

文章编号: 1000-2022(2003) 05-0677-08

三江平原地区开、封江时间与当地气候变化的关系

刘莉红¹, 郑祖光¹, 吕桂华²

(1. 中国气象局培训中心, 北京 100081; 2. 黑龙江省佳木斯市气象局, 黑龙江 佳木斯 154004)

摘要: 使用 MaxHat 小波和 Haar 小波变换分析了三江平原地区开江和封江时间与当地前期气候变化的关系, 结果表明: 3 月份温度与开江时间有良好的相关, 8 月份的温度和降水、10 月份气温以及 9-10 月的降水与封江时间有较好的相关。

关键词: MaxHat 小波; Haar 小波; 开江时间; 封江时间

中图分类号: P468 **文献标识码:** A

三江平原位于黑龙江省东北部, 是由黑龙江、乌苏里江和松花江汇流而成。三江水量充沛, 水运对当地经济发展起着重要作用。佳木斯市位于三江平原腹地, 它的地理、水文和气象状况对三江平原有一定的代表性。通常该市的河流封冻期(即封江)在 11 月, 解冻期(即开江)在 4 月。每年开江、封江的时间有早有晚。在过去的 50 a 里, 佳木斯的开江时间最早的是 4 月 5 日, 最晚的是 4 月 23 日; 封江时间最早的是 11 月 6 日, 最晚的是 12 月 5 日, 相差大约一个月。由水文和气象的实践知, 开江和封江的早晚与前期气候有某种联系。为了深入分析、了解二者的联系, 本文选用佳木斯的气象和水文资料, 首先将这些原始资料序列转化为距平序列, 然后从分析资料入手, 再用小波分析的方法来研究开江、封江时间的早晚及其与当地前期气候背景的联系, 以期用气象资料来预测开江和封江的时间, 这对当地的航运业以及旅游业都很有意义。

1 对开江问题的分析

1.1 观测资料的分析

选取佳木斯市 1951—2000 年的开江时间资料, 以及该市 1951—2000 年的 1—4 月气温和降水量资料。

图 1a 是佳木斯市 50 a 来开江时间序列的分析图。其中曲线() 是开江时间的距平曲线, 可以看出, 开江时间虽然都在 4 月, 但有早有晚: 最早的早 10 d (1959 年), 最晚的晚 8 d (1956 年和 1960 年)。为了看清楚变化的大趋势, 对原序列作了时间滑动平均, 曲线() 是 5 a 滑动平均曲线, 曲线() 是 10 a 滑动平均曲线。从曲线() 和() 看出, 从 20 世纪 50 年代初到世纪末, 开江时间经历了从偏晚(正距平)到偏早(负距平)的转折, 转折时间(距平接近零值)大约在 1976—1983 年。

收稿日期: 2002-09-15; 改回日期: 2003-01-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(49875018)

作者简介: 刘莉红(1970-), 女, 黑龙江伊春人, 助研, 硕士生, 研究方向: 天气动力学。

如何进一步确定这个转折年份呢? 以下应用小波分析来讨论这个问题。

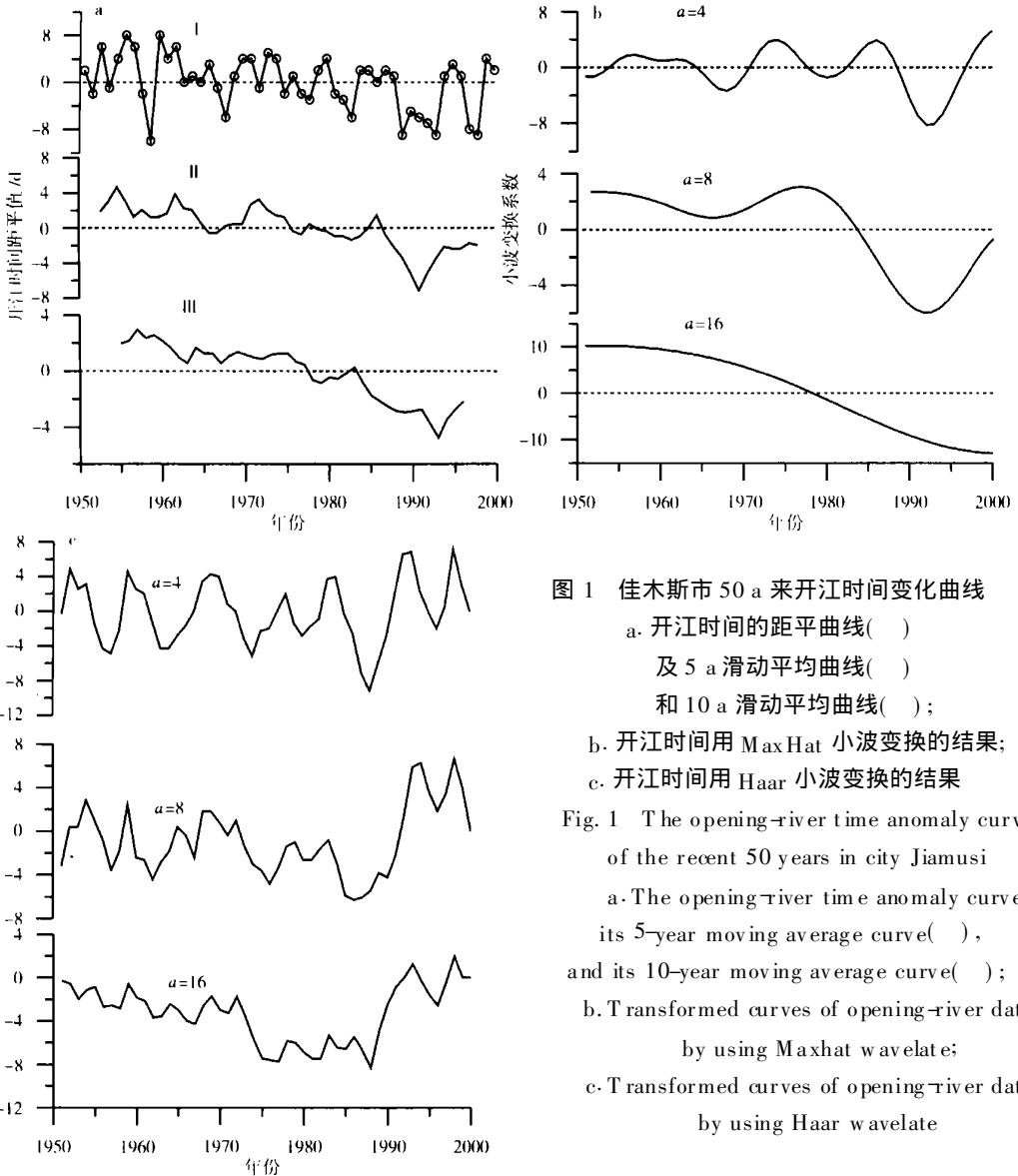


图 1 佳木斯市 50 a 来开江时间变化曲线

- a. 开江时间的距平曲线()
及 5 a 滑动平均曲线()
和 10 a 滑动平均曲线() ;
b. 开江时间用 MaxHat 小波变换的结果;
c. 开江时间用 Haar 小波变换的结果

Fig. 1 The opening-river time anomaly curve of the recent 50 years in city Jiamusi
a. The opening-river time anomaly curve(), its 5-year moving average curve(), and its 10-year moving average curve();
b. Transformed curves of opening-river date by using Maxhat wavelate;
c. Transformed curves of opening-river date by using Haar wavelate

1.2 小波分析基本原理及应用

小波分析包括小波变换和逆变换,是当前一个迅速发展的新的数学方法^[1]。它基于局部化思想,通过伸缩和平移等运算功能对信号进行多尺度细化分析,解决了 Fourier 变换若干难以解决的问题,有效地从信号(如水文、降水、温度等时间序列)中提取信息,从而被誉为“数学显微镜”。小波变换的功能之一是揭示原序列的转折点或突变点位置^[1],显现出复杂序列中不易被观察到的局部变化特征,即转折现象或突变现象。这种方法在气象上有广泛的应用^[2-6]。

小波分析的基本原理简述如下^[7]

若记 $\Psi(t)$ 为基本小波,则按如下方式生成小波函数族 $\{\Psi_{a,b}\}$

$$\Psi_{a,b}(t) = a^{-\frac{1}{2}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad b \in R, a \in R - \{0\}. \quad (1)$$

其中 a 是放大因子或称尺度参数, 它决定了小波函数的波形(宽度、峰度等); 因为 a 出现在式(1)的分母上, 故 a 的定义域应在实数域 R 内去掉零点及其邻域的值, 表示为 $a \in R - \{0\}$ 。 b 是平移因子, 它决定了小波函数所处的位置。 $\Psi_{a,b}(t)$ 具有平移和放大的特点。 一个信号或函数 f 的连续小波变换 $W_f(a, b)$ 定义为

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

文献[1]指出, 对于离散型信号集合(如气象、水文的时间序列), 进行小波变换时, 首先用某个光滑函数 $\theta(t)$ 作用(卷积)原序列 f_t , 使其成为具有光滑性的新函数 $f(t)$, 然后用这个 $\theta(t)$ 的一阶导数 $\left(\frac{d\theta}{dt}\right)$ 或二阶导数 $\left(\frac{d^2\theta}{dt^2}\right)$ 与 $f(t)$ 作卷积运算, 得到新函数 W_f 。 $\frac{d\theta}{dt}$ 和 $\frac{d^2\theta}{dt^2}$ 都可作为基本小波函数 $\Psi(t)$, 得到的 W_f 即小波变换的结果。 基本小波 $\Psi(t)$ 有不同形式, 相应的变换结果以及分析的着眼点也不相同。 用一阶导数作的小波变换 $W_f = \frac{d\theta}{dt} * f(t)$, 其最大(小)值对应于 $f(t)$ 的转折点或突变点; 而用二阶导数作的小波变换 $W_f = \frac{d^2\theta}{dt^2} * f(t)$, 其穿零点对应于 $f(t)$ 的转折点或突变点。 据此, 可用 W_f 来揭示原序列 f_t 的变化特征。 本文所用的 Haar 小波和 MaxHat 小波分别来源于某个光滑函数的一阶和二阶导数。

对于离散有限序列(长度为 N), 则有

$$W_f(a, b) = \frac{1}{C_b} a^{-\frac{1}{2}} \sum_{n=1}^N f(n) \overline{\Psi}\left(\frac{n-b}{a}\right). \quad (3)$$

其中 $\overline{\Psi}$ 是 Ψ 的共轭, $C_b = 2\pi \sum_{\omega=1}^{\hat{\Psi}(\omega)} \frac{\hat{\Psi}(\omega)^2}{\omega}$ 。 $b = 1, 2, \dots, n$; $\hat{\Psi}(\omega)$ 是 $\Psi(t)$ 的 Fourier 变换, ω 为频率。

对于二进型小波, 放大因子

$$a = 2^j, \quad j = 1, 2, \dots. \quad (4)$$

MaxHat 小波函数表达式为

$$\Psi(t) = (1 - t^2) \frac{1}{2\pi} e^{-\frac{t^2}{2}}, \quad -1 < t < 1. \quad (5)$$

$\Psi(t)$ 是由高斯函数二阶导数得来的。 用 MaxHat 小波函数得到的变换曲线图上, 原函数 $f(t)$ 的上升转折点(或突变点)对应 W_f 由下而上的穿零点(穿过横轴); 下降转折点(或突变点)则对应由上而下的穿零点。

Haar 小波函数的表达式为

$$\Psi(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t < \frac{1}{2}; \\ -1, & \frac{1}{2} \leq t < 1; \\ 0, & \text{其他。} \end{cases} \quad (6)$$

它是样条函数的简化形式。 用 Haar 小波函数得到的变换曲线图上, 原函数 $f(t)$ 的上升转折点(或突变点)对应 W_f 的峰点; 下降转折点(或突变点)则对应谷点。 对开江时间距平资料分别向前和向后拓延一个样本长度来做小波分析, 计算后, 再舍去所拓延的部分, 只保留中间的部分,

这样做可以减少边界效应的影响^[3]。

图 1b 是用 MaxHat 小波对开江时间序列进行变换的结果。当放大因子 $a=8$ 时, 变换得到的曲线的穿零点在 1983 年。当 $a=16$ 时, 穿零点在 1977 年。二者有差别, 这是不同放大因子下穿零点的“漂移”。综合来看, 开江时间在 1980 年前后有一次转折, 即由偏晚转为偏早。 $a=4$ 的变换结果除有 1977 年和 1983 年两个穿零点外, 还有其他几个穿零点。

图 1c 是用 Haar 小波对开江时间序列进行变换的结果。从大的时间尺度($a=16$)看, 变换曲线在 1975—1988 年处于低谷, 这对应着开江时间序列在大的尺度上有一次较为平缓的转折。

1.3 开江时间与当地气候背景的联系

从气候系统理论上讲, 对于特定的地域, 水文情况与气候情况有着密切的联系。从气象实践中知, 每年 4 月份开江日期的早晚与三江平原当年 2、3 月份的气温有一定的关联。据此本文分析 2、3 月份的气温和降水的观测资料, 进而与开江早晚联系起来。

图 2a 是 3 月份气温距平序列曲线图。其中曲线()是 3 月份气温变化的距平曲线, 曲线()是 5 a 滑动平均曲线, 曲线()是 10 a 滑动平均曲线。从滑动时间曲线的总趋势看, 3 月份气温经历了由偏冷到偏暖的转折, 转折时间在 1974—1983 年, 这个时间正对应着开江时间由偏晚到偏早的转折。

图 2b 是用 MaxHat 对 3 月份气温序列进行变换的结果, 可以看出, 在 $a=4$ 时, 有两个穿零点值得注意, 即 1973 年和 1978 年。 $a=16$ 时, 只有一个穿零点, 在 1977 年, 表明气温在此前后发生转折。

图 2c 是用 Haar 小波变换的结果。从 $a=16$ 看, 1977—1983 年曲线处于峰值, 对应着这段时间气温从偏低转向偏高。

用同样的方法分析 2 月份气温变化的情况(图略), 可以得到与图 2 类似的结论。

计算了开江时间与 2、3 月份气温的相关系数, 大小分别是 -0.350 和 -0.652 , 且通过 $0.01 \sim 0.05$ 显著性检验, 说明开江时间与 2、3 月份气温的变化有很大的关系。

2 对封江问题的分析

2.1 观测资料的分析

选取佳木斯市 1951—2000 年的封江时间资料, 以及该市 1951—2000 年的 8—10 月气温和降水量资料。图 3a 是佳木斯市 50 a 来封江时间序列的分析图。其中曲线()是佳木斯市 1951—2000 年的封江时间距平曲线, 可以看出各年的封江时间差别很大, 最早的早 16 d(1976 年), 最晚的晚 13 d(1994 年)。曲线()是 5 a 滑动平均曲线, 曲线()是 10 a 滑动平均曲线。从时间滑动平均曲线()和()可以看出, 存在两个转折时间: 50 年代初到 1976 年, 由偏晚转为偏早, 转折时间在 1965 年前后; 1976 年到上世纪 90 年代末由偏早转为偏晚, 转折点在 1984 年。此外, 1988 年到 20 世纪末, 下降到正常。

图 3b 是用 MaxHat 小波变换的结果, 可以看出, 当 $a=8$ 时, 有两个穿零点: 1965 年和 1987 年; 当 $a=16$ 时, 则是 1965 年和 1990 年。综合分析, 两次转折分别在 1965 年和 1988 年前后。前者(1965 年)对应得很好。

图 3c 是用 Haar 小波变换的结果, 从 $a=8$ 和 $a=16$ 看, 变换曲线的第一个低谷在 1963—1964 年, 第二个低谷大约在 1985 年前后。

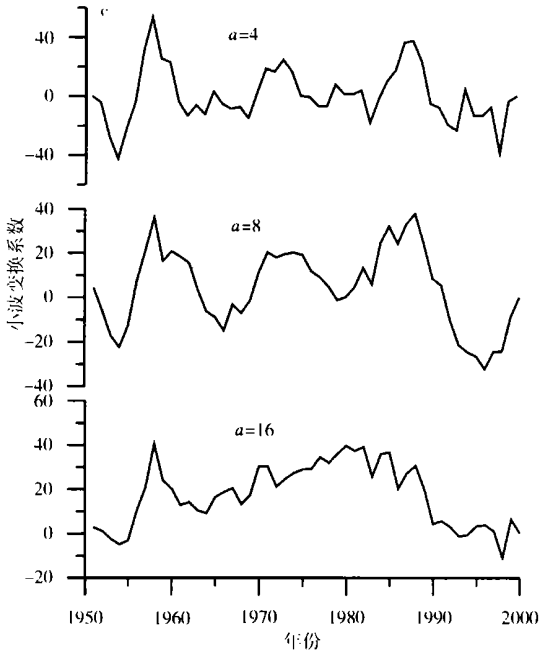
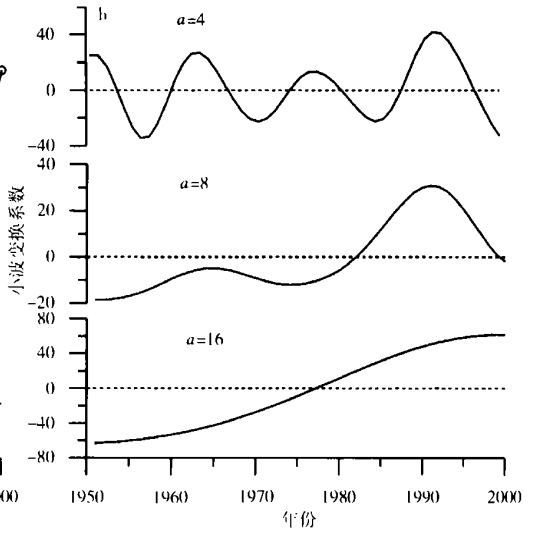
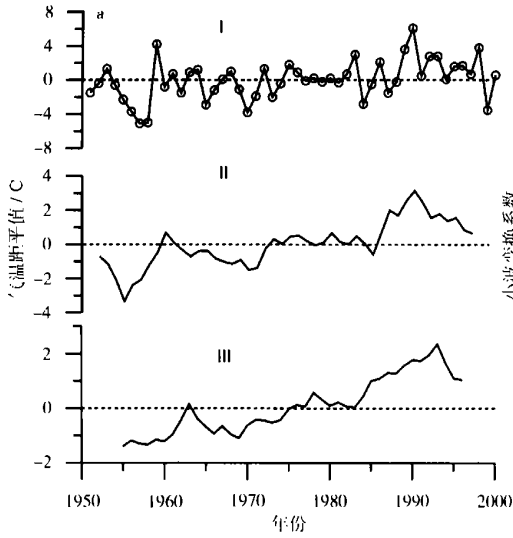


图 2 佳木斯市 3 月份气温变化的分析

a. 3 月份的距平曲线()

及 5 a 滑动平均曲线()

和 10 a 滑动平均曲线() ;

b. 3 月份气温用 MaxHat 小波变换的结果;

c. 3 月份气温用 Haar 小波变换的结果

Fig. 2 The temperature changes of March of the recent 50 years in city Jiamusi

a. The temperature change curve of March(), its 5-year moving average curve(), and its 10-year moving average curve();

b. Transformed curves of temperature changes by using Maxhat wavelat e;

c. Transformed curves of temperature changes by using Haar wavelate

2. 2 封江时间与当地气候背景的联系

如何把封江时间的早晚与前期(8—11月)的气候背景联系起来呢?为此,绘制了8—11各月的气温、降水的时间序列曲线图和小波变换图,通过比较发现8月份的气温和降水、10月气温以及9—10月的降水量与封江时间的变化联系较为紧密。图4是8月份气温距平序列的分析结果。

图4a中曲线()是8月份气温变化的距平曲线,曲线()是5a滑动平均曲线,曲线()是10a滑动平均曲线。从时间滑动曲线图上可以看出20世纪50年代到1973年由偏暖转为偏冷,转折点在1958年。1973—1985年由偏冷转偏暖,转折点在1980年。1987到上世纪90年代末,偏暖转正常。

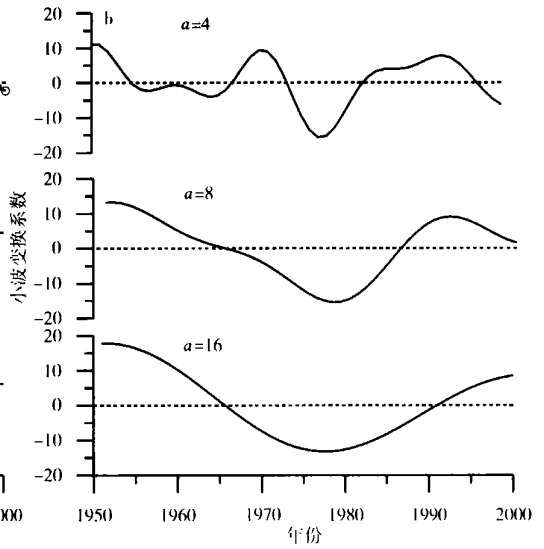
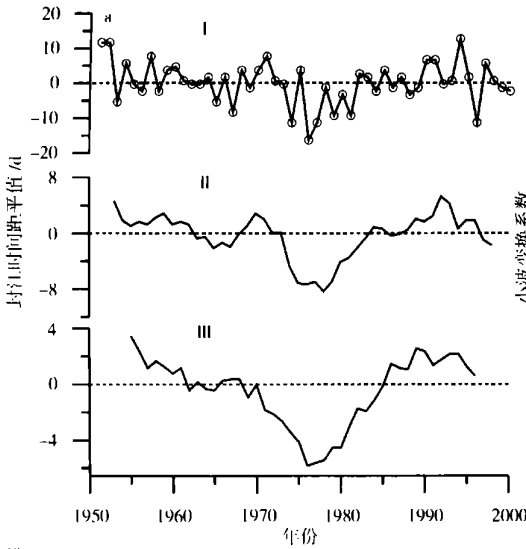


图 3 佳木斯市 50 a 来封江时间变化曲线

- a. 封江时间的距平曲线()
及 5 a 滑动平均曲线()
和 10 a 滑动平均曲线() ;
- b. 封江时间用 MaxHat 小波变换的结果;
- c. 封江时间用 Haar 小波变换的结果

Fig. 3 The closing-river time anomaly curve of the recent 50 years in city Jiamusi
 a. The closing-river time anomaly curve(), its 5-year moving average curve(), and its 10-year moving average curve();
 b. T transformed curves of closing-river date by using Maxhat wavelat e;
 c. T transformed curves of closing-river date by using Haar wavelate

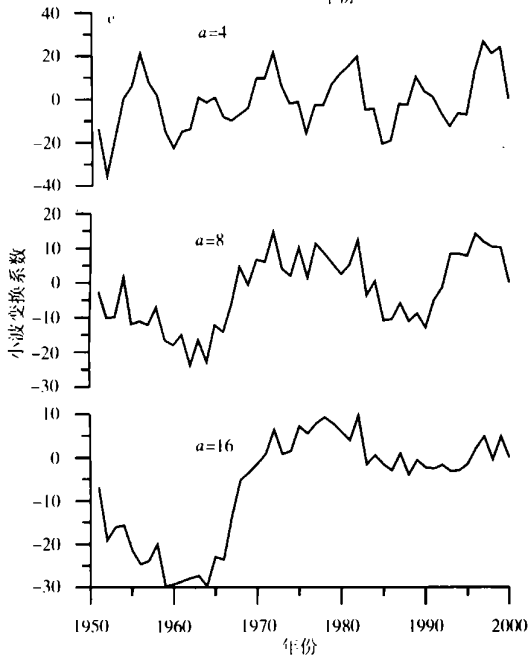


图 4b 是用 MaxHat 小波对 8 月份气温序列进行变换的结果, 可以看出 $a=8$ 时, 穿零点有 3 个: 1960、1980 和 1994 年。 $a=16$ 时, 穿零点有两个: 1963 和 1986 年。

图 4c 是用 Haar 小波变换的结果, 从 $a=8$ 和 $a=16$ 的变换曲线看出大致有两低一高: 低值在 1955—1958 年和 1992—1994 年; 高值在 1976—1979 年。 两个低值分别对应气温由高向低转折, 而高值则对应气温升高趋势。 用同样的方法分析其他气象要素资料与封江时间的联系 (图略), 可以得到与图 4 类似的结论。

为进一步验证上面的结论, 计算了封江时间与前期降水以及气温的相关系数, 降水通过 0.01 ~ 0.05 显著性检验的月份为 8 月(0.355) 和 9 月(0.337), 而气温通过 0.01 ~ 0.05 显著性检验的月份为 8 月(0.358) 和 10 月(0.313)。 因此可知, 封江时间与 8 月、10 月气温和 8 月、9 月降水的相关系数都较大, 且通过显著性检验。

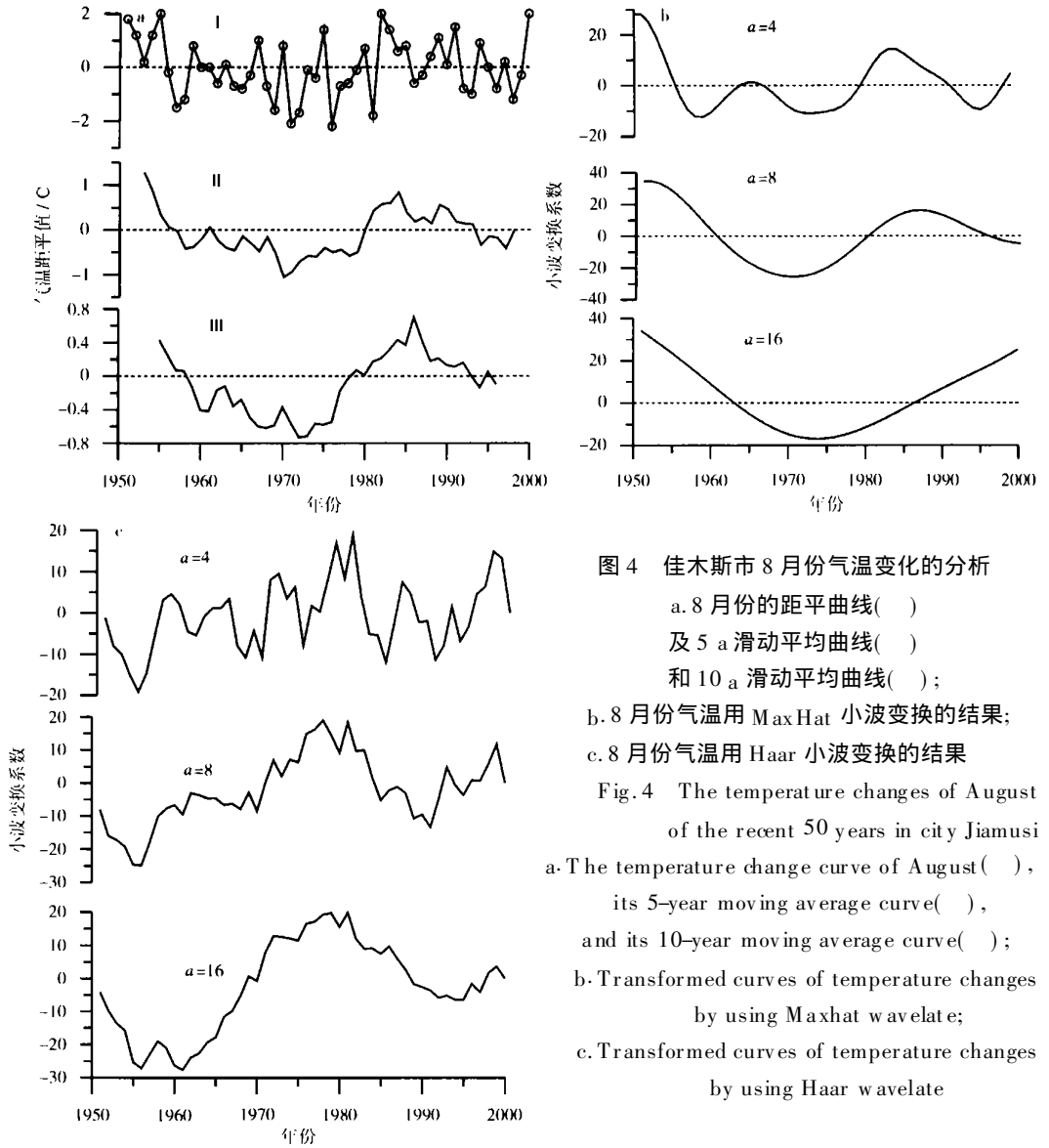


图 4 佳木斯市 8 月份气温变化的分析

a. 8 月份的距平曲线()

及 5 a 滑动平均曲线()

和 10 a 滑动平均曲线() ;

b. 8 月份气温用 MaxHat 小波变换的结果;

c. 8 月份气温用 Haar 小波变换的结果

Fig. 4 The temperature changes of August of the recent 50 years in city Jiamusi

a. The temperature change curve of August (), its 5-year moving average curve (), and its 10-year moving average curve ();

b. Transformed curves of temperature changes by using Maxhat wavelate;

c. Transformed curves of temperature changes by using Haar wavelate

3 结束语

本文以佳木斯市为例, 采用 MaxHat 小波和 Haar 小波变换的方法, 从分析资料入手, 揭示了三江平原地区开江和封江时间的转折性特征, 然后分析了开江和封江时间与当地前期气候变化的关系。结果表明: 开、封江时间变化的转折点位置与前期某些月份的气温和降水的转折点的位置是一致的, 且有很好的相关性。具体结论如下

(1) 开江时间与 2、3 月份气温的变化有很大的关系。2、3 月份温度偏高的年份开江时间偏早, 偏低的年份开江时间偏晚。

(2) 8 月份的温度偏高(或偏低), 封江时间将偏晚(或偏早)。此外, 封江时间的早晚还与 10

月气温和 8 月、9—10 月的降水有关。

(3) 小波分析具有确定时间序列的转折点或突变点的功能, 针对具体的水文、气象问题, 采用适当的放大因子 a , 能很好地揭示水文、气象时间序列的转折或突变的特征。本文得出的开江、封江时间与前期气候的关系, 可应用于根据当年前期气温、降水资料来预测开江、封江的时间。

需要说明, 小波变换的结果 (MaxHat 小波的穿零点或 Haar 小波的高、低值点) 对应的是序列曲线的转折或变化剧烈的地方, 这样的点与距平符号的转折 (偏晚转偏早或偏冷转偏暖等) 不是完全一致的, 这在分析时需要注意。

参考文献:

- [1] Mallat S. Wavelet transform maxima and multiscale edges [C] // Ruskai M B. Wavelets and their application. Paris: Jonec, 1992: 67-103.
- [2] 刘太中, 荣平平, 刘式达, 等. 气候突变的子波分析 [J]. 地球物理学报, 1995, 38(2): 158-162.
- [3] 林振山, 卞维林, 金龙, 等. 中国旱涝史料的层次分析 [J]. 气象学报, 1999, 57(1): 112-119.
- [4] 谢庄, 曹鸿兴, 李慧, 等. 近百余年北京气候变化的小波特征 [J]. 气象学报, 2000, 58(3): 362-369.
- [5] 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): 58-71.
- [6] 邓自旺, 林振山, 周晓兰. 西安市近 50 a 来气候变化多时间尺度分析 [J]. 高原气象, 1997, 16(1): 81-93.
- [7] 秦前清, 杨宗凯. 实用小波分析 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1994.

Relations of Opening-River and Closing-River Time with the Climate Change in the Three-River Plain

LIU Li-hong¹, ZHENG Zu-guang¹, LU Gui-hua²

(1. China Meteorological Administration Training Center, Beijing 100081, China;

2. Jiamusi Meteorological Bureau in Heilongjiang Province, Jiamusi 154004, China)

Abstract: Mexican Hat wavelet and Haar wavelet transform are used to analyze relations of opening-river and closing-river time with preutous climate changes in the Three-River Plain. Results show that the temperature of March is significantly to the time of opening-river, and the temperature and rainfall of August, the temperature of October, and the rainfall of September-October, are related to the time of closing-river.

Key words: Mexican Hat wavelet transform; Haar wavelet transform; opening-river time; closing-river time