

1964—2005年辽宁第一对流层顶温度变化特征分析

蔡福 李辑

(中国气象局沈阳大气环境研究所,沈阳 110016)

摘要:利用趋势分析、突变分析及小波分析方法对1964—2005年辽宁南部(大连)和北部(沈阳)第一对流层顶温度特征进行分析和比较。结果表明:近42 a,对于辽宁地区第一对流层顶温度,年、夏秋季平均值均呈升高趋势,春冬季平均值呈弱下降趋势;多年平均值的年变化表现为北部夏季最高、春季最低,南部秋季最高、春季最低;南部年、季的年际变化幅度均大于北部;年际变化幅度在南部夏季最大、春秋季次之、冬季最小,在北部夏季最大、冬季次之、春秋季差异不大;发生突变时段春夏季南部滞后于北部。在春季存在着3 a,6 a和18 a周期,其他季节周期变化南部较北部明显。

关键词:第一对流层顶;温度;趋势分析;突变分析;小波分析

1 引言

第3次IPCC报告指出,全球平均地面温度自19世纪末以来升高了 $(0.6 \pm 0.2)^\circ\text{C}$,1950—2000年,全球8 km以下低层大气的温度大约每10 a增加 0.1°C ,这与地表气温变化相似^[1-2]。可见,20世纪全球气候变暖已经是人们公认的事实,且这种变暖幅度存在很大的季节性、地域性、突变性、周期性等特征^[3-6]。以上的结论大多数是针对对流层中下层以及地表气温研究而得到的,高空大气层特别是对流层顶这一过渡层的状态是如何变化,目前还没有一个定量甚至定性的结论。对流层顶是指对流层与平流层之间的边界或者是对流层到平流层的过渡层。这个过渡层的标志是温度递减率从湍流混合的对流层到稳定层结的平流层的突变,其厚度约几百米至2 km,分为第一对流层顶(极地类)和第二对流层顶(热带或副热带类)^[7],中高纬度以前者为主,其高度偏低,是一个深厚的对流阻滞层,它阻碍着气溶胶和水汽的垂直交换;阻碍着积雨云顶的垂直发展,决定着云的上限、降水以及和云有关的天气现象的位置。该处大气温、压、湿结构以及环流的变化直接影响着近地层的天气和气候。由此可见,研究对流层顶的气候变化特征具有极大的应用价值和理论意义。目前,针对对流层顶大气温度的多年变化特征的研究还比较少,其中张广兴等^[8]利用新疆12个探空站逐日观测资料分析了40 a来新疆第一对流层顶年平均温度变化特征,结果表明,新疆第一对流层顶年平均温度总体呈下降趋势。蔡福等^[9]利用1977—1992年探空资料对同处中高纬度的沈阳地区第一、

第二对流层顶研究表明,第一对流层顶温度7月表现出显著降低,降幅为 $1.8^\circ\text{C}/10\text{ a}$,10月增温趋势显著,升幅为 $2.0^\circ\text{C}/10\text{ a}$ 。可见,第一对流层顶温度的多年变化存在明显的季节差异。在全球地面以及对流层中下层气温升高的情况下,第一对流层顶大气温度是否也在升高,有待于深入而系统地进一步研究。本文以地处北半球中高纬度、气候变化敏感区之一的中国辽宁地区为研究区域,采用小波分析、趋势分析以及突变分析等方法对其第一对流层顶温度的多年变化特征展开研究,以期给出该区域在全球变化背景下高层大气温度的多年演变规律,为研究区域气候变化提供新的科学依据。

2 资料与方法

2.1 资料来源

采用的第一对流层顶数据来源于辽宁省气象部门整编资料。考虑到资料的连续性和有效性以及探空站点的限制,以沈阳代表辽宁北部,大连代表辽宁南部,分别选取大连和沈阳2个探空站的1964—2005年第一对流层顶逐月平均温度数据,求出年和春(3—5月)、夏(6—8月)、秋(9—11月)、冬(12月至翌年1—2月)四季平均值。

2.2 研究方法

2.2.1 气候倾向率

引入气候倾向率^[10]来研究第一对流层顶高度和温度的变化趋势。用 x_i 表示对流层顶高度或温度,用 t_i 表示 x_i 所对应的时间,建立 x_i 与 t_i 之间的一元线性回归:

$$\hat{x}_i = a + bt_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

收稿日期:2007-01-25;修订日期:2007-03-26。

基金项目:中国气象局气候变化专项“中国关键人为大气气溶胶排放源及时空分布”(CCSF2006-27)资助。

作者简介:蔡福,男,1980年生,硕士,主要从事气候变化与应用气象方面的研究,E-mail:caifu_80@163.com

通信作者:李辑,E-mail:cqliji@sina.com。

式(1)中, \hat{x} 为气象要素的拟和值; $b \cdot 10$ 为气候倾向率, 表示气候要素 10 a 的变化速率。式(1)可以看作是一种特殊的、最简单的线性回归形式。它的含义是用一条合理的直线表示 x 与对应的时间 t 之间的关系, 是一种时间序列分析方法。

2.2.2 Mann-Kendall 法

为研究辽宁北部和南部第一对流层顶高度及温度的突变特征, 采用世界气象组织推荐的 Mann-Kendall 方法(简称 MK 法)。此方法更适用于水文气象等非正态分布的数据, 是一种非参数统计检验法。对于样本容量为 n 的时间序列, 定义统计量 $S_k = \sum_{i=1}^n r_i, k=2, 3, \dots, n, S_k$ 是第 i 个样本大于第 j 个样本的个数的累计值 ($1 \leq j \leq i$)。在原序列随机独立的假设下, S_k 的标准化序列 $U(S_k)$ 在给定的显著性水平 α_0 下, $\alpha_1 < \alpha_0$ 时, 拒绝原假设, 认为序列存在一个长期的趋势变化。所有的 $U(S_k)$ ($1 \leq k \leq n$) 将组成一条曲线 UF , 对 x 序列的逆序列重复上述

过程, 得到曲线 UB 。大(小)于零则表明序列呈上升(下降)趋势, 当 UF 超过临界线时, 表明上升(下降)的趋势显著。如果 UF 和 UB 曲线出现交点, 且交点在临界线之间, 这个交点即是突变点, 该点对应的时刻就是突变开始的时间^[11]。

2.2.3 小波分析

研究采用小波分析方法研究辽宁地区第一对流层顶各要素周期变化特征。小波分析是一种信号时、频局部化分析方法, 具有自适应变化的时频窗口。小波变换基于仿射群的不变性, 即平移和伸缩的不变性, 且允许将信号分解为时间和频率(空间和尺度)的贡献^[12]。若函数 $\Psi(t)$ 满足下列条件的任意函数:

$$\int_R \Psi(t) d_t = 0 \tag{2}$$

$$\int_R \frac{|\overline{\Psi}(t)|^2}{|\omega|} d_\omega < \infty \tag{3}$$

式(2)一式(3)中, $\overline{\Psi}(t)$ 是 $\Psi(t)$ 的频谱, 有 $\Psi_{a,b}(t) =$

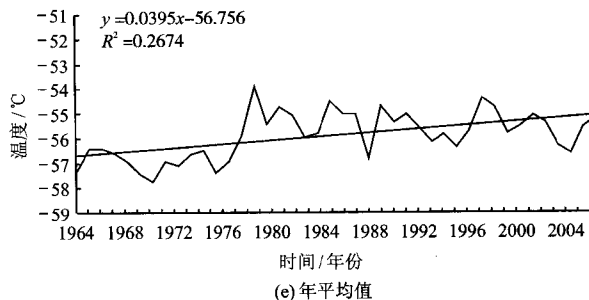
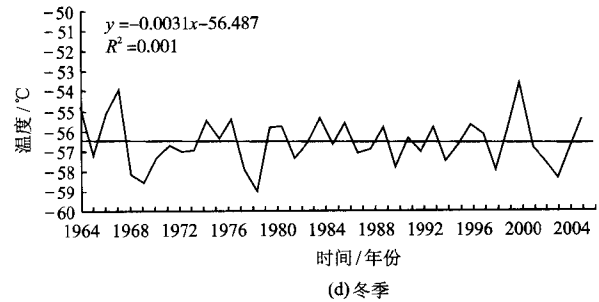
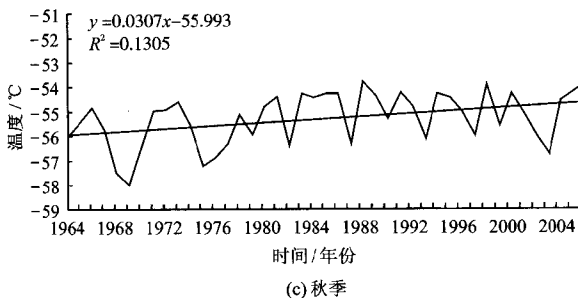
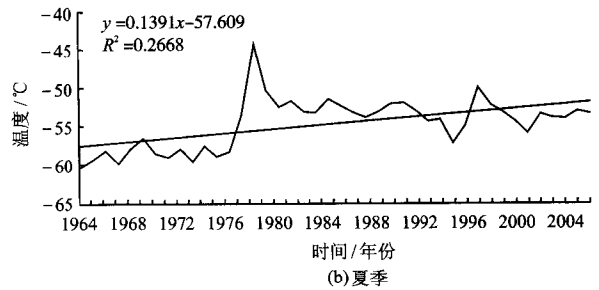
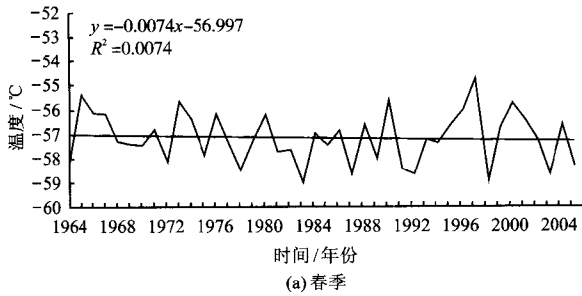


图 1 1964—2005 年辽宁北部第一对流层顶年和季平均温度变化曲线

$|a|^{-1/2} \Psi(\frac{t-b}{a})$ ($a, b \in R; a \neq 0$) 为连续小波; $\overline{\Psi}(\omega)$ 为基本小波或母小波(mother wavelet), 它是双窗函数, 一个是时间窗, 一个是频率谱, $\Psi_{a,b}(t)$ 的

振荡随着 $1/|a|$ 增大而增大; a 为频率参数, 即伸缩因子; b 为时间参数, 即平移因子, 表示波动在时间上的平移; R 为实数。那么, 任意函数 $f(t) \in L^2L(R), L(R)$ 表示平方可积的实数空间。小波变

化的连续形式:

$$W_f(a, b) = |a|^{-1/2} \int_R f(t) \overline{\Psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \quad (4)$$

式(4)中, $W_f(a, b)$ 随参数 a 和 b 变化, 可以制作出以 b 为横坐标、 a 为纵坐标的二维小波系数 $W_f(a, b)$ 等值线图。通过图中小波系数变化可以反映系统在不同时段、不同时间尺度下的变化特征。本文采用 Morlet 小波函数, 其函数有多种形式, 所用函数形式:

$$\Psi(t) = Ce^{-t^2/2} \cos(5t) \quad (5)$$

式(5)中, $\Psi(t)$ 为基本小波或母小波, t 为时间, C 为常数。利用该小波函数, 通过计算可得到第一对流层顶各要素时间序列在不同尺度下的小波系数。

3 结果分析

3.1 辽宁北部第一对流层顶温度年和季平均值气候特征

3.1.1 年和季平均值变化

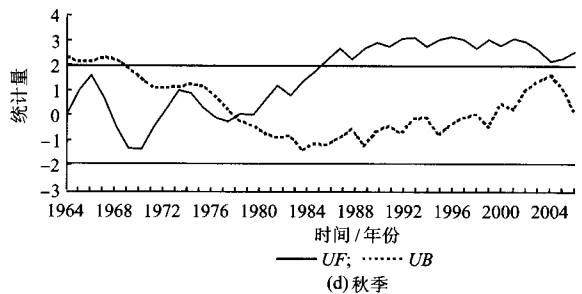
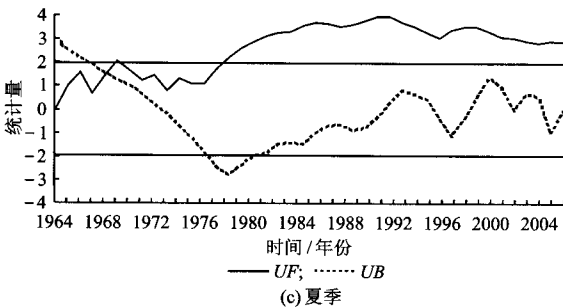
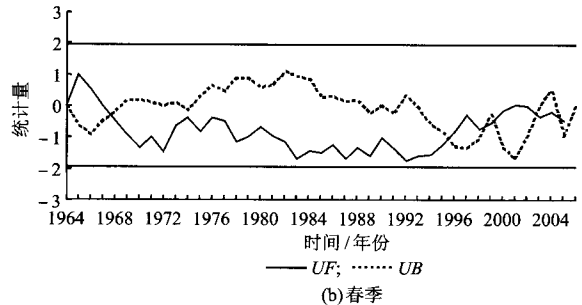
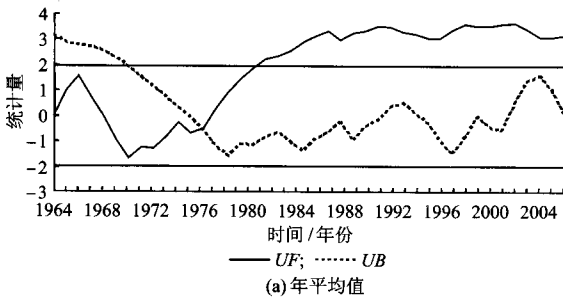


图2 1964—2005年辽宁北部第一对流层顶年和春夏秋冬季平均温度突变曲线

图2为采用 Mann-Kendall 方法绘出的近 42 a 辽宁北部第一对流层顶年和春、夏、秋季温度突变特征曲线。从图 2a 可以看出, 辽宁北部第一对流层顶年平均温度在 1976 年发生突变, 1976 年以前温度呈下降趋势, 之后温度缓慢回升, 到 20 世纪 80 年代初开始呈显著上升趋势, 并且一直持续到 2005 年。从图 2b 可以看出, 自 1964 年以来, 辽宁北部地区第一对流层顶春季平均温度发生 2 次突变, 分别出现在 1968 年前后的降温和 1996 年前后的升温。从整个时段来看, 温度呈下降趋势但不显著。由图 2c 可见, 辽宁北部第一对流层顶夏季平均温度在整个时

由图 1 可以看出, 辽宁北部第一对流层顶年、季温度升降趋势在近 42 a 均较小, 其中年和夏秋季呈升高趋势, 且年和夏季升温趋势显著, 升幅分别为 $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 和 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, 春冬季表现出弱下降趋势, 但不显著。春季, 第一对流层顶温度变化为 $-59\sim-54\text{ }^{\circ}\text{C}$, 20 世纪 60 年代表现为先升后降趋势, 70—80 年代为先降后升的波动变化趋势, 幅度较小, 从 20 世纪 90 年代开始, 温度变化呈大幅振荡状态, 但升降趋势不明显。夏季, 温度变化为 $-60\sim-46\text{ }^{\circ}\text{C}$, 1976 年之前, 温度低于 $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$, 在平稳震荡中上升。从 1978 年开始, 温度先是陡降, 然后平稳振荡。秋季, 温度变化为 $-58\sim-54\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。20 世纪 80 年代以前呈高位波动升温趋势, 1980—2000 年, 呈平稳波动上升趋势, 然后再一次出现波动。冬季, 温度变化为 $-59\sim-54\text{ }^{\circ}\text{C}$, 70 年代之前和 1998 年之后温度变化振荡幅度较大, 其余时段振荡中平稳下降, 趋势缓慢。

3.1.2 年和季平均值突变特征

段都表现出升高趋势, 1968 年发生了升温幅度上的突变, 自 1978 年以后, 一直处于显著的升温趋势。秋季温度变化趋势(图 2d)表现出自 1978 年以前发生波动性的升温和降温, 1978 年发生气候突变, 突变点以后温度持续上升。自 1985 年开始一直呈持续显著增温趋势。冬季第一对流层顶温度在近 42 a 中一直处于上下波动变化, 没有发生气候突变现象。

3.1.3 年和季周期变化

利用小波分析方法对辽宁北部第一对流层顶年、季温度进行周期分析, 其中年和夏冬季周期特征不明显, 春秋季节周期特征明显。图 3 为辽宁北部第

一对流层顶春秋季温度小波指数分布图,其中横轴为时间序列各年份,纵轴为时间尺度。由图 3a 可以看出,辽宁北部第一对流层顶春季温度存在 3,6 a 和

18 a 周期变化,秋季(图 3b)在近 42 a 整个时段中普遍存在 3,6 a 和 12 a 周期变化,并在 20 世纪 80 年代以前存在 9 a 周期。

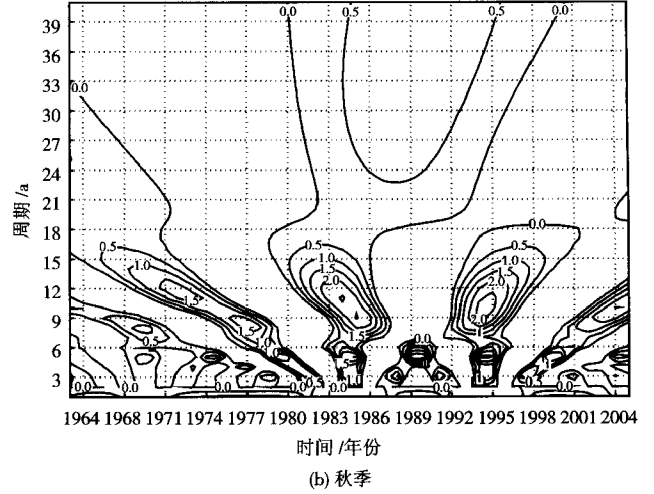
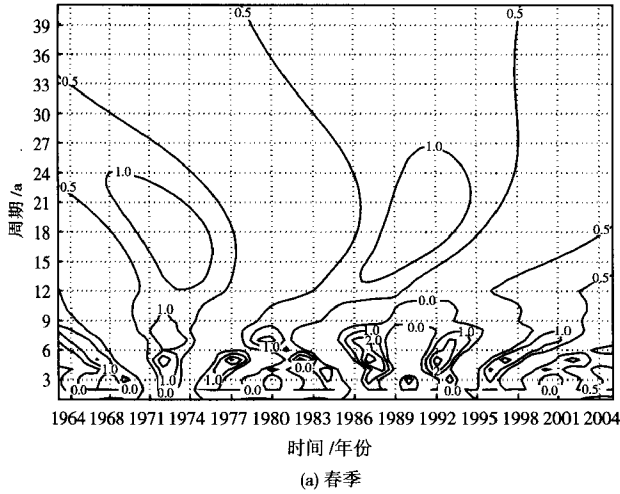


图 3 1964—2005 年辽宁北部第一对流层顶春秋季平均温度小波指数分布

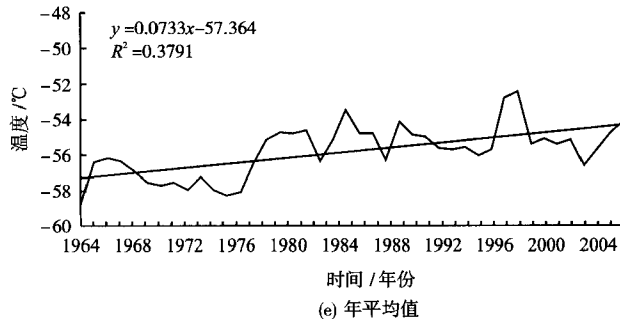
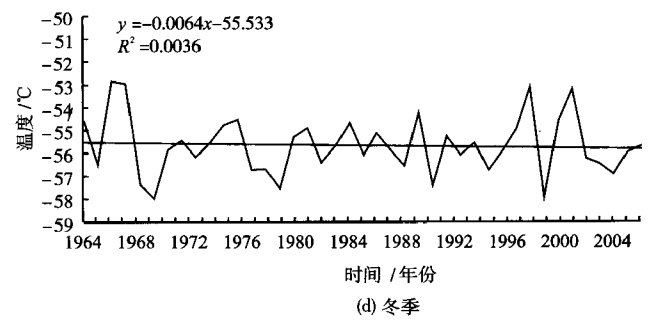
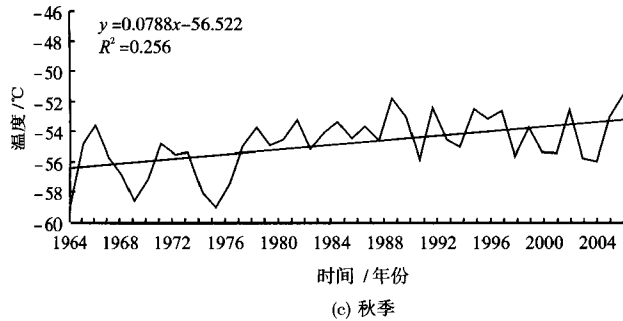
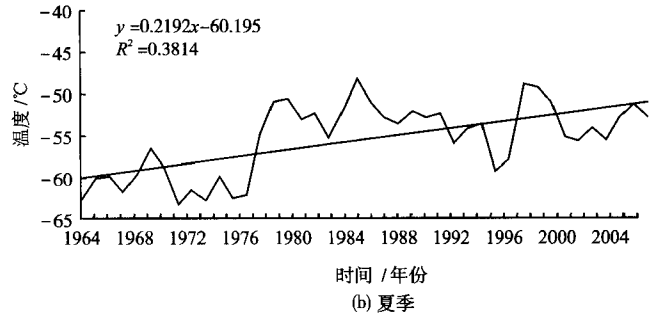
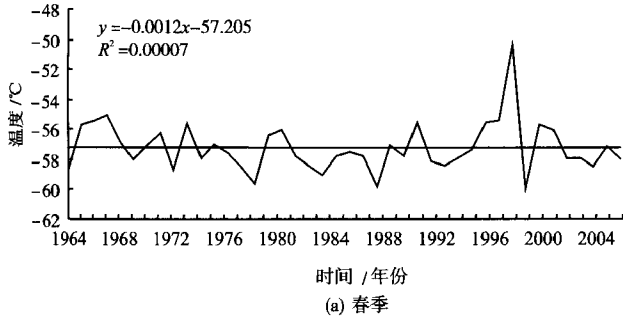


图 4 1964—2005 年辽宁南部第一对流层顶年和季平均温度变化曲线

3.2 辽宁南部第一对流层顶温度年和季平均值气候特征

3.2.1 年和季平均值年际变化

图 4 给出近 42 a 辽宁南部第一对流层顶年、季温度变化曲线。图 4 表明,春冬季呈弱降温趋势,但不显著,年和夏秋季呈升温趋势,并且趋势显著,升幅分别约为 $0.7, 2.2 \text{ }^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ 和 $0.8 \text{ }^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ 。春季,辽宁南部第一对流层顶温度在近 42 a 整个时段中以平稳降温为主,温度为 $-60 \sim -50 \text{ }^\circ\text{C}$,20 世纪 90 年代后期发生剧烈波动。夏季,温度年际变化大体分为 3 个时段,1977 年以前,温度小幅振荡,为 $-63 \sim -56 \text{ }^\circ\text{C}$,呈弱下降趋势;1978—1993 年,温度为 $-55 \sim -50 \text{ }^\circ\text{C}$,呈平稳小幅振荡,1994 年以后,温度为 $-60 \sim -49 \text{ }^\circ\text{C}$,呈波动上升趋势。秋季,温度为 $-60 \sim -52 \text{ }^\circ\text{C}$,1978 年以前温度为 $-60 \sim -54 \text{ }^\circ\text{C}$,呈大幅波动状态,之后一直为 $-56 \sim -52 \text{ }^\circ\text{C}$,呈平稳振荡;冬季,1978 年以前和 1994 年以后温度波动幅度较大,中间时段年

际变化幅度较小,温度为 $-58 \sim -53 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

3.2.2 年和季突变特征

图 5 为采用 Mann-Kendall 方法绘出的辽宁南部第一对流层顶年和春、夏、秋季温度突变曲线。由图 5a 可以看出,辽宁南部第一对流层顶年平均温度自 20 世纪 60 年代末之前温度升高;之后开始下降,1975 年降温趋势达到显著水平,1978 年发生突变,由降温趋势转为升温趋势;1983 年升温趋势达到显著水平,并在此之后一直持续显著升温。春季温度在近 42 a 中呈先升后降趋势,在 20 世纪 60 年代末和 90 年代中期发生了 2 次主要的突变。夏季主要以升温趋势为主,1975 年发生气候突变,从 1980 年开始持续显著升温。秋季,温度在 1978 年发生气候突变之前呈波动变化趋势,突变后持续升温,从 1984 年开始持续显著升温。冬季温度变化趋势与辽宁北部相似,呈波动变化,无明显升降趋势。

3.2.3 年和季周期特征

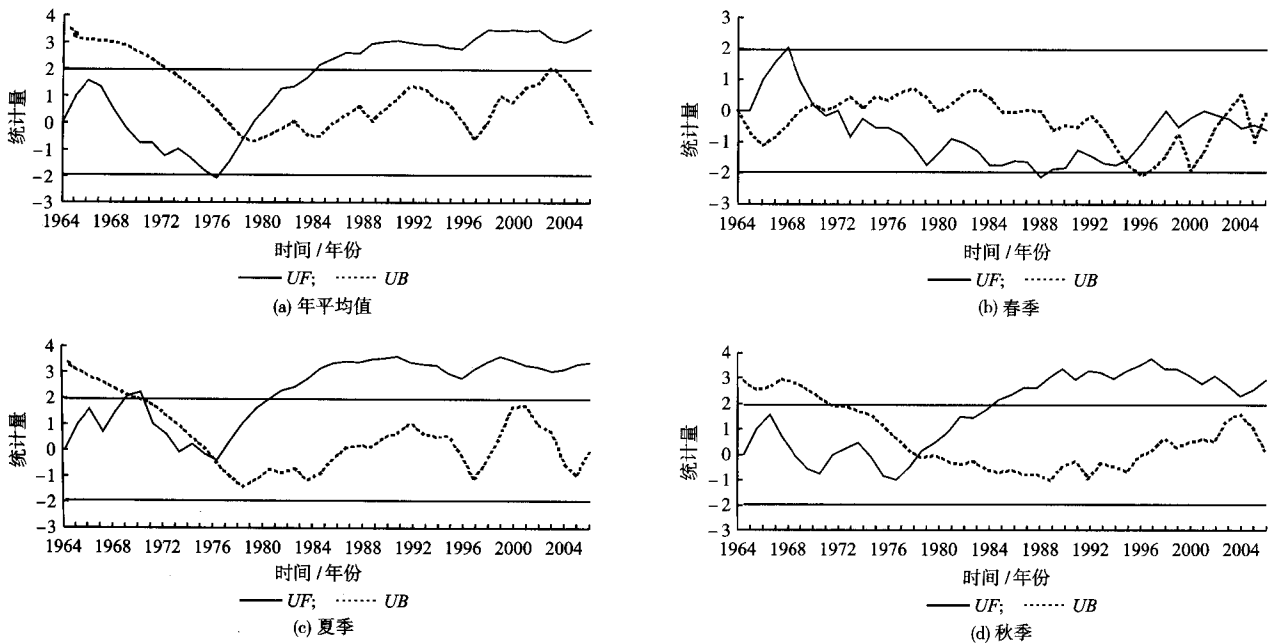


图 5 1964—2005 年辽宁南部第一对流层顶年和春夏秋冬季平均温度突变曲线

辽宁南部第一对流层顶温度除年和秋季以外,其他季节周期变化均比较明显。由图 6 可以看出,辽宁南部第一对流层顶温度近 42 a 在春季(图 6a)存在 3, 6 a 和 9 a 周期变化和 15—18 a 准周期。夏季(图 6b)在整个时段主要存在 12 a 和 18 a 准周期变化。此外,从 20 世纪 80 年代后期到 2005 年存在 3—5 a 和 6 a 的准周期变化。冬季(图 6c)在整个时段主要以 6 a 和 12—14 a 准周期为主,1980 年以前还存在 4—5 a 小周期。

3.3 辽宁北部和南部第一对流层顶温度异同点

近 42 a 辽宁南北部第一对流层顶年、季温度变化趋势总体上是一致的,均为年和夏秋季呈升高趋

势,年和夏季升温趋势显著,春冬季表现出弱下降趋势,但不显著,南部的夏秋季气候倾向率要明显大于北部。多年平均温度的年变化(表 1)表现为辽宁北部夏季最高,春季最低,而南部则秋季最高,春季最低,南部秋冬季温度高于北部。

从年际变化分析,南部年和季温度的标准差均大于北部,说明南部年和季际温度变化幅度均大于北部;其中,南部温度年际变化幅度夏季最大,春秋季节次之,冬季最小,而北部则为夏季最大,冬季次之,春秋季节差异不大。从突变特征曲线分析,辽宁南北部温度各季节发生突变时段均处于 20 世纪 70 年代中后期,略有差异;其中,年和春夏季南部滞后于北

部,秋季基本一致。从周期变化特征上看,辽宁南北部第一对流层顶温度在春季变化周期较为相似,均

存在 3,6 a 和 18 a 周期,在其他季节南部较北部周期变化更为明显。

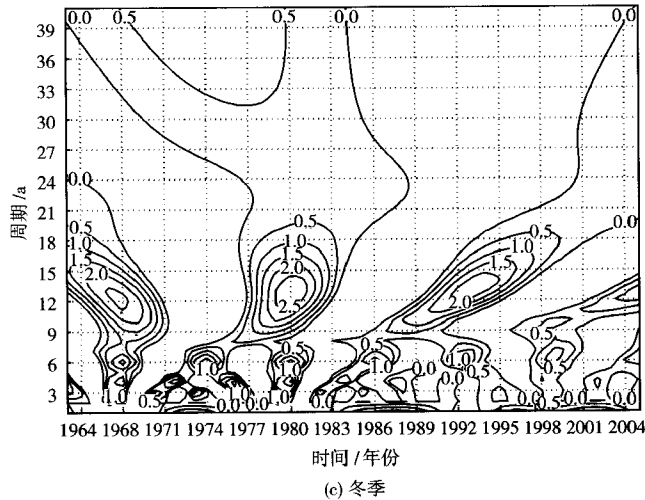
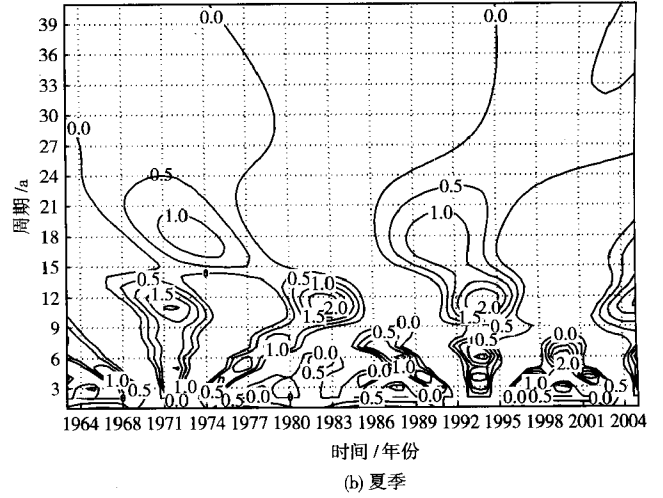
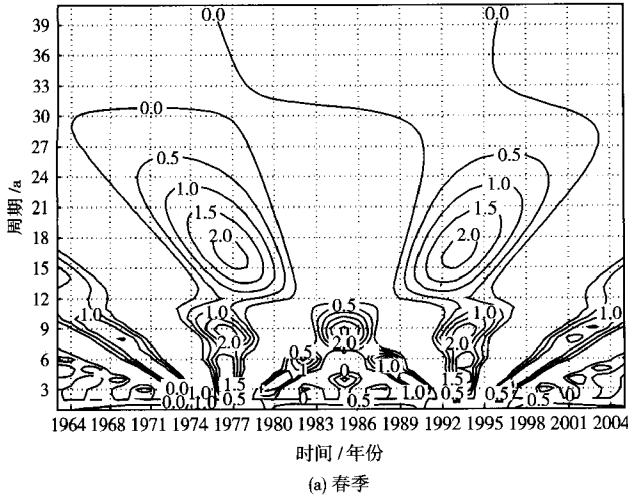


图 6 1964—2005 年辽宁南部第一对流层顶春夏冬季平均温度小波指数分布

表 1 1964—2005 年辽宁省南北部第一对流层顶年和季温度平均值与标准差

统计量	温度				
	春季	夏季	秋季	冬季	年
n-mean/°C	-57.15	-54.62	-55.33	-56.55	-55.91
s-mean/°C	-57.23	-55.48	-54.83	-55.67	-55.80
n-stdev	1.05	3.30	1.04	1.19	0.94
s-stdev	1.68	4.35	1.88	1.29	1.46

注:n-stdev,s-stdev,n-mean,s-mean 分别为辽宁北部、南部标准差和平均值

4 结论与讨论

近 42 a 辽宁地区第一对流层顶温度年和夏秋季呈上升趋势,春冬季表现出弱下降趋势。第一对流层顶多年平均温度的年变化表现为辽宁北部夏季最高、春季最低,而南部则秋季最高、春季最低,南部秋季温度高于北部。近 42 a 和季年际变化幅度均为南部大于北部。南部温度年际变化幅度夏季最大、

春秋季节次之、冬季最小,而北部则为夏季最大、冬季次之,春秋季节差异不大。春夏季发生突变时段南部滞后于北部。在春季,辽宁第一对流层顶温度存在 3,6 a 和 18 a 周期,其他季节南部较北部周期变化更为明显。

从研究结论可以看出,因研究地域和时间尺度的差异,同为第一对流层顶温度,其气候变化特征具有明显差异。同时,以往只针对对流层顶温度的年平均状态的研究忽视了季节变化本身的特征,其实不同季节的多年变化特征差异很大,甚至存在相反的趋势。另外,气候突变作为气候变化的一个重要的反映形式应当受到更广泛的关注,就研究而言,气候突变点前后第一对流层顶温度的变化趋势有所不同甚至相反,这说明气候变化的研究因时间尺度的差异将会得到完全不同的结论。总之,开展气候变化方面的研究应从不同时空尺度、不同地域等予以更全面的考虑,这样才会更加客观准确地对气候变

化的事实进行论述。

参考文献

- [1] Houghton J T, Ding Y, Griggs J, et al. IPCC, 2001: Climate change 2001 [M]. The climate change contribution of working group I to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge: Cambridge University Press, 2001: 156 - 159.
- [2] 王颖, 任国玉. 中国高空温度变化初步分析[J]. 气候与环境研究, 2005, 10(4): 780 - 790.
- [3] 李崇银, 朱锦红, 孙照渤. 年代际气候变化研究[J]. 气候与环境研究, 2002, 7(2): 209 - 219.
- [4] 章名立, 曾昭美, 季劲均. 全球增暖过程中亚洲东部区域气候的特点[J]. 地理学报, 1996, 51(6): 518 - 526.
- [5] Wallace J M, Zhang Y, Bajuk L. Interpretation of inter-decadal trends in Northern Hemisphere surface air temperature[J]. Journal of Climate, 1996, 9(2): 249 - 259.
- [6] 符淙斌. 气候突变现象的研究[J]. 大气科学, 1994, 18(3): 373 - 384.
- [7] 张广兴, 李娟, 崔彩霞, 等. 新疆 1960 - 1999 年第一对流层顶高度变化及其突变分析[J]. 气候变化研究进展, 2005, 1(3): 106 - 110.
- [8] 张广兴, 何清, 李娟, 等. 近 40 年来新疆极地对流层顶温度变化的若干事实和突变分析[J]. 干旱区地理, 2005, 28(6): 729 - 733.
- [9] 蔡福, 李辑, 明惠青, 等. 沈阳地区对流层顶气候特征分析[J]. 气象与环境学报, 2006, 22(1): 11 - 16.
- [10] 邱新法, 刘昌明, 曾燕. 黄河流域近 40 年蒸发皿蒸发量的气候变化特征[J]. 自然资源学报, 2003, 18(4): 437 - 442.
- [11] 马柱国, 魏和林, 符淙斌. 中国东部区域土壤湿度的变化及其与气候变率的关系[J]. 气象学报, 2000, 58(3): 278 - 287.
- [12] 张少文, 丁昌, 廖杰, 等. 基于小波的黄河上游天然年径流变化特征分析[J]. 四川大学学报, 2004, 36(3): 32 - 37.

Characteristics of the first tropopause temperature changes over Liaoning province from 1964 to 2005

CAI Fu LI Ji

(Institute of Atmospheric Environment, China Meteorological Administration, Shenyang 110016)

Abstract: The characteristics of the first tropopause temperatures over Dalian and Shenyang were analyzed by the trend analysis and abrupt change analysis as well as wavelet analysis. Shenyang and Dalian were thought as the northern city and the southern city of Liaoning province, respectively. The results showed that the yearly average temperature of the first tropopause over Liaoning province increased from 1964 to 2005. The average temperatures in both summer and autumn also increased, while they decreased in both spring and winter. The multi-year average temperature of the first tropopause was higher in summer and was lower in spring in the north of Liaoning province than in the south of Liaoning province, and it was higher in autumn and was lower in spring in the south than in the north of Liaoning province. Moreover, the inter-annual change ranges of year and season in the south of Liaoning province were larger than those in the north of Liaoning province. The largest inter-annual change range appeared in summer and the smallest one was in winter and the middle in both spring and autumn in the south of Liaoning province, while the largest one was in summer and followed in winter in the north of Liaoning province. And there was not an obvious difference in spring and autumn in the north of Liaoning province. In addition, climatic abrupt changes that took place in spring and summer in the south of Liaoning province lagged behind that in the north of Liaoning province. The first tropopause temperature had different cycles including 3, 6 a and 18 a in spring. Oscillations of other seasons in the south of Liaoning province were more obvious than that in the north of Liaoning province.

Key words: The first tropopause; Temperature; Change trend; Abrupt change; Wavelet analysis