

基于 Argo 资料的西太平洋混合层和温跃层数据产品研制

杨小欣^{1,2}, 吴晓芬², 卢少磊²

(1. 大连舰艇学院军事海洋系, 辽宁 大连 116000; 2. 国家海洋局第二海洋研究所卫星海洋环境动力学
国家重点实验室, 浙江 杭州 310012)

摘 要: 基于2017版全球海洋 Argo 网格数据集(BOA-Argo), 利用最大角度法和梯度比值法等客观分析方法计算了2004年1月—2016年12月期间, 西太平洋海域(25°S~40°N, 120°~180°E)的上混合层和温跃层上、下界深度, 并计算了混合层温盐度以及温跃层强度等海洋环境参数, 制作完成水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 的月平均 Argo 数据衍生产品。将本数据产品和采用阈值法计算得到 MILA GPV 数据集做比较, 结果显示: 对于混合层的主要空间分布特征和时间序列变化特征, 两者都十分吻合; 将西太平洋海域温跃层上、下界深度和强度等参数与人们利用传统的温度梯度法计算结果相比较, 其季节分布特征及变化趋势也大体相符。

关键词: 混合层; 温跃层; 最大角度法; 梯度比值法; Argo 资料

中图分类号: P731.24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2018)03-0057-11

1 引言

热带西太平洋海域临近我国, 该海域内海洋要素的时空分布特征复杂, 其中海洋混合层和温跃层又是上层海洋十分重要的海洋现象。混合层在海水相互作用中扮演着重要的角色, 其厚度及相关特性的分布特征变化通常对海洋与大气间的能量、淡水交换以及浮游生物的活动都有着至关重要的影响^[1]; 温跃层的分布直接关系我国的海洋渔业发展和军事活动, 尤其是温跃层对潜艇活动和水声仪器有着重要的影响, 因此了解海洋温跃层的分布和变化规律, 对反潜作战和军事海洋环境保护有着重要的意义^[2], 同时温跃层深度的确定对海洋热含量等要素的计算也有着一定得影响^[3]。目前国内外对于海洋跃层现象已经有着较多的研究^[4], 但是要进一步了解混合层和温跃层的特性和变化规律, 则需要足够详尽的大洋温盐观测数据, 而 Argo (Array for Real-time Geostrophic Oceanography) 计划的问世,

为提供准确的混合层及温跃层相关物理参数提供了可能。

20世纪90年代末美国和日本等国的科学家发起的国际 Argo 计划, 设想在全球大洋中每隔 300 km (空间分辨率 $3^\circ \times 3^\circ$) 布放一个自动剖面浮标, 总计为 3 000 个左右, 组成一个庞大的 Argo 实时海洋观测网, 以获取准实时、大范围、高分辨率的全球海洋资料。该计划于 2000 年正式实施, 到 2007 年底, Argo 观测网已经达到了预期的在全球无冰覆盖深海大洋中维持有 3 000 个剖面浮标正常工作的目标, 每个浮标平均每隔 10 d 可以获得一条 0~2 000 dbar 范围内的温度和盐度观测剖面。至今累计得到的剖面总数已经超过了 150 万条, 且还在以每年超过 12 万条剖面的速度增加^[5-6]。

Argo 观测网经过十多年的发展, 有着比以往任何一个观测系统更好的空间、时间范围内的一致分布^[5]; Argo 计划采取全球统一的实时、延时资料质量控制程序, 从而保证向用户提供高质量的基础研究

收稿日期: 2017-09-02; 修回日期: 2017-10-26。

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(41406022); 国家科技基础性工作专项(2012FY112300); 国家海洋局第二海洋研究所基本科研业务费专项资金项目(JG1622)。

作者简介: 杨小欣(1990-), 男, 助教, 硕士, 主要从事物理海洋学调查研究。E-mail: yangxiaoxin1@126.com

通讯作者: 吴晓芬(1983-), 女, 助理研究员, 硕士, 主要从事物理海洋学调查研究。E-mail: hzxiaofen@sio.org.cn

数据(其温度测量精度为 $\pm 0.005\text{ }^{\circ}\text{C}$,盐度测量精度为 0.01 PSU)。需要特别指出的是,自动浮标观测数据的垂向分辨率比较高,尤其是采用铱卫星进行通讯的浮标观测资料,相比常规采用ARGOS通讯的浮标,具有更高分辨率的采样层次,最多可以达到上千层(垂向间隔约 2 dbar ,常规浮标的观测层次仅为 70 个左右);目前,全球海洋上使用铱卫星通讯的浮标约占 50% 。Argo资料所具备的这些优势,的确为准确计算全球大洋混合层和温跃层等海洋环境参数提供了很好的机遇。

为此,我们利用两种客观分析方法分别计算了西太平洋海域($25^{\circ}\text{S}\sim 40^{\circ}\text{N}$, $120^{\circ}\sim 180^{\circ}\text{E}$)的上混合层深度及其温盐度,以及温跃层上、下界深度、强度等海洋环境参数,供国内相关研究项目使用。

2 资料来源与计算方法

2.1 资料来源

西太平洋海域Argo衍生数据产品的研制,主要使用了中国Argo实时资料中心提供的2017版全球海洋Argo网格数据集(BOA-Argo),验证该产品时还采用了其它数据集,具体信息如下:

BOA-Argo数据:该数据集是基于Cressman逐步订正法开发而成,其时间范围为2004年1月—2016年12月(并逐年更新),为全球海洋($180^{\circ}\text{W}\sim 180^{\circ}\text{E}$, $79.5^{\circ}\text{S}\sim 79.5^{\circ}\text{N}$)、 $0\sim 2\text{ }000\text{ dbar}$ 深度上共 58 层标准层、空间分辨率为 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 的逐年逐月网格化资料^[7]。该数据集及用户手册可以从中国Argo实时资料中心的官方网站(网址:<http://www.argo.org.cn>)上免费下载。

其它相关数据:日本海洋科学与技术厅(Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, JAMSTEC)官方网站提供的基于Argo剖面计算的混合层深度数据集(Mixed Layer data set of Argo, Grid Point Value, MILA GPV),采用阈值法($\Delta\sigma_{\theta}=0.125\text{ kg/m}^3$)计算得到的混合层数据^[1],计算初始层深度为 10 m ,其空间范围为全球海洋($180^{\circ}\text{W}\sim 180^{\circ}\text{E}$, $89.5^{\circ}\text{S}\sim 89.5^{\circ}\text{N}$),空间分辨率为 $2^{\circ}\times 2^{\circ}$,为多年(2001—2010年)月平均(1—12月)网格化资料。该数据集可以从日本Argo官方网站(网址:http://www.jamstec.go.jp/ARGO/argo_web/argo/)

[page_id=223&lang=en](http://www.jamstec.go.jp/ARGO/argo_web/argo/?page_id=223&lang=en))上免费下载。

2.2 计算方法

2.2.1 混合层计算方法

本文混合层深度先根据任意格点上的温、盐度剖面计算获得密度剖面,再利用“最大角度法”^[8]计算获得,同时还给出了各对应深度内的平均温度、盐度值。混合层数据空间范围为 $25^{\circ}\text{S}\sim 40^{\circ}\text{N}$, $120^{\circ}\sim 180^{\circ}\text{E}$,时间范围为2004年1月—2016年12月,深度单位为 dbar 。

“最大角度法”计算混合层深度的优点在于,该方法的计算不需要为临界值(阈值)的选取而烦恼(不同海区的阈值选取标准常常不同);再者,以前由于缺乏盐度数据,只能根据温度来计算混合层,但目前仅用温度计算的结果一般称为等温层,不足以代表真正的混合层,而采用密度值计算混合层已经普遍得到公认。

最大角度法的计算原理为:对于一个 $[\rho(z_k), T(z_k)]$ 的剖面,其中 z_k 为观测层次,表层数据记为 $k=1$ 并向下逐渐递增,理论上在混合层内部密度变化不大,而在混合层以下的密度跃层中密度变化很大,我们定义 $\Delta\rho=\rho_{\max}-\rho_{\min}$ 为垂向密度偏差,并将对应于 $0.1\Delta\rho$ 和 $0.7\Delta\rho$ 的观测层次记为 $z_{(0.1)}$ 和 $z_{(0.7)}$,在这两层之间为跃层的主要部分,并在逐一计算该剖面的密度向量,我们将 $[z_{(0.1)}, z_{(0.7)}]$ 间的数据格点数记为 n ,并令 $m=\min(n, 20)$,最后寻找密度向量之间的最大角度。层次 z_k 对应的第一个向量Vector-1,从 z_{k-h} 到 z_k ,其中:

$$j = \begin{cases} k-1, & k \leq m \\ m, & k > m \end{cases} \quad (1)$$

第二个向量Vector-2,从 z_{k+1} 到 z_k 。这两个向量通过线性拟合构造:

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

式中: c_k 和 G_k 为拟合系数。在混合层内部以及密度跃层的主要部分中, θ_k 较小,而在混合层深度附近 θ_k 达到最大值,由此可以看出从而得出混合层所在的深度。因此,最大角度法可以用来确定混合层的深度。

$$\theta_k \rightarrow \max, H_D = -z_k \quad (3)$$

为了简化计算,将 θ_k 用正切值 $\tan \theta_k$ 来替代,

$$\tan \theta_k \rightarrow \max, H_D = -z_k, G_k^{(1)} = G_k^{(1)}, G_k^{(2)} = G_k^{(2)} \quad (4)$$

式中: $G_k^{(1)} \approx 0$ 为混合层垂向梯度, $G_k^{(1)}$ 为密度跃层梯度, 由拟合系数可得:

$$\tan \theta_k = \frac{G_k^{(2)} - G_k^{(1)}}{1 + G_k^{(1)} G_k^{(2)}} \quad (5)$$

2.2.2 温跃层计算方法

采用“梯度比值法”^[9-10]计算温跃层上、下界深度,其空间范围为 $25^\circ\text{S} \sim 40^\circ\text{N}$, $120^\circ \sim 180^\circ\text{E}$, 时间范围为 2004 年 1 月—2016 年 12 月, 深度单位为 dbar; 跃层上界深度与下界深度之差为跃层的厚度; 跃层上、下界深度对应的水文要素(温度、盐度等)值之差除以跃层厚度所得的结果即为跃层的强度。

由于计算海域纵跨热带、副热带和温带海域, 跨度较大, 若用传统垂向温度梯度法计算跃层的话, 则在不同海域需要选取不同的标准, 且在热带、副热带及温带的过渡区会出现大的跳跃, 这是由于计算标准选取不同而导致的^[11], 而梯度比值法则属于客观分析方法, 不依赖阈值, 跟原始资料剖面形态直接相关。故本项目在研制该衍生数据产品时, 梯度比值法成为我们的首选, 但在验证该数据集时, 还是利用了传统温度梯度法的计算结果进行了比较。

梯度比值法的计算原理为: 对于海洋中的一个温度剖面, 当温度梯度接近 0 的时候, 可以近似为等温层(传统意义上的混合层), 当梯度值趋于无限大的时候则可视作温跃层。按照这个设计思想定义了每个剖面的梯度比值 $r_k = G_k / G_{\max}$, 然后对剖面进行判定 ($\bar{G}_{\text{th}} = \text{mean}_{r_k > 0.5}(G_k)$), 即可计算出温跃层的各参数。

根据上述方法和 BOA-Argo 网格化资料集计算了研究海域的混合层和温跃层等海洋环境参数, 其网格点为 $1^\circ \times 1^\circ$ 经纬度, 并进行了初步分析和比较验证。需要说明的是, 考虑到早期使用的自动剖面浮标, 只能观测约 10 dbar 深度以下的温、盐度剖面, 所以, 这里计算混合层与温跃层时初始深度均取为 10 dbar。

3 计算结果及其验证

3.1 混合层

图 1 给出了研究海域混合层深度的多年平均分

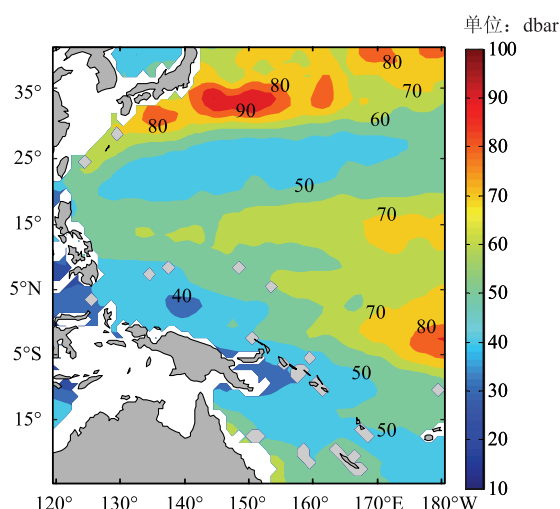


图 1 研究海域混合层深度的多年平均分布

布。由图 1 可以看出, 在西北太平洋黑潮延伸区、热带中太平洋 (170°E 以东海域) 以及 25°S 以南海域, 混合层比较深厚 (> 70 dbar), 菲律宾以东海域到巴布亚新几内亚以东海域、 $18^\circ \sim 27^\circ\text{N}$ 纬度带内的混合层深度则较浅薄 (< 50 dbar)。

图 2 呈现了研究海域 1、4、7、10 月份 (分别代表冬季、春季、夏季和秋季) 混合层深度的多年平均分布。根据 $1^\circ \times 1^\circ$ 的网格点获取的混合层深度等参数发现, 研究海域共 4 092 个格点, 其中 1 月混合层最大深度为 248 dbar, 且深度大于 200 dbar 的格点数仅 18 个 (占 0.44%), 4 月份混合层最大深度为 400 dbar, 其中深度大于 200 dbar 的格点数仅 19 个 (占 0.46%), 且这些数据点都是离散的, 考虑到混合层的质量连续性, 将这些点剔除, 然后绘制了图 2 (7 月和 10 月的混合层最大深度都大约为 100 dbar)。

由图 2 可以看出, 与多年平均相比, 研究海域的混合层深度具有非常明显的季节变化。冬季, 24°N 以北中西太平洋海域的混合层要比其它季节 (尤其是夏季) 深, 而在夏季, 16°S 以南海域混合层深度要大于其它季节。图 3 是利用 MILA GPV 资料^[1]绘制而成的, 同样为多年平均的 1、4、7 和 10 月混合层深度分布 (研究海域共 3 721 个点, 其中 1 月混合层最大深度为 211 m, 且深度大于 200 m 的格点数为 8 个 (占 0.21%), 4 月、7 月和 10 月的混合层最大深度分别为 197 m、119 m 和 92 m)。冀天宇等^[12]利用 4 种不同的方法将的深度与压强之间的相互转化, 并

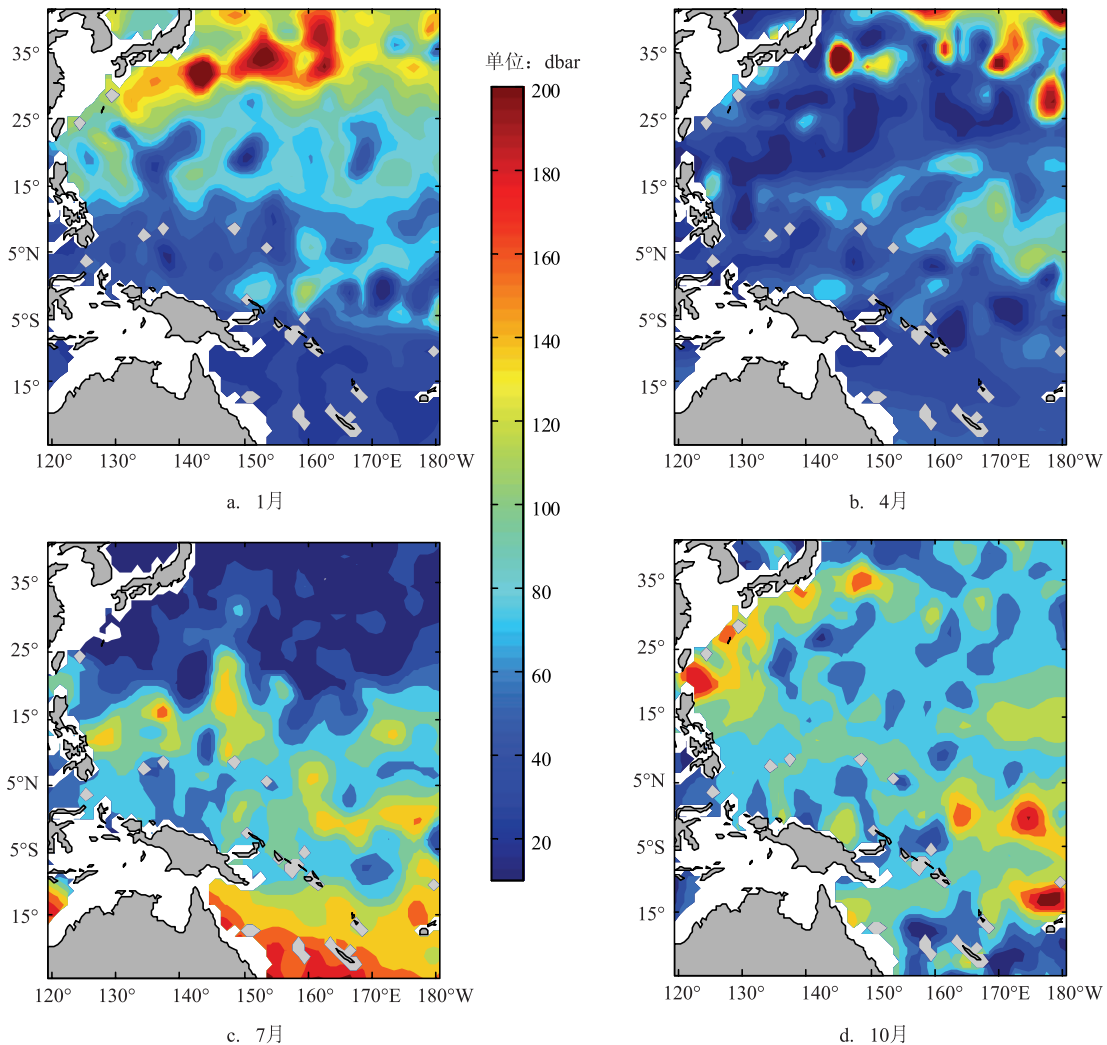


图2 利用最大角度法计算得到的不同季节混合层深度分布

表1 太平洋中部站点压强转化为深度的结果相比较^[12]

压强/dbar	深度/m			
	线性方案	EOS-80	TEOS-10	Gibbs
50	49.62	49.65	49.82	49.82
100	99.24	99.30	99.58	99.57
200	198.48	198.54	199.04	199.04
300	297.72	297.74	298.41	298.41
400	396.95	396.89	397.70	397.68
500	496.19	496.00	496.85	496.85
1 000	992.39	990.81	991.67	991.67
1 500	1 488.58	1 484.44	1 485.31	1 485.31

将转化结果相比较(见表1),可见浅水区域压力和深度在数值上相差不大,故此处暂且把压力(dbar)

与深度(m)近似等同^[12],以便两种资料的比较。

由图3可见,同样是在黑潮延伸区及其东北海域、热带中太平洋以及16°S以南海域,混合层深度偏高(>100 dbar);菲律宾以东到巴布亚新几内亚以东海域、16°~27°N纬度带的混合层深度(<80 dbar)则偏低,且同样具有明显的季节变化。Ohno等^[13]曾采用 $\Delta\sigma_\theta=0.125\text{ kg/m}^3$ 的阈值法计算了北太平洋混合层深度,并给出了3月份的大面分布图(图略),同样显示了在黑潮延伸区,混合层较深,甚至可以达到200 m;而利用最大角度法的计算结果显示,在相同的海域混合层深度也会超过160 dbar。安玉柱等^[14]曾采用了另一种方法计算混合层深度(即由表层盐度和比表层温度低0.5℃的温度值计算出一个密

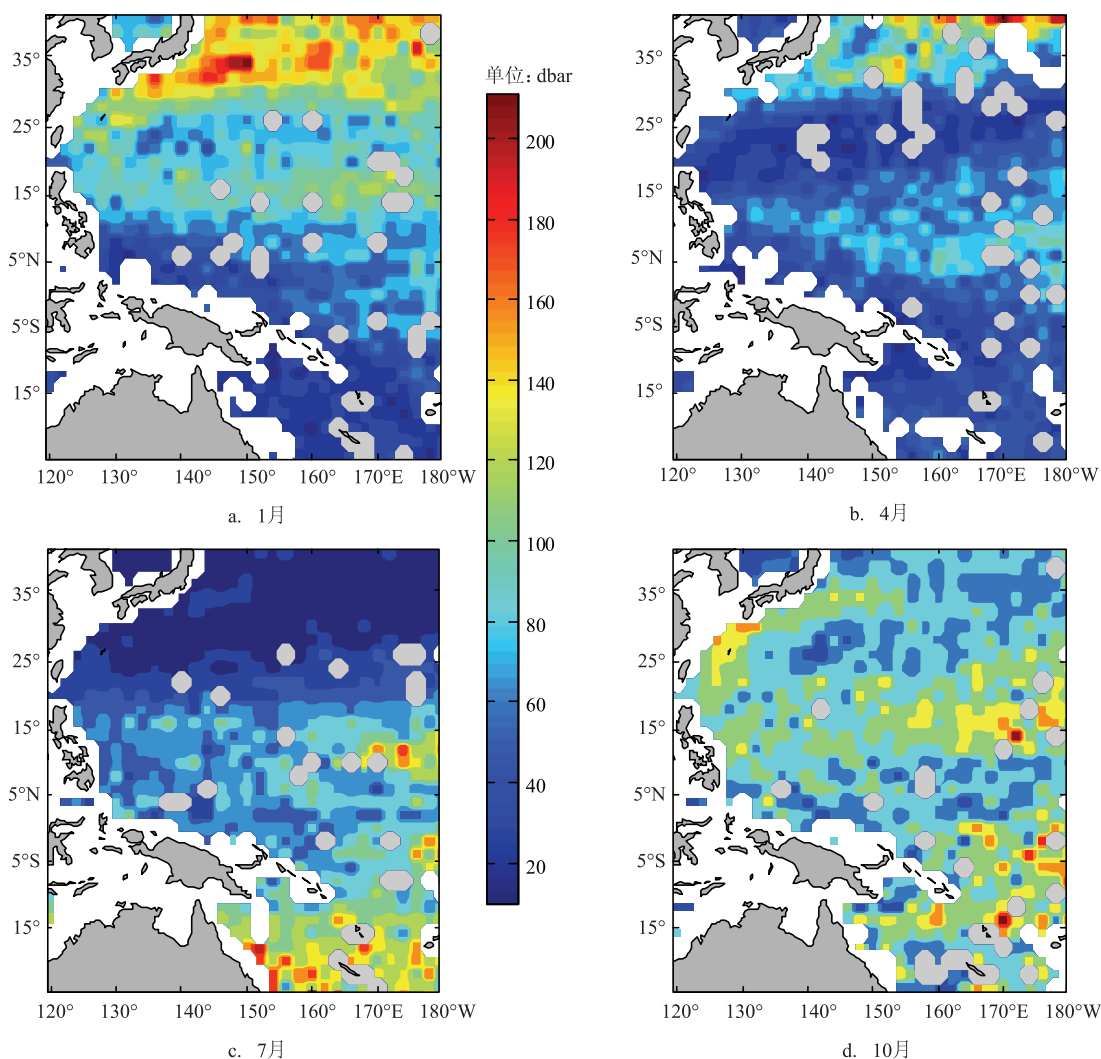


图3 利用阈值法计算获得的不同季节混合层深度分布

度,且把其所在的深度作为混合层的最大深度),结果表明:在两半球的夏季混合层深度都比较浅,冬季混合层深度则普遍比较深,这与图2中1月和7月的计算结果也是相符的。

我们进一步选取了几个经、纬向断面,对MILA GPV混合层深度与我们计算的结果进行了对比(见图4)。由图4可见,在40°N断面上,前者的平均混合层深度要明显大于后者计算的结果,但两者的变化趋势还是趋于一致的,且由后者的纬向变化明显可以看出,混合层深度几乎呈波浪状由西(约40 dbar)向东不断加深,到了约180°E附近,混合层深度约为85 dbar;10°N断面上,两者的混合层深度相差不大,由西(约50 dbar)向东缓慢加深(约70

dbar),且前者的深度曲线围绕后者上下波动;20°S断面上,在可以比较的范围(图中165°~175°E段),从153°E附近的60 dbar向东呈波状逐渐变浅,到了约180°E附近约为43 dbar,两者的混合层深度值及变化趋势都吻合的较好。

在3个经向断面(图略)上,从南(约24°S)到北(约40°N)混合层深度变化总体上呈现两高(约90 dbar)两低(约45 dbar)的波状分布,其中两个波峰分别出现在3°S和30°N附近,波谷则在10°S和24°N附近;南半球波峰位置处,混合层深度由西(135°E断面上约为52 dbar,162°E断面上约为63 dbar)向东(180°E断面上约为91 dbar)不断加深,在最西、最东断面上深度差可达39 dbar;而在北半球波峰位置处,混合

层深度在西、东断面上的差异(约6 dbar)并不明显,但波峰出现的位置似乎由西向东逐渐北偏,混合层深度也略有变浅。如在135°E断面上,混合层最大深度约为88 dbar,处于30°N附近;而在180°E断面上,最大深度约为82 dbar,且处于40°N附近。南半球10°S以南的波谷不是十分明显,其实在北半球40°N以北也隐约有波谷存在,但24°N附近的波谷则是十分显著的,而且出现的位置也基本相近,混合层最小深度的变化(约5 dbar)也不大。需要指出

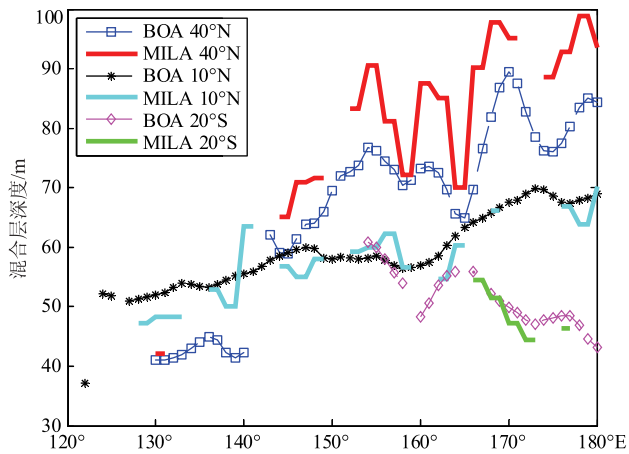


图4 3个代表性纬向断面上MILA GPV和BOA-Argo混合层深度变化曲线(曲线断开处为缺测,下同)

的是,在南北半球两个体现最大深度的波峰之间,还呈现了一个次高峰,大体位于14°N附近,由西(约60 dbar)向东(约73 dbar)混合层深度逐渐变深。比较而言,两个产品在135°E和162°E经向断面上,给出的混合层深度值和变化趋势都非常吻合(除了135°E断面上、25°N处两者差值相对较大之外);180°E断面上,MILA GPV产品的缺测值较多,但仍然可以看出,两者在赤道以南以及5°~15°N范围内数值和变化趋势也较吻合。

图5给出了利用BOA-Argo数据集计算获得的混合层温度和盐度多年平均分布。由图可以看出,西太平洋海域混合层温度基本呈纬向分布,在赤道和热带海域温度值偏高(暖池特征明显),并向两极递减;越往北,温度递减越快。西太平洋海域混合层盐度分布较温度要复杂,从南到北,高盐区和低盐区交替出现,主要低盐区(<34.4)出现在以8°N为中心轴的楔形纬度带(16°N~0°)以及32°N以北海域,其它海域盐度则较高(>34.8)。这与人们以往利用不同数据集获得的研究海域温、盐度分布特征也是基本一致的^[15-16]。

3.2 温跃层

图6给出了由BOA-Argo数据集计算获得的

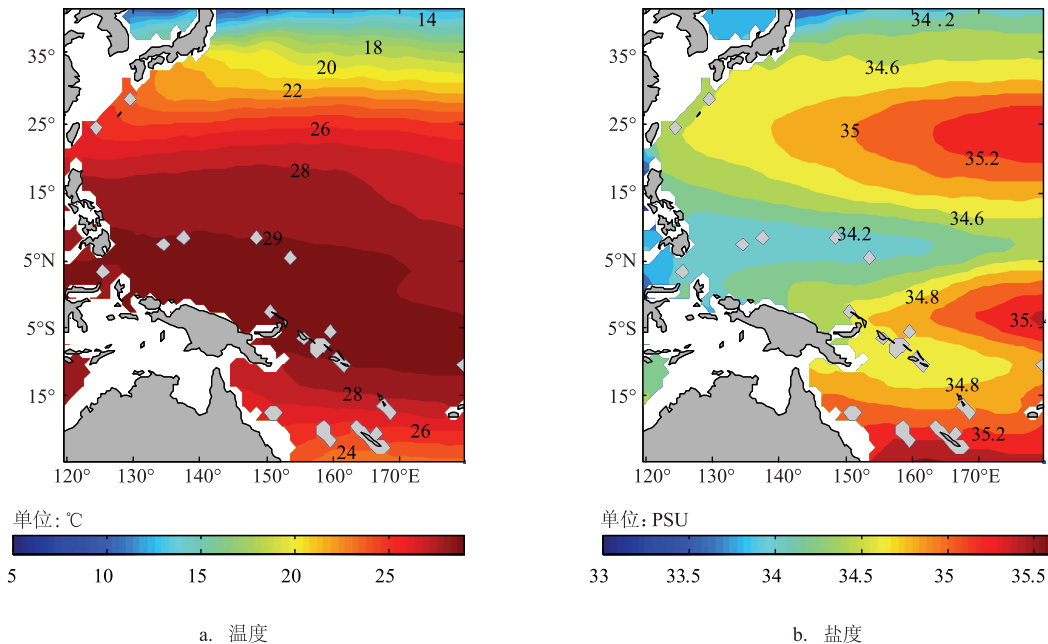


图5 由BOA-Argo资料计算获得的混合层温度和盐度多年平均分布

2016年研究海域温跃层上界深度(updepth)、下界深度(themocline base)以及强度(intensity)的季节性分布。统计表明:2016年四季(1、4、7和10月)温跃层上界深度最大值分别为204 dbar、187 dbar、162 dbar和185 dbar,但各季上界深度大于120 dbar的分别只有5个、8个、1个和3个格点(大于100 dbar的则分别为7个、20个、1个和3个格点),可见,春季的温跃

层要较其他季节深一些;而温跃层下界深度大于800 dbar的分别为7个、9个、5个和7个网格点,可见各季温跃层下界深度差异并不明显;各季温跃层强度的范围分别为0.003 6~0.168 1 $^{\circ}\text{C}/\text{dbar}$ 、0.003 5~0.187 7 $^{\circ}\text{C}/\text{dbar}$ 、0.007 5~0.155 7 $^{\circ}\text{C}/\text{dbar}$ 和0.001 9~0.016 54 $^{\circ}\text{C}/\text{dbar}$,其中四季温跃层强度大于0.14 $^{\circ}\text{C}/\text{dbar}$ 的网格点数分别为9个、4个、31个和11个(大

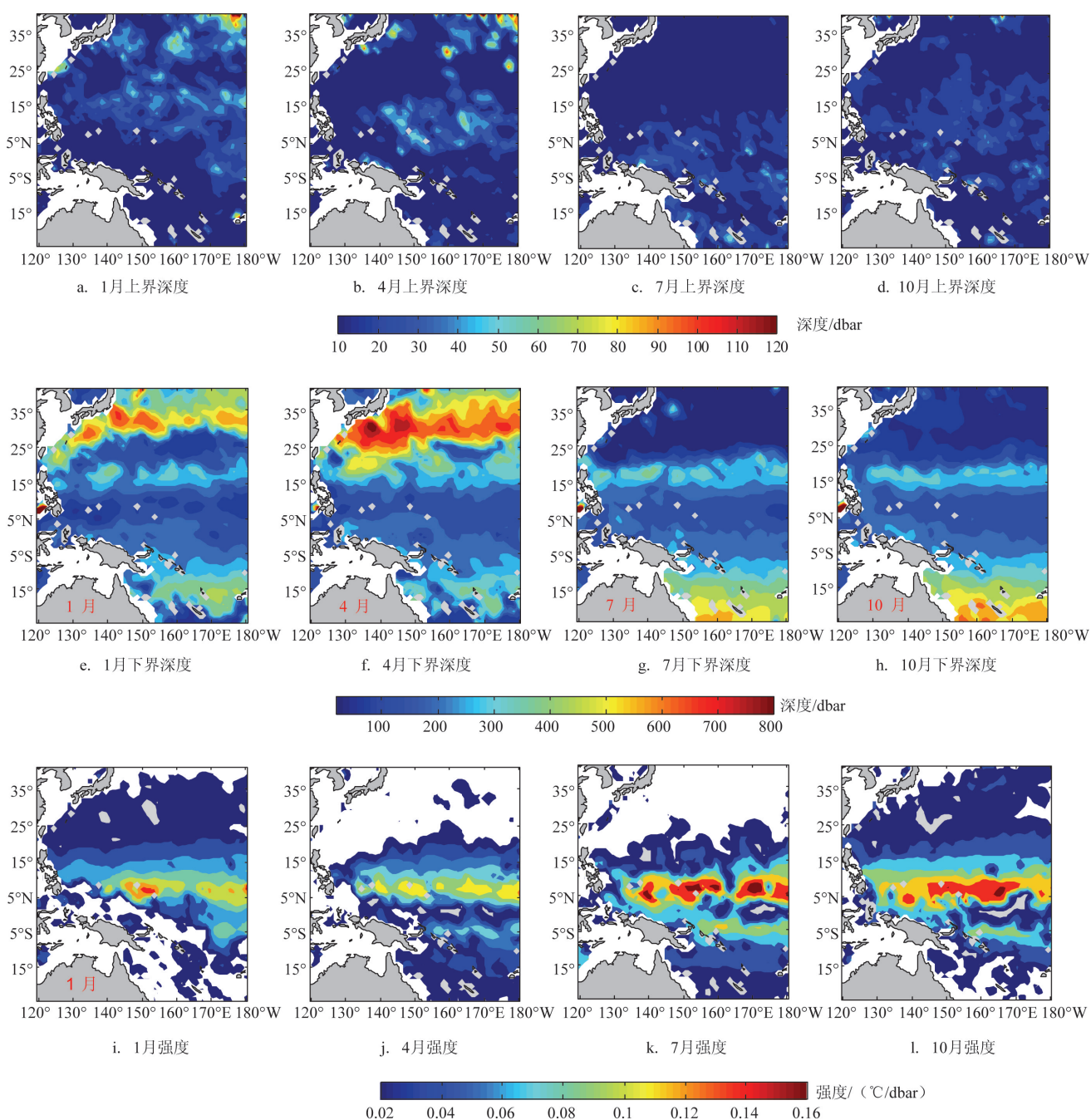


图6 2016年不同季节温跃层上、下界深度及强度分布

于 $0.16\text{ }^{\circ}\text{C/dbar}$ 的网格点数则分别为1个、1个、0个和1个),可见夏季温跃层强度虽不是最强,但强跃层区域比其他3个季节都要大得多。需要指出的是,强度分布图中空白处为温度梯度小于 $0.02\text{ }^{\circ}\text{C/dbar}$ 的区域,根据我国颁布的相关大洋区跃层标准^[17],深海(水深 $>200\text{ m}$)温跃层的最低标准为 $0.05\text{ }^{\circ}\text{C/m}$,也就是说,按照国标,强度小于 $0.05\text{ }^{\circ}\text{C/dbar}$ 的区域可看成无跃层区域,但依据梯度比值法,仍可以看出计算海域温度在垂向的微弱梯度变化($0.02\sim 0.05\text{ }^{\circ}\text{C/dbar}$)。也有研究指出^[18],跃层强度的最低标准 $0.05\text{ }^{\circ}\text{C/m}$ 仍然具有一定的局限性,为此,我们给出了研究海域温度垂向梯度 $\geq 0.02\text{ }^{\circ}\text{C/dbar}$ 的强度变化,供用户根据实际需要选择应用。

由图6可以看出,研究海域温跃层上界深度基本在 40 dbar 范围以内,仅有少数区域上界深度可以超过 80 dbar ,甚至达到 100 dbar 以上,主要位于黑潮延伸区以东海域,且出现的时间为冬、春季节;研究海域温跃层下界深度的季节性分布较为明显,其显著特征为冬、春季节北半球高纬海区(20°N 以北)和夏、秋季节南半球高纬海区(15°S 以南)温跃层较深,且北半球高纬海域温跃层($600\sim 800\text{ dbar}$)下界要比南半球($500\sim 600\text{ dbar}$)的深;从强度上看,热带海域($16^{\circ}\text{N}\sim 8^{\circ}\text{S}$)温跃层虽然浅,但强度较强,且强度极轴呈纬向走势。此外,热带海域温跃层强度的高值中心同样具有显著的季节变化特征,即夏、秋季节($>0.12\text{ }^{\circ}\text{C/dbar}$)的强于冬、春季节($0.10\sim 0.12\text{ }^{\circ}\text{C/dbar}$)。

王彦磊等^[19]曾依据温度梯度法($\Delta T/\Delta Z=0.05\text{ }^{\circ}\text{C/m}$)计算获得了世界大洋温跃层各参数的分布,其研究指出:夏季在 $10^{\circ}\sim 20^{\circ}\text{N}$, $0^{\circ}\sim 20^{\circ}\text{S}$ 纬度带是跃层上界深度最深的区域,且在热带跃层上界深度高值以外至高纬的广大区域为跃层深度较浅区,甚至没有跃层存在,这与图5给出的结果相近;他们的研究还指出:冬、夏季温跃层分布在南、北半球洋区正好相反,且跃层强度的高值区在 $10^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{N}$,两侧相对较低(图略),这与我们的结果也是一致的。

由图6可以看出,研究海域温跃层下界深度和强度以经向变化为主,因此我们选取了 140°E 和 160°E 两个经向断面,绘制了温跃层强度和下界深度在1、4、7、10共4个月份的断面分布图,进一步探

究温跃层参数的分布和年变化特征。

由图7可见, 140°E 断面上温跃层强度沿经向总体呈现单峰状分布,全年空间分布趋势相似,在 6°N 附近跃层强度达到峰值,并向南北方向逐渐减弱,最大强度出现在10月,可达 $0.09\text{ }^{\circ}\text{C/dbar}$ 。 6°N 以北的范围内,1月温跃层强度相对较大,而4月深度相对较小,最大相差约 $0.02\text{ }^{\circ}\text{C/dbar}$,7月、10月介于两者之间;在 6°N 以南的范围内,年变化趋势与 6°N 以北略有不同,7月温跃层强度相对较大,4月相对较小,最大相差约 $0.02\text{ }^{\circ}\text{C/dbar}$,1月和10月介于两者之间。

而 140° 断面上温跃层下界深度沿经向同样呈现波浪状分布,但经向变化趋势与上界深度明显不同,深度在 $30\sim 720\text{ dbar}$ 之间,其年变化比较明显的区域位于 15°N 以北,温跃层下界深度的季节差异非常明显,4月温跃层下界深度最大,最深可达 720 dbar ,1月份次之,而到了7月和10月,深度大幅降低,深度范围在 $30\sim 400\text{ dbar}$ 内;在 6°N 以南的范围内,虽然1月和4月温跃层下界深度相对仍然较深,但是相对于4月和7月其深度相差已经不大,没有明显的季节差异。

由图8可见, 160°E 断面上温跃层强度与 140°E 断面略有不同,沿经向总体呈现双峰状分布,全年空间分布趋势相似,两个峰值分别位于 5°N 和 5°S 处,但是年变化趋势以赤道附近为界,赤道以南和赤道以北的范围变化趋势有所不同。赤道以北的范围内,1月温跃层强度最大,最大可达 $0.12\text{ }^{\circ}\text{C/dbar}$,7月相对较小,4月和10月强度介于两者之间;而在赤道以南的范围内则相反,7月温跃层强度最大,最大可达约 $0.10\text{ }^{\circ}\text{C/dbar}$,1月相对较小,4月和10月强度介于两者之间。

对于温跃层下界深度,年变化明显的区域在 $16^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$ 以及 $25^{\circ}\sim 15^{\circ}\text{S}$ 两个范围内, $15^{\circ}\text{S}\sim 16^{\circ}\text{N}$ 的范围内各个月份的深度没有明显的季节差异。在 $16^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$ 范围内的季节差异最明显,7月深度最大,在 $350\sim 670\text{ dbar}$ 之间,1月次之,7月和10月深度较浅且相差不大,深度范围在 $40\sim 360\text{ dbar}$ 之间;在 $16^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$ 范围内,7月和10月深度较大,在 $400\sim 600\text{ dbar}$ 之间,而1月和4月深度相对较小,深度范围在 $120\sim 400\text{ dbar}$ 之间。

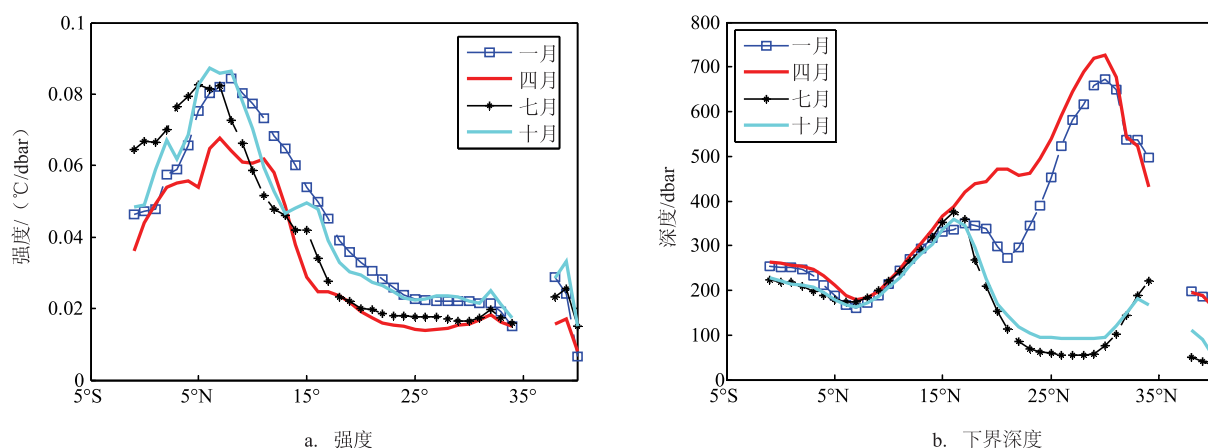


图7 140°E经向断面上BOA-Argo温跃强度和下界深度变化曲线

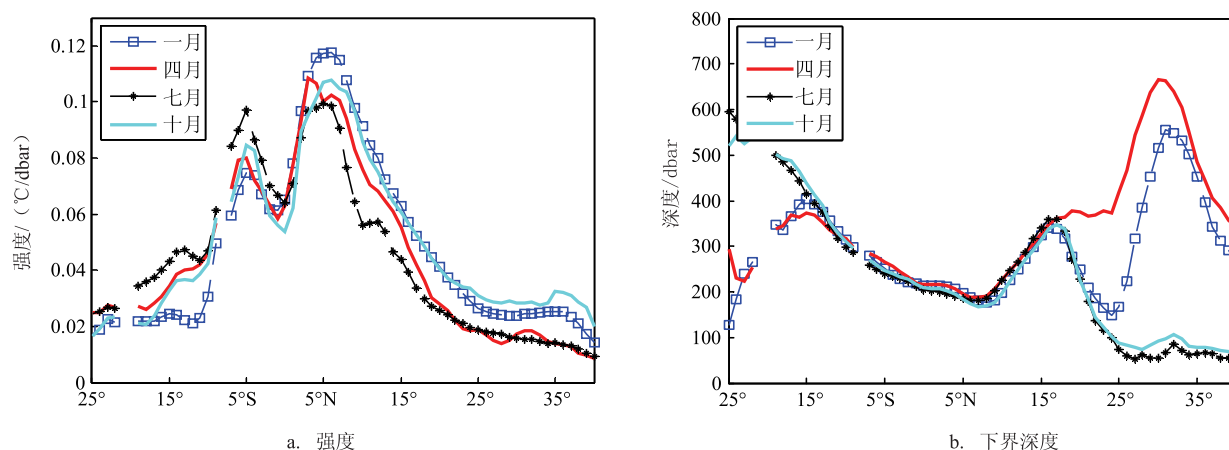


图8 160°E经向断面上BOA-Argo温跃层强度和下界深度变化曲线

3 结论

基于BOA-Argo网格化数据集,利用最大角度法和梯度比值法这两种客观分析方法分别计算得到西太平洋海域上混合层和温跃层的各物理参数,获得了2004—2016年期间西太平洋海域Argo衍生数据产品(集),并对计算结果进行了验证。

根据该数据产品得到的混合层数据,可以看出在西北太平洋黑潮延伸区、热带中太平洋以及25°S以南海域,混合层比较深厚,菲律宾以东海域到巴布亚新几内亚以东海域、18°~27°N纬度带内的混合层深度则较浅。且混合层深度具有非常明显的季节变化。冬季,24°N以北中西太平洋海域的混合层要较深,而夏季,16°S以南海域混合层深度要较

深。使用MILA GPV混合层数据与本数据集对比,结果表明,无论在分布趋势,还是数值上均相差无几,且几个代表性经、纬向断面上混合层深度变化也是一致的。

研究海域温跃层上界深度基本在40 dbar范围以内,主要位于黑潮延伸区以东海域,且出现的时间为冬、春季节;研究海域温跃层下界深度的季节性分布较为明显,其显著特征为冬、春季节北半球高纬海区和夏、秋季节南半球高纬海区温跃层较深,且北半球高纬海域温跃层下界要比南半球的深;从强度上看,热带海域温跃层虽然浅,但强度较强,且强度极轴呈纬向走势。此外,热带海域温跃层强度的高值中心同样具有显著的季节变化特征。利用梯度比值法计算得到的西太平洋海域温跃层上、下界深度和强度等参数的季节分布特征及

变化趋势,与人们利用传统的温度梯度法计算得到的结果也是大体相符的。

可见,该数据集是可靠的,也是值得信赖的。该数据集可以用来提高人们对西太平洋海域混合层和温跃层分布特征和变化规律的认识,以及帮助从事海洋模式模拟的科学工作者对混合层参数化方案进行验证或优化,同时为温跃层扰动对 ENSO 循环的动力机制的探讨提供基础数据。

参考文献:

- [1] Hosoda S, Ohira T, Sato K, et al. Improved description of global mixed-layer depth using Argo profiling floats[J]. *Journal of Oceanography*, 2010, 66(6): 773-787.
- [2] 李庆红, 刘天波, 张永刚. 海洋温跃层对舰船声纳探测的影响评估[J]. *舰船电子工程*, 2008, 28(2): 141-144.
- [3] 吴晓芬, 许建平, 张启龙, 等. 基于 Argo 资料的热带西太平洋上层热含量初步研究[J]. *海洋预报*, 2011, 28(4): 76-86.
- [4] 江伟, 邢博, 楼伟, 等. 海洋温跃层分析方法比较[J]. *海洋预报*, 2016, 33(3): 41-49.
- [5] Riser S C, Freeland H J, Roemmich D, et al. Fifteen years of ocean observations with the global Argo array[J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6(2): 145-153.
- [6] Liu Z H, Wu X F, Xu J P, et al. China Argo project: progress in China Argo ocean observations and data applications[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2017, 36(6): 1-11, doi: 10.1007/s13131-017-1035-x.
- [7] Li H, Xu F H, Zhou W, et al. Development of a global gridded Argo data set with Barnes successive corrections[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2017, 122(2): 866-889, doi: 10.1002/2016JC012285.
- [8] Chu P C, Fan C W. Maximum angle method for determining mixed layer depth from seaglider data[J]. *Journal of Oceanography*, 2011, 67(2): 219-230.
- [9] Chu P C, Fan C W. Objective determination of global ocean thermocline strength from profile data[C]//*Proceedings of the 16th Symposium on Integrated Observing and Assimilation Systems for the Atmosphere, Oceans, and Land Surface*. New Orleans, 2012.
- [10] Chu P C, Fan C W. Exponential leap-forward gradient scheme for determining the isothermal layer depth from profile data[J]. *Journal of Oceanography*, 2017, 73(4): 503-526, doi: 10.1007/s10872-017-0418-0.
- [11] 高飞, 张韧, 李璨, 等. 基于 Argo 网格产品资料的台湾以东海域海温场结构与温跃层特征分析[J]. *热带海洋学报*, 2014, 33(1): 17-25.
- [12] 冀天宇, 蒋国荣, 史剑, 等. 海洋中深度与压强的转换方法[J]. *海洋预报*, 2015, 32(2): 45-50.
- [13] Ohno Y, Kobayashi T, Iwasaka N, et al. The mixed layer depth in the North Pacific as detected by the Argo floats[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(11): L11306, doi:10.1029/2004GL019576.
- [14] 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.
- [15] Sprintall J, Roemmich D. Characterizing the structure of the surface layer in the Pacific Ocean[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104(C10): 23297-23311.
- [16] 黄国平, 严幼芳, 齐义泉. 热带太平洋混合层盐度季节-年际变化特征研究[J]. *热带气象学报*, 2016, 32(2): 219-228.
- [17] 国家技术监督局. GB/T 12763.7-1991 海洋调查规范 海洋调查资料处理[S]. 北京: 中国标准出版社, 1991.
- [18] 张旭, 张永刚, 聂邦胜, 等. 垂直梯度法与最优分割法确定温跃层边界的比较分析[J]. *海洋通报*, 2008, 27(6): 20-26.
- [19] 王彦磊, 黄兵, 张韧, 等. 基于 Argo 资料的世界大洋温度跃层的分布特征[J]. *海洋科学进展*, 2008, 26(4): 428-435.

Gridded mixed layer & thermocline data set derived from Argo profiles of the Western Pacific Ocean

YANG Xiao-xin^{1,2}, WU Xiao-fen², LU Shao-lei²

(1. PLA Dalian Naval Academy, Dalian 116000 China; 2. State Key Laboratory of Satellite Ocean Environment Dynamics, the Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012 China)

Abstract: Base on the newest BOA-Argo data set, gridded (1° latitude \times 1° longitude) and climatological monthly of mixed layer depth (MLD) and thermocline parameters of the West Pacific ($25^{\circ}\text{S}\sim 40^{\circ}\text{N}$, $120^{\circ}\sim 180^{\circ}\text{E}$) ocean from January 2004 to December 2016 has been developed. The MLD was calculated by maximum angle method and parameters of thermocline were estimated by gradient ratio method. When comparing with MILE GPV data set calculated by threshold method, both of the two climatological MLD show that the spatial and temporal variations of the MLD were very similar with each other. The results of the thermocline parameters calculated by gradient ratio method are also roughly consistent with those estimated by traditional temperature gradient method.

Key words: mixed layer; thermocline; maximum angle method; gradient ratio method; Argo data