

李双林, 韩哲, 刘娜, 等. 2016 年南极海冰破纪录减少及其成因的研究综述[J]. 海洋学报, 2021, 43(7): 1–10, doi:10.12284/hyxb2021119  
Li Shuanglin, Han Zhe, Liu Na, et al. A review of the researches on the record low Antarctic sea ice in 2016 and its formation mechanisms[J]. Haiyang Xuebao, 2021, 43(7): 1–10, doi:10.12284/hyxb2021119

# 2016 年南极海冰破纪录减少及其成因的研究综述

李双林<sup>1,2</sup>, 韩哲<sup>2</sup>, 刘娜<sup>2</sup>, 张超<sup>1</sup>, 蔡慧<sup>1</sup>

(1. 中国地质大学(武汉) 大气科学系, 湖北 武汉 430074; 2. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

**摘要:** 近几十年来, 在全球变暖背景下, 北极海冰不断减少, 但南极海冰却在小幅增加。正当人们试图解释南极海冰这一“变暖悖论”时, 2016 年末南极海冰范围却突然跌破纪录, 达到历史最低。其中, 12 月海冰减少范围最大, 达到  $2.13 \times 10^6 \text{ km}^2$ , 相对于 1981–2010 年的 30 年平均海冰范围减少了 20.5%。这立即引起了科学界的极大关注, 人们从大气环流、物理海洋和冰间湖等诸多方面, 对其成因进行了大量研究, 本文对这些工作进行了归纳总结。结果显示: 在大气方面, 主要的异常信号包括 9–10 月的纬向 3 波异常和 11–12 月的负位相南半球环状模以及气旋活动增加等, 纬向 3 波大气环流受到热带太平洋和印度洋海温异常的调制, 而南半球环状模异常主要是平流层极涡减弱下传导致; 海洋方面, 南大洋海温较常年偏暖, 威德尔海出现了自 1976 年以来最大的冰间湖, 对海冰减少起着不可忽视的作用。然而, 当前的研究难以说明这一极端事件是由全球变暖或其他外部强迫主导, 还是由气候系统内部变率产生, 亦或者是两者的共同作用。对这些问题的回答直接关系到未来南极海冰趋势的预估, 是亟待解决的科学问题和潜在的研究热点。

**关键词:** 南极; 海冰减少; 2016 年; 破纪录低值; 物理成因

中图分类号: P731.15

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2021)07-0001-10

## 1 引言

南极作为气候系统的重要冷源之一, 在全球气候变化中占有重要份额<sup>[1-2]</sup>, 是预估未来全球气候变化的重要区域之一<sup>[3]</sup>。海冰作为极地特有的介质, 影响着全球的热量和质量交换过程, 例如海冰反照率高, 可以减少海表对太阳短波的吸收, 降低海洋与大气之间的热量和水分交换, 从而改变海洋表面的能量平衡。海冰融化或冻结会导致局地海水盐度降低或增加, 改变海洋层结稳定度, 影响到南极底层水和南极中层水, 最后影响海洋翻转环流<sup>[4]</sup>。

近些年, 南极海冰覆盖范围发生了明显变化<sup>[5]</sup>。在全球变暖背景之下, 北极海冰快速消融, 而南极海

冰覆盖范围在 2015 年之前显示出明显的增长趋势<sup>[6]</sup>, 特别是 2012–2014 年海冰范围连续增大, 不断刷新纪录<sup>[7]</sup>。这一现象与通常所认为的——全球快速暖化海冰融化——不一致, 遂引起了国内外学者的广泛关注, 被称为“变暖悖论”。基于工业革命前耦合气候模式试验, 有研究认为这种增长趋势是由气候系统自然波动引起<sup>[8]</sup>。然而当人们正忙于探索南极海冰增加的成因时, 在 2016 年南半球的春末夏初, 南极海冰范围跌破历史记录, 成为有卫星观测记录以来的最低值<sup>[9-15]</sup>。之后, 南极海冰范围略有恢复, 但仍维持在较低水平。

关于这次事件, 最为关键的一个问题是: 它是长期趋势的突变或者年代际尺度的转折信号, 还是一次气候系统内部的年际波动? 弄清这一问题对认识未

收稿日期: 2020-12-31; 修订日期: 2021-04-27。

基金项目: 中国科学院战略性先导专项“地球大数据科学工程”项目七之子任务“南极气候变化及其对东亚夏季气候的影响”(XDA19070402)。

作者简介: 李双林(1966—), 湖北省孝感市人, 研究员, 主要从事热带外海气相互作用研究。E-mail: shuanglin.li@mail.iap.ac.cn

来南极海冰变化具有重要意义。对此,国内外很多学者围绕南极海冰减少的成因进行了大量研究,从多个角度提出了非常有意义的物理解释。诸多结果显示,导致这一极端减少事件的因素并不是单一的,而是大气和海洋的多个过程共同作用下形成的。本文总结了最近几年来国内外学者的研究成果,从大气和海洋两个方面进行了梳理,并对有待解决的科学问题进行了讨论。希望本综述对认识南极海冰变化成因有所启发。本文中的季节除特殊申明外,是就南半球而言,例如冬季是指南半球冬季(即 6–8 月份)。

## 2 2016 年海冰状况

自 1979 年以来,南极海冰范围(SIE)呈微弱增加的趋势。从年平均看,SIE 异常在 2014 年达到最大,为  $1.14 \times 10^6 \text{ km}^2$ ,随后快速减小(图 1)。从 1979 年 1 月至 2015 年 12 月共 37 年间,年平均值线性趋势为  $0.24 \times 10^6 \text{ km}^2 / (10 \text{ a})$ <sup>[10]</sup>。与之相比,从 1979 年 1 月至 2017 年 12 月的 39 年,线性趋势为  $0.15 \times 10^6 \text{ km}^2 / (10 \text{ a})$ ,减小了 37.5%,这说明 2016 年海冰的急剧减少对趋势的减小有重要贡献。2016 年年平均 SIE 异常为  $-0.41 \times 10^6 \text{ km}^2$ ,是自 1979 年以来减小最大的年份。其中,春季和夏季是减小最明显的季节,SIE 异常由 9 月份的  $-0.34 \times 10^6 \text{ km}^2$ ,减小至 12 月份的  $-2.13 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。此外,11 月和 12 月是有卫星观测记录以来同期

SIE 最小的两个月份,分别为  $14.22 \times 10^6 \text{ km}^2$  和  $8.28 \times 10^6 \text{ km}^2$ ,与气候态(即 1981–2010 年的平均,依次为  $15.90 \times 10^6 \text{ km}^2$  和  $10.41 \times 10^6 \text{ km}^2$ )相比,分别减小了 10.5% 和 20.5%。以上分析结果与 Schlosser 等<sup>[10]</sup>的研究结果一致。

图 2 是 2016 年逐月的海冰密集度(SIC)异常及其与 2015 年 SIC 异常之间的差异。从图中可以看出,2016 年,无论是 SIC 异常本身还是其与 2015 年的差异,均存在明显的季节性。在 1–3 月,SIC 异常减小主要出现在罗斯海东部和阿蒙森海(图 2a 至图 2c)。与气候态相比,大部分海域 SIC 异常减小 20% 以上,阿蒙森海的部分海域减小超过了 60%。尽管威德尔海海冰相对常年偏多,但与 2015 年相比 SIC 异常减小了 40% 以上。其中 2 月和 3 月的减小更为明显,部分区域甚至减小了 80% 以上(图 2b,图 2c)。此外,罗斯海和阿蒙森海 SIC 异常较 2015 年也明显减小,大约减小了 20%~60%。

4–6 月,SIC 异常有 4 个中心(图 2d 至图 2f)。两个负异常中心分别位于阿蒙森海和哈康七世海,大部分海域 SIC 异常减小 20%~80%。两个正中心分别位于别林斯高晋海–威德尔海中西部(增多 10%~50%)和南极的印度洋–西南太平洋区域(增多 10%~40%)。与 2015 年相比,除了别林斯高晋海的小部分海域出现微弱的增长外,罗斯海、阿蒙森海、威德尔

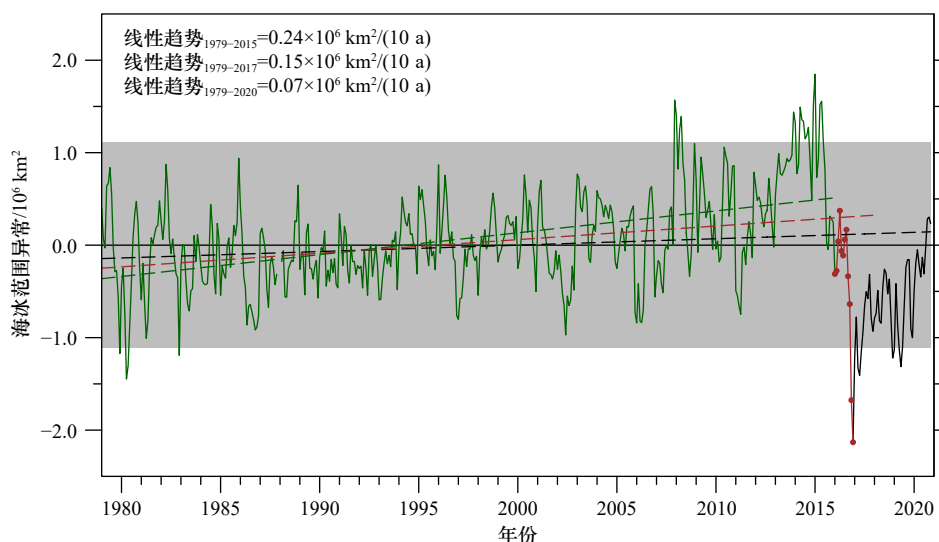


图 1 1979 年 1 月至 2020 年 11 月南极逐月海冰范围异常

Fig. 1 The evolution of monthly mean sea ice extent anomalies from January 1979 to November 2020

数据来自美国国家冰雪数据中心<sup>[11]</sup>。绿色虚线、红色虚线和黑色虚线分别代表 1979–2015 年, 1979–2016 年和 1979–2020 年的线性趋势, 灰色阴影代表  $\pm 2$  倍标准差区间。此图基于 Schlosser 等<sup>[10]</sup>的图 6 重画, 增补了 2018 年 1 月至 2020 年 11 月海冰范围异常指数

The data is from the National Snow and Ice Data Center<sup>[11]</sup>. The green, red and black dashed lines indicate the long-term trend for 1979–2015, 1979–2016 and 1979–2020, and grey shading indicates the  $\pm 2$  standard deviations. It was reproduced based on Fig 6 of Schlosser et al.<sup>[10]</sup>, but with the data through January

2018 to November 2020 added

2018 to November 2020 added

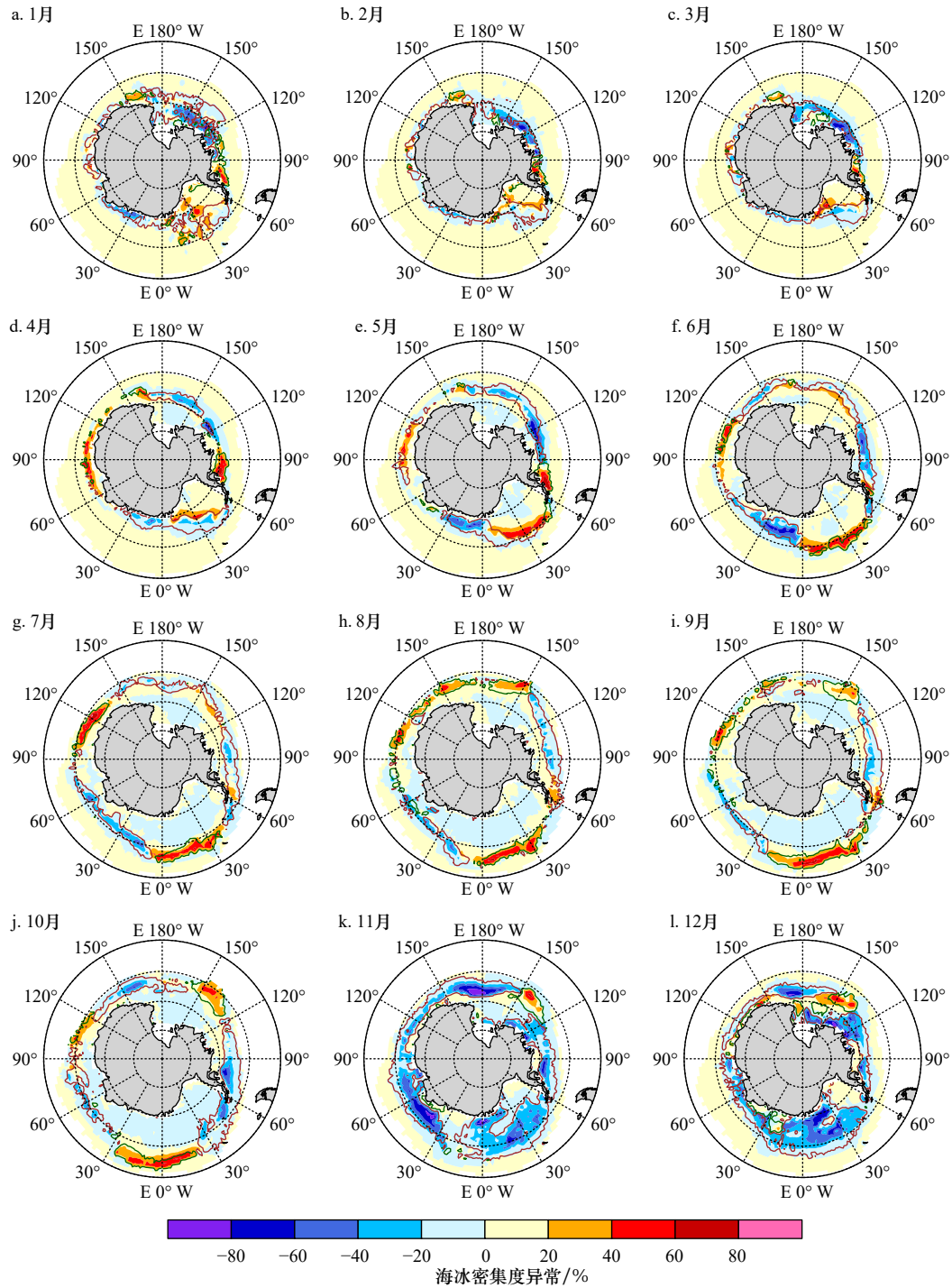


图2 2016年逐月海冰密集度异常分布及其与2015年的差值(-15%和15%两条等值线)分布

Fig. 2 Distributions of sea ice concentration anomaly in January–December 2016 together with the differences between the sea ice concentration anomaly in 2016 and in 2015 (-15% and 15% contours)

棕色和绿色实线分别表示-15%和15%等值线。海冰密集度数据来自英国气象局哈德利中心(UK Met Office Hadley Centre)<sup>[16]</sup>  
Green and brown solid lines indicate 15% and -15%, respectively. Sea ice concentration dataset is obtained from the UK Met Office Hadley Centre<sup>[16]</sup>

海和哈康七世海的海冰密集度(SIC)异常均减小, 最多超过80%。

7–9月, SIC异常的分布与4–6月类似, 但略微北移(图2g至图2i)。较强的两个SIC正异常中心分别位于威德尔海中东部和印度洋东部–太平洋中西部, 大部分海域增长20%~60%。SIC负异常主要位于阿

蒙森海和哈康七世海–印度洋, 相对于正异常要弱一些。与2015年相比, 阿蒙森海和别林斯高普海是SIC异常减小最显著的海域, 大部分海域减小40%以上, 最大达到80%。此外, 哈康七世海也出现减少的情况, 但强度较弱。与1–3月和4–6月不同, 7–9月部

分海域出现了海冰增长的情况,例如威德尔海东部、澳大利亚以南的海域以及罗斯海东部-阿蒙森海西部。

值得注意的是,10-12月是海冰减少最显著的季节(图2j至图2l)。从SIC异常分布来看,除罗斯海东部和阿蒙森海西部出现较明显增加外,其余海域均显著减少,且幅度明显强于其他3个季节。与2015年相比,10-12月均出现海冰急剧减少的情况。除罗斯海东部-阿蒙森海西部出现增长外,其余区域均明显减少。减少最显著的区域主要位于西半球,大部分区域减少20%以上,其中罗斯海、别林斯高晋海和威德尔海的部分区域甚至减少60%以上。

综上,2016年10-12月是海冰减少最显著的月份<sup>[10]</sup>。就夏季而言,2016年是有卫星观测记录以来海冰最少的一年。此外,海冰减少存在明显的地域性和季节性差异,西南极是减少最显著的区域,10-12月减少最多。

### 3 成因

#### 3.1 大气环流的影响

2016年的海冰破纪录减少是从前几年的偏多状态急转而来,这种急剧变化可能是由较强的大气内部变率引起。已有研究表明,2016年春夏的大气环流型的确出现了一些非常强的异常,包括纬向3波模态异常、南半球环状模异常和南极气旋活动异常等。

##### 3.1.1 纬向3波模

南半球纬向3波模(ZW3)最早由van Loon和Jenne<sup>[17]</sup>提出。Raphael<sup>[18]</sup>对其与南极海冰的关系进行了研究,发现与ZW3相联系的经向风异常通过动力输运以及改变海气之间热通量,影响海冰变化。2016年5-10月,南半球大气环流表现出非常强的ZW3异常结构<sup>[10]</sup>,相关的经向环流有利于海冰减少。并且,由于海冰-反照率的正反馈,海冰偏少状态会在后期维持或进一步加剧。正位相ZW3导致的海冰减少主要出现在罗斯海西部、别林斯高晋海、阿蒙森海和威德尔海西部。在东印度洋区域,由于9-10月非常强的经向热输送,海冰的减少与热力作用似乎更密切,模拟结果证实了这一点<sup>[19]</sup>。此外,热带海温对ZW3异常有一定的贡献<sup>[14]</sup>。在11-12月即海冰破纪录减少的时候,ZW3并没有显著的正位相异常,说明ZW3可能为11-12月海冰破纪录减少提供了有利的前期条件。

##### 3.1.2 南半球环状模/南极涛动

基于Marshall<sup>[20]</sup>的南半球环状模(SAM)指数,2016年11月份为有卫星观测记录以来的第二低值<sup>[10]</sup>。

这一负位相SAM导致向南的埃克曼输送,有利于海冰减少。但该负位相SAM异常发生在拉尼娜的背景之下,是非常罕见的,因为拉尼娜往往有利于正位相SAM异常的发生。那么,SAM负位相异常是如何发生的呢?可能与极地平流层信号下传和大气季节内振荡(MJO)有关<sup>[14]</sup>。人们早已认识到,在春季背景风表现为弱西风时,平流层极涡信号下传可以影响到对流层SAM<sup>[21-22]</sup>。2016年初春,存在从对流层顶向平流层的行星波上传,到达平流层上部时减弱了极涡。然后,这一信号到达平流层顶后被反射向下传播,使得SAM出现负位相异常,进而减弱了11-12月的近地面绕极西风。这一结果在历史观测资料和模式试验中均存在。尽管SAM的环流异常在中上层是纬向的,但是在近地面并不是纬向的,故其对海冰的影响并不是纬向对称的,西南极<sup>[8]</sup>和印度洋区域<sup>[23]</sup>更易受其影响。这就解释了2016年11月初SAM异常建立之后,为什么海冰在印度洋、太平洋区域以及威德尔海会进一步地减少。

负位相SAM异常还可以通过影响埃克曼抽吸,引起南大洋低层暖水向上层输送<sup>[13]</sup>。暖水从混合层夹卷进入表层,这经常发生在夏季末。夹卷进入表层的相对暖的海水有利于上层海洋变暖,进而导致海冰减少。这一影响在年代际时间尺度上更为显著。

##### 3.1.3 气旋活动

在2016年9月9日,70°~80°S,60°W~0°的区域生成了历史上最强之一的低压系统,最低气压为913 hPa。在其北部存在一高压,两者共同作用使得威德尔海出现特别强的西风异常,通过埃克曼输送将海冰向东北方向输送,造成威德尔海西北部的海冰减少,这是威德尔海海冰整体上减少的原因之一。威德尔海海冰的急剧减少出现在12月,也与气旋活动异常有关。在12月11-15日,有一深厚低压系统控制该区域<sup>[24]</sup>,这在夏季比较罕见<sup>[25]</sup>。尤其是12日,低压系统中心气压低于968 hPa,是历史上能到达75°S以南的最强低压系统之一(总数的3%)。强气旋东部的偏北风向威德尔海输送大量暖空气,有利于海冰减少。从观测记录(再分析资料)来看,相对于其他年份,2016年12月的强气旋活动对海冰的影响是最强的,主要原因是其他年份中气旋所影响区域内的海冰已经非常少。此外,气旋活动的增加使得威德尔海的开阔海域面积增大,海水吸收到更多的太阳辐射,上层海温进一步增暖,形成正反馈,有利于海冰进一步地减少。

##### 3.1.4 大气季节内振荡

MJO是热带大气季节内变率的支配模态<sup>[26-27]</sup>,其

不仅对局地天气、气候产生重要影响,还可以通过影响热带对流活动,并激发大气遥相关波列影响中高纬天气、气候。人们很早就注意到 MJO 和南半球大气环流存在联系。在南半球冬季,当印度洋 MJO 活动增强后,60°S 附近的西风会出现增强<sup>[28]</sup>。所以, MJO 活动异常完全有可能通过影响南半球的大气环流异常,进而影响南极海冰异常<sup>[29]</sup>。

在 2016 年 11 月,出现了一次非常强的 MJO 事件。MJO 在 11 月初处于第 5 位相,到 11 月中旬位于第 8 位相,而在 11 月底转变为第 3 位相。随着 MJO 的东传,其抑制了由印度洋偶极子(IOD)引起的热带对流活动异常,因此由 IOD 激发的 ZW3 型环流异常减弱。相应地,与 ZW3 型环流有关的经向输送也减弱了,这为负位相 SAM 的建立提供了基础<sup>[14]</sup>。

### 3.2 海洋的影响

过去的研究表明,热带太平洋<sup>[30-32]</sup>、印度洋<sup>[33]</sup>和大西洋<sup>[34-35]</sup>海表温度异常,均与南极海冰变化有着密切联系。在 2016 年 9-12 月及之前,热带和热带外海温都发生了显著异常。首先,2015/2016 年发生了超级厄尔尼诺(El Niño)事件,其在夏季(2015 年 12 月至 2016 年 2 月)达到峰值,之后衰减消亡。2016 年 7 月之后,出现了中等强度的拉尼娜事件。其次,热带印度洋海温异常在 2016 年 9-10 月呈现西冷东暖的偶极型分布,为自 1980 年以来最强的负 IOD 事件<sup>[36]</sup>,偶极子指数(Dipole Mode Index, DMI)在 9 月达到历史最小值<sup>[37]</sup>。已有研究认为 IOD 可能是海冰异常偏少的重要因素。下面将分别阐述。

#### 3.2.1 热带海温

##### 3.2.1.1 厄尔尼诺-南方涛动

厄尔尼诺-南方涛动(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)作为热带海洋最强的年际信号,通过大气桥影响着南极海冰的变化<sup>[38-40]</sup>。一方面,ENSO 可以在南半球中高纬激发一个被称为太平洋-南美遥相关型(PSA)的罗斯贝(Rossby)波列<sup>[41-42]</sup>,该波列具有准正压结构,构成该波列的一个中心位于阿蒙森低压上空附近<sup>[43]</sup>,先影响阿蒙森低压的强度,再通过热力和动力过程改变海冰的分布状态。另一方面,ENSO 也可通过改变南大西洋和南太平洋的大尺度经圈环流强度,引起向极的热量输送异常,造成海冰的北进或南退<sup>[44]</sup>。此外,ENSO 也可通过影响秘鲁寒流等海洋过程,进而影响南极海冰分布。

2016 年 9-12 月热带中东太平洋呈现冷异常,处于拉尼娜的发展和成熟位相,但南半球高纬的海温海冰异常并没有表现出典型拉尼娜发展年的情形(如 1998

年和 1983 年),而是相反地,呈现类似厄尔尼诺年的南极偶极型分布,即东罗斯海和阿蒙森海海温偏暖、海冰偏少,别林斯高晋海海温偏冷、海冰偏多。Stuecker 等<sup>[12]</sup>分析认为原因可能有两个:其一,2015/2016 年夏季发生的超强厄尔尼诺对高纬海温海冰的影响具有准静止、持续性特征;其二,2016/2017 年夏季发生的拉尼娜强度偏弱。具体来说,受前期超强厄尔尼诺激发的正 PSA 波列影响,2015/2016 年夏季西南极的偶极型海温分布可以一直持续至第二年的 11-12 月,海温-海冰正反馈使得东罗斯海至阿蒙森海的海冰减少持续较长时间。由于弱拉尼娜引起的海冰增加分量不足以抵消前期海冰减少的惯性,所以 2016 年 11-12 月海冰异常与同为强厄尔尼诺衰减年的 1983 年和 1998 年相反。Stuecker 等<sup>[12]</sup>的结论是基于理想 ENSO 循环强迫试验得到的,还存在一定的不确定性。Purich 和 England<sup>[45]</sup>基于真实海温强迫下大气环流-平板混合层海洋耦合模式的试验结果,显示前期夏季热带中东太平洋的暖海温异常引起的东罗斯海至阿蒙森海的暖异常不能一直维持,而是从 2016 年 5 月起开始减弱,在 9-10 月几乎消失。因此,前期超强 ENSO 事件对南极海冰的影响是否具有特殊性并不十分清楚,还需要更多的模式模拟来验证。

##### 3.2.1.2 印度洋

热带印度洋海温也是影响南极海冰的重要因子<sup>[33]</sup>,其影响在 2016 年比太平洋更重要<sup>[14,45]</sup>。观测结果显示,早春负位相的 IOD,引起了热带东印度洋至西太平洋的强对流活动,然后分别在澳大利亚以西和以东激发两支向极地传播的罗斯贝波列<sup>[13-14,45]</sup>。平板混合层海洋-大气耦合模式的模拟结果表明,热带东印度洋的热源激发了澳大利亚西侧的波列,而从西太平洋热源出发的罗斯贝波列,实际上是印度洋和太平洋两大海盆协同作用造成的<sup>[45]</sup>。两支波列到达极地后合并,调制了 ZW3 环流异常<sup>[13-14]</sup>。

11 月之后,受 MJO 东传影响,负位相 IOD 及伴随的热带对流减弱<sup>[14]</sup>,印度洋-南极的遥相关也就随之减弱。所以,11-12 月印度洋海温对海冰的遥影响并不清楚,有待于进一步的探讨。就像上一节提到的,11-12 月南极海冰异常偏少的一个重要原因是负位相的 SAM。尽管 SAM 在很大程度上是源自大气自身内部变率,但它也受到热带海温和平流层臭氧异常等外强迫的影响<sup>[14,46]</sup>。平板耦合模式的试验结果也表明,印度洋的海温可能对春季负 SAM 的发生起一定作用<sup>[45]</sup>。

##### 3.2.2 极地上层海洋

热带海温的平板耦合模式试验模拟的海冰异常

振幅同观测相比明显偏小,而极地大洋变化可能是引起海冰偏少的因素之一<sup>[45]</sup>。在春夏季,南极边缘海海表至向下 600 m 深度层,均呈现显著暖异常,有利于海冰减少<sup>[13,47]</sup>。从年代际尺度上看,2000 年之后负位相太平洋年代际振荡(IPO/PDO)和正位相 SAM,有利于形成负的风应力旋度异常,再通过埃克曼抽吸使得下层暖水上翻,然后造成次表层暖海水堆积。在年际尺度上,2016 年春末负位相 SAM 引起向南的埃克曼输送,将中低纬的暖海水输送至高纬,使得极地海温偏暖。少海冰与暖海温的正反馈,使得海冰减少加剧,有利于春季海冰的异常偏少<sup>[9]</sup>。

### 3.2.3 冰间湖

冰间湖是指在季节性海冰覆盖区域内出现的开阔水域,它在极地海冰气系统中扮演着重要角色。一方面,它可以通过改变海表反照率,影响进入海洋混合层的短波辐射,进而改变海洋和海冰之间的热量平衡。另一方面,冰间湖的形成和闭合过程也影响海水盐度,进而导致海洋层结和洋流的异常。

自 1972 年至今,卫星记录显示南极地区最大的冰间湖位于东威德尔海莫得山脉(Maud Rise, MR, 66°S, 3°E)和宇航员海(Cosmonaut Sea)近海区<sup>[48-49]</sup>。受气旋式涡旋引起的次表层暖盐水上翻,威德尔海西部异常低压带来的西北暖湿气流,以及海底地形上拱导致的温跃层抬升等 3 方面因素的共同作用<sup>[50]</sup>,2016-2017 年期间出现大面积的冰间湖。面积范围为 1976 年以来的最大值<sup>[51]</sup>。具体地,2016 年 7 月末冰间湖首次出现,最大面积达到 33 000 km<sup>2</sup>,持续 21 天后关闭。后于 11 月初再次出现<sup>[24]</sup>,然后关闭。2017 年 9 月中旬再次出现,至 12 月 1 日面积达到最大(约为 298 000 km<sup>2</sup>),持续时间最长。

Turner 等<sup>[24]</sup>的研究认为,MR 冰间湖对 2016 年 11-12 月的威德尔海海冰异常偏少起了重要作用。一方面,伴随着初期冰间湖的形成,更多的短波辐射进入海洋,混合层加深且温度升高,有利于海冰减少。另一方面,受威德尔海西部异常低压影响,异常西北风出现在 MR 区域,其带来的暖湿空气有利于冰间湖向西向北扩展。2016/2017 年夏季威德尔海地区海洋混合层海水温度达到历史最高值(约 0.5°C),冰间湖区域更是高达 2.5°C。冰间湖的影响也是 2017/2018 年春夏季(9-12 月)海冰范围异常偏小的一个重要因素<sup>[24,50]</sup>。

## 4 总结和讨论

作为地球大气的重要冷源,南极是全球气候与环

境变化研究的关键区。在全球变暖背景下,相对于北极海冰的快速消融,南极海冰表现出一些独特的、复杂的变化。在 2015 年之前,南极海冰表现出小幅的增长趋势,似乎与全球变暖相矛盾。这一“变暖悖论”问题遂成为国际关注的热点。但是,从 2015 年开始,南极海冰范围急剧减小,并在 2016 年 11 月跌破同期历史纪录,而且这种异常偏少状态一直持续至 2020 年底之前。针对这一异常现象,国内外学者对其成因开展了大量的科学研究,分别探讨了大气环流、物理海洋和冰间湖异常等诸多因素的影响。本文对这些成因进行了归纳总结,并形成了概略图(图 3)。

从大气方面看,9-10 月 ZW3 引起的北风异常有利于同期罗斯海西部、别林斯高晋海、阿蒙森海和威德尔海西部的海冰减少,为随后 11-12 月海冰范围跌破历史纪录提供了先决条件。在 11-12 月,大气环流异常表现为负位相 SAM,其中 11 月份的 SAM 指数为自 1979 年来的第二低值。11-12 月海冰减少是 ZW3 减弱和负位相 SAM 建立两者共同作用的结果。其中,ZW3 的减弱与 MJO 的异常活动有关,而负位相 SAM 建立则与平流层极涡异常信号的下传有关。负位相 SAM 异常会引起向南的埃克曼输送,有利于整个南极海冰的减少。在 11-12 月,气旋活动频繁是威德尔海海冰减少的重要原因之一,也对整体南极海冰减少起到了正的贡献。

在海洋方面,继前一年夏季发生的超强厄尔尼诺事件后,出现了中等强度的拉尼娜事件,与其相关的热带对流活动异常通过调制 PSA 遥相关引起了西南极的偶极型海冰异常,即罗斯海东部和阿蒙森海海冰减少,别林斯高晋海海冰增加。这与历史上发生的典型拉尼娜年海冰状况不太一样,有观点认为是前期超强厄尔尼诺引起的海温异常持续导致,同时后期中等强度的拉尼娜影响偏弱。但是,其结果是基于理想的 ENSO 循环强迫试验得到,而实际海温异常强迫平板海洋耦合模式的试验表明前期厄尔尼诺作用并不重要。因此,这一结论还需要更多的大气环流模式和海气耦合模式模拟来进一步地验证。除了热带太平洋外,热带印度洋在 2016 年春季出现非常强的负位相 IOD,且 IOD 为自 1980 年以来的最强负位相事件,与 IOD 相关的热带对流活动异常能够在南半球高纬强迫出类似 ZW3 型的环流异常。除了热带海洋,极地海洋的海温也较常年偏暖,在 2016 年春季,从海表至 600 m 深度均呈现暖异常。此外,在 2016 年夏季,还出现了大面积的冰间湖,并且是 1976 年以来最大的一次。它能够通过海冰-反照率的正反馈机制维持

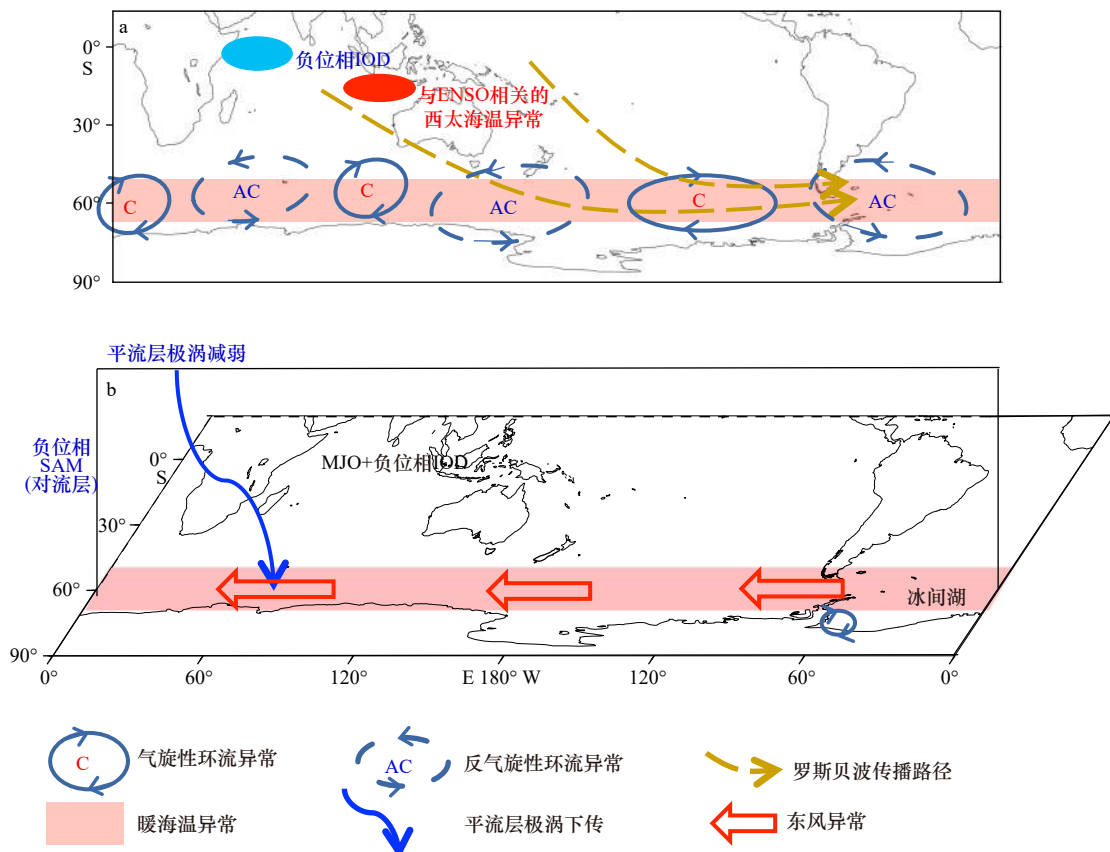


图3 导致南极海冰减少的因素

Fig. 3 Factors lead to the decrease of Antarctic sea ice

a. 9–10月; b. 11–12月

a. September to October; b. November to December

并扩大,是导致2016年夏季威德尔海冰减少的重要因素之一。

综上所述,前人的研究提供了多方面、多角度的解释,但是依然有一些问题并不十分清楚。例如,动力和热力作用对此次海冰减少的相对重要性还不清楚。Wang等<sup>[52]</sup>的研究表明,大气对海冰的动力作用远大于热力作用。Matear等<sup>[53]</sup>在研究南极海冰最近30多年的增加时,模拟结果也显示动力作用是主要的。而Kusahara等<sup>[19]</sup>的研究却认为,大气的热力作用更重要。要解决这一争议,还需要用更多的模式模拟来验证,并深入分析其中的物理过程,这对于理解ZW3和SAM异常对海冰的影响也非常重要。

另外一个值得注意的是,不同时间尺度过程的相对贡献和相互作用尚不清楚。弄清这个问题对认识2016年海冰减少到底是正常的年际波动还是年代际尺度的转折信号很关键。从长期趋势来看,尽管1998–2012年期间出现了全球变暖减缓,但依然处在增暖的状态下<sup>[54–55]</sup>。在年代际至多年代际时间尺度上,2013年前后IPO发生了位相转换,由负位相转为正

位相,全球又回到了快速增暖的状态<sup>[32,56–57]</sup>。在年际时间尺度上,热带太平洋依次发生了2014/2015年厄尔尼诺,2015/2016年超强厄尔尼诺,2016–2018年超长拉尼娜<sup>[58–59]</sup>。这些不同尺度的过程使得认识2016年末南极海冰异常跌破历史纪录这一问题,变得尤为复杂。定量区分长期趋势、年代际至多年代际以及年际时间尺度物理信号的相对贡献率,无疑很关键,但这方面的研究尚缺乏。

回答不同时间尺度过程的贡献问题,也有助于我们厘清海冰减少是气候系统内部的自然变率还是外部强迫导致的这一疑问。如果是前者,那么2016年海冰的急剧减少是正常的年际波动;如果是后者,那么它可能是年代际尺度或长期趋势的突变。当前研究探讨的影响因素都是气候系统内部的异常,事实上,这些影响因素可能与外部强迫有关。例如,SAM的负位相异常可能与南极臭氧的恢复引起的平流层增暖有关<sup>[14]</sup>。极地海洋次表层海温的上升与IPO有关,而IPO又与人类活动有关<sup>[60]</sup>。2016年9–10月的负IOD可以归因于前期南半球秋冬季的热带印度洋

暖异常<sup>[61]</sup>,而印度洋暖异常又可能与人类强迫引起的长期趋势有关<sup>[4]</sup>。不过,外部强迫在定量上有多大贡献并不清楚。尤其是,南极海冰范围异常在2016年跌破历史纪录后,缓慢向正常状态恢复,并在2020年底转变为较常年偏多的状态(图1)。而基于当前的

研究成果,无法判断2020年之后海冰恢复是否终止。总的来讲,我们对南极海冰变化的认识并不完全清楚。未来需要进一步地从观测和模拟两方面加强研究,才能更好地预测南极海冰的未来变化,同时为改进CMIP历史试验模拟提供新的认识。

#### 参考文献:

- [1] Simmonds I, Wu X R. Cyclone behaviour response to changes in winter southern hemisphere sea-ice concentration[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1993, 119(513): 1121–1148.
- [2] Parkinson C L. A 40-y record reveals gradual Antarctic sea ice increases followed by decreases at rates far exceeding the rates seen in the Arctic[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, 116(29): 14414–14423.
- [3] Bintanja R, Van Oldenborgh G J, Drijfhout S S, et al. Important role for ocean warming and increased ice-shelf melt in Antarctic sea-ice expansion[J]. *Nature Geoscience*, 2013, 6(5): 376–379.
- [4] 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.
- [5] Steig E J. How fast will the Antarctic ice sheet retreat?[J]. *Science*, 2019, 364(6444): 936–937.
- [6] Simmonds I. Comparing and contrasting the behaviour of Arctic and Antarctic sea ice over the 35 year period 1979–2013[J]. *Annals of Glaciology*, 2015, 56(69): 18–28.
- [7] Turner J, Hosking J S, Bracegirdle T J, et al. Recent changes in Antarctic sea ice[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 2015, 373(2045): 20140163.
- [8] Turner J, Bracegirdle T J, Phillips T, et al. An initial assessment of Antarctic sea ice extent in the CMIP5 models[J]. *Journal of Climate*, 2013, 26(5): 1473–1484.
- [9] Turner J, Phillips T, Marshall G J, et al. Unprecedented springtime retreat of Antarctic sea ice in 2016[J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(13): 6868–6875.
- [10] Schlosser E, Haumann F A, Raphael M N. Atmospheric influences on the anomalous 2016 Antarctic sea ice decay[J]. *The Cryosphere*, 2018, 12(3): 1103–1119.
- [11] Fetterer F, Knowles K, Meier W N, et al. Sea Ice Index, Version 3[R]. Boulder: National Snow and Ice Data Center, 2017.
- [12] Stuecker M F, Bitz C M, Armour K C. Conditions leading to the unprecedented low Antarctic sea ice extent during the 2016 austral spring season[J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(17): 9008–9019.
- [13] Meehl G A, Arblaster J M, Chung C T Y, et al. Sustained ocean changes contributed to sudden Antarctic sea ice retreat in late 2016[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 14.
- [14] Wang G M, Hendon H H, Arblaster J M, et al. Compounding tropical and stratospheric forcing of the record low Antarctic sea-ice in 2016[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 13.
- [15] Scott R C, Nicolas J P, Bromwich D H, et al. Meteorological drivers and large-scale climate forcing of west antarctic surface melt[J]. *Journal of Climate*, 2019, 32(3): 665–684.
- [16] Rayner N A, Parker D E, Horton E B, et al. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2003, 108(D14): 4407.
- [17] van Loon H, Jenne R L. The zonal harmonic standing waves in the Southern Hemisphere[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1972, 77(6): 992–1003.
- [18] Raphael M N. The influence of atmospheric zonal wave three on Antarctic sea ice variability[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112(D12): D12112.
- [19] Kusahara K, Reid P, Williams G D, et al. An ocean-sea ice model study of the unprecedented Antarctic sea ice minimum in 2016[J]. *Environmental Research Letters*, 2018, 13(8): 084020.
- [20] Marshall G J. Trends in the Southern Annular Mode from observations and reanalyses[J]. *Journal of Climate*, 2003, 16(24): 4134–4143.
- [21] Son S W, Purich A, Hendon H H, et al. Improved seasonal forecast using ozone hole variability?[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(23): 6231–6235.
- [22] Kidston J, Scaife A A, Hardiman S C, et al. Stratospheric influence on tropospheric jet streams, storm tracks and surface weather[J]. *Nature Geoscience*, 2015, 8(6): 433–440.
- [23] Deb P, Dash M K, Dey S P, et al. Non-annular response of sea ice cover in the Indian sector of the Antarctic during extreme SAM events[J]. *International Journal of Climatology*, 2017, 37(2): 648–656.
- [24] Turner J, Guarino M V, Arnatt J, et al. Recent decrease of summer sea ice in the Weddell Sea, Antarctica[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(11): e2020GL087127.
- [25] Jones D A, Simmonds I. A climatology of Southern Hemisphere extratropical cyclones[J]. *Climate Dynamics*, 1993, 9(3): 131–145.

- [26] Madden R A, Julian P R. Detection of a 40–50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1971, 28(5): 702–708.
- [27] Madden R A, Julian P R. Description of global-scale circulation cells in the tropics with a 40–50 day period[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1972, 29(6): 1109–1123.
- [28] Matthews A J, Hoskins B J, Masutani M. The global response to tropical heating in the Madden-Julian Oscillation during the northern winter[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2004, 130(601): 1991–2011.
- [29] Lee H J, Seo K H. Impact of the Madden-Julian Oscillation on Antarctic sea ice and its dynamical mechanism[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 10761.
- [30] Yuan X J. ENSO-related impacts on Antarctic sea ice: A synthesis of phenomenon and mechanisms[J]. *Antarctic Science*, 2004, 16(4): 415–425.
- [31] Stammerjohn S E, Martinson D G, Smith R C, et al. Trends in Antarctic annual sea ice retreat and advance and their relation to El Niño-Southern Oscillation and Southern Annular Mode variability[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113(C3): C03S90.
- [32] Meehl G A, Arblaster J M, Bitz C M, et al. Antarctic sea-ice expansion between 2000 and 2014 driven by tropical Pacific decadal climate variability[J]. *Nature Geoscience*, 2016, 9(8): 590–595.
- [33] Nuncio M, Yuan X J. The influence of the Indian Ocean Dipole on Antarctic sea ice[J]. *Journal of Climate*, 2015, 28(7): 2682–2690.
- [34] Li Xichen, Holland D M, Gerber E P, et al. Impacts of the north and tropical Atlantic Ocean on the Antarctic Peninsula and sea ice[J]. *Nature*, 2014, 505(7484): 538–542.
- [35] Simpkins G R, McGregor S, Taschetto A S, et al. Tropical connections to climatic change in the extratropical Southern Hemisphere: The role of Atlantic SST trends[J]. *Journal of Climate*, 2014, 27(13): 4923–4936.
- [36] Lu B, Ren H L, Scaife A A, et al. An extreme negative Indian Ocean Dipole event in 2016: Dynamics and predictability[J]. *Climate Dynamics*, 2018, 51(1/2): 89–100.
- [37] Trewin B, Ganter C. Seasonal climate summary for the southern hemisphere (spring 2016): Strong negative Indian Ocean Dipole ends, bringing second wettest September to Australia[J]. *Journal of Southern Hemisphere Earth Systems Science*, 2020, 69(1): 273–289.
- [38] Lau N C, Nath M J. The role of the “Atmospheric Bridge” in linking tropical Pacific ENSO events to extratropical SST anomalies[J]. *Journal of Climate*, 1996, 9(9): 2036–2057.
- [39] Li Z X. Influence of tropical Pacific El Niño on the SST of the Southern Ocean through atmospheric bridge[J]. *Geophysical Research Letters*, 2000, 27(21): 3505–3508.
- [40] Stuecker M F, Jin F F, Timmermann A, et al. Combination mode dynamics of the anomalous northwest Pacific anticyclone[J]. *Journal of Climate*, 2015, 28(3): 1093–1111.
- [41] Yuan X J, Kaplan M R, Cane M A. The interconnected global climate system—A review of tropical-polar teleconnections[J]. *Journal of Climate*, 2018, 31(15): 5765–5792.
- [42] Karoly D J. Southern hemisphere circulation features associated with El Niño-Southern oscillation events[J]. *Journal of Climate*, 1989, 2(11): 1239–1252.
- [43] Turner J. The El Niño-southern oscillation and Antarctica[J]. *International Journal of Climatology*, 2004, 24(1): 1–31.
- [44] Liu J P, Yuan X J, Rind D, et al. Mechanism study of the ENSO and southern high latitude climate teleconnections[J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(14): 1679.
- [45] Purich A, England M H. Tropical teleconnections to Antarctic sea ice during austral spring 2016 in coupled pacemaker experiments[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(12): 6848–6858.
- [46] Ding Q H, Steig E J, Battisti D S, et al. Influence of the tropics on the Southern Annular Mode[J]. *Journal of Climate*, 2012, 25(18): 6330–6348.
- [47] Lecomte O, Goosse H, Fichefet T, et al. Vertical ocean heat redistribution sustaining sea-ice concentration trends in the Ross Sea[J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 258.
- [48] Comiso J C, Gordon A L. Recurring polynyas over the Cosmonaut Sea and the Maud Rise[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1987, 92(C3): 2819–2833.
- [49] 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.
- [50] Jena B, Ravichandran M, Turner J. Recent reoccurrence of large open-ocean polynya on the Maud Rise seamount[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(8): 4320–4329.
- [51] Swart S, Campbell E C, Heuze C H, et al. Return of the Maud Rise polynya: Climate litmus or sea ice anomaly? [in “State of the Climate in 2017”][J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2018, 99(8): S188–S189.
- [52] Wang Z M, Turner J, Wu Yang, et al. Rapid decline of total Antarctic sea ice extent during 2014–16 controlled by wind-driven sea ice drift[J]. *Journal of Climate*, 2019, 32(17): 5381–5395.
- [53] Matear R J, O’Kane T J, Risbey J S, et al. Sources of heterogeneous variability and trends in Antarctic sea-ice[J]. *Nature Communications*, 2015, 6(1): 8656.
- [54] Easterling D R, Wehner M F. Is the climate warming or cooling?[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(8): L08706.

- [55] Schmidt G A, Shindell D T, Tsigaridis K. Reconciling warming trends[J]. *Nature Geoscience*, 2014, 7(3): 158–160.
- [56] Zhang C, Li S L, Luo F F, et al. The global warming hiatus has faded away: An analysis of 2014–2016 global surface air temperatures[J]. *International Journal of Climatology*, 2019, 39(12): 4853–4868.
- [57] Zhang C, Luo J J, Li S L. Impacts of tropical Indian and Atlantic Ocean warming on the occurrence of the 2017/2018 La Niña[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(6): 3435–3445.
- [58] 张超, 李双林. 为什么2014年没有发展成强El Niño[J]. *科学通报*, 2015, 60(20): 1941–1951.  
Zhang Chao, Li Shuanglin. Why is the El Niño event during the 2014 winter not a strong one?[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2015, 60(20): 1941–1951.
- [59] Zhang C, Li S L, Wan J H. The warmest year 2015 in the instrumental record and its comparison with year 1998[J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2016, 9(6): 487–494.
- [60] Dong L, Zhou T J, Chen X L. Changes of Pacific decadal variability in the twentieth century driven by internal variability, greenhouse gases, and aerosols[J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(23): 8570–8577.
- [61] Lim E P, Hendon H H. Causes and predictability of the negative Indian Ocean Dipole and its impact on La Niña during 2016[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 12619.

## A review of the researches on the record low Antarctic sea ice in 2016 and its formation mechanisms

Li Shuanglin<sup>1,2</sup>, Han Zhe<sup>2</sup>, Liu Na<sup>2</sup>, Zhang Chao<sup>1</sup>, Cai Hui<sup>1</sup>

(1. Department of Atmospheric Science, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

**Abstract:** Along with the global warming, the sea ice in the Arctic decreased rapidly, however the sea ice in the Antarctic has experienced a weak expansion. While many researchers are studying the mechanisms for this paradox in the Antarctic, the sea ice extent (SIE) began a rapid decline in 2016 and reached a record low in austral spring 2016. A rapid decrease of SIE anomaly occurred in December, with a 20.5% ( $2.13 \times 10^6$  km<sup>2</sup>) reduction compared with the long-term (1981–2010) mean ( $10.41 \times 10^6$  km<sup>2</sup>). It attracted a lot of attentions and scientists have investigated the causes of its occurrence from various aspects, such as the atmosphere circulations, the thermal state of the ocean, the polynya and so on. Their main results are summarized in this review. On the atmospheric aspect, the general circulation signals include a zonal height anomalies chain with wave number three during September and October, a Southern Annular Mode anomaly during November and December, and intensified cyclonic activity. The atmospheric zonal wave number three is modulated by the sea surface temperature anomalies in the tropical Pacific and Indian Ocean, and the Southern Annular Mode anomaly is mainly a result of downward weakening stratospheric polar vortex. On the ocean aspect, the upper ocean temperature is warmer than normal, and there is a large polynya in the Weddell Sea, which has the greatest area in the period of 1976–2016. However, it is difficult to identify the relative contributions of the external forcings of the climate system, the internal variability of the climate system, or their collaborative roles. We hope the summary can be useful to improve the understanding of the changes of Antarctic sea ice and its origins.

**Key words:** Antarctic; sea ice decrease; 2016; record low; physical mechanisms