DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2017.xxxx

ZHANG Lei, XU Bin, SHI Chunxiang, et al. Analysis of sea ice area change in the Arctic and Antarctic based on the satellite climate data during 1989 – 2015 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(6): xxxx – xxxx. [张雷, 徐宾, 师春香, 等. 基于卫星气候资料的 1989 – 2015 年南北极海冰面积变化分析[J]. 冰川冻土, 2017, 39(6): xxxx – xxxx.]

# 基于卫星气候资料的 1989-2015 年南北极海冰面积变化分析

张 雷<sup>1</sup>, 徐 宾<sup>1</sup>, 师春香<sup>1</sup>, 周自江<sup>1</sup>, 任国玉<sup>2</sup> (1.中国气象局国家气象信息中心,北京100081; 2.中国气象局气候研究开放实验室/国家气候中心,北京100081)

**摘 要:**利用被动微波卫星海冰密集度气候资料,分析了 1989 - 2015 年南北极海冰面积和密集度的长期变化趋势。结果表明:研究期内北极年平均海冰面积减少,南极海冰面积增加,变化趋势分别为-0.569×10<sup>6</sup> km<sup>2</sup> · (10a)<sup>-1</sup>和0.327×10<sup>6</sup> km<sup>2</sup> · (10a)<sup>-1</sup>,均通过了 0.01 水平的显著性检验,两极海冰面积变化趋势表现出明显的"非对称性"。两极总海冰面积出现了下降,变化趋势为-0.242×10<sup>6</sup> km<sup>2</sup> · (10a)<sup>-1</sup>。年海冰密集度在北极地区普遍减少,而在南极地区的变化趋势存在显著的空间差异,威德尔海、罗斯海北部海冰密集度增加,趋势超过了 10% · (10a)<sup>-1</sup>,别林斯高晋海、阿蒙森海的海冰密集度出现下降。北极各月海冰面积的变化趋势存在明显的季节差异,7-10月海冰面积减少明显,其中9月减少最显著,趋势为-0.955×10<sup>6</sup> km<sup>2</sup> · (10a)<sup>-1</sup>。南北极海冰冻结和融化的时间不完全对应,北极融化与冻结时间基本平衡,南极海冰冻结时间明显长于融化时间。南极年内海冰面积的变化幅度大于北极,呈现显著的季节性特征。北极极小海冰面积的变化趋势最显著,达到了-0.636×10<sup>6</sup> km<sup>2</sup> · (10a)<sup>-1</sup>。南极极大海冰面积出现的时间后移明显,趋势为0.733 侯/(10a);极小海冰面积出现的时间非常稳定,没有明显的变化趋势。

关键词: 气候变化; 海冰; 北极; 南极; 卫星 中图分类号: P731.15/P941.6 文献标志码: A

## 0 引言

极地是地球热机运转的冷源所在地,极地海冰 的变化通过影响大气、海洋的热量输送以及海-气 间的热量交换,影响全球能量和物质的循环<sup>[1-3]</sup>。 极地海冰对气候变化存在敏感的反馈与响应机制, 使其成为全球变化和可持续发展研究的热点之 一<sup>[4-8]</sup>。北极、南极海冰变化通过气候系统成员之 间的相互作用,可以影响欧亚大陆特别是中国的天 气气候<sup>[9-14]</sup>。因此,在全球气候变化背景下,开展 两极海冰覆盖变化的研究具有重要意义。

极地海冰面积的变化备受社会关注,国内外均 开展了该方面的研究<sup>[15-17]</sup>。马丽娟等<sup>[18]</sup>利用 文章编号: 1000-0240(2017)06-0xxx-09

Hadley 中心提供的全球海冰密集度格点资料,发现 南极海冰最多和最少期分别出现在9月和2月。张 璐等<sup>[19]</sup>研究指出1979-2007年北极海冰呈快速衰 减趋势,夏季以每10年超过10%的变化幅度快速 减少。刘艳霞等<sup>[20]</sup>基于被动微波辐射计海冰密集 度数据的研究表明,1979-2014年北极海冰范围明 显减小,南极海冰范围略微增大。Parkinson 和 Cavalieri<sup>[21-22]</sup>利用1979-2010年卫星微波传感器 SMMR(Scanning Multichannel Microwave Radiometer)、SSM/I(Special Sensor Microwave/Imager)和 SSMIS(Special Sensor Microwave Imager/Sounder) 的海冰密集度资料,发现北极海冰面积快速减小, 南极海冰面积不断增加,趋势分别为(-0.496 ±

收稿日期: 2017-05-09;修订日期: 2017-11-16

基金项目:国家气象信息中心青年科技基金项目(NMICQJ201613);国家自然科学基金项目(91437220);公益性行业(气象)科研专项 (GYHY201506002;GYHY201206012;GYHY201206001);国家气象科技创新工程攻关任务项目"气象资料质量控制及多源数 据融合与再分析"资助

作者简介:张雷(1980-),男,河北沧州人,高级工程师,2014年在南京信息工程大学获博士学位,从事气候变化、海洋数据研究. E-mail:zhang\_lei@cma.gov.cn.

土

39 卷

0.04)×10<sup>6</sup> km<sup>2</sup> · (10a)<sup>-1</sup>和(0.153±0.03)×10<sup>6</sup> km<sup>2</sup> · (10a)<sup>-1</sup>。Comiso<sup>[23]</sup>的研究表明,1979 – 2015年间北极和南极海冰面积月距平序列的变化 趋势分别达到(-0.503±0.017)×10<sup>6</sup> km<sup>2</sup> · (10a)<sup>-1</sup>和(0.245±0.018)×10<sup>6</sup> km<sup>2</sup> · (10a)<sup>-1</sup>。IPCC<sup>[24]</sup>指出,1979 – 2012年北极海冰范围缩小趋势为(-3.5%~-4.1%) · (10a)<sup>-1</sup>,南极海冰范围以(1.2%~1.8%) · (10a)<sup>-1</sup>的趋势增大,存在显著的区域差异,大部分区域在增大,但有些区域在缩小。此处需要指出,海冰范围和海冰面积的定义存在差异。

目前关于两极海冰面积变化的研究,大多是基 于多个卫星微波传感器的长期观测数据,并对数据 进行时间一致性等处理的基础上开展的,并没有使 用一套经过严格标准生成的海冰密集度气候数据集 进行研究。这样可能会造成海冰面积变化趋势和变 率等方面的分析存在问题。

本文基于卫星微波传感器的海冰密集度气候数 据集,对1989-2015年南北极海冰覆盖面积的变 化趋势进行了定量估计,给出两极海冰覆盖的气候 学分析,研究两极海冰面积变化趋势的异同,并讨 论差异存在的可能原因。

## 1 资料与方法

本文采用美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)与 美国国家冰雪数据中心(National Snow and Ice Data Center, NSIDC) 发布的 Climate Data Record of Passive Microwave Sea Ice Concentration, Version 2<sup>[25-26]</sup>逐日和逐月卫星被动微波辐射计海冰密集度 资料(http://nsidc. org/data/docs/noaa/g02202\_ice conc cdr/index. html#cdr flags) 进行研究。数据的 空间分辨率为 25 km; 起止时间为 1987 年 11 月至 2015年12月,开始年份数据不稳定,因此本文从 1989年开始使用。利用欧洲中期天气预报中心 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)研制的 ERA-Interim 再分析资料的 vertical integral of northward total energy flux 数 据<sup>[27]</sup>,分析大气总能量的经向输送。资料的时间 分辨率为6h,空间分辨率为1°×1°。

美国积累了长期的卫星遥感地球观测资料。由 NOAA 发起的卫星气候数据集(Climate Data Records, CDR)研制计划将存档的历史卫星资料处理 成气候数据,用于气候变化和变率研究<sup>[28]</sup>。Climate Data Record of Passive Microwave Sea Ice Concentration 是 CDR 计划多个气候要素数据集之一。

SSM/I和 SSMIS 传感器是搭载在美国国防部 所属的极轨 DMSP(Defense Meteorological Satellite Program)系列卫星上的主要传感器。较早的 SSM/I 传感器包括 19.35 GHz、23.235 GHz、37.0 GHz、 85.5 GHz 等4个频率, H/V 双极化共7个通道, 后期的 SSMIS 传感器有24个通道,用于海冰密集 度反演的通道被很好地继承(见表1)。

表1 卫星数据的基本信息

Table 1 Basic	information about t	the used satellite data
卫星	传感器	数据起止日期
DMSP-F8	SSM/I	1987-07-09/1991-12-02
DMSP-F11	SSM/I	1991-12-03/1995-09-30
DMSP-F13	SSM/I	1995-10-01/2007-12-31
DMSP-F17	SSMIS	2008-01-01/2015-12-31

为进一步保证海冰密集度资料的质量,对两极 逐日海冰面积序列进行了质量控制。质控过程按以 下步骤进行:①确定1989-2015年为气候参考期, 计算该期间内逐日海冰面积的均值和标准差。②超 出平均值3倍标准差的记录被标记为可疑值,根据 历年情况对记录进行人工判断,合理的记录保留, 不合理的记录按缺测值处理。③所有缺测值取本站 1989-2015年记录的平均值。海冰面积距平是海 冰面积与参考期平均海冰面积的差值。

在进行区域平均时,考虑到海冰密集度数据为 等面积数据,采用了算数平均的方法。使用最小二 乘法对海冰面积距平序列的变化趋势进行估计,并 用 *t* 检验方法判断线性趋势的显著性水平。

## 2 结果与分析

#### 2.1 年海冰密集度距平的长期趋势

图1展示了1989-2015年北极、南极和两极 海冰面积的距平序列。研究期内北极、南极海冰面 积均出现了明显的变化,北极海冰面积减少,南极 海冰面积增加。北极、南极海冰面积距平的变化趋 势分别为-0.569×10<sup>6</sup>km<sup>2</sup> · (10a)<sup>-1</sup>和0.327×10<sup>6</sup>km<sup>2</sup> · (10a)<sup>-1</sup>,均通了0.01水平的显著性检验。 由于北极海冰面积减少比南极海冰面积增加趋势更 明显,两极总海冰面积出现了下降,变化趋势为 -0.242×10<sup>6</sup>km<sup>2</sup> · (10a)<sup>-1</sup>。北极在2007、2012 年出现了年海冰面积的历史低值,而南极在2014 年出现了年海冰面积的高值。20世纪 80 年代初至



图 1 1989-2015 年北极、南极和两极海冰面积距平序列 Fig. 1 Variations of the anomaly of sea ice area (SIA) in the Arctic (a), Antarctic (b) and both (c) from 1989 to 2015

90年代中期两极总海冰覆盖面积距平波动平缓, 2000年后总海冰面积的波动幅度明显增大。

图 2 给出了 1989 – 2015 年研究区域年海冰密 集度趋势分布。

北极地区海冰密集度以减少为主,巴伦支海以 及新地岛以北区域的海冰密集度显著减少,变化趋 势最大达到 - 20% · (10a)<sup>-1</sup>。波弗特海北部、拉 普捷夫海西北部海冰密集度明显减少,格陵兰岛两 侧的格陵兰海、巴芬湾海域海冰密集度也出现减 少,但白令海的海冰密集度出现了增加。

南极地区主要以海冰密集度增加为主。在威德尔海、罗斯海北部区域,海冰密集度增加趋势超过了10% · (10a)<sup>-1</sup>。小部分海域海冰密集度出现了下降,其中别林斯高晋海、阿蒙森海域的海冰密集度下降明显,最大变化趋势达到了 – 10% · (10a)<sup>-1</sup>。

### 2.2 月平均海冰密集度距平的长期趋势

图 3、表 2 分别为 1989 - 2015 年北极、南极逐 月海冰面积距平序列和相应的变化趋势。北极各月 海冰面积均呈减少趋势,7-10 月北极海冰面积减 少趋势明显,9月减少最显著,趋势为-0.955×10<sup>6</sup> km<sup>2</sup> · (10a)<sup>-1</sup>,通过了 0.01 水平的显著性检验。 在 2007、2012 年出现了极低值,较往年减少 1.5×10<sup>6</sup>~2.0×10<sup>6</sup> km<sup>2</sup>。3-5 月北极海冰面积 减少趋势最小,9月北极海冰面积减少趋势为4月 减少趋势[-0.209×10<sup>6</sup> km<sup>2</sup> · (10a)<sup>-1</sup>]的4 倍多。 北极海冰面积各月的变化趋势存在明显的季节 差异。

研究期內南极各月海冰面积均出现增加,相对 北极海冰的变化,南极海冰变化趋势各月之间的差 异较小,季节差异不明显。最大变化趋势出现在12 月、6月,变化趋势分别为0.468×10<sup>6</sup> km<sup>2</sup> · (10a)<sup>-1</sup>和0.416×10<sup>6</sup> km<sup>2</sup> · (10a)<sup>-1</sup>,均通过了



图 2 1989-2015 年北极、南极年海冰密集度趋势分布

Fig. 2 The trend distributions of annual sea ice concentration (SIC) in the Arctic (a) and Antarctic (b) from 1989 to 2015



图 3 1989 - 2015 年北极、南极逐月海冰面积距平序列

Fig. 3 The anomalies of monthly SIA in the Arctic (a) and Antarctic (b) from 1989 to 2015

	表 2 1989 – 2015 年北极和南极海冰面积距平序列变化趋势						
Table 2	The trends of SIA anomalies in the Arctic and Antarctic from 1989 to 2015	$10^{6} \text{ km}$					

		Table	2 The t	rends of	SIA anom	nalies in t	he Arctic	and Anta	rctic from	1989 to	2015	$10^6 \text{ km}^2 \cdot$	$(10a)^{-1}$
	1月	2 月	3月	4 月	5 月	6月	7 月	8月	9月	10 月	11 月	12 月	全年
北极	-0.508 * *	* -0.472 * *	* -0.360 * *	-0.209 *	-0.264 * *	-0.495 * *	-0.733 * *	-0.835 * *	-0.955 * *	-0.900 * *	-0.580 * *	* -0.518 * *	-0.569 * *
南极	0.280 *	0. 183 *	0.203	0.310 *	0.328 * *	0.416 * *	0. 394 * *	0.287 * *	0.324 * *	0.372 * *	0.355 * *	* 0.468 * *	0.327 * *
	ナニッズットの		바 니 나 ㅋ٨	+ - >>	Lo of Litt								

注: \*表示通过0.05 水平显著性检验, \* \*表示通过0.01 水平显著性检验。

0.01 水平的显著性检验。最小的变化趋势出现在2月,其变化趋势为0.183×10<sup>6</sup> km<sup>2</sup> · (10a)<sup>-1</sup>。

## 2.3 候平均海冰密集度距平的长期趋势

由图4可以看出,海冰面积呈现季节性变化特 点,即海冰夏季融化减少,冬季冻结增加。北极最 大海冰面积出现在第13候左右,然后开始逐渐融 化,第51候附近达到最小值。北极海冰冻结时间 长度为35候,融化时间为37候左右,冻结与融化 时间基本平衡。南极在第11候附近海冰面积出现 最小值,随后不断增加,第53候左右海冰面积达到 峰值,然后迅速减少。南极海冰冻结时间为42候, 融化时间在 30 候左右,海冰冻结的时间明显长于 融化的时间。

两极海冰面积的季节变化非常显著,太阳辐射 在冬至、夏至达到极值,气温极值出现的时间滞后 于太阳辐射,由于海冰融化和冻结需要吸收和释放 大量热量,存在长时间的能量累积过程,海冰面积 的季节变化明显滞后于太阳辐射和气温的季节变 化。风和海浪等因素也会影响海冰的融化与消散。

南极极大、极小海冰面积分别大于和小于北极 极大、极小海冰面积,说明南极海冰面积具有明显 的季节性变化特征。南极年内海冰面积的变化幅度



注:黑实线为平均值,灰色区域表示标准差。 图 4 1989 – 2015 年北极、南极海冰面积逐候平均值 Fig. 4 The pentadly variations of the mean SIA in the Arctic (a) and Antarctic (b) from 1989 to 2015

大于北极,分别为15.0×10<sup>6</sup> km<sup>2</sup>和9.38×10<sup>6</sup> km<sup>2</sup> (图4)。这反映出南极地区多为一年期的海冰,而 北极地区多年冰的面积较大。对比两极地区逐候海 冰面积的标准差,发现北极地区的标准差总体大于 南极,且出现极小海冰面积时期的标准差最大,反 映出该时期北极地区海冰面积的波动性最强。

图 5、表 3 给出了 1989 - 2015 年北极和南极的 极大、极小及差值的海冰面积距平序列与变化趋势。从趋势上看,北极地区极大和极小海冰面积均 呈现显著减少趋势,南极地区极大和极小海冰面积 均明显增加,其中北极极小海冰面积距平序列的变 化趋势最明显,变化趋势达到了 - 0.636 × 10<sup>6</sup> km<sup>2</sup> · (10a)<sup>-1</sup>,通过了 0.01 水平的显著性检验。 两极极大、极小海冰面积差均增大,反映两极海冰





Fig. 5 The variations of anomalies of maximum (a), minimum (b) and difference (c) SIA in Arctic and Antarctic from 1989 to 2015

表 3 1989 - 2015 年北极和南极最大、最小海冰面积 距平序列变化趋势

Table 3 The maximum and minimum SIA anomalies in the Arctic and Antarctic from 1989 to 2015  $10^6 \text{ km}^2 \cdot (10a)^{-1}$ 

	最大	最小	最大 - 最小
北极	-0.362 * *	-0.636 * *	0.274 *
南极	0.327 * *	0.198 *	0.129

注: \* 表示通过 0.05 水平显著性检验, \* \* 表示通过 0.01 水 平显著性检验。 面积年内的变化幅度呈增加趋势,但只有北极地区 面积差的趋势通过了显著性检验。

图 6 给出了 1989 - 2015 年两极最大和最小海 冰面积出现时间的候数序列。在趋势上,北极极 大、极小面积出现的时间均出现了后移的现象,但 不明显。南极极大海冰面积出现时间的后移比较明 显,达到了 0.733 侯/(10a),但未通过了 0.05 水 平的显著性检验。南极极小海冰面积出现的时间非 常稳定,没有明显的变化趋势。从序列波动的幅度 可以看出,在北极和南极极小海冰面积出现的日期 相对最大面积出现日期更加稳定,尤其是南极极小 面积出现的范围只有 3 候。

## 3 讨论

目前大多研究使用时间一致性处理后的多卫星 资料对南北极海冰面积变化进行分析,但本文利用 卫星气候资料,深入候尺度对南北极海冰覆盖的气 候学和长期变化特征进行研究,发现南北极海冰变 化存在两种"非对称性"现象。首先,南北极海冰面 积增加和融化时间不对称。其次,两极海冰面积变 化趋势也不对称。这两种"非对称性"现象在国内 外的研究中也得到证实。

南北极海冰增加和融化时间不完全对应,这一 结果与郝春江等<sup>[29]</sup>、解思梅等<sup>[30]</sup>的研究结果相同。 他们的研究结果表明,北极分别在3月、9月出现 海冰面积的极大值和极小值,而南极在9月、2月 出现海冰面积的极值。本文在候尺度的分析表明, 北极海冰融化、冻结的时间分别为37候和35候左 右,融化与冻结时间基本平衡;南极海冰冻结、融 化时间分别为42候和30候左右,海冰冻结的时间 明显长于融化的时间。南北极海冰冻结和融化时间 不完全对应。这与前人月尺度的研究结果相印证, 但以候尺度进行分析可以刻画更清晰,有利于更细 致的研究。

南北极海冰面积变化趋势存在明显的差异。 Comiso<sup>[23]</sup>指出,1979 – 2015年北极和南极海冰面 积月距平序列的变化趋势分别达到(-0.503 ± 0.017)×10<sup>6</sup> km<sup>2</sup> · (10a)<sup>-1</sup>和(0.245 ±0.018)× 10<sup>6</sup> km<sup>2</sup> · (10a)<sup>-1</sup>。本文的南北极海冰面积变化趋 势结果印证了上述研究,并且表明研究期内北极年 平均海冰面积减少,南极海冰面积增加,变化趋势 分别为 – 0.569×10<sup>6</sup> km<sup>2</sup> · (10a)<sup>-1</sup>和 0.327×10<sup>6</sup> km<sup>2</sup> · (10a)<sup>-1</sup>。造成这种差异的主要原因,一方 面是分析时间段的差异,Comiso 等<sup>[31]</sup>发现





1979 - 2006 年北极、南极海冰面积的变化趋势分别 为(-0.436±0.020)×10<sup>6</sup> km<sup>2</sup> · (10a)<sup>-1</sup>和(0.109 ±0.027)×10<sup>6</sup> km<sup>2</sup> · (10a)<sup>-1</sup>。相对 1979 - 2015 年的研究, 1979 - 2006 年的趋势偏小,说明 2006 -2015 年变化趋势更大,并且两极海冰明显变化开始 于 20 世纪 80 年代后期,因此 1989 - 2015 年的趋势 与本 文的结论更接近。另一方面对 SMMR 和 SSM/I资料处理方法的不同,本文采用的卫星气候 资料具有较好的均一性,适合于长时间序列的趋势 分析。

在全球气候变暖的大背景下,北极海冰面积在 快速减少, 南极却在增加, 两极海冰面积相反的变 化趋势值得认真思考。1989-1996年北极涛动处 于正位相,在大气环流场和风应力作用下,大量的 多年冰通过弗莱姆海峡输出,北冰洋多年冰存量大 幅下降。近些年,尽管北极涛动为负位相,但由于 气温上升导致失去的多年海冰一直没有恢复。南极 海冰面积增加的解释尚存争议,但可能是以下3种 因素的共同作用: ①受气候变暖影响, 变暖的海水 促使南极冰盖边缘的冰架发生消融释放大量淡水, 有利于南极海冰的生成。②受南极臭氧洞的影响, 南极大陆沿岸风速显著增强,大部分海冰生成地区 都存在明显的离岸风分量,促使新生海冰漂离南极 大陆沿岸,造成南极海冰范围整体扩大。③全球变 暖致使大气中承载了更多水汽,南大洋降水增加, 降低了南大洋表层盐度,有利于南极海冰的生成; 同时降雪会使海冰表面反照率升高,对海冰的消融 产生抑制作用<sup>[32]</sup>。

本文利用 ERA-Interim 再分析资料,分析了气候变暖背景下全球大气能量经向输送的变化(图7),结果表明:1989-2015年赤道附近向北输送的大气总能量显著增多,变化趋势达到0.500×10<sup>15</sup>W·(10a)<sup>-1</sup>;向北极圈内输送的大气总能量增加趋势为0.120×10<sup>15</sup>W·(10a)<sup>-1</sup>,通过南极圈向南极输送的大气总能量的变化趋势为0.028×10<sup>15</sup>W·(10a)<sup>-1</sup>,且趋势未通过显著性检验,向两极圈内输送大气总能量的变化趋势存在明显差异。大气向两极输送能量变化趋势的不同,必然造成两极能量平衡变化的差异,从而影响海冰面积的变化。



Fig. 7 The variation tendency of longitudinal distribution of annual mean northward total energy transport by atmosphere during 1989 – 2015

将全球大气能量经向传输变化趋势的空间分布 (图8)与两极年海冰密集度变化趋势分布(图2)进 行对比,研究期内北极地区30°~90°E区域的巴伦 支海以及新地岛以北区域的海冰密集度显著减少, 50°~100°E的北极区域大气总能量向北输送显著 增加。在南极,150°~180°E和120°~150°W区 域海冰密集度分别出现增加与减少,在图8中上述 两个区域大气总能量向北输送分别增加和减少,即 通过大气向南输送能量的趋势分别为减少和增加。 大气能量输送与南、北极海冰密集度的变化在空间 上具有较好的对应关系。





极地海冰变化与全球气候变化密切相关,存在 相应的响应和反馈机制,并对我国天气气候有重要 影响。因此,未来需要深入分析南北极海冰面积出 现"非对称性"变化的根本原因,分析该现象对全球 气候系统的影响,以及这种"非对称性"变化是否能 够持续?这些科学问题需要后期深入研究。

## 4 结论

采用卫星微波传感器 SSM/I、SSMIS 的海冰密 集度气候资料,分析了 1989 – 2015 年两极海冰面 积的气候学特征和长期变化趋势,得到如下结论:

(1)研究期内北极年平均海冰面积减少,南极海冰面积增加,变化趋势分别为-0.569×10<sup>6</sup> km<sup>2</sup>·(10a)<sup>-1</sup>和0.327×10<sup>6</sup> km<sup>2</sup>·(10a)<sup>-1</sup>,均通过了0.01 水平显著性检验,两极海冰面积呈现"非对称性"变化趋势。两极总海冰面积出现下降,变化趋势为-0.242×10<sup>6</sup> km<sup>2</sup>·(10a)<sup>-1</sup>。北极地区海冰密集度变化的空间分布普遍呈减少趋势,最大达到-20%·(10a)<sup>-1</sup>。南极地区的变化趋势存在显著

的空间差异,威德尔海、罗斯海北部区域,海冰密 集度趋势超过了10% ・(10a)<sup>-1</sup>,别林斯高晋海、 阿蒙森海海冰密集度出现下降。

(2) 北极各月海冰面积的变化趋势存在明显的 季节差异,7-10 月北极海冰面积减少明显,以9 月减少最显著,为-0.955×10<sup>6</sup> km<sup>2</sup> · (10a)<sup>-1</sup>。 南极各月海冰面积变化趋势季节差异不明显,最大 变化趋势出现在12月、6月,趋势分别为0.468× 10<sup>6</sup> km<sup>2</sup> · (10a)<sup>-1</sup>和 0.416×10<sup>6</sup> km<sup>2</sup> · (10a)<sup>-1</sup>, 均通过了0.01 水平的显著性检验。最小的变化趋 势出现在2月,其变化趋势为0.183×10<sup>6</sup> km<sup>2</sup> · (10a)<sup>-1</sup>。

(3)南北极海冰冻结和融化时间不完全对应, 北极融化与冻结时间基本平衡,南极海冰冻结时间 明显长于融化时间。南极极大海冰面积出现时间后 移明显,达到0.733 侯/(10a),极小海冰面积出现 时间非常稳定,没有明显趋势。南极年内海冰面积 的变化幅度大于北极,分别为15.0×10<sup>6</sup> km<sup>2</sup>和 9.38×10<sup>6</sup> km<sup>2</sup>。极大、极小海冰面积在南北极呈相 反趋势,北极均减少,南极均增加,其中北极极小 海冰面积的变化趋势最显著,达到了-0.636×10<sup>6</sup> km<sup>2</sup> ·(10a)<sup>-1</sup>。

**致谢:**感谢国家气象卫星中心武胜利高级工程师和 郑照军高级工程师在海冰密集度资料处理方面给予 的指导。

#### 参考文献(References):

- Tang Shulin, Qin Dahe, Ren Jiawen, et al. The studies of polar sea ice and their contribution to climate change researches [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, 28 (1): 91 – 100. [唐述林,秦大河,任贾文,等. 极地海冰的研究及其在 气候变化中的作用[J]. 冰川冻土, 2006, 28(1): 91 – 100.]
- [2] Lu Longhua, Bian Lingen, Xiao Cunde, et al. A study on polar atmospheric sciences and global change[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2006, 17(6): 743 – 755. [陆龙骅, 卞 林根, 效存德,等. 极地大气科学与全球变化研究进展[J]. 应用气象学报, 2006, 17(6): 743 – 755.]
- [3] Xiao Cunde. Changes in Antarctic climate system: past, present and future[J]. Advances in Climate Change Research, 2008, 4 (1):1-7. [效存德. 南极地区气候系统变化:过去、现在和将来[J]. 气候变化研究进展, 2008, 4(1):1-7.]
- [4] Allison I, Barry R G, Goodison B. Climate and cryosphere (CliC) project science and coordination plan: version 1 [ R ]. Geneva, Swiss: World Meteorological Organization, 2001: 1 – 76.
- [5] Fang Zhifang. Interaction between subtropical high and polar ice in northern hemisphere[J]. Chinese Science Bulletin, 1987, 32 (5): 330-335. [方之芳. 北半球副热带高压与极地海冰的 相互作用[J]. 科学通报, 1986, 31(4): 286-289.]
- [6] Honda M, Inoue J, Yamane S. Influence of low Arctic sea-ice

土

minima on anomalously cold Eurasian winters [J]. Geophysical Research Letters, 2009, 36(8): 262 – 275.

- [7] Wu Bingyi, Su Jingzhi, Zhang Renhe. Effects of autumn-winter Arctic sea ice on winter Siberian High[J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(30): 3220 – 3228. [武炳义,苏京志,张人 禾. 秋-冬季节北极海冰对冬季西伯利亚高压的影响[J]. 科 学通报, 2011, 56(27): 2335 – 2343.]
- [8] An Hongmin, Dou Tingfeng, Che Tao, et al. Measurements of the surface features and the reflectance of Arctic sea ice during the initial phase of the melt season in Barrow [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(1): 35 - 42. [安红敏, 窦挺峰,车涛,等. 北极巴罗地区海冰消融初期表面特征及 光谱反射率观测研究[J]. 冰川冻土, 2017, 39(1): 35 -42.]
- [9] Qin Dahe, Zhou Botao, Xiao Cunde. Progress in studies of cryospheric changes and their impacts on climate of China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2014, 72(5): 869 – 879. [秦大河,周 波涛,效存德. 冰冻圈变化及其对中国气候的影响[J]. 气象 学报, 2014, 72(5): 869 – 879. ]
- [10] Fu Congbin. A possible relationship between pulsation of plum rains in Changjiang valley and snow and ice cover on Antarctica and the southern ocean[J]. Chinese Science Bulletin, 1982, 27 (1):71-75. [符淙斌. 我国长江流域梅雨变动与南极冰雪状况的可能联系[J]. 科学通报, 1981, 26(8):484-486.]
- [11] Bian Lingen, Lin Xuechun. Antarctica sea ice oscillation and its possible impact on monsoon of south sea and China summer rainfall[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2008, 30(2): 196-203. [卞林根,林学椿. 南极海冰涛动及其对东亚季风和我国夏季降水的可能影响[J]. 冰川冻土, 2008, 30(2): 196-203.]
- [12] Wang Dai, You Qinglong, Jiang Zhihong, et al. Response of seasonal extreme temperatures in China to the global warming slow down[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(1): 36-46. [王岱, 游庆龙, 江志红, 等. 中国极端气温季节变化对全球变暖减缓的响应分析[J]. 冰川冻土, 2016, 38(1): 36-46.]
- [13] Feng X, Guo P W, Yu Z H. Influence of interannual variability of Antarctic sea ice on summer rainfall in eastern China[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2003, 20(1): 97 – 102.
- [14] Liu Jiping, Curry J A, Wang Huijun, et al. Impact of declining Arctic sea ice on winter snowfall[J]. Proceedings of the National Academy of Science, 2012, 109(11): 4074 – 4079.
- [15] Zhang Haisheng. Rapid changes in Arctic sea ice and climatic, ecological effects[M]. Beijing: China Ocean Press, 2015. [张 海生. 北极海冰快速变化及气候与生态效应[M]. 北京:海 洋出版社, 2015.]
- [16] Zhang Zhanhai. Rapid changes in Arctic sea ice: observations, mechanisms and synoptic, climatic effects[M]. Beijing: China Ocean Press, 2016. [张占海. 北极海冰快速变化: 观测、机制 及其天气气候效应[M]. 北京: 海洋出版社, 2016.]
- [17] Tan Jiqiang, Zhan Qingming, Yin Fuzhong, et al. On evolution of technologies in remote sensing for sea ice change monitoring in polar regions[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2014, 37(4): 23-31. [谭继强, 詹庆明, 殷福忠, 等. 面向 极地海冰变化监测的卫星遥感技术研究进展[J]. 测绘与空 间地理信息, 2014, 37(4): 23-31.]
- [18] Ma Lijuan, Lu Longhua, Bian Lingen. Spatio-temporal character of Antarctic sea ice variation [J]. Chinese Journal of Polar Re-

search, 2004, 16(1): 29-37. [马丽娟, 陆龙骅, 卞林根. 南 极海冰的时空变化特征[J]. 极地研究, 2004, 16(1): 29-37.]

- [19] Zhang Lu, Zhang Zhanhai, Li Qun, et al. Status of the recent declining of Arctic sea ice studies[J]. Chinese Journal of Polar Research, 2009, 21(4): 344 352. [张璐,张占海,李群,等. 近 30 年北极海冰异常变化趋势[J]. 极地研究, 2009, 21 (4): 344 352.]
- [20] Liu Yanxia, Wang Zemin, Liu Tingting. Change analysis for Antarctic and Arctic sea ice concentration and extent[J]. Remote Sensing Information, 2016, 31(2): 24 - 29. [刘艳霞, 王泽 民, 刘婷婷. 1979 - 2014 年南北极海冰变化特征分析[J]. 遥 感信息, 2016, 31(2): 24 - 29. ]
- [21] Parkinson C L, Cavalieri D J. Antarctic sea ice variability and trends, 1979 – 2010[J]. The Cryosphere, 2012, 6: 871 – 880.
- [22] Cavalieri D J, Parkinson C L. Arctic sea ice variability and trends, 1979 – 2010[J]. The Cryosphere, 2012, 6: 881 – 889.
- [23] Comiso J C. Global changes in the sea ice cover and associated surface temperature changes [C]// International archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences: volume XLI-B8. [S. l.]: International Society of Photogrammetry and Remote Sensing, 2016: 469 – 479.
- [24] IPCC. Climate change 2013: the physical science basis [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2013: 317 – 382.
- [25] Meier W N, Fetterer F, Savoie M, et al. NOAA/NSIDC climate data record of passive microwave sea ice concentration: version 2
  [R]. Boulder, CO: National Snow and Ice Data Center, 2013.
- [26] 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, 6(1): 311 – 318.
- [27] Dee D P, Uppala S M, Simmons A J, et al. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2011, 137(656): 553 – 597.
- [28] Tang Shihao, Liu Ronggao. Research progress of satellite-based climate dataset[J]. Journal of Geo-information Science, 2015, 17(11):1278-1285. [唐世浩, 刘荣高. 卫星气候数据集的 应用研究与发展分析[J]. 地球信息科学学报, 2015, 17 (11):1278-1285.]
- [29] Hao Chunjiang, Xie Simei, Li Tongjuan. The change characteristics of Arctic sea ice[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 1994(2): 84-91. [郝春江, 解思梅, 李同娟. 北极 海冰的变化特征[J]. 海洋湖沼通报, 1994(2): 84-91.]
- [30] Xie Simei, Bao Chenglan, Hao Chunjiang. Interaction between sea ice of the Antarctic and Arctic[J]. Chinese Science Bulletin, 1995, 40(20): 1713 1718. [解思梅, 包澄澜, 郝春江. 南北两极海冰的相互关系[J]. 科学通报, 1995, 40(7): 632 635.]
- [31] Comiso J C, Fumihiko N. 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): 228 236.
- [32] Qin Dahe, Yao Tandong, Ding Yongjian, et al. Introduction to cryospheric science [M]. Beijing: Science Press, 2017. [秦大河,姚檀栋,丁永建,等. 冰冻圈科学概论 [M]. 北京:科学出版社, 2017.]

## Analysis of sea ice area change in the Arctic and Antarctic based on the satellite climate data during 1989 – 2015

ZHANG Lei<sup>1</sup>, XU Bin<sup>1</sup>, SHI Chunxiang<sup>1</sup>, ZHOU Zijiang<sup>1</sup>, REN Guoyu<sup>2</sup>

(1. National Meteorological Information Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China; 2. Laboratory for Climate Studies, China Meteorological Administration / National Climate Center, Beijing 100081, China)

Abstract: In this research, the trends of sea ice area (SIA) and concentrations in the Arctic and Antarctic from 1989 to 2015 were analyzed by using the climate data of passive microwave satellite sea ice concentrations (SIC). The results showed that the annual SIA had decreased in Arctic and increased in Antarctic. The ratios were  $-0.569 \times 10^{6} \text{ km}^{2} \cdot (10a)^{-1}$  and  $0.327 \times 10^{6} \text{ km}^{2} \cdot (10a)^{-1}$ , respectively, being significant at the 0.01 confidence level. The asymmetry of trends in the Arctic and Antarctic had been obvious. The total SIA had decreased, with a trend of  $-0.242 \times 10^6$  km<sup>2</sup> · (10a)<sup>-1</sup>. The trend of annual SIC had universally declined in the Arctic, but had been obviously spatial difference in the Antarctic. The SIC had increased in the north of Weddell Sea and Ross Sea with the rate more than  $10\% \cdot (10a)^{-1}$ , but had decreased in Bellingshausen Sea and Amundsen Sea. There was obvious seasonal difference in monthly SIA variation in the Arctic. The SIA had obviously reduced from July to October, significantly in September, reaching  $-0.955 \times 10^6$  km<sup>2</sup> · (10a)<sup>-1</sup>. The sea ice freezing time and melting time had not completely corresponded between the Arctic and Antarctic; in the Arctic melting time and freezing time had been roughly balanced, but in the Antarctic freezing time had been significantly longer than melting time. Within a year, the variation of SIA in the Antarctic had been greater than that in the Arctic, showing significant seasonal characteristics. Changing in the minimum SIA in the Arctic had been most significant, reaching  $-0.636 \times 10^6$  km<sup>2</sup> · (10a)<sup>-1</sup>. The occurrence time of the maximum SIA in the Antarctic had moved backwards obviously, with the ratio of 0.733 pentad per decade; the occurrence time of the minimum SIA in the Antarctic had been very stable without any obvious tendency.

Key words: climate change; sea ice; Arctic; Antarctic; satellite

(本文编辑:武俊杰)