

冯夏婷, 张佳鹏, 连炎清, 等. 基于季节性变化的数字滤波基流分割方法评价: 以伊河栾川流域为例[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2025, 23(1): 118-129. FENG X T, ZHANG J P, LIAN Y Q, et al. Evaluation of digital filtering baseflow separation methods based on seasonal variation: A case study of the Luanchuan basin of the Yi River [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2025, 23(1): 118-129. (in Chinese)

基于季节性变化的数字滤波基流分割方法评价

——以伊河栾川流域为例

冯夏婷^{1,2}, 张佳鹏^{1,2}, 连炎清^{2,3}, 凌牧午³

(1. 河海大学水文水资源学院, 南京 210098; 2. 河海大学水灾害防御全国重点实验室, 南京 210098;
3. 河海大学长江保护与绿色发展研究院, 南京 210098)

摘要: 数字滤波法作为估计基流最常用的自动分割方法, 计算简单、易于推广, 但滤波参数常采用经验取值, 且固定参数难以反映基流的季节性动态变化, 影响模型分析精度。以伊河上游栾川流域为典型研究区, 采用 4 种数字滤波模型, 通过分析径流退水系数(k)确定数字滤波参数, 讨论滤波参数的季节性变化对模型估算基流的影响, 并评估数字滤波方法在研究区域的适用性。结果表明: 栾川流域降水径流仍呈显著正相关关系, NDVI 增加及土地利用变化对流域退水系数影响不明显, 研究期内在夏、秋季平均径流退水系数 k 约在 20~35 h, 春、冬两季 k 值约在 90~100 h, 即流域径流退水在春冬两季较为缓慢, 且考虑滤波参数季节性变化的基流分割结果比全年使用同一滤波参数的结果更符合流域基流实际特征; 对 4 种数字滤波法所得的基流指数进行误差分析和精度评价, 发现在栾川流域, Eckhardt 双参数滤波模型比其他 3 种单参数滤波模型更为适用, 所得流域平均基流占比约为 33%。研究结果降低了滤波模型参数的不确定性, 提高了数字滤波方法模拟基流的准确性, 也为校准或验证水文模型提供参考。

关键词: 基流分割; 数字滤波法; 季节性变化; 栾川流域

中图分类号: TV121 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2025.0012

基流是河川径流量的重要组成部分, 由地下水补给, 不仅维持了枯水季河流流量和生态系统健康, 还对了解流域产流机制和水资源调控管理有重要意义。基流估算的方法可分为示踪剂法和非示踪剂法。基于示踪剂的质量平衡方法可以较好地估算实际基流量, 通过监测不同地质地貌条件下的地表径流、土壤水和地下水示踪剂的含量(水化学离子、同位素、电导率等), 可以较好地反映地表-地下水水力联系与补排关系^[1], 但该方法费时费力且价格昂贵, 在实际应用中受到一定的条件限制^[2]。非示踪剂法包括图解法、数值模拟法和数字滤波器等传统方法^[3-4], 数字滤波法作为非示踪剂的一种常用方法^[4], 将地表径流(高频信号)和基流量(低频信号)

从每日的流量记录中分割出来, 计算过程简单、容易实现、易于推广^[3]。

数字滤波模型的选择对于基流分割的准确性至关重要。常见的滤波方法有单参数滤波模型: Lyne-Hollick 滤波法^[5]、Chapman-Maxwell 滤波法^[6]、Boughton-Chapman 滤波法^[7], 以及 Eckhardt 双参数数字递归滤波器^[8]等。国内外学者针对不同数字滤波基流分割方法的适用性做了很多相关研究, 大多数研究^[3,8-10]表明 Eckhardt 双参数滤波方法划分的基流过程线更能够反映出基流的涨退水过程和迟滞效应, 适用性更强, 但也有学者研究发现单参数滤波法例如 Lyne-Hollick 滤波法和 Chapman 滤波法, 同样可以取得较高的精度, 且方法本身较为操作简单,

收稿日期: 2024-07-26 修回日期: 2024-09-04 网络出版时间: 2024-09-29

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.tv.20240927.1705.017>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3201100)

作者简介: 冯夏婷(2001—), 女, 河南周口人, 主要从事生态水文模拟研究。E-mail: 3170056656@qq.com

通信作者: 连炎清(1962—), 男, 美国, 教授、博士, 主要从事地下水、水文水资源模拟研究。E-mail: ylian@illinois.edu

应用广泛。单参数模型方法虽计算简单,只有一个参数为衰退常数,但是基流分割结果对参数变化的敏感度较大^[11],而双参数的优势在于可以能够灵活地调整模型参数来修正基流过程,然而其参数又难以确定。总体而言,单参数滤波法和多参数滤波法各有优缺点,且不同方法的适用性和流域特征相关。另一方面,滤波模型参数的取值对于准确分割基流同样极为重要。目前数字滤波法的常见参数是衰退常数和最大基流指数,滤波参数与河流状况和流域特征相关,然而过去很多研究使用滤波模型估算基流量时,都是使用预定义的经验参数^[12],近年来有研究^[13]提出使用流域的衰退常数估计滤波参数,而衰退常数值可以通过流域的实测流量退水过程计算得到^[14]。Yang等^[15]和Zhang等^[16]发现衰退分析结果因季节和流量数量级大小而异。但是,现有的研究在使用衰退常数估计滤波参数时较少考虑到参数的季节性变化特征。

栾川流域位于伊河源头,上游无其他支流汇入,且受人类取用水、水利工程等影响较小,径流季节性特征明显,因此使用数字滤波模型,结合退水系数分析参数季节性变化较为合适。目前大多针对伊洛河流域的研究^[17-19]都集中在揭示基流变化特征方面,在源头流域分析数字滤波基流分割方法及其适用性的相关研究较少。综上所述,采用4种数字滤波方法进行基流分割:Lyne-Hollick(LH)法、Chapman法、Chapman-Maxwell(CM)法和Eckhardt法,以伊河源区栾川流域作为典型研究区域,通过估计不同季节的流域退水系数来确定数字滤波参数,分析参数的季节性变化对估算基流量的影响,并且对滤波方法的适用性进行对比评价。研究内容为分析小流域地区基流变化以及数字滤波模型率定和优化参数提供了新的思路。

1 研究区概况

伊洛河作为黄河中下游的支流之一,位于三门峡—花园口河段,由伊河和洛河交汇而成,面积为18 881 km²,地势由西南到东北逐渐降低,有山地、丘陵、河谷、平原和盆地等,盆地山区多雨,河谷及附近丘陵少雨。栾川流域位于伊洛河流域伊河河源地区,栾川水文站控制面积约340 km²,栾川流域地势西高东低,森林覆盖率较高,植被主要是以落叶阔叶林及落叶阔叶灌丛为主。地质类型由岩浆

岩类、沉积岩类、碎屑岩类组成,深沟大岭部位岩石多裸露地表,土壤75%为褐土,具有深厚的土层,土体中部具有明显的黏化层^[20]。该流域属温带大陆性季风气候区,平均气温13.4℃,季节差异显著,年平均径流量为0.9亿m³,年平均降雨量为744 mm,年平均水面蒸发量为895.3 mm,年平均陆面蒸发量为518.62 mm,降水量分布不均,年际变化大,主要集中在7—9月。

2 数据与方法

2.1 数据来源

所用的径流和洪水要素数据为流域出口水文控制站栾川站实测的日尺度资料,数据资料均来源于黄河水文年鉴,数据收集年份为1964—1979年、2006—2020年。研究收集的典型实测洪水资料,鉴于各场次洪水实测数据时间间隔的差异,使用线性内插法将 $\Delta t=1$ h为步长对数据进行补充。

2.2 基流分割方法

2.2.1 数字滤波法

Lyne-Hollick滤波法是1979年由Lyne等首次提出的广泛应用在基于数字滤波器的基流分割方法,Nathan等在1990年引入水文中,公式为

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

$$Q_{b,t} = Q_t - q_t$$

式中: q_t 和 q_{t-1} 分别为 t 和 $t-1$ 时刻的直接径流量,m³/s,即为总径流中去除基流部分的径流量; Q_t 和 Q_{t-1} 分别为 t 和 $t-1$ 时刻的总径流量,m³/s; $Q_{b,t}$ 为 t 时刻的基流量,m³/s; β 为滤波器参数。

Chapman滤波法是在Lyne-Hollick滤波法上的改进,公式为

$$Q_{b,t} = \frac{3\alpha - 1}{3 - \alpha} Q_{b,t-1} + \frac{2}{3 - \alpha} (Q_t - \alpha Q_{t-1}) \quad (2)$$

式中: $Q_{b,t-1}$ 为 $t-1$ 时刻的基流量,m³/s; α 为衰退常数,可通过衰退分析得出。

Chapman和Maxwell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,公式为

$$Q_{b,t} = \frac{\alpha}{2 - \alpha} Q_{b,t-1} + \frac{1 - \alpha}{2 - \alpha} Q_t \quad (3)$$

递归数字滤波法由Eckhardt^[8]提出,可用于长时间水文序列基流分割,包含2个参数(衰退常数 α 和最大基流指数 $I_{BF,max}$),公式为

$$Q_{b,t} = \frac{\alpha(1 - I_{BF,max})Q_{b,t-1} + (1 - \alpha)I_{BF,max}Q_t}{1 - \alpha I_{BF,max}} \quad (4)$$

$$Q_{b,t} = \alpha Q_{b,t-1}$$

式中: α 为衰退常数; $I_{BF,max}$ 为最大基流指数, 即长时期内基流与总径流比值的最大值。本文中 2 个滤波参数均通过衰退分析得出。

2.2.2 退水系数计算滤波参数

数字滤波器基流分割的参数可以通过径流衰退分析获取^[21]。对于受人类活动影响较小的自然流域, 流量衰退过程往往显示出线性变化的趋势^[22], 可以表达为

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{1}{K}Q \quad (5)$$

式中: t 为时间步长, d ; K 是特征退水历时, d 。

对方程(5)进行积分, 流量消退过程曲线可根据指数型退水方程表示, 根据相邻时段流量相关法计算实测单峰洪水退水段的退水系数^[23], 可通过以下公式推求:

$$Q_t = \alpha Q_{t-1} = Q_0 \alpha^t = Q_0 e^{-\frac{1}{k}t} \quad (6)$$

式中: Q_t 为 t 时刻的流量, m^3/s ; Q_{t-1} 为 $t-1$ 时刻的流量, m^3/s ; α 为数字滤波方法的参数; k 为径流退水系数, 可有效地反映径流消退速度的快慢。

如式(6)所示, 径流退水曲线用指数型方程描述, 选取流域场次洪水退水段拟合出一条综合性的退水曲线, 用来反映流域退水特征。对于栾川流域, 属于较为湿润的流域, 巩轶欧等^[24]研究将拟合的退水曲线的常数项系数 Q_0 作为初始时刻的基流量, 通过改变最大基流指数的值直到分割出的基流峰值约为 Q_0 , 此时的基流指数即为 $I_{BF,max}$ 。

2.3 斜直线分割法

将流域多条流量退水曲线组合在一起, 尽量使其尾部完全重合, 得到一条所有退水曲线的下包络线作为流域综合退水曲线。斜直线分割法见图 1, 将综合退水曲线与要分割的流量过程线退水段画在同一比例尺上, 使横轴重合, 左右平移将两者退水段尾部吻合, 两线开始重叠的时刻即为地表径流的终止点, 即图中的 c 点, 从实测流量过程线的起涨点 a 到地表径流终止点连一条斜线, 该斜线以下即为基流。

2.4 误差分析方法

基流分割方法不同将得出不同的基流结果, 因此对于估算一个流域的基流选择合理适用的基流分割方法尤为重要。本研究采用 Nash-Sutcliffe 效

率系数(E_{NS})^[25]、灰色关联系数(D_{GR})^[26]和平均相对误差(E_{MR})3 种评价指标来对基流结果进行误差分析和精度评价, E_{NS} 和 D_{GR} 越大, E_{MR} 越小, 基流分割结果越好。

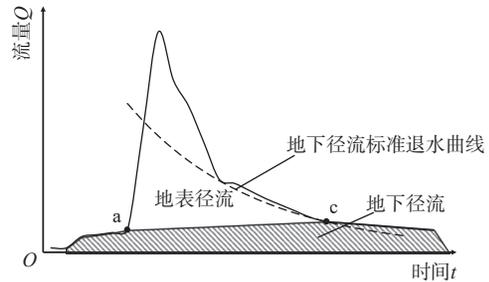


图 1 斜直线分割法

Fig. 1 Schematic diagram of the slanted linear segmentation method

Nash-Sutcliffe 效率系数 E_{NS} 和平均相对误差 E_{MR} 常用来对指标的误差和精度进行评估, 公式为

$$E_{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_{estimated} - y_{observed})^2}{\sum_{i=1}^n (y_{observed} - \bar{y}_{observed})^2} \quad (7)$$

$$E_{MR} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\left| \frac{y_{observed} - y_{estimated}}{y_{observed}} \right| \right) \quad (8)$$

式(7)和(8)中: n 为观测的次数; $y_{estimated}$ 和 $y_{observed}$ 分别为模拟数据和实测数据。

灰色关联系数对于 2 个因素之间变化的趋势和程度进行评估, 公式为

$$\zeta_i(k) = \frac{\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|}{|x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|} \quad (9)$$

式中: ρ 为取值在 0~1 的分辨系数, 分辨系数越大, 分辨率越大, 实际计算中一般取 $\rho=0.5$, 目前大多数研究在进行实证时都取分辨系数为 0.5。

3 结果分析

3.1 退水系数季节性变化特征分析

3.1.1 地面径流终止点计算

选取栾川水文站 1964—1979 年(时期 1)和 2006—2020 年(时期 2)年共计 47 场实测单峰洪水数据, 选取的这些场次洪水尽量前后无降水影响, 且退水趋于稳定。采用斜直线分割法对次洪过程进行基流分割, 确定各场次洪退水段的地面径流终止点 c , 统计各场次洪水过程基流深 R_g 与总径流深 R 的比值(记为 R_g/R)来表征地下径流占比的变化。流域在枯水期降水少, 在冬季基流是维持河川流量的主要组成部分, 即冬季河流流量基本都来自浅层

或深层地下水补给。因冬季极少有暴雨洪水发生,无洪水要素资料,退水系数的季节性变化主要针对春、夏和秋三季的场次洪水来分析,冬季按照多年平均日流量来统计退水系数,季节月份划分如下:春季(3—5月),夏季(6—8月),秋季(9—11月),冬季(12月—次年2月)。计算春、夏、秋三季47场

次洪水退水过程线的地面径流终止点和地下径流占比值。由表1可知,夏季 R_g/R 为0.32,春季 R_g/R 均值为0.37,相比于夏季增大15.6%,秋季 R_g/R 为0.39,相比于夏季增大21.9%,且两段时期地下径流补给占比相差不大,多年平均占比约为36.0%。

表1 栾川流域实测洪水退水过程地面径流终止点c及 R_g/R 计算结果Tab. 1 Surface runoff termination points and R_g/R calculation results of measured sub-flood recession process in Luanchuan basin

春季				夏季				秋季			
洪号	洪峰流量/($m^3 \cdot s^{-1}$)	c点流量/($m^3 \cdot s^{-1}$)	R_g/R	洪号	洪峰流量/($m^3 \cdot s^{-1}$)	c点流量/($m^3 \cdot s^{-1}$)	R_g/R	洪号	洪峰流量/($m^3 \cdot s^{-1}$)	c点流量/($m^3 \cdot s^{-1}$)	R_g/R
19640421	57.20	17.85	0.42	19640720	104.00	19.00	0.44	19641004	173.00	42.40	0.38
19640516	169.00	57.90	0.36	19640727	320.00	44.20	0.33	19670909	60.00	16.20	0.38
19650422	37.00	10.30	0.37	19670630	96.30	17.00	0.29	19670929	66.50	21.50	0.41
19650501	22.60	6.69	0.47	19670712	277.00	28.50	0.26	19741003	65.70	32.60	0.36
19660429	47.80	14.40	0.33	19740809	57.80	13.20	0.29	19751003	61.50	21.70	0.39
19670422	32.20	8.48	0.36	19750726	64.90	11.80	0.31	19771028	50.90	13.40	0.33
19750425	107.00	38.90	0.36	19750808	503.00	31.10	0.25	19790915	74.70	15.50	0.31
19770423	34.90	5.95	0.32	19770710	207.00	27.10	0.22	19790923	86.40	17.20	0.43
20090515	67.90	19.00	0.38	19770803	105.00	8.20	0.28	20060904	61.00	15.00	0.39
20090528	49.00	8.45	0.30	19780715	32.10	10.50	0.43	20060930	33.40	15.40	0.34
20100421	420.00	54.00	0.39	19790618	137.00	14.70	0.19	20110918	144.10	62.30	0.51
20130526	66.10	17.80	0.31	20060707	29.50	6.73	0.41	20170927	67.80	23.00	0.43
				20070705	277.00	47.60	0.27				
				20070730	319.50	51.10	0.38				
				20080722	134.00	28.20	0.37				
				20090817	48.90	9.10	0.40				
				20090822	105.00	27.00	0.34				
				20100724	1280.00	95.90	0.19				
				20150730	59.80	9.95	0.29				
				20160806	15.70	8.90	0.55				
				20200722	22.40	4.60	0.37				
				20200802	61.20	11.50	0.31				
				20200822	21.20	10.20	0.37				
均值	-	-	0.37	均值	-	-	0.32	均值	-	-	0.39

3.1.2 退水系数及滤波参数计算

将47场实测洪水退水过程线画在一起,采用相同的比例尺,使所有的退水曲线通过移动将退水曲线尾部达到最大重合。如图2所示,绘制了各季节主衰退曲线(MRC),黑色虚线表示次洪退水过程线,红色实线表示拟合的平均退水曲线。采用相邻时

段流量相关法计算场次洪水主衰退曲线c点之后的退水系数 k ,通过指数型方程拟合得到衰退常数,衰退常数越大,衰退曲线越平缓,表征在相同起始流量条件下衰退越慢。计算各季节退水系数,见表2。在各季节流量不同的条件下,参数会随流量衰退趋势而变化,计算流域春、夏、秋、冬平均退水系数为

90.91 h、23.81 h、34.48 h、100.00 h。流域全年平均径流退水系数 k 为 45.45 h, Q_0 为 67.07 m^3/s , 进而求

得数字滤波参数 α 为 0.978 2, 计算流域多年平均 $I_{BF,max}$ 为 0.4。

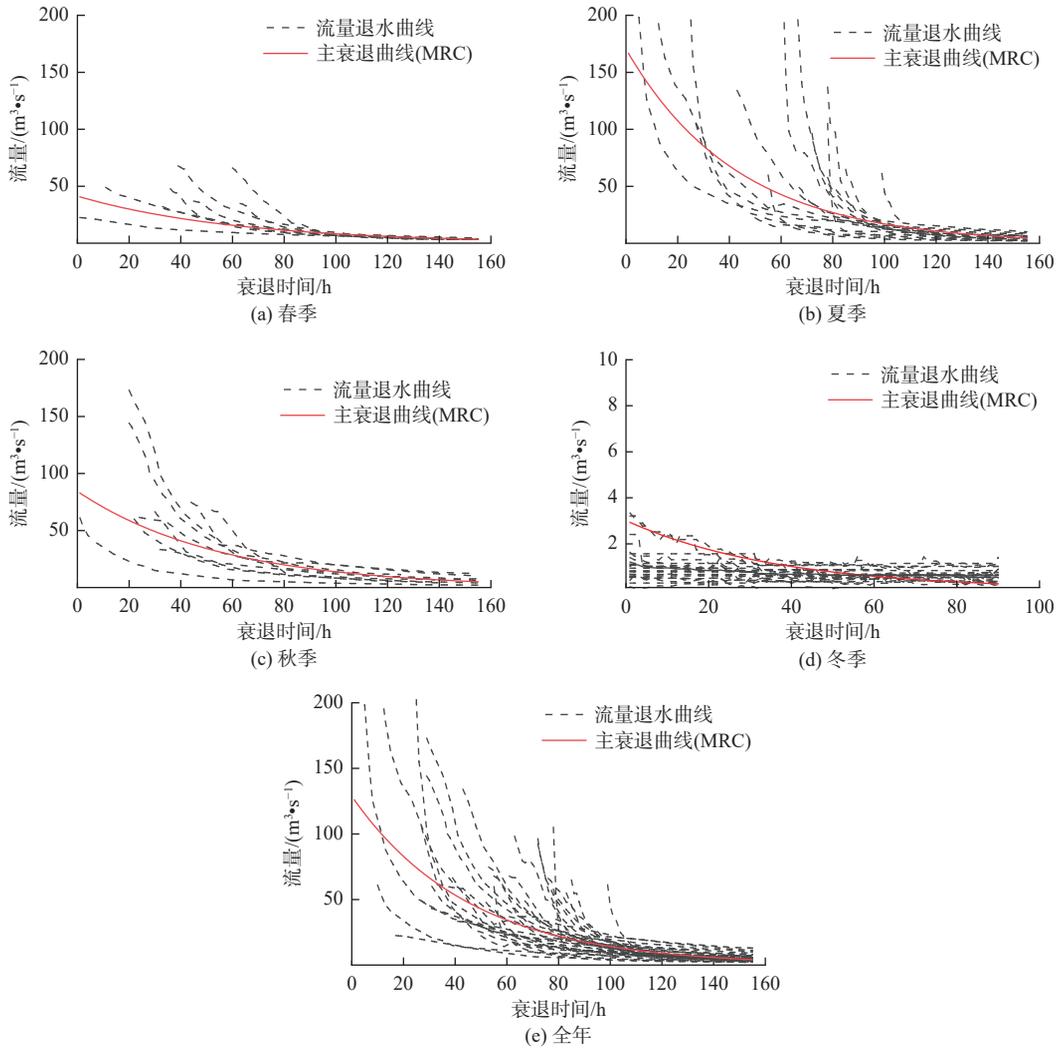


图 2 各场次洪水退水曲线及主衰退曲线趋势

Fig. 2 Trends in flood recession curves and main recession curves by site

表 2 伊河栾川流域径流退水系数 k 计算结果

Tab. 2 Calculation of runoff recession parameter k in the Luanchuan basin of the Yi River

时期	退水系数 k 均值/h	常数项系数 Q_0	滤波参 数 α	最大基流 指数 $I_{BF,max}$
春季	90.91	26.82	0.989 1	0.51
夏季	23.81	80.43	0.958 9	0.35
秋季	34.48	28.19	0.971 4	0.55
冬季	100.00	1.01	0.990 0	0.67
全年	45.45	67.07	0.978 2	0.40

夏季径流退水系数 k 最小, 即流域夏季次洪径流相较于其他季节的洪水退水速率要大, 表明流域在夏季多形成暴雨洪水, 洪峰流量大, 降雨强度大于地面下渗能力, 特征表现为历时短、涨水快, 地面快速地形成积水, 但河道水位高流速快, 在水动力

条件下退水也快, 产流类型表现为超渗地面径流。流域在冬季和春季降水较少, 流量较小的情况下退水系数大、退水速率慢, 此时由于汛期过后地下水位相对较高, 因此主要由地下水补给来维持河道流量。可见, 流域各季节径流衰退特征有所差异, 图 2(e) 中显示全年整个时期的实测次洪退水曲线, 可见与各季节径流衰退系数相差较大, 特别是春季和冬季, 若使用全年整个时期的主衰退曲线, 不能体现各季节流量衰退特征。

3.2 参数季节性变化对基流的影响

3.2.1 基流分割结果

考虑到滤波参数的季节及流量条件变化对估算基流的影响, 采用 4 种数字滤波法对流域日径流进行基流分割, 基流指数 I_{BF} (总基流量与总径流量的比值) 为评价地下水补给占地表径流的比例。滤波

参数采用表2中所示参数,各季节采用不同的滤波参数(多参数)与全年都使用一个滤波参数(单参数)得出的 I_{BF} 结果见表3,发现考虑参数季节性变化会使计算的基流指数明显减小。其中,LH方法在夏、秋季采用季节变化的滤波参数对估算基流影响较大,即季节性参数计算的夏季基流指数从0.52降至0.31,下降40.38%,秋季 I_{BF} 从0.71降到0.57,

下降19.72%,年均 I_{BF} 从0.62至0.47,下降24.19%。Chapman和CM方法基流变化特征相似,滤波参数在夏季对基流影响较大,年均 I_{BF} 从0.47至0.43。Eckhardt方法参数变化对各季节的基流影响很显著,夏季 I_{BF} 下降8%,其他季节下降15%以上,年均 I_{BF} 从0.39降至0.33。因此,基于滤波参数的季节性变化计算基流是非常有必要的。

表3 各季节参数和年单一参数滤波方法计算的 I_{BF} 结果对比Tab. 3 Comparison of I_{BF} calculated by seasonal parameters and annual single-parameter filtering methods

时期	径流量/($m^3 \cdot s^{-1}$)	方法	单参数		多参数		变化率/%
			基流量/($m^3 \cdot s^{-1}$)	I_{BF}	基流量/($m^3 \cdot s^{-1}$)	I_{BF}	
春季	133.38	LH	90.56	0.68	94.20	0.71	4.41
		Chapman	58.44	0.44	58.14	0.43	-2.27
		CM	58.62	0.44	58.32	0.44	0
		Eckhardt	54.21	0.41	45.31	0.34	-17.10
夏季	1 039.89	LH	536.80	0.52	323.35	0.31	-40.38
		Chapman	387.66	0.37	316.29	0.30	-18.92
		CM	391.66	0.38	319.74	0.31	-18.42
		Eckhardt	259.51	0.25	236.11	0.23	-8.00
秋季	823.47	LH	585.08	0.71	470.27	0.57	-19.72
		Chapman	466.28	0.57	458.80	0.56	-1.75
		CM	468.00	0.57	460.27	0.56	-1.75
		Eckhardt	444.00	0.54	356.61	0.43	-20.37
冬季	93.48	LH	93.35	0.99	93.35	0.99	0
		Chapman	82.01	0.88	75.41	0.81	-7.95
		CM	82.05	0.88	75.51	0.81	-7.95
		Eckhardt	65.96	0.71	83.78	0.90	-18.31
年平均	2 090.22	LH	1 305.79	0.62	981.16	0.47	-24.19
		Chapman	994.40	0.47	908.65	0.43	-8.51
		CM	1 000.33	0.48	913.84	0.44	-8.30
		Eckhardt	823.67	0.39	691.81	0.33	-15.38

3.2.2 滤波方法的适用性评估

为进一步评估和分析几种数字滤波方法在栾川流域的适用性,分别采用不同滤波参数,以斜直线分割法的结果作为参考,对47场次洪进行基流分割,分析评价各滤波方法基流占比 I_{BF} 计算的误差和精度。4种滤波方法与斜直线分割法计算的 I_{BF} 结果见图3,其中:Eckhardt方法估算的 I_{BF} 拟合效果最好,相关性达到0.79;Chapman和CM方法估算基流量相似,整体基流偏大,拟合效果较差, I_{BF} 基本都在

0.4以上;LH方法基流计算结果较为分散,且受流量变化条件影响较大。另外,图3(e)显示各方法计算出的 I_{BF} 结果误差,也显示Eckhardt与斜直线分割法的计算结果最为接近。分别采用 E_{NS} 、 D_{GR} 和 E_{MR} 3种评价指标来对数字滤波法计算得到的 I_{BF} 进行误差分析和精度评价(表4),结果表明,Eckhardt滤波法 E_{NS} 为0.57, D_{GR} 达到0.68,平均相对误差为0.03,可认为是栾川流域数字滤波法中最佳的基流分割方法。

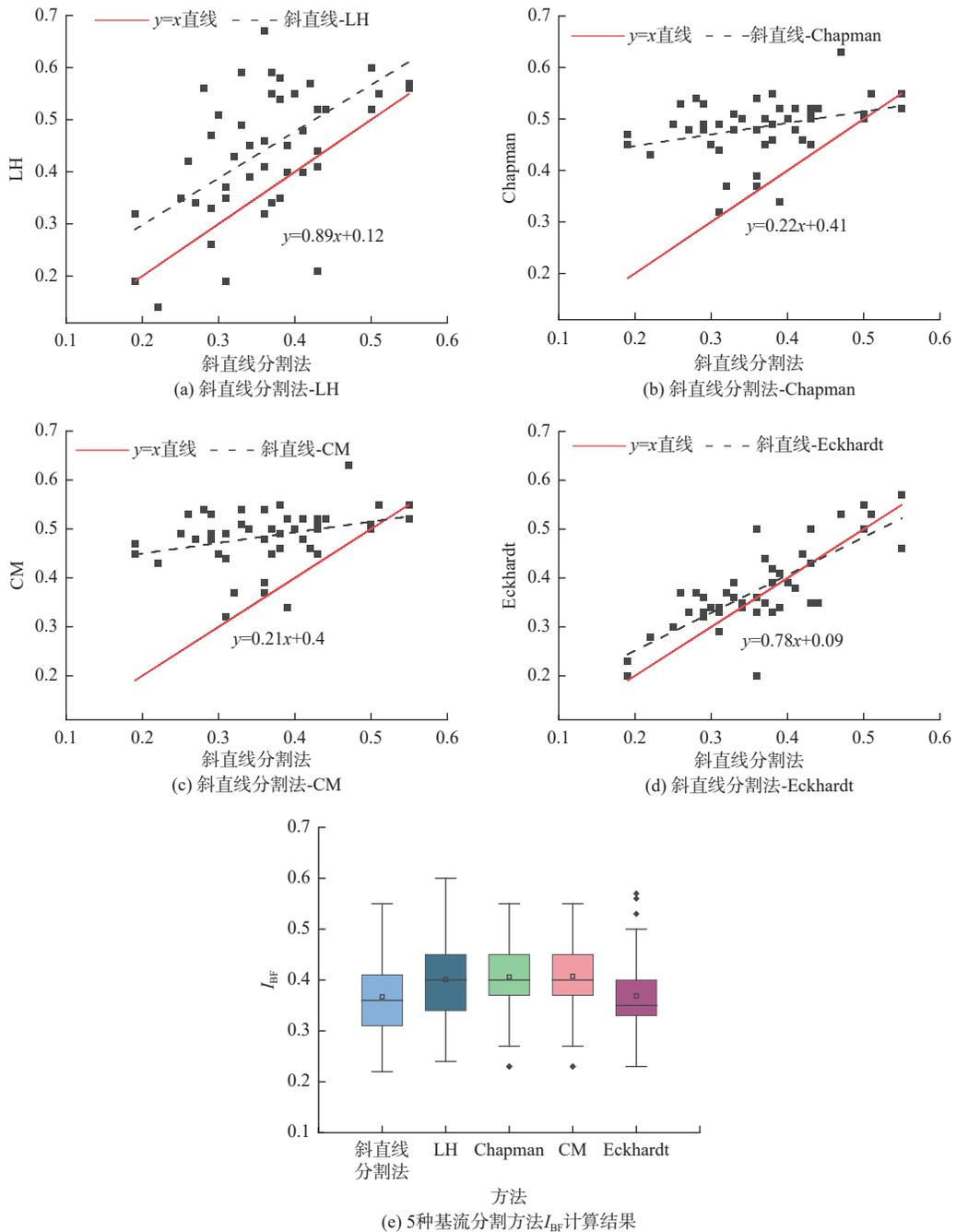


图 3 数字滤波法与斜直线分割法之间的相关性及 I_{BF} 计算结果

Fig. 3 Correlation and I_{BF} calculation results of digital filtering method and slanted linear segmentation method

表 4 各基流分割方法评价结果

Tab. 4 Evaluation results of each base flow segmentation method

评价指标	LH	Chapman	CM	Eckhardt
E_{NS}	0.57	0.44	0.40	0.89
D_{GR}	0.68	0.67	0.65	0.73
E_{MR}	0.08	0.09	0.10	0.03

4 讨论

4.1 基流分割方法的合理性

尽管数字滤波方法具有简单易用和可重复性强等优点,已经在国内外被广泛使用,但也必须认识

到方法和数据的局限性。由于基流难以直接观测,很难对流域分割结果进行准确的验证,枯水指数法反映地下水补给河川径流特性的重要指标^[11],因此通常被用来估算年基流量,在比较基流结果的同时,几种方法也能交叉验证。另一方面,由于基流作为径流中稳定的一部分流量,且地下水对于河川径流的补给会有一定的滞后性^[2,4,15-17],依据基流分割的稳定性和可靠性,基流过程线应是比较平滑的。因此,枯水指数法并不能作为基流分割方法评判的唯一标准,选取原则主要依据分离出的基流是否具有稳定性以及是否符合流域的水文地质条件。

图4为4种滤波方法在1960年基流分割过程线对比图,Chapman和CM方法明显分割的基流要更大,在汛期基流占比达到40%以上,而这与大多数学者在相同流域的研究结论不一致。LH和Eckhardt这2种方法计算结果相差不大;Lyu等^[27]研究黄河流域基流变化特征,显示黑石关站多年平均 I_{BF} 在0.30~0.47;杨桂莲等^[28]用SWAT模拟洛河

流域基流,估算 I_{BF} 为0.23;甘容等^[19]研究表明伊洛河流域多年平均 I_{BF} 小于0.50,栾川流域 I_{BF} 为0.31~0.40;Eckhardt双参数滤波法计算流域年均基流指数在0.33左右,即地下径流补给约占河川总径流的30%左右,且对于伊洛河流域来说较为适用。因此,考虑流域的季节性退水特征的差异,采用不同的滤波参数对基流分割结果更为合理。

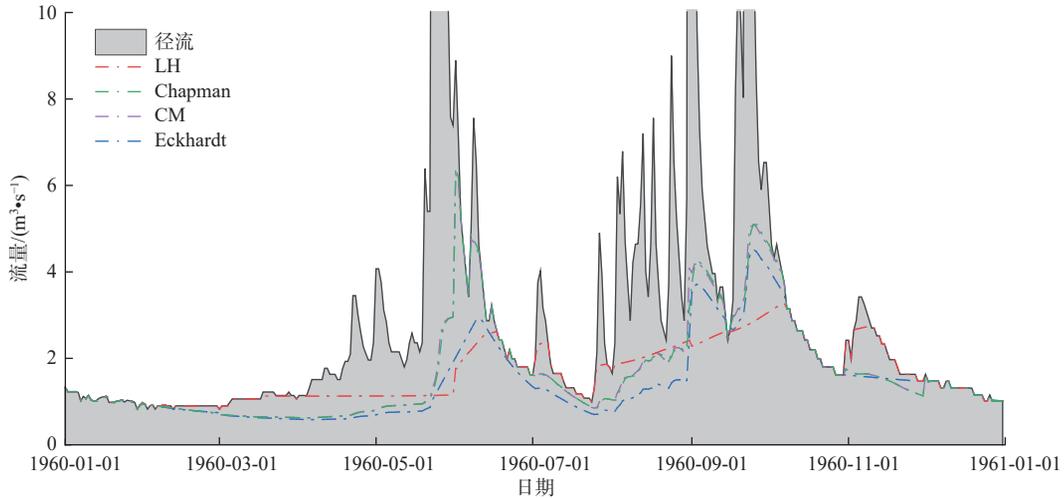


图4 4种数字滤波方法基流分割过程线

Fig. 4 Comparison of four digital filtering methods for baseflow segmentation process lines

考虑到目前同位素示踪来测量基流的方法所需成本较高,大部分学者^[3,29-30]的研究都采用非示踪剂的数值模拟方法来作为基流的基准值,若要准确地估算基流,仍需大量的观测数据以及环境同位素法等方法进行率定以获得可靠的分割结果。因此,如何准确分割和计算基流真实值依然是未来基流研究领域的重点和难点。

4.2 降水与径流变化

从基流深与径流深比值 R_g/R 的结果来看,两段时期的地下径流占比相差不大,一场降水形成后,

一部分下渗到地下,通过饱和带以地下水的形式补给给河道,这个过程要比地表径流形成漫长的多,其中降水对其影响是必不可少的。图5(a)分析了两段时期的降水和径流相关关系变化,表明从 t_1 到 t_2 ,两者的相关线性关系没有明显变化,在降水量相同的情况下径流量略有减少;图5(b)中显示了降水-径流的双累计曲线,也表明流域降水-径流关系并无明显变化,只是后期降水转化为径流的比例略有降低,但降水仍是主导径流变化的主要因素。

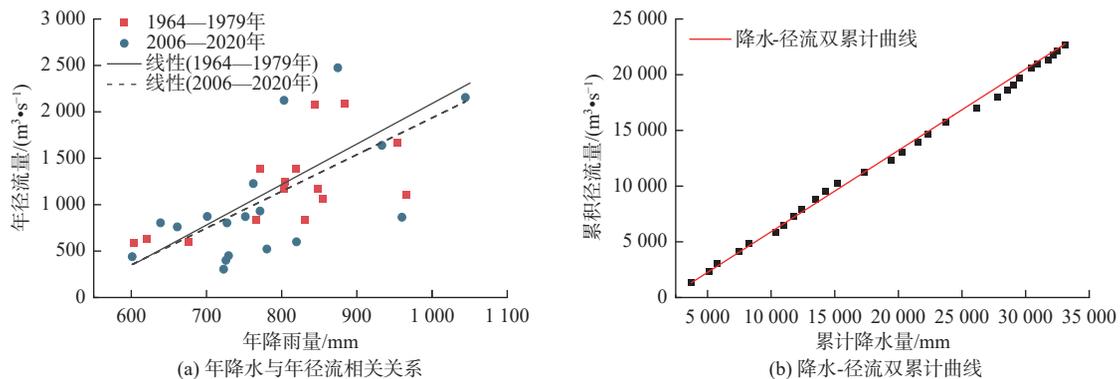


图5 栾川流域年降雨量与径流量变化

Fig. 5 Changes in annual rainfall and runoff in the Luanchuan basin

4.3 下垫面变化

基流不仅受不同气候的影响,还与流域特征,如

地形、土壤和植被等下垫面特征有关。分析1980年以来土地利用和植被覆盖变化(图6),栾川流域

土地利用变化不明显,主要是耕地面积、城镇和居民人口有所增加,但流域 80% 以上都是林地构成,相对来说人为因素影响较小。林地虽一部分转化为耕地和居民用地,但流域还是基本由林地构成,对于地质地貌变化和土壤结构没有明显影响。植被覆盖指数 NDVI 变化呈现逐渐增加的趋势,如图 7 (a),表明自 1999 年植树造林政策实施以来,虽

然林地面积有所减少,但流域的植被覆盖度显著提高,多年平均 NDVI 为 0.79。由 NDVI 与径流和退水系数的响应关系图 7 (b) 可知,NDVI 与径流量呈负相关,而与衰退常数并无明显相关关系,也进一步证明了对于栾川流域所研究两段时期的下垫面条件的变化对于退水系数的影响不大。

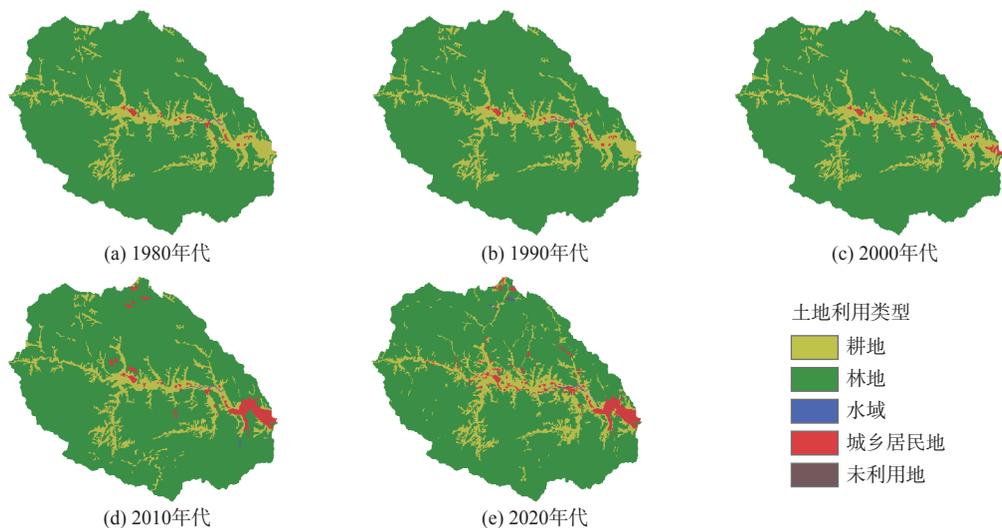


图 6 栾川流域 1980—2020 年土地利用变化

Fig. 6 Land use change of Luanchuan River basin from 1980 to 2020

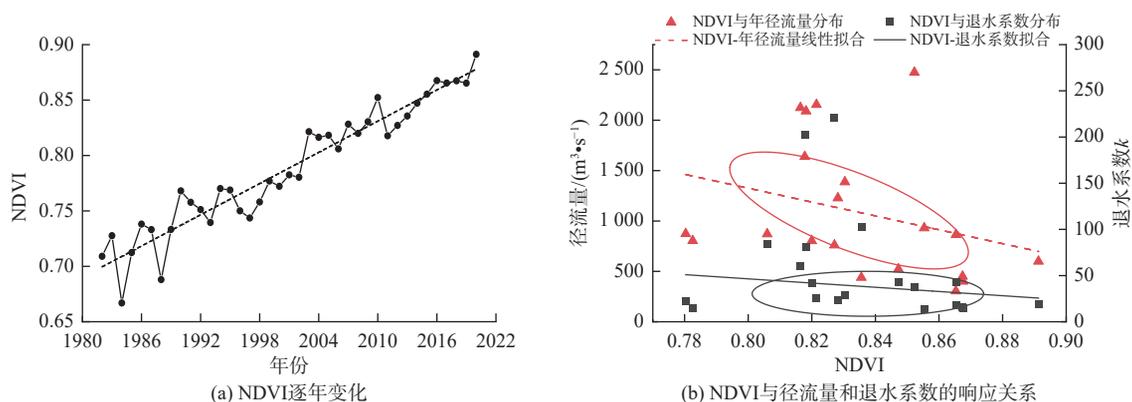


图 7 NDVI 逐年变化与径流和退水系数的响应关系

Fig. 7 The response relationship between the annual change of NDVI and runoff and water retreat coefficient

5 结论

以伊河上游段栾川流域为研究区,通过对场次洪水和径流数据的退水系数分析,确定数字滤波模型参数取值,探究滤波参数的季节性变化对于估算基流的影响,并对 4 种滤波方法进行误差评价和适用性评估。主要结论如下:

采用斜直线分割法确定洪水过程的退水曲线的地表径流终止点,计算流域退水系数,并分析其季节变化特征。流域研究时期内土地利用变化不大,NDVI 的增加对于流域退水系数并无明显影响。降

水-径流的双累计曲线显示,降水仍然是导致径流变化的主导因素,径流退水系数在年际间变化不大,但呈现的季节性变化明显,退水系数的大小关系为夏季<秋季<春季<冬季,即在夏季退水系数小衰退速度快。考虑滤波参数的季节性变化要比各季节采用滤波参数均值所得基流结果更为合理准确,且符合流域基流实际特征。

对 4 种滤波方法进行对比评估,得出 LH、Chapman 和 CM 单参数滤波方法计算的基流指数整体偏大,尤其在夏季基流占比不符合流域汛期基

流情况,且精度和相关性较差。Eckhardt 双参数滤波方法所得基流占比与斜直线分割法相关性达到 0.79,且与同流域的相关研究对比较为合理,因此,对比而言 Eckhardt 双参数滤波模型是栾川流域较适宜的基流分割方法。

数字滤波法操作简单、易于推广,但其缺乏物理机制,本文结合退水参数分析来确定数字滤波参数,探究滤波参数的季节性变化对基流分割的影响,以更好地反映流域退水的季节动态特征,降低了参数的不确定性,并提高了模型的准确性。但要想准确地获取基流,需要根据同位素示踪获取大量的观测数据,结合流域特征率定和优化模型参数准确分割径流还需进一步深入探究。

参考文献:

- [1] YANG W F, XIAO C L, LIANG X J, et al. Two baseflow separation methods based on daily average gage height and discharge[J]. *Water Supply*, 2019, 19(7): 1978-1985. DOI: 10.2166/ws.2019.074.
- [2] 张泳华,刘祖发,赵铜铁钢,等. 东江流域基流变化特征及影响因素[J]. *水资源保护*, 2020, 36(4): 75-81. DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2020.04.012.
- [3] XIE J X, LIU X M, WANG K W, et al. Evaluation of typical methods for baseflow separation in the contiguous United States[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 583, 124628. DOI:10.1016/j.jhydrol.2020.124628.
- [4] 莫崇勋,谢燕平,班华珍,等. 不同基流分割方法在澄碧河的适用性探讨[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2020, 18(2): 86-92. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2020.0030.
- [5] 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. DOI: 10.1029/WR026i007p01465.
- [6] CHAPMAN T G, MAXWELL A I. Baseflow separation-comparison of numerical methods with tracer experiments[J]. *Hydrology and Water Resources*, 1996, 2(5): 539-546. DOI: 10.3316/informit.360361071346753.
- [7] ZHANG J K, GAN R, TONG X X, et al. Quantification and variation characteristics of baseflow non-point source pollution in Yiluo River basin, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 626:130303. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2023.130303.
- [8] 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. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2008.01.005.
- [9] 李红霞. 基于 Budyko 模型的伊洛河流域径流变化归因分析[D]. 郑州: 郑州大学, 2022. DOI:10.27466/d.cnki.gzzdu.2022.005349.
- [10] 周星,沈忱,倪广恒,等. 结合退水曲线的数字滤波基流分割方法[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2017, 57(3): 318-323. DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2017.26.016.
- [11] KANG T, LEE S, LEE N, et al. Baseflow separation using the digital filter method: Review and sensitivity analysis[J]. *Water*, 2022, 14: 485. DOI: 10.3390/w14030485.
- [12] 夏露,毕如田,宋孝玉,等. 砚瓦川流域河川基流变化规律及其驱动因素[J]. *生态学报*, 2021, 41(21): 8430-8442. DOI: 10.5846/stxb202104010845.
- [13] 温馨,孙艳,李昱,等. 流域年径流预报方法及影响因素分析[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2023, 54(11): 113-123. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2023.11.010.
- [14] YANG D S, LEE S, KIM J, et al. Development of web-based hydrograph analysis tool considering seasonality and flow condition[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2024, 60(2): 707-724. DOI: 10.1111/1752-1688.13178.
- [15] YANG D, LEE S, LEE G, et al. Estimation of baseflow based on master recession curves (MRCs) considering seasonality and flow condition[J]. *Journal of Wetlands Research*, 2019, 21(1): 34-42. DOI: 10.17663/JWR.2019.21.1.034.
- [16] ZHANG J, ZHANG Y, SONG J, et al. Evaluating relative merits of four baseflow separation methods in eastern Australia[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 549: 252-263. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2017.04.004.
- [17] DUNCAN H P. Baseflow separation: A practical approach[J]. *Journal of Hydrology*, 2019(575): 308-313. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.05.040.
- [18] INDARTO, NOVITA E, WAHYUNINGSIH S. Preliminary study on baseflow separation at watersheds in east Java regions[J]. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 2016(9): 538-550. DOI: 10.1016/j.aaspro.2016.02.174.
- [19] 甘容,徐孟莎,左其亭. 伊洛河流域基流分割及其时空变化特征[J]. *资源科学*, 2022, 44(9): 1824-1834. DOI: 10.18402/resci.2022.09.07.
- [20] 栾川地情网. 栾川县年鉴[Z]. 2022.
- [21] LYU S X, ZHAI Y Y, ZHANG Y Q, et al. Baseflow signature behaviour of mountainous catchments around the North China Plain[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 606, 127450. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2022.127450.
- [22] HARE D K, HELTON A M, JOHNSON Z C, et al. Continental-scale analysis of shallow and deep

- groundwater contributions to streams[J]. *Nature Communications*, 2021, 12 (1), 1450. DOI: [10.1038/s41467-021-21651-0](https://doi.org/10.1038/s41467-021-21651-0).
- [23] 张清杰, 黄领梅. 基于斜率单变点法的小理河流域退水规律分析 [J]. *水电能源科学*, 2022, 40(1): 21-24. DOI:1000-7709(2022)01-0021-04.
- [24] 巩轶欧, 刘桂桂, 田长涛. 场次洪水径流分割方法实例分析 [J]. *科技创新与应用*, 2016(1): 154-157. DOI: [10.3880/j.issn.1004-6933.2021.04.012](https://doi.org/10.3880/j.issn.1004-6933.2021.04.012).
- [25] 郭伟, 陈兴伟, 林炳青. SWAT 模型参数对土地利用变化的响应及其对不同时间尺度径流模拟的影响 [J]. *生态学报*, 2021, 41(16): 6373-6383. DOI: [10.5846/stxb202007141834](https://doi.org/10.5846/stxb202007141834).
- [26] 周文浩, 曾波. 灰色关联度模型研究综述 [J]. *统计与决策*, 2020(15): 29-34. DOI: [10.13546/j.cnki.tjyj.2020.15.006](https://doi.org/10.13546/j.cnki.tjyj.2020.15.006).
- [27] LYU S X, GUO C L, ZHAI Y Y, et al. Characterising baseflow signature variability in the Yellow River Basin [J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 345: 118565. DOI: [10.1016/j.jenvman.2023.118565](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118565).
- [28] 杨桂莲, 郝芳华, 刘昌明, 等. 基于 SWAT 模型的基流估算及评价: 以洛河流域为例 [J]. *地理科学进展*, 2003, 22(5): 463-471. DOI: [10.11820/dlkxjz.2003.05.004](https://doi.org/10.11820/dlkxjz.2003.05.004).
- [29] CHONG X M, YU L R, XIANG G X, et al. Impact of climate change and human activities on the baseflow in a typical karst basin, Southwest China [J]. *Ecological Indicators*, 2021, 126, 107628. DOI: [10.1016/j.ecolind.2021.107628](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107628).
- [30] KISSEL M, SCHMALZ B. Comparison of baseflow separation methods in the German low mountain range [J]. *Water*, 2020, 12(6): 1740. DOI: <https://doi.org/10.3390/w12061740>.

Evaluation of digital filtering baseflow separation methods based on seasonal variation : A case study of the Luanchuan basin of the Yi River

FENG Xiating^{1,2}, ZHANG Jiapeng^{1,2}, LIAN Yanqing^{2,3}, LING Muwu³

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Yangtze Institute for Conservation and Development, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Baseflow is an important recharge to river runoff and is critical for maintaining the health of river ecosystems as well as for watershed water resource regulation and management. However, baseflow is difficult to measure and tracer-based methods are time-consuming and expensive, so non-tracer methods are commonly used for estimation. Digital filtering is a commonly used non-tracer method for partitioning baseflow, and the computational process is simple and easy to implement. The applicability of the digital filter model in different basins varies depending on the flow characteristics of the basin, and the filter parameters are often difficult to determine directly. In the past, most scholars often used empirical parameters to separate baseflow using digital filter model, and seldom considered the seasonal dynamic change characteristics of the parameters, which made the results of baseflow separation in different watersheds have a large uncertainty.

To improve the accuracy of baseflow separation, a digital filter baseflow separation method was proposed based on seasonal recession analysis. The Luanchuan basin of the Yi River was taken as a typical study area, and four digital filtering models were used for baseflow separation, including three single-parameter filtering models (Lyne-Hollick, Chapman and Chapman-Maxwell), and a two-parameter filtering model (Eckhardt). Based on the 47 measured sub-flood data and daily runoff data of the watershed from 1964 to 1979 and 2001 to 2020, the recession coefficient (k) of the watershed in different seasons was calculated. To analyze the effects of considering seasonal variations of model parameters on baseflow separation results and to calculate baseflow indices for each season in the study watershed, three evaluation indexes, namely, Nash-Sutcliffe efficiency coefficient (E_{NS}), Gray correlation coefficient (D_{GR}), and mean relative error (E_{MR}) were used to analyze the errors and evaluate the accuracy of baseflow results and to assess the applicability of the four filtering models.

The results showed that there was little land use change in the watershed over the two study periods, and the increase in NDVI did not have a significant effect on the number of receding water systems in the watershed. The precipitation-runoff double cumulative curve shows that precipitation is still the dominant factor leading to changes

in runoff. The seasonal variation of the receding coefficient k in the Luanchuan basin was obvious, and the receding rates were faster in summer and fall, with k about 20 to 35 h, and slower in fall and winter, with k about 90 to 100 h. Compared with using a single parameter throughout the year, using different filtering parameters in each season significantly reduces the base flow index, which is more in line with the base flow characteristics of the watershed; Taking the oblique straight line separation method as the evaluation standard, the error and accuracy of baseflow indices obtained from several digital filtering methods were evaluated, the baseflow indices calculated by single-parameter than two-parameter filtering methods were generally larger, and the results of baseflow separation were greatly affected by the parameters. Eckhardt two-parameter filtering method had the best fitting effect, and it was the best baseflow separation method in Luanchuan watershed, and the average proportion of groundwater runoff recharge in the basin is about 33%. The results of this research provide new ideas for improving the accuracy of the digital filtering model to separate baseflow.

Key words: baseflow separation; digital filtering method; seasonal variations; Luanchuan basin

.....
(上接第 117 页)

(RMSE) for water depth and velocity were within acceptable ranges, indicating the accuracy and reliability of the coupling method.

The superposition approach for coupling 1D and 2D LBM hydrodynamic models provides a robust and efficient solution for simulating shallow water flows in complex topographic regions. The method leverages the strengths of both 1D and 2D models, providing accurate and reliable results while maintaining computational efficiency. The successful application of this method expands the capabilities of LBM in hydrodynamic simulation and demonstrates its potential for solving other multi-dimensional coupling problems, such as 1D-3D coupling or solute transport coupling.

Key words: lattice Boltzmann method; hydrodynamics; 1D-2D coupling; superposition; shallow water equation