

滑动移除重标方差在动力学结构 突变检验中的应用*

孙东永¹⁾ 张洪波^{1)†} 黄强²⁾

1)(长安大学环境科学与工程学院, 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 西安 710054)

2)(西安理工大学水利水电学院, 西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地, 西安 710048)

(2014年4月24日收到; 2014年6月6日收到修改稿)

标度指数是一个有效的非线性动力学指数, 能够针对相关性时间序列动力学结构突变进行检测; 通过滑动窗口技术和滑动移除窗口技术, 重标极差对于相关时间序列动力学突变具有很好的检测能力, 但由于重标极差方法本身的不完善, 在滑动移除窗口较小时其检测结果出现一些虚假的突变点和突变区间. 鉴于此, 本文提出了一种新的动力学检测方法——滑动移除重标方差. 理想序列数值试验表明, 滑动移除重标方差具有很强的稳定性和准确性, 在滑动窗口较小时其检测结果没有出现虚假的突变点和区间, 实测资料的应用进一步验证了新方法的可靠性.

关键词: 标度指数, 重标方差, 滑动移除重标方差, 突变检测

PACS: 92.70.Aa, 92.60.Wc

DOI: 10.7498/aps.63.209203

1 引言

气候突变的研究对认识气候变化的性质以及进行气候预测都有着重要的意义^[1], 气候突变的检测是当今研究的热点^[2-7]. 气候突变的检测主要有统计学和动力学两种方法, 统计学方法如滑动-t检验、Cramer法、Mann-Kendall法^[8]等对于不断变化的气候系统的非线性、层次性检测效果不理想, 检测结果具有多尺度的特征, 不同的方法得到的结果并不一致. 针对统计学方法的不足, 相关学者从系统的动力学结构方面出发提出了一系列的突变检测方法, 如条件熵、动力学相关因子指数(Q指数)、启发式分割算法、排列熵、信息传递等. 理想时间序列数值试验表明, 这些新方法不仅能够有效地检测统计意义上的突变点, 而且对于系统的动力学结构突变也具有较好的效果, 但此类方法在

动力学检测中仍然存在很大的不确定性. 与此同时, 鉴于标度指数是表征系统内在性质的一个有效物理量, 可以有效刻画序列动力学结构特征的改变, He等^[9-13]基于标度理论先后发展了滑动去趋势波动分析(moving detrended fluctuation analysis, MDFA)、滑动移除去趋势波动分析(moving cut detrended fluctuation analysis, MC-DFA)、滑动移除重标极差分析(moving cut data-rescaled range analysis, MC-R/S)方法, 能够有效地对具有相关性时间序列进行突变检测. 注意到基于标度理论的动力学结构突变检测方法要求所分析的时间序列具有分形特征, 其适用性受到一定限制, 因此同时提出了近似熵^[14]、滑动移除近似熵^[15]、滑动变换参数^[16]等新方法来不断完善突变检测理论, 这些方法能够准确地对理想时间序列及实测资料序列进行动力学结构突变检测, 检测结果对于滑动窗口长度依赖小且抗噪能力强, 极大地丰富了系统动力

* 国家自然科学基金重大项目(批准号: 51190093)、国家自然科学基金(批准号: 51179148, 51179149, 51379014)、国家自然科学基金青年科学基金(批准号: 51009009, 51409005)和中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室开放研究基金(批准号: IWHR-SKL-201109)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: honeber@126.com

学结构突变检测理论. 但He等同时指出, 在理想序列数值试验中, 当滑动移除窗口较小时, MC-R/S会检测到一些虚假的突变点或突变区间, 可能与重标极差 (rescaled range analysis, R/S) 算法自身的不完善有关. 相关研究表明, R/S分析在序列的标度指数计算方面存在着一定的缺陷, 当序列存在短期记忆性、非均匀性及非平稳性时, R/S分析得出的标度指数会出现一定的偏差^[17,18]. Ciraitis等^[19]提出一种新的标度指数计算方法——重标方差分析方法 (rescaled variance analysis, V/S), 通过对比分析R/S和V/S统计量在标度指数诊断方面的异同, 指出V/S分析更具稳健性, 随后Cajueiro和Tabak^[20]通过蒙特卡罗模拟进一步证实了V/S分析的有效稳健性. 目前重标方差已经应用到股票、金融、水文等诸多领域的标度分析当中^[21-23]. 本文将V/S和滑动移除数据技术相结合, 提出一种新的动力学结构突变检测方法——滑动移除重标方差法 (moving cut data-rescaled variance analysis, MC-V/S), 与MC-DFA和MC-R/S类似, 该方法也是基于数据的移除对于具有相同动力学属性的相关序列标度指数的估算几乎没有影响的这一特征而提出.

为了深层次地研究MC-V/S方法在相关性时间序列突变分析的有效性, 探讨MC-V/S方法在实测序列突变检测中的应用性, 本文首先通过构造理想时间序列验证MC-V/S方法的有效性, 通过滑动移除子序列的标度指数的显著性变化研究理想时间序列的突变点和突变区间, 并结合均值突变给出显著性水平对结果进行验证. 之后将MC-V/S方法应用到实测径流序列的突变检测中, 探讨MC-V/S方法中滑动移除窗口、滑动步长等对实测结果的影响.

2 MC-V/S分析

2.1 V/S方法

任取一维时间序列样本 $\{x_t; |t = 1, 2, \dots, n\}$, 将R/S分析中序列的累积离差的极差用序列的方差来代替, 定义V/S统计量:

$$(V/S)_n = \frac{1}{nS_n^2} \left[\sum_{k=1}^n \left[\sum_{t=1}^k (x_t - \bar{x}) \right]^2 - \frac{1}{n} \left[\sum_{k=1}^n \sum_{t=1}^k (x_t - \bar{x}) \right]^2 \right], \quad (1)$$

式中,

$$S_n = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (x_t - \bar{x})^2}$$

为序列标准差; $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n x_t$ 为序列均值.

V/S分析的标度指数的估计: 绘制 n 与 $(V/S)_n$ 的 $\log n - \log(V/S)_n$ 图, 通过最小二乘回归估计直线的斜率, 斜率的 $1/2$ 即为标度指数 γ . 标度指数 $0 < \gamma < 0.5$ 时, 序列呈现出反相关性特征; $\gamma = 0.5$ 时, 序列呈现出随机游走的特征; $0.5 < \gamma < 1$ 时, 序列呈现出正相关性特征.

2.2 MC-V/S方法

参考文献^[13]中的MC-R/S方法, 本文给出MC-V/S分析方法的具体步骤:

- 1) 初选滑动移除窗口长度 M ;
- 2) 从时间序列的第 i ($i = 1, 2, \dots, N - M + 1$; N 为时间序列总个数) 个数据开始连续移除 M 个数据, 再将剩余的 $N - M$ 个数据直连形成新的时间序列;
- 3) 利用V/S计算新序列的标度指数;
- 4) 保持移除窗口长度 M 不变, 取滑动步长为 M 逐步移动窗口, 重复2), 3) 步骤, 直至原序列结束;
- 5) 通过1)—4) 步骤, 可以得到一个长度为 $N - M + 1$ 的标度指数序列;
- 6) 对得到的标度指数序列进行方差分析, 根据方差贡献大小区间初步确定原序列的突变点或突变区间, 并结合一定置信度下均值突变验证结果.

与MC-R/S方法相同, 对于无动力学结构突变且具有相关性的时间序列, 任意移除该序列的数据, 对其标度指数计算的影响几乎可以忽略. 因此, 可以根据步骤1)—6) 通过检测时间序列不同时间段内的数据对于整个序列标度指数贡献的大小来对系统的动力学结构进行检测.

3 数值实验

为了测试MC-V/S在相关性时间序列中的突变检测能力以及对比MC-R/S和MC-V/S检验结果, 采用文献^[13]中构造的理想时间序列IS1, 即在Logistic映射产生一条长度为1000的理想演化序列中, 将 $n = 301-330$ 原序列由随机序列代替, 构

成新的序列IS1. 因而新的序列IS1在 $n = 301$ 和 331 时分别发生了一次动力学结构突变(如图1所示). Logistic映射方程如下:

$$x_{n+1} = \mu x_n(1 - x_n) \quad (x \in [0, 1]), \quad (2)$$

式中, 初值 $x_0 = 0.8$, 参数 $\mu = 3.8$.

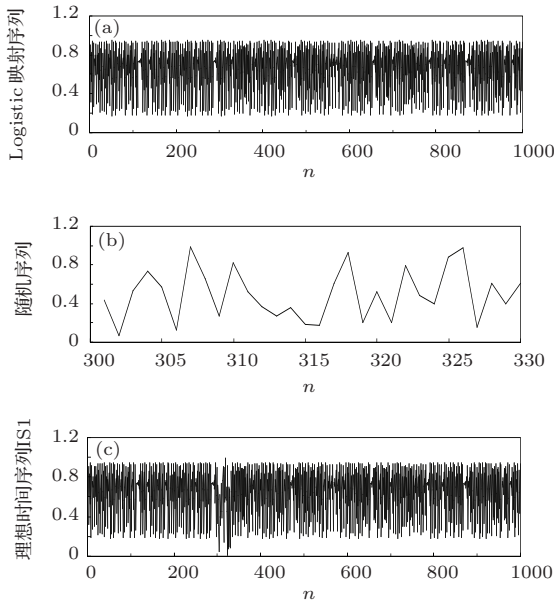


图1 理想时间序列IS1的构造 (a) Logistic映射序列, 长度为1000; (b) 随机序列, 长度为30; (c) 新序列IS1, 将(a)中 $n = 301$ — 330 的 Logistic映射序列由随机序列(b)代替

3.1 滑动重标方差在相关性时间序列中的动力学结构突变检测

为了验证MC-V/S方法检测的准确性, 与MD-FA类似, 构造另外一种动力学结构检测方法——滑动重标方差法(moving rescaled variance analysis, M-V/S), 即在序列中选择一定长度的滑动窗口, 采用V/S计算该滑动窗口子序列的标度指数, 随后保持滑动窗口不变, 逐步移动该序列, 再采用V/S计算新子序列的标度指数, 直至序列结束, 得到一个随步长变化的标度指数序列, 依据得到的标度指数波动的显著性变化检测序列是否发生了动力学结构突变. 图2给出了理想时间序列IS1在滑动窗口长度下 $M = 50, 100, 150$ 时的M-V/S的检测结果. 从图2中可以看出, 不同的滑动窗口长度下序列的标度指数演化规律类似, 在经历一段与滑动窗口长度基本相同的逐步变大—逐步变小的区间变化后, 均在约 $n = 328$ 处发生转折, 之后标度指数演变基本上呈现稳定状态. 而实际上通过对IS1序列的构造表明, 在 $n = 301$ 和 $n = 331$ 时分别发生了一次

动力学结构突变, M-V/S检测到的动力学突变点 $n = 328$ 仅仅与IS1序列中的 $n = 331$ 接近, 对于第一个突变点 $n = 301$ 没有体现, 说明M-V/S虽然对序列的动力学结构突变具有一定的识别能力, 但存在着不能准确定位突变点的问题, 在对相关时间序列多突变点的检测中容易受到滑动窗口长度的影响, 造成检测结果的遗漏或漂移, 需要进一步完善.

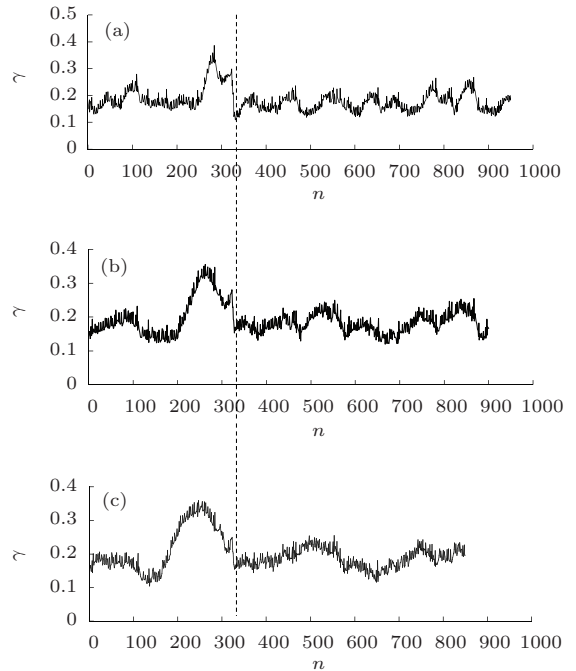


图2 理想时间序列IS1的M-V/S分析 (a) 滑动窗口长度 $M = 50$; (b) $M = 100$; (c) $M = 150$

3.2 MC-V/S在相关性时间序列中的动力学结构突变检测

图3给出了IS1的MC-V/S方法在滑动移除窗口 $M = 5, 10, 15, 30$ 下的检测结果. 由图3(a)—(d)可以得到不同的滑动移除窗口下V/S序列均在 $n = 301$ 和 $n = 330$ 处发生了突变, 即在区间 $n \in [301, 331]$ 中标度指数的变化剧烈, 区间之外相对平稳, 且随着滑动移除窗口长度的增加, 突变区间更加明显, 基本上与IS1序列构造的突变区间一致. 因此可以得出, MC-V/S方法对于滑动移除窗口长度的依赖性较小, 对于相关性时间序列的动力学突变有很好的检测能力. 同时, 这一结果进一步验证了文献[13]中提出的来源于同一动力学结构的子序列其标度指数变化平稳, 来自于不同的动力学结构的子序列其标度指数变化存在明显的差异, 因而可以通过标度指数的显著变化特征来判断序列的动力学结构突变.

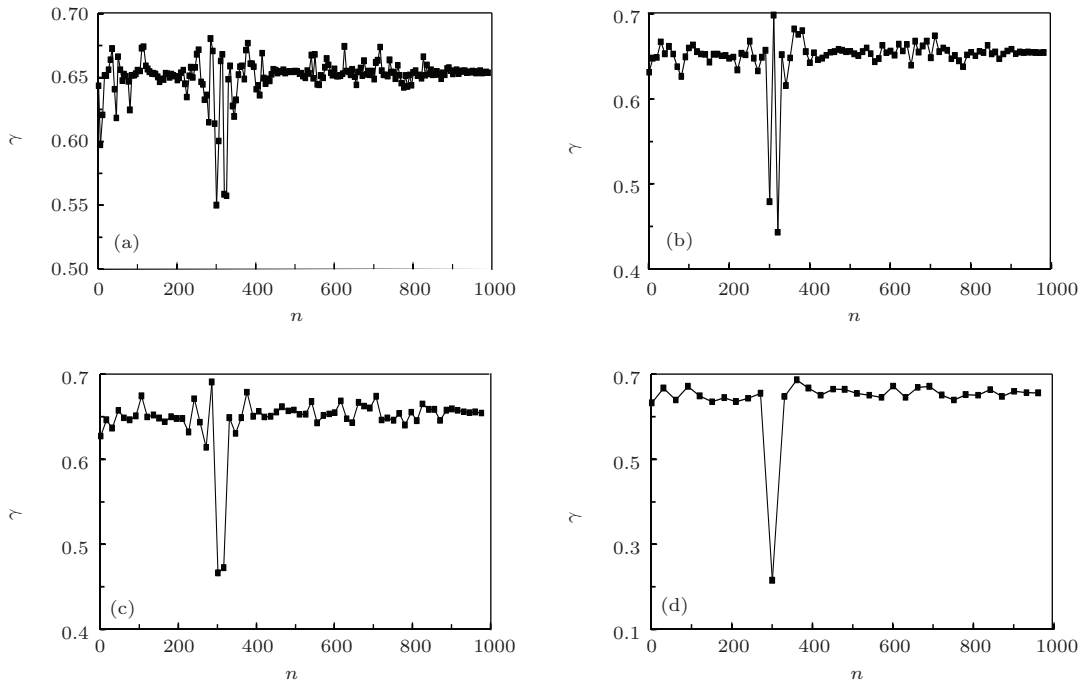


图3 理想时间序列IS1的MC-V/S分析 (a) $M = 5$; (b) $M = 10$; (c) $M = 15$; (d) $M = 30$

为了量化区分具有不同动力学性质的数据对于标度指数贡献大小的差异, 给出了MC-V/S分析结果的方差分析. 定义方差突变的阈值为三倍平均标准差, 超过该阈值即认为序列的动力学结构发生了突变^[13]. 如图4(a)—(d)所示, 滑动移除步长为 $M = 5, 10, 15, 30$ 时, 在 $n \in [301, 331]$ 内, 数据的移除造成标度指数计算的方差均超过了三倍方差阈值, 而其他区域内数据的移除造成标度指数计算的方差变化平稳, 几乎接近于0值. 因此, 通过方差贡献的情况可以进一步判定序列在 $n \in [301, 331]$ 内发生了动力学结构突变, 与理想时间序列IS1真实突变区域完全一致, 这表明MC-V/S对于相关性时间序列的动力学结构突变检测具有很好的准确性, 其结果和文献^[13]中MC-R/S基本一致. 对比M-V/S检测结果进一步表明, MC-V/S在理想时间序列IS1的突变检测中, 对于滑动移除窗口子序列的长度依赖性较小, 检测精度高, 不会发生突变点遗漏及漂移的现象, 其优势明显. 同时, 通过对比文献^[13]中MC-R/S中 $M = 5$ 的方差贡献图, 发现MC-V/S并没有出现部分未发生动力学结构突变处数据的移除产生的方差贡献超过方差阈值的情况. 图5(a)给出了在 $M = 2$ 的情况下方差贡献的情况, 与上述情况类似, 同时可以看到检测到的方差贡献区间为 $[301, 329]$, 接近于真实的突变区间, 说明MC-V/S方法在滑动移除窗口较小的情

况下依然可以保持很好的稳定性. 但同时注意到在 $M < 10$ 的情形下, 突变区间内部分数据的移除对标度指数计算的影响不大, 可能由于在突变区间累积方差的计算时算法本身存在的问题会随着窗口的增加而消失, 因此在实际中遇到此种问题可通过适当改变窗口长度来消除. 图5(b)给出了 $M = 35$ 时的方差贡献图, 可以看到, 类似于MC-R/S, 其检测到的突变区间为 $[281, 351]$, 相较真实区间偏大, 故在实际应用中要充分注意.

3.3 噪声对MC-V/S分析结果的影响

在进行实测资料分析的时候, 强噪声的存在会对结果造成一定的影响, 因此需考虑噪声的影响^[13,24]. 图6给出了 $M = 10$ 、信噪比(SNR)为30, 25, 20, 15 dB时MC-V/S检测到的突变区间各信噪比方差贡献, 检测到的突变区间基本与真实区间保持一致, 没有出现虚假的突变区间, 说明MC-V/S具有很好的抗噪能力.

3.4 实例分析

以上分析了理想时间序列的动力学结构突变, 由于事先预知了突变区间的位置, 可以选择合理的滑动移除窗口, 但实测资料具有更加复杂、动态的非线性特性, 滑动移除窗口过大或过小都会造成检测结果有所偏差; 同时, 在MC-V/S计算步骤中, 假

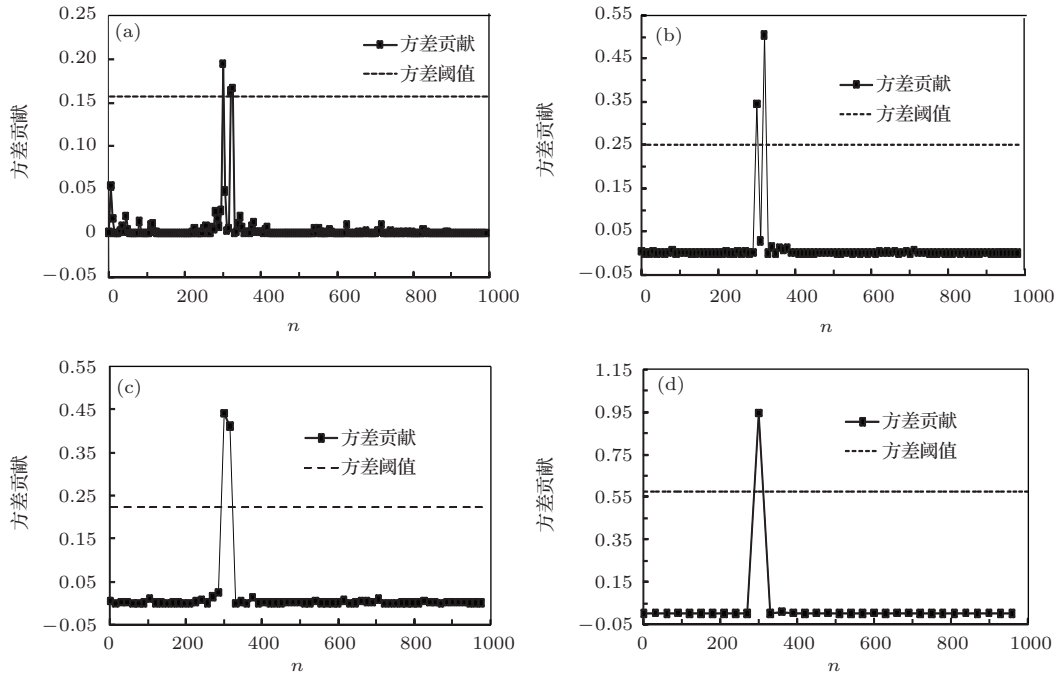


图4 不同滑动移除窗口 M 下的标度指数方差贡献 (a) $M = 5$; (b) $M = 10$; (c) $M = 15$; (d) $M = 30$

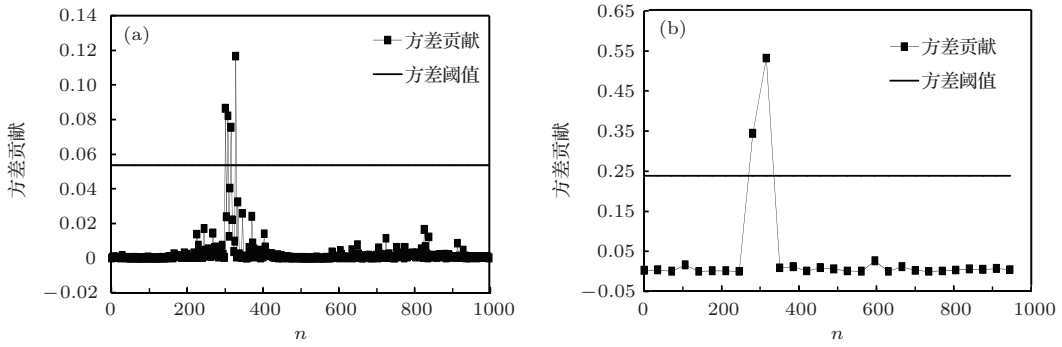


图5 标度指数方差贡献 (a) $M = 2$; (b) $M = 35$

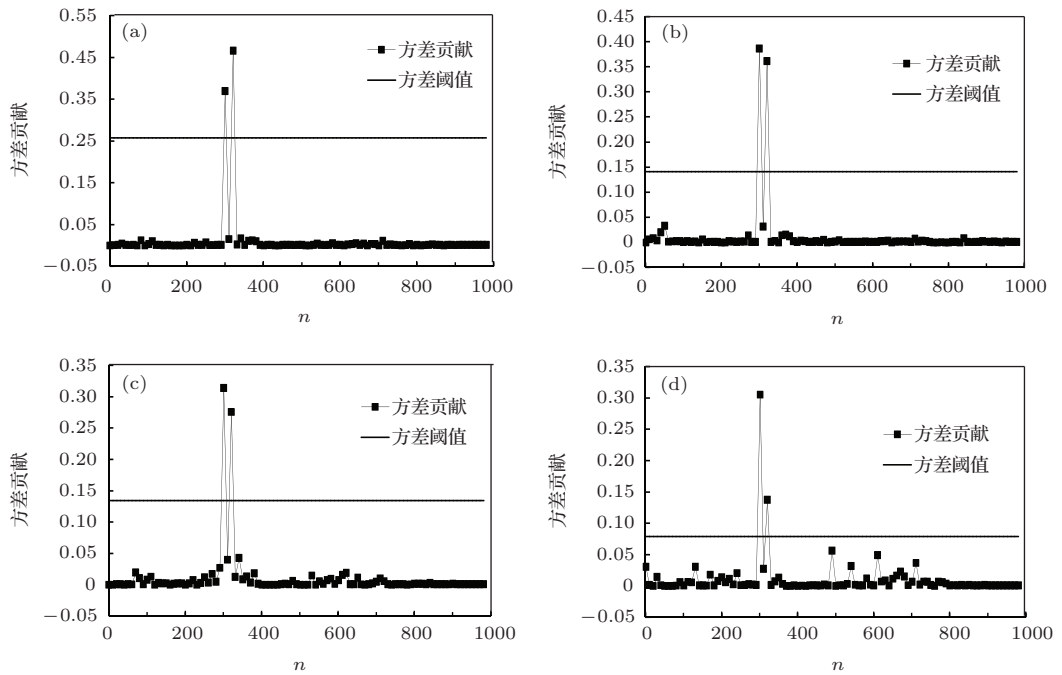


图6 强噪声对于 MC-V/S 的影响 (a) SNR = 30 dB; (b) SNR = 25 dB; (c) SNR = 20 dB; (d) SNR = 15 dB

设滑动步长等于滑动移除窗口, 没有考虑滑动步长对结果的影响. 鉴于此, 本文通过实测径流序列来检测滑动移除窗口和滑动步长对MC-V/S分析的影响, 探求其在实际应用中的操作性. 首先检测滑动移除窗口等于滑动步长情况下MC-V/S的分析结果. 图7(a)给出了1960—2000年共41年的渭河流域林家村站逐日径流资料在滑动移除窗口和滑动步长都等于1 a (1 a的长度为365 d), 即 $M = 365$ d情况下的MC-V/S的检测结果. 可以看到, V/S序列分为明显的三个稳定变化的阶段: 1960—1971年, 1972—1994年, 1995—2000年. 其中1972—1994年V/S值明显大于其他两个阶段, 而1995—2000年变化较为平稳, 且与图9应用滑动 t 检验(显著性水平为0.01)对V/S序列检测的结果一致. 故可以判断在1972年和1995年渭河流域林

家村站逐日径流量发生了突变, 与相关研究结果基本一致 [25,26]. 图7(b)给出了滑动移除窗口和滑动步长为2 a时, 即 $M = 730$ d时检测到的突变点, 与 $M = 365$ d基本一致. 但进一步增加到3和4 a时, 如图7(c), (d)所示, 之前检测到的1995年突变点发生了遗漏. 其原因在于滑动移除窗口太大, 截去了相关的突变区间; 其次, 实测序列中如区域降水、气温、径流等气象水文要素序列在具体分析时一般以1 a为尺度, 往往需要知道具体在何年发生了突变, 过大的滑动步长容易掩盖真实的突变区间, 造成检测结果的遗漏和偏移. 因此在进行实测序列的动力学结构突变检测时, 除了需要选择合适的滑动移除窗口之外, 还需对滑动步长予以注意. 对于温度、降水等气象实测序列, 经过大量计算, 本文建议

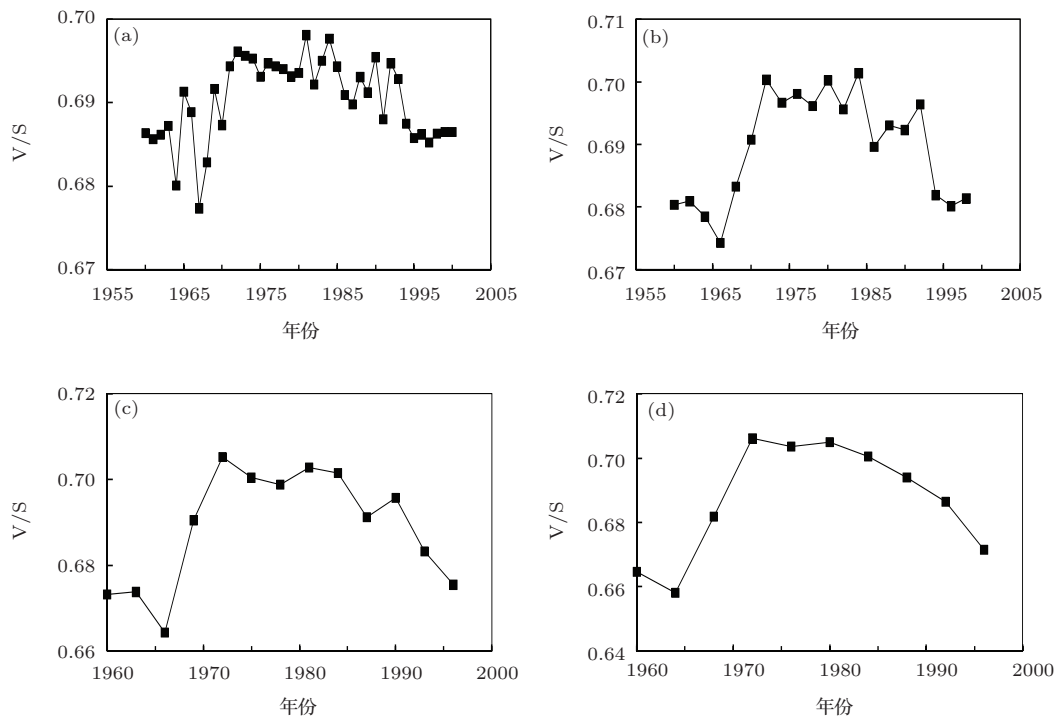


图7 林家村站逐日径流序列的MC-V/S分析 (a) $M = 365$ d; (b) $M = 730$ d; (c) $M = 1095$ d; (d) $M = 1460$ d

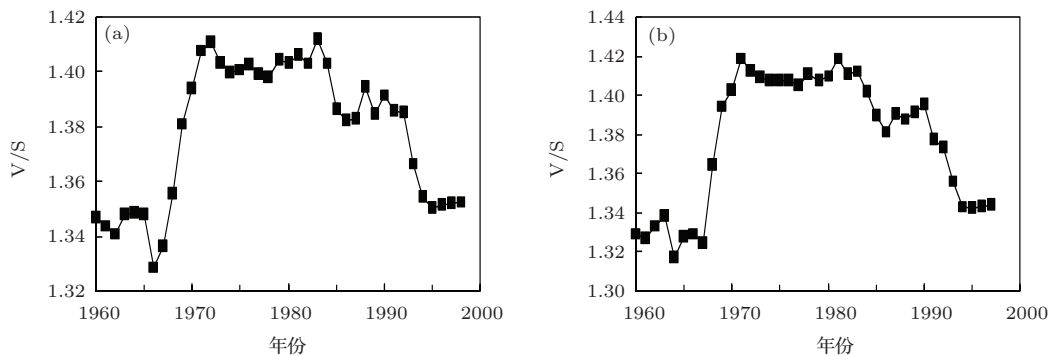


图8 滑动步长为1 a时MC-V/S分析 (a) $M = 1095$ d; (d) $M = 1460$ d

滑动移除窗口和滑动步长的选取中,一是滑动移除窗口的选取不应小于滑动步长,以年的整数倍,范围为1—5 a;二是滑动步长的选择应考虑年周期的影响以及实际应用的需要,取1 a.图8给出了林家村站逐日径流时间序列在滑动步长为1 a时,滑动移除窗口为3和4 a情况下的检测结果图,可以看到检测结果与图7(a)结果一致.

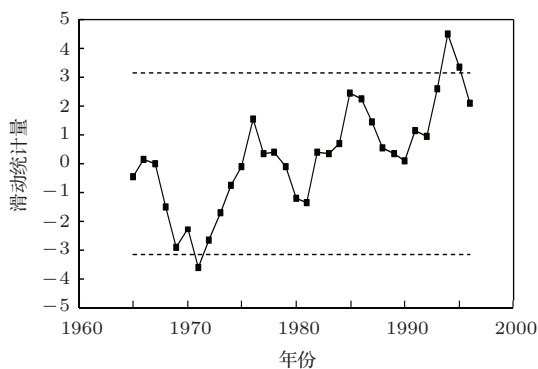


图9 V/S序列滑动t分析结果

4 结 论

1) 本文基于一种标度指数计算新方法——重标方差,借助于滑动移除数据技术,基于数据的移除对于具有相同动力学属性的相关性时间序列标度指数的估算几乎没有影响这一特征,构建了一种新的动力学结构突变检测方法MC-V/S.理想时间序列MC-V/S分析表明,相对于M-V/S方法,MC-V/S方法能够有效地对时间序列的突变区间进行检测,不会造成突变点的遗漏,同时其检测结果对于滑动移除窗口依赖性较小;当滑动移除窗口较小时,没有出现突变区间以外局部方差贡献超过方差阈值的情形.但同时注意到,如选择的滑动窗口长度大于实测序列的突变区间,则会发生突变点的漂移.

2) 实测序列MC-V/S分析表明,滑动移除窗口和滑动步长的选择对结果的准确性有直接的影响,滑动移除窗口太大会造成序列末端以前滑动移除窗口范围内突变点的遗漏,滑动步长太大则会造成滑动步长内突变点的遗漏,大量计算表明滑动移除窗口的取值范围为1—5 a,同时滑动步长取1 a情况下能满足实际分析以及准确性的需要,即具体在何年发生了突变.

3) 同时应该注意到,MC-V/S分析方法虽然为进一步完善时间序列动力学结构检测方法提供了

一条新的思路,但单一方法检测结果的准确性受到诸多关注,如何在各种检验结果中较准确地找到变异点是比较困难的.因此,将各种动力学结构突变检测方法相结合,充分利用各自优势,建立综合的诊断体系^[27,28]是下一步需要进行的工作.

参考文献

- [1] Feng G L, Dong W J, Gong Z Q, Hou W, Wan S Q, Zhi R 2006 *Nonlinear Theories and Methods on Spatial-Temporal Distribution of the Observational Data* (Beijing: Metrological Press) p27 (in Chinese) [封国林,董文杰,龚志强,侯威,万仕全,支蓉 2006 观测数据非线性时空分布理论和方法(北京:气象出版社)第27页]
- [2] Alexi M G, Brook E J, Severinghaus J P 2007 *Geophys. Res. Lett.* **34** L20703
- [3] Yang P, Hou W, Feng G L 2012 *Chin. Phys. B* **21** 019201
- [4] Wang X J, Zhi R, He W P, Gong Z Q 2012 *Chin. Phys. B* **21** 029201
- [5] Tong J L, Wu H, Hou W, He W P, Zhou J 2014 *Chin. Phys. B* **23** 049201
- [6] Wathen S F 2011 *Clim. Change* **108** 333
- [7] Trewin B 2013 *Int. J. Climatol.* **33** 1510
- [8] Lettenmaier D P, Wood E F, Wallis J R 1994 *J. Climate* **7** 586
- [9] Zhang W, Wan S Q 2008 *Chin. Phys. B* **17** 2311
- [10] He W P 2008 *Ph. D. Dissertation* (Lanzhou: Lanzhou University) p23 (in Chinese) [何文平 2008 博士学位论文(兰州:兰州大学)第23页]
- [11] He W P, Feng G L, Wu Q, Wan S Q, Chou J F 2008 *Nonlinear Proc. Geoph.* **15** 601
- [12] He W P, Feng G L, Wu Q, He T, Wan S Q, Chou J F 2012 *Int. J. Climatol.* **32** 1604
- [13] He W P, Deng B S, Wu Q, Zhang W, Cheng H Y 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 8264 (in Chinese) [何文平,邓北胜,吴琼,张文,成海英 2010 物理学报 **59** 8264]
- [14] Wang Q G, Zhang Z P 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 1976 (in Chinese) [王启光,张增平 2008 物理学报 **57** 1976]
- [15] He W P, He T, Cheng H Y, Zhang W, Wu Q 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 049202 (in Chinese) [何文平,何涛,成海英,张文,吴琼 2011 物理学报 **60** 049202]
- [16] He W P, Wan S Q, Jiang Y D, Jin H M, Zhang W, Wu Q, He T 2013 *Int. J. Climatol.* **33** 2713
- [17] Mandelbrot B B, Taqqu M S 1979 *Bull. Int. Stat. Inst.* **48** 59
- [18] Lo A W 1991 *Econometrica* **59** 1279
- [19] Giraitis L, Kokoszka P, Leipus R, Teyssiere G 2003 *J. Econometrics* **112** 265
- [20] Cajueiro D O, Tabak B M 2005 *Math. Comp. Sim.* **70** 172
- [21] He X Q, Li Z F 2006 *Syst. Engineer. Theory & Practice* **12** 47 (in Chinese) [何兴强,李仲飞 2006 系统工程理论与实践 **12** 47]

- [22] Sun D Y, Huang Q, Wang Y M 2011 *Journal of Hydroelectric Engineering* **30** 178 (in Chinese) [孙东永, 黄强, 王义民 2011 水力发电学报 **30** 178]
- [23] Wang C F, Zhang Q C, Li G 2003 *Systems Engineering* **21** 22 (in Chinese) [王春峰, 张庆翠, 李刚 2003 系统工程 **21** 22]
- [24] Jin H M, He W P, Hou W, Zhang D Q 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 069201 (in Chinese) [金红梅, 何文平, 侯威, 章大全 2012 物理学报 **61** 069201]
- [25] Bai C Y 2008 *M. S. Dissertation* (Yangling: Northwest A&F University) p43 (in Chinese) [拜存有 2008 硕士学位论文 (杨凌: 西北农林科技大学) 第 43 页]
- [26] Hou Q L, Bai H Y, Ren Y Y, He Y N, Ma X P 2011 *Resour. Sci.* **33** 1505 (in Chinese) [侯钦磊, 白红英, 任园园, 贺映娜, 马新萍 2011 资源科学 **33** 1505]
- [27] Xie P, Chen G C, Li D, Zhu Y 2005 *Water Resources and Power* **23** 11 (in Chinese) [谢平, 陈广才, 李德, 朱勇 2005 水电能源科学 **23** 11]
- [28] Xie P, Xu B, Zhang S A, Yang G L, Dou M, Chen G C, Liu Y, Liu J J 2006 *Study of Regional Water Resources Variation in Change Environment* (Beijing: Science Press) p32 (in Chinese) [谢平, 许斌, 章树安, 杨桂莲, 窦明, 陈广才, 刘媛, 刘静君 2012 变化环境下区域水资源变异问题研究 (北京: 科学出版社) 第 32 页]

Application of moving cut data-rescaled variance analysis in dynamic structure mutation testing*

Sun Dong-Yong¹⁾ Zhang Hong-Bo^{1)†} Huang Qiang²⁾

1) (Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effect in Arid Region of Ministry of Education, School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

2) (Key Laboratory of Northwest Water Resources and Environment Ecology of Ministry of Education, Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

(Received 24 April 2014; revised manuscript received 6 June 2014)

Abstract

Scaling exponent is a valid nonlinear dynamics index, and can effectively detect the dynamic structure mutations in the correlation time series by means of moving a fixed widow and the moving cut a fixed window technique. When there is short-term correlation, sequence with short-term correlation and the calculation result of scaling exponent with rescaled range will be influenced to a certain degree, resulting in a certain deviation for the scaling exponent calculation of a moving cut window sequence, and some false mutations point and mutations range for abrupt change detection. In view of this, we present a new method of the dynamic structure mutation detection-moving cut data-rescaled variance analysis. The numerical testing of ideal time series shows that the moving cut data-rescaled variance analysis has strong stability and accuracy, which is much better than the moving rescaled variance and the moving approximate entropy. The test results have not false mutation point and interval when the moving window is small. The further application to practically measured data validates the reliability of the new method.

Keywords: scaling exponent, rescaled variance, moving cut data-rescaled variance analysis, mutations detection

PACS: 92.70.Aa, 92.60.Wc

DOI: 10.7498/aps.63.209203

* Project supported by the Major Research Plan of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51190093), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51179148, 51179149, 51379014), the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51009009, 51409005), and the Open Research Fund of the State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin (Grant No. IWHR-SKL-201109).

† Corresponding author. E-mail: honeyber@126.com