

利用高阶矩检测近 2000 年来气候极端异常的研究^{*}

张 文^{1 B)} 高新全^{2 B)} 董文杰^{2 B)} 李建平⁴⁾

1) 扬州大学物理科学与技术学院, 扬州 225009)

2) 中国气象局气候研究开放实验室, 国家气候中心, 北京 100081)

3) 中国科学院东亚区域气候-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力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029)

(2005 年 9 月 15 日收到, 2005 年 11 月 4 日收到修改稿)

基于标准化后的高分辨率气候代用资料, 应用高阶矩分析方法检测近 2000 年来气候极端异常演变特征, 同时结合滤波方法进行具有物理背景的层次分离, 进而研究了各时间层次气候极端异常变化信息及其贡献. 结果表明: 1) 在 100 年以上的时间层次上, 可能存在千年左右的气候变化振荡周期, 而且 20 世纪是近 2000 年来气候极端异常现象最为活跃的时段, 可能对应于气候极端异常现象活跃期. 2) 对于 20—60 年这一时间层次, 公元 300—1100 年间气候极端异常现象比较明显, 而公元 1100—1980 年间相对比较缓和, 该层次对 20 世纪的气候异常没有显著贡献. 世纪以上和 20—60 年时间层次均揭示出在近 2000 年的气候变化中, 公元 1100 年前后可能是一个气候极端异常现象演变的关键转折时期. 3) 在年际尺度上(小于 20 年), 北京石花洞石笋微层厚度时间序列中发生气候极端异常现象的年份与出现 El Niño 事件和 La Niña 事件的年份有非常好的对应关系(仅讨论公元 1960—1980 年). 4) 高阶矩分析方法对于检测气候极端异常分布及演变规律有较好的应用前景.

关键词: 高阶矩, 气候异常, 极端事件, 层次

PACC: 9260X

1. 引 言

气候系统是一个典型的非线性强迫耗散和开放的非平稳系统^[1-8]. 近 10 年来, 气候系统的多层次结构特征已逐渐被理解和认识. 事实上, 气候系统的多层次结构正是产生非平稳行为的原因, 而气候系统的非平稳特性则是层次结构的集中表现.

研究表明, 近千年来气候系统大体包括以下几个层次的准周期振荡, 即 20—30 年、60—70 年以及 100 年以上等时间尺度^[8-10]. 但这几个尺度层次的物理背景目前还不太清楚, 其究竟是气候系统本身的自滞振荡现象还是外部因子的强迫所致? 针对气候系统各圈层相互作用以及外源的强迫而导致气候系统变化的复杂性, 目前的研究工作大都集中在气候资料序列所表征的气候要素的时间演变特征和突变特征, 以及在各层次上的演变规律等(比如温度的冷暖交替, 降水的丰枯变迁等的时间演变和空间分

布), 而对于近千年来气候极端异常分布及演变规律的研究很少. 研究各层次对气候极端异常变化信息的贡献无疑是一个难题. 基于此, 本文以高分辨率气候代用资料, 即北京石花洞石笋微层厚度和北半球树木年轮序列为例, 采用高阶矩分析方法检测近 2000 年来气候极端异常演变特征, 同时尝试探索利用新的分析手段和方法进行层次信息分离, 研究不同尺度层次所呈现的规律及其反映的气候特征的异同, 研究各层次对气候极端异常的贡献, 旨在从新的研究途径对气候和气候极端异常变化方面的预测提供有用信息.

2. 资料和方法

2.1. 资 料

人类进行大范围观测的器测资料只有 100 多年的历史, 因此对于近千年尺度的气候变化研究常规

^{*} 国家重点基础研究发展规划项目(批准号 2006CB400503)和国家自然科学基金(批准号 90411008 和 40325015)资助的课题.

观测资料无法满足人们的需求.为了解决这一问题,一般利用代用资料或考古资料,尤其是高分辨率的代用资料.石笋和树木年轮是科学研究中通常采用的两种代用资料.在全球气候变化的研究中,针对这些代用资料的分析和研究已取得了一系列成果^[11-17].

石笋微层厚度包含了气候演化的信息,尤其是温度和降水的信息.高分辨率的石笋记录表明,长时间尺度上的变化趋势主要反映了气温的变化,而在更精细的短时间尺度上的变化则主要代表降水量的变化^[14].北京石花洞石笋微层是华北地区气候变化最好的高分辨率地质记录之一^[12].Qin 等人^[11]通过功率谱分析石笋的年纹层变化检测出较为明显的 ENSO 周期.刘东生等人^[16]通过将石笋资料与仪器记录和根据历史文献得到的旱涝等级资料对比研究,发现石笋序列和器测降水量以及旱涝等级指数对应比较好,同时保留了长周期的低频信息和明显的年际变化特征;而且近一千年来北京石笋的年层厚度主要反映了降水的变化,这一结论得到了 Tan 等人^[13]的支持和验证.这种微层厚度变化与现代气候变化的一致性与石笋微层沉积学显微特征的观察结果相符合,可见石笋微层作为一种获取容易、连续性好、能够获得较长记录的材料,对研究我国过去气候的变化、预测未来气候的发展方向有很高的价值^[12].

树木年轮资料记录了从年际到十年、百年各种时间尺度的气候波动,是研究历史时期气候变化的有力材料.通过对树木年轮资料的分析,不但可以从了解长期气候变化的规律,而且可以成为获取过去气候环境演变数据的重要方法^[17],帮助人们预测未来气候变化和研究气候变化对生态系统的影响.对于单个的树木年轮而言,地区的地理特点的影响可能比冰芯要大的多.既然单个树木年轮得到的数据资料可能仅仅反映当时的局地气候环境条件,因此,对众多年轮资料进行综合分析,才能得到逐年乃至逐季的可靠代用资料序列^[15,17].基于这种考虑,Briffa 利用众多的北半球树木年轮资料(主要分布在北美、欧洲和亚洲的中高纬度地区),建立了北半球树木年轮指数序列,该序列对于北半球较大范围地区的历史时期气候演变特征,具有较好的代表性,同时资料质量可靠性也比较高^[15].

本文使用的代用资料为高分辨率的北京石花洞石笋微层厚度序列^[11]和北半球树木年轮序列^[15],为

了方便对比和分析,两代用资料取相同的时段进行研究,即公元 301—1980 年,样本长为 1680 年.

2.2. 方 法

1986 年 Zheng 等提出了一种滤波方法,该方法使用一种滤波频率带很狭窄的多级滤波器来实现高、低频的分离^[18],Rasmusson 等、Wang 等和 Shi 等先后用其对海平面温度 30 年以上慢变过程的平均值进行了分离^[19-21].该滤波器的计算程序由 Wang 提供,此方法的一个显著特点在于通过这种方法滤波后的序列长度与原序列相同.

矩分析方法简介如下:设一组关于气象要素 y 的时间序列 $y(t)$,其中 $t = t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$,假设期望值 $Y_1(t)$ 是时间序列 $y(t)$ 在时间段 $[t_1, t_n]$ 内具有线性趋势的一阶统计分布,即

$$Y_1(t) = E[y(t)] = a_1 + b_1 t, \quad (1)$$

其中 $E(y)$ 是 y 的期望值,参数 a_1 和 b_1 一般可根据气候资料由最小二乘法确定.进一步定义残差

$$y'(t) = y(t) - Y_1(t) = y(t) - a_1 - b_1 t \quad (2)$$

(2) 式的目的在于消去趋势项,以消除气候变化趋势的影响.我们定义 $y'(t)$ 为时间序列 $y(t)$ 的一阶矩序列.残差的二次幂定义为时间序列 $y(t)$ 的二阶矩序列,即

$$Y_2(t) = [y'(t)]^2. \quad (3)$$

依此类推,残差的三次幂和四次幂依次定义为时间序列 $y(t)$ 的三阶矩序列 $Y_3(t)$ 和四阶矩序列 $Y_4(t)$,可以写成

$$Y_3(t) = [y'(t)]^3, \quad (4)$$

$$Y_4(t) = [y'(t)]^4. \quad (5)$$

一般地,各种气候代用资料具有不同的量纲和不同量级的数值,为了使得不同类型的气候代用资料具有可比性,需要将这些资料进行标准化处理.由于本文分析的对象为标准化后的资料,为了叙述的方便,称标准化后的气候代用资料为原时间序列.

对各阶矩时间序列而言,本文以是否超过该序列平均值的 1.2 倍作为判断气候极端异常发生的标准,即某一年份的数值如果超过该时间序列平均值的 1.2 倍,即认为该年份出现了气候极端异常现象,反之则认为变化相对缓和,没有气候极端异常现象的发生.对于大时间尺度分析而言,单纯的某一年气候极端异常变化情况没有太大的意义,我们需要了解的是某一平均时段内的总体变化情况.因此在实际处理代用资料的过程中,一段时间内(本文取为

15 年.如果发生气候极端异常变化的年份超过该时段总年数的 60% 则认为该时段平均来讲发生了气候极端异常变化,否则认为该时段气候变化相对缓和,没有气候极端异常现象的发生.进一步,对于气候极端异常的时间段其气候变量皆赋值为 1.2 倍的平均值,否则赋值为其平均值,由此得到相应的气候极端异常演化示意图(图 1),从图示上可以容易看出变化剧烈(气候极端异常)和缓和的时间段.

由各阶矩的定义可以看出,其物理本质类似放大镜的作用,即将气候涨落逐项放大,并且放大倍数和涨落呈正相关,即涨落越大其被放大的越大,反之则涨落越小,被放大的越小,这就导致涨落越大即气候变化越剧烈,其剧烈程度越明显.并且随着阶数的增加,呈现出的是气候发生更大异常变化的年份.正由于此,我们认为高阶矩时间序列可以表征气候极端异常现象的演变情况.本文仅仅以四阶矩时间序列为例,利用气候代用资料检测近 2000 年来气候极端异常现象的演变特征.同时结合上述滤波程序,对标准化的代用资料进行层次分离,进而分析各层次上气候极端异常变化规律及其各自的贡献.

3. 结果分析

由图 1(a)和(b)可以看出,北京石花洞石笋微层厚度所反映的气候变化比较剧烈(气候极端异常)的时段主要发生在公元 301—323 年、654—673 年、728—795 年、822—836 年、939—953 年、1016—1036 年、1388—1414 年以及 1933—1960 年,其余时段内气候变化相对比较平稳.北半球树木年轮所反映的气候变化剧烈(气候极端异常)的时间段为 532—562 年、894—919 年、973—1002 年、1072—1096 年、1805—1825 年以及 1929—1970 年(图 1(c)和(d)),其余时段是一个相对比较平稳的过程.石笋和树木年轮所反映出的气候极端异常变化时间长度一般在 15—30 年之间.就整个时间段(公元 301—1980 年)而言,公元 300—1100 年间是气候极端异常现象频繁发生的时期,而公元 1100—1980 年间气候极端异常现象发生频率相对较低;在近 2000 年来的气候变化中,公元 1100 年前后可能是一个关键转折时期.20 世纪中叶以后,两个代用资料均不同程度地反映出气候极端异常现象又开始频繁发生,由以上分析可知自 20 世纪中期以后可能又进入气候极端异常现象发生的活跃期.石笋和树木年轮资料所一致反

映出的相对气候变化缓和期主要为公元 323—532 年、1096—1388 年和 1414—1805 年.从图 1(a)和(c)可以发现,在有些时段内,尽管某些年份气候极端异常非常强烈,但是这些年份在该时段内所占的比例没有超过 60%,因此在图 1(b)和(d)中没有反映出,如图 1(a)中的 539—558 年间;反之,在有些时段内,尽管某些年份气候极端异常现象存在而且强度不是特别明显,但是这些年份超过该时段 60%,因此虽然在图 1(a)和(c)中这一时段不明显,但是在图 1(b)和(d)中却有明显反映,如图 1(a)中的公元 728—795 和 1388—1414 年间.这与我们研究的着眼点相一致,即本文主要从较高层次进行分析,代表了某一时段内气候极端异常的总体变化情况.

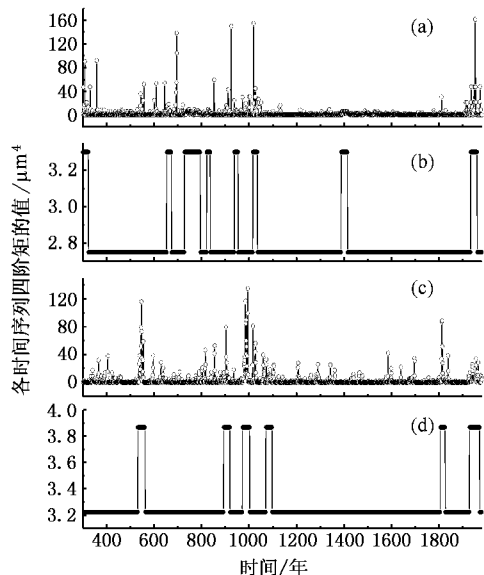


图 1 原时间序列四阶矩及其相应的气候极端异常演化示意图

图 2 为 100 年以上时间层次四阶矩序列及其相应的气候极端异常演化示意图.从图 2(a)和(b)可知,就世纪以上时间层次而言,从石笋资料中所反映的气候极端异常现象主要发生在公元 301—334 年、729—830 年、960—1099 年、1394—1564 年以及 1899—1980 年,其中 729—830 年,1899—1980 年两时段内气候极端异常最为明显.其他时段内气候变化相对比较平稳.对于树木年轮资料来说,气候极端异常现象主要集中在公元 403—447 年、965—1094 年、1806—1861 年以及 1912—1980 年(图 2(c)和(d)).从图 2 上还可以看出,对于世纪以上时间尺度来说,两种代用资料在公元 965—1094 年和 1912—1980 年时段内都发生了气候极端异常现象,公元 1100 年前后是其关键转折时期,即气候极端异常现

象随时间的演变可能存在千年左右的周期. 在整个分析时段内, 公元 1912—1980 年间两时间序列中的气候极端异常现象最为突出, 反映了 20 世纪气候急剧增暖这一事实.

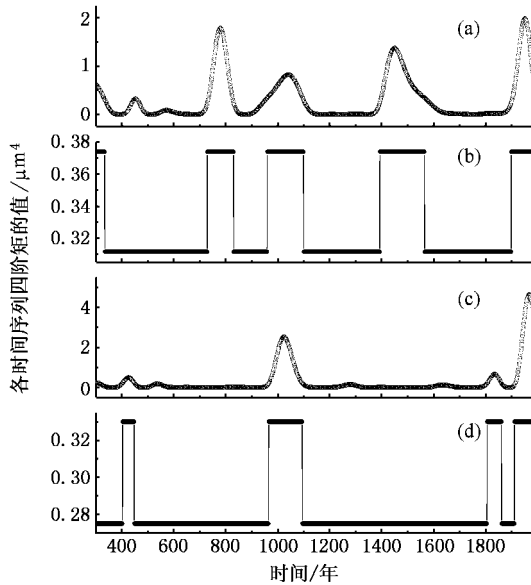


图 2 100 年以上时间层次四阶矩序列及其相应的气候极端异常演化示意图

在 60—100 年时间层次上, 虽然分析结果中也存在着某些气候变化剧烈的时段, 但是该层次四阶矩时间序列值较其他层次上的序列值相比, 小两到三个量级. 这一特征表明该层次对气候极端异常现象发生的贡献可能比较小, 本文不作讨论(图略).

图 3 显示的是 20—60 年时间层次四阶矩序列及其相应的气候极端异常演化示意图. 由图 3 (a) 和 (b) 可以发现, 对于 20—60 年这一时间层次而言, 从石笋资料中所反映的气候极端异常现象主要发生在公元 496—516 年、616—706 年、713—753 年、842—863 年、874—917 年、950—973 年、1366—1388 年、1636—1659 年. 对于树木年轮资料来说, 气候极端异常现象主要集中在公元 336—358 年、512—560 年、779—1018 年、1197—1298 年、1349—1369 年、1648—1669 年以及 1731—1751 年(图 3 (c) 和 (d)). 两类代用资料在公元 842—863 年、874—917 年以及 950—973 年三个时段内都发生了气候极端异常现象, 而且公元 1100 年前后在该层次上也是一个关键的转折期. 对照图 1 可知, 公元 300—1100 年间气候极端异常现象频繁发生, 可能与 20—60 年时间层次的气候剧烈变化有非常密切的联系, 而世纪以上时间层次仅仅提供了原始序列中公元 965—1094 年间气候变化

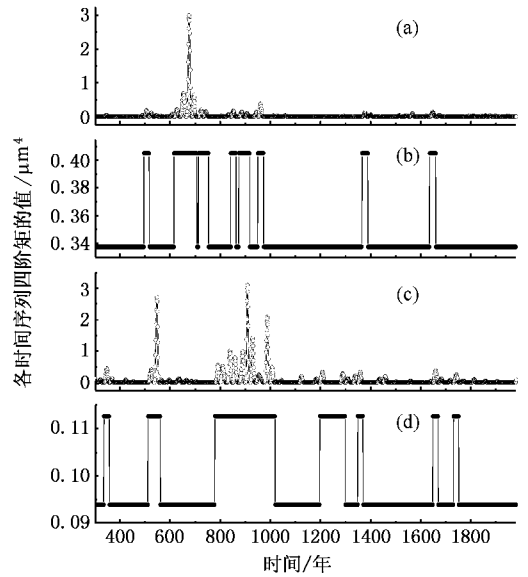


图 3 20—60 年时间层次四阶矩序列及其相应的气候极端异常演化示意图

的主要信息. 自 19 世纪初期至今, 20—60 年时间层次所反映的气候变化信号相对比较平稳, 换言之, 该层次对 20 世纪全球增暖现象的贡献较小, 或者基本没有贡献. 对照图 2 可知, 世纪以上时间层次对 20 世纪全球气候变化(气候增暖) 贡献了主要信号.

对于 20 年以下时间层次, 气候代用资料所反映的气候极端异常现象相对比较复杂, 几乎不存在平均 15 年以上的气候剧烈变化时段, 但是存在着气候极端异常现象发生的年际信号(图略). 鉴于此, 我们检测出气候极端异常的年份, 并且与 Jin, Tao^[22] 所统计的 El Niño 和 La Niña 事件表相对照(取其相同的时段, 即 1960—1980 年时段). 结果表明石笋代用资料中所反映的气候极端异常现象主要发生的年份是 1963, 1964, 1969, 1971, 1972 以及 1973 年, 其中除了 1971 年之外, 其他年份分别对应着相应的 El Niño 事件或 La Niña 事件, 但是对于树木年轮时间序列来说, 只有 1965 年对应着相应的 El Niño 事件.

4. 结论与讨论

针对气候极端异常现象的分析、检测和归因等研究, 本文采用一类新的方法——高阶矩分析方法, 结果表明该方法对于气候极端异常现象的演变特征分析非常有效, 为目前天气气候研究国际前沿——极端事件的资料分析和机理研究提供了新的途径和新的分析手段.

本文在标准化气候代用资料的基础上,利用滤波方法对资料序列进行层次分离,应用高阶矩分析方法检测了近 2000 年来气候极端异常现象的演变特征,进而研究了各时间层次上气候极端异常现象变化特征及其贡献.主要结论如下:

1. 对于 100 年以上时间层次,研究表明近 2000 年来气候极端异常现象可能存在着千年左右的周期振荡,公元 1100 年前后为关键转折时期,而且气候极端异常现象最为明显的时段与 20 世纪全球气候变化(气候增暖)相对应;60—100 年时间层次上的气候变化信号对气候极端异常现象发生的贡献可能相对较小.

2. 公元 300—1100 年间气候极端异常现象频繁发生,可能与 20—60 年时间层次上的气候变化信号

关系密切,而世纪以上时间层次则为公元 965—1094 年间气候极端异常现象的发生提供了主要的信号.

3. 在年际尺度上,石笋代用资料中所反映的气候极端异常现象的发生年份(公元 1960—1980 年间)与相应时段内海气相互作用下的 El Niño 或 La Niña 事件的发生年份有非常好的对应关系;而对树木年轮代用资料的分析却发现基本不存在这种对应关系.这或许表明石笋微层厚度相对于树木年轮所表征的气候指数,可能对 El Niño 和 La Niña 事件更为敏感和有效;当然,两类代用资料在地域方面对气候系统演变特征的表征范围、表征强度和表征指数对本文的分析结果也有影响.总之,这一现象有待于更加深入地分析和研究.

- [1] Feng G L , Chou J M , Dong W J 2004 *Chin. Phys.* **13** 1582 (in Chinese) [秦小光、刘东生、谭 明等 1999 地理学报 **54** 543]
- [2] Feng G L , Dong W J 2003 *Chin. Phys.* **12** 1076
- [3] Feng G L , Dong W J 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2347 (in Chinese) [封国林、董文杰 2003 物理学报 **52** 2347]
- [4] Feng G L , Gong Z Q , Dong W J *et al* 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 5494 (in Chinese) [封国林、龚志强、董文杰等 2005 物理学报 **54** 5494]
- [5] Shi N 2005 *Chin. Phys.* **14** 844
- [6] Shi N , Wei F Y , Feng G L *et al* 1997 *J. Nanjing Institute of Meteorology* **20** 355 (in Chinese) [施 能、魏凤英、封国林等 1997 南京气象学院学报 **20** 355]
- [7] Dai X G , Wang P , Chou J F 2004 *Progress in Natural Sciences* **14** 73
- [8] Gao X Q , Zhang W 2005 *Chin. Phys.* **14** 2370
- [9] 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]
- [10] Zeng H L , Gao X Q , Zhang W 2005 *Chin. Phys.* **14** 1265
- [11] Qin X G , Tan M , Liu D S *et al* 1999 *Holocene* **9** 689
- [12] Qin X G , Liu D S , Tan M *et al* 1999 *Acta Geogra. Sin.* **54** 543
- [13] Tan M , Qin X G , Liu D S 1998 *Science in China (series D)* **41** 416
- [14] Li H C , Gu D L , Lowel D Stott 1998 *Science in China (series D)* **41** 362
- [15] Briffa K R 2000 *Quater. Sci. Rev.* **19** 87
- [16] Liu D S , Tan M , Qin X G *et al* 1997 *Quater. Sci.* **7** 41 (in Chinese) [刘东生、谭 明、秦小光等 1997 第四纪研究 **7** 41]
- [17] Fritts H C 1976 *Tree rings and climate* (London : Academic press) p534
- [18] Zheng D W , Dong D N 1986 *Acta Astrom. Sin.* **27** 368
- [19] Rasmusson E M , Wang X L , Ropelewski C F 1994 *Secular variability of ENSO cycle National Research Council. Decade to century time scales of natural climate variability* (San Diego : Academic) p458
- [20] Wang X L , Ropelewski C F 1995 *J. Climate* **8** 1584
- [21] Shi N , Chen H , Xia D D 2000 *J. Trop. Meteor.* **16** 194
- [22] Jin Z H , Tao S Y 1999 *Chin. J. Atmos. Sci.* **23** 663

Detection of the recent 2000a climatic extreme anomalies based on a new kind of approach—the high-order moment method^{*}

Zhang Wen^{1)B)} Gao Xin-Quan^{2)B)} Dong Wen-Jie^{2)B)} Li Jian-Ping⁴⁾

1) *College of Physics Science and Technology, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China*

2) *Laboratory for Climate Studies of China Meteorological Administration, National Climate Center, Beijing 100081, China*

3) *Key Laboratory of Regional Climate-Environment Research for Temperate East Asia, 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 15 September 2005 ; revised manuscript received 4 November 2005)

Abstract

Based on the normalized high-resolution climatic proxy data, high-order moment method is used to detect the climate extreme anomalies in recent 2000 years in this paper. Combining with filtering method to extract the dominant components at physical backgrounds from the normalized data, we analyzed the information and examined the contributions of each component of the climate extreme events. The results show that: 1) On the timescale of more than 100 years, climatic oscillation with the period of about 1000 years may exist; besides, the 20th century witnessed the most active climate extreme anomalous phenomenon in recent 2000 years, so it may correspond to an active period of climate extreme anomaly phenomenon. 2) On 20—60year timescale, climate extreme anomaly phenomenon in the period of A. D. 300—1100a is relatively distinct and that in time span of A. D. 1100—1980a is comparatively mitigative. Possibly, this level makes no considerable contribution to the climatic anomaly of 20th century. This level and the century scale both reflect that for climatic change in recent 2000 years, the year around A. D. 1100a maybe the key period of climate transition. 3) On the interannual timescale (less than 20years), the years of occurrence of climatic extreme anomalies reflected in Beijing Shihua cave stalagmite proxy records has good correspondence with that of the El Niño or La Niña events (in this paper, only the period of 1960—1980a was considered). 4) high-order moment method has a good prospect in detecting the climatic extreme events.

Keywords : high-order moment, climatic anomaly, extreme events, hierarchy

PACC : 9260X

^{*} Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2006CB400503) and the National Natural Sciences Foundation of China (Grant Nos. 90411008 and 40325015).