

基于去趋势波动分析法的土壤含水量变化特性研究^①

高雄飞¹, 刘元会^{1*}, 郭建青², 郝立瑛³, 王媛英¹

(1 长安大学理学院, 西安 710064; 2 长安大学环境科学与工程学院, 西安 710051; 3 西安理工大学理学院, 西安 710061)

Research on Change of Soil Moisture Content Based on Detrended Fluctuation Analysis

GAO Xiong-fei¹, LIU Yuan-hui^{1*}, GUO Jian-qing², HAO Li-ying³, WANG Yuan-ying¹

(1 College of Science, Changan University, Xi'an 710064, China; 2 School of Environmental Science & Engineering, Changan University, Xi'an 710051, China; 3 College of Science, Xi'an University of Technology, Xi'an 710061, China)

摘要: 为探讨栾城站农田土壤含水量的长期演变规律和机理。运用去趋势波动分析法, 对栾城站 2002—2008 年土壤含水量时间序列进行了分析, 得到了土壤含水量长期演变规律的参数标度指数, 探讨了不同层次含水量序列的长程相关性及其内在的演变规律, 并用分形维数定量描述了土壤含水量动态变化过程的分形特征。结果表明: 不同层次序列的标度指数均大于 0.5, 即序列具有长程相关性, 含水量变化存在着趋势性成分。随着深度的增加, 标度指数逐渐增大, 揭示了含水量变化的长程相关性越来越强; 另一方面, 随着深度的增加, 分形维数逐渐减小, 表征了含水量的波动幅度越来越稳定, 这也与实际相符。

关键词: 去趋势波动分析法; 土壤含水量; 时间序列; 分形维数

中图分类号: X-158

水文时间序列分析是揭示和认识水文过程变化特性的有效手段和重要途径。目前对水文时间序列的分析方法主要包括序列相关分析法^[1]、水文频率分析法^[2]、模糊分析法^[3]、混沌理论分析法^[4]和小波分析法^[5]等。这些分析方法都是针对水文过程的某一特性进行研究, 因此无法有效地综合考虑水文过程的复杂特性, 直接影响了水文问题分析结果的精度和可靠性^[6]。而不同层次土壤含水量时间序列可能存在趋势性、季节的周期性、循环等成分, 若对时间序列本身进行较为深入的研究, 则需将这些成分分解出来或者将其过滤, 将会对时间序列的分析更为准确。去趋势波动分析法 (detrended fluctuation analysis, DFA)^[7-8]可以系统地滤去各阶的趋势成分, 检测含有噪声、且叠加有多项式趋势信号的长程相关性, 对数据长度也没有过多的要求, 对平稳和非平稳时间序列均适用。鉴

于此, 本文借助 DFA 方法, 对栾城 2002—2008 年 14 个层次的农田土壤含水量进行了分析, 通过计算定量描述土壤含水量长期演变行为的参数标度指数, 来探讨土壤序列的长程相关性, 分析其不同时间尺度下的相关特性, 并用分形维数揭示不同层次含水量变化的复杂程度。研究结果对进一步探索含水量系统波动规律及其演变趋势、构建水文资源系统的预测、模拟模型具有重要的意义。

1 材料与方法

1.1 数据来源

研究数据引用文献^[17]。该文献给出了中国科学院栾城农业生态系统试验站内试验农田 14 个不同深度层次, 2002—2008 年期间的土壤含水量的实测数据, 观测点的地理位置与观测方法可参见该文献。本

基金项目: 国家自然科学基金项目(11171043)资助。

* 通讯作者(chlyh@126.com)

作者简介: 高雄飞(1988—), 男, 陕西榆林人, 硕士研究生, 主要从事水文地质的数学方法研究。E-mail: chdgsxf@163.com

文拟以 10 cm、80 cm 和 140 cm 层次的含水量序列为数据对象,来探讨和分析不同层次含水量动态变化的特性。

1.2 去趋势波动分析方法

去趋势波动分析法(DFA)是由 Peng 等^[9]于 1994 年在研究 DNA 序列时提出的一种计算标度指数的方法。该方法在许多领域也得到了广泛的应用,如经济学^[10]、气象学^[11]及水文学^[12]等。DFA 方法能够很好地估计标度指数,刻画数据对象各自的长程相关性特性^[13]。DFA 计算原理如下^[14]：

1) 计算样本时间序列 $\{x(t)\}_{t=1,2,\dots,N}$ 的累积离差,即

$$X_i = \sum_{t=1}^i (x_t - \bar{x}) \quad (i=1,2,\dots,N) \quad (1)$$

其中 $\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N x(t)$ 。

2) 序列重构,把 $X(i)$ 等分成 N_j 个不相重叠的等时间长度 (j) 的区间,其中 $N_j = [N/j]$ 即取整数部分。

3) 对每个区间 k ,用最小二乘分别对每个区间包含的 j 个数据进行一阶线性拟合。假设每个区间均具有一个与时间 t 有关的 p 阶趋势,那么存在区间趋势方程：

$$X_{\tau}(i) = \sum_{j=0}^p \beta_j t^j \quad (2)$$

其中参数 $\beta_j (j = 0,1,2,\dots,p)$ 可以通过对该区间的数据进行最小二乘拟合得到,从而得到拟合曲线 $X_{\tau}(i)$, $X_{\tau}(i)$ 是与 X_i 对应的拟合曲线的各点值。

4) 滤去该趋势后的时间序列记为 $X_j(i)$,表示原序列与拟合值之差,即

$$X_j(i) = X(i) - p_k(i) \quad (i=1,2,\dots,N) \quad (3)$$

其中 $p_k(i)$ 为第 k 个区间的拟合多项式。

5) 计算每个区间滤去趋势后的方差：

$$F^2(k, j) = \frac{1}{j} \sum_{i=1}^j X_j^2[(k-1)j+i] \quad (k=1,2,\dots,N_j) \quad (4)$$

$$F^2(k, j) = \frac{1}{j} \sum_{i=1}^j X_j^2[N-(k-N_j)h+i] \quad (k=N_j+1,\dots,2N_j) \quad (5)$$

6) 对所有等长度区间求均值并开方,计算得到标准的 DFA 波动函数：

$$F(j) = \sqrt{\frac{1}{2N_j} \sum_{k=1}^{2N_j} F^2(k, j)} \quad (6)$$

如果 $\{x(t)\}$ 长程幂律相关,则 $F(h)$ 与 h 成幂律关系^[15],即满足式(7)

$$F(h) = ch^a \quad (7)$$

式中： c 是一个不依赖于 a 的一个常量,给上式两边取对数则有

$$\ln F(h) = a \ln h + \ln c \quad (8)$$

对双对数 $(\ln h, \ln F(h))$ 用最小二乘进行拟合,确定直线的斜率,其斜率即为标度指数 a 。分形维数可通过 $D = 2 - a$ 计算得到,分形维数可揭示不同层次土壤含水量变化幅度的复杂程度以及衡量其演变的总体趋向。其中,标度指数 a 满足 $0 < a < 1$,表征序列的相关性^[16]： $a = 0.5$ 时,说明时间序列不相关,是一个独立的随机过程； $0.5 < a < 1$ 时,说明时间序列具有长程相关性,呈现出趋势不断增强的状态,且 a 越接近于 1,相关性越强； $0 < a < 0.5$ 时,说明时间序列存在负的相关性,呈现反持久性的状态。

2 结果与分析

采用 DFA 对水文站栾城县 2002—2008 年不同土壤层次含水量时间序列按照上述计算原理进行计算。在分析过程中为了更准确地计算标度指数 a ,本文所取时间长度在 $10 < j < N/3$,取 3 个具有代表性层次的土壤含水量序列来进行分析,即取深度为 10 cm 代表土壤表层,深度为 80 cm 代表作物根系的主要发育区,深度为 140 cm 代表根系发育区的底部的含水量时间序列进行 DFA 分析。图 1 给出了 3 个层次含水量时间序列 DFA 分析结果,标度指数即为图 1 中 $\ln h$ 和 $\ln F(n)$ 拟合直线的斜率,所取的 3 个层次的线性关系均非常明显,相关系数均 $> 0.950 0$,其置信度均达到 95% 以上。

表 1 给出了 14 个层次计算所得到的标度指数 a 的值。从表 1 可以看出,10 ~ 120 cm 的标度指数 $0.5 < a < 1$,揭示了 10 ~ 120 cm 土壤含水量序列的相关性具有长程幂律关系,相邻观测值之间不是相互独立的,序列存在长程相关特性,也就是说土壤含水量在今后一段时期总体变化趋势与 2002—2008 年以来的变化趋势基本保持一致,即如果时序先前有下滑趋势,那么它将来仍将保持下滑的趋势;最后两层含水量序列的标度指数均大于 1,也就是说序列的相关性不具有幂律关系。另一方面,从表 1 可以看出,随着深度的增加标度指数基本呈现一个增加的趋势,这揭示了土壤深度越深,其土壤含水量的长程相关性就越强,产生这一现象可能是由于浅层土壤含水量受降水和蒸发的交互影响,波动剧烈,因此长程相关性较弱;

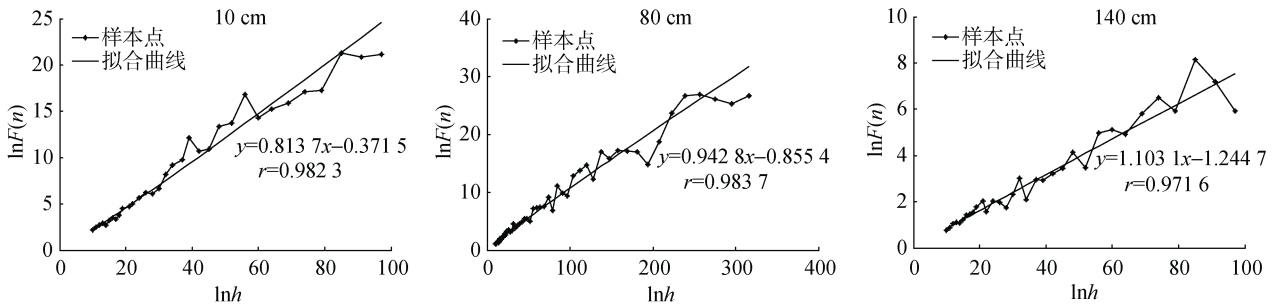


图 1 10、80 和 140 cm 含水量时间序列 DFA 分析结果

表 1 不同层次含水量时间序列的标度指数

层次(cm)	10	20	30	40	50	60	70
标度指数(α)	0.813 7	0.872 7	0.905 3	0.914 8	0.915 5	0.925 4	0.940 1
层次(cm)	80	90	100	110	120	130	140
标度指数(α)	0.942 8	0.949 4	0.985 0	0.917 9	0.970 0	1.060 5	1.103 1

对于深处土壤含水量而言,蒸发以及日照等因素的影响减弱,波动较弱,因此长程相关性较强。

分形维数 D 可定量地描述土壤含水量动态所具有的分形特征,来表征不同层次土壤含水量变化过程的复杂程度,分形维数越大说明变化过程越复杂。图 2 给出了不同层次含水量序列分形维数变化的一次和三次拟合曲线。从图 2 可以看出:随着土壤深度的增加,土壤含水量时间序列的分形维数逐渐减小,表明含水量变化的波动幅度越来越小,噪声更少,产生这一现象的原因可能是由于土壤含水量随季节和气候变化,同时降水或灌溉也会影响其波动,而表层土壤含水量变化所受的影响因素较多,使得含水量波动幅度比较大,分形维数也大。随着深度的增加土壤含水量受到的影响因素也减少,使得深层次土壤含水量变化幅度趋于稳定,而分形维数也越来越小,与实际相符。这在某种程度上反映了当地农田土壤含水量系统演变过程具有复杂的物理机制。

3 小结

1) 不同层次土壤含水量时间序列的标度指数

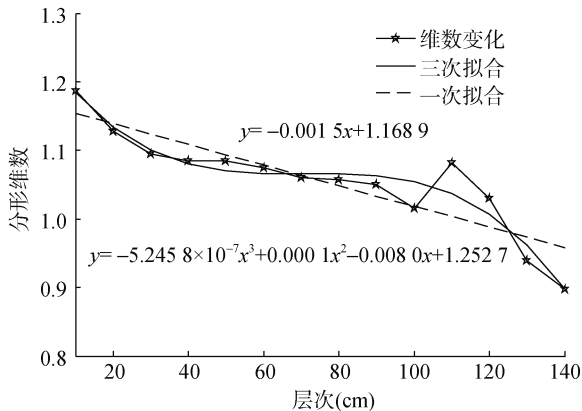


图 2 不同层次分形维数变化曲线

均 >0.5 ,其揭示了土壤含水量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;不同深度的长程相关性强弱有所差异,随着深度的增加,其长程相关性是越来越强的。

2) 随着土壤深度的增加,土壤含水量时间序列的分形维数呈现出一个下降的趋势,表征了随着土壤深度的增加土壤含水量波动幅度也越来越小,噪声更少。

参考文献:

- [1] Award H, Valdes J, Restrepo P. Streamflow forecasting for Han River basin Korea[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 1994, 120(5): 651-673
- [2] Labatt D, Josyane R, Jean LG. Recent advances in waveletanalyses: Part 2-Amazon, Parana, Orinoco and Congo discharges time scale variability[J]. Journal of Hydrology, 2005, 314(1-4): 289-311
- [3] 陈守煜. 模糊水文学[J]. 大连理工大学学报, 1988, 28(1): 93-97
- [4] 冯国章, 李佩成. 论水文系统混沌特征的研究方向[J]. 西北农业大学学报, 1997, 25(4): 97-101
- [5] 桑燕芳, 王栋, 吴吉春, 朱庆平. 水文时间序列小波互相关分析方法[J]. 水利学报, 2010, 41(11): 1 172-1 179
- [6] 桑燕芳, 王中根, 刘昌明. 水文时间序列分析方法研究进展[J]. 地理科学进展, 2013, 32(1): 20-30
- [7] Lee JM, Kin DJ, Kim IY, Eva KB. Detrended fluctuation analysis of EEG in sleep apnea using MIT/BIH Polson grapy data[J]. Computers in Biology and Medicine, 2002, 32: 37-47
- [8] Weron R. Esituating long-range dependence: Finite sample properties and confidence intervals[J]. J. Physical., 2002, 3(2): 285-299
- [9] Peng CK, Buldyrev SV, Havlin S, Marches M. Mosaic organization of DNA nucleotides[J]. Physical Review, 1994, 49(2): 1 685-1 689

- [10] 都国雄, 宁宣熙, 胡永生. 基于 DFA 的我国股票市场标度特性研究[J]. 南京师大学报, 2007, 30(3): 48-53
- [11] 江田汉. 我国近百年气温的非趋势波动分析[J]. 气象科学, 2004, 24(2): 199-206
- [12] Li ZW, Zhang YK. Quantifying fractal dynamics of ground-water systems with detrended fluctuation analysis[J]. Journal of Hydrology, 2007, 336(1-2): 139-146
- [13] Matsoukis C, Islam S, Rodriguez-Iturbe I. Detrended fluctuation analysis of rainfall and stream flow time series[J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 2000, 105 (D23): 29 165-29 172
- [14] 燕爱玲. 河川径流时间序列的分形特征研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2007
- [15] 何书元. 应用时间序列分析[M]. 北京: 北京大学出版社, 2003: 40-41
- [16] 张鑫, 蔡焕杰, 尹晓楠. 基于 DFA 的无定河径流长期变化趋势及持续性研究[J]. 生态环境学报, 2010, 19(1): 208-211
- [17] 孙鸿烈, 胡春胜. 农田生态系统卷河北栾城站(1988-2008)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2011: 120-128