

文章编号:1004-4574(2012)06-0111-08

基于混沌理论的武汉、宜昌近60年来 月降水特征的对比研究

王海鹏¹, 张 斌¹, 刘祖涵², 何婕妤¹, 罗 君¹

(1. 西华师范大学 国土资源学院, 四川 南充 637009; 2. 华东师范大学 地理信息科学教育部重点实验室, 上海 200062)

摘 要:根据混沌理论,对武汉、宜昌近60年来月降水量时间序列进行相空间重构,运用小数据量和G-P算法,计算了这两个序列的最大Lyapunov指数和关联维数等特征量。通过对比,发现了它们不同的混沌动力学特征:两个序列的最大Lyapunov指数 λ 均大于0,且前者大于后者;关联维数均为分数,且前者小于后者。结果表明,武汉、宜昌近60年来月降水量时间序列均存在混沌和分形特征,是非线性混沌动力系统演化的结果;前者的原动力系统对初始闭轨道的指数发散程度和系统的总体混沌水平大于后者,两者可预报降水的最大时间尺度分别为200个月和233个月;要恰当描述两地降水的动力学行为特征,所需要的独立变量数目分别至少为3个和4个。研究结果可为进一步研究武汉、宜昌降水量时间序列的复杂性、演化规律及预测提供参考。

关键词:混沌理论;月降水量;相空间重构;武汉;宜昌

中图分类号:P426.6

文献标志码:A

Chaos theory-based comparative study on monthly rainfall characteristics in Wuhan and Yichang during recent 60 years

WANG Haipeng¹, ZHANG Bin¹, LIU Zuhan², HE Jieyu¹, LUO Jun¹

(1. School of Land and Resources, China West Normal University, Nanchong 637009, China; 2. Key Laboratory of Geographic Information Science of Ministry of Education, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Abstract: According to chaos theory, this paper reconstructs the phase-space of the series of monthly rainfall in Wuhan and Yichang during recent 60 years, and calculates the characteristic quantities, including the maximum Lyapunov exponent and the correlation dimension, with small data sets and G-P algorithm, respectively. Their different characteristics in chaotic dynamics are discovered by comparison: both time series have greater-than-zero maximum Lyapunov exponents, and the one of Wuhan is greater; both correlation dimensions are fractions and the one of Yichang is larger. All results show obvious chaotic and fractal characteristics in the series of monthly rainfall in Wuhan and Yichang during recent 60 years, which is the result of the evolution of non-linear chaotic dynamic system; the divergent extent of the initial closed-orbit and the overall chaotic level are both greater in the dynamic system of Wuhan, and the maximum time scales that the two systems can forecast are 200 and 233 months respectively. At least three and four main dynamic variables must be established for the two time series respectively in or-

收稿日期:2011-11-29; 修回日期:2012-01-10

基金项目:四川省科技支撑资助项目(2009SZ0027)

作者简介:王海鹏(1986-),男,硕士研究生,主要从事数字化环境信息工程研究. E-mail:haizi5815@126.com

作者简介:张斌,教授,硕士研究生导师. E-mail:envgeo@163.com

der to interpret the characteristics of the dynamic behaviors effectively. The research gives reference to further study on the regional complexity, evolution and forecast of the time series of rainfalls.

Key words: chaos theory; the monthly rainfall; phase space reconstruction; Wuhan; Yichang

近些年中国旱涝灾害频发,给社会经济的发展造成了重大影响。降水量的多少不但直接影响水资源的开发和利用,而且与干旱、洪涝等自然灾害的发生、发展及其强度密切相关,因此降水变化特征及规律的研究一直受到学术界的高度重视。目前,国内学者对降水的研究集中于降水的特征^[1]、影响因素^[2]、变化趋势^[3]和对降水的预测^[4];在降水时间序列特征的研究方法上,主要有主成分分析法类(EOF(经验正交函数)^[5]、旋转主成分分析^[6]、主成份分析法^[7])、智能和非线性动力学类(小波分析法^[8]、消除趋势波动分析法(DFA)^[9]、小波-神经模糊模型^[10])、谱分析类(奇异谱方法^[11]、最大熵谱分析法^[12]、功率谱分析^[13]、自相关谱分析法^[14])、数理统计类(偏差指数法^[15]、非参数统计检验法^[16]、线性回归法^[17]、Mann-Kendall 趋势分析法^[18])等方法。这些研究取得了丰硕的成果,但其多数习惯将各时期降水量看作是孤立的、彼此没有影响。混沌是研究非线性复杂系统的一个重要的理论,它可以揭示那些貌似随机、表现上呈无序现象的内在规律。目前已在物理^[19]、化学^[20]、生物^[21]、医学^[22]、气象^[23]、地质^[24]、地震^[25]等诸多领域得到了广泛应用,而在气象方面的应用多集中于单一时间序列的特征描述,用于月降水量时间序列的对比研究还很少。

湖北省内的江汉平原是我国重要的产粮基地,其地势低洼,河湖众多,水网密布,是洪涝灾害多发、频发地带。多年来洪涝灾害成灾面积之和占全省播种面积的 20% 左右,占全部农业自然灾害成灾面积的 75.57%^[26],给人民生命财产造成了巨大损失。武汉、宜昌分别处于江汉平原东部和西部边缘,是长江中上游的重要地段,旱涝灾害首当其冲,但不同的下垫面、人类活动等影响因素造成两地降水规律不尽相同,因此,全面了解武汉、宜昌降水的不同特征、深刻认识其降水时间序列的动力机制,对于寻求防灾减灾对策、保证地方经济的快速稳步发展具有重要的意义。近年来有关武汉和宜昌降水的研究比较少,且集中于个别降水事件的特征研究^[27]。本文将混沌理论应用到武汉、宜昌近 60 a 来月降水量时间序列行为特征分析,从 Lyapunov 指数和关联维数等方面研究武汉、宜昌近 60 a 月降水量时间序列混沌动力学的不同特征,从而认识其不同的影响因素、演变过程和发展趋势,以期对武汉、宜昌的降水量监测和旱涝灾害防治决策提供理论支持。

1 数据与方法

1.1 数据来源与处理

以中国气象局网站(<http://www.cma.gov.cn/>)数据共享提供的武汉、宜昌降水量月值数据集为数据源。本研究的数据起止时间是 1951 年 7 月至 2011 年 6 月,60 a 的月降水数据值各 720 条,以 1951 年 7 月为序号 1,则 2011 年 6 月的序号为 720。其中,宜昌市 1951 年 7 月数据缺失,取各年份 7 月降水数据用平差的方法补上。为了消除边界效应,对数据采用周期法进行了延展,主要的数据处理和小波变换在 Matlab7.0 中实现。其中,季节划分为:春季(3-5 月)、夏季(6-8 月)、秋季(9-11 月)、冬季(12-2 月)。

1.2 研究方法

对于混沌目前尚无通用的严格定义,一般将确定性系统中出现的一种貌似无规则的、类似随机的现象称之为混沌。对未知系统时间序列混沌特性的识别多采用数值的方法:通过重构相空间计算该时间序列的最大 Lyapunov 指数和关联维,可以表明该时间序列是否具有混沌吸引子(即混沌特性),从而进一步刻画该系统的混沌动力学特征。

1.2.1 相空间重构

从时间序列研究混沌始于 Packard 等提出的重构相空间理论,建议用原始系统中某变量的延迟坐标来重构相空间。

设 X_1, X_2, \dots, X_n 为系统中某一状态输出的时间序列,于是在整数 $m > 1, \tau > 0$ 条件下得到一个 m 维相量

$$Y_i = [x_i, x_{i+\tau}, \dots, x_{i+(m-1)\tau}] \quad (1)$$

式中, m 为嵌入维数; τ 为滞时。式(1)描述了系统在 m 维相空间的演化轨迹。

1.2.2 最大 Lyapunov 指数

Lyapunov 指数从整体上反映了系统的混沌量水平,是一种整体特征。常用最大 Lyapunov 指数 λ_1 来进行混沌分析:当系统的 Lyapunov 指数只有最大者为正值,则系统为一维混沌系统;并且可以对系统进行预测:以 λ_1 的倒数为最大可预测长度的估计值。本文采用小数据量法求最大 Lyapunov 指数^[28]。

对于一维动力系统 $x_{n+1} = f(x_n)$,其定义表达式为

$$\lambda = \lim_{n \rightarrow \infty} \ln \left(\prod_{i=1}^{n-1} \left| \frac{df(x)}{dx} \right|_{x=x_i} \right), \quad (2)$$

即:

$$\lambda = \lim_{n \rightarrow \infty} \ln \left(\prod_{i=0}^{n-1} \left| \frac{df(x)}{dx} \right|_{x=x_i} \right). \quad (3)$$

设时间为 i 时,混沌系统轨道的距离为初始距离:

$$\delta_0^i = \| Y_i - Y_{ir} \| = \frac{1}{m} \sqrt{\sum_{k=1}^m (x_{i-(k-1)\tau} - x_{ir-(k-1)\tau})^2}. \quad (4)$$

由于混沌系统的轨道具有指数分离特点,即

$$\delta_s = \delta_0 e^{\lambda s}, \quad (5)$$

式中 δ_s 表示轨道分离曲线, δ_0 为初始距离, λ 为 Lyapunov 指数, s 为步长,则最大 Lyapunov 指数 λ_1 为

$$\lambda_1 = \frac{\ln(\delta_s/\delta_0)}{s} = \frac{\ln \delta_s}{s} - \frac{\ln \delta_0}{s}. \quad (6)$$

对 N 个相点及其邻近点经过 s 步演化后分离距离的平均值为

$$\overline{\delta_s} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta_s^i. \quad (7)$$

取其自然对数,绘出 $\ln \overline{\delta_s} \sim s$ 的曲线图,对曲线进行拟合,所得的斜率就是最大 Lyapunov 指数 λ_1 。

1.2.3 关联维数

关联维度有助于区分周期系统和混沌系统,非整数的关联维度不但说明系统具有混沌特性,还说明其具有分形的特征^[29]。饱和关联维可作为吸引子维数的估计,常用来反应吸引子的分形特征^[30]。

计算关联维数常用 G-P 算法^[31]。在重构的相空间中,定义两个相点的距离为

$$|Y_i - Y_j| = \max_{1 \leq k \leq m} |x_{i-(k-1)\tau} - x_{j-(k-1)\tau}|. \quad (8)$$

距离小于 r 的矢量,称为有关联的矢量。关联积分的计算表达式为

$$C(r) = \frac{2}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N \sum_{j=i+1}^N \theta(r - |Y_i - Y_j|), \quad (9)$$

其中 $\theta(x)$ 是 Heaviside 单位函数:

$$\theta(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 0, \\ 1, & x > 0. \end{cases} \quad (10)$$

关联维数 D_2 的定义为:

$$D_2 = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\ln C(r)}{\ln r}. \quad (11)$$

对 $\ln C(r) - \ln r$ 曲线进行直线拟合,其斜率就是 D_2 。

2 结果与分析

2.1 月降水量时间序列

武汉、宜昌近 60 a 来月降水量的变化如图 1。图 1 结果表明,武汉、宜昌的月降水量具有非稳定、非线性和多时间尺度性。从统计数据可看出,武汉、宜昌夏季降水丰富,冬季降水贫乏。武汉月降水量 $> 3\ 000$ mm 的月份有 39 个,最大月降水出现在 1998 年的 7 月,降水总量为 7 584 mm,降水量在 1 000 ~ 3 000 mm 的月份有 254 个,降水量在 250 ~ 1 000 mm 的月份有 325 个;宜昌月降水量 $> 3\ 000$ 的月份有 29 个,最大月降水出现在 1995 年的 7 月,降水总量为 5 042 mm,降水量在 1 000 ~ 3 000 mm 的月份有 242 个,降水量在 500 ~ 1 000 mm 的月份有 313 个,说明武汉的降水量比宜昌丰富。

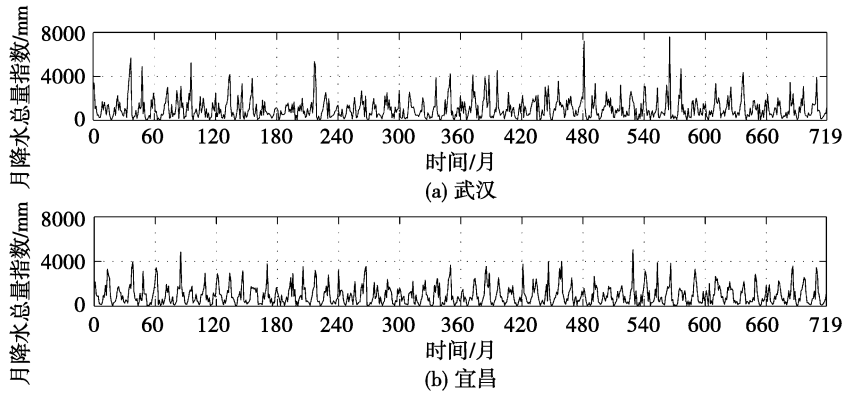


图 1 近 60 年来月降水量时间序列

Fig. 1 Time series of monthly rainfall during last 60 years

2.2 月降水量的混沌特征量

2.2.1 月降水量时间序列的时延及饱和嵌入维数

在重构相空间中为更好地描述奇异吸引子的特征,必须准确选择延时常数(τ)和嵌入维数(m)^[32],常采用互信息法求时延^[33]和 Cao 方法求嵌入维数^[34]。经计算如图 2(横坐标 T 表示时延,纵坐标 $\ln(T)$ 为最佳时延判别函数值)和图 3(横坐标 m 表示嵌入维数,纵坐标 $E(m)$ 为饱和嵌入维判别函数值)所示,可知武汉月降水量时间序列的最佳时延 $\tau = 2$,饱和嵌入维数 $m = 8$;宜昌月降水量时间序列的最佳时延 $\tau = 3$,饱和嵌入维数 $m = 9$ 。

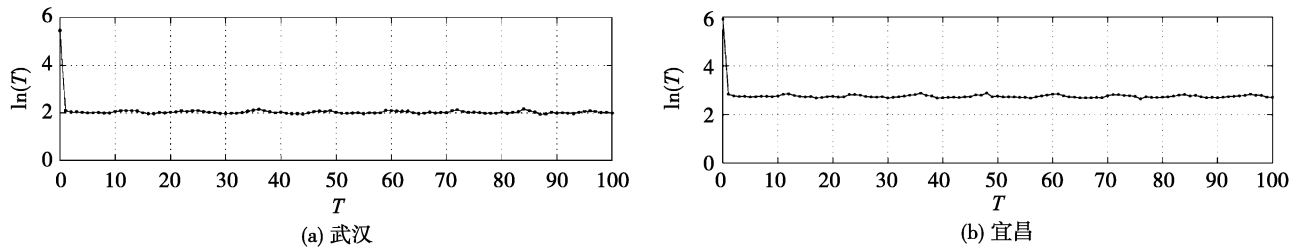


图 2 互信息法求延迟时间

Fig. 2 Time delay calculated by mutual information method

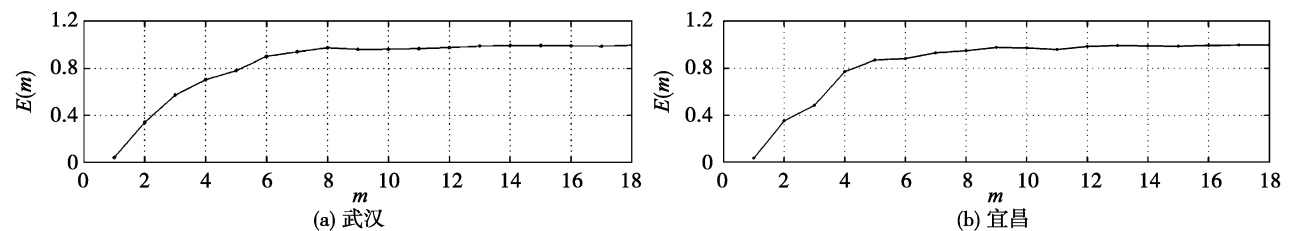


图 3 Cao 方法求嵌入维数

Fig. 3 Embedding dimension sought by Cao's method

2.2.2 最大 Lyapunov 指数

在 τ 和 m 已知情况下,对降水量时间序列绘出 $\ln \bar{\delta}_s - s$ 曲线(如图 4 所示)。对 $\ln \bar{\delta}_s - s$ 曲线作直线拟合,拟合直线的斜率即为最大的 Lyapunov 指数。武汉月降水量时间序列的最大 Lyapunov 指数 $\lambda_1 = 0.005 (>0)$;宜昌月降水量时间序列的最大 Lyapunov 指数 $\lambda_2 = 0.0043 (>0)$ 。

最大 Lyapunov 指数大于 0 可作为判断系统混沌行为的依据^[28]。 $\lambda_1, \lambda_2 > 0$ 表明武汉、宜昌月降水量时间序列的动力行为均是混沌的,其动力系统的奇怪吸引子不稳定,最大可预报的时间尺度分别为 200, 233;

$\lambda_1 > \lambda_2$ 表明武汉月降水量时间序列的原动力系统对初始闭轨道的指数发散程度和系统的总体混沌水平大于宜昌。

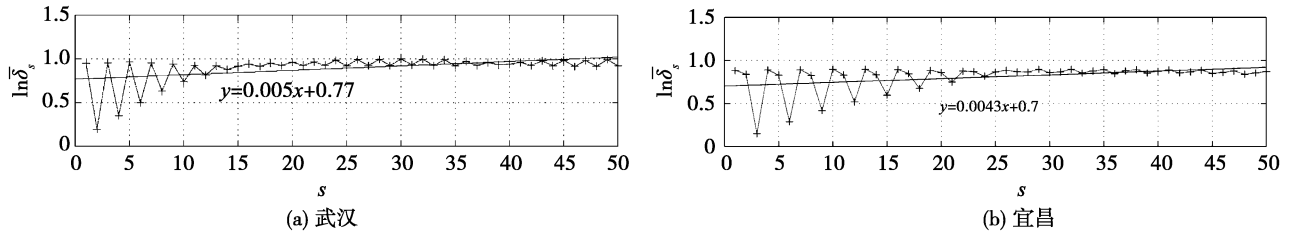


图 4 Rosenstein 小数据量法求最大 Lyapunov 指数

Fig. 4 Maximum Lyapunov exponent sought by Rosenstein small data set method

2.2.3 关联维数

图 5 显示了 m 从 2 到 11 时混沌系统关联积分的 $\ln C(r) - \ln r$ 曲线及斜率曲线。从图 5 可以看出,随着嵌入维数的增大, $\ln C(r) - \ln r$ 曲线的线性部分逐渐趋于平行,说明嵌入维已趋于饱和;斜率图则反映了随着嵌入维数的增大, $\ln C(r) - \ln r$ 曲线上各点的斜率逐渐收敛,说明关联维也趋于收敛,这也正符合混沌时间序列的特征。由 2.2.1 可知武汉、宜昌月降水量时间序列饱和嵌入维分别取 8 和 9,则与此对应的时间序列关联维分别是 2.715 6 和 3.492 8,此时关联维已经趋于稳定,嵌入维已达到饱和,再增加嵌入维数已无意义。

关联维是描述混沌吸引子自相似结构的量,以上表明武汉、宜昌月降水量时间序列具有混沌特性,存在着低维的混沌吸引子。按照混沌和分形理论,上述特征定性地说明了武汉、宜昌月降水量的变化并不是毫无规律的,而是周期性和非周期性变化的叠加^[35],具有复杂的内在动力学机制;武汉、宜昌月降水量时间序列重构相空间的吸引子是奇怪吸引子,是一种非常复杂的非规则分形体。

奇怪吸引子维数(即相空间关联维数)是反映系统结构复杂性的重要量度。根据混沌理论的应用原理,要恰当描述两地降水的动力学行为特征,所需要的独立变量数目分别至少为 3 个和 4 个。这是反演降水系统、建立系统动力学数学模型的基础,并由此开展降水系统的动态变化预测。

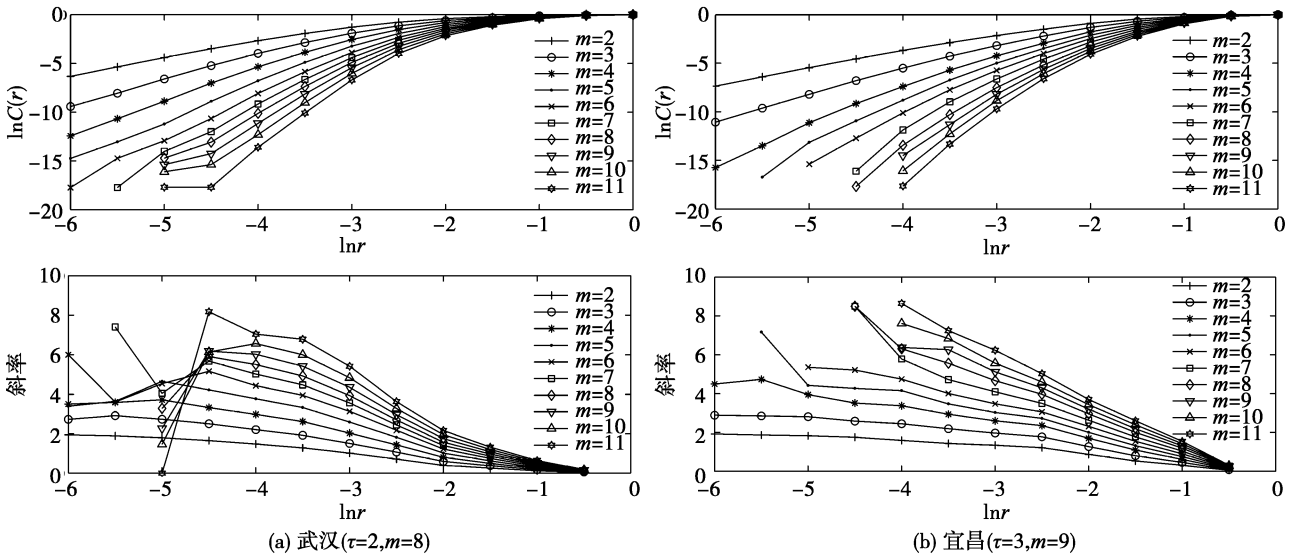


图 5 $\ln C(r) - \ln r$ 曲线及其斜率曲线

Fig. 5 Curves of $\ln C(r)$ vs $\ln r$ and their slope curves

2.3 降水量与关联维讨论

维数是空间和客体的重要几何参数,吸引子的维数表明该吸引子所必需的信息量^[36]。武汉、宜昌月降水量时间序列重构相空间的奇怪吸引子是一种非常复杂的非规则分形体,这种复杂性恰恰体现了武汉、宜昌自然因素和人类活动因素等多种状态变量和控制参量相互作用的复合效应。

根据武汉、宜昌两地的降水规律和的实地情况认为,影响两地降水量的独立变量均包括大气环流、海陆

位置和下垫面:

(1)我国大陆性季风气候显著,夏季主要受东南季风和西南季风的影响:夏季风雨带5月初出现在南海北部,6月中旬到达长江中下游地区,这便是梅雨期的开始,一般维持到7月上旬。夏季风很强的年份,雨带迅速推到北方,北方多雨,长江中下游梅雨期较短,出现严重的伏旱;反之,长江中下游雨带停滞,雨量过多,发生洪涝。极地大陆冷高压及其伴随的极锋或次冷锋是冬季我国天气的主要控制系统,天气气候特征是降水少和低温、干燥。因此,季风气候的特点及变化,特别是冬、夏季风的异常变化,是决定武汉、宜昌季节降水量最主要的因素。

(2)海陆位置即距海的远近的不同,使得陆地受到海洋的影响程度也就不同,因此降水量分布也就会产生差异,从而产生了我国自沿海向内陆降水量逐渐减少的分布规律。武汉、宜昌位于长江中上游地区,这决定了两地的降水量比我国东部沿海少但比西北内陆多;但宜昌比武汉偏西两个经度左右的特点并没有对两地降水量的差异造成太大影响。

(3)两地降水量的差异主要取决于下垫面的不同:武汉处于江汉平原东部,地形如盆地,故集热容易散热难;长江、汉江在此交汇,长江穿城而过,境内河湖众多,素有“百湖之城”的美誉,水域面积广阔,空气中水蒸气充沛,因此近地面的相对高温和湿润空气不断向云层输送造成了武汉比宜昌更为丰富的降水量;另外武汉城市化进程中形成的热岛效应对地区降水量也有影响^[37]。宜昌地处长江上游与中游的结合部、鄂西秦巴山脉和武陵山脉向江汉平原的过渡地带,地貌复杂多样,境内有山区、平原、丘陵,大致构成“七山一水二分田”的格局;水系属外流水系,以长江为主脉;城市中的下垫面等这些因素与武汉都有较大差异。除此之外,影响宜昌降水量的第4个独立变量为人类活动,作为“世界水电之都”、“中国动力之肺”的宜昌,拥有举世瞩目的长江三峡水利枢纽工程、葛洲坝水利枢纽等百余处水电枢纽工程,剧烈的人类活动也会对局地降水产生影响。

3 结论

本文应用互信息法、Cao方法确定出武汉、宜昌近60a来月降水量时间序列的重构参数:延迟时间和嵌入维数,并运用相空间重构技术、小数据量算法和G-P算法,分析月降水量时间序列的混沌动力学特征。计算结果显示:武汉、宜昌近60a月降水量时间序列的最大Lyapunov指数 λ 均大于0且前者大于后者,关联维数均为分数且前者小于后者。

通过以上分析,我们可以得到以下结论:

(1)武汉、宜昌近60a来月降水量时间序列均存在混沌和分形特征,而且时间序列数据所展现出的动力学行为具有内在的一致性,即标度无关的。这说明了武汉、宜昌月降水量的变化并不是毫无规律的,具有复杂的内在动力学机制。

(2)根据武汉、宜昌近60a月降水量时间序列最大Lyapunov指数 λ 可知,前者的原动力系统对初始闭轨道的指数发散程度和系统的总体混沌水平大于后者,对其降水进行预报的最大时间尺度分别为200个月和233个月。

(3)根据武汉、宜昌近60a月降水量时间序列关联维数可知,要恰当描述两地降水的动力学行为特征,所需要的独立变量数目分别至少为3个和4个,大气环流、海陆位置和下垫面等3个主要变量因素共同影响着武汉、宜昌的降水变化,人类活动则作为第4个主要变量影响着宜昌的降水变化。

(4)既然在月降水量中存在混沌和分形特征,那么通过常规的线性研究思路是无法刻画真实的月降水量动力学行为和揭示其内在规律性的,应用混沌研究方法可能得到更为准确、合理的定性的和定量的分析结果。

本文对武汉、宜昌近60a的一维月降水量时间序列监测值进行分析发现,武汉近60a降水量比宜昌丰富;通过反演复杂的具有多重耦合关系的多变量的天气系统,发现其存在明显的非线性混沌和分形特征。将混沌理论用于一维月降水量时间序列,能较好地反映该序列内在的运动机理,揭示动力系统复杂的运动规律和演化过程。只有对降水系统的混沌性进行客观识别,才能正确掌握它的演变规律,在深入探索的基础上进行降水的混沌预测。

参考文献:

- [1] 张万诚, 万云霞, 肖子牛. 中国西南纵向岭谷区近百年降水的时空变化特征[J]. 自然资源学报, 2006, 21(5): 802-809.
ZHANG Wancheng, WAN Yunxia, XIAO Ziniu. The spatio-temporal variations of the Longitudinal Range-Gorge Region (LRGR) precipitation in recent 100 years in southeast China[J]. Journal of Natural Resources, 2006, 21(5): 802-809. (in Chinese)
- [2] 吕文强, 王世杰, 刘秀明, 等. 喀斯特地区城市绿地土壤呼吸对降水变化的响应研究[J]. 地球与环境, 2011, 39(2): 174-180.
LV Wenqiang, WANG Shijie, LIU Xiuming, et al. Influence of rainfall on soil respiration in Karst urban green space[J]. Earth and Environment, 2011, 39(2): 174-180. (in Chinese)
- [3] 邱临静, 郑粉莉, 尹润生. 1952-2008年延河流域降水与径流的变化趋势分析[J]. 水土保持学报, 2011, 25(3): 49-53.
QIU Linjing, ZHENG Fenli, YIN Runsheng. Trend analysis of precipitation and streamflow during 1952-2008 in Yanhe River basin[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(3): 49-53. (in Chinese)
- [4] 冯亚文, 任国玉, 张丽, 等. 长江上游月降水人工神经网络预测模型[J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20(1): 40-47.
FENG Yawen, REN Guoyu, ZHANG Li, et al. Artificial neural network models for forecasting monthly precipitation in the upper Yangtze River [J]. Resources and Environment in the Yangtze basin, 2011, 20(1): 40-47. (in Chinese)
- [5] 朱丽华, 范广洲, 董一平, 等. 青藏高原夏季500hPa纬向风的时空演变特征及其与我国降水的关系[J]. 大气科学, 2011, 35(1): 168-178.
ZHU Lihua, FAN Guangzhou, DONG Yiping, et al. The spatial-temporal structure of 500-hPa zonal wind in summer in the Tibetan Plateau and its relationship to the precipitation in China[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2011, 35(1): 168-178. (in Chinese)
- [6] 苏布达, 王国杰, 姜彤. 西北地区45a来降水异常的时空变化及其尺度特征[J]. 冰川冻土, 2007, 29(2): 176-182.
SU Buda, WANG Guojie, JIANG Tong. Spatial and temporal variations and scaling of precipitation over northwest China during 1960-2004 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007, 29(2): 176-182. (in Chinese)
- [7] Cui M C, Lian S M, Yang D F, et al. Coast sea level and Asian monsoon system a downscaling exercise for Chinese coast [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 1998, 16(2): 108-121.
- [8] 李淼, 夏军, 陈社明, 等. 北京地区近300年降水变化的小波分析[J]. 自然资源学报, 2011, 26(6): 1001-1011.
LI Miao, XIA Jun, CHEN Sheming, et al. Wavelet Analysis on Annual Precipitation around 300 Years in Beijing Area[J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(6): 1001-1011. (in Chinese)
- [9] 张斌, 史凯, 刘春琼, 等. 元谋干热河谷近50年分季节降水变化的DFA分析[J]. 地理科学, 2009, 29(4): 561-566.
ZHANG Bin, SHI Kai, LIU Chunqiong, et al. Changes of seasonal precipitation of Yuanmou dry-hot valley in recent 50 Years based on method of DFA[J]. Scientia Geographica Sinica, 2009, 29(4): 561-566. (in Chinese)
- [10] Partal T, Kisi O. Wavelet and neuro-fuzzy conjunction model for precipitation forecasting[J]. Hydrol, 2007, 342(1/2): 99-212.
- [11] 周鑫, 郭正堂, 秦利. 近百年来自然和人为因素对亚洲季风降水影响的时间序列分析研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2010, 40(12): 1718-1724.
ZHOU Xin, GUO Zhengtang, QIN Li. Natural and anthropogenic impacts on the Asian monsoon precipitation during the 20th century[J]. Sci China Earth Sci, 2010, 40(12): 1718-1724. (in Chinese)
- [12] 李占杰, 鱼京普. 黄河流域降水要素的周期特征分析[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2010, 46(3): 401-404.
LI Zhangjie, YU Jingshan. Analysis on precipitation cycles in the Yellow River basin[J]. Journal of Beijing Normal University: Natural Science, 2010, 46(3): 401-404. (in Chinese)
- [13] 信忠保, 谢志仁. ENSO事件对淮河流域降水的影响[J]. 气象科学, 2005, 25(4): 346-354.
XIN Zhongbao, XIE Zhiren. The impact of ENSO events on Huaihe River basin's precipitation[J]. Scientia Meteorologica Sinica, 2005, 25(4): 346-354. (in Chinese)
- [14] Hartmann H, Becker S, King L. Quasi-periodicities in Chinese precipitation time series[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2008, 92(3-4): 155-163.
- [15] 姜逢清, 张延伟, 胡汝曦, 等. 新疆年降水不规则性空间差异与长期演变[J]. 干旱区地理, 2010, 33(6): 853-860.
JIANG Fengqing, ZHANG Yanwei, HU Ruji, et al. Spatial pattern and evolution of annual precipitation irregularity in Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2010, 33(6): 853-860. (in Chinese)
- [16] 徐长春, 陈亚宁, 李卫红, 等. 塔里木河流域近50年气候变化及其水文过程响应[J]. 科学通报, 2006, 51(增刊1): 21-30.
XU Changchun, CHEN Yaning, LI Weihong, et al. The responses of climate change and hydrological process in the Tarim River basin during last 50 years[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(S1): 21-30. (in Chinese)
- [17] 王怀清, 赵冠男, 彭静, 等. 近50年鄱阳湖五大流域降水变化特征研究[J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(7): 615-619.
WANG Huaiqing, ZHAO Guannan, PENG Jing, et al. Precipitation characteristics over five major river systems of Poyang drainage areas in recent 50 years[J]. Resources and Environment in the Yangtze basin, 2009, 18(7): 615-619. (in Chinese)
- [18] 卢爱刚. 半个世纪以来黄土高原降水的时空变化[J]. 生态环境学报, 2009, 18(3): 957-959.
LU Aigang. Spatial and temporal precipitation variation on the Loess Plateau in the past half century[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009, 18(3): 957-959. (in Chinese)
- [19] Sivakumar B. Chaos theory in geophysics: past, present and future[J]. Chaos, Solitons & Fractals, 2004, 19(2): 441-462.
- [20] Lee C K, Lin S H. Chaos in air pollutant concentration (APC) time series[J]. Aerosol Air Qual Res, 2008, 8(4): 381-391.

- [21] Sun Y B, Piyamarn S, Vladan B, et al. Efficient data assimilation method based on chaos theory and Kalman filter with an application in Singapore Regional Model[J]. *J Hydro Environ Res*, 2009,3(2):85-95
- [22] Ardalani - Farsa M, Zolfaghari S. Chaotic time series prediction with residual analysis method using hybrid Elman - NARX neural networks[J]. *Neurocomputing*, 2010,73(13/14/15):2540-2553.
- [23] Milla'n H, Ghanbarian - Alavijeh B, Garc'a - Fornaris I. Nonlinear dynamics of mean daily temperature and dewpoint time series at Babolsar, Iran, 1961 - 2005[J]. *Atmos Res*, 2010,98(1):89-101.
- [24] 陈建平,唐菊兴,李志军.混沌理论在三江北段成矿地质条件研究上的应用——以玉龙成矿带北段元素地球化学异常分析为例[J].*地质与勘探*,2003,39(3):1-4.
CHEN Jianping, TANG Juxing, LI Zhijun. Applications of chaos in metallogenetic conditions in the northern part of Three - River area, China [J]. *Geology and Prospecting*, 2003, 39(3):1-4. (in Chinese)
- [25] 杨丕鑫,杨迪雄.单自由度体系地震动力响应的混沌特性分析[J].*计算力学学报*,2010,27(5):834-844.
YANG Pixin, YANG Dixiong. Chaotic characteristic analysis of seismic dynamic reponses of SDOF systems[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2010, 27(5):834-844. (in Chinese)
- [26] 孔春芳,徐凯,吴冲龙.近30年来湖北洪涝灾害时序特征及预测分析——基于分形与混沌理论的研究[J].*自然灾害学报*,2009,18(6):182-188.
KONG Chunfang, XU Kai, WU Chonglong. Time series characteristics and forecast analysis of flood disaster in Hubei Province in recent 30 years; fractal and chaos theories - based exploration[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2009, 18(6): 182-188. (in Chinese)
- [27] 姜勇强,张维桓,盛夏,等.1998年7月21日武汉特大暴雨的数值模拟[J].*气象科学*,2002,22(1):52-59.
JIANG Yongqiang, ZHANG Weiheng, SHENG Xia, et al. Numerical simulation of heavy rainfall on July 21, 1998 in Wuhan area[J]. *Scientia Meteorologica Sinica*, 2002, 22(1):52-59. (in Chinese)
- [28] 吕金虎,陆君安,陈士华,等.混沌时间序列分析及其应用[M].武汉:武汉大学出版社,2002:106-108.
LV Jinhui, LU Junan, CHEN Shihua, et al. *The Analysis and Applications of Chaotic Time Series*[M]. Wuhan:Wuhan University,2002:106-108. (in Chinese)
- [29] Panas E, Ninni V. Are oil markets chaotic? A non - lineardynamic analysis [J]. *Energy Economics*, 2000,22(5):549-568.
- [30] 黄润生,黄浩.混沌及其应用[M].武汉:武汉大学出版社,2000:198-202.
HUANG Runsheng, HUANG Hao. *Chaos and Its Applications* [M]. Wuhan:Wuhan University,2000:198-202. (in Chinese)
- [31] Grassberger P, Procaccia I. Measuring the strangeness of strange attractor [J]. *Physica D*, 1983,9(1/2):189-208.
- [32] 马红光,李夕海,王国华,等.相空间重构中嵌入维和时间延迟的选择[J].*西安交通大学学报*,2004,38(4):335-338.
MA Hongguang, LI Xihai, WANG Guohua, et al. Selection of embedding dimension and delay time in phase space reconstructio[J]. 2004, 38(4): 335-338. (in Chinese)
- [33] 吕小青,曹彪,曾敏,等.确定延迟时间互信息法的一种算法[J].*计算物理*,2006,23(2):184-188.
LV Xiaoqing, CAO Biao, ZENG Min, et al. An algorithm of selecting delay time in the mutual information method[J]. *Chinese Journal of Computational Physic*, 2006, 23(2):184-188. (in Chinese)
- [34] CAO L. Practical method for determining the minimum embedding dimension of a scalar time series [J]. *Physica D*, 1997, 110(1/2):43-50.
- [35] 谢正栋,张永勤,徐敏,等.淮河流域洪水的分形特征及可预报时间研究[J].*南京大学学报:自然科学*,2003,39(1):113-119.
XIE Zhengdong, ZHANG Yongqin, XU Min, et al. Fractal traits and predietable time analysis for flood series in the Huaihe River basin[J]. *Journal of Nanjing University:Natural Sciences*, 2003, 39(1):113-119. (in Chinese)
- [36] 石教智,陈晓宏,林汝颜.东江流域降水时间序列的混沌特征分析中关于结论检验的问题[J].*中山大学学报:自然科学版*,2006,45(4):111-115.
SHI Jiaozhi, CHEN Xiaohong, LIN Ruyan. Chaotic characteristics of precipitation time series in the Dongjiang River valley[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2006, 45(4):111-115. (in Chinese)
- [37] 梁益同,陈正洪,夏智宏.基于RS和GIS的武汉城市热岛效应年代演变及其机理分析[J].*长江流域资源与环境*,2010,19(8):914-918.
LIANG Yitong, CHEN Zhenghong, XIA Zhihong. Decades change and mechanism of the urban heat island effect in Wuhan based on RS and GIS [J]. *Resources and Environment in the Yangtze basin*, 2010, 19(8):914-918. (in Chinese)