

青海湖流域 50 年来(1956 – 2007 年) 河川径流量变化趋势 ——以布哈河和沙柳河为例*

李岳坦, 李小雁, 崔步礼, 彭海英, 伊万娟

(地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875)

摘 要:通过对青海湖流域布哈河和沙柳河 50 年来的河川径流量分析发现, 布哈河和沙柳河年径流量 50 年来没有显著的变化趋势, 这两条河流的河川径流量对青海湖水位下降所起的作用不明显; 布哈河月平均流量的年际变化在 1 月、2 月和 3 月有减少的趋势, 沙柳河月平均流量的年际变化在 1 月、2 月、4 月和 5 月亦有减少的趋势; 布哈河的径流量大于沙柳河的径流量, 在 55% – 91% 频率范围内, 布哈河的径流量小于沙柳河的径流量, 在其它频率范围内, 布哈河的径流量显著大于沙柳河的径流量, 在一年中, 布哈河和沙柳河的月径流量具有显著的差异; 布哈河来水丰沛期是 20 世纪 60 年代, 贫乏期是 90 年代, 70 和 80 年代为平水期; 沙柳河月径流量从 20 世纪 60 年代到 90 年代一直比较稳定, 没有发生显著的变化。

关键词:青海湖; 布哈河; 沙柳河; 流量历时曲线; 径流量

Trend of streamflow in Lake Qinghai basin during the past 50 years(1956 – 2007) —Take Buha River and Shaliu River for examples

LI Yuetan, LI Xiaoyan, CUI Buli, PENG Haiying & YI Wanjuan

(State Key Laboratory of Earth Surface Processes, Beijing 100875, P. R. China)

Abstract: Annual streamflow of Buha River and Shaliu River were studied in this paper. No significant changes were found during the past 50 years, which indicated that the decline of the water level of Lake Qinghai was not affected by the streamflow of the two rivers in Lake Qinghai basin. The monthly mean streamflow of Buha River had declined trend in January, February and March, and the monthly mean streamflow of Shaliu River also had declined trend in January, February, April and May. The yearly streamflow of Buha River was larger than Shaliu River, but the streamflow of Shaliu River was larger than Buha River within the range of from 55% – 91%. The monthly streamflow of Buha River and Shaliu River were of great difference. High flow period of Buha River were found in the 1960s, normal flow period in the 1970s and 1980s, while low flow period in the 1990s. Compared with Buha River, the streamflow of Shaliu River was steady.

Keywords: Lake Qinghai; Buha River; Shaliu River; FDC; streamflow

河川径流是水循环的基本环节, 又是水量平衡的基本要素, 它是自然地理环境中最活跃的因素, 河川径流量的变化对流域生态系统的植被、水循环以及生态环境过程具有重要的影响, 因此研究流域河川径流量, 对于探讨流域水量平衡, 揭示流域水量动态变化以及流域生态需水量的研究均具有重要的意义。

国内外许多专家学者都曾经对流域河川径流量进行了大量而深入的研究, Omar I 等^[1]通过对 Mackenzie 河流域的冬季和夏季的径流量分析, 对 Mackenzie 河流域的水文过程的变化趋势进行了研究; Marius-Victor Birsan 等^[2]对瑞士 48 个不受人类干扰流域的日均径流量的变化趋势进行了研究; Ercan Kahya 等^[3]对土耳其 26 个流域的月径流量的变化趋势进行了分析; Zhang Qiang 等^[4]对长江流域 130 年来的年径流量的变化

* 国家科技支撑计划“十一五”项目(2007BAC30B02)、国家重点基础研究发展计划“973”项目(2004CB720207)和国家自然科学基金项目(NSFC 40599423)联合资助。2009 – 12 – 17 收稿; 2010 – 01 – 22 收修改稿。李岳坦, 男, 1980 年生, 博士研究生; E-mail: liyuetan@sohu.com.

趋势进行了深入研究;Jiang Tong 等^[5]对 1961–2000 年长江流域的降水和径流量的时空变化趋势进行了深入研究;Wang Jun 和 Meng Jijun^[6]对黑河流域 1994–2005 年径流量的变化特征和趋势进行了研究;汤奇成^[7]对塔里木盆地河川年径流量的变化趋势进行了分析. 与前人的研究不同,青海湖流域地处高寒半干旱地区,该区域具有独特的高原、水文、气候等环境条件,对青海湖流域的河川径流量进行研究,有助于认识高寒半干旱地区河流独特的水文特征;同时对整个青海湖流域而言,河川径流是青海湖流域水量平衡分析中的一个重要因素,对青海湖流域的河川径流量进行分析和研究,对青海湖流域水量动态变化和流域生态需水量的研究以及认识造成青海湖水位持续下降的原因均具有重要的意义.

本文尝试使用流量历时曲线,结合单调趋势的非参数检验 Mann-Kendall (MK) 法、Kendall 秩相关法、Spearman 秩相关法和偏相关系数分析青海湖流域最大的两条河流——布哈河和沙柳河 50 年来的径流量变化趋势.

1 研究区域概况

青海湖流域位于青海省东北部,东为日月山、南为青海南山、西为天峻山、北为大通山所环绕,为一封闭的内陆湖盆地. 地理位置介于 $97^{\circ}50'-101^{\circ}20'E$, $36^{\circ}15'-38^{\circ}20'N$ 之间,流域为西北高、东南低,海拔在 3194–5174m 之间,流域面积为 29661km². 青海湖流域有河流 50 余条,其中比较著名的有布哈河、沙柳河、哈尔盖河、乌哈阿兰河和黑马河等,其中布哈河和沙柳河是青海湖流域最大的两条河流,两条河流的径流量占青海湖流域总径流量的 64%,故选布哈河和沙柳河为研究对象来研究青海湖流域 50 年来河川径流量的变化. 青海湖流域布哈河和沙柳河的水系分布见图 1.

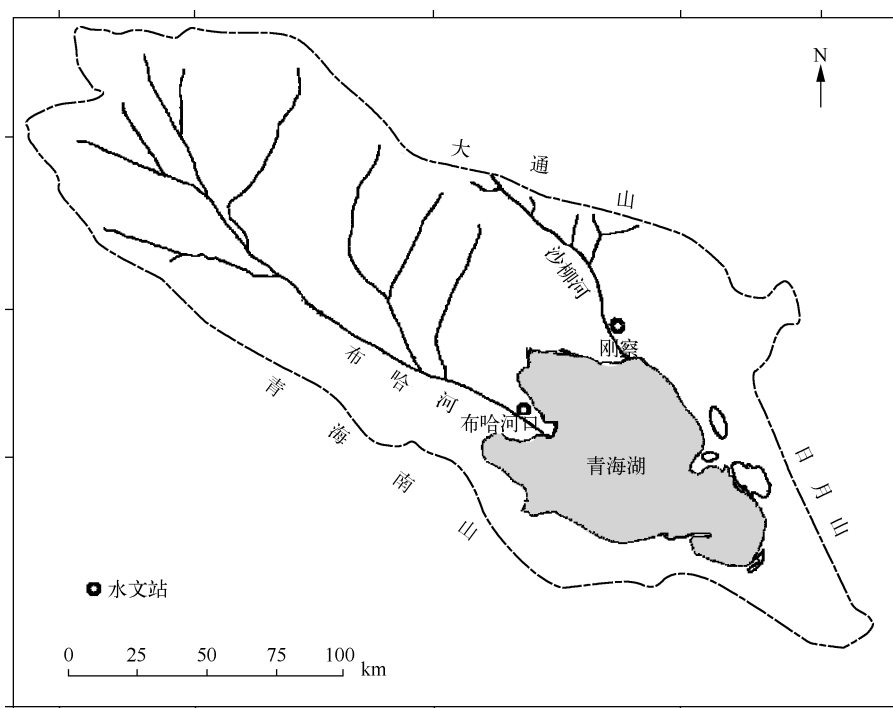


图 1 青海湖流域布哈河和沙柳河水系分布

Fig. 1 The river system of Buha River and Shaliu River in Lake Qinghai basin

布哈河发源于青海省天峻县疏勒南山,全长 262km,流域面积 14337km²,流域由青海南山、布果特山、疏勒南山、托莱南山所环抱,流域构成东西向,布哈河流入青海湖,河口至流域最高山顶海拔 3198–5174m,流域内海拔 4000m 以上终年冰雪覆盖,4000m 以下多为草原,间有块状水柏枝林、沙棘林等,植被率较高,水量

主要由冰川雪水、降水、地下径流补给,主要支流有郡子河、日哈河、希格尔曲、艾热盖阳康曲、哈吉尔河、夏日格曲等,布哈河是青海湖主要水源补给,所占比重较大。

沙柳河又称伊乌克兰河,发源于刚察县境内第一高峰桑斯扎山南麓,源头为冰冻沼泽区,全长 106km,流域面积 1442km²,流向由西向东南流入青海湖。

2 研究方法

本文主要是通过对流域内两条主要河流——布哈河和沙柳河 1956-2007 年的径流量资料进行分析从而研究青海湖流域河川径流量 50 年来的变化趋势。

2.1 单调趋势的非参数检验 Mann-Kendall 法

本文采用非参数检验 Mann-Kendall(MK)法,检验径流过程的可能趋势,其非参数统计检验公式为^[8-12]:

$$Z_{MK} = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S < 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中,

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (2)$$

$$\text{sgn}(\theta) = \begin{cases} 1, & \theta > 0 \\ 0, & \theta = 0 \\ -1, & \theta < 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q t_p(t_p-1)(2t_p+5)}{18} \quad (4)$$

式中, x_j 和 x_i 为连续的数据值, n 为数据集的长度, t_p 为“结”的宽度, q 为“结”的个数;正的 Z_{MK} 表示“上升趋势”,负的 Z_{MK} 表示“下降趋势”。

衡量变化趋势大小的指标为:

$$\beta = \text{Median}\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}\right) \quad \forall i < j \quad (5)$$

式中, x_j 和 x_i 表示第 j 和第 i 次观测数据。

零假设 $H_0: \beta = 0$. 当 $|Z_{MK}| > Z_{1-p/2}$, 拒绝零假设. 其中 $\pm Z_{1-p/2}$ 为标准正态累积分布函数, p 为显著性检验水平。

2.2 Kendall 秩相关系数

$$K = \frac{\sum_{i < j} [\text{sign}(R_i^* - R_j^*) \text{sign}(Q_i^* - Q_j^*)]}{\sqrt{\frac{1}{2}n(n-1) - \frac{1}{2} \sum_i (\tau_i^2 - \tau_i)}} \sqrt{\frac{1}{2}n(n-1) - \frac{1}{2} \sum_i (\eta_i^2 - \eta_i)} \quad (6)$$

$$\text{sign}((X_i - X_j)(Y_i - Y_j)) = \begin{cases} 1 & (X_i - X_j)(Y_i - Y_j) > 0 \\ 0 & (X_i - X_j)(Y_i - Y_j) = 0 \\ -1 & (X_i - X_j)(Y_i - Y_j) < 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中, K 为 Kendall 秩相关系数; n 为样本数; R_i^* 和 Q_i^* 分别表示 X_i 和 Y_i 在其样本中的平均秩; τ_i 和 η_i 表示 X 样本与 Y 样本的第 i 个结; sign 为符号函数^[13]。

2.3 Spearman 秩相关系数

$$r^* = \frac{\frac{n(n^2-1)}{6} - \frac{1}{12} [\sum_i (\tau_i^3(x) - \tau_i(x)) + \sum_j (\tau_j^3(y) - \tau_j(y))] - S^*}{2\sqrt{[\frac{n(n^2-1)}{12} - \frac{1}{12} \sum_i (\tau_i^3(x) - \tau_i(x))][\frac{n(n^2-1)}{12} - \frac{1}{12} \sum_j (\tau_j^3(y) - \tau_j(y))]}} \quad (8)$$

$$S^* = \sum_{i=1}^n (R_i^* - Q_i^*)^2 \quad (9)$$

式中, r^* 为 Spearman 秩相关系数; n 为样本数; $\tau_i(x)$ 和 $\tau_j(y)$ 分别表示在样本 X 和 Y 中的结统计量; R_i^* 和 Q_i^* 分别表示 X_i 和 Y_i 的秩^[13].

2.4 临界点的判定方法

具有显著趋势性变化的随机序列样本, 在某个时期存在显著性跳跃变化时, 可以把变化点作为临界点, 将系列样本分成两个不同的、具有显著性变化的随机系列样本, 从而对比分析两个随机系列样本的各自特征及其之间差异.

本文采用 Pettitt 提出的用于寻求系列显著性变化的非参数方法, 它使用了 Mann-Witney 提出的统计量 ($U_{t,N}$), $U_{t,N}$ 可以用来检验两个样本 $x_1 \cdots x_t$ 和 $x_{t+1} \cdots x_N$ 是否来自一个总体, 其计算公式为^[14-15]:

$$U_{t,N} = U_{t-1,N} + \sum_{j=1}^N \text{sign}(x_t - x_j) \quad \text{for } t = 2 \cdots N \quad (10)$$

式中, N 为样本长度.

该检验统计量是计算第一个样本的元素超过第二个样本元素值的次数. Pettitt 检验的零假设是不存在变化点. 用于显著性检验的统计量和相应概率为:

$$K_t = \max_{1 \leq t \leq N} |U_{t,N}| \quad (11)$$

$$p \approx 2 \exp \{ -6 (K_t)^2 / (N^3 + N^2) \} \quad (12)$$

如果 $p < 0.5$, 则存在明显的变化点, 整个随机序列被变化点 t 分为两部分.

2.5 流量历时曲线

流量历时曲线(FDC)是表示某一时段的流量值超过所有历史纪录的时间比例^[16-18], 它反映的是从低流量到洪水的各流量状态下流域的径流特征. 早在 1880 年, Clemens Herschel 首次应用了流量历时曲线^[19]. 目前, 流量历时曲线被广泛应用于水利工程相关的各领域如水电工程设计^[19-20]、灌溉规划^[19-20]、河流污染治理^[12]、河流和湖泊沉积物沉降及河流侵蚀等^[19, 21-23].

流量历时曲线表示流域某一时段内的流量与流量发生的频次之间的关系, 期间不必考虑时间的连续性, 它表示在整个时间序列中, 大于等于某一流量发生的时间百分比. 流量历时曲线能够全面而直观的反映整个研究时段流域径流的变化特征. 用于确定大约等于某一流量发生频次的计算方法为:

$$F = P(Q \geq q_i) \quad (13)$$

式中, F 为大于等于某一流量的发生频次; P 为概率密度函数; Q 为流量; q_i 为某一特定流量.

2.6 随机性检验方法

样本的随机性通常利用自相关系数来检验, 是通过计算不同时间段数据的自相关系数来确定样本的随机性, 如果样本是随机的, 所有的自相关系数都趋近零, 否则, 至少会有一个自相关系数明显偏离零. 本文将利用自相关系数来检验不同数据系列的随机性, 用于确定其置信区间 CB 的计算公式为^[24]:

$$CB = (Z_i - \partial/2) / \sqrt{n} \quad (14)$$

式中, Z_i 是正态分布的分位点百分数; ∂ 是置信度; CB 具有固定的宽度, 它取决于样本的大小.

3 结果与讨论

3.1 布哈河和沙柳河径流量年际变化趋势分析

布哈河和沙柳河年径流量的变异系数 C_v 、偏度系数 C_s 、峰度系数 C_k 、最小值 R_m 、最大值 R_x 、平均值 R_e 、标准差 SD 、 Z_{MK} 和变化速率 β 见表 1。

布哈河的年径流总量明显大于沙柳河的年径流量,并且布哈河径流量的年际变化较大,偏度系数和峰度系数也明显大于沙柳河(表 1)。与 Z_{MK} 相对应的 p 都比较大,零假设没有被推翻,这说明布哈河和沙柳河的年径流量 50 年来没有显著的变化趋势。

表 1 布哈河和沙柳河年径流总量的最小值 R_m 、最大值 R_x 、平均值 R_e 、标准差 SD 、变异系数 C_v 、偏度系数 C_s 、峰度系数 C_k 、与 Z_{MK} 对应的 p 值和变化速率 β

Tab. 1 Minimum streamflow R_m , maximum streamflow R_x , mean streamflow R_e , standard deviation SD , coefficient of variation C_v , coefficient of skewness C_s , coefficient of kurtosis C_k , the p -values refer to Z_{MK} and the variation velocity β

河流	$R_m (\times 10^8 \text{ m}^3)$	$R_x (\times 10^8 \text{ m}^3)$	$R_e (\times 10^8 \text{ m}^3)$	$SD (\times 10^8 \text{ m}^3)$	C_v	C_s	C_k	p	$\beta (\times 10^8 \text{ m}^3/\text{a})$
布哈河	1.99	19.48	7.93	3.64	0.46	1.01	1.39	0.25	-0.0233
沙柳河	1.42	5.54	3.08	0.80	0.26	0.40	0.62	0.33	0.0029

同时也分别采用了 Spearman 秩相关法、Kendall 秩相关法和偏相关法分析了布哈河和沙柳河年径流量的变化趋势。利用这三种方法的分析结果与 Mann-Kendall 的分析结果一致,布哈河和沙柳河年径流量的三个相关系数均没有达到显著的统计检验水平,说明布哈河和沙柳河的年径流量 50 年来没有显著的变化趋势(表 2)。

表 2 布哈河和沙柳河径流量年际变化趋势相关系数

Tab. 2 Trend regression coefficient of Buha River and Shaliu River

河流	Kendall 相关系数	显著性水平	Spearman 相关系数	显著性水平	偏相关系数	显著性水平
布哈河	-0.063	不显著	-0.091	不显著	-0.224	不显著
沙柳河	0.044	不显著	0.06	不显著	0.33	不显著

采用 Pettitt 方法分析两条河流径流量变化的临界年份,Pettitt 检验结果与其它方法的检验结果一致,即布哈河和沙柳河年径流量在 50 年来没有显著的变化趋势(图 2)。

由以上分析可以得出,青海湖流域两条最大的河流——布哈河和沙柳河的河川径流量 50 年来没有发生显著的变化,这两条河流的河川径流量对青海湖水位下降所起的作用不明显,研究发现,湖面降水量和湖面蒸发量对青海湖水位变化的影响显著^[25-27],因此对青海湖湖面降水量和湖面蒸发量进行观测对认识青海湖水位下降的成因是必不可少的。

3.2 布哈河和沙柳河月平均径流量年际变化

在本研究中,MK 非参数检验法也被用来检验布哈河和沙柳河的月平均径流量的年际变化趋势,分别利用公式(1)-(5)计算了两条河流每个月月平均流量年际变化的 Z_{MK} 和变化速率 β ,其中变化速率 β 的计算结果见表 3。

布哈河除 1 月、2 月和 3 月之外,其它月份计算的 $|Z_{MK}|$ 均小于 $Z_{1-0.05/2}$,零假设没有被推翻,这说明其它各月的平均流量没有显著的年际变化趋势,而 1 月、2 月和 3 月计算的 $|Z_{MK}|$ 大于 $Z_{1-0.05/2}$,说明 1 月、2 月和

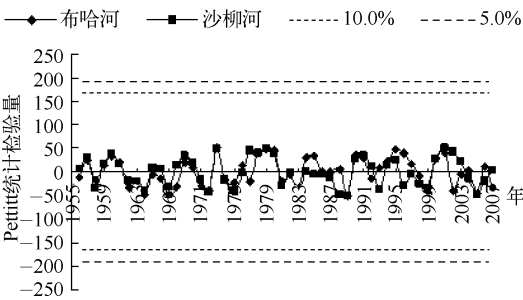


图 2 布哈河和沙柳河年际变化趋势的 Pettitt 检验
Fig. 2 The Pettitt test for detecting a change in the mean of annual streamflow of Buha River and Shaliu River

3 月的月平均径流量在 $P=0.05$ 显著性水平上变化趋势显著,布哈河的月平均流量在 1 月、2 月和 3 月略有减少的趋势,减少的速率分别为 $4.1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ 、 $4.4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ 和 $4.3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$;沙柳河除 1 月、2 月、4 月和 5 月之外,其它月份计算的 $|Z_{MK}|$ 也均小于 $Z_{1-0.05/2}$,说明其它各月的月平均流量也没有显著的变化,而 1 月、2 月、4 月和 5 月的 $|Z_{MK}|$ 大于 $Z_{1-0.05/2}$,表明 1 月、2 月、4 月和 5 月在 $P=0.05$ 显著性水平上月平均流量也存在着年际变化,沙柳河的月平均流量在 1 月、2 月、4 月和 5 月略有减少的趋势,减少的速率分别为 $1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ 、 $0.75 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ 、 $11 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ 和 $30 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ (表 3)。

通过对布哈河和沙柳河月径流量年际变化的趋势分析可以发现,布哈河径流量发生减少的月份分别是 1 月和 2 月,沙柳河径流量发生减少的月份分别是 1 月、2 月、4 月和 5 月,这个时期正好处于青海湖流域的冬、春季节,之所以发生这种现象应是 与青海湖流域近 50 年来冬、春季节气温有所升高,蒸发量增大有一定的关系^[25,26]。

表 3 布哈河和沙柳河月平均流量年际变化速率 β

Tab. 3 The variation velocity of the mean monthly streamflow of Buha River and Shaliu River

河流	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
布哈河 $\beta(\times 10^4 \text{ m}^3/\text{a})$	-4.1 *	-4.4 *	-4.3 *	-2.8	-3.9	40	-26	11	48	17	4.7	-2.2
沙柳河 $\beta(\times 10^4 \text{ m}^3/\text{a})$	-1 *	-0.75 *	-0.45	-11 *	-30 *	-9	-11	49	23	5.2	2.1	-0.17

* 表示在 $P=0.05$ 显著性水平上通过检验。

通过公式(14)对布哈河 1 月、2 月、3 月和沙柳河 1 月、2 月、3 月、4 月的月平均径流量系列数据的自相关系数进行了计算,结果表明所有时间序列的自相关系数都趋近于零,这说明这几组数据系列在时间变化上随机性明显,计算的变化速率比较可靠;布哈河 1 月、2 月、3 月和沙柳河 1 月、2 月、4 月、5 月的月平均流量年际变化趋势见图 3 和图 4。

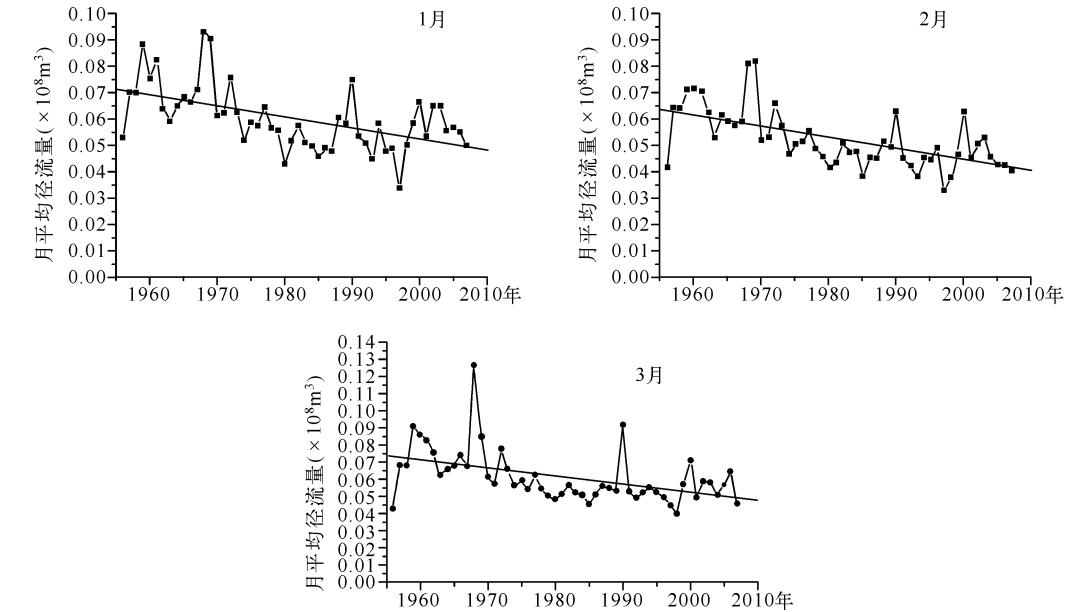


图 3 布哈河 1-3 月份月平均径流量年际变化趋势

Fig. 3 Monthly variation trend of mean streamflow from January to March of Buha River

3.3 布哈河和沙柳河月径流量过程的基本特征

布哈河和沙柳河多年序列的月平均径流量的流量历时曲线表明,在两条河流中,布哈河的径流量大于沙柳河的径流量;在 55% - 91% 频率范围内,布哈河的径流量小于沙柳河的径流量,在其它频率范围内,布哈河的径流量明显大于沙柳河的径流量(图 5),这表明在一年中,布哈河和沙柳河的月径流量具有显著的差

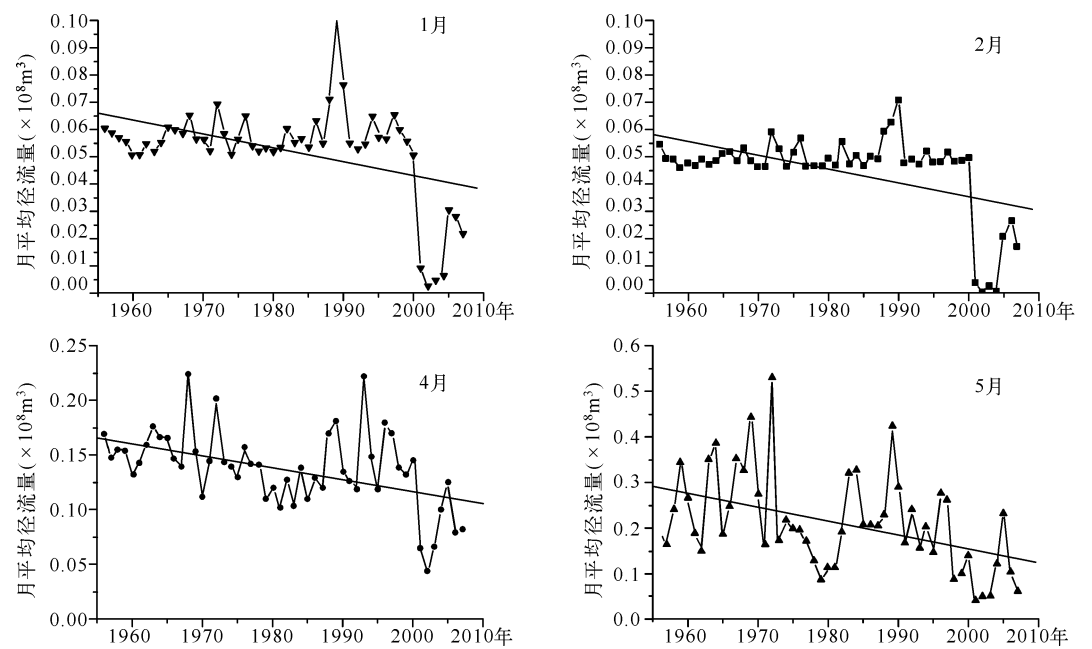


图 4 沙柳河 1、2、4 和 5 月份月平均径流量年际变化趋势

Fig. 4 Monthly variation trend of mean streamflow of January, February, April and May of Shaliu River

异,这是因为两条河流的集水面积差异较大所致,布哈河的集水面积为 14337km²,沙柳河的集水面积为 1442km²,二者相差较大.为了反映流域径流量的变化差异,采用特征频率下的流量与 50% 频率下的流量(用 Q_{50} 表示)比来表示,本文选择 1% 和 5% 频率代表高流量(汛期流量),95% 和 99% 频率代表低流量(枯季流量),并用 Q_1 、 Q_5 和 Q_{95} 、 Q_{99} 代表各频率下的流量值.两条河流特征频率下的月平均流量与 Q_{50} 之比见表 4.

表 4 布哈河和沙柳河 FDC 的流量特征指标

Tab. 4 Character index of FDC in Buha River and Shaliu River respectively

河流	$Q_{50}(\times 10^8 \text{ m}^3)$	Q_1/Q_{50}	Q_5/Q_{50}	Q_{95}/Q_{50}	Q_{99}/Q_{50}
布哈河	0.1923	26.9542	14.4137	0.2372	0.2075
沙柳河	0.1687	7.1238	7.1238	0.2611	0.0334

沙柳河的高流量 Q_1 、 Q_5 与 Q_{50} 的比值较小,而布哈河的比值非常大;而在低流量区,两条河流 Q_{95} 与 Q_{50} 的比值较为接近, Q_{99} 与 Q_{50} 的比值沙柳河明显偏小(表 4).这表明布哈河与沙柳河相比,月径流量的变化幅度较大,对降雨的响应更为敏感,这与布哈河径流量季节分配极为不均匀的特点是相一致的,即布哈河全年径流量 95% 集中在 4 - 10 月,其中又有 82.3% 集中在 6 - 9 月,11 月至次年 3 月的径流量仅占年径流总量的 5%^[28].

3.4 布哈河和沙柳河不同年代月径流量频率曲线

分别比较布哈河和沙柳河 20 世纪 60、70、80 和 90 年代的 4 条 FDC 曲线(分别用 FDC60、FDC70、FDC80 和 FDC90 表示)可以看出,在 20 世纪 70 - 80 年代布哈河月径流量历时曲线基本重合,表明这

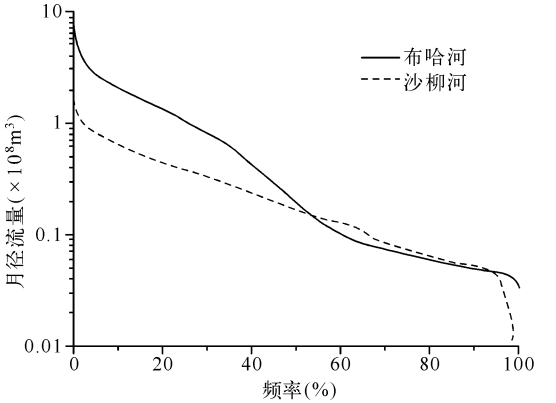


图 5 布哈河和沙柳河月径流量历时曲线

Fig. 5 Monthly duration curves of the whole period for Buha River and Shaliu River

两个时段内月径流量过程差异不明显,而 FDC60 则明显上移,FDC90 则相对于 FDC70 和 FDC80 呈现下移,这表明布哈河月径流量在 20 世纪 60 年代径流量相对丰富,在 70 年代和 80 年代相对平稳,而在 90 年代略有降低,这与张农霞^[29]对布哈河径流量变化规律的研究成果是一致的,即布哈河来水丰沛期是 60 年代,贫乏期是 90 年代,70 和 80 年代为平水期;沙柳河四个时段内 FDC 曲线基本重合,表明沙柳河月径流量从 20 世纪 60 年代到 90 年代一直比较稳定,没有发生明显的变化.通过对两条河流不同时期的 FDC 曲线的对比并结合青海湖流域近 50 年来气候变化分析发现,气候变化不是造成两条河流月径流量历时曲线变化规律不一致的主要原因^[30-31],这种现象应该是由两个流域其它自然地理要素的变化引起的,具体原因有待进一步研究和分析.

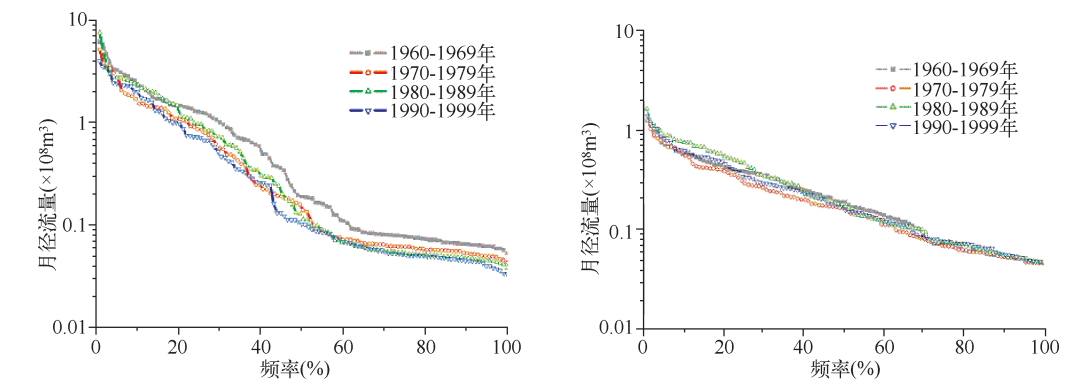


图 6 布哈河和沙柳河不同年代月径流量历时曲线
Fig. 6 FDCs in each decade year of Buha River and Shaliu River

两条河流不同年代特征频率下的月径流量与 Q_{50} 的比值表明,在高流量部分,从 20 世纪 60 年代到 90 年代,布哈河和沙柳河各特征指标呈现出先增后减的趋势,在 20 世纪 80 年代达到最大,90 年代开始减小;在低流量部分,两条河流从 20 世纪 60 年代到 90 年代各特征指标较为接近,说明从 20 世纪 60 年代到 90 年代低流量基本没有发生变化(表 5).高流量主要发生在汛期(主要是夏季),而研究表明 20 世纪 80 年代青海湖流域春季和夏季的降水相比其它时期有所增多^[32],从而导致 20 世纪 80 年代两条河流的高流量相对其它时期要大.

表 5 不同年代布哈河和沙柳河标准化月径流量 FDC 曲线特征参数
Tab. 5 FDC's character index of Buha River and Shaliu River in each decade year

河流	年代	$Q_{50}(\times 10^8 \text{ m}^3)$	Q_1/Q_{50}	Q_5/Q_{50}	Q_{95}/Q_{50}	Q_{99}/Q_{50}
布哈河	1960 - 1969	0.1900	32.2829	17.1987	0.3298	0.3030
	1970 - 1979	0.1392	37.2439	20.0124	0.3598	0.3285
	1980 - 1989	0.1152	66.0465	23.9535	0.3930	0.3611
	1990 - 1999	0.1024	38.9789	23.7536	0.3899	0.3296
沙柳河	1960 - 1969	0.1883	6.5718	3.7443	0.2703	0.2521
	1970 - 1979	0.1638	7.5701	4.4620	0.3110	0.2818
	1980 - 1989	0.1693	9.6861	5.1857	0.2990	0.2776
	1990 - 1999	0.1559	8.9588	5.1976	0.3320	0.3053

4 结论

本文对青海湖流域内布哈河和沙柳河 1956 - 2007 年的径流量数据进行了分析,分析结果如下:
(1)分别采用单调趋势的非参数检验 Mann-Kendall 法、Spearman 秩相关法、Kendall 秩相关法和偏相关法分析了布哈河和沙柳河径流量的年际变化趋势,并采用 Pettitt 方法分析两条河流径流量变化的临界年份,

结果表明布哈河和沙柳河年径流量50年来没有明显的变化趋势,这两条河流的河川径流量对青海湖水位下降所起的作用不明显,对青海湖水位下降的原因研究尚需要对青海湖水量平衡中诸要素中的其它因子变化进行进一步分析。

(2)由于青海湖流域近50年来冬、春季节气温有所升高,蒸发量增大,使得布哈河月平均流量的年际变化在1月、2月和3月呈现出减少的趋势,减少的速率分别为 $4.1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ 、 $4.4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ 和 $4.3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$;沙柳河月平均流量的年际变化在1月、2月、4月和5月也呈现减少的趋势,减少的速率分别为 $1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ 、 $0.75 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ 、 $11 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ 和 $30 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ 。

(3)用流量历时曲线分析了布哈河和沙柳河月径流量过程的基本特征,布哈河的径流量大于沙柳河的径流量,而在55%~91%频率范围内,布哈河的径流量小于沙柳河的径流量,在其它频率范围内,布哈河的径流量明显大于沙柳河的径流量。这表明在一年中,布哈河和沙柳河的月径流量具有显著的差异,这是因为两条河流的集水面积差异较大所致,布哈河的集水面积为 14337 km^2 ,沙柳河的集水面积为 1442 km^2 ,二者相差较大。

(4)用流量历时曲线对布哈河和沙柳河的月径流量过程进行了分析,在20世纪70~80年代布哈河月径流量历时曲线基本重合,表明这两个时段内月径流量过程差异不明显,而FDC60则明显上移,FDC90则相对于FDC70和FDC80呈现下移,这表明布哈河来水丰沛期是60年代,贫乏期是90年代,70和80年代为平水期;沙柳河四个时段内FDC曲线基本重合,表明沙柳河月径流量从20世纪60年代到90年代一直比较稳定,没有发生显著的变化。通过对两条河流不同时期的FDC曲线的对比并结合青海湖流域近50年来气候变化分析发现,气候变化不是造成两条河流月径流量历时曲线变化规律不一致的主要原因,这种现象应该是由两个流域其它自然地理要素的变化引起的,具体原因有待进一步研究和分析。

(5)由于20世纪80年代青海湖流域春季和夏季的降水量相比其它时期要多,从而导致20世纪80年代布哈河和沙柳河的汛期流量相比其它时期要大。

(6)青海湖流域气温的升高可能会引起该地区陆面蒸发量的下降^[33],同时气温的升高和过度放牧亦可能引起青海湖流域的植被群落组成及植被盖度的变化,这都会对径流系数产生影响,进而影响两条河流的河川径流量。

5 参考文献

- [1] Omar I, Abdul Aziz, Donald H Burn. Trends and variability in the hydrological regime of the Mackenzie River Basin. *Journal of Hydrology*, 2006, **319**: 282-294.
- [2] Marius-Victor Birsan, Peter Molnar, Paolo Burlando *et al.* Streamflow trends in Switzerland. *Journal of Hydrology*, 2005, **314**: 312-329.
- [3] Ercan Kahya, Serdar Kalayc. Trend analysis of streamflow in Turkey. *Journal of Hydrology*, 2004, **289**: 128-144.
- [4] Zhang Qiang, Liu Chunling, Xu Chongyu *et al.* Observed trends of annual maximum water level and streamflow during past 130 years in the Yangtze River basin, China. *Journal of Hydrology*, 2006, **324**: 255-265.
- [5] Jiang Tong, Su Buda, Hartmann Heike. Temporal and spatial trends of precipitation and river flow in the Yangtze River Basin, 1961-2000. *Geomorphology*, 2007, **85**: 143-154.
- [6] Wang Jun, Meng Jijun. Research on runoff variations based on wavelet analysis and wavelet neural net work model: A case study of Heihe River drainage basin (1944-2005). *Journal of Geographical Sciences*, 2007, **17**(3): 327-338.
- [7] 汤奇成. 近年塔里木盆地河川径流量变化趋势分析. *中国沙漠*, 1992, **12**(2): 15-20.
- [8] Francesca Todisco, Lorenzo Vergni. Climatic changes in Central Italy and their potential effects on corn water consumption. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, **148**: 1-11.
- [9] Donald H Burn, Mohamed A Hag Elnur. Detection of hydraulic trends and variability. *Journal of Hydrology*, 2002, **255**: 107-122.
- [10] Philip G Oguntunde, Jan Friesen, Nick van de Giesen *et al.* Hydroclimatology of the Volta River Basin in West Africa: Trends and variability from 1901 to 2002. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2006, **31**: 1180-1188.
- [11] Xu ZX, Li JY, Liu CM. Long-term trend analysis for major climate variables in the Yellow River basin. *Hydrological Processes*, 2007, **21**: 1935-1948.

- [12] Khaled H Hamed. Trend detection in hydrologic data: The Mann-Kendall trend test under the scaling hypothesis. *Journal of Hydrology*, 2008, **349**:350-363.
- [13] 吴喜之, 王兆军. 非参数统计方法. 北京: 高等教育出版社, 1996.
- [14] 刘克岩, 张 櫓, 张光辉等. 人类活动对华北白洋淀流域径流影响的识别研究. 水文, 2007, **27**(6):6-10.
- [15] Ma Zhenmei, Kang Shaozhong, Zhang Lu *et al.* Analysis of impacts of climate variability and human activity on streamflow for a river basin in Arid region of northwest China. *Journal of Hydrology*, 2008, **352**:239-249.
- [16] Attilio Castellarin, Giorgio Galeati, Luigia Brandimarte *et al.* Regional flow-duration curves: reliability for ungauged basins. *Advances in Water Resources*, 2004, **27**: 953-965.
- [17] Vogel RM, Fennessey NM. Flow-duration curves. I: New interpretation and confidence intervals. *Water Resour Plann Manage ASCE*, 1994, **120**(4):485-504.
- [18] 穆兴民, 高 鹏, 巴桑赤烈. 应用流量历时曲线分析黄土高原水土保持措施对河川径流的影响. 地球科学进展, 2008, **23**(4):382-389.
- [19] Foster HA. Duration curves. *Trans ASCE*, 1934, **99**:1213-1267.
- [20] Searcy JC. Flow duration curves, Manual of Hydrology: Part 2. Low flow techniques, US Geol Surv Water Supply Pap 1542-A, 1959.
- [21] Cordova JR, Gonzalez M. Sediment yield in small watersheds based on streamflow and suspended sediment discharge measurements. *Soil Technol*, 1997, **11**:57-65.
- [22] Richards KS. Rivers: form and process in alluvial channels. London: Methuen, 1982.
- [23] Wolman MG, Miller JP. Magnitude and frequency of forces in geomorphic processes. *J Geol*, 1960, **68**:54-74.
- [24] Reza Modarresa, Vicente de Paulo Rodrigues da Silva. Rainfall trends in arid and semi-arid regions of Iran. *Journal of Arid Environments*, 2007, **70**: 344-355.
- [25] 李 林, 朱西德, 王振宇等. 近 42a 来青海湖水位变化的影响因子及趋势预测. 中国沙漠, 2005, **25**(5):689-696.
- [26] 刘小园. 青海湖水位变化趋势分析. 干旱区研究, 2001, **18**(3):58-62.
- [27] 马 钰. 青海湖水位变化与湖区气候要素相关分析. 湖泊科学, 1996, **8**(2):103-106.
- [28] 石跃威. 布哈河流域水文特征和枯季水量分析. 青海水利, 1995, (1):25-26.
- [29] 张农霞. 布哈河径流量变化规律初探. 青海科技, 2002, (5):36-38.
- [30] 许何也, 李小雁, 孙永亮. 近 47a 来青海湖流域气候变化分析. 干旱气象, 2007, **25**(2):50-54.
- [31] 孙永亮, 李小雁, 许何也. 近 40a 青海湖流域逐日降水和气温变化特征. 干旱气象, 2007, **25**(1):7-13.
- [32] 王艳姣, 周晓兰, 倪绍祥等. 近 40a 来青海湖地区的气候变化分析. 南京气象学院学报, 2003, **26**(2):228-235.
- [33] Michael L Roderick, Graham D Farquhar. The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years. *Science*, 2002, **298**:1410-1411.