

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2015.05.002

长江干流朱沱站-大通站基流变化特征

陈 帅, 鲁程鹏, 李姝蕾, 王 冠, 李俊江

(河海大学 水文水资源学院, 南京 210098)

摘要: 基流是河川径流中相对稳定的径流组成部分, 基流分割在水资源、水环境和水安全的管理研究中都有着重要的应用。为了探究沿长江干流的基流变化特征, 使用递归数字滤波法对长江干流7个水文站进行基流分割研究。结果表明, 各站基流指数在0.768~0.798之间。对朱沱站-大通站区间基流量贡献最大的区间是宜昌站-螺山站, 其次是朱沱站-寸滩站, 最小的是万县站-宜昌站。2000年前后, 长江干流基流量出现明显的衰减变化。基流量衰减最大的是宜昌站(衰减率为8.82%), 其次为万县站(衰减率为8.79%)。

关键词: 基流分割; 递归数字滤波法; 长江干流; 空间变化; 年代变化

中图分类号: TV213 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)05-0823-04

Variation characteristics of baseflow between Zhutuo and Datong stations along the mainstream of Yangtze River

CHEN Shuai, LU Cheng-peng, LI Shu-lei, WANG Guan, LI Jun-jiang

(College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Baseflow is a relatively stable component of streamflow, and baseflow separation is widely used in the management and research of water resources, water environment, and water security. In order to investigate the variation of baseflow along the Yangtze River, recursive digital filters method was employed to calculate the baseflow at seven hydrological stations in the main stream of the Yangtze River. The research results showed that the BFI (baseflow index) is between 0.768 and 0.798 at each station. The river reach between Yichang and Luoshan stations has the greatest contribution to the baseflow between Zhutuo and Datong stations, followed by the river reach between Zhutuo and Cuntan stations, and the smallest is the river reach between Yichang and Wanxian stations. Around the year of 2000, the baseflow in the mainstream of the Yangtze River decreased significantly. Baseflow at Yichang station had the highest reduction rate of 8.82%, followed by Wanxian station with a reduction rate of 8.79%.

Key words: baseflow separation; recursive digital filters method; mainstream of Yangtze River; spatial variation; temporal variation

基流是指由前期降水形成的地下水和汇集速度缓慢的壤中流补给形成的河川径流^[1], 是河川径流中比较稳定的组成部分, 也是枯水期河川径流量的主要补给来源。基流不仅在水安全、非点源污染评价、水资源调查和评价、水资源优化配置中有着重要的应用, 而且也是流域产汇流计算的重要研究内容之一^[2]。作为中国第一大河流, 长江的基流指数(BFI, Baseflow Index, 基流与总径流之比)及基流变化特征研究对于流域水安全、水资源调查和评价及水资源优化配置等方面具有重要意义。基流分割的方法众多, 按照计算原理

的差异, 可分为图解法^[3]、水文模型法^[4]、同位素法^[5]、数学物理法及数值模拟法^[6]五种方法^[7], 其中数值模拟法是适用于大规模数据容量的一类自动化处理方法。在本次研究中, 采用数值模拟法中的递归数字滤波法来研究长江干流的基流变化特征^[8]。

1 资料

本次研究以长江朱沱站到大通站河段为研究对象, 中间包括寸滩站、万县站、宜昌站、螺山站和武汉关站, 总计7个

收稿日期: 2014-12-25 修回日期: 2015-08-19 网络出版时间: 2015-09-25

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150925.1023.001.html>

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); 中国博士后科学基金(2013M540410); 河海大学国家级大学生创新训练项目(201410294004)

作者简介: 陈 帅(1992-), 男, 江苏泗洪人, 主要从事地表水与地下水相互作用研究。E-mail: 2277073503@qq.com

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

水文站(见图 1)。采用的资料是 1965 年-2011 年的日平均流量,其中 1987 年-2000 年的资料未收集得到。

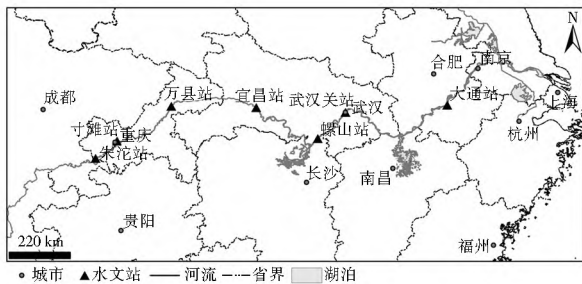


图 1 长江干流水文站点分布

Fig. 1 Distribution of hydrological stations along the mainstream of the Yangtze River

2 方法

2.1 数字滤波法简介

数字滤波法是将信号通过数字滤波器分解为高频和低频信号的一种方法,即将径流过程划分为直接径流(高频信号)和基流(低频信号)两个部分^[9,10],在 1990 年由 Nathan 和 McMahon^[11]首次将其用于基流分割。数字滤波法可分为单参数和双参数(递归数字滤波法)两类。单参数法的基流分割方程^[11]如下:

$$Q_d = f_1 Q_{d(t-1)} + \frac{(1-f_1)}{2} [Q_t - Q_{t-1}] \quad (1)$$

$$Q_b = Q_t - Q_{d_t} \quad (2)$$

式中: Q_{d_t} 、 $Q_{d(t-1)}$ 分别为 t 时刻、 $t-1$ 时刻的地表径流; Q_t 、 Q_{t-1} 分别为 t 时刻、 $t-1$ 时刻的总径流; Q_b 为 t 时刻的基流; f_1 为滤波参数。

后来虽然经过 Chapman 等^[7]多次改进,但方程的基本形式没变,都只含一个参数。

Eckhardt^[12]于 2005 年提出了双参数方法,其滤波方程为

$$Q_{b_t} = \frac{(1-BFI_{max})\alpha Q_{b(t-1)} + (1-\alpha)BFI_{max} Q_t}{1-\alpha BFI_{max}} \quad (3)$$

式中: Q_{b_t} 、 $Q_{b(t-1)}$ 分别为 t 时刻、 $t-1$ 时刻的基流; Q_t 为 t 时刻的总径流; α 为退水常数; BFI_{max} 为基流指数最大值,建议多孔介质含水层的多年性河流 $BFI_{max} = 0.8$,季节性河流 $BFI_{max} = 0.5$,坚硬岩石含水层的多年性河流 $BFI_{max} = 0.25$ 。

双参数法能降低高 BFI 值,增大低 BFI 值,与其他方法相比, BFI 变化较缓慢,得到的基流过程线相对平滑^[13],适用于大型河流基流变化相对稳定的特点。因此,选择双参数数字滤波法作为本次研究的主要计算方法。

2.2 递归数字滤波法参数的选择

滤波过滤次数和公式中参数的大小对基流分割结果影响显著^[13]。应用递归数字滤波法分割长江基流时,为寻求合适的过滤次数(n)和参数 α ,分别选用不同的过滤次数和 α ,对长江宜昌站 1977 年流量数据进行基流分割计算, BFI_{max} 取推荐的 0.8 ^[12]。保持 α 不变,过滤次数(n)分别取过滤 1 次、2 次和 3 次;保持过滤次数不变($n=1$), α 在 $0.95 \sim 0.98$ 之间变化。分割结果见图 2 和图 3。

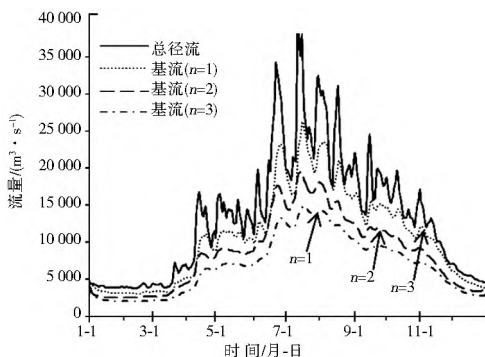


图 2 不同过滤次数 (n) 宜昌站 1977 年的基流分割结果

Fig. 2 Baseflow separation results at Yichang station based on different filtering times (n) in 1977

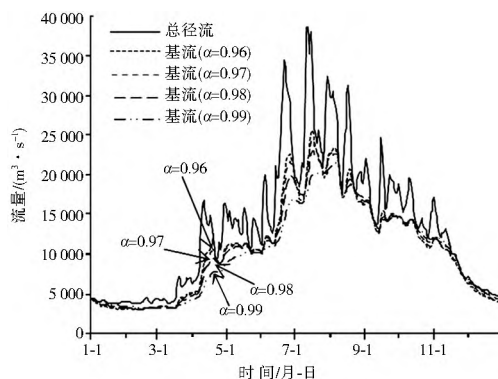


图 3 不同宜昌站 1977 年的基流分割结果

Fig. 3 Baseflow separation results at Yichang station based on different values in 1977

基流是枯水季节河川径流的主要补给来源,其年际和年内变化较小^[7]。因此,以合适的滤波参数分割得到的基流应具有过程线更加平滑且枯水期基流量接近于总径流量的特点。根据基流年际年内变化较小、基流过程线平滑和枯水期基流量接近于总径流量等特点,对比分析图 2 和图 3 中的基流分割结果,本次滤波法参数分别选取,过滤次数为 1、 α 为 0.98。由于上下游河流条件差异,对应不同站点或许应采用不同的滤波参数。这里仅探讨沿程不同站点的 BFI 差异以及不同年代的差异,因此不对各站点的滤波参数加以区分。

3 结果分析

3.1 长江干流基流分割结果

基流分割结果见表 1,表中数据为 1965 年-2011 年基流分割结果的多年平均值。图 4 为 BFI 沿长江干流变化趋势图,图 5 为各站年径流量和基流量分布图。

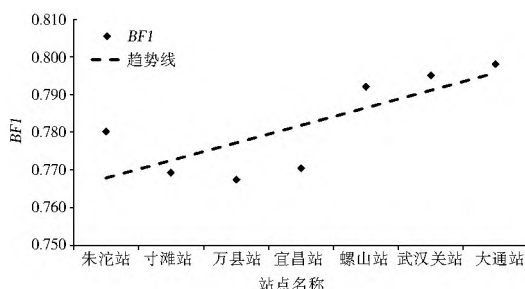


图 4 BFI 沿长江干流变化趋势

Fig. 4 Variation of BFI along the Yangtze River

3.1.1 各站基流情况

各站的基流量及各区间基流量大小见表1第(5)列。7个水文站的基流指数 BFI 在 0.768~0.798 之间(见表1第(8)列),表明基流对长江径流量的贡献很大,是其河川径流量的重要组成部分。递归数字滤波法分割基流得到的 BFI 比较稳定,各站基流指数相差很小,差值最大只有 0.031。从上游至下游,基流指数呈整体增加的趋势(见表1第8列及图4),基流量逐渐增加(图5),分析原因如下。

表1 长江干流基流多年平均值

Tab.1 The multi year average baseflow in the mainstream of the Yangtze River

水文站及河段	河段长度 / km	径流量 / (亿 $m^3 \cdot a^{-1}$)	占(朱沱站-大通站)区间径流量的比例(%)	基流量 / (亿 $m^3 \cdot a^{-1}$)	单位河长基流量 / (亿 $m^3 \cdot a^{-1} \cdot km^{-1}$)	占(朱沱站-大通站)区间基流量的比例(%)	BFI
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
朱沱站		2 589		2 019			0.780
朱沱站-寸滩站	120	754	12.39	551	4.59	11.23	
寸滩站		3 343		2 570			0.769
寸滩站-万县站	290	669	11.00	508	1.75	10.36	
万县站		4 012		0 3078			0.768
万县站-宜昌站	300	172	2.83	144	0.48	2.95	
宜昌站		4 184		3 222			0.770
宜昌站-螺山站	340	2 061	33.88	1724	5.07	35.16	
螺山站		6 245		4 946			0.792
螺山站-武汉关站	180	615	10.10	508	2.82	10.37	
武汉关站		6 860		5 454			0.795
武汉关站-大通站	430	1 813	29.80	1467	3.41	29.93	
大通站		8 673		6 921			0.798
总计	1660		100.00			100.00	

(1) 山区以坡面产流为主,地表径流占总径流比重大,地下径流比重小。与山区相比,平原地区的地下径流比重则较大。沿长江干流由上游往下游,地形从山区逐渐过渡为平原,地下径流占总径流的比重逐渐增加,越往下游,基流指数呈整体增加的趋势。

(2) 对下游断面基流量的贡献来自上游断面基流量与区间基流量,所以下游断面的基流量大于上游断面的基流量。

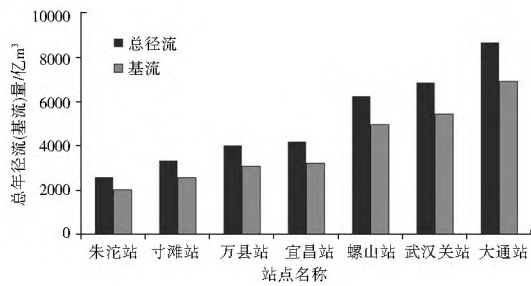


图5 各站年径流量和基流量

Fig.5 Annual runoff and baseflow of each station

3.1.2 区间基流情况

从表1第(6)列可以看出,对朱沱站-大通站区间基流量有贡献的各区间中,宜昌站-螺山站区间的基流量贡献最大,单位河长基流量为 5.07 亿 $m^3 / (a \cdot km)$;其次是朱沱站-寸滩站,单位河长基流量为 4.59 亿 $m^3 / (a \cdot km)$;武汉关站-大通站、螺山站-武汉关站和寸滩站-万县关站三个区间的单位河长基流量分别为 3.41、2.82 和 1.75 亿 $m^3 / (a \cdot km)$;万县站-宜昌站区间基流量的贡献最小,单位河长基流量只有 0.48 亿 $m^3 / (a \cdot km)$ 。区间单位河长基流量受到区间产流条件和水文地质条件的共同影响。本次区间基流分割结果表明沿着长江干流沿线,单位河长基流量变化特征较为复杂。

3.1.3 分割结果可靠性分析

数字滤波法已经在基流分割研究中得到广泛应用^{[14]16},

而在长江干流相关研究中尚未见报道。在本次研究中,为了验证基流分割结果的可靠性,将 Dai 等人^[17]在分割长江基流时采用 HYSEP (Hydrograph Separation) 法计算的 2000 年-2005 年多年平均 BFI 与本次递归数字滤波法计算的 BFI 结果进行对比分析,见表2。可以看出,两次研究计算出的 BFI 比较接近,各站全年 BFI (见表2第(4)、第(5)列)差值最大为 0.121;用 HYSEP 法计算所得 4 个站平均值为 0.82,用递归数字滤波法计算所得 4 个站平均值为 0.783,两者相差 0.037。尽管分割方法和计算时段的不同会导致计算结果的不同,但两次计算的 BFI 结果相差较小,所以认为本次使用递归数字滤波法计算的结果可靠。

表2 不同方法计算的 BFI 结果对比

Tab.2 Comparison of calculated BFI results by different methods

站点	HYSEP 法计算结果			递归数字滤波法计算结果
	Flood	Dry	Total	Total
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
寸滩站	0.78	0.81	0.89	0.769
宜昌站	0.75	0.90	0.80	0.770
武汉关站	0.75	0.93	0.80	0.795
大通站	0.76	0.88	0.80	0.798
平均值	0.76	0.88	0.82	0.783

注:(1)HYSEP 法计算的是 2000 年-2005 年 BFI 多年平均值,递归数字滤波法计算的是 1965 年-2011 年 BFI 多年平均值;(2)Flood, Dry 和 Total 分别代表汛期(5月-10月),非汛期(10月-12月和1月-4月)及全年。

3.2 长江干流基流量随时间的变化

通过对比长江各水文站 1965 年-1986 年基流量的 22 年均值与 2001 年-2011 年 11 年均值(见表 3)可知,各站基流量都出现明显的衰减变化。其中,基流量衰减最大的是宜昌站,衰减率为 8.82%;其次为万县站,衰减率为 8.79%;螺山站与大通站的基流衰减率在 5.20%左右;朱沱站、寸滩站和武汉关站的基流衰减率都小于 4%,寸滩站衰减率最小,为 2.78%。从表 3 可知,尽管各站基流量都呈现减小的趋势,但基流所占总径流的比值 *BFI* 却略显增加,增加最大的是万县站,增加了 1.75%。*BFI* 略微增加的原因是基流量衰减的同时,总径流也在衰减,且衰减的幅度略大于基流量的衰减。

基流量出现衰减的可能原因有如下。

表 3 各站总径流、基流量及 *BFI* 1965 年-1986 年和 2001 年-2011 年时段内年均值变化

Tab. 3 Comparison of average annual values of total runoff, baseflow, and *BFI* of each station between 2001-2011 and 1965-1986

站名	总径流/(亿 $m^3 \cdot a^{-1}$)		总径流 变化率 (%)	基流量/(亿 $m^3 \cdot a^{-1}$)		基流量 变化率 (%)	<i>BFI</i>		<i>BFI</i> 变化率 (%)
	1965 年- 1986 年	2001 年- 2011 年		1965 年- 1986 年	2001 年- 2011 年		1965 年- 1986 年	2001 年- 2011 年	
	朱沱站	2 624	2 525	- 3.75	2 041	1 980	- 3.00	0.778	0.784
寸滩站	3 387	3 251	- 4.02	2 593	2 521	- 2.78	0.766	0.776	1.23
万县站	4 151	3 722	- 10.34	3 167	2 889	- 8.79	0.763	0.777	1.75
宜昌站	4 311	3 906	- 9.40	3 312	3 020	- 8.82	0.768	0.774	0.69
螺山站	6 355	6 020	- 5.27	5 031	4 770	- 5.19	0.792	0.793	0.14
武汉关站	6 949	6 691	- 3.71	5 519	5 330	- 3.42	0.794	0.797	0.35
大通站	8 841	8 366	- 5.37	7 052	6 685	- 5.21	0.798	0.799	0.18

4 结论

(1) 应用递归数字滤波法时,选择过滤次数为 1,参数 *BFI*_{max} 取 0.8,取 0.98。通过与前人研究对比可知递归数字滤波法在长江干流基流分割应用的结果基本可靠。

(2) 7 个水文站的基流指数 *BFI* 在 0.768~0.798 之间,沿程变化趋势不明显,下游断面基流量大于上游断面基流量。

(3) 宜昌站-螺山站的区间基流量对朱沱站-大通站的基流量贡献最大,单位河长基流量为 5.07 亿 $m^3/(a \cdot km)$;其次是朱沱站-寸滩站,单位河长基流量为 4.59 亿 $m^3/(a \cdot km)$ 。在区间基流的维持和保护研究方面,应重点关注宜昌站-螺山站和朱沱站-寸滩站两个区间基流的保护。

(4) 所研究的长江干流各站基流量都出现明显的衰减变化,各站 *BFI* 变化并不显著。基流量衰减最大的是宜昌站,衰减率为 8.82%;其次是万县站,为 8.79%。在对长江主要断面基流保护时,应着重关注宜昌与万县站的基流变化。

参考文献(References):

[1] GB/T 50095-98, 水文基本术语和符号标准[S]. (GB/T 50095-98, Standard for essential technical terms and symbols in hydrology[S]. (in Chinese))

[2] 林凯荣. 数字水文模拟与基流分割方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2007. (LIN Kai rong, Application and Study on Baseflow Separation Using Digital Filters[D]. Wuhan: Wuhan University, 2007. (in Chinese))

[3] 倪雅茜, 张文华, 郭生练. 流量过程线分割方法的分析探讨[J]. 水文, 2005, 25(3): 10-19. (NI Ya qian, ZHANG Wen hua, GUO Sheng lian. Discussion on the discharge hydrograph separ-

(1) 人类活动因素。近 20 年来,在长江流域,人口激增,经济迅速发展,水的需求量增加。根据中华人民共和国水资源公报,长江流域地下水供水总量总体呈增加的趋势,沿江地区地下水开采量出现增加,地下水水位下降,地下水补给河流量减少,基流量出现衰减。

(2) 气候变化因素。Dai 等人^[17]认为长江流域气温升高不仅会直接导致地表蒸发量增加,而且也增加了部分地下水的蒸发损失,使得地下水对河川径流的补给减少。所以,全球气候变暖也可能是长江基流量衰减的原因之一。

为了防止基流量的大幅衰减,保护长江水资源的循环再生,必须采取相应措施,合理开发长江沿岸地表和地下水资源^[18]。

ration methods[J]. Journal of China Hydrology, 2005, 25(3): 10-19. (in Chinese))

[4] 王敏夫, 张立. 应用汇流模型分割河川基流[J]. 人民珠江, 1983(6): 39-50. (WANG Min fu, ZHANG Li. Baseflow Separation Using Concentration Model[J]. Pearl River, 1983(6): 39-50. (in Chinese))

[5] 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. (QU Si min, BAO Wei min, SHI Peng, et al. Review on Isotopic Hydrograph Separation Methods[J]. Water Resources and Power, 2006, 24(1): 80-83. (in Chinese))

[6] 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. (LEI Yong nan, ZHANG Xiao ping, ZHANG Jian jun, et al. Suitability analysis of automatic baseflow separation methods in typical watersheds of water wind erosion criss-cross region on the Loess Plateau, China[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2011, 9(6): 57-64. (in Chinese))

[7] 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. (YANG Rui, WANG Long, HAN Chun ling. Nine kinds of baseflow separation methods apply and comparative in the upper reach of nannan river[J]. Journal of Yunnan Agricultural University, 2013, 28(5): 707-712. (in Chinese))

[8] 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. (LIN Xue yu, LIAO Zi sheng, QIAN Yun ping, et al. Baseflow separation for groundwater study in the Yellow River Basin, China[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2009, 39(6): 959-967. (in Chinese))

(下转第 836 页)

- GUO Li Juan, TONG Bin, et al. Analysis on flood forecasting method of Wujiang River Basin affected by hydropower projects [J]. Yangtze River, 2011(6): 35-37. (in Chinese)
- [7] 张瑞勋, 张涛, 雒文生. 考虑上游水利工程影响的枫树坝水库洪水分析[J]. 中国农村水利水电, 2008(8): 29-31. (ZHANG Ruixun, ZHANG Tao, LUO Wensheng. Analysis on flood of Fengshuba reservoir basin considering the influence of hydropower projects upstream[J]. China Rural Water and Hydropower, 2008(8): 29-31. (in Chinese))
- [8] 沈清德, 全鸿烈. 水库上游水利工程对中小型水库洪水预报的影响[J]. 东北水利水电, 2002, 21(3): 43-44. (SHEN Qingde, QUAN Honglie. Influence of upstream hydroproject to middle and small flood forecast precision [J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China. 2002, 21(3): 43-44. (in Chinese))
- [9] 雒文生, 王祥三, 宋星源, 等. 受水利水电工程影响流域径流预报方法的探讨[J]. 水文, 1991(3): 13-19. (LUO Wensheng, WANG Xiangsan, SONG Xiyuan, et al. The approach of forecast method of yield runoff in basins influenced by hydraulic and hydroelectric engineering[J]. International Journal Hydroelectric Energy, 1991(3): 13-19. (in Chinese))
- [10] Beven J. Rainfall runoff Modelling [M]. England: John Wiley & Sons Ltd, 2001.
- [11] Beven J. Distributed Hydrological Modelling: Applications of the TOPMODEL Concept [J]. Advance in Hydrological Processes, 1997(11): 1069-1085.
- [12] 刘青娥, 左其亭. TOPMODEL 模型探讨[J]. 郑州大学学报: 工学版, 2002, 23(4): 82-86. (LIU Qing'e, ZUO Qiting. Discussion on TOPMODEL[J]. Journal of Zhengzhou University of Technology, 2002, 23(4): 82-86. (in Chinese))
- [13] 刘青娥, 夏军, 王中根. TOPMODEL 模型几个问题的研究[J]. 水电能源科学, 2003, 2(6): 41-44. (LIU Qing'e, XIA Jun, WANG Zhonggen. Discussion on some issues of TOPMODEL [J]. Hydroelectric Energy, 2003, 2(6): 41-44. (in Chinese))
- [14] 李成林, 孙新国, 彭勇, 等. 丰满流域水利工程对径流变化规律的影响研究[J]. 2013, 11(4): 79-83. (LI Chenglin, SUN Xinguo, PENG Yong, et al. Research of runoff processes changed by hydraulic projects in Fengman basin [J]. 2013, 11(4): 79-83. (in Chinese))
- [15] 张喜峰, 王进, 李文龙, 等. 丰满水库人类活动影响研究与洪水预报实践[J]. 大坝与安全, 2009(4): 34-38. (ZHANG Xifeng, WANG Jin, LI Wenlong, et al. Influence of human activity and flood forecast for Fengman Dam [J]. Dam and Safety, 2009(4): 34-38. (in Chinese))
- (上接第 826 页)
- [9] 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. (XU Leilei, LIU Jinglin, JIN Changjie, et al. Baseflow separation methods in hydrological process research: A review [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(11): 3073-3080. (in Chinese))
- [10] 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): 2232-2237. (DANG Suzhen, WANG Zhonggen, LIU Changming. Baseflow separation and its characteristics in the upper reaches of the Heihe River Basin [J]. Resources Science, 2011, 33(12): 2232-2237. (in Chinese))
- [11] Nathan RJ, McMahon TA. Evaluation of Automated Techniques for Baseflow and Recession Analysis. Water Resources Research, 1990, 26: 1465-1473.
- [12] Eckhardt K. How to Construct Recursive Digital Filters for Baseflow Separation Hydrological Processes, 2005, 19: 507-515.
- [13] 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. (CUI Yujie, LIU Defu, SONG Linxu, et al. Application of digital filtering theory in baseflow separation in Xiangxi River Watershed of Three Gorges Reservoir Area [J]. Journal of China Hydrology, 2011, 31(6): 18-23. (in Chinese))
- [14] 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. (DONG Xiaohua, DENG Xia, BO Huijuan, et al. A comparison between smoothed minima and digital filtering methods applied to catchment baseflow separation [J]. Journal of China Three Gorges University: Natural Sciences, 2010, 32(2): 1-4. (in Chinese))
- [15] 李鸿雁, 张蕾, 郑龙群, 等. 递归数字滤波法在嫩江流域地下径流分割中的应用[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2013, 49(6): 631-635. (LI Hongyan, ZHANG Lei, ZHENG Longqun, et al. Application of recursive digital filtering method in groundwater flow separation in Nenjiang River Basin [J]. Journal of Beijing Normal University: Natural Science, 2013, 49(6): 631-635. (in Chinese))
- [16] 李桂元, 杜新德, 罗利顺, 等. 基于数字滤波法的紫鹊界梯田区水源结构分析[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(18): 9756-9757, 9945. (LI Guiyuan, DU Xinde, LUO Lishun, et al. Analysis on the water source structure based on the digital filtering method at the Ziquejie Terrace [J]. Journal of Anhui Agri. Sci, 2012, 40(18): 9756-9757, 9945. (in Chinese))
- [17] DAI Zhi jun, CHU Ao, DU Jir zhou, et al. Assessment of extreme drought and human interference on baseflow of the Yangtze River [J]. Hydrological Process, 2010, 24: 749-757.
- [18] QIAN Kai zhu, WAN Li, WANG Xu sheng, et al. Periodical Characteristics of Baseflow in the Source Region of the Yangtze River [J]. Journal of Arid Land, 2012, 4(2): 113-122.