

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbtdqk.2020.0030

莫崇勋,谢燕平,班华珍,等.不同基流分割方法在澄碧河的适用性探讨[J].南水北调与水利科技(中英文),2020,18(2):86-92. MO C X, XIE Y P, BAN H Z, et al. Discussion on the applicability of different baseflow segmentation methods in Chengbi River[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(2): 86-92. (in Chinese)

不同基流分割方法在澄碧河的适用性探讨

莫崇勋^{1,2,3}, 谢燕平^{1,2,3}, 班华珍^{1,2,3}, 阮俞理^{1,2,3}, 孙桂凯^{1,2,3}, 黄亚^{1,4}

(1. 广西大学 土木建筑工程学院, 南宁 530004; 2. 工程防灾与结构安全教育部重点实验室, 南宁 530004; 3. 广西防灾减灾与工程安全重点实验室, 南宁 530004; 4. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

摘要:根据澄碧河流域平塘站 1963—2017 年日径流资料,采用最小滑动法、时间步长法和数字滤波法 3 类方法进行基流分割研究。结果表明:基流总量方面,数字滤波法对基流分割的结果优于最小滑动法和时间步长法,其中, Boughton-Chapman 滤波法分割的效果最好, Nash-Sutcliffe 效率系数为 0.930, 平均相对误差为 2.406%; 统计特征方面, 3 类方法对不同水平年均有一定辨识能力, 且年代际变化基本一致, 呈波动趋势, 时间步长法偏差程度最小, 最小滑动法和数字滤波法偏差程度大, 整体比较平稳; 基流过程线方面, 3 类方法在汛期的表现差异较大, 非汛期比较接近, 数字滤波法分割出的结果较平滑缓慢, 而最小滑动法和时间步长法分割出的结果拐点较多, 数字滤波法中的 Boughton-Chapman 滤波法比较符合基流迟滞特征。综上, Boughton-Chapman 滤波法在澄碧河基流分割中较为适宜。

关键词:澄碧河流域; 基流分割; 数值模拟法

中图分类号: TV121 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Discussion on the applicability of different baseflow segmentation methods in Chengbi River

MO Chongxun^{1,2,3}, XIE Yanping^{1,2,3}, BAN Huazhen^{1,2,3}, RUAN Yuli^{1,2,3}, SUN Guikai^{1,2,3}, HUANG Ya^{1,4}

(1. College of Civil and Architectural Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China;

2. Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety of Ministry of Education, Nanning 530004, China;

3. Guangxi Key Laboratory of Disaster Prevention and Engineering Safety, Nanning 530004, China;

4. China State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Catchment,

China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: This study applied the three methods such as minimum smoothing method, hydrograph separation program method and digital filter method to calculate baseflow using daily observed runoff data from 1963 to 2017 at Pingtang station in Chengbi River basin. The results indicated that the digital filter method exhibited better performance than the minimum smoothing method and hydrograph separation program method. The value of the error evaluation indexes including the Nash-Sutcliffe efficiency coefficient was 0.930 and the average relative error was 2.406%, respectively. The results also demonstrated that the Boughton-Chapman filter method had the highest simulation accuracy. In respect of statistical characteristics, three kinds of methods had certain identification ability in different year levels. Their separation results appeared the same and stable fluctuation trend at

收稿日期: 2019-05-24 修回日期: 2019-09-20 网络出版时间: 2019-09-27

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20190927.1421.014.html>

基金项目: 国家自然科学基金(51569003; 51609041); 广西自然科学基金(2017GXNSFAA198361); 广西研究生教育创新计划资助项目(YCBZ2019022, YCBZ2018023)

作者简介: 莫崇勋(1974—), 男(壮族), 广西忻城人, 教授, 博士生导师, 主要从事水文水资源方面研究。E-mail: 756298501@qq.com

通信作者: 阮俞理(1992—), 男(壮族), 广西南宁人, 博士研究生, 主要从事水文水资源方面研究。E-mail: yuliruan777@163.com

interdecadal scale. The deviation degree of the hydrograph separation program method was smaller than that of the minimum smoothing method and digital filter method. In terms of discharge hydrograph, the performance of the three methods was quite discrepant in flood season but relatively close in non-flood season. The simulation results of the digital filter methods were smoother compared with the other two types of methods. Particularly, Boughton-Chapman filter method in the digital filter method was consistent with the hysteresis characteristics of baseflow. In conclusion, the Boughton-Chapman filter method was more suitable in the division of Chengbi River baseflow.

Key words: Chengbi River basin; baseflow separation; numerical simulation method

国际上广泛将总径流划分为直接径流和基流^[1-2],直接径流对降水响应快速,而基流响应缓慢,它是枯水期径流的主要水源,对维系河道生态平衡、保护水环境、合理开发利用水资源等具有重要意义,对基流进行分割探讨能为地下水、流域污染、产汇流计算、水文模拟等研究提供参考。基流的定义具体研究有不同的理解^[3],本文认为基流来源于地下水和其他延迟部分的径流。

基流分割是水文水资源研究的难点和热点,经过几十年的发展,基流分割方法有直接分割法、水量平衡法、数值模拟法等^[4]。其中,直接分割法主观性强,工作量大,不适用于长时间尺度的基流分割^[5];水量平衡法参数较多,公式复杂,难以优化^[6];数值模拟法计算效率高,可重复性强^[5,7],应用比较广泛,但对不同流域的适用性存在差异,主要包括数字滤波法、时间步长法、平滑最小值法等。陈文艳等^[8]采用数字滤波法对新兴江流域的场次洪水进行基流分割,将分割后的地面径流与降雨建立关系曲线图应用于洪水拟合,证明数字滤波法虽然缺乏物理机制,但结果可信度高;董薇薇等^[9]研究表明平滑最小值相比递归数字滤波法更适用于祁连山地区;亢小语等^[10]将数字滤波法、时间步长法、基流指数法等多种方法应用于黄土高原昕水河流域,综合对比认为数字滤波法较为适宜,Arnold等^[11]建议正反交替滤波可抵消相位位移以校正波

峰和波谷位移,对序列进行反复滤波计算,且汛期高峰持续时间越长的,需更多次的滤波才能分割出较为稳定的基流。

澄碧河上游岩溶发育,明暗河交替,地下水和地表水相互交换过程复杂,水文过程的机理探索是研究难点,基流大部分由地下水组成,对基流进行量化能为岩溶区流域水资源调查与评价、开发与利用、保护与管理等工作提供基础。因此,论文尝试采用最小滑动法、时间步长法和数字滤波法 3 类方法对澄碧河基流进行探讨。

1 研究区域概况

澄碧河隶属西江水系,发源于广西凌云县青山一带,流经下甲、浩坤、平塘等于百色市汇入右江,全流域面积 2 087 km²,干流河长 151 km。澄碧河流域地处亚热带季风季候区,降水大部分(超过 85%)集中在 5—9 月,多年平均降水量为 1 560 mm,多年平均径流量 11.92 m³。上游浩坤一带处于我国西南岩溶区,岩溶面积 1 121 km²,占全流域面积的 53.7%,由于岩溶作用,河道明暗交替,暗河总长 25 km,地下储水丰富,是河道非汛期主要来源,澄碧河平塘站流域见图 1(a)(虚线表示暗河)。流域地质分布为三叠系百缝组泥岩、细砂岩地层,根据透水性将土壤划分为 A、B、C、D 四组,每组具有相似的径流潜力,澄碧河平塘站流域土壤水文分布见图 1(b)。

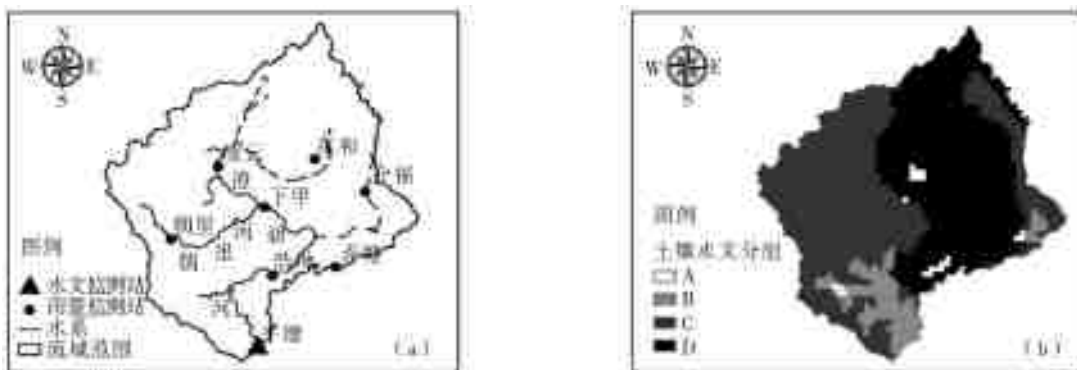


图 1 澄碧河平塘站流域

Fig. 1 Pingtang station's watershed map of Chengbi River

在土壤完全湿润条件下, A 组下渗率大(7.6~11.4), B 组具有中等下渗率(3.8~7.6), C 组下渗率(1.3~3.8)小, D 组下渗率(0~1.3)很小。流域内主要分布 C 和 D 组, 具有较高的径流潜力。

2 研究方法

2.1 最小滑动法

最小滑动法(minimum smoothing method, MSM)是英国水文研究所(Institute of Hydrology)于 1980 年提出^[12]。该方法将连续日径流序列划分为 $365/N$ 个时段, 每个时段最小流量值乘上拐点因子与相邻时段值对比, 若小于相邻时段值, 该点所在位置即为拐点, 重复以上过程找出所有拐点, 直线连接得出基流过程线。拐点因子一般取 0.9, 采用试算法确定分割时段天数 N 为 6 d。

2.2 时间步长法

时间步长法(hydrograph separation program, HYSEP)是 Pettyjohn 和 Henning 提出的, 并由美国地质调查局开发计算程序推广使用^[13]。该方法按计算方式分为固定间隔法(Fixed, 简称为 FI)、滑动间隔法(Slide, 简称为 SL)和局部最小值法(Localmin, 简称为 LM), 并按经验公式计算退水时长

$$N = A^{0.2} \quad (1)$$

式中: A 为流域面积, km^2 ; N 为退水持续时间, d, 通常介于 3~11 d, 与 $2N$ 最接近的奇数。平塘站控制的流域面积为 $1\,326\text{ km}^2$, 代入计算得时间间隔为 11 d。

2.3 数字滤波法

数字滤波法是 1979 年 Lyne 和 Hollick 提出的, 并由 Nathan 和 McMahon 应用到水文的基流分割^[14], 主要包括 Chapman-Maxwell 滤波法^[4]、Boughton-Chapman 滤波法^[15]、双参数递归数字滤波法^[16-17]。

2.3.1 Chapman-Maxwell 滤波法

1996 年, Chapman 和 Maxwell 假设 $t-1$ 时刻的地面径流和基流的加权平均为 t 时刻基流, 提出 Chapman-Maxwell 滤波法(记为 F1), 方程为

$$b_t = \frac{k}{2-k} b_{t-1} + \frac{1-k}{2-k} Q_t \quad (2)$$

式中: k 为退水系数, 推荐取值 $0.9 \sim 0.95$ ^[11]; Q_t 为 t 时刻总径流, m^3/s ; b_t 为 t 时刻基流量, m^3/s 。分割结果受退水系数和滤波次数选取的影响^[18-19], 需具体分析。

2.3.2 Boughton-Chapman 滤波法

Boughton-Chapman 滤波法(记为 F2)是 Boughton

于 1993 年提出, 1996 年 Chapman 等对其进行了改进, 使分割更平滑, 方程为

$$b_t = \frac{k}{1+C} b_{t-1} + \frac{C}{1+C} Q_t \quad (3)$$

式中: C 为固定值, 一般取 0.15, 其余参数意义同上。

2.3.3 双参数递归数字滤波法

该方法(记为 F3)的优势在于可通过 BFI_{\max} 指数取值来调整基流过程, 计算公式为

$$b_t = \frac{(1-\text{BFI}_{\max}) \times k \times b_{t-1} + (1-k) \times \text{BFI}_{\max} \times Q_t}{1-k \times \text{BFI}_{\max}} \quad (4)$$

式中: BFI_{\max} 表示基流指数的最大值, 不能直接观测得到, Eckhardt 经有限流域研究对不同的水文地质给出了推荐值 0.8(多孔隙含水层的常年性排水流域)、0.5(多孔隙含水层的季节性排水流域)、0.25(硬质基岩含水层的常年性排水流域)^[16], 其余参数意义同上。

2.4 结果评价方法

基流分割结果的可靠性评价目前主要从基流总量和流量过程线两方面进行验证, 基流总量用基流指数(Baseflow Index, 简称 BFI, 表示年基流量占年总径流量的百分比^[16])表示。枯水指数是表征地下水补给河道的重要指标, 基流实际观测值用枯水指数(Q_{90}/Q_{50})与总径流量的乘积估算^[2], 并采取 Nash-Sutcliffe 效率系数、平均相对误差、灰色关联度等指标进行定量评估^[20-21]。其中, Q_{90} 和 Q_{50} 由日流量历时曲线确定。过程线根据基流年际变化幅度小、过程线平滑、基流量接近总径流量、基流退水迟滞等特点进行定性比选^[22]。因此, 论文采用枯水指数法估算基流实际观测值, 进而用 Nash-Sutcliffe 效率系数(E)和平均相对误差(MRE)作为实际观测值和各方法分割值对比的评价指标, 计算公式为

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{a(i)} - Q_{b(i)})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{a(i)} - Q_{am})^2} \quad (5)$$

式中: E 为 Nash-Sutcliffe 效率系数, 越接近 1 精度越高; $Q_{a(i)}$ 为第 i 年实际年基流量, m^3 ; $Q_{b(i)}$ 为第 i 年分割出的基流量, m^3 ; Q_{am} 为实际年平均基流量, m^3 。

$$\text{MRE} = \frac{Q_{as} - Q_{am}}{Q_{am}} \times 100 \quad (6)$$

式中: MRE 为平均相对误差, %, 越接近 0 效果越好; Q_{as} 为分割出的年平均基流量, m^3 ; Q_{am} 实际年平均基流量, m^3 。

3 结果分析

论文基于澄碧河平塘站 1963—2017 年日径流数据进行基流分割研究。为了更好展示和分析结

果,基于水文频率分析法^[23-24]选取了丰(2012年)、平(1987年)、枯(1985年)水平年,对各方法的参数选取进行分析。在此基础上,采用了前述方法对澄碧河基流进行分割,并对其基流总量和基流过程线进行对比分析。

3.1 参数选取

初步试算发现,不同滤波方法的参数变化对分割结果的影响有差别, F_1 的参数取值与BFI值呈非线性负相关关系,当 $k < 0.8$ 时,不同水平年的BFI值趋于0.5,当 $k > 0.8$ 差别相对明显(图2(a)),且

k 对过程线的涨落影响显著, k 取值越大,过程线波动越大,峰型逐渐尖瘦; F_2 的参数取值与BFI值呈非线性正相关关系(图2(b)), k 对过程线影响与 F_1 类似,见图3; F_3 的改进之处在于可直接改变 BFI_{max} 调整BFI值和过程线,灵活性强,而取值影响相对微弱(图2(c)), BFI_{max} 与BFI值呈线性正相关关系(图2(d)),随着 BFI_{max} 的减小,极值逐渐减小,基流过程趋于平滑,基流退水越迟缓。随滤波次数的增加,BFI值变小显著,过程线起涨衰退变化幅度小,基流退水越缓慢,见图4。

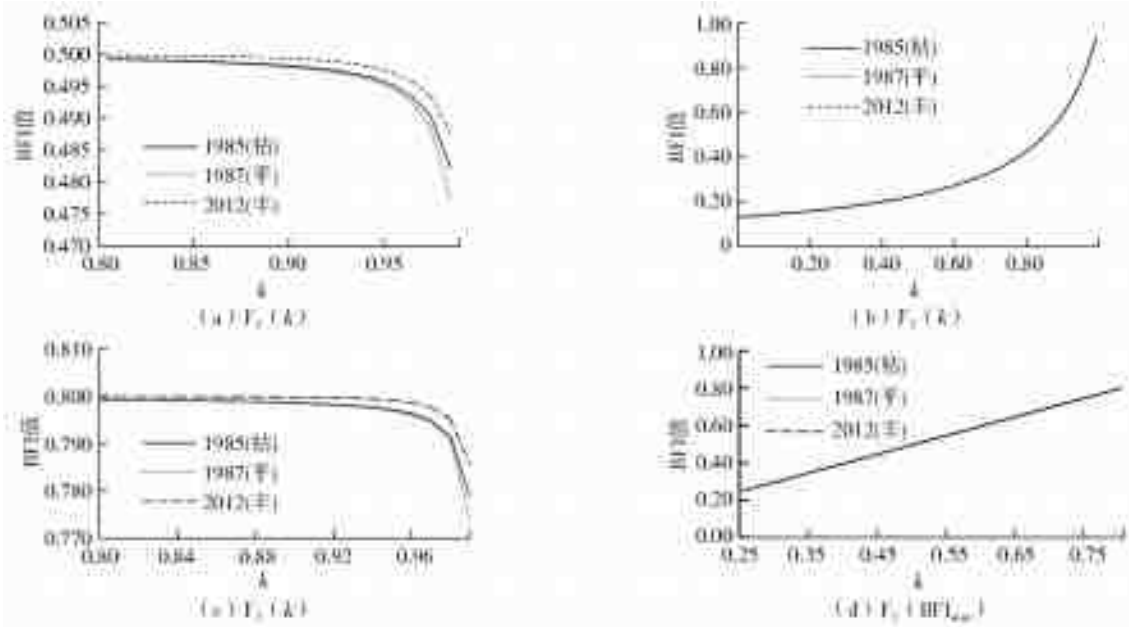


图2 系数与BFI值关系曲线

Fig. 2 Relation curve of water withdrawal coefficient and BFI

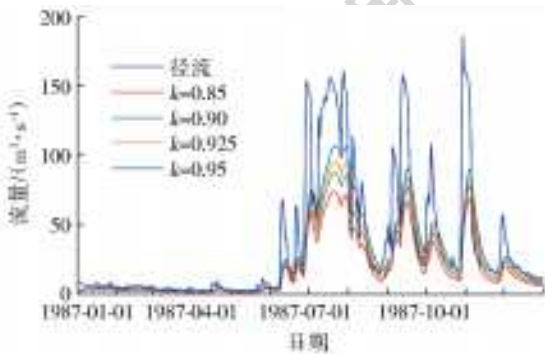


图3 F2不同滤波参数分割

Fig. 3 Results of F2 based on different filtering times

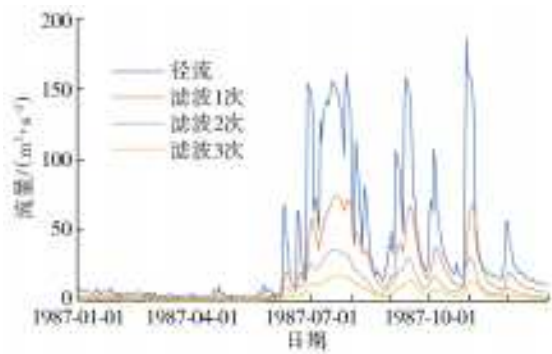


图4 F1最佳组合分割

Fig. 4 Optimal combination separated by F1

此外,当前后两天径流量差异较大时,3种数字滤波方法均出现高估的现象,即同一时段基流量大于总径流量,这是不合理的^[25]。综合滤波参数和次数的不同组合试算,滤波参数取0.925, F_1 正反2次滤波、 F_2 正一反一正3次滤波、 F_3 经6至8次滤波分割出的结果总量上相对接近实测值,过程线平滑稳定且无高估现象,拟合效果较好。

3.2 基流指数对比

由表1、2可知,各方法分割的结果差异明显,HYSEP法BFI值相对偏大,MSM法和数字滤波法相对接近。在相同年代际,3种HYSEP法的BFI值相近且偏大,3种数字滤波法和MSM法均有差别;不同年代际,7种方法的BFI值的变化基本一致,呈波动趋势,但整体比较平稳,结果具有一定的

可靠性。不同水平年,MSM 法和 HYSEP 法的结果均有差异,而数字滤波法的结果差异相对较小,说明各方法对不同水平年均有一定辨识能力。

表 1 不同年代际基流指数值对比
Tab. 1 Comparison of baseflow Indexes under decadal variation

时段	MSM 法	HYSEP 法			数字滤波法		
		FI	SL	LM	F1	F2	F3
1963—1969	0.401	0.680	0.651	0.660	0.324	0.327	0.331
1970—1979	0.472	0.689	0.680	0.675	0.377	0.364	0.376
1980—1989	0.382	0.557	0.537	0.541	0.280	0.312	0.291
1990—1999	0.479	0.656	0.649	0.641	0.266	0.293	0.315
2000—2009	0.379	0.606	0.577	0.575	0.225	0.284	0.269
2010—2017	0.395	0.563	0.545	0.542	0.101	0.285	0.210
1963—2017	0.421	0.627	0.609	0.608	0.264	0.310	0.300
平均值	0.418	0.626	0.607	0.606	0.262	0.311	0.299

表 2 不同水平年基流指数值对比
Tab. 2 Baseflow Indexes in different hydrological years

年份	Q ₉₀ / Q ₅₀	MSM 法	HYSEP 法			数字滤波法		
			FI	SL	LM	F1	F2	F3
1985	0.241	0.364	0.528	0.528	0.526	0.248	0.294	0.258
1987	0.181	0.317	0.551	0.508	0.552	0.248	0.294	0.206
2012	0.107	0.322	0.556	0.592	0.556	0.124	0.295	0.165
平均值	0.176	0.334	0.545	0.543	0.544	0.207	0.295	0.210

7 种方法年 BFI 值的统计值见表 3,进一步展示了各分割结果的差异性。从平均值看,FI 的 BFI 值最大,为 0.609,F2 的最小,为 0.271;从极值比看,F1 的比值最大,为 8.084,3 种 HYSEP 法的比值相近最小为 1.763,说明分割出的年基流量差异大;从标准差看,7 种方法的偏差程度小,说明年基流指数上下波动幅度小,分割结果稳定,相对差异较大的是数字滤波法,F1 的变差系数最大,为 0.493。

表 3 不同方法年基流指数统计特征
Tab. 3 Statistical characteristics of annual baseflow indexes

特征参数	MSM 法	HYSEP 法			数字滤波法		
		FI	SL	LM	F1	F2	F3
平均值	0.407	0.609	0.592	0.590	0.268	0.271	0.296
极大值	0.675	0.753	0.774	0.746	0.504	0.446	0.516
极小值	0.165	0.427	0.420	0.385	0.062	0.058	0.165
极值比	4.080	1.763	1.844	1.937	8.084	7.673	3.123
标准差	0.118	0.086	0.085	0.088	0.132	0.112	0.096
变差系数	0.290	0.140	0.143	0.148	0.493	0.415	0.323

3.3 流量过程线对比

以 1985、1987、2012 年作为枯(P=75%)、平(P=50%)、丰(P=25%)水平年的典型年,对比分析各方法基流分割过程线,进一步认识分割结果的合理性,基流过程线见图 5。

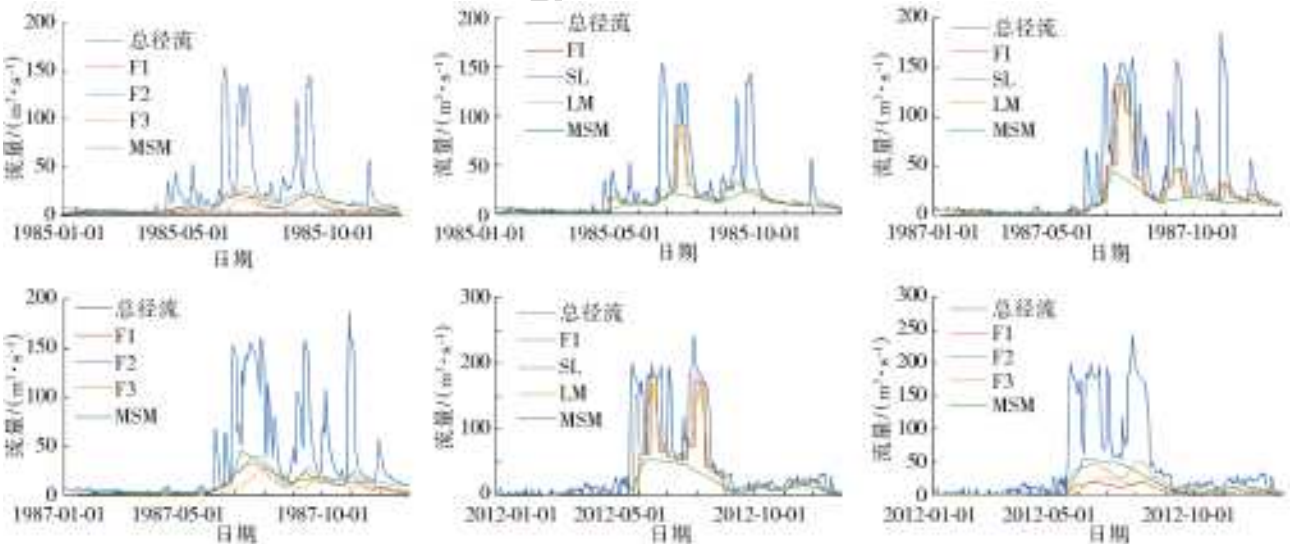


图 5 7 种方法基流分割过程线
Fig. 5 Discharge hydrograph using 7 methods

由图 5 可知,不同水平年,7 种方法分割出的基流过程相似,非汛期均比较平稳接近,而汛期差异显著,数字滤波法和 MSM 法对基流表现出较好的辨识能力。HYSEP 法的过程线在汛期变化幅度最大,起涨趋势接近总径流过程,FI 分割出的基流过程线是一系列的阶梯状直线,SL 法、LM 法和 MSM

法的基流过程为一系列的折线,4 种方法折点较多,MSM 法相对平滑;3 种滤波法反复滤波后得出的流量过程线均比较光滑平缓,在非汛期的分割出的基流值相对偏小,汛期基流涨落表现迟缓,不同之处是基流峰值的出现时间。根据流域下垫面特性分析,流域气候湿润,降水丰沛,地处岩溶区和断褶带内,

沟谷发育,含水层构造复杂,植被茂盛,土壤完全湿润后下渗率小,径流潜力高,使得直接径流产汇流快速,而对基流汇出产生阻尼和迟滞效应^[26],基流波峰出现时间应滞后于总径流,F2分割出的基流过程比符合这一特征。各方法在汛期的表现差异分析如下:澄碧河流域季风气候显著,汛期降水集中,地表径流退水持续时间长,HYSEP法滑动步长内地面径流仍未消退,峰值接近总径流;MSM法是最低流量连线分割基流,相对总径流同涨缓落,可能包含部分前期退水;数字滤波法经反复滤波,衰减了高频信号,使得过程线比较平滑,由于滤波次数的不同,波峰波谷的相位位移,导致3种方法的基流消退起点不同。

3.4 可靠性验证

根据2.4节,将枯水指数与年总径流量的乘积作为年总基流量的实际观测值,用于与7种方法的分

割值进行对比,并采用Nash-Sutcliffe效率系数和平均相对误差作为评价指标,结果见表4。有表可知,整体上数字滤波法的分割结果较优,F2分割的效果最好,Nash-Sutcliffe效率系数为0.930,平均相对误差为2.406%,其次为F1法,Nash-Sutcliffe效率系数为0.887,平均相对误差为-1.996%,分割结果略低于实测值;HYSEP法和MSM法分割结果均不理想,且误差较大。综合各方法的年代际和水平年BFI值,以及基流过程线特征分析,由于数字滤波法通过反复滤波衰减高频信号可提高分割精度,故表现理想,但衰减程度不一样,这也是3种数字滤波法的结果差异的原因;而HYSEP法的地表径流退水时长由经验公式计算得出,在汛期时段内的地表径流未消退完,从而导致分割结果偏大,MSM法的分割过程也可能包含前期洪水,需进一步实测验证。

表4 7种分割方法的验证结果

Tab. 4 Verified results estimated with 7 baseflow separation methods

评价指标	MSM法	HYSEP法			数字滤波法		
		F1	SL	LM	F1	F2	F3
E	0.172	0.009	0.119	0.115	0.887	0.930	0.789
MRE/%	103.860	258.426	191.500	190.445	-1.996	2.406	27.282

4 结论

(1)最小滑动法,时间步长法和数字滤波法3类7种方法对丰、平、枯水平年均有一定辨识能力,其分割出的基流指数年代际变化趋势基本一致。

(2)基流总量方面,数字滤波法的分割结果较优,其中,F2分割的效果最好,Nash-Sutcliffe效率系数为0.930,平均相对误差为2.406%;最小滑动法和时间步长法的基流指数值偏大。

(3)基流过程线方面,数字滤波法的分割结果比较平滑缓慢,而最小滑动法和时间步长法和的拐点较多;数字滤波法中的F2相对比较符合流域下垫面对基流的迟滞和阻尼效应。

(4)最小滑动法、时间步长法和数字滤波法的参数选取对基流分割结果有一定影响,需要进一步深入研究以提高基流分割结果的精度。

参考文献(References):

[1] 李芳,靳少波,邹松兵,等. 黄河源区白河基流分割方法适用性分析[J]. 冰川冻土,2018,40(3):679-689. (LI F, JIN S B, ZOU S B, et al. Analysis of the applicability of baseflow separation method in Baihe River base, the source regions Yellow River[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(3): 679-689. (in Chinese))

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2018.0307.
 [2] SMAKHTIN V U. Low flow hydrology: a review[J]. Journal of Hydrology, 2001, 240(3): 147-186. DOI:10.1016/S0022-1694(00)00340-1.
 [3] 赵玉友,耿鸿江,潘辉学. 基流分割问题评述[J]. 工程勘察, 1996(2): 30-32, 36. (ZHAO Y Y, GENG H J, PAN H X. Review on the problem of baseflow separation[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 1996(2): 30-32, 36. (in Chinese))
 [4] 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 R H, WANG X G, ZHENG W. Research progress in baseflow separation methods[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016, 36(5): 352-359. (in Chinese)) DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2016.05.061.
 [5] 徐磊磊,刘敬林,金昌杰,等. 水文过程的基流分割方法研究进展[J]. 应用生态学报, 2011, 22(11): 3073-3080. (XU L L, LIU J L, JIN C J, et al. Baseflow separation methods in hydrological processes: a view[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(11): 3073-3080. (in Chinese)) DOI: 10.13287/j.1001-9332.2011.0433.
 [6] WITTENBERG H. Baseflow recession and recharge as nonlinear storage processes[J]. Hydrological Processes, 1999, 13(5): 715-726. DOI: 10.1002/(SICI)1099-1085(19990415)13:53.0.CO;2-N.
 [7] AHIABLAME L, CHAUBEY I, ENGEL B, et al. Estimation of annual baseflow at ungauged sites in Indiana

- USA[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 476: 13-27. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2012.10.002.
- [8] 陈文艳, 夏达忠, 张行南. 数字滤波法分割基流的论证[J]. *水力发电*, 2014, 40(2): 37-40. (CHEN W Y, XIA D Z, ZHANG X N. Argument for base flow separating by digital filtering method[J]. *Water Power*, 2014, 40(2): 37-40. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.0559-9342.2014.02.012.
- [9] 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 W W, DING Y J, WEI X, Qilian Mountains, 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)) DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2014.0079.
- [10] 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. (KANG X Y, ZHANG Z Q, CHEN L X, et al. Applicability of automatic baseflow separation method in Xinshui River basin of Loess Plateau, northern china[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2019, 41(1): 92-101. (in Chinese)) DOI: 10.13332/j.1000-1522.20180087.
- [11] ARNOLD J G, ALLEN P M. Automated methods for estimating baseflow and ground water recharge from streamflow records[J]. *Jawra Journal of the American Water Resources Association*, 1999, 35(2): 411-424. DOI:10.1111/j.1752-1688.1999.tb03599.x.
- [12] BLOOMFIELD J P, ALLEN D J, GRIFFITHS K J. Examining geological controls on baseflow index (BFI) using regression analysis: An illustration from the Thames Basin, UK [J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 373(1): 164-176.
- [13] SLOTO R A, CROUSE M Y. HYSEP-A Computer program for streamflow hydrograph separation and analysis[R]. Lemoyne, Pennsylvania: USGS Water-resources Investigations Report 96-4040, 1996.
- [14] NATHAN R J M T A. Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses[J]. *Water Resources Research*, 1990, 26: 1465-1473. DOI:10.1029/WR026i007p01465.
- [15] CHAPMAN T G. Comment on "Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses" by R. J. Nathan and T. A. McMahon[J]. *Water Resources Research*, 1991, 27(7): 1785-1786. DOI: 10.1029/91WR01007.
- [16] ECKHARDT K. How to construct recursive digital filters for baseflow separation[J]. *Hydrological Processes*, 2005(19): 507-515. DOI:10.1002/hyp.5675.
- [17] SANTHI C A P M M. Regional estimation of base flow for the conterminous United States by hydrologic landscape regions[J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 351(1-2): 139-153. DOI:10.1016/j.jhydrol.2007.12.018.
- [18] A N R J M. Evaluation of automated techniques for baseflow and recession analyses[J]. *Water Resources Research*, 1990, 26(7): 1465-1473. DOI: 10.1029/WR026i007p01465.
- [19] 周星, 沈忱, 倪广恒, 等. 结合退水曲线的数字滤波基流分割方法[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2017, 57(3): 318-323. (ZHOU X, SHEN C, NI G H, et al. Digital filter baseflow separation method based on a master recession curve[J]. *Journal of Tsinghua University(Science and Technology)*, 2017, 57(3): 318-323. (in Chinese)) DOI:10.16511/j.cnki.qhdxxb.2017.26.016.
- [20] 焦玮, 朱仲元, 宋小园, 等. 基流分割方法在锡林河流域适用性分析[J]. *干旱区研究*, 2017, 34(1): 26-35. (JIAO W, ZHU Z Y, SOMG X Y, et al. Suitability analysis of Baseflow separation methods in Xilin River basin[J]. *Arid Zone Research*, 2017, 34(1): 26-35. (in Chinese)) DOI:10.13866/j.azr.2017.01.04.
- [21] 雷泳南. 窟野河流域河川基流演变特征及其驱动因素分析[D]. 北京: 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2012. (LEI Y N. Analysis on trend and driving factors of river base flow in Kuye Catchment [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Research Centre of Soil and Water Conservation and Environment, Ministry of Education), 2012. (in Chinese))
- [22] 陈帅, 鲁程鹏, 李姝蕾, 等. 长江干流朱沱站-大通站基流变化特征[J]. *南水北调与水利科技*, 2015, 13(5): 823-826. (CHEN S, LU C P, LI S L, et al. Variation characteristics of baseflow between Zhuntuo and Datong stations along the mainstream of Yangtze River [J]. *South-to-north Water Transfers and Water Science & Technology*, 2015, 13(5): 823-826. (in Chinese)) DOI:10.13476/j.cnki.nsbdqk.2015.05.002.
- [23] 陈利群, 刘昌明, 杨聪, 等. 黄河源区基流估算[J]. *地理研究*, 2006, 25(4): 661-665. (CHEN L Q, LIU C M, YANG C, et al. Baseflow estimation of the source regions of the Yellow River [J]. *Geographical Research*, 2006, 25(4): 661-665. (in Chinese))
- [24] 党素珍, 王中根, 刘昌明. 黑河上游地区基流分割及其变化特征分析[J]. *资源科学*, 2011, 33(12): 2232-2237. (DANG S Z, WANG Z G, LIU C M. Baseflow separation and its characteristics in the upper reaches of Heihe River basin[J]. *Resource Science*, 2011, 33(12): 2232-2237. (in Chinese))
- [25] 赵韦, 李占玲, 王月华. 黑河流域上游山区基流量分割及其变化[J]. *南水北调与水利科技*, 2016, 14(5): 26-31. (ZHAO W, LI Z L, WANG Y H. Separation and its characteristics base flow in the upper reaches of Heihe River basin[J]. *South-to-north Water Transfers and Water Science & Technology*, 2016, 14(5): 26-31. (in Chinese)) DOI:10.13476/j.cnki.nsbdqk.2016.05.005.
- [26] MEI Y, ANAGNOSTOU E N. A hydrograph separation method based on information from rainfall and runoff records[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 523: 636-649. DOI:10.1016/j.jhydrol.2015.01.083.