

# 60 年玛纳斯河红山嘴径流规律特征分析

常浩娟<sup>1</sup>, 刘卫国<sup>2</sup>, 吴琼<sup>1</sup>

(1. 石河子大学 信息科学与技术学院, 新疆 石河子 832000; 2. 新疆兵团勘测设计院 一分院, 新疆 石河子 832000)

**摘 要:**基于玛纳斯河红山嘴水文站 60 a 的径流资料,综合运用 R/S 分析、Morlet 小波、Mann-Kendall 非参数检验以及集中度和集中期等多种分析方法对红山嘴站径流进行年际和年内的规律特征分析。结果表明:玛纳斯河红山嘴断面 60 a 径流年际变化不大,长期有上升趋势,径流序列有较强的长期持续性;年径流存在 14~35 a、6~13 a 和 3~5 a 周期,第一主周期为 21 a,然后是 28 a 及 13 a;径流周期在 1980 年以前变化频繁,且变化幅度小,1980 年以后周期变长,变化幅度增大;丰枯水周期按照平、枯、丰的顺序变化;1994 年为径流突变点。径流年内分配不均匀,集中程度高,主要集中在 7 月底;大部分月径流表现出显著上升趋势,月径流突变年份基本都在 1990 年以后。

**关键词:**径流特征; 玛纳斯河; Hurst 指数; Morlet 小波分析; M-K 非参数检验

**中图分类号:**P333.1

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2016)06-0128-07

## Runoff Characteristics of Hongshanzui Hydrologic Station of Manas River in the Past 60 Years

CHANG Haojuan<sup>1</sup>, LIU Weiguo<sup>2</sup>, WU Qiong<sup>1</sup>

(1. College of Information Science and Technology, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832000, China; 2. Branch 1, Surveying & Planning Designing Institute(Group) of Xinjiang Production and Construction Corp Co., Ltd, Shihezi, Xinjiang 832000, China)

**Abstract:** We analyzed the interannual and inter-monthly runoff characteristics of Hongshanzui hydrologic station of Manas River by using R/S, Morlet wavelet, Mann-Kendall nonparametric test and concentration and concentrated period methods based on the Hongshanzui hydrologic runoff data in the past 60 years. Results show that in the past 60 years, interannual change of runoff of Hongshanzui hydrologic station was not significant, and had long-term upward trend, runoff series had strong long-term sustainability; annual runoff presented 14 to 35 years, 6 to 13 years and 3 to 5 years periods, and the first main cycle is 21 years, and then 28 years, the third was 13 years; runoff cycle changed frequently before 1980, but the change was small, and the cycle became longer and larger after 1980; the order of the rich and low water period was flat, rich and dry; the runoff abrupt occurred in 1994. The monthly runoff followed uneven distribution and high intensity, and the runoff mainly concentrated in the end of July; Runoff showed a significant rise, most of the runoff abrupt occurred after 1990.

**Keywords:** hydrologic characteristics; Manas River; Hurst index; Morlet wavelet; M-K nonparametric test

径流是河流水循环最重要的一部分,径流的分析 and 预测对水资源管理和规划是至关重要的<sup>[1]</sup>。长期径流分析对水资源的有效管理是非常关键的,对社会经济有非常重要的影响<sup>[2]</sup>。径流数学建模对水文来说非常重要;径流的长期监管问题,流域管理体制水平研究,自然水体的可持续利用,水资源管理系统中

流域水文预测的发展,人为改变径流的合理性评估等,都需要提高现有径流模型并开发新模型<sup>[3]</sup>。径流是河流的水文特征之一,径流变化趋势评估对于水资源可利用量分析、洪水和干旱变化等具有重要的参考价值。玛纳斯河流域位于新疆天山北坡经济技术开发区核心地带,人口密度高,生产力高度集中,是新疆

收稿日期:2015-11-18

修回日期:2016-01-08

资助项目:石河子大学高层次人才资助项目(RCZX201326);校级人文社科中青年人才培养资助项目(RWSK13-Y33);兵团社会科学资助项目(14QN09)

第一作者:常浩娟(1979—),女,江苏徐州人,博士,石河子大学信息科学与技术学院副教授,研究方向:系统科学与系统优化。E-mail:chj301@163.com

和兵团现代工业、农业、交通信息、教育科技等发展的重点区域,也是向西开放和“丝绸之路经济带”的重要枢纽。但是玛纳斯河流域属于典型的干旱绿洲经济区,水资源短缺,生态环境脆弱,区域资源环境承载力低。了解和掌握玛纳斯河流域水文特性,对玛纳斯河流域水资源的合理开发利用和防洪抗旱等工作起到关键作用,也直接影响流域经济社会的可持续发展。

已有文献对径流的分析视角广泛,一般有周期分析、趋势分析和突变检验等。针对玛纳斯河径流进行相关研究的主要有:借助小波理论、重标极差(R/S)法、Mann-Kendall非参数统计检验等对玛纳斯河肯斯瓦特站水文变化特征和周期进行分析,玛纳斯河径流年内分配极不均匀,主要集中在夏季的6—8月,四季径流区别较大;径流变化具有持续性,径流演变具有明显的阶段性,径流年际变化大,径流变化具有明显的周期性及阶段性,丰枯时期显著<sup>[4-8]</sup>;气温的升高、降水量的增加和人类活动等因素是导致玛纳斯河肯斯瓦特站和红山嘴站径流变化的重要原因<sup>[9]</sup>;玛纳斯河流域内塔西河、玛纳斯河、金沟河、巴音沟河径流不仅存在明显的周期性,这4条河流年径流过程存在着同步变化规律和正相关性;正相关性与空间距离成反向关系<sup>[10]</sup>。这些研究为本文的开展提供了参考和帮助,但是对红山嘴断面多年径流特征和变化规律分析不足,不够全面,本文在现有基础上,主要对玛纳斯河红山嘴断面年际和年内径流特征和长期变化规律进行系统的分析和研究。

本文主要根据收集的玛纳斯河红山嘴断面径流数据情况,按照年际和年内两个视角分别进行系统分析。红山嘴断面径流年际规律特征分析主要有:年际变化特征分析,采用极值比、变差系数和偏差系数等方法进行描述;年际径流变化趋势,借助R/S方法求Hurst指数进行趋势判断;年际变化周期主要用Morlet小波分析结合H-P滤波方法综合进行,同时采用距平百分率判断年际径流的丰枯水周期情况;非参数Mann-Kendall法进行趋势检验的同时,对径流做突变检测分析。以红山嘴断面60a月径流数据为基础,对径流年内规律特征进行分析:用百分比法结合集中度和集中期描述年内分配情况;借助Mann-Kendall法对年内径流变化趋势进行检验,同时对每个月径流进行突变检测分析。最后结合红山嘴断面年际和年内径流的分析,对红山嘴断面径流变化趋势和特征进行总结。

## 1 研究区概况

玛纳斯河流域地处天山北麓准噶尔盆地南部、古

尔班通古特荒漠区南缘。该流域的主要径流水源为高山区的冰雪融水与上游的降水,流域水汽主要来源于湿润的西北环流及北冰洋气流。上游水急多峡谷,下游平原坦荡。行政区划涵盖昌吉州的玛纳斯县、塔城地区的沙湾县、克拉玛依市的小拐乡、石河子市、兵团农八师及所属的14个农牧团场、农六师的新湖总场及流域内的工矿企业,流域总面积为2.655万km<sup>2</sup>。

玛纳斯河是天山北坡年径流量最大的河流,是新疆山溪性河流开发治理的典型代表,河流长约450km,年均径流量13亿m<sup>3</sup>。该河发源于巴音郭楞蒙古自治州和静县境内,天山主峰以南小尤尔都斯以北的冰峰地区,由古仍郭合拉哈特、古仍郭勒、郭德郭勒和夏格孜郭勒四条支流,汇流于玛纳斯、沙湾、和静三县交界处流入玛纳斯主河道,另一主要支流于和静县经呼斯台郭勒峡谷过沙湾境内流入玛纳斯河,北流注入玛纳斯湖。本文研究对象玛纳斯河红山嘴水利枢纽位于玛纳斯河出山口处,建于1959年,以灌溉为主结合发电。该水利工程设计引水能力105m<sup>3</sup>/s,年引水量9亿m<sup>3</sup>,引水率为68%。红山嘴引水工程可以控制玛纳斯河全灌区的用水,是玛纳斯河流域灌溉工程的命脉,也是全灌区的输水大动脉。

## 2 数据资料和研究方法

### 2.1 数据资料

本文数据主要来自于《新疆玛纳斯河流域地表水资源评价》报告,报告将红山嘴水文站38a(1956—1993年)径流资料系列与玛纳斯河红山嘴水管站20a(1994—2013年)径流资料系列合并使用(以下简称红山嘴断面),使红山嘴断面径流资料系列延长至58a(1956—2013年)。红山嘴断面径流数据凡有缺测的年份都尽量进行插补展延,对汛期缺测或全年缺测的年份,只进行年值插补,对非汛期个别缺测月进行月值插补,使其资料同步到1954—2013年径流资料系列。人口和经济等数据主要从《新疆维吾尔自治区玛纳斯河流域水利志》、《新疆统计年鉴》和《石河子统计年鉴》中收集和整理。在数据的整理和分析过程中主要借助Excel, Eviews, Matlab等工具进行数据的具体处理。

### 2.2 研究方法

本文涉及研究方法较多,下面对一些相对复杂的方法做介绍,其他方法在分析过程中简单说明。

2.2.1 R/S分析 R/S(Rescaled Range Analysis),即重标极差分析法,R/S方法中一个重要的统计量Hurst指数可以度量时间序列趋势的强度和噪声的水平随时间的变化情况。基本原理描述如下<sup>[11-12]</sup>:

第 1 步,将原始时间序列划分成若干子序列。选定合适尺度长度  $n$ ,将原始序列  $\{y_t\}_{t=1}^T$  划分成  $M$  个互不重叠的长度为  $n$  的子序列,各子序列记为  $D_m$  ( $m=1,2,3,\dots,M$ ),子序列内部元素记为  $y_{t,m}$ 。

第 2 步,对每个子序列计算累计离差  $Y_{k,m}$ ,同时计算出  $D_m$  的极差  $R_m$  和标准差  $S_m$ 。其中,累计离差计算公式为:

$$Y_{k,m} = \sum_{k=1}^n (y_{k,m} - \bar{y}_m) \quad (1)$$

式中:  $\bar{y}_m$  为子序列  $D_m$  的平均值。

第 3 步,计算  $D_m$  重标极差  $(R/S)_m$

$$(R/S)_m = R_m / S_m \quad (2)$$

则,完整序列重标极差

$$(R/S) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (R/S)_m \quad (3)$$

第 4 步,将  $n$  值不断扩大,扩大到  $T/3$  或  $T/2$ ,本文从时间序列的长度考虑, $n$  扩大到  $T/2$ 。对于非随机过程的时间序列,则有:

$$(R/S) = (an)^H \quad (4)$$

或者两边取对数表述为

$$\ln(R/S)_n = H \ln(a) + H \ln(n) \quad (5)$$

对  $\ln(n)$  和  $\ln(R/S)_n$  进行最小二乘法回归就可以估计出  $H$  的值,即 Hurst 指数值。

Hurst 等人证明,如果  $\{\xi(\tau)\}$  是相互独立、方差有限的随机序列,则有  $H=0.5$ ;  $0.5 < H < 1$ ,表明时间序列具有长期相关的特征,过程具有持续性,也就是说表明未来序列总体变化将与过去的变化趋势一致。如过去整体增加的趋势预示将来的整体趋势还是增加,反之亦然。且  $H$  值越接近 1,持续性就越强;  $0 < H < 0.5$ ,表明时间序列具有长期相关性,但将来的总体趋势与过去相反,即过去整体增加的趋势预示将来的整体上减少,反之亦然,这种现象就是反持续性,并且  $H$  值越接近 0,反持续性越强。

2.2.2 小波分析基本原理 小波分析基本原理描述如下<sup>[13-14]</sup>:

(1) 小波函数。小波分析的基本思想是用一簇小波函数系来表示或逼近某一信号或函数。小波函数  $\psi(t) \in L^2(R)$  且满足:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (6)$$

式中:  $\psi(t)$  为基小波函数,它可通过尺度的伸缩和时间轴上的平移构成一簇函数系:

$$\psi_{a,b}(t) = |a|^{-1/2} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad \text{其中, } a, b \in R, a \neq 0 \quad (7)$$

式中:  $\psi_{a,b}(t)$  为子小波;  $a$  为尺度因子,反映小波的周期长度;  $b$  为平移因子,反映时间上的平移。

选择合适的基小波函数是进行小波分析的前提,

本文选择 Morlet 小波作为基小波函数。Morlet 小波具有非正交性,而且是由 Gaussian 调节的指数复值小波,函数表达如下式。

$$\psi(t) = \pi^{-1/4} e^{i\omega_0 t} e^{-t^2/2} \quad (8)$$

式中:  $t$  为时间;  $\omega_0$  是无量纲小波中心频率。

(2) 小波变换。若  $\psi_{a,b}(t)$  是由(7)式给出的子小波,对于给定的能量有限信号  $f(t) \in L^2(R)$ ,其连续小波变换(Continue Wavelet Transform,简称为 CWT)为:

$$W_f(a,b) = |a|^{-1/2} \int_R f(t) \bar{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (9)$$

式中:  $W_f(a,b)$  为小波变换系数;  $f(t)$  为一个信号或平方可积函数;  $a$  为伸缩尺度;  $b$  平移参数;  $\bar{\psi}\left(\frac{x-b}{a}\right)$  为  $\psi\left(\frac{x-b}{a}\right)$  的复共轭函数。

(3) 小波方差。将小波系数的平方值在  $b$  域上积分,就可得到小波方差,即

$$\text{Var}(a) = \int_{-\infty}^{+\infty} |W_f(a,b)|^2 db \quad (10)$$

小波方差随尺度  $a$  的变化过程,称为小波方差图。由式(9)可知,它能反映信号波动的能量随尺度  $a$  的分布。因此,小波方差图可以用来确定信号中不同种尺度扰动的相对强度和存在的主要时间尺度,即主周期。

2.2.3 Mann-Kendall 非参数检验 Mann-Kendall 非参数检验基本原理描述如下<sup>[15-16]</sup>:

Mann-Kendall 检验不需要样本遵循一定的分布,也不受少数异常值的干扰,适用于水文、气象等非正态分布的数据,计算方便。

(1) 非参数 Man-Kendall 趋势检验。定义检验统计量  $S$ : 在 Mann-Kendall 检验中,原假设  $H_0$  为时间序列数据  $(X_1, \dots, X_n)$ , 是  $n$  个独立的、随机变量同分布的样本; 备择假设  $H_1$  是双边检验,对于所有的  $k, j \leq n$ , 且  $k \neq j$ ,  $X_k$  和  $X_j$  的分布是不相同的,检验的统计量  $S$  计算如下式:

$$S = \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} \text{sign}(X_i - X_j) \quad (11)$$

式中:  $\text{sign}()$  为符号函数。当  $X_i - X_j$  小于、等于或大于零时,  $\text{sign}(X_i - X_j)$  分别为  $-1, 0$  或  $1$ ; M-K 统计量公式  $S$  大于、等于、小于零时分别为:

$$\begin{cases} Z = (S-1) / \sqrt{n(n-1)(2n+5)/18} & S > 0 \\ Z = 0 & S = 0 \\ Z = (S+1) / \sqrt{n(n-1)(2n+5)/18} & S < 0 \end{cases} \quad (12)$$

$Z$  为正值表示增加趋势,负值表示减少趋势。 $Z$  的绝对值在大于等于 1.28, 1.64, 2.32 时表示分别通

过了信度 90%,95%,99%显著性检验。

(2) 非参数 Mann-Kendall 法突变检测。设有一时间序列如下: $x_1, x_2, \cdots, x_n$ , 构造一秩序列  $r_i, r_i$  表示  $x_i > x_j (1 \leq j \leq i)$  的样本累积数。定义  $S_k$ :

$$S_k = \sum_{i=1}^k r_i \quad (k=2, 3, \cdots, n) \tag{13}$$

$$\begin{cases} r_i = +1, & X_i > X_j \\ r_i = 0 & \text{否} \end{cases} \quad (j=1, 2, \cdots, i) \tag{14}$$

$S_k$  均值  $E(s_k)$  以及方差  $\text{var}(s_k)$  定义如下:

$$E(s_k) = \frac{n(n+1)}{4} \tag{15}$$

$$\text{var}(s_k) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72} \tag{16}$$

在时间序列随即独立假定下,定义统计量:

$$UF_k = \frac{s_k - E(s_k)}{\sqrt{\text{var}(s_k)}} \quad (k=1, 2, \cdots, n) \tag{17}$$

其中  $UF_1 = 0$ 。  $UF_k$  为标准正态分布,给定一显著水平  $\alpha$ ,查正态分布表得到临界值  $U_\alpha$ ,当  $|UF_k| > U_\alpha$ ,表明序列存在一个明显的增长或减少趋势,所有  $UF_k$  将组成一条曲线  $C_1$ ,通过信度检验可知其是否

表 1 全年各月包含的角度及月中代表的角度值

月份	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
包含角度/(°)	345~15	15~45	45~75	75~105	105~135	135~165	165~195	195~225	225~255	255~285	285~315	315~345
代表角度/(°)	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330

计算公式如下:

$$R_x = \sum_{i=1}^{12} r_i \sin \theta_i \tag{18}$$

$$R_y = \sum_{i=1}^{12} r_i \cos \theta_i \tag{19}$$

$$C_n = \sqrt{R_x^2 + R_y^2} / \sum_{i=1}^{12} r_i \tag{20}$$

$$D = \tan^{-1} (R_x / R_y) \tag{21}$$

式中: $R_x, R_y$  分别为 12 个月径流矢量的分量之和所构成的水平、垂直分量; $r_i$  为第  $i$  月的径流量; $\theta_i$  为第  $i$  月经流的矢量角度; $i$  为月序。

如果某年径流量集中在某月内,则合成向量与年径流量之比为 1,  $C_n$  为极大值;如果全年内各月经流量都相同,则合成向量为 0,  $C_n$  为极小值。可见  $C_n$  的取值在 0~1,越接近 1,表明径流量越集中,径流量的年内分配越不均匀;越接近 0,说明径流越不集中,径流量的年内分配越均匀。  $D$  计算的是合成向量的方位角,反映了一年中最大径流量出现的时间。

3 结果与分析

3.1 径流年际特征

3.1.1 年际变化特征 通过对红山嘴断面共 60 a 的实测径流资料合并统计,多年平均年径流量 13.37

具有趋势。把此方法引用到反序列中,再重复上述计算过程,并使计算值乘以 -1,得到  $UB_k, UB_k$  在图中表示为  $C_2$ 。分析绘出的  $UF_k$  和  $UB_k$  曲线图,若  $UF_k$  或  $UB_k$  的值大于 0,则表明序列呈上升趋势,小于 0 则表明呈下降趋势;当它们超过信度线时,即表示存在明显的上升或下降趋势;若  $C_1$  和  $C_2$  的交点位于信度线之间,则此点可能就是突变点的开始。

2.2.4 集中度和集中期 集中度和集中期基本原理如下<sup>[17-18]</sup>:

集中度  $C_n$  和集中期  $D$  是利用一年的逐月经流量资料来反映径流量年内分配集中的程度和集中的重心(一年中最大径流量出现的时间)。

把一年 12 个月的月经流量看作向量,月经流量大小作为该月经流矢量的模,所处的月份作为该矢量的方向,用圆周(把圆周的度数 360°作为一年天数 365 日,1 日相当于 0.986 3°,表 1 列出了全年各月包含的角度及月中代表的角度值)方位来表示,将一年中各月经流矢量求和,合矢量模与年径流量的比值为年径流集中度,合矢量方向为年径流集中期(表 1)。

亿  $m^3$ ,2002 年为最丰年,年径流量为 19.31 亿  $m^3$ ,1984 年为最枯年,年径流量为 10.55 亿  $m^3$ ,径流最大变幅为年径流均值的 1.44 倍,年最大径流量是最小径流量的 1.83 倍(图 1)。

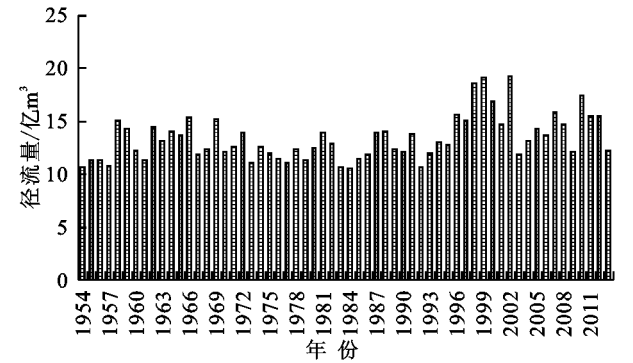


图 1 红山嘴年径流量趋势

年径流量变差系数  $C_v$  值和偏态系数  $C_s$  值在矩法估算的基础上,采用 P-Ⅲ 型频率曲线配线确定。径流变差系数  $C_v$  值为 0.16,说明红山嘴断面的径流年际变化不大。径流变差系数结合径流频率曲线拟合效果,计算得到径流偏差系数  $C_s$  值为 0.47 的正偏态分布,径流小于平均径流量概率较高,也就是说长期径流量为正偏态分布,径流出现大于均值的次数少但离差值大,径流小于平均径流量概率较高,但离差

值小。通过  $C_V$  值绘制径流频率曲线,根据拟合效果,选择  $C_S=3 C_V$ 。在此基础上,进一步推算出红山嘴断面径流五年一遇径流量为 20.72 亿  $m^3$ ,10 a 一遇径流量为 22.19 亿  $m^3$ (图 2)。

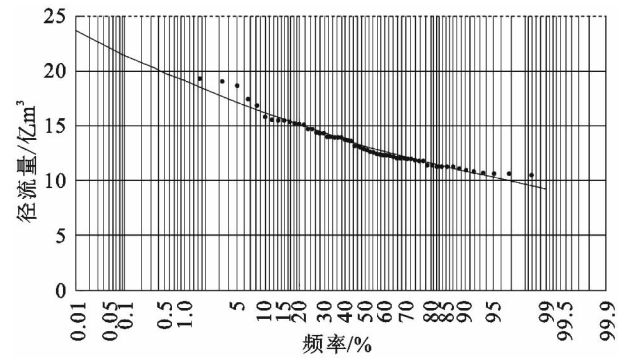


图 2 年径流频率曲线

3.1.2 年际变化趋势 通过对红山嘴断面径流时间序列进行 R/S 分析,得到 Hurst 指数,即  $H$  为 0.816 9,  $\ln(n)$  与  $\ln E(R/S)$  拟合图如图 3 所示,回归方程为:

$$R/S=0.7386n^{0.8169}$$

$H>0.5$ ,非常接近于 1,说明红山嘴断面年径流量序列为分形时间序列,存在长期记忆性和持续性,未来趋势与过去一致,并且持续性较强。Hurst 指数分析也印证了玛纳斯河流具有“天旱年河水不少,天雨年河水不多”,即年际变化小的特点。

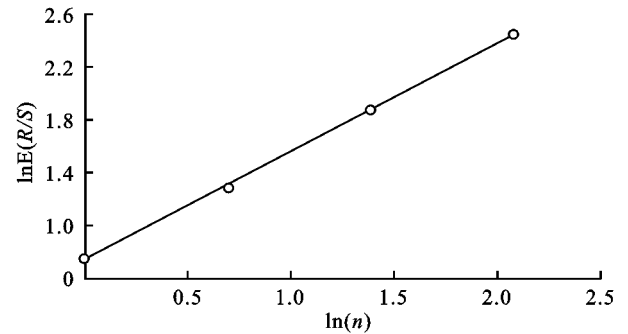


图 3 年径流 R/S 分析

3.1.3 年际变化周期分析 借助 Morlet 小波分析方法,同时尝试结合 H-P 滤波对红山嘴断面径流时间序列进行周期性分析。从分析的效果来看,小波分析能够很好的从整体上判断主周期、次周期等,而 H-P 滤波方法能够很好的对周期变化细节及中小周期分析做出清晰的判断,并且对周期变化趋势有较好的解释。

从年径流小波系数实部等值线图可以看出,年度径流演变过程中存在 14~35 a,6~13 a,以及 3~5 a 三类周期变化规律。其中在 14~35 a 尺度上出现枯—丰 3 次振荡;在 6~13 a 时间尺度上出现枯—丰 5 次振荡;在 1990 年以后周期变化相对稳定(图 4)。

小波变化方差图中有 5 个较明显的峰值,分别为

28 a,21 a,13 a,7 a 和 4 a 的时间尺度。期中 21 a 是最大峰值,说明 21 a 左右的周期振荡最强,为径流变化的第一主周期;28 a 为第二峰值,为径流变化第二主周期;13 a,7 a 和 4 a 的时间尺度分别为径流的第三、第四和第五主周期。这 5 个周期的波动控制着径流在整个时间域内的周期变化特征(图 5)。

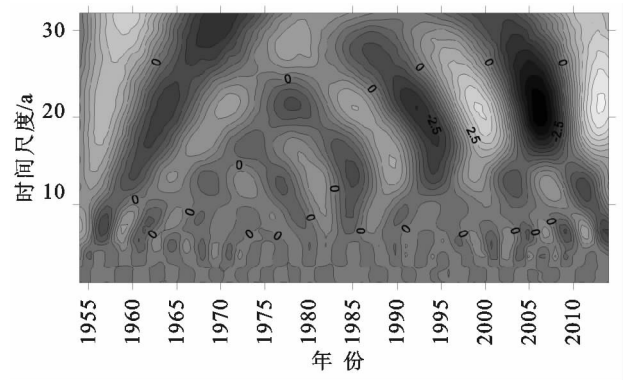


图 4 年径流小波变换系数等值线

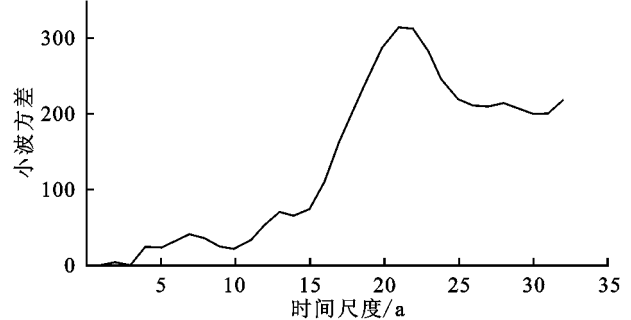


图 5 年径流小波方差图

H-P 滤波剔除径流序列的趋势成分后得到径流时间序列的周期成分,即图 6 中周期曲线。对于周期成分,可以根据谷—谷或者峰—峰来进行判断,这种方法简单易辨,篇幅原因,这里对具体周期划分不再赘述。从整体周期变化上来看,红山嘴断面径流在 1980 年之前是短周期为主,变动频繁,变化幅度不大;1980 年以后变动周期逐渐变长,变化幅度加剧。此外,可以从 H-P 滤波图上观察径流剔除周期成分后趋势曲线,即趋势曲线变化情况。60 a 来红山嘴断面径流表现出缓慢、长期的波动式上升趋势。

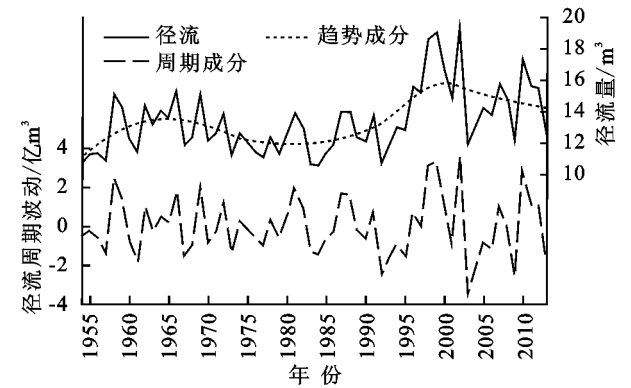


图 6 年径流量 H-P 滤波

**3.1.4 丰枯水周期** 用距平百分率划分丰平枯水年,距平百分率  $P = (\text{某年年径流量} - \text{多年平均径流量}) / \text{多年平均径流量} \times 100\%$ 。本文中划分了丰平枯三个级别,当  $P > 10\%$  为丰水年,当  $-10\% < P \leq 10\%$  为平水年,当  $P \leq -10\%$  为枯水年。根据每年的丰平枯水判断,整体来看,红山嘴断面 1954—1969 年为一个平水周期,1970—1995 年为一个较长的枯水周期,1996—2013 年为一个丰水周期,其间还有小的丰、平、枯变换过程。红山嘴断面这 60 a 径流系列包含了完整的丰、平、枯水过程。丰水段是枯水段平均径流量的 1.25 倍。

**3.1.5 年际径流突变分析** 借助 Mann-Kendall 对红山嘴径流进行突变分析,通过计算分析,分别绘出径流时间序列的顺序统计曲线 UF 和逆序统计曲线 UB。求得 Z 值为 3.04,大于 2.32,通过 99% 的显著性检验。从图 7 中可以看出,红山嘴径流的突变点在 1994 年,径流有增大趋势,结合丰枯水周期分析,径流在 1995 年从枯水周期进入丰水周期。

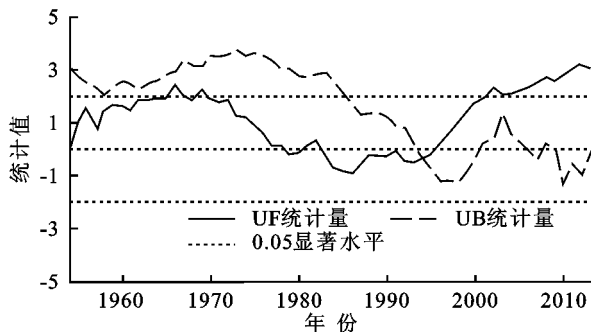


图7 年径流量 M-K 检验统计变化

### 3.2 径流年内变化

玛纳斯河流域四季分明,冬夏漫长,春秋季短暂,春季升温快,秋季降温迅速,四季气候特征直接影响了流域径流量的变化。

**3.2.1 年内分配** 红山嘴断面春季(3—5月)径流量占全年的 9.22%,夏季(6—8月)占 67.58%,秋季(9—11月)占 16.91%,冬季(12—2月)只占全年径流量的 6.29%。连续最大 4 个月径流为 6—9 月,占全年径流量的 77.06%,连续最小 3 个月(1—3 月)径流量占年径流量的 5.89%,四季分配不均匀,占年径流量按大小排列顺序为:夏季(6—8 月) > 秋季(3—5 月) > 春季(9—11 月) > 冬季(12—翌年 2 月)(图 8)。

**3.2.2 径流集中度和集中期** 红山嘴断面径流集中度变化区间在 0.5~0.7 之间,平均集中度为 0.62,变化幅度不是很大,集中程度较高。集中度最大值是 0.68,时间是在 1999 年;最小值是 0.54,时间是 2013 年。从总体趋势来看,在 1999 年之前是相对有规律的波动变化,并有一定的上升趋势,但是从 1999 年开

始到 2013 年,集中度明显下降(图 9)。

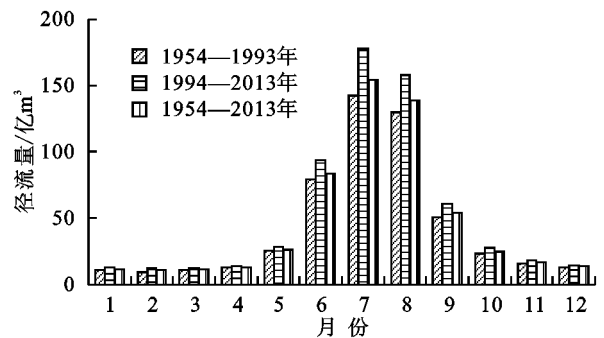


图8 分阶段月径流量年内分配特征

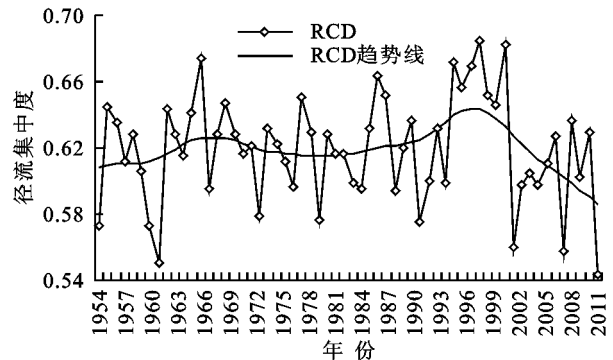


图9 月径流量集中度

红山嘴断面径流集中期变化区间在  $180^\circ \sim 201^\circ$  之间,集中期平均值是  $191.43^\circ$ ,最大值是  $200.62^\circ$ ,时间是在 1958 年;最小值是  $182.35^\circ$ ,时间是 1968 年。也就是说,红山嘴断面径流集中期主要在每年的 7 月下旬和 8 月上旬,数据统计结果显示,大多数年份的月径流集中期是在 7 月的下旬。从总体趋势来看,红山嘴断面月径流集中期在 1968 年之前处于下降趋势,1968 年之后开始相对有规律的波动变化,并有缓慢的上升趋势(图 10)。

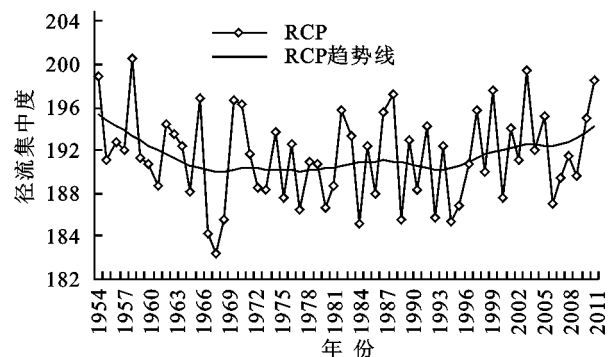


图10 月径流量集中期

**3.2.3 年内变化趋势及突变检验** 对 1954—2013 年月径流量的变化趋势进行检验,检验结果见表 2。除了 4 月、5 月和 6 月没有显著变化,其他月份均为显著上升趋势,60 a 来各个月径流量的突变时间节点除了 5 月份是在 1956 年,其他月份基本在 1990 年以后。

表 2 红山嘴断面径流年内变化趋势和突变 M-K 检验

月份	Z 统计量 (M-K)	显著性 $\alpha=0.05$	趋势	突变 年份
1 月	3.9288	显著	显著上升	1999
2 月	3.8969	显著	显著上升	2002
3 月	3.0933	显著	显著上升	2002
4 月	1.7794	不显著	无显著变化	2007
5 月	1.0396	不显著	无显著变化	1956
6 月	1.9198	不显著	无显著变化	1992
7 月	2.3088	显著	显著上升	1992
8 月	2.0473	显著	显著上升	1995
9 月	1.9708	显著	显著上升	1997
10 月	3.0486	显著	显著上升	1998
11 月	3.0678	显著	显著上升	2010
12 月	2.3024	显著	显著上升	2004

4 结论

(1) 径流年际变化不大,长期有上升趋势,径流量小于平均值概率较高,有利于径流资源的开发利用。

(2) 径流序列存在较强长期持续性和记忆性。

(3) 径流序列存在 14~35 a,6~13 a 和 3~5 a 周期变化,同时分析出第一主周期为 21 a,第二、三主周期分别为 28 a 及 13 a;径流整体周期在 1980 年以前变化频繁,幅度不大,1980 年以后变化幅度增强,周期变长;丰枯水周期表现为 16 a 平水周期,然后是 26 a 枯水周期,最后是 18 a 的丰水周期。

(4) 径流突变时间点为 1994 年,这与周期变化相一致,红山嘴断面径流在 1995 年从枯水周期进入丰水周期。

玛纳斯河红山嘴断面 60 a 月径流年内特征主要有:径流年内分配不均匀,夏季径流占最大百分比,接近 70%,集中程度高,主要集中在 7 月底和 8 月初;大部分月径流表现出显著上升趋势,突变年份除了 5 月径流在 1956 年,其他月份径流都在 1990 年以后。

影响玛纳斯河径流变化主要因素有以下两方面,一方面是全球气候变化的影响,全球变暖导致流域温度升高和降水增加,温度上升加速了冰川消融,1990—2010 年流域冰川/永久积雪的减少率高达 29.85%<sup>[19]</sup>,融雪加速和降水增加导致玛纳斯河年径流量出现上升趋势,同时区域变暖也会使河流月最大流量提前。气候系统内部变化,如西北环流及北冰洋气流的低频振动等也会对区域气温和降水产生影响,从而影响流域径流的年际和年内变化。另一方面因素是流域人类活动对玛纳斯河径流的影响。玛纳斯河流域 1949 年总人口是 6.4 万人,牲畜 8.4 万头,耕地面积 32.67 km<sup>2</sup>,工业生产基本空白,2013 年全流域总人口 100 余万人,牲畜 203 万头,灌溉面积 2 733.33 km<sup>2</sup>,工业总产值达到 69 亿元,工农业的大量用水会减少河流的径流量。并且随着人类活动的加剧,流域植被面积也在快

速减少<sup>[19]</sup>,破坏草地和砍伐森林会使水土流失加剧,洪峰径流剧增。同时人类活动增加也会导致区域气温上升,农业灌溉引起的局地水循环增强会导致区域降水的增加,所以人类活动对流域径流变化造成不可忽视的影响。

参考文献:

[1] Kahya E, Dracup J A. US streamflow patterns in relation to the El Niño/Southern Oscillation[J]. Water Resources Research, 1993,29(8):2491-2503.

[2] Klavins M, Briede A, Rodinov V, et al. Long-term changes of the river runoff in Latvia[J]. Boreal Environment Research, 2002,7(4):447-456.

[3] Frolov A V. Dynamic-stochastic modeling of long-term variations in river runoff[J]. Water Resources, 2006,33(5):483-493.

[4] 张伟,何新林,刘兵,等.天山北麓玛纳斯河规律径流分析[J].石河子大学学报:自然科学版,2008,26(1):80-82.

[5] 沈雪峰,艾成.新疆玛纳斯河径流时间变化特征及其趋势分析[J].干旱区资源与环境,2012,26(7):14-19.

[6] 吉磊,何新林,刘兵,等.近 60 年玛纳斯河径流变化规律的分析[J].石河子大学学报:自然科学版,2013,31(6):765-769.

[7] 凌红波,徐海量,张青青,等.新疆玛纳斯河年径流时序特征分析[J].中国沙漠,2011,21(6):1639-1646.

[8] 李燐楷,李毅.玛纳斯河肯特瓦特站年径流序列分形分析[J].水电能源科学,2010,28(7):9-11,50.

[9] 唐湘玲,吕新,李俊峰,等.近 50 年玛纳斯河流域径流变化规律分析[J].干旱区资源与环境,2011,25(5):124-129.

[10] 时京林,刘兵,丁文学.玛纳斯河流域河川径流时空分异特征研究[J].节水灌溉,2014(3):54-57.

[11] 张殷钦,胡伟,刘俊民.基于 R/S 分析法的地下水位动态变化趋势分析[J].中南大学学报:自然科学版,2012,43(12):4912-4916.

[12] 李宝玲,李建林,咎明军,等.河流年径流量的 R/S 灰色预测[J].水文,2015,35(2):44-48.

[13] 王元超,王旭,雷晓辉,等.丹江口水库入库径流特征及其演变规律[J].南水北调与水利科技,2015,13(1):15-19.

[14] 潘国营,秦永泰,马亚芬,等.基于 R/S 和 Morlet 小波分析的丹河径流变化特征研究[J].水资源与水工程学报,2015(3):41-45.

[15] 周婷,于福亮,李传哲,等.1960—2005 年渭公河流域径流量演变趋势[J].河海大学学报:自然科学版,2010,38(6):608-613.

[16] Rose S. Rainfall-runoff trends in the south-eastern USA: 1938—2005 [J]. Hydrological Processes, 2009, 23(8): 1105-1118.

[17] 杨远东.河川径流年内分配的计算方法[J].地理学报,1984,39(2):218-227.

[18] 刘贤赵,李嘉竹,宿庆,等.基于集中度与集中期的径流年内分配研究[J].地理科学,2007,27(6):791-795.

[19] 李慧婷,徐丽萍,郭鹏,等.玛纳斯河流域景观格局变化与地形控制分析[J].水土保持研究,2015,22(6):273-278.