泾河月径流量的混沌特征识别及预测

战国隆,马孝义,刘继龙,吕静渭,朱亚磊

(西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室,陕西 杨凌 712100)

摘要:利用泾河流域 1933~2000 年的月径流量实测资料,根据混沌理论,采用 Welch 法和小数据量法识别径流量的混沌特征,根据 C-C 法得出主要的混沌特征指标,并采用 Volterra 级数自适应预测模型进行一步预测。研究表明:月径流量序列存在一定的混沌特征,其频谱曲线均未出现明显的峰值或峰连成一片的现象,并且最大 Lyapunov 指数大于零;Volterra 级数自适应一步预测的精度较高,可用于泾河月径流量的预测。

关键词:月径流量;混沌理论;Lyapunov 指数;泾河流域

中图分类号:P338 **文献标识码**:A **文章编号**:1006-7647(2010)S1-0007-03

泾河流经宁夏、甘肃、陕西三省(区),为陕西省关中平原中部泾惠渠灌区提供水源。由于径流过程受多种因素的影响和制约,表现出复杂、随机、多维等特性。混沌现象是自然界广泛存在的一种不规则运动,是由确定的非线性动力系统生成的复杂行为。混沌中所指的无序是一种内在规律性的表现,并不是指单纯的混乱。目前,已有学者研究表明径流是一类混沌系统,如黄国如等对流域降雨径流时间序列的混沌识别及其预测研究[1],汪丽娜等对月径流时间序列的混沌特征分析[2]等。本文采用泾河流域 1933 年 1 月至 2000 年 12 月的月径流量,识别其混沌动力学特征,用 Volterra 级数自适应预测模型进行径流量一步预测,为泾河流域水资源的开发利用和泾惠渠灌区水资源的优化调度提供理论依据。

1 混沌理论

1.1 混沌识别

直接周期图法估计出的谱方差较大,Welch 法可以改善周期图法估计出谱的方差性能。它的基本思想是采用分段加窗的方法把一长度为 N 的数据 $X_N(1),X_N(2),\cdots,X_N(n)$ 分成 L 段,每段长度为 M,并允许每段数据有部分重叠,分别求每一段的功率谱 $\overset{\wedge i}{P}_{\mathrm{PER}}(\omega)$。然后加以平均,得到平均后的功率谱

$$\tilde{P}_{\mathrm{PER}}(\omega)=\frac{1}{L}\sum_{i=1}^{L}\overset{\wedge i}{P}_{\mathrm{PER}} \tag{1}$$

该方法的优点如下:①选择适当的窗函数 $w(n)$,并在周期图计算前直接加进去,加窗的优点是无论什么样的窗函数均可使谱估计非负;②在分段时可使各段之间有重叠,这样会使方差减小。

计算最大的 Lyapunov 指数采用 M T Roscnstcin,J J Collins 和 G J De luca 提出的一种小数据的计算方法操作起来比较方便,而且具有对小数据组比较可靠、计算量较小和相对易操作的优点。设混沌时间序列为 $\{x_1,x_2,\cdots,x_N\}$,嵌入维数 m,时间延迟 τ,则重相构空间:

$$Y_i=(x_i,x_{i+\tau},\cdots,x_{i+(m-1)_\tau})\in R^m \tag{2}$$
$$(i=1,2,\cdots,M)$$

其中 $N=M+(m-1)\tau$,m 和 τ 的选取根据 C-C 法。

在重构相空间后,寻找给定轨道上每个点的最近临近点,即

$$d_j(0)=\min_{X_j}\|Y_j-Y_{\hat{j}}\| \tag{3}$$
$$|j-\hat{j}|>p \tag{4}$$

式中 p 为时间序列的平均周期,可以通过能量光谱的平均频率的倒数估计出来,那么最大 Lyapunov 指数就可以通过基本轨道上每个点的最近临近点的平均发散速率估计出来。

Sato 等估计最大 Lyapunov 指数为

$$\lambda_1(i)=\frac{1}{i\Delta t}\frac{1}{M-i}\sum_{j=1}^{M-i}\ln\frac{d_j(i)}{d_j(0)} \tag{5}$$

基金项目:国家自然科学基金(50879072);国家科技支撑计划(2006BAD11B04);国家"863"计划(2006AA100209)

作者简介:战国隆(1984—),男,吉林长岭人,硕士研究生,从事农业水土保持研究。E-mail:zgl52@tom.com

通讯作者:马孝义(1965—),男,陕西凤翔人,博士,教授,E-mail:xiaoyimasl@yahoo.com.cn

式中：$\triangle t$ 为样本周期；$d_j(i)$为基本轨道上第 j 对最近邻近点对经过 i 个离散时间步长后的距离。

1.2 Volterra 级数自适应预测模型

混沌时间序列的自适应预测方法是在近年内发展起来的一种预测方法。自适应预测是动态调用模型参数的一种方式，根据当前获得的数据和当前的预测误差来不断修正模型参数。该方法只需要很少的训练样本就能对混沌序列做出很好的预测，适合小数据量的情况，便于实际应用；并且该方法能自适应地跟踪混沌的运动轨迹，预测精度较高。在非线性自适应预测中 Volterra 滤波器因其输出式滤波器核的线性函数，可用现有线性工具来分析其滤波性能，已成为广泛使用的预测模型之一。在实际中大量的非线性系统可用 Volterra 级数表征，因此可用 Volterra 级数展开式来构造混沌时间序列的非线性预测模型。设非线性离散动力系统的输入为 $X(n)=[x(n),x(n-\tau),x(n-(m-1)\tau)]$，输出为 $y(n)=x(n+1)$，则此非线性系统的 Volterra 级数展开式为

$$x(n+1)=h_0+\sum_{k=1}^{p}y_k(n) \tag{6}$$

其中

$$\begin{cases} y_k(n)=\sum\limits_{i_1,i_2,\cdots,i_k}^{m-1}h_k(i_1,i_2,\cdots,i_k) \\ \prod\limits_{j=1}^{k}x(n-i_j\tau) \end{cases} \tag{7}$$

式中：$h_k(i_1,i_2,\cdots,i_k)$ 为 k 阶 Volterra 核；p 为 Volterra 滤波器阶数。

在实际应用中，这种无穷级数展开式难以实现，必须采用有限阶截断和有限次求和的形式。用于混沌时间序列预测的滤波器为：

$$\hat{x}(n+1)=h_0+\sum_{i_1=0}^{m=1}h_1(i_1)x(n-i_1\tau)+\sum_{i_1,i_2=0}^{m=1}h_k(i_1,i_2)x(n-i_1)x(n-i_2\tau) \tag{8}$$

式中：N_1 和 N_2 为滤波器长度。

2 混沌特征识别及预测结果分析

2.1 月径流量的混沌特征

采用 Welch 法进行功率谱分析可以很容易地从功率谱上区分出其是周期函数还是非周期函数。非线性混沌序列是非周期的。笔者以泾河流域 1933 年 1 月至 2000 年 12 月的月径流量为例，利用 Welch 法研究月径流量时间特征，结果如图 1 所示。由图 1 可知，月径流量的频谱曲线均未出现明显的峰值或峰连成一片的现象，即月径流量时间序列为混沌序列。

C-C 法通过嵌入时间序列的关联积分来构造统计量 $S(\tau)$，$\triangle S(\tau)$和 $S_{cor}(\tau)$。C-C 法应用关联积分能够同时估计出延迟时间 τ_d 和嵌入窗宽 τ_ω。$S(\tau)$为所有子序列的统计量的均值，$\triangle S(\tau)$的第 1 个极小值对应第 1 个局部最大时间 τ，$S_{cor}(\tau)$的最小值对应时间序列独立的第 1 个整体最大值时间窗口，即延迟时间窗口。

图 2 为泾河月径流序列的 $S(\tau)$，$\triangle S(\tau)$，$S_{cor}(\tau)$与 τ 的关系曲线。当 $S(\tau)$第 1 次过零点或 $\triangle S(\tau)$为第 1 个局部极小值时，所对应的 τ 即为最佳嵌入窗口。实际情况是 τ 较小时预测效果更好。根据图 2 可取 $\triangle S(\tau)$的第 1 个极小值对应第 1 个局部最大时间为 8，$S_{cor}(\tau)$的最小值对应时间序列独立的第 1 个整体最大值时间窗口可取 56。根据 $\tau_\omega=(m-1)\tau_d$ 的关系，可得 $m=8$。

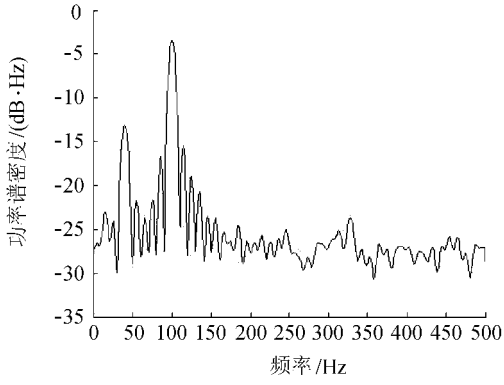

图 1 月径流量时序频谱

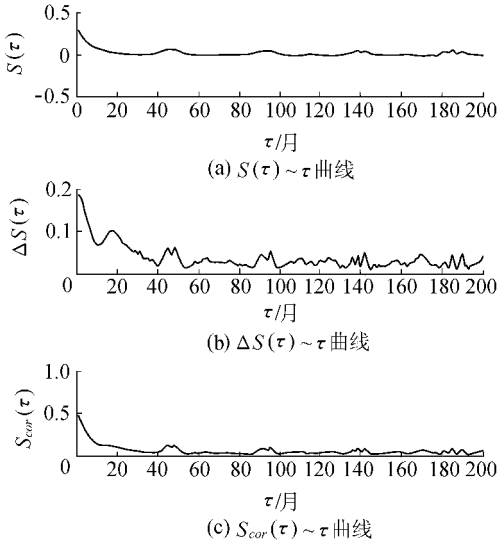

图 2 泾河月径流序列的 $S(\tau)$，$\triangle S(\tau)$，$S_{cor}(\tau)$与 τ 的关系曲线

对于离散的系统，或者说是非线性时间序列，通常只需计算最大的 Lyapunov 指数即可。最大 Lyapunov 指数是判断混沌存在和混沌特征的一个重要依据，最大 Lyapunov 指数大于零，说明混沌存在；

最大 Lyapunov 指数越大，混沌特征越强。

图 3 为根据小数据量法绘制的最大 Lyapunov 指数曲线。计算得到最大 Lyapunov 指数以 2 为底数时等于 1.954 7，以 e 为底数时等于 1.354 9。最大 Lyapunov 指数大于零，进一步说明月径流量时间序列是混沌的，可以对其进行混沌分析和预测。

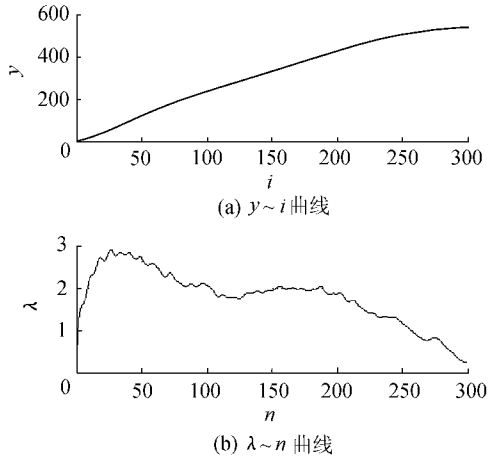

图 3　根据小数据量法绘制的最大 Lyapunov 指数曲线

2.2　Volterra 级数自适应预测

以混沌时间序列为例研究 Volterra 级数一步预测的有效性。图 4 为对混沌时间序列进行 Volterra 级数一步预测的结果。

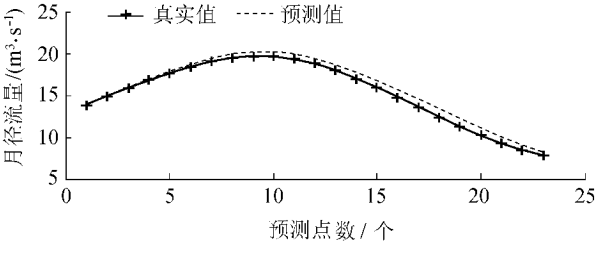

图 4　Volterra 级数一步预测结果

Volterra 级数一步预测结果的相对误差绝对值的最大值和最小值分别为 8.96%和 0.33%，其平均相对误差为 3.92%。这说明对混沌时间序列进行 Volterra 级数一步预测效果较好，预测精度较高。在实际预测中，可用 Volterra 级数自适应预测进行泾河月径流量的一步预测。

3　结　语

采用功率谱分析法、小数据量法和 C-C 法对泾河流域 1933 年 1 月至 2000 年 12 月的月径流量进行混沌特征识别和分析，并采用 Volterra 级数展开式来构造混沌时间序列进行一步预测。结果表明：月径流量存在一定的混沌特征，其频谱曲线均未出现明显的峰值或峰连成一片的现象，并且最大 Lyapunov 指数大于零；Volterra 级数自适应一步预测的精度较高，可用于泾河月径流量的预测。

参考文献：

[1] 黄国如，芮孝芳. 流域降雨径流时间序列的混沌识别及其研究进展[J]. 水科学进展，2004，15(2)：225-260.

[2] 汪丽娜，陈晓宏，李粤安，等. 月径流时间序列的混沌特征分析[J]. 生态环境，2008，17(6)：36-39.

[3] 白建东，叶德谦，李春兴. 混沌时间序列的 Volterra 级数多步预测研究[J]. 计算机仿真，2008，25(6)：274-277.

[4] 高强，王洪礼，管火志. 基于混沌时间序列的变电站设备温度预测[J]. 系统工程，2009，16(1)：36-40.

[5] 林汝颜. 降水时间序列的混沌特征分析[J]. 水利水电，2007 (1)：39-45.

[6] 蒋延臣，朱海宁. 基于最大 Lyapunov 指数的变形预测模式研究[J]. 工程勘探，2009 (10)：50-54.

[7] 陈关荣，汪小帆. 动力系统的混沌化：理论、方法与应用[M]. 上海：上海交通大学出版社，2006.

[8] 张玉梅，曲仕茹，温凯歌. 基于混沌和 RBF 神经网络的短时交通流量预测[J]. 系统工程，2007，25(11)：27-30.

(收稿日期：2009-09-29　编辑：高建群)

(上接第 4 页)

[17] 何永涛，李文华，李贵才，等. 黄土高原地区森林植被生态需水研究[J]. 环境科学，2004，25(3)：35-39.

[18] 汤洁，麻素挺，林年丰，等. 吉林西部植被生态环境需水量供需平衡研究[J]. 环境科学研究，2005，18(1)：5-8.

[19] 何永涛，闵庆文，李文华. 植被生态需水研究进展及展望[J]. 资源科学，2005，27(4)：8-13.

[20] 严军，苗卉，柴洪敏，等. 永定河下游河道生态需水量[J]. 人民黄河，2006，28(2)：51-53.

[21] 张玫，贾新平，魏洪涛. 南水北调西线一期工程调水地区河道内生态环境需水的分析与计量[J]. 资源科学，2005，27(4)：180-184.

[22] 徐志侠，陈敏建，董增川. 基于生态系统分析的河道最小生态需水计算方法研究(Ⅰ)[J]. 水利水电技术，2004，35(12)：15-18.

[23] 孙涛，杨志峰. 基于生态目标的河道生态环境需水量计算[J]. 环境科学，2005，26(5)：43-48.

[24] 王玉蓉，李嘉，李克锋，等. 雅砻江锦屏二级水电站减水河段生态需水量研究[J]. 长江流域资源与环境，2007，16(1)：81-85.

[25] 张保定，张振师. 黄河大河家水电站生态需水研究专题报告[R]. 西安：中国水电顾问集团西北勘测设计研究院，2006.

[26] 田士豪，陈新元. 水利水电工程概论[M]. 北京：中国电力出版社，2004.

[27] PERRY J A，VANDERKLEIIN E. Water quality of a natural resource[M]. Cambridge：Blackwell Science，1996.

[28] PAULA，PIRSA Marine Habitat Program. The Fish Habitat Handbook[M]. Adelaide：Custom Press Pty Ltd，2001.

[29] 余志堂，邓中昶，许蕴□等. 丹江口水利枢纽兴建以后的汉江鱼类资源[M]. 北京：科学出版社，1981.

[30] 四川省长江水产资源调查组. 长江鲟鱼类生物学及人工繁殖研究[M]. 成都：四川科学技术出版社，1988.

(收稿日期：2010-04-29　编辑：方宇彤)