

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2015.03.003

基于样本熵理论的长江干流径流序列复杂性分析

王远坤,王 栋

(南京大学地球科学与工程学院,江苏 南京 210023)

摘要: 基于样本熵理论,选取宜昌站、汉口站和大通站为长江干流主要水文控制站,对3站的径流序列进行分析,研究长江干流径流序列复杂性的空间分布及动态变化特征。结果表明:长江干流径流序列复杂性具有明显的空间差异性,从上游到下游总体上呈现增加趋势。各站的样本熵值与年径流量均呈现负相关关系。宜昌站和大通站径流序列复杂性处于不断增加趋势,汉口站21世纪以来呈现增加趋势。

关键词: 长江干流;径流序列复杂性;样本熵理论

中图分类号:TV121

文献标志码:A

文章编号:1000-1980(2015)03-0203-05

Analysis of complexity of runoff series based on sample entropy in Yangtze River

WANG Yuankun, WANG Dong

(School of Earth Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

Abstract: Based on the sample entropy, this study analyzed the spatial distribution and dynamic change characteristics of the complexity of runoff series using long-term daily runoff data from the Yichang, Hankou, and Datong hydrological stations, which were determined to be the main hydrological control stations in the Yangtze River. The results showed that the complexity of runoff series showed obvious spatial differences and an increasing trend from upstream to downstream in the Yangtze River. There was a negative correlation relationship between the annual runoff and the sample entropy value at every station. The complexity of runoff series at the Yichang and Datong stations showed a continuous increasing trend, and an increasing trend after 2000 at the Hankou Station.

Key words: Yangtze River; complexity of runoff series; sample entropy

河流系统是地球上的大动脉,在维系地球的水循环、能量平衡、气候变化和生态发展中具有重要的作用^[1]。在自然环境变化及人类活动的强烈干扰下,河川径流演变呈现出高度复杂性和非线性特点。对径流序列进行复杂性分析,是认识水文非线性系统动态演化特征的重要途径^[2-3]。目前大多数复杂性分析基于小波技术^[4]、Lyapunov 指数^[5]、分数维^[6]、Kolmogorov 熵^[7]等非线性动力学参数进行动力学结构分析,但这些复杂性测度方法的计算数据量非常大,对噪声很敏感^[3,8],对于变化环境下的小数据量数据集以及高度复杂、动态、非线性的径流时间序列检测能力不足,无法有效揭示变化环境下水文系统演变的过程和机理。

熵的概念起源于热力学,是量化系统复杂性的有效方法,熵值越大对应复杂性越高。20世纪90年代,Pincus^[9]从衡量非线性时间序列复杂性的角度提出了近似熵的概念,该概念在时间序列复杂性测度中所需数据较短,已成功应用于生物时间序列的复杂性研究。为克服近似熵在计算中存在的缺陷,Richman等^[10-11]发展了一种有别于近似熵的不计数自身匹配的样本熵。样本熵具有计算不依赖数据长度、较高一致性、对缺失数据不敏感等优点,在水文气象研究领域应用广泛。康艳等^[12]建立了基于排列熵、近似熵和样本熵算法

收稿日期:2014-08-12

基金项目:国家自然科学基金(51309131)

作者简介:王远坤(1981—),男,山东金乡人,讲师,博士,主要从事水文水资源及生态水文研究。E-mail:yuankunw@nju.edu.cn

的水文系统复杂性模型,判别诊断在变化环境水文系统复杂性的演化过程。彭涛等^[13]采用样本熵算法分析东江3个主要控制水文站月径流序列的复杂性,揭示自然环境变化特别是人类活动影响所引起的径流序列复杂性波动。佟春生等^[14]将样本熵概念引入径流序列的复杂性分析,并以黄河贵德站、兰州站、花园口站径流时间序列为样本,通过分析比较不同水文站的天然与实测径流的近似熵相对变化,以期反映人类活动对径流变化的影响。刘萌等^[15]利用样本熵方法对黑龙江农垦总局农场的地下水埋深序列复杂性进行了测度分析。长江是我国最大的河流,人类活动的加剧在一定程度上影响了径流序列的复杂性。本文采用样本熵理论研究长江流域干流3个主要控制水文站径流序列复杂性的变化特征,以揭示环境变化背景下径流序列复杂性的变化规律。

1 研究区域概况与资料选取

长江发源于青藏高原地区,流经11省市,全长约6300 km,总落差约5400 m,流域面积180万 km²。长江干流宜昌以上为上游,长约4500 km,流域面积100万 km²。宜昌以下,干流河道进入中下游冲积平原,宜昌至湖口为中游,长约950 km,流域面积68万 km²。湖口以下为下游,长约900 km,流域面积12万 km²^[16-17]。长江流域水能资源丰富,已经建设了4万多座水库,其中大型水库约120座,中型水库900多座,小型水库44550座,总库容达到2000多亿 m³,而且新建大中型水库还在迅速增加^[18]。受全球气候变化的影响,近年来长江流域气象环境不断演变。20世纪80年代以来,长江流域气温明显上升,驱动水循环加快,流域降水时空分布更加不均匀。近60年来长江流域年降水量呈不显著增加趋势,夏季降水量呈显著增加趋势,冬季降水量呈不显著增加趋势^[19-20],对长江流域径流过程造成了一定的影响。

本文选取宜昌、汉口和大通3个控制水文站作为长江干流代表站。宜昌水文站,控制流域面积100.55万 km²,是长江上游出口控制站,其水文断面上游6.0 km为长江葛洲坝水利枢纽,上游约44 km为长江三峡水利枢纽。汉口水文站为中游的主要控制站。大通水文站位于长江河口潮区界附近,是长江入海水沙量的控制站。选取1952—2008年3个水文站日流量资料为基础数据开展径流序列复杂性分析。宜昌站、汉口站和大通站径流序列见图1。

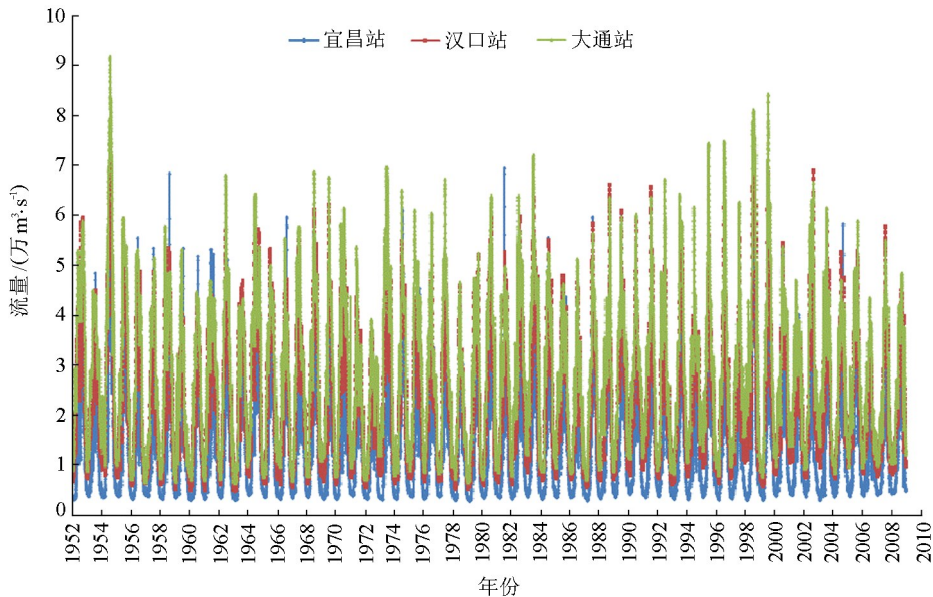


图1 宜昌站、汉口站和大通站3站径流序列

Fig. 1 Runoff series at Yichang, Hankou, and Datong hydrological stations

2 样本熵理论

样本熵在计算时不包含自身匹配,计算条件概率时需要一个长度为 m 的模板向量,然后通过寻找 $m+1$ 长度匹配的方法来计算熵值。样本熵的具体计算方法为^[10]:对于一个 N 点的时间序列 $\{u(j):1 \leq j \leq N\}$,可得到 $N-m+1$ 个矢量 $X_m(i) \{i | 1 \leq i \leq N-m+1\}$,其中 $X_m(i) = \{u(i+k):0 \leq k \leq m-1\}$ 是从 $u(i)$ 到 $u(i+m-1)$ 的 m

个数据点的矢量。2个矢量对应标量之间的最大距离定义为

$$d[u(i), u(j)] = \max\{|u(i+k) - u(j+k)|\} \quad 0 \leq k \leq m-1 \quad (1)$$

定义 B 为矢量 $X_m(j)$ 与矢量 $X_m(i)$ 距离在容限 r 范围内的个数, A 为矢量 $X_{m+1}(j)$ 与矢量 $X_{m+1}(i)$ 距离在容限 r 范围内的个数。则样本熵的计算公式为

$$\text{SampEn} = -\ln \frac{A}{B} \quad (2)$$

容限 r 取原时间序列标准差(S)的0.1~0.25倍,维数 d 取2, r 取0.15 S 。

3 结果分析与讨论

3.1 径流序列复杂性空间分布特性

以宜昌站、汉口站和大通站3站的实测径流时间序列资料为样本,根据样本熵理论分别计算得到3站的样本熵值为0.13、0.15和0.16。由图2可知,长江干流3个水文站的样本熵值呈逐渐增大趋势,样本熵值序列波峰和波谷的出现具有明显的一致性。在20世纪70年代以前,位于中游的汉口站样本熵值明显高于宜昌站和大通站,由于汉口站是长江流域最大支流汉江的最近入流测站,分析该现象发生的原因与丹江口水库蓄水有关。天然状态下汉口站径流序列受到汉江流域的影响,丹江口水库蓄水后,人工控制下泄径流,减少了径流的不确定性,丹江口水库蓄水改变了汉口站的径流特征。20世纪90年代后宜昌站和汉口站样本熵值呈增加趋势,这与近年来长江流域气候与环境变化、河道外取水量加大、人类活动造成下垫面改变有关,这些因素影响了径流变化的特征。整体上看,上游宜昌站的样本熵值小于下游大通站,但是在2003年后发生了部分改变,特别是2004年和2006年宜昌站出现了极大值,这可能与三峡水库的蓄水和气象干旱有关。由于三峡水库蓄水时间较短,蓄水后的径流序列样本较少,其对径流序列复杂性的影响程度难以全面掌握。由熵的性质可知,样本熵值越大,则整个系统的复杂性越高,由此可知,长江干流径流序列存在明显的空间差异性,下游明显大于上游,整体上呈现上游向下游递增趋势。从上游到下游,由于集水面积、来水条件、下垫面条件、支流汇入和人类活动剧烈程度的差异性造成了产汇流的复杂性及不确定性,加大了长江干流径流序列复杂性的空间差异。

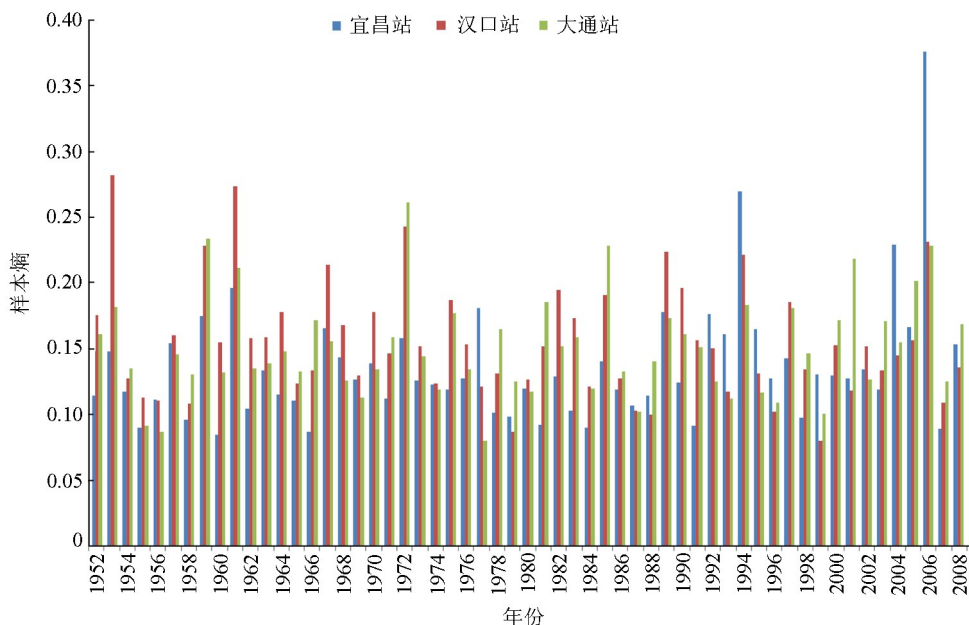


图2 宜昌站、汉口站和大通站样本熵值对比

Fig. 2 Comparison of sample entropy values between Yichang, Hankou, and Datong hydrological stations

3.2 径流序列复杂性时间分布特性

3.2.1 宜昌站径流序列时间分布

宜昌站样本熵值计算结果见图3(a)。由图3(a)可知,20世纪90年代前宜昌站样本熵值总体上呈现上

升趋势,在90年代后出现较大波动。分析其原因,发现这与1994年、2004年和2006年发生的重大旱情有关,其中2006年长江流域的大旱与三峡水库的蓄水综合作用使得宜昌站年径流量出现历史最小值,导致了特大样本熵值(0.38)的出现。由此可知,在人类活动和气象环境条件变化的综合作用下,径流序列的不确定成分明显增加,一定程度上改变了径流序列的结构,使得径流序列复杂性增加。

3.2.2 汉口站径流序列时间分布

汉口站样本熵值计算结果见图3(b)。由图3(b)可知,汉口站样本熵值呈现微下降趋势,20世纪60年代末丹江口水库的建成蓄水扰乱了原有的序列结构,使得年际间样本熵值变幅非常大。但21世纪以后样本熵值呈增加趋势,这可能与近年来气候与环境变化大背景下,河道外取水量加大、人类活动造成的下垫面改变有关。

3.2.3 大通站径流序列时间分布

大通站样本熵值计算结果见图3(c)。由图3(c)可知,整体上大通站样本熵值变化呈现上升趋势。大通站位于长江下游,是长江入海口的控制站,由于控制集水面积与中上游不同,如洞庭湖的影响、下垫面条件不同、受长江干流水利工程影响程度等,均造成径流序列复杂性和不确定性增加。

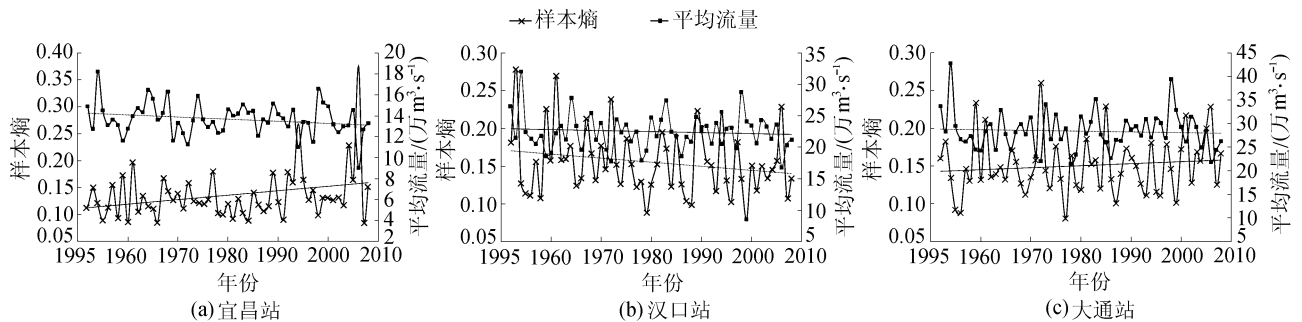


图3 平均流量与样本熵值变化趋势

Fig. 3 Variation trend in average runoff and sample entropy values

整体上宜昌站、汉口站和大通站的样本熵值与年径流量均呈现负相关关系,年径流量与样本熵值的峰谷均存在着反向的对应关系。从时间分布上看,宜昌站和大通站径流序列复杂性处于不断增加趋势,汉口站21世纪以来呈现增加趋势,这与21世纪以来全球气候变化大背景、人类活动加剧,特别是水利工程修建和河道取水有密切联系。南水北调工程的逐步建成与供水(东线、中线和西线均从长江取水)、2009年三峡水库的正常运行,都将会对长江干流的径流序列产生进一步的影响,需不断收集新的数据以补充研究工作。

4 结 论

a. 长江干流径流序列复杂性具有明显的空间差异性,样本熵值序列波峰和波谷的出现具有一致性,从上游到下游总体上呈现增加趋势。

b. 从时间分布上看,宜昌站和大通站径流序列复杂性处于不断增加趋势。汉口站21世纪以来呈现增加趋势,这与21世纪以来全球气候变化大背景、人类活动加剧,特别是水利工程修建和河道取水有密切联系。

c. 宜昌站、汉口站和大通站的样本熵值与年径流量均呈现负相关关系,年径流量与样本熵值的峰谷存在着反向的对应关系。年径流量与样本熵值的这种对应关系对于长江干流径流序列预测研究具有重要意义。

参考文献:

- [1] 夏自强,李琼芳,姜翠玲. 河流自然功能的利用及保护研究[C]//水利部国际合作与科技司. 河流生态修复技术研讨会论文集. 北京:水利水电出版社,2005:52-59.
- [2] 冯国章,宋松柏,李佩成. 水文系统复杂性的统计测度[J]. 水利学报,1998,29(11):76-81. (FENG Guozhang, SONG Songbai, LI Peicheng. A statistical measure of complexity in hydrological system[J]. Journal of Hydraulic Engineering,1998,29(11):76-81. (in Chinese))
- [3] 彭涛,陈晓宏,庄承彬. 基于样本熵的东江月径流序列复杂性分析[J]. 生态环境学报,2009,18(4):1379-1382. (PENG

- Tao, CHEN Xiaohong, ZHUANG Chengbin. Analysis on complexity of monthly runoff series based on sample entropy in the Dongjiang River[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009, 18(4): 1379-1382. (in Chinese))
- [4] 桑燕芳, 王栋, 吴吉春, 等. 水文时间序列复杂特性的研究与定量表征[J]. 水文, 2010, 30(5): 1-6, 56. (SANG Yanfang, WANG Dong, WU Jichun, et al. Quantitative characterization of complicated characteristics of hydrologic series[J]. Journal of China Hydrology, 2010, 30(5): 1-6, 56. (in Chinese))
- [5] 王文均, 叶敏, 陈显维. 长江径流时间序列混沌特性的定量分析[J]. 水科学进展, 1994, 5(2): 87-94. (WANG Wenjun, YE Min, CHEN Xianwei. Quantitative analysis of chaotic characters for the Yangtze River flow time series[J]. Advances in Water Science, 1994, 5(2): 87-94. (in Chinese))
- [6] 丁晶, 刘国东. 日流量过程分维估计[J]. 四川水力发电, 1999, 18(4): 74-76. (DING Jing, LIU Guodong. Estimation of fractal dimension for daily flow hydrograph[J]. Sichuan Water Power, 1999, 18(4): 74-76. (in Chinese))
- [7] OLMOGOROV A N. Three approaches to the quantitative definition of information[J]. Problems of Information Transmission, 1965 (1): 1-7.
- [8] 黄国如, 芮孝芳. 流域降雨径流时间序列的混沌识别及其预测研究进展[J]. 水科学进展, 2004, 15(2): 255-260. (HUANG Guoru, RUI Xiaofang. Study advances in diagnosis of chaotic behavior and its prediction for rainfall and stream flow time series in watershed [J]. Advances in Water Science, 2004, 15(2): 255-260. (in Chinese))
- [9] PINCUS S M. Approximate entropy as a measure of system complexity[J]. Proceeding of the National Academy Sciences, 1991, 88(6): 2297-2301.
- [10] RICHMAN J S, MOORMAN J R. Physiological time-series analysis using approximate entropy and sample entropy[J]. American Journal of Physiology: Heart and Circulatory Physiology, 2000, 278: 2039-2049.
- [11] 尚晓三, 王式成, 王振龙, 等. 基于样本熵理论的自适应小波消噪分析方法[J]. 水科学进展, 2011, 22(2): 182-188. (SHANG Xiaosan, WANG Shicheng, WANG Zhenlong, et al. Adaptive wavelet denoising method based on sample entropy[J]. Advances in Water Science, 2011, 22(2): 182-188. (in Chinese))
- [12] 康艳, 蔡焕杰, 宋松柏. 水文系统复杂性模型研究及应用[J]. 水力发电学报, 2013, 32(1): 5-10. (KANG Yan, CAI Huanjie, SONG Songbai. Study and application of complexity model for hydrological system [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(1): 5-10. (in Chinese))
- [13] 彭涛, 陈晓宏, 庄承彬. 基于样本熵的东江月径流序列复杂性分析[J]. 生态环境学报, 2009, 18(4): 1379-1382. (PENG Tao, CHEN Xiaohong, ZHUANG Chengbin. Analysis on complexity of monthly runoff series based on sample entropy in the Dongjiang River[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009, 18(4): 1379-1382. (in Chinese))
- [14] 佟春生, 黄强, 刘涵. 基于近似熵的径流序列复杂性研究[J]. 西北农林科技大学: 自然科学版, 2005, 33(6): 121-126. (TONG Chunsheng, HUANG Qiang, LIU Han. Study on runoff series complexity based on approximate entropy[J]. Journal of North-West Sci-Tech University of Agriculture and Forestry: Natural Science Edition, 2005, 33(6): 121-126. (in Chinese))
- [15] 刘萌, 刘东. 基于样本熵的地下水埋深序列复杂性分析[J]. 水利水电技术, 2012, 43(12): 5-8. (LIU Meng, LIU Dong. Sample entropy based analysis on complicity of groundwater depth series[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2012, 43(12): 5-8. (in Chinese))
- [16] 邹振华, 李琼芳, 夏自强, 等. 人类活动对长江径流量特性的影响[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2007, 35(6): 622-626. (ZOU Zhenhua, LI Qiongfang, XIA Ziqiang, et al. Human-induced alterations in runoff of the Yangtze River[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2007, 35(6): 622-626. (in Chinese))
- [17] 李琼芳, 邹振华, 郭瑾, 等. 人类活动对长江泥沙特性的影响[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2007, 35(4): 364-368. (LI Qiongfang, ZOU Zhenhua, GUO Jin, et al. Human-induced alterations in sediment of the Yangtze River[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2007, 35(4): 364-368. (in Chinese))
- [18] 陈进, 黄薇. 梯级水库对长江水沙过程影响初探[J]. 长江流域资源与环境, 2005, 14(6): 786-791. (CHEN Jin, HUANG Wei. Preliminary study on the change of water flow and sediment process in the Changjiang River [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2005, 14(6): 786-791. (in Chinese))
- [19] 姜彤, 苏布达, 王艳君, 等. 四十年来长江流域气温降水与径流变化趋势[J]. 气候变化研究进展, 2005, 1(2): 65-68. (JIANG Tong, SU Buda, WANG Yanjun, et al. Trends of temperature, precipitation and runoff in the Yangtze River Basin from 1961 to 2000[J]. Advance in Climate Research, 2005, 1(2): 65-68. (in Chinese))
- [20] 王冰冰, 荣艳淑, 白路遥. 长江源区和黄河源区降水量变化分析[J]. 水资源保护, 2013, 29(6): 6-12. (WANG Bingbing, RONG Yanshu, BAI Luyao. Analysis of precipitation variation in source regions of Yangtze River and Yellow River[J]. Water Resources Protection, 2013, 29(6): 6-12. (in Chinese))