



杭州全球海洋Argo系统野外科学观测研究站

Hangzhou Global Argo system field scientific observation and research station

全球海洋 Argo 网格资料集 (GDCSM_Argo) 用户手册 (第三版)

杭州全球海洋 Argo 系统野外科学观测研究站

中国 Argo 实时资料中心

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

上海海洋大学

2021年9月 上海

目 录

○、资料使用说明	ii
一、引言	1
二、数据集简介	2
1、构建流程	2
2、数据集基本信息	4
三、客观分析系统介绍	5
1、背景场	5
2、观测资料	5
3、客观分析方法	6
四、客观分析结果检验	10
1、均方根误差统计	10
2、与实测数据对比	10
3、与其他数据集对比	13
五、结束语	16
参考文献	17

〇、资料使用说明

全球海洋 Argo 资料集 (GDCSM_Argo) 的研制, 得到了国家自然科学基金项目“黑潮-亲潮交汇区涡旋演变对柔鱼生境及其渔场变迁的影响”(4210060098) 和大洋渔业资源可持续开发教育部重点实验室资助项目 (2018HY-XKQ03) 的共同资助。

本网格资料集的开发和维护由自然资源部杭州全球海洋Argo系统野外科学观测研究站(或自然资源部第二海洋研究所下属中国Argo实时资料中心) 和上海海洋大学共同开发完成。本数据集可免费下载使用, 凡使用本数据集时, 请统一标注为“GDCSM_Argo”, 且按文献格式引用:

张春玲, 刘增宏, 卢少磊, 李宏, 孙朝辉, 吴晓芬, 2021. 全球海洋Argo 网格化资料(GDCSM-Argo) 用户手册 (第三版), 中国Argo 实时资料中心, 19pp。

Zhang Chunling, Liu Zenghong, Lu Shaolei, Li Hong, Sun Chaohui, Wu Xiaofen, 2021. User manual (3rd version) of GDCSM_Argo gridded data set, China Argo Real-time Data Center, pp19.

或者直接引用以下文献:

谢春虎, 徐苗苗, 曹莎莎, 张勇, 张春玲*, 基于梯度依赖客观分析技术的全球Argo网格化数据集: 构建及初步应用, 海洋学研究, 2019, 37 (4), 24-35.

由于时间仓促, 该数据产品难免会有不足之处, 欢迎广大用户提供宝贵意见或建议, 非常感谢!

版权声明

GDCSM_Argo资料集的版权属自然资源部第二海洋研究所和上海海洋大学共同所有, 任何单位、网站或个人未经授权不得转载、修改和用于商业行为。经授权的单位、网站, 在使用或转载时必须注明“数据来源: 中国Argo实时资料中心网站 (或自然资源部杭州全球海洋Argo系统野外科学观测研究站) 和上海海洋大学“, 违者将依法追究其法律责任。

联系人

刘增宏: 0571-81963197, liuzenghong@139.com

张春玲: 021-61900396, zhangchunling81@163.com

卢少磊: 0571-81963098, lsl324004@163.com

孙朝辉: 0571-81963098, siosun@163.com

一、引言

全球 Argo 实时海洋观测网自 2007 年建成以来, 每年都以惊人速度提供来自深海大洋中的温盐度信息 (同时也含有次表层的海流信息), 截止到 2018 年 11 月, 温盐度剖面数量已经超过了 200 万条, 而且仍以每年超过 14 万条剖面的速度递增, 其在十余年的时间内, 所得到的观测资料数量已远远超过了海洋调查船在过去一百多年期间得到的温盐度剖面总数 (图 1)。而且, 自动剖面浮标观测的频次、同步性和覆盖面等均要优于历史上采用调查船或局域锚碇浮标网 (如 TAO) 的观测, 现在它已经成为海洋气候模式中的重要数据来源。

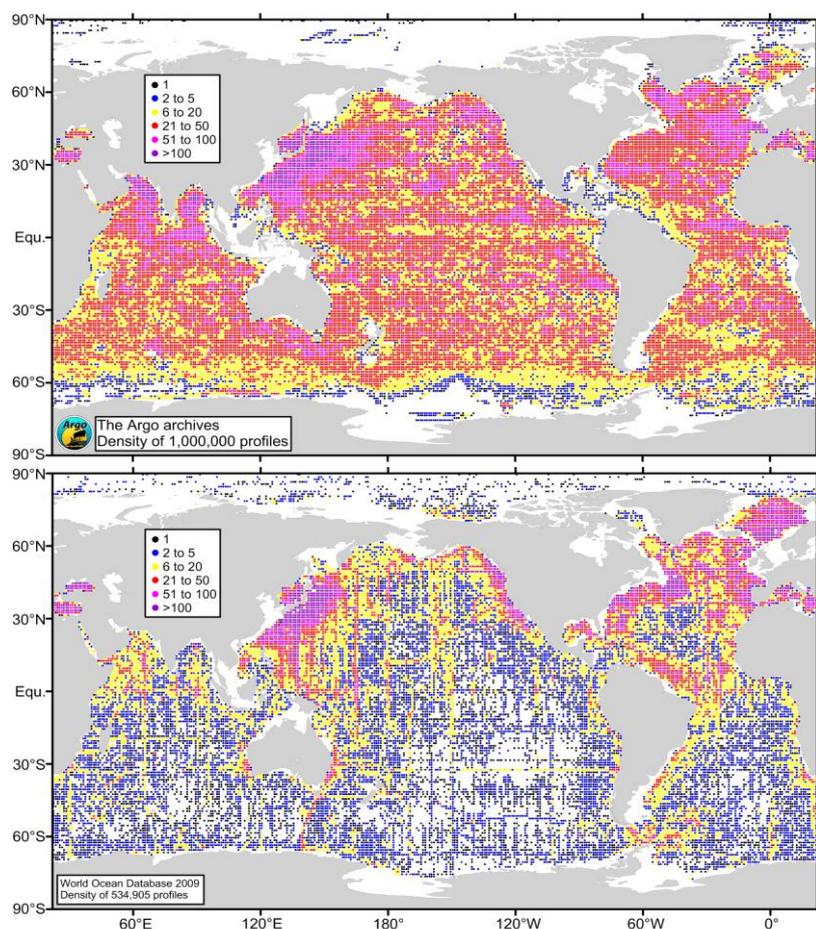


图 1 全球海洋中次表层温、盐度剖面分布

(上图为自动剖面浮标观测; 下图为历史上采用常规海洋仪器观测)

但自动剖面浮标具有的“随波逐流”特性, 由此导致其观测剖面在时间和位置上带有随意性, 给人们在海洋科学研究及海洋和天气预测预报等业务化领域中应用 Argo 资料, 带来了较大的局限性。早在上世纪 80 年代, 就有学者 (Levitus, 1982) 针对水文、气象资料的时空不均匀性这一缺陷, 进行了相关研究, 并推出了一系列网格化数据集。目前, 许多 Argo 成员国也都陆续开发了相应的网格化产品 (Bhaskar 等, 2007; Hosoda 等, 2008; Roemmich 和 Gilson,

2009)。这些数据集将 Argo 散点观测资料进行时空规则均匀化，极大地扩大了 Argo 资料的应用范围。由于常规观测缺乏表层数据，许多业务化的海洋预报或资料系统除了 Argo 资料以外，还使用了大量的其他海洋观测数据，不能很好地保持 Argo 资料的独立性，并保证资料的质量。

为此，我们立足于 Argo 资料本身（未同化其他观测资料），采用一种能够有效提高 Argo 客观分析精度的方法——梯度依赖相关尺度客观分析方法（Gradiente-dependent Correlation Scale Method, GDCSM），并结合基于跃层参数的表层信息构建模型，研发了全球海域 Argo 三维网格化温、盐度数据集及相应的衍生产品，供广大 Argo 用户共享。

二、数据集简介

1、构建流程

利用基于梯度依赖相关尺度的最优插值客观分析方法（Zhang et al., 2013; 张春玲等 2015; Zhang et al., 2021）构建次表层（5~2000 m）三维网格数据，并基于一个温度参数模型推算表层温度场（张春玲等，2014），同时采用 Akima 外插法获得表层盐度、声速场。其构建流程如图 2 所示。

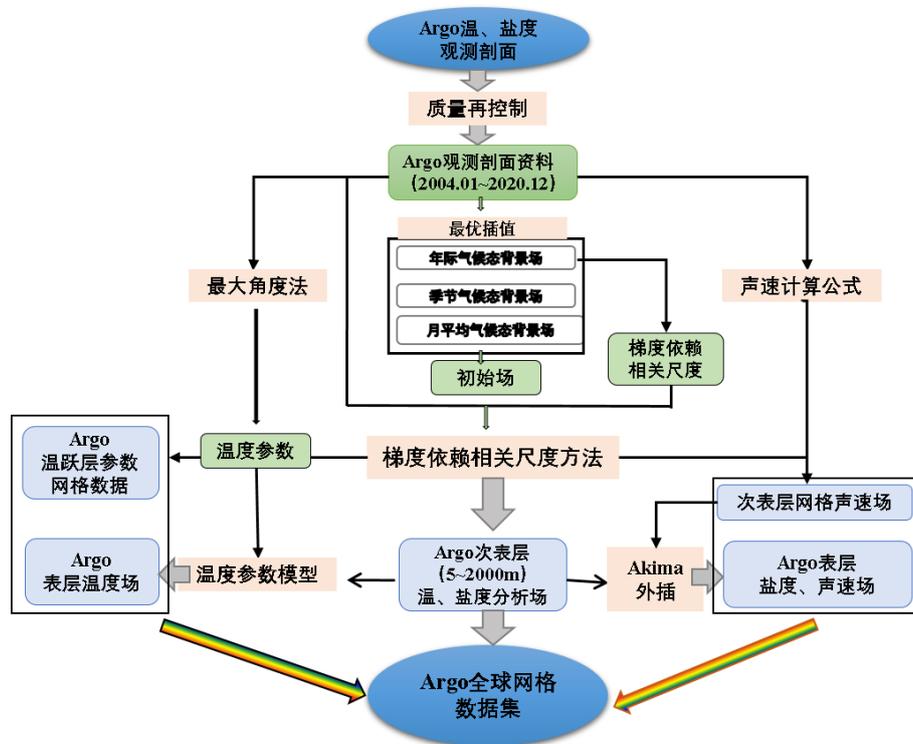


图 2. 全球网格数据集 (GDCSM_Argo) 构建流程

第 1 步：收集整理 2004 年 1 月至 2020 年 12 月的 Argo 温、盐度散点剖面资料

(<ftp://ftp.argo.org.cn/pub/ARGO/global/>), 参考 Li e al., (2017) 的方法, 进一步进行剖面资料质量检验和数据筛选, 计算每个剖面对应的跃层参数 (混合层深度、温跃层下界深度、跃层梯度) 和声速, 同时将观测剖面垂向插值到 57 个不等间隔的标准层 (表 1)。

表 1. 统一质控后的 Argo 观测剖面标准层深度

标准层	深度 / dbar	标准层	深度 / dbar
1	5	30	400
2	10	31	420
3	20	32	440
4	30	33	460
5	40	34	500
6	50	35	550
7	60	36	600
8	70	37	650
9	80	38	700
10	90	39	750
11	100	40	800
12	110	41	850
13	120	42	900
14	130	43	950
15	140	44	1000
16	150	45	1050
17	160	46	1100
18	170	47	1150
19	180	48	1200
20	200	49	1250
21	220	50	1300
22	240	51	1400
23	260	52	1500
24	280	53	1600

25	300	54	1700
26	320	55	1800
27	340	56	1900
28	360	57	1975
29	380		

第 2 步：制作背景场、计算相关尺度参数

经质量和筛选，2004 年 1 月至 2020 年 12 月的 Argo 温、盐度观测剖面共计 1703152 条。首先将温度和盐度观测数据在 $1^\circ \times 1^\circ$ 网格内进行算术平均，形成全球海洋 ($90^\circ\text{S} \sim 90^\circ\text{N}$, $180^\circ\text{W} \sim 180^\circ\text{E}$)，空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 的多年气候态初猜场，采用最优插值方法构建多年气候态背景场；然后，以气候态背景场为初猜场，构建多年季节平均的背景场；最后以季节平均场为背景场，分析得到多年月平均的背景场。利用多年气候态背景场数据，计算梯度依赖相关尺度参数。

第 3 步：次表层网格数据计算

根据第 2 步计算得到的各项异性梯度依赖相关尺度参数，测试梯度依赖最优插值中有效半径、背景误差与观测误差比、相关尺度常数等几个参数在全球海域的最优取值，形成适用于全球海域的 GDCSM 客观分析方案，以上述多年月平均分析场为背景场，利用 GDCSM 分析得到 2004.01-2020.12 逐年逐月的温度、盐度、声速次表层数据。

第 4 步：跃层参数计算、表层信息构建

采用最大角度法 (Chu et al., 2011; 张春玲等 2015) 计算 2004.01-2020.12 逐年逐月的全球网格点上对应的温跃层上界深度 (混合层深度)、温跃层下界深度、温跃层梯度等参数，并测试温度参数模型在全球海域的适用性，然后由次表层温度数据，推算全球海域 $1^\circ \times 1^\circ$ 的表层温度。同时采用 Akima 外插法 (Akima 1970) 计算表层盐度和声速。

2、数据集基本信息

构建的 GDCSM_Argo 三维网格资料集的基本信息如下：

- (1) 水平覆盖范围： $179.5^\circ\text{W} \sim 179.5^\circ\text{E}$, $89.5^\circ\text{S} \sim 89.5^\circ\text{N}$;
- (2) 水平分辨率： $1^\circ \times 1^\circ$ ，经、纬方向上的格点数分别为 360 和 180，垂向 (0~2000m) 共 58 层；
- (3) 时间分辨率：月平均、多年月平均、多年季节平均、多年气候态；
- (4) 覆盖时段：2004 年 1 月~2020 年 12 月；

(5) 数据格式: 数据文件以 Matlab 和 NetCDF 两种格式存储。逐年逐月的文件名均表示为 GDCSM_Argo_YYYYMM.mat, 其中, YYYY 表示年份, MM 表示月份; 气候态月平均数据文件名表示为 GDCSM_Argo_month_MM.mat, MM 表示月份; 多年平均气候态数据文件名表示为 GDCSM_Argo_annual.mat。

(6) 包含的变量:

其中 Matlab 格式的变量为温度 ($^{\circ}\text{C}$) (变量名: gdcsm_temp, 维数: $360\times 180\times 58$); 盐度 (变量名: gdcsm_psal, 维数: $360\times 180\times 58$); 声速 (变量名: gdcsm_svel, 维数: $360\times 180\times 58$); 混合层深度 (dbar) (变量名: gdcsm_mld, 维数: 360×180); 温跃层下界深度 (dbar) (变量名: gdcsm_tbd, 维数: 360×180); 温跃层梯度 ($^{\circ}\text{C}/\text{dbar}$) (变量名: gdcsm_gth, 维数: 360×180); 经度 (变量名: lon, 维数: 1×360); 纬度 (变量名: lat, 维数: 1×180); 深度 (dbar) (变量名: pres, 维数: 1×58); 日期 (儒略日) (变量名: time, 维数 1)。

NetCDF 格式的变量为温度 ($^{\circ}\text{C}$) (变量名: temp, 维数: $58\times 180\times 360$); 盐度 (变量名: salt, 维数: $58\times 180\times 360$); 声速 (变量名: svel, 维数: $58\times 180\times 360$); 混合层深度 (dbar) (变量名: MLD, 维数: 180×360); 温跃层下界深度 (dbar) (变量名: TBD, 维数: 180×360); 温跃层梯度 ($^{\circ}\text{C}/\text{dbar}$) (变量名: GTH, 维数: 180×360); 经度 (变量名: lon, 维数: 1×360); 纬度 (变量名: lat, 维数: 1×180); 深度 (dbar) (变量名: pres, 维数: 1×58); 日期 (儒略日) (变量名: time, 维数 1)。

三、客观分析系统介绍

1、背景场

鉴于本数据集立足于观测资料本身进行海洋资料客观分析, 不涉及模式的数值模拟效果, 且仅使用时间连续性强、覆盖面广的自动剖面浮标观测资料, 采用了最优插值客观分析方法 (Behringer 等, 1998), 来构建 Argo 次表层 (5~2000 m) 温、盐度网格化资料集的初始场。首先通过在 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 网格内进行算术平均, 形成多年气候态温、盐度初始场, 然后利用传统最优插方法构建多年气候态分析场, 以此为背景场再构建多年季节平均温、盐场, 以此类推, 构建多年月平均分析场, 以此为背景场, 利用梯度依赖相关尺度法, 构建逐年逐月的客观分析结果。

2、观测资料

用作客观分析的 Argo 次表层 (5~2000 m) 原始散点数据由中国 Argo 实时资料中心 (<http://www.argo.org.cn/>) 提供, 这里选用 2004 年 1 月~2020 年 12 月期间全球海域

(180°E~180°W, 80°S~80°N) 的温、盐度剖面资料, 并已经过各国 Argo 资料中心的实时和部分延时质量控制。为了保证数据集的可靠性, 我们还对所采用的观测资料进行了温盐范围检验、冰点检验、尖峰检验、温盐梯度检测及水深递增检验等质量再控制, 并将检测到的可疑观测数据剔除后, 利用 Akima 方法 (Akima, 1970) 垂向插值到 57 个标准层上。经质量再控制后, 全球海域 204 个月的观测剖面共计 1703152 条。

3、客观分析方法

(1) GDCSM 基本原理

本数据集构建 Argo 次表层 (5~2000 m) 三维温盐场的客观分析方法为梯度依赖相关尺度法 (Gradient-dependent correlation scale method, GDCSM) (Zhang et al., 2013; 张春玲等, 2015; Zhang et al., 2021), 其基本原理为每个格点的分析值均由背景场与以最优权重加权的观测增量叠加而成, 而最优权重可以通过一个线性方程组来确定) (图 3):

$$v_i^a = v_i^b + \sum_j^M w_{ij} \delta y_j^o, \quad \sum_{j=1}^M w_{ij} \mu_{jk} + \eta_k w_{ik} = \mu_{ik}, \quad k=1, \dots, M \quad (1)$$

其中, v 可以为任何分析变量, 如温度、盐度等, v_i^a 为第 i 个格点的分析场; v_i^b 为第 i 个格点的背景场; y_j^o 是分析格点周围有效半径 R 内, 可利用的第 j ($j=1,2,3,\dots,M$) 个观测值, $\delta y_j^o = y_j^o - H(y_j^o)$ 为对应的观测增量, 通常由从分析格点到观测点的双线性插值算子 H 作用得到; w_{ij} 为分析格点 i 周围第 j 个观测点最小二乘意义下的最优权重; μ_{jk} 是两个观测点 j,k 的背景误差相关; μ_{ik} 是观测点 k 和格点 i 间的背景误差相关; $\eta_k = \sigma_{ok}^2 / \sigma_{bi}^2$ (记为 η) 是观测误差与背景误差的平方比。

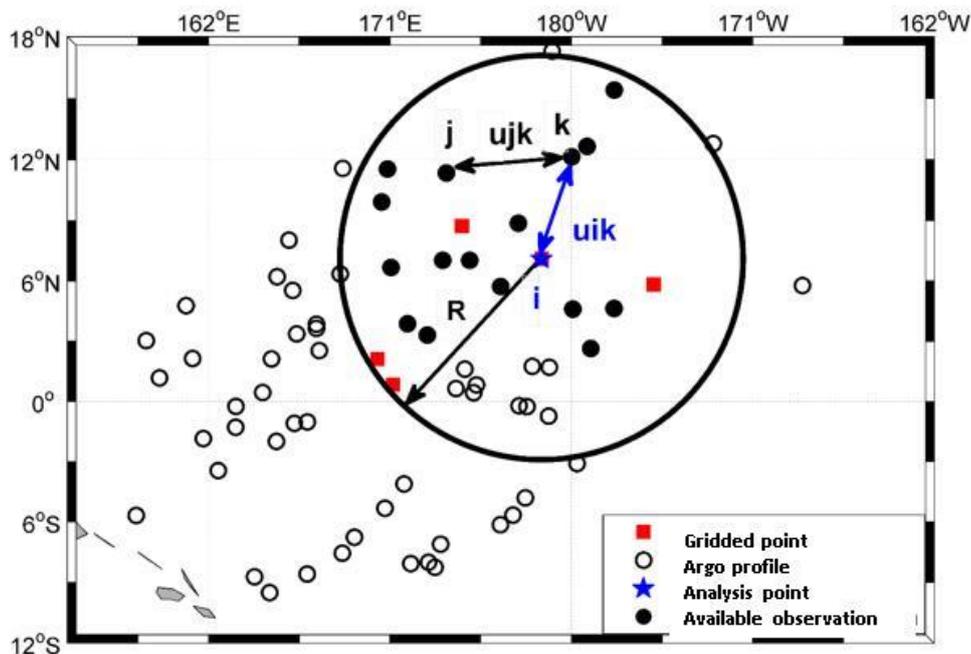


图 3. GDCSM 基本原理

(2) 梯度依赖相关尺度

制约 GDCSM 方法客观分析效果的一个关键因素是背景误差协方差矩阵中背景误差相关系数 μ_{ik} ，根据各项异性扩散方程的傅氏解及最大值原理（张春玲等，2015），该误差相关满足高斯函数形式：

$$\mu_{ik} \sim \exp \left[-\frac{(x_i - x_k)^2}{(L_x / G_x)^2} - \frac{(y_i - y_k)^2}{(L_y / G_y)^2} \right] \quad (2)$$

其中， (x_i, y_i) 和 (x_k, y_k) 分别为两点的经纬度坐标； L_x 和 L_y 为经向和纬向的相关尺度常数；梯度依赖相关尺度参数 G 包含经向分量 G_x 和纬向分量 G_y ，其基于分析变量的水平梯度变化规律给出各项异性的背景误差相关尺度：

$$G_x = 1 + \frac{|\partial v / \partial x|}{E(|\partial v / \partial x|)}, \quad G_y = 1 + \frac{|\partial v / \partial y|}{E(|\partial v / \partial y|)}, \quad (3)$$

$|\partial v / \partial x|, |\partial v / \partial y|$ 分别为经向和纬向的温度（或盐度）梯度， $E(\partial v / \partial x), E(\partial v / \partial y)$ 为水平梯度均值，公式 (3) 中的参数由多年气候态数据计算得到。由 (2) (3) 确定的全球海域 100 m 层梯度依赖相关尺度如图 4 所示。

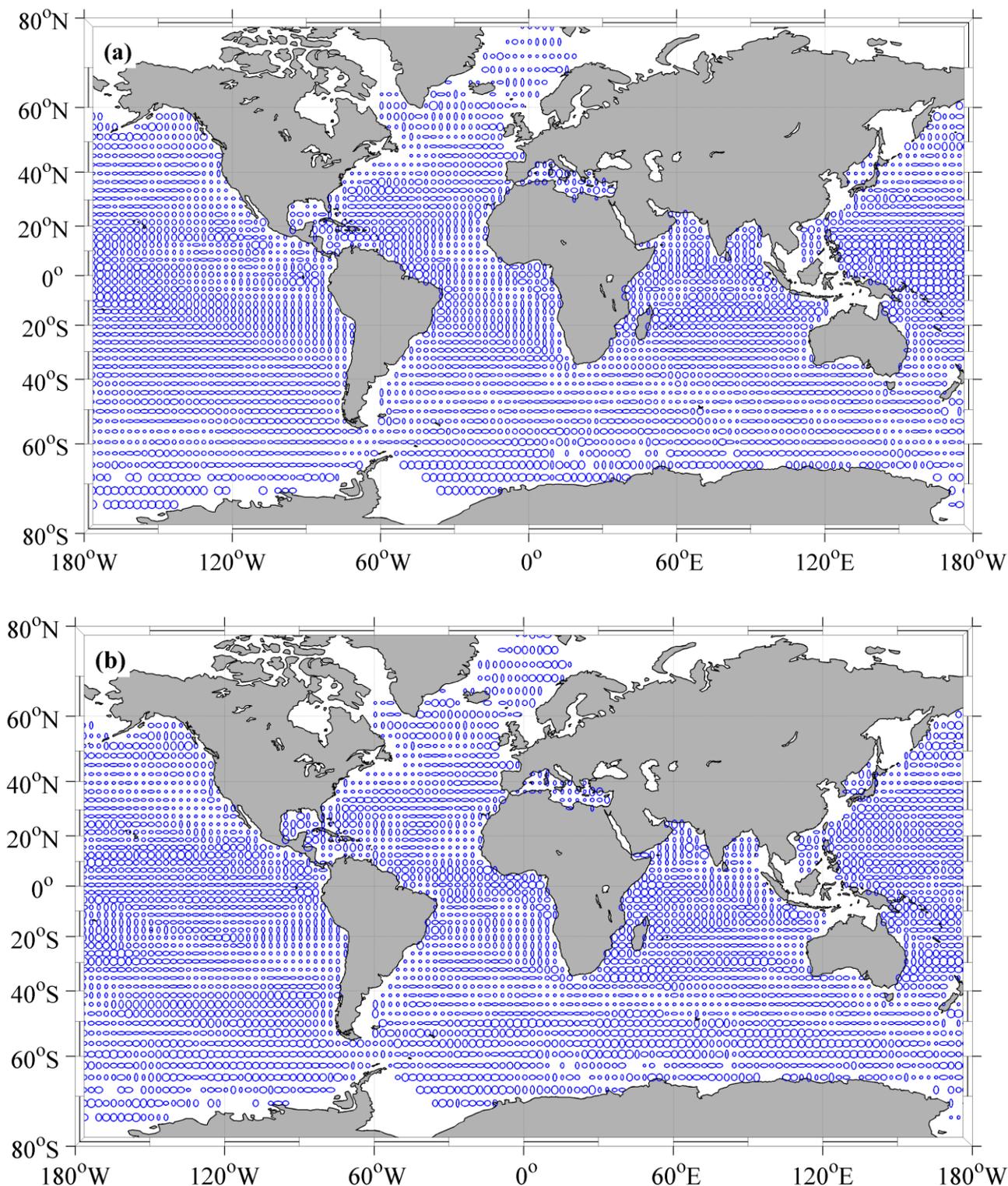
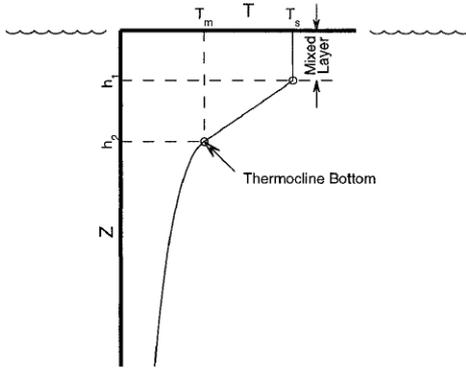


图 4. 全球海域 100 m 温度 (a)、盐度 (b) 梯度依赖相关尺度

(4) 表层信息构建方法

采用一个温度参数模型 (Chu and Fan, 2000), 以此来确定次表层温度与海表温度的函数关系, 然后利用自动剖面浮标观测获得的次表层数据推算出表层温度场 (张春玲等, 2014):



$$\begin{aligned}
 T(z) &= T_s, & (0 \geq z \geq -h_1), \\
 T(z) &= T_s + G_{th}(z + h_1), & (-h_1 \geq z \geq -h_2), \\
 T(z) - T_d &= (T_{td} - T_d) \exp\left[\frac{z_0^w - (z_0 - z - h_2)^w}{H^w}\right], & (z \leq -h_2),
 \end{aligned} \tag{4}$$

$$z_0 = \left[\frac{HG_{th}}{w(T_{td} - T_d)}\right]^{1/(w-1)} \tag{5}$$

首先采用最大角度法 (Chu and Fan, 2011) 计算出每个分析格点上的混合层深度 h_1 、温跃层下界深度 h_2 及温跃层梯度 G_{th} ，分别将该格点上 10, 20, 30, 50, 75, 100, 125, 150, 200 m 层的温度值作为 $T(z)$ ，根据温度参数模型 ((4) 式) 中对于的函数形式，推算每个网格点上的九个表层温度值，进而由 (6) 式进行加权平均：

$$T_i = \frac{\sum_{j=1}^9 b_{i,j} T_{i,j}}{\sum_{j=1}^9 b_{i,j}}, b_{i,j} = \exp(-(r_{i,j} - \bar{r}_i)^2 / L^2) \tag{6}$$

其中，参数 $H=2000$ ， $w=0.5$ ，温度误差相关尺度 L 取为 2°C ； T_d 为海洋底层温度，此处采用 WOA09 多年平均数据中 5500 m 深处对应的温度； T_{td} 为跃层下界温度。

沿用传统的 Akima 外插法 (Akima, 1970) 来估计表层盐度、声速场，其外插方式是借鉴 Akima 内插在边界处的插值方式：假设端点、其相邻的两个给定点及需要补充的两个数据点均在同一条抛物线上。

四、客观分析结果检验

1、均方根误差统计

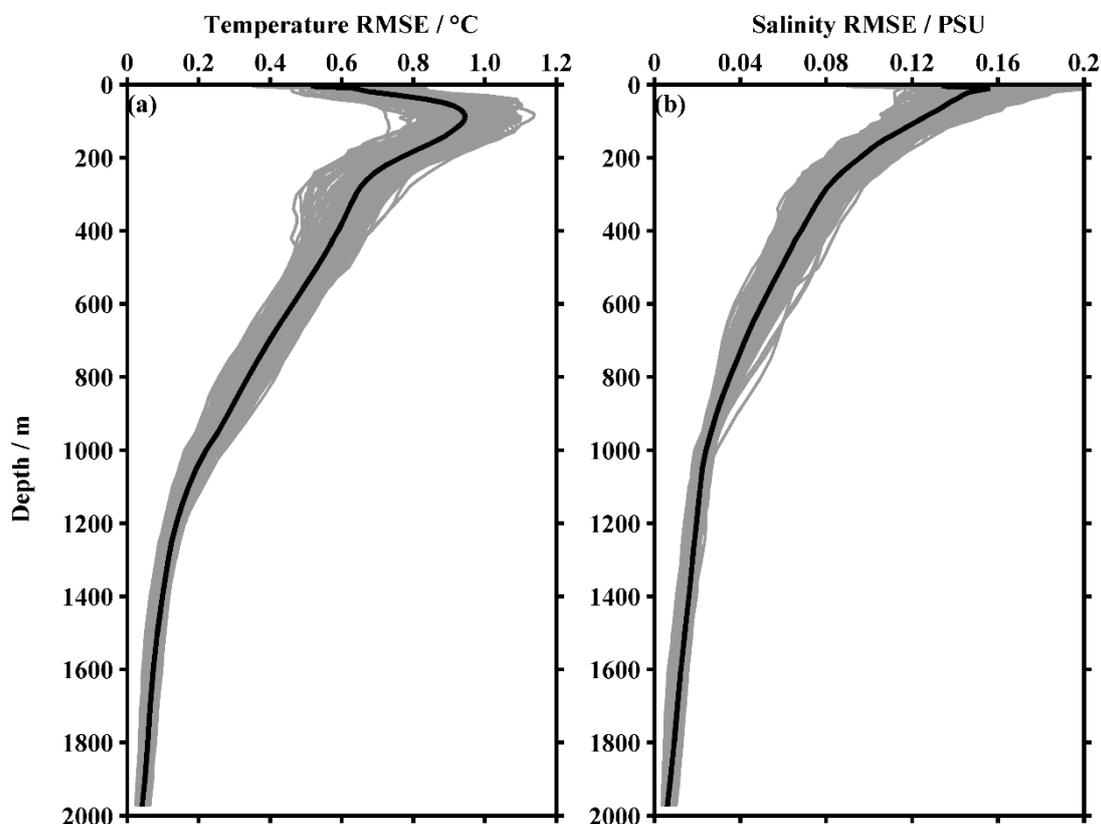


图 5. 2004-2020 年逐月的温、盐度均方根误差统计

由 2004.01-2020.12 年间 204 个月的温、盐度均方根误差随深度的变化曲线（图 5）可以看出，温度均方根误差随深度大致呈先增后减的趋势，而盐度均方根误差由上至下逐渐减小，1000m 以下，温度 RMSE 均小于 0.2°C ，盐度 RMSE，基本在 0.04 以内。由于海洋上层温、盐度变化较下层剧烈，季节性变化信号也较强，因此，温、盐度 RMSE 在 1000m 以上相对较大，最大则出现在 200m 以浅的水层。温度 RMSE 垂向分布显示，在 100~150m 深度上，温度跃层普遍存在，对应的温度 RMSE 也相对较大，最大 RMSE 在 0.8°C ~ 1.1°C 之间，200m 以深，温度 RMSEs 随深度逐渐递减。而盐度 RMSE，由表层至 2000m 深度随深度大致呈递减趋势，204 个月中，最大盐度 RMSE 大部分出现在 200m 以浅，约在 0.12~0.20 之间。

2、与实测数据对比

在太平洋 (0° , 147°E)、大西洋 (0° , 23°W)、印度洋 (0° , 80.5°E) 赤道附近海域，分别选取了三个 TAO 浮标观测站位的温、盐度观测数据时间序，与 GDCSM 历年逐月数据作温、盐度偏差对比验证（图 6-图 8）。

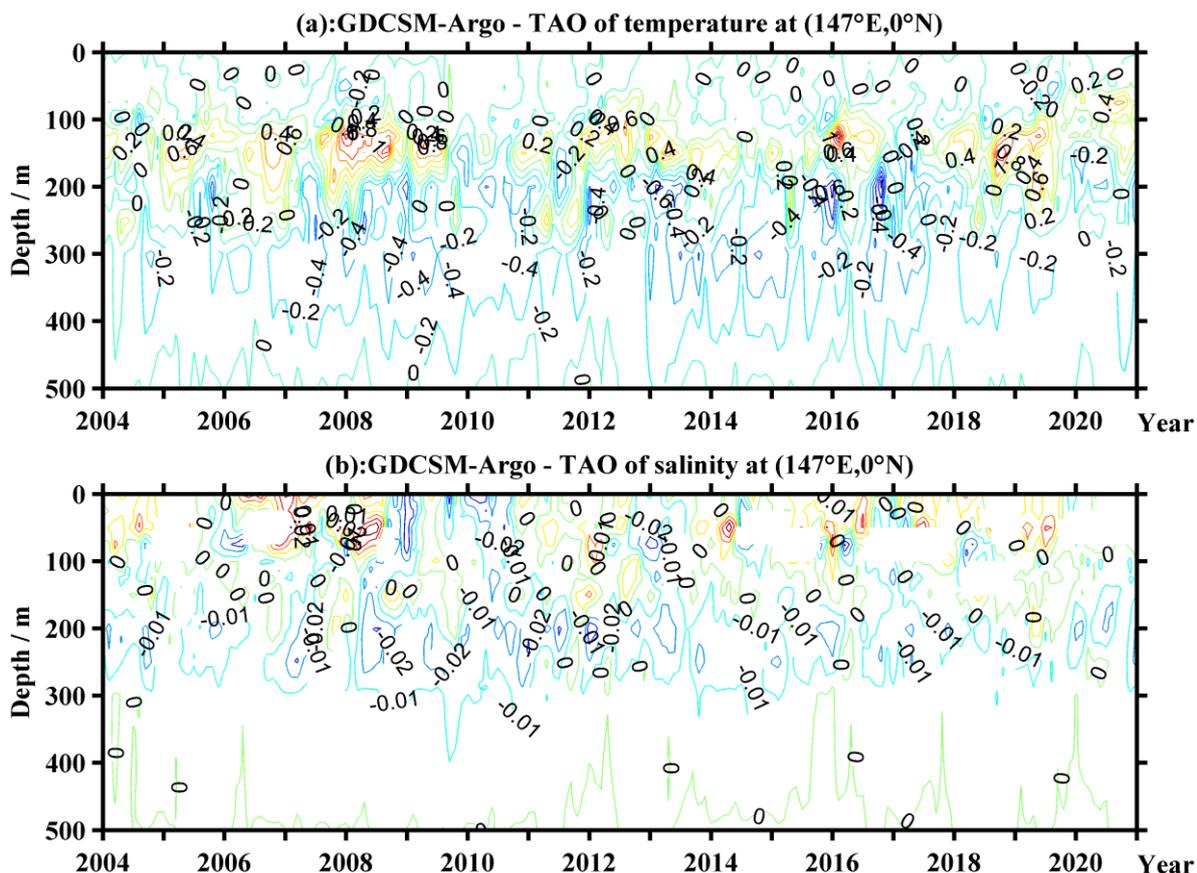


图 6. 2004 年 1 月至 2020 年 12 月太平洋 GDCSM_Argo 与 TAO 浮标观测的温(a)、盐(b)度偏差

在太平洋海域 (图 6), 17 年间温度偏差均随深度的增加先增后减, 100m 以浅每个月度的温度偏差均小于 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$, 100-200m 的跃层深度上, 温度偏差增大至 $\pm 0.2 \sim \pm 1.0^{\circ}\text{C}$, 200m 以下, 温度偏差又逐渐降低, 最大偏差不超过 $\pm 0.4^{\circ}\text{C}$ 。盐度偏差由表层 ($\sim \pm 0.02$) 至 500m 逐渐减小, 300m 以深, 盐度偏差基本为 0。大西洋海域 (图 7) 的温度偏差与太平洋类似, 100m 以浅温度偏差均小于 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$, 100m-200m 之间温度偏差增大至 $\pm 0.2^{\circ}\text{C} \sim \pm 0.6^{\circ}\text{C}$, 200m-500m 温度偏

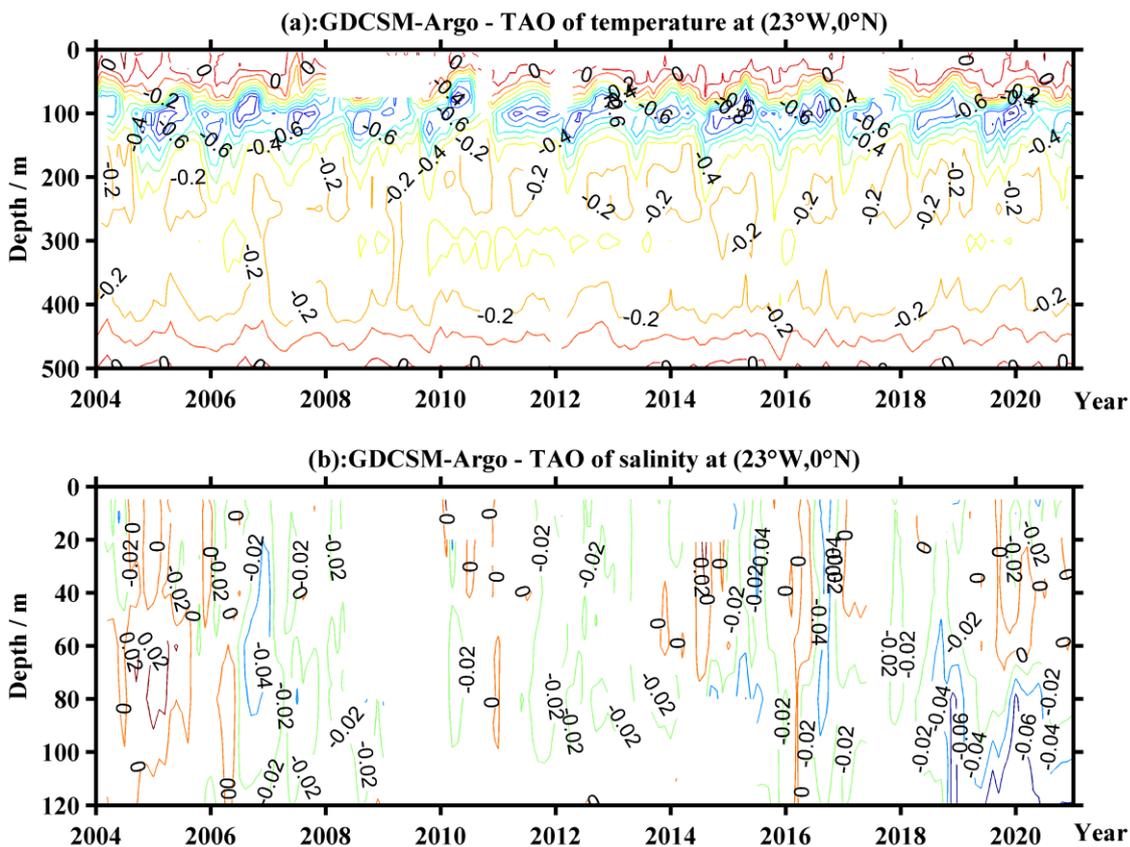


图 7. 2004 年 1 月至 2020 年 12 月大西洋 GDCSM_Argo 与 TAO 浮标观测的温(a)、盐(b)度偏差

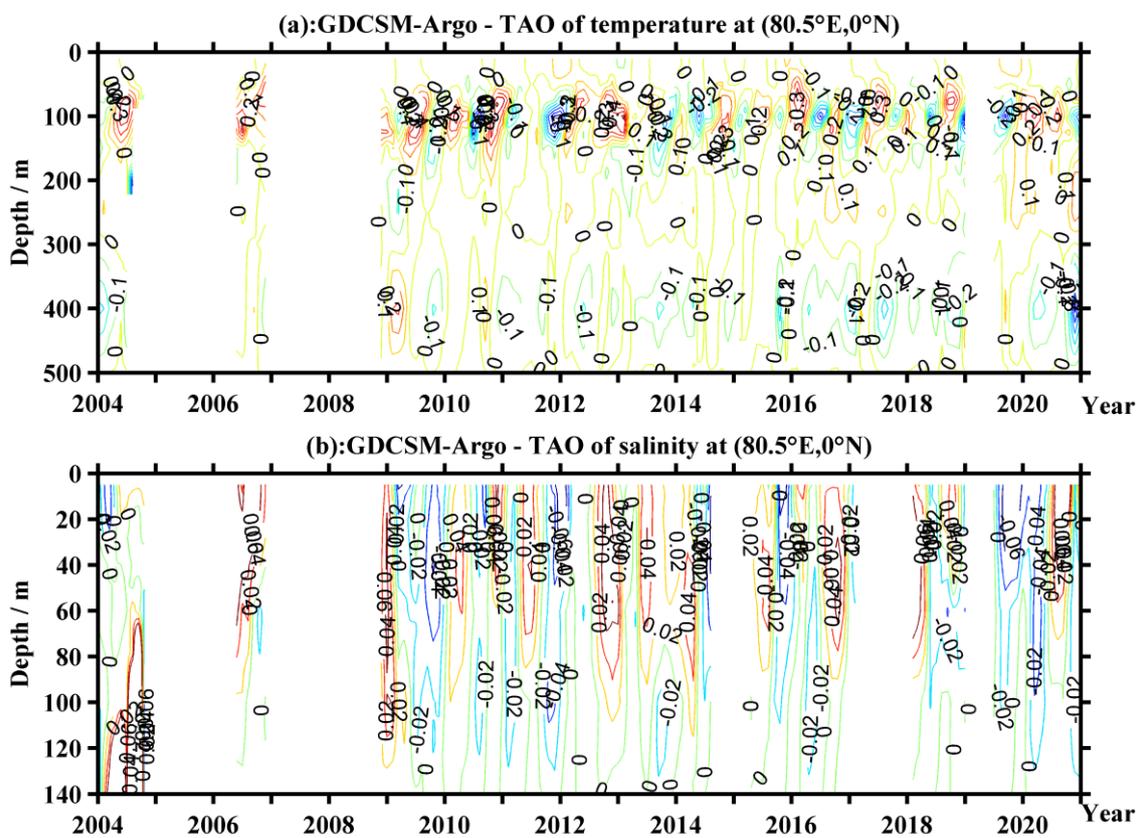


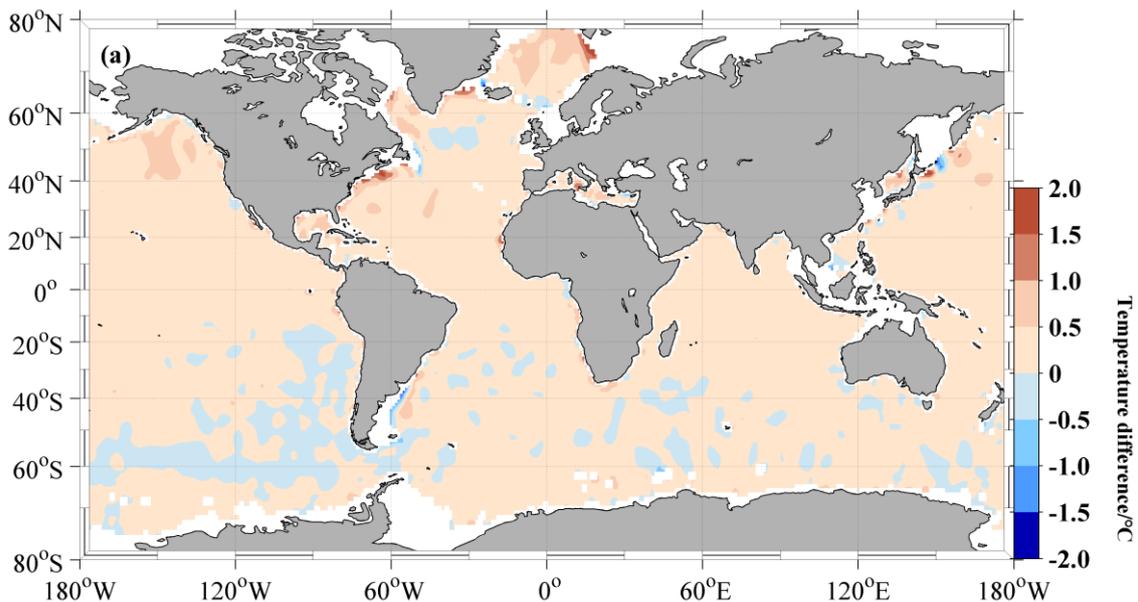
图 8. 2004 年 1 月至 2020 年 12 月大西洋 GDCSM_Argo 与 TAO 浮标观测的温(a)、盐(b)度偏差

差又减小到 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 以下。该站点的盐度最大观测深度为 120m，在此深度上，盐度偏差最大不超过 ± 0.06 。印度洋海域（图 8）的温度偏差在约 100m 深度处最大（ $\sim \pm 0.4^{\circ}\text{C}$ ），200m-300m 之间基本为 0，300m 以下又稍有增加，约为 $\pm 0.1^{\circ}\text{C} \sim \pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 。在 TAO 浮标盐度最大观测深度（140m）范围内，盐度偏差约为 $\pm 0.02 \sim \pm 0.04$ 。

3、与其他数据集对比

首先，利用 WOA18 多年气候态数据对 GDCSM_Argo 的表层温、盐度结果进行了初步检验。如图 9 所示，GDCSM_Argo 多年气候态海表温度与 WOA18 的温度偏差最大不超过 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ，大部分海域小于 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ，且赤道以北，GDCSM_Argo 的海表温度普遍稍高于 WOA18，而南半球的部分海域温度偏差为负值。太平洋海域除 $40^{\circ}\text{N} \sim 60^{\circ}\text{N}$ 之间的温度偏差稍高以外，其余海域的温度偏差均小于 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ，西北太平洋黑潮区个别临近边界的格点上，温度偏差约为 $\pm 1.5^{\circ}\text{C} \sim \pm 2.0^{\circ}\text{C}$ 。类似地，在北大西洋湾流区的个别格点，温度偏差也较大（ $> \pm 1.5^{\circ}\text{C}$ ），其余海域温度偏差基本在 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 以下。而整个印度洋海域的温度偏差均较小。

在全球海域大部分海域（图9（b）），GDCSM-Argo多年气候态表层盐度与WOA18的盐度偏差均小于 ± 0.1 ，且多数海域，GDCSM-Argo表层盐度低于WOA18。南太平洋 20°S 附近海域，盐度偏差为 $0 \sim 0.1$ ，太平洋其他海域盐度偏差基本处于 $-0.1 \sim 0$ 之间。大西洋南北副热带海域的盐度偏差为正，且在大西洋西边界的湾流区和巴西暖流区，盐度偏差稍大（ > 0.2 ），赤道海域和南北亚极低地区的盐度偏差均在 $-0.1 \sim 0$ 之间。而印度洋海域除临近亚洲大陆的边界处盐度偏差大于 0.1 外，其余海域盐度偏差均小于 ± 0.1 。



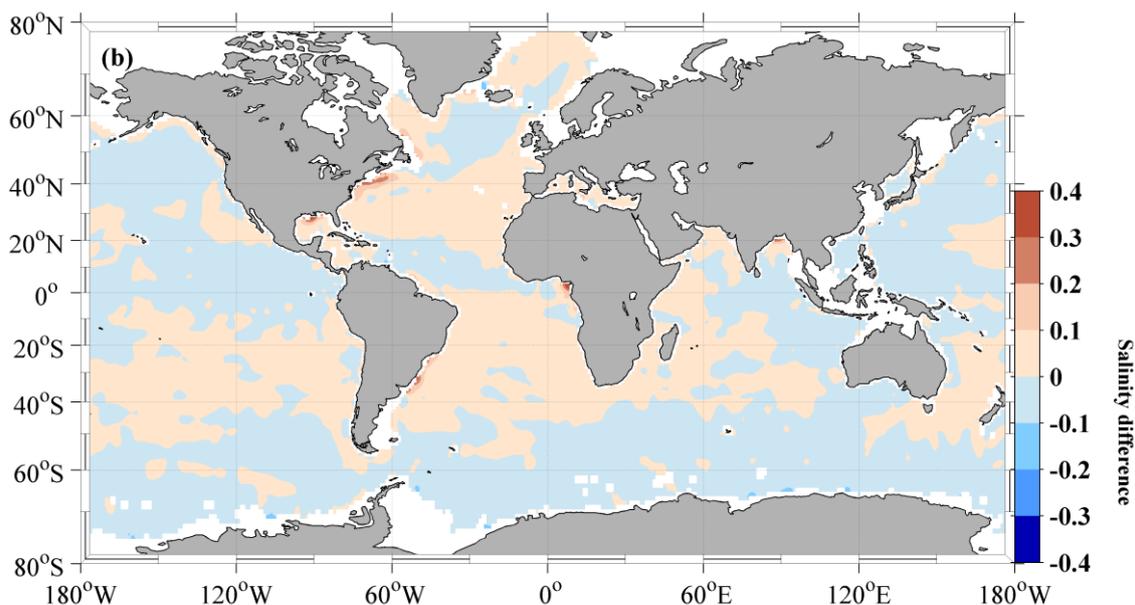


图 9. GDCSM_Argo 与 WOA18 的多年气候态表层温 (a)、盐 (b) 度偏差。

为了进一步验证 GDCSM_Argo 网格资料集的可靠性，我们选取美国 Scripps 研究所的 RG_Argo 网格数据集，该资料集与 GDCSM_Argo 相同，原始资料完全基于 Argo 观测剖面数据，分析方法为最优插值。图 10、图 11 分别给出了 GDCSM_Argo 和 RG_Argo 各自相对于 Argo 观测数据的温、盐度均方根误差时空序列。

GDCSM_Argo 与 RG_Argo 展示的温度均方根误差时空分布规律十分相似（图 10）：均方根误差随深度的增加先增后减，1000m 以浅温度均方根误差均小于 1.2 °C。GDCSM_Argo 表层温度均方根误差约为 0.4 °C，至 150m 深度处逐渐增大到 1.0 °C~1.2 °C，而自 200m 开始，随着深度的增加温度均方根误差又逐渐减小，800m 以深，温度均方根误差基本小于 0.3 °C。2004 年 1 月至 2020 年 12 月期间，等值线与等深层近似平行，自 2006 年开始，同一深度上相邻月份的温度均方根误差相差不大。特别地，2004 年 1 月至 2005 年 12 月期间，200m 以深的等值线有明显下沉，即与其他月份相比，同一水层的温度均方根偏大，这一特征在 2012 年 8 月份也有所体现。RG_Argo 显示的温度均方根误差规律与 GDCSM_Argo 类似，但同一水层相比，RG_Argo 的温度均方根误差要稍高，特别是 400m 以深，RG_Argo 比 GDCSM_Argo 高约 0.1 °C。且 2004 年 1 月至 2005 年 12 月、2012 年 8 月的等值线下沉，在 RG_Argo 中表现得更为显著，这或许与 Argo 观测资料有关。

由盐度均方根误差时空分布可以看出（图 11），GDCSM_Argo 与 RG_Argo 的盐度均方根误差均由表层至深层逐渐增大，最大盐度均方根误差不超过 0.2。同一深度上，GDCSM_Argo 的盐度均方根误差约比 RG_Argo 小 0.1 左右，800m 以深，GDCSM_Argo 盐度均方根误差均小于

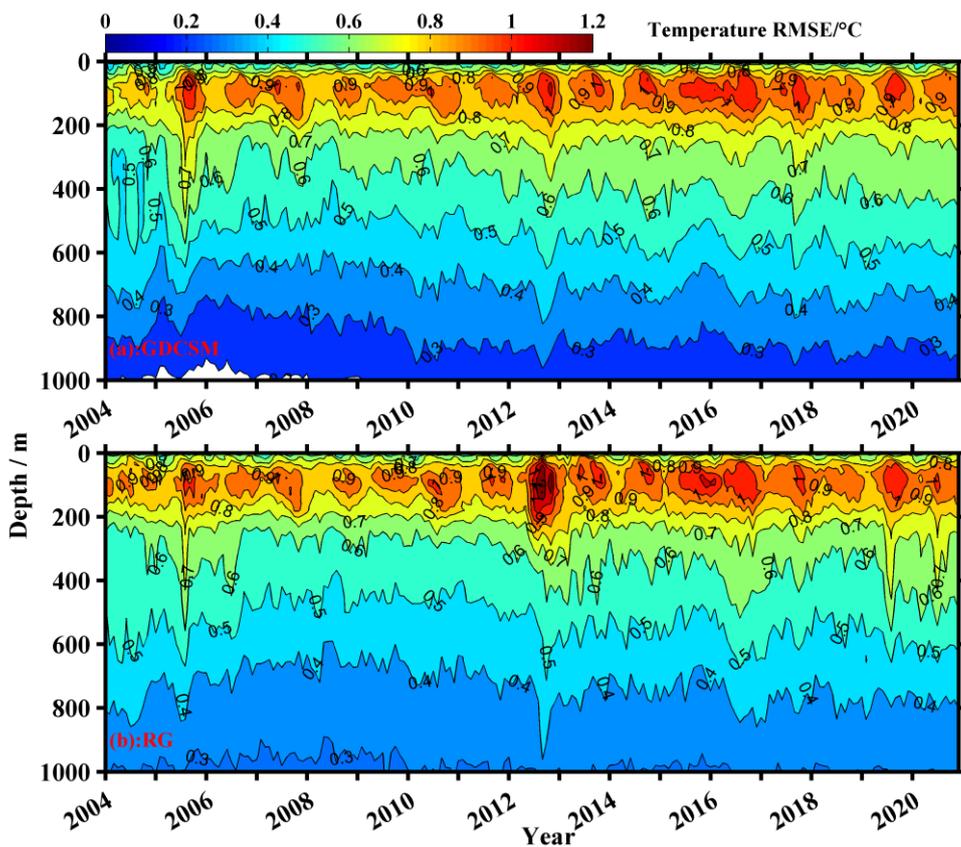


图 10. GDCSM_Argo (a) 与 RG_Argo (b) 相对于 Argo 观测剖面的温度均方根误差。

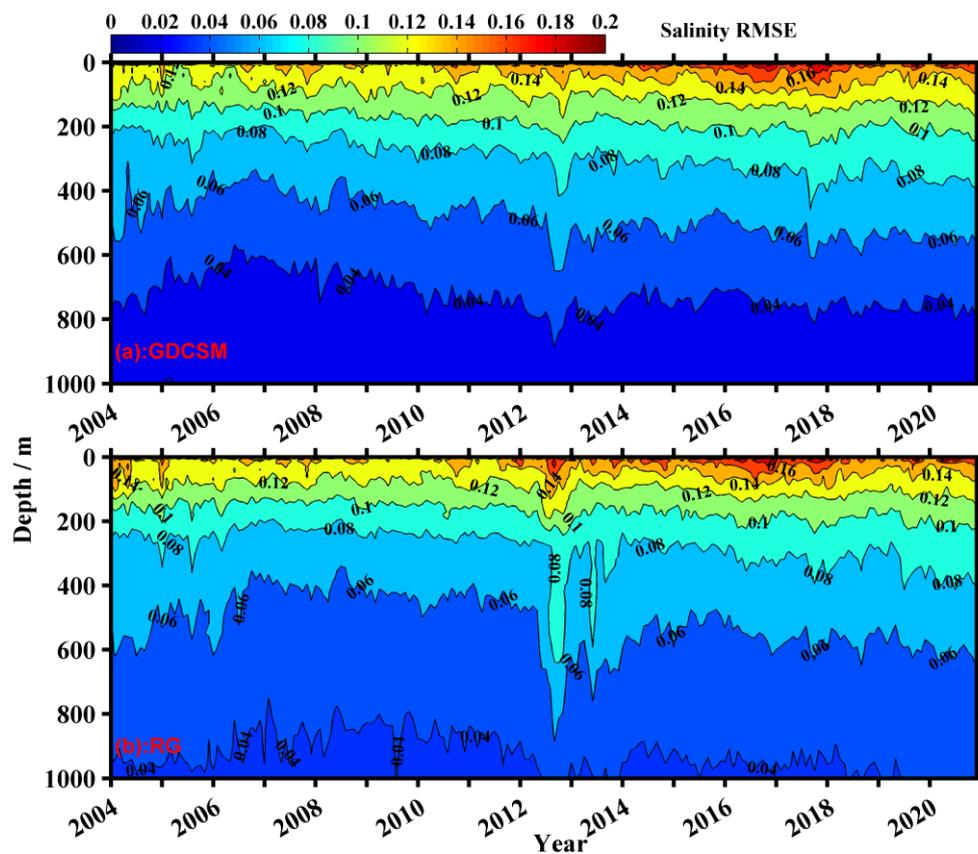


图 11. GDCSM_Argo 与 WOA18 的多年气候态表层温 (a)、盐 (b) 度偏差。

0.04, 而 RG_Argo 约为 0.05。2004-2020 年间, 等值线也大致与等深层平行, 两者相比, GDCSM_Argo 相邻月份的盐度均方根误差变化更缓慢, 特别是 2012 年 8 月份, 两个数据集的等值线均存在明显的下沉, 而 RG_Argo 更剧烈。

五、结束语

Argo 网格化数据集 (GDCSM-Argo) 第三版仍立足于 Argo 观测资料本身, 利用基于梯度依赖相关尺度的最优插值客观分析方法, 结合温度参数模型及 Akima 外插法进行构建。

第一版于 2013 年 9 月发布: 采用太平洋海域 ($120^{\circ}\text{E}\sim 70^{\circ}\text{W}$, $60^{\circ}\text{S}\sim 60^{\circ}\text{N}$) 2004 年 1 月~2011 年 12 月期间由自动剖面浮标观测的温、盐度资料, 并进行了温盐范围检验、冰点检验、温盐梯度检测及水深递增检验等质量再控制; 利用既简单经济, 又能产生较合理分析结果 (Kalnay, 2003) 的 Cressman (1959) 逐步订正方案, 来构建 Argo 次表层 (10~2000 m) 温、盐度网格化资料集的初始场。第一次迭代采用了相对较大的影响半径, 随后, 随着迭代次数的增加, 影响半径逐渐减小; 基于梯度依赖相关尺度的最优插值客观分析方法构建次表层温盐场, 其中, 温盐度梯度由 WOA09 多年月平均数据计算得到; 结合温度参数模型 (以混合层深度、温跃层下界深度、温跃层梯度为主要参数) 和 Akima 外插法推算表层温、盐度数据。该数据集时间分辨率为月平均; 垂向 (0~2000 m) 26 层; 水平分辨率为 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$, 经、纬方向上的格点数分别为 172 和 121; 以 .mat 格式存储。

第二版于 2017 年 5 月发布, 在第一版的基础上, 改进了背景场和温盐度梯度的计算方法: 相比 Cressman 逐步订正法, 利用订正效果更好的最优插值客观分析方法 (Behringer 等, 1998) 形成客观分析的初始场; 借助于客观分析的背景场, 即 Argo 资料多年月平均数据计算温盐度梯度数据, 用作梯度依赖相关尺度参数, 更好地保证了 Argo 资料的独立性。另外, Argo 剖面资料的再控制中增加了两倍方差剔除尖峰数据的模块, 同时网格资料集时间范围延长至 2015 年 12 月, 其他均不变。

第三版于 2021 年 10 月发布, 在第二版的基础上, 改进了客观分析参数设置, 使其适用于全球海域的 Argo 数据分析; 背景场的计算由原来的 Cressman 逐步订正法, 改进为传统最优插值; 完善了程序代码, 在有效减小计算量的同时, 通过更换原始观测剖面即可自动更新客观分析结果; 该版本的数据集研究海域由太平洋拓展到全球 ($179.5^{\circ}\text{W}\sim 179.5^{\circ}\text{E}$, $90^{\circ}\text{S}\sim 90^{\circ}\text{N}$), 垂向 (0~2000 m) 分层由 26 层细分为不等间隔的 58 层, 除了核心变量温度和盐度以外, 还增加了声速和跃层参数 (温跃层上界深度、温跃层下界深度、温跃层梯度), 时间范围延长至 2020 年 12 月。

参考文献

- [1] Akima, H. 1970. A new method for interpolation and smooth curve fitting based on local procedures. *J. Assoc. Comput. Mech.*, 17: 589~602.
- [2] Bhaskar, T.U., M. Ravichandran, R. Devender. 2007. An operational Objective Analysis system at INCOIS for generation of Argo Value Added Products. Technical Report No. NCOIS/MOG-TR-2/07.
- [3] Behringer, D. W., J. Ming, and L. Ants. 1998. An Improved Coupled Method for ENSO Prediction and Implications for Ocean Initialization. Part I: The Ocean Data Assimilation System. *Mon. Wea. Rev.*, 126: 1013~1021.
- [4] Chu P C, C W Fan. 2000. Determination of Vertical Thermal Structure from Sea Surface Temperature. *J. American Meteorological Society*, 17: 971~979.
- [5] Chu, P. C., and C. W. Fan. 2011. Maximum angle method for determining mixed layer depth from sea glider data. *J. Oceanogr.*, 67: 219~230.
- [6] Cressman, G. P. 1959. An operational objective analysis system. *Mon. Wea. Rev.*, 87: 367~372.
- [7] Hosoda, S., T. Suga, N. Shikama et al. 2008. Global Surface Layer Salinity Change Detected by Argo and Its Implication for Hydrological Cycle Intensification. *J. Oceanogr.*, 65:579~586.
- [8] Levitus, S. 1982. Climatological atlas of the World Ocean. NOAA Prof.Pap., 13, U.S. Gov. Print. Off., Washington, D. C.
- [9] Li H., Xu F., Zhou W., et al. 2017. Development of a global gridded Argo data set with Barnes successive corrections. *Journal of Geophysical Research: Ocean*, 122(2): 866~889.
- [10] Kalnay, E. 2003. Atmospheric Modeling, Data Assimilation and Predictability. Cambridge University Press, 1~341.
- [11] Roemmich, D., and J. Gilson. 2009. The 2004-2008 mean and annual cycle of temperature, salinity, and steric height in the global ocean from Argo program. *Progr. Oceanogr.*, 82: 81~100.
- [12] Zhang Chunling, Xu Jianping, Bao Xianwen, Wang Zhenfeng. 2013. An Effective Method for Improving the Accuracy of Argo Objective Analysis. *Acta Oceanologica Sinica*, 32 (7): 66~77.
- [13] Zhang Chunling, Wang Zhenfeng, Liu Yu, 2021. An argo-based experiment providing near-real-time subsurface oceanic environmental information for fishery data. *Fish. Oceanogr.* 30: 85~98. <https://doi.org/10.1111/fog.12504>.
- [14] 张春玲, 许建平*, 鲍献文, 王振峰, 刘增宏, 2014. 基于海温参数模型推算 Argo 表层温度, *海洋通报*, 33 (1): 16-26,
- [15] 张春玲, 许建平, 鲍献文, 2015. 基于 Argo 资料的梯度依赖相关尺度方法, *解放军理工大学学报*, 16 (5): 476-48.