

DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20210127

# 不同基流分割方法在黑河流域的应用

唐娜, 薄鑫

(黄河水利委员会 黑河流域管理局, 甘肃 兰州 730030)

**摘要:** 选用了基流指数标准法、单参数数字滤波法与递归数字滤波法对黑河上游莺落峡 1954—2018 年日均流量和下游正义峡 1963—2018 年日均流量进行了分割, 计算了基流指数, 并分析了其变化。莺落峡年均 BFI 在 0.70 左右, 正义峡年均 BFI 为 0.56 以下。1990 年起, 黑河中游用水剧增, 正义峡年均流量明显减少, 而年均 BFI 增大。近年来, 莺落峡和正义峡年均流量有显著增长趋势, BFI 减小。

**关键词:** 基流分割; 基流指数; 数字滤波法

**中图分类号:** P333; TV121 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0852(2022)05-0047-04

## 0 引言

西北内陆河冬末春初时, 由于部分河段封冻, 径流以地下水补给为主, 基流在维持河道不断流、水源的稳定性和脆弱的荒漠生态系统中发挥重要作用<sup>[1]</sup>。黑河地处西北内陆, 从上游冰川到下游荒漠, 地貌变化大, 上下游地表水与地下水转换频繁, 研究探讨流域基流变化对了解黑河地下水与地表水转换规律, 模拟水文进程有重大意义。

基流分割是一种把径流分割为地表径流与基流的方法, 用来估量地下水占径流的比例。基流分割对理解、鉴别和量化径流过程有重大帮助。数值模拟法能够使用计算机自动计算, 操作简便, 可重复检验, 适合处理批量的水文数据, 成为目前国际上广泛使用的基流分割方法, 包括基流指数法、数字滤波法、HYSEP 法等。董薇薇等<sup>[2]</sup>针对祁连山疏勒河上游流域采用数字滤波法和滑动最小值法进行基流分割, 对比分析基流和基流指数 BFI 的变化特征, 并从气温和降水两方面讨论疏勒河上游流域基流变化的主要影响因素。雷宇宽<sup>[3]</sup>基于酉阳河典型年汛期实测日平均流量资料, 分别采用 Chapman-Maxwell 改进方程数字滤波法一次滤波(参数  $N=1$ )以及二次滤波(参数  $N=2$ )、BFI(f)

法、HYSEP 固定步长法、HYSEP 滑动步长法、HYSEP 局部最小值法进行基流分割并对其结果进行分析对比。黄文等<sup>[4]</sup>基于数字滤波法、滑动最小值、时间步长三类方法对我国西北寒旱区黑河流域上游莺落峡水文站 1954—2012 年的逐日流量进行基流分割, 对三类共 9 种基流分割方法在研究区的适用性进行了比较分析。

## 1 研究区概况

黑河发源于祁连山区, 干流全长 928 km。出山口莺落峡以上为上游, 河道长 313 km, 平均海拔 3 000 m 以上, 多年平均气温不足 2℃, 年降水量 350 mm, 是黑河流域的产流区。莺落峡水文站位于甘肃省张掖市龙渠乡, 控制流域面积 10 009 km<sup>2</sup>, 为黑河干流出山口控制站, 平均气温 1~8℃, 年降水量 184.5 mm, 历年平均径流量  $15.6 \times 10^8$  m<sup>3</sup>。莺落峡至正义峡为中游, 河道长 204 km, 两岸地势平坦, 多年平均温度 6~8℃, 年降水量 140 mm, 为干旱区。正义峡水文站位于甘肃省高台县罗城乡, 控制流域面积 35 634 km<sup>2</sup>, 年降水量 67.6 mm, 多年平均蒸发量为 1 718.7 mm。正义峡以下为下游, 除河流沿岸和居延三角洲外, 大部分为沙漠戈壁, 年降水量只有 47 mm, 属极端干旱区。

收稿日期: 2021-03-12

网络首发日期: 2022-10-08

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1814.P.20220930.0921.005.html>

作者简介: 唐娜(1987—), 女, 中级工程师, 主要从事水文分析、水资源管理与水量调度方面的工作。E-mail: tn87@outlook.com

2 数据与方法

本文数据基础为黑河流域上游莺落峡 1954—2018 年日均流量,多年日均流量为 52.59 m<sup>3</sup>/s,下游正义峡 1962—2018 年日均流量,多年日均流量为 33.25 m<sup>3</sup>/s,来自甘肃省张掖水文站整编资料。

因为基流不能被直接观测到或测量,很多假设尚未证实,因此使用多种方法来检验比较其准确性和可信度<sup>[5]</sup>。选取了国际上广泛使用的 3 种数值模拟法,分别是基流指数标准法、单参数数字滤波法<sup>[6]</sup>和递归数字滤波法<sup>[7]</sup>。每种方法都使用日均流量计算日均基流,并计算出一个基流指数 BFI(Baseflow Index),即基流占总径流量的比例。

2.1 基流指数标准法

BFI 法主要有 BFI 标准法(BFI Standard)和 BFI 改进法,两种方法的区别就是拐点参数取值不同,本文采用 BFI 标准法,拐点参数取经验值 0.9<sup>[8]</sup>。N 值,即划分每个水文年的单位时段,对基流分割结果有较大影响。预先设定 N 的取值为 0~10 的 11 个自然数值,将每个值代入计算程序中,对所试算出的基流指数进行对比分析,确定 N 值<sup>[9-10]</sup>。本文选取 1982 年、1983 年和 1985 年分别作为平水年、丰水年和枯水年来分析 BFI 与 N 值的关系(见图 1)。

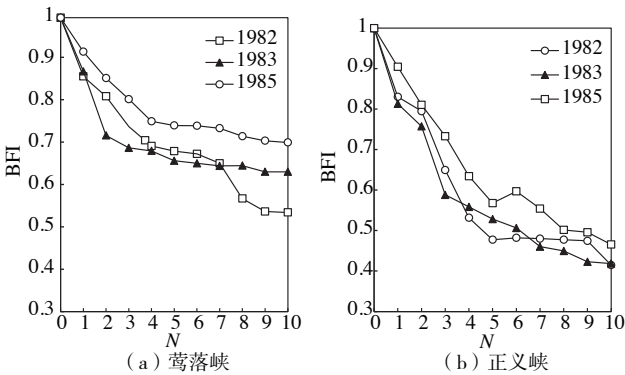


图1 BFI与N值关系  
Fig.1 Relationship of BFI and N

2.2 数字滤波法

NHTHAN 和 MCMAHON<sup>[6]</sup>首次将这种方法应用于水文分析中,将河川径流作为地表径流(高频信号)和基流(低频信号)的叠加,将基流从径流中分割出来。本文采用单参数数字滤波法(BFLOW)和递归数字滤波法(TwoPRDF)。

单参数数字滤波方程为:

$$b_t = \beta b_{t-1} + [(1 + \beta)/2](Q_t - Q_{t-1}) \tag{1}$$

式中: $b_t \leq Q_t$ ,  $b_t$  和  $b_{t-1}$  分别为  $t$  时刻和  $t-1$  时刻基流;  $Q_t$  和  $Q_{t-1}$  分别为  $t$  时刻和  $t-1$  时刻实测河川径流量;  $\beta$  为滤波参数,在 0.90~0.95 之间。Nathan 等对澳大利亚 186 个流域研究结果证明,  $\beta$  取 0.925<sup>[6,11]</sup> 时分割基流效果最好。

为了提高精度,需要对数据进行三次滤波,分别顺序滤波一次,反序滤波一次,再顺序滤波一次,得到的结果为最终基流量。使用单参数数字滤波法时,计算出的每日基流量( $b_t$ )不能小于零,计算时第一次滤波第一天的基流量取值当天径流量的一半。

递归数字滤波方程为:

$$b_t = \frac{(1 - BFI_{max})\alpha b_{t-1} + (1 - \alpha)BFI_{max}Q_t}{1 - \alpha BFI_{max}} \tag{2}$$

式中:  $b_t$  和  $b_{t-1}$  分别为  $t$  时刻和  $t-1$  时刻基流;  $Q_t$  为  $t$  时刻实测河川径流量;  $\alpha$  为退水常数,  $BFI_{max}$  为最大基流指数。

根据 BRUTSAERT<sup>[12]</sup> 的研究,  $\alpha$  取值 0.978,流域的退水常数趋向于不变。为了消除  $BFI_{max}$  取值的主观性,ECKHARDT<sup>[7]</sup> 建议根据流域下垫面的水文地质特性取值,以孔隙含水层未出的常流河,  $BFI_{max}$  取值 0.80;以孔隙含水层为主的季节性河流,  $BFI_{max}$  取值 0.50;以弱透水层为主的常流河,  $BFI_{max}$  取值 0.25。黑河上游莺落峡断面常年不断流,  $BFI_{max}$  取值 0.80,正义峡断面季节性断流,  $BFI_{max}$  取值 0.50。计算时滤波第一天的基流量取值  $0.9 \cdot BFI_{max} \cdot Q_t$ 。

3 结果与分析

3.1 基流分割结果

三种方法分割出来的莺落峡 1954—2018 年基流和 BFI 均值见表 1。通过计算皮尔逊参数,年平均基流与年平均径流量的相关系数分别为 0.95、0.89、0.92,相关性较好。

表1 莺落峡年基流与年 BFI 统计值  
Table1 The statistics of annual baseflow and BFI in Yingluoxia

统计值	BFI 标准法		单参数数字滤波法		递归数字滤波法	
	基流	BFI	基流	BFI	基流	BFI
均值	36.6	0.6981	30.8	0.5898	37.3	0.7140
最大值	51.3	0.7845	41.7	0.6729	53.2	0.766
最小值	23.5	0.6202	19.9	0.4731	24.0	0.5555
标准差	6.41	0.038	4.73	0.045	5.86	0.044

表2 正义峡年基流与年BFI统计值						
Table2 The statistics of annual baseflow and BFI in Zhengyixia						
统计值	BFI标准法		单参数数字滤波法		递归数字滤波法	
	基流	BFI	基流	BFI	基流	BFI
均值	18.3	0.5569	15.2	0.4616	13.2	0.3978
最大值	31.2	0.7511	24.0	0.6114	20.6	0.515
最小值	10.8	0.3842	8.36	0.3307	6.83	0.3053
标准差	4.54	0.083	3.69	0.055	3.37	0.039

三种方法分割出来的正义峡年基流和BFI均值见表2,通过计算皮尔逊参数,年平均基流与年平均径流量的相关系数分别为0.84、0.90、0.93,相关性较好。

为进一步了解三种方法基流分割的过程,选取典型平水年1982年莺落峡、正义峡日均流量进行基流分割,几种方法均可实现对基流的自动分割,但得到的基流过程线有一定差异(见图2)。

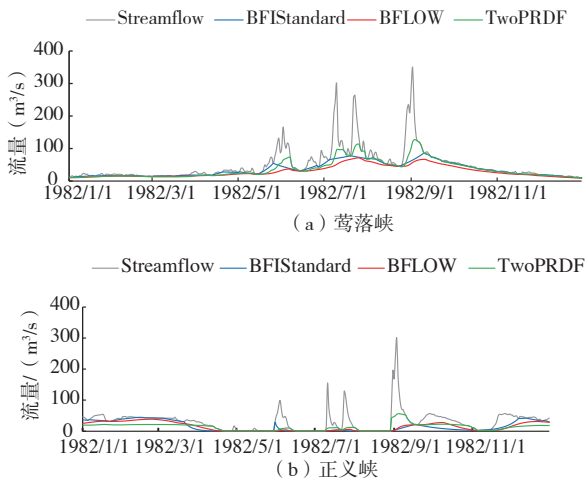


图2 1982年莺落峡、正义峡日均流量与日均基流过程线  
Fig.2 Daily average runoff and baseflow processes in Yingluoxia and Zhengyixia in 1982

参考三种方法对典型平水年1982年莺落峡与正义峡日均流量分割的结果,单参数数字滤波法分割出的莺落峡日均基流量偏小,不考虑此方法,则莺落峡1954—2018年BFI均值在0.70左右,三种方法计算的正义峡1963—2018年BFI均值为0.56以下,表明地下水对黑河径流的补充从上游到下游呈下降趋势。

3.2 径流量和BFI的年际与年内变化

三种方法计算的莺落峡和正义峡年均流量与BFI变化见图3。莺落峡和正义峡月均流量与BFI变化见图4。

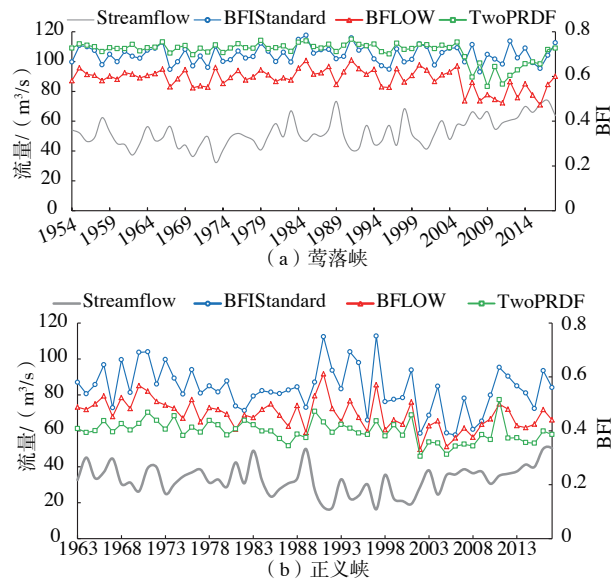


图3 莺落峡、正义峡年均流量与年均BFI过程线  
Fig.3 Annual average runoff and BFI processes in Yingluoxia and Zhengyixia

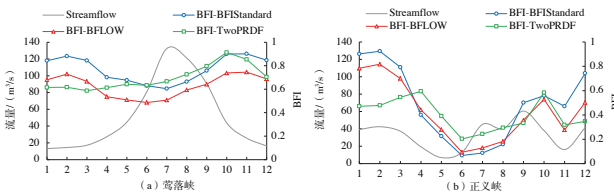


图4 莺落峡、正义峡月均流量与月均BFI过程线  
Fig.4 Monthly average runoff and BFI processes in Yingluoxia and Zhengyixia

4 结论

本文选用了BFI标准法、单参数数字滤波法与递归数字滤波法对黑河上游莺落峡1954—2018年日均流量和下游正义峡1963—2018年日均流量过程进行了分割,获得了莺落峡、正义峡基流过程,并计算了基流指数(BFI),分析了两个水文断面径流量、基流量和基流指数(BFI)的年际变化和年内分布。

(1)对比分析典型平水年1982年莺落峡、正义峡日均基流量过程,单参数数字滤波法分割的莺落峡基流偏小,递归数字滤波法分割的莺落峡多年平均BFI为0.71,与董薇薇<sup>[13]</sup>采用单参数数字滤波法分割计算的莺落峡多年平均BFI 0.72接近,结果可靠。单参数数字滤波法分割正义峡基流过程线较平滑,能客观反映下游流域退水的物理规律,递归数字滤波法分割正义峡基流过程线错过了一部份拐点,单参数数字滤波法年平均基流与年平均径流量的相关系数为0.90,较BFI平均法好。

(2)单参数数字滤波法和递归数字滤波法分割的莺落峡年际BFI变化趋势一致,1954—2005年年均BFI平稳波动,2006—2018年呈减小趋势,莺落峡自2004年起一直是丰水年,地下水对径流补充减少;三种方法分割的正义峡年际BFI变化趋势一致,1963—



1989年年均BFI平稳波动,90年代增大,主要是由于黑河中游用水剧增,正义峡径流量减少,地下水占径流比例增大;2002—2018年减小,主要是由于2000年起黑河实施水量调度,进入下游正义峡径流量增加,地下水占径流比例减少。

(3)三种方法分割的莺落峡和正义峡月均BFI变化趋势基本一致,莺落峡1—12月均BFI变化幅度较小,正义峡月均BFI变化幅度较大,与月均流量正相关,4—8月较小,12—3月较大,6月份最小,4—8月是黑河中游春灌与夏灌期,加上上中游水利工程拦蓄水及其他人类活动影响,地下水消耗较大,对下游径流补充较少;12—3月中游基本不用水,降水较少,径流主要依赖于河道下渗、灌区灌溉水及基岩裂隙水补给,地下水与地表水频繁转化以维系河道不断流。

综上所述,使用递归数字滤波法对莺落峡分割基流、单参数数字滤波法对正义峡分割基流更为适宜。即莺落峡多年平均基流为 $37.3 \text{ m}^3/\text{s}$ ,多年平均BFI为0.71;正义峡多年平均基流为 $15.2 \text{ m}^3/\text{s}$ ,多年平均BFI为0.46。黑河流域基流对径流影响显著,研究中下游地区基流补充径流规律,有助于明晰上游来水量,中下游耗水量和地下径流补充量,找到黑河水量消耗和补充的原因。这对进一步研究黑河上游气候变化、中游用水变化对流域地下水与地表水转换的影响提供帮助,也能为黑河水资源管理提供参考。

#### 参考文献:

- [1] 蓝永超,康尔泗.河西内陆干旱区主要河流出山径流特征及变化分析[J].冰川冻土,2000,22(2):147-152.(LAN Yongchao, KANG Ersi. Changing trend and features of the runoff from mountain areas of some main rivers in the Hexi inland region [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2000,22(2):147-152. (in Chinese))
- [2] 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))
- [3] 雷宇宽. 酉阳河流域典型年汛期的基流分割研究[J]. 水文, 2021, 41(1):35-41. (LEI Yukuan. Research on base flow separation at Youyang River basin in flood season of typical flow years [J]. Journal of China Hydrology, 2021,41(1):35-41. (in Chinese))
- [4] 黄文,李占玲,徐宗学,等.基流分割方法在寒旱区流域的适用性分析[J].水文,2018,38(3):21-28.(HUANG Wen, LI zhangling, XU zongxue, et al. Suitability analysis of different baseflow separation methods in cold and arid watershed [J]. Journal of China Hydrology, 2018,38(3):21-28. (in Chinese))
- [5] HALFORD KJ, MAYER GC. Problems associated with estimating ground water discharge and recharge from stream-discharge records [J]. Ground Water, 2000, 38(3):331-342.
- [6] NATHAN R J, MCMAHON T A. Evaluation of automated techniques for baseflow and recession analyses [J]. Water Resources Research, 1990,26(7):1465-1473.
- [7] ECKHARDT K. How to construct recursive digital filters for base flow separation[J]. Hydrological Processes, 2005, 19(2):507-515.
- [8] 杨蕊,王龙,韩春玲.9种基流分割方法在南盘江上游的应用对比[J].云南农业大学学报(自然科学版),2013,28(5):707-712.(YANG Rui, WANG Long, HAN Chunling. Nine kinds of base flow separation methods apply and comparative in the upper reach of Nanpan river [J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science), 2013,28(5):707-712. (in Chinese))
- [9] 左海风,武淑林,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(7):69-71.(ZUO Haifeng, WU Shulin, et al. Application of computerized base-flow separation method with BFI program in mountainous areas [J]. Journal of China Hydrology, 2007,27(7):69-71. (in Chinese))
- [10] WAHL K L, WAHL T L. Determining the flow of comal springs at New Braunfels, Texas [J]. Proceedings of Texas Water, 1995,95(6):16-17.
- [11] 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):1783-1784.
- [12] BRUTSAERT W. Annual drought flow and groundwater storage trends in the eastern half of the United States during the past two-third century: theoretical and applied climatology [J]. 2010, 100: 93-103.
- [13] 董薇薇.河西内陆河山区流域基流过程研究[D].兰州:兰州大学,2015.(DONG Weiwei. The Research of Base Flow Process in Mountain Area of Hexi Island River Basin [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2015. (in Chinese))

## Application of Different Baseflow Separation Methods in Heihe River Basin

TANG Na, BO Xin

(Heihe River Bureau of the Yellow River Conservancy Commission, Lanzhou 730030, China)

**Abstract:** This paper selected the BFI standard method, BFLOW method and TwoPRDF method to divide the daily baseflow of Yingluoxia from 1954 to 2018 and Zhengyixia from 1963 to 2018, and calculated the baseflow indexes and analyzed its variation. The average annual BFI of Yingluoxia is around 0.70, and the average annual BFI of Zhengyixia is less than 0.56. After 1990, water consumption in the middle reaches of the Heihe River increased sharply, while the average annual runoff of Zhengyixia decreased significantly and the average annual BFI increased. In recent years, the average annual flow of Yingluoxia and Zhengyixia has shown a significant increase and the BFI has decreased.

**Keywords:** baseflow separation; baseflow index; digital filtering method