

柯长青, 李海丽, 沈校熠. 1983–2022 年南极夏季海冰区反照率的反转变化特征分析[J]. 海洋学报, 2023, 45(12): 121–132, doi:10.12284/hyxb2023107

Ke Changqing, Li Haili, Shen Xiaoyi. The analysis on reversal of variation trend in the summer albedo of Antarctic sea-ice zone from 1983 to 2022[J]. Haiyang Xuebao, 2023, 45(12): 121–132, doi:10.12284/hyxb2023107

# 1983–2022 年南极夏季海冰区反照率的 反转变化特征分析

柯长青<sup>1</sup>, 李海丽<sup>1</sup>, 沈校熠<sup>1</sup>

(1. 南京大学 地理与海洋科学学院, 江苏 南京 210023)

**摘要:** 海冰区反照率会影响辐射收支平衡, 对全球气候变化有着重要影响。利用遥感反演的反照率数据产品分析了 1983–2022 年南极及其 6 个海域夏季海冰区反照率的时空变化, 探讨了海冰密集度、气温和大气环流与海冰区反照率的关系。结果表明, 卫星反演的南极夏季海冰区反照率与实测反照率结果一致。西威德尔海海冰区多年平均反照率最高 (0.61), 罗斯海最低 (0.45)。南极夏季海冰区反照率经历了先上升 (1983–2015 年) 后快速下降 (2015–2022 年) 的变化。除了别林斯高晋海–阿蒙森海海冰区反照率前后两个时段均下降外, 其余 5 个海域和南极一样出现了变化趋势的反转。南极海冰区反照率与海冰密集度显著正相关, 而与气温显著负相关。1983–2015 年夏季气温降低, 海冰消融减弱, 海冰密集度微弱上升 (0.03%/a), 海冰面积平均每 10 年增加  $2.07 \times 10^5 \text{ km}^2$ , 导致反射的太阳辐射增多, 反照率也微弱上升。2015–2022 年夏季气温升高, 海冰消融加剧, 冰间水道和开阔水域增多, 海冰密集度下降, 海冰区吸收更多的太阳辐射, 造成反射辐射减小, 因而海冰区反照率快速下降。此外, 南极环状模也是影响罗斯海和威德尔海海冰区反照率变化的因素之一。

**关键词:** 南极夏季海冰; 反照率; 时空变化; 气温; 海冰密集度; 大气环流

中图分类号: P731.15

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2023)12-0121-12

## 1 引言

海冰是冰冻圈的重要组成部分, 具有年际、季节变化大的特点<sup>[1-2]</sup>。同时, 海冰能够隔绝海气热量的直接交换<sup>[3]</sup>, 是高纬度海洋能量收支的关键因素<sup>[4-7]</sup>。海冰的反照率较高, 尤其是新雪覆盖的海冰, 其反照率超过 0.85, 而海水的反照率远小于海冰, 只有 0.06~0.07<sup>[8]</sup>。当气温升高时, 海冰融化成海水, 反照率会迅速降低, 从而导致吸收更多能量, 加剧海冰融化过程, 这就是著名的雪/冰–反照率正反馈过程<sup>[9]</sup>。由于这种反馈效应的存在, 极地海冰最容易受到气候变化的影响, 能够快速将全球气候变化的影响作用展示出来<sup>[9-10]</sup>。

南极作为冷源对全球气候变化起着重要作用, 直接影响着大气环流等重要的物理过程<sup>[11-12]</sup>。近几十年来随着全球气候变暖, 南极海冰面积不仅没有减小, 反而呈现增加趋势, 而且空间差异较大<sup>[13-14]</sup>。罗斯海海冰的增加尤为显著, 其次是威德尔海和印度洋扇区, 而别林斯高晋海–阿蒙森海和太平洋扇区海冰面积是减小的<sup>[15-16]</sup>。这与北极海冰面积的减小趋势恰恰相反<sup>[17]</sup>。随着南极海冰的增加, 反照率也发生了相应的变化, 对南极的气候与环境产生了显著影响<sup>[18]</sup>。但是近几年来, 南极海冰面积又有所减小<sup>[19-22]</sup>。因此, 在这种南极海冰复杂变化的背景下, 开展南极海冰区反照率变化的相关研究, 对了解全球气候变化对南极

收稿日期: 2022-12-20; 修订日期: 2023-09-18。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41976212); 江苏省自然科学基金项目(BK20210193, BK20230799)。

作者简介: 柯长青(1969—), 男, 陕西省丹凤县人, 教授, 研究方向为冰雪水文遥感。E-mail: keccq@nju.edu.cn

海冰的影响有着十分重要的意义。

目前, 南极海冰区反照率的研究相对较少。Zhou 等<sup>[23]</sup> 和 Pirazzini<sup>[24]</sup> 基于站点观测数据分析了南极海冰的反照率变化。Brandt 等<sup>[25]</sup> 基于冰站观测数据分析了不同类型海冰在有雪和无雪条件下的反照率。Hao 等<sup>[26]</sup> 基于 2016 年 10 月 5 日至 11 月 26 日东南极普里兹湾海冰的实测光谱反照率分析了春末到夏初平均反照率的变化。由于站点观测数据所限, 这些研究的时间尺度较短, 空间范围也非常有限, 难以反映整个南极海冰区反照率的变化规律。Laine<sup>[18]</sup> 基于 Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) 数据分析了 1981–2000 年南极海冰区反照率的时空变化, 文献<sup>[27]</sup> 研究得出 1982–2009 年南极海冰区反照率呈微弱增加趋势, Riihela 等<sup>[28]</sup> 研究表明南极海冰的扩张与 1982–2018 年南极冰雪反照率产生了负反馈。Zhou 等<sup>[29]</sup> 利用长时间序列的遥感数据分析了 1982–2015 年整个南极海冰区反照率的时空变化, 发现近 10 年来东南极海冰区反照率呈现升高的趋势, 而西南极海冰区反照率 2001 年之前呈降低趋势, 之后逆转为升高趋势。Zhang 等<sup>[30]</sup> 利用卫星和再分析数据分析了 1982–2015 年南极海冰区表面辐射收支状况, 发现由于海冰的高反照率, 云的长波辐射大于其短波反射和吸收, 除了夏季以外南极海冰区表面存在增温效应。尽管上述研究进行了大尺度南极海冰区反照率变化的探究, 但均局限在 2015 年之前。近年来南极海冰面积发生多次突变, 引起了海冰区反照率的变化, 因此亟需开展更长时间序列的海冰区反照率研究以理解长期尤其是近期的反照率变化情况。此外, 上述研究多是针对海冰区反照率变化的时空分析, 有关变化原因的探讨较少, 对于影响南极海冰变化的大气环流等因素讨论也较少, 这些都限制了目前对南极海冰区反照率变化成因的进一步探究。

利用 1982–2022 年反照率数据产品分析整个南极及其 6 个海域(印度洋扇区、别林斯高晋海–阿蒙森海、罗斯海、太平洋扇区、东威德尔海、西威德尔海, 图 1<sup>[31]</sup>) 夏季海冰区反照率的时空变化特征。同时, 利用海冰密集度、气温和大气环流数据探讨海冰区反照率变化的原因。

## 2 数据

### 2.1 海冰区反照率

海冰区反照率数据来自于卫星气候监测应用设施 (Satellite Application Facility on Climate Monitoring, CMSAF), CMSAF 旨在提供全球能源和水循环的高

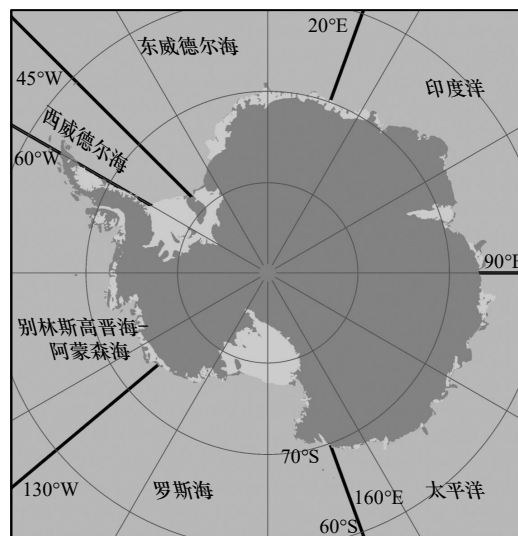


图 1 南极及其 6 个海域的空间分布  
(灰白色区域为冰架)<sup>[31]</sup>

Fig. 1 The spatial distributions of Antarctica and six sea sectors (ice shelves are colored in off-white)<sup>[31]</sup>

质量卫星反演数据, 以帮助了解全球气候变化。AVHRR 数据经过定标、传感器校正和太阳高度角校正得到大气层顶部反射率, 然后计算地表反照率, 进而计算光谱反照率, 最后利用窄波段转换算法<sup>[32]</sup> 获得海冰区反照率<sup>[33–34]</sup>。

使用的海冰区反照率数据产品为 CMSAF Cloud, Albedo, Radiation data record, AVHRR-based, Edition 2.1 (CLARA-A2) 和 Interim Climate Data Records (ICDR) AVHRR-based on CLARA-A2 数据 (ICDR CLARA-A2)。两种海冰区反照率数据产品投影均为兰伯特方位等面积投影, 空间分辨率为 25 km × 25 km。CLARA-A2 数据覆盖时间为 1982 年 1 月至 2019 年 6 月, ICDR-CLARA-A2 是 CLARA-A2 气候数据记录的更新和扩展, 可以用于填补 CLARA-A2 的数据缺失<sup>[35]</sup>。ICDR CLARA-A2 数据覆盖时间为 2019 年 1 月 1 日至今。ICDR CLARA-A2 延续了 CLARA-A2 的计算方法, 差异主要来自于输入数据 (包括气溶胶荷载和大气成分)。2019 年 1 月和 2 月 (两种数据产品的重叠时间), 多个海域 ICDR CLARA-A2-SAL 反照率与 CLARA-A2-SAL 反照率相等, 二者最大差异不超过 0.01 (表 1), 文献<sup>[35]</sup> 也表明夏季二者的差异通常可以忽略不计。因此, 两套数据之间具有较好的连续性和一致性, 数据自身的差异对研究结果影响不大。

与实测数据的对比表明 CMSAF 海冰区反照率产品具有 3%~15% 的相对精度<sup>[36]</sup>。为了分析近 40 年南极夏季海冰区反照率变化, 使用了 1982 年 12 月至 2019 年 2 月 CLARA-A2 和 2019 年 12 月至 2022 年

表1 2019年1–2月ICDR CLARA-A2与CLARA-A2海冰区反照率对比

Table 1 The comparison between ICDR CLARA-A2 albedo and CLARA-A2 albedo of Jan–Feb, 2019

南极海域	ICDR CLARA-A2-SAL		CLARA-A2-SAL	
	1月	2月	1月	2月
别林斯高晋海–阿蒙森海	0.50	0.49	0.50	0.50
印度洋扇区	0.57	0.56	0.57	0.57
太平洋扇区	0.46	0.47	0.47	0.48
罗斯海	0.44	0.46	0.45	0.47
东威德尔海	0.50	0.57	0.50	0.57
西威德尔海	0.59	0.62	0.59	0.62

2月ICDR CLARA-A2月平均海冰区反照率数据。需要注意的是,将前一年12月至当年2月定义为当年的夏季,例如2022年夏季是指2021年12月至2022年2月。

## 2.2 海冰密集度

海冰密集度数据来源于美国国家冰雪数据中心(NSIDC),最新的版本2产品提供了1978年10月26日至2022年5月31日数据,空间分辨率为25 km × 25 km。使用了1982–2022年12月至翌年2月南极月平均海冰密集度数据,用于分析南极夏季海冰区反照率变化与海冰密集度的关系。

## 2.3 气温和海平面气压

欧洲中期天气预报中心(ECMWF)提供了ERA5(ECMWF Re-Analysis 5)数据集,数据覆盖时间为1940年至今。该数据集包含了大量海洋、大气和海冰参数,可用于全球气候变化研究。采用1982–2022年12月至翌年2月月平均2 m气温数据来分析其与南极夏季海冰区反照率变化的关系。采用相同时间段的月平均海平面气压数据计算逐月南极环状模(Southern Annular Mode, SAM)指数,分析大气环流对反照率变化的影响。

# 3 结果

## 3.1 海冰区反照率的验证

采用Brandt等<sup>[25]</sup>提供的南极海冰过程和气候计划(ASPeCt)数据验证CLARA-A2夏季海冰区反照率,该数据是基于1980–2000年船载测量收集得到的<sup>[25]</sup>,包含了超过21 000个船载观测信息,测量误差不超过0.04<sup>[37]</sup>。前期光谱反照率测量使用了320~1 060 nm波长区域的辐射计,后期采用了红外光谱辐射计(320~1 800 nm)。Brandt等<sup>[25]</sup>首先选择了包含完整观测信息(包括降雪信息)的15 690个观测结果,然后删除了相距不到6海里的观测(剩余10 016次观测),

最后对相同海域相同季节的观测结果进行平均。

平均ASPeCt反照率依据每种表面类型进行了加权处理:

$$\alpha = \alpha_i c_i + \alpha_w (1 - c_i), \quad (1)$$

式中, $\alpha_i$ 为海冰反照率; $c_i$ 为海冰密集度; $\alpha_w$ 为开阔水域反照率。不同表面类型的反照率由Brandt等<sup>[25]</sup>提供。例如,在无雪覆盖的情况下,开阔水域反照率为0.07,尼罗冰反照率为0.14,灰冰反照率为0.25,厚度小于0.7 m的一年冰反照率为0.41。

Brandt等<sup>[25]</sup>将南极5个海域(没有将威德尔海细分为东西两个海域)55°–80°S区域按照2.5°纬度进行划分,提供了经过加权处理的每个海域逐个2.5°纬度区域内夏季平均ASPeCt反照率。采用固定的海冰反照率假定值的加权平均方法虽然不可避免的会给反照率计算带来一定的误差,但是在大量船载观测的约束下,假定值较为准确地反映了不同类型海冰的反照率<sup>[38]</sup>。另外,在南极实测反照率数据稀缺的背景下,Brandt等<sup>[25]</sup>提供的反照率结果也常被用做表面反照率的验证或对比数据<sup>[27,39–40]</sup>。

将每个海域内所有纬度区域的平均反照率(仅考虑平均反照率大于0.09的纬度区域,原因是研究只涉及海冰密集度不低于15%的像元)进行平均得到5个海域平均ASPeCt反照率。为了能够与ASPeCt反照率进行比较,按照Brandt等<sup>[25]</sup>的方法计算了5个海域1983–2001年CLARA-A2夏季平均反照率(表2)。别林斯高晋海–阿蒙森海、印度洋扇区、罗斯海的CLARA-A2反照率与ASPeCt反照率非常接近,太平洋扇区和威德尔海CLARA-A2反照率与ASPeCt反照率差异不大,最大差异为0.05。表明CLARA-A2夏季反照率与观测数据相符,结果可信。

## 3.2 海冰区反照率的年际变化

基于密集度计算出了海冰面积及其距平。利用南极夏季海冰面积距平变化判断海冰面积出现突变

表2 覆盖率加权平均的CLARA-A2反照率与ASPeCt反照率的对比

Table 2 The comparison between coverage-weighted CLARA-A2 albedo and ASPeCt albedo

南极海域	ASPeCt	CLARA-A2-SAL
别林斯高晋海–阿蒙森海	0.37	0.36
印度洋扇区	0.28	0.26
太平洋扇区	0.36	0.32
罗斯海	0.28	0.28
威德尔海	0.35	0.40

的年份,并根据海冰发生突变的年份分时段分析海冰区反照率的变化。2014年海冰面积达到最大,2015年海冰面积呈现较高的正异常,随后迅速减小,2016年降低为负异常。2015–2016年海冰面积距平值减小幅度是所有年份中最大的。因此,以2015年作为时间分界线对海冰区反照率的变化进行分析。

1983–2022年南极夏季海冰区反照率整体上微弱下降,下降速率为每年–0.01%(图2a,表3)。其中,1983–2015年海冰区反照率呈微弱的波动上升趋势,然而2015–2022年海冰区反照率已反转为快速下降。1993年、2022年夏季海冰区反照率相对较低,分

别为0.47和0.45;1994年、2011年夏季海冰区反照率相对较高,分别为0.53和0.52。南极月平均海冰区反照率的变化与文献[27]的结果相似,夏季南极月平均反照率的多年平均值(1982–2022)在12月达到最小值(0.47),2月达到最大值(0.55)。由于获取的是海冰区反照率,在计算反照率多年平均时不考虑开阔水域;2月海冰像元显著减少且多为表面有厚雪覆盖的多年冰的情况下,海冰区平均反照率高于12月和1月。在研究时段内,南极12月海冰区反照率整体上呈上升趋势;而对于1月和2月,南极海冰区反照率整体上呈现下降趋势(图2b)。

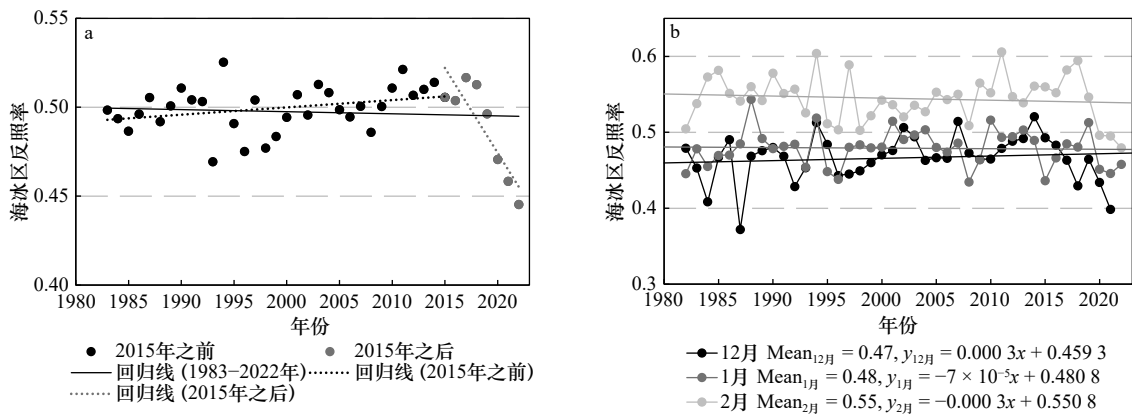


图2 1983–2022年南极夏季(a)以及12月、翌年1月和2月(b)海冰区反照率变化

Fig. 2 The albedo variations in Antarctic sea ice regions in summer (a), and December, January and February of the following year (b) from 1983 to 2022

6个海域海冰区反照率的变化情况各不相同(图3,表3)。1983–2022年别林斯高晋海–阿蒙森海、罗斯海与整个南极一致,反照率呈下降趋势,而印度洋扇

表3 1983–2022年南极及其6个海域夏季海冰区反照率平均值和变化速率(%/a)

Table 3 The mean value and change rates of albedo (%/a) in sea ice regions of Antarctica and six sea sectors in summer from 1983 to 2022

	1983–2022年		1983–2015年		2015–2022年	
	均值	速率	均值	速率	均值	速率
别林斯高晋海–阿蒙森海	0.51	-0.16*	0.52	-0.19*	0.51	-0.78*
印度洋	0.48	0.07	0.48	0.15*	0.48	-0.53
太平洋	0.50	0.05	0.50	0.20**	0.48	-1.73**
罗斯海	0.45	-0.06	0.46	0.02	0.43	-1.00*
东威德尔海	0.47	0.00	0.48	0.12	0.49	-1.06*
西威德尔海	0.61	0.02	0.61	0.07	0.61	-1.21**
南极	0.50	-0.01	0.50	0.04	0.51	-0.96**

注:\*\*和\*分别表示0.01和0.05显著性水平。

区、太平洋扇区、东威德尔海、西威德尔海则呈微弱上升趋势或没有明显升降变化。其中1983–2015年,仅有别林斯高晋海–阿蒙森海的海冰区反照率呈下降趋势,其他5个海域都呈微弱上升趋势。但是2015年以后,只有别林斯高晋海–阿蒙森海的海冰区反照率继续呈下降趋势,其他5个海域的海冰区反照率由上升反转为下降,至此所有6个海域的夏季海冰区反照率都呈加速下降趋势,这也导致了整个南极夏季海冰区反照率在2015年以后加速下降。

### 3.3 海冰区反照率的空间变化

南极夏季海冰区反照率的多年平均值在0.10~0.80之间,均值为0.50(图4a)。高反照率主要集中在西威德尔海、东威德尔海和别林斯高晋海–阿蒙森海。这里是南极海冰密集度比较高的海域,同时也是存在多年冰的海域。由于海冰和海水反照率的差异,更多的海冰覆盖会提升该海域的反照率[38]。多年冰通常较厚,同时表面存在更深的积雪,因此其反照率也较高。反照率低值区主要集中在海冰外延区域、罗斯海部分海域和埃默里冰架附近。这些海域海冰

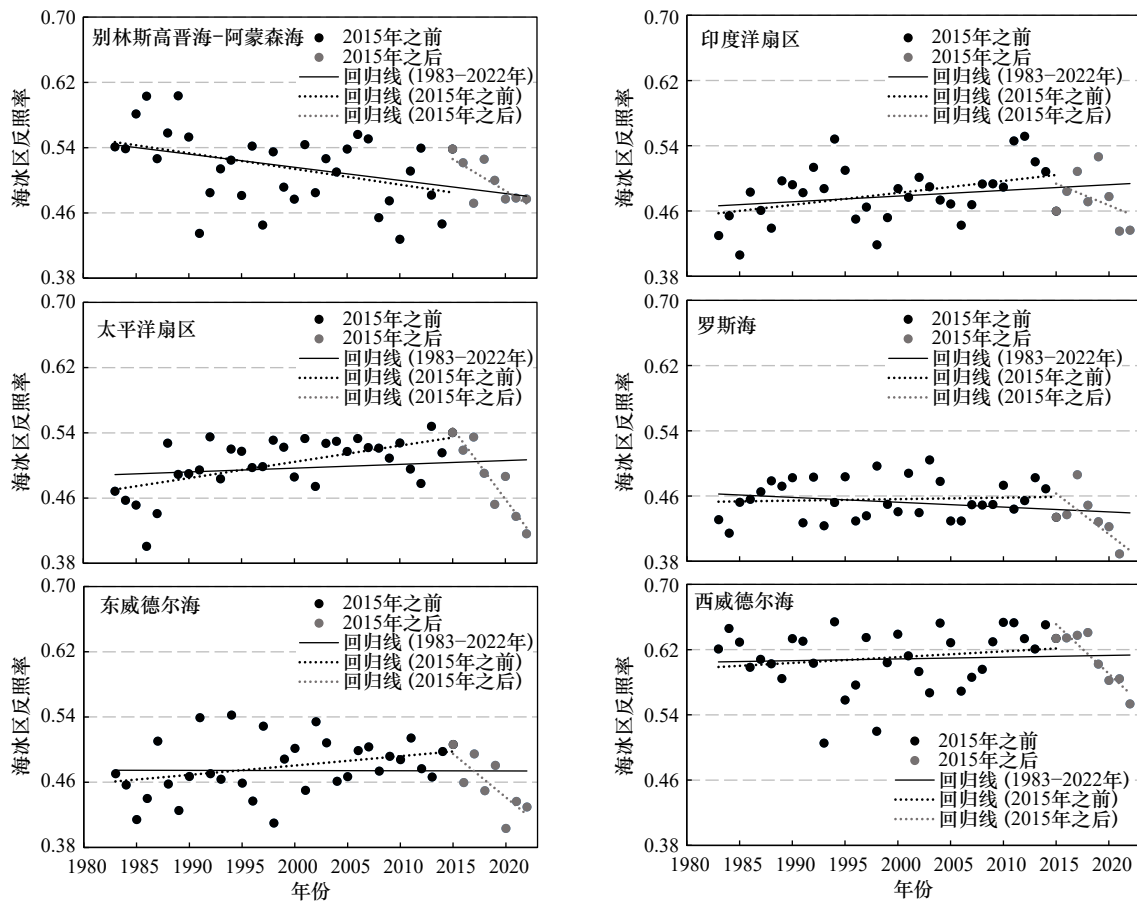


图3 1983–2022年南极6个海域夏季海冰区反照率变化

Fig. 3 The albedo variations in sea ice regions of Antarctica and six sea sectors in summer from 1983 to 2022

密集度较低,而且存在数目较多的冰间水道,因此会降低其反照率。12月反照率高值区分布最广,1月次之,到2月进一步缩小。从6个海域来看,西威德尔海由于是南极多年冰的聚集区,海冰区多年平均反照率最高,达到0.61,其次是别林斯高晋海-阿蒙森海,达到0.51。其他海域由于海冰密集度较低并且存在更多的冰间水道,海冰区反照率都小于0.50。其中,罗斯海的海冰区多年平均反照率最低,只有0.45,这与其存在较大面积的冰间湖有关。

通过最小二乘法对40年的数据进行线性拟合得到海冰区反照率空间变化趋势(图4b)。海冰区反照率变化趋势主要集中在 $-5\%$ ~ $5\%/a$ 之间。反照率呈上升趋势的海域主要集中在罗斯海、威德尔海和南极大陆边缘海域。下降的海域主要集中在别林斯高晋海-阿蒙森海、罗斯海的西部和东威德尔海的西侧海域。反照率上升最显著的海域主要集中在罗斯海东部和东威德尔海的部分海域,别林斯高晋海-阿蒙森海是下降趋势最显著的海域。12月海冰区反照率的上升趋势最为明显,1月上升和下降趋势的空间范围相当,2月下降趋势的空间范围超过上升趋势

的空间范围。

## 4 讨论

### 4.1 海冰密集度和气温的年际变化

逐像元计算1982–2022年12月、翌年1月、2月的海冰密集度平均值,得到平均海冰密集度空间分布图(图4c)。在不考虑开阔水域(海冰密集度小于15%)的前提下,南极夏季海冰密集度分布在15%~96%之间,平均值为61%。1983–2015年只有别林斯高晋海-阿蒙森海、罗斯海的海冰密集度呈微弱下降趋势,其他海域与整个南极一样呈微弱增加趋势。2015–2022年印度洋扇区、别林斯高晋海-阿蒙森海呈微弱增加趋势,而其他海域与整个南极一样呈下降趋势,导致1983–2022年整个南极夏季的海冰密集度以 $-0.05\%/a$ 的速率下降(图5a,表4)。海冰环绕分布于南极大陆周围,并延伸到低纬度海域,形成一圈低值区域。西南极海冰密集度总体上高于东南极,密集度比较高的海域主要集中在西威德尔海、东威德尔海、别林斯高晋海-阿蒙森海、罗斯海东部海域和南极大陆边缘海域;密集度较低的海域集中在罗斯海和

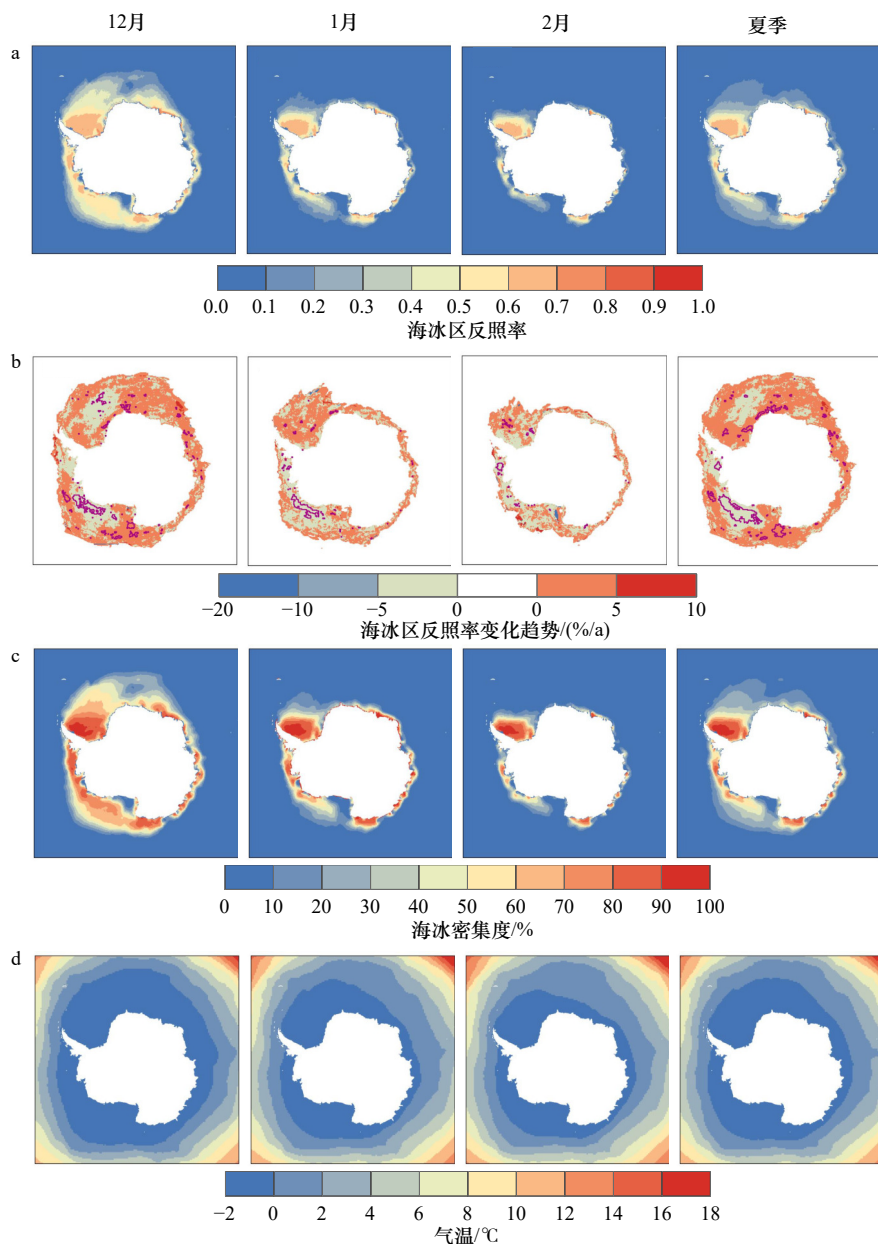


图 4 1983–2022 年南极夏季及其不同月份平均海冰区反照率(a)、海冰区反照率变化趋势(b)、平均海冰密集度(c)和平均气温的空间分布(d)

Fig. 4 The spatial distributions of averaged albedo in sea ice region (a), variation trend of averaged albedo in sea ice region (b), averaged sea ice concentration (c) and averaged air temperature (d) in summer and individual month in Antarctica from 1983 to 2022

图 b 中紫色框所指区域通过了 95% 显著性水平检验

Regions indicated by purple box in figure b means these trends above 95% significance level

埃默里冰架附近。12 月平均海冰密集度高值区分布最广, 翌年 1 月次之, 到 2 月进一步缩小。西威德尔海的平均海冰密集度最高, 达到 88%, 别林斯高晋海–阿蒙森海、太平洋扇区也较高, 超过 61%, 其他海域的平均海冰密集度较低(表 4)。

12 月至翌年 2 月, 东南极升温更加明显(图 4d)。南极及其 6 个海域在整个研究时段夏季平均气温在  $-2.19 \sim -1.46^{\circ}\text{C}$  之间(表 4)。1983–2015 年南极及其

所有海域的夏季平均气温都呈微弱降低趋势; 2015–2022 年, 除了印度洋扇区继续呈现下降趋势外, 其他海域和南极则反转为上升趋势(图 5b, 表 4)。然而, 整个南极及其 6 个海域的平均气温在整个研究时段上依然呈微弱降低趋势。

#### 4.2 海冰密集度、气温变化对海冰区反照率的影响

由于海冰和海水反照率的较大差异, 海冰密集度的变化会极大地改变海冰区整体的反照率<sup>[38–39]</sup>。开阔

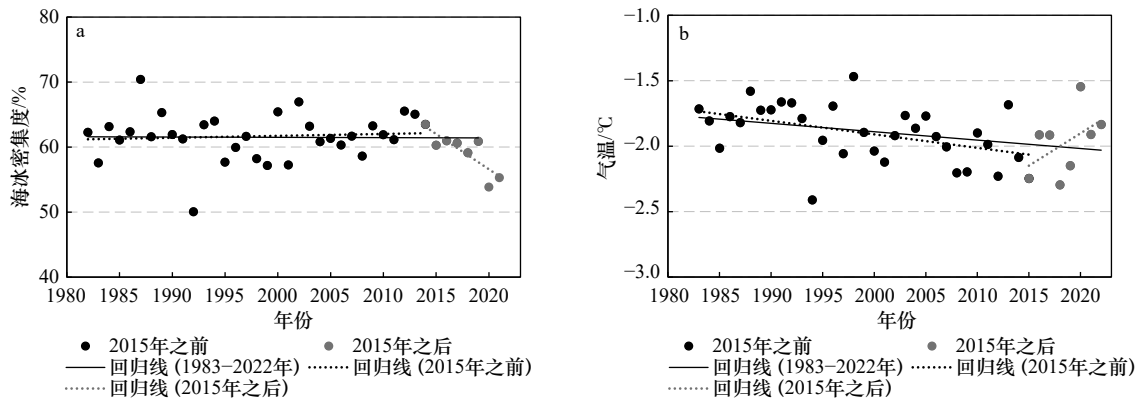


图5 1983–2022年南极夏季海冰密集度(a)和气温(b)的变化

Fig. 5 The variations of summer sea ice concentration (a) and air temperature (b) in Antarctica from 1983 to 2022

表4 1983–2022年南极及其6个海域夏季海冰密集度和气温均值及其变化速率

Table 4 The mean and change rate of summer sea ice concentration and air temperature in Antarctica and six sea sectors from 1983 to 2022

	1983–2022年		1983–2015年		2015–2022年	
	均值	速率	均值	速率	均值	速率
海冰密集度[均值(%) and 速率(%·a <sup>-1</sup> )]						
印度洋扇区	48	0.07	48	0.07	48	0.90
别林斯高晋海–阿蒙森海	61	-0.25	62	-0.44*	61	0.13
罗斯海	52	-0.28**	53	-0.03	43	-0.73
太平洋扇区	62	0.23*	61	0.39**	63	-1.81
东威德尔海	56	-0.01	57	0.29*	51	-1.94
西威德尔海	88	0.05	88	0.07	89	-1.01*
南极	61	-0.05	62	0.03	59	-1.08*
气温[均值(°C) and 速率(°C·(10 a) <sup>-1</sup> )]						
印度洋扇区	-1.87	-0.04	-1.88	-0.08	-1.85	-0.14
别林斯高晋海–阿蒙森海	-1.46	-0.01	-1.49	-0.08	-1.36	0.18
罗斯海	-1.94	-0.02	-1.94	-0.04	-1.97	1.02*
太平洋扇区	-1.72	-0.03	-1.73	-0.07	-1.70	0.14
东威德尔海	-2.19	-0.08	-2.14	-0.04	-2.42	0.53
西威德尔海	-1.95	-0.16**	-1.91	-0.22**	-2.16	0.03
南极	-1.91	-0.06*	-1.90	-0.10**	-1.98	0.50

注: \*\*和\*分别表示0.01和0.05显著性水平。

水域占比越高,能够吸收的辐射越多,反照率越低。南极夏季海冰密集度的空间分布与海冰区反照率的空间格局有很好的 consistency (图 4a, 图 4c),海冰密集度大的海域其反照率也高,二者显著正相关(图 6a)。海冰密集度和反照率去趋势后的相关性表明,6个海域海冰区反照率与海冰密集度均呈现显著正相关关系(表 5),因此海冰密集度是影响海冰区反照率的重

要因素之一。

降雪造成的海冰表面覆盖的积雪会极大地改变海冰的表面反照率<sup>[39]</sup>,因此积雪的冻融事件是影响海冰反照率的另一个重要因素<sup>[40]</sup>,而气温则是影响冻融事件的直接要素,对海冰区的反照率有着直接的影响。1983–2022年,南极及其多个海域夏季海冰区反照率与气温呈现显著负相关关系(图 6b),即气温越

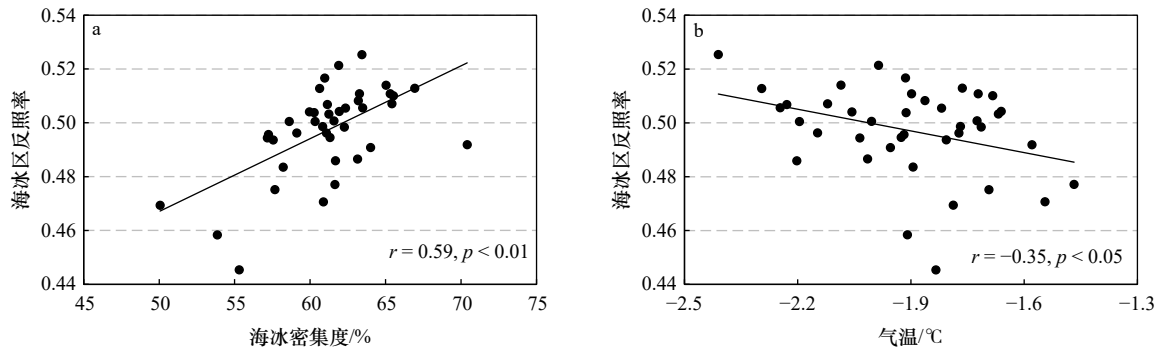


图 6 1983–2022 年南极夏季海冰区反照率与海冰密集度(a)和气温(b)的关系

Fig. 6 The relationships between albedo in sea ice regions and sea ice concentration (a) and air temperature (b) of Antarctica in summer from 1983 to 2022

表 5 1983–2022 年南极及其 6 个海域夏季海冰区反照率与海冰密集度和气温的相关系数及显著性

Table 5 Correlation coefficients and corresponding significances between albedo in sea ice region and sea ice concentration and air temperature of Antarctica and six sea sectors in summer from 1983 to 2022

	海冰密集度	气温
印度洋扇区	0.55**	-0.06
别林斯高晋海-阿蒙森海	0.91**	-0.11
罗斯海	0.76**	-0.44**
太平洋扇区	0.81**	-0.07
东威德尔海	0.78**	-0.32*
西威德尔海	0.77**	-0.57**
南极	0.59**	-0.41**

注: \*\*和\*分别表示0.01和0.05显著性水平。

高,海冰区反照率越低。特别的,2021年和2022年反照率与气温的离散程度较高。通常而言,在其他因素影响较小时,气温主导了反照率的变化。但是,反照率的变化受到多个因子协同作用的影响。尤其是在近些年,海冰密集度较低、SAM较高的情况下,海冰面积在减小,并且在2022年达到最小值,导致了研究期内最低的反照率,而气温没有明显的变化,因而离散程度较高。南极多个海域观测到夏季海冰区反照率与气温的负相关关系,西南极海域海冰区反照率与气温的相关关系一般强于东南极,其中西威德尔海反照率与气温关系最为密切(表5)。气温对西南极海冰区反照率变化的影响大于东南极。

气温一方面可以影响海冰表面的反照率,另一方面也会改变海冰密集度,最终造成相应海域反照率的变化。1983–2015年南极夏季气温降低减缓了海冰消融,从而也造成了海冰密集度的升高,导致反射的太

阳辐射增多,最终海冰区反照率也随着微弱上升;2015–2022年南极夏季气温反转为升高趋势,海冰消融加剧,冰间水道、开阔水域增多,造成海冰密集度降低(表4),海冰区吸收更多的太阳辐射,造成反射辐射减小,海冰区反照率出现反转,快速下降。最终导致整个研究时段南极夏季海冰区反照率呈微弱下降趋势。所分析的两个影响因子均在2015–2022年出现了趋势的反转,共同促进了南极夏季海冰区反照率变化趋势由正到负的变化。其中,海冰密集度与海冰区反照率的关系最为密切,这也与文献[27]的结果一致。6个海域中,太平洋对2015–2022年反照率的逆转变化贡献最大,紧接着是西威德尔海和东威德尔海(表3)。这3个海域海冰密集度降低速度最快,气温升高,造成3个海域海冰区反照率分别降低了0.12、0.08和0.08,共同促进南极平均反照率降低0.06。除此之外,海冰类型、海冰厚度和降雪也会改变海冰区的反照率<sup>[25,41]</sup>,在不考虑其他因素的前提下,多年冰、厚冰和降雪通常具有或可以形成较厚的海冰表面积雪覆盖,从而提高海冰区的反照率。

#### 4.3 大气环流、海流对海冰区反照率的影响

南极环状模(SAM)又称南极涛动(Antarctic Oscillation, AAO)。Nan和Li<sup>[42]</sup>基于Gong和Wang<sup>[43]</sup>的研究成果将SAM指数定义为40°~70°S之间归一化纬向平均海平面气压差。后续多项研究均使用该定义计算SAM指数<sup>[44–45]</sup>,也有研究将SAM定义为20°S以南850 hPa位势高度异常经过经验正交函数分解后的第一模态<sup>[46]</sup>。采用常用且易于计算的Nan和Li<sup>[42]</sup>方法得到1983–2022年夏季SAM指数。同时利用NOAA气候预测中心(Climatic Prediction Center, CPC)提供的AAO数据进行对比,用于证明计算的SAM是可信的。

计算获得的SAM指数与CPC提供的数据相关性达到0.97,且均表明SAM存在1~3年的年际变化规

律。虽然 SAM 波动较大,但总体呈现增加的变化趋势(图 7a)。两者数值上存在较大差异,这是由于两者采取的计算方法有所不同。虽然数值上存在差异,但 SAM 变化高度一致,且正负值出现的年份基本一致。SAM 指数与海冰区反照率的关系存在明显的区域差异,在威德尔海大部分海域观测到反照率与 SAM 显著的正相关关系,而在罗斯海和印度洋观测到反照率与 SAM 显著的负相关关系,表明海冰区反照率对 SAM 存在偶极响应(图 7b)。随着夏季 SAM 增强,观测到西风急流增强并向极地移动,同时海洋埃克曼抽吸和输送增强<sup>[47]</sup>。当 SAM 为正时,别林斯

高晋海–阿蒙森海存在异常低压,威德尔海具有更强烈的偏北风,罗斯海具有更强烈的偏南风<sup>[46]</sup>。因此,威德尔海海冰在北移海流的驱动下北移,造成高纬度海域形成上升流,在上升流的作用下将下层寒冷的冬季海水带上表层,海表温度降低,海冰面积增大,促进海冰区反照率升高。相反,罗斯海海冰在南移海流的作用下向南移动,海表温度升高,海冰面积减少,促使海冰区反照率降低。其他低相关性区域 SAM 对海冰区反照率的影响很大程度上被其他因子抵消了。此外,海冰的平流运输也会影响海冰的空间分布,进而影响海冰反照率的变化。

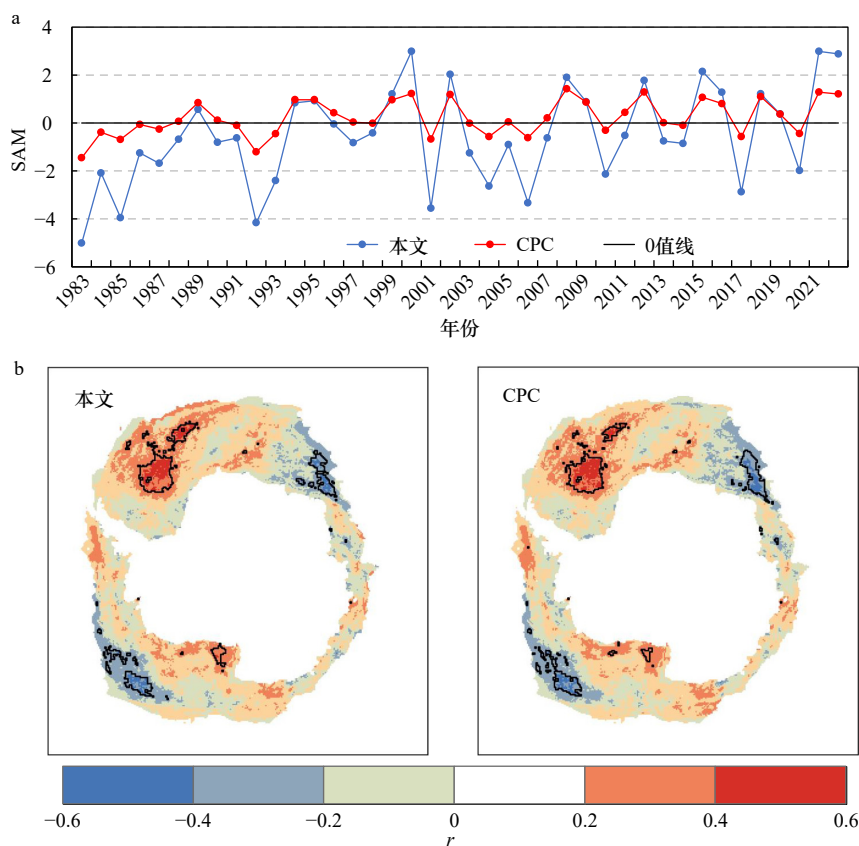


图 7 1983–2022 年南极夏季 SAM 变化(a)和 SAM 与海冰区反照率的关系(b)

Fig. 7 Changes in summer Antarctic SAM from 1983 to 2022 (a) and the relationship between albedo in sea ice regions and SAM of Antarctica in summer (b)

图 b 中黑色框所指区域通过了 95% 显著性水平检验

Regions indicated by black box in figure b means these trends above 95% significance level

综上, SAM 可以调节威德尔海、罗斯海和印度洋扇区海冰区反照率变化,但对其他海域的影响很小。因此对于整个南极而言, SAM 与反照率的负相关关系不显著,但部分年份 SAM 极大值与反照率极小值对应(2002 年和 2008 年), SAM 极小值与反照率极大值对应(1987 年、1997 年、2014 年和 2017 年)。以上结果揭示了南极海冰区反照率变化的复杂性。

## 5 结论

利用 CLARA-A2 反照率数据计算了南极及其 6 个海域夏季海冰区反照率,评估了反照率数据的可靠性。分析了 1983–2022 年、1983–2015 年和 2015–2022 年 3 个时段南极和各海域夏季海冰区反照率时空变化。然后探讨了对应时段海冰密集度、气温的

变化,及其与海冰区反照率的关系。最后从大气环流角度结合海洋环流分析海冰区反照率变化的原因,得出如下结论:

CLARA-A2 反照率和 ASPeCt 现场观测反照率一致性较好。1983–2015 年南极夏季海冰区反照率呈上升趋势,2015–2022 年呈显著下降趋势,造成 1983–2022 年南极夏季海冰区反照率呈现微弱的下降趋势。6 个海域中,别林斯高晋海–阿蒙森海 1983–2015 年海冰区反照率呈现降低趋势,2015–2022 年呈现加速降低趋势。其余海域变化与南极一致,海冰区反照率趋势均由正转负。海冰区反照率的空间差异大,夏季西威德尔海海冰区多年平均反照率高至 0.61,罗斯海低至 0.45。

海冰密集度空间分布与海冰区反照率相似,西威德尔海海冰密集度高,罗斯海和埃默里冰架附近的海冰密集度低。1983–2015 年南极夏季海冰密集度呈现增加趋势,气温呈降低趋势,而 2015–2022 年南极夏季海冰密集度、气温与 1983–2015 年呈现相反的变化。6 个海域中,至少一半海域的海冰密集度、气温的变化与整个南极的变化一致。南极夏季海冰区反

照率和海冰密集度显著正相关,和气温有显著负相关关系。2015–2022 年南极夏季海冰密集度的降低、气温的升高,共同促进了 2015–2022 年海冰区反照率趋势相对于 1983–2015 年由升到降的转变。

近 40 年来 SAM 指数呈现向正值发展的变化,其对海冰区反照率的影响存在明显的区域差异。当 SAM 为正,罗斯海盛行强烈的偏南风,威德尔海盛行强烈的偏北风,促进埃克曼抽吸和输送增强以及形成上升流或下降流。SAM 和海流共同促进夏季罗斯海海冰区反照率的降低和威德尔海海冰区反照率的升高。当然,本文只考虑了海冰密集度和气温与海冰区反照率的关系,且主要从动力学角度分析大气环流和海洋环流对海冰区反照率的影响,未来还需从热力学、动力学两个角度结合更多气候要素来更全面地分析海冰区反照率变化的驱动机制。此外,需要指出的是,研究时段为 1983–2022 年,相关的分析和讨论仅能代表该时段内的情况。未来可以结合更长时间序列的数据进一步探究南极海冰区反照率的长期变化趋势及相关机制。

#### 参考文献:

- [1] 丁永建,张世强. 冰冻圈水循环在全球尺度的水文效应[J]. *科学通报*, 2015, 60(7): 593–602.  
Ding Yongjian, Zhang Shiqiang. The hydrological impact of cryosphere water cycle on global-scale water cycle[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2015, 60(7): 593–602.
- [2] Curry J A, Schramm J I, Ebert E E. Sea ice-albedo climate feedback mechanism[J]. *Journal of Climate*, 1995, 8(2): 240–247.
- [3] Kattsov V M, Ryabinin V E, Overland J E, et al. Arctic sea-ice change: a grand challenge of climate science[J]. *Journal of Glaciology*, 2010, 56(200): 1115–1121.
- [4] Dickinson R E. Land surface processes and climate-surface albedos and energy balance[J]. *Advances in Geophysics*, 1983, 25: 305–353.
- [5] Holland M M, Landrum L, Raphael M N, et al. The regional, seasonal, and lagged influence of the Amundsen Sea Low on Antarctic sea ice[J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(20): 11227–11234.
- [6] Holloway G, Sou T. Has Arctic sea ice rapidly thinned?[J]. *Journal of Climate*, 2002, 15(13): 1691–1701.
- [7] Parkinson C L, Cavalieri D J. Arctic sea ice variability and trends, 1979–2006[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113(C7): C07003.
- [8] Massom R A, Eicken H, Hass C, et al. Snow on Antarctic sea ice[J]. *Reviews of Geophysics*, 2001, 39(3): 413–445.
- [9] Riihelä A, Laine V, Manninen T, et al. Validation of the Climate-SAF surface broadband albedo product: comparisons with *in situ* observations over Greenland and the ice-covered Arctic Ocean[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(11): 2779–2790.
- [10] Laine V, Manninen T, Riihelä A. High temporal resolution estimations of the Arctic sea ice albedo during the melting and refreezing periods of the years 2003–2011[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 140: 604–613.
- [11] Wang Z, Meredith M P. Density-driven Southern Hemisphere subpolar gyres in coupled climate models[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(14): L14608.
- [12] Wang Z, Kuhlbrodt T, Meredith M P. On the response of the Antarctic Circumpolar Current transport to climate change in coupled climate models[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2011, 116(C8): C08011.
- [13] Parkinson C L, Cavalieri D J. Antarctic sea ice variability and trends, 1979–2010[J]. *The Cryosphere*, 2012, 6(4): 871–880.
- [14] He L Y, Ke C Q, Zhou X B, et al. Antarctic sea ice change based on a new sea ice dataset from 1992 to 2008[J]. *Climate Research*, 2017, 71(2): 155–169.
- [15] 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.
- [16] Simpkins G R, Ciasto L M, England M H. Observed variations in multidecadal Antarctic sea ice trends during 1979–2012[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(14): 3643–3648.
- [17] Cavalieri D J, Parkinson C L. Arctic sea ice variability and trends, 1979–2010[J]. *The Cryosphere*, 2012, 6(4): 881–889.

- [18] Laine V. Antarctic ice sheet and sea ice regional albedo and temperature change, 1981–2000, from AVHRR Polar Pathfinder data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(3): 646–667.
- [19] Raphael M N, Handcock M S. A new record minimum for Antarctic sea ice[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2022, 3(4): 215–216.
- [20] Turner J, Holmes C, Caton Harrison T, et al. Record low Antarctic sea ice cover in February 2022[J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, 49(12): e2022GL098904.
- [21] Eayrs C, Li Xichen, Raphael M N, et al. Rapid decline in Antarctic sea ice in recent years hints at future change[J]. *Nature Geoscience*, 2021, 14(7): 460–464.
- [22] 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.
- [23] Zhou Xiaobing, Li Shusun, Morris K, et al. Albedo of summer snow on sea ice, Ross Sea, Antarctica[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2007, 112(D16): D16105.
- [24] Pirazzini R. Surface albedo measurements over Antarctic sites in summer[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2004, 109(D20): D20118.
- [25] Brandt R E, Warren S G, Worby A P, et al. Surface albedo of the Antarctic sea ice zone[J]. *Journal of Climate*, 2005, 18(17): 3606–3622.
- [26] Hao Guanghua, Pirazzini R, Yang Qinghua, et al. Spectral albedo of coastal landfast sea ice in Prydz Bay, Antarctica[J]. *Journal of Glaciology*, 2021, 67(261): 126–136.
- [27] Shao Zhude, Ke Changqing. Spring-summer albedo variations of Antarctic sea ice from 1982 to 2009[J]. *Environmental Research Letters*, 2015, 10(6): 064001.
- [28] Riihelä A, Bright R M, Anttila K. Recent strengthening of snow and ice albedo feedback driven by Antarctic sea-ice loss[J]. *Nature Geoscience*, 2021, 14(11): 832–836.
- [29] Zhou Chunxia, Zhang Trng, Zheng Lei. The characteristics of surface albedo change trends over the Antarctic sea ice region during recent decades[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(7): 821.
- [30] Zhang Teng, Zhou Chunxia, Zheng Lei. Analysis of the temporal–spatial changes in surface radiation budget over the Antarctic sea ice region[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 666: 1134–1150.
- [31] Li Huan, Xie Hongjie, Kern S, et al. Spatio-temporal variability of Antarctic sea-ice thickness and volume obtained from ICESat data using an innovative algorithm[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 219: 44–61.
- [32] Xiong Xiaozhen, Stamnes K, Lubin D. Surface albedo over the arctic ocean derived from AVHRR and its validation with SHEBA data[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2002, 41(4): 413–425.
- [33] Riihelä A, Manninen T, Laine V, et al. CLARA-SAL: a global 28 yr timeseries of Earth’s black-sky surface albedo[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, 13(7): 3743–3762.
- [34] Satellite Application Facility on Climate Monitoring. Algorithm Theoretical Basis Document CM SAF Cloud, Albedo, Radiation data record, AVHRR-based, Edition 2.1 (CLARA-A2.1) Surface Albedo[R/OL]. [2022–11–18]. [https://www.cmsaf.eu/SharedDocs/Literatur/document/2020/saf\\_cm\\_fmi\\_atbd\\_gac\\_sal\\_2\\_4\\_pdf.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.cmsaf.eu/SharedDocs/Literatur/document/2020/saf_cm_fmi_atbd_gac_sal_2_4_pdf.pdf?__blob=publicationFile).
- [35] Satellite Application Facility on Climate Monitoring. Product User Manual ICDR AVHRR–based on CLARA-A2 methods Surface Albedo[R/OL]. [2022–11–18]. [https://www.cmsaf.eu/SharedDocs/Literatur/document/2021/saf\\_cm\\_fmi\\_icdr\\_clara\\_sal\\_pum\\_2\\_1\\_pdf.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.cmsaf.eu/SharedDocs/Literatur/document/2021/saf_cm_fmi_icdr_clara_sal_pum_2_1_pdf.pdf?__blob=publicationFile).
- [36] Karlsson K G, Anttila K, Trentmann J, et al. CLARA-A2: the second edition of the CM SAF cloud and radiation data record from 34 years of global AVHRR data[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, 17(9): 5809–5828.
- [37] Allison I, Brandt R E, Warren S G. East Antarctic sea ice: albedo, thickness distribution, and snow cover[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1993, 98(C7): 12417–12429.
- [38] Lei Ruibo, Tian-Kunze Xiangshan, Leppäranta M, et al. Changes in summer sea ice, albedo, and partitioning of surface solar radiation in the Pacific Sector of Arctic Ocean during 1982–2009[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2016, 121(8): 5470–5486.
- [39] Perovich D K, Nghiem S V, Markus T, et al. Seasonal evolution and interannual variability of the local solar energy absorbed by the Arctic sea ice-ocean system[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2007, 112(C3): C03005.
- [40] Riihelä A, Manninen T, Laine V. Observed changes in the albedo of the Arctic sea-ice zone for the period 1982–2009[J]. *Nature Climate Change*, 2013, 3(10): 895–898.
- [41] Weiss A I, King J C, Lachlan-Cope T A, et al. Albedo of the ice covered Weddell and Bellingshausen Seas[J]. *The Cryosphere*, 2012, 6(2): 479–491.
- [42] Nan Sulan, Li Jianping. The relationship between the summer precipitation in the Yangtze River valley and the boreal spring Southern Hemisphere annular mode[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(24): 2266.
- [43] Gong Daoyi, Wang Shaowu. Definition of Antarctic oscillation index[J]. *Geophysical Research Letters*, 1999, 26(4): 459–462.
- [44] Feng Juan, Li Jianping, Li Yun. Is there a relationship between the SAM and southwest Western Australian winter rainfall?[J]. *Journal of Climate*, 2010, 23(22): 6082–6089.
- [45] Yuan Zhengxuan, Qin Jun, Li Shuanglin, et al. Impact of boreal autumn Antarctic Oscillation on winter wet-cold weather in the middle-

- lower reaches of Yangtze River Basin[J]. *Climate Dynamics*, 2022, 58(1/2): 329–349.
- [46] 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.
- [47] Purich A, Cai Wenju, England M H, et al. Evidence for link between modelled trends in Antarctic sea ice and underestimated westerly wind changes[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 10409.

## The analysis on reversal of variation trend in the summer albedo of Antarctic sea-ice zone from 1983 to 2022

Ke Changqing<sup>1</sup>, Li Haili<sup>1</sup>, Shen Xiaoyi<sup>1</sup>

(1. School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** The albedo of Antarctic sea-ice zone (ASZ) can affect the radiation budget and thus has essential influence on global climate change. Using the albedo product from satellite application facility on climate monitoring, the spatio-temporal variations of summer albedo in sea-ice zone from 1983 to 2022 in Antarctica and six sea sectors were analyzed, the relationships between ASZ albedo and sea ice concentration (SIC), air temperature and atmospheric circulation were also quantified. Results show that the albedo retrieved from satellite is consistent to that obtained from *in situ* observations and thus the satellite-based albedo is reliable. Among the six sea sectors, Weddell West has the highest multi-year averaged albedo of 0.61, whilst Ross Sea features the lowest one of 0.45. Albedo of ASZ in summer experienced gradual increases before 2015 followed by the rapid decline (2015–2022). All sea sectors have similar ASZ albedo variations to that of Antarctica, excepting for Bellingshausen-Amundsen Seas where decreases can be found in both two periods. ASZ albedo is positively correlated to SIC and negatively related to air temperature. From 1983 to 2015, the decreased summer air temperature weakened the sea ice ablation and the SIC increased slightly (0.03%/a), sea ice area increased by  $2.07 \times 10^5 \text{ km}^2$  per decade on average, all of these led to the increase of reflected solar radiation and sea-ice zone albedo. During the summer from 2015 to 2022, as the increased temperature enhanced the sea ice ablation, more leads and open water appeared, and then decreased the SIC. The sea-ice zone thus absorbed more solar radiation and had less reflected radiation, which leads to a rapid decline of the albedo. In addition, the Antarctic annular mode is one of the driving factors changing the albedo in sea-ice zone in the Ross Sea and Weddell Sea.

**Key words:** Antarctic summer sea ice; albedo; spatio-temporal variation; air temperature; sea ice concentration; atmospheric circulation