

南大洋混合层的时空变化特征*

应美佳 刘海龙 王夫常 张召儒 钟贻森

(上海交通大学 海洋学院 上海 200240)

摘要 过去对南大洋的研究受限于长期观测的缺乏,而现在地转海洋学实时观测阵(Array for Real-time Geostrophic Oceanography, Argo)项目自开始以来持续提供了高质量的温度盐度观测,使系统地研究南大洋海洋上层结构成为可能。本研究使用 2000—2018 年的 Argo 浮标观测数据,分析了南大洋混合层深度(Mixed Layer Depth, MLD)的时空分布特征。结果表明:南大洋混合层存在明显的季节变化,冬春两季 MLD 在副南极锋面北侧达到最高值并呈带状分布,夏秋两季由于海表加热导致混合层变浅,季节变化幅度达到 400m 以上;在年际尺度上,MLD 受南半球环状模(Southern Hemisphere Annular Mode, SAM)调制,呈现纬向不对称空间分布特征,这与前人结果一致;本文指出在所研究时段,南大洋混合层在 90°E 以东,180°以西有加深趋势,而在 60°W 以西,180°以东有变浅趋势,显示出偶极子分布特征,并且这种趋势特征主要是风场的作用。

关键词 南大洋;混合层;年际变率;南半球环状模

中图分类号 P733 doi: 10.11693/hyh20190800153

海洋混合层指的是物理属性充分混合,性质几乎不随水体深度变化的水体。混合层深度(Mixed Layer Depth, MLD)在海气相互作用中具有至关重要的作用,大气通过风应力搅拌和浮力强迫影响海洋混合层,而 MLD 表征了参与海气相互作用的海水总量,进而反映了海洋存储热量和碳的能力。同时 MLD 对大尺度海洋结构和环流、浮游生物和化学过程有重要贡献。动力上,混合层底部的变化表征着仰冲和潜沉过程,促使海洋上层和深层间的热量和营养物交换。生物方面,它控制着影响浮游植物的生长所需的光和营养物的含量(Ohlmann *et al.*, 1996),进而影响整个海洋的生物生产力。模式估计中,南大洋吸收的人类碳排放占全球海洋碳吸收的 40%(Orr *et al.*, 2001; Mikaloff Fletcher *et al.*, 2006),而 MLD 时空变率能够调制水团的形成和海水的碳吸收过程(Buongiorno Nardelli *et al.*, 2017),尤其是在南大洋区域(Sabine *et al.*, 2004)。南大洋冬季 MLD 大值区是南极中层水也

是副极地模态水的形成区(Nardelli *et al.*, 2018)。

当前的数值模式对南大洋 MLD 的模拟能力还不够。第五次耦合模式比较计划中气候模式模拟的表层水偏淡导致混合层偏浅;模式对海洋的垂直混合过程的模拟不够充分,纵使提高分辨率仍不能模拟出理想的 MLD;未来场景预估中,混合层变浅,位置偏移与南极绕极流(Antarctic Circumpolar Current, ACC)的变动一致,但模式间的差异较大(Sallée *et al.*, 2013);大多数基于协调性海洋—冰情基准试验(Coordinated Ocean-ice Reference Experiments-Phase II, CORE-II)强迫的模式模拟都低估了夏季 MLD(Downes *et al.*, 2015)。这表明仍然需要利用观测来进一步分析南大洋 MLD 的时空特性和物理过程,以便为模式的改进提供依据。

MLD 是一个具有高度时空变化特征的变量。即使在最初稀疏的观测中也可以看到 MLD 具有明显的季节循环:大值区有两处,一是位于季节性海冰区,

* 国家重点研发计划项目, 2016YFA0601804 号;国家自然科学基金项目, 41776019 号;青岛海洋科学与技术试点国家实验室开放基金, QNLM2016ORP0101 号;上海市自然科学基金, 16ZR1416200 号;国家自然科学基金, 41876221 号, 41575107 号。应美佳, 硕士研究生, E-mail: meijiaying@sjtu.edu.cn

通信作者: 王夫常, 博士后, E-mail: fewang@sjtu.edu.cn

收稿日期: 2019-08-06, 收修改稿日期: 2019-08-15

二是沿着 ACC 呈窄的带状结构, 从印度洋延伸到太平洋, 并且位于副极地锋面的北侧; 南半球冬季 8—9 月最深, 夏季 1—2 月最浅 (Dong *et al.*, 2008; Pellichero *et al.*, 2017; Uotila *et al.*, 2019)。随着观测 Array for Real-time Geostrophic Oceanography (Argo) (Roemmich *et al.*, 2009) 和卫星遥感数据的到来, 使得对 MLD 的年际变率的研究成为可能。Buongiorno Nardelli 等(2017)对比了 2010—2012 年的 MLD, 发现年际差别明显, 南极中层水和副极地模态水形成区的空间范围和深度不同, 最深的 MLD 出现在 2011 年。MLD 的变率受南半球环状模 (Southern Hemisphere Annular Mode, SAM) (李晓峰等, 2012) 调制。SAM 是南半球主要的大气变率 (Thompson *et al.*, 2002), 它可以通过影响海表热通量来影响 MLD; MLD 对 SAM 的响应可以达到 50—100m, 并且这种响应在夏季最大 (Sallée *et al.*, 2010); 同时 SAM 对 MLD 的调制在滞后 1—3 个月时最显著。最近几十年, 人类活动导致的南极平流层臭氧的减少, 使得 SAM 正位相增多 (Thompson *et al.*, 2002; Sallée *et al.*, 2010; Thompson *et al.*, 2011), 西风带增强并向南极收缩 (Morrow *et al.*, 2008), 导致南大洋中东印度洋子区和

中太平洋子区的 MLD 加深, 西太平洋子区的混合层变浅 (Sallée *et al.*, 2010)。本文将采用 2000—2018 年的 Argo 观测数据, 分别考察南大洋混合层季节变化、年际变化和长期趋势, 详细给出南大洋 MLD 的时空变化特征。

1 数据和方法

Argo 是“全球海洋观测业务系统 (Global Ocean Observing System, GOOS)”中的一个针对深海区温盐结构的实时观测阵列。自 2000 年以来, Argo 浮标被部署在全球海洋并周期性地采集水文数据。每 10 天, 浮标能够下潜至 2000m 并返回到海表, 把沿途的温度和盐度传输给卫星 (Roemmich *et al.*, 2009)。本文采用的是中国 Argo 实时资料中心发布的经过初步质量控制的全球海洋 Argo 散点资料集 3.0 版, 下载地址为 <ftp://ftp.argo.org.cn/pub/ARGO/global/>。目前正在运作的浮标有 3879 个, 它们每年提供约 14 万个温盐廓线。本文采用 30°S 以南的全部浮标数据, 但是仅保留温度、盐度、深度在各层被标记为 1 的廓线, 这样从 2000 年 1 月—2018 年 12 月, 总计 452513 个有效记录, 它们的时空分布见图 1。空间上, 南大洋中低

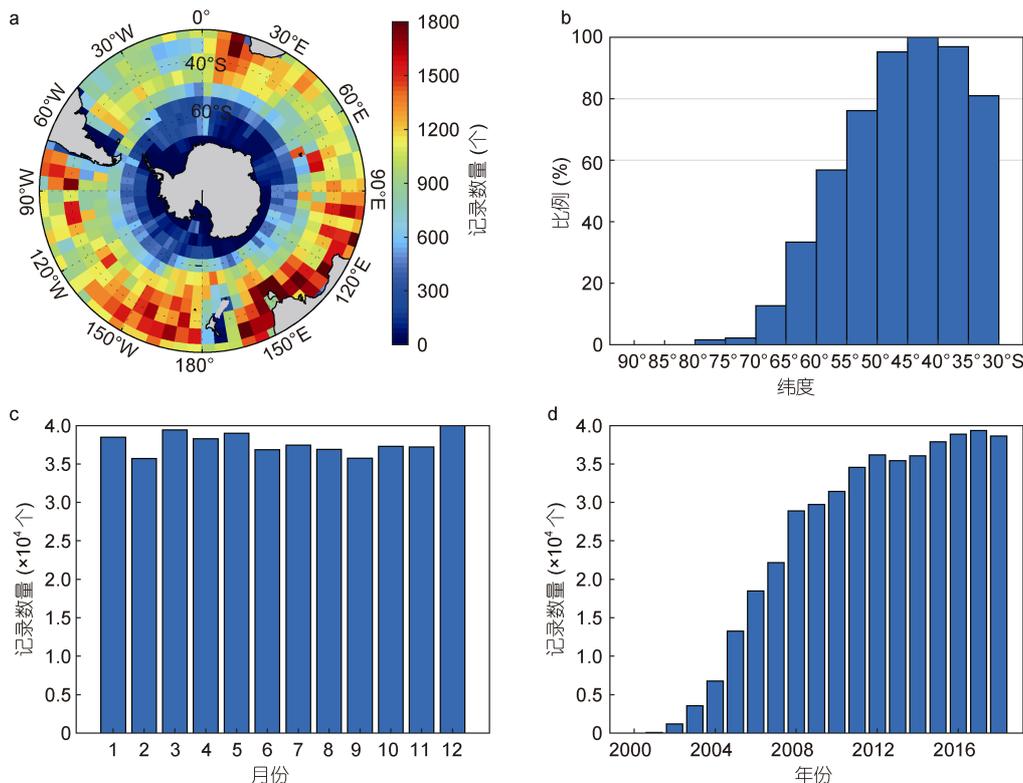


图 1 研究区域内(30°S 以南)Argo 有效记录数

Fig.1 Distribution of Argo temperature profiles within the southern of 30°S
注: a: 5°×5°空间分布; b: 纬度分布; c: 季节变化; d: 年际变化

纬度有效记录较多, 其中南太平洋和南印度洋达到 1700 个以上; 而靠近南极洲高纬度地区有效记录较少, 普遍在 500 个以下(图 1a)。经向上, 40°—45°S 的有效记录最多, 并向南北两个方向逐步减小(图 1b)(Buongiorno Nardelli *et al.*, 2017; Jones *et al.*, 2019)。时间上, 这 19a 各月总的有效记录均超过 35000 个, 其中南半球的冬半年(6—11 月)多于夏半年(12 月和 1—5 月, 图 1c)。此外, 有效记录数还在随着年份不断地增加(图 1d)。这些数据为得到具有统计意义的结果奠定了基础。

另外本文还用到了美国环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)和国家大气研究中心(National Center for Atmospheric Research, NCAR)再分析资料的月平均风场和热通量数据(Kalnay *et al.*, 1996), 时间为 2000 年—2018 年。同时, 本文采用 Marshall(2003)定义的 SAM 指数, 它是指 40°S 和 60°S 上五个站点的纬向平均的海平面气压的标准化序列之差, 下载地址为 <https://legacy.bas.ac.uk/met/gjma/sam.html>。

MLD 的计算方法有很多, 通常会基于密度廓线、盐度廓线或温度廓线。对于南大洋, 研究表明基于密度廓线的方法优于基于温度廓线(Holte *et al.*, 2009)。对于基于密度廓线的算法, 可分为固定的密度阈值、变化的密度阈值和垂直密度梯度等方法, 其中, 变化的密度阈值方法得到的结果更加准确(Holte *et al.*, 2009)。对比不同的混合层计算方法不在本文讨论范围之内, 同时各种方法比较的文章已有很多。本文采取 de Boyer Montégut 等(2004)提出的变化的密度阈值方法计算 MLD。由于部分廓线存在表层数据缺失, 本文弃用了 20m 以上没有数据的记录; 参考深度 z 选取 10m 附近第一个非缺测数据的深度。混合层深度定义为比 z 处的密度大 $\Delta\sigma$ 的密度所在的深度, $\Delta\sigma$ 是以 z 处的温度变化一个温度阈值 $\Delta T = 0.2^\circ\text{C}$ 所对应的密度变化量, 即

$$\Delta\sigma = \left| \sigma(T_z - \Delta T, S_z, P_0) - \sigma(T_z, S_z, P_0) \right|,$$

其中, T_z 和 S_z 分别为 z 处的温度和盐度, $P_0 = 0$ 是海表面压力, $\sigma(T_z, S_z, P_0)$ 为参考密度, 也记做 σ_z 。此时, 混合层底的密度 σ_{MLD} 为

$$\sigma_{\text{MLD}} = \sigma_z + \Delta\sigma.$$

假设此密度处于第 n 和第 $n+1$ 层之间, 则线性插值得到混合层深度

$$\text{MLD} = H_n + (\sigma_{\text{MLD}} - \sigma_n) / (\sigma_{n+1} - \sigma_n) \times (H_{n+1} - H_n),$$

其中, σ_n , σ_{n+1} 分别为第 n 层和第 $n+1$ 层密度, H_n , H_{n+1} 分别为第 n 层和第 $n+1$ 层所处深度。由于 Argo 只有现场温度和盐度数据, 所以本文先利用 the Gibbs Sea Water(GSW)海洋工具包计算位势温度, 再采用 UNESCO1980 海水状态方程计算位势密度, 最后按照上述公式得到混合层深度并插值到 $1^\circ \times 1^\circ$ 的网格中。

2 结果与讨论

2.1 南大洋典型垂直结构

根据南大洋 Argo 温盐廓线的结构特征, 将南大洋温度和盐度随深度变化特征大致分为以下三类: 1) 温度随深度增加而降低(图 2a), 2) 温度随深度增加而增大随后几乎保持不变即存在逆温层(图 2b), 3) 温度随深度增加而增大随后又减小(图 2c)。具体地, 第一类中温度随深度降低的结构是大洋中最普遍的温度层结, 通常出现在 ACC 北侧, 盐度随深度的增加而减小; 温度、盐度和密度的跃层不是很明显, 但有较显著的季节变化, 冬季的温度和盐度大于夏季; 密度主要受温度影响, 大体上冬季密度大于夏季。第二类中的逆温结构常出现在南大洋锋面附近具有明显的跃层; 跃层以下温度、盐度、密度随深度变化较小; 季节变化中, 夏季温度大于冬季, 50m 以下夏季盐度大于冬季。第三类也有逆温结构, 但在底层的温度低于表层。

2.2 混合层深度的季节分布特征

南大洋 MLD 具有显著的季节变化和空间不均匀性(图 3)。春季(图 3a)MLD 在 40°S 以北普遍小于 100m, 在 60°—120°E 存在部分点超过 100m, 在 40°—60°S 存在明显的高值区, 在新西兰南部甚至达到 350m 以上。高值区分布在澳大利亚南侧(60°—170°E)和东南太平洋(从 70°—160°W)。随着经度向东增加, 高值带中心偏向赤道, 在 60°E 时, 高值中心位于 43°S 左右, 往东延伸, 到 90°W 时, 高值中心已至 60°S。在极锋环绕的区域内, MLD 又随着纬度的增高从 150m 开始降低, 这部分混合层特征因为受数据限制, 极少有研究讨论。夏季(图 3b)MLD 变浅, 整个南大洋深度普遍不超过 100m, 在 50°S 以北混合层深度不到 50m, 高值区在 ACC 附近, 60°S 以南由于冬季水的存在导致层结加强深度变浅。秋季(图 3c)MLD 整体分布与夏季(图 3b)基本一致, 但深度有所回升, 高值区仍在 50°—60°S 之间可达 150m。冬季(图 3d)由于降温破坏水柱的稳定性使混合层深度急剧增加, 在太平洋和

印度洋区域 ACC 的北侧出现明显的纬向条带状的高值区, 在 130°E 和 120°W 部分区域, 深度达到 400m, 这些高值区域基本上位于副南极锋的北部, 被认为是南极中层水的主要形成区域。冬季 MLD 特征和春季基本一致。

2.3 混合层深度的年际变化

混合层深度的年际变化受多种因素影响, 如海表净热通量、风应力等大气变量, 另外他也受局地涡旋等海洋动力过程的影响; 而这些因素的年际调制主要来自于 SAM, 因此本文将 MLD 异常与 SAM 联系起来, 研究南大洋混合层的年际变化特征。

由上可知, 冬、春季节的 MLD 特征相似, 本文将 6—11 月合并为冬半年数据; 同理, 把其他月份合并为夏半年数据。图 4 显示了去趋势后的 MLD 异常线性回归到 SAM 指数的空间分布, 可以看到一个强的非对称纬向模态: 冬季显示出大致的三波数模态

(图 4a), 澳大利亚南部(100°—150°E)、中太平洋(90°—130°W)加深和西太平洋(150°E—130°W)的混合层变浅。在夏季(图 5b), 西南太平洋(120°—180°W), 澳大利亚南部(120°—150°E)以及 0°—60°E 部分区域加深, 南美洲东部(70°—110°W), 新西兰南部以及南印度洋(60°—115°E)变浅。冬季的异常值比夏季要大的多(冬季为±40m, 夏季变化约为±10m)。

为进一步考察 MLD 异常与 SAM 在年际尺度上的关系, 这里选取冬季混合层高值区所在的两个区域以及极锋包围的低值区(见图 3d), 计算其冬、夏 MLD 的异常并考察与 SAM 时间序列的相关性(图 5 和表 1)。相关系数的最大值为 0.5148, 出现在夏季极锋以南区域(绿框)的 MLD 与同期 SAM 的相关, 其它区域也表现出同期相关性好于滞后半年相关性, 事实上二者的相关在滞后 1—3 个月最为显著(Sallée *et al.*, 2010)。各区域比较而言, 在同期相关上, 位于南太平洋的红框区域最弱。

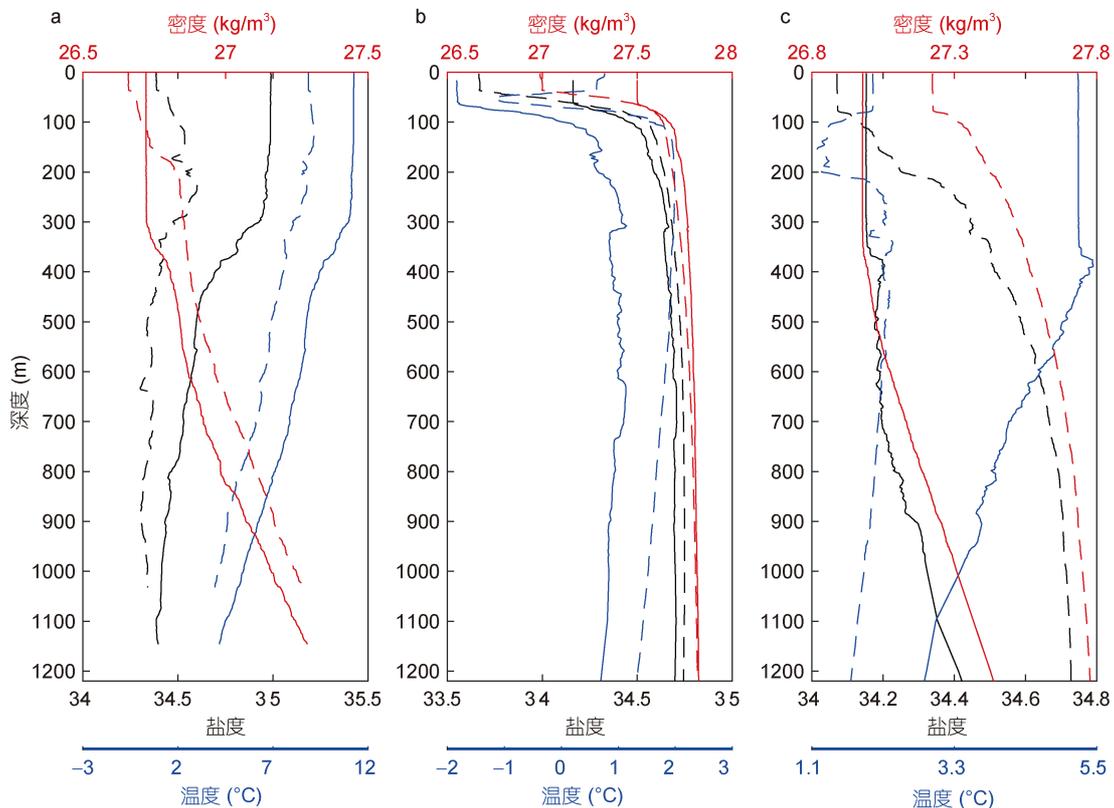


图 2 三个典型的温度、盐度和密度的垂向结构示意图

Fig.2 Three typical vertical profiles in temperature, salt, and density

注: 实线为冬季; 虚线为夏季; a—c 的地理位置见图 3b

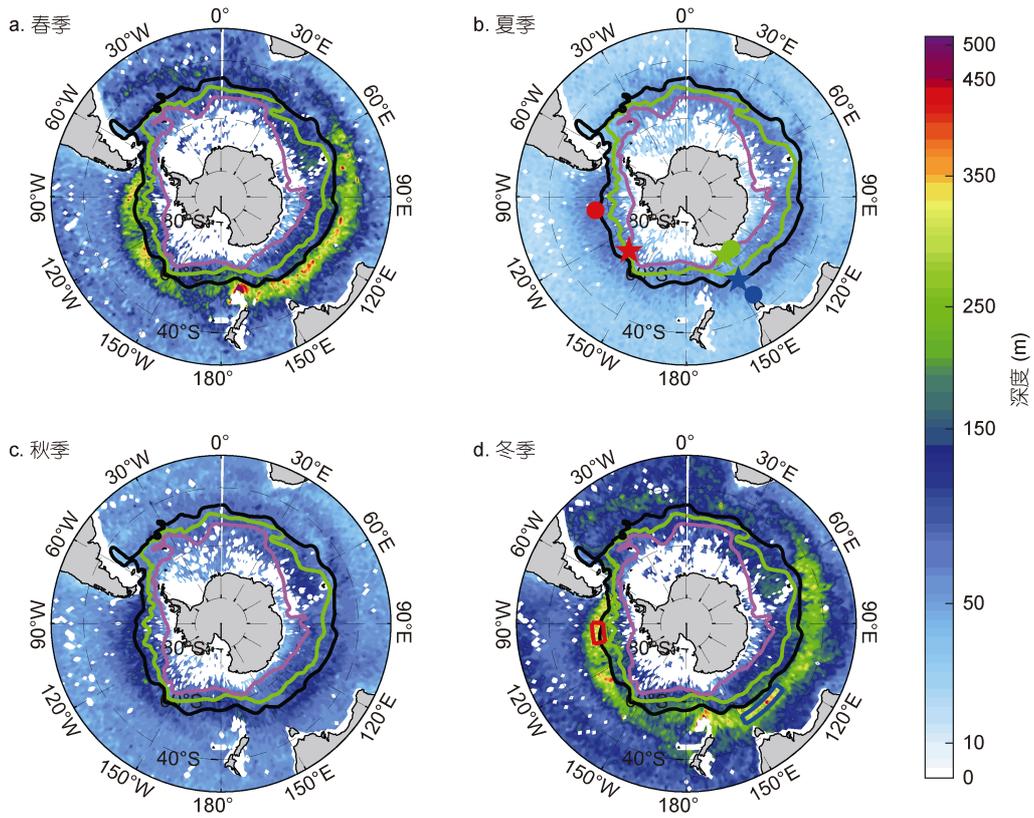


图 3 混合层深度(Mixed Layer Depth, MLD)季节分布

Fig.3 Seasonal distribution of MLD

注: a: 春季(9—11月), b: 夏季(12, 1—2月), c: 秋季(3—5月), d: 冬季(6—8月); 黑色线: 南极绕极流锋; 绿色线: 极锋; 紫色线: 副南极锋; b 中标出了三类典型温度、盐度和密度廓线的地理位置: 蓝色、绿色和红色标志分别对应图 2a、图 2b 和图 2c 中的廓线, 其中实心圆表示冬季, 五角星表示夏季; d 中的红线框为南太平洋混合层高值区, 蓝线框为南印度洋混合层高值区(下同)

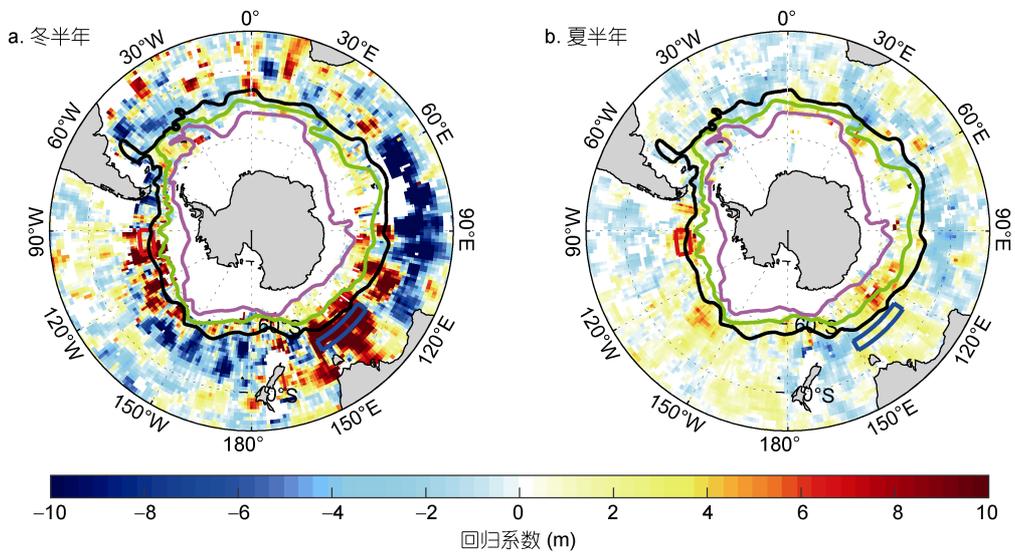


图 4 MLD 异常到南半球环状模(Southern Hemisphere Annular Mode, SAM)的线性回归

Fig.4 Regression of MLD anomaly onto SAM index

注: a: 冬半年(6—11月); b: 夏半年(12, 1—5月); 图中的回归系数是 $Y=kX+b$ 的 k , 其中 Y 是混合层深度异常, X 是 SAM 指数; 余同

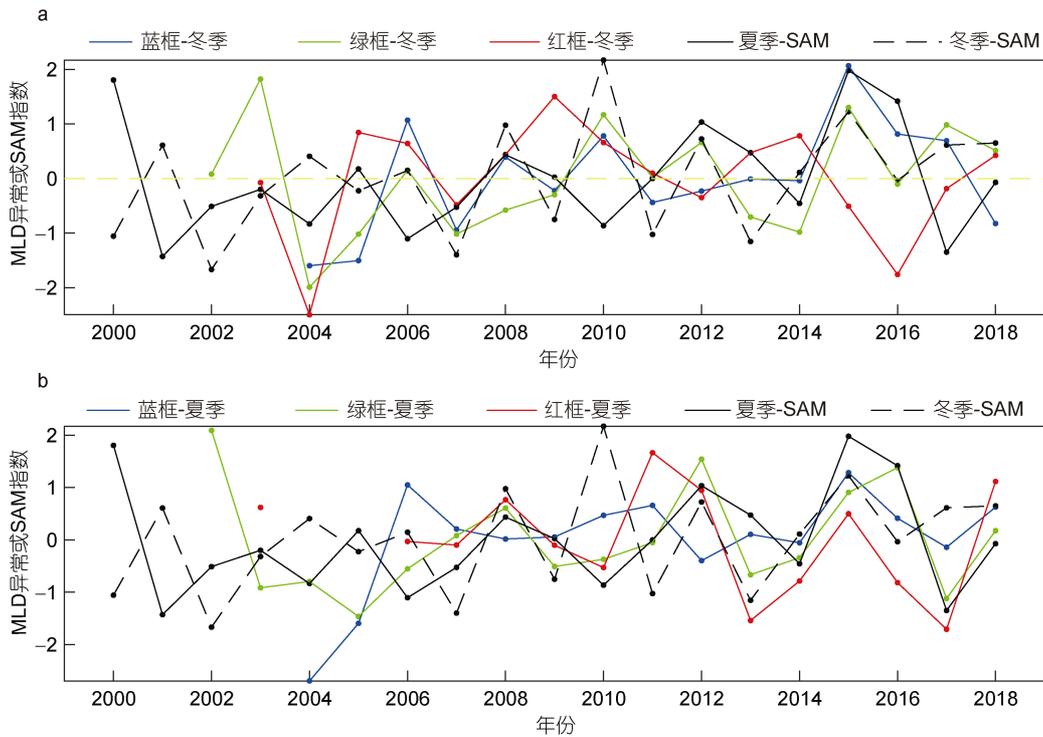


图 5 三个特定区域平均 MLD 异常年际变化与 SAM 指数的关系

Fig.5 The relationship between the interannual variation of average MLD anomalies in three specific regions and the SAM index

注: 蓝框、绿框和红框的地理位置见图 3d(余同)

表 1 南大洋特定区域的平均混合层深度异常与南半球环状模(Southern Hemisphere Annular Mode, SAM)指数的相关系数
Tab.1 Correlation coefficient between the averaged MLD anomaly in specific regions of the Southern Ocean and the SAM index

相关系数<a, b>	蓝框-冬季	绿框-冬季	红框-冬季	蓝框-夏季	绿框-夏季	红框-夏季
夏季-SAM	0.3047	0.1425	-0.1703	0.2454	0.5148**	0.2966
冬季-SAM	0.4469*	0.3713	-0.0631	0.0665	-0.0507	0.0708

注: *: 相关超过 90%的信度检验; **: 相关超过 95%的信度检验; 蓝框、绿框和红框的地理位置见图 3d

为考察 SAM 调制 MLD 的具体物理过程, 本文分别考察了热通量和风场的作用。海表净热通量到 SAM 指数的回归亦呈现出三波数空间分布(图 6), 夏季最为明显, 在海洋失去热量的区域(正值区), 上层海水失去浮力产生对流加深混合层; 相反地, 在净热通量增加区域(负值区), 倾向于层结增强使得混合层变浅。与图 4 的相似性表明, 海表净热通量可以部分解释 MLD 随 SAM 的空间变化特征。为考察风应力是否也起到类似的作用, 图 7 给出了风场到 SAM 指数的回归, 可以看出纬向风在锋面两侧呈现跷跷板关系, 但在锋面赤道一侧没有三波数结构(图 7a—图 7b), 表明纬向风的搅拌等作用相比于净热通量对混合层的影响不显著; 而经向风虽然较弱, 但是冬夏两季均出现明显的三波数结构, 并且位相与冬、夏 MLD

到 SAM 的回归一致(图 4), 表明经向风可能会通过纬向 Ekman 输运影响混合层。综上, MLD 对应 SAM 的响应是通过净热通量和经向风共同作用而致。从相对贡献来看(图 6b、图 7d), 相比于风场, 在年际尺度上 SAM 主要通过净热通量来调制 MLD。

2.4 混合层深度变化趋势

图 8 显示了 2000—2018 年南大洋混合层深度异常的变化趋势。冬季(图 8a)的变化趋势明显比夏季(图 8b)大。冬季 40°S 以北, 混合层深度年际变化无明显趋势; 40°—60°S 之间, 从 120°—170°E 澳大利亚南部, 混合层深度大面积呈增长趋势, 可达到至少 10m/a; 紧邻着增长区域, 向西延伸到 50°W, 混合层深度呈明显降低趋势; 与混合层深度季节变化的冬季分布(图 3d)类似, 随着经度的增加, 趋势中心的纬度也逐

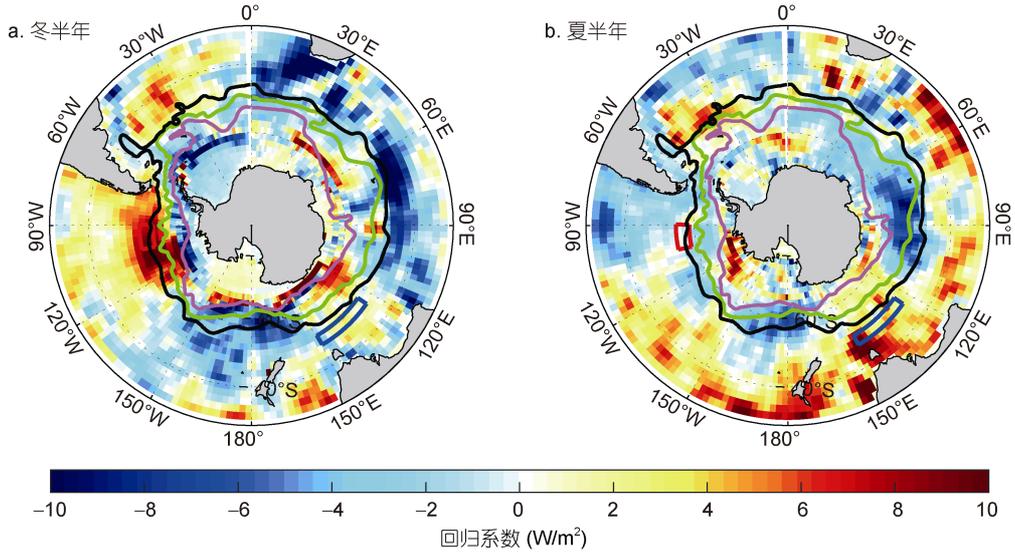


图 6 净热通量到 SAM 的线性回归
 Fig.6 Regression of net heat flux onto SAM index

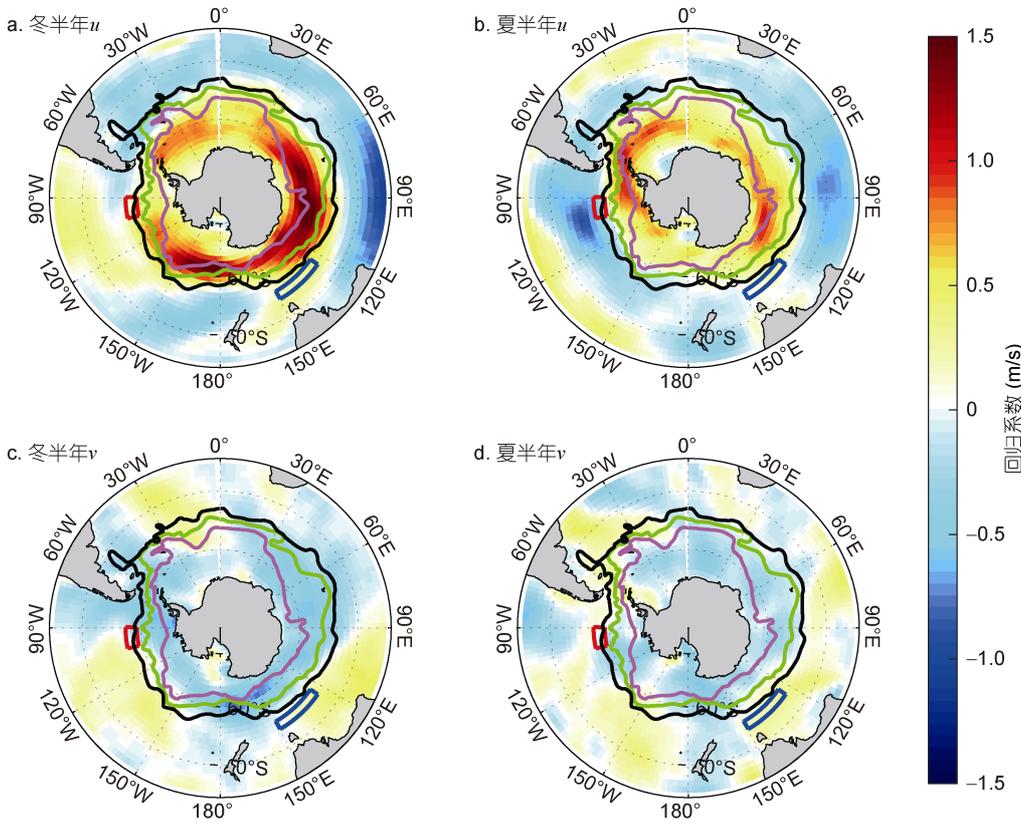


图 7 海表风场到 SAM 的线性回归
 Fig.7 Regression of sea surface wind onto the SAM index
 注: *u*: 纬向风; *v*: 经向风

渐升高。夏季(图 8b)南大洋混合层深度的整体趋势保持不变, 东半球变化趋势呈现正值, 但增长幅度不大, 普

遍在 3 m/a 以下, 在新西兰南部有部分区域增长趋势较大; 西半球负值居多, 趋势中心沿副南极锋面分布。

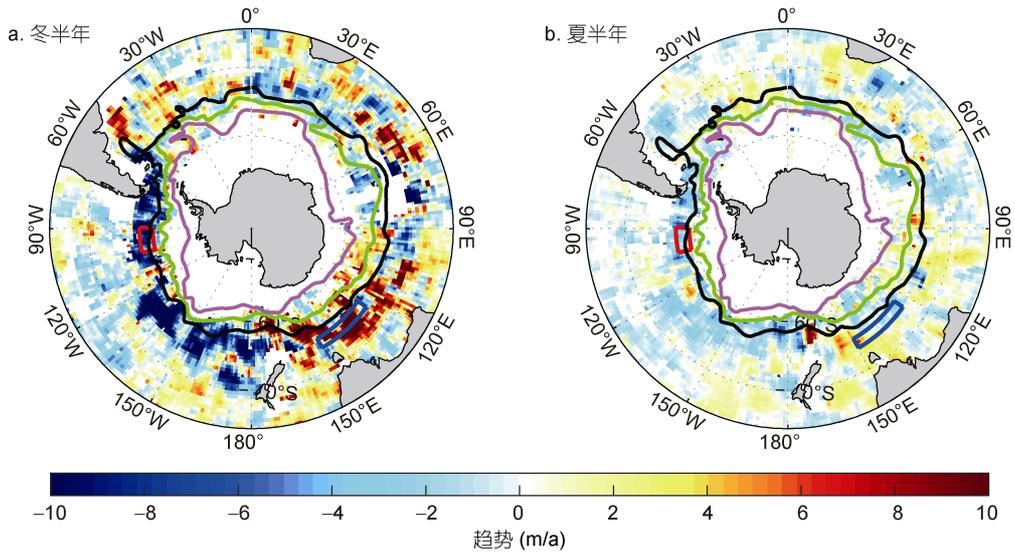


图 8 混合层深度变化趋势
Fig.8 Linear trend of MLD

年际变化上, SAM 可以通过净热通量和经向风调节 MLD(2.3 节), 该物理过程在长期趋势上是否依然成立需要进一步验证。为此, 对应于图 8 的混合层趋势, 图 9 和图 10 分别给出了净热通量和风场的趋势。对比可以发现, 在 MLD 趋势的中心带上 (120°E—60°W), 风场有很好的对应结构, 即风场增强的地方混合层加深, 反之亦然; 热通量的趋势则表现出更多的局地特征, 导致在部分区域与风场作用协同(如 150°—60°W, 120°E 附近)而在其它区域与风场作用相反(日界线附近)。相比较而言, 在长期趋势

上, 风场通过影响上层混合对 MLD 的调制作用要强于净热通量。这些作用与年际尺度上的结果有所不同。

3 结论

南大洋混合层存在明显的季节变化, 受热通量的损失以及风的搅拌的共同作用, 冬春两季混合层深度在副南极锋锋面以北达到最高值并呈带状分布, 夏秋两季由于海表加热混合层变浅, 季节变化幅度达到 400m 以上; 年际时间尺度上, 混合层深度受南

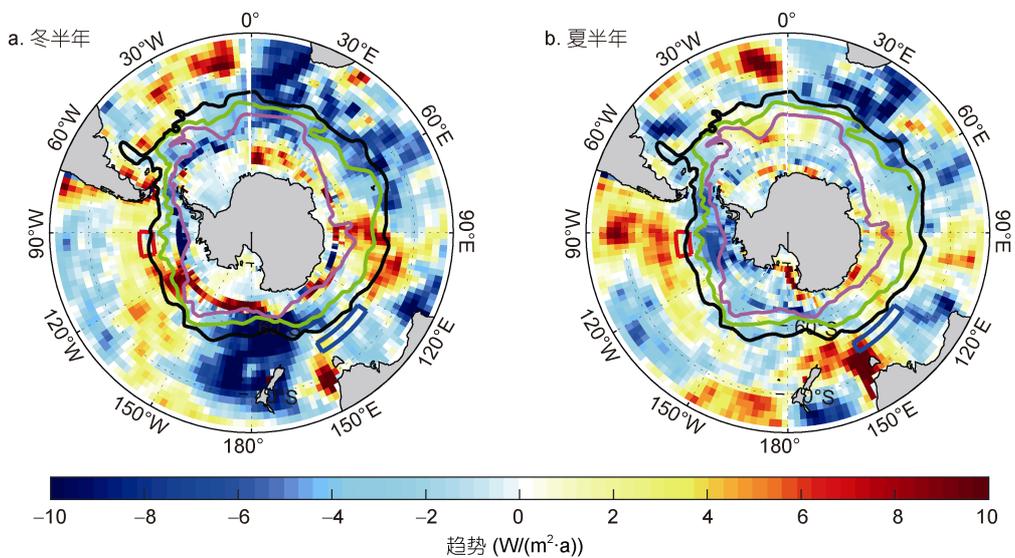


图 9 热通量趋势
Fig.9 Linear trend of net heat flux

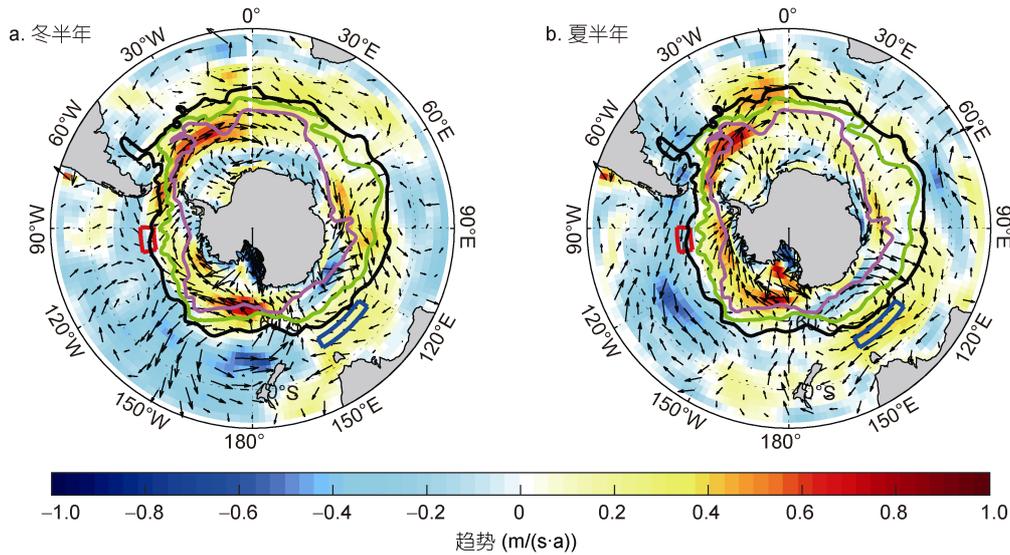


图 10 风场趋势

Fig.10 Linear trend of wind

半球环状模调制, 呈现纬向不对称的空间分布特征, 这与前人结果一致, 机理分析表明, MLD 对应 SAM 的响应是通过净热通量和经向风共同作用所致。本文指出在所研究时段, 南大洋混合层在东经 90°E 以东, 180°以西有加深趋势, 而在 60°W 以西, 180°以东有变浅趋势, 呈现偶极子分布特征, 这种趋势特征主要是风场的作用。

参 考 文 献

- 李晓峰, 李建平, 2012. 南半球环状模事件的准地转调整过程分析. *大气科学*, 36(4): 755—768
- Buonigorno Nardelli B, Guinehut S, Verbrugge N *et al*, 2017. Southern ocean mixed-layer seasonal and interannual variations from combined satellite and in situ data. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 122(12): 10042—10060
- de Boyer Montégut C, Madec G, Fischer A S *et al*, 2004. Mixed layer depth over the global ocean: an examination of profile data and a profile-based climatology. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 109: C12003
- Dong S F, Sprintall J, Gille S T *et al*, 2008. Southern ocean mixed-layer depth from Argo float profiles. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 113: C06013
- Downes S M, Farneti R, Uotila P *et al*, 2015. An assessment of southern ocean water masses and sea ice during 1988-2007 in a suite of interannual CORE-II simulations. *Ocean Modelling*, 94: 67—94
- Holte J, Talley L, 2009. A new algorithm for finding mixed layer depths with applications to Argo data and subantarctic mode water formation. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 26(9): 1920—1939
- Jones D C, Holt H J, Meijers A J S *et al*, 2019. Unsupervised clustering of southern ocean Argo float temperature profiles. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124(1): 390—402
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R *et al*, 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77(3): 437—472
- Marshall G J, 2003. Trends in the southern annular mode from observations and reanalyses. *Journal of Climate*, 16(24): 4134—4143
- Mikaloff Fletcher S E, Gruber N, Jacobson A R *et al*, 2006. Inverse estimates of anthropogenic CO₂ uptake, transport, and storage by the ocean. *Global Biogeochemical Cycles*, 20(2): GB2002
- Morrow R, Valladeau G, Sallée J B, 2008. Observed subsurface signature of Southern Ocean sea level rise. *Progress in Oceanography*, 77(4): 351—366
- Nardelli B B, Mulet S, Iudicone D, 2018. Three-dimensional ageostrophic motion and water mass subduction in the southern ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123(2): 1533—1562
- Ohlmann J C, Siegel D A, Gautier C, 1996. Ocean mixed layer radiant heating and solar penetration: a global analysis. *Journal of Climate*, 9(10): 2265—2280
- Orr J C, Maier-Reimer E, Mikolajewicz U *et al*, 2001. Estimates of anthropogenic carbon uptake from four three-dimensional global ocean models. *Global Biogeochemical Cycles*, 15(1): 43—60
- Pellichero V, Sallée J B, Schmidtko S *et al*, 2017. The ocean mixed layer under Southern Ocean sea-ice: seasonal cycle and forcing. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 122(2): 1608—1633
- Roemmich D, Johnson G C, Riser S *et al*, 2009. The Argo program: observing the global ocean with profiling floats. *Oceanography*, 22(2): 34—43
- Sabine C L, Feely R A, Gruber N *et al*, 2004. The oceanic sink for anthropogenic CO₂. *Science*, 305(5682): 367—371
- Sallée J B, Shuckburgh E, Bruneau N *et al*, 2013. Assessment of

- Southern Ocean mixed-layer depths in CMIP5 models: historical bias and forcing response. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118(4): 1845—1862
- Sallée J B, Speer K G, Rintoul S R, 2010. Zonally asymmetric response of the Southern Ocean mixed-layer depth to the Southern Annular Mode. *Nature Geoscience*, 3(4): 273—279
- Thompson D W J, Solomon S, 2002. Interpretation of recent Southern Hemisphere climate change. *Science*, 296(5569): 895—899
- Thompson D W J, Solomon S, Kushner P J *et al.*, 2011. Signatures of the Antarctic ozone hole in Southern Hemisphere surface climate change. *Nature Geoscience*, 4(11): 741—749
- Uotila P, Goosse H, Haines K *et al.*, 2019. An assessment of ten ocean reanalyses in the polar regions. *Climate Dynamics*, 52: 1613—1650

SPATIO-TEMPORAL VARIATIONS OF MIXED LAYER DEPTH IN SOUTHERN OCEAN

YING Mei-Jia, LIU Hai-Long, WANG Fu-Chang, ZHANG Zhao-Ru, ZHONG Yi-Sen
(Shanghai Jiaotong University, School of Oceanography, Shanghai 200240, China)

Abstract Researches on the Southern Ocean in the past were limited by the lack of long-term observations. The Array for Real-time Geostrophic Oceanography (Argo) project has continued to provide high-quality temperature-salinity observations since 1997, making it possible to comprehensively study the upper layer structure of the Southern Ocean. We used the Argo buoy observation data from 2000 to 2018 to analyze the temporal and spatial pattern characteristics of mixed layer depth (MLD) in the Southern Ocean. The results show that there is significant seasonal variation of mixed layer depth of the Southern Ocean. The MLD in winter and spring reaches its maximum in the north of the sub-Antarctic front in a strip shape. In summer and autumn, MLD becomes shallow due to surface heating, and the seasonal amplitude exceeds 400 meters. On interannual time scales, MLD is modulated by the southern hemisphere annular mode (SAM), which is consistent with previous results, showing an asymmetric zonal pattern. This research reveals that during the study period, the Southern Ocean MLD deepens within the eastern of 90°E and the western 180°W, while it shoals within the western of 60°W and the eastern of 180°. This spatial characteristic of dipoles is primarily driven by winds.

Key words Southern Ocean; mixed layer; interannual variability; Southern Hemisphere Annular Mode (SAM)