

王焯, 李宁, 张正涛, 等. BFAST——一种分析气候极端事件变化的新方法[J]. 灾害学, 2016, 31(4): 196–199.
[WANG Ye, LI Ning, ZHANG Zhengtao, et al. BFAST——A New Method to Analyze Change of Climate Extremes[J]. Journal of
Catastrophology, 2016, 31(4): 196–199. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2016.04.035.]

BFAST——一种分析气候极端事件变化的新方法^{*}

王焯^{1,3}, 李宁^{1,2,3}, 张正涛^{1,3}, 张洁^{1,3}

(1. 北京师范大学 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875; 2. 北京师范大学 环境演变与自然灾害
教育部重点实验室, 北京 100875; 3. 民政部/教育部减灾与应急管理研究院, 北京 100875)

摘要: 为了分析北京气候变化对极端事件频次的影响, 采用 Mann-Kendall 突变检验方法对北京站 1952–2010 年年平均温度数据进行突变分析, 在不能成功地检测到北京年平均温度的突变情况时, 引入 BFAST 方法处理月平均温度时间序列, 这是由于月平均温度数据与年数据相比更加精细, 灾害或极端事件发生的情况在月数据上有更加良好的反映, 得到月平均温度的变化趋势和突变点后, 进一步探究北京极端高温事件频次的变化。研究结果显示, BFAST 监测到的气候变化趋势和突变点与极端高温频次的变化有较好的一致性, 它是一个判定气候变化情况和分析气候极端事件的有力工具。

关键词: M-K 突变检验; BFAST 方法; 气候变化; 极端高温事件

中图分类号: X43; P461 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000–811X(2016)04–0196–04

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2016.04.035

1900 年以来, 地球气候正经历一次以全球变暖为主要特征的显著变化。IPCC 第四次气候变化评估报告指出^[1], 1906–2005 年, 全球地面平均温度升高了 0.74 °C。随着全球变暖的进一步加剧, 中国极端天气事件频率和强度也发生了很大的变化, 由此引发的灾害对我国社会经济的影响日益加深。

因此, 研究气候变化的情况对极端天气事件及灾害的发生有很好的指示意义。气候变化对极端事件的影响问题得到了广泛关注, 特别是近 30 年来, 基于对气候系统各组分进行的观测试验, 借助数理统计学和物理动力学的理论方法, 在揭露气候变化的基本事实、探讨气候变化的规律性特点、摸索气候变化趋势预测的途径和方法等方面取得了许多成果^[2–3]。在以往的研究中, 常用 M-K 突变检验的方法去判定温度的变化趋势和突变点, 并进一步分析气候变化对灾害的影响, 取得了良好的效果。其适用范围往往是年数据, 比如年均温度, 年降水量等。白莹莹等^[4]应用 M-K 突变检验等方法, 利用重庆地区 1961–2006 年气象观测资料, 对重庆地表年平均气温距平的变化趋势和突变时间进行了检测, 研究了气候变化对

重庆高温的影响。结果表明, 重庆气温距平的突变出现在 1997 年, 增暖后, 极端高温事件发生频次增加趋势明显, 高温热浪风险显著上升。

本文在 M-K 突变检验方法不能成功检测到北京年平均温度的突变情况时, 引入 BFAST 方法处理北京 1952–2010 年逐月平均温度时间序列, 得到月平均温度的变化趋势和突变点, 并进一步探究北京极端高温事件频次的变化。引入 BFAST 方法, 有以下几个原因: ①灾害的数据往往是极端值, 年平均温度数据较大程度上平均掉了极端数据的值, 较难透过年数据的变化得出气象灾害或极端事件的变化, 而月平均温度数据与年数据相比更加精细, 灾害或极端事件发生的情况在月数据上有更加良好的反映, 为了让气候变化的结果更好地指示灾害及极端天气事件, 选取月数据描述气候变化; ②BFAST 以往常被用于将 NDVI 时间序列分解成趋势组分和周期组分, 进而判断植被指数的变化趋势和突变点^[5–7]及物候变化的情况, 它是一个能够有效地处理具有周期性特点的月平均温度数据的方法。③BFAST 方法不仅可以判定月数据的变化趋势和突变点, 也可以判定月数据的周期性变化, 判断月数据的波动情况。

^{*} 收稿日期: 2016–04–14 修回日期: 2016–06–13

基金项目: 国家自然科学基金项目“基于多维联合分布理论的灾害风险评估模型研究”(41171401); 中央高校基本科研业务专项资金项目; 地表过程与资源生态国家重点实验室项目(20152708)

第一作者简介: 王焯(1992–), 女, 辽宁鞍山人, 硕士研究生, 主要从事自然灾害研究。E-mail: 718933969@qq.com

1 资料和方法

1.1 资料

本文利用国家气象数据共享服务网提供的北京站(编号为 54511, 纬度为 39.8°N , 经度为 116.47°E)1952–2010 年逐月平均温度、年平均温度及日最高温度等观测资料。

1.2 方法

本文主要采用 M-K 突变检验方法, BFAST 方法, 一元线性回归等方法。即用 M-K 突变检验方法和 BFAST 方法分别探究北京 1952–2010 年气候变化的趋势与突变点, 利用一元线性回归的方法对突变前后北京市极端高温事件频次的变化情况进行趋势分析, 并做相关系数的显著性检验。

M-K 法是非参数检验方法^[8], 其优点是样本不需要遵从一定的分布, 也不受少数异常值的干扰, 适合于类型变量和顺序变量, 计算比较简便, 同时不需事先假定数据分布特征, 因此 M-K 法在趋势分析中得到了广泛应用。通常用于年数据的检测。对于具有 n 个样本量的时间序列 x , 构造一秩序列:

$$S_k = \sum_{i=1}^k r_i, \quad k=1, 2, \dots, n. \quad (1)$$

式中: 秩序列 S_k 是第 i 时刻数值大于 k 时刻数值的个数的累计数。在时间序列随机独立的假定下, 定义统计量:

$$UF_k = \frac{S_k - E_{(S_k)}}{\sqrt{\text{Var}_{(S_k)}}}, \quad k=1, 2, \dots, n. \quad (2)$$

式中: $UF_1=0$, $\text{Var}_{(S_k)}$ 和 $E_{(S_k)}$ 分别为累计数 S_k 的方差和均值。 $E_{(S_k)} = k(k+1)/4$, $\text{Var}_{S_k} = k(k-1)(2k+5)/72$ 。这里 UF_i 是标准正态分布, 它按时间序列 x 顺序 x_1, x_2, \dots, x_n 计算出的统计量序列, 给定显著性水平 α , 查正态分布表, 若 $|UF_i| > U_\alpha$, 则表明序列存在明显的趋势变化。

按时间序列 x 逆序 x_n, x_{n-1}, \dots, x_1 , 重复上述过程, 同时使 $UB_k = -UF_k$, $k=n, n-1, \dots, 1$, $UB=0$ 。如果 UF_k 和 UB_k 两条曲线出现交点且交点位于置信线之间, 则交点对应的时刻即是突变开始的时间。若 UF_k 或 UB_k 大于 0, 则表示序列呈上升趋势, 若 UF_k 或 UB_k 小于 0, 则表示序列呈下降趋势。当它们超过临界线时, 表示上升或下降的趋势显著, 如果 UF_k 、 UB_k 2 条曲线出现交点, 且交点在临界线之间, 那么交点对应的时刻便是突变的时间^[9-10]。但是当交点在临界线外时, 则需要借助其他方法来判断突变点。

BFAST 算法 (Breaks for Additive Seasonal and Trend, 加性周期和长期趋势分解与断点识别算法) 由 Verbesselt 等于 2010 年提出^[5], 最初被用于利用遥感数据进行植被干扰识别, 该算法适用广泛, 可被用于气象、水文^[11]、经济等领域。

其一般模式如(3)式所示:

$$Y_t = T_t + S_t + e_t. \quad (3)$$

式中: Y_t 是 t 时刻的观测数据, 即北京站月平均温度数据, T_t 是长期趋势组分, S_t 是周期组分, e_t 是余下的组分, t 为观测的时刻。通过计算, 将原始数据(Y_t)分解成为周期组分(S_t)、趋势组分(T_t)和余下组分(e_t), 分别找到其突变点。

长期趋势 T_t 使用线性模型进行分段拟合, 对于每一段 $t_i^* < t \leq t_{i+1}^*$, 定义 $t_0=0$, 拟合出的线性模型如下式所示:

$$T_t = \alpha_i + \beta_i t. \quad (4)$$

式中: i 为突变点所在的位置, 取值从 1 到 p , 总计 p 个突变点; 突变点两侧线性模型的截距 α_i 和斜率 β_i 可对突变的程度和方向以及渐变的斜率进行分析。

周期组分 S_t 使用周期模型进行分段拟合, 对于 $t_j^* < t \leq t_{j+1}^*$, 定义 $t_0=0$, 拟合出的周期模型如(5)式所示:

$$S_t = \sum_{k=1}^j \alpha_{j,k} \sin\left(\frac{2\pi kt}{f} + \delta_{j,k}\right). \quad (5)$$

式中: j 为突变点所在的位置, 取值从 1 到 q , 总计 q 个突变点; k 是周期模型中调和项的数目; $\alpha_{j,k}$ 为振幅; f 为频率; $\delta_{j,k}$ 为时相, 本研究使用的数据为北京 1952–2010 年月平均温度数据, f 为 12。

长期趋势和周期组分中的突变点识别需要确定突变点的数量和突变点在时间序列中的位置。这里使用基于最小二乘法的移动求和检验判断是否存在突变点, 使用贝叶斯信息论准则确定突变点的最优数量, 通过最小二乘法估计突变点在时间序列中的位置。具体步骤如下式所示。

第一步: 如果基于最小二乘法的移动求和检验表明趋势组分存在突变点, 趋势组分突变点的数量和位置由剔除周期组分的数据 $Y_t - S_t$ 估计。

第二步: 对于趋势组分中特定段的线性函数, 参数 α_i 和 β_i 可由基于 M 检验的回归模型确定, 每一段线性函数可由式(4)估计。

第三步: 如果基于最小二乘法的移动求和检验表明周期组分存在突变点, 周期组分突变点的数量和位置由剔除趋势组分的数据 $Y_t - T_t$ 估计。

第四步: 对于周期组分特定段的函数, 参数 $\alpha_{j,k}$ 和 $\delta_{j,k}$ 可由基于 M 检验的回归模型确定, 周期组分的每一段函数可由式(5)估计。

本研究中, BFAST 算法在 R 语言的 BFAST 软件包中实现^[12]。

2 结果分析

2.1 利用 M-K 突变检验方法来检测北京地区气候变化

本文利用 M-K 突变检验的方法分析北京站年平均温度数据, 图 1 为绘制出的 UF 、 UB 曲线图,

所得结果显示,在1980年以后,北京站年平均气温有逐年升高的趋势,在1990年以后,年平均气温上升趋势显著,但在给定显著性水平 $\alpha=0.05$ 的条件下,并未检测到突变点。

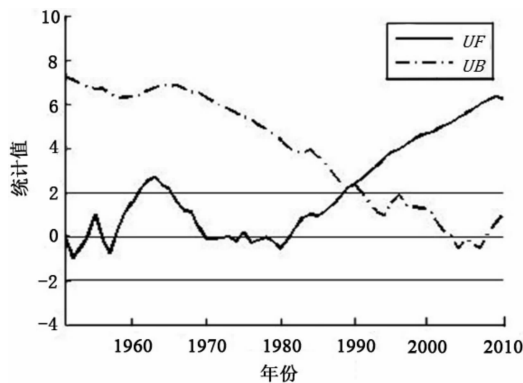


图1 北京地区年平均温度 M-K 曲线

2.2 利用 BFAST 来检测北京地区气候变化

图2为利用BFAST算法处理北京逐月平均温度时间序列(Y_t)得到的结果,原始数据被分解成为周期组分(S_t)、趋势组分(T_t)和余下组分(e_t)。

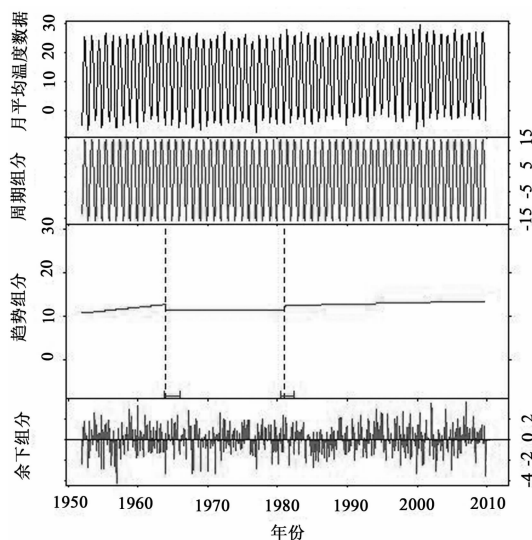


图2 北京地区月平均温度时间序列的分解与变化识别

趋势组分表示了北京市月平均温度的变化趋势,并展现了温度突变的情况。就趋势组分显示的突变情况来看,BFAST检测到两个突变点,分别发生在1964年1月和1981年2月。在1964年1月,北京市月平均温度突然降低;在1981年2月,北京市月平均温度突然升高。第一次突变发生在1963年11月到1966年9月的可能性为95%,第二次突变发生在1980年8月到1982年4月的可能性为95%。就趋势组分显示的变化趋势来看,在最初的1952-1964年间,北京市月平均温度以 $0.0092\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{月}$ 的幅度呈增加趋势;在发生第一次突变后的1964-1981年间,月平均温度维持较低水平,保持稳定状态,无显著变化($p>0.05$);在发生第二次突变的1981年以后,月平均温度以

$0.0032\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{月}$ 的幅度呈逐年升高的趋势,处在较高水平。

周期组分表示北京市月平均温度的波动情况,BFAST并没有检测到明显的变化,说明北京市月平均温度的波动幅度是比较稳定的。

2.3 北京地区极端高温事件的变化与突变点的关系

2.3.1 高温事件的选取

近年来对极端气候的研究日益增多,当天气状态严重偏离其平均态时被认为是不易发生的事件,在统计意义上称极端事件,关于极端气候事件并没有达成统一定义。目前,极端事件变化的研究多采用阈值法,超过阈值的即被认为是极值,该事件可被认为是极端气候事件。阈值一般可分为绝对阈值和百分比阈值两种,绝对阈值是指选取一个固定值作为极端事件中极值的阈值,例如气象上常常将日最高气温在 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上的日数称作高温日数;百分比阈值方法从概率统计的角度定义极端事件,该方法所定义的极端事件是统计意义上的小概率事件,极端程度一般对应于10%或90%的累积频率^[13]。

本文采用阈值法定义极端高温事件,参照翟盘茂等^[14]的定义,将北京站1952-2010年中同日最高温度资料按升序排列,得到该日最高温度的第90个百分位值,照此方法求出366个中的第90个百分位值,将其作为该日极端高温事件阈值。如果某日的最高温度高于该日的阈值,则认为该日出现了极端高温事件。

2.3.2 突变点前后极端高温频次的变化

根据北京市月平均温度突变的情况,将极端高温频次的变化分成三个时段,通过分析BFAST监测到的气候变化与极端高温频次变化的关系,我们可以看到,BFAST监测到的气候变化与极端高温频次变化具有较好的一致性(图3)。

第一,极端高温频次的变化与BFAST监测到的气候变化趋势一致。即在最初1952-1964年北京月平均温度上升时,极端高温频次也呈增加趋势;在北京月平均温度第一次突变后的1966-1980年,月平均温度维持在较低水平且变化不显著时,极端高温频次也维持在较低水平且变化不显著;在月平均温度第二次突变后的1981-2010年,月平均温度呈显著上升趋势时,极端高温频次也呈显著增加趋势,稳定增加了近30年,达到较高的水平。

第二,极端高温频次的变化与BFAST监测到的气候变化突变点基本一致。即在1964年,BFAST监测到北京月平均温度发生突变,突然降低,到1980年维持在较低水平,相对应的,极端高温频次在1964年和1966年大幅减小;在1981年,BFAST监测到北京月平均温度发生突变,突然升高,相对应的,极端高温频次在1981年大幅增加。

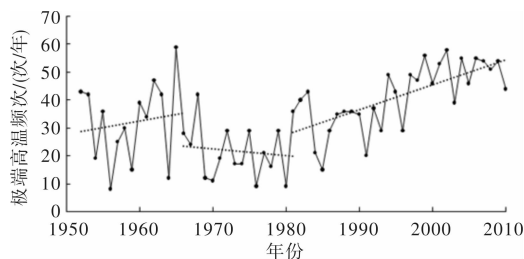


图3 北京极端高温频次随时间的变化

3 结论与讨论

本文用 BFAST 方法监测气候变化, 得到北京自 1952–2010 年月平均温度的变化趋势和突变点。通过对极端高温频次的研究发现, BFAST 监测到的气候变化趋势和突变点与极端高温频次变化有较好的一致性。

在以往的研究中, 常用 M-K 突变检验的方法检测年平均温度的变化趋势和突变点, 用滑动均方差的方法判断年平均温度的波动情况^[15], 而 BFAST 算法不仅可以检测温度变化趋势和突变点, 也能判别温度的波动情况。本文并未检测到周期组分存在波动的明显变化, 这是由于北京市位于暖温带北部地区, 非常接近中温带, 而根据以往的研究^[16], 中温带地区的气候波动振幅随时间变化很小, 保持较稳定状态。另外, BFAST 方法能够有效地处理具有周期性特点的月平均温度等数据, 月数据与年数据相比更加精细, 极端事件发生的情况在月数据上有更加良好的反映, 为了让气候变化的结果更好地指示灾害及极端天气事件, 选取月数据描述气候变化。综上, BFAST 作为一个判定气候变化情况和分析极端事件变化的有力工具, 有必要对其进行更加深入的研究。

参考文献:

- [1] Gray V. Climate Change 2007: The physical science basis summary for policymakers[J]. Energy & Environment, 2007, 18(3): 433–440.
- [2] 丁一汇, 张莉. 青藏高原与中国其他地区气候突变时间的比较[J]. 大气科学, 2008, 32(4): 794–805.
- [3] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术(第二版)[M]. 北京: 气象出版社, 2007.
- [4] 白莹莹, 高阳华, 张焱, 等. 气候变化对重庆高温和旱涝灾害的影响[J]. 气象, 2010, 36(9): 47–54.
- [5] Verbesselt J, Hyndman R, Zeileis A, et al. Phenological change detection while accounting for abrupt and gradual trends in satellite image time series[J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(12): 2970–2980.
- [6] Verbesselt J, Zeileis A, Herold M. Near real-time disturbance detection using satellite image time series[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 123: 98–108.
- [7] Verbesselt J, Hyndman R, Newnham G, et al. Detecting trend and seasonal changes in satellite image time series[J]. Remote sensing of Environment, 2010, 114(1): 106–115.
- [8] 周浩, 杨宝钢, 程炳岩. 重庆近 46 年气候变化特征分析[J]. 中国农业气象, 2008, 29(1): 23–27.
- [9] 刘光生, 王根绪, 胡宏昌, 等. 长江黄河源区近 45 年气候变化特征分析[J]. 资源科学, 2010, 32(8): 1486–1492.
- [10] 闫敏华, 邓伟, 陈泮勤. 三江平原气候突变分析[J]. 地理科学, 2003, 23(6): 661–667.
- [11] Wang F, Zhao G, Mu X, et al. Regime shift identification of runoff and sediment loads in the Yellow River Basin, China[J]. Water, 2014, 6(10): 3012–3032.
- [12] Zeileis A, Leisch F, Hornik K, et al. Strucchange. An R package for testing for structural change in linear regression models[J]. Journal of Statistical Software, 2002, 7(2): 1–38.
- [13] 杨萍, 刘伟东, 侯威. 北京地区极端温度事件的变化趋势和年代际演变特征[J]. 灾害学, 2011, 26(1): 60–64.
- [14] 翟盘茂, 潘晓华. 中国北方近 50 年温度和降水极端事件变化[J]. 地理学报, 2003, 9(S1): 1–10.
- [15] 郑祚芳, 陈家华, 祁文. 湖北省近 50 年气候变化特征分析[J]. 气象科学, 2002, 22(3): 279–286.
- [16] 史培军, 孙劭, 汪明, 等. 中国气候变化区划(1961–2010 年)[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(10): 2294–2306.

BFAST——A New Method to Analyze Change of Climate Extremes

WANG Ye^{1,3}, LI Ning^{1,2,3}, ZHANG Zhengtao^{1,3} and ZHANG Jie^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resources Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, Ministry of Education of China, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Ministry of Civil Affairs & Ministry of Education, Beijing 100875, China)

Abstract: To analyze the influence of climate change on the frequency of extreme events in Beijing, firstly, Mann-Kendall method is used to deal with annual average temperature data in 1952–2010 of Beijing station. Since abrupt change of the annual average temperature of Beijing was not successfully detected, BFAST is introduced to deal with the monthly average temperature time series, this is because monthly average data is more sophisticated compared with annual average data, disaster or extreme events can be better reflected on monthly data. The article further explores the changes of the frequency of extreme high temperature events in Beijing after gaining the trend and abrupt change of monthly average data. The results show that the climate change trend and abrupt change which BFAST detected is consistent with the change of the frequency of extreme high temperature events. BFAST is a powerful tool to determine climate change and to analyze climate extremes.

Key words: M-K test; BFAST; climate change; extreme high temperature events