

DOI: 10.5846/stxb202103140682

王晨杨, 闫铁柱, 翟丽梅, 华玲玲. 密云水库白河流域基流演变特征. 生态学报, 2022, 42(8): 3181-3190.

Wang C Y, Yan T Z, Zhai L M, Hua L L. Change characteristics of baseflow in Bai River Basin of Miyun Reservoir based on comparison of separation methods. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(8): 3181-3190.

密云水库白河流域基流演变特征

王晨杨, 闫铁柱, 翟丽梅*, 华玲玲

中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/农业农村部面源污染控制重点实验室, 北京 100081

摘要:基流是水文过程的一个重要组成部分,选择科学合理的基流分割方法,研究明确影响基流变化的驱动因素,对于保证河湖的生态水量至关重要。以北京密云水库的白河流域为例,根据白河流域张家坟水文站 1967—2012 年的实测径流数据和相关气象数据,对比分析了局部最小值法、单参数数字滤波法和递归数字滤波法三种方法的基流分割结果,并从气候变化和人类活动两方面分析影响基流变化的驱动因素。结果表明,相比局部最小值法和单参数数字滤波法,递归数字滤波法在白河流域有着更好的应用稳定性;在密云水库白河流域,基流对河川径流有着相当高的贡献比例 ($BFI > 0.65$);1967—2012 年白河流域年基流量存在极显著的减少趋势 ($P < 0.01$),而年基流指数值基本保持不变。白河流域基流序列分别在 1980 年和 1999 年发生了突变,其中 1999 年的突变主要受到降雨过程(气候变化)的影响,而 1980 年的突变点主要受到其他因素(如人类活动)的影响。

关键词:基流;白河流域;分割方法;演变特征

Change characteristics of baseflow in Bai River Basin of Miyun Reservoir based on comparison of separation methods

WANG Chenyang, YAN Tiezhu, ZHAI Limei*, HUA Lingling

Key Laboratory of Nonpoint Source Pollution Control, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China

Abstract: Baseflow is the portion of streamflow that comes from groundwater storage and other delayed sources, and is an integral part of the hydrological process. It is crucial to ensure the ecological water volume of rivers or lakes by choosing a scientific and reasonable baseflow separation method and identifying the driving factors that affect the change of baseflow. Therefore, the original achievement and objective of this study were to further contribute to the literature to fill the gap in the knowledge of how to analyse the impacts of climate change and human activities on baseflow more reasonably and comprehensively. The Bai River Basin of Miyun Reservoir was selected as a case study in this paper. The comparison and selection of methods were discussed, and the evolution characteristics of baseflow and its influencing factors were analyzed. Finally, the corresponding management guidance was given. The baseflow separation results of local minimum method, single parameter digital filter method and recursive digital filter were compared based on the measured streamflow data and related meteorological data from the Zhangjiafen Hydrological Station in the Bai River Basin from 1967 to 2012. Driving factors that affect baseflow changes were also identified from two aspects of climate change and human activities. The results showed the recursive digital filter method had better application stability in the Bai River Basin compared to other methods. The baseflow had a relatively high contribution rate to the river streamflow ($BFI > 0.65$) in the Bai River Basin of Miyun Reservoir. The amount of annual baseflow of the Bai River Basin had a very significant decreasing trend ($P < 0.01$) from

基金项目:中国农业科学院科技创新工程(G202116)

收稿日期:2021-03-14; 网络出版日期:2021-12-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhailimei@caas.cn

1967 to 2012, while the annual baseflow index remained unchanged. The baseflow sequence of the Bai River Basin had abrupt changes in 1980 and 1999, respectively. The abrupt change of the baseflow sequence in 1999 was mainly affected by the precipitation (climate change). The abrupt change in 1980 was not dominated by precipitation, but mainly affected by other factors, such as human activities. Therefore, in the future, it is necessary to rationally conserve the source of baseflow, and deepen the understanding and research on the rule of streamflow evolution, especially the impact of climate change and human activities on water resources. It will be of great significance to the safety of water supply in Beijing and the optimal allocation and management of regional water resources. This study enhances our understanding of the relative roles of climate variations and human activities on baseflow.

Key Words: baseflow; Bai River Basin; separation method; change characteristics

基流作为河川径流的一个重要组成部分,其来源具有一定的稳定性,因而在维持河流生态系统的功能和健康,保障生活、生产用水等方面发挥着重要作用^[1-2]。深入研究基流发生机制与功能对于流域水资源和水质管理、水文模型的校准和验证、控制河流富营养化以及盐水入侵等具有重要意义^[1, 3]。作为基流发生机制和功能研究的重要部分,基流分割对于区域的水资源规划、河流环境保护等具有重大意义,而且也是产汇流计算、构建降雨-径流关系和水文模拟等的重要研究内容^[4]。对于基流分割方法的选取和适用性,前人做了大量的研究^[5-8],例如莫崇勋等^[9]对不同分割方法在澄碧河的适用性进行了探讨,发现 Boughton-Chapman 滤波法在澄碧河的基流分割中较为适宜;张泳华等^[10]发现数字滤波法更适用于我国东江流域的基流变化分析;xie 等^[11]采用 9 种基流分割方法对美国境内的 1815 个流域进行了适用性评价,发现 Eckhardt 法的应用性能最佳。但目前对于如何选择适宜的基流分割方法仍存在较大争议性^[12]。

密云水库作为北京市重要的地表饮用水水源地,其上游入库河流是生态环境保护的重要区域。近年来,密云水库入库水量明显减少,对首都地区的水安全造成了一定的威胁^[13]。目前,已有不少关于密云水库上游流域径流流量变异性及其影响因素的相关研究^[14-16]。秦丽欢等^[14]对密云水库上游径流变化趋势及影响因素进行了研究,表明人类活动是影响密云水库径流变化的主要原因。同样,王泽勇等^[15]发现降水和人类活动是对密云水库上游流域径流量变化影响最大的因素,其中人类活动是导致密云水库上游入库流量减小的主要原因。这些研究主要是探讨了密云水库总径流流量输入的影响因素,然而对于区域的水资源管理来说,需要考虑径流的组成部分,即直接径流和基流对气候变化和人类活动的响应。针对于密云水库流域基流的演变特征,王曼玉等^[16]研究发现人类活动是导致密云水库潮河流域基流发生突变的主要原因,其贡献率达 81.1%。然而,目前尚未有关于密云水库白河流域基流序列长时间演变特征的相关研究。白河流域作为密云水库入库的最大河流,研究其生态基流演变过程和规律,对于流域水环境管理具有重要的现实意义,也可为区域的水资源优化调度提供一定的科学依据。本文选取局部最小值法、单参数数字滤波法和递归数字滤波法三种常见基流分割方法进行比较选择^[17-19],分析探讨影响白河流域基流演变特征的相关因素,以期能为流域基流分割方法的选择提供参考,为重要水源地确定合理的水资源管理措施提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

密云水库(116°07'—117°30'E, 40°14'—41°05'N)是北京市重要的饮用水源供应地,有潮河和白河两大入库河流。研究所选白河流域位于密云水库北部,潮河西部,流域面积约 8506 km²,是密云水库入库的最大河流,且为常年性河流(图 1)。白河起源于河北省沽源县,干流全长 280 km,北京市境内河段长 126.7 km,该河段流经区域多中低山地貌,土壤类型以棕壤和淋溶褐土为主;属暖温带季风性大陆型半湿润半干旱气候,多年年平均气温为 9—10℃;降雨集中在 6—9 月,季节变化明显。本研究区域集中于白河流域的密云段,具体范围包括白河流域自张家坟水文站入库的上游区域。

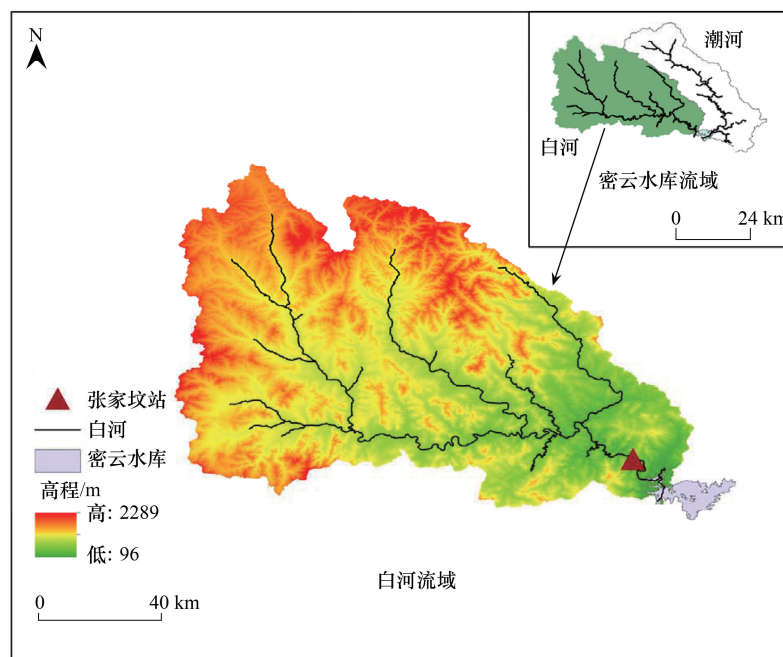


图 1 研究区域图

Fig.1 Geographical position of Bai River Basin

1.2 数据来源

本文以密云水库北部流域-白河流域内的实测降水数据、气象数据以及 1967—2012 年张家坟水文站实测日径流数据进行分析。相关数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)和海河水利年鉴。

1.3 基流分割

1.3.1 局部最小值法

局部最小值法属于时间步长法(Hydrograph separation program, HYSEP)中的一种分割方法。该方法利用公式 $N = (2.59A)^{0.2}$ 计算退水时长,式中 N 为地表径流停止后的退水时长(d), A 为流域面积(km^2)。确定流域基流分割的时间步长为最接近于 $2N$,并且取值区间为 3—11 的奇数^[20]。白河流域张家坟水文站的控制面积为 8506 km^2 ,经计算 N 为 7,故选择 11d 作为基流分割的步长。

1.3.2 单参数数字滤波法

单参数数字滤波法是根据直接径流变化幅度较大,基流变化幅度相对较小且稳定的特点,将河道径流近似看成高频信号和低频信号的叠加,从而得到基流分割^[4]。Lyne 等提出的单参数的数字滤波方程为:

$$b_k = a b_{k-1} + \frac{1-a}{2}(y_k + y_{k-1})$$

式中, b_k 为 k 时刻的基流, y_k 为 k 时刻的总径流量, a 表示基流退水常数,一般取值为 0.925—0.950, k 为时间。根据 Nathan 等^[21]对澳大利亚 186 个流域及 Arnold 等^[22]对美国 11 个流域的研究表明 a 取 0.925 时分割的效果较好,故本研究选取 a 值为 0.925。

1.3.3 递归数字滤波法

递归数字滤波法是由 Eckhardt 等^[18]在单参数数字滤波法的基础上提出的双参数数字滤波方法,其中 $\text{BFI}_{\max}$ 为因地域而异的基流指数。Eckhardt 等根据不同流域的水文地质特征给出了最大基流指数的三个建议值:0.80、0.50 和 0.25,分别对应于多孔介质含水层地区的常年性河流、季节性河流以及硬质岩介质含水层地区的常年性河流^[18]。本文白河流域为常年性河流,故选择 $\text{BFI}_{\max}$ 值为 0.80。

1.3.4 基流分割方法的选择

为比较以上分割方法的差异并选出最适合白河流域的分割方法,运用三种分割方法对白河流域张家坟水文站 46 年的实测径流值进行基流计算,获取基流指数值,并计算比较其均值与标准偏差等统计特征。同时运用 IBM SPSS Statistic 26 软件对不同方法获得的基流指数值作皮尔逊相关分析,获得相关系数,作为选择的依据。

在研究中,常用枯水指数(Q_{90}/Q_{50})来反映各支流的地下水补给河川径流的特性,其中的 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,通过日流量历时曲线 (Flow duration curve) 来确定^[23-24]。枯水指数与年总径流量的乘积可用来估测年基流量,记为枯水指数估测的基流量,用于和上述三种基流分割方法计算出的基流结果进行对比^[24]。用 Nash-Sutcliffe 效率系数 (E) 对枯水指数估测值与基流分割估算值进行评价,公式为:

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{mi} - Q_{pi})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{pi} - Q_{am})^2}$$

式中, E 为 Nash-Sutcliffe 效率系数; Q_{mi} 为基流分割方法计算出的第 i 年的年基流量; Q_{pi} 为枯水指数估测的第 i 年的年基流量; Q_{am} 为枯水指数估测的年基流量平均值, E 的取值一般在 0—1 之间,并且 E 值越接近 1,说明估算效果越好, E 越接近 0,说明估算效果越差。

同时采用平均相对误差 (E_{MR}) 进行误差评价,表达式为:

$$E_{MR} = \left| \frac{Q_{as} - Q_{am}}{Q_{am}} \right| \times 100\%$$

式中, E_{MR} 为平均相对误差 (%); Q_{as} 为基流分割方法估算的年基流量平均值。 E_{MR} 越接近 0,说明模拟结果的精度越高。

1.4 流量序列趋势变化分析

流量序列趋势变化分析采用非参数检验方法 Mann-Kendall 方法进行。其一方面不受少数异常值的干扰,同时待检序列不需要遵循一定的分布,因而在水文、气象等的时间序列趋势判断领域得到了广泛应用^[25]。去趋势预置白 Mann-Kendall 检验 (Trend-Free Pre-Whitening, TFPW-MK) 方法与普通 MK 方法相比,不仅剔除了序列的自相关性对趋势分析的影响,还考虑了数据序列显性趋势对自相关系数计算的影响^[26]。故本文采用 TFPW-MK 方法对张家坟站 1967—2012 年的年基流量进行趋势变化分析,其主要的步骤为:

(1) 如果被检验序列的 β 接近于零时,可认为该数列是一个独立数据,没有必要进行预处理,直接使用 Mann-Kendall 检验方法。否则,原时间序列去除趋势项 β 。

(2) 计算去趋势后的时间序列的一阶自相关系数且从原序列中剔除该一阶自相关性。通过补还趋势项 β ,一个新的时间序列就产生,且该时间序列保留了原序列的趋势性且不受自相关性的影响。

(3) Mann-Kendall 趋势检验方法被用于新产生的时间序列来估计单调趋势的显著性。

对于给定的 10%、5% 和 1% 显著性水平,对应统计量 Z_{MK} 值分别为 1.65、1.96 和 2.58; 即当 $|Z_{MK}|$ 大于等于以上三个值的时候,分别是检测序列存在明显、显著、极显著的上升/增加趋势^[27-28]。

1.5 流量序列突变分析

启发式分割算法是 Bernal-Galvan 等^[29]提出的一种能够有效处理非平稳、非显性时间序列突变分析的方法。该方法基于滑动 t 检验的思想,并在此基础上作了相应的改进,可有效检测到原序列中存在的均值突变点,而且克服了贝叶斯方法、秩统计量法等较传统的检测方法在处理非平稳、非线性序列时存在的缺陷^[30-31],还可进行多突变点分析^[32]。此方法已在输沙量、径流序列、气候和降水突变分析研究等方面得到了广泛的应用^[33-35]。因此,本文采用启发式分割算法来识别密云水库流域水文气象要素的突变点,序列最小分割长度 I_0 取为 25,临界值 P_0 取为 0.95。其具体方法可参考张敬平等^[32]对漳泽水库水文序列的突变分析方法。

2 结果与讨论

2.1 基流分割方法的选择

2.1.1 径流序列分割结果

采用三种基流分割方法对白河流域张家坟站 1967—2012 年径流序列分割的结果表明(图 2),三种基流分割方法所呈现的基流序列走势相近,均表现出随总径流涨退的趋势。总径流和分割出的基流序列在 1967—2012 年年尺度上总体呈递减趋势(图 2),总径流流量序列拟合的趋势线斜率为 -0.3945 ,局部最小值法、单参数数字滤波法和递归数字滤波法分割出的基流序列拟合的趋势线斜率分别为 -0.2841 、 -0.2985 、 -0.2808 ,三种方法所得到的基流序列无明显差异。表明该段时间内,存在外部因素(如人类活动或气候变化)的影响,导致了白河流域总径流和基流流量整体趋势的下降。如 Mo 等^[36]就在我国西南典型喀斯特流域研究探讨了人类活动和气候变化对其基流演变特征的影响。三种基流分割方法所得月尺度流量历时曲线分析结果趋势相同(图 2),一年中的汛期主要为 6—10 月,总径流流量和基流流量在 6—10 月大于其余月份。

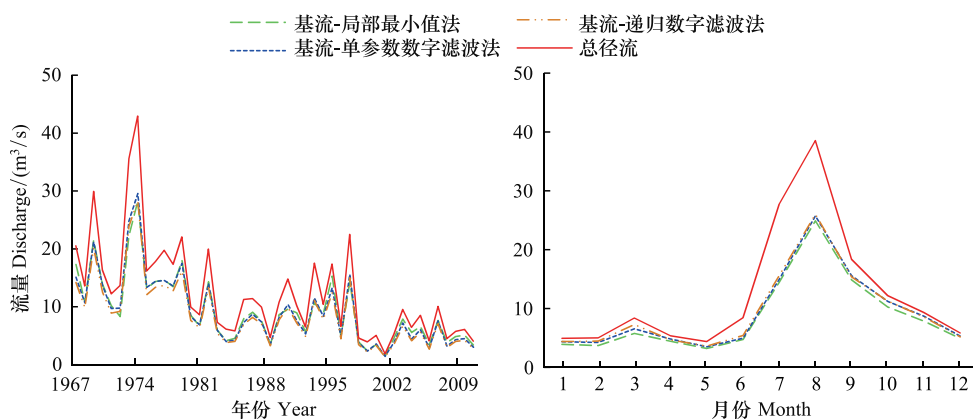


图 2 张家坟水文站 1967—2012 年基流分割方法的基流过程线比较

Fig.2 Comparison of baseflow hydrograph of baseflow separation methods in zhangjiafen hydrological station from 1967 to 2012

2.1.2 基流指数值

为比较不同基流分割方法在白河流域的适用性,分别计算了三种方法的基流指数(表 1)。三种计算结果均表明,白河流域不同年份间基流指数值较高,均大于 0.65,个别年份甚至超过了 0.80,表明地下水对河道的补给在白河流域占有较高比重。同样,基于基流分割,Yan 等^[37]在密云水库流域的研究表明基流可达年径流量的 63.5%。依据三种基流分割方法的年基流指数统计特征(表 2),发现递归数字滤波法所得到的基流指数值最大值、最小值、极值比、均值和中位数均较其余两种方法小,同时递归数字滤波法得到的基流指数值标准偏差最小,表明其得到的基流序列波动性最小,应用稳定性更好。递归数字滤波法作为一种双参数数字滤波法,引入了最大基流指数 BFI_{max} ,对直接径流涵盖的一定的低频信号对基流分割的影响进行了考虑^[38],是一种更加客观的基流分割方法。

2.1.3 基流量误差分析

为验证计算结果的准确性,选出最适合的基流分割方法,研究比较了不同分割方法的 Nash-Sutcliffe 效率系数与平均相对误差(E_{MR})(表 3)。结果表明,递归数字滤波法的 Nash-Sutcliffe 效率系数值最高,可达 0.462,局部最小值法的 Nash-Sutcliffe 效率系数值最低,仅为 0.260。进一步比较其平均相对误差,发现递归数字滤波法的平均相对误差最小,局部最小值法的平均相对误差最大。由于局部最小值法是一种时窗滤波,所选择的时窗长度(即时间间隔)具有很大的不确定性^[39],故其适用性有待考量。综合 Nash-Sutcliffe 效率系数和平均相对误差结果,研究得出递归数字滤波法所得到的基流量与实际观测值的模拟效果最好。以上综合对径流序

列分割结果、基流指数值和误差结果的分析,本研究选择递归数字滤波法计算结果进行基流发生特征与驱动因素的分析。

表 1 三种基流分割方法估算的基流指数

Table 1 Baseflow index estimated by three baseflow separation methods

时间 Time	局部最小值法 Local minimum method	单参数滤波法 Single parameter digital filter	递归数字滤波法 Recursive digital filter
1967—1976	0.6577	0.6886	0.6585
1977—1986	0.7717	0.8001	0.7385
1987—1996	0.7613	0.7446	0.7088
1997—2006	0.8570	0.8309	0.7559
2007—2012	0.7595	0.7505	0.7054

表 2 三种基流分割方法年基流指数统计特征

Table 2 Statistical characteristics of annual baseflow index of three baseflow separation methods

统计值 Statistics	局部最小值法 Local minimum method	单参数滤波法 Single parameter digital filter	递归数字滤波法 Recursive digital filter
最大值 Max	0.8810	0.8380	0.7686
最小值 Min	0.6005	0.5985	0.5554
极值比 Extremum ratio	1.4671	1.4001	1.3838
均值 Mean	0.7752	0.7450	0.6949
中位数 Median	0.7943	0.7461	0.6950
标准偏差 SD	0.0818	0.0538	0.0435

表 3 三种基流分割方法的验证结果

Table 3 Validation results of three baseflow separation methods

基流分割方法 Baseflow separation methods	Nash-Sutcliffe 效率系数 (NSE)	平均相对误差 (E_{MR})
局部最小值法 Local minimum method	0.260	0.572
单参数滤波法 Single parameter digital filter	0.286	0.545
递归数字滤波法 Recursive digital filter	0.462	0.449

2.2 白河流域基流过程分析

2.2.1 基流分割组成和变化特征

依据递归数字滤波法对白河流域 1967—2012 年期间的径流序列分割结果表明(图 3),白河流域 1967—2012 年期间年均径流量 $4.06 \times 10^8 \text{ m}^3$, 年均基流量 $2.71 \times 10^8 \text{ m}^3$, 年均基流指数值为 0.6675。在年尺度上, 1967—2012 年期间, 径流量和基流量整体呈现减少趋势, 而基流指数值基本保持不变(图 3)。应用去趋势预置白 Mann-Kendall 检验方法对白河流域 1967—2012 年间的年基流量进行趋势变化分析, 得到 Z 值为 -4.7909, 趋势的显著性水平为 1.6605×10^{-6} , 表示基流序列通过 99% 置信区间的显著性检验, 说明白河流域 1967—2012 年年基流量存在极显著的减少趋势 ($P < 0.01$)。这与王曼玉等^[16]对潮河流域 1963—2015 年基流量的变化分析趋势相一致。结合两者的研究结果可知, 密云水库的两大入库河流的基流量自 20 世纪 60 年代以来存在一定的减少趋势, 应采取合理措施保育基流来源, 防止基流变少。

在月尺度上, 白河流域 1967—2012 年期间月均径流量 $3.21 \times 10^7 \text{ m}^3$, 月均基流量为 $2.42 \times 10^7 \text{ m}^3$, 月均基流指数值为 0.7539(图 3)。在汛期前期(6—9 月份), 基流指数值较小, 最小值出现在 7 月份, 仅为 0.562; 在汛期末期(10 月份), 基流指数值最高, 可达 0.926。由于基流来源具有一定的滞后性^[40], 7 月份由于前期降雨, 导致流域内快速壤中流和坡面流较多, 故所得基流指数值小; 在汛期结束月 10 月份, 流域内积累的慢速壤中流已多, 故所得基流指数值高。本研究中, 年基流指数值较高 ($\text{BFI} > 0.65$), 超过了地表直接径流在河川总径

流中的比例,这与美国的 Raccoon River 流域和 Chesapeake 湾流域以及韩国 Daejeon 市地表水等地区的研究结果较为相似^[41—42]。在我国,胡胜等^[43]对我国北方潮河流域的研究结果发现,枯水期的基流指数可达 0.78;李文超等^[44]对洱海典型流域-凤羽河流域的研究发现,基流是高原湖泊流域水量输出的主要形式。由此可见,在不同的区域,基流始终是河流水的重要补给来源,对维持河道水源稳定性、区域水资源的可持续利用发挥着重要作用。

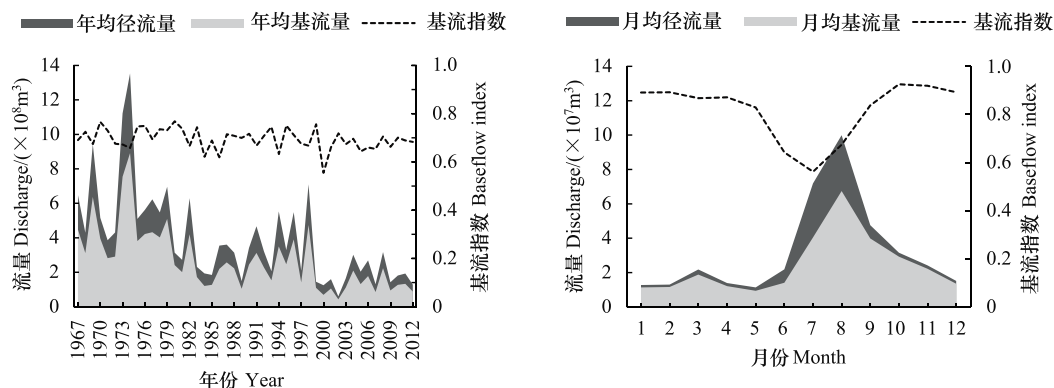


图3 白河流域 1967—2012 年期间的径流序列递归数字滤波法分割结果

Fig.3 Separation results of recursive digital filtering method for streamflow series in the Bai River Basin from 1967 to 2012

2.2.2 影响基流变化的驱动因素

降雨是影响地表径流和基流量的重要因素,由多年的降雨、径流和基流的变化趋势可以看出,降雨、径流和基流量之间有着较好的对应波动关系,降雨量年度之间有波动,但减少的趋势不明显,径流和基流量年度有波动,减少的趋势明显(图 2 和图 4)。运用 SPSS 软件对降雨、径流和基流之间的关系做皮尔逊相关性分析可知,年降水量与年径流量、年基流量之间的相关系数分别为 0.64 和 0.63,年径流量与年基流量的相关系数为 0.99,并且均在 0.01 水平上显著相关。同时通过应用启发式分割算法对年基流量、年径流量和年降雨量序列进行突变检测结果表明(表 4),白河流域 1967—2012 年基流序列分别在 1980 年和 1999 年发生了突变,而径流突变点为 1979 年和 1999 年,降雨的突变点仅在 1999 年。降雨序列突变分析与基流序列和径流序列 1999 年的突变相吻合。由此可见,基流流量的变化在 1999 年的突变阶段主要受降雨和径流的影响。流域内的蒸散发情况、降水等都会对径流量和基流量产生一定的影响,但有研究指出降水相比潜在蒸散发对基流的影响更为强烈^[16]。王云琦等^[45]也指出流域内降水量对产流量的影响相比蒸散量对产流量的影响更大。1999 年以来,北京遭遇了连续 7 年的干旱,降水量下降明显^[46—47]。因此在降水量持续减少的时期,大多数降水都用来补给土壤,只有少部分形成径流,径流量下降,导致基流量减少,这是 1999 年基流发生突变的原因之一。

白河流域内基流 1980 年的突变点与降雨和地表径流的突变点不吻合,证明还有其他因素主导影响这一时期的基流过程,已有的研究表明,流域内的人类活动是导致基流变化的另一个重要因素^[2, 48]。流域内的土地利用变化、水利工程措施建设、生态破坏和恢复以及流域用取水等均可能导致整个流域地表和地下水力路径的改变,进而导致基流量发生变化^[1—2]。由于研究所选方法、数据精度等的不同,关于人类活动对密云水库流域流量变异性的影响,不同学者研究得到了不同的结论。如刘星才等^[49]研究发现密云水库流域土

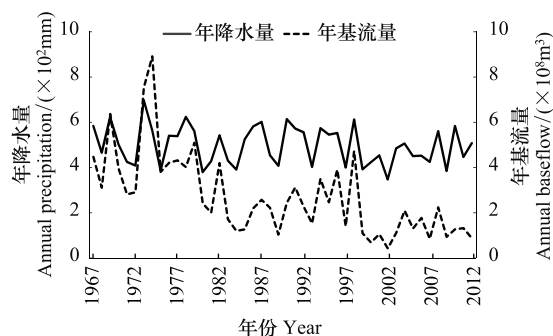


图4 白河流域年降水量和年基流量变化时序图

Fig.4 Time series of changes in annual precipitation and annual baseflow in the Bai River Basin from 1967 to 2012

地利用状况自 20 世纪 80 年代以来变化不大,没有对该流域的流量变异产生明显的影响。王曼玉等^[16]通过研究潮河流域 1963—2015 年基流变化趋势发现,人类活动是导致该流域基流发生突变的主要原因。20 世纪 70 年代末土地改革和改革开放政策的实施,中国社会经济快速发展,导致区域用水量增加,人均日用水量从 1959 年的不足 0.03 m^3 增加到 1995 年的 0.1 m^3 ^[50]。因此,基流量在 1980 年的突变可能是受人类活动的影响。20 世纪 70 年代至 80 年代初,白河流域建立了部分蓄水工程,人类活动对于流域内的水文过程影响增强,小型水库蓄水减少了水库下游的河川径流量,基流也相应地减少。值得注意的是,径流量在 1979 年发生了突变,径流的入渗过程减弱,导致基流量 1980 年发生突变。

表 5 白河流域降雨和流量启发式分割算法突变分析结果

Table 5 Abrupt analysis results of heuristic segmentation algorithm for precipitation and flow in Bai River Basin

指标 Parameter	突变年 Year	最大值 $T_{\max}$	统计显著性 $P(T_{\max})$
基流 Baseflow	1980	6.2235	1
	1999	3.7359	0.9944
径流 Streamflow	1979	5.6333	1
	1999	3.5819	0.9919
降雨 Precipitation	1999	2.1359	0.9912

2.3 不确定性分析

本文选择了三种常见基流分割方法进行了比较选择,最终确定递归数字滤波法在白河流域的基流分割有着更好的适用性,但是否可采用更好的基流分割方法?如非线性水库出流算法^[51]、水文过程机理模型法^[52]等。此外,针对人类活动和气候变化对流域基流影响的贡献定量化,以及二者之间的相互作用,均是需要进一步的研究探讨之处。如 Daniels 等人^[53]利用区域气候模型模拟了荷兰土地利用变化对降水的影响,发现土地利用变化对夏季降水的模拟影响小于气候变化对其的影响,但不可忽略。由于数据有限,本研究的时间跨幅为 1967—2012 年,未考虑在近年来极端气候频发的背景下,白河流域基流的演变特征,所得的结论具有一定的不确定性。

3 结论

本文通过研究对比筛选可知递归数字滤波法这一基流分割方法在白河流域有着更好的适用性。基流过程分析发现,基流对白河流域河流径流量有着相当高的贡献比例($\text{BFI} > 0.65$),但是,自 1967 年以来,白河流域年基流量存在极显著的减少趋势($P < 0.01$),而年基流指数值基本保持不变($\text{BFI} > 0.65$)。降雨减少(气候变化)是白河流域年基流量发生变化的主要因素之一,同时还受到其他因素(如人类活动)的影响。白河流域基流序列分别在 1980 年和 1999 年发生了突变,其中 1999 年的突变主要受到降雨过程(气候变化)的影响,而 1980 年的突变点主要受到其他因素(如人类活动)的影响。由于白河流域是密云水库重要的来水河流,因此,未来应合理保育基流来源,深化对径流演变规律,尤其是深化气候变化和人类活动对流域水资源影响的认识和研究,对于首都北京的供水安全和区域的水资源优化配置和管理具有深远意义。

参考文献(References):

- [1] 何圣嘉. 典型农业流域基流非点源污染的定量研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [2] 郝璐, 孙阁. 城市化对流域生态水文过程的影响研究综述. 生态学报, 2021, 41(1): 13-26.
- [3] 马秋梅, 李玮, 王毅, 刘新亮, 李勇, 吴金水. 基流对亚热带农业流域氮素输出的贡献研究. 环境科学, 2016, 37(4): 1371-1378.
- [4] Eckhardt K. A comparison of baseflow indices, which were calculated with seven different baseflow separation methods. Journal of Hydrology, 2008, 352(1/2): 168-173.
- [5] Zhang J L, Zhang Y Q, Song J X, Cheng L. Evaluating relative merits of four baseflow separation methods in Eastern Australia. Journal of Hydrology, 2017, 549: 252-263.

- [6] 崔超, 翟丽梅, 刘宏斌, 张富林, 刘申, 陈昌亮. 长尺度下不同基流分割方法在香溪河流域的应用比较. 湖北农业科学, 2016, 55(3): 569-574.
- [7] 周星, 沈忱, 倪广恒, 胡宏昌. 结合退水曲线的数字滤波基流分割方法. 清华大学学报: 自然科学版, 2017, 57(3): 318-323, 330-330.
- [8] Kissel M, Schmalz B. Comparison of baseflow separation methods in the German Low Mountain Range. Water, 2020, 12(6): 1740.
- [9] 莫崇勋, 谢燕平, 班华珍, 阮俞理, 孙桂凯, 黄亚. 不同基流分割方法在澄碧河的适用性探讨. 南水北调与水利科技, 2020, 18(2): 86-92.
- [10] 张泳华, 刘祖发, 赵铜铁钢, 梁廖逢, 高艺桔, 符洪恩. 东江流域基流变化特征及影响因素. 水资源保护, 2020, 36(4): 75-81.
- [11] Xie J X, Liu X M, Wang K W, Yang T T, Liang K, Liu C M. Evaluation of typical methods for baseflow separation in the contiguous United States. Journal of Hydrology, 2020, 583: 124628.
- [12] Partington D, Brunner P, Simmons C T, Werner A D, Therrien R, Maier H R, Dandy G C. Evaluation of outputs from automated baseflow separation methods against simulated baseflow from a physically based, surface water-groundwater flow model. Journal of Hydrology, 2012, 458-459: 28-39.
- [13] 戴向前, 黄晓丽, 柳长顺, 游进军. 潮白河生态流量估算及恢复保障措施. 南水北调与水利科技, 2012, 10(1): 72-76.
- [14] 秦丽欢, 周敬祥, 李叙勇, 曾庆慧. 密云水库上游径流变化趋势及影响因素. 生态学报, 2018, 38(6): 1941-1951.
- [15] 王泽勇, 廖卫红, 丁星臣, 李雪艳, 吕岩. 气候变化和人类活动对密云水库上游流域径流变化的影响. 水电能源科学, 2020, 38(6): 13-16.
- [16] 王曼玉, 蔡永茂, 李春征, 张志强. 气候变化和人类活动对基流的影响——以密云水库上游潮河流域为例. 中国水土保持科学, 2018, 16(6): 15-23.
- [17] Eckhardt K. How to construct recursive digital filters for baseflow separation. Hydrological Processes, 2005, 19(2): 507-515.
- [18] 徐磊磊, 刘敬林, 金昌杰, 王安志, 关德新, 吴家兵, 袁凤辉. 水文过程的基流分割方法研究进展. 应用生态学报, 2011, 22(11): 3073-3080.
- [19] 徐榕焱, 王小刚, 郑伟. 基流分割方法研究进展. 水土保持通报, 2016, 36(5): 352-359.
- [20] 申恋绵, 蒋晓辉, 雷宇昕. 窟野河流域河川基流变化及其驱动因素分析. 水资源研究, 2020, 9(4): 373-385.
- [21] Nathan R J, McMahon T A. Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses. Water Resources Research, 1990, 26(7): 1465-1473.
- [22] Arnold J G, Allen P M, Mutiah R, Bernhardt G. automated base flow separation and recession analysis techniques. Groundwater, 1995, 33(6): 1010-1018.
- [23] 穆兴民, 高鹏, 巴桑赤烈, 张晓萍. 应用流量历时曲线分析黄土高原水利水保措施对河川径流的影响. 地球科学进展, 2008, 23(4): 382-389.
- [24] 韩鹏, 王艺璇, 李岱峰. 黄河中游河龙区间河川基流时空变化及其对水土保持响应. 应用基础与工程科学学报, 2020, 28(3): 505-521.
- [25] Yue S, Wang C Y. Applicability of prewhitening to eliminate the influence of serial correlation on the Mann-Kendall test. Water Resources Research, 2002, 38(6): 4-1-4-7.
- [26] 章诞武, 丛振涛, 倪广恒. 基于中国气象资料的趋势检验方法对比分析. 水科学进展, 2013, 24(4): 490-496.
- [27] Mann H B. Nonparametric tests against trend. Econometrica, 1945, 13(3): 245-259.
- [28] Kendall M G. Rank Correlation Methods. London: Charles Griffin, 1975: 202-202.
- [29] Bernaola-Galván P, Ivanov P C, Amaral L A N, Stanley H E. Scale invariance in the nonstationarity of human heart rate. Physical Review Letters, 2001, 87(16): 168105.
- [30] Perreault L, Bernier J, Bobée B, Parent E. Bayesian change-point analysis in hydrometeorological time series. Part 1. The normal model revisited. Journal of Hydrology, 2000, 235(3/4): 221-241.
- [31] 涂新军, 陈晓宏. 基于秩统计量的枯水期径流时序变点的非参数识别. 水利学报, 2009, 40(5): 603-607.
- [32] 张敬平, 黄强, 赵雪花. 漳泽水库水文序列突变分析方法比较. 应用基础与工程科学学报, 2013, 21(5): 837-844.
- [33] 封国林, 龚志强, 董文杰, 李建平. 基于启发式分割算法的气候突变检测研究. 物理学报, 2005, 54(11): 5494-5499.
- [34] 李海彬, 张小峰, 胡春宏, 王延贵. 基于 B-G 分割算法的河川年输沙量突变分析. 水利学报, 2010, 41(12): 1387-1392.
- [35] 蓝利, 高凡, 努尔兰·哈再孜, 何兵, 许应达. 变化环境下乌伦古河径流序列变异特征诊断. 科学技术与工程, 2018, 18(15): 6-12.
- [36] Mo C X, Ruan Y L, Xiao X G, Lan H K, Jin J L. Impact of climate change and human activities on the baseflow in a typical karst basin, Southwest China. Ecological Indicators, 2021, 126: 107628.
- [37] Yan T Z, Bai J W, Yi A L Z, Shen Z Y. SWAT-simulated streamflow responses to climate variability and human activities in the Miyun reservoir basin by considering streamflow components. Sustainability, 2018, 10(4): 941.
- [38] Spongberg M E. Spectral analysis of base flow separation with digital filters. Water Resources Research, 2000, 36(3): 745-752.

- [39] Stewart M, Cimino J, Ross M. Calibration of base flow separation methods with streamflow conductivity. *Ground Water*, 2007, 45(1): 17-27.
- [40] Hall F R. Base-flow recessions—a review. *Water Resources Research*, 1968, 4(5): 973-983.
- [41] Schilling K, Zhang Y K. Baseflow contribution to nitrate-nitrogen export from a large, agricultural watershed, USA. *Journal of Hydrology*, 2004, 295(1/4): 305-316.
- [42] 何圣嘉, 吕军. 流域基流氮磷流失的非点源污染定量研究. *水土保持学报*, 2017, 31(6): 20-26.
- [43] 胡胜, 杨冬冬, 吴江, 高宇, 邱海军, 曹明明, 宋进喜, 万虹麟. 基于数字滤波法和 SWAT 模型的澜河流域基流时空变化特征研究. *地理科学*, 2017, 37(3): 455-463.
- [44] 李文超, 雷秋良, 翟丽梅, 刘宏斌, 胡万里, 刘申, 任天志. 流域氮素主要输出途径及变化特征. *环境科学*, 2018, 39(12): 5375-5382.
- [45] 王云琦, 齐实, 孙阁, McNulty S G. 气候与土地利用变化对流域水资源的影响——以美国北卡罗莱纳州 Trent 流域为例. *水科学进展*, 2011, 22(1): 51-58.
- [46] Wang S P, Zhang Z Q, Sun G, McNulty S G, Zhang M L. Detecting water yield variability due to the small proportional land use and land cover changes in a watershed on the Loess Plateau, China. *Hydrological Processes*, 2009, 23(21): 3083-3092.
- [47] 李屹峰, 罗跃初, 刘纲, 欧阳志云, 郑华. 土地利用变化对生态系统服务功能的影响——以密云水库流域为例. *生态学报*, 2013, 33(3): 726-736.
- [48] 雷泳南, 张晓萍, 张建军, 刘二佳. 窟野河流域河川基流量变化趋势及其驱动因素. *生态学报*, 2013, 33(5): 1559-1568.
- [49] 刘星才, 徐宗学, 占车生, 孙永亮. 密云水库入库流量变异性及其影响因素. *水土保持通报*, 2011, 31(1): 40-45.
- [50] Wang G S, Xia J, Chen J. Quantification of effects of climate variations and human activities on runoff by a monthly water balance model: a case study of the Chaobai River basin in northern China. *Water Resources Research*, 2009, 45(7): W00A11.
- [51] He S J, Li S, Xie R T, Lu J. Baseflow separation based on a meteorology-corrected nonlinear reservoir algorithm in a typical rainy agricultural watershed. *Journal of Hydrology*, 2016, 535: 418-428.
- [52] 鲍振鑫, 张建云, 刘九夫, 王国庆, Guobin F U, 贺瑞敏, 严小林. 基于土壤属性的 VIC 模型基流参数估计框架. *水科学进展*, 2013, 24(2): 169-176.
- [53] Daniels E, Lenderink G, Hutjes R, Holtslag A. Relative impacts of land use and climate change on summer precipitation in the Netherlands. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2016, 20(10): 4129-4142.