

基于复杂度分析冰芯和石笋代用资料时间序列的研究 *

侯 威¹⁾ 封国林^{2,3)†} 高新全⁴⁾ 丑纪范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 , 北京 100029)

⁴⁾(兰州大学大气科学系 , 兰州 730000)

(2004 年 8 月 6 日收到 2004 年 9 月 13 日收到修改稿)

运用动态非线性时间序列分析方法——Lemper-Ziv 复杂度 , 分别计算了古里雅冰芯资料和北京石花洞石笋资料的复杂度 , 探讨了复杂度的物理内涵及其在气候变化研究中的意义 ; 小波多尺度分解分析表明 , 复杂度序列具有明显的特征周期 , 存在 780 年、 380 年、 160 年和 105 年的准周期 . 进一步研究发现 , 当取不同的窗口长度时 , 复杂度序列的特征基本相同 , 并且复杂度序列的突变和气候突变在时间尺度上有着较好的对应关系 . 揭示了近千年以来 , 在 380 年时间尺度上的准周期振荡 , 其振幅一直是在减弱的 , 而且其固有周期频率逐渐减小 . 1900 年复杂度开始持续下降 , 1920 年之后变化很小 , 类似于中国 6 世纪中期及 12 世纪中期的变暖期 , 因此造成 20 世纪气候变暖的原因还有待于深入研究 .

关键词 : Lemper-Ziv 复杂度 , 小波变换 , 气候 , 自然变率

PACC : 9260x , 0340G

1. 引言

人类进行大范围气象观测只有 100 多年的历史 , 常规气象观测资料无法满足人们研究长期以及超长期气候演化的要求 . 为了解决这一问题 , 利用代用资料来研究气候在较长时间尺度上的变化 , 冰芯资料和石笋资料便是其中的一部分 . 冰芯资料中氧 18 同位素含量和冰川累积量分别是温度和降水的可靠指标^[1] ; 石笋资料对于全球气候变化的研究具有重要意义^[2] , 石笋微层厚度的变化信息不仅记录了气候的特征 , 而且包含了气候演化过程的信息 , 尤其是关于温度和降水的信息 , 代表了大尺度上的背景周期 . 现在普遍认为这两种资料所包含的信息比较好地代表了全球或区域气候的变化 , 对这两种资料的研究 , 国内很多研究者已经做了大量工作^[3—7] .

近年来对各种复杂现象复杂度的研究已成为非线性科学的前沿课题之一^[8—15] , 在地球科学中关于

复杂性也进行了类似的研究^[16] . 以往对气候系统复杂度的研究都是用分维数、 Lyapunov 指数、近似熵等作为度量 , 这些量的计算要求有大量数据才能保证计算结果的可靠性 . Lemper-Ziv 复杂度^[11] 是对任意给定的有限长度符号序列的复杂性的度量 , 计算方便 , 适用于对气候序列的研究 , 而小波多尺度分解法则能够区分出不同尺度的信号^[17—19] . 本文利用 Lemper-Ziv 复杂度方法来研究古里雅冰芯资料和石笋资料的复杂度 , 并用小波多尺度分解算法分析了复杂度的周期性 , 作为对气候变化复杂度研究的一个尝试以及非线性科学的研究成果在实际中的应用推广 . 阐述了复杂度的定义及其物理意义 , 详细分析了冰芯和石笋资料的复杂度的演化特征 .

2. 复杂度的定义及其物理意义

Lemper-Ziv 复杂度的计算法则扼要介绍如下^[16] .

* 国家自然科学基金(批准号 90411008 A0275031)和国家重点发展基础研究项目(批准号 2004CB418300)资助的课题 .

† E-mail : feng-gl@sina.com

设由有限个符号组成的长度为 n 的符号序列为 $s_1 s_2 s_3 \dots s_n$, 从空串 ϵ 出发开始向其中添加 s_1 . 先考虑中间步骤, 设已生成前缀 $s_1 s_2 s_3 \dots s_{r-1}$, 并且下一个符号 s_r 是用添加操作完成的, 记为 $s_1 s_2 s_3 \dots s_n \rightarrow s_1 \cdot s_2 s_3 \dots s_{r-1} s_r \cdot s_{r+1} \dots$, 这里在 s_1 和 s_r 后的记号“ \cdot ”表示 s_1 和 s_r 是由添加操作生成的.

演化法则是, 先令 $Q = s_{r+1}$, $S = s_1 s_2 s_3 \dots s_r$, 观察 Q 是否是 $S Q \pi$ 的子串. 其中 π 表示的操作为: 将它前面的符号串的最后一个操作去掉, 即 $S Q \pi = s_1 s_2 s_3 \dots s_r$. 如果 Q 不能从 $S Q \pi$ 中的某个子串得到, 则就用添加操作加上 s_{r+1} , 并加上一个记号“ \cdot ”, 重复上述操作. 如果 Q 可以从 $S Q \pi$ 中某个符号复制得到, 则继续观察 $Q = s_{r+1} s_{r+2}$ 能否从 $S Q \pi$ 的某个子串复制得到. 这时 $S Q \pi = s_1 s_2 s_3 \dots s_r s_{r+1}$ 如还可以从 $S Q \pi$ 的某个子串复制得到, 则再考虑 $Q = s_{r+1} s_{r+2} s_{r+3}$, 并提出同样的问题. 这样下去有两种可能, 或者 Q 已包含了原来给定的长度为 n 的序列的最后一个符号, 则分析结束. 或者对某个 Q , 它再不能从 $S Q \pi$ 的任何一个子串复制得到. 这时就采取添加操作, 将这个 Q 的最后一个符号添上, 并在它后面加上记号“ \cdot ”. 因此可以看到, 实际上记号“ \cdot ”的个数反映了采取添加操作的次数. 如果符号串在上述分析结束时以“ \cdot ”结束, 则这个记号的个数就等于符号串的复杂度. 否则将个数加一就得到复杂度. 也就是说, 原给定的符号串被“ \cdot ”分成段的数目就定义为复杂度. 这个复杂度实际上就是指描述给定符号序列所需的最少的互不相同的“子串”的个数, 这些子串一般称为“词”. 显然所需“词”越多, 则符号序列越复杂, 描述它就需要越多的子串.

一个经过了复制和添加操作的符号序列为 $s_1 s_2 s_3 \dots s_n \rightarrow s_1 \cdot s_2 s_3 \dots s_{r-1} s_r \cdot s_{r+1} \dots \cdot$, 此序列的复杂度为 3. 可以解释为: 两个“ \cdot ”号之间的符号串, 例如 $s_1 \dots s_r$, 是这个符号序列的一个新模式. 这里的“模式”就是上面所说的“词”, “新模式”就是向给定符号序列中采取添加操作所加入的“新词”, 它不可以从符号串 $s_1 \dots s_{r-1}$ 中复制得到, 而 $s_2 \dots s_k$, $k = 3, 4, \dots, r-1$ 可以从符号串 $s_1 \dots s_{r-1}$ 中复制得到, 是以前已经存在的某种模式的“翻版”或“在现在的周期性再现”. 一个符号序列的复杂度越大, 说明它的添加操作越多, 新模式也越多, 描述给定符号序列所需的最少的互不相同的“子串”的个数越多, 给定的符号序列周期性越弱, 出现新模式的速率越快. 反之则

复制操作越多, 新模式越少, 周期性越强, 出现新模式的速率越慢. 关于复杂度的物理机理可以参见文献[20—22], 现在普遍认为复杂度的物理意义在于复杂度反映了一个时间序列随着序列长度的增加出现新模式的速率^[15].

如果给定符号序列的复杂度为 Z , 我们就说这一符号序列出现新模式的速率为 Z , 也可以认为出现了新模式就是发生了新变化. 所以计算一个时间序列的复杂度并对其进行周期性分析具有很强的物理背景, 能够描述出系统的状态发生变化的速率以及这种速率所具有的周期性, 这一点是非常重要的.

本文计算了冰芯和石笋代用资料的复杂度. 这一复杂度代表了气候在窗口长度时期内随时间出现新变化(新模式)的速率, 两个“ \cdot ”之间的时期表明这一时期的气候变化形式在此之前是没有的. 复杂度越大, 说明气候在窗口长度时期内随时间出现的新变化越多, 发生新变化的速率越快, 表明这一时期的气候变化是无序而复杂的. 反之, 复杂度越小, 则说明发生新变化的速率越慢, 气候变化是规则的, 周期性越强.

3. 冰芯和石笋资料复杂度的演变特征及其小波分析结果

本文使用的代用资料为青藏高原古里雅冰芯的氧 18 同位素含量时间序列(301—1990 年)、冰芯冰川累积量时间序列(301—1990 年)和北京石花洞石笋的微层厚度时间序列(291—1980 年), 它们的长度均为 1690 年, 其中石笋资料代表了大的背景周期. 复杂度分析采用滑动窗口的方法: 对一个长度为 N 的时间序列, 从资料的第一个数据开始, 首先取一长度为 L 的矩形窗口的数据并对窗口内的数据计算其复杂度, 然后将窗口向后滑动, 滑动步长为 M 个点, 得到另一组数据并计算其复杂度, 重复上述步骤直到全部数据的最后一点; 每一个窗口内计算得到的复杂度赋值给窗口内最后一年, 将每个窗口计算得到的复杂度依次连接, 由此建立复杂度时间序列. 经过反复的计算和比较, 分别取窗口长度为 50, 150, 200, 250 和 350 年, 滑动步长取 1—5. 图 1 是古里雅冰芯氧 18 同位素含量资料在滑动步长同为 5, 不同的窗口长度时的复杂度序列, 图中自上而下窗口长度分别为 350, 250 和 150 年; 图 2 是冰芯氧 18 同位素含量资料在窗口长度同为 200, 不同滑动步

长时的情况,图中自上而下滑动步长分别为1,3和4.可以看出当取不同的窗口长度时得到的复杂度序

列的基本特征很相似,并且同一窗口长度取不同滑动步长时的特征几乎一样。冰芯累积量资料、石笋资

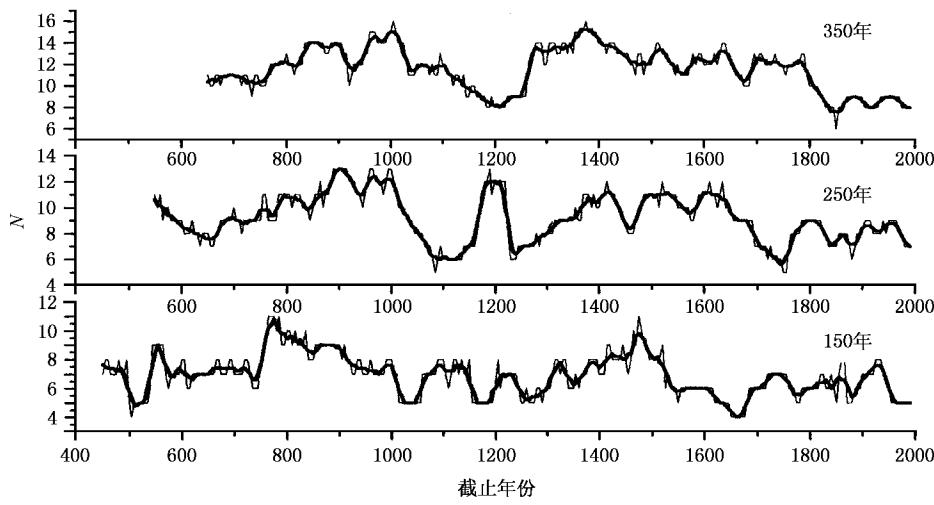


图1 冰芯氧18同位素含量资料在不同窗口长度、相同滑动步长时的复杂度序列。细黑线是复杂度序列,粗黑线是复杂度序列的5点平滑线,纵坐标Z为复杂度,横坐标为截止年份。

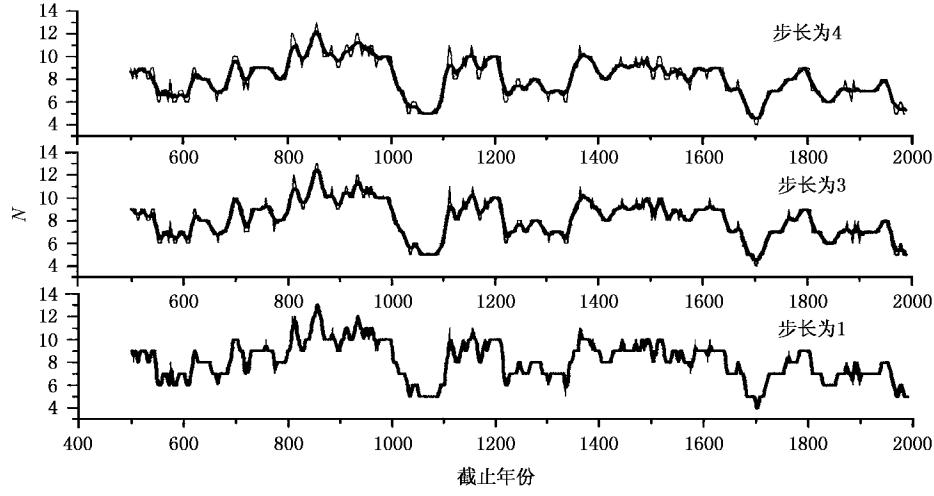


图2 冰芯氧18同位素含量资料在同一窗口长度、不同滑动步长时的复杂度序列。其他说明同图1

料的情形与冰芯氧18同位素含量资料很相似,图略。鉴于此,本文后面的分析统一采用窗口长度为200年,滑动步长为5的情况。

3.1. 复杂度的演变特征

图3为古里雅冰芯氧18同位素含量资料的复杂度演变曲线。从图中可以发现复杂度序列在振荡中演变发展,具有明显的年际、年代际(几十年)、世纪际(几百年)甚至更长时间尺度的特征。同时复杂度序列在一些年份发生了突变,参照于已有的研究结果^[6,22-28],我们发现在发生复杂度突变的年份也发生了气候突变。从6世纪中期开始,中国气候开始

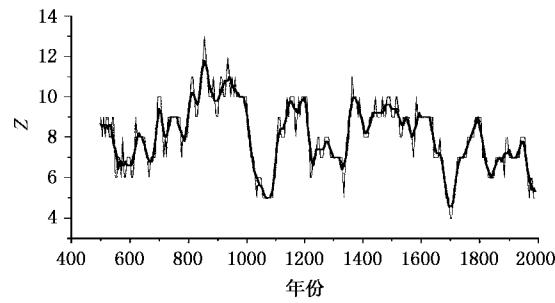


图3 古里雅冰芯氧18同位素含量的复杂度序列。其他说明同图1
转暖,直到中世纪适宜期结束,而在这一时期复杂度开始持续增大;1100年左右是中国气候的关键转

折时期,在 1100 年之前气候以寒冷和少雨为主,此后则温度上升,降雨增多;而在 990—1065 年和 1080—1155 年,气候均比较暖;在 1630 年气候转冷,1690 年又开始变暖,1795 年又变冷,在 1845 年再次变暖,在这些时段复杂度均发生了突变。自 1950 年之后复杂度持续下降,而 1950 年左右发生了一次气候突变。古里雅冰芯冰川累积量资料的复杂度序列与图 3 具有类似的时空演化结构(图略)。

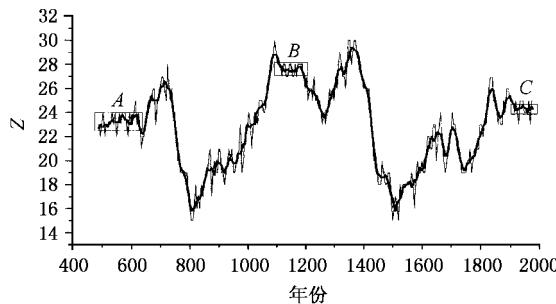


图 4 石笋微层厚度资料的复杂度序列。其他说明同图 1

石笋资料代表了大尺度上的背景周期。在图 4 中可以很明显的看出波动的周期结构,在序列的末尾复杂度只有微弱的变化,说明 20 世纪不同气候状态之间的转换速率是十分缓慢的。从图中还可以看出,在区域(用黑线框标出)A(490—625 年),B(1120—1190 年),C(1915—1980 年)有着很类似的现象,它们对应的平均复杂度分别为 23.34, 27.57, 24.32。参照已有的研究结果^[6, 22—28],中国从 6 世纪中期开始的气候变暖对应于 A 区,在 790—820 年气候突然变冷,复杂度序列也发生了突变;1100 年是一个气候突变点,在 1155—1190 年,气候持续变暖,这对应于 B 区;1230 年是一个很重要的突变点,全球气候在 1230 年前后是明显不同的,在图中也可以看出 1230 年前后的图形有着一定程度的对称关系;小冰期时期,在 15 世纪初和 16 世纪末气候均发生了回暖,这一时期复杂度序列也发生了突变;1900 年之后复杂度开始持续下降,1920 年之后变化很小,而在这一时期气候持续变暖,这对应于 C 区。

因此,就冰芯资料和石笋资料的复杂度序列而言,造成 20 世纪气候变暖的原因还有待于继续深入的研究,尤其是在各个层次尺度上的深入研究。

3.2. 复杂度的小波分析结果

尽管从图 3 和图 4 可以看出对于不同的代用资料,计算得到的复杂度的细节有所不同,但对三种资

料的复杂度序列进行小波分析,发现存在明显的 780 年、380 年、160 年和 105 年的周期,更小尺度层次上的小波系数图类似于 105 年的情形,它们具有惊人的一致性。

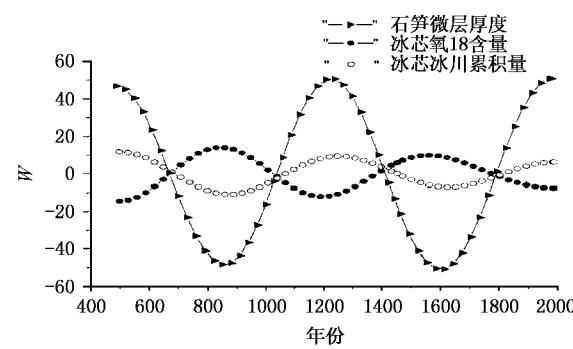


图 5 复杂度序列在 780 年尺度层次上的小波系数图 纵坐标 W 为小波系数,横坐标为截止年份

图 5 展示了复杂度序列在 780 年尺度层次上的小波系数。图中包含有两个完整的周期,周期长度几乎不变。而且,可以看出冰芯资料和石笋资料的突变时段非常一致,而且波峰和波谷有着比较好的对应关系,即在该时间尺度上石笋资料和冰川累积量资料位相相同,和冰芯氧 18 同位素含量资料相位相反。同时,冰芯资料在 780 年时间尺度上具有很强的振幅。仅对该层次而言,近千年气候的变化对于周期振幅和周期长度没有明显的变化。

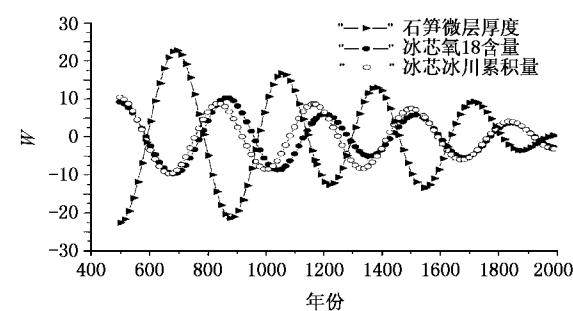


图 6 复杂度序列在 380 年尺度层次上的小波系数图 其他说明同图 5

从图 6 可以看出在整个资料长度内三种资料的振幅都随着时间而明显衰弱,尤其是石笋序列,在 1865 年之后振幅较以前更加小。三种资料包含的八个完整的波峰或波谷振幅的具体下降情况见表 1。说明在这一尺度层次上,尤其是近千年,复杂度的周期性越来越弱,这一现象一直持续到 20 世纪 90 年代,并且有继续减弱的趋势。在 1100—1450 年左

右,冰芯资料的波峰和波谷发生了微弱的紊乱,根据文献[6],在1101—1200年,气候是冷期,在1201—1450年,是气候暖期,这一时期发生了一次冷暖交替。在图中有三个完整的周期(从690—1865年),从总体上看每种资料的周期长度均在减小,即频率在增加,在此周期上气候变化越来越快。而且,冰芯和石笋资料的波峰和波谷的发生时期几乎是一致的,但是相位相反。

从图7可以看出,在160年尺度层次上,在1200—1600年之间,冰芯资料的图形发生了紊乱,但石笋资料的没有发生紊乱。而且在这一时期的前后,三种资料在同一时间波峰和波谷相位的异同性也发

表1 380年尺度层次上三种资料波峰或波谷的振幅变化

年份	冰芯氧18同位素含量		冰川累积量		石笋微层厚度	
	年份	振幅	年份	振幅	年份	振幅
685	9.754581	680	9.738195	680	22.47341	
865	10.27483	840	8.717338	870	21.38628	
1040	8.716508	1000	8.47617	1050	16.76466	
1205	6.028234	1165	8.623998	1210	12.60679	
1360	5.114791	1335	8.318447	1370	13.04496	
1520	5.79379	1505	7.451204	1535	13.36953	
1685	5.465389	1675	5.986832	1705	9.312862	
1845	3.773175	1840	4.109031	1685	3.57612	

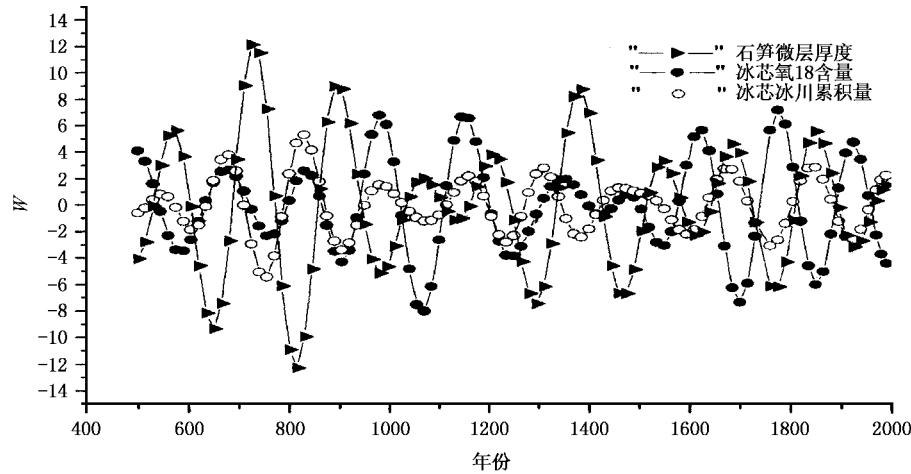


图7 复杂度序列在160年尺度层次上的小波系数图 其他说明同图5

生了变化。这说明,1100—1600年之间该尺度发生了很剧烈的变化。事实也是如此。根据文献[6],在1101—1200年,气候是冷期,在1201—1450年,气候

是暖期,在1451—1500年,变为冷期,在1501—1600年,又变为暖期,这期间有一个时间很短只有50年的变化周期。从整体上看160年尺度层次的周期固

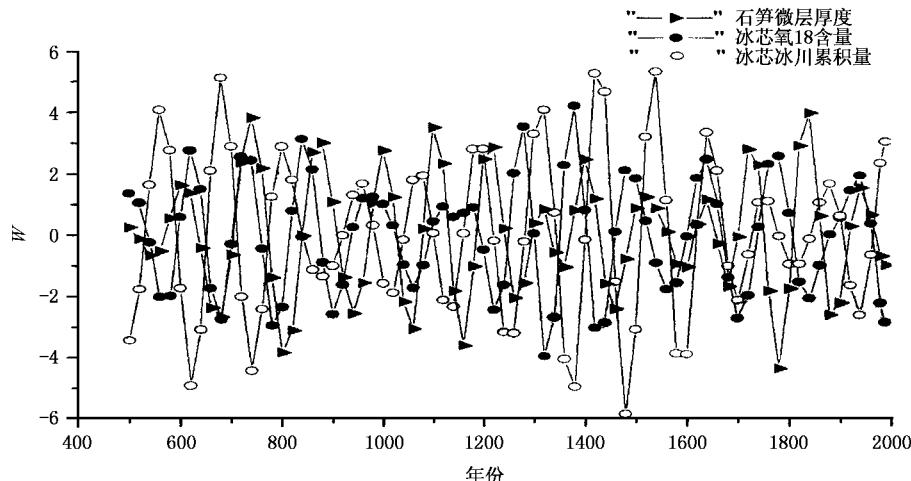


图8 复杂度序列在105年尺度层次上的小波系数图 其他说明同图5

有频率是比较稳定的。

由图 8 可以看出冰芯和石笋资料的 105 年的周期还是比较明显的,二者的振幅都随着时间不断变化,表现为一段时期的振幅较小,一段时期的振幅较大,两种情况交替出现,并且周期的时间长度的变化不明显。在冰芯冰川累积量的图上,1120—1175 年振幅出现了一次很小的波动,这一时期正是 11—12 世纪十分寒冷的冷期;1860—1915 年的曲线也有不规则的现象,这一时期是气候由冷向暖的过度时期,而 1920 年是公认的气候突变点。

综上所述,可以看出冰芯和石笋资料复杂度序列在 780 年、380 年,以及在 160 年、105 年尺度层次上的周期性是很明显的,其中 380 年尺度层次的振幅随着时间一直减弱,周期长度也在变小,但是其他尺度层次的周期长度几乎没有变化或者变化很小。

4. 结 论

本文基于 Lemper-Ziv 复杂度的概念和算法计算

了冰芯和石笋资料的复杂度,并分析了复杂度的周期性变化。由于复杂度代表了时间序列出现新模式的速率,而冰芯资料和石笋资料是气候的代用资料,所以冰芯和石笋资料复杂度的周期性变化就代表了气候变化速率的周期性变化。经过比较,发现复杂度序列的突变和气候变化在发生时间上有着较好的对应关系。对复杂度进行小波分析,结果显示冰芯和石笋资料的复杂度序列在 780 年、380 年,以及 160 年、105 年尺度层次上有明显的周期性,说明气候变化速率在这些尺度层次上也具有明显的周期性;其中在 380 年尺度层次上的振幅随着时间一直在减小,周期长度也在减小,尤其是近千年,减小的幅度愈来愈大,但其他尺度层次的周期长度几乎没有变化或者变化很小,这表明气候变化速率在 380 年尺度层次上的周期性愈来愈弱,尤其是在近千年,减弱的幅度越来越大,但在其他的尺度层次上,气候变化速率的周期性还是很稳定的,造成 20 世纪气候变暖的原因还有待于继续深入的研究。

- [1] Yao T D et al 2002 *Science in China (Series D)*. **45** 1068
- [2] Liu D S et al 1997 *Quaternary Science*. **1** 41 (in Chinese)[刘东生等 1997 第四纪研究 **1** 41]
- [3] Qin X G et al 1999 *Acta Geographic Sinica*. **54** 543 (in Chinese)[秦小光等 1999 地理学报 **54** 543]
- [4] Tan M , Qin X G , Liu D S 1998 *Science in China (Series D)*. **41** 416
- [5] Li H C , Gu D L , Lowel D , Stott 1998 *Science in China (Series D)*. **41** 363
- [6] Yao T D et al 1996 *Chinese Science Bulletin*. **41** 1103 (in Chinese)[姚檀栋等 1996 科学通报 **41** 1103]
- [7] Yao T D 2000 *Quaternary Science* **20** 165 (in Chinese)[姚檀栋 2000 第四纪研究 **20** 165]
- [8] Zhang H X et al 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 1416 (in Chinese)[张红煊等 2000 物理学报 **49** 1416]
- [9] Li C G et al 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2114 (in Chinese)[李春贵等 2003 物理学报 **52** 2114]
- [10] Yuan J et al 1997 *Acta Phys. Sin.* **46** 2095 (in Chinese)[袁坚等 2003 物理学报 **46** 2095]
- [11] Lemper A and Ziv J 1976 *IEEE Trans* **22** 75
- [12] Goldenfeld N and Kadanoff L P 1999 *Science* **284** 87
- [13] Rind D 1999 *Science* **284** 105
- [14] Pincus S M 1995 *Chaos* **5** 110
- [15] Gu H G et al 2001 *Space Medicine & Medical Engineering* **14** 192 (in Chinese)[古华光等 2001 航天医学与医学工程 **14** 192]
- [16] Deng Z W , Min J Z and Zhang Y 2001 *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* **24** 186 (in Chinese)[邓自旺、闵锦忠、张勇 2001 南京气象学院学报 **24** 186]
- [17] Wang P and Dai X G 2004 *Chin. Phys.* **13** 1770
- [18] Dai X G , Wang P and Chou J F 2003 *Chinese Science Bulletin* **48** 2483 (in Chinese)[戴新刚、汪萍、丑纪范 2003 科学通报 **48** 2483]
- [19] Dai X G et al 2003 *Progress in Natural Science* **13** 1182 (in Chinese)[戴新刚等 2003 自然科学进展 **13** 1182]
- [20] Kaspar F and Schuster H G 1987 *Physical Review A* **36** 842
- [21] Kolmogorov A N 1965 *Probl. Inf. Transmission* **1** 1
- [22] Zheng J Y , Ge Q S and Zhang P Y 1999 *Advance in Earth Science* **14** 177 (in Chinese)[郑景云、葛全胜、张丕远 1999 地球科学进展 **14** 177]
- [23] Fu Z B 1994 *Scientia Atmospherica Sinica* **18** 373 (in Chinese)[符淙斌 1994 大气科学 **18** 373]
- [24] Crowley T J and Lowery T S 2000 *Ambio* **29** 51
- [25] Mann M E , Bradley R S and Hughes M K 1999 *Geophys. Res. Lett.* **26** 759
- [26] Wei F Y and Cao H X 1995 *Scientia Atmospherica Sinica* **19** 140 (in Chinese)[魏凤英、曹鸿兴 1995 大气科学 **19** 140]
- [27] Liu SD et al 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 718 (in Chinese)[刘式达等 2003 物理学报 **52** 718]
- [28] Feng GL et al 2004 *Chin. Phys.* **13** 413

Investigation on the time series of ice core and stalagmite based on the analysis of complexity^{*}

Hou Wei¹⁾ Feng Guo-Lin^{2,3)} Gao Xin-Quan⁴⁾ Chou Ji-Fan⁴⁾

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

²⁾(*Key Laboratory of National Meteorological Bureau Climate Research Center , Beijing 100081 , China*)

³⁾(*Institute of Atmospheric Physics , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100029 , China*)

⁴⁾(*Department of Meteorological Science , Lanzhou University , Lanzhou 730000 , China*)

(Received 6 August 2004 ; revised manuscript received 13 September 2004)

Abstract

The complexity series of the Guliya (Tibetan plateau) ice core and Shihua cave (Beijing) stalagmite proxy records were respectively calculated in this paper , using a dynamical nonlinear analysis method for time series-Lemper-Ziv complexity algorithm ; and the physical implication of Lemper-Ziv complexity and its meaning in the study of climate change were also discussed. The wavelet analysis results show that there exist distinctive quasi-periods of 780- , 380- , 160- , and 105-year in the complexity series. Further investigations indicate that when different window lengths are selected , the characters of the complexity series for a given time series are basically the same , and there exists the coherency between the jumps of the complexity series and the climatic jumps on various timescales. This paper presents , for the first time so far as we know , the oscillation on 380-year timescale in the recent millennium , with amplitude decaying and intrinsic period reducing. The complexity of the time series has gradually reduced since 1900. For the complexity of the stalagmite data ,there has been the quasi-equal-amplitude oscillation after 1920 , which is similar to the circumstances of the warming epochs over China in the middle of the sixth century and the middle of the twelfth century. Consequently , the reason for the warming in the twentieth century remains to be necessary to study.

Keywords : Lemper-Ziv complexity , wavelet transform , climate , natural variability

PACC : 9260x , 0340G

^{*} Project supported by the National Natural Sciences Foundation of China (Grant Nos. 90411008 A0275031) and the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No.2004CB418300).