

王今菲, 杨清华, 于乐江, 等. 南极海冰变化及其气候效应研究述评[J]. 海洋学报, 2021, 43(7): 11–22, doi:10.12284/hyxb2021151

Wang Jinfei, Yang Qinghua, Yu Lejiang, et al. A review on Antarctic sea ice change and its climate effects[J]. Haiyang Xuebao, 2021, 43(7): 11–22, doi:10.12284/hyxb2021151

南极海冰变化及其气候效应研究述评

王今菲^{1,2}, 杨清华^{1,2*}, 于乐江³, 宋米荣⁴, 罗昊^{1,2}, 施骞^{1,2},
李雪薇^{1,2}, 闵超^{1,2}, 刘骥平⁴

(1. 中山大学 大气科学学院 热带大气海洋系统科学教育部重点实验室, 广东 珠海 519082; 2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519082; 3. 中国极地研究中心 自然资源部极地科学重点实验室, 上海 200136; 4. 中国科学院 大气物理研究所 大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029)

摘要: 南极海冰是全球气候系统的重要组成部分。不同于北极海冰的快速减少, 近 40 年来, 南极海冰范围在 2014 年前是缓慢增加、后是突变减少。单一的大尺度大气环流因素无法解释南极海冰的长期变化趋势, 海洋-大气相互作用对海冰的耦合影响还未得到充分研究。受南极海冰厚度遥感观测和数值模拟能力所限, 现有数据仍无法准确量化全球变化背景下南极海冰的厚度和体积变化; 目前南极海冰变化的气候效应还未充分明确。当前国内外对南极海冰研究的不足迫切要求发展长期可靠的南极海冰厚度数据, 以突破南极海冰体积变化研究的难题, 同时应综合考虑多气候模态和海气系统耦合的作用, 研究南极海冰变化的机制及其气候效应。

关键词: 南极; 海冰范围; 海冰厚度; 气候效应

中图分类号: P731.15

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2021)07-0011-12

1 引言

南极海冰是极地气候系统的重要组成部分, 也是全球气候变化最为敏感的要害之一。南极海冰影响着大气和海洋界面的通量(如热量、动量、物质等)交换, 参与南大洋复杂的大气-海冰-海洋相互作用: 例如, 通过冰间湖形成过程中的盐析作用促进底层水的生成^[1-2], 进而驱动全球大洋环流。南极海冰融化和冻结导致海水温度、盐度变化以及绕极深层水位置的调整, 影响了冰架底部融化和海平面升高^[3-4]。同时, 海冰能够反射大部分太阳辐射, 直接影响南半球高纬度天气和气候系统, 包括云的形成以及降水形态, 进而影响南极冰盖物质平衡及海平面变化^[5-6]。同时, 南极海冰对南大洋生物地球化学过程也极为重要^[7], 其季节性生消会影响到磷虾、企鹅、海豹和鲸等

诸多生物构成的南极生态系统^[8-9]。然而, 受制于极端恶劣的天气气候环境, 南大洋冰区是目前地球上观测最少的地区之一, 人类对此区域的了解甚至尚不能完全保障船舶的安全航行。2014 年 1 月, 俄罗斯“绍卡利斯基院士”号科考船受困南极浮冰区, 前去救援的“雪龙”船在成功解救俄罗斯科考船后, 受南大洋强气旋所致的海冰快速堆积的影响, 也一度受困浮冰区^[10]; 2019 年 1 月, 突发大雾天气导致“雪龙”船无法准确分辨出冰山和海冰, 使其在南极阿蒙森海域碰撞冰山, “雪龙”船局部受损, 并影响到后续科考任务的执行。这些意外事件直接反映了目前我们对南极海冰的认知水平仍非常有限。

全球变化背景下, 南极和北极海冰呈现出不同的变化趋势。近 40 年来, 与北极海冰的快速减少相反, 南极海冰范围先是呈现出稳定的缓慢增长趋势^[11-12],

收稿日期: 2020-09-07; 修订日期: 2021-06-21。

基金项目: 国家自然科学基金(41941009, 42006191); 广东省自然科学基金(2018A0303130268)。

作者简介: 王今菲(1998—), 女, 江苏省扬州市人, 主要从事南极海冰变化研究。E-mail: wangjf35@mail2.sysu.edu.cn

* 通信作者: 杨清华, 男, 教授, 主要从事极地海冰和大气研究。E-mail: yangqh25@mail.sysu.edu.cn

9月海冰范围在2012年、2013年和2014年不断刷新最高纪录,但截至2017年,整个南极地区的海冰范围变化仅在秋季才具有统计显著性,且罗斯海海冰面积的增加趋势最显著^[13-14]。随后南极海冰又迅速减少^[15-16],夏季海冰范围在2017年降到历史最低值(图1)。海冰面积不断达到最小值,使得罗斯海的增加趋势在统计上也不再显著^[14]。针对海冰的突变减少,尽管有研究从季节尺度变化进行了分析^[15-18],但目前仍无法确认这究竟是一次短暂的异常事件还是南极海冰长期减退趋势的开端^[19]。此外,南极海冰的变化趋势还表现出显著的区域性和季节性变化特征^[20-21]。在融化期,罗斯海和威德尔海海冰范围呈现增加趋势,而阿蒙森-别林斯高晋海海冰范围则呈现减小趋势(即偶极子变化趋势)^[11,20];南极海冰季节性变化周期高度一致,且呈现非对称性特征,即缓慢生长但快速融化^[21]。两极海冰受自然变异和人类活动的控制和影响显著不同,可能是因为两极的地理差异导致大气-海冰-海洋相互作用的不同^[14]。Nature 期刊于2017年发表了题为《破解南极海冰之谜(Solve Antarctica's Sea-ice Puzzle)》的评论文章,呼吁国际学界加强对南极海冰的协同研究^[22]。

南极海冰的变化具有气候效应,能够影响南极冰盖物质平衡,进而影响海平面变化^[5-6]。全球变化背景下,预计南极冰盖质量将持续损失^[23],冰盖表面融

化期加长,冰架崩塌更易出现。同时,南极冰盖边缘在加速变薄,使南极冰盖可能成为21世纪全球海平面上升的最大贡献者^[24-25]。积雪和温度是影响南极冰盖的重要因素,已有研究多侧重南半球大气环流对南极海冰整体极端分布的影响,但前人很少关注南极海冰的变化对南极大陆上空的降雪和温度进而对南极冰盖产生怎样的影响。

目前针对南极海冰变化的研究,主要是基于海冰密集度数据及由此得到的海冰范围。相较于南极海冰密集度和范围,海冰厚度或体积更能代表海冰的物质平衡,其变化信息对我们量化分析全球变化背景下南极不同区域海冰的响应尤为关键。由于现场观测有限,长期海冰厚度数据的获取主要依赖于卫星遥感监测。但由于南极表面积雪较厚、分布复杂,且夏季积雪变质导致雪的介电性质受到影响,卫星遥感观测到的冰厚存在很大偏差^[26-27]。数值模式的模拟,可弥补现场观测和卫星遥感监测的南极海冰厚度的不足,然而大多数CMIP5和CMIP6气候模式无法模拟出南极海冰范围的增长趋势^[28-29](图2),特别是南极不同海域的海冰变化差异。这反映出气候模式对南极海冰的模拟能力有限,其海冰厚度或体积的模拟结果存在很大的不确定性。在大气再分析资料驱动的海冰-海洋耦合模式中引入资料同化,可有效改善对南极海冰厚度和体积变化的估计。如通过在海冰-海洋耦合

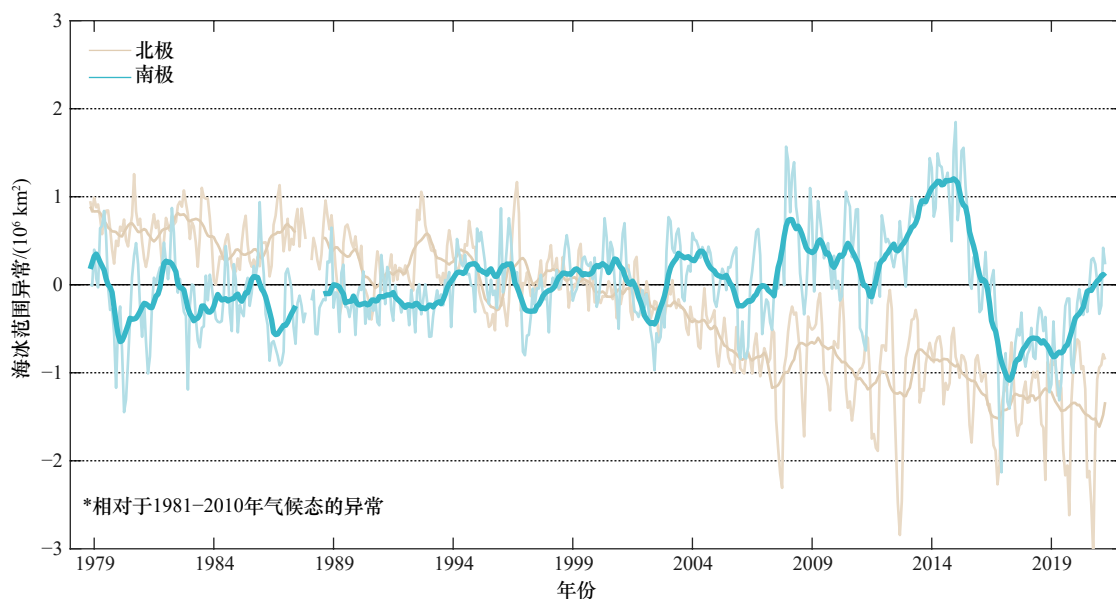


图1 1979–2020年南、北极海冰范围异常的时间序列(相比1981–2010年气候态异常平均而言)

Fig. 1 Time series of Arctic and Antarctic sea ice extent anomaly from 1979 to 2019 compared with the climatology from 1981 to 2010

数据来源:美国国家冰雪数据中心,细线表示月平均的海冰范围异常,粗线表示12年滑动平均的海冰范围异常(据文献[22]绘制)

The data is from National Snow and Ice Data Center. Thin lines represent monthly average sea ice extent anomalies and thick lines represent the 12-year running mean of sea ice extent anomalies. This figure is modified based on reference [22]

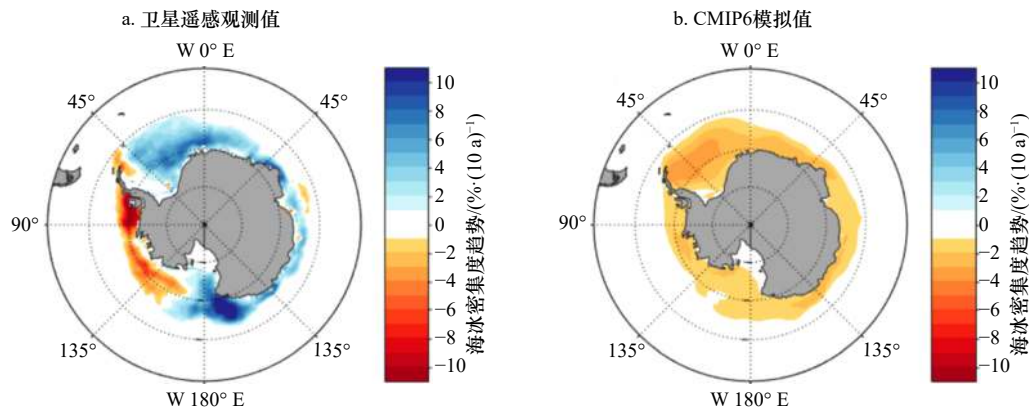


图2 1979–2014年南极海冰密集度变化趋势(引自文献[29]中图4)

Fig. 2 The trend of Antarctic sea ice concentration from 1979 to 2014 (this figure is cited from Fig. 4 in reference [29])

模式中同化海冰密集度观测, Massonnet 等^[30]给出了1990–2008年南极海冰体积总体增加的变化趋势,但由于未引入冰厚的观测信息,其海冰厚度的结果仍存在很大的不确定性^[31]。总体而言,国际上尚缺少对南大洋及其局部区域海冰厚度变化的连续、可靠估计,这严重制约了南极海冰及相关气候变化研究工作的开展。

本文从南极海冰范围变化、厚度变化及海冰变化引起的气候效应3个方面综述了国内外相关的研究进展,科学认知南极海冰前沿成果的研究水平,指出当前需要攻克的难题,推动南极海冰相关研究的发展。

2 南极海冰范围变化

被动微波遥感传感器(如SMMR、SSM/I、SSMIS、AMSR-E和AMSR2)可对南极海冰密集度和覆盖范围开展有效的卫星遥感探测。目前国际上有多种基于被动微波的极地海冰密集度产品,覆盖时段为自1978年10月至今。然而,被动微波传感器对精细尺度的浮冰、水道和冰缘^[32]的探测仍然存在一定的误差。同时,由于传感器的寿命有限,海冰密集度资料通常由多种传感器的观测结果组合而成^[33],这些传感器的探测能力各不相同,且它们的重合期很短。此外,在海冰密集度反演过程中应用不同的算法也会产生不同的结果^[34]。已有研究对不同海冰密集度产品及算法进行了系统性比较^[34–35],发现这些算法都低估了冰厚小于35 cm的海冰密集度^[34],且海冰密集度最大的不确定性位于海冰边缘区。Hobbs等^[19]比较了基于4种反演算法的南极海冰密集度数据,包括NASA Team算法^[36]、新旧Bootstrap算法^[37–38]、融合算法^[39],发现除旧版本的Bootstrap算法外,其余算法显示的海冰范围年变化基本一致。

基于1978年以来连续40年的南极海冰密集度卫星遥感数据,国际上已开展了较多的针对南极海冰范围变化的研究。前人研究指出,造成南极海冰范围长期变化的因素主要有大气环流异常、海洋热通量变化和人类活动^[14, 19, 21]。其中,大气环流异常对南极海冰范围的长期趋势和年际变化有着重要影响。以下节将从上述3个方面展开讨论。

2.1 大气环流异常

在南极海冰范围长期变化趋势方面, Liu等^[40]和 Yu等^[41]发现南半球环状模(Southern Annular Mode, SAM)指数正的趋势下,别林斯高晋海和南极半岛海区的海冰密集度减小,其他海区的海冰密集度增大。但是 Ferreira等^[42]注意到SAM正位相在前期导致南极海冰整体扩张,但在更长时间尺度上,增强的西风引起绕极深层水上涌促进海冰融化,导致南极海冰整体减少。同时,阿蒙森海低压(Amundsen Sea Low, ASL)加深有利于别林斯高晋海和南极半岛海区的海冰密集度减小和罗斯海海冰密集度的增大^[43]。但是1979–2013年期间,加深的ASL不能解释西罗斯海海冰的减少^[19]。厄尔尼诺–南方涛动(El Niño–Southern Oscillation, ENSO),特别是东太平洋型厄尔尼诺,可以解释罗斯海和南印度洋正的海冰变化趋势^[44]。西南极海冰冬、春季的变化趋势与太平洋和大西洋海温的年代际变化,即太平洋十年涛动(Pacific Decadal Oscillation, PDO)^[45]、太平洋年代际振荡(Interdecadal Pacific Oscillation, IPO)^[45]和大西洋年代际振荡(Atlantic Multidecadal Oscillation, AMO)^[46]有关。但Hobbs等^[19]认为AMO和IPO不能完全解释罗斯海冬春季海冰的变化趋势,同时AMO和IPO在南半球夏季对南极海冰的影响也较弱^[47]。对于1979–2014年各海区海冰范围的变化趋势,无法用单一的大尺度

大气环流因素来解释^[48]。针对 2015 年以后南极海冰范围显著减少的现象^[15],已有学者从南大洋上层的增暖^[18]、与纬向波数三模态相关的大气环流异常^[15,49]以及偏弱的极地平流层极涡导致的减弱的绕极表层西风^[49]等方面开展了研究。

在年际变化方面, SAM 对南极海冰的影响表现出一定的纬向非对称性^[50]。当 SAM 为正位相时,威德尔海海冰偏少、罗斯海海冰偏多,反之亦然。东太平洋型 ENSO 能够产生南极海冰的偶极子模态,即在厄尔尼诺年,阿蒙森海的海冰面积偏小,南极半岛附近海冰偏多;拉尼娜年呈相反的变化^[51]。中太平洋型厄尔尼诺在南半球冷季对南极海冰的影响与东太平洋型 ENSO 类似,只是异常区域的位置偏西;在暖季,中太平洋型厄尔尼诺对南极海冰的影响相对东太平洋型 ENSO 偏弱^[52]。纬向波数三模态对秋季南极海冰的影响呈现纬向三波的结构^[53]。半年周期涛动(the Semiannual Oscillation)能够导致 9 月别林斯高晋海的海冰偏多,其他海区的海冰偏少^[54]。印度洋偶极子(Indian Ocean Dipole, IOD)能够增大南印度洋 60°E 附近的海冰密集度,减小 90°E 附近的海冰密集度^[55];而在南太平洋海区,IOD 对南极海冰的影响受到 ENSO 干扰^[55]。然而,上述影响因子尚不能充分解释整个南极海冰范围的年际变化^[54]。

南极海冰的季节内振荡变化规律仍没有得到充分认识。Renwick 等^[56]使用最大协方差分析获得不同季节南极海冰密集度和大气环流在季节内时间尺度上的耦合模态,发现第一模态是纬向三波数的模态,是南半球高纬度大气自身振荡的结果,且海冰和大气环流之间的最大相关出现在海冰滞后 4~5 d 的时候。Kohyama 和 Hartmann^[44]发现南极海冰密集度和大气环流的耦合周期是 20 d 和 40 d,耦合模态的空间分布是 PSA(Pacific-South American)模态,且与 ENSO 无关。Henderson 等^[57]发现季节内振荡发生 1~2 周之后能够影响到南极的大气环流。

2.2 海洋热通量变化

南大洋弱的海洋层结和高的海洋热通量^[58]导致南极海冰变化与上层海洋层结改变所引起的海洋热通量变化有密切关系。前期的研究表明存在如下影响海洋热通量的反馈机制。Zhang^[59]发现秋季海冰产冰量和次年夏季产冰量之间存在负反馈过程,可用于解释秋季增温的大气和海洋导致次年夏季海冰增多的现象。Goosse 和 Zunz^[60]认为当年偏多的海冰会析出更多盐分进入深层海洋,这些盐分在次年冬季没有返回表层水体,导致次年冬季的海洋层结增强、海洋

热通量减小、海冰覆盖增加。Lecomte 等^[61]认为这种海洋正反馈过程能够解释罗斯海的海冰增加。这两种相反的反馈机理对海洋的背景水体、海冰运动和作用的时间尺度有着不同的要求^[19]。

大气环流异常和冰架融化除通过直接影响南极海冰变异常外,还可作为促发因素,以外部淡水输入的形式,通过海冰-海洋的反馈机制影响海冰变化^[60]。Bintanja 等^[62]认为冰架融化的淡水能够增强海洋水体层结,从而导致南大洋海冰范围增加。Liu 和 Curry^[63]认为降水增加也可以增强海洋水体层结,导致南极海冰范围增加。

2.3 人类活动影响

人类活动导致的温室气体增加和臭氧消耗,使 SAM 指数存在上升趋势^[64],从而影响南极海冰的变化。但是这种影响的时间尺度存在很大的不确定性^[65]。一些研究认为臭氧消耗会导致 ASL 的加深和别林斯高晋海海冰的减少^[66-67]。通过数值模拟,Xia 等^[68]指出臭氧引起的云辐射效应在南极海冰变化中也起着重要作用,南极臭氧空洞会导致高纬云层向下长波辐射的减少,从而造成了海冰的增长。也有观点认为南极海冰的局地变化可能不是臭氧损耗造成的^[69]。同时,由于南极沿岸重水下沉^[70]、南大洋对臭氧和温室气体的相反响应^[71]、南极海冰-海洋负反馈^[72]的作用,南大洋对于人类活动的响应比北极更弱,南大洋的低信噪比会使人类活动影响海冰变化的信号被年代际变化信号所掩盖^[19]。由于卫星观测数据的时间较短,自然变率和人类活动对海冰变化的贡献尚不能明确区分,而 Crosta 等^[73]通过重建和分析过去 2 000 年的海冰范围数据指出南大洋的自然变率对海冰年代际变化的影响较大。

3 南极海冰厚度变化

相较于南极海冰范围变化的研究,当前国内外对海冰厚度和体积变化及其机制的研究较少,南极海冰体积的变化规律尚不清楚,海冰厚度的估计是体积变化研究的难点。本章节将从观测数据和资料同化两个方面来讨论南极冰厚的研究进展。

3.1 南极海冰厚度的现场观测和卫星遥感

海冰厚度观测多集中在北极^[74],而南大洋的海冰厚度观测数据则更为稀少。表 1 给出了目前国际上可获取的主要南极海冰厚度现场观测数据。Worby 等^[75]汇编了基于南极海冰过程和气候(Antarctic Sea Ice Processes & Climate, ASPeCt)观测规范的南大洋船载观测数据,首次给出了南大洋区域平均海冰厚度

表 1 现有的主要南极海冰厚度现场观测数据

Table 1 Available Antarctic sea ice thickness field observations

序号	数据名称	数据来源	数据时段	覆盖区域
1	AWI-ULS	向上仰视声呐	1990–2010	威德尔海
2	ASPeCt	船载走航观测	1980–2004	南大洋
3	ISPOL	机载电磁感应	2004.11–2005.01	威德尔海(66~68°S)
4	WWOS	机载电磁感应	2006.09–2006.10	威德尔海(60~65°S)
5	ANTXXIX/6&ANTXXIX/7	机载电磁感应	2013.06–2013.10	威德尔海
6	IceBridge	积雪雷达、机载地形测绘仪	2009–2018	威德尔海

图,但由于航行路线多位于薄冰区以及目测的误差,ASPeCt在厚冰区观测到的冰厚偏低^[76];Worby等^[77]和Behrendt等^[78]分别使用系泊声呐冰厚观测数据分析了东南极和威德尔海的海冰厚度变化;美国国家航空航天局(NASA)冰桥行动(Operation IceBridge)项目使用机载激光高度计获得了威德尔海海冰厚度截面信息且已被有效利用在研究中^[27,79];Williams等^[76]通过自动水下机器人的观测发现76%的海冰是形变冰,并且实际冰厚应当比大部分的钻孔和船测获得的冰厚更大。基于现场钻孔、电磁感应、磁滞位移、电容感应和海冰物质平衡浮标等方式,我国学者也开展了南极海冰厚度的局地现场测量^[80–82]。此外,世界气候研究计划(World Climate Research Programme)和南极科学委员会(Scientific Committee on Antarctic Research)组织的国际南极浮标计划(International Programme for Antarctic Buoys),也致力于在南大洋特别是海冰上建立漂流浮标网络并提供实时的气象和海洋观测数据,其中包括海冰厚度、温度和运动等信息。环南极固定冰监测网(Antarctic Fast Ice Network)则旨在建立环绕南极海岸线的固定冰监测网络,系统收集海冰厚度、雪厚、固定冰形成和崩解等信息。

但国内外现有的南极海冰厚度现场观测在时间和空间上都非常稀疏,无法从整体上给出南极海冰厚

度的年际变化和趋势。

遥感探测可部分弥补现场观测的不足,但海冰厚度的遥感探测仍然充满挑战^[83]。特别是,南极海冰表面的积雪更厚、分布更加复杂,由于很难量化海冰表面积雪的厚度、密度以及确定积雪重量是否已将海冰表面挤压到水面以下^[22],导致南极海冰厚度卫星反演的难度更大。直到近年,国际上才发布了一些南极海冰厚度卫星遥感数据,如表2所示。目前以及即将可用的5种南极冰厚遥感数据包括:(1)ERS-1和ERS-2冰厚数据,覆盖时间分别为1991–2000年和1995–2011年^[84],但测得的海冰出水高度偏高^[85];(2)欧洲航天局于2018年8月发布的基于Envisat和CryoSat-2卫星的SICCI2.0冰厚产品,覆盖时间从2002年到2017年^[89],但它们使用的雷达高度计受湿度和盐度影响穿透能力不足^[90];(3)ICESat-1冰厚数据^[86–87],但覆盖时间较短(2003–2009年)且不连续,同时不同的反演算法产生的冰厚差异较大^[88];(4)德国不来梅大学和阿尔弗雷德魏格纳研究所-亥姆霍兹极地与海洋研究中心发布的SMOS南极冰厚产品,覆盖时间是从2010年至今,但由于亮温反演算法的限制,SMOS产品只能准确反演薄冰冰厚^[91];(5)美国宇航局发布的ICESat-2南极冰厚数据,覆盖时间从2018年9月至今^[92]。其中,SMOS卫星比较适合探测薄冰厚度,而CryoSat-

表 2 现有的主要南极海冰厚度卫星遥感数据

Table 2 Available Antarctic sea ice thickness remote sensing data

序号	数据名称	数据来源	数据时段	覆盖区域	数据网址
1	ERS-1/2	ERS-1/ERS-2卫星	1991–2011年	南大洋	https://earth.esa.int/eogateway/missions/ers
2	SICCI	Envisat和CryoSat-2卫星	2002–2017年	南大洋	http://esa-cci.nerisc.no/
3	ICESat-1	ICESat-1卫星	2003–2009年	南大洋	https://icesat.gsfc.nasa.gov/icesat/
4	SMOS	SMOS卫星	2010年至今	南大洋	私人通信
5	ICESat-2	ICESat-2卫星	2018年至今	南大洋	https://icesat-2.gsfc.nasa.gov/

2比较适合探测厚冰。需要指出的是,相比北极,由于南极雪厚产品的误差较大以及雷达受湿度和盐度影响穿透能力不足^[27],南极冰厚遥感数据存在更大的不确定性,其结果仍需系统性验证^[93]。可见,仅利用目前获取的海冰遥感数据无法准确估算南极海冰厚度和体积变化。而资料同化会在同时考虑模式误差和观测误差的框架下,将模式信息和观测信息有机结合起来,从而给出更准确的海冰状态估计^[94]。

3.2 南极海冰资料同化和厚度估计

先进的海冰资料同化方法是成功估计和预测极地海冰的关键^[95]。国际上现行的海冰业务预测系统使用了不同的资料同化方法,如 Nudging、最优插值、三维变分和集合卡曼滤波(Ensemble Kalman Filter, EnKF)等^[96]。因为可以考虑预报误差的动态演变,且无需发展复杂的伴随模式,EnKF是适用于当前复杂、高维数值模式的最佳资料同化方法。其中,局地误差子空间变换卡曼滤波(Local Error Subspace Transform Kalman Filter)对海冰资料同化计算更加高效,且结果更加合理^[97]。

相比北极而言,国际上的南极海冰资料同化研究较少,南极海冰厚度资料同化更是空白。Zhang和Rothrock^[98]基于海冰密集度资料同化发展了全球海冰-海洋再分析数据(Global Ice-Ocean Modeling and Assimilation System, GIOMAS); Massonnet等^[30]首次开展了基于海冰密集度资料同化的南极海冰厚度和体积数据重构,成功给出了1998-2008年以来南极海冰体积的合理变化趋势; Verdy和Mazloff^[99]基于海洋和海冰密集度资料同化发展了南大洋再分析数据 SOSE (Southern Ocean State Estimate)。受制于缺乏海冰厚度观测数据,上述研究仅同化了卫星观测的海冰密集度信息,其冰厚估计结果存在很大的不确定性^[31]。

相较于南极海冰范围变化的研究,受制于冰厚观测数据匮乏,当前国内外对海冰厚度和体积变化及其机制的研究较小。Zhang^[59], Massonnet等^[30]和Holland等^[100]利用海冰-海洋耦合模式研究发现在南半球冬季,威德尔海南部和罗斯海的海冰厚度增加,别林斯高晋海的海冰厚度减小,而CMIP5模拟出全南极海冰体积的减小^[28]。Kurtz和Markus^[87]认为夏、秋季海冰范围的增长抵消了海冰厚度的小幅减小,最终导致体积变化幅度很小;但由于厚度和体积不确定性很大,尚不能从中得到长期趋势和周期性变化。

4 南极海冰变化的气候效应

南极海冰观测数据缺乏以及海冰变化物理机制的不明确,导致我们对其气候效应的认知还不够充分。

南极海冰变化对于南半球大气环流具有显著的影响。Wu和Zhang^[101]采用滞后最大协方差分析方法分析了南半球春季500 hPa位势高度场与海冰异常之间的关系,发现位势高度场与超前4个月的海冰异常场存在显著相关,表明南极海冰异常对大气环流存在超前反馈作用。Raphael等^[102]分析气候系统模式CC-SM3的模拟结果发现极地环流在海冰极小(大)时扩张(收缩)并伴随着费雷尔环流的变化,同时SAM的位相也会受到影响。前人的数值模拟研究发现南极海冰变化对大气热通量及表面温度有显著影响^[103]。Kidston等^[104]利用CAM3大气模式分析了海冰边界整体扩张或缩小时大气的反馈,发现只有在冷季时,海冰范围会通过改变表面温度梯度影响南半球中纬度急流的强度并使其向极移动。Bader等^[105]首次分析了南半球海冰密集度减小时的大气环流响应,结果显示海冰减少时,南半球中纬度急流及风暴轴向赤道移动。而对于2014年之前南极海冰面积持续增长对气候的影响以及海冰增长的持续时间问题,Parise等^[106]通过考虑当前气候下海冰极大值的持久性及南半球耦合气候系统对南极海冰增加的敏感性和记忆性进行了分析。该研究发现当海冰增加时,其上空大气稳定性的增加使极地急流增强并向极移动,而中纬度地区斜压性增加,副热带急流向北扩张并减弱,同时低层气压在高纬度减弱而在中纬度增加(SAM正位相事件),这与Smith等^[107]的研究结论一致。

南极海冰变化还可以通过影响大气活动,进而影响其他气候要素的变化。England等^[108]通过分析WACCM4大气模式得到的模拟结果发现,21世纪末南极海冰减少使得对流层急流向赤道偏移,南极内陆表面温度降低,而南极半岛和西南极温度升高,这种表面温度的变化会进一步影响南极大陆冰盖的稳定性^[25]。而4倍CO₂突增的CMIP5试验结果显示南极海冰减少,SAM负位相增强,急流减弱并向赤道移动,平流层极涡在春季减弱^[109]。此外有研究发现,南极海冰变化可以跨赤道影响北半球季风包括东亚季风和印度季风,进而影响东亚和印度地区的降水变化^[110]。

上述针对南极海冰变化对大气的反馈研究,试验分析更多侧重在大气对海冰整体极端分布时的响应,而对近年来南极海冰变化,特别是海冰偶极子变化趋势以及最近几年南极海冰的突变减少对大气环流的影响研究还需加强。另一方面,针对南极海冰变化激发的大气环流变化,对南极冰盖上降水和温度的变化及其对冰盖稳定性等的影响,目前的研究还很少。需要指出的是,采用耦合模式(气候系统模式)和采用单

一的大气模式可能会得到不同的模拟结果, 因为耦合模式中的海洋动力作用可将海冰变化的影响扩展到更高的纬度^[107]。因此, 选用国际先进的大气模式和耦合模式分别进行南极海冰变化效应的机理研究很有必要。

南极海冰的变化还会对南大洋碳汇产生影响。南大洋是连接世界主要海盆的关键区域, 在全球碳循环中发挥着至关重要的作用: Fogwill 等^[111]通过重建高纬南大洋表面生产力揭示了南极逆冷时期 (Antarctic Cold Reversal, ACR) 持续升高的海洋生产力信号与南极海冰范围的最大季节变化相对应, 表明海冰的生物反馈增强了 CO₂ 的固存并形成了一个重要的区域性海洋碳汇; Gupta 等^[112]使用数值模拟和理想理论揭示了海冰变化可能对南大洋的 CO₂ 海气通量产生影响, 当海冰覆盖均匀且不随时间变化时, CO₂ 通量基本保持恒定; Shadwick 等^[113]根据大陆架上的锚系数数据估计西南极半岛海域的 CO₂ 海气通量, 结果表明该海域在夏季吸收大气 CO₂, 在秋季和冬季则是平衡状态。

南大洋的盐度变化及大洋热盐环流也受到南极海冰变化的影响。Haumann 等^[114]揭示了南极海冰的向北运输趋势是导致南大洋盐度变化的主要因素。Nadeau 等^[115]发现南极海冰范围的扩张和南极海冰形成的速率增加都会导致大西洋经向翻转环流向上偏移至高于跨等密度面混合作用较强的深度 (2 000 m 以浅), 从而使大西洋经向翻转环流与深层翻转环流分离。

5 总结与展望

南极海冰范围和体积变化的机制及其气候效应仍然存在很多待解决的科学问题。首先, 影响南极海冰变化的所有可能因素中, 大气环流异常及其触发的海冰-海洋反馈机制对南极海冰范围的长期变化趋势和年际变化有着重要影响, 但已有研究未能充分考虑多气候模态的共同作用, 以及海-冰-气相互作用的耦合影响; 其次, 受海冰厚度遥感观测和数值模拟能力所限, 国际上仍缺少一套可靠的海冰厚度和体积变化数据, 这导致现有研究主要集中在海冰范围变化, 无法准确量化全球变化背景下的海冰体积变化规律; 第三, 目前南极海冰变化对南极冰盖和气候影响的研究还不明确。

参考文献:

- [1] Ohshima K I, Fukamachi Y, Williams G D, et al. Antarctic Bottom Water production by intense sea-ice formation in the Cape Darnley

针对当前南极海冰变化研究的不足, 需要我们从以下 3 个方面开展研究。

首先是突破南极海冰体积变化难题。目前国际上仍缺少可靠的海冰厚度观测数据, 这要求我们一方面提高观测能力, 设计优化观测方案, 综合开展大型现场观测计划; 另一方面改进遥感反演算法, 减小遥感冰厚产品误差。同时, 北极海冰资料同化研究经验^[95, 97]表明, 在缺少海冰厚度观测的时期 (1979-1990 年), 可基于模式变量之间的物理关系, 通过多变量同化得到南极海冰厚度估计; 而在具有南极海冰厚度观测的时期 (1991 年至今), 可基于模式和观测及其误差信息, 通过资料同化得到更准确的南极海冰厚度估计。但相比北极, 南大洋的海冰-海洋特性以及各变量间的物理关系更为复杂。因此, 应发展基于集合的、适用于南大洋的海冰-海洋耦合资料同化方法, 在考虑数值模式误差和遥感观测误差框架下, 研究海冰厚度资料同化对南大洋海冰-海洋数值模拟的影响, 重构长时间的南极海冰厚度和体积序列^[116]。

其次是深入理解南极海冰范围和体积缓变与突变的机制。基于统计分析和国际先进的全耦合模式, 厘清多气候模态对南极海冰范围和体积变化的共同作用, 深入理解海洋-大气相互作用对南极海冰缓变和突变过程的耦合影响。此外, 南极海冰变化主要源自海冰运动所导致的辐合辐散、形变以及海洋和大气的温度异常所导致的海冰增减。海冰的动力和热力学因素对南极海冰范围、厚度和体积变化的作用不同, 因此应准确区分南极海冰的动力和热力学变化规律和影响因子。同时, 应发展长时间的古气候数据, 比较内部变率和人为因素对南极海冰变化的贡献。基于更加完善的海冰变化机制, 应发展适用于南大洋的气候模式参数化过程, 改进气候模式对南极海冰的模拟和预测能力。

第三是进一步评估南极海冰变化的气候效应。南极海冰变化通过影响大气环流进而影响南极冰盖和气候, 但大气环流对不同区域、不同强度海冰变化的响应并不相同^[108]。因此需要抓住近些年南极海冰变化的关键特征, 并基于国际先进的大气模式和全耦合模式设计数值试验。此外, 通过对大气模式和全耦合模式结果的对比分析, 找出大气和海洋系统对海冰变化的主要反馈机制, 从而系统揭示海冰变化对气候的影响机理。

- polynya[J]. *Nature Geoscience*, 2013, 6(3): 235–240.
- [2] Kitade Y, Shimada K, Tamura T, et al. Antarctic Bottom Water production from the Vincennes Bay polynya, East Antarctica[J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(10): 3528–3534.
- [3] Dutriex P, De Rydt J, Jenkins A, et al. Strong sensitivity of Pine Island ice-shelf melting to climatic variability[J]. *Science*, 2014, 343(6167): 174–178.
- [4] Holland P R, Jenkins A, Holland D M. Ice and ocean processes in the Bellingshausen Sea, Antarctica[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2010, 115(C5): C05020.
- [5] Bracegirdle T J, Stephenson D B, Turner J, et al. The importance of sea ice area biases in 21st century multimodel projections of Antarctic temperature and precipitation[J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(24): 10832–10839.
- [6] Massom R A, Scambos T A, Bennetts L G, et al. Antarctic ice shelf disintegration triggered by sea ice loss and ocean swell[J]. *Nature*, 2018, 558(7710): 383–389.
- [7] Delille B, Vancoppenolle M, Geilfus N X, et al. Southern Ocean CO₂ sink: The contribution of the sea ice[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2014, 119(9): 6340–6355.
- [8] Massom R A, Stammerjohn S E. Antarctic sea ice change and variability-physical and ecological implications[J]. *Polar Science*, 2010, 4(2): 149–186.
- [9] Steinberg D K, Ruck K E, Gleiber M R, et al. Long-term (1993–2013) changes in macrozooplankton off the Western Antarctic Peninsula[J]. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2015, 101: 54–70.
- [10] Wang Zhaomin, Turner J, Sun Bo, et al. Cyclone-induced rapid creation of extreme Antarctic sea ice conditions[J]. *Scientific Reports*, 2014, 4(1): 5317.
- [11] Parkinson C L, Cavalieri D J. Antarctic sea ice variability and trends, 1979–2010[J]. *The Cryosphere*, 2012, 6(4): 871–880.
- [12] Comiso J C, Gersten R A, Stock L V, et al. Positive trend in the Antarctic sea ice cover and associated changes in surface temperature[J]. *Journal of Climate*, 2017, 30(6): 2251–2267.
- [13] Yuan Naiming, Ding Minghu, Ludescher J, et al. Increase of the Antarctic sea ice extent is highly significant only in the Ross Sea[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 41096.
- [14] Maksym T. Arctic and Antarctic sea ice change: Contrasts, commonalities, and causes[J]. *Annual Review of Marine Science*, 2019, 11: 187–213.
- [15] 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.
- [16] Eayrs C, Li X, Raphael M N, et al. Rapid decline in Antarctic sea ice in recent years hints at future change[J]. *Nature Geoscience*, 2021, 14: 460–464.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] Hobbs W R, Massom R, Stammerjohn S, et al. A review of recent changes in Southern Ocean sea ice, their drivers and forcings[J]. *Global and Planetary Change*, 2016, 143: 228–250.
- [20] Stammerjohn S, Massom R, Rind D, et al. Regions of rapid sea ice change: An inter-hemispheric seasonal comparison[J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(6): L06501.
- [21] Eayrs C, Holland D, Francis D, et al. Understanding the seasonal cycle of Antarctic sea ice extent in the context of longer-term variability[J]. *Reviews of Geophysics*, 2019, 57(3): 1037–1064.
- [22] Turner J, Comiso J. Solve Antarctica's sea-ice puzzle[J]. *Nature*, 2017, 547(7663): 275–277.
- [23] Goelzer H, Huybrechts P, Raper S C B, et al. Millennial total sea-level commitments projected with the Earth system model of intermediate complexity LOVECLIM[J]. *Environmental Research Letters*, 2012, 7(4): 045401.
- [24] Shepherd A, Wingham D. Recent sea-level contributions of the Antarctic and Greenland ice sheets[J]. *Science*, 2007, 315(5818): 1529–1532.
- [25] Trusel L D, Frey K E, Das S B, et al. Divergent trajectories of Antarctic surface melt under two twenty-first-century climate scenarios[J]. *Nature Geoscience*, 2015, 8(12): 927–932.
- [26] Willatt R C, Giles K A, Laxon S W, et al. Field investigations of Ku-band radar penetration into snow cover on Antarctic sea ice[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(1): 365–372.
- [27] Kwok R, Kacimi S. Three years of sea ice freeboard, snow depth, and ice thickness of the Weddell Sea from Operation IceBridge and CryoSat-2[J]. *The Cryosphere*, 2018, 12(8): 2789–2801.
- [28] Shu Q, Song Z, Qiao F. Assessment of sea ice simulations in the CMIP5 models[J]. *The Cryosphere*, 2015, 9(1): 399–409.
- [29] Shu Qi, Wang Qiang, Song Zhenya, et al. Assessment of sea ice extent in CMIP6 with comparison to observations and CMIP5[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(9): e2020GL087965.
- [30] Massonnet F, Mathiot P, Fichet T, et al. A model reconstruction of the Antarctic sea ice thickness and volume changes over

- 1980–2008 using data assimilation[J]. *Ocean Modelling*, 2013, 64: 67–75.
- [31] Shi Qian, Yang Qinghua, Mu Longjiang, et al. Evaluation of sea-ice thickness from four reanalyses in the Antarctic Weddell Sea[J]. *The Cryosphere*, 2021, 15(1): 31–47.
- [32] Stroeve J C, Jenvovrier S, Campbell G G, et al. Mapping and assessing variability in the Antarctic marginal ice zone, pack ice and coastal polynyas in two sea ice algorithms with implications on breeding success of snow petrels[J]. *The Cryosphere*, 2016, 10(4): 1823–1843.
- [33] Screen J A. Sudden increase in Antarctic sea ice: Fact or artifact?[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(13): L13702.
- [34] Ivanova N, Pedersen L T, Tonboe R T, et al. Inter-comparison and evaluation of sea ice algorithms: Towards further identification of challenges and optimal approach using passive microwave observations[J]. *The Cryosphere*, 2015, 9(5): 1797–1817.
- [35] Lavergne T, Sørensen A M, Kern S, et al. Version 2 of the EUMETSAT OSI SAF and ESA CCI sea-ice concentration climate data records[J]. *The Cryosphere*, 2019, 13(1): 49–78.
- [36] Cavalieri D J, Parkinson C L, Gloersen P, et al. Deriving long-term time series of sea ice cover from satellite passive-microwave multisensor data sets[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1999, 104(C7): 15803–15814.
- [37] Comiso J C. Characteristics of Arctic winter sea ice from satellite multispectral microwave observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1986, 91(C1): 975–994.
- [38] 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.
- [39] Peng G, Meier W N, Scott D J, et al. A long-term and reproducible passive microwave sea ice concentration data record for climate studies and monitoring[J]. *Earth System Science Data*, 2013, 5(2): 311–318.
- [40] Liu Jiping, Curry J A, Martinson D G. Interpretation of recent Antarctic sea ice variability[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(2): L02205.
- [41] Yu Leijiang, Zhang Zhanhai, Zhou Mingyu, et al. Interpretation of recent trends in Antarctic sea ice concentration[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2011, 5(1): 053557.
- [42] Ferreira D, Marshall J, Bitz C M, et al. Antarctic Ocean and sea ice response to ozone depletion: A two-time-scale problem[J]. *Journal of Climate*, 2015, 28(3): 1206–1226.
- [43] Turner J, Hosking J S, Marshall G J, et al. Antarctic sea ice increase consistent with intrinsic variability of the Amundsen Sea Low[J]. *Climate Dynamics*, 2016, 46(7): 2391–2402.
- [44] Kohyama T, Hartmann D L. Antarctic sea ice response to weather and climate modes of variability[J]. *Journal of Climate*, 2016, 29(2): 721–741.
- [45] 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.
- [46] 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.
- [47] Jin D, Kirtman B P. Why the Southern Hemisphere ENSO responses lead ENSO[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2009, 114(D23): D23101.
- [48] Raphael M N, Hobbs W. The influence of the large-scale atmospheric circulation on Antarctic sea ice during ice advance and retreat seasons[J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(14): 5037–5045.
- [49] Wang Guomin, 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.
- [50] Lefebvre W, Goosse H, Timmermann R, et al. Influence of the Southern Annular Mode on the sea ice-ocean system[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2004, 109(C9): C09005.
- [51] Yuan Xiaojun. ENSO-related impacts on Antarctic sea ice: A synthesis of phenomenon and mechanisms[J]. *Antarctic Science*, 2004, 16(4): 415–425.
- [52] Ciasto L M, Simpkins G R, England M H. Teleconnections between tropical Pacific SST anomalies and extratropical Southern Hemisphere climate[J]. *Journal of Climate*, 2015, 28(1): 56–65.
- [53] Raphael M N. The influence of atmospheric zonal wave three on Antarctic sea ice variability[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007, 112(D12): D12112.
- [54] 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.
- [55] Nuncio M, Yuan Xiaojun. The influence of the Indian Ocean dipole on Antarctic sea ice[J]. *Journal of Climate*, 2015, 28(7): 2682–2690.
- [56] Renwick J A, Kohout A, Dean S. Atmospheric forcing of Antarctic sea ice on intraseasonal time scales[J]. *Journal of Climate*, 2012, 25(17): 5962–5975.
- [57] Henderson G R, Barrett B S, Lois A, et al. Time-lagged response of the Antarctic and high-latitude atmosphere to tropical MJO convection[J]. *Monthly Weather Review*, 2018, 146(4): 1219–1231.
- [58] Martinson D G, Iannuzzi R A. Antarctic ocean-ice interaction: Implications from ocean bulk property distributions in the Weddell

- Gyre[J]. Antarctic Sea Ice: Physical Processes, Interactions and Variability, 1998, 74: 243–271.
- [59] Zhang Jinlun. Increasing Antarctic sea ice under warming atmospheric and oceanic conditions[J]. *Journal of Climate*, 2007, 20(11): 2515–2529.
- [60] Goosse H, Zunz V. Decadal trends in the Antarctic sea ice extent ultimately controlled by ice-ocean feedback[J]. *The Cryosphere*, 2014, 8(2): 453–470.
- [61] 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.
- [62] 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.
- [63] Liu Jiping, Curry J A. Accelerated warming of the Southern Ocean and its impacts on the hydrological cycle and sea ice[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, 107(34): 14987–14992.
- [64] Thompson D W J, Solomon S. Interpretation of recent Southern Hemisphere climate change[J]. *Science*, 2002, 296(5569): 895–899.
- [65] Sigmond M, Fyfe J C. Has the ozone hole contributed to increased Antarctic sea ice extent?[J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(18): L18502.
- [66] Fogt R L, Zbacnik E A. Sensitivity of the Amundsen Sea low to stratospheric ozone depletion[J]. *Journal of Climate*, 2014, 27(24): 9383–9400.
- [67] Christidis N, Stott P A. Changes in the geopotential height at 500 hPa under the influence of external climatic forcings[J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(24): 10798–10806.
- [68] Xia Yan, Hu Yongyun, Liu Jiping, et al. Stratospheric ozone-induced cloud radiative effects on Antarctic sea ice[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2020, 37(5): 505–514.
- [69] Landrum L L, Holland M M, Raphael M N, et al. Stratospheric ozone depletion: An unlikely driver of the regional trends in Antarctic sea ice in austral fall in the late twentieth century[J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(21): 11062–11070.
- [70] Marshall J, Scott J R, Armour K C, et al. The ocean's role in the transient response of climate to abrupt greenhouse gas forcing[J]. *Climate Dynamics*, 2015, 44(7/8): 2287–2299.
- [71] Marshall J, Armour K C, Scott J R, et al. The ocean's role in polar climate change: Asymmetric Arctic and Antarctic responses to greenhouse gas and ozone forcing[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2014, 372(2019): 20130040.
- [72] Kirkman IV C H, Bitz C M. The effect of the sea ice freshwater flux on Southern Ocean temperatures in CCSM3: Deep-ocean warming and delayed surface warming[J]. *Journal of Climate*, 2011, 24(9): 2224–2237.
- [73] Crosta X, Etourneau J, Orme L C, et al. Multi-decadal trends in Antarctic sea-ice extent driven by ENSO–SAM over the last 2,000 years[J]. *Nature Geoscience*, 2021, 14(3): 156–160.
- [74] 季青, 庞小平, 许苏清, 等. 极地海冰厚度探测方法及其应用研究综述[J]. *极地研究*, 2016, 28(4): 431–441.
- Ji Qing, Pang Xiaoping, Xu Suqing, et al. Review of technology and application research on polar sea ice thickness detection[J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2016, 28(4): 431–441.
- [75] Worby A P, Geiger C A, Paget M J, et al. Thickness distribution of Antarctic sea ice[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2008, 113(C5): C05S92.
- [76] Williams G, Maksym T, Wilkinson J, et al. Thick and deformed Antarctic sea ice mapped with autonomous underwater vehicles[J]. *Nature Geoscience*, 2015, 8(1): 61–67.
- [77] Worby A P, Bush G M, Allison I. Seasonal development of the sea-ice thickness distribution in East Antarctica: Measurements from upward-looking sonar[J]. *Annals of Glaciology*, 2001, 33: 177–180.
- [78] Behrendt A, Dierking W, Fahrbach E, et al. Sea ice draft in the Weddell Sea, measured by upward looking sonars[J]. *Earth System Science Data*, 2013, 5(1): 209–226.
- [79] Wang Xianwei, Jiang Weixu, Xie Hongjie, et al. Decadal variations of sea ice thickness in the Amundsen-Bellinghshausen and Weddell seas retrieved from ICESat and IceBridge laser altimetry, 2003–2017[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2020, 125(7): e2020JC016077.
- [80] Lei Ruibo, Li Zhijun, Cheng Bin, et al. Annual cycle of landfast sea ice in Prydz Bay, East Antarctica[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2010, 115(C2): C02006.
- [81] 杨清华, 刘骥平, 张林, 等. 南极沿岸固定冰观测与研究述评[J]. *水科学进展*, 2013, 24(5): 741–749.
- Yang Qinghua, Liu Jiping, Zhang Lin, et al. Review of Antarctic landfast sea ice observations[J]. *Advances in Water Science*, 2013, 24(5): 741–749.
- [82] 赵杰臣, 杨清华, 程斌, 等. 基于温度链浮标获取南极普里兹湾积雪和固定冰厚度的研究[J]. *海洋学报*, 2017, 39(11): 115–127.
- Zhao Jiechen, Yang Qinghua, Cheng Bin, et al. Snow and land-fast sea ice thickness derived from thermistor chain buoy in the Prydz Bay, Antarctic[J]. *Haiyang Xuebao*, 2017, 39(11): 115–127.
- [83] Kwok R, Sulsky D. Arctic Ocean sea ice thickness and kinematics: Satellite retrievals and modeling[J]. *Oceanography*, 2010, 23(4): 134–143.

- [84] Laxon S, Peacock N, Smith D. High interannual variability of sea ice thickness in the Arctic region[J]. *Nature*, 2003, 425(6961): 947–950.
- [85] Giles K A, Laxon S W, Worby A P. Antarctic sea ice elevation from satellite radar altimetry[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(3): L03503.
- [86] Yi Donghui, Zwally H J, Robbins J W. ICESat observations of seasonal and interannual variations of sea-ice freeboard and estimated thickness in the Weddell Sea, Antarctica (2003–2009)[J]. *Annals of Glaciology*, 2011, 52(57): 43–51.
- [87] Kurtz N T, Markus T. Satellite observations of Antarctic sea ice thickness and volume[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2012, 117(C8): C08025.
- [88] Kern S, Ozsoy-Çiçek B, Worby A P. Antarctic sea-ice thickness retrieval from ICESat: Inter-comparison of different approaches[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(7): 538.
- [89] Hendricks S. Sea ice climate change initiative: Phase 2. D3.4 Product User Guide (PUG)[R]. Paris: European Space Agency, 2017.
- [90] Nandan V, Geldsetzer T, Yackel J, et al. Effect of snow salinity on CryoSat-2 Arctic first-year sea ice freeboard measurements[J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(20): 10419–10426.
- [91] Tian-Kunze X, Kaleschke L, Maaß N, et al. SMOS-derived thin sea ice thickness: Algorithm baseline, product specifications and initial verification[J]. *The Cryosphere*, 2014, 8(3): 997–1018.
- [92] Kwok R, Cunningham G, Markus T, et al. ATLAS/ICESat-2 L3A sea ice height, version 1[R]. Boulder: NSIDC (National Snow and Ice Data Center), 2019: 20.
- [93] Wang Jinfei, Min Chao, Ricker R, et al. A comparison between Envisat and ICESat sea ice thickness in the Antarctic[J]. *The Cryosphere Discussions*, 2020, doi: [10.5194/TC-2020-48](https://doi.org/10.5194/TC-2020-48).
- [94] Buehner M, Caya A, Pogson L, et al. A new environment Canada regional ice analysis system[J]. *Atmosphere-Ocean*, 2013, 51(1): 18–34.
- [95] Yang Qinghua, Losa S N, Losch M, et al. Assimilating SMOS sea ice thickness into a coupled ice-ocean model using a local SEIK filter[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2014, 119(10): 6680–6692.
- [96] Liu Jiping, Chen Zhiqiang, Hu Yongyun, et al. Towards reliable Arctic sea ice prediction using multivariate data assimilation[J]. *Science Bulletin*, 2019, 64(1): 63–72.
- [97] Mu Longjiang, Yang Qinghua, Losch M, et al. Improving sea ice thickness estimates by assimilating CryoSat-2 and SMOS sea ice thickness data simultaneously[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2018, 144(711): 529–538.
- [98] Zhang Jinlun, Rothrock D A. Modeling global sea ice with a thickness and enthalpy distribution model in generalized curvilinear coordinates[J]. *Monthly Weather Review*, 2003, 131(5): 845–861.
- [99] Verdy A, Mazloff M R. A data assimilating model for estimating Southern Ocean biogeochemistry[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2017, 122(9): 6968–6988.
- [100] Holland P R, Bruneau N, Enright C, et al. Modeled trends in Antarctic sea ice thickness[J]. *Journal of Climate*, 2014, 27(10): 3784–3801.
- [101] Wu Qigang, Zhang Xiangdong. Observed evidence of an impact of the Antarctic sea ice dipole on the Antarctic Oscillation[J]. *Journal of Climate*, 2011, 24(16): 4508–4518.
- [102] Raphael M N, Hobbs W, Wainer I. The effect of Antarctic sea ice on the Southern Hemisphere atmosphere during the southern summer[J]. *Climate Dynamics*, 2011, 36(7/8): 1403–1417.
- [103] Lachlan-Cope T. Role of sea ice in forcing the winter climate of Antarctica in a global climate model[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2005, 110(D3): D03110.
- [104] Kidston J, Taschetto A S, Thompson D W J, et al. The influence of Southern Hemisphere sea-ice extent on the latitude of the mid-latitude jet stream[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(15): L15804.
- [105] Bader J, Flügge M, Kvamstø N G, et al. Atmospheric winter response to a projected future Antarctic sea-ice reduction: A dynamical analysis[J]. *Climate Dynamics*, 2013, 40(11/12): 2707–2718.
- [106] Parise C K, Pezzi L P, Hodges K I, et al. The influence of sea ice dynamics on the climate sensitivity and memory to increased Antarctic sea ice[J]. *Journal of Climate*, 2015, 28(24): 9642–9668.
- [107] Smith D M, Dunstone N J, Scaife A A, et al. Atmospheric response to Arctic and Antarctic sea ice: The importance of ocean atmosphere coupling and the background state[J]. *Journal of Climate*, 2017, 30(12): 4547–4565.
- [108] England M, Polvani L, Sun Lantao. Contrasting the Antarctic and Arctic atmospheric responses to projected sea ice loss in the late twenty-first century[J]. *Journal of Climate*, 2018, 31(16): 6353–6370.
- [109] Ayres H C, Screen J A. Multimodel analysis of the atmospheric response to Antarctic sea ice loss at quadrupled CO₂[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(16): 9861–9869.
- [110] Azhar S S A, Chenoli S N, Samah A A, et al. The linkages between Antarctic sea ice extent and Indian summer monsoon rainfall[J]. *Polar Science*, 2020, 25: 100537.
- [111] Fogwill C J, Turney C S M, Menviel L, et al. Southern Ocean carbon sink enhanced by sea-ice feedbacks at the Antarctic cold reversal[J]. *Nature Geoscience*, 2020, 13(7): 489–497.

- [112] Gupta M, Follows M J, Lauderdale J M. The effect of Antarctic sea ice on Southern Ocean carbon outgassing: Capping versus light attenuation[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2020, 34(8): e2019GB006489.
- [113] Shadwick E H, De Meo O A, Schroeter S, et al. Sea ice suppression of CO₂ outgassing in the West Antarctic Peninsula: Implications for the evolving Southern Ocean carbon sink[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48(11): e2020GL091835.
- [114] 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.
- [115] Nadeau L P, Ferrari R, Jansen M F. Antarctic sea ice control on the depth of North Atlantic deep water[J]. *Journal of Climate*, 2019, 32(9): 2537–2551.
- [116] Luo H, Yang Q, Mu L, et al. DASSO: a data assimilation system for the Southern Ocean that utilizes both sea-ice concentration and thickness observations[J]. *Journal of Glaciology*, 2021: 1–6.

A review on Antarctic sea ice change and its climate effects

Wang Jinfei^{1,2}, Yang Qinghua^{1,2}, Yu Lejiang³, Song Mirong⁴, Luo Hao^{1,2}, Shi Qian^{1,2},
Li Xuewei^{1,2}, Min Chao^{1,2}, Liu Jiping⁴

(1. School of Atmospheric Sciences and Ministry of Education Key Laboratory of Tropical Atmosphere-Ocean System, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China; 2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082, China; 3. Ministry of Natural Resources Key Laboratory for Polar Science, Polar Research Institute of China, Shanghai 200136, China; 4. State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: Antarctic sea ice plays an important role in the global climate system. In contrast to the rapid decrease in Arctic sea ice extent, Antarctic sea ice extent exhibits a gradually increasing trend before 2014, followed by an abrupt decline in the last four decades. A single large-scale atmospheric circulation cannot fully explain the long-term trend of Antarctic sea ice, and the coupling influence of ocean-atmosphere interactions has not been sufficiently investigated. Limited by the capabilities of remote sensing and numerical simulation, the Antarctic sea ice thickness and volume variations in the context of global change cannot be quantified precisely with currently available sea ice thickness and volume data. Moreover, the climate effects of Antarctic sea ice change require further investigation. Hence it is strongly urgent to develop a long-term and reliable Antarctic sea ice thickness data set to quantify the Antarctic sea ice volume change. Meanwhile, the influences of multi-climate modes and ocean-atmosphere coupling system on the Antarctic sea ice changes should be considered comprehensively.

Key words: Antarctic; sea ice extent; sea ice thickness; climate effects