

文章编号: 1007-7588(2007)05-0121-08

# 石羊河流域主要气象要素及径流变化趋势分析

徐宗学<sup>1</sup>, 李占玲<sup>1</sup>, 史晓崑<sup>2</sup>

(1. 北京师范大学水科学研究院, 水沙科学教育部重点实验室, 北京 100875;

2. 甘肃省水利水电勘测设计研究院, 兰州 730000)

**摘要** 在对石羊河流域 1956 年~2003 年诸月与年平均气温、降水及径流资料进行 Mann-Kendall 非参数统计检验的基础上, 运用 R/S 法分析了流域的年平均气温、降水、径流时间序列的持续性, 估算了各项指标的 Hurst 指数, 以定量估计未来气候及径流的变化趋势, 并采用随机重排法对估算结果进行了稳定性检验。结果表明: 石羊河流域 1956 年~2003 年各月及年平均气温绝大多数都以增温为主; 武威和永昌两个站点的年平均降水表现为显著增加, 其他站点各月没有显著趋势; 古浪河和杂木河年平均径流量减少的趋势显著, 其他支流径流量减少趋势不明显; 干流各月及年平均径流量减少的趋势十分显著。各站点 Hurst 指数结果表明, 石羊河流域未来的气温、降水、径流变化趋势都表现为较强的持续性, 与过去近 48 年的变化趋势基本保持一致。

**关键词** 石羊河; Hurst 指数; 非参数检验; 径流

## 1 引言

石羊河是我国内陆河流域中人口最密集、水资源开发利用程度最高、用水矛盾最突出、生态环境问题最严重的流域之一。现状流域水资源开发利用已严重超过其承载能力, 致使流域生态环境日趋恶化, 危害程度和范围日益扩大。下游民勤湖区北部地区已显现“罗布泊”景象。近年来, 石羊河流域水资源配置、生态环境的改善与治理<sup>[1]</sup>、长期气候变化趋势<sup>[2]</sup>、径流变化<sup>[3]</sup>、人类活动对水资源的影响<sup>[4]</sup>等相关研究已引起广泛关注。

本文利用 Mann-Kendall 非参数统计检验方法分析了石羊河流域 1956 年~2003 年气候及径流的长期变化趋势。但由于 M-K 检验只对过去时间序列存在的趋势进行检验, 无法对未来的趋势进行预测, 因此, 在进行 M-K 检验的基础之上, 又进一步引入 R/S 分析法, 估算了气温、降水、径流时间序列的 Hurst 指数, 以辨识未来气候及径流的变化趋势, 为流域管理者提供决策支持和依据。

## 2 研究区域

石羊河流域位于甘肃省河西走廊东部, 乌稍岭以西, 祁连山北麓, 东经 101°41'~104°16', 北纬 36°29'~39°17' 之间(图 1), 总面积  $4.16 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 是甘肃省河西走廊三大内陆河流域之一。地势南高北

低, 自西南向东北倾斜。石羊河流域深居大陆腹地, 属大陆性温带干旱气候, 太阳辐射强、日照充足、温差大、降水少、蒸发强烈。流域自南向北划分为 3 个气候区: 南部祁连山高寒半干旱半湿润区, 年降水量 300mm~600mm, 年蒸发量 700mm~1 200mm; 中部走廊平原温凉干旱区, 年平均气温小于 7.8℃, 年降水量 150mm~300mm, 年蒸发量 1 300mm~2 000mm; 北部温暖干旱区, 年平均气温小于 8℃, 年降水量小于 150mm, 年蒸发量 2 000mm~2 600mm。

流域水系发源于祁连山, 自东向西由大靖河、古浪河、黄羊河、杂木河、金塔河、西营河、东大河、西大河等 8 条河流及多条小沟小河组成, 8 条河流出口均建有水文站。河流补给来源为山区大气降水和高山冰雪融水, 产流面积  $1.1 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 多年平均径流量  $15.6 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。按照水文地质单元分为 3 个子水系: 大靖河水系、六河水系和西大河水系。

## 3 数据来源及处理

研究选用 5 个均匀分布于石羊河流域及周边的气象站点的逐月气温和降水数据。观测资料由中国气象局国家气象中心气象资料室提供, 数据经过了完整性、一致性和极值检验, 质量良好; 其中乌稍岭、武威和民勤的数据长度是 1956 年 1 月 1 日至 2003 年 12 月 31 日。门源和永昌资料记录的开始时间不

收稿日期: 2007-03-08; 修订日期: 2007-05-08

基金项目: 中国气象局气候变化专项(编号: CCSF2007-42) 北京师范大学“京师学者”特聘教授启动经费资助。

作者简介: 徐宗学, 男, 山东淄博市人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为水文水资源。

E-mail: zongxuexu@vip.sina.com

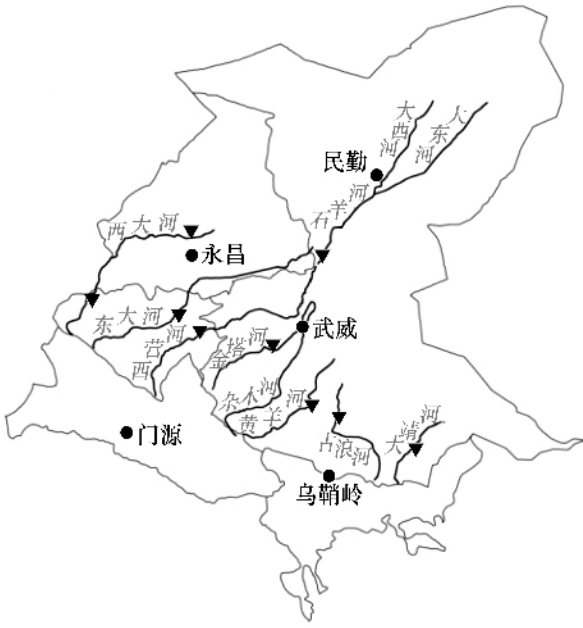


图1 石羊河流域及其气象/水文站分布  
(●表示气象站点, ▼表示水文站点)

Fig.1 The Shiyang River basin map showing gauging stations

一致,分别是1956年10月1日和1958年4月1日,为了序列的完整和统一,前4个站点所用数据时段为1956年1月1日至2003年12月31日,永昌所用数据时段为1958年1月1日至2003年12月31日。采用空间插补法补齐缺少的数据。石羊河干流及八条支流的月、年径流观测资料(1956年1月至2003年12月)来源于甘肃省水利水电勘测设计院,是经过整编的正式成果。

## 4 研究方法

### 4.1 Mann-Kendall 非参数检验

Mann-Kendall 非参数统计检验法是由世界气象组织推荐的应用于环境数据时间序列趋势分析的方法,已经广泛用于检验水文气象资料的趋势成分,包括水质、流量<sup>[5]</sup>、气温和降雨序列<sup>[6]</sup>等。

在 Kendall 秩次检验中,若统计量  $|Z_c| \leq Z_{(1-\alpha/2)}$ ,则认为时间序列没有显著趋势,其中,  $\pm Z_{1-\alpha/2}$  是标准正态分布的  $1-\alpha/2$  分位数,  $\alpha$  为显著性水平。用 Kendall 倾斜度  $\beta$  表示单调变化趋势的大小,其中:

$$\beta = \text{Median} \left( \frac{x_i - x_j}{i - j} \right), \forall j < i$$

$$(1 < j < i < n) \quad (1)$$

当  $\beta$  值为正时表示上升趋势;当  $\beta$  为负时表示下降趋势。本文对石羊河流域近48年的气温、降水

和径流序列在95%置信水平上进行趋势检验。

### 4.2 Hurst 指数

对于管理者和决策者而言,了解流域水文现象的未来变化趋势要比仅了解已发生的水文现象变化趋势更为重要。Hurst 指数对时间序列的未来趋势具有很强的预测能力。因此本文采用 Hurst 指数预测研究区域未来的气候变化趋势。估算 Hurst 指数的方法包括绝对值法、聚合方差法、R/S 分析法、周期图法、Whittle 法、残差方差法、小波分析法等。应用最广的是 R/S 分析法。R/S 分析法属于非参数分析法,不必假定潜在的分布是高斯分布,它对考察的对象几乎不作任何假设,具有很好的鲁棒性<sup>[7]</sup>。

R/S 分析法的原理如下:考虑一个时间序列  $\{x(\tau)\}, \tau=1, 2, \dots$ , 对于任意正整数  $\tau \geq 1$ , 定义均值序列:

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

累积离差  $X(t, \tau)$  序列:

$$X(t, \tau) = \sum_{i=1}^t (x(i) - x_\tau), 1 \leq t \leq \tau \quad (3)$$

极差  $R$  序列:

$$R(\tau) = \max_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) - \min_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) \quad (4)$$

标准差  $S$  序列:

$$S(\tau) = \left( \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} (x(t) - x_\tau)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

Hurst 研究发现,用观察值的标准差除以极差(即重标极差)建立一个无量纲的比率,如果满足如下关系式:

$$\frac{R(\tau)}{S(\tau)} = (\alpha\tau)^H \quad (6)$$

式中:  $\alpha$  为常数,则时间序列存在 Hurst 现象;  $H$  为 Hurst 指数。

$H$  取值范围为  $[0, 1]$ , 当  $H=0.5$ , 表示序列是随机的和不相关的,现在不会影响未来;  $H > 0.5$  意味着时间序列的持续性,即时间序列的长期依赖性,或长期记忆效应,就是指今天发生的事情会对以后发生的事件有影响,未来变化的趋势将与过去一致,  $H$  越接近1,持续性越强;  $0 \leq H < 0.5$  表示时间序列的反持续性,该系统有比随机过程更高的反转频率,即将来变化的总体趋势与过去相反,过去总体减少预示着将来总体有增加的趋势,  $H$  值越接近于0,反持续性越强<sup>[8]</sup>。

很多学者将 R/S 分析法应用到水文、气象时间

序列的研究中,并取得了很多成果,但也存在着很多问题,如江田汉等人提出“很多研究中,未考虑时间序列的长度、 $\tau$  取值的合理性以及未对分析结果进行检验”<sup>[7]</sup>。杨庆<sup>[9]</sup>、邹新月<sup>[10]</sup>等人提到了  $R/S$  分析对短期相依性非常敏感,  $H$  估计值在  $n$  较小时,误差较大,时间序列的非平稳性质,如均值变化、线性或多项式趋势等对检测和估计 Hurst 指数影响也很大<sup>[11]</sup>。本文对于非平稳时间序列,通过一阶差分,消除其线性趋势;由于所用的时间序列较短,所以,把原来的时间序列顺序打乱,进行随机重排,消除时间序列的非稳定特性,同时对原序列和随机重排后的序列进行  $R/S$  分析,由此对估算结果的稳定性和可靠性进行检验,二者的 Hurst 指数应当相同或接近。

## 5 结果分析与讨论

### 5.1 气温和降水

**5.1.1 气温序列的趋势变化** 流域上、中、下游 5 个气象站点气温的多年平均值以及各月和年平均气温变化的  $M-K$  趋势检验结果表明(表 1 和图 2):门源站 5 月、6 月、7 月、8 月、9 月、10 月、11 月份平均气温通过了 95% 置信度检验,具有显著趋势;其  $\beta$  值均大于 0,因此具有明显上升趋势;其年平均气温以  $0.38^{\circ}\text{C}/10$  年速度递增;6 月份气温上升最为显著。乌稍岭站 6 月、9 月、11 月、1 月、2 月份平均气温通过了 95% 置信度检验,具有显著上升趋势;11 月、1 月、2 月份上升最为显著,年平均气温递增速率为  $0.25^{\circ}\text{C}/10$  年。武威和民勤站 10 月、11 月、12 月、1 月、2 月份以及永昌站 9 月、10 月、11 月份通过了 95% 置信度检验,具有显著上升趋势;年平均气温递增速率分别为  $0.28^{\circ}\text{C}$ 、 $0.39^{\circ}\text{C}$ 、 $0.21^{\circ}\text{C}/10$  年。各站点其他月份虽然没有通过检验,但通过图 2 中  $\beta$  值变化趋势可以发现,流域 1956 年~2003 年各月份及年平均气温绝大多数都以增温为主,20 世纪 90 时

代年平均气温较 60 年代平均高出  $0.9^{\circ}\text{C}$ 。就各个季节气温变化趋势而言,冬季气温表现为显著增加趋势,上、中、下游 5 个站点都通过了 95% 置信度检验;民勤和武威站冬季增温最为显著;门源站夏季增温较为明显;乌稍岭站春季和武威站夏季气温表现为微弱的下降趋势。

年平均气温序列 Hurst 指数列于表 2,随机重排序列的  $H$  值(均值 0.79)与原始序列的  $H$  值(均值 0.87)较接近,说明此时  $H$  值可以接受。各站点年平均气温变化 Hurst 指数均大于 0.8,表明气温序列具有很强的长程依赖性,流域未来平均气温变化趋势与过去近 48 年气温变化趋势相同,呈上升趋势。上游门源站和下游民勤站未来年平均气温增温的持续性最强,其次是平原区的乌稍岭站和武威站。

**5.1.2 降水序列的趋势变化** 降水序列变化趋势没有气温序列变化趋势明显。武威和永昌两个站点年平均降水通过了 95% 置信度检验,表现为降水增加趋势(表 1 和图 2)。其他站点各月都没有通过检验。但观察图 2 中  $\beta$  值变化趋势可以发现,流域降水呈现增加趋势的站点及月份远多于呈现下降趋势的站点和月份。除门源站外,其他 4 个站点一年中只有 1 月~3 个月  $\beta$  值小于 0,其余月份以及年平均降水的  $\beta$  值均大于等于 0,降水仍然是以增加为主,但增幅不大;门源站有 6 个月的  $\beta$  值小于 0,降水量有减少趋势。乌稍岭站和永昌站 6 月份降水增加较明显。门源站 7 月份降水减少较为明显。就降水变化的季节趋势而言,乌稍岭站和永昌站冬季降水表现为增加;门源站春季降水表现为增加,夏、秋、冬季降水表现为减少;武威站春、秋降水表现为增加。总体而言,流域 80 年代~90 年代降水呈增加趋势,但增幅不大。门源站 80 年代增幅达 5%;乌稍岭站增幅 8%;永昌站 90 年代增幅 17%;下游民勤站 80 年代降水量减少较为显著。

表 1 石羊河流域多年平均气温和降水量

Table 1 Long-term annual temperature and precipitation in the Shiyang River basin

	气温( $^{\circ}\text{C}$ )				降水(mm)			
	1956~1970	1971~1980	1981~1990	1991~2003	1956~1970	1971~1980	1981~1990	1991~2003
门源	0.13	0.55	0.61	1.29	533.39	504.02	558.33	509.27
乌稍岭	-0.27	-0.31	-0.19	0.48	382.13	401.84	412.66	406.42
武威	7.70	7.63	7.70	8.54	157.97	154.62	162.75	183.84
永昌	4.76	4.80	4.96	5.40	181.45	189.92	205.45	211.87
民勤	7.77	7.87	8.27	8.94	107.26	123.54	99.11	120.65

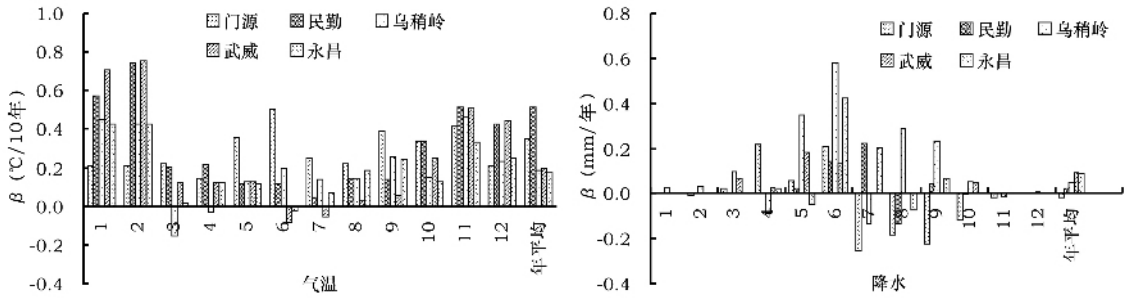


图 2 石羊河流域各月及年平均气温和降水序列  $\beta$  值

Fig.2  $\beta$  values for twelve months and annual temperature and precipitation time series in the Shiyang River basin

表 2 石羊河流域年平均气温、降水和径流序列的 Hurst 指数

Table 2 Hurst exponents for annual temperature and precipitation time series in the Shiyang River basin

站点	H 值	随机重排后 H 值	
气温	门源	0.9021	0.8173
	乌鞘岭	0.8623	0.7802
	武威	0.8541	0.8027
	永昌	0.8337	0.7418
	民勤	0.9296	0.7950
降水	门源	0.6364	0.7219
	乌鞘岭	0.7308	0.7651
	武威	0.6996	0.6002
	永昌	0.6527	0.6523
	民勤	0.6985	0.6633
径流	干流	0.9423	0.7948
	支流 大靖河	0.6832	0.7250
	六河平均	0.6567	0.6691
	西大河	0.6200	0.7230

表 2 中年平均降水序列与随机重排序列的 H 值比较接近,此时 H 值可以接受。各站点年平均降水变化 Hurst 指数均大于 0.6,具有较强的长程依赖性,即表现为持续性。流域未来降水变化趋势与过去保持一致,空间上降水变化趋势大致相同,乌鞘岭站降水变化的持续性较强。但是显然,通过比较 Hurst 指数可知,流域降水序列未来变化趋势没有气温序列的持续性强烈。

**5.1.3 分析与讨论** 很多学者利用多种区域气候模式模拟和研究了我国西北地区未来气候变化,取得了丰富的成果。这些成果对本文具有重要的指导意义和参考价值。徐影<sup>[12]</sup>、赵宗慈等<sup>[13]</sup>利用 IPCC 提供的 7 个全球海气耦合气候系统模式的模拟结果,对我国西北地区未来 21 世纪考虑温室气体增加 (GG)和温室气体与硫化物气溶胶共同影响 (GS)时,冬夏季的气候变化情景进行了分析,结果表明,我国西北地区冬季变暖最明显,线性趋势为 5℃ ~ 8℃/

100 年,夏季变暖线性趋势 3℃ ~ 5℃/100 年;气温将平均升高 2.79℃ ~ 4.50℃/100 年;未来降水量将增加 48mm ~ 60mm/100 年。郑益群等人<sup>[14]</sup>利用第二代区域气候模式 RegCM2,分析了近 140 年来的东亚区域气候变化,结果表明,增温现象在地域上具有不均匀性,西北地区增暖较为明显,降水有所增加。许吟隆<sup>[15]</sup>利用区域气候模式系统 PRECIS,分析了全国范围内地面气温和降水变化,结果显示,2011 年 ~ 2020 年, A2 情景下,温度增量 1.0℃,降水增量 3.3%; B2 情景下,温度增量 1.16℃,降水增量 3.7%;随着大气中温室气体浓度的持续增加,我国 21 世纪末将呈现北方暖干化、南方夏季洪涝和冬季干旱同时加重的趋势。李巧萍等人<sup>[16]</sup>利用国家气候中心改进的高分辨率区域气候模式 RegCM-NCC 研究了近代历史时期土地利用/覆盖变化对区域气候的影响,结果显示,近 50 年来我国大部分区域平均气温升高,西北地区降水有所增加。张丽萍等人<sup>[17]</sup>根据西北地区生态环境形成演化的地质及大气环流形势推测,西北地区目前仍处于气候转暖的初期,降水量增加将滞后于温度升高。李耀辉<sup>[18]</sup>分析得到,民勤地区 20 世纪 90 年代的平均气温比 20 世纪 60 年代、70 年代上升了 1.9℃,均值高于全球和我国平均升温值。任朝霞等人<sup>[19]</sup>以武威、民勤站为例,分析表明河西走廊地区年平均气温增加,冬季普遍增暖。本文研究表明,石羊河流域近 48 年气温呈上升趋势,降水呈增加趋势,降水增幅没有气温显著;未来的气温和降水变化表现为较强的持续性,与过去近 48 年的变化趋势保持一致。可见,本文分析结果与上述研究结果相一致。

石羊河流域近 48 年气温变化及未来气温变化总体均呈上升趋势,与全球尤其是北半球气候变暖存在着某种程度的一致性;人类活动导致的土地荒漠化、土壤含水量下降等使得空气中的水分减少、云

量减少,白天温度升高、地面吸收热量加大,从而近地层温度显著升高,也可能会造成年平均气温的升高。该流域位于欧亚大陆腹地,远离海洋,夏季主要受东亚季风暖湿气流影响,其次受西南季风影响,而西部大西洋和北部北冰洋的气流到达本区已很微弱,冬季受蒙古和西伯利亚高压的控制下晴冷少雪,因此降水量很少<sup>[20]</sup>。全球变暖使更多的水汽从海洋与陆地蒸发,促进水循环,增加降水,有利于缓解流域的干旱环境,但是气候的干湿变化,主要取决于降水与蒸发的平衡状态。在全球范围气候转暖的情况下,由于海陆热容量的差异,陆地升温快于海面,导致蒸发量上升,干旱程度加重,随着气温的持续上升,海水升温,水汽蒸发加强,促进水循环,大气降水将趋于增加。目前,石羊河流域内气温普遍升高,气候干旱指数较高,流域处于干旱程度加重状态。流域内降水量近 50 年变化过程及未来变化趋势存在时间和空间上的复杂性,可能是受不同天气系统影响或局部地理上的差异造成的。如 20 世纪 80 年代中后期受西北地区北部蒙古高压反气旋环流增强的影响,祁连山中段南风分量明显增强,水汽有所增加,从而降水量增加<sup>[21]</sup>;此外,土地利用条件的改变也会通过影响大气温度、湿度、基本流场等因素进而导致降水发生变化<sup>[16]</sup>。

### 5.2 径流

**5.2.1 径流序列的趋势变化** 径流序列 *M-K* 趋势检验结果表明(表 3、表 4):支流古浪河和杂木河通过了 95% 置信度检验,径流量减少的趋势显著;其他支流没有通过检验;观察表 3 中各支流对应的  $\beta$  值,多数都小于 0,说明支流径流量具有减少趋势,但不显著;大靖河和东大河径流量变化不明显;干流 1 月至 12 月以及年平均径流量都通过了检验,干流径流量的减少非常显著(表 4 和图 3)。20 世纪 70 年代的年平均径流量较 60 年代减少 37%,90 年代较 60 年代减少近 70%。就季节而言,冬季径流减少的趋势最为明显。

支流大靖河、西大河及其余六河的 *H* 值大于 0.5,基本通过了稳定性检验。干流 *H* 值高达 0.94 以上(表 2),随机重排后序列 *H* 值达 0.79,二者相差较大,主要原因是选用的数据序列长度有限,不能达到进行 *R/S* 分析的理想数据长度,*H* 值估计会存在误差,此外,还可能与时间序列存在周期等趋势项有关,本文采用一阶差分可能并没有完全消除这种趋势的影响。尽管如此,原始序列和随机重排序列的

*H* 值都大于 0.5,说明径流序列存在持续性。流域内未来径流变化仍呈现减少趋势,干流径流量继续减少的持续性最为强烈,各支流径流量继续减少的程度相当。此结果与很多学者研究结果一致。例如,施雅风<sup>[22]</sup>、蓝永超等人<sup>[23]</sup>研究发现:石羊河流域出山径流量将继续减少。王根绪等人<sup>[1]</sup>也指出,近 50 年来石羊河流域出山径流多年变化呈减少趋势,尤其是 20 世纪 70 年代~80 年代,减少幅度较大。

表 3 石羊河流域 8 条支流年径流序列  $\beta$  值

Table 3  $\beta$  values for eight tributaries of the Shiyang River

支流	大靖河	古浪河	黄羊河	杂木河	金塔河	西营河	东大河	西大河
趋势	不显著	显著	不显著	显著	不显著	不显著	不显著	不显著
$\beta$ ( $\times 10^8 \text{ m}^3/\text{年}$ )	0.000	-0.007	-0.008	-0.01	-0.005	-0.010	0.000	-0.002

表 4 石羊河干流径流序列  $\beta$  值

Table 4  $\beta$  values for mainstream of the Shiyang River

干流	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月
趋势	显著	显著	显著	显著	显著	显著	显著
$\beta$ ( $\times 10^8 \text{ m}^3/\text{年}$ )	-0.15	-0.18	-0.16	-0.07	-0.04	-0.03	-0.05
干流	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	年均	
趋势	显著	显著	显著	显著	显著	显著	显著
$\beta$ ( $\times 10^8 \text{ m}^3/\text{年}$ )	-0.05	-0.06	-0.08	-0.08	-0.13	-0.09	

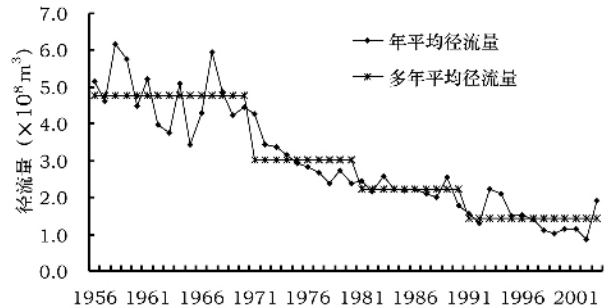


图 3 石羊河干流年平均径流量及多年平均径流量随时间变化曲线

Fig.3 Change of runoff in mainstream of the Shiyang River

**5.2.2 径流变化成因浅析** 流域出山口各河流天然来水量的普遍减少,主要原因是①全球变暖导致上游祁连山冰川面积逐年减少。流域高山区冰川融水对出山径流有一定的补给和调节作用。1961 年~1995 年 35 年间,冰川面积减少了 20%;多年监测研究表明,祁连山冰川正在以每年超过 2m 的速度退缩,而且退缩速度在加快,导致八条山区河流的出山径流量均表现出总的减少趋势<sup>[24]</sup>。这种减少趋势主要受制于全球变暖的区域响应,同时也与人类活动有关。与冰川面积减少和雪线上升同时发生的还有冻土草原退化和林草植被退化,这些因素都会导致河流出山径流量的减少; ②石羊河流域冰川

具有高积累强消融特征,物质平衡水平较高,而径流量与物质平衡具有反相关性,即负物质平衡量越大,径流量越大<sup>[25]</sup>。在升温情景下,流域冰川物质平衡增加,因此河川径流量将减少;③受全球变暖和人类活动的共同影响,流域下垫面条件发生改变。20世纪60年代以来,祁连山地森林面积减少16.5%、林带上升400m,覆盖度减少10%<sup>[26]</sup>;山区开矿、草场过度放牧、坡面大面积开垦,破坏了流域原有的蓄水条件,造成水土严重流失、草场退化、植被覆盖度降低、水源涵养功能下降;④石羊河流域气温升高显著,降水增幅不明显,降水的增加不能补偿由于气温增加而引起的干旱化,也是导致径流量减少的原因之一。

流域产流主要在祁连山区,平原区不产流。中游径流主要来自于上游山区的径流,下游径流主要来自于中游的退水、余水和上游的洪水。自20世纪70年代以来,上游取水量不断增加,中游灌溉面积持续扩大,大中小企业迅猛发展,耗水量猛增,使得进入下游的径流量锐减。根据资料分析,石羊河进入民勤县境内水量已由20世纪50年代的 $4.6 \times 10^8 \text{ m}^3$ 减少到90年代的 $1.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,1999年仅为 $1.0 \times 10^8 \text{ m}^3$ <sup>[1]</sup>。因此,中上游人类活动的影响已对下游径流起到主要的控制作用。

## 6 结论

采用M-K检验方法分析了石羊河流域1956年~2003年气温、降水和径流时间序列的变化趋势,在此基础上,估算了各时间序列的Hurst指数,分析了未来一段时间内气候和径流的变化趋势和方向,主要结论如下:

(1)石羊河流域1956年~2003年各月及年平均气温绝大多数都以增温为主,20世纪90年代年平均气温较60年代平均高出 $0.9^\circ\text{C}$ 。就季节而言,冬季气温表现为显著增加;民勤和武威站冬季增温最为显著;门源站夏季增温较为明显;乌稍岭站春季和武威站夏季气温表现为微弱的下降趋势。年平均气温序列随机重排后的H值与原始序列的H值较接近,各站点Hurst指数大于0.8,具有很强的持续性,说明石羊河流域未来一段时间内平均气温变化趋势与过去48年变化基本相同,仍将呈上升趋势。上游门源站和下游民勤站未来年平均气温增温的持续性

最强。流域气温变化趋势受全球尤其是北半球气候变暖的影响较大。

(2)只有武威和永昌两个站点的年平均降水表现为显著增加趋势,其他站点各月没有显著趋势。但是流域内降水呈现增加趋势的站点及月份远多于呈现下降趋势的站点和月份。就季节而言,乌稍岭站和永昌站冬季降水表现为增加,武威站春、秋降水表现为增加,门源站春季降水表现为增加,夏、秋、冬季降水表现为减少。流域20世纪80年代~90年代降水增加,但增幅不大。各站点Hurst指数均大于0.6,表现为持续性,即未来一段时间内降水变化趋势与过去保持一致。但是降水序列未来变化趋势没有气温序列的持续性强烈。降水变化过程及未来变化趋势存在时间和空间上的复杂性,可能是受不同天气系统的影响或局部地理上的差异造成的。

(3)古浪河和杂木河径流量减少趋势显著,其他支流径流量减少的趋势不明显。石羊河干流各月及年平均径流量减少趋势非常显著。20世纪70年代干流年平均径流量较60年代减少37%,90年代较60年代减少近70%。冬季径流减少的趋势最为明显。Hurst指数估算结果表明,径流序列存在很强的持续性,流域内未来径流变化仍呈现减少趋势,干流径流量继续减少的持续性最强。支流径流量普遍减少的原因不仅包括人类活动的影响,如上游取水量的不断增加、下垫面条件的改变等,也包括气候变化的因素,如流域冰川的高积累强消融特征导致的河流径流量减少、流域气温升高导致的蒸发量增大等。干流径流量持续减少的主要原因是中上游人类活动的影响。中上游水资源开发利用程度的不断提高,致使进入流域下游的地表水量减少,加之下游地区过量开采地下水,导致地下水位急剧下降,是流域下游地区生态环境恶化最主要、最直接的原因。

## 参考文献 (References):

- [1] 王根绪,程国栋,沈永平.近50年来河西走廊区域生态环境变化特征与综合防治对策[J].自然资源学报,2002,17(1):78~86.[WANG Gen-xu, CHENG Guo-dong, SHEN Yong-ping. Features of eco-environmental changes in Hexi Corridor Region in the last 50 years and comprehensive control strategies[J]. *Journal of Natural Resources*, 2002, 17(1):78~86.]
- [2] 马晓波,施雅风,沈永平,等.西北地区近代及历史时期气候变化

- 趋势分析[J]. 冰川冻土, 2003, 25(6): 672~675. [ MA Xiao-bo, SHI Ya-feng, SHEN Yong-ping, et al. An analysis of climate changing trend in Northwest China: Recent and historical period[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25(6): 672~675. ]
- [ 3 ] 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, WEI Xiao-mei. Analysis on aberrance point of annual runoff serials in the Downstream of Shiyang River[J]. *Agricultural Research in the Arid Area*, 2006, 24(2): 174~177. ]
- [ 4 ] Ma, J. Z., Wang, X. S., Edmunds, W. M. The characteristics of ground-water resources and their changes under the impacts of human activity in the arid Northwest China - a case study of the Shiyang River Basin[J]. *Journal of Arid Environmentals*, 2005, 61: 277~295.
- [ 5 ] Xu, Z. X., Chen, Y. N., Li, J. Y. Impact of climate change on water resources in the Tarim River basin[J]. *Water Resour. Mgmt.*, 2004, 18(5): 439~458.
- [ 6 ] Xu, Z. X., Takeuchi, K., Ishidaira, H. Monotonic trend and step changes in Japanese precipitation[J]. *J. Hydrol.*, 2003, 279(1~4): 144~150.
- [ 7 ] 江田汉, 邓莲堂. Hurst 指数估计中存在的若干问题~以在气候变换研究中的应用为例[J]. 地理科学, 2004, 24(2): 177~182. [ JIANG Tian-han, DENG Lian-tang. Some problems in estimating a hurst exponent- A case study of applicatings to climatic chang[J]. *Scientia Geographic Sinica*, 2004, 24(2): 177~182. ]
- [ 8 ] 赵磊. 近 50 年来兰州城市气候变化的 R/S 分析[J]. 干旱区地理, 2002, 25(1): 90~95. [ ZHAO Jing. R/S Analysis of urbanization effect on climate in Lanzhou[J]. *Arid Land Geography*, 2002, 25(1): 90~95. ]
- [ 9 ] 杨庆, 秦伟良. R/S 和修正 R/S 方法的实证分析[J]. 统计与决策, 2003, (11): 18~19. [ YANG Qing, QIN Wei-liang. Csa studies of r/s method and revised R/S method[J]. *Statistics and Decision*, 2003, (11): 18~19. ]
- [ 10 ] 邹新月, 许涤龙. H 指数估计方法的有效性检验[J]. 统计研究, 2004, (8): 37~39. [ ZOU Xin-yue, XU Di-long. Testing the effectiveness of estimation method of H Index[J]. *Statistical Research*, 2004, (8): 37~39. ]
- [ 11 ] Dang, T. D., Molnar, S. On the effects of non-stationarity in long-range dependence test[J]. *Periodical Polytechnica Ser. El., Eng*, 1999, 43(4): 227~250.
- [ 12 ] 徐影, 丁一汇, 赵宗慈, 等. 我国西北地区 21 世纪季节气候变化情景分析[J]. 气候与环境研究, 2003, 8(1): 19~25. [ XU Ying, DING Yi-hui, ZHAO Zong-ci, et al. A Scenario of seasonal climate change of the 21st century in Northwest China[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2003, 8(1): 19~25. ]
- [ 13 ] 赵宗慈, 丁一汇, 徐影, 等. 人类活动对 20 世纪中国西北地区气候变化影响检测和 21 世纪预测[J]. 气候与环境研究, 2003, 8(1): 27~34. [ ZHAO Zong-ci, DING Yi-hui, XU Ying, et al. Detection and prediction of climate change for the 20<sup>th</sup> and 21<sup>st</sup> century due to human activity in Northwest China[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2003, 8(1): 27~34. ]
- [ 14 ] 郑益群, 于革, 王苏民, 等. 140 年来植被和大气 CO<sub>2</sub> 浓度变化对东亚气候影响的数值模拟[J]. 自然科学进展, 2003, 13(9): 951~957. [ ZHENG Yi-qun, YU Ge, WANG Su-min, et al. Numerical simulation on impact of vegetation and CO<sub>2</sub> changes on East Asia Climate in the Past 140 Years[J]. *Progress in Natural Science*, 2003, 13(9): 951~957. ]
- [ 15 ] 许吟隆, 黄晓莹, 张勇, 等. 中国 21 世纪气候变化情景的统计分析[J]. 气候变化研究进展, 2005, 1(2): 80~84. [ XU Yin-long, HUANG Xiao-ying, ZHANG YONG, et al. Statistical analyses of climate change scenarios over China in the 21st century[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2005, 1(2): 80~84. ]
- [ 16 ] 李巧萍, 丁一汇, 董文杰. 中国近代土地利用变化对区域气候影响的数值模拟[J]. 气象学报, 2006, 64(3): 257~270. [ LI Qiao-ping, DING Yi-hui, DONG Wen-jie. A numerical simulation on impact of historical land-use changes on regional climate in China Since 1700[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2006, 64(3): 257~270. ]
- [ 17 ] 张丽萍, 张锐波, 倪含斌. 西北地区生态环境形成背景及动态演化趋势[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2005, 16(2): 88~92. [ ZHANG Li-ping, ZHANG Rui-bo, NI Han-bin. Evolution trend and formation background of eco-environment with world climatic variation in Northwest China[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2005, 16(2): 88~92. ]
- [ 18 ] 李耀辉, 孙国武, 张强, 等. 中亚与我国西北地区环境蠕变问题的分析[J]. 中国环境科学, 2006, 26(5): 609~613. [ LI Yao-hui, SUN Guo-wu, ZHANG Qiang, et al. The analysis of environmental creeping problems in Central Asia and Northwest China[J]. *China Environmental Science*, 2006, 26(5): 609~613. ]
- [ 19 ] 任朝霞, 杨达源. 近 50a 西北干旱区气温分区及其变化趋势研究[J]. 干旱区资源与环境, 2006, 20(1): 99~103. [ REN Zhao-xia, YANG Da-yuan. Study on the division and trends of temperature variation in Northwest Arid Area of China in resent 50 year[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2006, 20(1): 99~103. ]
- [ 20 ] 刘春明. 石羊河流域气候干湿状况分析及评价[J]. 生态学报, 2006, 25(8): 880~884. [ LIU Chun-ming. Analysis and assessment of climatic dry and wet conditions in Shiyang River Basin[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(8): 880~884. ]
- [ 21 ] 俞亚勋, 王劲松, 李春燕. 西北地区空中水汽时空分布及变化趋势分析[J]. 冰川冻土, 2003, 25(2): 149~154. [ YU Ya-xun, WANG Jin-song, LI Chun-yan. Spatial and temporal distribution of water vapor and its variation trend in atmosphere over Northwest China[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25(2): 149~154. ]
- [ 22 ] 施雅风, 沈永平, 李栋梁, 等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨[J]. 第四纪研究, 2003, 23(2): 152~164. [ SHI Ya-feng, SHEN Yong-ping, LI Dong-liang, et al. Discussion on the present climate change from warm-dry to warm-wet in Northwest China[J]. *Quaternary Sciences*, 2003, 23(2): 152~164. ]
- [ 23 ] 蓝永超, 丁永建, 沈永平, 等. 河西内陆河流域出山径流对气候转型的响应[J]. 冰川冻土, 2003, 25(2): 181~185. [ LAN Yong-chao, DING Yong-jian, SHEN Yong-ping, et al. Responding of river streamflow to the climate Shift in the Hexi Inland Region[J].

- Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25(2): 181 ~ 185. ]
- [ 24 ] 康尔泗, 李新, 张济世, 等. 甘肃河西地区内陆河流域荒漠化的水资源问题[ J ]. 冰川冻土, 2004, 26(6): 657 ~ 667. [ KANG Er-si, LI Xin, ZHANG Ji-shi, et al. Water resources relating to desertification in the Hexi Area of Gansu Province, China[ J ]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, 26(6): 657 ~ 667. ]
- [ 25 ] 沈永平, 刘时银, 甄丽丽, 等. 祁连山北坡流域冰川物质平衡波动及其对河西水资源的影响[ J ]. 冰川冻土, 2001, 23(3): 244 ~ 250. [ SHEN Yong-ping, LIU Shi-yin, ZHAN Li-li, et al. Fluctuations of glacier mass balance in watersheds of Qilian Mountain and their impact on water resources of Hexi Region[ J ]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2001, 23(3): 244 ~ 250. ]
- [ 26 ] 气候变化的影响[ EB/OL ]. [http://www.cma.gov.cn/qxkp/qxzs/t20070305\\_181653.shtml](http://www.cma.gov.cn/qxkp/qxzs/t20070305_181653.shtml), 2007-03-05. [ Impacts of Climate Change [ EB/OL ]. [http://www.cma.gov.cn/qxkp/qxzs/t20070305\\_181653.shtml](http://www.cma.gov.cn/qxkp/qxzs/t20070305_181653.shtml), 2007-03-05. ]

## Long-Term Trends of Major Climatic Variables and Runoff in the Shiyang River Basin

XU Zong-xue<sup>1</sup>, LI Zhan-ling<sup>1</sup>, SHI Xiao-kun<sup>2</sup>

( 1. Key Laboratory of Water and Sediment Sciences, Ministry of Education, College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China ;  
2. Gansu Institute of Water Resources Surveying, Designing and Research, Lanzhou 730000, China )

**Abstract :** Long-term trends of major climatic variables and hydrological time series including air temperature, precipitation and runoff in the Shiyang River basin from 1956 to 2003 were detected using nonparametric Mann-Kendall technique. For the purpose of estimating the long-range dependence of time series, R/S method, the most powerful way to estimate the future tendency of climate and runoff change, was used in this study. The robust of the estimation result on Hurst exponent was tested by comparing the H values obtained from the original time series and the stochastically reset ones. The results showed that the temperature in most of months and annual temperature in the study area experienced a significant increasing tendency during the past 48 years, especially in winter. Annual average temperature in the 1990s was 0.9°C, higher than that in the 1960s. H values obtained from the original temperature time series were close to those from the stochastically reset ones and most of them were more than 0.8, which implied that there were strong long-range dependence characteristics in temperature in the study area, and the future tendency of temperature generally exhibits consistency with that in the past 48 years. The precipitation at only two stations, Wuwei and Yongchang stations, increased at 5% level of significance, and no obvious trend was found in other stations. While the stations and months with increasing tendency of precipitation were much more than those with decreasing tendency of precipitation. H values were above 0.6, indicating long-range dependence characteristics exist in precipitation time series. Results also showed that the persistence in precipitation was weaker than that in temperature by comparing H values resulted from two time series. Decreasing trend was detected in annual runoff in Gulang River and Zamu River, without obvious decreasing trend in other tributaries. The runoff at any time scale, months or year, exhibited significant decreasing tendency along the mainstream of the Shiyang River. 37% of annual runoff along the mainstream was reduced from the 1960s to the 1970s, nearly 70% until the 1990s. The results on Hurst exponent implied that strong long-range dependence characteristics in runoff time series in the study area were existed, and the future tendency of runoff change was consistent with that in the past 48 years. The change in temperature may owe to the impacts of global warming. The spatial and temporal complexity of precipitation may associate with different weather systems and diverse local geographical conditions. Both human activities and climate change dominated the decreasing of runoff in both tributaries and mainstream of the Shiyang River.

**Key words** Shiyang River ; Hurst exponent ; Nonparametric test ; Runoff