

湘江流域基流分割方法适宜性评价

谢 铮

湖南师范大学地理科学学院, 湖南 长沙

收稿日期: 2026年3月6日; 录用日期: 2026年4月10日; 发布日期: 2026年4月24日

摘 要

基流是指来源于地下水或者与地下水相连的延迟水源, 探究流域适宜的基流分割方法, 对流域研究基流变化特征及其驱动力等方面具有重要意义, 为流域水安全和社会经济发展等方面提供支持。本研究利用12种基流分割方法对湘江流域地区上、中、下游3条支流流域6个水文站点的逐日径流数据进行基流分割计算, 通过比对不同基流分割方法在基流过程线、基流指数稳健性以及有效性反应, 探讨典型流域地区适宜的基流分割方法。结果表明: (1) 基于数字滤波法分割的基流值绘制的基流过程线表现更加平滑, 滞后于径流的变化。(2) 数字滤波法计算得到的基流指数稳定性好, 符合流域产汇流特征。(3) 有效性指数Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE)和Kling-Gupta Efficiency (KGE)数字滤波法显著高于其它方式, Boughton方法分割的效果最佳, 得到的NSE和KGE最高, 可达0.93和0.9, 为湘江典型流域地区较为适宜的基流分割方法。

关键词

基流分割, 湘江流域, 适宜性评价

Evaluation of Suitability of Baseflow Separation Method in the Xiangjiang River Basin

Zheng Xie

School of Geographical Sciences, Hunan Normal University, Changsha Hunan

Received: March 6, 2026; accepted: April 10, 2026; published: April 24, 2026

Abstract

Baseflow refers to the delayed water source from or connected to groundwater, and exploring the appropriate baseflow segmentation method in the basin is of great significance for the study of the

characteristics of baseflow change and its driving force in the basin, and providing support for water security and social and economic development in the basin. In this study, 12 baseflow segmentation methods were used to calculate the daily runoff data of six hydrological stations in the upper, middle and lower reaches of the Xiangjiang River Basin. The results show that: (1) The base flow process line drawn based on the base flow value segmented by digital filtering method is smoother and lags behind the change of runoff. (2) The baseflow index calculated by the digital filtering method has good stability, which is in line with the characteristics of basin production and confluence. (3) The effectiveness index of Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) and Kling-Gupta Efficiency (KGE) digital filtering methods was significantly higher than that of other methods, and the Boughton method had the best segmentation effect, and the NSE and KGE obtained were the highest, reaching 0.93 and 0.9, which were more suitable baseflow segmentation methods in typical Xiangjiang basin areas.

Keywords

Baseflow Separation, Xiangjiang River Basin, Suitability Evaluation

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

河川径流是水资源重要的存在形式和组成部分之一，是工业生产和人民生活用水的重要来源[1]。而基流又是径流的重要组成成分。基流是枯水季节河流的基本流量，是地下水补给地表径流的慢速流，也是维持生态系统稳定的河道基本径流[2][3]。基流在水安全、粮食安全、工农业供水和降雨-径流关系模拟中具有重要作用[4]。且由于基流难以通过直接测量得到，如何准确评估基流是水文学中径流成分分析领域的一个科学问题[5]。因此，准确分割基流对于流域水资源研究及其调控极为关键。

湘江是长江八大支流之一，承担着为中部地区居民提供饮用水的重要任务[6]，下游的洞庭湖平原是我国重要的商品粮基地，同时，湘江流域地区承载着湖南省一半以上的人口，是省内人口最密集的地区。近年来，湘江流域面临多重水安全挑战，湘江长沙综合枢纽的建成运行虽保障了供水与航运，但也导致河流水文情势改变，需通过生态调度恢复鱼类洄游通道和自然水文节律；湘潭等河段频发的水葫芦爆发事件，暴露出枯水期河流自净能力下降与富营养化风险加剧的矛盾。这些问题的有效解决，依赖于对基流组分的准确识别与定量分割。基流不仅是生态流量确定的基础，也是水质预警系统的核心输入参数。然而，已有的湘江流域基流研究多将基流作为生态流量评价、水源涵养分析或生态系统服务评估的输入或输出参数，直接采用某一种分割方法，尚未对不同基流分割方法在湘江流域的适用性进行比较和优选[7][8]。因此，开展湘江流域基流分割方法的适宜性评价，筛选出适用于不同河段的最优方法，对于支撑流域生态调度、污染控制和水资源管理具有重要的理论价值与现实意义。

2. 研究区域与研究方法

2.1. 研究区域

湘江发源于湖南省永州蓝山县，流经湖南、广西，注入洞庭湖后汇入长江。以老埠头站和衡阳站为界，将湘江流域划分上、中、下游，老埠头以上为上游，老埠头至衡阳为中游，衡阳以下为下游[9]。湘江流经 62 个市县，流域覆盖长沙、株洲、湘潭、衡阳、郴州等重要城市，是湖南省最发达的地区。本研

究选取湘江流域上、中、下游三个流域——潇水流域、耒水流域和浏阳河流域作为研究区。其中，潇水流域位于湘江上游地区，耒水流域位于湘江中游地区，浏阳河位于湘江流域下游地区。研究区的地理位置如图 1 所示。

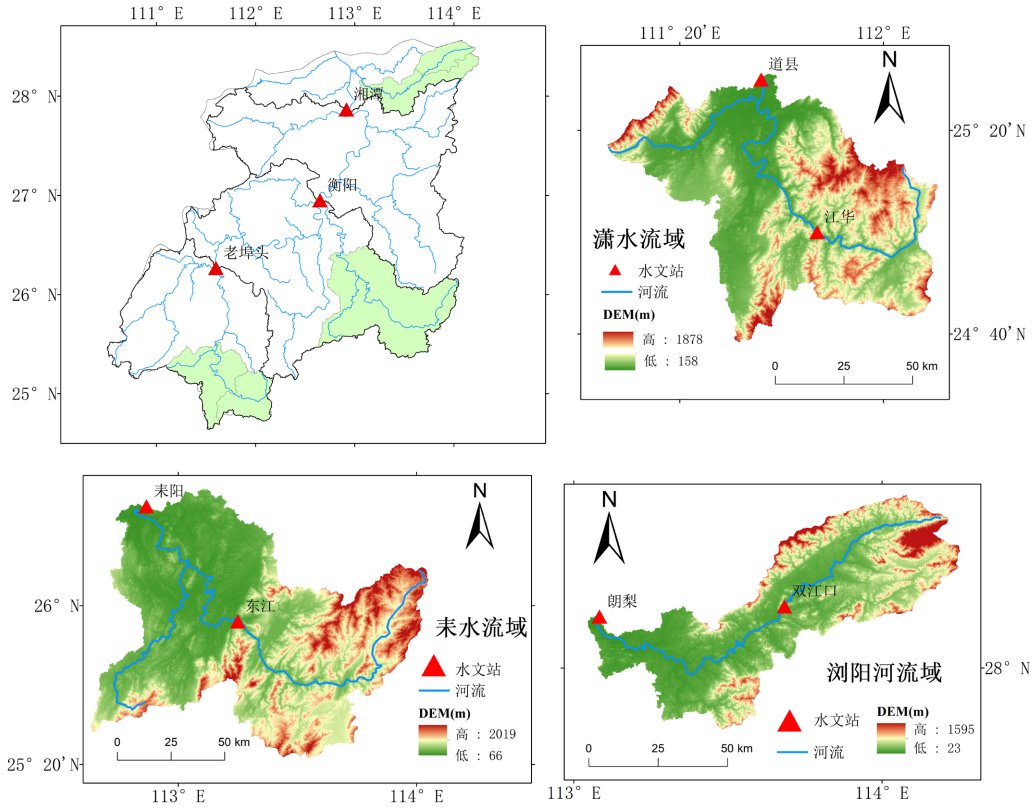


Figure 1. Location map of the Xiangjiang River Basin and typical watersheds in the upper, middle and lower reaches
图 1. 湘江流域及上中下游典型流域区位图

2.2. 研究数据

径流数据：潇水流域代表水文站点为道县和江华，耒水流域为耒阳和东江水文站，浏阳河流域为朗梨和双江口水文站。逐日实测径流数据范围为 1961~2020 年，其中江华水文站数据时间范围为 1961~2014 年。资料来自于湖南省水利水文资源厅。各站点位置如图 1 所示，详细信息见表 1。

Table 1. Upstream, midstream, and downstream basin site information
表 1. 上中下游流域站点信息

序号	名称	纬度/°N	经度/°E	研究时间	集水区面积(km ²)	所在河流位置
1	道县	25.50	111.60	1961~2020	5573.68	潇水
2	江华	25.00	111.78	1961~2014	2121.15	潇水
3	东江	25.93	113.25	1961~2020	4596.99	耒水
4	耒阳	26.42	112.87	1961~2020	9829.63	耒水
5	双江口	28.20	113.68	1961~2020	1226.31	浏阳河
6	朗梨	28.17	113.08	1961~2020	3754.99	浏阳河

2.3. 研究方法

2.3.1. 基流分割方法

(1) HYSEP 法

时间步长法(HYSEP)方法基本原理是 Pettyjohn 和 Henning 提出的,是美国地质调查局所经常使用的,可以用于分割径流的组成成分[10]。包括局部最小值法(Local)、滑动间隔法(Slide)和固定间隔法(Fixed)。退水时长均采用经验公式获得:

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

式中: N 为径流的持续时间, d ; A 为流域面积, km^2 。采用的时间间隔为最接近 $2N$ 并且在 3~11 之间的奇数。

(2) UKIH 法

平滑最小值法(UKIH)是英国水文研究所提出的[11],其基本原理是将径流序列以 $5d$ 为间隔分成相同长度的子序列;之后在每段子序列中找到最低值,并且与前后两个低值比较,若这个低值满足条件 $Q_t \leq 1.11Q_{t-1}$ 和 $Q_t \leq 1.11Q_{t+1}$,则将这个低值定为突变点;找出所有的突变点并且连接起来进行线性插值构成基流过程线,低于基流过程线下的面积则是基流量。

(3) 数字滤波法

1979年, Lyne 和 Hollick 首次提出数字滤波法,并被 Nathan 和 McMahon 首次引入基流分割中[12]。数字滤波法将基流视为低频成分,地表径流为高频成分,日径流为地表径流和基流组成。本文选择八种数字滤波法进行基流分割。

F1 法是 Nathan 和 McMahon 应用在基流分割中的方法,文中称为 LH 方法。滤波方程为:

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

$$b_t = Q_t - q_t \quad (3)$$

式中: q_t 为 t 时刻的地表径流, b_t 为 t 时刻的基流, Q_t 为 t 时刻的径流, β 为滤波参数,结合前人研究成果本文取值为 0.925,并且进行 2 次滤波。

F2 法是 Chapman 于 1991 年提出的[13],滤波方程为:

$$b_t = \frac{(3\alpha - 1)}{3 - \alpha} * (b_{t-1}) + \frac{1 - \alpha}{3 - \alpha} (Q_t + Q_{t-1}) \quad (4)$$

式中: α 为衰退常数, b_t 为 t 时刻的基流。

F3 法由 Chapman 和 Maxwell 在 1996 年提出[14],滤波方程为:

$$b_t = \frac{\alpha}{2 - \alpha} b_{t-1} + \frac{1 - \alpha}{2 - \alpha} Q_t \quad (5)$$

F4 法由 Boughton 于 2004 年提出[15],滤波方程为:

$$b_t = \frac{\alpha}{1 + C} b_{t-1} + \frac{C}{1 + C} Q_t \quad (6)$$

式中: C 为形状常数。

F5 法为 Furey 和 Gupta 提出[16],滤波方程为:

$$b_t = (\alpha - A(1 - \alpha)) b_{t-1} + A((1 - \alpha)) Q_{t-1} \quad (7)$$

F6 法为 Eckhardt 于 2005 年提出[17], 滤波方程为:

$$b_t = (1 - BFI_{\max})\alpha b_{t-1} + \frac{(1 - \alpha)BFI_{\max}Q_t}{1 - \alpha BFI_{\max}} \quad (8)$$

其中, BFI_{\max} 为最大基流指数。

F7 法为 EWMA 提出[18], 滤波方程为

$$b_t = (1 - e)b_{t-1} + eQ_t \quad (9)$$

式中: e 为光滑参数。

F8 法为 Willems 于 2009 年提出[19], 滤波方程为

$$b_t = \frac{\alpha - \nu}{1 + \nu} b_{t-1} + \frac{\nu}{1 + \nu} (Q_t + Q_{t-1}) \quad (10)$$

式中: ν 为典型流域中流量中快速流的平均比例。

以上 8 种数字滤波方法中的初始基流值均设置为开始年份 1 月 1 日的径流值。 α 采用 Brutsaert 等提出的方法进行估计[20], 其余的参数采用 Rammal 等提出的多目标优化方案进行选择[21]。各参数最后结果见表 2。

Table 2. Information on each parameter

表 2. 各参数信息

站点	α	C	A	BFI_{\max}	e	ν
江华	0.98	0.06	2.36	0.72	0.03	0.29
道县	0.98	0.06	2.11	0.71	0.03	0.30
东江	0.97	0.06	1.91	0.69	0.02	0.33
耒阳	0.97	0.06	1.91	0.68	0.02	0.33
双江口	0.97	0.06	1.89	0.68	0.02	0.33
朗梨	0.98	0.04	1.58	0.65	0.02	0.38

2.3.2. 适宜性评价方法

(1) 基流过程线法

基流过程线表示某一横断面上流量随时间变化的连续曲线, 以基流为纵坐标, 时间为横坐标绘制而成。本文选择各个站点丰水年 9~10 月份的数据进行基流过程线的绘制。基流变化过程是平缓的, 且滞后于径流的变化。通过绘制并且对比不同基流分割方法的基流过程线, 可以直观对比不同分割方法的差异, 并且从定性角度上排除不适用于湘江典型流域的基流分割方法。

(2) 基流指数稳健性分析

基流指数是指在一段时段内的总基流与总径流的比值, 可以反映河流的水源补给特性。对比 12 种基流分割方法在 6 个水文站点基流分割后的基流指数的均值、标准差和极值比的稳健性进行效果评价。

(3) 基流有效性评价

本文采用 Xie 等提出的方法进行研究[22], 比对严格基流点处的基流值与不同基流分割方法得到的对应时间基流值之间的差异来进行评估。严格基流点是指在快速流停止时的基流, 此时基流与径流相等。采用以下方式进行挑选严格基流点: (1) 排除在日径流序列中 $-(y_{i+1} - y_{i-1})/2 \geq 0$ 处的径流点; (2) 考虑到

降水量低于基流补给量的现象，在第一步的基础上，排除位于第一步径流点前两天的径流点和后三天的径流点；(3) 考虑到径流的洪峰径流的衰退过程，排除位于洪峰后 5 天的径流点；(4) 排除 dy/dt 值较小的径流点。对这四步严格基流点选择的解释如下：(1) 径流在没有快速流时会下降，因此，日径流中有非负 dy/dt 的点是含有快速流的点，应将其移除。(2) 为了避免降水不能抵消基流减少的影响，消除了非负 dy/dt 之前的两个点。(3) 考虑到快速流的移动持续时间，剔除非负 dy/dt 后的 3 个点或洪峰事件后的 5 个点。(4) 日流量点随后出现较大的 $-dy/dt$ 可能是由测量误差引起的，应予以消除。

采用两个指标来进行基流的有效性评价，分别为 Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE)和 Kling-Gupta Efficiency (KGE)。

NSE 计算的公式如下：

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=t_1, t_2, \dots, t_n} (Q_m^t - Q_0^t)^2}{\sum_{t=t_1, t_2, \dots, t_n} (Q_0^t - \bar{Q}_0)^2} \quad (11)$$

式中， t 代表严格基流点对应的不同时期， Q_m^t 是在 t 时刻不同基流分割方法得到的基流分割值， Q_0^t 是严格基流点在 t 时刻的基流值， \bar{Q}_0 是严格基流点的均值。NSE 的波动范围为 $(-\infty, 1)$ 。越接近 1，代表基流分割方法划分后的基流值与严格基流值越接近，划分的效果更加好。

KGE 衡量基流分割方法的分割效果的公式如下：

$$KGE = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_o} - 1\right)^2 + \left(\frac{\bar{Q}_m}{\bar{Q}_o} - 1\right)^2} \quad (12)$$

式中： r 是严格基流点对应的基流值和基流分割方法划分后的基流值的相关系数， σ_o 是严格基流点的标准差， σ_m 是严格基流点对应时间不同基流分割方法划分后得到的标准差， \bar{Q}_m 是严格基流点对应时刻的不同基流分割方法得到的平均值， \bar{Q}_o 是严格基流点的平均值。KGE 的值和 NSE 的衡量标准一致。

3. 研究结果与分析

3.1. 基流过程线分析

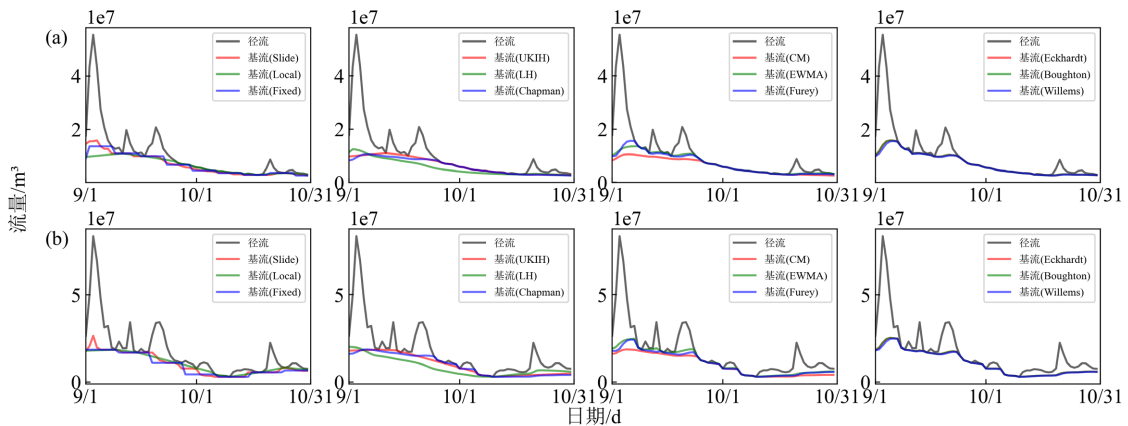


Figure 2. Runoff and baseflow process lines in the Xiaoshui River basin

图 2. 潇水流域径流与基流过程线

为对比 12 种基流分割方法分割基流的效果，绘制各个站点径流量最多年份 9~10 月基流过程线。分

析图 2~4 可知, 三个流域中不同水文站基流过程线演变呈现一致的特点。不同基流分割方法绘制的基流过程线存在差异, 表现为数字滤波法分割后的基流过程线平滑, 比 HYSEP 和 UKIH 分割后的效果更好, 更加符合基流产汇流过程的特点。HYSEP 和 UKIH 所得的基流过程线呈现锯齿状, 波动程度较大, 基流过程线不平滑, 与基流在流域的出口断面过程中受到降水、土壤和地表植被覆盖等的作用导致缓慢的产汇流过程不符, 因此这四种方法不适用于湘江流域基流特征的研究。数字滤波法的基流过程线表现为变化过程平滑, 滞后于径流的变化, 更加符合基流的退水过程。因此, 从定性的角度分析, 数字滤波法为湘江典型流域较为适宜的基流分割方法。

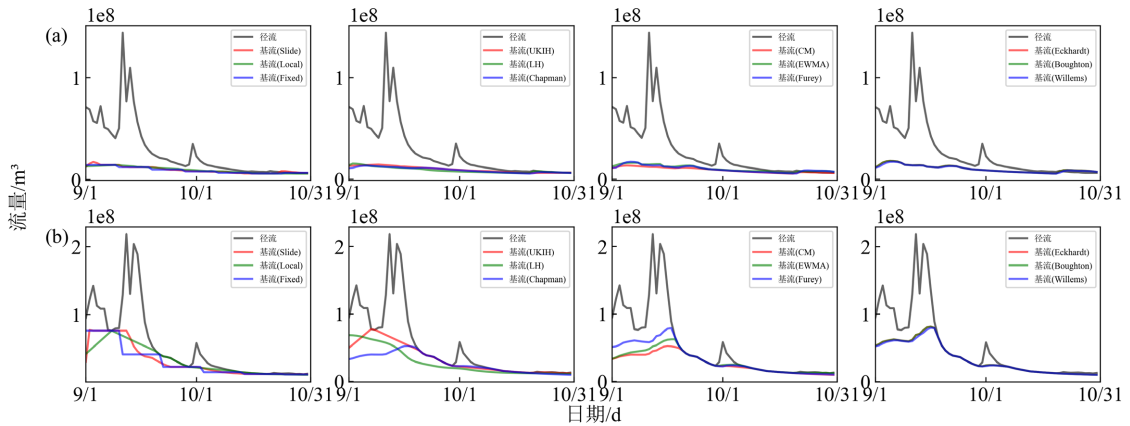


Figure 3. Runoff and base flow process lines in the water basin

图 3. 耒水流域径流与基流过程线

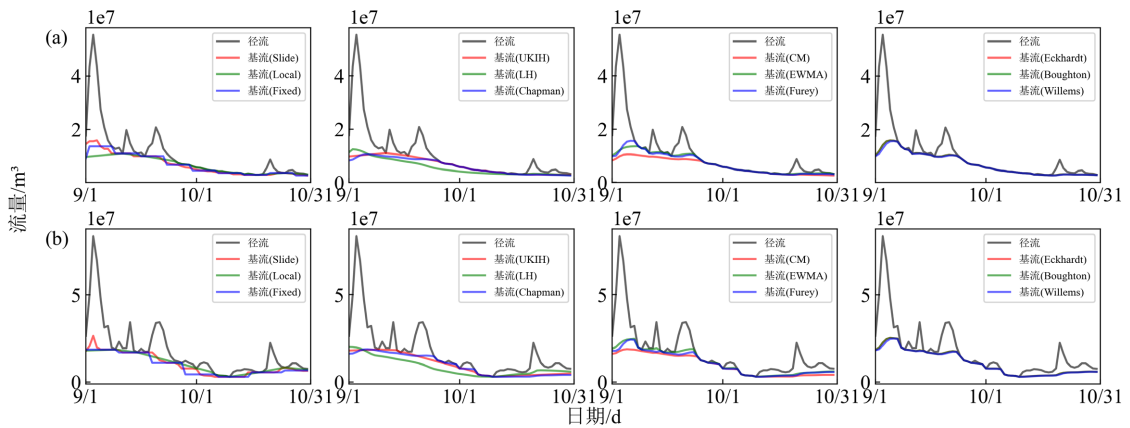


Figure 4. Runoff and baseflow process line in the Liuyang River Basin

图 4. 浏阳河流域径流与基流过程线

3.2. 基流指数对比分析

绘制 12 种基流分割方法划分后得到的年基流指数箱型图, 并且对比不同基流分割方法得到的统计性指标的大小, 包括均值、极值比、标准差等统计量。由各个站点逐年 BFI 箱型图(图 5)可知, 数字滤波法比 HYSEP 和 UKIH 在湘江典型流域地区计算的 BFI 更加稳定。HYSEP 和 UKIH 中年 BFI 的数值波动比较大, 数字滤波方法波动较小, 较为稳定。数字滤波方法中 Chapman 和 CM 方法估计的年 BFI 值明显低于其他方法估计的值。

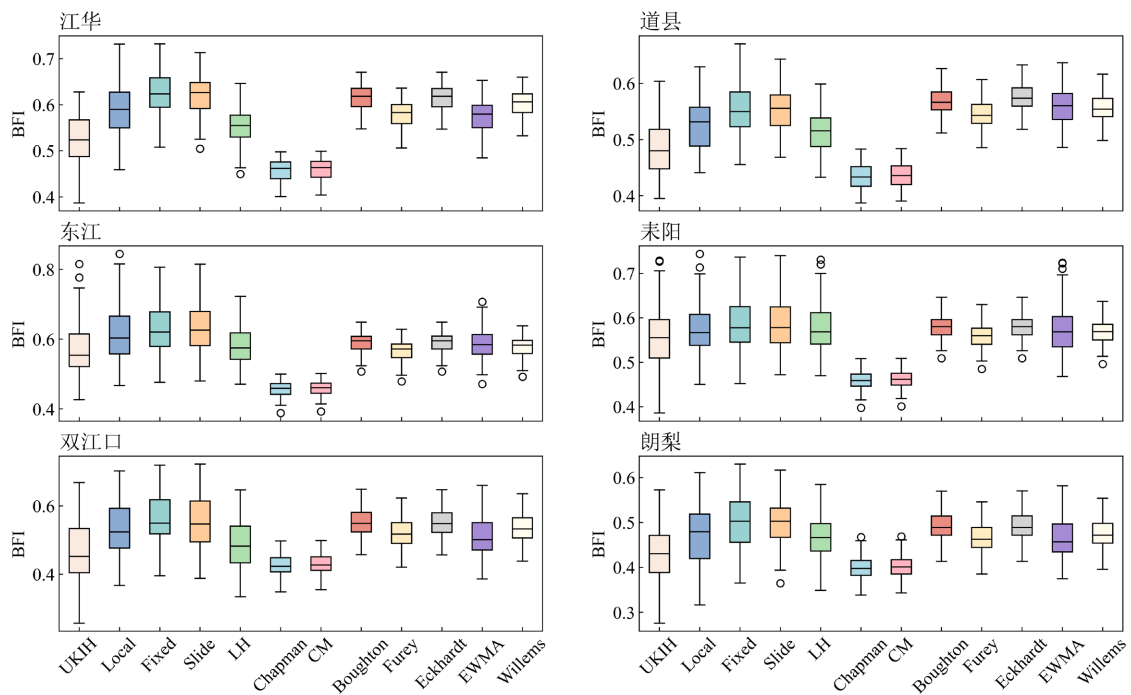


Figure 5. Box diagram of annual base flow index
图 5. 年基流指数箱型图

由表 3~8 可知，12 种基流分割方法中 CM 和 Chapman 方法得到的基流指数均值偏小，HYSEP 方法得到的基流指数高于其他的方法。对比不同站点根据不同方法得到的标准差和极值比，可以发现，整体上数字滤波方法比 HYSEP 和 UKIH 得到的标准差和极值比更加小，换句话说数字滤波法划分基流的效果更加稳定，效果更加好。数字滤波法中，LH、Furey、EWMA、Willems 方法得到的标准差和极值比略高，CM、Chapman、Boughton、Eckhardt 方法得到的基流指数的标准差和极值比较小，较为稳定。

Table 3. Statistical characteristics of annual base flow index (Xiaoshui Basin Daoxian Station)
表 3. 年基流指数的统计特征(潇水流域道县站)

指标	UKIH	Local	Fixed	Slide	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8
max	0.59	0.63	0.65	0.64	0.60	0.48	0.48	0.63	0.61	0.63	0.65	0.62
min	0.38	0.44	0.47	0.47	0.43	0.39	0.39	0.52	0.49	0.52	0.50	0.50
mean	0.48	0.53	0.55	0.55	0.51	0.43	0.44	0.58	0.54	0.58	0.57	0.56
std	0.05	0.05	0.04	0.04	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02
极值比	1.55	1.43	1.38	1.37	1.38	1.25	1.24	1.22	1.25	1.22	1.30	1.23

Table 4. Statistical characteristics of annual base flow index (Jianghua Station in Xiaoshui Basin)
表 4. 年基流指数的统计特征(潇水流域江华站)

指标	UKIH	Local	Fixed	Slide	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8
max	0.62	0.73	0.72	0.71	0.65	0.50	0.50	0.67	0.65	0.67	0.66	0.66
min	0.41	0.46	0.50	0.50	0.45	0.40	0.40	0.55	0.52	0.55	0.50	0.53
mean	0.52	0.59	0.62	0.62	0.55	0.46	0.46	0.61	0.59	0.61	0.58	0.60

续表

std	0.05	0.06	0.05	0.04	0.04	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03
极值比	1.50	1.59	1.46	1.41	1.44	1.24	1.24	1.23	1.25	1.23	1.33	1.24

Table 5. Statistical characteristics of annual base flow index (Leiyang Station in Leishui River Basin)**表 5.** 年基流指数的统计特征(耒水流域东江站)

指标	UKIH	Local	Fixed	Slide	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8
max	0.81	0.84	0.83	0.82	0.72	0.50	0.50	0.66	0.63	0.66	0.71	0.64
min	0.38	0.47	0.48	0.48	0.47	0.39	0.39	0.52	0.48	0.52	0.47	0.49
mean	0.58	0.62	0.63	0.63	0.58	0.46	0.46	0.60	0.57	0.60	0.59	0.58
std	0.09	0.08	0.08	0.08	0.06	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.05	0.03
极值比	2.12	1.81	1.73	1.70	1.53	1.29	1.28	1.27	1.31	1.27	1.50	1.30

Table 6. Statistical characteristics of annual base flow index (Shuangjiangkou Station in Liuyang River Basin)**表 6.** 年基流指数的统计特征(耒水流域耒阳站)

指标	UKIH	Local	Fixed	Slide	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8
max	0.75	0.74	0.73	0.74	0.73	0.51	0.51	0.66	0.64	0.66	0.73	0.65
min	0.40	0.45	0.46	0.47	0.47	0.40	0.41	0.53	0.50	0.53	0.48	0.51
mean	0.56	0.57	0.59	0.59	0.58	0.46	0.47	0.60	0.57	0.60	0.59	0.58
std	0.08	0.07	0.06	0.06	0.06	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.06	0.03
极值比	1.88	1.65	1.58	1.57	1.55	1.27	1.26	1.25	1.28	1.25	1.52	1.26

Table 7. Statistical characteristics of annual base flow index (Dongjiang Station in Leishui Basin)**表 7.** 年基流指数的统计特征(浏阳河流域双江口站)

指标	UKIH	Local	Fixed	Slide	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8
max	0.67	0.70	0.74	0.72	0.65	0.50	0.50	0.65	0.62	0.65	0.66	0.64
min	0.24	0.37	0.36	0.39	0.33	0.35	0.35	0.46	0.42	0.46	0.39	0.44
mean	0.45	0.53	0.56	0.55	0.49	0.43	0.43	0.55	0.52	0.55	0.51	0.54
std	0.09	0.08	0.08	0.08	0.07	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.06	0.04
极值比	2.80	1.91	2.06	1.86	1.94	1.43	1.41	1.42	1.48	1.42	1.71	1.45

Table 8. Statistical characteristics of annual base flow index (Langli Station in Liuyang River Basin)**表 8.** 年基流指数的统计特征(浏阳河流域朗梨站)

指标	UKIH	Local	Fixed	Slide	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8
max	0.57	0.61	0.62	0.62	0.58	0.47	0.47	0.58	0.55	0.58	0.58	0.56
min	0.27	0.32	0.39	0.36	0.35	0.34	0.34	0.42	0.39	0.42	0.37	0.40
mean	0.43	0.47	0.50	0.50	0.47	0.40	0.40	0.50	0.46	0.50	0.47	0.47
std	0.07	0.07	0.05	0.05	0.05	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03
极值比	2.13	1.93	1.56	1.69	1.68	1.38	1.37	1.38	1.42	1.38	1.55	1.40

3.3. 基流有效性分析

为准确对比不同基流分割方法在湘江流域地区的适用性，并挑选出湘江流域最佳基流分割方法，利用 12 种基流分割方法得到的基流值与严格基流点处基流值之间的差异来衡量基流分割的效果，采用两者在 NSE 和 KGE 上的差异，从定量角度对比不同基流分割方法。得到的 KGE 值和 NSE 值如图 6 所示，可以发现，数字滤波法后五种方法的 NSE 值明显高于其它基流分割方法，NSE 值波动范围介于 0.8969 和 0.9303 之间。数字滤波方法中除 LH 方法外，其余数字滤波方法的 KGE 均值均比 HYSEP 和 UKIH 法的值高。其中，数字滤波法中 Boughton、Furey、Eckhardt、EWMA 和 Willems 方法得到的 KGE 达到的 0.88 以上，明显高于 CM 和 Chapman 方法得到的 KGE 均值在 0.72 左右。而 Boughton 方法得到的 NSE 和 KGE 均值最高，分别为 0.9303 和 0.9060，Eckhardt 方法次之。因此，从有效性角度定量分析，数字滤波法中的后五种方法要更加好，而 Boughton 方法为在湘江流域地区有效性最高的方法。

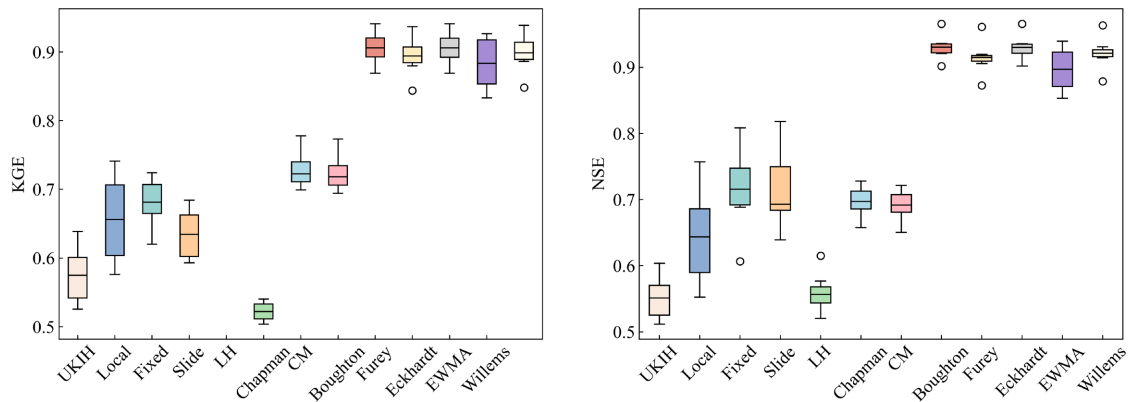


Figure 6. 12 base-flow segmentation methods NSE and KGE value box diagrams
图 6. 12 种基流分割方法 NSE 和 KGE 值箱型图

3.4. 基流分割方法适宜性的水文地质机理探讨

不同基流分割方法在湘江流域表现出的适宜性差异，其深层原因与流域水文地质背景密切相关。湘江流域广泛分布花岗岩、变质岩和碳酸盐岩，土壤以红壤、黄壤为主，具有土层较薄、下伏基岩风化裂隙发育的特点。地下水以基岩裂隙水和岩溶水为主，含水层调蓄能力中等偏弱，退水过程表现为初期较快、后期趋于平缓的双曲线型特征。

在此背景下，Boughton 方法表现最优，Boughton 方法采用双参数线性水库模型，参数 C 控制基流对径流变化的响应速度。经参数优化，潇水、耒水、浏阳河流域的 C 值分别为 0.06、0.06 和 0.04，这种较低的 C 值使得基流对降雨事件的响应较为平缓，恰好模拟了风化裂隙介质中地下水缓慢释水的过程。相比之下，Chapman 和 CM 方法仅依赖单一的退水常数 α ，其线性退水假设难以捕捉裂隙介质中非线性的退水特征，导致基流指数均值明显偏低，有效性指标也相对较低。Eckhardt 方法在有效性评价中仅次于 Boughton 方法，其优势在于引入了最大基流指数 BFI_{max}。从上游潇水流域到下游浏阳河流域，BFI_{max} 呈现递减趋势，这与下游第四系松散堆积物增厚、地表径流占比增加的实际情况相符，使该方法能够自适应不同河段的基流特征，表现出较好的稳定性。HYSEP 和 UKIH 方法表现较差，根源在于其算法结构与湘江流域水文地质特征不匹配。这类方法基于退水时长的经验公式或固定时间窗口提取最小值，本质上假设退水过程具有统一的时间尺度。然而，湘江流域土壤基岩复合介质的非均质性导致不同场次洪水的退水速率差异较大，采用固定窗口难以准确捕捉退水拐点，因此基流过程线呈现锯齿状波动，年基流

指数极值比较高。

综上, Boughton 方法成为湘江流域最适宜的基流分割方法, 根本原因在于其双参数线性水库结构与区域风化裂隙含水层的释水特性高度契合, 而参数的区域优化使其能够自适应上中下游的水文地质差异。

4. 不足与展望

4.1. 研究局限性

本研究在有效性评价方面存在三方面主要局限。首先, 评价基准的不确定性源于严格基流点的理论假设与实际退水过程的偏差, 即假设洪峰退水过程中特定时刻的径流完全由基流组成, 但实际可能仍包含少量延迟地表径流, 导致基准值略高于真实基流, 从而引入有效性评价的系统性偏差; 同时, 严格基流点的筛选依赖于主观性较强的经验规则, 其数量与分布也受径流序列丰枯变化影响, 可能使评价结果对特定水文年份过于敏感, 且在洪峰附近的基流点准确性方面存在一定局限。其次, 模型参数估计存在敏感性, 衰退常数 α 的估算采用 Brutsaert 退水曲线分析方法, 但退水事件的识别标准和退水段长度选择具有一定主观性, 而 Eckhardt 的研究表明滤波参数的微小误差可能导致基流指数(BFI)的相对误差被放大 1.5 倍以上; 尽管引入多目标优化方案降低了参数选择的主观性, 但优化目标函数的选择仍会影响参数率定结果, 进而导致方法适用性排序的差异。最后, 研究结论在空间推广方面存在限制: 湘江流域属湿润亚热带季风气候, 基流以降水入渗补给为主, 结论对于干旱半干旱区、冰川融水补给型河流或喀斯特地貌区可能不适用; 同时, 研究站点集水面积介于 1226~9829 km², 对于更小或更大尺度流域, 产汇流机制差异可能改变方法适用性排序, 而人类活动强度亦可能影响不同方法的相对表现。

4.2. 未来展望

本文虽然运用了 12 种国内外广泛使用和认可的基流分割方法, 在一定程度上降低了单一方法带来的不确定性, 但是由于基流难以通过实验方法准确测量获得, 因此得到的数据无法验证真实性, 只是可能接近实际的基流值, 在今后的研究中应当结合同位素或电导率等示踪剂方法进行基流分割, 为数字滤波法精度提供基准验证。此外, 还可以引入机器学习预测径流峰值附近的基流点。

在深化基流估算方法的同时, 未来的研究还应重点关注基流变化的时空演变特征及其驱动机制。具体而言, 可以从不同时间尺度揭示基流的动态变化规律, 结合流域空间异质性, 探讨基流在空间上的分布差异。在此基础上, 系统分析自然因素与人类活动对基流演变的多重影响。自然因素方面, 可以聚焦气候变化因子和流域下垫面状况, 如降水、土壤类型、植被覆盖度和地形地貌等对地下水补给和基流形成过程的影响。人类活动方面, 则可评估土地利用覆被变化、地下水开采强度变化、农业灌溉用水量以及水利工程建设等对基流过程的贡献。可采用定性描述与定量分析相结合的方法, 量化区分不同驱动力对基流变化的相对贡献率, 揭示主导因素及其作用机制, 最终为湘江流域乃至类似地区的水资源开发利用、生态环境保护和规划管理提供科学依据和合理建议。

5. 结论

本研究以湘江流域地区上、中、下游 3 条典型流域潇水、耒水和浏阳河流域为研究区, 基于流域内 1961~2020 年的实测日径流数据, 采用 12 种基流分割方法估算基流, 探讨湘江典型流域地区基流分割适宜性方法。

(1) 绘制流域站点 9~10 月基流过程线研究发现, 数字滤波方法得到的基流过程线比 HYSEP 和 UKIH 得到的基流过程线更加平滑, 符合流域在降水过程中受到流域下垫面植被覆盖的影响, 基流的产汇流过程变化缓慢且滞后于径流的变化特点。

(2) 基流指数稳健性分析中发现, 数字滤波方法中, CM、Chapman、Boughton 和 Eckhardt 方法得到的基流指数变化波动较小, 稳定性强, 符合在长期研究中基流缓慢变化的特点。

(3) 有效性分析中发现, 数字滤波方法中的 Boughton、Furey、Eckhardt、EWMA 和 Willems 方法相较于其他方法而言, NSE 值和 KGE 值显著高于其它的基流分割方法, 具有明显的优势, 而 Boughton 方法得到的 NSE 值和 KGE 值最高。

综上所述, 数字滤波方法在湘江典型流域地区的适宜性较好, 其中 Boughton 方法在湘江流域地区得到的 NSE 和 KGE 值均最大, 为最适宜的基流分割方法。因此, 本文选择 Boughton 方法进行后续基流演变特征及基流演变驱动力的研究。

参考文献

- [1] 宋小园. 气候变化和人类活动影响下锡林河流域水文过程响应研究[D]: [博士学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2016.
- [2] 吴珍妮. 黄土区基流分割适宜性方法及基流特征分析[D]: [硕士学位论文]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2019.
- [3] Fan, Y., Li, H. and Miguez-Macho, G. (2013) Global Patterns of Groundwater Table Depth. *Science*, **339**, 940-943. <https://doi.org/10.1126/science.1229881>
- [4] 徐宗学, 武玮, 于松延. 生态基流研究: 进展与挑战[J]. 水力发电学报, 2016, 35(4): 1-11.
- [5] 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(1): 73-78.
- [6] Zeng, X., Liu, Y., You, S., Zeng, G., Tan, X., Hu, X., et al. (2015) Spatial Distribution, Health Risk Assessment and Statistical Source Identification of the Trace Elements in Surface Water from the Xiangjiang River, China. *Environmental Science and Pollution Research*, **22**, 9400-9412. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-4064-4>
- [7] Guo, W., Wang, G., Hong, F., Huang, L., Bai, X., Wang, B., et al. (2025) Evaluation of River Ecological Flow Based on Baseflow Separation in Xiangjiang River, China. *Journal of Water and Climate Change*, **16**, 1529-1550. <https://doi.org/10.2166/wcc.2025.648>
- [8] Wu, Y., Liu, S., Yan, W., Xia, J., Xiang, W., Wang, K., et al. (2015) Climate Change and Consequences on the Water Cycle in the Humid Xiangjiang River Basin, China. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, **30**, 225-235. <https://doi.org/10.1007/s00477-015-1073-x>
- [9] 李伯华, 李珍, 刘沛林, 等. 湘江流域传统村落景观基因变异及其分异规律[J]. 自然资源学报, 2022, 37(2): 362-377.
- [10] Hu, C., Zhao, D. and Jian, S. (2020) Baseflow Estimation in Typical Catchments in the Yellow River Basin, China. *Water Supply*, **21**, 648-667. <https://doi.org/10.2166/ws.2020.338>
- [11] Aksoy, H., Kurt, I. and Eris, E. (2009) Filtered Smoothed Minima Baseflow Separation Method. *Journal of Hydrology*, **372**, 94-101. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.03.037>
- [12] Nathan, R.J. and McMahon, T.A. (1990) Evaluation of Automated Techniques for Base Flow and Recession Analyses. *Water Resources Research*, **26**, 1465-1473. <https://doi.org/10.1029/wr026i007p01465>
- [13] Chapman, T. (1999) A Comparison of Algorithms for Stream Flow Recession and Baseflow Separation. *Hydrological Processes*, **13**, 701-714. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1099-1085\(19990415\)13:5<701::aid-hyp774>3.0.co;2-2](https://doi.org/10.1002/(sici)1099-1085(19990415)13:5<701::aid-hyp774>3.0.co;2-2)
- [14] Chapman, T.G. and Maxwell, A.I. (1996) Baseflow Separation—Comparison of Numerical Methods with Tracer Experiments. In: Frankenberg, J., Ed., *Hydrology and Water Resources Symposium 1996: Water and the Environment; Preprints of Papers*, Institution of Engineers, 539-545.
- [15] Boughton, W. (2004) The Australian Water Balance Model. *Environmental Modelling & Software*, **19**, 943-956. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2003.10.007>
- [16] Furey, P.R. and Gupta, V.K. (2001) A Physically Based Filter for Separating Base Flow from Streamflow Time Series. *Water Resources Research*, **37**, 2709-2722. <https://doi.org/10.1029/2001wr000243>
- [17] Eckhardt, K. (2004) How to Construct Recursive Digital Filters for Baseflow Separation. *Hydrological Processes*, **19**, 507-515. <https://doi.org/10.1002/hyp.5675>
- [18] Tularam, G.A. and Ilahee, M. (2008) Exponential Smoothing Method of Base Flow Separation and Its Impact on Continuous Loss Estimates. *American Journal of Environmental Sciences*, **4**, 136-144. <https://doi.org/10.3844/ajessp.2008.136.144>
- [19] Willems, P. (2009) A Time Series Tool to Support the Multi-Criteria Performance Evaluation of Rainfall-Runoff Models.

-
- Environmental Modelling & Software*, **24**, 311-321. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2008.09.005>
- [20] Brutsaert, W. (2008) Long-Term Groundwater Storage Trends Estimated from Streamflow Records: Climatic Perspective. *Water Resources Research*, **44**, W02409. <https://doi.org/10.1029/2007wr006518>
- [21] Rammal, M., Archambeau, P., Erpicum, S., Orban, P., Brouyère, S., Piroton, M., *et al.* (2018) Technical Note: An Operational Implementation of Recursive Digital Filter for Base Flow Separation. *Water Resources Research*, **54**, 8528-8540. <https://doi.org/10.1029/2018wr023351>
- [22] Xie, J., Liu, X., Wang, K., Yang, T., Liang, K. and Liu, C. (2020) Evaluation of Typical Methods for Baseflow Separation in the Contiguous United States. *Journal of Hydrology*, **583**, Article ID: 124628. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124628>