

李崇银, 王力群, 顾薇. 2011. 冬季蒙古高压与北太平洋海温异常的年际尺度关系 [J]. 大气科学, 35 (2): 193–200. Li Chongyin, Wang Liqun, Gu Wei. 2011. Interannual time-scale relationship between Mongolia high and SST anomaly in the North Pacific in winter [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (2): 193–200.

冬季蒙古高压与北太平洋海温异常的年际尺度关系

李崇银^{1,2} 王力群¹ 顾薇³

1 解放军理工大学气象学院, 南京 211101

2 中国科学院大气物理所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

3 中国气象局国家气候中心, 北京 100081

摘 要 蒙古高压和北太平洋海区的气压差被认为是造成东亚冬季风及其变化的重要原因, 而过去有关的研究以其年代际时间尺度为多, 本文的研究揭示了冬季蒙古高压和北太平洋海温异常 (SSTA) 在年际时间尺度上的相互关系。冬季蒙古高压的活动与太平洋年代际振荡 (PDO) 之间在年际时间尺度上也存在明显的负相关, 冬季的强 (弱) 蒙古冷高压活动往往对应着北太平洋 PDO 的负 (正) 位相; 这种年际时间尺度的负相关存在着年代际变化, 它基本上出现在年代际尺度相关不明显的时期。分析还表明从东北太平洋到热带西太平洋存在一条冬季蒙古高压指数与海温间的高相关带, 它的位置和形势与过去所研究的年代际通道 (IP) 十分一致, 而且从前春到同期冬季的海温都与蒙古冷高压有显著的相关, 表明亚洲大陆和北太平洋海气相互作用的一定特征, 我们称其为北太平洋中纬度“海气相互作用桥 (SAIB)”。同时也可以看到, SAIB 所显示的最大相关区有季节移动性, 在一定程度上反映了年际海气相互作用的季节性变化特征; PDO 和 SAIB 区域的海温变化, 尤其是前期 (特别是夏季) SAIB 区的正海温异常可能对东亚冬季风 (蒙古冷高压) 的加强活动有指示意义。

关键词 蒙古高压 北太平洋海温 太平洋年代际振荡 (PDO) 年代际通道 (IP)

文章编号 1006-9895 (2011) 02-0193-08

中图分类号 P461

文献标识码 A

Interannual Time-Scale Relationship between Mongolia High and SST Anomaly in the North Pacific in Winter

LI Chongyin^{1, 2}, WANG Liqun¹, and GU Wei³

1 Meteorological College, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101

2 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

3 National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

Abstract The difference of sea level pressure (SLP) between the Mongolia high and the North Pacific has been regarded as an important reason to cause East Asian winter monsoon and its variation, but most of the interrelated studies are associated with interdecadal time scale. This study will reveal the relationship on interannual time scale between the Mongolia high and the sea surface temperature (SST) in the North Pacific in winter. The data analyses show that negative correlation between the Mongolia high and the Pacific Decadal Oscillation (PDO) is still evident on interannual time scale, and strong (weak) Mongolia high in winter is corresponding to negative (positive) phase

收稿日期 2010-04-15, 2010-07-14 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展计划项目 2007CB411805

作者简介 李崇银, 男, 教授/研究员, 主要从事天气气候变化及其动力学研究。E-mail: lcy@lasg.iap.ac.cn

of the PDO; interdecadal variation exists in this interannual negative correlation, and it generally appears in the period that the interdecadal correlation is not distinct. The data analyses also show that there is a high correlation belt between the winter Mongolia high index and the SST in the North Pacific from the northeastern Pacific to the tropical western Pacific, and both of its location and pattern are similar to the Interdecadal Pathway (IP) in the previous research. This correlation obviously exists in the period from the preceding spring to the corresponding winter, which demonstrates a fixed feature of the air-sea interaction in the Asia / North Pacific area, and it can be called air-sea interaction bridge (SAIB) in the middle latitudes of the North Pacific. It is also shown that the distribution of correlation coefficient expressing the SAIB varies with the season, which means that the interannual correlation of the air-sea interaction has seasonal variation characteristics. Since the SSTA mode is relatively stationary, the PDO and SST anomaly in the SAIB region could be the factor to predict the Mongolia high activity in winter (East Asian winter monsoon). Particularly in the earlier stage (especially in summer), positive SST anomaly in the SAIB region could have the indicative sense for the enhancement of Mongolia high (East-Asian monsoon) activity in winter.

Key words Mongolia high, sea surface temperature (SST) in the North Pacific, Pacific Decadal Oscillation (PDO), Interdecadal Pathway (IP)

1 引言

蒙古高压是北半球冬季最强大的大气系统之一,也是东亚冬季风的重要组成部分,它的强度能较好地解释我国冬季气温变化的特征(陶诗言, 1959; Ding and Krishnamurti, 1987); 冬季蒙古高压脊经常伸向我国北方,强西北冷空气的南下就形成寒潮天气及东亚冬季风的一次次加强,并可进一步影响到东南亚地区的天气气候(Chang and Lau, 1980; Lau et al., 1983; Chan and Li, 2004; 韦道明和李崇银, 2009)。有关东亚冬季风变化的研究指出,冬季风较强时,蒙古高压也较强(徐建军等, 1999),而已有研究还表明,同东亚冬季风相联系的西北利亚和蒙古地面气压异常与 ENSO 关系紧密(李崇银, 1988; 陶诗言和张庆云, 1998; 穆明权和李崇银, 1999; Li and Mu, 2002; 黄荣辉和陈文, 2002)。可见,蒙古高压在冬季对东亚冬季风的不同时间尺度的变化都有重要影响,并且还会进一步影响其它气候系统。

另一方面,与蒙古高压和东亚冬季风相伴的阿留申低压被认为是半永久性大气系统之一,实际上它也同其它万物一样,在运动和变化着,而且它的变化与北太平洋海温的异常有直接的关系。从经典的意义讲,季风是海陆对比、尤其是海陆热力差异的产物,东亚冬季风的活动自然也就与蒙古冷高压和北太平洋海温有密切关系。由于海洋有较长时间尺度的记忆能力,海温的变化相对大气温度又较慢,大家也就比较注意在年际及年代际时间尺度上

海温的变化和影响;尤其是对于北太平洋的海温,人们更加重视其年代际变化(PDO)和影响(Trenberth and Hurrelle, 1994; Latif and Barnett, 1996; Li and Xian, 2003; 朱益民和杨修群, 2003; Li et al; 2006; Zhou et al., 2007)。近年来,还有研究(Wang and Liu, 2000; Zhou et al., 2006)表明北太平洋海温变化还存在一个“年代际通道——IP”,这个年代际通道 IP 既有最强的海温年代际变化信号,又与北太平洋 PDO 和东亚冬季风有密切联系,甚至也被视为联系中纬度太平洋和热带太平洋海气相互作用的“桥梁”。

在过去的研究中已经发现,北太平洋海温变化除年代际时间尺度外年际变化也是极其显著的;而且,与北太平洋海温变化有关系的东亚季风和东亚气候的变化最为突出的还是在年际时间尺度(张庆云等, 2003; 李崇银和潘静, 2007; 黄荣辉等, 2008)。因此,本文将着重分析和揭示蒙古高压与北太平洋海温异常的年际尺度相互关系,加深对东亚及西北太平洋地区海气相互作用的认识。

2 所用资料

本文采用 Hadley 气候中心的全球月平均海平面气压(SLP)和海温(SST)再分析资料,空间分辨率分别为 $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ 和 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$,所用资料的时间长度为 1870~2006 年。我们以冬季(12 月至次年 2 月)区域($35^{\circ}\text{N} \sim 55^{\circ}\text{N}$, $80^{\circ}\text{E} \sim 120^{\circ}\text{E}$)内的平均海平面气压来衡量冬季蒙古高压(WMH)的强弱,而由选定区域内 SLP 的标准化距平定义为冬季蒙古

高压指数 (I_{WMH})。这里所选区域较冬季蒙古高压的中心位置略为偏东,这主要是考虑到蒙古高压中心位置的变化相对较小,而东部的变化及其所带来的影响都相对较大。冬季 PDO 指数 (I_{PDO}) 则是根据 Mantua et al. (1997) 的方法,对 1870~2006 年北太平洋地区海温异常进行经验正交分解所得的第一主分量。

3 蒙古冷高压与北太平洋 PDO

蒙古冷高压是冬季北半球最为强大的地面系统,它不仅直接影响东亚冬季风,也对北半球其它地区的天气气候系统有重要作用。基于对海平面气压资料的分析,图 1 给出了近 100 多年时间里平均的冬季地面气压场形势,一个强大的蒙古高压显得十分突出,同时,在北太平洋还有清楚的一个低压中心,即阿留申低压。与蒙古高压相伴在北太平洋有阿留申低压,它们间的关系已有不少研究。通过本文的分析研究,我们想进一步知道北太平洋的海温及其变化与蒙古高压的活动有什么样的关系,进而为冬季蒙古高压(东亚冬季风)活动的预报提供一定的科学依据。为了描写蒙古冷高压的活动及其变化,我们将 137 个冬季的 WMH 标准化处理后定义为冬季蒙古高压指数 I_{WMH} ,其计算公式如下:

$$I_{WMH} \equiv \frac{P_i - P_0}{\sigma},$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (P_i - P_0)^2, \quad i = 1, 2, \dots, N,$$

这里, P_i 是区域平均海平面气压值, P_0 表示其多年(气候)平均值; i 表示某年, N 是资料长度(137 年)。

蒙古高压虽然是一个半永久性大气环流系统,但也存在明显的年际和年代际变化。图 2 是过去一百多年里 I_{WMH} 随时间的变化曲线。其中细实线为 I_{WMH} 的年际变化趋势,从中能够看出明显的年际变化特征;粗实线为 7 年滑动平均曲线,可以反映出 I_{WMH} 存在明显的年代际变化特征。根据资料分析, I_{WMH} 的时间变化主要包括 3~4 年和 2.5 年准周期的年际模,以及 35~36 年和 13.7 年准周期的年代际模。

另一方面,北太平洋海表温度变化的最显著模态及信号是 PDO,而它本身既有年代际时间尺度的变化,也有年际时间尺度的变化特征。为了揭示冬季蒙古高压与太平洋 PDO 之间的关系,在图 3 中我们首先给出蒙古高压指数与太平洋 PDO 指数 (I_{PDO}) 随时间的变化情况,由图不难看到,两者都有极其显著的年际变化, I_{PDO} 的年代际变化特征也十分明显, I_{WMH} 也有年代际变化特征,但不及 I_{PDO} 显著。由图 3 中两条曲线的对比我们还可以发现, I_{WMH} 和 I_{PDO} 之间基本上存在着负相关,正(负) I_{WMH} 大都对应着负(正) I_{PDO} 。相关系数的计算结果表明它们间的相关系数为-0.23,达到 99% 的信度,这说明冬季蒙古高压与太平洋 PDO 之间在年际尺度也存在着显著的负相关。冬季的强(弱)蒙古冷高压活动往往对应北太平洋 PDO 的负(正)位相。在图 3 中 1871~1900、1918~1946 和 1975~1988 是最显著的年代际负相关时段;而即使在年代际时段,其中也存在年际时间尺度的负相关,例如 1878、1880、1883、1886、1889、1892、1898、1900 年,以及 1919、1923、1925、1931、1937、1939、1840 年等。

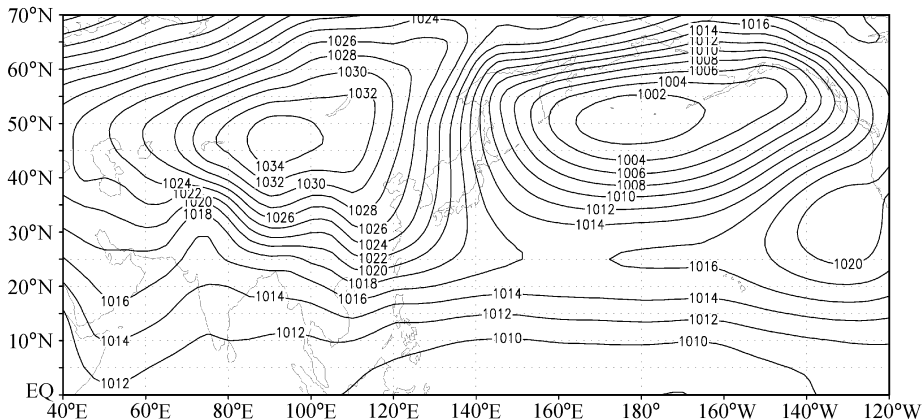


图 1 亚洲及西北太平洋海平面气压场(单位: hPa) 的多年平均形势
Fig. 1 The climatological average pattern of sea surface pressure (hPa) over Asia and the northwestern Pacific

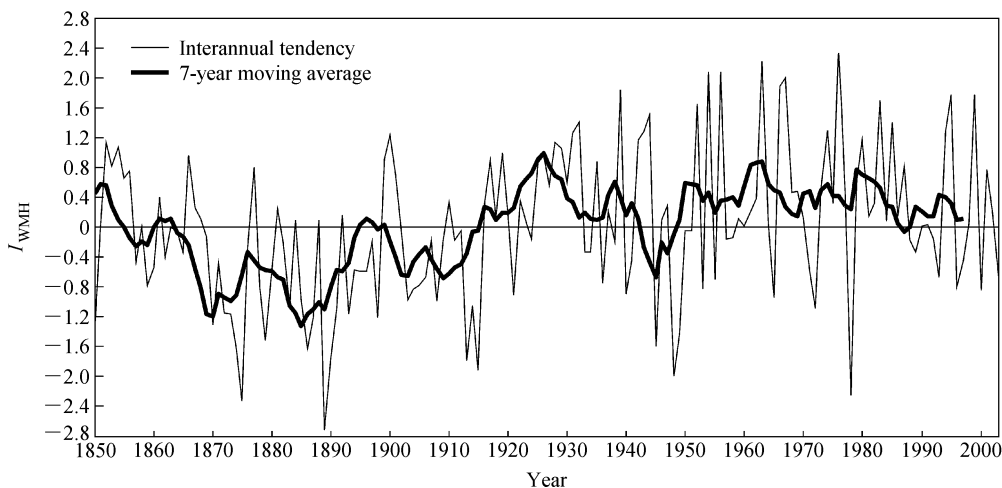


图 2 1850~2003 年 I_{WMH} 的变化特征。粗实线: 7 年滑动平均

Fig. 2 Temporal variation of I_{WMH} during 1850–2003, thick line is moving average

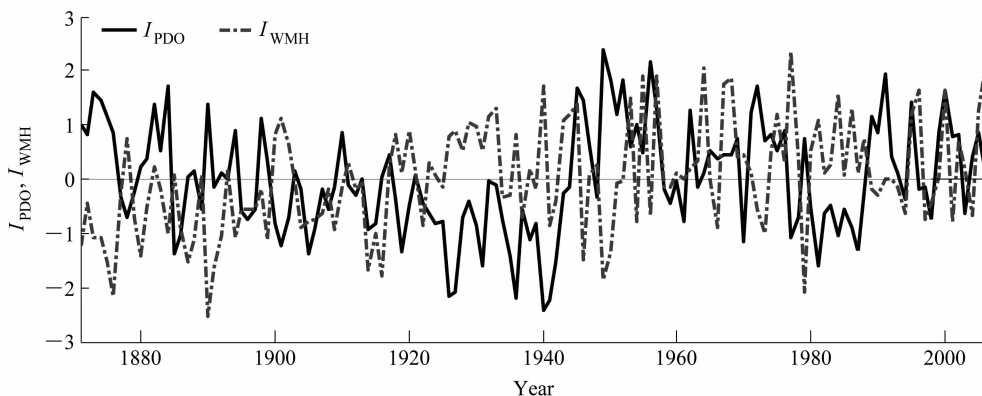


图 3 1871~2006 年冬季 PDO 指数与蒙古高压指数的时间变化

Fig. 3 Temporal variations of the PDO (Pacific Decadal Oscillation) index and the Mongolia high index in winter during 1871–2006

为了进一步揭示冬季蒙古高压与 PDO 之间的关系, 我们又计算了冬季蒙古高压指数 I_{WMH} 与 I_{PDO} 的交叉谱, 如图 4 所示。图 4 中粗实线所围的范围表示信度通过 95% 的区域, 黑色圆弧线外表示受边界效应影响较大的区域; 箭头表示相对位相关系: 箭头向右表示同位相 (正相关), 箭头向左表示反位相 (负相关), 箭头向上表示 PDO 超前蒙古高压 1/4 位相, 箭头向下表示 PDO 滞后蒙古高压 1/4 位相。由图 4 我们可以清楚地看到, 冬季蒙古高压与 PDO 之间除了在年代际尺度上有显著的负相关 (30 多年尺度的相关极其突出) 之外, 在年际时间尺度上也有明显的负相关, 在某些时段这种年际时间尺度的相关还十分显著, 例如在 1960~1980 年代初 3~4 年尺度的相关十分突出。而且我们还可

以看到, 这种年际时间尺度的负相关存在年代际变化特征, 它基本上出现在年代际尺度相关不明显的时期。例如在 1960 年到 1982 年期间, 它们存在极强的 3~4 年周期负相关; 而在该段时期, 它们在年代际时间尺度上的相关却并不是十分显著。这里似乎也显示出了一定的规律性, 年代际时间尺度相关十分显著的时期, 年际时间尺度相关就不是十分显著。例如图 4 中表明在 1920~1957 年期间有极为显著的年代际时间尺度相关, 而这期间年际时间尺度相关就很不明显。

上面的分析清楚表明, 冬季蒙古高压的活动与 PDO 之间除了在年代际尺度上有显著的负相关之外, 在年际时间尺度上也存在明显的负相关, 值得很好注意。

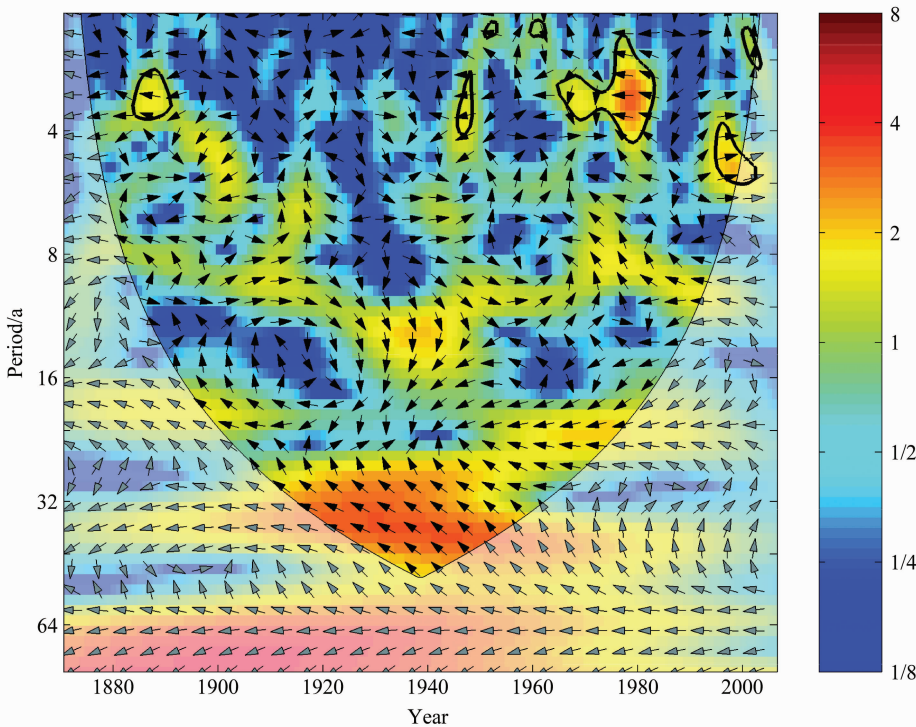


图 4 冬季蒙古高压指数 I_{WMH} 与 I_{PDO} 的交叉谱分析结果。粗实线为信度通过 95% 的区域；黑色圆弧线外表示受边界效应影响较大的区域
Fig. 4 The cross-correlation between I_{WMH} and I_{PDO} . Thick line: 95% significance level; arc line: the boundary effect

4 蒙古冷高压与北太平洋中纬度“通道”

近些年来研究表明，北太平洋海温变化还存在在一个“年代际通道——IP”，这个年代际通道 IP 既有最强的海温年代际变化信号，又与北太平洋 PDO 和东亚冬季风有密切联系，甚至也被视为联系中纬度太平洋和热带太平洋海气相互作用的“桥梁”。虽然“IP”是在研究年代际时间尺度变化时定义的一种模态，但我们的分析研究发现在北太平洋中纬度也存在着与 IP 有相似空间特征的与蒙古冷高压相关的海温模态，其以年际时间尺度为主要特征。这里，我们就讨论蒙古冷高压与北太平洋中纬度“通道”在年际时间尺度上的关系。

在图 5 中给出了冬季蒙古高压指数与前期春季、夏季、秋季和同期冬季的海温之间相关系数的分布形势。我们这里仅关注北太平洋的情况，不去分析其它海区的形势。首先，可以清楚看到从东北太平洋到热带西太平洋存在一条高相关带，它的位置和形势与过去所研究的 IP 十分一致，而且从前春到同期冬季的海温都与蒙古冷高压有显著的相关，表明亚洲大陆和北太平洋海气相互作用的一定

特征，可以将其称为北太平洋中纬度“海气相互作用桥（SAIB）”。同时，也可以看到 SAIB 所显示的相关系数的大小分布有一些变化，前春的最强相关在靠近北美大陆的海区，前夏的最强相关在中纬度中太平洋、西伸明显，前秋的相关系数相对较弱，并有东缩的现象，同期冬季的最强相关也在近北美海区，但比前春西伸要明显一些。这种最大相关区的季节移动性变化，在一定程度上反映了年际海气相互作用的季节性变化特征。另外，我们还可以看到蒙古冷高压与前期以及冬季同期的 PDO 海区的海温有较好的负相关，与上节的分析结果一致，但其相关要明显比与 SAIB 区域海温的相关要弱一些。考虑到海洋模态有相对较为稳定的特征，在冬季蒙古高压活动（东亚冬季风）的预报中可以将 PDO 的变化作为一个因子，当然这还要作进一步的研究方能在实际中应用。

在已有的研究中，较多地讨论了北太平洋海温的年代际变化，而对于北太平洋海温的年代际时间尺度的变化来讲，除了 PDO 之外还有 IP，同时，北太平洋海温的年代际变化又都与东亚冬季风活动及天气气候的年代际变化有一定关系。而本文上面的分析表明，在年际时间尺度上，作为东亚冬季风重

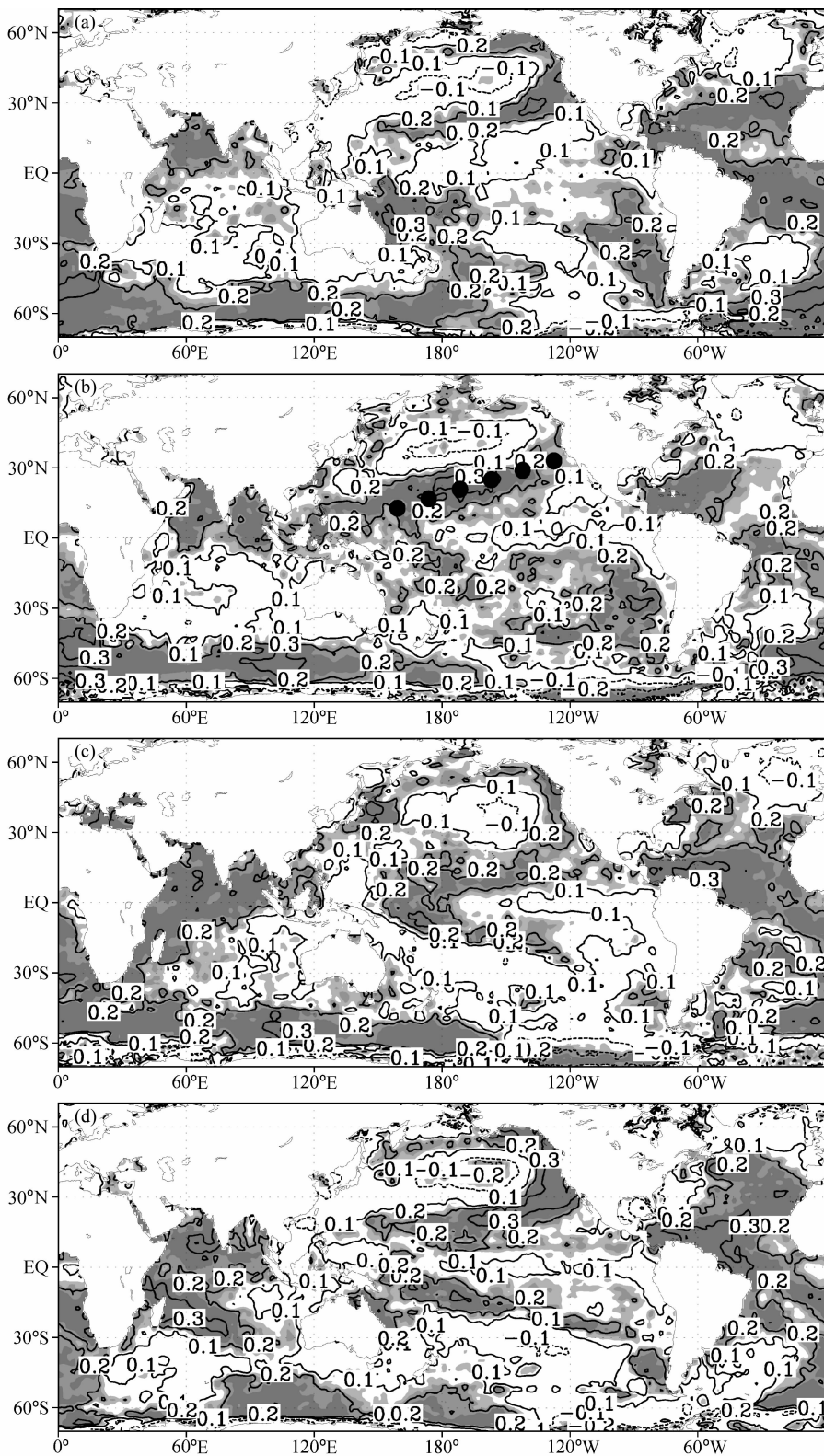


图 5 冬季蒙古高压指数与前期春季 (a)、夏季 (b)、秋季 (c) 和同期冬季 (d) 海温的相关场 (1871~2006 年)。阴影表示信度超过 95% 的区域

Fig. 5 Correlation coefficient distributions between Mongolia high index in winter and the SST in the preceding (a) spring, (b) summer, (c) autumn, and (d) the corresponding winter. Shaded areas show 95% significance level

要系统的蒙古冷高压也与北太平洋 PDO 和 SAIB 区域的海温变化存在显著相关; 而且在这种相对较短的年际时间尺度上, 蒙古冷高压与 SAIB 区海温的相关特别显著, 值得我们更加重视这种相关特征。

考虑到上述这种显著的相关性, 对于蒙古冷高压的活动以及东亚冬季风的年际变化而言, 要特别注意 SAIB 区海温的异常变化, 尤其是图 5 表明, 冬季的蒙古高压与前期夏季 SAIB 区的海温异常就存在显著的相关, 更值得我们关注。这里的分析结果表明, 前期 (特别是夏季) SAIB 区的正海温异常可能对东亚冬季风 (蒙古冷高压) 的加强活动有一定指示意义, 这无疑对我们预报东亚冬季风活动提供了一定科学依据。

前面已经指出, “IP” 在联系温带太平洋和热带太平洋以及它们的温度场变化方面有着重要作用。Zhou et al. (2006) 的研究表明, 在年代际时间尺度上东亚冬季风的大气强迫对 “IP” 有重要作用, 并可进而引起 PDO 的变化。但同时, 与蒙古冷高压相联系的东亚冬季风的年际异常既突出又重要, 它不但是影响东亚地区天气气候异常的主要因素, 它所引起的赤道西太平洋西风异常和积云对流活动异常通过海气相互作用对 ENSO 的发生起着重要激发作用 (李崇银, 1988; Li, 1995)。另一方面, ENSO 对东亚冬季风的影响 (Li, 1990; 陶诗言和张庆云, 1998) 也主要在年际时间尺度。而中纬度 “海气相互作用桥 (SAIB)” 区 SST 的变化在相当程度上也是 ENSO 模态的一个部分, 它与 ENSO 一样将主要在年际时间尺度上影响东亚冬季风。因此, 不难解释为什么蒙古冷高压或者东亚冬季风活动在年际时间尺度上与 “IP” 也有显著的相关性。

5 结论与讨论

蒙古高压和北太平洋海区的气压差被认为是造成东亚冬季风及其变化的重要原因, 而过去有关北太平洋海温变化的研究以其年代际时间尺度为多。本文的研究揭示了冬季蒙古高压和北太平洋海温在年际时间尺度上的相互关系, 包括与 PDO 和 IP 的年际时间尺度关系。

冬季蒙古高压的活动与 PDO 之间除了在年代际尺度上有显著的负相关之外, 在年际时间尺度上也存在明显的负相关。冬季的强 (弱) 蒙古冷高压活动往往对应着北太平洋 PDO 的负 (正) 位相, 而

且特别有意思的是这种年际时间尺度的负相关存在着年代际变化, 它基本上出现在蒙古冷高压活动与北太平洋 PDO 的年代际尺度相关不明显的时期。

本文的分析表明, 从东北太平洋到热带西太平洋存在一条冬季蒙古高压指数与海温间的高相关带, 它的位置和形势与过去研究指出的 “IP” 十分一致, 而且该海区的海温从前春到同期冬季都与蒙古冷高压有显著的相关。这些结果表明亚洲大陆和北太平洋区域海气相互作用的一定特征, 可称其为北太平洋中纬度 “海气相互作用桥 (SAIB)”。同时, 还可以看到在 SAIB 区所显示的相关系数的大小分布有一些变化, 前春的最强相关在靠近北美大陆的海区, 前夏的最强相关在中纬度中太平洋、西伸明显, 前秋的相关系数相对较弱、并有东缩的现象, 同期冬季的最强相关也在靠近北美的海区、但比前春西伸要明显一些。这种最大相关区的季节性移动和变化, 在一定程度上还反映了所讨论区域年际海气相互作用的季节性变化特征。

考虑到海洋模态有相对较为稳定的特征, 在冬季蒙古高压 (东亚冬季风) 活动的预报中可以将 PDO 和 SAIB 区域的海温变化作为一个因子, 尤其是前期 (特别是夏季) SAIB 区的正海温异常可能对东亚冬季风 (蒙古冷高压) 的加强活动有指示意义。揭示出的这些关系无疑为我们预报东亚冬季风活动提供了一定科学依据, 当然, 还需要作进一步的研究方能在实际中很好应用。

本文的研究结果更多地表明北太平洋海温变化对东亚大气环流的影响, 而实际上大气、海洋是相互作用的, Cayan (1992) 基于 COADS 资料的分析就曾表明, 冬季热带外北太平洋向大气释放的湍流热通量与 SST 倾向的距平相关系数有很强的负相关, 而与 SST 本身的距平则没有显著的正相关, 说明湍流热通量异常可能是热带外北太平洋 SST 变化的重要强迫因子。但是, 湍流热通量交换的异常必然与大气环流的异常有关, 热带外北太平洋 SST 的变化也就与大气环流的变化直接有关。

本文给出的还只是一些资料分析结果, 与动力学机制有关的物理解释以及相关数值模拟还有待作进一步的研究。

参考文献 (References)

Cayan D R. 1992. Latent and sensible heat flux anomalies over the

- northern oceans: Driving the sea surface temperature [J]. *J. Phys. Oceanogr.*, 22: 859–881.
- Chan J C L, Li C. 2004. The East Asian winter monsoon [M]// Chang C P. *East Asian Monsoon*. Singapore: World Scientific Publisher, 54–106.
- Chang C P, Lau K M. 1980. Northeasterly cold surges and near-equatorial disturbances over the Winter MONEX area during December 1974. Part II: Planetary-scale aspects [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 108: 298–312.
- Ding Y, Krishnamurti T N. 1987. Heat budget of the Siberian high and the winter monsoon [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 115: 2428–2449.
- 黄荣辉, 陈文. 2002. 关于亚洲季风与 ENSO 循环相互作用研究最近的进展 [J]. *气候与环境研究*, 7: 146–159. Huang Ronghui, Chen Wen. 2002. Recent progresses in the research on the interaction between Asian monsoon and ENSO cycle [J]. *Climate and Environmental Research (in Chinese)*, 7: 146–159.
- 黄荣辉, 顾雷, 陈际龙, 等. 2008. 东亚季风系统的时空变化及其对我国气候异常影响的最近研究进展 [J]. *大气科学*, 32: 691–719. Huang Ronghui, Gu Lei, Chen Jilong, et al. 2008. Recent progresses in studies of the temporal-spatial variations of the East Asian monsoon system and their impacts on climate anomalies in China [J]. *Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 32: 691–719.
- Latif M, Barnett T P. 1996. Decadal climate variability over the North Pacific and North America: Dynamics and predictability [J]. *J. Climate*, 9: 2407–2423.
- Lau K M, Chang C P, Chan P H. 1983. Short-term planetary-scale interactions over the tropics and midlatitudes. Part II: Winter MONEX period [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 111: 1372–1388.
- Li Chongyin. 1990. Interaction between anomalous winter monsoon in East Asia and El Niño events [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 7: 36–46.
- Li Chongyin. 1995. Westerly anomalies over the equatorial western Pacific and Asian winter monsoon [C]. *Proceeding of the International Scientific Conference on the TOGA Programme, WCRP-91-WMO/TP, No. 717*, 557–561.
- Li Chongyin, Mu Mingquan. 2002. A further study of the essence of ENSO [J]. *Chinese J. Atmos. Sci.*, 26: 309–328.
- Li Chongyin, Zhou W, Jia X, et al. 2006. Decadal/interdecadal variations of the ocean temperature and its impacts on the climates [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 23 (6): 964–981.
- 李崇银. 1988. 频繁的强大东亚大槽活动与 El Niño 的发生 [J]. *中国科学 (B)*, 18: 667–674. Li Chongyin. 1989. Frequent activities of stronger aerotroughs in East Asia in wintertime and the occurrence of the El Niño event [J]. *Science in China (B)*, 32: 976–985.
- 李崇银, 潘静. 2007. 南海夏季风槽的年际变化和影响研究 [J]. *大气科学*, 31 (6): 1049–1058. Li Chongyin, Pan Jing. 2007. The interannual variation of the South China Sea summer monsoon trough and its impact [J]. *Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 31 (6): 1049–1058.
- Mantua N J, Hare S R, Zhang Y, et al. 1997. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 78: 1069–1079.
- 穆明权, 李崇银. 1999. 东亚冬季风年际变化的 ENSO 信息 I. 观测资料分析 [J]. *大气科学*, 1999, 23 (3): 276–285. Mu Mingquan, Li Chongyin. 1999. ENSO signals in interannual variability of East Asian winter monsoon. Part I: Observed data analyses [J]. *Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 23 (3): 276–285.
- Wang Dongxiao, Liu Zhengyu. 2000. The pathway of the interdecadal variability in the Pacific Ocean [J]. *Chin. Sci. Bull.*, 45: 1555–1561.
- 陶诗言. 1959. 近十年我国对东亚寒潮的研究 [J]. *气象学报*, 30: 226–230. Tao Shiyan. 1959. Study on East Asian cold waves in China during recent 10 years (1949–1959) [J]. *Acta Meteor. Sin. (in Chinese)*, 30: 226–230.
- 陶诗言, 张庆云. 1998. 亚洲冬季风对 ENSO 事件的响应 [J]. *大气科学*, 22: 399–407. Tao Shiyan, Zhang Qingyun. 1998. Response of the Asian winter and summer monsoon to ENSO events [J]. *Chinese J. Atmos. Sci. (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese)*, 22: 399–407.
- Trenberth K E, Hurrelle J W. 1994. Decadal atmosphere–ocean variations in the Pacific [J]. *Climate Dynamics*, 9: 303–319.
- 韦道明, 李崇银. 2009. 东亚冬季风的区域差异和突变特征 [J]. *高原气象*, 28 (5): 1149–1157. Wei Daoming, Li Chongyin. 2009. Regional differences and abrupt change characteristics of East Asian winter monsoon in different region [J]. *Plateau Meteor. (in Chinese)*, 28 (5): 1149–1157.
- 徐建军, 朱乾根, 周铁汉. 1999. 近百年东亚冬季风的突变性和周期性 [J]. *应用气象学报*, 10 (1): 1–8. Xu Jianjun, Zhu Qian'gen, Zhou Tiehan. 1999. Sudden and periodic changes of East Asian winter monsoon in the past century [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 10 (1): 1–8.
- 张庆云, 陶诗言, 陈烈庭. 2003. 东亚夏季风指数的年际变化与东亚大气环流 [J]. *气象学报*, 61 (5): 559–568. Zhang Qingyun, Tao Shiyan, Chen Lieting. 2003. The interannual variability of East Asian summer monsoon indices and its association with the pattern of general circulation over East Asia [J]. *Acta Meteor. Sin. (in Chinese)*, 61 (5): 559–568.
- Zhou W, Li C Y, Wang X. 2006. Possible connection between Pacific Oceanic interdecadal pathway and East Asian winter monsoon [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34, L01701, doi: 10.1029/2006GL027809.
- Zhou W, Wang X, Zhou T J, et al. 2007. Interdecadal variability of the relationship between the East Asian winter monsoon and ENSO [J]. *Meteor. Atmos. Phys.*, 98, doi: 10.1007/s00703-007-0263-6.
- 朱益民, 杨修群. 2003. 太平洋年代际振荡与中国气候变率的联系 [J]. *气象学报*, 61: 641–654. Zhu Yimin, Yang Xiuqun. 2003. Relationships between Pacific decadal oscillation (PDO) and climate variabilities in China [J]. *Acta Meteor. Sin. (in Chinese)*, 61: 641–654.