

济南、威海成山头近 60 a 冬季平均气温的小波分析

邹良超¹，肖尚斌^{1,2}，倪林¹，张京穗¹

(1. 三峡大学 土木水电学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 中国科学院 黄土与第四纪地质国家重点实验室, 陕西 西安 710075)

摘要: 利用济南和威海成山头 1951~2006 年的冬季气温的观测资料, 用 MHF (墨西哥帽函数) 小波分析了两地冬季气温的多时间尺度变化特征并对两地出现的极端气候进行了一定分析。结果表明近 60 a 来, 济南冬季年平均气温 (0.82℃) 比威海成山头冬季年平均气温 (0.53℃) 高, 济南和威海成山头两地冬季气温倾向率分别为 0.431℃/10a 和 0.359℃/10a; 两地在较大时间尺度上, 突变点位置比较接近, 在较小时时间尺度上, 演变略有差异, 济南冬季气温变化比威海成山头略快; 在振动周期上, 济南的冬季平均气温变化以 5, 18 a 左右周期振动较强, 威海成山头的冬季平均气温变化则以 4, 18 a 左右为较强周期振动; 在未来一段时间内, 两地冬季气温将保持偏高状态, 但都有转低的趋势; 出现极端气候时有明显的群发性和阶段性, 成山头出现极端气候时情况更加恶劣。

关键词: 冬季气温; 气候倾向率; MHF 小波; 气候变化

中图分类号: P423.32

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2008)09-0029-08

山东位于中纬度地区, 范围跨度甚广, 既受陆地性气候的影响也受海洋性气候的影响, 选择济南、威海两地分析其变化特征与规律和地域差异, 可为该地区未来气候分析和预测研究作参考。

对气候资料进行分析和诊断传统方法有滑动平均、滤波、Fourier 变换等^[1-3]。但由于气候系统是一个多时间尺度系统, 在时频中存在多层次时间尺度结构和局部化特征, 用以上方法不能揭示出气候变化的多层次结构以及有效的提取不同层次气候变化的重要信息。目前, 小波分析被认为是 Fourier 分析方法的突破性进展, 可以详细地揭示出时间序列中瞬时频率结构随时间的变化。从而在气候分析中, 小波分析不仅可以给出气候序列变化的尺度, 还可以显示出变化的时间位置。同时, 小波分析还具有数学意义上严格的突变点诊断能力 (对应于拐点)^[2-3], 可以用来分析气候变化中的突变。作者采用常用的 MHF (墨西哥帽函数) 小波分析济南和威海成山头冬季气温的多时间尺度变化特征。

1 资料与方法

作者选用中国气象科学数据共享服务网提供的济南和威海成山头 1951~2007 年的气候资料, 选取 12~2 月代表 12 月份所属年份的冬季。对于

成山头 1954 年 1 月和 2 月缺测的数据, 采用线性插值法进行插补。在进行小波分析之前, 先求出两地冬季月平均气温的距平序列。为反映冬季气温变化的总趋势, 作者拟对济南和威海成山头冬季月平均气温序列进行直线拟合, 拟合直线斜率的 10 倍为气候倾向率^[4], 代表每 10 a 冬季月平均气温的变化值。

关于小波分析技术, 许多文献都有介绍^[1-7], 简单描述如下: 设有时间序列 $f(t)$ 及一组有参数 a, τ 构成的母小波 $\psi_{a,\tau}(t)$, 其形式为:

$$\psi_{a,\tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (1)$$

式中 a, τ 为实数, 分别称为尺度参数和平移参数。由 $f(t)$ 与 $\psi_{a,\tau}(x)$ 的卷积构成小波变换:

$$K_{a,\tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) f(t) dt \quad (2)$$

收稿日期: 2008-06-11; 修回日期: 2008-07-14

基金项目: 中国博士后科学基金项目(20070421132); 三峡大学资助项目(2007KF12)

作者简介: 邹良超(1987-), 男, 湖北宜昌人, 主要研究方向为气候变化的统计分析, 电话: 15871572865, E-mail: zoule@126.com

上式将一维时间函数 $f(t)$ 展开为一个二维参数空间 (a, τ) , 从而形成一种能在时间坐标位置 τ 和尺度 (时间周期) a 上具有变化的小波系数 $K_{a,\tau}(t)$ 的一种度量。根据积分中值定理, 上式的离散形式为:

$$K_{a,\tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Delta t \sum_{i=1}^n \psi\left(\frac{i\Delta t - b}{a}\right) f(i\Delta t) \quad (3)$$

式中, Δt 为取样间隔, n 为样本空间。

小波方差分析是小波分析的重要内容, 小波方差反映了能量随时间尺度的分布, 可以确定一个时间序列中各种尺度扰动的相对强度, 对应峰值处的尺度称为主要时间尺度, 用以反映时间序列的主要周期。其计算式为:

$$w(a) = \int_{-\infty}^{\infty} |K(a, \tau)|^2 d\tau \quad (4)$$

MHF (墨西哥帽函数) 的表达式为:

$$\psi(t) = \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \pi^{-\frac{1}{4}}\right) (1-t^2) e^{-\frac{t^2}{2}} \quad (5)$$

联合 (3) 式和 (5) 式可得到小波变换结果。从而将一个一维信号在时间和频率两个方向上展开, 这样就可以气候系统的时间-频率结构做细化分析。

为了减小边界效应, 一般将资料向前和向后延拓一个样本长度^[4-8]。变换后再将延拓部分舍去。

2 分析与讨论

2.1 济南冬季月平均气温变化的多时间尺度特征和突变分析

1951~2006 年, 济南冬季月平均气温的平均值为 0.824 °C, 变化比较明显, 其每 10 a 冬季月平均气温距平见表 1。由表 1 可见, 1951~1980 年冬季月平均气温距平为负值, 说明期间冬季平均气温偏低, 而 1981~2006 年冬季月平均气温距平为正值, 说明期间冬季平均气温偏高, 特别在 20 世纪 90 年代冬季月平均气温上升幅度较大。从图 1 中可以看出, 1951~2006 年, 济南冬季月平均气温变化呈上升趋势, 倾向率为 0.431 °C/10 a, 幅度较大。

表 1 济南每 10 a 冬季月平均气温距平

Tab.1 The mean winter temperature anomalies per 10 a in Jinan

年份	冬季月平均气温距平 (°C)
1951~1960	-0.800
1961~1970	-0.860
1971~1980	-0.097
1981~1990	0.213
1991~2000	1.186
2001~2006	0.598

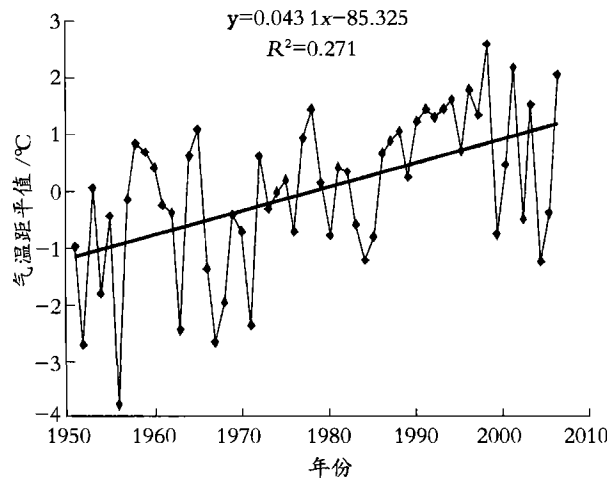


图 1 济南冬季平均气温距平时间序列及趋势变化

Fig.1 The average winter temperature anomalies time series and trends changing in Jinan

图 2 显示出了济南近 60 a 来冬季月平均气温在不同时间尺度上的周期震荡。图 2 (a) 是对应尺度

为 1~18 a 区间的等值线, 图 2 (b) 对应尺度为 1~4 a 区间的等值线。从图 2 中可以看出, 图的上部等

值线相对稀疏, 对应较长尺度周期的振荡 (低频振荡), 而下部等值线相对密集, 对应较短尺度周期的振荡 (高频振荡)。20 世纪 50 年代以来, 济南冬季月平均气温的各种时间尺度周期变化在时间域中的分布有差异, 各个时期的主要振动周期是变化的。最明显的几个振动周期在 5, 18 a。以 5 a 为周

期振动时, 最强的几个振动中心分别在 50 年代前期、60 年代前期和后期、70 年代后期以及 80 年代中期。以 18 a 为周期振动时, 最强的振动中心主要在 60 年代和 90 年代中期, 且直到 2006 年等值线仍未闭合, 说明在未来一段时间内济南冬季月平均气温仍将持续偏高。

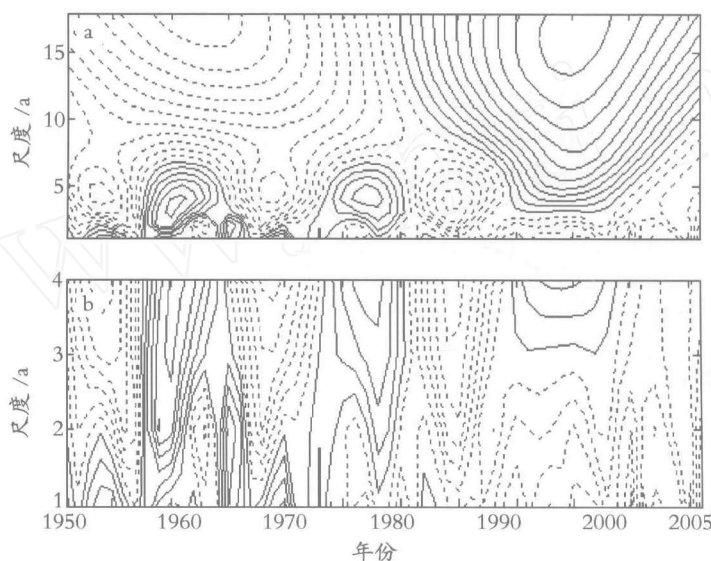


图2 济南冬季月平均气温距平 MFH 小波变换结果

Fig.2 The mean temperature anomalies MFH wavelet transforms during winter in Jinan

实线为正值, 虚线为零和负值, 等值线间隔为 0.4 (图 6 同)

Solid lines are positive isotimic, dash lines are negative isotimic or zero, and isotimic interval is 0.4 (the same as Fig.6)

由 (4) 式计算小波方差 (图 3) 也可以看出,

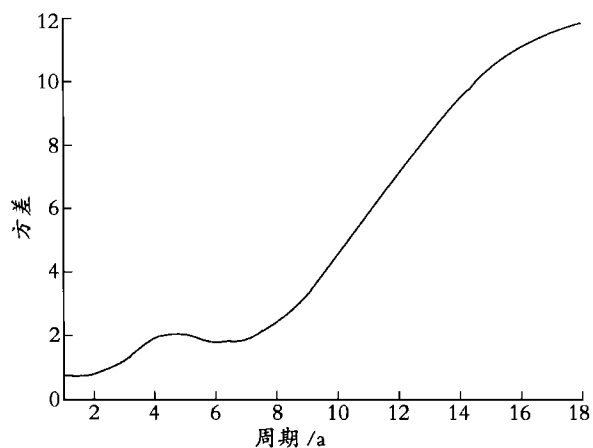


图3 济南冬季月平均气温距平变化的MFH小波方差

Fig.3 The MFH wavelet variance of mean temperature anomalies during winter in Jinan

在 1952~2006 年整个时间域内, 济南冬季月平均气温变化在较短周期中以 5 a 周期振动相对较强, 在较长周期中, 能量逐渐增大, 其中以 18 a 周期振动最强, 为主要时间周期。

由于 MFH 小波变换系数对某一时间尺度过零点的位置是对应于该时间尺度下的气候突变点。为了清晰地反映济南冬季平均气温距平的突变点, 作者选取尺度参数 a 分别取 18,9,6,3 时的变换结果, 来分析济南冬季月平均气温距平的突变点。将图 4 中反映的突变点列于下表中。由表 2 和图 4 可以看出: 在 $a=18$ 的尺度上, 济南冬季月平均气温突变点有 1 个, 突变性质是由冷变暖。在 $a=9$ 的尺度上, 济南月冬季平均气温突变点有 2 个, 突变性质依次是由冷变暖 (1983 年) — 由暖变冷 (2005 年)。在 $a=6$ 的尺度上, 济南冬季月平均气温突变点有 6 个,

突变性质依次是由冷变暖（1957 年）—由暖变冷（1964 年）—由冷变暖（1974 年）—由暖变冷（1980 年）—由冷变暖（1988 年）—由暖变冷（2002 年）。在 $a=3$ 的尺度上，济南冬季月平均气温突变点仍为 7 个。由以上结果可以看出，在不同的尺度下，对应小波系数的波形都相似，突变点大体吻合，随着尺度的细化，突变点有所增加，说明在更小的尺度上更具体的反映出了济南冬季月平均气温距平的局部变化特征，即在短时期内济南冬季月平均气温的变化存在波动性，但在较长时期内还是具有整体变化趋势。同时在变化趋势中可以看出在未来一段时间，济南冬季月平均气温大体虽将持续偏高，但

有转低的趋势。

表 2 济南冬季月平均气温距平在不同尺度下的突变点
Tab. 2 Jump points of mean temperature anomalies at different time scales during winter in Jinan

a	突变 点数	出现年份
18	1	1979
9	2	1983 2005
6	6	1957 1964 1974 1980 1988 2002
3	6	1957 1966 1972 1981 1988 1999

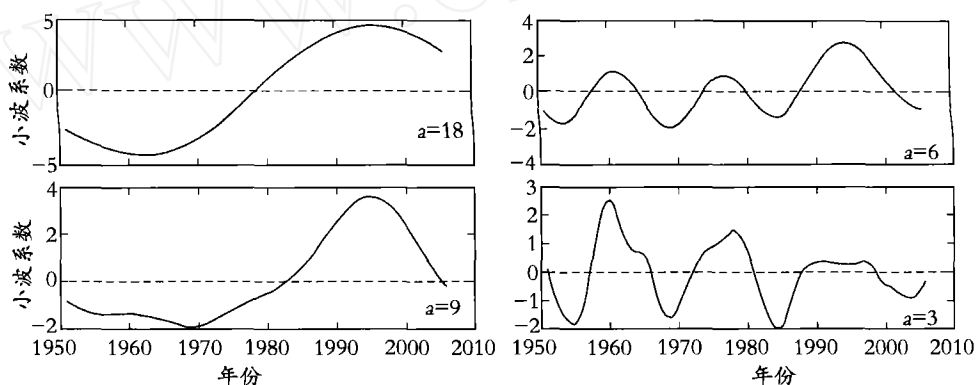


图 4 济南冬季月平均气温距平不同尺度小波变换结果

Fig.4 The results of wavelet transform of mean temperature anomalies at different time scales during winter in Jinan

2.2 威海成山头冬季月平均气温变化的多时间尺度特征和突变分析

1951~2006 年，威海成山头冬季月平均气温的平均值为 0.824°C ，变化比较明显，其每 10 a 冬季月平均气温距平见表 3。由表 3 可见，1951~1980 年冬季月平均气温距平为负值，说明期间冬季平均气温偏低，而 1981~2006 年冬季月平均气温距平为正值，说明期间冬季平均气温偏高，特别在 20 世纪 90 年代冬季月平均气温上升幅度较大。从图 5 中可以看出，1951~2006 年，威海成山头冬季月平均气温变化呈上升趋势，倾向率为 $0.359^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ，幅度较大。

图 6 显示出了威海成山头近 60 a 来冬季月平均气温在不同时间尺度上的周期震荡。图 6 (a) 是对应尺度为 1~18 a 区间的等值线，图 6 (b) 对应尺

度为 1~4 a 区间的等值线。从图中可以看出，20 世纪 50 年代以来，威海成山头冬季月平均气温的各种时间尺度周期变化在时间域中的分布有差异，各个时期的主要振动周期是变化的。最明显的几个

表 3 威海成山头每 10 a 冬季月平均气温距平

Tab.3 The mean winter temperature anomalies per 10 a in Weihai Chengshantou

年份	冬季月平均气温距平($^{\circ}\text{C}$)
1951~1960	-0.526
1961~1970	-0.740
1971~1980	-0.076
1981~1990	0.127
1991~2000	0.907
2001~2006	0.617

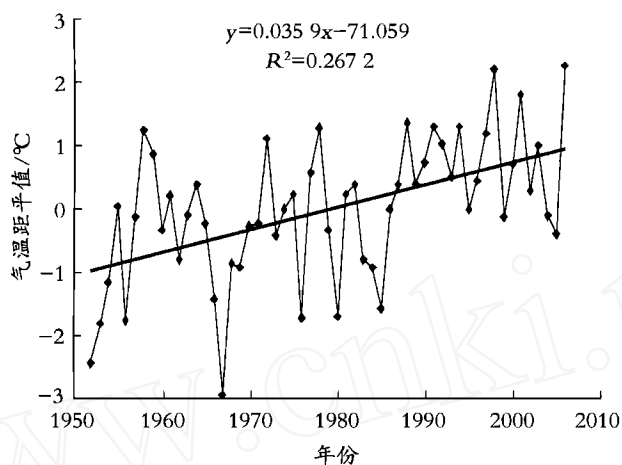


图5 冬季平均气温距平时间序列及趋势变化

Fig.5 The average winter temperature anomalies time series and trends changing in Weihai Chengshantou

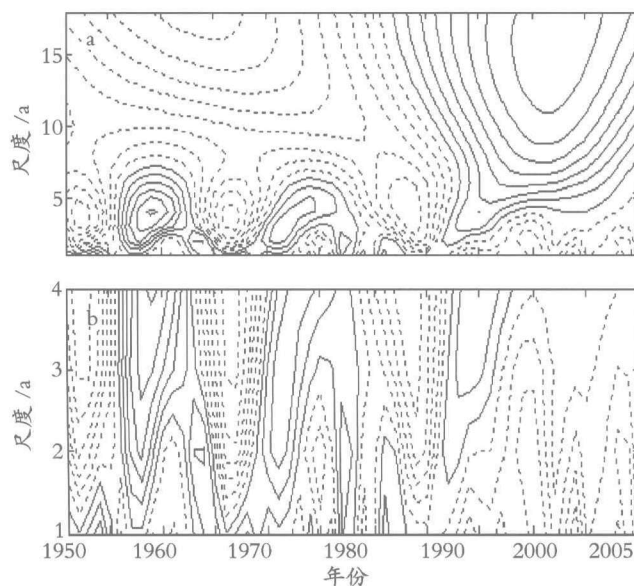


图6 威海成山头冬季月平均气温距平小波变换结果

Fig.6 The mean temperature anomalies MHF wavelet transforms during winter in Weihai Chengshantou

振动周期在 4, 18 a。以 4 a 为周期振动时, 最强的几个振动中心分别在 50 年代前期和后期、60 年代后期、70 年代前期以及 80 年代前期。以 18 a 为周期振动时, 最强的振动中心主要在 60 年代和 90 年代中期, 且直到 2006 年等值线也仍未闭合, 说明在未来一段时间威海成山头冬季月平均气温仍将保

持偏高。

由威海成山头冬季月平均气温距平变化的 MHF 小波方差 (图 7) 可以看出, 在 1952~2006 年整个时间域内, 威海成山头冬季月平均气温变化有两个峰值, 在较短周期中以 4 a 周期振动相对较强, 在较长周期中以 18 a 周期振动最强, 主时间

周期为 18 a，能量也逐渐增大。

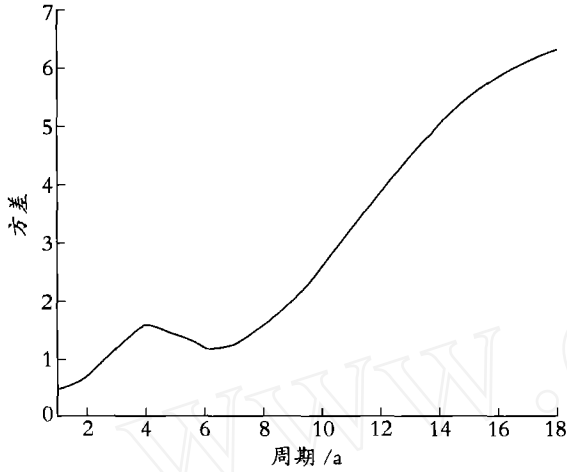


图 7 威海成山头冬季月平均气温距平变化的 MHF 小波方差

Fig.7 The MHF wavelet variance of mean temperature anomalies during winter in Weihai Chengshantou

将图 8 中反映的突变点列于下表 4 中。由表 4 和图 8 可以看出：在 $a=18$ 的尺度上，威海成山头冬季月平均气温突变点有 1 个，突变性质是由冷变暖（1982 年）。在 $a=9$ 的尺度上，威海成山头冬季月平均气温突变点有 1 个，突变性质依次是由冷变暖（1987 年）。在 $a=6$ 的尺度上，威海成山头冬季月平均气温突变点有 5 个，突变性质依次是由冷变

暖（1957 年）—由暖变冷（1965 年）—由冷变暖（1972 年）—由暖变冷（1978 年）—由冷变暖（1988 年）。在 $a=3$ 的尺度上，威海成山头冬季月平均气温突变点增加至 8 个。由以上结果同样可以看出，在不同的尺度下，对应小波系数的波形都相似，突变点大体吻合，随着尺度的细化，突变点逐渐增加，说明在更小的尺度上更具体的反映出了威海成山头冬季月平均气温距平的局部变化特征，即在短时期内威海成山头冬季月平均气温的变化存在波动性，但在较长时期内还是具有整体变化趋势。同样在变化趋势中可以看出在未来一段时间，威海成山头冬季月平均气温虽然仍将保持偏高，但有转低的趋势。

表 4 威海成山头冬季月平均气温距平在不同尺度下的突变点

Tab.4 Jump points of mean temperature anomalies at different time scales during winter in Weihai Chengshantou

a	突变点 数	出现年份
18	1	1982
9	1	1987
6	5	1957 1965 1972 1978 1988
3	8	1957 1965 1970 1981 1988 1993 1998 2002

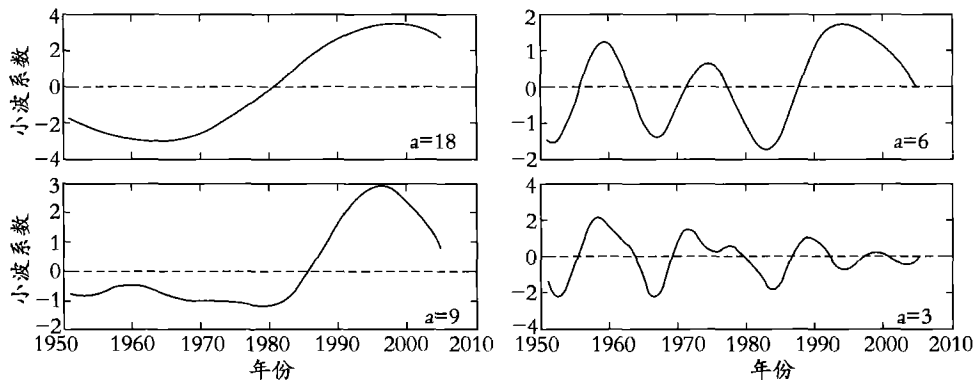


图 8 威海成山头冬季月平均气温距平不同尺度小波变换结果

Fig.8 The results of wavelet transform of mean temperature anomalies at different time scales during winter in Weihai Chengshantou

2.3 异常值（极端气候）分析

将冬季平均气温偏离整个时间域平均值 300% 以上的年份定义为气候异常点，即出现极端气候，一般出现于小波变换的等值线中心。

表 5 是济南威海成山头近 60 a 来的冬季月平均气温出现异常的年份。其中，1956 年为济南近 60 a 来冬季气温最低的一年，偏离平均值-460.1%，而威海成山头近 60 a 来冬季气温最低的一年为 1967 年，偏离平均值-553%。1998 年为济南近 60 a 来冬季气温最高的一年，偏离平均值 312.7%，而威海成

山头近 60 a 来冬季气温最高的一年为 2006 年，偏离平均值 428.3%。济南冬季平均气温极冷点主要分布在上个世纪 50 年代和 60 年代，而极暖点主要分布在上世纪末和本世纪初。威海成山头冬季平均气温极冷点主要分布在 20 世纪 50 年代、60 年代和 80 年代前期，而极暖点同样主要分布在上世纪末和本世纪初。两地在冬季气温出现异常时，阶段性和群发性都比较明显。

表 5 济南威海成山头近 60 a 冬季月平均气温异常年份

Tab.5 Abnormal years of monthly winter temperature in recent 60 a of Jinan and Chengshantou

济南				成山头			
极冷年份	偏离平均值 百分比 (%)	极暖年份	偏离平均值 百分比 (%)	极冷年份	偏离平均值 百分比 (%)	极暖年份	偏离平均值 百分比 (%)
1952	-330.6	1998*	312.7	1952	-458.7	1998	416.0
1956*	-460.1			1953	-339.1	2001	340.5
1967	-326.6			1956	-332.8	2006*	428.6
				1967*	-553.1		
				1976	-326.5		
				1979	-320.3		

注：*表示出现极值的年份

3 结论

近 60 a 来，济南冬季年平均气温（0.82 °C）比威海成山头冬季年平均气温（0.53 °C）高，济南和威海成山头两地冬季气温都有明显的上升趋势，倾向率分别为 0.431 °C/10 a 和 0.359 °C/10 a。

两地冬季气温在较大时间尺度上，突变点位置比较接近，在较小时间尺度上，演变略有差异，济南冬季气温变化比威海成山头略快。

在振动周期上，济南的冬季平均气温变化以 5，18 a 左右周期振动较强，威海成山头的冬季平均气温变化以 4，18 a 左右周期振动较强。

在未来一段时间内，济南和威海成山头两地冬季气温虽然仍将保持偏高状态，但都有转低的趋势。

出现极端气候时群发性和阶段性明显，成山头的气候偏离平均值程度较大，说明成山头出现极端气候时情况更加恶劣。

参考文献：

- [1] 邓自旺,尤卫红,林振山.小波变换在全球气候多时间尺度变化分析中的应用[J].南京气象学院学报,1997,20(10): 505-510.
- [2] 胡增臻,石伟.子波变换在大气科学中的应用研究[J].大气科学,1997,21(1): 58-72.
- [3] 秦前清, 石伟.实用小波分析[M].西安: 西安电子科技大学出版社, 1993.38-56.
- [4] 邵晓梅,许月卿,严昌荣.黄河流域降水序列变化的小波分析[J].北京大学学报(自然科学版), 2006,42(4): 503-509.
- [5] 覃军,张录军,胡江林.武汉近百年来气温变化的多时间尺度分析[J].气象科学,2001,21(2): 206-219.
- [6] 刘德,李永华,何卷雄.重庆市夏季气温及降雨变化的小波分析[J].高原气象, 2003, 22(2): 173-178.
- [7] 葛哲学, 沙威.小波分析理论与 MATLAB R2007 实现

[M].北京:电子工业出版社,2007.38-72.

Wavelet analysis of variations of recent 60 years winter temperatures in Jinan and Weihai Chengshantou

ZOU Liang-chao¹, XIAO Shang-bin^{1,2}, NI Lin¹, ZHANG Jing-sui¹

(1. China Three Gorges University, Yichang 443002,China;2. Insitute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710075,China)

Received:Jun.,18,2008

Key words : winter temperature ; climate tend-rate; MHF wavelet ; climate variation

Abstract: Based on the monthly mean winter temperature data from 1951 to 2006 of Jinan and Chengshantou climate-stations. The multi-time scales characteristics of winter temperature and the extreme climate had been analyzed using MHF(Mxican Hat Function).It was shown that the average temperature in winter of Jinan (0.82 °C) was higher than that in Chengshantou (0.53 °C) ; in recent 60 years, the tend-rates of winter temperature in Jinan and Chengshantou were 0.431 °C/10 a and 0.359 °C/10 a respectively; the mutation positions were chosen to each other in larger time scales; in smaller time scales,the evolution showed some sightly differences;the winter temperature changes of Jinan was slightly faster than that of Chengshantou ; 5 a,18 a period-oscillation of winter temperature variations in Jinan is the strongest, and 4 a,18 a period-oscillation of summer precipitation variations in Chengshantou is the strongest; in the coming period, winter temperatures of the two places may still be high,but have a lowering trend; throughout the whole time,the extreme weather contains obvious staggered features;the extreme weather in Chengshantou was even worse than in Jinan.

(本文编辑: 刘珊珊)