

网络出版时间:2015-03-12 14:17 DOI:10.13207/j.cnki.jnwfufu.2015.04.024
网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20150312.1417.024.html

基于排列熵和小波分析的渭河降水突变研究

孙东永¹,黄 强²,张 莉³

(1 长安大学 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 陕西 西安 710054;2 西安理工大学 西北旱区生态水利工程
国家重点实验室培育基地, 陕西 西安 710048;3 中国地质大学(北京) 地球科学与资源学院, 北京 100083)

【摘 要】 【目的】将排列熵和小波分析相结合,研究近 60 年来渭河干流降水序列的突变特征及其影响因素,为渭河流域水资源的利用提供参考。【方法】利用 1960—2003 年渭河流域干流水天、宝鸡、武功和西安 4 个站点日降水观测资料,按照不同窗口滑动取样得到不同时间段的降雨数据,利用排列熵算法分别计算其复杂度,分析复杂度序列随时间的演变规律来检测序列的突变点,之后通过小波分析对复杂度序列进行逐级分解,分析不同时间尺度的周期波动在降水突变中的贡献。【结果】渭河流域天水、宝鸡、武功和西安 4 站降水量在 20 世纪均发生了 2 次突变,其中位于上游的天水站突变发生于 1971 和 1994 年,位于中下游的宝鸡、武功和西安站突变发生于 1980 和 1994 年,呈现出一致性的特征。【结论】准 10 年时间尺度的周期气候波动是渭河干流降水突变的主要因素。

【关键词】 降水突变;排列熵;小波分析;渭河

【中图分类号】 TV125;P333.6 【文献标志码】 A 【文章编号】 1671-9387(2015)04-0229-06

Precipitation mutation of Wei River based on permutation entropy and wavelet analysis

SUN Dong-yong¹, HUANG Qiang², ZHANG Li³

(1 Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effect in Arid Region of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 2 Key Lab of Northwest Water Resources and Environment Ecology of MOE, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;
3 Faculty of Earth of Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: 【Objective】 Combined permutation entropy and wavelet analysis method was used to analyze the mutation characteristics and influence factors of main stream precipitation sequence in Wei River, aiming to improve water resources utilization of Wei River. 【Method】 Daily precipitation observation data at four sites (Tianshui, Baoji, Wugong, and Xi'an) from 1960 to 2003 along main stream of Wei River basin were estimated by different sampling sliding window method and the complexity was calculated using permutation entropy method. The evolution of complexity was analyzed to detect the mutations points, and the contributions of different time scales of cyclical fluctuations to precipitation mutation were obtained by sequential decomposition of wavelet analysis. 【Result】 Tianshui, Baoji, Wugong and Xi'an stations in Wei River basin all had two mutations, which were in 1971 and 1994 at Tianshui station in upstream, while in 1980 and 1994 at Baoji, Wugong and Xi'an stations in midstream and downstream, showing a consistent feature. 【Conclusion】 The major factor for precipitation mutation in Wei River was periodic fluctuation of climate with the time scale of quasi 10 years.

〔收稿日期〕 2013-12-09
〔基金项目〕 国家自然科学基金重大专项(51190093);国家自然科学基金项目(51409005,51179148,51179149)
〔作者简介〕 孙东永(1981—),男,山西朔州人,讲师,博士,主要从事水文学及水资源系统工程研究。
E-mail:sun2002_ren@163.com

Key words: precipitation mutation; permutation entropy; wavelet analysis; Wei River

渭河流域是典型的干旱半干旱区域,受全球气候变暖以及局部地区人类活动对下垫面的影响,流域降水序列表现出复杂、动态的非线性特征,并出现了不同程度的突变,破坏了序列的“一致性”,给工程水文学分析计算带来一系列困难。针对渭河流域的降水突变问题,不同的学者通过累计距平^[1]、滑动平均法^[2]、Mann-Kendall 等统计方法^[3],分别从年、月等不同的时间尺度进行了研究,取得了一系列的成果,但不同时间尺度分析得到的不同突变结果,无法辨识系统是发生了位相或频率的变化还是序列本质发生了变化,无法进行突变前后的性质和突变贡献分析。序列的动力学结构变化与时间尺度没有必然的联系^[4],从系统动力学结构稳定出发判定序列是否发生了突变,可以有效地辨识突变点的性质及其突变位置,如 kolmogorov 熵、启发式分割算法、近似熵等^[5-7]。排列熵(Permutation entropy, PE)是一种新的动力学分析方法^[8-9],通过对时间序列的复杂性进行度量,可以揭示动力系统变化的实质,且概念简单、计算快速、抗噪声强,现已广泛应用于气象、信号分析、机械故障诊断等突变性检测方面^[10-14]。排列熵序列包含了系统演变的信息,为了分析不同时空尺度上的信息,需要对计算结果进行分离,而小波变换(Wavelet transformation, WT)能有效地对信号序列分解重构,从而提取序列多尺度信息。本研究提出基于排列熵和小波分析相结合的降水突变分析方法,用其对渭河流域干流天水、宝鸡、武功、西安 4 站日降水量进行排列熵分析,之后对排列熵序列进行分解重构,以期明确降水突变点的位置、突变前后性质及其影响因素,进而分析 60 年来渭河流域降水序列的演变规律,为渭河流域水资源的利用提供依据。

1 理论与方法

1.1 PE 算法

利用 PE 算法^[10],设有降水时间序列 $\{x(i), i=1, 2, \dots, n\}$, 对其任意元素 $x(i)$ 进行相空间重构,得到:

$$X(i)=[x(i), x(i+\tau), \dots, x(i+(m-1)\tau)]. \quad (1)$$

式中: $X(i)$ 为任意元素 $x(i)$ 相空间重构分量, m 和 τ 分别为嵌入维数和滞时。

对 $X(i)$ 重构分量按升序排列,得:

$$[x(i+(j_1-1)\tau) \leq x(i+(j_2-1)\tau) \leq$$

$$\dots \leq x(i+(j_p-1)\tau)], 1 \leq j \leq n-m+1. \quad (2)$$

式中: $j_1, j_2, \dots, j_p$ 为升序排列后嵌入维数 m 的次序,排序中若 $x(i+(j_{i1}-1)\tau) = x(i+(j_{i2}-1)\tau)$, 则按照 j 值的大小来进行排序,最终任意一个向量 $X(i)$ 都可以得到 1 组符号序列,即:

$$C(k)=[j_1, j_2, \dots, j_m], k=1, 2, \dots, g, g \leq m!. \quad (3)$$

式中: $C(k)$ 为符号序列; k, g 为每一组符号序列 $C(k)$ 出现的个数; $m!$ 为每一组符号序列 $C(k)$ 出现的最大个数。

每一组符号序列 $[j_1, j_2, \dots, j_m]$ 总共有 $m!$ 种不同的排列方式, $C(k)=[j_1, j_2, \dots, j_m]$ 为其中一种,计算每一种符号序列出现的概率 $P_1, P_2, \dots, P_g$,按照 Shannon 信息熵的形式对计算出的概率 $P_1, P_2, \dots, P_g$ 定义排列熵,可得:

$$D_p(m) = -\sum_{i=1}^g P_i \ln P_i. \quad (4)$$

式中: $D_p(m)$ 为排列熵原始状态值。

当 $P_i=1/m!$ 时, $D_p(m)$ 达到最大值 $\ln(m!)$, 实际中,通常将 $D_p(m)$ 用 $\ln(m!)$ 进行标准化处理,即:

$$0 \leq D_p = \frac{D_p(m)}{\ln(m!)} \leq 1. \quad (5)$$

式中: D_p 即为 PE 值,其大小反映了水文时间序列 $\{x(i), i=1, 2, \dots, n\}$ 的随机程度。 D_p 愈小,序列越规则,复杂度越小; D_p 愈大,序列愈趋近于随机,复杂性越大。

序列 PE 的计算通过滑动窗口的方法进行,对长为 n 的时间序列,从序列的第一个数据开始,选取长度为 l 的窗口计算其 PE 值;保持窗口长度不变,然后以滑动步长 h 将窗口向后滑动并计算其 PE 值,直至 $n-h+1$ 结束,将各个窗口计算得到的 PE 值依次相连,得到 $n-h+1$ 个 PE 值序列,通过其变化规律来检测序列的突变点。

1.2 小波分解与重构算法

小波分解常用的快速变换算法有 2 种: Mallat^[15] 和 A Trous^[16] 算法,本研究采用 Mallat 算法。设水文时间序列 $\{Q(t)\}$, 令 $\{C_0(t) = Q(t)\}$, 分解和重构算法表达式分别为公式(6)和公式(7)^[17]:

$$\begin{cases} C_{j+1,i} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} C_{j,k} \bar{h}(a), j=0, 1, \dots, L. \\ D_{j+1,i} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} C_{j,k} \bar{g}(a), j=0, 1, \dots, L. \end{cases} \quad (6)$$

$$C_{j,k} = \sum_{i=-\infty}^{\infty} h(a)C_{j+1,i} + \sum_{i=-\infty}^{\infty} g(a)D_{j+1,i},$$
$$j=L,L-1,\cdots,1,0. \tag{7}$$

式(6)和(7)中: $a=k-2i$, L 为分解层数(尺度数), $C_{j+1,i}$ 、 $D_{j+1,i}$ 分别为第 $j+1$ 层小波变换的低通系列和高通系列, $h(a)$ 为离散低通滤波器(这里滤波器采用 Symlets 小波^[18]), $g(a)$ 为高通滤波器, $\bar{h}(a)$ 和

$\bar{g}(a)$ 分别为 $h(a)$ 和 $g(a)$ 的共轭转置矩阵。

2 结果与分析

选取渭河流域天水、宝鸡、武功、西安 4 个测站(图 1)1960-01-01—2003-12-31 共 44 年的日降雨时间序列来进行突变分析。

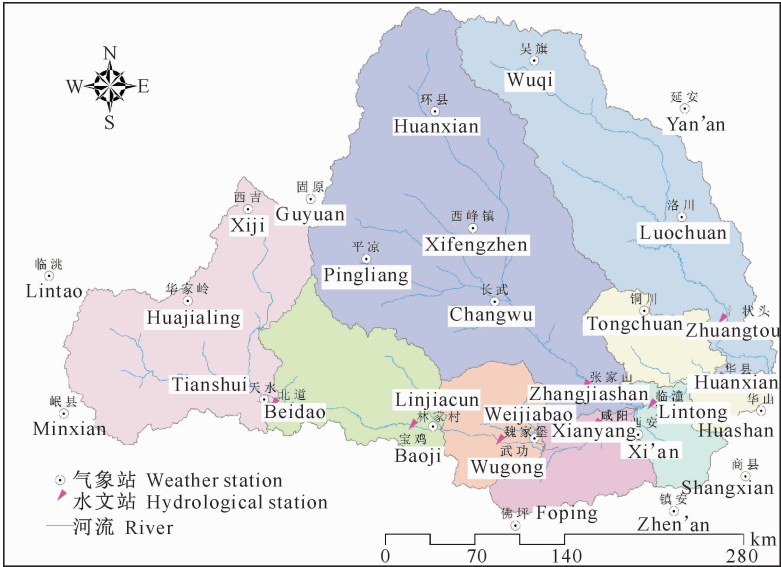


图 1 渭河流域示意图
Fig. 1 Sketch map of Wei River Basin

取滑动窗口长度 $l=5$ 年(每年按 365 d 计),滑动步长 $h=1$ d,嵌入维数 $m=5$,计算每个滑动窗口下的 PE 值,将得到的 PE 值赋值给序列的最后 1 个数据点,横坐标可按式(7)得到其所对应的年份。

$$Y=1960+(t/365-1). \tag{8}$$

式中: Y 为横坐标 t 对应的年份, t 为每一个 PE 值对应的数据点。

计算结果如图 2 所示。由图 2 可知,天水于 $t=4\ 386$ 和 $t=12\ 505$ 处降水发生了 2 次最大的 PE 突变,分别对应于 1971 和 1994 年;宝鸡于 $t=7\ 365$ 和 $t=12\ 540$ 处降水发生了 2 次最大的 PE 突变,分别对应于 1980 和 1994 年;西安于 $t=7\ 358$ 和 $t=12\ 538$ 处降水发生了 2 次最大的 PE 突变,分别对应于 1980 和 1994 年;武功于 $t=7\ 362$ 和 $t=12\ 530$ 处降水发生了 2 次最大的 PE 突变,分别对应于 1980 和 1994 年。上述结果说明,渭河流域干流降水在 20 世纪 80 年代初期和 90 年代中期经历了 2 次较大的突变,且突变具有很强的一致性,其中 80 年代初由于西北气候发生了突变,出现了自 70 年代中期第 1 次气候突变以来的第 2 次升温^[19]。受流域下垫面变化以及 ENSO (El Niño-Southern Oscilla-

tion) 的影响,从 1994 年开始渭河流域气候出现持续异常,由 1972—1993 年冷期转变为 1994 年的暖期,流域降水亦出现突变,连续 7 年出现干旱^[20]。另外,对于天水、宝鸡、武功和西安水文站,其 t 分别为 1 768,1 838,1 931,1 867 时,均对应于 1964 年,PE 值在 1964 年之后进入到另外一个相对稳定的阶段,故渭河流域降水在 60 年代中期也发生了突变,这与相关研究结果^[21-23] 基本一致。

为了进一步分离各站 PE 值序列不同尺度的周期波动,了解渭河流域降水在不同尺度的气候贡献,用小波分析方法对 PE 序列进行逐级分解,采用 sym8 进行分解重构,得到 d1~d12 共 12 个分量,其中天水站的结果如图 3 所示(其他站点图略)。在图 3 中,天水站 PE 值 sym8 分解得到的 d10 分量显示了天水站日降水 PE 值演变的平均状态,其演变特征和天水站日降水 PE 值规律基本一致,呈现准 10 年左右的周期(图 4),这说明 20 世纪天水站降水突变和 d10 分量这一时间尺度的降水变率有着密切的联系。图 5 为天水、宝鸡、武功、西安 4 站 d10 分量与日太阳黑子数演变图(太阳黑子数据资料来源于中国气象数据网(<http://data.cma.gov.cn>))。由

图 5 可以看出,天水、宝鸡、武功、西安 4 站 d10 分量与太阳黑子活动准 10 年周期有着很大的联系。故笔者认为太阳黑子周期波动在天水、宝鸡、武功、西安日降雨序列的演变中发挥着重要作用。

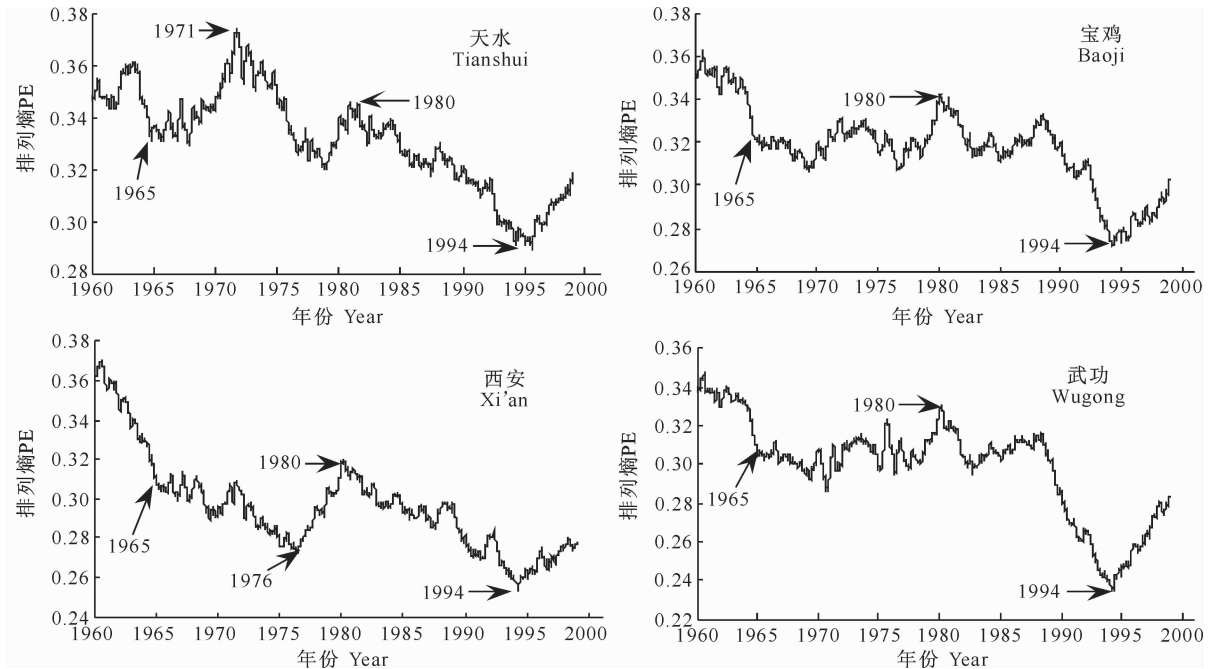


图 2 渭河干流天水、宝鸡、武功和西安站降水量 PE 值随时间的演变

Fig. 2 Evolution of precipitation permutation entropy at Tianshui, Baoji, Wugong and Xi'an stations along Wei River

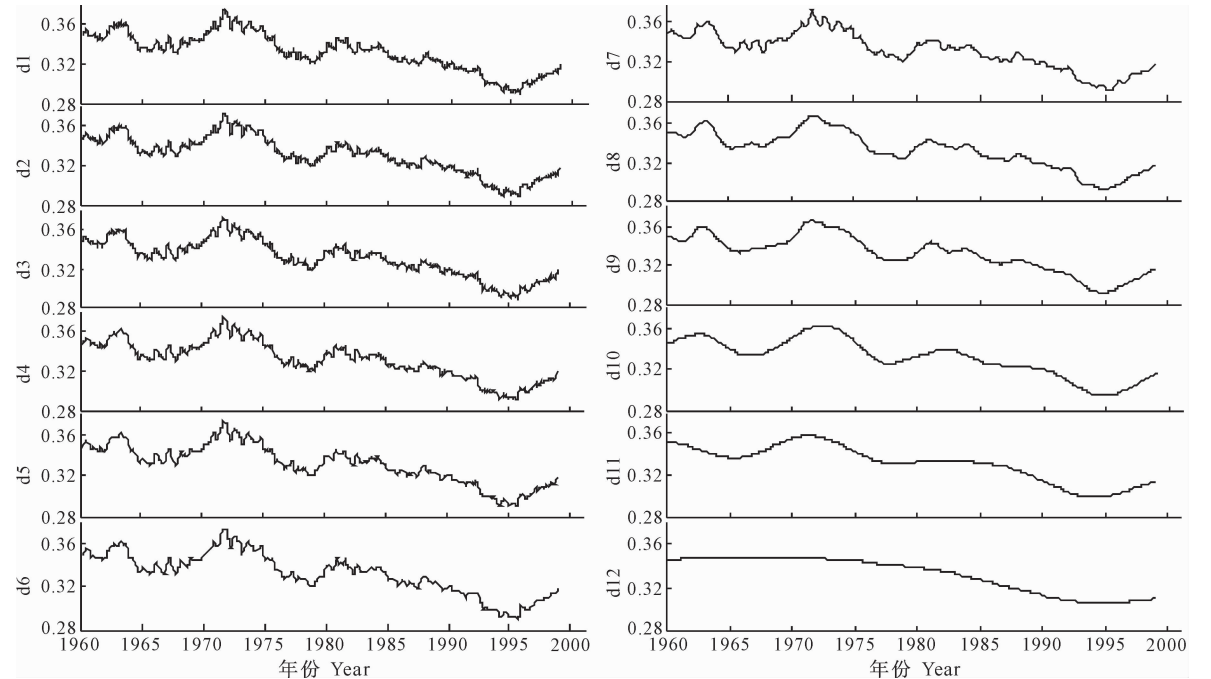


图 3 渭河干流天水站 PE 值的小波分解

Fig. 3 Wavelet decomposition of PE at Tianshui station of main stream of Wei River

3 讨论与结论

(1)渭河干流天水、宝鸡、西安、武功 4 个水文站点降雨在 20 世纪 60 年代中期、80 年代初期和 90 年代中期均发生了较大突变,具有较强的一致性,而流域面上的 70 年代气候突变和 90 年代 ENSO 等气候变化是影响渭河干流 4 个站点降水突变的主要原因;尺度分解表明,4 个站点降水演变与准 10 年这

一代际时间尺度密切相关,太阳黑子活动在其演变中有着重要的作用。

(2)通过排列熵从序列的动力学结构变化出发进行突变检测,可以避免时间尺度的影响,揭示序列

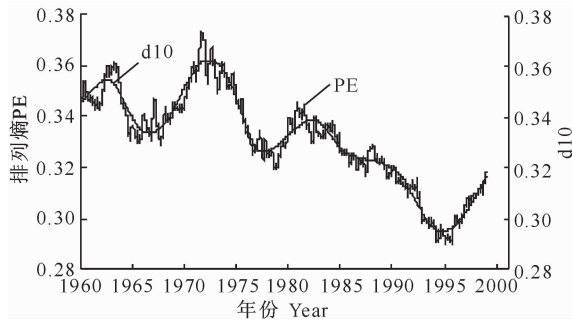


图4 渭河干流水电站 d10 分量与 PE 的对比

Fig. 4 Comparison of the d10 components and

PE at Tianshui station of main stream of Wei River

(3)排列熵算法中采用的滑动窗口对结果有着重要的影响,目前主要通过人工试算来进行确定,如何设定算法通过计算机自动优选滑动窗口是下一步要研究的内容。

[参考文献]

- [1] 张宏利,陈豫,任广鑫,等.近50年来渭河流域降水变化特征分析[J].干旱地区农业研究,2008,26(4):236-241.
Zhang H L, Chen Y, Ren G X, et al. The characteristics of precipitation variation of Weihe River Basin in Shaanxi Province during recent 50 years [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2008, 26(4): 236-241. (in Chinese)
- [2] 来文立,宋进喜,章杰,等.近60a渭河流域降水特征[J].干旱区研究,2013,30(6):1106-1112.
Lai W L, Song J X, Zhang J, et al. Precipitation in the Weihe river Basin in recent 60 years [J]. Arid Zone Research, 2013, 30(6): 1106-1112. (in Chinese)
- [3] 宋令勇,宋进喜,张文静.西安地区降水时空分布及变化规律分析[J].干旱区资源与环境,2010,24(1):85-89.
Song L Y, Song J X, Zhang W J. Temporal and spatial distribution and long-term variation trend of precipitation in Xi'an [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2010, 24(1): 85-89. (in Chinese)
- [4] 何文平.动力学结构突变检测方法的研究及其应用[D].兰州:兰州大学,2008.
He W P. The research and application of the abrupt detecting methods in dynamical structures [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2008. (in Chinese)
- [5] Boffetta G, Cencini M, Falcioni M, et al. Predictability: A way to characterize complexity [J]. Physics Reports, 2002, 365(6): 367-474.
- [6] 陈广才,谢平.基于启发式分割算法的水文变异分析研究

内在本质的变化;进一步结合小波分析对序列进行分解重构,可以揭示降水突变在不同时间尺度上的主要气候归因。

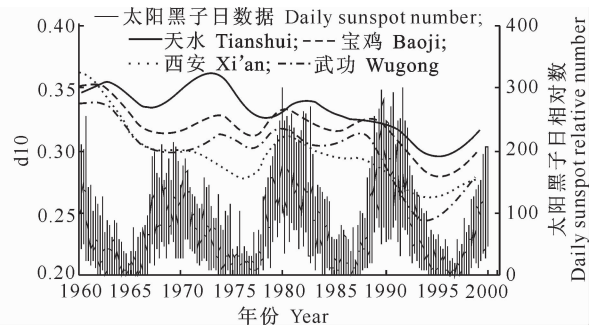


图5 渭河干流4个水文站 PE 值 d10 分量与

太阳黑子演变周期的关系

Fig. 5 Comparison of the sunspot and d10 cycle components at 4 stations of main stream of Wei River

- [J]. 中山大学学报:自然科学版,2008,47(5):122-125.
Chen G C, Xie P. Change point analysis of hydrologic time series based on heuristic segmentation method [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni: Natural Science Edition, 2008, 47(5): 122-125. (in Chinese)
- [7] 王启光,张增平.近似熵检测气候突变的研究[J].物理学报,2008,57(3):1976-1983.
Wang Q G, Zhang Z P. The research of detecting abrupt climate change with approximate entropy [J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(3): 1976-1983. (in Chinese)
- [8] Bandt C, Pompe B. Permutation entropy: A natural complexity measure for time series [J]. Phys Rev Lett, 2002, 88(17): 1741021-1741024.
- [9] Bandt C, Keller G, Pompe B. Entropy of interval maps via permutations [J]. Nonlinearity, 2002, 15: 1595-1602.
- [10] 侯威,封国林,董文杰,等.利用排列熵检测近40年华北地区气温突变的研究[J].物理学报,2006,55(5):2663-2668.
Hou W, Feng G L, Dong W J, et al. A technique for distinguishing dynamical species in the temperature time series of north China [J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(5): 2663-2668. (in Chinese)
- [11] 孙克辉,谈国强,盛利元.基于排列熵算法的混沌伪随机序列复杂性分析[J].计算机工程与应用,2008,44(3):47-49.
Sun K H, Tan G Q, Sheng L Y. Analysis of chaotic pseudo-random sequence complexity based on permutation entropy [J]. Computer Engineering and Applications, 2008, 44(3): 47-49. (in Chinese)
- [12] 刘永斌.基于非线性信号分析的滚动轴承状态检测诊断研究[D].合肥:中国科学技术大学,2011.
Liu Y B. Nonlinear Signal Analysis for rolling bearing condition monitoring and fault diagnosis [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2011. (in Chinese)
- [13] 赵小磊,任明荣,张亚庭,等.基于排列熵的心电信号非线性分

析 [J]. 现代电子技术,2010,33(19):90-93.

Zhao X L, Ren M R, Zhang Y T, et al. Nonlinear analysis of ecg signal based on permutation entropy [J]. Modern Electronics Technique,2010,33(19):90-93. (in Chinese)

[14] 郝成元,吴绍洪,李双成. 排列熵应用于气候复杂性度量 [J]. 地理研究,2007,26(1):46-52.

Hao C Y,Wu S H,Li S C. Measurement of climate complexity using permutation entropy [J]. Geographical Research,2007,26(1):46-52. (in Chinese)

[15] 崔锦泰. 小波分析导论 [M]. 西安:西安交通大学出版社,1995.

Cui J T. An introduction to wavelets [M]. Xi'an:Xi'an Jiao-tong University Press,1995. (in Chinese)

[16] Aussum F, Alex A, Fionn M, et al. Combing neural network forecasts on wavelet-transformed time series [J]. Connection Science,1997,10(1):113-121.

[17] 刘明才. 小波分析及其应用 [M]. 北京:清华大学出版社,2005.

Liu M C. Analysis and applications on wavelet [M]. Beijing: Tsinghua University Press,2005. (in Chinese)

[18] 胡昌华,张军波,夏 军,等. 基于 MATLAB 的系统分析与设计:小波分析 [M]. 西安:西安电子科技大学出版社,1999.

Hu C H,Zhang J B,Xia J, et al. System analysis and design based on MATLAB-wavelet analysis [M]. Xi'an:Xi'an Elec-tronic and Science University Press,1999. (in Chinese)

[19] 郭慕萍,王志伟,秦爱民,等. 54 年来中国西北地区降水量的变化 [J]. 干旱区研究,2009,26(1):120-125.

Guo M P,Wang Z W,Qin A M,et al. Changes in precipitation in northwest china over the last 54 years [J]. Arid Zone Re-search,2009,26(1):120-125. (in Chinese)

[20] 朱拥军,王秀花. 渭河上游干旱特征与降水对天水市水资源的影响 [J]. 干旱气象,2003,21(4):50-54.

Zhu Y J,Wang X H. The drought character in upper area of weihe river and precipitation influence on water resource in Tianshui [J]. Arid Meteorology,2003,21(4):50-54. (in Chi-nese)

[21] 左洪超,吕世华,胡隐樵. 中国近 50 年气温及降水量的变化趋势分析 [J]. 高原气象,2004,23(2):238-244.

Zuo H C,Lü S H,Hu Y Q. Variations trend of yearly mean air temperature and precipitation in China in the last 50 years [J]. Plateau Meteorology,2004,23(2):238-244. (in Chinese)

[22] 黄荣辉,徐予红,周连童. 我国夏季降水的年代际变化及华北干旱化趋势 [J]. 高原气象,1999,18(4):465-476.

Huang R H,Xu Y H,Zhou L T. The inter decadal variation of summer precipitations in China and the draught trend in north china [J]. Plateau Meteorology,1999,18(4):465-476. (in Chinese)

[23] 占车生,乔 晨,徐宗学. 渭河流域近 50 年来气候变化趋势及突变分析 [J]. 北京师范大学学报:自然科学版,2012,48(4):399-405.

Zhan C S,Qiao C,Xu Z X. Climate change and mutation anal-ysis in Weihe river basin in the last 50 years [J]. Journal of Beijing Normal University:Natural Science Edition,2012,48(4):399-405. (in Chinese)