

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.01.021

不同时间尺度吉林市地下水位混沌特性与空间分布*

闫佰忠¹ 肖长来¹ 乔雨¹ 梁秀娟¹ 危润初²

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

摘要: 0-1 测试方法是一种可直接作用于时间序列的二元混沌识别方法,该方法不需要相空间重构,是通过量化指标 K_c 是否接近于 0 或 1 来识别时间序列的混沌特性。通过对 Chebyshev 映射进行混沌检验,验证了其有效性。运用该方法对吉林市 83 眼监测井 2001—2010 年不同时间尺度(5、10、15 和 30 d)地下水埋深监测序列进行了混沌识别,并进行了混沌程度比较和空间分布研究。结果表明:吉林市不同时间尺度地下水埋深序列均表现出混沌特性。同时,均方位移随时间的渐进增长率 K 的空间插值结果具有明显的分区特征,即吉林市北部和南部为高值区,城区为相对低值区,并且随着时间尺度的增大,城区 K 值的相对低值区范围增大。研究表明,0-1 混沌测试方法简单有效,并且具有反映数据序列混沌程度的特性。

关键词: 地下水埋深序列 混沌识别 吉林市 时间尺度 0-1 测试

中图分类号: P332.3; O415.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)01-0138-10

Multiple Timescale Chaos Identification of Groundwater Depth and Subdivision of Jilin City Based on 0-1 Test

Yan Baizhong¹ Xiao Changlai¹ Qiao Yu¹ Liang Xiujuan¹ Wei Runchu²

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

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

Abstract: The 0-1 test method is a new binary test approach which is used for distinguishing chaotic dynamics and applying directly to time series data without the phase space reconstruction. It was proved to be an effective test after test for chaos of Chebyshev map. The 0-1 test method was used to identify the degree and spatial distribution of chaos of 83 monitoring wells with multiple timescale (5, 10, 15 and 30 d) groundwater depth surveillance data series from 2001 to 2010 in Jilin city, northeast China. The results showed that multiple timescale groundwater depth surveillance data series of all monitoring wells were chaotic. The minimum K values of multiple timescale (5, 10, 15 and 30 d) groundwater depth surveillance data were 0.9673, 0.9720, 0.9210 and 0.8863, respectively, and the maximum K values were 0.9995, 0.9996, 0.9994 and 0.9992, respectively. In addition, the spatial interpolation of their asymptotic growth rate K showed significantly spatial variability. The highest and lowest K values were mainly occurred in northern, southern part and central urban areas of Jilin city, respectively. The chaos characteristic of groundwater level was influenced by hydrology, meteorology, geology and so on. The findings demonstrated that the 0-1 test method was effective and reliable by using chaotic inspection of the Chebyshev maps and it can be very useful for reflecting the degree of chaos which had a better guiding role for the forecast of groundwater level.

Key words: Groundwater depth series Identification for chaos Jilin city Timescale 0-1 test

收稿日期: 2014-09-28 修回日期: 2014-10-26

* 吉林省科技攻关资助项目(20100452)和国家潜在油气资源产学研用资助项目(20100331-OSR01-7)

作者简介: 闫佰忠, 博士生, 主要从事水环境、地下水研究, E-mail: jluybz@126.com

通讯作者: 肖长来, 教授, 博士生导师, 主要从事水环境、地下水研究, E-mail: xcl2822@126.com

引言

水文要素(地下水埋深、降水等)是一个复杂、连续的物理过程,其形成、发展的过程受众多因素的影响而表现出并非随机却貌似随机的特征^[1]。在地下水位的分析预测中,用传统的线性动力学理论刻画这种复杂性已越来越体现出理论本身的局限性,而非线性科学的理论来描述和研究已成为近年来的热点^[2-3]。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。传统的混沌识别方法主要是建立在相空间重构基础上的饱和关联维数法(G-P)、Lyapunov 指数法和 Kolmogorov 熵等方法^[4],但是由于混沌理论还不够成熟以及水文系统的特殊性,这些方法在运用过程中还存在一些问题,如重构相空间所需的延迟时间 τ 和嵌入维数 D 的确定具有一定的主观性与不确定性,不同方法计算得到的值往往差别较大^[5],并且传统的混沌研究方法一般对时间序列长度有严格要求^[6]。

0-1 测试方法是 Gottwald 等提出的一种时间序列混沌特性识别方法^[7-8]。该方法直接进行时间序列混沌特性的测试,根据计算结果是否接近于 0 或 1 来判断序列是否具有混沌特性。目前有关该方法的应用和研究正逐步深化。

Gottwald 提出该方法后将其应用于含有噪声的时间序列和实验数据的混沌识别研究^[9-10],同时在切削过程的混沌识别以及激光液滴的非线性分析等领域有所应用^[11-12]。孙克辉等^[13]首次将 0-1 测试方法引入国内,随后李新杰等^[14]将该方法应用到径流时间序列混沌特性的识别研究中。桑秀丽等^[15]将该方法应用于含噪声降雨-径流时间序列混沌特征分析中,这些研究验证了 0-1 测试方法能够有效识别水文要素时间序列的混沌特性。

地下水位为水文现象中的重要因素,有关地下水位混沌的研究主要集中在利用传统的混沌方法对地下水混沌特征进行识别和预测。刘庆军等^[16]利用重构相空间理论和加权一阶局域预测模型讨论了华北某地区地下水位的混沌特征并对地下水位进行了预测。陈南祥等^[17]利用相空间重构理论,并借助 G-P、C-C 算法,探讨了宁陵地区地下水位的混沌特征并对地下水位进行了预测。这些研究具有传统方法的局限性而且集中在单一时间尺度,对混沌程度比较的研究较少。本文将 0-1 测试方法运用于吉林市 83 眼监测井不同时间尺度(5、10、15 和 30 d)地下水埋深监测序列的混沌识别,进行混沌程度比较研究,并对计算结果进行空间插值,研究吉林市地

下水埋深的混沌特征空间分布。

1 研究区概况

研究区位于吉林省吉林市,东经 $126^{\circ}12'40'' \sim 126^{\circ}42'00''$,北纬 $44^{\circ}5'22'' \sim 43^{\circ}40'10''$,面积为 $70\,290.0 \text{ hm}^2$ 。区内多年平均降水量为 688.97 mm ,多年平均蒸发量为 $1\,432 \text{ mm}$ 。主要河流为第二松花江及其支流温德河、牯牛河(图 1)。研究区地貌属于伊舒地堑(北部近郊)和河谷平原,主要含水层为第四系松散堆积地层,赋存有孔隙潜水,周边为低山丘陵,基岩岩性主要为燕山期花岗岩(γ_5^2)、上三叠系大酱缸组(T_3d)的安山岩、上二叠系杨家沟组(P_2y)等,地下水类型为基岩裂隙水。伊舒地堑和河谷平原含水层岩性为全新统、上更新统及下更新统强透水的砾砂、圆砾及砾卵石层,单井涌水量 $100 \sim 3\,000 \text{ m}^3/\text{d}$,本次研究的监测井井深在 $5.0 \sim 25.0 \text{ m}$ 之间,含水层均为伊舒地堑和河谷平原的孔隙潜水。

2 研究方法

2.1 0-1 测试方法

假设时间序列为 $\varphi(j)$,其中 $j=1,2,\dots,N$,令 c 为区间 $(0, \pi)$ 的随机常数,则定义

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

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

定义函数 $p_c(n)$ 和 $q_c(n)$ 的均方位移 $M_c(n)$ 为

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

p_c 和 q_c 的散布特征可以通过对均方位移 $M_c(n)$ 的分析来进行研究,如果时间序列是有序的,则 $M_c(n)$ 是一个有界函数,如果时间序列具有混沌特性,则 $M_c(n)$ 随时间线性增长,因此只要计算出 $M_c(n)$ 对应于 n 的渐进增长率 K_c ,就可以来判断数据序列的混沌特性^[8]。由于 $M_c(n)$ 的收敛性不好,因此给出修正的均方位移 $M(n)$

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

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

$M(n)$ 与 $M_c(n)$ 渐进增长特性相同,但 $M(n)$ 具有更好的收敛性^[18]。由于地下水埋深序列长度是有限的,因此用地下水埋深序列的平均值来近似替代 $E(\varphi)$,即 $E(\varphi) = \bar{x} = \left(\sum_{i=1}^N x_i \right) / N$ 。对于 n 的取值范围,已有研究都建议 $n \leq N/10$ ^[9,19]。渐进增长

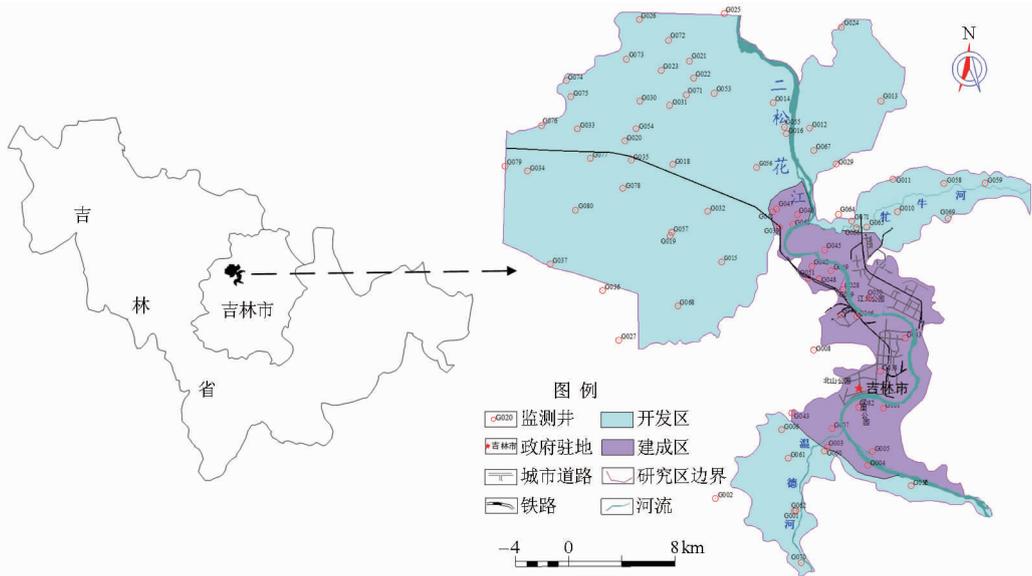


图1 研究区位置及范围

Fig. 1 Location of study area

率 K_c 的计算定义有 2 个,一是把 K_c 定义为 $\lg M(n)$ 与 $\lg n$ 线性回归系数,二是把 K_c 定义为 $M(n)$ 与 n 的相关系数,即

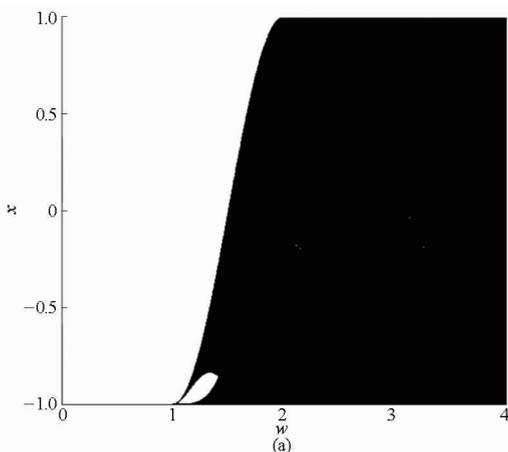
$$K_c = \frac{\text{cov}(n, M(n))}{\sqrt{\text{var}(n) \text{var}(M(n))}} \quad (6)$$

本次研究采用第 2 种定义进行计算。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。计算过程中,一般选取 N_c 个随机常数 c ,计算得到取 N_c 个 K_c ,然后将 K_c 的中位数值 K 作为最终结果值。

2.2 方法验证

为了验证 0-1 测试方法的混沌识别和比较的有效性,引入混沌研究的一个经典模型——Chebyshev 映射。Chebyshev 映射又叫 Chebyshev 迭代,迭代计算式为^[20]

$$x_{n+1} = T_k(x_n) = \cos(w \arccos x_n) \quad (7)$$



Chebyshev 方程中变量 x 的值随参数 w 的变化由周期逐次加倍进入混沌状态,即由倍周期分岔通向混沌(图 2)。在 $w = 1$ 附近, x 的分布出现扰动,此后序列分岔进入半混沌状态,在 $w > 1.4$ 时,序列进入混沌状态。传统上根据 Lyapunov 指数值 λ 来判断系统是否具有混沌特性,它能反映相轨迹有无扩散运动特征。当 $\lambda < 0$ 时,系统有稳定的不动点; $\lambda = 0$ 时,对应着分岔点或系统的周期解;当 $\lambda > 0$ 时,系统具有混沌特征^[4]; λ 值反映了系统的混沌程度^[21]。由 Chebyshev 映射的 $\lambda - w$ 关系图可以发现,在 $w < 1$ 时,系统动力学形态比较简单,处于稳定状态, λ 值始终小于 0;在 $w = 1$ 附近,对应于 x 分布的扰动, λ 值出现一个脉冲,此后系统进入半混沌状态,此时 $\lambda > 0$ 。

通过计算得到 w 从 0 逐渐增大的各序列 0-1 混沌测试结果(图 3)。测试结果表明,随着 w 的变

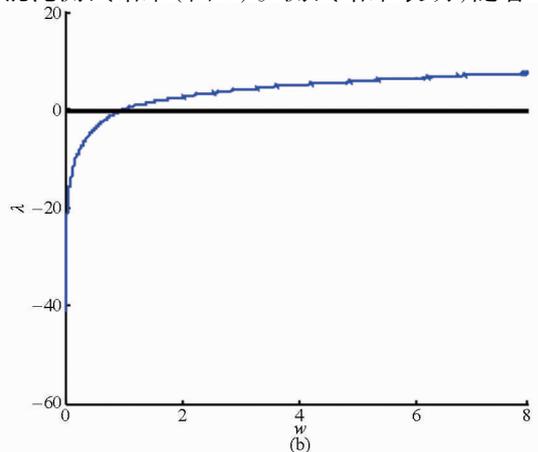
图2 Chebyshev 映射($x_{n+1} = \cos(w \arccos x_n)$)

Fig. 2 Chebyshev map

(a) 倍周期分岔过程 (b) Lyapunov 指数 λ

化,系统从有序变为半混沌,最后进入完全混沌状态。 K 值初期趋近于 0,在 $w = 1$ 附近对应于系统扰动和 λ 值脉冲, K 值也出现了局部振荡,随后快速增长,在 $w > 1.4$ 后, K 值趋近于 1。

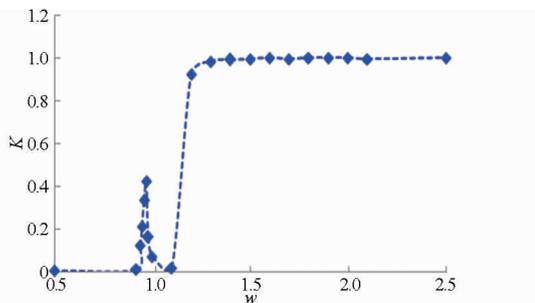


图 3 $K-w$ 关系曲线

Fig. 3 Curve of K versus w

分别给出 $w = 0.5$ (有序)、 $w = 1.3$ (半混沌) 和 $w = 2.5$ (混沌) 的 Chebyshev 序列的 $p-q$ 轨迹相图、不同 c 值条件下 $M(n)-t$ 关系曲线图和 K_c-c 散点图(图 4)。可以发现,当 $w = 0.5$ 时,即系统为有序稳定, $p-q$ 轨迹范围有界确定,均方位移 $M(n)$ 随时间变化无明显的增长趋势,其 K_c 的计算值稳定地分布在 0 附近;当 $w = 1.3$ 时,系统为半混沌状态, $p-q$ 轨迹开始出现杂乱现象,部分 $M(n)-t$ 曲线呈现线

性增长特征, K_c 的值也开始向 1 移动;当 $w = 2.5$ 时,系统为混沌状态, $p-q$ 轨迹呈现出布朗运动的特性, $M(n)$ 随时间均呈现出明显的线性增长, K_c 的分布趋近于 1。

Chebyshev 映射 0-1 测试的结果与其倍周期分插图和最大 Lyapunov 指数图结论一致,验证了该方法的有效性,同时 K 随 w 的变化关系也说明 0-1 方法能够反映系统不同程度的混沌特性,因此可以用来进行不同系统间的混沌程度比较。

3 计算与分析

3.1 地下水埋深混沌识别

时间序列的混沌研究假设时间序列具有某种平稳性,因此对 83 眼监测井不同时间尺度(5、10、15、30 d)地下水埋深监测序列进行平稳性检验,对不平稳序列采用差分平稳化处理。由 ADF 单位根检验法检验结果发现原始数据序列不是平稳序列,将原始数据进行一阶差分平稳化处理,处理后数据序列单位根检验量 ADF 的 t 统计量均小于显著性水平 1% 的值($t(0.01) = -3.443$)。

平稳化处理后的(5、10、15、30 d)地下水埋

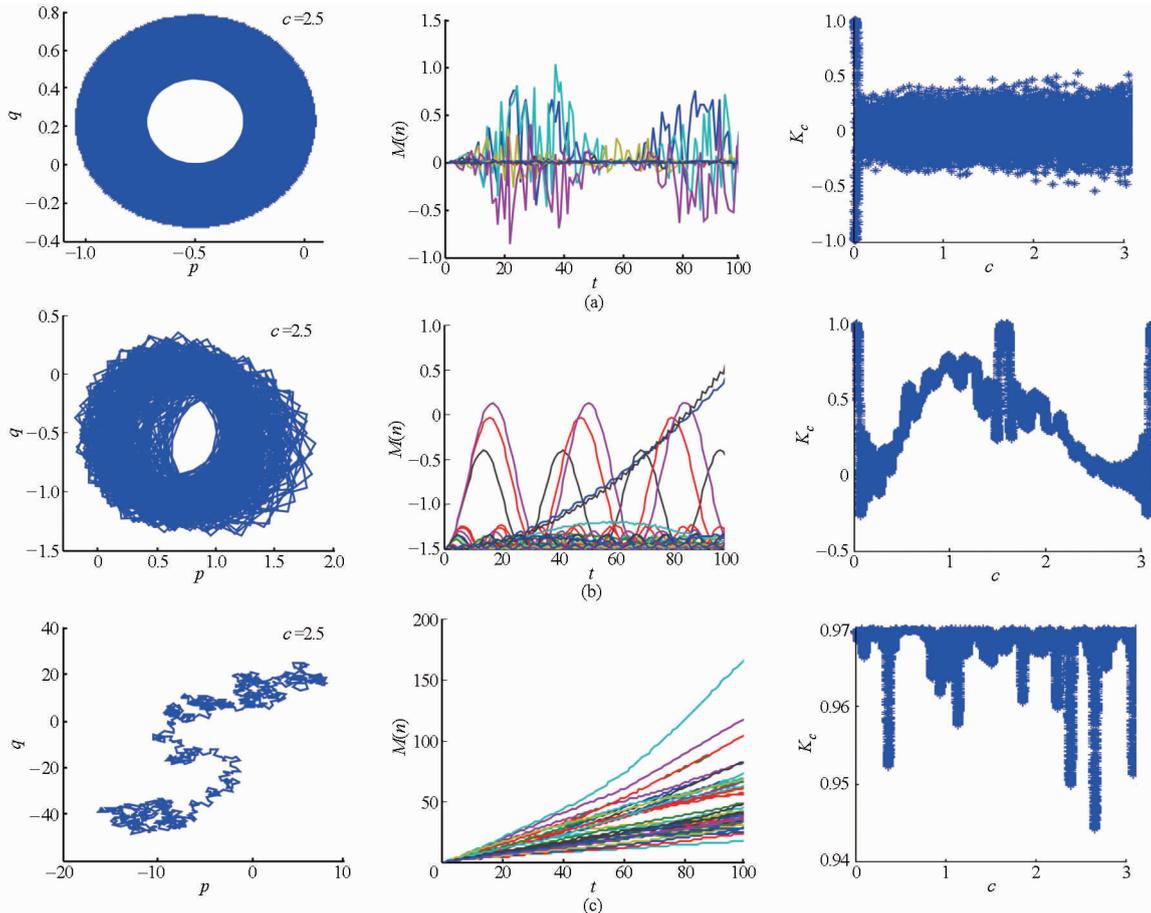


图 4 基于 0-1 测试的 Chebyshev 映射

Fig. 4 Chebyshev map tested by 0-1 algorithm

(a) $w = 0.5$ (b) $w = 1.2$ (c) $w = 2.5$

深监测序列长度分别为720、360、240和120个。令随机数 c 的个数 N_c 等于20000,运用0-1测试方法对83眼监测井不同时间尺度(5、10、15、30 d)地下水埋深监测序列进行测试,得到各监测井均方位移 $M(n)$ 对应于时间的渐进增长率 K

(表1~4)。

由表1可知,5 d监测序列的 K 最小值为G082监测井的0.9673,最大值为G020监测井的0.9995,平均值为0.9959。从G082和G020监测井的 $p-q$ 轨迹相图、 $M(n)-t$ 关系曲线图和 K_c-c 散点图可以看

表1 各监测井地下水埋深5 d监测序列渐进增长率 K

Tab.1 Asymptotic growth rate K of groundwater depth within 5 d surveillance series of all monitoring wells

监测井	K												
G001	0.9978	G013	0.9979	G025	0.9968	G037	0.9990	G049	0.9989	G061	0.9976	G073	0.9968
G002	0.9987	G014	0.9978	G026	0.9966	G038	0.9680	G050	0.9985	G062	0.9955	G074	0.9962
G003	0.9990	G015	0.9993	G027	0.9966	G039	0.9975	G051	0.9986	G063	0.9947	G075	0.9954
G004	0.9994	G016	0.9961	G028	0.9961	G040	0.9979	G052	0.9912	G064	0.9959	G076	0.9960
G005	0.9976	G017	0.9984	G029	0.9981	G041	0.9922	G053	0.9947	G065	0.9977	G077	0.9970
G006	0.9988	G018	0.9979	G030	0.9983	G042	0.9993	G054	0.9984	G066	0.9983	G078	0.9988
G007	0.9977	G019	0.9991	G031	0.9990	G043	0.9985	G055	0.9963	G067	0.9977	G079	0.9980
G008	0.9985	G020	0.9995	G032	0.9984	G044	0.9904	G056	0.9977	G068	0.9961	G080	0.9986
G009	0.9984	G021	0.9979	G033	0.9970	G045	0.9988	G057	0.9980	G069	0.9952	G081	0.9700
G010	0.9971	G022	0.9992	G034	0.9958	G046	0.9983	G058	0.9958	G070	0.9966	G082	0.9673
G011	0.9982	G023	0.9979	G035	0.9876	G047	0.9984	G059	0.9927	G071	0.9976	G083	0.9820
G012	0.9964	G024	0.9966	G036	0.9987	G048	0.9974	G060	0.9943	G072	0.9989		

表2 各监测井地下水埋深10 d监测序列渐进增长率 K

Tab.2 Asymptotic growth rate K of groundwater depth within 10 d surveillance series of all monitoring wells

监测井	K												
G001	0.9972	G013	0.9976	G025	0.9975	G037	0.9986	G049	0.9982	G061	0.9982	G073	0.9967
G002	0.9985	G014	0.9981	G026	0.9975	G038	0.9750	G050	0.9978	G062	0.9954	G074	0.9975
G003	0.9977	G015	0.9990	G027	0.9919	G039	0.9964	G051	0.9987	G063	0.9930	G075	0.9954
G004	0.9991	G016	0.9969	G028	0.9970	G040	0.9964	G052	0.9910	G064	0.9928	G076	0.9975
G005	0.9960	G017	0.9968	G029	0.9982	G041	0.9900	G053	0.9957	G065	0.9975	G077	0.9954
G006	0.9989	G018	0.9968	G030	0.9973	G042	0.9990	G054	0.9978	G066	0.9984	G078	0.9965
G007	0.9946	G019	0.9988	G031	0.9988	G043	0.9975	G055	0.9969	G067	0.9915	G079	0.9970
G008	0.9985	G020	0.9996	G032	0.9979	G044	0.9953	G056	0.9977	G068	0.9948	G080	0.9985
G009	0.9972	G021	0.9974	G033	0.9983	G045	0.9977	G057	0.9976	G069	0.9777	G081	0.9720
G010	0.9977	G022	0.9985	G034	0.9966	G046	0.9978	G058	0.9921	G070	0.9948	G082	0.9730
G011	0.9971	G023	0.9975	G035	0.9886	G047	0.9969	G059	0.9917	G071	0.9962	G083	0.9750
G012	0.9934	G024	0.9886	G036	0.9989	G048	0.9967	G060	0.9964	G072	0.9990		

表3 各监测井地下水埋深15 d监测序列渐进增长率 K

Tab.3 Asymptotic growth rate K of groundwater depth within 15 d surveillance series of all monitoring wells

监测井	K												
G001	0.9969	G013	0.9926	G025	0.9968	G037	0.9991	G049	0.9971	G061	0.9985	G073	0.9975
G002	0.9983	G014	0.9982	G026	0.9958	G038	0.9250	G050	0.9315	G062	0.9965	G074	0.9954
G003	0.9973	G015	0.9985	G027	0.9866	G039	0.9940	G051	0.9986	G063	0.9947	G075	0.9958
G004	0.9991	G016	0.9970	G028	0.9959	G040	0.9975	G052	0.9900	G064	0.9689	G076	0.9967
G005	0.9949	G017	0.9972	G029	0.9986	G041	0.9680	G053	0.9970	G065	0.9981	G077	0.9947
G006	0.9973	G018	0.9935	G030	0.9969	G042	0.9981	G054	0.9945	G066	0.9987	G078	0.9973
G007	0.9970	G019	0.9984	G031	0.9984	G043	0.9966	G055	0.9970	G067	0.9839	G079	0.9954
G008	0.9975	G020	0.9993	G032	0.9993	G044	0.9336	G056	0.9973	G068	0.9962	G080	0.9986
G009	0.9972	G021	0.9977	G033	0.9970	G045	0.9968	G057	0.9963	G069	0.9701	G081	0.9210
G010	0.9952	G022	0.9987	G034	0.9961	G046	0.9300	G058	0.9930	G070	0.9907	G082	0.9220
G011	0.9976	G023	0.9969	G035	0.9820	G047	0.9983	G059	0.9896	G071	0.9974	G083	0.9230
G012	0.9932	G024	0.9810	G036	0.9994	G048	0.9938	G060	0.9949	G072	0.9984		

出(图 5、6), $p-q$ 图表现出布朗运动, $M(n)$ 随时间 t 呈现出明显的线性增长, K_c 值均趋近于 1。表明吉

林市 83 眼监测井地下水埋深 5d 监测序列具有混沌特性。

表 4 各监测井地下水埋深 30 d 监测序列渐进增长率 K

Tab.4 Asymptotic growth rate K of groundwater depth within 30 d surveillance series of all monitoring wells

监测井	K												
G001	0.977 9	G013	0.993 0	G025	0.991 3	G037	0.996 5	G049	0.914 5	G061	0.997 0	G073	0.993 2
G002	0.999 2	G014	0.995 6	G026	0.995 0	G038	0.900 0	G050	0.918 0	G062	0.995 0	G074	0.984 0
G003	0.920 0	G015	0.998 9	G027	0.962 7	G039	0.988 8	G051	0.918 4	G063	0.995 4	G075	0.995 7
G004	0.921 0	G016	0.996 9	G028	0.915 6	G040	0.996 2	G052	0.930 0	G064	0.886 3	G076	0.995 1
G005	0.915 0	G017	0.986 2	G029	0.989 8	G041	0.924 2	G053	0.995 2	G065	0.995 2	G077	0.992 5
G006	0.997 1	G018	0.990 1	G030	0.995 9	G042	0.915 8	G054	0.994 2	G066	0.998 0	G078	0.997 1
G007	0.912 0	G019	0.996 7	G031	0.995 0	G043	0.981 9	G055	0.994 8	G067	0.934 8	G079	0.995 8
G008	0.900 5	G020	0.995 2	G032	0.996 8	G044	0.916 3	G056	0.996 1	G068	0.994 0	G080	0.997 0
G009	0.915 5	G021	0.998 1	G033	0.997 1	G045	0.914 1	G057	0.988 4	G069	0.931 3	G081	0.891 2
G010	0.971 8	G022	0.993 5	G034	0.996 6	G046	0.914 7	G058	0.986 0	G070	0.959 1	G082	0.893 0
G011	0.994 6	G023	0.993 3	G035	0.980 3	G047	0.997 8	G059	0.962 0	G071	0.986 4	G083	0.892 0
G012	0.974 3	G024	0.944 6	G036	0.997 3	G048	0.916 6	G060	0.914 8	G072	0.996 7		

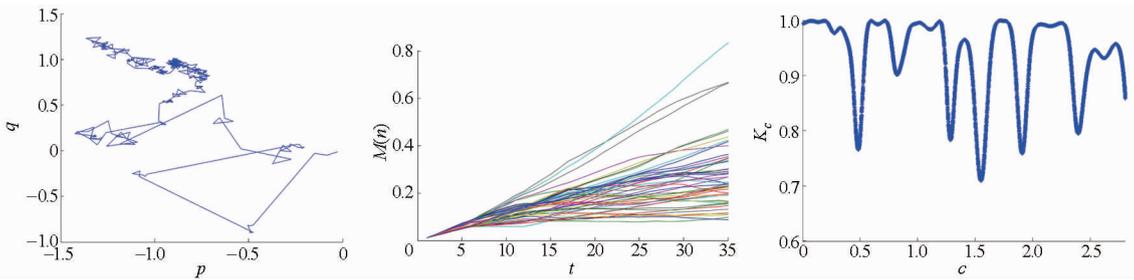


图 5 基于 0-1 测试的 G082 监测井地下水埋深 5 d 监测序列 ($K=0.967 3$)

Fig.5 Groundwater depth within 5 d surveillance series of G082 tested by 0-1 method ($K=0.967 3$)

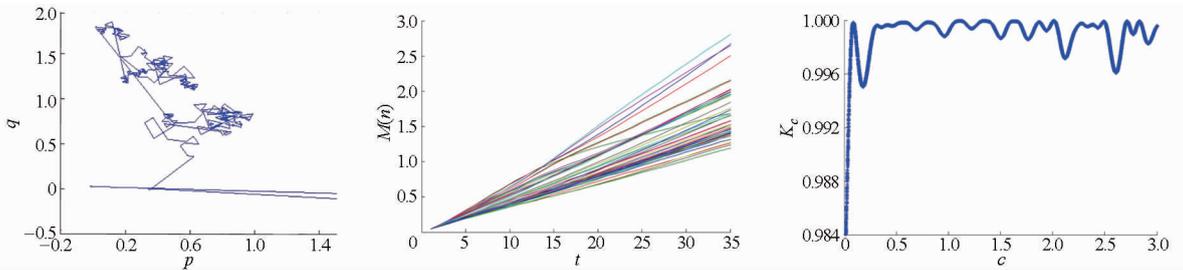


图 6 基于 0-1 测试的 G020 监测井地下水埋深 5 d 监测序列 ($K=0.999 5$)

Fig.6 Groundwater depth within 5 d surveillance series of G020 tested by 0-1 method ($K=0.999 5$)

由表 2 可知, 10 d 监测序列的 K 最小值为 G081 监测井的 0.972 0, 最大值为 G020 监测井 0.999 6, 平均值为 0.995 2。从 G081 和 G020 监测井的 $p-q$ 轨迹相图、 $M(n)-t$ 关系曲线图和 K_c-c 散点图可以看

出(图 7、8), $p-q$ 图表现出布朗运动, $M(n)$ 随时间 t 呈现出明显的线性增长, K_c 值均趋近于 1。表明吉林市 83 眼监测井地下水埋深 10 d 监测序列具有混沌特性。

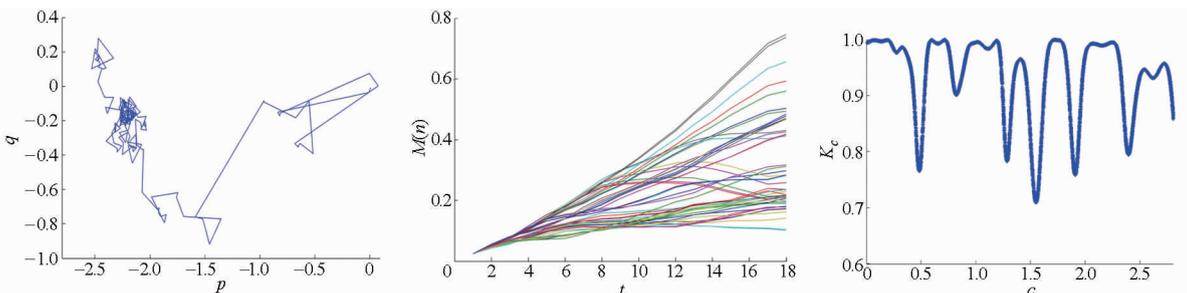


图 7 基于 0-1 测试的 G081 监测井地下水埋深 10 d 监测序列 ($K=0.972 0$)

Fig.7 Groundwater depth within 10 d surveillance series of G081 tested by 0-1 method ($K=0.972 0$)

由表 3 可知,15 d 监测序列的 K 最小值为 G081 监测井的 0.921 0,最大值为 G036 监测井的 0.999 4,平均值为 0.989 0。从 G081 和 G036 监测井的 $p-q$ 轨迹相图、 $M(n)-t$ 关系曲线图和 K_c-c 散点图可以看

出(图 9、10), $p-q$ 图表现出布朗运动, $M(n)$ 随时间 t 呈现出明显的线性增长, K_c 值均趋近于 1。表明吉林市 83 眼监测井地下水埋深 15 d 监测序列具有混沌特性。

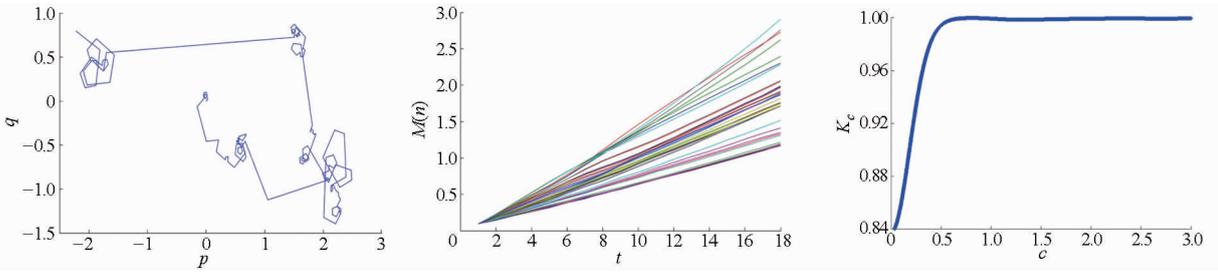


图 8 基于 0-1 测试的 G020 监测井地下水埋深 10 d 监测序列 ($K=0.999 6$)

Fig. 8 Groundwater depth within 10 d surveillance series of G020 tested by 0-1 method ($K=0.999 6$)

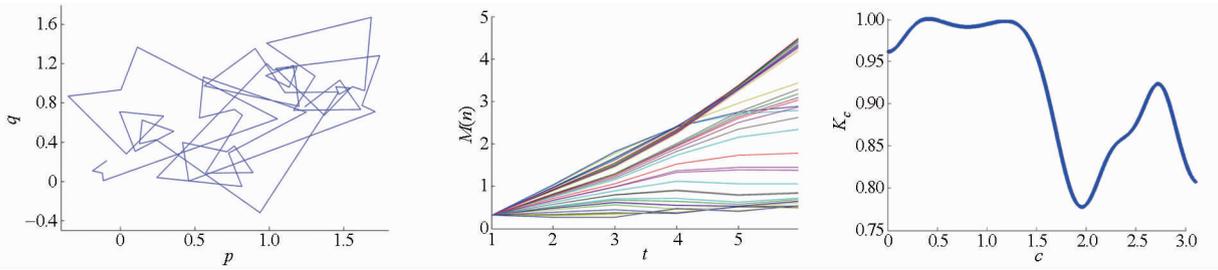


图 9 基于 0-1 测试的 G081 监测井地下水埋深 15 d 监测序列 ($K=0.921 0$)

Fig. 9 Groundwater depth within 15 d surveillance series of G081 tested by 0-1 method ($K=0.921 0$)

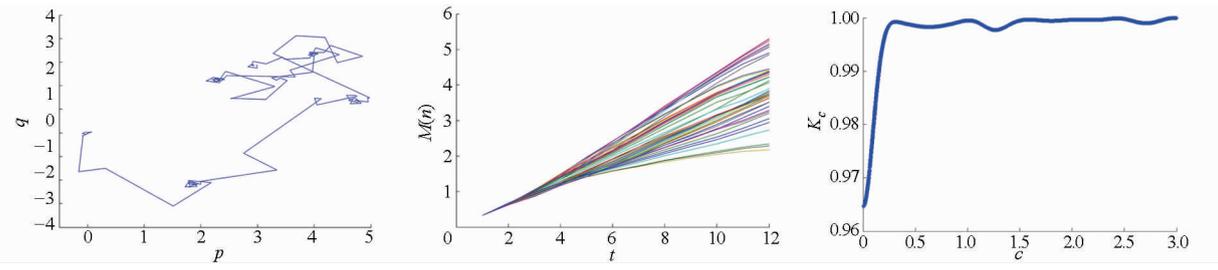


图 10 基于 0-1 测试的 G036 监测井地下水埋深 15 d 监测序列 ($K=0.999 4$)

Fig. 10 Groundwater depth within 15 d surveillance series of G036 tested by 0-1 method ($K=0.999 4$)

由表 4 可知,30 d 监测序列的 K 最小值为 G064 监测井的 0.886 3,最大值为 G002 监测井的 0.999 2,平均值为 0.995 9。从 G064 和 G002 监测井的 $p-q$ 轨迹相图、 $M(n)-t$ 关系曲线图和 K_c-c 散点图可以看出(图 11、12), $p-q$ 图表现出布朗运动, $M(n)$ 随时间 t 呈现出明显的线性增长, K_c 值均趋近于 1。表明吉林市 83 眼监测井地下水埋深 30 d 监测序列具有

混沌特性。但监测井 G028、G041、G045、G046、G048、G049、G050、G051、G060、G064、G067、G069、G081、G082、G083 的渐进增长率 K 有明显的减小。

3.2 地下水混沌特性空间分布

为了进一步研究吉林市地下水埋深混沌特性的空间分布规律,根据计算的各监测井不同时间尺度地下水埋深序列的 K 值,运用克里金插值方法进行

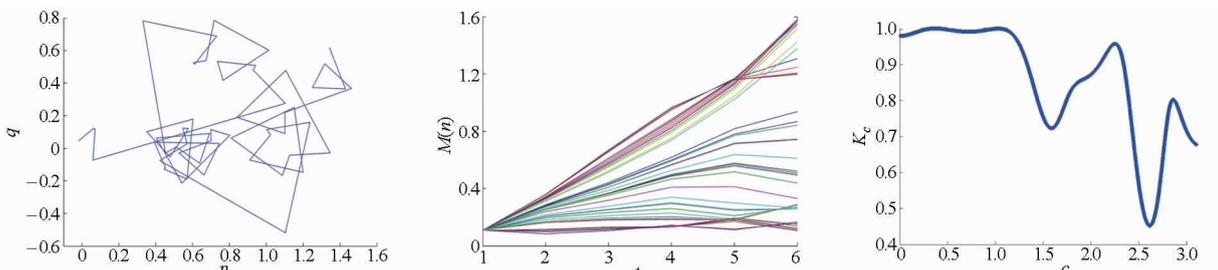


图 11 基于 0-1 测试的 G064 监测井地下水埋深 30 d 监测序列 ($K=0.886 3$)

Fig. 11 Groundwater depth within 30 d surveillance series of G064 tested by 0-1 method ($K=0.886 3$)

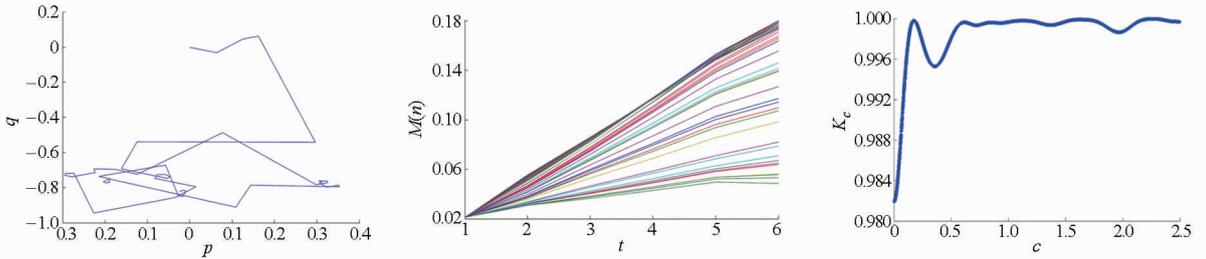


图 12 基于 0-1 测试的 G002 监测井地下水埋深 30 d 监测序列 ($K=0.9992$)

Fig. 12 Groundwater depth within 30 d surveillance series of G002 tested by 0-1 method ($K=0.9992$)

全区插值,得到全区 K 值分布图(图 13)。由图 13 可知,研究区内 K 值具有明显的空间集聚特征。在吉林市北部和南部,不同时间尺度地下水埋深监测序列 K 值较大,中心城区 K 值相对较小。5、10 d 地下水埋深监测序列 K 值较大,仅在中心城区小面积出现相对低值区,最小值分别大于 0.966 0、0.971 0; 15 d 地下水埋深监测序列 K 值也较大,仅在中心城区出现相对低值区,最小值大于 0.915 0,但是相对低值区范围增大;30 d 地下水埋深监测序列 K 值在城区北部较大,但是在城区出现较大范围相对低值区 ($0.8900 < K < 0.9450$)。

部属于高新技术区,并有局部农业区,土地开发较晚。该区域地下水接受大气降水入渗补给、周边基岩裂隙水侧向补给和灌溉入渗补给,排泄方式主要为向河谷的侧向径流、人工开采以及潜水蒸发,地下水埋深受气象、水文、地质地貌及人为因素等多因素影响,地下水埋深所受因素较多,其动力学系统较为复杂,混沌程度较高,因而地下水埋深序列表现出较高的 K 值。

吉林市中部为吉林市城区,该区域地下水接受大气降水入渗补给,排泄方式主要为向河谷的侧向径流和潜水蒸发,并且由于城区路面硬化度较高,地下水补给和蒸发强度较弱,而且由于吉林市城区用

吉林市北部属于郊区,为主要的农业区域。南

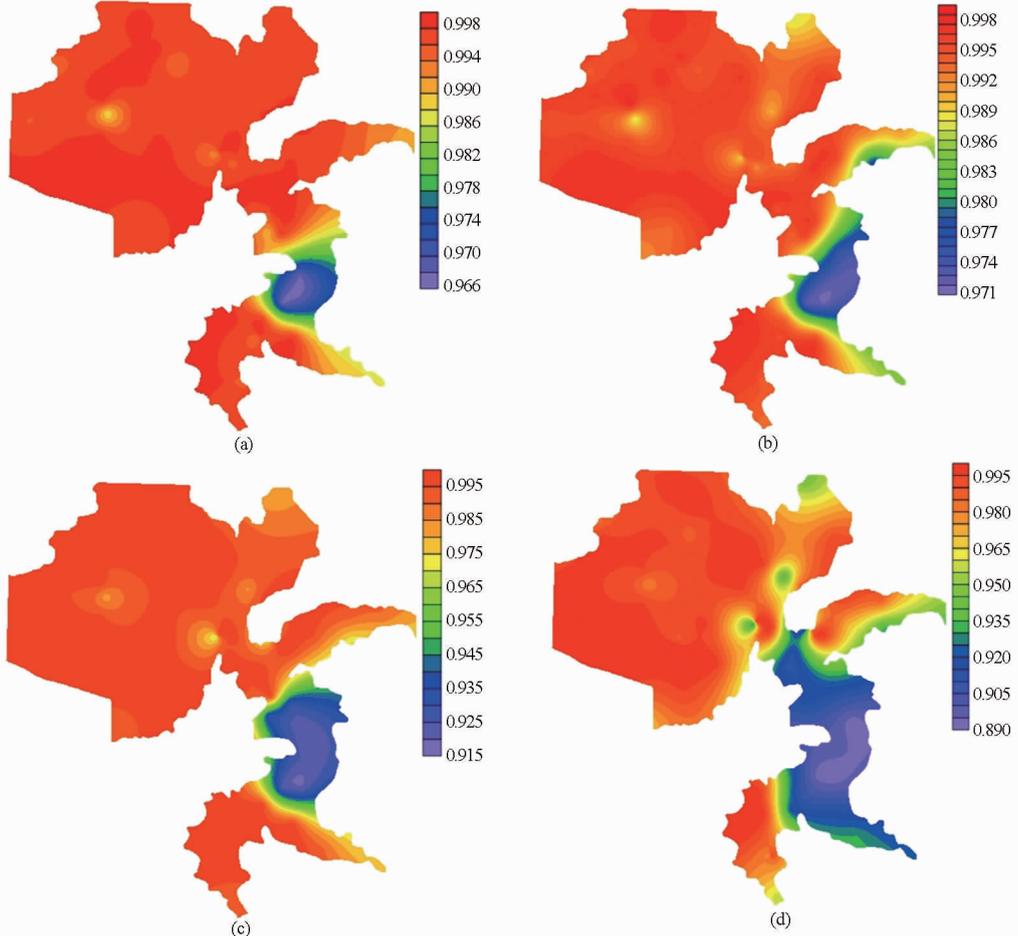


图 13 不同时间尺度地下水埋深监测序列 K 值分布

Fig. 13 K value distribution of multiple timescale groundwater depth surveillance series

(a) 5 d (b) 10 d (c) 15 d (d) 30 d

水主要来源于松花江,不存在地下水开采现象。由地下水埋深监测井可以看出多年来吉林市城区地下水位仅有较小的下降。吉林市城区地下水埋深影响因素较为简单,因而城区 K 值相对较小。并且由图 13 可知,在吉林市北部的郊区,随着时间尺度的增大,地下水埋深序列的 K 值变化不大,呈现出高值区;但在吉林市城区,随着时间尺度的增大, K 值的相对低值区范围增大。这是因为在吉林市北部的郊区,地下水埋深所受因素较多,其动力学系统较为复杂,时间尺度的增大无法削弱地下水动力学系统的复杂性,而在吉林市城区,地下水埋深影响因素较为简单,随着时间尺度的增大,地下水埋深的有序性有所增强,混沌特征相对减弱, K 值的相对低值区范围增大。

4 讨论

0-1 混沌测试方法是基于数据的分析方法,该方法可直接应用于时间序列,而不需要相空间重构和主观的经验来选择不同方法确定参数。并且该方法与时间序列所暗含的系统的动力行为无关,适用于各种实验数据。同时由于该方法为二元测试,只需要根据输出的渐进增长率 K_c 的结果是否接近于 0 和 1 来判断时间序列的混沌特性。但 K_c 随变量 c 的变化在一定范围内波动,当 N_c 的取值较小时,这种现象会严重影响 K_c 的平均值,因此一般取中位数为 K_c 的最终值^[8]。

本研究中 K 的空间插值结果显示出明显的区

间差异,证明 0-1 测试方法具有混沌比较的功能特性。对于动力学系统复杂性较低的时间序列,时间尺度的增大能够削弱动力学系统的复杂性,使时间序列倾向于有序性。但是该方法不能反映数据本身所隐含的非线性特征,其在混沌控制和预测方面还没有相关文献进行过研究,其理论意义还有待进一步明确,因此还需要更深入细致的研究。

5 结论

(1)通过运用 Chebyshev 映射对 0-1 测试方法进行验证,证明了 0-1 测试方法能够有效地对数据序列进行混沌识别。该方法直接应用于时间序列,且是二元测试,计算过程简单。同时,吉林市不同时间尺度地下水埋深监测序列混沌的分区结果说明,0-1 测试方法具有反映数据序列混沌程度的特性。

(2)通过 0-1 混沌测试方法的识别,吉林市不同时间尺度地下水埋深监测序列的 K 值均趋近于 1,表现出明显的混沌特性。渐进增长率 K 的空间插值结果具有明显的空间分布特征,吉林市北部郊区、南部为高值区,城区为相对低值区。并且随着时间尺度的增大,吉林市城区 K 值的相对低值区范围增大,地下水埋深混沌程度有所减弱。

(3)地下水位序列的混沌特征受水文、气象、地质地貌等多因素影响,0-1 混沌测试方法能够有效的识别地下水埋深动力系统的复杂性,对地下水位的预测有较好的指导作用。

参 考 文 献

- 1 叶守泽,夏军. 水文科学研究的世纪回眸与展望[J]. 水科学进展,2002,13(1):93-104.
Ye Shouze, Xia Jun. Century's retrospect and looking into the future of hydrological science[J]. Advances in Water Science, 2002, 13(1):93-104. (in Chinese)
- 2 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,2005:8-61.
- 3 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):14-18.
Song Yu, Chen Jiajun, Sun Xiong. Chaotic analysis of groundwater time series[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2004(1): 14-18. (in Chinese)
- 4 Ghorbani M A, Kisi O, Aalinezhad M. A probe into the chaotic nature of daily stream flow time series by correlation dimension and largest Lyapunov method[J]. Applied Mathematical Modeling, 2010, 34(12):4050-4057.
- 5 王红瑞,宋宇,刘昌明,等. 混沌理论及在水科学中的应用存在的问题[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 Steffen Zeeb, Thomas Dahms, Valentin Flunkert, et al. Discontinuous attractor dimension at the synchronization transition of time-delayed chaotic systems[J]. Physical Review E, 2013, 87(4): 042910.
- 7 Georg A Gottwald, Lan Melbourne. A new test for chaos in deterministic systems[J]. Proceedings of the Royal Society A, 2004, 460(2042):603-611.
- 8 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.
- 9 Georg A Gottwald, Lan Melbourne. Testing for chaos in deterministic systems with noise[J]. Physica D: Nonlinear Phenomena, 2005, 212(1-2):100-110.

- 10 Ian Falconer, Georg A Gottwald, Lan Melbourne. Application of the 0 - 1 test for chaos to experimental data [J]. Society for Industrial and Applied Mathematics, 2007, 6(2):395 - 402.
- 11 Grzegorz Litak, Arkadiusz Syta, Marian Wiercigroch. Identification of chaos in a cutting process by the 0 - 1 test [J]. Chaos, Solitons & Fractals, 2009, 40(5):2095 - 2101.
- 12 Blaz Krese, Edvard Govekar. Nonlinear analysis of laser droplet generation by means of 0 - 1 test for chaos [J]. Nonlinear Dynamics, 2012, 67(3):2101 - 2109.
- 13 Sun Kehui, Liu Xuan, Zhu Chongxu. The 0 - 1 test algorithm for chaos and its applications [J]. Chinese Physics B, 2010, 19(11):110510.
- 14 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, 23(6):861 - 868.
Li Xinjie, Hu Tiesong, Guo Xuning, et al. Chaos analysis of runoff time series at different timescales [J]. Advances in Water Science, 2012, 23(6):861 - 868. (in Chinese)
- 15 桑秀丽, 苏俞真, 肖汉杰, 等. 基于 0 - 1 测试方法的含噪声降雨-径流时间序列混沌特征分析 [J]. 云南大学学报: 自然科学版, 2014, 36(2):233 - 240.
Sang Xiuli, Su Yuzhen, Xiao Hanjie, et al. Analysis of chaotic characteristics of rainfall-runoff time series with noise based on the 0 - 1 test algorithm [J]. Journal of Yunnan University: Natural Sciences, 2014, 36(2):233 - 240. (in Chinese)
- 16 刘庆军, 王雅华, 李继伟. 地下水位时间序列的混沌特征分析 [J]. 人民黄河, 2007, 29(9):40 - 42.
Liu Qingjun, Wang Yahua, Li Jiwei. Analysis chaos of the characteristics of the groundwater level time series [J]. Yellow River, 2007, 29(9):40 - 42. (in Chinese)
- 17 陈南祥, 魏杰. 混沌时间序列法在地下水位预测中的应用 [J]. 水利与建筑工程学报, 2011, 9(6):1 - 4.
Chen Nanxiang, Wei Jie. Application of chaos time series method in groundwater level prediction [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2011, 9(6):1 - 4. (in Chinese)
- 18 Georg A Gottwald, Lan Melbourne. On the validity of the 0 - 1 test for chaos [J]. Nonlinearity, 2009, 22(6):1367 - 1382.
- 19 Abarbanel H D, Brown R, Sidorovich J J, et al. The analysis of observed chaotic data in physical systems [J]. Rev. Modern Phys., 1993, 65:1331 - 1392.
- 20 Mitchell J. Feigenbaum. Quantitative universality for a class of nonlinear transformations [J]. Journal of Statistical Physics, 1978, 19(1):25 - 52.
- 21 王文圣, 向红莲, 赵东. 水文序列分形维数估计的小波方法 [J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2005, 37(1):1 - 4.
Wang Wensheng, Xiang Honglian, Zhao Dong. Estimating the fractal dimension of hydrological time series by wavelet analysis [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2005, 37(1):1 - 4. (in Chinese)