

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. 地球物理学报, 2012, 55(7): 2249-2258, doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.07.011.

An Y Z, Zhang R, Wang H Z, et al. Study on calculation and spatio-temporal variations of global ocean mixed layer depth. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(7): 2249-2258, doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.07.011.

全球大洋混合层深度的计算及其时空变化特征分析

安玉柱,张 韧*,王辉赞,陈 建,陈奕德

解放军理工大学气象学院,军事海洋环境军队重点实验室,南京 211101

摘 要 本文利用 2005—2009 年的全球网格化 Argo 数据,分别采用温度判据和密度判据计算了全球大洋混合层深度(Mixed Layer Depth, MLD),讨论了障碍层(Barrier Layer, BL)和补偿层(Compensated Layer, CL)对混合层深度计算的影响,得到了合成的混合层深度,并研究了其时空变化特征. 研究表明:(1)在赤道西太平洋(10°S—5°N, 150°E—150°W),孟加拉湾,热带西大西洋(10°N—20°N, 30°W—60°W)是障碍层高发区域. 冬季的北太平洋副热带区域(30°N 附近)以及东北大西洋(40°N—60°N, 0°—30°W)是补偿层发生的区域.(2)在各个半球的夏季 MLD 都比较浅,在各个半球的冬季 MLD 则普遍比较深. 北太平洋和北大西洋的 MLD 的分布和变化比较相似,印度洋 MLD 受季风影响显著,呈现半年周期变化. 太平洋和大西洋的 MLD 的经向分布大致呈现出“两端深,中间浅”的拱形特点.(3)混合层深度距平场 EOF 第一模态时间变化为周期的年信号,北太平洋和北大西洋、南大洋(尤其是南极绕流区)都是 MLD 变化剧烈的海域,第二模态显示全球大洋混合层深度距平存在着一个半年的变化周期.

关键词 Argo, 混合层深度, 障碍层, 补偿层, 等温层深度, 时空变化

doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.07.011

中图分类号 P731

收稿日期 2011-07-05, 2012-06-18 收修定稿

Study on calculation and spatio-temporal variations of global ocean mixed layer depth

AN Yu-Zhu, ZHANG-Ren*, WANG Hui-Zan, CHEN-Jian, CHEN Yi-De

PLA Key Laboratory of Military Marine Environment, Institute of Meteorology,

PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China

Abstract Argo gridded data over the period 2005—2009 are used to calculate the global Mixed Layer Depth (MLD) based on the temperature criterion and density criterion, respectively. Due to the Barrier Layer (BL) and Compensated Layer (CL), there will be misleading to estimate the MLD. After taking these phenomena into account, this paper obtains the global hybrid MLD and then analyzes its spatio-temporal distribution. The results show that the western equatorial Pacific(10°S—5°N, 150°E—150°W), Bengal bay and western tropical Atlantic(10°N—20°N, 30°W—60°W) are the regions where the barrier layer occurs frequently. The northern subtropical Pacific (near 30°N) and northeastern Atlantic(40°N—60°N, 0°—30°W) in winter are the regions where compensated layer occurs. The MLD is shallow in summer and deep in winter. MLD and its variation in the northern Pacific Ocean are similar to the northern Atlantic Ocean. Monsoon has significant influence on MLD in the Indian Ocean where the MLD shows a semi-annual cycle. The meridional sections show arch-shaped distributions that MLD is deep in the two poles while

基金项目 国家自然科学基金(41276045)资助.

作者简介 安玉柱,男,1985年生,河北武安人,博士研究生,主要从事海洋数据处理和物理海洋研究. E-mail: ayz_276521@sina.com

* 通讯作者 张韧,男,1963年生,四川峨眉人,教授,博士生导师,主要从事海气相互作用研究. E-mail: zren63@126.com

shallow in the equator. The first mode of the EOF analysis of mixed layer depth anomaly indicates an annual cycle. The northern Pacific, northern Atlantic and South Ocean (especially the Antarctic Circumpolar Current) are the areas where MLD varies significantly. The second mode indicates that the mixed layer depth anomaly contains a semiannual cycle.

Keywords Argo, Mixed layer depth, Barrier layer, Compensated layer, Isothermal layer depth, Spatio-temporal variation

1 引言

海洋近表层由于太阳辐射、降水、风力强迫等作用,形成温、盐、密几乎垂向均匀的混合层(Mixed Layer, ML)^[1]. 混合层在海气相互作用过程中起着重要作用,海洋与大气的能量、动量、物质交换主要通过混合层进行. 此外,混合层的观测对于验证和改进大洋环流模式中的混合层参数化方案具有重要价值^[2-3]. 近年来有不少关于混合层的研究,施平等^[4]通过分析 Levitus 气候平均温盐资料,得到南海混合层的时空分布特征,剖析了混合层深度及其内部温度的季节变化规律,指出季风通过流场调整对南海混合层分布有明显影响;Ohno 等^[5]将 Argo 浮标测得的混合层的深度和基于气候学的混合层的深度相比,研究了北太平洋的混合层的深度的空间分布和随时间的变化,并指出了气候学混合层深度的不足;芦静等^[6]利用散点 Argo 资料计算了准全球海洋夏季的混合层深度,并与 Levitus 资料计算的进行了比较,结果表明前者普遍大于后者;李泓等^[7]研究了太平洋区域混合层深度年际变率的地理分布和季节变化,指出 1980 年代以来,伴随强 El Niño 事件发生,有混合层的正常东传;巢纪平等^[8]指出深厚混合层与弱海气相互作用相联系;赵永平等^[9]研究了热带太平洋混合层水体振荡与 ENSO 循环的关系,指出混合层水体振荡在 ENSO 循环中的重要作用.

鉴于混合层在科学研究中的重要作用,其恰当定义和准确计算至关重要. 潘爱军等^[10]在研究南海东北部障碍层(Barrier Layer, BL)时,指出等温层深度(温跃层顶界深度)与等盐度层深度或混合层深度(密度跃层顶界深度)并不一定重合. 目前,关于混合层的深度的计算有多种定义,概括起来可分为两种:①差值法:与参考深度处的温度或密度相差一定值的深度;②梯度法:温度梯度或密度梯度达到一定值的深度. 差值法的优势在于可用于垂直分辨率较低的剖面,计算简单易行,但是计算的混合层的

深度偏差较大;梯度法的优势在于计算的混合层深度更精确,但是需要较高的垂向分辨率,而且容易受到“淡盖”的影响,出现虚假的浅混合层. Brainerd 和 Gregg^[11]研究指出,基于差值法要比基于梯度计算得到的混合层深度结果更理想;贾旭晶等^[12]分别采用海洋调查规范^[13]和 Sprintall 和 Tomczak^[14]关于混合层和温跃层的定义,分析了混合层和温跃层两种定义下的共同点和差异,认为南海春季的混合层和温跃层研究采用差值法比较合适;de Boyer Montégut 等^[15]采用差值法,分别以温度和密度判据,利用全球剖面数据(1994—2002 年, PFL, MBT, XBT, CTD 数据)计算了全球混合层深度的气候态平均数据集.

差值法和梯度法都用温度或者密度作为判据. 温度判据的优点是温度数据覆盖范围广且时空分辨率高,但确定的混合层深度比较粗略;密度为判据的优点是综合考虑了温度和盐度的影响,混合层的深度的计算更为准确,但是盐度数据稀缺. 由于受限于温盐资料,目前的研究大多集中在局部海域,对全球混合层的深度的计算和研究还不是很多. 令人可喜的是 Argo 全球海洋观测网于 2007 年宣布建成,每年可提供多达 10 万个剖面(0~2000 m)的温度、盐度资料,为采用多种判据计算混合层的深度提供了很好的数据基础. 本文的目的是利用新的 Argo 数据网格化温、盐产品,计算全球海洋混合层深度,通过判断是否存在障碍层和补偿层,并得出合成混合层深度,然后分析其时空变化特征.

2 数据

本文所使用的全球网格化 Argo 数据产品来自于中国 Argo973 网站(<http://www.argo.org.cn/data/data1.html> [2011-05-20]). 该数据产品由国家海洋信息中心制作^[16],方法如下:首先对来源于法国 Argo 数据中心 1998—2009 年的 Argo 浮标剖面原始观测资料进行质量控制,在常规实时质控和盐度延时订正(WJO^[17]方法和 OW^[18]方法)的基础

上,人工审核剔除局部毛刺和尖峰数据;然后采用时空加权平均技术对质控后的数据在全球范围进行网格化,构造出气候态背景场;再采用全三维空间多重网格三维变分数据同化方法同化 2005—2009 年各月的现场 Argo 观测资料,形成全球网格化 Argo 数据产品. 该同化方法以网格的粗细来描述背景场误差协方差矩阵中的相关尺度,在一组由粗到细的网格上依次对观测场相对于背景场的增量进行三维变分分析,在每次分析的过程中,将上次较粗网格上分析得到的分析场作为新的背景场代入到下次较细网格的分析中,而每次分析的增量也是指相对于上次较粗网格分析得到的新背景场的增量,最后将各重网格的分析结果相叠加得到最终的分析结果.

该产品完全以 Argo 数据作为分析对象,包含了温度和盐度要素,资料长度是 2005 年 1 月至 2009 年 12 月,时间分辨率为逐年逐月,空间范围为

全球,分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$,垂向共有 26 个标准深度层: 0, 10, 20, 30, 50, 75, 100, 125, 150, 200, 250, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1100, 1200, 1300, 1400, 1500, 1750, 2000 m.

3 方法

3.1 混合层的计算依据

本文采用的混合层深度定义^[14]如下,定义 1(温度判据):比表层温度低 0.5°C 的温度所在的深度作为混合层深度,文中称为 ILD (Isothermal Layer Depth);定义 2(密度判据):由表层盐度和比表层温度低 0.5°C 的温度值计算出一个密度,这个密度所在的深度处即为混合层底所在处,文中称为 MLD (在这里,ILD 和 MLD 分别代表了由温度和密度判据计算得来的混合层深度).若 ILD 大于 MLD,则存

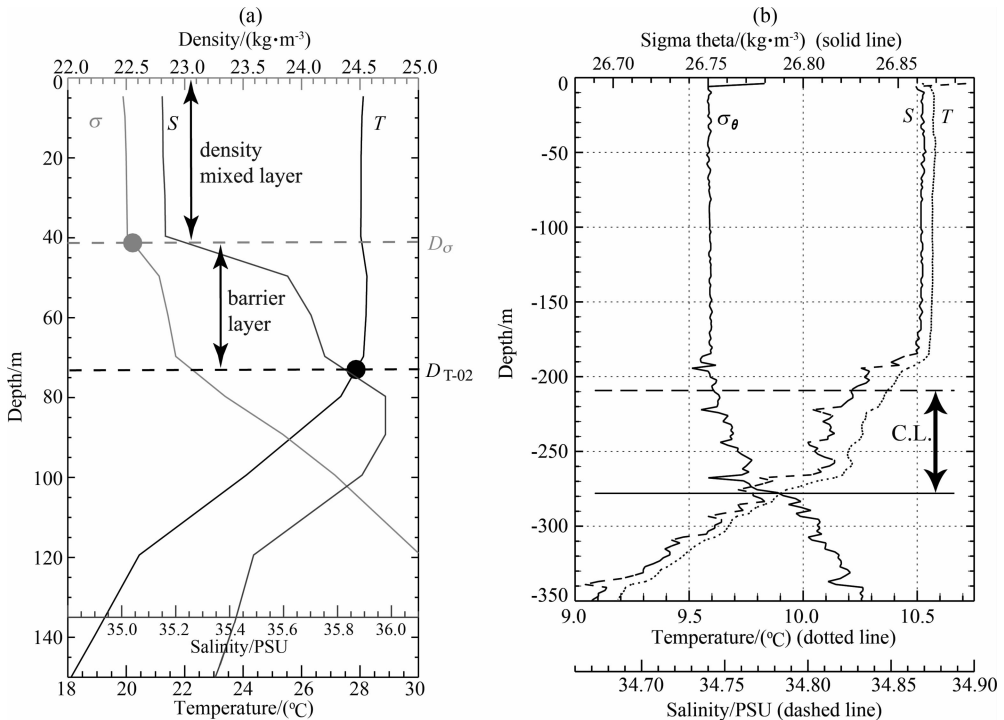


图 1 存在障碍层或补偿层时对计算 MLD 的影响示意图

(a)存在障碍层:2002 年 1 月 31 日位于东南阿拉伯海(67.3°E , 7.4°N)Argo 浮标的温度、盐度、密度剖面,左侧实圆点表示根据密度判据得到的 MLD,右侧实圆点表示根据温度判据得到的 ILD(引自 de Boyer Montégut 等^[20]);(b)存在补偿层:1995 年 7 月 17 日位于澳大利亚南部海域(146.2°E , 44.4°S)CTD 的温度、盐度、密度剖面,虚直线表示根据温度判据得到的 ILD,实直线表示根据密度判据得到的 MLD(引自 de Boyer Montégut 等^[15]).

Fig. 1 Sketch maps of presence of Barrier layer or Compensated Layer in calculating MLD

(a) An example of BL case: Temperature, salinity and density profiles were measured from an Argo float on 31 January 2002 in the southeastern Arabian Sea (67.3°E , 7.4°N). The left solid dot showed the depth where the density criteria reached. The right solid dot showed the depth where the temperature criteria reached (from de Boyer Montégut et al., 2007); (b) An example of CL case: Temperature, salinity and density profile were measured from CTD, on 17 July 1995 in the south of Australia (146.2°E , 44.4°S). The dashed line showed the depth where the temperature criteria reached. The solid line showed the depth where the density criteria reached (from de Boyer Montégut et al., 2004).

在障碍层 (Barrier Layer, BL), 障碍层厚度 (Barrier Layer Thickness, BLT) 为 (ILD-MLD); 若 ILD 小于 MLD, 则存在补偿层 (Compensated Layer, CL), 补偿层厚度 (Compensated Layer Thickness, CLT) 为 (MLD-ILD). 实际海洋中, 表层 10 m 温度和盐度的分布基本上是均匀的, 将表层温度和盐度取其 10 m 处的值, 可以忽略海洋表层异常热力过程的影响, 例如淡水的输入, 急剧的蒸发等. 另外, 以 10 m 作为参考层符合 Argo 浮标的观测特点, 减小 Argo 数据在表层的误差.

在大部分海域, 由于存在较强的温跃层, ILD 和 MLD 是一致的, 但是在一些区域如赤道西太平洋和南半球高纬度地区, ILD 和 MLD 则有很大的差异, 所以在这些地方只采用定义 1 或定义 2 则会造成计算的混合层深度有很大的差异^[19]. 图 1 为 de Boyer Montégut 等^[15,20]在研究混合层时列举的实例. 图 1a 为存在障碍层的示意图. 以温度作为判据时计算的 ILD 为 $D_{T-0.2}$, 以密度判据时计算的 MLD 为 D_σ , 故障层的厚度为 $D_{T-0.2} - D_\sigma$, 可见在障碍层内温度基本不变, 但密度已经发生了较大的变化, 用 $D_{T-0.2}$ 作为混合层深度显然偏大, 取 D_σ 则更准确; 图 1b 为存在补偿层时的示意图, 以温度作为判据时计算得到的 ILD 为 210 m, 以密度判据时计算的 MLD 为 280 m, 所以补偿层厚度为 70 m, 补偿层内密度基本不变, 但温度发生了较大的变化, 所以混合层的深度应该取 210 m. 从以上的分析可知, 混合层深

度的确定受 BL 和 CL 的影响, 所以本文首先用温度判据计算 ILD, 再用密度判据计算 MLD, 判断是否存在 BL 和 CL, 最终确定出合成的混合层深度.

3.2 混合层深度算法

根据 3.1 节的定义, 本文采用下述算法^[21]计算混合层深度. 该方法以 10 m 作为初始参考层, 计算过程中能够动态调整参考温度值或参考密度值, 对于存在逆温层或者多个温度跃层有比较好的适应性. 图 2 是计算方法的示意图, 图 2a 采用定义 1 计算 ILD, 图 2b 用定义 2 计算 MLD.

结合图 2b, 下面以密度判据为例说明该方法的具体计算流程(ILD 的计算方法与此类似). 如图 3 所示.

①选择 10 m 深的密度 σ_{ref} 作为参考密度, 即 $\sigma_{\text{ref}} = \sigma_2$, 下标 2 表示第二个标准深度 10 m;

②根据 $\Delta\sigma = \sigma(T_2 - \Delta T, S_2, P_0) - \sigma(T_2, S_2, P_0)$ 计算出密度差 $\Delta\sigma$, 其中 T_2 和 S_2 分别为第二个标准深度 10 m 深处的温度和盐度, 温度差值 $\Delta T = 0.5^\circ\text{C}$, P_0 为海表面压强, 且取 $P_0 = 0$, 计算海水密度采用 UNESCO1980 海水状态方程;

③寻找密度均匀层, 更新参考密度值. 从 10 m 处(即 $n=2$) 开始, 判断 n 和 $n+1$ 层相邻两层之间的密度差是否小于 $0.1\Delta\sigma$, 若密度差小于 $0.1\Delta\sigma$, 则认为是均匀层, 并且用第 n 层的密度 σ_n 作为新的参考密度 σ_{ref} , 此时 $\sigma_b = \sigma_{\text{ref}} + \Delta\sigma$ 是 MLD 底的密度, 线性插值得 $\text{MLD} = H_n + (\sigma_b - \sigma_n) / (H_{n+1} - H_n)$.

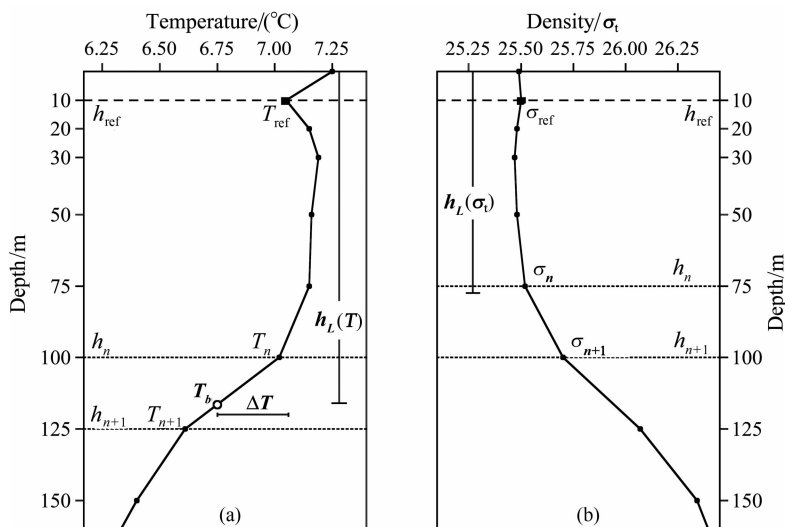


图 2 (a) 用温度判据计算的 ILD($h_L(T)$); (b) 用密度判据计算的 MLD($h_L(\sigma_t)$) 的示意图(引自 Kara 等^[21])

Fig. 2 A schematic illustration of the ILD($h_L(T)$) based on temperature criteria and MLD($h_L(\sigma_t)$) based on density criteria (from Kara et al., 2002)

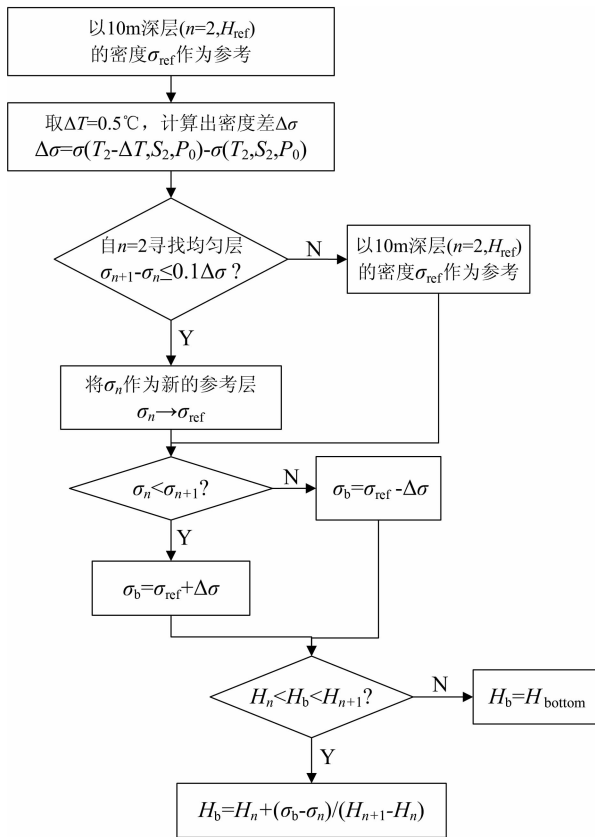


图3 计算 MLD 的流程图

Fig. 3 Flow chart of calculating MLD

4 结果与讨论

4.1 全球大洋混合层深度的空间分布特征

根据上述方法,图 4a 和图 4b 分别为利用 Argo 网格化数据计算得到的 ILD 和 MLD 的各月平均分布,图 4c 为 ILD-MLD 的值,正值区为障碍层,负值区为补偿层. 在讨论混合层深度时空变化特征时,根据 Levitus 的定义^[22],将北半球的季节划分如下:1—3 月为冬季,4—6 月为春季,7—9 月为夏季,10—12 月为秋季. 从图 4a 和图 4b 可以发现,ILD 和 MLD 的分布非常相似,都能揭示全球大洋混合层深度的基本分布特征,如北太平洋、北大西洋以及南大洋的混合层冬深夏浅的季节变化等. 在大部分海域,ILD 和 MLD 都能得出比较一致的混合层深度. 但是在某些海域两者存在着较大的深度差异,结合图 4c 可见,在赤道西太平洋(10°S—5°N, 150°E—150°W),孟加拉湾,热带西大西洋(10°N—20°N, 30°W—60°W),ILD 都大于 MLD,即是障碍层高发的区域,尤其是在冬季的高纬度地区如北太平洋(40°N 以北)和拉布拉多海以及南大洋副极地海域

(45°S 以南),混合层深度都超过了 300 m,说明单纯依靠温度判据计算的 ILD 在定义混合层深度时会出现很大偏差. 冬季的北太平洋副热带地区(30°N 附近)以及东北大西洋(40°N—60°N, 0°—30°W)区域,MLD 则大于 ILD,存在着补偿层. 因此,根据 3.1 节的分析,存在障碍层的区域,以 MLD 作为该区域的混合层深度,同理存在补偿层的区域,以 ILD 作为该区域的混合层深度,这样综合了定义 1 和定义 2,消除障碍层和补偿层的影响,得到较为合理的全球大洋混合层深度,即合成混合层深度(Hybrid MLD).

图 4d 为合成的全球大洋混合层深度(为讨论方便,除非特别说明,下文将合成的混合层深度简称为 MLD)的各月平均分布. 最显著的特征是在各个半球的夏季 MLD 都比较浅,而在各个半球的冬季 MLD 则普遍比较深,而且大致呈纬向带分布. 夏季,北太平洋和北大西洋的 MLD 的分布很相似,从高纬度向中低纬度,北大西洋延伸至 10°N,太平洋则延伸到 30°N,MLD 都逐渐变浅;冬季,北太平洋和北大西洋的 MLD 都比较深,尤其是北大西洋从 40°N 向极地的区域,MLD 的最大深度大于 300 m,并且从 1 月维持到 4 月,从春季到夏季 MLD 逐渐变浅,从秋季到冬季则重新成为深 MLD 区域. 相对而言,冬季副极地太平洋 MLD 没有同纬度大西洋的深,主要是在北太平洋因降水和下层水上翻形成了盐度跃层^[19]. 在强的西边界流地区如黑潮和湾流在冬季 MLD 最深,到夏季则很快地变浅. 印度洋上夏季受西南季风控制,冬季受东北季风控制,季风和与之相关的感热、潜热通量是影响印度洋 MLD 的主要因素,尤其在阿拉伯海海域,受季风影响,MLD 的季节变化非常显著. 在赤道海域特别是在赤道西太平洋上,在冬季有一个浅 MLD 舌,向南延伸到约 20°S 的位置,结合图 4c,在该海域也是障碍层频发的地区^[20],到夏季浅 MLD 舌则消失. 40—60°S 的南大洋上明显的特征是 MLD 普遍较深,且呈纬向带分布,贯穿全球. 在南半球高纬度,这是因为高纬度地区热膨胀系数很小,盐度的变化作用相对就更大一些,形成了稳定的层结. 在 60°S 以南,MLD 则全年小于 20 m,这主要是由于南极大陆的淡水注入,使得靠近南极大陆边缘海的 MLD 很浅. 以上分析揭示了全球大洋平均 MLD 的水平时空分布特征,受季风、海气间的热交换等影响,MLD 存在着明显的季节性变化.

图 5a 和图 5b 分别选取了 160°E 和 30°W 两个

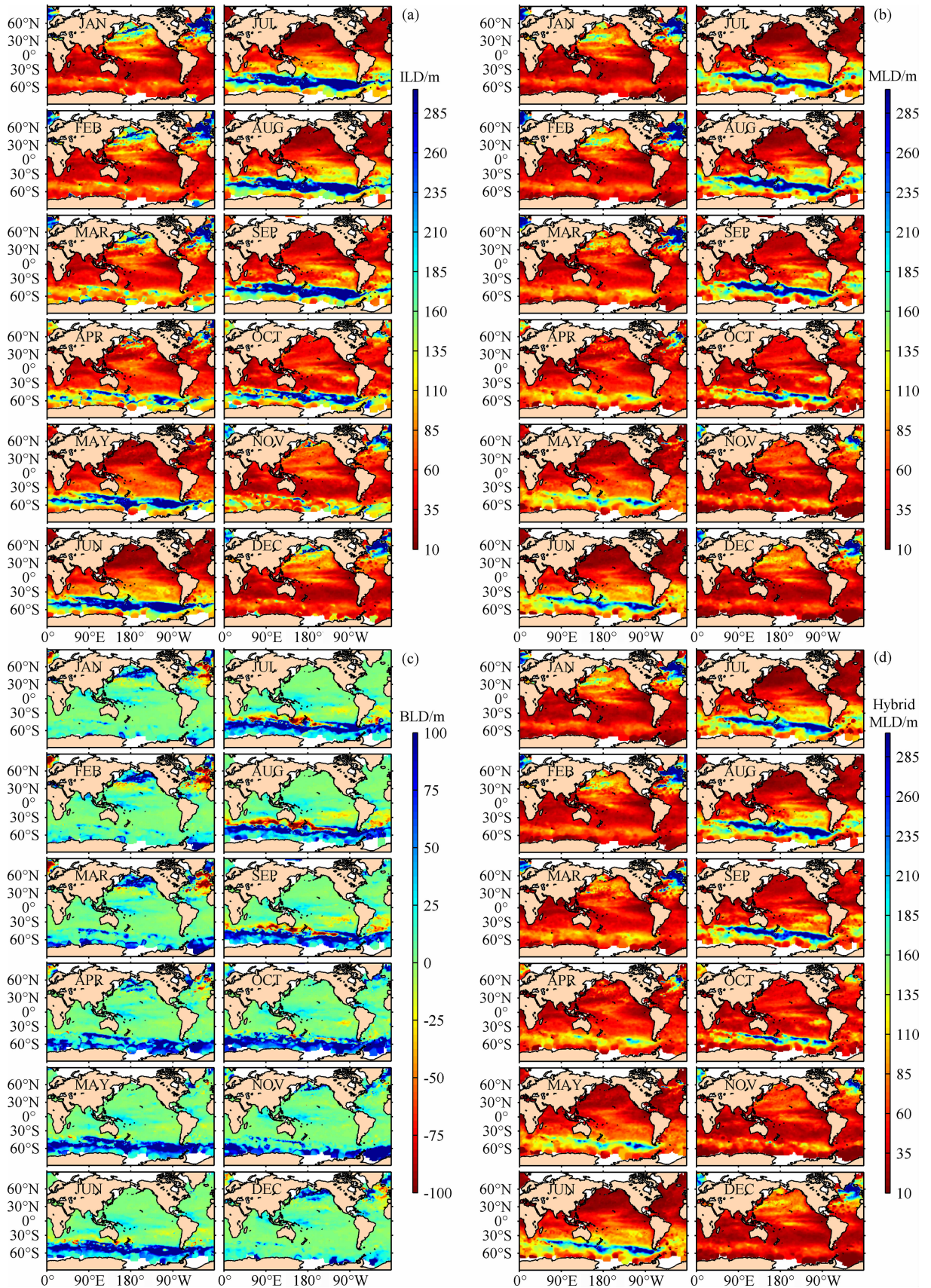


图4 基于Argo网格化数据计算的2005—2009年逐月平均的(a)ILD、(b)MLD、(c)ILD-MLD和(d)合成MLD分布

Fig. 4 Monthly mean (a) ILD, (b)MLD, (c)ILD-MLD and (d)Hybrid MLD calculated from Gridded-Argo data over the period 2005—2009

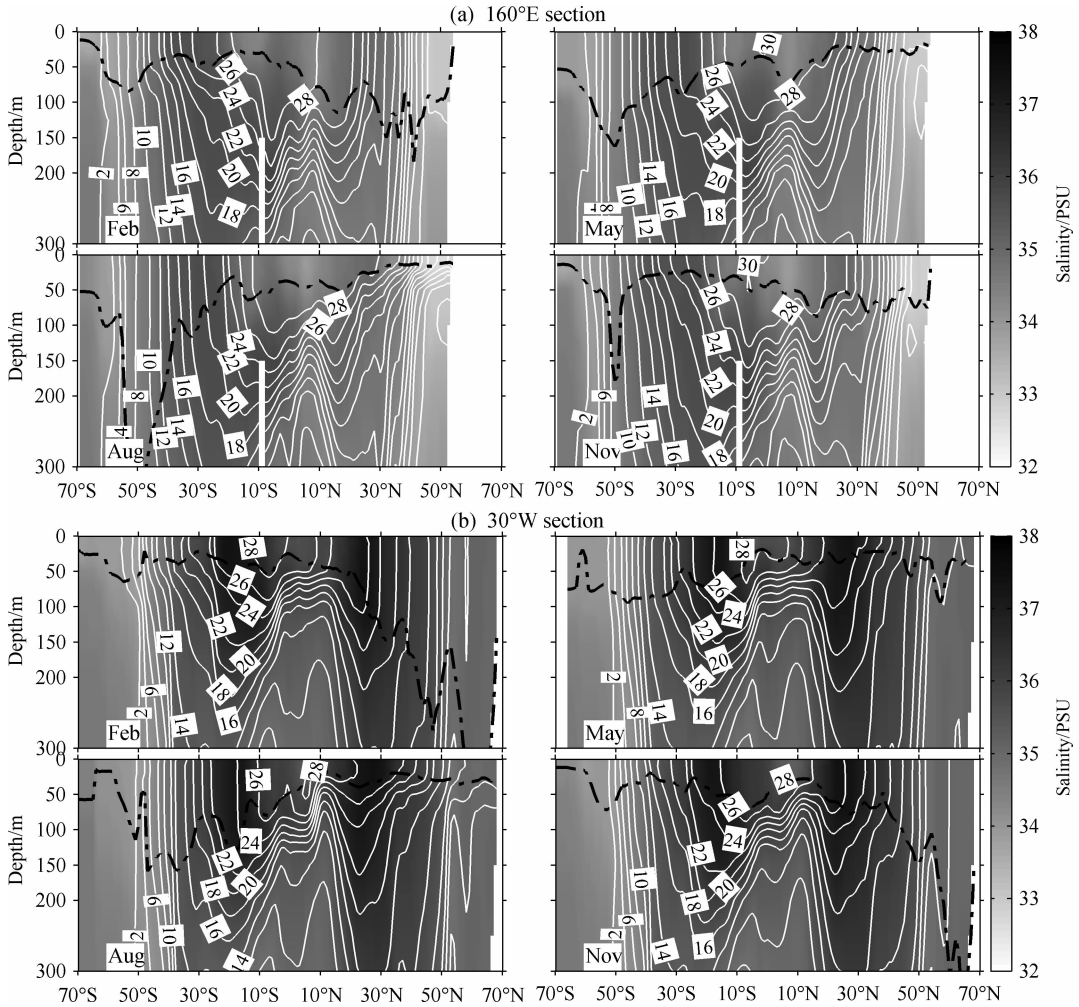


图 5 经向断面上的温度、盐度、MLD 特征, (a)160°E; (b)30°W

(白色等值线为温度, 间隔 2°C, 颜色为盐度, 黑色点划线为混合层深度)

Fig. 5 Temperature, Salinity and MLD features in 160°E (a) and 30°W (b) meridional sections

(white contours denote temperature with interval 2°C, color denotes salinity, black dot line denotes MLD)

经向断面, 给出温度、盐度和 MLD 月平均分布图 (只给出 2、5、8、11 月, 以分别代表冬春夏秋四季), 讨论其垂直时空分布。其中, 160°E 位于太平洋, 30°W 位于大西洋。在 160°E 断面上清楚的看到: 在这四个月份中, 10°N—20°N 的混合层深度基本上与等温线平行或者重合, 位于 30°N—40°N 的 MLD 随月份变化比较大, 冬季赤道以北 MLD 加深, 到春季逐渐变浅, 在夏季则最浅, 到秋季又逐渐变深; 赤道以南 MLD 变化和赤道以北相反, 在 30°W 断面上季节变化与 160°E 类似。MLD 的这种变化显然是受到海表动力(风、流等)和热力(太阳辐射, 蒸发等)因素的作用, 引起湍流混合强度变化造成的。在北半球冬季, 海面风大浪高, 海面降温增密引起海水强烈湍流混合, MLD 厚度增加。在北半球夏季, 海面风小, 海面增温密度减小, 海水对流减弱, MLD 变薄。从两个经向剖面可以发现: 在副极地地区, MLD 都比

较深, 向低纬度地区, MLD 逐渐变浅。太平洋和大西洋的 MLD 的经向分布大致呈现出“两端深, 中间浅”的拱形特点。

4.2 全球大洋混合层深度的时间变化特征

从 4.1 节分析可知, MLD 空间分布很不均匀, 在夏季半球能够小于 20 m, 而冬季副极地海区则可以超过 300 m, 而且 MLD 的空间分布与时间变化关系密切, 如年变化、年际尺度变化以及季节变化和季节内变化等。为揭示 MLD 的季节变化特征, 图 6 选取了全球各大洋的特定点 MLD 的逐月变化进行分析。在 1—6 月, 6—12 月两个时间段里, 印度洋和赤道海域的 MLD 都存在着深-浅-深的变化, 呈现出明显的半年周期, 这可能与印度洋季风和赤道辐合带的半年变化有关。热带海域和南极海域的 MLD 全年存在着浅-深-浅的变化, 北太平洋和北大西洋的 MLD 全年则存在着深-浅-深的变化, 即冬季深, 夏

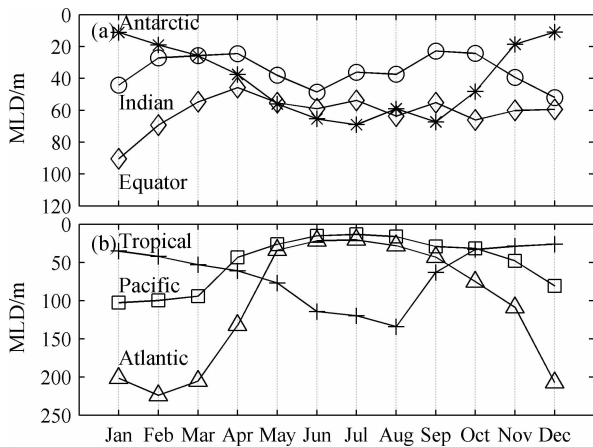


图 6 全球大洋特定海域平均 MLD 的逐月变化:(a) 南极(70°S,90°W)、印度洋(10°N,55°E)、赤道海域(1°S,170°E) (b) 热带海域(20°S,140°W)、太平洋(45°N,160°E)、大西洋(45°N,30°W)

Fig. 6 Monthly changes of MLD at selected locations in the global ocean: (a) Antarctic(70°S, 90°W), Indian Ocean(10°N, 55°E), and Equator(1°S, 170°E); (b) Tropical Ocean (20°S, 140°W), Pacific Ocean (45°N, 160°E), and Atlantic Ocean(45°N, 30°W)

季浅的季节性周期. 这与太阳辐射、风力搅动有关.

全球大洋混合层深度的平均时空分布在各海域不一致,借助 EOF 分解及总体小波功率谱分析,对全球大洋混合层深度的年变化特征进行研究. 图 7 是 2005—2009 年 MLD 的距平值第一和第二 EOF

模态及其相应的主成分时间序列和小波功率谱检验,前两个模态的方差贡献率达到 87.1%,时间序列已通过各自标准差进行标准化. 图 7(a1)是第一模态特征向量的空间型分布,该模态的解释方差占整体方差的 74.8%,其反映了全球平均 MLD 变化的主要形式. 其在大部分海域的距平值位于 0 附近,南北大洋呈现出偶极型的分布,北太平洋和北大西洋、南大洋(尤其是南极绕流区)都是 MLD 变化剧烈的海域,这一点在图 4d 和图 6 中已经得到证实. 结合图 7(a2),主模态的时间序列呈现非常规律的波动,说明每年的冬季和夏季 MLD 交替变化. 从图 7(a3)小波功率谱分析可以看到,该模态主要存在一个显著的约为 1 年(12 个月)的变化周期.

图 7(b1)是第二模态特征向量的空间型分布,该模态的解释方差占整体方差的 12.3%,变化显著的区域整体上与第一模态相似,但是呈现出单一极型. 图 7(b2)所示的时间序列包含了更高频的变化信息,每年内基本上都有两个周期,结合图 7(b3)的小波功率谱分析可以看出,存在显著的半年(6 个月)周期信号. 另外,还可以看到 2005—2006 年全球混合层深度为负距平,2007—2009 年全球混合层深度逐渐变为正距平,这包含了一个长期的变化趋势. 图 7(b3)中显示该模态还存在着一个约为 10 年的变化周期,但是需要更长时间的资料予以验证.

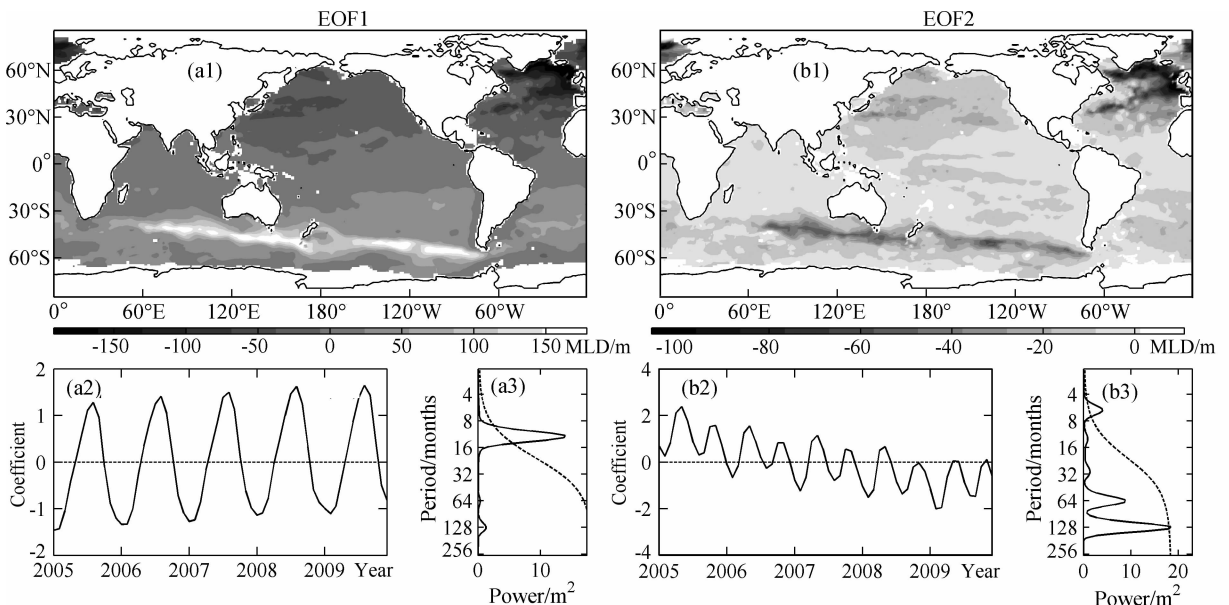


图 7 2005—2009 年 MLD 距平场 EOF 展开的第一模态(a)和第二模态(b)

(a1, b1)为空间型;(a2, b2)为标准化后的时间系数序列;(a3, b3)为总体小波功率谱(实线)及其显著性(虚线).

Fig. 7 The first and second modes of the MLD anomaly over the period 2005—2009

(a1), (b1) are the spatial patterns; (a2), (b2) are the normalized time coefficients series; (a3), (b3) are the wavelet power spectrums (solid line for power, dashed line for 95% confidence level).

5 结 论

本文通过采用温度判据和密度判据,分别计算全球大洋混合层深度,比较了存在障碍层和补偿层时混合层计算存在的差异,得到了合成的混合层,然后分析全球大洋的平均 MLD 的空间和时间变化特征. 研究表明:

(1)在赤道西太平洋($10^{\circ}\text{S}-5^{\circ}\text{N}$, $150^{\circ}\text{E}-150^{\circ}\text{W}$), 孟加拉湾, 热带西大西洋($10^{\circ}\text{N}-20^{\circ}\text{N}$, $30^{\circ}\text{W}-60^{\circ}\text{W}$)是障碍层高发区域. 冬季的北太平洋副热带区域(30°N 附近)以及东北大西洋($40^{\circ}\text{N}-60^{\circ}\text{N}$, $0^{\circ}-30^{\circ}\text{W}$)是补偿层发生的区域.

(2)北太平洋和北大西洋的 MLD 存在冬深夏浅的季节性变化,这可能与海表动力(风、流等)和热力(太阳辐射,蒸发等)因素有关. MLD 的经向分布大致呈现出“两端深,中间浅”的拱形特点. 印度洋和赤道海域则呈现半年周期变化.

(3)混合层深度距平场 EOF 分解的第一模态显示北太平洋和北大西洋、南大洋(尤其是南极绕流区)都是 MLD 变化剧烈的海域,全球大洋的混合层深度变化主要以一年周期为主,第二模态显示全球大洋混合层深度距平存在着一个半年的变化周期.

本文虽然揭示了 MLD 变化一些特征,得到一些有益的结论,但是对于影响其变化的因素和更大尺度的时空变化特征有待进一步研究.

致 谢 国家海洋信息中心制作的全球 Argo 网格化产品提供的数据支持,评审专家为文章修改提出的宝贵意见,在此一并致谢!

参考文献(References)

[1] 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. 海洋科学进展, 2007, 25(3): 280-288.
Sun Z Y, Liu L, Yu W D. Study on seasonal variations in the tropical Indian Ocean mixed layer depth derived from Argo float data. *Advances in Marine Science* (in Chinese), 2007, 25(3): 280-288.

[2] Masson S, Delecluse P, Boulanger J P, et al. A model study of the seasonal variability and formation mechanisms of the barrier layer in the eastern equatorial Indian Ocean. *J. Geophys. Res.*, 2002, 107 (C12): 8017, doi: 10. 1029/2001JC000832.

[3] Kara A B, Wallcraft A J, Hurlburt H E. Climatological SST and MLD predictions from a global layered ocean model with an embedded mixed layer. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 2003, 20(11): 1616-1632.

[4] 施平, 杜岩, 王东晓等. 南海混合层年循环特征. 热带海洋学报, 2001, 20(1): 10-17.
Shi P, Du Y, Wang D X, et al. Annual cycle of mixed layer in South China Sea. *Journal of Tropical Oceanography* (in Chinese), 2001, 20(1): 10-17.

[5] Ohno Y, Kobayashi T T, Iwasaka N, et al. The mixed layer depth in the North Pacific as detected by the Argo floats. *Geophys. Res. Lett.*, 2004, 31 (11): L11306, doi: 10. 1029/2004GL019576.

[6] 芦静, 乔方利, 魏泽勋等. 夏季海洋上混合层深度分布研究—Argo 资料与 Levitus 资料的比较. 海洋科学进展, 2008, 26(2): 145-155.
Lu J, Qiao F L, Wei Z X, et al. Study on distributions of Mixed Layer Depth in the world ocean in summer—comparison between Argo data and Levitus data. *Advances in Marine Science* (in Chinese), 2008, 26(2): 145-155.

[7] 李泓, 李丽平, 王盘兴等. 太平洋混合层厚度(dml)年际异常的初步分析. 南京气象学院学报, 2003, 26(5): 646-652.
Li H, Li L P, Wang P X, et al. A study about interannual snomalies of Mixed Layer Depth in the Pacific. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 2003, 26 (5): 646-652.

[8] 巢纪平, 王彰贵. 简单的热带海气耦合波-Rossby 波的相互作用. 气象学报, 1993, 51(4): 385-393.
Chao J P, Wang Z G. Simple air-sea coupled waves in the Tropics—The interaction between Rossby waves. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1993, 51(4): 385-393.

[9] 赵永平, 陈水利, 王凡等. 热带太平洋海洋混合层水体振荡与 ENSO 循环. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2007, 37(8): 1120-1133.
Zhao Y P, Chen S L, Wang F, et al. Tropical Pacific Ocean mixed layer water oscillation and ENSO cycle. *Science in China (Series D: Earth Sciences)* (in Chinese), 2007, 37 (8): 1120-1133.

[10] 潘爱军, 万小芳, 许金电等. 南海东北部障碍层特征及其形成机制. 科学通报, 2006, 51(8): 951-957.
Pan A J, Wan X F, Xu J D, et al. Study about the character and forming mechanism of the barrier layer in northeastern South China Sea. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 2006, 51(8): 951-957.

[11] Brainerd K E, Gregg M C. Surface mixed and mixing layer depths. *Deep. Sea. Research Part I.*, 1995, 42(9): 1521-1543.

[12] 贾旭晶, 刘秦玉, 孙即霖等. 1998 年 5-6 月南海上混合层、温跃层不同定义的比较. 海洋湖沼通报, 2001, 10(1): 1-7.
Jia X J, Liu Q Y, Sun J L, et al. A comparison between two different definitions of the mix layer and the thermocline in the South China Sea. *Transactions of Oceanology and Limnology* (in Chinese), 2001, 10(1): 1-7.

[13] 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. 北京: 中国标准出版社, 1992.
AQSIQ. GB/T 12763. 7—1991 The Specification for

- Oceanographic Survey-Oceanographic Survey Data Processing (in Chinese). Beijing: Standards Press of China, 1992.
- [14] Sprintall J, Tomczak M. Evidence of barrier layer in the surface layer of tropics. *J. Geophys. Res.*, 1992, 97(C5): 7305-7316.
- [15] de Boyer Montégut C, 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. Geophys. Res.*, 2004, 109(C12): C12003, doi: 10. 1029/2004JC002378.
- [16] 国家海洋信息中心. Argo 网格化产品用户手册, 2011: 6pp. National Marine Data and Information Service. Users' Manual of Gridded Argo product (in Chinese), 2011: 6pp.
- [17] Wong A P S, Johnson G C, Owens W B. Delayed-mode calibration of autonomous CTD profiling float salinity data by θ -S climatology. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 2003, 20(2): 308-318.
- [18] Owens W B, Wong A P S. 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*, 2009, 56(3): 450-457.
- [19] Kara A B, Rochford P A, Hurlburt H E. Mixed layer depth variability over the global ocean. *J. Geophys. Res.*, 2003, 108(C3): 3079, doi: 10. 1029/2000JC000736.
- [20] de Boyer Montégut C, Mignot J, Lazar A, et al. Control of salinity on the mixed layer depth in the world ocean: 1. General description. *J. Geophys. Res.*, 2007, 112: C06011, doi: 10. 1029/2006JC003953.
- [21] Kara A B, Rochford P A, Hurlburt H E. Naval research laboratory Mixed Layer Depth (NMLD) climatologies. NRL Rep. NRL/FR/7330-02-9995, 2002: 26 pp.
- [22] Levitus S. Climatological Atlas of the world ocean. *Eos Trans. AGU*, 1983, 64 (49): 962, doi: 10. 1029/EO064i049p00962-02.

(本文编辑 胡素芳)