接近, 可以初步判断, 本航次利用船载 CTD 仪获取的观测资料, 无法作为验证浮标观测质量的真值。考虑到历史观测资料的日期比较早(20 世纪 90 年代), 且海洋动力可能存在多种时间尺度的变化, 故单单依据 CTD 仪观测结果与历史和浮标观测结果之间的差别并不能完全说明 CTD 仪观测结果存在问题, 但航次期间 CTD 仪确实出现接口短路的故障。

为了更加直观地比较和验证各种观测资料的质量及其可信度, 还收集了观测海域历史上利用船载 CTD 仪观测的、且最大观测深度大于 2000dbar 的剖面进行了比较分析, 并将本航次船载 CTD 仪和 HM2000 型剖面浮标观测的资料, 与同期 APEX 型剖面浮标观测的结果和历史船载 CTD 仪观测的结果, 统一绘制在同一幅 T-S 图(图 6)上对比。不难发现, HM2000 型浮标获取的剖面资料与同期 APEX 浮标和历史船载 CTD 仪观测的结果更吻合; 而本航次船载 CTD 仪的剖面观测资料同样要比同期 APEX 浮标和历史船载 CTD 仪观测的结果偏高些, 估计偏差在 0.01—0.03 之间。

综上所述, 从这些站位的数据比测来看, 本航次船载 CTD 仪观测结果与浮标剖面和历史观测资料存在系统性偏差, 且该偏差很可能是 CTD 仪短路故障导致的, 且该误差应当是可以提前预知的。况且, 根据国标海洋监测和海洋调查规范要求, 在调查仪器出现故障并进行维修后, 不能马上投入使用, 需要送往权威部门进行检定, 在确保仪器准确度后方可投入使用。此举也是为了保证调查数据的质量, 而本航次出现的问题也正好说明了仪器标定的重要性。

2.2 CTD 仪观测数据出现显著偏差事件 II

2009 年 7 月国家科技部《国家重点基础研究发展规划》(973 计划)——“基于全球实时海洋观测计划

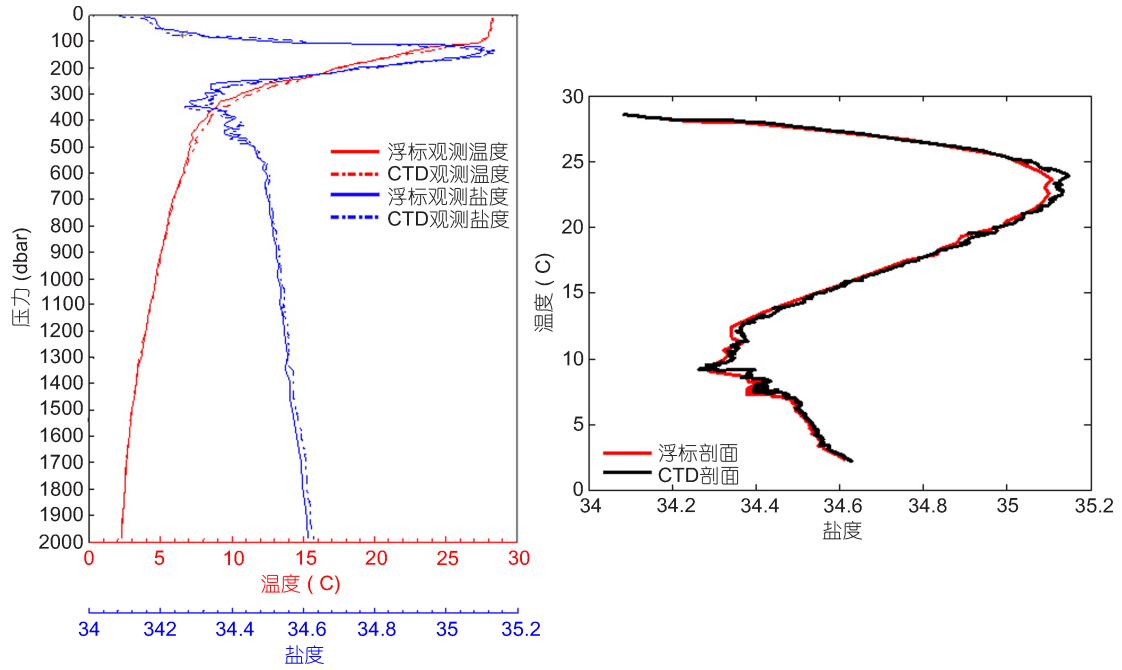


图3 E130-7 站位上温、盐度垂直分布(左)和 T-S 曲线(右)

Fig.3 Vertical distributions of the temperature and salinity(left) and T-S curves (right) on E130-7 station

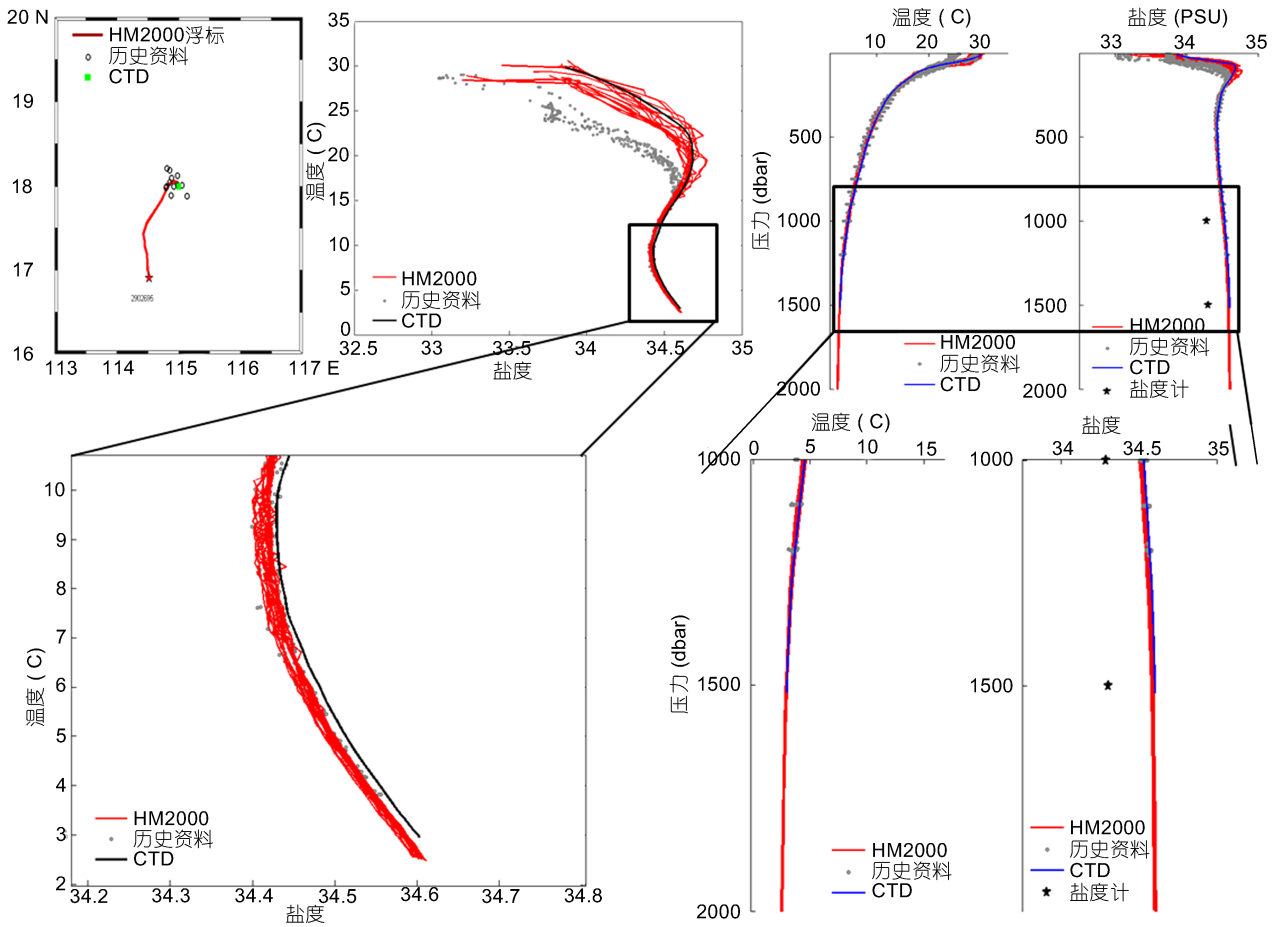


图4 25号 CTD 站上 T-S 曲线(左)和温、盐度垂直分布(右)

Fig.4 Vertical distributions of the temperature and salinity(right) and T-S curves(left) on No. 25 CTD station

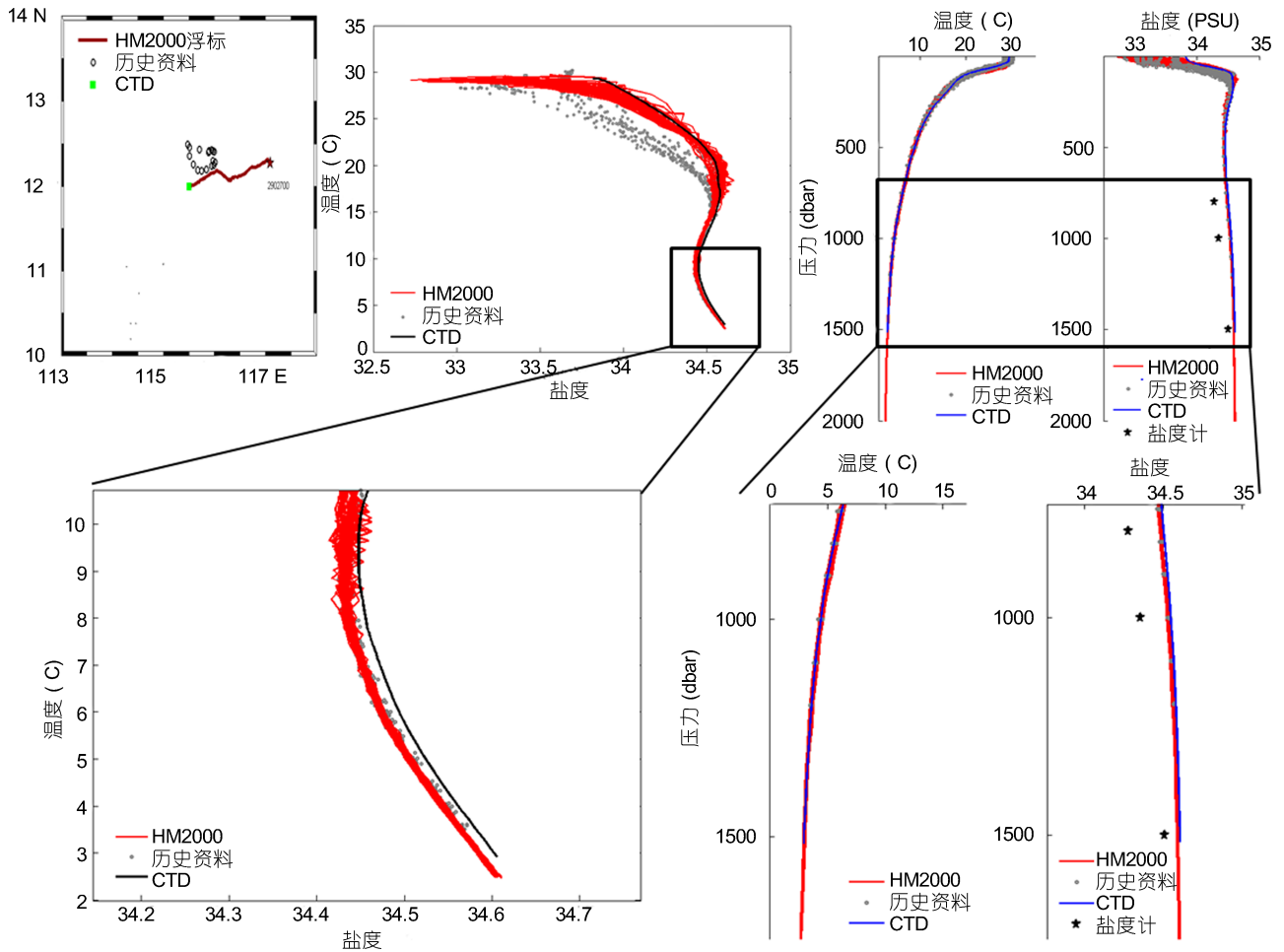


图 5 56 号 CTD 站上 T-S 曲线(左)和温、盐度垂直分布(右)

Fig.5 Vertical distributions of the temperature and salinity(right) and T-S curves(left) on No. 56 CTD station

(Argo)的上层海洋结构、变异及预测研究”项目租用中国海洋大学“东方红 2”号科学考察船,在吕宋海峡附近海域布放了 5 个 APEX 型剖面浮标,同时获得了 5 个浮标投放站 0—2500m 水深内的 CTD 仪观测剖面,以及每个站位上 8 个特定层次上的水样(其中 Argo-02 站上由于玫瑰型采水器发生故障,未能采集到 500m 层以下的水样,Argo-05 站位投放的浮标由于出现故障,未能正常收到盐度观测资料)。

利用这些数据同样对 CTD 仪、自动剖面浮标和实验室高精度盐度计的测量结果进行了比较分析,并绘制了各个测站上的温、盐度垂直分布图和 T-S 曲线,还分别计算了各个测站上自动剖面浮标和 CTD 仪观测结果与盐度计测量结果在对应层次上的盐度差值(表 4,剔除 Argo-02 和 Argo-05 站位的比较结果)。图 7 和图 8 中,左图呈现的是测站上的温、盐度垂直分布,右图则为各个测站上的 T-S 曲线。

从 5 个测站的温度比较(篇幅原因,仅以 Argo-01 和 Argo-02 站位为例)可以看出,自动剖面浮标和 CTD 仪观测的温度变化比较吻合,表明两者的测量结果相当接近。但盐度变化差异较大;相比而言,实验室高精度盐度计与自动剖面浮标观测的结果比较接近,但与 CTD 仪的观测结果相差甚远;再与该区域的历史观测资料(World Ocean Atlas, WOA)(Boyer *et al*, 2015)比较发现,实验室盐度计和历史观测资料与剖面浮标资料比较吻合,而与 CTD 差别较大。不难判断,本航次使用的 CTD 仪电导率传感器存在明显的系统误差。其中,CTD 仪与实验室高精度盐度计测量的盐度差(表 4)为 -0.1787 — -0.0371 (在 100—800m 水深间)和 -0.10121 — -0.0735 (在 1000—2000m 水深间)。对照“GB/T12763.2-2007《海洋调查规范 第 2 部分 海洋水文要素调查》”对盐度准确度(± 0.02)的要求,显然无论是上层还是下层,本航次使用的 CTD 仪观测结果均已远远低于这一要求。

进一步观察自动剖面浮标与盐度计测定的结果,发现在各测站的上层(约 800m 水深以上)两者拟合程度不是很好,而在深层却几乎重叠,两者差值在 $-0.0001-0.0178$ 之间(表 4)。只是在 Argo-03 站的 1000m 层上,其盐度差值达到了 0.0486,超过国标“GB/T12763.2-2007《海洋调查规范 第 2 部分 海洋水文要素调查》”允许的误差范围(± 0.02),但经查明,这一结果与实验室测量时盐度计传导单元中存留气泡(通过酒精去除即可恢复正常)有关,从而造成实验室测量盐度有较大的误差。这一比较结果表明,

由于自动剖面浮标观测的第一个剖面是在浮标投放后的 24h 内获得的,所以,上层比测结果不尽理想也是情理之中。此外,众所周知,大洋深处(如 1000dbar 水深以下)水体(温、盐特性)在相当长一段时间内基本保持不变,所以,两者差值在 1000m 水深以下十分接近也是必然的。人们也正是利用了深层海水的这一特性,来校正由于浮标在海上长期漂移后可能产生的系统观测误差。再看一下各个测站上的 T-S 曲线可以发现,虽其变化趋势基本一致,但浮标与 CTD 仪之间的差别还是相当明显的。

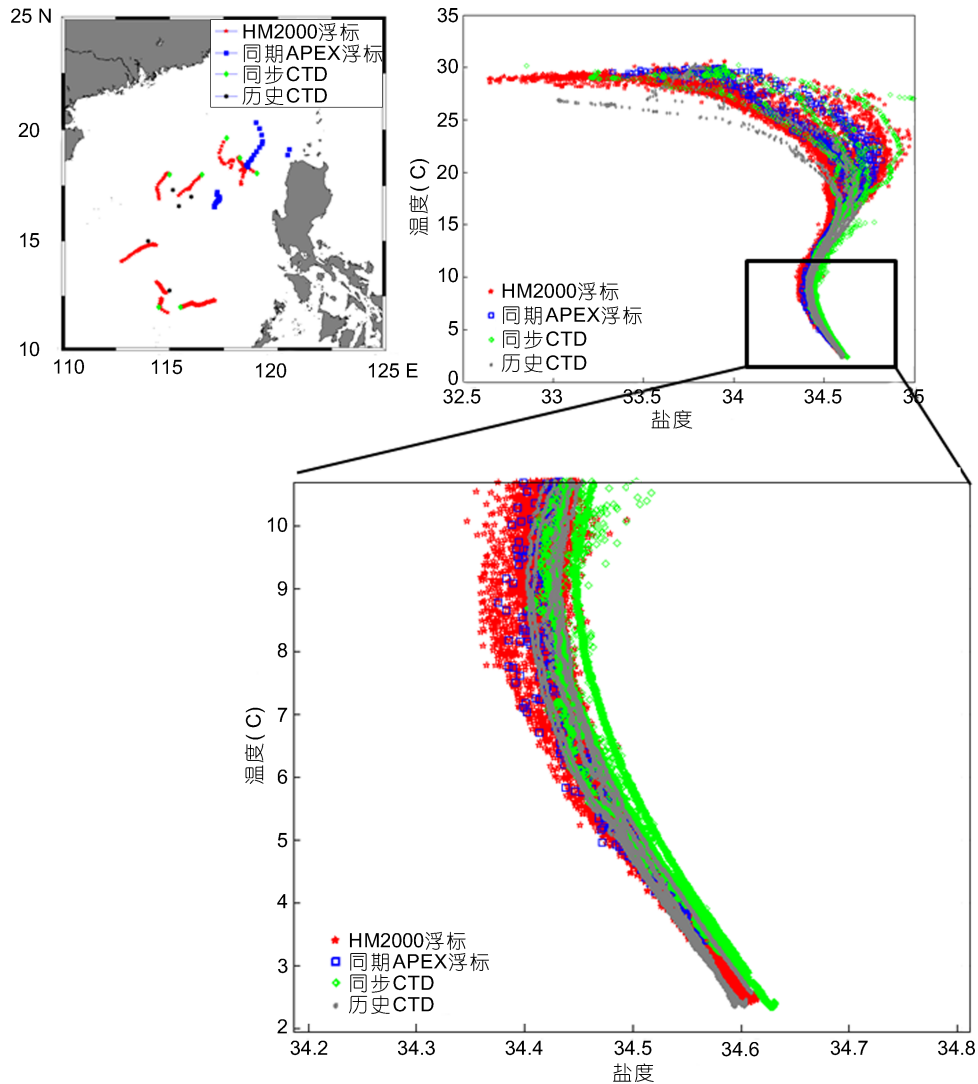


图 6 利用不同观测资料绘制的 T-S 曲线

Fig.6 The T-S curves using different data from different observations

注: 包括本航次船载 CTD 仪、HM2000 型浮标与同期 APEX 型浮标和历史船载 CTD 仪观测资料

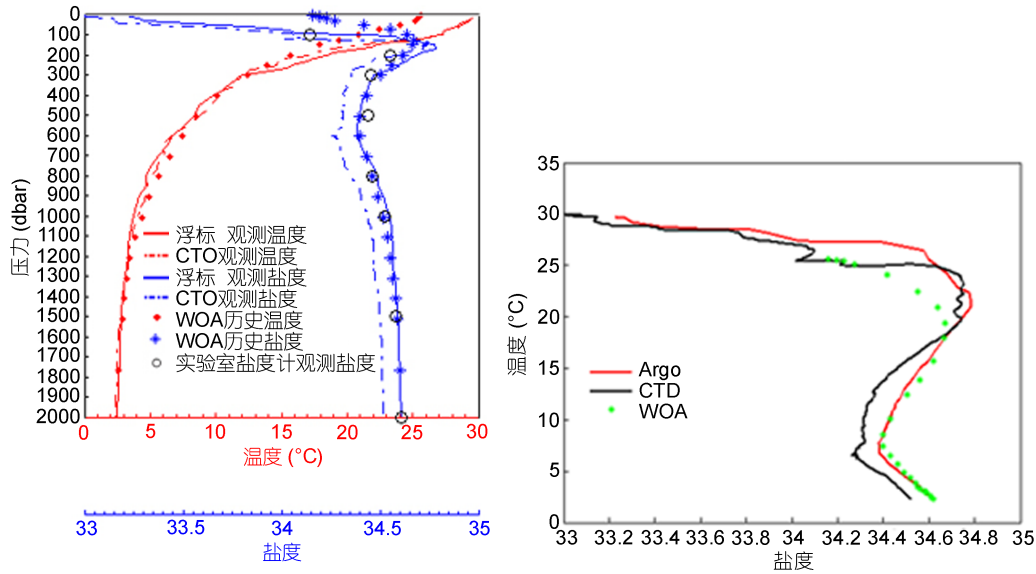


图 7 Argo-01 站上温、盐度垂直分布(左)和 T-S 曲线(右)

Fig.7 Vertical distributions of the temperature and salinity(left) and T-S curves (right)on Argo-01 station

表 4 自动剖面浮标、CTD 仪观测盐度值与实验室高精度盐度计测量盐度值对比表

Tab.4 Salinity comparison of the profiling float, CTD and laboratory salinometer observations

| | 深度(m) | 盐度值 (CTD) | 盐度值 (浮标) | 盐度值 (盐度计) | 盐度差值 (CTD-盐度计) | 盐度差值 (浮标-盐度计) |
|------------|-------|--------------|-------------|--------------|-------------------|------------------|
| Argo-01 站点 | 2000 | 34.516 | 34.607 | 34.6071 | -0.0911 | -0.0001 |
| | 1500 | 34.501 | 34.591 | 34.5789 | -0.0779 | 0.0121 |
| | 1000 | 34.434 | 34.544 | 34.5262 | -0.0922 | 0.0178 |
| | 800 | 34.353 | 34.486 | 34.4578 | -0.1048 | 0.0282 |
| | 500 | 34.313 | 34.400 | 34.4424 | -0.1294 | -0.0424 |
| | 300 | 34.353 | 34.471 | 34.4566 | -0.1036 | 0.0144 |
| Argo-03 站点 | 2000 | 34.527 | 34.622 | 34.6218 | -0.0948 | 0.0002 |
| | 1500 | 34.480 | 34.580 | 34.5723 | -0.0923 | 0.0077 |
| | 1000 | 34.335 | 34.483 | 34.4344 | -0.0994 | 0.0486 |
| | 800 | 34.252 | 34.379 | 34.3567 | -0.1047 | 0.0223 |
| | 500 | 34.153 | 34.200 | 34.2463 | -0.0933 | -0.0463 |
| | 300 | 34.668 | 34.674 | 34.7521 | -0.0841 | -0.0781 |
| Argo-04 站点 | 2000 | 34.651 | 34.776 | 34.7921 | -0.1411 | -0.0161 |
| | 1500 | 34.532 | 34.623 | 34.6214 | -0.0894 | 0.0016 |
| | 1000 | 34.481 | 34.580 | 34.5758 | -0.0948 | 0.0042 |
| | 800 | 34.344 | 34.438 | 34.4452 | -0.1012 | 0.0072 |
| | 500 | 34.224 | 34.371 | 34.3473 | -0.1233 | 0.0237 |
| | 300 | 34.189 | 34.250 | 34.2538 | -0.0648 | -0.0038 |
| | 200 | 34.629 | 34.719 | 34.7596 | -0.1306 | -0.0406 |
| | 200 | 34.683 | 34.824 | 34.8213 | -0.1383 | 0.0027 |

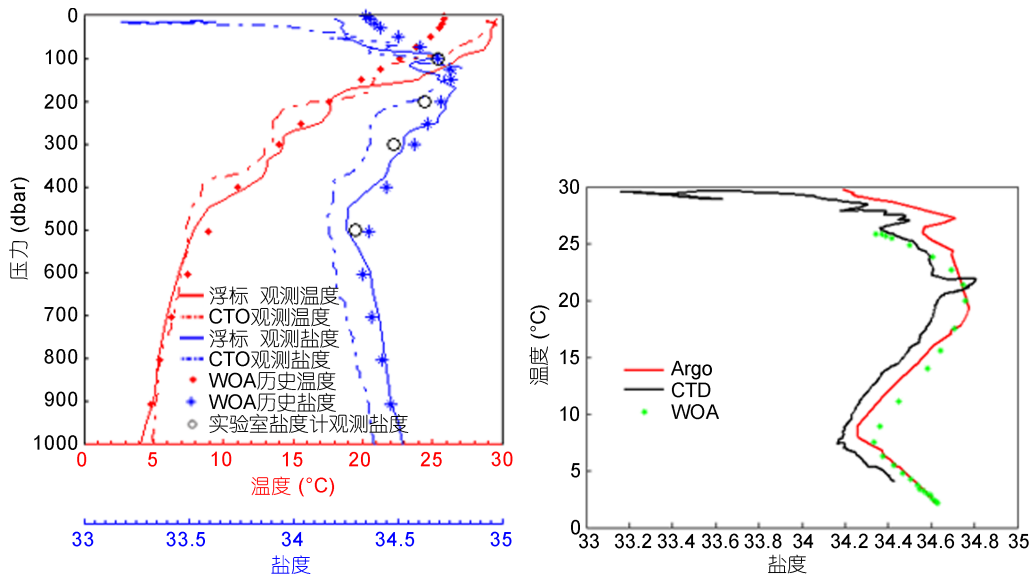


图8 Argo-02 站上温、盐度垂直分布(左)和 T-S 曲线(右)

Fig.8 Vertical distributions of the temperature and salinity(left) and T-S curves (right)on Argo-02 station

在各测量数据进行比对后,建议中国海洋大学船舶中心尽快将该航次使用的船载 CTD 仪送国家权威部门(如国家海洋计量中心)检定。不久,据该中心的反馈意见称,航次期间使用了错误的 CTD 仪标定参数,并提供了新的纸质版标定证书。于是我们对 CTD 仪的观测结果采用最新提供的标定参数进行了重新计算,并做了新的对比分析。

新的对比表明(图略),CTD 仪观测盐度与实验室高精度盐度计的测量结果也比较接近,各测站 CTD 仪与实验室高精度盐度计测量的盐度差范围为 0.001—0.064,但在 1000—2000dbar 的海洋深层,其误差范围降低为 0.002—0.019,符合国标“GB/T12763.2-2007《海洋调查规范 第 2 部分 海洋水文要素调查》”对盐度准确度(± 0.02)的要求。

图 9—图 10 给出的是利用本航次全部 CTD 温、盐度剖面数据绘制而成的 T-S 曲线,由图可以看到,在 CTD 仪参数未标定的情况下,海洋深层的 T-S 曲线(图 9)比较分散,但 CTD 仪标定以后,其 T-S 曲线(图 10)则高度集中。以上这些都说明 CTD 仪标定之后获得的新的盐度资料是可靠的。

3 结束语

国际 Argo 指导组和资料管理小组要求各国在投放 Argo 剖面浮标的同时,尽可能借助船载 CTD 仪对浮标观测的温度、盐度资料,特别是第一条观测剖面进行现场质量控制,以验证剖面浮标观测资料的质量。然而,中国 Argo 计划在过去十多年执行

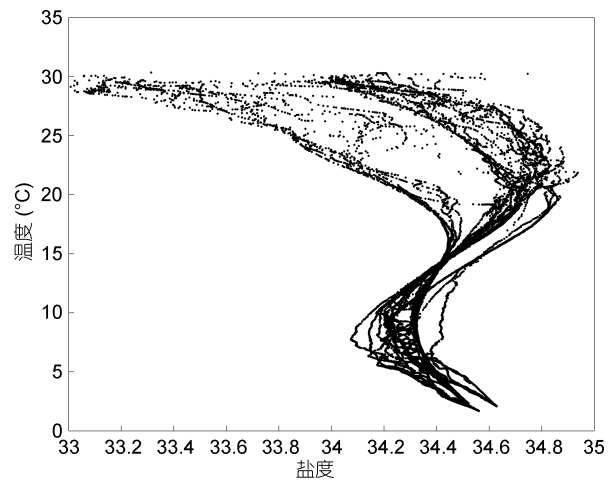


图9 利用航次中给出的电导率参数计算获得的 CTD 资料的 T-S 点聚

Fig.9 Scatter diagram of the temperature and salinity using the CTD data of this cruise which are extracted by the un-revised parameters

这一要求的过程中,发现刚刚布放的剖面浮标,其观测资料基本能够达到国家或国际标准,相反,船载 CTD 仪提供的资料质量参差不齐(有人为造成的观测误差,也有未知原因的误差),发现的主要问题有:

(1) 船载 CTD 仪不按规定在航次前后送往权威部门进行检测;

(2) 有的 CTD 仪即使在航次前送权威部门检测了,并提供了新的校正参数,但由于人为疏忽,未能及时将该新的校正参数输入到船载 CTD 仪控制软件中,从而造成人为的观测误差;

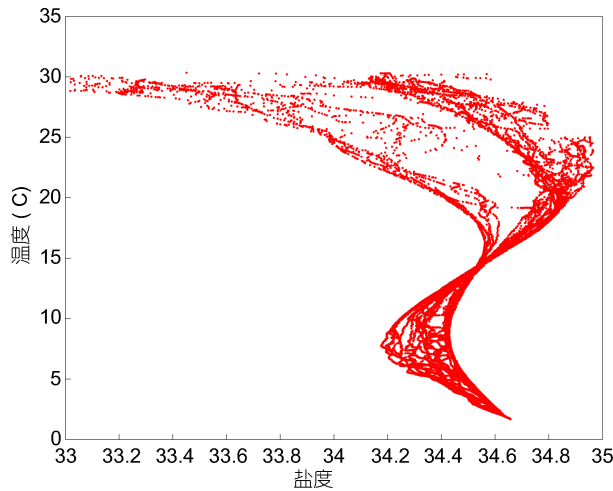


图 10 利用航次后给出的电导率参数计算获得的 CTD 资料的 T-S 点聚

Fig.10 Scatter diagram of the temperature and salinity using the CTD data of this cruise which are extracted by the revised parameters

(3) 即使进入本世纪以来, 人们对船载 CTD 仪的观测资料质量给予了应有的重视, 许多单位还从国外引进了实验室高精度盐度计, 但实际在航次现场中使用的比较少见, 且一些船载 CTD 仪并未携带玫瑰型采水器, 也就无法进行现场比较校正。

为此, 建议长期从事深海大洋调查、观测的部门和单位, 当发现船载 CTD 仪或自动剖面浮标存在系统误差或偶然误差后, 必须对其观测资料进行质量控制, 方可提供给业务化部门或基础研究应用部门使用。至于船载 CTD 仪或自动剖面浮标观测资料的校正方法及其质量控制, 可参阅相关规范、文献。

从中国 Argo 计划掌握的多航次比对结果发现, 所布放的自动剖面浮标的第一条观测剖面几乎都是好的, 说明剖面浮标采用的 CTD 传感器是稳定的、可靠的, 然而一旦某个浮标的运输过程中或者其它原因导致浮标出现观测误差, 可以依据收集的 CTD 资料进行校正, 此外, 收集和积累浮标观测海区高质量的船载 CTD 仪观测资料, 使得人们可以对早期布放在附近海域或漂移进入该海域的浮标(浮标通常可以在海上工作 3 年左右)观测资料进行检验、校正, 以确保其观测资料的质量。反之, 当人们发现某个航次的船载 CTD 仪观测资料存在质量问题时, 不妨可以通过收集同时期、同一海域比较接近的自动剖面浮标观测资料进行检验和校正, 以尽可能挽救存在质量问题的船载 CTD 仪观测资料。

致谢 中国 Argo 计划采购的 400 多个自动剖面浮

标搭载 20 多个航次得以顺利布放, 期间得到了各航次首席科学家、调查队长和全体调查队员, 以及各类科学考察船长及全体船员的鼎力支持和帮助, 在此深表感谢! 同时感谢各航次项目负责人向我们免费提供的 CTD 站位数据, 使我们得以对自动剖面浮标数据进行质量控制。

参 考 文 献

- 王辉赞, 张 韧, 王桂华等, 2012. Argo 浮标温盐剖面观测资料的质量控制技术. 地球物理学报, 55(2): 577—588
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会, 2008. GB/T 12763.2-2007 海洋调查规范第 2 部分: 海洋水文观测. 北京: 中国标准出版社
- 卢少磊, 孙朝辉, 刘增宏等, 2016. COPEX 和 HM2000 与 APEX 型剖面浮标比测试验及资料质量评价. 海洋技术学报, 35(1): 84—92
- 卢少磊, 李 宏, 刘增宏, 2014. Argo 盐度资料延时质量控制的改进方法. 解放军理工大学学报(自然科学版), 15(6): 598—606
- 刘增宏, 许建平, 朱伯康等, 2006b. Argo 资料延时质量控制及其应用探讨. 见: 许建平. Argo 应用研究论文集. 北京: 海洋出版社
- 刘增宏, 许建平, 孙朝辉, 2007. Argo 浮标电导率漂移误差检测及其校正方法探讨. 海洋技术, 26(4): 72—76
- 刘增宏, 许建平, 修义瑞等, 2006a. 参考数据集对 Argo 剖面浮标盐度观测资料校正的影响. 海洋预报, 23(4): 1—12
- 刘增宏, 吴晓芬, 许建平, 2016. 中国 Argo 海洋观测十五年. 地球科学进展, 31(5): 445—460
- 许建平, 苏纪兰, 1999. CTD 资料质量控制浅析. 海洋学报, 21(1): 126—132
- 孙朝辉, 刘增宏, 朱伯康等, 2005. Argo 剖面浮标观测资料的接收、处理与共享. 海洋技术, 24(2): 130—134
- 李凯峰, 欧阳永忠, 陆秀平等, 2018. 海洋控制测量误差分析与成果质量评定. 海洋测绘, 38(1): 46—49
- 沈 锐, 王德亮, 刘增宏等, 2017. 一种跻身全球 Argo 实时海洋观测网的国产海洋观测仪器: HM2000 型剖面浮标. 见: 许建平. 西太平洋 Argo 实时海洋调查研究文集. 北京: 海洋出版社, 355—372
- 陈 建, 姜祝辉, 宿兴涛等, 2018. 多源资料重构三维海温场的先验误差估计和诊断分析. 海洋学报, 40(4): 15—29
- 奚 萌, 宋清涛, 林明森等, 2017. 西北太平洋红外辐射计海表温度数据交叉比对分析. 海洋与湖沼, 48(3): 436—453
- 童明荣, 孙朝辉, 刘增宏, 2003. AUTOSAL 8400B 型实验室盐度计及其应用. 海洋技术, 22(4): 85—88
- 窦文洁, 蒋锦刚, 周斌等, 2014. SST 产品误差在海-气 CO₂ 通量计算中的传递及贡献分析. 海洋与湖沼, 45(1): 148—156
- Annie W, Robert K, Thierry C *et al*, 2018. Argo Quality Control Manual for CTD and Trajectory Data, version 3.1. <http://dx.doi.org/10.13155/33951>
- Bhaskar T V S U, Venkat Shesu R, Boyer T P *et al*, 2017. Quality control of oceanographic in situ data from Argo floats using climatological convex hulls. MethodsX, 4: 469—479
- Boyer T, Locarnini R A, Zwing M M *et al*, 2015. Changes to

- calculations of the World Ocean Atlas 2013 for version 2. https://data.nodc.noaa.gov/woa/WOA13/DOC/woa13v2_changes.pdf
- Cheng L J, Zhu J, Cowley R *et al*, 2014. Time, Probe Type, and Temperature variable bias corrections to historical Expendable Bathythermograph observations. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 31(8): 1793—1825
- Coriolis Data Management, 2017. Implementation of Argo real time quality controls by Coriolis data centre. <http://doi.org/10.13155/49438>
- Hsu J Y, Lien R C, D'Asaro E A *et al*, 2018. Estimates of surface waves using subsurface EM-APEX floats under typhoon Fanapi 2010. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 35(5): 1053—1075
- Kobayashi T, 2004. Historical salinity dataset for Argo delayed-mode quality control: Selected Hydrographic Dataset (SeHyD). *Report of Japan Marine Science and Technology Center*, 49: 51—71
- Kobayashi T, King B A, Shikama N, 2009. An estimation of the average lifetime of the latest model of APEX floats. *Journal of Oceanography*, 65(1): 81—89
- Liu Z H, Wu X F, Xu J P *et al*, 2017. China Argo project: progress in China Argo ocean observations and data applications. *Acta Oceanologica Sinica*, 36(6): 1—11
- Owens W B, Wong A P S, 2009. An improved calibration method for the drift of the conductivity sensor on autonomous CTD profiling floats by θ - S climatology. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 56(3): 450—457
- Riser S C, Freeland H J, Roemmich D *et al*, 2016. Fifteen years of ocean observations with the global Argo array. *Nature Climate Change*, 6(2): 145—153
- Roemmich D, Boebel O, Desaubies Y *et al*, 2001. Argo: the global array of profiling floats. In: Koblinsky C J, Smith N R eds. *Observing the Oceans in the 21st Century*. Melbourne: GODAE Project Office, Bureau of Meteorology, 248—258

PRELIMINARY QUALITY DISCUSSION BETWEEN SHIP-BASED CTD AND PROFILING FLOATS OBSERVATIONAL DATA

WU Xiao-Fen¹, ZHOU Hui², CAO Min-Jie¹, LIU Zeng-Hong¹, SUN Chao-Hui¹, LU Shao-Lei¹

(1. State Key Laboratory of Satellite Ocean Environment Dynamics, the Second Institute of Oceanography, MNR, Hangzhou 310012, China; 2. Key Laboratory of Ocean Circulation and Waves, Institute of Oceanography, Chinese Academy of Science, Qingdao 266071, China)

Abstract It is well known that the development of marine science depends on accurate data, however, a variety of marine observation instrument that work in complicated ocean environments may unavoidably produce measurement error, lead to the need for real-time (or delayed mode) data quality control. This article mainly gives a real-time contrast among the data collected by ship-based CTD instruments, Argo profiling floats and high-precision laboratory salinometer after two voyages carried by China Argo program. Analysis results show that the data inspection through laboratory salinometer is very important for in-situ observational data, especially for the ship-based CTD observations, and is thus vital for the calibration of temperature or salinity data, especially for deep ocean. Just like the comparison gave, the salinity near 1000 dbar acquired by a ship-based CTD which was not calibrated before the voyage, has a differential of nearly ± 0.1 compared with laboratory salinometer observation. Such lags are far behind the accuracy of ± 0.02 salinity measurement requirement in the domestic ocean survey specification. Based on these tests, we suggest that researchers who are engaged in the open ocean survey should give a focus on the data quality control with different instruments, for example, the ship-based CTD should be sent to authoritative department for calibration before and after a cruise, in order to promote and improve the quality of the national marine observational dataset.

Key words profiling floats; ship-based CTD; laboratory high precision salinometer; data quality