

全球海洋混合层深度和障碍层厚度计算及其时空变化特征分析

邢霄波^{1,2}, 贾永君³, 王斌^{1,2*}, 李亚文^{1,2}, 党超群^{1,2}, 胡锦涛^{1,2}, 吴宝勤⁴, 朱先德⁴

(1. 国家海洋技术中心, 天津 300112; 2. 自然资源部海洋观测技术重点实验室, 天津 300112; 3. 国家卫星海洋应用中心, 北京 100081; 4. 中国人民解放军 92859 部队, 天津 300061)

摘 要: 基于 2002—2019 年的 Argo 温盐数据计算得到海洋混合层深度 (MLD) 和障碍层厚度 (BLT), 利用阈值法在计算过程中设置不同的温度阈值 $\Delta T_1=0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $\Delta T_2=0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 并分别利用温度、密度以及由温度和密度计算得到全球海洋的 MLD 和 BLT 值, 基于此描述不同温度阈值下得到的全球海洋混合层和障碍层分布特征。结果表明: 不论阈值是 ΔT_1 还是 ΔT_2 , 基于温度和密度的计算结果较基于温度参数或密度参数的结果更为可靠。利用温度参数或密度参数计算得到的 MLD 值, 不论是 MLD_T 还是 MLD_D 都能够在一定程度上体现全球海洋 MLD 的分布特征, 两者在赤道附近和低纬度海域结果的一致性较好, 在高纬度海域差异较大。基于阈值 $\Delta T_2=0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的结果比基于阈值 $\Delta T_1=0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的结果与现有 MLD 数据的相关性更高, 但是均方根误差也更大, 可能是由于不同海域适合的阈值选择不同, 需进一步计算分析。全球海洋 BLT 较南北半球高纬度海域 BLT 值更大, BLT 值随着纬度的降低而减小, 空间分布特征在不同海域均存在明显差异, 总体来说 BLT 随着纬度的降低而减小。

关键词: 全球海洋; 混合层深度; 障碍层厚度; 时空特征

中图分类号: P731.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2024)05-0062-15

0 引言

海洋表层海域受到波浪、潮汐和热对流等物理过程的影响, 海水会发生垂向运动, 海水上层会形成一个温度、盐度和密度变化小且较为均匀的混合层 (Mixing Layer, ML) 和一个相对混合层较冷、温度急剧下降的温跃层。由于海洋表层海水盐度层结的存在, 阻碍了密度混合层和湍流等垂直运动向更深层海域的发展, 进而在等密层和温跃层形成一个新的水层, 该层即为障碍层 (Barrier Layer, BL)^[1-4]。温度混合层深度小于密度混合层深度的海洋层则为补偿层 (Compensated Layer, CL)。

障碍层的垂向温度几乎保持不变, 但其层内的海水密度则随着深度的加深而变大, 层结作用增强, 阻碍了混合层和温跃层的热量和动量交换, 进而影响海洋表层水温^[5-6]。混合层和障碍层的时空

变化特征对海洋表层海水结构有着重要影响, 是海洋学者们长期关注和研究的海洋物理现象。美国国家海洋和大气管理局 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 发布并更新的世界气候学地图集已被广泛用于全球海洋表层混合层及障碍层的研究^[7]; Argo (Array for Real-Time Geostrophic Oceanography) 全球海洋观测网温盐观测数据的增多及数据垂向分辨率高、覆盖范围广等特点也给混合层深度研究带来巨大的改变, 可以帮助越来越多的科学家更好地研究海洋混合层深度 (Mixed Layer Depth, MLD) 和障碍层的厚度 (Barrier Layer Thickness, BLT)^[2] 的时空分布特征^[7-9]; ALRADDADI 等^[10] 通过红海中部的 Argo 数据研究了该地区的 MLD 变化, 结论表明 MLD 存在明显的季节变化规律; HOSODA 等^[11] 利用 2001—2009 年的 Argo 观测数据, 基于不同的阈值计算了全球的

收稿日期: 2023-06-07。

基金项目: 自然资源部海洋环境信息保障技术重点实验室开放基金课题; 自然资源部海洋观测技术重点实验室定向基金 (2022klootB01)。

作者简介: 邢霄波 (1994-), 女, 研究实习员, 硕士, 主要从事海洋观测数据处理与应用工作。E-mail: 15632779253@163.com

*通信作者: 王斌 (1984-), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事海气界面观测技术与数据应用工作。E-mail: notc_bwang@163.com

MLD 并进行比较,分析讨论了 MLD 的变化特征;TOYODA 等^[12]利用全球海洋再分析集合,通过经验正交函数(Empirical Orthogonal Function, EOF)分析,对北太平洋的冬季 MLD 进行了年际-年代际变化研究,结果表明 MLD 与太平洋十年涛动指数有关。LIU 等^[13]利用 Argo 观测数据,讨论了海洋动力对亚热带太平洋季节 MLD 变异的影响;GAUBE 等^[14]利用 Argo 浮标数据和同步卫星观测数据对尺度涡进行了分析讨论,结论表明,MLD 与涡旋的海面高度振幅线性相关,并且在冬季出现最大值;XIA 等^[15]针对全球变暖现象对 MLD 气候态分布差异的影响进行了讨论,结果表明全球变暖后出现了 MLD 变浅的现象。由此可见,深入研究分析海洋表层海水混合层和障碍层的时空分布特征,对进一步研究海水三维结构和垂直结构与海洋垂向物理过程之间的关系具有非常重要的意义。

本文基于 Argo 温盐剖面数据,采用不同参数的差值法计算全球海域的混合层深度,进而计算障碍层厚度,并通过设置不同的阈值,分时间(月份、季节、年度)和空间(纬度、海域)对比分析 MLD 的变化特征。

1 数据

1.1 Argo 数据

本文采用的是 Argo 浮标温盐数据集(网址: <https://data-argo.ifremer.fr/>, http://www.argo.ucsd.edu/About_Argo.html)。选取温度、盐度数据,垂向共 58 层,时间范围为 2002—2019 年,空间范围为全球。

首先对数据进行筛选,去除不符合试验要求的剖面数据以及测量中超出或低于实际海水物理性质范围等的剖面数据,共得到 6 583 283 条试验剖面数据,将这些剖面数据作为最终试验数据^[16]。为去除海洋表层异常热力过程影响,本文计算 MLD 时设定参考水深为 10 m,这是符合 Argo 浮标观测设定的深度^[9]。通过线性内插法,将全球 0~1 000 m 水深的温盐资料进行插值,插值为垂直方向间隔 1 m 的试验数据,并对这些数据进行网格化处理,网格分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 。

1.2 验证数据

通过现有的混合层深度产品(网址: <http://mixedlayer.ucsd.edu/>)验证文中计算的 MLD。该产

品是 Argo 数据计算衍生的数据产品,产品使用 Argo 剖面 and 混合方法^[17]编制了混合层气候学和数据库^[18]以查找 MLD。气候学包含近 262 万个 Argo 剖面(2022 年 4 月)。新的混合算法对每个剖面的一般形状建模,搜索剖面中的物理特征并计算 MLD,以组合一套可能的 MLD 值,然后分析套件中的模式以选择最终的 MLD。输出包括 2000 年 1 月—2021 年 3 月收集的近 245 万个延迟模式和实时 Argo 剖面数据,过程中进行了质量控制。基于上述方法,该产品适用于验证算法的有效性。

2 研究方法

2.1 计算混合层深度

对 Argo 数据进行预处理后,利用上述数据,通过选择不同的阈值来计算海洋 MLD 值,阈值分别选择 $\Delta T_1 = 0.2^\circ\text{C}$ 和 $\Delta T_2 = 0.5^\circ\text{C}$ 。利用差值法,根据温度判断时,把低于海表 10 m 温度且符合温度阈值的对应深度标记为 MLD_T ;根据密度判断时,计算低于海表 10 m 处 ΔT_1 、 ΔT_2 的温度值,该温度值与 10 m 处的盐度值用于计算得到海水密度值,将此密度的深度定义为 MLD_D ^[2],密度则由海水状态方程(UNESCO1980)计算得到^[2,5]。

为了更好在下文中论述 MLD 和 BLT 的时空尺度变化特征,定义北半球春季为 3—5 月,夏季为 6—8 月,秋季为 9—11 月,冬季为 12 月—次年 2 月;而南半球春季为 9—11 月,夏季为 12 月—次年 2 月,秋季为 3—5 月,冬季为 6—8 月^[3,5]。依据地理学,将 $0^\circ \sim 30^\circ$ 定义为低纬度, $30^\circ \sim 60^\circ$ 定义为中纬度, $60^\circ \sim 90^\circ$ 定义为高纬度,单独划分 $10^\circ\text{N} \sim 10^\circ\text{S}$ 为赤道^[2]。

2.2 计算障碍层厚度

障碍层定义为基于温度和密度判定的混合层深度之差^[4],即 $\text{BLT} = \text{MLD}_T - \text{MLD}_D$ 。由此可得,当 $\text{MLD}_T = \text{MLD}_D$ 时,温度跃层与密度跃层重合,不存在障碍层或者补偿层,此时混合层深度 $\text{MLD} = \text{MLD}_T = \text{MLD}_D$;当 $\text{MLD}_T < \text{MLD}_D$ 时,温度垂向变化已经通过密度混合层达到了平衡,即可能有补偿层存在,此时 $\text{MLD} = \text{MLD}_T$;反之,当 $\text{MLD}_T > \text{MLD}_D$ 时,即可能有障碍层存在,则 $\text{MLD} = \text{MLD}_D$ ^[2,4,5,9]。综上,在 MLD 值的计算过程中,加入 MLD_T 和 MLD_D

对MLD计算结果的影响,计算得到MLD值^[2]。

3 结果

3.1 月均值结果分析

图1a、1b分别为基于温度、密度参数计算的

MLD月均值分布。从图中可以看到,不论是MLD_T还是MLD_D都能够在一定程度上体现全球海洋MLD的分布特征,如混合层冬深夏浅的变化特征等。在赤道附近等低纬度海域,二者结果的一致性较好,但高纬度海域的差异较大,如4月、6月和8月中高纬度海域存在明显差异(见图1a、1b)。

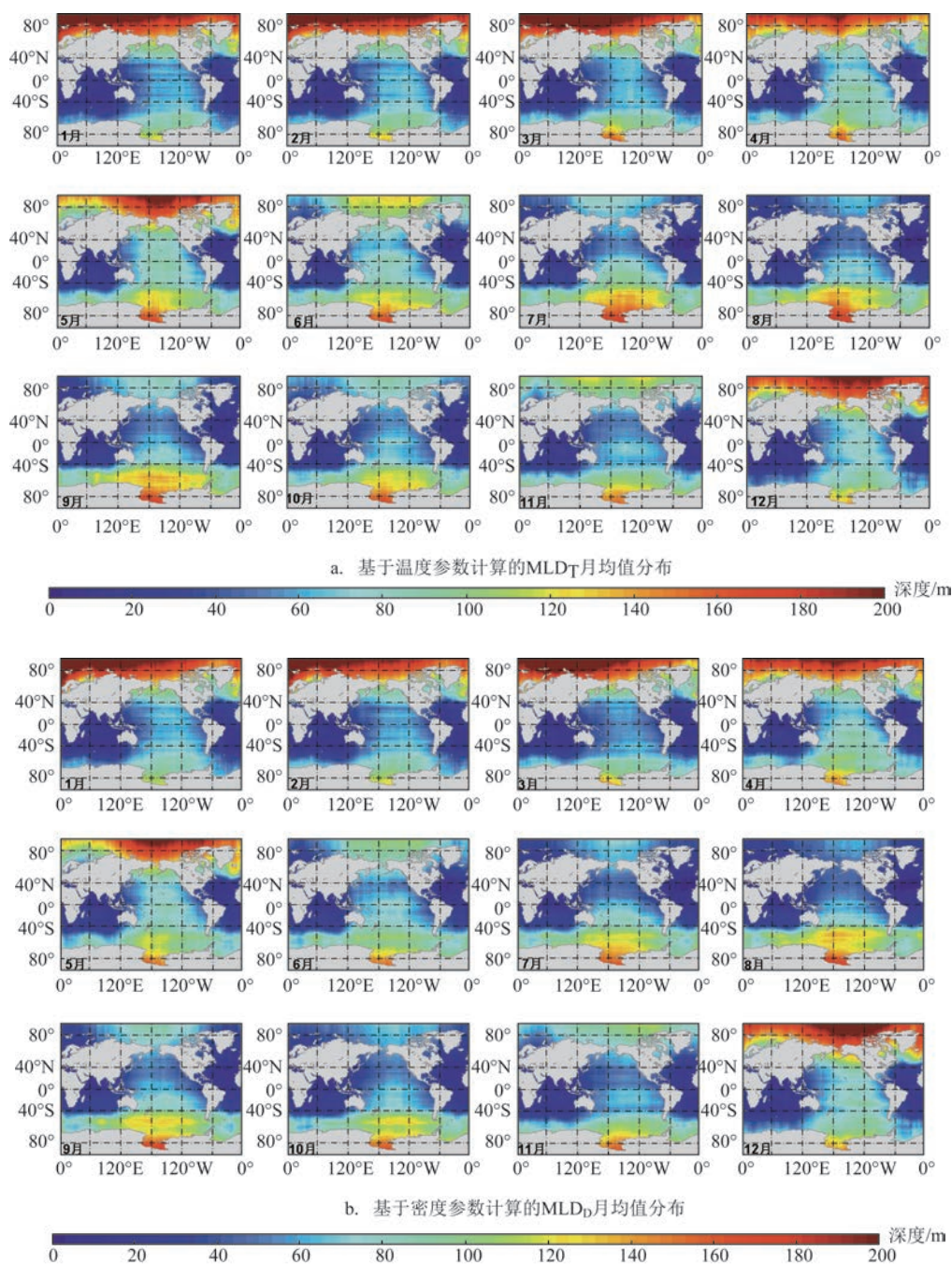


图1 阈值为 ΔT_1 时全球MLD和BLT月均值分布

Fig.1 Distribution of monthly mean MLD and BLT based on ΔT_1

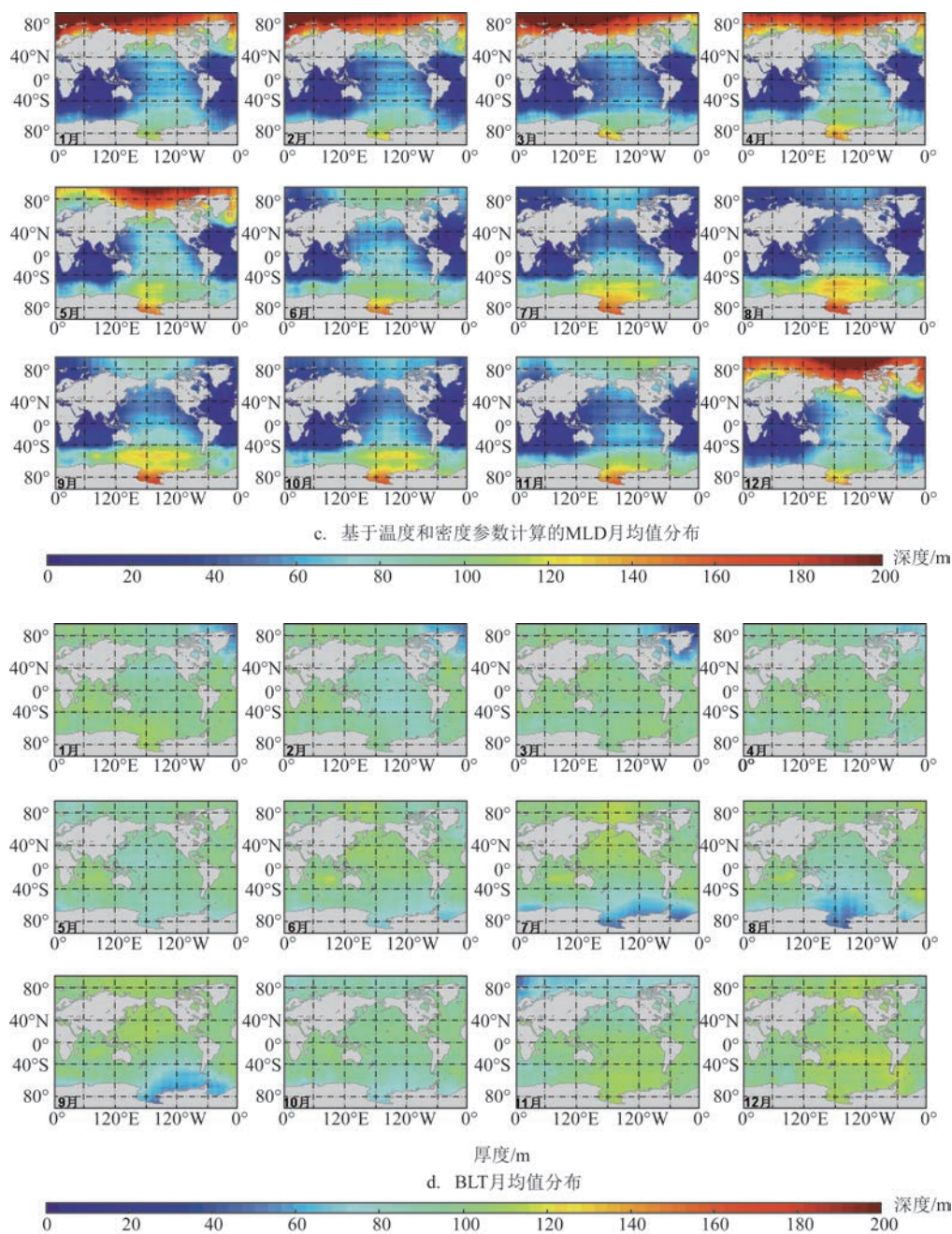


图1 (续)

Fig.1 (Continued)

图1c为阈值 $\Delta T_1 = 0.2^\circ\text{C}$ 时计算得到的全球MLD月均值分布。从图中可以观察到,MLD最浅小于10 m,计算得到的MLD最大值超过300 m。北半球MLD的月均值变化幅度相对较大,尤其是5—6月和11—12月,月均值的变化幅度都在30 m以上。MLD表现为冬季达到最大值,夏季有最小值,秋季北半球MLD的分布相对冬夏两季更均匀,其

他月份北半球MLD值随着纬度由低到高延伸至北部极地海域逐渐增大,7月MLD最小,3月MLD最大可达到320 m。北半球冬季MLD大而夏季小,这可能与在科氏力作用下形成的较强西边界流有关,其对海水温盐结构的影响非常大,海洋水平温度流在副热带东北太平洋MLD的不均匀分布中起着关键作用,不仅影响到混合层深度,还使其具有季节

特征^[5,17]。从图中可以看到,除7—9月外,北太平洋海域MLD普遍大于北大西洋,可能是蒸发降水、风浪等影响了海水垂向运动,导致经向净水通量分布不平衡,从而影响盐跃层的发展^[2,19]。

图1d为全球海洋BLT月均值的分布。观察可知,全球海洋BLT在南北半球高纬度海域较大,并随着纬度的降低而减小,南半球6—10月主要为补偿层。较小的BLT月均值多出现在中低纬度海域,且月变化幅度小,较大的BLT值则多出现在高纬度海域,个别海域达到87 m,且变化幅度较中低纬度

海域大。在高纬度海域,北半球障碍层夏季较薄,冬季较厚,而南半球海域的6—10月主要存在补偿层,障碍层则主要集中在11月—次年5月。综上可知,高纬度海域的BLT可能具有以半年为周期的时间变化规律。

3.2 季节均值结果分析

图2a、2b分别为基于温度参数、密度参数计算得到的MLD季节均值分布。与月均值分布相同的是,利用温度参数、密度参数计算得到的结果同样

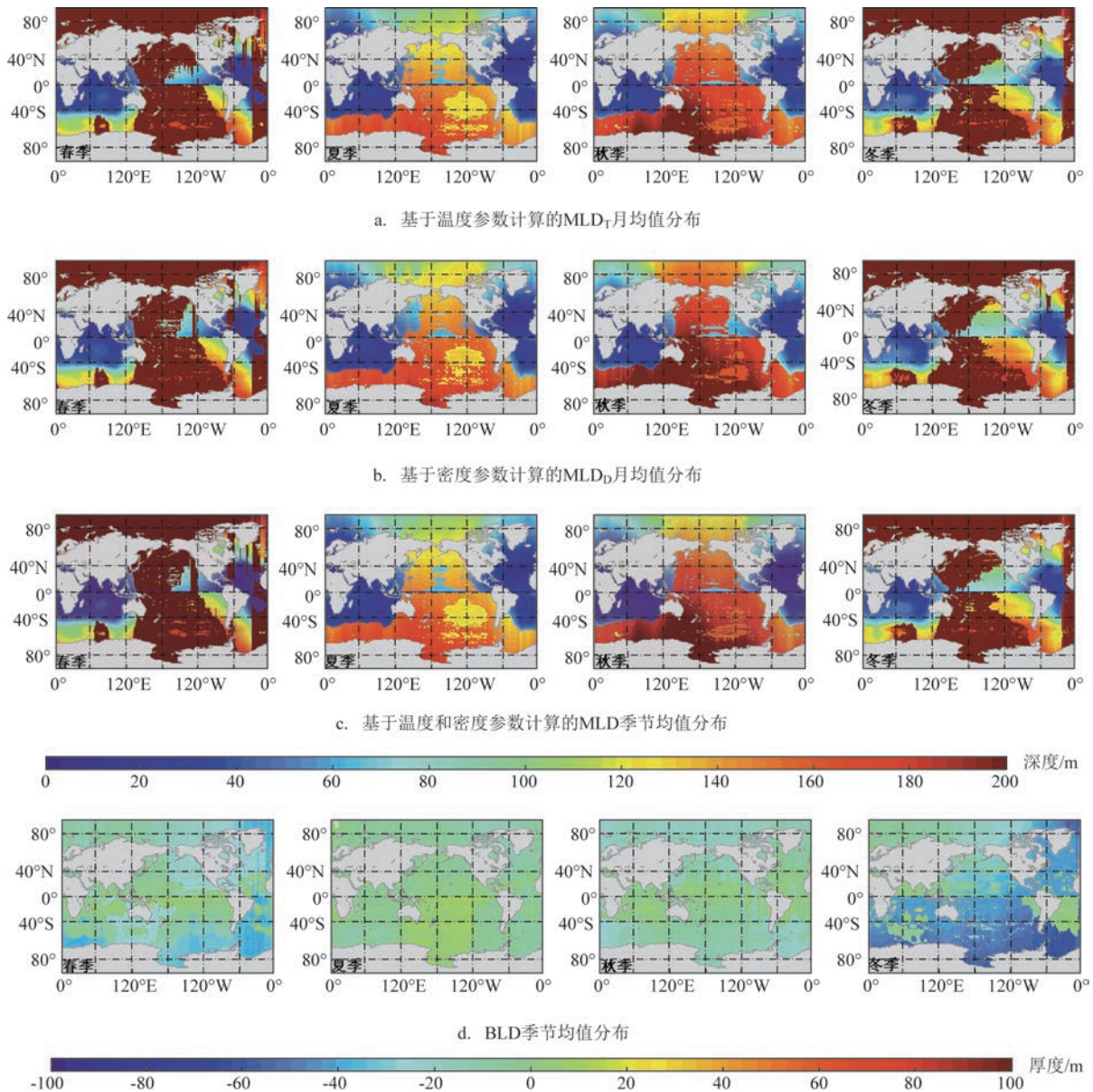


图2 阈值为 ΔT_1 时全球MLD和BLT季节均值分布

Fig.2 Distribution of seasonal mean MLD and BLT based on ΔT_1

能够在一定程度上体现海洋 MLD 在全球的分布特征,但是图 2a 和图 2b 同样存在差异,尤其是中高纬度海域差异较为明显,秋季二者的差值超过 50 m。

图 2c 为基于温度参数和密度参数计算的 MLD 季节均值,结果表明 MLD 具有显著的季节特征,夏季浅、冬季深,秋季与夏季的分布基本一致,但开始逐渐增大,冬季急剧增加,春季与冬季的分布基本一致,但有所变浅。MLD 季节均值的变化可能由海面风、浪等因素引起,即冬季海面风浪大,海洋表层温度降低,密度增大,导致海水在垂向上发生的湍流混合作用加强^[20-21],引起冬季混合层加深;夏季的海风和海浪弱,垂向湍流混合作用减弱,导致夏季混合层

变浅。在经度方向上,MLD 随着经度偏东,高值区中心偏向赤道。从图中可以看到,北冰洋区域的 MLD 具有明显的季节变化,可能主要与海冰的消融有关。

图 2d 为全球海洋 BLT 季节均值的分布。夏秋季两个半球高纬度海域 BLT 较厚,超过 30 m,中低纬度海域 BLT 较薄,冬春季两个半球中高纬度主要为补偿层,低纬度为较薄的障碍层,其中春季较冬季存在障碍层的海域更多,进一步体现了高纬度海域 BLT 以半年为周期的变化规律。

3.3 年均值结果分析

图 3a、3b 分别为基于温度参数、密度参数计算

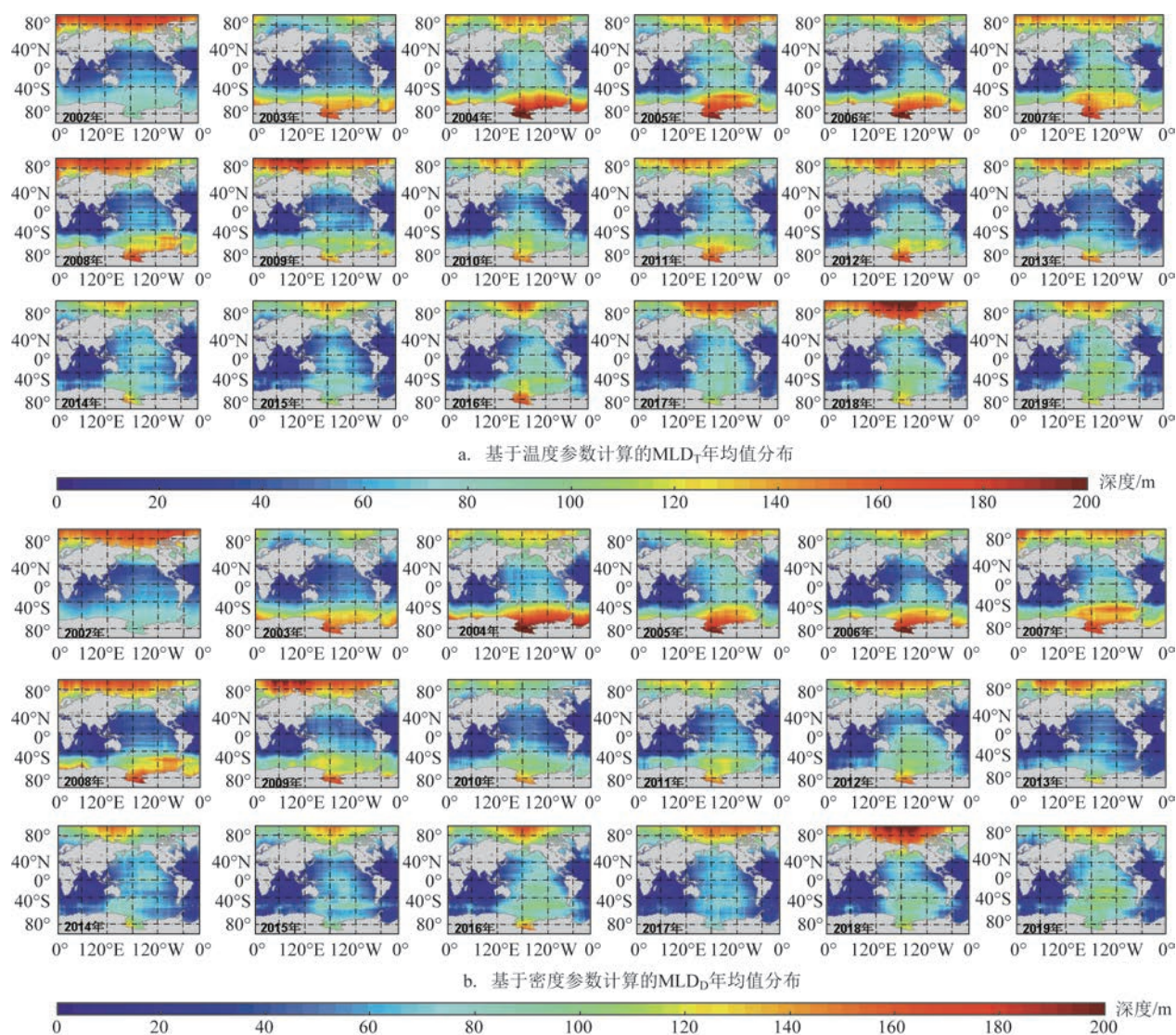


图3 阈值为 ΔT_i 时全球MLD和BLT年均值分布

Fig.3 Distribution of annual mean global MLD and BLT based on ΔT_i

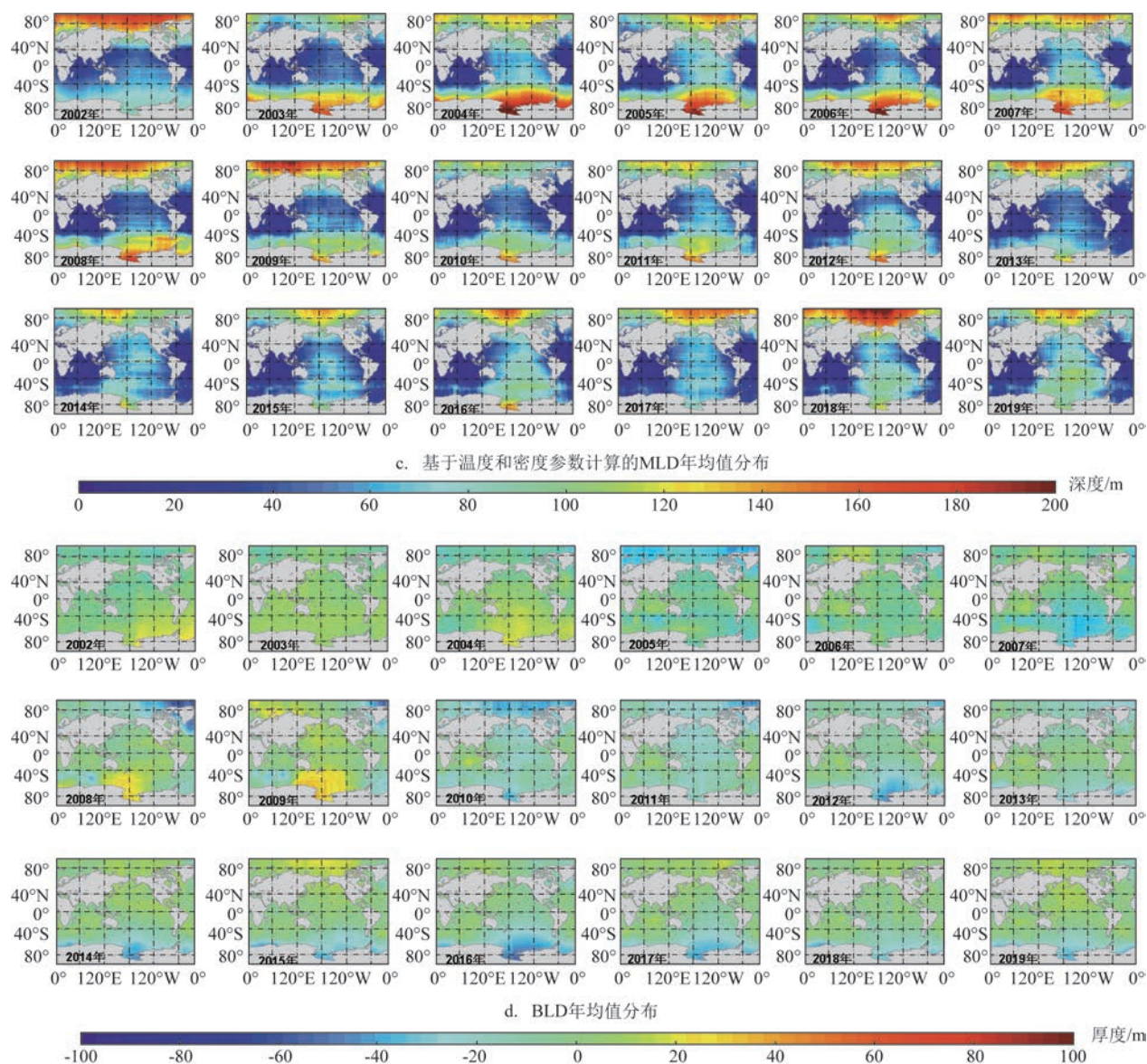


图3 (续)

Fig.3 (Continued)

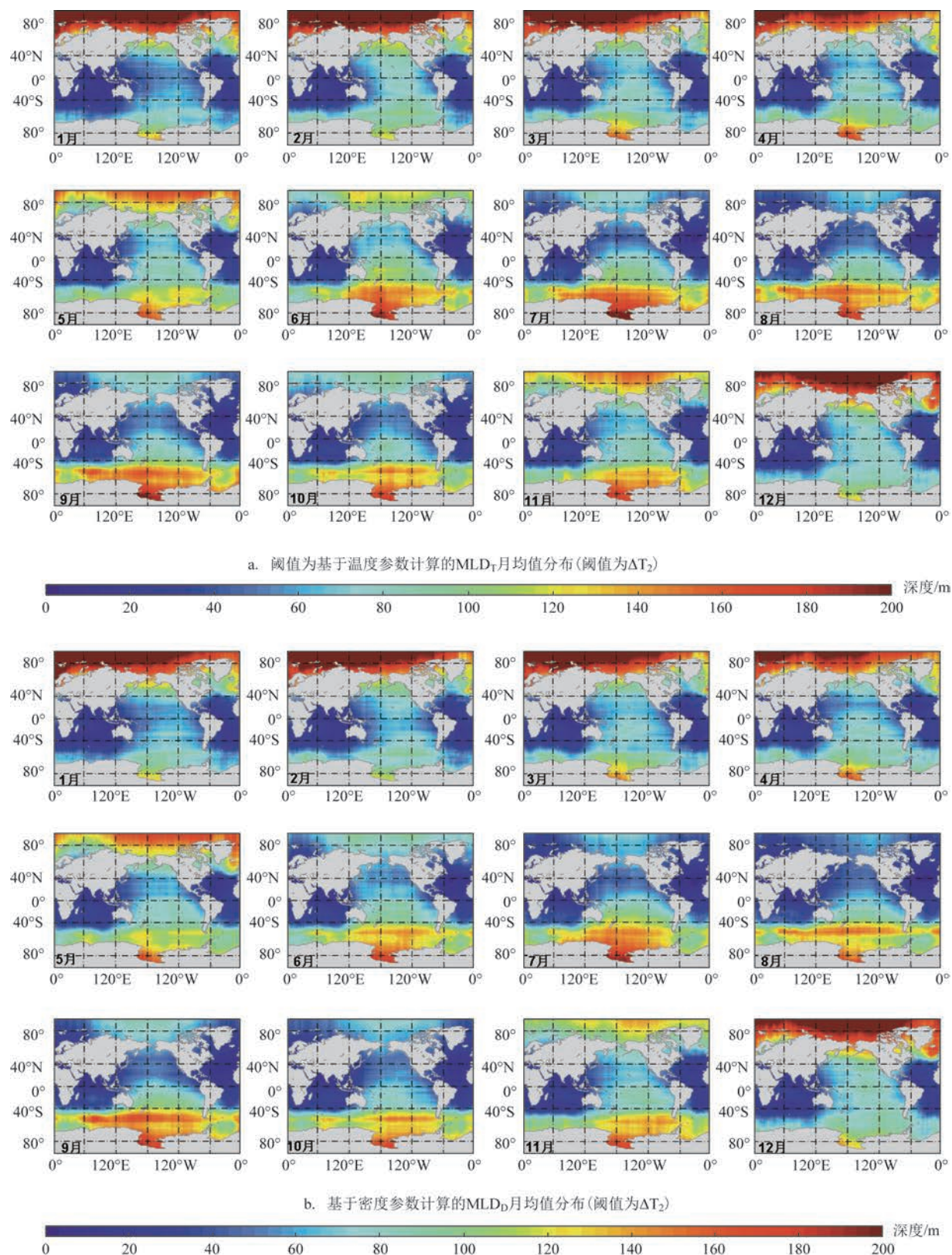
得到的MLD年均值分布,得到的 MLD_T 和 MLD_D 都能在一定程度上体现MLD的全球分布特征。图3a和3b同样存在差异,其中中高纬度的差异较为明显,如2003年、2005年和2017年等。

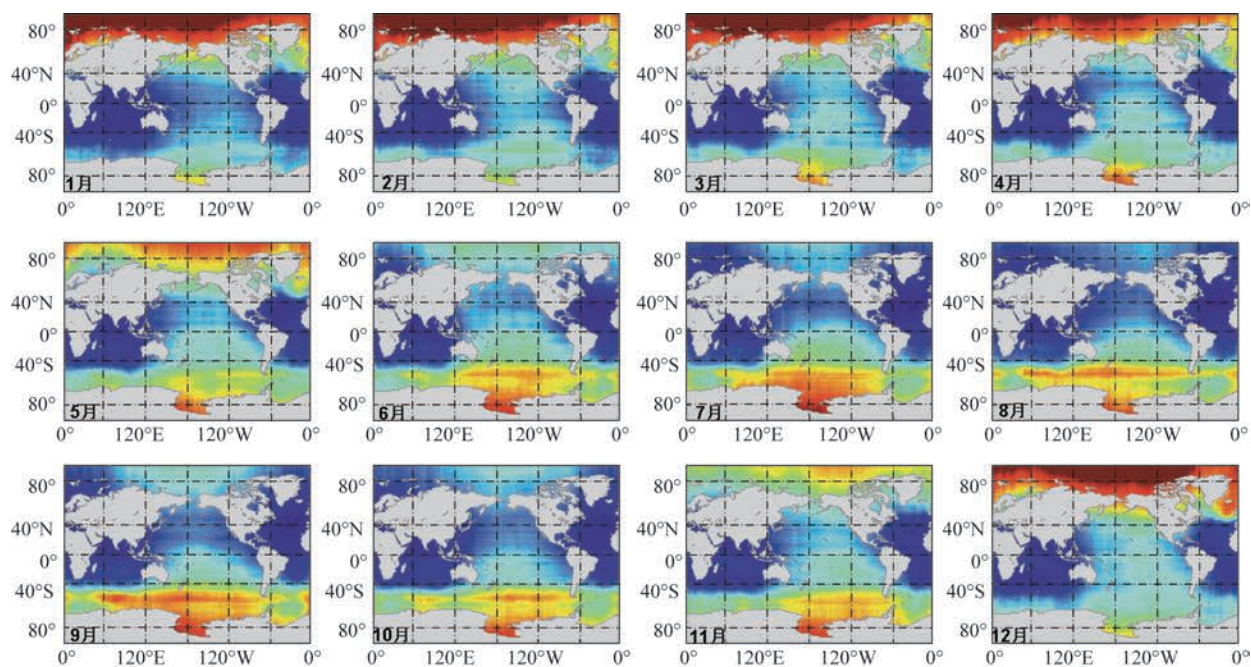
从图3a—c可以得出,随着纬度的增加,北半球MLD的年均值先变小后变大,南半球变化趋势相同,但没有北半球显著。全球大部分海洋MLD的年均值分布与月均值、季节均值分布有很多相似的特征。从图中可以观察到,南北半球高纬度海域的MLD年均值变化相对较大,原因可能是高纬度海域温度变化受到低温深层水及其环流的影响。

图3d为全球海洋BLT年均值的分布。从图中可以看到,北半球BLT年均值变化幅度不大,南半球的幅度比北半球大;2006—2009年BLT年均值变化幅度较大,超过25 m。2005年、2008年、2010年、2011年北半球高纬度海域表现为显著补偿层;2007年、2010年、2019年南半球高纬度海域表现为显著补偿层。

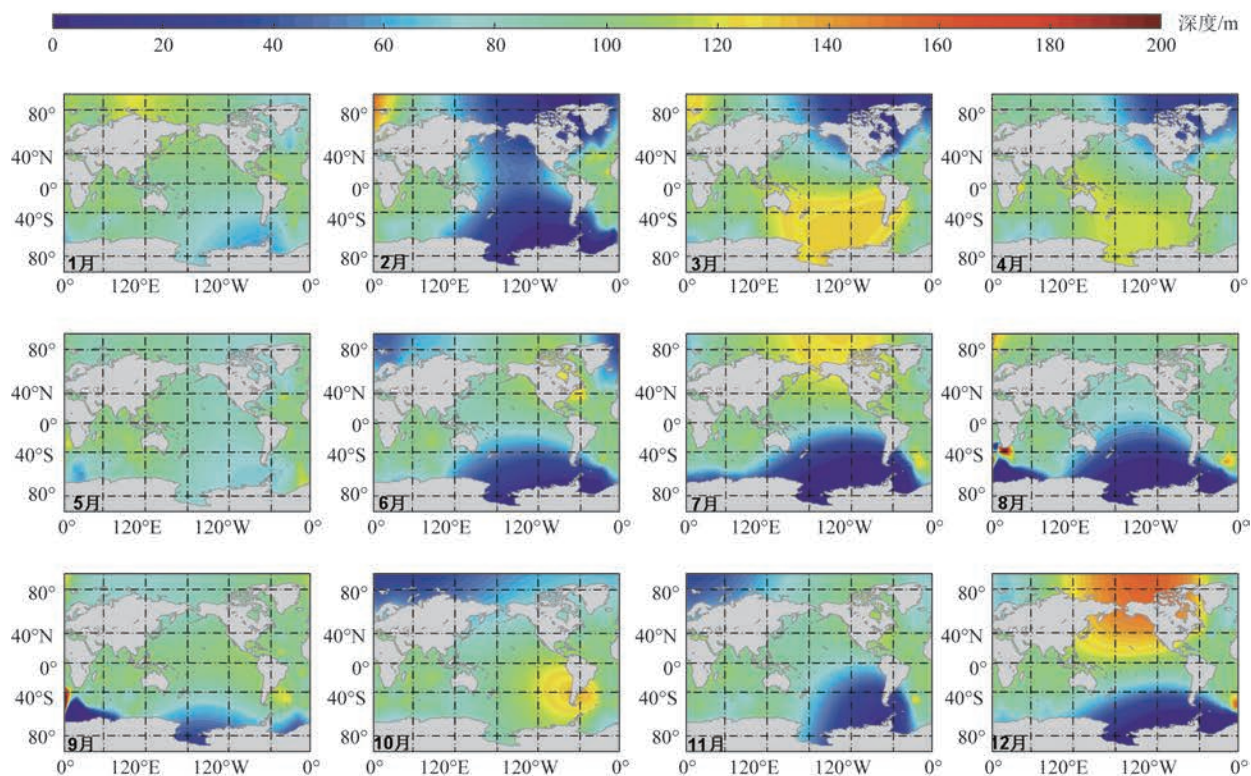
3.4 不同的阈值计算结果分析

图4—6分别为由阈值 $\Delta T_2=0.5^\circ\text{C}$ 计算得到的全球MLD和BLT的月均值分布、季节均值分布和年

图4 阈值为 ΔT_2 时全球MLD和BLT月均值分布Fig.4 Distribution of monthly mean MLD and BLT based on ΔT_2



c. 基于温度和密度参数计算的MLD月均值分布



d. BLT月均值分布

图4 (续)
Fig.4 (Continued)

均值分布。观察可得,基于 ΔT_1 、 ΔT_2 的MLD和BLT整体分布特征相似,冬季和夏季差异较大,冬季的MLD和BLT的差异达到68 m和125 m,夏半年基于 ΔT_2 得到的BLT比基于 ΔT_1 得到的BLT值更大;冬半年,在基于 ΔT_2 的BLT季节均值分布中,补偿层存在的海域较障碍层存在的海域范围大,可能是与太阳辐射和风搅拌有关。年均值分布也存在此现象,如2005—2011年和2015年等,基于 ΔT_2 的计算

结果中补偿层存在的海域较多,其深度也比基于 ΔT_1 计算的结果大。

基于 ΔT_1 、 ΔT_2 计算的MLD年均值基本一致,但是个别年份基于 ΔT_2 的MLD结果较大,差异超过90 m,如2008年、2009年南半球中高纬度海域,以及2010年、2011年和2012年北半球高纬度海域。基于 ΔT_1 、 ΔT_2 计算的MLD月均值也基本一致,但仍然存在差异,表现在1月、3月、4月、6月和7月南半球

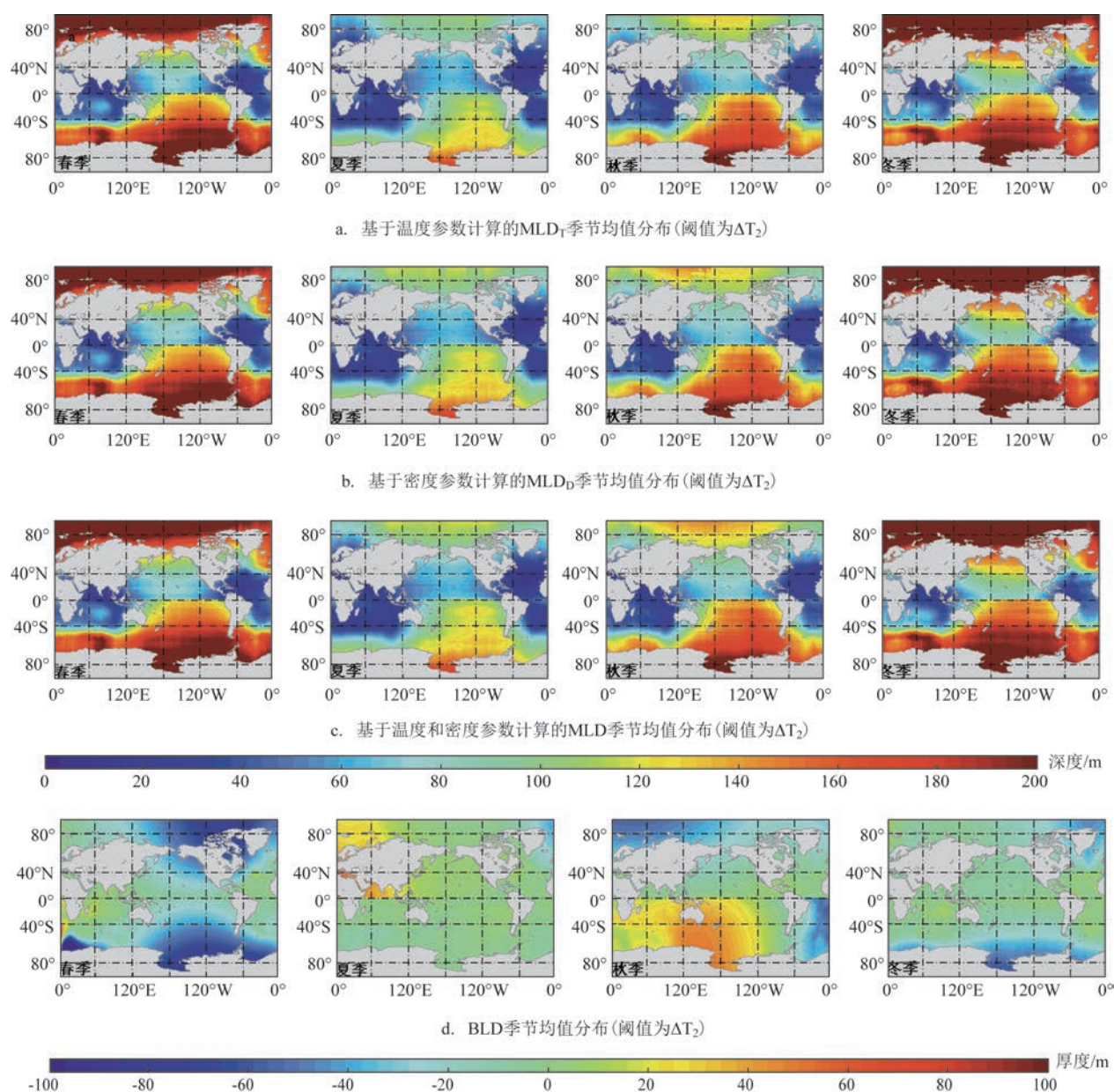


图5 阈值为 ΔT_2 时全球MLD和BLT季节均值分布

Fig.5 Distribution of seasonal mean MLD and BLT based on ΔT_2

高纬度海域基于 ΔT_2 的MLD显著增大,3月、5月、11月北半球中高纬度海域基于 ΔT_2 的MLD显著增大。某些海域基于 ΔT_1 的结果更加准确,而另外一部分海域基于 ΔT_2 的结果更加准确。基于 ΔT_1 、 ΔT_2 计算的MLD季节均值较月均值和年均值的差异更大,需进一步分析可能的物理机理。

由表1可以看出,不论阈值是 ΔT_1 还是 ΔT_2 ,相

较于温度参数或者密度参数,基于温度和密度的计算结果更为可靠。还可以看到,基于阈值 $\Delta T_2=0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的MLD结果与现有MLD数据的相关性比基于阈值 $\Delta T_1=0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的结果与现有MLD数据的相关性高,二者偏差相对较小,但是前者的均方根误差更大,这可能是由于不同海域适合的阈值不同,需进一步计算分析。

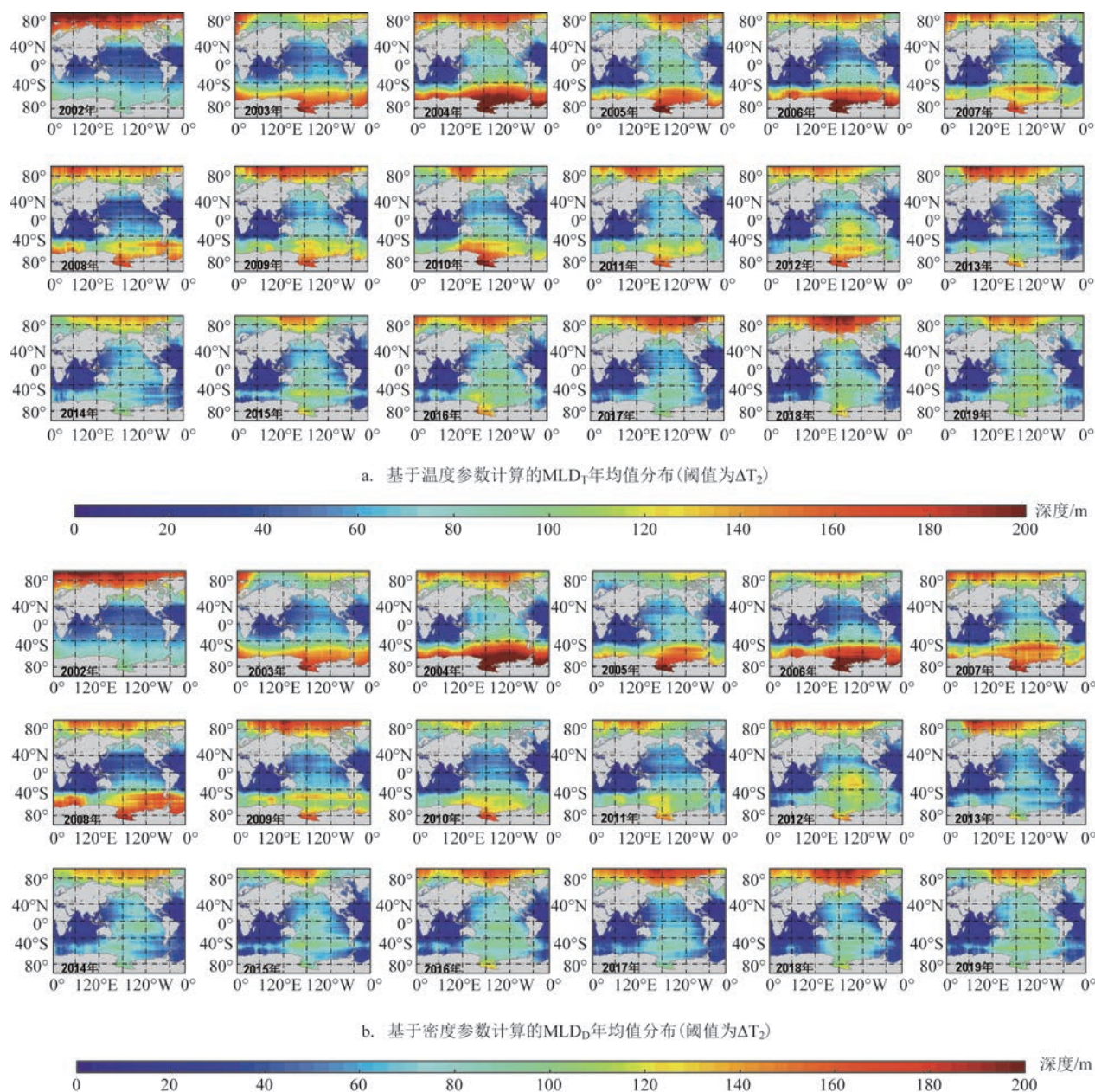


图6 阈值为 ΔT_2 时全球MLD和BLT年均值分布

Fig.6 Distribution of annual mean MLD and BLT based on ΔT_2

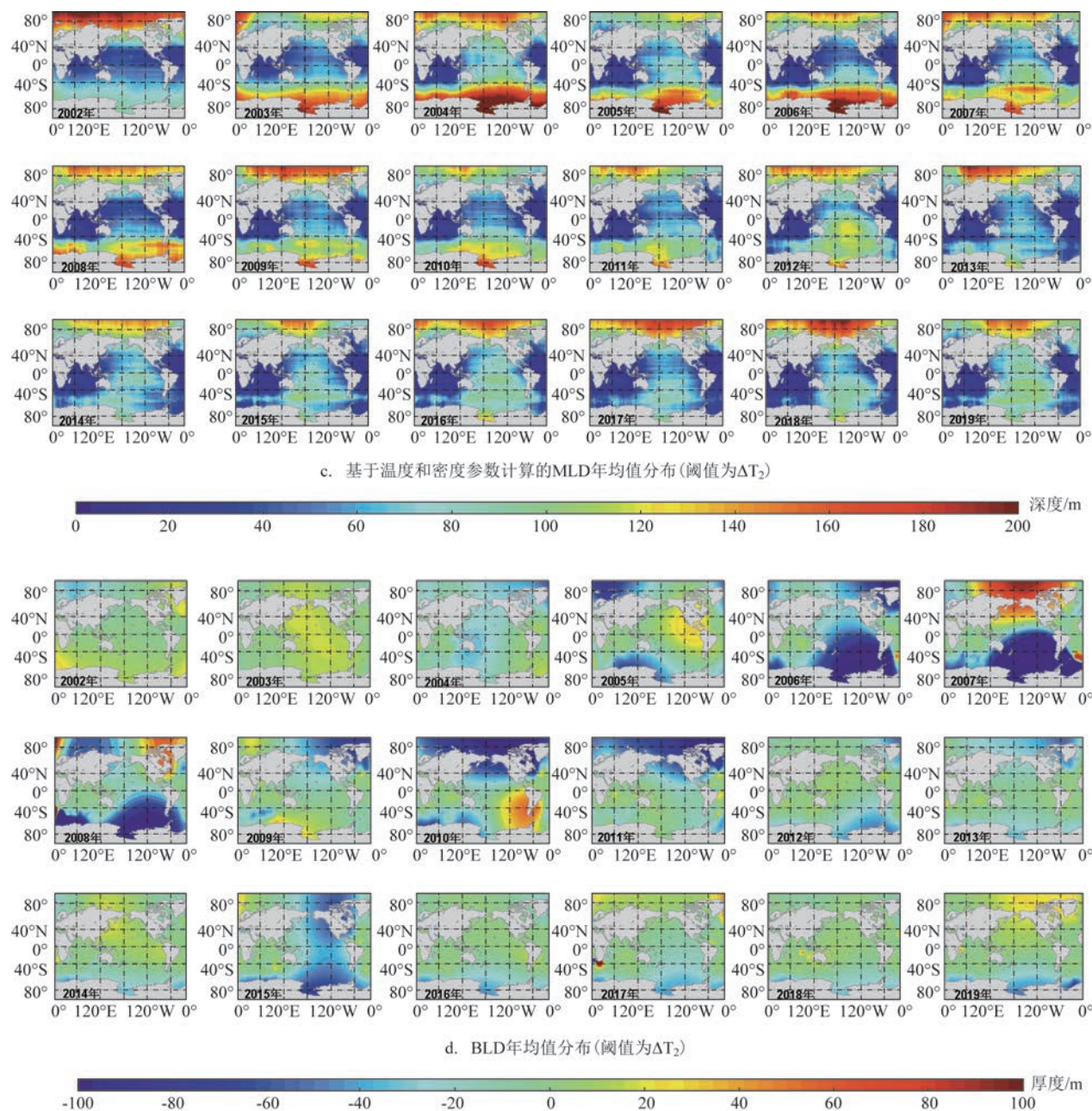


图6 (续)

Fig.6 (Continued)

表1 计算结果与现有MLD数据比较

Tab.1 Comparison between our results and other existing MLD data

$\Delta T_1=0.2^\circ\text{C}$	相关系数	均方根误差/m	偏差/m	$\Delta T_2=0.5^\circ\text{C}$	相关系数	均方根误差/m	偏差/m
MLD _T	0.981 2	2.503 8	0.590 2	MLD _T	0.992 8	4.404 1	1.038 1
MLD _D	0.962 3	1.675 1	0.215 1	MLD _D	0.985 3	3.015 1	0.696 1
MLD	0.962 9	1.573 0	-0.001 5	MLD	0.989 7	2.522 9	0.417 5
BLD	0.749 8	2.463 3	-0.580 6	BLD	0.801 6	5.308 3	-1.233 5

4 结论

基于2002—2019年Argo温盐数据计算得到MLD和BLT,描述全球海洋MLD和BLT的分布特征以及不同温度阈值计算得到的MLD和BLT的异同。在计算过程中设置不同的温度阈值 $\Delta T_1 = 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $\Delta T_2 = 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,分别利用温度、密度以及温度和密度计算得到全球海洋的MLD和BLT值,较全面地描述了不同温度阈值下得到的全球海洋混合层和障碍层分布特征。结论如下:

①分别利用温度参数、密度参数计算得到MLD值,不论是 MLD_T 还是 MLD_D ,都能在一定程度上体现全球海洋MLD的分布特征,如混合层冬深夏浅的变化特征等,在赤道附近等低纬度海域,二者结果的一致性较好,但在高纬度海域二者差异较大,如图1a和1b中4月、6月和8月中高纬度海域存在很明显的差异。综上可知,相较于基于温度参数或者密度参数,基于温度和密度的计算结果更能考虑到细节也更加可靠。

②在相同的时空条件下,基于 ΔT_1 或 ΔT_2 计算得到的MLD的月均值和年均值基本一致,但季节均值较月均值和年均值的差异偏大。

③MLD存在冬季深、夏季浅的变化特征。北半球的MLD随季节变化大且快速,南半球的MLD随季节变化同样显著,且呈纬向分布;随着纬度增加,北半球的MLD年均值先变小后变大,南半球变化趋势相同,但没有北半球显著。全球大部分海洋MLD的年均值分布与月均值、季节均值有很多相似特征。北半球和南半球高纬度海域的MLD年均值变化相对较大。

④南北半球高纬度海域的BLT值较大,并随着纬度的降低而减小,南半球6—10月主要为补偿层。全球海洋BLT的季节周期性变化特征同样显著。夏季和秋季南北半球高纬度海域的BLT值较大,障碍层较厚,BLT较小值即薄障碍层多分布在中低纬度;冬季和春季两个半球的中高纬度主要为补偿层,低纬度为较薄的障碍层,春季较冬季存在障碍层的海域更多。BLT的空间分布特征在不同海域均存在明显差异。总体来说障碍层厚度随着纬度的降低而减小。北半球的BLT年均值变化幅度不大,

南半球较北半球更大。

但是本文的算法仍存在不足之处,例如Argo逐年数据在处理过程中会产生误差;对基于 ΔT_1 和 ΔT_2 计算得到的障碍层和补偿层结果也有待进一步分析讨论并验证其可靠性和可能的形成机制,后续试验中会引入更多的观测数据来进一步论证实验结果;文中算法仅考虑了温度和密度。针对这些问题,下一步计划在算法中增加风、浪等动力因素来进一步完善算法,为后续研究障碍层和补偿层在年际、年代际及更长时间尺度的变化规律和物理机制提供前期准备。

参考文献:

- [1] 刘颖,严幼芳,凌征. 北印度洋障碍层厚度气候态和季节变化特征及其成因初步分析[J]. 热带海洋学报, 2020, 39(5): 98-108.
LIU Y, YAN Y F, LING Z. Preliminary analysis on climatological and seasonal variation of barrier layer thickness in the northern Indian Ocean and its mechanism[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2020, 39(5): 98-108.
- [2] 于瑶,吴松华. 基于2007-2018年Argo数据分析全球混合层和障碍层时空特征[J]. 中国海洋大学学报, 2021, 51(12): 123-132.
YU Y, WU S H. Temporal and spatial characteristics of global mixed layer depth and barrier layer thickness based on Argo data from 2007 to 2018[J]. Journal of Ocean University of China, 2021, 51(12): 123-132.
- [3] 应美佳,刘海龙,王夫常,等. 南大洋混合层的时空变化特征[J]. 海洋与湖沼, 2019, 50(6): 1223-1232.
YING M J, LIU H L, WANG F C, et al. Spatio-temporal variations of mixed layer depth in Southern Ocean[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2019, 50(6): 1223-1232.
- [4] GODFREY J S, LINDSTROM E J. The heat budget of the equatorial western Pacific surface mixed layer[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1989, 94(C6): 8007-8017.
- [5] 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.
AN Y Z, ZHANG R, WANG H Z, et al. Study on calculation and spatio-temporal variations of global ocean mixed layer depth[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(7): 2249-2258.
- [6] 郭文仪,邱云,林新宇. 孟加拉湾障碍层年际变化及其与印度洋偶极子事件的联系[J]. 海洋学报, 2020, 42(9): 38-49.
GUO W Y, QIU Y, LIN X Y. The interannual variability of barrier layer in the Bay of Bengal and its relationship with IOD events[J]. Haiyang Xuebao, 2020, 42(9): 38-49.
- [7] LEVITUS S. Climatological atlas of the world ocean[J]. Eos, Transactions American Geophysical Union, 1983, 64(49): 962-963.
- [8] 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]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2004, 109(C12): C12003.
- [9] KARA A B, ROCHFORD P A, HURLBURT H E. Mixed layer depth variability and barrier layer formation over the North Pacific Ocean[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2000, 105 (C7): 16783-16801.
- [10] ALRADDADI T M, ALSAAFANI M A, ALBARAKATI A M, et al. Seasonal variability of mixed layer depth from Argo floats in the central Red Sea[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, 14 (6): 496.
- [11] 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.
- [12] TOYODA T, FUJII Y, KURAGANO T, et al. Interannual-decadal variability of wintertime mixed layer depths in the North Pacific detected by an ensemble of ocean syntheses[J]. *Climate Dynamics*, 2017, 49(3): 891-907.
- [13] LIU Q Y, LU Y Q. Role of horizontal density advection in seasonal deepening of the mixed layer in the subtropical Southeast Pacific[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2016, 33 (4): 442-451.
- [14] GAUBE P, MCGILLICUDDY D J JR, MOULIN A J. Mesoscale eddies modulate mixed layer depth globally[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(3): 1505-1512.
- [15] XIA R B, LIU Q Y, XU L X, et al. North Pacific eastern subtropical mode water simulation and future projection[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2015, 34(3): 25-30.
- [16] 吴森森, 曹敏杰, 杜震洪, 等. 全球 Argo 资料共享与服务平台设计与实现[J]. *海洋通报*, 2018, 37(3): 287-295.
- WU S S, CAO M J, DU Z H, et al. Design and implementation of the global Argo data sharing and service platform[J]. *Marine Science Bulletin*, 2018, 37(3): 287-295.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] MIGNOT J, DE BOYER MONTÉGUT C, LAZAR A, et al. Control of salinity on the mixed layer depth in the world ocean: 2. Tropical areas[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2007, 112(C10): C10010.
- [20] ZULBERTI A P, JONES N L, RAYSON M D, et al. Mean and turbulent characteristics of a bottom mixing-layer forced by a strong surface tide and large amplitude internal waves[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2022, 127(1): e2020JC017055.
- [21] 邢小罡, 邱国强, 王海黎. Bio-Argo 浮标观测北大西洋色素与颗粒物的季节分布[J]. *高技术通讯*, 2014, 24(1): 55-64.
- XING X G, QIU G Q, WANG H L. Seasonal distributions of pigment and particle in the North Atlantic observed by a Bio-Argo float[J]. *Chinese High Technology Letters*, 2014, 24(1): 55-64.

Analysis of spatiotemporal variations of mixed layer depth and barrier layer thickness in the global ocean

XING Xiaobo^{1,2}, JIA Yongjun³, WANG Bin^{1,2*}, LI Yawen^{1,2}, DANG Chaoqun^{1,2}, HU Jinguo^{1,2}, WU Baoqin⁴, ZHU Xiande⁴
(1. National Marine Technology Center, Tianjin 300112, China; 2. Key Laboratory of Marine Observation Technology, Ministry of Natural Resources, Tianjin 300112, China; 3. National Satellite Ocean Application Service, Beijing 100081, China; 4. PLA 92859, Tianjin 300061, China)

Abstract: In this paper, the mixed layer depth (MLD) and barrier layer thickness (BLT) are calculated using the threshold method, based on in-situ ocean temperature and salinity measurements of the Argo profiles during 2002—2019. Different thresholds of $\Delta T_1=0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $\Delta T_2=0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, as well as different judgement rules, i.e. ocean temperature alone, ocean density alone, ocean temperature and density together, are involved in the calculation, and the differences in the MLD and BLT characteristics arose from different thresholds are described. The results show that the MLD judged by temperature and density together are more reliable than those judged by temperature alone or density alone, regardless of the threshold using ΔT_1 or ΔT_2 . Both the MLD judged by temperature alone (MLDT) and density alone (MLDD) can reflect the spatial characteristics of the MLD in the global ocean to a certain extent. The MLDT and MLDD are in good agreement with each other in the equatorial

and low-latitude oceans, while divergent largely in the high-latitude oceans. The correlation of the derived MLD using the threshold of $\Delta T_2=0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ is higher than that using the threshold of $\Delta T_1=0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ with respect to other existing MLD data, but the former has a larger root-mean-square error than the latter, probably due to regional suitability of the selected threshold. The spatial characteristics of the BLT are significantly different in different ocean areas. In general, the BLT has a relative large value in the high-latitude oceans, and decreases equatorward.

Key words: global ocean; mixing layer depth; barrier layer thickness; temporal and spatial characteristics