

中国气温涨落层次结构的区域性特征^{*}

余振苏^{1,3)} 陈 炯^{1,2,4)} 梁 爽^{1,2)} 刘式达^{1,2)}

1) (北京大学力学与工程科学系湍流与复杂系统研究国家重点实验室, 北京 100871)

2) (北京大学地球物理系, 北京 100871)

3) (Department of Mathematics, University of California, Los Angeles, CA 90095, U. S. A.)

4) (中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029)

F4 A

摘 要 运用近年来发展的湍流层次结构模型分析中国气温序列的涨落, 研究其层次相似结构的区域性特征。通过对全国 160 个站点近 50 年来的月平均气温距平序列的分析, 发现层次相似律基本上都存在, 得到的层次相似系数 β 具有一定的区域分布特征。我们对 β 的含义进行了讨论, 并研究了 β 的区域分布以及造成这种分布的原因。

关键词: 层次相似律; 气温变化; 区域性特征

1 引言

气温的变化不仅在时间上是不均匀的, 而且在空间上具有明显的区域差异, 以近百年的气温变化为例, 北半球、南半球、全球平均和中国的气温变化都不尽相同。有研究表明^[1,2], 20 世纪 30 年代末到 60 年代中期, 北半球陆地气温基本上呈线性下降了 0.2°C , 而南半球的平均温度基本保持稳定。中国气温与北半球及全球气温变化的比较结果为, 20 年代到 30 年代的增温是一致的, 1940~1970 年间的降温也是一致的, 不过中国的幅度更大; 80 年代的回暖则远不如北半球或全球明显, 以至中国 80 年代的气温仍略低于近百年的平均, 而 80 年代则是全球近百年来最暖的 10 年。

大气是高雷诺数的粘性流体, 速度场始终处于湍流状态, 从观测资料看, 速度场上大涡旋达数千公里, 小涡旋仅几毫米。同时, 大气中除了有速度场以外还有温度场、湿度场等被动标量场。和速度场对应, 在天气图上也有高达数千公里的温度等值线构成的大涡旋, 以及同样小的不同地点的温度差别而形成的小涡旋。因此温度场也处于多种尺度的湍流状态。过去刘式达等^[3]曾对不同尺度的气温状态提出了大小尺度(高低层次)之间的相互作用动力学, 并且刘式达等^[4]、陈炯等^[5]、荣平平等^[6]用子波变换分析了温度场的多尺度多层次特征。气温在不同尺度上均有随机涨落, 但这些涨落是更大范围的大气环流运动的产物, 因此这些涨落运动中蕴含着一定的自组织结构特性。

近几年来, 余振苏等^[7~9]提出了湍流层次结构理论, 将湍流的随机性和确定性联系起来, 认为湍流运动不仅在不同尺度上形成层次, 也在不同涨落幅度上形成层次, 并且

2000-12-12 收到, 2002-07-29 收到再改稿

^{*} 国家自然科学基金委员会杰出青年科学基金(1825503)、国家自然科学基金资助项目 40035010 以及 49975024 和教育部优秀回国人员基金资助

在湍流串级过程中, 最高激发态(极大振幅涨落)起着领导作用。最近, 陈炯等¹⁾已经将层次结构理论运用到气温涨落信号的分析, 揭示了不同尺度、不同幅度的气温涨落间的内在相关性。中国地域广阔, 东西南北跨度很大, 本文试图用气温涨落的层次相似律来定量描述中国气温变化的区域性特征及分布, 更进一步地探讨层次相似律在气候动力学上的应用。

2 层次结构模型

首先对湍流的层次结构模型^[7]作一个简单的介绍。

湍流统计结构分析一般从分析速度结构函数入手。在充分发展的各向均匀同性湍流场中, 定义粗粒化的速度脉动 $\delta v_l = v(x+l) - v(x)$ 为尺度 l 的速度差, 它刻划了该尺度上的速度涨落。定义 p 阶速度结构函数 $S_p(l) = \langle |\delta v_l|^p \rangle$, 这里 p 为任意实数, $\langle \cdot \rangle$ 代表系综平均值, $S_p(l)$ 刻划了阶数为 p 的涨落运动幅度。理论分析表明, 当 $l \ll l_0$ 时 (l_0 为湍流场的积分尺度), δv_l 并非呈高斯分布。根据 Kolmogorov 的理论, l 在耗散尺度到积分尺度之间存在一个惯性区, 内有 $S_p(l) \sim l^{\zeta_p}$, 这就是标度律, 它反映了 p 阶涨落运动随尺度变化的标度规律。

按照层次结构模型^[7], 引入层次变量的概念, 定义 p 阶层次速度结构变量

$$F_p(l) = S_{p+1}(l) / S_p(l) = \int |\delta T_l| Q_p(|\delta T_l|) d|\delta T_l|, \quad (1)$$

其中, $Q_p(|\delta T_l|) = \frac{|\delta T_l|^p P(|\delta T_l|)}{\int |\delta T_l|^p P(|\delta T_l|) d|\delta T_l|}$ 是速度差绝对值的 p 阶加权概率密度函

数, 它反映了 p 阶矩的概率分布特征。这样 $F_p(l)$ 为对应于 p 阶加权概率密度函数的期望值。因为 $|\delta v_l|$ 非负, 容易得出这样的结论, 即 $F_0(l) \leq F_1(l) \leq \dots$, 因此, $F_p(l)$ 代表了幅度增长的涨落结构序列, 这也正是层次变量的含义, 它反映了涨落的分布具有一种层次结构。 p 值越大时, 大振幅涨落表现得越为突出, 对应于峰值的期望值 $F_p(l)$ 也越大, 即大振幅事件的影响随之越来越突出。

按照层次相似律假设, 相邻层次间的期望值满足下面的量纲关系

$$F_{p+1}(l) = A_p F_p(l)^\beta F_\infty(l)^{-\beta}, \quad (2)$$

其中 $F_\infty(l)$ 称为最高激发态结构, 显然 $F_\infty(l) = \lim_{p \rightarrow \infty} F_p(l)$, 反映了振幅最大的涨落事件。为了消除 $F_\infty(l)$ 的影响, 选取 p_0 为参考阶数, 作比值, 得到:

$$\frac{F_{p+1}(l)}{F_{p_0+1}(l)} = \frac{A_p}{A_{p_0}} \left(\frac{F_p(l)}{F_{p_0}(l)} \right)^\beta, \quad (3)$$

考查 $\log \frac{F_{p+1}(l)}{F_{p_0+1}(l)}$ 与 $\log \frac{F_p(l)}{F_{p_0}(l)}$ 之间是否有线性关系, 即层次相似律是否成立。如果存在

1) 陈炯、余振苏、梁爽、刘式达, 气温涨落中的层次相似律, 南京气象学院学报(待发表)

层次相似律, 则直线的斜率就是层次相似系数 β 。

3 全国气温的层次结构分析

定义 $\delta T_\tau = T(t + \tau) - T(t)$ 为相隔时间间隔为 τ 的温度差, 它反映了时间尺度为 τ 上的温度涨落。按照上一节介绍的层次结构理论, 可定义 $P(|\delta T_\tau|)$ 为 τ 时间尺度上的温度涨落概率密度分布函数, 则温度场涨落的结构函数为 $S_p(\tau) = \langle |\delta T_\tau|^p \rangle$, p 阶加权期望的密度分布函数记为 $Q_p(|\delta T_\tau|)$, 相应的加权期望值记为 $F_p(\tau)$, 它对应于一组幅度不断增加的气温涨落结构。画出 $\log \frac{F_{p+1}(\tau)}{F_{p+1}(\tau)}$ 对 $\log \frac{F_p(\tau)}{F_p(\tau)}$ 的图, 检验两者是否有线性关系。如果两者有线性关系, 则层次相似律存在, 直线的斜率为 β 。

我们对全国 160 个站点 1951 年 1 月~1999 年 2 月的月平均气温距平资料进行分析。对于每一个站点, 都可以通过加权概率密度分布 $Q_p(|\delta T_\tau|)$ 算出 $F_p(\tau)$, 其中 $1 \leq p \leq 7$, $12 \text{ 月} \leq \tau \leq 120 \text{ 月}$ 。以 $\log \frac{F_p(\tau)}{F_7(\tau)}$ 和 $\log \frac{F_{p+1}(\tau)}{F_8(\tau)}$ 为横纵坐标, 由最小二乘法求得该直线的斜率即 β 。结果表明, 对于全国 160 个站点而言, 气温涨落基本满足层次相似律, 层次相似系数 β 在 0.48~0.77 之间, 差别还是比较明显的。图 1 给出了 β 在全国范围内的大致分布图。可以看出, β 的分布大致可以划分为 3 个区域, 图中用 3 种不同的灰度表示。全国大部分地区的气温涨落 β 值在 0.6~0.7 之间; 东北及华中沿海地区 β 值较高, 在 0.7 以上; 西南地区 β 值较低, 小于 0.6。

我们选出 3 个位于不同区域的典型站点, 它们是大理、包头和厦门, β 值分别是最小、在 0.6 和 0.7 之间、最大。图 2 显示的是这 3 个城市近百年的月平均气温序列。它们的 β 值测量见图 3。

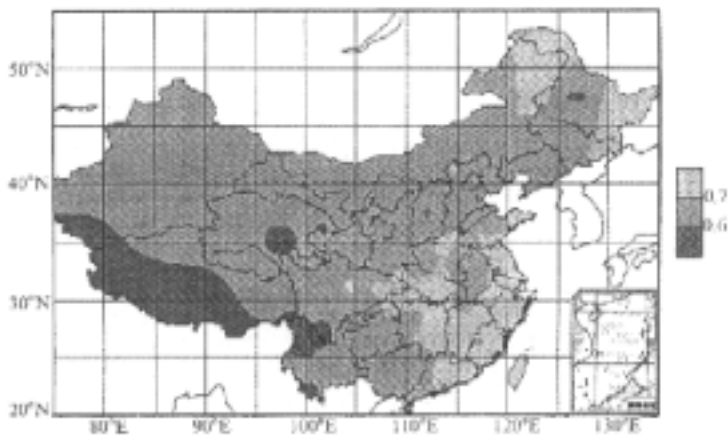


图 1 中国近 50 年月平均气温层次相似系数 β 的分布图

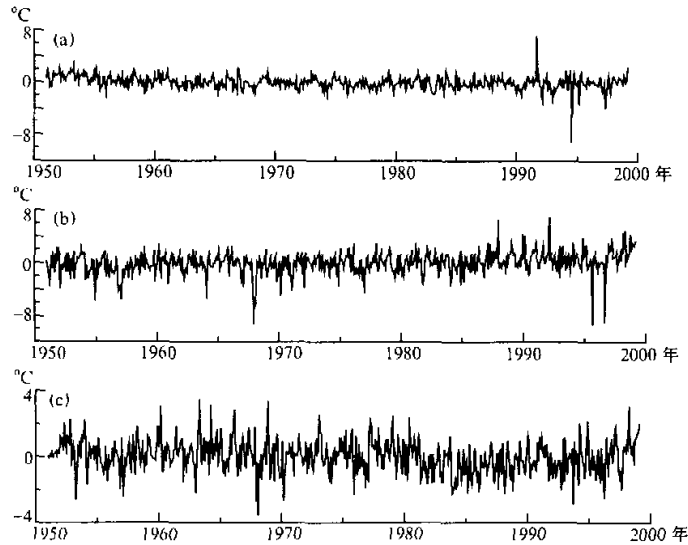


图2 大理 (a)、包头 (b)、厦门 (c) 的月平均气温距平序列

4 关于层次相似系数 β 以及中国气温 β 区域分布特征的讨论

根据层次结构模型, 湍流场是由不同尺度、不同脉动幅度以及不同相干程度 (又叫空间填充度) 的层次结构组成。大尺度上的脉动由于非线性作用传播到小尺度, 动力学状态变化的特征时间随空间尺度减小而减小, 脉动速度的典型值 (例如均方根) 也是如此。然而, 相对于脉动速度的典型值, 在串级过程中渐渐出现稀少的大振幅事件, 脉动振幅越大, 它们占据的空间集合的维数越小, 因此空间形态的相干性就越强。其中最大振幅的事件对应于最强间歇结构或最高激发态, 它们占有的空间集合维数最小, 具有最强的空间相干性。在统计定常情况下, 即湍流发展充分时, 不同尺度和幅度的脉动由相似律联系在一起, 形成了一个整体性的层次结构, 使湍流在统计意义上成为一个完整的自组织体系。可以认为层次结构是由最高激发态和层次相似系数 β (又称间歇参数) 共同决定的。

气温在不同尺度上也有随机涨落, 可以认为这些涨落是更大范围大气环流运动的产物, 因此这些涨落运动中蕴含着一定的自组织结构特性。我们曾对 Jones 序列进行分析¹⁾, 验证了气温涨落中层次相似律的存在, 得到了层次相似系数 $\beta \approx 0.7$ 。通过对全国 160 个站点的月平均气温序列进行分析, 我们对 β 的意义有了更进一步的了解。全国 160 个站点的月平均气温资料不仅包含了近 50 年来中国气温在时间上多尺度涨落的信息, 更包含了空间即地域上气温分布多层次的信息。我们目前的分析表明, 在 1~10 年尺度上, 全国 160 个站点的气温涨落基本上都满足层次相似律, 其层次相似系数 β 在

1) 陈制, 余振苏, 梁爽, 刘式达, 气温涨落中的层次相似律, 南京气象学院学报(待发表)

0.49~0.77 之间变化。从图 2 和图 3 我们可以看出, 不同的 β 对应的气温序列具有明显不同的特征。

根据层次结构理论, β 是对系统内高振幅涨落与低振幅涨落之间相关关系的统计描述。当 $\beta \rightarrow 1$ 时, 高低振幅的涨落变化是完全随机的, 或者说系统大小尺度的结构在统计上是完全自相似的, 高低振幅的涨落结构没有差别, 这对应于经典的 Kolmogorov 湍流图像, 也对应于一个完全混乱的随机过程 (如布朗运动)。而当 $\beta \rightarrow 0$ 时, 表明高低振幅涨落结构存在着极大的差别, 通常系统完全由最高激发态所决定, 如 Burgers 激波就是这样的例子, 这时我们可以认为高低振幅的涨落变化完全非随机, 系统处于最佳有序态。

分析图 2 中的 3 组序列, 我们发现, 当序列中出现了一个或几个极大

振幅事件, 如大理在 1990~1995 年之间出现的两个比较特殊的高温和低温事件, 对应的 β 相对较小, 大理的 β 值约为 0.49; 如果序列中的极值事件在整个尺度上均匀随机分布, 则对应的 β 值相对较大, 如厦门。这也可以从 (3) 式中进行分析。我们知道, p 值越大, $F_p(\tau)$ 越能反映极值事件的影响。当系统中出现一个高振幅事件时, 最高激发态与次高激发态之间差别比较大, p 增加到 $p+1$ 时, $F_p(\tau)$ 的变化很大, 因此 $F_{p+1}(\tau)$ 与 $F_p(\tau)$ 之间的差别很大, β 值更趋向于 0, 此时由 (2) 式知, 系统主要由该高振幅事件所控制。相反, 如厦门的月平均气温距平, 它的最高激发态与次高激发态之间差别不大, 因此, 当 p 增加到 $p+1$ 时, $F_{p+1}(\tau)$ 相对于 $F_p(\tau)$ 变化较小, β 值更趋向于 1。

从图 1 中的 β 分布情况看, β 的大值区分布在东北及华中沿海地区, 小值区分布在青藏高原。我们对此的解释是, 华中沿海地区属于温带气候, 受海洋调节作用的影响, 其温度变化比较平和, 以厦门的气温变化为例, 没有什么特别大的突发性事件, 间歇度较小; 而青藏高原海拔较高, 受太阳辐射的直接影响较大, 可能会在某些月份出现温度较高的现象, 如大理 1991 年 8 月份的高温事件和 1994 年 7 月份的异常低温, 它们与其他月份的温度差别很大, 正如上面的讨论, β 其值较小。图 1 分析的结果与实际气候情况相符。

5 结论

本文通过对全国 160 个站点的月平均气温序列进行分析, 绘制出了层次相似系数 β

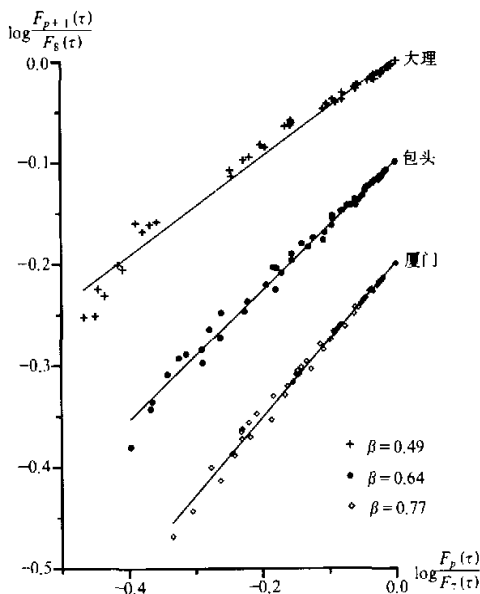


图 3 大理、包头和厦门的 β 值测量

在全国范围内的大致分布情况,发现该分布具有一定的气候学意义。同时得到极值气候对层次相似系数 β 的影响,即造成 β 值减小。或者说, β 值的大小反映了气候序列的某些特征。这些结果对我们进一步研究气候动力学具有一定的意义。

致 谢 北京大学湍流国家重点实验室的苏卫东博士、任奎同学、邹正平博士、付遵涛博士多次和作者进行了有益的讨论,本文图 1 所使用的气象绘图软件是由北京大学地球物理系的郑永光同学制作提供,在此深表感谢!

参 考 文 献

- 1 王绍武,气候系统引论,北京:气象出版社,1994,54~59.
- 2 李晓东,气候物理学引论,北京:气象出版社,1997,81~84.
- 3 刘式达,郑祖光,林振山,气候层次动力学初探,气候变化若干问题研究,北京:科学出版社,1992,1~5.
- 4 刘式达,陈炯,刘式适,近百年中国,北半球和南半球气温内在结构比较(I),应用气象学报,1999,增刊,9~15.
- 5 陈炯,刘式达,刘式适,近百年中国,北半球和南半球气温内在结构比较(II),应用气象学报,1999,增刊,142~147.
- 6 荣平平,刘式达,不同时间尺度下气候变化基本特征的探索,气候与环境研究,1997,2(1),77~82.
- 7 She Zhensu and E. Leveque, Universal Scaling Laws in Fully Developed Turbulence, *Phys. Rev. Lett.*, 1994, 72(3), 336~339.
- 8 余振苏,苏卫东,湍流中的层次结构和标度律,力学进展,1999,29(3),289~303.
- 9 余振苏,苏卫东,湍流脉动的层次结构描述,湍流研究新进展,北京:中国科学技术出版社,1999.

Local Characteristics of Hierarchical Structures in Climate Temperature Fluctuations in China

She Zhensu^{1,3)}, Chen Jiong^{1,2,4)}, Liang Shuang^{1,2)} and Liu Shida^{1,2)}

1) (State Key Laboratory for Turbulence Research, Department of Mechanics and Engineering Science, Peking University Beijing 100871)

2) (Department of Geophysics, Peking University, Beijing 100871)

3) (Department of Mathematics, University of California, Los Angeles, CA 90095, U. S. A.)

4) (State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract Multi-scale fluctuations in climate temperature variations are analyzed in the framework of the Hierarchical Structure model of turbulence. Through an analysis of the monthly mean temperature series in recent 50 years in 160 stations in China, it is shown that the hierarchical symmetry exists in climate temperature fluctuations. We obtain an hierarchical similarity parameter β from 0.49~0.77 in the different regions, which seems to be consistent with the climate character in those region. We also find that extreme fluctuation events are the main cause of smaller β value, implying that stronger intermittency is associated with extreme fluctuations in climate dynamics.

Key words: hierarchical structures; temperature variations; regional characteristic