

自动基流分割法在北洛河流域的适宜性对比

于艺鹏¹, 杨亚辉^{2,3}, 蔺鹏飞^{2,3}, 赵文慧¹, 张亭亭¹, 张晓萍²

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100;

2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要:基流是枯水季节河川径流的重要补给来源, 河川基流量及其变化对流域生态健康和水资源合理利用具有重要作用。确定适宜流域生态环境特点的基流分割法, 在基流研究中是十分关键的工作。以北洛河流域上游典型黄土丘陵沟壑区刘家河站的多年实测径流资料为基础, 分析 BFI、HYSEP、数字滤波等三类共 9 种基流分割法的适宜性, 结果表明: BFI 法和 HYSEP 法分割结果比较接近, 所得基流指数在 0.399 4~0.428 1。尤其修正 BFI 法估算的基流量及过程线, 能够客观反映研究流域流量过程线退水段的物理规律。综合考虑变异性、稳定性、过程线吻合程度等方面, 认为修正 BFI 法是黄土区水文研究中进行基流分割的适宜方法。

关键词:自动基流分割; 基流; 数字滤波法; 北洛河流域

中图分类号: P333

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2016)02-0302-06

Comparison of Suitability Among Automatic Baseflow Separation Methods for Separating Baseflow in Beiluo River Basin

YU Yipeng¹, YANG Yahui^{2,3}, LIN Pengfei^{2,3}, ZHAO Wenhui¹, ZHANG Tingting¹, ZHANG Xiaoping²

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University,

Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, CAS&MWR,

Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China)

Abstract: Baseflow is an essential supply source of streamflow in the dry season. Its variability is very important for ecological health and water resources balance in a region. It is critical to identify a baseflow separating method which is associated with the climatic and physiographic characteristics in the study region. Daily streamflow data at Liujiahe gauge station of Beiluo river basin, one of the catchment in the Middle reaches of Yellow River, were used to analyze the suitability of 9 tools in three types of baseflow separation methods of BFI, HYSEP and digital filtering. The results show that the base flow indices derived from BFI and HYSEP turn to be consistent, and they are all between 0.399 4 and 0.428 1. Particularly, the baseflow and the duration curve estimated by revised BFI can objectively reflect the recession hydrograph. The revised BFI is expected as the most suitable baseflow separation method for loess area in hydrological researches in terms of comprehensive consideration of the variability, stability and the process line of the results form 9 tools.

Keywords: automatic baseflow separation; baseflow; digital filtering; Beiluo River Basin

河川基流是枯水季径流的重要组成部分, 在径流的形成、维持及再生过程中具有重要作用。同时, 基流在水资源安全、水资源评价、侵蚀产沙模拟和降雨—径流关系模拟等研究中都有重要应用。近年来, 受气候变化和人类活动的影响, 黄土高原河川基流量呈现显著减少趋势^[1]。河川基流减少, 引起黄河下游断流, 对流域经济、生态和环境造成了严重影响。

基流分割是水文学的基本内容^[2]。根据各研究

区水文地质条件和产流过程的不同, 学者们对基流分割提出了诸多方法, 大致可分为图解法、水文模型法、数学物理法、物理化学法和数值模拟法。其中图解法是基流分割的基本方法, 以人工目视判断为主, 工作量大, 主观性强, 效率低, 难以处理长时间序列的水文数据^[3]。随后以专业理论为指导, 出现了水文模型、数学物理法、同位素法等。数值模拟法是随着计算机技术的发展涌现出来的自动基流分割法, 包括 HY-

SEP法、数字滤波法、BFI法、PART法、加列宁系列方法等。由于可以通过编程实现自动分割,因此具有方便、高效、可以处理大量水文数据的特点。目前数值模拟法在实践中已经得到广泛应用^[4]。其中南方高降雨量地区普遍采用数字滤波法,尤其以 Lynehollick, Chapman-Maxwell 等方法为主估算基流量。例如崔玉洁等^[5]利用数字滤波法对香溪河流域径流总量进行分割,获取了最符合流域水文特点的滤波参数。陈文艳等^[6]运用数字滤波法分割新兴江流域径流量,认为数字滤波法分割所得基流更加平滑,更加符合流量过程线退水段的物理规律。段琪彩等^[7]运用数字滤波法对松华坝水源区径流区进行基流分割,研究了流域内水源涵养能力。黄国如^[2]在研究东江流域时,通过比较认为,Chapman-Maxwell 法得到的结果最优,其基流指数变化幅度小,结果稳定。相比之下,北方黄土高原地区的研究中选用的基流分割方法不尽相同。例如林学钰等^[8]采用 BFI 法估算了黄河流域的基流量,研究地下水可再生能力变化规律,制定黄河流域水资源管理方案。左海凤等^[9]运用 BFI 法和直线斜割法,分析了汾河流域河岔水文站径流分割结果,认为 BFI 法在大幅度减少工作量的同时,能够正确表示基流变化趋势。雷泳南等^[10]经过研究,认为数字滤波法比其他数值模拟法更适宜用于以窟野河流域为代表的黄土高原风蚀交错区的基流分割。豆林等^[11]对比研究认为数字滤波法比最小滑动值法和 PART 法更加适合黄土区流域的基流分割。

从目前的研究看,虽然数值模拟法已经广泛应用于长江和黄河流域等广大地区的水文研究,但是由于降雨、植被、土壤等自然环境的差异,以及其不同的降水—产流机制和地下水退水过程^[12],一种基流分割方法对不同流域并不具有绝对的适宜性。进行基流分割不仅要考虑基流量相对稳定的特点,也要考虑其过程线是否符合区域降水产流机制和退水过程。黄土区采用基流分割法较多,然而究竟那类分割法比较合适,尚需全面对比和研究。

北洛河流域上游刘家河站位于黄土丘陵沟壑区,地形破碎,植被覆盖度低,对于探讨适合黄土区的基流分割方法具有典型性。本文以北洛河流域上游典型丘陵沟壑区流域刘家河站实测水文资料为基础,探讨了自动基流分割法中三类9种方法的适宜性,为该区域水资源管理、生态环境建设、水土保持效益评价等提供科技支持。

1 研究区概况及数据基础

北洛河流域位于东经 $107^{\circ}33'33''$ — $110^{\circ}10'30''$,

北纬 $34^{\circ}39'55''$ — $37^{\circ}18'22''$,全长 680.3 km。流域总面积 2.69 万 km^2 ,海拔在 297~1 886 m,是黄河的二级支流。该流域属暖温带半干旱大陆性气候,流域内矿产资源丰富。随着国家区域经济发展,资源的开发利用,人口快速增长,水资源供需矛盾日益突出。

北洛河上游为典型丘陵沟壑区,为黄河流域多沙粗沙区的一部分。其控制水文站刘家河站集水面积 7 325 km^2 ,植被类型属暖温性森林带和森林草原带。在退耕还林(草)政策指引下,截止 2007 年,控制区内植被覆盖度达到了 41.6%^[13]。多年侵蚀模数已由退耕前 15 280.2 $\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,降至 2010 年的 5 865.1 $\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ^[14]。到 2006 年止,林、草措施和梯田、淤地坝等小型水利工程控制面积占到北洛河上游总面积的 33.7%^[15],沟道中没有大型水利工程的建设。

刘家河站所处丘陵沟壑区土层深厚,主要土壤类型黄绵土,质地轻壤。地形破碎,相对切割深度 150~200 m^[16],沟壑密度为 2.86 km/km^2 ^[17]。流域多年平均降雨量 525.7 mm,6—9 月占全年降雨的 71.2%^[18],多以暴雨形式出现,年内大部分小雨对产流几乎没有贡献。流量过程线表现出“双峰型”特点,径流在 3 月和 7—8 月形成春汛和夏汛。图 1 是北洛河流域上游刘家河水文站丰水年 1986 年日降水—日径流量过程,反映出降雨和河川径流具有明显的汛枯季特点。

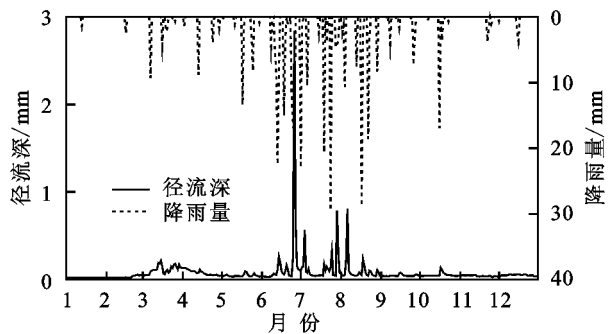


图1 1986年刘家河水文站降雨和径流过程对比

刘家河站 1959—2011 年的实测水文日径流资料来自中国科学院水利部水土保持研究所馆藏,以及黄土高原生态环境数据库(<http://www.loess.cadb.cn>)。数据采用基流深(mm)的概念,反映的是单位面积上的产流量。基流指数是一定时段内基流量和河川径流量的比值,是反映该区域地下水资源量的重要参数。

2 基流分割方法

2.1 HYSEP 法

HYSEP 法是由 Petty John 和 Hehning^[19]在 1979 年提出,由美国地质调查局推荐使用的计算机分割基流方法,并提供了局部最小值法(H_1),固定步

长法(H_2)和滑动步长法(H_3)三种计算方式。其中基流分割参数时间间隔 t 长度对基流分割结果有较大影响,其取值为最接近于 $2N$ 的,介于 3 到 11 之间的奇数。根据经验公式计算出直接径流的持续时间 N :

$$N = (2.59A)^{0.2} \quad (1)$$

式中: A ——流域面积(km^2)。刘家河水文站流域控制面积为 $7\,325\text{ km}^2$, N 计算结果为 7.2 d ,根据经验公式,本文决定采用 $t=11\text{ d}$ 计算基流指数。

2.2 数字滤波法

数字滤波法的基本原理是将地表径流视为高频信号,基流视为低频信号,通过数字滤波器将高频信号与低频信号分离,从而达到基流分割的目的。目前应用较广泛的数字滤波法有 Lyne-hollick(F_1), Chapman-Maxwell(F_2), Boughton-Champan(F_3) 和 Eckhardt(F_4) 四种方法。

(1) Lyne-hollick (F_1)

$$q_{fi} = a q_{f(i-1)} + \frac{1+a}{2} [q_i - q_{f(i-1)}] \quad (2)$$

$$q_{bi} = q_i - q_{fi}$$

式中: q_i ——第 i 时刻的径流量(m^3/s); q_{fi} ——第 i 时刻的地表径流量(m^3/s); q_{bi} ——第 i 时刻的基量(m^3/s); a ——滤波因数,一般取 $0.925^{[20]}$ 。

(2) Chapman-Maxwell (F_2)

1991 年 Chapman 对 F_1 法进行了系统的研究分析,提出了如下改进方程:

$$q_{bi} = \frac{k}{2-k} q_{b(i-1)} + \frac{1-k}{2-k} q_i \quad (3)$$

式中: k ——退水系数,一般取 0.95 ,通过大量试验证明,取值为 $0.9 \sim 0.95$ 时得到的基流过程比较接近实际,通常取 $0.9, 0.925, 0.95$ 来分割基流^[21],比较三组结果,最后确定最适宜的参数。

(3) Boughton-Champan (F_3)

为了得到更加平滑的基流过程线,引入参数 C ,改进 F_2 法得到基流分割方程:

$$q_{bi} = \frac{k}{1+C} q_{b(i-1)} + \frac{C}{1+C} q_i \quad (4)$$

式中: C ——参数,一般取 0.15 。

(4) Eckhardt (F_4)

Eckhardt 提出 Eckhardt filter 方法,滤波方程为:

$$q_{bi} = \frac{\alpha(1-B_{max})q_{b(i-1)} + (1-\alpha)B_{max}q_i}{1-\alpha B_{max}} \quad (5)$$

式中: B_{max} ——基流指数最大值,Eckhardt 利用该方法对美国多个流域进行研究^[22],推荐在以多孔介质含水层为主的多年性河流, B_{max} 取值为 0.80 ,在以多孔介质含水层为主的季节性河流, B_{max} 取值为 0.50 ,

在以坚硬岩石含水层为主的多年性河流, B_{max} 取值为 0.25 。Eckhardt 的初衷是对其他几种数字滤波法的改进,这种方法可应用于任何时间步长的水文序列。根据北洛河流域的地形地貌特点,本文选择 $B_{max} = 0.80$ 进行基流分割。

2.3 基流指数法

基流指数(BFI)法是由英国水文研究所首先提出的,这种方法以基流指数为权系数估算基流量。使用 BFI 法估算基流量时需确定两个参数:(1)拐点检验因子 f ,在给定 N 值条件下微调基流过程线的退水涨水的倾斜度, f 值变化对基流分割结果影响不显著。(2)根据最小流量选择原理,确定划分水文年的单位时间 N 值,对基流分割结果有较大影响。为了找出最符合刘家河流域特点的 N 值,选取刘家河站 1977 年、1984 年、2011 年水文资料,分别代表丰、平、枯水年,改变 N 值,分别计算基流指数,分析基流指数随 N 值变化的规律。从图 2 可以看出,当 $N \geq 4$ 时,各水文年基流指数随 N 值的变化率趋于稳定^[23]。因此 $N=4$,采用 BFI 法对刘家河站多年日径流数据进行基流分割比较符合实际情况。BFI 法主要有标准 BFI 法(B_1)和修正 BFI 法(B_2),其拐点检验因子分别取经验值 0.9 或 $0.979\,15$ 。

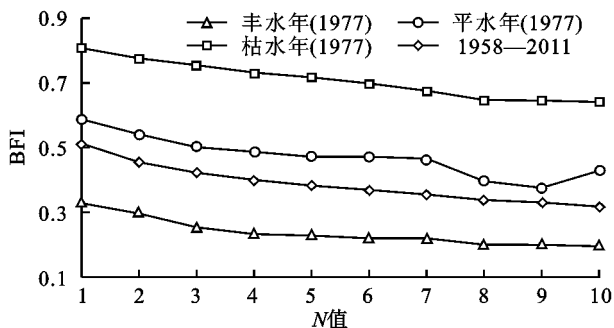


图 2 BFI 法基流指数与 N 值关系

3 结果与分析

3.1 基流指数对比分析

本文运用三类 9 种基流分割方法对北洛河流域刘家河站的实测径流数据资料进行基流分割估算,如表 1 所示。从表 1 可知, F_1 和 F_3 法基流指数最大,多年均基流指数分别为 $0.623\,6, 0.530\,8$,其他几种方法基流指数偏小且较为接近,在 $0.340\,8 \sim 0.428\,1$ 之间。 H_1, H_2 和 H_3 三种方法得到的结果表现十分一致,结果相差不超过 1.72% 。河川基流量大小主要取决于流域降雨量,水土保持的作用主要体现在河川基流指数上^[24]。1959—2010 年,研究区内水土保持措施面积增加,年径流深(mm)随年代基本表现出下降趋势,而基流指数表现出增大的趋势。20 世纪 90 年代遇上罕见的特大暴雨,水土保持措施在降雨

强度较大时拦水作用较弱,产流增加,基流指数减小。表 1 中 9 种方法所获基流指数,10 a 尺度上均表现出了这个时间变化特征。而由 HYSEP 法、BFI 法分割

基流的基流指数,年变化率大于 0.054,与钱云平等^[1]的研究结果更接近。而数字滤波法基流指数变化较为平缓,年变化率小于 0.03。

表 1 9 种基流分割方法所获基流指数的时间变化特征

年份	平均径 流深/mm	HYSEP 法			数字滤波法				BFI 法	
		H ₁	H ₂	H ₃	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	B ₁	B ₂
1959—1969	36.89	0.3115	0.3137	0.3145	0.5699	0.3310	0.4718	0.2951	0.3003	0.3255
1970—1979	33.66	0.3705	0.3735	0.3725	0.5988	0.3581	0.5178	0.3254	0.3591	0.3920
1980—1989	29.89	0.4642	0.4658	0.4648	0.6884	0.4092	0.5803	0.3838	0.4518	0.4898
1990—1999	38.01	0.3865	0.3838	0.3904	0.5762	0.3438	0.5029	0.3171	0.3776	0.4017
2000—2011	21.75	0.5844	0.5811	0.5899	0.7339	0.4347	0.6235	0.4174	0.5771	0.6019
1959—2011	31.74	0.4097	0.4100	0.4127	0.6236	0.3693	0.5308	0.3408	0.3994	0.4281

3.2 基流指数稳定性分析

统计 9 种基流分割方法得到的多年平均基流指数值,获取其平均值和标准偏差等统计特征并分析稳定性。9 种基流分割方法得到的多年均基流指数做统计分析见表 2。数据分析结果表明,F₁ 和 F₃ 法所得的均值在 9 种方法中最大,F₂ 和 F₄ 法均值最小,HYESP 和 BFI 五种方法基流指数均值介于两者之间且十分接近。数字滤波法的变异系数(CV)比 HYSEP 法和 BFI 法小。数字滤波法的极值比和标

准偏差普遍小于 HYSEP 法和 BFI 法。

其结果与上述方法对基流分割原理的差异有关。HYSEP 法和 BFI 法的分割原理都是寻找一段时间内的最小径流量来分割径流,在降水量变化剧烈的时段,划入基流的径流量较少,得到的基流指数较小。HYSEP 法和 BFI 法分割得到的基流指数变异性大、极值比偏大的特点,反映出这两类方法对地表径流变化的不敏感性。这恰好反映了北洛河流域年内降雨集中且多暴雨的产流特点。

表 2 9 种基流分割方法年基流指数统计值

统计特征	HYSEP 法			数字滤波法				BFI 法	
	H ₁	H ₂	H ₃	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	B ₁	B ₂
极大值	0.771	0.765	0.789	0.853	0.503	0.719	0.511	0.766	0.800
极小值	0.186	0.177	0.184	0.322	0.207	0.319	0.175	0.172	0.186
极值比	4.149	4.313	4.293	2.651	2.434	2.253	2.923	4.457	4.309
均值	0.454	0.454	0.457	0.657	0.390	0.559	0.365	0.444	0.474
标准偏差	0.137	0.136	0.138	0.105	0.064	0.085	0.072	0.138	0.141
变异系数/%	30.2	29.8	30.3	16.0	16.3	15.1	19.8	31.0	29.8

3.3 流量过程线对比分析

《全国水资源综合规划技术细则》要求统一采用的直线斜割法,表示出了汛期降雨产流、地面退水、地下水补给等物理过程,成果较为稳定可靠,如图 3 所示。点 A 和点 B 分别为地表径流起始点和终止点。A 点较易确定。通常认为流量过程线退水段上坡度由陡变缓的转折点为 B 点。之后,流量过程线可用平滑曲线 AB,或从 A 点继续消退直到洪峰出现时刻的 C 点,与 B 点以光滑曲线连接^[25],曲线以下部分即为基流。图 3 表明,基流过程线随地表径流滞后变化的规律,而且降雨过程中径流转化为基流的量很少,仍保持相对稳定。

选取研究区丰水年中径流量较多的 1965 年的资料,绘制日流量过程线和日基流过程线,探讨不同分割方法所获基流过程线的合理性。如图 4 所示。

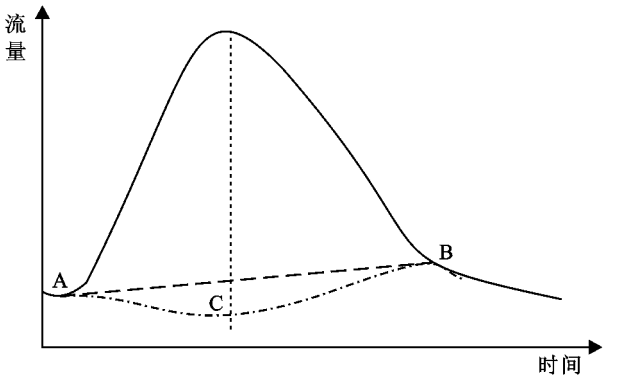


图 3 直线斜割法示意图

从图 4 可以看出,数字滤波法得到的基流过程线在汛期表现出起伏较大的特点,尤其是 F₂ 和 F₃ 法甚至出现汛期与径流过程线重合的现象,这显然不符合实际的退水过程。

由于 HYSEP 法和 BFI 法分割基流的基本原理

都是利用流量最低点的连线将径流分割成直接径流和基流,得到的基流过程线比较平滑稳定,没有出现陡涨陡落的现象。而 BFI 法对图 4 中的 A,B 点位,以及基流过程线均表示得更合理。经过与手工直线斜割法所获基流过程线进行相关分析,BFI 法

复相关系数最高,尤其修正 BFI 法复相关系数(R^2)达到 0.815 0,显著优于 HYSEP 法(0.5~0.7)($p < 0.05$),数字滤波法最差(0.35~0.46)($p < 0.001$)。这与左海凤等^[9]在汾河流域河岔水文站运用 BFI 法得到的结果相一致。

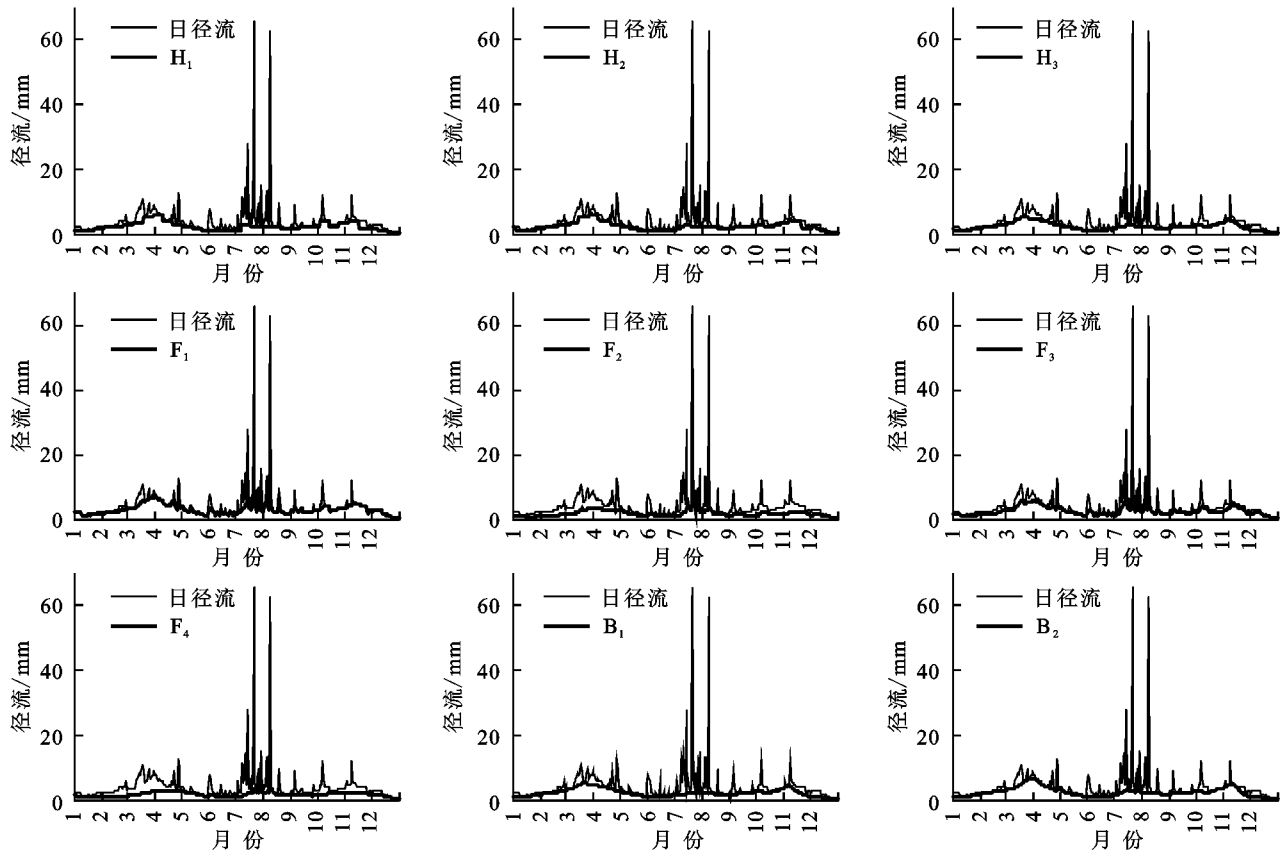


图 4 1965 年 9 种基流分割方法流量过程线对比

4 结论

本文以北洛河上游刘家河站的多年实测径流资料为基础,采用 BFI、HYSEP、数字滤波等三类 9 种方法进行基流分割,从多年基流指数、基流指数的稳定性以及基流过程线三个角度探讨了流域基流分割法的适宜性。结果表明,9 种自动基流分割方法中,BFI 和 HYSEP 法估算的流域多年平均基流指数接近,其范围为 0.399 4~0.428 1。BFI 和 HYSEP 法在表现出其对降雨产流过程的数量稳定性,优于数字滤波法。比较 9 中方法得到的基流过程线,修正 BFI 法估算得到的基流过程线较为平滑,能较客观的反映北洛河流域流量过程线退水段的物理规律。修正 BFI 法在 9 种方法中最适宜于北洛河上游流域的基流分割,可为黄土丘陵沟壑区的基流研究提供一种较为稳定可靠的方法。不过,由于研究区产汇流过程受多种自然和人为因素的影响,其估算基流量的精度还需进一步验证。采用修正 BFI 法估算刘家河站多年(1959—2011)均基流深为 13.6 mm,多年平均基流

指数 0.428,10 a 尺度上基流指数表现出缓慢增加趋势,变化率为 0.03。

参考文献:

- [1] 钱云平,蒋秀华,金双彦,等.黄河中游黄土高原区河川基流特点及变化分析[J].地球科学与环境学报,2004,26(2):88-91.
- [2] 黄国如.流量过程线的自动分割方法探讨[J].灌溉排水学报,2007,26(1):73-78.
- [3] 包为民,张小琴,付森彪,等.流量过程多水源分割方法探讨[J].水土保持研究,2009,16(4):49-51.
- [4] 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.
- [5] 崔玉洁,刘德富,宋林旭,等.数字滤波法在三峡库区香溪河流域基流分割中的应用[J].水文,2011,31(6):18-23.
- [6] 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.
- [7] 段琪彩,方绍东,王杰,等.昆明市松华坝水源地下水涵养能力时空变化研究[J].中国农村水利水电,2012(10):170-173.
- [8] 林学钰,廖资生,钱云平,等.基流分割法在黄河流域地

- 下水研究中的应用[J]. 吉林大学学报:地球科学版, 2009, 39(6): 959-967.
- [9] 左海凤, 武淑林, 邵景力, 等. 山丘区河川基流 BFI 程序分割方法的运用与分析: 以汾河流域河岔水文站为例[J]. 水文, 2007, 27(1): 69-71.
- [10] 雷泳南, 张晓萍, 张建军, 等. 自动基流分割法在黄土高原水蚀风蚀交错区典型流域适用性分析[J]. 中国水土保持科学, 2011, 9(6): 57-64.
- [11] 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.
- [12] 李建柱, 冯平, 王勇. 地下径流退水过程规律[J]. 天津大学学报, 2010, 43(5): 400-405.
- [13] Chen N, Ma T, Zhang X. Responses of soil erosion processes to land cover changes in the Loess Plateau of China: A case study on the Beiluo River basin[J]. Catena, 2015.
- [14] 杨光, 丁国栋, 赵廷宁, 等. 黄土丘陵沟壑区退耕还林的水土保持效益研究: 以陕西省吴旗县为例[J]. 水土保持通报, 2006, 26(2): 88-90, 99.
- [15] 冉大川. 黄河流域水沙变化情势分析与评价[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2011.
- [16] 赖亚飞. 吴起县退耕还林工程效益评价及其绿色 GDP 核算[D]. 北京: 北京林业大学, 2007.
- [17] 秦伟. 北洛河上游土壤侵蚀特征及其对植被重建的响应[D]. 北京: 北京林业大学, 2009.
- [18] 崔文艺, 王武成. 北洛河流域中上游水文特性分析及防洪减灾对策[J]. 陕西水利, 2009(3): 43-44.
- [19] Pettyjohn W A, Henning R. Preliminary estimate of ground water recharge rates, related streamflow and water quality in Ohio. US Department of the Interior[R]. Project A-051-OHIO, Project Completion Report, 1979.
- [20] Nathan R J, McMahon T A. Estimating low flow characteristics in ungauged catchments [J]. Water Resources Management, 1992, 6(2): 85-100.
- [21] 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.
- [22] Eckhardt K. A comparison of baseflow indices, which were calculated with seven different baseflow separation methods[J]. Journal of Hydrology, 2008, 352(1/2): 168-173.
- [23] Wahl K L, Wahl T L. Determining the flow of comal springs at New Braunfels, Texas[J]. Proceedings of Texas Water, 1995, 95: 16-17.
- [24] 张建兴, 马孝义, 屈金娜. 气候变化对黄河中游河龙区间径流量的影响分析[J]. 水土保持研究, 2007, 14(4): 197-200.
- [25] 倪雅茜, 张文华, 郭生练. 流量过程线分割方法的分析探讨[J]. 水文, 2005, 25(3): 10-14, 19.

~~~~~

(上接第 301 页)

- [10] 李玉双, 葛京凤, 梁彦庆, 等. 河北省城市土地集约利用与城市化的耦合协调度分析[J]. 水土保持研究, 2013, 20(2): 238-242.
- [11] 赵敏宁, 周治稳, 曹玉香, 等. 陕西省城市土地集约利用评价及其区域差异研究[J]. 水土保持研究, 2014, 21(5): 210-215.
- [12] 郭婧锐, 周伟. 青海省土地集约利用与经济发展时空差异分析[J]. 水土保持研究, 2014, 21(2): 194-199.
- [13] 杨磊, 张永福, 王伯超. 乌鲁木齐市土地集约利用潜力评价研究[J]. 水土保持研究, 2008, 15(3): 35-38.
- [14] 崔娟敏, 季文光. 基于 AHP 的土地集约利用水平模糊综合评价[J]. 水土保持研究, 2011, 18(4): 122-125.
- [15] 顾湘, 姜海, 曲福田. 区域建设用地集约利用综合评价: 以江苏省为例[J]. 资源科学, 2006, 28(6): 112-119.
- [16] 欧雄, 冯长春, 沈青云. 协调度模型在城市土地利用潜力评价中的应用[J]. 地理与地理信息科学, 2007, 23(1): 42-45.
- [17] 李景刚, 张效军, 高艳梅. 基于改进熵值模型的城市土地集约利用动态评价: 以广州市为例[J]. 地域研究与开发, 2012, 31(4): 118-123.
- [18] 林雄斌, 马学广. 城市—区域土地集约利用评价与影响因素研究: 以珠三角为例[J]. 国土资源科技管理, 2015, 32(1): 13-20.
- [19] 朱一中, 曹裕. 珠江三角洲地区城市土地集约利用评价[J]. 山东农业大学学报: 自然科学版, 2011, 42(4): 561-566.
- [20] 孙宇杰, 陈志刚. 江苏省城市土地集约利用与城市化水平协调发展研究[J]. 资源科学, 2012, 34(5): 889-895.