对水文时间序列混沌特征参数估计问题的讨论

王 文[1], 许武成[2]

(1. 河海大学水资源环境学院, 江苏 南京 210098; 2. 西华师范大学国土资源学院, 四川 南充 637002)

摘要: 水文过程到底是不是低维混沌过程一直是个有争议的问题。相关文献在混沌特征参数估计中存在不少问题, 包括: 时延量估计的主观性很强, 不同研究者的估计值差别很大; 在关联维估计中, 很多研究者有意无意地忽略了一个基本原则, 即只有在关联维估计图上存在明确的标度区的情况下才能准确判断存在有限关联维; 很多研究者在计算水文时间序列的关联维时仍采用原始的 G-P 计算公式, 而没有采用 Theiler 提的修正公式, 从而可能误将相点在时序上的相关性当做一种状态空间几何特征, 造成关联维估计错误; 国内相关研究中还普遍存在序列长度偏短的问题, 对这些问题进行了讨论并给出了相应的结论。

关 键 词: 水文时间序列; 混沌特性; 关联维; 嵌入维数; 流量过程

中图分类号: P333.9 文献标识码: A 文章编号: 1001-6791(2005)04-0609-08

从20 世纪 80 年代初开始, 随着人们对混沌现象认识的深入, 有学者开始对水文过程是否存在混沌特性进行研究, 近10 年来对这方面的研究不断增温。从目前发表的关于水文过程混沌特性分析的研究成果来看[1~23], 大多数认为存在低维混沌特性, 否定性的结论不多, 尤其是国内所有关于水文过程混沌特性的研究结果, 无一例外地认为所研究的序列是混沌序列或者具有混沌特性。

然而, 由于混沌理论研究还不成熟, 在水文过程时间序列混沌特性分析中有很多问题值得讨论[24], 这些问题包括混沌特性检验方法的充分性问题、混沌特征参数估计中的主观性、获得可靠混沌特征参数估计所需序列长度问题、序列预处理(如除噪声、差分)对分析结果的影响、可预报时间长度推断的合理性等等。本文将针对参数估计与序列长度问题加以讨论。

1 时延量的估计

已发表的有关流量过程关联维分析中, 对时延量 τ 的估计值相去甚远。对日流量过程, τ 值有 1 d[3]、2 d[2]、10 d[6, 7]、7 d[8]、8~ 20 d[1, 14]、110 d[25]、146 d[4]; 对于月流量序列, τ 值有 1 月、20 月[5], 对于月降水序列, 有取 τ= 1 月[20]、3 月[5, 22]。造成这种差异的原因一方面是由于估计方法本身没有固定标准, 例如, 在采用自相关函数法估计 τ 时, 有的研究者取自相关系数首次达到 0 时的时距为时延量, 有的则取其首次达到某个较小值(如 0.1, 0.5 时)的时距; 另一方面与不同研究者的主观认识有关, 如 Porporato 和 Ridolfi[3] 认为对于日流量过程如果取 τ= 30~ 100 d 是因为季节性增加了序列间的自相关性, 因而取日流量的 τ 值为 1, 并认为如果不考虑季节性, 月尺度的流量值之间几乎是独立的。但这显然有违常理。对流量过程随机特性的分析表明[24], 即使除去流量过程中的季节性成分, 相邻时刻的流量仍具有很强的相关性, 尤其是日流量序列。

对黄河流量过程分析表明[24], 尽管 ACF 检验的仅是时间序列数据间的线性依赖性, 而不象互信息那样检验更广义的非线性联系, 但以自相关系数首次达 0 为标准得到的时延量的估计值与以互信息首次达最小值为标

收稿日期: 2004-03-18; 修订日期: 2004-07-12
作者简介: 王 文(1967-), 男, 江苏泰县人, 副教授, 博士, 主要从事 GIS 与遥感应用、水文时间序列分析研究。
E-mail: w.wang@126.com

准得到的时延量的估计值基本相同，并且自相关函数首次达到0时的时延量与选择时间序列的1/4周期长度基本一致。丁晶等[25]采用不同方法得到的日流量过程时延量估计值也基本与1/4周期相当。若以1/4周期确定流量过程的时延量显然很方便，因为其季节性明确，并且直接取1/4周期可以避免随机因素的影响。依此计算，当流量过程存在显著季节性特征时，日流量序列的时延量 τ 应在91 d左右。

2 关联维数的估计

关联维数的估计在混沌非线性分析中是最为重要的，同时也是问题最多的一个环节。估计关联维数一般采用Grassberger和Pocassia提出的算法[26]（通常称为G-P算法）。该算法是以关联积分的计算为基础的，本质上是统计在m-维重构状态空间（即嵌入空间）中，相互距离小于标度尺度 r 的相点（状态矢量）数在相点总数中所占的比例。关联积分的计算公式为[26]：

$$C_{m,M}(r)=\frac{2}{M(M-1)}\sum_{1\leqslant i<j\leqslant M}H(r-\|X_i-X_j\|) \tag{1}$$

式中 X_i 为重构状态空间中的相点；m 为状态空间嵌入维数；M 为重建后的状态空间数据点的数目，即 $M=N-(m-1)\tau$；r 为以 X_i 为中心的 m-维嵌入空间中的球体的半径，可视为标度尺度，即度量相点间距离的尺子的长度；H 为阶跃函数，当 $x>0$ 时，$H(x)=1$，当 $x<=0$ 时，$H(x)=0$；$\|\cdot\|$ 为欧几里德范数。对于混沌时间序列，关联积分 $C(r)$ 与标度尺度 r 近似呈幂指数关系：$\lim_{r\to 0,N\to\infty}C(r)\approx r^D$，其中 D 为关联维数。

在采用G-P算法计算关联维数时，有二点是必须注意的，而又被很多人忽略了的：一是关于标度区的确定，二是时序上相关的相点的剔除。

2.1 标度区的确定

对于有限的数据，当标度尺度 r 小于某一下限时，则落在半径为 r 的球体中的相点数为零，$C(r)$ 也为零；而标度尺度 r 达到某一上限时，则所有的相点都落在半径为 r 的球体中，$C(r)$ 为1。对于某一给定的嵌入维数 m，若以 $\ln C(r)$（ln为自然对数）为纵坐标，以 $\ln r$ 为横坐标绘制 $\ln C(r)\sim\ln r$ 的折线图，则在 $\ln r$ 的某一范围内，$\ln C(r)\sim\ln r$ 坐标对近似可连接成直线，即 $\ln C(r)\sim\ln r$ 折线的斜率近似为一固定值，从而在这一范围内，$C(r)$ 与 r 呈幂指数关系。如果随嵌入维数的增加，这一直线段消失，则不存在有限关联维，所分析的序列为随机序列；而对于混沌过程，则会存在一段基本固定的 $\ln r$ 范围，在此范围内 $C(r)$ 与 r 呈相对固定的幂指数关系。这时的幂指数即为关联维 D，而这一范围称为标度区（scaling region）。直接从 $\ln C(r)\sim\ln r$ 折线图上是难以准确判断哪个区域是标度区的，必须绘制以 $\ln C(r)\sim\ln r$ 折线图中各段斜率为纵坐标，以 $\ln r$ 为横坐标的局部折线斜率图。混沌序列的 $\ln C(r)\sim\ln r$ 折线斜率图上会存在一个近似的平台，从而得到关联维的估计值。由于 $\ln C(r)\sim\ln r$ 折线的斜率波动比较大，可以计算经过平滑处理的关联维的Takens-Theiler估计值 D_{TT} 或高斯核函数平滑估计值[27]，并绘制以此估计值为纵坐标，以 $\ln r$ 为横坐标的关联维估计图，从而判断所分析的过程是否存在有限的关联维。

估计关联维数时一定要在 $\ln C(r)\sim\ln r$ 折线斜率图或者关联维估计图上找到明确的标度区。Kantz和Schreiber[28]指出，在不提供折线斜率图、没有显示清楚的标度区的情况下，任何关联维估计值都是不可信的。而在那些认为所研究序列存在混沌特性的文章中，一方面，有些虽然给出了斜率图，但在图中，作者所指示的标度区往往并不显著（一个典型的例子是Porporato和Ridolfi[3]在日流量关联维数分析中所指示的标度区并不是一个显著的平台区域）；另一方面，很多没有给出 $\ln C(r)\sim\ln r$ 折线斜率图[2, 5, 7, 14, 15, 18]，而是仅仅根据 $\ln C(r)\sim\ln r$ 折线图是是而非地说明存在所谓的标度区，或者根本忽略必须存在标度区才能准确判断存在有限关联维数这一基本原则。虽然在这些作者给出的以嵌入维数为 X 轴、以关联维数为 Y 轴的折线图上，能看到关联维数随嵌入维数的增加而趋于一个稳定最大值（即达到饱和），但其可靠性难以评估，因为这些作者往往不交待其具体的计算过程，有的甚至是根据 $\ln C(r)\sim\ln r$ 折线图手工量算得到的。

此外, 实际上对于有限长度的序列, 随着嵌入维数增加, 关联维数总有所增加, 有些作者为回避这一难点, 干脆取一个较小的嵌入维数来计算, 这可能会人为地低估系统吸引子维数[29]。比如, 在 Porporato 和 Ridolfi[3] 对某日流量进行关联维分析时, 只取 2~ 10 这样一段较小的嵌入维数计算关联维, 认为关联维数总是小于 4, 而作者提供的嵌入维与关联维指数的折线图却显示随着嵌入维数增加, 关联维还会增长。

2.2　时序相关相点的剔除

如果一个时间序列的时序相关性(即自相关性)显著时, 在采用 G-P 算法计算其关联积分 $C(r)$ 时, 会误将相点在时序上的相关性当做一种状态空间几何特征。为了防止出现这种情况, Theiler[30] 提出了设定 Theiler 窗口来解决这个问题, 修正的关联维计算公式为

$$C(r) = \frac{2}{(M+1-w)(M-w)}\sum_{n=w}^{M}\sum_{i=1}^{M-n} H(r - \|X_{i+n} - X_i\|) \tag{2}$$

式中　$w(\geqslant 1)$ 为 Theiler 窗口的大小。当 $w=1$ 时, 式(2)与式(1)相同, 相当于没有设定 Theiler 窗口。

设定 Theiler 窗口对于流量过程的关联维估计是非常重要的, 尤其是对于日流量过程, 因为流量过程都具有很强的时序相关性。对日流量过程的分析表明[24], 如果不设定 Theiler 窗口(即设 $w=1$)以消除相点之间的时序相关性, 可能将不收敛的关联维数错误地估计为有限的关联维数。图 1 是不设定 Theiler 窗口时得到的黄河上游唐乃亥站日流量过程的 $\ln C(r) \sim \ln r$ 折线图及关联维 Takens-Theiler 估计图(取时延参数 $\tau = 91$), 从图 1(b)中我们可以发现在 $\ln r = 5 \sim 7$ 之间有一个显著的标度区, 从而得到一个 < 4 的关联维数估计值, 但这个估计值是由于关联积分计算中没有考虑邻近相点在时间上的相关性导致的错误估计。如果设定了 Theiler 窗口(取 $w = 91$), 我们得到的 $\ln C(r) \sim \ln r$ 折线图及关联维 Takens-Theiler 估计图就不存在这样的显著标度区(图 2), 也就是说不存在有限的关联维。

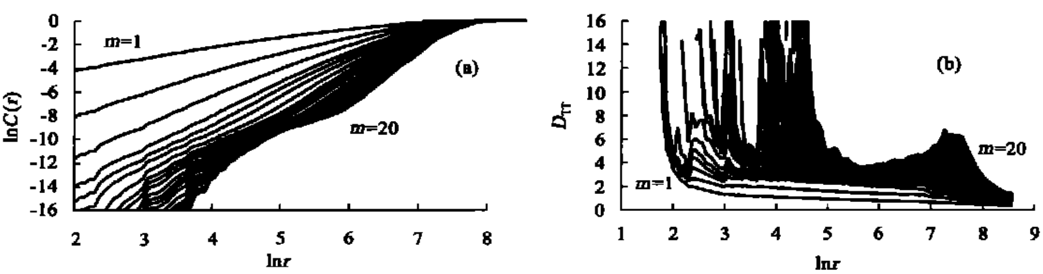

图 1　不设定 Theiler 窗口时得到的黄河上游唐乃亥站日流量过程的(a) $\ln C(r) \sim \ln r$ 折线图及(b)关联维 Takens-Theiler 估计图

Fig. 1　(a) $\ln C(r) \sim \ln r$ and (b) Takens-Theiler estimate of correlation dimension when no Theiler window is set for correlation analysis for daily sreamflow at Tangnaihai

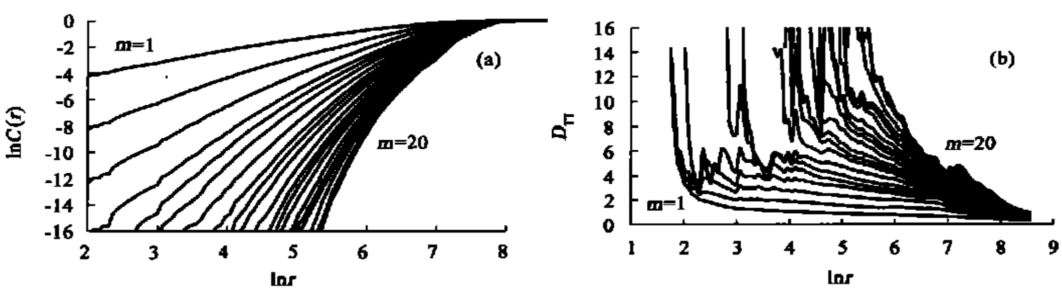

图 2　设定 Theiler 窗口时得到的黄河上游唐乃亥站日流量过程的(a) $\ln C(r) \sim \ln r$ 图及(b)关联维 Takens-Theiler 估计图

Fig. 2　(a) $\ln C(r) \sim \ln r$ and (b) Takens-Theiler estimate of correlation dimension when Theiler window is set for correlation analysis for daily sreamflow at Tangnaihai

Theiler对G-P算法的修正是1986年提出来的[30]。Grassberger[31]在提出关联维优化算法的同时，建议对于存在时序相关性的时间序列，要慷慨地使用Theiler窗口参数(即w要足够大)，并指出很多研究结果因没有注意这个问题而没有价值。但遗憾的是，十多年过去了，这一点仍被很多研究者忽视。已发表的有关水文过程混沌特性分析的文献中，很多(尤其是国内文献)没有采用Theiler的修正公式来计算关联维(如[11，12，14，16，22])，也就是说在计算关联维没有考虑剔除时序相关的相点，由此导致对关联维的错误估计。

3 嵌入维数的估计

估计嵌入维的较常用的方法有关联维法和伪近邻法，但这二种方法都具有很大的主观性。关联维法是指以关联维数为基准进行嵌入维数的估计。但采用此法时，不同研究者往往采用不同的估计标准。例如，Takens[32]指出在存在噪声的情况下重构状态空间时嵌入维数m应满足$m \geqslant 2D+1$，这一关系式被众多研究者接受，在实际应用中，较多研究者采用这一标准的下限，即$m=2D+1$(如[6，10，11])。也有研究者提出采用其它的估计值，如$m \geqslant D$[33，34]，在实际应用有少数研究者采用这一标准(如[9])。如果采用伪近邻法[35]估计嵌入维数，也同样不能避免主观性问题，因为有二个需要主观设定的值：一是判断二个相点是否为近邻的阈值；二是有伪近邻点的相点在全部相点中所占的比例。

由于没有一个检验时间序列混沌特性的严格标准，也没有精确可靠的确定状态空间参数的方法；因此，有研究者[48]提出利用预报精度作为状态空间重建的标准，在预报阶段使用若干组可能的系统状态空间参数(主要是时延量和嵌入维数)，以预报结果最优的那组参数确定为最终的系统状态空间参数。但是这样一来，得到的参数估计值就可能在理论上不合理。例如，Liu等[36]对8个日流量过程的预报误差分析表明，预报精度最佳的嵌入维m分别是2，2，3，4，4，7，2和4，如果以此为依据确定状态空间嵌入维数，根据$m \geqslant 2D+1$这一关系，则大多数流量过程的$D \leqslant 1$，最大也不超过3。然而水文过程的关联维数$D \leqslant 1$是不合理的，因为这意味着动力系统只受控于一个变量，对于流量过程这是难以想象的。因此以预报结果最优为标准来定系统状态空间参数未必可取。

4 混沌特性分析所需序列长度

各种混沌特性分析方法对于所需数据长度都有一定要求。关联维分析是最常用的检验混沌特性的手段。部分研究者对计算关联维所需的数据序列长度问题进行了讨论，认为要使关联维估计值的误差小于5%，则所需的数据序列长度应不小于10^{A}[37]或$10^{(2+0.4m)}$[38，39]，其中A是小于关联维数的最大整数，m是嵌入维数。若按这些标准，在较高维的情况下，大多观测序列难以满足要求。与此同时，也有不少研究结果表明估计关联维所需序列不必那么长，如Abraham等[40]通过实验分析认为，在吸引子维数不很高的情况下，用约500个点以上的含噪声时间序列可求得较可靠的分数维值；Eckmann和Ruelle[41]通过对G-P算法的分析认为计算关联维D所要求的时间序列长度不能小于$10^{D/2}$，洪时中和洪时明[42]证明计算关联维所需序列最小长度应该是$\sqrt{2}\cdot 27.5^{D/2}$。同样，进行另一个重要混沌特征量——Lyapunov指数的计算也需要一定的长度，如Wolf等[43]指出，要估计最大Lyapunov指数，序列长度应该为$10^{D}\sim 30^{D}$；Eckmann和Ruelle[41]认为应该大于10^{D}。相应地，在用另一种常用混沌分析方法——替代数据方法[44]做非线性检验时也需要序列的满足一定的长度，因为在检验时需要计算Lyapunov指数或关联维数。

另一方面，从水文时间序列混沌特性分析的实践来看，国内很多研究者在水文混沌特性分析中所使用的数据长度非常之短。比如，王文均等[13]分析长江干流5个站的年径流序列时，使用的数据长度为39~121，算得关联维数为2.338~5.702；陈云浩等[21]分析上海市旬降水量时，使用的数据长度为180，算得关联维数为9.664；陈仁升等[17]分析黑河莺落峡站年平均流量混沌特征时，使用的数据长度为56，计算出关联维数为

4.32; 杨思全等[45]分析天山北坡一个河冰湖 18 年间的突发洪水序列的混沌特征时, 所用序列长度仅为 14, 并且序列的时间间隔不等, 算得关联维为 1.47。

因此, 不禁要问, 在进行水文时间序列混沌特性分析时是否要用几千、上万个点的序列? 另一方面, 那些由短序列计算出来的关联维数的可靠性究竟怎样?

下面首先通过统计试验来说明序列的长度对关联维估计的影响。统计试验对象是经典的具有混沌特性的 Henon 映射序列。Henon 映射的数学表达式为

$$\begin{cases} x_{n+1} = 1 - a x_n^2 + b y_n \\ y_{n+1} = x_n \end{cases}$$

首先生成了长度为 50、100 的 Henon 映射序列各一个($a = 1.4$, $b = 0.3$)。对于这二个不含噪声的纯净 Henon 序列, 分别计算其嵌入维 $m = 1 \sim 10$ 时的关联维 Takens-Theiler 估计值 D_{TT}[27], 计算结果见图 3。可以看出, 对于长度为 100 的序列(图 3(b)), 从图上可以清楚地分辨出标度区, 即图中曲线存在一个清楚的平台区域, 从而基本准确地估计出关联维为 1.26, 但对长度为 50 的序列(图 3(a))很难确定标度区。

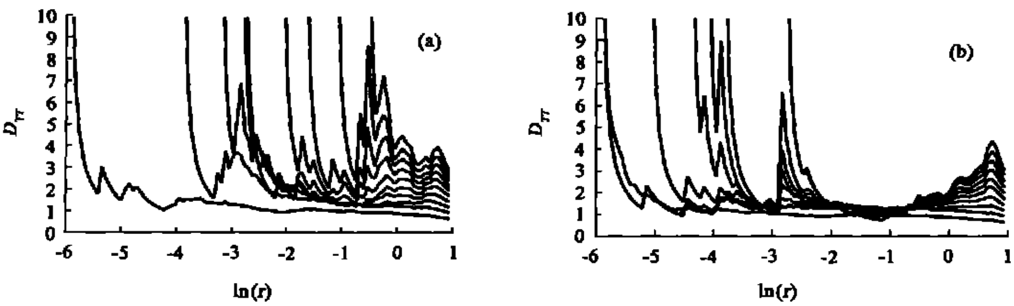

图 3　无噪声情况下长度为(a) 50; (b) 100 的 Henon 映射序列的关联维 Takens-Theiler 估计

Fig. 4　Takens-Theiler estimate of correlation dimension of pure Henon map series of (a) size 50 and (b) size 100

加上 10% 的正态分布噪声(即噪声的标准差为原序列标准差的 10%), 分别计算长度为 50 和 100 的 Henon 映射序列的关联维估计值 D_{TT}, 计算结果见图 4。对于长度为 100 的序列(图 4(b)), 可以从图上分辨出标度区, 但准确地估计出关联维已经比较困难, 对于长度为 50 的序列(图 4(a))则标度区很难识别, 几乎无法估计关联维数。

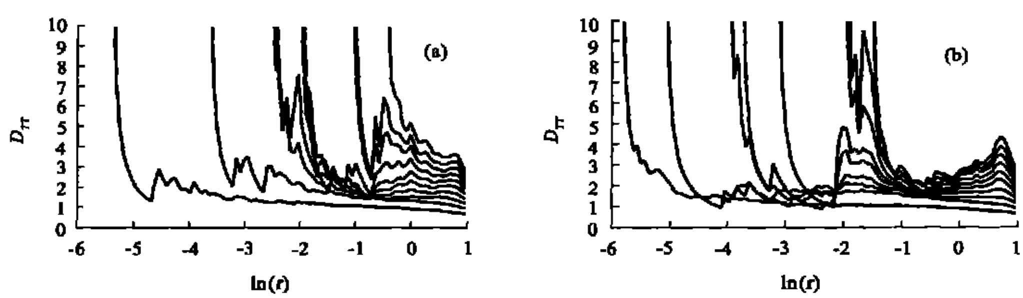

图 4　有 10% 噪声情况下长度为 (a) 50; (b) 100 的 Henon 映射序列的关联维 Takens Theiler 估计

Fig. 4　Takens-Theiler estimate of correlation dimension of Henon map series of (a) size 50 and (b) size 100, when the noise level is 10%

从上述分析可以看到, 对于低维(约 1.26 维)的 Henon 映射序列, 在受噪声干扰时, 如果长度小于 100, 要得出准确的关联维估计已经很困难, 可以推断, 对于通常含有大量噪声成分的水文观测序列, 当序列长度小于 100 时甚至小于 50, 要估计出可靠的较高的关联维数(例如, 大于 4) 几乎是不可能的。虽然关于计算关联维所需序列长度的认识不统一, 但国外还没有哪项发表在主流刊物上的研究成果采用不到 100 点长度的观测数据进行

关联维计算。尽管有些研究者提出的计算关联维所需序列下限长度比较短，如 $10^{D/2}$，但那些结论都是以某些理想状态假设为前提的，在分析实测序列时，序列长度应该大大超过这个下限标准。而国内某些混沌特性研究中使用的数据长度连这些理想状态下的长度下限都没有达到。

另一方面，根据对于黄河源头段唐乃亥站流量过程的不同时间尺度(日、旬、月)的序列的关联指数分析表明[24]，虽然三个序列的长度有很大差别，分别为16 437、1 620及540，但三者的关联积分随标度尺度 r 的变化情况高度一致。这说明500个在维数不高时点左右的序列基本满足关联指数分析的需要。这与Abraham等[40]的分析结果是一致的。Pasternack[4]在计算日流量的关联维时也发现，400个相点就可以得到稳定的关联积分估计。因此，在进行水文时间序列混沌特性分析时用几千、上万个点的序列不是必须的。在实践中，可能洪时中和洪时明[42]所建议的长度要求比较合适。这意味着，要想得出3维以上的关联维估计值，所采用的时间序列的长度至少要有200个点。

5 结　　论

水文过程到底是不是低维混沌过程一直是个有争议的问题，从20世纪80年代末以来，不断有研究者认为发现了存在低维混沌特性的确凿证据，尤其是近几年发表的这方面的文章不断增多，国内关于流量和降水过程混沌特性分析的研究结果更是一边倒地认为所研究的序列为混沌时间序列或具有混沌特性。与此同时，也有少量研究对降雨过程[46, 47]、径流过程[1, 4]是否存在低维混沌特性表示怀疑，认为这些过程应该当做随机过程而非混沌过程。Schertzer等[48]甚至指出Sivarkumar等所做的降雨径流过程混沌特性研究[5]已经走进死胡同。

在这一片混沌研究热潮中，有很多问题需要做冷静而深入的探讨。目前不同研究者已提出了不少关于混沌参数——时延量、嵌入维数及关联维数的估计方法，也已有不少关于各方法优缺点的讨论。但由于目前的状态空间参数估计理论和方法还不成熟，并且现有理论都是以长度无限且没有噪声干扰的数据为基础的，由此导致在分析实际观测数据时，参数估计的客观性、可靠性很成问题。具体而言，目前在水文过程混沌特征参数估计中存在的问题大致有：

(1) 时延量估计极具主观性，不同研究者的估计值差别很大。当流量过程具有显著季节性时，用1/4周期做为时延量的估计值应该是一个比较客观、方便的方法。

(2) 在关联维估计中，很多研究者有意或无意地忽略了一个基本原则，就是只有在关联维估计图上存在明确的标度区的情况下才能准确判断存在有限关联维。

(3) 很多研究者在计算水文时间序列的关联维时仍采用原始的G-P计算公式，而没有采用Theiler提出的修正公式，从而可能误将相点在时序上的相关性当做一种状态空间几何特征，造成关联维估计错误。

(4) 对于要获得可靠的关联维估计值应该用多长的时间序列，虽然还没有统一认识，但以Henon序列为例分析表明，在存在噪声的情况下，即使对于1.26维的Henon映射序列这样的低维混沌序列，长度小于100时要得出准确的关联维估计很困难。而时间序列长度过短的问题在国内相关研究中极为突出，不少研究中使用的水文时间序列长度小于100甚至小于50，所得到的关联维估计值的可靠性根本无法保证。另一方面，实践表明，进行混沌分析也不一定需要长度达到数千、数万个点的时间序列，在维数不高的情况下，有500个点左右的长度基本满足需要。

以低维混沌来描述复杂的水文系统的想法很吸引人。但寻找水文时间序列存在混沌特性的证据不应该是研究的最终目的。如果果真发现水文时间序列存在混沌特性，我们应该给予合理的解释。但还没有哪个研究者能对他们所声称的水文过程低维混沌特性做出解释。理论上，分形维数与系统的自由度有关，它代表了描述系统演变的独立变量数目的下界。若以此分析，某些研究结果得到的水文序列的关联维数是难以解释的，如流量过程0.45维[2]，降水过程1.01维[19]。即使对于较大的关联维数，如3~6，如何解释也是个问题。难以想象，水文过程只受控于这么几个变量。

参考文献:

[1] Wilcox B P, Seyfried M S, Matison T H. Searching for chaotic dynamics in snowmelt runoff[J]. Water Resour Res, 1991, 27(6): 1005–1010.

[2] Jayawardena A W, Lai F. Analysis and prediction of chaos in rainfall and stream flow time series[J]. J Hydrol, 1994, 153: 23–52.

[3] Porporato A, Ridolfi L. Clues to the existence of deterministic chaos in river flow[J]. Int J Mod Phys B, 1996, 10(5): 1821–1862.

[4] Pasternack G B. Does the river run wild? Assessing chaos in hydrological systems[J]. Advances in Water Resources, 1999, 23: 253–260.

[5] Sivakumar B, Berndtsson R, Olsson J, *et al*. Evidence of chaos in the rainfall-runoff process[J]. Hydrol Sci, 2001, 46(1): 131–145.

[6] Phoon K K, Islam M N, Liaw C Y, *et al*. Practical Inverse Approach for Forecasting Nonlinear Hydrological Time Series[J]. J Hydro Eng, 2002, 7(2): 116–128.

[7] Elshorbagy A, Simonovic S P, Panu U S. Estimation of missing stream flow data using principles of chaos theory[J]. J Hydrol, 2002, 255: 125–133.

[8] Islam M N, Sivakumar B. Characterization and prediction of runo. dynamics: a nonlinear dynamical view[J]. Advances in Water Resources, 2002, 25: 179–190.

[9] Lambrakis N, Andreou AS, Polydoropoulos P, *et al*. Nonlinear analysis and forecasting of a brackish karstic spring[J]. Water Resour Res, 2000, 36(4): 875–884.

[10] Bordignon S, Lisi F. Nonlinear analysis and prediction of river flow time series[J]. Environmetrics, 2000, 11: 463–477.

[11] Jayawardena AW, Li WK, Xu P. Neighborhood selection for local modeling and prediction of hydrological time series[J]. J Hydrol, 2002, 258: 40–57.

[12] Sivakumar B, Persson M, Berndtsson R, *et al*. Is correlation dimension a reliable indicator of low-dimensional chaos in short hydrological time series? [J]. Water Resour Res, 2002, 38(2): 3–1–8.

[13] 王文均, 叶　敏, 陈显维. 长江径流时间序列混浊特性的定量分析[J]. 水科学进展, 1994, 5(2): 87–93.

[14] 傅　军, 丁　晶, 邓育仁. 洪水混沌特性初步研究[J]. 水科学进展, 1996, 7(3): 226–230.

[15] 丁　晶, 王文圣, 赵永龙. 长江日流量混沌变化特性研究——II 相空间嵌入维数的确定[J]. 水科学进展, 2003, 14(4): 412–416.

[16] 温　权, 张士军, 张周胜. 探求径流序列中的混沌特征[J]. 水电能源科学, 1999, 17(1): 21–23.

[17] 陈仁升, 康尔泗, 杨建平, 等. 黑河出山径流的非线性特征分析[J]. 冰川冻土, 2002, 24(3): 292–298.

[18] Rodriguez-Iturbe I, Febres de Power B, Sharifi M B, *et al*. Georgakakos. Chaos in rainfall[J]. Water Resources Research, 1989, 25(7): 1667–1675.

[19] Sivakumar B, Liong, S Y, Liaw C–Y, *et al*. Singapore rainfall behavior: chaotic? [J]. J Hydrol Eng, 1999, 4(1): 38–48.

[20] 王宝灵, 谢金南, 俞亚勋. 西北地区降水混沌特性的初步分析[J]. 高原气象, 2000, 19(1): 25–31.

[21] 陈云浩, 史培军, 李晓兵. 不同热力背景对城市降雨(暴雨)的影响(I)—降雨时序的混饨分析[J]. 自然灾害学报, 2001, 10(3): 20–25.

[22] 袁　鹏, 李谓新, 王文圣, 等. 月降雨量时间序列中的混沌现象[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2002, 34(1): 16–19.

[23] 王德智, 夏　军, 张利平. 东北地区月降雨时间序列的混沌特性研究[J]. 水电能源科学, 2002, 20(3): 32–34.

[24] 王　文. 黄河流量过程时间序列分析与建模[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2003.

[25] 丁　晶, 王文圣, 赵永龙. 长江日流量混沌变化特性研究——I　相空间嵌入滞时的确定[J]. 水科学进展, 2003, 14(4): 407–411.

[26] Grassberger P, Procaccia I. Measuring the strangeness of strange attractors[J]. Physica D, 1983, 9: 189–208.

[27] Hegger R, Kantz H, Schreiber T. Practical implementation of nonlinear time series methods: The TISEAN package[J]. Chaos, 1999, 9: 413–435.

[28] Kantz H, Schreiber T. Nonlinear time series analysis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.

[29] 严中伟. 华北旱涝变化的混沌性质分析[J]. 气象学报, 1995, 53(2): 232–237.

[30] Theiler J. Spurious dimension from correlation algorithms applied to limited time-series data[J]. Phys Rev A, 1986, 34(3): 2427–2432.

[31] Grassberger P. An optimized box-assisted algorithm for fractal dimensions[J]. Phys Lett A, 1990, 148: 63–68.

[32] Takens F. Detecting strange attractors in turbulence[J]. Lecture notes in mathematics, 1981, 898: 366- 381.

[33] Farmer J D, Sidorowich J J. Predicting chaotic time series[J]. Phys Rev Lett, 1987, 59(8): 845- 848.

[34] Sauer T, Yorke J. How many delay coordinates do you need? [J]. Int J Bifurcation Chaos, 1994, 3: 737- 744.

[35] Kennel M B, Brown R, Abarbanel H D. Determining embedding dimension for phase-space reconstruction using geometrical construction[J]. Phy Rev A, 1992, 45: 3403- 3411.

[36] Liu Q, Islam S, Rodriguez-Iturbe I, et al. Phase-space analysis of daily streamflow: Characterization and prediction[J]. Adv Water Resour, 1998, 21: 463- 475.

[37] Procaccia I. Complex or just complicated? [J]. Nature, 1988, 333: 498- 499.

[38] Nerenberg, M. A. H., Essex, C. Correlation dimension and systematic geometric effects[J]. Phys Rev A, 1990, 42 (12): 7065- 7074.

[39] Tsonis A A, Elsner J B, Georgakakos K P. Estimating the dimension of weather and climate attractors: Important issues about the procedure and interpretation[J]. J Atmos Sci, 1993, 50(15): 2549- 2555.

[40] Abraham N B. et al. Calculating the Dimension of Attractors from Small Data[J]. Phys Lett A, 1986, 114: 217- 221.

[41] Eckmann J P, Ruelle D. Fundamental limitations for estimating dimensions and Lyapunov exponents in dynamical systems[J]. Physica D, 1992, 56, 185- 187.

[42] Hong Shi-Zhong, Hong Shi-Ming. An Amendment to the Fundamental Limits on Dimension Calculations[J]. Fractals. 1994, 2 (1): 123- 125.

[43] Wolf A, Swift J B, Swinney H L, et al. Determining Lyapunov exponents from a time series[J]. Physica D, 1985, 16: 285- 317.

[44] Theiler J, Eubank S, Longtin A, et al. Testing for nonlinearity in time series: the method of surrogate data[J]. Physica D, 1992, 58: 77- 94.

[45] 杨思全, 陈亚宁. 河冰湖突发洪水的分形和混沌特征研究[J]. 干旱区地理, 1999, 22 (2): 77- 82.

[46] Ghilardi P, Rosso R. Comment on chaos in rainfall[J]. Water Resour Res, 1990, 26 (8): 1837- 1839.

[47] Koutsoyiannis D, Pachakis D. Deterministic chaos versus stochasticity in analysis and modeling of point rainfall series[J]. J Geophys Res, 1996, 101 (D21): 26441- 26451.

[48] Schertzer D, Tchiguirinskaia I, Lovejoy S, et al. Which chaos in the rainfall-runoff process? A discussion on "Evidence of chaos in the rainfall-runoff process" by Sivakumar et al[J]. Hydrol Sci J., 2002, 47(1): 139- 147.

Some issues on the characterization of chaotic properties of hydrologic time series

WANG Wen[1], XU Wu-cheng[2]

(1. *Faculty of Water Resources and Environment, Hohai University, Nanjing* 210098, *China;*

2. *Faculty of Land Resources, Xihua Normal University, Nanchong* 637002, *China*)

Abstract: Whether hydrologic processes are low-dimensional chaotic processes is still controversial. After analyzing the literature about the research of chaos, we find that there are many problems. For instance, the estimation of the time delay is very subjective and application-dependent; in estimation of correlation dimension, many researchers ignore intentionally or carelessly a principle, i.e., there must be a clearly scaling region used for confirming the existence of finite correlation dimension; many researchers still use the original formula of G-P algorithm to calculate the correlation of hydrological time series instead of using the modified formula proposed by Theiler. Therefore, the temporally correlated points in the state space are probably mistaken for a spatial geometry in the state space, and the problem still commonly exits that the size of the studied series by researchers in China is too small.

Key words: hydrologic time series; chaotic property; correlation dimension; embedding dimension; streamflow process