

1980—2015 年夏季南大洋亚南极锋和极地锋的长期变化研究

权陕媛 史久新

(中国海洋大学海洋与大气学院, 山东 青岛 266100)

摘要 本文利用再分析月均海洋温盐数据, 分别采用基于物理现象和固定温盐量值的锋面识别标准, 探究 1980—2015 年夏季(1—3 月)亚南极锋(Subantarctic Front, SAF)和极地锋(Polar Front, PF)的变化特征。对此时段的长期变化, 两类标准给出了基本一致的结果。在绕极平均意义上, SAF 和 PF 的位置虽然存在南北向摆动, 但是在 1980—2015 年并没有显著的长期移动趋势。在整个空间场上, 锋面的位移幅度、稳定性和长期移动趋势均有明显的区域差异性, 在经过大的地形障碍区时, 锋面较稳定, 位移幅度较小, 而在深海盆区和脱离地形约束的下游, 锋面稳定性较低, 且径向位移幅度较大。SAF 和 PF 稳定性最高、长期移动趋势最小的区域分别位于印度洋扇区和大西洋扇区。SAF 在太平洋扇区的东部海盆区有较显著的长期移动趋势, 且南北向位移均存在, PF 在印度洋扇区以向极移动为主。在年代和年际尺度上, 两类标准给出的结果存在一定的差异, 进而分别对两类识别标准的适用性进行了讨论。对于 PF 来说, 温度现象类标准总体上稳定性更高, 优于等温线标准。

关键词 亚南极锋 极地锋 长期变化 南大洋

doi: 10.13679/j.jdyj.20190015

0 引言

环绕整个南极大陆的南大洋, 是连接世界三大洋(太平洋、大西洋和印度洋)的关键纽带, 对南极地区环境、全球大洋环流和气候变化等有重要影响^[1-2]。南极绕极流(Antarctic Circumpolar Current, ACC)作为世界上唯一东西贯通的大型洋流, 在南大洋的物质与能量输送中扮演着重要的角色。ACC 区中存在三支重要的海洋锋面, 自北向南依次为亚南极锋(Subantarctic Front, SAF), 极地锋(Polar Front, PF)和 ACC 南部锋(southern ACC front, sACCf)^[3]。这些锋面处常伴随着强的急流, 并纬向连续地环绕整个南大洋^[4-5]。ACC 区

海洋锋面的变化对南大洋热量和质量平衡、水团性质及分布、物质交换等有重要影响^[6-7]。

从 20 世纪初叶至今, 针对 ACC 区锋面结构的研究不断向前推进, 人们对锋面的认识也日渐深入。研究者们借助实测温盐断面资料, 在南大洋不同扇区均识别并探究了 ACC 锋面系统的结构特征^[8-14], 并逐步明确了 ACC 中的锋面纬向连续地环绕整个南大洋^[3-4]。这些锋面常视作不同性质水团之间的边界, 其定义与识别的判据同南大洋若干重要水团联系紧密^[9-10, 14-16]。其中, 在 ACC 体积输运中占主要比重的 SAF 和 PF 分别作为极锋区(Polar Frontal Zone, PFZ)的北界和南界, 区分亚南极区和南极区的水团^[11, 14]。借助实测水文断面, 大量研究指出 ACC 锋面处物理量的水平

[收稿日期] 2019 年 3 月收到来稿, 2019 年 5 月收到修改稿

[基金项目] 国家重点研发计划项目(2018YFA0605701)资助

[作者简介] 权陕媛, 女, 1994 年生。硕士研究生, 主要从事极地物理海洋学研究。E-mail: sirius10sky@126.com

[通讯作者] 史久新, E-mail: shijiuxin@ouc.edu.cn

梯度较大,温盐等值线密集^[4,9],等密度面显著倾斜,且常伴随较强的流动^[3,14]。然而,由于实测数据在时间连续性和空间分辨率上有明显不足,因此早期 ACC 锋面的研究成果主要集中在锋面的识别、锋面的结构特征及其空间分布上,而对南大洋锋面长期变化的研究尚难以开展。

随着卫星遥感技术的进步,越来越多的研究者转而利用时空连续性更好的卫星遥感资料,这使得 ACC 锋面的研究进入了崭新阶段。与中低纬度海洋的情形类似,卫星遥感海表面温度(Sea Surface Temperature, SST)数据最先被用于分析南大洋锋面^[17-18],并持续至今^[19]。以 ACC 锋面处常伴随强流这一特征为理论基础,海表面高度(Sea Surface Height, SSH)数据也被用于锋面的识别^[20-25]。由于 SST 数据易受到云的影响,在时空连续性上不及 SSH 数据^[18],且极区海水温度低, SST 梯度较弱,不易于锋面的识别^[26]。因此,如今 ACC 锋面的研究多以 SSH 数据为主。由于锋面识别不再依赖相关的水团,而仅基于 ACC 锋面处的急流属性,因此不同的研究者会选用不同的识别标准来确定每支锋面的位置。Sokolov 和 Rintoul^[25]首次提出了 SSH 等值线方法来识别 ACC 区锋面; Kim 和 Orsi^[22]肯定了该等值线方法,并将其运用至 ACC 锋面的变化研究中。但 Gille^[21]、Graham 等^[26]、Chapman^[27]和 Thompson^[28]等学者则指出尽管该等值线法在锋面研究中有重要价值,但对于锋面随时间变化的研究存在明显不足:首先,SSH 等值线与标志锋面位置的 SSH 梯度大值区的对应关系会随时间和空间变化,因此特定 SSH 等值线不能稳定且准确地标识出锋面位置^[26,28];其次,SSH 等值线的移动并不能反映锋面的移动情况。因为除了受锋面变化的影响,SSH 等值线还会因海平面上升^[21]和急流强度与宽度的变化而发生移动^[20]。近来,许多研究者也提出了更多新的锋面识别方法^[20, 21, 27]。相对于从实测数据中得到的传统认识,基于卫星遥感海表面要素(SSH 或 SST)分析得到的 ACC 区锋面显示出更为复杂的结构特征^[17,24,25]:锋面由数目不定的多个分支组成,在空间上并非严格纬向连续地环绕整个南大洋,但长期稳定存在,可认为是近似绕极连续的^[29]。总之,卫星遥感资料在时空分辨率、连续性和覆盖度上的显著优势,极大地弥补了传统实测数据

的缺陷,给出了更为丰富的锋面空间结构,但也与传统的锋面认识产生了差别。

进入新世纪,若干研究揭示出南大洋在最近几十年中发生了显著变化,如南半球西风带增强并向南移动^[26,30,31]、南大洋上层和底层均出现不同程度的增暖和淡化现象^[6,32-35]。在此背景下,人们日益关心 ACC 锋面是否会受气候变化的影响而发生移动。目前,针对这一问题的研究进展主要来自卫星遥感数据的分析结果。以 Sokolov 和 Rintoul^[25]及 Kim 和 Orsi^[22]为代表的一些研究者,采用 SSH 等值线这一锋面识别方法,指出 ACC 锋面有显著南移的趋势;而越来越多的研究者^[20,21,23,27],通过发展和使用更多新的方法,认为 ACC 锋面长期稳定不变,并未发生显著移动。在对这一科学问题的研究和上述争议的讨论中,学者们逐渐发现锋面识别方法的选择对研究结论有重要影响^[26,36],进而引发了上文中对 SSH 等值线方法的质疑与讨论。因此,对锋面识别方法准确度及其适用性的评估,已成为现今 ACC 锋面研究中一项不容忽视的内容。

基于遥感数据的锋面研究从 20 世纪末至今,仅有二十余年的历史,对锋面的定义尚不成熟,且现有识别方法究竟孰优孰劣,其准确度和适用性究竟如何,尚待进一步地评估和论证。因此,为了探究在当前气候变化背景下,ACC 锋面是否发生移动,并对由卫星遥感资料得到的已有研究结论进行对比和检验,本文从传统温盐数据分析的角度出发,以锋面本源的水团定义及其识别方法为依据,选用较长时间的再分析海洋资料,讨论最近 36 年内 SAF 和 PF 的时空变化特征。为了确保研究结论尽可能不受锋面识别方法选取的影响,本文同时应用传统研究中两类不同的锋面识别标准,并对其在当前海洋环境中的适用程度进行比较和讨论。

1 数据和方法

1.1 数据

本文使用的温度和盐度数据来自 SODA (Simple Ocean Data Assimilation) 3.3.2 版本的月均再分析数据¹,水平分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$,垂向上分为 50 层,时间跨度为 1980—2015 年。该数据是

¹ 下载网址: http://www.atmos.umd.edu/~ocean/index_files/soda_3.3.2_mn_download_b.htm

利用冰-海耦合模式进行同化得到的, 海洋模式采用美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)/地球物理动力实验室(Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, GFDL)的MOM5(Modular Ocean Model, Version 5), 海冰模式为SIS(Sea Ice Simulator)。大气强迫场来自美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)的大气再分析资料MERRA-2(Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2)。海洋同化数据主要包括世界海洋数据集(World Ocean Database 2013, WOD 2013), Argo浮标数据和SST数据^[37]。由于南大洋实测资料多集中于夏季, 故再分析资料中夏季的海洋数据更为可信, 又因传统的实测锋面研究大多集中于夏季, 故本文仅选取南半球夏季(1—3月)平均的数据, 进行SAF和PF的时空变化的分析。在本文研究中, 温度采用位势温度。

1.2 锋面识别方法

以传统实测温盐数据识别和研究锋面时, 锋面被定义为不同水团之间的边界, 其识别标准与水团的性质和结构特征密切相关。SAF通常被认为是亚南极表层水(Subantarctic Surface Water, SASW)的南边界; 在次表层, 北侧性质相对均匀的亚南极模态水(Subantarctic Mode Water, SAMW)常使锋面处形成强的水平温度梯度^[4,9]。此外, 在SAF处, PFZ的表层低盐水体下沉继而向北延伸形成南极中层水(Antarctic Intermediate Water, AAIW), 在中层形成显著的盐度极小值层^[4,14,15]。因而, 温盐等值线密集、等密度面倾斜、次表层温度梯度大、盐度极小值层出现等特点常作为识别SAF的依据。PF通常被定义为南极表层水(Antarctic Surface Water, AASW)的北边界, 在南半球夏季, 也可视作残留的冬季水(Winter Water, WW)可到达的北界^[9-10, 14-16]。因而, 次表层冷水舌、温度梯度较大、密度等值线倾斜等特点常作为PF的识别依据。Belkin和Gordon^[4]及Gao等^[38]总结了历史研究中识别SAF和PF常用的标准。这些锋面识别标准总体可分为两类, 一类是物理现象标准^[14], 另一类是温盐量值标准。前者常以水团边界处特定的物理现象来确定锋面的位置, 后者则通过选取特定的温度和/或盐度值进行

锋面的识别。

本文选用两类识别标准(见表1)分别进行锋面识别, 避免因锋面识别标准的选取对研究结论的可信度造成影响。标准的确定主要遵循以下几个原则: (1)物理现象类标准要能够反映锋面的水团定义, 且该物理现象较易捕捉;(2)量值类标准应具有较高的认可度和较广泛的使用度;(3)为了尽量减少海-气交换带来的短期变化影响, 均选取表层以深的指标。

早期许多研究者一致发现, 表征AAIW的盐度极小值层, 其南边界可作为SAF的现象类识别标准^[4, 14]。在南大洋中, S_{\min} 所在深度主要集中在中层深度(400—1 500 m)之间。故本文参考前人的研究, 选用这一物理现象类标准进行SAF的识别。对于PF, 参考早期研究对其的定义和判断^[9, 10], 选用次表层(核心深度: 100—300 m)温度极小值层的北界进行锋面的识别。在选取量值类识别标准时, 通过综合比较前人的研究^[3, 4, 38], 选用了表1所示的常用标准。此外, 对于PF, 两类识别标准在选取时均基于温度场, 以确保两者的可比性, 而SAF由于既无绕极适用的特征盐度量值, 也无易捕捉的温度现象, 故分别选取了表1所示的两种识别标准。

1.3 数据可信度检验

作为常用海洋资料, SODA数据已被许多研究者用于南大洋的研究中, 他们的研究工作均证明, 该再分析数据可以用来进行水团结构、环流及南大洋长期变化的研究^[39-42]。在研究锋面长期变化之前, 先对SODA数据的可用性及可信度进行评估。所用的对比数据是NOAA的国家海洋数据中心(National Oceanographic Data Center, NODC)-海洋气候实验室(Ocean Climate Laboratory, OCL)提供的基于实测数据得到的10年平均气候态客观分析资料, 即WOA2013(World Ocean Atlas 2013, Version 2)。选择WOA2013与SODA

表1 本文的锋面识别标准

Table 1. Criteria for SAF and PF identification in this paper

锋面	物理现象类	量值类
SAF	中层深度上盐度极小值层(S_{\min})的南边界	200 m, 4℃等温线
PF	次表层温度极小值层(T_{\min})的北边界	200 m, 2℃等温线

的两个重合时间段,即 1985—1994 年和 1995—2004 年(分别记作 D1 和 D2),将 SODA 数据处理为相应的 10 年平均结果,与 WOA2013 同期的数据进行对比。

首先,评估 SODA 数据在水团分布结构上的同化效果。由于锋面识别与水团的性质和结构特征密切相关,特别是物理现象类识别标准,对 SAF 和 PF 位置的确定主要依赖于对低盐 AAIW 和低温 WW

水团特征的捕捉,因此先就历史观测数据积累较多、研究比较充分的代表性断面处的纬向水团结构分布进行对比分析。以 1985—1994 年的 0°E 断面为例(图 1),对比两套数据在此处的纬向温盐断面,可发现 SODA 的同化结果能较准确地体现 AAIW 低盐水舌的特征和 WW 低温水舌的特征,其温盐等值线形态、水团范围和垂向水团结构与 WOA2013 基本相似,可认为其模拟效果整体尚佳。

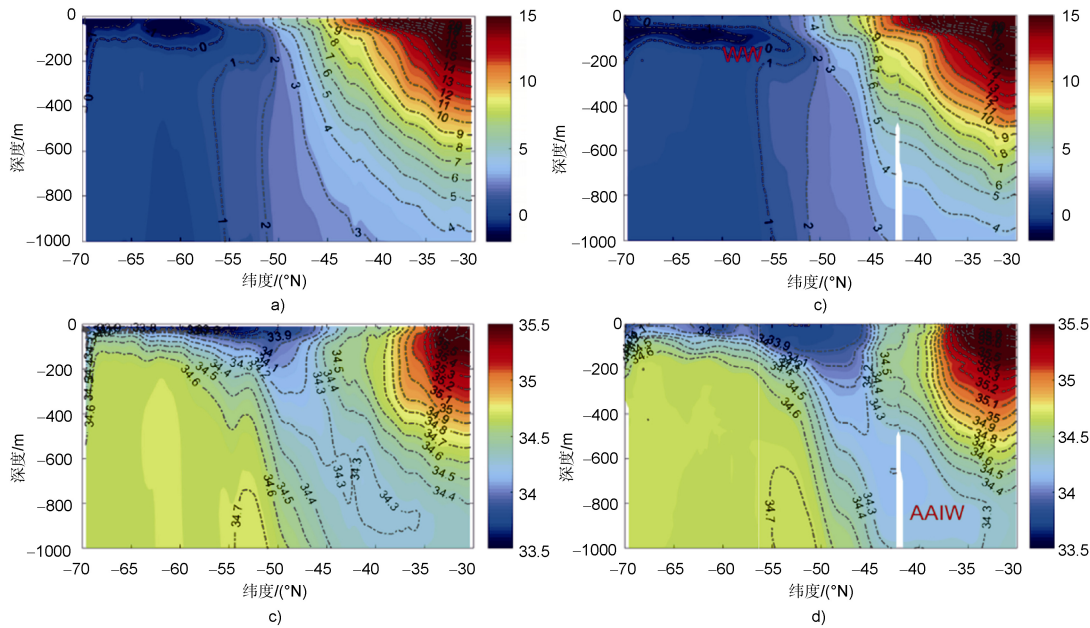


图 1 D1 时期 0°E 断面夏季平均温度(a、c)和盐度(b、d)分布。a)和 b)为 SODA 数据, c)和 d)为 WOA2013 数据
Fig.1. Potential temperature (a, c)and salinity (b, d) distribution along 0°E during austral summer in D1 from SODA (a, b) and WOA2013 (c, d)

其次,为进一步确定该再分析资料是否适用于锋面研究,我们使用表 1 中的物理现象类识别标准,分别在 D1 和 D2 两个 10 年平均场中得到 SAF 和 PF 的空间分布,将该结果与同时期 WOA2013 温盐场上的识别结果进行对比。如图 2 和 3 所示,在识别方法相同的条件下,基于两种数据得到的 SAF 和 PF 位置分布基本一致。定量分析的结果(见表 2)表明, SODA 数据能够较真实地体现 ACC 区主要的水文结构特征,并能较准确地识别出锋面的位置。

此外,将由 SODA 数据识别出的 SAF 和 PF 位置与 Orsi 等^[3]基于历史资料得到的锋面位置作对比(如图 2 和图 3),可以发现,利用再分析资料识别的锋面位置在整体上与历史研究结果

也基本吻合,锋面在各个大洋扇区和特殊地形区域的走向变化是一致的。尽管个别位置处,识别出的 SAF 和 PF 与 Orsi 等的结果^[3]有差异,但锋面处具有强温度梯度的特征总能在温度场中

表 2 SODA 和 WOA 的锋面识别结果对比
Table 2. Comparison of SAF and PF between SODA and WOA2013

锋面	时间	绕极平均的位置/(°S)		两套数据位置差异的平均值/(°)
		SODA	WOA	SODA-WOA
SAF	D1	49.36	49.98	0.66
	D2	49.79	50.15	0.31
PF	D1	54.16	53.83	-0.33
	D2	54.26	53.87	-0.39

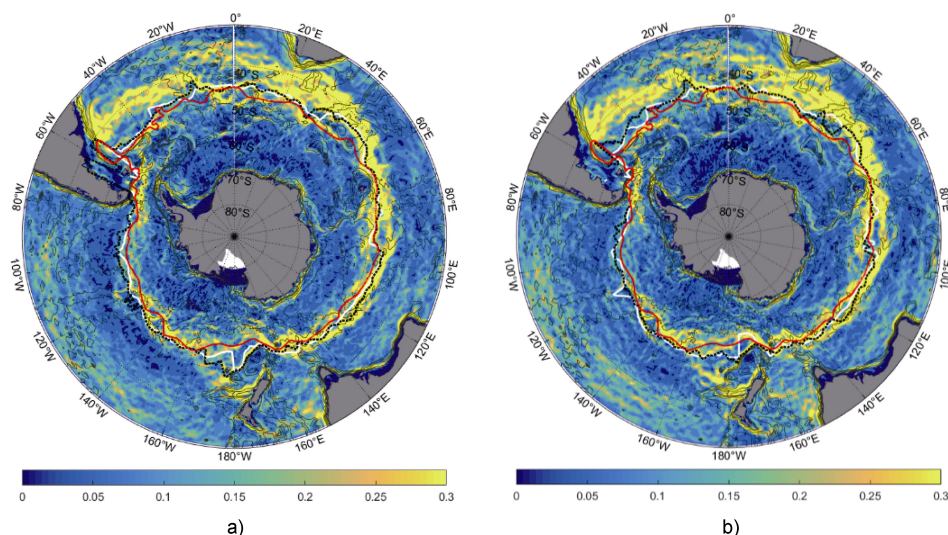


图 2 从 SODA 中识别的 SAF(黑色点线), 从 WOA2013 中识别的 SAF(白色实线)和 Orsi 等^[3]给出的 SAF(红色实线)分别在 D1(a)和 D2(b)两个时期的结果. 背景彩色表示温度梯度(单位: $^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$)在垂向 50—800 m 上的积分

Fig.2. SAF identified from SODA (black dashed line), WOA2013(white solid line) and Orsi et al^[3] (red solid line) in D1(a) and D2(b). Overlaid color shows temperature gradient ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$) integrated over the upper 50—800 m.

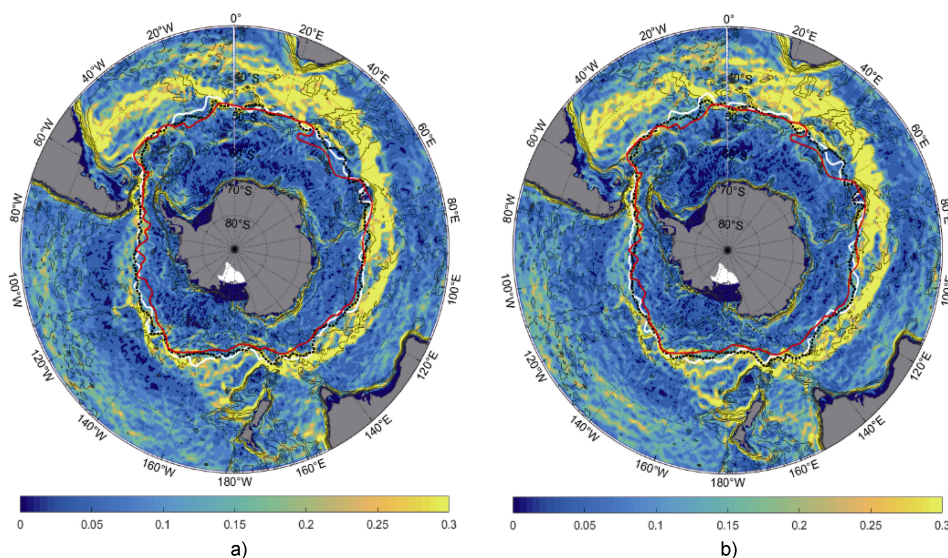


图 3 从 SODA 中识别的 PF(黑色点线), 从 WOA2013 中识别的 PF(白色实线)和 Orsi 等^[3]给出的 PF(红色实线)分别在 D1(a)和 D2(b)两个时期的结果. 背景彩色表示温度梯度(单位: $^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$)在垂向 50—800 m 上的积分

Fig.3. PF identified from SODA (black dashed line), WOA2013(white solid line) and Orsi et al^[3] (red solid line) in D1(a) and D2(b). Overlaid color shows temperature gradient ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$) integrated over the upper 50—800 m.

得到体现,说明该再分析资料能够准确地捕捉和体现 SAF 和 PF 的基本特征, 可用来进行锋面的研究。

2 结果与讨论

基于 SODA 温盐数据, 利用表 1 中 SAF 和

PF 的两类识别判据, 得到了 36 年南大洋夏季 SAF 和 PF 的空间分布, 分别对两支锋面的时空变化特征进行分析, 并讨论不同识别方法对研究结论的影响。

2.1 PF 的时空变化分析

1980 至 2015 年间, 逐年绕极平均的 PF 位置如图 4 所示, 锋面的年际变化显著, 常发生南北

向摆动。由 T_{\min} 标准得到的结果显示(表 3), 绕极平均的 PF 位置最北可到达 53.1°S , 最南可至 54.5°S , 分别出现于 1980 和 1990 年, 其多年平均位置在 54°S 处。尽管锋面年际变化明显, 但基本围绕其平均值上下波动, 1980 至 2015 年, 计算得到 PF 的长期移动趋势仅为 $-0.1^{\circ}/10$ 年(正值表示北向, 负值表示南向), 无明显的经向移动趋势。 2°C 等温线标准得到的结果则显示, 多年平均的 PF 位于 55.1°S 处, 较 T_{\min} 标准的结果偏南, 该锋面分别在 1986 和 2003 年到达其最北(54.2°S)和最南(56.0°S)位置。此外, 36 年间锋面的长期移动趋势仅为 $-0.03^{\circ}/10$ 年, 与 T_{\min} 标准的结果相似, 均表明 PF 长期较稳定, 无明显经向位移。

基于两类识别标准得到的 PF 结果均指出, 从长期来看, PF 总体较稳定, 无明显经向移动。

然而, 在较短的年代尺度上, 两类识别标准的结果呈现出一定差异(图 4)。例如, 在 1993 至 2004 这 10 年内, 2°C 等温线结果显示 PF 出现明显南移, 平均向极移动了 0.38° , 而 T_{\min} 标准得到的 PF 则基本稳定在多年平均值附近, 平均位移幅度仅有 -0.01° ; 在 2006—2015 年, 两类标准给出的位置变化虽然都是比较平稳, 但是与多年平均位置的关系是相反的。在年际尺度上, 两类标准得到的 PF 变化情况较为相似, 尽管位移幅度有所差异, 但锋面在相邻年份间的移动方向经常是一致的。

对 PF 在 36 年内的空间分布进行统计分析, 得到多年位置的平均值、标准差、能够到达的最北和最南的纬度, 如图 5 所示。在凯尔盖朗海台, 德雷克海峡及其下游, 两类识别标准得出的多年

表 3 绕极平均的 SAF 和 PF 统计结果
Table 3. Statistics of SAF and PF in circumpolar average

锋面	识别方法	平均值/ $(^{\circ}\text{S})$	标准差	最北位置/ $(^{\circ}\text{S})$ (出现时间)	最南位置/ $(^{\circ}\text{S})$ (出现时间)	长期趋势/ $(^{\circ}/10\text{年})$
PF	T_{\min}	54.0	0.35	53.1(1980)	54.5(1990)	-0.1
	2°C 等温线	55.1	0.40	54.2(1986)	56.0(2003)	-0.03
SAF	S_{\min}	50.3	0.54	48.8(1990)	51.7(1982)	0.03
	4°C 等温线	51.8	0.25	51.3(1992)	52.4(1980)	0

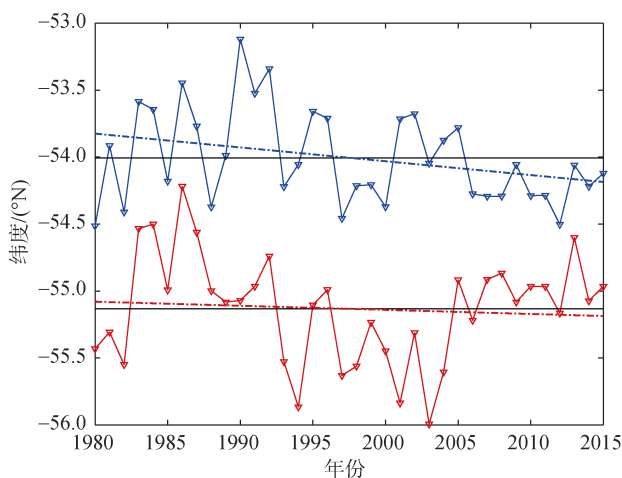


图 4 T_{\min} 标准(蓝线)和 2°C 等温线标准(红线)得到的绕极平均的 PF 位置变化. 虚线表示长期变化趋势, 黑色实线表示多年平均的位置

Fig.4. Position of zonal mean PF derived from T_{\min} (blue line) and 2°C contour (red line) criteria. Dashed line represents long-term trend, and black solid line represents multi-year averaged position

平均的 PF 位置基本一致, 差别较小($<0.5^{\circ}$)。在整个绕极区域, 通过分析 PF 多年位置的极值和标准差, 进而发现锋面的经向位移幅度和稳定性均有区域差异性。两类识别标准得到的结果一致表明, PF 经向位移幅度最大的区域主要在东太平洋海盆、东南印度洋海盆、克罗泽岛东侧海盆等处。在三大洋中, 大西洋扇区的 PF 稳定性最高, 而太平洋扇区和印度洋扇区的稳定性较弱(表 4), 特别是在深海盆区, 锋面位置易发生显著的经向变化, 当经过大的地形障碍区时, 锋面位置较稳定, 位移幅度较小。对比两类识别方法的研究结果, 我们发现由 2°C 等值线标准得到的 PF 平均位移幅度较 T_{\min} 标准的更大, 锋面稳定性更低。

就长期变化来看, 尽管 PF 在绕极平均的意义上较为稳定, 无明显经向移动, 但在空间场上则有明显的区域性差异(见图 6 和表 4)。对比两类识别标准的结果可以发现, 在大西洋扇区, PF 长期移动趋势均最小; 在印度洋扇区, PF 均以向极

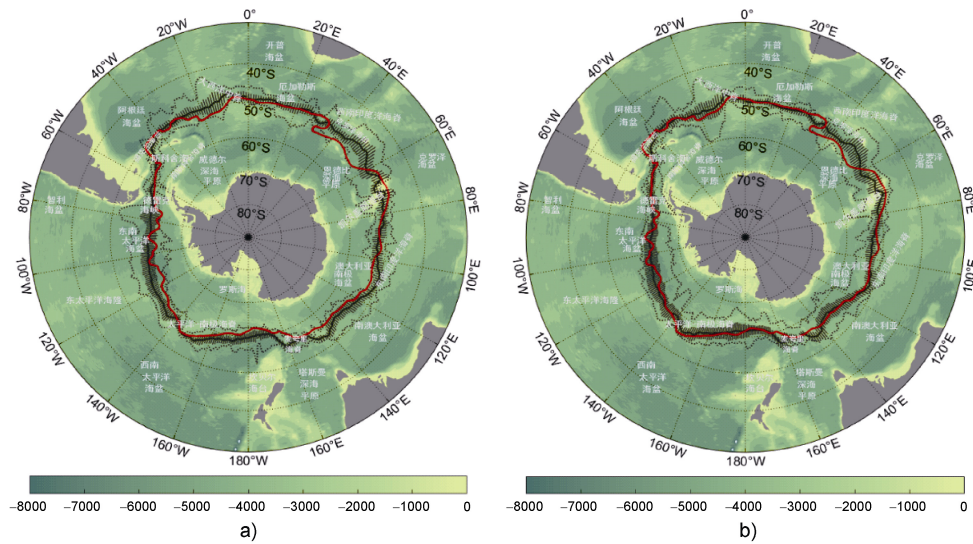


图 5 T_{min} 标准(a)和 2°C 等温线标准(b)得到的 PF 平均位置(黑色粗实线), 标准差(黑色细实线), 极值位置(黑色点线)和 Orsi 等^[3]给出的 PF 位置(红色实线). 背景彩色表示底地形

Fig.5. Mean position(black thick line), standard deviation(black thin line) and extremum position(black dashed line) of PF derived from T_{min} (a) and 2°C contour (b) criteria respectively, with the PF from Orsi et al^[3] (red solid line). Overlaid color shows topography

表 4 两类识别标准下 SAF 和 PF 的标准差和长期变化趋势

Table 4. Standard deviation and long-term trend of SAF and PF from different criteria

锋面	识别标准	标准差/($^{\circ}$)				长期趋势($^{\circ}/10$ 年)			
		印度洋	太平洋	大西洋	全场平均	印度洋	太平洋	大西洋	全场平均
PF	T_{min}	1.48	1.38	1.23	1.38	-0.22	-0.08	0.04	-0.1
	2°C 等温线	1.63	1.72	1.26	1.58	-0.20	0.14	-0.08	-0.03
SAF	S_{min}	1.32	2.07	1.89	1.76	0.03	-0.07	0.30	0.05
	4°C 等温线	1.02	1.12	1.57	1.19	-0.06	0.01	0.07	-0.01

移动为主; 在太平洋扇区, 2°C 等温线标准的结果显示该海区中西部有明显北移趋势, 而 T_{min} 标准的结果则在东部发现有显著南移。

2.2 SAF 的时空变化分析

首先分析 36 年 SAF 绕极平均位置的变化(图 7)。与 PF 相似, SAF 也存在明显的年际变化, 但两种识别方法的结果存在一定差异。基于 S_{min} 标准得到的 SAF, 其多年平均纬度位于 50.3°S , 锋面稳定性更低, 年际变化幅度更大, 能够到达的最北和最南位置分别为 48.8°S 和 51.7°S , 分别出现于 1990 和 1982 年; 从 1980—2015, 该锋面长期变化趋势仅为 $0.03^{\circ}/10$ 年, 基本稳定不变(见表 3)。而基于 4°C 等温线标准得到的 SAF, 多年平均位置在 51.8°S 处, 较前者偏南, 虽然也存在年际变化, 但锋面位置的稳定性较高, 经向位移

幅度较小, 该锋面分别于 1992 和 1980 年到达最北和最南位置, 分别位于 51.3°S 和 52.4°S ; 从长期来看, SAF 基本稳定不变, 未发生经向移动。

对比由两种方法得到的 SAF 结果后发现, 在对 SAF 长期变化的研究中, 两类识别方法的结论基本一致。在更短的年代和年际尺度上, 不同的识别方法给出的变化有所不同, 4°C 等温线给出的锋面位置相对更加稳定。

与 PF 的分析类似, 图 8 给出 SAF 的时空变化的统计分析结果。由两类识别标准得到的多年平均位置, 在大西洋扇区差别最小($<0.5^{\circ}$), 锋面走向基本吻合。SAF 位移幅度较大的区域主要集中在大西洋和太平洋扇区, 特别是地形的下游和海盆区。基于 4°C 等温线得到的 SAF, 分析其位置的极值和标准差可发现, 整体上锋面经向的变化

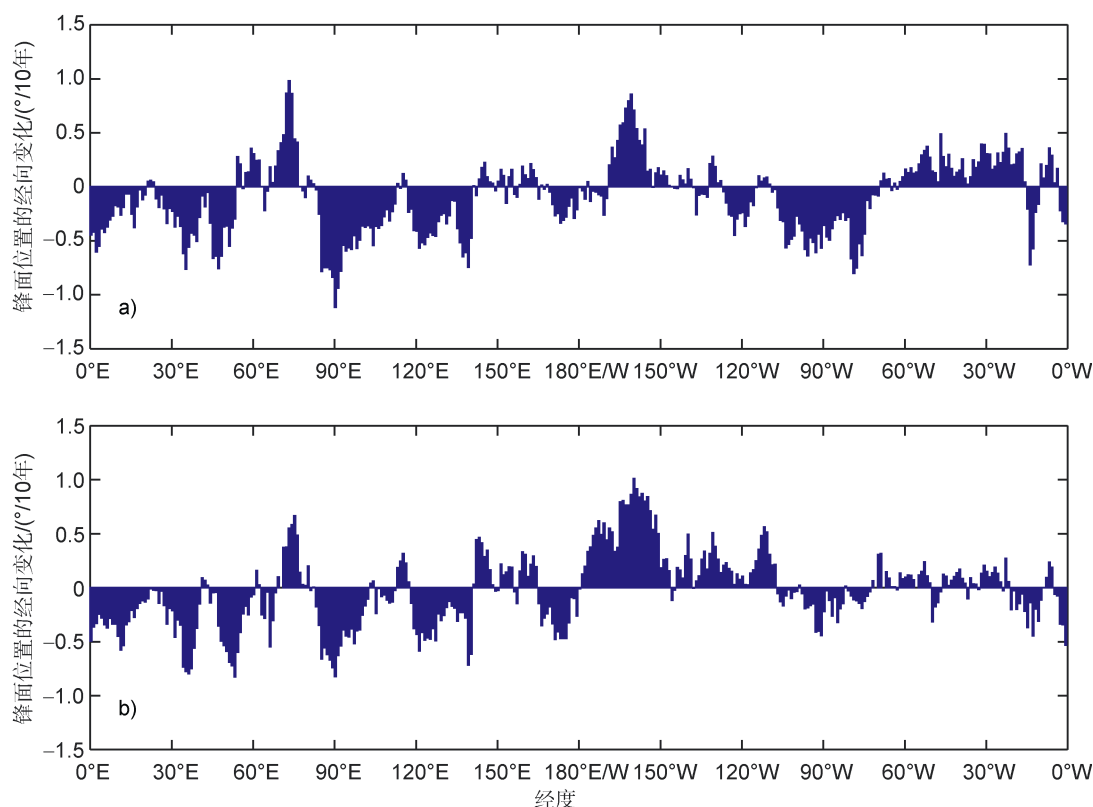


图 6 T_{\min} 标准(a)和 2°C 等温线标准(b)得到的 PF 长期变化趋势

Fig.6. Long-term trend of PF derived from T_{\min} (a) and 2°C contour (b) criteria ($^{\circ}/\text{decade}$)

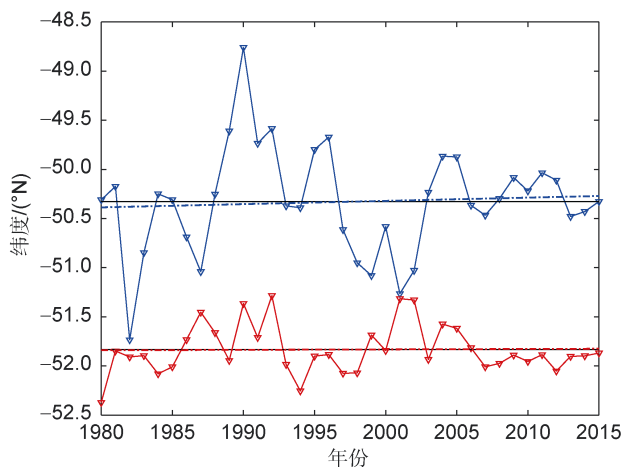


图 7 S_{\min} 标准(蓝线)和 4°C 等温线标准(红线)得到的绕极平均的 SAF 位置变化。虚线表示长期变化趋势,黑色实线表示多年平均的位置

Fig.7. Position of zonal mean SAF derived from S_{\min} (blue line) and 4°C contour (red line) criteria. Dashed line represents long-term trend, and black solid lines represent multi-year averaged position

幅度更小, 稳定性更高; 其中, SAF 在印度洋扇区最稳定, 太平洋扇区次之, 大西洋扇区最弱。基于 S_{\min} 标准得到的结果表明, SAF 在印度洋扇区最稳定, 大西洋扇区次之, 而太平洋扇区最弱。两套结果一致表明, 在经过大的地形障碍区时, 如凯尔盖朗海台、坎贝尔海台、克罗泽岛及大洋中脊等, 锋面表现出较高的稳定性, 不易发生变化, 南北向移动的幅度很小。然而, 在海盆区和大地形障碍的下游, 锋面较易发生摆动, 经向移动幅度相对较大, 例如在东南太平洋海盆区、凯尔盖朗海台及坎贝尔海台的下游。

计算 1980 至 2015 年 SAF 在各区域的长期变化趋势, 如图 9 及表 4 所示。整体上, SAF 的长期变化趋势较 PF 更小, 且变化特征同样具有区域差异性。从两类识别标准的结果中均可以发现, SAF 在太平洋扇区有较显著的长期变化, 但位移方向在该海区的不同区域有所不同, 在印度洋扇区, 锋面长期变化一致较小。然而, 基于 S_{\min} 标

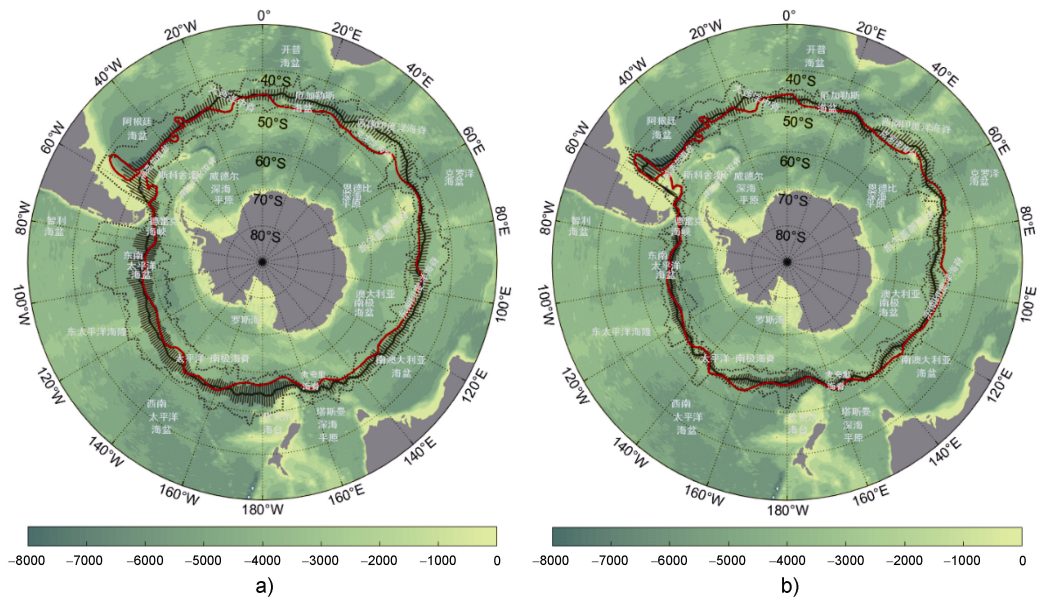


图 8 S_{min} 标准(a)和 4°C 等温线标准(b)得到的 SAF 平均位置(黑色粗实线), 标准差(黑色细实线), 极值位置(黑色点线)和 Orsi 等^[3]给出的 SAF 位置(红色实线). 背景彩色表示底地形

Fig.8. Mean position(black thick line), standard deviation(black thin line) and extremum position(black dashed line) of SAF derived from S_{min} (a) and 4°C contour (b) criteria respectively, with the SAF from Orsi et al^[3](red solid line). Overlaid color shows topography

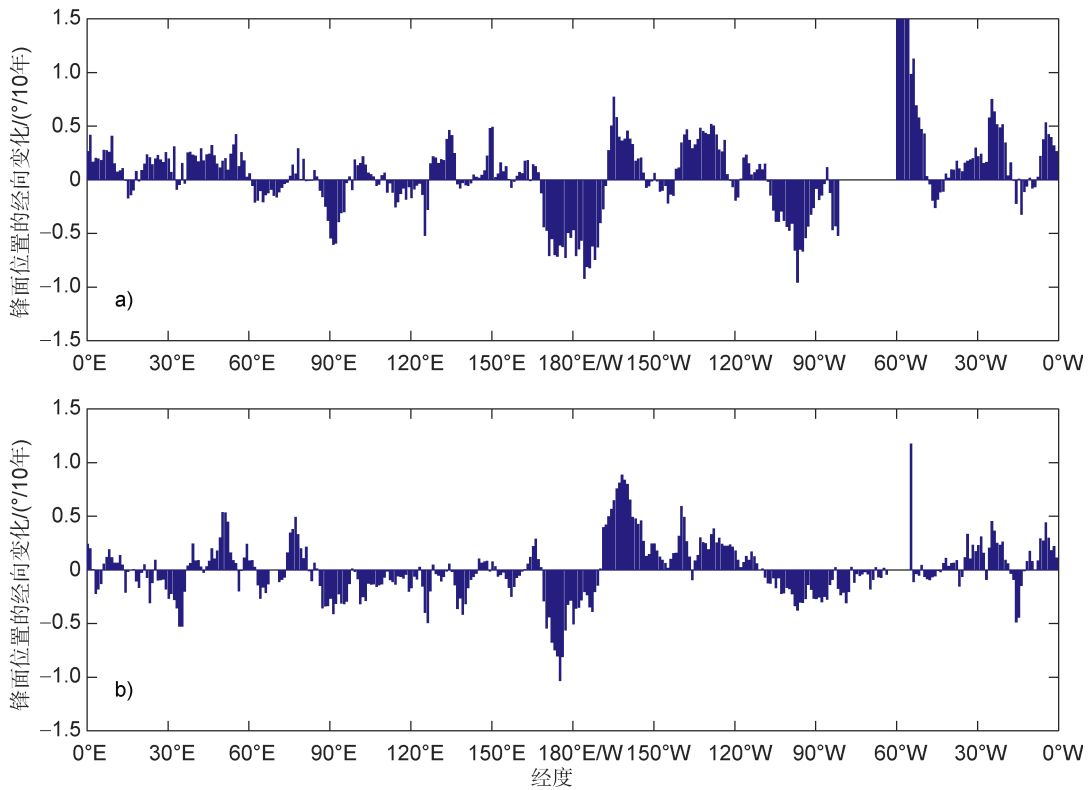


图 9 S_{min} 标准(a)和 4°C 等温线标准(b)得到的 SAF 长期变化趋势
Fig.9. Long-term trend of SAF derived from S_{min} (a) and 4°C contour (b) criteria ($^{\circ}/\text{decade}$)

准得到的结果显示,在德雷克海峡东侧,SAF 有显著北向移动趋势。

2.3 锋面变化结果与识别标准的讨论

基于卫星高度计数据的研究现状表明,识别方法对研究结论有重要影响。因此,在使用传统温盐数据进行锋面变化研究时,同样需要关注识别方法的选取问题。在分别使用两类识别标准探究 PF 和 SAF 的长期变化特征之后,本节将分析和讨论不同识别方法对研究结论的影响,以了解两类识别标准在使用中的适用性和稳定性。

由于两类识别方法均与温盐场的状态联系紧密,因此首先分析 1980—2015 年 ACC 区域的温盐变化情况。图 10 和图 11 分别为绕极平均的温度和盐度在不同深度上的长期变化趋势,可以看出,整体上 ACC 区表层以深有增温现象,SAF 和 PF 所在处整体的增温幅度较小,且增温主要集中在次表层。ACC 以北上层海洋增温显著,特别是 45°S 以北,且海洋表层增温最强。基于 SODA 数据分析所得到的这一温度长期变化结果与 Armour 等^[43]对相同时段的研究结论基本一致。此外,ACC 锋面区域淡化现象显著,淡化程度随深度增加而逐渐减弱,ACC 以北海域的中深层呈变淡趋势,可以看出,AAIW 在最近 36 年有淡化现

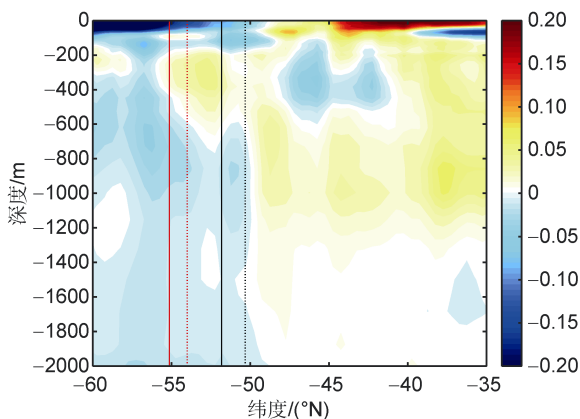


图 10 不同深度上纬向平均温度的长期变化趋势(°C/10 年)及两类标准下(实线:量值类标准,虚线:物理现象类标准)SAF(黑线)和 PF(红线)绕极平均的位置

Fig.10. Long-term trend of zonal mean temperature (°C/decade) at different depth, with zonal mean position of SAF (black line) and PF (red line) from different criteria (dashed line for phenomenological criteria, solid line for value criteria)

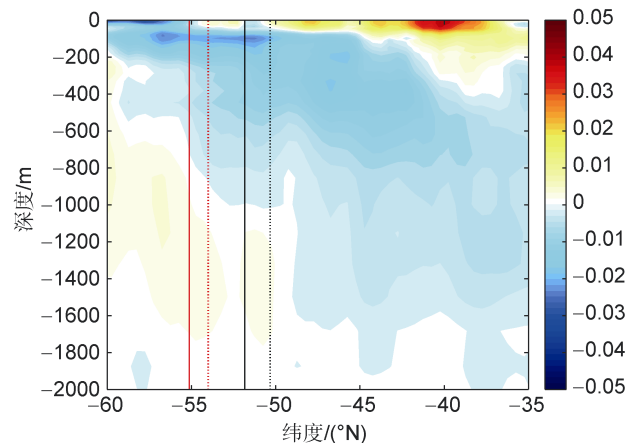


图 11 不同深度纬向平均盐度的长期变化趋势(/10 年)及两类标准下(实线:量值类标准,虚线:物理现象类标准)SAF(黑线)和 PF(红线)绕极平均的位置

Fig.11. Long-term trend of zonal mean salinity (‰/decade) at different depth, with zonal mean position of SAF (black line) and PF (red line) from different criteria (dashed line for phenomenological criteria, solid line for value criteria)

象,这与已有对 AAIW 变化的认识相一致^[44-45]。因此,SODA 资料的结果基本上能够反映已有研究所得到的结论,即南大洋从上世纪至今存在增暖和淡化的长期趋势^[6,43,46]。

分析 2.1 节中 PF 的研究结果可以发现,对于该锋面长期变化的研究,两类标准所得结果基本一致,说明在该时间尺度上,两种标准均适用。分析 36 年间 PF 所在区域背景温度的变化(图 10 和图 12),可以发现温度在这段时间的长期变化较小,总体升温幅度较弱,因此,基于温度场状态的两类识别标准给出的锋面长期变化都较小。然而,在较短的年代和年际尺度上,基于两种标准的研究结论有差异,因两种标准对背景温度变化的响应有所不同, T_{\min} 标准在使用中稳定性更高,优于 2°C 等温线标准。如图 13(a,b)所示,基于温度状态的两类识别标准均受到锋面背景温度场变化的影响,温度升高(降低),PF 南移(北移),但两种方法对背景温度变化的响应程度有差异,2°C 等温线标准明显对温度变化更敏感,在 PF 背景温度变化相同的条件下,该方法得到的 PF 位移幅度更大,说明该标准的稳定性较 T_{\min} 标准更低。特别地,如图 12 所示,1993 至 2004 年,PF 所在区域出现较强升温现象,2°C 等温线标准指出在绕极

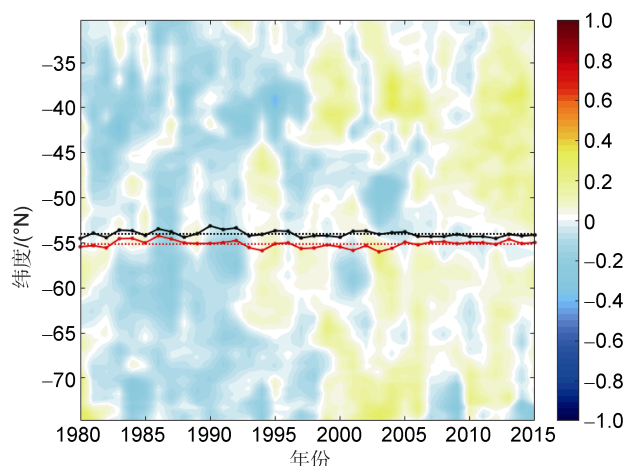


图 12 200—1 000 m 层纬向平均温度的距平和 T_{\min} 标准 (黑线) 及 2°C 等温线标准 (红线) 得到的绕极平均 PF 位置的变化

Fig.12. Zonal mean temperature anomaly at 200—1 000 m, with zonal mean position of PF derived from T_{\min} (black line) and 2°C contour criteria (red line)

平均意义上, PF 向南移动了约 0.5° , 而 T_{\min} 标准的结果则显示, 该时期 PF 移动幅度较小, 仅有

-0.1° , 基本稳定不动。这说明, 温度升高会直接导致等温线发生移动, 但与 PF 相关的次表层冷水核心的范围并未发生移动。综上所述, 对 PF 在 1980—2015 年间的长期变化来说, 由于背景温度变化较小, 两种识别方法给出的结果相近, 都尚且适用; 但对于更短的年代和年际变化研究来说, 两种方法受背景温度变化的影响程度有所不同, T_{\min} 标准的稳定性更高。

对于 SAF 长期变化的研究, 表 1 中两种识别方法得到的结论基本一致。而在更短的年际尺度上, 锋面变化结果存在一定差异。例如, 2000 年前后, 两种识别标准得到的 SAF 变化趋势是相反的。造成该现象的原因可能是, 两类识别标准分别受到背景温度/盐度场变化 (如图 12, 14) 的影响, 继而导致 SAF 识别结果的差异。然而, 基于 S_{\min} 标准的 SAF 年际变化幅度更大 (如图 7), 位置的稳定性更低, 造成该现象的原因可能有以下两方面。(1) 背景盐度场确实存在显著变化, AAIW 受到强烈影响, 使得作为水团边界的 SAF 发生明显

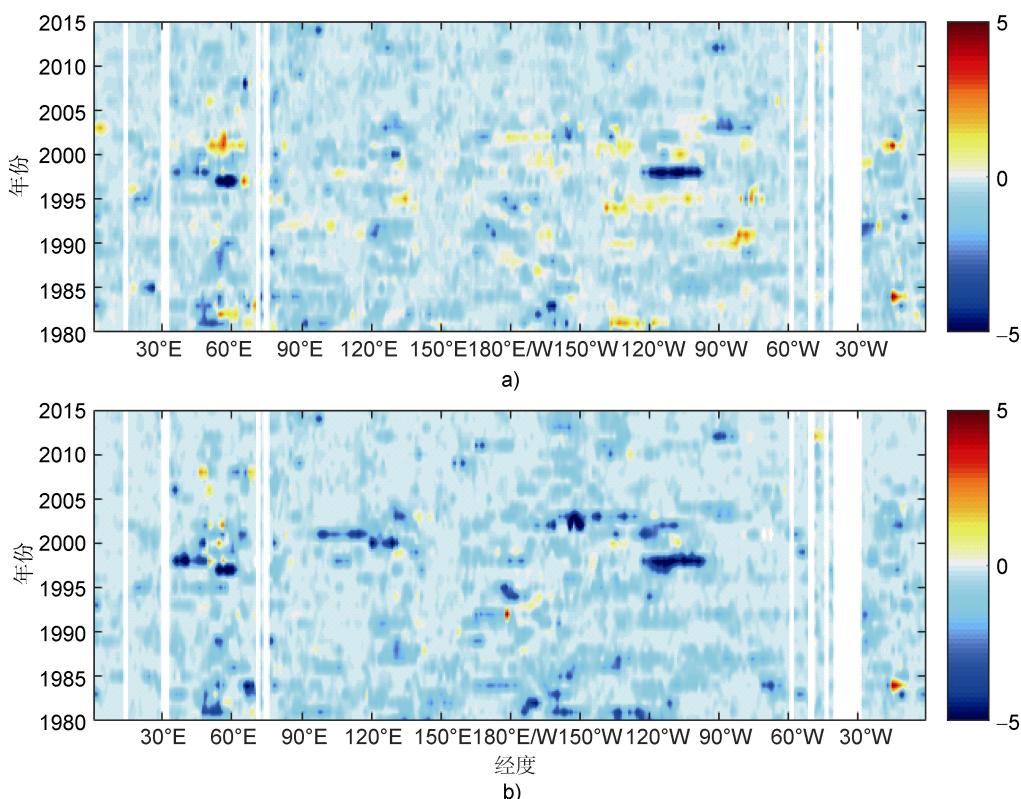


图 13 T_{\min} 标准 (a) 及 2°C 等温线标准 (b) 得到的逐年 PF 位置距平乘以 PF 所在背景区域平均温度的距平
Fig.13. PF anomaly from T_{\min} (a) and 2°C contour criteria (b) multiplied by temperature anomaly in PF background area

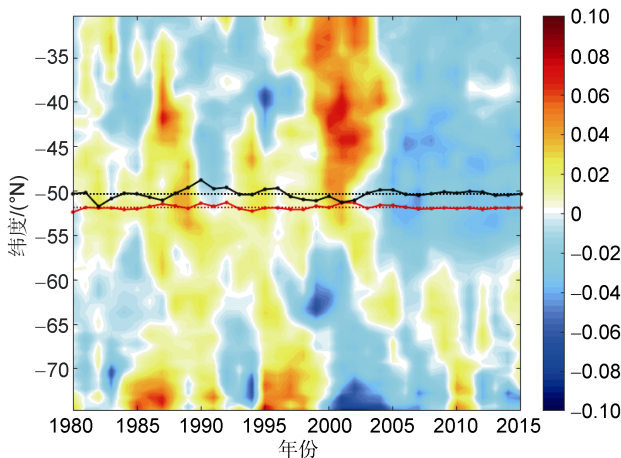


图 14 200—1 000 m 层纬向平均盐度的距平和 S_{\min} 标准 (黑线) 及 4°C 等温线标准 (红线) 得到的绕极平均 SAF 位置的变化

Fig. 14. Zonal mean salinity anomaly at 200—1 000m, with zonal mean position of SAF derived from S_{\min} (black line) and 4°C contour criteria (red line)

变化。例如, 在 1982—1991 年期间, SAF 位置出现极小和极大值, 锋面位移幅度最大, 且主要集中在印度洋扇区和太平洋扇区, 历史研究^[47]曾指出, 在该时间段附近(1985—1994 年), ACC 区域曾出现明显的南极绕极波现象, 因此 SAF 极可能受到该大尺度现象的影响而发生显著变化。(2)该方法基于对盐度现象的捕捉, 而 AAIW 的低盐特征在不同海区间存在差异, 即 S_{\min} 现象的强弱有所不同, 使用中操作的难度较高, 方法稳定性可能受到识别技术的影响。

由于 SAF 无绕极适用的盐度等值线标准, 故无法像 PF 一样, 进一步对比确定 S_{\min} 标准受背景盐度变化的影响情况。因此, 以盐度场为基础的现象类识别标准的准确度和稳定性, 有待进一步地讨论和探究。而 4°C 等温线标准的结果则表明, 从年代到年际尺度, 该方法在使用中的稳定性都相对较高。不过, 这两种识别标准究竟孰优孰劣, 目前尚难以得到准确的结论。一方面, 两种标准分别与盐度和温度有关, 难以进行比较; 另一方面, 由于 SAF 处的水团结构较 PF 更加复杂, 温度标准和盐度标准分别基于对 SAMW 和 AAIW 两个水团的认知, 故反映的是不同水团边界处的特征, 难以评价两者的优劣。

3 总结

本文利用月均的再分析温盐数据, 分别使用传统研究中的两类锋面识别标准, 探究 1980—2015 年夏季 SAF 和 PF 的时空变化特征, 并对比研究结果, 讨论不同识别方法在锋面变化研究中的适用性和稳定性, 对研究结论和讨论的总结如下。

1. 在绕极平均意义上, 基于两类识别标准的研究结果一致表明, SAF 和 PF 在 1980—2015 年间较为稳定, 无明显的经向移动趋势。其中, T_{\min} 和 2°C 等温线标准得到的 PF 长期移动趋势分别为 $-0.1^{\circ}/10$ 年和 $-0.03^{\circ}/10$ 年, S_{\min} 和 4°C 等温线标准得到的 SAF 长期移动趋势分别为 $0.03^{\circ}/10$ 年和 $0^{\circ}/10$ 年。在年代尺度上, 两类识别标准得到的锋面变化特征呈现出差异, 变化趋势会有所不同。两支锋面在年际尺度上的变化都较明显, 常发生南北向摆动, 由两种识别方法得到的 PF 结果较为相似, 相邻年份间 PF 的移动方向经常是一致的, 而 SAF 在年际变化幅度和位移方向上, 两种方法的结果均有明显差异。锋面的位移幅度、稳定性和长期移动趋势均有明显的区域差异性。总体而言, 锋面在经过大的地形障碍区时, 锋面位置较稳定, 位移幅度较小, 而在深海盆区和脱离地形约束的下游, 锋面稳定性较弱, 经向位移幅度较大。

2. PF 在大西洋扇区的稳定性最高, 长期移动趋势最小。在印度洋扇区, PF 以向极移动为主, 在太平洋扇区, 2°C 等温线标准的结果显示该海区中西部有明显北移趋势, 而 T_{\min} 标准的结果则在东部发现显著南移。SAF 在印度洋扇区最稳定, 锋面的长期变化一致较小, 而在太平洋扇区有较显著的长期变化, 但南北向位移同时存在。

3. 在锋面长期变化的研究中, 两类识别标准的结果基本一致, 说明对于较长时间尺度的研究, 两类识别方法都尚且适用。在年代和年际尺度上, 对于 PF, T_{\min} 标准的稳定性更高, 受背景温度变化的影响相对于 2°C 等温线较小。对于 SAF, 4°C 等温线标准的稳定性相对较高, 基于 S_{\min} 标准的锋面年际变化幅度更大, 由于两类标准反映了不同水团的特征, 且两种物理量之间难以进行比较, 故两种标准究竟孰优孰劣, 尚待进一步的研究。

参考文献

- 1 RINTOUL S R, SOKOLOV S, WILLIAMS M J M, et al. Antarctic Circumpolar Current transport and barotropic transition at Macquarie Ridge[J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(20): 7254—7261.
- 2 TOGGWEILER J R, RUSSELL J. Ocean circulation in a warming climate[J]. *Nature*, 2008, 451(7176): 286—288.
- 3 ORSI A H, WHITWORTH III T, NOWLIN J W D. On the meridional extent and fronts of the Antarctic Circumpolar Current[J]. *Deep-Sea Research I*, 1995, 42(5): 641—673.
- 4 BELKIN I M, GORDON A L. Southern Ocean fronts from the Greenwich meridian to Tasmania[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1996, 101(C2): 3675—3696.
- 5 MOORE J K, ABBOTT M R, RICHMAN J G. Variability in the location of the Antarctic Polar Front (90°-20°W) from satellite sea surface temperature data[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(C13): 27825—27833.
- 6 BÖNING C W, DISPERT A, VISBECK M, et al. The response of the Antarctic Circumpolar Current to recent climate change[J]. *Nature Geoscience*, 2008, 1(12): 864—869.
- 7 THOMPSON A F, SALLÉE J B. Jets and Topography: Jet transitions and the impact on transport in the Antarctic Circumpolar Current[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2012, 42(6): 956—972.
- 8 BURLING R W. Hydrology of circumpolar waters south of New Zealand[M]. New Zealand: Department of Scientific and Industrial Research Bulletin 143, 1961.
- 9 EMERY W J. Antarctic polar frontal zone from Australia to the Drake Passage[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1977, 7(6): 811—822.
- 10 GORDON A L. Structure of Antarctic Waters between 20° W and 170°W[M]//BUSHNELL V C. Antarctic Map Folio Series 6. New York: American Geographical Society, 1967.
- 11 GORDON A L. Antarctic polar front zone[M]//REID J L. Antarctic Oceanology I. Washington D C: American Geophysical Union, 1971.
- 12 NAGATA Y, MICHIDA Y, UMIMARA Y. Variation of positions and structures of the oceanic fronts in the Indian Ocean sector of the Southern Ocean in the period from 1965 to 1987[M]//SAHRHAGE D. Antarctic Ocean and Resources Variability. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1988: 92—98.
- 13 OSTAPOFF F. The salinity distribution at 200 meters and the Antarctic frontal zones[J]. *Deutsche Hydrographische Zeitschrift*, 1962, 15(4): 133—142.
- 14 WHITWORTH III T, NOWLIN J W D. Water mass and currents of the Southern Ocean at the Greenwich Meridian[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1987, 92(C6): 6462—6476.
- 15 PATTERSON S L, WHITWORTH III T. Chapter 3 Physical Oceanography[M]//GLASBY G P. Antarctic Sector of the Pacific. New York, USA: Elsevier, 1989: 55—93.
- 16 READ J F, POLLARD R T, MORRISON A I, et al. On the southerly extent of the Antarctic Circumpolar Current in the southeast Pacific[J]. *Deep-Sea Research II*, 1995, 42(4-5): 933—954.
- 17 KOSTIANOY A G, GINZBURG A I, FRANKIGNOULLE M, et al. Fronts in the Southern Indian Ocean as inferred from satellite sea surface temperature data[J]. *Journal of Marine Systems*, 2004, 45 (1-2): 55—73.
- 18 MOORE J K, ABBOTT M R, RICHMAN J G. Location and dynamics of the Antarctic Polar Front from satellite sea surface temperature data[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1999, 104(C2): 3059—3073.
- 19 FREEMAN N M, LOVENDUSKI N S, GENT P R. Temporal variability in the Antarctic Polar Front (2002–2014)[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2016, 121(10): 7263—7276.
- 20 CHAMBERS D P. Using kinetic energy measurements from altimetry to detect shifts in the positions of fronts in the Southern Ocean[J]. *Ocean Science*, 2018, 14(1): 105—116.
- 21 GILLE S T. Meridional displacement of the Antarctic Circumpolar Current[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 2014, 372(2019): 20130273.

- 22 KIM Y S, ORSI A H. On the Variability of Antarctic Circumpolar Current Fronts Inferred from 1992–2011 Altimetry[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2014, 44(12): 3054–3071.
- 23 SHAO A E, GILLE S T, MECKING S, et al. Properties of the Subantarctic Front and Polar Front from the skewness of sea level anomaly[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2015, 120(7): 5179–5193.
- 24 SOKOLOV S, RINTOUL S R. Circumpolar structure and distribution of the Antarctic Circumpolar Current fronts: 1. Mean circumpolar paths[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114(C11): C11018.
- 25 SOKOLOV S, RINTOUL S R. Circumpolar structure and distribution of the Antarctic Circumpolar Current fronts: 2. Variability and relationship to sea surface height[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114(C11): C11019.
- 26 GRAHAM R M, DE BOER A M, HEYWOOD K J, et al. Southern Ocean fronts: Controlled by wind or topography ? [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2012, 117(C8): C08018.
- 27 CHAPMAN C C. New perspectives on frontal variability in the Southern Ocean[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2017, 47(5): 1151–1168.
- 28 THOMPSON A F. Jet formation and evolution in baroclinic turbulence with simple topography[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2010, 40(2): 257–278.
- 29 LANGLAIS C, RINTOUL S, SCHILLER A. Variability and mesoscale activity of the Southern Ocean fronts: Identification of a circumpolar coordinate system[J]. *Ocean Modelling*, 2011, 39 (1-2): 79–96.
- 30 MARSHALL G J. Trends in the southern annular mode from observations and reanalysis[J]. *Journal of Climate*, 2003, 16(24): 4134–4143.
- 31 THOMPSON A F, RICHARDS K J. Low frequency variability of Southern Ocean jets[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116(C9): C09022.
- 32 JOHNSON G C, PURKEY S G, BULLISTER J L. Warming and freshening in the abyssal southeastern Indian Ocean[J]. *Journal of Climate*, 2008, 21(20): 5351–5363.
- 33 MEIJERS A J S, BINDOFF N L, RINTOUL S R. Frontal movements and property fluxes: Contributions to heat and freshwater trends in the Southern Ocean[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116(C8): C08024.
- 34 PURKEY S G, JOHNSON G C. Warming of global abyssal and deep Southern Ocean waters between the 1990s and 2000s: Contributions to global heat and sea level rise budgets[J]. *Journal of Climate*, 2010, 23(23): 6336–6351.
- 35 PURKEY S G, JOHNSON G C. Antarctic Bottom Water warming and freshening: Contributions to sea level rise, ocean freshwater budgets, and global heat gain[J]. *Journal of Climate*, 2013, 26(16): 6105–6122.
- 36 CHAPMAN C C. Southern Ocean jets and how to find them: Improving and comparing common jet detection methods[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2014, 119(7): 4318–4339.
- 37 CARTON J A, CHEPURIN G A, CHEN L G. SODA3: a new ocean climate reanalysis[J]. *Journal of Climate*, 2018, 31(17): 6967–6983.
- 38 GAO G P, HAN S Z, DONG Z Q, et al. Structure and variability of fronts in the South Indian Ocean along sections from Zhongshan Station to Fremantle[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2003, 25(6): 9–19.
- 39 CARTON J A, GIESE B S, GRODSKY S A. Sea level rise and the warming of the oceans in the Simple Ocean Data Assimilation (SODA) ocean reanalysis[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110(C9): C09006.
- 40 JOHNSTON B M, GABRIC A J. Long-term trends in upper ocean structure and meridional circulation of the Southern Ocean south of Australia derived from the SODA reanalysis[J]. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 2010, 62(5): 719–736.
- 41 JOHNSTON B M, GABRIC A J. Interannual variability in estimated biological productivity in the Australian sector of the Southern Ocean in 1997–2007[J]. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 2011, 63(2): 266–286.
- 42 YANG X Y, WANG D X, WANG J, et al. Connection between the decadal variability in the Southern Ocean circulation and the Southern Annular Mode[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(16): 130–144.
- 43 ARMOUR K C, MARSHALL J, SCOTT J R, et al. Southern Ocean warming delayed by circumpolar upwelling and equatorward transport[J]. *Nature Geoscience*, 2016, 9(7): 549–554.
- 44 YAO W J, SHI J X, ZHAO X L. Freshening of Antarctic Intermediate Water in the South Atlantic Ocean in 2005–2014[J]. *Ocean Science*, 2017, 13(4): 521–530.

- 45 姚文峻, 史久新. 南极中层水盐度多年变化: 1981—2010[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2018, 48(3): 1—11.
- 46 SWART N C, GILLE S T, FYFE J C, et al. Recent Southern Ocean warming and freshening driven by greenhouse gas emissions and ozone depletion[J]. *Nature Geoscience*, 2018, 11(11): 836—841.
- 47 WHITE W B, PETERSON R G. An Antarctic circumpolar wave in surface pressure, wind, temperature and seaice extent[J]. *Nature*, 1996, 380(6576): 699—702.

STUDY ON THE LONG-TERM VARIABILITY OF SUBANTARCTIC AND POLAR FRONTS IN AUSTRAL SUMMER DURING 1980—2015

Quan Shanyuan, Shi Jiuxin

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

Abstract

The variability of the Subantarctic Front (SAF) and Polar Front (PF) in austral summer (January–March) during 1980–2015 was investigated using monthly mean potential temperature and salinity reanalysis data, and by applying criteria based on physical phenomena and fixed property values to frontal detection. The results derived from two types of criterion were consistent with each other regarding the long-term trend of frontal position during the 36-year period. In terms of circumpolar average, no significant trend of frontal movement was found between 1980 and 2015, although frontal variability appeared as fluctuation during these years. The migration amplitude, stability and long-term trend of the fronts showed regional differences. Minimal displacement and high stability were found in regions with large topographic obstacles, whereas the fronts move significantly and frequently in deep basins and downstream of obstacles. The regions with the highest stability and the smallest long-term movement of the SAF and PF were found in the Indian and Atlantic sectors, respectively. In the eastern Pacific sector, the SAF showed significant long-term movement with both northward and southward shifts, whereas southward displacement of the PF dominated the Indian sector. On decadal and interannual timescales, evident differences were found between the results of frontal detection derived from the two criteria; thus, the applicability of both criteria was discussed accordingly. For the PF, the criterion based on the temperature phenomenon was found more stable than the isotherm criterion.

Key words Subantarctic Front, Polar Front, long-term variability, Southern Ocean