

夏季欧亚海平面气压场主要非线性模态的时空变化

杨秋明, 谢志清, 黄世成

江苏省气象科学研究所, 南京 210008

摘要 用非线性主成分分析方法研究了欧亚地区 1948–2007 年 60 年夏季海平面气压距平场主要空间模态的非线性特征。结果表明, 夏季欧亚地区海平面气压场异常变率具有显著的非线性特征, 非线性主成分分析法有能力表示出更一般的低维结构特征。当第一非线性主成分取不同异常值时, 对应的海平面气压异常空间分布型具有显著的非对称性。其解释方差为 47.5%, 比线性 PCA 第一模态高出 12.8%, 因而非线性较强。同时, 第一非线性主成分时间变化表现为不均匀的周期为 2~4 年的年际振荡, 其强度在 1967 年以后迅速增强。这个主要非线性空间模态与东亚地区大气内部非线性相互作用密切相关, 反映了夏季欧亚地区环流非线性低频波活动的时空不对称性。

关键词 海平面气压场; 非线性空间模态; 欧亚地区; 夏季; 年际变化

中图分类号 P732

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2009)02-0083-05

Temporal and Spatial Variations of the Nonlinear Principal Mode of Summer Sea Level Pressure Anomalies over Eurasia

YANG Qiuming, XIE Zhiqing, HUANG Shicheng

Jiangsu Meteorological Institute, Nanjing 210008, China

Abstract Eurasian summer sea level pressure anomalies during 1948–2007 were investigated by applying a Nonlinear Principal Component Analysis (NLPCA) method. The results show that the Eurasian summer sea level pressure anomalies show a distinct nonlinear nature, and the NLPCA can be used to describe more general characteristics of the low-dimension structure of the sea level pressure. The spatial distribution is obviously asymmetrical when the first principal nonlinear component (NLPC1) takes positive or negative values for the anomalies. This nonlinear spatial mode accounts for 47.5% of variance, which is 12.8% higher than that of the first linear principal component (PC1), as very strongly nonlinear. Moreover, the time coefficient of NLPC1 has an uneven oscillation on the time scale of 2~4 years, with the intensity of nonlinear oscillation getting stronger significantly after 1967. These changes are closely linked to the atmosphere internal nonlinear interaction in

East Asia, reflecting the spatial and temporal asymmetrical evolutions of the nonlinear low frequency wave for the summer sea level pressure.

Keywords summer sea level pressure anomalies; nonlinear spatial mode; Eurasia; summer; interannual variation

0 引言

大范围的持续干旱、洪涝、冷暖都是由于大气环流持续异常造成的。观测事实表明, 大气环流的异常有一定的区域特征及相关性, 即遥相关现象。20 世纪 80 年代, J. M. Wallace 和 D. S. Gutzler 发现并定义了冬季的北半球 500 hPa 遥相关型^[1], 这些遥相关型由外部热源强迫和大气内部动力过程产生, 其中与中国冬季气候变化具有密切直接联系的遥相关型是 EU 和 WP 型^[2-3]。此后许多工作还分析了北半球夏季大气环流的遥相关型, 表明夏季欧亚地区 500 hPa 高度场东亚太平洋型 (EAP) 遥相关对中国的夏季气候有重要的影响^[4-5]。近年来, Ding 和 Wang 通过分析 56 年的 NCEP/NCAR 再分析资料, 揭示了北半球夏季 200 hPa 环流在年际尺度上存在一绕球遥相关 (CGT)^[6]; 孙建奇等研究了夏季欧亚地区海平面气压场的阿拉伯半岛-北太平洋型遥相关 (APNPO)^[7] 的时空变化特征。这两种夏季遥相关型对东亚季风都有显著影响, 因此深入研究夏季遥相关变化特征对于提高中国的气候预报具有重要意义。然而, 过去国内外大部分关于欧亚地区夏季环流遥相关

收稿日期: 2008-10-29

基金项目: 中国气象局基础研究预研基金项目 (200726)

作者简介: 杨秋明, 高级工程师, 研究方向为中长期天气预报, 电子信箱: yqm0305@263.net

的观测研究主要基于线性主成分分析(EOF 或 PCA)、线性相关和合成分析,反映了环流空间波异常传播的线性特征,因而仍有一定的局限性。大气环流异常的非线性结构和大气对外源强迫的非线性响应是气候研究中的困难问题,需要采用非线性的分析方法,其中非线性主成分分析(NLPCA)^[8]是主要方法之一。NLPCA 应用于 ENSO, AO 和北美地区温度变化等方面已取得很多有意义的结果^[9-13],但对于欧亚地区夏季环流非线性如何演变和怎样变化等问题仍然需要进一步研究,目前这方面工作做得很少。本文用非线性主成分分析^[14],研究近 60 年(1948-2007 年)夏季欧亚地区海平面气压场距平的非线性模态空间分布,然后讨论年际变化特征,结果有利于人们深刻认识夏季欧亚地区海平面气压场异遥相关空间分布的非线性变化规律,对于提高中国夏季气候预测精度十分重要。

1 资料与方法

本文使用的资料为 NCEP/NCAR 月平均再分析资料中的海平面气压场格点资料^[15],分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$,资料时间为 1948-2007 年。夏季定义为每年 6-8 月,共 60 个夏季。

主成分分析方法(PCA)又称主分量分析,是一种数据压缩和特征提取的多变量统计分析技术,但 PCA 只能提取多变量数据集的线性关系。而在很多情况下,原始资料集中的数据之间存在一定的非线性关系,需要对数据进行非线性

变换,提取其非线性特征。本文采用一种反向非线性主成分分析模型方法(Inverse Model of Nonlinear PCA)进行研究分析^[14],其性能明显优于通常的基于 5 层前馈型神经网络的非线性主成分分析方法^[9-13],能够更好地识别低维空间中复杂的主要非线性模态。网络的非线性最优化由 MATLAB 自带函数“fminu”完成。NLPCA 模态解释的方差百分比 FEV 为

$$FEV=1-\langle \|X'-X\|^2 \rangle / \langle \|X-\bar{X}\|^2 \rangle$$

式中, X 为网络输入数据; X' 为网络的输出数据,即 X 的非线性近似。为了对资料集做降维处理,首先对欧亚地区夏季海平面气压场距平场做传统 PCA 分析。将距平资料集投影到前 k 个 PCA 模态上,可得到前 k 个主成分(PC),然后把这 k 列时间系数输入到神经网络中进行网络训练。训练结束后,便可得到夏季欧亚地区海平面气压场距平场的 NLPCA 第一模态和时间系数 α 。

2 结果与分析

在 NLPCA 分析之前,先对夏季欧亚地区海平面气压场距平场进行 PCA 分析(在分析之前,格点高度距平进行了标准化处理,消除纬际变化的差异)。第一模态解释了总方差的 34.7%,第二、三模态的解释方差分别为 13.1%和 5.7%。前 3 个模态共解释了总方差的 53.5%,它们是夏季欧亚地区海平面气压场距平场最显著的线性空间模态。其余的空间模态的解释方差均小于 5%,因而其显著性较小。图 1 给出了解释方

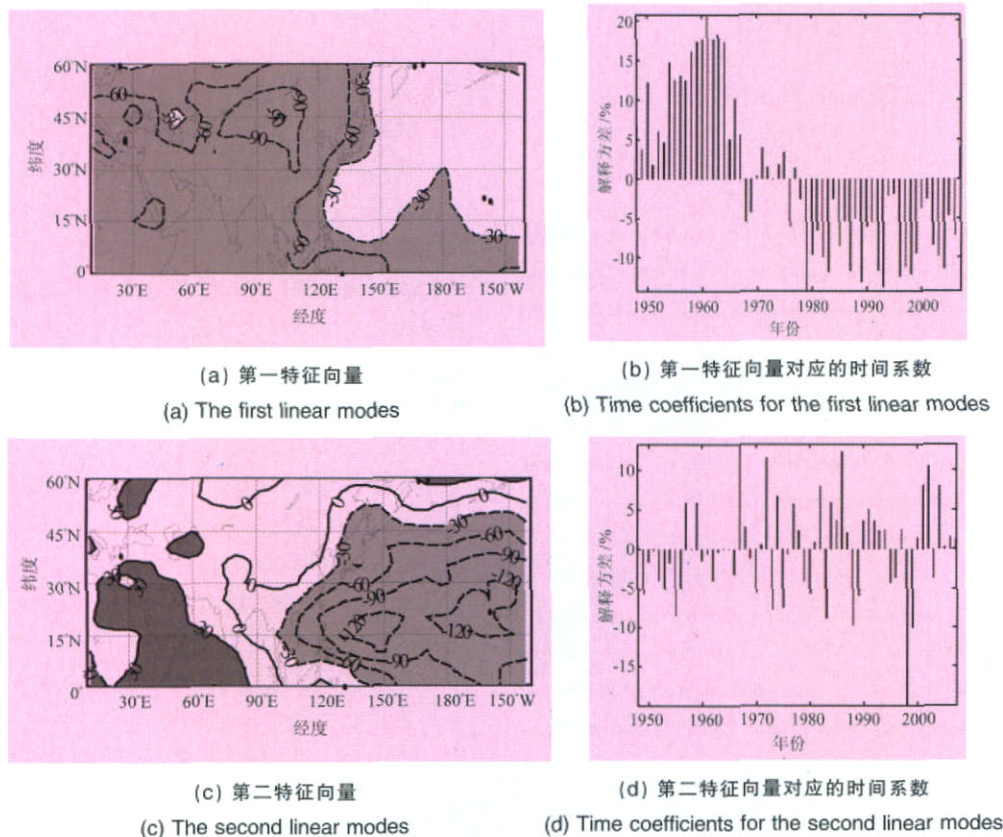


图 1 夏季欧亚地区海平面气压场距平场主要线性模态

Fig. 1 Principal spatial patterns of the main linear modes of summer sea level pressure anomalies over Eurasia

差大于 10% 的夏季欧亚地区海平面气压场距平前 2 个线性空间模态的空间型及与之对应的时序序列。对于第一线性空间模态, 表现为单一的负值空间分布, 最大负值东亚大陆中纬度地区 (图 1(a)), 副热带西太平洋和北太平洋地区负异常不明显, 其时间变化主要呈现极显著的年代际变化 (图 1(b))。1978 年以前以正值为主, 1979 年以后负值占主导地位, 它反映了欧亚地区夏季海平面气压背景状态的变化。近 30 年来, 夏季中国北方和蒙古地区海平面气压明显升高, 第二线性空间模态分布呈现出明显的偶极特征, 正值位于北太平洋地区, 负值位于亚洲大陆-北印度洋地区, 即阿拉伯半岛-北太平洋型遥相关型 (APNPO) (图 1(c)), 反映的是对流层低层北太平洋高压和南亚夏季风低压之间的一种共变特征, 具有显著的 3~5 年的年际振荡周期 (图 1(d)), 它的变化与亚洲夏季风的变化之间有着密切的联系^[7]。

由于夏季东亚地区大气环流内部的非线性作用较强, 下面使用 NLPCA 进一步揭示空间模态的非线性特征。将前 3 个主成分 (PC) 作为 NLPCA 占主导作用的对象, 构成网络输

入数据集 X , 得到冬季欧亚海平面气压距平的 NLPCA 第一模态。其解释方差为 47.5%, 比线性 PCA 第一模态高出 12.8%, 非线性比较明显。为了更直观地了解和解析非线性特征, 采用三维空间图 (图 2)。从图 2(d) 可以看出, PC1-PC2-PC3 三维空间中的 NLPCA 曲线由一系列重叠的空心圆圈构成, 图 2(a)、(b)、(c) 则为在 PC1-PC2、PC1-PC3 和 PC2-PC3 平面上的投影。与 PCA 相比较, 在 PC1-PC3 和 PC2-PC3 平面上均可看到一条明显的非对称“Z”形曲线, 在 PC1-PC2 平面上则表现为一交叉曲线, 表现出较强的非线性。图 3 是 NLPCA 第一模态对应的时间系数 (NLPC1) 的变化曲线, 它表现为不规则的年际变化特征, NLPC1 的年际振荡强度和周期存在显著的年代际变化。1966 年以前, NLPC1 年际振荡较弱, 而到 1967 年以后, 年际振荡变为较明显的 2~4 年的不规则振荡, 且振荡强度迅速增强, 表明在 20 世纪 60 年后欧亚夏季海平面气压距平主要非线性空间模态 (NLPC1) 的年际振荡强度发生了突变。这种突变可能与东亚地区大气内部非线性相互作用产生的年代际转换有关, 其物理过程有待进一步研究。

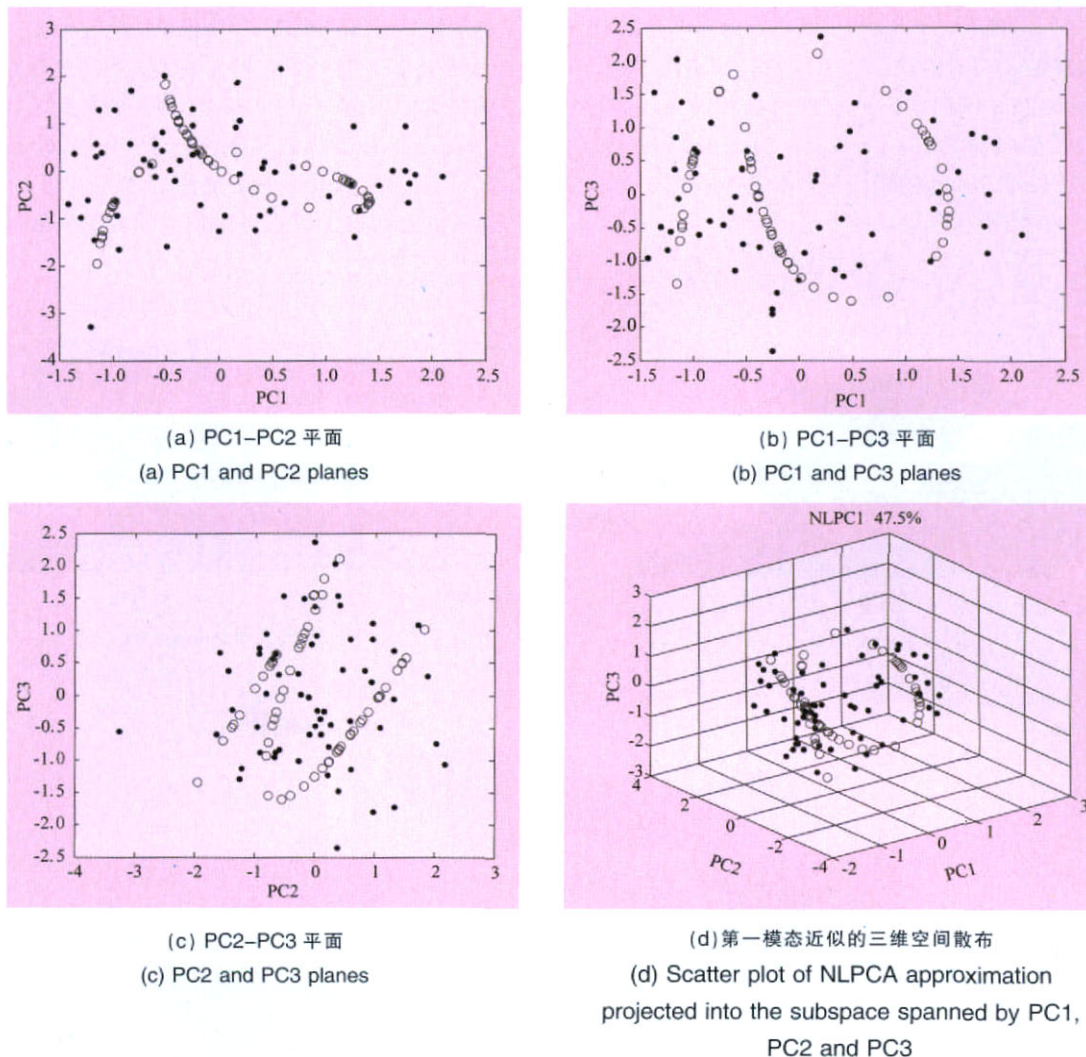


图 2 夏季欧亚地区海平面气压场距平 NLPCA 第一模态图像
Fig. 2 Scatter plot of the summer sea level pressure anomaly over Eurasia

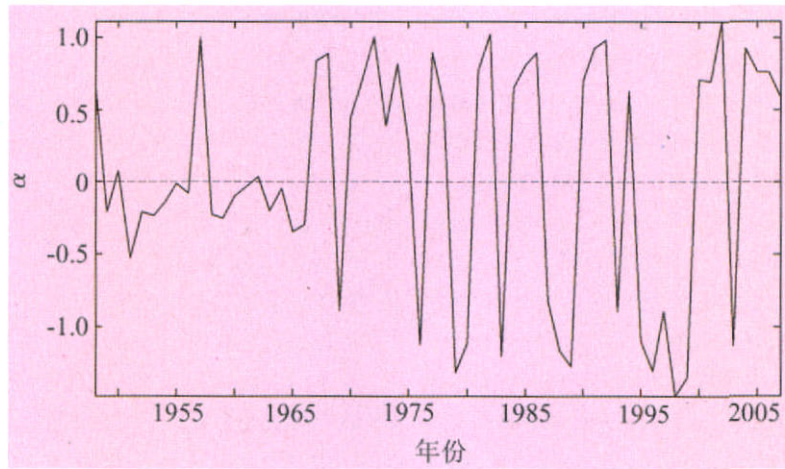


图3 夏季欧亚地区海平面气压场距平 NLPCA第一模态的时间变化

Fig. 3 Time series of the first nonlinear principal component for summer sea level pressure anomaly over Eurasia

下面分析 NLPC1 表现出的不同空间振荡型的空间结构。NLPC1 对应的时间系数 α 可被看作是 NLPCA 曲线的独立曲线调整系统, 每个 α 都对应于前 3 个 PC 模态的一个空间型, 通过对不同强度的 α 所对应的观测海平面气压场距平的合成图可以得到 NLPC1 不同状态的空间分布图。图 4 给出 NLPC1 分别为较强负异常 ($-1.2\sigma < \alpha < -0.8\sigma$, σ 为 α 的标准差), 正常 ($-0.2\sigma < \alpha < 0.2\sigma$) 和较强正异常 ($0.8\sigma < \alpha < 1.2\sigma$) 所对应的夏季欧亚地区海平面气压场距平空间分布, 图中阴影部

分是达到 95% 置信度的区域。可以看出, 图 4(a) 表现为亚洲中纬度地区和北太平洋地区气压变化相反的翘翘板结构, 当亚洲中纬度地区气压升高(降低)时, 北太平洋中纬度地区气压降低(升高), 而且西亚阿拉伯半岛到印度和东南亚一带存在较显著的正值分布, 因而与北太平洋地区气压变化反相关, 具有第二线性模态部分特征(图 1(c)), 但负异常区域相对较小, 是 NLPC1 的一种峰值位相(强负异常)。而 NLPC1 处于正常状态时, 上述亚洲中纬度地区正异常区变为负异常

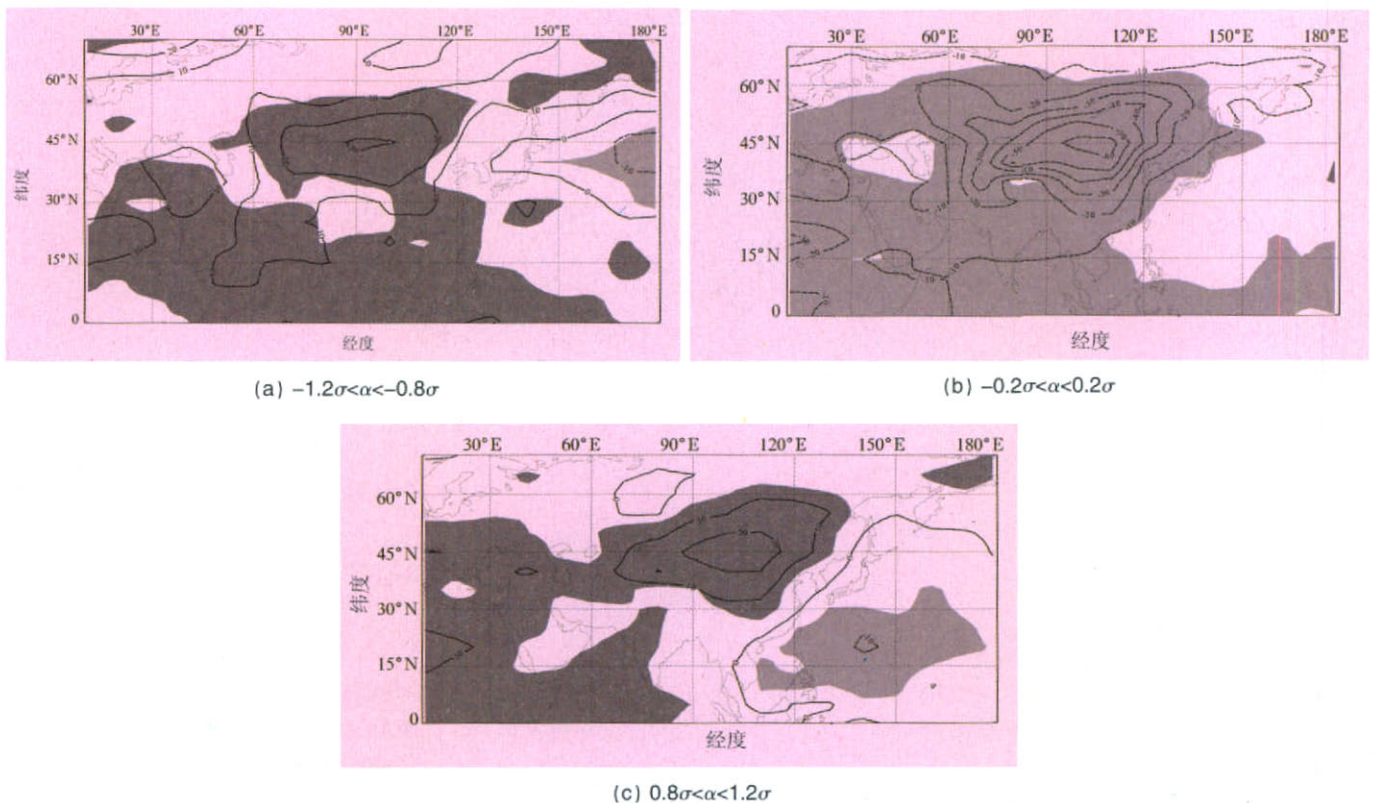


图4 非线性主成分 α 取不同异常值时对应的夏季海平面气压空间分布型

Fig. 4 Composite maps of summer sea level pressure corresponding to NLPC1 approximation

区,并且迅速增强发展到峰值状态,北太平洋中纬度负值区和南亚正值区消失(图4(b)),表现为第一线性模态的空间分布(图1(a)),是NLPC1变化的中间位相。这说明NLPC1变化时同时包含线性PC1和PC2时间变化的部分信息。因此,虽然线性PC1和PC2线性无关,但仍然存在一定程度的非线性相关。值得注意的是,当NLPC1处于较强的正异常状态时,表现为明显的东亚大陆地区气压和西北太平洋地区气压反相变化的偶极特征(图4(c)),这表明正负异常的区域和异常中心分布与NLPC1较强的正异常对应的空间分布没有明显的反对称关系,它是NLPC1的另一种峰值状态,可能和夏季东亚中低纬度地区海陆热力差异有密切联系。因此,不同强度的夏季欧亚地区海平面气压场距平第一非线性模态(NLPC1)变化时伴随着非反对称的时空演变过程,它由夏季欧亚地区大气内部非线性相互作用的强度决定。

线性主成分分析方法(PCA)只能提取海平面气压场距平异常分布的线性特征。例如,当PC1或PC2取极端相反值时,一维线性近似返回的海平面气压场距平场呈明显的反对称分布,类似于图1(a)或图2(a)。所以,通过NLPCA方法可以得到传统线性统计方法不能得到的结论,且这种非线性距平演变信息对于加深理解夏季风活动规律具有重要的作用。

3 结论

1) 传统线性主成分分析法只能提取夏季海平面气压场异常分布的线性特征。当PC1取极端相反值时,一维线性近似返回的欧亚地区夏季海平面气压场距平场呈反对称分布。

2) 欧亚地区夏季海平面气压场距平分布存在一定的非线性特征,当NLPCA第一模态的非线性主成分取不同强度的异常位相时,一维非线性近似还原的海平面气压场异常分布呈现较显著的非反对称性。夏季海平面气压距平场的第一非线性模态变化时,同时包含了线性PC1和PC2时间变化的部分信息。

3) 夏季欧亚地区海平面气压距平场的第一非线性主成分时间变化表现为不均匀的周期为2~4年的年际振荡,其强度在1967年以后迅速增强,它与东亚地区大气内部非线性相互作用密切相关。

由于大气环流主要模态时空变化的非线性演变与阶段性、持续性、频发性高影响天气事件的形成(特别是夏季持续强降水过程)密切相关,而且年际变化的非线性十分显著,不同的非线性过程对区域气候异常的作用也不同,因而进一步研究其时空变化有利于东亚夏季气候预测水平的提高。

参考文献 (References)

[1] Wallace J M, Gutzler D S. Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemispherewinter [J]. *Mon Wea Rev*, 1981, 109: 784-812.
 [2] 施能. 北半球夏季大气环流遥相关的长期变化及其与我国气候变化的关系[J]. *气象学报*, 1996, 54(6): 675-683.

Shi Neng. *Acta Meteorologica Sinica*, 1996, 54(6): 675-683.
 [3] 李勇, 陆日宇, 何金海. 太平洋西部遥相关型与赤道中东太平洋海温的关联性和独立性[J]. *自然科学进展*, 2006, 16(8): 1051-1055.
 Li Yong, Lu Riyu, He Jinhai. *Progress in Nature Science*, 2006, 16(8): 1051-1055.
 [4] Nitta T. Convective activities in the tropical western Pacific and their impacts on the Northern Hemisphere summer circulation [J]. *J Meteorol Soc Japan*, 1987, 65: 373-390.
 [5] 黄荣辉, 孙凤英. 热带西太平洋暖池的热状态及其上空的对流活动对东亚夏季气候异常影响[J]. *大气科学*, 1994, 18: 141-151.
 Huang Ronghui, Sun Fengying. *Chin J Atmos Sci*, 1994, 18: 141-151.
 [6] Ding Q H, Wang B. Circumglobal teleconnection in the Northern Hemisphere summer[J]. *J Climate*, 2005, 18: 3483-3505.
 [7] 孙建奇, 袁薇, 高玉中. 阿拉伯半岛-北太平洋型遥相关及其与亚洲夏季季风的关系[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2008, 38(6): 750-762.
 Sun Jianqi, Yuan Wei, Gao Yuzhong. *Sci China Ser D: Earth Sci*, 2008, 51(7): 1001-1012.
 [8] Kramer M A. Nonlinear principal component analysis using autoassociative neural networks[J]. *AIChE Journal*, 1991, 37: 233-243.
 [9] Monahan A H. Nonlinear principal component analysis by neural networks: Theory and application to the Lorenz system [J]. *J Climate*, 2000, 13: 821-835.
 [10] Hsieh W W. Nonlinear principal component analysis by neural networks [J]. *Tellus*, 2001, 53A: 599-615.
 [11] Hsieh W W. Nonlinear multivariate and time series analysis by neural network methods [J]. *Reviews of Geophysics*, 2004, 42, RG1003, doi: 10.1029/2002RG000112.
 [12] Teng Q, Fyfe J C, Monahan A H. Northern Hemisphere circulation regimes: Observed, simulated and predicted [J]. *Climate Dynamics*, 2007, 28: 867-879.
 [13] 韦莹莹, 吴洪宝, 沈桂凤. 北半球冬季大气环流遥相关型的非线性特征[J]. *南京气象学院学报*, 2007, 30(1): 17-25.
 Wei Yingying, Wu Hongbao, Shen Guifeng. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 2007, 30(1): 17-25.
 [14] Scholz M, Kaplan F, Guy C, et al. Non-linear PCA: A missing data approach[J]. *Bioinformatics*, 2005, 21(20): 3887-3895.
 [15] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project[J]. *Bull Am Meteor Soc*, 1996, 77: 437-471.

(责任编辑 李慧政)

《科技导报》“书评”栏目征稿

“书评”栏目由《中华读书报》“书评周刊”主编王洪波先生主持,发表图书评论文章,被评论的图书以高级科普、学术专著及科学文化图书为主,兼顾科学精神、科学方法、科技哲学、科学人文、科学家传记、经典科学著作、科学通俗读物、科学道德等内容的图书。欢迎投稿,择优刊登。每篇书评以2000字左右为宜,需配书影,并含书名、作者、出版单位、出版年份、定价等信息。栏目责任编辑:陈广仁;投稿邮箱:chenguangren@cast.org.cn。