

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2019.0034

ZHOU Jiaxin, DING Yongjian, WU Jinkui, et al. Applied comparison analysis of base-flow separation methods in upper Shule River basin[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2019, 41(6):1456-1466. [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.]

基流分割方法在疏勒河上游流域的应用对比分析

周嘉欣^{1,3}, 丁永建^{1,2,3}, 吴锦奎^{1,3}, 王 建⁴

(1. 中国科学院西北生态环境资源研究院 内陆河流域生态水文重点实验室, 甘肃 兰州 730000;

2. 中国科学院西北生态环境资源研究院 冰冻圈科学国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000;

3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 盐城师范学院 城市与规划学院, 江苏 盐城 224002)

摘 要: 基于疏勒河上游昌马堡水文站2007—2016年日径流资料, 运用单参数数字滤波法、平滑最小值法、递归数字滤波法和HYSEP法(固定步长法、滑动步长法、局部最小值法)对其进行基流分割计算。结果表明: 4种方法均可实现基流的自动分割, 且得到的基流过程线平滑缓慢, 所获得的基流序列稳定, 变异性小。4种方法得到基流指数具有差异性, 最大为0.72, 最小为0.49, 其中递归数字滤波法估算的结果稳定性最高。单参数数字滤波法中, 当滤波参数 β 取值0.95时为最优参数。平滑最小值法、HYSEP法中的SI法和LM法和单参数数字滤波法($\beta=0.95$)具有较高的Nash-Sutcliffe效率系数, 且平均相对误差小于10%, 说明这些方法基流估算结果稳定可靠且精度高, 均适用于疏勒河上游流域。

关键词: 径流; 基流分割; 基流指数; 疏勒河上游; 基流过程线

中图分类号: P333.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2019)06-1456-11

0 引言

基流是河川径流中较为稳定的组成部分。在枯水期, 基流是河流的最主要的补给来源, 其变化规律可以反映地下水水位、水量的变化情况^[1], 同时也是流域汇流计算和水文模拟的重要内容^[2]。目前学术界对基流还没有统一的定义, 主流基流分割方法中的基流是指地下水和其它延迟部分补给径流的水量^[3]。基流在水资源评价与调查、水利工程建设、污染评价、降雨径流关系分析中具有重要作用^[4]。基流的大小与流域面积、水文地质地貌条件、土壤、植被、气候、下垫面情况紧密相关^[5]。基流是水文过程线上较低的部分, 年际和年内变化较小, 并且基流占全年总流量的比重较大。基流的研究不仅对生产生活稳定供水、农田灌溉和河流环境保护具有重要作用, 而且有助于水资源规划管理和维持良性的水文循环, 同时基流的分割研究可为水

文模型研究提供参考依据。在西北干旱和半干旱地区, 内陆河在冬末春初时由于河流部分封冻, 河流主要来源于地下水, 因此基流在维持河道不断流、水源和生态系统的稳定性中有至关重要的作用^[6]。分析处于干旱半干旱典型流域基流的时空变化规律, 有助于了解该流域的水资源特性和水循环特征及其转化关系, 而且对水资源高效利用具有实践指导意义。

河川径流可以通过水文站观测获得数据资料, 然而基流只能通过一定的方法进行估算, 因此基流分割一直是国内外水文学研究的重点和难点之一^[5,7-8]。由于不同的研究区的水文地质条件和基流产流过程存在差异性, 研究者们针对基流量的计算提出了诸多方法。传统的基流分割方法以图解法为主, 该方法主观性强且要求要求操作者熟悉流域的水文地质特征^[9], 工作效率低, 计算繁琐, 不利于分析长时间序列的数据资料, 精度难以保证且无

收稿日期: 2018-12-17; 修订日期: 2019-05-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(41730751; 41771084; 41771087; 41471060; 41877156)资助

作者简介: 周嘉欣(1988—), 女, 新疆昌吉人, 2015年在中国科学院寒区旱区环境与工程研究所获得硕士学位, 现为中国科学院西北生态环境资源研究院在读博士研究生, 从事寒区水文水资源研究。E-mail: zhoujiaxin@lzb.ac.cn

通信作者: 丁永建, E-mail: dyj@lab.ac.cn.

法确定误差来源^[10]。因此在实践中常采用自动分割技术进行基流分割,近年来,采用数值模拟分割流量过程线的方法得到了快速发展,广泛应用的主要有 SWAT 模型模拟分割法^[11]、平滑最小值法、HYSEP(Hydrograph separation)法,数字滤波法等,以上这些方法客观性强,操作简便,可以采用计算机程序实现,因此可以快速有效的得到连续的基流过程。

研究者对于干旱、半干旱地区的径流变化已有诸多研究,但大部分都着重于对径流的变化趋势、特征及径流的影响因素进行研究^[12],而对基流的研究较少,鉴于此,本文以疏勒河上游流域为研究区,基于昌马堡水文站 2007—2016 年日径流资料,运用单参数数字滤波法、平滑最小值法和 HYSEP 法和递归数字滤波法对研究区进行基流分割研究,对不同方法的基流估算结果进行讨论,进而对比不同方法的可靠性、稳定性,找出研究区适合的分割方法,为基流变化规律和基流影响因子等研究提供技术支持,为流域水文模拟和水资源合理分配提供依据。

1 研究区概况

疏勒河流域是我国河西内陆干旱区三大流域

之一,发源于疏勒南山和托勒南山之间的沙果林那木吉木岭。疏勒河上游为出山口昌马堡以上的山区,位于 96.6°~99.0° E, 38.3°~39.9° N,流域面积为 1.14×10⁴ km²。行政上地跨青海省海西蒙古族自治州的天骏县和甘肃省酒泉市的肃北蒙古族自治县(图 1)。地形上主要由两侧的托勒南山、疏勒南山和疏勒河谷地组成,山区地势高大峻峭、地形陡峻,河谷地区地形相对平坦。研究区海拔在 2 100~5 750 m,4 500 m 以上现代冰川分布广泛,冰川水资源丰富。据统计,疏勒河上游冰川覆盖面积为 549 km²,多年冻土分布面积为 9 447 km²。研究区以草地为主,其它景观类型镶嵌其中,景观结构简单—^[13]。

疏勒河流域气候干燥,降水稀少且潜在蒸发量较大,年降水量 200~400 mm,主要集中在生长季 5—9 月,占全年降水量 90%^[14]。由于低温高寒,降水的一部分以冰和雪的固体形势被储存起来。年均气温-3.5℃,年均潜在蒸发量 1 203.5 mm。疏勒河上游干流多年平均径流量 10.83×10⁸ m³,流量年季内配不均,全年径流总量的 53% 集中在 7—9 月,冬春两季径流量只占全年径流量的 8.5% 和 10%^[15]。径流主要由地下水、季节性积雪、降水和冰川融水混合补给。

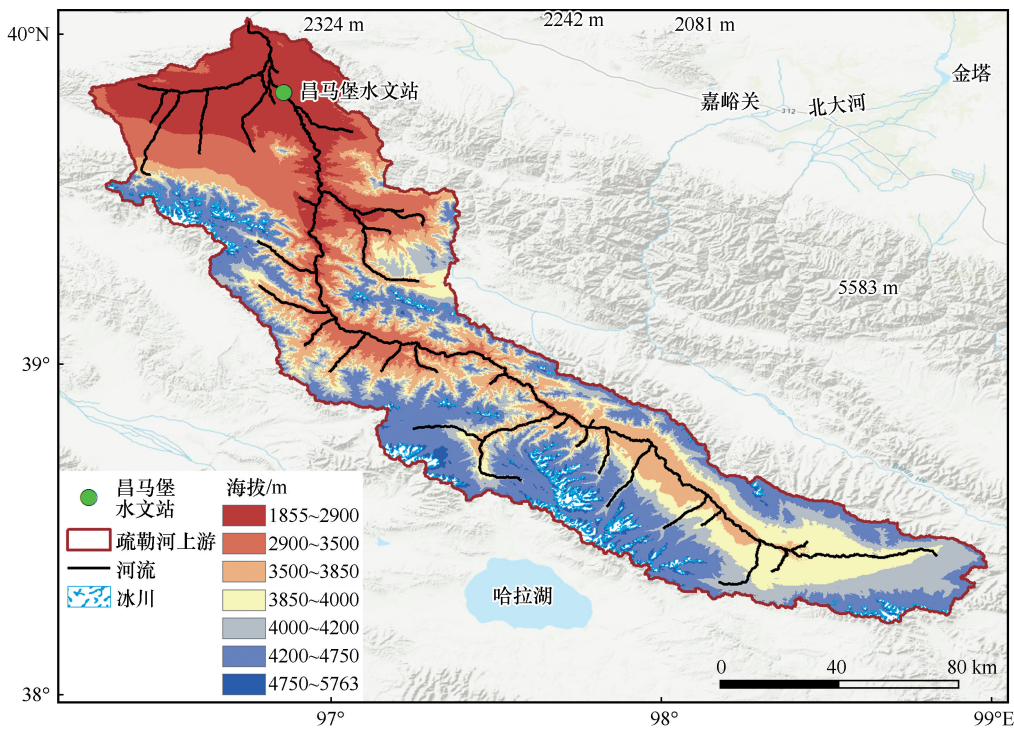


图1 研究区位置示意图
Fig. 1 Map showing the location of study area

2 基流分割方法

2.1 平滑最小值法

平滑最小值法 (Minimum smoothing method, MSM) 是英国水文研究所在 1980 年提出的一套基流计算方法^[16], 该方法的基本原理是先将整个日径流序列以 N 天为时间段划分成 $365/N$ 个时间段, 然后确定每一时段内的最小流量值, 若某个时段内的流量最小值与拐点检验因子的乘积小于等于左右相邻两个时段内的流量最小值, 那么确定其为拐点; 将所有拐点进行连线即可得到基流过程线。该方法已在很多国家和地区得以应用。应用平滑最小值法进行基流分割的具体步骤为:

(1) 将日径流序列 $Q_t (t=1, 2, \dots, n, n$ 是径流序列的长度) 以 5 d 为时间间隔划分成 m 个互不重叠的块。若 n 不是 5 的整数倍, 则忽略最后一个不完整的块。块的划分是根据径流数据的采集频率和流域面积决定的^[17]。本文选取 5 d 为一个计算时段。

(2) 找出每个块中的最小值, 形成流量最小值序列: q_1, q_2, \dots, q_m 。再将序列中相邻的 3 个值划分为 1 个块 $(q_1, q_2, q_3), (q_2, q_3, q_4), \dots, (q_{m-1}, q_m, q_{m+1})$ 。

(3) 通过英国水文研究所得到的经验公式确定拐点^[16]。该公式为: $Kq_i \leq \min(q_{i-1}, q_{i+1})$, 即, 如果最小值 q_i 的 K 倍小于等于左右相邻的最小值, 则 q_i 满足条件就是一个拐点, 其中 K 为拐点检验因子, 国内外诸多研究表明, 当 K 取值为 0.9 时基流分割的结果较好^[19], 且 K 值的变化对径流分割的结果影响不显著^[18]。

(4) 重复步骤 (3), 将所有径流序列分析完成, 得到拐点序列, 将所有拐点连接, 拐点之间的基流数值由相邻拐点数值通过线性内插得到, 若某一天的插值大于径流值, 则基流值等于径流值, 最后将各个拐点连接起来得到基流序列。

2.2 单参数数字滤波法

单参数数字滤波法是 Nathan 在 1990 年首次提出的一种分割流量过程的数学方法^[20], 该方法源于信号分析和处理技术, 近年来在基流分割计算研究中已成为国际上应用最广泛的方法。其原理是将日径流量看作是高频信号 (地表径流) 和低频信号 (基流) 的叠加, 通过信号处理技术将高频信号和低频信号分离, 从而相应的将地表径流和基流从径流中分割出来。Arnold 在美国东部和西部选取了 6 个代表性流域, 对该方法的可靠性进行验证, 结果表明该方法具有参数少、执行速度快、操作容易并具

有较好的客观可重复性等优点^[7]。其滤波方程为:

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

地表径流 q_t 计算出来之后, 基流由下式计算:

$$b_t = Q_t - q_t \quad (2)$$

式中: q_t 和 q_{t-1} 分别为 t 和 $t-1$ 时刻过滤出的快速响应 (即地表径流), $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; β 为滤波参数; Q_t 和 Q_{t-1} 为 t 和 $t-1$ 时刻实测的河流径流量, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; b_t 为 t 时刻的基流, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; t 为时间, 单位为 d。

为了提高计算精度, 需对径流序列进行一定次数的反复滤波^[20], 具体步骤如下: (1) 按起始日期到终止日期的顺序, 根据公式 (1) 计算出地表径流, 再根据公式 (2) 得到基流量。结合地表径流与基流的性质, 即 $q_t \geq 0, b_t \geq 0, Q_t \geq q_t, Q_t \geq b_t$ 。若 $q_t < 0$, 则赋值 $q_t = 0$, 那么 $b_t = Q_t$; 若 $b_t < 0$, 则赋值 $b_t = 0$, 那么 $q_t = Q_t$; 若 $b_t > Q_t$, 则赋值 $b_t = Q_t$ 。需注意第一道滤波是以第二个记录 (实测径流) 为起点向后做正向运算。(2) 在第一道滤波分割出基流的基础上, 第二道滤波以倒数第二个数据为起点做逆向计算获得一组基流数据。(3) 再从起始日期到终止日期, 按照公式 (1)、(2) 计算获得最终的基流数据。反复计算基流过程使得基流过程的线更加平滑。数字滤波法使得基流分割的计算中不会出现基流大于于总径流的现象, 也不会出现负值^[21]。诸多研究结果表明滤波法估算的基流分割结果具有较好的可重复性和客观性^[22]。

2.3 递归数字滤波法

递归数字滤波法由 Eckhardt 于 2005 年提出^[23], 包含两个滤波参数 (退水常数 α 和最大基流指数 BFI_{\max}), 计算公式如下:

$$q_{b(t)} = \frac{(1 - BFI_{\max}) \alpha q_{b(t-1)} + (1 - \alpha) BFI_{\max} q_t}{1 - \alpha BFI_{\max}} \quad (3)$$

式中: $q_{b(t)}$ 为 t 时刻的基流; $q_{b(t-1)}$ 为 $t-1$ 时刻的基流; q_t 为 t 时刻实测的河流径流量; t 为时间 (单位为日), α 为退水常数, 可根据退水分析得到; BFI_{\max} 为最大基流指数。为了消除参数 BFI_{\max} 值确定时的主观性, Eckhardt 研究了 65 个典型的水文地质条件下的流域的基流分割估算结果, 根据流域下垫面的水文地质特性, 在以多孔含水层的多年性河流 BFI_{\max} 取值 0.8, 季节性河流 BFI_{\max} 取值 0.5, 坚硬岩石含水层的多年性河流 BFI_{\max} 取值 0.25。该方法较单参数数字滤波法对径流序列的高频信号的平滑作用更显著, 将该方法的结果与与其他方法比较, 表明该方法估算的基流序列更稳定, 并且可应用于

任何时间步长的水文序列。

2.4 HYSEP 法

时间步长法也称 HYSP (A computer program for streamflow hydrograph separation and analysis) 分割法, Petty John 等^[24]于 1979 年提出了该程序,首次实现了基流计算的程序化。运用此方法时首先需计算地表径流的持续时间:

$$t = (2.95A)^{0.2} \quad (4)$$

式中: A 为流域面积, km^2 。通常取与 $2t$ 最为接近且介于 3 到 11 之间的奇数,进而确定时间间隔长度。

HYSEP 法共有固定时间间隔法 (Fixed interval)、滑动时间间隔法 (Sliding interval) 和局部最小值法 (Local minimum) 3 种不同的流量分割方法。固定时间间隔法 (FI): 在选取的时间间隔内,将该时段内的最小流量作为该时间间隔内任意一天的基流。滑动间隔法 (SI): 在时间间隔内,将某一天前后 $(2t-1)/2d$ 的时间范围内的最小流量作为该天的基流,然后用同样的方法计算出下一天的基流。局部最小值法 (LM): 找出时间间隔内中心点前后 $(2t-1)/2d$ 内的最小流量,并将其赋值为相邻时间步长内中心点的基流值,最后通过线性内插得到步长中心点以外时间的基流。3 种方法均是以当次计算的终点作为下次计算的起点。HYSEP 程序具有计算速度快、易操作、可重复利用、可计算长期的径流序列等优点^[25]。

2.5 评价指标

枯水指数是反映地下水补给河川径流的重要指标,研究中用枯水指数 (Q_{90}/Q_{50}) 与年总径流量的乘积作为年基流量的实际观测值。该年基流量的实际观测值用于与基流分割的估算结果进行对比。研究中使用 Nash-Sutcliffe 效率系数来评价年基流量观测值与估算值的估算效果^[26]。公式为:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_{ci})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_m)^2} \quad (5)$$

式中: NSE 为 Nash-Sutcliffe 效率系数; Q_{oi} 为第 i 年观测的年基流量,单位为 10^8 m^3 ; Q_{ci} 为第 i 年计算得到的年基流量,单位为 10^8 m^3 ; Q_m 为观测的平均年基流量,单位为 10^8 m^3 。 E 的取值范围在 0~1 之间, E 值越大且越接近于 1,表明模拟效果越好,反之,模拟效果越差。采用平均相对误差对估算结果的精度进行评价,公式为:

$$RE = \frac{Q_{ca} - Q_m}{Q_m} \times 100\% \quad (6)$$

式中: RE 为平均相对误差, %, RE 越小,表明估算效果越好; Q_{ca} 为估算的平均年基流量,单位为 10^8 m^3 。多数研究认为当 NSE 值大于 0.6, RE 值小于 10% 时,说明估算效果好且精度较高。

3 结果分析

3.1 径流的年内年际变化特征

图 2 为疏勒河上游径流的年内分配过程,从图中可以看出疏勒河上游的径流过程呈明显的单峰型分布,研究区的河流由降水、冰雪融水和地下水混合补给,且河流的补给形势随季节变化存在差异^[27]。2007—2016 年疏勒河上游月均径流在 $14.69 \sim 122.25 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 之间变化,平均值为 $43.60 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,最大值出现在 8 月,最低值出现在 2 月。在 1—2 月径流变化不大,处于稳定状态,均在 $14.5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 附近波动。3—4 月,随着气温的逐渐上升,积雪逐渐消融,冰雪融水的补给使得径流量增加。5—8 月,由于夏季降雨的大量补给,径流量再次上升并且增幅较大,在 8 月份达到全年的峰值。9—12 月,由于融水量和降雨量的减小,径流也随之减小并趋于稳定。

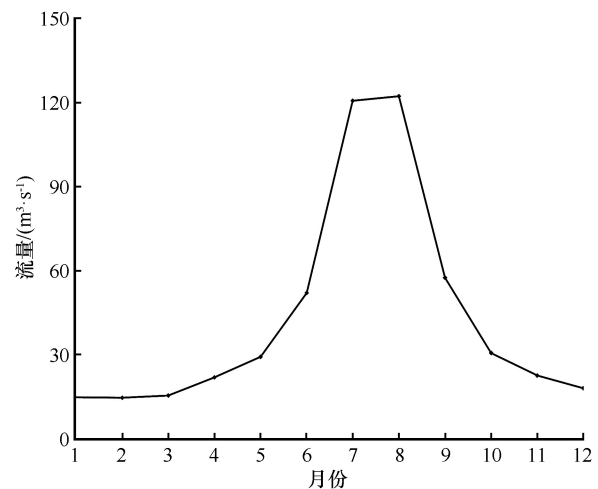


图 2 疏勒河上游流域径流年内分配过程

Fig. 2 Monthly variation of the runoff in the upper reaches of the Shule River

疏勒河上游年径流量的年际变化如图 3 所示,从图中可以看出,在 2007—2016 年这 10 年间,径流量在 $10.26 \times 10^8 \sim 17.24 \times 10^8 \text{ m}^3$ 之间变化,年径流量的均值为 $13.75 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。在观测期间,径流量的变化波动较大,径流量的变化主要与气温与降水有

关。蓝永超等^[28]利用水文站和气象站的观测数据对疏勒河流域的出山径流量的变化进行了分析,结果表明,疏勒河山区气候持续性的向暖湿转化,不同季节的气温均呈上升趋势,降水量总体上呈增加趋势。由于降水量与气温上升,冰雪融水对径流的补给作用增加,故径流量总体呈增加趋势。

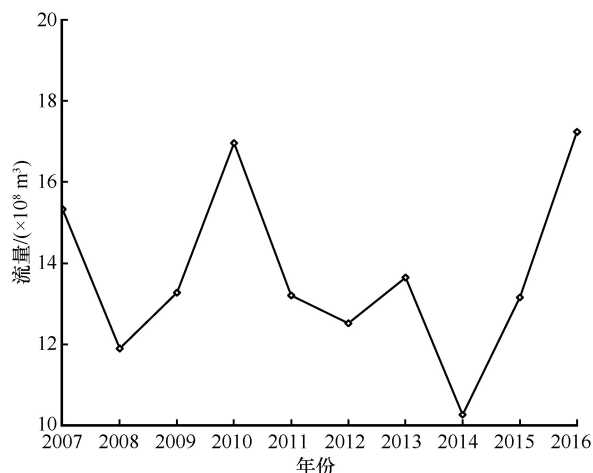


图3 2007—2016年疏勒河上游流域径流的年际变化

Fig. 3 Annual variation of the runoff in the upper reaches of the Shule River basin from 2007 to 2016

3.2 基流分割过程比较

选取疏勒河上游昌马堡水文站2007—2016年的日径流序列资料,采用4种基流分割方法对径流过程进行分割计算,得到的基流过程线如图4所示,从图中可看出,几种方法都可以实现对基流的分割并且得到的基流变化与径流的变化趋势一致,但各种方法得到的基流过程线有差异性。平滑最小值法得到的基流过程线平滑度高,退水过程缓慢,主要是由于流域的下垫面对降水在流域出口口的汇流产生阻尼和迟滞作用,因此基流的流量过程线应该是平滑缓慢的。图4(b)为运用数字滤波法,当 β 取值为0.85、0.9、0.925、0.95和0.975时,对径流序列经过3次滤波后得到的基流。从图中可以看出,当 β 取值越大,分割结果越小。林凯荣等人的研究中认为,当滤波次数超过3次时,滤波次数的增加对径流的削减作用微弱,基流量趋于稳定^[29]。递归数字滤波法计算得到的基流序列更稳定,因为相对于一个参数的滤波器,两个参数的数字滤波器对径流序列中的高频信号具有更显著的平滑作用。HYSEP法中SI和LM得到的基流结果比较相近,而FI与其它两种方法得到的结果差异性较大。由于基流变化受到降水类型、土壤类型、

土地利用类型等因素的共同作用,所以选取哪种分割方法,需要根据研究区具体情况而定并进行分割结果的有效性检验。

3.3 基流指数对比分析

基流指数(baseflow index, BFI)是指某时间段内河川基流量占径流总量的比例。基流指数用来比较不同基流分割方法估算结果间的差异性。表1为4类(6种)基流分割方法计算的年基流指数的统计特征(表1),从表中可以看出,数字滤波法的计算中随着 β 参数的取值越大,得到的基流指数越小,多年平均BFI值为0.551~0.829。由于增大滤波参数会增加中低频率的通过率,从而增大了地表径流,因此基流量减小,即BFI值减小。HYSEP计算的BFI值较数字滤波法计算的结果小,FI、SI、LM三种方法计算得到的基流指数的多年平均值分别为0.724、0.622和0.627,可以看出,SI和LM两种方法得到的BFI值很接近,而FI得到的BFI值较SI和LM方法得到的BFI值大。平滑最小值法得到的多年平均BFI值为0.726。平滑最小值法是由径流曲线上的一系列拐点及插值后形成的折线,不够平滑且不能很好的反映真实产汇流情况。递归数字滤波法计算得到的多年平均BFI值为0.499,是不同方法估算的基流指数值中最小且最稳定的。

3.4 基流分割结果的有效性检验

为了验证不同方法计算结果的可靠性,并筛选出最适合研究区的基流分割方法,以枯水指数与年径流总量的乘积作为实际的基流观测值,对4类(6种)滤波法的分割结果进行验证。通过计算出Nash-Sutcliffe效率系数和平均相对误差,可以有效的筛选出基流分割的最优参数。

从表2中可以看出,HYSEP的三种方法中,SI和LM具有较高的Nash-Sutcliffe效率系数,而FI较前两种方法的Nash-Sutcliffe效率系数低,并且其相对误差大于20%,说明FI方法的估算精度不高。单参数数字滤波法中,当 β 参数取值为0.95时,其Nash-Sutcliffe效率系数高达0.92,且平均相对误差小于10%,分割结果具有较高的模拟精度。当 β 参数取值为0.85时,其Nash-Sutcliffe效率系数为负值,说明此方法估算的年基流量值偏大。因此不同的流域的基流分割使用的参数 β 不同,合适的参数对结果的准确性至关重要。平滑最小值法Nash-Sutcliffe效率系数为0.80,说明其估算效果可以,但平均相对误差大于10%,模拟的结果精度

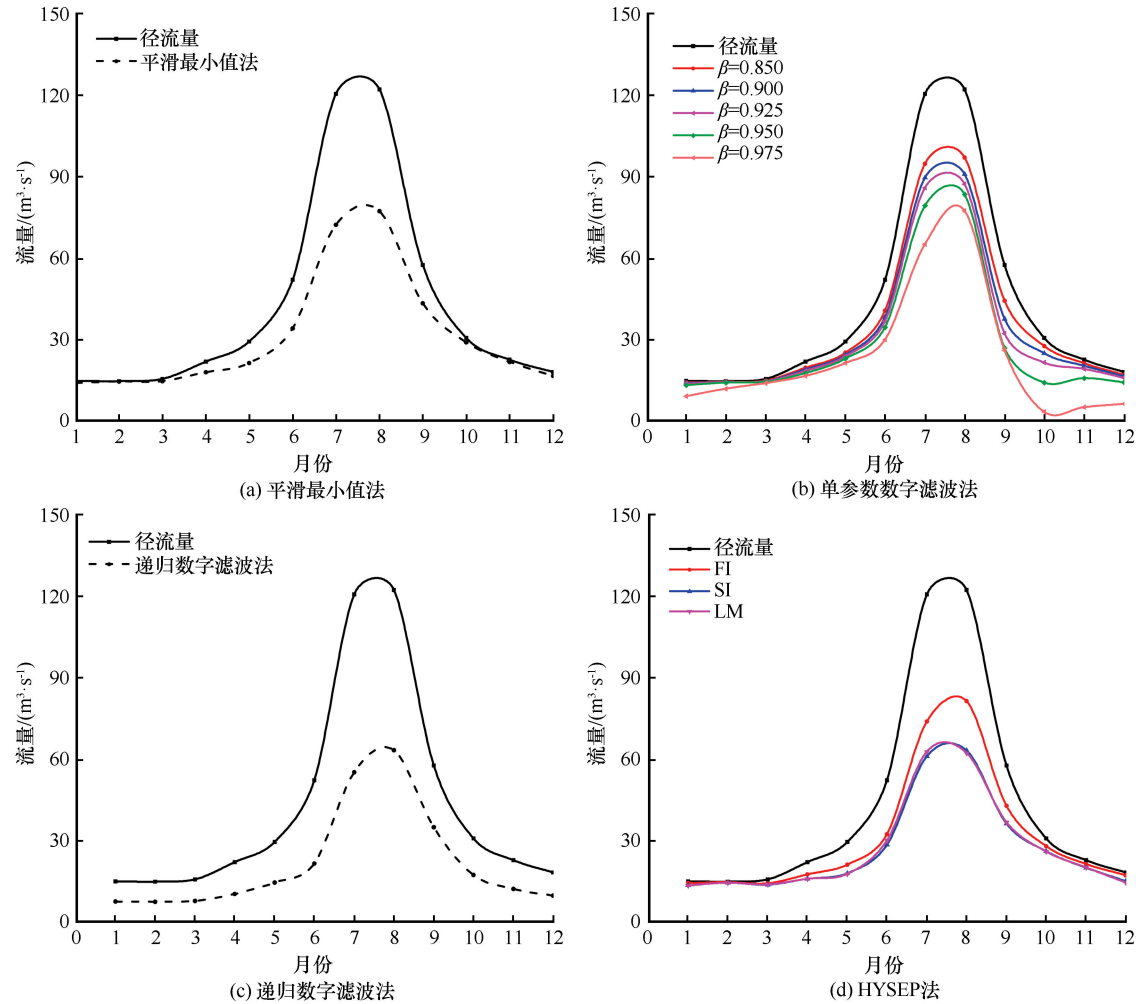


图4 2007—2016年6种基流分割方法的基流过程线比较

Fig. 4 Monthly variations of base-flow calculated by the four base-flow separation methods from 2007 to 2016

表1 四类基流分割方法估算的基流指数值

Table 1 A summary of the base-flow indexes estimated by four baseflow separation methods

年份	单参数数字滤波法					HYSEP法			平滑最小值法	递归数字滤波法
	0.85	0.9	0.925	0.95	0.975	FI	SI	LM		
2007年	0.858	0.814	0.776	0.713	0.587	0.764	0.696	0.696	0.794	0.499
2008年	0.837	0.792	0.755	0.699	0.574	0.767	0.687	0.684	0.776	0.499
2009年	0.808	0.790	0.753	0.695	0.589	0.741	0.655	0.665	0.735	0.500
2010年	0.799	0.764	0.720	0.653	0.548	0.721	0.597	0.603	0.717	0.500
2011年	0.832	0.757	0.721	0.667	0.541	0.642	0.553	0.561	0.639	0.500
2012年	0.829	0.800	0.756	0.688	0.532	0.777	0.682	0.681	0.829	0.498
2013年	0.841	0.741	0.701	0.643	0.543	0.717	0.586	0.596	0.688	0.500
2014年	0.823	0.803	0.769	0.701	0.557	0.665	0.584	0.592	0.708	0.501
2015年	0.849	0.780	0.740	0.675	0.568	0.755	0.599	0.626	0.710	0.500
2016年	0.839	0.759	0.714	0.639	0.485	0.691	0.584	0.562	0.666	0.497
多年平均	0.817	0.779	0.739	0.675	0.551	0.724	0.622	0.627	0.726	0.499

不高。递归数字滤波法 Nash–Sutcliffe 效率系数为 0.56, 平均相对误差 42%, 远大于 10%, 表明该方法估算的年基流量结果不好。

对不同方法估算的年基流量与实测的年基流量进行分析(图5), 从图中可看出, 四种方法估算的基流量与实测的基流量有较好的相关性。单参

表2 四种基流分割方法的验证结果
Table 2 Verification the base-flows resulted from the four base-flow separation methods

方法		NSE	RE/%
HYSEP法	FI	0.78	26.10
	SI	0.83	7.32
	LM	0.87	4.66
单参数数字滤波法	$\beta=0.85$	-0.21	11.33
	$\beta=0.9$	0.66	13.22
	$\beta=0.925$	0.76	31.74
	$\beta=0.95$	0.92	3.85
	$\beta=0.975$	0.79	27.51
平滑最小值法		0.80	9.22
递归数字滤波法		0.56	42.36

数数字滤波法($\beta=0.95$)得到的年基流量为 $7.18 \times 10^8 \sim 11.09 \times 10^8 \text{ m}^3$, 观测的年基流量为 $6.19 \times 10^8 \sim 10.40 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。平滑最小值法计算得到的年基流量均值为 $9.97 \times 10^8 \text{ m}^3$, 观测的年基流量均值为 $8.29 \times 10^8 \text{ m}^3$, 可看出平滑最小值法估算的年基流量偏大。递归数字滤波法估算的年基流量均值为 $6.87 \times 10^8 \text{ m}^3$, 从图5中可明显看出估算值小于观测的年基流量均值。FI法估算得年基流量均值为 $9.96 \times 10^8 \text{ m}^3$, 与平滑最小值法的估算结果相近, 估算的年基流量偏大。SI和LM法估算的年基流量分别为 $8.54 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $8.60 \times 10^8 \text{ m}^3$, 与观测的年基流量相近, 说明估算效果好。

为了更好的了解疏勒河上游基流的变化情况,

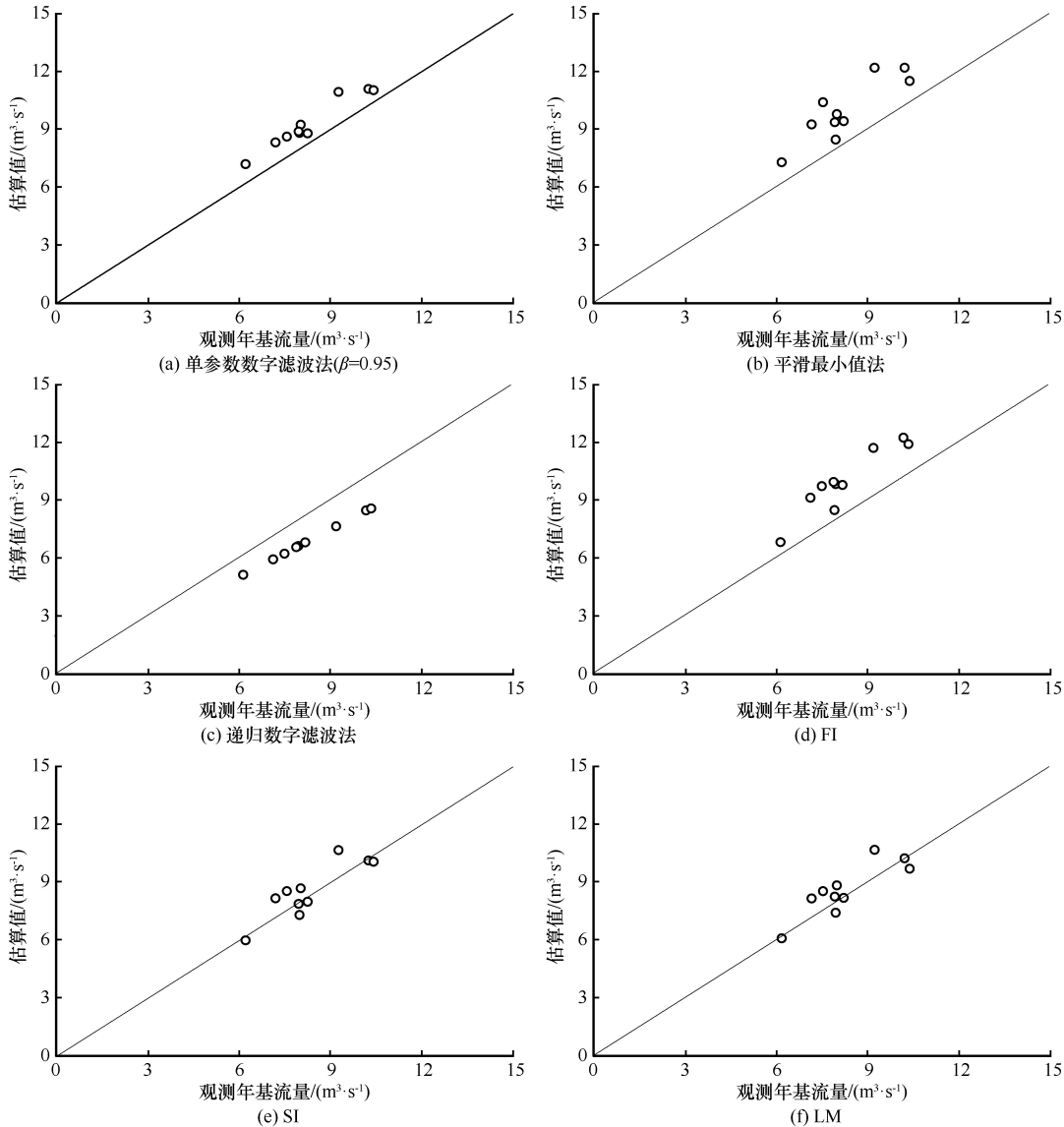


图5 6种基流分割方法的年基流量对比

Fig. 5 Compared the results of base-flow estimated with the six base-flow separation methods

选取平水年 2007 年的日流量序列, 应用这些方法得到基流过程线, 从图 6 中可以看出四种方法得到的基流过程线走势基本一致。数字滤波法分割得到的基流过程线相对其他方法波动性大。平滑最小值法得到的基流过程线在起涨阶段和衰退阶段与径流曲线非常接近, 该方法对径流序列的处理中采用了线性内插所以不能很好的反映实际的产汇流规律。SI 和 LM 两种时间步长法得到的基流过程线更加平滑, 很好的反映出了水文学中降雨-径流在汇流是产生的迟滞和阻尼效应。

4 讨论与结论

单参数数字滤波法在研究区的分割结果偏大, 这与滤波参数和滤波次数的选择有关。平滑最小值法是将连续的径流数据分块并选出每个块中的

最小值, 按照一定的条件选出拐点, 将各个拐点连接得到基流序列, 因此得到的基流序列基本上是总径流序列的下包线, 而实际一次降雨过程除了本次降雨形成的地表和地下径流, 还包括前期没有退完的地表和地下径流, 所以分割的基流包含前期降雨没有退完的地表径流, 从而使得分割结果偏大^[17]。递归数字滤波法计算得到的基流序列更稳定, 是因为两个参数的数字滤波器比 1 个参数的数字滤波器对径流序列的高频信号的平滑作用更显著。HYSEP 法所得分割结果略有偏大, 可能是由于 HYSEP 法中 t 可取的最大值为 11, 而疏勒河上游流域面积很大, 退水时间也相对较长, 从物理意义上来说 t 的取值应该大于 11 d。时间步长法中 SI 和 LM 得到的结果非常相近, 这是由于分割方法的原理本身决定的。

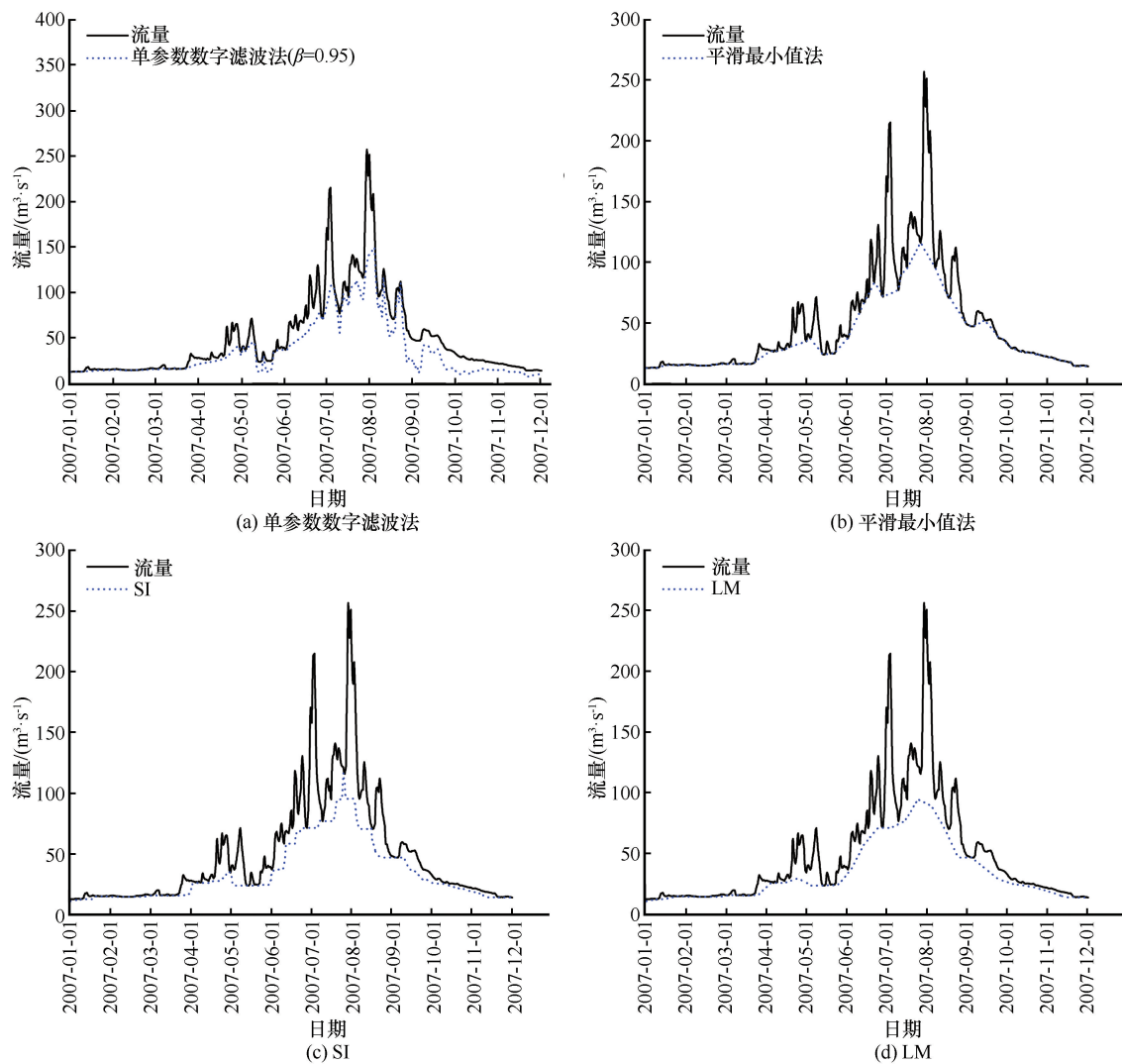


图 6 2007 年 4 种基流分割方法的基流过程线比较

Fig. 6 Compared the base-flow hydrographs estimated with the four base-flow separation methods in 2007

本文利用疏勒河上游昌马堡水文站 2007—2016 年日径流资料,运用单参数数字滤波法、平滑最小值法、递归数字滤波法和 HYSEP 法(固定步长法、滑动步长法、局部最小值法)共 4 类(6 种)方法对其进行基流分割计算,得到以下结论:

(1)通过对比 4 种基流分割方法的分割结果,4 种方法都能实现对基流的自动分割且得到的基流与径流的变化趋势一致。4 种方法得到的基流过程线都较平滑、缓慢,符合实际情况。在单参数数字滤波法中,随着 β 取值越大,分割的基流值越小。

(2)4 种基流分割方法计算的基流指数有明显的差异性,递归数字滤波法估算的基流指数值稳定性较高,均在 0.50 附近,得到的结果偏小;HYSEP 法中滑动步长法 SI 和局部最小值法 LM 得到的基流指数值比较接近且稳定性良好,得到基流指数为 0.622 和 0.627。而 FI 得到的基流指数值较前两者基流指数大。平滑最小值法得到的结果偏大,基流指数为 0.726。

(3)为了验证不同方法计算结果的可靠性,并筛选出最适合研究区的基流分割方法,通过计算出 Nash-Sutcliffe 效率系数和平均相对误差,可以有效的筛选出基流分割的最优参数。结果表明:单参数数字滤波法中,当 β 参数取值为 0.95 时,其 Nash-Sutcliffe 效率系数高达 0.92,且平均相对误差小于 10%,分割结果具有较高的模拟精度,说明 β 取值 0.95 为最优参数。平滑最小值法 Nash-Sutcliffe 效率系数为 0.80,平均相对误差为 9%,说明该方法模拟的结果精度好。SI 和 LM 具有较高的 Nash-Sutcliffe 效率系数且平均相对误差均小于 10%,说明该方法的估算效果好且精度高。

因此,数字滤波法($\beta=0.95$)、平滑最小值法和 HYSEP 分割方法中的 SI 法和 LM 法的基流估算结果稳定可靠且精度高,均适用于疏勒河上游流域。

参考文献(References):

- [1] Yang Zeyuan, Wang Wenke. Reviews and prospects on eco-effect induced by groundwater in arid and semi-arid regions[J]. *Arid Land Geography*, 2009, 32(5): 739-745. [杨泽元,王文科. 干旱半干旱区地下水引起的生态效应的研究现状与发展趋势[J]. 干旱区地理, 2009, 32(5): 739-745.]
- [2] Hu Xinglin. Analysis on runoff variation regularity and regional water resources optimum allocation in the Heihe River basin[J]. *Hydrology*, 2003, 23(1): 32-36. [胡兴林. 黑河流域径流演变规律及区域性水资源优化配置分析[J]. 水文, 2003, 23(1): 32-36.]
- [3] Hall F R. Base-flow recessions - A review[J]. *Water Resources Research*, 1968, 4(5): 973-983.
- [4] Xu Leilei, Liu Jinglin, Jin Changjie, et al. Baseflow separation methods in hydrological process research: a review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(11): 3073-3080. [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.]
- [5] Arnold J G, Allen P M. Automated methods for estimating baseflow and groundwater recharge from streamflow records 1[J]. *Jawra Journal of the American Water Resources Association*, 1999, 35(2): 411-424.
- [6] 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. [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趋势分析[J]. 冰川冻土, 2000, 22(2): 147-152.]
- [7] Arnold J G, Allen P M, Mutiah R, et al. Automated baseflow separation and recession analysis techniques[J]. *Groundwater*, 1995, 33(6): 1010-1018.
- [8] Koskela A I, Fisher T R, Utz R M, et al. A new precipitation-based method of baseflow separation and event identification for small watersheds (<50 km²) [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 450: 267-278.
- [9] Birtles A B. Identification and separation of major base flow components from a stream hydrograph [J]. *Water Resources Research*, 1978, 14(5): 791-803.
- [10] Furey P R, Gupta V K. A physically based filter for separating base flow from streamflow time series[J]. *Water Resources Research*, 2001, 37(11): 2709-2722.
- [11] Arnold J, Srinivasan R, Neitsch S, et al. Soil and water assessment tool (SWAT) global applications [M]. Bangkok, Thailand: World Association of Soil and Water Conservation, 2009.
- [12] Jiao Wei, Zhu Zhongyuan, Song Xiaoyuan, et al. Suitability analysis of baseflow separation methods in the Xilin River basin [J]. *Arid Zone Research*, 2017, 34(1): 26-35. [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.]
- [13] Gao Mingjie, Han Tianding, Wang Jie, et al. Variations of the components of radiation in permafrost region of the upstream of Shule River [J]. *Plateau Meteorology*, 2013, 32(2): 411-422. [高明杰,韩添丁,王杰,等. 疏勒河上游流域多年冻土区辐射变化分析[J]. 高原气象, 2013, 32(2): 411-422.]
- [14] Wu Jinkui, Chen Junwu, Wu Hao, et al. Comparative study of evapotranspiration in an alpine meadow in the upper reach of Shulehe River basin[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2013, 33(1): 97-103. [吴锦奎,陈军武,吴灏,等. 疏勒河上游高寒草甸蒸散对比研究[J]. 地理科学, 2013, 33(1): 97-103.]
- [15] Zhou Jiaxin, Ding Yongjian, Zeng Guoxiong, et al. Major ion chemistry of surface water in the upper reach of Shule River basin and the possible controls [J]. *Environmental Science*, 2014, 35(9): 3315-3324. [周嘉欣,丁永建,曾国雄,等. 疏勒河上游地表水水化学主离子特征及其控制因素[J]. 环境科学, 2014, 35(9): 3315-3324.]
- [16] Institute of Hydrology. Low flow studies [J]. Wallingford, United Kingdom: Institute of Hydrology, 1980: 12-19.
- [17] Zhang Ge, Liu Defu, Song Linxu, et al. Comparative research on the application of different baseflow separation methods in the Xiangxi River watershed[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2013, 22(2): 164-171. [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.]
- [18] Li Hongyan, Zhang Lei, Zheng Longqun, et al. Application of recursive digital filtering method in groundwater flow separation in Nenjiang River basin[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2013, 49(6): 631–635. [李鸿雁, 张蕾, 郑龙群, 等. 递归数字滤波法在嫩江流域地下径流分割中的应用[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2013, 49(6): 631–635.]
- [19] Dong Xiaohua, Deng Xia, Bo Huijuan, et al. A comparison between smoothed minima and digital filtering methods applied to catchments baseflow separation[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2010, 32(2): 1–4. [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.]
- [20] Nathan R J, McMahon T A. Evaluation of automated techniques for base-flow and recession analyses [J]. Water Resources Research, 1990, 26(7): 1465–1473.
- [21] Zhang Wenna, Liu Zhihui, Wang Rongjun, et al. Application of digital filtering theory in baseflow separation of Juntanghu River watershed in northern slope of the Tianshan Mountains [J]. Arid Zone Research, 2015, 32(1): 35–39. [张文娜, 刘志辉, 王荣军, 等. 数字滤波法在天山北坡军塘湖河流域流量基流分割中的应用[J]. 干旱区研究, 2015, 32(1): 35–39.]
- [22] Guo Juntao, Zhang Zhiqiang, Wang Shengping, et al. Features of baseflow and its influencing factors for small watersheds in loess hilly and gully region[J]. Bulletin of Soil & Water Conservation, 2011, 31(1): 87–92. [郭军庭, 张志强, 王盛萍, 等. 黄土丘陵沟壑区小流域基流特点及其影响因子分析[J]. 水土保持通报, 2011, 31(1): 87–92.]
- [23] Eckhardt K. How to construct recursive digital filters for baseflow separation [J]. Hydrological Processes, 2005, 19(2): 507–515.
- [24] Pettyjohn W A, Henning R. Preliminary estimate of groundwater recharge rates, related streamflow and water quality in Ohio[R]. Ohio State University Water Resources Center Project Completion Report, 1979.
- [25] Yang Rui, Wang Long, Han Chunling. Nine kinds of baseflow separation methods apply and comparative in the upper reach of Nanpan River[J]. Journal of Yunnan Agricultural University, 2013, 28(5): 707–712. [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, 2013, 28(5): 707–712.]
- [26] Sutcliffe J V Nash J E. River flow forecasting through conceptual models part I: a discussion of principles [J]. Journal of Hydrology, 1970, 10: 282–290.
- [27] Zhou Jiaxin, Wu Jinkui, Liu Shiwei, et al. Hydrograph separation in the headwaters of the Shule River basin: combining water chemistry and stable isotopes [J]. Advances in Meteorology, 2015, 2015: 1–10.
- [28] Lan Yongchao, Hu Xinglin, Ding Hongwei, et al. Variation of water cycle factors in the western Qilian Mountain area under climate warming: taking the mountain watershed of the main stream of Shule River basin for example [J]. Journal of Mountain Science, 2012, 30(6): 675–680. [蓝永超, 胡兴林, 丁宏伟, 等. 气候变暖背景下祁连山西部山区水循环要素的变化——以疏勒河干流上游山区为例[J]. 山地学报, 2012, 30(6): 675–680.]
- [29] Lin Kairong, Chen Xiaohong, Jiang Tao, et al. Reviews on base flow researches [J]. Progress in Geography, 2008, 34(6): 28–30. [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.]

Applied comparison analysis of base-flow separation methods in upper Shule River basin

ZHOU Jiabin^{1,3}, DING Yongjian^{1,2,3}, WU Jinkui^{1,3}, WANG Jian⁴

(1. Key Laboratory of Ecohydrology of Inland River Basin, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. State Key Laboratory of Cryospheric Sciences, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. College of Urban and Environmental Sciences, Yancheng Teachers University, Yancheng 224002, Jiangsu, China)

Abstract: Base-flow is main supply source of runoff during the dry season. The reliable method of base-flow separation plays an important role in base-flow research and the management and utilization of water resources. Based on the daily runoff data from Changmabao Hydrological Station in the upper reaches of the Shule River from 2007 through 2016, in this study, using single parameter digital filtering method, minimum smoothing method, recursive digital filter technique, fixed interval method, sliding interval method and local minimum method, the base-flow is separated. The results show that the four methods can accomplish the automatic separation of base-flow. The above separated base-flow hydrograph is smooth. There are four base-flow separation methods, which have different base-flow index, ranging from 0.49 to 0.72. The results of recursive digital filtering method have the highest stability. When the filtering parameter β takes a value of 0.95, it is an optimal parameter of the single parameter digital filtering method. The minimum smoothing method, sliding interval method, local minimum method and single parameter digital filtering method ($\beta=0.95$) have high Nash-Sutcliffe efficiency coefficients with the average relative error less than 10%. The base-flow simulated results show that these methods were stable, reliable, accurately and could be used as the optimal separation methods to estimate base-flow in the study area.

Key words: runoff; base-flow separation; base-flow index; upper reaches of the Shule River; base-flow hydrograph

(本文编辑: 周成林)