

# 基流分割方法研究进展

徐榕焯<sup>1</sup>, 王小刚<sup>2</sup>, 郑伟<sup>1</sup>

(1. 中国气象局 国家卫星气象中心, 北京 100081; 2. 南京大学 地球科学与工程学院 水科学系, 江苏 南京 210093)

**摘要:** [目的] 针对基流分割理论和方法所存在的争议, 对基流分割研究进展进行综述, 为今后基流研究提供参考。[方法] 采用综述方法较为系统地阐述了基流的定义, 对基流分割方法进行了回顾和分析, 包括图解法、数值模拟法、水量平衡法以及同位素和水化学法等。[结果] 重点研究和评述了基流分割方法的理论基础、优缺点以及适用范围, 提出当前基流分割方法研究所存在的问题及其未来研究的趋势。[结论] 迄今为止, 尚未找到一种得到普遍认同的基流分割方法, 还需进一步加强基流分割理论与方法研究, 形成统一、完善的理论体系, 科学、合理地确定基流, 并探讨基流变化特征及其驱动因子, 这将是未来基流研究的重要内容。

**关键词:** 基流分割; 图解法; 数值模拟法; 水量平衡法; 同位素和水化学法

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2016)05-0352-08

**中图分类号:** P345, P333

**文献参数:** 徐榕焯, 王小刚, 郑伟. 基流分割方法研究进展[J]. 水土保持通报, 2016, 36(5): 352-359. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2016.05.061

## Research Progresses in Baseflow Separation Methods

XU Ronghan<sup>1</sup>, WANG Xiaogang<sup>2</sup>, ZHENG Wei<sup>1</sup>

(1. National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;

2. Department of Hydrosociences, School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

**Abstract:** [Objective] In view of the controversies in baseflow separation theory and methods, the research progresses in baseflow separation was summarized in order to provide references for baseflow research. [Methods] We systematically reviewed the definitions of baseflow components, and the development of different baseflow separation methods, which include graphic analysis method, numerical simulation method, water balance method, isotope and chemistry method. [Results] We analyzed and evaluated the theoretical basis, advantages and disadvantages and conditions of application of above methods, and pointed out existing problems and future research trends. [Conclusion] So far, no method for baseflow separation is wide recognition. We still need to further strengthen the baseflow separation theory and method research, to form a unified and perfect theory system, and to determine the baseflow scientifically and reasonably. In addition, the change features and driving factors of baseflow will be an important part of the study of baseflow in the future.

**Keywords:** baseflow separation; graphic analysis method; numerical simulation method; water balance method; isotope and chemistry method

对于流域的一次降雨过程来说, 其在流域出口断面形成的流量过程线由不同水源组成, 如何区分径流的不同组分及其所占比例, 需要对径流进行地面径流和基流的划分, 即基流分割<sup>[1-3]</sup>。基流分割作为工程

水文学和应用水文学中的一个基本问题, 其分割结果不仅是产汇流计算和水文模拟的重要研究内容<sup>[4]</sup>, 而且对工农业供水、水安全、水资源评价、污染物运移、河流生态环境保护等具有重大影响<sup>[5-7]</sup>。因此, 基流

收稿日期: 2016-07-18

修回日期: 2016-08-15

资助项目: 国家自然科学基金项目“被动微波遥感洪涝信息定量反演及超分辨率成图方法研究”(41571425); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05090200)

第一作者: 徐榕焯(1987—), 女(汉族), 福建省南平市人, 博士, 工程师, 主要从事区域气候变化与水资源演变研究。E-mail: tsuicas@163.com。

分割受到国内外研究者广泛关注,近年来取得了一定的进展和突破<sup>[8-10]</sup>。然而,由于基流分割涉及到气候、自然地理、水文地质等多种科学,而且无法通过试验对基流分割结果进行科学论证,迄今为止,各种基流分割理论和方法之间仍然存在着较大的争议<sup>[5,10-13]</sup>。因此,本文拟针对国内外基流定义进行系统阐述,对基流分割方法进行回顾和分析,并提出当前基流分割方法研究所存在的问题及其未来研究的趋势,以期今后基流研究提供参考。

## 1 基流定义

河川基流研究开始于19世纪,但迄今为止,对构成总径流的几种水源的划分依然存在着不同的理解,基流的定义还不尽一致。综合国内外学者对基流的定义,主要概括为以下几类<sup>[5,10,13]</sup>:

(1) 基流定义为深层地下径流<sup>[14]</sup>。传统水文学将总径流划分为地面径流,壤中流和地下径流。其中,地下径流又分为快速(浅层)和慢速(深层)2种,通常把后者称为基流。

(2) 基于传播时间,将总径流划分为直接径流和基流2部分<sup>[15]</sup>。其中,基流由地下径流和慢速壤中流组成,而直接径流则由地面径流和快速壤中流组成。

(3) 基流定义为补给河水的地下径流<sup>[6,16]</sup>。该地下径流包括浅层地下径流和深层地下径流,是枯水季节河流的基本流量。对一般流域而言,深层地下径流所占比例较少,所以基流主要为浅层地下径流。

(4) 基流是指除地面径流以外的径流,包括来源于地下水或是其他延迟部分的径流<sup>[1,17]</sup>。Dooge等<sup>[17]</sup>对径流过程的形成做了如下叙述:“应用水文学中,一般对坡面流、壤中流和地下径流不加区分,因为实际上不可能将三者分开。因而,应用水文学家只区别地面径流和基流,将降雨分成净雨和下渗及其他损失。其中,净雨产生直接径流,而下渗补充土壤蓄水量到土壤饱和后,所有剩余下渗水量都补给地下水,最后成为基流”。

## 2 基流分割方法

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,迄今为止,还尚未找到一种得到普遍认同的基流分割方法,各种方法分割结果并不完全相同,有时甚至差异较大<sup>[10-11,14,18]</sup>。根据基流分割方法的原理,可分为图解法、数值模拟法、水量平衡法以及同位素和水化学法等。

### 2.1 图解法

图解法是根据流量过程线的几何特征,按照水文地质工作者的经验判断分割位置与方式的方法,包括直线分割法、库捷林法和退水曲线法等(图1)。

2.1.1 直线分割法 该方法是用直线连接流量过程线上的不同特征拐点进行基流分割,适用于闭合山区流域<sup>[19]</sup>,主要包括直线平割法和直线斜割法。① 直线平割法是以年内枯季月均流量的最小平均值(如最小月平均或连续几个月的最小平均值)为基准,水平切割流量过程线,并规定水平切割线以下为基流量。当对多年流量过程进行基流分割时,一般选取多个水文年为代表年份,逐年绘制日均流量过程线,并以预先确定的基准流量进行分割。可见,枯水期月份数的选取是该方法的关键。林学钰等<sup>[3]</sup>推荐采用“试算—比较”法确定枯水期月份数,以减少因枯水期月份选取不当而对结果产生不利影响。② 直线斜割法是在日均流量过程线上,将洪水起涨点与退水拐点以斜直线相连,对于凌汛期及多次洪水过程,需作分段斜线分割,斜直线以下为汛期基流量,与枯季径流量相加即为年基流量<sup>[19]</sup>。一般来说,洪水起涨点较明显且易于确定,而退水拐点则需借助预先制作的综合退水曲线进行判别。综合退水曲线的制作是摘录、点绘一组无降水影响径流的退水曲线,水平移动退水曲线,使各个退水段尾部重合,绘制这组退水曲线的外包线即为综合退水曲线<sup>[13]</sup>。当包气带很厚、暴雨历时较短、且降水未及时补给地下水时,一般采用直线平割法进行基流分割;当包气带不厚、雨后浅层地下得到补给而有所增加时,可用直线斜割法分割基流<sup>[12]</sup>。

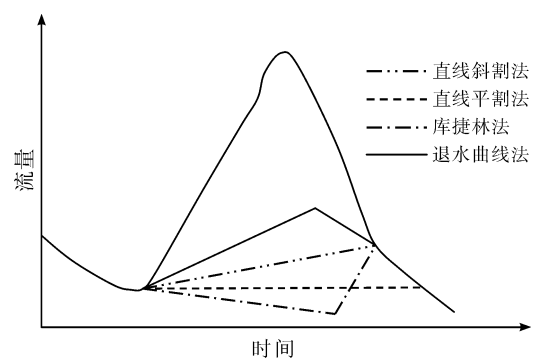


图1 图解法示意图

2.1.2 库捷林法 当潜水与河水有直接水力联系时,河流涨洪,河水补给地下水,基流为其上游河网的地下水排泄量,基流逐渐减少。当河水回落时,两岸的地下水补给河流,基流又开始增加。转折点的位置根据河水与潜水的水力关系而定<sup>[12]</sup>。

2.1.3 退水曲线法 该方法在潜水与河水无水力联

系(地下径流不受河水涨落影响)时,假定雨后地下径流迅速增加,其峰值与洪峰出现相近。然后,选取若干个流量过程线的退水段,采用相同比例尺,通过移动使退水曲线尾部达到最大程度的重合,下包线即为退水曲线,从而确定流量过程线上的起涨点和退水拐点,取两点的切线方向并沿其方向延伸后相交,其交点应低于流量过程线,以求得基流<sup>[12-13]</sup>。该方法指明了起涨点和退水拐点,在一定程度上反映了地下水与地表水之间的转换过程。

## 2.2 数值模拟法

为了简化基流分割过程,人们提出利用数据处理或滤波程序技术对径流序列进行基流分割,主要包括平滑最小值法、数字滤波法、HYSEP法和PART法等。

**2.2.1 平滑最小值法** 平滑最小值法(smoothed minima method)是1980年由英国水文研究所提出,也称为UKIH法,并由美国地质调查局的K. L. Wahl和T. L. Wahl编写出计算程序(BFI)<sup>[20]</sup>。该方法将连续的日径流序列按给定的时间间隔 $N$ 划分为 $365/N$ 个不重叠的时间段,并确定每个时间段中的最小值 $q_t$ ;然后与相邻时间段的最小值( $q_{t-1}, q_{t+1}$ )进行比较,如果满足 $kq_t \leq \min(q_{t-1}, q_{t+1})$ ,则将该点确定为拐点;重复此过程,在流量过程线上确定出所有拐点,将拐点用直线连接并用线性内插法将其他点的值计算出来,即可得到基流过程线。

该方法需要确定程序计算所需的2个参数<sup>[20-21]</sup>:时间间隔 $N$ 与拐点检验因子 $k$ 。其中, $N$ 可以通过试算的方式来获得。预先设定 $N$ 的取值为0~10的11个自然数值,将每个值代入计算程序中,通过对所试算出的年基流指数进行分析对比,确定 $N$ 值<sup>[19,21]</sup>。英国水文研究所将应用该方法所得到的基流结果与人工方法结果进行对比,得出拐点检验因子 $k$ 的最优解为0.9。应用实践也证明 $k$ 值取0.9能够得到较好的分割效果<sup>[19,22]</sup>。在实际应用中,部分学者认为该方法简单以总径流的下包线作为基流,将使基流包含前期洪水没有退完的地面径流,放大了基流量,与实际不符<sup>[22]</sup>。然而,另外一些学者通过将多种基流分割方法进行比较,表明平滑最小值法所得到的基流值或基流指数却是偏小<sup>[11]</sup>。由此可见,该方法依然存在不确定性。随着对平滑最小值法研究的不断深入,在其基础上出现了一些改进方法,如RUKIH<sup>[19]</sup>, AdUKIH<sup>[23]</sup>和FUKIH<sup>[22]</sup>等。

**2.2.2 数字滤波法** 数字滤波法源于信号分析,主要功能是将信号分为高频信号和低频信号。由于直接径流的快速响应特征与高频信号类似,而基流的慢

速相应特征与低频信号类似,通过数字滤波器分解出高频和低频信号,即将径流过程划分为直接径流和基流<sup>[8]</sup>。目前应用较为广泛的数字滤波法主要有Lyne-Hollick滤波法<sup>[8,24]</sup>、Chapman滤波法<sup>[25]</sup>、Chapman-Maxwell滤波法<sup>[26]</sup>、Boughton-Chapman滤波法<sup>[26]</sup>和Eckhardt滤波法<sup>[27]</sup>等。

Lyne-Hollick滤波法由Lyne和Hollick于1979年首次提出,并由Nathan和McMahon于1990年首次应用于基流分割,其滤波方程为:

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

式中: $q_t$ —— $t$ 时刻的地面径流( $\text{m}^3/\text{s}$ ); $Q_t$ —— $t$ 时刻的总径流( $\text{m}^3/\text{s}$ ); $\alpha$ ——滤波参数。下同。

$$b_t = Q_t - q_t \quad (2)$$

式中: $b_t$ —— $t$ 时刻的基流( $\text{m}^3/\text{s}$ )。大量实践证明<sup>[8,29-30]</sup>,当 $\alpha$ 取值为0.925时,该滤波法能够得到较好的结果。研究表明<sup>[11,30-31]</sup>,该滤波法可以应用于从月径流序列中分割出月基流,推荐采用1次滤波进行滤波参数调试,所确定的区域滤波参数是有价值的。

Chapman于1991年对Lyne-Hollick算法进行改进,提出了Chapman滤波法,其滤波方程为:

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

之后,Chapman和Maxwell于1996年假定某时刻的基流为该时刻的地面径流和前一时刻基流的加权平均,提出了Chapman-Maxwell滤波法,其滤波方程为:

$$q_t = \frac{k}{2-k}q_{t-1} + \frac{1-k}{2-k}Q_t \quad (4)$$

式中: $k$ ——退水系数,一般情况下取值为0.95,可通过MRC(master recession curve)方法<sup>[2,28]</sup>进行退水系数计算。黄国如<sup>[14]</sup>以东江流域为例,通过多种基流分割方法的对比分析,认为该方法得到的基流分割结果可能最优。曾松青等<sup>[31]</sup>采用不同方法对中山大学珠海滨海试验基地上游区域的基流进行分割,表明Chapman-Maxwell滤波法的计算结果与同位素分析结果最为接近。

为了得到更为平滑的基流分割结果,Boughton于1993年提出Boughton-Chapman滤波法,并由Chapman和Maxwell于1996年进行了改进,其滤波方程为:

$$q_t = \frac{k}{1+C}q_{t-1} + \frac{C}{1+C}Q_t \quad (5)$$

式中: $C$ ——参数,一般情况下可以取0.15。

为提高上述数字滤波器的灵活性,Eckhardt于2005年在式(4)的基础上提出了Eckhardt滤波法,

其滤波方程为:

$$q_t = \frac{(1 - \text{BFI}_{\max})kq_{t-1} + (1 - k)\text{BFI}_{\max}Q_t}{1 - k\text{BFI}_{\max}} \quad (6)$$

式中: BFI——长期地下径流对总径流的比,称为基流系数(base flow index, BFI),而  $\text{BFI}_{\max}$  为其比值的最大值。为了消除  $\text{BFI}_{\max}$  取值的主观性, Eckhardt<sup>[27]</sup> 建议根据流域下垫面的水文地质特性,在以孔隙含水层为主的常流河,  $\text{BFI}_{\max}$  取值为 0.80; 在以孔隙含水层为主的季节性河流,  $\text{BFI}_{\max}$  取值为 0.50; 在以弱透水层为主的常流河,  $\text{BFI}_{\max}$  取值为 0.25。Eckhardt<sup>[11]</sup> 在美国 65 个流域应用该方法与其他方法进行比较,结果表明该方法估算的基流量可能最为合理。雷泳南等<sup>[18]</sup> 应用平滑最小值法、HYSEP 法和数字滤波法等方法对窟野河流域进行基流分割,结果表明 Chapman-Maxwell 滤波法和 Eckhardt 滤波法估算的基流结果最为稳定、可靠。

2.2.3 HYSEP 法 HYSEP 法也称为时间步长法,其基本原理由 Pettyjohn 和 Henning 于 1979 年提出,计算程序由美国地质调查局开发并推荐使用<sup>[32]</sup>。该方法首先需要利用经验公式计算直接径流的持续时间:

$$N = (2.59A)^{0.2} \quad (7)$$

式中:  $N$ ——直接径流的持续时间(d);  $A$ ——流域面积( $\text{km}^2$ )。时间间隔取值范围在 3~11 d,且选择与  $2N$  最接近的奇数作为时间间隔。

HYSEP 法包括 3 种基流分割方式<sup>[32]</sup>: ① 固定时间间隔法:将所选取时间间隔内的最小流量作为该时段内任意一天的基流,然后以本次计算的时间终点为下次计算的时间起点依此进行计算。② 滑动时间间隔法:在所选取时间间隔内,找出要计算的某一天前后  $(2N-1)/2$  时间范围内的最小值,并将其赋值为该天的基流,然后用同样的方法计算下一天的基流。③ 局部最小值法:计算相邻时间步长内中心点的基流,步长中心点之外时段的基流以线性内插得到。步长中心点的基流计算方法如下:选择前后  $(2N-1)/2$  时间范围内的最小值并将其赋值为该天的基流,然后以本次计算的时间终点为下次计算的时间起点依此进行计算。其中,局部最小值法应用较为广泛<sup>[32-33]</sup>。

2.2.4 PART 法 PART 是美国地质调查局(USGS)提出的一种基流分割程序。该方法以日流量为数据源,并非基于前期降雨,而是基于前期径流消退进行分割<sup>[34]</sup>。该方法运行规则如下: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,日径流量值即作为地下水

排泄量(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。

### 2.3 水量平衡法

水量平衡法是根据水量平衡原理求解出地下水出流过程的方法,主要包括参数分割法和水文模拟法。

#### 2.3.1 参数分割法

(1) 加里宁法。20 世纪 50 年代,原苏联学者加里宁提出山区河川径流一般是由与河川径流无水力联系的基岩裂隙水补给,并假定含水层的来水量与地面径流之间存在比例关系,并建立近似的水量平衡方程求解基流,即加里宁法<sup>[5]</sup>。该方法的改进在 20 世纪 80 年代中后期提出<sup>[35]</sup>,假定地下水的消退服从指数衰减规律,含水层的来水量与地面径流之间存在动态的交换,其估算方程可写为:

$$Q_{Fn} = \theta \bar{Q}_{n-1} + \gamma Q_{Fn-1}$$

$$\text{其中, } \theta = B\alpha\Delta t, \gamma = 1 - (1 + B)\alpha\Delta t \quad (8)$$

式中:  $\bar{Q}_{n-1}$ ——计算时段  $n-1$  至  $n$  内河流的平均流量( $\text{m}^3$ );  $Q_{Fn-1}$ ——时刻  $n-1$  的基流量( $\text{m}^3$ );  $Q_{Fn}$ ——时刻  $n$  的基流量( $\text{m}^3$ );  $B$ ——比例系数,近似为地下径流与地面径流的比值;  $\alpha$ ——退水系数,反映了流域地表水与地下水转换的快慢程度。一般情况下,退水指数值越大,洪流退水过程越顺畅。

该方法包括 2 个参数,退水系数  $\alpha$  和比例系数  $B$ 。其中,退水系数的求取是根据地下水的消退遵循指数衰减的假定。对退水曲线作对数线性拟合,其斜率即为退水指数。陈利群等<sup>[36]</sup> 为了保证退水常数不受观测误差、个别数据跳动的影响,建议退水过程的时间长度应大于 30 d。比例系数  $B$  值目前没有理论公式进行计算,只能通过地区径流组合特点、经验确定或试算得出<sup>[36]</sup>。

(2) 水库法。水库法主要包括线性水库法和非线性水库法。其中,线性水库法采用单一线性水库或者多个串连的线性水库模拟计算基流<sup>[9,37-38]</sup>。张志成和袁作新<sup>[39]</sup> 以地下径流形成的基本规律为基础,联解地下水水库的蓄泄方程和水量平衡方程,提出地下径流的参数分割法。地下径流演算公式为:

$$G_2 = \frac{(C_2 - ZC_1)G_1 + ZC_1(Q_1 + Q_2)}{1 + ZC_1}$$

$$C_1 = \frac{\Delta t/2}{K + \Delta t/2}, \quad C_2 = \frac{K - \Delta t/2}{K + \Delta t/2} \quad (9)$$

式中:  $Z$ ——地下水入流参数,即地下水入流瞬时值与同时发生的地面径流瞬时值的比率,由优选获得;  $K$ ——具有时间量纲的蓄量系数;  $\Delta t$  根据具体情况选定。张文华等<sup>[40]</sup> 基于霍顿下渗能力曲线推导出地

下净雨量在非饱和带运行时间公式和地下水汇流公式,进行基流分割。然而,该算法只能对场次洪水进行流量过程线的分割。林凯荣等<sup>[41]</sup>在用前期影响雨量代替流域蓄水量的基础上,提出了基于霍顿下渗能力曲线的连续分割方法。然而,线性水库法假定地下水出流量与地下水储水量之间呈线性关系,不一定符合流域的水文规律<sup>[9]</sup>。但是,大量研究表明<sup>[37-38,42]</sup>,线性水库法依然能够较好反应实际退水过程,具有良好的精度。

非线性水库法是根据非线性经验公式或径流退水的非线性关系进行基流计算。研究表明<sup>[43]</sup>,在没有降雨时,径流退水过程中的土壤蓄水量和出流关系并不符合线性水库假设,而是非线性的,进而提出了非线性水库计算方法分割基流。在退水时进行基流分割的逆向推导法的表达式为:

$$Q_{t-\Delta t} = [Q_c^{b-1} + \frac{(b-1)}{ab} \Delta t]^{1/(b-1)} \quad (10)$$

式中:  $Q_{t-\Delta t}$ ,  $Q_t$  ——  $t-\Delta t$  和  $t$  时刻的基流;  $\Delta t$  —— 时间步长;  $a, b$  —— 参数系数,无法直接求得,必须优化率定<sup>[43-45]</sup>。其中,  $a$  可能与流域面积、孔隙度、渗透系数以及流域地形地貌有关;  $b$  与含水层属性有关,取值范围为  $0 \sim 1$ 。

当有降雨时,径流总量  $q$  一般会增大。在这种情况下,若根据上式求出的基流  $Q_{t-\Delta t}$  大于同一时刻的总径流  $q_{t-\Delta t}$ ,那么在  $t$  和  $t-\Delta t$  时刻的基流  $Q_t$  和  $Q_{t-\Delta t}$  的计算公式重新推求为:

$$Q_t = q_{t-\Delta t} [1 + \frac{(1-b)q_{t-\Delta t}^{1-b}}{ab} \Delta t]^{1/(b-1)} \quad (11)$$

$$Q_{t-\Delta t} = q_{t-2\Delta t} [1 + \frac{(1-b)q_{t-2\Delta t}^{1-b}}{ab} \Delta t]^{1/(b-1)} \quad (12)$$

当  $q_t > q_{t-\Delta t}$  时,在  $t-\Delta t$  时刻的基流  $Q_{t-\Delta t}$  将采用式(12)进行计算。

熊立华等<sup>[44]</sup>采用非线性水库法对牧马河流域进行基流分割,所得结果和数字滤波方法求得的结果基本一致。Aksoy 等<sup>[46]</sup>认为非线性水库法比线性水库法具有更好的精度,能够反映实际退水过程,并能够适用于间歇性河流。然而,非线性水库法所需率定的参数较多,并存在一定的主观性<sup>[43]</sup>。

2.3.2 水文模拟法 水文模拟法基于质量守恒原理,建立在区域水文循环概念模型基础上,通过计算流域各项水均衡的水量,进行基流计算。常用水文模型包括: Tank 模型、Stanford 模型、Sacramento 模型、新安江模型等。随着 3S 技术的广泛应用,分布式水文模型(如 TOPMODEL 模型和 SWAT 模型)的出现为基流分割提供了一种很好的方法<sup>[6,13]</sup>。但其

难点在于区域水文循环概念模型的可靠性或适用性,如果依赖于观测资料进行模型参数率定,使用者能否合理地优选出区域参数为模拟基流的关键因素<sup>[4,47]</sup>。

Scanlon 等<sup>[48]</sup>通过改进 TOPMODEL 模型结构,将暴雨期在包气带中的相对不易透水层上产生的暴雨壤中流从基流中分割出来。文佩<sup>[49]</sup>将 TOPMODEL 模型改进为三水源模型,以模拟降雨期地面径流、快速壤中流和地下径流三水源的变化过程。李超群等<sup>[50]</sup>利用 Horton 下渗曲线改进 TOPMODEL 模型的基流模拟,指出改进后的 TOPMODEL 模型不仅能够更加合理地模拟基流过程,而且径流过程的模拟精度要优于原模型。

杨桂莲等<sup>[51]</sup>应用 SWAT 模型对洛河流域进行基流估算,并将结果与数字滤波法比较,结果表明 2 种方法的拟合度均较高。Gan 等<sup>[42]</sup>将非线性水库法耦合到 SWAT 模型中进行基流计算,且与双线性水库法作比较,结果表明两者的基流模拟结果相似,但前者具有形式简单,参数少的优势。Chen 等<sup>[4]</sup>基于 SWAT 模型与 TOPMODEL 模型,提出了 SWAT-TOP 模型。该模型同时考虑流域地形与地下水埋深动态,实例研究表明,相比较于 SWAT 模型,该模型的水文过程模拟结果更合理。

## 2.4 同位素和水化学法

同位素和水化学法是采用不同示踪剂或离子的质量平衡关系阐述基流产生过程,始于 20 世纪 70 年代<sup>[52]</sup>。该方法通过分析径流不同组分中同位素示踪剂的组成,将一次降雨事件产生的流量过程线分割成不同的水源,揭示径流不同组分在总径流中的比例。目前,主要有 3 种划分方法<sup>[53-54]</sup>: ① 时间源划分方法,将径流划分为事件水和事件前水。其中,事件水一般由降雨产生,事件前水指降雨事件前已经储存在土壤中的水分。② 产流机制划分方法,一般将径流分为霍顿坡面径流、变源坡面径流或饱和坡面径流、壤中流、地下径流、栖息饱和和径流等。③ 地理源划分方法,根据水流到达河道之前所处地理位置的不同来划分,如之前是存储在饱和带还是包气带等。

国内外研究一般假定地面径流和本次降水的同位素组成相同,土壤水和地下水的同位素组成相同,进而将流量过程线分割成地面径流和地下径流<sup>[53]</sup>。实际上,地面径流不一定全来自降水,而且降水中同位素组成不仅受降雨成因影响,还明显受气温、地形等条件影响,时空变化很大<sup>[55]</sup>。此外,地下径流中的同位素组成在降雨径流过程中也具有很大的时程变化,只有在枯季径流条件下其时空变化才比较小。而且这种划分方法忽略了壤中流的影响。研究表明,壤

中流对流量过程线的贡献是不可忽略的,否则将造成不合理的结果<sup>[53]</sup>。因此,后续开展了关于三水源流量过程线分割研究<sup>[56]</sup>。Wu等<sup>[57]</sup>应用<sup>222</sup>Rn质量平衡和水均衡方法估算了黑河中游溢出带以下张掖—正义峡地段径流中地下水的比例。陈宗宇等<sup>[58]</sup>利用稳定同位素(<sup>2</sup>H和<sup>18</sup>O)及水化学方法定量识别了黑河流域地下水向河道的排泄量占河道径流总量的69%。Yang等<sup>[59]</sup>将同位素与水化学示踪剂相结合,用前者进行流动路径的识别和分割,用后者进行水分

来源的识别和分割,从而对降雨径流的形成过程和机制进行更为精细的刻画。

### 3 结论与展望

针对基流分割理论和方法所存在的争议,本文对基流定义进行了概述,并对基流分割方法进行了较为系统的回顾和分析,包括图解法、数值模拟法、水量平衡法以及同位素和水化学法等,这些方法的理论依据、优缺点以及适用范围如表1所示。

表1 基流分割方法比较分析

基流分割方法	亚类	理论依据	数据要求	适用范围	主要优点	局限性
图解法	直线分割法	缺乏严格理论依据	水文序列	闭合山区流域	简单,可作为其他方法的一种检验	手工操作、效率低、主观性较大;难以处理长系列、多批次的水文动态数据
	退水曲线法					
	库捷林法					
数值模拟法	平滑最小值法	缺乏严格理论依据	水文序列	普遍适用	自动实现,易操作、可重复;适合处理海量、长系列的水文动态数据;可应用于间歇性河流	存在一定的主观性、不确定性
	数字滤波法					
	HYSEP法					
	PART法					
水量平衡法	参数分割法	水量平衡原理	水文序列	资料较丰富地区	物理意义明确,具有客观、可重复的特点	存在一定的主观性,对操作者能力要求较高,且所需调试的参数较多
	水文模拟法					
同位素和水化学法	时间源划分法	质量平衡原理	样品测试结果	普遍适用	可操作性和可信用度高	需要大量人力物力,难以在流域尺度进行应用
	产流机制划分法					
	地理源划分法					

从表1可知:①图解法是较早提出的基流分割方法,该方法虽然简单,但缺乏严格的理论依据,手工操作上主观性较大,工作效率低,难以处理长系列、多批次的水文动态数据<sup>[9,14]</sup>,故可靠性受到质疑。但该方法在中国仍然适用,通常作为其他方法的一种检验<sup>[3,19]</sup>。②数值模拟法虽没有严格的物理学意义,但该方法易于采用计算机自动实现,克服了人工方法的主观性和随意性,具有易操作和可重复的特点,适合处理海量的、长系列的水文动态数据,且不仅适用于连续性河流,也可应用于间歇性河流<sup>[27]</sup>。该方法已成为目前国际上广泛应用的基流分割方法。③水量平衡法物理意义明确,能够描述水文循环过程,具有客观、可重复的特点,但其对操作者能力要求较高,且所需调试的参数较多,实施起来有些困难。参数分割法是向水文模拟法的过渡方法,更多作为理论方法进行讨论,未来价值体现在为其他方法(例如水文模拟法)提供理论依据。随着计算机技术的快速发展以及水文模型的广泛应用,水文模拟法已成为基流分割研究主要发展趋势。④同位素和水化学法相比于其他方法的最大优点是可操作性和可信用度高,近年来得到

了迅速发展,其对研究径流产生机制、包气带中土壤水分运动规律、流域水源成分等具有重要作用,但由于该方法对实测条件的限制,还难以进行广泛应用<sup>[6]</sup>。

目前,基流分割方法还无法直接应用于无资料地区<sup>[10]</sup>。随着3S等空间信息技术的快速发展,大量学者试图通过建立流域基流量或基流指数与其气候、地形地貌特征等因素的回归分析模型,开展基流量或基流指数的区域化研究,将有资料地区的模型参数或者流量特征移植到无资料区域<sup>[8,30,60]</sup>。Mazvimavi等<sup>[60]</sup>利用多元线性回归和人工神经网络技术,研究了津巴布韦52个流域的基流指数,认为基流指数与多年平均降雨量、河网密度和坡度有关,且人工神经网络方法所得到的预测精度高于线性回归方法。郭军庭等<sup>[61]</sup>应用多元线性回归分析得出蔡家川流域的基流指数与次降雨量,河网密度和河流比降成线性关系,进而分析了流域内无观测数据地区的基流。近年来,气候变化与人类活动的加剧对基流产生了明显影响<sup>[28-29,31-32]</sup>,而基流作为河流径流的重要组成部分,其变化势必对生态环境和人类社会经济造成影响。

因此,进一步加强基流分割理论与方法研究,形成统一、完善的理论体系,科学、合理地确定基流,并探讨基流变化特征及其驱动因子,这将是未来基流研究的重要内容。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] Hall F R. Baseflow recessions: A review[J]. *Water Resources Research*, 1968,4(5):973-983.
- [2] Arnold J G, Allen P M, Muttiah R, et al. Automated base flow separation and recession analysis techniques [J]. *Ground Water*, 1995,33(6):1010-1018.
- [3] 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.
- [4] Chen Ji, Wu Yiping. Advancing representation of hydrologic processes in the Soil and Water Assessment Tool(SWAT) through integration of the TOPographic MODEL (TOPMODEL) features [J]. *Journal of Hydrology*, 2012,420(7):319-328.
- [5] 陈利群,刘昌明,李发东.基流研究综述[J]. *地理科学进展*, 2006,25(1):1-15.
- [6] Partington D, Brunner P, Simmons C T, et al. Evaluation of outputs from automated baseflow separation methods against simulated baseflow from a physically based, surface water-groundwater flow model [J]. *Journal of Hydrology*, 2012,458(9):28-39.
- [7] Janke B D, Finlay J C, Hobbie S E, et al. Contrasting influences of stormflow and baseflow pathways on nitrogen and phosphorus export from an urban watershed [J]. *Biogeochemistry*, 2013,121(1):209-228.
- [8] Nathan R J, McMahon T A. Evaluation of automated techniques for base flow and recession analysis [J]. *Water Resources Research*, 1990,26(7):1465-1473.
- [9] Tallaksen L M. A review of baseflow recession analysis [J]. *Journal of hydrology*, 1995,165(1):349-370.
- [10] Smakhtin V U. Low flow hydrology: A review[J]. *Journal of hydrology*, 2001,240(3):147-186.
- [11] 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.
- [12] 赵玉友,耿鸿江.基流分割问题评述[J]. *工程勘察*, 1996(2):30-32.
- [13] 徐磊磊,刘敬林,金昌杰.水文过程的基流分割方法研究进展[J]. *应用生态学报*, 2011,22(11):3073-3080.
- [14] 黄国如.流量过程线的自动分割方法探讨[J]. *灌溉排水学报*, 2007,26(1):73-78.
- [15] Chow V T. *Handbook of applied hydrology*[M]. New York: McGraw-Hill Press, 1964.
- [16] Singh V P, 赵卫民,戴东,等.水文系统:降雨径流模拟[M]. 郑州:黄河水利出版社,1999:110-129.
- [17] Dooge J C I, Napiorkowski J J. Applicability of diffusion analogy in flood routing[J]. *Acta Geophysica Polonica*, 1987,35(1):66-75.
- [18] 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.
- [19] 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):69-71.
- [20] Wahl T L, Wahl K L. Effects of regional groundwater level declines on streamflow in the Oklahoma Panhandle[C]// *Water-Use Data for Water Resources Management. Proceedings of a Symposium. American Water Resources Association, Bethesda, Maryland*, 1988: 16-45.
- [21] 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.
- [22] Aksoy H, Kurt I, Eris E. Filtered smoothed minima baseflow separation method[J]. *Journal of Hydrology*, 2009,372(1):94-101.
- [23] Aksoy H, Unal N E, Pektas A O. Smoothed minima baseflow separation tool for perennial and intermittent streams[J]. *Hydrological Processes*, 2008,22(22): 4467-4476.
- [24] Lyne V, Hollick M. Stochastic time-variable rainfall-runoff modelling[C]// *Institute of Engineers Australia National Conference. Canberra: Institution of Engineers*, 1979(10):89-93.
- [25] Chapman T. Comment on "Evaluation of automated techniques for baseflow and recession analysis" by R J Nathan and T A McMahon[J]. *Water Resources Research*, 1991,27(7):1783-1784.
- [26] Chapman T G, Maxwell A I. Baseflow separation-comparison of numerical methods with tracer experiments[C]// *Institute of Engineers Australia National Conference. Canberra: Institution of Engineers*, 1996(5):539-545.
- [27] Eckhardt K. How to construct recursive digital filters for base flow separation[J]. *Hydrological Processes*, 2005,19(2):507-515.
- [28] 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*, 2011,33(12): 2232-2337.
- [29] 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.
- [30] Hughes D A, Hannart P, Watkins D. Continuous baseflow separation from time series of daily and monthly streamflow data[J]. *Water SA*, 2003,29(1): 43-48.

- [31] 曾松青,陈建耀,付丛生. 同位素在小流域基流计算中的应用研究[J]. 水文,2010,30(2):20-24.
- [32] Dai Zhijun, Chu Ao, Du Jinzhou, et al. Assessment of extreme drought and human interference on baseflow of the Yangtze River [J]. Hydrological Processes, 2010,24(6):749-757.
- [33] Stadnyk T A, Gibson J J, Longstaffe F J. Basin-scale assessment of operational base flow separation methods [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2014,20(5):1-11.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] Chapman T. A comparison of algorithms for stream flow recession and baseflow separation[J]. Hydrological Processes, 1999,13(5):701-714.
- [38] Fenicia F, Savenije H H G, Matgen P, et al. Is the groundwater reservoir linear? Learning from data in hydrological modelling[J]. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 2006,10(1):139-150.
- [39] 张志成,袁作新. 地下径流的参数分割法[J]. 水文,1990,10(1):14-19.
- [40] 张文华,郭生练,林凯荣. 流量过程线分割的新方法:公式推导[J]. 水文,2006,25(5):11-15.
- [41] 林凯荣,郭生练,张文华. 基于霍顿下渗能力曲线的流量过程线连续分割方法研究[J]. 水文,2008,28(1):10-14.
- [42] Gan R, Luo Y. Using the nonlinear aquifer storage-discharge relationship to simulate the base flow of glacier and snowmelt-dominated basins in Northwest China [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2013,17(9):3577-3586.
- [43] Wittenberg H. Baseflow recession and recharge as nonlinear storage processes [J]. Hydrological Processes, 1999,13(5):715-726.
- [44] 熊立华,郭生练. 采用非线性水库假设的基流分割方法及应用[J]. 武汉大学学报:工学版,2005,38(1):27-29.
- [45] Harman C, Sivapalan M. A similarity framework to assess controls on shallow subsurface flow dynamics in hillslopes [J]. Water Resources Research, 2009,45(1):206-218.
- [46] Aksoy H, Wittenberg H. Nonlinear baseflow recession analysis in watersheds with intermittent streamflow [J]. Hydrological Sciences Journal-Journal des Sciences Hydrologiques, 2011,56(2):226-237.
- [47] Zhang X, Srinivasan R, Arnold J, et al. Simultaneous calibration of surface flow and baseflow simulations: A revisit of the SWAT model calibration framework [J]. Hydrological Processes, 2011,25(14):2313-2320.
- [48] Scanlon T M, Raffensperger J P, Hornberger G M, et al. Shallow subsurface storm flow in a forested headwater catchment: Observations and modeling using a modified TOPMODEL [J]. Water Resources Research, 2000,36(9):2575-2586.
- [49] 文佩. 基流分割及基于改进 TOPMODEL 径流模拟 [D]. 南京:河海大学,2006.
- [50] 李超群,郭生练,张俊,等. 利用 Horton 下渗曲线改进 TOPMODEL 模型的基流模拟[J]. 水文,2009,29(1):4-7.
- [51] 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.
- [52] Dincer T, Payne B R, Florkowski T, et al. Snowmelt runoff from measurements of tritium and oxygen-18 [J]. Water Resources Research, 1970,6(1):110-124.
- [53] 瞿思敏,包为民,石朋,等. 同位素流量过程线分割研究进展与展望[J]. 水电能源科学,2006,24(1):80-83.
- [54] Tetzlaff D, Soulsby C. Sources of baseflow in larger catchments; Using tracers to develop a holistic understanding of runoff generation [J]. Journal of Hydrology, 2008,359(3):287-302.
- [55] McDonnell J J, Bonell M, Stewart M K, et al. Deuterium variations in storm rainfall: Implications for stream hydrograph separation [J]. Water Resources Research, 1990,26(3):455-458.
- [56] Semenov M Y, Zimnik E A. A three-component hydrograph separation based on relationship between organic and inorganic component concentrations: A case study in Eastern Siberia, Russia [J]. Environmental Earth Sciences, 2015,73(2):611-620.
- [57] Wu Yanqing, Wen Xiaohu, Zhang Yexin. Analysis of the exchange of groundwater and river water by using Radon-222 in the middle Heihe Basin of Northwestern China [J]. Environmental Geology, 2004,45(5):647-653.
- [58] 陈宗宇,万力,聂振龙,等. 利用稳定同位素识别黑河流域地上水的补给来源[J]. 水文地质工程地质,2006,33(6):9-14.
- [59] Yang Yonggang, Xiao Honglang, Wei Yongping, et al. Hydrological processes in the different landscape zones of alpine cold regions in the wet season, combining isotopic and hydrochemical tracers [J]. Hydrological Processes, 2012,26(10):1457-1466.
- [60] Mazvimavi D, Meijerink A M J, Stein A. Prediction of base flows from basin characteristics: A case study from Zimbabwe [J]. Hydrological Sciences Journal, 2004,49(4):703-715.
- [61] 郭军庭,张志强,王盛萍,等. 黄土丘陵沟壑区小流域基流特点及其影响因子分析[J]. 水土保持通报,2011,31(1):87-92.