

黑龙江省降水混沌识别及空间分布研究

乔雨¹, 闫佰忠¹, 梁秀娟¹, 危润初², 刘泓志¹, 张茜¹

(1. 吉林大学地下水资源与环境教育部重点实验室, 吉林 长春 130021;
2. 长沙理工大学水利工程学院, 湖南 长沙 410000)

摘要:为更好地研究降水时间序列的非线性特征,基于不同时间尺度 0-1 测试方法识别黑龙江省 30 个气象站 1958~2011 年降水时间序列的混沌特性。分别以三个不同时间尺度月系列、季系列、半年系列的渐进增长率中位值最小的北林站、漠河站、牡丹江站为代表说明黑龙江省各气象站均存在混沌特性,月系列和半年系列混沌特性较强,季系列混沌特性较弱。为研究全省范围内降水混沌特性空间分布规律,对各气象站 K 值进行克里金插值。空间分布结果表明,混沌特性在月降水系列呈现较为明显东西向的分带性,在季系列和半年序列并未呈现出明显的分带性;得出结论:不同时间尺度降水系列均产生混沌现象,混沌识别结果与气候类型、地形特征、人类活动特征相互支撑,为降水系统非线性特征提供一定参考。

关键词:降水;混沌;0-1 测试方法;克里金;空间分布

中图分类号:P426.6

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2015)03-0064-05

1 引言

通过研究水文时间系列发现,水文时间系列具有离散特性、非线性和复杂性,因此用线性动力学理论去刻画其规律存在一定局限性,因而许多学者引入用非线性科学的理论去描述和研究其规律^[1-2]。近年来,以混沌理论为核心的当代非线性科学的迅猛发展有力地推动了水文时间序列分析的研究。王红瑞^[5]等认为在水科学领域中的混沌假设是合理,混沌理论可以很好地应用在水科学领域当中。

现有混沌识别方法有功率谱法、最优嵌入维数法、饱和分维数法、0-1 测试法、最优时滞法、Laypunov 指数法、重构相空间轨迹法、非线性预测法、代替数据法、柯尔莫诺夫熵法等。

0-1 测试方法是 2003 年 Georg A. Gottwald 和 Lan Melbourne 提出的一种新的时间序列混沌特性识别方法^[3-4]。0-1 测试方法不需重构相空间即可直接进行时间序列混沌特性的测试;0-1 测试方法是一种二元测试方法,即给定时间序列作为输入然后计算结果,根据

计算所得的渐进增长率是否接近 0 或 1 来判断其是否具有混沌特性。

0-1 测试方法在现有研究中已得到了较好的验证,李新杰^[7,8]和危润初^[6]等分别基于 Logistic 和 Chebyshev 两种映射较好地验证了其有效性。然而目前为止,针对不同时间尺度 0-1 测试方法降水系列的混沌特性比较研究相对较少。

本文在上述研究的基础上,基于不同时间尺度 0-1 测试方法对黑龙江省 30 个气象站的 1958~2011 年降水系列资料进行混沌特性识别,然后运用地统计学方法探寻黑龙江省降水混沌特性的空间分布规律。

2 研究区概况及研究方法

2.1 研究区概况

黑龙江省位于中国最东北部,中国国土的北端与东端均位于省境。黑龙江东部和北部以乌苏里江黑龙江为界河与俄罗斯为邻,与俄罗斯的水陆边界长约 3 045km;西接内蒙古自治区,南邻吉林省。介于北纬 43°26'~53°33',东经 121°11'~135°05',南北长约 1 120km,东西宽约

收稿日期:2014-10-13

基金项目:国家潜在油气资源产学研用项目(20100331-OSR01-7);吉林省科技厅重点攻关项目(20100452);吉林省水资源专项(0773-1441GN-JL00390);吉林省自然科学基金(20140101164JC)

作者简介:乔雨(1990-),男,黑龙江肇东人,硕士研究生,研究方向为水文学及水资源。E-mail:qiaoyunau@163.com

通讯作者:梁秀娟(1964-),女,吉林公主岭人,教授,博士生导师,研究方向为水资源与环境模拟与评价。E-mail:lax64@126.com

930km, 面积 $47.3 \times 10^4 \text{km}^2$; 多年平均降水量为 533.18mm, 省内各气象站多年平均降水量最小值为泰来站 385.88mm, 最大值为漠河站 660.10mm; 黑龙江省地势大致是西北部、北部和东南部高, 东北部、西南部低, 主要由山地、台地、平原和水面构成。西北部为东北—西南走向的大兴安岭山地, 北部为西北—东南走向的小兴安岭山地, 东南部为东北—西南走向的张广才岭、老爷岭、完达山脉, 东北部为三江平原。

2.2 0-1 混沌特性测试方法

0-1 混沌特性测试方法通过判断计算所得均方位移 $M(n)$ 是否随时间 t 呈现线性增长, 渐进增长率 K_c 是否趋近于 1, $p-q$ 轨迹相图是否呈现出无规则的布朗运动, 进而研究时间序列是否具有混沌特性, 现已成为一种可以简单有效识别水文时间序列混沌特性的新方法^[5,7]。

p_c 和 q_c 的计算公式为(1)(2), 它们的散布特征通过对均方位移 $M(n)$ 的分析来进行研究。如果时间序列有序, 则均方位移 $M(n)$ 是一个有界函数; 如果时间序列具有混沌特性, 则 $M(n)$ 是随时间呈线性增长的, 因此只要计算出 $M(n)$ 对应于 n 的渐进增长率 K_c , 判断其是否是有界函数, 就可以判定数据序列是否具有混沌特性^[4]。定义函数 $p_c(n)$ 和 $q_c(n)$ 的均方位移 $M(n)$, 联合公式(3)(4)(5)进行计算。本次研究中渐进增长率 K_c 采用公式(6)进行计算。

$$p_c(n) = \sum_{j=1}^n \varphi(j) \cos(jc), n=1, 2, \dots, N \quad (1)$$

$$q_c(n) = \sum_{j=1}^n \varphi(j) \sin(jc), n=1, 2, \dots, N \quad (2)$$

$$M_c(n) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N [(p(j+n) - p(j))^2 + (q(j+n) - q(j))^2] \quad (3)$$

$$M(n) = M_c(n) - (E(\phi))^2 \frac{(1 - \cos nc)}{(1 - \cos c)} \quad (4)$$

$$(E\phi) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \varphi(j) \quad (5)$$

$$K_c = \frac{\text{cov}(n, M(n))}{\sqrt{\text{var}(n) \text{var}(M(n))}} \quad (6)$$

式中: $\varphi(j)$ 为时间序列; j 为对应时间, $j=1, 2, \dots, N$; c 为 $(0, \pi)$ 范围内的随机常数。

计算过程中, 一般 n 取值建议 $n \leq N/10$; 选取 N_c 个随机常数 c , 计算得到 N_c 个 K_c ; 如果 K_c 趋近于 1, 表示该时间序列具有混沌的特性; 如果 K_c 趋近于 0, 表示该时间序列不具有混沌特性。

3 计算与分析

3.1 降水混沌特性识别

本次研究模型参数设定, 用 MATLAB 软件 rand 函数随机生成 20000 个 $(0, \pi)$ 范围内且满足均匀分布的常数 c 。

为更好地进行全省范围内降水系列混沌特性的空间分布, 本次研究选取三个尺度降水系列作为研究对象, 应用 0-1 测试方法分别对月降水系列、季降水系列、半年降水系列进行混沌特性识别分析。

对 30 个气象站 54a 不同时间尺度降水数据进混沌 0-1 识别, 运算求得均方位移 $M(n)$ 随时间变化的渐进增长率 K_c , 选取 K_c 的中位值 K 作为渐进增长率的最终结果, 从表 1 中可以得出不同时间尺度下 0-1 测试方法计算所得渐进增长率中位值 K 范围不同, 月、季、半年时间尺度下降水系列 K 值范围分别为 $[0.9799, 0.9962]$ 、 $[0.6232, 0.9169]$ 、 $[0.8628, 0.9956]$, 其平均值分别为 0.9873、0.7704、0.9256, 图 1 也可以明显看出月系列和半年系列尺度下的渐进增长率中位值较大且大于月系列的, 其中月系列中北林站 K 值最小, 季系列中漠河站 K 值最小, 半年系列中牡丹江站 K 值最小, 本文以不同时间尺度最小 K 值站为代表进行混沌特性分析研究, 见图 2, 图 3, 图 4。

从图 2、图 3、图 4 可以得出不同时间尺度 0-1 测试结果 $p-q$ 轨迹相图均呈现出无规则运动的布朗、 $M(n)-t$ 关系曲线图均呈现出 $M(n)$ 随时间 t 线性增长

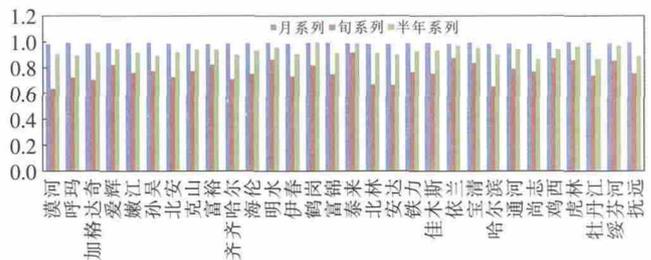


图 1 不同时间尺度降水系列渐进增长率中位值柱形图

Fig.1 Value column diagram of the different time measures

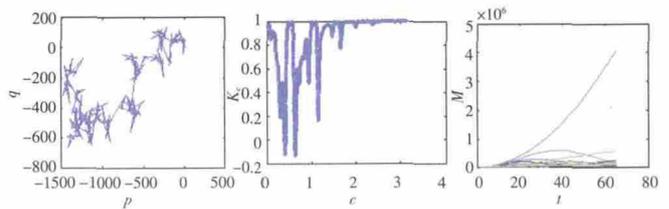


图 2 月系列北林站计算结果(最小 K 值站)

Fig.2 The computation results of the Beilin station in the month series

表1 不同时间尺度降水系列渐进增长率中位K值计算结果

Table 1 K Values of the different time measures

气象站	漠河	呼玛	加格达奇	爱辉	嫩江	孙吴	北安	克山	富裕	齐齐哈尔
月系列	0.9819	0.9907	0.9856	0.9925	0.9897	0.9897	0.9839	0.9841	0.9800	0.9869
季系列	0.6320	0.7210	0.7026	0.8256	0.7598	0.7744	0.7236	0.7713	0.8232	0.7066
半年系列	0.9048	0.8945	0.9167	0.9454	0.9143	0.8907	0.9221	0.9379	0.9381	0.9012
气象站	海伦	明水	伊春	鹤岗	富锦	泰来	北林	安达	铁力	佳木斯
月系列	0.9881	0.9884	0.9882	0.9893	0.9909	0.9868	0.9799	0.9823	0.9878	0.9883
季系列	0.7494	0.8663	0.7336	0.8170	0.7504	0.9169	0.6701	0.6646	0.7673	0.7545
半年系列	0.9329	0.9544	0.9061	0.9956	0.9124	0.9835	0.9091	0.8991	0.9305	0.9330
气象站	依兰	宝清	哈尔滨	通河	尚志	鸡西	虎林	牡丹江	绥芬河	抚远
月系列	0.9870	0.9926	0.9806	0.9867	0.9820	0.9899	0.9962	0.9918	0.9880	0.9884
季系列	0.8763	0.8366	0.6499	0.7900	0.7638	0.8678	0.8559	0.7364	0.8528	0.7539
半年系列	0.9703	0.9509	0.8987	0.9398	0.8630	0.9405	0.9647	0.8626	0.9672	0.8879

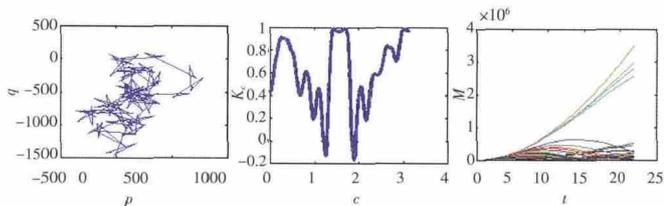


图3 季系列漠河站计算结果(最大K值站)

Fig.3 The computation results of the Mohe station in the quarter series

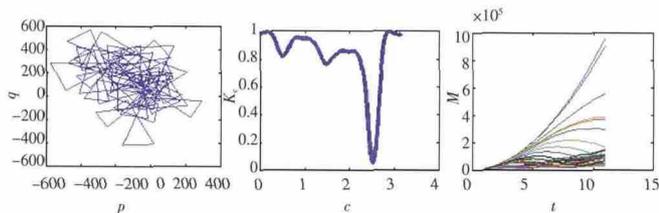


图4 半年系列牡丹江站计算结果(最小K值站)

Fig.4 The computation results of the Mudanjiang station in the half year series

关系、 K_c-c 散点图中渐进增长率随着 c 的增加均趋近于 1,因此可以得出降水月系列、季系列、半年系列均存在混沌现象。

3.2 混沌特性空间分布研究

混沌是对系统不确定性的一种描述,是介于有序系统和随机系统的一种状态,但是三者之间的纯粹界限是不存在的。不同时间尺度降水系列的混沌特性是由多因素组成的动力系统决定的,能反映降水动力系统的复杂性;然而降水系统受到多个驱动系统影响,它们之间以某种或多种方式发生复杂的非线性和非平衡的相互作用^[6]。

在上述不同时间尺度降水系列混沌识别的基础上,为深入研究黑龙江省降水混沌特性空间分布,根据表 1 计算结果对各气象站渐进增长率中位值 K 进行

克里金插值,得到黑龙江省不同时间尺度降水系列 K 值空间分布图,进而研究不同时间尺度下降水序列的混沌特性空间分布规律。

从图 5、图 6、图 7 中可以明显看出,不同时间尺

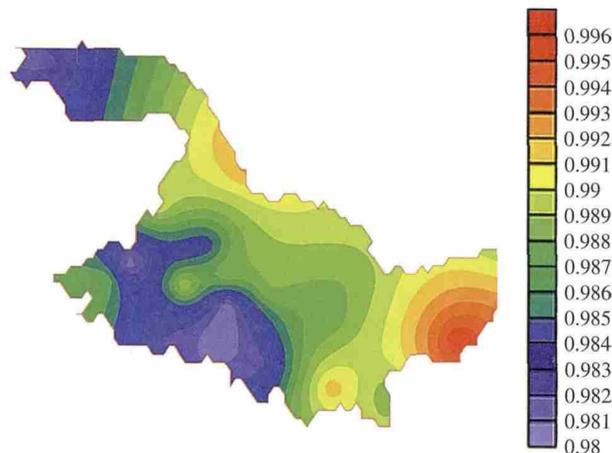


图5 月系列 K 值空间分布图

Fig.5 The spatial distribution the K values in the month series

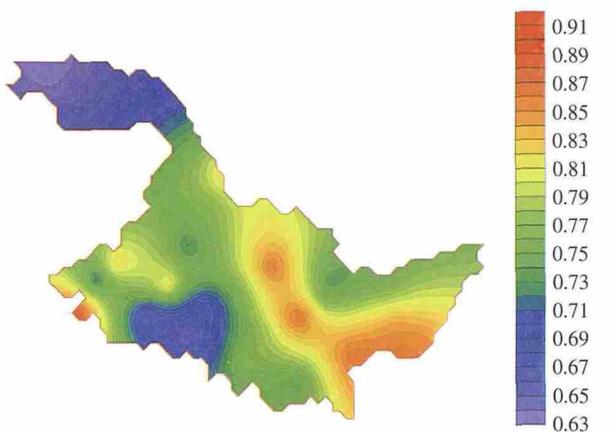


图6 季系列 K 值空间分布图

Fig.6 The spatial distribution of the K values in the quarter series

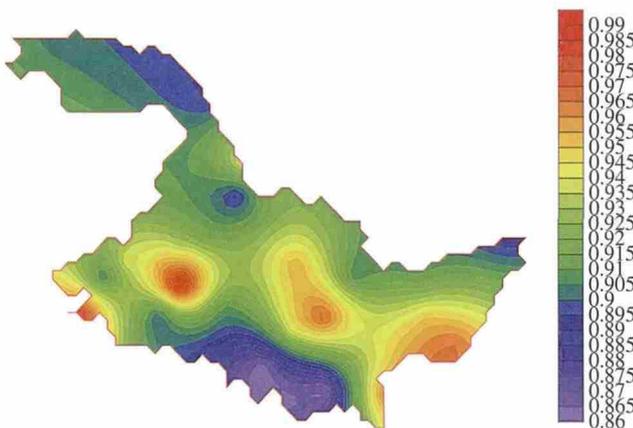


图7 半年系列 K 值空间分布图

Fig.7 The spatial distribution the K values in the half year series

度混沌特性在空间分布中月降水系列呈现较为明显东西向的分带性,而季系列和半年序列并未呈现出明显的分带性。

月降水系列混沌特性从西向东, K 值存在逐渐增加的趋势,空间上呈现出自西向东月降水系列周期性逐渐减弱,混沌特性逐渐增强。不同时间尺度下,研究区范围内兴凯湖平原区均呈现出降水系列较强的非线性特征,大兴安岭区和松嫩平原区部分均呈现较弱非线性特征。

本文将降水混沌特性外部环境因素归结为气候因子、地形因子、人为因子。

气候因子中西太平洋海洋季风对季降水系列影响最为明显,这也就是导致季系列混沌特性弱于月和半年系列的主要原因;地形因子中大兴安岭和小兴安岭山脉作为主要地形影响因素,导致不同时间尺度下的大兴安岭地区均呈现出较低的混沌特性,地形因子是局部地区降水混沌变异的重要因素^[6]。人为因子表现在松嫩平原区部分人口密度较大、人类活动频繁,导致其内部系统的随机性和非规律的有序性减弱,因而外部环境因素对其影响较大,不同时间尺度下均呈现出较弱非线性特征。

大兴安岭地区不同时间尺度下,均出现较弱的混沌特性,原因该区为中山、低山、丘陵和山间盆构成,地形复杂,人口密度较小,人为因子影响较为微弱,因为外部环境因素对其影响不大,不同时间尺度下均呈现出较低的非线性特征。

三江平原为黑龙江、乌苏里江和松花江冲积形成、

水系繁多、生态种类复杂,系统内部存在较强内在随机性和非规律的有序性,不同时间尺度下,均呈现出较强非线性特征。

4 结论

0-1混沌测试方法是一种简单有效的混沌特性识别方法,该方法基于序列数据的分析,可直接应用于时间序列。

不同时间尺度0-1测试方法结果表明,不同时间尺度月系列、季系列、半年系列0-1测试方法最小 K 值气象站均呈现出混沌现象,进而表明黑龙江省各气象站月、季、半年降水系列均存在混沌特性,其中月系列和半年系列混沌特性较强,季降水系混沌特性相比较弱。不同时间尺度降水系列的降水混沌特性的外部环境因素归结为气候因子、地形因子、人为因子。由于混沌特性具有内在随机性和非规律的有序性;若其内部随机性和非规律的有序性在受到外部环境的影响时,其混沌特性会增强或是减弱。

参考文献:

- [1] 付强. 农业水土资源系统分析与综合评价[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005. (Fu Qiang. Agricultural Land and Water Resources System Analysis and Comprehensive Evaluation [M]. Beijing: China WaterPower Press, 2005. (in Chinese))
- [2] 宋宇,陈家军,孙雄. 地下水水位时间序列中的混沌特征[J]. 水文地质工程地质, 2004,(1). (SONG Yu, CHEN Jiajun, SUN Xiong. Chaotic analysis of groundwater time series [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2004,(1). (in Chinese))
- [3] Georg A. Gottwald, Lan Melbourne. A new test for chaos in deterministic systems [J]. The Royal Society, 2003,460(2042):603-611.
- [4] Georg A. Gottwald, Lan Melbourne. On the implementation of the 0-1 Test for Chaos [J]. SIAM Journal on Applied Dynamical Systems, 2009,8(1):129-145.
- [5] 王红瑞,宋宇,刘昌明,等. 混沌理论及在水科学中的应用与存在的问题[J]. 水科学进展, 2004,15(3):400-407. (WANG Hongrui, SONG Yu, LIU Changming, et AL. Application and issues of chaos theory in hydroscience [J]. Advances in Water Science, 2004,15(3):400-407. (in Chinese))
- [6] 危润初,肖长来,张余庆,等. 中国降水混沌识别及空间聚类[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2014,44(2):626-635. (WEI Runchu, XIAO Changlai, ZHANG Yuqing, et al. Identification and spatial clustering for chaos of precipitation of China [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2014,44(2):625-635. (in Chinese))
- [7] 李新杰. 河川径流时间序列的非线性特征识别与分析[D]. 武汉: 武汉大学, 2013. (LI Xinjie. Nonlinear Characteristics Identification and Analysis for River Runoff Time Series [D]. Wuhan: Wuhan U-

- niversity, 2013. (in Chinese)
- [8] 李新杰,胡铁松,郭旭宁,等. 0-1 测试方法的径流时间序列混沌特性应用 [J]. 水科学进展, 2012,(6):861-868. (LI Xinjie, HU Tiesong, GUO Xvning, et al. Application of the 0-1 test algorithm for chaos to runoff time series [J]. Advances in Water Science, 2012,(6):861-868. (in Chinese))

Identification and Spatial Distribution for Chaos of Precipitation in Heilongjiang Province

QIAO Yu¹, YAN Baizhong¹, LIANG Xiujuan¹, WEI Runchu², LIU Hongzhi¹, ZHANG Qian¹

(1. *Key Laboratory of Groundwater Resources and Environment, Ministry of Education, Changchun 130021, China;*

2. *School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410000, China)*

Abstract: To better study on the nonlinear characteristics of precipitation time series, using 0-1 test method to identify precipitation time series characteristics of chaos of the 30 meteorological stations in Heilongjiang Province from 1958 to 2011. Three different time scale are month, season and half year, And the Beilin Station, Mohe Station and Mudanjiang Station have the smallest values, which indicates that all the stations exist chaotic characteristics within the scope of the province, the chaos characteristics of month series and half year series are stronger, and season series is smaller. To study the province within the scope of precipitation spatial distribution chaos characteristics, Kriging values for the K of each station were interpolated. The results show different time scales, the precipitation series all produced chaotic characteristics, which are consistent with climate types, topography features, human activities.

Key words: precipitation; chaos; 0-1 test; Kriging; spatial distribution

(上接第 37 页)

Monitoring and Analysis of Water Pollution in Dongjiang Headwater Area

SONG Dunfu, ZHANG Xiaojin, PENG Xin, HUANG Honglan

(*Jiangxi Environment Engineering Vocational College, Ganzhou 341000, China)*

Abstract: Based on the three divisions of Xunwu control unit, Anyuan control unit and Dingnan control unit from the 18 water function parts of the Dongjiang headwater area, the water quality monitoring and the calculation of water pollution load were made during 2011-2012. The results show that surface water pollution has got more serious, caused by the most extensive main pollution source of agricultural non-point source pollution, urbanization intensified regional domestic pollution and the industrial point source pollution dominated from rare earth mineral. The main pollutants are COD, NH₃-N and TN, respectively accounting for 21.86mg/L, 0.90mg/L, 0.96mg/L, and their pollutant load of 1 235.9t/a, 622.8t/a and 3 361.8 t/a.

Key words: control unit; water quality monitoring; water pollution load; Dongjiang Headwater Area