

不同基流分割方法在秦淮河流域的应用^①

郝璐¹, 李素云¹, 孙磊², 方荻¹, 秦孟晟¹

1. 南京信息工程大学 应用气象学院/江苏省农业气象重点实验室, 南京 210044;

2. 扬中市气象局, 江苏 镇江 212213

摘要: 基流可以反映流域地下水的变化过程, 是研究流域水量平衡、地下水对气候变化与人类活动响应及预测的关键因子, 因此选择合适的基流分离方法对研究流域内地下水变化特征有着重要的意义. 本文基于秦淮河流域定门闸实测逐日流量数据, 选用数字滤波法、基流指数法(BFI)和 HYSEP 法 3 类 6 种基流分割法对流量的基流部分进行了分离. 结果表明: 6 种方法均可以实现对基流的自动分割, 方法较为简便, 可以克服人工法的主观性, 但是得到的基流过程线却有一定差异. HYSEP 法中固定步长法和滑动步长法分割出的基流过程基本没有反映出汛期径流随地下水流动过程消退的现象, 与径流曲线的变化情况对应较差; BFI 法虽能够实现地下径流的自动分割, 但是不能很好地反映真实的产汇流规律; 而数字滤波法和局部最小值法得到的基流过程线更为平滑, 更加符合水文气象学中降雨—径流在流域汇流时的阻尼和迟滞效应. 总之, 从极值比、变幅和基流过程变化而言, 数字滤波法标准差较小, 分割结果较为稳定, 且其基流分割过程线更加合理, 是 6 种方法中较为可靠的分割方法, 更适用于秦淮河流域的基流分割. 运用数字滤波法对秦淮河流域近十年基流进行分析, 结果表明, 流域的年基流指数均大于 0.35 且呈现增长趋势.

关键词: 基流分割; 数字滤波法; BFI 法; HYSEP 法; 秦淮河流域

中图分类号: P333; P461⁺.5

文献标志码: A

文章编号: 1000-5471(2019)01-0062-08

基流是河川中比较稳定的径流成分, 通常认为地下径流是枯水季节河流的基本流量, 故称其为基流^[1-2]. 基流作为地下水和其他延迟的水资源补给河川径流的部分水量, 在河流的补给和流域生态的维持方面有着重要的作用; 枯水季节, 流域降水补给已终止或减少, 而基流的存在可以有效地防止因为河道萎缩或断流造成的生态系统的破坏, 保证河流湖泊基本的生态环境功能^[3]; 同时, 基流在水资源安全、水资源评价、水资源调控和管理、侵蚀产沙模拟和降雨—径流关系模拟等研究中都有重要作用^[4-6]; 此外, 对基流的准确分离和估算还能用来校正和验证具有物理机制的水文模型.

基流分割是水文学的基础内容. 由于基流无法通过实验方法测得, 学者们根据不同研究区域水文地质条件、气候条件和产流过程的差异, 相应地提出了不同的基流分割方法. 按照原理的差异, 基流的计算方法主要包括图解法、同位素法、数值模拟法^[7-8]、数学物理法、水文模型法^[9-10]. 图解法虽然是基流分割的基本方法, 但是主观性太强, 结果不具备重复操作检验的条件; 同位素法可操作性强, 但是会污染目标水体; 数学物理法和水文模型法物理意义明确, 可信度高, 但是所需参数较多, 操作极为复杂; 而数值模拟法是随着计算机技术的进步而涌现出来的基流分割方法, 包括数字滤波法、BFI 法和 HYSEP 法等, 其结果满足基流所应具备的特征, 具有客观、可重复、易操作等特点, 虽然其物理意义不明, 但已得到广泛的运用. 受降水条件差异的影响, 国内南北方的基流分割方法有着明显不同的适用性. 北方地区 BFI 法和数字滤波法更为准确和稳定, 左海凤等^[11]采用直线斜割法和 BFI 法对汾河流域进行基流分割, 认为 BFI 法可以

① 收稿日期: 2018-04-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(41571026, 41877151); 南京信息工程大学大学生实践创新训练计划项目(201710300135).

作者简介: 郝璐(1970-), 女, 博士, 研究员, 主要从事气候变化与环境演变研究.

更为简便地获得更为准确的结果; 雷泳南等^[12]采用数值模拟法计算以窟野河流域为代表的黄土高原风蚀交错区基流, 其结果远远好于作图等原始方法; 林学钰等^[13]采用 BFI 法估算黄河流域的基流量来研究地下水可再生能力变化规律, 从而制定黄河流域水资源管理方案; 王燕等^[14]采用 7 种方法对渭河流域进行基流分割时认为数字滤波法中的 F1 法和 F2 法最为稳定可靠. 相比之下, 南方降雨量较多的地方则更加倾向于数字滤波法. 段琪彩等^[15]采用数字滤波法分割松华坝水源地径流区基流, 用来研究流域内水源涵养能力; 黄国如^[16]以东江流域的子流域为例, 对 BFI 法、HYSEP 法和滤波法等数值模拟法进行了探讨, 认为数字滤波法的基流过程更加符合降水退水规律, 更加符合实际; 崔玉洁等^[17]利用数字滤波法对香溪河流域径流总量进行分割, 获取了最符合流域水文特点的滤波参数; 董晓华等^[18]采用平滑最小值法和数字滤波法对三峡水库的日入库流量进行基流分割, 认为数字滤波法所得径流曲线更加符合退水段的规律. 数值模拟法的适用性虽已得到广泛认可, 但各类基流的分割方法缺乏普适性. 基流分割结果的判断除了考虑基流指数这一指标外, 还需要考虑过程曲线是否符合产流机制和退水过程, 所以究竟哪种分割方法最适合研究区域, 还要进一步分析.

秦淮河流域内, 土壤、地形以及植被十分多样复杂. 南京市近几十年来发展迅速, 城市化进程很快, 但林地和耕地不断减少, 工程用地与裸地不断增加, 再加上流域内暴雨过程频繁, 河道的含沙量逐日增多^[19], 使得流域内的水土保持面临着极大的考验. 本文利用秦淮河逐日径流数据, 探讨了不同基流分割方法的适应性, 为水文水资源的研究以及水土保持的政策提供支持.

1 研究区概况及数据来源

秦淮河流域地处长江下游, 位于江苏省西南部, 由盆地四周向中心依次为黄土岗地、丘陵和平原圩区, 地面高程 0~410 m, 水系全长约 110 km, 干流长约 34 km, 流域集水面积约为 2 631 km², 年均径流量为 6.95×10⁸ m³; 上游包括溧水河(南源)、句容河(北源), 两源于江宁区西北村汇合为秦淮河, 通过西北角南京市秦淮新河水文站和武定门水文站两个出水口汇入长江. 该流域地理位置位于 118.39°—119.21°E, 31.30°—32.10°N 间(图 1), 地处华东发达地区, 包括大部分南京城区、江宁县、句容市和溧水县; 近几十年城市化进程加快, 经济快速发展, 流域耕地及农用地大量减少, 城市用地大幅增加, 不透水面积增长近 4 倍, 流域水土流失和水质污染等问题日益突出.

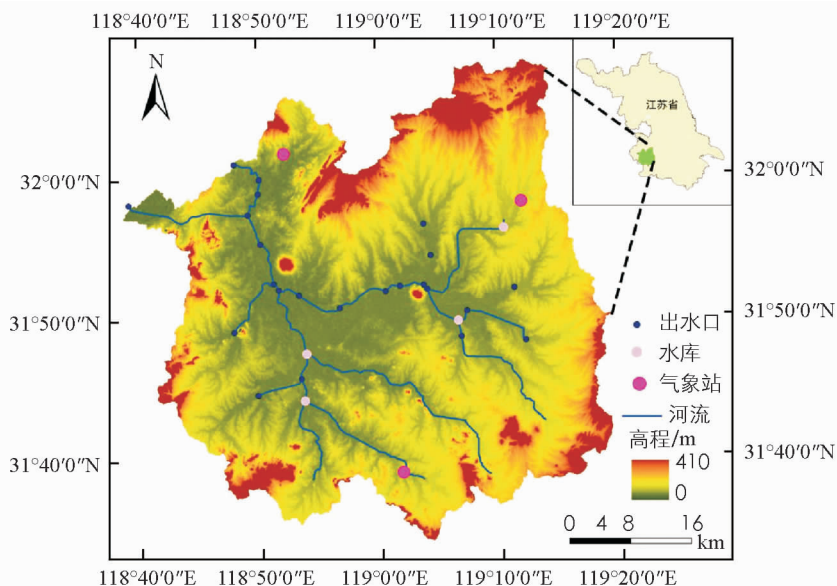


图 1 基于 DEM 的秦淮河流域水系分布图

此外, 该流域位于北亚热带向中亚热带的过渡带, 雨热同季, 光照充足, 年均日照可达 2 240 h, 年均气温为 15.4 °C; 受全球气候变暖的影响, 年均气温以每年 0.44 °C 的速度增长; 多年平均降水量为 1 116 mm, 其中 75% 的降水量来自 4—10 月. 本文的水文数据来源于秦淮河武定门闸 2000—2013 年的逐

日径流实测数据, 其中, 2004 年与 2007 年的数据缺失较多未被采用。

2 基流分割方法

2.1 数字滤波法

数字滤波法源于信号分析, Nathan 等^[20]于 1990 年首次将这种技术应用于水文研究中。其原理是用高频信号模拟直接径流, 用低频信号模拟基流。河川径流可视为由直接径流和基流两部分组成, 利用信号处理技术将低频信号从高频信号中分离, 将基流从径流的序列中分割出来。数字滤波法有单参数滤波法和双参数滤波法(又称递归数字滤波法)两种^[21-23]。至今, 共提出 4 种数字滤波法的方程, 本文采用了 1990 年 Nathan 提出的单参数数字滤波方程:

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

基流为:

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

式中: q_t 为 t 时刻地表径流; Q_t 为 t 时刻实测河川径流量; b_t 为 t 时刻的基流; t 为时间(单位为日); β 为滤波参数, 影响基流衰减度, 一般取值为 0.9~0.95, 在降水量 600~1 100 mm 的地区取值为 0.925, 高于或低于这个区域的取值分别减小或降低 2%, 本文取值 0.925^[24-26]; 崔玉洁等^[17]对香溪河流域基流分割的研究结果表明, 在数字滤波法中采用正一反一正 3 次滤波的基流分割方法结果最优, 本文即采用此类滤波法。此方法不具备特殊的物理意义, 仅从数值上分割直接径流和基流, 但能利用长时间径流资料计算基流, 分析地下水对河流的贡献随时间的变化, 具有良好的可重复性^[27]。

2.2 BFI 法

基流指数(BFI)法也称为最小滑动法, 其基本原理是将每年按 N 天为一个时段进行划分(划分为 365/ N 个时段), 确定每一时段内的最小流量, 如果某时段最小流量的一定比例值小于左右相邻时段内的最小流量值, 则确定其为拐点, 将各拐点直线连接, 得出基流过程线, 过程线下方的面积确定为该年基流量。BFI 法主要有标准 BFI(f)法和改进 BFI(k)法两种, 两种方法的区别就是拐点参数取值不同, 在分割过程中, 两参数分别取经验值 0.9 和 0.979 15^[24-26]。BFI 程序最早由 Wels 等人编写, 适宜处理大量数据, 并进行长时间序列基流量的自动估算, 建立在多年数据基础上的年基流指数具有可信度, 因此对基流趋势分析非常有用, 同时利用程序可输出拐点、河川日基流量及日流量等信息, 便于进一步分析基流量的年内分配; 在分水岭附近地区, 以及发生暴雨事件或者观测点流量受水库放水等上游调控的情况下, BFI 程序需要进行人为校正^[21]。

分割前首先需要确定程序计算所需的两个参数: 一是参数 N , 依据最小流量选择原理, 确定划分每个水文年的单位时段, 即 N 值, 其对基流结果有较大影响; 二是拐点调试参数, 其值在给定 N 值的情况下将有限地调整基流过程线的退水和涨水的倾斜度, 拐点参数值的变化对基流结果影响无统计学意义。本文从径流数据的完整性和径流大小的特性考虑, 选取武定门闸 2006 年、2011 年和 2012 年分别作为枯水年、平水年、丰水年来进行基流指数与 N 值的关系分析(图 2), 可以看到, BFI 值均随 N 值增大而减小, 2006 年和 2011 年 $N=5$ 时, 基流指数曲线趋于平缓, 而 2012 年 $N=8$ 时, 基流指数才趋于平缓, 因此本文取 $N=8$, 即以 8 天为间隔进行基流的分割。

2.3 HYSEP 法

HYSEP 法^[22-23]是由美国地质调查局推荐使用的基流计算方法, 由 Petty john 于 1979 年提出。

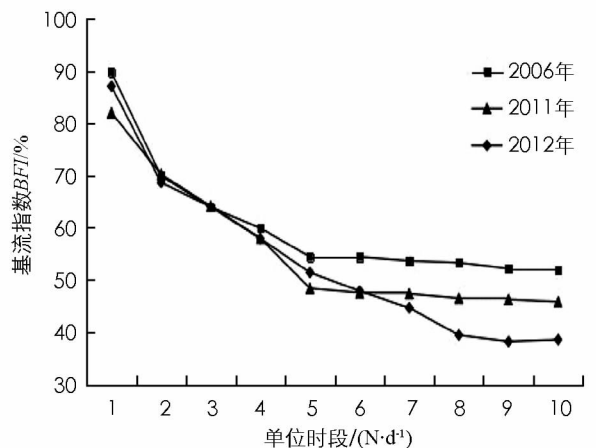


图 2 基流指数与 N 值关系(武定门闸)

此法首次实现了基流的计算程序化. 首先利用经验公式计算退水时间:

$$n = (2.59 A)^{0.2} \quad (3)$$

式中: n 为地表径流过程停滞后的退水时间(d); A 为流域面积(km^2); 用于计算基流的步长 T 为介于 3~11 之间与 $2n$ 最为接近的奇数, 然后利用步长进行基流计算. 秦淮河流域面积为 $2\,631\text{ km}^2$, 因此 n 为 5.99, T 为 11.

HYSEP 法主要分为固定步长法、滑动步长法和局部最小值法 3 种. 固定步长法: 在上文所取时间间隔内, 将该时间间隔内的最小流量作为该时段内任意一天的基流; 滑动步长法: 将某天前后 $(2n-1)/2$ d 内的最小流量作为当天的基流, 以此类推, 算出每一天的基流; 局部最小值法: 选择时间步长内中心点前后 $(2n-1)/2$ d 内的最小流量作为相邻时间步长内中心点的基流. 此 3 种方法都以本次计算的终点当作下次计算的起点, 重复过程, 可以得到基流分割结果.

3 结果与分析

3.1 基流计算结果对比

在基流计算中, 一般以基流占总径流量的比例即基流指数(BFI)来量化. 由于径流数据的部分缺失, 为了保证能够有充足的数据进行基流分析, 让结果更加具有代表性, 本文将数据划分为 4 个时间段进行处理分析, 利用 6 种基流分割法所得的各年代际基流指数计算结果如表 1 所示.

表 1 6 种基流分割方法计算的 BFI 值

年份	数字滤波法	BFI(f)	BFI(k)	HYSEP 法		
				固定步长法	滑动步长法	局部最小值法
2000—2002	0.410 8	0.348 3	0.352 9	0.411 5	0.431 2	0.333 1
2003, 2005—2006	0.446 9	0.381 6	0.381 1	0.440 1	0.468 2	0.351 7
2008—2010	0.457 2	0.438 7	0.417 4	0.485 4	0.510 8	0.427 5
2011—2013	0.460 3	0.421 4	0.428 6	0.510 2	0.518 6	0.416 9
多年平均	0.443 8	0.397 5	0.395 0	0.461 8	0.482 8	0.382 3

从表 1 可以看出, 在秦淮河流域基流占径流的比例较小; 各种方法计算得出的基流指数相差较大, 介于 0.33 至 0.52 之间, 尤其是在不同方法体系下的结果, 差别尤为明显; 从多年平均结果来看, HYSEP 法中固定步长法和滑动步长法的 BFI 值最大, 分别为 0.461 8 和 0.482 8; BFI(f), BFI(k) 和局部最小值法 3 种方法计算的结果较小, 介于 0.382 3 到 0.397 5 之间, 且前两种方法的结果基本相同; 数字滤波法得出的结果在数值上较为适中, 取值 0.443 8, 6 种方法的结果在不同年代际也展现出相同的特征; 不同年代际计算出的 BFI 值差异较大, 结果较不稳定.

为了分析不同分割方法基流分割结果的稳定性, 计算了 6 种方法的基流指数标准差、极值和极值比等统计值, 结果如表 2 所示. 从极值比来看, 数字滤波法比值最小, 其他各基流分割方法的差异较小, 说明其年代际变化较小, 并没有太大的差异; 从不同分割方法的标准差来看, 6 种方法的差异不大但数字滤波法的标准差最小, 仅为 0.022 7, 这表明数字滤波法最为稳定, 计算流域基流的能力最为平稳; HYSEP 法中的局部最小值法所得的标准差值最大.

秦淮河流域降水集中且暴雨较多而 HYSEP 法和 BFI 法的分割原理都是寻找一段时间内的最小径流量来分割, 在降水量变化剧烈的时段, 划入基流的径流量较少, 相应的基流指数也较小; HYSEP 法和 BFI 法分割得到的基流指数标准差大, 反映出这两类方法与数字滤波法相比, 对地表径流的变化较不敏感.

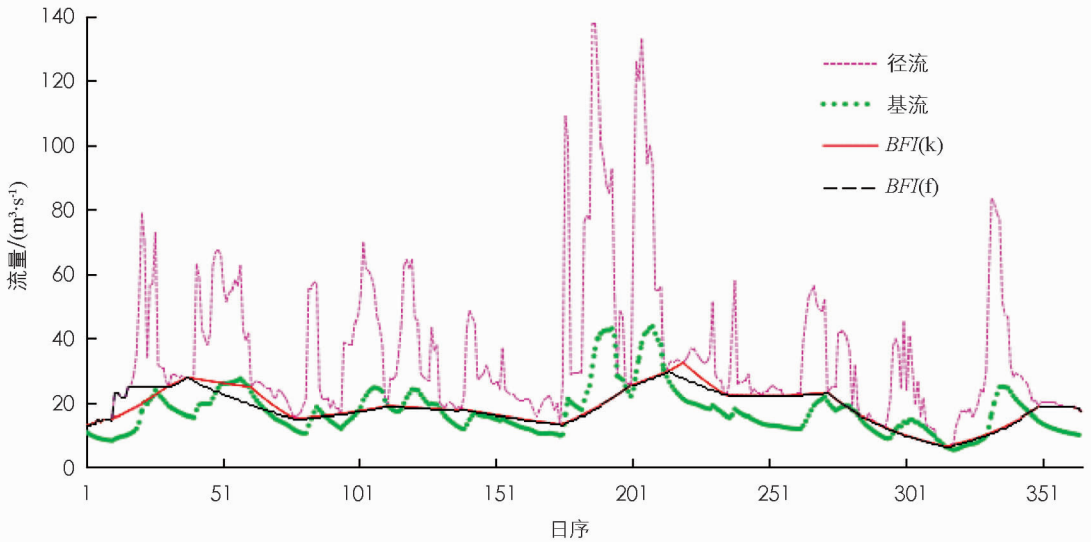
表 2 6 种基流分割方法计算的基流指数统计值

统计值	数字滤波法	BFI(f)	BFI(k)	HYSEP 法		
				固定步长法	滑动步长法	局部最小值法
最大值	0.460 3	0.438 7	0.428 6	0.510 2	0.518 6	0.427 5
最小值	0.410 8	0.348 3	0.352 9	0.411 5	0.431 2	0.333 1
极值比	1.120 5	1.259 5	1.214 5	1.239 8	1.202 6	1.283 4
标准差	0.022 7	0.040 6	0.034 6	0.044 3	0.040 6	0.046 9

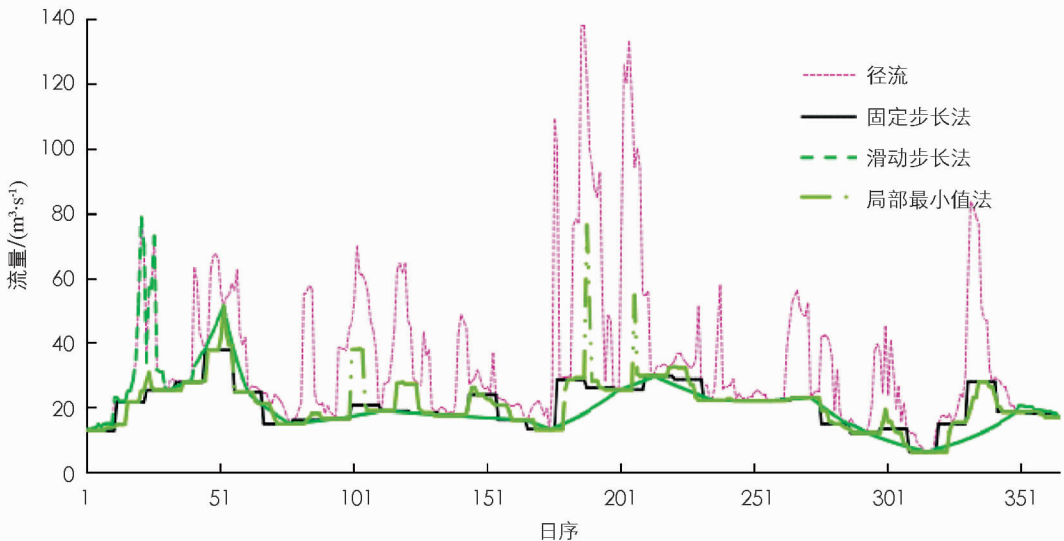
3.2 基流分割过程对比

为了进一步了解各种基流分割方法所获得的基流分割过程的特点,选取了 6 种分割方法结果中 2006 年基流过程(图 3).可以看出,几种方法均可以实现对基流的自动分割,方法较为简便,但是得到的基流过程线却有一定差异. HYSEP 法中局部最小值法在日序小于 30 时曲线与径流基本重合,而在日序大于 30 时以后表现为一系列折线;固定步长法的基流过程表现为一系列水平直线;滑动步长法的基流过程相对平滑,但出现许多折点且所得基流结果是 6 种方法中最大的. BFI 两种方法处理的结果均由折线段组成,许多拐点不够平滑,这主要是由平滑最小值法对径流序列在处理时采用了线性内插的方式决定的,与局部最小值法类似,这 3 种方法虽然能够实现地下径流的自动分割,但是不能很好地反映真实的产汇流规律.

较为平滑且可以初步反映基流基本过程的只有数字滤波法和滑动步长法.进一步分析,当流域进入汛期发生强降水时,观察这两种方法的基流过程曲线,滑动步长法只能反映出部分汛期,且其过程曲线与径流曲线在汛期变化太过一致,这说明其结果并不符合水文学中降雨径流在流域汇流时的阻尼和迟滞效应.反观数字滤波法,其很好地反映了涨潮期基流曲线变化的幅度,以及衰退期随着时间的推移而逐渐衰退的过程,符合流域降雨径流过程演变的物理本质,比较接近实际的退水过程.



(a) 数字滤波法、BFI(f)与BFI(k)法



(b) HYSEP法, 包括固定步长法、滑动步长法与局部最小值法

图 3 基于 6 种基流分割方法对 2006 年基流分割过程图

3.3 秦淮河流域基流变化特征

采用数字滤波法, 对秦淮河流域 2000—2013 年(除去 2004 年和 2007 年)武定门闸站的基流进行分割, 基流指数与径流的年变化曲线如图 4 所示. 图中径流曲线在 2005 年出现峰值是因为该年的径流资料不全, 只有汛期及汛期后的径流数据, 导致算出来的径流值严重偏大不能作为正常值比较; 径流在研究期内存在较弱的增加趋势; 多年平均基流指数(BFI)都大于 0.35, 表明基流是河川的重要组成部分; 虽然基流指数存在很大的波动, 但是总体而言呈现增加趋势, 这说明地下水补给的部分所占比例在增加, 因此可以认为, 基流也是呈现上升趋势的. 这与秦淮河流域地下水观测的变化趋势是一致的^[18].

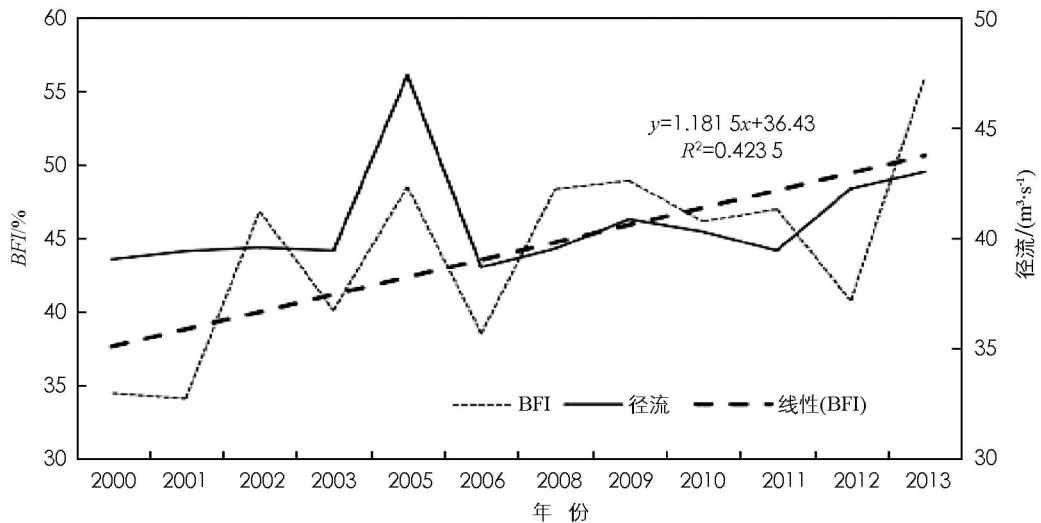


图 4 秦淮河流域基流指数与流量变化图

4 结论与讨论

基流无法通过实测获得, 仅能从其年际和年内变化角度探讨其适应性和稳定性. 目前为止还没有一个公认且适用于所有流域的径流分割方法, 而在秦淮河流域对于基流分割的研究较少. 本文利用秦淮河流域武定门闸实测逐日径流数据, 选用数字滤波法、BFI法和 HYSEP法 3类 6种基流分割法对秦淮河进行分割, 得到如下结论:

1) 6种方法得到的基流指数相差较大, 多年来 HYSEP法中的固定步长法和滑动步长法得到的结果数值最大, 分别是 0.4625 和 0.4825; 其次是数字滤波法, 结果为 0.4450; BFI法和局部最小值法得到的结果数值最小.

2) 对比 6种方法所得基流的数学统计值来分析各种方法的稳定性, 从极值比来看, 6种方法差异不大; 从标准差来看, 数字滤波法的基流分割结果最为稳定, 而局部最小值法标准差值最大, 不同年份基流分割结果差异不大.

3) 对比 6种方法的基流分割过程发现, 数字滤波法得到的过程线最为平滑, 能较好地反映汛期径流随地下水过程消退的现象, 更加符合水文气象学中降雨—径流在流域汇流时的阻尼和迟滞效应.

4) 秦淮河流域基流指数总体较高, 年均大于 0.35, 且近年来呈现增长趋势.

综上所述, 综合考虑极值比、变幅和基流过程变化, 数字滤波法更为适合秦淮河流域的基流分割, 可以为秦淮河基流研究提供一种较为适宜的计算方法. 基流量取决于流域的气候、地形地貌和地质水文等条件^[16], 虽然数字滤波等方法并没有明确的物理意义, 但是利用数字滤波等方法分割基流, 并以此校准具有物理机制的生态水文模型, 可以为进一步模拟解释秦淮河流域气候变化、地形地貌、水文地质条件, 以及土地利用/覆被等人类活动因素对基流变化的影响提供帮助. 除此之外, 结合水文非线性系统方法与分布式水文模拟, 能够在水文资料信息不完全或者有不稳定性干扰条件下完成分布式水文模拟, 也是一种分析人类活动影响的有益工具^[10].

参考文献:

- [1] 张 华, 张 勃, 赵传燕. 黑河上游多年基流变化及其原因分析 [J]. 地理研究, 2011, 30(8): 1421-1430.
- [2] MWAKALILA S, FEYEN J, WYSEURE G. The Influence of Physical Catchment Properties on Baseflow in Semi-Arid Environments [J]. Journal of Arid Environments, 2002, 52(2): 245-258.
- [3] 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.
- [4] 陈利群, 刘昌明, 郝芳华, 等. 黄河源区基流变化及影响因子分析 [J]. 冰川冻土, 2006, 28(2): 141-148.
- [5] ABDULLA F A, LETTENBDULLA D P, LIANG X. Estimation of the ARNO Model Baseflow Parameters Using Daily Streamflow Data [J]. Journal of Hydrology, 1999, 222(1-4): 37-54.
- [6] 许有鹏, 石 怡, 都金康. 秦淮河流域城市化对水文水资源影响: 首届中国湖泊论坛论文集 [C]. 南京: 东南大学出版社, 2011.
- [7] 钱开铸, 吕京京, 陈 婷, 等. 基流计算方法的进展与应用 [J]. 水文地质工程地质, 2011, 38(4): 20-25.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 夏 军, 叶爱中, 乔云峰, 等. 黄河无定河流域分布式时变增益水文模型的应用研究 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2007, 15(4): 457-465.
- [11] 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——以汾河流域河岔水文站为例 [J]. 水文, 2007, 27(1): 69-71.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 王 燕, 赵雪花, 张永波, 等. 不同基流分割方法在渭河流域的应用对比分析 [J]. 水力发电, 2017, 43(2): 15-17, 80.
- [15] 段琪彩, 方绍东, 王 杰, 等. 昆明市松华坝水源地水源涵养能力时空变化研究 [J]. 中国农村水利水电, 2012(10): 170-173.
- [16] 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.
- [17] 崔玉洁, 刘德富, 宋林旭, 等. 数字滤波法在三峡库区香溪河流域基流分割中的应用 [J]. 水文, 2011, 31(6): 18-23.
- [18] 董晓华, 邓 霞, 薄会娟, 等. 平滑最小值法与数字滤波法在流域径流分割中的应用比较 [J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2010, 32(2): 1-4.
- [19] HAO L, SUN G, LIU Y, et al. Urbanization Dramatically Altered the Water Balances of a Paddy Field-Dominated Basin in Southern China [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2015, 19(7): 3319-3331.
- [20] NATHAN R J, MCMHON T A. Evaluation of Automated Techniques for Base-Flow and Recession Analyses [J]. Water Resources Research, 1990, 26(7): 1465-1473.
- [21] HUGHES D A, HANNART P, WATKINS D. Continuous Base-Flow Separation from Time Series of Daily and Monthly Stream Flow Data [J]. Water Research Commission, 2003, 29(1): 43-48.
- [22] 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): 21-28.
- [23] 张 革, 刘德富, 宋林旭, 等. 不同基流分割方法在香溪河流域的应用对比研究 [J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22(2): 164-171.
- [24] 杨 蕊, 王 龙, 韩春玲. 9 种基流分割方法在南盘江上游的应用对比 [J]. 云南农业大学学报(自然科学版), 2013, 28(5): 707-712.
- [25] 李 瑞, 张士锋. 两种自动基流分割方法在干旱半干旱地区的对比研究 [J]. 地理科学进展, 2017, 36(7): 864-872.
- [26] 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, 330.
- [27] 王 冠, 鲁程鹏, 李姝蕾, 等. 五种基流分割方法在长江螺山站的应用对比研究 [J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(3): 118-123.

On Application of Different Base Flow Separation Methods in Qinhuai River Basin

HAO Lu¹, LI Su-yun¹,
SUN Lei², FANG Di¹, QIN Meng-sheng¹

1. College of Applied Meteorology / Key Laboratory of Agricultural Meteorology in Jiangsu,

Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;

2. Yangzhong Meteorological Bureau, Zhenjiang Jiangsu 212213, China

Abstract: The base flow is a key factor to study the water balance. The response and prediction of groundwater to climate change and human activities could reflect the change process of groundwater in the basin. Therefore, choosing an appropriate base flow separation method has great significance to study the characteristics of groundwater changes in the basin. Based on the measured daily flow data of Wuding River Gate in Qinhuai River Basin, six kinds of basic flow segmentation methods have been chosen in this paper: digital filtering method, base flow index method (BFI) and HYSEP method to separate the basic flow. The results show that the six methods can realize the automatic segmentation of the base flow, which is simple and can overcome the subjectivity of the artificial method, but the process has some differences. Fixed step and the sliding step method in the HYSEP basically does not reflect the phenomenon that the runoff in the flood season subsides with the groundwater process, and corresponds to the change of the runoff curve; The BFI can achieve the subsurface runoff automatic segmentation, However, this method does not reflect the true law of production and sink flow; We found the basic flow process lines obtained by the digital filter and the local minimum method are smooth. The digital filtering method has a smaller standard deviation, the segmentation result is more stable and reasonable. Compared with other methods, it is more suitable for the base flow segmentation in Qinhuai River Basin. The results show that the annual base flow index of the watershed was greater than 0.35 and has an increasing trend.

Key words: base flow; digital filter method; BFI method; HYSEP method; Qinhuai River Basin

责任编辑 包颖