

五种基流分割方法在长江螺山站的应用对比研究

王冠, 鲁程鹏, 李姝蕾, 陈帅, 李俊江
(淮海大学 水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

摘 要: 基流是枯水期河川径流的主要来源, 稳定可靠的基流分割方法对基流研究具有重要作用。基于螺山站 1965-2012 年逐日流量资料, 采用基流指数法、HYSEP 法(固定步长法、滑动步长法、局部最小值法) 和数字滤波法 3 类(5 种) 基流分割方法进行基流分割。研究结果表明: 5 种方法所得年基流指数相差不大, 但年内基流过程差别显著。BFI 法和局部最小值法计算结果较为合理, 对不同年份 BFI 值年际变化有较好的辨识度, 是长江中游干流区较为适宜的基流分割手段。

关键词: 基流分割; BFI 法; HYSEP 法; 数字滤波法; 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)03-0118-06

Applied comparison of five separation methods of base flow at Luoshan station of Yangtze River

WANG Guan, LU Chengpeng, LI Shulei, CHEN Shuai, LI Junjiang

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

Abstract: Base flow is the main source of river in dry season. The stable and reliable method of base flow separation is of importance to base flow research. Based on the daily discharge data of Luoshan station from 1965 to 2012, the paper used five methods which include the base flow index method, fixed interval method, sliding interval method, local minimum method and digital filtering method to separate the base flow. The results show that there are little differences among five methods, but the base flow process varied significantly between the five methods in a year. The results of BFI method and local minimum method are more reasonable and have better identification in different years. The method is a suitable mean of base flow separation in the middle area of the Yangtze River.

Key words: base flow separation; BFI method; HYSEP method; digital filtering method; Luoshan station of Yangtze River

基流是河川的基本径流, 国内外对基流的定义较多, 本文采用国内大多数学者较为认可的定义: 基流是指补给河流的地下径流^[1-3]。基流的年际和年内变化较小, 是一种较为稳定的径流成分, 对维持河流生态流量有着极为重要的意义, 研究基流对流域水文模拟、水资源开发利用和生态环境保护同样具有重要作用^[4]。

长江流域作为我国重要流域之一, 其基流变化在对水资源利用、生态需水量、河流输沙量和河流自净力等多方面的研究中具有极其重要的科学意义。

长江中游干流区属典型的丘陵区, 枯水季节河川径流主要由基流补给, 基流在河川径流量中占有很大的比例。找到适合长江干流河川基流特点、简单易操作的基流分割方法, 是准确探究该流域基流变化及特征的基础, 对合理开发利用长江中游地区水资源具有重要的意义。

按照水文地质条件及基流产流过程的差异, 前人提出了诸多基流分割方法, 大致可分为图解法、水文模型法、物理化学法、数学物理法及数值模拟法五类^[5]。图解法是传统的基流分割方法之一, 主观性

收稿日期: 2014-12-24; 修回日期: 2015-01-15

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项目(20120094120019); 中国博士后科学基金面上资助项目(2013M540410); 淮海大学国家级大学生创新训练项目(201410294004)

作者简介: 王冠(1994-), 女, 河南新乡人, 在读本科生, 研究方向为地表水与地下水相互作用。

通讯作者: 鲁程鹏(1984-), 男, 安徽肥东人, 博士, 研究方向为地表水与地下水相互作用。

强,计算繁琐,实践中难以应用于长序列资料的分析计算,且该法仅对完整的波峰进行分割,无法解释不同波峰间本质的内在联系,基流量计算结果较粗略^[6]。水文模型法利用水文循环模型,基于质量守恒原理计算各水均衡项,物理意义明确,具有客观、可重复性的特点,但对使用者能力具有较高的要求,且模型所需调试的参数较多,模型参数的选取困难^[7-8]。物理化学法利用同位素放射性示踪剂进行示踪,结果准确,可信度高,但对监测仪器和监测区水文地质条件要求比较高且所需费用较高^[9]。数学物理法通过建立数学物理方程,较好刻画了基流产流的物理机制,但当结果出现较大偏差时,多参数调整与适用范围确定的难度较大^[10]。数值模拟法基于信号处理技术,通过河道径流量计算基流量,其中主要方法包括滤波法、BFI法、HYSEP法、PART法和加里宁系列方法,具有精度高、客观性强、操作简便、计算速度快、可重复使用等特点,并且可直接易于采用计算机自动实现^[11],在实践中得到了广泛应用和认可^[12]。在实际应用过程中,需要根据流域的水文地质特性来选取稳定可靠的基流分割方法。

近年来,采用数学方法分割流量过程线的自动分割技术得到了快速发展,使得数值模拟法成为国际上应用最为广泛的基流分割方法。但从目前的研究来看,数值模拟法尤其是滤波法分割基流的稳定和适应并无绝对性,因此本次研究中选用数值模拟法中的基流指数法(BFI)、HYSEP法和数字滤波法进行基流分割,探究其在螺山站使用的稳定性和适用性。

本次研究以长江中游干流控制站螺山水文站1965-2012年实测逐日流量、水位及降水量资料为基础,应用基流指数法(BFI)、数字滤波法和HYSEP法三类算法进行基流分割,通过对比五种方法分割结果,探讨不同方法的稳定性和可靠性,选出适宜的计算方法,为了解和分析该流域基流的变化特征和演变规律提供技术支持,为流域水文模拟和水资源开发利用提供依据。

1 研究区概况

螺山水文站为国家I类重点水文站,东经113°22′、北纬29°40′,位于长江中游的洞庭湖与长江干流交汇处的湖北省洪湖市螺山镇境内。地处城陵矶至汉口河段,上距洞庭湖出口30.7 km,下距武汉210 km,是长江荆江与洞庭湖出流汇合后的第一个水文控制断面,控制着长江中游干流在洞庭湖入汇后的水

情变化^[13-14]。其控制着长江干流宜昌以上、支流清江、洞庭湖湘、资、沅、澧四水和松滋、太平、藕池三口及洞庭湖区间等整个区间来水,控制流域面积129.49万km²,是长江中游河段的重要控制测站^[15]。

长江中游地区受海陆热力性质差异的影响,属亚热带湿润季风气候,其特点是冬夏长,春秋短,四季分明,光照充足,雨量充沛,温和湿润。夏季高温多雨,冬季温和少雨,雨热同期,降水多集中于春夏,洪涝灾害较多。

本次研究共收集1965-2012年期间,螺山站的降水和流量资料。特别需要说明的是,本研究采用的数据资料有部分缺失,缺失年份为1988-2000年。根据年降水量资料统计,多年平均降水量为1303 mm,年最大降水量为1935 mm(2002年),年最小降水量为774 mm(1968年)。图1为螺山站1965-2012年月平均降水量,图2所示为典型平水年份(1984年)螺山站降水径流过程图,从图中可知,长江中游地区的降水和径流过程均有明显的汛枯特点,降水年内分配不均,主要集中于3-8月,约占全年降水量的60%。

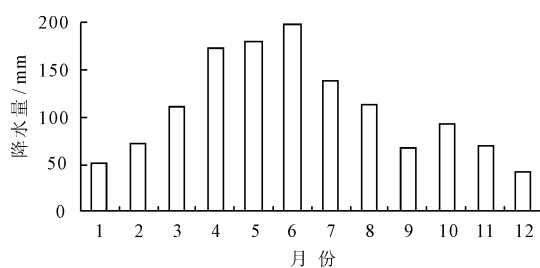


图1 螺山水文站 1965-2012 年月平均降水量

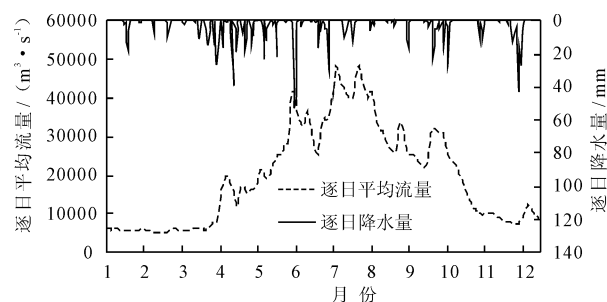


图2 典型平水年份(1984年)螺山站的降水径流过程

2 研究方法

2.1 基流指数法

基流指数(BFI)法又称最小滑动法,最早于1980年由英国水文所(Hydrology Institute of England)提出^[16],并由Wels等^[17]编写了该方法的计算程序。该方法以基流指数(即基流量与总径流量的

比值)为权系数来计算基流量^[16,18],在区域枯季径流的研究中,该值可反映区域地下水资源量的参数。通常情况下,主要由地下水补给的河流 BFI 值接近 1,而季节性河流的 BFI 值趋近 0^[4]。

BFI 法主要有标准 BFI(f)法和改进 BFI(k)法两种,其拐点检验因子 f 和 k 一般取经验值 0.9 和 0.97915^[19]。其计算原理是:以 N 天为一个时间单位,将每年划分成 365/N 个时段,记相邻 3 个时段内的最小流量值分别为 Q_{n-1} 、 Q_n 、 Q_{n+1} 。如果某时段内的最小流量值与拐点检验因子 f(或 k)的积小于相邻左右时段内的最小流量值,即 $Q_n < fQ_{n-1}$ 且 $Q_n < fQ_{n+1}$ (或 $Q_n < kQ_{n-1}$ 且 $Q_n < kQ_{n+1}$),则将中间点确定为拐点。在年内日流量过程线图上确定出所有拐点,并将所有拐点用直线连接,即可得到基流过程线,过程线以下的面积即为该年的基流量。

本文中采用的是标准 BFI 法,拐点检验因子 $f = 0.9$ 。同时,通过水文频率分析,以 2002,1984 和 1986 年分别代表丰、平、枯水年,进行 N 值和 BFI 值的关系分析。当 $N \geq 9$ 时,各水平年基流指数基本趋于稳定,因此在本研究区内选取 $N = 9$,即以 9 d 为一时段进行基流分割较为合理,这一参数对其他区域及支流区域适应性并不确定。

2.2 HYSEP 法

PettyJohn 和 Henning 于 1979 年提出了 HYSEP 程序,此方法首次实现了基流计算的程序化^[20]。首先利用经验公式 $N = (2.59A)^{0.2}$ 计算退水时间, 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)。用于基流分割的步长 t 取介于 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。螺山水文站的控制流域面积为 129.49 万 km^2 ,经计算可得 t 应取 11。

HYSEP 法有固定步长法、滑动步长法和局部最小值法 3 种方式^[1,21-22]:固定步长法(Fixed interval):在上述所选取的时间间隔内,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(Sliding interval):将某天前后 $(2N-1)/2$ d 内的最小流量作为该天的基流,由此计算出每一天的基流;局部最小值法(Local minimum):选择时间步长内中心点前后 $(2d-1)/2$ d 内的最小流量作为相邻时间步长内中心点的基流值,然后通过线性内插得到步长中心点之外时段的基流。3 种方法均以本次计算的终点作为下次时间的起点,重复以上过程便可计算出基流分割过程。HYSEP 程序具有易操作、计算速度快、可重复使用、可计算长期的径流

资料等优点,现已成为美国地质调查局使用的主要基流计算方法^[23]。

2.3 数字滤波法

近年来,伴随着计算机技术的日臻成熟,源于信号处理技术的滤波法在基流计算研究中得到广泛应用与改进。Nathan 等^[24]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。河川径流视为由直接径流和基流两部分组成,通过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^[1,3,12,23]。

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,其中包含 2 个滤波参数(退水常数 α 和最大基流指数 $BFI_{\max}$)的双参数滤波法更加灵活准确,故本次采用双参数滤波法进行研究。该方法由 Eckhardt 于 2005 年提出^[22,25],其计算公式如式(1)所示:

$$q_{b(t)} = \frac{(1 - BFI_{\max})\alpha q_{b(t-1)} + (1 - \alpha)BFI_{\max}q_t}{1 - \alpha BFI_{\max}} \quad (1)$$

式中: $q_{b(t)}$ 为 t 时刻的基流; $q_{b(t-1)}$ 为 t-1 时刻的基流; q_t 为 t 时刻实测河川径流量; t 为时间,单位为日。 α 为退水常数,可通过退水分析确定,根据螺山站的日流量资料,通过 MRC(Master Recession Curve)方法^[26]得出 $\alpha = 0.98$; $BFI_{\max}$ 为最大基流指数,即长期地下径流与总径流的比值的最大值。针对河流域下垫面不同的水文地质情况,不同类型流域的 $BFI_{\max}$ 值不同。Eckhardt 通过对美国 65 个流域的研究,建议有可透水含水层的多年性河流取 0.8,季节性河流取 0.5,有不透水含水层的多年性河流取 0.25。依据本研究区流域的水文地质情况, $BFI_{\max}$ 值应取 0.8。确定了参数之后,便可利用公式(1)直接计算出基流量。

此方法不具有特别的物理意义,仅从数值上分割直接径流和基流^[27],但能利用长历时径流资料计算基流,从而分析流域地下水对河流的贡献随时间的变化,具有较好的客观性和可重复性^[28]。

3 结果与分析

3.1 基流计算结果对比

根据实测资料,螺山站年均实测径流量为 6245 亿 m^3 。在基流计算中,一般以年基流量和基流占总径流量的比例即基流指数(Base flow Index, BFI)来量化。利用五种基流分割方法所得出的各代际基流指数计算结果见表 1。

表 1 五种基流分割方法计算所得 BFI 值					
年份	基流 指数 (BFI)法	HYSEP 法			滤波法
		固定步 长法	滑动步 长法	局部最 小值法	
1965 - 1969	0.7942	0.8669	0.8709	0.8066	0.7917
1970 - 1979	0.7972	0.8823	0.8816	0.8215	0.7906
1980 - 1989	0.8260	0.8824	0.8797	0.8383	0.7930
2000 - 2009	0.8360	0.8922	0.8914	0.8087	0.7919
2010 - 2011	0.8706	0.9037	0.9530	0.8556	0.7957
多年平均值	0.8248	0.8855	0.8953	0.8261	0.7926

从表 1 看出,在长江中游地区,基流占径流的比重较大,五种基流分割方法计算的多年基流指数相差不大,其值均在 0.79~0.90 之间。其中固定步长法和滑动步长法所得结果较大,数字滤波法所得结果较小,利用 BFI 法和局部最小值法所计算出的 BFI 值较为合理。

不难看出,HYSEP 法所得 BFI 值都略有偏大,这可能是由于在 HYSEP 法中退水时间 t 可取的最大值为 11,而螺山水文站控制流域面积很大,退水时间也相对较长,从物理意义上来说, t 的取值应大于 11d。在确定时间间隔内的每日基流时,是选取这一步长内基流量的最小值,因此所得的基流量偏大,使得计算出的 BFI 值偏大。

3.2 基流分割过程对比

本文以 2002、1984 和 1986 年分别作为丰($P = 25\%$)、平($P = 50\%$)、枯水年($P = 75\%$)的典型年,用五种基流分割方法作出其基流过程线并进行对比分析,五种方法对于典型年基流分割过程如图 3 所示。

可以看出五种方法所得的基流过程线相差较大,固定步长法和滑动步长法对不同年份的基流过程分割结果相差不大,局部最小值法、BFI 法和数字滤波法差异较大,对于不同年份的基流过程有较好的识别能力。

一般地,径流量大的年份来自流域地表汇水的比重较大,而来自地下水补给的基流部分相对较少,从而计算所得的 BFI 值较小;径流量小的年份径流多来自于地下水的慢速补给,故 BFI 值越大。几种方法中 BFI 法和局部最小值法所得 2002、1984、1986 年的 BFI 值依次增大,计算结果与理论推断相吻合,且这两种方法所得 BFI 值在不同年份下相差较大,说明这两种方法对于不同年份的 BFI 值辨识能力较好。而固定步长法、滑动步长法和数字滤波

法所得出的典型年基流过程和 BFI 值的可靠性较差,且其在不同年份下相差不大,对于不同年份的 BFI 值辨识能力较弱。

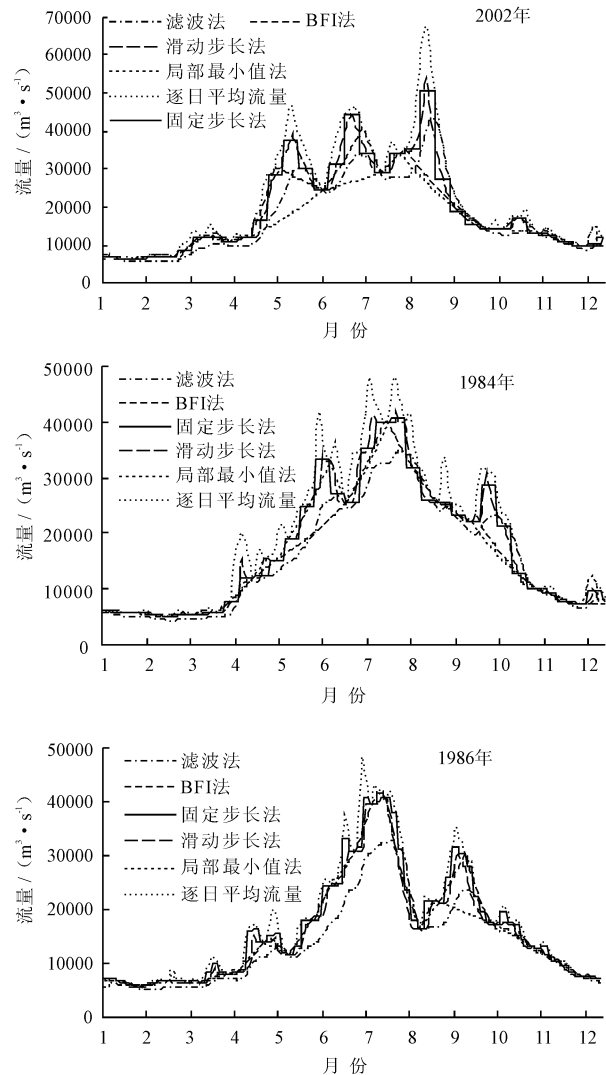


图 3 5 种基流分割方法对于典型年基流分割过程图

3.3 基流分割方法的敏感性分析

将 3 类(5 种)方法的 BFI 进行统计分析,绘制其箱式图(图 4)。

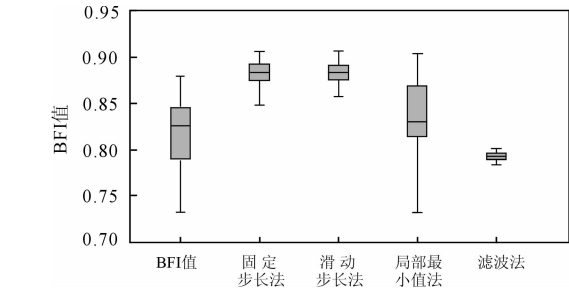


图 4 5 种基流分割方法所得 BFI 值箱式图

由图 4 可以看出,BFI 法和局部最小值法所得

结果波动较大,对不同年份的基流过程较为敏感,而其余 3 种方法的敏感性相对较差。其中,滤波法的方差最小,仅为 0.00003,表明滤波法年际变化最小,在这五种基流分割方法中辨识不同年份的 BFI 值能力最弱。BFI 法和 HYSEP 法中的局部最小值法所得的方差较大,对不同年份计算出的 BFI 值结果差异较大,更能分辨出不同年份本身 BFI 值年际变化的强弱,有较好的辨识度。

杨蕊等^[23]将 BFI 法、HYSEP 法和数字滤波法 3 类方法运用于南盘江上游,黄国如^[11]将滑动最小值法、HYSEP 法和数字滤波法 3 类方法运用于东江流域,雷咏南等^[29]将滑动最小值法、HYSEP 法和数字滤波法 3 类方法运用于窟野河流域,通过对比分析,均认为数字滤波法所得结果较为合理可靠。然而,各种基流分割方法的稳定性和适应性依流域特性而异,不同地区所适宜的基流分割方法有所不同。

4 结 语

本文基于长江中游干流控制站螺山水文站实测逐日流量、水位及降水量资料,选用 BFI 法、HYSEP 法和数字滤波法 3 类(5 种)基流分割技术对长江干流螺山站进行基流分割,将 5 种方法的计算结果、基流分割过程和敏感性进行对比分析,可得出如下结论:

(1)5 种方法计算出的年基流指数相差不大,其中双参数数字滤波法计算所得 BFI 值相对较小,固定步长法和滑动步长法计算结果相对较大。基流指数总体分布在 0.79~0.90 之间,说明基流是该地区河川径流的主要组成部分。

(2)对比 5 种方法所得典型丰平枯水年的基流过程线和基流指数,从年内基流过程来看,滤波法对不同年份的 BFI 值辨识能力较弱,固定步长法和滑动步长法计算出的各年基流指数区分度很小,在不同年份间所展示的 BFI 差别也不合理。BFI 法和局部最小值法计算所得 BFI 值与理论推断相吻合,对不同年份的基流过程分割结果相差较大,对于不同年份的基流过程有较好的识别能力。

(3)5 种方法计算结果的方差和极值比都较小,其中滤波法的方差最小,对不同年份的 BFI 值不太敏感。BFI 法和局部最小值法对不同年份计算出的 BFI 值结果差异较大,对于不同年份本身 BFI 值年际变化有较好的辨识度。

综上所述,BFI 法和局部最小值法所得结果辨识度最好,且在不同年份的计算结果相对合理,总体

来看,是长江流域中游干流区内较为适宜的基流分割方法。

究竟哪一种方法更适合于长江中游干流区的基流分割仍需探讨,此外,基流划分的结果与研究区自然地理特征以及受人类活动影响等因素之间的关系也值得专家学者进一步研究。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 赵玉有,耿鸿江,潘辉学. 基流分割问题评述[J]. 工程勘察,1996(2):30-32.
- [3] 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]. 水资源与水工程学报,2013,24(3):38-42.
- [4] 胡兴林. 黑河流域径流演变规律及区域性水资源优化配置分析[J]. 水文,2003,23(1):32-35.
- [5] 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+31.
- [6] 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:中国科学院研究生院,2012.
- [7] Xu Liang, WOOD E F, LETTENMAIER D P. Surface soil moisture parameterization of VIC-2L model: evaluation and modification[J]. Global and Planetary Change, 1996, 13(1):195-206.
- [8] Arnold J G, Williams J R, Maidment D R. Continuous-time water and sediment-routing model for large basins[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1995, 121(2):171-183.
- [9] Pinder G, Jones J F. Determination of the ground-water component of peak discharge from the chemistry of total runoff[J]. Water Resources Research, 1969, 5(2):438-445.
- [10] Birtles A B. Identification and separation of major base-flow components from a stream hydro-graph[J]. Water Resources Research, 1978, 14(5):791-803.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 熊 明,刘东生,沈力行. 螺山站水位流量关系变化分析[J]. 水利水电快报, 1999, 20(18):5-9.
- [14] 谢作涛,张小峰,谈广鸣. 长江螺山站水位预报研究[J]. 水电能源科学, 2003, 21(3):7-9.
- [15] 李世强,邹红梅. 长江中游螺山站水位流量关系分析[J]. 人民长江, 2011, 42(6):87-89.
- [16] Institute of Hydrology. Low Flow Studies[R]. Wallingford, United Kingdom: Institute of Hydrology, 1980.

- [17] Wels C, Cornett R J, Lzaerte B D. Hydrograph separation: A comparison of geochemical and isotopic tracers [J]. *Journal of Hydrology*, 1991, 122(1-4): 253-274.
- [18] Mazvimavi D, Meijerink M J, Stein A. Prediction of base flows from basin characteristics: a case study from Zimbabwe [J]. *Hydrological Science Journal*, 2004, 49(4): 703-715.
- [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, 21(1): 69-71.
- [20] Pettyjohn W A, Henning R. Preliminary estimate of ground-water recharge rates, related stream-flow and water quality in Ohio [R]. Columbus, Ohio, United States: Ohio State University Water Resources Center, 1979.
- [21] Sloto R A, Crouse M Y. HYSEP: A computer program for streamflow hydrograph separation and analysis [R]. U. S. Geological Survey Water-Resources Investigation Report, 1996.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] Nathan R J, McMahon T A. Evaluation of automated techniques for baseflow and recession analysis [J]. *Water Resources Research*, 1990, 26(7): 1465-1473.
- [25] Eckhardt D K. How to construct recursive digital filters for baseflow separation [J]. *Hydrological Processes*, 2005, 19(2): 507-515.
- [26] Aronld J G, Allen P M, Muttiah R, et al. Automated baseflow separation and recession and recession analysis techniques [J]. *Ground Water*, 1995, 33(6): 1010-1018.
- [27] 林凯荣, 张文华, 郭生练. 流量过程线分割的新方法——应用分析 [J]. *水文*, 2006, 26(4): 15-20.
- [28] Aronld J G, Allen P M. Automated methods for estimating baseflow and ground water recharge from streamflow [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 1999, 35(2): 411-424.
- [29] 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.

(上接第 117 页)

虑水资源的稀缺性和节水的重要性,进一步调整产业结构,逐步降低工业在产业结构中的比重,同时继续通过清洁生产、节能降耗、回收利用等技术,减少水资源利用强度,提高水资源利用效率。

参考文献:

- [1] 黄林楠, 张伟新, 姜翠玲, 等. 水资源生态足迹计算方法 [J]. *生态学报*, 2008, 28(3): 1279-1286.
- [2] 莫明浩, 王学雷, 任宪友, 等. 湖北省洪湖市生态足迹与水足迹动态分析 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2009, 19(6): 70-74.
- [3] Chapagain A K, Hoekstra A Y, Savenije H H G. Water saving through international trade of agricultural products [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2006, 10(3): 455-468.
- [4] 洪辉. 基于生态足迹法的西安市水资源生态足迹研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2007.
- [5] 谭秀娟, 郑钦玉. 我国水资源生态足迹分析与预测 [J]. *生态学报*, 2009, 29(7): 3559-3568.
- [6] 赵红飞, 方朝阳. 基于虚拟水消费的郑州市水足迹计算 [J]. *水电能源科学*, 2010, 28(2): 30-31+60.
- [7] 蔡振华, 沈来新, 刘俊国, 等. 基于投入产出方法的甘肃省水足迹及虚拟水贸易研究 [J]. *生态学报*, 2012, 32(20): 6481-6488.
- [8] 吴志峰, 胡永红, 李定强, 等. 城市水生态足迹变化分析与模拟 [J]. *资源科学*, 2006, 28(5): 152-156.
- [9] 潘华玲. 慈溪地表水环境整治研究 [D]. 金华: 浙江师范大学, 2010.
- [10] 孙志威, 廖红英, 宋雨燕. 基于对数平均迪氏指数法的天津市能源消费碳排放分解分析 [J]. *环境污染与防治*, 2011, 33(1): 83-86+91.