

基于数字滤波法的拒马河基流分割及演变规律研究*

马晓婧^{1,2)} 刘 强^{2,3)†} 潘继花¹⁾ 张军龙⁴⁾ 孙荧杉^{2,5)} 袁晓敏^{2,3)}

(1)曲阜师范大学地理与旅游学院, 276826, 山东日照; (2)北京师范大学环境学院, 水环境模拟国家重点实验室, 100875, 北京; (3)北京师范大学环境学院, 教育部水沙科学重点实验室, 100875, 北京; (4)山东师范大学地理与环境学院, 250358, 山东济南; (5)济南大学水利与环境学院, 250002, 山东济南)

摘要 以大清河流域拒马河为研究对象, 基于紫荆关水文站 1950—2016 年的日径流数据, 采用改进退水常数后数字滤波法中的 Chapman-Maxwell 法, 对拒马河径流过程进行基流分割, 并对拒马河丰、平、枯年基流变化特征进行分析. 结果表明: 1) 使用改进后退水常数($\alpha=0.993$)比以往经验所得退水常数($\alpha=0.925$)计算的基流量变化特征更稳定; 2) 基流与径流均呈减小突变, 基流突变时间略早于径流突变时间, 突变前后基流变化幅度小于径流变化幅度; 3) 丰、平、枯不同水平年基流对径流的贡献率分别达到 35.80%、42.51%、52.20%, 丰水年基流贡献率最小, 枯水年基流是径流的主要补给源. 研究成果可为保障河道生态基流及应对气候变化对河道生态系统的影响提供理论和技术支撑.

关键词 基流; 退水常数; 自动化基流识别法; Chapman-Maxwell 法; 拒马河

中图分类号 P333

DOI: 10.12202/j.0476-0301.2019204

基流是地下水的重要组成部分, 一般是指地下补给地表径流的一种慢速径流, 对于维持枯水期河川径流的基本流量和生态系统健康具有重要意义^[1]. 基流反映了地下水与地表水之间的互相补给关系, 一方面受气候、地质、地形、土壤、植被等自然因素影响, 另一方面也受人类活动的影响, 从而导致基流量和基流持续时长变化^[2]. 在气候变化与人类活动的双重影响下, 基流过程发生变化, 河川径流组成与其水文情势也发生了难以逆转的变化, 威胁着下游生态系统的健康与稳定. 认识基流变化过程已成为认识地下水对径流过程的贡献、核算河道生态流量的重要前提与基础. 根据有无示踪剂, 基流分割的方法可以分为示踪剂法和非示踪剂法^[3]. 示踪剂法是目前最接近实际基流的分割方法, 但对研究区域有非常严格的限制条件, 且不易在大尺度流域推广. 在非示踪剂法中, 最常用的方法是数字滤波法^[4-7]. 目前, 数字滤波法已经广泛应用于基流分割的研究中, 例如: 周旭东等^[8]基于数字滤波法发现黄河源区的基流区别于其他流域, 具有稳定性特征; 左海凤等^[9]在汾河基流研究中, 发现基流指数法优于手工分割法; 周星等^[10]结合退水曲线确定数字滤波法的参数, 结果显示数字滤波法较其他基流计算方法能够得到更平稳的基流结果. 上述研究结果反映出数字滤波法较其他基流分割方法具有计算简单, 基流分割的结果准确、稳定的优点; 同时, 数字滤波法根据不同流域特征计算退水常数, 适应性更广.

本文选择拒马河基流为研究对象, 基于紫荆关水文站 1950—2016 年的日径流数据, 利用改进退水常数后的 Chapman-Maxwell(C-M)法对其进行基流分割, 分析其基流量变化特征及丰、平、枯年基流对径流贡献量的变化.

1 研究区概况

拒马河发源于河北境内太行山深处的涞源县, 源头水量较少, 沿途各处沟谷都有泉水流入, 从而汇聚成河, 是大清河水系的重要支流, 其河道长 254 km, 在北京市的张坊镇张坊村分为南北拒马河. 拒马河水量少时流入白洋淀, 水量大时可以直接流入渤海. 拒马河流域属于典型的温带大陆性季风气候, 四季分明, 降水年内分配不均匀, 主要集中在夏季(6—9 月份), 占全年降水量的 70%~80%, 多年平均降水量 740 mm 左右, 流域内

* 水体污染控制与治理科技重大专项资助项目(2018ZX07110001); 国家自然科学基金资助项目(51579008); 北京市科技计划课题资助项目(217300011)

† 通信作者: 刘强(1978—), 男, 副教授, 博士. 研究方向: 生态水文学. e-mail: qiang.liu@bnu.edu.cn

收稿日期: 2019-07-18

植被类型丰富,林地覆盖率可达到 50%^[11].紫荆关水文站是拒马河流域的重要控制站点,紫荆关以上的拒马河流域面积约为 1 760 km².

2 研究方法 with 数据

2.1 水文年的划分方法 采用我国水文频率分析法^[12]中规定的通用线性 P-III 型曲线,分析河流径流频率.水文频率分析中径流数据是均值,变差系数和偏态系数均为待定参数,使用目估适线法确定相关参数,根据径流频率确定丰、平、枯水年.

2.2 C-M 法 为了解决径流在快速流动期间基流不确定性的问题,提出了 C-M 法,其计算式为

$$Q_{bi} = \frac{\alpha}{2-\alpha} Q_{b(i-1)} + \frac{1-\alpha}{2-\alpha} Q_i, \quad (1)$$

式中 Q_{bi} 表示 i 时刻的基流量, $Q_{b(i-1)}$ 表示 i 前一时刻的基流量, Q_i 表示 i 时刻的径流量, α 表示退水常数.

因为在自然河流中普遍存在线性退水的情况,所以描述基流的理论方程可以表述为

$$dQ/dt = 1/kQ, \quad (2)$$

式中 t 为时间间隔(d), k 为特征排水时间(d).对式(2)积分,得出基流的退水指数形式 $Q_b = Q_0 e^{-t/k}$,当 Q_0 表示初始基流时,退水常数的计算式表示为

$$\alpha = e^{-1/k}. \quad (3)$$

以往在分割基流时,通常将退水常数设置为固定值 0.925,然而这并不是对所有的流域都适用,因而 Brutsaert 和 Nieber 在 1977 年提出衰退分析(表示为 BN77)法,用于估算流域的退水常数 α , Zhang 等^[13]和 Cheng 等^[14]开发了自动化基流识别法(automatic baseflow identification technique, ABIT),能快速且客观地计算流域退水常数.

2.3 趋势分析和突变分析 采用一元线性回归模型^[15]模拟径流量的年际变化趋势,计算式为

$$y = ax + b, \quad (4)$$

式中 y 表示年径流序列($m^3 \cdot s^{-1}$), x 表示时间序列(a).

利用 Mann-Kendall(M-K)检验法^[16]对年径流量和年基流量进行突变检验. M-K 检验法的原理是构建径流量和基流量连续时间序列的秩序列 S_k 和标准正态分布 U_{Fk}

$$S_k = \sum_{i=1}^k r_i, k = 2, 3, \dots, n, \quad (5)$$

$$\begin{cases} E(S_k) = k(k-1)/4, \\ \text{var}(S_k) = k(k-1)(2k+5)/72, \end{cases} k = 2, 3, \dots, n, \quad (6)$$

$$U(S_k) = (S_k - E(S_k)) / \sqrt{\text{var}(S_k)}, k = 1, 2, \dots, n. \quad (7)$$

同理,将上述方法应用反系列,可以得到 $\bar{U}(S_k)$. 2 个统计量 $U(S_k)$ 与 $\bar{U}(S_k)$ 的序列曲线和显著水平 $\alpha=0.95$ 的临界值 $\mu_{0.05} = \pm 1.96$, 共同判断数据序列是否具有突变趋势.

3 结果分析与讨论

3.1 拒马河不同基流分割常数对比 基于 C-M 法,利用 ABIT 估算退水常数(图 1),紫荆关水文站的退水时间 $k=147.1$ d,通过计算得出退水常数 α 为 0.993,其值大于经验所得退水常数 $\alpha=0.925$.

依据水文频率分析法, 选取丰、平、枯水年的代表年份分别是 1966 年($P=25\%$)、1970 年($P=50\%$)和 2010 年($P=75\%$), 对比分析了采用经验参数和 ABIT 求解参数的基流过程的差异. 结果显示(图 2), 经验退水常数($\alpha=0.925$)较 ABIT 得到的退水常数($\alpha=0.993$)计算的基流分割过程线波动更大, 且更不稳定. 这一研究结果也得到陈文艳等^[17]的证实. 不同退水常数对枯水期基流分割过程线影响较小, 但对汛期基流分割过程线影响显著; ABIT 计算的参数更能反映出基流稳定的特征, 呈现出平滑的基流分割过程线; 不同水平年基流变化差异较小, 基流汛期峰值的差值不显著, 基流仍是波动小且变化平稳.

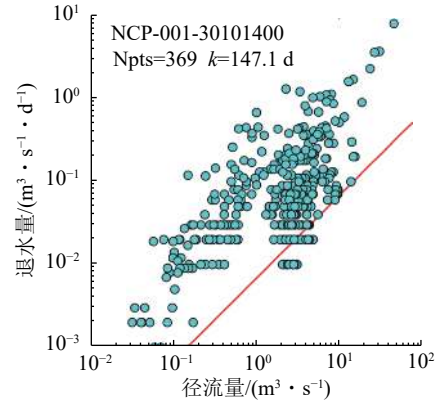


图 1 退水常数

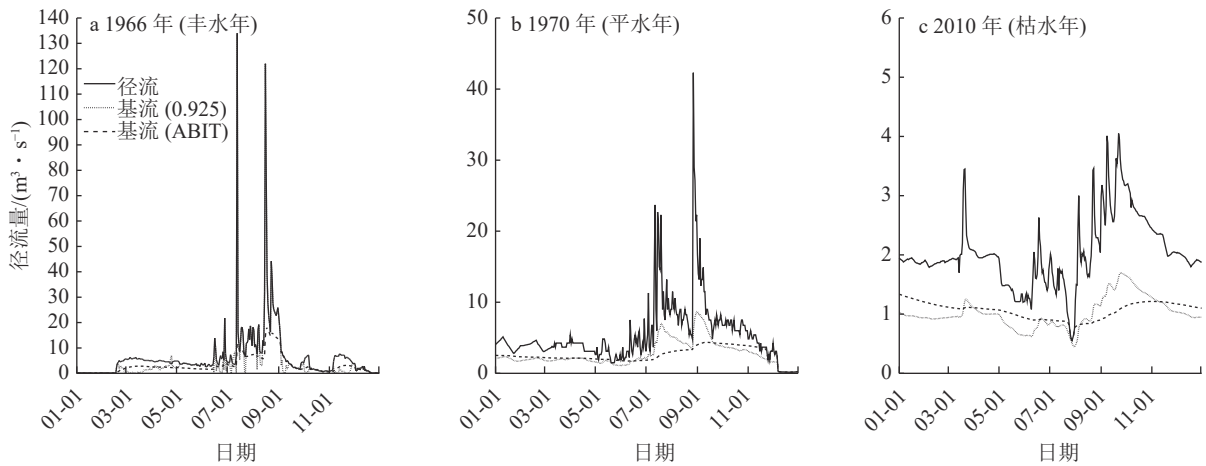


图 2 紫荆关水文站不同水平年径流以及经验退水参数与 C-M 法求解参数分割的基流过程线

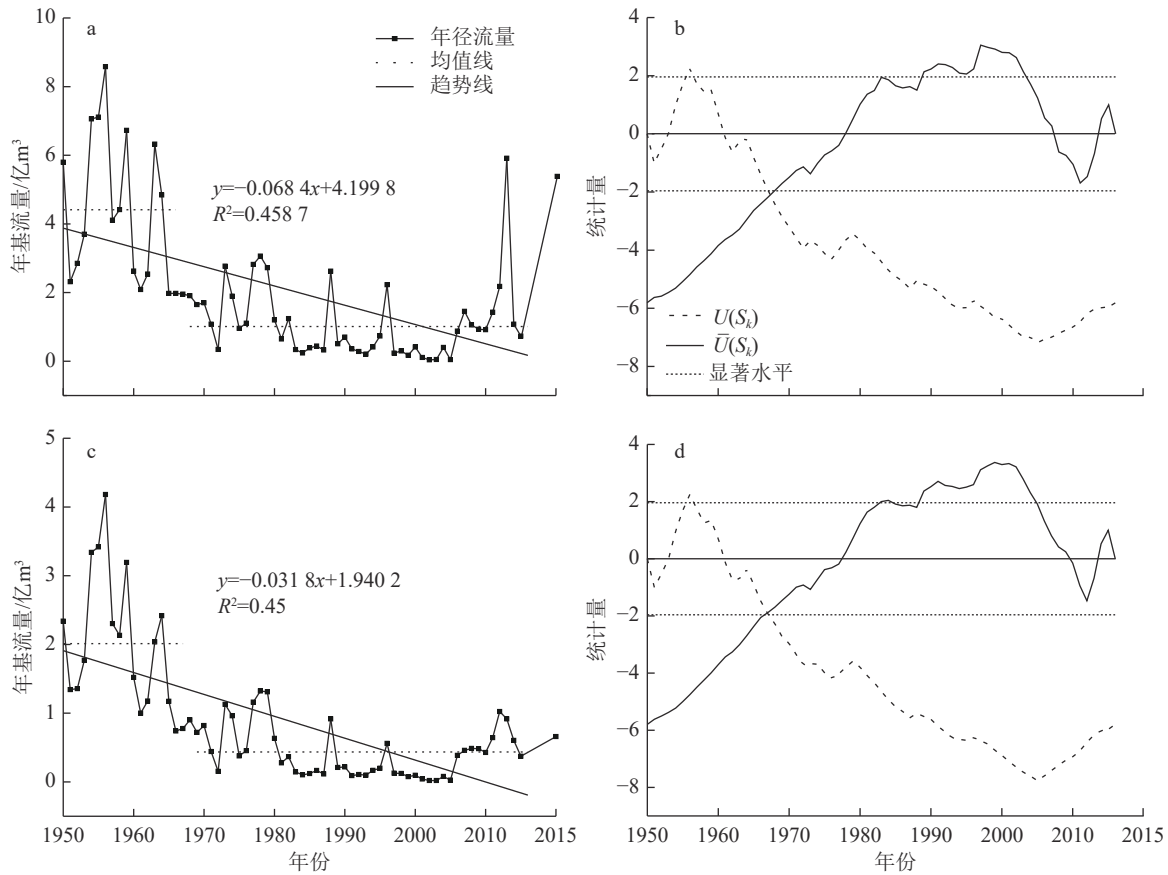
3.2 径流与基流的趋势分析 拒马河年径流量、年基流量变化趋势显示(图 3), 二者总体呈现出一致性特征, 均呈下降趋势, 线性倾向率分别为 0.068×10^8 和 $0.03 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-2}$, 通过对比径流减少趋势更为明显. 从 M-K 检测结果来看, 径流与基流都在 1967 年左右发生减小突变, 且基流突变的时间稍早于径流突变时间. 突变时间并没有体现出基流相对于径流变化的滞后性^[18]. 可能的原因如下: 水库大坝蓄水改变了上下游之间的基流补给; 地下水的无序开采改变了基流过程, 影响到基流对径流的贡献率. 突变后径流量均值($1.98 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$)较突变前($4.84 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$)减少了 59.09%; 而突变后多年基流均值($1.17 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$)较突变前($2.42 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$)减少了 51.65%. 研究结果显示, 相较于径流的变化, 基流呈现出更为稳定的特征.

3.3 不同水平年基流对径流的贡献率 1950—2016 年基流对拒马河径流贡献率的分析结果显示(图 4): 不同年份基流对径流贡献率存在一定差异性, 多年平均贡献率为 44.7%, 是径流重要的补给源; 随着丰、平、枯年的转换, 基流对径流变化的贡献差别较大, 如丰水年(1966 年, $P=25\%$)、平水年(1970 年, $P=50\%$)、枯水年(2010 年, $P=75\%$)基流对径流的贡献率分别为 35.8%、47.1%、52.2%. 随着洪水脉冲的增加, 基流对径流量贡献率相应地减少, 丰水年基流在径流过程中占比有所降低.

从基流对径流的贡献率来看(图 4-b): 不同水平年汛期(6—9 月)和非汛期(10 月—次年 5 月)基流对径流的贡献差别较大, 丰、平、枯年非汛期基流对径流的贡献率分别为 50.1%、64.1%、56.4%; 而在汛期基流对径流的贡献率则为 28.7%、33.5%、43.9%. 上述结果表明, 基流是非汛期径流的主要补给源, 而在汛期由于降水产生的洪水脉冲量增加, 基流对径流的贡献率有所降低, 但是枯水年汛期基流贡献率依然可以达到 43.9%, 构成枯水年基流的主要补给来源. 河流生态系统的维持既需要河流中稳定的持续水流, 也需要汛期短时期的脉冲流量, 例如鱼类的产卵等^[19].

4 结论

以拒马河为研究对象, 选取 C-M 法对拒马河紫荆关水文站点多年日径流量进行基流分割, 得出紫荆关水



a 与 b 分别为年径流量的年趋势与突变检测; c 与 d 分别为年基流量的年趋势与突变检测。

图 3 拒马河流域年径流量和年基流量的时间变化趋势

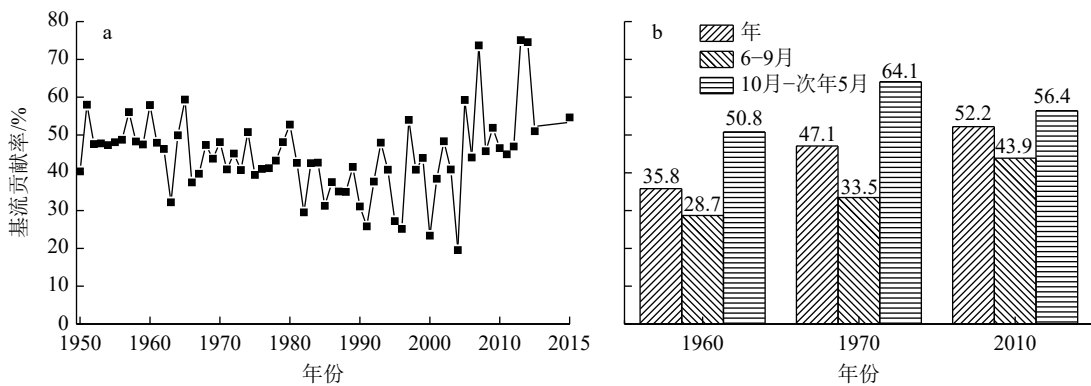


图 4 拒马河基流对径流的贡献率: 1950—2016 年 (a) 以及不同水平年汛期、非汛期 (b)

文站点的基流量序列,分析了长水文序列丰、平、枯年不同水文年基流的变化及其对径流过程的贡献率.主要结论如下:

1)改进退水常数后的 C-M 法计算的基流更符合基流的变化特征.

2)1950—2016 年拒马河年径流量、年基流量呈现出下降的趋势,且径流与基流都在 1967 左右发生突变,基流并未呈现出对径流变化的滞后性.突变前后基流的变化幅度小于径流的变化幅度,突变前后径流与基流的相对变化量分别为 59.09% 和 51.65%.

3)受降水的影响,汛期与非汛期基流对径流的贡献率具有明显差异;基流在径流过程中的贡献率,在丰、平、枯水年的非汛期依次减小,但是贡献率均在 50% 以上,表明基流对径流过程的影响较大.

5 参考文献

[1] FAN Y T, CHEN Y N, LIU Y B, et al. Variation of baseflows in the headstreams of the Tarim River Basin during 1960-2007[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 487: 98

- [2] PRICE K. Effects of watershed topography, soils, land use, and climate on baseflow hydrology in humid regions: a review[J]. *Progress in Physical Geography*, 2011, 35(4): 465
- [3] GONZALES A L, NONNER J, HEIJKERS J, et al. Comparison of different base flow separation methods in a lowland catchment[J]. *Hydrological Earth System Sciences*, 2009, 13(11): 2055
- [4] HUYCK A A O, PAUWAL V, VOHOUSR N. A base flow separation algorithm based on the linearized Boussinesq equation for complex hillslopes[J]. *Water Resources Research*, 2005, 41(8): 553
- [5] ECKHARDT K. How to construct recursive digital filters for baseflow separation[J]. *Hydrological Processes*, 2005, 19(2): 507
- [6] NATHAN R J, MCMAHON T A. Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses[J]. *Water Resources Research*, 1990, 26(1): 1465
- [7] 黄文, 李占玲, 徐宗学, 等. 基流分割方法在寒旱区流域的适用性分析[J]. *水文*, 2018, 38(3): 21
- [8] 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
- [9] 左海凤, 武淑林, 邵景力, 等. 山丘区河川基流BFI程序分割方法的运用与分析: 以汾河流域河盆水文站为例[J]. *水文*, 2007, 27(1): 69
- [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
- [11] 姚鹏, 卢国平. 拒马河水化学、同位素特征及其指示意义[J]. *环境化学*, 2017, 36(7): 1525
- [12] 徐宇程, 朱首贤, 张文静, 等. 长江大通站的丰平枯水年划分探讨[J]. *长江科学院院报*, 2018, 35(6): 19
- [13] ZHANG J L, ZHANG Y Q, SONG J X, et al. Evaluating relative merits of four baseflow separation methods in Eastern Australia[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 549: 252
- [14] CHENG L, ZHANG L, BRUTSAERT W. Automated selection of pure base flows from regular daily streamflow data: objective algorithm[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2016, 21(11): 0601
- [15] 贺伟, 布仁仓, 熊在平, 等. 1961—2005年东北地区气温和降水变化趋势[J]. *生态学报*, 2013, 33(2): 519
- [16] ULLAH S, YOU Q L, ULLAH W, et al. Observed changes in precipitation in China-Pakistan economic corridor during 1980–2016[J]. *Atmospheric Research*, 2018, 210: 1
- [17] 陈文艳, 夏达忠, 张行南. 数字滤波法分割基流的论证[J]. *水力发电*, 2014, 40(2): 37
- [18] YANG Y T, MCVICAR T R, DONOHUE R J, et al. Lags in hydrologic recovery following an extreme drought: assessing the roles of climate and catchment characteristics[J]. *Water Resources Research*, 2017, 53(6): 4821
- [19] 蒋晓辉, ANGELA A, 刘昌明. 基于流量恢复法的黄河下游鱼类生态需水研究[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2009, 45(5/6): 537

Baseflow separation and temporal changes in the Juma River, China

MA Xiaojing^{1,2)} LIU Qiang^{2,3)†} PAN Jihua¹⁾ ZHANG Junlong⁴⁾
SUN Yingshan^{2,5)} YUAN Xiaomin^{2,3)}

(1) School of Geography and Tourism, Qufu Normal University, 276826, Rizhao, Shandong, China;

2) State Key Laboratory of Water Environment Simulation, School of Environment, Beijing Normal University, 100875, Beijing, China;

3) Key Laboratory for Water and Sediment Sciences, Ministry of Education, School of Environment, Beijing Normal University, 100875, Beijing, China;

4) School of Geography and Environment, Shandong Normal University, 250358, Jinan, Shandong, China;

5) School of Water Resources and Environment, University of Jinan, 250002, Jinan, Shandong, China)

Abstract Digital filtering method with improved regression constant, the Chapman-Maxwell method, was used to separate baseflow from daily runoff in Zijinguan hydrological station in Juma River, China, with temporal trends of baseflow investigated. Modified receding water constant ($\alpha = 0.993$) calculated from Chapman-Maxwell method were found suitable to separate baseflow compared with experienced receding water constant ($\alpha = 0.925$). Annual runoff and baseflow presented decreasing trends with abrupt changes around 1967. Abrupt changes for annual baseflow were found to be earlier than for annual runoff. Changes in baseflow were found to make up to 35.8%, 42.51%, and 52.20% of changes in runoff in flood, normal, and drought years. It is concluded that baseflow presents steady characteristics than changes in runoff, this plays a vital role in maintaining integrity of river ecosystem.

Keywords baseflow separation; regression constant; automatic baseflow identification technique; Chapman-Maxwell method; Juma River