

长江螺山站 50 年来基流演变趋势分析

李姝蕾¹, 鲁程鹏¹, 李伟^{1,2,3}, 陈帅¹, 王冠¹

(1. 河海大学 水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 国土资源部地裂缝地质灾害重点实验室, 江苏 南京 210018; 3. 江苏省地质调查研究院, 江苏 南京 210018)

摘要: 基流是枯水期河川径流量的主要补给来源,合理确定基流过程及其演变趋势在水资源、水环境和水安全的管理中都有着重要的意义。本文选用 HYSEP 法对长江螺山站 1965-2011 年的逐日流量过程进行了基流分割,得到了螺山站基流过程,选用 M-K 趋势检验法分析了总径流量、基流量及基流指数(BFI)值的年际变化。结果表明:螺山站多年平均 BFI 为 0.83;近 50 年来,年均径流和基流都呈现显著下降趋势;年均降水量和基流指数分别表现出下降和上升趋势,但趋势并不显著;径流年内分配不均,且主要集中在 4-9 月,基流表现为 1-7 月份增加,8-12 月份减少;BFI 年内则呈 1-4 月下降,10-12 月上升的变化趋势;人类活动和上游洞庭湖的调蓄作用可能是影响螺山站基流过程的主要原因。

关键词: 基流分割; 基流演变趋势; 径流; HYSEP 法; 长江螺山站

中图分类号: P333.1 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2015)05-0128-04

Analysis of evolution trend of base flow in Luoshan hydrology station of Yangtze river in past 50 years

LI Shulei¹, LU Chengpeng¹, LI Wei^{1,2,3}, CHEN Shuai¹, WANG Guan¹

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Key Laboratory for Earth Fissures Geological Disaster of MLR, Nanjing 210018, China; 3. Geological Survey of Jiangsu Province, Nanjing, 210018, China)

Abstract: Base flow is the main supply source of river runoff in dry season. The reasonable determination of baseflow process and its evolution trend is of great significance in water resources, water environment and water safety management. This paper used HYSEP to perform the base flow separation from 1965 to 2011 for the Luoshan station of Yangtze river, and got the base flow of Luoshan station. It chose M-K (Mann-Kendall) analysis method to identify the trend of interannual and annual average runoff, base flow and base flow index distribution. The results indicate that the base flow index is 0.83 at Luoshan station. During the past 50 years, the runoff and base flow decreased; the yearly average rainfall and BFI value show the falling and rising trend respectively but the trend is not significant; the runoff is uneven in a year and mainly concentrates from April to September. Base flow is increased from January to July and reduced from August to December; BFI decreases from January to April and ascends from October to December. The main reasons that impact the process of base flow at Luoshan station may be the human activities and storage function of upstream of Dongting lake.

Key words: base flow separation; evolution trend of base flow; run off; HYSEP method; Luoshan station of Yangtze river

基流是多数河流枯水期河川径流的主要补给来源,是维持河流生态健康的基本流量^[1]。基流对区域水资源可持续开发利用、维系流域生态环境健康

都具有重要意义。不同研究领域对基流的概念有着各自的理解,尚未有统一的定义。本研究从水文学研究的角度出发,认为基流的定义为除地面径流以

收稿日期:2015-03-25; 修回日期:2015-04-09

基金项目:国家自然科学基金项目(41201029); 高等学校博士学科点专项科研基金(20120094120019); 河海大学国家级大学生创新训练项目(201410294004)

作者简介:李姝蕾(1993-),女,河南郑州人,本科生,研究方向:地下水数值模拟及开发利用。

通讯作者:鲁程鹏(1984-),男,安徽肥东人,博士,副教授,主要从事地表水与地下水相互作用、地下水数值模拟研究。

外的径流量。基流分割方法是基流研究中的一个重要科学问题,而目前国内外已有许多成熟并且广泛应用的方法,这其中包括:图解法^[2],水量平衡法^[2],同位素^[2]法,数字滤波法^[2-4],基流指数法(BFI)^[1-3]及HYSEP法等。

螺山站是一个长江中游干流主要水文测站之一,此站洪水流量过程特征为历时短且洪量大,水位流量关系主要受上游洪水涨落和下游回水顶托影响^[5]。此外,由于基流过程不仅受到流域地形地貌,包气带和含水层介质的影响,人类活动对下垫面也将会产生重要改变,进而影响基流过程和基流指数。本文以长江中游螺山站为研究对象,选用HYSEP法中的局部最小值法,对具有连续、长序列的流量过程进行分割,采用Mann-Kendall趋势检验方法定量分析该站50年来基流年际变化趋势,并探讨基流演变的原因。

1 数据及研究方法

1.1 数据

本文选用螺山站1965-2011年的水位、流量及降水量资料,其中1988-2000年资料缺失(缺失年份的数据变化趋势在本研究中不予讨论),数据摘自长江流域的《中国人民共和国水文年鉴》。

1.2 研究方法

1.2.1 HYSEP法简介 HYSEP法是USGS推荐使用的基流分割法。包括局部最小值法(Localmin)、固定步长法(Fixed)和滑动步长法(Slide)3种计算方法。此法计算时重要参数 t 为地表径流停止后径流过程的退水时间,通常取最接近2 t 、介于3到11之间的奇数来确定时间间隔长度。 $t = (2.95A)^{0.2}$,式中 A 为流域面积,km²。通过计算,得到年基流量与总径流量的比值(Base Flow Index, BFI),该比值称为基流指数,是描述河川基流量的重要指标^[2-6]。

1.2.2 基流分割方法的选择 本次研究中选择基流分割方法的原则包括以下两个方面:

(1)分割的基流过程应该符合产流的物理机制;

(2)分割出的基流指数在年际和年内的变化范围合理。一般来说,同一站点的基流指数年际变化过小不能体现出具体年份的差异性,过大不能保证结果的可靠性,即BFI的值需较为稳定,这样才能保证选择的基流分割方法相对可靠,计算结果才能有更高的可信度与研究意义。这里以1977年长江螺山站的流量数据为例,分别采用局部最小值法、固定步长法和滑动步长3种方法计算,比较各种方法计

算结果的异同,基流分割结果如图1所示。

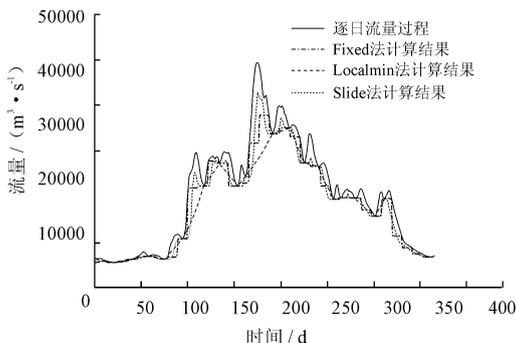


图1 1977年逐日平均流量用3种方法分割的计算结果

固定步长法中将固定时间步长内的基流结果认为是一固定不变的常数,基流曲线则是由这些水平的短线连接而成,因此基流过程不平滑,相比之下并不适宜选用此方法进行数据处理,但是多年基流指数的均方差为0.014,计算结果相对稳定。滑动步长法的基流曲线平滑,与逐日流量过程相似,多年基流指数的均方差最小,为0.010,但是得到的基流指数相比于其他方法偏大,在汛期时基流成分过高与产流机制并不十分相符。局部最小值法采用了线性插值的思路进行分割,基流过程曲线不如滑动步长法平滑,但是基流过程更贴近产流的物理机制。此方法的均方差为0.048,能较好地体现出不同年份的差异,而且BFI的波动在合理的范围内。综上所述本文采用HYSEP法中使用较为广泛的局部最小值法进行分析计算。

1.2.3 趋势分析方法 M-K法(Mann-Kendall)是一个非参数统计检验的方法,主要应用于分析时间序列趋势变化特征,它不仅可以检验出增减趋势,而且可以用数值反映出趋势变化的显著程度。其检验的统计量 S 计算公式如下:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(X_j - X_k) \quad (1)$$

$$\text{sgn}(X_j - X_k) = \begin{cases} +1, & X_j - X_k > 0 \\ 0, & X_j - X_k = 0 \\ -1, & X_j - X_k < 0 \end{cases} \quad (2)$$

当 $n > 10$ 时,统计量 S 近似服从正态分布,方差 $\text{Var}(S) = n(n-1)(2n+5)/18$ 。统计量 Z 的计算方法如下:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (3)$$

Z 为正值代表上升趋势, 负值代表下降趋势, Z 的绝对值分别 ≥ 1.28 、 1.64 、 2.32 时表示通过 90%、95%、99% 置信度显著性检验^[7-9]。

2 研究区概况

长江流域面积达 180 万 km^2 。流域内的地貌类型众多。螺山站建于 1952 年, 位于湖北省洪湖市螺山镇, 处长江荆江与洞庭湖交汇口下游 30.5 km 处, 控制流域面积达 129.5 万 km^2 , 处于长江中游干流, 界牌河上段。控制流域为地势平坦的冲积平原, 河网星罗棋布。部分河段流经山地和丘陵, 河谷宽阔, 阶地发育。地下水主要存在类型为孔隙水, 螺山站毗邻洞庭湖。

螺山控制站年平均气温 $16 \sim 18^\circ\text{C}$, 多年平均降水量为 1 308.7 mm, 年最大降水量 1 935 mm (2002), 年最小降水量 774 mm (1968), 年最大降水量是最小降水量的 2.5 倍。年降水量多集中在每年的 3-8 月, 期间降水量占全年降水量的 69%。

3 结果与分析

3.1 基流计算结果

螺山站年均实测径流量为 6240 亿 m^3/a 。年代基流指数计算结果见表 1。

表 1 螺山站代际基流计算结果

年份	径流量/ (亿 $\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$)	基流量/ (亿 $\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$)	BFI
1965-1969	6580	5310	0.81
1970-1979	6140	5040	0.82
1980-1987	6450	5410	0.84
2001-2009	5450	4410	0.81
2010-2011	5570	4760	0.86
均值	6240	5170	0.83

从计算结果可以看出, 基流指数在 0.81~0.86 之间变化, 平均基流指数是 0.83, 基流占总径流的比重很大。长江流域上中下游各主要测站, 如寸滩站、宜昌站、汉口站、大通站等基流所占总比重同样很大, 整个长江流域的基流指数平均值约在 0.78~0.89 之间变化, 干旱的年份基流的比重更大, 而在降水丰沛的年份地表径流增加从而基流比重下降, 但是基流仍然是主要的成分^[6]。螺山站的平均基流指数 0.83, 此值对比长江干流各大测站的平均基流指数, 处于合理的范围之内。基流指数较大, 一方面是由于螺山站控制流域处于长江中游山地丘陵地区, 地表透水性较强, 有利于降水下渗, 地下水多为

孔隙含水层, 储水能力较好; 另一方面, 测站上游毗邻洞庭湖, 可常年受洞庭湖地区丰沛的地下水补给, 从而进一步增加地下径流在总径流中的比重^[5,10]。

3.2 年际基流变化

长江螺山站年均径流量、基流量和降水量及 BFI 的变化过程及趋势如图 2、3 所示:

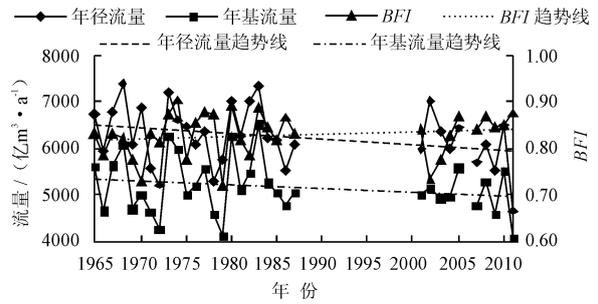


图 2 年均 BFI 、径流量及基流量的年际变化图

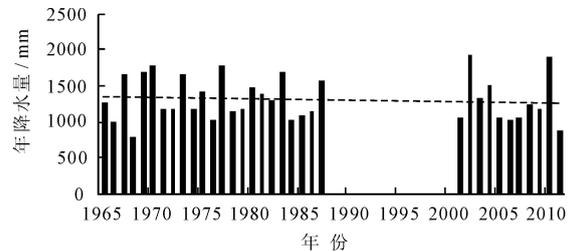


图 3 降水量的年际变化过程及趋势图

由图 2 可知, 年均径流和基流均呈现逐渐下降的趋势, 而基流指数 BFI 的趋势线呈略微上升的趋势。图 3 反映螺山站在 1965-2011 年间, 降水量存在比较显著的年际变化, 总体上呈现略微下降的趋势。本文利用 M-K 趋势检验法对上述各变量的变化趋势进行统计检验, 结果见表 2 所示。

表 2 各统计量 M-K 检验结果

	径流量	基流量	降水量	BFI
Z 值	-2.33***	-1.79**	-0.697	0.73

注: ** 表示通过了 95% 的显著性检验; *** 表示通过了 99% 的显著性检验。

表 2 给出的统计检验结果与图 2 和图 3 所示结果一致, 都指出年均径流量、基流量和降水量呈下降趋势, 年均径流量下降趋势通过了 99% 的置信度检验和基流量的下降趋势通过了 95% 的置信度检验, 说明这两个统计量的下降趋势明显; 而降水量虽呈下降趋势但是并不显著, BFI 的上升趋势同样不显著, 这两个统计量的变化十分稳定。即长江螺山站基流量和年均径流量的年际变化不均, 整体呈下降趋势, 而基流指数 (BFI) 的年际变化并不随之下降而是呈不显著的上升趋势。

图1所示的典型年径流过程与基流过程,以及表2所示的趋势检验结果分析可知,基流是该站总径流的主要成分,基流变化与径流变化趋势相一致。基流产生过程受地形地貌、包气带和含水层介质的差异及人类活动等多方面因素的共同影响。在研究期内地形地貌、包气带和含水层介质的变化在本次研究中认为其变化程度较小,对基流过程的影响也较小;而人类活动在50年间有很大变化,比如城市化加快,森林覆盖减少等人类的活动影响了产流和下渗的不同环节,使得产生的直接径流量和基流量逐渐减少。上游的地下水侧向补给及洞庭湖的调蓄作用使基流量的减少速率低于总径流的减少速率。傍河取水、农业灌溉等一系列相关的人类活动直接影响了径流量。年际降雨量的多少则影响了一年的水位流量变化和总径流的多寡^[11-13]。由于螺山站年际降雨量不同,具有明显的波动特征,因而螺山站的年均径流量和基流量也存在较大的波动。

3.3 年内基流变化分析

该站基流、径流、降水量及BFI的多年平均年内变化如图4。

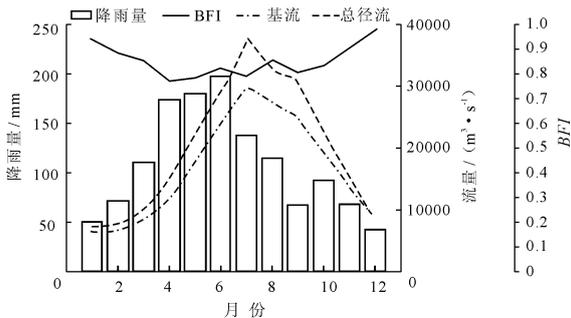


图4 降水量、总径流、基流及BFI值多年平均年内变化图

BFI的数值在枯水期(10-次年4月)要大于丰水期(4-10月),这说明枯水期的河川径流量主要来自基流。螺山站的月平均径流在7月最大,1月最小。这是由于一年内的降雨时程分配不均造成,降水量的峰值先于径流的峰值出现。月平均基流的变化也是1-7月份逐渐增大,7月份达到峰值而后逐渐减少,到1月份减少至最低。BFI值年内分配由1-4月份呈下降趋势,说明1-4月份降雨量逐渐增大地表径流增加,基流比重下降。4-7月份基流指数最小变化稳定,9月份以后又有增加趋势,说明雨季过后随着降雨量的减小,地表径流也在减小。

4 结 语

通过对研究期内流量资料的处理分析结论如下:

(1)HYSEP法的三种方法中局部最小值法更符合螺山站产流机制且计算结果更为合理。

(2)长江中游的螺山站基流占径流比重较大,平均BFI为0.83,表明基流是螺山站径流的重要组成部分。

(3)综合径流、基流和BFI的分析结果,认为人类活动及上游洞庭湖的调蓄作用可能是影响径流、基流和BFI变化的主要原因。

(4)径流、基流及BFI值平均年内变化同时受蒸发过程和降雨过程影响,基流全年变化过程与径流变化趋势一致;在4-9月份期间,降雨相对集中的时段内,地表径流比例较大,而在枯水期内,基流所占比重较丰水期更大。

由于基流过程的影响因素复杂,目前不同分割方法的适用性还未有定论,因此基流分割方法与研究区自然地理状况、人类活动影响等诸多因素之间的关系值得进一步研究。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 徐磊磊,刘敬林,金昌杰,等. 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.
- [3] 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,2013,28(5):707-712.
- [4] 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.
- [5] 林天才,吴世勇,阳立群. 螺山水文站综合单断沙关系分析[J]. 科技信息,2007,34:318-319.
- [6] 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.
- [7] 雷泳南. 窟野河流域河川基流演变特征及其驱动因素分析[D]. 北京:中国科学院,2012.
- [8] 于延胜,陈兴伟. R/S和Mann-Kendall法综合分析水文时间序列未来的趋势特征[J]. 水资源与水工程学报,2008,19(3):41-44.
- [9] 祖明娟,管仪庆,张丹蓉,等. 海流兔河近50年来基流变化特征分析[J]. 水资源与工程学报,2013,24(3):38-42.
- [10] 秦年秀,姜彤,徐崇育. 长江流域径流趋势变化及突变分析[J]. 长江流域资源与环境,2005,14(5):589-594.
- [11] 刘晓黎,黄强,吕玉洁,等. 洮河流域径流变化特征分析[J]. 干旱区资源与环境,2008,22(9):97-101.
- [12] 张伟,闫敏华,陈泮勤. 松嫩平原近50年来生长季降水资源特征分析[J]. 干旱区资源与环境,2007,21(10):73-78.
- [13] 曹辉,黄强,畅建霞,等. 黑河径流时空演变规律分析[J]. 水资源与水工程学报,2008,19(5):69-72.