

渠江流域基流变化及气象关联性分析

赵宾华^{1,2}, 马方铭¹, 李占斌¹, 李鹏^{1,2}, 黄金华¹, 周梦涵¹, 孟丽君¹

(1. 西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 西安 710048;

2. 旱区生态水文与灾害防治国家林业和草原局重点实验室, 西安 710048)

摘要: 河川径流是水资源的重要存在形式, 基流是径流的重要组成部分, 研究基流变化及影响因素对于掌握流域水资源变化具有重要的意义。采用渠江流域 2007—2018 年日流量资料, 对 9 种不同基流分割方法的适用性及基流变化特征进行分析。结果表明: (1) 不同方法差异较大, 时间步长法和滑动最小值法分割结果偏高, F4 滤波法方差与变异系数分别为 0.038 和 0.138, 说明该方法分割更加稳定且离散程度较低, 在渠江流域适用性最好; (2) 流域多年平均基流指数 31.5%, 年内存在伏汛与秋汛双汛期, 多年平均月降水、径流和基流变化趋势存在一致性, 而且流域径流、基流峰现时间相对于降水存在滞后性; (3) 采用小波相干分析, 表明流域降水和基流序列均存在 10~14 个月的变化周期且同向变化, 时频上基流滞后于降水序列, 同时基流对气候变化的响应具有时滞性, 当基流相对于同期气候指数滞后 8~10 个月时二者的相关程度显著提升。研究成果有助于提升对渠江流域基流变化的认识, 为流域水资源管理与调控提供一定的科学依据。

关键词: 渠江流域; 基流; 变化特征; 影响因子; 小波相干分析

中图分类号: P333.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2023)04-0142-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.04.019

Analysis of Baseflow Variation and Meteorological Correlation in Qujiang Basin

ZHAO Binhua^{1,2}, MA Fangming¹, LI Zhanbin¹,

LI Peng^{1,2}, HUANG Jinhua¹, ZHOU Menghan¹, MENG Lijun¹

(1. State Key Laboratory Base of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an

University of Technology, Xi'an 710048; 2. State Key Laboratory of National Forestry and

Grassland Administration on Ecological Hydrology and Disaster Prevention in Arid Regions, Xi'an 710048)

Abstract: River runoff is an important form of water resources, and baseflow is a vital part of the runoff. It is of great significance to study the change of baseflow and its influencing factors to master the change of water resources in the basin. Based on the daily flow data of Qujiang Basin from 2007 to 2018, the applicability of nine different baseflow separation methods and the variation characteristics of baseflow were analyzed. The results showed that: (1) There were great differences among different methods, and the separation results of time step method and sliding minimum method were higher than others. The variance and coefficient of variation of F4 filtering method were 0.038 and 0.138, indicating that the separation of this method was more stable and less discrete, and had the best applicability in the Qujiang Basin. (2) The multi-year average baseflow index of the basin was 31.5%, and there were both summer and autumn flood seasons in the year, the multi-year average monthly precipitation, runoff and baseflow had the same variation trend, and the peak time of runoff and baseflow in the basin showed a lag compared with precipitation. (3) Wavelet coherence analysis showed that both precipitation and baseflow series in the basin had a 10~14 months variation cycle and changed in the same direction, the baseflow lagged behind the precipitation series in time and frequency, and the baseflow had a time delay in response to climate change. When the baseflow lagged 8~10 months behind the climatic index of the same period, the correlation between the two was significantly increased. The

收稿日期: 2023-01-04

资助项目: 国家自然科学基金项目(U2040208, 42007070, 42277359); 陕西省教育厅重点实验室项目(20JS100)

第一作者: 赵宾华(1990—), 男, 博士, 讲师, 主要从事流域水文过程与水土保持研究。E-mail: zbh20080810@126.com

通信作者: 赵宾华(1990—), 男, 博士, 讲师, 主要从事流域水文过程与水土保持研究。E-mail: zbh20080810@126.com

research results are helpful to improve the understanding of the change of baseflow in the Qujiang basin and provide a scientific basis for the management and regulation of water resources in the basin.

Keywords: Qujiang basin; baseflow; variation character; influencing factors; wavelet coherence analysis

在全球水资源问题逐渐严峻的背景下,如何合理利用与配置水资源已成为水资源管理的重要课题,基流作为地下水和其他延迟水源流入河流的一部分,对于流域维持枯水期河道流动、生物多样性、流域产汇流模拟等意义重大^[1]。同时,基流时空变化依赖于流域水文特性的改变,与土壤特性、土地利用类型、地貌条件等密不可分,随着近年来极端气候的发生以及人类活动的影响,研究对基流在时空上的可变性有影响的关联因素对于扰动下的流域水资源管理十分必要。

基流的确定方法主要包括化学法、图解法和数值模拟法等^[2-4]。其中,示踪法虽然可以很好地追溯径流的来源、反映不同流域的水文地质特征,但是需要对样点的长期监测,直接分割法工作量大且易受主观因素影响,水量平衡法参数多且公式较为复杂,所以目前应用较为广泛的是基于计算机和信号处理的数值模拟法,近些年不同学者在不同流域内对该类方法也进行多次应用探讨^[5-7]。张革等^[8]在香溪河流域将滤波法与平滑最小值法相结合并认为该方法得到的基流过程线更为符合实际汇流过程;在长江流域,陈帅等^[9]使用递归数字滤波法对长江干流7个水文站进行基流分析,结果表明,基流从上游到下游呈现增加趋势,且在2000年前后基流量出现衰减;Qian等^[10]利用改进的Kalinen分离法对长江源区1957—2009年的年基流进行了估算,认为20世纪80年代以前基流的变化波动较小。对于基流变化特征及变化的原因,Ayers等^[11]使用GAMLSS模型得到美国大陆地区月基流增加可能与降水增加、融雪量变化与前期湿度有关,气温升高或降水不足会带来基流的减少;杨倩楠^[12]以黄河中游3个不同地貌区为研究区,量化了降水、生态建设、淤地坝建设、人类活动等因素对基流的贡献,得出该地区人类活动对基流的贡献较大的结论;王曼玉^[13]分析潮河流域密云水库上游基流变化认为,人类对地下水利用增加、水利工程建设引起蒸散发增加、土地利用类型转变等都引起了流域基流的减少^[14]。

目前多数研究还是集中在不同流域径流演变规律及成因分析中,围绕基流的研究相对较少,长江流域基流变化及原因探讨等相关研究主要针对长江源区及干流,对于流域中不同水系的关注较少,同时渠江流域具有独特的水文特性,降水径流年内分配极不均匀,汛期长且洪水消退慢,主汛期内常连降暴雨致

使流量变化极大,容易造成灾害性洪水的发生,枯水期河道水量主要来源于地下水。所以本研究以渠江流域为研究对象,采用数字滤波法、时间步长法和滑动最小值法等3类9种数值模拟方法进行基流的分割与对比分析,并结合流域降水量与全球气候指数,以期得到变化条件下渠江径流组分特征与气象影响因子,从而为枯水期河道水资源管理提供可参考的依据。

1 研究区概况

渠江属于长江支流嘉陵江水系,流域位于嘉陵江流域东南部,主要包括大通江、州河等支流,其控制水文站罗渡溪(二)站集水面积3.8万km²^[15](图1)。流域地势东北高、西南低,北部多高山区且喀斯特地貌发育,南部多低丘区,土壤类型以紫色土为主。渠江流域属于亚热带湿润气候类型,其水量充沛,多年平均降水量为1134mm,多年平均径流量为730m³/s,由于受流域内地形及季风气候影响,气温、降水存在时空分配不均性,降水、径流量多集中在汛期5—10月^[16]。

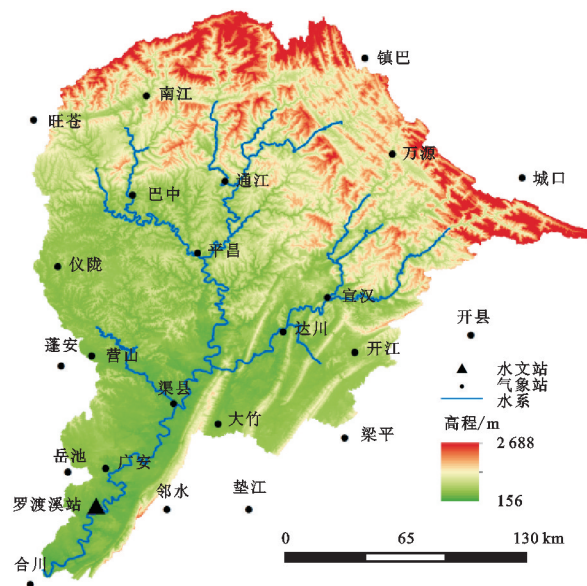


图1 渠江流域气象及水文站点分布

2 数据与方法

2.1 数据来源

本研究降水数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>),径流数据选取流域控制站罗渡溪(二)站2007—2018年日资料,来源于长江流域嘉陵江区水文年鉴,全球气候指数来自世界气候组织官网(<https://www.public.wmo.int>),选取厄尔尼诺指数Nino3.4、降水指数PCP、南方涛动指数SOI、太平洋年代际振荡PDO,以及北极涛动AO、南极涛动AAO、北大西洋

涛动 NAO 和太平洋北美模式 PNA 4 个大气环流指数,流域数字高程模型 (DEM) 分辨率为 30 m,数据来源于地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn>)。

2.2 研究方法

2.2.1 基流分割方法

(1) 参数滤波法。数字滤波法的原理是通过数字滤波器将高频信号从低频信号中分离,将径流过程分为地表径流和基流,目前广泛应用的包括 4 种方法^[17]。

F1 滤波法是将 Lyne-Hollick 改进后提出的一种分割算法,其分割方程为:

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

$$q_{bt} = Q_t - q_t \quad (2)$$

式中: q_t 、 q_{t-1} 分别为 t 时刻、 $t-1$ 时刻的地表径流量 (m^3/s); Q_t 、 Q_{t-1} 分别为 t 时刻、 $t-1$ 时刻的实测径流量 (m^3/s); q_{bt} 为 t 时刻基流量 (m^3/s); α 为滤波参数。本研究中结合经验,通过控制变量对不同滤波参数 α (0.80, 0.85, 0.90, 0.925, 0.95) 分别进行不同滤波次数的试算,随着滤波次数的增加高频信号出现衰减,结合流域实际综合选取 $\alpha = 0.95$ 、 $N = 3$ 进行基流分割。

F2 滤波法是 Chapman 将 L-H 法方程改进后提出的:

$$q_t = \frac{3\alpha-1}{3-\alpha} q_{t-1} + \frac{2}{3-\alpha} (Q_t - Q_{t-1}) \quad (3)$$

$$q_{bt} = Q_t - q_t \quad (4)$$

F3 滤波法为 Chapman-Maxwell 滤波法,该方法通过对 $i-1$ 时刻的基流量和 i 时刻的实测径流量赋权重进行加权平均后得到 i 时刻的基流量,其分割方程为:

$$q_{bt} = \frac{k}{2-k} q_{b(t-1)} + \frac{1-k}{2-k} Q_t \quad (5)$$

式中: q_{bt} 、 $q_{b(t-1)}$ 分别为 t 时刻、 $t-1$ 时刻的基流量 (m^3/s); k 为退水系数,一般取 0.95。

F4 滤波法是由改进的 Boughton 法,分割方程为:

$$q_{bt} = \frac{k}{1+c} q_{b(t-1)} + \frac{c}{1+c} Q_{t-1} \quad (6)$$

式中: c 为滤波参数,一般取值为 0.15。

(2) 时间步长法。时间步长法 (HYSEP) 包括固定时间间隔法 (fixed interval)、滑动时间间隔法 (sliding interval) 和局部最小值法 (local-min), 根据美国地质调查局 (USGS) 提出的参数退水时间确定公式换算后得到:

$$t = (2.59A)^{0.2} \quad (7)$$

式中: t 为地表径流停止后退水持续的时间 (天); A 为流域面积 (km^2)。在进行基流分割时时间长度 N

选取 3~11 天范围内 $2t$ 最接近的奇数,渠江流域面积为 3.81 万 km^2 ,经过计算时间长度 t 取 11。

(3) 滑动最小值法。滑动最小值法又称基流指数法 (baseflow index), 是由英国水文研究所提出的一种基流分割方法,包括 BFI-f 和改进的 BFI-k 法 2 种,为了得到较好的分割效果,拐点检验因子一般取值为 0.9,经过前期试算分析当 $N = 6$ 时流域基流指数 BFI 趋于稳定变化。

2.2.2 分析方法

(1) 皮尔逊相关分析。皮尔逊相关系数 (Pearson correlation coefficient) 常用于度量 2 个变量 X 和 Y 之间的线性关系,用样本协方差和方差的比值来衡量:

$$r = \frac{\sum (x - m_x)(y - m_y)}{\sqrt{\sum (x - m_x)^2 \sum (y - m_y)^2}} \quad (8)$$

式中: r 为相关系数,其取值范围为 $[-1, 1]$,当相关系数的绝对值越接近于 1 时说明二者有很好的相关性,否则说明二者相关性较弱或没有线性相关性; m_x 、 m_y 分别为 2 个序列的均值。

(2) 小波分析。在非平稳时间序列的分析中,小波分析的功率谱可以反映序列在研究期内的周期波动特征及变化强度,而由小波变换与相干分析相结合的小波相干分析 (wavelet coherence, WTC) 可以用于衡量 2 个时间连续序列的相位关系,在时间-频率空间中找到 2 个时间序列共同变化的区域,而交叉小波分析 (cross wavelet analysis, XWT) 可以用于时间-频率空间中找到时间序列里周期性强度一致的区域^[18-20]。

3 结果与分析

3.1 渠江流域基流变化特征

3.1.1 9 种基流分割方法对比分析 基流指数 (BFI) 为河川基流与径流量的比值,采用 9 种基流分割方法得到渠江流域年基流量,根据绘制的基流指数曲线 (图 2) 可以看出,9 种方法分割结果差异较大,数字滤波法 F2、F3 得到的基流指数虽然波动幅度不大,但数值明显低于其他方法分割结果,时间步长法分割的结果值较高,其他几种方法分割结果较为相近。

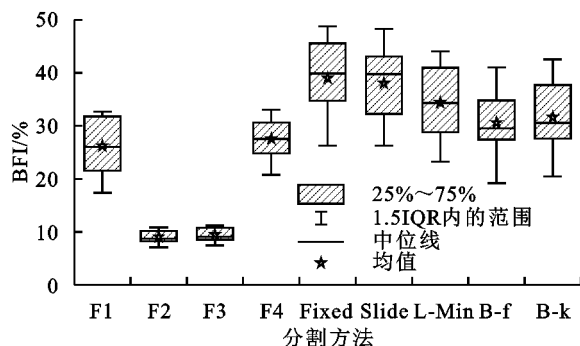


图 2 不同基流分割方法基流指数 BFI 分布

表 1 采用均值、标准差、变异系数 CV 等统计值

对基流指数序列对 9 种方法的适用性和稳定性进行统计分析,其中数字滤波法 F1、F4 的统计值较为接近,F4 法标准差为 0.038,说明其分割稳定程度相对来说较高,其变异系数为 0.138,也反映该序列离散程度较低。时间步长法和滑动最小值法极值比、平均值均较高,后者的极值比分别为 2.14 和 2.08,同时从

标准差和变异系数 CV 来看其偏离程度也较高。选用枯水指数 Q_{90}/Q_{50} 来表征流域实际基流指数,同时与 9 种方法分割所得的结果用进行误差分析,可以看出虽然 F2、F3 分割方法较为稳定,但是相对误差超过 65%,综合分析得到 F4 滤波法在渠江流域的适用性更好。

表 1 9 种基流分割方法对应基流指数统计值

统计值	数字滤波法				时间步长法			滑动最小值法	
	F1	F2	F3	F4	Fixed	Slide	L—Min	BFI—f	BFI—k
最大值	0.327	0.109	0.112	0.330	0.487	0.483	0.440	0.410	0.425
最小值	0.174	0.071	0.075	0.207	0.263	0.263	0.232	0.192	0.205
极值比	1.880	1.530	1.500	1.590	1.850	1.840	1.890	2.140	2.080
平均值	0.262	0.091	0.095	0.276	0.390	0.380	0.344	0.306	0.316
标准差	0.052	0.012	0.012	0.038	0.073	0.071	0.068	0.062	0.065
变异系数	0.198	0.134	0.132	0.138	0.188	0.186	0.197	0.202	0.205
误差/%	29.500	67.100	65.800	26.200	47.500	43.200	32.500	33.500	34.800

为了进一步得到 9 种分割方法所得到的基流特征,以流域 2018 年的基流过程为研究对象对分割结果进行分析。由图 3a 可以直观看出,数字滤波法得到的基流曲线更加平滑且整体趋势上符合径流过程线,其中 F2、F3 滤波法分割结果相似,而且年内随洪峰的出现 2 条曲线波动并不大,F1、F4 法基流曲线相似,但是在径流过程线相邻 2 个峰值间的最低值处,F1 分割得到的基流量相比更高,而在峰值对应的点处 F4 分割结果更大。由于时间步长法和滑动最小值法分割原理均为局部最小值的连线,所以图 3b、图 3c 的基流过程线所表现出的洪峰特点以及汛期特征并不明显,其中固定时间间隔法(fixed)和滑动时间间隔法(slide)基流曲线呈阶梯状,局部最小值法(local—min)与 BFI—k 分割结果类似。

3.1.2 基流年内年际变化分析 以 F4 滤波法得到的基流为分析对象,图 4 为 2007—2018 年渠江流域月平均降水量、径流量和基流变化过程,可以看出三者之间变化趋势在年内具有较高一致性,均存在伏汛期和秋汛期 2 个波峰,而且年内 1—7 月呈现增加趋势,8—12 月呈现下降趋势。降水量年内最高出现在 7 月(254.1 mm),对应的径流量和基流量分别为 63 198.6、14 157.7 m³/s,在研究期内 2011 年、2015 年和 2018 年均出现 9 月降水量远高于 8 月的情况,其中降水量最为充沛的 2011 年,9 月降水量(429.1 mm)比 8 月(173.4 mm)高 1.5 倍。

以基流指数(BFI)来反映研究期内基流变化的年际特征,由图 5 可以看出,年基流指数(BFI)变化幅度不大,多年平均基流指数为 31.5%,最大值(35.1%)和最小值(26.3%)分别出现在 2007 年和 2013 年。在各年内,

汛期(5—10 月)基流远高于非汛期,汛期基流最大值为 72 464.3 m³/s(2012 年),非汛期基流变化相对来说更加稳定。

为了更直观得到基流的变化过程,选取降水最充沛的 2011 年,以 F4 参数滤波法分割所得的结果进行分析。图 6 为渠江流域 2011 年降水、径流和基流年内变化特征,可以看出年内降水量、径流量主要集中在汛期 6—10 月,当一段时间内的径流量达到峰值时基流也产生相应的增长波动,其他时间变化较为平稳。流量最大值 25 600 m³/s 出现在 9 月 20 日,对应的基流量为 1 173.9 m³/s,分析 9 月径流高于主汛期的原因是 9 月 12—14 日连续 3 天日降水量大于 30 mm,9 月 17 日降水 52 mm 以及 9 月 18 日出现大暴雨级别的降水(125.1 mm)造成的。同时,由图 6 过程线可以看出,渠江流域径流、基流峰值出现的时间相对于降水发生的时间存在 0~2 个月的时间滞后性。

3.2 关联因素分析

3.2.1 降水因素 为了更全面反映 2 个非平稳序列的时频分布特征,采用小波变换分析流域降水和基流的共同周期变化^[18]。由图 7 小波周期图可以得到,流域 12 年间月降水存在 10~14 个月的变化周期,其中 2007—2014 年存在有 0~4 个月的周期性变化,而基流变化整体上与降水存在相同的周期,同时在 2016 年后存在有 2~6 个月较弱的变化周期,交叉小波功率谱(图 8)也印证在高能量区二者间的共变周期,不考虑边界效应影响锥曲线外区域,可以看出降水和基流在 10~14 个月的周期上通过 95%显著性水平的红噪声检验,同时在 2010 年后存在 0~4 个月的共振周期。

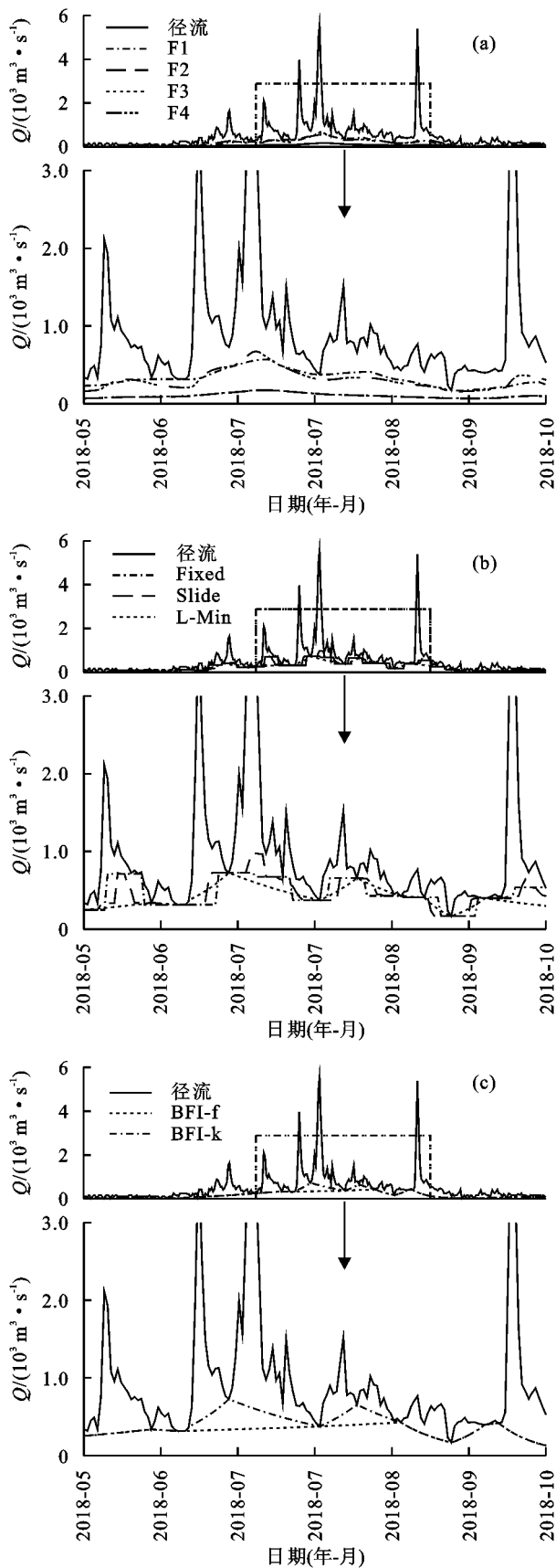


图 3 渠江流域 2018 年基流过程线

图 9 为降水与基流序列的小波相干凝聚谱,可以看出,在整个研究期间低能量区通过显著性检验的周期普遍分布在为 0~24 个月。在 2009—2012 年存在 0~3 个月的周期,相关系数达到 0.8 以上,检验区内

箭头分布多为“→”正相位及第四象限指向,说明降水和基流为正相位变化,即为正相关,同时基流滞后于降水。在 10~16 个月周期内降水和基流仍存在相关系数高于 0.9 的较强正相关关系,同时降水序列整体上提前于基流序列,说明在渠江流域上降水和基流整体上同向变化且降水提前于基流,宏观来看无论是在高或低能量区内,降水仍是影响基流的重要因子。

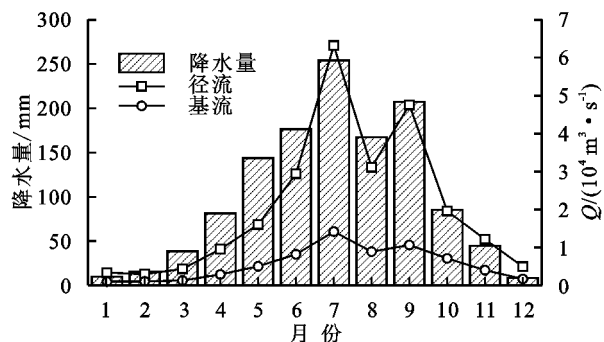


图 4 渠江流域 2007—2018 年月降水、径流和基流平均年变化

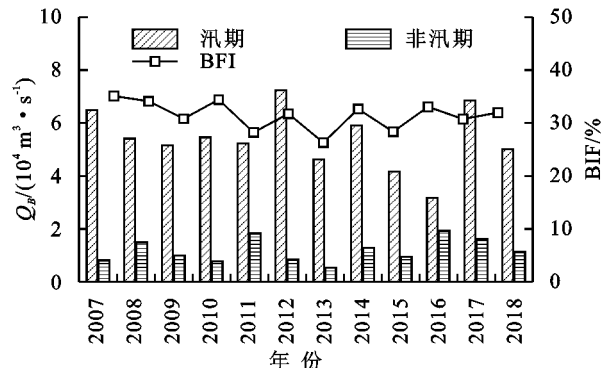


图 5 渠江流域 2007—2018 年汛期、非汛期基流变化

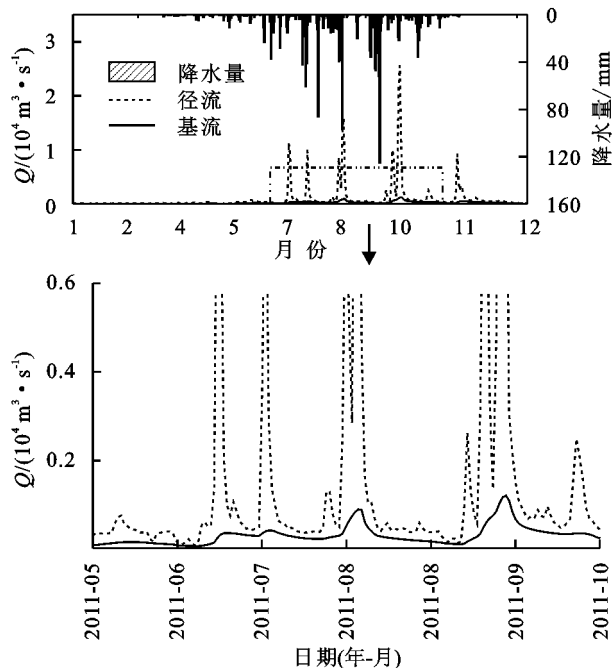


图 6 渠江流域 2011 年径流、基流过程线

3.2.2 全球气候指数 能量输送引起的大气环流影响全球气候变化,在厄尔尼诺和拉尼娜事件影响下风向和洋流发生逆转,全球出现多种极端气候,而气候

变化势必会改变水文循环中降水、径流、蒸发或下渗的发生。图 10 为 2007—2018 年月基流与同期气候指数的相关性,整体来看弱相关及以上(≥ 0.2)占比为 50.0%,但只有 11.1%的相关系数达到中等程度相关及以上(≥ 0.4),月基流与 AAO、PNA 相关性整体上更强。从季节尺度来看,冬、夏两季基流与气候指数的相关性更高,且 12 月至翌年 2 月多数为正相关,而夏季基流与气候指数较多呈现负相关。

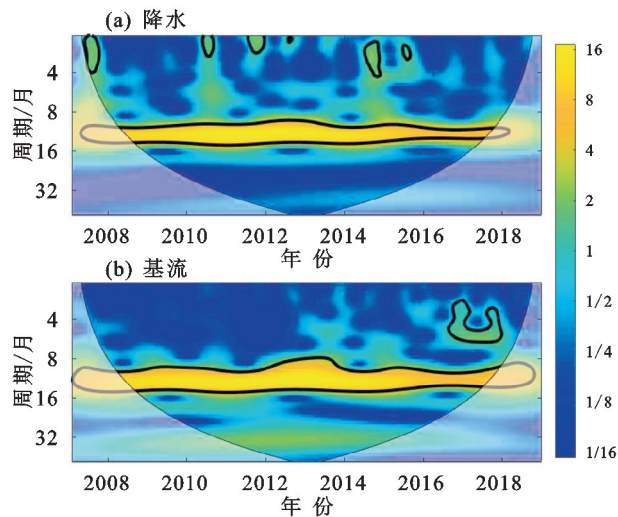


图 7 渠江流域 2007—2018 年降水、基流小波周期图

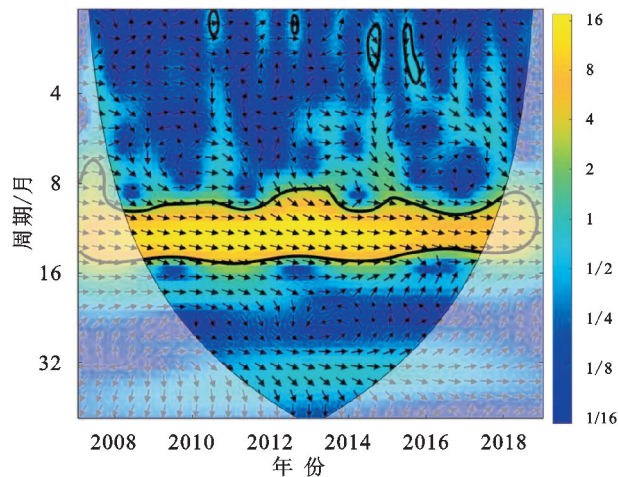


图 8 渠江流域 2007—2018 年降水—基流交叉小波功率谱

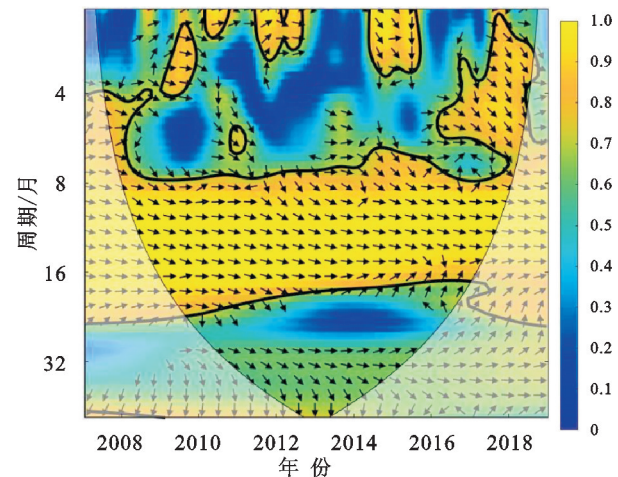


图 9 渠江流域 2007—2018 年降水—基流小波相干凝聚图

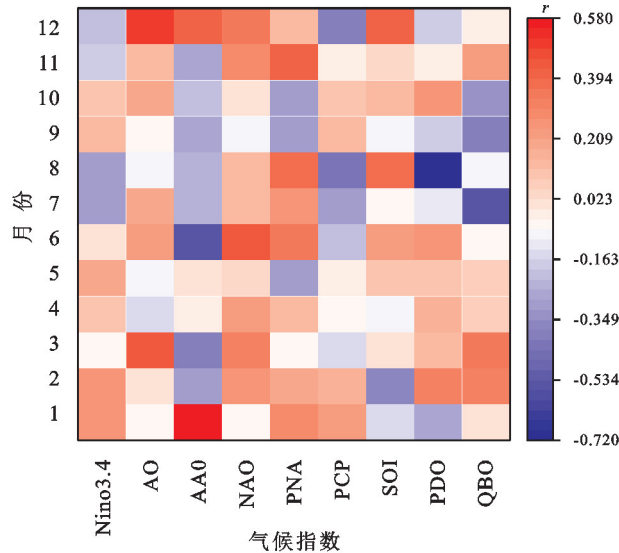


图 10 月基流和全球气候指数相关性

气候变化对水文过程具有一定的延后影响,为了得到变化条件下研究区基流对气候的响应,本研究中分析了基流相对于同期气候指数滞后 1,2,3,4,5,6,8,10,12 个月情景下的相关性^[21]。可以看出,随着滞后月份的增加,相关系数达到中等程度及以上的比例相对提升,但是整体相关性只有在滞后 8~10 个月的时候有明显提高。图 11 分别为月基流序列滞后 3,8,10,12 个月时与全球气候指数之间的相关系数,可以看出当发生滞后尤其是基流滞后 10 个月时相关系数整体上有较大提升。由此说明,全球气候的变化影响流域水文过程,基流对气候指数变化的响应存在有一定的滞后性,而且随着滞后时间的延长二者之间的相关性更高。

4 讨论

河川基流作为水资源的一部分也随着气候变化及人类扰动发生相应的改变,为了研究渠江流域基流的变化特征,本研究中使用 3 类 9 种数值模拟方法对基流进行分割,而基流作为水文水资源的研究热难点,无法进行实测等科学的论证,所以本文中仅以通过流量过程分析计算得到的枯水指数作为衡量标准,得出 F4 滤波法在渠江流域的适用性优于其他方法的结论。时间步长法和滑动平均值法的平均极值比分别为 1.86 和 2.11,离散程度较高,分析原因可能是 2 种分割方法均需要设定一定的时间间隔来选取该段时间内的流量最小值,而水文现象的随机性和不确定性以及近年来极端降水的发生,导致基流分割的起伏波动较大。同时,在本研究中对滤波参数(α)分别取 0.80,0.85,0.90,0.95 值并经 1,2,3 次滤波试算后选取 0.95、 $N=3$ 进行基流分割,张泳华等^[22]在东江流域的基流分割中经过取值对比,最后同样选择 $\alpha=0.95$ 进行正—反—正 3 次滤波;董晓华等^[23]对三峡

水库的入库流量进行分析时也发现,数字滤波法优于平滑最小值法,其滤波参数(α)选择推荐经验值 0.925。在黄土高原流域,多数研究者^[24-25]也认为,数字滤波法在基流分割的应用上更加稳定可靠,且分割

结果更符合实际的基流情况,可见数字滤波法的应用极具普适性,但是由前人得到的经验参数并不一定适合于每个研究区,根据研究区的特征来试算确定适当的滤波参数是基流分割的关键。

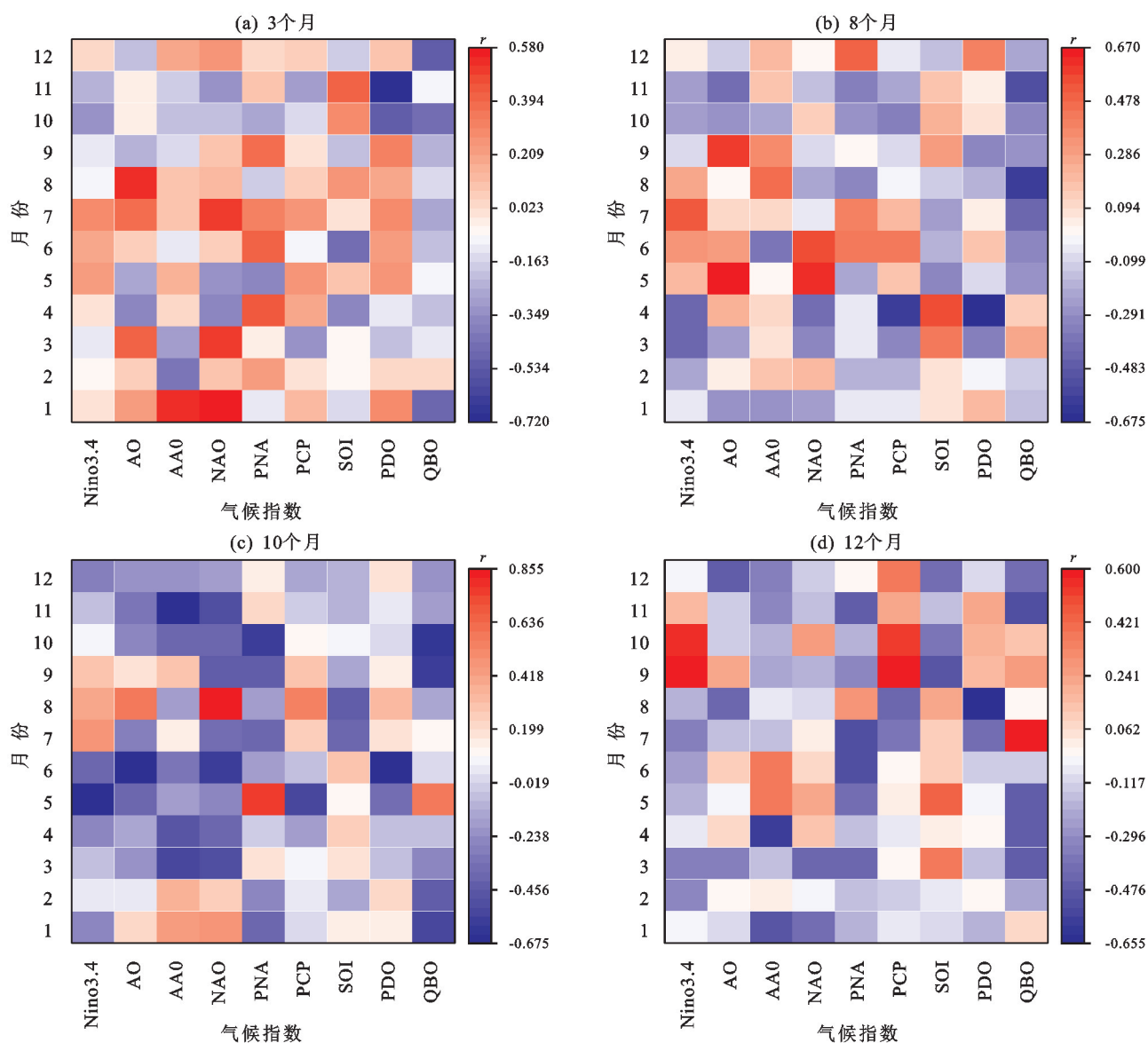


图 11 月基流和滞后不同月份全球气候指数相关性

基流对降水的响应存在时滞性,从降水基流过程线可以直观看出,基流峰值的出现总是滞后于降水峰值 0~2 个月,而根据降水—基流小波相干凝聚图可以看出箭头均为向右的正相位及 0~45° 相位指向,说明基流对降水的响应滞后 0~1.5 个月。宋小园^[26]在锡林河流域的研究也表明,基流对降水存在 0~1.5 个月的滞后期,最长滞后时间为 4.5 个月;党丽娟等^[27]对黄土丘陵区康沟流域进行分析时发现,泉水对降水的响应滞后 22~32 天;李倩等^[28]在对开都河和玛纳斯河的研究中发现,前者基流与降水峰值出现的时间基本重叠,而玛纳斯河基流峰值较降水峰值相差 2 个月左右;李俊等^[29]在对南方九曲水流域

进行径流对降水的时滞响应时得到,基流年均滞后时长为 6.4 天的结论,这反映了不同流域径流的时滞特点普遍存在且大部分都存在 1 个月左右的滞后,与本研究中华江流域基流滞后时间类似,而具体滞后时间不同,可能是流域不同补给特征、降水时程分配特征以及不同的地貌、下垫面特征等造成。

流域气候、植被覆盖、地形地貌、土壤和下渗特征、蒸散发和人类扰动等对基流的补给与损失都有一定的影响,本文仅通过统计学方法分析了降水、全球气候指数和基流序列的相关性,其他气候因素以及人类活动对基流时空变化带来的影响也有待进一步研究分析。

5 结论

(1)结合枯水指数分析9种基流分割得到的结果,F2、F3数字滤波法分割结果偏低且误差大,F1、F4滤波法分割曲线更符合流量过程线的峰谷波动,时间步长法和滑动最小值法得到的基流值偏高,结合枯水指数分析得到F4滤波法更适合渠江流域基流分割。

(2)多年平均月降水、径流和基流变化趋势具有较高一致性,年内存在7月和9月双汛期,多年平均基流指数为31.5%,由于流域下垫面的差异以及降水时程分配特征不同,径流与基流出现峰值的时间相对于降水存在1~2个月的时间滞后性。

(3)渠江流域降水和基流变化时频上存在共振周期且同向变化,时间上基流滞后于降水序列。气候变化影响流域水文过程,当基流相对于同期气候指数滞后不同月份时,随着滞后时间的增加两者之间的相关性均有所提升。

参考文献:

- [1] 陈利群,刘昌明,李发东.基流研究综述[J].地理科学进展,2006,25(1):1-15.
- [2] 钱开铸,吕京京,陈婷,等.基流计算方法的进展与应用[J].水文地质工程地质,2011,38(4):20-25,31.
- [3] Lott D A, Stewart M T. Base flow separation: A comparison of analytical and mass balance methods[J].Journal of Hydrology,2016,535:522-533.
- [4] Zhang J L, Zhang Y Q, Song J X, et al. Evaluating relative merits of four baseflow separation methods in Eastern Australia[J].Journal of Hydrology,2017,549:252-263.
- [5] 周嘉欣,丁永建,吴锦奎,等.基流分割方法在疏勒河上游流域的应用对比分析[J].冰川冻土,2019,41(6):1456-1466.
- [6] 吴珍妮,穆兴民,高鹏,等.北洛河上游基流分割适宜性方法及基流特征[J].人民黄河,2019,41(3):94-99.
- [7] Xie J X, Liu X M, Wang K W, et al. Evaluation of typical methods for baseflow separation in the contiguous United States[J].Journal of Hydrology,2020,583:e124628.
- [8] 张革,刘德富,宋林旭,等.不同基流分割方法在香溪河流域的应用对比研究[J].长江流域资源与环境,2013,22(2):164-171.
- [9] 陈帅,鲁程鹏,李姝蕾,等.长江干流朱沱站一大通站基流变化特征[J].南水北调与水利科技,2015,13(5):823-826,836.
- [10] Qian K Z, Wan L, Wang X S, et al. Periodical characteristics of baseflow in the source region of the Yangtze River: Periodical characteristics of baseflow in the source region of the Yangtze River[J].Journal of Arid Land,2012,4(2):113-122.
- [11] Ayers J R, Villarini G, Jones C, et al. Changes in monthly baseflow across the U.S. Midwest[J].Hydrological Processes,2019,33(5):748-758.
- [12] 杨倩楠.黄河中游不同地貌区基流变化及对生态建设的响应[D].西安:西安理工大学,2019.
- [13] 王曼玉.潮河流域基流变化特征及其影响因素分析[D].北京:北京林业大学,2018.
- [14] 殷书梅,赵礼涛,张艳敏.汉江流域基流变化及主要气象影响因素分析[J].水电能源科学,2022,40(7):23-26,18.
- [15] 朱嘉伟.渠江水系河网探究[J].水利规划与设计,2011(2):48-50,53.
- [16] 孟泽坤,王彬.渠江流域降水时空分布特征[J].水土保持学报,2022,36(2):209-218.
- [17] 林凯荣,陈晓宏,江涛,等.数字滤波进行基流分割的应用研究[J].水力发电,2008,34(6):28-30,88.
- [18] 孙卫国,程炳岩.交叉小波变换在区域气候分析中的应用[J].应用气象学报,2008,19(4):479-487.
- [19] 黄珊珊,董前进.长江流域上中下游基流演变规律及与降水量关联分析[J].水电能源科学,2022,40(7):10-13.
- [20] 韦晓伟,张洪波,辛琛,等.变化环境下流域气象水文要素的相关性演化[J].南水北调与水利科技(中英文),2020,18(6):17-26.
- [21] 王桂钢,周可法,孙莉,等.天山山区草地变化与气候要素的时滞效应分析[J].干旱区地理,2011,34(2):317-324.
- [22] 张泳华,刘祖发,赵铜铁钢,等.东江流域基流变化特征及影响因素[J].水资源保护,2020,36(4):75-81.
- [23] 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,2010,32(2):1-4.
- [24] 亢小语,张志强,陈立欣,等.自动基流分割方法在黄土高原昕水河流域适用性分析[J].北京林业大学学报,2019,41(1):92-101.
- [25] 豆林,黄明斌.自动基流分割方法在黄土区流域的应用研究[J].水土保持通报,2010,30(3):107-111,133.
- [26] 宋小园.气候变化和人类活动影响下锡林河流域水文过程响应研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2016.
- [27] 党丽娟,徐勇,徐学选.黄土丘陵区地表水和地下水对降水的响应:以康沟小流域为例[J].地理科学进展,2011,30(1):87-94.
- [28] 李倩,李兰海,尚明,等.天山中段南北坡典型流域基流及其影响因素[J].干旱区研究,2015,32(1):29-34.
- [29] 李俊,盛菲,刘士余,等.赣南九曲水流域基流变化特征及其对降水的响应[J].应用生态学报,2022,33(8):2251-2259.