

渤海海冰与西伯利亚高压之间的关系及 与北大西洋涛动之间的可能联系*

药蕾¹, 苏洁^{1,2**}

(1. 中国海洋大学物理海洋教育部重点实验室, 山东 青岛 266100; 2. 青岛海洋科学与技术国家实验室, 山东 青岛 266100)

摘要: 依据对 2000/2001—2014/2015 年冬季渤海海冰范围和海平面气压(SLP)场季节内和年际变化的分析表明, SLP 场与海冰范围关系密切, 其中西伯利亚高压、冰岛低压附近为正相关区, 亚速尔高压附近为负相关区。西伯利亚高压的变化在季节内和年际尺度上同时影响渤海海冰, 北大西洋涛动(NAO)与渤海海冰的相关性主要表现在年际尺度上。研究表明, 渤海海冰逐年冬季的季节内变化有所不同, 在 2003/2004、2004/2005、2007/2008 年存在 9~12 候的显著周期, 与大气 30~60 d 的季节内振荡相对应, 但在 2009/2010 年以后这一周期没有再出现, 而西伯利亚高压相关区 SLP 的 9~12 候信号在整个研究时段相对较明显, 这可以解释在季节内尺度上西伯利亚相关区与海冰范围的相关性在 2009/2010 年以后明显减小的现象; 在年际尺度上, 2007/2008 年以后 NAO(冰岛和亚速尔相关区 SLP)与海冰范围的相关性突然增大, 这一变化是由 NAO 和海冰范围(渤海地区气温)的 2~4 年和 4~8 年周期从 2007/2008 年开始更加契合引起的。NAO 年际周期的变化可能会通过大气环流的北极-亚洲遥相关模态对渤海海冰范围产生影响。

关键词: 渤海; 海冰; 季节内变化; 年际变化

中图法分类号: P732.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-5174(2018)06-001-12

DOI: 10.16441/j.cnki.hdxh.20170128

引用格式: 药蕾, 苏洁. 渤海海冰与西伯利亚高压之间的关系及与北大西洋涛动之间的可能联系[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2018, 48(6): 1-12.

YAO Lei, SU Jie. Relationships between Siberian High and Bohai Sea ice and possible connections between North Atlantic oscillation and Bohai Sea ice[J]. Periodical of Ocean University of China, 2018, 48(6): 1-12.

渤海海冰具有多时间尺度的变化, 与太阳辐射及诸多大气环流因子有着密切的关系。对渤海海冰年际变化的周期性研究由来已久, 张启文等对 1951—1980 年的渤海冰情等级进行分析, 得到了 10 年左右的周期^[1]; 李剑等由 1953—2000 年的渤海海冰面积指数得到了 2~4、6~8 以及 16 年左右的周期^[2]; 邓冰等的分析显示, 1951—2000 年辽东湾和渤海湾冰级有 2.7、4.4 和 9.6 年的主周期, 莱州湾冰级有 2.7 和 12 年的主周期^[3]; 郑冬梅等针对 1950/1951—2012/2013 年渤海冰情等级的分析结果指出, 主周期分别为 2.6、4.0、5.8、6.8 和 11 年, 总的来说渤海海冰存在 2~7 年和 10 年左右的周期^[4], 其中 10 年左右的周期基本对应着 11 年的太阳黑子相对数变化周期, 是所有周期中比较确定的, 其他周期在选择不同的时间段和海冰变量时结果有一定的差别。以上研究主要针对渤海海冰的年际变化, 对其季节内尺度上的周期研究目前还很少。

在季节内尺度上渤海海冰受东亚冬季大气变化的

影响, 对大气中的季节内低频振荡进行响应, 可能存在与之相近的周期。围绕东亚冬季大气的季节内低频振荡已有许多研究^[5], 例如, 寒潮的活动周期为 20 天左右^[6], 强冷空气活动具有准 40 天周期的振荡^[7], 东亚大槽的加强与向东南方向伸展有 30~50 d 周期的振荡^[8]等。这些结论同样由于所选资料年代和长度的不同而有所差异, 但大致指出了东亚冬季的冷过程存在着 10~20 d 周期的准双周振荡和 30~60 d 周期的季节内振荡^[9-10]。

对于渤海海冰变化成因的研究同样主要集中在年际尺度上, 主要分为两个方向: 一方面, 渤海海冰与东亚大气环流变化密切相关, 冬季西伯利亚高压、冬季风较强时, 冷空气活跃, 渤海海冰相应偏重^[11]。渤、黄海海冰轻、重极端年份的冬季 500 hPa 位势高度合成场上差异最显著的系统是乌拉尔山高压脊, 地面气压场上差异最显著的系统是西伯利亚高压; 亚速尔高压、冰岛低压等大气活动中心的强度与渤、黄海冬季气温变化

* 基金项目: 气象公益性行业项目(GYHY201306049); 国家自然科学基金委员会基金项目(41676189)资助

Supported by Meteorological Commonweal Project(GYHY201306049); National Natural Science Foundation of China(41676189)

收稿日期: 2017-03-18; 修订日期: 2017-05-22

作者简介: 药蕾(1992-), 女, 硕士生, 从事渤海海冰与东亚大气环流变化方向研究。

** 通讯作者: E-mail: sujie@ouc.edu.cn

和渤海冰情有一定的联系^[12]。秋季北极海冰密集度、冬季北极涛动等气候因子与渤海冰情也存在负相关关系^[13]；另一方面，渤海海冰的年际变化与西太平洋副热带高压存在相关关系。有研究显示，拉尼娜现象的发生使西太平洋副高、东亚大气纬向环流减弱，有利于冷空气南下，进而使渤海冰情加重^[14]。统计结果也表明，1975—2006年8和12月太平洋副热带高压面积和强度指数与渤海冰情等级具有良好的相关关系，尤其在海冰偏轻年^[15]。副高对渤海海冰的影响较为复杂，在不同的时期有所不同。在1972年以前，冬季副高面积和强度指数与渤海海冰之间的关系较密切，但在1972年之后冬季副高与渤海海冰之间的关系明显减弱，秋季副高与海冰之间的关系却明显增强^[16]。

作为一年冰，渤海海冰变化特征中最为明显是季节变化，且与气温变化直接相关。李彦青等人研究认为，渤海海冰的季节变化受冬季大气环流因子的影响，500 hPa上存在两个负相关区，其中东亚关键区位于渤海西侧，西太关键区位于极地低压和西太副高之间。当东亚大槽偏强，或西太平洋副高脊线偏南，面积和强度偏小时，有利于冷空气的发展南下，从而使渤海冰情偏重^[17]。

渤海海冰不仅有年际和季节变化，季节内和天气尺度上也有明显的变化。受大气环流的影响，与强冷空气过程密切相关。前人对渤海海冰的研究主要从统计学角度在年际尺度上得到了不同的大气影响因子，但对各因子在渤海海冰不同时间尺度变化中的相对重要性认识还十分欠缺。受海冰数据不足的限制，针对季节内变化的研究还比较少。本文针对渤海海冰范围候平均序列^[17]的变化特征进行研究，分析其季节内和年际变化的大气影响因子，旨在揭示不同时间尺度下影响因子的作用和变化，并解释大尺度大气环流与渤海海冰变化的可能联系，为海冰的中短期预报提供基础。

1 数据和方法

本文使用的海冰数据为2000/2001—2014/2015年冬季渤海海冰范围候平均序列，其中2000/2001年冬季指从2000年11月第4候到2001年3月第3候，共24候^[17]。气象场数据包括美国国家环境预报中心(NCEP)提供的：(1)2000—2015年海平面气压(SLP)场、500 hPa位势高度场和地面气温场的北半球逐日再分析资料；(2)1948—2015年海平面气压场、500 hPa位势高度场和地面气温的北半球月平均再分析资料，分辨率均为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 。同时使用了中国地面国际交换站气候资料月值数据集中1951—2015年营口、大连和淮

坊台站的气温数据。

本文用带阻滤波方法对渤海海冰范围数据进行处理，去掉信号最为显著、可能造成序列不连续的季节信号，针对海冰范围的季节内和年际尺度变化进行研究，结合小波分析方法分析其周期特征，并利用相关、滑动相关分析等方法研究海冰范围变化的影响因子。对SLP场与海冰范围主要相关区的海平面气压进行区域平均，并滤波去掉季节变化，作为该相关区的SLP指数。通过小波分析、合成分析等方法对气象因子的变化及其对海冰的作用进行探讨。

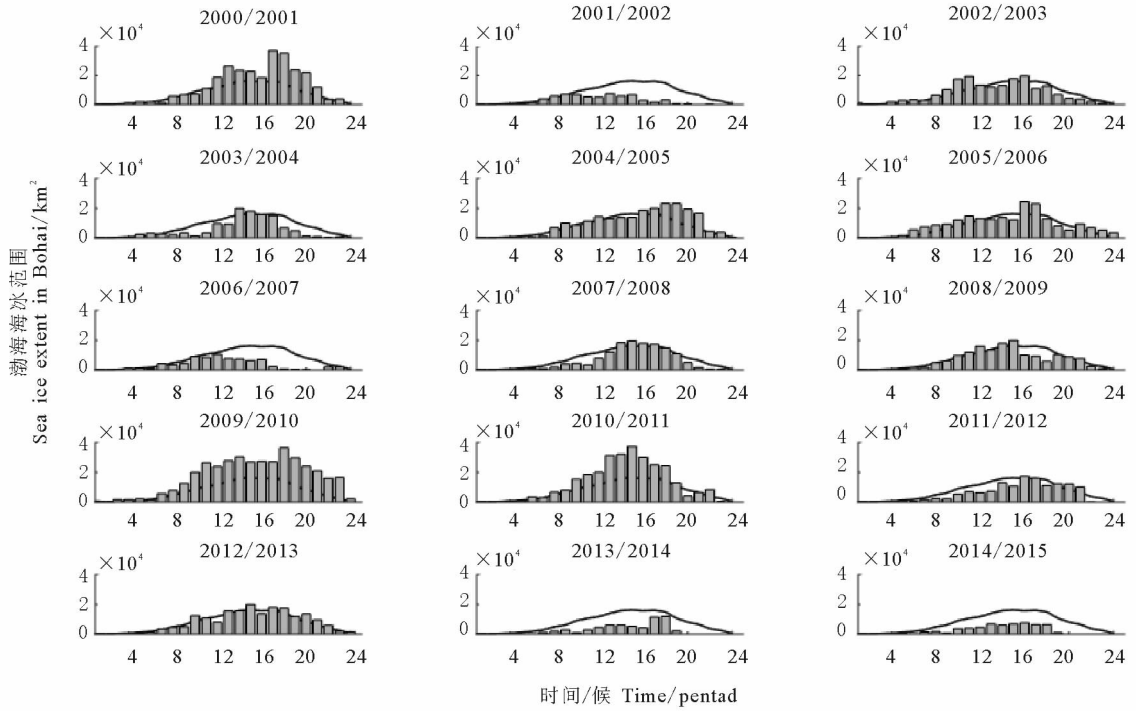
2 渤海海冰范围变化的基本特征

由2000/2001—2014/2015年冬季渤海海冰范围候平均序列(见图1)可以看出，渤海海冰具有很强的季节变化，此外还存在年际变化和季节内变化。2000/2001、2009/2010、2010/2011年渤海海冰范围较大，2001/2002、2006/2007、2013/2014、2014/2015年则较小，具有明显的年际变化。海冰从开始出现到最大值，再到结束的过程并不是线性增加和减小的，其中还存在着季节内尺度上的变化，出现双峰型(如2004/2005年)和三峰型(如2012/2013年)等。渤海海冰受我国冬季气候的影响很大，在冬季风盛行，寒潮爆发频繁的年份，冰情偏重，而当气温在季节内尺度上发生剧烈变化时，渤海海冰可能相应地发生较快速的变化，因此渤海海冰在年际和季节内尺度上都受东亚大气变化的影响，有必要进一步了解不同的气象因子与渤海海冰不同时间尺度变化之间的关系。

针对渤海海冰季节内变化的周期性，分别对2000/2001—2014/2015年逐年冬季海冰范围候平均序列距平进行小波分析。由图2可以看出2003/2004、2004/2005、2007/2008年存在9~12候的显著周期，其他年份还存在较为明显的4~7候和2~3候的周期。其中2~3候周期与东亚大气中10~20 d的准双周振荡相对应，9~12候周期与30~60 d的季节内振荡相对应。因此，渤海海冰作为东亚海气环流系统中的一员，与东亚冬季的冷过程存在着较为一致的季节内变化周期。针对渤海海冰年际变化的周期性，由于本文采用的海冰参数的研究时段较短，将在5.3节中以渤海气温作为代替指标进行讨论。

3 海平面气压场与渤海海冰范围变化的相关性

首先构造2000/2001—2014/2015年渤海海冰范围的候平均序列。由于海冰只有冬季的数据，在图1中每年的海冰数据都代表从无冰情况开始，经历海冰的冻结、演变，到海冰完全消融的一个完整的海冰生消



(蓝色实线为冬季海冰范围的多年平均。Blue line represents the multi-year average.)

图 1 2000/2001—2014/2015 年冬季候平均的渤海海冰范围

Fig. 1 The pentad mean sea-ice extent in Bohai Sea during the winter of 2000/2001 to 2014/2015

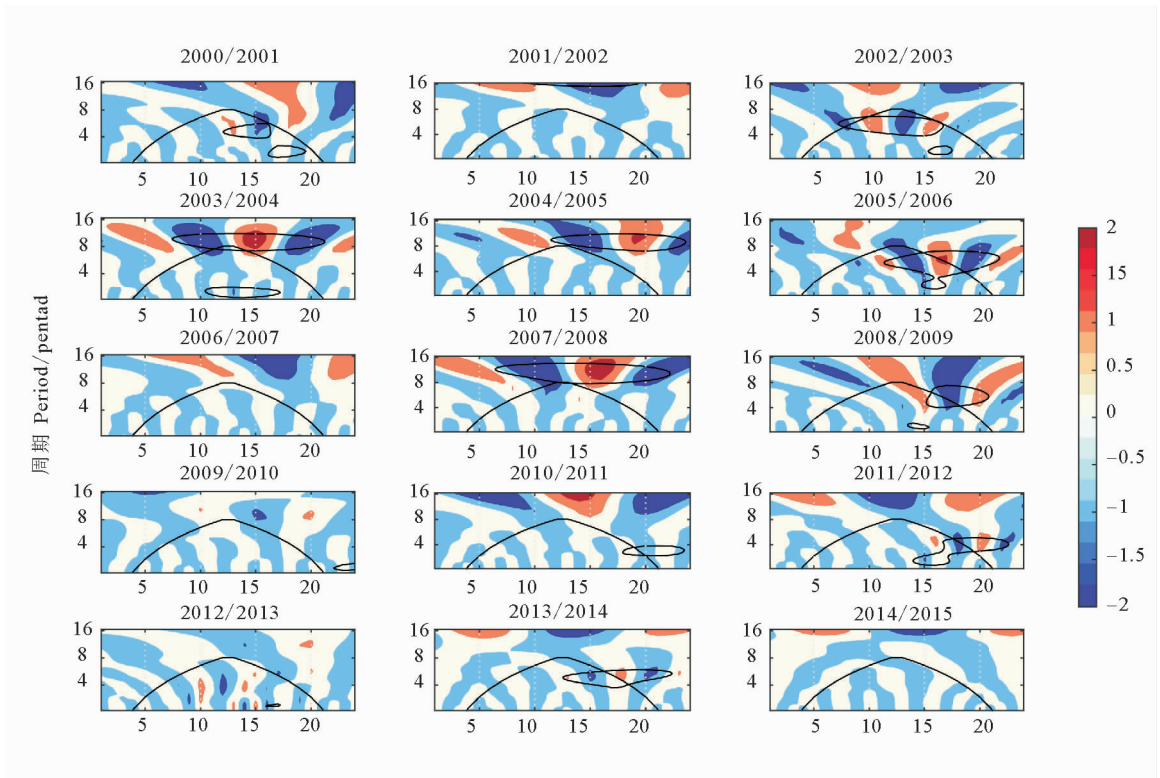


图 2 2000/2001—2014/2015 年冬季渤海海冰范围距平的小波系数

Fig 2 The real part of wavelet coefficient of Bohai sea-ice extent anomaly during the winter of 2000/2001 to 2014/2015

过程,因此数据两端海冰范围数值都为 0,以 2015 年中最早/最晚的初/终冰日这一候为起始/结束的端点,以减小数据在季节尺度上的不连续性。为了去掉其最为

显著的季节变化信号,首先计算海冰范围序列距平,但去掉多年平均后的序列仍存在较为明显的季节变化(见图 3 红线),为了既去掉最为显著的季节变化影响,

又保留季节内和年际变化信号的特征,对海冰序列进行不同窗口的带阻滤波。从24候的季节周期前后逐渐增加带阻滤波的窗口宽度,可以看到24候附近的周期峰值渐渐减小,季节信号被剔除。从去掉季节变化信号的角度,21~27候带阻滤波(见图3绿线)已经能

够较好地做到这一点,同时考虑尽可能多保留季节变化以外的信号。本文选择这一窗口的带阻滤波结果对渤海海冰范围的季节内和年际尺度变化与大气要素场的相关性进行研究。

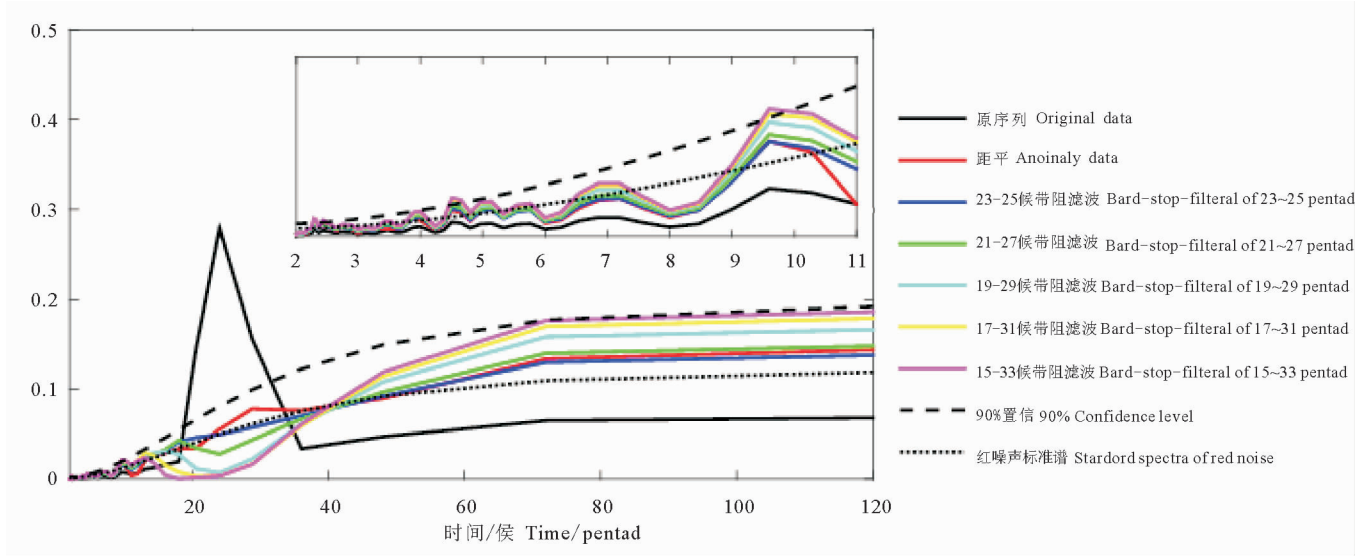


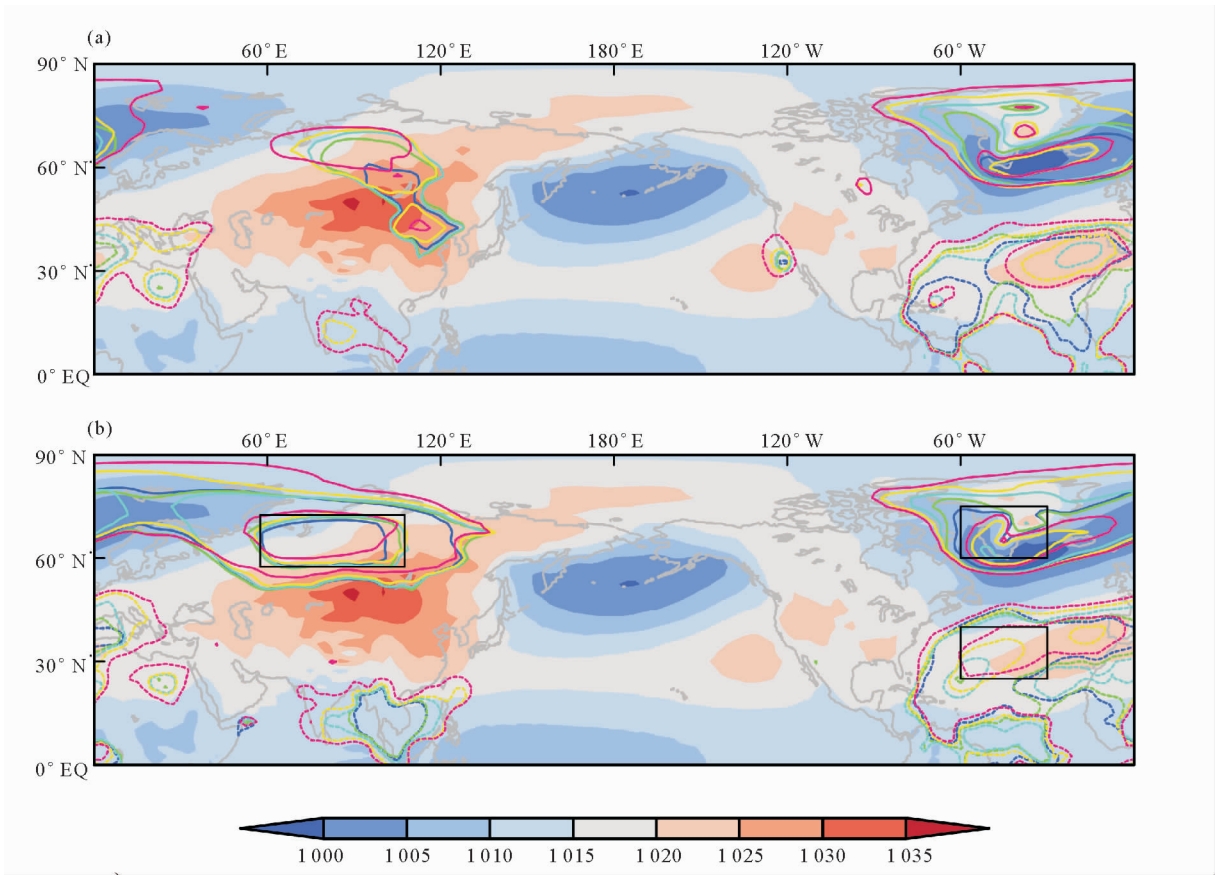
图3 2000/2001—2014/2015年冬季渤海海冰范围原序列、距平及不同窗口带阻滤波后序列的功率谱
Fig 3 The power spectrum of the original sequence, anomaly sequence and band-stop filtered sequence of different windows during the winter of 2000/2001 to 2014/2015, respectively

首先分析年际和季节内尺度上海平面气压(SLP)场与海冰范围的同期相关性。为保证相关区选择的可信度,这里取与功率谱计算(见图3)相同的带阻窗口滤波结果进行计算。由图4(a)可见,不同窗口滤波后的相关区比较集中,都有3个主要相关区,分别位于西伯利亚高压、冰岛低压和亚速尔高压附近。为了得到更具预报意义的相关区,将SLP场超前1~8候计算超前相关,其中超前2候时相关性最强,同样存在3个主要相关区(见图4(b))。其中西伯利亚高压附近为正相关区,超前2候时相关区位于西伯利亚高压平均态位置的上游偏西北处。冰岛低压附近同样为正相关区,亚速尔高压附近则为负相关区,同期和超前时相关区的位置和范围较为相近,超前两候时相关系数最大。冰岛低压和亚速尔高压同时加强或减弱的现象被称为北大西洋涛动(NAO),标准化后的亚速尔高压和冰岛低压的海平面气压之差被定义为NAO指数^[18],渤海海冰范围与NAO指数为负相关,当NAO指数为正、冰岛低压和亚速尔高压偏强时,海冰范围偏小。

为了进一步研究相关区与海冰范围变化之间的关系,分别把相关系数最强(超前2候)时西伯利亚相关区(57.5°N~72.5°N, 57.5°E~107.5°E)、冰岛相关区(60°N~75°N, 30°W~60°W)和亚速尔相关区(20°N~

45°N, 30°W~60°W)(见图4(b)中框出区域)的海平面气压进行区域平均。对应于海冰范围的带阻滤波窗口,对海平面气压场的区域平均也取21~27候带阻滤波,得到3个相关区的SLP指数。

对3个SLP指数与21~27候带阻滤波后的海冰范围序列进行滑动相关分析,讨论在不同时段它们之间的相关关系,分别取2年(46候)、3年(72候)和5年(120候)作为滑动窗口时,相关系数变化的规律较为一致(图略)。考虑到序列长度和置信度的影响,取3年滑动窗口的结果进行研究(见图4(c))。可以看出西伯利亚相关区SLP指数在2009/2010年之前与海冰范围有较好的正相关关系,2009/2010年以后相关系数不断减小到95%置信以下并维持在较小水平,即西伯利亚高压与海冰范围的相关性从2009/2010年开始有所减弱。而冰岛、亚速尔相关区SLP指数与海冰范围的相关从2007/2008年开始突然变得显著。将亚速尔和冰岛相关区SLP指数作差,与NOAA提供的逐日NAO指数异常进行比较,可以得到两者较为相关($r=0.66$),因此本文得到的这2个指数可以较好地表示NAO的变化及其与海冰范围的关系。3个相关区在不同的时段与海冰范围的相关性存在着变化,下面对其原因进行进一步研究。



(阴影为 SLP 场多年平均, 彩色实(虚)线为带阻滤波后海冰范围与 SLP 场的 $+(-)0.2, +(-)0.3$ 相关系数线, 颜色与图 2b 中一致。Shading represents the multi-year average SLP. Solid (dotted) line represents correlation coefficient equal to $+(-)0.2, +(-)0.3$, with the same color as Fig 2(b).)

图 4(a)同期和(b)超前 2 候时不同窗口带阻滤波后海平面气压场与海冰范围的相关关系

Fig. 4(a) Synchronous and (b) 2-pentad lead correlation between the sea-level pressure field and sea-ice extent band-stop filtered in different windows

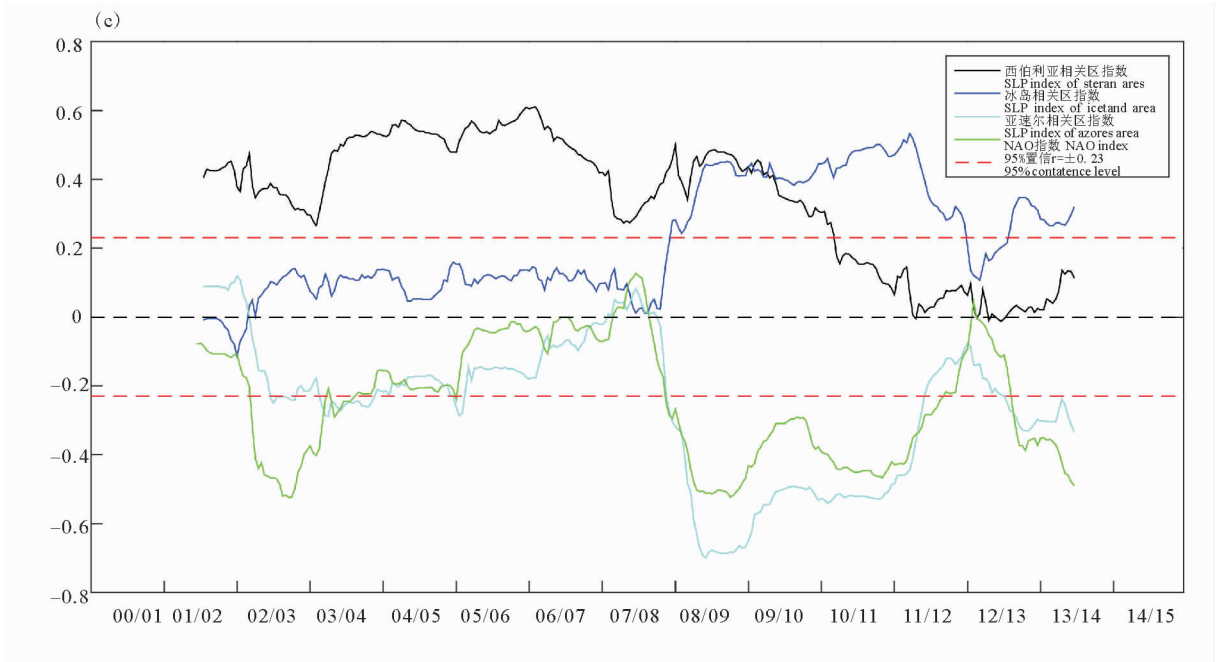


图 4(c)21~27 候带阻滤波后西伯利亚、冰岛、亚速尔相关区 SLP 指数和 NAO 指数与海冰范围的滑动相关(滑动窗为 3 年(72 候))
Fig. 4(c) Sliding correlation between the sea ice extent and the SLP index of three related regions, the NAO index, respectively with 21~27 pentad band stop (Sliding window is 3 years or 72 pentads)

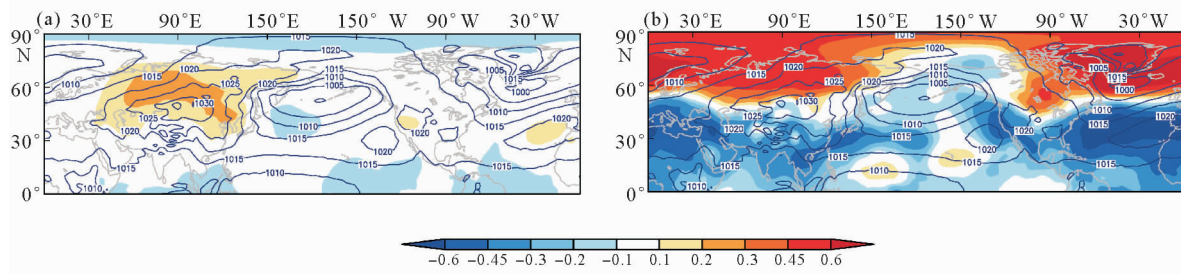
4 各相关区 SLP 指数与渤海海冰范围相关性发生变化的原因

4.1 各相关区对渤海海冰范围在季节内和年际尺度上的不同影响

渤海海冰的空间分布范围相对较小,与大气环流之间的关系以响应大气环流的变化为主,这也是第4节中将大气要素场超前于海冰范围计算两者相关关系的原因,相关区 SLP 指数与海冰范围的关系一定程度上体现了大气环流变化对渤海海冰的影响。为了区分大气环流在季节内和年际尺度上对渤海海冰的影响,本文对渤海海冰范围和海平面气压场进行 21 候高通和 27 候低通滤波,同样将 SLP 场超前 2 候计算相关关系(见图 5),以便与第 4 节结果(见图 4(b))进行比较。由图 5 可以看出,不论在季节内还是年际尺度上,西伯利亚高压附近都为正相关区。西伯利亚高压作为最主要的大气环流因子之一,对冬季东亚气候变化有着直接和强烈的影响,前人研究也认为西伯利亚高压是渤海海冰年际变化的重要影响因子^[4]。而季节内尺度

上,西伯利亚高压增强时,常伴随着东亚冬季风增强,寒潮爆发,渤海海冰随之加重,因此西伯利亚高压在季节内尺度上同样影响渤海海冰的变化。至于该相关区与渤海海冰的相关性为什么在 2009/2010 年之后有所减弱,作者将在 4.2 节中讨论。

由图 5(a),(b)还可以发现,亚速尔高压和冰岛低压附近的相关区,即 NAO 与海冰范围的相关性仅存在于年际尺度上。由图 5(b)可以看出,冰岛低压和西伯利亚高压附近同为正相关,当 NAO 为负指数(冰岛低压和亚速尔高压偏弱)、西伯利亚高压偏强时,渤海海冰偏重。有研究认为,NAO 与东亚冬季风的变化存在着较为密切的联系,这种联系是通过影响西伯利亚高压实现的,当 NAO 指数为负时,高空经向环流增强,西伯利亚高压增强,冬季风活跃,寒潮爆发频繁^[19-20]。但是 NAO 是否通过西伯利亚高压进而影响渤海海冰的变化,仍处于推论^[13]和猜测阶段,有待进一步的研究。然而,最引起我们注意的是图 4(c)所示的冰岛、亚速尔相关区 SLP 指数与海冰范围的相关从 2007/2008 年开始突然变得显著这一现象,作者将在 4.3 节中进行详细的分析。



(蓝色实线为 SLP 场的多年平均,阴影为通过 95%置信的相关系数。Blue line represents the 15-year average of the SLP field and shading represents correlation coefficients with a confidence level of 95%.)

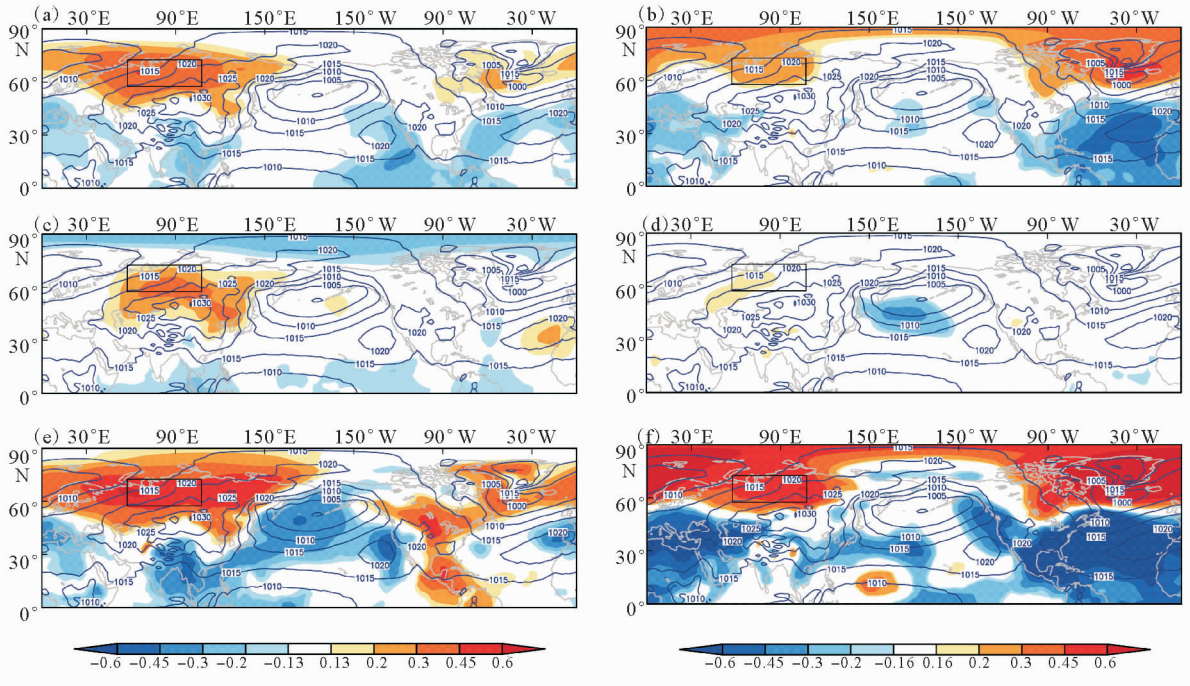
图 5 21 候高通滤波(a)和 27 候低通滤波(b)后海平面气压场与海冰范围的超前 2 候相关

Fig. 5 The 2-pentad lead correlation between the sea level pressure field and sea-ice extent filtered with 21-pentad high-pass (a) and 27-pentad low-pass(b)

4.2 西伯利亚相关区 SLP 指数与渤海海冰范围相关关系发生变化的原因

根据图 3,针对西伯利亚相关区 SLP 指数与渤海海冰范围相关性在 2009/2010 年以后变弱的问题,以 2009/2010 年为界对 21~27 候带阻滤波、21 候高通滤波和 27 候低通滤波后海平面气压场和海冰范围序列的相关性进行分段研究。由图 6(a),(b)可以看出,在 2000/2001—2008/2009 年,西伯利亚相关区的影响最为显著;在 2009/2010—2014/2015 年,西伯利亚相关区与海冰范围仍有较大的相关关系,但最显著相关区则位于冰岛低压和亚速尔高压附近。通过分别比较图 6(a),(c),(e)和图 6(b),(d),(f)可以看出,西伯利亚高压相关区对渤海海冰的影响在前一阶段是季节内尺度和年际尺度上的共同作用,而在后一段则以年际尺度上的影响为主。

为进一步分析季节内尺度上西伯利亚相关区对渤海海冰影响减弱的原因,对西伯利亚相关区的海平面气压异常进行小波分析。由图 7 可以得出,在 2009/2010 年以前,海冰范围和西伯利亚相关区海平面气压的季节内尺度周期较为对应,2000/2001、2002/2003、2008/2009 年主要是 4~7 候周期;2003/2004、2005/2006、2007/2008 年主要是 9~12 候信号;2009/2010 年之后西伯利亚相关区海平面气压的 9~12 候信号虽然未通过 95%的置信,但仍较为稳定的持续。而海冰范围的 9~12 候周期在 2009/2010 年以后有明显的减弱。因此,2009/2010 年以后,西伯利亚高压 SLP 指数与渤海海冰的相关性在季节内尺度上减弱是由于在这一时段西伯利亚高压仍具有 9~12 候信号,而渤海海冰却基本没有。



(蓝色实线为 SLP 场的多年平均, 阴影为通过 95% 置信的相关系数。Shading represents correlation coefficient with a confidence level of 95%.)

图 6 2001/2001—2008/2009 年(a)和 2009/2010~2014/2015 年(b)21 候带阻滤波后的 SLP 场和海冰范围的超前 2 候相关; 2000/2001—2008/2009 年(c)和 2009/2010—2014/2015 年(d)21 候高通滤波后的 SLP 场和海冰范围的超前 2 候相关 21 候高通滤波后; 2000/2001—2008/2009 年(e)和 2009/2010-2014/2015 年(f)27 候低通滤波后的 SLP 场和海冰范围的超前 2 候相关

Fig. 6 The 2-pentad lead correlation between the SLP field and sea-ice extent while filtered with 21~27 pentad band-stop during the winter of 2000/2001 to 2008/2009 (a) and 2009/2010 to 2014/2015(b); the same as above but filtered with 21-pentad high-pass during the winter of 2000/2001 to 2008/2009(c) and 2009/2010 to 2014/2015(d) and filtered with 27-pentad low-pass during the winter of 2000/2001 to 2008/2009(e) and 2009/2010 to 2014/2015(f)

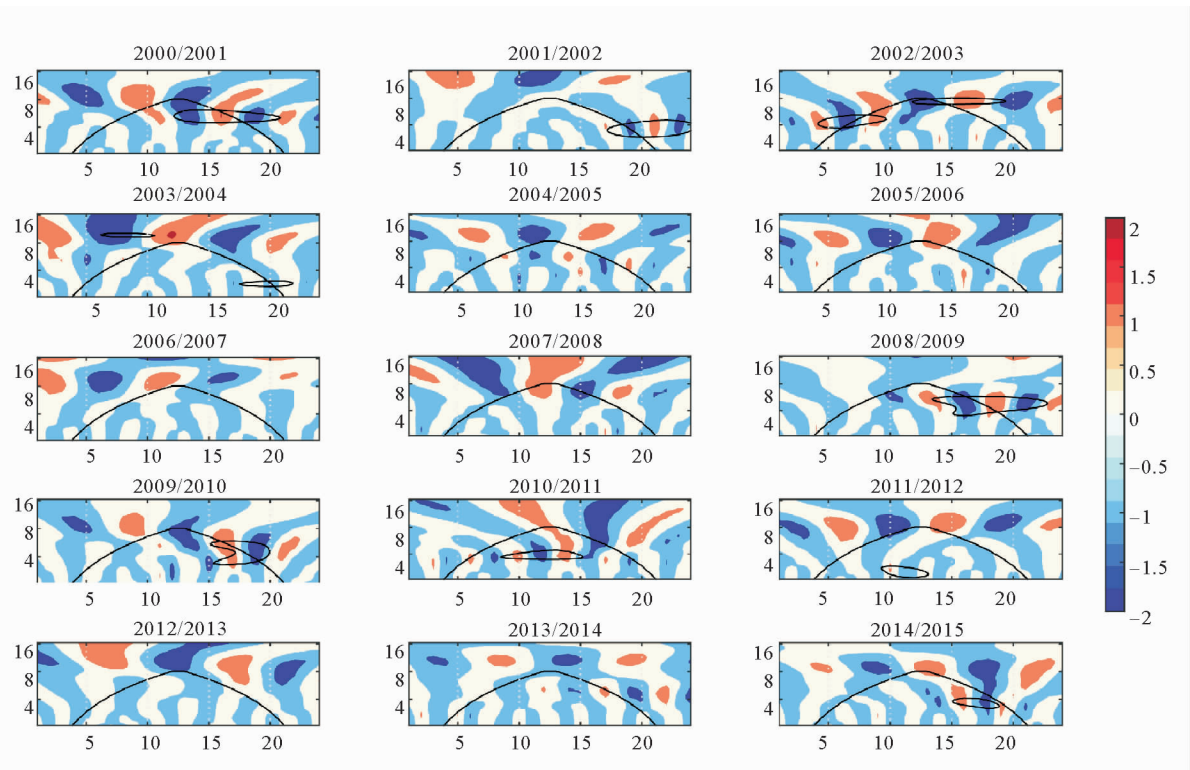


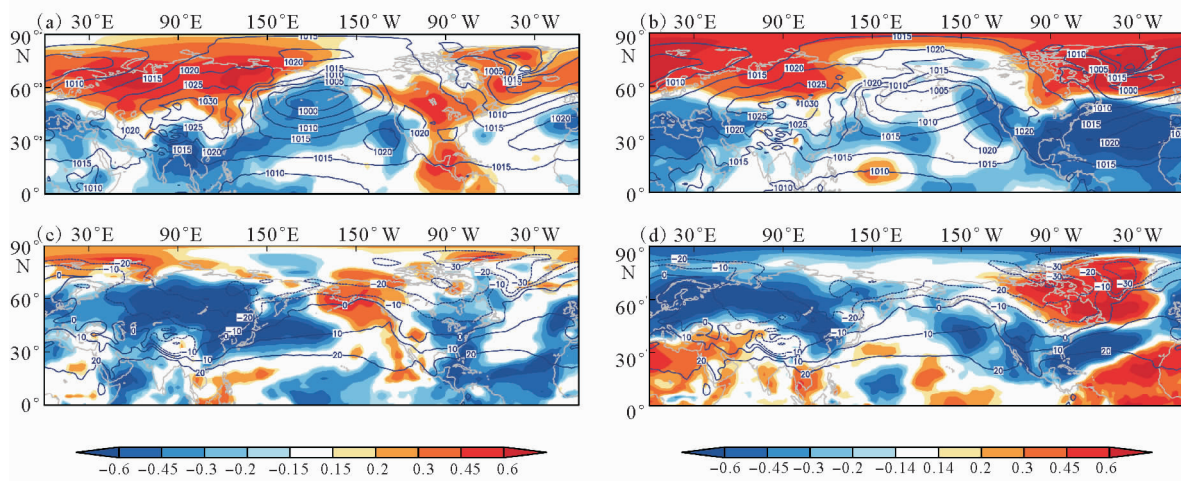
图 7 2000/2001 年—2014/2015 年冬季西伯利亚相关区海平面气压距平的小波系数

Fig. 7 The real part of wavelet coefficient of Siberian related region SLP anomaly during the winter of 2000/2001 to 2014/2015

4.3 NAO 相关区 SLP 指数与渤海海冰范围相关关系发生变化的原因

本节针对冰岛和亚速尔相关区 SLP 指数与渤海海冰范围相关性从 2007/2008 年开始变得显著(见图 4(c))的现象进行研究。由于 NAO 与海冰范围的相关性主要体现在年际尺度上(见图 5(b)),本文以 2007/2008 年为界对 27 候低通滤波后海平面气压场与海冰范围的

相关性进行分段研究,同样将 SLP 场超前 2 候计算两者的相关关系(见图 8(a),(b))。对比两个时段,最明显的差别在于冰岛低压和亚速尔高压相关区的相关系数大大增加,这从另一个侧面证实了图 3 中“冰岛和亚速尔相关区 SLP 指数与渤海海冰范围相关性从 2007/2008 年开始变得显著”的结论。



(蓝色实线为对应时段大气要素场的平均态,阴影为通过 95%置信的相关系数。Blue line represents the mean state of atmosphere in the corresponding period and shading represents correlation coefficient with a confidence level of 95%.)

图 8 2000/2001—2006/2007 年(a)和 2007/2008—2014/2015 年(b)27 候低通滤波后的 SLP 场和海冰范围的超前 2 候相关;

2000/2001—2006/2007 年(c)和 2007/2008—2014/2015 年(d)27 候低通滤波后的地面气温场和海冰范围的超前 2 候相关

Fig 8 The 2-pentad lead correlation between SLP field and sea-ice extent while filtered with 27-pentad low-pass during the winter of 2000/2001 to 2006/2007(a) and 2007/2008 to 2014/2015(b); the 2-pentad lead correlation between surface air temperature and sea-ice extent filtered with 27-pentad low-pass during the winter of 2000/2001 to 2006/2007(c) and 2007/2008 to 2014/2015(d)

为了解释年际尺度上 NAO 相关区与渤海海冰范围相关性突然变化的原因,需要对二者年际变化的周期性进行研究。由于前文采用的 2000/2001—2014/2015 年冬季候平均序列长度较短,不适合年际尺度的分析,因此用 1949/1950—2014/2015 年月平均序列进行以下的分析。首先针对 NAO 相关区,对相关区海平面气压的区域平均进行 18 个月的低通滤波,并进行小波分析(见图 9(a)~(d))。结果显示两个相关区海平面气压的年际周期在 1960—1970 年发生了一次突变,2~4 年周期减弱,8~16 年周期增强,这与前人研究中 NAO 年际周期在 1960 年代末发生的转变(由 3~4 年周期转为了 8~15 年周期)^[22]基本一致。图 9(b)显示这一转变在冰岛相关区更为明显。在本文研究时段中,两个相关区海平面气压的年际周期同样发生了变化。在 2007/2008 年以前,冰岛相关区海平面气压的周期主要为 16 年左右,亚速尔相关区主要为 8 年左右;在 2007/2008 年以后,两者的 2~4 年周期均开始增强,此时冰岛相关区海平面气压的 16 年周期已经减弱,亚

速尔相关区海平面气压的 8 年周期转为 4~8 年周期。

由于渤海海冰范围序列长度的限制,无法得到其年际周期的变化,故用地面气温数据代替,对 1949/1950—2014/2015 年渤海地区(35°N~45°N, 115°E~125°E)的地面气温月平均数据进行 18 个月的低通滤波并进行小波分析,结果见图 9(e)~(f),与 1951/1952—2014/2015 年营口、大连和潍坊站月平均气温进行同样周期分析后的结果非常一致(图略)。在本文研究时段内,渤海地区气温持续存在 2~4 年的年际周期,从 2007/2008 年开始 4~8 年的年际周期开始增强。

因此,在 2007/2008 年以后冰岛和亚速尔相关区海平面气压的 2~4 年周期增强,与渤海海冰(渤海地区气温)持续存在的 2~4 年周期契合;此时渤海海冰(渤海地区气温)的 4~8 年周期增强,与亚速尔相关区海平面气压自 2000/2001 年以来存在的 4~8 年契合;年际周期的契合使得 NAO 这一环流因子与渤海海冰的相关关系迅速增大。

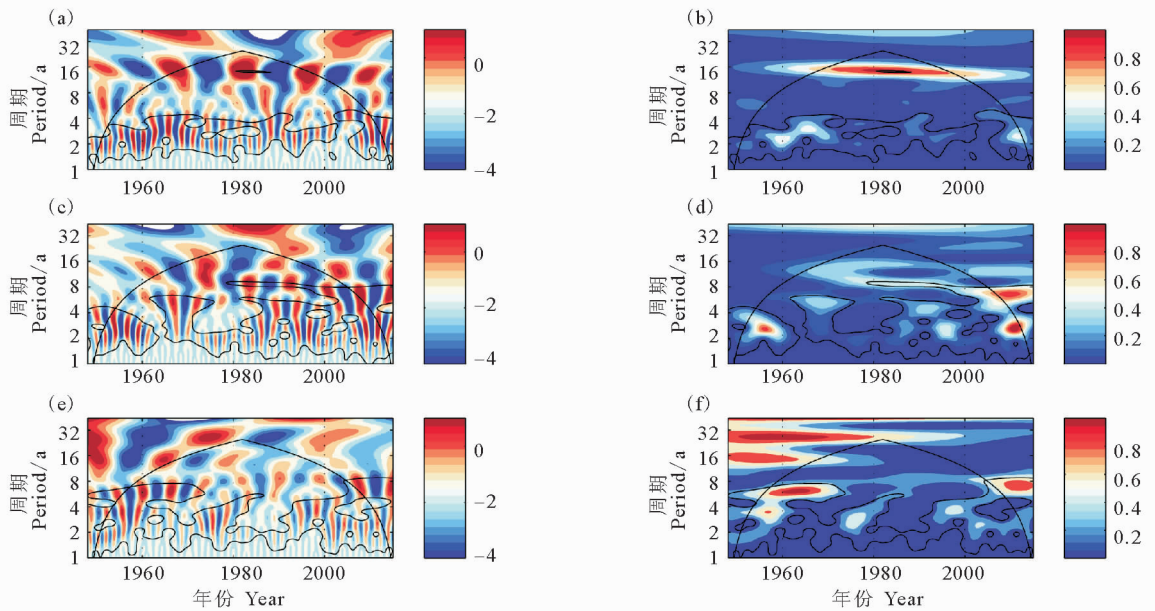
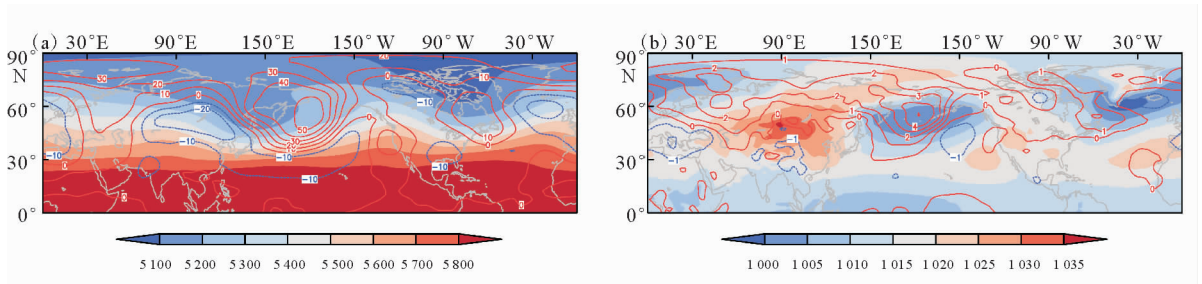


图9 1949/1950—2014/2015年冰岛相关区海平面气压的小波系数实部(a),小波能量谱(b),亚速尔相关区海平面气压的小波系数实部(c),小波能量谱(d),渤海区域地面气温的小波系数实部(e)和小波能量谱(f)

Fig. 9 The real part of wavelet coefficient(a), wavelet energy spectrum of Iceland SLP(b), real part of wavelet coefficient(c), wavelet energy spectrum of Azores SLP (d), real part of wavelet coefficient(e) and wavelet energy spectrum(f) of air temperature in Bohai during the winter of 1949/1950 to 2014/2015

NAO作为大气环流系统中重要的一环,其年际周期的转变与北半球大气环流形势的演变有着必然的联系。为进一步分析大气环流的变化,将2007/2008—2014/2015年和2000/2001—2006/2007年的冬季(前一年11月—当年3月)平均海平面气压场和500 hPa高度场分别合成并作差(见图10),可以看出无论是在

哪个高度上,最大异常均位于北太平洋。在500 hPa高度场上表现为北美脊和东亚槽均向西偏移,且北美脊增强;对应的海平面高度场上西伯利亚高压和阿留申低压平均位置处分别为负异常和正异常,都有所减弱,对应经向环流的减弱。这可能与NAO年际周期的转变有一定联系。



(图中阴影为15年冬季不同要素场的平均态。Shadow represents the 15-year mean atmospheric state of different variables.)

图10 500 hPa高度场(a)和海平面气压场(b)2007/2008—2014/2015年和2000/2001—2006/2007年冬季的合成场之差
Fig. 10 The difference between the synthesis fields during the winter of 2007/2008—2014/2015 and 2000/2001—2006/2007 in 500 hPa geopotential height (a)and SLP(b)

4.4 进一步讨论

在NAO年际周期转变和东亚大气环流调整的过程中,年际尺度上海冰范围与SLP场的主要相关区由西伯利亚相关区变为了冰岛相关区和亚速尔相关区。为进一步了解不同系统影响渤海海冰的机制,对同时段低通滤波后的地面气温场和海冰范围进行超前2

候相关分析(见图8(c)~(d))可以看出:在2007/2008年以前新地岛以北区域为正相关区,表明这一区域气温上升时渤海海冰偏强,可能的机制为西伯利亚高压增强时,经向环流发展,暖空气随乌拉尔山脊北伸(新地岛以北洋面气温上升),有利于阻塞高压生成南下,将冷空气带入东亚^[11],渤海冰情偏重。有研究也指出,

前秋巴伦支海海温指数偏高时,冬季乌拉尔山阻塞形势加强,亚洲纬向环流偏弱,渤海冰情偏重^[23]。而2007/2008年以后,新地岛以西洋面气温与渤海海冰范围为负相关,表明这一区域气温上升时渤海冰情偏轻,其相关关系与2007/2008年以前相反,机制也必然有很大的不同。

为了解释这一现象,需要把不同系统(西伯利亚高压和NAO)对东亚大气的影响区分开来。武炳义等人的研究曾将东亚冬季大气环流场分为西伯利亚高压型(SH型)和北极-亚洲遥相关型(AA型),其中SH型主要体现了与西伯利亚高压密切相关的大气环流分布,当SH型为正位相时,西伯利亚高压偏强,东亚气温偏低,喀拉海到北极气温则为正异常;AA型主要体现了北极与亚洲之间大气环流的遥相关关系,当AA型为正位相时,SLP场上亚洲50°N以北为负异常,以南为正异常,冰岛低压、亚速尔高压相应偏强,气温场与SLP场对应,亚洲50°N以北为正异常^[21]。针对本文研究区域(西伯利亚相关区)进行类似分析可以得到与之近似的大气环流分布形态,通过对2000/2001—2014/2015年大气环流型的时间序列进行统计,发现从2007/2008年开始AA型显著的年份增多(图略),而2007/2008年刚好是NAO与渤海海冰相关性变得更强的转折,因此NAO年际周期的变化可能与大气环流型的转换有关。显然,AA型环流模式下NAO与渤海海冰范围的相关性更大,但其物理过程和机制还需进一步研究。

5 结论

本文利用2000/2001—2014/2015年冬季渤海海冰范围候平均序列,研究了渤海海冰季节内至年际尺度的变化特征,结合海平面气压等大气要素场的变化分析了渤海海冰多尺度变化的成因。主要结论如下:

(1)带阻滤波(21~27候)后,海冰范围与海平面气压场有三个主要相关区,其中西伯利亚附近为正相关区,西伯利亚高压的变化在季节内和年际尺度上同时影响渤海海冰;冰岛低压和亚速尔高压附近分别为正相关和负相关区,表征了NAO变化与渤海海冰范围的关系,NAO为正异常(冰岛低压和亚速尔高压偏强)时,海冰范围偏小,反之则偏大。NAO与海冰范围的相关性主要表现在年际尺度上。

(2)在季节内尺度上,西伯利亚相关区海平面气压与渤海海冰范围的相关性在2009/2010年以后有明显的减小,这一变化与二者周期性的变化有关。在2009/2010年以前,海冰范围和西伯利亚相关区海平面气压的季节内尺度周期较为对应,2009/2010年之后西伯利亚相关区海平面气压的9~12候信号仍较为稳定的持续,

而海冰范围的该周期则基本不存在了。

(3)在年际尺度上,2007/2008年以后NAO与渤海海冰范围的相关性明显加强,这一现象与NAO年际周期的转变有必然的联系。在2007/2008年以后冰岛和亚速尔相关区海平面气压的2~4年周期增强,与渤海海冰(渤海地区气温)持续存在的2~4年周期契合;同时,渤海海冰(渤海地区气温)的4~8年周期增强,与亚速尔相关区海平面气压自2000/2001年以来存在的4~8年周期契合。年际周期的契合使得NAO与海冰范围的相关关系迅速增大。NAO年际周期的变化可能会通过大气环流的北极-亚洲遥相关模态对渤海海冰范围产生影响。

参考文献:

- [1] 张启文. 渤海海冰变化与气象条件的关系[J]. 海洋预报, 1986(1): 51-56.
Zhang Qiwen. The relationship between variation in the Bohai Sea Ice and its meteorological conditions[J]. Marine Forecasts, 1986(1): 51-56.
- [2] 李剑, 黄嘉佑, 刘钦政. 黄、渤海海冰长期变化特征分析[J]. 海洋预报, 2005, 22(2): 22-32.
Li Jian, Huang Jiayou, Liu Qinzheng. The long-term variation characteristics of sea ice in the Bohai Sea and the North Huanghai Sea[J]. Marine Forecasts, 2005, 22(2): 22-32.
- [3] 邓冰, 佟凯, 张学宏, 等. 渤、黄海海冰的变化和预报结果分析[J]. 海洋科学进展, 2003, 21(2): 214-218.
Deng Bing, Tong Kai, Zhang Xue-Hong, et al. Variations and predicted result analysis of sea ice in the Bohai Sea and Yellow Sea[J]. Advances in Marine Science, 2003, 21(2): 214-218.
- [4] 郑冬梅, 王志斌, 张书颖, 等. 渤海海冰的年际和年代际变化特征与机理[J]. 海洋学报, 2015, 37(6): 12-20.
Zheng Dong Mei, Wang Zhi Bin, Zhang Shu Ying, et al. Interannual and interdecadal variations of the sea ice in Bohai Sea and its mechanisms[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2015, 37(6): 12-20.
- [5] Murikami T. Winter monsoonal surges over East and Southeast Asia[J]. J Meteor Soc Japan, 1979(57): 133-158.
- [6] 仇永炎. 中期天气预报[M]. 北京: 科学出版社, 1985: 333-337.
Chou Yong Yan. Medium Range Weather Forecast[M]. Beijing: Science Press, 1985: 333-337.
- [7] 李崇根. 北半球大气运动的30-50天振荡[C]. 北京: 气象出版社, 1990: 63-73.
Li Chongyin. 30-50 Day Oscillation of Atmospheric Motion in the Northern Hemisphere[C]. Beijing: China Meteorological Press, 1990: 63-73.
- [8] 杨松, 朱乾根. 东亚地区冬季大气低频振荡与冷空气活动关系的初步研究[J]. 南京气象学院学报, 1990(3): 339-347.
Yang Song, Zhu Qian Gen. Oscillation and its relation to cold air activities in Asian winter[J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 1990(3): 339-347.
- [9] 金祖辉, 孙淑清. 东亚大陆冬季风的低频振荡特征[J]. 大气科学, 1996, 20(1): 101-111.
Jin Zu Hui, Sun Shu Qing. The characteristics of low frequency

- oscillations in winter monsoon over the Eastern Asia[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 1996, 20(1): 101-111.
- [10] Compo G P, Kiladis G N, Webster P J. The horizontal and vertical structure of east Asian winter monsoon pressure surges[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1999, 125(553): 29-54.
- [11] 王遵娅, 丁一汇. 近 53 年中国寒潮的变化特征及其可能原因[J]. 地球科学, 2006(6): 14-22.
Wang Zunya, Ding Yihui. Climate change of the cold wave frequency of China in the last 53 years and the possible reasons[J]. Earth Science, 2006(6): 14-22.
- [12] 刘煜, 刘钦政, 隋俊鹏, 等. 渤、黄海冬季海冰对大气环流及气候变化的响应[J]. 海洋学报, 2013, 35(3): 18-27.
Liu Yu, Liu Qinzhen, Sui Junpeng, et al. The respond of ice for the Bohai Sea and the Huanghai Sea with the general circulation and the climate change in winters[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2013, 35(3): 18-27.
- [13] 唐茂宁, 洪洁莉, 刘煜, 等. 气候因子对渤海冰情影响的统计分析[J]. 海洋通报, 2015(2): 152-157.
Tang Mao-ning, Hong Jie-li, Liu Yu, et al. Statistical analysis of climatic factors impacting on the Bohai Sea ice[J]. Marine Science Bulletin, 2015(2): 152-157.
- [14] 耿淑琴, 王旭. 拉尼娜持续年的渤海海冰[J]. 海洋通报, 2001, 20(2): 1-11.
Geng Shu-qin, Wang Xu. Sea ice in the Bohai Sea during La Nina years[J]. Marine Science Bulletin, 2001, 20(2): 1-11.
- [15] 李春花, 刘钦政, 黄焕卿. 渤海、北黄海冰情与太平洋副热带高压的统计关系[J]. 海洋通报, 2009, 28(5): 43-47.
Li Chun-hua, Liu Qin-zheng, Huang Huan-qing. Statistic relation between sea ice in the Bohai Sea and North Yellow Sea of China and the subtropical high in the Pacific Ocean[J]. Marine Science Bulletin, 2009, 28(5): 43-47.
- [16] 刘钦政, 黄嘉佑, 白珊, 等. 渤海冬季海冰气候变异的成因分析[J]. 海洋学报, 2004, 26(2): 11-19.
Liu Qin-zheng, Huang Jia-you, Bai Shan, et al. Studies on the causation of sea ice decadal variation in the Bohai Sea of China. [J] Acta Oceanologica Sinica, 2004, 26(2): 11-19.
- [17] 李彦青, 苏洁, 汪洋, 等. 渤海海冰外缘线候平均离岸距离的变化及其关键影响因子[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2013, 43(7): 7-16.
Li Yan-Qing, Su Jie, Wang Yang, et al. Variability of the pentadly average distance between the sea ice edge and the coast in the Bohai Sea and its key impact factors[J]. Periodical of Ocean University of China, 2013, 43(7): 7-16.
- [18] Thompson D W J, Wallace J M. The Arctic oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields[J]. Geophysical Research Letters, 1994, 25(9): 1297-1300.
- [19] 武炳义, 黄荣辉. 冬季北大西洋涛动极端异常变化与东亚冬季风[J]. 大气科学, 1999, 23(6): 641-651.
Wu Bingyi, Huang Ronghui. Effects of the extremes in the North Atlantic oscillation on East Asia winter monsoon[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 1999, 23(6): 641-651.
- [20] 武炳义, 卞林根, 张人禾. 冬季北极涛动和北极海冰变化对东亚气候变化的影响[J]. 极地研究, 2004, 16(3): 211-220.
Wu Bing-yi, Bian Lin-gen, Zhang Ren-he. Effects of the winter AO and the arctic sea ice variations on climate variation over East Asia. Chinese[J]. Journal of Polar Research, 2004, 16(3): 211-220.
- [21] Wu B, Su J, D'Arrigo R. Patterns of Asian winter climate variability and links to Arctic sea ice[J]. Journal of Climate, 2015(38): 6841-6858.
- [22] 李崇银, 李桂龙. 北大西洋涛动和北太平洋涛动的演变与 20 世纪 60 年代的气候突变 [J]. 科学通报, 1999, 44(16): 1765-1769.
Li Chong-yin, Li Gui-long. The climate jump of NAO and NPO in 1960s[J]. Science Bulletin, 1999, 44(16): 1765-1769.
- [23] 周群, 魏立新, 黄焕卿. 秋季巴伦支海海温异常对冬季我国渤海冰情的可能影响[J]. 海洋学报, 2016, 38(3): 40-48.
Zhou Qun, Wei Li-xin, Huang Huan-qing. Possible effect of SSTa in the Barents Sea in fall on the variations of Bohai Sea ice in the following winter[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2016, 38(3): 40-48.

Relationships Between Bohai Sea Ice and Siberian High and Possible Connections Between Bohai Sea Ice and North Atlantic Oscillation

YAO Lei, SU Jie

(1. The Key Laboratory of Physical Oceanography, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;
2. Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266100, China)

Abstract: After analyzing the relationship between Sea Level Pressure (SLP) and Bohai sea ice extent during the winter of 2000/2001—2014/2015 on the intra-seasonal and inter-annual scales, three main correlation areas were found around Siberian High (positive), Iceland Low (positive) and Azores High (negative). Siberia high affects Bohai sea ice both in intra-seasonal and inter-annual scales, and the correlation between North Atlantic Oscillation (NAO) and Bohai sea ice is mainly on the inter-annual scale. Research shows that the Bohai sea has remarkable cycle of 9~12 pentads in 2003/2004, 2004/2005 and 2007/2008. This cycle disappear after 2009/2010, but the Siberia high SLP still maintain a period of 9~12 pentads, which can be explained the season why the correlation coefficient between Siberian High and sea ice extent reduced significantly after the winter of 2009/2010. On the inter-annual scale, the correlation coefficient between NAO and sea ice extent increased rapidly after 2007/2008 due to the same periodic variation of 2~4 years and 4~8 years of NAO and Bohai air temperature. This shift may have a influence on Bohai sea ice extent through the Arctic-Asian teleconnection pattern.

Key words: Bohai Sea; sea ice; intra-seasonal; inter-annual variations

责任编辑 庞 旻