

阿克苏河年径流变化的非线性特征

禹朴家^{1,2}, 徐海量^{1*}, 刘世薇^{1,2}, 安红燕^{1,2}, 张青青^{1,2}, 龚君君³

(1. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049;

3. 新疆师范大学地理科学与旅游学院, 乌鲁木齐 830054)

摘要:以阿克苏河流域的托什干河、库玛拉克河和阿克苏河干流为例,基于1957—2008年的径流序列,运用小波分析和R/S分析方法分析了阿克苏河径流过程的非线性特征,揭示了流域径流的变化规律,得出以下结论:①库玛拉克河、托什干河及阿克苏河干流的年径流序列均呈增加的趋势,且都以20世纪80年代后期为分界点分为两个阶段:前期径流较少,处于枯水期;后期径流较多,处于丰水期。②阿克苏河流域年径流量变化存在较长周期,长周期中又包含着短周期;其中,18 a和22 a的周期贯穿于整个时间序列,为流域径流的第一主周期。③流域内三条河流各个时段径流量的Hurst指数几乎都大于0.5,表明流域径流的时间序列具有长期持续的特征;从各条河流最后一个时段的Hurst指数可以推断,在2008年后的一段时间里流域径流量将会继续保持增加趋势。

关键词:径流;非线性特征;小波分析;R/S分析;阿克苏河

中图分类号: P343.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-3037(2011)08-1412-11

径流的水文过程一般受气候变化和人类活动的综合影响,其演变过程是一个复杂的线性、非线性系统^[1]。西北干旱区大多具有丰富的自然资源,但水资源短缺,生态环境脆弱,区域经济的可持续发展很大程度上受制于水资源,而水资源主要来源于高山冰雪消融形成的内陆河流,因此内陆河流径流变化的特征引起了越来越多的人的关注^[2-4]。塔里木河流域是我国也是世界上最大的内陆河,流域面积达 $102 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。塔里木河本身不产流,主要依靠上游的阿克苏河、和田河、叶尔羌河补给,其中,阿克苏河是流域源流中径流量最大的河流,也是唯一一条常年向塔里木河干流输水的源流^[5]。因此研究阿克苏河径流量的变化规律对塔里木河流域的生态系统和社会经济的发展具有重要的作用。

径流时间序列是一个复杂的系统过程,具有尺度特征和混沌特征,不同的时间尺度隐含着不同的水资源变化规律和丰枯变化趋势^[2,6]。小波分析是一种信号的时间尺度分析方法,具有多分辨率的特点,能够准确找到时间序列的大小周期尺度^[6-7]。自从将小波分析引入到水文系统中后,小波分析已经在水科学研究中取得了一定的成果。杨志峰等^[7]、王钧等^[8]、蒋晓辉等^[9]采用小波分析方法对黑河流域和黄河流域水文要素变化的周期性做了详细的分析和讨论;R/S分析法也称为重新标度极差分析法,是赫斯特提出的一种时间序列数

收稿日期: 2010-02-28; 修订日期: 2011-02-22。

基金项目: 自然科学基金项目(30600092, 30970549, 40971284); 国家科技支撑计划项目(2007BAC17B01); 新疆社科基金项目(075YB012)。

第一作者简介: 禹朴家(1986-), 男, 山东省泰安人, 硕士, 主要从事干旱区生态环境研究。E-mail: yupujia@126.com

* 通信作者简介: 徐海量(1971-), 男, 江苏宝应人, 博士, 研究员, 主要从事干旱区生态水文研究。E-mail: xuhl@ms.xjb.ac.cn

据变化趋势的统计分析方法,许多学者应用该方法进行了水文序列变异特征分析和水文数据修正计算,以及河流径流的中长期预测。王波雷等^[10]利用 R/S 分析方法对内蒙古乌兰木河径流量的变化进行了分析,确定了变异点,分析了变异前后两个时段年径流量差异的显著性。马岚等^[11]利用 R/S 分析方法对石羊河下游红崖山水库的入库径流量进行了分析,结果表明径流序列的变异点为 1977 年,其分界点前后两个序列的统计特征值及回归方程均具有明显的差异。在我国西北干旱区,虽然部分学者已经对内陆河流径流的周期特征和非线性特征进行了分析^[12-13],但这种复杂的过程并没有被人们完全认识清楚。本文选择阿克苏河流域三条河流(阿克苏河干流、托什干河和库玛拉克河)1957—2008 年的径流序列,运用小波分析和 R/S 分析方法,分析了阿克苏河年径流过程的非线性特征,揭示了流域径流的变化规律,为流域水资源评价、开发、利用和管理提供了依据。

1 资料来源与研究方法

1.1 数据来源

阿克苏河位于塔里木盆地的西北,是唯一常年向塔里木河干流输水的源流,补给的水量最多,占源流总补给量的 73%^[5],是塔里木河最重要的源流。阿克苏河发源于天山中段西部山区,境内流域面积约 $3.1 \times 10^4 \text{ km}^2$,上游由两条支流组成,其中北支流为库玛拉克河,发源于汗腾格里峰;西支流为托什干河,发源于阿特巴什山脉^[14],两大支流在卡拉都维汇合后称为阿克苏河(图 1)。

为了分析塔里木盆地阿克苏河年径流的变化趋势,本文选择阿克苏河干流和两条支流托什干河、库玛拉克河 1957—2008 年间的径流数据。其中,托什干河的数据来自沙里桂兰克水文站,库玛拉克河的数据来自协合拉水文站。由于这些水文站位于相应河流的源区,人类对水的利用数量相对较少,因而其水文监测数据基本接近于自然状态。

1.2 方法

1.2.1 小波分析方法

对于任意函数 $f(x) \in L^2(R)$,以小波母函数 $\varphi(x)$ 为基的连续小波变换(CWT)为 $f(x)$ 和 $\varphi_{a,b}(x)$ 的内积,

$$W_f(a,b) = \langle f(x), \varphi_{a,b}(x) \rangle = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_R f(x) \varphi\left(\frac{x-b}{a}\right) dx \quad (1)$$

式中: a 为尺度因子; b 为平移因子。CWT 变化的结果得到许多小波系数 $W_f(a,b)$,该系数表示该部分信号与小波的近似程度^[15-16]。

Morlet 小波与径流时间序列的波形很相近,且在时频域局部性较好,故本文采用 Morlet 小波对流域径流序列进行小波分析。其表达式为:

$$\varphi(x) = e^{iw_0x} e^{-\frac{x^2}{2}} \quad (2)$$

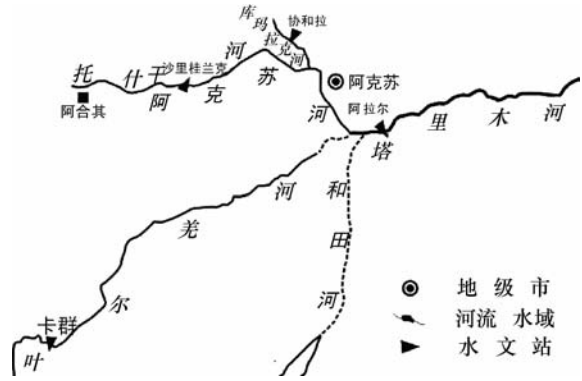


图 1 阿克苏河流域示意图

Fig. 1 Sketch map showing the Aksu River Basin

式中: w_0 为常数; i 为虚数。傅立叶变换为 $\varphi(w) = \sqrt{2\pi} e^{-\frac{(w-w_0)^2}{2}}$, 当 $w_0 \geq 5$ 时, 近似满足条件。Morlet 小波的时间尺度 a 与周期 T 存在以下关系:

$$T = \frac{4\pi}{w_0 + \sqrt{2 + w_0^2}} \times a \quad (3)$$

当 $w_0 = 6.2$ 时, $T = a$, 故 Morlet 小波可以做气候、水文径流序列的周期分析。通过小波变换, 将 $f(x)$ 一维水文序列转换为 a, b 为坐标的小波系数图。小波系数的垂直截面图表示序列中每一年的小波特征, 小波系数的水平截面图表示序列中每种周期的小波随时间的变化。小波系数图中, 等值线的闭合中心对应于径流变化中心, 正值表示径流量增多, 负值表示径流量减少, 小波系数的零点对应于径流量的突变点。Morlet 小波的连续小波变换为:

$$w_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{\mathbb{R}} f(x) e^{iw_0(\frac{x-b}{a})} e^{-\frac{1}{2}(\frac{x-b}{a})^2} dx \quad (4)$$

将时间域上关于尺度 a 的所有小波系数的平方进行积分, 即为小波方差, 其公式为:

$$\text{Var}(a) = \int_{-\infty}^{+\infty} |w_f(a, b)|^2 db \quad (5)$$

$\text{Var}(a)$ 表示时间序列在某一尺度下周期波动的强弱, 可以用来确定序列中各种尺度扰动的相对强度, 小波方差图对应极值处的尺度称为该序列的主要周期尺度^[17]。

1.2.2 R/S 分形分析方法

R/S 分形分析方法是由英国学者 H. E. Hurst 在总结尼罗河的多年水文观测数据时, 于 1965 年提出的一种处理时间序列的方法。该方法经过 Mandelbrot 的补充和完善后, 被 Mandelbrot 称作分式布朗运动, 也称之为分形时间序列。其基本思想是改变所研究对象的时间尺度大小, 研究其统计特性变化规律, 从而将小尺度的规律用于大的时间尺度范围, 或将大的时间尺度得到的规律用于小尺度, 其原理如下^[18-19]:

考虑某河流的年径流序列为 $X(t)$, 对于任意正整数 $p \geq 1$, 定义均值为:

$$\langle X \rangle_p = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p X(t) \quad p = 1, 2, 3, \dots \quad (6)$$

累积离差为:

$$X(t, p) = \sum_{u=1}^t (X(u) - \langle X \rangle_p) \quad 1 \leq t \leq p \quad (7)$$

其中 $X(t, p)$ 不仅与 t 有关, 而且还与 p 的取值有关。每一个 p 值对应一个 $X(t, p)$ 序列, 不同的 p 值有不同的 $X(t, p)$ 序列, 把同一个 p 值所对应的最大 $X(t, p)$ 值和最小的 $X(t, p)$ 值之差称为极差。其公式为:

$$R(p) = \max_{1 \leq t \leq p} X(t, p) - \min_{1 \leq t \leq p} X(t, p) \quad p = 1, 2, 3, \dots \quad (8)$$

标准差为:

$$S(p) = \left[\frac{1}{p} \sum_{t=1}^p (X(t) - \langle X \rangle_p)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad p = 1, 2, 3, \dots \quad (9)$$

当分析 $\frac{R(p)}{S(p)} \cong \frac{R}{S}$ 的统计规律时, 赫斯特发现存在如下的关系:

$$\frac{R}{S} \propto \left(\frac{p}{2}\right)^H \quad (10)$$

这表明该时间序列存在赫斯特现象, H 称为赫斯特指数 (Hurst)。 H 值可以根据计算出的

($p, R/S$) 值,在双对数坐标系($\ln p, \ln R/S$)中用最小二乘法拟合得到。赫斯特等还认为,如果 $X(t)$ 是一个相互独立、方差有限的随机序列,则有 $H = 0.5$ 。 $H(0 < H < 1)$ 与一个关联函数 $C(t)$ 有关:

$$C(t) = 2^{2H-1} - 1 \quad (11)$$

当 $H > 0.5$ 时, $C(t) > 0$, 意味着时间序列未来的趋势与过去一致, 如果过去径流为增加的趋势, 则在将来一定的时间段内也为增加的趋势, 这个过程具有持续性; 当 $H < 0.5$ 时, $C(t) < 0$, 意味着未来的总体趋势将与过去相反, 如果过去径流为增加的趋势, 则在将来一定的时间段内变为下降的趋势, 即过程具有反持续性; 当 $H = 0.5$ 时, $C(t) = 0$, 意味着时间序列各要素完全独立, 没有相关性或只是短程相关^[2]。因此 R/S 分析在时间序列中具有很强的预测预报作用。

2 阿克苏河年径流变化趋势

水文序列存在趋势, 可能是由于气候变化低频摆动所致, 或是由于土地利用及流域特征变化引起的。径流序列随着时间的增加呈现连续递减或是递增的变动就是径流序列的趋势变化^[12]。从图 2 中可以看出, 库玛拉克河、托什干河及阿克苏河的年径流序列均呈增加的趋势, 且都通过了 $\alpha = 0.01$ 的显著性检验。其中, 阿克苏河径流序列的增加趋势最为明显, 其倾向斜率为每 10 a 增加 $4.67 \times 10^8 \text{ m}^3$; 托什干河径流序列的增加趋势最小, 其倾向斜率为每 10 a 增加 $1.85 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。阿克苏河是一条以冰雪融水和降水补给为主的河流, 气候因子的变化势必会导致径流序列的变化。近年来, 随着全球气候的变暖, 新疆气候正由暖干向暖湿转变, 其特征主要表现为降水量和气温的增加^[20-22], 气温的升高必然会加速冰川融化, 王国亚等^[23]的研究表明在阿克苏河水系中, 近 50 a 来以融雪径流补给为主的托什干河和以冰川融水径流补给为主的库玛拉克河的径流量都有显著的增加。因此, 在冰川融水和降水量增加的影响下, 阿克苏河径流量发生了明显的增加。

从大时间尺度来看, 阿克苏河流域三站年径流序列均呈增加的趋势, 但从小时间尺度上来看, 阿克苏河流域三站年径流序列又体现出一定的波动性。表 1 给出了阿克苏河干流、库玛拉克河和托什干河径流序列的年代际变化特征, 可以看出: 20 世纪 50 年代是阿克苏河流域的枯水期, 年径流序列均达到近 52 a 来的最低值; 60—80 年代, 除库玛拉克河外, 流域径流量有所下降, 但变化不大, 托什干河和阿克苏河干流径流量分别下降了 $2.65 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $0.76 \times 10^8 \text{ m}^3$; 90 年代后, 流域径流量迅速增加, 流域三站均处于丰水期; 21 世纪初, 流域年

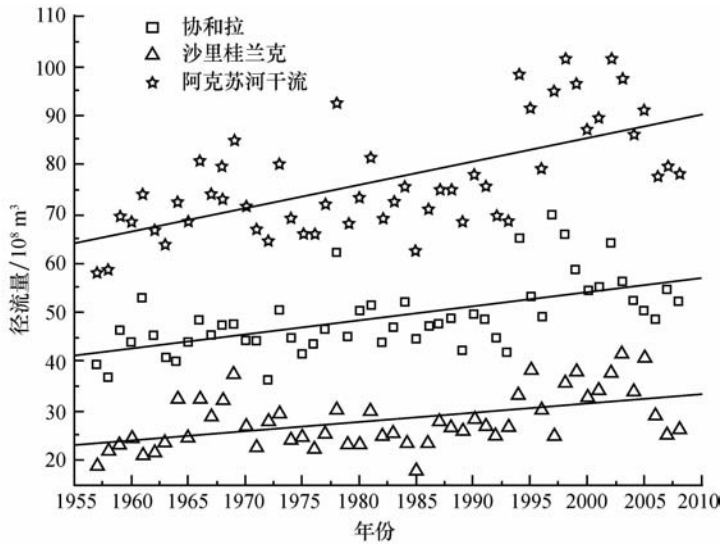


图 2 1957—2008 年阿克苏河不同断面径流量年际变化
Fig. 2 Changes in annual runoff at different sections along the Aksu River

径流量达到了近 52 a 来的最高值,阿克苏河干流、托什干河和库玛拉克河径流量比 20 世纪 80 年代分别增加了 14.88×10^8 、 8.14×10^8 和 $6.74 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。总的看来,阿克苏河流域三站年径流量变化趋势基本相同,并以 80 年代后期为分界点,大致可以分为两个阶段:前期径流较少,处于枯水期;后期径流较多,处于丰水期。

表 1 阿克苏河不同年代际间径流的变化

Table 1 The change of annual runoff in the Aksu River during different decades (10^8 m^3)

年代	1957—1960	1961—1970	1971—1980	1981—1990	1991—2000	2001—2008	1957—2008
库玛拉克河	41.59	45.60	46.50	47.49	55.07	54.23	48.98
托什干河	22.17	28.07	25.37	25.42	31.23	33.56	28.04
阿克苏河	63.76	73.67	71.87	72.91	86.30	87.79	77.02

3 阿克苏河年径流的小波分析

小波分析是一种信号的时间尺度分析方法,具有多分辨率分析的特点,可以看到每一时刻在各周期中所处的位置,能够更好地分析序列随时间的变化情况,借助小波变换的时频局部化优势可以准确地找到时间序列的大小时间尺度(周期)和突变点所在的位置,从而为气候及水文系统分析、预测提供重要依据^[7]。

阿克苏河流域近 52 a 径流量的小波分析(图 3、4)表明,年径流量变化存在较长周期,长周期中又包含着短周期,流域内年径流量的变化是由不同长度周期震荡的叠加而形成的。

图 3 给出了库玛拉克河、托什干河和阿克苏河流域干流年径流序列小波方差和主周期尺度小波系数曲线图。小波方差的大小可以指示出径流序列的周期尺度,小波方差出现极值的时间尺度即为径流变化的周期。小波方差的极值越大,周期性越明显。从图 3(左)中可以看出:三站年平均径流序列都具有明显的以 18 a 和 22 a 为主的周期特征,且分布于整个时间序列,为第一主周期;此外,三站平均径流序列还有 6 a 和 15 a 为主的周期特征,分布在时间序列的某个时间段内,为第二主周期。由于数据序列较短,无法准确预测更长时间尺度周期,最终确定流域径流在近 52 a 的时间尺度上存在约准 18 a、准 22 a 的年代际周期和准 6 a 的年际周期。小波系数曲线图可以准确地反映出径流序列在某一主周期尺度上的变化趋势;从小波系数值的正负可以看出该年径流量的多少,小波系数值为正表明径流处于丰水期,小波系数值为负表明径流处于枯水期。从图 3(右)中可以看出:对于库玛拉克河,在 22 a 的时间尺度上,前期径流量偏少,后期径流量偏多,并以 1982 年为转折点;在 17 a 的时间尺度上,1970 年以前,周期并不明显,径流序列经历了一个枯水期;1970 年以后,周期性比较明显,经历了两个丰水期和一个枯水期,并以 1969 年、1981 年、1993 年、2006 年为转折点。对于托什干河,18 a 的周期尺度在整个时间序列上都比较明显,经历了两个丰水期和一个枯水期,其转折年份为 1963 年、1978 年、1992 年、2007 年;在 22 a 的时间尺度上,径流序列也经历了一个枯水期和一个丰水期,且枯水期持续的时间要比库玛拉克河长一些,以 1987 年为转折点。对于阿克苏河干流,22 a 的周期尺度在整个时间序列上最为明显,也分为两个阶段,前一段为枯水期,后一段为丰水期;在 18 a 的时间尺度上,流域径流经历了两个丰水期、一个完整的枯水期和半个枯水期。总的来看,阿克苏河流域三站径流的变化趋势基本相同,都存在一个明显的 18 a 和 22 a 左右的主周期;在不同的主周期时间尺度上又存在着多个枯水期和丰水期。

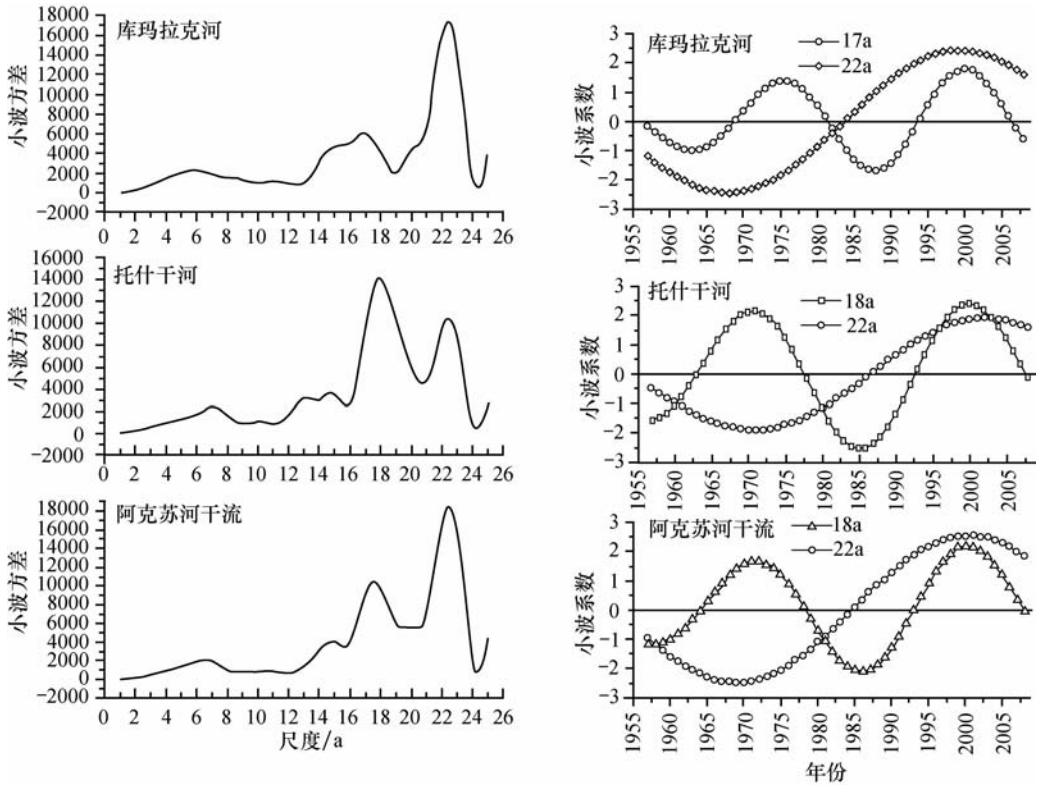


图3 阿克苏河不同断面径流量的小波方差(左)和小波系数曲线(右)

Fig. 3 Wavelet variance (left) and wavelet coefficient (right) for annual runoff at different sections along the Aksu River

图4为阿克苏河流域库玛拉克河、托什干河和阿克苏河干流年径流的小波系数等值线分布,可以看出研究区近52 a径流量的主要变化周期。小波系数为正值(图中实线),表示流域径流处于丰水期,河流流量比较大;小波系数为负值(图中虚线),表示流域径流处于枯水期,河流流量比较小。

由图4可以看出,阿克苏河流域年径流序列小波系数等值线在18 a和22 a的时间尺度上分布比较密集,存在明显的小波系数高低值中心震荡。库玛拉克河径流量在整个时段上存在6 a、8 a的短周期,15 a、18 a和22 a的年代际周期,其中18 a和22 a的长周期最为显著。在20~25 a的时间尺度上,径流量前期较少、后期较多,存在一个枯水期和一个丰水期的交替;在10~20 a的时间尺度上,径流量经历了“枯—丰—枯—丰”的交替变化,20世纪70年代之前和80年代中期到90年代中期是两个枯水期;在0~10 a的时间尺度上,径流的周期性并不明显,80年代之前以8 a的时间尺度为主,80年代之后以6 a的时间尺度为主。托什干河径流量在整个时段上存在7 a的短周期,18 a和22 a的年代际周期。在20~25 a的时间尺度上,径流量经历了一个“枯—丰”交替;在10~20 a的时间尺度上,径流量经历了1965—1977年、1993—2008年两个丰水期和1957—1965年、1978—1993年两个枯水期,每个丰枯交替期大约经历了25 a的时间;在0~10 a的时间尺度上,80年代中期以前以7 a的周期为主,80年代中期至90年代后期以6 a的周期为主,21世纪初期则以4 a的周期为主。阿克苏河干流径流量在整个时间段上存在6 a的短周期和18 a、22 a的长周期。在20~25 a的时间尺度上,径流量同样存在一个“枯—丰”交替;在10~20 a的时间尺度上,18 a的周期

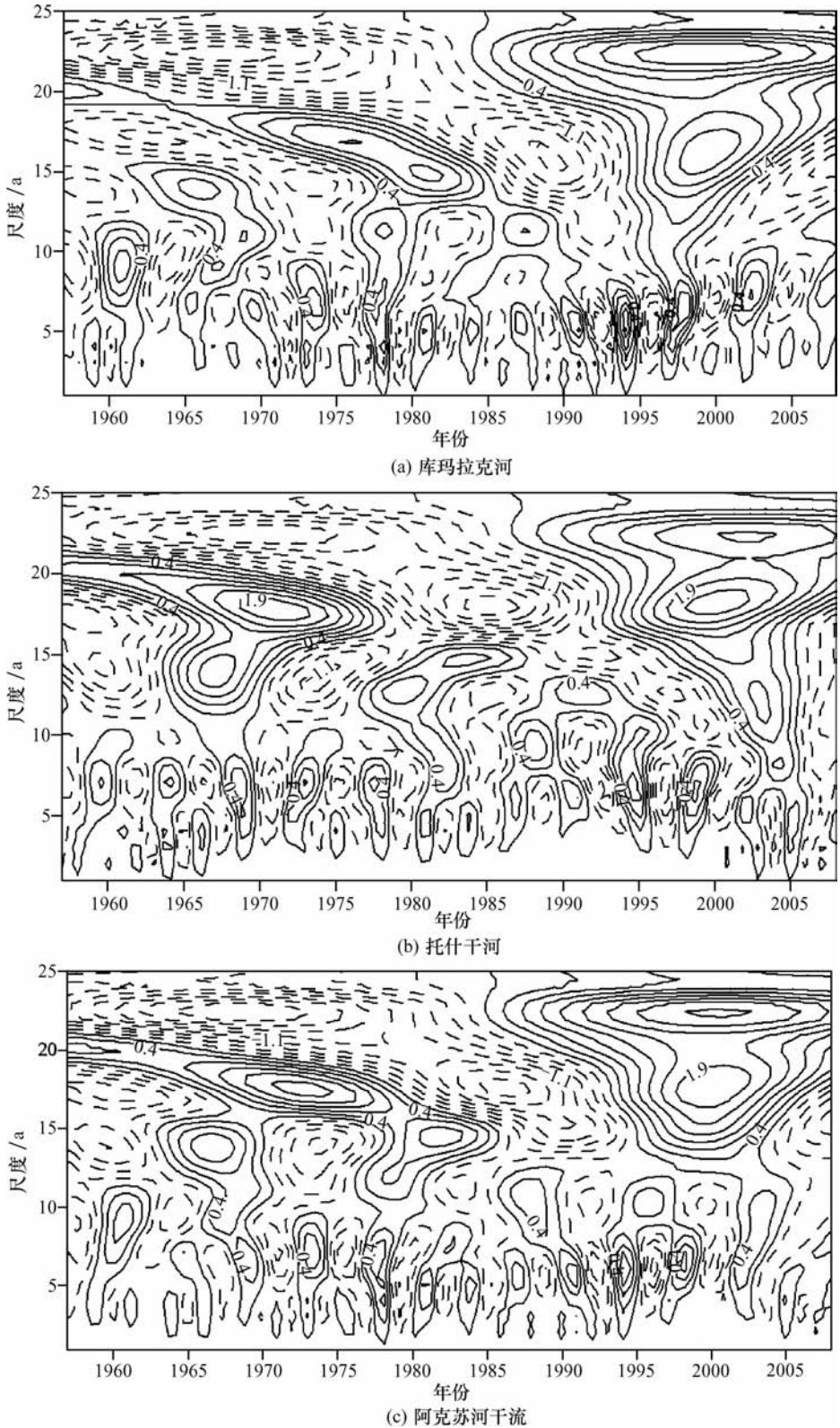


图4 阿克苏河不同断面径流量的小波系数等值线

Fig. 4 Wavelet coefficient isogram for annual runoff at different sections along the Aksu River

贯穿整个时间序列,经历了两个丰水期和两个枯水期,14 a 的时间尺度在前期比较明显,并大约持续了 30 a;在 0~10 a 的时间尺度上,6 a 的短周期最为显著,并大约持续了近 40 a 的时间。

综合图 3、4 来看,无论是库玛拉克河、托什干河还是阿克苏河干流的径流序列,无论是从长周期来看还是短周期来看,阿克苏河流域的小波系数等值线都没有闭合,小波系数曲线要么是虚线(枯水期),要么处于实线的末期(丰水期)。由此可以推断,无论是从哪个时间尺度来看,无论是从阿克苏河的哪个断面来看,在未来一段时间,流域内的径流量将进入一个枯水期。

4 阿克苏河年径流的 R/S 分析

小波分析的结果表明,在 18 a 和 22 a 的年际尺度上,阿克苏河流域三站径流表现出一定的长期趋势。从总体上来说,1957—2008 年间,阿克苏河干流、库玛拉克河和托什干河径流均呈增加的趋势。根据小波分析的结果,以 22 a 和 18 a 的时间尺度,将流域 52 a 的径流可以划分为 3 个时段,即 1957—1978 年、1979—2000 年、2001—2008 年(托什干河径流序列以 18 a 为时间间隔)。表 2 给出了流域内阿克苏河干流、库玛拉克河和托什干河三站各时间段径流的平均值,可以看出,52 a 来流域径流量均表现为增加趋势,尤其是阿克苏河干流,21 世纪初期的径流量比 20 世纪 80 年代之前增加了 23%。虽然 52 a 间流域径流量均在增加,但托什干河径流量在 1975—1992 年间略有减少,但减少幅度不大。

表 2 阿克苏河不同时段径流的变化

Table 2 The change of annual runoff in the Aksu River at different time intervals (10⁸ m³)

年代	1957—1978	1979—2000	2001—2008
库玛拉克河	45.10	50.95	54.23
阿克苏河干流	71.32	78.80	87.79
年代	1957—1974	1975—1992	1993—2008
托什干河	26.34	25.30	33.04

基于阿克苏河干流、库玛拉克河和托什干河三站径流量资料,运用 R/S 分形分析方法,计算流域内三站在每一个时段的 Hurst 指数,结果如表 3 所示。

表 3 阿克苏河流域不同截面径流过程的 Hurst 指数

Table 3 Hurst exponents for annual runoff in the three stations of the Aksu Rivers

年代	1957—1978	1979—2000	2001—2008	1957—2008
库玛拉克河	0.489	0.685	0.790	0.800
阿克苏河	0.718	0.783	0.825	0.703
年代	1957—1974	1975—1992	1993—2008	1957—2008
托什干河	0.808	0.580	0.794	0.604

对于库玛拉克河,在 1957—1978 年间,Hurst 指数为 0.489,小于 0.5,它意味着年径流量序列的分式布朗运动在该期间具有反持续的特征,即过去径流量增加的趋势在将来一定时间内将会变为下降的趋势;1979—2000 年和 2001—2008 年两个时段的 Hurst 指数分别为 0.685、0.790,它们都大于 0.5,这说明年径流量序列的分式布朗运动在该期间具有长期持续的特征,即过去径流量增加的趋势在将来一定时间内将会继续增加。虽然第一个阶段的 Hurst 指数小于 0.5,但从长期来看,整个径流序列的 Hurst 指数为 0.8,大于 0.5,说明库玛拉克河径流增加的趋势将会继续下去。根据 2001—2008 年的 Hurst 指数,可以推测库玛拉

克河的径流量在2008年后的一段时间里将继续保持增加的趋势。

对于阿克苏河干流,1957—1978年、1979—2000年和2001—2008年3个时段的Hurst指数分别为0.718、0.783和0.825,它们都大于0.5,表明在每一个时段里,年径流序列的分式布朗运动具有长期持续的特征,即径流量增加的趋势将会继续增加。1957—2008年径流的Hurst指数大于0.5,且3个时段中,后一阶段的Hurst指数均大于前一阶段,说明3个阶段径流不仅具有相同的变化趋势,且这种变化趋势的同向性越来越强,阿克苏河干流径流量增加的趋势在未来一段时间内将会继续下去。这种变化趋势与图2中径流的实际变化趋势一致。根据2001—2008年的Hurst指数,可以预测阿克苏河干流径流在2008年后的一段时间里将会继续保持增加趋势。

对于托什干河,1957—1974年、1975—1992年、1993—2008年和1957—2008年径流序列的Hurst指数均大于0.5,说明年径流序列在以上时段中都具有长期的持续特征。1993—2008年的Hurst指数为0.794,由此可以预测,托什干河径流在2008年后的一段时间里将会继续保持增加的趋势。

5 结论

本文利用阿克苏河流域1957—2008年的径流序列,运用小波分析和R/S分析方法,分析了阿克苏河年径流过程的非线性特征,揭示了流域径流的变化规律,得出以下结论:

(1)库玛拉克河、托什干河及阿克苏河干流的年径流序列均呈增加的趋势,且都通过了 $\alpha=0.01$ 的显著性检验。从整个时间序列来看,流域径流以20世纪80年代后期为分界点,大致可以分为两个阶段:前期径流较少,处于枯水期;后期径流较多,处于丰水期。

(2)阿克苏河流域近52 a径流量的小波分析表明,年径流量变化存在较长周期,长周期中又包含着短周期,流域内年径流量的变化是由不同长度周期震荡的叠加而形成的。其中,贯穿于整个时间序列的18 a和22 a的周期为流域径流的第一主周期,存在于时间序列某个时段的6 a和8 a的周期为流域径流的第二主周期。在每个周期时间尺度上存在着多个径流的“枯—丰”交替期。

(3)流域内3条河流径流量的Hurst指数几乎都大于0.5,表明流域年径流量的时间序列表现出长程相关特性。从各条河流最后一个时段的Hurst指数可以推断,在2008年后的一段时间内,流域径流量基本上均呈增加趋势。

参考文献(References):

- [1] 高龙华. 径流演变的人类驱动力模型[J]. 水利学报, 2006, 37(9): 1129-1133. [GAO Long-hua. Model of human driving force affecting the evolution of runoff. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 37(9): 1129-1133.]
- [2] 徐建华, 陈亚宁, 李卫红, 等. 西北干旱区内陆河年径流过程的非线性特征-塔里木盆地三源河的实证分析[J]. 干旱区地理, 2008, 31(3): 324-332. [XU Jian-hua, CHEN Ya-ning, LI Wei-hong, et al. Checking the nonlinear characteristics of annual runoff processes of inland rivers in arid area of Northwest China: A demonstration from the three headwaters of the Tarim River. *Arid Land Geography*, 2008, 31(3): 324-332.]
- [3] CHEN Ya-ning, ZHANG Xiao-lei, LI Wei-hong, et al. Analysis on the ecological benefits of the stream water conveyance to the dried-up river of the lower reaches of Tarim River, China [J]. *Science in China Series D*, 2004, 47(11): 1053-1064.
- [4] 王顺德, 王彦国, 王进, 等. 塔里木河流域近40a来气候、水文变化及其影响[J]. 冰川冻土, 2003, 25(3): 315-320. [WANG Shun-de, WANG Yan-guo, WANG Jin, et al. Change of climate and hydrology in the Tarim River Basin during past 40 years and their impact. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25(3): 315-320.]

- [5] 王顺德, 李红德, 胡林金, 等. 2002 年塔里木河流域四条源流区间耗水分析[J]. 冰川冻土, 2004, 26(4): 496-502. [WANG Shun-de, LI Hong-de, HU Lin-jin, et al. Interzone water consumption from four source streams to main-stream of Tarim River, Xinjiang, in 2002. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, 26(4): 496-502.]
- [6] 李占玲, 徐宗学, 巩同梁. 雅鲁藏布江流域径流特性变化分析[J]. 地理研究, 2008, 27(2): 353-361. [LI Zhan-ling, XU Zong-xue, GONG Tong-liang. Characteristics of runoff variation in the Yarlung Zangbo River Basin. *Geographical Research*, 2008, 27(2): 353-361.]
- [7] 杨志峰, 李春晖. 黄河流域天然径流量突变性与周期性特征[J]. 山地学报, 2004, 22(2): 140-146. [YANG Zhifeng, LI Chun-hui. Abrupt and periodic changes of the annual natural runoff in the subregions of the Yellow River. *Journal of Mountain Science*, 2004, 22(2): 140-146.]
- [8] 王钧, 蒙吉军. 黑河流域近 60 年来径流量变化及影响因素[J]. 地理科学, 2008, 28(1): 83-88. [WANG Jun, MENG Ji-jun. Characteristics and tendencies of annual runoff variations in the Heihe River Basin during the past 60 years. *Scientia Geographica Sinica*, 2008, 28(1): 83-88.]
- [9] 蒋晓辉, 刘昌明, 黄强. 黄河上中游天然径流多时间尺度变化及动因分析[J]. 自然资源学报, 2003, 18(2): 142-148. [JIANG Xiao-hui, LIU Chang-ming, HUANG Qiang. Multiple time scales analysis and cause of runoff changes of the upper and middle reaches of the Yellow River. *Journal of Natural Resources*, 2003, 18(2): 142-148.]
- [10] 王波雷, 马孝义, 季万才, 等. 乌兰木伦河径流变异特征分析研究[J]. 水土保持学, 2007, 14(6): 313-318. [WANG Bo-lei, MA Xiao-yi, JI Wan-cai, et al. The analysis of aberrance point in Wulanmulun River Basin by using R/S method. *Research of Soil and Water Conservation*, 2007, 14(6): 313-318.]
- [11] 马岚, 魏晓妹. 石羊河下游年径流序列的变异点分析[J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24(2): 174-177. [MA Lan, WEL Xiao-mei. Analysis on aberrance point of annual runoff serials in the downstream of Shiyang River. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2006, 24(2): 174-177.]
- [12] 张晓伟, 沈冰, 黄领梅. 和田河年径流变化规律研究[J]. 自然资源学报, 2007, 22(6): 974-979. [ZHANG Xiao-wei, SHEN Bing, HUANG Ling-mei. Study on the variation law of the annual runoff in Hotan River. *Journal of Natural Resources*, 2007, 22(6): 974-979.]
- [13] XU Jian-hua, LU Yan, SU Fang-lin, et al. R/S and wavelet analysis on the evolutionary process of regional economic disparity in China during the past 50 years [J]. *Chinese Geographical Science*, 2004, 14(3): 193-201.
- [14] 张姣, 刘光瑗, 沈永平, 等. 20 世纪下半叶以来阿克苏河山前绿洲带气候、径流变化特征及其人类活动影响[J]. 冰川冻土, 2008, 30(2): 218-223. [ZHANG Jiao, LIU Guang-yuan, SHEN Yong-ping, et al. Changes in runoff and climate and the human activity impacts in the Aksu River outside the mountains since the second half of the 20th century. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, 30(2): 218-223.]
- [15] 林勇, 刘世荣, 李崇巍, 等. 小波变换在岷江上游杂古脑流域径流时间序列分析中的应用[J]. 应用生态学报, 2005, 16(9): 1645-1649. [LIN Yong, LIU Shi-rong, LI Chong-wei, et al. Application of wavelet transform to monthly runoff time serial analysis in Zagunao watershed, the upper Minjiang River. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(9): 1645-1649.]
- [16] 路云阁, 李双成, 蔡运龙. 近 40 年气候变化及其空间分异的多尺度研究——以内蒙古自治区为例[J]. 地理科学, 2004, 24(4): 433-439. [LU Yun-ge, LI Shuang-cheng, CAI Yun-long. Multiscale studies on climatic change and its spatial heterogeneity in recent 40 years: A case study in Inner Mongolia. *Scientia Geographica Sinica*, 2004, 24(4): 433-439.]
- [17] 刘会玉, 林振山, 张明阳. 建国以来中国洪涝灾害成灾面积变化的小波分析[J]. 地理科学, 2005, 25(1): 43-48. [LIU Hui-yu, LIN Zhen-shan, ZHANG Ming-yang. Wavelet analysis of area affected by flood disaster in China after 1949. *Scientia Geographica Sinica*, 2005, 25(1): 43-48.]
- [18] Donald I Turcotte. *Fractals and Chaos in Geology and Geophysics* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1997: 158-162.
- [19] 门宝辉, 刘昌明, 夏军, 等. R/S 分析法在南水北调西线一期工程调水河流径流趋势预测中的应用[J]. 冰川冻土, 2005, 27(4): 568-573. [MEN Bao-hui, LIU Chang-ming, XIA Jun, et al. Application of R/S on forecast of runoff trend in the water-exporting regions of the first stage project of the western route of the south-to-north water transfer scheme. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2005, 27(4): 568-573.]

- [20] 李红军, 江志红, 刘新春, 等. 阿克苏河径流变化与北大西洋涛动的关系[J]. 地理学报, 2008, 63(5): 491-501. [LI Hong-jun, JIANG Zhi-hong, LIU Xin-chun, *et al.* The relationship between the north Atlantic Oscillation and runoff variation of Aksu River in Xinjiang, China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, 63(5): 491-501.]
- [21] 施雅风, 沈永平, 胡汝骥. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨[J]. 冰川冻土, 2002, 24(3): 219-226. [SHI Ya-feng, SHEN Yong-ping, HU Ru-ji. Preliminary study on signal, impact and foreground of climatic shift from warm-dry to warm-humid in Northwest China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, 24(3): 219-226.]
- [22] 姜大膀, 苏明峰, 魏荣庆. 新疆气候的干湿变化及其趋势预估[J]. 大气科学, 2009, 33(1): 90-98. [JIANG Da-bang, SU Ming-feng, WEI Rong-qing, *et al.* Variation and projection of drought and wet conditions in Xinjiang. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2009, 33(1): 90-98.]
- [23] 王国亚, 沈永平, 苏宏超, 等. 1956—2006 年阿克苏河径流变化及其对区域水资源安全的可能影响[J]. 冰川冻土, 2008, 30(4): 562-568. [WANG Guo-ya, SHEN Yong-ping, SU Hong-chao, *et al.* Runoff changes in Aksu River Basin during 1956-2006 and their impacts on water availability for Tarim river. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, 30(4): 562-568.]

The Nonlinear Characteristics of Annual Runoff Change in Aksu River

YU Pu-jia^{1,2}, XU Hai-liang¹, LIU Shi-wei^{1,2}, AN Hong-yan^{1,2},
ZHANG Qing-qing^{1,2}, GONG Jun-jun³

(1. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, CAS, Urumqi 83001, China;
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Geography
Science and Tourism Department, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China)

Abstract: As a demonstration from the three rivers of the Aksu River Basin, the paper checked the nonlinear characteristics of annual runoff processes from 1957 to 2008 by using the wavelet analysis method and R/S analysis. The main conclusions are as follows: The annual runoff trends of the mainstream of Aksu River, the Kumlak River and Tuoshigan River are increasing; the trends are divided into two parts: the runoff is less in the prophase and more in the latter period. The time series of runoff in Aksu River all has long cycles, which contains some short ones. The period of 18 years and 22 years is the first period, which is through all the time sequence. The Hurst index of the three rivers in the Aksu River Basin is over 0.5 in each period, which indicates that the time series of runoff have the long trend. The Hurst index of each river in the last period indicates that the annual runoff in the Aksu River Basin will show an increasing trend in the future.

Key words: runoff; nonlinear; wavelet method; R/S analysis; Aksu River