

中国近 50 a 气候变化复杂性分析

邓自旺¹, 闵锦忠², 张 勇³

(南京气象学院 1. 环境科学系; 2. 气象灾害和环境变化重点实验室; 3. 气象台, 南京 210044)

摘要: 分析了我国气温和降水量变化的兰帕尔-齐夫复杂度空间分布特征。结果表明, 平均而言, 我国平均气温和降水量变化的复杂度约为 10 ~ 11, 小于随机序列的复杂度 13; 年平均气温变化序列的复杂度最小, 秋季平均气温变化序列的复杂度最大。季节和年平均气温序列的复杂度小于月平均气温变化序列的复杂度。月总降水量变化序列的复杂度小于季节和年总降水量序列的复杂度。从空间分布来看, 气温和降水量变化的复杂度为西部、北部大于南部和东部, 我国东南沿海地区气候要素变化的复杂度最大。

关键词: 气温, 降水, 兰帕尔-齐夫复杂度, 空间分布

中图分类号: P468.0 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-2022(2001)02-0186-08

近年来, 随着非线性科学的发展, 对各种复杂现象的复杂度的研究已成为各学科的前沿课题, 很多科学家对此做了深入研究^[1~5]。在社会学和自然科学中都进行了一些关于系统复杂性的度量的研究^[6~12]。气象工作者对大气科学中的非线性与复杂性也进行了研究, 文献[7]对此进行了评述。众所周知, 气候系统是一个复杂的巨系统, 对其复杂度的研究具有重要的理论意义和实用价值, 以往的研究中都是用分数维、Lyapunov 指数等做为度量, 但在计算中要求有大量数据, 才能保证计算结果的可靠性。这对月以上时间尺度来说, 显然很少有足够长的连续气候资料能够满足这一要求。气候系统的复杂度反映在表征气候变化的各气候要素的变化中, 这使得对气候变化的复杂度的研究可以通过对气候要素变化复杂度的研究来得到。人类对自然界的研究和观测, 只能在一定精度下进行, 永远做不到绝对准确, 对气候变化而言也是如此。符号动力学是研究动力系统的新方法^[1~4], 它是将实际动力系统进行高度概括和抽象, 把实际动力系统的轨道“粗粒化”为由很少几个符号组成的符号序列, 然后对该序列进行研究, 用以揭示实际动力系统的本质。许多研究表明^[7], 气候系统可以看作为一个动力系统, 某地某一气候要素的变化可以看作反映该地气候变化的动力系统的一条轨道。因此可以运用符号动力学方法对其进行研究。符号动力学的发展为复杂度研究提供了理论依据。不同地区不同季节的气候变化是由于不同原因影响的结果, 其复杂度必定有所不同, 因此有必要研究其不同时间的空间分布特征。兰帕尔-齐夫复杂度是对任意给定的有限长度符号序列复杂性的度量, 计算方便,

收稿日期: 2000-10-20; 修订日期: 2001-03-09

基金项目: 国家“九五”重中之重科技项目 96-908-01-01-1; 中国气象局青年气象科学基金

作者简介: 邓自旺, 男, 1965 年 3 月生, 博士研究生, 讲师

适合于对气候序列的研究。因此本文以它为标准研究我国近 47 a 来气温和降水量序列复杂度,初步分析了我国气候变化复杂度的空间分布特征。作为对气候变化复杂度研究的一个尝试。

1 资料和方法

资料为国家气候中心整理公布的 160 站 1951 年 1 月~1998 年 2 月的月平均气温和降水量序列。春、夏、秋、冬季和年平均序列所指月份分别为: 3~5 月、6~8 月、9~11 月、12 月~次年 2 月和 1~12 月。

根据符号动力学理论,对单个序列复杂度的刻画可以采用不同的方法,如柯尔莫哥洛夫复杂度、基于移位寄存器的复杂度和兰帕尔-齐夫复杂度,前两者难于计算,而第三者易于计算,因此本文采用兰帕尔-齐夫复杂度概念对我国气候变化复杂度进行研究。下面给出求兰帕尔-齐夫复杂度的一般法则^[4,12]。

设由有限个符号组成的长度为 n 的符号序列为 $s_1s_2s_3\dots s_n$,从空串 出发开始添加 s_1 。现考虑中间步骤,设已生成前缀 $s_1s_2s_3\dots s_{r-1}$, $r < n$,并且下一个符号 s_r 是用添加操作完成的,记为

$$s_1s_2s_3\dots s_n \quad s_1 \quad s_2s_3\dots s_{r-1} \quad s_{r+1}\dots$$

这里在 s_r 后的记号“·”表示 s_r 是由添加操作生成的。

现在给出如何做下去的法则,先令 $Q = s_{r+1}$, $s = s_1s_2s_3\dots s_r$,观察 Q 是否是 sQ 的子串。其中表示将它前面的符号串的最后—个符号取掉后的操作,即 $sQ = s_1s_2s_3\dots s_r$ 。如果 Q 不能从 sQ 中某个子串复制得到,则就用添加操作加上 s_{r+1} ,并加上一个记号“·”,这样又回到与前叙相同的情况。如果 Q 可以从 sQ 中某个符号复制得到,则继续观察 $Q = s_{r+1}s_{r+2}$ 能否从 sQ 的某个子串复制得到。这时 $sQ = s_1s_2s_3\dots s_{r+1}$ 如能办到,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—个符号,则分析结束。或者对某个 Q ,它再不能从 sQ 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—个符号添上,并在它后面加上记号“·”。因此可以看到,实际上记号“·”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“·”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—即得到复杂度。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”^[4]。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。

理论上已经证明,由 a 个符号组成长度为 n 的序列的兰帕尔-齐夫复杂度具有确定的上限。当序列的长度足够大时,文献[5]中已给出了这一上限的表达式。但本文中 $a=2$, $n=47$,序列长度较小,这一上限只能通过随机数发生器产生足够多个(本文取 5 000)长度为 47 的符号序列,然后求出这些序列中复杂度的最大值而得,即上限为 13。即对于由两个符号组成的长度为 47 的序列,如果其兰帕尔-齐夫复杂度等于 13,则它必为一个完全随机的序列,完全不可预报。对于由两个符号组成的长度大于 1 的符号序列,很显然其最小复杂度为 2,即符号序列由同一个符号组成,如“++++++”。长度为 47 的某序列的复杂度越接近 13,说明该序列越复杂,越无规律可循,自然其所表征的物理量的可预报性越差。反之复杂度越小,则说明该序列中有某种结构存在,这些结构可能是周期性变化、持续性变化或自相似结构。显然存在这些结构时,其可预报性就好。

要分析某资料序列的复杂度,首先必须对该序列进行粗粒化,也就是说把资料序列变换成由少数几个符号组成的符号序列。本文所用资料比较短,所以只考虑两种状态,即以多年平均

值作为标准,若某年某序列值大于 47 a 的平均值,则记为符号“+”,否则记为符号“-”。也就是说,将原序列变换为距平符号序列。下面以南京站年平均气温变化序列为例说明复杂度的求法。

南京 1951 ~ 1997 年年平均气温序列可粗粒化为

+++-----+++++--+--+-----
 +-+---++-----+---++++-+-+---+++。

其中“+”表示该年平均气温高于多年平均值,即正距平,“-”则表示等于或低于多年平均值,即负距平(为方便起见,等于平均值可作为退化的负距平看待)。按前述算法,该序列的兰帕尔-齐夫复杂度等于 10。具体计算过程及结果为

+•+ +-•--- ---+•++----- +•+ +-•+-----+•
 -+- -+•+-----+• ---++++-+-+•+---+++•。

共有 10 个符号“•”,最后为一个符号“•”,故复杂度等于符号“•”的个数,即南京年平均气温变化的复杂度等于 10。该值小于 13 说明该序列中存在一些结构,例如序列中有下划线的两个子序列就完全一样,表明这两段时期南京气温的变化是相似的。

2 气温变化的复杂性分析

首先计算了 160 站各月平均气温变化的复杂度的平均值及表征复杂度空间变率的均方差,如表 1 所示。可见,不同月份平均气温序列复杂度 160 站平均值有所不同,但都在 10 以上。其中 3 月最大,达 10.61;5 月最小,为 10.06。复杂度的空间变率最大的是 9 月,为 1.15;最小的是 11 月,为 0.86。总体而言,前半年气温变化复杂度比后半年要小。

为了更深入地研究月平均气温变化复杂度,有必要进一步分析不同情况下复杂度的空间分布特征。图 1 为 3 月份和 5 月份气温距平符号序列复杂度空间分布(阴影部分小于 10,下文同),可见平均复杂度大的月份全国复杂度都较大。如 3 月份除极个别站外,复杂度都在 10 以上;东北南部、西北东部及东南沿海均有成片的复杂度大于 11 的区域,表明这些区域 3 月份平均气温变化是比较复杂的。和 3 月份相比,5 月份整个区域的复杂度明显较小,只有华南沿海和个别站点气温变化的复杂度大于 11,而在长江流域、东北、陕北及云南则有大片复杂度小于 10 的区域。因篇幅所限,其他月份的空间分布特征不再讨论。

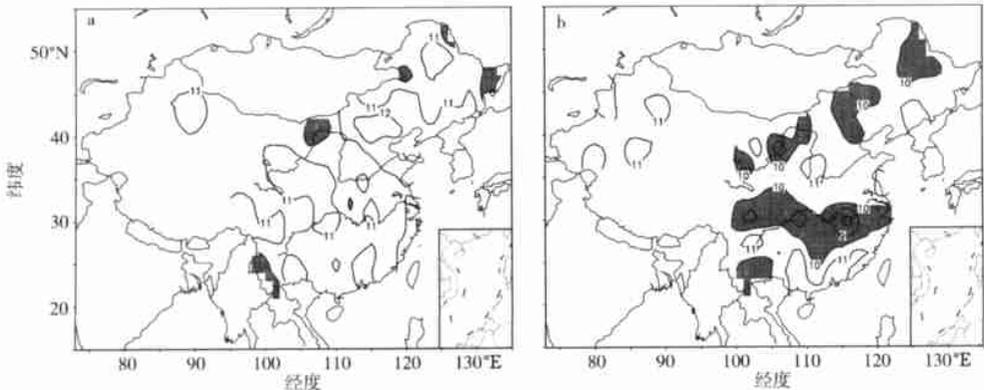


图 1 3 月(a)和 5 月(b)平均气温序列复杂性分布

Fig. 1 Monthly mean temperature complexity spatial distribution in March(a) and May(b)

表 1 160 站各月平均气温变化复杂度统计

Table 1 Compleity statistics of monthly average temperature variation at the 160 stations

	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
平均值	10.22	10.17	10.61	10.34	10.06	10.33	10.44	10.38	10.41	10.51	10.56	10.43
均方差	1.03	1.01	0.96	0.99	0.97	0.95	1.02	1.01	1.15	0.92	0.86	0.88

表 2 为我国不同季节气温变化复杂度为不同值的站数统计。可见, 除个别站外, 各季节和年平均气温变化的复杂度均在 8~12 之间, 为 11、12 复杂度的站数占总站数的三分之二以上。但不同季节有所不同。春、夏、秋、冬和年平均气温序列 160 站平均复杂度分别为 10.22、10.28、10.31、10.26、9.99。其空间变率(均方差)分别为 1.0、1.04、0.94、0.9、1.06。可见, 总体而言, 秋季气温变化最复杂, 年平均气温变化最简单, 但差别并不显著。冬季复杂度的空间差异最小, 年平均气温变化复杂度的空间差异最大。

表 2 我国气温变化不同复杂度的站数

Table 2 Numbers of station with different compleity in temperature variation

	复杂度							
	5	7	8	9	10	11	12	13
春	0	0	6	35	51	54	14	0
夏	1	1	5	22	59	59	13	0
秋	0	0	7	18	68	53	14	0
冬	0	0	4	26	64	59	5	2
年	0	2	15	28	57	53	5	0

由图 2(图中阴影部分为复杂度小于或等于 10 的区域)可见, 年平均气温变化复杂度空间分布, 我国东北、华北、云南、四川组成的一条东北-西南向复杂度较小的带。新疆南部和东部部分地区复杂度也较小, 最小值出现在东北, 为 7。而东南部复杂度则较大, 最大值出现在上海、杭州等地, 为 12。春季与年平均的分布形态比较相似, 但东北-西南向的复杂度较小区被一些复杂度较大区分隔成一些小的区域。长江以南沿 110°E 线有一条南北向的复杂度为 12 的大值区。夏季西北、华南和东北部分地区复杂度较小, 而东部大部分地区 and 云贵高原复杂度则较大。秋季气温变化并无成片的复杂度较小区, 空间分布特征并不明显。冬季东北部分地区、山西、山东、云南、四川和新疆北部为复杂度较小区, 而我国东南部则复杂度较大。综上所述, 可见我国气温变化在东南部较复杂, 而在东北、四川和新疆的西部和北部地区则较为简单。这可能是影响我国东南部气温变化的因素较多的缘故。

3 降水量变化的复杂度分析

表 3 为各月降水量变化复杂度统计表。由表可见各月降水量变化复杂度的平均值均在 10.00~10.50 之间。其中最大的月份是 8 月和 9 月, 分别为 10.50 和 10.49, 最小的月份是 1 月和 11 月, 为 10.02。与各月气温变化复杂度相比, 可见, 各月降水量的变化并不比气温变化复杂, 除 5 月、8 月和 9 月外, 其余各月降水量变化的复杂度均小于气温变化的复杂度。但降水量变化复杂度的空间变率比气温要大, 其中最大的月份为 12 月。

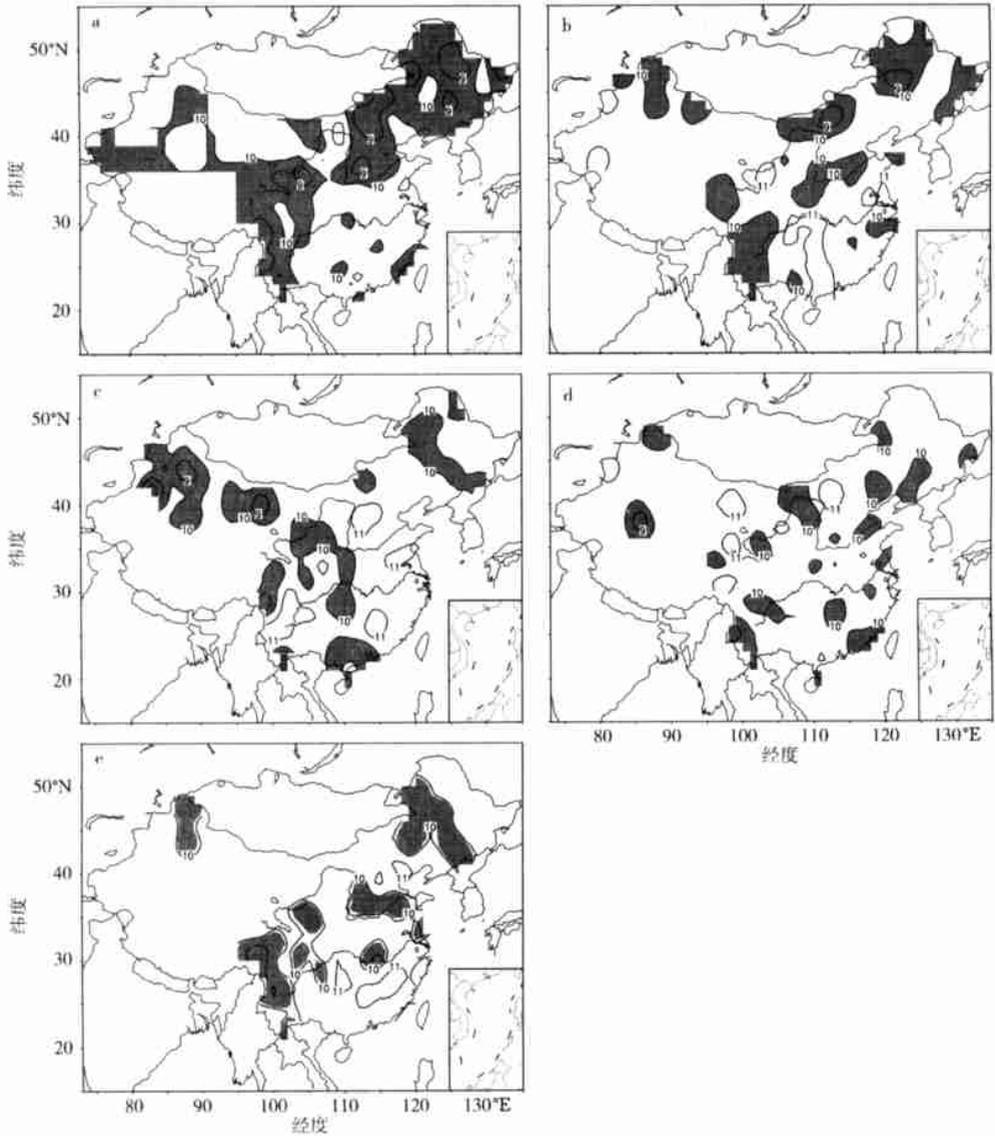


图2 年(a)、春(b)、夏(c)、秋(d)、冬(e)季平均气温变化复杂性空间分布

Fig.2 Spatial distribution of the complexities of temperature series

a. annual; b. spring; c. summer; d. autumn; e. winter

表3 160站各月降水量变化复杂性统计

Table 3 Complexity statistics of monthly precipitation at the 160 stations

	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
平均值	10.02	10.10	10.14	10.16	10.30	10.31	10.26	10.50	10.49	10.23	10.02	10.08
均方差	1.03	1.08	1.07	1.04	0.97	1.00	0.97	0.87	0.96	1.14	1.10	1.17

图3为8月份和1月份降水量变化复杂性空间分布,可见8月份降水量变化复杂性在东北南部、东部沿海及四川南部有大片大于11的区域,而小于10的区域则很小。1月份降水量

变化复杂度空间分布则有所不同, 东北有大片小复杂度区域, 在长江与黄河之间也有成片的复杂度大于 11 的区域。

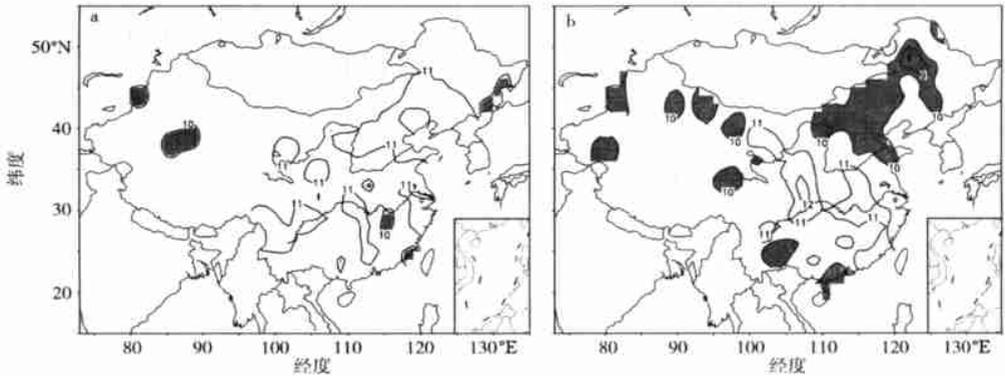


图3 8月(a)和1月(b)降水量序列复杂性分布

Fig. 3 Monthly rainfall complexity spatial distribution in August(a) and January(b)

160站春、夏、秋、冬季和年总降水量变化的复杂度平均值分别为 10.29、10.47、10.51、10.55、10.33, 明显大于相应季节和年平均气温变化的复杂度, 也大于相应月份复杂度的平均值。夏季复杂度接近各月复杂度的上限, 秋、冬季的复杂度超过月总降水量变化复杂度平均值的上限。这给我们一个启示, 即对月降水量进行预报比季节预报效果会好一些。春、夏、秋、冬、年降水量变化复杂度的空间变率分别为 1.06、1.00、1.04、0.94、0.90。年总降水量空间变率最大, 冬季空间变率最小。

由图 4 可见, 我国大部分地区年总降水量变化复杂度都大于 10, 其中最大值为四川、贵州、湖北、山东等地, 最小值出现在甘肃、青海、新疆北部及浙江等地。春季有位于浙江、江苏、山东和山西的大片降水量变化复杂度小于等于 10 的区域, 仅有新疆西北部、陕北和贵州等局部地区复杂度大于 11。夏季西北东部复杂度较小, 其他大部分地区复杂度都在 10 以上。秋季云南和陕北复杂度较小, 东北部分地区复杂度较大, 而其余地区均为 11。冬季内蒙古、河北北部及北疆复杂度较小, 其余地区均较大, 特别是我国东部有大片复杂度大于 11 的区域, 表明冬季降水量年际变化比较复杂, 难于预报。

4 结论与讨论

(1) 无论是气温还是降水量变化, 是月平均序列还是季节或是年平均序列, 其变化序列的复杂度都集中在 8~12 之间, 小于同长度随机符号序列的复杂度 13。这说明我国的气候变化仍然有一些规律性, 气候要素序列中包含着一些诸如周期性结构、持续性结构及相似性结构等可预报的成份。特别是复杂度小于 10 的区域, 气候要素变化规律性更加明显, 对这些区域气候变化的预测将会比较容易。只有极个别站点气候要素序列的复杂度等于随机序列的复杂度 13。对这些序列的预测难度将会很大。

(2) 气温和降水量变化复杂度的空间分布相差很大, 两者的相似之处在于我国东南部同为较大复杂度区。从各季序列来看, 降水序列变化的复杂度大于气温。但从各月序列来看, 降水变化的复杂度明显小于气温的变化。不同季节, 不同要素变化的复杂度的空间分布有明显的差别。年平均气温变化最简单, 秋季气温变化最复杂。西部、北部的气温变化比南部、东部简单, 最复杂的是我国东南沿海地区。这可能是由于这一地区气候变化不但受中高纬度大气环流异

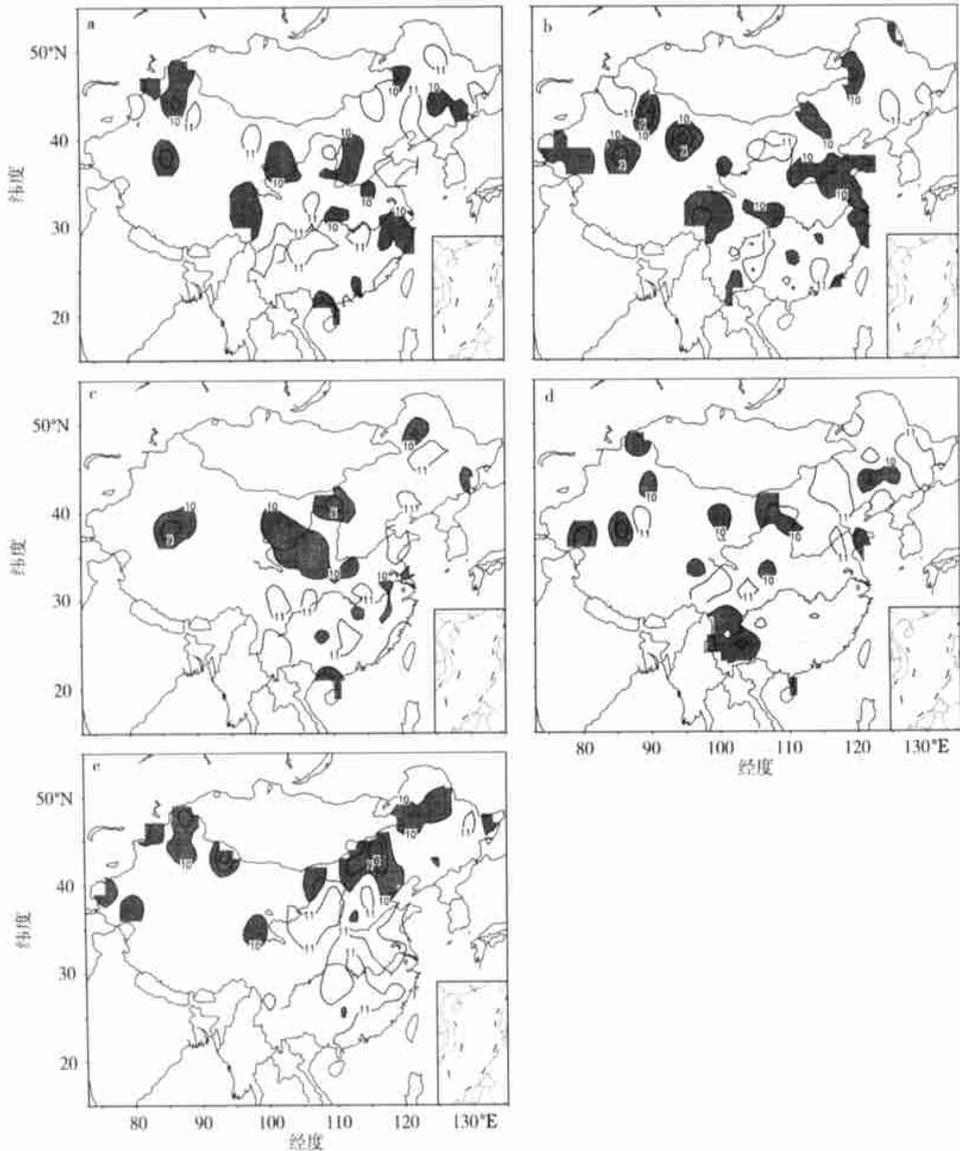


图 4 年(a)、春(b)、夏(c)、秋(d)、冬(e)季降水量变化复杂性空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of the complexities of precipitation series
a. annual; b. spring; c. summer; d. autumn; e. winter

常的影响而且还受海陆季风的影响。

(3) 平均而言,月平均气温变化序列的复杂度要比季、年平均气温序列大,但月总降水量序列变化的复杂度却较季、年降水量变化的复杂度要小。这说明对气温的预报采用季节为单位预报效果可能较以月为单位好一些。而降水量的预报以月为单位可能较以季节或年为单位好一些。对此有必要进一步研究。

参考文献:

- [1] 郑伟谋,郝柏林.实用符号动力学[M].上海:上海教育出版社,1994.1~11
[2] 郝柏林.复杂性的刻画与“复杂性科学”[J].科学,1999,51(3):3~8

- [3] HAO Bailin. Elementary symbolic dynamics and chaos in dissipative systems [M]. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte Ltd, 1989. 101 ~ 205
- [4] 谢惠民. 复杂性与动力系统 [M]. 上海: 上海科技教育出版社, 1994. 186 ~ 209
- [5] LEMPER A, ZIV J. On the comple ity of finite sequences [J]. IEEE Trans, 1976, IT -22(1): 75 ~ 93
- [6] 成思危. 复杂科学与管理 [J]. 中国科学院院刊, 1999, (3): 176 ~ 183
- [7] 丑纪范. 大气科学中非线性与复杂性研究进展 [J]. 中国科学院院刊, 1997, (5): 325 ~ 329
- [8] 魏一鸣. 自然灾害复杂性研究 [J]. 地理科学, 1998, 18(1): 25 ~ 31
- [9] GOLDENFELD N, KADANOFF L P. Simple lessons from comple ity [J]. Science, 1999, 284(2): 87 ~ 89
- [10] RIND D. Comple ity and climate [J]. Science, 1999, 284(2): 105 ~ 107
- [11] 李 夏, 戴汝为. 系统科学与复杂性 () [J]. 自动化学报, 1998, 24(4): 476 ~ 482
- [12] 廖旺才, 胡广书, 扬福生. 心率变异性的复杂性与分形维数分析 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 1996, 36(2): 1 ~ 6

Complexity of climatic change in China in the last 50 years

DENG Zi-w ang¹, MIN Jin-zhong², ZHANG Yong³

(1. Department of Environmental Sciences;

2. Key Laboratory of Meteorological Disaster and Environmental Variation Studies;

3. Meteorological Observatory, NIM, Nanjing 210044)

Abstract: Spatial distributions of Lemper-Ziv comple ity of temperature and precipitation time series are discussed. It shows that the comple ities of temperature and precipitation variations are about 10 ~ 11, which are little than 13, the value of complete random symbol series. The 160-station averaged comple ities of annual, seasonal and monthly mean temperature series are increased with the decreasing time scale, i. e., the comple ity values of annual and monthly elements are the minimum and ma imum of the three time-scales. The mean comple ity of monthly precipitation is little than that of seasonal and annual series. Spacially, the comple ities of temperature and precipitation are larger in the west and north than in the east and south of China, and with the ma imum values in the south-east coastal areas.

Key words: temperature, precipitation, Lemper-Ziv comple ity, spatial distribution