

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2018.0307

LI Fang, JIN Shaobo, ZOU Songbing, et al. Analysis of the applicability of baseflow separation methods in Baihe River basin, the source regions of Yellow River[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(2):587-597. [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, 2020, 42(2):587-597.]

## 黄河源区白河基流分割方法适用性分析

李 芳<sup>1,2</sup>, 靳少波<sup>3</sup>, 邹松兵<sup>1,4,5</sup>, 陆志翔<sup>1,5</sup>, 曹光明<sup>3</sup>, 沈延青<sup>3</sup>,  
张俊才<sup>3</sup>, 蓝永超<sup>1,5</sup>, 金会军<sup>1,6</sup>, 阮宏威<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 西北生态环境资源研究院, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 黄河上游水电开发有限责任公司, 青海 西宁 810000; 4. 兰州大学 资源环境学院, 甘肃 兰州 730000; 5. 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; 6. 中国科学院 西北生态环境资源研究院 冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

**摘 要:** 基流是黄河径流的重要补给来源, 对源区水资源规划和生态环境建设具有重要作用。以黄河源区白河流域为研究区, 利用唐克水文站 1981-2015 年的实测日径流资料, 采用常用的 5 类 12 种数值模拟法, 进行基流分割并比较分析其适用性。结果表明: 12 种方法估算的基流指数(Baseflow index, *BFI*)差异明显, Lyne-Hollick 滤波法计算的 *BFI* 值最大, 为 0.91; 加里宁法计算的 *BFI* 值最小, 为 0.39; Eckhardt 滤波法的标准差和极值比最小, 稳定性最好; 加里宁法的标准差和极值比最大, 稳定性最差; 对 1992 年(丰水年)日径流过程进行分割, Chapman 滤波法、Chapman-Maxwell 滤波法和加里宁法的基流过程线平滑缓慢, 更符合实际情况; Boughton-Chapman 滤波法、*BFI* 法和 HYSEP 法基流模拟效果较好, Nash-Sutcliffe 效率系数高于 0.87, 决定系数接近 0.9, 平均相对误差小于 10%。综合比较, 认为 Boughton-Chapman 滤波法、*BFI* 法是白河流域较为适宜的基流分割手段。

**关键词:** 基流分割; 基流指数(*BFI*); 白河流域

**中图分类号:** P333 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2020)02-0587-11

### 0 引言

国际上根据对降水响应速度的快慢将径流分为直接径流和基流。直接径流退水在流量过程线上表现为快而陡, 基流退水则表现为慢而平缓。因此, 可用分割流量过程线来估算基流<sup>[1]</sup>。基流分割受到国内外研究者的广泛关注, 近年来取得了一定的进展。在国际上, 基流被广泛地应用于地下水平衡、水文过程等研究, 在国内, 基流研究主要集中在基流估算、基流变化特征与基流影响因子等方面。

Wittenberg 等<sup>[2]</sup>应用径流退水分析与基流分割对澳大利西部哈里斯河流域地下水平衡进行了估

算。Ahiablame 等<sup>[3]</sup>应用递归数字滤波法分割基流, 并用基流、土地利用和流域地理特征资料建立回归模型, 预测了美国印第安纳无资料地区的基流和基流指数。Eckhardt<sup>[4]</sup>应用不同的数值模拟法在美国 65 个流域进行基流分割并进行比较, 结果表明 Eckhardt 滤波法估算的基流量可能最为合理。焦玮等<sup>[5]</sup>以锡林河流域为研究区, 运用 4 类共 9 种数值模拟法进行基流分割并分析其适用性, 结果表明 Lyne-Hollick 滤波法和滑动步长法适合该流域的基流分割。陈利群等<sup>[6]</sup>对加里宁基流估算方法进行改进, 应用滤波法和改进的加里宁法对比分析了黄河源区的基流量。李倩等<sup>[7]</sup>利用 Lyne-Hollick 滤波法对天山中段南北坡的开都河与玛纳斯河流域进行

收稿日期: 2017-06-01; 修订日期: 2017-11-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(41571031; 41601036); 国家电力投资集团公司科技项目“黄河上游人工增雨效益评估研究”(41Y61AA)资助

作者简介: 李芳(1993-), 女, 陕西横山人, 2016 年在四川大学获学士学位, 现为中国科学院西北生态环境资源研究院在读硕士研究生, 从事水文水资源研究. E-mail: lifang162@mails.ucas.edu.cn

通信作者: 邹松兵, 副研究员, 从事 GIS 环境建模、生态水文模型及流域科学研究. E-mail: zousongbing@lzb.ac.cn.

基流分割,并利用两流域气象资料,分析了气温和降水对两流域基流的影响。

基流大小受到流域特征等因素的影响<sup>[8]</sup>,时段内基流量与河川径流量的比值为基流指数(Base-flow index, *BFI*),可反映河川基流量的大小及河流的水源补给特性<sup>[9-10]</sup>。根据研究区域的水文地质条件及基流产流过程差异,国内外学者提出了众多基流分割方法。然而,各种方法分割结果并不完全相同,有时甚至差异较大。各种基流分割方法的稳定性和适应性因流域特性而异<sup>[11]</sup>。

基流是黄河水资源的重要组成部分,黄河流域非汛期河川径流主要由基流补给<sup>[6,12]</sup>。20世纪90年代,由于气候变暖<sup>[13-14]</sup>和人类活动的影响<sup>[15]</sup>,黄河径流大幅减少<sup>[14,16]</sup>,黄河源区地下水位呈明显的下降趋势<sup>[17]</sup>,严重影响流域经济发展和生态环境安全<sup>[14]</sup>,因此,确定基流量及其变化对研究黄河的水循环及源区生态环境保护具有重要意义<sup>[6,18-19]</sup>。前人对黄河源区的基流研究主要针对整个源区的基流进行计算<sup>[6,11]</sup>,缺乏对源区典型流域基流的分析。白河流域位于黄河源降水量最丰沛的河曲段,是黄河径流主要来源区之一<sup>[20]</sup>。另外白河流域地下水天然储量年最大可达地表总径流量的38.2%,其对源区水文与水资源的影响不容忽视<sup>[21]</sup>。鉴于此,本文将白河流域作为黄河源区典型研究区,基于流域水文控制站唐克站1981-2015年日径流资料,运用5类12种数值模拟法对基流进行分割,对比基流估算结果,讨论各种方法的稳定性和可靠性,确定适合白河流域的自动基流分割方法。为进一步研究该流域基流演变规律以及对黄河源区水资源可持续利用和生态保护等提供数据基础<sup>[5]</sup>。

## 1 研究区概况

白河(又称嘎曲)流域( $32^{\circ}09' \sim 33^{\circ}28' \text{ N}$ ,  $102^{\circ}07' \sim 102^{\circ}59' \text{ E}$ )位于青藏高原东北隅的若尔盖高原东部,发源于巴颜喀拉山东端的查勒肯,源头高程4 460 m,由南往北流经红原,至唐克附近汇入黄河。干流全长270 km,流域面积5 488 km<sup>2</sup>,平均比降3.8‰,其中大部分河段在0.5‰以下,大于1‰的河段仅占1/5。河口附近以汊流形式流入黄河,属典型的弯曲型河道<sup>[20]</sup>。白河流域由沼泽区发展而成,因此整个流域沼泽遍布,湖泊众多,河道平缓,排泄不畅<sup>[21]</sup>。

白河流域属大陆性温寒带气候,年平均气温只

有0.7~1.1℃,年平均降水量为640~750 mm,是黄河流域年降水量丰沛的地区之一。7-9月降水量约占全年降水量的三分之二,暴雨的量级和频次都是黄河流域的低值区,能形成洪水的降水是在低压天气控制下的长历时阴雨,加之地面沼泽对径流的滞缓作用,无大洪峰出现。因此本流域的洪水是缓涨陡落,反映了高原湖沼地区特殊的下垫面对洪水的调蓄作用与一般河流的规律不同<sup>[21]</sup>。多年平均径流量为 $17.8 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,径流模数为 $32.4 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$ ,居黄河支流之冠<sup>[22]</sup>。径流年际、年内变化比较稳定。流域内径流的补给来源以降水为主。在中、上游河段地表水补给地下水占一定比重,至下游河段,地下水又补给地表水,所以白河河道本身又是本区域地下水的排泄通道<sup>[21]</sup>。

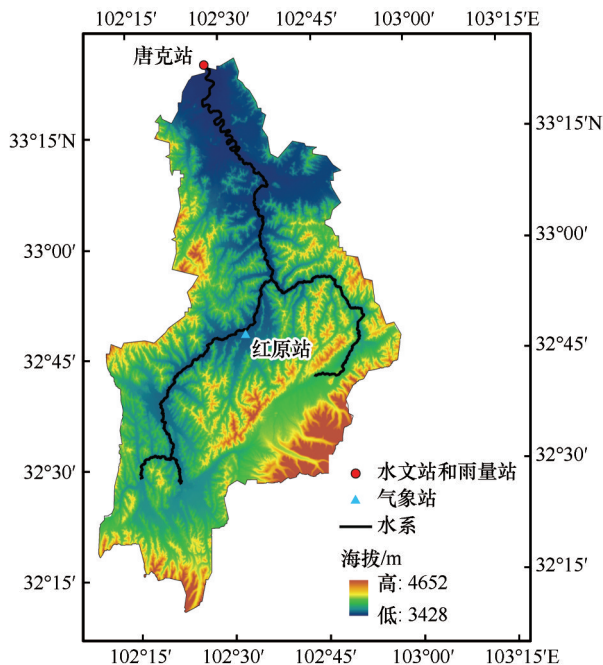


图1 白河流域

Fig. 1 The Baihe River basin

## 2 基本数据与研究方法

### 2.1 基本数据

径流数据为白河流域控制水文站唐克站( $33^{\circ}15' \text{ N}$ ,  $102^{\circ}28' \text{ E}$ )实测日径流资料,较完整的观测资料始于1981年<sup>[23]</sup>,本文采用1981-2015年,共35 a的实测日径流量资料。1985年所缺1-5月的数据用其他34 a平均数据进行填补。

### 2.2 基流分割方法简介

基流分割方法根据基流计算的原理,分为图解法、物理化学法、数学物理法、水文模型法和数值

模拟法<sup>[24-25]</sup>。其中数值模拟法基于信号处理技术, 通过河道径流量计算基流量, 这类方法采用计算机自动实现, 操作简便、计算速度快、可重复使用, 因此在实践中得到了广泛应用和认可<sup>[24-26]</sup>。本文采用数值模拟法中的数字滤波法、*BFI*法、*HYSEP*法、*PART*法和加里宁法共5类12种对白河流域基流进行分割。

### 2.2.1 数字滤波法

数字滤波法(Digital filter method)利用数字滤波器将信号分解为高频和低频部分, 即将径流过程划分为直接径流(高频信号)和基流(低频信号)2个部分, 代表流域降雨-径流过程中快速响应的直接径流特征与数字信号中的高频部分相似, 代表慢速响应的基流特征与数字信号中的低频部分相似<sup>[27-28]</sup>。数字滤波法包括单参数滤波法和双参数滤波法(又称递归数字滤波法)<sup>[9]</sup>。

单参数数字滤波法可分为4种<sup>[10]</sup>。

方法1: Lyne-Hollick滤波法由Lyne和Hollick于1979年首次提出, 并由Nathan和McMahon于1990年引入到水文中进行基流分割<sup>[29]</sup>, 其基流分割方程为:

$$Q_d(i) = f_1 Q_d(i-1) + \frac{1+f_1}{2} [Q(i) - Q(i-1)] \quad (1)$$

$$Q_b(i) = Q(i) - Q_d(i) \quad (2)$$

式中:  $i$ 为时间, 单位d;  $Q_d(i)$ 和 $Q_d(i-1)$ 分别为第 $i$ 时刻和第 $i-1$ 时刻的直接径流;  $Q(i)$ 和 $Q(i-1)$ 分别为第 $i$ 时刻和第 $i-1$ 时刻的径流;  $Q_b(i)$ 为第 $i$ 时刻的基流;  $f_1$ 为滤波参数, 一般取为0.925。

方法2: Chapman<sup>[30]</sup>于1991年对Lyne-Hollick滤波法进行了改进, 提出了Chapman滤波法, 改进后的基流分割方程为:

$$Q_d(i) = \frac{3f_1-1}{3-f_1} Q_d(i-1) + \frac{2}{3-f_1} [Q(i) - Q(i-1)] \quad (3)$$

式中:  $f_1$ 为退水参数, 一般取为0.95; 其他参数含义同上。再用式(2)计算基流。

方法3: Chapman和Maxwell于1996把基流假定为同时刻的地表径流和前一时刻基流的加权平均, 提出了Chapman-Maxwell滤波法<sup>[31]</sup>, 基流分割方程如下:

$$Q_b(i) = \frac{f_1}{2-f_1} Q_b(i-1) + \frac{1-f_1}{2-f_1} Q(i) \quad (4)$$

式中:  $f_1$ 为退水参数, 一般取为0.95; 其他参数含义同上。

方法4: 为使基流分割更为平滑, Boughton于

1993年提出Boughton-Chapman滤波法<sup>[32]</sup>, 基流分割方程为:

$$Q_b(i) = \frac{f_1}{1+f_2} Q_b(i-1) + \frac{f_2}{1+f_2} Q_b(i) \quad (5)$$

式中:  $f_1$ 为退水参数, 一般取为0.95;  $f_2$ 为固定值, 一般取为0.15<sup>[10]</sup>。

Eckhardt滤波法为双参数滤波法<sup>[4]</sup>, 包含2个滤波参数(退水常数 $\alpha$ 和最大基流指数 $BFI_{\max}$ ), 方法更加灵活准确, 其计算如式(6)所示:

$$Q_b(i) = \frac{(1-BFI_{\max})\alpha Q_b(i-1) + (1-\alpha)BFI_{\max}Q(i)}{1-\alpha BFI_{\max}} \quad (6)$$

式中:  $\alpha$ 为退水常数, 可通过MRC(Master Recession Curve)方法<sup>[33]</sup>得出,  $BFI_{\max}$ 为最大基流指数, 即长期地下径流与总径流的比值的最大值,  $Q_b(i-1)$ 为第 $i-1$ 时刻的基流, 其他参数含义同上。

### 2.2.2 基流指数(BFI)法

基流指数(BFI)法又称最小滑动法, 该方法以基流指数为权系数来计算基流量, 在区域枯季径流的研究中, 该值可反映区域地下水资源量的参数<sup>[34-35]</sup>。通常情况下, 主要由地下水补给的河流*BFI*接近1, 而季节性河流的*BFI*值趋近0<sup>[24]</sup>。

*BFI*法主要有标准*BFI(f)*法和改进*BFI(k)*法, 其拐点检验因子 $f$ 和 $k$ 一般取经验值0.9和0.97915<sup>[36]</sup>。其计算原理是: 以 $N$ 天为一个时间单位, 将每年划分成 $365/N$ 个时段, 记相邻3个时段内的最小流量值分别为 $Q(i-1)$ 、 $Q(i)$ 、 $Q(i+1)$ 。如果某时段内的最小流量值与拐点检验因子 $f$ (或 $k$ )的积小于相邻左右时段内的最小流量值, 即 $Q(i) < fQ(i-1)$ 且 $Q(i) < fQ(i+1)$ [或 $Q(i) < kQ(i-1)$ 且 $Q(i) < kQ(i+1)$ ], 则将中间点确定为拐点。在年内日流量过程线图上确定出所有拐点, 并将所有拐点用直线连接, 即可得到基流过程线, 过程线以下的面积即为该年的基流量<sup>[24]</sup>。

本文以1992年、2003年和1986年分别作为丰水年( $P=25\%$ )、平水年( $P=50\%$ )、枯水年( $P=75\%$ )的典型年份, 进行 $N$ 值和*BFI*值的关系分析。经测算, 当 $N \geq 4$ 时, 各水平年基流指数基本趋于稳定, 因此在本研究区内选取 $N=4$ , 即以4d为一时段进行基流分割较为合理<sup>[10]</sup>。

### 2.2.3 时间步长(HYSEP)法

Petty John和Henning于1979年提出了HYSEP程序<sup>[4,37]</sup>, 此方法首次实现了基流计算的程序。HYSEP法是美国地质调查局(USGS)使用的主要基流计算方法<sup>[24,38]</sup>。HYSEP法有固定步长法、滑动步

长法和局部最小值法 3 种方式。固定步长法(Fixed interval), 在上述所选取的时间间隔内, 将该时间间隔内的最小流量作为该时段内任意一天的基流。滑动步长法(Sliding interval), 将某天前后  $(2N-1)/2d$  内的最小流量作为该天的基流, 由此计算出每一天的基流。局部最小值法(Local minimum), 选择时间步长内中心点前后  $(2N-1)/2d$  内的最小流量作为相邻时间步长内中心点的基流值, 然后通过线性内插得到步长中心点之外时段的基流。3 种方法均以本次计算的终点作为下次时间的起点, 重复以上过程便可计算出基流分割过程。

#### 2.2.4 PART 法

PART<sup>[38]</sup> 是美国地质调查局(USGS)提出的用于分割基流的另一种计算机程序, PART 法适用于以谷地泻流方式排泄或测站位于下游终点的河流, 所需径流资料不少于一个水文年<sup>[25]</sup>。该方法以日流量为数据源, 基于前期径流消退进行分割。这种方法首先将日平均流量数据排列成单维数组, 然后在数组中选择符合前期衰退要求的日值, 在符合条件的这些天数中, 如果日衰退量小于 0.1 个对数周期, 日径流量值即作为基流量, 在其余的日期中, 基流值则通过线性插值的方法来获得<sup>[39]</sup>。

#### 2.2.5 加里宁-阿里巴扬基流估算改进方法

基于水量平衡原理, 加里宁提出了基流的分割方法<sup>[6]</sup>, 杨远东<sup>[40]</sup>和陈利群等<sup>[6]</sup>对其进行改进。实际资料表明, 改进的方法避免了地下水流量过程估算的任意性, 且减少了计算工作量, 所得成果是合理的, 方法是简易可行的<sup>[40]</sup>。其估算方程为:

$$Q_b(i) = \theta \bar{Q}(i-1) + \lambda Q_b(i-1) \quad (7)$$

其中,  $\theta = B\alpha \Delta t$ ;  $\lambda = 1 - (1+B)\alpha \Delta t$ 。式中:  $\bar{Q}(i-1)$  为计算时段  $i-1$  至  $i$  内的平均径流量;  $B$  为比例系数, 是地下径流与地表径流的比值;  $\alpha$  为退水系数;  $\Delta t$  为计算时间段间隔; 其他参数含义同上。该估算方法中有两个参数, 其中退水系数  $\alpha$  可通过退水曲线来确定, 比例系数  $B$  则尚无相应的理论公式, 只能通过流域特征、参考临近流域经验估算, 或运用试算法得出。确定  $B$  值的原则为其大小应小于且接近地下径流与地表径流的比值, 并要求算出的基流量低于河川总径流量<sup>[11]</sup>。

#### 2.3 实际基流量确定

枯水指数是反映地下水补给河川径流特性的重要指标,  $Q_{90}$  和  $Q_{50}$  分别代表时段内出现频率大于等于 90% 和 50% 时的径流量, 采用日流量历时曲线

来确定<sup>[41]</sup>。以枯水指数  $(Q_{90}/Q_{50})$  与年总径流量的乘积作为年基流量的实际观测值, 用于和上述基流分割估算结果进行对比<sup>[41-42]</sup>。

#### 2.4 数据分析方法

为了比较各种基流分割方法的效果, 运用 5 类 (12 种) 基流分割方法对白河流域唐克水文站 35 a 的实测日径流资料进行基流计算, 获取基流指数值, 分析其平均值, 极值和标准偏差(Standard deviation)等统计特征。

#### 2.5 评价指标

用相关系数( $r$ )作为不同基流分割方法计算结果相关程度的评价指标。用 Nash-Sutcliffe 效率系数(NSE)<sup>[43]</sup>和决定系数( $R^2$ )<sup>[44]</sup>作为基流实际观测值与分割值的对比标准。决定系数( $R^2$ )作为估算值与观测值拟合程度的度量, 其值是相关系数的平方。NSE 计算公式如下:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_o(i) - Q_b(i))^2}{\sum_{i=1}^n (Q_o(i) - Q_{o, \text{mean}})^2} \quad (8)$$

$R^2$  和 NSE 取值一般在 0 ~ 1 之间, 越接近 1, 说明拟合度越好, 估算效果越好, 越接近 0, 说明效果越差。

采用平均相对误差(MRE)对误差进行评价, 表达式为:

$$MRE = \frac{|Q_o(i) - Q_b(i)|}{Q_b(i)} \times 100\% \quad (9)$$

MRE 越接近 0, 说明模拟效果越好。一般认为, NSE 超过 0.6, MRE 小于 10% 模拟结果就具有较好的精度。

### 3 结果分析

#### 3.1 径流变化特征

白河流域径流年内分配呈明显的双峰型(图 2), 属于冰雪融水和降水混合补给型的河流<sup>[45]</sup>。最小流量发生在 12 月至次年 2 月, 此时河流封冻, 径流主要靠地下水补给, 径流相对稳定。3 月份以后, 气温渐升, 冰雪逐渐融化和河流解冻形成春汛, 流量缓增。夏秋两季径流随降水而变, 6-7 月径流最多, 8 月径流下降, 因为每年约有 20 d 的伏旱段, 9 月径流又上升, 原因是随降雨增多而增大<sup>[22]</sup>, 10 月以后属退水阶段。径流年内分配不均, 连续最大 4 个月径流量出现在 6-9 月, 占全年径流量的 58.94%。最大月径流量出现在 7 月, 占年径

流量的 18.38%, 最小月径流量出现在 1 月, 占年径流量的 1.90%。

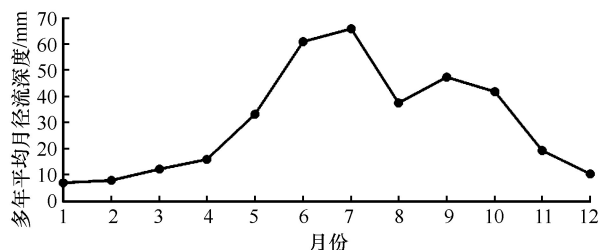


图2 白河流域径流年内分配过程

Fig. 2 Distribution of monthly runoff volume in the Baihe River basin

白河径流年代际变化情况(表 1)为 1980s 偏丰, 1990s 平水, 进入 2000 年以后, 水量偏枯, 在 2010 年以后径流量有所增加。汛期水量约占年径流的 80%, 非汛期占 20%。多年平均年径流量越少, 汛期水量占比越小, 相反非汛期水量占比则越大。

表1 1981 – 2015 年白河流域径流量的年代际变化

Table 1 Decadal variation of runoff volume in the Baihe River basin during 1981 – 2015

时间段	多年平均/ $\times 10^8 \text{ m}^3$	汛期/ $\times 10^8 \text{ m}^3$	非汛期/ $\times 10^8 \text{ m}^3$	汛期占比/%	非汛期占比/%
1981 – 1990 年	23.80	18.99	4.31	79.82	18.10
1991 – 2000 年	19.22	15.46	3.77	80.43	19.62
2001 – 2010 年	15.55	11.76	3.79	75.67	24.35
2011 – 2015 年	21.01	17.05	3.96	81.18	18.87
平均	19.73	15.63	3.95	79.18	20.01

表2 12 种基流分割方法估算的基流指数值

Table 2 Estimation of the baseflow indices based on 12 baseflow separation methods

年份	数字滤波法					BFI 法		HYSEP 法			PART 法	加里宁法
	Lyne-Hollick 滤波法	Chapman 滤波法	Chapman-Maxwell 滤波法	Boughton-Chapman 滤波法	Eckhardt 滤波法	标准 BFI	改进 BFI	固定步长法	滑动步长法	局部最小值法		
1981 – 1990 年	0.90	0.56	0.56	0.78	0.81	0.83	0.82	0.83	0.81	0.82	0.86	0.35
1991 – 2000 年	0.90	0.56	0.56	0.78	0.81	0.85	0.84	0.85	0.85	0.83	0.88	0.37
2001 – 2010 年	0.92	0.54	0.54	0.77	0.81	0.89	0.88	0.89	0.89	0.85	0.93	0.46
2011 – 2015 年	0.91	0.55	0.55	0.77	0.81	0.85	0.85	0.87	0.87	0.85	0.90	0.41

本文以 1992 年、2003 年和 1986 年分别作为丰 ( $P=25\%$ )、平 ( $P=50\%$ )、枯水年 ( $P=75\%$ ) 的典型年份, 利用 12 种基流分割方法计算各水平年的年基流指数(表 3), 可以发现不同方法计算的典型年  $BFI$  值有所差异。 $BFI$  法和加里宁法所得结果差异较大, 年来水量越多,  $BFI$  值越小, 说明这两类方法对于典型年的基流过程有较好的辨别能力。其他

### 3.2 基流指数对比分析

利用 12 种基流分割方法计算所得的各年代际基流指数结果(表 2)可以看出, 白河流域基流占径流的比重较大。5 种数字滤波法计算的  $BFI$  值差异明显, Lyne-Hollick 滤波法计算的  $BFI$  值最大, 不小于 0.90, Chapman 滤波法和 Chapman-Maxwell 滤波法计算的  $BFI$  值等大, 且最小, 不超过 0.60。2 种  $BFI$  法和 3 种 HYSEP 法计算的  $BFI$  值非常接近, 差异较小。5 类方法中加里宁法计算的  $BFI$  值最小, PART 法计算的  $BFI$  值最大。对于不同年代同种方法分割所得的  $BFI$  值也有所不同, 但总体上差异很小, 加里宁法相差最多为 0.11。按年代划分, 多年平均  $BFI$  值总体上呈先上升后下降的趋势, 与多年平均径流正好呈相反的变化趋势。这是因为在一般情况下, 径流量大的丰水年份河川径流来自流域地表汇水的比重较大, 而来自地下水补给的基流部分相对较少, 从而计算所得的  $BFI$  值较小; 而径流量小的枯水年份径流主要来自于地下水的缓慢补给, 故  $BFI$  值偏大<sup>[24]</sup>。

方法对不同水平年的分割结果相差不大, 说明对于不同年份的基流过程不能较好地区分。

为进一步揭示不同方法估算结果的差异性, 本文分析了 12 种基流分割方法估算的基流指数的统计特征(表 4)。数字滤波法的标准偏差最小, 说明最为稳定。加里宁法标准偏差最大, 稳定性最差, 因为加里宁法分割基流受实测径流影响很大。其

表3 12种基流分割方法估算的典型年基流指数值

Table 3 Estimation of the typical year baseflow indices based on 12 baseflow separation methods

年份	数字滤波法					BFI法		HYSEP法			PART法	加里宁法
	Lyne-Hollick 滤波法	Chapman 滤波法	Chapman-Maxwell 滤波法	Boughton-Chapman 滤波法	Eckhardt 滤波法	标准 BFI	改进 BFI	固定步长法	滑动步长法	局部最小值法		
1986年	0.90	0.57	0.57	0.79	0.82	0.78	0.77	0.81	0.81	0.82	0.87	0.23
1992年	0.91	0.58	0.58	0.79	0.81	0.85	0.84	0.83	0.83	0.81	0.88	0.38
2003年	0.90	0.52	0.52	0.76	0.80	0.87	0.87	0.87	0.88	0.87	0.93	0.53

表4 12种基流分割方法估算的各年基流指数值的统计特征

Table 4 Statistical results of annual baseflow indices estimated with 12 baseflow separation methods

统计特征	数字滤波法					BFI法		HYSEP法			PART法	加里宁法
	Lyne-Hollick 滤波法	Chapman 滤波法	Chapman-Maxwell 滤波法	Boughton-Chapman 滤波法	Eckhardt 滤波法	标准 BFI	改进 BFI	固定步长法	滑动步长法	局部最小值法		
平均值	0.91	0.55	0.55	0.77	0.81	0.86	0.85	0.86	0.86	0.84	0.89	0.39
标准差	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.03	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.09
最大值	0.94	0.58	0.58	0.79	0.82	0.94	0.93	0.93	0.92	0.92	0.95	0.58
最小值	0.88	0.52	0.52	0.76	0.80	0.78	0.77	0.81	0.80	0.77	0.84	0.23
极值比	1.08	1.11	1.11	1.04	1.01	1.20	1.19	1.14	1.14	1.20	1.13	2.53

他方法的标准偏差介于这两类法之间，且偏差程度相近。年 *BFI* 极值比加里宁法计算结果最大，达 2.53，其他方法计算结果相近，都接近于 1。因此，认为数字滤波法的基流分割结果稳定性最高，加里宁法的稳定性最差，其他方法介于二者之间，且稳定程度类似。

将 12 种方法估算的年均 *BFI* 值作相关性分析

(表 5)，12 种方法中滑动步长法估算的 *BFI* 值与其他方法的相关性最好，加里宁法与其他方法的相关性最差。*BFI* 法和 HYSEP 法的同类方法之间相关性较好，与它们计算原理相近有关。不同的数字滤波法之间相关性较差，尤其 Lyne-Hollick 滤波法，与其他四种数字滤波法的相关性极差，这与数字滤波法的计算方程和所使用的参数的适用性有关。

表5 12种基流分割方法基流指数值的相关系数

Table 5 Correlation coefficients of annual baseflow indices estimated with 12 baseflow separation methods

方法	数字滤波法					BFI法		HYSEP法			PART法	加里宁法
	Lyne-Hollick 滤波法	Chapman 滤波法	Chapman-Maxwell 滤波法	Boughton-Chapman 滤波法	Eckhardt 滤波法	标准 BFI	改进 BFI	固定步长法	滑动步长法	局部最小值法		
Lyne-Hollick 滤波法	1.00											
Chapman 滤波法	-0.28	1.00										
Chapman-Maxwell 滤波法	-0.28	0.99*	1.00									
Boughton-Chapman 滤波法	-0.01	0.80*	0.78*	1.00								
Eckhardt 滤波法	-0.23	0.61*	0.62*	0.61*	1.00							
标准 BFI	0.72*	-0.51*	-0.51*	-0.40	-0.60*	1.00						
改进 BFI	0.69*	-0.55*	-0.56*	-0.46•	-0.63*	0.96*	1.00					
固定步长法	0.73*	-0.56*	-0.54*	-0.49*	-0.48*	0.86*	0.87*	1.00				
滑动步长法	0.69*	-0.65*	-0.63*	-0.57*	-0.60*	0.88*	0.89*	0.97*	1.00			
局部最小值法	0.67*	-0.59*	-0.60*	-0.51*	-0.50*	0.77*	0.85*	0.79*	0.81*	1.00		
PART 法	0.66*	-0.61*	-0.59*	-0.49*	-0.45•	0.76*	0.80*	0.87*	0.88*	0.79*	1.00	
加里宁法	0.37	-0.54*	-0.54*	-0.32	-0.38	0.43•	0.46•	0.50*	0.48*	0.54*	0.53*	1.00

注：•表示在 0.01 水平上显著，\*表示在 0.005 水平上显著。

### 3.3 基流分割结果对比

为更深入地了解各种基流分割方法所得基流过程的特点, 采用12种基流分割方法对1992年(丰水年)日径流过程进行分割估算(图3)。可以看出, 各种方法分割得到的基流过程线起伏程度差异较大, 但形状基本与径流过程线相似。所得基

流序列随径流的起涨衰退趋势一致, 但相对径流变化有一定的延迟, 不同方法的延迟时间也有所不同。12种方法分割所得的基流过程线在流量较低、变化较小的阶段, 分割结果的差别很小; 而在流量较大的6-7月和9-10月, 分割结果有明显的不同。

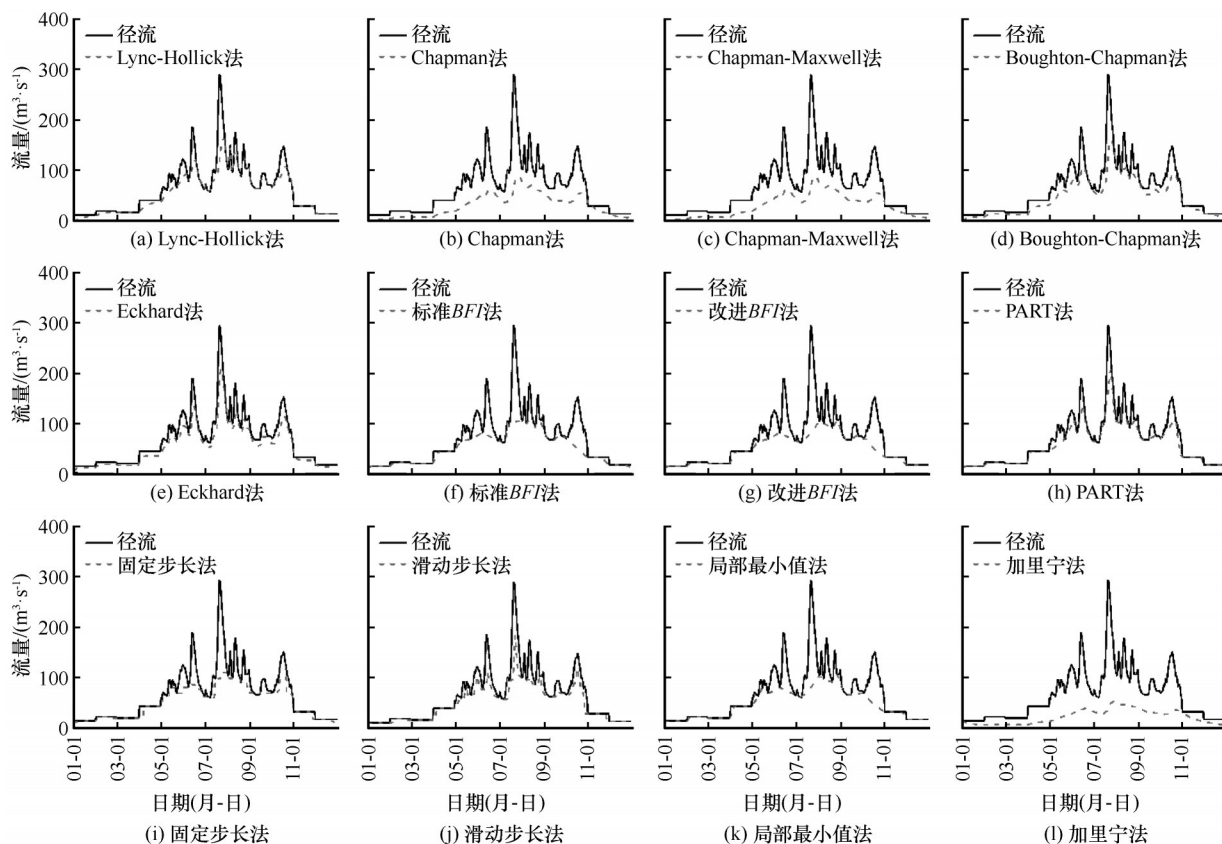


图3 1992年(丰水年)5类(12种)基流分割法的基流过程线比较

Fig. 3 Baseflow hydrographs estimated with the 12 baseflow separation methods in 1992 (a wet year)

5种数字滤波法中, Eckhardt滤波法分割所得的基流过程起伏程度最大; Lyne-Hollick滤波法和Boughton-Chapman滤波法基流过程线起伏幅度次之, 且两者的过程相近; Chapman滤波法和Chapman-Maxwell滤波法分割的基流过程最为平缓, 且二者的过程线极为一致。2种BFI法的基流分割结果也极为相似。3种HYSEP法中, 滑动步长法分割的基流过程起伏幅度最大, 固定步长法和局部最小值法分割的基流过程幅度较小, 且过程线相似。Eckhardt滤波法、PART法和滑动步长法分割的基流过程线随径流变化陡起陡落, 峰值出现位置高且尖锐, 不能很好反映基流的实际情况。Chapman滤波法、Chapman-Maxwell滤波法和加里宁法分割的基流过程整体比较平稳。

在日径流的衰退阶段, BFI法、PART法和滑动步长法分割所得的基流值相对其他方法更高一些, 更接近于径流的变化。这主要是因为它们分割的基流是基于相邻两拐点线性内插进行分割得到的。由于在衰退阶段, 河川径流主要由基流组成, 认为Chapman滤波法、Chapman-Maxwell滤波法以及局部最小值法和加里宁法在径流衰退阶段分割的基流与基流产生的实际情况相符。加里宁法所依据的方程受实测径流过程的影响很大, 起伏过程与实测径流过程相似, 该方法受试算期内特枯流量影响较大, 如10月末流量突降, 为了保证分割出的基流量始终低于实测流量, 所设计的参数 $B$ 值范围受限, 最终得出的BFI值仅为0.376, 与其他方法相差很大。固定步长法划分的基流过程线不平滑, 与实

际情况不符,因为流域下垫面会对降水在形成径流的汇流阶段产生阻尼和迟滞效应,从而决定了地下径流的流量过程线应是平滑的。

3.4 基流分割结果验证

为验证不同基流分割方法对实际基流量估算的可靠性,本文选用 Nash-Sutcliffe 效率系数 NSE、决定系数  $R^2$  及平均相对误差 MRE 这 3 个指标来评价基流实际值与估算值之间的差异性,从而选出最优分割方法。

通过对比 12 种方法的验证结果(表 6)可以看出,5 种数字滤波法的 NSE 和 MRE 相差较大,  $R^2$  相近,且均接近于 0.95。根据评价指标,认为 Eckhardt 滤波法优于 Lyne-Hollick 滤波法,但二者 MRE

均超过 10%,其中 Lyne-Hollick 滤波法的 MRE 甚至接近于 20%。2 种  $BFI$  法和 3 种 HYSEP 法同类之间进行比较,差异较小,结果非常接近。这两类方法计算所得的评价指标结果比较理想,对白河流域基流计算适应性较好。PART 法所得指标结果也表明其对白河流域基流分割的适用情况较好,但 MRE 超过了 10%,相较而言  $BFI$  法和 HYSEP 法更优。12 种方法比较,其中 Boughton-Chapman 滤波法的评价指标显示,基流分割结果与实际基流最为接近,准确性最高;Chapman 滤波法和 Chapman-Maxwell 滤波法与加里宁法所得评价指标结果较差,与实际基流相差较大,说明这 3 种方法不适于计算白河流域基流。

表 6 12 种基流分割方法的验证结果  
Table 6 Verified results of baseflow estimated with 12 baseflow separation methods

方法	数字滤波法					$BFI$ 法		HYSEP法			PART 法	加里 宁法
	Lyne-Hol- lick 滤波法	Chapman 滤波法	Chapman-Max- well 滤波法	Boughton-Chap- man 滤波法	Eckhardt 滤波法	标准 $BFI$	改进 $BFI$	固定步 长法	滑动步 长法	局部最 小值法		
NSE	0.58	-0.27	-0.26	0.94	0.78	0.86	0.87	0.86	0.87	0.86	0.80	-2.22
$R^2$	0.94	0.96	0.96	0.95	0.95	0.87	0.87	0.91	0.92	0.87	0.90	0.48
MRE/%	18.38	30.03	29.98	4.83	12.86	8.46	7.95	9.71	9.33	7.78	11.99	45.08

3.5 结果对比与分析

综合比较,认为 Boughton-Chapman 滤波法、 $BFI$ 法(标准和改进)是白河流域较为适宜的基流分割手段,计算的所得的  $BFI$  值分别为 0.77、0.86、0.85。结合前人对黄河源区的基流指数的计算结果,钱云平等<sup>[46]</sup>利用  $BFI$  法计算黄河源区  $BFI$  值达到 0.7 左右。陈利群等<sup>[47]</sup>对加里宁基流估算方法进行改进,分段计算整个黄河源区基流,黄河沿以上流域  $BFI$  值为 0.556,黄河沿-吉迈区间  $BFI$  值为 0.588,吉迈-玛曲区间为 0.649,玛曲-唐乃亥区间  $BFI$  值高达 0.704。周旭东等<sup>[11]</sup>选取典型年径流量过程单峰型、双峰型、多峰型,采用数字滤波法、加里宁试算法、改进的经验斜割法计算的黄河源区  $BFI$  值范围分别在 0.410 ~ 0.426, 0.343 ~ 0.462, 0.370 ~ 0.409 之间。

与其他研究者计算的黄河源区的  $BFI$  值相比,本文计算的白河流域的  $BFI$  值较大。结合白河流域沼泽遍布,湖泊众多的特征,所以认为白河流域  $BFI$  值相对整个黄河源区较高具有合理性。

4 结论

通过采用 5 类(12 种)基流分割方法对白河基流

的分析与对比,得到如下结论:

(1) 基流指数的年代际变化趋势与径流正好相反。不同分割方法对于典型年的识别能力不同,  $BFI$  法和加里宁法识别能力较好;数字滤波法、HYSEP 法和 PART 法识别能力较差。

(2) 不同方法计算出的多年平均  $BFI$  值有明显差异,基流指数大体分布在 0.75 ~ 0.90 之间,说明基流是白河径流的主要组成部分。采用不同方法得到的基流分割结果的标准差和极值比大都较小,其中数字滤波法的稳定性最好,加里宁法的稳定性最差。

(3) 通过对比 1992 年(丰水年)分割所得的基流过程线,并结合流域特征,发现 Lyne-Hollick 滤波法和 Boughton-Chapman 滤波法分割的基流过程线能较好地体现出基流随退水曲线变化特征,从年内变化来看,Chapman 滤波法、Chapman-Maxwell 滤波法和加里宁法分割得到的基流过程变化较为平稳,更符合实际情况。

(4) 使用 Boughton-Chapman 滤波法分割出的基流量与实际观测值的拟合优度最好,  $BFI$  法和 HYSEP 法模拟效果次之,加里宁法效果最差。

综上所述,认为 Boughton-Chapman 滤波法、

*BFI*法在白河流域具有适宜性。由于白河流域特殊的地理特征,其*BFI*值相对整个黄河源区较高。基流主要受区域地形地貌等自然特征影响,而数字滤波法和*BFI*法并无明确的物理成因,其计算的基流结果与研究区自然地理特征之间的关系以及受人类活动影响程度等值得进一步研究。而且,这两类方法在黄河源区及其支流区域的适应性如何值得进一步探讨。

## 参考文献(References):

- [1] Dang Suzhen, Wang Zhonggen, Liu Changming. Baseflow separation and its characteristics in the upper reaches of the Heihe River basin [J]. Resources Science, 2011(12): 2232 – 2237. [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(12): 2232 – 2237.]
- [2] Wittenberg H, Sivapalan M. Watershed groundwater balance estimation using streamflow recession analysis and baseflow separation[J]. Journal of Hydrology, 1999, 219(1/2): 20-33.
- [3] Ahiablame L, Chaubey I, Engel B, et al. Estimation of annual baseflow at ungauged sites in Indiana USA [J]. Journal of Hydrology, 2013, 476(2): 13 – 27.
- [4] 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.
- [5] 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. [焦伟, 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.]
- [6] Chen Liquan, Liu Changming, Yang Cong, et al. Baseflow estimation of the source regions of the Yellow River [J]. Geographical Research, 2006, 25(4): 659 – 665. [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): 659 – 665.]
- [7] Li Qian, Li Lanhai, Shang Ming, et al. Baseflow and its affecting factors of the typical alpine watersheds in the north and south slopes of the central tianshan mountains [J]. Arid Zone Research, 2015, 32(1): 29 – 34. [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.]
- [8] Qian Kaizhu, Lü Jingjing, Pei Chaozhong, et al. Calculation and analysis of baseflow of Tongtian River in the source region of Yangtze Rive [J]. Arid Land Geography, 2011, 34(3): 511 – 518. [钱开铸, 吕京京, 裴超重, 等. 长江源区通天河基流的计算与分析[J]. 干旱区地理, 2011, 34(3): 511 – 518.]
- [9] 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.]
- [10] 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.]
- [11] Zhou Xudong, Yang Tao. Applications of three baseflow separation methods in source region of Yellow River [J]. Water Resources and Power, 2014, 32(10): 18 – 21. [周旭东, 杨涛. 三种基流分割方法在黄河源区应用中的对比分析[J]. 水电能源科学, 2014, 32(10): 18 – 21.]
- [12] Lin Xueyu, Liao Zisheng, Qian Yunping, et al. Baseflow separation for groundwater study in the Yellow River basin [J]. China Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2009, 39(6): 959 – 967. [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.]
- [13] Wang Jinxing, Zhang Jianyun, Li Yan, et al. Variation trends of runoffs seasonal distribution of the six larger basins in China over the past 50 years [J]. Advances in Water Science, 2008, 19(5): 656 – 661. [王金星, 张建云, 李岩, 等. 近50年来中国六大流域径流年内分配变化趋势[J]. 水科学进展, 2008, 19(5): 656 – 661.]
- [14] Zhang Guosheng, Li Lin, Shi Xinghe, et al. Climatic changes over the upper Yellow River and its effects on water resources [J]. Advances in Water Science, 2000, 11(3): 277 – 283. [张国胜, 李林, 时兴合, 等. 黄河上游地区气候变化及其对黄河水资源的影响[J]. 水科学进展, 2000, 11(3): 277 – 283.]
- [15] Li Erhui, Mu Xingmin, Zhao Guangju. Temporal changes in annual runoff and influential factors in the upper and middle reaches of Yellow River from 1919 – 2010 [J]. Advances in Water Science, 2014, 25(2): 155 – 163. [李二辉, 穆兴民, 赵广举. 1919 - 2010年黄河上中游区径流量变化分析[J]. 水科学进展, 2014, 25(2): 155 – 163.]
- [16] Wang Weidi, Sun Hanxian, Shi Jiabin. Analysis of persistence of hydrological drought on the upper Yellow River [J]. Advances in Water Science, 1991, 2(4): 251 – 257. [王维第, 孙汉贤, 施嘉斌. 黄河上游连续枯水段分析与设计检验[J]. 水科学进展, 1991, 2(4): 251 – 257.]
- [17] Peng Xuanming, Wu Qingbai, Tian Mingzhong. The effect of groundwater table lowering on ecological environment in the headwaters of the Yellow River [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(6): 667 – 671. [彭轩明, 吴青柏, 田明中. 黄河源区地下水水位下降对生态环境的影响[J]. 冰川冻土, 2003, 25(6): 667 – 671.]
- [18] Xu Jiongxin. Impact of human activities on the stream flow of Yellow River [J]. Advances in Water Science, 2007, 18(5): 648-655. [许炯心. 人类活动对黄河河川径流的影响[J]. 水科学进展, 2007, 18(5): 648 – 655.]
- [19] Li Fuxing, Chen Dong, Tang Qiuhong. Variations of hydro-meteorological variables in the Yellow River basin and their relationships with the East Asian summer monsoon [J]. Advances in Water Science, 2015, 26(4): 481 – 490. [李夫星, 陈东, 汤秋鸿. 黄河流域水文气象要素变化及与东亚夏季风的关系[J]. 水科学进展, 2015, 26(4): 481 – 490.]
- [20] Zhao Zile. Water and sediment regulation of Heihe and Baihe River basin in the upper reaches of the Yellow River [J]. Gansu Water Resources and Hydropower Technology, 2005, 41(4): 336 – 338. [赵资乐. 黄河上游黑河、白河流域水沙规律[J]. 甘肃水利水电技术, 2005, 41(4): 336 – 338.]
- [21] Zhang Qifu, Hu Erchang. Black and White River basin [J]. Yellow River, 1983(4): 67 – 69. [张启富, 胡尔昌. 黑、白河流域概况[J]. 人民黄河, 1983(4): 67 – 69.]
- [22] He Qiuming. Analysis on the characteristics of water and sediment in Baihe station in the Yellow River [J]. Gansu Water Resources and Hydropower Technology, 2009(9): 16 – 19. [何

- 秋明. 浅析黄河源区白河唐克站水沙特征[J]. 甘肃水利水电技术, 2009(9): 16 – 19. ]
- [23] Ma Qingquan. Characteristics of runoff and sediment in Baihe River basin [C]//The sixth symposium on hydrology and sediment Specialized Committee of China Hydropower Engineering Society, China Hydrology and Sediment Specialized Committee. Chengdu, 2011: 28 – 30. [ [马庆全. 白河流域径流及泥沙特征[C]//白河流域径流及泥沙特征. 中国水力发电工程学会水文泥沙专业委员会第六届学术讨论会, 中国水力发电工程学会水文泥沙专业委员会. 成都, 2011: 28 – 30. ] ]
- [24] Wang Guan, Lu Chengpeng, Li Shulei, et al. Applied comparison of five separation methods of base flow at Luoshan station of Yangtze River[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2015, 26(3): 118 – 123. [王冠, 鲁程鹏, 李殊蕾, 等. 五种基流分割方法在长江螺山站的应用对比研究[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(3): 118 – 123. ]
- [25] Qian Kaizhu, Lü Jingjing, Chen Ting, et al. A review on baseflow calculation and its application[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2011, 38(4): 20 – 25. [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. ]
- [26] Gu Lei, Zhang Hongbo, Chen Keyu, et al. Spatial-temporal evolution of river baseflow in northern Shaanxi[J]. Advances in Earth Science, 2015, 30(7): 802 – 811. [顾磊, 张洪波, 陈克宇, 等. 陕北地区河川基流的时空演变规律[J]. 地球科学进展, 2015, 30(7): 802 – 811. ]
- [27] Cui Chao, Zhai Limei, Liu Hongbin, et al. Comparative application of different methods of base flow separation in Xiangxi River basin during long period[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2016, 55(3): 569 – 574. [崔超, 翟丽梅, 刘宏斌, 等. 长尺度下不同基流分割方法在香溪河流域的应用比较[J]. 湖北农业科学, 2016, 55(3): 569 – 574. ]
- [28] Arnold J G, Allen P M. Automated methods for estimating baseflow and ground water recharge from streamflow records [J]. Jwra Journal of the American Water Resources Association, 1999, 35(2): 411 – 424.
- [29] Nathan R J, McMahon T A. Evaluation of automated techniques for baseflow and recession analyses[J]. Water Resources Research, 1990, 26(7): 1465 – 1473.
- [30] 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.
- [31] Chapman T G, Maxwell A I. Baseflow separation-comparison of numerical methods with tracer experiments [C]//Hydrology and Water Resources Symposium 1996: Water and the Environment; Preprints of Papers. Institution of Engineers, Australia, 1996: 539 – 545.
- [32] Boughton W C. A hydrograph-based model for estimating the water yield of ungauged catchments [C]//Hydrology and Water Resources Symposium, Newcastle, IEAust, 1993. 1993.
- [33] Arnold J G, Allen P M, Muttiah R, et al. Automated baseflow separation and recession analysis techniques[J]. Groundwater, 1995, 33(6): 1010 – 1018.
- [34] Hydrology I O. Low flow studies [M]. Wallingford, Oxfordshire: Institute of Hydrology, 1980.
- [35] Wels C, Cornett R J, Lazerte B D. Hydrograph separation: a comparison of geochemical and isotopic tracers[J]. Journal of Hydrology, 1991, 122(1/2/3/4): 253 – 274.
- [36] 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.
- [37] Sloto R A, Crouse M Y. HYSEP-a computer program for streamflow hydrograph separation and analysis[R]. U. S. Geological Survey, Water-Resources Investigations Report 96-4040, 1996.
- [38] Barlow P M, Cunningham W L, Zhai Tong, et al. US Geological Survey groundwater toolbox, a graphical and mapping interface for analysis of hydrologic data (version 1.0): user guide for estimation of base flow, runoff, and groundwater recharge from streamflow data [R]. U. S. Geological Survey, Techniques and Methods 3-B10, 2015.
- [39] Dou Lin, Huang Mingbin. Applied study of baseflow separation methods in watersheds of Loess Plateau [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2010, 30(3): 107 – 111. [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. ]
- [40] Yang Yuandong. The improvement of estimation method of Kalinin-Abariyan groundwater: study on water resources in plain area [M]. Shanghai: Xuelin Publishing House, 1985: 122 – 126. [杨远东. 加里宁 – 阿巴里扬地下水估算方法的改进——平原地区水资源研究[M]. 上海: 学林出版社, 1985: 122 – 126. ]
- [41] Smakhtin V U. Low flow hydrology: a review[J]. Journal of Hydrology, 2001, 240(3/4): 147 – 186.
- [42] Lei Yongnan, Zhang Xiaoping, Zhang Jianjun, et al. Suitability analysis of automatic baseflow separation methods in typical watersheds of water-wind erosion crisscross region on the Loess Plateau, China [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2011, 9(6): 57 – 64. [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. ]
- [43] Nash J E, Sutcliffe J V. River flow forecasting through conceptual models part I: a discussion of principles[J]. Journal of Hydrology, 1970, 10(3): 282 – 290.
- [44] Legates D R, McCabe G J. Evaluating the use of “goodness of fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation [J]. Water Resources Research, 1999, 35(1): 233 – 241.
- [45] Li Dongliang, Zhang Jiali, Quan Jianrui, et al. A study on the feature and cause of runoff in the upper reaches of Yellow River [J]. Advances in Water Science, 1998, 9(1): 22 – 28. [李栋梁, 张佳丽, 全建瑞, 等. 黄河上游径流量演变特征及成因研究[J]. 水科学进展, 1998, 9(1): 22 – 28. ]
- [46] Qian Yunping, Jin Shuangyan, Jiang Xiuhua, et al. Influence of variation of baseflow in the upper reaches of Lanzhou on water resources of Yellow River[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2004, 15(1): 19 – 23. [钱云平, 金双彦, 蒋秀华, 等. 黄河兰州以上河川基流量变化对黄河水资源的影响[J]. 水资源与水工程学报, 2004, 15(1): 19 – 23. ]
- [47] Chen Liquan, Liu Changming, Hao Fanghua, et al. Change of the baseflow and its impacting factors in the source regions of Yellow River [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, 28(2): 141 – 148. [陈利群, 刘昌明, 郝芳华, 等. 黄河源区基流变化及影响因子分析[J]. 冰川冻土, 2006, 28(2): 141 – 148. ]

## Analysis of the applicability of baseflow separation methods in Baihe River basin, the source regions of Yellow River

LI Fang<sup>1,2</sup>, JIN Shaobo<sup>3</sup>, ZOU Songbing<sup>1,4,5</sup>, LU Zhixiang<sup>1,5</sup>, CAO Guangming<sup>3</sup>,  
SHEN Yanqing<sup>3</sup>, ZHANG Juncui<sup>3</sup>, LAN Yongchao<sup>1,5</sup>,  
JIN Huijun<sup>1,6</sup>, RUAN Hongwei<sup>1,2</sup>

(1. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Huanghe Hydropower Development Co., Ltd., Xining 810008, China; 4. College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 5. Key Laboratory of Ecohydrology of Inland River Basin, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 6. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** Baseflow is the vital supply sources of the runoff in the Yellow River, which plays an important role in water resource planning and ecological environment construction in the source regions. In this study, the Baihe River basin was selected as research area in the source area of the Yellow River. Based on the daily runoff data observed at Tangke Hydrological Station from 1981 to 2015, 12 kinds of five types commonly and widely used numerical simulation methods were used to separate the baseflow and compare and analyze the applicability in the Baihe River basin. The results showed that there were significantly difference among the annual baseflow indexes estimated by the 12 methods; the baseflow index from the Lyne-Hollick digital filter method was the maximum, 0.91, and that from the Kalinin method was the minimum, 0.39; the standard deviation and the extreme value ratio from the Eckhard filter method were the worst, with the best stability; the standard deviation and the extreme value ratio from the Kalinin method were the biggest with the worst stability. The daily runoff process in 1992 (a wet year) was separated, of which the results showed that the baseflow hydrographs from Chapman digital filter method, Chapman-Maxwell digital filter method and Kalinin method were much more smoother and slower, which were more accordant with practical circumstances. The baseflow simulation results of Boughton-Chapman digital filter method, *BFI* and *HYSEP* methods were better, their Nash-Sutcliffe efficiency coefficients were higher than 0.87, their decisive coefficients were close to 0.9 and their average relative errors were less than 10%. It was concluded that the Boughton-Chapman digital filter method and *BFI* method were more suitable for the baseflow separation in the Baihe River basin.

**Key words:** baseflow separation; baseflow index; Baihe River basin

(责任编辑: 周成林; 编辑: 周成林)