

近 40 年来东亚冬季风的年代际时空变化趋势

施晓晖¹ 徐祥德¹ 谢立安²

¹ 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

² 美国北卡罗来纳州立大学海洋、地球与大气科学系, 罗利 NC27695-8208

摘 要 利用经验正交函数-奇异值分解 (EOF-SVD) 综合分析方法和 1961~2000 年 NCEP/NCAR 月平均再分析资料对近 40 年来东亚冬季风和冬季表面气温的年代际变化特征及其相关关系进行了分析。研究表明, EOF 得到的冬季海平面气压场主成分空间结构 (第一特征向量) 及其时间系数可以较好地反映出东亚冬季风的变化, 而且可以同时得到东亚冬季风强度和南扩程度的变化, 具有一定的优越性。通过对冬季海平面气压和表面气温年代际分量的 EOF-SVD 综合分析, 发现了东亚冬季风强度减弱、南扩加强的年代际变化趋势, 冬季表面气温则表现出中高纬地区海陆热力差异减弱、低纬地区海陆热力差异加强的年代际变化特征, 两者之间存在很好的对应关系。另外, 大陆冬季表面气温与海平面气压的年代际对应关系比海洋的更加显著, 表明对温室效应的区域气候响应与东亚冬季风的年代际变化之间可能存在较为密切的联系。

关键词 东亚冬季风 年代际变化 EOF-SVD 综合分析

文章编号 1006-9895 (2007) 04-0747-10

中图分类号 P462

文献标识码 A

Interdecadal Spatial-Temporal Change Trend of East Asian Winter Monsoon in the Last 40 Years

SHI Xiao-Hui¹, XU Xiang-De¹, and XIE Li-An²

¹ State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

² Department of Marine, Earth and Atmospheric Sciences, North Carolina State University, Raleigh NC27695-8208

Abstract The spatial-temporal characteristics of the interdecadal change (IC) of East Asian winter monsoon (EAWM), represented by sea level pressure (SLP), and surface air temperature (SAT) in winter during the period of 1961-2000 and their relationship are studied based on NCEP/NCAR reanalysis data and using some statistic methods, such as running mean, correlation analysis and empirical orthogonal function-singular value decomposition (EOF-SVD) compositive analysis. The basic clue of EOF-SVD compositive analysis is (1) decomposing SLP and SAT in winter by EOF respectively to gain their principal spatial structure, i.e., the first eigenvectors, and temporal change trends, denoted by the corresponding time coefficients (TC), as well as the relationship of their spatial-temporal changes; (2) using SVD of SLP and SAT in winter to investigate their spatial remote correlations if the close relation is found in step 1. Results suggest that using the EOF of SLP to investigate the variety of EAWM is reasonable and superior to EAWM index defined by regional mean, because it can attain the spatial structure of SLP, which simultaneously includes the information of the intensity and southward extending of EAWM. According to the EOF results, it is found that on interannual scale, EAWM exhibits an overall weakening trend in the past 40 years. By means of EOF-SVD compositive analysis on interdecadal scale, the results show that the first eigenvector

收稿日期 2006-02-15, 2006-07-27 收修定稿.

资助项目 国家自然科学基金资助项目 90502003, 科研院所社会公益研究专项 2005DIB3J057, 国家重点基础研究发展规划项目 2003CB 716806

作者简介 施晓晖, 男, 1972 年出生, 博士, 主要从事气候变化研究. E-mail: sxh@cams.cma.gov.cn

of interdecadal component (FEIC) of SLP in winter displays a spatial structure with "negative in north and positive in south" over East Asia and positive anomalies over the sea. A turning from negative to positive happens to the TC of the first eigenvector in the late 1970s, reflecting the interdecadal weakening of intensity and southward extending of EAWM. The FEIC of SAT in winter exhibits a spatial distribution with distinctive warming over middle-high latitude land and little change over low latitude land and sea. A turning from negative to positive for the TC also occurs in the early 1980s, suggesting an interdecadal decreasing trend of sea-land thermal difference (SLTD) in middle-high latitudes and an interdecadal increasing trend of SLTD in low latitudes. The spatial-temporal changes of the above two meteorological elements are in accordance, indicating the close correlation between the interdecadal spatial-temporal changes of EAWM and SAT in winter. The results of SVD indicate that the interdecadal corresponding relationship between SLP and SAT in winter over land is more significant than that over sea, suggesting the IC of EAWM may be associated with the regional response of the climate in East Asia to the heterogeneous spatial structure of global warming.

Key words East Asian winter monsoon, interdecadal change, EOF-SVD composite analysis

1 引言

亚洲冬季风系统是北半球冬季最活跃的环流系统之一,它的异常不仅带来区域性的冷害、大风等灾害天气,而且能引发全球范围的大气环流异常^[1~4],冬季风异常不仅可以造成同期环流形势的差异,而且对后期环流和天气状况也有影响^[5]。最近的研究还表明,异常东亚冬季风能够激发赤道西太平洋的纬向风异常,并通过赤道太平洋的海气相互作用,可进一步导致 El Niño (La Niña) 事件的发生^[6],数值试验结果也支持了这一观点^[7]。因此,研究东亚冬季风的变化趋势及其成因具有十分重要的科学价值和社会意义。

近年来,很多学者对东亚冬季风的年际变化及其成因进行了研究,得到了很多有意义的结论。武炳义等^[8]发现冬季北极喀拉海、巴伦支海的海冰面积变化与东亚冬季风的强、弱之间存在密切联系。陈海山等^[9]的研究则发现欧亚大陆中高纬地区冬季积雪异常与东亚冬季风和中国冬季气温存在明显的关系。Wu 等^[10]最近的研究结果表明,冬季北极涛动不仅影响北极和北大西洋区域气候变化,并且可能影响冬季西伯利亚高压,进而影响东亚冬季风。雷永荟和吴洪宝^[11]研究了东亚冬季风异常与海陆热力差异的联系,结果表明在东亚季风区内冬季风异常有明显的地理差异,不同地区海陆热力差异影响不同冬季风子系统的强度。

东亚冬季风的长期变化及其成因是科学家们目前关注的另外一个问题。徐建军等^[12]研究了东亚冬季风的长期变化趋势,发现 20 世纪 80 年代以后

冬季风有所减弱。Wang^[13]认为 20 世纪 70 年代全球大气环流的转变是导致东亚季风减弱的主要原因。20 世纪 80 年代以后东亚冬季风强度减弱已经为人们所公认,但现在对季风的这种变化是否与全球气候变化有关这一问题还没有得到清楚的认识。张家诚^[14]认为亚欧地区大气环流的主要特征是行星、海陆和极冰三部热机相互作用的结果,同时提出季风是海陆热机的产物,而近百年来,地球气候正经历一次以全球气候变暖为主要特征的显著变化,1860 年有气象观测记录以来,全球平均温度升高了 $0.6 \pm 0.2^{\circ}\text{C}$,但这种增温具有明显的空间分布非均匀性,一般来说,高纬地区增温多,低纬地区增温少,中国的气候变化趋势与全球变化的总趋势基本一致^[15]。那么,在这种全球变暖区域非均匀分布的背景下,东亚冬季风的年代际变化趋势如何?其与气温之间具有什么样的联系?针对上述问题,本文提出了一种经验正交函数-奇异值分解 (EOF-SVD) 综合分析方法,对东亚冬季风和表面气温的年代际变化趋势及其相关关系进行初步的探讨。

2 EOF-SVD 综合分析方法

根据 EOF 和 SVD 方法的特点,可以将两种方法结合,用来研究东亚冬季风的年代际变化趋势及其与表面气温的关系,即 EOF-SVD 综合分析方法。其基本思路为:首先对变量场分别进行 EOF,分析其主成分空间型(第一特征向量)的结构和对应时间系数的变化特征,并确定两个变量场主成分空间型的变化趋势是否具有联系;如果具有密切联系,则将两个变量场进行 SVD 分解,分析其异性相

关系数场的空间分布, 寻找相互影响关键区, 了解两变量场之间的空间遥相关特征。具体计算方法如下:

利用 EOF 得到的特征向量以及相应的时间系数, 我们可以了解变量场的空间和时间变化特征, 但在分析某个变量场变化成因的时候, 可能还需要分析两个变量场之间的相关关系。如有两个变量矩阵 $\mathbf{X}_{m \times n}$ 和 $\mathbf{Y}_{m \times n}$, 分别对它们进行 EOF, 可以得到:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{X}_{m \times n} \\ \mathbf{Y}_{m \times n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{U}_{m \times p} \mathbf{T}_{p \times n} \\ \mathbf{V}_{m \times p} \mathbf{T}_{p \times n}^* \end{pmatrix}. \quad (1)$$

计算时间系数 $\mathbf{T}$ 和 $\mathbf{T}^*$ 的相关系数, 可以了解两个变量场变化趋势空间结构的相关性, 分析时间系数的线性变化趋势:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{T}_{p \times n} \\ \mathbf{T}_{p \times n}^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_i + b_i j \\ a_i^* + b_i^* j \end{pmatrix}, \quad i = 1, 2, \dots, p; \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

还可以了解两者的变化趋势是否一致。如果两变量场第一特征向量的方差贡献较大, 时间系数相关显著, 且长期变化趋势均显著, 则可以认为两个变量场的主成分空间型具有显著的长期变化趋势, 且两者之间存在密切联系, 但此时还不能确定变量场之间相互影响的关键区。在此基础上, 根据 SVD 基本原理, 将变量场进行标准化处理, 得到 $\mathbf{X}'_{m \times n}$ 和 $\mathbf{Y}'_{m \times n}$, 并分别作为左变量场和右变量场。两场之间的交叉相关系数场

$$S_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x'_i(k) y'_j(k), \quad i, j = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

可以分解为

$$\mathbf{S} = \mathbf{L} \begin{pmatrix} \mathbf{\Lambda}_m & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \mathbf{R}', \quad (4)$$

空间分布型 $\mathbf{L}$ 称为左奇异向量场, 表示 $\mathbf{X}'_{m \times n}$ 场对相关系数场的贡献, 另一空间分布型 $\mathbf{R}$ 则称为右奇异向量场, 表示 $\mathbf{Y}'_{m \times n}$ 场对相关系数场的贡献。式中 $\mathbf{\Lambda}_m = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m)$ 为奇异值。

SVD 的目的是要把左、右变量场 $\mathbf{X}'_{m \times n}$ 、 $\mathbf{Y}'_{m \times n}$ 分解为左、右奇异向量 $\mathbf{L}$ 、 $\mathbf{R}$ 的线性组合, 即由左、右两场构造两个矩阵 $\mathbf{T}$ 、 $\mathbf{T}^*$, 使

$$\begin{pmatrix} \mathbf{T} \\ \mathbf{T}^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{L}' \mathbf{X}'_{m \times n} \\ \mathbf{R}' \mathbf{Y}'_{m \times n} \end{pmatrix}. \quad (5)$$

利用 $\mathbf{L}$ 、 $\mathbf{R}$ 为正交化向量的条件, 可以得到左、右变量场的展开式分别为

$$\begin{pmatrix} \mathbf{X}'_{m \times n} \\ \mathbf{Y}'_{m \times n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{L} \mathbf{T} \\ \mathbf{R} \mathbf{T}^* \end{pmatrix}, \quad (6)$$

其中, $\mathbf{T}$ 、 $\mathbf{T}^*$ 分别为左、右奇异向量场的时间系数矩阵, 因此 SVD 相当于把左、右变量场分解为左、右奇异向量的线性组合, 每一对奇异向量和相应的时间系数就确定了一对 SVD 模态。

得到奇异向量和相应的时间系数后, 计算每对奇异向量的时间系数 $\mathbf{T}$ 和 $\mathbf{T}^*$ 之间的相关系数, 其亦反映了两变量场空间分布型的总体相关程度; 更重要的是, 通过分析两个变量场之间的异性相关系数场可以了解两变量场相互作用的关键区。其中左异性相关系数场为左变量场与右奇异向量时间系数的相关系数场, 右异性相关系数场则为右变量场与左奇异向量时间系数之间的相关系数场:

$$\begin{pmatrix} r_j(\mathbf{X}'_{m \times n}, \mathbf{T}^*) \\ r_j(\mathbf{Y}'_{m \times n}, \mathbf{T}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\sum_{k=1}^n (x'_i(k) - \bar{x}') (t_j^*(k) - \bar{t}^*)}{\sqrt{\sum_{k=1}^n (x'_i(k) - \bar{x}')^2} \sqrt{\sum_{k=1}^n (t_j^*(k) - \bar{t}^*)^2}} \\ \frac{\sum_{k=1}^n (y'_i(k) - \bar{y}') (t_j(k) - \bar{t})}{\sqrt{\sum_{k=1}^n (y'_i(k) - \bar{y}')^2} \sqrt{\sum_{k=1}^n (t_j(k) - \bar{t})^2}} \end{pmatrix}, \quad i, j = 1, 2, \dots, m, \quad (7)$$

代表了两个变量场相互关系的空间分布结构。根据相关系数的检验标准, 在本文中样本长度为 30, 则相关系数绝对值大于 0.5541 的区域可定义为显著相关区 (通过 $\alpha=0.001$ 显著性检验), 亦即两变量场之间相互影响的关键区^[16]。

关于 SVD 模态的显著性检验, 本文采用了 Wallace 等^[17] 提出的随机试验方法, 即两个场都采用实际的气象场样本资料, 其中一个场资料的序号是按实际时间顺序排列, 另一个场资料的序号随机排列, 即两个场的样本在时间上不再对应, 这样做 SVD, 得到两个场的总协方差平方和:

$$\|C_{xy}\|^2 = \sum_{k=1}^m \lambda_k^2, \quad (8)$$

和第 k 对 SVD 模态对总协方差平方和的贡献率:

$$S_k = \frac{\lambda_k^2}{\|C_{xy}\|^2}. \quad (9)$$

反复随机更替第二个场的资料样本序号, 共进行 100 次 SVD, 得到一系列随机试验的 $\|C_{xy}\|^2$ 和 S_k 。然后, 用资料时间序号对应的实际资料 SVD

得到的 $\|C_{xy}\|^2$ 和 S_k 与随机试验的一系列 $\|C_{xy}\|^2$ 和 S_k 来进行比较, 如果实际资料 SVD 的 $\|C_{xy}\|^2$ 大于随机试验得到的 100 个 $\|C_{xy}\|^2$ 中第 5 位最大值, 可以认为两变量场之间整体上存在相关。在此前提下, 对于第 k 个模态, 如果实际资料 SVD 的 S_k 大于随机试验得到的 100 个 S_k 中第 5 位最大值, 则第 k 对模态反映的相关联系是显著的。

本文使用的资料为 NCEP/NCAR 月平均再分析资料, 主要包括海平面气压、表面气温以及 850 hPa 纬向、经向风等, 分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$; 资料时间均为 1961~2000 年, 下载自 NOAA-CIRES 气候诊断中心网站。冬季定义为当年 12 月至次年 2 月, 即 1961 年冬季为 1961 年 12 月~1962 年 2 月, 其余类推。

3 海平面气压场 EOF 分解表征东亚冬季风时空变化特征的可行性

我国的气象科学工作者曾经定义了不同的东亚冬季风强度指数, 大致可以归为以下三类: 利用海平面气压定义的东亚冬季风强度指数^[12, 18, 19], 利用 500 hPa 高度场资料定义的东亚冬季风强度指数^[20]以及利用 850 hPa 风速定义的东亚冬季风强度指数^[21, 22]。但目前利用这些指数对东亚冬季风强度变化趋势的研究得到的结论不尽相同, 已有研究也表明东亚冬季风异常具有明显的地理差异, 采用反映某一区域平均状况的季风指数来表征冬季风的变化存在一定的局限性^[11]。因此, 有必要寻求

能够更为客观地描述东亚冬季风强度的新方法。

考虑到 EOF 分解能够同时得到变量场的主要空间结构和时间变化特征, 加上海陆热力差异是季风最重要的起动机, 相对于海洋来讲, 陆地的热容量相对较小, 对太阳辐射的反应相对较快。因此, 冬季北太平洋上空为热低压, 其西侧中国大陆中西部大部分地区上空则表现为大陆冷性高压, 东西向大气质量分配的差异, 即海平面气压的差异在很大程度上决定了东亚冬季风的强度变化^[22], 因此, 本文将利用 EOF 方法对海平面气压场进行分解, 通过分析其特征向量的空间分布及时间系数的变化来了解东亚冬季风的时空结构及其变化趋势, 本节将主要讨论这一方法的可行性。

图 1a 为 1961~2000 年东亚大陆东部-西太平洋区域 (以下简称东亚区域) 冬季海平面气压距平场 EOF 第一特征向量的空间分布 (方差贡献 35%), 可以看出其主要的空间结构为冬季东亚大陆海平面气压偏高, 贝加尔湖附近地区偏高尤为显著, 表明西伯利亚高压偏强; 西太平洋上的海平面气压则偏低, 表明阿留申低压亦偏强。这样的空间分布意味着冬季风在源地的强度偏强, 同时东西向海平面气压差偏大, 东亚冬季风南扩程度亦偏强, 即东亚冬季风整体偏强。从对应时间系数的变化上看, 其具有明显的年际变化特征, 长期变化趋势为显著线性减小趋势, 与时间的相关系数为 -0.2997, 通过 $\alpha=0.10$ 显著性检验 (图 1b)。因此近 40 年来, 东亚冬季风的长期趋势整体上呈减弱趋势, 这与最

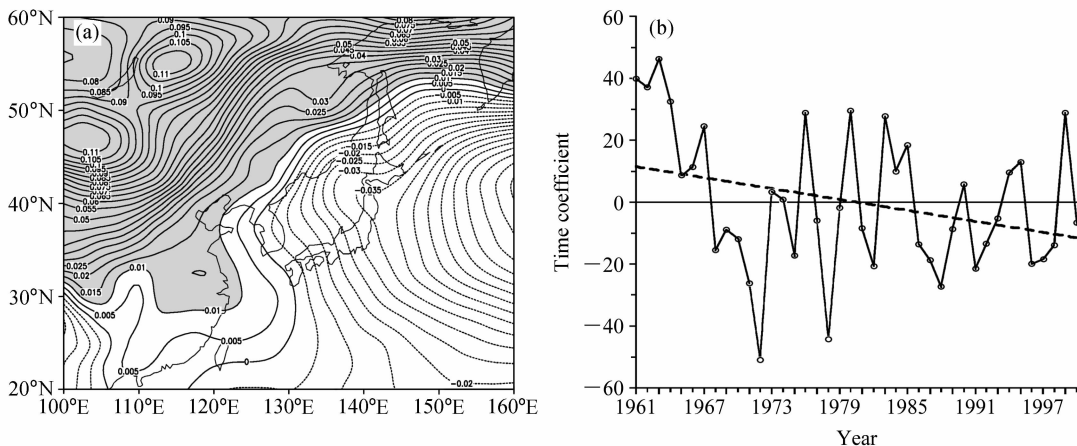


图 1 1961~2000 年冬季平均海平面气压 EOF 第一特征向量空间分布及时间系数的变化: (a) 特征向量空间分布, 阴影区 ≥ 0.01 ; (b) 时间系数, 虚线为线性趋势

Fig. 1 The first eigenvector of sea level pressure (SLP) anomaly and the corresponding time coefficient series in winter during 1961-2000: (a) The first eigenvector, the shaded area denotes the values ≥ 0.01 ; (b) time coefficients, the dashed line denotes linear trend

近 40~50 年中,我国寒潮频率趋于降低,低温日数趋于减少的冬季气候变化趋势^[23]相吻合。

为了验证上述 EOF 结果是否合理,本文将时间系数大于 15 的年份作为典型强冬季风年,分别为 1961、1962、1963、1964、1967、1976、1980、1983、1985、1999 年,共 10 年;时间系数小于-15 的年份作为典型弱冬季风年,分别为 1968、1971、1972、1975、1978、1982、1987、1988、1991、1996、1997 年,共 11 年;然后对强、弱年份的 850 hPa 风场进行合成,绘制了典型强、弱冬季风年 850 hPa

风场相对 1961~2000 年平均值的距平分布(图 2)。从图 2 可以看出,强冬季风年,东亚大陆东部地区及其以东近海区域为偏北风距平,弱冬季风年则相反,东亚大陆东部地区及其以东近海区域为偏南风距平。由于东亚冬季风主要由北半球高纬度地区南下的冷空气和中、高纬度西风带气流相叠加产生,表现为西北或北风,因此用海平面气压场 EOF 分解第一特征向量时间系数定义的强、弱冬季风年合成 850 hPa 风场距平的反向分布特征很好地反映了东亚冬季风的强、弱变化。

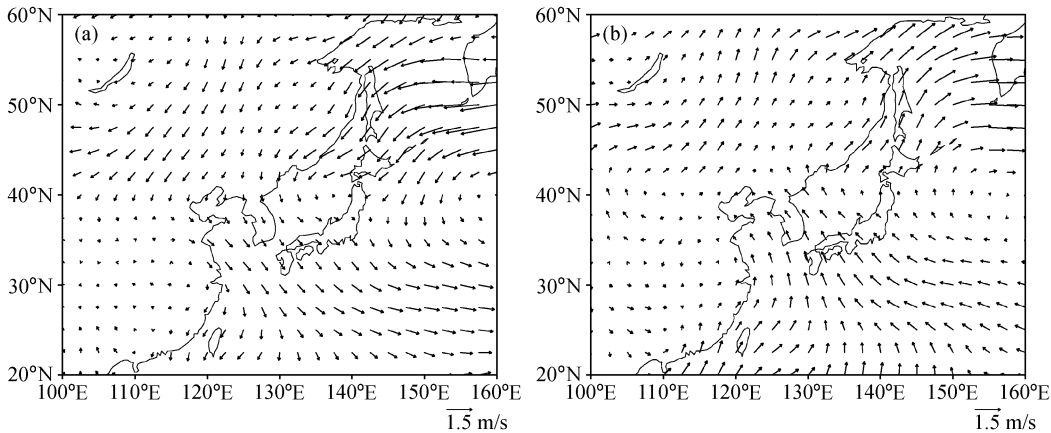


图 2 强、弱冬季风年 850 hPa 冬季风场的距平分布: (a) 强冬季风年; (b) 弱冬季风年
Fig. 2 Anomalies of winter wind at 850 hPa in strong (a) and weak (b) East Asian winter monsoon (EAWM) years

表 1 不同东亚冬季风指数得到的强、正常、弱冬季风年比较					Table 1 The comparison of strong, normal and weak years determined by various indices of East Asian winter monsoon				
年份	I_1	I_2	I_3	I_4	年份	I_1	I_2	I_3	I_4
1961	正常	强	强	强	1981	正常	弱	正常	正常
1962	强	强	强	强	1982	弱	弱	强	弱
1963	正常	弱	弱	强	1983	强	强	正常	强
1964	正常	正常	正常	强	1984	正常	强	弱	正常
1965	弱	正常	强	正常	1985	强	强	强	强
1966	强	弱	强	正常	1986	正常	弱	强	正常
1967	强	强	正常	强	1987	弱	正常	强	弱
1968	弱	强	正常	弱	1988	弱	弱	弱	弱
1969	正常	强	强	正常	1989	弱	正常	弱	正常
1970	正常	正常	弱	正常	1990	正常	弱	正常	正常
1971	正常	弱	弱	弱	1991	正常	弱	正常	弱
1972	弱	弱	弱	弱	1992	正常		弱	正常
1973	强	正常	正常	正常	1993	正常		强	正常
1974	正常	弱	正常	正常	1994			正常	正常
1975	正常	正常	正常	弱	1995			强	正常
1976	强	强	正常	强	1996			正常	弱
1977	正常	强	强	正常	1997			弱	弱
1978	弱	弱	正常	弱	1998			强	正常
1979	正常	强	强	正常	1999			弱	强
1980	强	正常	强	强	2000				正常

将文献[12, 20, 22]定义的东亚冬季风强度指数分别记为 I_1 (东西向海平面气压差)、 I_2 (东亚大槽强度)、 I_3 (850 hPa 风速), 本文海平面气压场距平 EOF 分解第一特征向量的时间系数则记为 I_4 , 比较了不同指数得到的强、正常、弱冬季风年 (表 1)。可以看出, I_4 与 I_1 吻合得较好, 33 年中有 23 年是一致的, 吻合率达到 70%; 其次是 I_2 , 吻合率为 52%; I_4 与 I_3 的差异较大, 吻合率只有 31%。同时可以看出, I_4 得到的强、弱冬季风年与其他 3 个指数得到的大部分相同, 但也存在一定的差异, 进一步表明了 I_4 的合理性。

综上所述, 冬季海平面气压场 EOF 分解得到的主要空间结构及其时间系数可以较好地反映出东亚冬季风的变化, 且空间结构同时包含了东亚冬季风在源地的强度及其南扩程度的信息, 结合时间系数的变化, 可以同时得到东亚冬季风强度和南扩程度的变化特征, 相对于利用要素区域平均值定义的季风指数 (一般只能单一地反映东亚冬季风的强度或是南扩程度) 来说, 具有一定的优越性。

4 东亚冬季风年代际时空变化趋势的 EOF-SVD 综合分析

20 世纪 90 年代以来, 年代际气候变化已成为国际气候学研究的热门问题之一, 也是气候变化与可预测性研究计划 (CLIVAR) 的重要研究内容之一。东亚冬季风的年代际变化及其成因也日益受到人们的关注, 但目前的研究还较少, 以下本文将利用 EOF-SVD 综合分析方法对东亚区域冬季海平

面气压和表面气温的年代际变化趋势及其相互关系等问题进行探讨, 以了解东亚冬季风的年代际变化趋势及其与全球变暖之间的可能联系。

4.1 东亚冬季风年代际变化特征的 EOF 分析

基于上一节中利用冬季海平面气压 EOF 第一特征向量及其时间系数表征东亚冬季风强度的可行性分析, 为了更清楚地了解东亚冬季风的年代际变化趋势, 本文首先将东亚区域 1961~2000 年冬季平均海平面气压场进行 11 年滑动平均作为年代际分量, 然后对年代际分量距平场进行 EOF。第一特征向量的空间结构表现出东亚大陆高纬度地区为负值, 其他区域为正值分布特征 (图 3a, 方差贡献为 69%)。相应的时间系数在 1966~1976 年为负值, 即在此期间, 东亚大陆东部冬季海平面气压距平为与第一特征向量空间分布相反的“北正南负”空间结构, 描述了东亚冬季风在源地的强度偏弱、南扩程度偏弱的特征; 1977 年以后转为正值, 即此段时间内, 东亚大陆东部冬季海平面气压距平转为与第一特征向量空间分布相同的“北负南正”空间结构, 反映了东亚冬季风在源地的强度偏弱, 南扩程度偏强的特征 (图 3b)。

冬季海平面气压 EOF 第一特征向量对应时间系数的长期线性变化趋势为显著增大趋势 (其与时间的相关系数为 0.9043, 远远大于 $\alpha=0.001$ 的显著性检验水平), 表明东亚冬季风在源地的强度减弱、而南扩程度加强的年代际变化趋势越来越显著。这与上一节得到的年际尺度上东亚冬季风整体减弱的长期变化趋势并不一致, 造成这种差异的原

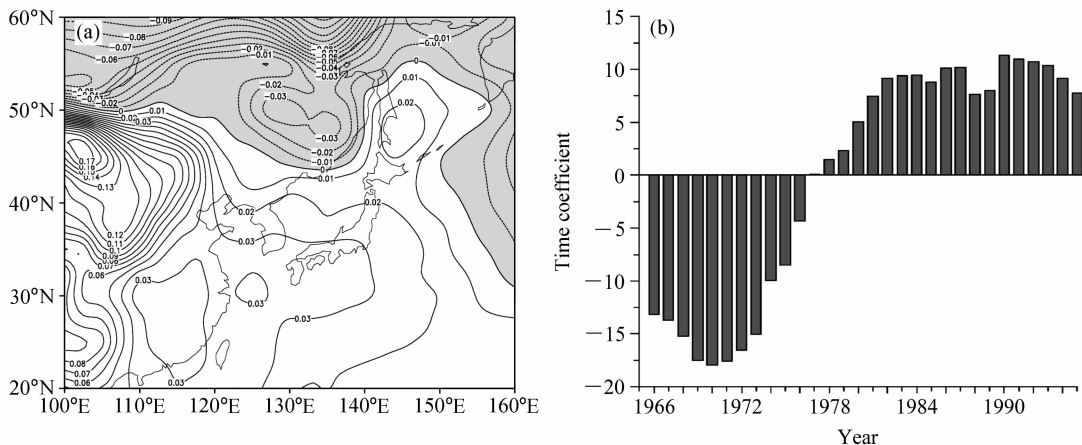


图 3 冬季海平面气压年代际分量距平场 EOF 分解第一特征向量和相应的时间系数: (a) 特征向量, 阴影区为负值; (b) 时间系数

Fig. 3 The first eigenvector of the anomaly field of the interdecadal components of SLP in winter and its corresponding time coefficients; (a) The first eigenvector, the area with negative values is shaded; (b) time coefficients

因也是值得继续深入研究的问题。

上述海平面气压年代际分量距平场 EOF 第一特征向量的空间分布及其时间系数的变化描述出东亚冬季风在源地的强度由强变弱, 南扩程度则由弱变强的年代际变化趋势, 并表明这一东亚冬季风年代际尺度“位相突变”的发生时间是在 20 世纪 70 年代末期, 与郭其蕴^[18]发现的 20 世纪 80 年代东亚冬季风强度偏弱而南扩程度偏强的现象相吻合。相关研究^[24, 25]也发现 20 世纪 80 年代初期以后, 西伯利亚高压强度明显地减弱, 与本文的研究结果基本一致。

4.2 东亚区域海陆表面气温年代际变化特征的 EOF 分析

分析 1961~2000 年东亚区域冬季表面气温年代际分量距平场 EOF 第一特征向量的空间分布 (图 4a, 方差贡献 83%) 可以发现, 其分布特征为大陆地区基本上为正距平, 中高纬地区为高值区; 海洋上在鄂霍次克海区域存在一个负距平中心, 其他区域为弱的正距平。体现了北部地区海陆热力差异减弱、南部地区海陆热力差异有所加强的空间结构特征。其对应的时间系数亦具有显著增大的线性变化趋势 (与时间的相关系数为 0.9760, 远远大于 $\alpha=0.001$ 的显著性检验水平), 在 1966~1981 年为负值, 1982~1995 年为正值, 即冬季表面气温在 20 世纪 80 年代初期发生了年代际尺度的“位相突变” (图 4b)。

与图 3a、b 比较还可以发现, 冬季表面气温和海平面气压年代际分量距平场 EOF 第一特征向量

的空间分布具有很好的对应关系, 且时间系数变化亦十分一致。但两者年代际“位相突变”的发生时间存在一定的差异, 表明年代际尺度上东亚冬季风的减弱和气温的变化并不完全同步, 冬季表面气温的变化可能还受到其他因素的影响。这一时间上“错位”现象的可能成因还需要进一步研究。综合上述研究结果, 东亚区域冬季表面气温的非均匀年代际时空演变和东亚冬季风的年代际变化之间存在密切的联系, 但冬季表面气温和海平面气压的空间遥相关特征又是怎样的呢?

4.3 东亚冬季风与冬季表面气温年代际空间遥相关特征的 SVD 分析

将东亚-西太平洋区域 1961~2000 年的冬季平均海平面气压和表面气温的年代际分量 (11 年滑动平均值) 距平分别作为左、右变量场进行 SVD 分解, 其 $\|C_{xy}\|^2$ 为 56010.44, 远大于随机试验得到的最大 $\|C_{xy}\|^2$ (12409.70), 表明两个变量场之间整体相关显著, 第一模态的 S_1 为 88.46%, 大于随机试验 S_1 的第 5 位最大值 (88.21%), 即第一模态是显著的, 其他模态则未能通过显著性检验。上述结果亦表明年代际尺度上, 冬季海陆表面气温与海平面气压的变化密切相关。

具体分析第一对异性相关系数场的空间分布 (图 5), 可以发现左异性相关系数场中冬季海平面气压与表面气温的时间系数在 50°N 以北的高纬度地区呈负相关, 50°N 以南的中低纬度地区则基本上为正相关区 (图 5a), 且大部分区域均可通过 $\alpha=0.001$ 显著性检验, 分布形式与海平面气压年代际

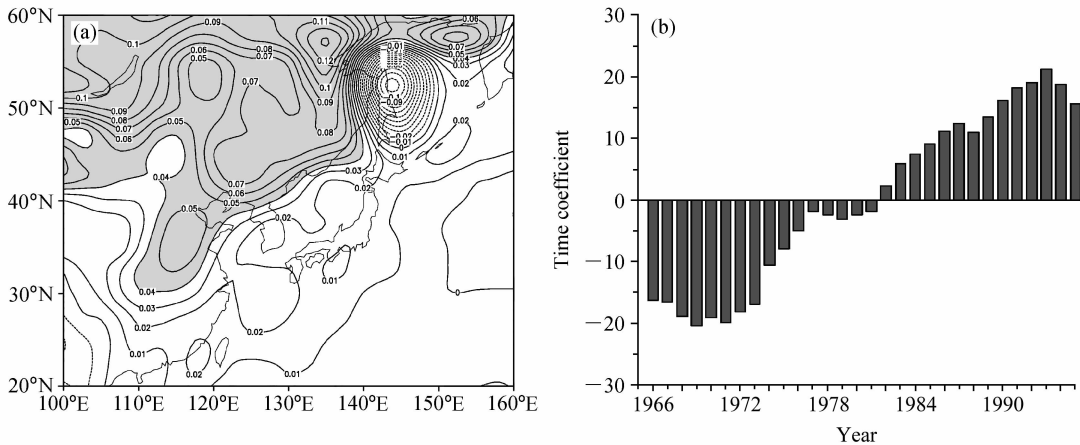


图 4 冬季表面气温年代际分量距平场 EOF 分解的第一特征向量和相应的时间系数: (a) 特征向量, 阴影区 ≥ 0.04 ; (b) 时间系数
Fig. 4 The first eigenvector of the anomaly field of the interdecadal components of surface air temperature (SAT) in winter and its corresponding time coefficients: (a) The first eigenvector, the shaded area denotes the values ≥ 0.04 ; (b) time coefficients

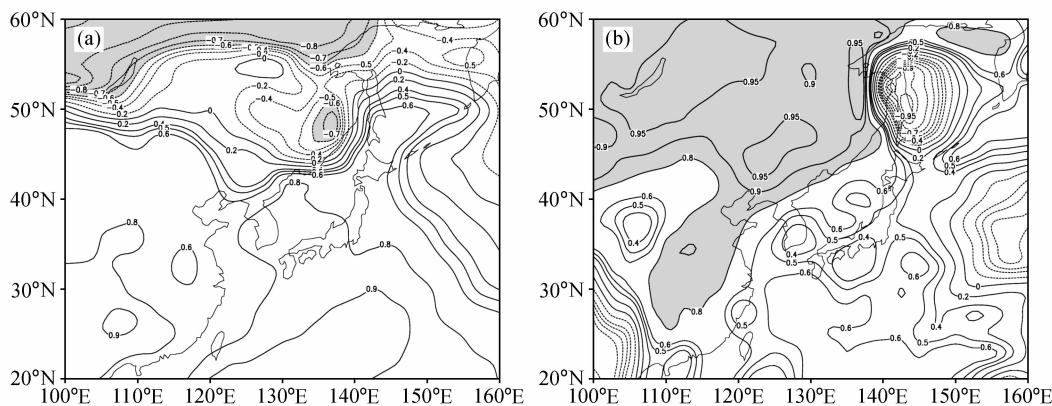


图5 冬季海平面气压和表面气温年代际分量的第一对SVD异性相关系数场: (a) 左异性相关系数, 阴影区 ≤ -0.6 ; (b) 右异性相关系数, 阴影区 ≥ 0.8

Fig. 5 The first pair of SVD heterogeneous correlation coefficients for the interdecadal components of SLP and SAT in winter: (a) The left heterogeneous correlation, the area with values less than -0.6 is shaded; (b) the right heterogeneous correlation, the area with values larger than 0.8 is shaded

分量距平 EOF 第一特征向量的空间分布较为相似(图 3a); 右异性相关系数场中的大部分区域同样可通过 $\alpha=0.001$ 的显著性检验, 其分布为冬季表面气温与海平面气压的时间系数在大陆上基本上均为正相关; 海洋上除了鄂霍次克海为负相关区外, 其余大部分地区亦为正相关; 总体来说, 最显著的正相关区位于 45°N 以北的大陆地区(图 5b), 这样的分布形式与表面气温年代际分量距平 EOF 第一特征向量的空间分布亦较为吻合(图 4a)。考虑到近 50 年来的气候变化很可能主要是由人类活动造成的^[26], 上述冬季大陆表面气温与东亚区域海平面气压之间的年代际对应关系比海洋的更加显著的分析结果, 在某种程度上表明东亚冬季风的年代际变化与全球变暖之间可能具有较为密切的联系。

我们还利用区域气候模式(RegCM3)进行了敏感性试验, 发现在 RegCM3 中减小了冬季东亚大陆东北部的长波辐射降温率以后, 敏感性试验和控制试验的地面气温差值呈大陆显著增温而海洋降温或增温不明显的分布形式; 850 hPa 差值风场中, 大陆东北部到西北太平洋一带均为偏东或东南差值气流, 与冬季盛行的西北风方向相反, 大陆南部地区则出现了偏北差值气流, 体现了东亚冬季风强度减弱而南扩程度加强的变化特征(图略), 上述数值模拟结果很好地验证了诊断分析结果。利用全球气候模式进行的温室效应对全球和区域气候影响的数值试验结果亦表明, 温室效应加强将导致东亚冬季风的减弱^[27, 28]。这些数值试验结果进一步表明,

对温室效应的区域气候响应可能与东亚冬季风的年代际变化之间存在密切的联系。

5 结论

本文提出了一种 EOF-SVD 综合分析方法, 并利用该方法和 1961~2000 年 NCEP/NCAR 月平均再分析资料, 对近 40 年来东亚冬季风和东亚区域冬季表面气温的年代际变化特征及其相关联系进行了分析。得到以下主要结论:

(1) 利用海平面气压场距平的 EOF 第一特征向量及其时间系数来研究东亚冬季风的变化趋势具有可行性, 而且可以同时获取东亚冬季风强度和南扩程度的变化特征, 相对于利用要素区域平均值定义的季风指数具有一定的优越性。

(2) 东亚区域冬季海平面气压年代际分量距平的 EOF 第一特征向量反映了东亚冬季风在源地的强度减弱、而南扩程度加强的年代际变化空间结构; 相应的时间系数在 1966~1976 年为负值, 1977~1995 年转为正值, 即东亚冬季风在 70 年代末期发生了年代际“位相突变”, 由强度偏强、南扩程度偏弱转变为强度偏弱、南扩程度偏强。

(3) 冬季表面气温年代际分量距平的 EOF 第一特征向量反映了中高纬地区海陆热力差异减弱、而低纬地区海陆热力差异增强的空间结构, 其时间系数与海平面气压年代际分量距平 EOF 第一特征向量时间系数的变化十分一致, 其在 1966~1981 年为负值, 1982~1995 年为正值, 即冬季表面气温

在 80 年代初期发生了年代际尺度的“位相突变”。海陆热力差异的年代际时空变化特征与东亚冬季风的年代际变化趋势之间具有很好的对应关系。

(4) SVD 分析结果表明, 冬季大陆表面气温与东亚区域海平面气压之间的年代际对应关系比海洋的更加显著。这在某种程度上表明东亚冬季风的年代际变化与全球变暖之间可能存在较为密切的联系。

参考文献 (References)

- [1] Lau K M, Li M. The monsoon of East Asia and its global association—A survey. *Bulletin of American Meteorological Society*, 1984, **65**: 114~125
- [2] 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): 4~16
Zhu Baozhen, Ding Yihui, Luo Huibang. A review of the atmospheric general circulation and monsoon in East Asia. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1990, **48** (1): 4~16
- [3] Yasunari T. The monsoon year—A new concept of the climatic year in the tropics. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1991, **72**: 937~957
- [4] 陈隽, 孙淑清. 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. *大气科学*, 1999, **23** (1): 101~111
Chen Jun, Sun Shuqing. Eastern Asian winter monsoon anomaly and variation of global circulation. Part I: A comparison study on strong and weak winter monsoon. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 1999, **23** (1): 101~111
- [5] 孙淑清, 孙柏民. 东亚冬季风环流异常与中国江淮流域夏季旱涝天气的关系. *气象学报*, 1995, **53** (4): 440~450
Sun Shuqing, Sun Boming. Relationship between East Asian winter monsoon circulation anomalies and summer drought-flood in Changjiang-Huaihe basin. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1995, **53** (4): 440~450
- [6] 普业, 裴顺强, 李崇银, 等. 异常东亚冬季风对赤道西太平洋纬向风异常的影响. *大气科学*, 2006, **30** (1): 69~79
Pu Ye, Pei Shunqiang, Li Chongyin, et al. Influence of anomalous East Asian winter monsoon on zonal wind anomalies over the equatorial western Pacific. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2006, **30** (1): 69~79
- [7] 杨辉, 陈隽, 孙淑清. 东亚冬季风异常激发 El Niño 现象的数值试验研究. *大气科学*, 2005, **29** (2): 321~333
Yang Hui, Chen Jun, Sun Shuqing. Numerical experiment on the El Niño event stimulated by the East Asian winter monsoon. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2005, **29** (2): 321~333
- [8] 武炳义, 黄荣辉, 高登义. 冬季北极喀拉海、巴伦支海海冰面积变化对东亚冬季风的影响. *大气科学*, 1999, **23** (3): 267~275
Wu Bingyi, Huang Ronghui, Gao Dengyi. The impact of variation of sea-ice extent in the Kara Sea and the Barents Seas in winter on winter monsoon over East Asia. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 1999, **23** (3): 267~275
- [9] 陈海山, 孙照渤, 闵锦忠. 欧亚大陆冬季积雪异常与东亚冬季风及中国冬季气温的关系. *南京气象学院学报*, 1999, **22** (4): 609~615
Chen Haishan, Sun Zhaobo, Min Jinzhong. The relationships between Eurasian winter snow cover anomaly and EAWM, China winter air temperature. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 1999, **22** (4): 609~615
- [10] Wu Bingyi, Wang Jia. Possible impacts of winter Arctic oscillation on Siberian High, the East Asian winter monsoon and sea-ice extent. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2002, **19** (2): 297~320
- [11] 雷永荟, 吴洪宝. 东亚冬季风异常的空间结构及与海陆热力差异的联系. *南京气象学院学报*, 2002, **25** (2): 145~152
Lei Yonghui, Wu Hongbao. Spatial structure of East Asian winter monsoon and its relationship with sea-land thermal contrast. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 2002, **25** (2): 145~152
- [12] 徐建军, 朱乾根, 周铁汉. 近百年东亚冬季风的突变性和周期性. *应用气象学报*, 1999, **10** (1): 1~8
Xu Jianjun, Zhu Qian'gen, Zhou Tiehan. Sudden and periodic change of East Asian winter monsoon in the past century. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 1999, **10** (1): 1~8
- [13] Wang Huijun. The weakening of the Asian monsoon circulation after the end of 1970's. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2001, **18** (3): 376~386.
- [14] 张家诚. 大气科学的季节变化和季风的科学概念. 全国热带夏季季风学术会议文集. 昆明: 云南人民出版社, 1983. 1~9
Zhang Jiacheng. Seasonal change of general circulation and scientific concept of monsoon. *Proceedings of the Symposium on the Summer Monsoon in Southeast Asia* (in Chinese). Kunming: People's Press of Yunnan Province, 1983. 1~9
- [15] 丁一汇, 张锦, 徐影, 等. 气候系统的演变及其预测. 北京: 气象出版社, 2003. 32~35
Ding Yihui, Zhang Jin, Xu Ying, et al. *Climate System Evolution and Its Prediction* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2003. 32~35
- [16] 魏凤英. 现代气候统计诊断预测技术. 北京: 气象出版社, 1999. 114~122
Wei Fengying. *Modern Climatic Statistic Diagnosis and Forecast Technology* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1999. 114~122
- [17] Wallace J M, Smith C, Christopher S B. Singular value decomposition of wintertime sea surface temperature and 500-

- mb height anomalies. *J. Climate*, 1992, **5** (6): 561~576
- [18] 郭其蕴. 东亚冬季风的变化与中国气温异常的关系. 应用气象学报, 1994, **5** (2): 218~225
Guo Qiyun. Relationship between the variations of East Asian winter monsoon and temperature anomalies in China. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 1994, **5** (2): 218~225
- [19] 施能, 杨永胜. 1873-1996 年东亚冬、夏季风强度指数及其主要特征. 南京气象学院学报, 1998, **21** (2): 208~214
Shi Neng, Yang Yongsheng. East Asian winter/summer monsoon intensity indices in 1873-1996 and its main features. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 1998, **21** (2): 208~214
- [20] 崔晓鹏, 孙照渤. 东亚冬季风强度指数及其变化的分析. 南京气象学院学报, 1999, **22** (3): 321~325
Cun Xiaopeng, Sun Zhaobo. East Asian winter summer monsoon intensity indices and analysis of its change. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 1999, **22** (3): 321~325
- [21] 布和朝鲁, 纪立人. 东亚冬季风活动异常与热带太平洋海温异常. 科学通报, 1999, **44** (3): 252~259
Bueh Cholaw, Ji Liren. Anomalous activity of East Asian winter monsoon and the tropical Pacific SSTA. *Chinese Science Bulletin*, 1999, **44** (10): 890~898
- [22] 王会军, 姜大膀. 一个新的东亚冬季风强度指数及其强弱变化之大气环流场差异. 第四纪研究, 2004, **24** (1): 19~27
Wang Huijun, Jiang Dabang. A new East Asian winter summer monsoon intensity index and atmospheric circulation comparison between strong and weak composite. *Quaternary Sciences* (in Chinese), 2004, **24** (1): 19~27
- [23] Zhai Panmao, Sun Anjian, Ren Fumin, et al. Change of climate extremes in China. *Climate Change*, 1999, **42** (1): 203~218
- [24] 龚道溢, 王绍武. 西伯利亚高压的长期变化及全球变暖对其的影响. 地理学报, 1999, **54** (2): 125~133
Gong Daoyi, Wang Shaowu. Long-term variability of the Siberian High and the possible influence of global warming. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 1999, **54** (2): 125~133
- [25] Gong D Y, Ho C H. The Siberian High and climate change over middle to high latitude Asia. *Theor. Appl. Climatol.*, 2002, **72**: 1~9
- [26] Houghton J T, Ding Yihui, Griggs D J, et al. *Climate Change 2001: The Scientific Basis, Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the International Panel on Climate Change, IPCC*. UK: Cambridge University Press, 2001. 112~124
- [27] Bueh C, Ulrich C, Lin Y, et al. The change of North China climate in transient simulations using the IPCC SRES A2 and B2 scenarios with a coupled atmosphere-ocean general circulation model. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2003, **20** (5): 755~766
- [28] Kimoto M. Simulated change of the East Asian circulation under global warming scenario. *Geophysical Research Letter*, 2005, **32** (16): L16701, 10.1029/2005GL023383