

# 合肥市降水变化趋势分形特征分析与预测

朱良燕<sup>1</sup>, 毛军军<sup>1,2</sup>, 苗强<sup>1</sup>, 吴涛<sup>1,2,3</sup>

(1. 安徽大学 数学科学学院, 安徽 合肥 230039;

2. 安徽大学 智能计算与信号处理教育部重点实验室, 安徽 合肥 230039;

3. 南京大学 计算机软件新技术国家重点实验室, 江苏 南京 210093)

**摘要:**研究降水量变化规律对分析水循环、社会生产、防灾救灾都具有重要意义。为分析合肥地区自建国以来降水量变化规律的特点,在应用小波变换的分解和重构消除了合肥市1953~2007年降水量时间序列噪声基础上,将R/S法和非参数统计检验法(Mann-Kendall)相结合,研究该地区降水量变化的突变点、变化趋势、非周期循环长度等趋势特征,从多角度、多层次揭示该地区降水量的演化规律,并预测未来合肥降水量变化趋势。结果显示:(1)合肥市降水系统在1970~1980年发生突变;(2)春、秋两季降水量有下降趋势,夏、冬两季降水量有明显的上升趋势,预测未来合肥降水变化维持这一发展趋势。

**关键词:**小波变换;R/S法;Mann-Kendall法;预测;降水量

**中图分类号:**TP391

**文献标识码:**A

**文章编号:**1673-629X(2009)09-0017-04

## Analysis of Precipitation Changes Trend Fractal Features and Forecasts in Hefei

ZHU Liang-yan<sup>1</sup>, MAO Jun-jun<sup>1,2</sup>, MIAO Qiang<sup>1</sup>, WU Tao<sup>1,2,3</sup>

(1. Department of Mathematical Sciences, Anhui University, Hefei 230039, China;

2. Ministry of Edu. Key Lab. of Intelligent Computing & Signal Processing, Anhui Univ., Hefei 230039, China;

3. State Key Laboratory for Novel Software Technology, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

**Abstract:** It has very important value to analyse water-cycling, social-production, disaster preventing for research the change of precipitation. In order to analyse the character of change of the precipitation in Hefei from 1953 to 2007, in this paper, R/S analyses and Mann-Kendall method were combined based on wavelet denoising. The point of abrupt, change trend characteristics, the length of non-periodic cycles were analysed. To find out the change of precipitation from different angles and forecaste, it points out that, (1) The abrupt change happened during 1970-1980. (2) Spring and Autumn precipitation upward trend, but the precipitation in summer and winter may go down. And the trend of precipitation in Hefei will keep on in the future.

**Key words:** wavelet transform; R/S analyses; Mann-Kendall method; forecast; precipitation

## 0 前言

降水量是表征水循环的重要气象要素之一,研究降水量的演变规律,对分析气候变化情景下的水循环具有非常重要的意义。在大气温室效应加剧、气候变暖趋势明显的大背景下,自然降水变化的趋势和特点,

是人们普遍关心的话题。近年来,R/S法、Mann-Kendall法(下称M-K方法)以及小波变换理论已被广泛应用于城市气候趋势研究<sup>[1-3]</sup>。R/S法指出,如果过去存在某种变化特征,那么将来会对过去存在一定的周期记忆性,在一定的周期里将来和过去会有相同或相反的变化特征;M-K法是一种被广泛用于分析趋势变化特征的检验方法,它不仅可以检验时间序列趋势上升与下降,而且还可以说明趋势变化的程度,能很好地描述时间序列的趋势特征;小波变换通过从大到小尺度的变换,将研究对象分解到不同尺度的空间进行分析和处理,然后再根据需要进行相应的重构,小波重构能有效地消除数据中的噪声<sup>[4]</sup>,得到更符合实际的数据。

收稿日期:2008-12-24;修回日期:2009-03-14

基金项目:国家自然科学基金(60475017,60675031);安徽省高校省级自然科学基金(2008B093);中国博士后科学基金;安徽大学人才队伍建设经费和安徽大学创新项目

作者简介:朱良燕(1986-),女,安徽芜湖人,硕士研究生,研究方向为人工智能;毛军军,副教授,博士,研究方向为人工智能、信息优化。

以上方法均从某一侧面揭示序列的演化规律,但不能揭示时间序列未来发展趋势。能否综合利用以上方法多角度的揭示时间序列的演化规律及预测未来趋势特征<sup>[5~7]</sup>? 文中针对 50 多年的合肥市降水量时间序列,在小波变换去噪基础上,将 R/S 法和 M-K 法相结合,研究合肥市降水系统的演化规律,如突变点、趋势特征、非周期循环长度以及预测未来发展趋势。

## 1 数据来源及分析方法

### 1.1 数据来源

文中选取安徽地区的合肥气象站自 1953 年至 2007 年气象资料,使用数据来源于中国气象资料共享网。气象要素为降水量,季节划分为春季(3~5 月)、夏季(6~8 月)、秋季(9~11 月)、冬季(12~次年 2 月)。

### 1.2 分析方法

#### (1) R/S 分析法<sup>[8]</sup>。

R/S(Rescaled Range Analysis)分析法,又被称为重标极差法。R/S 分析法的计算结果如下:

假设  $P$  为长度为  $N$  的时间序列。将这  $N$  个数据划分为  $m$  个子区间,每个子区间的长度为  $n$ 。每个子区间记为  $I_a$ ,其中  $a = 1, 2, \dots, m$ ,  $I_a$  中的元素记为  $N_k$ ,其中  $k = 1, 2, \dots, n$ 。子区间  $I_a$  的平均值:

$$M_a = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n N_{k,a} \quad (1)$$

$$\text{累计离差: } X_{k,a} = \sum_{i=1}^k (N_{i,a} - M_a), k = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

$$\text{极差: } RI_a = \max(X_{k,a}) - \min(X_{k,a}), 1 \leq k \leq n \quad (3)$$

$$\text{标准差: } SI_a = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (N_{k,a} - M_a)^2} \quad (4)$$

$$\text{重标极差: } FI_a = RI_a / SI_a$$

$$\text{平均重标极差: } F_n = \frac{1}{m} \sum_{a=1}^m \left( \frac{RI_a}{SI_a} \right) \quad (5)$$

通过增加  $n$  的数值,  $m$  的值减少,直到  $n = (m - 1)/2$ 。当然,  $n$  要能整除  $(m - 1)$ 。

$$\text{Hurst 指数 } H \text{ 有关系式: } F_n = c * n^H \quad (6)$$

对上式两端取对数可得:

$$\log(F_n) = \log(c) + H * \log(n) \quad (7)$$

通过对(7)式用最小二乘法拟合求得  $H$  估算值。

$H$  指数的取值一般在 0 到 1 之间。 $H$  的大小可以揭示许多重要的非线性动力学特性和演化规律。

笔者在上述  $H$  指数算法的基础上,加入了最大非周期循环长度的寻找,在算出  $H$  指数的同时也算出了非循环周期的长度。具体算法如下:

设算出的平均重标极差  $F_n$  有  $q$  个,记为:

$$F_n(1), F_n(2), \dots, F_n(q), \text{ 令}$$

$$X(j) = |F_n(j+1) - F_n(j)|, j = 1, 2, \dots, q-1 \quad (8)$$

因此可以得到  $X(j)$  的最大值  $\max_{1 \leq j \leq q-1} X(j)$ , 记为  $X(r)$ , 其中的  $r$  即为非周期循环的长度,也就是说系统平均经过  $r$  天后失去对初始条件的记忆。

#### (2) M-K 法<sup>[3,8]</sup>。

M-K 法是目前被广泛应用的趋势分析方法, M-K 法能很好地揭示时间序列的趋势变化,其优点在于不需要样本遵从一定的分布,也不受少数异常值的干扰。具体检验原理如下:

设时间序列为  $\{x_i\} (i = 1, 2, \dots, n)$ , 时间序列  $\{x_i\}$  的对偶数  $(x_i < x_j, i < j, i = 1, 2, \dots, n, j = i + 1, \dots, n) S$ ,

$$S = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i), \text{ 其中 } \text{sgn}() \text{ 为符号函数;}$$

$$\text{M-K 统计量 } U: U = \frac{\tau}{\sqrt{\text{Var}(\tau)}}, \text{ 其中}$$

$$\tau = \frac{4S}{n(n-1)-1}, \text{Var}(\tau) = \frac{2(2n+5)}{9n(n-1)}。$$

M-K 统计量  $U$  的取值范围为  $-\infty$  到  $+\infty$ 。 $U > 0$  时,表示时间序列  $\{x_i\}$  为上升趋势; $U < 0$  时,表示时间序列  $\{x_i\}$  为下降趋势; $|U| > U_{0.05/2} = 1.96$ ,表示序列趋势变化显著。

当用 M-K 法检验突变时,其具体原理如下:

设时间序列为  $\{x_i\} (i = 1, 2, \dots, n)$ , 构造一新序列

$$d_k = \sum_{i=1}^k m_i \quad (2 \leq k \leq n)$$

其中  $m_i$  为  $x_i > x_j (1 \leq j \leq i)$  的样本累积数。

$d_k$  的均值以及方差定义如下:

$$\text{均值: } E(d_k) = \frac{k(k-1)}{4} \quad (2 \leq k \leq n)$$

$$\text{方差: } \text{Var}(d_k) = \frac{k(k-1)(2k+5)}{72} \quad (2 \leq k \leq n)$$

在时间序列随机独立假设下,定义统计量:

$$UF_k = \begin{cases} 0 & k = 0 \\ \frac{d_k - E(d_k)}{\sqrt{\text{Var}(d_k)}} & 2 \leq k \leq n \end{cases}$$

给定显著性水平  $\alpha$ ,查正态分布表得到临界值  $t$ ,当  $|UF_k| > t$  时,表明时间序列存在明显的上升或下降趋势,所有  $UF_k$  将组成一条曲线  $UF$ ,把同样的方法引用到反序列中,得到另一条曲线  $UB$ 。将统计量曲线  $UF$ 、 $UB$  以及  $\pm t$  两条直线绘在统一坐标系上,如果  $UF > 0$ ,表示时间序列呈上升趋势, $UF < 0$ ,表示时

间序列呈下降趋势,当它们超过临界值直线时,表明上升或下降趋势显著。如果  $UF$  和  $UB$  两条曲线出现交点,则交点为突变点。

(3) 突变点寻找法。

设时间序列为  $\{x_i\}, i = 1, 2, \dots, n$ , 将时间序列  $\{x_i\}$  分成两个部分,分别为  $\{x_{1j}\}$  和  $\{x_{2j}\}$ , 分割点为:  $\xi_j(j = 10, 11, \dots, n - 10)$ 。

第一步:利用 R/S 分析法求出分割点前后的时间序列  $\{x_{1j}\}$  和  $\{x_{2j}\}$  的  $hurst$  指数  $H_{1j}$  和  $H_{2j}$

记  $\Delta H_j = |H_{1j} - H_{2j}|$

令  $\Delta H_{j_0} = \max |H_{1j} - H_{2j}|$ ;

$j_0$  点即为时间序列  $\{x_i\}$  的突变点。

第二步:利用 R/S 法和 Mann-Kendall 法计算时间序列的  $hurst$  指数和趋势特征统计量  $U$ 。

文中通过分析比较突变点前后的  $hurst$  指数和趋势特征统计量  $U$ , 预测未来的时间序列变化趋势。

2 实例分析

2.1 降水量的时序变化趋势

图 1 为合肥市 1952 年~2007 年春、夏、秋、冬降水量时序变化趋势图。

从图中可以看出:

(1)春、秋两季降水量有下降趋势,以春季下降趋势显著;下降幅度约为-8mm。

(2)夏、冬两季降水量有明显的上升趋势,上升幅度约为 4~5mm,合肥市降水集中于夏季,特别是近几年

年发生了不同程度的洪涝灾害,而冬季降水量较少。

2.2 突变点与未来趋势分析

1)利用 R/S 法、M-K 法和突变点寻找法分析合肥市 1953~2007 年降水量时间序列(1~12 月、春夏秋冬)的突变点、趋势特征统计量  $U$ 、 $hurst$  指数、周期以及根据各项特征统计结果给出的预测。试验结果见表 1。

表 1 突变点前后的趋势特征统计表

	突变年份	$\Delta H$	$U$ 统计量	$H$ 指数	周期	预测
1 月	1987 年	0.1219	2.7886	0.6635	22	明显上升
2 月	1974 年	0.1228	0.4648	0.667	25	稍微上升
3 月	1987 年	0.0987	-0.029	0.672	19	稍微下降
4 月	1973 年	0.0903	-1.6557	0.6835	12	下降
5 月	1977 年	0.072	-1.496	0.6689	21	下降
6 月	1981 年	0.1011	2.2803	0.6607	15	明显上升
7 月	1983 年	0.0889	-1.191	0.669	18	下降
8 月	1988 年	0.0594	1.2491	0.6586	9	上升
9 月	1982 年	0.0615	-1.8445	0.6476	26	下降
10 月	1978 年	0.0898	0.1888	0.6637	16	稍微上升
11 月	1985 年	0.1214	1.191	0.6682	19	上升
12 月	1974 年	0.0816	0.8714	0.6744	22	上升
春	1973 年	0.042	-2.0769	0.6737	19	明显下降
夏	1985 年	0.1247	0.6536	0.6357	14	上升
秋	1988 年	0.1196	0.1888	0.6692	19	稍微上升
冬	1975 年	0.0566	2.8177	0.6679	15	明显上升
年	1988 年	0.1418	-0.0726	0.651	12	稍微下降

从表 1 中可以看出:

(1)突变年份均在 20 世纪七、八十年代,说明在这

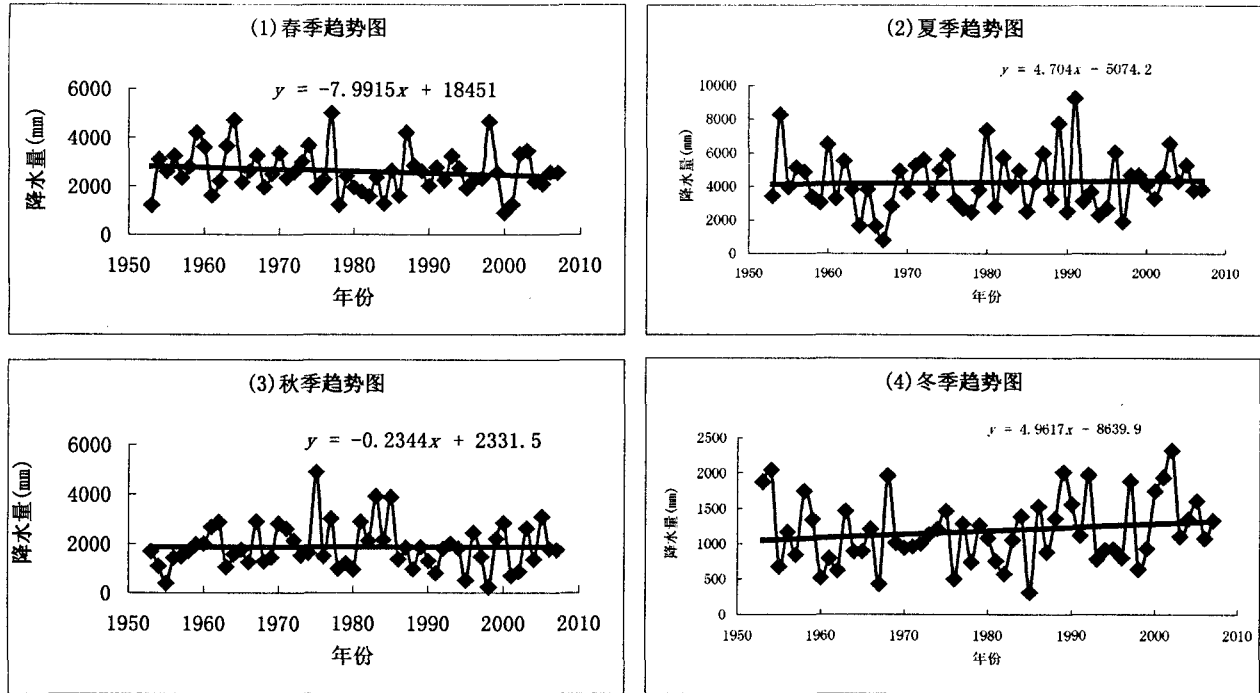


图 1 合肥市 1953 年~2007 年四季降水量时序变化趋势图

一段时间内,合肥市降水系统发生了突变。

(2)从总体来看,hurst 指数都接近 0.7,大于 0.5,具有持续性,即过去的上升或下降趋势在未来仍然持续;周期均在 15~25 年,说明未来一二十年合肥市降水系统仍维持过去的趋势。

(3)3~5 月:  $U$  统计量均小于 0,呈下降趋势,春季的  $U$  统计量为 -2.0769,呈明显下降趋势,说明未来春季降水量会有明显的下降趋势。

(4)6~8 月:  $U$  统计量基本大于 0,呈上升趋势,其中 6 月有明显上升趋势,夏季  $U$  统计量为 0.6536,呈稍微上升趋势,说明未来夏季降水量会有上升。

(5)9~11 月: 9 月  $U$  统计量小于 0,呈较明显的下降趋势,而 10~11 月  $U$  统计量大于 0,呈稍微下降趋势,上升和下降会相互制约,因此未来秋季降水不会有明显的变化。

(6)12~2 月:  $U$  统计量均大于 0,呈上升趋势,其中 1 月有明显的上升趋势,冬季的  $U$  统计量为 2.8177,呈明显的上升趋势,说明未来冬季降水量会有明显的上升趋势。

2)利用 M-K 法检验年降水量,试验结果如图 2 所示。

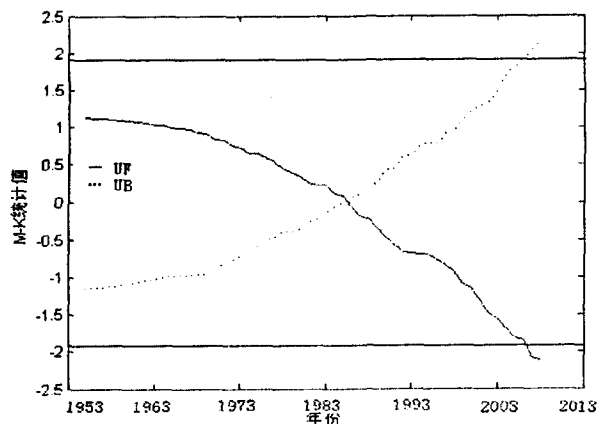


图 2 1953~2007 年合肥市年降水量突变判别曲线(M-K 法)

从图 2 中可以看出:

合肥市自 1953~2007 年合肥市年降水量有呈现下降趋势,同时,  $M-K$  统计量在显著性水平 0.025 的临界线之间,表明合肥市年降水量没有呈现某一明显的变化趋势;突变点在 1986 年附近,这与前面得到的“突变年份均在 20 世纪七、八十年代”结论一致。

### 3 结束语

文中在小波变换去噪的基础上,将 R/S 法和 M-K 法相结合,针对 50 多年的合肥市的降水量时间序列,从突变点、趋势特征、非周期循环长度以及预测未来发展趋势等方面,研究了合肥市降水系统的演化规律和未来发展那趋势。

#### 参考文献:

- [1] 秦年秀,姜 彤,许崇育.长江流域径流趋势变化及突变分析[J].长江流域资源与环境,2005,14(5):589-594.
- [2] 王小霞,徐宗学,阮本清.天津市降水量变化趋势的时空分布特征[J].干旱区资源与环境,2008,22(9):92-97.
- [3] 龚 宇,邢开成,王 璞.沧州地区近 40 年来气温和降水量的变化趋势分析[J].中国农业气象,2008,29(2):143-145.
- [4] 李水根,吴纪桃,分形与小波[M].北京:科学出版社,2000.
- [5] Kendall M G. Rank correlation methods[M]. New York: Oxford Univ. Press,1975.
- [6] Mandelbrot B B, Wallis J R. Some long run properties of geophysical records[J]. Water Resource Research, 1969, 5(2): 321-340.
- [7] Ichiyangl K, Yamanaka M D, Muraji Y, et al. Precipitation in N. Cpell between 1987 and 1996[J]. International Journal of Climatology, 2007, 15(2): 245-256.
- [8] 于延胜,陈兴伟. R/S 法与 Mann-Kendall 法综合分析水文时间序列未来的趋势特征[J]. 水资源与水工程学报, 2008, 19(3): 41-44.

(上接第 16 页)

<http://www.etsi.org>.

- [7] Waldrop J, Engels D W, Sanna S E. Colorwave: An anticollision algorithm for the reader collision problem[C]//IEEE WCNC 2003. New Orleans, Louisiana, USA: [s. n.], 2003.
- [8] Birari S. Mitigating the Reader Collision Problem in RFID Networks in Mobile Readers[D]. Bombay: Indian Institute of Technology, 2005.
- [9] Hwang K, Kim K, Eom D. DiCa: Distributed Tag Access with Collision-Avoidance Among Mobile RFID Readers[C]//Zhou X. EUC Workshops 2006. Seoul, Korea: [s. n.], 2006: 413-422.
- [10] Ho J, Engels D W, Sarma S E. HiQ: A Hierarchical Q-Learning Algorithm to Solve the Reader Collision Problem[M]. Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society, 2006.
- [11] Lin C F, Lin Y S F. A Simulated Annealing Algorithm for RFID Reader Networks[C]//Wireless Communications and Networking Conference, 2007. (WCNC 2007). Hong Kong, China: [s. n.], 2007.