

基于多源遥感数据的北极新冰提取及范围时序变化分析

刘婷婷¹ 刘一君¹ 王泽民¹ 周春霞¹

¹ 武汉大学中国南极测绘研究中心,湖北 武汉,430079

摘要:本文利用多源遥感数据从不同空间尺度对 2004 年至 2012 年间北极地区新冰进行了提取并对其范围变化进行了分析。统计分析结果表明,北极海冰总体覆盖面积与北极近地表气温的变化呈反比;新冰覆盖面积的变化与海冰总面积的变化相比较缓慢;北极各个区域新冰覆盖范围的变化与各区域近地表温度的变化有较大的关联。

关键词:北极海冰;新冰;海冰覆盖范围;时序变化分析
中图分类号:P237.9;P228 文献标志码:A

海冰处于海气交界面,具有热力隔绝效应。它通过热力学、动力学过程以及在时空上的反馈机制直接影响海洋和大气的能量交换,对区域乃至全球的气候状态和变化起着极其重要的作用^[1-4]。

海冰覆盖范围是北极海冰研究的重要目标之一。对海冰范围变化的研究主要集中在海冰总体覆盖范围的变化^[5-7],而对多年冰和季节性海冰的研究则较少。新冰是厚度小于 30 cm 的冰,属于季节性海冰的一种,是海冰重要的组成部分。新冰具有重要的研究价值,其重要性主要体现在以下两个方面:①从地球物理学的角度分析,它与热盐环流的触发密不可分,并且能够让更多的热量从相对温暖的海水传递到冰冷的大气中,这种热盐环流和热量传递对北极地区气候系统产生着举足轻重的影响;②从生物学的角度分析,它与藻类、无脊椎动物等海洋初级生产力也有着千丝万缕的联系^[5],这种海洋初级生产力对北极地区环境系统产生着深远的影响。因此,研究北极新冰覆盖范围的时序变化,可为研究北半球甚至全球气候、环境变化提供可靠的数据支撑,具有重要的研究意义。

本研究利用多源遥感影像数据对 2004 年至 2012 年间北极地区新冰覆盖范围的月变化进行分析。首先,利用低分辨率被动微波 SSM/I 数据对北极地区 2004 年至 2012 年间海冰范围进行估

算,选出海冰覆盖面积最大和最小的年份进行详细分析。然后,结合宽波段大气顶层反照率和地表温度的阈值分割方法,完成基于 MODIS 数据的北极地区新冰提取。最后,结合北极地区多个自动气象站(automatic weather station, AWS)的近地表气温数据,对典型年份的北极地区新冰覆盖面积及比例的月变化进行统计并分析。

1 数据

1.1 SSM/I 数据

SSM/I(special sensor microwave/imager)是美国国防气象系列卫星 DMSP 上搭载的被动微波辐射计。该系列卫星为极轨卫星,覆盖除南北极 2.4°圆形区域外的所有地区,对极区的重访周期为每日。美国国家冰雪数据中心发布了基于 SSM/I 数据的海冰密集度产品,其空间分辨率为 25 km。本研究基于该产品完成了对北极海冰覆盖范围的估算。

1.2 MODIS 数据

MODIS(moderate-resolution imaging spectroradiometer)是装载在 TERRA 和 AQUA 这两颗卫星上的重要传感器。本研究使用的数据包括 MODIS L1B 数据、地理定位数据(MYD03)、海冰

收稿日期:2014-09-09

项目来源:国家自然科学基金资助项目(41206177);国家 863 计划资助项目(2012AA12A304,2013AA12A301);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2042014kf0293);南北极环境综合考察与评估专项基金资助项目(CHINARE2014-02-04)。

第一作者:刘婷婷,博士,讲师,研究方向为遥感影像处理、极地遥感应用研究。E-mail:ttliu23@whu.edu.cn

温度产品(MYD29)和云掩膜产品(MYD35),空间分辨率均为1 km。

1.3 气温数据

本研究中使用的近地表气温数据来源于美国国家海洋和大气管理局“北极大气观测计划(Arctic Atmospheric Observatory Program, AAOP)”。该计划的观测内容同时包括云、辐射、气溶胶、和地表能量通量等。

1.4 数据选择及预处理

由于SSM/I数据不受云雨的影响,在进行数据选择时无需考虑天气对影像的影响。而且,基于该数据的海冰密集度产品已进行过几何校正等预处理,可直接用于北极海冰范围提取。

MODIS数据容易受到云的影响,为减少工作量,可先通过人工判别的方式从每日数据中挑选云覆盖较少的影像进行后续处理。北极新冰主要分布在北纬 70° 至 80° 之间,因此,数据选择的原则为确保影像中北纬 70° 至 80° 之间云量少。同时,考虑到日照和极夜等原因,仅选择北极夏季6~9月的数据进行研究。除此以外的数据预处理还包括几何校正、辐射定标、太阳高度角校正和去蝴蝶效应等。

AAOP计划提供的近地表气温数据包括日平均、月平均和年平均数据,考虑到遥感数据的时间分辨率为月平均,因此,气温数据也选择了月平均数据。AAOP计划中的实测AWS为9个,但2004年至2012年间可提供数据的仅有7个。因此,本研究只选择了这7个AWS(俄罗斯Tiksi站和Cherski站、加拿大Alert站、芬兰Pallas and Sodenkylai站,美国阿拉斯加州Barrow站、瑞典Abisko站和格陵兰岛Summit站)。

2 海冰及新冰提取方法

2.1 基于SSM/I数据的北极海冰范围提取

由于散射/反射特性的不同,海冰和海水在被动微波数据中存在差异,通常使用基于阈值的方法^[8]完成对海水和海冰的分类;当海冰密集度大于15%时,该像素将被标注为海冰。

2.2 基于MODIS数据的北极新冰提取

不同类型的海冰在反照率上存在着差异,同时薄冰与海水在温度上也存在着差异。本研究根据这些差异提出结合宽波段大气顶层反照率和温度这两个参数,实现基于阈值分割的北极区域新冰提取,其具体的流程如图1所示。

根据Cavalieri等人^[9]的研究,反照率的估算可利用MODIS数据的第1、3和4波段完成:

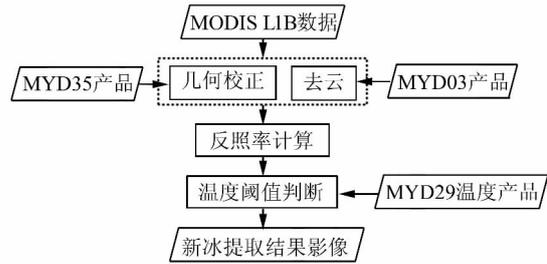


图1 新冰提取流程图

Fig. 1 Flowchart of the New Ice Extraction

$$\text{Albedo} = B_1 \times 0.3265 + B_3 \times 0.2366 +$$

$$B_4 \times 0.4364 \quad (1)$$

式中,Albedo表示宽波段大气顶层反照率; B_1 、 B_3 和 B_4 表示校正后MODIS影像中1、3和4波段相应的反射率值。Cavalieri等人利用Landsat-7 ETM+的全色波段完成了基于反照率阈值的新冰提取,并进一步验证了该阈值用于MODIS数据的有效性^[10]。利用该研究的成果,本研究完成了新冰的提取,阈值设定为:

$$0.1 < \text{Albedo}_{\text{新冰}} < 0.6 \quad (2)$$

当反照率($\text{Albedo}_{\text{新冰}}$)介于0.1和0.6之间时,该海冰的类型定义为新冰。

由于薄冰和水体的光谱具有一定的相似性,而反照率的估算又依赖于光谱信息,因此,仅利用反照率无法准确地区分薄冰和海水。本研究基于MYD29数据,根据冰和海水表面温度的差异性设定阈值,进一步区分薄冰和海水。当表面温度 $T_{\text{新冰}}$ 小于271.4 K时,该海冰类型为新冰。在新冰提取结果的基础之上,统计结果中新冰像素的个数($N_{\text{新冰}}$),以进行北极新冰覆盖面积的估算:

$$S_{\text{新冰}} = N_{\text{新冰}} \times A^2 \quad (3)$$

式中, $S_{\text{新冰}}$ 表示新冰覆盖面积,单位为 km^2 ;A表示影像空间分辨率。由于使用数据的分辨率为1 km,则A取值为1。在北极新冰覆盖面积估算结果的基础上,对北极新冰覆盖比例进行计算:

$$P_{\text{新冰}} = S_{\text{新冰}} \times 100\% / S_{\text{海域面积}} \quad (4)$$

式中, $P_{\text{新冰}}$ 表示新冰覆盖比例; $S_{\text{新冰}}$ 表示新冰覆盖面积; $S_{\text{海域面积}}$ 表示海域大小,估算方法与新冰面积类似,其估算公式为:

$$S_{\text{海域}} = N_{\text{海域}} \times A^2 \quad (5)$$

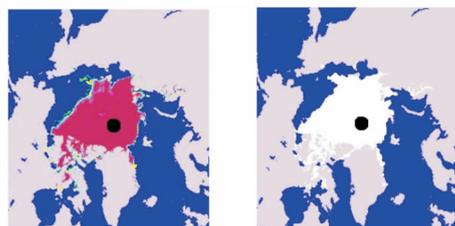
式中, $S_{\text{海域}}$ 表示海域面积,单位为 km^2 ; $N_{\text{海域}}$ 为海域像素个数,即影像中非陆地像素。

3 结果及分析

3.1 海冰范围年度变化分析

本研究利用2004年至2012年间每日的北极

海冰密集度产品进行海冰的提取和范围的统计分析。图 2 为 2004-09-01 北极海冰的密集度产品(图 2(a))以及获得的海冰提取结果图(图 2(b)),其中蓝色代表开阔海域,浅紫色代表陆地,黑色代表数据缺失地区,其他颜色代表海冰。



(a) SSM/I海冰密集度产品 (b) 海冰提取结果

图 2 海冰提取结果展示图

Fig. 2 Sea Ice Extraction Results

在获得 2004 至 2012 年间每日北极海冰覆盖面积后,对这些结果进行按月统计并计算月平均值,如图 3 所示。

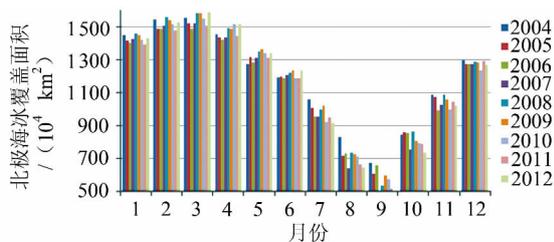


图 3 2004 年至 2012 年间北极海冰范围变化统计图

Fig. 3 Arctic Sea Ice Extent from 2004 to 2012

根据图 3 中历年间不同月份海冰覆盖面积的变化可发现,北极海冰范围于每年 3 月达到全年最大值,于 9 月达到全年最小值。从图 3 中 9 月的数值分布可发现,北极地区海冰覆盖范围最大的年份为 2004 年,海冰覆盖面积高达 670 万 km^2 ;而最小的年份为 2012 年,海冰覆盖面积低于 400 万 km^2 。将该现象结合北极地区年均近地表气温(图 4)作进一步分析。

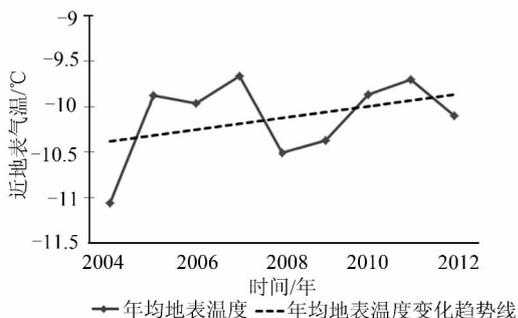


图 4 2004 年至 2012 年间北极地区年均地表温度图

Fig. 4 Air Temperature in the Arctica (2004-2012)

图 4 展示了 2004 年至 2012 年间北极地区年

均地表温度变化的趋势。其中,实线为北极圈内 AWS 实测的近地表气温的年平均值,虚线为趋势线。与北极海冰范围逐渐减小相反的是,2004 年至 2012 年间北极气温持续上升,两个要素间呈极大的负相关,这说明北极海冰变化和北极地区气候变化存在紧密的联系。

3.2 代表性年份中北极新冰范围变化分析

在 2004 至 2012 年间北极海冰范围变化趋势研究的基础上,进一步利用 MODIS 数据对 2004 年和 2012 年这两年北极新冰覆盖范围变化进行详细的分析。

3.2.1 北极海域子区域划分

由于 MODIS 数据分辨率相对较高,一景数据无法覆盖全北极地区,为方便后续的统计和区域性分析,本研究依照海域的分布将北极地区划分为 7 个子区域,其分布情况如表 1 所示。

表 1 子区域划分表

Tab. 1 Table of Sub-region Zoning

区域	主要海域	子区域经度范围	
1	格陵兰海海域	10°E	20°W
2	巴伦支海及喀拉海海域	90°E	10°E
3	拉普捷夫海海域	135°E	90°E
4	东西伯利亚海海域	180°E	135°E
5	波弗特海海域	120°W	180°E
6	巴芬湾以西海域	70°W	120°W
7	巴芬湾以东海域	20°W	70°W

3.2.2 北极新冰时序变化分析

完成北极海域的子区域划分后,对每个区域内的新冰分布情况及覆盖面积的变化进行分析。以格陵兰海海域(区域 1)为例,其 2004 年 6 月至 9 月新冰提取结果及分布情况如图 5 所示。以拉普捷夫海海域(区域 3)为例,其 2004 年 6 月至 9 月新冰提取结果及分布情况如图 6 所示。

由图 5 和图 6 可发现,不同区域的新冰分布存在差异。区域 1 的格陵兰海海域(图 5)和区域 7 的巴芬湾以东海域(未展示)的新冰多分布在靠近格陵兰岛的海域上,而区域 3 的拉普捷夫海海域(图 6)和其他未展示区域(区域 2~区域 5)的新冰多分布在中高纬海域上。

另一个现象也存在于图 5 和图 6 中:区域 1 格陵兰海海域的新冰于 2004 年 7 月骤减,8 月份逐渐增多,而 9 月份达到最大值;同样的现象也存在于区域 3 的拉普捷夫海海域,新冰覆盖范围于 2004 年 6 月份开始逐渐增多,9 月份达到最大值。同时,对其他区域新冰分布情况进行分析,发现新冰覆盖变化的总体趋势与区域 1 和 3 相同。针对该现象,本研究对两个年份(2004 和 2012 年)北

极各区域的新冰覆盖面积进行统计,并对新冰所占海域的比例(即新冰面积与区域中整个海面

积之比)进行了计算,统计结果如图7所示。

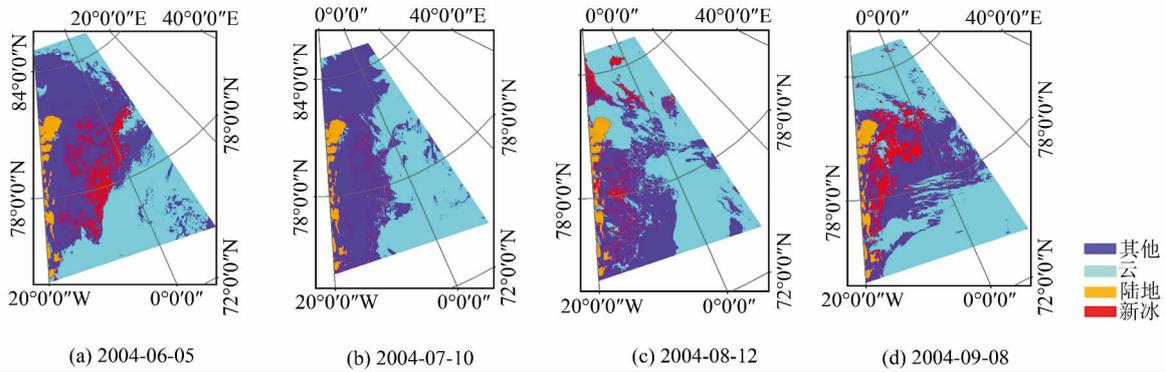


图5 格陵兰海海域新冰范围变化时序图

Fig. 5 Time Series Changes of New Ice Extent in Greenland Sea

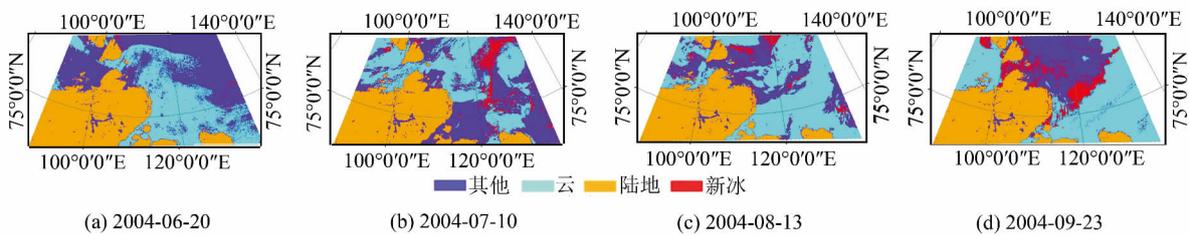


图6 拉普捷夫海海域新冰范围变化时序图

Fig. 6 Time Series Changes of New Ice Extent in Laptev Sea

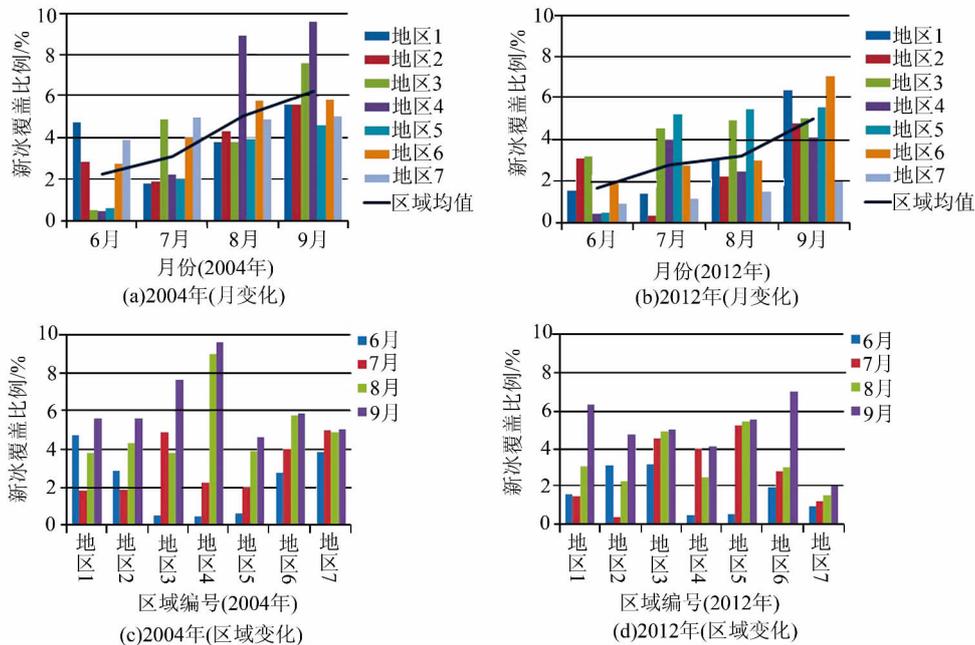


图7 子区域新冰覆盖面积比例图

Fig. 7 Regional New Ice Extent Proportion

由图7不难发现,北极地区各区域新冰覆盖范围的变化存在一定的相似性,但也存在着差异。图7(a)和7(b)两幅统计图比较了不同月份各区域新冰覆盖面积所占的比例,反映出各区域新冰

覆盖面积变化在整体趋势上的共性:各区域新冰的覆盖面积从6月开始逐渐增大,9月时达到最大值。结合图3、图7(a)、7(b)中的统计数据可获得如图8所示的统计结果。

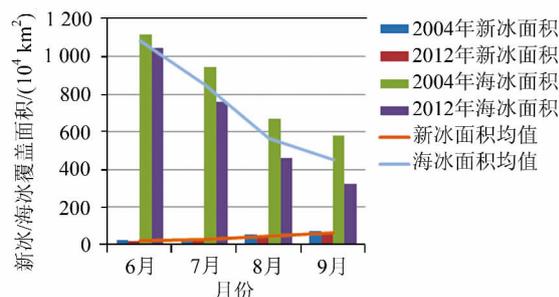


图 8 2004 年和 2012 年海冰、新冰面积对比图

Fig. 8 Comparison between Sea Ice Extent and New Ice Extent in 2004 and 2012

由图 8 可发现,相比 2004 年,2012 年的海冰面积各月份均呈急剧减少的变化趋势,而新冰面积的减少则较缓慢,且新冰面积在 2012 年 7 月较 2004 年 7 月有所增加,因此不难推断多年冰也呈急剧减少的变化趋势。多年冰厚度较大,反照率也较大,能阻隔传输至海洋表面的大气辐射^[11],这些特征影响着海冰反照率反馈机制,而新冰与之相反。Koerner 的研究^[12]表明,多年冰覆盖下海冰的生长速度为每年 0~4 mm/d,而较薄的海冰(新冰等)覆盖下海冰的生长速度则高达 18~70 mm/d。多年冰覆盖面积的减少为新冰的生长提供了广阔的空间,新冰大面积生长时释放出的盐分加大了北冰洋表层海水的盐度,导致海水的密度增加,从而使高密度海水下降形成对流,并产生热量传递。这一热量传递为海、气和冰热量交换提供载体,加快了海冰的消融,从而解释了新冰相对于海冰和多年冰覆盖范围减少缓慢的原因。

图 7(c)和 7(d)比较了各区域不同月份新冰覆盖面积所占的比例。区域 1 和区域 2 新冰面积最小的月份是 7 月,而其他区域新冰面积最小的月份均是 6 月。在新冰生长的过程中,区域 1 和 2 中的新冰本应增加,但北极夏季时处于外围的新冰和一些碎浮冰会随着洋流等经过格陵兰海和挪威海流出北极圈外,导致这两个区域 7 月的新冰覆盖面积反而减小。这两幅图还进一步表明同一区域不同年份的新冰范围变化存在着明显的差异:2004 年新冰面积所占海域比例最小的是区域 5,而该区域的新冰覆盖面积却在 2012 年激增;2004 年区域 7 新冰面积所占海域比例并不小,而在 2012 年却是 7 个子区域中最小的。为解释这种现象,本研究根据图 5 中区域的划分收集并整理了相应区域内 AWS 的近地表气温数据,如图 9 和图 10。

图 9 和图 10 中不同颜色的折线代表不同 AWS 的近地表气温。Barrow 所在的区域为区域

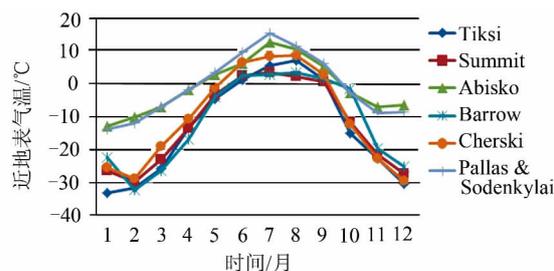


图 9 2004 年北极地区 6 个 AWS 近地表气温图

Fig. 9 Air Temperature of 6 Arctic AWSs in 2004

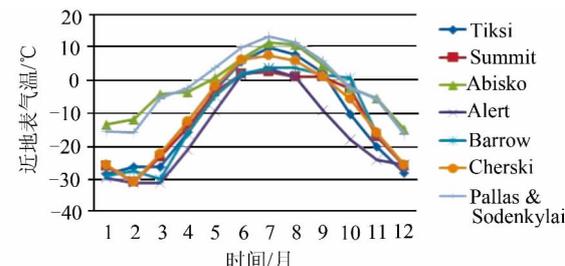


图 10 2012 年北极地区 7 个 AWS 近地表气温图

Fig. 10 Air Temperature of 7 Arctic AWSs in 2012

5, Alert 和 Summit 站所在的区域为区域 7,图中 AWS 除 Alert 站以外都处于相似纬度。2004 年的 6 至 9 月间(图 9),区域 5 中的 Barrow 站的气温最低,由于 Summit 站纬度较 Barrow 高,导致在 8 月 Summit 站气温略低。2012 年的 6 至 9 月间(图 10),区域 7 中的 Alert 和 Summit 站气温均低于其它站的温度。因此,历年北极各区域新冰覆盖面积的差异与各区域气温的差异具有一定的关联。

4 结 语

本研究先利用被动微波 SSM/I 数据对 2004 年至 2012 年间北极地区总体海冰覆盖范围的变化趋势进行分析,并进一步利用 MODIS 数据对海冰总面积最大的 2004 年和海冰总面积最小的 2012 年中 6 月至 9 月新冰覆盖范围变化进行详细的分析。分析发现:2004 年至 2012 年间北极海冰总体覆盖面积呈减少的趋势,与北极近地表温度的变化呈负相关;2004 年和 2012 年新冰覆盖面积的变化与海冰总面积的变化相比较缓慢,海冰面积减少的主要贡献者为多年冰;北极各个区域新冰覆盖范围的变化与所处区域的地理位置无明显相关性,但与各区域近地表温度的变化有较大的关联。进一步的研究将结合海洋、大气、全球气候变化等相关领域的的数据,分析北极新冰变化与洋流、气团等的相关性,以及它对全球气候变化的影响及反馈。

参 考 文 献

- [1] Vinnikov K Y, Robock A, Stouffer R J, et al. Global Warming and Northern Hemisphere Sea Ice Extent [J]. *Science*, 1999, 286(5 446): 1 934-1 937
- [2] Kang D, Im J, Lee M I, et al. The MODIS Ice Surface Temperature Product as an Indicator of Sea Ice Minimum over the Arctic Ocean [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 152: 99-108
- [3] Zhang Xin, Zhou Chunxia, E Dongchen, et al. Monitoring of Antarctic Sea Ice Based on the Multi-channel MODIS data [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(10): 1 194-1 198(张辛, 周春霞, 鄂栋臣, 等. MODIS 多波段数据对南极海冰变化的监测研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2014, 39(10): 1 194-1 198)
- [4] Xie Surui, Li Fei, Zhao Jiechen, et al. Estimation of Sea Ice Thickness at Zhongshan Station in Antarctica Based on a Combination of GPS and Tide Observations [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(10): 1 153-1 157(谢苏锐, 李斐, 赵杰臣, 等. 验潮与 GPS 联合监测南极中山站附近海冰厚度变化[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2014, 39(10): 1 153-1 157)
- [5] Shokr M, Dabboor M. Interannual Variability of Young Ice in the Arctic Estimated Between 2002 and 2009 [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51: 3 354-3 370
- [6] Parkinson C L, Cavalieri D J, Gloersen P, et al. Arctic Sea Ice Extents, Areas, and Trends, 1978-1996 [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1999, 104(C9): 20 837-20 856
- [7] Maslanik J, Stroeve J, Fowler C, et al. Distribution and Trends in Arctic Sea Ice Age Through Spring 2011 [J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38, (13): L13502
- [8] de la Mare W K. Abrupt Mid-Twentieth-Century Decline in Antarctic Sea-Ice Extent from Whaling Records [J]. *Nature*, 1997, 389(6 646): 57-60
- [9] Cavalieri D J, Markus T, Hall D K, et al. Assessment of AMSR-E Antarctic Winter Sea-Ice Concentrations Using Aqua MODIS [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48 (9): 3 331-3 339
- [10] Cavalieri D J, Markus T, Hall D K, et al. Assessment of EOS Aqua AMSR-E Arctic Sea Ice Concentrations Using Landsat-7 and Airborne Microwave Imagery [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(11): 3 057-3 069
- [11] Perovich D K, Grenfell T C, Light B, et al. The Seasonal Evolution of Arctic Sea Ice Albedo [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107 (c10): SHE20-1-SJE20-13
- [12] Koerner R M. The Mass Balance of The Sea Ice of the Arctic Ocean [J]. *Journal of Glaciology*, 1973, 12(65): 173-185

Time Series Analysis of Arctic New Ice Extent by Using Multi-source Remotely Sensed Data

LIU Tingting¹ LIU Yijun¹ WANG Zemin¹ ZHOU Chunxia¹

¹ Chinese Antarctic Center of Surveying and Mapping, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: Sea ice is the most active and unstable component in polar region that its change is significant for the investigation of regional and global climate and environmental change. In this research, the Arctic sea ice and new ice extent from 2004 to 2012 were extracted and their time series changes were analyzed by using multi-source remotely sensed data. The results indicate: there was an inverse relationship between the sea ice extent changes and the near surface air temperature variations; the new ice extent changes were inversely proportional to the sea ice extent changes; the regional new ice extent changes and the near surface air temperature variations had a close relationship.

Key words: Arctic sea ice; new ice; sea ice extent; time series analysis

First author: LIU Tingting, PhD, lecture, specializes in the polar remote sensing application. E-mail: ttliu23@whu.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, No. 41206177; the National High Technology Research and Development Program (863 Program) of China, Nos. 2012AA12A304, 2013AA12A301; the Fundamental Research Funds for the Central Universities, No. 2042014kf0293; the Chinese Polar Environment Comprehensive Investigation & Assessment Programmes, No. CHIN-ARE2014-02-04.