

文章编号:0559-9350(2011)03-0315-08

## 基于去趋势波动分析方法的土壤水分长程相关性研究

宋闰柳<sup>1,2</sup>, 于静洁<sup>1</sup>, 刘昌明<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 地理科学与资源研究所 陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 采用去趋势波动分析法(DFA), 分析华北山区2004—2007年逐日土壤水分序列的长程相关特性, 为土壤水动态动力学机制的揭示以及模拟预测研究提供客观依据。主要结论有: (1)观测点土壤水序列并非完全随机的, 具有较为显著的线性趋势, 二阶去趋势波动分析可以有效地去除原始序列的线性趋势; (2)研究区土壤水序列波动形式接近于分维布朗运动, 是一个由内在自相似机制决定的长程相关过程。长程相关性强的变化与土壤深度变化并不一致; (3)土壤水序列(20cm, 40cm, 70cm)标度指数存在“拐点”。随着时间尺度的增大, 土壤水序列的长程相关性质发生变化。

**关键词:** 土壤水分; 长程相关性; 去趋势波动分析法

**中图分类号:** S152.7

**文献标识码:** A

## 1 研究背景

气候和水文变量时间序列的波动不是完全随机的, 而是在一定范围内存在相关性: 时间序列随季节、年和年代际而表现出周期变化和非线性过程。同时, 具有多种周期的气温、径流等序列的长程幂律(分形)相关性可以延续至几年乃至几十年<sup>[1-2]</sup>。水文、气候系统是一个具有非平稳输入和输出的复杂动态系统, 传统的统计学方法以完全随机的序列波动为前提, 而不考虑标度(长程相关)特性的模拟预测会造成预测结果的偏差<sup>[1,3-4]</sup>。探讨水文序列的长程相关特征, 在理论上可以深化对水文系统线性与非线性动力机制的认识, 在实际应用中对于发展新的水文模拟预测模型以及不同时间尺度数据系列插值也具有重要指导意义。识别气候、水文变量的长期记忆特征, 探讨复杂气候、水文现象不确定性的行为机制, 是国际气候和水文学领域的热点问题之一, 时间序列的长程相关性研究是探索未来人类活动对水循环系统影响的重要途径<sup>[5-7]</sup>。

水文序列的长程相关性研究有较长的历史。20世纪50年代Hurst在对尼罗河径流的研究中发现水文时间序列具有长期记忆特征<sup>[8]</sup>; 60年代Mandelbrot等把分形理论引入水文时间序列自相似特征的研究, 使之与水文系统的非线性动力机制建立起密切联系<sup>[9]</sup>。1994年, Peng等在研究核糖核酸行为机制的过程中提出了分析幂律函数关系的去趋势波动分析(DFA, Detrended Fluctuation Analysis)法<sup>[10]</sup>, 此后该方法被引入了包括水文气象领域在内的广泛自然系统长程相关性的研究<sup>[10-13]</sup>。与常规方法相比, 去趋势波动分析可以检测非平稳时间序列中长周期波动所造成的伪相关现象<sup>[14]</sup>, 有效地识别时间序列的长程相关性。在DFA方法的基础上, Kantelhardt等<sup>[15]</sup>进一步提出多重分形去趋势波动分析法(Multifractal Detrended Fluctuation Analysis, MF DFA), 可以判别序列的多重分形特征。

近年来在水文学领域DFA方法已应用于分析降水、径流、地下水位等时间序列数据的研究<sup>[11-12,14-20]</sup>。

收稿日期: 2010-05-14

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)(2009CB421305); 国家自然科学基金面上项目(40371025)

作者简介: 宋闰柳(1985-), 女, 河北涿州人, 硕士生, 主要从事土壤水分研究。E-mail: songrl.08s@igsnrr.ac.cn

通讯作者: 于静洁(1964-), 吉林四平人, 研究员, 主要从事水文水资源研究。E-mail: yujj@igsnrr.ac.cn

一般而言,随着时间步长(窗口长度)的增长,标度指数变小,长程相关性变弱,DFA曲线多出现“拐点”特性<sup>[12,14-16,21]</sup>。Livina等学者通过对30条国际河流径流量的DFA分析,发现在小于1年的时间尺度上河流径流量呈长程相关性;在大于1年的尺度上,长程相关性基本消失<sup>[21]</sup>。DFA方法应用于高分辨率的地下水、径流和基流数据的研究则发现,地下水位的波动属于分维布朗运动<sup>[8]</sup>,降水、径流、地下水位、基流的时序相关性逐渐升高<sup>[11-12]</sup>。国内学者对长江干流的研究表明长江日、月径流序列均具有明显的长期记忆特征;集水面积越大,长期记忆越强<sup>[14,19]</sup>。张斌等对元谋干热河谷分季节降水量时间序列的DFA分析发现:夏、冬季具有较弱的长期持续性及较强的随机性,春、秋季具有较弱的反持续性<sup>[18]</sup>。此外DFA方法也应用于我国参考作物腾发量的长程相关性研究,发现其波动为由内在机制(自相似性)决定的长程相关过程,且在全球气候变化背景下,参考作物腾发量将维持一定趋势继续增大或减小<sup>[17]</sup>。

目前DFA方法已逐渐应用于各水文要素长程相关性的研究,在世界不同地带的实证研究仍十分缺乏;在水循环重要环节之一的土壤水时间序列中的应用,国内外研究文献较少。土壤水分是综合反映气候、土壤、水文、植被相互作用的关键变量,其通过强烈的非线性方式控制着降水在蒸散发、径流、入渗等水分循环过程中的分配<sup>[22]</sup>。在全球土壤湿度计划(Global Soil Wetness Project, GSWP)中,土壤水已被作为专门的议题来进行探讨和研究<sup>[23]</sup>,且已经成为全球变化研究的重要焦点之一<sup>[24]</sup>。本文以实测高分辨率土壤水分序列为基础,以华北地区燕山山脉中北部东台沟流域实验基地作为研究地,采用DFA方法探讨土壤水分日系列的长程相关性,分析其在不同时间尺度下的相关特征。研究结果将有益于了解土壤水动态过程的动力学机制;同时也为综合的气候、水文模型中时间尺度特性的研究提供依据。

## 2 数据来源与研究方法

**2.1 数据来源** 本文采用的土壤含水量数据来自中国科学院陆地水循环及地表过程重点实验室东台沟实验基地的土壤水连续自动观测数据,时段为2004年1月1日至2007年11月24日。东台沟流域(40°45' 3" N~40°45' 12" N, 116°37' 12" E~116°37' 30" E)位于华北地区燕山山脉中北部,属白河流域的二级支流,流域面积0.64 km<sup>2</sup>,沟向为南北向,平均坡度为30°<sup>[25]</sup>。土壤含水量通过时域反射仪(TDR)配合Data Taker数据采集器获取。观测点位于东台沟流域沟道下游出口,数据采集频率在汛期为1次/10min,非汛期为1次/30min。经整理计算获得不同深度(20cm, 40cm, 70cm和100cm)日土壤体积含水量数据,序列长度为1 424d。

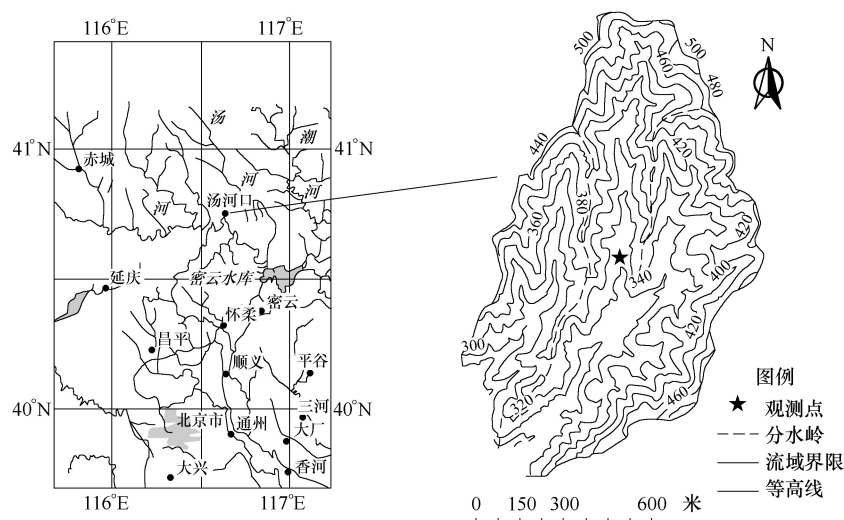


图1 东台沟实验流域地理位置及土壤水观测地点

**2.2 研究方法** 去趋势波动分析方法(DFA)是Peng等<sup>[10]</sup>在研究核糖核酸行为机制过程中提出的一种分析幂律函数关系的方法。从动力学角度讲,该方法中变换后的序列与原序列保持相同的持续性或反持续性;同时,变换后能够滤除自身演化的趋势成分,剩下的离差序列主要是波动成分。因而,较其他分形分析方法,如谱分析和重标度极差(R/S)分析而言,它具有两个优点:(1)能够检测出包含于表面上看来不平稳的时间序列中内在的自相似性;(2)能够避免检测出由于外在趋势而导致的明显的伪相关现象<sup>[11]</sup>。DFA法已成为探索气候、水文序列长期记忆特征的典型工具<sup>[8,11-12,14-15]</sup>。标准的DFA算法如下<sup>[12-13]</sup>:

第一步,计算原序列 $\{x(t) | t=1, 2, \dots, N\}$ 累计离差,转换为新序列 $\{y(t) | t=1, 2, \dots, N\}$ ;

$$y(t) = \sum_{i=1}^t (x(i) - \bar{x}) \quad (1)$$

式中: $x(t)$ 在文中为去除周期项后的日土壤体积含水量序列,单位%;周期项的去除方法见下文; $\bar{x}$ 为序列 $x(t)$ 的平均值。

第二步,把 $\{y(t) | t=1, 2, \dots, N\}$ 以等长度 $l$ 划分为不重叠的 $m$ 个区间。 $l$ 是区间长度,即为时间尺度,本文中为天; $m$ 为区间(或窗口)数量,是 $N/l$ 的整数部分。以最小二乘法拟合每个区间的局部趋势 $y_l(t)$ 。根据拟合多项式次数的不同,可记为一阶去趋势波动分析(first-order detrended fluctuation analysis, DFA1),二阶去趋势波动分析(second-order detrended fluctuation analysis, DFA2)等。

第三步,对序列 $y(t)$ 剔除每个区间的局部趋势,并计算新序列的均方根;

$$F(l) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y(t) - y_l(t))^2} \quad (2)$$

第四步,针对不同区间长度 $l$ 重复上述计算,获取 $l$ 与波动函数 $F(l)$ 之间的关系。通常情况下 $F(l)$ 会随着区间长度 $l$ 的增大而增大;在 $F(l)$ 、 $l$ 的双对数图中线性关系的存在即表示长程相关现象。

$$F(l) \propto l^\alpha \quad (3)$$

可用最小二乘法线性拟合得到的斜率即为 $\alpha$ ,称为标度指数,代表着时间序列的长程相关特性。 $\alpha$ 的取值范围不同反映了序列的不同时间尺度特性。 $\alpha=0.5$ 表明序列是相互独立的白噪音序列,完全随机的,无长程相关;当 $\alpha=1.5$ 时,序列信号波动为布朗运动,呈现长程相关性。标度指数 $\alpha$ 与布朗运动分维数 $D$ 的关系为: $D=3-\alpha$ <sup>[12]</sup>。持续性是指如果时间序列在某一时段是增大(减小)的,在接下来的时期将继续增大(或减小);或者说该时间尺度内时间序列具有一致的趋势特征。标度指数 $\alpha$ 大于1.5,表明该时间尺度内序列是持续的,变化趋势不变,将保持原有趋势增大(或减小); $\alpha$ 小于1.5,表明序列是非持续的,变化趋势相反<sup>[12]</sup>。

序列的周期性波动会对长期相关的检测产生显著影响,容易导致检测到并不存在的长期记忆<sup>[14]</sup>。水文、气象变化往往存在以年为周期的季节性波动,合理地消除其季节性波动是准确估计 $\alpha$ 值的一个重要环节<sup>[12,14,21]</sup>。为了获得更合理的DFA标度指数,在本文中采用谱回归分析的二阶傅里叶级数去除原始土壤水含量日数据的季节性趋势<sup>[12]</sup>。傅里叶级数提取公式为:

$$T = \sum_{i=1}^n a_i \cos\left(\frac{2\pi i t}{365}\right) + \sum_{i=1}^n b_i \sin\left(\frac{2\pi i t}{365}\right) \quad (4)$$

其中, $T$ 为序列的周期项 $n=1$ 代表年波动, $n=2$ 代表年波动和季节波动的组合; $a$ 、 $b$ 为振幅(回归系数)<sup>[10]</sup>。

在本文中对原始土壤水序列中减去周期项后,对残差序列做DFA分析,制作残差序列的双对数图,获得标度指数 $\alpha$ 。其中,原始时间序列的 $\lambda-1$ 阶趋势可以通过去除局部序列的 $\lambda$ 阶趋势而去除;如采用2次多项式拟合去除局部趋势(即DFA2)可以剔除原始序列的潜在线性趋势<sup>[12,15]</sup>。计算过程中最大分隔区间 $l$ 为 $N/4=356d$ , $N$ 为土壤水序列长度1424d;最小分隔区间为 $(2 \times k + 2)d$ ,其中 $k$ 为DFA阶数,DFA1,DFA2,DFA3最小分隔区间分别为4d,6d,8d。

### 3 结果分析

**3.1 不同阶数DFA结果比较** 采用2.2中所述DFA方法对土壤水系列分别做DFA1, DFA2, DFA3计算。波动函数 $F(l)$ 和分割区间 $l$ 的双对数关系如图2所示。DFA1, DFA2, DFA3计算结果中 $F(l)$ 和 $l$ 的对数线性关系均非常明显。当时间步长 $l$ 相同时, DFA阶数越高, 对局部趋势的拟合效果越好, 波动函数 $F(l)$ 值越小, 即 $F(l)$ 值DFA1>DFA2>DFA3。随着步长 $l$ 的增大, DFA1、DFA2、DFA3对应的 $F(l)$ 值差异逐渐变小,  $l$ 最小时差异最大。DFA2、DFA3中 $F(l)$ 序列较为接近, 表明随着时间尺度的增大, 不同阶数(DFA2, DFA3)的去趋势处理获得的波动成分逐渐接近。

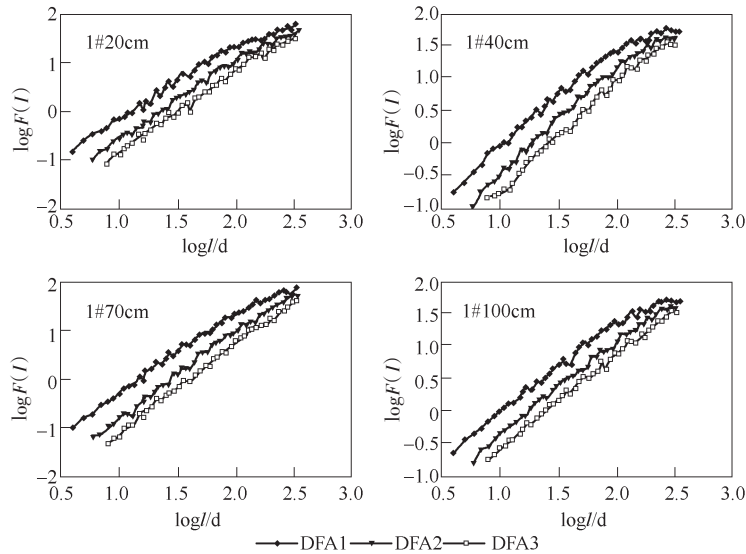


图2 不同阶数DFA波动函数 $F(l)$ 与分割区间 $l$ 的关系

对不同深度不同阶数的波动函数 $F(l)$ 与分割区间 $l$ 的对数值进行了拟合。20cm, 40cm, 70cm, 100cm土壤水序列DFA1计算的标度指数分别为: 1.34, 1.32, 1.50, 1.24; DFA2计算的标度指数分别为: 1.50, 1.50, 1.72, 1.37。DFA2分析中计算得到的标度指数 $\alpha$ 均显著大于对应的DFA1结果。标度指数越大 $\alpha$ 值越大, 序列的长程相关性越强; DFA2对土壤水序列进行局部二次拟合, 剔除了整个序列的线性趋势。去除线性趋势后序列的相关性更大, 表明观测点土壤水序列有较为显著的线性趋势。土壤水序列的二阶去趋势波动分析(DFA2)效果要优于DFA1。但是DFA2、DFA3效果相近, 本文采用DFA2分析土壤水序列的长程相关性。

**3.2 土壤水序列的长程相关性** DFA2计算结果如图3。标度指数 $\alpha$ 即为图中 $\log F(l)$ 和 $\log l$ 拟合直线的斜率, 在各深度线性关系均非常明显, 拟合直线的相关系数为0.987~0.994, 置信度均达到95%以上。整个研究时间尺度内(6d~356d)不同深度(20cm, 40cm, 70cm, 100cm)土壤水序列标度指数 $\alpha$ 分别为1.498, 1.498, 1.719, 1.365, 反映土壤水序列在研究尺度(6d~356d)内具有长程相关的特点。因分维数 $D = 3 - \alpha$ , 所以 $D$ 处于1.281~1.635之间。 $\alpha$ 处于1.365~1.719, 或 $D$ 处于1.281~1.635, 表明观测点土壤水序列的波动接近于分维布朗运动。研究区土壤水序列的波动不是完全随机的, 而是一个持续有序的过程, 具有长程相关性, 土壤含水量数值携带有前期“记忆”。

标度指数 $\alpha$ 的大小反映长程相关性强弱。不同深度土壤水分的长程相关性强弱有所差异。70cm深处土壤水分长程相关性最强, 标度指数达1.719; 20cm和40cm深处标度指数相等, 具有相同的长程相关性; 100cm深处长程相关性较弱, 标度指数仅为1.365。结果表明长程相关性的变化与土壤深度变化并不一致, 受土壤深度外的其他因素的影响。

**3.3 标度指数“拐点”分析** 从图3中也可以发现, 拟合直线在不同时间步长 $l$ 拟合程度不同。为了进一步揭示土壤水序列的时间尺度特征, 对 $\log F(l)$ 和 $\log l$ 进行了分段拟合, 以获取不同时间尺度下的标

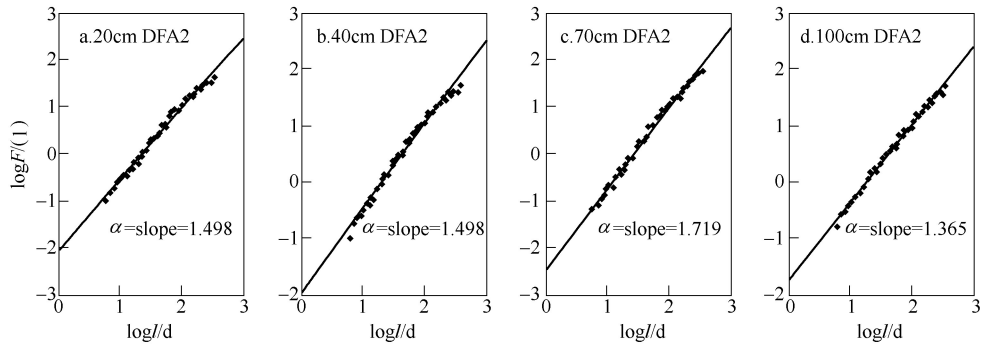


图3 土壤水序列DFA分析

度指数。步骤简述为采用动态聚类的方法对  $F(l)$  序列进行分类，当所分类别的拟合直线斜率均大于（或小于）1.5时，合并为一类；然后对分类后的序列分别进行最小二乘拟合。两类  $\log F(l)$  序列交点对应的  $l$  即为时间步长。结果如图4所示。

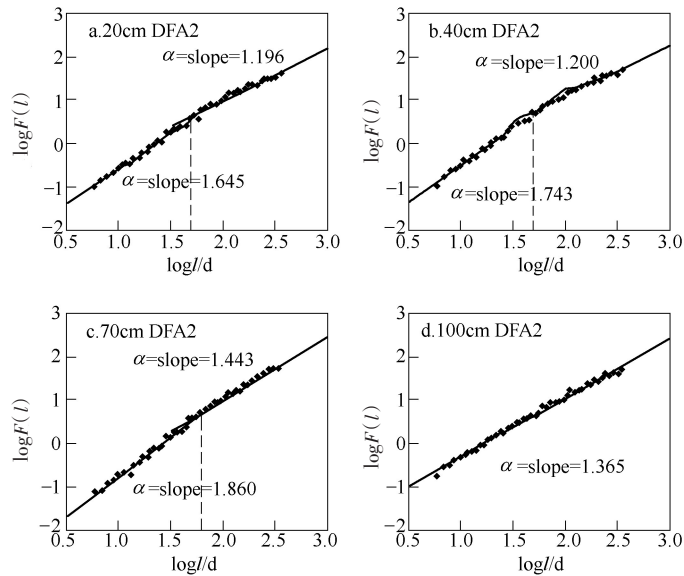


图4 DFA2标度指数“拐点”分析

研究区土壤水序列（深度20cm，40cm，70cm）DFA2计算结果显示，波动函数拟合直线在时间步长  $\log l = 1.6 \sim 1.7$  ( $l = 44d \sim 48d$ ) 处可以分为斜率明显不同的两部分。步长小于44d、44d、48d，标度指数  $\alpha$  分别为：1.645，1.742，1.860，步长大于44d、44d、48d，标度指数  $\alpha$  分别为：1.196，1.200，1.443。表明在时间尺度为44d、44d、48d处，土壤水序列的标度指数存在“拐点”。时间步长小于44d或48d，标度指数  $\alpha$  均显著大于1.5，表明土壤水分序列是持续的，在44d(20cm，40cm)或48d(70cm)的时间尺度范围内，土壤水序列的变化趋势不变，将保持原有趋势增大(或减小)；步长大于44d(20cm，40cm)或48d(70cm)， $\alpha$  小于1.5，表明土壤水分序列是非持续的，土壤水序列的变化趋势相反。

对100cm深度土壤水序列  $\log F(l)$  和  $\log l$  分段拟合发现，拟合直线斜率无明显差异，标度指数不存在拐点。100cm深处土壤水序列标度指数为1.365，小于1.5，表明该深度土壤水含量在时间尺度(6d~356d)内为非持续的，变化趋势不同。

#### 4 结论

本文基于2004—2007年华北山区东台沟实验流域不同深度沟道日土壤含水量实测数据，应用去趋势波动分析法研究土壤水序列的长程相关性，探讨了不同深度土壤含水量动态的时间尺度特征，

结论如下:

(1)二阶去趋势波动分析(DFA2)可以有效去除原始序列的潜在线性趋势,效果优于一阶去趋势波动分析(DFA1)。不同阶数DFA计算结果(DFA1, DFA2, DFA3)比较显示,在相同的时间尺度 $l$ 下,拟合阶数越高,波动函数值 $F(l)$ 越小。随着 $l$ 的增大,DFA1、DFA2、DFA3对应的 $F(l)$ 差异逐渐变小,尺度最小时差异最大。

(2)研究时间尺度内(6d~356d)20cm、40cm、70cm、100cm土壤水序列标度指数 $\alpha$ 分别为1.498、1.498、1.719、1.365。观测点土壤水序列的波动接近于分维布朗运动,土壤水序列的波动不是完全随机的,而是一个持续有序过程,具有长程相关性。不同深度土壤水分的长程相关性强弱有所差异。70cm深处土壤水分长程相关性最强,100cm深处长程相关性较弱,长程相关性的变化与土壤深度变化并不一致。

(3)土壤水序列(20cm, 40cm, 70cm)随着时间尺度 $l$ 的增大,标度指数 $\alpha$ 减小,时序相关性降低。在 $l$ 为44d, 44d, 48d处, $\alpha$ 存在“拐点”。 $l$ 小于44d或48d, $\alpha$ 大于1.5,分别为1.645、1.742、1.860,土壤水序列为持续的,变化趋势一致;大于44d或48d, $\alpha$ 小于1.5,分别为1.196、1.200、1.443,土壤水序列为非持续的,变化趋势发生变化。100cm深度土壤水序列标度指数未出现“拐点”,标度指数小于1.5,土壤水序列为非持续的。

## 5 讨论

长程相关性越强,表明前一时段土壤水分对后时段影响越大,波动越弱,确定性越强。20cm、40cm、70cm土壤水相比,70cm深土壤水长程相关性强于20cm和40cm。其原因分析如下:根据气象观测数据,研究流域小于5mm的降水占总降水事件的65.1%,降雨以小雨为主,能够引起各层土壤水分显著上升的降水次数少,且年内分布不均,不确定性强;同时,研究区位于半干旱地区,蒸发强烈,浅层20cm、40cm土壤水分受降水和蒸发的交互影响,波动剧烈,因此长程相关性较弱。对于70cm深处土壤水分而言,蒸发的影响减弱,土壤松散,砾石较多,相对于浅层20cm、40cm更容易接受侧向流的补给,造成该深处土壤水分的收入项占优势地位,确定性较强,波动较弱,因此长程相关性强。

对100cm深处土壤水分来说,除受降雨入渗、侧渗、蒸发、排泄的作用外,还会接受毛管上升水的补给,受地下水位的影响;已有的同位素分析也表明100cm深是土壤水同位素特征发生变化的深度<sup>[25]</sup>;影响土壤水分的各因素作用更复杂,造成100cm深处长程相关性最弱,不确定性最强。

对于不同深度土壤水标度指数“拐点”的出现,原因为本文分析采用的土壤水数据来源于沟道下游,长程相关特性的改变与降水、蒸散发、汇流以及排泄的综合作用有关。浅层土壤水序列(深度20cm, 40cm, 70cm)44d或48d处的变化,可以认为在小于44d或48d的时间尺度内,由于降水、汇流的作用,土壤含水量会持续地增加;而大于44d或48d,降水、汇流的影响减弱,蒸散发和排泄取代了降水、汇流占支配地位,土壤含水量变化趋势由增加转变为减少。标度指数拐点的位置(44d或48d)则与能够引起土壤含水量明显上升的有效降雨的时间间隔有关。

而100cm深度土壤水序列标度指数未出现“拐点”, $\alpha$ 小于1.5,土壤水序列为非持续的,反映出研究区100cm深度土壤水动态变化的驱动机制与浅层不同。Li和Zhang<sup>[12]</sup>对地下水序列的研究中也有类似的结果,发现深层地下水DFA分析标度指数无拐点,而浅层地下水序列存在拐点。

本文对水文系统中的土壤水分环节进行了长程相关性的探讨。学者Li和Zhang的研究中,降水,径流,地下水和基流的标度指数 $\alpha$ 逐渐升高,时序相关性逐渐增强,并认为这是由于地表覆盖类型、土壤特性和含水层特性的综合作用越来越复杂所导致的<sup>[11-12]</sup>,且入渗的时间尺度特性应处于径流和地下水之间。在本研究中深度为20cm, 40cm的土壤水在大于44d、48d时间步长时标度指数为1.196, 1.200,数值位于Li和Zhang研究所得的降水和地下水、基流之间<sup>[12]</sup>。本文研究结果与Li和Zhang研究推论相符(表1)。国内学者王国杰等<sup>[14]</sup>对长江流域的月径流和月降水序列的研究中,在更大时间尺

度上的也符合以上结果, 径流的长程相关性要弱于小时间尺度, 降水序列的标度指数为0.5, 在大时间尺度上为随机分布。现有研究表明, 水文系统中各要素长程相关性的分布具有规律性, 时间尺度增大, 时序相关性变弱, 降水、径流、地下水、基流的时序相关性逐渐增强。水文系统中长程相关性的进一步研究, 必将加深对各要素变化动力机制的深入理解。

表1 DFA方法计算的土壤水标度指数 $\alpha$ 与降水, 径流, 地下水, 基流标度指数 $\alpha$ 的比较

|         | 时间尺度(10至100-300d)                                      | 时间尺度(大于100-300d)                 |
|---------|--|----------------------------------|
| 降水      | 0.62—0.98 <sup>[11-12]</sup>                           | 0.5 <sup>[14]</sup>              |
| 径流      | 0.89, 1.12 <sup>[11-12]</sup>                          | 0.60, 0.72, 0.76 <sup>[14]</sup> |
| 本研究中土壤水 | 1.196(20cm), 1.200(40cm),<br>1.443(70cm), 1.365(100cm) | —                                |
| 地下水     | 1.28 <sup>[12]</sup>                                   | —                                |
| 基流      | 1.28 <sup>[12]</sup>                                   | —                                |

此外, 长程相关现象(或称标度特性)作为自然系统中广泛存在的现象之一, 模拟预测研究中标度特性的考虑有助于使模拟结果更贴近于实际情况。例如有研究表明, 气候模式研究中标度的缺失会导致对全球变暖现象的过高估计<sup>[1,3-4]</sup>, 因此, 有学者将时间尺度特征加入到全球气候模式的研究<sup>[7]</sup>。在水文系统模型研究中, 不同水文变量时间尺度特性的引入, 也会为水文模拟预测提供新的思路。

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] Bunde A, Havlin S, Koscielny-Bunde E, et al . Long term persistence in the atmosphere: global laws and tests of climate models[J] . Physica a-Statistical Mechanics and Its Applications, 2001, 302(1-4): 255-267 .
- [ 2 ] 李贤彬, 丁晶, 李后强 . 水文序列Hurst系数的子波估计[J] . 水利学报, 1999(8): 21-25 .
- [ 3 ] Vjushin D, Govindan R B, Brenner S, et al . Lack of scaling in global climate models[J] . Journal of Physics-Condensed Matter, 2002, 14(9): 2275-2282 .
- [ 4 ] Govindan R B, Vyushin D, Bunde A, et al . Global climate models violate scaling of the observed atmospheric variability[J] . Physical Review Letters, 2002, 89(2): 028501-1-028501-4 .
- [ 5 ] Fraedrich K, Luksch U, Blender R . 1/f model for long-time memory of the ocean surface temperature[J] . Physical Review E, 2004, 70(3): 037301-1-037301-4 .
- [ 6 ] Bordi I, Fraedrich K, Gerstengarbe F W, et al . Potential predictability of dry and wet periods: Sicily and Elbe-Basin(Germany)[J] . Theoretical and Applied Climatology, 2004, 77(3-4): 125-138 .
- [ 7 ] Blender R, Fraedrich K . Long time memory in global warming simulations[J] . Geophysical Research Letters, 2003, 30(14):1769-1772 .
- [ 8 ] Hurst H E . Long-Term Storage Capacity of Reservoirs[J] . Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1951, 116: 770-799 .
- [ 9 ] Mandelbrot B B, Wallis J R . Some Long-Run Properties of Geophysical Records[J] . Water Resources Research, 1969, 5(2): 321-340 .
- [ 10 ] Peng C K, Buldyrev S V, Havlin S, et al . Mosaic organization of DNA nucleotides[J] . Physical Review E, 1994, 49(2): 1685-1689 .
- [ 11 ] Matsoukas C, Islam S, Rodriguez-Iturbe I . Detrended fluctuation analysis of rainfall and streamflow time series [J] . Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 2000, 105(D23): 29165-29172 .
- [ 12 ] Li Z W, Zhang Y K . Quantifying fractal dynamics of groundwater systems with detrended fluctuation analysis[J] . Journal of Hydrology, 2007, 336(1-2): 139-146 .
- [ 13 ] Peng C K, Havlin S, Stanley H E, et al . Quantification of Scaling Exponents and Crossover Phenomena in Non-stationary Heartbeat Time-Series[J] . Chaos, 1995, 5(1): 82-87 .
- [ 14 ] 王国杰, 姜彤, 陈桂亚 . 长江干流径流的时序结构与长期记忆[J] . 地理学报, 2006, 61(1): 47-56 .
- [ 15 ] Kantelhardt J W, Zschiegner S A, Koscielny-Bunde E, et al . Multifractal detrended fluctuation analysis of non-

- stationary time series[J]. *Physica a-Statistical Mechanics and Its Applications*, 2002, 316(1-4): 87-114.
- [ 16 ] Koscielny-Bunde E, Kantelhardt J W, Braun P, et al. Long-term persistence and multifractality of river runoff records: Detrended fluctuation studies[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 322: 120-137.
- [ 17 ] 谢先红, 崔远来, 周玉桃. 参考作物腾发量时间序列的长程相关性和多重分形分布[J]. *水利学报*, 2008, 39(12): 1327-1333.
- [ 18 ] 张斌, 史凯, 刘春琼, 等. 元谋干热河谷近50年分季节降水变化的DFA分析[J]. *地理科学*, 2009, 24(7): 561-566.
- [ 19 ] 陈莹, 许有鹏, 尹义星, 等. 长江干流日径流序列的多重分形特征[J]. *地理研究*, 2008, 27(4): 819-828.
- [ 20 ] 孙燕, 祁文. 北京逐日气温和降水量的长程变化特征[J]. *气象科学*, 2008, 28(4): 421-425.
- [ 21 ] Livina V, Ashkenazy Y, Kizner Z, et al. A stochastic model of river discharge fluctuations[J]. *Physica a-Statistical Mechanics and Its Applications*, 2003, 330(1-2): 283-290.
- [ 22 ] 刘鹤, 赵文智, 何志斌. 祁连山浅山区草地生态系统点尺度土壤水分动态随机模拟[J]. *中国科学D辑*, 2007, 37(9): 1212-1222.
- [ 23 ] 李海滨, 林忠辉, 等. Kriging方法在区域土壤水分估值中的应用[J]. *地理研究*, 2001, 20(4): 446-452.
- [ 24 ] Henderson-Sellers A. Soil moisture: A critical focus for global change studies[J]. *Global and Planetary Change*, 1996, 13(1): 3-9.
- [ 25 ] 杨聪. 华北山区典型流域水循环过程实验-东台沟实验流域研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2006.

## Long-range correlations of soil moisture series with detrended fluctuation analysis

SONG Run-liu<sup>1, 2</sup>, YU Jing-jie<sup>1</sup>, LIU Chang-ming<sup>1</sup>

(1. *Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes,  
Institute of Geographic Science and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;*

2. *Graduate School of CAS, Beijing 100049, China*)

**Abstract:** Long-term correlations are considered as one of the most essential characteristics of soil moisture system, and related research would contribute to understanding of soil moisture dynamic mechanism and simulation. Based on the daily soil moisture series observed in Dongtaigou catchment from 2004 to 2007, this paper has explored the long-range correlations of soil moisture data with detrended fluctuation analysis (DFA) and discussed the long-term memories. The results are as follows. (1) There is a significant linear trend in soil moisture series. The second-order detrended fluctuation analysis could remove the linear trend in the original series effectively and help to reveal the long-term correlation. (2) The fluctuation of soil moisture around the general trend exhibits self-similar scaling behavior and long-term correlation rather than a complete random process at time scales, which is governed by the intrinsic self-similar properties. The soil moisture dynamics in the catchment observed may fluctuate as fractional Brownian motion. (3) Crossovers are found in fractal scaling of soil moisture dynamics in the time scale of 44 or 48 days. Temporal correlations become weaker as time scale increases.

**Key words:** soil moisture; long-range correlations; detrended fluctuation analysis

(责任编辑: 吕斌秀)