

新疆呼图壁河径流时间序列分析

丰亚萍^{1,2}, 刘志辉^{1,2,3,4}, 郭小云^{1,2}, 聂敏^{1,2}, 苏向明^{1,2}

(1.新疆大学资源与环境科学学院, 新疆 乌鲁木齐 830046;
2.新疆大学教育部绿洲生态重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830046;
3.新疆大学干旱生态环境研究所, 新疆 乌鲁木齐 830046; 4.干旱半干旱区可持续发展国际研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830046)

摘要: 基于呼图壁河石门水文站 1956—2011 年的年径流数据,采用 Morlet 小波分析和 R/S 分析方法,对新疆呼图壁河流域径流周期、变化特征和未来趋势进行分析和预测。研究结果表明:(1) 通过对呼图壁河 1956—2011 年径流量的分析发现,径流时间序列存在 5 a、10 a、18 a 和 28 a 左右的震荡周期,18 a 尺度震荡周期最强,其次是 28 a 尺度。18 a 时间尺度上的震荡在 56 a 研究时段内均较强,且存在 4 个丰水期和 5 个枯水期;28 a 震荡周期在 56 a 尺度时段内相对较强,存在 3 个丰水期和 3 个枯水期,目前处于偏丰期;(2) 利用 R/S 分析呼图壁河径流量序列,Hurst 指数为 0.6442,存在明显的赫斯特现象,这就意味着未来一段时间的径流量与过去具有同样的增加趋势。

关键词: 呼图壁河;径流周期;径流特征;Morlet 小波分析;径流量预测

中图分类号: S273.29 **文献标志码:** A

Time series analysis for river runoff of Hutubi River in Xinjiang

FENG Ya-ping^{1,2}, LIU Zhi-hui^{1,2,3,4}, GUO Xiao-yun^{1,2}, NIE Min^{1,2}, SU Xiang-ming^{1,2}

(1. School of Resources and Environment Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;
2. Key Laboratory of Oasis Ecology, Ministry of Education, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;
3. Institute of Arid Ecology and Environment, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;
4. International Research Center for Sustainable Development in Arid and Semi-arid Areas, Urumqi 830046, P. R. China)

Abstract: Based on the annual runoff data of Shimen Hydrological Station in Hutubi River during 1956 to 2011, using the methods of Morlet wavelet analysis and R/S analysis, the runoff period, variation characteristics and future trend of Hutubi River Basin in Xinjiang have been analyzed and forecasted. The research results showed that: (1) Through the analysis for the runoff in Hutubi River during 1956—2011, found the runoff time series to exist the oscillation period about 5 a, 10 a, 18 a and 28 a, among them the oscillation cycle of 18 a scale was the strongest, secondly was the 28 a scale. The oscillation on the time scale of 18 a in the 56 years research period was more stronger and existed 4 wet seasons and 5 dry seasons; the oscillation cycle of 28 a in 56 years period was relatively strong, and existed 3 wet seasons and 3 dry three seasons, at present was at the rather rich period. (2) Using the R/S to analyze the runoff sequence of Hutubi River, the Hurst index was 0.6442 and existed obvious Hearst phenomenon, which means that the runoff in future will be the increasing trend with the same as the past.

Keywords: Hutubi River; runoff period; runoff characteristics; Morlet wavelet analysis; runoff prediction

径流是水文过程的重要环节,气候系统和水系统是相互作用相互影响^[1]。气候变化和人类活动对水文过程有直接影响,随着全球变暖和人类活动影响的加剧,河川径流发生了显著的变化。21 世纪初,施雅风院士^[2]提出中国西北地区气候由暖干转向暖湿,20 世纪 80 年代中期开始有变湿趋势,新疆天山西部地区变湿更加明显,年径流量呈连续多年增加的趋势。陈亚宁^[3]认为西北干旱区的径流出现“突变型”增加、汛期增加和丰—枯变化加剧等现象,给生态水文过程带来重大影响。同时,迪丽努尔^[4]研究证明了 1987—2000 年间,新疆河流径流量在空间格局上发生了明显的变化,河流径流量的增加主

收稿日期:2016-01-26
基金项目:水利部公益性行业科研专项(201301103);国家自然科学基金重点项目(41130531);国家自然科学基金面上项目(41171023)资助
作者简介:丰亚萍(1990—),女,河南商丘人,在读硕士,研究方向为水文学与水资源。E-mail:dlyaping@163.com。
通信作者:刘志辉(1957—),男,新疆石河子人,博士,教授,主要从事“3S”技术应用等研究。E-mail:lizh@xju.edu.cn。

要发生在新疆北部。这些文献都对干旱区径流进行了不同程度的研究,对于径流年际变化大且年内水量分配极不均衡、水资源匮乏的呼图壁河流域而言,对径流趋势分析及预测是水资源合理开发利用的重要环节,对实行最严格的水资源管理、高效利用水资源和实现水资源优化配置,具有重要的意义。

近年来,对呼图壁河流域的研究主要集中在气候变化对径流量的影响^[5]、流域水文特征分析^[6]、流域径流的时序变化特征^[7]等方面,而对呼图壁河径流趋势分析及流量的预测相对较少。小波分析是 20 世纪 80 年代发展起来的分析非线性水文水资源的重要方法,在水文序列的多时间尺度分析、水文变化特性分析、水文预测和模拟方面取得了一定的进展。R/S 分析方法是一种基于长程相关思想的时间序列分析方法,由赫斯特于 1951 年在水文研究中提出。现在 R/S 分析方法在国内外得到了广泛的应用,King^[8]、Rehman^[9]等国外学者取得很多成果,邓建伟^[10]等在石羊河流域采用 R/S 分析对径流量进行了变异诊断,得到了变异前后序列的均值和年径流量的变化关系。将小波分析和 R/S 相结合用于径流时间序列的研究已有不少,但用于呼图壁河流域径流时间序列的研究还未出现。由于小波分析在多时间尺度分析和监测突变点方面是分析径流变化周期的有效手段,R/S 分析方法在时间序列的长程相关方面具有优势,所以,本文将小波分析和 R/S 分析法用于呼图壁河 1956—2011 年径流量的分析,以预测径流未来的变化,为流域水资源的开发利用、科学管理和优化调度提供科学参考。

1 研究区概况

呼图壁河流域位于天山中段北麓,准噶尔盆地南缘,介于 86°05′ ~ 87°08′ E,43°07′ ~ 45°20′ N 之间。河流发源于喀拉乌成山,自南向北流动,最终消失于沙漠,河流全长 258 km,流域面积 10 254.68 km²,属天山北坡东段水系^[10]。呼图壁河流域含呼图壁河和军塘湖河两大独立水系,其中呼图壁河是流域的主水系,是天山北坡中段第二大河流(图 1,见 277 页彩图)。该流域气候四季分明,夏季干旱炎热,冬季寒冷漫长,春季温度变化剧烈,秋季降温迅速。

呼图壁河流域地形总趋势是南高北低,由东南向西北倾斜,全流域分为南部山区产流区、中部平原绿洲消耗区和北部荒漠需水区三大单元。呼图壁河石门水文站以上河道长 88 km,集水面积 1 840 km²,平均高程 2 985 m,河道纵降比 21.19%,以石门水文站控制断面为界,断面以上为主要径流形成区,断面

以下为径流散失区^[11]。该站径流的变化反映着流域的径流变化,同时又直接影响着流域中下游区水资源的利用格局。因此,本文选择石门水文站为研究断面,采用其多年径流量数据进行径流时间序列分析具有合理性。

2 数据与分析方法

本文采用的水文数据为呼图壁河出山口处石门水文站 1956—2011 年实测日径流数据,该数据来源于新疆维吾尔自治区水文水资源局信息中心,对数据资料进行严格的质量控制,保证了数据的精度和质量。对日径流数据进行统计分析,获得年径流资料;通过小波变换和 R/S 分析对年径流数据进行分析,揭示呼图壁河年径流的变换规律和未来变化趋势。

2.1 小波分析

在时间序列研究中,时域和频域是两种基本形式,径流随时间的变化呈现非平稳变化序列,具有多时间尺度特征。小波分析(Wavelet Analysis)是 Morlet 于 20 世纪 80 年代初提出的一种研究时间序列问题兼顾时-频两域的视域局域化特性能力的分析方法,能够清晰地获取隐藏在时间序列中的多种变化周期,并能反映序列在不同时间尺度中的变化趋势,对序列未来发展趋势能够进行定性估计,以更好地研究非平稳时间序列问题^[12]。

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。小波函数是一组震荡变化能够迅速衰减到零的伸缩平移基,即小波函数 $\psi(t) \in L^2(R)$ 且满足:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0 \tag{1}$$

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

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

式中, $\psi_{a,\tau}(t)$ 为子小波; a 为尺度因子; τ 为平移因子。

若 $\psi_{a,\tau}(t)$ 是子小波, $f(t) \in L^2(R)$ 的连续小波变换为:

$$W_f(a, \tau) = |a|^{-1/2} \int_R f(t) \bar{\psi}\left(\frac{t-\tau}{a}\right) dt \tag{3}$$

式中, $W_f(a, \tau)$ 为小波变换系数; $f(t)$ 为可积函数; $\bar{\psi}\left(\frac{x-\tau}{a}\right)$ 为 $\psi\left(\frac{x-\tau}{a}\right)$ 的复共轭函数。设函数 $f(x\Delta t)$, ($x = 1, 2, \dots, N$; Δt 为取样间隔), 则离散

小波变换为:

$$W_f(a, \tau) = |a|^{-1/2} \Delta t \sum_{x=1}^N f(x \Delta t) \bar{\psi}(\frac{x \Delta t - \tau}{a}) \quad (4)$$

将小波系数的平方值在 τ 域上积分,得到小波方差,即

$$\text{Var}(a) = \int_{-\infty}^{\infty} |W_f(a, \tau)|^2 d\tau \quad (5)$$

小波方差随尺度 a 的变化过程,称为小波方差图.由式(5)可知反映径流时间序列的波动能量随时间尺度 a 的分布情况.因此,小波方差图可用来确定信号中不同时间尺度扰动的相对强度和存在的显著周期,即主周期^[13].

2.2 R/S 分析

R/S 分析法可以在貌似没有趋势的时间序列中揭示隐含的趋势,为径流量时序的演变提供一种有效的科学预测.通过 Hurst 指数可以判定径流量时间序列的分形结构和状态持续性;通过平均循环长度可以估算系统的记忆时间长度.

R/S 分析法的基本原理^[14]如下:长度为 N 的径流量序列 $\{x(k)\}$,各子序列记为 $D_m(m = 1, 2, \cdots, M)$,相应元素为 $x_{k,m}$,求 D_m 的均值 $\bar{x}_m$;

(1) 计算累积离差 $X_{k,m}$ 、极差 R_m 及标准差 S_m

$$X_{k,m} = \sum_{k=1}^N (x_{k,m} - \bar{x}_m) \quad (6)$$

$$R_m = \max_{1 \leq k \leq m} X_{k,m} - \min_{1 \leq k \leq m} X_{k,m} \quad (7)$$

$$S_m = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m (X_{k,m} - \bar{x}_m)^2} \quad (8)$$

(2) 计算 D_m 的重标极差及序列的重标极差

$$(R/S)_m = R_m / S_m \quad (9)$$

$$(R/S) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (R/S)_m \quad (10)$$

(3) 得到 $\{x(k)\}$ 的重标极差序列,并满足下式:

$$R(n)/S(n) = (an)^H \quad (11)$$

对式(11)两边取对数可得:

$$\lg(R/S)_n = H \lg a + H \lg n \quad (12)$$

以 $\lg(R/S)$ 为因变量, $\lg n$ 为自变量作散点图,以最小二乘法估计拟合直线,直线的斜率即是 Hurst 指数的值.

若 $H = 0.5$,径流量序列为随机序列; $0 \leq H < 0.5$,径流量序列则为一种逆状态持续性序列,即过去的一个增量意味着未来的一个减量,过去的一个减量意味着未来的一个增量; $0.5 < H \leq 1$,径流量序列则具有状态持续性,是一个持久性的或趋势增强的序列,过去的一个增量意味着未来的一个增量,

过去的一个减量意味着未来的一个减量. H 越接近 1,序列的持续性程度越强,反之越弱.

3 结果与分析

3.1 多年径流变化趋势

径流量的变化主要反映气候要素波动或变化的影响.呼图壁河属于冰雪融水和降水混合补给型河流,其径流变化具有不稳定性.图 2 给出了 1956—2011 年 56 a 呼图壁河石门水文站天然径流量的变化趋势.可以看出:1956—2011 年平均径流量的变化总体呈波动上升趋势,1956—1966 年间径流呈波动上升趋势,1967—1986 年间径流有微弱的波动下降趋势但不明显,1987—1995 年间径流呈微弱的波动趋势,1996—2002 年间径流有明显的上升趋势,2003—2006 年出现短暂的减少,之后又出现增加趋势.其中,年最大径流量出现在 1999 年,达到 $6.34 \times 10^8 \text{ m}^3$,年最小径流量出现在 1977 年,为 $3.43 \times 10^8 \text{ m}^3$.

3.2 径流多时间尺度分析

根据 1956—2011 年呼图壁河年径流数据,绘制 Morlet 小波变换系数实部等值线图 and 模方时频分布图(图 3),正值代表径流丰水期,负值代表径流枯水期.小波系数实部等值线图在径流多时间尺度分析中,能够反映径流在不同时间尺度的周期变化及其在时间域中的分布,进而能判断在不同时间尺度上,径流的未来变化趋势^[12].Morlet 小波系数的模平方相当于小波能量谱,可以显示出不同周期的震荡能量,其等直线图表现径流在时间域中波动能量强弱的变化特性,进而确定主导径流变化的能量聚集中心,找出强周期对应的时间尺度,以利于进一步分析径流序列时间尺度上的波动变化^[15].

由图 3 可知,呼图壁河径流量序列在 1956—2011 年的 56 a 间存在 18~28 a 左右的震荡周期,结合图 4,发现呼图壁河年径流序列 18 a 尺度震荡周期最强,其次是 28 a 尺度.其中,18 a 时间尺度上的震荡在 56 a 研究时段内均较强,且存在 4 个丰水期和 5 个枯水期,丰水期分别为 1965—1966、1978—1979、1987—1989 和 1998—2000 年,枯水期分别为 1960—1962、1970—1974、1983—1986、1995—1997 和 2004—2006 年,径流变化的平均周期为 11 a 左右,大约经历了 4 个周期的丰-枯变化.28 a 震荡周期在 56 a 尺度时段内相对较强,存在 3 个丰水期和 3 个枯水期,丰水期分别为 1958—1959、1975—1976 和 1994—1996 年,枯水期分别为 1967—1968、1983—1986 和 2003—2006 年,28 a 时间尺度上径流变化的

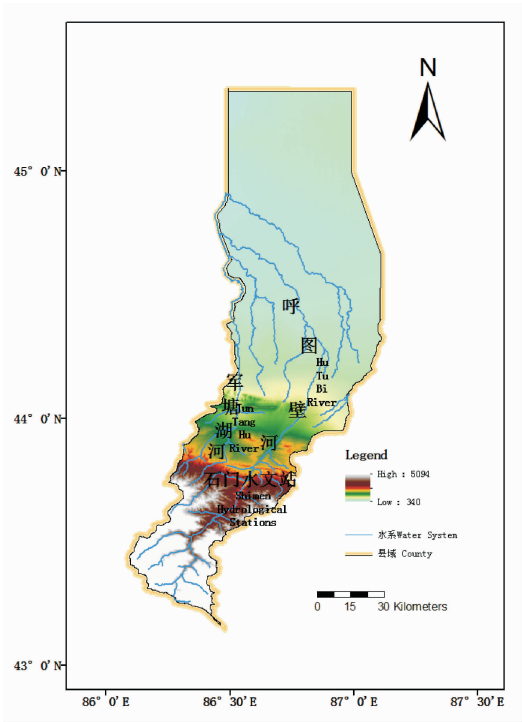


图 1 呼图壁河流域的地理概况
Fig.1 Location of the Hutubi River Basin

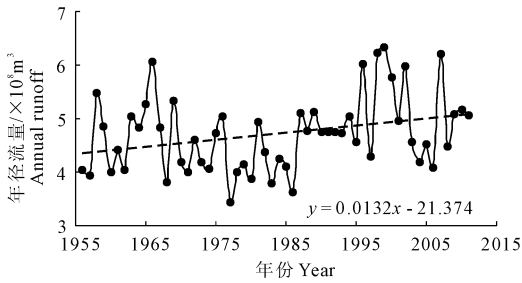


图 2 呼图壁河年径流变化趋势图
Fig.2 The change trend of the annual runoff in Hutubi River

平均周期为 18.8 a 左右,大约经历 2 个周期的丰 – 枯变化。径流丰枯周期的变化可以从图 2 呼图壁河年径流的时间序列中得到进一步的验证,与新疆呼图壁河流域径流过程与气候的响应相一致^[11]。

小波方差能反映径流时间序列随时间尺度 a 的波动能量分布情况,明确小波变换在不同频域内方差贡献率的相对极大值,从而准确地判断径流变化过程中存在的主周期^[12]。由图 5 可知,呼图壁河流域径流的小波方差图中存在 4 个较为明显的峰值,它们依次对应着 18 a、24 a、10 a 和 5 a 的时间尺

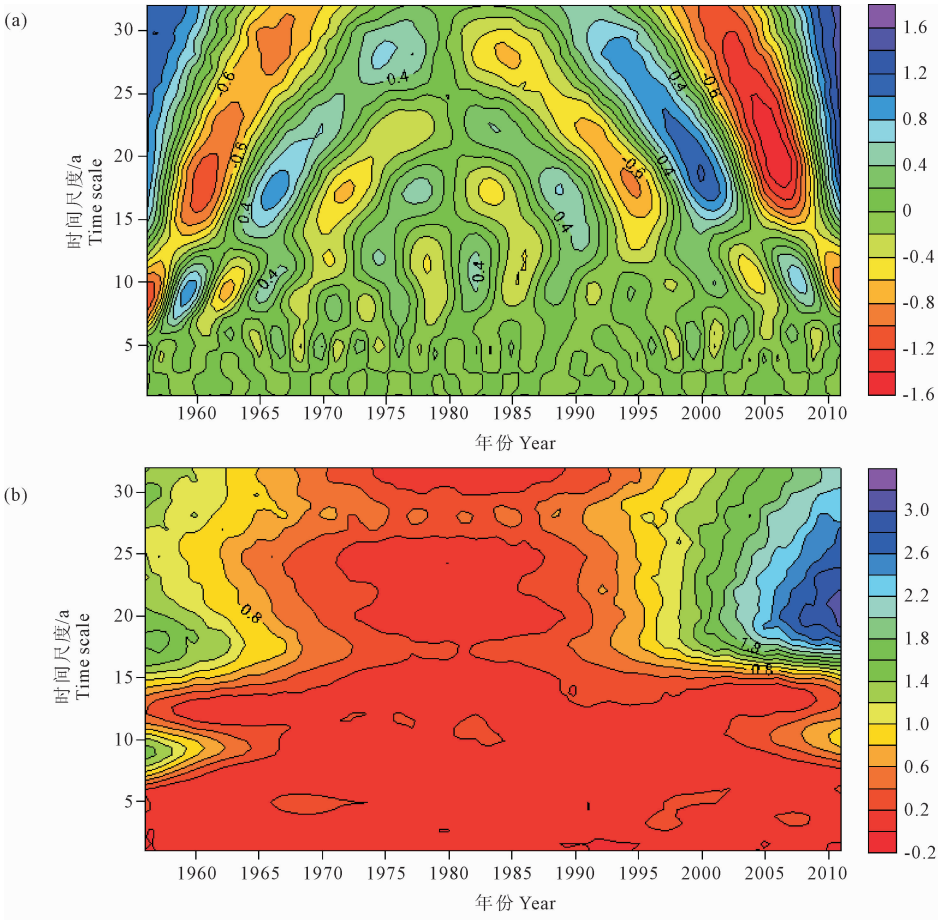


图 3 1956—2011 年呼图壁河径流变化小波变换实部(a)和模方(b)时频
Fig.3 The time frequency of real part (a) and modular square(b) of wavelet transform for runoff change in Hutubi River during 1956 to 2011

度。存在 18 a 的显著周期,即径流变化的主周期。在整个时间尺度范围内,存在另一些震荡周期 28 a、10 a、5 a。

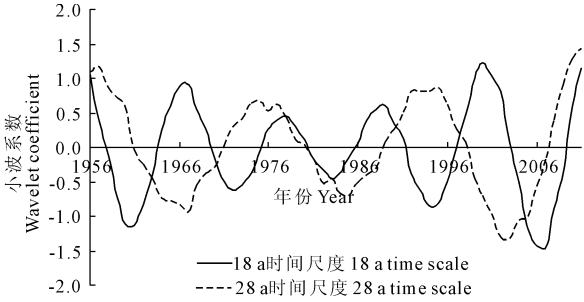


图 4 呼图壁河流域年径流变化小波实部过程线

Fig.4 The process line of wavelet real part for runoff change in Hutubi River Basin

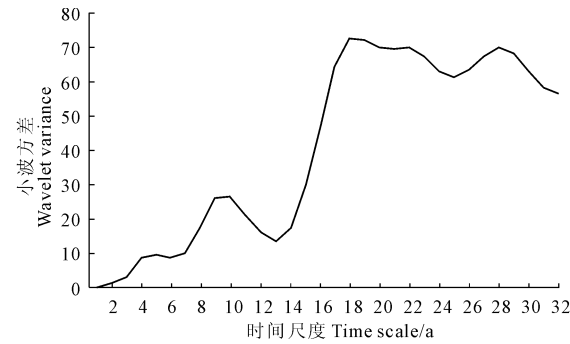


图 5 呼图壁河流域年径流的小波方差

Fig.5 The wavelet variance of annual runoff in Hutubi River Basin

3.3 径流变化趋势

根据 R/S 分析方法的原理,对 $\lg(R/S)$ 与 $\lg n$ 进行最小二乘回归,求得赫斯特指数 H 值(图 6),基于 1956—2011 年的径流变化趋势,预测未来呼图壁河年径流量的变化趋势。呼图壁河径流量序列的 Hurst 指数为 0.6442。 H 大于 0.5,说明呼图壁河年径流量序列为分形时间序列,存在长期记忆性和持续性。

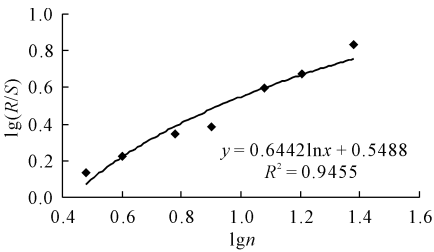


图 6 呼图壁河年径流量序列的 Hurst 指数

Fig.6 The Hurst index of annual runoff sequence in Hutubi River Basin

水文站天然径流量的变化过程,可以看出 1978—2011 年径流量的变化总体呈波动上升趋势,这就意味着未来的径流量也将表现为增加趋势,而有研究也认为新疆河流径流量呈增加趋势^[4]。呼图壁河靠冬、春季节积雪消融和夏季降水补给,而气候变暖对该流域的融雪径流分配产生了影响^[16]。图中相关系数 $R^2 = 0.9455$,表明 $\lg(R/S) - \lg n$ 直线与计算值拟合较好,说明 R/S 分析能很好地应用于水资源变化的综合分析。

4 结论与讨论

本文以呼图壁河 1956—2011 年的实测年径流数据为基础,应用小波分析和 R/S 分析方法分析径流的时序变化特征。研究表明:(1) 小波分析在长时间尺度分析和监测突变点方面是分析径流变化周期的有效手段,将小波分析用于呼图壁河 1956—2011 年径流量的分析发现,径流时间序列存在 18 ~ 28 a 左右的震荡周期,18 a 尺度震荡周期最强,其次是 28 a 尺度。18 a 时间尺度上的震荡在 56 a 研究时段内均较强,且存在 4 个丰水期和 5 个枯水期;28 a 震荡周期在 56 a 尺度时段内相对较强,存在 3 个丰水期和 3 个枯水期,现在处于偏丰期。(2) 径流时间序列具有分形特征,可以利用 R/S 方法进行分析,Hurst 指数可以判定径流时间序列的分形结构和状态持续性。1956—2011 年呼图壁河年径流径流量整体呈现增加趋势,年径流量时间序列的 Hurst 指数为 0.6442 大于 0.5,表明未来的径流量将与过去具有相同的增加趋势,这与施雅风、陈亚宁等学者^[2-4]的研究相一致,对于该地区洪涝灾害的防范具有一定的指导意义。

径流时间序列是一个复杂的系统过程,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^[17]。本文采用小波分析和 R/S 分析方法研究了呼图壁河 50 多年的径流变化,两种方法的有效结合、相互补充,对全面了解径流时间序列的变化规律具有重要的现实意义。需要指出的是,径流的变化是一个复杂的过程,受气温、降水及下垫面条件等因素的影响,本文仅从统计水文学的角度对呼图壁河年径流变化趋势进行了分析,而对径流过程的研究还需要做进一步深化,研究结果有待进行多方法的集成和验证,以提高结论的准确性和可信度。另外,采用小波分析方法对呼图壁河 1956—2011 年年径流量变化周期的研究,虽然跨越 56 a 的时间序列,为提高研究结论的可靠性,需要进一步获取更长时间序列和更多站点的资料。

图 2 给出了 1956—2011 年 56 a 呼图壁河石门

- [1] 刘智勇, 张鑫, 李小冰. 气候变化对奎屯河流域径流量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(6): 184-190.
- [2] 施雅风, 沈水平, 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.
- [3] 陈亚宁, 李稚, 范煜婷, 等. 西北干旱区气候变化对水文学水资源影响研究进展[J]. 地理学报, 2014, 69(9): 1295-1304.
- [4] 迪丽努尔·艾克, 巴尔. 新疆主要河流径流量变化的时空特征研究[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(11): 100-104.
- [5] 普宗朝, 张山清, 李景林, 等. 气候变化对呼图壁河径流量的影响[J]. 沙漠与绿洲气象, 2008, 1(5): 44-47.
- [6] 耿峻岭, 高玲, 陈建江, 等. 新疆呼图壁河流域水文特征分析[J]. 干旱区研究, 2005, 22(3): 371-376.
- [7] 白东明, 李卫红, 郝兴明, 等. 新疆呼图壁河流域径流时序变化特征[J]. 中国水土保持科学, 2007, 5(3): 19-23.
- [8] King M R. Fractal analysis of eight glacial cycles from an Antarctic ice core[J]. Chaos, Solitons & Fractals, 2005, 25(1): 5-10.
- [9] Rehman S, Siddiqi A H. Wavelet based Hurst exponent and fractal dimensional analysis of Saudi climatic dynamics[J]. Chaos, Solitons &

- [10] 邓建伟,宋松柏,卢书超.石羊河流域年径流序列的变异诊断[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2006,34(4):121-124.
- [11] 魏天锋,刘志辉,姚俊强,等.呼图壁河径流过程对气候变化的响应[J].干旱区资源与环境,2015,29(4):102-107.
- [12] 王文圣,丁晶,李跃清.水文小波分析[M].北京:化学工业出版社,2005.
- [13] 王岚,刘志辉,姚俊强,等.1978—2011年呼图壁河径流的变化趋势[J].水土保持通报,2015,35(3):62-67.
- [14] 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.
- [15] 凌红波,徐海量,张青青,等.叶尔羌河年径流量与降水量的集中性及相关性分析[J].中国沙漠,2012,32(6):1757-1764.
- [16] 陈峰,袁玉江,魏文寿,等.呼图壁河流域过去313a春季平均最高气温序列及其特征分析[J].中国沙漠,2009,29(1):162-167.
- [17] 塔依尔·夏库热,依米提·海米提,艾则孜麦麦提·吐尔逊,等.基于小波分析的开都河径流变化周期研究[J].水土保持研究,2014,21(1):142-146.

- [20] 王林忠. 利用 PEG6000 胁迫鉴定西葫芦幼苗的抗旱性[J]. 河南农业大学学报, 2014, 48(3): 310-314.
- [21] 朱学海, 宋燕春, 赵治海, 等. 用渗透剂胁迫鉴定谷子芽期耐旱性的方法研究[J]. 植物遗传资源学报, 2008, 9(1): 62-67.
- [22] 冯晓东, 王悦, 王晓洁, 等. 聚乙二醇模拟干旱对甜高粱幼苗生长及抗旱性的影响[J]. 延安大学学报: 自然科学版, 2015, 34(1): 33-36.
- [23] 彭民贵, 张继, 陈学林, 等. 聚乙二醇模拟干旱胁迫下紫斑牡丹的抗旱性研究[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2014, 42(4): 179-186.
- [24] Blum A, Ebercon A. Cell membrane stability as a measure of drought and heat tolerance in wheat[J]. Crop Science, 1981, 21(1): 43-47.
- [25] 景蕊莲, 吕小平. 用渗透剂胁迫鉴定小麦种子萌发期抗旱性的方法分析[J]. 植物遗传资源学报, 2003, 4(4): 292-296.
- [26] 李云. 不同冬小麦品种抗旱性鉴定及抗旱指标研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2009.
- [27] 张军. 小麦骨干亲本小偃 22 抗旱耐寒适应性分析及对其衍生物种的遗传贡献[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
- [28] 汤章城. 现代植物生理学实验指南[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 34-125.
- [29] 张宪政, 陈凤玉. 植物生理学试验技术[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2004: 1-10.

术出版社,1994;23-57.

[30] 兰巨生,胡福顺,张景瑞.作物抗旱指数的概念和统计方法[J].华北农学报,1990,5(2):20-25.

[31] 谢季坚.农业科学中的模糊数学方法[M].武汉:华中理工大学出版社,1993.

[32] 白志英,李存东,孙红春,等.小麦代换系抗旱生理指标的主成分分析及综合评价[J].中国农业科学,2008,41(12):4264-4272.

[33] 兰巨生.农作物综合抗旱性评价方法的研究[J].西北农业学报,1998,7(3):85-87.

[34] 芦静,曹俊梅,周安定,等.PEG处理下新疆冬小麦品种幼苗期生理指标的抗旱性研究[J].新疆农业科学,2014,51(3):393-402.

[35] 王曙光,朱俊刚,孙黛珍,等.山西小麦地方品种幼苗期抗旱性的鉴定[J].中国农业大学学报,2013,18(1):39-45.

[36] 李国瑞,马宏亮,胡雯媚,等.西南麦区小麦品种萌发期抗旱性的综合鉴定及评价[J].麦类作物学报,2015,35(4):479-487.

[37] 周广生,梅方竹,周竹青,等.小麦不同品种耐湿性生理指标综合评价及其预测[J].中国农业科学,2003,36(11):1378-1382.

[38] 董剑,王伟,赵万春,等.小麦新品种西农538的选育及其特征特性[J].种子,2011,(12):105-106.