

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2020.04.012

东江流域基流变化特征及影响因素

张泳华^{1,2}, 刘祖发^{2,3}, 赵铜铁钢^{2,3}, 梁廖逢^{1,2}, 高艺桔^{1,2}, 符洪恩^{1,2}

(1. 中山大学地理科学与规划学院, 广东 广州 510275; 2. 中山大学水资源与环境研究中心, 广东 广州 510275;
3. 中山大学土木工程学院, 广东 广州 510275)

摘要:基于东江流域控制性水文站博罗站 1954—2010 年实测日径流数据,采用数字滤波法和平滑最小值法进行基流分割,从不同的时间尺度上探讨博罗站基流的变化特征,从降水和人类活动两方面分析基流影响因素。结果表明:数字滤波法更适用于研究区;东江博罗站基流量的年内分布先增大后减小,基流指数先减小后波动增大;东江博罗站年均基流量和基流指数总体呈增大的趋势,多年平均基流量为 414.04 m³/s,多年平均基流指数为 0.56。枯水年和偏枯水年的平均基流指数均为 0.55,平水年为 0.57,偏丰水年和丰水年分别为 0.57 和 0.55;降水对东江流域基流量有年际影响;年内不同月份的突变规律说明大型水库是东江流域基流变化的关键性因素,水库的水量调度使基流量在枯水期呈显著增长趋势。

关键词:基流分割;基流特征;基流指数;数字滤波法;平滑最小值法;东江流域

中图分类号:TV121 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2020)04-0075-07

Variation characteristics and influencing factors of base flow in Dongjiang River Basin//ZHANG Yonghua^{1,2}, LIU Zufa^{2,3}, ZHAO Tongtiegang^{2,3}, LIANG Liaofeng^{1,2}, GAO Yijie^{1,2}, FU Hong'en^{1,2} (1. School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 2. Center for Water Resource and Environment, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 3. School of Civil Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Based on the measured daily runoff data from 1954 to 2010 at the Boluo Station of the Dongjiang River, the digital filtering method and the smoothing minimum method were used for the base flow separation. The variation characteristics of the base flow and the base flow index at Boluo station were discussed on different time scales, and the influence factors of base flow were analyzed from precipitation and human activities. It was found that the digital filtering method was more suitable than the smooth minimum method in the study area. The annual distribution of the base flow of Boluo Station increased first and then decreased, while the base flow index decreased first and then increased. The average annual base flow and base flow index at Boluo Station showed an increasing trend. The average annual base flow was 414.04 m³/s, and the average annual base flow index was 0.56. The average base flow index in both dry and partial dry years were 0.55, that in the normal year was 0.57, and that in partial wet and wet years were 0.57 and 0.55, respectively. Precipitation has an interannual impact on the base flow in Dongjiang River Basin. The change of the runoff in different months indicates that the large reservoir is a key factor in the change of the base flow in Dongjiang River Basin. The water regulation of the reservoir makes the base flow increase significantly in the dry season.

Key words: base flow separation; characteristics of base flow; base flow index; digital filtering method; smoothing minimum method; Dongjiang River Basin

基流一般来源于地下水或其他延迟部分的径流,在枯水期维持着河流径流量,是自然径流的重要组成部分。在工农业供水、水安全、非点源污染评价、水资源评价与调查、降雨和径流关系模拟等水资

源研究中,基流的研究占有重要地位^[1-2]。

基流涉及气候、地理等多方面,无法通过观测直接获取,需要结合数值方法进行分割^[3-4]。基流分割方法很多,且适用范围不同^[5]。数字滤波法和平滑

基金项目:国家自然科学基金(51979295)

作者简介:张泳华(1993—),女,硕士研究生,研究方向为水文水资源。E-mail: zhangyh38@mail2.sysu.edu.cn

通信作者:赵铜铁钢,教授。E-mail: zhaottg@mail.sysu.edu.cn

最小值法利用数值模拟简化分割过程,是国内外常用的基流分割方法^[6-7]。这两种方法在不同流域适用性不同。王敬哲等^[8]对呼图壁河进行基流分割,发现平滑最小值法优于数字滤波法;董晓华等^[9]进行三峡水库基流分割,认为数字滤波法优于平滑最小值法;郝璐等^[10]在秦淮河流域进行基流分割,认为数字滤波法更稳定。基流特征时空变化受气候和人类活动的影响,Smettem 等^[11]根据澳大利亚南海岸的基流特征得出基流时空变化与流域的水文地质地貌、人类活动等有关;董薇薇等^[12]认为降水在长时间尺度上主要影响疏勒河基流;白乐等^[13]发现人类活动是影响秃尾河基流演变的主要因素;亢小语等^[14]研究黄土高原流域基流特征后,认为人类活动是基流变化的驱动因素。

珠江三角洲经济区经济持续快速发展,是我国三大增长极之一^[15]。东江水资源供给珠三角地区的香港、深圳和广州等重要城市。近年来东江流域枯水期提前,沿海咸潮顶托,发生了供水危机。枯水期径流主要由基流组成,开展东江基流分割研究,对于流域生产生活供水稳定和水环境保护具有重要作用。整体上,东江基流研究集中于分割方法的讨论,对影响因素的研究较少。文佩^[16]对东江部分流域进行基流分割,比较改进 TOPMODEL 模型与多种传统方法,发现数字滤波法更接近模型模拟结果。黄国如^[17]研究东江 13 个子流域的基流特征后认为不同分割方法差距较大,得到稳定基流指数(base flow index, BFI)的数字滤波法可能是最优的分割方法。

本文运用数字滤波法和平滑最小值对东江博罗水文站 1954—2010 年实测日流量过程进行基流分割适用性研究,探讨博罗年均基流量和 BFI 的变化特征,讨论降水和人类活动对基流量的影响。

1 研究区概况

东江发源于江西省,上游称寻乌水,南流入广东省境内,至龙川定南水后称东江。东江干流流经多个城市至东莞石龙,分南北两水道入狮子洋,经虎门出海。流域范围在东经 113°52′~115°52′、北纬 22°38′~25°14′,流域面积为 35 340 km²。流域内地貌以低山丘陵为主,土壤类型以赤红壤和红壤为主。东江流域属于亚热带季风气候,4—6 月多为副热带高压控制的锋面雨,7—9 月则为热带气团的台风强降雨。受降水的影响,河流的汛期是每年 4—9 月。

供水区域内人口超千万的广州、深圳、东莞平均经济密度大,香港更高达 16 亿元/km²^[18]。东江流域经济的持续发展使东江水资源利用和管理面临着严峻的挑战。

本研究选取的博罗站汇水面积为 25 325 km²,占流域总面积 71.7%,具有代表性^[19]。博罗水文站设立于 1953 年 8 月,位于东江下游的广东省博罗县,是国家一类精度水文站,也是东江干流下游控制站,地理位置为东经 114°18′、北纬 23°10′。

2 数据资料与研究方法

2.1 数据资料

研究数据为东江控制性水文站博罗站 1954—2010 年实测逐日径流量时间序列,对日径流量进行基流分割,日基流量按时间累计得到月基流量和年基流量。

2.2 基流分割方法

2.2.1 数字滤波法

在 1990 年,Nathan 等^[20]通过多组方法对比,揭示了数字滤波法对于基流分割的有效性。数字滤波法由于参数少,操作简单,在基流分割中的应用越来越广泛。本文采用的滤波方程为

$$Q_{d,t} = \alpha Q_{d,t-1} - \frac{\alpha + 1}{2}(Q_t - Q_{t-1}) \quad (1)$$

$$Q_{b,t} = Q_t - Q_{d,t} \quad (2)$$

式中: Q_t 、 Q_{t-1} 分别为时段 t 和 $t-1$ 内河段的总径流量; $Q_{d,t}$ 、 $Q_{d,t-1}$ 分别为时段 t 和 $t-1$ 内的地表径流产生量; $Q_{b,t}$ 为时段内河段的基流量; α 为滤波参数,表征基流衰减度。

根据各流域的气候、地质等实际情况得到滤波参数取值 0.9~0.95,采用正反相交滤波计算能使基流更稳定^[21]。本研究中,当滤波参数分别取值 0.9、0.925、0.95、0.975,得到的基流指数分别为 0.632、0.602、0.559、0.483。当滤波参数为 0.95 时,第 3 次滤波计算后,基流量分别比第二次和第一次减少 9% 和 23%,且反映水文序列变异程度的离散系数 C_v 分别减少了 0.05 和 0.14,基流相对平稳,因此滤波参数 α 取 0.95,采用正、反、正 3 次滤波。

2.2.2 平滑最小值法

先将连续日径流长序列按照固定步长划分为不重叠的短序列,然后将每个短序列的最小值 q_t 组成一个新序列。若 $0.9q_t \leq \min(q_{t-1}, q_{t+1})$,则 q_t 为基流过程线的一个拐点。将所有拐点用线性内插法计算剩下的其他点,最终连接所有点得到基流过程线。东江博罗站流域面积较大,划分步长不宜过短,取步长为 5 d。

2.3 数据分析方法

水文系列的相关系数按积差方法计算,若相关系数为正,则水文序列呈正相关关系,相关系数为负则水文序列呈负相关关系。相关系数的绝对值越

大,两水文序列的相关程度越高。采用线性回归法^[22]对水文序列进行线性趋势分析, R^2 为线性回归的决定性系数,方程一阶导数为单位时间内的变化率。 R^2 越大,水文序列线性拟合程度越高。Mann-Kendall 检验法(M-K法)能够检验非线性趋势^[23],被广泛应用于水文、气候等领域^[24]。 Z_{MK} 为时间序列变化趋势值,若 $Z_{MK} > 0$,表示水文序列随时间呈增加趋势,反之表示呈减小趋势。当显著性水平为5%时, $|Z_{MK}| > 1.96$,水文序列数据存在显著趋势性。 U_{FK} 和 U_{BK} 分别为顺时间和逆时间的累积统计值,当 U_{FK} 、 U_{BK} 两曲线相交时,则水文序列存在突变点。

3 结果与分析

3.1 基流量和基流指数的年内变化特征

基流指数是指一段时间间隔内基流量与总径流量的比值。图1为研究区径流量、基流量与基流指数的年内月变化趋势(a和b分别代表数字滤波法和平滑最小值法两种方法的计算结果,下同)。博罗站年内径流量集中在汛期4—9月,径流量自4月明显增加,夏季6月达到最大,而后逐步减少,进入10月后径流量达到相对稳定。两种方法计算所得的基流量的涨落规律与径流量一致,均呈先增加后减少的趋势。基流指数先减小后波动增加,其中6月基流指数最小。7月和8月的基流指数较6月和9月有小幅增长,在这两个月降水量减少,但6月部分径流量下渗为地下水时流速减缓,并在7月补给基流,基流量的减幅小于径流量,基流指数增大。8月与7月类似,但此类补给亦随着径流量减少而减少。10月进入枯水期,径流量显著减少,基流指数逐渐增大。枯水期BFI均大于0.6,表明枯水期的径流主要来源为基流。

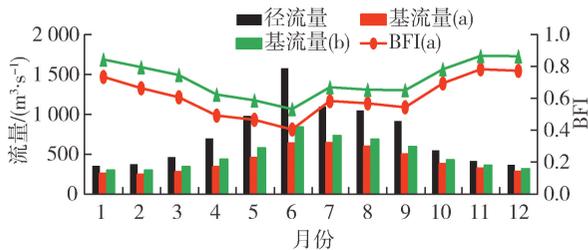


图1 径流量基流量与基流指数的年内月变化

Fig. 1 Monthly variations of runoff and base flow and BFI

3.2 基流量和BFI的年内变化特征

对两种方法得出的博罗站流量序列进行线性回归趋势分析,放到年际基流变化及趋势如表1和图2所示。在1954—2010年间,东江博罗站年均径流量为 $741.05 \text{ m}^3/\text{s}$,总体有不显著的上涨趋势。两种方法得到的线性回归变化速率均为每年增加约

$3 \text{ m}^3/\text{s}$,为年径流量增速的4倍。两种方法计算所得的基流量的 Z_{MK} 和 R^2 均高于径流量,基流量趋势更显著,线性回归的拟合程度也更高。基流受地下水和地表径流两者影响,在博罗站,基流量的变化大于径流量,可能地下水对基流的影响较大。河流基流量受流域包气带调蓄作用和下渗过程等影响,这说明东江流域近年来的土地利用变化改变了流域的下垫面,对河流产汇流影响较大。

表1 1954—2010年径流量与基流量的年际变化特征

Table 1 Annual variations characteristics of runoff and base flow from 1954 to 2010

类别	年均径流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	年均增速/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	C_v	Z_{MK}	R^2
总径流	741.05	0.73	0.2721	0.5989	0.0036
基流(a)	125.72	3.00	0.3036	3.2148	0.1544
基流(b)	150.80	3.03	0.3045	2.5676	0.1094

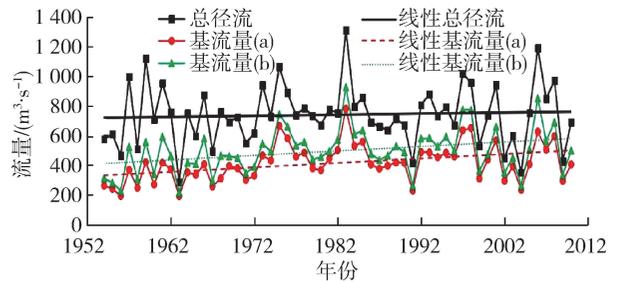


图2 径流量与基流量的年际变化

Fig. 2 Annual variations of runoff and base flow

图3为两种方法计算所得的年际BFI变化过程及趋势。两种方法计算所得的多年平均BFI分别为0.56和0.66。数字滤波法分割所得的BFI变幅为0.37~0.68, R^2 为0.4687, C_v 为0.1514。平滑最小值法的BFI变化幅度较大,为0.46~0.81, R^2 为0.4973, C_v 为0.1223。两种方法计算所得的BFI变化过程存在一定差异,但总体离散程度相似,且在年际变化上均表现为明显递增的趋势,增长速率每10a高达0.035。

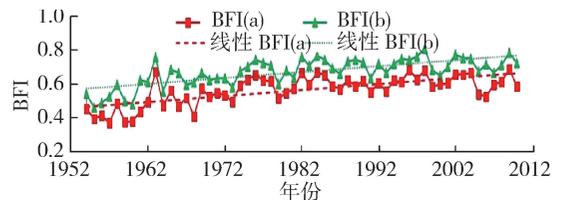


图3 BFI的年际变化

Fig. 3 Annual variation of BFI by two methods

3.3 两种基流分割方法的比较

两种方法分割出的基流特征存在一定差异,平滑最小值法分割的基流量与BFI均大于数字滤波法。Eckhardt^[25]认为常年排水性流域BFI的最大值小于0.8。本研究数字滤波法得到的BFI最大值低

于 0.8,更适用于博罗站。以 1982 平水年和 1983 丰水年为例,如图 4 所示,平滑最小值法计算的基流涨落明显,特别在洪水较多的汛期,分割的基流包含过多地面径流,基流量偏大,与 Aksoy 等^[26]的研究结果一致。在流域产汇流时,下垫面对降水有阻尼等效应,基流过程线较光滑。平滑最小值法分割的基流量 C_v (0.4898) 大于数字滤波法 (0.4345),数字滤波法的基流过程线比平滑最小值法的更为平稳。在博罗站,数字滤波法计算的基流值更为准确,下文均选用数字滤波法分割的基流数据。

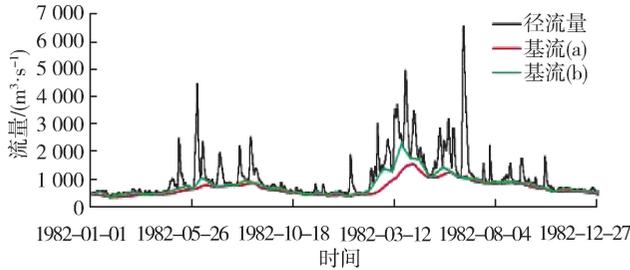


图 4 1982 年和 1983 年径流量和基流量

Fig. 4 The runoff and base flow in 1982 and 1983

3.4 不同水平年的基流量和 BFI 的变化特征

根据径流量年际变化过程,采用 SL250—2000《水文情报预报规范》,用年径流量和距平百分率划分丰平枯水年,东江博罗站划分标准和结果见表 2。博罗站径流量年际变化较大,1963 年最少,1983 年最多。博罗站的年均基流量在枯水年和偏枯水年分别为 80.2 亿 m^3 和 109 亿 m^3 ,平水年为 132 亿 m^3 ,偏丰水年和丰水年分别为 154 亿 m^3 和 178 亿 m^3 。枯水年 BFI 最大可达 0.68,枯水年和偏枯水年的多年平均 BFI 均为 0.55;偏丰水年和丰水年分别为 0.57 和 0.55;平水年的 BFI 最大,多年平均为 0.57。

表 2 丰平枯水年划分标准

Table 3 The standard of wet, normal and dry years

丰平枯级别	距平百分率/%	径流量/亿 m^3
丰水年	≥ 20	≥ 280
偏丰水年	(10, 20)	(257, 280)
平水年	(-10, 10]	(210, 257]
偏枯水年	(-20, -10]	(187, 210]
枯水年	≤ -20	≤ 187

4 基流的影响因素

4.1 降水

在东江流域所有气象要素中,与径流关联度最大的是降水^[27]。董满宇等^[28]基于东江流域及邻近 12 个气象站点 1959—2004 年逐月完整的降水量资料得到东江全流域年降水量分布情况,同时也选用 M-K 检验方法对东江流域降水情况进行分析。结合其相关降水数据和本研究对应的 1959—2004 年

的径流和基流情况,得到东江流域降水量与博罗站径流、基流量的 M-K 检验统计值 Z_{MK} ,如表 3 所示。

表 3 东江流域降水量与博罗站径流、基流量的 M-K 检验统计值 Z_{MK}

Table 3 M-K test values for runoff, base flow at Boluo Station and precipitation in Dongjiang River

月份	降水量	径流量	基流	月份	降水量	径流量	基流
1	1.47	3.50	3.58	7	1.43	-0.53	0.57
2	0.24	2.65	3.84	8	0.45	-0.49	1.67
3	0.12	2.46	3.64	9	0.14	0.19	0.25
4	0.48	1.76	3.67	10	-0.67	-0.44	0.17
5	-1.62	-0.97	2.42	11	-0.58	-0.04	-0.09
6	-1.41	-2.35	-0.09	12	0.69	1.59	1.25

1959—2004 年,东江流域降水量多年 Z_{MK} 平均值为 1.04,虽总体呈上升趋势,但趋势不显著。年内 5—6 月和 10—11 月的降水量呈下降趋势,汛期 5 月和 6 月的下降趋势较显著。与降水量年际变化不同,博罗站的径流量虽围绕平均值波动,较为离散,但 Z_{MK} 值为 -0.70,有不明显的减小趋势。区域内多年降水量和径流量应持平,而为了缓解供水地区的缺水问题,东江流域从 1965 年逐步建设东深供水工程等跨流域引水工程,对东江流域径流量有一定影响。在年内,径流量在汛期除了 4 月和 9 月有不显著的上升趋势外,5—8 月为下降趋势,其中 6 月下降趋势最明显。从 10 月到翌年 3 月减少趋势减缓,枯水期的 1—3 月趋势转为增加,且增加趋势显著。径流量的年内趋势与降水趋势差别较大,在枯水期尤为明显,可能与人类活动的影响有关。

与径流量不同,博罗站的基流 Z_{MK} 值为 1.89,总体趋势增加,比降水和径流的增加趋势更为显著。除了 6 月和 11 月有不显著减少趋势外,其余月份的基流量均呈增加趋势,1—5 月的趋势显著。枯水期的基流趋势与径流基本一致,说明枯水期径流受降水的影响较小,径流主要来源于基流,这与周平等^[29]研究结论一致。同时,基流量的年际和年内的增长趋势均高于径流量,进一步说明人类活动对东江流域的下垫面影响较大。

4.2 人类活动

4.2.1 大型水库对基流的影响

大型水库的调蓄使东江流域径流年内分配显著改变^[30]。东江流域新丰江、枫树坝、白盆珠三大水库分别于 1959 年、1973 年和 1985 年投入使用,总控制面积占博罗站以上控制面积 46.4%^[31]。三大水库的总库容分别是 138.96 亿 m^3 、19.32 亿 m^3 和 12.2 亿 m^3 ,总库容占总径流 73%;集雨面积分别为 5734 km^2 、5150 km^2 和 856 km^2 ,所处河段分别是新丰江、东江干流和西枝江。大型水库在汛期储水、枯水

期泄洪,调节了东江洪枯流量。

以汛期径流量和基流量最大的6月和进入枯水期的10月为例,图5为博罗站径流量和基流量M-K法突变检验结果。在1954—2010年,博罗站6月径流上升趋势波动减缓,随时间变化出现下降趋势。相似地,博罗站的径流除了4月和8月有上升趋势外,其余汛期月份上升趋势波动减缓。在枯水期径流量趋势上升,随时间变化达到显著。水库在汛期拦蓄,使博罗站的上游来水减少;在枯水期下泄库容,使博罗站径流量增加,与张正浩等^[32]的结论一致。博罗站6月基流减少趋势波动减缓,随时间出现显著的上升趋势。相似地,博罗站各月份基流总体趋势上升,趋势转变的突变年份集中在1970—1980年。1960年起新丰江水库运行,全年的径流量和基流量减少趋势减缓。1973年枫树坝水库运行,枯水期径流量和基流量呈上升趋势,随时间变化趋势更明显。径流和基流的突变年份和三大水库运行时间重合。

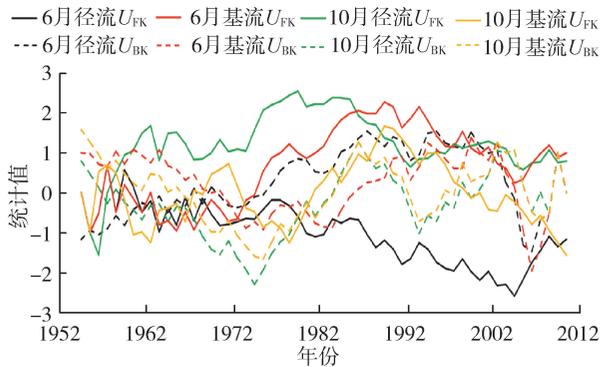


图5 部分月份径流和基流M-K突变检验曲线

Fig. 5 M-K catastrophe detection curve of runoff and base flow in several months

图6为不同时期的基流指数月变化情况。在1959年三大水库运行前,1月和12月的基流指数最大,其他月份均较小。随着三大水库运行,1月和12月的BFI减小,2—11月明显增大。1960年三大水库运行前后,各月份基流量的平均增加量相比径流量多了34%,这说明基流受大型水库的调节影响更深远。

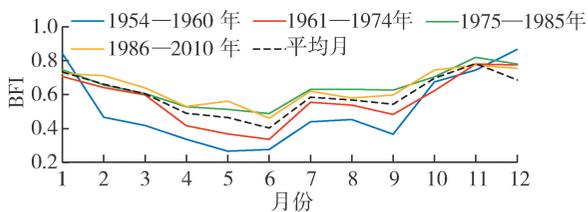


图6 不同时期的基流指数月变化情况

Fig. 6 BFI for each month in different periods

1960年新丰江水库运行后,年内各月份基流量平均增加量比径流量多了15%。随着枫树坝水库

投入使用,年内各月份基流指数均比1965—1974年进一步增大,各月份基流量平均增加量比径流量多了20%,对博罗站的影响更大。虽然枫树坝水库的库容只占三大水库库容的11%,但是集雨面积与新丰江水库相当且地处干流,对博罗站的影响不小于新丰江水库。1985年白盆珠水库开始运行,BFI与前一阶段差异不大。白盆珠水库的库容只占三大水库的7%,集雨面积小且处于东江支流,对处于干流的博罗站基流的影响小于另外两个水库。水库蓄水1a后会提升地下水水位^[33],东江大型水库蓄水使流域地下水水位提高,基流量较径流量增加更多,BFI增加。水库调度对基流的影响与水库的库容、集雨面积和位置有关。

4.2.2 采砂活动对基流的影响

20世纪80年代以来,东江下游地区有较大规模的采砂活动,采砂边界上移逼近博罗河段^[34]。采砂活动使河床持续下切,枯水期潮区界向上游推移。2006年的潮区界已到达博罗站附近,博罗站初显潮汐特征,到2007年博罗站已完全具有潮水位站特征^[35]。以进入枯水期的10月为例,从图5可知,博罗站10月径流和基流的 U_{FK} 和 U_{BK} 曲线在2005年有波动,其中 U_{FK} 在2005年波动下降。博罗站9月、11月的径流和11月的基流在2005年的 U_{FK} 和 U_{BK} 曲线亦有波动,说明在2005年径流和基流的增加量有所下降。1986年后三大水库对基流影响趋于稳定,与1986—2005年相比,2006—2010年全年各月份基流平均增加量相比径流只多了1%,其影响小于三大水库调度。

上下游河段采砂规模、强度的不同使局部水面比降剧增,流速沿程变化明显,河床溯源冲刷^[36]。河床的变化引起区域产汇流机制的变化,影响径流和基流。采砂活动对基流的影响不如大型水库,但长期的采砂已改变局部流域下垫面,影响未来的水文过程。

5 结 语

采用数字滤波法和平滑最小值法对东江流域控制性水文站博罗站1954—2010年的实测日径流进行基流分割,通过比较这两种方法分割出的BFI与基流过程线,发现两种方法对东江博罗站的基流分割结果存在差异,平滑最小值法的结果偏大,数字滤波法的基流过程更稳定,但在研究区内数字滤波法优于平滑最小值法。东江博罗站基流量的年内分布先增加后减少,BFI先减小后波动增加;东江博罗站年均基流量和BFI总体呈增加的趋势,多年平均基流量为 $414.04 \text{ m}^3/\text{s}$,多年平均BFI为0.56。枯水年和偏枯水年的平均BFI均为0.55,平水年的BFI为

0.57, 偏丰水年和丰水年的 BFI 分别为 0.57 和 0.55。

本文主要讨论对径流基流影响较大的降水因素,其他气象要素对基流的影响本研究并未涉及。同时,除了大型水库设施建设和采砂活动,人类活动也通过植被覆盖度的变化、地下水的开采和水土保持措施等方式影响基流,但任何的人类活动对水文过程的影响都是发生在某种气候背景下,它不是独立的。如何选取和定量分析各要素对东江基流的影响,需要后续深入研究。

参考文献:

- [1] 王东升,袁树堂,杨祺.金沙江流域云南片水文极小值演变及生态基流保障分析[J].水资源保护,2019,35(4):35-41. (WANG Dongsheng, YUAN Shutang, YANG Qi. Analysis of hydrological minimum evolution and ecological base flow guarantee in Yunnan area of Jinshajiang River Basin, China [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(4):35-41. (in Chinese))
- [2] 陈利群,刘昌明,李发东.基流研究综述.地理科学进展[J].2006,25(1):1-15. (CHEN Liqun, LIU Changming, LI Fadong. Review on base flow researches [J]. Progress in Geography, 2006, 25(1):1-15. (in Chinese))
- [3] HALL F R. Base flow recessions: a review [J]. Water Resources Research, 1968, 4:973-983.
- [4] PARTINGTON D, BRUNNER P, SIMMONS C T, et al. Evaluation of outputs from automated base flow separation methods against simulated base flow from a physically based, surface water-groundwater flow model [J]. Journal of Hydrology, 2012, 458-459:28-39.
- [5] 徐榕焱,王小刚,郑伟.基流分割方法研究进展[J].水土保持通报,2016,36(5):352-359. (XU Ronghan, WANG Xiaogang, ZHENG Wei. Research progresses in base flow separation methods [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016, 36(5):352-359. (in Chinese))
- [6] ARNOLD J G, MUTTIAH R S, SRINIVASAN R, et al. Regional estimation of base flow and groundwater recharge in the upper Mississippi River Basin [J]. Journal of Hydrology, 2000, 227(1/2/3/4):21-40.
- [7] 刘新有,谢飞帆.基于数字滤波法的怒江流域基流时空分异[J].水资源保护,2017,33(1):18-23. (LIU Xinyou, XIE Feifan. Spatial-temporal differentiation of base flow in Nujiang River Basin based on digital filtering method [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(1):18-23. (in Chinese))
- [8] 王敬哲,刘志辉,塔西南拉提·特依拜,等.呼图壁河基流变化及其影响因素[J].中国沙漠,2017,37(4):793-801. (WANG Jinzhe, LIU Zhihui, TASHPOLAT Tiyp, et al. Variation of the base flow and its causes of Hutubi River [J]. Journal of Desert Research, 2017, 37(4):793-

801. (in Chinese))

- [9] 董晓华,邓霞,薄会娟,等.平滑最小值法与数字滤波法在流域径流分割中的应用比较[J].三峡大学学报(自然科学版),2010,32(2):1-4. (DONG Xiaohua, DENG Xia, BO Huijuan, et al. A comparison between smoothed minima and digital filtering methods applied to catchment base flow separation [J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2010, 32(2):1-4. (in Chinese))
- [10] 郝璐,李素云,孙磊,等.不同基流分割方法在秦淮河流域的应用[J].西南师范大学学报(自然科学版),2019,44(1):62-69. (SUN Lu, LI Suyun, SUN Lei, et al. On application of different base flow separation methods in Qinhuai River Basin [J]. Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition), 2019, 44(1):62-69. (in Chinese))
- [11] SMETTEM K, UNDERWOOD S, CALLOW N. Impacts of land use and climate change on base flow in catchments along the south coast of Western Australia [C]//EGU General Assembly Conference Abstracts. Vienna, Australia:EGU, 2014.
- [12] 董薇薇,丁永建,魏霞.祁连山疏勒河上游基流变化及其影响因素分析[J].冰川冻土,2014,36(3):661-669. (DONG Weiwei, DING Yongjian, WEI Xia. Variation of the base flow and its causes in the upper reaches of the Shule River in the Qilian Mountains [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(3):661-669. (in Chinese))
- [13] 白乐,李怀恩,何宏谋.降水和人类活动对秃尾河流域基流的影响[J].自然资源学报,2014(12):2078-2088. (BAI Le, LI Huaen, HE Hongmou. Assessing the impacts of precipitation and human activities on base flow in the Middle Tuwei River Basin of the Yellow River [J]. Journal of Natural Resources, 2014(12):2078-2088. (in Chinese))
- [14] 亢小语,张志强,陈立欣,等.黄土高原中尺度流域基流变化驱动因素分析[J].自然资源学报,2019,34(3):563-572. (KANG Xiaoyu, ZHANG Zhiqiang, CHEN Lixin, et al. Base flow variation and driving factors for the last six decades in a watershed on the Loess Plateau, Northern China [J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(3):563-572. (in Chinese))
- [15] 潘文卿,李子奈.三大增长极对中国内陆地区经济的外溢性影响研究[J].经济研究,2008(6):85-94. (PAN Wenqing, LI Zinai. Spillover effects of the three growth poles on the Inland Regions of China [J]. Economic Research Journal, 2008(6):85-94. (in Chinese))
- [16] 文佩.基流分割及基于改进 TOPMODEL 径流模拟 [D]. 南京:河海大学,2006.
- [17] 黄国如.流量过程线的自动分割方法探讨[J].灌溉排水学报,2007(1):73-78. (HUANG Guoru. Base flow

- separation from daily flow hydrograph using automated techniques[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2007 (1):73-78. (in Chinese))
- [18] 贺涛,马小玲,彭晓春,等. 东江水资源环境管理问题及矛盾[J]. *水资源保护*, 2009, 25(6):85-89. (HE Tao, MA Xiaoling, PENG Xiaochun, et al. Problems and contradiction in water resources environmental management of Dongjiang Basin [J]. *Water Resources Protection*, 2009, 25(6):85-89. (in Chinese))
- [19] 吕乐婷,张杰,江源,等. 土地利用变化对东江流域产流过程影响的定量评估[J]. *水资源保护*, 2018, 34(3):45-51. (LYU Leting, ZHANG Jie, JIANG Yuan, et al. Quantitative assessment on influence of land use change on process of runoff production in Dongjiang River Basin [J]. *Water Resources Protection*, 2018, 34(3):45-51. (in Chinese))
- [20] NATHAN R J, MCMAHON T A. Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses[J]. *Water Resources Research*, 1990, 26:1465-1473.
- [21] 林凯荣. 数字水文模拟与基流分割方法研究[D]. 武汉:武汉大学, 2007.
- [22] 杨永岐. 农业气象中的统计方法[M]. 北京:气象出版社, 1982:25-87.
- [23] HAMED K H. Trend detection in hydrologic data: the Mann-Kendall trend test under the scaling hypothesis[J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 349(3/4):350-363.
- [24] 方国华,张钰,闻昕,等. 基于质心分析的淮河流域降水时空分布特征[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2018, 46(5):384-389. (FANG Guohua, ZHANG Yu, WEN Xin, et al. Spatial and temporal distribution characteristic of precipitation in the Huaihe River Basin based on centroid analysis [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2018, 46(5):384-389. (in Chinese))
- [25] ECKHARDT K. How to construct recursive digital filters for base flow separation [J]. *Hydrological Processes*, 2005, 19:507-515.
- [26] AKSOY H, KURT I, ERIS E. Filtered smoothed minima base flow separation method [J]. *Journal of Hydrology (Amsterdam)*, 2009, 372(1/2/3/4):94-101.
- [27] 林凯荣,何艳虎,雷旭,等. 东江流域 1959—2009 年气候变化及其对径流的影响[J]. *生态环境学报*, 2011, 20(12):1783-1787. (LIN Kairong, HE Yanhu, LEI Xu, et al. Climate change and its impact on runoff during 1956-2009 in Dongjiang Basin [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, 20(12):1783-1787. (in Chinese))
- [28] 董满宇,江源,李俞萍,等. 近 46 年来东江流域降水变化趋势分析[J]. *水文*, 2010, 30(5):85-90. (DONG Manyu, JIANG Yuan, LI Yuping, et al. Analysis of precipitation change trend over last 46 Years in Dongjiang River Basin [J]. *Journal of China Hydrology*, 2010, 30(5):85-90. (in Chinese))
- [29] 周平,陈刚,刘智勇,等. 东江流域降水与径流演变趋势及周期特征分析[J]. *生态科学*, 2016, 35(2):44-51. (ZHOU Ping, CHEN Gang, LIU Zhiyong, et al. Variation trend and periodicity analysis of precipitation and runoff in Dongjiang Watershed [J]. *Ecological Science*, 2016, 35(2):44-51. (in Chinese))
- [30] 赖天铨,张强,张正浩,等. 人类活动与气候变化对东江流域径流变化贡献率定量分析[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2016, 55(4):136-145. (LAI Tianzen, ZHANG Qiang, ZHANG Zhenghao, et al. Quantitative evaluations of fractional contribution of human activities and climate changes to the streamflow variations across the East River Basin [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2016, 55(4):136-145. (in Chinese))
- [31] 黄秋华. 东江流域三大水库联合优化调度探讨[J]. *广东水利水电*, 2018(12):4-9. (HUANG Qiuhua. Research on optimal operation of the three major reservoirs in Dongjiang River Basin [J]. *Guangdong Water Resources and Hydropower*, 2018(12):4-9. (in Chinese))
- [32] 张正浩,张强,邓晓宇,等. 东江流域水利工程对流域地表水文过程影响模拟研究[J]. *自然资源学报*, 2015, 30(4):684-695. (ZHANG Zhenghao, ZHANG Qiang, DENG Xiaoyu, et al. Hydrological effects of water reservoirs on fluvial hydrological processes for the East River Basin using statistical modeling technique [J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(4):684-695. (in Chinese))
- [33] 王俊梅,刘海宁. 水库蓄水引发的地下水位抬升和渗控措施研究[J]. *水文地质工程地质*, 2011, 38(5):115-119. (WANG Junmei, LIU Haining. Seepage control of unsaturated soil based on the SWCC [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2011, 38(5):115-119. (in Chinese))
- [34] 任杰,曾学智,贾良文. 东江下游河段溯源侵蚀特征与机理[J]. *水科学进展*, 2010, 21(1):84-88. (REN Jie, ZENG Xuezhi, JIA Liangwen. Mechanism study of retrogressive erosion in the lower Reach of Dongjiang River [J]. *Advances in Water Science*, 2010, 21(1):84-88. (in Chinese))
- [35] 王雪燕. 东江博罗水文站水文特征变异情况分析[J]. *广东水利水电*, 2011(1):61-64. (WANG Xueyan. Analysis of hydrological alteration measured at Boluo Hydrologic Station in the Dongjiang River [J]. *Guangdong Water Resources and Hydropower*, 2011(1):61-64. (in Chinese))
- [36] 季荣耀,陆永军,左利钦. 东江下游博罗河段人类活动影响下的河床演变[J]. *泥沙研究*, 2010(5):48-54. (JI Rongyao, LU Yongjun, ZUO Liqin. Effects of human activities on fluvial processes of Boluo reach, East River [J]. *Journal of Sediment Research*, 2010(5):48-54. (in Chinese))