

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

康丽华^{1,2} 陈文¹ 魏科^{1,2}

1 中国科学院大气物理研究所季风系统研究中心, 北京 100080

2 中国科学院研究生院, 北京 100039

摘要 利用我国 160 个台站 50 年 (1951~2000 年) 的月平均温度资料和 NCEP/NCAR 再分析资料, 对我国从 1951/1952~1999/2000 共 49 个冬季 (11 月至次年 3 月平均) 的气温进行经验正交函数 (EOF) 分解。第 1 模态表现为全国一致的增温或者降温, 20 世纪 70 年代中期以后, 我国冬季气温增暖明显, 发生了显著的年代际变化; 第 2 模态则表现为南北温度的反相关系, 20 世纪 80 和 90 年代, 我国北部地区, 特别是东北和西北的温度增加, 而我国南部则温度降低。采用频谱分析方法提取我国冬季气温的年代际变化信号更清楚地反映出这些变化。而且这两种模态从 20 世纪 80 年代开始的正位相叠加使得我国冬季持续偏暖, 在降水场没有显著变化的情况下, 加剧了华北地区的干旱程度。对气温的年代际变化与大气环流的回归分析表明, 我国冬季气温年代际变化的第 1 模态与半球尺度上的北极涛动 (AO) 的变化有密切的关系, 它在高度场上表现为一个准正压的南北环状模态; 而第 2 模态则与中高纬大气环流中的一波结构联系密切, 它在高度场上表现为一个准正压的太平洋和大西洋上反相的振荡模态。这就表明, 我国冬季气温的年代际变化与大气环流中的基本气流及其扰动有密切的关联。作者还讨论了大气环流影响我国冬季气温年代际变化的可能机理, 并指出进一步需要研究的问题。

关键词 东亚冬季风 经验正交函数 年代际变化 大气环流

文章编号 1006-9585 (2006) 03-0330-10 **中图分类号** P434 **文献标识码** A

The Interdecadal Variation of Winter Temperature in China and Its Relation to the Anomalies in Atmospheric General Circulation

KANG Li-Hua^{1,2}, CHEN Wen¹, and WEI Ke^{1,2}

1 *Center for Monsoon System Research, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080*

2 *Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039*

Abstract By using the monthly temperature in 160 stations of China and the NCEP/NCAR reanalysis data, the winter (November to March) temperature variations from 1951 to 2000 are studied with the empirical orthogonal function (EOF) analysis. The first EOF has an identical signal in whole China and demonstrates that the winter temperature has increased since the middle of 1970s in China. The second EOF has a seesaw pattern between southern and northern China and shows a warming in the 1980s and 1990s in Northwest China and Northeast China. The interdecadal variation with periods longer than 8 years can also be revealed using Fourier harmonics analysis. In addition, the warming superimposition of EOF1 and EOF2 probably causes persistent warming winter in China from

收稿日期 2006-02-20 收到, 2006-04-02 收到修定稿

资助项目 中国科学院知识创新工程重要方向项目 KZCX3-SW-218、国家自然科学基金项目 40375021 和 40231005

作者简介 康丽华, 女, 1968 年出生, 博士研究生, 从事气候动力学研究。E-mail: kang-lihua@163.com

the 1980s. This significant warming may intensify the drought in North China, since there are no obvious changes in the regional precipitation. The linear regressions of the atmospheric general circulation upon the winter temperature on interdecadal time scales indicate that the first EOF of temperature is significantly correlated to the Arctic Oscillation (AO), with a quasi-barotropic annular mode in the geopotential height field. However, the second EOF of temperature is closely associated with height anomalies of wavenumber one in middle-high latitudes, with a quasi-barotropic out-of-phase oscillation between the Pacific Ocean and the Atlantic Ocean. The results show that the interdecadal variations of winter temperature in China are closely related to the basic flows and perturbations in the atmosphere. The possible mechanisms of the atmospheric general circulation influencing the winter temperature in China are discussed and the questions needed to be further studied are presented.

Key words East Asian winter monsoon, empirical orthogonal function, interdecadal variation, general circulation

1 引言

无论从环流、降水或温度来看, 季风均表现为一种年循环现象, 使得夏季风和冬季风交替盛行, 周而复始^[1]。我国的降水主要发生在夏季, 华北干旱也主要与夏季降水的减少有关。而到了冬季, 降水并不是东亚冬季风的主要特征。冬季在我国华北、东北以及日本、韩国盛行寒冷的西北风, 而在我国东南沿海则有强的东北风; 并且, 这些寒冷的冬季风往往比较干燥。东亚冬季风的异常活动不仅决定东亚地区寒潮降温和降雪等灾害性天气的频次^[2], 而且通过西风急流影响附近及北美的气候^[3], 也影响西太平洋地区的大尺度的对流活动, 进一步引起 Hadley 环流和 Walker 环流的异常^[4]。东亚季风还可以影响到马来西亚南部、印度尼西亚、澳大利亚等地汛期的旱涝^[5,6]以及澳大利亚季风的的活动^[7]。研究还表明, 东亚冬季季风在 ENSO/季风系统的两年振荡中起到关键的作用^[8]。

研究冬季风时, 人们常用风场的变化来表示季风的强弱。比如陈文等^[9]利用东亚沿岸的风场定义了一个东亚冬季风强度指数, 系统地研究了东亚冬季风的年际变化。研究还表明异常的东亚夏季风往往跟之前的冬季风有密切的关系^[10,11]。其实, 近地面气温同样是描述冬季风主要特征的参数, 尽管干旱主要与当地的降水变化有关, 但是气温的显著升高会引起地面蒸发量的增加, 同样也会引起干旱的发生。由于地面气温的变化存在较强的区域性^[9,12], 而且具有明显的长时间的年代际变化特征^[12]。因此, 很有必要研究我国冬季气温在年代际尺度上的时空变化特征, 同时了

解与此特征相一致的大气环流的变化, 这不仅有利于了解我国气候变化的原因, 也有助于预报气候的长期变化。

2 资料和方法

本文所用的资料为中国气象局提供的全国 160 个台站的月平均温度和降水资料以及美国国家环境预测中心/国家大气研究中心 (NCEP/NCAR) 发布的全球再分析的月平均资料^[13], 选取的时间段为 1951 年 1 月~2000 年 12 月, 采用的再分析资料包括月平均海平面气压 (SLP)、500 hPa 高度场和 200 hPa 纬向风场, 网格距为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。由于冬季风一般建立于 11 月, 而于次年 4 月初撤退^[14], 因此用当年 11 月到次年 3 月的平均做为冬季风盛行期间的季节平均场。

采用的方法主要有经验正交函数 (EOF) 分解、线性回归和相关分析。EOF 分析又称为主分量分析或主成分分析, 用来研究气象场主导的时空变化型^[15]。EOF 分析可以用主要的几个时空变化型最大可能地解释原始数据的方差变化, 并且因其没有固定的函数形式, 展开收敛速度快, 能在有限区域上对不规则分布的站点进行分解, 成为当前气象诊断分析中最流行的方法之一。

3 我国冬季气温变化特征分析

为了分析我国冬季气温的主要变化模态及其变化特征, 对从 1951/1952 年~1999/2000 年共 49 个冬季 (11 月至次年 3 月平均) 的气温进行 EOF 分析, 得到空间主要模态和时间变化特征。为了能表示出实际的变化量级, EOF 的空间模态

不直接用特征向量场,而是通过对标准化的时间序列进行回归来表示。其中 EOF 分析前两个模态分别解释了总方差的 52% 和 16%,按照 North 等^[16]的标准,这两个主分量是可以同其他主分量区分开来的,并且是彼此可分的。

图 1 是我国冬季气温变化 EOF 分析第 1 模态的空间分布及其对应的时间序列。EOF1 的空间分布特征表现为:我国冬季基本为一致的正信号,表示冬季气温的主要变化是全国一致的增温或者降温,温度的变化幅度基本为从南向北增加,其中东北和西北地区有最大值,达到 1.6 °C。相应的时序序列有着显著的年代际变化特征,在 20 世

纪 80 年代中期以前基本为负位相,我国冬季温度主要为负异常,表明我国冬季气温一致偏冷,而从 80 年代中期以后则基本为正位相,我国冬季温度主要为正异常,全国冬季气温升高趋势明显,冬季增温显著,这种变化特征在 11 年滑动平均曲线上表现的更为清楚。以前的研究^[17,18]通过对重建的我国近百年气温序列的分析,表明我国自 80 年代开始增暖,两者的结果是一致的。

如图 2 所示, EOF2 的空间分布特征主要表现为南北振荡的形势,即大约在 40°N 以北包括我国东北和新疆北部基本为正信号区,而 40°N 以南基本为负信号区。我国北部的最大振幅接近 1.2 °C,

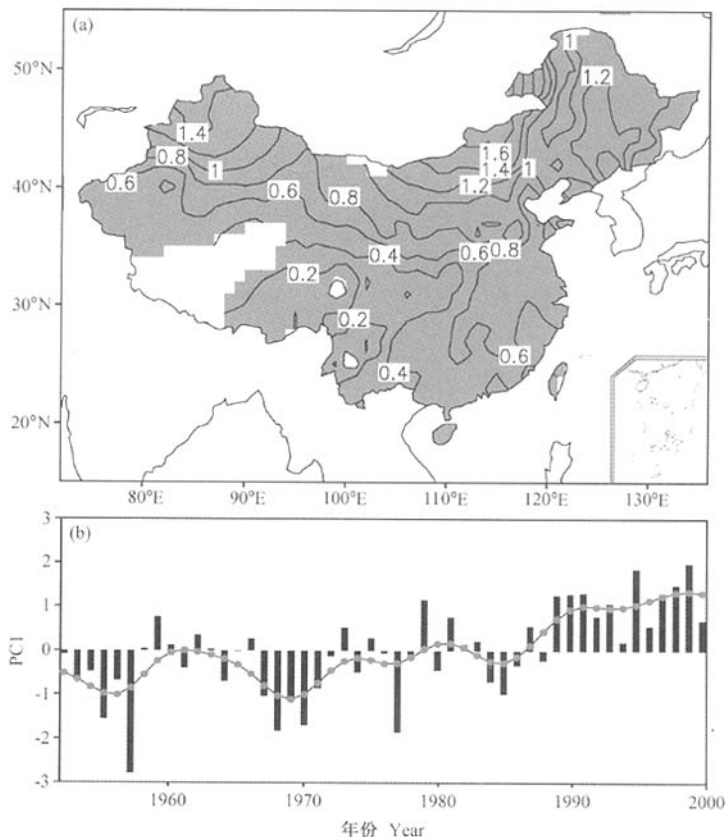


图 1 1951/1952~1999/2000 年中国冬季温度 EOF 第 1 模态: (a) 空间分布型 (单位: °C), 图中阴影表示正信号; (b) 标准化时间序列 (直方条) 及其 11 年滑动平均 (曲线)

Fig. 1 Leading EOF mode of wintertime (Nov-Mar) temperature for 1951/1952-1999/2000 in China: (a) Regression map based on the standardized time series. Positive contours are shaded. Contour intervals are 0.2 °C; (b) Standardized time series (bars) and its 11-year running mean (curve)

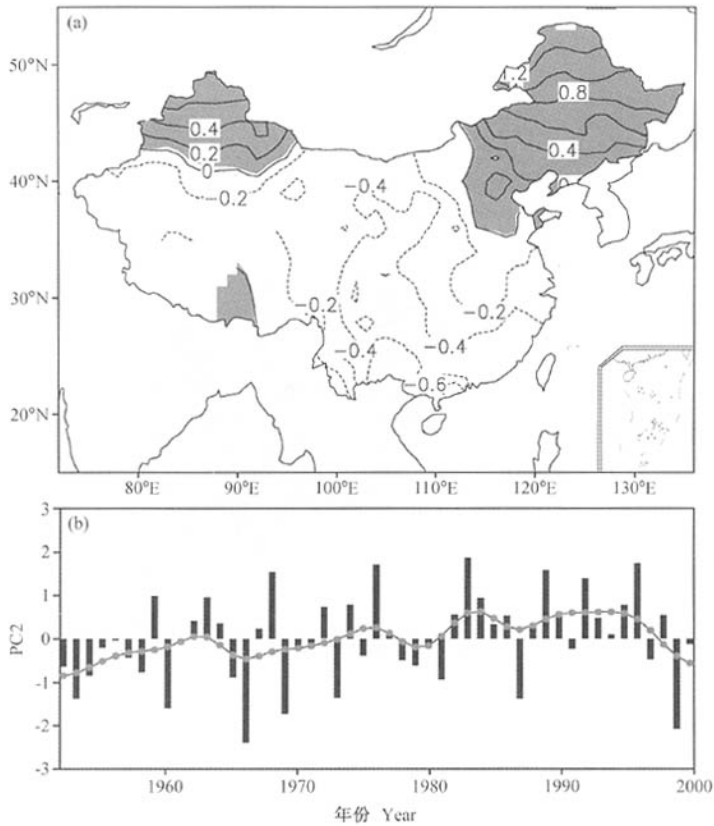


图2 与图1相同, 但为 EOF 第 2 模态
Fig. 2 As in Fig. 1, but for the second EOF mode

南部的最大振幅达到 0.6 °C 左右。这表明我国冬季气温的变化还存在一种南北反相的基本模态, 即当我国北部地区温度升高时, 对应我国南部温度降低; 反之, 当我国北部温度降低的时候, 我国南部的温度则会升高。相应的时间序列表现为有明显的年际变化 (直方图) 和年代际变化特征 (曲线), 滑动平均曲线表明, 20 世纪 70 年代中期以前基本为负位相, 而从 70 年代中期至 90 年代中期基本为正位相, 此后开始降低并有向负位相转变的趋势。这表明在第 2 模态上 70 年代以前我国东北、华北和新疆的部分地区气温偏低, 70 年代中期至 90 年代中期温度偏高, 此后开始降低; 我国南部地区与此相反。将 EOF1 和 EOF2 结合起来看, 80~90 年代我国北部地区, 特别是东北、西北和华北北部冬季温度一直处于偏高位相,

说明这是两种主要变化模态叠加的结果, 使得我国从 80 年代中期开始出现了持续性暖冬。

4 我国冬季气温年代际变化特征的分析

虽然从 20 世纪 80 年代以来我国冬季多为暖冬, 但增暖不但有明显的时段性而且有清楚的区域性。因此在研究我国冬季风的变化特征时, 有必要将年代际变化信号提取出来进行研究。对我国 160 个台站冬季平均的气温资料做波频谱分析, 取 ≥ 8 年为年代际变化, 而 < 8 年为年际变化。本文主要分析其年代际变化。

图 3 和图 4 分别是我国冬季气温的年代际变化的 EOF1 和 EOF2。同样通过对标准化的时间序

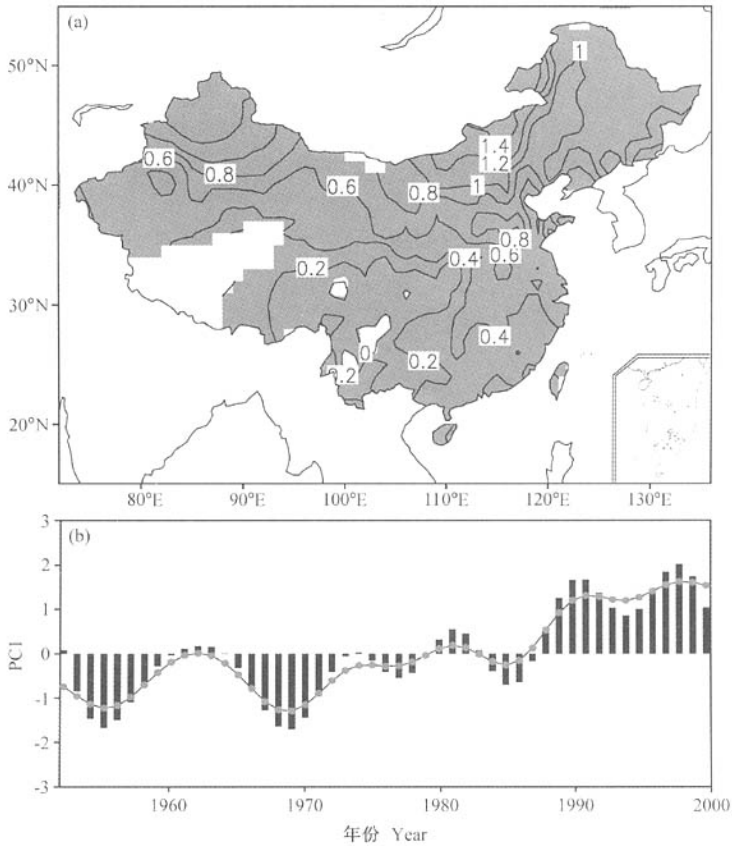


图3 1951/1952~1999/2000年中国冬季温度年代际变化部分 EOF 第一模态: (a) 空间分布型 (单位: °C); (b) 标准化时间序列 (直方条) 及其 11 年滑动平均 (曲线)

Fig. 3 Leading EOF mode of the interdecadal variation part of wintertime (Nov-Mar) temperature for 1951/1952-1999/2000 in China: (a) Regression map based on the standardized leading time series. Positive contours are shaded. Contour intervals are 0.2 °C, (b) Standardized time series (bars) and its 11-year running mean (curve)

列进行回归得到 EOF 的空间模态。其中 EOF 分析前两个模态分别解释了年代际变化总方差的 66% 和 13%，按照 North 等^[16] 的标准，这两个主分量是可以同其他主分量区分开来的，并且是彼此可分的。很显然，冬季气温的年代际变化 EOF1 的解释方差相比于原始资料有了明显的增加，而 EOF2 的解释方差则略有减少。

从图 3 的 EOF1 空间分布可以看出，我国冬季基本为一致的正信号，表明在年代际时间尺度上我国冬季气温的主要变化是全国一致的增温或者降温，温度的变化幅度也基本为从南向北增加，其中在东北和西北地区有最大值，最大增温幅度达到 1.2 °C。图 3 的时间序列在 80 年代中期以前

基本为负位相，在 80 年代中期以后基本为正位相。这就表明在年代际变化的时间尺度上，80 年代中期以前我国冬季气温主要为负异常，全国一致偏冷，而 80 年代中期以后我国冬季气温主要为正异常，全国冬季气温升高趋势明显，这就不难理解这段时间我国频繁的暖冬现象了。

图 4 的空间分布场表明，在我国东北、华北和新疆基本为正值区，而其他地区为负值区，说明上节讨论的我国冬季气温的南北振荡现象也存在于年代际时间尺度上，这种南北振荡在我国东部地区尤为明显。图 4 的时间序列在 70 年代以前一直为负位相，70 年代之后基本为正位相，在正位相中也有一些周期存在 10 年左右的波动；从 90

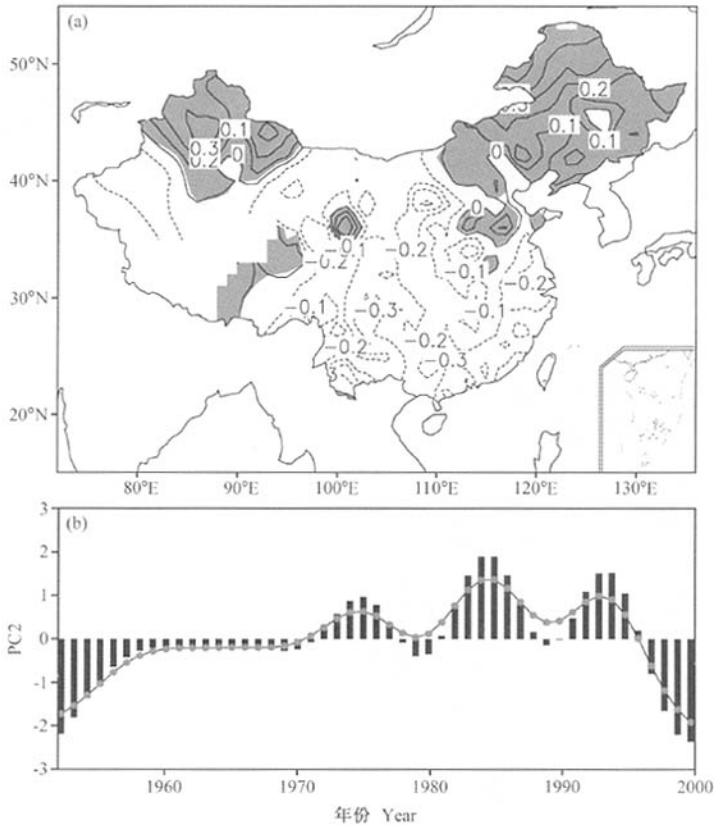


图4 与图3相同，但为 EOF 第 2 模态
Fig. 4 As in Fig. 3, but for the second EOF mode

年代中期以后时间序列一直在降低，这表明在 70 年代至 90 年代中期，年代际时间尺度上 EOF 第 2 模态的增温主要出现在我国北部，特别是东北、华北和新疆地区；而从 90 年代以后这种南北振荡模态反相，我国的增温主要出现在我国中部和南部地区。

与我国气温这两种年代际变化模态相关的降水场异常，在华北地区并没有显著的信号（图略）。说明，从 80 年代起我国华北冬季持续偏暖，而相应的降水没有明显的变化。因此，这种情况下温度的偏高同样会造成华北地区冬季偏旱。值得注意的是温度年代际变化的 EOF2 从 90 年代中期开始反相，它对我国冬季持续偏暖的影响需要进一步研究。

5 与我国气温年代际变化有关的东亚冬季风系统的异常

以往的研究^[14,19]表明东亚冬季风系统由海陆热力差异所驱动，其主要的成员包括：海平面气压场上的西伯利亚高压和阿留申低压，低层的东亚大陆边缘的强的北风，对流层中层的深厚的东亚大槽和对流层高层的东亚急流。因此，本文选取代表冬季风的冬季海平面气压场（SLP）、500 hPa 高度场和 200 hPa 纬向风场（U），用这些变量场的年代际变化分别与上节中冬季气温年代际的 EOF 分析时间序列做回归分析，来研究它们与中国冬季气温年代际变化相关的变化特征（图 5 和图 6）。

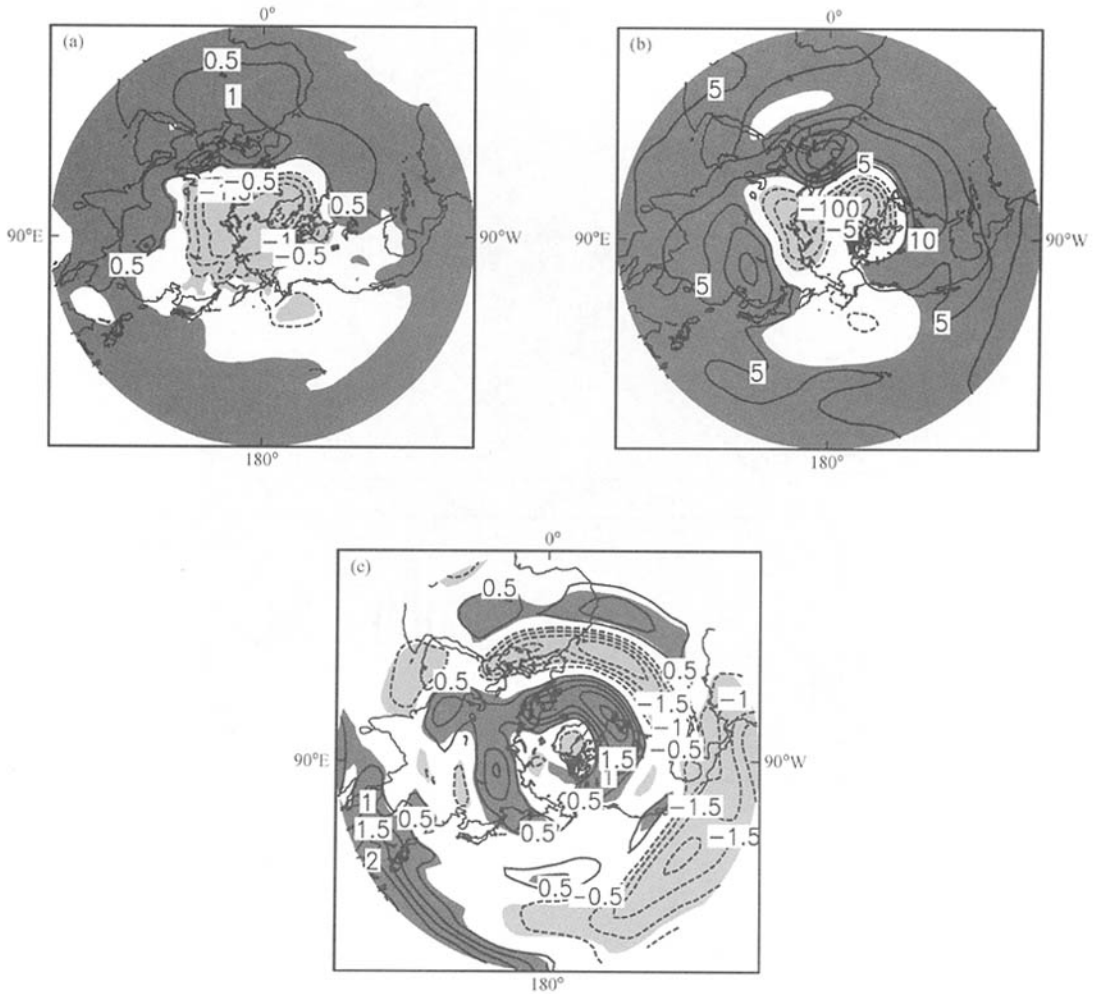


图5 对我国冬季气温年代际变化 EOF 第 1 模态的回归分析 (阴影表示通过 95% 信度检验): (a) 海平面气压 (单位: hPa); (b) 500 hPa 位势高度 (单位: m); (c) 200 hPa 纬向风 (单位: $m \cdot s^{-1}$)

Fig. 5 Regression maps for (a) sea surface pressure (units: hPa), (b) geopotential height at 500 hPa (units: m), and (c) zonal wind at 200 hPa (units: $m \cdot s^{-1}$), based upon the standardized leading PC of the interdecadal variation part of wintertime (Nov–Mar) temperature for 1951/1952–1999/2000 in China. Shadings indicate significant values at the 95% confidence levels

从图 5 可以看出,在年代际变化的时间尺度上,我国冬季气温年代际变化的第 1 模态与一个准正压的南北环状结构相关。在海平面气压场(图 5a)和 500 hPa 位势高度场(图 5b)上,这种环状结构非常清晰,在北半球大约 45°N 以北为主要的负相关区,而中低纬则为环状的正相关区;从回归的数值来看,其环状结构主要表现为极区和中高纬地区的反相振荡,呈现出类似北极涛动

(AO) 的形态^[20]。在 200 hPa 纬向风场(图 5c)上,也表现为准环状结构,在中高纬度有环状的正相关区,而在中低纬度则表现为带状的负相关区域,非常类似于北半球环状模的分布^[21]。最近的研究^[22,23]表明 AO 对东亚的气候有一定的影响,这里得到的结果表明我国冬季气温年代际变化的第 1 模态与 AO 存在着一定的关系,利用年代际时间尺度上的 AO 指数与我国冬季气温年代际变

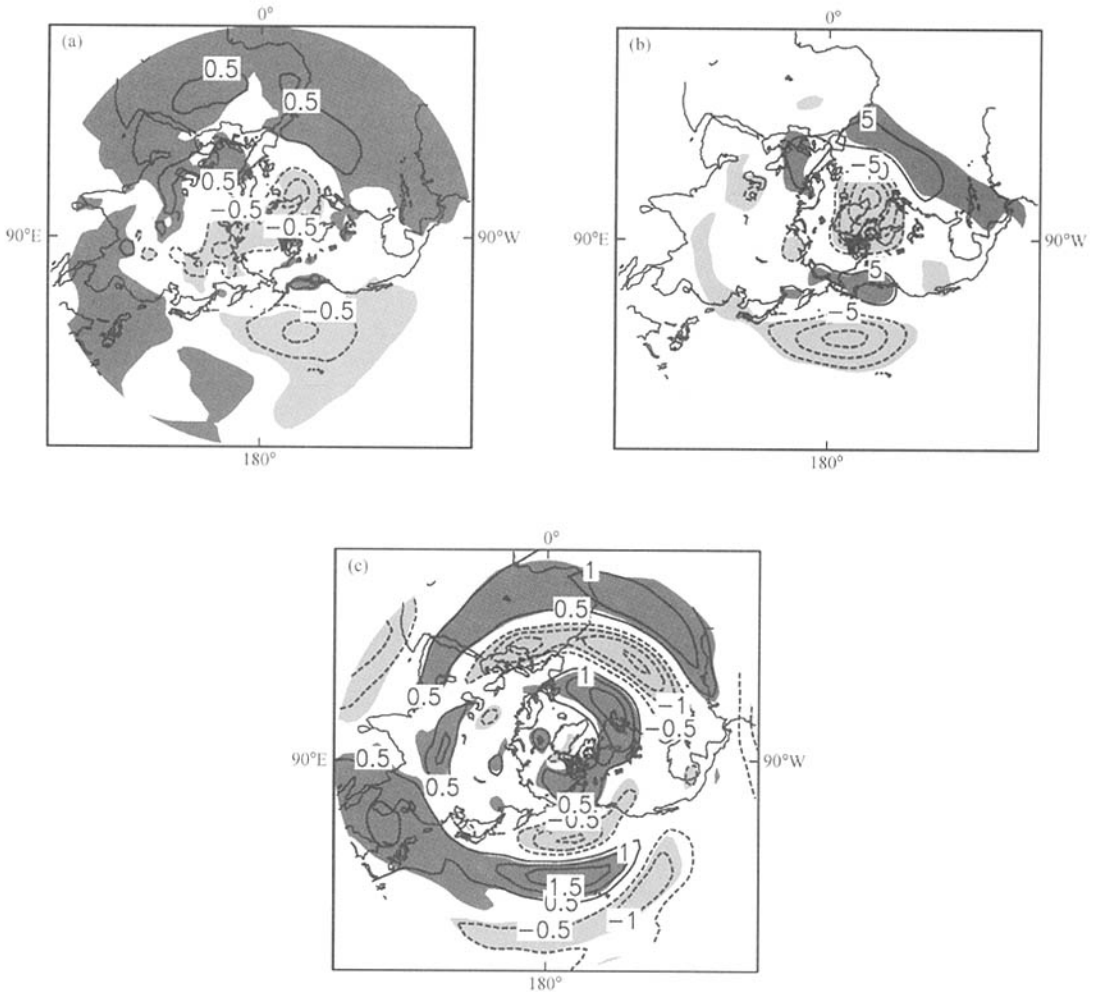


图 6 与图 5 相同，但为 EOF 第 2 模态
Fig. 6 As in Fig. 5, but based upon the standardized second PC

化的 EOF1 时间序列求相关，可以发现两者有显著的相关，相关系数达到 0.41。事实上这种环状模态与早期揭示的“纬向指数循环”是很相似的^[24]，我国气温与这种半球尺度的变化模态之间联系的机理目前并不清楚，初步的研究认为很可能跟大尺度准定常行星波的活动有关^[25]。

图 6 为我国冬季气温年代际变化的第 2 模态与海平面气压场（图 6a）、500 hPa 位势高度场（图 6b）和 200 hPa 纬向风场（图 6c）的回归和相关分布，与第 1 模态不同的是，第 2 模态和一个波状结构相对应，并且在海平面气压场和 500 hPa

位势高度场上，也表现出正压结构。分布形式表现为极地的负中心和太平洋、大西洋的正中心，说明两个大洋上存在反相的振荡关系；而在 200 hPa 纬向风场上则具有明显的区域特征，在太平洋和大西洋分别有南北向的“一、+、-”和“+、-、+”纬向风异常分布。由此看来，我国气温在年代际时间尺度上的南北振荡与太平洋和大西洋高度场的反相振荡紧密联系在一起。

6 结论和讨论

20 世纪 80 年代至今，我国冬季气温一直偏

暖,出现了频繁的暖冬。本文通过对我国冬季温度进行 EOF 分解,揭示出 EOF 前 2 个模态的时间序列在 80 年代初都有位相的转变,对应有显著的年代际变化,两个模态在 80、90 年代均处于正位相,同位相迭加后,使得我国尤其是东北、西北地区以及华北北部气温显著增暖。这种变化在我国冬季气温年代际变化的 EOF 分解上可以更清楚地看出来。我国冬季气温年代际变化的主要模态表明,第 1 模态表示全国一致的增温或降温,第 2 模态则是一种年代际变化中南北反相振荡的关系。而与这两种气温年代际变化模态相关的降水场异常在华北地区并没有显著的信号,说明从 80 年代起我国华北冬季持续偏暖,这也加剧了华北地区的干旱程度。

进一步对我国冬季气温年代际变化部分主要模态对大气环流的回归分析表明,我国冬季气温年代际变化的第 1 模态与半球尺度上的 AO 变化有密切的关系,在高度场上表现为一个准正压的南北环状模态;而第 2 模态则与中高纬大气环流中的一波结构联系密切,在高度场上表现为一个准正压的太平洋和大西洋上反相的振荡模态。这些结果表明我国冬季温度的年代际变化是和半球尺度的大气环流结构变化联系在一起的,即在年代际时间尺度上,不仅纬向基本气流和纬向平均气压的分布发生着变化,而且在其上叠加的波动也存在着振荡现象。但是,东亚地区特殊的海陆分布和地形状况决定了东亚季风是个复杂的系统,除了大气的内部过程发生着变化以外,还受外部各种强迫作用,特别是各种外源强迫的作用又会引起大气内部过程发生相应的变化,各种信号相互叠加并可以相互作用,因此要深入了解季风发生异常变化的机制,还需要进一步深入地研究。

参考文献 (References)

- [1] 黄荣辉, 陈文, 丁一汇, 等. 关于季风动力学以及季风与 ENSO 循环相互作用的研究. 大气科学, 2003, **27** (4): 484~502
Huang Ronghui, Chen Wen, Ding Yihui, et al. Studies on the Monsoon Dynamics and the Interaction between Monsoon and ENSO Cycle. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2003, **27** (4): 484~502
- [2] Ding Yihui. *Monsoon over China*. Kluwer Academic Publishers, 1994. 419pp
- [3] Yang S, Lau K M, Kim K M. Variations of the East Asian jet stream and Asian-Pacific-American winter climate anomalies. *J. Climate*, 2002, **15**: 306~325
- [4] Lau K M, Chang C P. Planetary scale aspects of the winter monsoon and atmospheric teleconnections. In: *Monsoon Meteorology*. New York: Oxford University Press, 1987. 161~201
- [5] 朱抱真, 丁一汇, 罗会邦. 关于东亚大气环流和季风的研究. 气象学报, 1990, **48** (1): 4~161
Zhu Baozhen, Ding Yihui, Luo Huibang. A Review of the atmospheric general circulation and monsoon. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1990, **48** (1): 4~161
- [6] 梁必骥. 热带气象学. 广州: 中山大学出版社, 1990. 383pp
Liang Biji. *Tropical Meteorology* (in Chinese). Guangzhou: Sun Yat-sen University Press, 1990. 383pp
- [7] Davidson N E, McBride J L, McAvaney B J. The onset of the Australian monsoon during winter MONEX: Synoptic aspects. *Mon. Wea. Rev.*, 1983, **111**: 495~516
- [8] Tomita T, Yasunari T. Role of the northeast winter monsoon on the biennial oscillation of the ENSO/Monsoon system. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1996, **74**: 399~413
- [9] Chen Wen, Graf H F, Huang Ronghui. The interannual variability of East Asian winter monsoon and its relation to the summer monsoon. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2000, **17** (1): 48~60
- [10] Sun Bomin, Sun Shuqing. The analysis on the features of the atmospheric circulation in preceding winter for the summer drought and flooding in the Yangtze and Huaihe River Valley. *Advance in Atmospheric Sciences*, 1994, **11** (1): 79~90
- [11] 陈文. El Niño 和 La Niña 事件对东亚冬、夏季风循环的影响. 大气科学, 2002, **26** (5): 595~610
Chen Wen. The impacts of El Niño and La Niña on the cycle of East Asian winter and summer monsoon. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2002, **26** (5): 595~610
- [12] 陈隆勋, 邵永宁, 张清芬. 近 40 年我国气候变化的初步分析. 应用气象学报, 1991, **2** (2): 164~173
Chen Longxun, Shao Yongning, Zhang Qingfen. Preliminary analysis of Climatic change during the last 39 years. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 1991, **2** (2): 164~173
- [13] Kalnay E, Coauthors. The NCEP/NCAR 40-year reanalyses project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1996, **77**: 437~471
- [14] 陈隆勋, 朱乾根, 罗会邦. 东亚季风. 北京: 气象出版社, 1991. 362pp
Chen Longxun, Zhu Qiangen, Luo Huibang. *East Asian*

- Monsoon (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1991. 362pp
- [15] Jolliffe I T. *Principal Component Analysis*. Springer-Verlag, 1986. 290 pp
- [16] North G R, Bell T L, Cahalan R F, et al. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions. *Mon. Wea. Rev.*, 1982, **110**: 699~706
- [17] 林学椿, 于淑秋, 唐国利. 中国近百年温度序列. 大气科学, 1995, **19** (5): 525~532
Lin Xuechun, Yu Shuqiu, Tang Guoli. Series of Average Air Temperature over China for the Last 100-Year Period. *Scientia Atmospheric Sinica* (in Chinese), 1995, **19** (5): 525~532
- [18] 王绍武. 现代气候学研究进展. 北京: 气象出版社, 2001. 458pp
Wang Shaowu. *Advance in Modern Climatological Studies* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2001. 458pp
- [19] Staff members of Academia Sinica. On the general circulation over Eastern Asia (I). *Tellus*, 1957, **9**: 432~446
- [20] Thompson D W J, Wallace J M. The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. *Geophys. Res. Lett.*, 1998, **25**: 1297~1300
- [21] Limpasuvan V, Hartmann D L. Eddies and the annular modes of climate variability. *Geophys. Res. Lett.*, 1999, **26**: 3133~3136
- [22] Gong D Y, Wang S W, Zhu J H. East Asian winter monsoon and Arctic oscillation. *Geophys. Res. Lett.*, 2001, **28**: 2073~2076
- [23] Jhun J G, Lee E J. A New East Asian Winter Monsoon Index and Associated Characteristics of the Winter Monsoon. *J. Climate*, 2004, **17**: 711~726
- [24] Namias J. The index cycle and its role in the general circulation. *J. Meteorology*, 1950, **7**: 130~139
- [25] Chen W, Yang S, Huang R H. Relationship between stationary planetary wave activity and the East Asian winter monsoon. *J. Geophys. Res.*, 2005, **110**, D14110, doi: 10.1029/2004JD005669