崔红艳,乔方利,舒启. 2013 年北极最小海冰范围比 2012 年增加的原因分析[J]. 海洋学报,2015,37(11): 23－32,doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2015.11.003

Cui Hongyan, Qiao Fangli, Shu Qi. Reasons for the increase minimum Arctic sea ice extent in 2013 compared with 2012[J]. Haiyang Xuebao, 2015, 37(11): 23－32, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2015.11.003

2013 年北极最小海冰范围比 2012 年增加的原因分析

崔红艳[1,2],乔方利[1,2*],舒启[1,2]

(1. 国家海洋局 海洋环境科学与数值模拟国家海洋局重点试验室,山东 青岛 266061;2. 国家海洋局 第一海洋研究所,山东 青岛 266061)

摘要: 北极海冰范围从 1979 年有卫星观测资料以来呈现明显下降趋势,尤其是 9 月份。2012 年 9 月北极海冰范围达到有观测记录以来的最小值,而 2013 年 9 月比 2012 年同期增加了 60%。增加的区域主要在东西伯利亚海区、楚科奇海和波弗特海区。本文应用距平和经验模态分解方法,分析了美国国家冰雪数据中心的北极海冰卫星数据、欧洲预报中心的夏季底层大气环流数据和上层海洋的温度,指出 2013 年北极最小海冰范围比 2012 年在北冰洋太平洋扇区增加的原因,是由于表面气温(SAT)降低、海平面气压(SLP)升高、气旋式风场异常、表面空气中水汽含量(SH)降低以及海表面温度(SST)降低 5 个条件形成的冰－SAT、冰－SST 和冰－汽(SH)3 个正反馈机制共同作用造成的。

关键词: 北极;海冰范围;大气环流;上层海洋;反馈机制

中图分类号: P731.15 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-4193(2015)11-0023-10

1 引言

近年来北极地区不仅一年冰存在融化现象,多年冰也开始融化[1－3],且每年的融化区域不同。学者们很早就致力于北极海冰时间、空间分布变化的研究[4－5]。目前,北极海冰的快速融化得到极大关注,科研人员纷纷开始研究北极海冰快速融化的原因[6－9],但比较北极海冰每年融化区域不同的研究并不多[10]。为更好地理解北极地区大气环流状况,本文针对北极海冰范围在 2012 年 9 月达到最小值,而 2013 年 9 月比 2012 年同期增加 60%的特殊现象,分析 2013 年北极最小海冰范围比 2012 年增加的原因。

从 1979 年有卫星观测资料以来,北极海冰面积就呈现下降趋势,尤其在 9 月份[11],但每年融化的区域不同;张璐等指出在过去 30 年间,北极海冰减少经历了从平缓到突变过程,尤其是夏季北极海冰正以每 10 年超过 10%的变化幅度快速减少[12]。北极海冰一般从每年的 6 月份开始融化,在 9 月海冰范围达到最小值,融化期主要在夏季。因此分析夏季北极大气环流和上层海洋的特性,对研究 2013 年北极最小海冰范围比 2012 年增加的原因,是很有必要的。

北极海冰的融化由很多因素导致,例如:人为原因导致的大气温室气体浓度的增加带来的气候变化[6];大气和海洋环流的改变[8－9];此外,云层覆盖、水汽含量的作用也是研究人员争议的话题[7]。Stroeve 等对 2007 年 9 月北极海冰达到有观测记录以来

收稿日期: 2015-04-15;**修订日期:** 2015-06-09。

基金项目: 极地专项极地对全球和我国气候变化影响的综合评估(CHINARE2015－04－04);国家自然科学重点基金(41406027)。

作者简介: 崔红艳(1984－),女,山东省临沂市人,博士,从事北极海冰对气候变化影响研究。E-mail:cuihy@fio.org.cn, 403160221@163.com.

*通信作者:** 乔方利,研究员,博士生导师。E-mail:qiaofl@fio.org.cn

的次小值的现象给出合理解释[13]，认为是最近几十年来气候变化加速和“北极放大效应”最直接的体现[14—15]。Kay 等指出波弗特高压区域的暖空气对流、云的减少、表面短波辐射的增加，都能导致北极海冰观测面积的急剧下降[16]。Polyakov 等认为，近几十年北大西洋中层水在北冰洋俄罗斯区域的增暖，对北极冰盖的消失起很大作用[17]。Rigor 和 Stroeve 研究了冬季风的变化，如北极涛动(AO)，通过分析经向传输到弗拉姆海峡较厚的多年冰的量，来研究夏季北极海冰面积[1—3]。虽然上述文章能够解释夏季北极海冰为什么融化，但不能解释为什么 2012、2013 年这两个特殊年份北极海冰融化区域的不同。Devasthale 等利用美国宇航局 Aqua 卫星仪表板上的大气红外探测器(AIRS)提供的三维大气热力学信息，比较了 2007、2012 年北极秋季海冰达到最小记录时的大气状况[10]，为本研究提供重要信息。

夏季大气环流状况，对控制北极海冰范围起很重要的作用[18—22]。Ogi 和 Wallace 研究表明，夏季北冰洋上空反气旋环流异常，有利于 9 月份北极海冰范围达到低值[23]。融化季节的前期条件，比如：风场、热力学条件和表面参数，是促成海冰融化的重要因素[24—27]。Screen 等讨论了北极常年冰剧烈年际变化与夏季北极风暴异常活动之间的联系[28]。刘喜迎和刘海龙通过全球海冰－海洋耦合模式(MITgcm)认为，地表气温变率和向下长波辐射通量变率，是造成海冰面积减少的主要原因[29]。而海冰覆盖面积减少和海冰密集度下降，使海洋吸收的热量增加到原来的 500％以上[30]，这些新增的能量主要用于融化海冰，形成加速海冰融化的正反馈，使海冰密集度进一步降低[31]。

本文通过研究北极地区夏季底层大气环流和上层海洋状况，来解释为什么 2013 年 9 月北极海冰与 2012 年同期相比增加 60％，且增加的区域主要在波弗特海、楚科奇海以及东西伯利亚海。本文第 2 部分为数据来源介绍，第 3 部分为结果分析，第 4 部分总结和讨论。

2 数据来源和方法

海冰资料由美国国家冰雪数据中心(NSIDC)提供的 1979 年 1 月至 2013 年 12 月北半球逐月海冰密集度资料，分辨率最小达到 25 km。海冰密集度占网格总面积的比例，用 0～1 数值范围表示，0 表示无冰，1 表示全部为海冰覆盖，0.1 表示该网格有 10％被海冰覆盖。文中北极海冰范围指海冰密集度超过 15％的部分[32]，用 NASA 团队算法从扫描多通道微波辐射计和特殊微波、成像传感器获取[33]。

气象要素场资料如表面气温(SAT)、海表面气压(SLP)、表面风、水汽(SH)和海表面温度(SST)数据均来自欧洲预报中心(ERA-Interim)再分析数据集。时间为 1979 年 1 月至 2013 年 12 月，文中数据选择的分辨率为 1.5°×1.5°。因为 ERA-Interim 再分析数据集在分辨率、模式的物理背景、四维变量数据同化和变量偏差纠正等方面比卫星辐射资料有关键性提高[34—35]。卫星辐射数据的偏差校正考虑到随时间变化的偏差，例如观测网络的变化和卫星轨道的漂移等。与先前 ERA-40 再分析数据集相比，ERA-Interim 再分析数据集受虚假信息的影响较小，能更加真实的描述北极对流层气温。夏季选为当年 6－8 月(JJA)，秋季为 9－11 月(SON)。

文中采用的经验模态分解(Empirical Mode Decomposition，EMD)方法是由 Norden. E. Huang 等(1998 年)提出的一种崭新的、自适应数据处理方法。该方法不需要先验假设基底形式，能够自适应地将信号中的不同尺度波动逐级分开，表征为一系列本征模函数(Intrinsic Mode Function，IMF)与趋势之和。每个 IMF 必须满足以下特征：(1)极值点数与跨零点数一致或至多相差 1；(2)极大值包络和极小值包络在每一个点的算术平均和为零。

EMD 方法非常适合非线性、非平稳数据的分析，其实现步骤可概括为如下筛分过程。对于时间序列 $X(t)$，第一，确定 $X(t)$ 的极大(小)值点，对极值点做三次样条曲线拟合得到上(下)包络线。记上下包络线的均值为 m_1，定义

$$h_1(t) = X(t) - m_1; \tag{1}$$

第二，检查 $h_1(t)$ 是否满足 IMF 的条件，若满足，则令第一个 IMF 为 $c_1(t) = h_1(t)$，并进入步骤 3；若不满足，对 $h_1(t)$ 重复步骤 1，计算 $h_1(t)$ 的上下包络线均值为 m_2，并定义 $h_2(t) = h_1(t) - m_2(t)$；如此反复筛分，直至 $h_k(t) = h_{k-1}(t) - m_k(t)$ 成为一个 IMF，令 $c_1(t) = h_k(t)$，进入步骤 3；

第三，移去 $X(t)$ 中的高频信号 $c_1(t)$ 得到残量 $r_1(t) = X(t) - c_1(t)$。判断 $r_1(t)$ 是否单调变化，若是，则结束循环；否则对 $r_1(t)$ 重复步骤 1 和 2。如此不断筛分直至 $r_n(t) = r_{n-1}(t) - c_n(t)$ 是一个单调序列，不可再被分解，此时代表原始数据序列的均值或趋势。通过步骤 1～3，$X(t)$ 可表征为：

$$X(t) = \sum_{j=1}^{n} c_j(t) + r_n(t). \quad (2)$$

2012 年 9 月,北极海冰范围达到有观测记录以来的最小值,但 2013 年北极海冰的范围,并没有延续 2012 年的状态继续快速融化,而突然比 2012 年增加了 60%(来自 NSIDC 资料)。2012 年 9 月 16 日,北极海冰最小值只有 3.41×10^6 km^2,而 2013 年 9 月 13 日北极海冰达到 5.1×10^6 km^2,与 2009 年 9 月 13 日的 5.13×10^6 km^2 相当(来自 NSIDC 资料)。并且 2013 年的北极海冰与 2012 年相比,增加的区域主要在北冰洋太平洋扇区的东西伯利亚海区、楚科奇海扇区和波弗特海区(图 1)。本文对 2012、2013 年夏季底层大气环流各变量和上层海洋温度模态进行分析,利用冰—温(SAT 和 SST)和冰—汽(SH)3 个正反馈机制、表面风场异常等,研究 2013 年秋季北极海冰比 2012 年秋季增加 60%的原因。

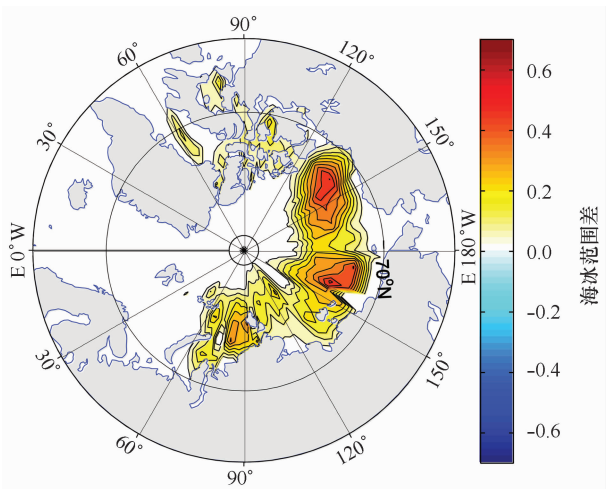


图 1　2013 年 9 月北极海冰范围与 2012 年海冰范围之差

Fig. 1　The difference of Arctic sea ice extents in September of 2012 and 2013

3　结果分析

夏季的 SAT 异常分布,如图 2 所示。2012 年 6、7 月,在喀拉海、西伯利亚区域、格陵兰岛、维多利亚群岛等区域,SAT 正异常,而波弗特海扇区在 2012 年夏季,SAT 都升高明显。气温正异常的区域,北极海冰都融化了。较高的 SAT 能提供海冰融化所需的热量,得出导致 2012 年西伯利亚海区和波弗特海海冰融化的原因之一:SAT 正异常。SAT 升高,促进海冰融化;海冰融化后,表面反照率大大降低,使更多的太阳辐射能量进入低层大气和表面海洋,从而 SAT 升高,形成 SAT 与海冰的正反馈机制。2013 年 6 月,在加拿大北部、巴伦支海、喀拉海、北地群岛等区域 SAT 明显正异常,7、8 月,在喀拉海和巴伦支海 SAT 正异常,导致这些区域的海冰融化。然而 8 月,在北冰洋太平洋扇区的东西伯利亚海、楚科奇海以及波弗特海区 SAT 呈现负异常,阻止了海冰的融化,使该扇区海冰没有融化(图 1)。2012、2013 年夏季,喀拉海和西伯利亚地区,都存在 SAT 正异常分布(图 2),这两年海冰在两个区域都消失了(图 1),而 2013 年,在北冰洋太平洋扇区的波弗特海、楚科奇海和东西伯利亚海区 SAT 负异常(图 2),才使这个扇区的海冰没有完全融化。这种现象正是海冰和 SAT 正反馈机制作用的结果。

为进一步分析 SAT 和北极海冰融化之间的关系,验证 SAT 升高和海冰融化不具有偶然性。本文计算了这两个变量 1979—2013 年的相关系数(图 3)。其中 SAT 选取 60°N 以北的区域,它们的相关系数为−0.84,两者之间显著负相关,海冰融化伴随着 SAT 的升高。文中还用 EMD 方法,对 SAT 和北极海冰面积进行分解,讨论了它们长期的变化趋势(图 3)。从图中可知,北极秋季海冰面积从 1979 年有卫星观测以来出现下降趋势,而 SAT 出现上升趋势,尤其 1996 年后,海冰下降速度明显加快,同时 SAT 升温也加快。从 EMD 分解的长期变化趋势,也可看出北极海冰和北极 SAT 呈现负相关。北极海冰减少,SAT 升高,这正是北极近几年较明显的“北极放大效应”。另外,SAT 正异常,还会导致大气环流中其他变量的改变,进而影响北极海冰的融化。

SAT 作为底层大气环流的主要变量,它的高低不仅直接决定海冰的融化与否(图 2),也会影响 SLP 的高低、风场的改变(图 4)和 SH 的多少(图 5),从而又会决定海冰的融化与否(图 1)。

SLP 与风场对北极海冰的融化,也起重要作用。图 4 为 2012 年和 2013 年夏季 SLP 和表面风的异常场。2012 年 6 月,西伯利亚地区和格陵兰岛周边,存在明显高压中心,形成从西伯利亚吹向极地的风场,从较低纬度带来的暖湿气流,促使北冰洋西伯利亚扇区海冰融化。2012 年 7、8 月,北冰洋东部太平洋扇区 SLP 负异常,形成反气旋式风场异常,容易造成空气对流下沉,较易形成晴好天气,太阳辐射增强,使该区域的海冰融化。2013 年 6 月,北极区域存在明显低压场,延伸至北大西洋;而在东欧平原和西伯利亚平原

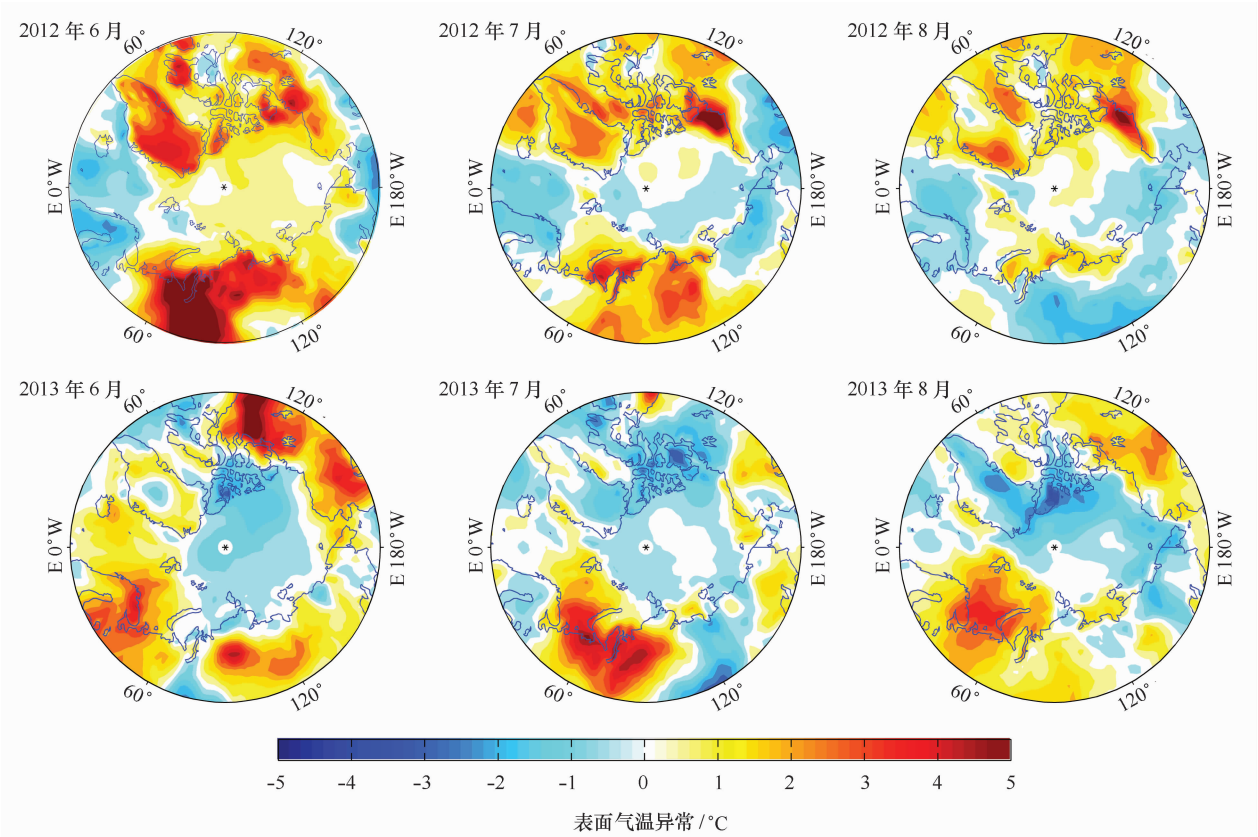


图 2 对应 1979—2012 年夏季平均气候态的 2012 和 2013 年夏季表面气温异常

Fig. 2 Surface air temperature anomalies in the boreal summer in 2012 and 2013, the climatological surface air temperature is from 1979 to 2012

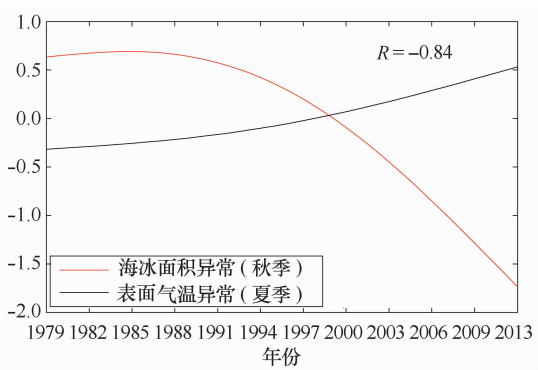


图 3 1979—2013 年秋季北极海冰面积异常和夏季表面气温异常的 EMD 分解

Fig. 3 The trend of Arctic sea ice area anomalies in SON and surface air temperature anomalies in JJA from 1979 to 2013 using EMD method

存在高压场。7 月，低压场向北大西洋移动，高压场向喀拉海、拉普捷夫海等海区移动。SLP 的异常形成从西伯利亚地区吹向极区的异常风场，携带着来自低纬度的暖湿空气，造成西伯利亚扇区的海冰融化。2013 年 8 月，东西伯利亚海区、楚科奇海和波弗特海，存在明显高压中心，形成气旋式风场异常，容易造成空气对流上升，较易形成阴雨天气，太阳辐射减弱，不利于海冰融化，使这部分区域海冰得以保留。

至此，2013 年与 2012 年相比，海冰在北冰洋太平洋扇区没有融化的原因之二：该海区的 SLP 在 2013 年夏季出现正异常，形成气旋式风场异常，阻止了海冰融化；而在 2012 年 SLP 出现负异常，形成反气旋性风场异常，促进海冰的融化。SAT 正异常分布的区域，SLP 也正异常（图 2、图 4），表面风场的向极风也加强，使得较低纬度温暖的空气吹向极区，促进了北极夏季海冰的融化。

空气中的水汽作为一种温室气体，在海冰融化的过程中，也起重要作用（图 5、图 6）。SH 较高的区域（图 5），都是 SAT 出现正异常的区域（图 2）。空气中较高的水汽含量，能阻止表面长波辐射进入外太空，反射回来的长波辐射又使得 SAT 升高，SH 增加。空

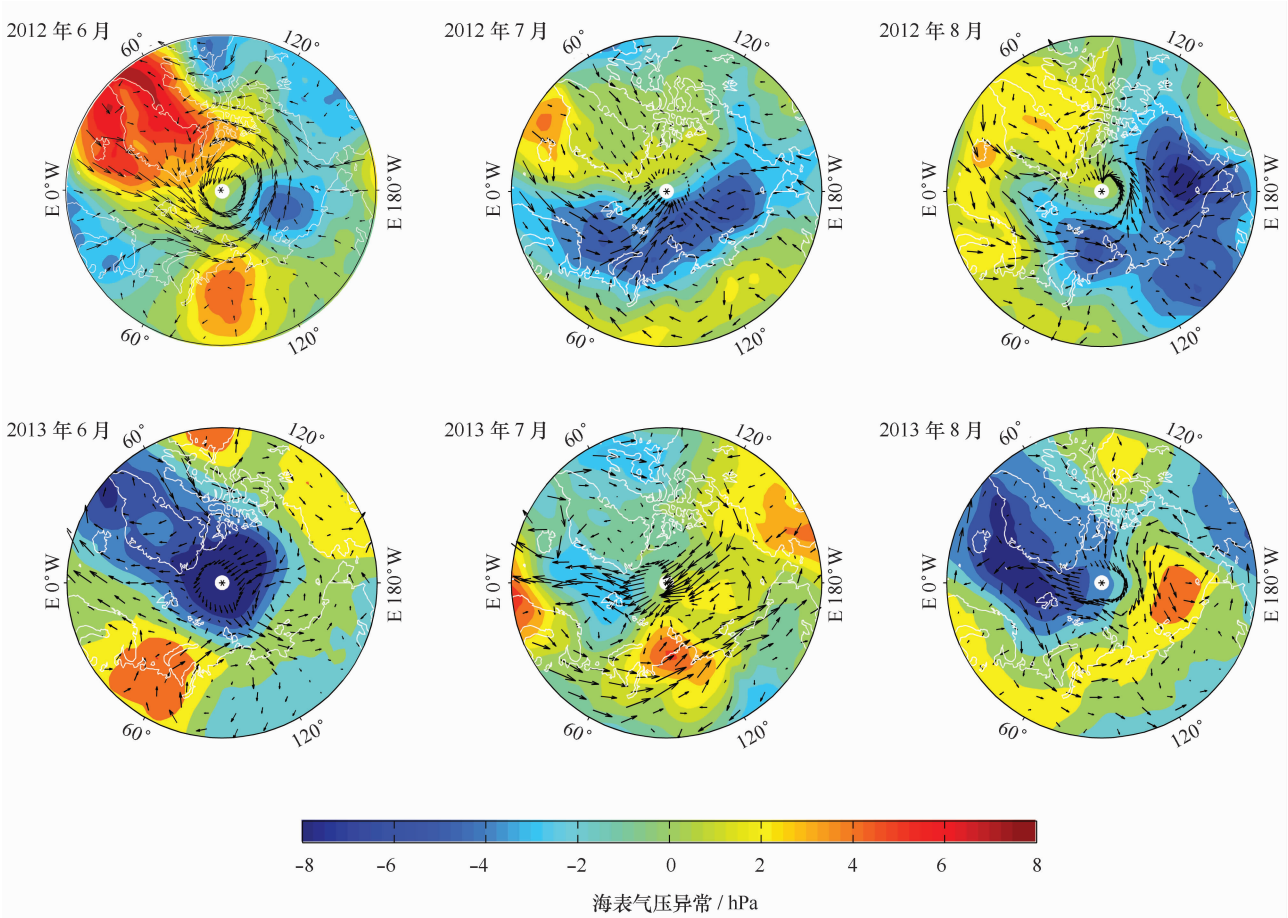


图 4　对应 1979—2012 年夏季平均气候态的 2012 和 2013 年夏季海表面气压异常和 925 hPa 风场异常

Fig. 4　Sea level pressure anomalies and 925 hPa surface wind anomalies in the boreal summer in 2012 and 2013, the climatological sea level pressure and surface wind are from 1979 to 2012

气水汽含量增加,有利于海冰的融化;另外,海冰融化的过程,也会逐渐向大气释放出水汽;海冰融化后,海水面积增加,蒸发也增加,又使得空气中水汽含量增加,形成了冰—汽(SH)正反馈机制。

从空气 SH 的异常分布图中可看出(图 5),2012 年和 2013 年 SH 和表面气温的异常分布基本一致(图 2、图 5)。2012 年夏季,SH 在西伯利亚区域和波弗特海扇区都很高,促使了这个区域海冰的融化。2012 年夏季水汽含量与 2013 年夏季相比,在北冰洋东部太平洋扇区没有出现明显负异常,从而该区域海冰在 2012 年融化。2013 年 7、8 月,表面 SH 在海冰融化的区域,都存在明显正异常(图 5),如北冰洋的东欧平原和西伯利亚平原扇区。在加拿大北部波弗特海区域,SH 明显降低,使得这部分海冰没有融化。2013 年 6、8 月,北冰洋东部太平洋扇区,海冰没有融化的区域,SH 明显降低。

为从长期趋势讨论空气中 SH 高低和北极海冰融化的关系,文中计算了 1979—2013 年的极区夏季 SH 异常和北极秋季海冰面积异常的相关系数。其中表面水汽选取 60°N 以北的区域,得到它们的相关系数为—0.71(图 6),SH 含量与北极秋季海冰呈明显负相关。文中用 EMD 的方法,分析了它们 1979—2013 年的长期变化趋势。从图 6 可知,北极秋季海冰下降趋势很明显,空气中 SH 呈现上升趋势。说明长期以来夏季表面空气中 SH 增多,与北极秋季海冰的融化有很大关系。北极夏季表面 SH 升高,有利于海冰的融化;海冰融化又向空气中释放更多的水汽,反过来使空气中水汽含量增多,正是冰—汽正反馈机制的结果。北极夏季表面 SH 从海冰融化初期开始上升,与 SAT 升高相一致(图 3)。

不仅海冰上部的底层大气环流异常,如 SAT、表面风场、SLP、表面的 SH,与海冰融化有直接关系。海冰底部的上层海洋温度,与海冰的融化也有直接关系。海水温度的高低,直接影响到海洋传递给海冰热

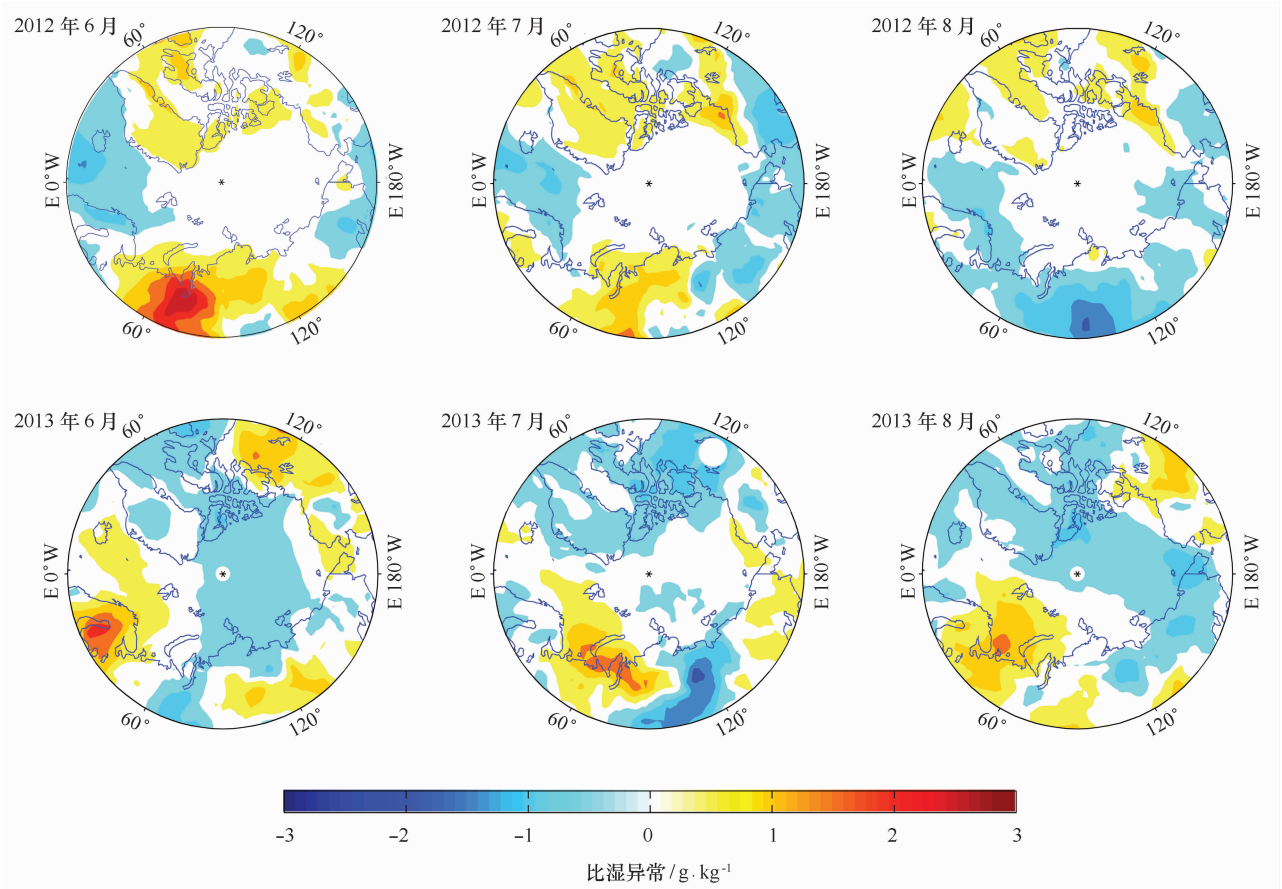


图 5 对应 1979－2012 年 1 000 hPa 比湿场气候态的 2012 和 2013 年夏季 1 000 hPa 比湿异常

Fig. 5 Maps of 1 000 hPa specific humidity anomalies in the boreal summer in 2012 and 2013, the climatological specific humidity is from 1979 to 2012

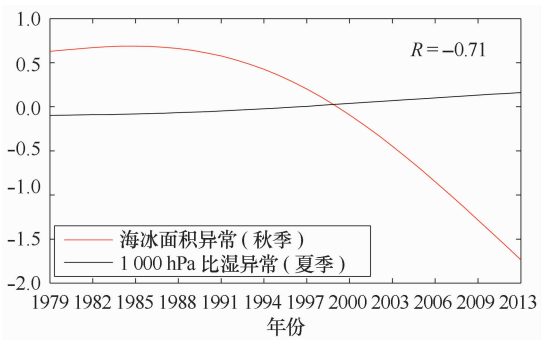


图 6 1979－2013 年秋季北极海冰面积异常和夏季 1 000 hPa 比湿异常的 EMD 分解

Fig. 6 The trend of Arctic sea ice area anomalies in SON and 1 000 hPa specific humidity anomalies in JJA from 1979 to 2013 using EMD method

量的多少，导致海冰能否快速的融化。下面讨论夏季上层海洋的温度异常分布(图 7)与 2013 年北极海冰融化的关系。

2012 年海冰融化较多的巴伦支海、喀拉海区域以及波弗特海区域，都出现 SST 升高现象，导致了这些区域海冰融化。尤其波弗特海明显的正异常，会导致此海区周边的海冰融化。2013 年 7、8 月，SST 在巴伦支海和喀拉海明显正异常，是导致这部分海冰融化又一个原因。2013 年 8 月份，在北冰洋东部太平洋扇区 SST 出现负异常，不利于该海区海冰的融化。从而得出，2013 年秋季海冰与 2012 年相比，在北冰洋太平洋扇区没有融化的另一个原因：夏季 SST 降低，不能为海冰的融化提供足够的热量。海冰融化和上层海洋温度的正反馈机制作用在这得到验证。

在北冰洋边缘区域，SST 的高低对海冰融化起很大作用。海冰融化和上层海洋增暖，形成了冰－表层水温(SST)的正反馈机制。首先，北冰洋沿岸 SST 正异常，可导致沿岸一年冰的融化；其次，因海冰和海洋反照率差异很大，当海冰融化后，大量的太阳辐射热量被上层海洋吸收，会导致上层海洋的增暖。增暖的

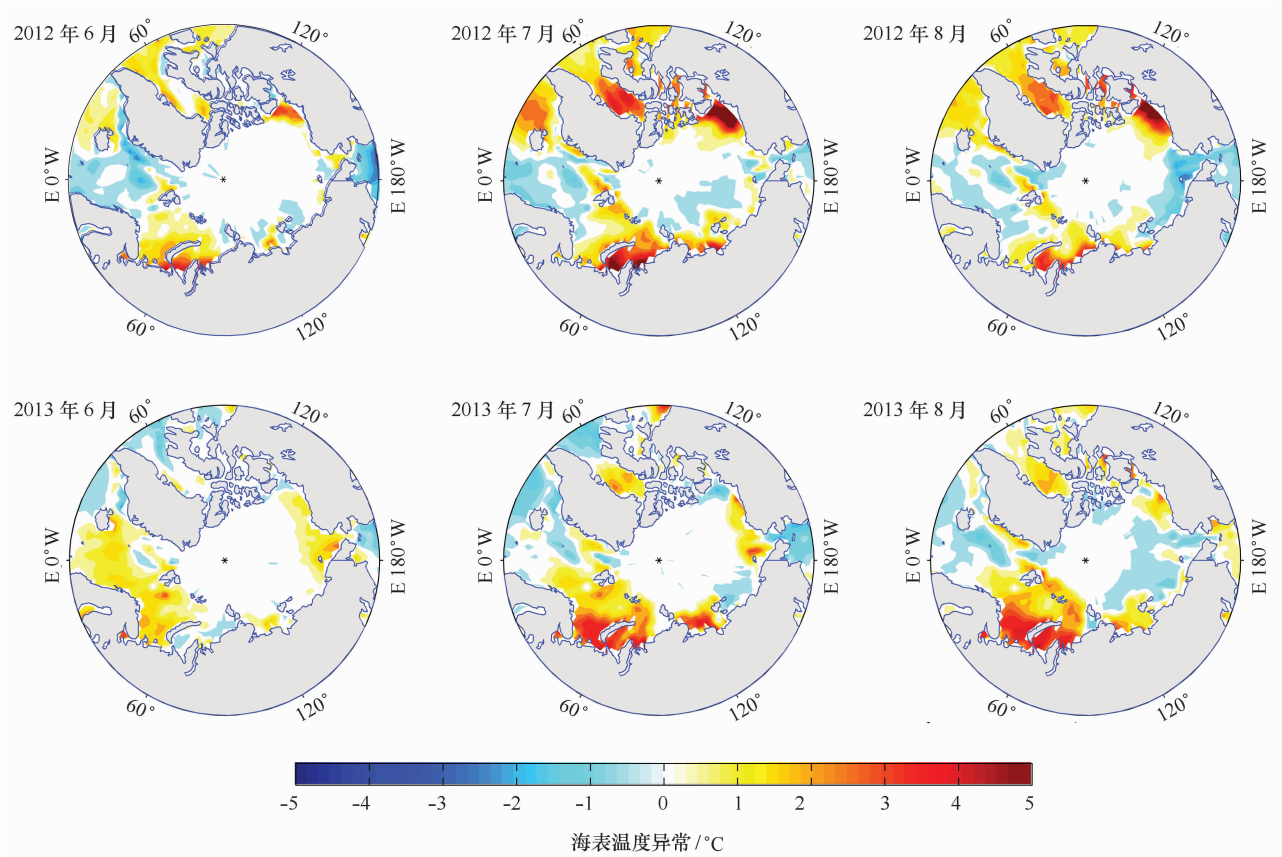


图 7　对应 1979－2012 年的海表面温度场平均气候态的 2012 和 2013 年夏季海表面温度异常

Fig. 7　Sea surface temperature anomalies in the boreal summer (JJA) in 2012 and 2013, the climatological sea-surface temperature is from 1979 to 2012

上层海洋,会将热量传输到附近海冰未融化区域,进而又导致海冰的继续融化;另外,随着海冰的融化,大量低盐度海水漂流在海洋上层,加强海洋上层的层化,这会阻止上层海洋的热量传输到中下层,上层海洋聚集热量,SST 升高,会导致海冰继续融化,并阻止海冰在秋季的慢慢恢复。

同样文中计算了 1979－2013 年的极区夏季 SST 和北极秋季海冰的相关系数,为－0.73,呈负相关。北冰洋 SST 升高,北极海冰减少。通过 EMD 方法,分析它们两者的长期变化趋势(图 8)。从图中可知,伴随着北极秋季海冰明显的下降趋势,SST 也存在上升趋势。

至此,2013 年北极秋季海冰与 2012 年相比,增加区域主要在东西伯利亚海区、楚科奇海扇区和波弗特海区是由于 2013 年夏季,该海区的 SAT 和 SST 降低、SH 降低、SLP 升高以及反气旋式风场异常等。

“北极放大效应”不仅体现在北极表面空气的升温中(图 3),也体现在北冰洋表面海水的升温中(图

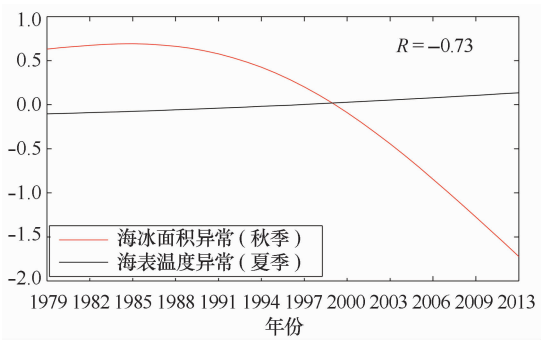


图 8　1979 年至 2013 年秋季北极海冰面积异常和夏季海表面温度异常的 EMD 分解

Fig. 8　The trend of Arctic sea ice area anomalies in SON and sea surface temperature anomalies in JJA from 1979 to 2013 using EMD method

8)。从北极海冰有卫星观测资料以来,尤其近十几年,北极 SAT、SST 的升温速度加快、极区 SH 增加,直接导致夏季海冰的融化;SLP 发生异常变化、表面风场呈现向极风加强的现象,于是在夏季较低纬度的

暖湿气流，容易进入北极海冰区域，又造成了北极夏季海冰的快速融化。

以上分析可知，在北极区域存在强的冰－温（SST 和 SAT）和冰－汽（SH）3 个正反馈机制，共同作用导致极区的海冰快速融化。一方面，随着北极气温的异常升高，SLP 的分布也随之改变，导致了北极表面风场的改变，使较低纬度的温暖、湿润的空气，由南向北进入极区海冰区域，直接导致了海冰的快速融化。在海冰融化后，由于反照率的改变，使更多的热量进入上层海洋和底层大气，又会导致海冰进一步的融化，形成一种冰－温（SST 和 SAT）正反馈机制。另一方面，随着北极部分区域表面气温的升高，空气中 SH 也明显升高，空气中的水汽作为一种温室气体，同样会导致海冰的融化；海冰溶化后又会产生更多的水汽，形成一种冰－汽（SH）正反馈机制。因此北极区域的底层大气环流和上层海洋，通过 3 个正反馈机制，以及风场改变所带来的湿热的空气，促使了北极海冰的融化。

4 讨论

从每年夏季的 6 月份北极海冰进入融化期，经过整个夏季的融化，海冰一般在 9 月份达到每年的最小值。因海冰下面浸入在上层海洋中，而上面部分暴露在空气中，因此，北冰洋夏季底层大气环流的异常和上层海洋的温度异常对研究 2013 年与 2012 年北极海冰融化区域不同有重要意义。2013 年北极海冰范围最小时，比 2012 年同期增加了 60%，增加区域主要在东西伯利亚海区、楚科奇海和波弗特海区。通过分析 NSIDC 北极海冰卫星数据、ERA-Interim 的夏季底层大气环流数据和上层海洋的温度，注意到 SAT 升高、SLP 降低、由低纬度吹向高纬度的风场加强、表面 SH 增多以及 SST 升高，这 5 个条件所形成的冰－SAT、冰－SST 和冰－汽（SH）3 个正反馈机制，共同作用导致了 2013 年北极最小海冰范围比 2012 年的增加。夏季 SAT 升温是导致北极海冰 2013 年比 2012 年增加的主要因素，两者的相关系数达到了－0.84。伴随着 SAT 的升高，SLP 和风场异常促使了北极海冰 2013 年比 2012 年增加。向极风的加强，有利于从低纬度带来温暖湿润的空气，促进了 2012 年极区海冰的融化。表面 SH 和 SST 的升高也促使北极海冰的融化，它们的相关系数分别达到了－0.71 和－0.73。

目前，北极海冰的变化，以及北极海冰对北半球气候变化的影响，已得到了广泛的关注[36－37]。借助北极地区的 3 个反馈机制，通过观测北极区域夏季底层大气环流模态和上层海洋温度状况，可用来预估北极海冰的减少区域和海冰达到最小值时的范围。事实上，还有很多其他因素影响海冰的融化，例如云含量、太阳辐射、海洋热盐环流等，都需要进一步研究。随着科学技术的发展，卫星和现场观测水平的提高，会为认识海冰、大气和海洋提供至关重要的信息，能帮助我们更好的理解北极海冰的融化和底层大气与上层海洋之间的反馈作用。

参考文献：

[1] Rigor I G, Wallace J M, Colony R L. Response of sea ice to the Arctic Oscillation[J]. J Clim, 2002, 15: 2648－2663.

[2] Rigor I G, Wallace J M. Variations in the age of Arctic sea ice and summer sea-ice extent[J]. Geophys Res Lett, 2004, 31(9): L09401.

[3] Stroeve J C, Maslanik J, Serreze M C, et al. Sea ice response to an extreme negative phase of the Arctic Oscillation during winter 2009/2010[J]. Geophys Res Lett, 2011, 38(2): L02502.

[4] 武炳义，高登义，黄荣辉. 冬春季节北极海冰的年际和年代际变化[J]. 气候与环境研究，2000，5(3)：249－258.
Wu Bingyi, Gao Dengyi, Huang Ronghui. The interannual and interdecadal changes of Arctic sea ice in spring and winter[J]. Climate and Environment, 2000, 5(3): 249－258.

[5] 朱大勇，赵进平，史久新. 北极楚科奇海海冰面积多年变化的研究[J]. 海洋学报，2007，29(2)：25－33.
Zhu Dayong, Zhao Jinping, Shi Jiuxin. Study on the Chukchi sea ice for years of change[J]. Haiyang Xuebao, 2007, 29(2): 25－33.

[6] Solomon S, Somerville R, Rusticucci M, et al. Climate Change 2007: The Physical Science Basis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

[7] Schweiger A J, Lindsay R W, Vavrus S, et al. Relationships between Arctic sea ice and clouds during autumn[J]. J Clim, 2008, 21: 4799－4810.

[8] Simmonds I, Keay K. Extraordinary September Arctic sea ice reductions and their relationships with storm behavior over 1979－2008[J]. Geophys Res Lett, 2009, 36(9): L19715 .

[9] Simmonds I, Rudeva I. The great Arctic cyclone of August 2012[J]. Geophys Res Lett, 2012, 39: L054259.

[10] Devasthale A, Koenigk T, Sedlar J, et al. The thermodynamic state of the Arctic atmosphere observed by AIRS: comparisons during the record minimum sea-ice extents of 2007 and 2012[J]. Atmos Chem Phys Discuss, 2013, 13(1): 177－199.

[11] Comiso J C,Parkinson C L,Gersten R,et al. Accelerated decline in the Arctic sea ice cover[J]. Geophys Res Lett,2008,35(1): L01703.
[12] 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.
Zhang Lu,Zhang Zhanhai,Li Qun,et al. The trend of Arctic sea ice anomalies in recent 30 years[J]. Advances in Polar Science,2009,21(4): 344－352.
[13] Stroeve J,Serreze M,Drobot S,et al. Arctic sea ice extent plummets in 2007[J]. EOS Trans AGU,2008,89(2): 13－14.
[14] Screen J A,Simmonds I. The central role of diminishing sea ice in recent Arctic temperature amplification[J]. Nature,2010,464: 1334－1337.
[15] Steele M,Zhang J,Ermold W. Mechanisms of summertime upper Arctic Ocean warming and the effect on sea ice melt[J]. Journal of Geophysical Research,2010,115: C11004.
[16] Kay J E,L'Ecuyer T,Gettelman A,et al. The contribution of cloud and radiation anomalies to the 2007 Arctic sea ice extent minimum[J]. Geophys Res Lett,2008,35(8): L08503.
[17] Polyakov I V,Timokhov L A,Alexeev V A,et al. Arctic Ocean warming contributes to reduced polar ice cap[J]. J Phys Oceanogr,2010,40(12): 2743－2756.
[18] Ogi M,Wallace J M. Summer minimum Arctic sea ice extent and the associated summer atmospheric circulation[J]. Geophys Res Lett,2007,34(12): L12705.
[19] Ogi M,Rigor I G,McPhee M G,et al. Summer retreat of Arctic sea ice: Role of summer winds[J]. Geophys Res Lett,2008,35(24): L24701.
[20] Ogi M,Yamazaki K,Wallace J M. Influence of winter and summer surface wind anomalies on summer Arctic sea ice extent[J]. Geophys Res Lett,2010,37(7): L07701.
[21] L'Heureux M L,Kumar A,Bell G D,et al. Role of the Pacific－North American (PNA) pattern in the 2007 Arctic sea ice decline[J]. Geophys Res Lett,2008,35(20): L20701.
[22] Wang J,Zhang J,Watanabe E,et al. Is the Dipole Anomaly a major driver to record lows in Arctic summer sea ice extent?[J]. Geophysical Research Letters,2009,36: L05706.
[23] Ogi M,Wallace J M. The role of summer surface wind anomalies in the summer Arctic sea ice extent in 2010 and 2011[J]. Geophys Res Lett,2012,39(9): L09704.
[24] Sedlar J,Devasthale A. Clear sky thermodynamic and radiative anomalies over a sea ice sensitive region of the Arctic[J]. Journal of Geophysical Research,2012,117: D19111.
[25] Vihma T,Jaagus J,Jakobson E,et al. Meteorological conditions in the Arctic Ocean in spring and summer 2007 as recorded on the drifting ice station Tara[J]. Gephys Res Lett,2008,35(18): L18706.
[26] Zhang J,Lindsay R,Steele M,et al. What drove the dramatic retreat of arctic sea ice during summer 2007? [J] Geophys Res Lett,2008,35(11): L11505.
[27] Zhang Jinlun,Lindsay R,Steele M,et al. The impact of an intense summer cyclone on 2012 Arctic sea ice retreat[J]. American Geophysical Union,2013,40(4):720－726.
[28] Screen J A,Simmonds I,Keay K. Dramatic interannual changes of perennial Arctic sea ice linked to abnormal summer storm activity [J]. Journal of Geophysical Research,2011,116: D15105.
[29] 刘喜迎,刘海龙.大气变率对北极地区近期海冰变化趋势影响数值模拟研究[J]. 地球物理学报,2012,55(9): 2867－2875.
Liu Xiying,Liu Hailong. The Numerical simulation studies on the influence of the atmospheric variability on the trend of recent sea ice in the Arctic region[J]. Chinese Journal of Geophysics,2012,55(9): 2867－2875.
[30] Perovich D k,Richter M J A,Jones K F,et al. Sunlight,water,and ice: Extereme Arctic Sea ice melt during the summer of 2007[J]. Geophys Res Lett,2008,35: L11501.
[31] Perovich D K,Light B,Eicken H,et al. Increasing solar heating of the Arctic Ocean and adjacent seas,1979－2005: Attribution and role in the ice-albedo feedback[J]. Geophys Res Lett,2007,34: L19505.
[32] 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,1999,104: 15803－15814.
[33] Fetterer F,Knowles K,Meier W,et al. Sea Ice Index (National Snow and Ice Data Center,Boulder,CO) (updated 2009) [R]. National Snow and Ice Data Center,Boulder,2002.
[34] Dee D P,Uppala S. Variational bias correction of satellite radiance data in the ERA-Interim reanalysis[J]. Q J R Meteorol Soc,2009,135(644): 1830－1841.
[35] Dee D P,Uppala1 S M,Simmons1 A J,et al. The ERA-interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system[J]. Q J Roy Meteorol Soc,2011,137(656): 553－597.
[36] Vihma T. Effects of Arctic Sea ice decline on weather and climate: A review[J]. Surveys in Geophysics,2014,35: 1175－1214.
[37] Gao Yongqi,Sun Jianqi,Li Fei,et al. Arctic sea ice and Eurasian climate: A review[J]. Advances in Atmospheric Sciences,2015,32(1): 92－114.

Reasons for the increase minimum Arctic sea ice extent in 2013 compared with 2012

Cui Hongyan[1,2], Qiao Fangli[1,2], Shu Qi[1,2]

(1. *Key Laboratory of Marine Science and Numerical Modeling, State Oceanic Administration, Qingdao* 266061, *China*; 2. *The First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao* 266061, *China*)

Abstract: Satellite data since 1979 show that the monthly mean Arctic sea-ice extent has downward trends, with the largest trend in September. The Arctic sea-ice minimum extent is observed in September 2012. While the minimum Arctic sea-ice area in the following September 2013 increases 60% compared with 2012. The sea-ice increase areas mainly locate in the Pacific section of Arctic Ocean: East Siberian Sea, Chukchi Sea, and Beaufort Sea. By using methods of climatological anomalies and Empirical Mode Decomposition, we investigated the Arctic sea-ice data from the National Snow and Ice Data Center, lower atmospheric circulation pattern and the upper-ocean from ERA-Interim data in summer to explain this sea-ice sharp increase phenomenon. Results show that the increasing of the Arctic sea ice in 2013 compared with 2012 is related to the following five conditions: the surface air temperature (SAT) decrease, sea level pressure (SLP) increase, the cyclonic anomaly of wind field, surface special humidity (SH) and surface sea temperature (SST) decrease. All these five favorable conditions for sea-ice increase are closely related with by the ice-SAT, ice-SST and ice-SH positive feedbacks in the Arctic Ocean.

Key words: Arctic sea ice extent; atmospheric circulation; the upper ocean; feedback