

刘伟, 宋文玲. 2018. 中国北方冬季气温的年际变化对北太平洋东部海温异常的响应 [J]. 气候与环境研究, 23 (3): 275–286. Liu Wei, Song Wenling. 2018. Impact of the sea surface temperature anomaly in the eastern North Pacific on interannual variations of winter temperature in northern China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 23 (3): 275–286, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2018.17095

中国北方冬季气温的年际变化对北太平洋东部海温异常的响应

刘伟¹ 宋文玲²

¹ 内蒙古自治区气候中心, 呼和浩特 010051

² 中国气象局国家气候中心, 北京 100081

摘 要 利用地面气温观测资料及 NCEP/NCAR 逐月再分析资料, 分析了中纬度北太平洋东部海温异常变化对中国北方地区冬季气温的可能影响。结果表明, 前期夏、秋季中纬度北太平洋东部海温与北方地区冬季气温存在持续稳定的正相关关系, 并且这种相关性在年代际尺度上较年际尺度更为显著。这种联系与中纬度北太平洋东部关键区海温在对流层中低层激发出的一种类似北美—大西洋—欧亚遥相关型波列有关。当前期关键区海温偏高(低)时, 其激发的波列使得乌拉尔山阻塞高压偏弱(强), 西伯利亚高压偏弱(强), 导致贝加尔湖以南大部地区受正(负)高度距平控制, 亚洲地区中高纬以纬(经)向环流为主, 有利于北方大部地区气温偏高(低)。研究表明, 中纬度北太平洋东部海温异常通过激发出一个从关键海区到我国北方地区的跨越东西半球的遥相关型波列, 引发北半球中高纬度大气环流异常, 进而影响北方冬季气温。

关键词 北太平洋东部 遥相关波列 乌拉尔山阻塞高压 西伯利亚高压 冬季气温

文章编号 1006-9585 (2018) 03-0275-12

中图分类号 P461.2

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2018.17095

Impact of the Sea Surface Temperature Anomaly in the Eastern North Pacific on Interannual Variations of Winter Temperature in Northern China

LIU Wei¹ and SONG Wenling²

¹ Inner Mongolia Climate Center, Hohhot 010051

² National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

Abstract Based on monthly temperature observations collected at meteorological stations and the NCEP/NCAR monthly reanalysis data, possible impacts of sea surface temperature anomaly (SSTA) in the mid-latitude eastern North Pacific (MENP) on winter temperature in northern China are studied. The results are as follows. There is a stable positive relationship between winter temperature in northern China and SSTA in the preceding summer and autumn in the MENP, and the correlation is more significant on interdecadal scale than on interannual scale. This relationship is associated with a kind of wave pattern analogous to the North America-Atlantic-Eurasia wave train pattern in the middle and lower

收稿日期 2017-07-04; **网络预出版日期** 2018-02-22

作者简介 刘伟, 女, 1986 年出生, 硕士研究生, 工程师, 主要从事短期气候预测研究。E-mail: liuwei.05@163.com

通讯作者 宋文玲, E-mail: songwl@cma.gov.cn

资助项目 内蒙古自治区气象局科技创新项目 nmqkjcx201817, 公益性行业(气象)科研专项 GYHY201406024

Funded by Technological Innovation Program of Inner Mongolia Meteorological Administration (Grant nmqkjcx201817), Special Fund for Meteorological Scientific Research in the Public Interest (Grant GYHY201406024)

troposphere triggered by SSTA in preceding autumn in the MENP. When the SSTA in preceding autumn over the MENP is higher (lower), the wave train pattern makes the Ural blocking and Siberian high weaker (stronger). At the same time, most regions to the south of the Baikal Lake are controlled by positive (negative) 500-hPa geopotential height anomaly. These factors lead to dominant zonal (meridional) circulation over the Asian region and cause higher (lower) temperature over most regions of northern China. The present study reveals that the wave train pattern from the Western Hemisphere to the Eastern Hemisphere can be triggered by SSTA in the MENP. This wave train can influence general circulation in northeastern Asia and ultimately affect temperature in northern China.

Keywords Eastern North Pacific, Teleconnection wave train, Ural blocking, Siberian high, Winter temperature

1 引言

我国地处东亚地区,其气候异常主要受东亚季风系统的影响。由于冬季容易出现低温、雨雪和冰冻等灾害,对工农业生产及人们日常生活都会造成严重的影响,所以深入了解和认识冬季气温的变化规律及机理对提高冬季气温变化的气候预测水平具有重要意义(贾丹和简茂球,2015)。研究发现,20世纪80年代以后我国冬季存在明显的增温现象(丁一汇和戴晓苏,1994;任国玉等,2005;王凌等,2007;Chen et al., 2013a),并且北方地区的增温较南方更加显著(唐红玉等,2005;康丽华等,2006;丁一汇和张莉,2008;Chen et al., 2013b)。但造成我国北方冬季气温年际和年代际变化的成因和机制存在着很多不确定性。所以,研究北方冬季气温的影响因子和机制更有助于理解气候增暖的本质。

前人对于我国冬季气温的影响因子展开过大量研究,其中海温异常被认为是重要的影响因子之一。海温的异常量值不要求很大,且所引起的感热量值也不大,但却是气候异常的主要触发因子之一(王谦谦等,1995;张晨等,2014)。研究表明,当我国北方偏暖而南方偏冷时,同期海表温度(Sea Surface Temperature, SST)在北太平洋副热带地区存在显著的正距平(康丽华等,2009)。陈佩燕等(2001)指出,赤道东太平洋春、夏季海温与我国东部地区冬季温度异常存在显著的相关关系。此外,印度洋海区也是影响我国冬季气温的关键区。唐卫亚和孙照渤(2007)指出,当印度洋海温一致变化时,中国大部分地区温度变化也一致;当印度洋海温距平偶极振荡时,中国东、西部冬季气温也出现偶极变化的现象。赤道印度洋海区是影响我国东部特别是东北、华北冬季气温的关键区,两者呈同位相变化(张友姝,2002)。热带印度洋海温异常对于东亚冬季气温变化,尤其是对于极端暖冬或

冷冬的预测有一定的前兆信号(Wang and Chen, 2014a)。

除了热带以及副热带海温变化对我国冬季气温存在显著影响外,中纬度 SSTA 对我国冬季温度异常也有重要影响。陈少勇等(2009)将西北太平洋冬季海温异常年同期 500 hPa 位势高度场进行合成分析后发现,西北太平洋海温升高,使乌拉尔山脊减弱,阿拉斯加脊减弱,东亚大槽减弱东移,纬向环流加强,导致我国东部大部分地区冬季气温偏高。北大西洋中部地区海温异常偏高,冬季中国东部地区气温将偏高,反之则偏低(曲金华等,2006)。北大西洋多年代际变率的正位相会导致中纬度北大西洋至欧亚地区的海平面气压均为负距平,使得西伯利亚高压偏弱,有利于我国冬季气温偏高(Li and Bates, 2007; Ding et al., 2014)。

由于海气相互作用,大西洋 SSTA 可引起环流异常,并通过上下游波动能量的频散影响到东亚季风区环流(Palmer and Sun, 1985; Liu et al., 2014)。前冬西北大西洋 SSTA 通过激发一个横跨北大西洋—欧洲沿岸—乌拉尔山的波列影响乌拉尔山脊的强度,异常暖海温使得乌拉尔山脊偏强,我国前冬气温易偏低(Li, 2004)。传统的欧亚型遥相关波列可能受北大西洋海温异常驱动,进而影响我国冬季气温(Liu et al., 2014)。那么,中纬度北太平洋 SSTA 对我国冬季气温的影响是否也存在类似的机制?本文在前人研究的基础上,分析了中纬度北太平洋东部海温对中国北方冬季气温的前兆影响,并进一步探讨其可能影响机制,以期为北方冬季气温预测提供一定的理论依据。

2 资料和方法

本文采用国家气候中心整编的 1981~2014 年 160 站逐月气温观测资料,由于该资料包含西部地区的测站较稀疏,为了减少因测站分布不均带来的

误差, 选取 100°E 以东的区域进行分析。本文将 36°N 以北、 100°E 以东地区定义为北方地区, 用该区域共 53 个测站的区域平均气温代表北方气温。大气环流资料取自 1951~2014 年 NCEP/NCAR 逐月再分析数据, 其中包括 500 hPa 位势高度场、海平面气压场和 850 hPa 水平风场资料, 其水平分辨率为 $2.5^{\circ}(\text{纬度}) \times 2.5^{\circ}(\text{经度})$ (Kalnay et al., 1996)。海表温度资料取自 NOAA 的 ERSST (Extended Reconstructed SST), 水平分辨率为 $2^{\circ}(\text{纬度}) \times 2^{\circ}(\text{经度})$ (Smith and Reynolds, 2004)。文中夏季是指 6~8 月平均, 秋季指 9~11 月平均, 冬季指当年 12 月至次年 2 月的平均。为了消除气候系统对全球变暖的响应, 对于上述的资料去除了趋势。文中主要采用相关分析、合成分析、高斯滤波、滑动相关等方法对研究内容进行分析。

3 中纬度北太平洋东部海温与北方冬季气温的关系

已有的研究表明, 我国冬季气温于 20 世纪 80 年代发生了突变, 而太平洋海温 (Wang, 1995)

和大气环流 (Trenberth, 1990) 在 20 世纪 70 年代后期也发生了显著的突变。为了避免气温及环流突变带来的影响, 本文主要的研究时段为 1981~2014 年。计算了 1981~2014 年北方冬季气温与前期 3 月至次年 2 月逐月全球海温的相关 (图略), 发现从前期 6~11 月在中纬度太平洋东部均存在一个显著的正相关区。图 1 给出了 1981~2014 年北方冬季气温与前期夏、秋季北太平洋海温的相关分布, 可以看出, 前期夏、秋季中纬度北太平洋东部的显著正相关区 (黑色方框区域) 持续存在, 并且秋季较夏季更为显著, 可以一直向南延伸至北纬 20°N 附近, 中心相关系数达到 0.5 以上, 说明秋季该海区海温与北方冬季气温的关系具有较好的季节持续性和空间连续性。到了冬季, 该海区正相关仍然存在, 但已不显著 (图略)。此外, 黑潮区和北太平洋中部也存在显著正相关区, 但持续性较差, 只存在于前期夏季, 且有关黑潮区与冬季大气环流的关系前人已有研究 (李忠贤和孙照渤, 2004; 殷明等, 2016), 本文暂不予讨论。选取图 1 黑色方框区域 ($34^{\circ}\text{N} \sim 52^{\circ}\text{N}$, $142^{\circ}\text{W} \sim 128^{\circ}\text{W}$) 作为关键区海温展开进

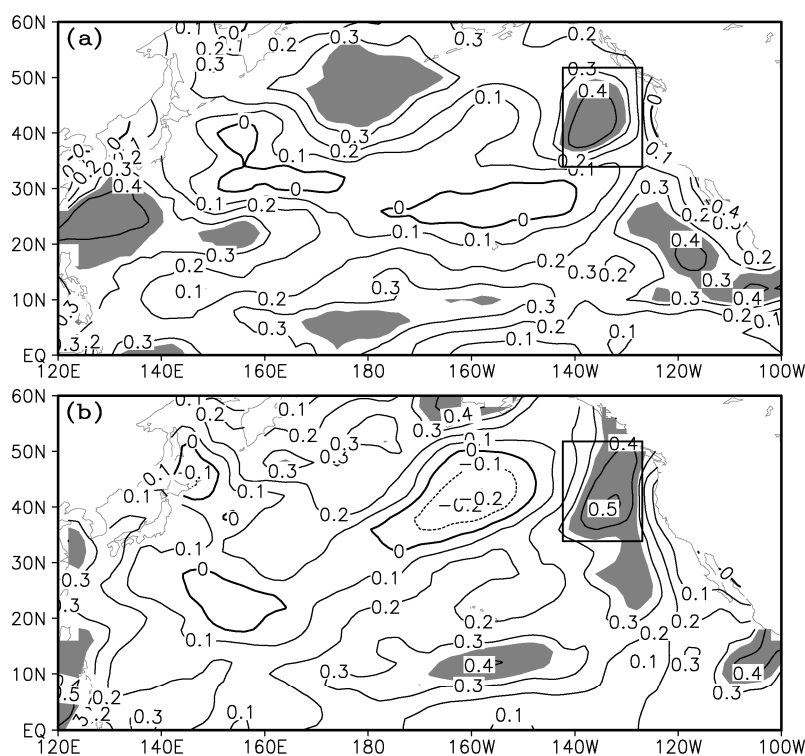


图 1 中国北方冬季气温与前期 (a) 夏季、(b) 秋季北太平洋海面温度的相关 (阴影区通过 0.05 显著性检验, 黑色方框为显著正相关区)

Fig. 1 Correlation between winter temperature over northern China and the North Pacific SST in preceding (a) summer and (b) autumn (shaded areas are significant at 0.05 level and rectangles denote positive correlation areas)

一步分析。

前期关键区海温与北方冬季气温的关系还可以从图 2 得到更加清楚的说明。可以看出,无论是在年际尺度还是年代际尺度上,夏、秋季海温演变趋势与冬季气温基本呈同相变化。在 20 世纪 80 年代前期,冬季气温处于偏低时期,关键区海温基本以负距平为主。80 年代后期至 21 世纪 00 年代中期,绝大多数年份冬季气温都偏高。由于 45°N 左右的准定常行星波振幅在 1988 年之后显著减弱,导致西伯利亚高压强度减弱,东亚冬季风偏弱 (Wang et al., 2009; Huang et al., 2012), 所以这一时段我国冬季气温普遍偏高,与之相对应的关键区海温也基本以正距平为主。00 年代后期开始气温又有所下降,这与东亚冬季风的年代际重新增强有关 (Wang and Chen, 2014b; Ding et al., 2014)。近两年气温又

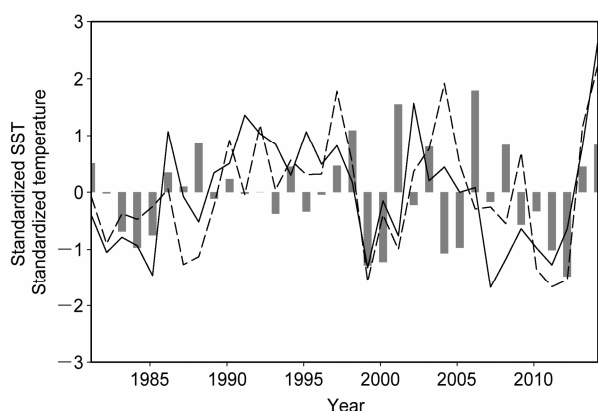


图 2 中国北方冬季气温 (直方图) 与前期夏季 (虚线)、秋季 (实线) 关键区海温标准化序列

Fig. 2 Standardized winter temperature in northern China (histogram) and standardized SST in the key region in preceding summer (dashed line) and autumn (solid line)

显著上升,对应的海温在近两年也由显著的负位相转为显著的正位相。统计结果表明,夏、秋季关键区海温与冬季气温的相关系数分别为 0.37、0.45,均通过 0.05 显著性检验。刘实等 (2010) 的研究结果表明东亚冬季风指数与前期 10 月海表温度场在东北太平洋存在高相关区;刘舸等 (2013) 利用朱艳峰定义的东亚冬季风指数与前秋 (9~10 月) 北太平洋海温做相关,发现东北太平洋的相关最显著,这都与本文所取的海温关键区基本吻合,说明前期秋季东北太平洋海温与东亚冬季风乃至我国冬季气温确实存在密切的联系。

为了进一步分析前期关键区海温与冬季气温在不同时间尺度上的关系,对原始序列滤波分别提取各自的 10 年以上年代际分量和 10 年以下的年际分量 (图 3)。年代际尺度上,关键区海温与气温同位相变化的特征更清楚 (图 3a), 80 年代后期二者均由负位相转为正位相,00 年代后期转为较弱的负位相后近两年又再次转为较强的正位相。年代际尺度上,夏、秋季关键区海温与气温的相关系数分别为 0.79、0.77,均通过 0.05 的显著性检验。这也侧面证实了 Barnett et al. (1999) 的研究结果:通过海气相互作用,海洋的年代际变化会影响大气的年代际变化。年际尺度上关键区海温与气温同样体现了同相变化特征 (图 3b),例如在关键区海温偏高的 1986 年、1997 年、2014 年气温均偏高,海温偏低的 1999 年、2011 年、2012 年气温均偏低。年际尺度夏、秋季关键区海温与气温的相关系数分别为 0.20、0.35,均弱于原始值和年代际分量,其中秋季通过 0.05 显著性检验,说明关键区海温与气温的显著正相关主要是年代际分量的贡献,但年际分量

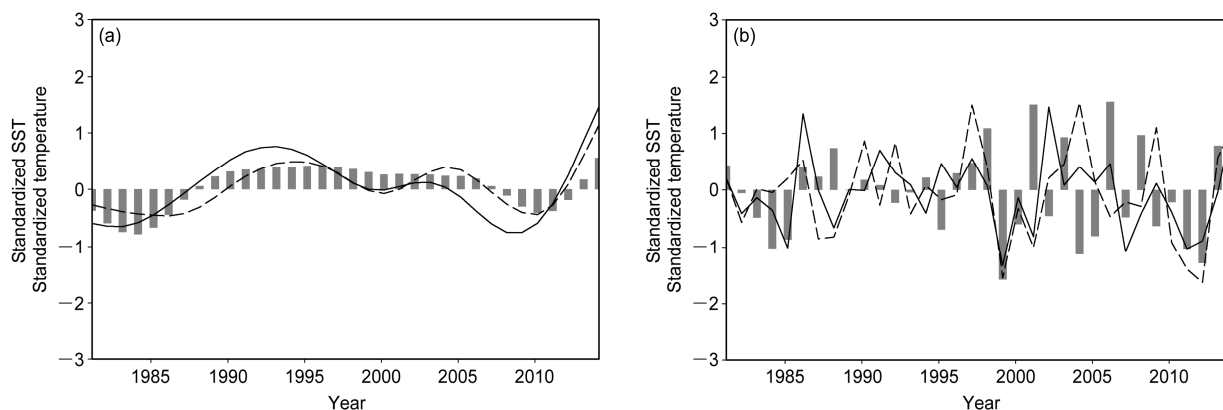


图 3 同图 2, 但为各自的 (a) 年代际分量和 (b) 年际分量

Fig. 3 Same as Fig. 2, but for the (a) interdecadal and (b) interannual components

也起到比较重要的作用。

4 东亚冬季风环流形势的响应和影响

4.1 位势高度场和环流场

为了解我国北方地区冬季温度异常对应的东亚冬季风环流形势,图4给出了北方冬季气温与同期500 hPa位势高度场及850 hPa水平风场的相关。由图3可知,年代际尺度的相关较年际尺度更显著,但从预测的角度考虑,年代际尺度特征一般当做背景作为参考,年际尺度的变化考虑的更多一些,所以下研究内容主要针对年际尺度进行分析。与北方冬季偏暖对应的500 hPa位势高度场在欧亚中高纬地区呈现“十—十”的分布形势,中纬度西欧存在一个显著的正相关区,其东侧乌拉尔山地区及其北侧是一个显著的负相关区,而在贝加尔湖及其以南我国大部地区为显著的正相关区,正相关区一直向东延伸至180°附近形成一个强正相关舌。所以,当乌拉尔山阻塞高压偏弱时,不利于冷空气南下入侵我国,我国大部地区受正位势高度距平控制,有利于北方气温偏高,这与陈菊英等(1991)的研究结果一致。对应于850 hPa风场,中纬度西欧存在一个较强的反气旋式相关矢量,其东北侧乌拉尔山及其北侧地区为一个强大的气旋式相关矢量,而在贝加尔湖及其以南我国大部地区存在一个强大的反气旋式相关矢量,与北方冬季偏暖相对应的850 hPa风场表现为弱东亚冬季风的环流形势,冷空气活动较弱。反之,当乌拉尔山阻塞高压偏强时,有利于冷空气南下入侵我国,我国大部地区受负位势高度距平控制,850 hPa风场表现为强东亚冬季风的环流形势,导致北方气温偏低。

由图2可知,关键区海温与冬季气温存在显著的正相关关系,且前期秋季关键区海温与北方冬季气温的相关更为显著,那么当秋季关键区海温异常时是否也会激发出类似图4的环流配置?为探讨导致大气环流异常的可能影响机制,图5给出了前期秋季关键区海温与冬季500 hPa位势高度场及850 hPa水平风场的相关。对于高度场而言,在关键区海温上方为负相关,当关键区海温偏高时,受上升运动的影响,其上空对应负位势高度距平。海温关键区东北侧的北美大陆西部为正相关,在正相关区的东侧即北美大陆东侧存在一个负相关区。西欧为正相关区,其东侧的乌拉尔山及其北侧为一个

显著的负相关区,贝加尔湖以南我国北方大部地区为正相关区。由以上空间分布可以推测,前期关键区海温异常能在对流层中层激发出一个从关键区上空到我国北方上空类似阻塞高压与切断低压交替分布的遥相关波列。其物理过程为当关键区海温偏高时,其所激发的一系列波列使得乌拉尔山阻塞高压偏弱,我国北方大部地区受正高度距平控制,这与北方冬季偏暖年对应的高度场相似。反之,当前期关键区海温偏低时,其所激发的一系列波列使得乌拉尔山阻塞高压偏强,有利于冷空气南下入侵我国,我国大部地区受负高度距平控制,与北方冬季偏冷年对应的高度场相似。

关键区海温与850 hPa风场的相关也存在相似的环流配置。在海温关键区上方为气旋式相关矢量,即当海温偏高时,其上方低层辐合上升运动增强。关键区东北侧北美大陆西部被激发出反气旋式相关矢量,北美大陆东部至大西洋西北部存在一个气旋式相关矢量。西欧存在反气旋式相关矢量,其东侧的乌拉尔山及其北侧地区为显著的气旋式相关矢量,我国北方地区为反气旋式相关矢量。与高度场类似,前期关键区海温异常能在对流层低层激发出一个从关键区上空到我国北方上空的气旋与反气旋交替分布的遥相关波列。当关键区海温偏高时,其所激发的遥相关波列使得乌拉尔山地区上空为气旋式环流控制,即乌拉尔山阻塞高压偏弱,冷空气势力较弱,我国北方大部地区受偏南风控制,这与北方冬季偏暖年对应的850 hPa环流场相似,表现为弱东亚冬季风的环流形势。反之,当前期关键区海温偏低时,其所激发的遥相关波列使得乌拉尔山地区上空为反气旋式环流控制,即乌拉尔山阻塞高压偏强,冷空气势力较强,我国北方大部地区受偏北风控制,这与北方冬季偏冷年对应的850 hPa环流场相似,表现为强东亚冬季风的环流形势。Wang and Lu (2017)的研究结果表明,乌拉尔山地区的阻塞活动会以欧亚遥相关形式影响东亚冬季风的强度,这与本文的分析结果很相似。

图6为前秋关键区海温异常偏高、偏低年冬季大气环流合成差异。与图5对比,500 hPa位势高度差值场上,北半球中高纬地区从东太平洋至我国北方“负—正—负—正—负—正”的遥相关波列很清晰,大西洋东北部至西欧地区存在一个正异常中心,乌拉尔山地区存在一个强的负异常中心,而我国北方大部地区对应强的正异常中心。对应于850

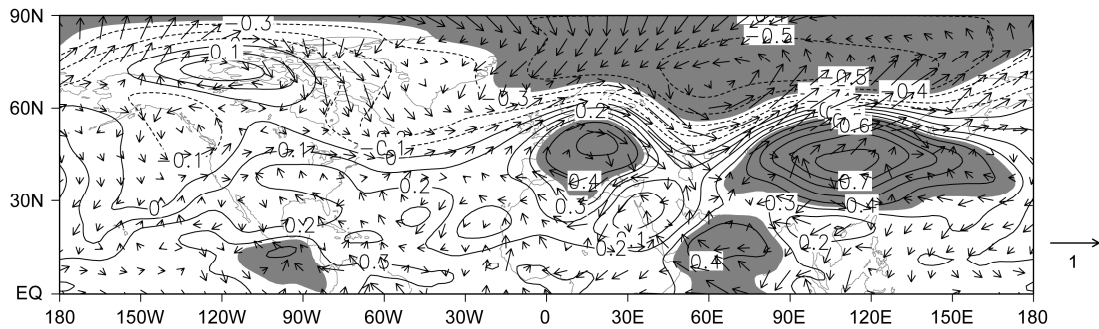


图 4 中国北方冬季气温与同期 500 hPa 位势高度场（等值线，阴影区通过 0.05 显著性检验）及 850 hPa 水平风场（箭头）的相关
Fig. 4 Correlations of winter temperature in northern China with 500-hPa geopotential height (contours; shaded areas are significant at 0.05 level) and 850-hPa horizontal wind field (arrows) in winter

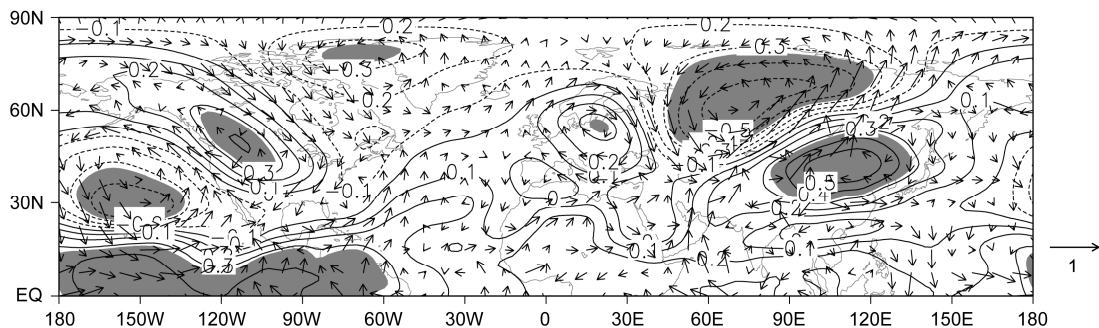


图 5 同图 4，但为前期秋季关键区海面温度与冬季 500 hPa 位势高度场及 850 hPa 水平风场的相关
Fig. 5 Same as Fig. 4, but for the correlations of SST in the key region in the preceding autumn with 500-hPa geopotential height and 850-hPa horizontal wind field in winter

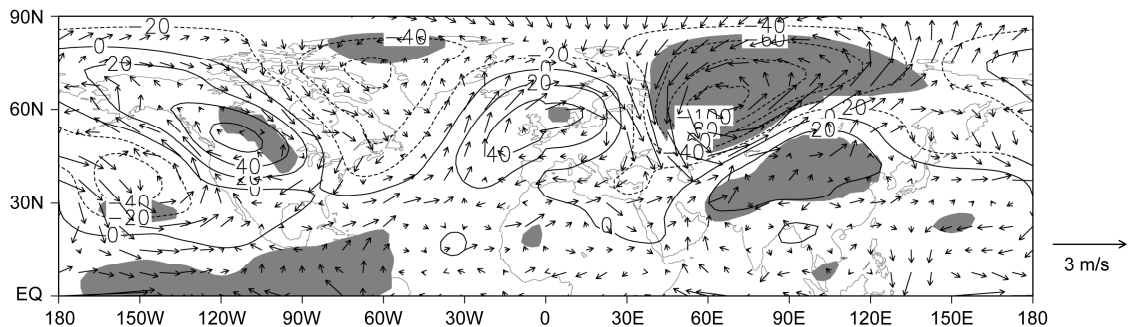


图 6 前期秋季关键区海面温度偏高、偏低年冬季 500 hPa 位势高度场（等值线，单位：gpm）及 850 hPa 风场（箭头）合成差异（阴影区通过 0.05 显著性检验）
Fig. 6 Differences in 500-hPa geopotential height (contours, units: gpm) and 850-hPa wind field (arrows) in winter between years of abnormally high and low SST in the key region in the preceding autumn (shaded areas are significant at 0.05 level)

hPa 差值风场，从东太平洋至我国东北地区存在气旋—反气旋—气旋—反气旋—气旋—反气旋遥相关波列，乌拉尔山地区存在一个异常强的气旋中心，我国东北偏北地区存在一个反气旋中心，北方大部地区受反气旋西侧及乌拉尔山气旋东南侧偏南气流的共同影响，有利于气温偏高，这也进一步验证了前面相关分析得到的结论。

传统的观点认为中高纬度地区主要是大气驱动海洋，而非海洋驱动大气(Wallace et al., 1990; Cayan, 1992)。Hartmann (2015) 利用历史资料并通过系列数值试验研究发现 2013/2014 年北美冷冬的形成原因与太平洋海表温度的模态有关，且热带外海洋及天气气候模态对其有很强的响应。从 2013 年中至 2015 年 1 月北太平洋东部型的海温变率都

维持在两倍标准差以上,而这一模态回归的 500 hPa 高度场及数值模拟结果都表现为北太平洋东部受高压脊控制,北美中部受低压控制,与 2013/2014 年冬季实况很接近,北美受高脊前高纬南下冷空气影响,气温显著偏低,证明热带外北太平洋东部的暖海温对 2013/2014 年北美冷冬的形成起到重要作用。本文中纬度北太平洋东部海温通过其激发的遥相关波列,引发北半球中高纬度大气环流异常,进而影响我国冬季气温,这与 Hartmann (2015)的研究结果很相似,说明热带外北太平洋东部海温对大气环流也存在一定程度的影响。

那么前期秋季关键区 SSTa 如何激发出冬季环流异常? 计算了前期秋季关键区海温与同期 500 hPa 位势高度场的相关(图 7)。在北半球中高纬度,通过 0.05 显著性检验的区域主要分布在北太平洋中部、太平洋东北部、北美和北大西洋,4 个显著相关区呈“负—正—负—正”分布。这个环流分布型与刘实等(2010)利用东亚冬季风指数与前期 10 月 500 hPa 位势高度场相关分布的负位相颇为相似。刘实等(2010)根据其活动中心分别位于北太平洋、北美、北大西洋的特点,将这一异常环流型称之为 PAA 型,

$$I_{PAA} = (H_{G1} + H_{G2} - H_{D1} - H_{D2})^*, \quad (1)$$

其中, I_{PAA} 表示 PAA 型指数, H 为 500 hPa 高度距平, $G1$ 代表北太平洋中部, $G2$ 代表加拿大中北部, $D1$ 代表东北太平洋, $D2$ 代表北大西洋, * 表示进行了标准化。他们还计算了 I_{PAA} 与冬季各个月份 500 hPa 高度的相关场,发现 1 月东亚大槽异常直接受欧洲一侧异常环流的影响,其相关场在北欧、乌拉尔山、东亚大槽区呈现“负—正—负”分布。研究表明,10 月 PAA 型环流与东亚地区冬季冷空气活动确实存在密切联系,只是冬季各个月份存在一些差异,且秋季后期热带外北半球环流异常信号可反映冬季大气环流的初始状态。我们也分别计算了秋季各月关键区海温与冬季各月 500 hPa 高度场的相关(图略),各月的情况有所差异,11 月的海温与 12 月、1 月的高度场相关最显著,但考虑到季节预测,所以选取整个冬季为研究对象。

钱维宏和梁浩原(2012)利用旋转经验正交函数(Rotated Empirical Orthogonal Function, REOF)展开的方法对月平均高度行星尺度纬圈平均扰动和月平均高度天气尺度扰动做分解,其中 REOF 第五模态反映了北大西洋至欧亚大陆上的 500 hPa 高度天气尺度扰动持续性结构,在中纬度地区有两对

振荡中心,表现为阻塞高压与切断低压的分布形势。当阻塞高压(切断低压)在东北亚的时候,切断低压(阻塞高压)在东欧,而在大西洋和西欧又有一对阻塞形势。由这样的 4 个振荡中心,将其定义为“大西洋—欧亚遥相关型”(AEA)。Liu et al. (2014)的研究结果表明,季节尺度上北大西洋海温异常是激发类似欧亚遥相关型(AEU 型)的重要外强迫因子,当冬季 EU 型出现显著正(负)异常时,北大西洋海温往往从前年秋季开始为暖(冷)异常,且该异常可持续到冬季及次年春季。秋季北大西洋海温异常可以激发出其上空至乌拉尔西部的“正—负—正”位势高度异常分布,随后异常波列持续东移,使得后期冬季西伯利亚出现大范围显著正异常,同时东亚日本上空为负距平(卢国阳,2016)。所以,本文关键区海温应是在秋季激发出类似 PAA 型环流异常,导致北大西洋上空环流异常,大气强迫海洋,使得北大西洋将秋季的这个异常信号得以储存,然后通过大西洋—欧亚遥相关型(AEA 型)环流异常影响我国冬季气温。

4.2 冬季风关键气候系统

以往研究表明,冬季乌拉尔山阻塞高压的发生常常伴随着强的西伯利亚高压,这是强东亚冬季风最重要的特征之一(Lau and Li, 1984; Takaya and Nakamura, 2005),两者的伴随出现最终导致东亚地区冷空气的爆发(Joung and Hitchman, 1982)。那么,前期关键区海温是否与西伯利亚高压也有一定的联系? 计算了关键区海温与海平面气压场的相关(图略),发现二者在西伯利亚地区呈显著的负相关。将(40°N~60°N, 80°E~120°E)区域平均的海平面气压定义为西伯利亚高压,将(50°N~70°N, 50°E~80°E)区域平均的 500 hPa 位势高度场定义为乌拉尔山阻塞高压,图 8a、8b 给出了前秋关键区海温分别与乌拉尔山阻塞高压和西伯利亚高压的时间变化序列。

从图 8a 可以看出,20 世纪 80 年代左右开始,前秋关键区海温与乌拉尔山阻塞高压的反位相变化特征非常清楚。进一步分析二者的 21 a 滑动相关(如图中粗线条所示),在 20 世纪 50 年代初期至 80 年代初期,二者为较弱的正相关,之后相关值逐渐减弱,在 20 世纪 70 年代中期至 90 年代中期时段减弱为显著的负相关。虽然在 20 世纪 80 年代中期至 00 年代中期二者的相关系数有所减弱,但是之后二者的负相关关系又一次显著增强,说明关键

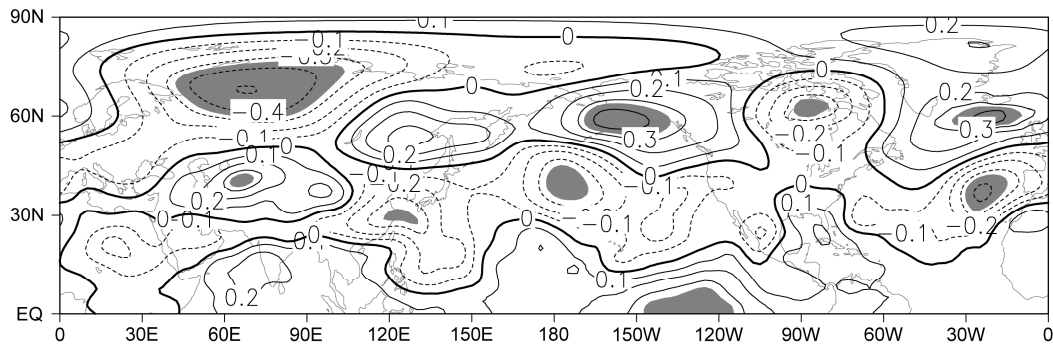


图7 前期秋季关键区海面温度与同期 500 hPa 位势高度场的相关分布 (阴影区通过 0.05 显著性检验)

Fig. 7 Correlation between SST in the key region and 500-hPa geopotential height in the preceding autumn (shaded areas are significant at 0.05 level)

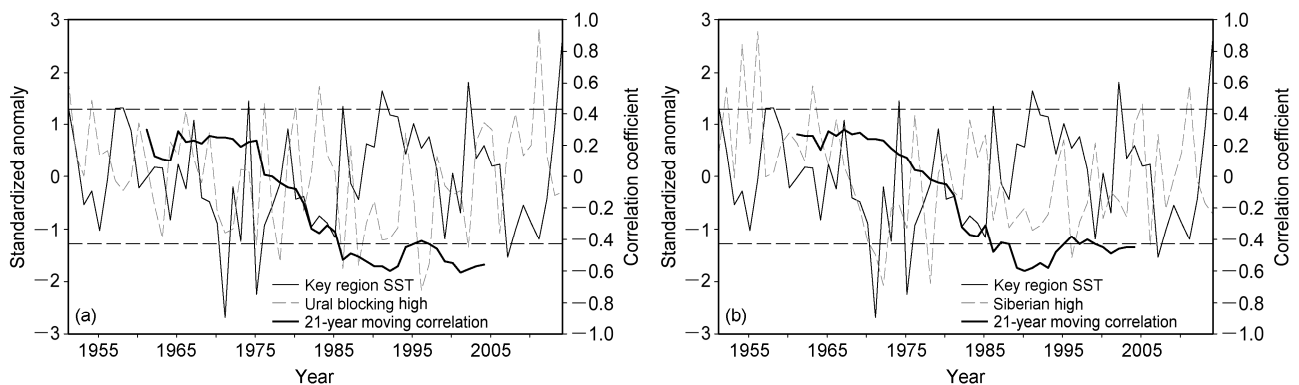


图8 前期秋季关键区海面温度分别与 (a) 乌拉尔山阻塞高压和 (b) 西伯利亚高压标准化距平。21 a 滑动相关系数对应的年份是 21 年的中间年份 (例如 1961 年数值对应为 1951~1971 年相关系数); 两条水平虚线对应于 0.05 显著性检验

Fig. 8 Sliding-window correlation coefficients of standardized anomalies of SST in the key region in the preceding autumn and (a) the Ural blocking high and (b) the Siberian high in a 21-year window. Numbers in the abscissa mean the middle of the 21-year period, for example, 1961 means the correlation coefficient is calculated within the period of 1951–1971; the two dashed lines indicate significance at 0.05 level

区海温对乌拉尔山阻塞高压的预测信号在增强。不论在年际尺度还是年代际尺度上, 前秋关键区海温与西伯利亚高压的变化特征 (图 8b) 与图 8a 非常相似, 二者的反相关关系在 80 年代以后更为显著。

通过计算乌拉尔山阻塞高压与西伯利亚高压的时间变化序列 (图 9), 发现二者呈显著的正相关, 相关系数为 0.79, 通过 0.01 显著性检验。由于 70 年代中后期大气环流在世界的许多地区发生突变 (Trenberth and Hurrell, 1994; Nakamura et al., 1997; Wang et al., 2007), 为此计算了 1951~1980 年和 1981~2014 年两个时段二者的相关系数, 分别是 0.7 和 0.86, 虽然两个时段的相关系数均通过 0.01 显著性检验, 但前一时段乌拉尔山阻塞高压只能解释西伯利亚高压方差的 49%, 而后一时段可达 74%。从 21 a 滑动相关也可以看出, 二者的正相关关系从 60 年代中期至 80 年代中期开始逐渐增强, 因此乌拉尔山阻塞高压在后一时段可以解释更高的方差。

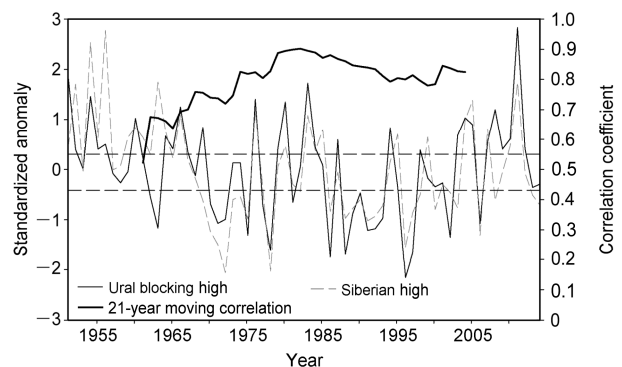


图9 同图 8, 但为乌拉尔山阻塞高压和西伯利亚高压标准化距平。上、下水平虚线分别对应于 0.01 和 0.05 显著性检验

Fig. 9 Same as Fig. 8, but for standardized anomalies of the Ural blocking high and Siberian high. The upper and lower dashed lines indicate significance at 0.01 and 0.05 levels, respectively

研究表明, 西伯利亚高压的强度可以用来表示东亚冬季气候 (Gong et al., 2001)。所以, 关键区海温通过其激发的遥相关波列改变乌拉尔山阻塞高

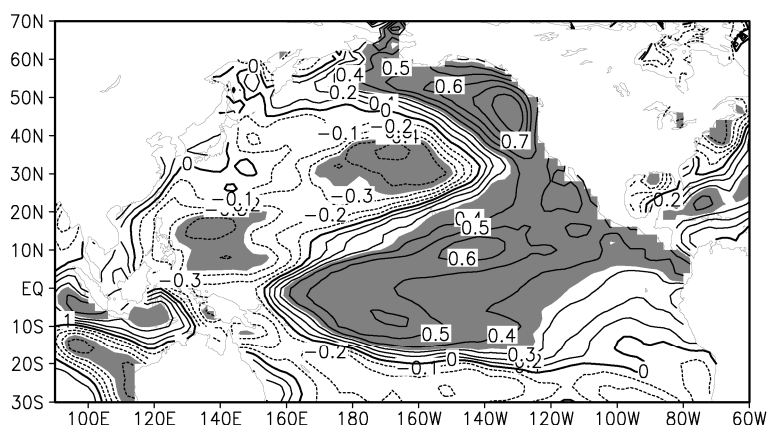


图 10 前期秋季关键区海面温度与冬季海表温度场的相关（阴影区通过 0.05 显著性检验）

Fig. 10 Correlation between the SST in the key region in the preceding autumn and the winter SST (the shaded areas are significant at 0.05 level)

压和西伯利亚高压强度，使得亚洲地区环流形势发生变化，进而影响我国北方冬季气温。由于近 30 多年来乌拉尔山阻塞高压与西伯利亚高压正相关关系的加强，关键区海温对我国北方冬季气温的这种间接影响在 1980 年代以来也更为显著，这也侧面证实选取 1981 年以来的历史资料进行分析是较为合理的。

5 讨论

由于海洋—大气耦合作用是一个非常复杂的过程，除上述中高纬度遥相关波列的影响外，海洋自身的演变对我们关注的大气系统也起到了一定作用，包括海盆尺度的季节和年际尺度的异常作用及非关键区域的强迫。从前期秋季关键区海温与冬季海表温度的相关（图 10）可看到，在前文所述海温关键区仍存在一个显著的正相关区，中心相关系数达到 0.8 以上，通过了 0.001 的显著性检验，说明关键区海温的异常信号可以持续到冬季。此外，在赤道中东太平洋也存在一个显著的正相关区，而菲律宾以东的暖池区及北太平洋中部均存在显著的负相关区，表现出较明显的 El Niño (La Niña) 特征。El Niño 年的冬季大都伴随着弱的东亚冬季风，亚洲上空环流形势不利于寒潮向南爆发，中国大部地区冬季温度比气候平均值偏高，而 La Niña 年一般都伴随着强的冬季风，中国大部地区冬季温度比气候平均值偏低（李崇银，1989；陶诗言和张庆云，1998；陈文，2002；张庆云等，2008；Wang and Lu，2017）。所以，前期关键区海温不仅在本地区具有较好的持

续性，在一定程度上也受到海盆尺度异常—El Niño (La Niña) 信号的影响，通过改变冬季风的强弱影响我国冬季气温。

本文初步分析了中纬度北太平洋东部海温对北方冬季气温的可能影响，但在详细机制上，如其与 ENSO 的内在联系及其对北方冬季气温是否还有其他影响路径等方面仍需深入开展研究。影响冬季气温的气候系统非常复杂，除了海洋的前兆信号及中高纬阻塞系统，欧亚积雪（Watanabe and Nitta，1999；Clark and Serreze，2000）、北极海冰（黄菲和高聪晖，2012）和一些其他外源强迫因子对冬季气温也有显著的影响，这些内容都有待于进一步系统研究。

6 结论

本文研究了中纬度北太平洋东部海温（34°N~52°N，142°W~128°W）对我国北方冬季气温的影响，并探讨了可能的影响机制，得到以下主要结论：

（1）前期夏、秋季中纬度北太平洋东部海温与北方冬季气温存在持续稳定的正相关关系，且秋季相关更显著。两个季节在年代际尺度上与气温的相关性均较年际时间尺度更为显著。

（2）关键区海温在对流层中低层可激发出一种类似北美—大西洋—欧亚型遥相关波列。当前期关键区海温偏高（低）时，其激发的波列使得乌拉尔山阻塞高压偏弱（强），西伯利亚高压偏弱（强），贝加尔湖以南我国北方大部地区受正（负）高度

距平控制, 亚洲中高纬地区以纬(经)向环流为主, 有利于北方大部气温偏高(低)。其中, 北大西洋海温在整个波列当中起到了桥梁和纽带的作用, 使得前期秋季的异常信号得以储存, 之后继续以波列的形式影响下游气候。

(3) 前期关键区海温不仅在本地区具有较好的持续性, 在一定程度上也可以指示 El Niño (La Niña) 的信号, 通过改变冬季风的强弱影响我国冬季气温。

参考文献 (References)

- Barnett T P, Pierce D W, Latif M, et al. 1999. Interdecadal interactions between the tropics and midlatitudes in the Pacific Basin [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 26 (5): 615–618, doi:10.1029/1999GL900042.
- Cayan D R. 1992. Latent and sensible heat flux anomalies over the northern oceans: The connection to monthly atmospheric circulation [J]. *J. Climate*, 5 (4): 354–369, doi:10.1175/1520-0442(1992)005<0354:LASHFA>2.0.CO;2.
- Chen S F, Chen W, Wei K. 2013a. Recent trends in winter temperature extremes in eastern China and their relationship with the Arctic Oscillation and ENSO [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 30 (6): 1712–1724, doi:10.1007/s00376-013-2296-8.
- Chen H S, Liu L, Zhu Y J. 2013b. Possible linkage between winter extreme low temperature events over China and synoptic-scale transient wave activity [J]. *Science China: Earth Sciences*, 56 (7): 1266–1280, doi:10.1007/s11430-012-4442-z.
- 陈菊英, 章基嘉, 彭淑英. 1991. 乌拉尔 500hPa 月平均阻塞对中国气温同期和滞后影响的研究 [J]. *南京气象学院学报*, 14 (增刊): 489–496.
- Chen Juying, Zhang Jijia, Peng Shuying. 1991. A study of the relationship between the 500hPa monthly mean blocking pattern in the URAIS and the contemporary and lagging monthly mean temperatures in China [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese)*, 14 (S1): 489–496, doi:10.13878/j.cnki.dqkxb.1991.s1.017.
- 陈佩燕, 倪允琪, 殷永红. 2001. 近 50 年来全球海温异常对我国东部地区冬季温度异常影响的诊断研究 [J]. *热带气象学报*, 17 (4): 371–380.
- Chen Peiyan, Ni Yunqi, Yin Yonghong. 2001. Diagnostic study on the impact of the global sea surface temperature anomalies on the winter temperature anomalies in Eastern China in past 50 years [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 17 (4): 371–380, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2001.04.005.
- 陈少勇, 张燕霞, 夏权, 等. 2009. 中国东部冬季气温异常与海表温度异常的关系分析 [J]. *高原气象*, 28 (5): 1181–1188.
- Chen Shaoyong, Zhang Yanxia, Xia Quan, et al. 2009. Analysis of relationship between winter air temperature in Eastern China and sea surface temperature anomaly [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 28 (5): 1181–1188.
- 陈文. 2002. El Niño 和 La Niña 事件对东亚冬、夏季风循环的影响 [J]. *大气科学*, 26 (5): 595–610.
- Chen Wen. 2002. Impacts of El Niño and La Niña on the cycle of the East Asian winter and summer monsoon [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 26 (5): 595–610, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2002.05.02.
- Clark M P, Serreze M C. 2000. Effects of variations in East Asian snow cover on modulating atmospheric circulation over the North Pacific Ocean [J]. *J. Climate*, 13 (20): 3700–3710, doi:10.1175/1520-0442(2000)013<3700:EOVIEA>2.0.CO;2.
- 丁一汇, 戴晓苏. 1994. 中国近百年来的温度变化 [J]. *气象*, 20 (12): 19–26.
- Ding Yihui, Dai Xiaosu. 1994. Temperature variation in China during the last 100 years [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 20 (12): 19–26, doi:10.7519/j.issn.1000-0526.1994.12.008.
- 丁一汇, 张莉. 2008. 青藏高原与中国其他地区气候突变时间的比较 [J]. *大气科学*, 32 (4): 794–805.
- Ding Yihui, Zhang Li. 2008. Intercomparison of the time for climate abrupt change between the Tibetan Plateau and other regions in China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32 (4): 794–805, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.04.08.
- Ding Y H, Liu Y J, Liang S J, et al. 2014. Interdecadal variability of the East Asian winter monsoon and its possible links to global climate change [J]. *Journal of Meteorological Research*, 28 (5): 693–713, doi:10.1007/s13351-014-4046-y.
- Gong D Y, Wang S W, Zhu J H. 2001. East Asian winter monsoon and Arctic Oscillation [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 28 (10): 2073–2076, doi:10.1029/2000GL012311.
- Hartmann D L. 2015. Pacific sea surface temperature and the winter of 2014 [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 42 (6): 1894–1902, doi:10.1002/2015GL063083.
- 黄菲, 高聪晖. 2012. 东亚冬季气温的年际变化特征及其与海温和海冰异常的关系 [J]. *中国海洋大学学报*, 42 (9): 7–14.
- Huang Fei, Gao Conghui. 2012. Interannual variations of winter temperature in East Asia and their relationship with sea surface temperature and sea ice concentration [J]. *Periodical of Ocean University of China (in Chinese)*, 42 (9): 7–14.
- 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.
- 贾丹, 简茂球. 2015. 中国冬季月地面气温的年际变化 [J]. *气候与环境研究*, 20 (4): 454–464.
- Jia Dan, Jian Maoqiu. 2015. Interannual variability of wintertime monthly surface air temperature in China [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 20 (4): 454–464, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2015.14240.
- Joung C H, Hitchman M H. 1982. On the role of successive downstream development in East Asian polar air outbreaks [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 110 (9): 1224–1237, doi:10.1175/1520-0493(1982)110<1224:OTROSD>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): 437–472, 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, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2006.03.09.
- 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, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2009.01.05.
- Lau K M, Li M T. 1984. The monsoon of East Asia and its global associations—A survey [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 65 (2): 114–125, doi:10.1175/1520-0477(1984)065<0114:TMOEAA>2.0.CO;2.
- 李崇银. 1989. El Niño 事件与中国东部气温异常 [J]. 热带气象学报, 5 (3): 210–219. Li Chongyin. 1989. El Niño event and the temperature anomalies in Eastern China [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 5 (3): 210–219.
- Li S L. 2004. Impact of northwest Atlantic SST anomalies on the circulation over the Ural Mountains during early winter [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 82 (4): 971–988, doi:10.2151/jmsj.2004.971.
- Li S L, Bates G T. 2007. Influence of the Atlantic multidecadal oscillation on the winter climate of East China [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 24 (1): 126–135, doi:10.1007/s00376-007-0126-6.
- 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, doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.2004.02.001.
- 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, Cholaw B, Tao Shiyun, 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, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2010.01.04.
- Liu Y Y, Wang L, Zhou W, et al. 2014. Three Eurasian teleconnection patterns: Spatial structures, temporal variability, and associated winter climate anomalies [J]. Climate Dyn., 42 (11–12): 2817–2839, doi:10.1007/s00382-014-2163-z.
- 刘舸, 宋文玲, 朱艳峰. 2013. 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. 2013. 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, doi:10.11676/qxb.2013.025.
- 卢国阳. 2016. 前秋海温信号与东亚冬季风关系的年代际变化及 CMIP5 对冬季遥相关的模拟 [D]. 中国科学技术大学硕士学位论文, 21–32. Lu Guoyang. 2016. Decadal variation of the relationship between autumn SST and the East Asian winter monsoon and the simulation of teleconnection in CMIP5 [D]. M. S. thesis (in Chinese), University of Science and Technology of China, 21–32.
- Nakamura H, Lin G, Yamagata T. 1997. Decadal climate variability in the North Pacific during the recent decades [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 78 (10): 2215–2226, doi:10.1175/1520-0477(1997)078<2215:DCVITN>2.0.CO;2.
- Palmer T N, Sun Z B. 1985. A modelling and observational study of the relationship between sea surface temperature in the North-West Atlantic and the atmospheric general circulation [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 111 (470): 947–975, doi:10.1002/qj.49711147003.
- 钱维宏, 梁浩原. 2012. 北半球大气遥相关型与区域尺度大气扰动 [J]. 地球物理学报, 55 (5): 1449–1461. Qian Weihong, Liang Haoyuan. 2012. Atmospheric teleconnections and regional-scale atmospheric anomalies over the Northern Hemisphere [J]. Chinese Journal Geophysics (in Chinese), 55 (5): 1449–1461, doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.05.003.
- 曲金华, 江志红, 谭桂容, 等. 2006. 冬季北大西洋海温年际、年代际变化与中国气温的关系 [J]. 地理科学, 26 (5): 557–563. Qu Jinhua, Jiang Zhihong, Tan Guirong, et al. 2006. Relation between interannual, interdecadal variability of SST in North Atlantic in winter and air temperature in China [J]. Scientia Geographica Sinica (in Chinese), 26 (5): 557–563, doi:10.3969/j.issn.1000-0690.2006.05.007.
- 任国玉, 初子莹, 周雅清, 等. 2005. 中国气温变化研究最新进展 [J]. 气候与环境研究, 10 (4): 701–716. Ren Guoyu, Chu Ziyang, Zhou Yaqing, et al. 2005. Recent progresses in studies of regional temperature changes in China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 10 (4): 701–716, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2005.04.01.
- Smith T M, Reynolds R W. 2004. Improved extended reconstruction of SST (1854–1997) [J]. J. Climate, 17 (12): 2466–2477, doi:10.1175/1520-0442(2004)017<2466:IEROS>2.0.CO;2.
- Takaya K, Nakamura H. 2005. Mechanisms of intraseasonal amplification of the cold Siberian high [J]. J. Atmos. Sci., 62 (12): 4423–4440, doi:10.1175/JAS3629.1.
- 唐红玉, 翟盘茂, 王振宇. 2005. 1951~2002 年中国平均最高、最低气温及日较差变化 [J]. 气候与环境研究, 10 (4): 728–735. Tang Hongyu, Zhai Panmao, Wang Zhenyu. 2005. On change in mean maximum temperature, minimum temperature and diurnal range in China during 1951–2002 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 10 (4): 728–735, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2005.04.03.
- 唐卫亚, 孙照渤. 2007. 印度洋海温异常与中国气温异常的可能联系 [J]. 南京气象学院学报, 30 (5): 667–673. Tang Weiya, Sun Zhaobo. 2007. Effect of Indian ocean SSTA on China temperature anomaly [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 30(5): 667–673, doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2007.05.011.
- 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 Shiyun, Zhang Qingyun. 1998. Response of the Asian winter and summer monsoon to ENSO events [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 22 (4): 399–407, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1998.04.02.
- Trenberth K E. 1990. Recent observed interdecadal climate changes in the Northern Hemisphere [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 71 (7): 998–993, doi:10.1175/1520-0477(1990)071<0988:ROICCI>2.0.CO;2.
- Trenberth K E, Hurrell J W. 1994. Decadal atmosphere–ocean variations in the Pacific [J]. Climate Dyn., 9(6): 303–319, doi:10.1007/BF00204745.
- Wallace J M, Smith C, Jiang Q R. 1990. Spatial patterns of atmosphere–ocean interaction in the Northern winter [J]. J. Climate, 3 (9): 990–998, doi:10.1175/1520-0442(1990)003<0990:SPOAOI>2.0.CO;2.
- Wang B. 1995. Interdecadal changes in El Niño onset in the last four decades [J]. J. Climate, 8 (2): 267–285, doi:10.1175/1520-0442(1995)008<0267:ICIENO>2.0.CO;2.
- 王凌, 张强, 陈峪, 等. 2007. 1956~2005 年中国暖冬和冬季温度变化 [J]. 气候变化研究进展, 3 (1): 26–30. Wang Ling, Zhang Qiang, Chen Yu, et al. 2007. Changes of warmer winter and winter temperature over

- China in the past 50 years [J]. *Advances in Climate Change Research* (in Chinese), 3 (1): 26–30, doi:10.3969/j.issn.1673-1719.2007.01.005.
- 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.
- Wang L, Chen W. 2014a. An intensity index for the East Asian winter monsoon [J]. *J. Climate*, 27 (6): 2361–2374, doi:10.1175/JCLI-D-13-00086.1.
- Wang L, Chen W. 2014b. 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, Lu M M. 2017. The East Asian winter monsoon [M]//Chang C P, Ding Y H, Lau N C, et al. *The Global Monsoon System: Research and Forecast* (3rd Edition). Taiwan: World Scientific Publishing Co., 51–61.
- 王谦谦, 钱永甫, 徐海明, 等. 1995. 1991 年太平洋海温异常对降水影响的数值试验 [J]. *南京气象学院学报*, 18 (2): 200–206. Wang Qianqian, Qian Yongfu, Xu Haiming, et al. 1995. Numerical study of influence on rainfall of 1991 Pacific SST anomaly [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 30 (5): 667–673.
- Watanabe M, Nitta T. 1999. Decadal changes in the atmospheric circulation and associated surface climate variations in the Northern Hemispheric winter [J]. *J. Climate*, 12 (2): 494–510, doi:10.1175/1520-0442(1999)012<0494:DCITAC>2.0.CO;2.
- 殷明, 肖子牛, 黎鑫, 等. 2016. 东海黑潮暖舌的演变及其对我国气温的影响 [J]. *气候与环境研究*, 21 (3): 333–345. Yin Ming, Xiao Ziniu, Li Xin, et al. 2016. Evolement of the Kuroshio warm tongue in the East China Sea and its relationship with temperature in China [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 21 (3): 333–345, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.15245.
- 张晨, 余锦华, 刘红艳, 等. 2014. 东北地区冬季气温对海温异常响应的研究 [J]. *南京信息工程大学学报*, 6 (5): 459–468. Zhang Chen, Yu Jinhua, Liu Hongyan, et al. 2014. Response of winter air temperature in Northeast China to SST anomaly [J]. *Journal of Nanjing University of Information Science and Technology* (in Chinese), 6 (5): 459–468, doi:10.3969/j.issn.1674-7070.2014.05.009.
- 张庆云, 陶诗言, 彭京备. 2008. 我国灾害性天气气候事件成因机理的研究进展 [J]. *大气科学*, 32 (4): 815–825. Zhang Qingyun, Tao Shiyan, Peng Jingbei. 2008. The studies of meteorological disasters over China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 32 (4): 815–825, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.04.10.
- 张友姝. 2002. 华北地区气温的气候特征及其与 100 hPa 高度场异常、西北印度洋海温异常的关系 [D]. *南京气象学院硕士学位论文*, 30–38. Zhang Youshu. 2002. Climatic characteristics of air temperature in North China and the relationship between 100 hPa geopotential height anomaly, SST anomaly in Northwest Indian Ocean and the air temperature [D]. M. S. thesis (in Chinese), Nanjing Institute of Meteorology, 30–38.