1960—2017 年珠江流域下游径流年际与年内变化特征

杨远东[1]，王永红[1]，蔡斯龙[2]，刘 锋[3]

(1. 海底科学与探测技术教育部重点实验室，中国海洋大学 海洋地球科学学院，
山东 青岛 266100；2. 广东省水文局，广州 广东 510150；3. 中山大学 海洋科学学院，广州 广东 510275)

摘 要：[目的] 分析 1960—2017 年珠江三角洲顶点径流年际、年内变化，为合理利用流域水资源提供参考。[方法] 年际变化运用径流年际变差系数(C_v)、M-K 趋势分析、Morlet 小波分析等方法分析，年内变化运用集中度(期)、径流等值线法等方法分析。[结果] 珠江三角洲顶点主要水文站径流年际变率较小。1960 年以来研究区主要水文站径流量总体并未发生显著变化；径流量距平百分率 K_i 显示西、东江流域旱涝灾害发生较均匀且发生率较低，北江流域易发生洪涝灾害；珠江流域西、北、东江径流基本存在 25～32，10～20，4～10 a 的周期变化。珠江流域径流年内分配极不均匀，年径流集中度(RCD_{year})北江和东江略低于西江，近年来集中度都有减小趋势。北江最大径流最早出现，在 5，6 月份交替，东江最大径流在 6，7 月份交替，西江最大径流主要出现在 7 月份。[结论] 珠江流域下游地区近 60 a 径流量并未发生明显的下降或上升趋势，但径流年际与年内变化仍十分明显，变化的主要原因为流域水库修建等剧烈的人类活动。

关键词：珠江流域；径流；年际变化；年内变化；人类活动

文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2019)05-0023-09 **中图分类号**：P333

文献参数：杨远东，王永红，蔡斯龙，等. 1960—2017 年珠江流域下游径流年际与年内变化特征[J]. 水土保持通报，2019，39(5)：23-31. DOI：10. 13961/j. cnki. stbctb. 2019. 05. 004；Yang Yuandong，Wang Yonghong，Cai Silong，et al. Interannual and intra-annual variation characteristics of runoff in downstream areas of Pearl River basin during 1960—2017[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2019，39(5)：23-31.

Interannual and Intra-annual Variation Characteristics of Runoff in Downstream Areas of Pearl River Basin During 1960—2017

Yang Yuandong[1]，Wang Yonghong[1]，Cai Silong[2]，Liu Feng[3]

(1. *Key Lab of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques*，*College of Marine Geosciences*，
Ocean University of China，*Qingdao*，*Shandong* 266100，*China*；2. *Guangdong Bureau of Hydrology*，*Guangzhou*，
Guangdong 510150，*China*；3. *School of Marine Science*，*Sun Yat-sen University*，*Guangzhou*，*Guangdong* 510275，*China*)

Abstract：[Objective] Variations in the interannual and intra-annual runoff of the Pearl River basin from 1960 to 2017 were analyzed in order to provide reference for rational use of watershed resources. [Methods] We used the interannual variation coefficient (C_v) of the runoff，the M-K trend analysis and the Morlet wavelet to analyze the interannual variations in runoff. Meanwhile，we used concentration (period) and runoff contour method for runoff within a year. [Results] The interannual variability of runoff in the Pearl River basin was small and the runoff stability was high. The total runoff had not changed significantly. The change in runoff was coinciding with droughts and floods in the Xijiang and Dongjiang river basins were relatively uniform and the incidence was low，the Beijiang river basin was prone to flood disasters. The runoff in Xijiang，Beijiang，Dongjiang，rivers of the Pearl River basin was basically 25～32，10～20，4～10 years. The distribution of runoff in the Pearl River basin was extremely uneven during the year，and in the annual runoff concentration (RCD_{year})，the Xijiang river was slightly higher than Beijiang and Dongjiang rivers. In recent years，the RCD_{year} had decreased. The annual runoff concentration period (RCP_{year}) indicated that the

收稿日期：2019-03-11 **修回日期**：2019-05-01

资助项目：国家重点研发计划项目“基于长序列及多要素观测模型的水沙异变研究”(2016YFC0402602)；国家自然科学基金“基于模糊聚类方法的黄渤海表层沉积物物源和输移路径的磁性诊断”(41376054)，“中国东部陆架海泥质区菌生磁铁矿的形成及环境控制因素研究”(41176039)。

第一作者：杨远东(1992—)，男(汉族)，山东省德州市人，硕士生，主要从事河口沉积与地貌研究。E-mail：465159677@qq. com。

通讯作者：王永红(1969—)，女(汉族)，山东省青岛市人，教授，博士生导师，主要从事海洋地质与环境研究。E-mail：yonghongw@ouc. edu. cn。

maximum runoff of the Beijiang river alternated in May and June, and the maximum runoff of the Dongjiang river alternated in June and July, and the maximum runoff of the Xijiang river occurred mainly in July. [Conclusion] There is no obvious decline or upward trend of runoff in the downstream areas of the Pearl River basin from 1960—2017, but the interannual and intra-annual changes in runoff are still obvious. The main reason for the change is the vigorous human activities such as the construction of river basin reservoirs.

Keywords: Pearl River basin; runoff; interannual variation; intra-annual variation; human activities

河川径流年际变化与年内变化特征对于河道整治、农业灌溉、工农业用水、水库调水等方面意义重大。分析径流年际、年内特征的方法较多，例如白丽等[1]使用径流变差系数(C_v)法对 1957—2015 年赣江流域径流特征及变化规律分析，戴明龙等[2]对长江流域 1952—2006 径流时空分布及变化规律进行了研究。杨敏等[3]使用 M-K 趋势检验法对 1951—2015 年洞庭湖水沙演变进行了评估，李瑞等[4]使用此方法对渭干河流域 1960—2006 年径流量进行了研究，除此之外，常用的方法还有 R/S 分析法[5-7]，丰枯等级划分法[8-9]，滑动平均法[10-11]等。径流年内分析主要方法有集中度(期)法[12-13]，年内分配不均匀系数法[14]等。

这些方法在研究珠江流域径流变化时也经常使用，例如吴创收等[15]对近 100 年来珠江流域西江年径流量进行了研究，发现其存在着 2～3 a，12 a 左右以及 27 a 左右的振荡周期；陈立华等[16]对珠江流域西江 1980—2010 年径流进行了分析，发现西江下游水文站径流存在不显著的下降趋势；李艳等[17]对珠江流域北江 1956—2000 年径流进行了分析，发现年径流量系列呈不显著缓慢上升趋势，并存在 2 年左右的变化周期；刘金凤等[18]对珠江流域东江 1956—2015 年径流进行研究，发现近 60 a 东江流域年径流变化趋势总体平稳，未有显著变化。这些研究往往只集中在某一流域，研究的内容也仅仅对径流年内变化或年际变化单独研究，未能将其综合对比。本文采用径流年际变差系数(C_v)、年际极值比(W)、M-K 趋势分析、滑动平均法、Morlet 小波分析法、集中度(期)等方法对珠江流域西江(高要)、北江(石角)、东江(博罗)水文站 1960—2017 年径流进行分析，以期更好理解近几十年内其年际与年内变化特征。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

珠江发源于云南省马雄山，由西江、北江与东江 3 大支流构成，全长 2 400 km，流域面积 45×10^4 km^2，流经云南、贵州、广西、广东、湖南、江西 6 个省(区)和越南的北部，是中国第二大河，境内第三长河。珠江流域地处亚热带，北回归线横贯流域的中部，气候温和多雨，多年平均温度在 14 ℃～22 ℃之间，多年平均降雨量 1 200～2 200 mm，多年平均径流量 3.10×10^{11} m^3 多(1954—2016 年)，多年平均输沙率 2.80×10^7 t 多(1954—2016 年)，径流水沙季节分配很不均匀，常年 4—9 月份洪水期多年平均径流量约占全年的 80%，输沙率占 91～95%。珠江流域西北两江分别在广东省三水市思贤滘东西两侧、东江在广东省东莞市石龙镇汇入珠江三角洲。高要(112°27′13″E，23°2′43″N)、石角(112°56′59″E，23°33′39″N)、博罗(114°17′42″E，23°9′50″N)分别为进入三角洲之前西、北、东江最主要的水文控制站。

1.2 数据来源

本文收集了珠江流域进入珠江三角洲之前西、北、东江的主要水文控制站高要、石角、博罗 1960—2017 年月度径流量数据，长时间序列径流数据来源于广东省水文局，中山大学与《中国河流泥沙公报(http://www.mwr.gov.cn/)。珠江流域主要大坝建设数据来源于中国大坝工程学会网站(http://www.chincold.org.cn/)。高要、石角、博罗水文站历史位置未发生改变，同时对 3 站径流年际累计值进行分析，分析结果如图 1 所示。3 站径流年际累计值基本为一条直线，其相关系数 R 值接近 1，径流分析结果表明 3 站径流数据一致性较强。

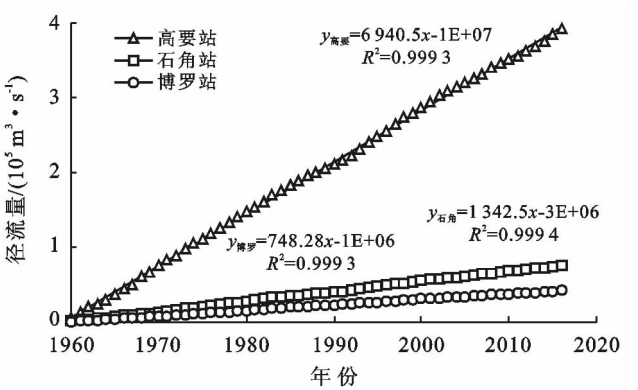


图 1 1960－2017 年高要、石角、博罗水文站际累计径流量

2 结果与分析

2.1 径流年际变化特征

2.1.1 径流年际变异性 河川径流量的年际变化主要取决于降水量的年际变化，同时还受流域水源补给

类型及流域内地貌、地质等条件的影响[19],径流年际变异性常用变差系数(C_v)与年际极值比(w)来表示,变差系数(C_v)是水文统计中的一个重要参数,用来说明水文变量长期变化的稳定程度[20],其值为样本序列的标准差与算术平均值的比值,C_v 值越大,年径流量的年际变化越大,是反映径流年际变化不均匀性的重要指标[21-22]。变差系数(C_v)计算公式如(1)[23]:

$$C_v=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(k_i-1)^2} \tag{1}$$

式中:k_i——模比系数,即第 i 年的年径流量与平均年径流量的比值;n——系列长度。

年际极值比(w)是指径流量变化的绝对值比例,其大小用多年最大、最小年径流量比值表示[24],年际极值比计算公式如(2)[23]:

$$w=W_{\max}/W_{\min} \tag{2}$$

珠江流域西、北、东江 1960—2017 年径流年际变化特征值计算结果见表 1。由表 1 可知,西、北、东江径流变差系数(C_v)值均较小,其值介于 0.196～0.273之间,说明珠江流域径流年际变率较小,径流量稳定性较高,稳定性的大小顺序为西江大于北江大于东江。西、北、东江径流变差系数(C_v)与径流年际极值比(w)变化趋势相似,径流年际极值比(w)值介于 2.398～4.636 之间,西江 w 值较小,北江、东江 w 值较为接近且较大。径流变差系数(C_v)值与径流年际极值比(w)均反映 1960—2017 年珠江流域径流量年际变异程度东江高于北江高于西江。

表 1　1960－2017 年珠江流域西、北、东江径流年际变化特征

水文站	多年平均流量/($m^3\cdot s^{-1}$)	最大径流量		实测最小径流量		C_v	w
		流量/($m^3\cdot s^{-1}$)	年份	流量/($m^3\cdot s^{-1}$)	年份		
高要站	6 890	10 198	1994	4 252	2011	0.196	2.398
石角站	1 337	2280	1973	515	1963	0.255	4.427
博罗站	742	1312	1983	283	1963	0.273	4.636

2.1.2　径流年际趋势性　用于诊断连续水文序列趋势性方法较多,其中应用最广范、最为简便直观的方法为 M-K 趋势分析法与滑动平均法,本文分别用这两种方法对珠江流域西、北、东江 1960—2017 年径流趋势性进行分析。M-K 趋势分析法(Mann-Kendall 法)是一种非参数统计检验方法,其优点是样本不需要遵循一定的分布,也不受少数异常值的干扰,更适用于类型变量与顺序变量,计算也比较简便,最初由曼和肯德尔提出原理并发展了这一方法。现已成为世界气象组织推荐并已广泛使用的非参数检验方法,适用于水文、气象等非正态分布的数据。其计算公式如公式(3)—(6),设径流序列为 $x_1,x_2,\cdots,x_n$,S_k 表示第 i 个样本 $x_i>x_j(1\leqslant j\leqslant i)$的累计数,

$$S_k=\sum_{i=1}^{k}r_i \quad (k=2,3,\cdots,n) \tag{3}$$

其中:

$$r_i=\begin{cases}1 & x_i>x_j\\ 0 & x_i\leqslant x_j\end{cases} \quad (j=1,2,\cdots,n) \tag{4}$$

在时间序列随机独立的假设下,S_k 的均值与方差分别为:

$$\begin{cases}E(S_k)=\dfrac{n(n+1)}{4}\\ \mathrm{var}(S_k)=\dfrac{n(n-1)(2n+5)}{72}\end{cases} \tag{5}$$

将 S_k 标准化为:

$$\mathrm{UF}_k=\frac{[S_k-E(S_k)]}{\sqrt{\mathrm{var}(S_k)}} \quad (k=1,2,\cdots,n) \tag{6}$$

式中:$\mathrm{UF}_1=0$,给定显著性水平 α,若$|\mathrm{UF}|>U_\alpha$,表明序列存在明显的趋势变化。将此方法引用到反序列,序列顺序变为 $x_n,x_{n-1},\cdots,x_1$,反序列标准化由 UB_k 表示,UB_k 和 UF_k 可组成 2 条曲线,在这里设定 α 值为 0.05,临界值 $U_{0.05}$ 为±1.96。

珠江流域西、北、东江 1960—2017 年径流 M-K 趋势分析结果如图 2 所示。西江高要水文站 1960—2017 年 UF 与 UB 统计曲线在信度区间内发生了 5 次交叉,根据统计学检验意义,1964,1986,1991,1999,2016 年是高要水文站径流可能的突变年份,其中,UF 值并未突破 0.05 置信区间,说明径流有上升、下降趋势但趋势不明显;北江石角站 1960—2017 年 UF 与 UB 统计曲线在信度区间内发生了 6 次交叉,可能的突变年份分别为 1961,1973,1984,1990,1999,2016 年,但 UF 值未突破 0.05 置信区间;东江博罗水文站 1960—2017 年 UF 与 UB 统计曲线在信度区间内发生交叉次数较多,根据图像性质推测可能突变的年份分别为 1963,1990,1999,2007,2017 年,UF 值同样未突破 0.05 置信区间。综合分析,1960—2017 年珠江流域西、北、东江支流径流虽存在各自的上升下降突变点,但 UF 值均未突破 0.05 置信区间,径流有轻微变化但总体变化趋势并不显著。

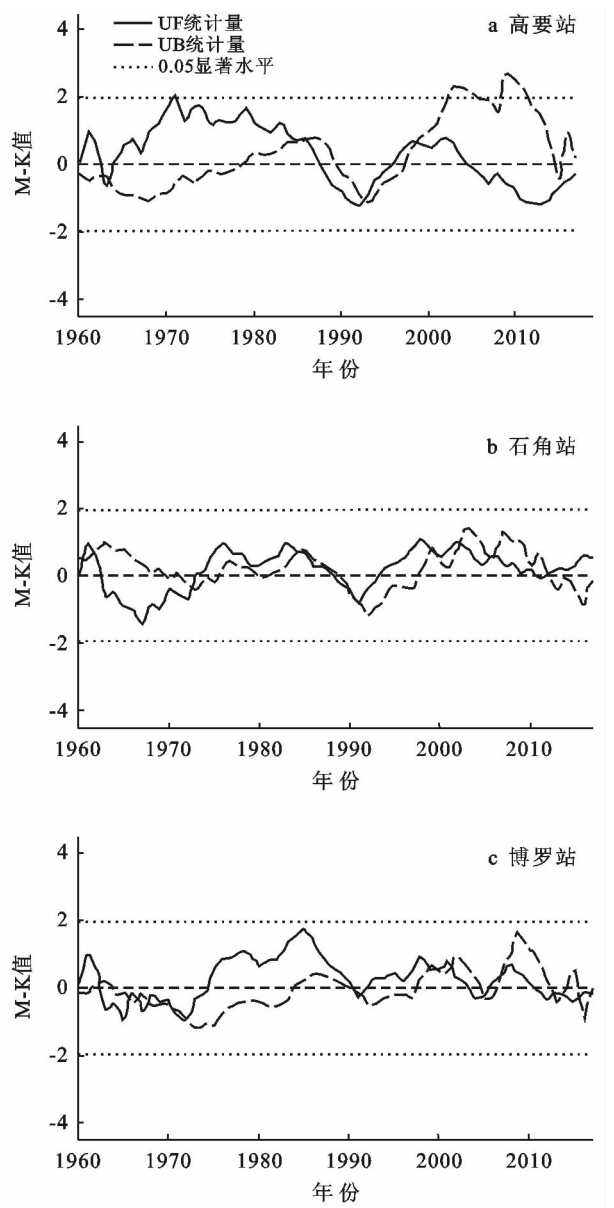


图 2 1960－2017 年高要、石角、博罗水文站径流 M－K 检验

滑动平均法因其简单直观性，在水文学研究中应用较为广泛。其主要思路是将时间序列 x_1，x_2，…，x_n 的几个前期值和后期值取平均，求出新的序列 y_t。其计算公式如公式(7)[25]：

$$y_t=\frac{1}{2k+1}\sum_{i=-k}^{k}x_{t+i} \tag{7}$$

式中：y_t——新序列；k 为滑动平均尺度；x_{t+i}——参与此次生成新序列的旧序列值；$k=1$ 时 y_t 为 3 a 滑动平均值，$k=2$ 时 y_t 为 5 a 滑动平均值；若 X_n 有趋势性，选择合适的 k，即可通过 将其趋势清晰地表示出来。

本文计算了珠江流域高要、石角、博罗 1960—2017 年径流 3 a 滑动平均值与 5 a 滑动平均值，计算结果如图 3 所示。

3 个水文站 3 a 滑动平均值与 5 a 滑动平均值相差不大，均可说明径流的变化趋势。总体看来，径流都呈现上升—下降—上升—下降—上升 5 个变化过程。高要水文站存在 3 个上升期，分别为：1960—1970，1990—1997，2010—2017 年，且以后两个阶段上升速率较快，其余时段径流呈下降趋势，主要的变异年份为 1964，1970，1988，1997，2011 年；石角水文站同样存在 3 个上升期，分别为：1965—1975，1990—1997，2010—2017 年，3 个阶段上升速率差异不大，其余时段径流呈下降趋势，主要的变异年份为 1964，1975，1983，1990，1998，2010 年；博罗水文站上升—下降阶段较为复杂，以 6～8 a 为时间间隔上升—下降相互交替出现，主要变异年份为 1964，1975，1984，1990，1999，2003，2008 年。

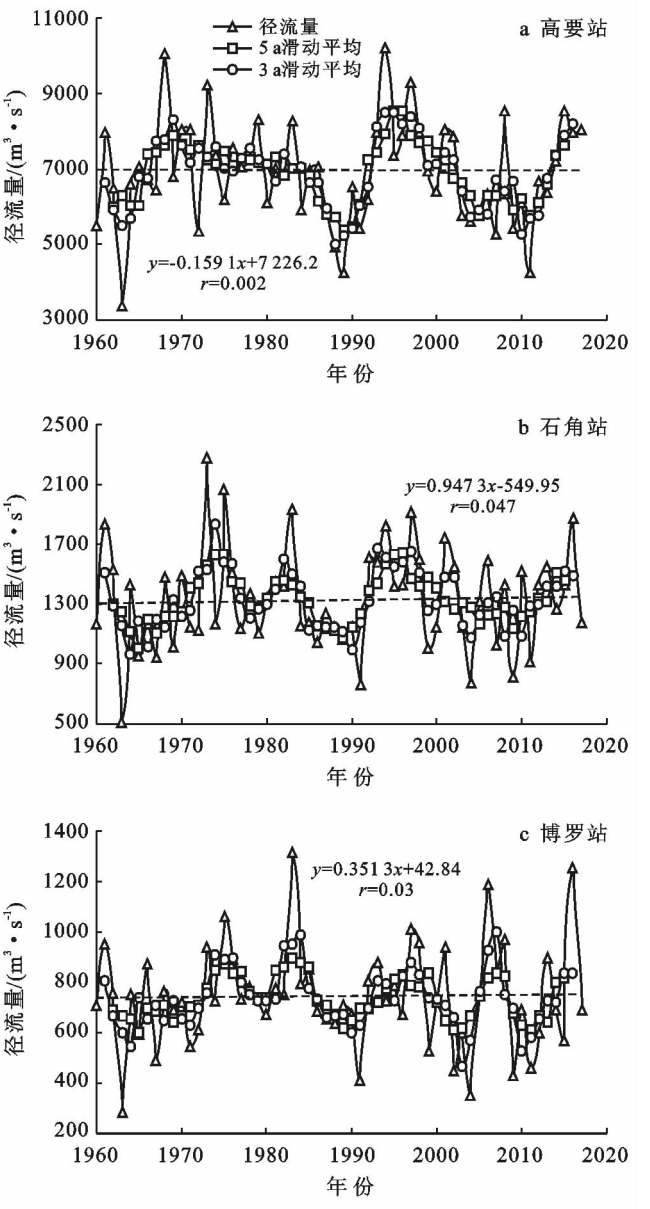


图 3 1960－2017 年高要、石角、博罗水文站年径流及 3 a，5 a 滑动平均

分析 1960 年以来西、北、东江突变点出现的原因,推测主要是由大洪水的出现导致,西江在 1968,1986,1994,1998,2005,2016 年爆发过大洪水,北江在 1968,1982,1994 年爆发过大洪水,东江在 1984,2007,2016 年爆发过大洪水,一般在洪水发生前后2 a 内出现突变点。此外东江由于径流小而水库库容较大,人类对于水库的储放水活动也容易产生突变点。

对 M-K 趋势分析法与滑动平均法检测出的突变点进行对比,结果如表 2 所示,两种方法检测出的突变时刻相差不大,滑动平均法检测出的突变点往往更多,但在两个时间端点(1965 年之前与 2010 年以后),滑动平均法由于两端点数据缺失(3 a 滑动平均只能输出 1961—2016 年数据,5 a 滑动平均只能输出 1962—2015 年数据)检测性能往往较差,而 M-K 趋势分析法不受端点限制,检验出 3 个水文站在时间轴右端点 2016 年左右均发生突变。

表 2　高要、石角、博罗水文站 M-K 检验与滑动平均法突变点对比

水文站	M-K 检验年份	滑动平均法检验年份	
		3 a 滑动平均	5 a 滑动平均
高要站	1964,1986,1991,1999,2016	1963,1969,1988,1997,2010	1964,1969,1989,1997,2010
石角站	1961,1973,1984,1990,1999,2016	1965,1975,1983,1989,1998,2010	1964,1975,1983,1990,1998,2010
博罗站	1963,1990,1999,2007,2017	1965,1975,1984,1989,1999,2003,2008	1964,1975,1984,1990,1999,2003,2008

此外,对高要、石角、博罗 3 个水文站 1960—2017 年径流数据作线性回归分析,研究其 58 a 间总体变化特征,线性回归方程如图 3 所示,高要、石角、博罗线性分析斜率 k 值分别为 −0.16,0.95,0.35,相关系数 r 值分别为 0.002,0.047,0.03,根据线性回归计算结果分析可知,西江流域径流总体呈下降趋势,北、东江流域径流总体呈上升趋势。当 $\alpha=0.05$,$n=58$ 时,查表得相关系数 $r=0.259$,3 个流域 $|r|$ 值均小于 $r_{0.05}$,由此证明 3 个支流虽存在上升或下降趋势,但变化趋势并不明显。

2.1.3　径流年际枯丰变化　为找出径流序列丰、枯水年阶段性变化规律,根据水利部信息中心编制的水文预报规范,将径流量距平百分率 K_i 划分为 5 个级别,5 个级别分别是:$K_i<-20\%$ 为枯水,$-20\%\leqslant K_i<-10\%$ 为偏枯,$-10\%\leqslant K_i\leqslant 10\%$ 为平水,$10\%<K_i\leqslant 20\%$ 为偏丰,$K_i>20\%$ 为丰水。其中 K_i 计算公式如公式(8):

$$K_i=\frac{\text{某年流量}-\text{多年均值}}{\text{多年均值}}\times 100\% \tag{8}$$

珠江流域西、北、东江控制站高要、石角、博罗 3 个水文站年径流距平百分率 K_i 计算结果如图 4 所示,年径流分级统计结果见表 3。3 个水文站径流丰枯差异较大,高要、博罗站平水年所占比例最大,1960—2017 年平水年所占比例分别为 37.9%,44.8%,石角站丰水年所占比例最大,1960—2017 年丰水年所占比例为 48.3%,接近调查年份总年数的一半。1960—2017 年高要水文站丰水年与偏丰年总计 18 a,而枯水年与偏枯年总计也为 18 a,其平水年比例占比最大,说明西江流域旱涝灾害发生较均匀且发生率较低,水情较为稳定;石角水文站丰水年与偏丰年总计 31 a,枯水年与偏枯年总计 9 a,丰水年比例远远高于枯水年,且丰水年比例也高于平水年,说明北江流域易发生洪涝灾害;博罗水文站丰水年与偏丰年总计 16 a,而枯水年与偏枯年总计也为 16 a,且其平水年所占比例最大,说明东江流域旱涝灾害发生较均匀且发生率较低,水情比较稳定。按此方法分析西、北、东江旱涝灾害发生率最小的为西江、其次为东江,最易发生旱涝灾害的为北江。

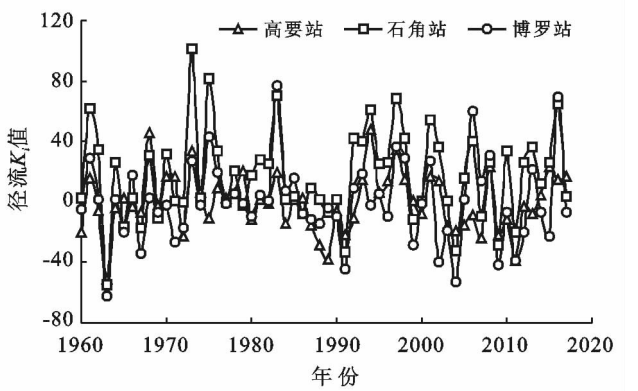


图 4　1960−2017 年高要、石角、博罗站径流距平百分率 K_i 值

表 3　1960−2017 年珠江流域高要、石角、博罗水文站年径流分级统计

水文站	丰水年		偏丰年		平水年		偏枯年		枯水年	
	年数/a	比例/%	年数/a	比例/%	年数/a	比例/%	年数/a	比例/%	年数/a	比例/%
高要站	7	12.1	11	19.0	22	37.9	9	15.5	9	15.5
石角站	28	48.3	3	5.2	18	31.0	5	8.6	4	6.9
博罗站	11	19.0	5	8.6	26	44.8	6	10.4	10	17.2

高要、石角、博罗 3 个水文站径流量距平百分率 K_i 在不同年代之间也存在差异，高要水文站丰水年主要发生在 1965—1975，1994—1998 年期间，枯水年主要发生在 1987—1992 年期间；石角水文站主要发生在 1965—1977，1990—2016 年期间，其中 1990—2016 期间也是枯水年多发年份；博罗水文站丰水年、枯水年多发的年份都为 1990—2016 年，丰枯年份基本交替出现。

2.1.4 径流年际周期性变化 本文采用 Morlet 小波分析对珠江流域西江、北江、东江支流 1956—2013 年径流量进行周期性分析。Morlet 小波能从时域和频域两方面进行信号分辨，能够准确地揭示隐藏在时间序列中的多种变化周期，充分反映出系统在不同时间尺度中的变化趋势。Morlet 小波分析计算公式如公式(9)—(10)。对于给定的能量有限信号 $f(t)\in L(R)$，其连续小波变换为：

$$W_f(a,b)=|a|^{-1/2}\int_R f(t)\bar{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right)\mathrm{d}t \tag{9}$$

式中：$W_f(a,b)$——小波变换系数；$f(t)$——一个信号或平方可积函数；$a,b\in R$；$a\neq 0$，a 为伸缩尺度；b——平移参数。将小波系数的平方值在 b 域上积分，得小波方差如下式：

$$\mathrm{var}(a)=\int_{-\infty}^{+\infty}|W_f(a,b)|^2\mathrm{d}b \tag{10}$$

根据公式计算得出珠江流域流域西、北、东江小波系数实部等值线见图 5。小波系数实部等值线图能反映径流序列不同时间尺度的周期变化及其在时间域中的分布。

根据图 5 可知，珠江流域西江径流存在 25～32 a，15～20 a，3～8 a 这 3 类尺度的周期变化特征；北江径流存在 25～32 a，10～20 a，4～10 a 这 3 类尺度的周期变化特征；东江径流存在 25～32 a，10～20 a，4～7 a这 3 类尺度的周期变化特征。3 个支流均存在 25～32 a 的周期变化，58 a 间西、北、东江分别出现 6，5，5 次周期震荡，该时段的周期变化较为稳定，具有全域性；第二震荡周期基本为 10～20 a，西、北、东江分别出现 9，11，12 次周期震荡；第三震荡周期基本为 4～10 a，西、北、东江震荡次数较多，平均每 2～3 a 就会出现一次丰季或枯季。

2.2 径流年内变化特征

本文借鉴径流量年内分配的向量法定义单站径流时间分配特征的参数径流集中度和集中期。径流集中度指各月径流量按月以向量方式累加，其各分量之和的合成量占年径流量的百分数，其意义是反映径流量在年内的集中程度。集中期是指径流向量合成后的方位，反映全年径流量集中的重心所出现的月份，以 12 个月分量和的比值正切角度表示，具体计算过程见刘贤赵等[12]文献。计算公式如公式(11)—(13)：

$$\mathrm{RCD}_{\mathrm{year}}=\sqrt{R_x^2+R_y^2}/R_{\mathrm{year}} \tag{11}$$

$$\mathrm{RCP}_{\mathrm{year}}=\arctan(R_x/R_y) \tag{12}$$

$$R_x=\sum_{i=1}^{12}r_i\sin\theta_i,\quad R_y=\sum_{i=1}^{12}r_i\cos\theta_i \tag{13}$$

式中：$\mathrm{RCD}_{\mathrm{year}}$——年径流集中度；$\mathrm{RCP}_{\mathrm{year}}$——年径流集中期；$R_{\mathrm{year}}$——年径流量；$R_x$，$R_y$——12 个月的分量之和所构成的水平、垂直分量；$r_i$——第 i 月的径流量；θ_i——第 i 月径流的矢量角度。$\mathrm{RCD}_{\mathrm{year}}$越大表示径流量越分散，越小径流量越集中，$\mathrm{RCP}_{\mathrm{year}}$表示一年中最大径流量出现的时间，表 4 为各个月份包含及代表角度值。

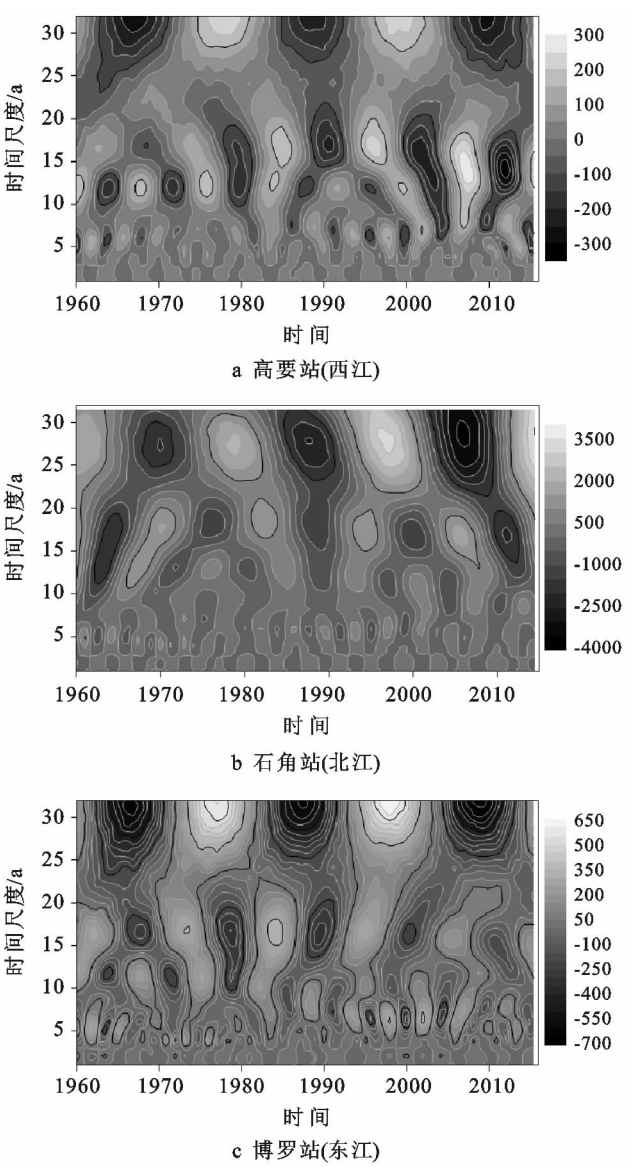


图 5 1960－2017 年高要、石角、博罗水文站径流小波分析实部等值线

珠江流域高要、石角、博罗水文站 1960—2017 年间 10 a 尺度的径流集中度与集中期计算结果如表 5

所示。从径流集中度的大小关系可以看出西江年径流量的分散程度略高于北江,高于东江。根据年径流集中期对应的角度,发现西江最大径流量主要出现于 7 月份,北江最大径流量主要出现在 5,6 月份,东江最大径流量主要出现 6,7 月份。

RCD_{year}与 RCP_{year}在 1960—2017 年也表现出一定的变化趋势,1960—2009 年间年径流集中度较为相似,2010—2017 径流集中度明显减小,尤其以西江高要水文站减小最为剧烈,反映了最近 10 a 间径流年内分配变得更加分散。而对于年径流集中期,各个水文站变化具有不一致性,高要水文站径流集中期对应角度虽都位于 165°～195°之间,但径流集中期对应的角度呈减小趋势,反映了西江最大径流月份不变,但在最大径流月内最大径流日期向前移动;石角水文站径流集中期对应角度无明显增大或减小趋势,上下震荡,1980—1989 年径流集中期为 5 月份,其余时间径流集中期为 6 月份;同石角水文站相似,博罗水文站流集中期对应角度也属于上下震荡类,1980—1989,2010—2017 年径流集中期为 6 月份,其余时间径流集中期为 7 月份。

同时,对 1960—2017 年高要、石角、博罗水文站月度径流作等值线图(图 6),从图 6 中可以清楚地看出径流年内的分散程度与最大、最小径流出现的时间。对比径流等值线图与径流集中度与集中期表格,发现其演变阶段具有一致性,径流等值线图年内径流较分散年份,径流集中度往往也较低,反之亦然,而径流集中期角度的波动与等值线图最大值的上下移动也有较好的对应性。

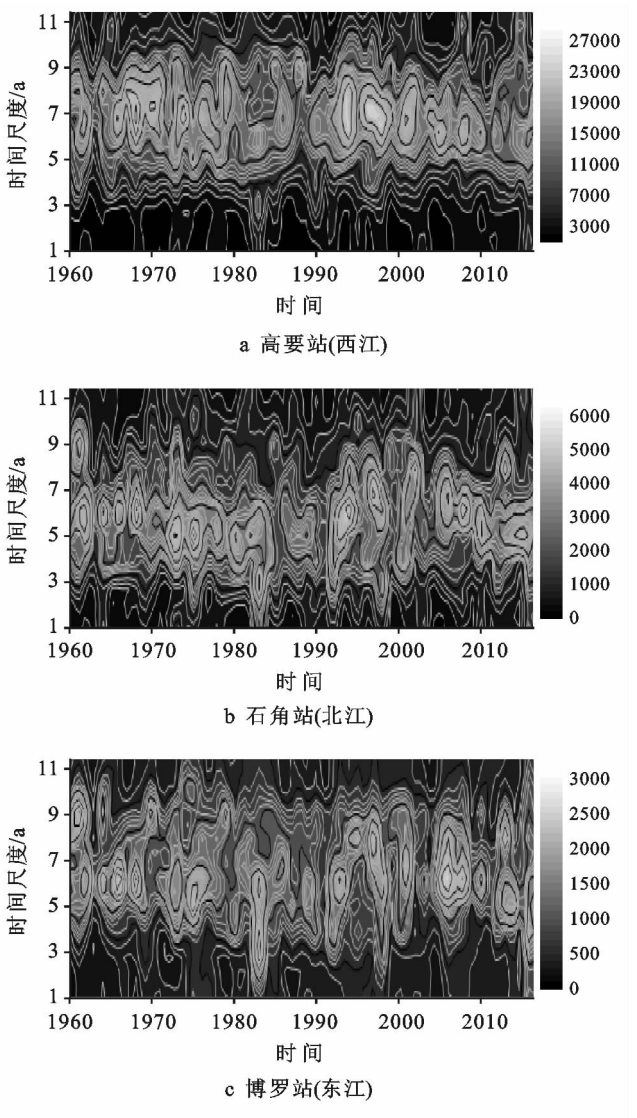


图 6　1960—2017 高要、石角、博罗水文站径流等值线

表 4　RCPyear 计算各月份包含及代表角度值　　(°)

项 目	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
包含角度	345－15	15－45	45－75	75－105	105－135	135－165	165－195	195－225	225－255	255－285	285－315	315－345
代表角度	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330

3　讨 论

3.1　径流年际变化

本文从变异性、趋势性、周期性与丰枯变化特征等方面说明了珠江流域下游主要水文站西江高要站、北江石角站、东江博罗站径流年际变化特征。其中变异性、丰枯变化特征反映了径流的年际波动特征,即反映径流的稳定性,综合变异性与丰枯变化特征,珠江流域下游径流变异性与丰枯变化最小的都为西江,其径流稳定性最高,而北江、东江在变异性与丰枯变化两个特征方面排序不同,在变异性方面,东江虽高于北江但两者径流年际变差系数(C_v)、年际极值比(w)数值都较为相近,而在丰枯变化特征方面,北江变化程度远远高于东江,综合两方面,认为东江稳定性高于北江,稳定性由大到小为西江、东江、北江,且三江都基本存在 25～32 a,10～20 a,4～10 a 的径流周期变化。而在径流趋势性方面,3 个水文站虽存在众多变异点,但由于 M-K 分析均为突破 0.05 置信区间,且线性回归$|r|$值均小于 $r_{0.05}$,证明径流无明显趋势性。

表 5 高要、石角、博罗水文站年径流集中度与集中期

年 份	高要站		石角站		博罗站	
	集中度	集中期	集中度	集中期	集中度	集中期
1960—1969	0.47	185	0.45	149	0.39	176
1970—1979	0.48	181	0.43	146	0.33	183
1980—1989	0.41	181	0.44	132	0.32	158
1990—1999	0.5	179	0.44	146	0.29	171
2000—2009	0.48	172	0.44	154	0.31	173
2010—2017	0.36	171	0.4	141	0.28	157

分析径流年际变化的原因，流域降水的多少对于径流影响巨大[26]，特别是在人类活动影响较小的地区，其作用更为显著，降水通过影响流域水分在下垫面的垂向和横向的再分配，进而作用于流域径流的变化[27]。除此之外，流域植被覆盖率也是影响流域径流的因素之一，但在珠江流域，其对径流变化的贡献并不显著[28]。

受距离海洋的远近及海拔的影响，珠江流域西北部长期降水分布较平均，降水极值情况发生的几率相对较低；东南部长期降水较集中，降水极值情况发生的几率相对较高[29]。受降水空间分布特征的影响，西江径流较为稳定，东江、北江相对较差。除自然因素外，人类对于径流年际变化也有一定的影响，但相对于自然作用其影响程度较小，人类主要通过流域修建大坝、影响流域植被覆盖率等方式影响流域径流，在珠江流域，大坝的修建是人类的主要作用方式，例如由于东江径流量较小，且其水库库容较大（见表 6），在新丰江水库等的调节作用下，径流稳定性得到改善，较少发生大洪水或极端干旱，而北江径流量大于东江，水库库容也较东江较小，人类干预作用较小，稳定性较差。

表 6 珠江流域较大规模水库建设情况

流域	水库名称	库容量/10^8 m^3	建成年份
西 江	大王滩	5.85	1960
	明江那板	7.02	1960
	西 津	30.00	1964
	澄碧河	11.30	1966
	大化	9.64	1982
	岩 滩	33.80	1992
	天胜桥	108.00	1997
	百 色	56.00	2006
	龙 滩	273.00	2006
北江	南 水	12.43	1971
	长 湖	1.49	1973
	锦 江	1.90	1990
	飞来峡	19.5	1999
东江	新丰江	138.96	1969
	枫树坝	19.40	1973
	白盆珠	12.20	1985

3.2 径流年内变化影响因素

上文通过集中度与集中期分析了西江高要站、北江石角站、东江博罗站径流年内分配情况，研究结果表明，径流集中度总体呈下降趋势，西江、东江下降速度较快，其下降时期分别为 2010—2017，1970—1979 年，北江下降速度较慢，主要下降期为 2010—2017 年，径流集中度的下降与流域水库修建等人类活动关系密切，人类活动一般通过建设各类水利工程、变更土地利用类型等改变下垫面条件来间接影响流域径流[30]，且其对于径流年内的影响程度远高于年际，例如通过水库、淤地坝、水窖等蓄水工程，拦蓄地表径流、消减洪峰流量、调节径流分配。目前，在对中国众多流域的研究中都发现，人类活动对于流域径流量变化的贡献率都远远超过 50%[31-33]。

水库的修建延长了汇流时间，消减了洪峰，使年内流量过程线变得平缓。20 世纪 60 年代，大规模的水库尚未建成，此时径流集中度可近似代表原始状态下的年内径流集中程度，集中度主要受各个流域降水的影响，其由高向低依次为西江、北江、东江，2010—2017 年处于人类的剧烈活动下，众多水库已建成或正在修建，这一阶段径流集中度由高到低依次为北江、西江、东江，2 个阶段西江、北江、东江径流集中度的变化比例分别为 23%，11%，28%，而计算目前三江水库库容所占径流量比例，分别为 25%，8%，72%，两者大小关系较一致，说明了大坝修建在调节径流年内分配方面有重要作用。

与径流集中度相似，径流集中期同样受人类活动影响，20 世纪 60 年代珠江流域受人类活动影响较小，径流主要受降水控制[34]，由于各个流域间气候存在差异，造成北江最大径流出现时间早于东江早于西江，受人类活动的影响，1960—2017 年间径流集中期有向前移动的趋势，但目前各个支流年内最大径流出现的时间仍为北江早于东江早于西江。

4 结 论

本文基于珠江流域西、北、东江主要控制站高要、石角、博罗水文站 1960—2017 年月度径流数据，利用径流年际变差系数（C_v）、年际极值比（w）、M-K 趋势分析、滑动平均、集中度（期）等方法对三站长序列径流年际变化与年内变化特征进行研究，主要结论如下：

（1）珠江流域西、北、东江径流变差系数（C_v）值均较小，其值介于 0.196～0.273 之间，说明珠江流域径流年际变率较小，径流量稳定性较高，流变差系数（C_v）与径流年际极值比（w）均反映珠江三条支流年径

流稳定性顺序西江>北江>东江。

(2) M-K 趋势分析法与滑动平均法均检测出珠江流域径流存在若干突变点,径流有轻微变化但总体变化趋势并不显著。

(3) 径流丰枯变化表明西、东江流域旱涝灾害发生较均匀且发生率较低,北江流域易发生洪涝灾害。

(4) Morlet 小波分析表明,近几十年珠江流域西、北、东江径流普遍存在 25～32 a,10～20 a,4～10 a 的周期变化。

(5) 珠江流域径流年内分配极不均匀,年径流集中度(RCD_{year})西江略高于北江,高于东江,且近年来集中度都有减小趋势;年径流集中期(RCP_{year})表明西江最大径流量主要出现于 7 月份,北江最大径流在 5,6 月份交替,东江最大径流量在 6,7 月份交替出现,近年来集中期都有向前(更早月份)移动趋势。

[参 考 文 献]

[1] 白丽,陈龙,刘美玲. 赣江流域径流特征及变化规律分析[J]. 中国水运:下半月,2018,18(11):178-179,186.

[2] 戴明龙,张明波. 长江流域径流时空分布及变化规律研究[J]. 人民长江,2013,44(10):88-91.

[3] 杨敏,毛德华,刘培亮,等. 1951—2015 年洞庭湖水沙演变及人类活动对径流影响的定量评估[J]. 中国水土保持,2019(1):38-43,69.

[4] 李瑞,张飞,高宇潇,等. 渭干河流域生态水文时间序列特征及影响因素[J]. 中国沙漠,2016,36(6):1713-1720.

[5] 王孝礼,胡宝清,夏军. 水文时序趋势与变异点的 R/S 分析法[J]. 武汉大学学报:工学版,2002,35(2):10-12.

[6] 陈伟东,包为民,瞿思敏,等. 锦江水库对下游径流年际变化影响分析[J]. 中国农村水利水电,2015(9):12-16.

[7] 傅丽昕,陈亚宁,李卫红,等. 近 50 a 来塔里木河源流区年径流量的持续性和趋势性统计特征分析[J]. 冰川冻土,2009,31(3):457-463.

[8] 胡兴林. 甘肃省主要河流径流时空分布规律及演变趋势分析[J]. 地球科学进展,2000,15(5):516-521.

[9] 熊雅丽. 洮河流域近 20 年径流量偏枯原因分析[J]. 地下水,2018,40(5):192-195.

[10] 刘伟,何俊仕,陈杨. 浑河流域降水与径流变化特征及同步性分析[J]. 水土保持研究,2016,23(1):150-154.

[11] 刘波,陈刘强,周森,等. 长江上游重庆段径流变化归因分析[J]. 长江流域资源与环境,2018,27(6):1333-1341.

[12] 刘贤赵,李嘉竹,宿庆,等. 基于集中度与集中期的径流年内分配研究[J]. 地理科学,2007,27(6):791-795.

[13] 孙永寿,段水强,李燕,等. 近年来青海三江源区河川径流变化特征及趋势分析[J]. 水资源与水工程学报,2015,26(1):52-57.

[14] 毛德华,曹艳敏,李锦慧,等. 洞庭湖入出湖径流泥沙年内变化规律及成因分析[J]. 水资源与水工程学报,2017,28(1):32-39,44.

[15] 吴创收,邱立国. 西江流域 100 多年来径流量的变化研究[J]. 广东水利水电,2012(9):38-40,50.

[16] 陈立华,叶明,王佳佳,等. 西江流域干流径流演变特征与趋势分析[J]. 广西大学学报:自然科学版,2014,39(4):920-927.

[17] 李艳,陈晓宏,王兆礼. 北江流域径流量分布规律及其变异性分析[J]. 水资源与水工程学报,2006,17(4):14-17.

[18] 刘金凤,田兆伟,沈雪娇. 近 60 年东江流域降雨径流特性分析[J]. 广东水利水电,2018(12):31-36,74.

[19] 季学武,王俊. 水文分析计算与水资源评价[M]. 北京:中国水利水电出版社,2008.

[20] 王俊德. 水文统计[M]. 北京:水利电力出版社,1993.

[21] 李丽娟,李海滨,王娟. 澜沧江水文与水环境特征及其时空分异[J]. 地理科学,2002,22(1):49-56.

[22] 姚治君,管彦平,高迎春. 潮白河径流分布规律及人类活动对径流的影响分析[J]. 地理科学进展,2003,22(6):599-606.

[23] 冯德锃,赵玲玲,李翀. 近 60 a 饶河流域径流变化特征研究[J]. 中国农村水利水电,2018(9):42-45,51.

[24] 胡光伟,毛德华,李正最,等. 60 年来洞庭湖区进出湖径流特征分析[J]. 地理科学,2014,34(1):89-96.

[25] 文聘,沈冰,黄领梅. 西安市降水变化趋势及 R/S 分析[J]. 黑龙江大学工程学报,2011,2(4):21-26.

[26] 宋晓猛,张建云,占车生,等. 气候变化和人类活动对水文循环影响研究进展[J]. 水利学报,2013,44(7):779-790.

[27] 张士锋,华东,孟秀敬,等. 三江源气候变化及其对径流的驱动分析[J]. 地理学报,2011,66(1):13-24.

[28] 李天生,夏军. 基于 Budyko 理论分析珠江流域中上游地区气候与植被变化对径流的影响[J]. 地球科学进展,2018,33(12):1248-1258.

[29] 郑炎辉,陈晓宏,何艳虎,等. 珠江流域降水集中度时空变化特征及成因分析[J]. 水文,2016,36(5):22-28.

[30] 李秋菊,李占玲,王杰. 黑河流域上游径流变化及其归因分析[J]. 南水北调与水利科技,2013,17(3):31-39.

[31] 张调风,朱西德,王永剑,等. 气候变化和人类活动对湟水河流域径流量影响的定量评估[J]. 资源科学,2014,36(11):2256-2262.

[32] 夏军,马协一,邹磊,等. 气候变化和人类活动对汉江上游径流变化影响的定量研究[J]. 南水北调与水利科技,2017,15(1):1-6.

[33] 郭爱军,畅建霞,黄强,等. 渭河流域气候变化与人类活动对径流影响的定量分析[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2014,42(8):212-220.

[34] 李艳,陈晓宏,张鹏飞. 北江流域径流年内分配特征的变异性分析[J]. 水文,2014,34(3):80-86.