

倪旭彬, 杜凌, 史荒原. 大尺度环流异常对南极印度洋扇区海表面高盐异常的影响[J]. 海洋学报, 2021, 43(7): 23–34, doi:10.12284/hyxb2021111

Ni Xubin, Du Ling, Shi Huangyuan. The role of large-scale circulation on the consistent positive salinity anomaly in the Indian sector of the Antarctic[J]. Haiyang Xuebao, 2021, 43(7): 23–34, doi:10.12284/hyxb2021111

大尺度环流异常对南极印度洋扇区 海表面高盐异常的影响

倪旭彬¹, 杜凌^{1*}, 史荒原¹

(1. 中国海洋大学 海洋与大气学院, 山东 青岛 266100)

摘要: 南极印度洋扇区分布了许多南极底层水的生成区, 此海域海水盐度变化对全球的气候变化有着深远影响。本文采用 EN4 再分析数据、实测海豹资料和 WOD18 数据, 结合大气再分析和海冰密集度数据, 对南极印度洋扇区表面盐度长期变化及其对大尺度环流异常的响应进行探究。2008 年以来, 南极沿岸出现显著的海表面持续性高盐异常, 其中印度洋扇区变化最为显著, 表层高盐水主要集中在达恩利冰间湖附近与沙克尔顿冰架以北的海域。沿岸海域的高盐陆架水向北扩张且影响深度不断加深, 高盐的绕极深层水上涌也更加明显。此高盐异常与南极涛动 (Antarctic Oscillation, AAO)、印度洋偶极子 (Indian Ocean Dipole, IOD) 两种大尺度环流密切相关。AAO 与 IOD 正位相下, 西风显著增强, 促进海冰大量生成, 为海表面提供了大量的盐通量。同时, 海表面出现更显著的风场旋度负异常与低压异常, 促进高盐深层水上涌, 对高盐异常有重要维持作用。此外, 纬向风剪切与蒸发增强也是影响该高盐异常的重要局地过程。

关键词: 高盐异常; 南极印度洋扇区; 南极涛动; 印度洋偶极子

中图分类号: P731.12

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2021)07-0023-12

1 引言

气候变化背景下, 南极表层盐度的变化特征不仅体现了全球水循环的改变, 也与海洋和大气中的大尺度环流紧密联系, 对全球水循环和未来气候变化都将产生深远影响^[1]。与南极海冰变化类似, 南极表层盐度也表现出复杂的变化特征, 如不同盐度数据集呈现出的 20 世纪后半叶的趋势变化, 在 60°S 以南海域的差别很显著^[2]。南极印度洋扇区是南大洋变化的重要海区^[3]。近年来, 南极印度洋扇区的高盐异常现象十分明显, 咸化趋势在 60°S 以南、500 m 以浅的上层海

洋体现得最为显著^[4]。该海域包含我国南大洋调查的重点研究海域——普里兹湾, 众多学者对该海域水团也开展了广泛深入的研究, 发现存在 3 种高盐水体, 均为该海域的永久性水团, 分别为 67°S 以南至陆架区域的普里兹湾高盐陆架水、埃默里冰架前缘的高盐冰架水, 以及位于 63°~64°S 的绕极深层水^[5-7]。徐智昕等^[7]指出 2011 年普里兹湾湾口与陆架区分布着一条显著高盐带, 盐度超过 34.4。林丽娜等^[8]的研究结果也表明, 2009 年普里兹湾陆架的大部分水体出现高盐异常, 比 2004 年高约 0.75, 且高盐陆架水向北扩张。最近, Masuda^[9]使用 EN4 数据探究南极印度洋

收稿日期: 2020-12-29; 修订日期: 2021-01-27。

基金项目: 国家重点研发计划重点专项课题 (2018YFA0605701); 全球变化研究国家重大科学研究计划 (2015CB953902); 国家自然科学基金 (41576020, 41976217)。

作者简介: 倪旭彬 (1997—), 女, 福建省南平市人, 从事南极气候变化研究。E-mail: nxb@stu.ouc.edu.cn

* 通信作者: 杜凌, 副教授, 从事气候变化与极地海洋学研究。E-mail: duling@ouc.edu.cn

扇区上层水体的盐度变化特征,发现表层与次表层水体因受海冰等过程影响,盐度季节变化较为明显,其中 100 m 以浅的表层水体盐度在冬季最大,夏季最小。

南极上层海洋盐度变化与大尺度环流异常联系密切。已有的研究表明,南极涛动(Antarctic Oscillation, AAO)与印度洋偶极子(Indian Ocean Dipole, IOD)对南极海表面盐度变化的影响不可忽视。AAO 正位相期间,南半球中纬度西风增强,造成向北的埃克曼输送,以及大量的海冰生成^[10],为上层海洋贡献更多的盐通量^[11],促进了表层与次表层水体盐度的增大^[9]。另一方面,AAO 正位相下南极沿岸东风减弱,加深了沿岸的密度跃层,促使高盐的绕极深层水入侵陆架,有利于维持上层海洋的高盐特征^[12]。由于 AAO 与 IOD 强正位相的共同影响,南极印度洋扇区的海冰生成将显著增多,从而为海表面提供更多盐通量^[13]。同时,IOD 的正位相能够增强南极印度洋扇区沿岸的海表面蒸发^[14],同样有利于表层海水出现高盐异常。

局地过程对海表面盐度也有重要影响,有贡献的局地因素主要包括蒸发增加与降水减少^[14]、淡水水平流减弱^[15],以及南极沿岸海冰生成的增强^[16]。局地风和风场旋度变化影响蒸发与降水的强弱,是影响海表面盐度的淡水通量的重要原因。南极印度洋扇区及其以北的海域盛行下降风且风速较大,使得蒸发增强、降水减弱^[17],也促使海表面盐度增加。局地风也可以通过埃克曼抽吸促进混合层加深,有利于下层的高盐水与表层水之间的对流混合^[18],增大上层水体的盐度并减弱层化。西风带增强南移,沿岸东风南退并减弱,由局地东风驱动的沿岸淡水平流减少^[15],也将使得沿岸的表层水体盐度增大。

目前,有关南极印度洋扇区海洋水团性质和划分方面已取得重要进展,而在盐度长期变化与大尺度环流异常的联系等方面仍需深入。本文探讨了南极印度洋扇区长期持续的海表面高盐异常现象与 AAO、IOD 等环流异常的联系,主要利用实测 CTD 和 EN4 数据详细分析了该海区高盐异常的时空分布特征,进而从 AAO、IOD 影响下的大尺度环流和局地过程的角度,讨论这一海表面高盐异常的影响机理。

2 数据

2.1 盐度数据

EN4 数据^[19]为经过质量控制的实测海洋温盐剖面再分析数据,包含 Argo、WOD09、ASBO(Arctic Synoptic Basin-wide Oceanography)以及美国 GTSP

(Global Temperature and Salinity Profile Programme) 实测廓线。由英国气象局哈德利气候变化中心(Met Office Hadley Centre for Climate Change)提供,目前版本为 EN4.2.1。本文采用的是其全球海洋温盐场月均数据,空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 。根据 Durack 和 Wijffels^[5] 计算全球温盐趋势的研究,并考虑了数据网站对 2019–2020 年 EN4 盐度数据的使用提示,本文选定南极印度洋扇区($60^\circ \sim 71^\circ \text{S}$, $30^\circ \sim 120^\circ \text{E}$)为研究海域,选取 1950–2018 年的盐度资料进行分析。

WOD18(World Ocean Database 2018)^[20]数据由政府间海洋学委员会(IOC)下设的“国际海洋学数据和信息交换”计划(IODE)和美国国家海洋和大气管理局(NOAA)的国家环境信息中心(NCEI)共同提供(以下称 WOD 数据),经月平均处理后,得到该海域 1981–2018 年间的盐度时间序列。

海豹数据^[21]由 MEOP(Marine Mammals Exploring the Oceans Pole to Pole)收集并发布(以下称 MEOP 数据),根据安置在海豹身上的 CTD 等仪器,获得各海域的物理、生物、地质、化学等海洋变量的实测资料。本文采用澳大利亚海洋集成观测系统(Integrated Marine Observing System, IMOS)、德国 PANGAEA 数据中心以及法国提供的南极印度洋扇区海豹数据资料,选取南极印度洋扇区中温盐结构较为合理、具有代表性的温盐廓线,得到该海区 2004–2018 年温盐数据。

2.2 大气数据

本文采用的大气再分析数据为哥白尼气候变化服务中心提供的 ERA5 全球再分析产品^[22],数据包括 1978 年至今的大气变量,比 ERA-Interim 覆盖了更长的时段、提供更多的变量且具有更高的时空分辨率,数据网址为: <https://cds.climate.copernicus.eu/>。本文使用月均的 10 m 风速、海平面气压、蒸发和降水数据,数据空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,时间范围为 1979–2018 年。此外,大尺度环流指数包括 AAO 指数和 IOD 指数^[23],它们分别由 NOAA 下设的气候预测中心(Climatology Prediction Center, CPC)、全球气候观测系统(Global Climate Observing System, GCOS)提供。

2.3 海冰数据

海冰密集度数据^[24]由美国国家冰雪数据中心(NSIDC, <https://nsidc.org/>)提供,本文采用 Passive Microwave Sea Ice Concentration v3 的月均数据。该数据的空间分辨率为 $25 \text{ km} \times 25 \text{ km}$,时间范围为 1980 年 1 月至 2018 年 12 月。目前,与其他两种海冰密集度算法的结果相比,基于该版本数据得到的南极海冰密集度与

实测数据相比,误差最小^[25]。本文选取了1980–2018年的海冰密集度月均数据。

3 南极印度洋扇区盐度变化

3.1 表层分布

印度洋扇区是南极海表面盐度长期变化的关键区之一。60°S以南的南极海表面盐度 EOF 分析的第一、第二模态及时间序列,均体现了印度洋扇区高盐现象的出现与持续(图1)。第一模态方差贡献率约23.1%,1950–2018年南极海表面盐度变化基本一致,总体而言东南极比西南极变化更显著。其中,南极印度洋扇区(30°~120°E)的盐度变化最为显著,南极半岛西侧的别林斯高晋海与威德尔海以西海域的盐度变化次之。结合时间序列的变化可以发现,在2008年之前,60°S以南的海表面盐度变化较小,季节变化并不明显;此后,南极表层盐度由负异常逐渐转变为显著的正异常。2008–2018年,时间序列则表现为持续盐度正异常叠加以显著的季节变化(图1a)。滤掉季节变化后,这种持续显著的高盐异常现象仍然存在,可能与大尺度环流异常有关(4.1节)。

海表面盐度的偶极子分布是南极盐度变化的重要特征之一,主要出现在第二模态,其方差贡献率为10.5%。这种分布特征可能与南极海冰偶极子(Antarctic Dipole, ADP)^[26]密切相关,也可能与两个海区存在深层水的上涌有关。这种盐度偶极子分布与 EOF1

的关键区明显不同,表现为南极印度洋扇区与罗斯海的海表面盐度呈同相变化,而与南极半岛周边海域的海表面盐度则为反相变化。2008–2018年印度洋扇区与罗斯海均呈现显著的增盐趋势,也有利于南极海表面的高盐异常持续存在。EOF前两个模态均显示,2008–2018年60°S以南海表面盐度表现出明显的季节振荡增强。

南极印度洋扇区的实测资料也显示2008年后持续显著的海表面高盐异常(图2a)。EN4数据与实测资料的表现基本一致,低盐特征在2008年以后几乎发生了逆转。依据这种盐度变化特征,本文以1979–2002年、2008–2018年两个时段(通过置信度为99%的均值检验),重点探讨该海域盐度的长期变化。小波分析的结果同样也显示,表层盐度在前一时间段主要表现为无明显周期性的低盐特征,而在近年来(2008–2018年)表现出季节性和年际变化相叠加的高盐特征,两个时段间表层盐度增加了0.2。2008年开始持续性地出现12~16个月、32个月的显著周期(通过置信度为95%的显著性检验,图2b)。两个时段的WOD和MEOP资料,也证实了该海域前期低盐、后期高盐的特征,其盐度变化可达0.8。我们同时也发现,海豹MEOP数据所表现出的高盐现象更为显著,这可能是由于海豹记录时间与生活习性有关。而2008年后的WOD数据主要集中在低盐的夏季,数据连续性明显不如海豹MEOP数据,故该时段的实测

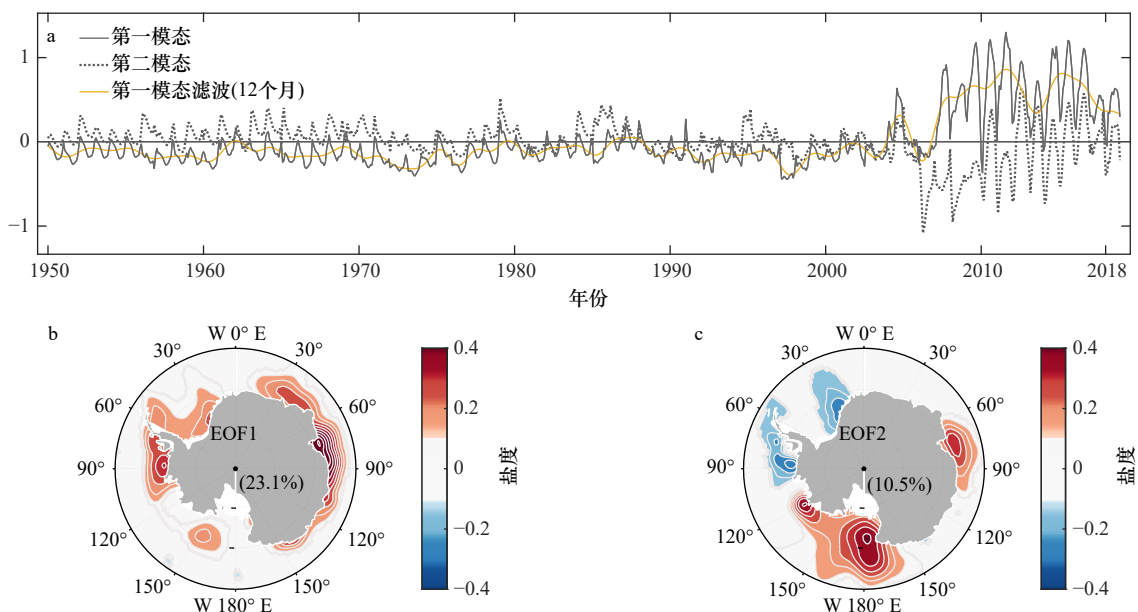


图1 1950–2018年60°S以南的EN4海表面盐度 EOF 分析结果

Fig. 1 The first two EOFs of EN4 sea surface salinity in the south of 60°S from 1950 to 2018

a为 EOF 分析的时间序列。b、c分别为 EOF 分析的第一、第二模态,图中数值为对应的方差贡献率
The time series of the first two EOFs are shown in a. b and c are the first and second mode with each contribution

数据主要参考了 MEOP 数据。

南极印度洋扇区的表层高盐异常主要集中在南极沿岸, MEOP、WOD 数据实测数据更为清晰的呈现出近年来的高盐异常特征(图 3)。2008–2018 年表层盐度为 33.9 ± 0.09 , 在埃默里冰架、沙克尔顿冰架及邻近冰间湖附近海域出现显著的高盐特征, 如沙克尔顿

冰架(Shackleton Ice Shelf, SIS)及其以北海域($95^\circ \sim 115^\circ \text{E}$)出现盐度高于 34.5 的高盐冰架水; 达恩利冰间湖(Darnley Polynya, DP)附近($62^\circ \sim 81^\circ \text{E}$)也存在这一高盐水, 但分布范围较前者而言更为集中。相较而言, 前一时间段内的绝大部分海域表层海水盐度低于 33.9, 埃默里冰架前缘出现盐度低至 33.4 的低温低

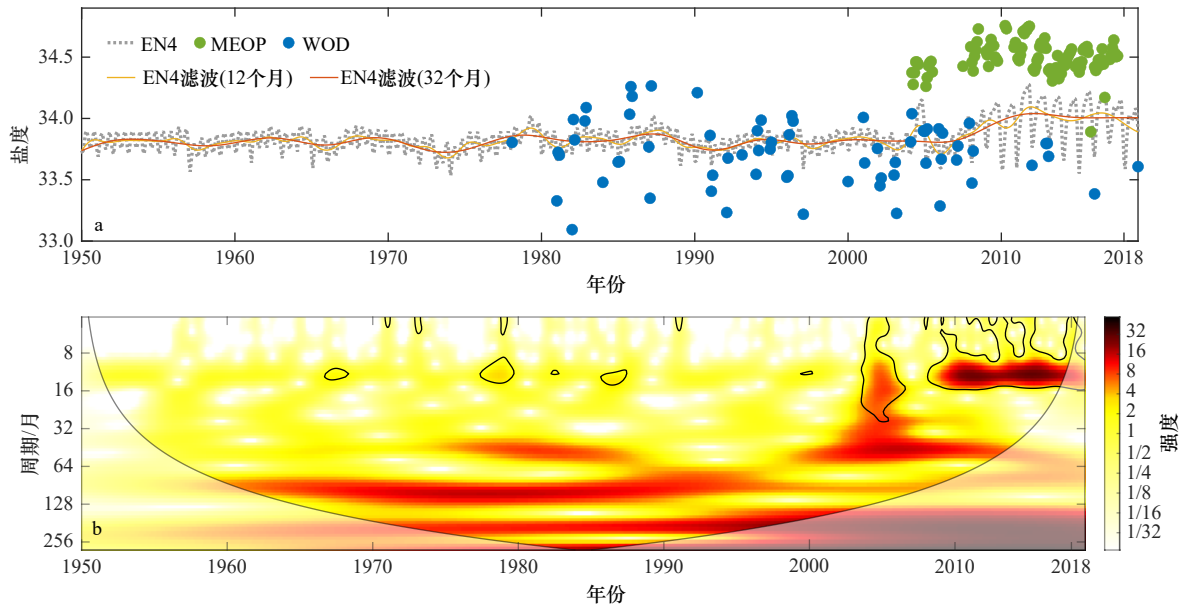


图 2 南极印度洋扇区表层盐度变化(a)及其小波分析(b)

Fig. 2 The low frequency change of sea surface salinity derived from the observed and reanalysis data (a) and the wavelet analysis (b) in the Indian sector of the Southern Ocean (ISO)

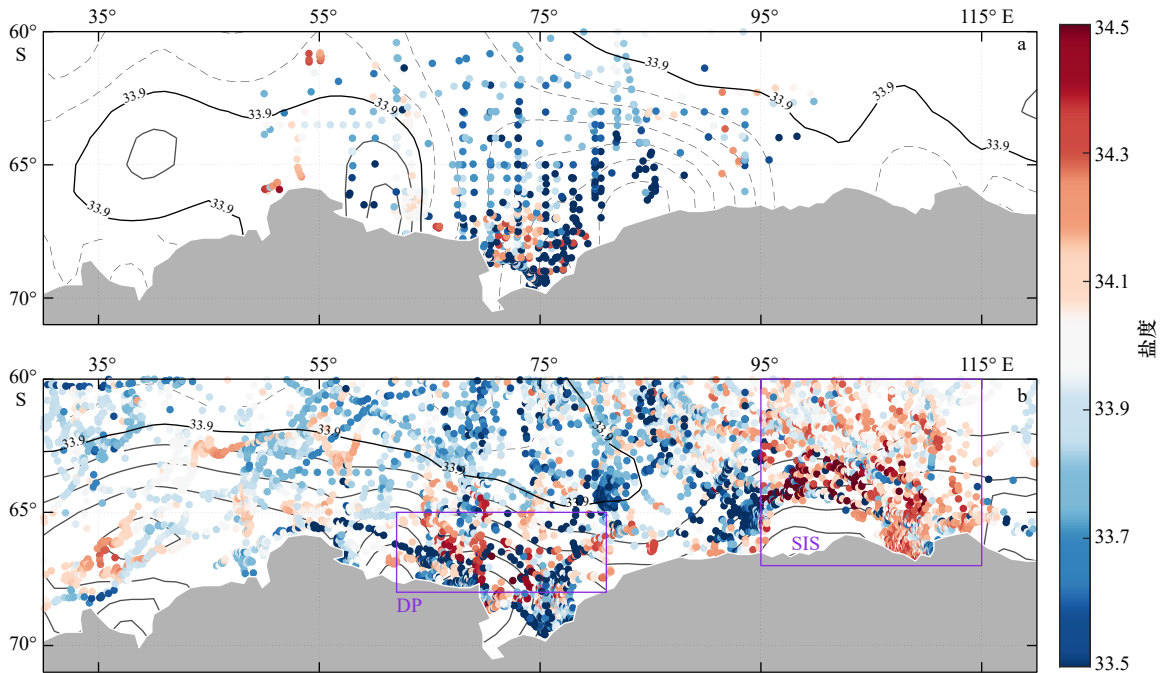


图 3 MEOP、WOD 与 EN4 数据给出的 1979–2002 年(a)、2008–2018 年(b) 的南极印度洋扇区表层盐度分布

Fig. 3 Surface salinity distribution derived from MEOP, WOD and EN4 in the Indian sector of the Antarctic during 1979–2002 (a) and 2008–2018 (b) respectively

盐的普里兹湾表层水, 仅在沿岸的达恩利冰间湖附近海域存在高盐水体, 且较 2008–2018 年更为集中也盐度偏低^[11,18]。

对比两个时段 EN4 数据盐度的空间分布可以看出, 南极印度洋扇区的海表面盐度在沿岸明显较大。与前一个时间段相比, 2008–2018 年 33.9 等盐线由南极沿岸向北退缩, 高盐水体基本占据了 65°S 以南的南极印度洋扇区沿岸海域(图 3b 中的灰实线)。95°E 以西、65°S 以北的深海平原是低盐表层水仅存的影响区域。前一个时间段的等值线以 60°E 的沿岸为中心向外海延伸, 盐度逐渐变小。在此期间, 海表面盐度基本低于 33.9。在后一个时间段内, 等盐线以 60°~70°E、110°E 的沿岸海域为中心向外海延伸, 中心沿岸海域盐度高于 33.9, 体现出南极印度洋扇区的海表面盐度增大、高盐范围增加。

3.2 垂直结构

盐度垂直结构的变化主要集中在 200 m 以浅的上层海洋(图 4a)。考虑到 2008–2018 年表层盐度季节变化增强(图 1), 本文选择海表面盐度年变化显著且与海冰季节性生消密切相关的冬季(7月)、夏季(2月)的实测 WOD 与 MEOP 数据的盐度廓线, 兼顾了观测数据点尽可能多、覆盖的时间也较长, 并且能够反映盐度垂直廓线在 1979–2018 年的逐年变化。盐度在不同季节的年际变化表明, 不论是海冰生成、海表面盐度较高的冬季(图 4b), 还是在海冰消融、海表面盐度较低的夏季(图 4c), 南极印度洋扇区表层及次表层的盐度在 2008 年后均表现出明显的高盐

异常。

2008–2018 年的上层海洋盐度比 1979–2002 年平均盐度明显增大(图 4a), 增盐现象在 50 m 以浅尤为显著。盐跃层深度约为 100 m, 跃层以上水体的盐度随深度变化较小。主要的增盐区域集中在 62°~81°E 之间的沿岸海域(图 3), 这里分布着达恩利冰间湖、麦肯齐冰间湖和普里兹湾冰间湖, 高盐异常与冰间湖的结冰析盐过程密切相关^[16]。在海冰生成期间, 100 m 以浅的海水均存在盐度明显增大现象。此时跃层较深, 上混合层厚度可达 120 m。表层水体在海冰融化期间则表现为盐度降低(图 4c), 上层海洋对流明显减弱, 跃层甚至浅于 50 m, 并且 150 m 以深的盐度亦有所增加。年均盐度廓线清晰的呈现出这一高盐异常的垂直结构变化, 与 1979–2002 年相比, 2008–2018 年的平均盐度的高盐异常主要发生在 0~50 m 的表层、150~500 m 的深层, 而在次表层 50~150 m 深度内略有变淡。其中, 次表层的变淡可能与史久新^[27]所概述的变性绕极深层水携带的热量入侵冰腔所导致的底部融化有关。总体说来, 跃层在 2008–2018 年明显减弱, 这可能与深层水变化有关。

南极印度洋扇区盐度经向断面在前后两个时间段的对比, 体现了高盐陆架水的向北扩张, 以及绕极深层水涌升的增强。图 5 给出了两个时段经向断面的盐度(阴影)、温度(等值线)结构。黑色实线(34.2 等盐线)指示的是南极印度洋扇区冰间湖结冰析盐产生对流, 使得表层水与深层高盐水发生混合的等盐面^[16]。在前一时间段内, 低温低盐的水体广泛存

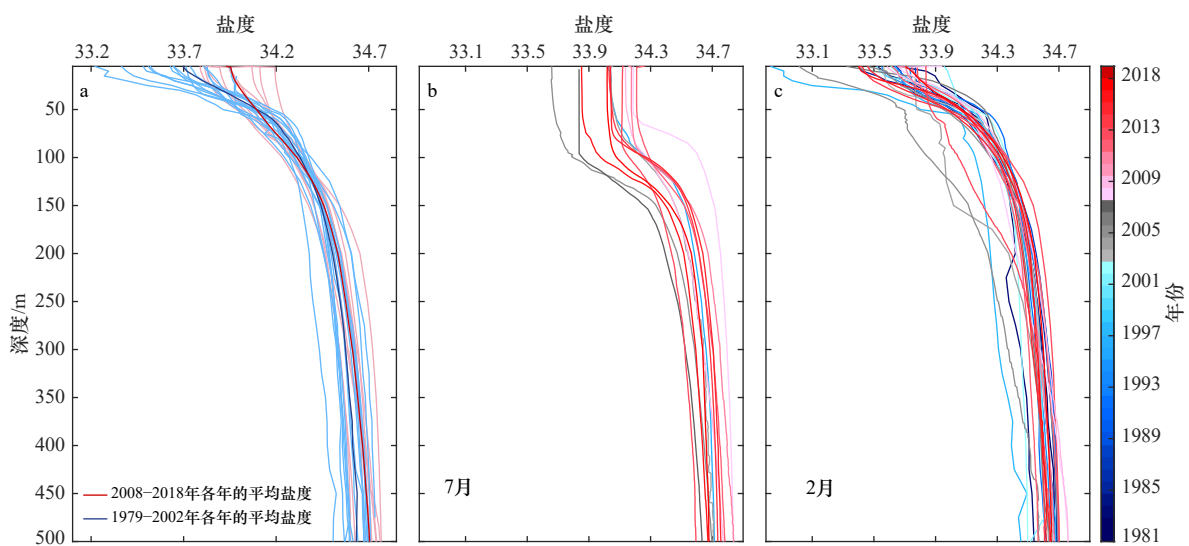


图 4 南极印度洋扇区两个时段的实测年均盐度(a)、各年7月(b)和2月(c)盐度的垂直廓线

Fig. 4 The mean salinity profile observations in ISO during two time periods (a), and mean salinity profile in July (b), February (c) of each year

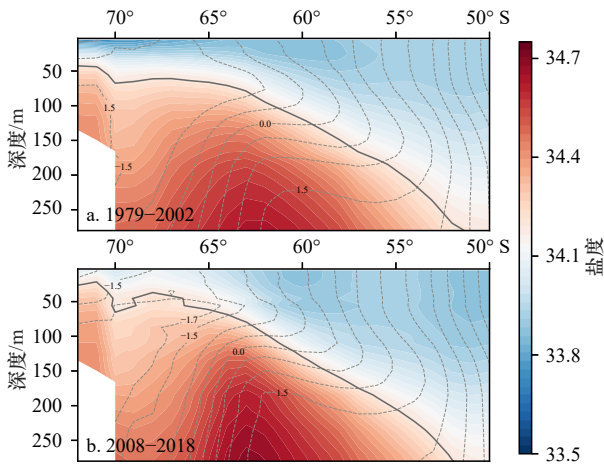


图5 1979–2002年(a)和2008–2018年(b)南极印度洋扇区EN4经向温(等值线,单位:°C)盐断面
Fig. 5 Meridional mean salinity and temperature (isoline, unit: °C) sections in ISO (30°–120°E) during 1979–2002 (a) and 2008–2018 (b)

在于 60°S 以南、50 m 以浅的近表层, 50 m 以浅的水体分层明显。南极辐散带附近、盐度大于 34.5 的绕极深层水集中于 150 m 以深, 其北侧的水体盐度较低而南侧高。2008–2018 年期间近表层水体增盐明显。绕极深层水上涌以 63°S 为核心, 更为集中并向南入侵, 出现高盐的绕极深层水显著入侵陆架。34.2 等盐线爬升至 50 m 以浅, 最浅可达 20 m。Guo 等^[28]在普里兹湾的研究也发现了变性绕极深层水涌升入侵陆架, 上层低盐水明显向北堆积, 盐度低于 34.2 的水层明显变薄, 表明表层水与深层水混合可以

发生在更浅深度上。100 m 深度附近的绕极深层水向上层海洋的入侵更明显。此外, 北扩的高盐陆架水与南侵的绕极深层水之间的温盐梯度也变得更大。

从整个断面来看, 2008–2018 年间高盐陆架水体积显著增大, 绕极深层水上涌增强, 近岸(65°S 以南)上层水体混合更加均匀。北扩的高盐陆架水直接影响了印度洋扇区高盐异常的水平分布与垂直结构, 而绕极深层水的涌升对表层水体增盐也有很大促进作用^[28]。以上高盐异常现象出现及持续时间与近年来 AAO、IOD 正位相密切相关, 为深入探究与两者的可能联系, 下文着重从大尺度环流异常和局地过程的角度进行讨论和分析。

4 大尺度环流的作用

4.1 AAO、IOD 的影响

AAO、IOD 正位相期间南极印度洋扇区海表面表现出显著的高盐异常(图6)。依据 AAO 和 IOD 指数, 确定大尺度环流异常(超出 1 倍方差)的显著年份(表1)。大尺度环流异常年份下表层盐度异常(SSSa)的合成分析与 EOF 分析结果(图1)相似, 南极印度洋扇区、南极半岛–威德尔海附近海区在 AAO、IOD 正位相期间均出现显著的高盐异常, 罗斯海及其邻近海域则表现为盐度负异常。AAO 与 IOD 负位相期间, 南极印度洋扇区也呈现出显著的盐度负异常。环流指数的时间序列显示, 自 2008 年以来 AAO 与 IOD 主要表现为正位相(表1), 是导致南极印度洋扇

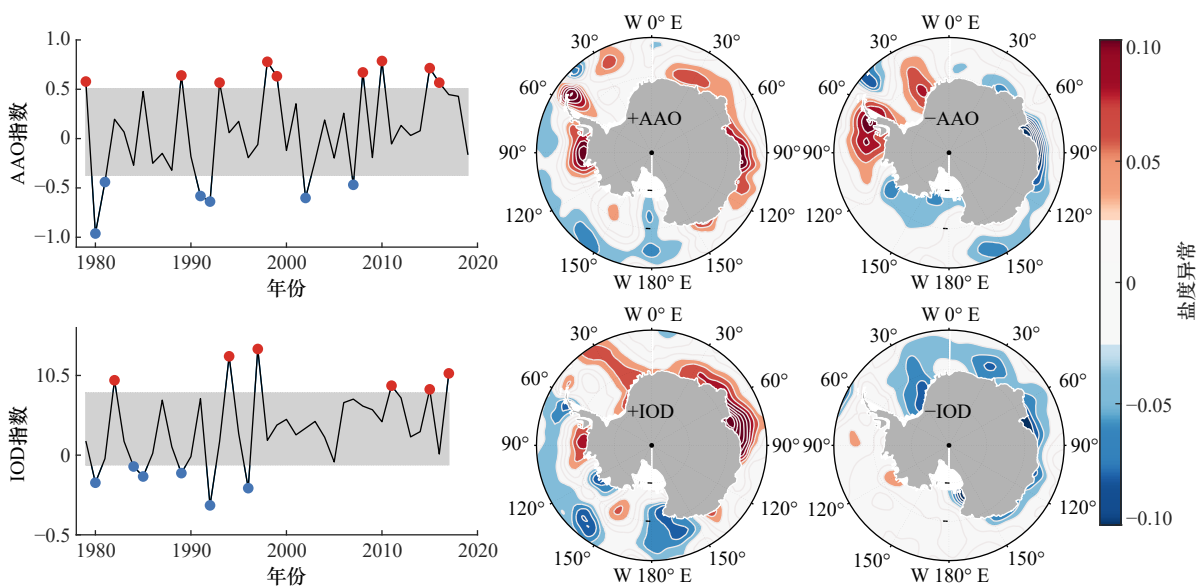


图6 1979–2018 年间 AAO、IOD 指数序列与环流异常期间的南极海表面盐度异常合成分析结果
Fig. 6 The AAO and IOD indices and the corresponding composite analysis of sea surface salinity anomaly in the Antarctic from 1979 to 2018

表1 1979–2018年间 AAO、IOD 指数的环流异常年份

Table 1 The anomaly years of AAO and IOD indices from 1979 to 2018

环流	正位相	负位相
AAO	1979、1989、1993、1998、1999、2008、2010、2015、2016	1980、1981、1991、1992、2002、2007
IOD	1982、1994、1997、2011、2015、2017	1980、1984、1985、1989、1992、1996

区的高盐异常长期存在(图2)的主要大尺度环流背景。为探究大尺度环流系统对高盐异常的影响,本文分析了 AAO、IOD 指数与南极印度洋扇区 SSSa 时间序列的超前滞后相关(图略),结果表明对于 SSSa 低频变化,特别是年际尺度上的变化,AAO 超前 1~2 年时正相关系数最大($r \geq 0.7$),而 IOD 超前 1~2 年和 6~10 年有显著正相关($r=0.6 \sim 0.7$),相关系数均通过 95% 的置信检验,这在某种程度上表明 AAO 较 IOD 的影响更显著。

大尺度环流异常(AAO 与 IOD 正位相)主要通过风场旋度、海冰消融影响南极印度洋扇区的海表面盐度变化。本文利用多年逐月的大气要素(包括风、气压、蒸发和降水)和海冰密集度进行合成分析用以探究 AAO 和 IOD 正、负位相的不同响应过程。图7 等值线表示海表面气压异常(实线代表正异常,虚线代表负异常),阴影表示风场旋度异常。AAO 与 IOD 正位相时 60°S 以南的南大洋表现为较为一致的气压

场和风场旋度的响应,体现为强劲的风场旋度负异常与低压异常,这种影响在冬季(6–8 月)体现得更加明显(图7),以 AAO 正位相时的南极印度洋扇区最为显著。风场旋度异常通过增强埃克曼抽吸,促进绕极深层水涌升,有利于对流混合过程产生海表面的高盐异常。这种作用在静力稳定度较差的南极印度洋扇区影响更加明显^[29]。海冰异常的响应主要发生在秋季(3–5 月)海冰生成期间,因秋冬季风场异常无明显变化,故图8 将秋季海冰和冬季风场异常进行合成分析。AAO、IOD 正位相期间,西风带向极移动,南极沿岸东风向南退缩,南极印度洋扇区沿岸出现强劲的西风异常,促进海表面气温降低,有利于海冰的生成、结冰析盐产生的高盐水的向北输运^[30]。纵观 60°S 以南的南大洋,威德尔海对 AAO、IOD 正位相的响应过程与印度洋扇区相近,在罗斯海则明显不同,尤其是 IOD 正位相期间的秋季海冰异常。

比较 AAO 和 IOD 不同位相期间的大气和海冰变

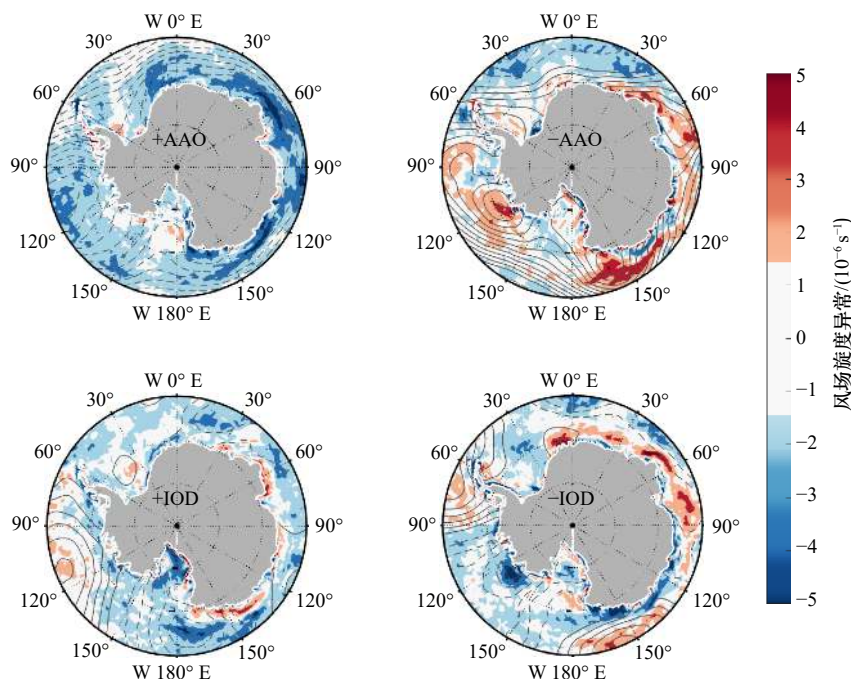


图7 南极冬季海表面气压异常与风场旋度异常的合成分析

Fig. 7 The composite analysis of sea surface pressure anomaly and wind curl anomaly in the Antarctic in winter

图中实线代表正异常,虚线代表负异常

The solid line and the dashed line are corresponding to the positive and negative anomaly respectively

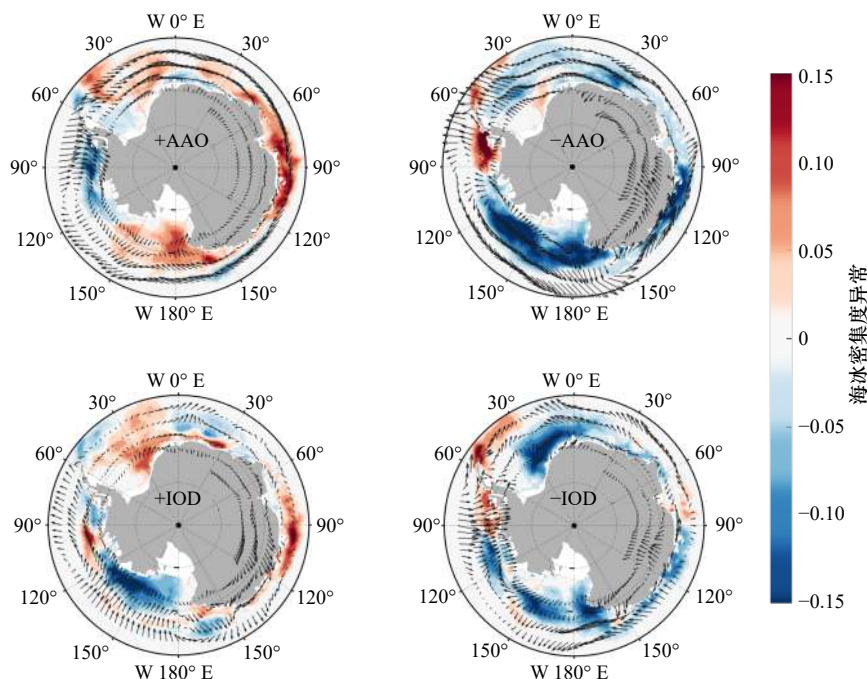


图 8 南极冬季风场异常与秋季海冰密集度异常的合成分析

Fig. 8 The composite analysis of winter wind anomaly and autumn sea ice concentration anomaly in the Antarctic

化,也表明大尺度环流异常的响应过程是影响印度洋扇区盐度变化的重要因素。如 AAO 与 IOD 负位相期间,南极印度洋扇区的风场与气压场呈显著的正异常(图 7),不利于绕极深层水的上涌与表层结冰析盐产生的卤水进行对流混合^[1],上层水体增盐受到阻碍。IOD 负位相期间仅在南极 60°~90°E 范围内表现出弱的海冰正异常(图 8),60°S 以南的西风也较弱,主要表现为东风异常,水体向岸积聚,不利于暖而咸的深层水上涌以及混合增密过程的持续^[31]。

4.2 局地过程的响应

在大尺度环流异常的背景下,局地风场剪切与蒸发的增强也是高盐异常的重要影响因素。根据前文分析得到的南极印度洋扇区的典型高盐异常区(图 3 的 SIS 和 DP 附近海域),着重探讨了 SSSa 与局地风场(纬向风、风场旋度)异常的滑动相关关系(图 9)。图中虚线指示 95% 的显著性检验域。

滑动相关的结果表明,2008 年后,纬向风异常、风场旋度异常共同促进了高盐异常区(SIS、DP 区)的高盐异常。在 SIS 附近海域,纬向风与高盐异常的正相关在前一时段短暂存在,而在 2008–2018 年间则显著增强,与此同时局地风旋度负异常与高盐异常表现出持续的负相关,这种影响主要表现为局地风旋度负异常下,增强的埃克曼抽吸对高盐深层水涌升的促进作用。西风异常与局地风旋度负异常的影响在 DP 附近海域也有明显体现,2008–2018 年间,纬向风与

SSSa 的相关性也由负变正,对高盐异常现象具有促进作用。这是由于近年来 AAO、IOD 正位相下的西风增强有关。西风风速增大且向极移动,增强了水体离岸的埃克曼输送。由于补偿作用,沿岸高盐深层水上涌,与表层高盐水的混合得到促进。同时,沿岸的东风减弱^[12],减少了表层的湍流热通量使海表面的温度降低^[32],使表层水体在对流混合过程中仍具有持续生成海冰并产生高盐水的的生产能力。

此外,AAO 与 IOD 正位相显著增强了沿岸海域的蒸发,对该海区海表面盐度的增大有直接影响(图 10),相较而言降雨的变化影响不大。图中阴影表示蒸发异常,实线(虚线)表示降水正(负)异常。与 1979–2002 年相比,2008–2018 年南极印度洋扇区的海表面蒸发明显增强,尤其集中在沿岸冰间湖、SIS 附近以及 65°S 以北、55°E 以东的海域。这种特征在 AAO、IOD 正位相下体现得更加明显。

当 IOD 处于较强正位相时,纬向风的经向梯度增强,向极移动的西风与减弱的东风使沿岸的风场剪切增大;另一方面,从热带到印度洋东部的罗斯贝(Rossby)波列能够调节海冰带附近的气旋活动^[13]。这两种作用都能在南极印度洋扇区激发更多的气旋式环流^[32],促进海表面蒸发的增强。同时,AAO 正位相也有利于气旋频率增大^[33],这种蒸发的增强应是 AAO 与 IOD 的共同影响。

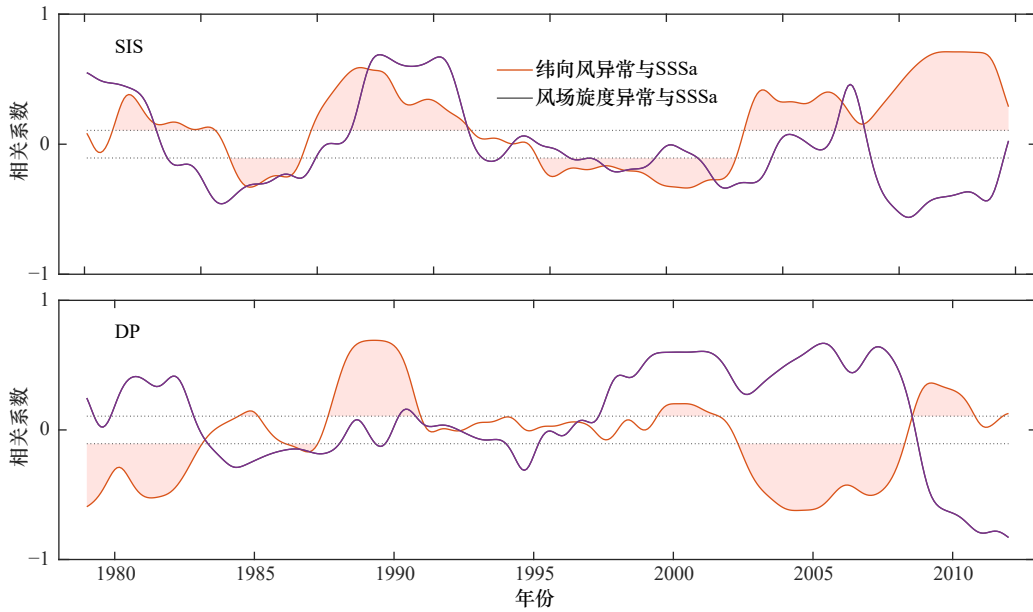


图9 高盐异常区(图3)的SSSa与局地风场的滑动相关

Fig. 9 The running-mean correlation coefficients of zonal wind anomaly and wind curl anomaly with SSSa in the positive salinity anomaly (Figure 3)

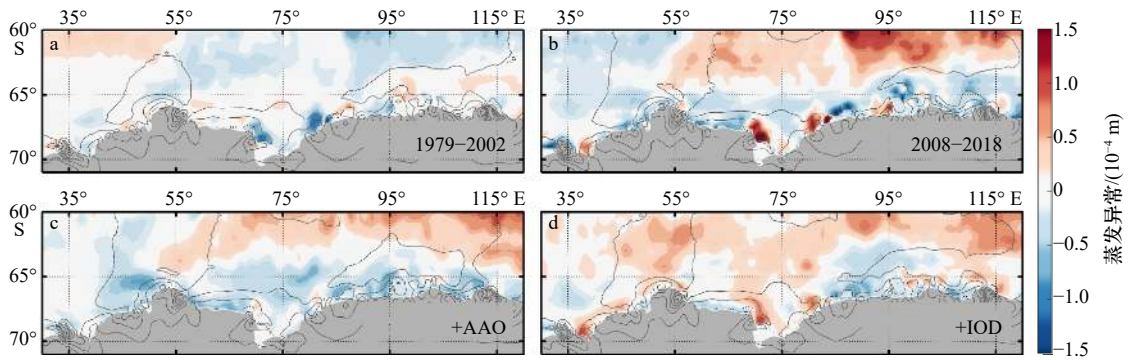


图10 蒸发异常与降水异常在1979-2002年、2008-2018年两个时间段的平均态与AAO、IOD正位相下的合成分析

Fig. 10 The climatological evaporation and precipitation anomaly during the 1979-2002, 2008-2018, and the composite analysis of AAO, IOD positive phases

图中颜色表示为蒸发异常,等值线表示降水异常,实线对应正异常,虚线对应负异常。a、b为二者在两个时间段的平均态,c、d为二者在AAO、IOD下的合成分析

The shading color represents evaporation anomaly. The solid line and the dashed line are the positive and negative precipitation anomaly, respectively. a and b are the climatology of evaporation/precipitation anomaly in two period, c and d are their composite analysis corresponding to positive AAO and IOD phase

5 总结与讨论

本文采用实测 MEOP、WOD 资料和 EN4 再分析数据对 60°S 以南的南极海表面高盐异常现象进行分析,探讨大尺度环流(AAO 和 IOD)异常的影响。EOF 分析表明,印度洋扇区是南极海表面盐度长期变化的关键区之一。2008-2018 年间,该海区海表面盐度变化表现为持续的高盐异常,并叠加以显著的 12~16 个月、32 个月的变化。这种高盐异常集中在 SIS 和

DP 附近海域。高盐异常的影响深度加深,100 m 以浅的水体均存在盐度明显增大的现象,其中冬季是最显著的。混合层内的低盐水向北退缩,65°S 以南的水体明显咸化,致使高盐陆架水的体积增大,绕极深层水涌升增强且显著入侵,两种高盐水体间的混合变得更加均匀。

此高盐异常现象与近年来大尺度环流 AAO、IOD 持续的正位相及其在局地产生的影响有关。在 AAO 与 IOD 的正位相下,南极印度洋扇区表现出显

著的风场旋度负异常与低压异常,增强了埃克曼抽吸与高盐绕极深层水的上涌,有利于对流混合过程产生海表面的高盐异常。同时,西风显著增强并向极移动,有利于海冰大量生成,发生在冰间湖与冰架底部冷冰腔的结冰析盐过程能够提供大量高盐水。另一方面,增强的西风使离岸的水体输送增强,绕极深层水在近岸涌升并入侵陆架,与表层结冰析盐的高盐水发生对流混合,且埃默里冰架的冷冰腔有利于高盐陆架水的生成,并且阻碍了高温、高盐的绕极深层水融化冰架底部^[27],有利于该高盐现象的维持。AAO 与 IOD 的局地影响在 SIS 和 DP 两个高盐异常区表现得最为显著。2008 年后纬向风异常与高盐异常呈持续显著的正相关,体现沿岸西风异常促使 SIS 与 DP 附近水体的离岸输送,由于补偿作用,沿岸高盐深层水与表层高盐水的混合得到促进。2008–2018 年期间,AAO 与 IOD 持续的正位相增大了沿岸风场剪切,增强该海区的海表面蒸发,对高盐异常有直接的促进作用。这种影响在达恩利冰间湖、麦肯齐冰间湖、普里兹湾冰间湖、沙克尔顿冰架附近海区体现得更加显著。

参考文献:

- [1] Haumann F A, Gruber N, Münnich M, et al. Sea-ice transport driving Southern Ocean salinity and its recent trends[J]. *Nature*, 2016, 537(7618): 89–92.
- [2] Durack P J. Ocean salinity and the global water cycle[J]. *Oceanography*, 2015, 28(1): 20–31.
- [3] Durack P J, Wijffels S E. Fifty-year trends in global ocean salinities and their relationship to broad-scale warming[J]. *Journal of Climate*, 2010, 23(16): 4342–4362.
- [4] Curran M A J, Van Ommen T D, Morgan V I, et al. Ice core evidence for Antarctic sea ice decline since the 1950s[J]. *Science*, 2003, 302(5648): 1203–1206.
- [5] 林丽娜, 陈红霞, 刘娜. 普里兹湾及邻近海域多航次水文特征比较分析[J]. *海洋科学进展*, 2015, 33(4): 460–470.
Lin Li'na, Chen Hongxia, Liu Na. A comparative analysis on hydrographic features during several cruises in the region of Prydz Bay, Antarctica[J]. *Advances in Marine Science*, 2015, 33(4): 460–470.
- [6] 陈红霞, 林丽娜, 史久新. 南极普里兹湾及其邻近海域水团研究[J]. *海洋学报*, 2014, 36(7): 1–8.
Chen Hongxia, Lin Li'na, Shi Jiuxin. Study on water masses in Prydz Bay and its adjacent sea area[J]. *Haiyang Xuebao*, 2014, 36(7): 1–8.
- [7] 徐智昕, 许建平, 高郭平, 等. 2011 年冬季南极普里兹湾及其邻近海域水文特征与水团分析[J]. *海洋科学进展*, 2016, 34(2): 226–239.
Xu Zhixin, Xu Jianping, Gao Guoping, et al. Study on hydrographic features and water masses in the Prydz Bay and its adjacent waters in Antarctic winter of 2011[J]. *Advances in Marine Science*, 2016, 34(2): 226–239.
- [8] 林丽娜, 陈红霞, 刘娜. 南极普里兹湾 73°E 断面地转流及水文特征分析[J]. *海洋科学进展*, 2013, 31(3): 332–342.
Lin Li'na, Chen Hongxia, Liu Na. Zonal geostrophic currents and hydrographic features along 73°E in the Prydz Bay, Antarctica[J]. *Advances in Marine Science*, 2013, 31(3): 332–342.
- [9] Masuda S. Determining subsurface oceanic changes in the Indian sector of the Southern Ocean using Argo float data[J]. *Polar Science*, 2020, 23: 100498.
- [10] Pezza A B, Rashid H A, Simmonds I. Climate links and recent extremes in Antarctic sea ice, high-latitude cyclones, Southern Annular Mode and ENSO[J]. *Climate Dynamics*, 2012, 38(1/2): 57–73.
- [11] Cheon W G, Cho C B, Gordon A L, et al. The role of oscillating Southern Hemisphere westerly winds: Southern Ocean coastal and open-ocean polynyas[J]. *Journal of Climate*, 2018, 31(3): 1053–1073.
- [12] Hazel J E, Stewart A L. Are the near-Antarctic easterly winds weakening in response to enhancement of the Southern Annular Mode?[J]. *Journal of Climate*, 2019, 32(6): 1895–1918.
- [13] Nuncio M, Yuan Xiaojun. The influence of the Indian Ocean dipole on Antarctic sea ice[J]. *Journal of Climate*, 2015, 28(7): 2682–2690.
- [14] Yang Jiao, Du Zhiheng, Xiao Cunde. Sea salt sodium record in a shallow ice core from east Antarctica as a potential proxy of the Antarctic sea ice extent in Southern Indian Ocean[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2019, 18(6): 1351–1359.

在南极印度洋扇区,持续的强风维持了海表面较长时间的低温环境,使下层暖水上涌带来的热量不足以抑制海冰的生成,使结冰析盐作用与深对流过程能够持续为海表面提供高盐水。然而与南极印度洋扇区变化明显不同,罗斯海并未出现如此显著的高盐异常,这可能是由于 IOD 正位相下罗斯海产生显著的北风异常,暖平流使海冰生成减弱,与 AAO 正位相在此的作用相反。同时,本文还探索了厄尔尼诺–南方涛动与南极印度洋扇区的海表面盐度异常的相关性,结果发现 AAO、IOD 仍是主要影响因素。此外,本文发现海表面盐度异常还表现出罗斯海与威德尔海的偶极子,这种分布特征可能与 AAO 的变化有关^[34],及其在全球变暖背景下其对南极表层盐度的影响仍待深入研究。

致谢: 感谢国际 MEOP 联合会及其做出贡献的国家收集并免费提供海洋哺乳动物数据 (<http://www.meop.net>); 感谢哥白尼气候变化服务中心 (Copernicus Climate Change Service) 提供的 ERA5 数据资料。

- [15] Graham J A, Heywood K J, Chavanne C P, et al. Seasonal variability of water masses and transport on the Antarctic continental shelf and slope in the southeastern Weddell Sea[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2013, 118(4): 2201–2214.
- [16] Ohshima K I, Fukamachi Y, Williams G D, et al. Antarctic bottom water production by intense sea-ice formation in the Cape Darnley Polynya[J]. *Nature Geoscience*, 2013, 6(3): 235–240.
- [17] 丁卓铭, 张林, 卞林根, 等. 普里兹湾沿岸下降风特征分析[J]. *极地研究*, 2015, 27(4): 351–363.
Ding Zhuoming, Zhang Lin, Bian Lingen, et al. Analysis of katabatic winds on the coast of Prydz Bay[J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2015, 27(4): 351–363.
- [18] Aoki S, Ono K, Hirano D, et al. Continuous winter oceanic profiling in the Cape Darnley Polynya, East Antarctica[J]. *Journal of Oceanography*, 2020, 76(5): 365–372.
- [19] Good S A, Martin M J, Rayner N A. EN4: Quality controlled ocean temperature and salinity profiles and monthly objective analyses with uncertainty estimates[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2013, 118(12): 6704–6716.
- [20] Boyer T P, Antonov J I, Baranova O K, et al. World ocean database 2013[R]. Silver Spring: NOAA, 2013.
- [21] Roquet F, Williams G, Hindell M A, et al. A Southern Indian Ocean database of hydrographic profiles obtained with instrumented elephant seals[J]. *Scientific Data*, 2014, 1(1): 140028.
- [22] ERA5 monthly averaged data on single levels from 1979 to present[DB/OL]. (2019–04–18) [2020–12–28]. <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels-monthly-means?tab=overview>.
- [23] Saji N H, Yamagata T. Possible impacts of Indian Ocean dipole mode events on global climate[J]. *Climate Research*, 2003, 25(2): 151–169.
- [24] Comiso J C, Nishio F. Trends in the sea ice cover using enhanced and compatible AMSR-E, SSM/I, and SMMR data[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2008, 113(C2): C02S07.
- [25] Kern S, Lavergne T, Notz D, et al. Satellite passive microwave sea-ice concentration data set intercomparison: Closed ice and ship-based observations[J]. *The Cryosphere*, 2019, 13(12): 3261–3307.
- [26] Yuan Xiaojun, Martinson D G. The Antarctic dipole and its predictability[J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(18): 3609–3612.
- [27] 史久新. 南极冰架–海洋相互作用研究综述[J]. *极地研究*, 2018, 30(3): 287–302.
Shi Jiuxin. A review of ice shelf–ocean interaction in Antarctica[J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2018, 30(3): 287–302.
- [28] Guo Guijun, Shi Jiuxin, Gao Libao, et al. Reduced sea ice production due to upwelled oceanic heat flux in Prydz Bay, East Antarctica[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(9): 4782–4789.
- [29] Campbell E C, Wilson E A, Moore G W K, et al. Antarctic offshore polynyas linked to Southern Hemisphere climate anomalies[J]. *Nature*, 2019, 570(7761): 319–325.
- [30] Langlais C E, Rintoul S R, Zika J D. Sensitivity of Antarctic circumpolar current transport and eddy activity to wind patterns in the Southern Ocean[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2015, 45(4): 1051–1067.
- [31] Thompson A F, Stewart A L, Spence P, et al. The Antarctic slope current in a changing climate[J]. *Reviews of Geophysics*, 2018, 56(4): 741–770.
- [32] Yu Lejiang, Yang Qinghua, Vihma T, et al. Features of extreme precipitation at progress station, Antarctica[J]. *Journal of Climate*, 2018, 31(22): 9087–9105.
- [33] Grieger J, Leckebusch G C, Raible C C, et al. Subantarctic cyclones identified by 14 tracking methods, and their role for moisture transports into the continent[J]. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 2018, 70(1): 1–18.
- [34] Lefebvre W, Goosse H. An analysis of the atmospheric processes driving the large-scale winter sea ice variability in the Southern Ocean[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2008, 113(C2): C02004.4.

The role of large-scale circulation on the consistent positive salinity anomaly in the Indian sector of the Antarctic

Ni Xubin¹, Du Ling¹, Shi Huangyuan¹

(1. College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: The key regions for formation of the Antarctic Bottom Water occupied in the Indian sector of the Southern Ocean. The salinity change of the region has a profound influence on the global climate change. EN4 reanalysis-gridded data, measured seal data, WOD18 data combined with atmospheric reanalysis and sea ice concentration data were all used to explore the sea surface salinity changes in the Indian sector of the Southern Ocean and the response to large-scale circulation anomaly. The observation and reanalysis data both illustrated a significant posit-

ive surface salinity anomaly occurred in the Antarctic coast since 2008, especially in the Indian sector. The surface positive salinity anomaly was mainly centered in the Darnley Polynya and the north of Shackleton Ice Shelf. The high salinity shelf water expanded northward from the Antarctic coast and deepened. Meanwhile, the upwelling of Circumpolar Deep Water became increasingly distinct. Our study showed that this positive salinity anomaly was connected with the Antarctic Oscillation (AAO) and the Indian Ocean Dipole (IOD). During the positive AAO and IOD phases, the westerly wind enhanced significantly in the Indian sector and promoted the formation of sea ice, which increased surface salt flux. The significant negative wind curl and low pressure anomaly resulted in the upwelling of salty Circumpolar Deep Water and maintained the positive salinity anomaly. Additionally, increased locally zonal wind shear and enhanced evaporation were important factors as well.

Key words: positive salinity anomaly; the Indian sector of the Antarctic; Antarctic Oscillation; Indian Ocean dipole