

Doi:10.11840/j.issn.1001-6392.2023.03.005

不同混合层深度算法的全球适用性对比分析

王学华¹, 程灵巧¹, 张春玲¹, 李宏²

(1. 上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306; 2. 复旦大学 大气与海洋科学系, 上海 200433)

摘 要: 混合层深度是研究海洋上层动力过程及海气相互作用的一个至关重要的物理量, 准确估算混合层深度对上层海洋动力学和热力学的深入研究具有重要的科学意义。本文基于Argo实时观测剖面数据, 分海域、分季节对比分析了目前常用的几种混合层深度算法的异同与优缺点。结果表明, 理论上最大角度法的精确度最高, 曲率法其次, 然后是阈值法和最优线性拟合法。最大角度法和曲率法的结果比较接近, 实测数据表明曲率法的时空适用性更广。阈值法、最优线性拟合法分别受梯度阈值和密度(或温度)梯度变化的制约, 其计算的混合层深度相对较浅。各种算法的差异性随着季节跃层的增强而逐渐减小, 且北半球的差异小于南半球。

关键词: 混合层深度; Argo剖面; 位势密度; 算法

中图分类号: P736.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-6932(2023)03-0279-11

Comparative analysis of global applicability for different mixed layer depth algorithms

WANG Xuehua¹, CHENG Lingqiao¹, ZHANG Chunling¹, LI Hong²

(1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. Department of Atmospheric and Oceanographic Sciences, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: The depth of the mixed layer is a critical physical parameter for studying the dynamic process and air-sea interaction of the upper ocean. Accurate estimation of the depth of mixed layer is of great scientific significance for further research of dynamic and thermodynamic processes. Based on Argo real-time observation profile data, this paper compares and analyzes the similarities, differences, advantages, and disadvantages of several commonly used algorithms of the mixed layer depth in different areas and seasons. The results show that the maximum angle method has the highest accuracy in theory. That is followed by the curvature method, the threshold method, and the optimal linear fitting method. The results of the maximum angle method and the curvature method are relatively similar. The curvature method has wider space-time applicability by comparing with the observations. The methods of Threshold and optimal linear fitting are constrained by gradient threshold and density (or temperature) gradient change respectively. Both the calculated results are relatively shallow. The differences of various algorithms gradually decrease when the seasonal pycnocline enhance with the differences in the northern hemisphere are smaller than that in the southern hemisphere.

Keywords: mixed layer depth; Argo profile; potential density; algorithm

海洋上混合层(Ocean Upper Mixed Layer)是位于大气底边界层和深层海洋之间的温度、盐度、密度等在垂向上分布近似均匀的水体^[1], 是海洋与大气间进行能量、动量和物质交换的主要水层^[2]。

而混合层深度(Mixed Layer Depth, MLD)直接反映了上层海洋对各种外界强迫的响应强度, 是刻画海洋混合层的一个重要物理参数^[3], 它对气旋强度^[4]、海表温度的季节变化^[5]、内波表面信号^[6]和

收稿日期: 2022-02-11; 修订日期: 2022-04-15

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(42106090); 农业农村部全球渔业资源调查监测评估(公海渔业资源综合科学调查)专项

作者简介: 王学华(2001—), 本科生, 主要从事物理海洋学研究, 电子邮箱: 1925962016@qq.com

通信作者: 张春玲, 博士, 副教授, 电子邮箱: clzhang@shou.edu.cn

生态动力学^[7]等都具有重要影响。因而准确估算海洋混合层深度对深入理解上层海洋的动力、热力、生化过程具有重要的研究意义。

自1936年开始,海洋学家们基于混合层以下密度垂向跃变的特征,陆续提出了多种混合层深度计算方法,这些方法大体可以分为两类,一类是阈值类法,如阈值法^[8-10]、梯度法^[11],以及综合两者的混合法等^[12-13],这类方法通过给定的密度变化阈值来确定混合层深度。阈值类法具有简单、高效的优点,但其结果依赖于密度阈值的主观确定^[14]。关于阈值的确定,Kara等在比较多种阈值的取值后,总结出全球的密度最优阈值为 0.03 kg/m^3 ^[15]。另一类是客观分析法,如曲率法^[16]、最优线性拟合法^[17]、最大角度法^[18]等,通过计算密度观测剖面的曲率或者最大误差比和最大夹角等方式分析确定混合层深度。每种计算混合层深度的方法均有其一定的适用条件,国内外学者针对不同的海域和不同的研究目的,对各种方法进行了一系列的比较:贾旭晶等利用定点观测数据对比了阈值法和梯度法在南海南北部的计算精度,结果表明,在该海域前者的计算结果更理想^[19]。Huang等基于全球海洋再分析数据集,根据有限水层的温度相对变化率,给出了一种混合层深度计算公式,通过与阈值法、曲率法和最大角度法进行对比,表明该方法与曲率法的稳定性均比其他两种方法稍高^[14]。也有学者为避免最优阈值选取引入的误差,以Argo (Array Real-time Geostrophic Oceanography) 浮标实测数据为样本,在太平洋海域开展了人工智能计算混合层深度的实验,结果显示,人工智能方法可以有效提高混合层计算效率,如果有足够量的实测资料进行遍历学习,所建立的智能识别模型在太平洋海域得到的结果比传统方法更准确^[1]。

前人研究表明,混合层深度具有较强的地域性,即使采用同一种计算方法,不同的温盐剖面计算得到的混合层深度也各有差异,而Argo温盐剖面观测作为全球海洋温盐数据的主要来源之一,具有垂向分辨率高、准实时、覆盖范围广等优点,在海洋混合层的研究方面得到了广泛应用^[20-24]。鉴于此,本文基于Argo温盐实时观测剖面数据,采用常用的几种方法计算全球海域的混合层深度,并通过质量因子对比、相关统计分析、实测数据

验证等方式,分区域、分季节地对比分析每种方法计算结果的差异和联系,探讨不同方法在计算全球海域混合层深度的适用性,以期发展更具普适性、更精确的混合层深度计算方法提供理论依据。

1 数据和方法

1.1 数据

本文用于计算混合层深度的剖面观测资料由杭州全球海洋Argo系统野外科学观测研究站(以下简称“野外站”)(<ftp://ftp.argo.org.cn/pub/ARGO/global/>)提供。该数据为“野外站”经过实时和延时质量控制的全球海洋散点剖面资料集3.0版,每三个月更新一次,包括全球海域的温度、盐度、压力、溶解氧、硝酸盐、pH值、叶绿素 a 、悬浮颗粒和下沉辐照度等多个海洋要素的实时观测剖面。截至目前,更新数据的时间覆盖范围为2000年1月1日至2021年6月30日。有研究表明^[14],海水密度能够反映海水温度、盐度、压力的综合效应,在确定MLD时是比温度更可靠的参数选择。因此,本文选用全球海域2020年的温、盐剖面观测资料,并以2月、5月、8月、11月,分别代表北半球的冬、春、夏、秋四个季节,首先计算每个观测剖面对应的位势密度剖面,进而通过不同的方法确定海洋混合层深度,并加以对比分析。

1.2 方法

本文选取目前广泛采用的阈值类法中的阈值法以及三种客观分析法(曲率法、最大角度法、最优线性拟合法),统一采用位势密度剖面进行混合层深度计算并进行对比分析。

1.2.1 阈值法

阈值法是通过判断温度(或密度)垂向梯度是否在阈值范围内来确定混合层深度^[10],即根据原始观测剖面的分层,由上至下逐层计算相邻位势密度与基准深度(水面下10 m)处位势密度的差值,如果差值超过 0.03 kg/m^3 ,则将第一个观测水深视为密度跃层的上界,近似等于混合层深度(图1(a))。

1.2.2 曲率法

曲率法是Chu等在分析北冰洋海域的温盐结构时首先提出的^[16],该方法是基于每个位势密度

剖面 $\rho(z_i)$, $i=1,2,\dots,N$ (z 为深度, i 为层数), 通过以下公式计算每个观测水层的二阶导数值(曲率):

$$\left. \frac{\partial^2 \rho}{\partial z^2} \right|_{z_i} \approx \frac{1}{z_{i+1} - z_{i-1}} \left(\frac{\rho_{i+1} - \rho_i}{z_{i+1} - z_i} - \frac{\rho_i - \rho_{i-1}}{z_i - z_{i-1}} \right) \quad (1)$$

边界 ρ_1 、 ρ_N 处的曲率取其相邻观测水层的值:

$$\left. \frac{\partial^2 \rho}{\partial z^2} \right|_{z_1} = \left. \frac{\partial^2 \rho}{\partial z^2} \right|_{z_2}, \quad \left. \frac{\partial^2 \rho}{\partial z^2} \right|_{z_N} = \left. \frac{\partial^2 \rho}{\partial z^2} \right|_{z_{N-1}} \quad (2)$$

而第一个局部最大值所在深度(图1(b))记为混合层深度MLD。

1.2.3 最优线性拟合法

最优线性拟合法是以迭代的方式计算混合层深度, 以图1(c)中的位势密度剖面 ρ_{z_i} 为例, 对表层 z_1 与观测层次 z_k 区域间的密度数据点逐层进行多项式线性拟合, 原始数据和拟合数据分别由 $(\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_k)$ 和 $(\hat{\rho}_1, \hat{\rho}_2, \dots, \hat{\rho}_k)$ 表示, 对应的均方根误差定义为:

$$E_1(k) = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (\rho_i - \hat{\rho}_i)^2} \quad (3)$$

其后, 从深度 z_k 向下选择 n 个数据点($n \ll k$): $\rho_{k+1}, \rho_{k+2}, \dots, \rho_{k+n}$, 数据点 $(z_1, z_2, \dots, z_k)$ 的线性多项式被外推到深度 $(z_{k+1}, z_{k+2}, \dots, z_{k+n})$, 得到对应的拟合密度值 $\hat{\rho}_{k+1}, \hat{\rho}_{k+2}, \dots, \hat{\rho}_{k+n}$, 而这 n 个点的线性拟合值的绝对平均偏差可通过式(4)确定:

$$E_2(k) = \left| \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (\rho_{k+j} - \hat{\rho}_{k+j}) \right| \quad (4)$$

由于对均方根误差 $E_1(k)$ 中的每个误差进行

了平方开方的二次运算, 即单个误差呈二次增长, 故通常情况下, $E_1(k)$ 大于 $E_2(k)$ 。而混合层深度 z_k 底部, $E_1(k)$ 和 $E_2(k)$ 均迅速增加, 但两者相对大小逐渐减小, 故可通过相对最大值来确定混合层深度:

$$\frac{E_2(z_k)}{E_1(z_k)} \rightarrow \max, H_{\text{mix}} = -z_k \quad (5)$$

1.2.4 最大角度法

最大角度法是在最优线性拟合的基础上发展起来的, 其在一定的密度变化范围内进行逐层向量夹角计算。将对应于 $0.1\Delta\rho$ 和 $0.7\Delta\rho$ ($\Delta\rho = \rho_{\text{max}} - \rho_{\text{min}}$ 为垂向密度偏差)的深度范围设定为鉴定跃层的主要部分。 n 为两层之间的数据点总数, 并令 $m = \min(n, 20)$ 。对每一个观测层次构造两个密度向量, 一个向量由 z_{k-j} 指向 z_k , 另一个向量由 z_{k+1} 指向 z_{k+m} , $j = \begin{cases} k-1, & \text{for } k \leq m \\ m, & \text{for } k > m \end{cases}$, 这两个向量均通过线性拟合得到:

$$\rho(z) = \begin{cases} c_k^{(1)} + G_k^{(1)}z, & z = z_{k-j}, z_{k-j+1}, \dots, z_k \\ c_k^{(2)} + G_k^{(2)}z, & z = z_{k+1}, \dots, z_{k+m} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $c_k^{(1)}$ 、 $c_k^{(2)}$ 、 $G_k^{(1)}$ 、 $G_k^{(2)}$ 是拟合系数。因为垂向密度梯度在跃层处显著增大, 故可通过确定两个向量夹角的最大值, 进而得到混合层深度(图1(d)), 且实际应用中通常用正切值来代替角度的计算:

$$\tan \theta_k = \frac{G_k^{(2)} - G_k^{(1)}}{1 + G_k^{(1)}G_k^{(2)}}, \tan \theta_k \rightarrow \max, \quad (7)$$

$$H_D = -z_k, G_k^{(1)} = G_k^{(1)}, G_k^{(2)} = G_k^{(2)}$$

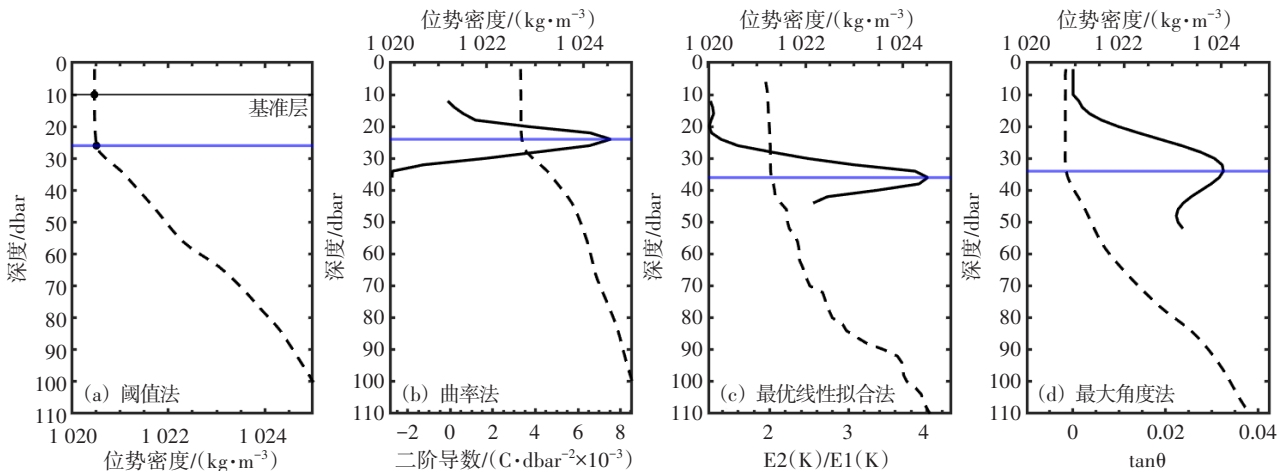


图1 不同MLD算法的计算基本原理

注: 蓝色实线为混合层深度位置; 黑色虚线表示位势密度剖面; 黑色实线为基准层; 蓝色实线分别表示最大阈值深度、最大二阶导数深度、最大相对偏差和拟合角度正切值最大深度对应的深度。

最大二阶导数深度、最大相对偏差和拟合角度正切值最大值对应的深度

2 不同算法的比较分析

2.1 质量因子验证

质量因子 (Quality Index, QI) 是评价某种方法是否能够将均匀层从下面的分层区域清晰地分离出来的重要指标之一, 被广泛用作评估混合层深度识别准确程度的依据, 是一个无量纲参数, 可定义为^[25]:

$$QI = 1 - \frac{S_{MLD}}{S_{1.5MLD}} \tag{8}$$

式中: S 是以垂向平均值为基准得到的位势密度标准差, 下标 MLD、1.5 MLD 分别表示混合层深度和 1.5 倍的混合层深度。混合层深度范围内, 密度相对均匀, 即整个剖面的密度关于其垂向平均值的标准差接近于零, 而混合层以下密度梯度显著增大, 对应的密度标准差迅速增加。因此, 一般而言, 较高的 QI 值代表较高的混合层深度识别准确度, 反之亦然。Lorbacher 等规定 QI 值大于 0.8 时表示算法可以准确识别 MLD, QI 值小于 0.5 时表示识别的混合层深度不可信^[25]。

表 1 给出了南、北半球由四种不同算法识别的混合层深度对应的季节平均和年平均 QI 值。整体而言, 四种方法在全球海洋识别混合层深度的准确度均较高, 除阈值法的个别月份外, 其他月份 QI 值均大于 0.7, 而南、北半球全年平均 QI 值相差不大, 南半球略高。北半球的秋季存在明显的季节性温跃层 (南半球季节相反), 具有强烈的密度跃层, 而春季海洋上层分层较弱。因此, 对于每一种算法, QI 值均具有较明显的季节变化, 北半球季节平均 QI 值的最高值大于 0.83, 而南半球大于 0.85, 均出现在秋季 (北半球为 11 月份, 南半球为 5 月份); 而最小平均 QI 值 (<0.75) 则均在春季 (北半球的 5 月份, 南半球的 11 月份) 出现。对比不同方法的计算结果可以看出, 客观分析方法比阈值法的准确度更高, 无论南半球还是北半球, 由阈值法计算得到的各个季节的平均 QI 值都是最低的, 而最大角度法的 QI 值均在 0.75 以上, 最大可达 0.92, 除北半球的夏季比曲率法稍低外, 其他月份的季节平均 QI 值是四种方法中最高的。并且, 四种方法相比较, 最大角度法的年平均 QI 值最高, 具有更好的平均识别效果; 其次是曲率法, 其全球年平均 QI 值均超过了 0.8; 而最优线性拟合法在南半球的识别效果好于北半球, 全球海域均优于阈值法。

表 1 不同算法得到的南、北半球季节平均和年平均质量因子 (QI 值) 统计

方法	北半球					南半球					全球
	冬季	春季	夏季	秋季	全年	冬季	春季	夏季	秋季	全年	
	2月	5月	8月	11月		2月	5月	8月	11月		
阈值	0.75	0.67	0.74	<u>0.83</u>	0.75	0.8	0.68	0.76	<u>0.85</u>	0.77	0.76
曲率	0.82	0.74	0.86	<u>0.9</u>	0.84	0.83	0.73	0.85	<u>0.9</u>	0.83	0.83
最优线性合	0.83	0.72	0.75	<u>0.84</u>	0.78	0.86	0.75	0.78	<u>0.89</u>	0.82	0.8
最大角度	0.84	0.75	0.84	<u>0.91</u>	0.84	0.86	0.75	0.87	<u>0.92</u>	0.85	0.84

注: 加粗数字为每列数据的最大值, 带下画线的数字为每行数据的最大值。

由此可见, 混合层识别准确度有明显的季节性变化特征, 这与混合层深度 (MLD) 的季节变化规律相对应, 即混合层的识别准确度与温跃层的季节变化有关。图 2 展示了 2020 年所有 Argo 观测剖面由不同方法计算得到的 MLD 与其对应的 QI 之间的散点分布, 其中, 散点底色表示的频率分布为各区间内散点数与区间面积之比。由图可见, 四种方法的 QI 均随着 MLD 的增大而逐渐升高, 即跃层现象越显著, 对应的混合层识别准确度也越

高, 且四种方法在大部分观测剖面上的 MLD 识别准确度都大于 0.5。就平均值而言, 最大角度法的平均 QI 最高 (约为 0.84), 其次为曲率法 (约为 0.82), 最优线性拟合的平均 QI 值约为 0.8, 而阈值法则小于 0.8。所有算法的结果中, 混合层深度小于 150 dbar 时, 剖面数量均占有较高的频率, 除阈值法外, 其他三种方法在该混合层深度上均有较高的识别度 (QI>0.5)。随着混合层深度的增加, 剖面数量逐渐减少, 但 QI 逐渐升高, 这在最

优线性拟合法和最大角度法中表现得尤为明显。

四种方法相比, 阈值法和最优线性拟合法识别得到的MLD普遍比曲率法和最大角度法浅, 阈值法频率最高的MLD约为20~90 dbar, 但有很多观测剖面的QI值小于0.5 (图2(a)), 而最优线性拟合法识别的MLD多集中在30~100 dbar, 100~200 dbar的MLD也占有一定的比例, 且具有较高的识别度(QI>0.8) (图2(c)); 曲率法和最大角度法识别得到的混合层深度范围相对更广, 识别

准确度大于0.8的MLD约为30~180 dbar (图2(b)、(d)), 而最大角度法更为明显, 其高频率MLD从30 dbar到150 dbar不等, 且对应的识别度也大多超过了0.5。换言之, 当混合层深度较大时, 阈值法准确度较高; 最优线性拟合法识别准确度较高, 但其计算得到的MLD相对较浅; 曲率法和最大角度法计算得到的MLD范围较大, 更符合全球海洋各个季节的实际MLD分布特征, 而最大角度法的高频率MLD范围和对应的QI相对更大、更高。

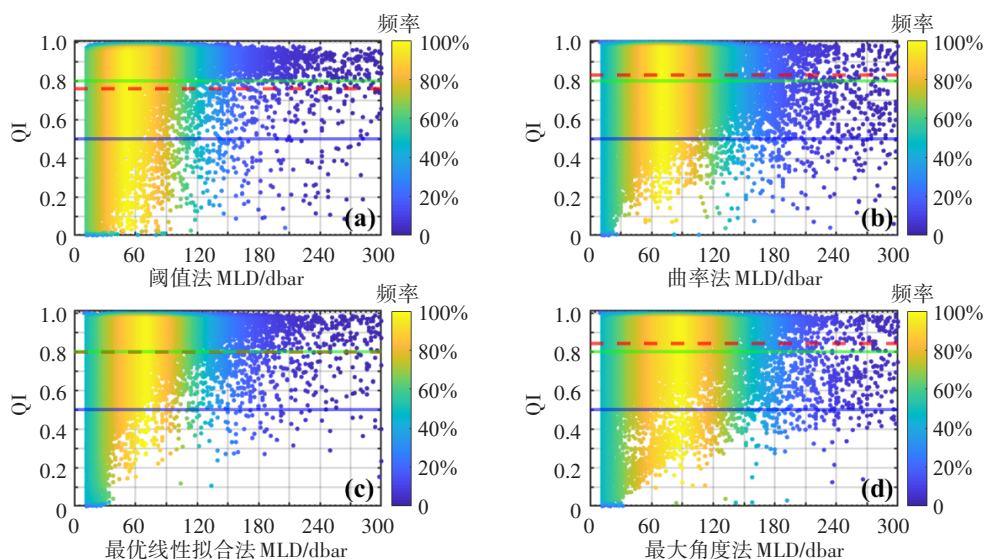


图2 基于不同算法的MLD与QI值的散点分布

注: 底色表示混合层深度在不同区间的频率分布; 红色虚线表示QI平均值, 绿色实线表示QI=0.8, 蓝色实线表示QI=0.5。

2.2 与实测数据对比

为进一步对比不同算法在全球不同海区, 不同季节的适用性, 这里将全球大洋分为北太平洋、南太平洋、北大西洋、南大西洋, 以及印度洋等5个海区, 并在每个海区的中纬度海域分别选取一个代表性站点: 北太平洋(36°N, 135°W)、南太平洋(38°S, 77°W)、北大西洋(35°N, 33°W)、南大西洋(34°S, 10°E)和印度洋(37°S, 110°E), 根据代表站点上四个季节的Argo温、盐度剖面观测数据确定的位势密度剖面, 利用不同算法计算5个代表站点对应的混合层深度位置, 并通过人工判别方式, 以位势密度剖面上产生密度突变的最浅水深为对应的实测MLD加以对比 (图3—图5), 其中北半球的冬、春、夏、秋四个季节分别以2月、5月、8月、11月四个月份代表, 而以8月、11月、2月、5月分别代表南半球的冬、春、夏、秋四个季节。

在太平洋海域 (图3), 除北半球的冬季 (图3(a)) 外, 最优线性拟合法结果的误差较其他三种方法明显偏大, 且其识别得到的MLD最浅, 而阈值法在南、北半球的识别结果均与实际观测位置很接近, 曲率法和最大角度法的结果差别较小。密度跃层具有非常明显的季节变化, 夏季跃层最明显, 此时阈值法、曲率法及最大角度法的结果都与实际观测深度非常接近 (图3(c)、(g)), 秋季跃层也较为明显, 这三种方法的识别结果与实际位置十分一致, 但较夏季略有差别 (图3(d)、(h))。而在冬、春季节 (图3(a)、(b)、(e)、(f)), 跃层现象减弱, 垂向梯度变化较小, 几种方法识别得到的MLD普遍偏浅, 逐层计算密度梯度的阈值法与实际结果更接近。

在大西洋海域 (图4), 曲率法和最大角度法的结果在南、北半球的各个季节都比较一致, 均与实测位置的偏差不大, 特别是最大角度法, 其

在大西洋的MLD计算结果中,除春季与实际观测深度稍有偏差,其余识别结果几乎均与实际值相吻合;最优线性拟合的大部分结果仍存在较大的偏差,特别是在跃层比较显著的季节误差更大;而阈值法的结果在跃层增强的季节,识别结果偏差较小,在跃层减弱的季节,则表现出较差的识别结果。冬季(图4(a)、(e))几乎不存在季节跃层,混合层深度较深(>100 m),阈值法的计算明显偏离实际(<90 m),其余三种方法的结果均与

实际深度比较一致。春季季节跃层开始出现(图4(b)、(f)),但特征不明显,四种方法的计算结果具有较大的随机性,均与实际深度有一定偏差。夏季(图4(c)、(g))季节跃层显著增强,四种方法的计算准确度也随之增加,除最优线性拟合外,其余三种方法的MLD偏差都比较小。秋季(图4(d)、(h))季节跃层又明显减弱,四种计算结果的差异性也逐渐明显,曲率法和最大角度法十分相似,均略浅于实际深度,而阈值法略深于实际深度,

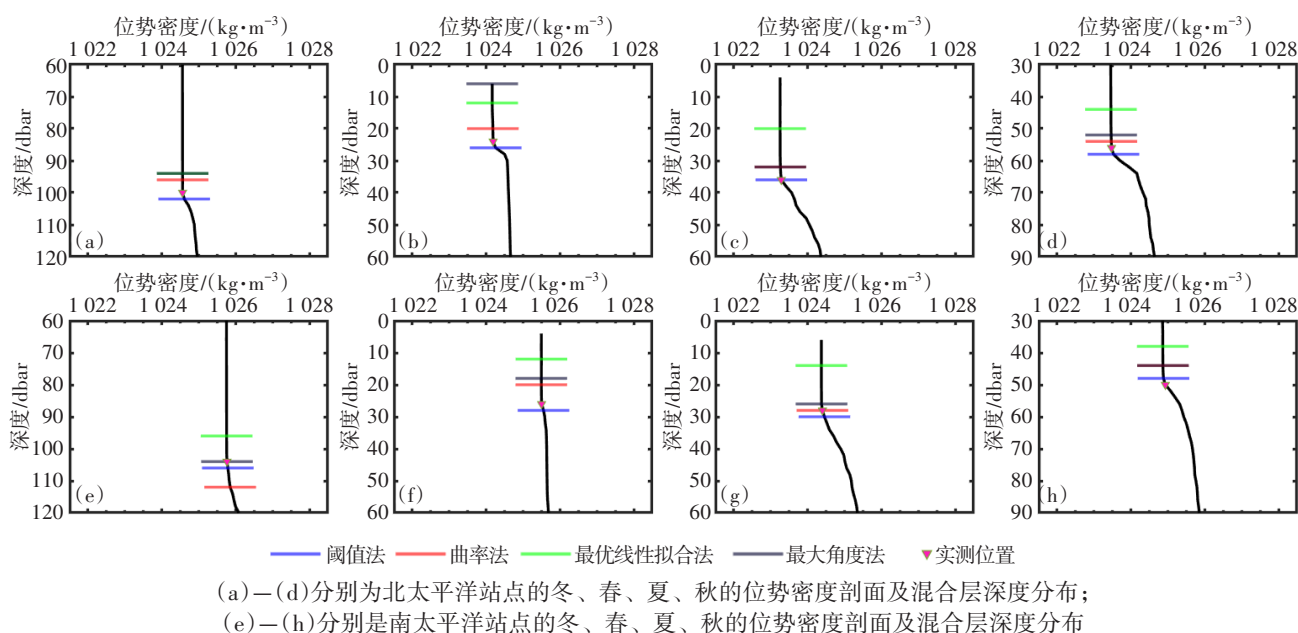


图3 太平洋海域代表站点上由不同算法得到的混合层深度对比

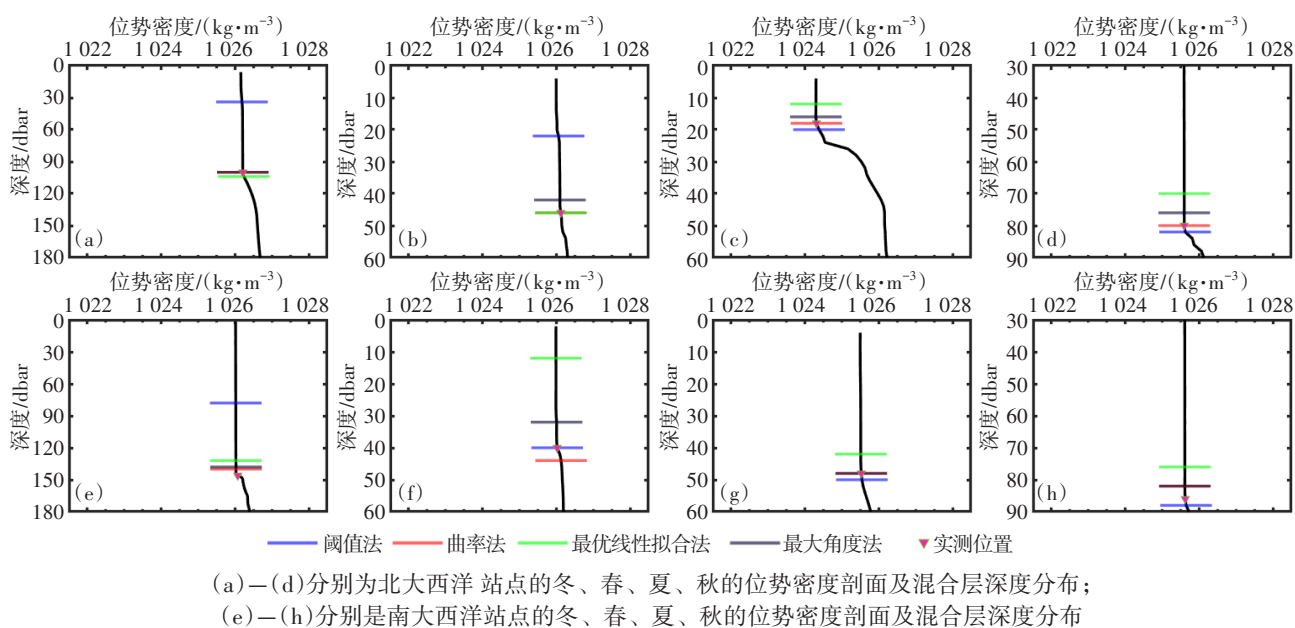


图4 大西洋海域代表站点上由不同算法得到的混合层深度对比

最优线性拟合的MLD则明显较浅。

在印度洋赤道以南海域（图5），密度季节跃层的季节变化与太平洋和大西洋类似，最优线性拟合法所计算的MLD相对偏差较大，每个季节都比实际深度要浅。在春季和夏季跃层较明显的季节（图5(b)、(c)），阈值法的计算效果相较好，而在秋、冬季节计算的混合层深度与实测位置略有差异（图5(a)、(d)）。曲率法和最大角度法的计算结果更为接近，两种方法在四个季节的计算结果几乎完全重合，并且与实际MLD相比，春季、夏季、秋季的结果比实际深度略浅，但偏差不大。特别需要指出的是，冬季（图5(a)）跃层不明显时，曲率法和最大角度法识别的混合层深度对应于永久跃层所对应的水深位置（南印度洋约500~600 dbar）。

由绝对偏差统计结果（表2）可以更清楚地看出，最优线性拟合法仅在北大西洋海域的计算结果比较接近实际MLD，其他海域大部分时间的绝对偏差都超过了10 dbar。而阈值法似乎与之呈互补关系，其在北大西洋冬、春季节，以及南大西洋冬季的计算偏差高达25 dbar以上，但其在太平洋和印度洋海域的结果全年绝对偏差都较小（<10 dbar）。相比之下，曲率法和最大角度法在各个海域、各个季节的计算结果相对比较稳定，除印度洋冬季（与图5（a）类似）计算结果与永久跃层相对应外，这两种方法的计算结果与实际MLD的绝对偏差均不大，曲率法尤为明显，其大部分绝对偏差都小于5 dbar。由此可见，在太平洋海域，曲率法和阈值法有较好的适用性；在大西洋海域，曲率法和最大角度法的适用性较高；而在印度洋海域，除最优线性拟合法外，其他三种方法都可以得到比较接近真实混合层深度的结果。

图6给出了5个代表性浮标站点观测的位势

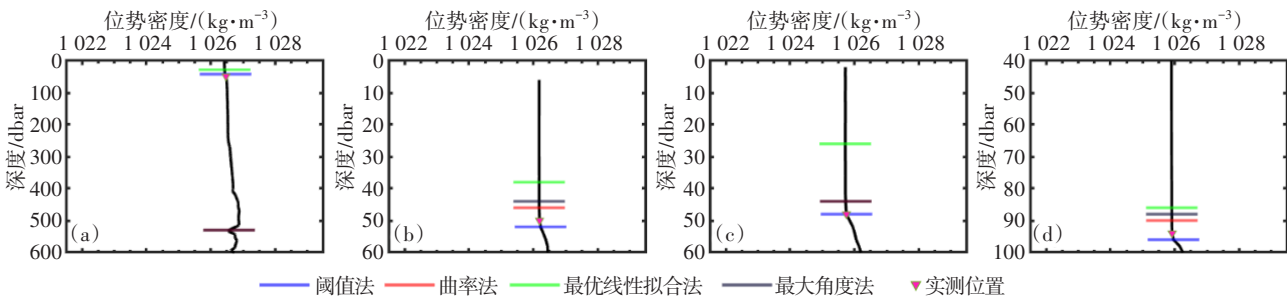
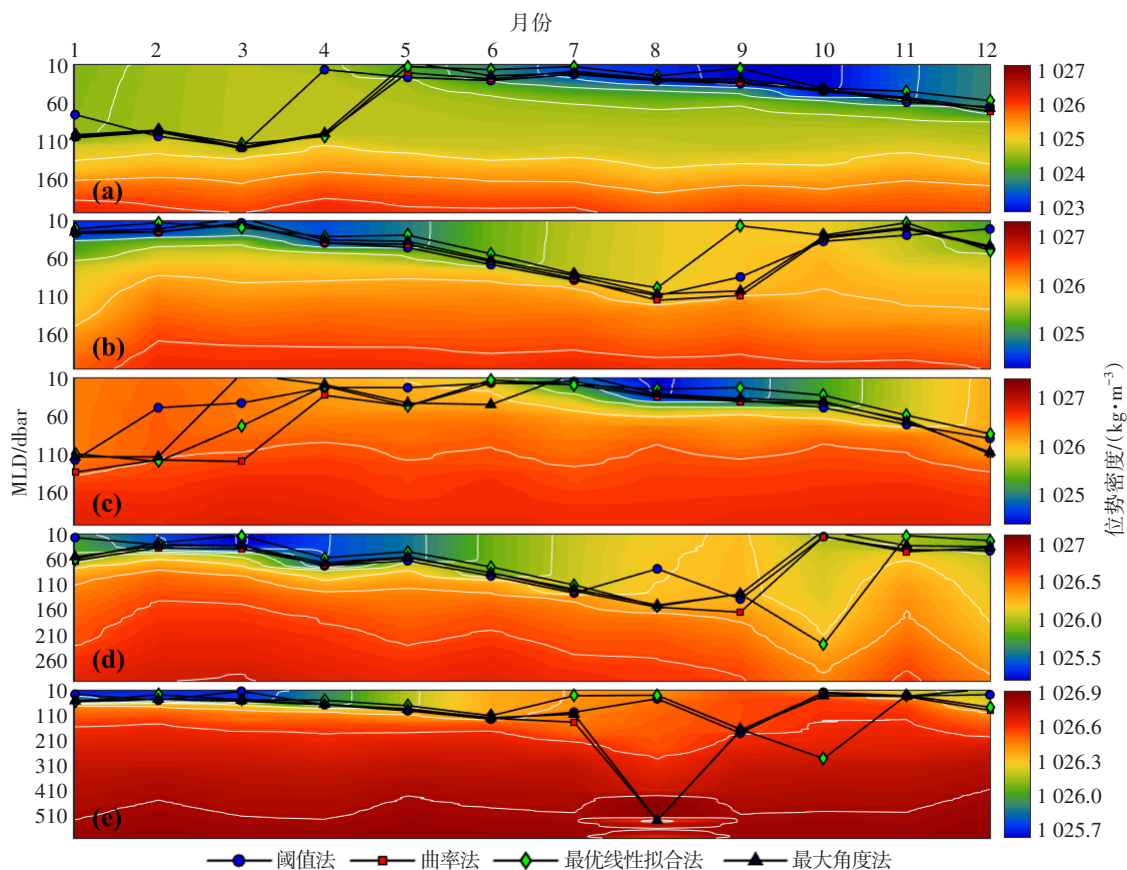


图5 印度洋海域代表站点的位势密度剖面及混合层深度分布

表2 不同算法的MLD与实测深度之间的绝对偏差统计/dbar

海域	季节	阈值法	曲率法	最优线性拟合	最大角度法
北太平洋	冬季	2	4	6	6
	春季	2	6	14	20
	夏季	2	2	6	2
	秋季	4	0	10	2
南太平洋	冬季	2	6	10	2
	春季	0	8	16	10
	夏季	4	2	14	6
	秋季	0	4	16	8
北大西洋	冬季	66	2	4	2
	春季	28	4	4	8
	夏季	2	4	6	0
	秋季	4	2	8	0
南大西洋	冬季	74	2	0	2
	春季	4	8	24	4
	夏季	4	2	8	2
	秋季	2	4	16	6
印度洋	冬季	8	480	22	480
	春季	8	4	10	6
	夏季	2	4	22	4
	秋季	4	4	16	2

密度时间序列。很显然，北半球（图6(a)、(c)）的混合层深度随时间先由深变浅，再由浅变深，而南半球（图6(b)、(d)、(e)）则呈现先由浅变深，而后又逐渐变浅的变化趋势，即各算法得到的MLD均能反映全球大洋混合层深度冬深夏浅的基本特征，且混合层深度基本上与等密线平行或者重合。在某些月份各算法的结果也会出现较大差异：图5和表2展示的规律类似，曲率法和最大角度法的结果在各个月份、各个海域均比较一致；阈值法在MLD较深的月份与其他方法差别较大，如北太平洋1月和3月（图6(a)）、南太平洋9月和12月（图6(b)）、北大西洋2月和3月（图6



(a)–(e)分别代表位于北太平洋的4902933号浮标、位于南太平洋的3901283号浮、位于北大西洋的3901970号浮标、位于南大西洋的3901228号浮标、位于印度洋的5902527号浮标

图6 浮标位势密度的时间序列

注：白实线为密度等值线；黑实线为不同方法计算的混合层深度。

(c))及南大西洋8月(图6(d)),而且这些月份阈值法识别出的混合层深度都较浅,说明对于较冷且密度大的混合层,采用 0.03 kg/m^3 作为阈值可能会偏小;最优线性拟合大部分海域的多数月份均比其他三种方法的结果偏浅,且依据密度变化的线性拟合原理,势必导致其在密度等值线变化剧烈的月份计算的MLD具有较大波动,如南太平洋9月(图6(b))、南大西洋10月(图6(d))、印度洋7月和10月(图6(e))。值得指出的是,无论哪种算法,其计算结果的准确度除了取决于算法本身外,观测数据的质量也是一个非常重要的制约因素。如图6(d)中的10月份和图6(e)中的8月份,虽然曲率法、最大角度法和最优线性拟合方法的计算结果看似偏差较大,但结合其算法的原理,不难看出该结果是符合实际观测数据的。因此,原始观测剖面的数据质量是制约结果是否准确的一个先决条件。

2.3 MLD统计分析

图7统计了不同算法给出的海洋混合层深度。从全球海域2020年的97 924条Argo观测剖面得到的结果来看,各算法计算的混合层深度的年际变化均呈现北半球“深–浅–深”、南半球“浅–深–浅”的变化趋势,即与季节跃层深度春季开始出现、夏季最强烈、秋季减弱、冬季基本消失的变化规律相一致。春季北半球MLD约为50~120 dbar,南半球较深(60~150 dbar),夏季全球海域的MLD均抬升至30~60 dbar,秋季又下沉至30~100 dbar(南半球略深),冬季持续下沉,北半球约为90~120 dbar,而南半球最深可达150 dbar。四种方法相比,阈值法和最优线性拟合的结果比较相似,而曲率法和最大角度法的结果更接近,且前两种方法普遍比后两种方法计算的MLD浅,夏、秋季节相差5~15 dbar,冬、春季节相差15~50 dbar,随着跃层现象的增强,差距也逐渐缩小。

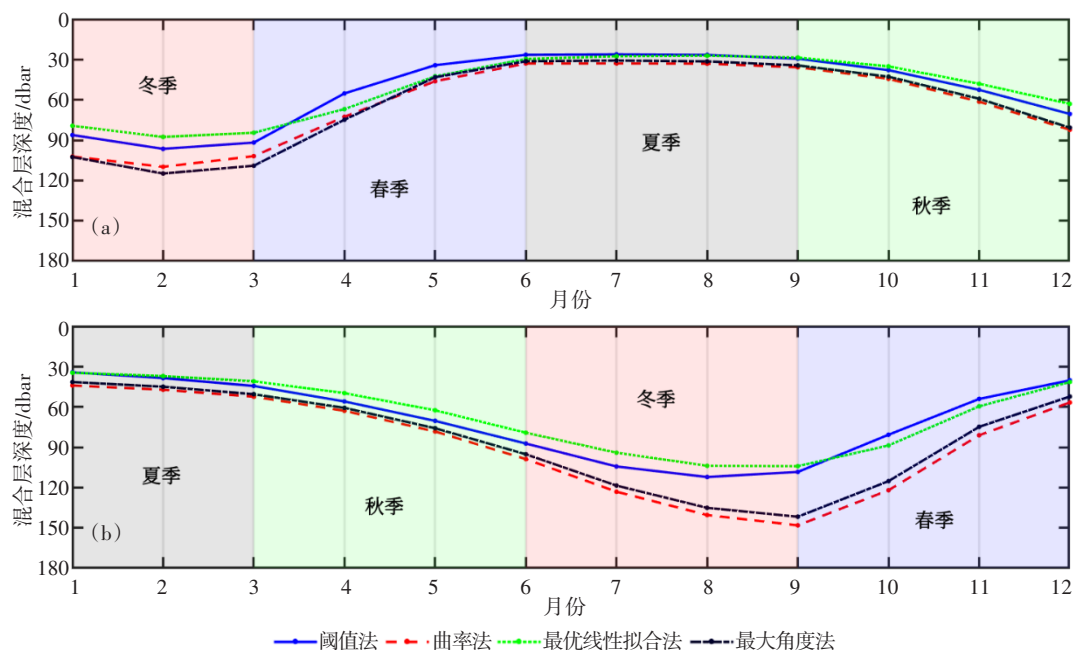


图7 不同算法得到的北半球 (a) 和南半球 (b) 月平均混合层深度 (MLD)

并且,不管是阈值法与最优线性拟合的差异,还是曲率法和最大角度法之间的差异,均在跃层不明显的冬、春季节增大,而在跃层显著的夏、秋季节明显减小。南、北半球相比,各种算法在北半球的差异比南半球稍小。

通过统计不同算法和不同季节在南、北半球得到的混合层深度可以看出,冬季MLD最大(图8(a)),北半球MLD中位数约为50~100 dbar,南半球则为100~125 dbar,夏季最浅(图8(c)),南、北半球都不超过50 dbar,且冬季的极值和四分数的变化范围都比夏季大得多。春、秋季节MLD相较于夏季略有加深(图8(b)、(d)),但春季的MLD中位数基本小于50 dbar,南半球的秋季MLD下沉至50~100 dbar。同一个季节,四种算法在南半球的多数结果均比北半球深度更大、分布更分散、极值范围更广。同一种算法,不同季节的MLD离散程度、偏差范围均呈由冬季至夏季逐渐减小,而秋季又稍有增大的分布趋势。四种方法相比,曲率法和最大角度法在每个季节的计算结果均比阈值法和最优线性拟合略深(MLD中位数和50%深度值较大),而阈值法和最优线性拟合的结果中,MLD分布相对比较集中(图8(b)、(c)、(d)),而曲率法和最大角度法对应的四分数区间变化范围更大,这与各大洋的MLD区域性变化有关。

3 结论与讨论

本文基于2020年的97 924条Argo温、盐实时观测剖面数据,通过计算位势密度剖面,并利用目前常用的几种混合层深度计算方法,分时、分区计算得到不同季节、不同海域的混合层深度,进而通过理论验证、实测数据对比,以及统计分析等方式,系统分析了采用不同方法在全球海域计算混合层深度的准确性与适用性。

相同的时空条件下,曲率法和最大角度法得到的MLD结果十分相近,这两种方法的结果普遍比阈值法和最优线性拟合的结果略深,而阈值法在大部分情况下得出的MLD是四种方法中最浅的,这与其采用的密度梯度阈值相关。从质量因子的理论验证来看,最大角度法理论上是最准确的,其次是曲率法,然后是阈值法和最优线性拟合。而通过与实测数据的对比,曲率法显示出比最大角度法更稳定、更精确的优势,但差别较小。因采用的阈值不同,阈值法在不同的海域,不同的季节具有不同的适用性,总体精确度较曲率法和最大角度法略低。多种对比结果显示,最优线性拟合的结果是四种方法中精确度最低的,其结果受观测数据影响较大。

虽然四种算法得到混合层深度时空变化规律,

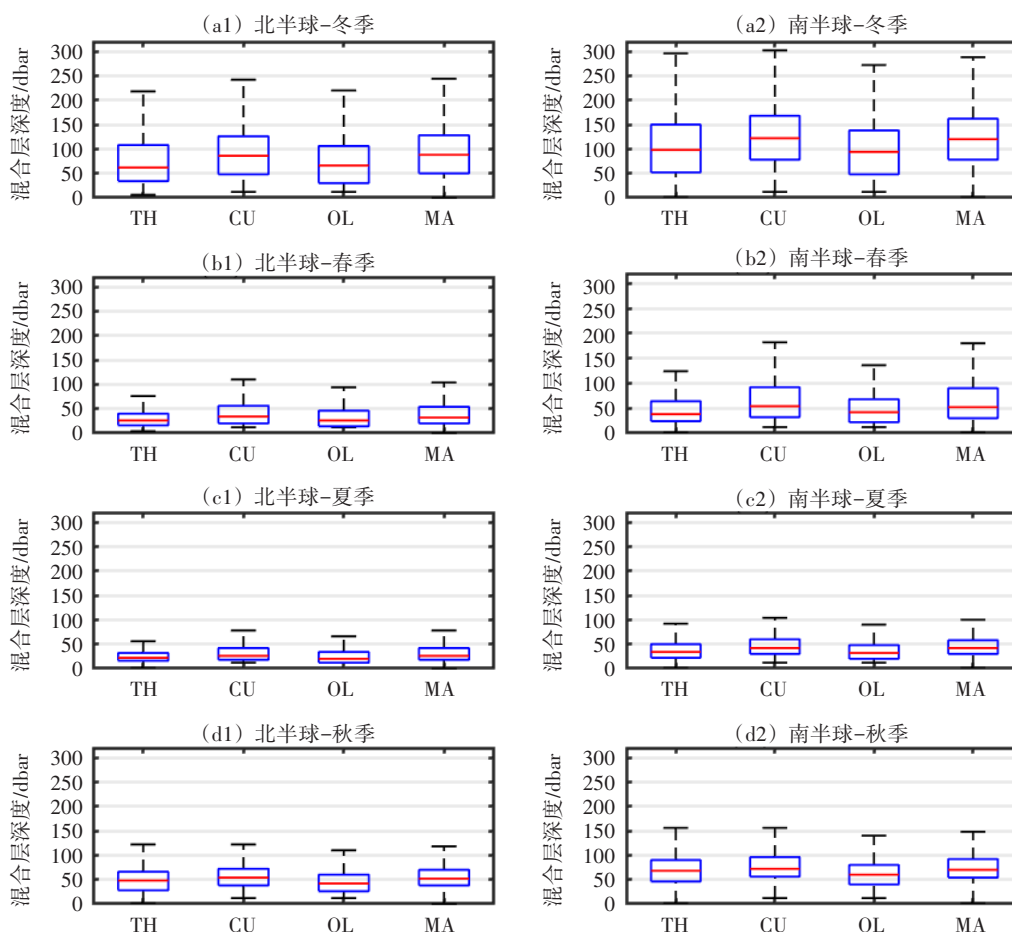


图8 不同算法得到的南、北半球混合层深度的季节统计

注：红色实线表示中位数；箱形的顶部和底部分别表示 3/4 和 1/4 分位数；虚线为上、下限。

TH、CU、OL 和 MA 分别指代阈值法、曲率法、最优线性拟合法和最大角度法。

均与季节跃层的变化趋势基本一致，但在不同季节、不同海域，各种方法得到的 MLD 也存在明显差异，且这种差异随着季节跃层的减弱而逐渐增大。究其原因，本文各个算法均是基于一个基本假设：混合层底部对应于季节跃层活跃深度，而相应参数（如阈值、二阶导数、相对偏差、拟合角度正切值等）在季节跃层对应的深度处具有信号突变的特征。因此，当混合层以下存在相对较强的季节性跃层时，识别的混合层深度与实测 MLD 的偏差较小，各方法间差异小，而当跃层强度减弱时，各算法相应参数对混合层内部或者跃层内部的密度波动具有较高的敏感度，不同方法相应参数的敏感度也各有差异，得到的混合层深度差异也会随之增大。换言之，在季节跃层现象显著的季节，不同算法的结果差别不大，但在跃层减弱或者不存在明显跃层的时空条件下，不同

MLD 结果差异也显著增大。就海域而言，所有算法得到的北半球 MLD 比南半球更浅，且不同结果在北半球的差异小于南半球。曲率法在全球海域都有较高的准确度，最大角度法更适用于大西洋和印度洋海域，而阈值法则在太平洋和印度洋海域具有较好的识别效果，相对而言，最优线性拟合法只在北大西洋表现出较高的准确度。

值得一提的是，因计算量问题，本文在不影响总体分析结果的前提下，仅采用了一年的数据进行全球海域的分析，不同时间序列的计算结果对于特定时间、特定海域混合层的计算可能稍有差别。并且，采用任何方法计算混合层深度，均需要考虑以下几点：首先，根据每种方法统计意义上的适用条件进行方法的筛选和取舍；然后，结合该方法的计算原理，针对特定的时空条件，系统验证具体参数的设置（如基准深度、梯度阈

值、垂向分层等);最后,务必重视和考虑所采用的观测数据的准确性,采用真实反映海洋垂直结构的数据是进行混合层准确计算的先决条件。

致谢:感谢中国 Argo 实时资料中心为本文提供的宝贵观测资料。

参 考 文 献

- [1] 张康,郭双喜,黄鹏起,等.一种海洋混合层深度的智能识别方法研究[J].热带海洋学报,2019,38(5):32-41.
- [2] 安玉柱,张韧,王辉赞,等.全球大洋混合层深度的计算及其时空变化特征分析[J].地球物理学报,2012,55(7):2249-2258.
- [3] 李丽平,靳莉莉,王超,等.热带太平洋混合层深度的年际异常及其与中国夏季降水关系分析[J].热带气象学报,2010,26(6):659-666.
- [4] 张志伟.西北太平洋上层海洋对台风响应的个例研究[J].海洋通报,2019,38(5):562-568.
- [5] 关皓,周林,施伟来,等.热带太平洋-印度洋上层海温、热含量和混合层深度的年变化特征[J].海洋预报,2006,23(B09):47-59.
- [6] 吕海滨,申辉,何宜军.背景流和混合层深度对内波表面信号的影响[J].海洋科学,2013,37(9):20-23.
- [7] 田洪阵,刘沁萍,杨萌萌.基于2002-2018年MODIS数据的黄海叶绿素 a 时空变化研究[J].海洋通报,2020,39(1):101-110.
- [8] THOMSON R E, FINE I V. Estimating mixed layer depth from oceanic profile data[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2003, 20(2): 319-329.
- [9] KARA A B, ROCHFORD P A, HURLBURT H E. Mixed layer depth variability over the global ocean[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2003, 108(C3): 3079.
- [10] MONTÉGUT C D B, MADEC G, FISCHER A S, et al. Mixed layer depth over the global ocean: An examination of profile data and a profile-based climatology[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2004, 109(C12): C12003.
- [11] LUKAS R, LINDSTROM E. The mixed layer of the western equatorial Pacific Ocean[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1991, 96(S01): 3343-3357.
- [12] HOLTE J, TALLEY L. A new algorithm for finding mixed layer Depths with applications to Argo data and subantarctic mode water formation[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2009, 26(9): 1920-1939.
- [13] HOLTE J, TALLEY L D, GILSON J, et al. An Argo mixed layer climatology and database[J]. Geophysical Research Letters, 2017, 44(11): 5618-5626.
- [14] HUANG P Q, LU Y Z, ZHOU S Q. An objective method for determining ocean mixed layer depth with applications to WOCE data[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2018, 35(3): 441-458.
- [15] KARA A B, ROCHFORD P A, HURLBURT H E. An optimal definition for ocean mixed layer depth[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2000, 105(C7): 16803-16821.
- [16] CHU P C, WANG Q, BOURKE R H. A geometric model for the Beaufort/Chukchi Sea thermohaline structure[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1999, 16(6): 613-632.
- [17] CHU P C, FAN C. Optimal linear fitting for objective determination of ocean mixed layer depth from glider profiles[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2010, 27(11): 1893-1898.
- [18] CHU P C, FAN C. Maximum angle method for determining mixed layer depth from seaglider data[J]. Journal of Oceanography, 2011, 67(2): 219-230.
- [19] 贾旭晶,刘秦玉,孙即霖.1998年5-6月南海上混合层、温跃层不同定义的比较[J].海洋湖沼通报,2001(1):1-7.
- [20] 赵鑫,李宏,刘增宏,等.基于混合层模型反推 Argo 表层温度和盐度[J].海洋通报,2016,35(5):532-44.
- [21] DONG S, SPRINTALL J, GILLE S T, et al. Southern Ocean mixed-layer depth from Argo float profiles[J]. Journal of Geophysical Research, 2008, 113(C6): C06013.
- [22] 孙振宇,刘琳,于卫东.基于 Argo 浮标的热带印度洋混合层深度季节变化研究[J].海洋科学进展,2007,25(3):280-288.
- [23] 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.
- [24] 张春玲,司文,谢春虎.基于 Argo、XBT 数据的苏拉威西海温盐特征分析[J].海洋通报,2021,40(1):27-36.
- [25] LORBACHER K, DOMMENGET D, NIILER P P, et al. Ocean mixed layer depth: A subsurface proxy of ocean-atmosphere variability[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2006, 111(C7): C07010.

(本文编辑:王少朋)