

孙淑清, 刘舸, 宋文玲, 等. 2014. 中国东部冬季温度异常偶极型模态的一个前兆信号 [J]. 大气科学, 38 (4): 727–741, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.13211. Sun Shuqing, Liu Ge, Song Wenling, et al. 2014. A precursory signal for the dipole mode of winter temperature anomaly over eastern China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (4): 727–741.

中国东部冬季温度异常偶极型模态的一个前兆信号

孙淑清¹ 刘舸² 宋文玲³ 彭京备¹

¹ 中国科学院大气物理研究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

² 中国气象科学研究院, 北京 100081

³ 国家气候中心, 北京 100081

摘 要 利用中国 160 站逐月温度、NCEP 再分析、NOAA-CIRES 20 世纪再分析以及 NOAA 海表温度等资料, 分析了中国东部 (100°E 以东地区) 冬季温度年际变化的主要模态, 并重点研究了其中第 2 模态 (即偶极型模态) 的成因机理和前期信号。同时, 也以 2012~2013 年冬季为例, 探讨了这一温度异常模态的预测方法。研究主要发现: 除中国东部大范围一致偏冷或偏暖模态以外, 110°E 以东的北方地区偏冷 (暖) 还经常对应着华南和 110°E 以西地区的偏暖 (冷), 构成温度异常反向变化的偶极型模态。这种偶极型模态也是冬季气候变化的一个主要模态, 2012~2013 年冬季温度异常即属于这一模态。中国东部冬季温度一致型模态主要与前期秋季中东太平洋海温异常、亚洲大陆北部积雪, 及其邻近的北冰洋地区海冰密集度异常联系紧密。而对于偶极型模态, 海温的影响并不明显, 前期秋季的东亚中纬度地区积雪、北冰洋斯瓦尔巴群岛、法兰士约瑟夫地群岛附近海域的海冰密集度异常, 以及它们引起的表面温度异常分布可能具有重要贡献, 其中北冰洋海冰密集度异常导致的该地区表面温度异常的影响可能更为重要。综合了海冰和积雪信号的前期秋季北冰洋—东亚温度差异 (Arctic Ocean–East Asian temperature contrast, 简称 AE) 指数与中国东部冬季温度异常偶极型模态具有显著联系, 可以作为一个重要的预测因子。2012 年秋季赤道中东太平洋海温的正常状态以及北冰洋暖异常和东亚中纬度地区冷异常的表面温度分布特征, 都不利于中国东部冬季温度南北一致型异常的发生, 而是有利于偶极型异常分布。利用 AE 指数可以有效地预测 2012~2013 年中国东部冬季温度异常特征。

关键词 冬季温度 冬季风 海冰 积雪 预测

文章编号 1006–9895(2014)04–0727–15

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.13211

A Precursory Signal for the Dipole Mode of Winter Temperature Anomaly over Eastern China

SUN Shuqing¹, LIU Ge², SONG Wenling³, and PENG Jingbei¹

¹ State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

² Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

³ National Climate Center, Beijing 100081

Abstract In this study, the dominant modes of winter temperature over eastern China (to the east of 100°E) are

收稿日期 2013–07–11, 2013–12–28 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金项目 412714342、41375089, 十二五国家科技支撑计划项目 2012BAH32B03, 中国气象科学研究院基本科研业务费专项 2013Z002

作者简介 孙淑清, 女, 1936 年出生, 研究员, 主要从事天气动力学研究。E-mail: ssq@lasg.iap.ac.cn

通讯作者 刘舸, E-mail: liuge@cma.gov.cn

analyzed using the monthly temperature data recorded at 160 stations in China, National Centers for Environmental Prediction (NCEP) reanalysis data, National Oceanic and Atmospheric Administration–Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences (NOAA–CIRES) 20th century reanalysis data, and NOAA Sea Surface Temperature (SST) data. The formation mechanism and precursory signals for the second (dipole) mode are primarily studied. Moreover, the prediction method for the second mode is explored by using the winter of 2012–2013 as an example. The results indicate that in addition to the unanimously colder or warmer first mode, the dipole mode, which is characterized as a colder (warmer) region over northern China and to the east of 110°E accompanied by a warmer (colder) region over southern China and to the west of 110°E, is also a main mode dominating the region over eastern China. The winter of 2012–2013 belongs to the second mode. The first mode is related mainly to the SST anomalies in the tropical eastern and central Pacific, the snow cover anomalies over the northern Asian continent, and the sea ice concentration anomalies in the Arctic Ocean along northern Asia during the previous autumn. For the second (dipole) mode, the SST anomalies have no clear influence; however the snow cover anomalies over the middle latitudes over East Asia, the sea ice concentration anomalies from the Svalbard archipelago to the Franz Josef Land archipelago of the Arctic Ocean during the previous autumn, and the surface air temperature pattern of the Arctic Ocean–East Asian temperature contrast caused by the aforementioned snow cover and sea ice anomalies seem to be important. The previous autumn Arctic Ocean–East Asian temperature contrast (AE) index, which involves the synthesized signals of snow cover and sea ice concentration, is closely related to the second mode and should be considered as an important predictor. In the autumn of 2012, several previous signals, such as the normal SST state in the equatorial Eastern and central Pacific, the warmer surface air temperature over the Arctic Ocean, and the colder surface air temperature over the middle latitudes of East Asia, are not conducive to the first mode but are favorable for the second (northern-colder–southern-warmer) mode. By using the previous AE index, the anomalous temperature pattern over eastern China in the winter of 2012–2013 can be effectively predicted.

Keywords Winter temperature, East Asian winter monsoon, Sea ice, Snow cover, Prediction

1 引言

东亚冬季风的异常变化及相应的冬季严寒、暴风雪等灾害一直以来都为人们所关注。很多学者从不同的角度探讨了冬季风和相应的东亚冬季气候异常的影响因子和机制(陶诗言和张庆云, 1998; 陈隽和孙淑清, 1999a, 1999b; Wu and Wang, 2002; 据建华等, 2004; 陈文和康丽华, 2006; Li and Bates, 2007; 李双林等, 2009; Wang et al., 2009; 刘实等, 2010)。近年来的一些研究(王会军和贺圣平, 2012; 贺圣平和王会军, 2012; 王会军和范可, 2013)揭示, 在 1980 年代中期以后东亚冬季风在年代际特征和年际变率等方面都出现了明显变化, 这更促使人们利用较新的资料对冬季风及我国冬季气候进一步研究。

以寒潮爆发为主要特征的东亚冬季风活动, 往往会导致我国大范围的低温异常。相应地, 中国大陆冬季一致偏冷或偏暖成为冬季气候变化的最主要模态(朱艳峰等, 2007; 朱艳峰, 2008)。因此, 一般情况下通过预测东亚冬季风的强弱即可大体上判断中国冬季温度异常状况。利用前期海温、积雪、海冰等异常信号预测冬季风的研究有很多(陈

海山等, 2002a, 2002b; 管成功和孙照渤, 2002; 李忠贤和孙照渤, 2004; 刘实等, 2010; 武炳义等, 2011; 刘舸等, 2013a), 这里不一一赘述。然而需要指出的是, 在很多年份冬季温度异常分布并不表现为中国东部大陆整体一致型。例如, 2012~2013 年中国东部冬季(2012 年 12 月~2013 年 2 月)温度异常就出现了北方偏冷而华南和 110°E 以西地区偏暖的结构(图 1)。显然, 这种特殊的温度异常分布增加了预测难度。而且, 针对这种温度异常分布型的预测研究较少, 其形成机制和前期信号值得深入探讨。作为一个典型个例, 2012~2013 年中国东部冬季温度异常的原因也需进一步分析。

一些研究发现, 东亚冬季风活动存在不同的模态或纬带差异。郭其蕴(1994)指出, 反映冬季风强度的西伯利亚高压变化与反映冬季风向南扩展程度的海陆热力差异存在不一致的现象。有些年份西伯利亚高压虽然偏强, 但冷空气向南扩展并不明显。这实际上就是冬季风纬带差异的一种体现。Wu et al. (2006) 通过 850 hPa 风场的 Hermite 矩阵分解也发现东亚冬季风具有不同模态。利用经验正交函数分解(Empirical orthogonal function, 简称 EOF)方法也可清楚地发现, 东亚低纬和中高纬的偏北风

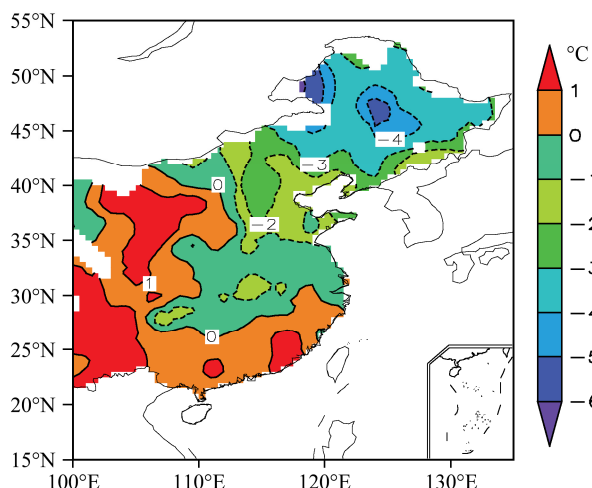


图1 2012~2013年冬季温度距平(单位: °C)

Fig. 1 Temperature anomaly in the winter of 2012~2013 (unit: °C)

异常除了有一致性变化的模态外, 还存在着反向变化的模态, 且这种反向变化经常发生 (Liu et al., 2012; 刘舸等, 2013b)。上述冬季风的模态差别或纬带差异实际上暗示了强冷空气不总能影响到东亚低纬度地区, 这为中国冬季温度异常南北不一致的分布 (如 2012~2013 年冬季, 见图 1) 提供了间接支持。

康丽华等 (2006, 2009) 直接从温度异常的角度分析了我国冬季气候的时空变化特征, 指出我国冬季气温主要表现为全国一致变化型和南北反向变化型两种空间模态。Wang et al. (2010) 进一步从更大的空间尺度提出了东亚季风区冬季温度分布的两类模态 (北方型模态和南方型模态), 其中北方型指冷空气不能影响到低纬度地区, 其影响范围偏北的模态, 而南方型指冷空气影响范围可达南方低纬地区的模态。另外, Wang et al. (2010) 还进一步从海温和积雪异常等角度考察了分别影响这两种模态的前期信号。最近, 陈文等 (2013) 的研究也揭示出了东亚冬季气温变化的两种模态, 并重点探讨了南北反向变化模态与平流层极涡强度的联系。

在上述研究的基础上, 本文将分析中国东部冬季温度年际变化的主要模态, 重点探索中国东部地区冬季温度异常第 2 模态的成因机理和前期信号, 并与 Wang et al. (2010) 的结果进行比较, 在其基础上提出新的前期因子。最后, 以 2012~2013 年冬季为例探讨中国冬季温度第 2 模态型异常的预测方法, 以期为中国冬季温度的短期气候预测提供一定参考。

2 资料与方法

本文所用的资料有: 1981~2013 年中国 160 站的逐月温度资料, 该资料下载自国家气候中心网站 (<http://ncc.cma.gov.cn>), 是预测业务中常用的资料; 美国国家环境预报中心 (National Centers for Environmental Prediction, 简称 NCEP) 的再分析大气环流资料, 包括 1981~2013 年的月平均温度、位势高度和 u 、 v 矢量风场等, 其水平分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ (Kalnay et al., 1996); NCEP 再分析产品表面通量 (CDC Derived NCEP Reanalysis Products Surface Flux) 的逐月表面温度和海冰密集度资料, 其分辨率为 192×94 高斯格点 (Kalnay et al., 1996); 美国国家海洋大气局和科罗拉多大学环境科学合作研究所 (NOAA-CIRES) 的 20 世纪再分析积雪资料, 其分辨率为 192×94 高斯格点 (Compo et al., 2011); 美国国家海洋和大气局 (NOAA) 气候诊断中心的 SST 扩展重建资料 (NOAA Extended Reconstructed Sea Surface Temperature V2), 其水平分辨率为 $2^\circ \times 2^\circ$ (Smith et al., 2004); NOAA 气候预测中心 (Climate Prediction Center, CPC) 的 1981~2010 年的逐月北极涛动 (Arctic Oscillation, AO) 指数。根据世界气象组织的规定, 一般选取最近 3 个年代的平均值作为当前的气候平均状况, 目前国家气候中心等业务单位已经将 1981~2010 年平均作为新的气候平均值标准。因此这里采用 1981 年以来的最新资料, 这也避免了 1970 年代 NCEP 再分析资料在东亚地区的虚假年代际变化问题 (Wu et al., 2005; 黄刚, 2006)。在本文中, 冬季指当年 12 月至次年 2 月的平均。

为了考察各种影响因子的独立作用, 本文采用偏相关 (Partial correlation) 方法进行分析。偏相关公式 (Zar, 1998; Wu and Kirtman, 2007) 为

$$r_{12.3} = \frac{r_{12} - r_{13}r_{23}}{\sqrt{(1-r_{13}^2)(1-r_{23}^2)}}, \quad (1)$$

其中 r_{ij} 指 i 和 j 的相关。该公式在数学上给出了去除 3 的影响之后的 1 与 2 的相关关系。此外, 本文所用方法还包括 EOF 分析、相关和回归分析等。

3 中国冬季温度的主要模态及其环流特征

尽管不同地区的线性上升趋势存在差异, 但中国大部分地区气温都表现出较为明显的增暖特征

(李庆祥等, 2010; 周国华等, 2011)。因此, 为了考察冬季温度年际变化特征, 我们首先将中国东部 (100°E 以东) 139 站的冬季温度去除线性趋势, 然后再对其标准化值进行 EOF 分析 (图 2)。

如图 2a 所示, 第 1 模态表现为中国东部一致的偏冷或偏暖。这一模态占了总解释方差的 60%, 是中国东部冬季温度变化的最主要模态。由于该结果是在去除线性趋势的基础上得到的, 因此图 2a 说明这一模态并不是由中国大部分地区温度一致性增暖趋势造成的, 中国东部冬季温度年际尺度变化本身就以此种一致性变化为主。中国东部冬季温度的第 2 模态则显示出不一致的变化特征 (图 2b)。具体来说, 在 110°E 以东、 27°E 以北偏冷 (暖), 华南以及 110°E 以西地区则偏暖 (冷)。为方便, 这里将这种“正—负”对比结构定义为“偶极型”模态。实际上, 这一模态与康丽华等 (2009) 利用 1951~2000 年得到的全国范围冬季温度异常的第 2 模态在 100°E 以东的体现基本相同。比较发现, 2012~2013 年冬季出现的温度异常结构 (图 1) 与图 2b 较为一致, 可见 2012~2013 年冬季温度异常并不是一种特例, 而是属于第 2 模态。该模态占总解释方差的 18%, 具有一定的普遍性, 因此值得深入研究相关的成因机理和前期信号。

从更大的空间尺度上看, 上述两个模态所反映的冬季温度变化不仅局限于中国东部。图 3 给出了第 1 和第 2 模态对应的主成分 (Principal component, 分别称为 PC1 和 PC2) 时间序列与亚洲区冬季温度的相关 (如无特殊说明, 下文中的各个物理量都经去线性趋势处理)。由图 3a 可见, 第 1 模态反映了亚洲大陆 60°N 以南地区一致性的冬季温度变化, 它

覆盖了中国大部分地区。而第 2 模态则表现为亚洲大陆 40°N 以南和以北反向变化的特征 (图 3b)。其中在中国东部反向变化的分界线更为偏南 (在 30°N 附近)。图 3 所示的第 1 和第 2 模态对应的亚洲大陆温度变化特征分别与 Wang et al. (2010) 给出的“南方型”和“北方型”模态较为相似。可见在去除线性趋势后的年际变化尺度上, 这两种模态仍然是亚洲冬季温度变化的最主要模态。同时也说明, 中国东部冬季温度变化的主要模态并不是局地性的, 而是亚洲大陆冬季温度年际变化在中国东部的一种体现。因此, 下面我们从更大的空间尺度分析两模态对应的环流特征。

PC1 序列与冬季 500 hPa 位势高度场的相关 (图 4a) 显示, 在亚洲 50°N 以北地区为显著正相关, 而在 50°N 以南地区为显著负相关。其中, 在中国东部沿海地区, 显著负相关更为向南扩展, 直至南海和西太平洋地区。在气候平均的 500 hPa 位势高度场上, 东亚大槽从鄂霍次克海向西南倾斜至中国东部沿海地区 (图略)。因此, 自中国东部向南扩展至南海及西太平洋的显著负相关 (图 4a) 表明, 当中国东部冬季温度异常表现为正第 1 模态型 (即南北一致偏冷) 时, 对应着东亚大槽加深偏南。相应地, 东亚地区显著偏北风异常从中高纬一直扩展到低纬南海地区, 异常偏北风的南界达 10°N 附近 (图 4b)。这将有利于冷空气南下, 从而导致中国东部大范围一致性的降温 (也即图 2a 所示的第 1 模态特征)。反之, 当中国东部冬季温度异常表现为负第 1 模态型 (即南北一致偏暖) 时, 上述环流异常则相反。

对于第 2 模态, PC2 序列与冬季 500 hPa 位势

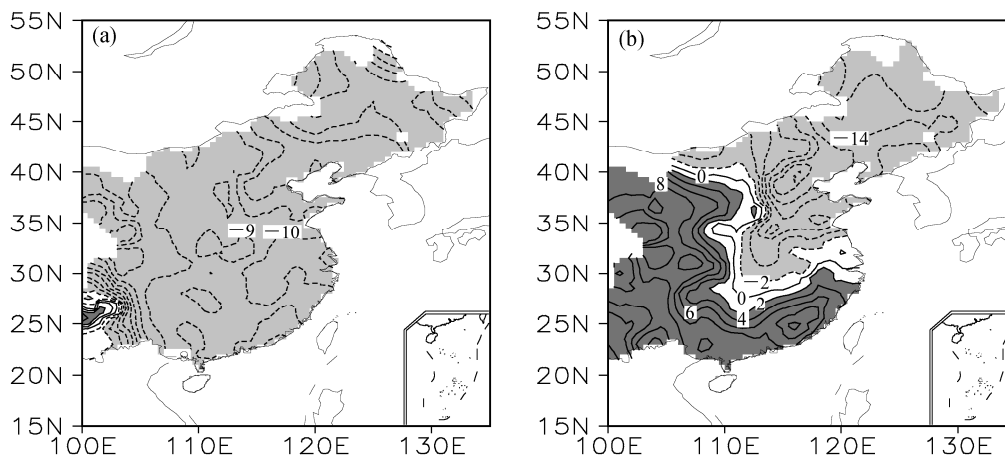


图 2 1981~2012 年标准化的冬季温度的 EOF 分解 ($\times 100$): (a) 第 1 模态; (b) 第 2 模态。阴影区绝对值超过 0.02

Fig. 2 The (a) first and (b) second EOF modes for 1981–2012 normalized winter temperature ($\times 100$). The shaded areas denote the absolute values over 0.02

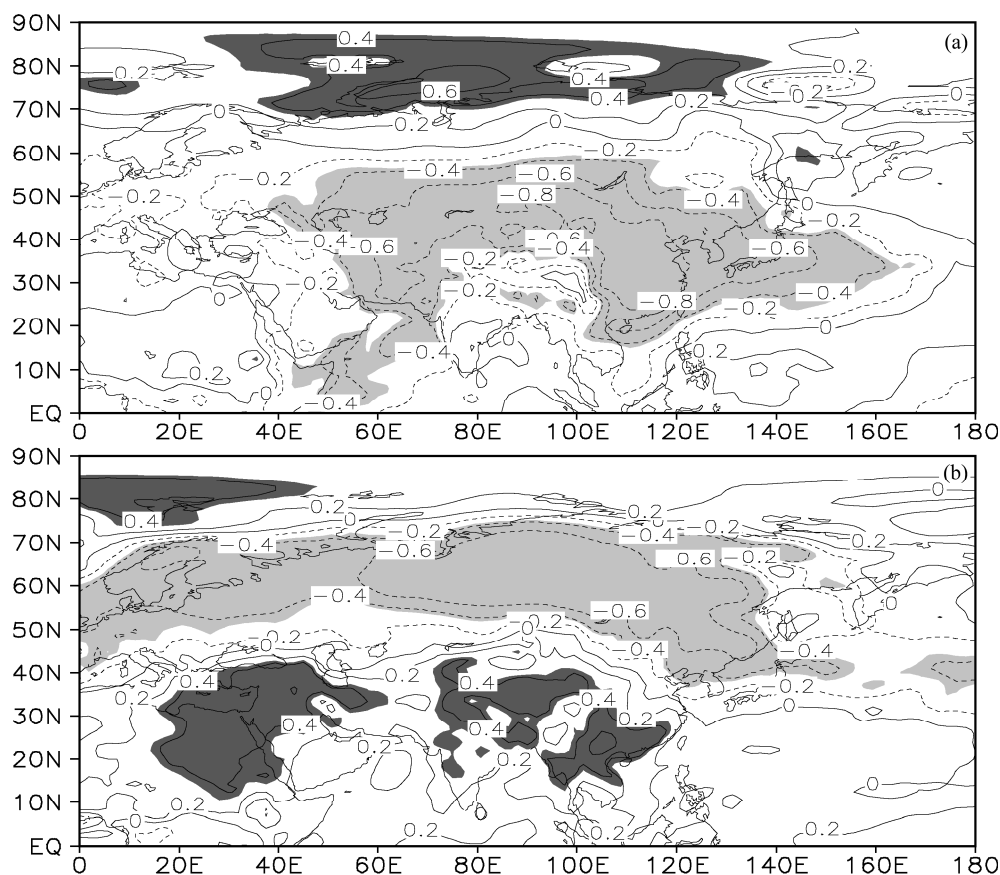


图3 1981~2011年标准化的冬季温度的EOF (a)第1模态和(b)第2模态的主成分时间序列与冬季温度的相关, 阴影区超过95%统计置信度

Fig. 3 Correlations of winter temperature with the principal components (PCs) of the (a) first and (b) second EOF modes for 1981–2011 normalized winter temperature (PC1 and PC2), the correlation coefficients over the 95% confidence level are shaded

高度场的相关(图5a)显示,从北极经贝加尔湖到亚洲30°N附近,出现了“正—负—正”型显著相关。其中,中高纬地区的正—负异常纬带结构与AO结构较为一致,因此我们进一步研究了冬季AO与中国东部冬季温度的关系(图略)。分析发现,AO可以较好地反应第2模态(偶极型)的温度分布特征(图略),1981~2010年冬季AO指数与PC2序列的相关系数为 -0.56 ,超过99.9%统计置信度。这进一步支持了康丽华等(2009)利用1951~2000年资料得到的结果。另外,从图5a可见,贝加尔湖地区表现为显著负相关,这说明当中国东部冬季温度异常表现为正第2模态型(即北冷南暖)时,对应着东亚大槽偏西,这有利于冷空气由西北路径自中西伯利亚向中国北方地区爆发;而在110°E以东沿海地区则没有表现偏北风异常,异常偏北风的南界仅达50°N附近,冷空气的影响不能达到华南地区,从而造成了中国东部出现北冷南暖的第2模态特征(图5b)。反之,当中国东部冬季温度异常

表现为负第2模态型(即北暖南冷)时,上述环流异常则相反。

需要指出的是,中国东部温度异常特征与异常偏北风向南扩展的南界有关,但并不是与之完全吻合的。我们计算了1981~2012年区域(50°~70°N, 110°~130°E)平均的 v 风与冬季温度的相关(图6a)。可以看到,尽管区域平均的南界为50°N,显著正相关的范围则扩展到了27°N以北,也即当东亚50°N以北地区出现偏北风异常偏强时,导致的降温可以影响到27°N以北地区,但对华南地区的影响则不十分显著,这种相关分布特征与第2模态(偶极型)基本一致。而对于异常偏北风南界达到10°N附近的情况,区域(10°~50°N, 110°~130°E)平均的 v 风与冬季气温的相关(图6b)则显示,中国东部表现出整体一致的正相关,说明10°N以北出现异常偏北风时,则会导致中国东部大范围一致的降温,这与第1模态(南北一致型)基本相符。

综上所述,中国东部冬季温度年际变化的两个

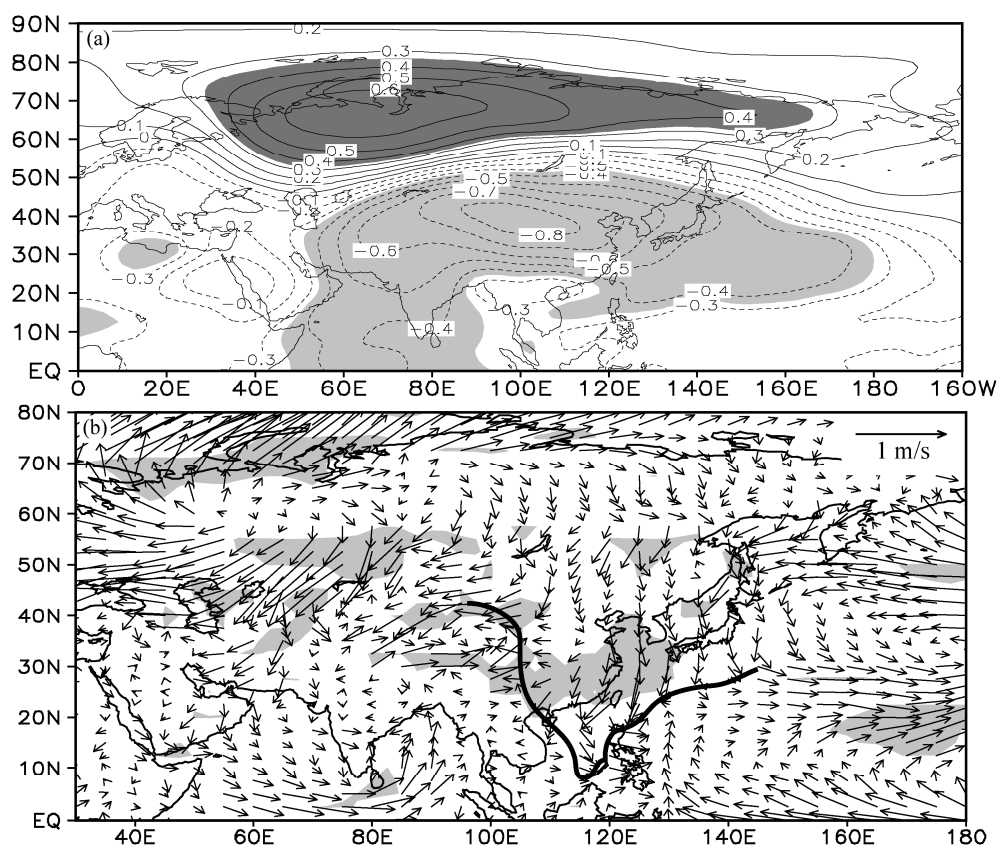


图4 (a) 1981~2011 年 PC1 与冬季 500 hPa 位势高度场的相关; (b) 基于 PC1 回归的表面风场。阴影区超过 95% 统计置信度, 黑色粗线标注了东亚地区异常偏北风影响的南界

Fig. 4 (a) Correlation of winter 500-hPa geopotential height with the PC1 time series during 1981–2011; (b) regressed surface winds against PC. The areas with the values over 95% confidence level are shaded; the black thick line indicates the southern boundary of anomalous northerly winds over East Asia

最主要类型为南北一致型(第 1 模态)和偶极型(第 2 模态)。影响这两种类型的大气环流异常具有明显的差别。其中, 东亚大槽强度和位置的异常造成的冷空气路径和影响范围的差异是导致中国东部冬季温度出现上述两种类型的重要原因。此外, 冬季 AO 与第 2 模态也具有显著联系, 也是影响偶极型温度异常的重要环流系统。

4 前期信号

海温、积雪和海冰等下垫面异常往往具有持续性, 其相应的海—陆—气耦合系统经常表现出“慢变”特征, 是短期气候预测的重要基础。因此, 本文主要从海温、积雪、海冰及其相应的表面温度异常等方面分析中国东部冬季温度年际变化主要模态的前兆信号。

首先从海温异常来看, PC1 序列与前期秋季以及同期冬季 SST 的相关结果(图略)都显示, 赤道中东太平洋出现了显著负相关。这表明前期秋季中

东太平洋海温冷异常(即 La Niña 型海温异常)可持续到冬季, 进而造成中国东部南北一致的大范围低温。反之, 当前秋中东太平洋海温出现暖异常(即 El Niño 型海温异常)时, 将会导致中国东部南北一致偏暖。陶诗言和张庆云(1998)指出, La Niña (El Niño) 型海温异常可导致亚洲上空环流型有(不)利于寒潮向南方爆发, 从海温异常的角度解释了中国东部一致偏冷(暖)的原因。而对于中国东部冬季温度异常偶极型模态, 则没有明显的前期和同期海温异常信号(图略), 这与 Wang et al. (2010) 得到的结果是一致的。

从积雪异常来看, PC1 序列与前期秋季亚洲 50°N 以北地区的积雪表现出显著负相关(图 7a)。从海冰异常来看, PC1 序列与前期秋季北冰洋东部、亚洲大陆北部邻近海域的海冰密集度表现为显著负相关(图 7b)。上述相关结果表明, 前期秋季亚洲大陆北部及其邻近的北冰洋地区积雪和海冰偏少(多), 对应中国东部南北一致偏冷(暖)的冬

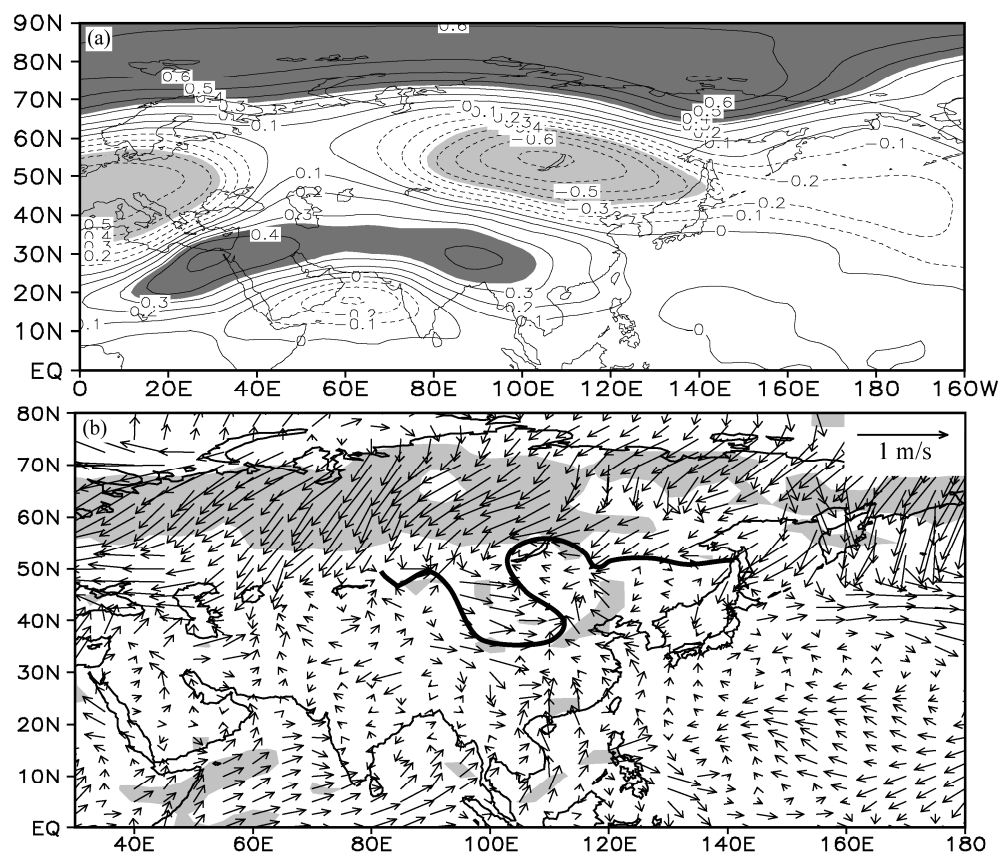
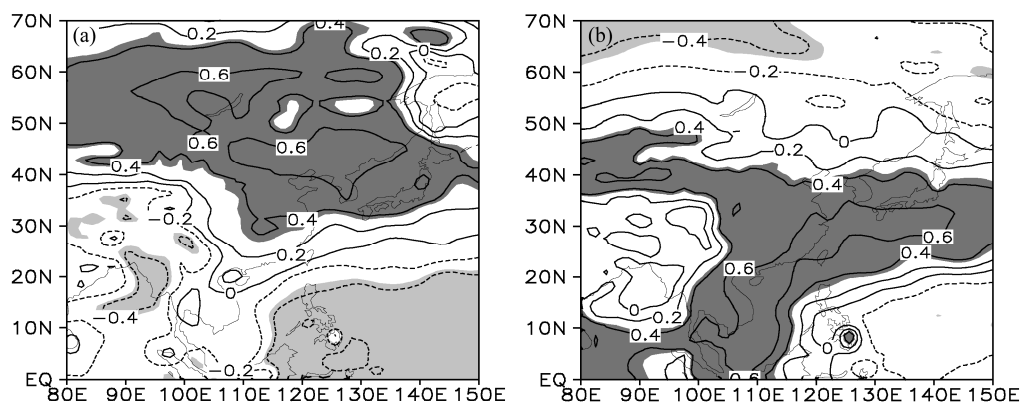


图5 同图4, 但为 PC2 对应的结果

Fig. 5 Same as Fig. 4, but for the PC2 time series

图6 1981~2012 年区域 (a) ($50^{\circ}\sim 70^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\sim 130^{\circ}\text{E}$) 和 (b) ($10^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\sim 130^{\circ}\text{E}$) 平均的冬季 v 风与冬季温度的相关, 阴影区超过 95% 统计置信度Fig. 6 Correlation of winter air temperature with surface v winds averaged over regions (a) ($50^{\circ}\sim 70^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\sim 130^{\circ}\text{E}$) and (b) ($10^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\sim 130^{\circ}\text{E}$) during 1981–2012, the areas with the values over 95% confidence level are shaded

季温度异常。亚洲大陆北部及其邻近的北冰洋地区积雪和海冰偏少(多)一般对应着当地表面温度偏高(低), 因此 PC1 序列与亚洲北部至北冰洋地区大范围的前期秋季表面温度也存在着显著正相关(图 7c)。根据图 7c, 选取亚洲北部 ($60^{\circ}\sim 69^{\circ}\text{N}$, $60^{\circ}\sim 90^{\circ}\text{E}$) 及其邻近的北冰洋地区 ($71^{\circ}\sim 82^{\circ}\text{N}$, $60^{\circ}\sim 150^{\circ}\text{E}$) 区域平均的前期秋季表面温度作为北

亚温度 (North Asian temperature, 简称 NA) 指数, 并与冬季温度场进行相关发现, 该指数的确能很好地反映中国东部南北一致的冬季温度异常(图略)。由于 NA 指数包含了积雪和海冰的共同信息, 因此以之作为中国东部冬季温度异常一致型的前兆信号可能更为合理。本文的研究重点在于中国东部冬季温度异常偶极型模态的前兆信号及其影响机制,

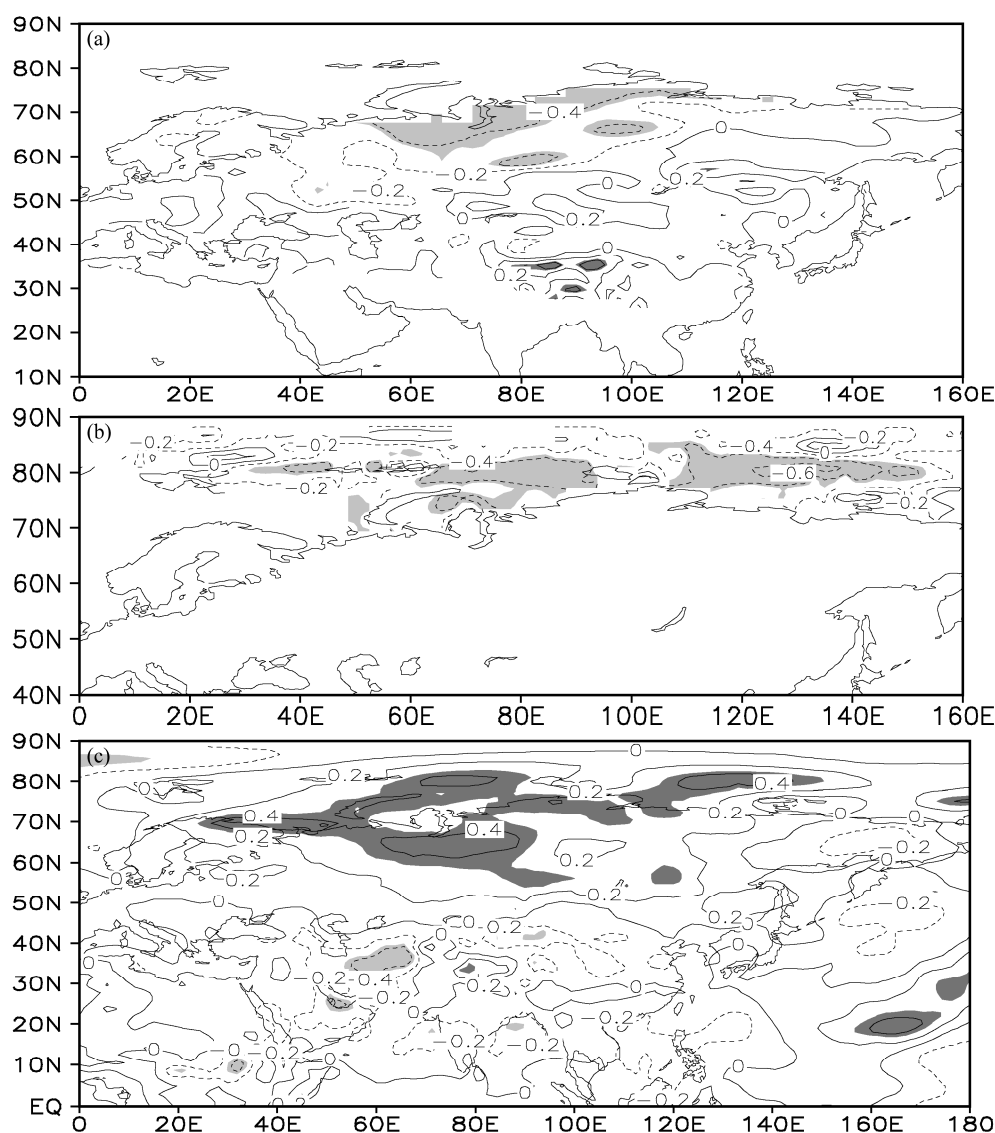


图7 1981~2011年PC1与前期秋季(a)积雪、(b)海冰密集度和(c)表面温度的相关, 阴影区超过95%统计置信度

Fig. 7 Correlations of the PC1 time series with (a) snow cover, (b) sea ice concentration, and (c) surface air temperature in the preceding autumn the period 1981–2011, the areas with the correlation coefficients over 95% confidence level are shaded

因此这里对前期积雪、海冰及其相应的表面温度异常如何影响冬季温度一致型模态的具体过程不做深入探讨。

对于中国东部冬季温度异常偶极型模态(第2模态), 同样分析了前期秋季积雪、海冰和相应的表面温度异常(图8)。中国东部冬季温度异常偶极型模态的前兆信号(图8)与一致型模态的前兆信号(图7)有明显差别: 从积雪上看, 东亚中纬度地区表现为大范围的显著正相关(图8a); 从海冰密集度上看, 北冰洋的显著负相关与图7相比更为偏西, 显著性也相对偏低(图8b); 从表面温度场上看(图8c), 北冰洋斯瓦尔巴群岛、法兰士约瑟

夫地群岛附近海域出现了显著正相关, 这与该地区的海冰密集度负相关相对应, 而在东亚中纬度地区出现了显著负相关, 这与该地区积雪的正相关相对应。对比图8b和8c还可发现, 相对于海冰密集度场, 表面温度场上的相关在北冰洋西部海域更为显著。这一结果暗示, 尽管前期秋季北冰洋斯瓦尔巴群岛、法兰士约瑟夫地群岛附近海域海冰的前兆信号相对偏弱, 但它可通过调节当地的表面温度异常, 进而与偶极型模态紧密联系。同时, 上述结果也表明, 以包含北冰洋海冰和东亚中纬度积雪异常信息的前期秋季表面温度异常作为中国东部冬季温度异常偶极型模态的前兆信号, 可能更为合适。

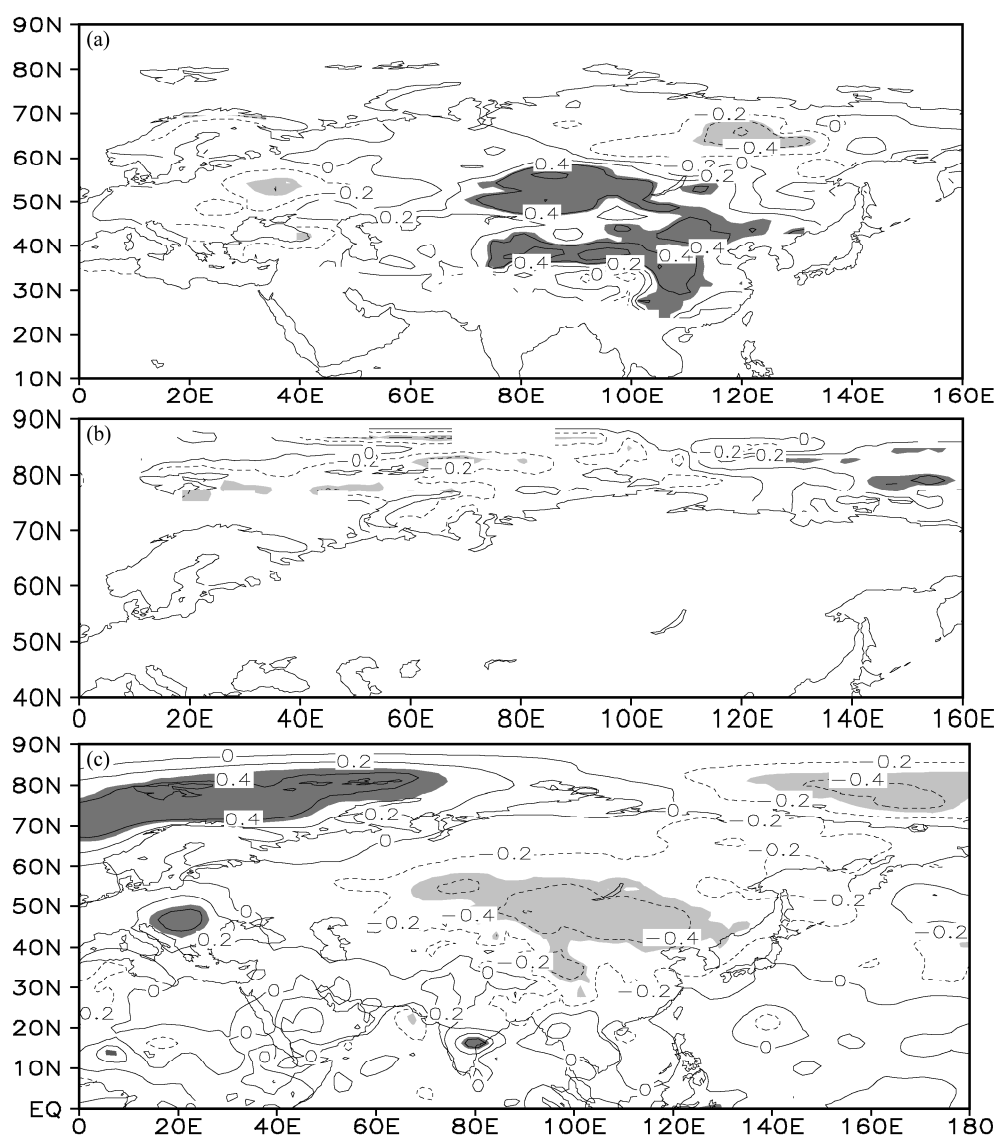


图 8 同图 7, 但为 PC2 对应的结果

Fig. 8 Same as Fig. 7, but for the PC2 time series

根据图 8c, 分别将北冰洋斯瓦尔巴群岛、法兰士约瑟夫地群岛附近海域 ($70^{\circ}\sim 82^{\circ}\text{N}$, $0^{\circ}\sim 70^{\circ}\text{E}$) 和东亚中纬度地区 ($41^{\circ}\sim 55^{\circ}\text{N}$, $85^{\circ}\sim 124^{\circ}\text{E}$) 区域平均的前期秋季表面温度定义为北冰洋温度 (Arctic Ocean Temperature, 简称 AT) 指数和东亚温度 (East Asian Temperature, 简称 ET) 指数。1981~2011 年前期秋季 AT 和 ET 指数的相关系数为 -0.46 , 超过 99% 的统计置信度。这表明海冰异常导致的北冰洋斯瓦尔巴群岛、法兰士约瑟夫地群岛附近海域表面温度异常与积雪异常导致的东亚中纬度地区的表面温度异常之间存在密切联系, 两个前期信号耦合在一起。因此, 为了分析两者与中国东部冬季温度异常的独立关系, 我们采用公式 (1) 给出的

偏相关方法进行分析。图 9a、9b 分别给出了前期秋季 ET 指数和 AT 指数与冬季温度的偏相关。图 9a 显示, 去除北冰洋温度异常信号后, 与前期秋季 ET 指数显著相关的冬季温度异常的范围较小, 仅在中国西部地区表现出明显的负相关, 中国东部没有显著相关。这说明东亚中纬度温度异常 (ET 指数) 对中国东部冬季温度异常的独立影响可能较弱。图 9b 显示, 去除东亚中纬度温度异常信号后, 前期 AT 指数与冬季温度在东亚中高纬地区表现出较大范围的显著负相关, 其中在中国东部的负相关在 27°E 以北地区都较为显著, 大体上表现出了冬季温度的偶极型异常特征。这一结果说明, 前期北冰洋斯瓦尔巴群岛、法兰士约瑟夫地群岛附近海域

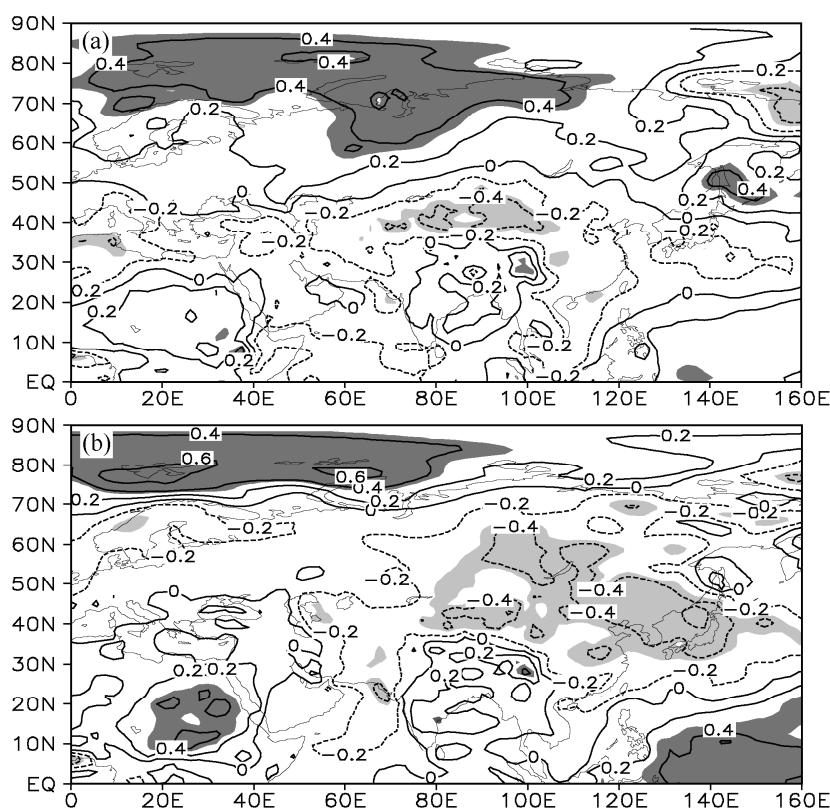


图9 1981~2011年冬季温度分别与前期秋季(a) ET指数和(b) AT指数的偏相关, 阴影区超过95%统计置信度

Fig. 9 Partial correlations of winter temperature with the previous autumn (a) ET and (b) AT indices for the period 1981–2011, the areas with the correlation coefficients over 95% confidence level are shaded

的海冰密集度及其相应的表面温度异常对偶极型模态的贡献可能更为重要。

进一步分析发现, 综合考虑前期北冰洋表面温度异常以及东亚中纬度地区的表面温度异常(图8c), 将AT和ET指数的差值(AT-ET)作为一个新的指数, 即北冰洋—东亚温度差异(Arctic-East Asian temperature contrast, 简称AE)指数, 则能更好地预测中国东部冬季温度异常偶极型模态。1981~2012年前期秋季AE指数序列与PC2序列具有非常好的对应关系, 两者的相关系数为0.61, 超过99.9%统计置信度(见图10a)。同时, 前期秋季AE指数与中国东部冬季温度场的相关也显示出了东北、华北地区负相关而华南以及110°E以西地区正相关的偶极型结构(见图10b)。这进一步说明, 采用AE指数能更好地预测这种偶极型模态。然而, 应该注意的是, AE指数与北方的负相关十分显著, 但与华南和110°E以西地区的正相关并不显著。这暗示AE指数主要影响的是北方冷空气的活动状况, 而南方和西部地区温度异常可能还受其他因子的影响。但从总体相关结构特征以及与PC2的显著

相关来看, AE指数大体上能够预测中国东部冬季温度异常偶极型模态。

前期秋季北冰洋—东亚温度差异(AE指数)可通过对亚洲地区冬季环流的影响进而影响冬季温度。图11a为前期秋季AE指数与冬季500 hPa位势高度场的相关, 与图5a在中高纬地区较为一致, 同样表现出了AO的结构特征。进一步分析发现, 1981~2010年前期秋季AE指数与冬季AO的相关系数高达-0.60, 超过99.9%统计置信度。前文指出冬季AO与中国东部冬季温度异常的偶极型模态具有显著联系。因此上述结果暗示, 秋季北冰洋—东亚温度差异(AE指数)可能通过AO的连接作用影响我国冬季气温。由图11a还可看到, 在贝加尔湖地区出现了显著负相关, 表明东亚大槽偏西, 因此冷空气由西北路径自中西伯利亚向中国北方地区爆发(图11b)。而在110°E以东沿海地区, 异常偏北风的南界仅达50°N附近(图11b), 冷空气的影响不能达到华南地区, 从而造成了中国东部出现北冷南暖的偶极型模态。因此, AE指数序列与PC2序列相关显著。同时也需注意, 与图5a不

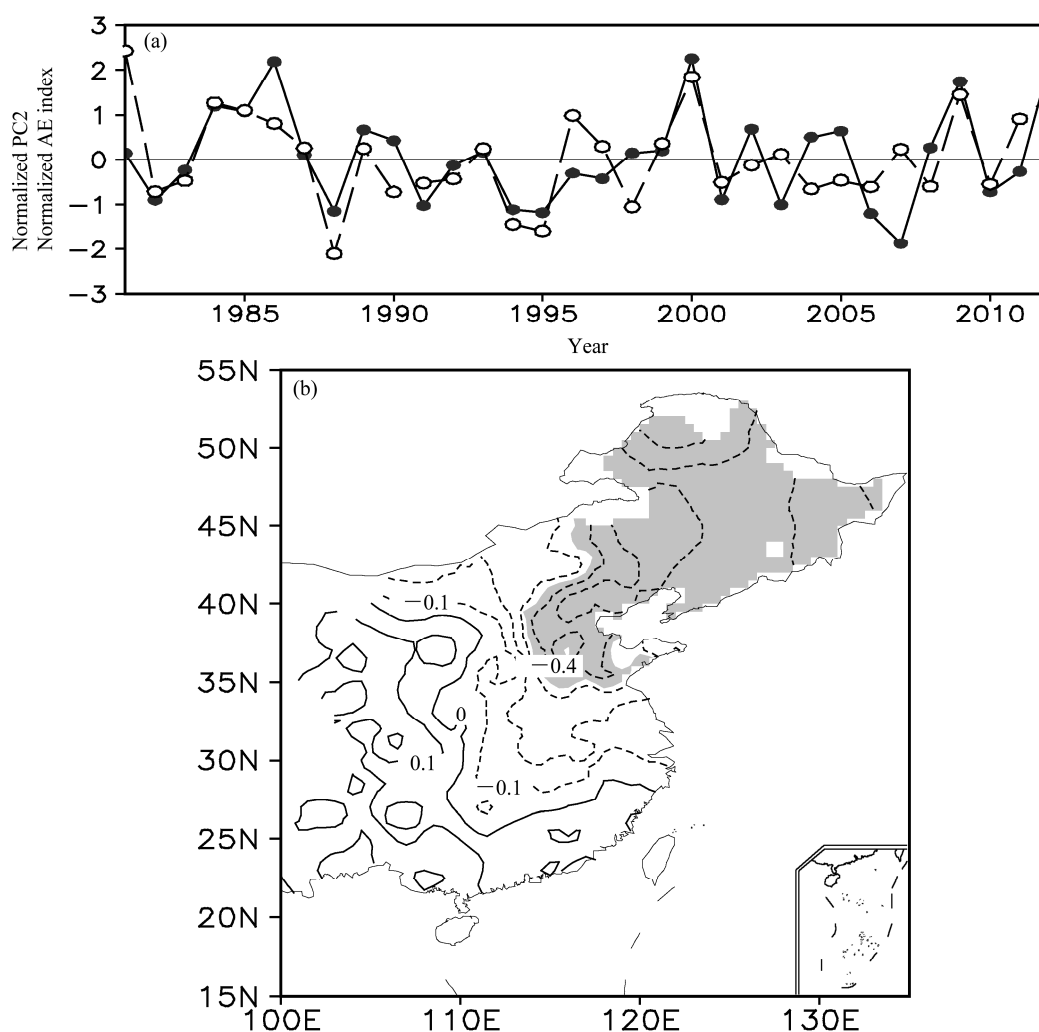


图 10 (a) 1981~2012 前期秋季 AE 指数 (虚线) 与第 2 模态主成分 (PC2; 实线) 的标准化序列; (b) AE 指数与中国东部冬季温度的相关, 阴影区超过 95% 统计置信度

Fig. 10 (a) Time series of the normalized previous autumn AE index (dashed line) and the principal component of the second EOF mode (PC2; solid line) for the period 1981–2012; (b) correlation between the AE index and winter temperature over eastern China, the areas with the correlation coefficients over 95% confidence level are shaded

同, 在图 11a 中亚洲 30°N 附近没有出现显著正相关。这一结果暗示 AE 指数对中高纬地区环流影响较为明显, 对更为偏南地区的环流影响较弱, 这可能是图 10b 中的华南和西部地区正相关不显著的一个原因。

综上所述, 中国东部冬季温度一致型模态主要受前期中东太平洋海温异常和亚洲大陆北部积雪及其邻近的北冰洋地区海冰异常的共同影响。而对于中国东部冬季温度偶极型模态, 海温的影响并不明显。为此, Wang et al. (2010) 主要考察了积雪的影响。而我们的研究发现, 除了东亚中纬度地区的积雪外, 前期北冰洋斯瓦尔巴群岛、法兰士约瑟夫地群岛附近海域的海冰密集度及其相应的表面

温度异常也对这一模态具有明显影响, 而且这种影响可能更为重要。综合了海冰和积雪信号的前期秋季北冰洋—东亚温度差异指数可能通过影响亚洲地区冬季环流 (如 AO 以及冷空气路径和影响范围等) 进而影响冬季温度, 因而能够很好地指示中国东部冬季温度异常偶极型模态。

5 2012 年冬季温度预测个例分析

在上一节的基础上, 以 2012 年为例探讨中国东部冬季温度异常的可能原因和预测。首先, 从海温异常上看, 2012 年秋季赤道中东太平洋海温处于正常状态, 未表现出明显的 El Niño (La Niña) 型特征 (图略), 这不利于中国东部冬季温度一致型

的发生。另外经计算发现,与中国东部冬季温度异常一致型模态密切相关的 NA 指数在 2012 年的值为 0.43,仅处于正常略偏强状态,这表明中高纬海冰和积雪异常及其对应的前期温度异常也不利于

2012 年中国东部冬季温度出现明显的南北一致型异常。

从秋季表面温度异常分布来看(图 12),北冰洋地区为暖异常,其异常中心在 90°E 以西,而东

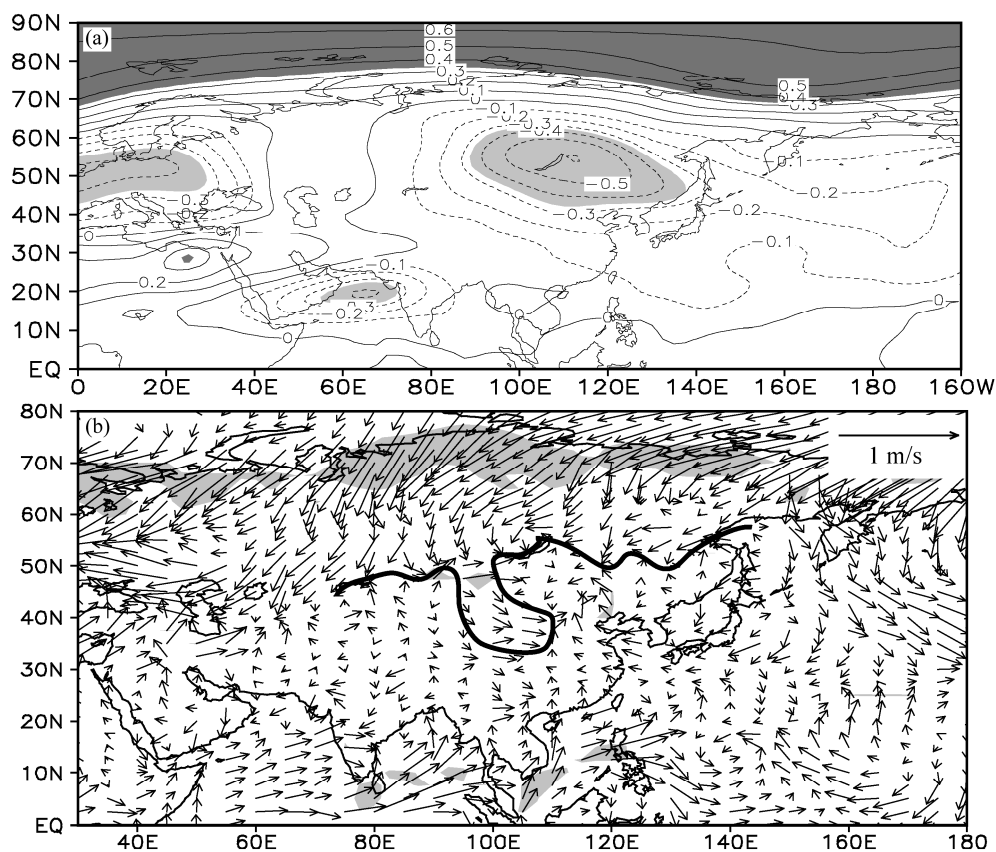


图 11 (a) 1981~2011 年前期秋季 AE 指数与冬季 500 hPa 位势高度场的相关; (b) 基于前期 AE 指数回归的表面风场。阴影区超过 95% 统计置信度, 黑色粗线标注了东亚地区异常偏北风影响的南界

Fig. 11 (a) Correlation of winter 500-hPa geopotential height with the previous autumn AE index during 1981–2011; (b) regressed surface winds against the previous AE index. The areas with the values over 95% confidence level are shaded; the black thick line indicates the southern boundary of anomalous northerly winds over East Asia

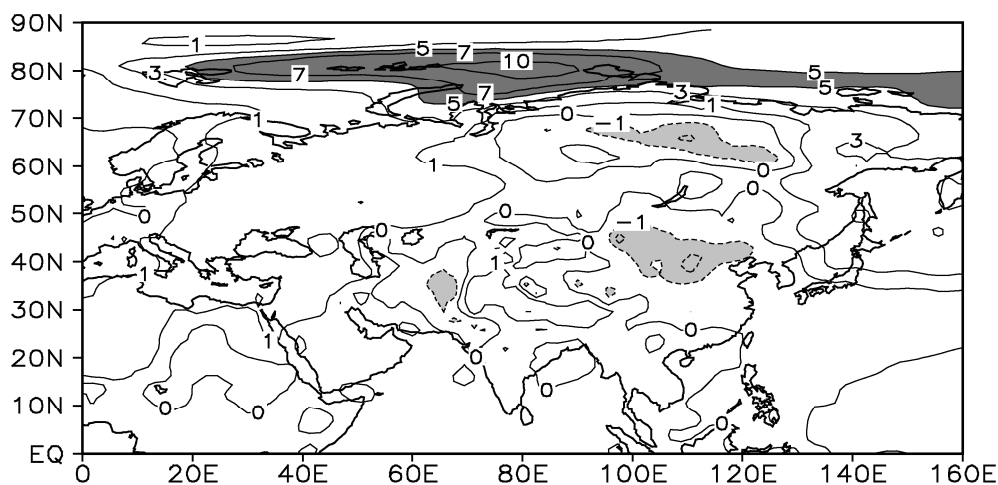


图 12 2012 年秋季表面温度距平 (单位: °C), 这里深色和浅色阴影区分别表示温度距平高于 5°C 和低于 -1°C

Fig. 12 Anomaly of surface air temperature in the autumn of 2012 (unit: °C), where dark and light shaded areas indicate temperature anomaly higher than 5°C and lower than -1°C, respectively

亚中纬度地区表现为冷异常。这种冷暖异常分布结构与图 8c 的结构较为相似。同时由图 10a 可见, 与中国东部冬季温度异常偶极型模态显著相关的 AE 指数在 2012 年的值为 1.21, 处于明显偏强状态, 这正对应着 PC2 的正异常, 由此可正确预测 2012 年冬季中国东部温度异常北冷南暖型分布 (图 1)。这也暗示, 前期海冰和积雪异常及其相应的北冰洋—东亚温度差异, 可能是影响中国东部冬季温度异常偶极型模态的重要因子。

6 总结和讨论

中国东部大陆冬季温度大范围一致的偏高或偏低是该地区冬季气候变化的最主要模态, 它与东亚冬季风强弱具有直接联系, 一直以来都为人们所重视。关于冬季风及其相应的中国大陆整体温度变化机理和预测的研究工作也很多。然而, 2012~2013 年冬季中国东部温度异常出现了 110°E 以东、27°E 以北偏冷, 华南以及 110°E 以西地区则偏暖的偶极型结构。这增加了冬季气候预测的难度, 同时也提示我们对此应深入研究。为此, 我们考察了中国东部冬季温度年际变化的主要模态, 重点分析了偶极型模态的成因机理和前期信号, 同时也以 2012~2013 年冬季为例探讨了这一类型温度异常的预测方法。

EOF 分析发现, 在年际变化尺度上, 中国东部大范围一致的偏冷或偏暖, 是冬季气候变化的最主要模态 (约占总解释方差的 60%)。中国东部冬季温度异常偶极型模态是第 2 主要模态 (占总解释方差的 18%)。2012~2013 年冬季温度异常并不是一种特例, 它属于第 2 模态, 具有一定的普遍性。上述两种模态对应的大气环流特征具有明显的差别。其中, 东亚大槽强度和位置的异常造成的冷空气路径和影响范围的差异是导致中国东部冬季温度出现上述两种模态的重要原因。另外, 冬季 AO 也与偶极型模态具有紧密联系。

分析两种模态的前期影响因子发现: 中国东部冬季温度一致型模态可能受前期秋季中东太平洋海温异常和亚洲大陆北部积雪及其邻近的北冰洋地区海冰异常的共同影响。而对于中国东部温度偶极型模态, 海温的影响并不明显, 前期秋季东亚中纬度地区的积雪、北冰洋斯瓦尔巴群岛、法兰士约瑟夫地群岛附近海域的海冰密集度异常, 以及它们引起的当地表面温度异常可能对偶极型模态具有

重要作用。其中北冰洋斯瓦尔巴群岛、法兰士约瑟夫地群岛附近海域海冰密集度异常导致的该地区表面温度异常的影响可能更为重要。综合了海冰和积雪信号的前期秋季北冰洋—东亚温度差异 (AE) 可以激发亚洲地区冬季环流异常, 进而影响中国东部冬季温度异常偶极型模态, 因此前期秋季 AE 指数与冬季温度异常南北相反型模态具有显著关系 (1981~2012 年阶段两者相关系数高达 0.61, 超过 99.9% 统计置信度)。2012 年秋季赤道中东太平洋海温的正常状态以及北冰洋暖异常和东亚中纬度地区冷异常的表面温度分布特征, 都不利于中国东部冬季温度南北一致型异常的发生, 而是有利于北冷南暖型异常分布。利用 AE 指数可以有效地预测 2012~2013 年中国东部冬季温度异常特征。进一步分析发现, AE 指数与 ENSO 的关系并不显著 (图略), 可见 AE 指数是独立于 ENSO 且对中国东部冬季温度异常具有一定预测能力的一个重要前期信号。

必须指出, 影响中国东部冬季温度异常的途径有很多, AE 指数显然不是唯一的影响因子。最近陈文等 (2013) 研究发现, 异常的平流层极涡向下传播可引起对流层低层 AO 和西伯利亚高压的异常, 同样会导致东亚地区南北反向型的温度变化。而且, AE 指数对中高位地区环流影响较为明显, 对更为偏南地区的环流影响较弱, 它实际上反映了冬季中高纬冷空气的影响范围不能到达华南和西部地区的情况。对于华南冬季异常冷月的预测, 吴尚森和梁建茵 (2000a, 2000b) 从大气环流、太平洋海温、北极海冰和青藏高原积雪等角度进行了探讨。但由于华南地区冬季温度变化在大多数年份是与北方地区一致的 (即第 1 模态), 因此他们的研究实际上也包括了对方北方地区同样有影响的因子作用。而在中国东部冬季温度处于偶极型模态时, 影响华南和西部地区独立的冬季温度变化的物理因子和前期信号还需进一步研究。另外, 本文尽管对前期秋季北冰洋—东亚温度差异影响途径和可能机制给出了一定解释, 但这一结果主要基于相关分析, 存在不确定性。对于相关的物理机制, 特别是北冰洋西部海域的海冰密集度异常和东亚中纬度地区的积雪的联系机制以及它们对中国冬季温度的独立和协同影响作用, 还需利用数值模式进一步探讨。

致谢 感谢两位匿名审稿专家的意见和建议。

参考文献 (References)

- 陈海山, 孙照渤, 倪东鸿. 2002a. Nino C 区秋季海温异常对东亚冬季大气环流的影响 [J]. 热带气象学报, 18 (2): 54–62. Chen Haishan, Sun Zhaobo, Ni Donghong. 2002a. Possible impacts of Nino C SSTA on winter atmospheric general circulation over East Asia [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 18 (2): 148–156.
- 陈海山, 孙照渤, 倪东鸿, 等. 2002b. 东亚冬季风对秋、冬季 SSTA 响应的数值试验 [J]. 南京气象学院学报, 25 (6): 721–730. Chen Haishan, Sun Zhaobo, Ni Donghong, et al. 2002b. Numerical experiments on the responses of East Asian winter monsoon to autumn and winter SSTA [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 25 (6): 721–730.
- 陈隽, 孙淑清. 1999a. 东亚冬季风异常与全球大气环流变化: I. 强弱冬季风影响的对比研究 [J]. 大气科学, 23 (1): 101–111. Chen Jun, Sun Shuqing. 1999a. Eastern Asian winter monsoon anomaly and variation of global circulation. Part I: A comparison study on strong and weak winter monsoon [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 23 (1): 101–111.
- 陈隽, 孙淑清. 1999b. 东亚冬季风异常与全球大气环流变化: II. 冬季风异常对全球热带海温变化的影响 [J]. 大气科学, 23 (3): 286–295. Chen Jun, Sun Shuqing. 1999b. Eastern Asian winter monsoon anomaly and variation of global circulation. Part II: Influence on SST by winter monsoon [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 23 (3): 286–295.
- 陈文, 康丽华. 2006. 北极涛动与东亚冬季气候在年际尺度上的联系: 准定常行星波的作用 [J]. 大气科学, 30 (5): 863–870. Chen Wen, Kang Lihua. 2006. Linkage between the Arctic Oscillation and winter climate over East Asia on the interannual timescale: Roles of quasi-stationary planetary waves [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (5): 863–870.
- 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.
- Compo G P, Whitaker J S, Sardeshmukh P D, et al. 2011. The twentieth century reanalysis project [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 137: 1–28.
- 管成功, 孙照渤. 2002. 秋季区域海冰面积异常与冬季大气环流及东亚区域气候的关系 [J]. 南京气象学院学报, 25 (1): 14–20. Guan Chenggong, Sun Zhaobo. 2002. Relationship of East Siberian autumn sea ice anomaly with winter atmospheric circulation and East Asia climate [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 25 (1): 14–20.
- 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 Qiyun. 1994. Relationship between the variations of East Asian winter monsoon and temperature anomalies in China [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 5 (2): 218–225.
- 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 Shengping, Wang Huijun. 2012. An integrated East Asian winter monsoon index and its interannual variability [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (3): 523–538.
- 黄刚. 2006. NCEP/NCAR 和 ERA-40 再分析资料以及探空观测资料分析中国北方地区年代际气候变化 [J]. 气候与环境研究, 11 (3): 310–320. Huang Gang. 2006. The assessment and difference of the interdecadal variations of climate change in northern part of China with the NCEP/NCAR and ERA-40 reanalysis data [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 11 (3): 310–320.
- 据建华, 任菊章, 吕俊梅. 2004. 北极涛动年代际变化对东亚北部冬季气温增暖的影响 [J]. 高原气象, 23 (4): 429–434. Ju Jianhua, Ren Juzhang, Lü Jumei. 2004. Effect of interdecadal variation of Arctic Oscillation on temperature increasing in North of East Asian winter [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 23 (4): 429–434.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 77 (3): 437–470.
- 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.
- 康丽华, 陈文, 王林, 等. 2009. 我国冬季气温的年际变化及其与大气环流和海温异常的关系 [J]. 气候与环境研究, 14 (1): 45–53. Kang Lihua, Chen Wen, Wang Lin, et al. 2009. Interannual variations of winter temperature in China and their relationship with the atmospheric circulation and sea surface temperature [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 14 (1): 45–53.
- 李庆祥, 董文杰, 李伟, 等. 2010. 近百年中国气温变化中的不确定性估计 [J]. 中国科学, 55 (16): 1544–1554. Li Qingxiang, Dong Wenjie, Li Wei, et al. 2010. Assessment of the uncertainties in temperature change in China during the last century [J]. Chinese Science Bulletin, 55 (19): 1974–1982.
- Li S L, Bates G T. 2007. Influence of the Atlantic Multidecadal Oscillation on the winter climate of East China [J]. Adv. Atmos. Sci., 24 (1): 126–135.
- 李双林, 王彦明, 郇永琪. 2009. 北大西洋年代际振荡(AMO)气候影响的研究评述 [J]. 大气科学学报, 32 (3): 458–465. Li Shuanglin, Wang Yanming, Gao Yongqi. 2009. A review of the researches on the Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO) and its climate influence [J]. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (3): 458–465.
- 李忠贤, 孙照渤. 2004. 秋季黑潮海温与东亚冬季风的相关联系 [J]. 南京气象学院学报, 27(2): 145–152. Li Zhongxian, Sun Zhaobo. 2004. Relationship between autumn Kuroshio SST and East Asian winter monsoon [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 27 (2): 145–152.
- Liu G, Ji L R, Sun S Q, et al. 2012. Low- and mid-high latitude components of the East Asian winter monsoon and their reflecting variations in winter climate over eastern China [J]. Atmos. Oceanic Sci. Lett., 5 (3): 195–200.
- 刘舸, 宋文玲, 朱艳峰. 2013a. 一个反映中国大陆冬季气温变化的东亚冬季风指数的统计预测方法 [J]. 气象学报, 71 (2): 275–285. Liu Ge, Song Wenling, Zhu Yanfeng. 2013a. A statistical prediction method for an East Asian winter monsoon index reflecting winter temperature changes

- over the Chinese mainland [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 71 (2): 275–285.
- 刘舸, 纪立人, 孙淑清, 等. 2013b. 关于东亚冬季风指数的一个讨论——东亚中、低纬冬季风的差异 [J]. *大气科学*, 37 (3): 755–764. Liu Ge, Ji Liren, Sun Shuqing, et al. 2013b. A discussion on the East Asian winter monsoon index—Differences between the East Asian winter monsoon at mid-high and low latitudes [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 37 (3): 755–764.
- 刘实, 布和朝鲁, 陶诗言, 等. 2010. 东亚冬季风强度的统计预测方法研究 [J]. *大气科学*, 34 (1): 35–44. Liu Shi, Bueh Cholaw, Tao Shiyang, et al. 2010. A study of the statistical prediction method for the East Asian winter monsoon intensity [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 34 (1): 35–44.
- Smith T M, Reynolds R W. 2004. Improved extended reconstruction of SST (1854–1997) [J]. *J. Climate*, 17 (12): 2466–2477.
- 陶诗言, 张庆云. 1998. 亚洲冬夏季风对 ENSO 事件的响应 [J]. *大气科学*, 22 (4): 399–407. Tao Shiyang, Zhang Qingyun. 1998. Response of the Asian winter and summer monsoon to ENSO events [J]. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 22 (4): 399–407.
- Wang B, Wu Z W, Chang C P, et al. 2010. Another look at interannual-to-interdecadal variations of the East Asian winter monsoon: The northern and southern temperature modes [J]. *J. Climate*, 23: 1495–1511.
- Wang Y M, Li S L, Luo D H. 2009. Seasonal response of Asian monsoonal climate to the Atlantic Multidecadal Oscillation [J]. *J. Geophys. Res.*, 114, D02112, doi:10.1029/2008JD010929.
- 王会军, 范可. 2013. 东亚季风近几十年来的主要变化特征 [J]. *大气科学*, 37 (2): 313–318. Wang Huijun, Fan Ke. 2013. Recent changes in the East Asian monsoon [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 37 (2): 313–318.
- 王会军, 贺圣平. 2012. ENSO 和东亚冬季风之关系在 20 世纪 70 年代中期之后的减弱 [J]. *科学通报*, 57 (19): 1713–1718. Wang Huijun, He Shengping. 2012. Weakening relationship between East Asian winter monsoon and ENSO after mid-1970s [J]. *Chinese Science Bulletin*, 57 (27): 3535–3540.
- 武炳义, 苏京志, 张人禾. 2011. 秋—冬季节北极海冰对冬季西伯利亚高压的影响 [J]. *科学通报*, 56 (27): 2335–2343. Wu Bingyi, Su Jingzhi, Zhang Renhe. 2011. Effects of autumn–winter Arctic sea ice on winter Siberian High [J]. *Chinese Science Bulletin*, 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, Zhang R H, D'Arrigo R. 2006. Distinct modes of the East Asian winter monsoon [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 134 (8): 2165–2179.
- Wu R G, Kirtman B. 2007. Observed relationship of spring and summer East Asian rainfall with winter and spring Eurasian snow [J]. *J. Climate*, 20: 1285–1304.
- Wu R G, Kinter III J L, Kirtman B P. 2005. Discrepancy of interdecadal changes in the Asian region among the NCEP-NCAR reanalysis, objective analyses, and observations [J]. *J. Climate*, 18 (15): 3048–3067.
- 吴尚森, 梁建茵. 2000a. 华南冬季异常冷月预测概念模型 I: 500 hPa 高度场和海温场特征 [J]. *热带气象学报*, 16 (3): 193–201. Wu Shangsen, Liang Jianyin. 2000a. Schematic predictive model for extremely severe cold months in South China winter—500 hPa geopotential field and SST field [J]. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 16 (3): 193–201.
- 吴尚森, 梁建茵. 2000b. 华南冬季异常冷月预测概念模型 II: 大气环流、极冰、积雪等物理因子特征 [J]. *热带气象学报*, 16 (4): 290–296. Wu Shangsen, Liang Jianyin. 2000b. Schematic predictive model for extremely severe cold months in South China winter—Physical factors of general circulation, polar sea ice and perpetual snow [J]. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 16(4): 290–296.
- Zar J. 1998. *Biostatistical Analysis* (4th Ed) [M]. Singapore: Pearson Education, 663pp.
- 周国华, 王益兴, 罗小莉, 等. 2011. 基于 160 站资料的我国表面气温异常特征 [J]. *应用气象学报*, 22 (3): 283–291. Zhou Guohua, Wang Panxing, Luo Xiaoli, et al. 2011. Characteristics of surface air temperature anomalies in China based on observations at 160 stations [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 22 (3): 283–291.
- 朱艳峰. 2008. 一个适用于描述中国大陆冬季气温变化的东亚冬季风指数 [J]. *气象学报*, 66 (5): 781–788. Zhu Yanfeng. 2008. An index of East Asian winter monsoon applied to description the Chinese mainland winter temperature changes [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 66 (5): 781–788.
- 朱艳峰, 谭桂容, 王永光. 2007. 中国冬季气温变化的空间模态及其与大尺度环流异常的联系 [J]. *气候变化研究进展*, 3 (5): 266–270. Zhu Yanfeng, Tan Guirong, Wang Yongguang. 2007. Variation of spatial mode for winter temperature in China and its relationship with the large scale atmospheric circulation [J]. *Advances in Climate Change Research* (in Chinese), 3 (5): 266–270.