

# 近 48 年区域气候变化对精河地表径流的影响分析

柯琳<sup>1a</sup>, 叶茂<sup>1a,1b</sup>, 凌红波<sup>2</sup>, 涂文霞<sup>1a</sup>, 陈么<sup>3</sup>

(1a. 新疆师范大学 地理科学与旅游科学学院, 新疆 乌鲁木齐 830054;

1b. 新疆干旱区湖泊环境与资源实验室, 乌鲁木齐 830054; 2. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 新疆 乌鲁木齐 830011; 3. 陕西师范大学 旅游与环境学院, 陕西 西安 710062)

**摘要:** 利用精河源流区近 48 年的降水、气象以及径流数据, 借助非参数检验、小波分析、周期性叠加趋势模型等方法分析了精河流域气候因子及年径流量的变化趋势以及气候因子对径流影响量分离。结果表明:①在未来的 50 年气温、降水以及径流量仍将保持原来增加的趋势。②在年际变化上, 年气温、降水量和径流量均存在 11、14、16 年的变化周期。③利用周期性叠加趋势模型对源流来水量进行模拟和预测, 1998 - 2008 年气候变化对径流量的影响是积极的, 分离出近 10 年气候变化对径流量的影响量知降水量变化对精河径流影响更突出。

**关键词:** 气候变化; 小波分析; 突变检验; 趋势预测; 精河源流区

中图分类号: TV121.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2013)01-0054-06

## Analysis of regional climate change impact on surface runoff in Jinghe river in recent forty-eight years

KE Lin<sup>1a</sup>, YE Mao<sup>1a,1b</sup>, LING Hongbo<sup>2</sup>, TU Wenxia<sup>1a</sup>, CHEN Yao<sup>3</sup>

(1a. School of Geographical Sciences and Tourism; 1b. Xinjiang Laboratory of Lake Environment and Resources in Arid Zone, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China; 2. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China; 3. Tourism and Environment College, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China)

**Abstract:** Using non-parametric tests, wavelet transform, cyclical overlay trend model analysis methods, the paper analyzed climate factors in Jinghe River basin and the change trend of annual runoff and the separation of influence of climate factors on runoff volume based on the precipitation, meteorological and flow data in Jinghe source area for nearly 48 years. Results show that: ① In the next 50 years temperatures, rainfall and runoff will remain original trend of increase. ② In the interannual variations, the temperature, precipitation and runoff exist are 11, 14, 16 years of change cycle. ③ Using periodic superimposed trend model to simulate and forecast origin runoff, the influence of climate change on runoff from 1998 to 2008 was positive, separating out nearly 10 years influence quantity of climate change on runoff know that the influence of precipitation change on JingHe runoff is more outstanding.

**Key words:** climate change; wavele analysis; abrupt change test; trend prediction; Jinghe source area river

## 0 引言

未来气候的潜在变化将对河流系统造成深远的影响。作为自然界水循环过程中两大要素的气温和降水, 对水资源的形成、发展和演化具有极其重要的作用<sup>[1]</sup>。新疆干旱区水资源的一个显著特点是依赖山区冰川融水和大气降水, 因此温度升高和降水量的变化以及时空分布都将引起径流的变化<sup>[2]</sup>。

精河流域径流补给主要依靠源流山区降水与冰

川融水补给, 因此该流域气候变化对其年径流量的影响也更为显著。以往大量的研究多集中于对精河流域径流气候因子进行简单的趋势分析和关联检验, 而对于流域源流山区气候因子的变化, 其对径流的影响量分离以及对未来气温、降水量和径流变化趋势预测的研究成果却少见报道。而博尔塔拉河、精河流域是目前艾比湖仅有的入湖水量, 研究精河流域的地表径流变化及影响因子, 有助于艾比湖流域水资源的合理配置和可持续发展战略研究, 为该

收稿日期: 2012-10-25; 修回日期: 2012-11-05

基金项目: 新疆干旱区湖泊环境与资源实验室基金(XJDX0909-2010-11)

作者简介: 柯琳(1988-), 女, 陕西安康人, 在读研究生, 主要从事干旱区水资源研究。

通讯作者: 叶茂(1977-), 女, 陕西省绥德人, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事干旱区生态水文过程研究。

流域可持续发展提供理论依据。

## 1 研究区概况

精河发源于天山中段的婆罗科努山北坡,地理位置介于东经  $93^{\circ}45' \sim 94^{\circ}18'$ 、北纬  $43^{\circ}00' \sim 43^{\circ}10'$  之间,全长 114 km,由南向北流,出山口后经过精河县城注入艾比湖<sup>[2]</sup>。精河流域属于温带大陆性干旱和半干旱气候,年平均气温  $7.8^{\circ}\text{C}$ ,极端最高气温  $41.5^{\circ}\text{C}$ ,极端最低气温  $-36.4^{\circ}\text{C}$ ,多年平均蒸发量  $2\,447.1\text{ mm}$ ,多年平均降水量  $251.9\text{ mm}$ 。精河源区为现代冰川作用区和永久积雪覆盖区<sup>[3]</sup>。精河流域有 129 条冰川,冰川面积  $91\text{ km}^2$ ,冰川总储量  $54.598\text{ 亿 m}^3$ ,冰川年融水量为  $0.96\text{ 亿 m}^3$ ,占河川径流量的 20.6%。精河多年平均径流量为  $4.75\text{ 亿 m}^3$ <sup>[2]</sup>。精河上游主要由乌图精河与冬都精河两大源流汇合而成,出山口设有精河山水文站。

## 2 数据收集及研究方法

### 2.1 数据收集

为了分析精河流域年径流的变化趋势,本文收集了精河 1961—2008 年间统计年鉴数据和精河山水文站实测的年平均气温、年降水量、精河年径流量等气象水文数据。由于该水文站位于河流源区,人类对水的利用数量相对较少,因而其水文监测数据基本上接近于自然状态,可看作天然径流量。

### 2.2 研究方法

**2.2.1 非参数检验** 在非参数检验中,原假设认为时间序列的增减趋势或者阶段转换的跳跃不明显;而备择性假设认为时间序列变化趋势显著<sup>[4]</sup>。从检验能力上看,使用非参数 Mann-Kendall 单调趋势检验和 Mann-Whitney 阶段转换检验要优于参数  $t$  检验,并且无须事先假定样本的统计分布<sup>[5]</sup>。在非参数 Mann-Kendall 单调趋势检验中,原假设  $H_0$  认为气候及径流时间序列没有发生显著性变化,而备择假设  $H_1$  则表示待测时间序列变化显著。该方法在处理非独立的时间序列和随机正态分布变量时能直观地表现时间序列的年度变化趋势,且不必先假定数据的分布特征。已有大量文献详细阐述<sup>[6]</sup>,本文不再具体介绍。

**2.2.2 R/S 分析方法** R/S 法是由 Hurst 在分析尼罗河水文资料时提出的一种分析方法<sup>[7-8]</sup>,近些年该方法在分形研究中得到了许多应用,是一种非线性的科学预测方法,其基本步骤如下:对于一个时间序列  $x(t), t = 1, 2, \dots$ 。均值序列为:

$$Y(\tau) = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} x(t), \tau = 1, 2, \dots \quad (1)$$

累积离差为:

$$F(t, \tau) = \sum_{u=1}^t x(u) - Y(\tau) \quad 1 \leq t \leq \tau \quad (2)$$

极差为:

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

标准差为:

$$S(\tau) = \left[ \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} (x(t) - Y(\tau))^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad \tau = 1, 2, \dots \quad (4)$$

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

$$R/S = \left( \frac{\tau}{2} \right)^H \quad (5)$$

式中:  $H$  为赫斯特系数。上述分析方法被称为  $R/S$  分析法,对公式(10)两边同时取对数即得到赫斯特经验公式,基于时间序列并利用赫斯特经验公式得到的一簇  $H$  值进行最小二乘法拟合,得出的直线斜率即为修正后的赫斯特指数 ( $0 < H < 1$ ),它揭示了时间序列的分形特征;对于不同的  $H$ , 表示序列有不同的趋势变化:当  $H = 0.5$  时,表明时间序列是完全独立的,没有相关性或只是短程相关;当  $0 < H < 0.5$  时,意味着未来的变化状况与过去相反,即反持续性,  $H$  越小,反持续性越强;当  $H > 0.5$  时,意味着未来的变化状况与过去一致,这个过程具有持续性,即过去的增长趋势意味着将来也具有增长趋势,反之亦然,  $H$  越大持续性越强。

**2.2.3 小波变换** 小波分析可以较好地甄别出实测序列在多时间尺度下周期变化的位相和强度,并能够为短期气候及径流量预测提供科学依据<sup>[9-11]</sup>。本文利用 Morlet 小波变换探讨精河流域源流区气候因子与年径流量的多时间尺度的变化特征<sup>[12-13]</sup>。

小波函数为一组震荡变换的伸缩平移基  $\psi(t)$ 。将小波母函数  $\psi(t)$  进行伸缩平移,就可以得到一组函数序列  $\psi(t)$ :

$$\Psi_{a,\tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-\tau}{a}\right) \quad a, \tau \in R, a > 0 \quad (6)$$

式中:  $a$  为伸缩因子;  $\tau$  为平移因子;  $\psi(t)$  为子小波。

Morlet 小波函数为复数小波,其表达式为:

$$\psi(t) = e^{ict} e^{-t^2/2} \quad (7)$$

式中:  $c$  为常数;  $i$  表示虚部。

小波变换是把一称为基本小波的函数做位移后,再在不同的尺度域下对待分析信号做内积。

2.2.4 周期性叠加趋势模型 假设径流量的变化除具有周期性变化特点外并有一定的趋势水平,则利用周期性叠加趋势模型预测水资源变化的趋势,在时段  $T + S$  的期望值为<sup>[14]</sup>:

$$L_{(T+S)} = a_T + b_S + D_{(T+S)} \quad (8)$$

式中:  $a_T$  是时段  $T$  的平均水准;  $b_S$  是该时段的斜率;  $D_{(T+S)}$  是在时段  $T + S$  的季节增量。利用历史资料建立预测预报模型分两步: 第一步, 先根据完整周期的时间序列的历史数据 ( $x_1, x_2, x_3, \dots, x_T$ ) 来估计第  $T$  个周期(时段)中  $a_T$  的估值  $\hat{a}_T$ 、 $b_S$  的估值  $\hat{b}_T$  和  $D_{(T+S)}$  的估计值  $d_{(T+S)}$  ( $S = 1, 2, \dots, M$ ), 并对未来时段进行预测; 第二步, 用余下不够一个完整周期的数据更新预报模型, 并作相应的预测, 从而建立  $T$  在对未来第  $S$  时段的完整预测模型:

$$\hat{x}_T(S) = \hat{a}_T + \hat{b}_T S + d_{(T+S)} \quad (S = 1, 2, \dots, M) \quad (9)$$

### 3 结果与分析

#### 3.1 气候因子与精河流域地表径流的变化趋势分析

从表 1 中可以看出,精河流域气温、降水量及精河来水量总体表现为增加走势。近 48 年来,精河流域气温以  $0.03^\circ\text{C}/\text{a}$  的速率强势升高,并据气温统计量  $Zc = 3.84 > Z_{0.01} = 2.58$  在 0.01 检验水平下达

到极显著。降水量的检验统计量  $Zc = 2.85 > Z_{0.01} = 2.58$ , 以  $1.18 \text{ mm}/\text{a}$  的速率增加,且趋势极显著。据径流量的检验统计量  $Zc = 2.1953 < Z_{0.05} = 1.96$ , 在 0.05 检验水平下接受原假设,表明其径流量以  $0.039 \text{ 亿 m}^3$  的年变化率呈显著增加走势。经过 R/S 分析,1961 - 2008 年的气温、降水量及径流量的  $H$  值分别为 0.8505、0.7698 和 0.798 (图 1), 皆大于 0.5, 具有较强的持续性,表明在 2008 年后的一段时间内,精河流域气温和降水量仍将保持上升趋势。这与西北地区由暖干向暖湿化转化,年降水量有所增加的趋势相同<sup>[15]</sup>, 精河年径流量在未来 50 年仍可能保持增加趋势。

在干旱区气候因子是驱动区域水文的主要动力,气温的变化影响着源流区的山区冰川与积雪的消融,而大气降水是地表水资源的根本补给来源,因此气温、降水量变化对区域地表径流的形成与转换至关重要,将累积距平曲线变化中上升段定义为气温偏暖、降水增加阶段,下降段定义为气温偏冷、降水减少阶段,利用曲线上的微小变化可以考察气象要素的短期变化趋势,利用长期的变化趋势则可反映气象要素长期演变趋势<sup>[16]</sup>, 利用 1961 - 2008 年气温、降水量及径流量实测数据借助累积距平值以分析其变化特征(图 2)。气温趋势变化为 1961 - 1982 年, 1984 - 1988 年。1991 - 1996 年曲线趋势下降, 亦为变冷期。

表 1 Mann - Kendall 趋势检验及 R/S 分析预测

因子	时段(年)	标准差	平均值	Zc	$\beta$	$H_0$	趋势	Hurst 指数
气温	1961 - 2008	1.0490	7.10490	3.8485	0.0375	显著	递增	0.8505
降水量	1961 - 2008	41.7033	157.1121	2.8531	1.1815	显著	递增	0.7698
径流量	1961 - 2008	1.0670	12.6643	2.1953	0.0399	显著	递增	0.7980

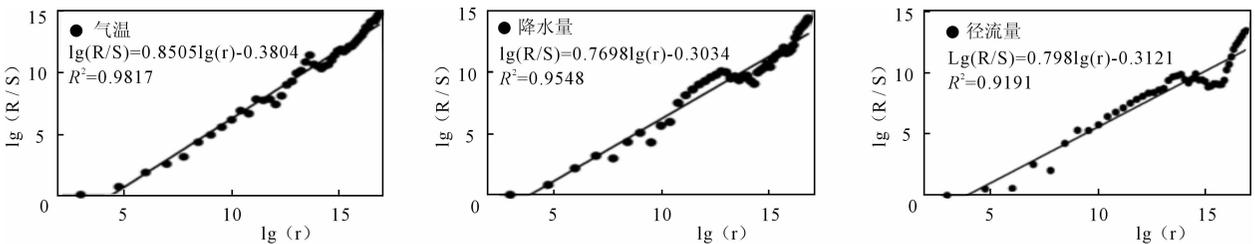


图 1 R/S 分析预测

1982 - 1984 年、1988 - 1991 年、1996 - 2008 年曲线趋势上升, 亦为变暖期。降水量的变化趋势为 1961 - 1985 年降水量为波动下降趋势, 亦为降水减少。1985 - 2006 年曲线趋势为波动上升趋势, 亦为降水增加。2006 - 2008 年趋势为下降趋势, 亦为降

水减少。年降水累积距平曲线和年气温累积距平曲线总的变化趋势比较一致。与施雅风西北干旱地区由暖干向暖湿转化的趋势相同。径流量趋势变化 1961 - 1997 年曲线为波动下降趋势, 亦为径流量减小。1998 - 2008 年曲线为上升趋势, 亦为径流量增

加。这与气温、降水的总趋势相同,精河径流补给主要依靠降水以及冰川融水,气温与降水增加补给径

流,径流量与气温、降水量趋势相同。

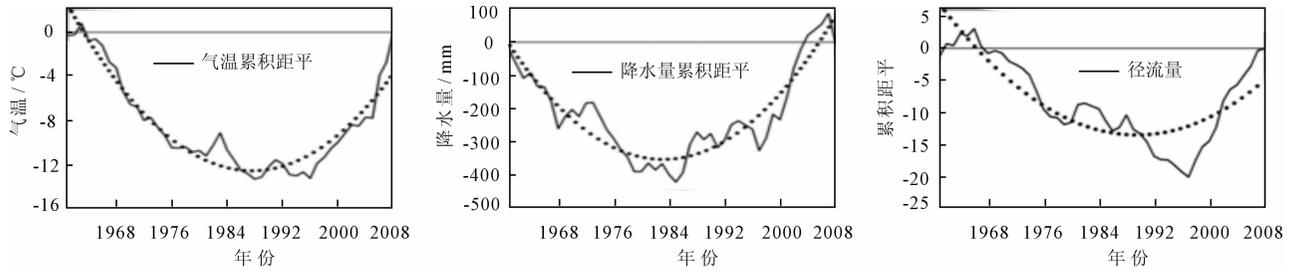


图 2 气候因子及径流累积距平值

从表 2 可看出,经过 Mann - Whitney 阶段转换检验,精河气温和降水量均存在突变点且分别出现在 1996 年、1985 年,并依此为基点将气温的时间序列分为 1961 - 1996 与 1997 - 2008 两个时间区段,降水量的时间序列也分为 1961 - 1985 与 1986 - 2008 年两个时间区段。根据表 2,对精河气温序列进行 Mann - Whitney 突变检验,其检验统计量  $|Z_w| = 3.905 > Z_{0.01}$  (经查表,  $Z_{0.01} = 2.58$ ),在 0.01 水平下跃变极为显著。降水量检验统计量为 3.023,大于 2.58 (经查表,  $Z_{0.01} = 2.58$ ),即拒绝原假设,表明其跃变在 0.01 检验水平下呈现极显著性,说明精河流域气温在 1997 年和 1986 年分别发生显著跃变,温度升高加快,降水强度明显增加。

表 2 精河流域气候因子的 Mann - Whitney 突变检验

气候因子	时段(年)	标准差	平均值	$Z_w$	$H_0$
气温	1961 - 1996	0.7602	6.7493	3.905	显著
	1997 - 2008	1.0985	8.1719		
降水量	1961 - 1985	30.2238	140.2704	3.023	显著
	1986 - 2008	45.2360	175.4183		
径流量	1961 - 1997	0.5130	4.6170	4.158	显著
	1998 - 2008	0.4879	5.076		

### 3.2 气候因子与地表径流的周期分析

利用研究区 48 年气温和降水量数据,借助 Morlet 小波函数得到其时间序列的时频分布图、小波系数图中,小波系数值大于 0 时为正值相,表示径流量、降水量偏多或气温偏高,小于 0 为负位相,表示径流量、降水量偏少或气温偏低,0 点处表示突变年,意味着在该年径流量、降水量发生了由偏少(偏多)向偏多(偏少)的突变,气温发生了由偏低(偏高)向偏高(偏低)的突变)。

由精河流域气温小波方差图(图 3)可知,气温存在 4 年、11 年和 17 年的显著周期。4 年周期处的小波系数存在明显正负位相交替变换,且在 1984 年

后小波系数值较小,周期性不强。11 年周期在 1962 - 1965, 1971 - 1974, 1979 - 1983, 1988 - 1991, 1997 - 2000 和 2005 - 2008 年表现为正位相,气温处于偏高期,而 17 年周期在 1961 - 1962, 1975 - 1986 和 1999 - 2008 年为正位相,气温偏高。

图 4 为精河流域降水量小波方差图,从图 4 可看出精河流域降水量存在 5 年和 14 年的显著周期。5 年周期存在明显的丰枯交替变化的高频振荡。14 年周期在 1968 - 1974, 1983 - 1990 和 1999 - 2005 年为正位相,降水量偏多,而其他时期为负位相,降水量偏少。

利用研究区 48 年径流量数据,借助 Morlet 小波函数得到其时间序列的时频分布图中显示了精河流域年径流量小波方差图(见图 5)。由图 5 可知,径流量存在 6 年、11 年和 16 年的显著周期。6 年周期处小波系数振幅变化不大。11 年周期在 1961 - 1965, 1970 - 1973, 1979 - 1982, 1987 - 1991, 1997 - 2001 和 2007 - 2008 年为正位相,径流量偏多;而正位相在 16 年周期处的表现在 1961 - 1966, 1977 - 1987 和 1998 - 2008 年,径流量偏多。

由以上分析可知,精河流域气温、降水量和径流量存在明显的周期性和趋势性,且大周期内包含小周期的高频振荡。综合 R/S 分析结果可知,研究区降水量、气温和径流量在未来的一段时间将呈波动性减少和下降。以精河气温(11 年)、降水量(14 年)和径流量(16 年)的最强主周期(小波方差最大值为依据,对三者未来的周期性变化和突变进行预测,这可为研究区实现水资源的合理配置提供理论依据。利用研究区气温、降水量和径流量在 11、14 和 16 年的小波系数值,分别建立与年份(t)之间的回归方程见表 3。根据拟合方程,综合考虑研究区气温、降水量和径流量主周期未来可能持续的时间长度,并借鉴姜世中等的研究成果<sup>[17]</sup>。

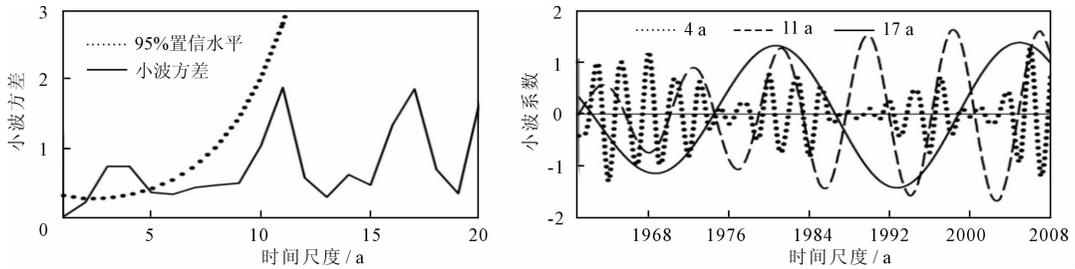


图3 气温的小波方差及小波系数图

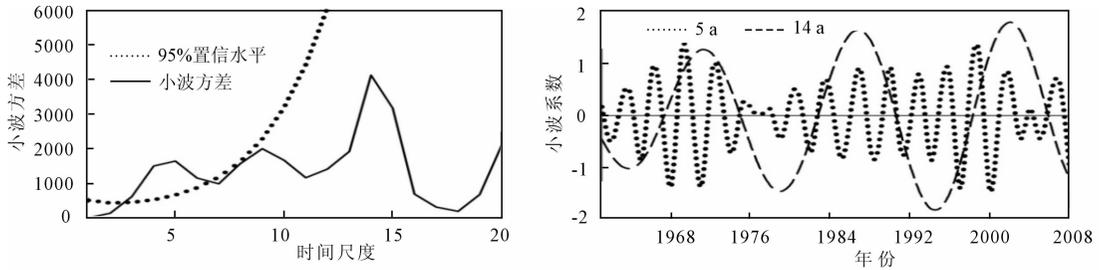


图4 降水量小波方差及小波系数图

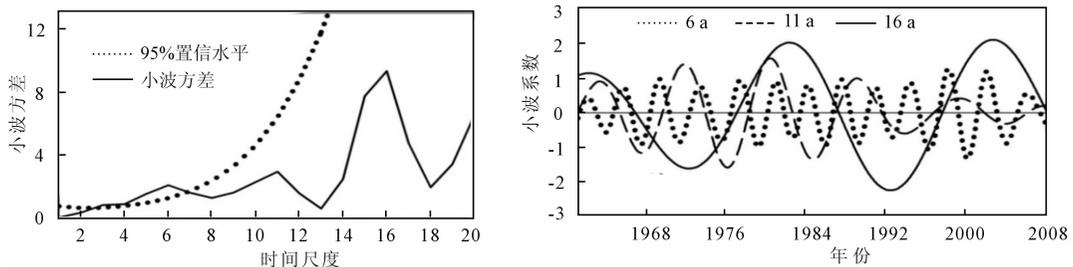


图5 精河流域径流的小波分析

表3 基于小波系数的非线性拟合方差

气候因子	时段	周期	拟合方程	$R^2$	$F$	$P$
气温	1961-2008	11a	$Y = 1.1474\sin(2\pi x/9.0754 - 6.28)$	0.7680	74.4927	<0.0001
降水量	1961-2008	14a	$Y = 1.4841\sin(2\pi x/15.861 - 6.28)$	0.9422	367.0409	<0.0001
径流	1961-2008	16a	$Y = 1.8871\sin(2\pi x/21.0292 - 6.28)$	0.9605	547.6157	<0.0001

选择20年为预见期,得到精河流域气候因子和径流量的变化特征(图6)。由图6知,2010-2028年的气温在2016、2025和2011、2020发生了偏多、偏少4次突变,气温在2016和2025年发生了由偏低向偏高的突变;降水量的突变点发生在2015、2023年,且2010-2015年为负位相,降水量偏少,2016-2023年为降水量偏多期,2024-2028年转变为偏少期。2010-2028年的径流量在2020年发生了1次突变,在2020年发生了由偏低向偏高的突变。

### 3.3 气候变化对地表径流的影响量分离

考虑到精河径流量具有周期性和趋势性,因此采用周期性叠加趋势模型,对精河径流量进行模拟与预测(图7)。将周期16年与1961-1997年的径流数据代入模型,周期性叠加趋势模型参数如下:周期均值平滑参数  $\alpha = 0.01000000$ ;周期内斜率平滑参数

$\beta = 0.01000000$ ;周期增量平滑参数  $\gamma = 0.01000000$ ;周期均值  $A = 12.2542$ ;斜率  $B = 0.0076$ ,均方拟合误差为0.83;模型  $X(\tau) = 12.2542 + 0.0076\tau + d_{t+\tau}$ 。 $X(\tau)$ 为预测结果, $\tau$ 为时段, $d_{t+\tau}$ 为周期增减量。

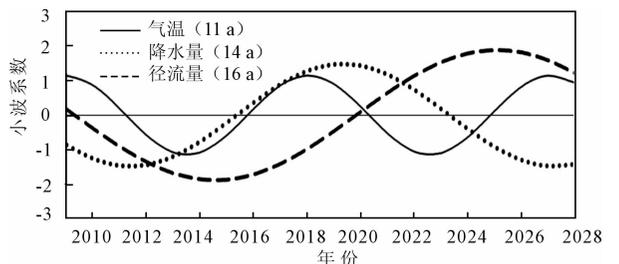


图6 基于小波系数预测

对比1961-1997年的模拟值与实测值,均方拟合误差为0.83;这表明该模型的精度较好。

根据预测模型,可分离出近10年气候变化对径

流量的影响,1998 - 2008 年气候变化对径流量的影响是积极的,年影响总量为 22.846 亿  $m^3$  (表 4)。

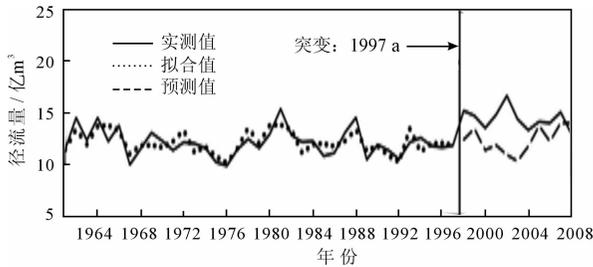


图 7 气候变化对精河流域径流量的影响量分离

表 4 气候变化对精河流域径流的影响量

亿  $m^3$

年 份	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	总计
影响量	2.837	1.235	2.174	2.929	5.788	4.105	1.593	0.396	1.794	1.109	-1.114	22.846

分析其原因,即 2003 - 2008 年精河流域气温逐渐升高,冰川融水量逐渐增加,降水量逐渐下降,而精河径流总量逐渐减小,说明冰川融水补给对精河径流总量影响不大,可知降水量变化对精河径流影响更突出。这与精河流域径流补给主要依靠源流山区降水与冰川融水补给,冰川融水补给占精河来水总量的 20.4% 的结论是一致的。

## 4 结 语

精河流域径流及气候系统是一个复杂的非线性系统。本文利用小波分析、R/S 分析和周期性趋势叠加分析模型,从多时间尺度探讨了径流及气候因子的非线性变化特征和相关关系,其结论如下:

(1) 通过线性趋势分析,1961 - 2008 年精河源流区气温、降水量和径流均为增加趋势,结合 R/S 分析,三者的 Hurst 指数皆大于 0.5,具有持续性,这表明在未来的 50 年三者仍可能将保持原来增加的变化趋势,温度升高,降水增加将潜在地给该地区带来丰沛的水源,对该区的生态保护具有重要意义。

(2) 精河源流区水文过程是一个复杂的非线性系统,具有周期性和突变特性。根据小波分析,在年际变化上,研究区年气温、降水量和径流量均存在 11、14、16 年的主周期变化。据已有研究成果,在西北干旱区,降水量河夏季干旱指数均存在 9 ~ 14 年的显著周期,这与精河降水主周期一致。

(3) 利用年气温、降水量和径流量主周期处的小波系数值进行周期性拟合并预测,未来 20 年气温在 2011、2015、2020、2025 年发生了偏少、偏多、偏少、偏多的 4 次交替性突变;降水量在 2015 - 2023 年处于偏多时期,而其他时段为偏少期;径流量在气

精河流域气候与径流量总体多表现为显著的正相关,在 1998 - 2003 年的正影响量呈波动上升的趋势,2003 - 2007 年正影响量呈波动下降的趋势,在 2008 年气候变化对径流影响负相关,1998 - 2003 年气温处于负相位,温度呈逐渐下降的趋势,2003 - 2008 年由负相位到正相位且温度呈上升的趋势,1998 - 2003 降水量处于正相位且降水量呈逐渐上升趋势,2003 - 2008 年降水量处于正相位,降水量呈逐渐下降趋势。

温在 2017 年发生了周期性的减少突变。

(4) 从周期性叠加趋势分析模型看,可分离出近 10 年气候变化对径流量的影响量。1998 - 2008 年气候变化对径流量的影响是积极的,径流量增加 22.846 亿  $m^3$ ,1998 - 2003 年的正影响量呈波动上升的趋势,2003 - 2007 年正影响量呈波动下降的趋势,在 2008 年气候变化对径流影响负相关,分析其原因,2003 - 2008 年精河流域气温逐渐升高,冰川融水量逐渐增加,降水量逐渐下降,而精河径流总量逐渐减小,说明冰川融水补给对精河径流总量影响不大,可知降水量变化对精河径流影响更突出,与精河流域径流补给主要依靠源流山区降水与冰川融水补给,冰川融水补给占精河来水总量的 20.6% 的研究成果<sup>[2]</sup>是一致的。

## 参考文献:

- [1] Vörösmarty C J. Global change, the water cycle, and our search for Mauna Loa[J]. Hydrological Processes, 2002, 16(1): 135 - 139.
- [2] 高明. 精河径流与降水变化特征及响应[J]. 新疆水利, 2012(2): 9 - 12.
- [3] 袁新春, 张莉萍. 新疆精河流域水文特性分析[J]. 现代农业科技, 2010(6): 290 - 290.
- [4] 徐长春, 陈亚宁, 李卫红, 等. 塔里木河流域近 50 年气候变化及其水文过程响应[J]. 科学通报, 2006, 51(1): 21 - 30.
- [5] 徐海量, 叶茂, 宋郁东. 塔里木河源流区气候变化和年径流量关系初探[J]. 地理科学, 2007, 27(2): 219 - 224.
- [6] Xu C, Chen Y, Li W. Climate change and hydrologic process response in the Tarim River Basin over the past 50 years[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51: 25 - 36.

(下转第 63 页)

无法得知,表明 Mann - Kendall 法划分丰枯变化过程也存在着不足。但由于 Mann - Kendall 法属于非参数检验,由于受限制比较少,如不要求样本的分布类型、样本中可允许少量漏测值,以及方法比较简单适用,而差积曲线受样本值影响较大,如果因某种原因,有漏测值,那么就无法计算其后的累积距平值。因此,Mann - Kendall 法和应用差积曲线法划分丰枯变化过程的方法互为补充。

#### 参考文献:

- [1] 穆兴民,李靖,王飞,等. 黄河天然径流量年际变化过程分析[J]. 干旱区资源与环境, 2003,17(2):1-5.
- [2] 张少文,张学成,王玲,等. 黄河天然年径流长期丰枯状态变化特性研究[J]. 人民黄河, 2005,27(5):9-10.
- [3] 赵太想,王文圣,周秀平. 一种径流丰枯分类的新方法研究[J]. 人民黄河, 2006,28(5):12-13.
- [4] Khaled H Hamed. Trend detection in hydrologic data: the Mann - Kendall trend test under the scaling hypothesis[J]. Journal of Hydrology, 2008,349:350-363.
- [5] Donald H Burn, Mohamed A Hag Elnur. Detection of Hydrologic trends and variability[J]. Journal of hydrology, 2005,255:107-122.
- [6] Jiang T, Zhang Q, Blender R, et al. Yangtze delta floods and droughts of the last millennium: Abrupt changes and long term memory[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2005,10:131-141.
- [7] 曹建廷,秦大河,罗勇,等. 长江源区 1956-2000 年径流量变化分析[J]. 水科学进展, 2007,18(1):29-34.
- [8] 张建云,章四龙,王金星,等. 近 50 年来中国六大流域年际径流变化趋势研究[J]. 水科学进展, 2007, 18(2):230-234.
- [9] 徐宗学,张楠. 黄河流域近 50 年降水变化趋势分析[J]. 地理研究, 2006,25(1):27-35.
- [10] 王生雄,魏红义,郑晓梅. 渭河流域径流趋势及突变分析[J]. 水资源研究, 2008,29(3):1-3.
- [11] 李红军,江志红,魏文寿. 近 40 年来塔里木河流域旱涝的气候变化[J]. 地理科学, 2007,27(6):801-806.
- [12] 陈华,郭生练,郭海晋,等. 汉江流域 1951-2003 年降水气温时空变化趋势分析[J]. 长江流域资源与环境, 2006,15(3):340-345.
- [13] 丁晶,邓育仁. 随机水文学[M]. 成都:成都科技大学出版社. 1988.
- [14] Mann - Kendall test for detecting trends[EB/OL]. [2011-03-03]. <http://www.minitab.com.au/support/macros/default.aspx?Action=display&cal=timeseries#92>.
- [15] 松花江概述[DB/OL]. [2012-05-20]. <http://baike.baidu.com/view/4214.htm>.
- [16] 王德智. 水文中长期预报的系统理论与方法研究[D]. 武汉:武汉大学,2003.
- [7] 江田汉,邓莲堂. Hurst 指数估计中存在的若干问题[J]. 地理科学, 2004,24(2):177-182.
- [8] 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, 1994,27(4):568-573.
- [9] 姜晓艳,刘树华,马明敏,等. 东北地区近百年降水时间序列变化规律的小波分析[J]. 地理研究, 2009,26(2):354-362.
- [10] 张少文,丁晶,廖杰,等. 基于小波的黄河上游天然年径流变化特性分析[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2004,36(3):32-37.
- [11] 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, 2011,31(6):1639-1646.
- [12] 凌红波,徐海量,史薇,等. 西北干旱区典型绿洲气候因子非线性特征研究——以新疆石河子地区为例[J]. 中国沙漠, 2010, 30(4):968-975.
- [13] 凌红波,徐海量,张青青,等. 1957-2007 年新疆天山山区气候变化对径流的影响[J]. 自然资源学报, 2011,26(11):1908-1917.
- [14] Chen Y, Pang Z, Hao X, et al. Periodic changes of stream flow in the last 40 years in Tarim River Basin, Xinjiang, China[J]. Hydrological processes, 2008, 22(21):4214-4221.
- [15] 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.
- [16] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京:气象出版社, 1999.
- [17] 姜世中. 黄河源区达日至玛曲段近 50 年径流量变化趋势分析[J]. 地理研究, 2008, 27(1):221-228.

(上接第 59 页)