

DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2017.01.005

基于数字滤波法的怒江流域基流时空分异

刘新有^{1,2}, 谢飞帆²

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 云南省水文水资源局, 云南 昆明 650106)

摘要:为明晰怒江流域基流时空分异特征,利用数字滤波法进行怒江干流和南汀河支流的基流研究。结果表明:①怒江干流3站基流指数 I_{BF} 在0.71~0.74之间,南汀河支流2站的多年平均 I_{BF} 在0.68左右,南汀河支流 I_{BF} 明显低于怒江干流,干支流基流量和 I_{BF} 自上游向下游递增;②各站基流量与径流量变化过程基本一致,两者相关系数均在0.9以上;③怒江干支流各站多年平均基流量和径流量年内分配均呈“尖瘦”的单峰形,而多年平均基流指数年内分配均呈“V”字形,但两者变化过程不完全相反;④怒江干流代表站道街坝站和南汀河支流代表站姑老河站 I_{BF} 均为丰水年<平水年<枯水年,这与基流相对于径流更为稳定有关。

关键词:基流量;径流量;基流分割;数字滤波法;时空分异;怒江流域

中图分类号:TV121 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2017)01-0018-06

Spatial-temporal differentiation of base flow in Nujiang River Basin based on digital filtering method

LIU Xinyou^{1,2}, XIE Feifan²

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Hydrology and Water Resources Bureau of Yunnan Province, Kunming 650106, China)

Abstract: In order to examine the spatial-temporal differentiation characteristics of the base flow in the Nujiang River Basin, the digital filtering method was used to analyze the base flow in the main stream of the Nujiang River and in the Nantinghe River, which is one of tributaries of the Nujiang River. The results are as follows: (1) The multi-year average base flow index (BFI) was between 0.71 to 0.74 for the three hydrological stations over the main stream of the Nujiang River. The multi-year average BFI was around 0.68 for the two hydrological stations over the Nantinghe River, which was significantly lower than that for the main stream. The volume of base flow and BFI increased from upstream to downstream for both the main stream of the Nujiang River and the Nantinghe River. (2) The variations of the base flow and runoff were basically consistent, and their correlation coefficient exceeded 0.9. (3) The average intra-annual variations of the base flow and runoff exhibited a single peak pattern, while the average intra-annual BFI had a V-shaped variation for all of the hydrological stations over the main stream of the Nujiang River and the Nantinghe River. However, their variations were not exactly opposite. (4) The BFI values were ranked in the following ascending order: the wet year, the normal year, and the dry year, for the Daojieba Station, which is a typical hydrological station of the main stream of the Nujiang River, and for the Gulaohe Station, which is a typical hydrological station of the Nantinghe River. This is because base flow is more stable than runoff.

Key words: base flow; runoff; base flow separation; digital filtering method; spatial-temporal differentiation; Nujiang River Basin

基流是河川径流中比较稳定的组成部分,在维持河流健康、维护流域生态平衡、保障供水安全、优

化水资源配置等方面具有不可替代的重要作用。基流可由谷底地表附近的存储水补给,在降水过程中

基金项目:江苏省博士后科研资助计划(1501060B);云南省水利科技项目(2014003)

作者简介:刘新有(1981—),男,高级工程师,博士,主要从事水文水资源与生态安全研究。E-mail: xyliu1981@163.com

这些地方水分快速汇集,并且能保证干旱季节不间断地向河流侧向补给,该部分的存储水分严格来讲并不是真正的“地下水”;使用水化学示踪剂与环境同位素进行水文过程线分割,可更好地理解径流的形成过程,但容易受到环境的影响而产生不确定性,且费用较高,在实际中很少采用^[1]。传统的直线分割法其操作上的人为性和随意性较大,所分割出来的基流量结果粗略、可靠性受到质疑,且由于依靠手工操作,效率很低,难以处理长系列水文数据^[2]。由于无法通过实验对径流分割和水源划分的结果进行科学论证^[3],基流分割一直是水文学、生态水文学研究的重点和难点之一,也一直受到国内外学者的广泛关注,迄今已取得了一定的进展与突破^[4]。近年来,具有客观性强、操作简便、计算速度快等特点的滑动最小值法、HYSEP法、PART法、数字滤波法等自动分割技术快速发展^[5]。其中,数字滤波法对基流分割的结果具有较好的客观性和可重复性,近年来在国际上得到广泛的应用。利用数字滤波方法,吕玉香等^[6]对贡嘎山黄崩溜沟流域进行了基流估算,并分析出基流指数与地表水及地下水中化学元素含量具有较高的一致性和相关性;郭军庭等^[7]对黄土丘陵沟壑区小流域基流特点及其影响因子的分析表明,随着次降雨量增加,基流指数减小,土地利用类型中的农地、灌丛和人工林对基流产生负影响,基流指数与流域河网密度和河流比降呈线性相关;权锦等^[8]对石羊河流域的基流分割研究表明,基流量与降水、地形等因素密切相关;崔玉洁等^[9]对三峡库区香溪河流域基流分割的研究指出,滤波方程的参数和次数对基流分割结果有影响,因此,使用者能够在分割基流的过程中比较方便地加入自己的经验^[10];雷泳南等^[5]以黄土高原窟野河流域为对象,对滑动最小值法、HYSEP法和数字滤波法3类自动基流分割方法进行对比分析,结果表明数字滤波法分割的基流过程线与实际观测值的验证效果最好;豆林等^[11]以我国黄土区6个流域为对象,选取PART法、数字滤波法及滑动最小值法等自动基流分割方法,对这3种方法在该地区的适用性进行分析,结果表明数字滤波法分割的基流过程与实际基流状况更为相符。本文采用数字滤波方法,对怒江流域进行基流分割,并对其基流量、基流指数、基流年内分配、基流与径流的关系进行分析,以明晰怒江流域基流时空分异特征。

1 研究区概况

怒江发源于青藏高原唐古拉山南麓的吉热拍格,经中国云南德宏州出境流入缅甸后改称萨尔温江,最后注入印度洋的安达曼海。从河源至入海口

全长3240 km,其中中国部分2013 km,流域面积13.67万km²,多年平均出境流量约700亿m³。怒江上游属高原地区,山势较平坦,水面较宽,河流补给以冰雪融水为主,降雨为辅;中游云南段山高谷深,河道比降大,水流湍急,河流补给以降雨为主,冰雪融水为辅;下游缅甸和泰国区域雨水丰沛,地势开阔,水流平缓,农业灌溉条件优越。怒江流域中上游地理环境和气候条件复杂,生物多样性突出,山地灾害频发,水资源和水电能源丰富。云南境内怒江干流水能资源理论蕴藏量达1815万kW,经济可开发量达1797万kW,目前水能资源开发率仅约2%。但由于怒江处于断裂带和“三江并流”世界自然遗产保护区,怒江水电开发自2003年以来就广受争议。近年来,有关怒江气候变化^[13-14]、水文过程及其对气候变化的响应^[15-18]、土地利用^[19]、生态安全^[20-21]等方面的研究逐步增多,但与其他国际大河相比,对怒江的研究基础仍较为薄弱,对其基流的研究更是空白。自20世纪80年代以来,在西南纵向岭谷区的金沙江、澜沧江相继进行了大规模梯级水电开发,唯有怒江仍保持相对自然的状态,受到人类活动的影响较小,怒江成为揭示我国西南纵向岭谷区水文自然变化过程唯一的理想场所。

2 研究方法与数据来源

2.1 数字滤波法

数字滤波法是Nathan和McMahon于1990年首次提出的一种模仿人工分割流量过程的数学方法^[22],通过将日径流资料作为地表径流(高频信号)和基流(低频信号)的叠加将基流划分出来,易于计算机自动实现。数字滤波法提出之后,其他学者曾先后从不同角度对滤波方程进行了改进^[23-25],但改进多出经验性判断,未能充分体现其在精度和普适性方面比原滤波方程更为优越。因此,本文仍采用最初提出的滤波方程:

$$\begin{cases} q_t = \beta q_{t-1} + \frac{1+\beta}{2}(Q_t - Q_{t-1}) & (1) \\ b_t = Q_t - q_t & (2) \end{cases}$$

式中: q_t 、 q_{t-1} 分别为 t 、 $t-1$ 时刻过滤出的地表径流; Q_t 、 Q_{t-1} 分别为 t 、 $t-1$ 时刻实测河川径流; b_t 为 t 时刻的基流; β 为滤波参数。

由于 β 和滤波次数对基流分割的准确性会产生一定影响,因此在利用数字滤波方法进行基流分割时,应根据流域气候和地理特征进行合理的参数取值。崔玉洁等^[9]对三峡库区香溪河流域基流分割的研究表明, β 越大,滤波次数越多,分割得到的基流越小,而 β 取0.925,滤波次数采用3次时基流分

表 1 怒江流域水文站基本情况及资料年限

干支流	站名	控制流域面积/km ²	至出境点距离/km	径流资料年限
怒江干流	贡山	101 146	547	1987—2011 年
	道街坝	110 224	153	1964—2011 年
	木城	120 373	27	2005—2011 年
南汀河支流	姑老河	4 185	63	1965—2011 年
	大湾江	7 986	25	2004—2011 年

3 结果分析

3.1 基流时空分布特征

由于各站资料年限不统一,为便于对比分析怒江流域输沙时空特征及其之间的关系,将各站基流量和 I_{BF} 按照资料年限和 2005—2011 年时间段分别进行统计,并给出其与径流量的 pearson 相关系数。

由表 2 可知,怒江干流各站多年平均基流量在 954.3 ~ 1337.0 m³/s 之间, I_{BF} 多年平均值在 0.7 ~ 0.8 之间,基流量自上游到下游递增,下游木城站的 I_{BF} 均值稍大于贡山站和道街坝站。南汀河支流的姑老河站和大湾江站多年平均基流量分别为 62.2 m³/s 和 117.6 m³/s, I_{BF} 多年平均值在 0.68 左右,下游大湾江站的 I_{BF} 均值稍大于中游的姑老河站。干流 I_{BF} 大于南汀河支流,这种差异主要与河流补给形式有关。怒江干流贡山站、道街坝站和南汀河支流的姑老河站 3 站 2005—2011 年径流量和基流量均小于其长序列统计值,这主要与流域 2006 年以来降水较常年偏少有关。各站基流量与径流量的 pearson 相关系数均在 0.9 以上,且通过 $\alpha = 0.01$ 置信水平的显著性检验,表明基流量与径流量呈显著正相关。

表 2 各站多年平均基流量及其与径流量的关系

干支流	站名	统计年限	平均径流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	平均基流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	I_{BF} 均值	基流与径流量的 pearson 相关系数
怒江干流	贡山	1987—2011 年	1321.2	954.3	0.723	0.992 **
		2005—2011 年	1215.7	878.0	0.723	0.991 **
	道街坝	1964—2011 年	1723.3	1236.9	0.718	0.986 **
	木城	2005—2011 年	1657.8	1207.9	0.728	0.993 **
南汀河支流	姑老河	1965—2011 年	1808.3	1337.0	0.739	0.990 **
		2005—2011 年	92.6	62.2	0.674	0.980 **
	大湾江	2005—2011 年	80.4	54.6	0.680	0.985 **
			172.9	117.6	0.682	0.993 **

注: ** 为 $\alpha = 0.01$ 置信水平。

从各站年均基流量及 I_{BF} 变化过程(图 2)来看,各站基流量与径流量变化过程和趋势基本一致, I_{BF} 年际变幅较小且变化趋势不明显。

3.2 基流年内分配特征

由图 3 可知,怒江干流的贡山站、道街坝站和南汀河支流的姑老河站多年平均径流量和基流量年内分配均呈“尖瘦”的单峰形,且年内分配过程基本一致;各站多年平均 I_{BF} 年内分配均呈“V”字形,即早

割结果最优。怒江流域与三峡库区香溪河流域均为喀斯特峡谷区,地形、地貌和降水量相近,因此怒江流域基流分割中 β 和滤波次数采用三峡库区香溪河流域的成果,即 β 取 0.925,滤波次数选用 3 次。

2.2 基流指数

为方便流域基流特征分析,在利用数字滤波法分割出各站逐日基流后,分别按月、年统计,并通过基流占总径流量的比重,即基流指数(base flow index, I_{BF})来量化。

2.3 丰平枯水平年的划分

为对不同径流丰平枯水平年基流特征进行对比分析,在基流分割的基础上进行年径流丰平枯的划分和基流统计。利用实测年径流资料,采用 P-III 型频率曲线法,以一定保证率 P 作为划分年径流丰平枯的标准。在此基础上,计算丰平枯划分标准所对应的年径流量与多年平均径流量的比值,即模比系数 k ,以直观表示各年份径流相对丰枯程度。

2.4 数据来源

怒江流域水沙时空分异特征分析数据来自流域水文观测站,包括贡山、道街坝、木城 3 个干流水文站及南汀河支流的姑老河、大湾江水文站实测日径流数据。怒江流域水文站点分布见图 1,各站基本情况及资料年限见表 1。

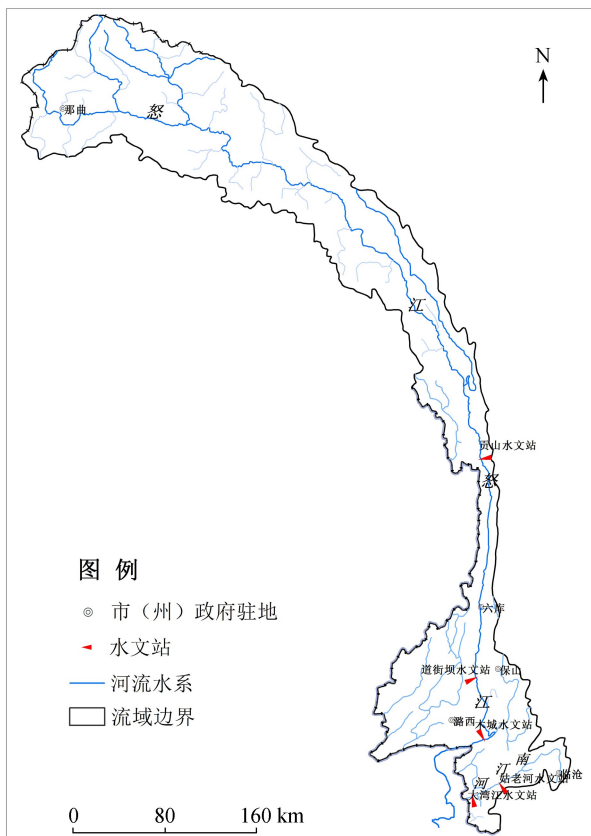
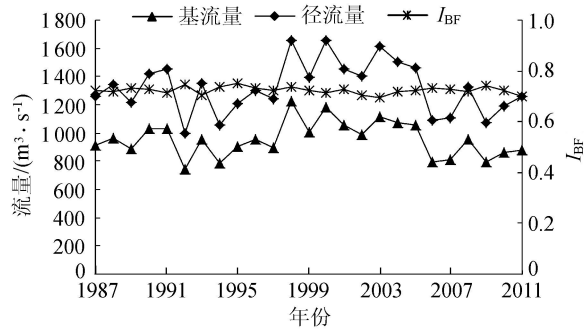
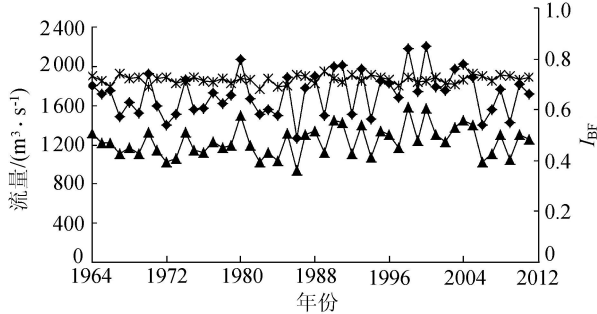


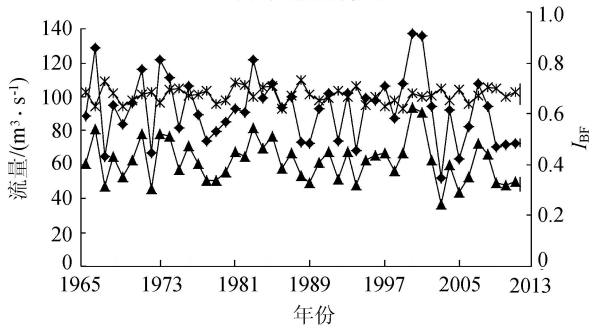
图 1 怒江流域水文站点分布



(a) 干流贡山站



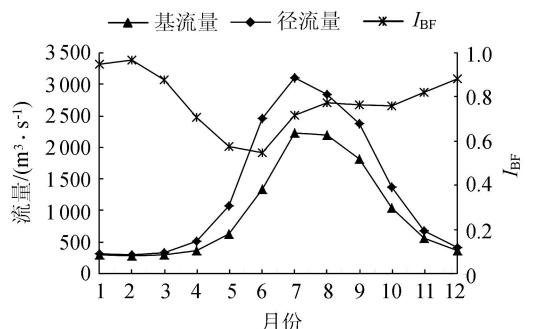
(b) 干流道街坝站



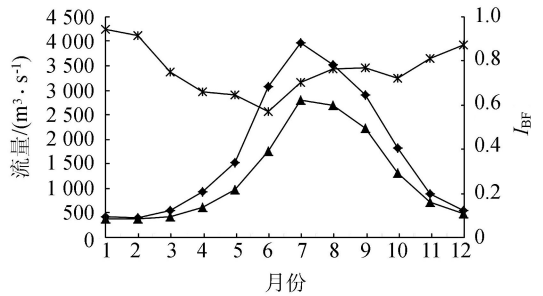
(c) 支流姑老河站

图2 怒江干支流3站年均基流量、径流量及 I_{BF} 变化过程

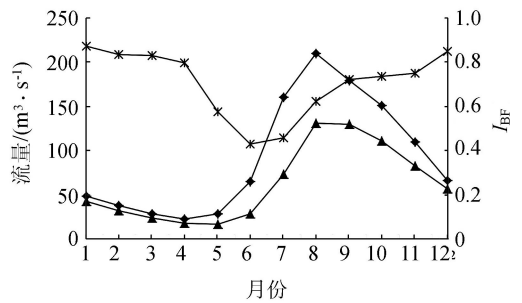
季高雨季低,多年平均 I_{BF} 最低值均出现在6月,但年内分配过程不完全与径流相反。干流贡山站、道街坝站径流量和基流量低值均出现在12月至次年3月,最高值均出现在7月;南汀河支流的姑老河站径流量和基流量低值出现在3—5月,最高值均出现在8月。怒江干流和南汀河支流基流年内分配特征的差异主要与区域气候和地理条件有关。西南季风6月开始沿怒江河谷由南向北推进,下游雨季开始早而结束晚,3—5月春旱明显;干流上游4月气温开始上升,融雪补给增加,径流量和基流量也随之增加。从上游到下游,干流多年平均月 I_{BF} 最低值增大,最高值减小,变幅呈下降趋势;南汀河支流多年平均5—8月 I_{BF} 明显低于其他月份,9月—次年4月



(a) 干流贡山站



(b) 干流道街坝站



(c) 支流姑老河站

图3 怒江干支流3站基流量、径流量及 I_{BF} 年内变化过程

I_{BF} 变幅较小。基流年内分配及 I_{BF} 年内变化主要与河流补给特征区域分异有关。

3.3 不同水平年基流特征

根据水文相关规范,P-III型频率曲线法需要的样本序列一般不少于30年,因此只对径流样本序列较长的干流贡山站、道街坝站和南汀河支流的姑老河站进行丰平枯水年的划分。根据各站年径流量丰平枯水年的划分标准(表3),分别将丰平枯水年年均基流量和 I_{BF} 进行统计(表4)。3站年均基流量均为丰水年 > 平水年 > 枯水年,年均 I_{BF} 均为丰水年 < 平水年 < 枯水年,这是由于河流径流量不同水平年差异较大,而河流基流相对于径流量更为稳定,在枯水年份径流中的比例增加所致。

表3 贡山、道街坝和姑老河站年径流量丰枯水平年的划分标准

丰枯水平年	设计频率 $P/\%$	贡山站		道街坝站		姑老河站	
		年径流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	k	年径流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	k	年径流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	k
丰水年	(0,25]	>1443	>1.09	>1869	>1.08	>105	>1.13
平水年	(25,75]	1443 ~ 1194	1.09 ~ 0.90	1869 ~ 1568	1.08 ~ 0.91	105 ~ 79	1.13 ~ 0.85
枯水年	(75,100)	<1194	<0.90	<1568	<0.91	<79	<0.85

表4 贡山、道街坝和姑老河站不同水平年的年均基流量及 I_{BF}

站名	丰水年			平水年			枯水年		
	年数	年均基流量/($m^3 \cdot s^{-1}$)	I_{BF}	年数	年均基流量/($m^3 \cdot s^{-1}$)	I_{BF}	年数	年均基流量/($m^3 \cdot s^{-1}$)	I_{BF}
贡山	7	1105.6	0.717	12	944.3	0.721	6	797.9	0.735
道街坝	12	1431.4	0.713	21	1244.2	0.717	15	1071.3	0.724
姑老河	12	77.9	0.663	23	61.6	0.667	12	47.8	0.697

4 结 论

a. 怒江干支流各站基流量与径流量变化过程基本一致,基流量与径流量呈显著正相关, I_{BF} 值年际变幅较小且变化趋势不明显。

b. 南汀河支流基流量及 I_{BF} 值明显低于怒江干流,同一时期(2005—2011年)干支流基流量和 I_{BF} 值均呈自上游到下游递增的规律;怒江干支流各站2005—2011年径流量和基流量均小于其长序列统计值,这主要与流域该时期年均降水较常年偏少有关。

c. 怒江干流贡山站、道街坝站和南汀河支流姑老河站多年平均基流量和径流量年内分配均呈“尖瘦”的单峰形,各站多年平均 I_{BF} 值年内分配均呈“V”字形,但两者变化过程不完全相反。各站基流年内分配及 I_{BF} 值年内变化差异主要与河流补给特征区域分异有关。

d. 怒江干流贡山站、道街坝站和南汀河支流姑老河站年均基流量均为丰水年 > 平水年 > 枯水年,且变幅较大;年均 I_{BF} 值均为丰水年 < 平水年 < 枯水年,但变幅较小。

参考文献:

[1] 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))

[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): 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): 3073-3080. (in Chinese))

[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): 960-967. (LIN Xueyu, LIAO Zisheng, QIAN Yunping, et al. Baseflow separation for groundwater study in the Yellow River Basin, China [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2009, 39(6): 960-967. (in Chinese))

[4] 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. (CHEN Liqun, LIU Changming, LI Fadong. Reviews on base flow researches [J]. Progress in Geography, 2006, 25(1): 1-15. (in Chinese))

[5] 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 Yongnan, ZHANG Xiaoping, ZHANG Jianjun, et al. Suitability analysis of automatic baseflow separation methods in typical watersheds of water-wind erosion crisscross region on the Loess Plateau, China [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2011, 9(6): 57-64. (in Chinese))

[6] 吕玉香,王根绪,张文敬. 贡嘎山黄崩溜沟流域基流估算及其特性分析[J]. 中国农村水利水电, 2009(3): 17-20. (LYU Yuxiang, WANG Genxu, ZHANG Wenjing. Base flow estimation and its characteristics in Huangbengliu Gully Basin in the Gongga Mountains [J]. China Rural Water and Hydropower, 2009(3): 17-20. (in Chinese))

[7] 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. (GUO Junting, ZHANG Zhiqiang, WANG Shengping, et al. Features of base flow and its influencing factors for small watersheds in loess hilly and gully region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2011, 31(1): 87-92. (in Chinese))

[8] 权锦,马建良. 石羊河流域基流分割及特征分析[J]. 水电能源科学, 2012, 28(1): 15-17. (QUAN Jin, MA Jianliang. Base flow separation and its characteristics analysis in Shiyang River Basin [J]. Water Resources and Power, 2012, 28(1): 15-17. (in Chinese))

[9] 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 base flow separation in Xiangxi River Watershed of Three Gorges Reservoir area [J]. Journal of China Hydrology, 2011, 31(6): 18-23. (in Chinese))

[10] 林凯荣,陈晓宏,江涛,等. 数字滤波进行基流分割的应用研究[J]. 水力发电, 2008, 34(6): 28-30. (LIN Kairong, CHEN Xiaohong, JIANG Tao, et al. Application and study on base flow separation using digital filters [J]. Water Power, 2008, 34(6): 28-30. (in Chinese))

[11] 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. (DOU Lin, HUANG Mingbin. Applied study of base flow separation methods in watersheds of Loess Plateau [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2010, 30(3): 107-111. (in Chinese))
- [12] 冯彦, 何大明, 甘淑. 纵向岭谷区怒江流域生态变化之驱动力分析[J]. 山地学报, 2008, 26(5): 538-545. (FENG Yan, HE Daming, GAN Shu. The main factors to effect the ecological changes in Nujiang Drainage Basin of Longitudinal Range-Gorge Region [J]. Journal of Mountain Science, 2008, 26(5): 538-545. (in Chinese))
- [13] 樊辉, 何大明. 怒江流域气候特征及其变化趋势[J]. 地理学报, 2012, 67(5): 621-630. (FAN Hui, HE Daming. Regional climate and its change in the Nujiang River Basin [J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(5): 621-630. (in Chinese))
- [14] 杜军, 翁海卿, 袁雷, 等. 近 40 年西藏怒江河谷盆地的气候特征及变化趋势[J]. 地理学报, 2009, 64(5): 581-591. (DU Jun, WENG Haiqing, YUAN Lei, et al. The climate characteristics and changing trends over the Nujiang River Basin in Tibet from 1971 to 2008 [J]. Acta Geographica Sinica, 2009, 64(5): 581-591. (in Chinese))
- [15] 刘新有, 何大明. 怒江流域悬移质输沙时空分布特征及变化趋势[J]. 地理学报, 2013, 68(3): 365-371. (LIU Xinyou, HE Daming. Temporal and spatial distribution and its change trend of suspended sediment transport in the Nujiang River Basin [J]. Acta Geographica Sinica, 2013, 68(3): 365-371. (in Chinese))
- [16] 姚治君, 段瑞, 刘兆飞. 怒江流域降水与气温变化及其对跨境径流的影响分析[J]. 资源科学, 2012, 34(2): 202-210. (YAO Zhijun, DUAN Rui, LIU Zhaofei. Changes in precipitation and air temperature and its impacts on runoff in the Nujiang River Basin [J]. Resources Science, 2012, 34(2): 202-210. (in Chinese))
- [17] YOU Weihong, GUO Zhirong, HE Daming. Variation in trans boundary flow of Nujiang River and its correlation with summer monsoon under the effect of the Longitudinal Range-Gorge [J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(sup2): 148-155.
- [18] 尤卫红, 吴湘云, 郭志荣. 纵向岭谷区的怒江跨境径流量变化特征[J]. 山地学报, 2008, 26(1): 22-28. (YOU Weihong, WU Xiangyun, GUO Zhirong. Transboundary flow change features of the Nujiang River in the Longitudinal Range-Gorge Region [J]. Journal of Mountain Science, 2008, 26(1): 22-28. (in Chinese))
- [19] 邹秀萍, 齐清文, 徐增让, 等. 怒江流域土地利用/覆被变化及其景观生态效应分析[J]. 水土保持学报, 2005, 19(5): 147-151. (ZOU Xiuping, QI Qingwen, XU Zengrang, et al. Analysis of land use/cover changes and its landscape ecological effects in Nujiang Watershed [J]. Journal of Soil Water Conservation, 2005, 19(5): 147-151. (in Chinese))
- [20] 何大明, 吴绍洪, 彭华, 等. 纵向岭谷区生态系统变化及西南跨境生态安全研究[J]. 地球科学进展, 2005, 20(3): 338-344. (HE Daming, WU Shaohong, PENG Hua, et al. A study of ecosystem changes in Longitudinal Range-Gorge Region and trans boundary eco-security in Southwest China [J]. Advances in Earth Science, 2005, 20(3): 338-344. (in Chinese))
- [21] 包广静, 吴兆录, 骆华松. 怒江流域水电开发社会经济影响分析[J]. 水利水电科技进展, 2007, 27(6): 10-17. (BAO Guangjing, WU Zhaolu, LUO Huasong. Analysis of social and economic effects of hydropower development in Nujiang watershed [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2007, 27(6): 10-17. (in Chinese))
- [22] NATHAN R J, MCMAHON T A. Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses [J]. Water Resources Research, 1990, 26: 1465-1473.
- [23] CHAPMAN T G. Comment on "Evaluation of automated techniques for base flow and recession analysis" by R J Nathan and T A McMahon [J]. Water Resources Research, 1991, 27: 1783-1784.
- [24] CHAPMAN T G. A comparison of algorithms for stream flow recession and base flow separation [J]. Hydrological Processes, 1999, 13: 701-714.
- [25] ECKHARDT K A. How to construct recursive digital filters for base flow separation [J]. Hydrological Process, 2005, 19: 507-515.

(收稿日期: 2016-06-03 编辑: 徐娟)

· 喜报 ·

《水资源保护》主编王沛芳教授荣获国家
科技进步一等奖

2017年1月9日, 2016年度国家科学技术奖励大会在北京隆重举行。《水资源保护》主编王沛芳教授主持的“生态节水型灌区建设关键技术及应用”获国家科技进步一等奖。

王沛芳教授领衔的“生态节水型灌区建设关键技术及应用”研究团队针对我国农业面源污染防控和水资源节约重大需求, 创建生态节水型灌区建设理论方法体系, 构建节水减污和面源防控四道防线系统, 发明水肥精准施用设备、便携式水质净化器等核心技术和创新装置, 开发灌区智能监控管理系统, 攻克灌排系统与面源防控相耦合的关键技术瓶颈, 在新技术的工艺、结构、材料和装备方面取得重大原创性突破。成果广泛应用于灌区规划设计和建设运行中, 取得了重大社会经济与生态环境效益。

(本刊编辑部 供稿)