

蓝柳茹,李栋梁,2019. 西伯利亚高压南界东段季节及季节内变化特征及成因[J]. 气象,45(12):1651-1665. Lan L R, Li D L, 2019. Seasonal and intraseasonal variation characteristics of Siberian high south boundary eastern segment and their causes[J]. Meteor Mon,45(12):1651-1665(in Chinese).

## 西伯利亚高压南界东段季节及 季节内变化特征及成因\*

蓝柳茹<sup>1,2</sup> 李栋梁<sup>2</sup>

1 广西柳州市气象局,柳州 545001

2 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际合作联合实验室/  
气象灾害预报预警与评估协同创新中心,南京 210044

**提 要:** 利用 NCEP/NCAR 再分析资料和 Hadley 中心海冰密集度资料,对 1951—2017 年冬季西伯利亚高压南界东段(SHSBES)的变化特征及其与北极海冰的关系进行研究,并比较季内差异。结果表明:冬季 SHSBES 在 20 世纪 60 年代中期由偏南转偏北,70 年代末偏南,自 20 世纪 90 年代进入正常略偏南状态。12 月 SHSBES 年代际转折时间较早,1 月和 2 月与冬季相似。冬季 SHSBES 与同期北大西洋扇区海冰关系最好,海冰偏少有利于冬季贝加尔湖阻塞高压建立;9 月北大西洋扇区海冰与 12 月 SHSBES 关系最好,海冰偏少有利于 12 月西欧阻塞高压建立;3 月北极西半球区海冰则可影响到次年 1 月和 2 月的 SHSBES,3 月海冰偏少使次年 1 月贝加尔湖西侧阻塞高压建立,2 月形成三阻(西欧、贝加尔湖、勘察加半岛)。在动力作用上,阻塞高压环流使西伯利亚高压东南部及其以南处于脊前负涡度平流区,气流下沉,地面增压,促使 SHSBES 南伸,反之亦然。在热力作用上,9 月大西洋扇区和 3 月西半球区海冰偏少(多)分别使 12 月、次年 2 月西伯利亚南界及其以南偏冷(暖),利于地面加压(减小),引导 SHSBES 南(北)移。

**关键词:** 西伯利亚南界东段(SHSBES),北极海冰,时空联系,季节内差异

**中图分类号:** P456, P467

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.12.003

## Seasonal and Intraseasonal Variation Characteristics of Siberian High South Boundary Eastern Segment and Their Causes

LAN Liuru<sup>1,2</sup> LI Dongliang<sup>2</sup>

1 Liuzhou Meteorological Office of Guangxi, Liuzhou 545001

2 Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education (KLME)/Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change (ILCEC)/Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters (CIC-FEMD), Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

**Abstract:** Based on the NCEP/NCAR reanalysis data and Hadley sea ice concentration data, the winter variation characteristics of Siberian high (SH) south boundary eastern segment (SHSBES) and its relationship with Arctic sea ice during 1951—2017 were analyzed, and the intraseasonal differences were also discussed. The results showed that SHSBES in winter moves to the north from south in the mid-1960s, and transfers to the south in the late 1970s, then turns a little southerly than the normal location since 1990s. The interdecadal transition time of SHSBES in December is earlier, the interdecadal variations of

\* 国家重点研发计划(2018YFC1505602)资助

2018 年 11 月 18 日收稿; 2019 年 5 月 31 日收修定稿

第一作者:蓝柳茹,主要从事天气预报与短期气候预测工作. Email:liuru\_lan@126.com

通信作者:李栋梁,主要从事气候异常变化诊断与预测研究. Email:lidl@nuist.edu.cn

SHSBES in January and February of the following year are similar to the one in winter. SHSBES in winter is most closely related to the homochronous Atlantic sector Arctic sea ice whose decreases can induce the appearance of Baikal Lake blocking high in winter. SHSBES in December is most influenced by Atlantic sector Arctic sea ice in September, and the Western Hemisphere Arctic sea ice in March has the most significant impact on SHSBES in January and February of the next year. Less sea ice of the former results in the blocking high of September in Western Europe, and the reduction of the latter brings about the blocking high on the west site of Baikal in January. Three blocking highs are located respectively in Western Europe, Baikal and Kamchatka Peninsula in February during the ensuing year. Under the dynamic action of the atmospheric blocking, the southeast of SH and its south region are situated in a negative zone of the relative vorticity advection, the surface pressure increases with the downdraft, which is favorable for the southward movement of SHSBES, and vice versa. The decrease (increase) of Atlantic sector Arctic sea ice in September and Western Hemisphere Arctic sea ice in March can cause the southeast of SH and its south region to become colder (warmer) in December and the next year's February respectively, facilitating the increase (decrease) of surface pressure, ultimately leading SHSBES into the south (north).

**Key words:** Siberian high south boundary eastern segment (SHSBES), Arctic sea ice, space-time connection, intraseasonal difference

## 引 言

冬季欧亚大陆是大气冷源,在对流层下部西伯利亚高压—蒙古地区对应有强大的冷高压,即西伯利亚高压(Siberian high, SH),它是北半球季节性大气活动中心。SH 是东亚冬季风的重要成员,对欧亚的天气和气候有强烈影响(Cohen et al, 2001; 丁婷等, 2017; 朱晶晶等, 2018)。气候变暖背景下 SH 和冬季风强度的减弱导致中国寒潮及大风频次减少(王遵娅和丁一汇, 2006)。而近年来欧亚大陆中纬度寒潮事件频发且持续时间加长与 SH 增强有关(谢韶青和卢楚翰, 2018)。

许多学者从不同角度定义 SH 特征量来研究其演变(郭其蕴, 1994; 朱乾根等, 1997; 侯亚红等, 2008; 刘晴晴等, 2011)。孙晓娟等(2010)比较了两种 SH 中心位置指数及五种强度指数,分析表明 SH 中心在 20 世纪 70 年代末发生由北转南的突变;多数强度指数由强转弱的突变发生在 60 年代后期。黄荣辉等(2014)指出自 20 世纪 90 年代末起 SH 又出现增强趋势,这是造成东亚冬季风在近年来增强的原因之一。SH 强度在百年尺度上主要存在准 2 a 和 3~4 a 的年际周期以及 13~14、20~21 和 35~36 a 的年代际周期(王力群等, 2010)。SH 面积在 20 世纪 60 年代末后收缩,21 世纪以来又有所扩张(侯亚红等, 2008; 蓝柳茹和李栋梁, 2016)。

北极涛动(AO)的位相变化对 SH 的发展至关重要。SH 的发展主要依赖于对流层下沉气流,当冬季 AO 为正(负)位相时,下沉气流减弱(增强),SH 偏弱(强)(Wu and Wang, 2002)。冬季乌拉尔山阻塞高压(以下简称阻高)的发展和北大西洋风暴轴经度的正异常也可使 SH 增强(曾鼎文等, 2015; 章大全和宋文玲, 2018)。北极海冰则是影响 SH 的重要外强迫因子(王东阡等, 2015; 宋文玲和袁媛, 2017; 武炳义, 2018)。Wu et al(1999)指出,冬季喀拉海、巴伦支海海冰面积偏大(小)使 SH 偏弱(强)。秋季北极海冰是预测冬季 SH 强度的潜在前期信号(Wu et al, 2011),但更为重要的是前期夏季北冰洋表面反气旋风场加强了海冰偏少对冬季大气变率的负反馈,进一步使 SH 增强(武炳义和杨琨, 2016; Wu et al, 2016)。

目前对 SH 的研究多从其强度、面积等角度出发,而较少关注 SH 边界位置的变化。SH 面积描述的是其所占据的范围大小,其变化涉及到南、北、东、西四个边界位置共同变化的结果,而不是某一边界的单独变化。可见 SH 面积的变化不一定能代表单一边界位置的变化,两者存在区别。众所周知,西太平洋副热带高压脊线位置对中国夏季气候有重要影响,那么 SH 作为冬季风重要系统,其南扩能促使冷空气南下侵袭中国,因此对其南边缘的研究是很有意义的。蓝柳茹和李栋梁(2016)曾对此做了初步探讨,但研究时段仅到 2013 年,且未讨论其在季节

内的异常差异,也未涉及关于 SH 南界对北极海冰响应的研究。基于上述问题,本文采用最新资料对冬季 SH 南边缘的异常特征及其与北极海冰的时空联系进行分析,并比较季内差异,以期对 SH 有更深入的认识,也为中国冬季气候异常的诊断与预测提供参考依据。

## 1 资料和方法

所用的大气要素资料来自美国国家环境预报中心/大气研究中心(NCEP/NCAR)月平均再分析资料,包括海平面气压场(sea level pressure, SLP)、位势高度场、风场和温度场,水平分辨率为  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 。海冰资料是英国 Hadley 中心逐月海冰密集度(sea ice concentration, SIC),水平分辨率为  $1^\circ \times 1^\circ$ 。SIC 为网格内海冰覆盖面积占整个网格面积的比例,若网格内无海冰则记为 0,网格整个被海冰覆盖则记为 1。将网格点面积与 SIC 相乘,则得到格点的海冰面积。资料长度均取 1951 年 1 月至 2018 年 2 月。

SH 的活动范围参考龚道溢和王绍武(1999)的定义方法,取 SLP 场上 1028 hPa 等值线作为特征线。文中冬季为 12 月至次年 2 月,如 1951 年冬季指 1951 年 12 月、1952 年 1 月和 2 月,因此冬季 1 月和 2 月均使用次年的资料。北极所指范围在  $66.5^\circ \sim 90^\circ\text{N}$ 、 $0^\circ \sim 360^\circ\text{E}$ 。主要研究方法为高斯滤波、相关分析、MK 检验、小波分析、回归分析等常规统计方法,并对统计结果做显著性检验。所有用于相关和回归分析的 SH 南界东段位置指数与北极海冰面积

的时间序列均去除了线性趋势。

## 2 SH 南界的时空变化特征

### 2.1 空间形态及其季节内差异

在冬季 SLP 气候平均场(图 1a)上,SH 呈东西带状分布,南界西段( $100^\circ\text{E}$  以西)大致在  $40^\circ\text{N}$ ,南界东段南伸至  $35^\circ\text{N}$ 。SH 的空间形态存在季节内差异。从 12 月到次年 1 月 SH 向东北扩张(图 1b),西界少动,南界东段( $100^\circ\text{E}$  以东)维持在  $35^\circ\text{N}$  附近,西段是沿黄河河谷伸向高原的高压舌。次年 2 月,SH 减弱收缩,南界北退到  $40^\circ\text{N}$ ,收幅大于其他边界。

对 1951—2017 年逐年普查发现,不管冬季还是冬季内各月,均有 SH 南界西段( $100^\circ\text{E}$  以西)与高原冷高压相互独立或者打通的情况,可见南界西段变化情况较复杂。李栋梁和蓝柳茹(2017)研究发现冬季 SH 南界东段( $100^\circ\text{E}$  以东)在 SH 强弱期的摆幅大于其西段,表明东段对 SH 强度的响应更敏感。鉴于以上情况,本文重点分析 SH 南界东段的位置异常。

### 2.2 SH 南界东段位置的时间演变

为定量分析 SH 南界东段的位置变化,根据 SH 特征线的气候形态,将 SLP 场上  $100^\circ \sim 115^\circ\text{E}$  内 SH 南边缘(1028 hPa 等值线)上各格点所在纬度的平均值定义为 SH 南界东段位置(Siberian high southern boundary east segment, SHSBES)指数。指数值越大(小)表示位置越偏北(南)。图 2 为冬季

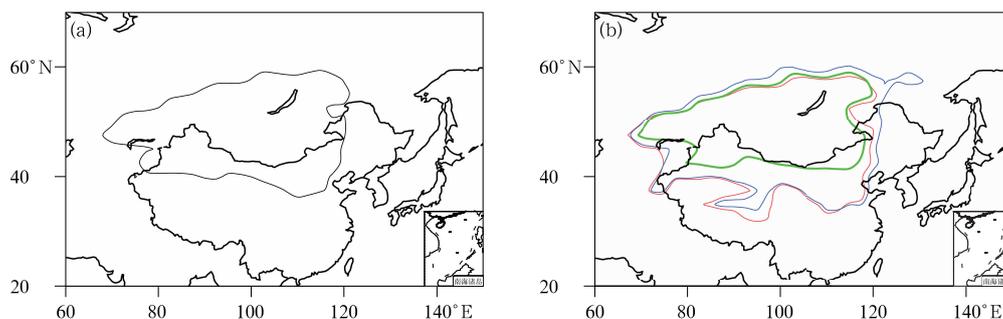


图 1 冬季(a)、12月(b,红线)及次年1月(b,蓝线)、2月(b,绿线)

SLP 平均场上 SH 特征线(单位:hPa)(资料为 1951—2017 年的冬季,下同)

Fig. 1 SH characteristic line of climatic SLP field (unit: hPa) in winter (a) and December (b, red line) (during 1951—2017, the same below), as well as the ones in January (b, blue line) and February (b, green line) of the next year

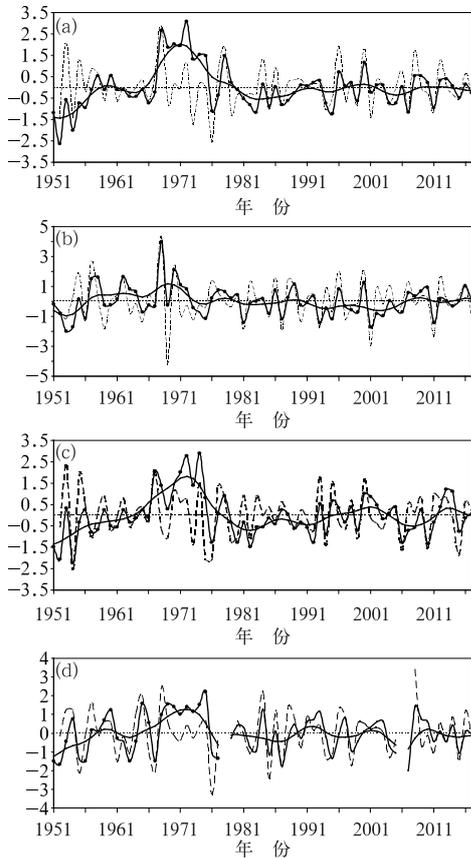


图 2 冬季(a)、12月(b)及次年1月(c)、2月(d)SHSBES指数的标准化时间序列(实心圆线为标准化值;实线为9年高斯滤波值)及其年际增量(虚线)

Fig. 2 Standardized time series of SHSBES index (solid line with the circles; standardized value; solid line; 9 year Gaussian filtered value) and its interannual differences (dashed line) in winter (a) and December (b), as well as the ones in January (c) and February (d) of the next year

及季内各月 SHSBES 指数的时间序列,其中 1979 年和 2007 年的 2 月 SH 特征线的东脊点异常偏西 ( $91^{\circ}\text{E}$  附近),即使是  $1025\text{ hPa}$  等值线的东脊点也在  $95^{\circ}\text{E}$  以西,故 2 月 SHSBES 指数在这两年缺省,在文中的相关和回归分析中已剔除,下文不再赘述。

在年代际尺度上,9 a 高斯滤波值曲线表明冬季 SHSBES(图 2a)在 20 世纪 60 年代中期由偏南转偏北,70 年代末转入偏南位相,从 90 年代起为正常略偏南状态。将冬季 SHSBES 指数标准化值  $>1.0$  和  $<-1.0$  分别作为偏北年(1968、1969、1970、1971、1972、1973、1974、1975、1978、2000 年)和偏南年(1951、1952、1954、1976、1983、1995、2007 年),在偏

南年,SH 增强南伸至长江中下游;在偏北年,SH 减弱北收至蒙古南部(图 3)。

12 月(图 2b)SHSBES 变化与次年 1 月、2 月有较大差异,在 1957 年由南转北(早于 1 月、2 月),自 1974 年起又开始偏南,MK 检验(图略)表明 2001 年是 12 月 SHSBES 由北转南的一次突变,2006 年后转为正常略偏北状态。1、2 月 SHSBES 在 20 世纪 90 年代之前的年代际变化与冬季相似,随后分别从 90 年代后期(图 2c)、90 年代初期(图 2d)转入南北位相的振荡。此外,冬季及其各月的振幅都从 70 年代后期减小,意味着驱动冬季风的能量减弱。

引用年际增量来分析 SHSBES 的年际变化。年际增量即当年的变量减去前一年的变量得到的差值,表征年与年之间的差异,它可放大变量的年际异常信号,减小年代际背景的影响(范可等,2007)。取年际增量绝对值大于一倍标准偏差的年份作为年际增量异常年。SHSBES 指数的年际增量(图 2 虚线)异常年在冬季集中在 1952—1955、1968—1985、1994—2012 年;12 月主要在 1955—1970、1986—2001 年;1 月集中在 1954—1956、1968—1983、1994—2001 年;2 月集中在 1954—1969 年、1985—1999 年。这些时段表明 SHSBES 年际振荡较大,尤其在 20 世纪 50 年代、60 年代末期、90 年代中后期的年际波动均偏大。小波分析(图略)还表明,SHSBES 的年际增量均有显著的准 2 a 周期。

从 SH 的各边界看,SHSBES 摆幅最大(图 3)。

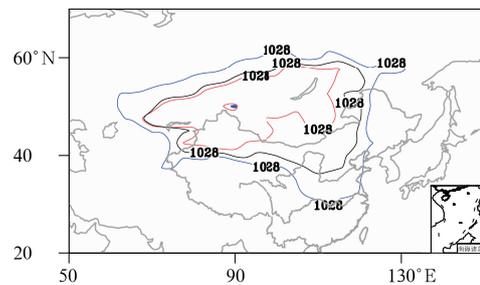


图 3 冬季 SHSBES 偏北年(红线)和偏南年(蓝线)SH 特征线及中心(单位: hPa;黑线是冬季 SLP 气候平均场上 SH 特征线)

Fig. 3 SH characteristic line and SH center in the north anomaly years (red line) and south anomaly years (blue line) of the winter SHSBES (unit: hPa; Black line is the SH characteristic line in the winter climatological field of SLP)

以往研究表明 SH 中心随 SH 增强北移(侯亚红等, 2008;刘晴晴等, 2011),从图 3 也可看出在 SHSBES 偏南年,SH 虽较强大,但中心位置也并未明显南移。这可能是由于 SH 作为冷高压具有趋冷性以及 SH 增强时北边缘同时北扩的原因而导致的。可见 SHSBES 和 SH 中心位置与 SH 强度的关系并不一致,SHSBES 更能反映增强的 SH 携带冷空气南侵的特点。

### 3 西伯利亚高压南界东段位置与北极海冰的关系

#### 3.1 不同季节北极海冰变化的空间差异

在全球变暖背景下(IPCC, 2013;孙劭等, 2019),北极海冰密集度(SIC)在四季有不同程度减少(图 4)。夏季(图 4b)、秋季(图 4c)SIC 为全区减小趋势,格陵兰海—巴伦支海—喀拉海—拉普捷夫海和东西伯利亚海—白令海峡以北海域是海冰消融

最大区。春季(图 4a)、冬季(图 4d)SIC 呈两区反相变化,且消融程度明显大于增长程度,尤其是格陵兰海—巴伦支海海冰在春、冬季急剧融化。从全区平均看,1951—2017 年北极海冰面积标准化值在四季呈显著的线性减少趋势(图略),春、夏、秋、冬季的气候倾向率分别为 $-0.42$ 、 $-0.48$ 、 $-0.45$ 、 $-0.39$ ,表明夏季海冰的消融最快。

#### 3.2 西伯利亚高压南界东段位置与北极海冰关系的季节演变

为去除全球变暖对北极海冰的影响,全文均已对北极 SIC 去除线性趋势。另外,SH 的变化又与冷空气活动密切联系,研究表明东亚冬季风在 20 世纪 80 年代中期出现明显的年代际减弱特征(贺圣平和王会军,2012),因此下文用 SHSBES 指数做相关分析时也均已对该指数去除线性趋势。将冬季 SHSBES 指数与四季 SIC 做相关分析(图 5),显著正相关区在春季(图 5a)主要在格陵兰海至  $30^{\circ}\text{E}$ ,夏季(图 5b)东伸到巴伦支海和喀拉海,秋季(图 5c)进

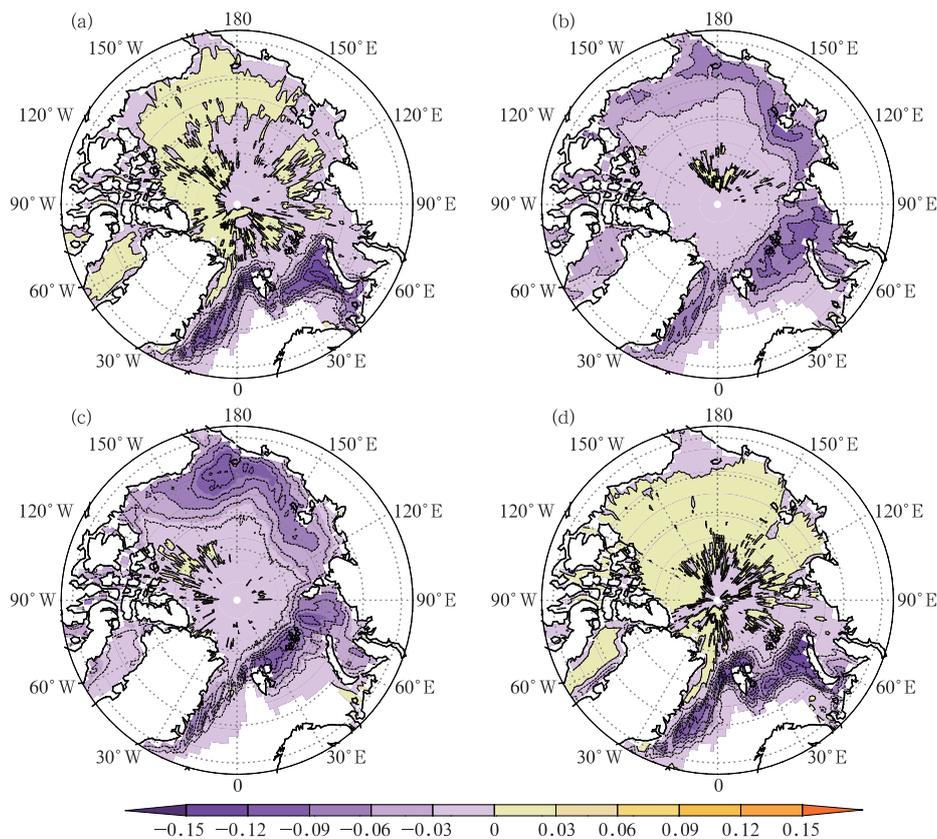


图 4 春季(a)、夏季(b)、秋季(c)、冬季(d)北极 SIC 的气候倾向率

Fig. 4 Climatic tendency rates of Arctic SIC in spring (a), summer (b), autumn (c) and winter (d)

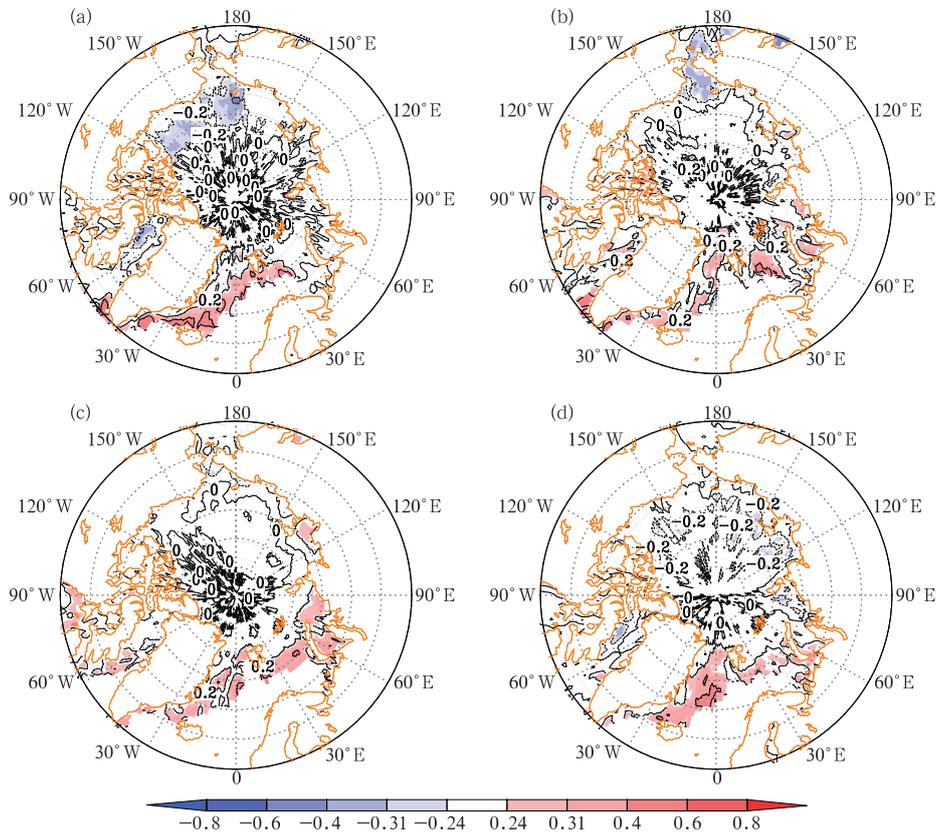


图 5 冬季 SHSBES 指数与前期春季(a)、夏季(b)、秋季(c)和同期冬季(d)北极 SIC 的相关系数分布  
(阴影表示通过 0.05 的显著性水平检验)

Fig. 5 Correlation coefficient distributions between SHSBES index in winter and Arctic SIC in the preceding spring (a), summer (b), autumn (c) and corresponding winter (d)  
(shaded areas having passed the 0.05 significance level test)

一步向东西扩展,冬季(图 5d)又回缩到格陵兰海—巴伦支海—喀拉海南部;显著负相关区最强出现在春季 180°E 以东至波费特海和巴芬湾,夏季开始明显减弱。当上述显著正相关区的海冰偏少,显著负相关区的海冰偏多时,SHSBES 偏南,反之偏北。

两者关系在冬季各月存在差异。12 月 SHSBES 指数与海冰关系(图 6a, 6d, 6g, 6j)在春、夏季较弱,到秋季和 12 月明显加强,显著正相关区从格陵兰海逐渐东扩到巴伦支海。次年 1 月 SHSBES 指数与海冰的正相关显著区(图 6b, 6e, 6h, 6k)在春、夏、秋季在格陵兰岛两侧,到同期 1 月东扩到巴伦支海。次年 2 月 SHSBES 指数(图 6c, 6f, 6i, 6l)与春季、同期 2 月海冰的关系稍好,春季格陵兰海为显著正相关,180°E 附近海域为显著负相关;2 月显著正相关为巴伦支海和喀拉海,显著负相

关在拉普捷夫海—东西伯利亚海及加拿大海盆西南部。从相关的范围和程度看,上述正相关区总体强于负相关区,且 2 月 SHSBES 指数与海冰的相关最弱。从分布看,正相关基本在大西洋扇区(60°W~60°E)游离,负相关区基本局限在太平洋扇区(120°E~120°W)。从季节移动看,冬季及季内各月 SHSBES 指数与海冰的显著相关区在春季多占据在西半球,此后逐渐东扩到东半球。

总体上显著相关区在空间上分布较为零散不匀,根据以上分析将北极划分为东半球区(0°~180°E)、西半球区(0°~180°W)、太平洋扇区(120°E~120°W)、大西洋扇区(60°W~60°E)来讨论,以找到最强的影响区域和时间。由 SHSBES 指数与前期春、夏、秋季和同期北极全区及各区海冰面积的相关系数(表略)可知,在同期相关上,大西洋扇区海冰

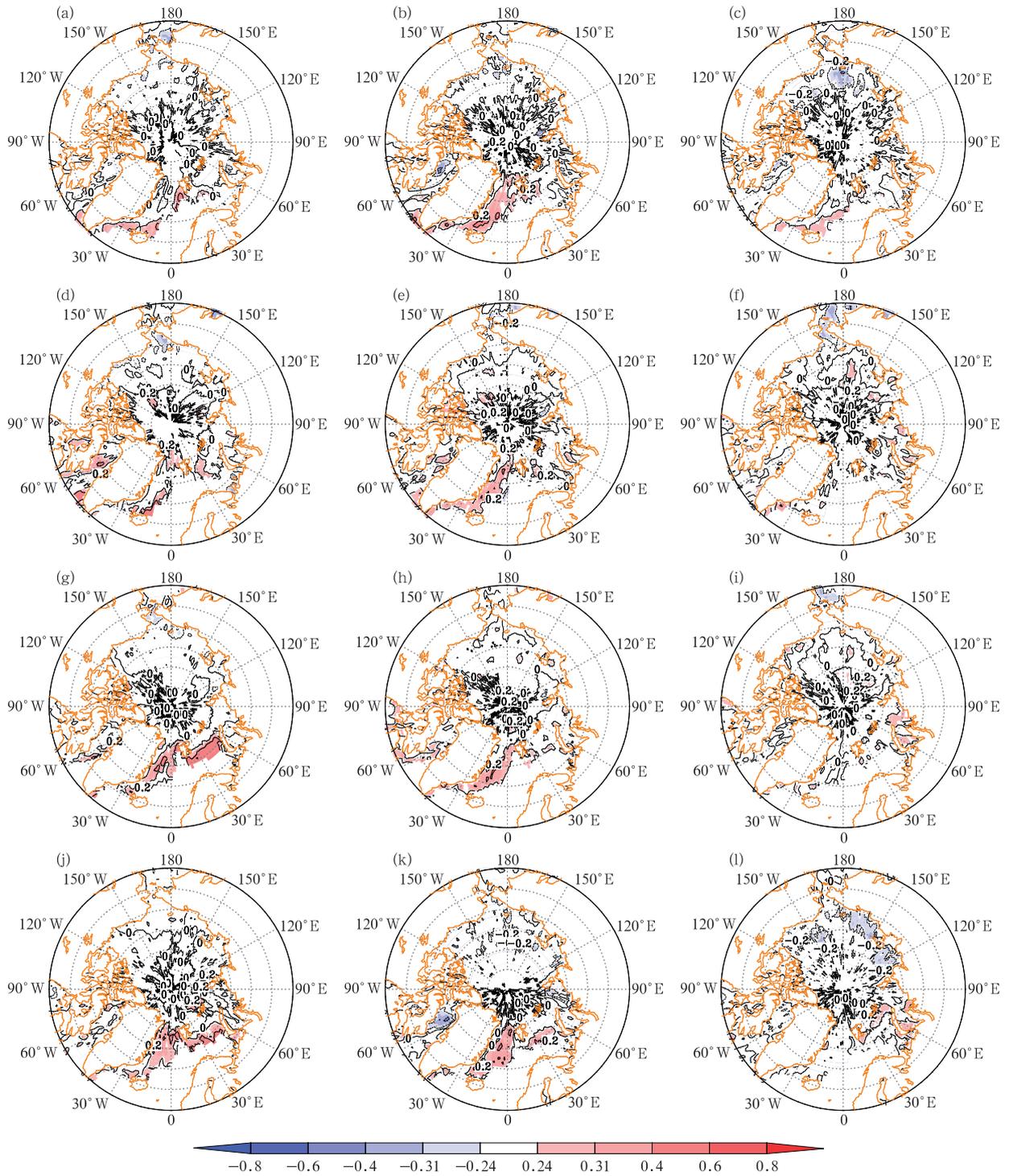


图 6 SHSBES 指数分别与前期春季(a,b,c)、夏季(d,e,f)、秋季(g,h,i)和同期(j,k,l)北极 SIC 的相关系数分布  
(阴影表示通过 0.05 的显著性水平检验)

(a,d,g,j)12 月,(b,e,h,k)次年 1 月,(c,f,i,l)次年 2 月

Fig. 6 Correlation coefficient distributions between SHSBES index and Arctic SIC in the preceding spring (a, b, c), summer (d, e, f), autumn (g, h, i) and corresponding period (j, k, l) during 1951–2017

(a, d, g, j) December, (b, e, h, k) January, (c, f, i, l) February  
(shaded areas having passed the 0.05 significance level test)

面积是影响冬季、12月、次年1月 SHSBES 指数的最强信号(相关系数分别为 0.46、0.40、0.41),次年2月 SHSBES 指数无显著影响区;从前兆信号看,春季西半球海冰面积是冬季、次年1和2月 SHSBES 指数的最强信号(相关系数分别为 0.43、0.40、0.27),秋季大西洋扇区海冰面积是12月 SHSBES 指数的最强信号(相关系数达 0.41)。夏季北极海冰面积也存在显著相关区,其中冬季、次年1月 SHSBES 指数对大西洋扇区的响应最强(相关系数分别为0.40、0.33),次年2月 SHSBES 指数对东半球区的响应最强(相关系数为 0.24),而夏季海冰对12月 SHSBES 指数的影响不显著。

图 7 是 SHSBES 指数与前期 3 月乃至同期北

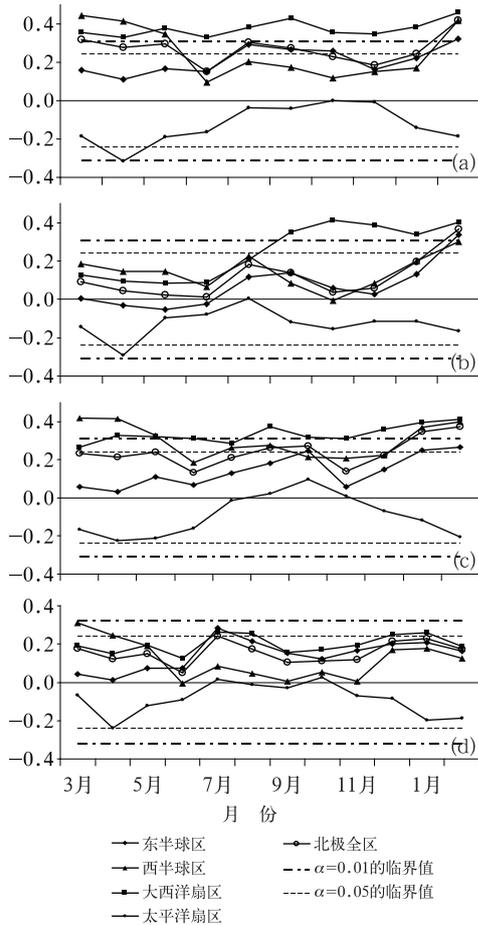


图 7 冬季(a)、12月(b)、次年1月(c)和2月(d)SHSBES 指数分别与前期3月至同期的北极各区海冰面积的逐月相关系数  
Fig. 7 Monthly correlations of the sea ice area of each Arctic region from the previous March to the corresponding period with the SHSBES index in winter (a), December (b) and the following January (c) and February (d)

极各区海冰面积的逐月相关系数,可进一步挑出最强前兆信号出现的月份,并与同期相关作比较,以锁定最显著的海冰区和对应月份。结果表明,12月 SHSBES 指数的最强前兆信号出现在9月大西洋扇区;冬季及1月和2月 SHSBES 指数的最强前兆信号均出现在3月西半球区。而在夏季,8月大西洋扇区海冰与冬季及其各月 SHSBES 指数关系均较为突出。另外,相关的逐月演变表明,西半球区海冰面积与冬季及1月和2月 SHSBES 指数的相关均在前期3月达到最强后逐渐减弱到不显著,直到同期相关有所回升。大西洋扇区海冰面积与冬季和及1月 SHSBES 指数的相关从前期3月开始波动上升,并从初夏开始跃居为各月中的最强区;其与12月 SHSBES 指数的相关则自8月起变为各月中的最强区。

比较前期和同期相关,由图7可直观地看出冬季 SHSBES 指数与同期大西洋扇区海冰面积关系最好;12月 SHSBES 指数与9月大西洋扇区海冰面积相关最强;次年1月和2月 SHSBES 指数与前期3月西半球区海冰面积相关最强。可见春季北极海冰对SH南扩有较大影响,而SH强度主要受秋冬季海冰的影响(Wu et al, 2011)。比较图2和图8,这三个关键海冰因子的面积偏大(小)期与各自对应的 SHSBES 的偏北(南)期基本吻合。

### 3.3 冬季欧亚大气环流对北极海冰的响应

上文表明北极冬季和9月大西洋区、3月西半球区的海冰分别对冬季及季内12月、1月和2月 SHSBES 有显著影响。北极海冰可通过复杂的反馈过程对区域乃至全球大气环流和气候起到重要的影响和调控作用(Lemke et al, 2000)。下文将从冬季欧亚大气环流对北极海冰的响应入手来探讨海冰影响 SHSBES 的可能物理过程。

图9是冬季大西洋扇区海冰面积对同期1000 hPa 温度场、500 hPa 高度场、SLP 场的回归分析,当海冰面积偏大时,欧亚大陆中高纬偏冷使气柱收缩,贝加尔湖附近对应应有低槽建立,在此环流形势下 SH 东南部及其外围显著减压,不利于 SHSBES 南下。此外 SH 作为冷高压具有趋冷性,偏冷的中高纬可诱导 SH 北抬,促使 SHSBES 偏北。当冬季该区海冰面积偏小时,偏暖的欧亚大陆中高纬使经向温度梯度和纬向气流减弱,气柱膨胀利于贝加尔湖阻高发展,在此形势下 SH 东南部及其外围明显

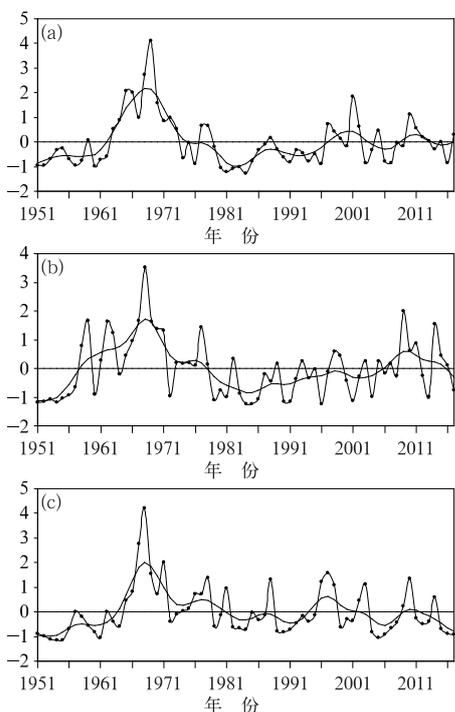


图 8 北极 3 月西半球区(a)、9 月大西洋扇区(b)、冬季大西洋扇区(c)海冰面积(去趋势)的标准化时间序列

(实心圆线为标准化值;实线为 9 年高斯滤波值)

Fig. 8 Standardized time series of the Western Hemisphere Arctic sea ice area in March (a), Arctic Atlantic sector sea ice area in September (b) and winter (c)

(All data are detrended; solid line with the circles is the standardized value; solid line is the 9 year Gaussian filtered value)

增压,引导 SHSBE 南移。

从季节内大气环流的响应差异看,如图 10a, 10d,10g 所示,当 9 月大西洋扇区海冰面积偏大(小)时,12 月西欧偏冷(暖)使其上空气柱收缩(膨胀),500 hPa 低槽(阻高)随之建立。3 月西半球区海冰面积(图 10b,10e,10h)偏大(小)使次年 1 月贝加尔湖以西偏冷(暖),同理在此有一低槽(阻高);对次年 2 月(图 10c,10f,10i)则使西欧和亚洲中东部偏冷(暖),进而有三槽(西欧、贝加尔湖、勘察加半岛)建立。在上述环流形势下,SH 东南部及其以南均有显著减(增)压,不(有)利于 SHSBEs 南移。

此外,9 月大西洋扇区和 3 月西半球区海冰面积偏大(小)还可分别使 12 月和次年 2 月欧亚中低纬偏暖(冷),更加剧了 SH 南界及其以南减(增)压,在热力作用下直接影响 SHSBEs 的摆动。那么,上

述海冰在动力作用上是如何影响 SHSBEs 呢?

从区域动力条件看,当上述海冰面积偏大(小)使冬季及季内各月对应的欧亚中高纬度低槽(阻高)建立时,SH 东南部及其以南区域(50°N 以南)均处于槽(脊)前,偏南(北)气流将正(负)涡度输送到此,上空正(负)涡度平流增大(图 11)。正(负)涡度平流区有气旋(反气旋)性涡度的增加使风压场不平衡,在地转偏向力的作用下有水平辐散(合),进而低层减(加)压,气压梯度力的作用又使减(加)压区气流辐合(散),则出现了 50°N 以南高层辐散(合)和低层辐合(散)的配置(图 12),气流上升(下沉)运动由此产生,空气质量得以保持连续。相对涡度平

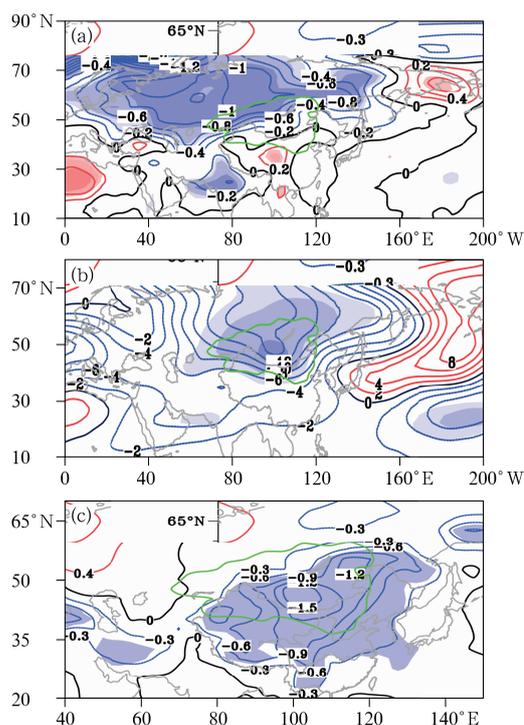


图 9 冬季北极大西洋扇区海冰面积对同期 1000 hPa 温度场(a,单位: °C)、500 hPa 高度场(b,单位: gpm)、SLP 场(c,单位: hPa)的回归分析 (阴影区表示通过 0.05 的显著性水平检验;绿线是冬季 SLP 气候场上 SH 特征线)

Fig. 9 Reegression maps of (a) 1000 hPa air temperature (unit: °C), (b) 500 hPa geopotential height (units: gpm) and (c) sea level pressure (unit: hPa) in the corresponding winter against the winter Atlantic sector Arctic sea ice area (Area shaded is having passed the 0.05 significance level test; green line is the SH characteristic line in the winter climatological field of SLP)

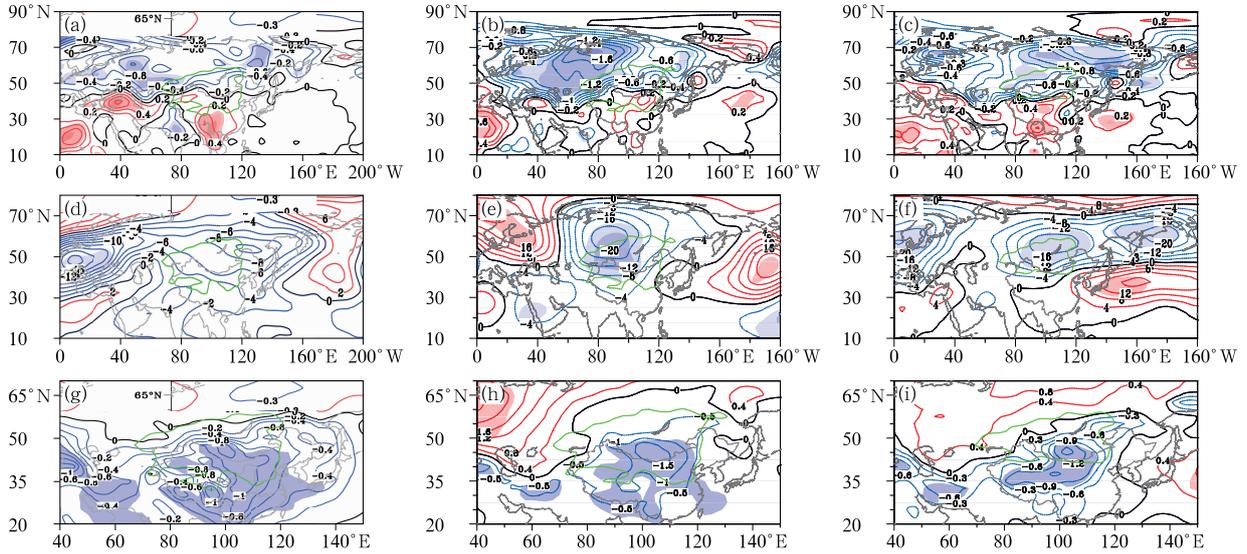


图 10 北极 9 月大西洋扇区(a,d,g)、3 月西半球区海冰面积(b,e,h,c,f,i)分别对当年 12 月(a,d,g)、次年 1 月(b,e,h)、次年 2 月(c,f,i)1000 hPa 温度场(a,b,c; 单位: °C)、500 hPa 高度场(d,e,f; 单位: gpm)、SLP 场(g,h,i; 单位: hPa)的回归分析  
(阴影区表示通过 0.05 的显著性水平检验; 绿线是冬季各月 SLP 气候平均场上 SH 特征线)  
Fig. 10 Regession maps of 1000 hPa air temperature (a, b, c; unit: °C), 500 hPa geopotential height (d, e, f; unit: gpm) and sea level pressure (g, h, i; unit: hPa) in December of the current year (a, d, g) against Atlantic sector Arctic sea ice area in September (a, d, g), as well as the ones in January (b, e, h) and February (c, f, i) of the next year against Western Hemisphere Arctic sea ice area in March (b, e, h, c, f, i), respectively (shaded areas are having passed the 0.05 significance level test, green line is the SH characteristic line in each winter month climatological field of SLP)

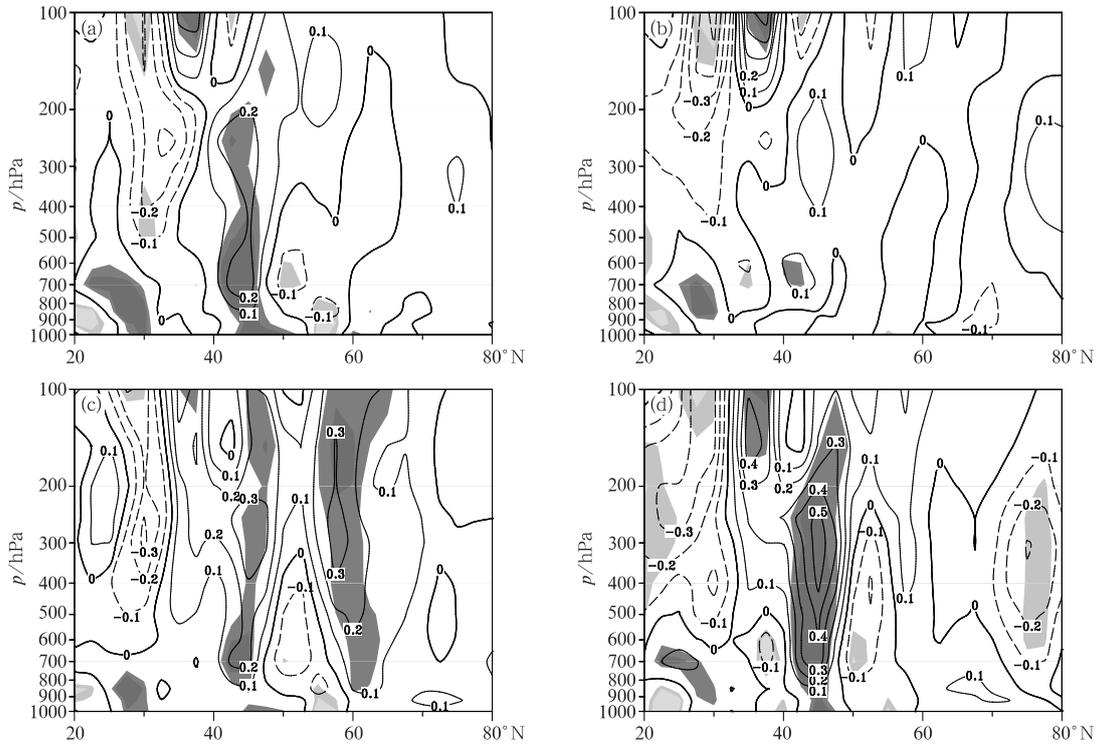


图 11 北极冬季大西洋扇区(a)、9 月大西洋扇区(b)、3 月西半球区海冰面积(c,d)分别对当年冬季(a)、12 月(b)、次年 1 月(c)和 2 月(d)纬向平均(100°~115°E)相对涡度平流(单位:  $10^{-10} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ )的回归分析  
(阴影区表示通过 0.05 的显著性水平检验)  
Fig. 11 Regression maps of zonal ( $100^{\circ}-115^{\circ}\text{E}$ ) mean relative vorticity advection (unit:  $10^{-10} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ) in the current winter (a) and December (b) with January (c) and February (d) of the next year against the Atlantic sector Arctic sea ice area in winter (a) and in September (b), and Western Hemisphere Arctic sea ice area in March (c, d), respectively (shaded areas having passed the 0.05 significance level test)

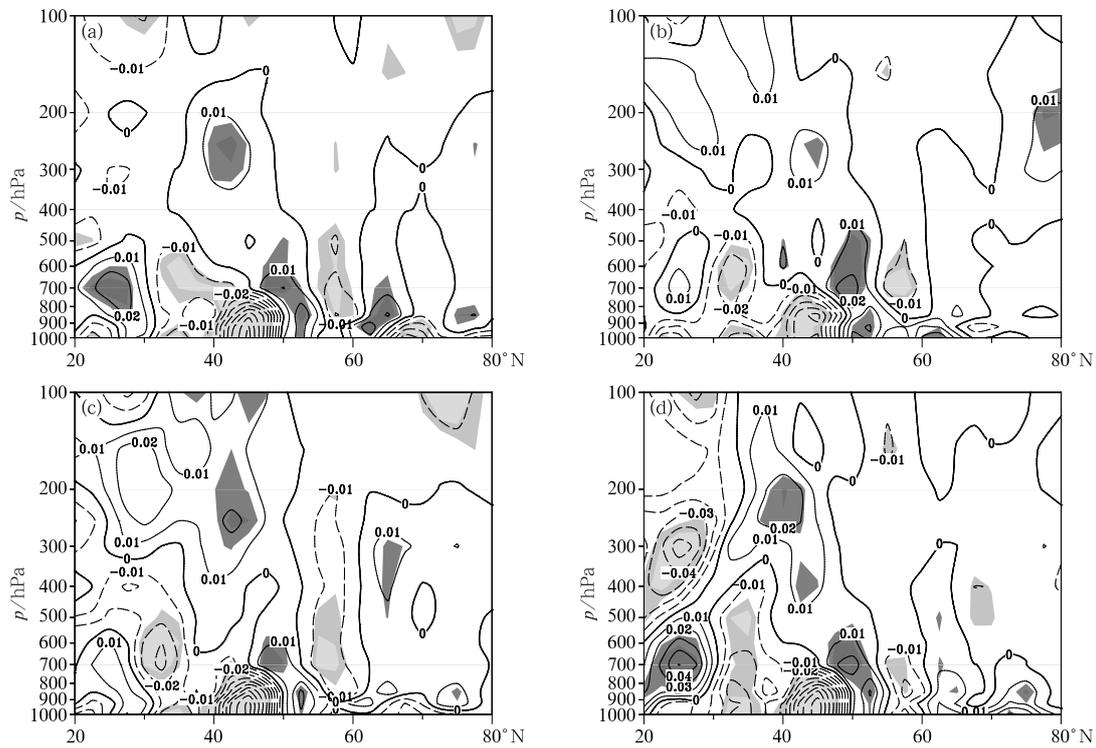


图 12 同图 11, 但为对水平散度(单位:  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) 的回归分析

Fig. 12 Same as Fig. 11, but for the horizontal divergence (unit:  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ )

表 1 3 月北极西半球区海冰面积、次年 1、2 月贝加尔湖阻高强度分别与次年 1、2 月北极各区海冰面积的相关系数

Table 1 Correlations of the sea ice area of each Arctic region in January and February of the next year with the Western Hemisphere Arctic sea ice area in March, and the intensity of Baikal Lake blocking high in the following January and February

	3 月西半球区海冰面积	次年 1 月贝加尔湖阻高强度	次年 2 月贝加尔湖阻高强度	
次年 1 月海冰面积	东半球区	0.31*	-0.22*	
	西半球区	0.57*	-0.31*	
	大西洋区	0.51*	-0.30*	
	太平洋区	-0.04	-0.01	
次年 2 月海冰面积	北极全区	0.48*	-0.30*	
	东半球区	0.25*	—	-0.07
	西半球区	0.61*	—	-0.27*
	大西洋区	0.48*	—	-0.21
	太平洋区	-0.04	—	0.27*
	北极全区	0.45*	—	-0.16

注: \* 表示通过 0.05 的显著性水平检验。

Note: \* denotes the value passing the 0.05 significance level test.

流和低层散度在 SH 东南部 ( $40^{\circ} \sim 50^{\circ} \text{N}$ ) 上空变化最显著。丁一汇等 (1991) 指出负涡度的显著增大对 SH 发展尤为重要, 对流层中、上层负涡度平流和低层散度项对负涡度的出现和增大起主要作用。因此, 上述海冰面积偏小所致的欧亚阻高使 SH 东南部及其以南上空负涡度平流增大, 最终使地面增压,

SHSBES 南下。

对比可知 9 月大西洋扇区海冰异常所引起的 12 月 SH 东南部及其以南上空相对涡度平流和低层散度的变化最弱, 这是由于该海冰因子主要影响的是 12 月西欧低槽 (阻高), 距离 SH 较远。而另外两个海冰关键因子均可分别影响到冬季、次年 1、2

月贝加尔湖附近的低槽(阻高),距离 SH 很近,容易向 SH 东南部及其以南上空输送更多的正(负)涡度,故引起的相对涡度平流和散度变化更大。可见贝加尔湖阻高对 SHSBES 移动至关重要。

下文进一步探讨在相隔近 1 年的时段中,3 月西半球区海冰的异常是如何影响到后期次年 1 月和 2 月 SHSBES 的变化。首先将 ( $50^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$ 、 $80^{\circ}\sim 110^{\circ}\text{E}$ ) 区域平均的 500 hPa 高度标准化值作为贝加尔湖阻高强度(王遵娅,2011)。3 月西半球区海

冰面积(去趋势)与次年 1 月和 2 月贝加尔湖阻高强度相关系数分别为  $-0.36$ 、 $-0.31$ , SHSBES 指数与贝加尔湖阻高强度的同期 1 月和同期 2 月相关系数分别为  $-0.55$ 、 $-0.57$ , 相关均显著,更表明贝加尔湖阻高是联系 3 月西半球区海冰面积与次年 1 月和 2 月 SHSBES 的重要纽带。

图 13 为 3 月北极西半球区海冰面积分别与春季各月、夏季、秋季、冬季各月北极 SIC 的相关分布。当 3 月西半球区海冰面积偏大(小)时,主要是

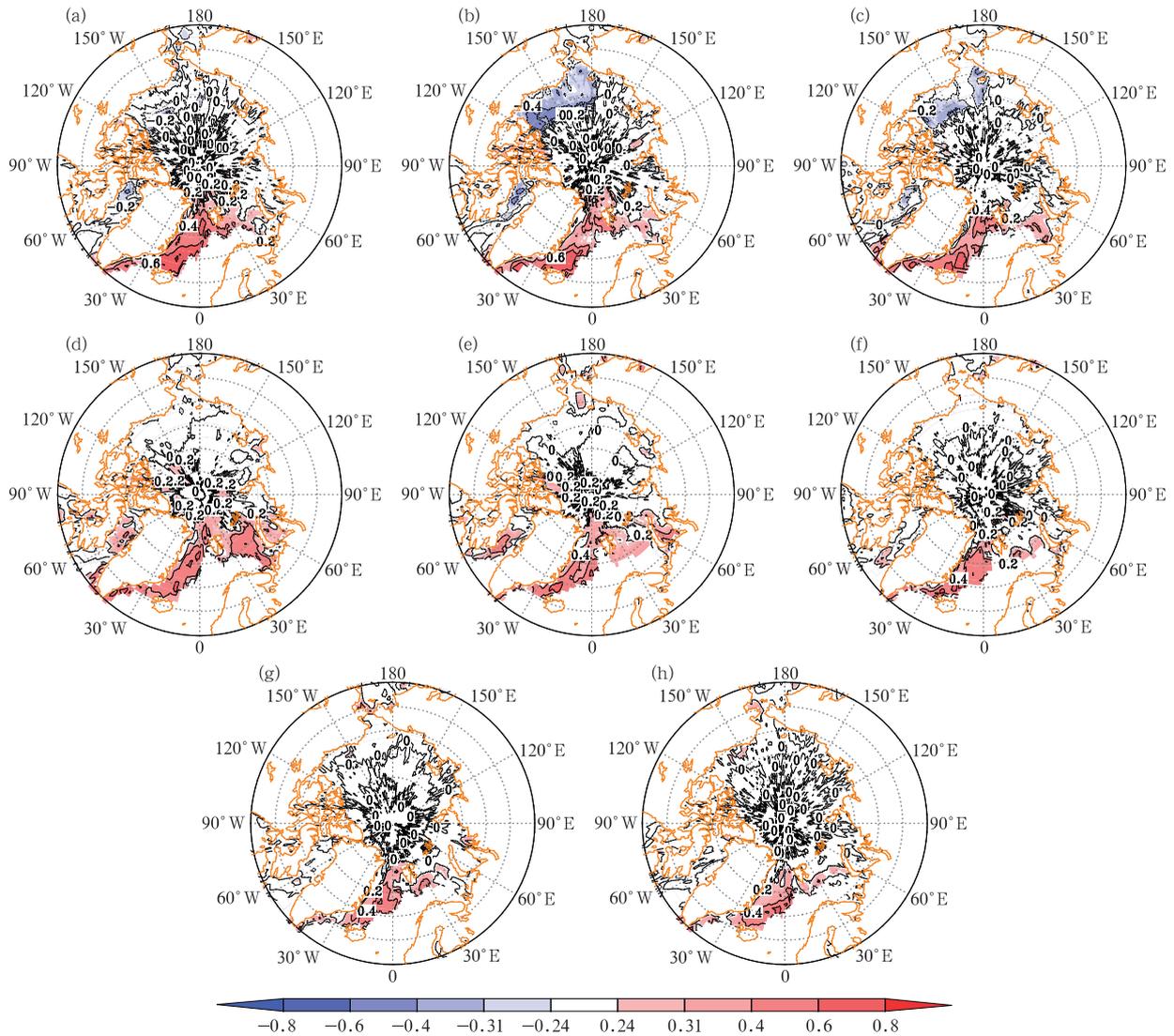


图 13 3 月北极西半球区海冰面积与当年 3 月(a)、4 月(b)、5 月(c)、夏季(d)、秋季(e)、12 月(f)、次年 1 月(g)和 2 月(h)北极 SIC 的相关系数分布  
(阴影表示通过 0.05 的显著性水平检验)

Fig. 13 Correlation coefficient distributions between the Western Hemisphere Arctic sea ice area in March and Arctic SIC in the current March (a), April (b), May (c), summer (d), autumn (e) and December (f) as well as the ones in January (g) and February (h) of the next year (d) (shaded areas having passed the 0.05 significance level test)

3 月西半球区的格陵兰海海冰增多(减少)最显著,且这种气候效应可从 3 月一直持续到次年 2 月,且使次年 1 月和 2 月西半球区海冰面积偏大(小)最明显(表 1)。同时,1 月和 2 月西半球区海冰面积的偏多(少)对于同期贝加尔湖阻高的减弱(增强)影响最大(表 1)。结合上文,贝加尔湖阻高的减弱(增强)利于同期 SHSBES 偏北(南)。可见 3 月西半球区海冰面积的异常有一定持续性,进而通过影响贝加尔湖阻高,最终导致次年 1 月和 2 月 SHSBES 的异常变化。

## 4 结论和讨论

本文分析了 1951—2017 年冬季及季节内各月 SHSBES 的异常变化,将北极分为四区对 SHSBES 和北极海冰关系进行研究,并探讨海冰的可能影响过程及季内差异。主要结论如下:

(1) 冬季 SHSBES 在 20 世纪 60 年代中期由偏南转偏北,70 年代末后再转为偏南,自 90 年代起进入正常略偏南状态。在季节内,12 月 SHSBES 在 1957 年由偏南转偏北,转折较早,从 1974 年进入偏南位相,2006 年后为正常略偏北状态。1 月、2 月 SHSBES 在 90 年代前的年代际变化与冬季相似,随后在 90 年代开始转为南北位相的年际振荡。四者在 50 年代、60 年代末期、90 年代中后期的年际波动均较大。

(2) 冬季及季内各月 SHSBES 指数与海冰的显著相关区在春季多占据在北极西半球区,此后逐渐东扩;其中正相关区基本游离在大西洋扇区,负相关区主要在太平洋扇区且较弱。次年 2 月 SHSBES 指数与前期和同期海冰的关系最弱。

(3) 冬季 SHSBES 指数与同期大西洋扇区海冰面积关系最显著。12 月 SHSBES 指数与 9 月大西洋扇区海冰面积相关最强;次年 1 月和 2 月 SHSBES 指数受前期 3 月西半球区海冰面积影响最大。当海冰面积偏大时,SHSBES 偏北;反之亦然。

(4) 冬季大西洋扇区海冰面积偏小时,欧亚中高纬偏暖,经向温度梯度和纬向气流减弱,气柱受热膨胀促使贝加尔湖阻高建立。季内同理,9 月大西洋扇区海冰面积偏小使 12 月西欧阻高建立;3 月西半球区海冰面积偏小使次年 1 月贝加尔湖西侧阻高

建立,2 月则有三阻(西欧、贝加尔湖、勘察加半岛)建立。在此环流形势下,SH 东南部及其以南均为脊前负涡度平流区,高层辐合和低层辐散,气流下沉,地面加压,引导 SHSBES 南伸。当上述海冰面积偏大时,情况相反。其中,3 月西半球区海冰面积的异常可一直持续到次年 2 月,进而通过影响贝加尔湖阻高,最终导致次年 1 月和 2 月 SHSBES 的异常。

(5) 在动力作用上,9 月大西洋扇区海冰面积较其他两个海冰关键因子影响弱。在热力作用上,9 月大西洋扇区和 3 月西半球区海冰面积偏小(大)可分别使 12 月和次年 2 月 SH 南界及其以南偏冷(暖),加剧了该区域地面的加(减)压,在一定程度直接影响 SHSBES 南伸(北抬)。

本文的研究主要基于对已有观测资料的统计诊断分析结果,下一步将通过数值试验对海冰影响 SHSBES 的物理过程加以验证。另外,西伯利亚高压南界东段位置(SHSBSE)和西段位置(SHSBSW)的南北异常分别对中国和中亚冬季气候的影响如何也是后期的研究重点。

## 参考文献

- 丁婷,王永光,柯宗建,等,2017. 2016/2017 年冬季北半球大气环流及对我国冬季气温的影响[J]. 气象,43(7):887-893. Ding T, Wang Y G, Ke Z J, et al, 2017. Northern Hemisphere atmospheric circulation in winter 2016/2017 and its impact on temperature in China[J]. Meteor Mon,43(7):887-893(in Chinese).
- 丁一汇,温市耕,李运锦,1991. 冬季西伯利亚高压动力结构的研究[J]. 气象学报,49(4):430-439. Ding Y H, Wen S G, Li Y J, 1991. A study of dynamic structures of the Siberian high in winter[J]. Acta Meteor Sin,49(4):430-439(in Chinese).
- 范可,王会军,Young-Jean C,2007. 一个长江中下游夏季降水的物理统计预测模型[J]. 科学通报,52(24):2900-2905. Fan K, Wang H J, Young-Jean C,2008. A physically-based statistical forecast model for the middle-lower reaches of the Yangtze River Valley summer rainfall[J]. Chin Sci Bull,53(4):602-609.
- 龚道溢,王绍武,1999. 西伯利亚高压的长期变化及全球变暖可能影响的研究[J]. 地理学报,54(2):125-133. Gong D Y, Wang S W, 1999. Long-term variability of the Siberian high and the possible connection to global warming[J]. Acta Geogr Sin, 54(2):125-133(in Chinese).
- 郭其蕴,1994. 东亚冬季风的变化与中国气温异常的关系[J]. 应用气象学报,5(2):218-225. Guo Q Y, 1994. Relationship between the variations of East Asian winter monsoon and temperature anomalies in China[J]. Quart J Appl Meteor, 5(2):218-225(in

- Chinese).
- 贺圣平,王会军,2012. 东亚冬季风综合指数及其表达的东亚冬季风年际变化特征[J]. 大气科学,36(3):523-538. He S P, Wang H J, 2012. An integrated East Asian Winter monsoon index and its interannual variability[J]. Chin J Atmos Sci, 36(3):523-538(in Chinese).
- 侯亚红,杨修群,李刚,等,2008. 西伯利亚高压特征指数及其变率分析[J]. 南京气象学院学报,31(3):326-330. Hou Y H, Yang X Q, Li G, et al, 2008. Four indexes and their change rates of Siberian high[J]. J Nanjing Inst Meteor, 31(3):326-330(in Chinese).
- 黄荣辉,刘永,皇甫静亮,等,2014. 20世纪90年代末东亚冬季风年代际变化特征及其内动力成因[J]. 大气科学,38(4):627-644. Huang R H, Liu Y, Huangfu J L, et al, 2014. Characteristics and internal dynamical causes of the interdecadal variability of East Asian winter monsoon near the late 1990s[J]. Chin J Atmos Sci, 38(4):627-644(in Chinese).
- 蓝柳茹,李栋梁,2016. 西伯利亚高压的年际和年代际异常特征及其对中国冬季气温的影响[J]. 高原气象,35(3):662-674. Lan L R, Li D L, 2016. Interannual and interdecadal anomaly features of Siberian high and their impact on winter temperature of China[J]. Plateau Meteor, 35(3):662-674(in Chinese).
- 李栋梁,蓝柳茹,2017. 西伯利亚高压强度与北大西洋海温异常的关系[J]. 大气科学学报,40(1):13-24. Li D L, Lan L R, 2017. Relationship between the intensity of the Siberian high and the SST anomaly in the North Atlantic[J]. Trans Atmos Sci, 40(1):13-24(in Chinese).
- 刘晴晴,王盘兴,徐祥德,等,2011. 蒙古高压一组环流指数及与中国同期气候异常关系分析[J]. 热带气象学报,27(6):889-898. Liu Q Q, Wang P X, Xu X D, et al, 2011. A group of circulation indices of Mongolia high and analysis of its relationship with simultaneous anomaly in the climate of China[J]. J Trop Meteor, 27(6):889-898(in Chinese).
- 宋文玲,袁媛,2017. 强厄尔尼诺背景下2015/2016年冬季气候预测的不确定性分析[J]. 气象,43(10):1249-1258. Song W L, Yuan Y, 2017. Uncertainty Analysis of climate prediction for the 2015/2016 winter under the background of super El Niño event[J]. Meteor Mon, 43(10):1249-1258(in Chinese).
- 孙劭,李多,王遵娅,等,2019. 2018年全球重大天气气候事件及其成因[J]. 气象,45(4):533-542. Sun S, Li D, Wang Z Y, et al, 2019. Global major weather and climate events in 2018 and the possible causes[J]. Meteor Mon, 45(4):533-542(in Chinese).
- 孙晓娟,王盘兴,智海,等,2010. 蒙古高压若干环流指数及与我国冬季气温异常相关的分析和比较[J]. 高原气象,29(6):1493-1500. Sun X J, Wang P X, Zhi H, et al, 2010. Analysis and comparison of several Mongolian high circulation indices and their relationship with temperature anomaly of China in winter[J]. Plateau Meteor, 29(6):1493-1500(in Chinese).
- 王东阡,崔童,司东,等,2015. 2014/2015年东亚冬季风活动特征及其可能成因分析[J]. 气象,41(7):907-914. Wang D Q, Cui T, Si D, et al, 2015. Features and possible causes for East Asian winter monsoon in 2014/2015[J]. Meteor Mon, 41(7):907-914(in Chinese).
- 王力群,李崇银,谭言科,等,2010. 冬季蒙古高压的时空变化和突变特征研究[J]. 高原气象,29(1):23-32. Wang L Q, Li C Y, Tan Y K, et al, 2010. Study on time-spacial changes and sudden characteristic of winter Mongolia high[J]. Plateau Meteor, 29(1):23-32(in Chinese).
- 王遵娅,2011. 中国冰冻日数的气候及变化特征分析[J]. 大气科学,35(3):411-421. Wang Z Y, 2011. Climatic characters and changes of ice-freezing days in China[J]. Chin J Atmos Sci, 35(3):411-421(in Chinese).
- 王遵娅,丁一汇,2006. 近53年中国寒潮的变化特征及其可能原因[J]. 大气科学,30(6):1068-1076. Wang Z Y, Ding Y H, 2006. Climate change of the cold wave frequency of China in the last 53 years and the possible reasons[J]. Chin J Atmos Sci, 30(6):1068-1076(in Chinese).
- 武炳义,2018. 北极海冰融化影响东亚冬季天气和气候的研究进展以及学术争论焦点问题[J]. 大气科学,42(4):786-805. Wu B Y, 2018. Progresses in the impact study of Arctic sea ice loss on wintertime weather and climate variability over East Asia and key academic disputes[J]. Chin J Atmos Sci, 42(4):786-805(in Chinese).
- 武炳义,杨琨,2016. 从2011/2012和2015/2016年冬季大气环流异常看北极海冰以及前期夏季北极大气环流异常的作用[J]. 气象学报,74(5):683-696. Wu B Y, Yang K, 2016. Roles of Arctic sea ice and the preceding summer Arctic atmospheric circulation anomalies in the atmospheric circulations anomalies of 2011/2012 and 2015/2016 winters[J]. Acta Meteor Sin, 74(5):683-696(in Chinese).
- 谢韶青,卢楚翰,2018. 近16a来冬季欧亚大陆中纬度地区低温事件频发及其成因[J]. 大气科学学报,41(3):423-432. Xie S Q, Lu C H, 2018. Intensification of winter cold events over the past 16 years in the mid-latitudes of Eurasia and their causes[J]. Trans Atmos Sci, 41(3):423-432(in Chinese).
- 曾鼎文,朱伟军,马小娇,等,2015. 冬季北大西洋风暴轴的变化及其对西伯利亚高压的影响[J]. 大气科学学报,38(2):232-240. Zeng D W, Zhu W J, Ma X J, et al, 2015. North Atlantic storm track and its influence on Siberian high in winter[J]. Trans Atmos Sci, 38(2):232-240(in Chinese).
- 章大全,宋文玲,2018. 2017/2018年冬季北半球大气环流特征及对我国天气气候的影响[J]. 气象,44(7):969-976. Zhang D Q, Song W L, 2018. Northern hemisphere atmospheric circulation characteristics in 2017/2018 winter and its impact on weather and climate in China[J]. Meteor Mon, 44(7):969-976(in Chinese).
- 朱晶晶,赵小平,吴慧,等,2018. 近40年海南岛冷冬气候特征及其成因分析[J]. 气象,44(10):1286-1294. Zhu J J, Zhao X P, Wu H,

- et al, 2018. Climatic characteristics and causes of cold winter over Hainan in last 40 years[J]. Meteor Mon, 44(10):1286-1294(in Chinese).
- 朱乾根,施能,吴朝晖,等,1997. 近百年北半球冬季大气活动中心的长期变化及其与中国气候[J]. 气象学报, 55(6):750-758. Zhu Q G, Shi N, Wu Z H, et al, 1997. The Long-term change of atmospheric active centers in northern winter and its correlation with China climate in recent 100 years[J]. Acta Meteor Sin, 55(6): 750-758(in Chinese).
- Cohen J, Saito K, Entekhabi D, 2001. The role of the Siberian high in Northern Hemisphere climate variability[J]. Geophys Res Lett, 28(2):299-302.
- IPCC, 2013. Summary for policymakers[M]//Climate Change 2013: The Physical Science Basis; Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press; 36.
- Lemke P, Harder M, Hilmer M, 2000. The response of Arctic sea ice to global change[J]. Climate Change, 46(3):277-287.
- Wu B Y, Huang R H, Gao D Y, 1999. Effects of variation of winter sea-ice area in Kara and Barents seas on East Asia winter monsoon[J]. Acta Meteor Sin, 13(2):141-153.
- Wu B Y, Su J Z, Zhang R H, 2011. Effects of autumn-winter arctic sea ice on winter Siberian high[J]. Chin Sci Bull, 56(30):3220-3228.
- Wu B Y, Wang J, 2002. Possible impacts of winter Arctic Oscillation on Siberian High, the East Asian winter monsoon and sea-ice extent[J]. Adv Atmos Sci, 19(2):297-320.
- Wu B Y, Yang K, Francis J A, 2016. Summer Arctic dipole wind pattern affects the winter Siberian high[J]. Int J Climatol, 36(13): 4187-4201.