

覃星铭,蒋忠诚,蓝芙宁,等.南洞地下河月径流时间序列的混沌特征及预测[J].中国岩溶,2015,34(4):341-347.
DOI:10.11932/karst20150405

南洞地下河月径流时间序列的混沌特征及预测

覃星铭^{1,2},蒋忠诚¹,蓝芙宁¹,马祖陆¹,赵一¹

(1.中国地质科学院岩溶地质研究所/国土资源部、广西壮族自治区岩溶动力学重点实验室/岩溶生态系统与石漠化治理重点实验室,广西桂林541004;2.西南大学资源环境学院,重庆400716)

摘要:利用基于相空间重构技术、混沌识别与预测理论对1993—2013年南洞地下河月径流时间序列的非线性特征进行了分析,由所获得的延迟时间和最佳嵌入维数实现了月径流时间序列的相空间重构,运用饱和关联维数法和小数据量法计算出南洞地下河月径流时间序列的饱和关联维数和最大Lyapunov指数,并运用Volterra模型对南洞地下河月径流时间序列进行了多步预测研究。研究结果表明,南洞地下河月径流时间序列相空间重构的延迟时间和最佳嵌入维数分别为 $\tau=5$ 、 $m=8$,饱和关联维数D和最大Lyapunov指数 λ 分别为4.63、0.7489,从定性和定量的角度证明了南洞地下河月径流时间序列具有弱混沌特征。Volterra自适应滤波模型的预测结果能较好地表征南洞地下河月径流的变化趋势和规律,对18个月内的短期预测精度较高,模拟效果较好。

关键词:月径流;相空间重构;混沌时间序列;Volterra预测模型;南洞地下河

中图分类号:P333

文献标识码:A

文章编号:1001-4810(2015)04-0341-07

0 引言

径流过程是一种受地质背景、气候条件、人类活动、流域环境、下垫面特征等多个因素综合影响下的复杂的水文现象,从时间和空间角度来看,其具有复杂的时空演变特性及不确定性干扰特征。由于其复杂特性,当前尚无完善的模型可以准确描述径流过程,因此,用非线性径流时间序列来分析和量化径流过程,对描述时间尺度的径流变化过程、预测及其特征规律具有重要的作用,这也正是当前径流研究的难点和热点^[1-3]。

模糊数学法、灰色模式、回归法、小波与神经网络法、径向基函数法等方法在水文时间序列的复杂性研究和时间尺度预测方面获得了大量的尝试和应用^[4-10],特别是以混沌理论为基础的非线性科学的快速发展极大推动了水资源系统混沌特性识别和时间序列预测分析的研究深度,但是这些理论与应

用尝试的对象主要是地表水径流,由于岩溶地下河流域地质背景的特殊性、地下河系统空间结构的复杂性以及非线性理论本身对初始条件的敏感性和不确定性,使得专门针对岩溶地下河径流的非线性研究极少^[11]。因此,本文采用混沌理论的关联维数法、Lyapunov指数法和Volterra自适应滤波模型,对南洞地下河1990—2013年的月径流序列的混沌特征及其多步预测进行了研究,拓展了混沌理论在岩溶地下河径流研究领域中的应用,对南洞地下河水文水资源规律的探索、水资源量的优化管理与开发、环境治理与保护等具有重要的指导意义和实践价值。

1 研究区概况

南洞地下河流域位于云南省红河哈尼族彝族自治州所辖的开远市、蒙自市和个旧市,流域面积约1700 km²,为西南岩溶区流域面积大于1000 km²和

基金项目:中国地质大调查项目(12120114062601);国家自然科学基金面上项目(41471447);国家自然科学基金青年基金项目(41502257);广西自然科学基金青年基金项目(2013GXNSFBA019220);岩溶地质研究所基本科研业务费项目(121237128100246)

第一作者简介:覃星铭(1983—),男,助理研究员,博士研究生,主要从事岩溶水土资源过程研究。E-mail:qxm212@karst.ac.cn。

通讯作者:蒋忠诚(1962—),男,研究员,博士生导师,主要从事岩溶水文地质与环境地质研究;蓝芙宁,男,副研究员,博士,主要从事岩溶生态地质研究。

收稿日期:2015-06-12

年枯季资源大于 1 亿 m³ 的超大型地下河流域之一。该流域系统是一个结构复杂的岩溶水系统,由南、北两条地下河汇流排出后形成南洞地表河,其主要含水层有岩溶含水层、碎屑岩裂隙含水层和孔隙含水层(见图 1)。流域自南向北分别由蒙自、草坝、鸡街、大庄 4 个断陷盆地、浅丘与周边中低山组成宏观地形地貌,地势上略向北倾斜,海拔高度约 1 000~2 700 m。受两条南北向断裂和红河深大断裂带的影响,区域地质构造条件复杂。流域内出露有寒武系、泥盆系、石炭系、二叠系、三叠系及第三系、第四系地层,其中三

叠系地层约占区域面积的三分之二,第三系、第四系主要分布于各盆地内。受低纬度亚热带季风气候和地形地貌的影响,区域气候具有高原立体气候特征,盆地与山区年平均气温相差约 4.6℃,年均降雨量相差约 400 mm^[12]。中国地质调查局组织了多次南洞地下河水文地质与环境地质调查工作,广大水文地质工作者开展了很多研究并取得了较好的成果^[13-17],但是目前对南洞地下河径流的演变特征与预测的研究还较少。

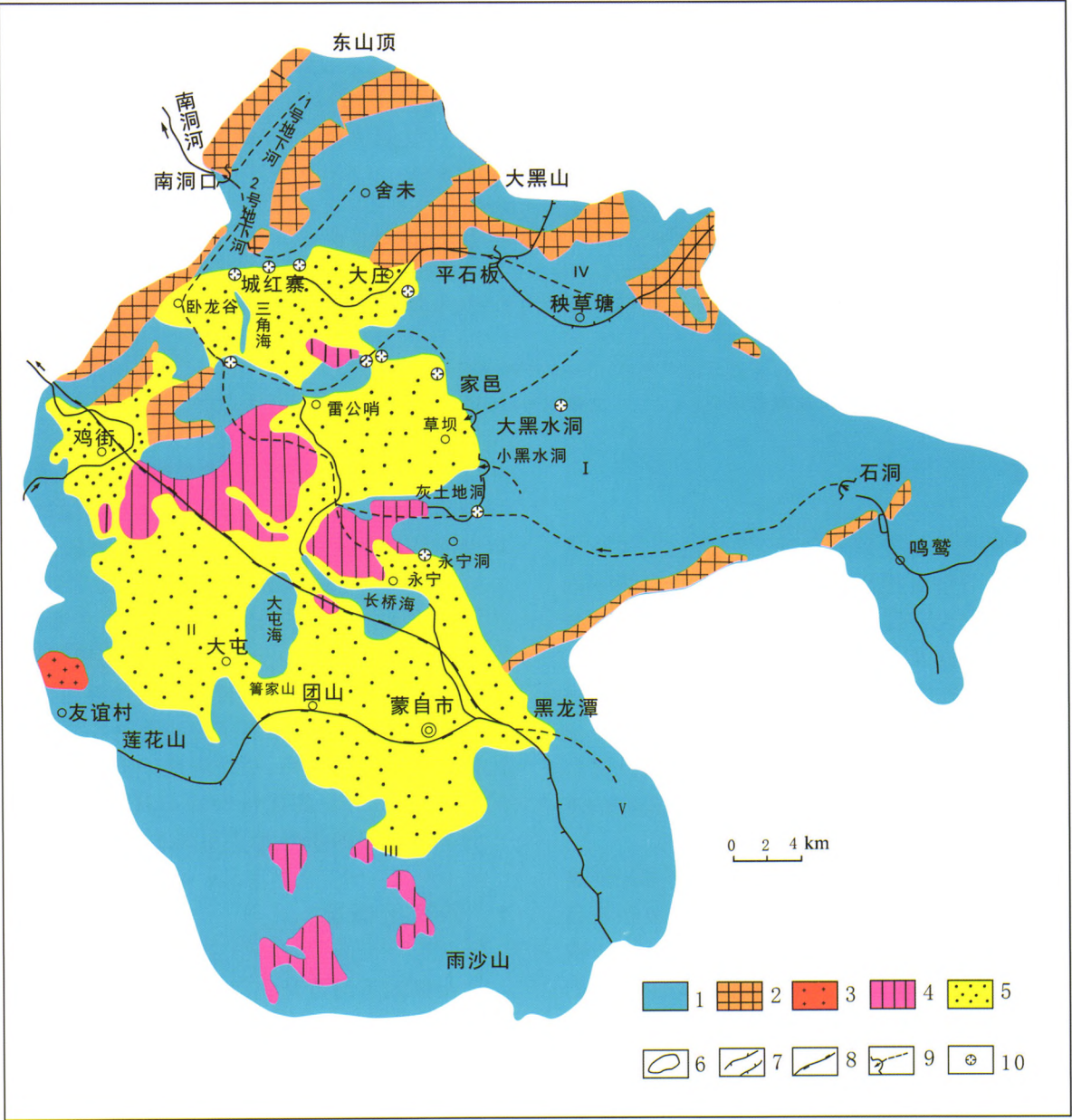


图 1 南洞地下河系统水文地质简图

Fig. 1 Schematic hydrogeologic map in the Nandong underground river

1—岩溶含水层 2—碎屑岩裂隙含水层 3—岩浆岩裂隙含水层 4—泥灰岩裂隙孔隙含水层 5—孔隙含水层
6—流域边界 7—地表、地下水分水岭 8—深部阻水边界 9—地下河及出口 10—落水洞

2 研究方法

2.1 径流时间序列的相空间重构及其参数选择

相空间重构是水文混沌特性识别和非线性预测的基础和前提,由水文时间序列的信息来反映水文系统的演化。通过观测可得出径流时间序列的测量值 $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$, 选定延迟时间 τ 和嵌入维数 m 作为径流时间序列相空间重构的重要参数^[14]。延迟时间 τ 可通过自相关法、复自相关法和去偏复自相关、互信息法等获取,本文选择用互信息法;嵌入维数 m 则可由饱和关联维数(G-P)法、伪最近邻域、改进型虚假邻近点法(Cao法)等确定,本文采用Cao法。

2.2 混沌特性的表征方法

混沌吸引子是表征混沌系统规律特性的重要特征之一,判断南洞径流时间序列所反映的系统运动是否具有混沌特征,则可由混沌吸引子的重要指标关联维和Lyapunov指数来确定。

关联维数是吸引子关联性的非线性度量指标,其取值可以看作是系统是否具备混沌特性的一个表征。其近似值的计算公式为:

$$D(m) = \lim_{r \rightarrow 0} \ln C(r, m) / \ln r \quad (1)$$

式中, $C(r, m)$ 为关联积分, r 为向量 X_i 到其他向量的距离。在实际的计算过程中,通常由相空间重构和G-P法计算出双对数关系 $\ln C(r, m) \sim \ln r$ 的直线段,该直线段中最佳拟合直线的斜率就是关联维数 D 。

Lyapunov指数是描述两个相近的初值所形成的轨道随时间推移而分离的量,即反映出分离快慢的指数发散率。在一维动力系统 $x_{n+1} = F(x_n)$ 中,两点迭代的轨迹取决于导数 $\frac{dF}{dx}$ 的值,每次迭代引起的分离指数为 λ ,经过 n 次迭代后可得到:

$$\lambda = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} \ln \left| \frac{dF^i(x)}{dx} \right| \quad (2)$$

式中, λ 表示系统在相空间的 n 个方向的收缩或扩张的Lyapunov指数。当 $\lambda < 0$ 时则表示相邻点无限靠近为一点;当 $\lambda > 0$ 时则表示相邻点最终要分离;当 $\lambda = 0$ 时表示各点对应分岔点。因此,以Lyapunov指数 $\lambda > 0$ 作为判断混沌特性的重要指标,表示系统是混沌的。

2.3 预测评价指标

参考《水文情报预测规范》的相关要求,以平均绝对百分比误差(MAPE)作为预测评价指标,其中平均绝对百分比误差(MAPE)定义为:

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|X_{obs,i} - X_{model,i}|}{X_{obs,i}} \times 100\% \quad (3)$$

2.4 数据分析与处理

运用小波分析理论,借助Matlab7.0、suffer8.0和Excel2010等相关软件,对南洞地下河1990—2013年的径流数据进行分析与绘图。

3 结果与分析

3.1 南洞地下河月径流变化特征

对南洞地下河总出口1990—2013年的月均流量统计分析可知,南洞地下河月均流量值为2.59~25.8 m³/s,24年的月平均流量为8.16 m³/s,丰水期一般为每年的7—11月,最大月流量发生在每年8月的次数占总次数的45.8%,最枯流量主要出现在每年的4—5月,约占总次数的80.8%。由1990—2013年各年度内月均流量和标准差的分析结果可知(见图2),南洞地下河1992、2010、2011和2013年各年内月流量标准差均低于3、月均流量均低于6.7 m³/s,明显低于24年的月均流量值。在1990—2013年共24年中,1998年7月出现最大月流量,1999年6月出现最小月流量,最大流量与最小流量最大相差约10倍。

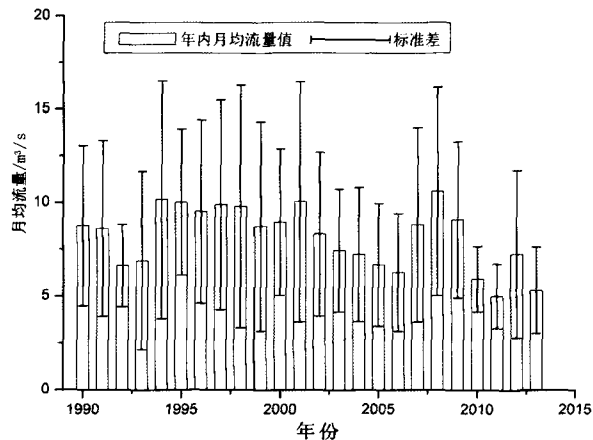


图2 南洞地下河各年内月均流量特征

Fig. 2 Average monthly variations of runoff in the Nandong underground river

3.2 南洞地下河径流的相空间重构

延迟时间 τ 和嵌入维数 m 的确定是实现相空间重构的两个最主要的关键点,本文通过互信息法和改进型虚假邻近点法(Cao法)计算延迟时间 τ 和嵌入维数 m 。互信息法是一种以Shannon信息熵为理论基础用于判断线性相关性和非线性相关性的常用主流方法,既能计算两个变量的相关性,也能度量变量的整体依赖程度^[18]。假设具有离散取值空间的两组随机变量分别为 X 和 Y ,则由两个变量熵和联合熵的定义可知二者的互信息为:

$$H(x, y) = H(x) + H(y) - H(x, y) \quad (4)$$

式中, x, y 为随机变量, H 为信息熵。

假设延迟时间参数为 τ , 则经过变量归一化和计算时间序列的联合概率, 可计算互信息为:

$$I(\tau) = - \sum_{i=1}^N P(x_i) \ln P(x_i) - \sum_{i=1}^{N-\tau} P(x_{i+\tau}) \ln P(x_{i+\tau}) + \sum_{i=1}^{N-\tau} P(x_i, x_{i+\tau}) \ln P(x_i, x_{i+\tau}) \quad (5)$$

式中, $P(x_i)$ 为概率, $P(x_i, x_{i+\tau})$ 为联合概率。

绘制 $\tau - I(\tau)$ 曲线可知, 当 $I(\tau)$ 达到第一个局部最小值时所产生的冗余最小且具有最大独立性, 此时的延迟时间 τ 即可作为相空间重构的时间延迟值。前人研究结果认为, 用于重构相空间最小样本容量为 260^[19], 本文采用南洞地下河出口 1990—2013 年月流量观测数据进行分析符合最小样本要求。根据互信息法计算获得南洞地下河月径流序列延迟时间的结果见图 3, 由月径流时间序列互信息与延迟时间的关系曲线可知, 当 $\tau=5$ 时获得第一个局部最小值为 0.575。因此, 南洞地下河月径流序列最佳延迟时间(滞时)取值为 $\tau=5$, 即相空间重构的延迟时间取 $\tau=5$ 。

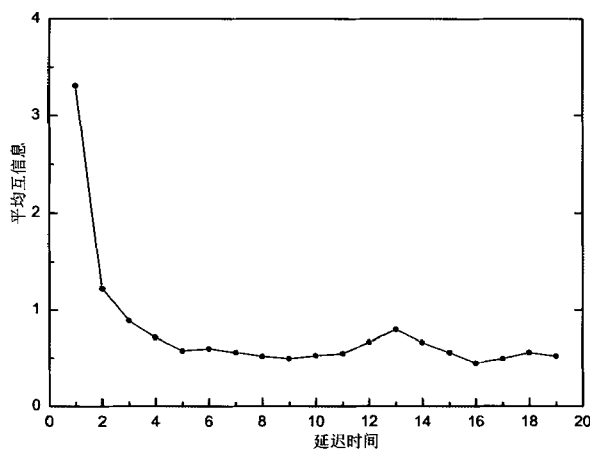


图 3 平均互信息与延迟时间关系曲线

Fig. 3 Relation curve of average mutual information and delay time

改进型虚假邻近点法(Cao 法)是根据吸引子在嵌入空间产生的投影点与相空间中的其他点形成最邻近点, 由此确定最佳嵌入维数, 该方法能有效区分随机系统和确定性系统。其原理步骤可定义为:

$$E(m) = \frac{1}{N - m\tau} \sum_{i=1}^{N-m\tau} a(i, m) \quad (6)$$

式中, $E(m)$ 为所有 $a(i, m)$ 的均值。

$E(m)$ 只依赖于延迟时间 τ 和嵌入维数 m , 为了检测嵌入维数从 m 变化为 $m+1$ 时相空间的变化特征, 则定义:

$$E_1(m) = \frac{E(m)}{E(m+1)} \quad (7)$$

为了精准判断 $E_1(m)$ 在某一 m 处是缓慢增加还是停止变化, Cao 定义量

$$E^*(m) = \frac{1}{N - m\tau} \sum_{i=1}^{N-m\tau} |x_{\eta(i)+m\tau} - x_{i+m\tau}| \quad (8)$$

$$E_2(m) = \frac{E^*(m)}{E^*(m+1)} \quad (9)$$

如果时间序列有吸引子产生, 当 m 大于某一个 m_0 时, $E_1(m)$ 不再变化, 则重构相空间的最小嵌入维数为 m_0+1 。根据这一原理, 在较少数据量条件下由 $E_1(m)$ 和 $E_2(m)$ 值就可确定南洞地下河月径流时间序列相空间重构的最小嵌入维数。由图 4 可知, 当 m 大于 7 时, $E_1(m)$ 趋向于平稳而不再变化, 故南洞地下河月径流时间序列相空间重构的最小嵌入维数 $m=8$ 。

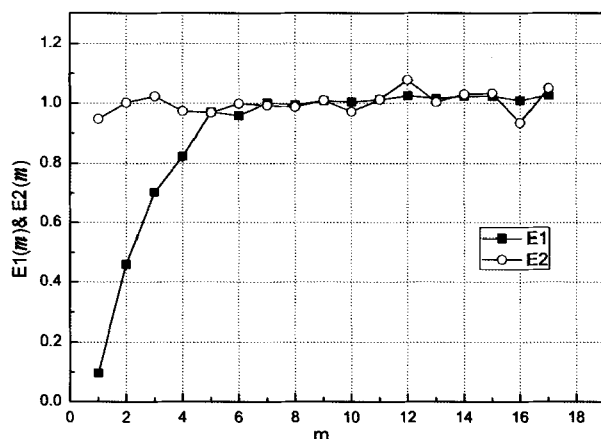


图 4 南洞地下河月径流 $E_1(m)$ 和 $E_2(m) \sim m$ 关系图

Fig. 4 Relationship among $E_1(m)$, $E_2(m)$ and m in the theNandong underground river

由以上所获得的延迟时间 τ 和嵌入维数 m 对南洞地下河月径流序列进行空间重构, 对于南洞月径流离散时间序列 $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$, 其重构嵌入相空间可表示为:

$$\begin{aligned} Y_1 &= \{X_1, X_{1+\tau}, \dots, X_{1+(m-1)\tau}\} \\ Y_2 &= \{X_2, X_{2+\tau}, \dots, X_{2+(m-1)\tau}\} \\ &\dots \\ Y_l &= \{X_l, X_{l+\tau}, \dots, X_{l+(m-1)\tau}\} \end{aligned} \quad (10)$$

式中, $l = n - (m-1)\tau$ 。

3.3 南洞地下河月径流时间序列的混沌特性

一般可由相图法、功率谱法定性或关联维数法、Lyapunov 指数、Kolmogorov 熵定量来识别系统是否具有混沌特征^[20-21], 本文分别从时间序列相空间中的吸引子是否具有自相似结构的分数维几何体, 计算最大 Lyapunov 指数特征量来对南洞地下河月径

流序列的混沌特征进行分析。

3.3.1 南洞地下河月径流时间序列的关联维

饱和关联维数法(G-P法)是由 m 维相空间点对中距离小于 r 的数目在所有相点中所占的比例,通过绘制 $\ln C(r) \sim \ln r$ 关系图来获得关联维数 D ,即当关联维数 D 随嵌入维数 m 的增大而逐渐变小并趋向于平衡时的关联维数为饱和关联维数。其计算公式见公式(1)。

利用饱和关联维数法(G-P法)计算了南洞地下河月径流序列的饱和关联维数,获得 $\ln C(r) \sim \ln r$ 关系如图 5 所示,得到南洞地下河月径流序列的吸引子饱和关联维数为 4.63,即关系曲线图中直线部分的斜率不再随 m 的增大而发生变化,关联维数的值会随着嵌入维数的增加而趋于饱和现象,相空间中的吸引子具有自相似结构的分数维几何体,由此表明南洞地下河月径流序列存在混沌特征。

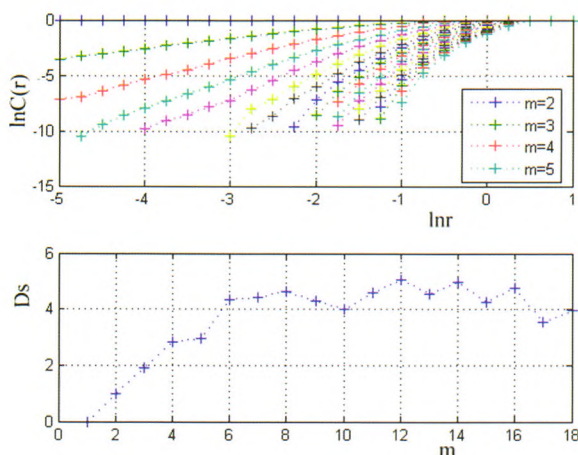


图 5 南洞地下河月径流 $\ln C(r) \sim \ln r$ 关系图

Fig. 5 Relationship of $\ln C(r)$ and $\ln r$ in the Nandong underground river

3.3.2 南洞地下河月径流时间序列的最大 Lyapunov 指数

最大 Lyapunov 指数作为一个重要的混沌不变量,是表征和判断非线性时间序列是否为混沌系统的关键指标^[22]。由于小数据量法具有计算程序简单、计算速度快、抗噪能力强的特点,所以是计算小数据样本最大 Lyapunov 指数的一种常用的有效方法。小数据量法的主要计算步骤为:

(1)找出相空间中每个点 X_j 的最邻近点 X_k ,并设置短暂分离,则

$$d_j(0) = \min_j \|x_j - x_k\|, |j - k| > p \quad (11)$$

式中, $j=0, 1, \dots, N$; $d_j(0)$ 表示到第 j 个点的最近距离; p 表示时间序列的平均周期。

(2)最大 Lyapunov 指数可通过基本轨道上每个

点的最邻近点的平均发散速率估计出来,即:

$$\lambda_1(i) = \frac{1}{i\Delta t} \frac{1}{(M-i)} \sum_{j=1}^{M-i} \ln \frac{d_j(i)}{d_j(0)} \quad (12)$$

式中, Δt 为样本周期, $d_j(i)$ 为基本轨道上第 j 对最邻近点对经过 i 个离散时间步长后的距离。

(3)为了简化计算难度,可对每个 i , 求出所有 j 的 $\ln d_j(i)$ 平均值,即,

$$y(i) = \frac{1}{q\Delta t} \sum_{j=1}^q \ln d_j(i) \quad (13)$$

式中, q 为非零 $d_j(i)$ 的数目, $y(i)$ 为距离 $d_j(i)$ 对 q 累积和的平均值。可通过最小二乘法逼近而获得回归直线的斜率即为最大 Lyapunov 指数。

按以上小数据量法的步骤可获得演化步长 i 与 $\text{Lyapunov}(i)$ 的关系(见图 6),由此计算可知南洞地下河月径流序列的最大 Lyapunov 指数 $\lambda=0.7489$ 。当演化步长分别取 30、60、90、120、150、180、210 时的最大 Lyapunov 指数分别为 0.006 6、0.005 1、0.002、0.000 5、0.000 8、0.000 9、0.002 2。计算结果表明,南洞地下河月径流序列的最大 Lyapunov 指数均大于零,表明南洞地下河月径流序列存在混沌特征,且演化步长对南洞地下河月径流序列的最大 Lyapunov 指数具有一定的影响。由 $0 < \lambda < 1$ 可知,南洞地下河月径流具有一定的拟周期性,其水文系统的时间序列特征比较复杂,可进行有限周期长度的预测。

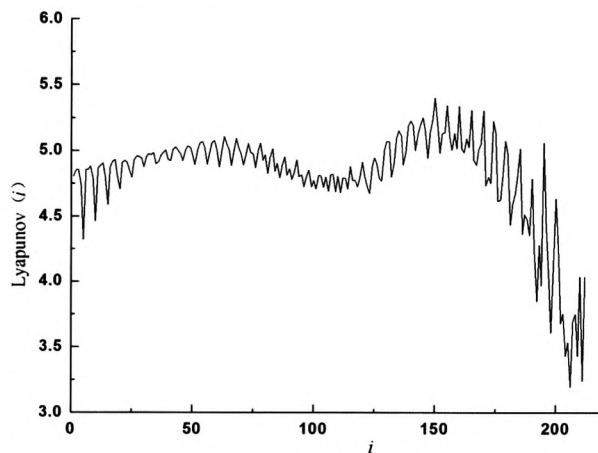


图 6 南洞地下河月径流序列的 $\text{Lyapunov}(i)$ 与 i 的关系

Fig. 6 Relationship between $\text{Lyapunov}(i)$ and i for monthly runoff time series

3.4 基于 Volterra 模型的南洞地下河径流时间序列的多步预测研究

Volterra 模型是根据获得的数据和预测误差来不断修正模型参数,使之能够自适应地跟踪混沌运动轨迹,获得较高的预测精度,是近年来较多用于混沌时间序列预测的方法^[23-25]。Volterra 自适应滤波模型的建立主要包括重构水文混沌时间序列的相空间、

利用 Volterra 级数将水文混沌时间序列转换为线性空间时间序列和通过归一化的最小均方自适应算法 (NLMS) 滤波器滤波估计 Volterra 模型参数等 3 个计算过程。Volterra 自适应滤波模型的算法步骤主要为:

(1) 识别水文时间序列的混沌特性, 获得延迟时间 τ 和嵌入维数 m 。将月径流数据进行归一化处理, 然后重构系统相空间, 模型输入向量为 $(x(n), x(n-\tau) \cdots, x(n-(m-1)\tau))$, 期望输出响应为 $x(n+1)$ 。

(2) 根据水文混沌时间序列最小嵌入维数 m , 定义 Volterra 滤波器的截断阶数为 $N_{\text{opt}} = m_{\text{min}}$ 。

(3) 展开 Volterra 滤波器二阶或三阶的截断级数, 生成滤波器的参数向量 $H(n)$ 线性滤波器的输入信号 $U(n) = [1, x(n), x(n-\tau) \cdots, x(n-(m-1)\tau), x^2(n), x(n)x(n-\tau) \cdots, x^2(n-(m-1)\tau)]^T$ 。假设初始参数向量 $H(n) = 0$ 。设定滤波器自适应收敛因子为 μ , 小的正常数为 φ , 线性滤波器输入为 $1+m+m(m-1)/2$ 。

(4) 估计误差为 $e(n) = x(n+1) - U^T(n)H(n)$, 利用 NLMS 迭代计算公式为:

$$H(n+1) = \frac{\mu}{\varphi + U^T(n)U(n)} U(n)e(n) \quad (14)$$

进一步计算均方差, 由所建立的水文时间序列 Volterra 滤波模型进行多步预测。

对月径流时间序列进行预测分析, 选用 1990 年 1 月到 2011 年 12 月之间 21 年共 252 个月径流时间序列作为训练数据, 预测检验选取 2012 年 1 月—2013 年 12 月共 24 个月径流数据。经多次试算确定模型参数为 Volterra 三阶级数展开, 训练次数为 5 000 次, 获得南洞地下河月径流多步预测结果 (见图 7)。预测结果表明, 平均绝对百分比误差 $MPAE =$

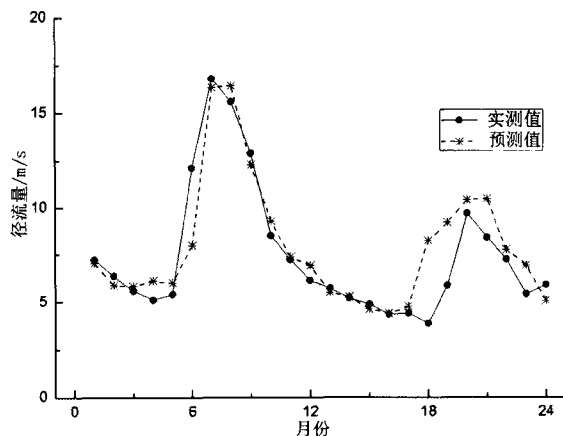


图 7 月径流时间序列的 Volterra 多步预测结果

Fig. 7 Multi-step prediction results for monthly runoff time series using Volterra model

16.17%, 误差绝对值超过 30% 的点仅占 12.5%, 误差绝对值超过 20% 的 5 个点中有 4 个分布在预测月份的最后 6 个月, 由此可知运用 Volterra 预测模型对南洞地下河月径流的预测效果较好, 预测值的相对精度已达到预测的要求, 而且预测误差随着时间推移有逐渐增大的趋势。

4 结 论

(1) 运用互信息法和改进型虚假邻点法 (cao 法) 计算了南洞地下河月径流序列的延迟时间和嵌入维数, 实现了月径流时间序列的相空间重构。从定性和定量两个方面对混沌特征进行识别, 分析结果表明南洞地下河月径流序列具有弱混沌特性。

(2) 根据南洞地下河月径流序列具有的混沌特性, 应用 Volterra 模型对南洞地下河月径流序列进行的预测结果表明, 该模型对具有混沌特性的南洞地下河月径流序列预测有较高的准确性和有效性, 而且 Volterra 模型对南洞地下河 18 个月周期长度的预测更为精准, 预测模型可为南洞地下河水资源的开发、调配和使用提供准确的短期预测预报。

(3) 对南洞地下河径流的混沌特征进行了初步的研究, 但由于专门针对岩溶地下河径流混沌特征研究的参考文献较少, 而且南洞地下河的水文地质条件复杂, 当前尚未能完全准确地掌握其地下管道的空间展布, 南洞地下河的径流不但受水文地质条件的制约, 也与流域降雨特征密切相关, 许多问题还需进一步深入研究, 今后可考虑将水文地质条件与降雨条件结合起来进行更为准确的径流分析与预测预报, 为类似南洞地下河的岩溶地下水的规划与开发提供服务。

参考文献

- [1] 王红瑞, 宋宇, 刘昌明, 等. 混沌理论及在水科学中的应用与存在的问题[J]. 水科学进展, 2004, 15(3): 400—407.
- [2] Bof L H, Pruski F F, Da Silva L M, et al. Analysis of appropriate timescale for water diversion permits in Brazil[J]. Environmental Management, 2013, 51(2): 492—500.
- [3] 李新杰, 胡铁松, 郭旭宁, 等. 不同时间尺度的径流时间序列混沌特性分析[J]. 水利学报, 2013, 44(5): 515—520.
- [4] 蒋传文, 侯志俭, 李涛, 等. 基于小波分解的径流非线性预测[J]. 上海交通大学学报, 2002, 36(7): 1053—1056.
- [5] Ghorbani M A, Kisi O, Aalinezhad M. A probe into the chaotic nature of daily stream flow time series by correlation dimension and largest Lyapunov method[J]. Applied Mathematical Modeling, 2010, 34(12): 4050—4057.
- [6] 桑秀丽, 苏真真, 肖汉杰, 等. 基于 0—1 测试方法的含噪声降雨—径流时间序列混沌特征分析[J]. 云南大学学报: 自然科学版, 2014, 36(2): 233—240.

- [7] 王文圣,向红莲,赵东. 水文序列分形维数估计的小波方法[J]. 四川大学学报(工程科学版),2005,37(1):1-4.
- [8] 姜翔程. 基于 Volterra 自适应方法的水文混沌时间序列预测[J]. 数理统计与管理,2015,34(3):434-441.
- [9] 刘祖涵. 塔里木河流域气候—水文过程的复杂性与非线性研究[D]. 上海:华东师范大学,2014.
- [10] 桑燕芳,王中根,刘昌明. 水文时间序列分析方法研究进展. 地理科学进展,2013,32(1):20-30.
- [11] 温忠辉,任化准,束龙仓,等. 岩溶地下河日流量预测的小样本非线性时间序列模型[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2011,41(2):455-464.
- [12] 覃星铭,蒋忠诚,蓝芙宁,等. 南洞地下河最枯径流的周期变化及趋势分析[J]. 广西师范大学学报自然科学版,2015,33(2):120-126.
- [13] 覃星铭,蒋忠诚,何丙辉,等. 南洞流域东部重点区的石漠化现状及治理对策分析[J]. 中国岩溶,2014,33(4):456-463.
- [14] 高明刚. 云南南洞岩溶地下水温度场时空变化规律研究[J]. 中国岩溶,1995,14(1):19-29.
- [15] 张贵,周翠琼,康晓波. 云南开远南洞地下河水质演变特征[J]. 中国岩溶,2008,27(4):366-370.
- [16] 康彦仁,梁彬. 云南南洞地下河系统的水文地质特征[J]. 水文地质工程地质,1996,(4):28-30.
- [17] 马祖陆. 云南南洞地下河流域地貌特征及地下河发育演化的初步研究[J]. 中国岩溶,1993,12(3):273-283.
- [18] 姜翔程. 水文时间序列的混沌特性及预测方法[M]. 北京:中国水利水电出版社,2011.
- [19] 林振山. 长期预报相空间理论和模式[M]. 北京:气象出版社,1993.
- [20] 李彦彬,黄强,徐建新,等. 河川径流混沌特征及预测理论与实践[M]. 北京:中国水利水电出版社,2011,44-51.
- [21] 汤琳,杨永国. 混沌时间序列分析及应用研究[J]. 武汉理工大学学报,2010,32(19):189-192.
- [22] 吕金虎,陆君安,陈士华. 混沌时间序列分析及其应用[M]. 武汉:武汉大学出版社,2002:29-48.
- [23] 杜杰,曹一家,刘志坚,等. 混沌时间序列的局域高阶 volterra 滤波器多步预测模型[J]. 物理学报,2009,58(9):5997-6005.
- [24] 张家树,肖先赐. 用于混沌时间序列自适应预测的一种少参数二阶 Volterra 滤波器[J]. 物理学报,2001,50(7):1248-1254.
- [25] 孟庆芳,张强,牟文英. 混沌时间序列多步自适应预测方法[J]. 物理学报,2006,55(4):1666-1671.

Chaos analysis and prediction of monthly runoff time series in the Nandong subterranean river

QIN Xing-ming^{1,2}, JIANG Zhong-cheng¹, LAN Fu-ning¹, Ma Zu-lu¹, ZHAO Yi¹

(1. Institute of Karst Geology, CAGS / Key Laboratory of Karst Ecosystem and Rocky Desertification Rehabilitation, MLR/Key Laboratory of Karst Dynamics, MLR&GZAR, Guilin, Guangxi 541004, China;

2. School of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China.)

Abstract In order to provide scientific evidence for the development and utilization of water resources in the Nandong area, this study analyzes the nonlinear features of monthly runoff series of the subterranean river from 1990 to 2013. It is based on the phase space reconstruction theory and chaos theory. The optimal embedding dimension and time delay for the real monthly runoff series are determined using the improved false nearest neighbor method and mutual information method, respectively. And the saturation correlation dimension and the largest Lyapunov exponent for the series are calculated to distinguish its chaotic characteristics by using the Grassberger-Procaccia method and small data sets. According to Volterra series theory, a prediction model is established to describe the changes of monthly runoff series of the Nandong subterranean River in the future. The results show that the time delay and optimal embedding dimension $\tau=5$ and $m=8$, respectively. The saturation correlation dimension of attractor of phase space is 4.63 and the maximum Lyapunov index is 0.748 9. The results also indicate that the monthly runoff series in the Nandong subterranean river has a weak chaotic characteristic in both quality and quantity. The model using the third-order Volterra adaptive filter is effective to predict hydrologic chaotic time series in the study area. It is accurate enough for monthly precipitation forecasting, especially for short-term precipitation forecasting within 18 months.

Key words average monthly runoff, phase space reconstruction, chaotic hydrological time series, Volterra model, Nandong subterranean River

(编辑 吴华英)