

肖晓, 陈文, 范广洲, 等. 2016. 20 世纪 90 年代末东亚冬季风年代际变化的外强迫因子分析 [J]. 气候与环境研究, 21 (2): 197–209. Xiao Xiao, Chen Wen, Fan Guangzhou, et al. 2016. Possible external forcing factors for the interdecadal change in the East Asian winter monsoon around the late 1990s [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 21 (2): 197–209, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2015.15169.

20 世纪 90 年代末东亚冬季风年代际变化的外强迫因子分析

肖晓¹ 陈文² 范广洲¹ 周定文¹

¹ 成都信息工程大学, 成都 610200

² 中国科学院大气物理研究所季风系统研究中心, 北京 100029

摘要 使用 NCEP/NCAR、英国气象局哈德莱中心 (Met Office Hadley Center) HadISST 以及 NOAA 提供的再分析资料分析了海温、海冰及雪盖异常对 20 世纪 90 年代末我国冬季气温和东亚冬季风 (EAWM) 年代际跃变的外部强迫作用, 同时也对比分析了 20 世纪 90 年代 EAWM 年代际跃变与 20 世纪 80 年代 EAWM 年代际跃变特征和成因的一些差异。结果表明: 20 世纪 80 年代中期 EAWM 的年代际变化特征主要表现为全国一致偏冷型, 同时中国近海的海温也偏低; 该年代际变化的主要原因来自大气内部动力过程, 而海温和海冰的作用不显著。20 世纪 90 年代末 EAWM 年代际变化的特征表现为东亚北方气温显著偏冷而南方偏暖的南北反相变化分布; EAWM 在 20 世纪 90 年代末的年代际变化受北大西洋海温和热带太平洋海温的共同影响。北大西洋显著的异常暖海温, 激发一个向下游传播的波列, 使得西伯利亚高压加强, EAWM 加强, 从而导致我国北方气温下降; 同时, 秋冬季北极海冰异常偏少和秋季欧亚雪盖偏多对东亚冬季风的增强也有一定的作用。此外, 热带西太平洋的暖海温异常会导致在海洋性大陆地区有异常的辐合和对流增强, 引起大气环流的 Gill 型响应, 对流西侧的异常气旋在孟加拉湾至我国西南地区出现南风异常, 使得东亚南部地区温度偏高。因此, 20 世纪 90 年代末之后东亚温度呈现南暖北冷的分布特征。

关键词 东亚冬季风 年代际变化 外部强迫因子 海冰 海温

文章编号 1006-9585 (2016) 02-0197-13

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2015.15169

Possible External Forcing Factors for the Interdecadal Change in the East Asian Winter Monsoon around the Late 1990s

XIAO Xiao¹, CHEN Wen², FAN Guangzhou¹, and ZHOU Dingwen¹

¹ Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610200

² Center for Monsoon System Research, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract In this study, the authors investigate the effects of anomalous sea surface temperature (SST), sea ice, and snow cover in the interdecadal change in the East Asian Winter Monsoon (EAWM) that occurred around the late 1990s by using reanalysis datasets from NCEP/NCAR, the Met Office Hadley Centre, the NOAA Climate Diagnostic Center, and the Northern Hemisphere snow cover reanalysis product from NOAA. Characteristics of and mechanisms for the interdecadal

收稿日期 2015-07-13; 网络预出版日期 2015-12-30

作者简介 肖晓, 女, 1990 年出生, 硕士研究生, 主要从事东亚季风和气候动力学方面的研究。E-mail: 374501319@qq.com

通讯作者 陈文, E-mail: chenw@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家自然科学基金 41230527、41461144001

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 41230527, 41461144001)

changes in the EAWM that occurred around mid-1980s (1976–1988) and late 1990s (1999–2012) are also compared. Results indicate that the interdecadal change in the EAWM that occurred around mid-1980s is characterized by negative temperature anomalies over the entire areas of China. The interdecadal change in the EAWM that occurred around mid-1980s is not related to external forcing including SST and sea ice anomalies. Instead, it is attributed to internal atmospheric dynamics. However, the interdecadal change in the EAWM that occurred around the late 1990s may be attributed to external forcing of SST, sea ice and snow cover anomalies in the preceding fall and winter. Particularly, the warmer SST in the late 1990s over the North Atlantic triggered an atmospheric wave train that propagated eastward and reached East Asia. This wave train intensified Siberian high, leading to a stronger EAWM and negative temperature anomalies over northern East Asia. The reduced sea ice anomalies in the Arctic Ocean and the increased snow cover over the Eurasian Continent in the preceding autumn is also a possible reason for the interdecadal change in the EAWM occurred around the late 1990s. In addition, positive SST anomalies over the tropical western Pacific can lead to convergence and enhanced convection over the maritime continent. As a result, cyclonic circulation anomalies over the tropical eastern Indian Ocean developed via a Gill type response. The anomalous southerly winds to the east of the cyclone eventually led to positive temperature anomalies over southern East Asia.

Keywords East Asian Winter Monsoon, Interdecadal change, External forcing factor, Sea ice, Sea surface temperature (SST)

1 引言

东亚冬季风是东亚季风系统的重要组成部分,同时它也是全球大气环流系统中活跃和独特的成员之一。东亚冬季风对东亚冬季的天气和气候存在着异常重要的影响 (Chang et al., 2006; Huang et al., 2012)。东亚冬季风与来自西伯利亚高压向东南方向移动的冷空气有显著联系 (Chen et al., 2000; Chan and Li, 2004), 强的冬季风常给我国带来低温、寒潮等灾害性天气, 而弱的冬季风则会使地表温度偏暖, 导致暖冬事件的发生 (王会军和姜大膀, 2004)。

冬季风作为行星尺度的环流系统, 前人研究指出它具有很明显的年代际变化特征 (Wang et al., 2009; Wang and Chen, 2010; Wei et al., 2011; Wang and Chen, 2014), 也有一些研究分析了影响冬季风年代际变化的原因, 包括准定常行星波 (Wang et al., 2009)、大气遥相关模态 (Wang et al., 2007; Chen et al., 2013a; Tan and Chen, 2014) 等大气内部动力原因; 还包括外强迫因子如海洋 (Zhou et al., 2007; 丁一汇等, 2014) 以及全球变暖 (丁一汇等, 2014) 等的作用。

有研究表明, 东亚冬季风在 20 世纪 80 年代中后期开始明显减弱, 我国冬季气温从全国一致变冷变为全国一致变暖, 出现持续的暖冬 (康丽华等, 2006), 并有研究指出 20 世纪 80 年代后期的东亚季风的年代际变化是北半球大尺度环流异常变化的结果 (Wu et al., 2013a)。黄荣辉等 (2014) 在继

2013 年指出东亚夏季风在 20 世纪 90 年代末发生了年代际跃变 (黄荣辉等, 2013) 之后又提出, 从 1999 年之后, 东亚冬季风也经历了一次明显的年代际变化。20 世纪 90 年代末之后, 我国冬季的气温和冬季风都发生了明显的年代际跃变 (Yang and Wu, 2013; 黄荣辉等, 2014)。东亚冬季风在这次年代际变化的主要特征表现为: 我国冬季气温变化从全国一致变化型变成南北振荡型 (即北冷南暖型), 东亚冬季风从偏弱变偏强, 冬季我国北方低温雨雪冰冻灾害频繁发生。他们的分析表明东亚冬季风在 20 世纪 90 年代末的年代际变化是与西伯利亚高压和阿留申低压的加强有关。

关于东亚冬季风在 90 年代末的突变, 黄荣辉等 (2014) 主要强调了大气内部动力的作用, 分析了北极涛动 (Arctic Oscillation, AO) 及北半球准定常行星波活动对这次东亚冬季风年代际变化的影响。他们的研究表明 20 世纪 90 年代末之后, 北半球冬季准定常行星波在高纬地区沿极地波导传播到平流层加强, 而沿低纬波导传播到副热带对流层上层减弱, 这造成行星波 E-P 通量在对流层和平流层高纬度地区辐合加强, 而在对流层中、上层副热带地区辐散加强。这导致对流层到平流层北半球高纬度地区纬向平均流和欧亚上空的极锋急流减弱, 而副热带急流加强, 从而造成 AO 减弱和东亚冬季风加强。

然而, 东亚冬季风除了受内部动力作用影响, 还受到外界强迫因子 (如: 海温、雪盖、海冰等) 的显著影响 (陈文等, 2013; 丁一汇等, 2014)。

全球季风系统是气候系统的一个重要组成部分,一旦气候系统由于外界强迫因子发生了改变,就必然会对全球季风系统产生深刻的影响,尤其是对庞大的亚洲季风系统(丁一汇等, 2014)。海陆热力差会受到全球气候变化的影响,从而对东亚冬季风产生影响。海温、雪盖、海冰等外强迫是否对东亚冬季风在 20 世纪 90 年代末的突变存在影响,这些目前还不清楚。因此,本文旨在分析海温、海冰和雪盖等外界强迫因子对 20 世纪 90 年代末东亚冬季风年代际变化的可能作用,同时我们还对比分析了在 20 世纪 90 年代末突变后与 80 年代中后期突变之前两段时期强东亚冬季风的特征和成因的差异。

2 数据和方法

本文使用 NCEP/NCAR(Kalnay et al., 1996)提供的全球逐月平均的海平面气压(sea level pressure, SLP)、位势高度、水平风场(包括纬向风和经向风两个分量)[该资料的水平分辨率为 2.5° (纬度) \times 2.5° (经度)],以及 NCEP/NCAR 再分析资料提供的逐日(每日 4 个时次的平均)位势高度、水平风场(u 、 v 分量)。英国气象局哈德莱中心(Met Office Hadley Center)提供的海冰和海表温度数据(HadISST, Rayner et al., 2003)[该资料的水平分辨率为 1° (纬度) \times 1° (经度)],NOAA 气候诊断中心提供的地气系统向外长波辐射资料(Outgoing Longwave Radiation, OLR)(Liebmann and Smith, 1996)[该资料的水平分辨率为 2.5° (纬度) \times 2.5° (经度)]以及 NOAA 北半球雪盖资料(该资料从 1966 年 10 月 4 日开始每周更新)(Squires et al., 2014),分辨率为纬向 89 格点 \times 经向 89 格点(<http://climate.rutgers.edu/snowcover/docs.php?target=datareq> [2015-04-09])。

本文采用黄荣辉等(2014)选取的时间段,即 1976~2012 年,且按照文中分法将该时期分为 3 个时间段以便于比较(1976~1987 年、1988~1998 年、1999~2012 年)。黄荣辉等(2014)指出,这 3 个时间段东亚冬季风经历了由强到弱再到强的变化。为了对比分析两个强冬季风的差异,本文采用强冬季风时期减去弱冬季风时期的合成方法,即 1976~1987 年强冬季风时期减去 1988~1998 年弱冬季风时期;1999~2012 年强冬季风时期减去 1988~1998 年弱冬季风时期。分析结果均进行了 t

检验(魏凤英, 2007)。

3 强冬季风时期气温和大气环流异常的特征比较

本文首先利用 NCEP/NCAR 再分析资料地表气温数据分析了欧亚大陆及临近海洋上 1976~1987 年和 1999~2012 年强冬季风期间冬季气温异常的分布。图 1 为北半球冬季(12 月至次年 2 月)地表气温异常的合成分析。图 1a 为 1976~1987 年强冬季风时期(1976~1987 年减去 1988~1998 年)地表气温异常分布。图中阴影区表示通过 95% 显著性检验的区域。可以看到,整个东亚地区均为负值,说明 1976~1987 年强冬季风时期比 1988~1998 年的弱冬季风时期全国温度一致偏冷,尤其是我国中东部地区的温度显著偏冷。图 1b 为 1999~2012 年强冬季风时期(1999~2012 年减去 1988~1998 年)地表气温异常分布。可以看到, 40°N 以北地区主要为温度负异常而 40°N 以南地区为温度正异常,我国的温度异常呈现西南部地区异常偏暖,北部及东部地区偏冷的信号。这说明 1999~2012 年强冬季风时期偏冷的地区主要是我国的北方地区至西伯利亚地区以及东边的日本。同时在图 1 中也可以发现,图 1a 中北极地区异常偏暖,但异常不显著,而图 1b 北极地区有异常显著偏暖的信号。图 1 的结果说明 1976~1987 年与 1999~2012 年地表气温异常在空间分布上存在明显的差异。合成分析的结果与黄荣辉等(2014)利用经验正交函数(Empirical Orthogonal Function, EOF)分析的结果是一致的,本文中后面皆采用合成方法进行对比分析。

为了揭示两个强冬季风时期气温异常分布不同的原因,图 2 和图 3 分别给出两个强冬季风时段北半球冬季的大气环流异常分布。图 2 为 1976~1987 年强冬季风时期(1976~1987 年减去 1988~1998 年)的大气环流异常分布。东亚冬季风的变化与西伯利亚高压和阿留申低压的变化密切相关,从图 2a 海平面气压场中可以清楚地看到,该时期西伯利亚北部有正的异常,阿留申低压也增强;导致东西向气压梯度增大,北风加强,从而东亚冬季风加强。这在低层 850 hPa 风场上也可看出北风异常加强;另外,在 500 hPa 高度场上,东亚大槽加深;在 200 hPa 高空急流也加强。从而,整个东亚冬季风系统呈现出强冬季风的态势。

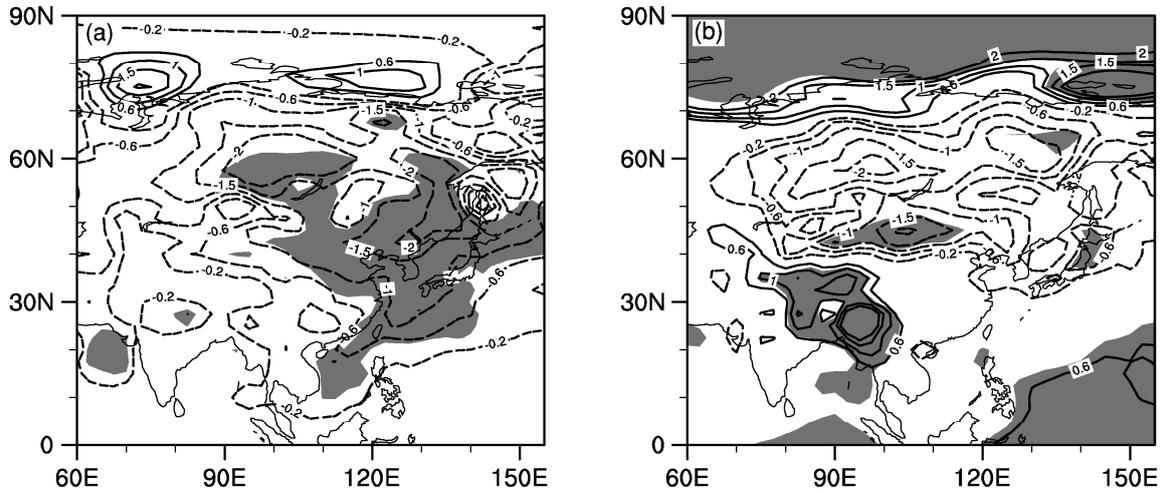


图1 北半球冬季(12月至次年2月)地表气温异常合成分析(单位: °C): (a) 1976~1987年与1988~1998年差值; (b) 1999~2012年与1988~1998年差值。实、虚线分别表示正、负距平, 阴影表示超过95%的显著性检验

Fig. 1 Differences (units: °C) in wintertime (December–February, DJF) surface air temperature (a) between 1976–1987 and 1988–1998 and (b) between 1999–2012 and 1988–1998. The solid and dashed lines denote positive and negative anomalies, respectively. The anomalies that are statistically significant at 95% confidence level are shaded

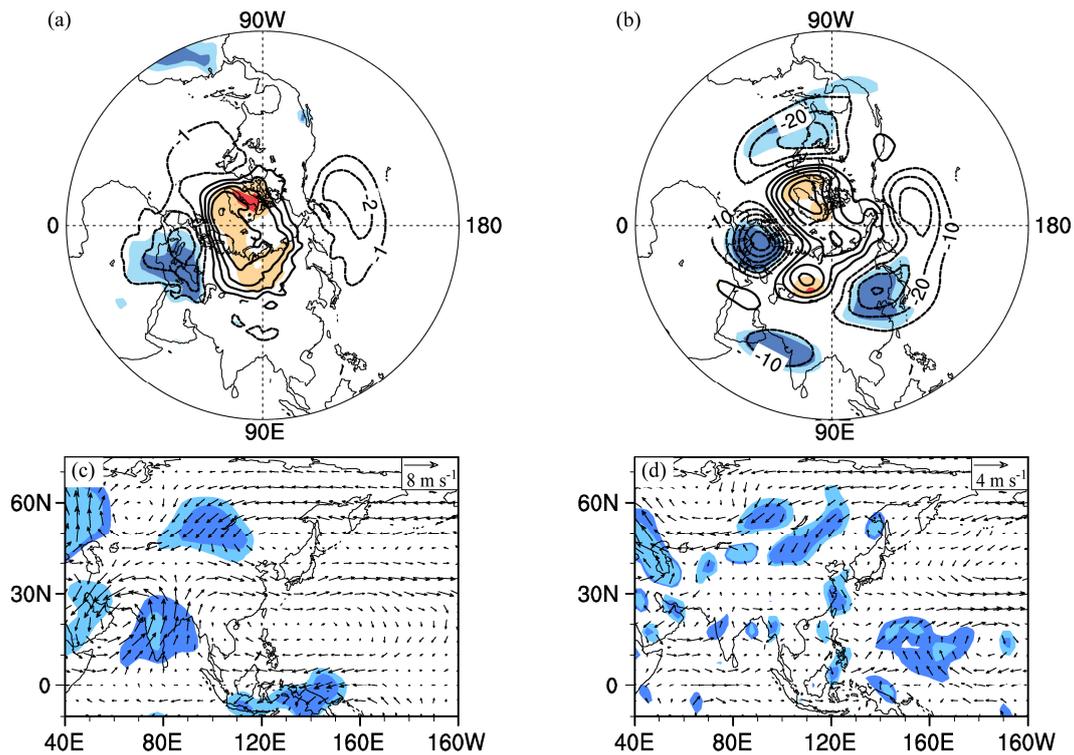


图2 1976~1987年强冬季风时期(1976~1987年减去1988~1998年)北半球冬季(12月至次年2月)大气环流异常分布: (a) 海平面气压场(单位: hPa); (b) 500 hPa 位势高度场(单位: m); (c) 200 hPa 风场; (d) 850 hPa 风场。实、虚线分别表示正、负距平; (a)、(b) 红色深、浅阴影分别表示正值通过99%和95%的显著性检验, 蓝色深浅阴影分别表示负值通过99%和95%的显著性检验; (c)、(d) 深、浅阴影区域表示纬向风或经向风异常通过99%和95%显著性检验

Fig. 2 Differences in wintertime (DJF) (a) sea level pressure (SLP) (units: hPa), (b) geopotential height at 500 hPa (units: m), (c) winds at 200 hPa, and (d) winds at 850 hPa between 1976–1987 and 1988–1998. The solid and dashed lines denote positive and negative anomalies, respectively. In (a) and (b), heavy and light shadings indicate that the anomalies are statistically significant at 99% and 95% confidence levels, respectively. Red and blue colors represent positive and negative anomalies, respectively. In (c) and (d), heavy and light shadings indicate that the zonal and meridional wind anomalies are statistically significant at 99% and 95% confidence levels, respectively

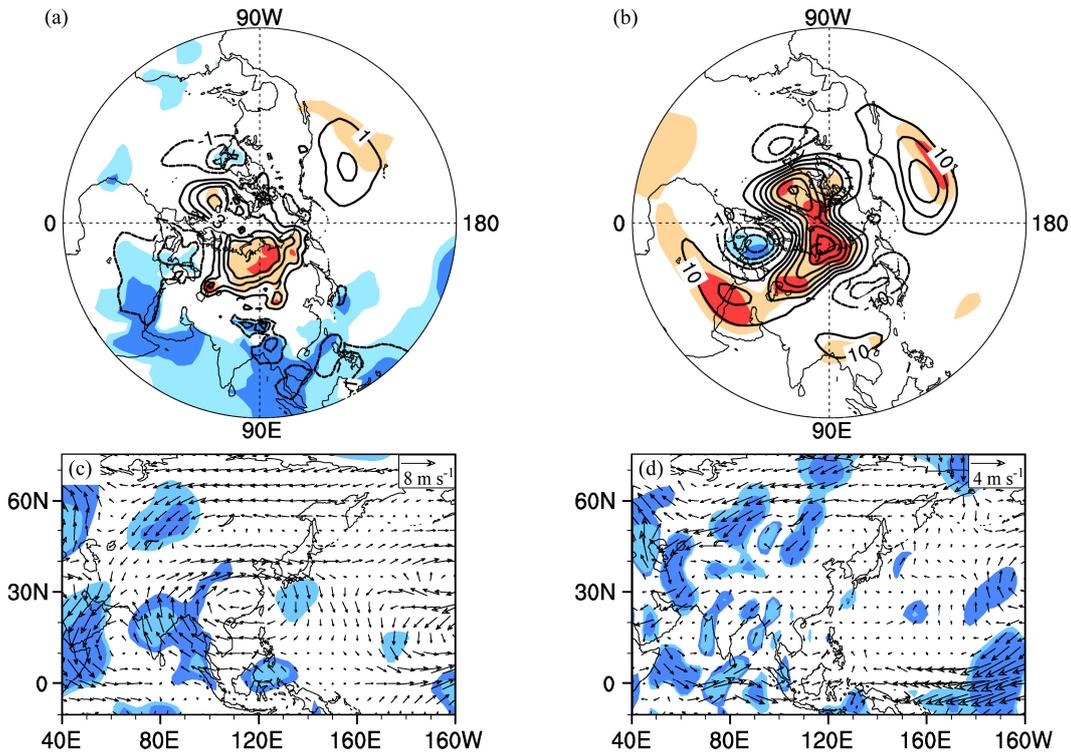


图 3 同图 2, 但为 1999~2012 年强冬季风时期 (1999~2012 年减去 1988~1998 年) 北半球冬季 (12 月至次年 2 月) 大气环流异常分布

Fig. 3 Same as Fig. 2, but for differences between 1999~2012 and 1988~1998

图 3 为 1999~2012 年强冬季风时期 (1999~2012 年减去 1988~1998 年) 的大气环流场异常分布。该时期西伯利亚高压显著增强, 但阿留申低压减弱, 这使得东西向气压梯度没有前一强冬季风时期强, 异常北风也偏弱。在 500 hPa 高度场上东亚大槽偏强但不显著, 北半球欧亚大陆上空有明显的从大西洋传过来的波列, 这与之前黄荣辉等 (2014) 讨论的有所不同。200 hPa 东亚急流偏强偏北。由此可见, 该时期内整个东亚冬季风系统不像前一个强冬季风时期那样有显著的信号。此外, 从海平面气压场来看, 热带西太平洋地区包括我国南海附近有显著的负异常, 这与低层风场在印度洋地区有异常西风, 而在热带西太平洋地区有异常强的东风导致的辐合是一致的。

由上面的分析可以看到, 1976~1987 年与 1999~2012 年两个强冬季风时期气温异常分布存在明显的不同: 1976~1987 年整个东亚地区为一致偏冷, 而 1999~2012 年以北纬 40°N 为界呈现北冷南暖的分布, 并且北极地区也有显著的暖异常。两个强东亚冬季风时段的大气环流异常也明显不同: 1976~1987 年西伯利亚北部高压增强, 阿留申低压

增强, 东西向气压差显著增大, 低层有北风异常加强南下; 东亚大槽和高空急流均加强。1999~2012 年西伯利亚高压增强, 但阿留申低压减弱, 低层的北风异常不能延伸到 40°N 以南; 500 hPa 上有一个从大西洋传过来的波列, 高空急流偏北; 此外, 热带西太平洋地区有明显的东、西风辐合和低压异常。

4 东亚冬季风年代际变化对应的外强迫分析

上面的分析可以看到, 1976~1987 年与 1999~2012 年两个强冬季风时期大气环流型有所不同, 而外强迫对整个气候系统包括大气环流会有重要影响。所以接下来本文从海温、海冰和雪盖这 3 个外强迫因子来看看它们对 1976~1987 年与 1999~2012 年强冬季风影响的差异。

4.1 海温对东亚冬季风年代际变化的作用

图 4 为冬季 (12 月至次年 2 月) 海表温度的异常分布。图 4a 为 1976~1987 年减去 1988~1998 年的海表温度合成结果。从图 4a 中可以看到, 除

了我国近海区域存在负值, 印度洋区域也有明显负异常。结合图 2 中的大气环流异常可知, 这些区域的海温异常偏低与强冬季风是联系在一起的, 寒冷干燥的北风到达海洋后, 会使得海洋向上的感热增加导致海温偏冷(蔡榕硕等, 2011)。图 4b 为 1999~2012 年减去 1988~1998 年的海表温度合成结果。

1999~2012 年强冬季风时期的海表温度与 1976~1987 年期间的异常明显不同, 海温异常主要出现在太平洋和大西洋, 这包括北大西洋和热带大西洋明显的暖异常和热带西太平洋及其向南北伸展的暖异常, 以及中东太平洋和靠近北美的北太平洋冷海温异常。同时, 图 5 为前期秋季的海表温度的异常

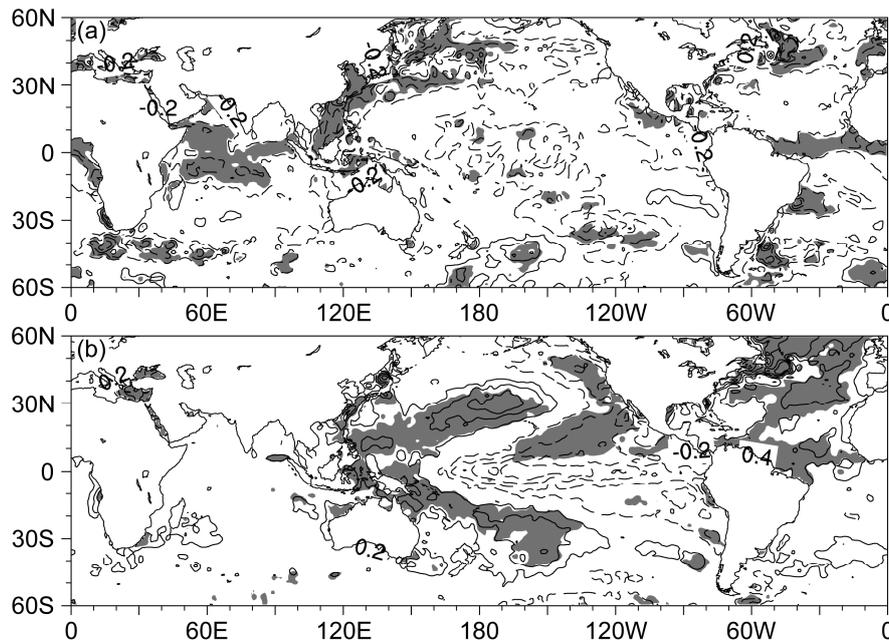


图 4 NCEP/NCAR 再分析资料冬季 (12 月至次年 2 月) 海表温度异常分布 (单位: $^{\circ}\text{C}$): (a) 1976~1987 年与 1988~1998 年差值; (b) 1999~2012 年与 1988~1998 年差值。实、虚线分别表示正、负距平, 阴影表示超过 95% 的显著性检验

Fig. 4 Differences in wintertime (December–February, DJF) sea surface temperature (units: $^{\circ}\text{C}$) between (a) 1976–1987 and 1988–1998 and (b) 1999–2012 and 1988–1998 from the NCEP/NCAR reanalysis dataset. The solid and dashed lines denote positive and negative anomalies, respectively. The anomalies that are statistically significant at 95% confidence level are shaded

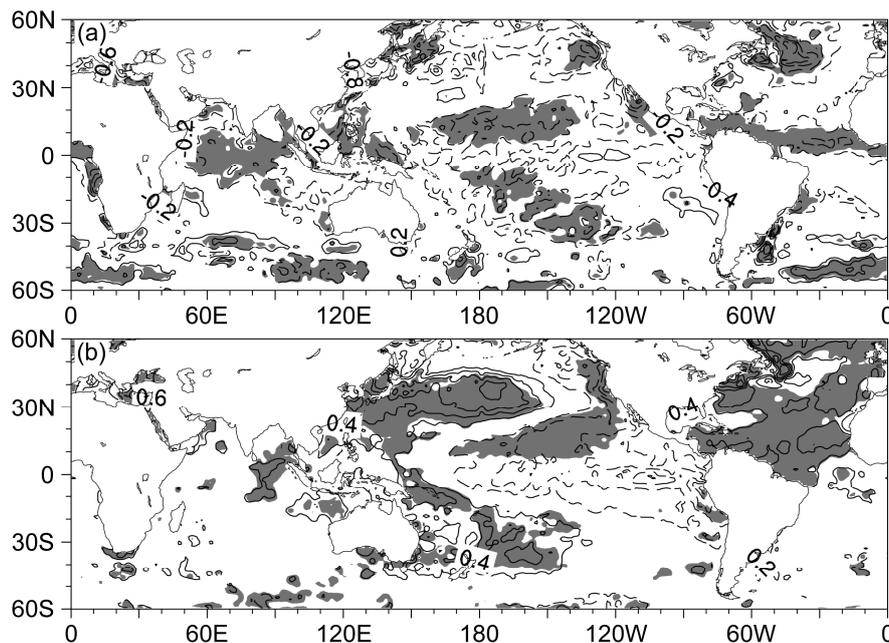


图 5 同图 4, 但为前期秋季的海表温度异常分布 (单位: $^{\circ}\text{C}$)

Fig. 5 Same as Fig. 4, but for differences in sea surface temperature in the preceding autumn (units: $^{\circ}\text{C}$)

分布, 可以看到, 前述的冬季海温异常分别在前期秋季就已经存在, 而且 1999~2012 年强冬季风时期的海温异常在秋季范围更大、强度更强。上面的结果说明, 前一阶段 (1976~1987 年) 的强冬季风与后一阶段 (1999~2012 年) 的强冬季风时期的海温信号有很大差异: 前一阶段 (1976~1987 年) 我国近海区域和印度洋区域为明显负异常; 而后一阶段 (1999~2012 年) 为大西洋和热带西太平洋的异常偏暖以及东太平洋的异常偏冷。这说明后一阶段的强冬季风很可能受到了海温外强迫影响。

由于 1999~2012 年 500 hPa 高度场上显示的欧亚大陆上空有一个明显的从大西洋传过来的波列 (见图 3a), 并且北大西洋海温在秋季就存在异常的暖信号, 因此从大西洋传播到东亚的波列有可能是暖海温异常激发的。下面本文利用波作用通量 (T-N 通量) (Takaya and Nakamura, 1997, 2001) 来进一步诊断该波列的形成。

T-N 通量可以很好地诊断定常波的三维传播, 该通量在 Wentzel-Kramers-Brillouin (WKB) 近似假定下与定常 Rossby 波列的局地群速度方向一致。图 6 分别给出了两个强冬季风时期波作用通量 (T-N 通量) 的异常分布。从图 6b 可以看到, 1999~2012 年强冬季风时期在大西洋附近有一波源并向东传播, 在地中海附近分为两支, 一支偏南传向赤道, 另一支继续东传至东亚。对比图 6a, 1976~1987

年强冬季风时期虽然也有类似波列向东传播但明显偏弱。结合图 3~6 可知, 后一阶段 (1999~2012 年) 的强冬季风时期, 大西洋地区的异常暖海温可能激发波列并沿急流传播到东亚地区, 使得西伯利亚高压增强, 导致东亚冬季风加强。Deser et al. (2007) 通过数值模式试验揭示出大西洋海温作为外强迫影响大气环流的过程: 大气环流对大西洋海温的异常偏暖最初有斜压响应, 随后响应逐渐倾向于正压, 并在空间范围和振幅上加强, 2~2.5 个月 后大气环流调整达到准平衡态, 而相当正压的大气环流异常型, 又会对海温产生正反馈。该结果可以在一定程度上解释本文的结果, 即在秋季大气环流对大西洋异常暖海温斜压响应, 并向下游传播, 振幅加强, 并不断调整趋于正压, 在随后的冬季达到准平衡态, 形成相当正压的大气环流异常; 该环流型与大西洋海温有正反馈的相互作用, 使得异常海温和波列在冬季可以持续。

1999~2012 年强冬季风时期与 1976~1987 年强冬季风时期的气温分布相比有一个显著的差异, 就是出现在 40°N 以南地区, 特别是青藏高原南侧地区的暖异常 (见图 1b)。结合图 3 的环流和图 4、图 5 的海温分布, 可见 1999~2012 年强冬季风时期热带西太平洋地区海温异常偏暖, 同时该地区低层有明显的东、西风辐合和低压异常。进一步利用美国 NOAA-CIRES 气候诊断中心提供的卫星观测

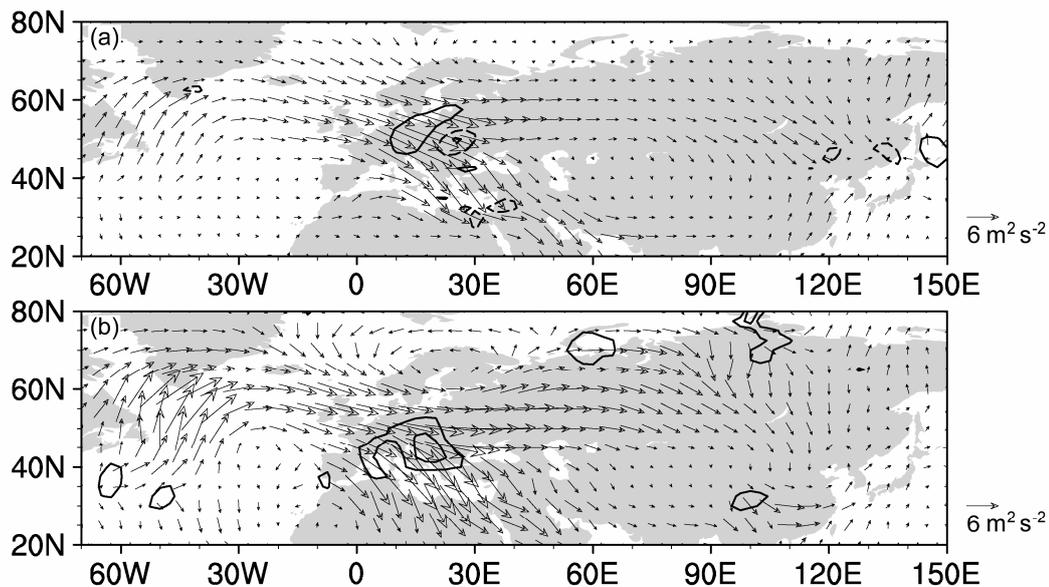


图 6 北半球冬季 (12 月至次年 2 月) T-N 波列传播异常分布: (a) 1976~1987 年与 1988~1998 年差值; (b) 1999~2012 年与 1988~1998 年差值

Fig. 6 Differences in wintertime (December–February, DJF) T-N fluxes between (a) 1976–1987 and 1988–1998 and (b) 1999–2012 and 1988–1998

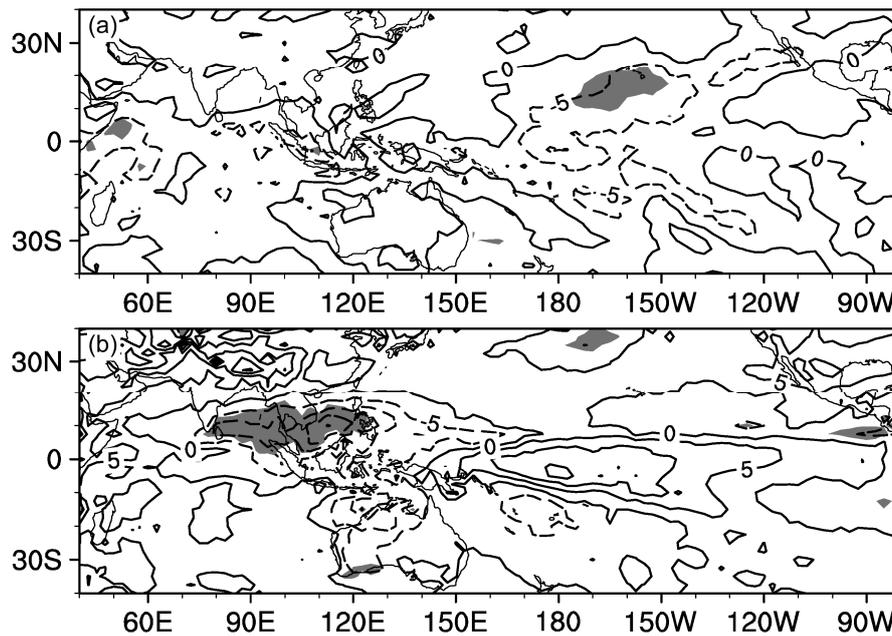


图 7 热带地区冬季 (12 月至次年 2 月) OLR 异常分布 (单位: Wm^{-2}): (a) 1976~1987 年与 1988~1998 年差值; (b) 1999~2012 年与 1988~1998 年的差值 (阴影表示 OLR 分布通过 0.05 显著性检验的区域)

Fig. 7 Differences in wintertime (December–February, DJF) outgoing longwave radiation (OLR) (units: Wm^{-2}) between (a) 1976–1987 and 1988–1998 and (b) 1999–2012 and 1988–1998. The shadings indicate anomalies are significant at the 0.05 level

地气系统向外长波辐射资料 (Outgoing Longwave Radiation, OLR) 考察了热带对流的异常。比如, Chu and Wang (1997) 曾用 OLR 研究了印度洋、西太平洋热带对流的年际变化; Prasad and Bansod (2000) 分析了 OLR 与印度夏季风降水的关系。图 7 分别给出了两个强季风时期 OLR 的异常分布。从图 7a 可见, 1976~1987 年的强季风时期 (1976~1987 年减去 1988~1998 年) 几乎没有显著的 OLR 信号, 而在图 7b 中, 1999~2012 年的强季风时期 OLR 场在海洋性大陆地区有显著的负信号, 说明在该地区有强烈的对流增强。该对流异常在其左侧激发异常的气旋环流 (图 3d), 类似 Gill 模态 (Gill, 1980)。从图 3d 中可以看到, 该气旋的东侧从孟加拉湾深入至我国西南部, 输送暖湿气流, 使得东亚的西南地区温度偏高 (图 1b)。事实上, 该对流异常增强可以从热带西太平洋的异常偏暖以及东、西风异常在海洋性大陆地区辐合的配置得到解释。

因此, 前后两个时期强季风与海温的关系有明显的不同。1976~1987 年的强季风时期海温异常偏弱, 且可能主要是强的冬季风影响了海表温度 (我国近海区域), 冬季风强则主要受到了大气内

部动力因子的影响, 正如前人的一些研究结果所呈现的那样 (Wang et al., 2007, 2009)。而本文的研究发现海温异常对 1999~2012 年时期的强季风有很大影响, 大西洋异常的暖海温激发的波列沿急流东传, 导致西伯利亚高压增强, 从而使得冬季风变强, 我国北方气温异常偏低; 同时热带西太平洋海温异常偏暖, 导致海洋性大陆地区的异常辐合和对流增强, 产生 Gill 型的大气响应, 其左侧产生异常气旋环流, 气旋环流东侧的南风异常使得东亚西南部温度偏暖。

4.2 海冰对东亚冬季风年代际变化的作用

有研究指出, 全球变暖导致的北极增暖会使得海冰减少, 特别是自 20 世纪 90 年代后期以来, 夏季北极海冰快速减少。近年来, 伴随着北极海冰的减少, 欧亚大陆经历了严冬频发和极端降水/降雪事件 (Wu et al., 2011)。一些研究表明, 欧亚大陆寒冬频发与秋冬季北极海冰减少有着密切联系 (Wu et al., 1999; Petoukhov and Semenov, 2010)。武炳义等 (2004) 指出, 冬季巴伦支海和喀拉海是海—气相互作用的关键区域, 其海冰面积变化对局地大气层结和行星边界层的稳定性都有重要的影响。Francis et al. (2009) 研究指出, 9 月海冰范围与后期冬季大

尺度大气环流异常相联系。Inoue et al.(2012)指出, 秋季巴伦支海冰异常偏少可以通过影响气旋路径导致后期冬季冷事件的发生。Honda et al.(2009)指出, 远东地区冬季早期的显著冷异常和冬季晚期从欧洲至远东地区纬向分布的冷异常均与前期 9 月北极海冰减少有关系, 后者可以通过激发定常罗斯贝波加强西伯利亚高压。观测结果显示, 冬季巴伦支海—喀拉海的海冰偏多时, 中国冷空气活动则偏少, 东亚冬季风减弱 (Wu et al., 1999), Petoukhov and Semenov (2010) 的数值模拟试验结果进一步证实了该结论。最近也有研究指出, 春、夏季北极地区表面风场在 90 年代后期发生年代际变化, 影响了秋季北极海冰异常, 进而影响到冬季风(Wu et al., 2013a; Yang and Wu, 2013)。

图 8 给出了前期秋季 (9~11 月) 和冬季 (12 月至次年 2 月) 巴伦支海和喀拉海地区的海冰密集度合成分析。从图中可以看到, 1976~1987 年的强冬季风时期海冰秋季几乎没有异常信号, 冬季信号也很弱; 而 1999~2012 年的强冬季风时期在巴伦支海和喀拉海有大范围显著负异常信号并持续到冬季。冬季该关键海区海冰面积变化与东亚冬季风强弱变化有紧密的联系, 当秋季海冰面积异常偏多 (少) 时, 东亚冬季风往往偏弱 (强)。因此, 1999~2012 年的强冬季风时期东亚冬季风的加强与秋冬季巴伦支海和喀拉海海冰的异常减少也有一定的

关系。而海冰的异常减少有可能与北极风场异常变化有关 (Wu et al., 2012)。

4.3 雪盖对东亚冬季风年代际变化的作用

雪盖是气候系统中的一个重要的组成部分, 其异常可以引起下垫面能量和水分的异常, 改变地表与大气之间的热量及水汽交换, 进而对气候变化产生重要的影响。积雪异常主要会引起 3 个方面的气候效应: 1) 反照率效应: 积雪的高反射率, 引起地面吸收的太阳辐射减少, 产生净的冷却效应, 改变地表的热力状况及地气之间的热量交换(Hahn and Shukla, 1976); 2) 积雪水分效应: 积雪异常通过融雪对地表的水平衡产生影响, 引起土壤水分及蒸发的异常, 影响地气系统之间的水汽、能量交换 (Meeh, 1994); 3) 雪盖异常引起的大气异常的遥响应: 雪盖异常的局地效应, 通过大气对它的响应以及大气环流的调整, 对更大范围乃至对全球气候产生影响 (Barnett et al., 1989; Cohen and Rind, 1991; Khandeker, 1991; Cohen and Entekhabi, 1999; Ye et al., 2015)。近年来, 很多研究提出雪盖也是一个可能的强迫北半球大气和影响冬季风变化的因子 (Jhun and Lee, 2004)。

图 9 给出了北半球前期秋、冬季的雪盖合成分析, 1976~1987 年的强冬季风时期和 1999~2012 年的强冬季风时期的前秋雪盖分布差异比冬季的差异更大。比较来说, 在 1976~1987 年 (图 9a 和

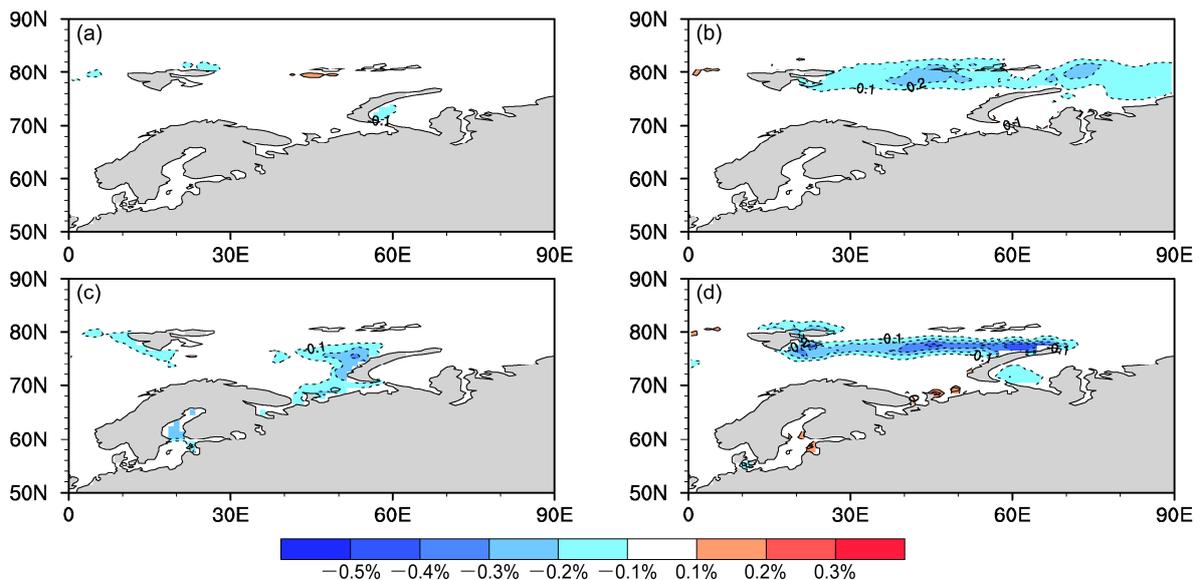


图 8 (a, b) 秋季、(c, d) 冬季巴伦支海和喀拉海地区海冰密集度合成分析: 左列 1976~1987 年与 1988~1998 年差值; 右列为 1999~2012 年与 1988~1998 年差值

Fig. 8 Differences of the sea ice extent over the Barents Sea and Kara Sea in (a, b) preceding autumn and (c, d) winter between 1976~1987 and 1988~1998 (left) and 1999~2012 and 1988~1998 (right)

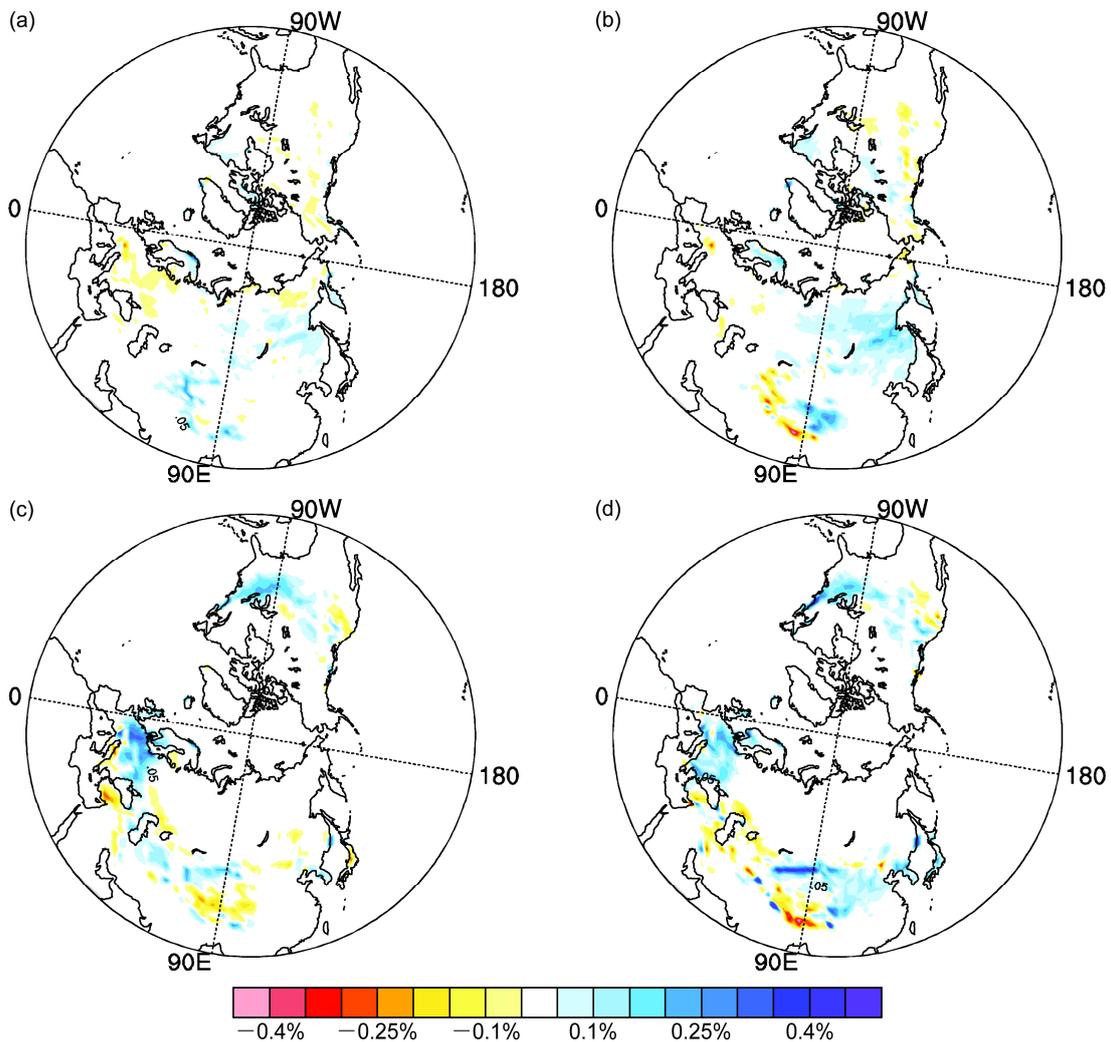


图9 同图8, 但为雪盖覆盖率

Fig. 9 Same as Fig. 8, but for snow cover extent

9c), 秋季欧亚雪盖异常较弱; 而冬季在西北欧地区和北美出现正异常。在 1999~2012 年 (图 9b), 秋季有明显的欧亚雪盖正异常, 包括欧亚大陆北部的俄罗斯西伯利亚地区、我国青藏高原地区以及加拿大北部、东北部地区; 到冬季又呈现出与 1976~1987 年相类似的雪盖异常分布 (图 9d)。研究指出, 欧亚秋季雪盖与北半球冬季大气环流的关系密切, 欧亚秋季雪盖增多可能会引起随后冬季大气环流的调整和异常, 从而导致冷冬的发生 (Cohen and Entekhabi, 1999; Cohen et al., 2013)。Handorf et al. (2015) 通过模式验证了秋季欧亚雪盖的增多和海冰的减少对随后冬天的行星波列有一定影响。而从图 9 中可以看出, 秋季欧亚雪盖在 1999~2012 年比在 1976~1987 年偏多, 面积更大, 因此秋季欧

亚雪盖异常可能和秋冬季巴伦支海和喀拉海海冰一样也是影响后期冬季北半球大气环流的一个外强迫因子, 秋季欧亚雪盖的异常偏多和秋季北极海冰的减少都与后期东亚冬季风的加强有关。

5 结论与讨论

本文利用 NCEP/NCAR 提供的大气环流场和表面温度资料、英国气象局哈德莱中心提供的海温资料 (Met Office Hadley Center) 以及 NOAA 气候诊断中心提供的 OLR 资料分析了海温、海冰和雪盖对 20 世纪 90 年代末我国冬季气温和 EAWM 年代际跃变的外部强迫作用。

1999~2012 年的强冬季风时期与之前的

1976~1987 年的强冬季风时期相比较, 不仅气温差异的空间分布存在明显不同, 大气环流异常型也有显著差异, 而海温、海冰及雪盖异常在其中起了重要的作用。1976~1987 年的强冬季风时期, 我国的温度异常表现为全国一致型, 且它与秋冬季海温、海冰和雪盖的关系不大, 这与前人发现该东亚冬季风的年代际变化主要与大气内部动力因子有关是一致的。1999~2012 年的强冬季风时期, 东亚的温度异常表现为北冷南暖的分布, 这种异常主要受到外部强迫因子的影响。北大西洋异常的暖海温会激发一个向下游传播的大气波列, 在 500 hPa 位势高度场上表现为一个从大西洋沿欧亚大陆东传的波列, 该波列传播到东亚地区后会增强西伯利亚高压, 使得东亚冬季风加强, 我国北方地区温度下降。同时, 秋冬季北极海冰异常偏少和秋季欧亚雪盖偏多对东亚冬季风的增强也有一定的作用。另一方面, 热带西太平洋的暖海温异常会导致在海洋性大陆地区有异常的辐合和对流增强, 引起大气环流的 Gill 型响应, 对流西侧的异常气旋在孟加拉湾至我国西南地区出现南风异常, 使得东亚南部地区温度偏高。

事实上, 也有研究认为 20 世纪 80 年代 EAWM 年代际跃变可能与欧亚大陆上积雪异常有关 (Wang et al., 2009; Wu et al., 2009), 但冬春季积雪也可能是冬季风异常的结果, 因此确切的因果关系仍需要后续的研究。此外, 一些研究发现冬春季北极海冰和欧亚大陆积雪的年代际变化也会对后期夏季欧亚大陆大气环流、东亚夏季降水等产生影响 (Wu et al., 2009, 2013b), 而东亚冬、夏季风存在一定的联系 (Chen et al., 2013b)。因此, 有必要开展东亚冬、夏季风在年代际变化上的关系及其与外强迫年代际变化的联系。

应该强调的是, 本文只是对 20 世纪 90 年代末发生的 EAWM 年代际跃变的外部强迫因子做了分析并与 20 世纪 80 年代 EAWM 年代际跃变进行了对比讨论, 其得到的结果还比较初步。海温、海冰及雪盖异常作为外强迫影响东亚冬季风的过程以及它们之间的联系和相对重要性都还需要进一步利用更多资料并采用气候系统模式来深入研究和验证。

参考文献 (References)

Barnett T P, Dümenil L, Schlese U. 1989. The effect of Eurasian snow cover on regional and global climate variations [J]. *J. Atmos. Sci.*, 46 (5):

- 661–686, doi: 10.1175/1520-0469(1989)046<0661:TEOESC>2.0.CO;2.
- 蔡榕硕, 陈际龙, 谭红建. 2011. 全球变暖背景下中国近海表层海温变异及其与东亚季风的关系 [J]. *气候与环境研究*, 16 (1): 94–104. Cai Rongshuo, Chen Jilong, Tan Hongjian. 2011. Variations of the sea surface temperature in the offshore area of China and their relationship with the East Asian monsoon under the global warming [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 16 (1): 94–104.
- Chan J C L, Li C. 2004. The East Asia winter monsoon [M]// Chang C P. *East Asian Monsoon*. Singapore: World Scientific Publishing Company, 54–106.
- Chang C P, Wang Z, Hendon H. 2006. The Asian winter monsoon [M]// Wang B. *The Asian Monsoon*. Heidelberg: Springer, 89–127.
- Chen W, Graf H F, Huang R F. 2000. The interannual variability of East Asian winter monsoon and its relation to the summer monsoon [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 17 (1): 48–60, doi: 10.1007/s00376-000-0042-5.
- Chen W, Lan X Q, Wang L, et al. 2013a. The combined effects of the ENSO and the Arctic Oscillation on the winter climate anomalies in East Asia [J]. *Chinese Science Bulletin*, 58 (12): 1355–1362, doi: 10.1007/s11434-012-5654-5.
- Chen W, Feng J, Wu R G. 2013b. Roles of ENSO and PDO in the link of the East Asian winter monsoon to the following summer monsoon [J]. *J. Climate*, 26 (2): 622–635, doi: 10.1175/JCLI-D-12-00021.1.
- 陈文, 魏科, 王林, 等. 2013. 东亚冬季风气候变异和机理以及平流层过程的影响 [J]. *大气科学*, 37 (2): 425–438. Chen Wen, Wei Ke, Wang Lin, et al. 2013. Climate variability and mechanisms of the East Asian winter monsoon and the impact from the stratosphere [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 37 (2): 425–438, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12309.
- Chu P L, Wang J B. 1997. Recent climate change in the tropical western Pacific and Indian Ocean regions as detected by outgoing longwave radiation records [J]. *J. Climate*, 10(4): 636–646, doi: 10.1175/1520-0442(1997)010<0636:RCCITT>2.0.CO;2.
- Cohen J, Rind D. 1991. The effect of snow cover on the climate [J]. *J. Climate*, 4 (7): 689–706, doi: 10.1175/1520-0442(1991)004<0689:TEOSCO>2.0.CO;2.
- Cohen J, Entekhabi D. 1999. Eurasian snow cover variability and Northern Hemisphere climate predictability [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 26 (3): 345–348, doi: 10.1029/1998GL900321.
- Cohen J, Jones J, Furtado J C, et al. 2013. Warm Arctic, cold continents: A common pattern related to Arctic sea ice melt, snowadvance, and extreme winter weather [J]. *Oceanography*, 26 (4): 150–160, doi: 10.5670/oceanog.2013.70.
- Deser C, Tomas R A, Peng S L. 2007. The transient atmospheric circulation response to north Atlantic SST and sea ice anomalies [J]. *J. Climate*, 20 (18): 4751–4767, doi: 10.1175/JCLI4278.1.
- 丁一汇, 柳艳菊, 梁苏洁, 等. 2014. 东亚冬季风的年代际变化及其与全球气候变化的可能联系 [J]. *气象学报*, 72 (5): 835–852. Ding Yihui, Liu Yanju, Liang Sujie, et al. 2014. Interdecadal variability of the East Asian winter monsoon and its possible links to global climate change [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 72 (5): 835–852.
- Francis J A, Chan W H, Leathers D J, et al. 2009. Winter Northern

- Hemisphere weather patterns remember summer Arctic sea-ice extent [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 36: L07503, doi:10.1029/2009GL037274.
- Gill A E. 1980. Some simple solutions for heat-induced tropical circulation [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 106 (449): 447–462, doi: 10.1002/qj.49710644905.
- Hahn D G, Shukla J. 1976. An apparent relationship between Eurasian snow cover and Indian monsoon rainfall [J]. *J. Atmos. Sci.*, 33 (12): 2461–2462, doi: 10.1175/1520-0469(1976)033<2461:AARBES>2.0.CO;2.
- Handorf D, Jaiser R, Dethloff K, et al. 2015. Impacts of Arctic sea ice and continental snow-cover changes on atmospheric winter teleconnections [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 42 (7): 2367–2377, doi: 10.1002/2015GL063203.
- Honda M, Inous J, Yamane S. 2009. Influence of low Arctic sea-ice minima on anomalously cold Eurasian winters [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 36 (8): L08707, doi: 10.1029/2008GL037079.
- 黄荣辉, 刘永, 冯涛. 2013. 20 世纪 90 年代末中国东部夏季降水和环流的年代际变化特征及其内动力成因 [J]. *科学通报*, 58 (8): 617–628.
- Huang Ronghui, Liu Yong, Feng Tao. 2013. Interdecadal change of summer precipitation over eastern China around the late-1990s and associated circulation anomalies, internal dynamical causes [J]. *Chinese Science Bulletin*, 58 (12): 1339–1349, doi: 10.1007/s11434-012-5545-9.
- Huang R H, Chen J L, Wang L, et al. 2012. Characteristics, processes, and causes of the spatio-temporal variabilities of the East Asian monsoon system [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 29 (5): 910–942, doi: 10.1007/s00376-012-2015-x.
- 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 Ronghui, Liu Yong, Huangfu Jingliang, et al. 2014. Characteristics and internal dynamical causes of the interdecadal variability of East Asian winter monsoon near the late 1990s [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 38 (4): 627–644.
- Inoue J, Hori M E, Takaya K. 2012. The role of Barents Sea ice in the wintertime cyclone track and emergence of a warm-Arctic cold-Siberian anomaly [J]. *J. Climate*, 25 (7): 2561–2568, doi: 10.1175/JCLI-D-11-00449.1.
- Jhun J G, Lee E J. 2004. A new East Asian winter monsoon index and associated characteristics of the winter monsoon [J]. *J. Climate*, 17 (4): 711–726, doi: 10.1175/1520-0442(2004)017<0711:ANEAWM>2.0.CO;2.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77 (3): 437–471, doi: 10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2.
- 康丽华, 陈文, 魏科. 2006. 我国冬季气温年代际变化及其与大气环流异常变化的关系 [J]. *气候与环境研究*, 11 (3): 330–339.
- Kang Lihua, Chen Wen, Wei Ke. 2006. The interdecadal variation of winter temperature in China and its relation to the anomalies in atmospheric general circulation [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 11 (3): 330–339.
- Khandekar M L. 1991. Eurasian snow cover, Indian monsoon and El Niño/Southern Oscillation: A synthesis [J]. *Atmosphere-Ocean*, 29 (4): 636–647, doi: 10.1080/07055900.1991.9649422.
- Liebmann B, Smith C A. 1996. Description of a complete (interpolated) outgoing longwave radiation dataset [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77: 1275–1277.
- Meeh G A. 1994. Influence of land surface in the Asia summer monsoon: External conditions versus internal feedbacks [J]. *J. Climate*, 7 (7): 1033–1049, doi: 10.1175/1520-0442(1994)007<1033:IOTLSI>2.0.CO;2.
- Petoukhov V, Semenov V A. 2010. A link between reduced Barents-Kara sea ice and cold winter extremes over northern continents [J]. *J. Geophys. Res.*, 115: D21111, doi: 10.1029/2009JD013568.
- Prasad K, Bansod S D. 2000. Interannual variations of outgoing longwave radiation and Indian summer monsoon rainfall [J]. *International Journal of Climatology*, 20 (15): 1955–1964, doi: 10.1002/1097-0088(200012)20:15<1955::AID-JOC589>3.0.CO;2-W.
- Rayner N A, Parker D E, Horton E B, et al. 2003. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century [J]. *J. Geophys. Res.*, 108, doi: 10.1029/2002JD002670.
- Squires M F, Lawrimore J H, Heim R R Jr, et al. 2014. The regional snowfall index [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 95 (12): 1835–1848, doi: 10.1175/BAMS-D-13-00101.1.
- Takaya K, Nakamura H. 1997. A formulation of a wave-activity flux for stationary Rossby waves on a zonally varying basic flow [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 24 (23): 2985–2988, doi: 10.1029/97GL03094.
- Takaya K, Nakamura H. 2001. A formulation of a phase-independent wave-activity flux for stationary and migratory quasigeostrophic eddies on a zonally varying basic flow [J]. *J. Atmos. Sci.*, 58 (6): 608–627, doi: 10.1175/1520-0469(2001)058<0608:AFOAPI>2.0.CO;2.
- Tan B K, Chen W. 2014. Progress in the study of the dynamics of extratropical atmospheric teleconnection patterns and their impacts on East Asian climate [J]. *Journal of Meteorological Research*, 28 (5): 780–802, doi: 10.1007/s13351-014-4041-3.
- 王会军, 姜大膀. 2004. 一个新的东亚冬季风强度指数及其强弱变化之大气环流场差异 [J]. *第四纪研究*, 24 (1): 19–27.
- Wang Huijun, Jiang Dabang. 2004. A new east Asian winter monsoon intensity index and atmospheric circulation comparison between strong and weak composite [J]. *Quaternary Sciences (in Chinese)*, 24 (1): 19–27.
- Wang L, Chen W. 2010. How well do existing indices measure the strength of the East Asian winter monsoon? [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 27 (4): 855–870, doi: 10.1007/s00376-009-9094-3.
- Wang L, Chen W. 2014. The East Asian winter monsoon: Re-amplification in the mid-2000s [J]. *Chinese Science Bulletin*, 59 (4): 430–436, doi: 10.1007/s11434-013-0029-0.
- Wang L, Chen W, Huang R H. 2007. Changes in the variability of North Pacific Oscillation around 1975/1976 and its relationship with East Asian winter climate [J]. *J. Geophys. Res.*, 112 (D11): D11110, doi: 10.1029/2006JD008054.
- Wang L, Huang R H, Gu L, et al. 2009. Interdecadal variations of the East Asian winter monsoon and their association with quasi-stationary planetary wave activity [J]. *J. Climate*, 22 (18): 4860–4872, doi: 10.1175/2009JCLI2973.1.
- 魏凤英. 2007. 现代气候统计诊断与预测技术 [M]. 北京: 气象出版社, 32–33.
- Wei Fengying. 2007. *Modern Climatic Statistical Diagnosis and Forecasting Technology (in Chinese)* [M]. Beijing: China Meteorological Press, 32–33.
- Wei K, Chen W, Zhou W. 2011. Changes in the East Asian cold season since

- 2000 [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 28 (1): 69–79, doi: 10.1007/s00376-010-9232-y.
- 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 Meteorologica Sinica*, 13 (2): 141–153.
- 武炳义, 卞林根, 张人禾. 2004. 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*, 16 (3): 211–220. Wu Bingyi, Bian Lin'gen, Zhang Renhe. 2004. Effects of the winter AO and the Arctic sea ice variations on climate variation over East Asia [J]. *Chinese Journal of Polar Research (in Chinese)*, 16 (3): 211–220.
- Wu B Y, Yang K, Zhang R H. 2009. Eurasian snow cover variability and its association with summer rainfall in China [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 26 (1): 31–44, doi: 10.1007/s00376-009-0031-2.
- Wu B Y, Su J Z, Zhang R H. 2011. Effects of autumn-winter Arctic sea ice on winter Siberian High [J]. *Chinese Science Bulletin*, 56 (30): 3220–3228, doi: 10.1007/s11434-011-4696-4.
- Wu B Y, Overland J E, D'Arrigo R. 2012. Anomalous Arctic surface wind patterns and their impacts on September sea ice minima and trend [J]. *Tellus A*, 64: 18590, doi: 10.3402/tellusa.v64i0.18590.
- Wu B Y, Handorf D, Dethloff K, et al. 2013a. Winter weather patterns over Northern Eurasia and Arctic sea ice loss [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 141 (11): 3786–3800, doi: 10.1175/MWR-D-13-00046.1.
- Wu B Y, Zhang R H, D'Arrigo R, et al. 2013b. On the relationship between winter sea ice and summer atmospheric circulation over Eurasia [J]. *J. Climate*, 26 (15): 5523–5536, doi: 10.1175/JCLI-D-12-00524.1.
- Yang L N, Wu B Y. 2013. Interdecadal variations of the East Asian winter surface air temperature and possible causes [J]. *Chinese Science Bulletin*, 58 (32): 3969–3977, doi: 10.1007/s11434-013-5911-2.
- Ye K H, Wu R G, Liu Y. 2015. Interdecadal change of Eurasian snow, surface temperature, and atmospheric circulation in the late 1980s [J]. *J. Geophys. Res.*, 120 (7): 2738–2753, doi: 10.1002/2015JD023148.
- 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: 283–293, doi: 10.1007/s00703-007-0263-6.