

新疆塔里木河三源流径流量变化趋势分析

凌红波^{1,2} 徐海量¹ 张青青^{1,2} 史 薇^{1,2}

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

摘要:运用非参数检验、R/S 分析和小波分析等方法对塔里木河三源流的年径流序列进行了分析。结果表明:阿克苏河与叶儿羌河的突变点在 1993 年,而和田河在 1978 年;阿克苏河径流呈显著增加趋势而叶儿羌河增加不显著。结合其 Hurst 指数可知,在未来阿克苏河仍将保持增加走势而叶尔羌河将转变为减少;和田河径流呈轻微的减少趋势,其 Hurst 指数接近于 0.5,具有随机性,不可做长程预测;阿克苏河在 6、18、22 a 周期性明显,和田河主周期为 9 和 17 a,而叶尔羌河在 3、9、13 和 17 a 处周期性明显。

关 键 词:径流趋势;突变;非参数检验;源流

中图分类号: P333 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0690(2011)06-0728-06

水资源的演变过程具有复杂的线性、非线性特征,隐含着突变、趋势性和多时间尺度等特性^[1,2]。塔里木河地处亚欧大陆腹地,属大陆性极端干旱沙漠气候区,是中国最大的内陆河流域,并且流域内自然资源丰富与生态环境脆弱并存^[3]。近年来,受全球变暖影响,加上流域内人口不断增加,耕地面积迅速扩大,致使流域源流区来水量增加而干流区水资源矛盾日趋突出^[4],因此探讨塔里木河源流区径流量的变化对该流域搞好生态保育具有重要意义。在以往研究中,也曾对塔里木河的径流趋势及周期进行了分析^[5-7],但大多基于单个水文站较短的时间序列展开研究,这对甄别大尺度下的主周期效果较差,并且相关研究成果也极少涉及到三源流突变的显著性检验及未来径流量总体变化趋势预测,同时对三源流在多时间尺度下的周期性变化特征也仍需进一步的探讨。基于此,本文利用塔里木河源流区 5 个水文站近 50 a 水文资料,基于非参数检验、小波分析、R/S 分析等方法对阿克苏河、和田河和叶尔羌河径流趋势进行分析预测,以期为塔里木河今后水资源合理规划与管理提供决策依据。

1 数据与方法

1.1 数据来源

本文收集了塔里木河流域源流山区 5 个水文

站(协合拉、沙里桂兰克、乌鲁瓦提、同古孜洛克和卡群) 1957~2008 年的实测径流资料(塔里木河流域管理局提供),上述测站以上未经人为分流和灌溉,可看作天然径流量。

1.2 研究方法

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^[8]。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^[3]。在 Mann-Kendall 检验中,常用倾斜度 β 来量化单调趋势,表示单位时间内的变化量,当 β 为正时,表示上升趋势;当 β 为负时,表示下降趋势。

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形方法,Hurst 指数 ($0 < H < 1$) 揭示了时间序列的分形特征^[9-11]。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

收稿日期:2010-02-22; 修订日期:2010-05-25

基金项目:国家重点基础研究发展计划(No. 2009CB421308)、水利部公益性行业科研专项(No. 201101049) 共同资助。

作者简介:凌红波(1983-),男,河南商丘人,博士研究生,主要从事生态水文研究。E-mail: linghongbo0929@163.com

通讯作者:徐海量,博士,副研究员。E-mail: xuhl@ms.xjb.ac.cn

持续性越强。

对于介绍小波分析的文献较多^[12,13],在此不作详述。

2 结果与分析

2.1 塔里木河三源流径流趋势分析

近 50 a 来,受流域气候变化影响,塔里木河三源流在最近 10 a,径流量均进入丰水期(表 1)。在

表 1 中,塔里木河三源流及各水系来水量近 10 a 皆呈增加趋势,阿克苏河、和田河和叶尔羌河 10 a 的平均径流量分别比各自多年平均增加 11.59、2.61、 $5.49 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。在阿克苏河,径流量在 20 世纪 70 年代最小,比最近 10 a 平均减少了 $16.94 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。和田河最小值在 90 年代,而叶尔羌河在 80 年代,分别比近 10 a 的径流值减少 $5.23 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 和 $8.63 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。

表 1 塔里木河流域源流径流量年际变化特点

Table 1 Variation characteristics of annual runoff in the headstreams of the Tarim River Basin

年代际	阿克苏河及各测站径流量(10^8 m^3)			和田河及各测站径流量(10^8 m^3)			叶尔羌河径流量(10^8 m^3)
	协合拉	沙里桂兰克	合计	同古孜洛克	乌鲁瓦提	合计	
1960 s	45.55	27.82	73.37	22.66	21.31	43.97	63.26
1970 s	45.91	25.73	71.67	23.24	22.6	45.84	66.64
1980 s	47.56	24.9	72.46	20.55	21.19	41.74	63.16
1990 s	54.59	30.78	85.37	21.31	20.13	41.43	68.77
1999~2008 年	54.67	33.94	88.61	23.73	22.93	46.66	71.79

径流量累积距平过程线常用来描述径流的丰枯变化,距平曲线下降时为枯水期,上升时意味着丰水期,水平波动时则表示径流量为平水年。对塔里木河流域三源流进行累积距平计算,得到其近 50 a 的水文波动状况(图 1)。

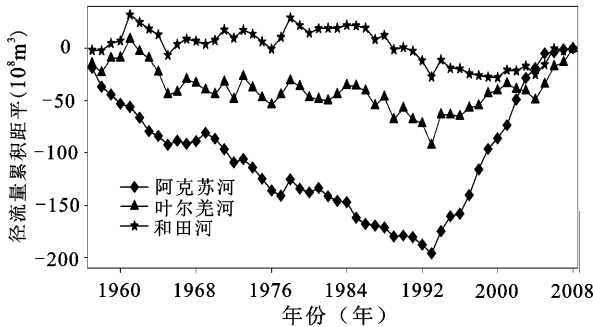


图 1 塔里木河三源流径流量累积距平

Fig.1 The accumulative anomalies of the annual runoff of the three headstreams of Tarim River

在图 1 中,阿克苏河丰枯交替变化较少但坡度很大,大体上 1993 年之前为枯水期,径流呈波动下降趋势,而在 1993 年之后迅速上升,径流量增加速率较快表示其进入丰水期。对于叶尔羌河径流丰枯交替呈高频振荡,从整体来看,在 1957~1961、1994~2001 和 2005~2008 年为丰水期,1962~1965、1990~1993 与 2002~2004 年为枯水期,平水年持续时间较长为 1966~1989 年。和田河径流量丰枯波动近似于叶尔羌河,1962~1965 年出现

短暂的枯水期,1966~1975 年为平水年,1957~1961、1976~1978 年为丰水期,在 1978 年后整个径流累积距平线表现为轻微的下陷趋势,只是在 1993 年后产生一个较小的增多跃变,径流量整体呈减少趋势。从三源流的径流距平累积过程可知,三源流在 1993 年后均发生了转型,除和田河外,其它径流皆表现为增加,但突变点是否为 1993 年,而突变是否显著仍不可知,为此可借助 Mann-Whitney 阶段转换检验给予甄别。

经过 Mann-Whitney 阶段转换检验,阿克苏河与叶尔羌河的突变点皆出现在 1993 年,并依此为基点将其时间序列分为 1957~1993 与 1994~2008 年两个时间区段。而和田河有所不同,其径流量在 1978 年发生轻微的增加跃变。根据表 2,对阿克苏河径流序列进行 Mann-Whitney 阶段的转换检验,其检验统计量 $|Z_w| = 5.019 > Z_{0.01}$ (经查表 $Z_{0.01} = 2.58$),在 0.01 水平下跃变极为显著。叶尔羌河的检验统计量为 2.474,大于 1.96 (经查表: $Z_{0.05} = 1.96$),即拒绝原假设,表明其跃变在 0.05 检验水平下呈现显著性,而和田河则接受原假设 ($|Z_w| = 0.759 < Z_{0.05}$)。这意味着其径流过程的跃变状况并不明显。根据已有研究成果^[8],塔里木河流域气候在 1986 年发生显著跃变,温度升高加快,降水强度明显增加,比三源流的突变点提前 7 a,这表明径流突变对流域内的气候突变响应具有滞后性,并且三源流与气候因子之间关联强度及变化趋势的协

表2 Mann-Whitney 阶段转换检验
Table 2 Mann-Whitney test results of step trend

阿克苏河				和田河				叶尔羌河			
时间段		检验结果		时间段		检验结果		时间段		检验结果	
n_1	n_2	$ Z_w $	H_0	n_1	n_2	$ Z_w $	H_0	n_1	n_2	$ Z_w $	H_0
37	15	5.019	R	22	30	0.759	A	37	15	2.474	R

协调性也有所差异^[3]。

表3描述三源流在跃变前后的变异特征。阿克苏河在突变前后两个时段产生 $18.36 \times 10^8 \text{ m}^3$ 增多跃变,并且在1957、2002年出现极端枯、丰值,枯丰跃度为 $43.38 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。和田河在1978年前后两个时段发生 $2.29 \times 10^8 \text{ m}^3$ 轻微的减少跃变,而其枯、丰值则分别在1965、1961年,枯丰跃度为 $44.43 \times 10^8 \text{ m}^3$,同时由于和田河在跃变之前存在高频振荡(图2),因此其变异系数(0.221 2)较其

它水文站为大。叶尔羌河在1993年的突变跃度为 $8.68 \times 10^8 \text{ m}^3$,丰、枯极值分别在1994、1965年,而丰枯跃度为 $54.85 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

2.2 塔里木河三源流径流预测

掌握径流的未来变化趋势,对管理者做好水资源的合理配置及生态修复等工作具有重要意义。Mann-Kendall 单调趋势检验可以较好的描述径流的趋势性而R/S分析可以借助以诊断得到的径流趋势进行长程预测(表4)。

表3 三源流径流量序列分析
Table 3 The analysis on the runoff time series of the three headstreams

河流	No.	时间序列(年)	$N(a)$	平均值(10^8 m^3)	标准差	变异系数
阿克苏河	1	1957 ~ 1993	37	71.72	7.01	0.0978
	2	1994 ~ 2008	15	90.08	8.39	0.0931
和田河	1	1957 ~ 1978	22	45.37	10.03	0.2212
	2	1979 ~ 2008	30	43.08	7.44	0.1727
叶尔羌河	1	1957 ~ 1993	37	63.8	11.41	0.1789
	2	1994 ~ 2008	15	72.48	9.81	0.1354

表4 塔里木河三源流径流量 Mann-Kendall 单调趋势检验和 R/S 分析
Table 4 The Mann-Kendall monotonic trend test and R/S analysis of the three headstreams of Tarim River

类别	变异系数	平均值(10^8 m^3)	Z_c	β	H_0	趋势	H 值
阿克苏河	0.1449	77.0177	4.5926	0.4298	R	递增	0.777
和田河	0.1956	44.0493	-0.1026	-0.0068	A	微递减	0.5014
叶尔羌河	0.1747	66.2999	1.886	0.2257	A	微递增	0.4857

由表4可知,阿克苏河时间序列检验统计量 $Z_c=4.5926 > Z_{0.01}$,在0.01水平下拒绝原假设,增加趋势极显著并以 $0.43 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 的速率上升。经过R/S分析,1957~2008年的 H 值为0.777,大于0.5,具有较强的持续性,预示2008年以后一段时间内,阿克苏河径流量仍将保持上升趋势。和田河与阿克苏河的变化趋势相反,检验统计量 $Z_c=-0.1026 > -Z_{0.05}$,接受原假设,径流呈现轻微的减少,其 H 值为0.5014,接近于0.5,持续性较弱,表明和田河径流变化具有随机性与混沌特性,很难对其做长程预测。叶尔羌河径流表现增加走势但不显著($Z_c=1.886 < Z_{0.05}$),年增加率为 0.23×10^8

m^3/a ,而 H 值为0.4857,小于0.5,具有反持续性,这意味着该河流径流在未来的一段时间将表现为减少。研究区三源流径流补给主要依靠山区降水与冰川融水补给,近年来全球气温的显著升高是三源流来水量增加的主要因素^[3,8]。而三源流径流趋势有所差异是与其所处不同的地理位置有关,这是因为新疆水汽来源主要依靠纬向西风环流带来的西来水汽与北冰洋的干冷气流,在和田河与叶尔羌河流域由于受喀喇昆仑山和昆仑山的阻挡,造成西风环流和西南阿拉伯海气流难以到达,致使流域山区降水量北部多于南部,从而形成了三源流从北部阿克苏河至南部和田河径流的增加趋势逐渐减

弱。三源流变异系数不大,以阿克苏河的为最小(0.114 9),和田河最大(0.195 6),叶尔羌河居中(0.174 7),这是因为阿克苏河主要依靠冰川融水与降水补给,占到总补给量的 76.4%,在降水量较多年份温度较低而高温年份降水相对较少,二者互补使其径流量年际变化较为稳定。和田河与叶尔羌河冰川融水与地下水补给量分别占总补给量的 80.4% 和 86.6%,但和田河的降水补给高于叶尔羌河,这与二者变异系数的大小是一致的,这反映出主要依靠降水量补给的河流变异系数较大,从中国东部同纬度的大部分河流变异系数均在 0.4 以上可证明这一观点^[14]。

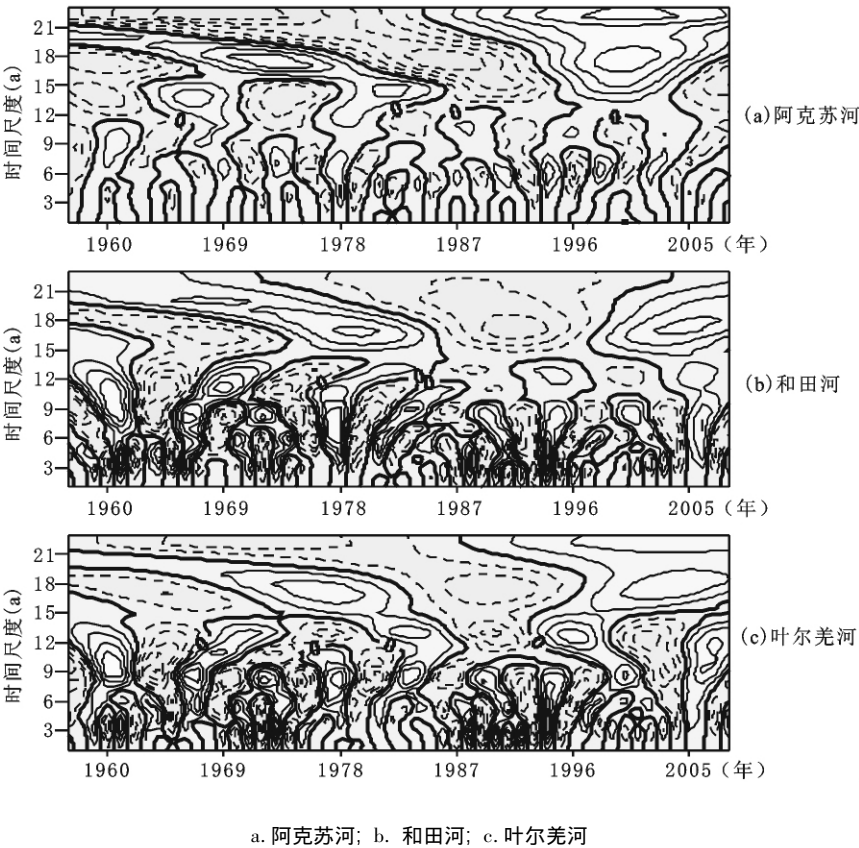
在干旱区内陆河流域,气候变化影响到源流区冰川的增减进而作用于径流,而对径流的预测也应以冰川在未来的消融状况为依据。在塔里木河源流区,阿克苏河与和田河近年来冰川面积相对于 20 世纪 60 年代初期分别减少 1.4% 和 3.3%,缩小幅度最小,在阿克苏河退却冰川面积仅为其冰川总面积的 7.9%,而叶尔羌河却已高达 81.2%^[15],

随着温度的升高,阿克苏河源流冰川在未来出现融水高峰的日期将远远滞后于叶尔羌河,因此未来的一段时间内阿克苏河径流量将保持增加而叶尔羌却将呈现减少的趋势是可信的。

2.3 三源流径流变化的小波分析

小波分析是一种时间窗和频率窗都可改变的时频局域化分析方法,借助小波变换的时频局域化优势可在多时间尺度下寻找其周期与突变性^[16]。小波变换系数的实部包含不同时间尺度下信号强度与位相两方面的信息(图 2)。

图 2a 为阿克苏河径流量时间序列的 Morlet 小波系数实部的时频分布图。由图可知,从年代季上看,周期为 21 a 以上的低频振荡在 1985 年左右存在一个突变点,并此时间为基准整个时间序列位相呈负正交替,表明径流量在 1985 年由枯水期进入丰水期,并根据其等值线 2008 年并未闭合可以预测,这种径流量偏多还将持续一段时间,而中心时间尺度表现在 22 a,这从小波方差图中可以得到验证(图 3)。10~20 a 的时间尺度上以 18 a 处周期



实线表示径流量丰水期,虚线表示枯水期,粗实线为突变年
图 2 塔里木河径流 Morlet 小波分析的时频分布

Fig. 2 The time - frequency distribution of Morlet wavelet analysis of runoff of Tarim River

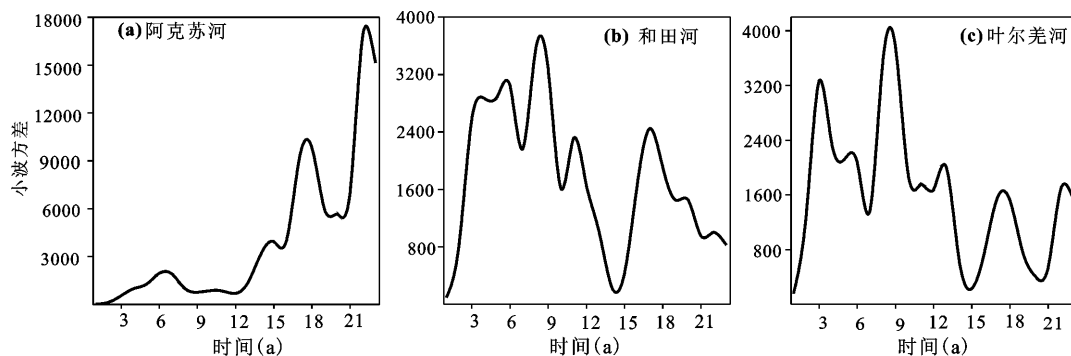


图3 三源流小波方差

Fig. 3 Wavelet variances of the runoff of the three headstreams

显著,小波方差值仅次于22 a周期,并分别在1965、1979、1993和2008年出现枯丰4次交替。从年际变化上看,6 a左右的时间尺度上在1968~1982和1988~2003年两个时段正负位相交替振荡明显,而在其他时间尺度上等值线较为零乱,周期性不强。图2b为和田河小波系数实部的时频分布。结合小波方差图(图3),在年代际上,中心时间尺度在17 a时周期性明显并在1961、1973和1986年产生丰枯交替的3次振荡;年际变化在9 a周期处正负位相呈规律性交替变换并贯穿整个时间序列,小波方差也达到最大值,为和田河径流序列的第一主周期,并且对于大于9 a以上的周期径流在2008年均进入丰水期。另外,在9~12 a周期处在70年代末之前周期性也较为明显。从小波方差图上看,叶尔羌河径流序列年际变化间周期性较强,分别表现在3、9 a处,年代际在13、17 a处出现较小峰值。图2c为叶尔羌河径流的小波系数时频分布。由图可知,在3、9 a周期处等值线闭合较好且极为密集,周期性能量信号很强。在3 a周期处的1958~1964、1970~1975和1986~1995年正负位相呈较好的交替变换,9 a周期在整个时间序列表现较好。13 a周期处在1963~1967、1974~1980、1987~1992、和1999~2004年为负位相,表示枯水期,而其它时段为丰水期;17 a周期处在1958、1971、1984和1997年发生4次突变,并以负位相开始呈周期性交替循环。根据陈亚宁等研究,三河流温度及降水存在13~19 a的周期性变化,这与三源流在年代际所表现的周期具有一致性,而对于年际间的周期性,主要是由于气候因子间不同周期的抵消和叠加,加上人类活动、太阳活动干扰、不同源流间地理位置及环境条件差异等因素共同作用所致^[6,8,17,18]。

3 结 论

1) 三源流径流量在近10 a皆明显增多。根据径流量累积距平过程,阿克苏河在1993年前后分别呈枯、丰水期,而叶尔羌河与和田河分别在1993、1978年之前表现出丰枯交替变化的高频振荡,其后叶尔羌河进入丰水期,但和田河却大体表现为枯水期。

2) 经过非参数Mann-Whitney阶段转换检验,阿克苏河与叶尔羌河的突变点皆在1993年,阿克苏河为极显著的增多跃变而叶尔羌河在0.05检验水平下增多跃变显著;与以上两源流不同,和田河的突变点在1978年且为不显著性减少跃变。

3) 阿克苏河径流呈极显著递增趋势,叶尔羌河呈增加趋势但不显著,根据R/S分析,结合二者的赫斯特指数 H 值(阿克苏河:0.777 > 0.5; 叶尔羌河:0.4857 < 0.5)可知,阿克苏河在未来的一段时间内仍保持增加走势而叶尔羌河将转型为减少;和田河径流呈轻微的减少趋势,其 H 值为0.5014,接近于0.5,因此表现为随机性与混沌特性,不可做长期预测。

4) 根据小波分析,阿克苏河在6、18和22 a处周期明显,并在22 a处小波方差值最大,周期性最强;和田河在9 a处周期最为显著,另外还存在着17 a周期的年代际变化;叶尔羌河年际变化最为显著,分别在3、9 a处;年际变化在13、17 a处周期性较好,这也表明了塔里木河三源流径流变化存在多时间尺度的复杂周期特性。

参考文献:

- [1] 唐 蕴,王 浩,严登华等. 嫩江流域近45年来径流演变规律研究[J]. 地理科学, 2009, 29(6): 864~868.

- [2] 王 钧, 蒙古军. 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.
- [3] 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.
- [4] 赵万羽, 陈亚宁. 塔里木河下游断流河道整治引发的生态问题与重建对策分析[J]. 地理科学 2008 **28**(4): 496 ~ 500.
- [5] 徐海量, 叶 茂, 宋郁东, 等. 塔里木河流域水资源变化的特点与趋势[J]. 地理学报 2005 **60**(3): 487 ~ 494.
- [6] 陈亚宁, 郝兴明, 徐长春. 新疆塔里木河流域径流变化趋势分析[J]. 自然科学进展 2007 **17**(2): 205 ~ 210.
- [7] 蒋 艳, 夏 军. 塔里木河流域径流变化特征及其对气候变化的响应[J]. 资源科学 2007 **29**(3): 63 ~ 68.
- [8] 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**(增刊 1): 21 ~ 30.
- [9] Hurst H E, Black R P, Simaika Y M. Long-term Storage: An Experimental Study[J]. London: Constable, 1965: 1 ~ 155.
- [10] 江田汉, 邓莲堂. Hurst 指数估计中存在的若干问题—以在气候变化研究中的应用为例[J]. 地理科学 2004 **24**(2): 177 ~ 182.
- [11] 赵 晶, 徐建华. 河西走廊沙尘暴频数的时序分形特征[J]. 中国沙漠 2003 **23**(4): 415 ~ 419.
- [12] 袁淑杰, 缪启龙, 谷晓平, 等. 中国云贵高原喀斯特地区春旱特征分析[J]. 地理科学 2007 **27**(6): 796 ~ 800.
- [13] 刘 东, 付 强. 基于小波变换的三江平原低湿地井灌区年降水序列变化趋势分析[J]. 地理科学 2008 **28**(3): 380 ~ 384.
- [14] 蒋 艳, 周成虎, 程维明. 新疆阿克苏河流域年径流时序特征分析[J]. 地理科学进展 2005 **24**(1): 87 ~ 96.
- [15] 刘时银, 丁永建, 张 勇, 等. 塔里木河流域冰川变化及其对水资源影响[J]. 地理学报 2006 **61**(5): 482 ~ 490.
- [16] 刘建梅, 王安志. 杂谷脑河径流趋势及周期变化特征的小波分析[J]. 北京林业大学学报 2005 **27**(4): 49 ~ 55.
- [17] 郭汉伟, 乐贵明. 太阳黑子群周期的小波分析[J]. 自然科学进展 2004 **14**(4): 597 ~ 600.
- [18] 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.

The Annual Runoff Variation Trends in the Three Headstreams of Tarim River

LING Hong-bo^{1, 2}, XU Hai-liang¹, ZHANG Qing-qing^{1, 2}, SHI Wei^{1, 2}

(1. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi, Xinjiang 830011, China;

2. Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Based on the observed annual runoff data of 5 hydrological stations in Tarim River headstreams areas from 1957 to 2008, the paper studied the annual trend, abrupt change, periodicity and the coming period trends by use of the nonparametric test, R/S analysis and wavelet analysis and so on. The results showed that: (1) Both Aksu river and Yarkand river of which the jump points happened at 1993 hold significant step change, but Hetian river expressed a slightly decreasing step trend and is not significant; (2) Aksu river holds a significant increasing trend but Yarkand river the trend is not, and based on the Hurst exponents (Aksu: $0.777 > 0.5$, Yarkand: $0.4857 < 0.5$) of two the streams, the annual runoff of Aksu river will keep an increasing trend and Yarkand river will be in reverse in the coming period; Hetian river has a slightly decreasing trend and the Hurst exponent is 0.5014, which equals 0.5 approximately and indicates that the annual runoff process is in chaos, then it can not be taken a long-term predict. (3) The primary periods of Aksu river and Hetian river are 6a, 18a, 22a and 9a, 17a respectively, otherwise, Yarkant river is at 3a, 9a, 13a and 17a.

Key words: runoff trends; abrupt change; nonparametric test; headstreams