

引用格式:孔爱婷,刘健,余旭,等.北极海冰范围时空变化及其与海温气温间的数值分析[J].地球信息科学学报,2016,18(6):797-804. [Kong A T, Liu J, Yu X, *et al.* 2016. Spatio-Temporal variability of Arctic sea ice extent and its numerical analysis with sea surface temperature and air temperature. *Journal of Geo-information Science*, 18(6):797-804.] DOI:10.3724/SP.J.1047.2016.00797

北极海冰范围时空变化及其与海温气温间的数值分析

孔爱婷^{1,2}, 刘 健², 余 旭^{1*}, 左 菲^{2,3}

1. 广东工业大学土木与交通工程学院, 广州 510006; 2. 中国极地研究中心, 上海 200136; 3. 上海海洋大学, 上海 201306

Spatio-Temporal Variability of Arctic Sea Ice Extent and Its Numerical Analysis with Sea Surface Temperature and Air Temperature

KONG Aiting^{1,2}, LIU Jian², YU Xu^{1*} and ZUO Fei^{2,3}

1. School of Civil and Transportation Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. Polar Research Institute of China, Shanghai 200136, China; 3. Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China

Abstract: The annual and seasonal variability of Arctic sea ice extent was analyzed using of the sea ice extent data from 1989 to 2014, which was offered by the America National Snow and Ice Data Center. According to the data, it can be found that the Arctic sea ice extent decreases with an amplitude about 59 100 km² annually. Moreover, the fastest decline occurs in summer, while the slowest decrease appears in winter. In addition, the Arctic sea ice extent shows a relatively stable seasonal variation, which exhibit the same thawing and freezing period. Arctic sea ice extent reaches its maximum value in March, undergoing the ice thawing period from April to September. It has the minimum value in September. Subsequently, it is the ice freezing period from October to March. During the summer, the sea ice reveals some featured characteristics, such as the fast thawing and sudden freezing. The Arctic sea ice thaws quickly in July and August, and freezes fast in October and November. The freezing and thawing process maps of the Arctic sea ice were made by ArcGIS software. Then, the freezing and thawing processes of the sea ice were discussed in detail. The results show that the Arctic sea ice mainly freezes and thaws in various marginal seas, including the Bering sea, Okhotsk, Beaufort Sea, Chukchi Sea, East Siberian Sea, Laptev Sea, Kara Sea, Barents Sea, Hudson B. and Baffin Bay. Finally, according to the sea surface temperature and air temperature data, the relationships among Arctic sea ice extent, sea surface temperature and air temperature were preliminarily discussed here. The results show that a change of the Arctic sea ice which affects the sea surface temperature may cause a variation of the air temperature. However, the seasonal changes of sea ice extent occur later than the seasonal changes of sea surface temperature and air temperature. The relationships among Arctic sea ice extent, sea surface temperature and air temperature in Chukotskoye More were analyzed using the sea surface temperature data and air temperature data derived from the ship-based observations. The data show that when the sea ice extent gets closer to the North Pole, the sea surface temperature and air temperature will be lower. When the sea ice extent gets closer to the land, the sea surface temperature and air temperature will be higher.

Key words: Arctic; sea ice extent; sea surface temperature; air temperature; spatio-temporal variation

***Corresponding author:** YU Xu, E-mail: yxgraduate@163.com

摘要: 本文利用美国国家冰雪中心提供的1989–2014年海冰范围资料,分析了北极海冰范围的年际变化和季节变化规律。分析发现,北极海冰范围呈减少趋势,每年减小 5.91×10^4 km²,夏季减少趋势显著,冬季减少趋势弱。北极海冰范围显现相对稳

收稿日期:2015-07-06;修回日期:2015-09-18.

基金项目:国家自然科学基金项目(41101353);极地环境与资源信息集成及共享服务项目(CHINARE2015-04-07)。

作者简介:孔爱婷(1990–),女,广东佛山人,硕士生,研究方向为地理信息系统。E-mail: aitykong@126.com

*通讯作者:余 旭(1977–),男,湖北麻城人,博士,副教授,研究方向为地理信息系统的理论与应用。

E-mail: yxgraduate@163.com

定的季节变化规律,海冰的结冰和融化主要发生在各个边缘海,夏季期间的海冰具有融化快、冻结快的特征。结合海温、气温数据,进行北极海冰范围与海温、气温间的数值分析,结果表明北极海冰范围变化通过影响北极海温变化进而影响北极气温变化。海冰范围的季节变化滞后于海温和气温的季节变化。基于北极考察走航海温气温数据,进行楚科奇海海冰范围线与海温气温间的数值分析,发现楚科奇海海冰范围线所在区域的海温、气温与纬度高低、离陆地远近有关。

关键词: 北极;海冰范围;海温;气温;时空变化

1 引言

全球气候自20世纪80年代开始增暖趋势非常明显,主要表现为气温与海温升高、气压降低、海平面升高。大量分析表明,在全球变暖过程中,气温变化幅度最大的是北极地区,这与北极海冰减少对气温增幅的放大作用密切相关^[1]。北极海冰作为巨大的冷源,其时空分布和变化不仅直接影响海洋环流,而且对全球大气环流都有举足轻重的影响^[2]。北极海冰的退缩,增加了北极的能量来源,对应北极的气温、海温也会发生变化^[3]。北极海冰与海温之间有重要关系,而海温的变化对气候有极其重要的影响。因此,研究北极海冰的变化规律及其与海温、气温之间的关系是研究全球气候变化不可缺少的环节,对全球气候变化的影响机理和可预报性有重要的科学意义。

目前,海冰的研究主要集中在变化特征方面,以不同的参数(密集度、范围、厚度等)监测海冰的变化状况,研究结果表明,北极海冰范围总体趋势在减少^[4-7]。1979-1996年北极海冰范围每年减少 $3.4 \times 10^4 \text{ km}^2$,每10年减少2.9%,而1979-2006年北极海冰范围每年减少 $4.5 \times 10^4 \text{ km}^2$,每10年减少3.7%^[8-9]。1997-2006年北极海冰范围减少速度比1979-1996年快,每年减少 $7.6 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[10]。北极夏季海冰范围减少速度比冬季快,1979-2006年,夏季(9月)的海冰范围每10年减少8.6%,而冬季(3月)的海冰范围每10年减少2.8%^[11]。Cavalieri和Parkinson^[12]利用1979-2010年的被动微波遥感数据,得到9月的海冰范围在1979-2006年间每年减少了 $5.7 \times 10^4 \text{ km}^2$,而在1979-2010年间每年减少了 $8.0 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。苏洁等^[13]率先利用AMSR-E的海冰密集度数据研究西北航道海冰季节变化和年际变化。

海冰与海温、气温间有重要关系。Goosse等^[14]研究表明北大西洋和北极之间的海、冰、气和水的异常交换是北极海冰异常的主要原因。最近有研究成果指出巴伦支海冬季海冰范围与海平面气压、海表温度都有非常好的相关关系^[15]。陈锦华等^[16]的研究表明,东南极海冰变化与南太平洋的海温场存

在密切关系。

本文利用大尺度长时间序列的海冰范围、海温和气温数据,研究分析了1989-2014年北极海冰范围的年际变化和季节变化规律,进而分析与海温、气温之间的关系,研究北极海冰变化对海温、气温的影响。基于北极考察走航海温气温数据,进行了楚科奇海海冰范围线与海温气温间的数值分析。

2 数据来源与处理

海冰卫星遥感数据来源于美国国家冰雪中心(NSIDC),由Nimbus7卫星搭载的SMMR传感器、DMSP卫星搭载的SSM/I和SSMIS传感器测量得到的逐月海冰范围数据。该数据涵盖了整个南北极地区全年的海冰密集度和海冰范围分布情况,便于研究南北极海冰的持续变化过程。本文选取了北极结冰区域的海冰范围数据,时间范围是1989年1月至2015年3月。首先利用这些逐月海冰范围数据计算得到年平均数据、季节平均数据等,然后用年平均数据减去多年平均值(1979-2014年),得到每年海冰范围的距平,最后对这些数据进行线性拟合,得到这些数据的变化趋势。为了分析海冰的空间分布情况,利用ArcGIS软件进行制图分析,导入海冰范围面数据集和线数据集,叠加地理基础信息地图并添加相应的图示图例,经图幅整饰后,输出地图。为了更直观地分析海冰融化和结冻过程的空间分布特征,把不同时期的海冰显示在同一幅地图上。为了解决不同时期海冰重叠的现象,做图时将海冰区域的颜色统一为白色,海冰边界线用不同颜色与不同线型表示。

大尺度海表温度数据来自美国国家海洋和大气局地球系统研究实验室(NOAA's Earth System Research Laboratory)提供的OI逐月数据,空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 。本文利用MATLAB软件提取和计算 $67.5^\circ \sim 90^\circ \text{N}$ 的月平均海温数据。

大尺度气温数据来自NOAA提供的NCEP/NCAR逐月再分析数据,时间序列为1989-2014年。NCEP/NCAR再分析数据由美国国家环境预报

中心和国家大气研究中心联合制作,该数据空间分辨率为 $2.5^{\circ}\times 2.5^{\circ}$ 。本文利用MATLAB软件提取和计算 $67.5^{\circ}\sim 90^{\circ}\text{N}$ 的月平均气温数据。

小尺度海温气温数据来自中国第4次、第5次和第6次北极考察走航观测数据。走航海温数据利用船载表层海水自动传感器(SBE21)测量得到。第4次和第5次北极考察走航气象数据利用船用自动气象观测站VAISALA 500获得,第6次北极考察走航气象数据利用SH3000船载气象站系统获得。本文利用ArcGIS软件进行分析,根据楚科奇海每天的海冰范围线和走航路线,得到海冰范围线与走航路线的交点,并通过在地图上查询得到海冰范围线的海温和气温。

3 北极海冰范围变化分析

3.1 海冰范围年际变化分析

从海冰范围年平均距平变化曲线(图1)可看出,北极海冰范围线是一条大起大落的曲折下跌

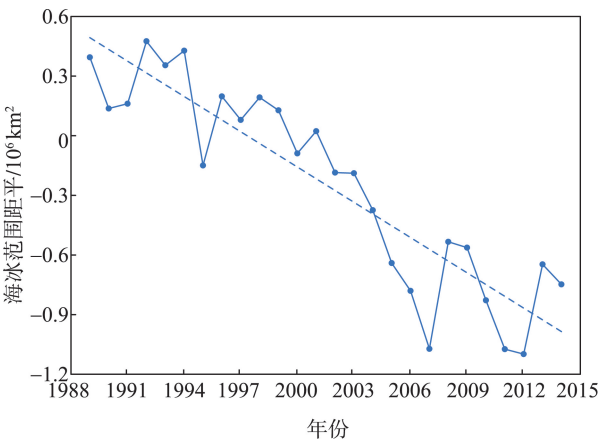


图1 北极海冰范围年平均距平变化
Fig. 1 Average annual anomaly variation of Arctic sea-ice extent

线,海冰范围呈现短期扩大、长期缩小的现象。对年平均变化曲线进行线性拟合,得到了相关系数 r 为 -0.8973 的合格拟合直线。年平均拟合直线表明,近20多年海冰范围呈下降的趋势,下降速度为 $5.91\times 10^4\text{ km}^2/\text{a}$ 。从1998年起,海冰迅速减少,特别是2001–2007年的北极海冰范围在持续减少,从2001年的 $11.78\times 10^6\text{ km}^2$ 减少到2007年的 $10.68\times 10^6\text{ km}^2$,6年减少了 $1.10\times 10^6\text{ km}^2$ 。自2002年以来,北极海冰范围持续负距平。2007年海冰范围负距平出现巨大的低谷,表明海冰范围出现异常。2012年北极海冰范围负距平再次出现低谷,这是由于大风暴的原因^[17]。北极海冰范围相邻年份间可能会有增加或减少的变化,但从过去20多年的数据来看,北极海冰总体呈减少趋势。

由图2、表1可看出,1989–2014年每个月的海冰范围都呈现减少的趋势。海冰范围较小的7、8、9和10月减少趋势最为显著,变化最大的时间段是海冰范围最小的9月,下降速度为 $10.56\times 10^4\text{ km}^2/\text{a}$;海冰范围较大的1、2、3、4和5月减少趋势弱,变化最小的是5月,下降速度为 $2.0\times 10^4\text{ km}^2/\text{a}$,海冰范围最大的是3月,下降速度为 $3.53\times 10^4\text{ km}^2/\text{a}$ 。大

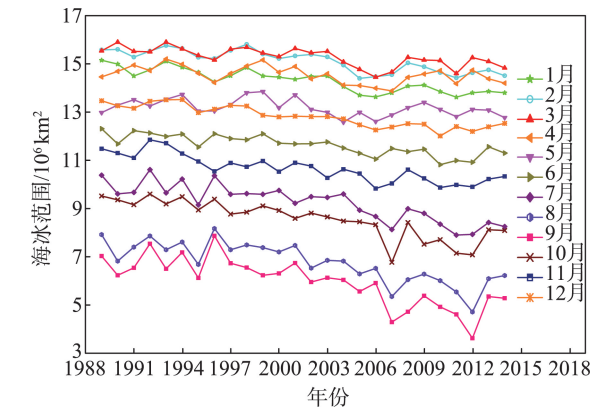


图2 北极海冰范围月平均变化
Fig. 2 Average monthly variation of Arctic sea-ice extent

表1 北极海冰范围线性回归
Table 1. Linear regression of Arctic sea-ice extent

月份	斜率	相关系数	月份	斜率	相关系数
1	-0.0542	-0.8737	7	-0.0862	-0.8558
2	-0.0491	-0.8245	8	-0.0892	-0.7966
3	-0.0353	-0.6864	9	-0.1056	-0.7936
4	-0.0224	-0.4525	10	-0.0872	-0.8431
5	-0.0199	-0.4030	11	-0.0632	-0.8535
6	-0.0444	-0.8131	12	-0.0526	-0.9025

多数月份的海冰范围变化不大,9月的海冰范围变化曲线与年平均变化曲线最为相似,此时的海冰范围最能代表北极一年中的海冰覆盖情况。

3.2 海冰范围季节变化分析

北极海冰范围存在明显的季节变化。海冰融化期和冻结期都长达6个月。海冰的结冻和融化主要发生在各个边缘海。从图3的2014年北极海冰融化过程变化图可看出,自4月海冰开始融化,相比3月,海冰范围没有多大的变化,在斯瓦尔巴群岛附近有所增加,在白令海和鄂霍次克海有所减少。5月海冰范围继续减少,相比4月,海冰在白令海和鄂霍次克海明显减少,在巴伦支海有所减少。相比5月,6月海冰在楚科奇海、拉普捷夫海和巴伦之海明显减少。7月,海冰融化加快,加拿大东北部的哈得孙湾和巴芬湾的海冰基本融化,波佛特海、楚科奇海、拉普捷夫海和喀拉海的海冰也明显减少。8月,海冰外缘线明显地向北退缩,主要体现在东西伯利亚海和拉普捷夫海。9月,海冰范围进一步缩小,达到最小值。

图4是北极海冰冻结过程变化图。10月,北极气温迅速下降,海冰进入快速冻结期,主要体现在拉普捷夫海的海冰明显增加。11-12月,海冰继续

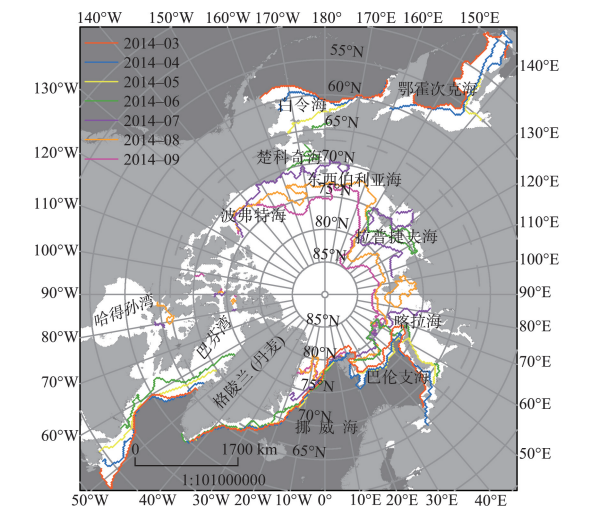


图3 北极海冰融化过程
Fig. 3 Thawing process of Arctic sea-ice

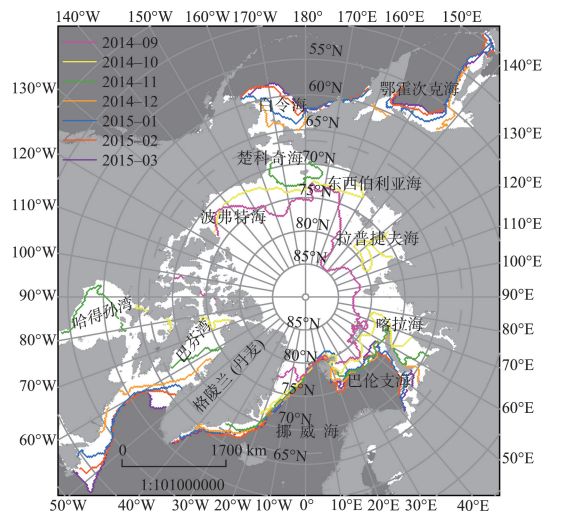


图4 北极海冰冻结过程
Fig. 4 Freezing process of Arctic sea-ice

快速增加,波佛特海、楚科奇海、东西伯利亚海、喀拉海、巴伦之海、哈得孙湾和巴芬湾的海冰都明显地增加。2015年的1-2月海冰的冻结速度明显比前3个月慢,白令海、鄂霍次克海和巴伦之海的海冰略有增加。3月,海冰范围进一步扩大,达到最大值。

将当月的海冰范围减去前一个月的海冰范围所得的差值,作为海冰冻融的判断依据(表2),差值为正时为冻结,为负时则为融化。结果表明,海冰在冬季变化缓慢,在夏季变化快速。其中,海冰融化最快的是7月和8月,结冻最快的是10月和11月。一年中,虽然北极海冰融化期和冻结期时间一样长,但是由于在夏季期间海冰的快融化、快冻结特征,北极经历海冰小范围覆盖的时间较短。

参考 Cavalieri 和 Parkinson 的北极海冰季节划分方法^[12],定义冬季为1-3月,春季为4-6月,夏季为7-9月,秋季为10-12月。由图5分析结果可知,从1989-2014年,4个季节的海冰范围都呈现明显的衰减现象。结合图5的拟合直线可知,海冰范围下降趋势最快的季节是夏季,下降速度为 $9.37 \times 10^4 \text{ km}^2/\text{a}$,其次是秋季和冬季,秋季下降速度为 $6.77 \times 10^4 \text{ km}^2/\text{a}$,冬季下降速度为 $4.62 \times 10^4 \text{ km}^2/\text{a}$,下降趋势最慢的季节是春季,下降速度为 $2.90 \times 10^4 \text{ km}^2/\text{a}$ 。不同季节,海冰范围的变化规律

表2 北极海冰冻融判断												
Table 2. Arctic sea-ice freezing and thawing judgment												
差值	月份											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
差值	1.41	0.71	0.32	-0.63	-1.43	-1.47	-3.05	-2.03	-0.94	2.81	2.24	2.20

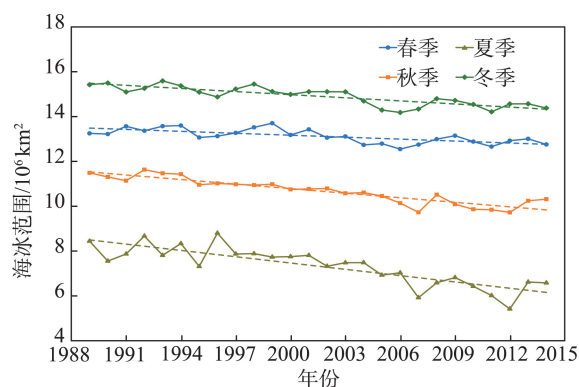


图5 北极海冰范围季变化

Fig. 5 Seasonal variation of Arctic sea-ice extent

也有所不同。冬季和春季的海冰范围在2006年达到历史最低值;秋季和夏季的海冰范围在2012年达到历史最低值。冬季和春季的海冰范围线是一条较平缓的曲线,波动不大;秋季和夏季的海冰范围线波动较大,特别是在夏季。

4 北极海冰范围与海温气温间的数值分析

4.1 海冰范围与海温气温间的年际变化分析

北极海温增暖与海冰范围减少有密切的关系。从图6可以看出,在北极海冰范围减少的趋势下,海温则表现出明显的上升趋势。1989–2014年北极年平均海冰范围与年平均海温的相关系数为 -0.7911 ,存在明显的负相关关系,海温每上升 0.1°C ,海冰范围减少 $40.87 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。北极海冰减少与海温上升互为因果,互相促进。海温上升,会使海冰的融化加快,海冰范围的减少会导致更多的海洋表面暴露在阳光下,就会吸收更多的太阳能

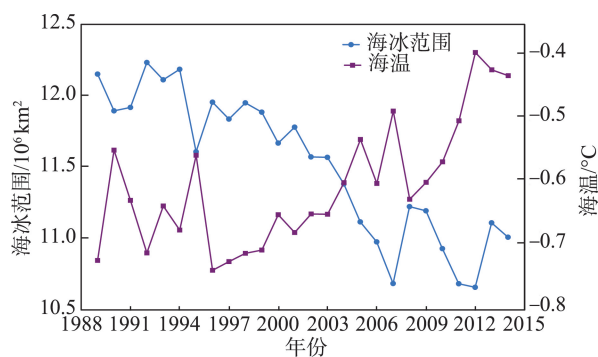


图6 北极海冰范围与海温的变化

Fig. 6 The variation of Arctic sea-ice extent and sea surface temperature

量,从而使海温上升,这是一个不断反馈加强的过程。反之,若海温下降,对冰的增长起到促进作用,太阳辐射被大面积的冰覆盖反射,从而使海温下降。

海温是与大气运动相互影响最紧密的海洋因子,对气温有着重要的影响。从图7可以看出,1989–2014年北极气温呈现上升的趋势,与海温有非常好的正相关关系,相关系数达到 0.7017 。由海冰范围与海温的相关性和海温与气温的相关性,可认为北极海冰变化通过影响北极海温变化,进而影响北极气温变化。1989–2014年北极年平均海冰范围与年平均气温的相关系数为 -0.9467 ,呈现出高度的负相关关系。此外,北极海冰范围与同期海温异常可导致气温异常。在全球气候变暖的趋势下,将会导致北极海洋变暖,从而导致北极海冰总量减少,海温与气温继续上升的趋势。在这样的趋势下,北极具有开阔水域的时间将会增长,对北极航道的开通有积极影响。

4.2 海冰范围与海温、气温间的季节变化分析

北极海冰范围与海温、气温的变化存在季节差异(图8(a)、(b))。一年中,海温最高出现在8月,最低出现在2月或3月;气温最高出现在7月,最低出现在1月或2月;海冰范围最高出现在3月,最低出现在9月。海温气温到达最高时,海冰还在融化,海冰范围还没达到最小值;海温、气温到达最低时,海冰还在冻结,海冰范围还没达到最大值。

延迟相关分析:月平均海冰范围与海温显著同步负相关(图8(c))。1989–2014年北极海冰范围与当月海温的相关系数为 -0.9321 ,与前一个月海温的相关系数为 -0.9227 。这表明,海冰范围与当月及前一个月的海温均有密切关系。海冰范围变化相对于气温变化有滞后性(图8(c))。1989–2014年北极

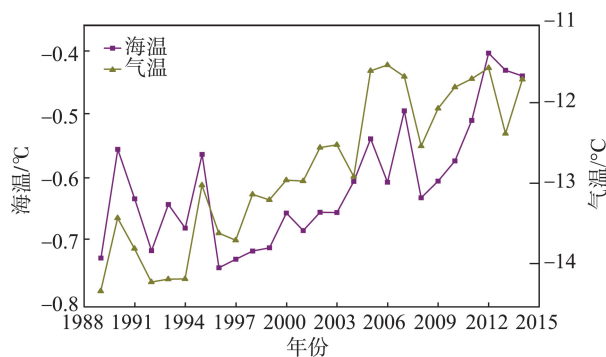


图7 北极海温与气温的变化

Fig. 7 The variation of sea surface temperature and air temperature

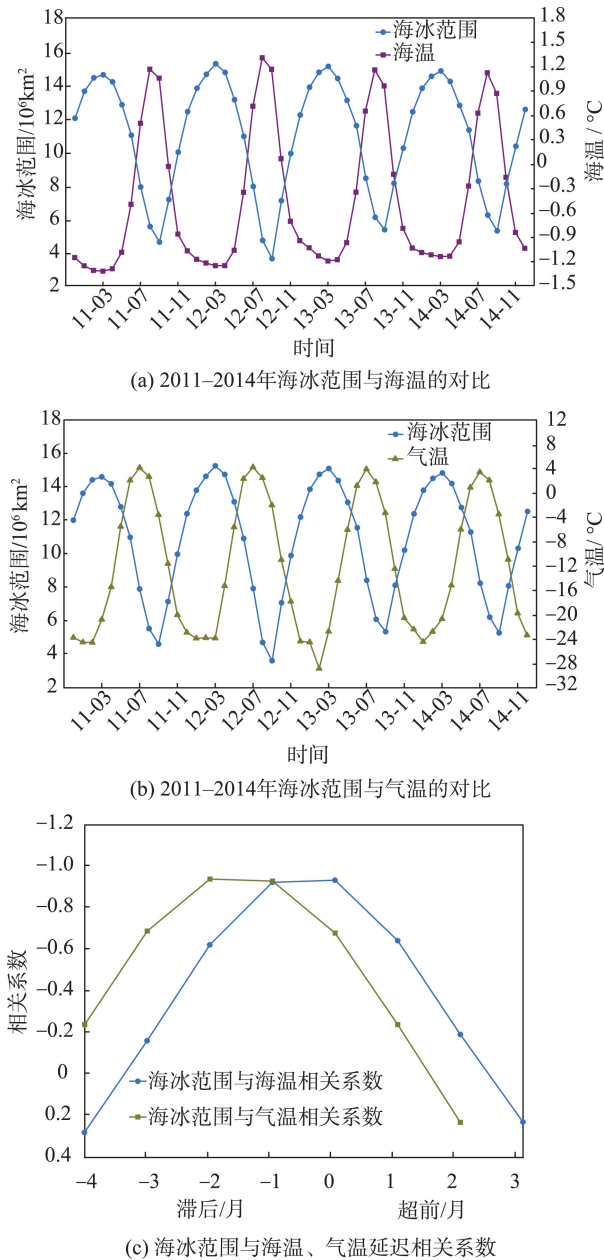


图8 北极海冰范围与海温、气温的变化

Fig. 8 The variation of Arctic sea-ice extent, sea surface temperature and air temperature

海冰范围与当月气温的相关系数为-0.6817,与前一个月气温的相关系数为-0.9360,与前两个月气温的相关系数为-0.9390。结果表明,海冰范围与当月气温相关性不显著,与前一个月及前两个月的气温有较强的负相关关系,海冰范围变化相对于气温变化滞后1-2个月。从滞后性可认为气温变化通过影响海温变化,进而影响海冰范围变化。同时,海冰在融化和冻结过程中会吸收或释放大量的热,对大气和海洋的热交换起很大作用,从而影响周围区域的海温及气温。

4.3 楚科奇海海冰范围线与海温、气温间的数值分析

图9为2010年第4次北极考察、2012年第5次北极考察和2014年第6次北极考察雪龙船在楚科奇海进入海冰区和离开海冰区当天的海冰范围和走航路线图。结合走航海温数据和走航气象数据,得到不同时期海冰范围线的海温和气温(表3),序号表示走航路线与海冰范围线的交点,可看到海冰范围线的海温和气温不是一个特定的值。根据图9,对比分析表3的数据,发现科奇海海冰范围线所在区域的海温、气温与离陆地远近、纬度高低有关。图9中的点4、点8、点9靠近陆地,它们的海温气温都相对较高;点5和点11纬度相对较高,海温和气温相对较低。可以认为:(1)海冰范围线越靠近陆地,海冰范围线的海温、气温越高;(2)海冰范围线纬度越高,海冰范围线的海温、气温越低。

假设以上2个结论都不成立,点6纬度比点5的低,点6比点5更靠近陆地,根据假设点6的海温、气温比点5的低,而点6的海温、气温实际比点5的高,因此假设不成立。假设只有结论(1)不成立,点9纬度比点8的高,点9比点8更靠近陆地,根据假设点9的海温、气温比点8的低,而点9的海温、气温实际比点8的高,因此假设不成立。假设只有结论(2)不成立,点7纬度比点1的高,点7比点1更靠近陆地,根据假设点7的海温、气温比点1的高,而点7的海温、气温实际比点1的低,因此假设不成立。通过以上假设,说明海冰范围线越靠近陆地,海冰范围线的海温、气温越高。海冰范围线越靠近北极点,海冰范围线的海温、气温越低。

5 结论

本文运用1989-2014年北极SMMR和SSM/I海冰范围数据,分析了北极海冰范围的年际变化和季节变化规律及其时空变化特征。结合OI逐月海温数据和NCEP/NCAR逐月再分析气温数据,进行海冰范围与海温、气温间的年际变化和季节变化分析。并基于第4次、第5次和第6次北极考察走航海温气温数据,进行楚科奇海海冰范围线与海温、气温间的数值分析。

(1)1989-2014年,北极海冰范围呈现出减少的总体趋势,同时在减少的过程中突然出现大幅增长的特例。其中,海冰范围越小的月份减少趋势越显著,海冰范围较大的月份减少趋势弱。因此,海冰

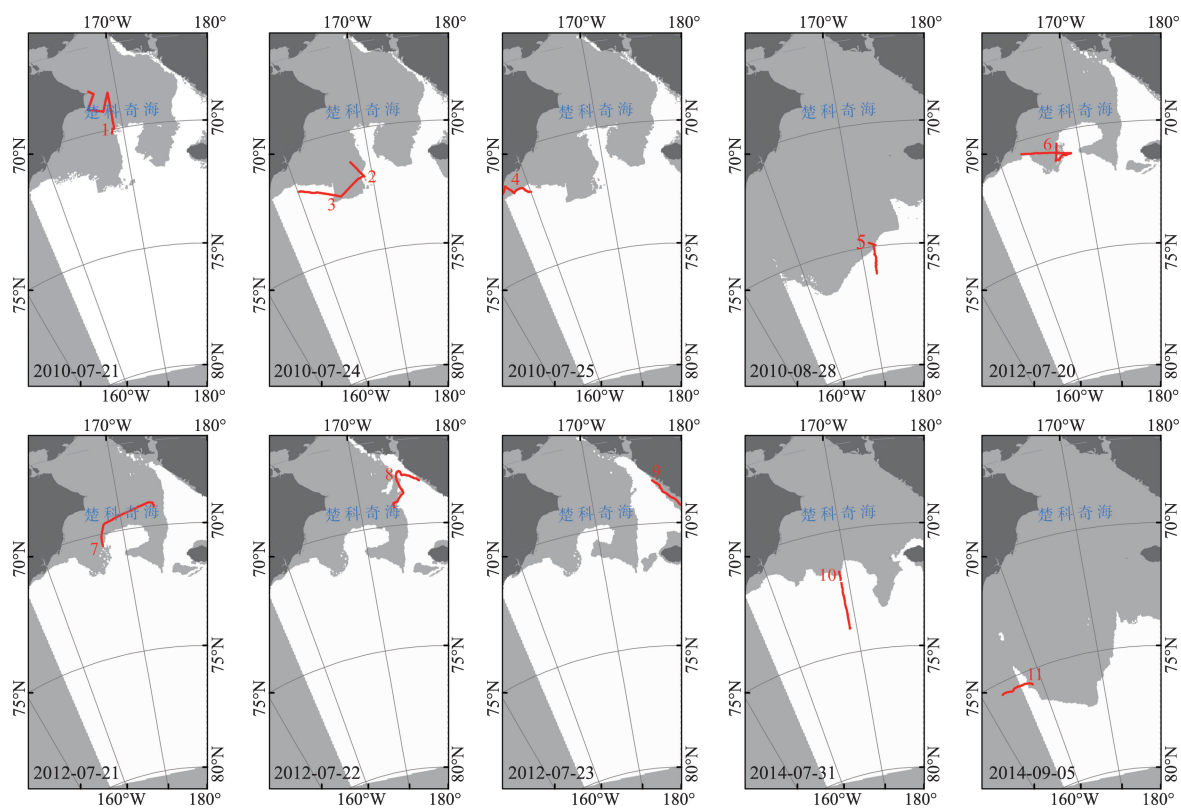


图9 楚科奇海走航路线图(白色为海冰,红色线为走航路线)

Fig. 9 Ship-based track in Chukotskoye More (the white area represents sea-ice and the red line represents the expedition track)

表3 走航海温气温观测值

Tab. 3 Sea surface temperature and air temperature derived from ship-based observations

序号	时间	经度/°	纬度/°	海温/℃	气温/℃
1	2010-07-21	-168.96	69.99	1.675	5.4
2	2010-07-24	-168.43	71.97	0.971	3.1
3	2010-07-24	-164.53	72.42	1.017	1.9
4	2010-07-25	-158.20	71.58	2.175	5.5
5	2010-08-28	-172.05	75.04	-0.732	-1.0
6	2012-07-20	-167.94	70.92	0.801	0.8
7	2012-07-21	-167.30	70.40	0.594	0.6
8	2012-07-22	-174.39	68.05	2.251	6.1
9	2012-07-23	-176.92	68.28	4.223	11.7
10	2014-07-31	-169.01	72.23	1.100	2.6
11	2014-09-05	-157.52	75.48	-0.400	-2.5

范围最小的9月最能代表北极一年中海冰的覆盖情况。

(2)1989-2014年,在北极年平均海冰范围减少的趋势下,北极年平均海温和气温则表现出明显的上升趋势。海冰范围与海温有明显的负相关关系,相关系数为-0.7911,,而海温与气温的相关系数为0.7017。说明北极海冰变化通过北极海温影响北极

气温变化。北极海冰减少与海温气温的上升是互为因果、互相促进的。

(3)1989-2014年,北极海冰范围呈明显的季节变化,海冰的结冻和融化主要发生在各个边缘海。海冰在夏季期间具有快融化、快冻结的特征,融化最快的是7月和8月,结冻最快的是10月和11月。北极海冰范围季节变化相对于海温、气温变化有滞后性,相对于海温滞后0-1个月,相对于气温滞后1-2个月。

(4)夏季,楚科奇海海冰范围线的海温、气温不是一个特定的值。海冰范围线越靠近北极点,所在区域的海温、气温越低;海冰范围线越靠近陆地,所在区域的海温、气温越高。

(5)由于中国北极考察走航实测的海温、气温数据时间不连续,时间序列不长和数据量较少,本文仅对2010、2012和2014年楚科奇海夏季的海冰范围线与海温、气温进行定性分析。此外,海冰的变化不仅仅体现在范围的变化,还体现在密集度、厚度等参数的变化,同时影响海冰变化的因素较多(如海水盐度性质等),后续研究还需要进一步考虑这些要素,进行定量分析。

致谢:数据由国家科技基础条件平台之一的中国极地研究中心和中国南北极数据中心建设的“极地科学数据共享平台(<http://www.chinare.org.cn>)”提供,谨致谢忱!

参考文献(References):

- [1] Screen J A, Simmonds I. The central role of diminishing sea ice in recent Arctic temperature amplification[J]. *Nature*, 2010,464(7293):1334-1337.
- [2] 李概.海冰热力学系统解的稳定性及其最优化控制[D].大连理工大学,2009. [Li K. The stability of solutions and optimal control of sea ice thermodynamic system[D]. Dalian University of Technology, 2009.]
- [3] 徐栋.北极海冰变化与北半球海温关系研究[J].第31届中国气象学会年会S6大气成分与天气,气候变化,2014. [Xu D. Study on the relationship between the variation of Arctic sea ice and Northern Hemisphere sea surface temperature[J]. The 31st Chinese Meteorological Society S6 Atmospheric Composition and Weather, Climate Change, 2014.]
- [4] González M E P, Rodríguez M P G. Evolution in sea ice from 1978 to 2012[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014,72(9):3467-3477.
- [5] 耿家营,管磊,吴凡,等.基于卫星数据的北极海冰变化分析[J].海洋技术学报,2014,33(2):8-13. [Geng J Y, Guan L, Wu F, *et al.* Analysis on the variation of Arctic sea ice using satellite data[J]. *Journal of Ocean Technology*, 2014,33(2):8-13.]
- [6] 康立廷.基于卫星遥感数据的北极海冰覆盖范围和积雪深度变化的研究[D].中国海洋大学,2012. [Kang L T. Study on the variation of Arctic sea ice extent and snow depth on sea ice using satellite remote sensing data[D]. Ocean University of China, 2012.]
- [7] 柯长青,彭海涛,孙波,等.2002年—2011年北极海冰时空变化分析[J].遥感学报,2013,17(2):459-466. [Ke C Q, Peng H T, Sun B, *et al.* Spatio-temporal variability of Arctic sea ice from 2002 to 2011[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2013,17(2):459-466.]
- [8] 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* (1978- 2012), 1999,104 (C9):20837-20856.
- [9] Parkinson C L, Cavalieri D J. Arctic sea ice variability and trends, 1979- 2006[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978- 2012), 2008, 113(C7): C07003, DOI: 10.1029/2007JC004558.
- [10] Dong H J, Zou X L. Variations of sea ice in the Antarctic and Arctic from 1997-2006[J]. *Frontiers of earth science*, 2014,8(3):385-392.
- [11] Serreze M C, Holland M M, Stroeve J. Perspectives on the Arctic's shrinking sea-ice cover[J]. *science*, 2007, 315 (5818):1533-1536.
- [12] Cavalieri D J, Parkinson C L. Arctic sea ice variability and trends, 1979-2010[J]. *Cryosphere*, 2012,6(4):881-889.
- [13] 苏洁,徐栋,赵进平,等.北极加速变暖条件下西北航道的海冰分布变化特征[J].极地研究,2010,22(2):104-124. [Su J, Xu D, Zhao J P, *et al.* Features of northwest passage sea ice's distribution and variation under Arctic rapidly warming condition[J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2010,22(2):104-124.]
- [14] Goosse H, Gerdes R, Kauker F, *et al.* Influence of the exchanges between the Atlantic and the Arctic on sea ice volume variations during the period 1955-97[J]. *Journal of climate*, 2004,17(6):1294-1305.
- [15] Pavlova O, Pavlov V, Gerland S. The impact of winds and sea surface temperatures on the Barents Sea ice extent, a statistical approach[J]. *Journal of Marine Systems*, 2014, 130:248-255.
- [16] 陈锦年,褚健婷,许兰英.南极气候和海冰的时空变化特征及其与太平洋海温场的关系[J].海洋学报,2003,25(6): 39-47. [Chen J N, Chu J T, Xu L Y. Spatio-temporal characteristics of Antarctic temperature and sea ice and their relationship[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2003,25(6):39-47.]
- [17] 武丰民,何金海,祁莉.北极海冰消融及其对欧亚冬季低温影响的研究进展[J].地球科学进展,2014,29(8):913-921. [Wu F M, He J H, Qi L. Arctic sea ice declining and its impact on the cold Eurasian winters: a review[J]. *Advances in Earth Science*, 2014,29(8):913-921.]