

# Argo 溶解氧数据的气候态校正方法改进\*

刘 焯 邢小罡

(自然资源部第二海洋研究所 杭州 310012)

**摘要** Argo 浮标观测的溶解氧数据的质量控制方法目前还还不够完善, 其中传统的气候态校正方法存在的问题主要表现为会受到异常剖面 and 异常斜率系数的影响。本文针对这些问题, 提出了一套气候态校正方法的改进方案, 包括: 1) 使用中值法取代平均值法; 2) 利用比较浮标观测的溶解氧饱和度整个剖面与气候态剖面的方法, 提出了一种异常剖面的剔除标准; 3) 提出了一种异常斜率系数的剔除标准。改进后的溶解氧剖面与气候态剖面更为接近, 有效避免了异常剖面与异常值的影响, 显著提高了 Argo 浮标观测溶解氧的整体数据质量。

**关键词** Argo 浮标; 溶解氧; 气候态校正; 斜率系数; 异常剖面

**中图分类号** P332.7; P714; P715.5 **doi:** 10.11693/hyhz20190100002

海洋中的溶解氧为海洋生物生存提供了必要的生化环境, 其时空分布同时受到物理过程与生物化学过程的影响, 物理过程包括海洋通风、海气交换、混合作用, 生物化学过程则包括初级生产、呼吸作用、有机物氧化作用。通过海水溶解氧的观测与分析, 可以在一定程度上了解该海区的生物地球化学循环过程及其对不同时空尺度物理过程的响应。特别是在全球变暖的大背景下, 上层海洋层化逐渐加强, 海洋中溶解氧的含量呈现降低的趋势, 开阔大洋的脱氧现象(deoxygenation)不断加剧, 海洋中层最低含氧区(oxygen minimum zone, OMZ)的范围不断扩大(Stramma *et al.*, 2008; Keeling *et al.*, 2010)。贫氧(anoxic)环境产生反硝化作用(denitrification)会生成比 CO<sub>2</sub> 更强烈的温室气体——N<sub>2</sub>O, 同时(由于氧气不足)硝酸盐作为呼吸作用的替代性受体会被快速消耗, 这对于海洋碳、氮循环以及海洋生态系统都具有重要的影响, 同时对全球变暖产生正反馈(Keeling *et al.*, 2010; Johnson *et al.*, 2010)。因此, 海水溶解氧观测对于海洋生态系统与气候变化的研究至关重要。

直到 21 世纪初, 开阔大洋的溶解氧观测数据一直非常缺乏(Stramma *et al.*, 2008), 这极大地限制了人

们对全球海洋溶解氧时空分布及其受物理过程影响的认识与理解。Argo 浮标的出现为海洋学的发展做出了革命性的贡献(Roemmich *et al.*, 2009), 借助传统温盐 Argo 浮标成熟的技术平台, 自 2002 年起, 携带溶解氧传感器的 Argo 浮标开始出现(Körtzinger *et al.*, 2005)。截至 2018 年 7 月, 全球投放的可观测溶解氧的生物地球化学 Argo(Biogeochemical-Argo)浮标已超过 900 台(图 1), 总计观测了超过 13 万条溶解氧剖面。其观测数据在海洋学研究中发挥着重要的作用, 包括海洋净群落生产力(Net Community Production, NCP)的季节循环(Riser *et al.*, 2008; Yang *et al.*, 2017; Huang *et al.*, 2018)、海洋碳输出(Martz *et al.*, 2008)、海气通量(Kihm *et al.*, 2010; Bushinsky *et al.*, 2017)、以及最低含氧区的动态变化(Prakash *et al.*, 2012; Stanev *et al.*, 2018; Sarma *et al.*, 2018)等研究。

然而到目前为止, 这一海量的数据集还没有得到充分的利用, 其数据的质量控制研究仍在不断完善。影响溶解氧数据质量的主要问题来源于传感器的“存放漂移”(Johnson *et al.*, 2015), 表现为溶解氧测量值与真实值之间存在一个固定的斜率。针对其漂移的校正目前有两种方法: 空气测量校正法(Bittig *et al.*,

\* 青岛海洋科学与技术试点国家实验室开放基金项目, QNLM2016ORP0103 号; 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, QNYC1702 号, 14283 号。刘 焯, 硕士研究生, E-mail: 439574997@qq.com

通信作者: 邢小罡, 副研究员, E-mail: xing@sio.org.cn

收稿日期: 2019-01-02, 收修改稿日期: 2019-04-05

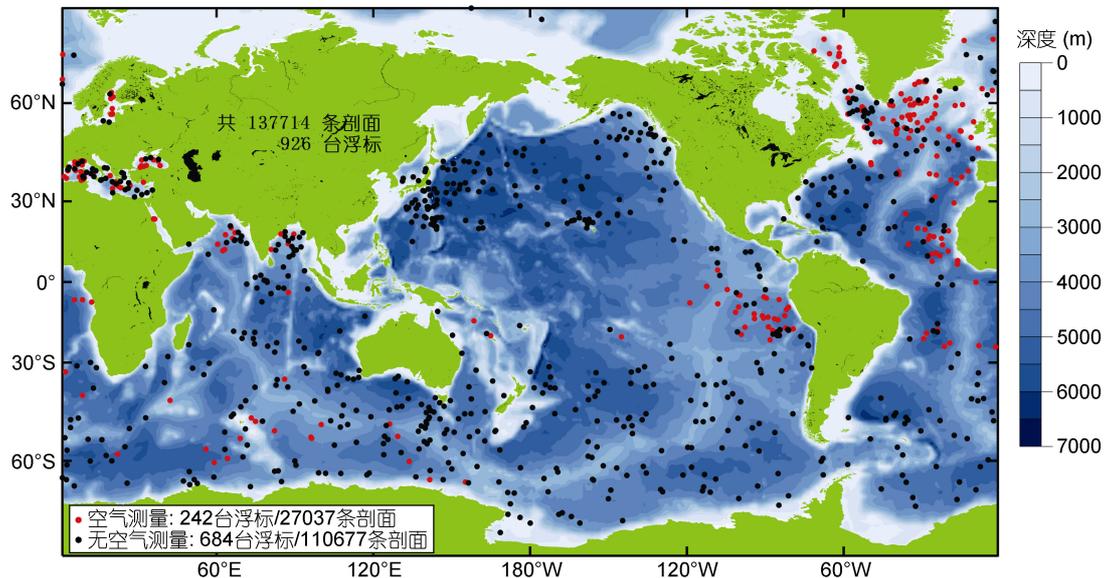


图 1 截至 2018 年 7 月全球大洋中投放的携带有溶解氧传感器的 Argo 浮标分布图

Fig. 1 Global deployment of Argo floats equipped with dissolved oxygen sensor up to July 2018

2018)与气候态校正法(Takeshita *et al*, 2003)。虽然空气测量法被认为是目前最准确的 Argo 溶解氧校正方法,但也存在一定问题(刘焯等, 2019),主要表现为: 1)各种类型的 Argo 浮标目前空气测量方式与校正方法并不统一,导致不同类型浮标的空气校正结果可能存在系统性偏差; 2)2016 年之前投放的溶解氧 Argo 浮标由于传感器的高度不够,可能没有有效观测到空气中的氧含量; 3)此外,也是更为重要的是,在目前全球 Argo 溶解氧的数据库中(截至 2018 年 7 月),超过 70%浮标(684 台)无法进行空气测量,其观测的剖面数超过 80%(110677 条),如果仅采用空气测量校正法则会损失大量的观测数据。

另一方面,气候态校正方法不仅可以校正所有的溶解氧数据,而且使用的数据标准是统一的气候态数据集,因而不同类型的浮标数据校正后不会存在系统性偏差。然而,目前的气候态校正方法也存在一些问题,主要表现为其校正系数会受到异常剖面 and 异常值的影响(刘焯等, 2019)。在此背景下,本文提出了一种基于气候态校正方法的改进方案,以期进一步提高校正系数的准确性以及溶解氧的数据质量。

## 1 材料与方法

### 1.1 数据

Argo 浮标数据来源于法国 Argo 数据中心(<ftp://ftp.ifremer.fr/ifremer/argo>),截至 2018 年 7 月共携带有溶解氧传感器的 Argo 浮标 926 台(图 1),总

计观测了 137714 条剖面数据。由于溶解氧数据的质量控制通常使用氧分压  $p_{O_2}$  或溶解氧饱和度  $Sat_{O_2}$  进行校正,浮标观测的溶解氧浓度( $[O_2]$ )需要转化为饱和度和:

$$Sat_{O_2} = [O_2] / [O_{2,sol}] \times 100\% \quad (1)$$

其中,氧气的溶解度(solubility) $[O_{2,sol}]$ 根据海水温度、盐度计算(Bittig *et al*, 2016)。

溶解氧气候态数据集使用美国国家海洋与大气局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)下属的国家海洋数据中心发布的世界海洋地图集(World Ocean Atlas, WOA)13v2(Garcia *et al*, 2013)([www.nodc.noaa.gov/OC5/woa13](http://www.nodc.noaa.gov/OC5/woa13)): 气候态逐月的温度( $T$ )、盐度( $S$ )、溶解氧饱和度( $Sat_{O_2}$ )剖面数据,水平分辨率  $1^\circ \times 1^\circ$ 。

数据处理过程中,需要首先剔除掉一些由于观测剖面较少无法有效获得校正系数的浮标,根据 Bittig 等(2015)的研究表明,至少需要 20 个有效的  $m_i$  值可以获得较为可信的校正系数,因此本文通过 20 个有效值的标准首先对数据进行筛选。在 926 台浮标中,83 台浮标观测的剖面数不足 20 个、55 台浮标虽然剖面数满足标准但观测到的表层值(深度  $< 10m$ )不足 20 个、30 台浮标具有足够的浮标表层值但对应的 WOA 气候态表层值不足 20 个、4 台浮标虽然有足够的浮标与 WOA 表层值但两者匹配数据不足 20 个。最终满足条件的浮标共计 754 台(占全部浮标个数的 81%),共计观测 127611 条剖面(占全部剖面个数的 93%)。

## 1.2 Takeshita 气候态校正方法

Takeshita 等(2013)首先提出了基于 WOA 气候态数据的溶解氧校正方法,使用气候态月平均的海表面溶解氧饱和度  $Sat_{O_2, WOA, i}$  (经过时间与空间内插到浮标所在时间与位置),与浮标观测的海表面饱和度 ( $Sat_{O_2, float, i}$ ) 比值,每个观测剖面得到一个斜率系数  $m_i$  (公式(2)),收集该浮标观测的所有斜率系数  $m_i$  取平均得到校正系数  $M$ ,本文记为  $M_0$ , (公式(3))。这里,  $N$  代表该浮标观测所得  $m_i$  的个数。

$$m_i = Sat_{O_2, WOA, i} / Sat_{O_2, float, i} \quad (2)$$

$$M_0 = (\sum_{i=1}^N m_i) / N \quad (3)$$

## 1.3 校正方法改进 1: 中值法替代平均值法

由于目前的校正系数易受到异常剖面和异常值的影响(刘焯等, 2019), 本文针对气候态校正方法提出了三种改进策略, 层层推进。为了比较不同改进策略的效果, 分别将改进后的校正系数命名为  $M_1$ 、 $M_2$  和  $M_3$ 。首先使用中值法替代平均值法: 即对于一台浮标观测的所有  $m_i$  值按大小排序后取中值作为校正系数, 记为  $M_1$ 。

## 1.4 校正方法改进 2: 异常溶解氧剖面剔除标准

目前的气候态校正方法(Takeshita *et al.*, 2013)在计算每个剖面的斜率系数  $m_i$  时, 只比较每个剖面的表层溶解氧饱和度, 对于每个  $m_i$  值并没有提供任何评估方法。而实际上, 浮标现场观测的溶解氧饱和度除近表面受生物活动的影响外, 整体与气候态平均值的相似程度很高(刘焯等, 2019), 因而可以首先对浮标观测的溶解氧剖面与 WOA 气候态剖面进行比较, 由此剔除掉一些异常剖面, 这些异常剖面计算的  $m_i$  值则不会对最终计算的校正系数  $M$  产生影响, 从而提高  $M$  值的准确性。本文引入两个剖面(浮标观测与 WOA)的平均绝对误差(mean absolute error, MAE)作为评估标准(公式(4)), 通过结果分析(见后文), 选择 10% 作为判别阈值, 符合这一阈值的  $m_i$  记为  $m_i^*$  (即  $MAE_i$  10% 的  $m_i$  值), 再通过中值法得到校正系数, 记为  $M_2$ 。其中,  $Sat_{O_2, floatprof, i}$  和  $Sat_{O_2, WOAprof, i}$  分别代表某一条浮标观测的溶解氧饱和度剖面与对应的 WOA 溶解氧饱和度剖面 (由于 WOA 的观测深度有限, 将浮标观测的溶解氧剖面内插到 WOA 剖面对应深度上进行计算),  $N_{obs, i}$  代表该剖面上点的个数。

$$MAE_i = \left( \sum_{i=1}^{N_{obs, i}} |m_i \times Sat_{O_2, floatprof, i} - Sat_{O_2, WOAprof, i}| \right) / N_{obs, i} \quad (4)$$

## 1.5 校正方法改进 3: 异常斜率系数的剔除标准

通过第二步的异常剖面判别标准, 可以剔除掉一些影响最终计算校正系数的  $m_i$  值, 但在实际分析中发现, 对于某一台浮标的全部  $m_i$  值, 仍然可能存在离散性很大的情况。基于此, 本文提出改进方法的第三步, 在异常剖面判别的基础上, 引入所有  $m_i^*$  值的绝对中值偏差(median absolute deviation, MAD), 它定义为所有  $m_i^*$  值的中值与  $m_i^*$  值差的绝对值的中值。并以三倍绝对中值偏差 ( $3 \times MAD$ ) 作为偶然误差的容许值, 以此剔除掉离散性较大的  $m_i$  值(Leys *et al.*, 2013)。在实际计算过程中, 由于每次有离散程度较大的  $m_i$  值被剔除后, 其 MAD 值会发生改变, 因而采用迭代方法: 当有  $m_i$  值被剔除(即  $m_i$  值的个数发生变化)后, 重新计算 MAD, 直到没有  $m_i$  值被剔除(即  $m_i$  值的个数不发生变化)时, 此时完成迭代, 计算剩余所有  $m_i$  值的中值, 记为  $M_3$ 。

## 2 结果与讨论

由于“存放漂移”的存在, 理论上传感器的校正系数  $M$  值通常大于 1, 但在实际计算中发现, 仍然存在少量传感器会出现  $M < 1$  的情况(Johnson *et al.*, 2015)。整体上, 溶解氧传感器的漂移程度一般比较小, Johnson 等(2015)的结果显示,  $M$  值一般出现在 0.83—1.20。本文选取了  $m_i$  变化范围较大的四台 Argo 浮标作为范例(编号分别为 2900731、3900347、2901550 和 2900765), 图 2 显示了这四台浮标基于气候态校正方法计算的斜率系数  $m_i$  的时间序列, 其中浮标 2900731(图 2a)的  $m_i$  时间序列表现为: 在观测的前期(2008 年)和后期(2010 年)  $m_i$  较为稳定, 而在观测中期出现一个显著的高值区(2009 年), 最高达到 4.5, 这一高值区可能是由于现场观测数据显著低于气候态数据导致的, 但与传感器自身的稳定性无关; 浮标 3900347(图 2b)则表现为: 在浮标运行的大部分时间内  $m_i$  值都稳定在 1.1 左右, 只在后期(2008 年夏季开始)突然变高, 最大值接近 11.0, 增长了接近 10 倍, 这一异常的增高可能与传感器的退化或生物附着有关; 浮标 2901550(图 2c)表现为: 浮标观测前期  $m_i$  值基本保持不变, 但自 2014 年夏季开始,  $m_i$  值突然变化, 先突然减小而后出现较大波动, 自 2015 年春季之后则迅速增加, 最终达到接近 7.0; 浮标 2900765(图 2d)同样表现为观测前期  $m_i$  值较为稳定, 之后开始增大, 与浮标 3900347(图 2b)不同的是, 此台浮标后期的异常高值较多, 为准确计算校正系数带来很大的困难。

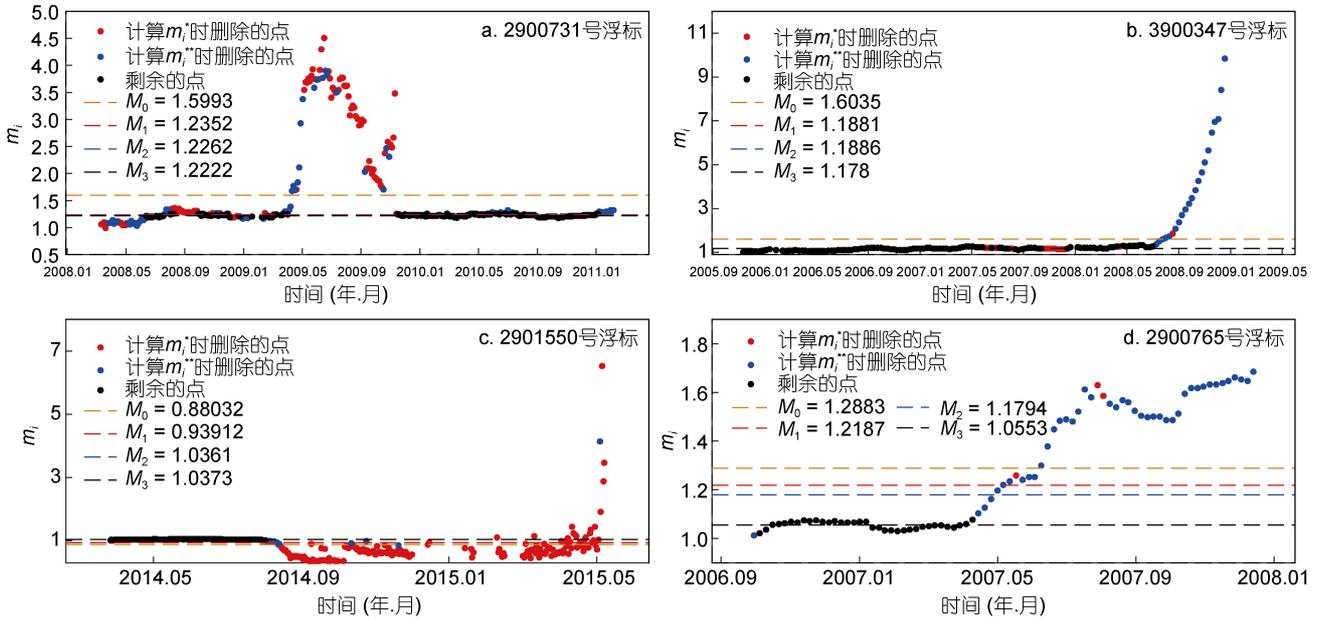


图 2 四台浮标(编号分别为 2900731、3900347、2901550 和 2900765)计算的  $m_i$  值随时间的变化

Fig.2 Time series of  $m_i$  value of the four float (Nos. 2900731, 3900347, 2901550, and 2900765)

注:  $m_i$  表示每个观测剖面得到一个斜率系数;  $M_0$ 、 $M_1$ 、 $M_2$ 、 $M_3$  分别表示 Takeshita 气候态校正方法、中值法替代平均值法、异常溶解氧剖面剔除标准、异常斜率系数的剔除标准得到的校正系数

基于传统的气候态校正方法, 计算得到四台浮标的  $M_0$  值分别为 1.5993、1.6035、0.88032 以及 1.2883, 其中前两台浮标的计算结果显著偏高, 后两台浮标虽然在数值上符合  $M$  值的正常范围, 但偏离该浮标前期稳定的  $m_i$  值, 分别出现一定程度的低估(图 2c)和高估(图 2d)。

### 2.1 中值法的改进

在传感器测量到的溶解氧剖面大部分为正常剖面时, 采用平均值法也可以得到较为准确的校正系

数。但当异常剖面较多时, 平均值会显著地受到这些偏大(或偏小)的异常值影响, 当这些异常值的数量较少(或分布均匀), 中值则较少受到影响, 具有较强的稳健性。图 2 显示出, 对于前两台浮标(图 2a 和图 2b), 采用中值法之后,  $M_1$  值与大部分  $m_i$  值非常接近, 分别为 1.2352 和 1.1881, 也符合  $M$  值的正常范围(Johnson *et al.*, 2015); 对于后两台浮标(图 2c 和图 2d),  $M_1$  值虽然与大部分  $m_i$  值仍然存在差距, 但都比  $M_0$  更接近。

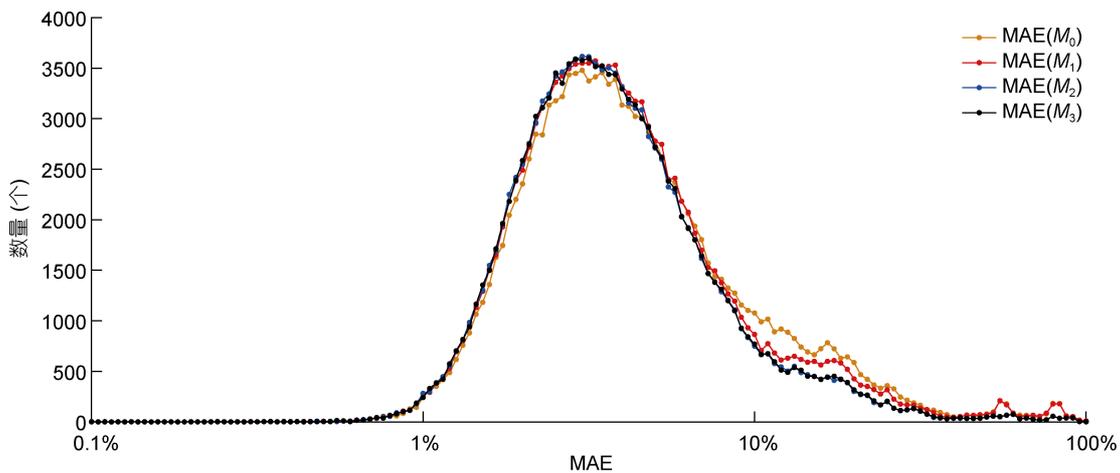


图 3 截至 2018 年 7 月所有 Argo 浮标观测的溶解氧数据经过不同校正系数校正后的溶解氧饱和度剖面与 WOA 气候态剖面的平均绝对偏差(mean absolute error, MAE)

Fig.3 Statistical histogram of the mean absolute errors (MAE) between all Argo-observed  $Sat_{O_2}$  profiles (up to July 2018) corrected by different coefficients and corresponding WOA climatological profiles

通过两个校正系数校正后的溶解氧剖面与 WOA 气候态的比较也可以发现, 通过  $M_1$  值校正后平均绝对偏差(MAE)在 10%以上的剖面数量明显减少, 说明中值法计算的  $M_1$  值受到少量异常剖面的影响较小, 更接近大部分正常剖面计算的  $m_i$  值, 因而大幅度地提高了 Argo 浮标观测溶解氧的整体数据质量。

## 2.2 异常溶解氧剖面剔除标准的改进

第二步校正方法的改进通过比较浮标观测的溶解氧剖面与 WOA 剖面的相似性, 剔除掉一些异常的溶解氧剖面, 首先需要确定剔除标准。图 4 显示

了所有 Argo 浮标观测的溶解氧饱和度剖面与 WOA 气候态剖面的 MAE 的分布, 以及与温度和盐度剖面的平均绝对偏差(MAE<sub>T</sub>和 MAE<sub>S</sub>)的散点图。可以看出, 大部分(90.42%)浮标观测的溶解氧剖面与 WOA 的平均绝对偏差都在 10%以内, 因此可以使用 10%作为阈值标准剔除一些明显与 WOA 剖面形态不相同的剖面, 从而进一步提高  $M$  值的计算(即  $M_2$ )。此外, 图 4 显示了溶解氧高偏差的剖面并不明显对应于温度偏差较高或盐度偏差较高的剖面, 说明无法使用温度或盐度剖面作为溶解氧剖面的剔除标准。

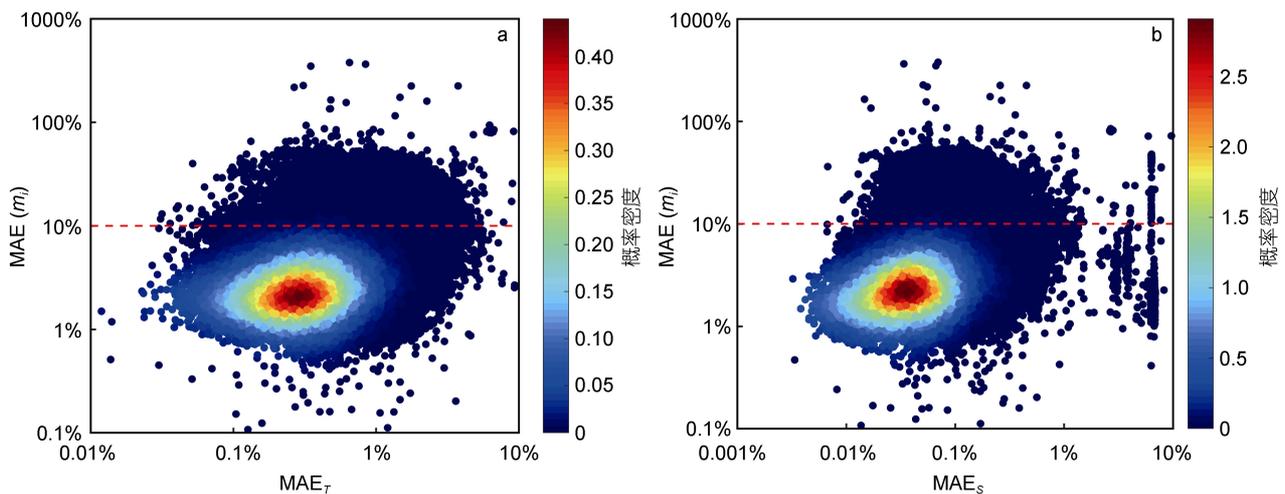


图 4 截至 2018 年 7 月所有 Argo 浮标观测的溶解氧饱和度剖面与 WOA 气候态剖面的 MAE 分别与温度剖面的平均绝对偏差(MAE<sub>T</sub>)(a)、盐度剖面的平均绝对偏差(MAE<sub>S</sub>)(b)的散点图

Fig.4 Scatter plots of the MAE between all Argo-observed SatO<sub>2</sub> profiles (until July 2018) and corresponding WOA climatological profiles vs. the MAE of temperature (MAE<sub>T</sub>) (a), and the MAE of salinity (MAE<sub>S</sub>) (b), respectively

增加了异常剖面的剔除标准后, 校正系数  $M_2$  的准确性得到了进一步的提高。从图 2c 中可以看出, 浮标 2901550 后期观测的(偏离前期稳定的  $m_i$  值范围的)大部分剖面都与 WOA 剖面存在较大的差别, 在  $M_2$  的计算中对这些  $m_i$  值予以有效的剔除, 计算得到的  $M_2$  值为 1.0361, 已与前期稳定的  $m_i$  值一致; 与其对应的是, 浮标 2900765(图 2d)显示出异常剖面剔除标准对于其  $M$  值计算的改善较小, 说明该浮标后期  $m_i$  值的持续增高是由于传感器的整体退化导致的, 因此其剖面形态与 WOA 剖面仍存在很高的相似性(只是传感器的灵敏度不断下降), 同样的情况也发生在浮标 3900347(图 2b)中。通过异常剖面的剔除标准, 我们也可以识别出哪些异常的  $m_i$  值是由于观测异常导致的, 而哪些是由于传感器退化导致的。

从图 3 中也可以看出, 使用  $M_2$  值校正后的全部溶解氧剖面与 WOA 气候态剖面更为接近, 大于 10% 平均绝对偏差的剖面数量进一步减少; 图 5a 则显示出, 通过增加异常剖面的剔除标准后, 浮标所有  $m_i$  值的绝对中值偏差显著下降, 说明该标准剔除掉的大部分是一些离散较大的  $m_i$  值(偏高或偏低, 如图 2a 和图 2c 显示)。此外, 图 5b 绘制了同一台浮标计算的  $M_1$  和  $M_2$  的散点图, 可以看出, 对于绝大多数浮标, 异常剖面的剔除标准并没有改变最终校正系数的计算, 再次说明中值法对于异常值的稳健性; 不过对于某些浮标,  $M_2$  值比  $M_1$  值更接近于 1, 如前文所述, 理论上漂移校正的  $M$  值应大于 1, 虽然存在一些  $M < 1$  的传感器, 但其数量较少。因此,  $M_2$  值的分布更符合预期。

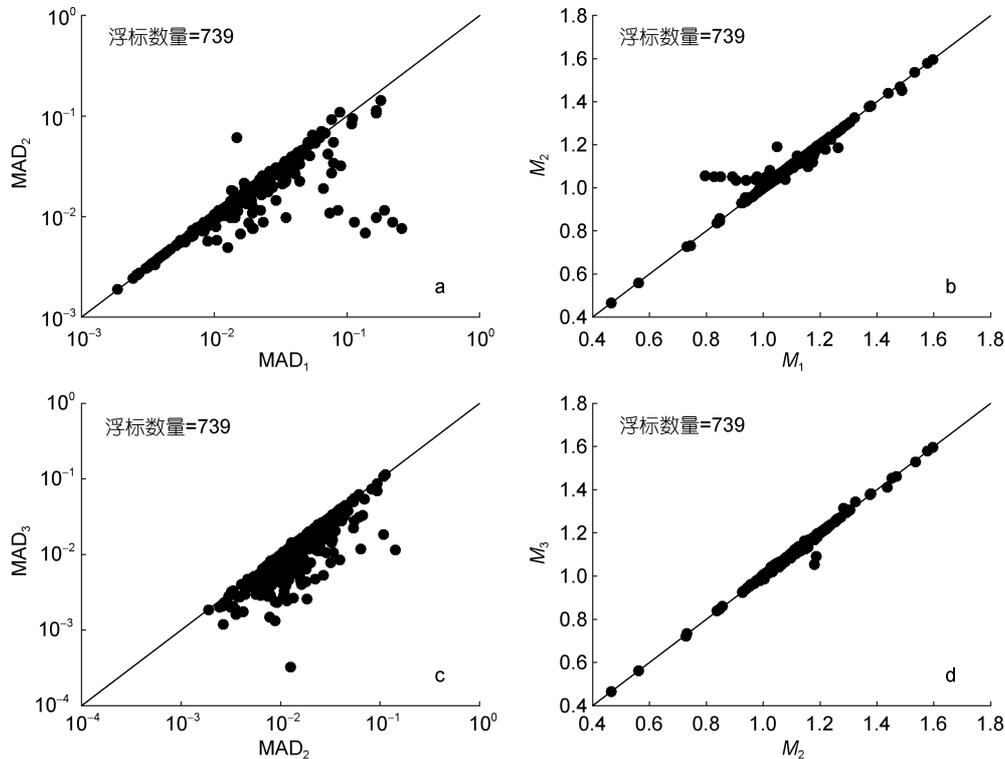


图 5 计算  $M_1$  值的绝对中值偏差 (median absolute deviation,  $MAD_1$ ) 与  $M_2$  值的绝对中值偏差  $MAD_2$  的散点图 (a) 以及  $M_1$  值与  $M_2$  值散点图 (b), 计算  $M_2$  值的绝对中值偏差与  $M_3$  值的绝对中值偏差的散点图 (c) 以及  $M_2$  值与  $M_3$  值散点图 (d)  
 Fig.5 Scatter plots of median absolute deviation of  $M_1$  ( $MAD_1$ ) vs.  $MAD_2$  (a),  $M_1$  vs.  $M_2$  (b),  $MAD_2$  vs.  $MAD_3$  (c),  $M_2$  vs.  $M_3$  (d)

### 2.3 异常 $m_i$ 值剔除标准的改进

在剔除异常剖面的改进之后, 本文提出第三步改进方案, 基于三倍绝对中值偏差的标准, 进一步剔除掉一些离散性较大的  $m_i$  值。在图 2 的四台浮标中, 仅浮标 2900765 (图 2d) 表现为较大的改进, 计算的  $M_3$  值与该浮标前期观测的稳定的  $m_i$  值基本一致。图 5c 和图 5d 显示, 通过增加异常  $m_i$  值的剔除标准后, 绝对中值偏差显著下降 ( $MAD_3 < MAD_2$ ), 但对于校正系数  $M$  的计算影响不大, 绝大多数  $M_3$  值与  $M_2$  值基本一致, 仅对于个别浮标 (如图 2d) 产生作用, 这说明: 1) 在使用中值法以及增加异常剖面的剔除标准之后,  $M_2$  值已比较稳定, 受异常值的影响非常小, 绝大多数浮标观测的  $m_i$  值变化不大; 2) 个别浮标仍然存在  $M_2$  值偏离大部分  $m_i$  值的现象, 而  $M_3$  则可以进一步避免异常  $m_i$  值的影响 (如图 2d)。从校正后的溶解氧饱和度剖面与 WOA 气候态剖面的平均绝对偏差 (MAE) 的折线统计图 (图 3) 中也可以看出,  $M_3$  校正后的结果与  $M_2$  基本没有差别。

## 3 结论

从图 2 四台浮标的示例以及图 3 的折线统计图中

都能明显地看到, 校正系数  $M_3$  比传统方法计算的  $M_0$  有了较大程度的改进。 $M_3$  的值域范围更合理, 基本不会受到异常剖面与异常  $m_i$  值的影响, 显著提高了 Argo 溶解氧数据库的整体数据质量。不仅如此, 上述三种改进方法对于空气测量校正法同样适用。特别是“异常剖面的剔除标准”, 可以使得计算中值时不受这些异常剖面的影响。

需要说明的是, 气候态溶解氧数据虽然可以作为一个重要的参考值, 但由于其代表的是一个“气候平均态”分布, 而现场观测数据则代表了溶解氧的“瞬时”特征, 包含了年际变化与特殊事件的影响, 两者不可能完全一致。因此, “异常剖面的剔除标准”可能存在“误判”——即将一些正常偏离平均态的溶解氧观测剖面定为“异常”。这种“误判”在计算校正系数  $M$  时, 对最终的结果影响不大, 但不能将所有高偏差的观测剖面都判定为异常而剔除。同样, “异常  $m_i$  值的剔除标准”也仅用于计算校正系数, 一些异常高的  $m_i$  值主要是受到传感器退化的影响, 其剖面形态与气候态数据吻合程度仍然很高 (如图 2b 和图 2d), 说明传感器退化产生的漂移同样是一种“斜率漂移”。

因此,本研究虽然对校正系数  $m$  值的计算提出了一种改进方法,但不能用于对浮标数据进行分级(flagging)。一些高偏差的“异常”剖面可能是由于一些瞬时过程(如平流过程、中尺度涡、台风等)导致的;而一些异常  $m_i$  值则是由于传感器退化造成的,如果采用较高的斜率系数( $m_i$ ),这些高漂移数据在一定程度上仍然可以得到校正与补救。Argo 浮标观测溶解氧数据的质量控制方法仍未完善,在本研究的基础上,未来还需进一步研究如何进行合理的数据分级,剔除或采用特殊方法校正一些质量低的数据点或剖面,从而提高数据库的整体数据质量。

### 参 考 文 献

- 刘 焯, 邢小罡, 2019. Argo 浮标观测溶解氧数据的原理与质量控制. 海洋科学, 43, 28—37. doi: 10.11759/hyxx20181102001
- Bittig H, Körtzinger A, Johnson K *et al*, 2016. SCOR WG 142: Quality control procedures for oxygen and other biogeochemical sensors on floats and gliders. Recommendations on the conversion between oxygen quantities for Bio-Argo floats and other autonomous sensor platforms. France: IFREMER, doi: 10.13155/45915
- Bittig H C, Körtzinger A, 2015. Tackling oxygen optode drift: near-surface and in-air oxygen optode measurements on a float provide an accurate in situ reference. *J Atmos Oceanic Technol*, 32(8): 1536—1543
- Bittig H C, Körtzinger A, Neill C *et al*, 2018. Oxygen Optode Sensors: principle, characterization, calibration, and application in the ocean. *Front Mar Sci*, 4: 429
- Bushinsky S M, Gray A R, Johnson K S *et al*, 2017. Oxygen in the southern ocean from Argo floats: determination of processes driving air-sea fluxes. *J Geophys Res Oceans*, 122(11): 8661—8682
- Garcia H E, Locarnini R A, Boyer T P *et al*, 2013. World Ocean Atlas 2013, Volume 3: dissolved oxygen, apparent oxygen utilization, and oxygen saturation. NOAA Atlas NESDIS 75. Silver Spring: NOAA, 1—27
- Huang Y B, Yang B, Chen B Z *et al*, 2018. Net community production in the South China Sea basin estimated from in situ  $O_2$  measurements on an Argo profiling float. *Deep-Sea Res I Oceanogr Res Paper*, 131: 54—61
- Johnson K S, Plant J N, Riser S C *et al*, 2015. Air oxygen calibration of oxygen optodes on a profiling float array. *J Atmos Oceanic Technol*, 32(11): 2160—2172
- Johnson K S, Riser S C, Karl D M, 2010. Nitrate supply from deep to near-surface waters of the North Pacific subtropical gyre. *Nature*, 465(7301): 1062—1065
- Keeling R E, Körtzinger A, Gruber N, 2010. Ocean deoxygenation in a warming world. *Annu Rev Mar Sci*, 2: 199—229
- Kihm C, Körtzinger A, 2010. Air-sea gas transfer velocity for oxygen derived from float data. *J Geophys Res*, 115: C12003
- Körtzinger A, Schimanski J, Send U, 2005. High quality oxygen measurements from profiling floats: a promising new technique. *J Atmos Oceanic Technol*, 22(3): 302—308
- Leys C, Ley C, Klein O *et al*, 2013. Detecting outliers: do not use standard deviation around the mean, use absolute deviation around the median. *J Exp Social Psychol*, 49(4): 764—766
- Martz T R, Johnson K S, Riser S C, 2008. Ocean metabolism observed with oxygen sensors on profiling floats in the South Pacific. *Limnol Oceanogr*, 53: 2094—2111
- Prakash S, Nair T M B, Bhaskar T V S U *et al*, 2012. Oxycline variability in the central Arabian Sea: an Argo-oxygen study. *J Sea Res*, 71: 1—8
- Riser S C, Johnson K S, 2008. Net production of oxygen in the subtropical ocean. *Nature*, 451(7176): 323—325
- Roemmich D, Johnson G C, Riser S C *et al*, 2009. The Argo Program: observing the global ocean with profiling floats. *Oceanography*, 22(2): 34—43
- Sarma V V S S, Udaya Bhaskar T V S, 2018. Ventilation of oxygen to oxygen minimum zone due to anticyclonic eddies in the Bay of Bengal. *J Geophys Res Biogeosc*, 123(7): 2145—2153
- Stanev E V, Poulain P M, Grayek S *et al*, 2018. Understanding the dynamics of the Oxidic-anoxic interface in the Black Sea. *Geophys Res Lett*, 45(2): 864—871
- Stramma L, Johnson G C, Sprintall J *et al*, 2008. Expanding oxygen-minimum zones in the tropical oceans. *Science*, 320(5876): 655—658
- Takeshita Y, Martz T R, Johnson K S *et al*, 2013. A climatology-based quality control procedure for profiling float oxygen data. *J Geophys Res Oceans*, 118(10): 5640—5650
- Yang B, Emerson S R, Bushinsky S M, 2017. Annual net community production in the subtropical Pacific Ocean from in situ oxygen measurements on profiling floats. *Global Biogeochem Cycl*, 31(4): 728—744

## AN IMPROVEMENT ON CLIMATOLOGY-BASED CORRECTION METHOD OF ARGO-OBSERVED DISSOLVED OXYGEN DATA

LIU Ye, XING Xiao-Gang

*(Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China)*

**Abstract** To date, the quality control methods on Argo-observed dissolved oxygen data remain inadequate, marked mainly by the vulnerability of classical climatology-based correction method to abnormal float-observed oxygen profiles and abnormal slope coefficients. In this context, we proposed a set of improvements on the classical method, including 1) replacing the average with the median, 2) proposing an Abnormal Profile Elimination Criterion to remove some slope coefficients with abnormal profiles based on comparison between the whole float-observed profile and climatology, and 3) proposing an Outlier Elimination Criterion to remove some outliers of slope coefficients. Using the improved correction coefficients, the corrected oxygen profiles are much closer to the climatology, which could effectively avoid the influence of abnormal profiles and abnormal slope coefficients, and significantly enhance the Argo-observed oxygen data quality.

**Key words** Argo float; dissolved oxygen; climatology-based correction; slope coefficient; abnormal profile