李一玲, 王澄海, 张飞民. 2018. 欧亚大陆冬季地表温度南北反相变化的年代际特征及机理 [J]. 气候与环境研究，23 (2): 161−175. Li Yiling, Wang Chenghai, Zhang Feimin. 2018. Interdecadal variations and mechanisms of the seesaw pattern for winter surface temperature between northern and southern Eurasia [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 23 (2): 161−175, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17059.

欧亚大陆冬季地表温度南北反相变化的年代际特征及机理

李一玲　王澄海　张飞民

兰州大学大气科学学院，甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室，兰州 730000

摘　要　对欧亚大陆冬季地表温度南北反相的时空分布特征及机理的分析结果表明，欧亚大陆冬季地表温度约以 55°N 为界存在南北反相变化特征。1961～2015 年欧亚大陆冬季地表温度变化具有显著的年际和年代际变化特征；年代际尺度上，北半球行星波“冬三”分布型变化与欧亚大陆地表温度南北反相变化密切联系。冬季欧亚地表温度南北反相变化存在明显的季节内转变。滤除年代际信号和全球变暖趋势后，欧亚大陆冬季地表温度与秋季北极海冰面积之间存在显著相关；北极海冰面积减小是欧亚、尤其中亚地区冬季地表温度降低的主要外强迫因素之一；同期北大西洋“三极子”和欧亚大陆冬季地表温度南北反相变化在年际尺度上存在显著相关。

关键词　冬季地表温度　年际和年代际变化　大气环流形势　海冰　海面温度

文章编号　1006-9585（2018）02-0161-15　　**中图分类号**　P461　　**文献标识码**　A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17059

Interdecadal Variations and Mechanisms of the Seesaw Pattern for Winter Surface Temperature between Northern and Southern Eurasia

LI Yiling, WANG Chenghai, and ZHANG Feimin

College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Key Laboratory for Arid Climatic Change and Disaster Reduction of Gansu Province, Lanzhou 730000

Abstract　The characteristics and mechanism of the spatial and temporal seesaw pattern of winter surface temperature between northern and southern Eurasia was analyzed. Results show that the seesaw pattern of winter surface temperature between northern and southern Eurasia is evident with the boundary located at about 55°N. Besides, the interannual and interdecadal variations of winter surface temperature over Eurasia are also significant during 1961−2015. On the interdecadal scale, planetary waves in the Northern Hemisphere such as the “Three Troughs/Ridges in winter” are closely associated with the seesaw pattern. In addition, this seesaw pattern on the interdecadal scale also has an obvious transitional feature on seasonal scale. Results that exclude the interdecadal and global warming signals indicate that winter surface temperature in Eurasia is significantly correlated with the Arctic sea ice extent in autumn. The decrease in Arctic sea ice extent is one of the main external forcing factors that cause decreases in winter surface temperature in Eurasia, especially in central Asia. Further analysis shows that on interannual time scale, the seesaw pattern has a

收稿日期　2017-03-31；**网络预出版日期**　2017-07-13

作者简介　李一玲，女，1992 年出生，硕士研究生，主要从事气候变化研究。E-mail: ylli15@lzu.edu.cn

通讯作者　王澄海，E-mail: wch@lzu.edu.cn

资助项目　国家自然科学基金 91437217、41471034、41661144017，公益性行业（气象）科研专项（重大专项）GYHY201506001-4

Fund by　National Natural Science Foundation of China (Grants 91437217, 41471034, and 41661144017), China Special Fund for Meteorological Research in the Public Interest (Major projects, Grant GYHY201506001-4)

significant correlation with the synchronous sea surface temperature that displays a “three-pole” structure in the North Atlantic Ocean.

Keywords Winter surface temperature, Interdecadal and interannual variations, General circulation pattern, Sea ice, Sea surface temperature

1 引言

温度变化是气候研究中的基础性问题，20 世纪 50 年代之前就已展开了关于半球及全球温度变化的研究。Mitchell (1961) 在 20 世纪 60 年代建立了较可靠的近百年半球及全球平均气温序列，分析出近百年来全球气候有变暖趋势（Mitchell, 1961；唐国利等，2009）。IPCC（2013）第五次报告结果显示，结合全球海洋和陆地地表温度数据，全球平均地表温度在 1901～2012 年间上升了 0.89 °C，特别是欧亚大陆中高纬地区地表温度上升幅度可达 1.5 °C，其中冬季气温的变化较显著。冬季气温的演变是一个非常复杂的问题，其与大气环流联系密切，东亚冬季风作为欧亚大陆中高纬地区大气环流的主要影响因子，与青藏高原冬季降雪存在显著相关（王澄海等，2015）。东亚冬季风强度变化可引起中国冬季气温一致性变化，其路径变化往往对应着气温南北反相变化（陈文等，2013）。而北极涛动(Arctic Oscillatio, AO)、北大西洋涛动(North Atlantic Oscillation, NAO)等北半球大尺度环流型异常可改变西伯利亚高压的范围及强度，进而改变东亚冬季风的路径和强度，从而对冬季气温产生影响（Walker, 1923；王永波和施能，2001；Gong and Ho, 2003；琚建华等，2004）。研究也指出，南极涛动异常也与欧亚冬春季气温联系密切，冬季南极涛动异常可通过两半球的经向遥相关型影响东亚局地环流，在南极涛动强年，欧亚大陆西风偏强，东亚冷空气强度减弱，冬季气温增高。同时，冬春季南极涛动变化引起的大气环流改变也会影响春季沙尘天气发生的频次（Fan and Wang, 2004；范可和王会军，2006）。外强迫因子（海冰、积雪面积、海表面温度等）变化也可影响冬季气温。如秋季北极海冰的减少可改变极区大气环流使得欧亚大陆冬季气温偏低（Honda et al., 2009；Jaiser et al., 2012；Outten and Esau, 2012；Hopsch et al., 2012）。El Niño 年，赤道东太平洋海表面温度正异常促使中国东部冬季温度异常升高，出现暖冬，也即海表面温度的变化对中国冬季温度有一定影响（Wu and Cubasch, 1987；Zhang et al., 1996；Wang et al., 2012）。由此可见，冬季气温会受到大气环流和外强迫因子（积雪、海温、海冰）的共同影响，从而表现为多尺度、多区域的复杂演变特征。

随着对冬季气候的深入认识，研究结果显示，在全球变暖背景下，近百年来东亚地区冬季气温主要有两种变化类型：一类为西南—东北反相变化，另一类为 40°N 以南气温一致变化型（范可和刘辉，2013）；中国冬季气温年代际变化主要也可分为两类模态，一种表现为全国范围一致降温或升温。第二类为南北地区气温的反相变化（康丽华等，2006；韦玮等，2014）。研究也认为（韦玮等，2014），中国地区前冬、后冬气温存在着显著的年际变化特征，不同演变模态对应着不同的大气环流背景。中国冬季气温除了在时空分布上显示出年际、年代际变化特征，其季节内也存在着明显的年际、年代际差异（谢庄和曹鸿兴，1996；黄嘉佑和胡永云，2006；黄琦，2007）。

研究也表明，除了中国冬季气温存在南北反相变化的特点，欧亚大陆冬季气温也同样存在南、北反相变化。何金海等（2015）利用 1979～2012 年的欧洲中期数值预报中心 2 m 气温资料（ERA_Interim），分析了年代际和年际时间尺度上秋季北极海冰与欧亚冬季气温的联系，认为在年代际尺度上，北极秋季海冰偏少对应冬季欧亚大陆中高纬高压异常，从而利于北极冷空气南侵；年际尺度上，北冰洋西南边缘的巴伦支海、喀拉海和拉普捷夫海西部的海冰偏少将引发冬季北大西洋涛动负位相，导致欧亚大陆中高纬气温偏低。由此可见，秋季北极海冰减少将对欧亚大陆冬季气温产生影响。

本文利用 NASA 戈达德空间研究所 1961～2015 年 GISS (Goddard Institute for Space Studies)的地表温度资料，对欧亚大陆冬季地表温度的时空分布特征进行分析，探讨大气环流异常和外强迫因子（海冰和海温）与欧亚大陆冬季地表温度南北反相变化之间的联系。加深认识了欧亚大陆冬季温度的变化特征及可能的机理，为提高冬季气候的预测水平提供参考依据。

2 资料及研究方法

本文使用的地表温度数据为 GISS 2°（纬度）×2°（经度）月平均地表温度距平场资料，该数据中的气候平均值以 1951～1980 年为基准，时段为 1880 年 1 月至 2016 年 4 月。海冰资料采用美国国家冰雪数据中心（NSIDC）提供的 1979～2015 年 9 月、10 月北极海冰面积（Sea Ice Extent）观测资料，其分辨率为 25 km。海温资料采用日本气象厅（JMA）提供的 1°（纬度）×1°（经度）全球月平均海表面温度资料。大气环流数据为 NCEP/NCAR 提供的全球月平均再分析资料(Kalnay et al., 1996)，包括 200 hPa 纬向风、500 hPa 高度场及海平面气压场，该资料垂直方向上等压面共有 17 层，其要素的格点分辨率均为 2.5°（纬度）×2.5°（经度）。文中大气环流场的距平值计算以 1981～2000 年气候态平均值为基准，冬季指当年 12 月至次年 2 月。北大西洋海温三极子指数采用中国气象局国家气候中心的数据（http://cmdp.ncc-cma.net [2016-10-15]）。

为研究欧亚大陆冬季地表温度的时空分布特征，本文使用经验正交分解 (Empirical Orthogonal Function, EOF) 方法对欧亚大陆冬季地表温度的时空变化进行分析。分析中，本文用标准化后的 1961～2015 年欧亚大陆冬季地表温度 EOF 时间序列，回归到原温度距平场来代替 EOF 空间场，并使用 *t* 检验进行了显著性检验。

3 欧亚大陆冬季地表温度时空变化特征及季节内的持续性

为了揭示冬季欧亚大陆季节内地表温度的时空分布特征，对 1961～2015 年冬季（12 月至次年 2 月）的地表温度分别进行 EOF 分解。由图 1、2 可知，冬季三个月前两个模态的解释方差之和均接近 50%，这表明温度场收敛性快，且在空间上的一致性较好。第一模态（图 1a、1b、1c）揭示出欧亚大陆冬季地表温度大范围一致变化特征，反映出冬季欧亚大陆在来自北极的冷空气控制之下，40°N 以北区域（欧洲和西伯利亚）地表温度变化具有较高的一致性，通过了 95%的显著性检验。图 1d、1e、1f 给出了对应的时间序列演变，结合 11 年滑动平均曲线可以看出，1、2 月地表温度的时间系数 (Principal Component 1, PC1)（图 1e、1f）在 1985 年前后存在一次明显的年代际转变；而 12 月 PC1（图 1 d）的年际变化较明显，反映出前冬（12 月）冷空气活动的年际变化大。由时间变化（图 1e、1f）和空间分布（图 1b、1c）可知，欧亚大陆 40°N 以北地区 1、2 月地表温度在 1985 年前后经历了一次显著的转变，转换前地表温度偏冷，之后转为偏暖。

图 2 为 1961～2015 年欧亚大陆冬季地表温度第二模态空间分布及其对应的时间系数 PC2。12 月第二模态的解释方差为 15.9%，12 月的空间分布场（图 2a）反映出欧亚大陆冬季地表温度大致以 55°N 为界呈现出南北反相变化，欧亚大陆北部地表温度以正异常为主，中亚及东亚地区为负异常区，尤其在中亚地区负异常最为明显。1 月第二模态空间分布（图 2b）与 12 月相似，欧亚大陆地表温度南北反相变化特征明显，解释方差为 15.2%；欧亚大陆中部通过显著性检验的区域相比 12 月略有减小，而 55°N 以北地区显著性的范围有所增加，也即温度变化剧烈的范围更广。2 月的第二模态空间分布型（图 2c）与 12 月、1 月一致，呈现出南北反相变化特征；不同的是，该月 55°N 以北地区为负异常区，中亚及中国大部分地区为正异常区，且该月欧亚大陆中部通过显著性检验的地区相比前两个月略有增加，表明温度变化剧烈的区域更广。

冬季三个月地表温度第二模态的时间系数 PC2（图 2d、2e、2f）与 PC1 一样，也存在年代际变化。结合 11 年滑动平均曲线可以看出，12 月第二模态时间系数 PC2（图 2d）大致以 1976 年、2000 年为正、负分界点，1976 年之前 PC2 以正值为主，1976～2000 年以负值为主，2000 年之后又转为正值。1 月 PC2（图 2e）的变化与 12 月相似，但正负分界的时间点略有不同。2 月 PC2（图 2f）则在 1990 年以前以负值为主，之后转为正值。结合空间分布（图 2a、2b、2c）可知，12 月至次年 1 月，欧亚大陆 55°N 以北区域在 1976 年之前、2000 年以后以偏暖为主，中亚及中国大部分地区偏冷，1976～2000 年亚洲中部地区偏暖，55°N 以北地区偏冷。2 月，55°N 以北地区在 1990 年之前地表温度偏暖，亚洲中部地区偏冷，1990 年之后，55°N 以北地表温度转为偏冷，亚洲中部地表温度以偏暖为主。

以上结果表明，欧亚大陆冬季地表温度 EOF 第二模态存在近似南北反相变化的特征，其分界线

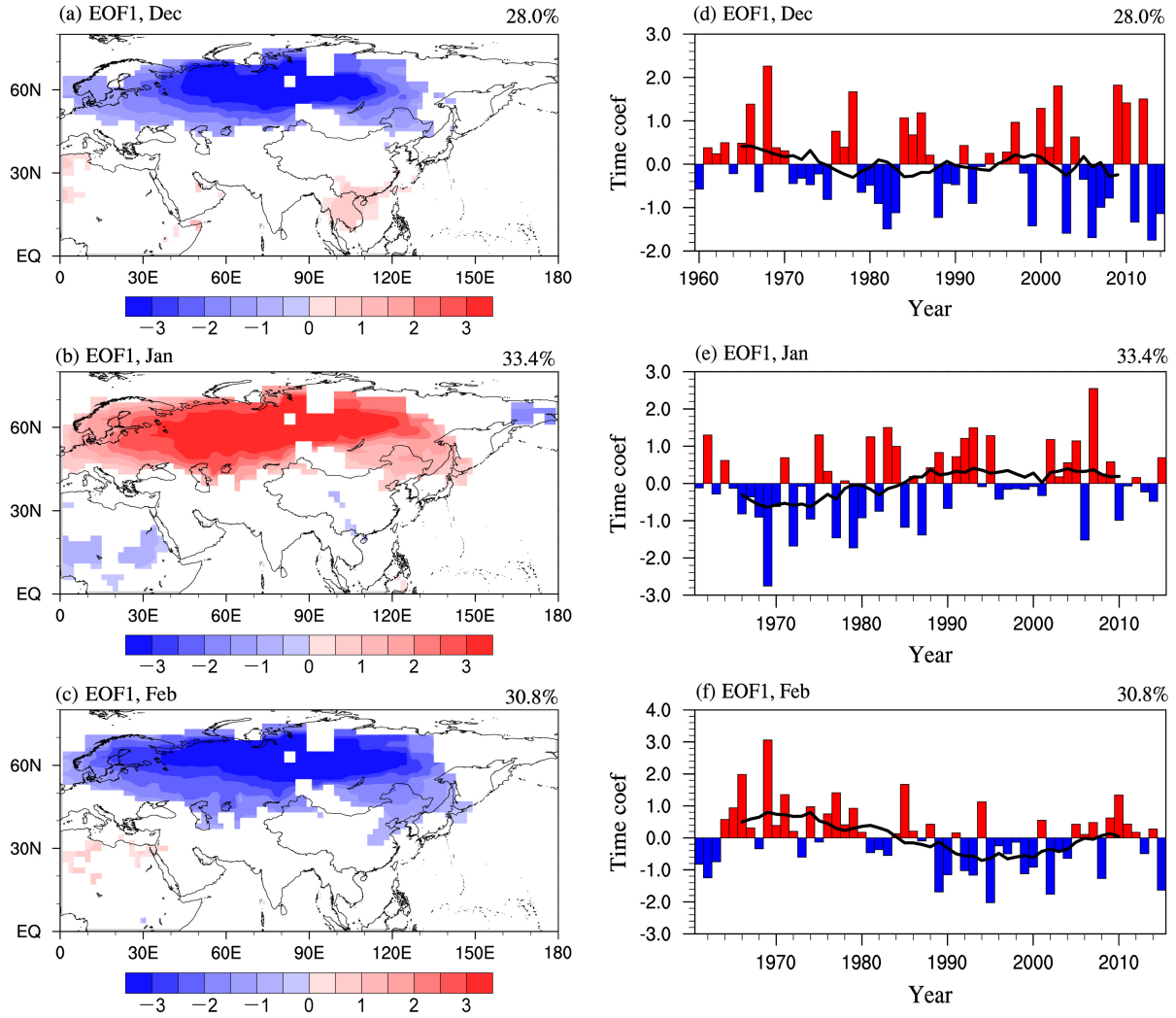

图 1 1961～2015 年欧亚大陆冬季地表温度（12 月至次年 2 月）EOF 第一模态：（a–c）空间分布型（阴影区表示通过了 95%显著性检验）；（d–f）标准化时间序列（直方图，实线表示 11 年滑动平均曲线）

Fig. 1 The first Empirical Orthogonal Function (EOF) mode of surface temperature in winter (Dec to next Feb) from 1961 to 2015 over the Eurasian region: (a–c) Spatial distribution based on the standardized time series (shaded colors represent values above the 95% confidence level); (d–f) standardized time series (bars, the solid line indicates 11-year running mean)

约在 55°N 左右。冬季各月地表温度的南北反相变化皆存在明显的年代际变化特征。此外，2 月地表温度偏冷、偏暖的时间段与 12 月、1 月不同，表明第二模态冬季地表温度年代际变化也存在明显的季节内差异。事实上，近年的观测也表明，冬季地表温度在季节内尺度上会出现季节内突变，其月际持续性并不好，如 2001 年 12 月中国全国一致偏冷而 1 月和 2 月转为全国性偏暖（韦玮等，2014）。为了进一步考察欧亚大陆冬季地表温度变化在季节内的持续性，图 3 给出了 1961～2015 年 12 月与 1 月、12 月与 2 月、1 月与 2 月地表温度的相关系数分布。从图 3a 中可以看出，12 月与 1 月在（40°N～70°N，0°～80°E）区域及欧亚大陆南部（西西伯利亚平原、东欧平原、阿拉伯半岛、印度半岛、中南半岛及中国东北部）呈正相关且通过了 90%的显著性检验，表明这些地区的地表温度的持续性好。其余地区地表温度的持续性则较差。值得注意的是，中国东部长江中下游地区呈现负相关，这可能是由于该地区 12 月仍在海洋气团的控制下，使其与 1 月的地表温度表现出反相变化。12 月与 2 月（图 3b）相比 12 月与 1 月（图 3a），欧亚大陆地表温度整体的相关性更差，欧亚大陆通过显著性检验的正相关区范围明显缩小，显著正相关区主要集中在西伯利亚和欧洲西部。与前面两种情形不同，1 月与 2 月（图 3c）两月间的地表温度则

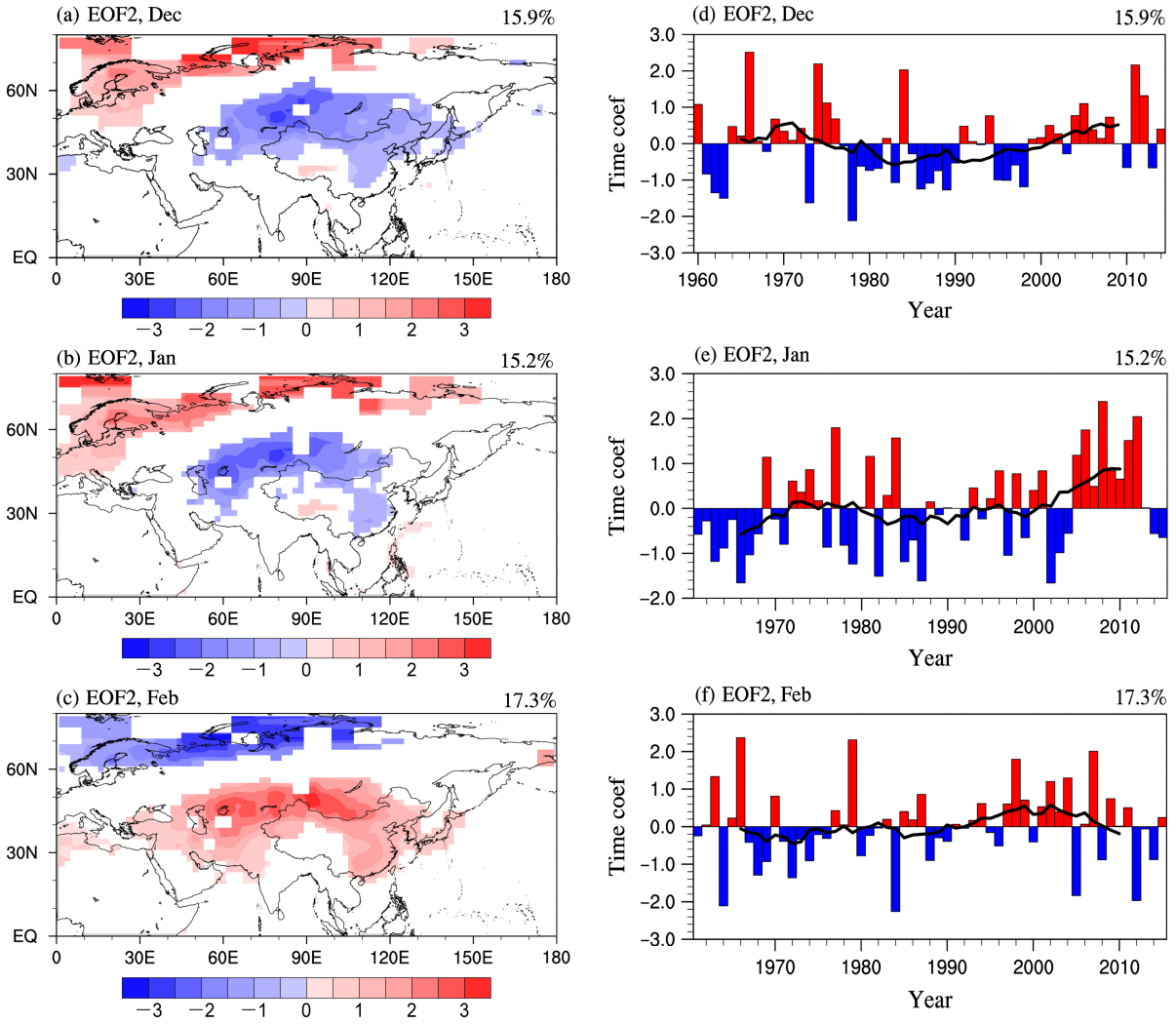

图 2　同图 1，但为 EOF 第二模态

Fig. 2　Same as Fig. 1, but for the second EOF mode

表现出很好的持续性，显著正相关区相比图 3a、3b 显著增加。由此可见，欧亚大陆近 50 年（1961～2015 年）来 12 月与 1 月地表温度整体上呈正相关，但在中国地区的持续性并不好；1 月和 2 月地表温度在欧亚大陆，包括中国地区的绝大部分地区呈显著正相关，表明 1～2 月地表温度的持续性和一致性较好。而 12 月与 2 月欧亚大陆地表温度整体的相关性较差，表明地表温度变化的持续性大约在一个月左右，这可能与冬季大气环流的演变有关。

4　欧亚大陆冬季地表温度反相变化的年代际变化特征

图 1 揭示的 20 世纪 80 年代中期欧亚大陆冬季地表温度 EOF 第一模态在 40°N 以北地区由整体偏冷转为偏暖，这一现象与东亚冬季风在 20 世纪 80 年代中期发生年代际减弱是相互对应的(Wang et al., 2009；Wang and Chen, 2014)。图 1a、1b、1c 揭示出，EOF 第一模态中欧亚大陆 40°N 以北地表温度变化一致。第二模态（图 2a、2b、2c）揭示出欧亚大陆冬季地表温度以 55°N 为界，呈现南北反相变化的特征。为了进一步分析地表温度南北反相变化的特征，将欧亚大陆冬季 3 个月的平均地表温度进行 EOF 分解。从第二模态（图 4）中挑选出地表温度年际变化异常值最大（小）的区域作为正、负中心（取温度异常值小于−1 °C 的区域为负中心，大于 1 °C 的区域为正中心），将地表温度正、负中心的差定义为北半球欧亚大陆冬季地表温度南北反

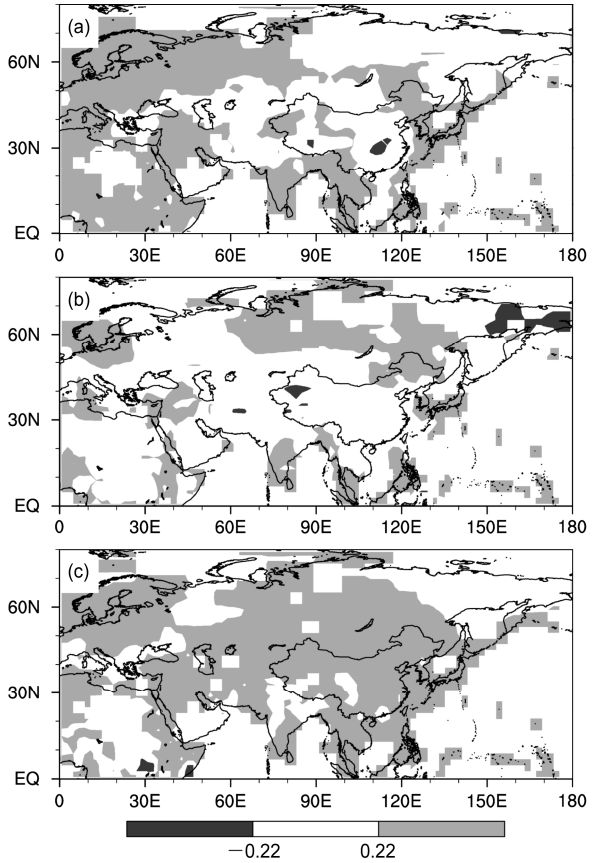

图 3 1961～2015 年欧亚大陆冬季地表温度两两月份间的相关系数分布：（a）12 月与 1 月；（b）12 月与 2 月；（c）1 月与 2 月。阴影部分通过了 90%的显著性检验，地表温度已去除线性趋势

Fig. 3 Correlation coefficients of surface temperature in winter from 1961 to 2015 over Eurasian region: (a) Between Dec and Jan; (b) between Dec and Feb; (c) between Jan and Feb. Shaded areas are for values above the 90% confidence level and the linear trend of surface temperature has been removed

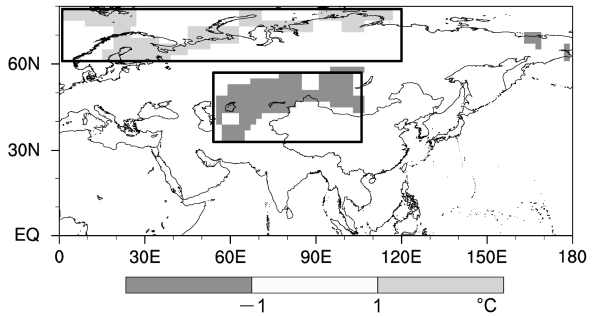

图 4 欧亚大陆冬季平均地表温度（12 月、1 月、2 月）EOF 第二模态的时间系数 PC2 对原温度场的回归分析（黑色方框表示温度异常的正负中心）

Fig. 4 Regression of mean surface temperature in winter over Eurasian region to normalized principal component (PC2). Black boxes indicate the positive and negative centers of temperature anomaly

相变化指数（I）：

$$I = T_N - T_S, \qquad (1)$$

其中，T_N 为正中心地表温度序列，T_S 为负中心地表温度序列。图 5a、5b、5c 给出了欧亚大陆冬季三个月地表温度区域平均的南北反相变化指数的年际演变。可以看出，12 月和 1 月在 1965～1976 年间以正异常为主，1980～2000 年为负异常，2001～2014 年再次变为正异常（图 5a、5b）；2 月在 1965～1976 年、1981～1992 年以正异常为主，1993～2008 年转为负（图 5c）。这表明，欧亚大陆冬季地表温度南北反相变化存在明显的年代际特征，这和图 2 的分析结果相一致。前冬（12 月、1 月）和后冬（2 月）在 1980～2000 年变化相反，在 2000 年后，2 月的变化明显滞后于 12 月、1 月的变化，也表明了地表温度持续性的变化特征。

为进一步分析地表温度南北反相变化的特征，根据第二模态冬季地表温度南北反相变化明显的区域（图 4b 黑框区域），统计出第二模态冬季正、负中心处 55 年（1961～2015 年）间地表温度的反号次数、反号率（表 1）。由表 1 可知，1961～2015 年冬季地表温度在正、负中心处的反号率在 40%左右，冬季欧亚大陆南、北部地表温度约有 18 年是反相变化的，表明冬季地表温度南北反相变化特征明显。其次，冬季三个月地表温度的反号率、反号次数呈现出明显的年代际变化；进一步的，我们对冬季各月南北反相变化指数做 MK 突变点检验，结果与上述时段划分基本一致（图略）。这也从侧面验证了冬季地表温度南北反相变化指数具有年代际变化的特征。

表 1 1961～2015 年第二模态正、负中心处冬季地表温度反号次数（反号率）统计

Table 1 Statistics of the number of surface temperature's opposite sign and rate of surface temperature's opposite sign according to positive and negative centers of the second mode in winter for the period 1961–2015

时段	反号次数（反号率）		
	12 月	1 月	2 月
1965～1976 年	6 (50%)	4 (33%)	6 (50%)
1980～2000 年（1981～1992 年）	10 (48%)	10 (48%)	4 (33%)
2001～2014 年（1993～2008 年）	3 (21%)	7 (50%)	5 (31%)
总和	19 (40%)	21 (45%)	15 (38%)

5 冬季欧亚大陆地表温度南北反相变化的大气环流背景

研究表明，欧亚大陆中高纬度大气环流异常（郭其蕴，1994；武炳义和黄荣辉，1999；龚道溢，2000；王澄海等，2015）是导致冬季地表温度异常

变化的最直接因子。为了分析冬季欧亚大陆地表温度南北反相变化的大气环流背景，我们结合图 5 中冬季 3 个月 *I* 的 11 年滑动平均曲线划分时间段，将 1961～2015 年大致分为 3 个时间段（12 月和 1 月取以下年份 ：1965～1976 年、1980～2000 年、2001～2014 年；2 月取以下年份 1965～1976 年、1981～1992 年、1993～2008 年），考察北半球大气环流的年代际变化特征发现，冬季 3 个月各阶段的时间跨度都在 10 年左右，表明欧亚大陆地表温度南北反相变化存在年代际特征。由于 12 月和 1 月的特征基本相似，因此只给出了 1 月和 2 月的大气环流特征图为代表；为了分析全球变暖在欧亚大陆地表温度南北反相变化中的效应，分别给出了 1980～2000 年和 2001～2014 年与 1965～1976 年的差值场及其显著性检验。

图 6 给出了 1 月 1980～2000 年与 1965～1976 年 200 hPa 纬向风、500 hPa 位势高度场，海平面气压场的差值场，并进行了 *t* 检验。图 6a 是 1980～

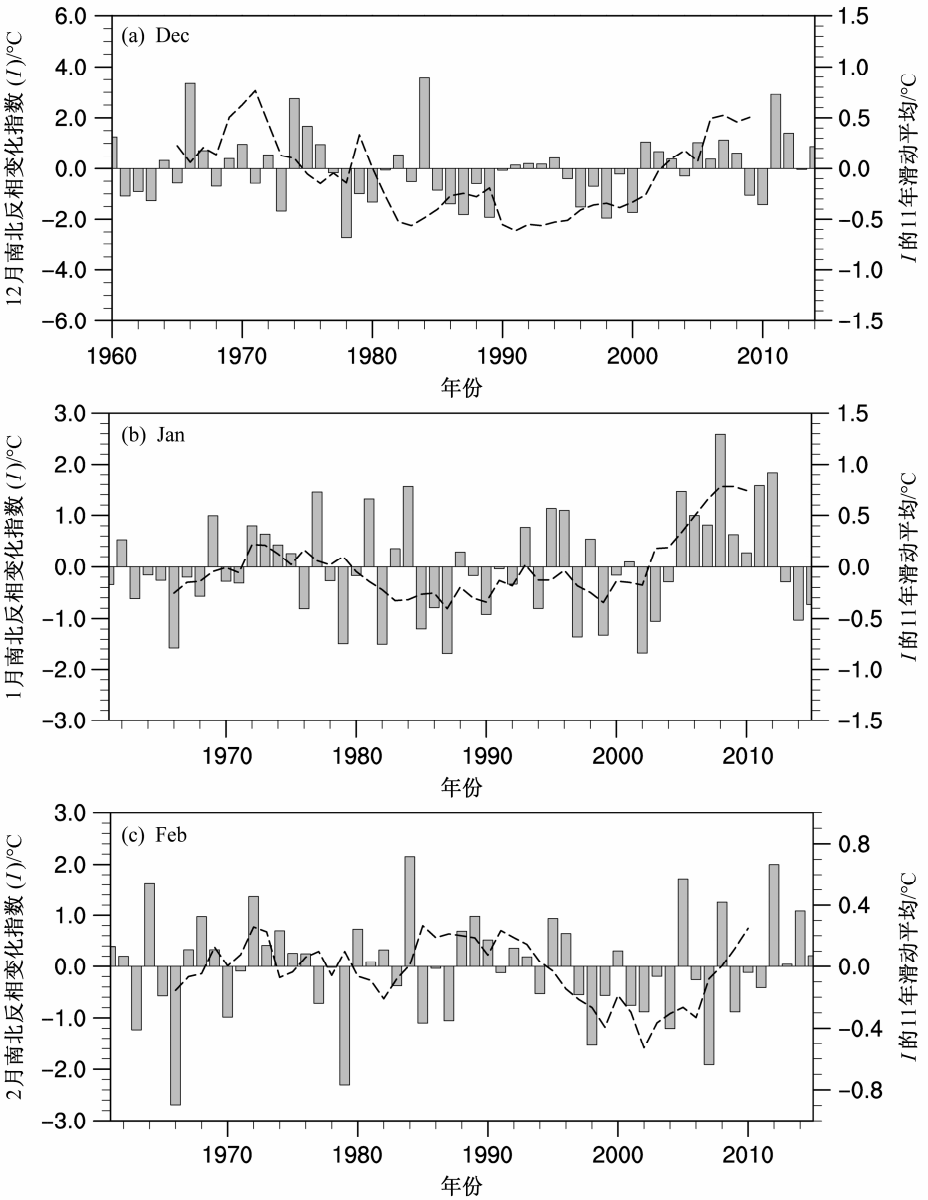

图 5 1961～2015 年欧亚大陆冬季地表温度南北反相变化指数 *I*：（a）12 月；（b）1 月；（c）2 月。灰色柱状图为 1961～2015 年地表温度南北反相变化指数（对应左侧坐标轴）；数据已进行标准化处理，黑色虚线为 *I* 的 11 年滑动平均曲线（对应右侧坐标轴）

Fig. 5 Variation index (*I*) of surface temperature in winter between the northern and southern Eurasian regions for the period of 1961–2015: (a) Dec; (b) Jan; (c) Feb. The grey bar indicates the variation index (*I*) (corresponding to the left side of the axis); all the data have been normalized; the black dashed line indicates 11-year running mean of *I* (corresponding to the right side of the axis)

2000 年相对 1965～1976 年的差值分布，由图可知，显著区主要位于 20°N～45°N 间的大洋上。也即地表温度南北反相变化对应的 200 hPa 纬向风差异最为显著的区域在副热带急流的平均位置处，表明副热带急流位置和强度变化与欧亚大陆地表温度南北反相变化关系密切。图 6b 是 500 hPa 位势高度差值场，差值显著区基本与定常行星波多年平均位置（冬三夏四）相对应，其中欧亚大陆差异显著区主要对应青藏高原北部脊。相比 1965～1976 年，1980～2000 年欧洲浅槽加深，青藏高原北部脊加强，斯堪的纳维亚半岛在高纬度冷空气的控制之下，地表温度偏低，中亚地区（30°N～60°N，55°E～105°E）受到脊后西南气流影响地表温度偏高。这表明 1980～2000 年相比 1965～1976 年，欧亚大陆西北部偏冷的程度要比南部更大，地表温度南北反相变化更剧烈。一方面，这表明北半球冬季对流层中层槽脊系统存在年代际变化特征；另一方面也反映出欧亚大陆地表温度的南北反相变化与 500 hPa 的平均槽脊位置相联系。对流层下层的海平面气压差值场（图 6c）的显著区基本与 500 hPa 位势高度场相重合，主要表现在西伯利亚高压位置及强度的变化，冬季，欧亚大陆的温度变化受西伯利亚高压强度直接控制，这和已有的研究及观测相一致。

图 6d–6f 给出了 1 月 2001～2014 年与 1965～1976 年 200 hPa 纬向风、500 hPa 位势高度场、海平面气压场的差值场及其显著性检验。可以看出，和图 6a–6c 相似，200 hPa 纬向风差值场的显著区位于副热带急流平均位置（图 6d）。500 hPa 位势高度差值场的分布（图 6e）与图 6b 相似，对应着定常行星波多年平均的形态（“冬三”）中槽脊的位置；欧洲海平面气压差值场显著区（图 6f）相比图 6c 明显减少。这表明，进入 21 世纪，随着全球气温

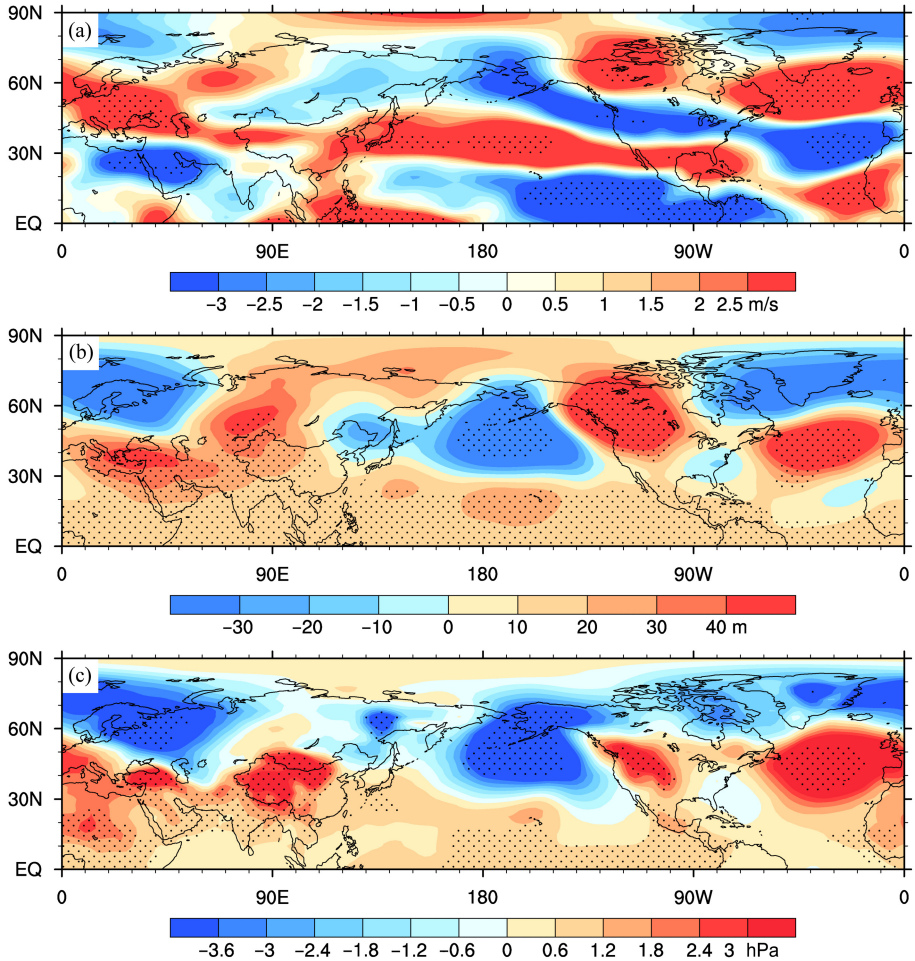

图 6 1 月 1980～2000 年与 1965～1976 年（a）200 hPa 纬向风、（b）500 hPa 位势高度、（c）海平面气压场的差值场；（d–f）同（a–c），但为 2001～2014 年与 1965～1976 年的差值场（阴影部分通过置信度为 95%检验）

Fig. 6 Differences in Jan between 1980–2000 and 1965–1976: (a) 200-hPa zonal wind, (b) geopotential height at 500 hPa, (c) sea-surface pressure; (d–f) same as (a–c), but for the differences between 2001–2014 and 1965–1976 (shaded areas indicate the values above the 95% confidence level)

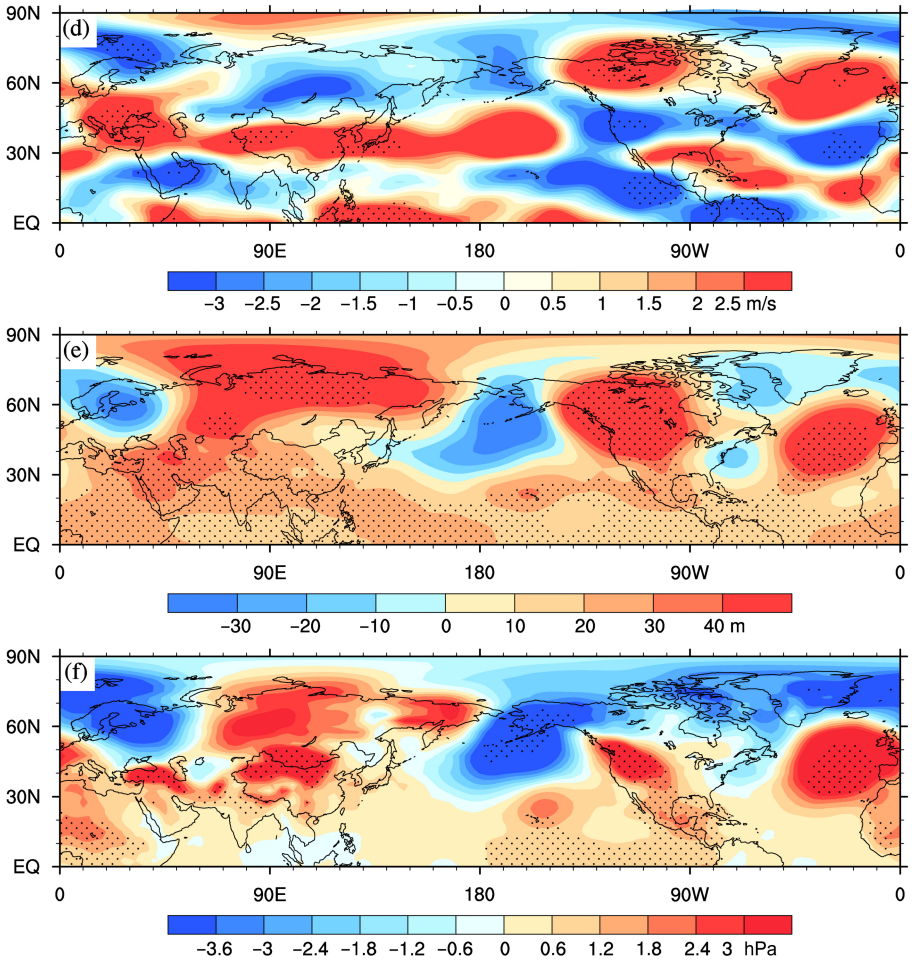

图 6 （续）

Fig. 6 (Continued)

的上升，北半球高、低空行星尺度的高低压系统和西风带长波与 1965～1976 年的差异相比 1980～2000 年要小，是否与“全球增暖停滞”有关，需要进一步研究。

12 月大气环流场的分布和 1 月相类似，主要环流系统的年代际变化和显著区域的变化基本一致。综合以上分析可看出，欧亚大陆地表温度的南北反相变化和北半球冬季对流层行星尺度的槽、脊系统活动及半永久性大气活动中心（西伯利亚高压）的年代际变化有着联系；二者之间都存在着显著的年代际变化。

2 月，由于欧亚大陆地表温度南北反相变化指数的时段划分与 12 月、1 月略有不同（图 7）。因此，该月 1981～1992 年与 1965～1976 年的对流层环流场的差值分布也与 12 月、1 月存在差异。图 7a 中 200 hPa 纬向风显著区主要位于 40°N～50°N 之间，与副热带急流平均位置相对应，反映出 1981～1992 年比 1965～1976 年的副热带急流强度有所减弱，或者位置偏南。500 hPa 位势高度差值场（图 7b）的显著区主要位于青藏高原北部以及北美大陆东部，分别对应青藏高原脊和北美大槽的平均位置。类似地，海平面气压差值场（图 7c），1981～1992 年相对于 1965～1976 年的差异显著区位于东西伯利亚、欧洲以及亚洲大陆中部地区。1981～1992 年相比于 1965～1976 年西伯利亚高压强度减弱，反映出相对于 1965～1976 年，1981～1992 年欧亚大陆海平面气压分布更不利于高纬度冷空气南下，使得欧亚大陆地表温度南北反相变化更剧烈。这可能与近年来东亚冬季风的衰退相联系。1993～2008 年与 1965～1976 年对流层上、中、下层的环流差值场（图 7d、7e、7f）分布特征与图 7a、7b、7c 大致相同，200 hPa 纬向风、500 hPa 位势高度场、海平面气压场同样存在年代际变化特征。

上述分析表明，欧亚大陆冬季（12 月至次年 2

月）在全球升温显著的 1980 年代以后，欧亚大陆北部比南部更冷，也即地表温度南北反相变化更明显，这与行星尺度的大气环流年代际变化相联系。

6 欧亚大陆冬季地表温度南北反相变化与外强迫因子的联系

欧亚大陆冬季地表温度南北反相变化除了与行星尺度大气环流联系密切外，还受到许多外强迫因子（如海冰、海温、积雪）的影响。研究表明，秋季北极海冰异常与冬季欧亚大陆低温天气有显著联系（Deser et al., 2004；何金海等，2015）。同样，通过海气相互作用，海温异常会导致大气环流异常进而对气候产生影响。

6.1 与秋季北极海冰的关系

研究表明，秋季北极海冰与北半球冬季地表温度联系密切（Francis et al., 2009；Honda et al., 2009；何金海等，2015）。为了分析秋季北极海冰面积对欧亚大陆冬季地表温度的影响，本文采用美国国家冰雪数据中心（NSIDC）提供的 1979～2015 年秋季北极海冰面积（9 月、10 月）资料，计算了秋季北极海冰面积与欧亚大陆冬季各月地表温度的相关系数（图 8）。图 8a–8c 分别为去除趋势后的秋季北极海冰面积和欧亚大陆 12 月、1 月、2 月地表温度相关系数分布，反映的是在去除长期变化信号后，北极海冰面积与欧亚大陆冬季地表温度异常之间的相关关系。秋季北极海冰面积与欧亚大陆 12 月地表温度在中国华北和里海东部区域呈显著正相关（相关系数通过了 90%的显著性检验），而与欧亚大陆其余地区的地表温度相关较差（图 8a）。1 月欧亚大陆地表温度和秋季北极海冰面积在（30°N～60°N，60°E～140°E）（包括蒙古和中国

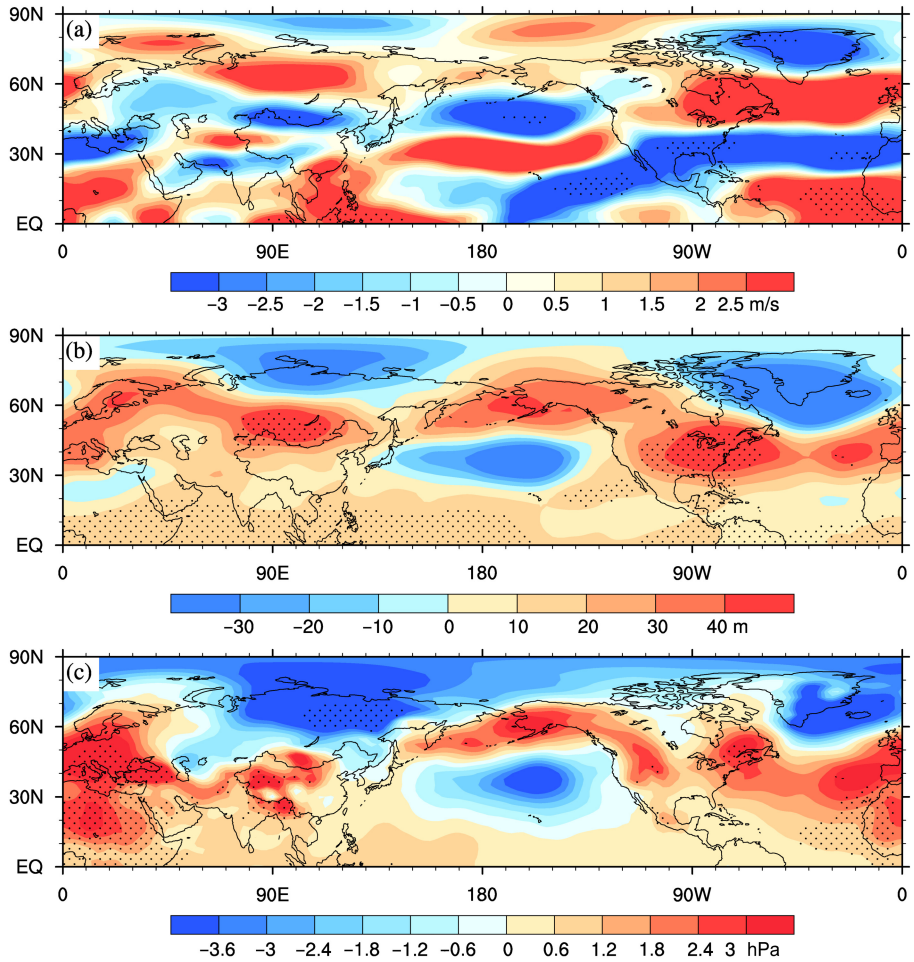

图 7 2 月 1981～1992 年与 1965～1976 年（a）200 hPa 纬向风、（b）500 hPa 位势高度、（c）海平面气压的差值场；（d–f）同（a–c），但为 1993～2008 年与 1965～1976 年的差值场（阴影部分通过置信度为 95%检验）

Fig. 7 Differences in Feb between 1981–1992 and 1965–1976: (a) 200-hPa zonal wind, (b) geopotential height at 500 hPa, (c) sea-surface pressure; (d–f) same as (a–c), but for the differences between 1993–2008 and 1965–1976 (shaded area are for values above the 95% confidence level)

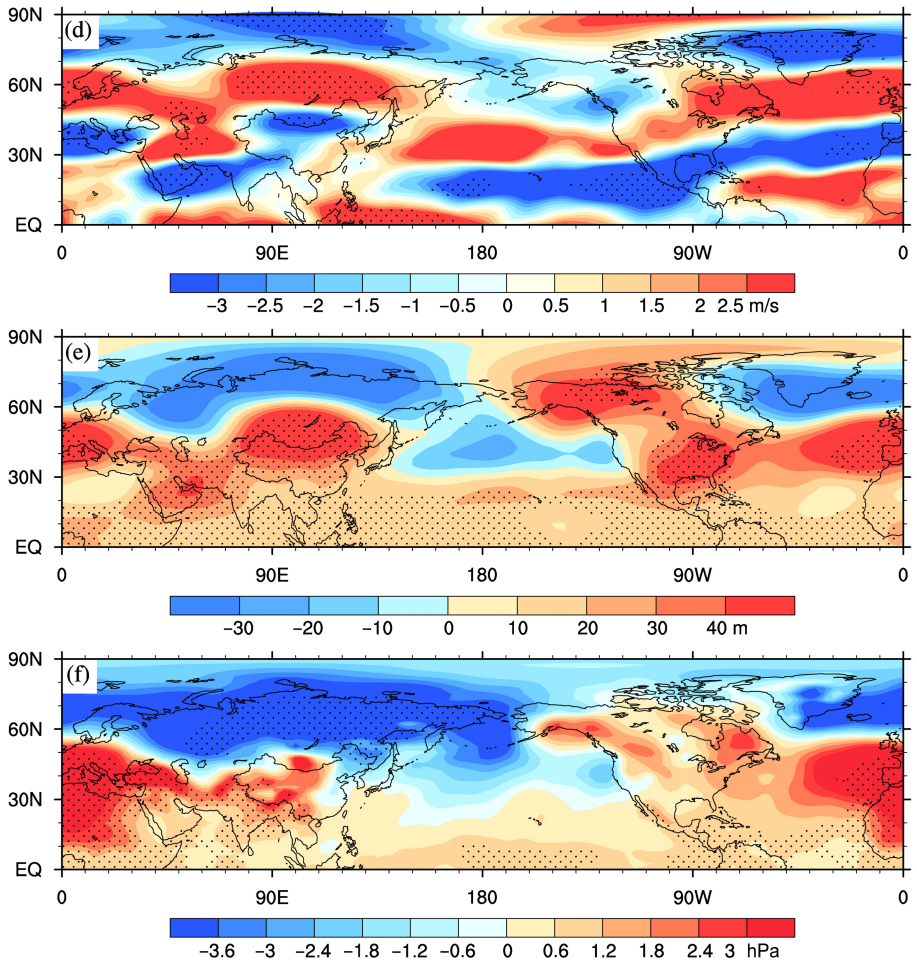

图 7 （续）

Fig. 7 (Continued)

的东部、新疆地区）呈显著正相关（图 8b）。这表明秋季海冰面积减少可使欧亚大陆中部 1 月地表温度降低，从而加剧地表温度的南北反相变化；2 月正相关区相比 1 月有所增加，表明秋季北极海冰面积对欧亚大陆 2 月地表温度的影响更大，其显著区主要集中在 30°N～40°N 纬度带上(图 8c)。综合来看，秋季北极海冰面积减少是欧亚大陆冬季地表温度偏低的主要原因之一，尤其在亚洲中东部地区正相关最显著，反映出秋季北极海冰面积和中亚及中国东部冬季地表温度之间存在本质和内在的正相关，且全球变暖对这种关系有着显著影响。在年际尺度上，北极海冰作为一个影响欧亚大陆冬季地表温度变化的外在因素，秋季北极海冰面积减少可使中亚及中国东部地区冬季地表温度偏低，从而加剧欧亚大陆冬季地表温度南北反相变化的程度。

6.2 与海温的关系

海温作为重要的大气外强迫因子与欧亚大陆冬季气候变化有着紧密的联系(李崇银，1989; Chen et al., 2000)。已有研究也表明，在全球变暖的背景下，北大西洋冬季海温异常可导致中国冬季气温异常（曲金华等，2006），北太平洋冬季海温异常是引起中国冬季气温南北反相变化的一个因子（康丽华等，2009）。为分析欧亚大陆冬季地表温度南北反相变化与同期海温的关系，图 9 给出了 12 月、1 月、2 月南北反相变化指数 I 与同期海温的相关系数分布图。从图 9a 可看出，12 月北大西洋显著相关区主要集中在美国东海岸的佛罗里达海峡东部以及非洲西海岸。尽管 1 月北大西洋通过显著性检验的区域较少（图 9b），但 2 月北大西洋上由南到北呈现出了负、正、负相关分布型（图 9c），这种分布型态与 NAO 强迫下形成的北大西洋三极子相

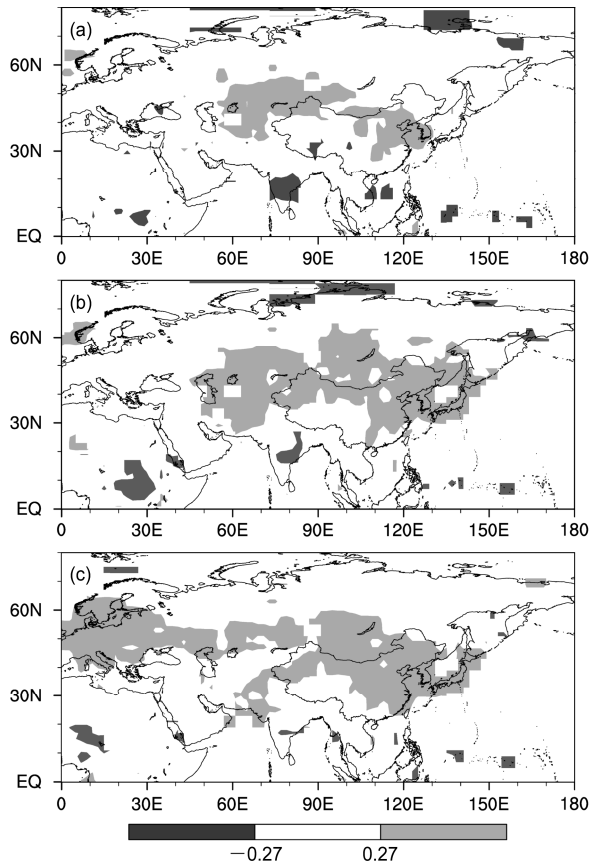

图 8 1979～2015 年秋季北极海冰面积与欧亚大陆冬季地表温度（12 月、1 月、2 月）相关系数分布；（a）12 月；（b）1 月；（c）2 月。阴影部分表示通过了 90%的显著性检验；北极海冰面积与地表温度均已去除线性趋势

Fig. 8 Correlation coefficient between the Arctic Sea Ice Extent in autumn and surface temperature in winter over Eurasia in Dec, Jan, and Feb for the period 1979–2015. Shadings indicate values above the 90% confidence level; the linear trends of Arctic Sea Ice Extent and surface temperature have been removed

似。这表明冬季北大西洋海温可能与同期欧亚大陆地表温度南北反相变化有一定联系。

为了分辨外强迫因素的影响，图 9d、9e、9f 给出了去除线性趋势后冬季各月南北反相变化指数 I 与同期海温的相关系数分布图。由图 9d、9e、9f 可见，其通过显著性检验的区域与图 9a、9b、9c 基本一致，12 月、2 月北大西洋三极子相关分布型更显著（图 9d、9f）。也即 12 月、2 月北大西洋海温三极子呈正位相（北大西洋中纬度海温偏高，高纬度和低纬度海温偏低），对应欧亚大陆地表温度南北反相变化越显著。滤除全球变暖信号后，12 月、2 月南北反相变化指数 I 与北大西洋海温三极子依然存在着密切的联系，这说明 12 月、2 月地表温度的南北反相变化与同期北大西洋海温三极子之间可能存在着本质的、内在的关系。我们也计算了 NAT 指数与地表温度南北反相变化指数 I 之间的相关系数。结果显示，12 月、1 月、2 月欧亚大陆地表温度南北反相变化指数和 NAT 的相关系数分别为：$r_{NAT.12}$=0.2(～90%)、$r_{NAT.1}$=−0.1、$r_{NAT.2}$=0.31 (＞98%)，也说明北大西洋海温三极子与欧亚大陆冬季地表温度南北反相变化之间存在显著相关。

7 结论

本文分析了 1961～2015 年欧亚大陆冬季地表温度变化的时空分布特征，探讨了冬季欧亚大陆地表温度南北反相变化的年际、年代际特征及其对应的环流背景的异常特征，分析了欧亚大陆冬季地表温度南北反相变化与前期北极秋季海冰面积、同期海温之间的关系，得到如下初步结论：

（1）欧亚大陆冬季 40°N 以北地表温度在空间上存在南北（大致以 55°N 为界线）反相变化的特征，且具有明显的年代际特征。

（2）欧亚大陆 12 月与 1 月的地表温度存在着较好的持续性。尤其在较高纬度的（40°N～70°N，0°～80°E）范围内及欧亚大陆南部呈显著正相关，表明欧亚大陆大部分地区的地表温度具有较好的持续性；而在中国东南部，由于受到海洋气候的影响，地表温度在 12 月与 1 月之间呈现出显著负相关；1 月和 2 月的地表温度在欧亚大陆基本呈显著正相关，而 12 月与 2 月欧亚大陆地表温度相关性较差。反映出地表温度的持续性大约在一个月之内。

（3）欧亚大陆冬季地表温度南北反相变化的年代际变化与大气环流的年代际变化有着紧密联系。200 hPa 急流位置、强度的变化，500 hPa 北半球中高纬上“冬三夏四”环流型中的“冬三”行星尺度波异常，以及西伯利亚高压的异常与年代际尺度上欧亚大陆冬季地表温度南北反相变化相联系。

（4）秋季北极海冰和海温是影响欧亚大陆冬季地表温度南北反相变化的外强迫因子。滤除由全球变暖引起的趋势信号后，秋季北极海冰与欧亚大陆（30°N～60°N，60°E～140°E）冬季地表温度都存在显著相关。海冰面积减小影响了冬季欧亚大陆大气环流，造成西伯利亚高压强度的异常，加剧了欧亚大陆地表温度南北反相变化。此外，冬季北大西

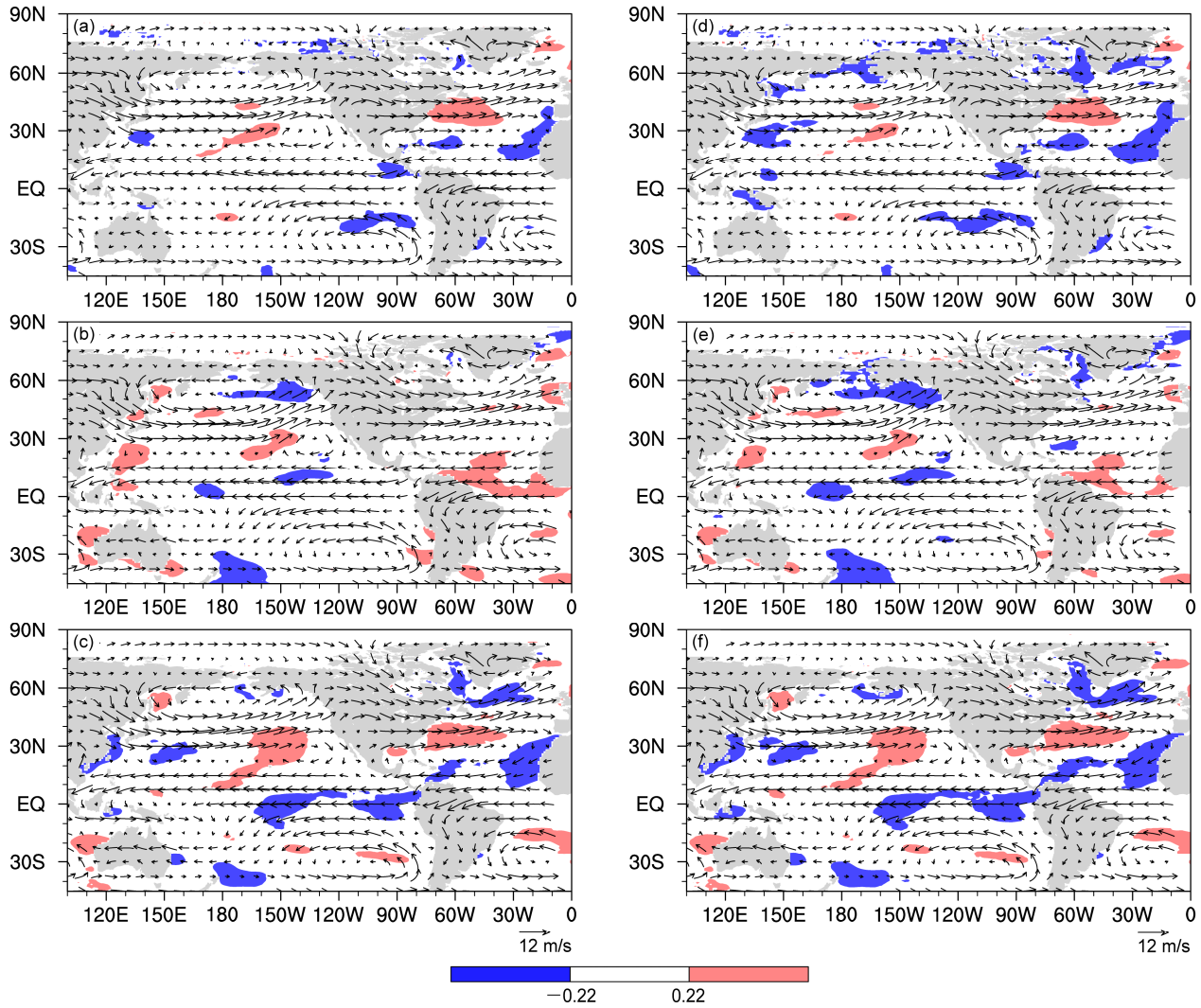

图 9　1961～2015 年冬季各月南北反相变化指数与海温的相关（填色）分布以及 850 hPa 合成风风场（箭头）分布：（a、d）12 月，（b、e）1 月，（c、f）2 月；（a–c）原序列，（d–f）去除线性趋势。阴影区表示通过了 90%的显著性检验

Fig. 9　Correlation coefficients (shadings) between *I* of Dec, Jan, and Feb in Eurasia and corresponding SST and 850-hPa wind fields (vectors) for the period 1961–2015: (a, d) Dec; (b, e) Jan; (c, f) Feb; (a–c) original sequences, (d–f) removed linear trends. Shadings indicate values above the 90% confidence level

洋海温“三极子”和欧亚大陆南北反相变化具有一定的关系。

本文采用 EOF 方法分析了欧亚大陆冬季地表温度年际异常的前两个模态，并以第二模态中冬季地表温度南北反相变化为主，分析了大气环流异常和外强迫因子（海冰、海温）与欧亚大陆冬季地表温度南北反相变化之间的联系。但深入的因果关系及机理还需进一步研究。

参考文献 (References)

Chen W, Graf H F, Huang R H. 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.

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.

Deser C, Magnusdottir G, Saravanan R, et al. 2004. The effects of North Atlantic SST and sea ice anomalies on the winter circulation in CCM3. Part II: Direct and indirect components of the response [J]. J. Climate, 17 (5): 877–889, doi: 10.1175/1520-0442(2004)017<0877:TEONAS>2.0.CO;2.

Fan K, Wang H J. 2004. Antarctic oscillation and the dust weather frequency in North China [J]. Geophys. Res. Lett., 31 (10): L10201,

doi:10.1029/2004GL019465.

范可, 王会军. 2006. 南极涛动的年际变化及其对东亚冬春季气候的影响 [J]. 中国科学 (D 辑: 地球科学), 36 (4): 385–391. Fan K, Wang H J. 2006. Interannual variability of Antarctic Oscillation and its influence on East Asian climate during boreal winter and spring [J]. Science in China (Ser. D), 49 (5): 554–560, doi: 10.1007/s11430-006-0554-7.

范可, 刘辉. 2013. 近百年东亚冬季气温及其大气环流变化型态 [J]. 大气科学, 37 (2): 383–394. Fan Ke, Liu Hui. 2013. Winter temperature over East Asia and atmospheric circulation patterns in the last 100 years [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (2): 383–394, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12305.

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 (7): L07503, doi: 10.1029/2009GL037274.

龚道溢. 2000. 大尺度大气环流变化及其对北半球冬季温度的影响 [J]. 地学前缘, 7 (S2): 203–208. Gong Daoyi. 2000. Large-scale atmospheric circulation and its influence on winter temperature in the Northern Hemisphere [J]. Earth Science Frontiers (in Chinese), 7 (S2): 203–208.

Gong D Y, Ho C H. 2003. Arctic oscillation signals in the East Asian summer monsoon [J]. J. Geophys. Res.: Atmos., 108 (D2): 4066, doi: 10.1029/2002JD002193.

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.

何金海, 武丰民, 祁莉. 2015. 秋季北极海冰与欧亚冬季气温在年代际和年际尺度上的不同联系 [J]. 地球物理学报, 58 (4): 1089–1102. He Jinhai, Wu Fengmin, Qi Li. 2015. Decadal/interannual linking between autumn Arctic sea ice and following winter Eurasian air temperature [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 58 (4): 1089–1102, doi: 10.6038/cjg20150401.

Honda M, Inoue 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.

Hopsch S, Cohen J, Dethloff K. 2012. Analysis of a link between fall Arctic sea ice concentration and atmospheric patterns in the following winter [J]. Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography, 64 (1), doi: 10.3402/tellusa.v64i0.18624.

黄嘉佑, 胡永云. 2006. 中国冬季气温变化的趋向性研究 [J]. 气象学报, 64 (5): 614–621. Hu Jiayou, Hu Yongyun. 2006. Trends of winter temperatures in China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 64 (5): 614–621, doi: 10.11676/qxxb2006.060.

黄琦. 2007. 中国冬季气温的年际变化 [J]. 山东气象, 27 (2): 5–8. Huang Qi. 2007. Interannual variations of the winter temperature in China [J]. Journal of Shandong Meteorology (in Chinese), 27 (2): 5–8.

IPCC. 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis Summary for Policymakers [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 36pp.

Jaiser R, Dethloff K, Handorf D, et al. 2012. Impact of sea ice cover changes on the Northern Hemisphere atmospheric winter circulation [J]. Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography, 64 (1), doi: 10.3402/tellusa.v64i0.11595.

琚建华, 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, Lu Junmei. 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): 437–471, 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.

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.

李崇银. 1989. 中国东部地区的暖冬与厄尔尼诺 [J]. 科学通报, 34 (4): 283–286. Li Chongyin. 1989. Warmer winter in eastern China and El Niño [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 34 (4): 283–286.

Mitchell J M. 1961. Recent secular changes of global temperature [J]. Annals of the New York Academy of Sciences, 95 (1): 235–250, doi: 10.1111/j.1749-6632.1961.tb50036.x.

Outten S D, Esau I. 2012. A link between Arctic Sea ice and recent cooling trends over Eurasia [J]. Climatic Change, 110 (3–4): 1069–1075, doi: 10.1007/s10584-011-0334-z.

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): 558–563. 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): 558–563.

唐国利, 丁一汇, 王绍武, 等. 2009. 中国近百年温度曲线的对比分析 [J]. 气候变化研究进展, 5 (2): 71–78. Tang Guoli, Ding Yihui, Wang Shaowu, et al. 2009. Comparative analysis of the time series of surface air temperature over China for the last 100 years [J]. Advances in Climate Change Research (in Chinese), 5 (2): 71–78.

Walker G T. 1923. Correlation in seasonal variations of weather, VIII: A preliminary study of world weather [J]. Mem. Indian Meteor. Dept., 24 (571): 1–24.

Wang C H, Yu L, Huang B. 2012. The impact of warm pool SST and general circulation on increased temperature over the Tibetan Plateau [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 29 (2): 274–284, doi: 10.1007/s00376-011-1034-3.

王澄海, 李燕, 王艺. 2015. 北半球大气环流及其冬季风的年代际变化对青藏高原冬季降雪的影响 [J]. 气候与环境研究, 20 (4): 421–432. Wang Chenghai, Li Yan, Wang Yi. 2015. Impacts of interdecadal variability of circulation and winter monsoon on winter snowfall over the Tibetan Plateau [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 20 (4): 421−432, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2015.14169.

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, 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.

王永波, 施能. 2001. 近 45a 冬季北大西洋涛动异常与我国气候的关系 [J]. 南京气象学院学报, 24 (3): 315–322. Wang Yongbo, Shi Neng. 2001. Relation of North Atlantic oscillation anomaly to China climate during 1951–1995 [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 24 (3): 315–322.

韦玮, 王林, 陈权亮, 等. 2014. 我国前冬和后冬气温年际变化的特征与联系 [J]. 大气科学, 38 (3): 524–536. Wei Wei, Wang Lin, Chen Quanliang, et al. 2014. Interannual variations of early and late winter temperatures in China and their linkage [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (3): 524−536, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1401.13320.

武炳义, 黄荣辉. 1999. 冬季北大西洋涛动极端异常变化与东亚冬季风 [J]. 大气科学, 23 (6): 641–651. Wu Bingyi, Huang Ronghui. 1999. Effects of the extremes in the North Atlantic oscillation on East Asia winter monsoon [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 23 (6): 641–651.

Wu G X, Cubasch U. 1987. The impact of El Niño SST anomaly on mean meridional circulation and transfer properties of the atmosphere [J]. Scientia Sinica (Ser. B), 30 (5): 533–545.

谢庄, 曹鸿兴. 1996. 北京最高和最低气温的非对称变化 [J]. 气象学报, 54 (4): 501–507. Xie Zhuang, Cao Hongxing. 1996. The asymmetric trend of change in maximum and minmum temperature in Beijing [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 54 (4): 501–507, doi: 10.11676/qxxb1996.052.

Zhang R H, Sumi A, Kimoto M. 1996. Impact of El Niño on the East Asian monsoon: A diagnostic study of the '86/87 and '91/92 events [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 74 (1): 49–62, doi: 10.2151/jmsj1965.74.1_49.