

基于启发式分割算法检测华北和全球 气候变化的特征^{*}

龚志强¹⁾ 封国林^{2)†} 万仕全¹⁾ 李建平⁴⁾

1) (扬州大学物理科学与技术学院, 扬州 225009)

2) (国家气候中心气候研究开放实验室, 北京 100081)

3) (中国科学院大气物理研究所东亚区域气候-环境重点实验室, 北京 100029)

4) (中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体物理学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029)

(2005 年 5 月 10 日收到, 2005 年 6 月 14 日收到修改稿)

全球变化已成为当代科学界瞩目的新领域, 气候变化是其研究的核心内容之一, 它受到各国政府的极大重视. 气候突变是气候变化的重要表现形式之一, 目前对气候突变的研究主要针对代用资料, 运用传统的统计学方法进行处理, 尽管取得了不少进展, 但气候系统的非线性、多层次性和非平稳性对分析和检测气候突变的方法提出了较高的要求. 众所周知, 气候系统可能是由多个不同区域气候子系统构成的复杂体系, 因而局地 and 全球气候变化之间必然存在一定的内在联系, 但目前关于这方面研究的理论和方法还较少. 介绍了一种适合非线性和非平稳时间序列的突变检测新方法——启发式分割算法(BG 算法), 运用该方法对北半球树木年轮宽度和北京石花洞石笋微层厚度距平序列分别基于高频和低频进行处理, 试图区分不同性质的突变, 揭示其变化的物理机理. 定义了新的物理量——突变密度, 对比前后千年内突变的疏密分布特点, 就人为因素对气候变化可能产生的影响作初步探讨. 对树轮和石笋资料的高频序列从不同的角度进行检测和分析, 进而以华北气候变化的特征为例, 研究局地和全球气候变化之间的内在的联系.

关键词: 突变, 启发式分割算法, 人为变率, 小冰期, 全球变化

PACC: 9260X

1. 引 言

20 世纪 60 年代中期以来, 以 Thom 的工作为先导而逐步建立的突变理论, 目前已被广泛应用于气候、地震等各个研究领域^[1, 2]. 气候突变(abrupt climate change) 又称气候变化的不连续性、气候的跳跃, 是普遍存在于气候系统中的一个重要现象. 自从 Lorenz 和 Charney 从理论上揭示了气候突变的可能性后, 有关气候突变的研究得到了广泛的开展. 一般认为, 气候系统内部动力结构发生演化或外界的扰动过大, 将导致系统的状态在相空间中不再趋向于原来的吸引子而是趋向于新的吸引子即发生了突变, 它是一种多时间尺度的现象, 可以发生在季节、年际、年代际、百年际甚至更长的时间尺度上, 是气候系统所具有的非线性特殊的表现形式^[3, 4]. 检测突变是近代气候变化研究的热点之一, 它对于认识气

候变化的性质具有重要意义. 目前对气候突变的研究主要还是针对代用资料, 运用传统的统计方法进行处理, 尽管取得了不少进展, 但许多研究仅局限在根据时间序列演变趋势判断气候系统的冷暖或旱涝变化等. 由于气候系统的非线性, 必然导致代用资料信息的多尺度性、多层次性和非平稳性, 这就大大增加了分析和检测气候突变的难度, 对检测的方法也提出了较高的要求. 大的气候系统(如全球)具有复杂的结构和内部联系, 具有较好的稳定性, 而相对小的局地气候子系统(如区域)稳定性就相对差一些, 对外强迫的响应较敏感. 局地性的气候变化依赖于全球气候变化, 但由于区域气候固有的特殊性, 即使在同一全球气候变化趋势下, 局地的气候变化也不尽相同, 例如 20 世纪以来全球气温总体升高的趋势下, 高纬度地带增温幅度最大, 中纬度地带增温幅度较小. 同时, 局地气候变化也会影响全球气候, 可能由于全球各地(各区域)人类活动的加强, 温室气体

^{*} 国家重点基础研究发展计划项目(批准号 2004CB418300)和国家自然科学基金(批准号 90411008 和 40325015)共同资助的课题.

[†] E-mail: feng_gl@sina.com

排放的增多,在某种程度上支持了 20 世纪以来的全球温度上升,因此研究局地 and 全球气候变化之间的内在联系就显得尤为重要.导致局地和全球气候变化的因素主要可以分为两大类:一、太阳活动等外强迫导致的气候系统动力结构的突变,即自然变率;二、温室气体的排放、气溶胶和下垫面等人为因素的影响引起的突变,即人为变率.因此诸如气候突变检测的新理论和新方法的研究,如何区分自然变率和人为变率对气候的影响及贡献大小的问题,进而分析局地和全球气候变化的特征,这些科学问题,是气候学家目前迫切需要解决的.

Bernaola-Galvan 提出的启发式分割算法(简称 BG 算法)是一种检测非线性、非平稳时间序列的有效方法,已在医学等领域有了一定的应用^[5].本文运用 BG 算法分别对北半球树木年轮宽度和北京石花洞石笋微层厚度距平序列基于高频和低频进行处理,试图区分不同性质的突变.定义新的物理量——突变密度,对树轮和石笋的高频序列从不同的角度进行检测和比较,结合突变理论,以全球气候变化为背景研究我国华北气候变化的特征,并分析两者之间的内在联系.下节给出 BG 算法及其物理含义,在第三节中分析华北和全球气候变化的特征,对比分析前后千年突变的疏密分布特点,就人为因素对气候变化的影响作初步的探讨.第四节给出本文结论.

2. Bernaola-Galvan 启发式分割算法及其物理含义

传统的突变检测方法,如滤波检测法、滑动 t, F 检测法、Gramer 法等应用于检测气候突变时,往往假设气候变化是平稳和线性过程,显然会存在一些缺陷^[6-8].Bernaola-Galvan 在 2001 年提出的启发式分割算法是一种有别于传统理论的突变检测方法,其主要思想介绍如下:

对于一个由 N 个点构成的时间序列 $x(t)$,从左到右分别计算每个点左边部分和右边部分的平均值 $\mu_1(i)$ 和 $\mu_2(i)$ 以及标准偏差 $s_1(i)$ 和 $s_2(i)$,则 i 点的合并偏差 $s_D(i)$ 为

$$s_D(i) = \left(\frac{(N_1 - 1) \times s_1(i)^2 + (N_2 - 1) \times s_2(i)^2}{N_1 + N_2 - 2} \right)^{1/2} \times \left(\frac{1}{N_1} + \frac{1}{N_2} \right), \quad (1)$$

其中, N_1, N_2 分别为 i 点左边和右边部分的点数.

我们用 t 检验的统计值 $T(i)$ 来量化表示 i 点左右两部分均值的差异

$$T(i) = \left| \frac{\mu_1(i) - \mu_2(i)}{s_D(i)} \right|, \quad (2)$$

对 $x(t)$ 中的每一个点重复上述计算过程,得到与 $x(t)$ 一一对应的检验统计值序列 $T(i)$, T 越大,表示该点左右两部份的均值相差越大.计算 $T(i)$ 中的最大值 T_{\max} 的统计显著性 $P(T_{\max})$:

$$P(T_{\max}) = \text{Pr}(T \leq T_{\max}), \quad (3)$$

$P(T_{\max})$ 表示在随机过程中取得 T 值小于等于 T_{\max} 的概率.一般情况下 $P(T_{\max})$ 可近似表示为

$$P(T_{\max}) \approx (1 - I_{(v/v+T_{\max}^2)}(\delta v, \delta))^v, \quad (4)$$

由蒙特卡罗模拟可得 $\eta = 4.19 \ln N - 11.54$, $\delta = 0.40$, N 是时间序列 $x(t)$ 的长度, $v = N - 2$, $I_x(a, b)$ 为不完全 β 函数.我们设定一个临界值 P_0 , $P(T_{\max}) \geq P_0$ 则于该点将 $x(t)$ 分割成两段均值具有一定差异(差异的大小随 P_0 的取值变化)的子序列,否则不分割.对新得到的两个子序列分别重复上述操作,如果子序列也有 $P(T_{\max}) \geq P_0$, 并且子序列与其左、右相邻的子序列间均值的差异程度均满足上述条件,则对子序列进行分割,否则不分割.如此重复直至所有的子序列都不可分割为止.为确保统计的有效性,当子序列的长度小于等于 l_0 (l_0 为最小分割尺度)时不再对其进行分割.通过上述操作,将原序列分割为若干不同均值的子序列,分割点即为均值突变点.我们定义原时间序列被分割得到的每个子序列所对应的时间段为“均值段”.根据已有的工作^[5,9], l_0 的取值不小于 25, P_0 可取 0.5—0.95, 视具体的分割要求和资料特点而定.

BG 算法优点主要表现在:1)该方法基于 t 检验将非平稳序列分割为多个具有不同均值的,自平稳的子序列,各子序列分别代表了不同层次的信息,各层次的尺度不受方法本身的限制,克服了以往的检测方法对非平稳时间序列检测效果较差的问题;2)由于分割时采用多次迭代一分为二的方法,大大减少了计算量,实用性较好;3)可以通过调整 l_0 和 P_0 的大小改变检测的尺度和精度,即能够检测不同尺度和不同幅度的突变;4)白噪声和尖峰噪声对该方法的影响较小,故特别适合于处理类似气候资料的时间序列^[9].

3. 华北和全球气候变化特征的分析

资料 北半球树木年轮宽度距平序列 $S_1(t)$

(A. D. 1—1980)¹⁰(图 1(a))和北京石花洞石笋微层厚度距平序列 $S_2(t)$ (A. D. 1—1980)¹¹(图 1(d)). $S_1(t)$ 通过北半球多个地区(蒙古、东西伯利亚、西加拿大、西西伯利亚、中西伯利亚、北美和北瑞典等)的树轮整合而得,含有近 2000 a 北半球气候变化的信息,可表征全球气候变化的特点; $S_2(t)$ 含有局地气候变化的信息,可表征我国华北气候变化特点. 树木年轮和石笋记录具有分辨率高和记录气候的信息量大等特点,它们的形成与温度和降水有着非常紧密的联系,因此这两种序列中包含着温度和降水的年际变化信息,对它们进行研究将有助于更好地认识近 2000 a 气候的变化特点^[12-16].

表 1 $S_1(t)$ 和 $S_2(t)$ 滤波低频序列的大尺度突变点

	突变年份/a								
树轮	364	486	-	902	1118	1349	1573	-	1919
石笋	387	-	708	879	1135	1347	1619	1754	-

$S_1(t)$ 和 $S_2(t)$ 均为非平稳序列,包含着各种不同尺度的信息,直接检测其中包含的气候突变信息,对于检测得到的突变点,无法区别其性质,即无法区分其属于小尺度气候突变还是真正意义上的气候变化重大事件. Zhang 等提出的滤波方法是一种滤波

频带很狭窄的多级滤波器,能够实现高、低频的分离. 这种滤波方法被 Rasmusson 等、Wang 等用于分离海平面温度 29 年以上的慢变平均值. 该滤波器的计算程序由 Wang 提供,利用这种方法滤波后序列的长度与原序列相同^[17-20]. 本文运用该程序对树轮和石笋序列进行 100 a 尺度的滤波. $S_1(t)$ 和 $S_2(t)$ 经滤波后分别得到低频(图 1(b))(e)和高频(图 1(c))(f)两组新序列,它们分别包含了不同性质的突变信息. 用 BG 算法分别对低频率序列和高频率序列进行处理,可以得到大尺度和小尺度的突变点(图 2 图 3),即通过先滤波后分割的处理,有可能判别树轮和石笋记录中各种不同性质的突变信息. 对 $S_1(t)$ 和 $S_2(t)$ 的低频率序列分别基于 BG 算法进行处理, l_0 取 400, P_0 取 0.85. 由图 2 可以看出, $S_1(t)$ 和 $S_2(t)$ 低频率序列的大尺度突变点数均为 7,根据文献^[20-21]这些大尺度突变点的分布与发生较大干湿变化的年份有着较好的对应关系. 同时,两个序列在 380 a,900 a,1120 a,1350 a,1600 a 附近均发生了大尺度突变(表 1). 华北气候变化特别是降水与大尺度的大气环流和南亚季风有着重要的关系, $S_2(t)$ 反映的华北降水的特点与 $S_1(t)$ 表征的全球气候变化的大背景是一致的,所以有上述大尺度突变点数和突

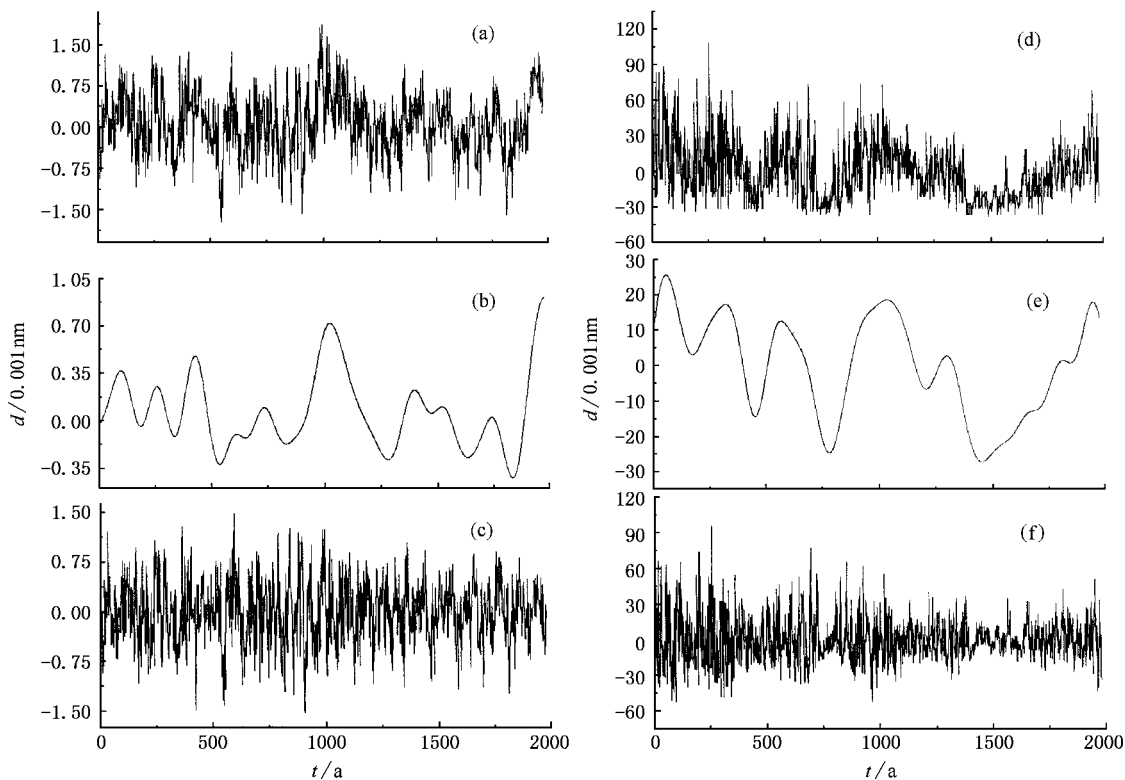


图 1 $S_1(t)$ 和 $S_2(t)$ 100 a 尺度滤波的图像

变年份的相似. 石笋序列中 708 a 和 1754 a 两个突变点在树轮序列中没有与之对应的突变年份,其原因可能在于石笋序列表征了华北气候变化的局地信息,该区域当时可能受到局地外强迫作用而发生突变,即气候的局地性特点. 这也在一定程度上说明了局地性气候突变不一定发生在较短的尺度上,在百

年乃至更大的尺度,同样可能存在,这也是非线性系统的一种特殊表现方式. 树轮序列中的 486 a 和 1919 a 两个突变点在石笋序列中也没有与之对应的突变点,其原因可能在于树轮序列是由多个资料整合得到,弱化了局地性,突出了大范围、大尺度的客观变化^[22].

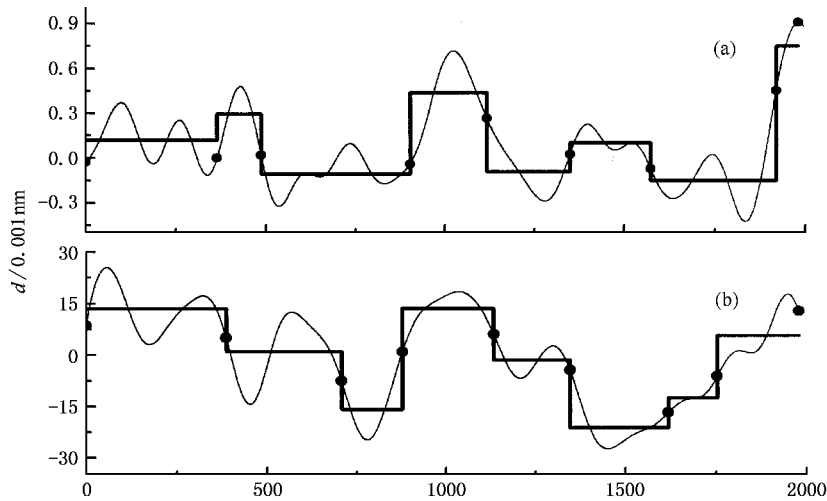


图 2 $S_1(t)$ 和 $S_2(t)$ 滤波低频率序列的突变图

以树轮记录包含的气候变化信息为背景, $S_1(t)$ 和 $S_2(t)$ 低频率序列的上述 5 组相对应的突变点(表 1), 分别将 $S_1(t)$ 和 $S_2(t)$ 滤波后的高频率序列分割为 6 个相对稳定的大尺度均值段(表 2), 在这 6 个均值段中包含各种小尺度的突变. 定义“突变密度”检测并分析两个序列在上述 6 个均值段内突变点疏密分布的异同性, 将有助于以全球气候的变化为背景研究华北气候的变化特点. l_0 取 30, P_0 取 0.85, 用 BG 算法对 6 个均值段进行检测.

集段, 否则为突变稀疏段(本文取 η_0 为 0.5 并分析每个百年尺度的突变密度). 由图 3 可以看出, $S_1(t)$ 和 $S_2(t)$ 的高频率序列的第 1(图 3(a))(b), 第 2(图 3(c))(d) 和第 6(图 3(e))(f) 均值段内, 就单个突变点进行比较, 两个序列类似的突变年份较少, 难以分析两者的联系和突变点的分布规律; 用统计的方法计算三个均值段内每个百年尺度的突变密度发现: 这三组两两对应的均值段内突变密集段的分布惊人的相似, 图 3(a)(b) 的 1—100 a, 图 3(c)(d) 的 460—560 a, 600—710 a 和 760—865 a, 图 3(e)(f) 的 1610—1710 a 和 1800—1900—1980 a 均为突变密集段. 其余 3 个均值段的情况与此类似, 两序列在第 3 均值段中虽然均没有突变密集段, 但都存在一个同期的大尺度平稳时段, 考虑到另外 3 个均值段的宽度较小, 故没有给出图像. 各对应均值段内突变密集段分布的相似, 以及 $S_1(t)$ 和 $S_2(t)$ 大尺度突变点的一致, 在一定程度上体现了全球气候变化是局地气候变化的背景, 局地和全球气候同步变化, 局地气候变化的总体方向受全球气候变化的制约, 而局地气候变化也会影响全球气候变化的特点, 即体现了华北的气候突变可能在很大程度上受控于全球的气候变化, 同时又对全球气候变化存在着一定的影响. 借

若 N 年的突变点数为 n , 定义 η 为“突变密度”,

$$\eta = \frac{n}{N} \times 10. \quad (5)$$

表 2 $S_1(t)$ 和 $S_2(t)$ 滤波后的高频率序列的大尺度均值段

均值段	突变年份/a	时段/a	宽度/a	突变年份/a	层次段/a	宽度/a
1	—	1—364	364	—	1—387	386
2	364	365—902	538	387	388—879	492
3	902	903—1118	216	879	880—1135	256
4	1118	1119—1349	231	1135	1136—1347	212
5	1349	1350—1573	224	1347	1348—1619	272
6	1573	1574—1980	407	1619	1620—1980	361

设定密度常数 η_0 , 若 $\eta \geq \eta_0$ 则对应的时段为突变密

助于突变密度可以定量比较百年或更大尺度上突变点的密集程度,同时突变密度本身具有一定的统计

意义,能够在一定程度上反映各种气候资料之间内在的联系和规律.

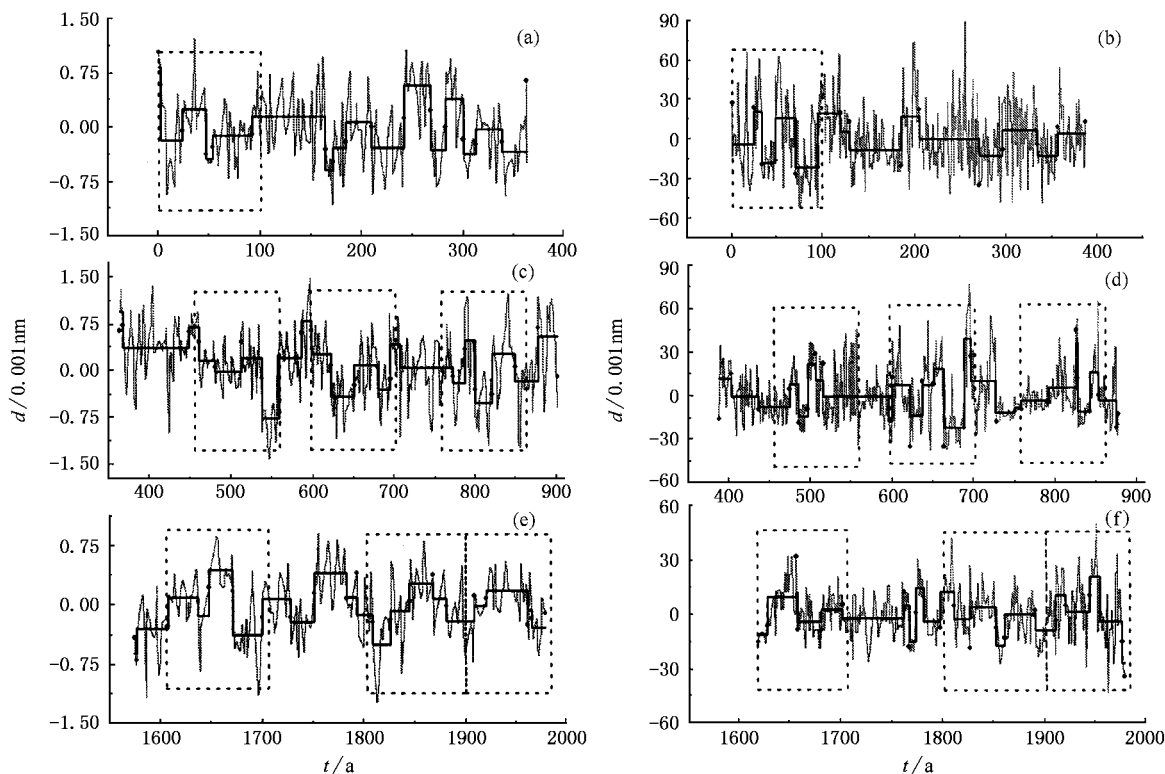


图3 $S_1(t)$ 和 $S_2(t)$ 滤波后的高频序列三个均值段的突变疏密分布 (虚线框为突变密集段)

公元 1000 年以前,人为因素对气候的影响可能比较小,气候突变的原因可能是火山喷发、太阳活动异常等自然因素的作用.近 1000 a 来特别是第一次工业革命以来,人为因素对气候的影响不断加剧,人为因素很可能已成为继自然因素之后造成气候突变的重要原因之一. l_0 取 30, P_0 取 0.85,从突变密度的角度对比分析 $S_1(t)$ 和 $S_2(t)$ 滤波后的高频序列在公元 1000 年前后两个千年内突变的疏密分布(表 3).由表 3 可以看出,两个序列的突变密集段和稀疏段的分布大体一致,均表现为前 1000 a 密集段和稀疏段交替分布,比例相当,保持一种内在的平衡;后 1000 a 疏密分布的平衡被逐渐打破,特别是 1500 年以来,突变密集段出现的频率大大增强,其原因可能是自然因素作用的基础上,公元 1500 年以来,特别是第一次工业革命以来,人为因素的作用不断加剧,人为因素与自然因素的双重作用导致前后千年气候突变疏密分布的变化.石笋序列包含的突变信息表明,人为因素的作用对华北的气候变化也有一定的作用,其影响虽然较全球稍晚,但就近 500 a 而言,其影响也是越来越大,进而导致了 1500—1700 a 和

1800—1980 a 两个时段突变密集段的连续出现.

表 3 $S_1(t)$ 和 $S_2(t)$ 滤波后的高频序列前后千年内突变的疏密分布

时段*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
树论 η	0.5	0.2	0.4	0.5	0.5	0.4	0.6	0.4	0.3	0.5
疏密	密	疏	疏	密	密	疏	密	疏	疏	密
石笋 η	0.5	0.3	0.3	0.4	0.5	0.4	0.6	0.3	0.5	0.2
疏密	密	疏	疏	疏	密	疏	密	疏	密	疏
时段	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
树论 η	0.3	0.5	0.6	0.3	0.6	0.5	0.5	0.4	0.5	0.5
疏密	疏	密	密	疏	密	密	密	疏	密	密
石笋 η	0.4	0.3	0.5	0.4	0.2	0.5	0.5	0.4	0.5	0.5
疏密	疏	疏	密	疏	疏	密	密	疏	密	密

* 时段一行: 1 表示 1—100 a, 2 表示 101—200 a, ..., 20 表示 1901—1980 a

小冰期是指自全新世以来全球变冷的一种总体现象.关于小冰期起止年代,大多数学者认为应定为 12 世纪中期到 19 世纪末期,部分学者认为应将小冰期的开始年代定于 13 世纪初期,止于 19 世纪末期.究竟哪一种更准确还没有定论^[23-24].由树轮序列近 1000 a 的突变图(图 4(a))可以看出,1220—1350 a, 1450—1580 a 和 1750—1870 a 三个时间段内,均为突

变高度密集段.小冰期事件不仅单纯是变冷事件,它还伴随有全球的干湿变化,并且干湿变化较大,旱涝灾害天气较多,必然导致气候突变的明显增多.东亚、欧洲北美、北极、南半球在13世纪、16世纪、19世纪均有较大尺度冷期^[25-30],由图4(a)可知在这三个世纪均对应气候突变高发期.从突变密度的角度考虑,我们认为全球范围内的小冰期可能始于13世纪初期,止于19世纪末期,而16世纪则是小冰期的盛期.但由于各地区开始变冷的日期不同,所以小冰期的起止时间还存在着地域差异.由石笋序列近

1000 a的突变图(图4(b))可以看出,其同样存在着三个突变密集段,时间上略滞后于树轮的三个高密度段20—30 a,1080—1880 a为我国气候的低温期,近2000年的22次低温事件有11次发生于这个阶段,近1000 a的三个突变密集段也对应频率较高的冷事件^[31,32],这说明受全球范围的小冰期的影响,小冰期在我国开始的时间可能较全球稍晚,大概始于13世纪中期,结束于19世纪末.至于小冰期的变冷和气候突变的高发之间是否有关联,及其发生的内在物理机理还有待进一步研究.

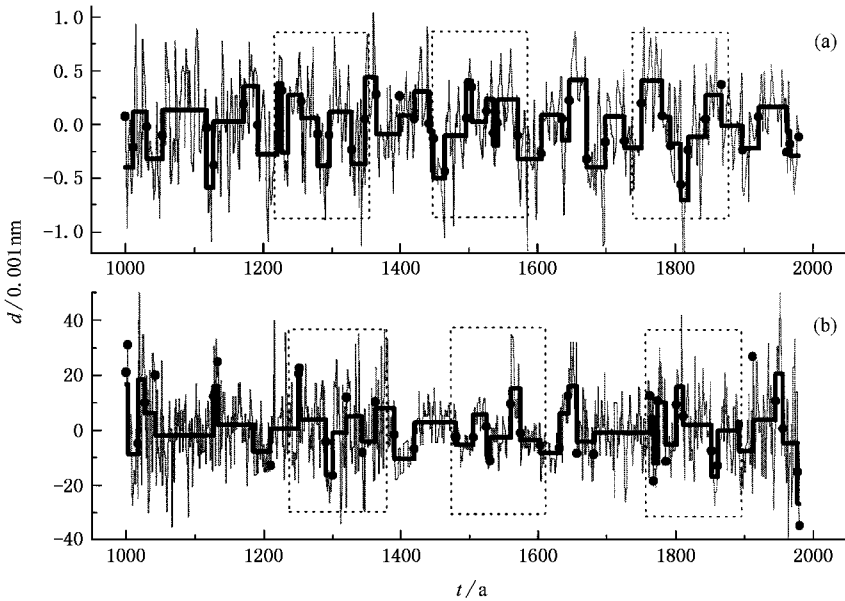


图4 $S_1(t)$ 和 $S_2(t)$ 滤波后的高频序列前后千年的突变图

4. 结 论

1. BG算法是一种检测非线性、非平稳时间序列的有效方法,用BG算法分别对低频序列和高频序列进行处理,可以分别得到大尺度和小尺度的突变点,即通过先滤波后分割的处理,有可能判别树轮和石笋记录中各种不同性质的突变信息.

2. $S_1(t)$ 和 $S_2(t)$ 滤波得到的低频率序列在380 a, 900 a, 1120 a, 1350 a, 1600 a附近均发生了大尺度突变,这5组对应的突变点将 $S_1(t)$ 和 $S_2(t)$ 滤波后的高频序列分割为6个均值段,对突变点和均值段的

分析表明我国降水的特点与全球气候变化的大背景是一致的,在一定程度上说明了在百年乃至更大的尺度,同样可能存在局地突变,两个序列各均值段内突变密集段的类似在一定程度上体现了局地 and 全球气候同步变化,局地气候受全球气候系统的制约,又会影响全球气候变化的特点,即华北的气候突变可能在很大程度上受控于全球的气候突变.

3. 基于BG算法,从突变密度的角度出发,我们认为全球范围内的小冰期可能始于13世纪初期,止于19世纪末期,而16世纪则是小冰期的盛期.受全球范围小冰期的影响,小冰期在我国开始的时间可能较全球稍晚,大概始于13世纪中期,结束于19世纪末.

- [1] Dansgaard W C , Clausen H B , Gundestrup N *et al* 1982 *Science* **218** 1273
- [2] Li F H 1984 *Mechanical Progres* **14** 389
- [3] Dai X G , Fu Z B , Wang P 2005 *Chin . Phys .* **14** 850
- [4] Shi N 2005 *Chin . Phys .* **14** 844
- [5] Bernaola-Galvan P 2001 *Phys . Rev . Lett .* **87** 168105
- [6] Shi Y F , Zhang P Y 1996 *The variation trend and its effect of the climate in China and sea level change—he historical climatic change in China* (Jinan : Shandong Science and Technology Press) 383—393 (in Chinese) [施雅风 , 张丕远 1996 中国气候与海面变化及其趋势和影响中国历史气候变化(济南 : 山东科学技术出版社) 383—393]
- [7] Yang W F , Li Z Y , Li X M 1997 *Quarterly Journal of Applied Meteorology* **8** 119
- [8] Yan Z W , Li Z Y , Wang X C 1993 *Scientia Atmospheric Sinica* **17** 663
- [9] Fukuda K , Stanley H E , Amaral L A N 2004 *Phys . Rev . Lett .* **69** 021108
- [10] Keith R , Briffa 2000 *Quaternary Science Reviews* **19** 87
- [11] Liu D S , Tan M , Qing X G , Qing X G *et al* 1997 *Quaternary Sciences* **1** 41 (in Chinese) [刘东生等 1997 第四纪研究 **1** 41]
- [12] Hou A M , Peng S L , Zhou G Y 1999 *Ecologic Science* **18** 16 (in Chinese) [侯爱敏、彭少麟、周国逸 1999 生态科学 **18** 16]
- [13] Gong Z Q , Zou M W , Gao X Q *et al* 2005 *Acta . Phys . Sin .* **54** 3947 (in Chinese) [龚志强、邹明珠、高新全等 2005 物理学报 **54** 3947]
- [14] Yao T D , Yang X M , Kang X C 2001 *Quaternary Sciences* **21** 515 (in Chinese) [姚檀栋、杨学梅、康兴成 2001 第四纪研究 **21** 515]
- [15] Fu Z B , Wang Q 1992 *Scientia Atmospheric Sinica* **6** 482
- [16] Fu Z B 1994 *Scientia Atmospheric Sinica* **18** 373
- [17] Zhang D W , Dong D N 1986 *Acta Astrom . Sin .* **27** 368
- [18] Shi N 2000 *J . Trop . Meteor .* **16** 131 (in Chinese) [施能 2000 热带气象学报 **16** 131]
- [19] Rasmusson E M , Wang X L , Ropelewski C F 1994 *Secular variability of ENSO cycle* (Sandong : Academic Press)
- [20] Wang X L , Ropelewski C F 1995 *J . Climate* **8** 1584
- [21] Yao T D , Yang X M , Kang X C 2001 *Quaternary Sciences* **21** 514 (in Chinese) [姚檀栋、杨学梅、康兴成 2001 第四纪研究 **21** 514]
- [22] Zhang D E , Liu C Z , Jiang J M 1997 *Quaternary Sciences* **1** 1
- [23] Lamb H H 1965 *Palaeogeography , Palaeoclimatology , Palaeoecology* **1** 13
- [24] Wang L G , Zhong W , Li S 2002 *J . Glaciology and Geocryology* **24** 750 (in Chinese) [王立国、钟巍、李思 2002 冰川冻土 **24** 750]
- [25] Jacoby G C , D ' Arrigo R 1989 *Climatic Change* **14** 39
- [26] Scuderi L A 1987 *Quaternary Research* **27** 220
- [27] Bernabo J C 1981 *IBID* **15** 143
- [28] Paterson W S B , Koerner R M , Fisher D *et al* 1977 *Nature* **266** 508
- [29] Bryson R A 1974 *Science* **184** 753
- [30] Yang B , Kang X C , Shi Y F 2000 *Scientia Geographica Sinica* **20** 397 (in Chinese) [杨保、康兴成、施雅风 2000 地理科学 **20** 397]
- [31] Hou W , Feng G L , Gao X Q *et al* 2005 *Acta . Phys . Sin .* **54** 2441 (in Chinese) [侯威、封国林、高新全等 2005 物理学报 **54** 2441]
- [32] Feng G L , Gong Z Q 2005 *Acta Phys . Sin .* **54** 5494 (in Chinese) [封国林、龚志强 2005 物理学报 **54** 5494]

Analysis of features of climate change of Huabei area and the global climate change based on heuristic segmentation algorithm^{*}

Gong Zhi-Qiang¹⁾ Feng Guo-Ling^{2)†} Wan Shi-Quan¹⁾ Li Jian-Ping⁴⁾

1) (Department of Physics , Yangzhou University , Yangzhou 225009 , China)

2) (Laboratory for Climate Studies of National Meteorological Bureau Climate Research Center , Beijing 100081 , China)

3) (Key Laboratory of Regional Climate-Environment Research for Temperature East Asia , Institute of Atmospheric Physics , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100029 , China)

4) (State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics , Institute of Atmospheric Physics , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100029 , China)

(Received 10 May 2005 ; revised manuscript received 14 June 2005)

Abstract

Global change science is a new research field , and one of the most important topics of which is the climate change study , to which great importance is attached by all governments of the world , and climatic abrupt change is one of manifestations of climate changes . Nowadays , research of climate change is mainly based on climatic proxy using traditional statistical method . However , climatic system is nonlinear , non-stationary and hierarchical , which makes even harder to detect and analyze abrupt climate changes . As well known , climatic system is made up of several sub-systems , and there may be inherent connections between them ; however , there is only a few research methods and theories in this field . This article introduces a new detecting method , the heuristic segmentation algorithm , which is well fitted to nonlinear and non-stationary time series . Then , dealing with northern hemisphere tree rings and Beijing stalagmite based on high and low frequency series , we try to distinguish abrupt changes in different scales and disclose its physical mechanism . Defining a new physical quantity , the abrupt density , and analyzing the distribution characteristics of abrupt changes before and after 1000 a , We take Huabei area 's climatic change as an example to explore the inherent connections between local and global areas .

Keywords : abrupt change , heuristic segmentation algorithm , human activeness , little ice stage , global temperature change

PACC : 9260X

^{*} Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2004CB418300) and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 90411008 and 40325015).

[†] E-mail : feng_gl@sina.com