

北半球海-冰-气系统的 10 年振荡 及其振源初探

高登义 武炳义

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

摘 要 采用最大熵谱方法分析了 1953~1990 年间冬季喀拉海、巴伦支海海冰面积指数、西伯利亚高压强度指数、东亚冬季风强度指数的变化周期, 并把冬季喀拉海、巴伦支海海冰面积变化与春夏各季节副热带高压的特征量指数(包括面积指数、强度指数)变化进行了比较。研究发现在海冰-大气气候系统中, 明显存在 10 年尺度周期性变化; 冬季喀拉海、巴伦支海海冰面积变化与西伯利亚高压强度指数、东亚冬季风强度指数均呈现相反的变化趋势, 海冰偏多(少)则西伯利亚高压偏弱(强)、东亚冬季风也偏弱(强); 冬季海冰面积变化与春夏各季节副热带高压的范围、强度均呈现相同的变化趋势, 并且海冰变化要超前 0~1 年; 复经验正交分析表明大气 10 年尺度周期性变化的振荡源分布均与某一海区(洋区)有关, 大气 10 年尺度变化是对海洋(海冰)变化的响应。

关键词 海冰 10 年振荡 振源 副热带高压

1 引言

关于气候系统的年代际变化, 最初是通过分析大西洋的状况发现的, 早在 30 年以前, Bjerknes 就提出北大西洋 SST 的 10 年际变化是由大洋环流的变化引起的^[1]。近年来的观测和数值模拟研究表明在大西洋海域的大气-海洋-海冰气候系统中, 明显地存在 10 年和 10 年以上时间尺度变化, 如 Levitus 等分析了大西洋 125 m 深处的历史海洋温度资料, 指出在 1947~1990 年间有海盆范围准 10 年温度振荡现象^[2], Hurrell 指出南欧地中海地区冬季近 10 年干旱以及从冰岛到斯堪的纳维亚半岛的温度异常均与北大西洋振荡的持续正位相有关^[3]。由密度驱动的海洋温盐环流(THC)的强度变化也存在 10 年尺度变化^[4], Delworth 等用耦合的大气海洋环流模式模拟了 THC 强度的 10 年尺度变化, 指出这种变化与北大西洋 THC 的汇区盐度异常一致, 引起 SST 的 10 年振荡并导致北大西洋北欧和北极的气温异常^[5]。Deser 和 Blackmon 研究指出纽芬兰东部的 10 年时间尺度 SST 振荡与拉布拉多海海冰的 10 年尺度变化有紧密的联系, 海冰变化要超前海温 2 年^[6]。Lazier 的研究指出 60 年代后期北大西洋盐度的降低, 以及伴随而来的气候转冷^[7], 同样的盐度异常在本世纪初也曾出现过, 这两次盐度异常都对应着格陵兰海冰的正距平期(1905~1915 年和 1965~1975 年)。

近年来的研究表明, 10 年以及更长时间尺度的变化在北太平洋地区也很明显, 北太平洋大气和海洋的显著变化大约是从 1976 年开始的, 太平洋地区 10 年时间尺度变化

与 El Niño 和 La Niña 事件的频率和强度变化有关, 并认为该时间尺度变化的源在热带^[8]。同时观测研究表明, 在热带太平洋以外, 该时间尺度变化与热带太平洋、印度洋海表温度有关^[9~10], 数值模拟也表明北太平洋 10 年尺度变化受控于热带海温的异常强迫^[11]。从以上这些工作可以看出, 气候系统的 10 年尺度变化最明显的部分都出现在海洋中或与海洋状况密切相关, 大气中这种时间尺度的变化信息相对较少, 正如 Kellogg^[12]所指出的那样, 大气响应太快并且不可能靠其自身变化产生 10 年尺度振荡, 10 年尺度变化的反馈机制应当包含在海冰和海洋环流中。因此大气中的 10 年尺度变化很可能是对海洋变化的响应, 本文目的就是寻找大气中 10 年尺度变化的信息, 其次是讨论这种变化与海洋变化的联系。

2 资料和分析方法

本文利用 Walsh 1953~1990 年逐月海冰密集度资料, 500 hPa 逐月高度场利用美国

NMC 1946~1980 年以及欧洲中期预报中心 1980~1989 年数据。北半球各区域逐月副热带高压的特征量指数(副热带高压的北界、面积指数、强度指数等)取自国家气象中心, 从 1951~1989 年。首先, 把北极海冰按海洋的地理位置分区, 主要考虑格陵兰和喀拉海、巴伦支海的海冰变化(图 1), 图中---、- - - 分别表示冬季 2 月和夏季 9 月的海冰范围^[13]。从图中可以看到喀拉海、巴伦支海在地理位置上最靠近北极, 并且冬夏海冰范围的变化明显比格陵兰海大。从海洋-海冰-大气相互反馈的角度考虑, 该海区或许可以称得上是一个关键区域, 冬季冷空气常常在这里

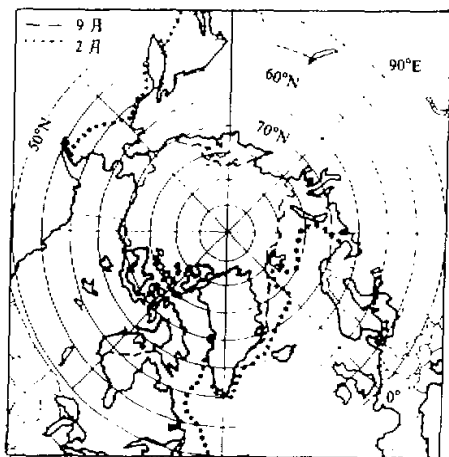


图 1 9 月和 2 月平均海冰范围(引自文献^[13])

里堆积, 并不断由此南下造成大范围的寒潮天气, 该路径的寒潮强度明显比其他路径的强。冬季从海洋向大气传输的热通量对海冰的面积、厚度极其敏感, 仅就海冰厚度而言, 当其变化时, 热通量的变化可以达到 2 个量级以上^[14]。倘若该区域海冰偏少冰厚偏薄, 必然会减缓南下冷空气的强度。

为了寻找海冰面积的变化周期, 这里采用最大熵谱方法, 该方法的突出优点是可从较短的样本资料中分辨出较长的周期来, 这是其他谱方法无法相比的。本文考虑冬季(12~2 月)海冰面积变化, 取这 3 个月海冰面积指数的平均值作为该冬季海冰面积指数。同时根据分析出的大气周期性变化, 采用带通滤波方法对高度场进行滤波, 并对滤波后的资料进行 CEOF 分析(复经验正交分析), 目的是寻找大气振荡的源以及波动的传播, 并进一步研究这种振荡的源与喀拉海、巴伦支海海冰变化有何种联系。

3 诊断分析研究

从图 2a 可以看出喀拉海、巴伦支海海冰存在年代际时间尺度变化, 对数据经过 3 年滑动平均后, 10 年时间尺度变化极为清晰, 同时最大熵谱分析在 10 年处存在一个明显的峰值 (对没有滑动平均的数据) (图 2b), 而格陵兰海区海冰变化存在 6 年周期 (图略), 当把格陵兰、喀拉海和巴伦支海海冰合在一起进行最大熵谱分析时, 仍以 10 年尺度变化周期最为显著 (图略), 这说明在北极气候系统的年代际变化中, 喀拉海、巴伦支海海冰变化起着关键性的作用, 其他海区如白令海海冰存在 2~3 年周期。

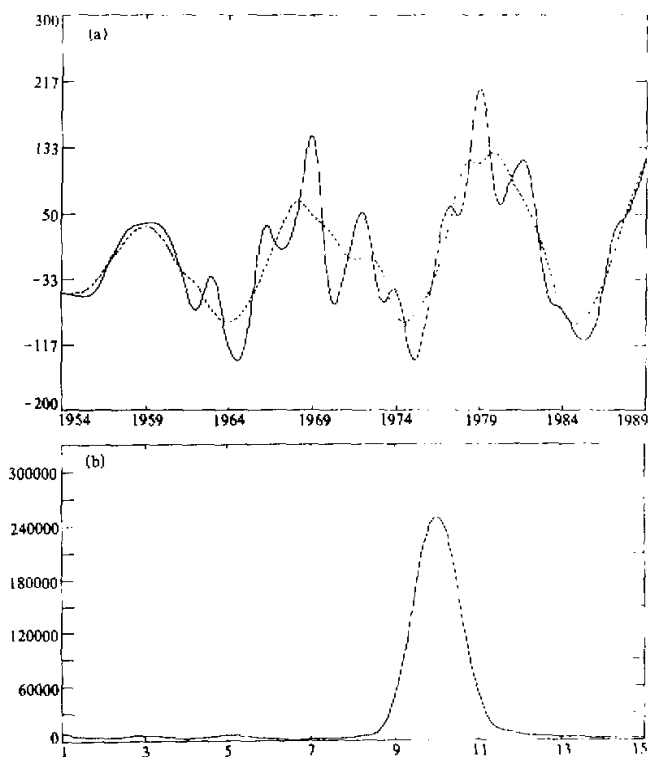


图 2 冬季 (12~2 月) 喀拉海、巴伦支海海冰面积指数 (实线) 和对海冰面积指数进行 3 年滑动平均 (a); 海冰面积指数的最大熵谱分析 (b), 横坐标单位: 年

这就提出一个问题, 既然冬季喀拉海、巴伦支海海冰在气候系统的年代际变化中起着重要作用, 并且该区域又是冬季向南爆发寒潮的源地之一, 那么大气中是否存在 10 年时间尺度变化, 若存在, 它与该海区海冰的关系如何? 为了寻找大气中 10 年尺度周期性变化, 主要研究以下大气环流特征量的周期性变化, 冬季 (12~2 月) 西伯利亚高压 (105~110°E, 50~55°N), 东亚冬季风强度指数^[15], 春、夏季节西太平洋副热带高

压、北美副热带高压和北美大西洋副热带高压的面积指数、强度指数。图 3a 表明冬季西伯利亚和东亚冬季风强度指数均存在 10 年尺度周期性变化, 为了更清晰地描述这种时间尺度的变化, 这里采用 Butterworth 的带通滤波器^[16], 带通滤波的中心频率所对应的周期是 10 年, 半功率响应的频率所对应的周期分别是 8 年和 12.5 年。经过带通滤波的海冰面积指数、东亚冬季风强度指数和西伯利亚高压强度指数的方差占其原方差的百分比分别是 54.45%、16.94%和 24.095%。10 年带通滤波曲线说明喀拉海、巴伦支海海冰变化与东亚冬季风强度指数、西伯利亚高压强度均呈现相反的变化趋势 (图 3b、c), 该海区海冰偏多则东亚冬季风偏弱、西伯利亚高压也偏弱。

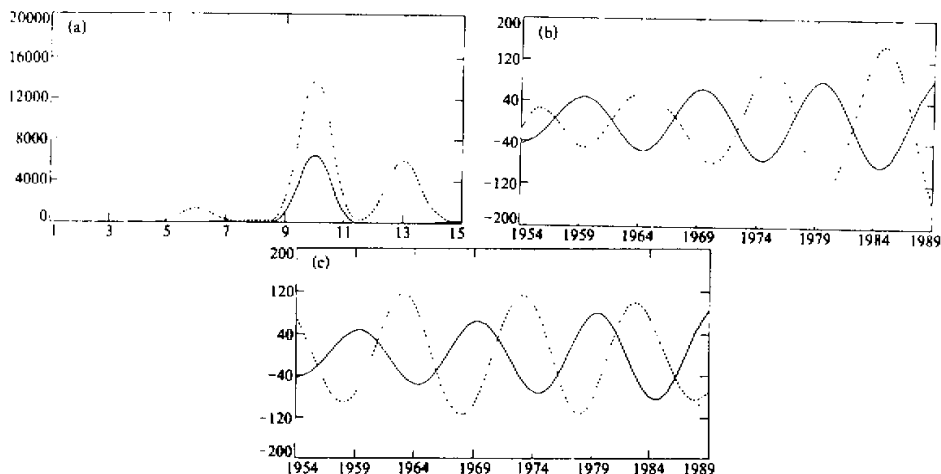


图 3 (a) 东亚冬季风强度指数和冬季西伯利亚高压强度指数 (虚线) 的最大熵谱分析, 季风强度指数的谱值已扩大 800 倍, 横坐标单位: 年; (b) 经过 10 年带通滤波的冬季喀拉海、巴伦支海冰面积指数 (实线) 和东亚冬季风强度指数, 面积指数和强度指数已扩大 400 倍; (c) 经过 10 年带通滤波的冬季喀拉海、巴伦支海冰面积指数 (实线) 和冬季西伯利亚高压强度指数, 面积指数和强度指数已扩大 10 倍

在春季和夏季, 西太平洋、北美 (图略) 以及北美大西洋副热带高压的面积指数、强度指数变化与喀拉海、巴伦支海冰面积指数变化基本一致 (图 4), 说明这些大气特征量也存在准 10 年尺度变化, 从整体上看海冰变化要超前 0~1 年, 冬季海冰偏多则春夏季节副热带高压普遍偏强, 但这并非是线性关系, 与海冰关系较密切的是西太平洋副热带高压, 尤以春季关系更为紧密。差异主要出现在 80 年代末期。这很可能与近 10 年来 El Niño 和 La Niña 事件出现的频率与强度变化有关, 主要表现在 1976 年以后北太平洋区域准 10 年周期性变化很明显, 正如在引言中所提到的那样, 北太平洋 10 年尺度变化受控于热带海温异常的强迫, 与喀拉海、巴伦支海冰相比, 热带海温对副热带高压的影响要大些。但以上事实足以说明大气环流确实存在准 10 年尺度周期性变化, Currie 也是用最大熵谱分析发现在北美、南美、南非、日本、朝鲜和我国华北地区的气温、气压和旱涝变化中均存在这种周期性变化^[17]。

那么, 大气变化与海冰变化到底存在怎样的联系呢? 以夏季西太平洋副热带高压为

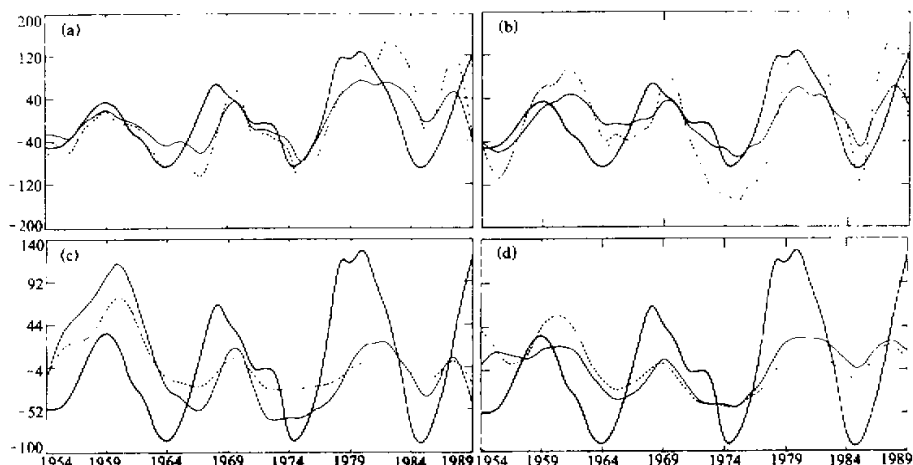


图 4 经过 3 年滑动平均的冬季喀拉海、巴伦支海海冰面积指数 (粗实线)、春、夏各季节副热带高压面积 (细实线) 和强度指数

(a) 春季西太平洋副热带高压, (b) 夏季西太平洋副热带高压, (c) 春季北大西洋副热带高压, (d) 夏季北大西洋副热带高压。(a)、(b)、(c) 中的副热带高压面积指数和强度指数均扩大 10 倍, (d) 中的副热带高压面积指数扩大 5 倍

例, 计算了副热带高压面积指数、强度指数与海冰面积指数 (没有经过带通滤波的数据) 的交叉滞后相关 (图 5), 表明当西太平洋副热带高压滞后 0~1 年时, 相关系数达 0.4 以上, 超过 0.05 统计显著性水平, 当海冰滞后 4 年以上时, 相关系数也超过 -0.4, 也就是说当年的大气环流状况可以明显影响 4 年以后的海冰, 这显然是不可能的。大气的持续性不会超过 4 个月, 而海洋的持续性却可以超过 1 年半以上^[18], 说明海冰超前西太平洋副热带高压 0~1 年是合理的。

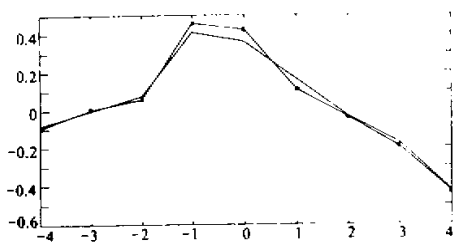


图 5 冬季喀拉海、巴伦支海海冰面积指数与夏季西太平洋副热带高压面积 (·)、强度指数的交叉滞后相关
横坐标单位: 年, 负值表示海冰超前

既然大气环流诸多特征量都表现在准 10 年尺度周期性变化, 并且这些变化与喀拉海、巴伦支海海冰变化有较好的滞后关系, 那么在大气准 10 年尺度变化中, 海冰是否是一个重要的触发因子? 其振荡源在哪里? 为此, 先对 500 hPa 位势高度场进行准 10 年带通滤波, 所用的资料为每年 1~3 月的平均值, 从 1946~1989 年共 44 年。对滤波后的数据进行复经验正交分析 (CEOF), 该分析方法的优点是能够识别出空间尺度行波和驻波以及振荡的源区。任一气象要素场中, 第 J 空间点变量的时间序列为 $A_J(t)$, 用 Hilbert 变换作用于该时间序列使之成为

$$\hat{A}_J(t) = \sum_{L=-\infty}^{\infty} A_J(t-L)h(L),$$

$$h(L) = \begin{cases} \frac{2}{\pi L} \sin\left(\frac{\pi L}{2}\right), & L \neq 0, \\ 0, & L = 0. \end{cases}$$

在计算中 $L=7$ 可以有足够大的响应振幅, 实际上这是一个滤波过程, 过滤后的序列 $\hat{A}_J(t)$ 频率响应振幅大小为 1, 相差为 $\pi/2$, 因此它能够揭示出同一频率中相差为 $\pi/2$ 的振荡情况, 由 $A_J(t)$, $\hat{A}_J(t)$ 构成一个新的复时间序列

$$B_J(t) = A_J(t) + L\hat{A}_J(t).$$

不同空间点复时间序列的协方差组成矩阵 C , 其元素 $C_{JK} = \langle B_J^*(t)B_K(t) \rangle$, 其中 $*$ 表示复共轭, $\langle \rangle$ 表示时间平均。矩阵 C 的特征值 λ_n 所对应的复特征向量 $\vec{V}_n$ 。由复特征向量所定义的空间点 J 的位相函数为

$$\theta_K(J) = \arctan \left[\frac{\text{Im} \vec{V}_K(J)}{\text{Re} \vec{V}_K(J)} \right],$$

头两个特征向量分别能够解释总方差的 45.6% 和 38.9%, 但是由于第一特征向量的空间场代表的是驻波结构, 这里主要分析第二特征向量的性质。从位相角的空间分布来看 (图 6), 最明显的特征是在新地岛东南方存在一个西北-东南走向的位相小值区, 中心位于 $(70^\circ\text{E}, 65^\circ\text{N})$ 附近, 正好位于喀拉海的南部, 该区域正好对应冷空气的南下路径, 源于该区域的振荡可以向四周传播, 无疑是振荡的源区, 这个振荡的源无疑是由海冰所激发出的。

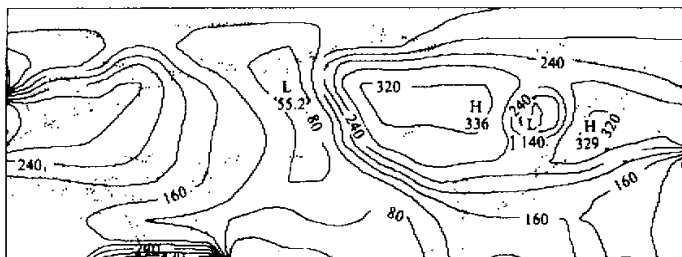


图 6 CEOF2 位相角的空间分布

另外还有 3 个位相小的振源区, 分别位于中太平洋、阿拉伯海至南中国海以及斯瓦巴德群岛的西南方, 从这些振源的地理分布来看, 均与某一海区 (洋区) 有关, 这进一步说明大气的准 10 年尺度变换是由海洋所激发的, 与以前工作得到的结论一致^[9~11]。

那么海洋 (包括海冰) 的准 10 年尺度周期性变化是由什么引起的呢? 这是一个非常困难的问题, 研究表明太阳活动 (太阳黑子相对数) 存在准 11 年周期性变化, 当太阳黑子数减少时, 全球平均海温下降; 太阳黑子数增加时平均海温升高, 太阳常数与太

阳黑子一样, 均以约 11 年的周期变化着, 其振幅约为平均值的 0.039%^[19]。过去人们对太阳活动导致气候异常问题一直争论不休, 一个明显的原因是太阳活动的变化幅度不太大, 很难认为这一数值可以产生直接引起气候异常的巨大能量变化, 但作为长期变化趋势, 如果持续数 10 年的话, 太阳活动的影响就会表现出来, 在海洋-海冰-大气气候系统中, 10 年尺度周期性变化是否是对太阳活动的响应? 看来在弄清这个问题以前, 人们还需要作深入细致的研究工作。

4 结论

通过以上研究可以得出以下结论:

(1) 在北极气候系统的年代际变化中, 喀拉海、巴伦支海海冰变化起着关键性的作用, 冬季(12~2月)喀拉海、巴伦支海海冰面积、西伯利亚高压强度、东亚冬季风强度、春夏季各季节各区域(西太平洋、北美、北美大西洋)副热带高压面积、强度均存在 10 年尺度周期性变化;

(2) 冬季(12~2月)喀拉海、巴伦支海海冰面积与东亚冬季风强度、西伯利亚高压强度均呈现相反的变化趋势, 海冰偏多(少)则东亚冬季风偏弱(强)、西伯利亚高压也偏弱(强);

(3) 冬季(12~2月)喀拉海、巴伦支海海冰与春夏各季节各区域副热带高压的范围、强度均呈现相同的变化趋势, 海冰变化超前副热带高压变化 0~1 年;

(4) 大气位势高度场 10 年尺度周期性变化的振源分布均与某一海区(洋区)有关, 喀拉海、巴伦支海海冰所激发的大气振荡源的中心位于(70°E, 65°N)附近, 另外 3 个大气振源分别位于中太平洋、阿拉伯海至南中国海以及斯瓦巴德群岛的西南方。

参 考 文 献

- 1 Bjerknes, 1964, Atlantic air-sea interaction, *Adv. Geophys.*, **10**, 1~82.
- 2 Levitus, S., J. I. Antonov and T. P. Boyer, 1994, Interannual variability of temperature at a depth of 125 meters in the North Atlantic Ocean, *Science*, **266**, 96~99.
- 3 Hurrell, J. W., 1995, Decadal trends in the North Atlantic Oscillation and relationships to regional temperature and precipitation, *Science*, **269**, 676~679.
- 4 Weaver, A. J. et al., 1991, Freshwater flux forcing of decadal and interdecadal oceanic variability, *Nature*, **353**, 836~838.
- 5 Delworth, T. et al., 1993, Interdecadal variations of the thermohaline circulation in a coupled ocean-atmosphere model, *J. Climate*, **6**, 1993~2011.
- 6 Deser, C. and M. L. Blackmon, 1993, Surface climate variations over the North Atlantic Ocean during winter, 1900~1989, *J. Climate*, **6**, 1743~1754.
- 7 Lazier, J., 1988, Temperature and salinity changes in the deep Labrador sea 1962~1986, *Deep Sea Res.*, **35**, 1247.
- 8 Trenberth, K. E. and J. W. Hurrell, 1994, Decadal atmosphere-ocean variations in the Pacific, *Clim. Dyn.*, **9**, 303~319.
- 9 Kawamura, R., 1994, A rotated EOF analysis of global sea surface temperature variability with interannual and interdecadal scales, *J. Phys. Oceanogr.*, **24**, 707~715.
- 10 Lau, N.-C. and M. J. Nath, 1994, A modeling study of the relative roles of tropical and extratropical SST

- anomalies in the variability of the global atmosphere-ocean system. *J. Climate*, 7, 1184~1207.
- 11 Kawamura, R. et al., 1995, Interdecadal and interannual variability in the northern extratropical circulation simulated with the JMA global model, *J. Climate*, 8, 3006~3019.
 - 12 Kellogg, W. W., 1975, Climate feedback mechanisms involving the polar regions, In: *Climate of the Arctic*, Wel-
ler and Bowling (Eds), Geophys. Inst., University of Alaska, 111~116.
 - 13 Parkinson, C. L. et al., 1987, Arctic sea ice, 1973~1976; Satellite passive-microwave observations, NASA
SP-489, Nat. Aeronaut. and Space Admin., Washington, D. C.
 - 14 高登义、邵永祺, 1995, 极地海-冰-气相互作用的观测和模拟研究进展, 南极与全球气候环境的相互作用和
影响研究进展, 北京: 科学出版社, 157~166.
 - 15 施能等, 1996, 东亚冬、夏季风百年强度指数及其气候变化, 南京气象学院学报, 19(2), 168~176.
 - 16 Krishnamurti, T. N. and D. Subrahmanyam, 1982, The 30~50 day mode at 850 mb during MONEX, *J. Atmos.
Sci.*, 39, 2088~2095.
 - 17 Currie, R. G. and D. P. O'Brien, 1988, Periodic 18.6-year and cyclic 10 to 11 year signals in northeastern United
States precipitation data, *J. Climatology*, 8, 255~281.
 - 18 黄嘉佑, 1993, 统计动力分析与预报, 北京: 气象出版社, 118~119.
 - 19 胡仓正著、周力译, 1991, 气候异常与环境破坏, 北京: 气象出版社, 79~80.

Preliminary Study on Decadal Oscillation and Its Oscillation Source of the Sea-Ice-Air System in the Northern Hemisphere

Gao Dengyi and Wu Bingyi

(Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract By using maximum entropy and band-pass filter methods, the variation periods of sea ice area index in the Kara / Barents Seas, the intensity index of the Siberia High and winter monsoon over East Asia during winter of 1953~1990 were analyzed. And the sea ice area variation in winter in the Kara / Barents Seas was compared with the area and intensity indices of the subtropical high in the following spring and summer. These analyses show that there is an obvious decadal variation in the sea-ice-air system in the Northern Hemisphere, that the variations of intensity index of winter Siberia High and winter monsoon over East Asia are out of phase with that of sea ice area in winter in the Kara / Barents Seas. And the more (less) sea ice is, the weaker (stronger) winter Siberia High and winter monsoon are. The variation trend of sea ice area is similar to that of the area and the intensity of the subtropical high in the coming spring and summer, and with a lag period of 0~1 year for the later. The decadal oscillation sources in the atmosphere are closely linked to some sea regions. The centre of the strongest oscillation source excited by winter sea ice in the Kara / Barents Seas is at near 70°E, 60°N.

Key words sea ice decadal oscillation oscillation source subtropical high