

DOI :10.3969/j.issn.1004-6933.2010.05.007

额尔齐斯河流域年降水量时间序列分析

李海娟^{1,2},夏自强^{1,2},章 洁²,张 楠²

(1.河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏 南京 210098;2.河海大学水文水资源学院,江苏 南京 210098)

摘要 :分别采用 Morlet 小波分析法、R/S 分析法对额尔齐斯河流域塞米巴拉金斯克、托博尔斯克两站的年降水量资料进行分析。Morlet 小波分析结果表明 :两站的年降水量变化表现出多个时间尺度的相对丰枯交替特征,并且两站均存在显著的 16 a 左右的主周期。R/S 分析结果表明 :两站年降水量存在明显的赫斯特现象,即降水量变化存在着持续性,未来年份降水量可能呈现增多趋势。
关键词 :小波变换 ;R/S 分析法 ;时间序列 ;年降水量 ;额尔齐斯河
中图分类号 :P333.1 **文献标识码** :A **文章编号** :1004-6933(2010)05-0029-04

Analysis of time series of annual precipitation in Irtysh River Basin

LI Hai-juan^{1,2},XIA Zi-qiang^{1,2},ZHANG Jie²,ZHANG Nan²

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract :The series of annual precipitation was analyzed using the Morlet wavelet method and the R/S analysis method at the Semipalatinsk and Tobolsk Station in the Irtysh River Basin. The results of the Morlet wavelet method revealed that the annual precipitations at two representative stations showed the complicated structure of multiple-scale time alternative characteristics of high flow and low flow, and there existed obvious periodic variations with scales of 16 years for annual precipitation. The results of the R/S analysis method showed that there existed the obvious Hurst phenomenon of annual precipitation and the trend of future annual precipitation was increasing.

Key words :wavelet transform ;R/S analysis ;time series ;annual precipitation ;Irtysh River

额尔齐斯河(以下简称额河)是我国唯一一条自东向西流入北冰洋的跨界河流^[1],河流发源于中国境内新疆维吾尔自治区富蕴县北部海拔 3 500 m 的齐格尔台达坂,自东向西流经中国、哈萨克斯坦、俄罗斯。在俄罗斯境内汉特—曼西斯克附近汇入鄂毕河,为鄂毕河的最大支流。河流全长 4 248 km,流域面积 164 万 km²^[2];在中国境内河长 633 km,流域面积 5.37 万 km²。塞米巴拉金斯克站(50.4°N,80.2°E)位于额河流域的上游,托博尔斯克站(58.2°N,68.2°E)位于额河流域下游,笔者选取塞米巴拉金斯克站和托博尔斯克站 1925—2001 年共 77 a 的年降水量资料进行分析。

1 小波分析

1.1 国内外研究进展

小波分析是一种信号的时间尺度分析方法,由于其具有数学意义上严格的突变点诊断能力以及趋势性分析,所以在水文水资源学中得到了广泛应用。1993 年,Kumar 等^[3]在小波分析基础上,运用正交小波变换研究了空间降水的尺度和振荡特征。在国内,小波分析在水文系统多时间尺度分析中也得到了广泛应用。1997 年,邓自旺等^[4]根据 Morlet 小波变换系数的模、位相和实部对月降水量多时间尺度结构进行了分析。1999 年,李贤彬等^[5]基于 mallat 算法给出了水文过程变化特征的信息量系数。2006

基金项目 国家自然科学基金(30490235)
作者简介 李海娟(1982—),女,河北唐山人,硕士研究生,研究方向为水文水资源及生态水文。E-mail :lhj82@yahoo.cn

年,万明波等^[6]利用 Morlet 小波对青藏铁路沿线地区 7 个代表站 30 a 的月平均气温和月平均降水量资料进行了处理和分析。2008 年,郭文献等^[7]采用复 Morlet 小波函数对长江中游宜昌水文站近 50 a 河流水温资料进行分析,并依据主周期对未来水温变化进行预测。

1.2 小波分析原理

小波分析法^[8]是一种调和分析方法。是 Fourier 分析发展史上的一个里程碑式的进展,被人们誉为“数学的显微镜”。

小波函数指的是具有振荡特性、能够迅速衰减到零的一类函数,即 $\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0$ 。目前有很多小波函数可选用,例如 Haar 小波、Mexican hat 小波、Morlet 小波、Meyer 小波、Wave 小波等。

Morlet 小波作为复数小波,它的实部和虚部位相相差 $\pi/2$,消除了实数形式小波在变换过程中系数模的振荡,并且从 Morlet 小波系数中可以分离出模和位相,鉴于其在应用中比实数形式的小波有更多的优点,本文采用 Morlet 小波。

Morlet 小波定义为:

$$\psi(t) = e^{iet} e^{-t^2/2} \quad (1)$$

对于时间序列 $f(t) \in L^2(R)$,其连续小波变换定义为:

$$W_f(a, b) = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \quad (2)$$

式中: $W_f(a, b)$ 称小波(变换)系数; a 为缩放因子(对应于频率信息),反映小波的周期长度; b 为时间平移因子(对应于时空信息),反映时间上的平移。

当 a 相同时,小波变换系数随时间变化过程反映系数在该尺度下的变化特征:小波变换系数正值对应于偏多期,小波变换系数负值对应于偏少期,小波变换系数为零对应着突变点;小波变换系数绝对值越大,说明该时间尺度变化越显著。

将时间域上关于 a 的所有小波变换系数的平方进行积分,即为小波方差:

$$\text{var}(a) = \int_{-\infty}^{+\infty} |W_f(a, b)|^2 db \quad (3)$$

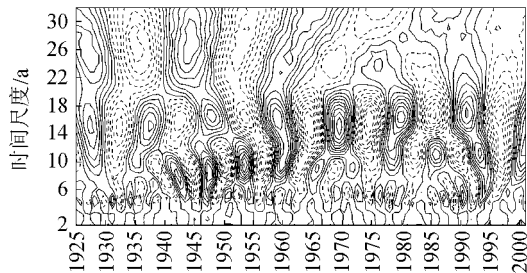
在尺度 a 下, $\text{var}(a)$ 表示时间序列中该尺度周期波动的强弱。小波方差随尺度 a 的变化过程称为小波方差图。它反映了水文时间序列中所包含的各种尺度(即周期)波动以及其能量随尺度变化的分布特性。通过小波方差图,可以确定一个水文序列中存在的主要时间尺度,即主周期。

1.3 年降水量时间序列小波分析结果

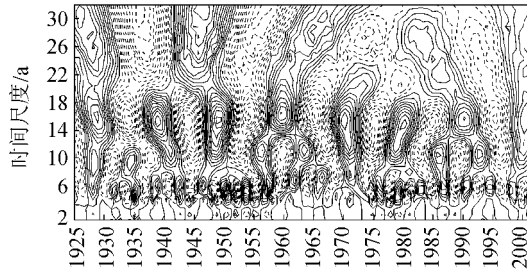
选取塞米巴拉金斯克站和托博尔斯克站共 77 a

的年降水量资料,应用距平法将资料中第 1 年的自然周期滤去,得到年降水量的距平序列,然后采用 Morlet 小波方法分析年降水量变化的多时间尺度结构。

图 1 绘制了年降水量距平序列 Morlet 小波变换实部的时频变化。图 1 清晰地显示了年降水量时间尺度变化及其位相结构,实线表示降水量偏多,虚线表示降水量偏少。塞米巴拉金斯克站 14~18 a 尺度表现非常突出,其中心时间尺度为 16 a 左右,正负位相交替出现,降水经历了 15 个丰枯循环交替; 9~11 a 时间尺度比较明显,其尺度中心在 10 a 左右,降水经历了 24 个丰枯循环交替; 4~6 a 周期变化十分频繁,共经历了 44 个丰枯循环交替。托博尔斯克站 13~19 a 尺度表现非常突出,其中心时间尺度为 16 a 左右,正负位相交替出现,降水经历了 16 个丰枯循环交替; 5~7 a 周期变化十分频繁,其尺度中心在 6 a 左右,共经历了 40 个丰枯循环交替。



(a) 塞米巴拉金斯克站



(b) 托博尔斯克站

图 1 年降水量距平序列小波变换的实部的时频变化

图 2 给出了两站 16 a 时间尺度的小波系数实部变化过程,从图 2 可以清楚地看出年降水量的丰枯变化和突变点。塞米巴拉金斯克站在 1929 年以前、1935—1940 年、1946—1950 年、1957—1961 年、1967—1972 年、1978—1982 年、1989—1993 年、2000—2001 年各时段为正相位,表示降水量偏多,直到 2001 年等值线仍未闭合,说明 2001 年以后一段时间内降水量仍偏多;而 1930—1934 年、1941—1945 年、1951—1956 年、1962—1966 年、1973—1977 年、1983—1988 年及 1994—1999 年各时段为负相位,表示降水量偏少。托博尔斯克站在 1925 年以前、1932—1936 年、1942—1946 年、1952—1957 年、

1963—1967 年、1973—1977 年、1983—1987 年、1993—1997 年各时段为负相位,表示降水量偏少;而 1926—1931 年、1937—1941 年、1947—1951 年、1958—1962 年、1968—1972 年、1978—1982 年、1988—1992 年、1998—2001 年各时段为正相位,表示降水量偏多,直到 2001 年等值线仍未闭合,说明 2001 年以后一段时间内降水量仍将处于偏多期。

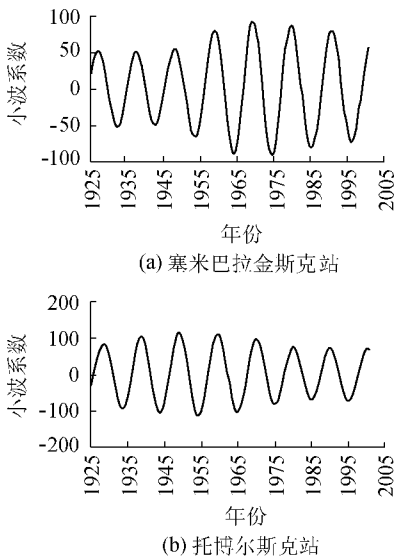


图 2 年降水量距平序列 16 a 时间尺度 Morlet 小波变换实部变化过程

图 3 为年降水量距平序列 Morlet 小波方差图,由图 3 可见 塞米巴拉金斯克站小波方差图出现了 3 个峰值,分别对应 5 a、10 a、16 a 的时间尺度,第一峰值对应着 16 a 时间尺度,说明其存在 16 a 左右的第 1 主周期。托博尔斯克站第一峰值对应着 16 a 时间尺度,说明其存在 16 a 时间尺度的第 1 主周期。

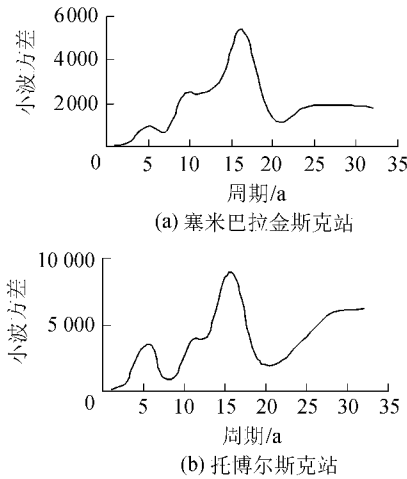


图 3 年降水量距平序列 Morlet 小波方差图

2 R/S 分析

2.1 R/S 分析原理

R/S 分析法的基本原理为^[9]:设在时刻 $t_1, t_2,$

$\dots, t_n$ 处取得的相应时间序列为 $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$,对于任意正整数 $\tau \geq 1$,该时间序列的平均为:

$$\langle \xi \rangle_\tau = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} \xi(t) \quad \tau = 1, 2, 3, 4, \dots, n \quad (4)$$

用 $X(t, \tau)$ 表示累积偏差为:

$$X(t, \tau) = \sum_{u=1}^t (\xi(u) - \langle \xi \rangle_\tau) \quad 1 \leq t \leq \tau \quad (5)$$

把同一个 τ 值所对应的最大 $X(t)$ 值和最小 $X(t)$ 值之差称为极差,并记为 R :

$$R(\tau) = \max_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) - \min_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) \quad \tau = 1, 2, 3, \dots, n \quad (6)$$

Hurst 利用的标准偏差为:

$$S(\tau) = \left[\frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} (X(t, \tau) - \langle \xi \rangle_\tau)^2 \right]^{1/2} \quad \tau = 1, 2, 3, \dots, n \quad (7)$$

Mandelbrot et al 证实了 Hurst 的研究,并得出了更广泛的指数律,即:

$$R/S = (\tau/2)^H \quad (8)$$

式中 H 为赫斯特系数。

上述分析方法被称为 R/S 分析法。

对应于不同的赫斯特系数 $H(0 < H < 1)$,存在以下几种情况:①当 $H = 0.5$ 时,即各项指标完全独立,相互没有依赖,丰枯水年的出现是随机性的。②当 $H > 0.5$ 时,意味着未来的趋势与过去一致,即过程具有持续性或长程相关性。 H 值越接近 1,持续性就越强。反映在降水指标上,则表明未来的降水整体变化将与过去的变化趋势一致,如过去年降水量增多的趋势预示将来的整体趋势还是继续增多,反之亦然。③当 $H < 0.5$ 时,意味着未来的总体趋势将与过去相反,即过程具有反持续性。 H 值越接近 0,反持续性就越强。在这种情况下,过去的增加趋势预示着未来的减少趋势,而过去的减少趋势则使未来可能出现增加趋势。

2.2 R/S 分析结果

图 4 给出了塞米巴拉金斯克和托博尔斯克两 1925—2001 年降水量变化曲线,从图 4 可见:塞米巴拉金斯克站 77 a 的降水量是逐渐增加的,趋势线的斜率为 0.401 7,历史降水量增加较为明显;托博尔斯克站 77 a 的降水量同样呈上升趋势,其趋势线的斜率为 0.349 5,但是增幅较塞米巴拉金斯克站小。

塞米巴拉金斯克和托博尔斯克两个代表站的 R/S 分析过程见表 1。

由图 5 中可见,两站的 H 值均大于 0.5,表明年降水均存在赫斯特现象,且具有状态持续性。图 4 已经分析了两站的历史降水量变化趋势,均表现

表 1 代表站年降水序列 R/S 分析过程

年份	τ	$R(\tau)$		$S(\tau)$		$R(\tau)/S(\tau)$	
		塞米巴拉金斯克站	托博尔斯克站	塞米巴拉金斯克站	托博尔斯克站	塞米巴拉金斯克站	托博尔斯克站
1925	1	0	0	0	0	0	0
1926	2	3.7	32.7	3.7	32.7	1	1
1927	3	4.6	80.1	3.3	62.6	1.41	1.3
...	...	...	...	...	...	...	...
2000	76	1046.8	1031.7	65.7	94.2	15.9	11.0
2001	77	1083.8	1082.5	66.4	96.8	16.3	11.2

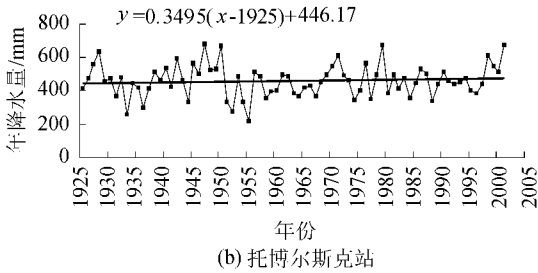
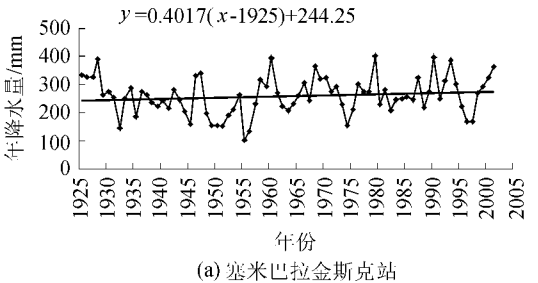


图 4 1925—2001 年降水量变化曲线

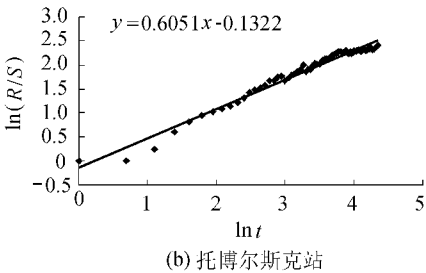
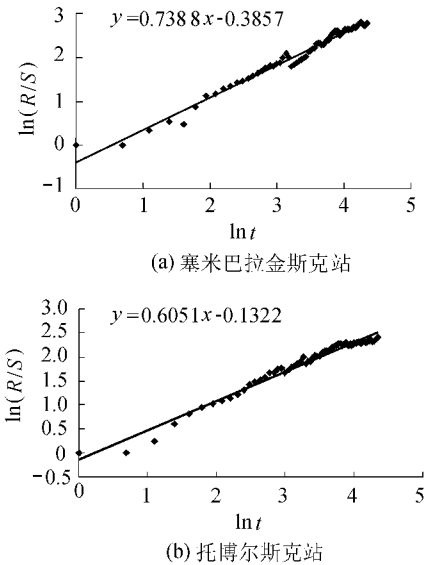


图 5 代表站降水量序列 R/S 分析结果

为上升趋势,也就是说塞米巴拉金斯克站和托博尔斯克站年降水量将延续过去的趋势,即未来年份降水量可能继续上升,其中塞米巴拉金斯克站的 H 值较大(0.7388),预示其未来年份降水量增长趋势有可能比托博尔斯克站更为明显。

3 结 论

- a. 塞米巴拉金斯克和托博尔斯克两站共 77 a 历史降水量均呈上升趋势,但是塞米巴拉金斯克站降水量上升趋势较托博尔斯克站明显。
- b. 两站年降水变化均表现出多个时间尺度的相对丰枯交替特征,存在显著的 16 a 左右的第一主周期。
- c. 两站的赫斯特指数均大于 0.5,表明年降水均存在赫斯特现象,即未来年降水量可能呈现上升趋势。

参考文献：

[1] 汤齐成,李丽娟.西北地区主要国际河流水资源特征与可持续发展[J].地理学报,1999,54(6):21-28.

[2] 李捷,夏自强,郭利丹,等.额尔齐斯河流域气候特征及变化趋势分析[J].河海大学学报:自然科学版,2008,36(3):311-315.

[3] KUMAR P,FOUFOULA-GEORGIU E. A multicomponent decomposition of spatial rainfall fields:1. segregation of large- and small-scale features using wavelet transforms[J]. Water Resources Research,1993,29(8):2515-2532.

[4] 邓自旺,林振山,周晓兰.西安市近 50 年来气候变化多时间尺度分析[J].高原气象,1997,16(1):81-93.

[5] 李贤彬,丁晶,李后强,等.子波分析及其在水文水资源中的潜在应用[J].四川联合大学学报:工程科学版,1997,1(4):49-52.

[6] 万明波,程智,王文.青藏铁路沿线气温和降水的小波分析[J].干旱气象,2006,24(4):35-39.

[7] 郭文献,夏自强,王鸿翔,等.近 50 年来长江宜昌站水温变化的多尺度分析[J].水利学报,2008,39(11):1197-1203.

[8] 崔锦泰.小波分析导论[M].西安:西安交通大学出版社,1995.

[9] 王孝礼,胡宝清,夏军.水文时序趋势与变异点的 R/S 分析[J].武汉大学学报:工学版,2002,35(2):10-12.

(收稿日期 2009-09-01 编辑 徐 娟)