

文章编号: 1004-4965(2010)03-0364-07

北半球夏季对流层顶气压与气温的 年(代)际变率与趋势分析

朱保林^{1,2}, 管兆勇², 程智³

(1. 云南省气象局, 云南 昆明 650034; 2. 南京信息工程大学/江苏省气象灾害重点实验室,
江苏 南京 210044; 3. 安徽省气象局, 安徽 合肥 230031)

摘 要: 利用 NCEP/NCAR 再分析月平均资料, 研究了 1979—2002 年夏季全球对流层顶气压和气温的分布特征与变化趋势。选取了夏季北半球对流层顶年(代)际变率最大区域来定义气压指数和气温指数。分析结果表明: (1) 全球对流层顶气压和气温在北半球随纬度的增加而增大, 在南半球随纬度先增大再减小, 而在整个热带地区对流层顶气压和气温的分布则较为均匀。(2) 全球平均的对流层顶气压和气温在分析时段内呈减小趋势, 但在中高纬度地区对流层顶气压和气温存在大范围增大现象, 表明二者的趋势并不是全球一致的。(3) 对流层顶年(代)际变率最大值出现在北半球的中纬度地区和南半球的副热带及高纬度地区, 最小值则出现在热带地区。气压指数和气温指数显示出准 10 年和准 3~5 年周期。

关键词: 气候学; 年(代)际变率; 小波分析; 趋势; 对流层顶

中图分类号: P423.6

文献标识码: A

Doi: 10.3969/j.issn.1004-4965.2010.03.014

1 引 言

对流层顶是在 1900 年前后被发现的。Le'on Teisserenc de Bort(法国)和 Richard Assman(德国)使用探空气球, 经过仔细观测, 分别发现在中纬度地区 10~15 km 上空存在一个惊人的温度逆转层。1957 年 WMO(世界气象组织)^[1]给对流层顶作了定义: 500 hPa 等压面之上的温度递减率 ≤ 2 °C/km 的最低高度, 且在此高度与其上 2 km 气层内的温度平均递减率也 < 2 °C/km, 这就是所谓的对流层顶的“热力学”定义。这种基于递减率的热力学定义最适合于热带地区。在中高纬度地区, 通常使用基于位涡的“动力学”定义, 动力学对流层顶理解为位涡的零阶不连续, 它将对流层内位涡的低值与平流层内的高值分开^[2-3]。本文中使用的 NCEP/NCAR 对流层顶资料是按照温度的垂直递减率定义的。

国外关于对流层顶的研究成果很多。1998 年 Steinbrecht 等^[4]指出, 在中纬度地区, 臭氧总量及对流层气温与对流层顶高度密切相关, 臭氧总量与对

流层顶高度呈反相关关系, 而对流层气温则与对流层顶高度呈正相关关系。热带对流层顶的年际变化主要与平流层准 2 年振荡^[5-7]、ENSO^[7-9]及火山活动^[7]相联系。Hoinka^[10]用 1979—1993 年的 ECMWF 资料系统地分析了在冬夏季热带、中纬度地区和极区对流层顶气压的分布特征, 分析了几种对流层顶定义下对流层顶气压的经向结构, 还分析对流层顶气压 1979—1993 年的趋势, 结果表明, 在北半球中高纬度地区和南半球高纬度地区对流层顶气压具有减小趋势。Santer 等^[11]指出, 1979—1999 年对流层顶高度上升了几百米, 这种变化可以认为是由于人类活动和自然力二者共同作用引起的, 其中人类活动的影响更为显著。人类活动造成平流层的降温和对流层的升温, 从而使得对流层顶高度上升。2001 年 Seidel 等^[12]利用 83 个站的探空资料研究了热带对流层顶的时空特征指出, 在北半球冬季, 北半球对流层顶比南半球对流层顶更高、更冷、气压更低, 而在北半球夏季, 南半球对流层顶比北半球对流层顶更高、气压更低, 只是北半球对流层顶仍较南半球

收稿日期: 2008-11-12; 修订日期: 2010-03-11

基金项目: 国家重点基础发展计划(2010CB428602); 国家自然科学基金项目(40675025)资助

通讯作者: 朱保林, 男, 云南省人, 硕士, 工程师, 主要从事气候动力学的研究。E-mail: zhubaolin2004@163.com

冷。在热带地区, 1978—1997 年对流层顶的高度、气压和气温的趋势分别为 20 m/(10 a)、-0.5 hPa/(10 a)和-0.5 k/(10 a)。2003 年 Sausen 等^[13]指出, 自 1979 年以来, 全球平均的对流层顶高度呈上升趋势, 并认为对流层顶高度的变化与地表温度、垂直温度廓线和海洋热含量的变化相一致。1998 年 Highwood 等利用 ECMWF 资料研究了热带对流层顶指出, 6—8 月热带平均对流层顶气压比 12—2 月大些, 热带对流层顶气压和气温的最低值在 6—8 月都位于亚洲季风区(见文献[14]中图 5、6)。另外, 他们还指出, 6—8 月主要的对流活动发生在亚洲季风区。

以往对对流层顶的研究主要集中在热带地区^[5-10, 12, 14], 对中高纬和极地对流层顶也有一些研究^[4, 10], 但由于资料的限制, 还不足以全面了解对流层顶的变动规律及其与对流层、平流层内各种变化过程的联系。随着资料的不断积累, 全面研究全球对流层顶变率及其物理机制已成为可能。本文将研究夏季(6—8 月)全球对流层顶气压和气温的分布特征及变率, 结果将有利于人们深刻认识对流层顶的变化规律。

2 资料及方法

2.1 资料

使用 NCEP/NCAR 再分析月平均资料, 其水平分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 。变量包括全球范围的对流层顶气压和气温的月平均资料。资料时段取为 1979 年 1 月—2003 年 4 月, 因为在卫星应用以前(1978 年以前)和应用卫星期间(1979 年至今), 对流层顶统计上有一个显著的不连续^[15]。

2.2 方法

1979 年以来, 许多大气变量显示出全球气候变化的某种长期趋势, 这种趋势可能与全球增暖有关, 也可能是气候系统长期周期变化的一部分。这里用线性变化(一元线性回归)拟合并滤除全球变化中的这种长期趋势, 以分析对流层顶的年(代)际变率。时间序列的周期特征则使用 Morlet 小波分析^[16]获得, 其中本文所用的小波母函数为,

$$\Psi(t) = e^{-i2\pi t} \exp\left[-\left(\frac{2\pi}{k_\Psi}\right)^2 \frac{|t|^2}{2}\right],$$

其中 t 以年为单位, 用来限定母小波的宽度, k_Ψ 在小波变换的计算过程中恒为常数, Morlet 小波要求 $k_\Psi \geq 6$, 因为当 $|k_\Psi|$ 变大, 也就是母小波宽度变宽, 小波的分辨率降低, 因此 $|k_\Psi|$ 取得越小越好, 这里

取 $|k_\Psi| = 10$ 。

3 夏季全球对流层顶多年平均特征和长期变化趋势

夏季全球对流层顶的多年(1979—2002 年)平均特征见图 1。由图可知, 对流层顶气压和气温在北半球随纬度的增加而增大, 而在南半球则是随纬度先增大再减小; 热带地区对流层顶气压和气温的分布都较为均一。由此可知, 夏季期间南极对流层顶较北极更高、更冷、气压更低。1985 年, Reid 等^[7]指出, 热带对流层顶在很大范围内是均一的, 图 1 基本反映了热带对流层顶的这一气候特征。具体而言, 在北半球, 气压从赤道向北极递增, 在纬向上具有波动结构。在中纬度地区气压的经向梯度较大, 在亚洲上空存在一个对流层顶气压的低值区, 中心气压为 100 hPa。在南半球, 等压线在副热带呈纬向分布, 经向气压梯度很大。

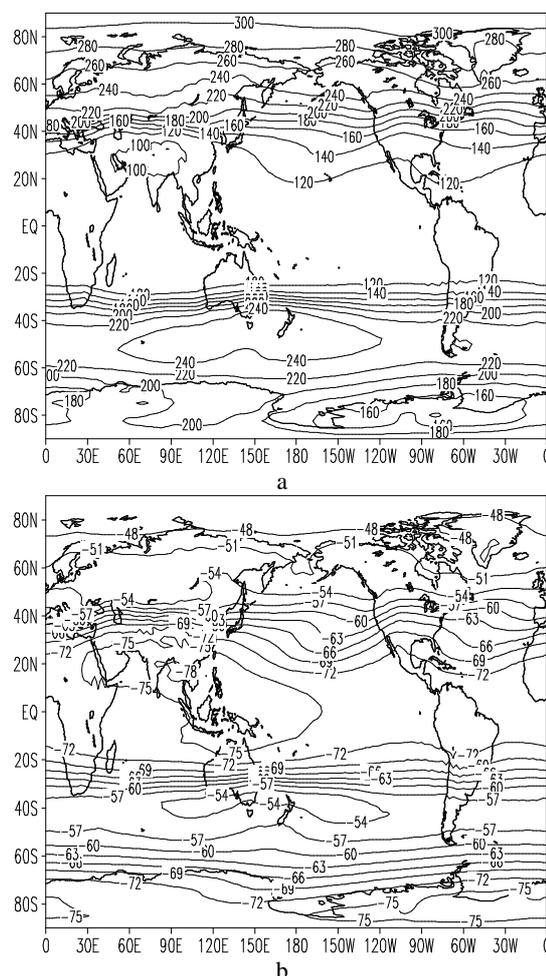


图 1 多年平均的夏季对流层顶气压(a, 单位: hPa)和对流层顶气温(b, 单位: $^\circ\text{C}$)的分布

值得注意的是,在 $40 \sim 60^\circ \text{S}$ 纬带内存在一个广阔的高压区,中心气压约为 240 hPa ;在西半球的南极大陆上空存在一个对流层顶气压低值区,中心气压约为 140 hPa (图 1a),这种变化可能与南极涛动(AAO)有关。Hoinka^[10]指出在北半球夏季,南半球高纬度上空为高压区,这与本文的结论不同,这一差异可能是由于资料的不同造成的。

对流层顶气温的分布型(图 1b)和气压的分布型很相似。在北半球,对流层顶气温从赤道向北极递增,在中纬度气温的经向梯度较大,在格陵兰岛东部及南部上空各存在一个低温中心。在热带上空存在一个范围非常大的低温区,从非洲东北部经亚洲南部,一直延伸至西太平洋上空,中心位于印度-孟加拉湾-缅甸上空,中心值为 -78°C 。Highwood 等^[14]利用 ECMWF 资料研究了热带对流层顶,指出对流层顶气压和气温的最低值在 6—8 月都位于亚洲季风区,与本文的结果一致,表明夏季亚洲季风区对流层顶低温与强大的对流活动有关。在南半球,等温线总体呈带状分布,经向温度梯度很大;在中纬度地区上空存在一个范围较大的高温区,中心气温为 -54°C ,这与此处极高的对流层顶气压相对应。此外,南极大陆上空存在大范围的闭合低温区。南半球的这种对流层顶气温分布特点与 Maxobep3M^[17]的研究结果一致。

南北半球对流层顶气压和气温分布的不同特点可能是由下垫面的差异造成的^[17]。在北半球,大陆和海洋交替分布以及巨大地形(青藏高原)的存在对对流层顶的热状况有很大影响。而南半球下垫面比较均匀(海洋占整个半球面积的 81%),对对流层顶热状况的影响也较均匀。

近几十年的全球气候具有增暖趋势,这种趋势在对流层顶高度变化上亦有体现。1979—2002 年夏季对流层顶气压和气温的趋势分布可见图 2。两半球的中低纬度地区均表现出基本一致且统计显著的对流层顶气压下降趋势。Santer 等^[11]指出,1979—1999 年对流层顶高度上升了几百米,即对流层顶气压下降了几百帕。通过计算发现 1979—2002 年夏季全球对流层顶气压总趋势为 $-1.4 \text{ hPa}/(10 \text{ a})$,这与 Santer 等的结论一致。他们认为这种变化是由于人类活动和自然力二者的共同作用所引起的,其中人类活动的影响更为显著。另外我们计算出南半球高纬度和北半球中高纬地区的对流层顶气压趋势分别为 $-4.2 \text{ hPa}/(10 \text{ a})$ 和 $-1.7 \text{ hPa}/(10 \text{ a})$,这与 Hoinka^[10]

得出的结论一致。要说明的是,在南半球的中纬度和北半球的高纬度地区均出现了大范围的对流层顶气压增大区(图 2a),然而除俄罗斯北部、澳大利亚西南部的印度洋和阿根廷东部沿海上空通过了 95% 的置信度检验外,其余地区增大趋势均不显著。

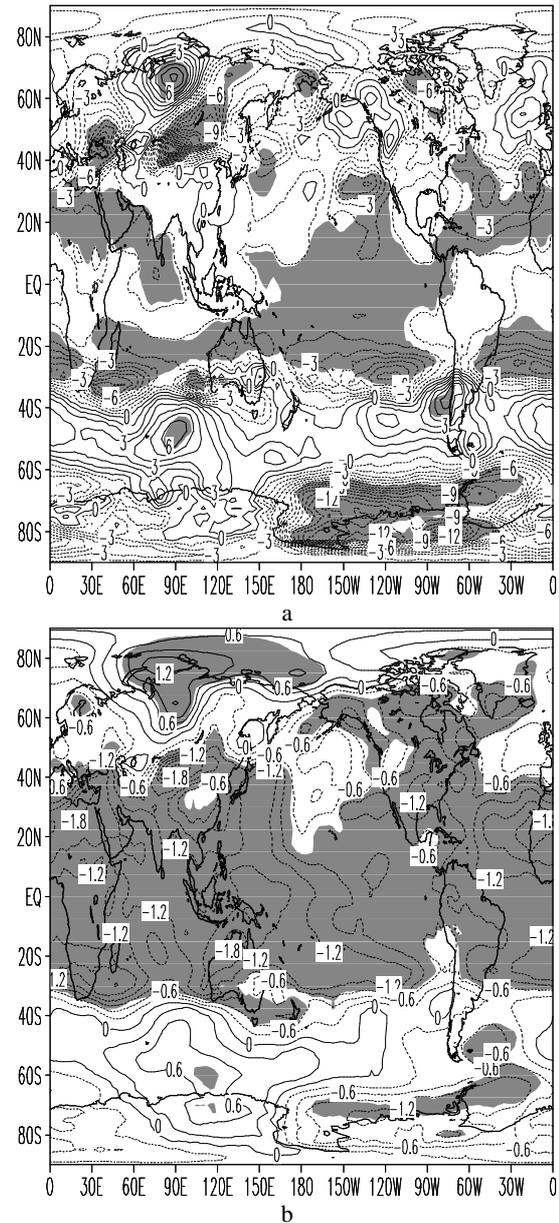


图 2 夏季对流层顶气压(a, 单位: $\text{hPa}/(10 \text{ a})$)和气温(b, 单位: $^\circ \text{C}/(10 \text{ a})$)多年变化趋势
阴影区表示置信度 $\geq 95\%$ 。

图 2b 是夏季全球对流层顶气温的趋势分布和显著性检验。可以看出,夏季对流层顶气温的趋势分布与气压的趋势分布很相似。在北半球高纬度和南半球的中高纬度地区都出现了大范围的对流层顶气温上升趋势,然而只有俄罗斯西北部-北冰洋上空

和南印度洋及南极洲的小部分地区上空通过了 95% 的置信度检验。在两个半球中低纬度的大部分地区, 夏季对流层顶气温表现出一致的减小趋势, 且达到了 95% 的置信度水平。吴润等^[18]指出, 东亚地区对流层顶高度在 1970 年后呈波动上升趋势, 近 20 年来上升了约 86 m, 这个趋势从图 2 中也可以看出。值得注意的是, 对流层顶气压和气温的下降趋势并不是全球一致的, 在两半球的中高纬度地区上空均存在几个正值中心, 即 1979—2002 年夏季对流层顶的气温和气压具有增大趋势。通过计算发现, 1979—2002 年夏季全球对流层顶气温的线性趋势为 $-0.77\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})$, 考虑到对流层顶气压的减小趋势, 说明对流层顶在分析时段内确实有所升高。

4 夏季对流层顶气压和气温的年(代)际变率

4.1 夏季对流层顶气压和气温的标准差分布

夏季对流层顶气压和气温的最大标准差在北半球出现在中纬度地区, 在南半球则出现在副热带和高纬度地区。Sprengr 等^[19]指出, 季节平均的对流层顶折叠频率分布表明, 发生在副热带地区的对流层顶折叠占发生总频数的 30%; Elbern 等^[20]指出, 大多数对流层顶折叠发生在 30° 至极地这一宽阔的纬度带内。夏季对流层顶气压和气温标准差大值区的出现可能与对流层顶折叠存在一定的联系, 这一点还需要作进一步的工作来证实。夏季对流层顶气压和气温标准差的最小值出现在热带地区。Reid 等^[7]利用站点资料研究热带对流层顶的结果表明, 热带对流层顶在很大范围内是均一的, 换句话说, 热带地区是对流层顶年(代)际变率标准差的小值区。南北半球标准差的分布也存在较大的差别。

夏季对流层顶气压标准差(图 3a)的大值区在北半球主要位于中亚和中国北部至蒙古上空, 在南半球主要出现在澳大利亚南部至南太平洋上空以及整个南极大陆上空。整体来看, 夏季对流层顶气压标准差等值线的分布在北半球是由低纬度向中高纬先增大再减小, 至极区再增大。南半球的分布情况与北半球类似, 然而标准差的数值更大一些。

夏季对流层顶温度标准差的分布与气压标准差的分布在南半球基本一致, 而在北半球则有较大的差异(图 3b)。温度标准差大值区在北半球主要出现在中亚和中国北部至蒙古上空, 在南半球主要出现在南极大陆上空。对流层顶气温变率最小值不仅

出现在热带地区, 而且还出现在北半球的较高纬度地区以及北大西洋和南大西洋上空。值得注意的是, 在格陵兰岛北部和加拿大的西南部上空出现了对流层顶温度变率最小值中心。Maxobep^[17]指出, 对流层顶高度和温度的最大标准差都出现在副热带地区, 并由此向南、北两侧逐渐减小, 这与我们的结论有一定的差异。另外, 他所得出的标准差的最大值中心位置也与我们得出的有所不同, 这些差异可能是由于所用资料的不同而产生的。

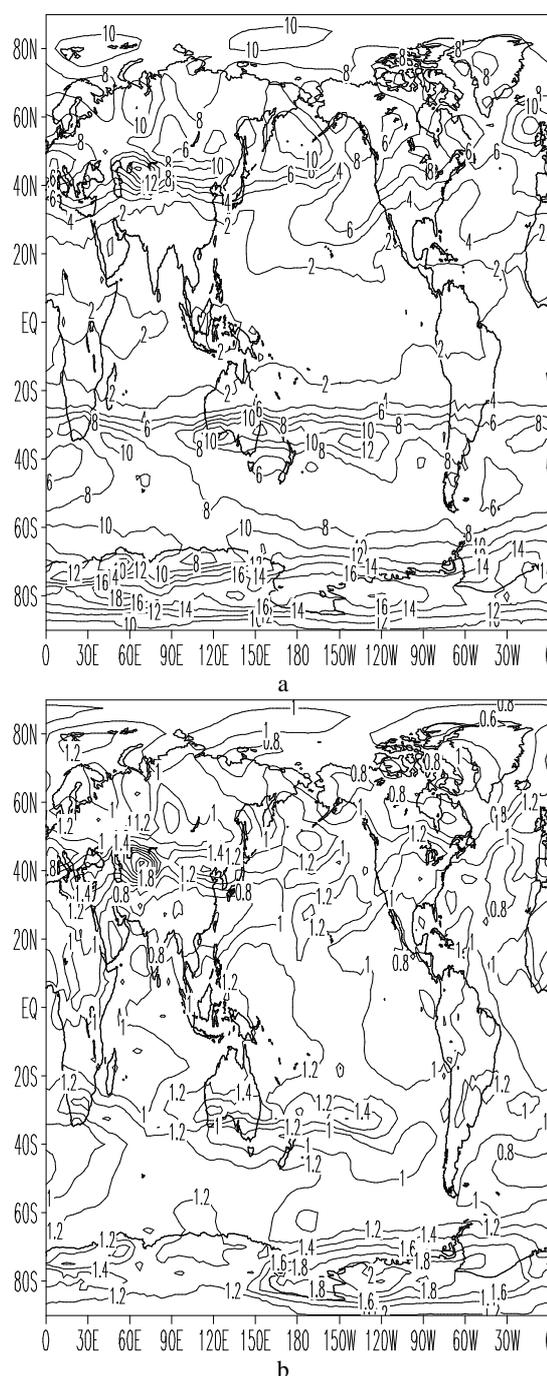
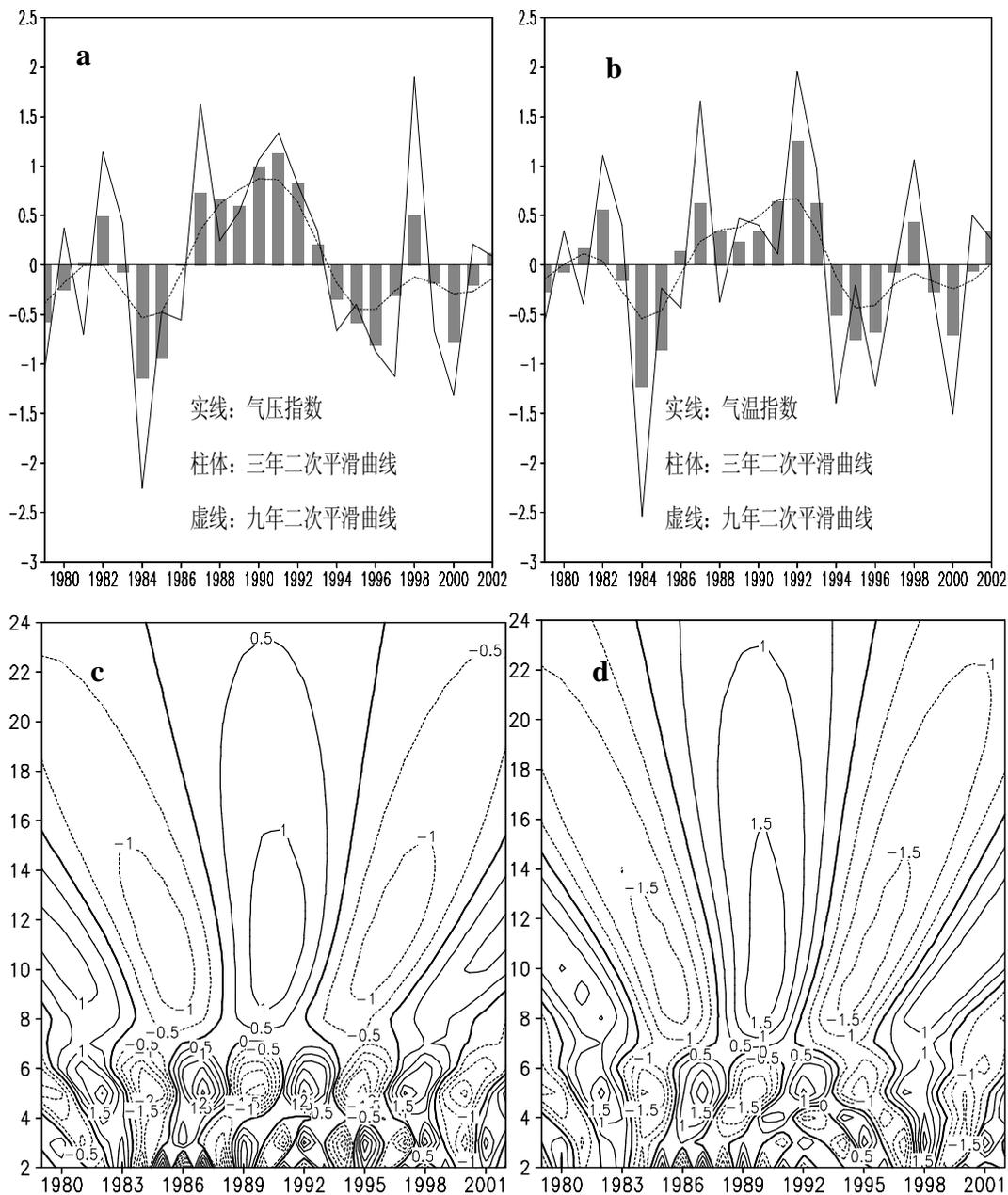


图 3 夏季对流层顶气压(a)和气温(b)的标准差分布

4.2 夏季对流层顶气压和气温的周期分析

为了更好地描述夏季对流层顶的变化特征，本文选取对流层顶气压和气温变率最大的区域（80~160°E，20~35°N）定义了区域平均的对流层顶气压指数和气温指数，然后再作标准化处理。图 4a 和 4b 分别是夏季对流层顶气压指数和气温指数的时间变化曲线及 3 年和 9 年二次平滑曲线。通过计算得到两指数之间的相关系数为 0.85。由此可知二者的变化趋势基本一致。由图看出，二者的年代际变化具有一致的趋势，1981 年以前上升，1981—1984 年下降，而 1984—1992 年再呈上升趋势，

1992—1995 年呈下降趋势，1995 年后基本呈上升趋势。另外，从图中还可看出二者的年际变化也基本一致。Randel 等^[15]指出，1982 年的 El Chichón 火山喷发使得热带对流层顶在 1~2 年内增温 1~2 K，高度下降了 200 m；1991 年爆发的 Pinatubo 火山对对流层顶的影响较小。此外，比较 1982、1987、1992 及 1998 年气压和气温指数的较大异常正好对应于 1982/1983、1986/1987、1992/1994 及 1997/1998 年的 ENSO 事件（其中 2 次对应于 ENSO 次年的夏季）。这说明对流层顶的变化可能与 ENSO 事件及火山活动有较好的关系。



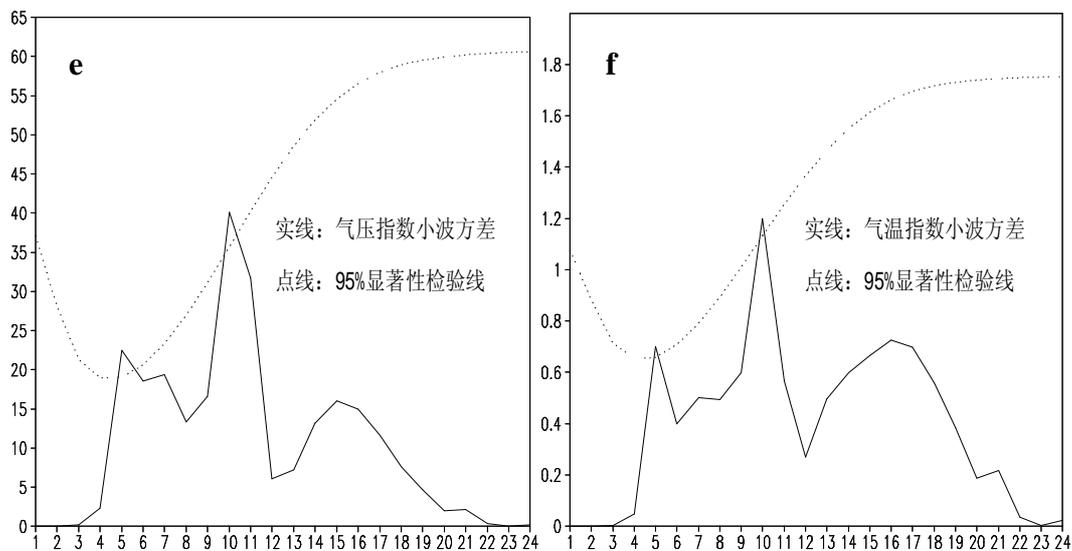


图4 夏季对流层顶气压指数(a)和气温指数(b)随时间变化曲线及其3年和9年二次平滑, 气压指数(c)和气温指数(d)的Morlet小波变换实部, 气压指数(e)和气温指数(f)的小波方差检验

大量研究表明, 对流层顶年际(年代际)变化, 主要为对流层顶的准两年周期振荡^[5-7]、ENSO信号^[7, 9, 21]以及与太阳活动相关的10~12年振荡^[7, 22-23]。这里的研究结果也清楚地显示出这些周期。

本文利用Morlet小波分析来确定上述各指数的周期。由图4c可以看出, 夏季对流层顶气压指数在整个研究时段上以准10年周期为主, 这与9年二次平滑曲线显示出的年代际变化趋势一致。在年际时间尺度上, 准5年周期在整个时段上都可以观察到, 而准3年的周期在1991年后才能观察到, 这些特征也表现在3年二次平滑曲线中。夏季对流层顶气温指数与气压指数的周期变化不同之处在于年际尺度变化, 气温指数在1995年之前的准5年周期较强, 1995年之后准3年较强(图4d), 显示出年际变化的年代际差异。对流层顶气温的这种年际变化的年代际差异是如何形成的则需要进一步研究。从图4e和4f可知, 对流层顶气压指数和气温指数小波方差准5年和准10年周期均通过了95%的置信度检验, 这与Morlet小波分析结果一致。

5 小结与讨论

(1) 多年平均的夏季对流层顶气压和气温在北半球随纬度的增加而增大, 在南半球则是随纬度先增大再减小; 热带地区对流层顶气压和气温的分布都较为均匀。夏季期间(6—8月)南极对流层顶较北极更高、更冷、气压更低。这个结果清楚地刻画了夏季对流层顶气压和气温的水平结构。夏季全球平均的对流层顶气压在分析时段内呈减小趋势, 表明对流层顶高度有所上升; 而夏季全球平均的对流层顶气温也呈减小趋势, 这个结论与Santer等^[11]的结论一致。然而, 值得注意的是, 对流层顶气压和气温的减小趋势并不是全球一致的。

(2) 夏季对流层顶年(代)际变率最大值出现在北半球的中纬度地区和南半球的副热带及高纬度地区, 最小值出现在热带地区; 气压指数和气温指数都显示出准10年及准3~5年的主要周期, 二者的变化趋势基本一致。

参 考 文 献:

- [1] WMO. Meteorology—A three-dimensional science: Second session of the commission for aerology[J]. WMO Bull, 1957, 4 (2) : 134-138.
- [2] REED R J. A study of a characteristic type of upper level frontogenesis[J]. J Meteorol, 1955, 12 (3) : 226-237.
- [3] HOINKA K P. The tropopause: discovery, definition and demarcation[J]. Meteorol Z, 1997, 6 (4) : 281-303.
- [4] STEINBRECHT W, CLAUDE H, KOHLER U, et al. Correlations between tropopause height and total ozone: Implications for long-term changes[J]. J Geophys Res, 1998, 103 (7) : 19 183-19 192.

- [5] ANGELL J K, KORSHOVER J. Quasi-biennial variations in temperature, total ozone, and tropopause height[J]. *J Atmos Sci*, 1964, 21 (5) : 479-492.
- [6] ANGELL J K, KORSHOVER J. Quasi-biennial and long-term fluctuations in tropopause pressure and temperature, and the relation to stratospheric water vapor[J]. *Mon Wea Rev*, 1974, 102 (1) : 29-34.
- [7] REID G C, GAGE K S. Interannual variations in the height of the tropical tropopause[J]. *J Geophys Res*, 1985, 90 (3) : 5 629-5 635.
- [8] GETTELMAN A, RANDEL W J, MASSIE S, et al. El-Nino as a natural experiment for studying the Tropical Tropopause Region[J]. *J Climate*, 2001, 14 (6) : 3 375-3 392.
- [9] REID G C, GAGE K S. Troposphere-stratosphere coupling in the tropics: the role of El Nino and the QBO[J]. Chanin, Marie-Lise(ed.). *The role of the stratosphere in global change*. Heidelberg, Germany, Springer-Verlag, 1993: 245-266.
- [10] HOINKA K P. Statistics of the global tropopause pressure[J]. *Mon Wea Rev*, 1998, 126 (12) : 3 303-3 325.
- [11] SANTER B D, WEHNER M F, WIGLEY T M L, et al. Contributions of anthropogenic and natural forcing to recent tropopause height changes[J]. *Science*, 2003, 301 (5632) : 479-483.
- [12] SEIDEL D J, ROSS R J, ANGELL J K, et al. Climatological characteristics of the tropical tropopause as revealed by radiosondes[J]. *J Geophys Res*, 2001, 106 (D8) : 7 857-7 878.
- [13] SAUSEN R, SANTER B D. Use of changes in tropopause height to detect human influences on climate[J]. *Meteorol Z*, 2003, 12(3): 131-136.
- [14] HIGHWOOD E J, HOSKINS B J. The tropical tropopause[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1998, 124 (549) : 1 579-1 604.
- [15] RANDEL W J, WU F, GAFFEN D J. Interannual variability of the tropical tropopause derived from radiosonde data and NCEP reanalyses[J]. *J Geophys Res*, 2000, 105 (D12) : 15 509-15 523.
- [16] 徐建军, 朱乾根. 印度洋-太平洋海温长期变化的周期性及其年代际变化[J]. *热带气象学报*, 1998, 14 (4) : 353-358.
- [17] MAXOBEP 3M著, 张贵银, 廖寿发译. 对流层顶气候学(第一版)[M]. 北京: 气象出版社, 1987.
- [18] 吴润, 杨茜, 符淙斌, 等. 全球变暖背景下东亚对流层顶高度演变特征的研究[J]. *热带气象学报*, 2007, 23 (6) : 595-600.
- [19] SPRENGER M, MASPOLI M C, WERNLI H. Tropopause folds and cross-tropopause exchange: A global investigation based upon ECMWF analyses for the time period March 2000 to February 2001[J]. *J Geophys Res*, 2003, 108 (D12) , 8518, doi: 10.1029/2002JD002587, STA 3-1-3-11.
- [20] ELBERN H, HRNDRICKS J, EBEL A. A climatology of tropopause folds by global analyses[J]. *Theor Appl Climatol*, 1998, 59 (2) : 181-200.
- [21] HIROAKI H, YAMAZAKI K. Interannual variations of temperature and vertical motion at the tropical tropopause associated with ENSO[J]. *Geophys Res Lett*, 2001, 28 (15) : 2 891-2 894.
- [22] COLE H P. Investigation of a possible relationship between the height of the low-latitude tropopause and the sunspot number[J]. *J Atmos Sci*, 1975, 32 (5) : 998-1 001.
- [23] STRANZ D. Solar activity and the altitude of the tropopause near the equator[J]. *J Atm Terr Pys*, 1959, 16 (2) : 180-182.

INTERANNUAL/INTERDECADAL VARIABILITIES AND TREND IN THE TROPOPAUSE PRESSURE AND TEMPERATURE FIELDS DURING BOREAL SUMMER

ZHU Bao-lin^{1,2}, GUAN Zhao-yong², CHENG zhi³

(1. Yunnan Meteorological Bureau, Kunming 650034, China;

2. Department of Atmosphere Sciences and KLME, NUIST, Nanjing 210044, China;

3. Anhui Meteorological Bureau, Hefei 230031, China)

Abstract: Using the monthly mean tropopause pressure and temperature data from NCEP/NCAR reanalysis from 1979 through to 2002, we investigated both the interannual and interdecadal variabilities of the summertime tropopause. The tropopause pressure index is defined as the areal average over the region where the tropopause pressure variability reaches its maximum. The tropopause temperature index is defined in a similar way as the tropopause pressure index. Results demonstrated that both the tropopause pressure and temperature increase poleward, in general, in both the Northern and Southern Hemisphere during boreal summer, except in latitudes higher than 45 °S where both the tropopause pressure and temperature decrease poleward. Both the air pressure and temperature at tropopause distribute uniformly in tropics rather than in extratropics. Both the global mean tropopause pressure and temperature have been decreasing since 1979, indicating that the tropopause has been moving higher and higher. However, the tropopause pressure and temperature increase with time goes on in most part of the middle and high latitudes, showing the complicated behavior of the tropopause variations. The tropopause variability reaches its maximum in the middle latitudes in both the Northern and Southern Hemisphere respectively, whereas the tropopause variability reaches its minimum in tropical regions. The periodicities as reflected in the pressure and temperature indices are dominantly 10 years and 3 ~ 5 years.

Key words: climatology; interannual/interdecadal variability; wavelet analysis; trend; tropopause