

平流层各层温度变化的时空特征分析

陈权亮¹, 刘晓冉^{1,2}, 李国平¹

(1. 成都信息工程学院高原大气与环境四川高校重点实验室, 成都 610225;
2. 重庆市气候中心, 重庆 401147)

摘要: 利用欧洲中心的 ECMWF 月平均温度场再分析资料分析了平流层各个层次温度变化的空间分布特征, 结果表明 1958~2001 年全球平流层不同高度温度的变化有一定的差异. 在平流层上层 2 hPa, 温度呈显著的下降趋势; 平流层中层 20 hPa 温度场低纬度地区和高纬度地区相反变化, 低纬度地区呈显著的下降; 平流层下层 70 hPa 温度场除了南半球高纬度地区外也呈下降趋势. 同时, 分析了不同区域温度变化的趋势和周期特征, 平流层不同层次温度变化周期有着一定的差异, 温度下降区域和温度上升区域的突变时间也有着明显的不同.

关键词: 平流层; 温度变化; 经验正交函数(EOF); 小波分析

中图分类号: P423 **文献标识码:** A

Space-time feature analysis of temperature variations in the stratosphere

CHEN Quan-liang¹, LIU Xiao-ran^{1,2}, LI Guo-ping¹

(1. Center for Plateau Atmospheric and Environmental Research, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China;
2. Chongqing Climate Center, Chongqing 401147, China)

Abstract: The spatial distribution characteristics of temperature variations in each stratospheric layer was analyzed through using monthly average temperature data of ECMWF reanalysis. The research result shows that, from 1958 to 2001, the temperature in the higher stratosphere about 2 hPa level decreased remarkably in the whole global; and in the middle stratosphere about 20 hPa level, the temperature in low latitude areas changed opposite to that in high latitude areas and the temperature in low latitude areas decreased evidently; at the same time, the temperature in the lower stratosphere about 70 hPa level showed a decreasing trend except over the high latitude areas of South Hemisphere. Meanwhile, Morlet wavelet analysis was used to analyze the trend and the periodicity of temperature variations in different regions in the stratosphere. The analysis results show that the temperatures in different levels have different periods, and the times of abrupt temperature changes in the temperature-down region are also evidently different from the temperature-up region.

Key words: stratosphere; temperature variation; EOF (empirical orthogonal function); wavelet analysis

0 引言

近年来,随着卫星探测资料的不断获取,人们对于平流层各种微量气体的研究以及平流层和对流层的相互作用等方面都取得了很多的成果^[1~4]. 而平流层温度的变化是地球气候变化中十分重要的一部分. 有关研究表明,全球气候变暖主要是由于大气中温室气体的增加,使得近地面和对流层大气的温度升高. 但是,平流层以上的大气却是降温的. 大气温度上下层的变化,必然会引起温度层结的变化,进而影响大气中重力波、行星波、剩余环流的变化,使得对流层和平流层之间的质量、能量和动量交换发生变化. 平流层温度变化趋势已经成为政府间 IPCC (政府间气候变化委员会) 评估报告的内容. WCRP (世界气候研究计划) 的 SPARC (平流层过程及其对气候的作用) 计划中,也成立了专门的研究小组评估平流层温度的变化趋势. SPARC 评估报告中明确指出,温度、臭氧和水汽是气候变化在平流层的指示器. 平流层温度变化趋势的研究已经是当前大气科学研究的一个热点. 这项研究将为气候变化与预测提供重要的依据和参考.

国外对于平流层温度的变化进行了一定的观测和模式研究. 观测资料表明 1979~1994 年北半球中纬度地区平流层年平均温度有明显的变化,在 20~30 km 气层中变化率为 -0.75 K/10 年,30 km 越往上,温度降低越多^[5]. Brasseur 等^[6], Bruh^[7] 等分别进行了模拟,结果表明平流层顶温度在 21 世纪末最大可降温 16~22 K. 我们国家的很多研究者也对平流层温度进行了一定的研究. 陈月娟等研究表明^①,从 1980 年至 2003 年,平流层下层温度下降为 1.5 K,10 hPa 高度下降为 2 K 左右. 马瑞平等^[8] 分析了我国 20 km 以上高空大气的温度特征,郑彬^[9] 也利用 NCEP/NCAR 的资料分析表明,平流层下部的降温大约是 1.18 K/10 年. 郑彬还进一步分析了平流层降温对于纬向风的影响,指出平流层下部温度变化率的经向不均匀性将会引起该地区平均纬向风的变化. 陈月娟等^[10] 也研究了平流层温度变化与对流层温度变化的关系. 邓淑梅、陈月娟^[11] 还利用 NCEP 再分析资料分析了平流层爆发性增温的特征,表明平流层温度和环流场的变化对对流层有一定的影响. 平流层爆发性增温期间,行星波有明显

的变化,这可以通过波流相互作用影响到对流层^[12]. 这些研究成果都为我们的进一步研究提供了很好的参考. 但是这些研究的资料长度或者空间分辨率有限,对于认识全球平流层各个层次上气温的不同变化有一定的缺陷. 在目前时间序列较长的气候研究资料中,很多研究都使用了 ECMWF 资料,它具有时间序列长、垂直层次高的特点. 在平流层中,该资料使用了纯等压面坐标,资料的可信度相对时间序列长的再分析资料(如 NCEP 资料)要好^[13]. 本研究将利用欧洲中心的 44 年的平流层高分辨率全球温度场资料,分析平流层各个层次全球不同区域的温度变化,从而为研究平流层变化以及全球气候变化提供一定的参考.

1 资料和方法

本文采用 1958~2001 年共 44 年的 ECMWF 全球平流层的月平均温度场再分析资料^[14],格距为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$. 首先处理为相应的年平均温度场资料,并进行标准化处理.

经验正交函数(EOF)分解能够将变量场分解为某些相互独立的模态(特征向量场和主成分),这些模态可以代表变量场的典型的时空变化特征,因而 EOF 方法稳定性较好,具有计算收敛性快的特点^[15,16]. 根据 EOF 原理,对每个标准化资料阵 ${}_m X_n$ 均可展开成下列矩阵运算:

$${}_m X_n = {}_m V_k \sqrt{\lambda_k} \cdot \frac{1}{\sqrt{\lambda_k}} {}_k T_n = {}_m L_k \cdot {}_k F_n,$$

式中, ${}_m V_k$ 为空间特征向量, ${}_k T_n$ 为时间系数, ${}_m L_k$ 为空间载荷向量阵, ${}_k F_n$ 为主成分, λ_k 为 ${}_m X_n$ 的相关系数阵 ${}_m R_m$ 的特征值. 变换后载荷向量场中每个格点的值是该格点上的资料标准化序列与该空间型对应的主成分之间的相关系数,载荷向量场的值的平方又是该 EOF 型对格点上标准化距平序列的方差贡献率^[13]. 利用 Mann-Kendall 方法^[17,18] 对气温的时间变化进行突变检验分析. 小波分析在时域和频域上同时具有很好的局部化特征,在气候分析中得到广泛应用^[18],本文选用 Morlet 小波进一步分析平流层气温变化的多尺度时频结构.

2 平流层温度再分析资料对比

为了验证 ECMWF 再分析资料,我们将其和

① 陈月娟,毕云. 平流层温度变化与对流层温度变化的关系.

HALOE 卫星观测的资料进行了对比。HALOE 卫星资料采用了郑彬^[19]的处理方法,把非定点的资料插值到 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 的网格点上,水平范围最大为 $70^{\circ}\text{S} \sim 70^{\circ}\text{N}$ 。图 1 为 1991 年 10 月~2002 年 8 月 ECMWF 资料和 HALOE 卫星垂直剖面的对比。从图上可以看出,两种资料中平流层温度的分布和数值大小都吻合得比较好,尤其在中低纬度地区,两种资料几乎完全一致。在高纬度地区,二者有一定的差异,但是 HALOE 卫星在高纬度地区是缺测的,因此无法准确比较二者高纬度地区的差异,二者在南北半球 50° 以上地区出现的差异可能是由于 HALOE 卫星的缺测而导致的。

3 平流层温度变化时空特征分析

通过对 ECMWF 全球平流层各层(1 hPa, 2 hPa, 3 hPa, 5 hPa, 7 hPa, 10 hPa, 20 hPa, 30 hPa, 50 hPa, 70 hPa, 100 hPa)温度场进行 EOF 分析,发现第一特征向量由高层往下层存在明显上、中、下三层不同的空间型,因此我们主要以平流层上层 2 hPa,平流层中层 20 hPa 和平流层下层 70 hPa 作为各自的代表层,分析平流层各层的时空变化特征。

3.1 平流层上层温度变化的时空特征

平流层上层 2 hPa 温度场 EOF 第一模态的方差贡献达到 59%,说明该模态可以很好地反映平流层上层温度场变化的特征。第一载荷向量场(图 2(a))全球为一致的正值区,其中南北纬 40° 之间为大于 0.8 的高值区,表明该 EOF 型表示这些地区温度局地的方差的 64% 以上。该空间型主要体现了平流层上层温度变化的整体一致性特点。相应的第一主成分能够很好地反映全球 2 hPa 温度场的时间变化特征,由图 2(b)可以看到,这 44 年全球平流层上层 2 hPa 呈显著的下降趋势,上世纪 60 年代温度偏

高,80 年代中期以后温度异常偏低。Mann-Kendall 检验(图 2(c))结果表明,平流层上层气温存在两个阶段的下降,60 年代开始的降温趋势在 60 年代后期降温趋势超过 0.05 的显著性水平,虽然 70 年代气温有所回升,但是在 80 年代中期后又开始下降,80 年代中期以后这一下降趋势达到甚至超过了 0.001 的显著性水平,下降趋势异常显著。而第一主成分的小波分析(图 2(d))结果表明,全球平流层上层 2 hPa 温度变化在这 44 年整个时段存在着显著的准 20 年的周期诊断,另外还存在准 11 年的短周期。

3.2 平流层中层温度变化的时空特征

图 3 为平流层中层 20 hPa 温度场 EOF 分解的第一载荷向量场和第一主成分。平流层中层 20 hPa 温度场 EOF 分解后第一模态的方差贡献为 32%。由图 3 可以看出,第一载荷向量场在低纬度地区为正值,高纬度地区为负值,尤其是南半球极地地区中心地带载荷向量值在 -0.8 以上,这反映了平流层中层 20 hPa 温度场低纬度地区和高纬度地区相反变化的特点。第一主分量在 20 世纪 60 年代为正值,60 年代后期以后呈明显下降趋势,70 年代后期到 90 年代为负位相。结合空间载荷向量和主分量表明,平流层中层 20 hPa 的低纬度地区从 60 年代末开始经历一次明显的降温过程,而高纬度地区尤其是南半球高纬度地区则经历了一次明显的升温过程。

根据第一载荷向量空间型的特点,将 $20^{\circ}\text{S} \sim 47.5^{\circ}\text{N}$ 之间纬度带地区定义为中低纬降温区,将其他南北半球高纬度地区定义为高纬升温区。图 4 为平流层中层 20 hPa 高纬度升温区和中低纬降温区的年平均气温的标准化曲线以及对应的 Mann-Kendall 统计量曲线和小波变换。图 4 中高纬升温区的年平均气温标准化曲线表明,平流层中层 20 hPa 高纬度地区温度从 60 年代后期开始呈上升趋势。

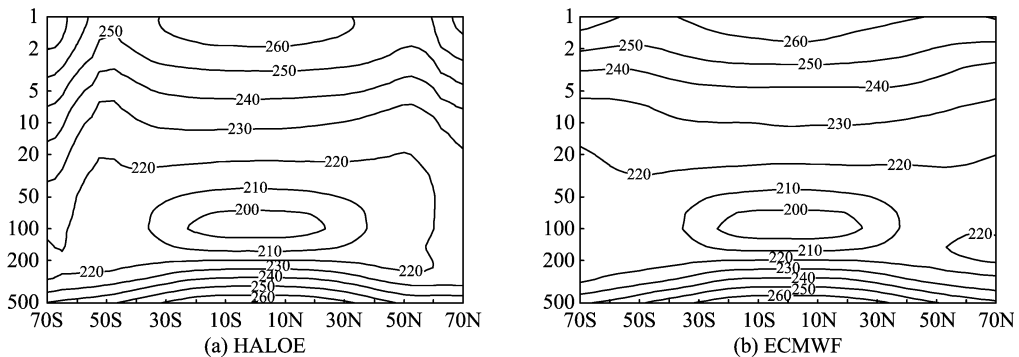


图 1 ECMWF 资料和 HALOE 资料的对比

Fig. 1 Contrast between HALOE and ECMWF data

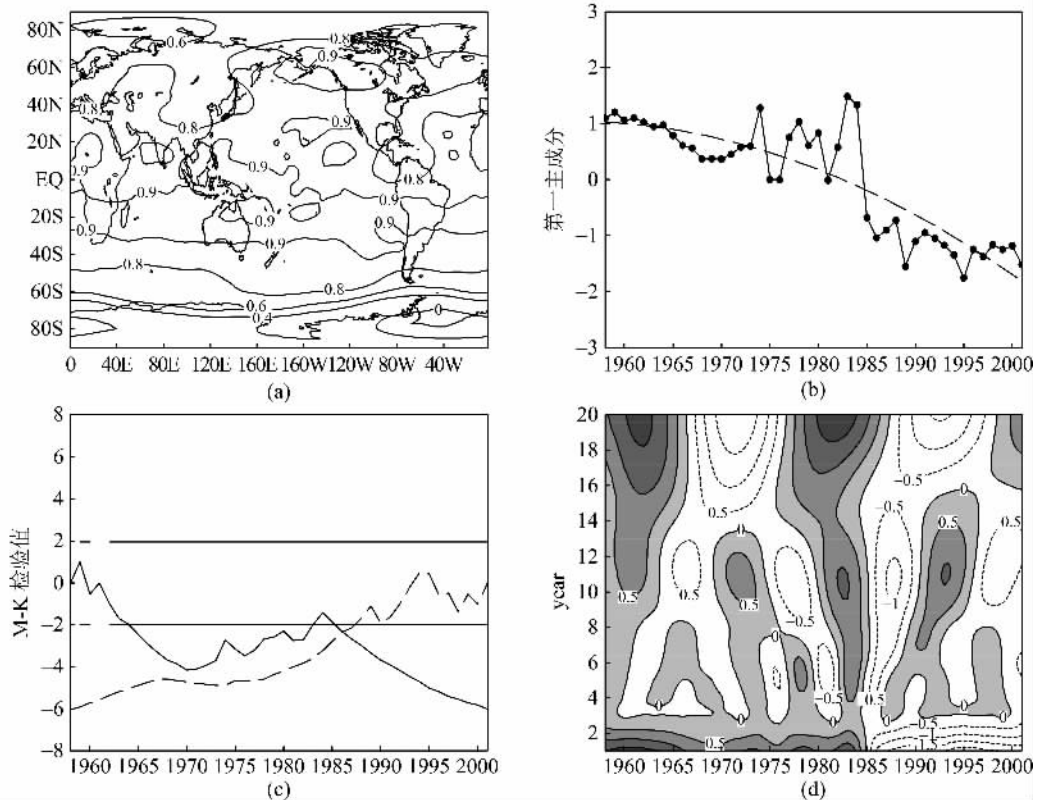


图 2 平流层上层 2 hPa 温度场 EOF 分解的第一载荷向量场(a)和第一主成分(b), 以及第一主成分的 Mann-Kendall 统计量曲线(c)和小波变换(d)

Fig. 2 The first loading eigenvector field of EOF analysis of temperature at 2 hPa in the high stratosphere (a), the first primary component (b), the Mann-Kendall statistic curve of the first loading eigenvector (c) and its wavelet transform (d)

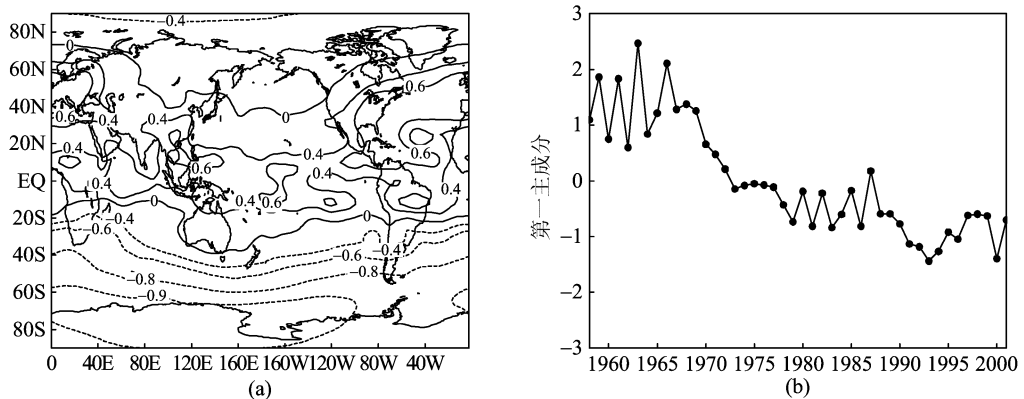


图 3 平流层中层 20 hPa 温度场 EOF 分解的第一载荷向量场(a)和第一主成分(b)
Fig. 3 The first loading eigenvector field of EOF analysis of temperature at 20 hPa in the mid stratosphere (a) and the first primary component (b)

Mann-Kendall 检验结果表明, 60 年代后期开始的增温, 在 70 年代中期以后这种升温趋势均大大超过 0.05 的显著性水平甚至超过 0.001 的显著性水平, 表明高纬度地区气温的上升趋势是十分显著的. 小波分析表明, 高纬度地区气温变化在整个时段主要

存在准 20 年的周期, 另外在 70 年代升温后的时期还存在较显著的 10 年左右的周期.

而平流层中层 20 hPa 中低纬地区在这 44 年温度整体呈下降趋势, Mann-Kendall 检验结果表明, 这 44 年该地区温度主要存在两次明显降温, 一次是

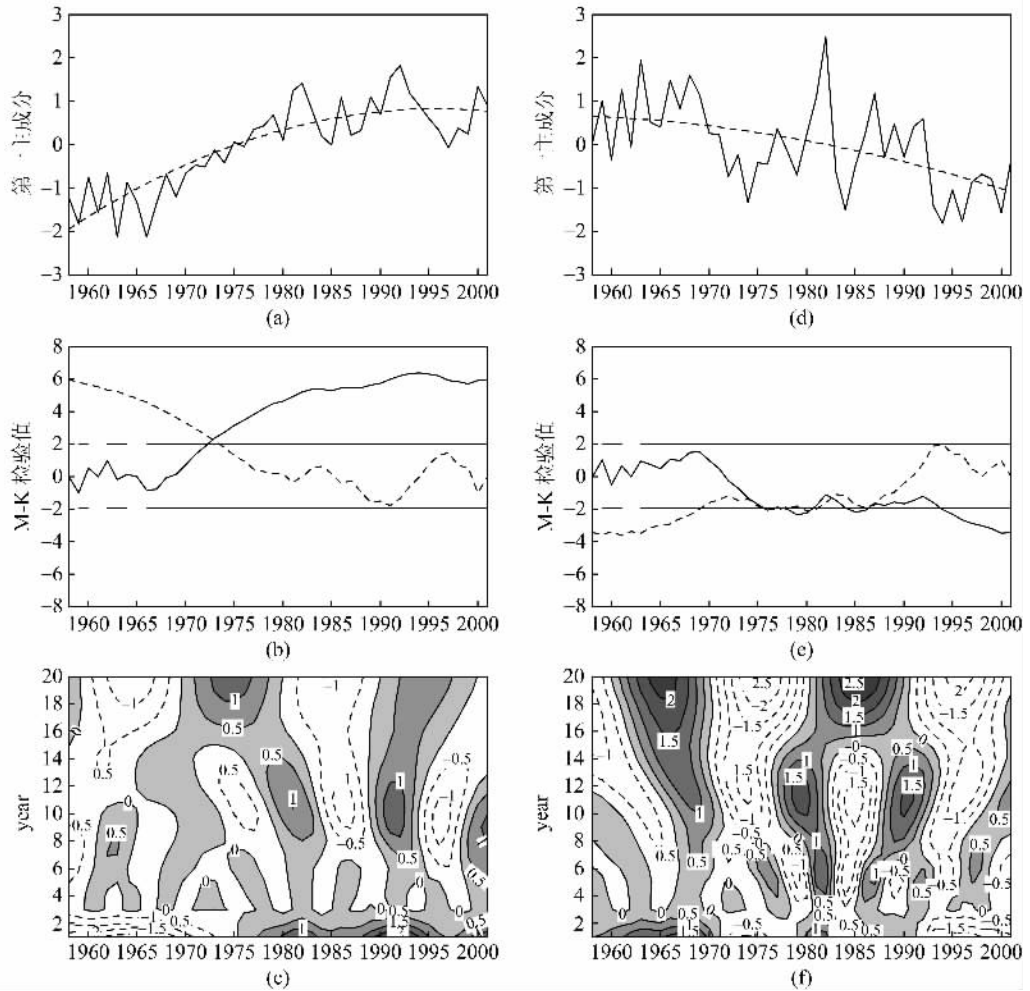


图 4 平流层中层 20 hPa 高纬度升温区(a,b,c)和中低纬度降温区(d,e,f)的年平均气温的标准化曲线(a,d)以及对应的 Mann-Kendall 统计量曲线(b,e)和小波变换(c,f)

Fig. 4 The standard curve at 20 hPa in the mid stratosphere in high latitudes(a), in the low-mid latitudes (d), their Mann-Kendall statistic curves (b, e) and the wavelet transform (c, f)

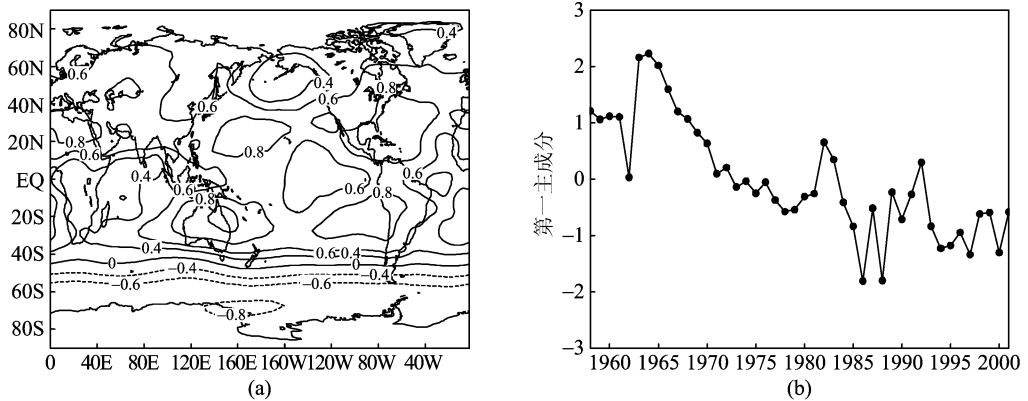


图 5 平流层下层 70 hPa 温度场 EOF 分解的第一载荷向量场(a)和第一主成分(b)

Fig. 5 The first loading eigenvector field of EOF analysis of temperature at 70 hPa in the low stratosphere (a) and the first primary component (b)

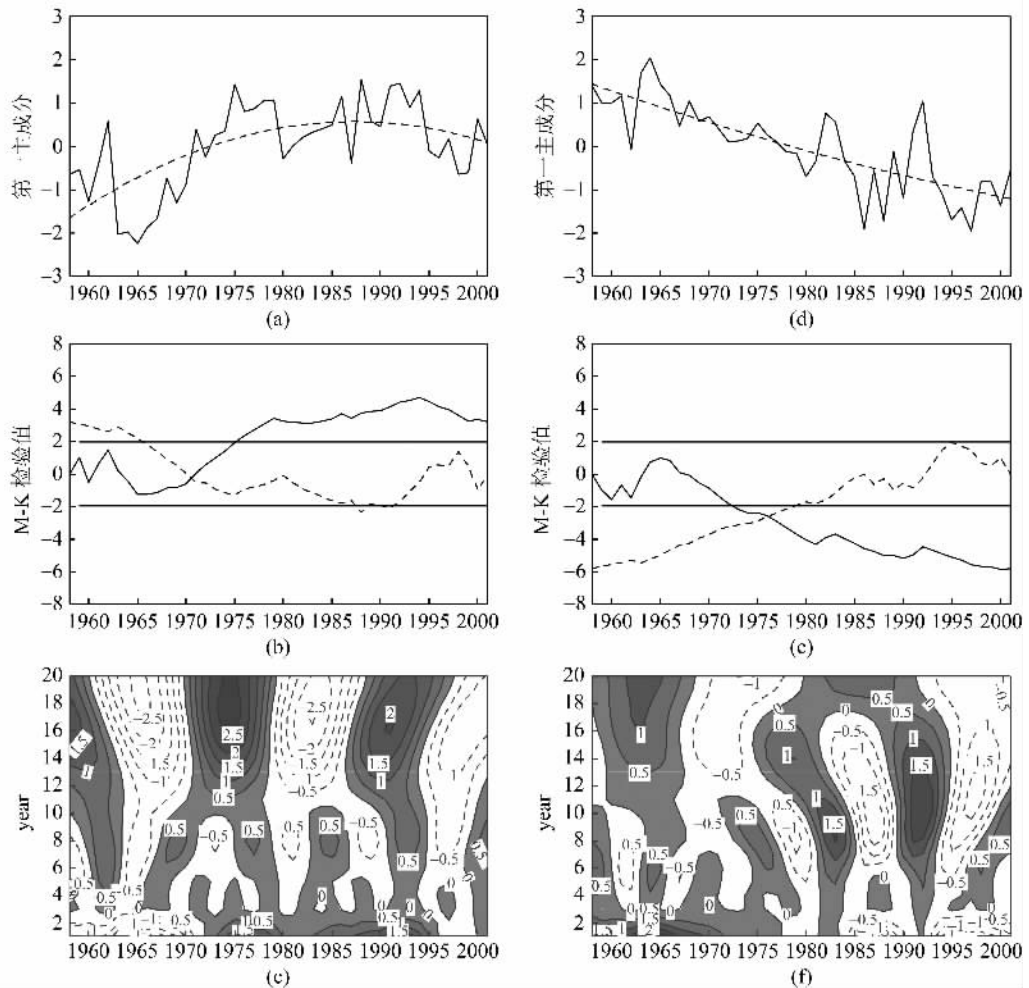


图 6 平流层下层 70 hPa 升温区(a, b, c)和降温区(d, e, f)的年平均气温的标准化曲线(a, d)以及对应的 Mann-Kendall 统计量曲线(b, e)和小波变换(c, f)

Fig. 6 The standard curve at 70 hPa in the low stratosphere in high latitudes (a), in low-mid latitudes (d), their Mann-Kendall statistic curves (b, e) and the wavelet transform (c, f)

20 世纪 60 年代末开始的下降趋势,另一次是 80 年代后期开始的降温趋势,最近这一次降温趋势在 90 年代中期以后就超过了 0.05 的显著性水平,这次降温突变是从 1987 年开始的.小波分析表明,该地区温度变化在整个时段存在非常显著的准 20 年的周期,另外在 60 年代中期以后还存在显著的准 11 年的周期.

3.3 平流层下层温度变化的时空特征

平流层下层 70 hPa 温度场 EOF 分解的第一模态的方差贡献达 39%,图 5 为其 EOF 分解的第一载荷向量和第一主成分.第一载荷向量场除了南半球高纬度地区达 -0.6 负值区外,其他地区为一致的正值区,南北纬 20° 的中心地带载荷向量值达到 0.8.第一主分量 20 世纪 60 年代为正位相,60 年代中期开始呈明显下降趋势,70 年代以后为负位相.结合第一空间载荷向量和主分量表明,平流层下层

70 hPa 在南半球高纬度地区经历了一次明显的升温过程,其他地区相反,60 年代气温偏高,60 年代中期到 70 年代后期经历一次明显的降温过程,气温呈下降趋势.

根据第一载荷向量空间型的特点,将 $90^\circ\text{S} \sim 47.5^\circ\text{S}$ 之间地区归为南半球中高纬升温区,将其他地区归为降温区.图 6 为平流层下层 70 hPa 升温区和降温区的年平均气温的标准化曲线以及对应的 Mann-Kendall 统计量曲线和小波变换.南半球中高纬升温区的年平均气温标准化曲线表明,该地区平流层下层 70 hPa 温度在 20 世纪 60 年代前期下降后从 60 年代中期开始呈上升趋势,值得注意的是,90 年代又略有下降趋势. Mann-Kendall 检验结果表明,从 60 年代中期开始的上升趋势在 70 年代以后超过了 0.05 的显著性水平,这一突变是从 1972

年开始的.小波分析图表明,该地区温度变化在整个时段存在着显著的准 18 年的周期,另外还存在着一个准 8 年的短周期.降温区的年平均气温标准化曲线表明,该地区气温从 60 年代中期开始呈异常显著的单调下降趋势,Mann-Kendall 检验结果表明,这个下降趋势从 70 年代前期开始达到了 0.05 甚至超过了 0.001 的显著性水平.小波分析表明,该地区气温主要在 80 年代以后存在着 11 年的周期.

4 结论

本文利用欧洲中心的 ECMWF 月平均温度场再分析资料分析了平流层各个层次温度变化的空间分布特征,得到以下结论:

(I) 1958~2001 年平流层各个层次温度变化的空间分布特征有一定的差异,平流层上层 2 hPa 全球呈显著的下降趋势;平流层中层 20 hPa 温度场低纬度地区和高纬度地区相反变化,低纬度地区呈显著的下降;平流层下层 70 hPa 温度场除了南半球高纬度地区外也呈下降趋势.

(II) 44 年以来全球平流层上层 2 hPa 呈显著的下降趋势,上世纪 60 年代温度偏高,80 年代中期以后温度异常偏低.平流层中层 20 hPa 高纬度地区温度从 60 年代后期开始呈上升趋势,而 20 hPa 中低纬地区在这 44 年温度经历了两次明显的下降,一次是 60 年代末开始的下降趋势,另一次是 80 年代后期开始的降温趋势.平流层下层 70 hPa 在南半球高纬度地区 60 年代中期到 70 年代后期经历一次明显的降温过程,其他地区则相反.

(III) 小波分析结果表明,全球平流层上层 2 hPa 温度变化在这 44 年整个时段存在着显著的准 20 年和准 11 年的周期诊断;20 hPa 高纬度地区气温变化在整个时段主要存在准 20 年的周期,在 20 世纪 70 年代升温后的时期还存在较显著的 10 年左右的周期,20 hPa 中低纬地区在整个时段存在非常显著的准 20 年的周期,另外在 60 年代中期以后还存在着显著的准 11 年的周期;70 hPa 南半球中高纬升温区存在着显著的准 18 年和准 8 年的周期,降温区 80 年代以后存在着 11 年的周期.

参考文献(References)

[1] 简俊,陈月娟,郑彬.北半球中层大气中 NO_x 的垂直分布特征[J].大气科学,2001,25(5):697-706.
[2] Chen Yue-juan, Zheng Bin, Zhang Hong. The features

of ozone quasi-biennial oscillation in tropical stratosphere and its numerical simulation[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2002, 19(5):777-793.

- [3] 陈月娟,施春华,周任君.我国上空平流层中微量气体的垂直分布和变化趋势[J].地球物理学报,2006,49(5):1288-1297.
[4] 陈洪滨,卞建春,吕达仁.上对流层-下平流层交换过程研究的进展与展望[J].大气科学,2006,30(5):813-820.
[5] Ramaswamy V, Chianin M, Angell J, et al. Stratospheric temperature trends: Observations and model simulations[J]. Reviews of Geophysics, 2001, 39(1):71-122.
[6] Brasseur G, Hitchman M H, Simon P C, et al. Ozone reductions in the 1980's: A model simulation of anthropogenic and solar perturbations[J]. Geophys Res Lett, 1988, 15:1361-1364.
[7] Bruhl C, Crutzen P J. Scenarios of possible changes in atmospheric temperatures and ozone concentrations due to man's activities, estimated with a one-dimensional coupled photochemical climate model[J]. Climate Dynamics, 1988, 2:173-203.
[8] 马瑞平,徐寄遥,廖怀哲.我国地区 20-80 km 高空大气温度特征[J].空间科学学报,2001,21(4):249-252.
[9] 郑彬,施春华.全球平流层下部降温及其对纬向风的影响[J].气象科技,2006,34(5):538-541.
[10] 陈月娟,毕云,凌健.平流层的温度变化趋势及其与对流层温度变化的关系[G]//推进气象科技创新加快气象事业发展(上册).中国气象学会,2004:31-38.
[11] 邓淑梅,陈月娟.平流层爆发性增温的时空分布特征[J].中国科学技术大学学报,2006,36(4):445-452.
[12] 邓淑梅,陈月娟,陈权亮.平流层爆发性增温期间行星波的活动[J].大气科学,2006,31(1):1236-1248.
[13] Trenberth K E, Stepaniak D P. A pathological Problem with NCEP reanalysis in the stratosphere[J]. J Climate, 2002, 16(6):690-695.
[14] Uppala S, Kallberg P, Angeles H, et al. ERA-40: ECMWF 45-year reanalysis of the global atmosphere and surface conditions 1957-2002 [J]. ECMWF Newsletter Meteorology, 2004, 101: 1-21.
[15] 丁裕国,梁建茵,刘吉峰.EOF/PCA 诊断气象变量场问题的新探讨[J].大气科学,2005,29(2):307-313.
[16] 吴洪宝,吴蕾.气候变率诊断和预测方法[M].北京:气象出版社,2005:15-33.
[17] 符淙斌,王强.气候突变的定义和检测方法[J].大气科学,1992,16(4):482-493.
[18] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M].北京:气象出版社,1999:69-72;106-113.
[19] 郑彬.中层大气微量气体的分布特征[D].合肥:中国科学技术大学地球与空间科学学院,2003:29-30.