

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdcqk.2019.0130

陈秋潭,张永勇. 淮河中上游流域基流时空变化特征及闸坝调控影响[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(6): 10-19. CHEN Q T, ZHANG Y Y. Temporal and spatial variation characteristics of base flow and regulation effect of sluice and dam in the upper and middle reaches of the Huai River basin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(6): 10-19. (in Chinese)

淮河中上游流域基流时空变化特征及闸坝调控影响

陈秋潭^{1,2}, 张永勇¹

(1. 中国科学院 地理科学与资源研究所 陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:基流作为河川径流的重要组成部分,对维系河流生态系统稳定起着关键作用。以淮河中上游流域为例,采用 Chapman-Maxwell、Lyne-Hollick 和 Boughton-Chapman 三种数字滤波法对淮河干流和支流沙颍河不同闸坝调控的 7 个站点 2001—2015 年日径流序列进行基流分割;采用 Mann-Kendall 趋势分析检测基流量在年际、汛期和非汛期多种时间尺度下的变化,对比分析闸坝调控的影响特征。结果表明:Chapman-Maxwell 数字滤波法对基流过程分割更合理,沙颍河水系站点的基流系数在 0.23~0.46,淮河干流站点系数在 0.36~0.50,沙颍河水系站点基流系数均小于淮河干流站点;沙颍河和淮河干流的站点基流量均呈现出减少的趋势,其中沙颍河的基流量减幅明显高于淮河干流;沙颍河槐店、阜阳闸和淮河干流王家坝的年平均基流量,以及沙颍河白龟山、槐店和阜阳闸的汛期基流量减少趋势显著;闸坝拦蓄导致下游的径流和基流量均呈现减少的趋势,沙颍河站点影响较严重,特别是在汛期 8 月减少趋势具有统计显著性;淮河干流站点受闸坝调控较弱,减少并不显著。研究可为认识淮河中上游流域的水循环特征及其转化关系提供技术支撑,也可为流域地下水资源可持续利用、人类活动影响评估等提供依据。

关键词:基流;数字滤波法;趋势检验;闸坝调控;淮河流域

中图分类号:TV121;P333 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Temporal and spatial variation characteristics of base flow and regulation effect of sluice and dam in the upper and middle reaches of the Huai River basin

CHEN Qiutan^{1,2}, ZHANG Yongyong¹

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Process, Chinese Academic Science, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academic Science, Beijing 100049, China)

Abstract: As the most important part of runoff, base flow plays a key role in maintaining the river ecosystem stability. In this study, three digital filtering methods (Chapman-Maxwell, Lyne-Hollick, and Boughton-Chapman) were adopted to divide the baseflow series. The daily observed runoff series were obtained from 2001 to 2015 at seven stations in the Huai River and Shaying tributary. Temporal and spatial variations of base flow were further explored at inter-annual and seasonal scales using the Mann-Kendall trend analysis method and regional impacts of dam regulations were also identified. Results showed that: The Chapman-Maxwell digital filtering method was more reasonable for the division of the baseflow process. The baseflow indices of Shaying River were between 0.23 to 0.46, much less than those of the Huai mainstream which were between 0.36 to 0.50; The inter-annual base flows in the entire Huai River basin decreased gradually, particularly those at the Huaidian and Fuy-

收稿日期:2019-01-28 修回日期:2019-06-21 网络出版时间:2019-09-03

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20190902.1539.002.html>

基金项目:“十三五”国家重点研发计划(2016YFC0400902);国家自然科学基金(41671024)

作者简介:陈秋潭(1994—),男,江西武宁人,主要从事水循环模拟方面研究。E-mail:chenqiutan1@163.com

通信作者:张永勇(1981—),男,湖北荆门人,副研究员,博士,主要从事环境水文学方面的研究。E-mail:zhangyy003@igsnr.ac.cn

ang stations in Shaying river and Wangjiaba station in Huai river, which showed statistically significant decreasing trend. The baseflow series in the flood season at Baiguishan, Huaidian and Fuyang stations in the Shaying River also showed significant decreasing trend. The regulations of dam and sluice decreased the downstream runoff and baseflow, and the regulation effects in the Shaying River were more serious, especially in the flood season (i. e. , August). The mainstream of the Huaihe River was weakly regulated by the dam, and the reduction was not significant. The study is expected to provide technical support for understanding the characteristics of water cycle and its transformation relationship in the upper and middle reaches of the Huai River basin, and also provide a basis for sustainable utilization of groundwater resources and impact assessment of human activities.

Key words: base flow; digital filtering method; trend analysis; regulation of sluices and dams; Huai River basin

基流是河川径流的重要组成成分,一般由地下水以及其它延迟水量补给。基流在整个流域的水资源补给、河流生态系统的维系等方面起到了巨大的作用,也在水资源调查评价、污染溯源以及降雨—径流关系探索等方面均有重要的地位^[1-3]。基流量的变化分析也对水资源和包气带蓄水能力等评价研究具有十分重要的意义。

基流产生机制并不完善,也无法像河川径流一样直接通过观测获取相应数据^[3-4]。基流分割方面存在多种方法,但多数尚缺乏普适性^[5]。作图法是最早使用的分割方法,主要包括直线分割法、估计作图法等^[4],但此类方法随机性太大,且分割所需时间也较长。近年来,随着计算机技术的迅速发展,采用数值模拟和径流序列的信号处理技术对基流进行分割可以得出准确的结果,计算效率大幅度提高。最具代表性的方法有数字滤波法^[6]、HYSEP法^[7]、PART法^[8]和滑动最小值法^[9]。其中,数字滤波法普适性较好,该方法由 Lyne 和 Hollick 于 1979 年首次提出, Nanthan^[10]、 Boughton、Chapman 和 Maxwell^[11]先后对其进行了改进,使得该方法越来越简便与成熟,成为国际上应用最为广泛的分割法之一,该方法的基本原理是通过数字滤波器将信号分解为高频和低频,其中高频代表响应较快的地表径流,低频代表响应较慢的地下径流,从而将河川径流过程分为地表径流和地下径流^[5],能够克服人工进行基流分割的主观性,具有迅速、稳定、可重复性等特点。如焦玮等^[12]以锡林河流域为研究区,使用不同的基流分割方法对径流过程进行分割,得到数字滤波法分割的结果稳定性较高;党素珍等^[13]认为数字滤波法能够较好的得出年内基流量以及 BFI 值变化趋势。

基流时空变化受到自然因素和人类活动等多重因素的影响,变化过程也极为复杂。其中自然因素包括降水、流域面积、土壤、气候、地质、地形等^[14];

而人类活动包括地下水开采、水库修建和调蓄^[15-16]、农作物种植及人工林覆盖等^[17-18]。王劲哲等^[14]对呼图壁河基流变化及影响因素进行了分析,其中气候、降水等自然因素在一定程度上控制着基流的变化情况;白乐等^[19]分析了降水和人类活动对秃尾河流域基流的影响,发现人类活动(水利工程的建设和调蓄、地下水开采)占主导作用;王曼玉等^[20]以密云水库上游潮河流域为研究区,分析得出水利工程建设会引起流域基流量变化;亢小语等^[21]针对黄土高原基流的动态变化特征分析得出,人类活动逐渐成为影响基流变化的主要因素。因此在揭示自然因素对基流时空变化特征影响的同时,亟待进一步加强人类活动对基流变化的影响机制,特别是在多闸坝调控流域。

淮河流域是我国最具代表性的多闸坝调控流域。目前全流域已修建不同类型闸坝一万多座^[22]。河道径流过程受闸坝调控等人类活动的影响,已发生了显著的变化^[23-26],但基流过程的变化及其影响因素还有待进一步探索。本文选择多种数字滤波法(Chapman-Maxwell、Lyne-Hollick 及 Boughton-Chapman)和趋势分析(Mann-Kendall 检验)相结合,重点探索淮河流域中上游基流的时空变化特征,并通过对比不同调控强度地区基流量的变化,揭示了闸坝调控的影响。研究成果可为认识淮河中上游流域的水循环特征及其转化关系提供技术支撑,也为淮河中上游流域的地下水资源可持续利用提供依据。

1 研究区概况和数据来源

淮河流域地处 111°55′~121°25′E, 30°55′~36°36′N,面积约 27 万 km²。流域地处我国南北气候过渡带,北部属暖温带半湿润气候区,南部属亚热带湿润季风气候区。流域多年平均降水量约为 883 mm,多年平均气温 13.2~15.7℃,降水和气温

均呈现由南向北逐渐递减的趋势。淮河干流全长约 1 000 km,总落差约 200 m,其中河川径流主要靠降水和地下径流补给^[27]。本文以淮河中上游为研究区域(图 1),淮河干流径流量较大、闸坝数量少且调蓄能力有限,而沙颍河径流量较小,且受梯级闸坝调控影响严重,几乎每 50 km² 就有一座闸坝。选择淮

河干流长台关、王家坝、鲁台子及蚌埠和沙颍河白龟山、槐店及阜阳共 7 个水文站 2001—2015 年实测日平均流量资料进行基流分割和时空变化特征分析,各站点的基本属性和调控闸坝见表 1。另外,考虑的时间尺度主要包括年际、汛期(每年 6 至 9 月)和非汛期(10 月—次年 5 月)。

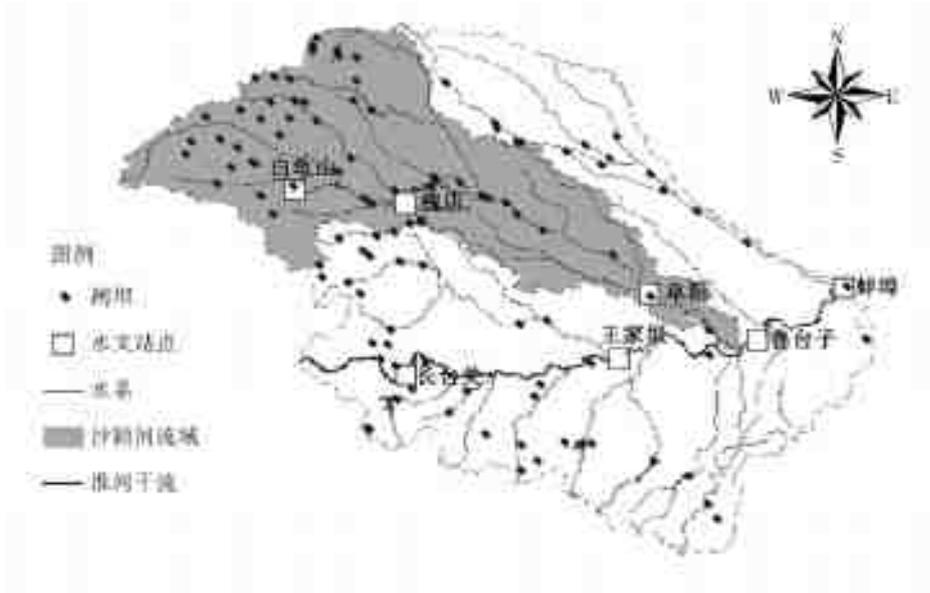


图 1 研究区、水文站点及闸坝位置

Fig. 1 Locations of study area including selected hydrological stations,dams and sluices

表 1 选择的水文站点和闸坝属性

Tab.1 Detail information of the selected hydrological stations,dams and sluices in the study area

河流	水文站点	控制流域面积/km ²	有无闸坝调控	总库容/亿 m ³	年均流量/(m ³ ·s ⁻¹)	时间
沙颍河	白龟山	1 416	有	9.220	14.12	2001—2015
	槐店	27 300	有	0.256	87.83	2001—2015
	阜阳	35 246	有	1.060	116.40	2001—2015
淮河干流	长台关	3 090	无		27.22	2001—2015
	王家坝	30 630	有	7.2(蒙洼区)	218.56	2001—2015
	鲁台子	88 630	无		612.21	2001—2015
	蚌埠	121 330	有	2.72	785.00	2001—2015

2 研究方法

2.1 基流分割方法

基流分割方法主要选择三种较为常见的数字滤波法,其中包括 Lyne-Hollick 数字滤波法、Chapman-Maxwell 数字滤波法和 Boughton-Chapman 数字滤波法。选择三种方法的主要目的是比较三种数字滤波法分割日平均流量得出的基流结果,并根据结果合理性挑选出适宜的方法,最终选择该方法分割出的基流结果进行分析。

2.1.1 Lyne-Hollick 数字滤波法

该方法由 Lyne 和 Hollick 在 1979 年首次提出,其特点是基于信号分析和处理,能够将河川径流

划分为响应较快的地表径流和响应较慢的基流,Nathon 和 McMahon 于 1990 年对该公式进行改进,公式为

$$R_t = aR_{t-1} + \frac{(1+a)}{2}(Q_t - Q_{t-1}) \quad (1)$$

$$Q_b = Q_t - R_t \quad (2)$$

式中:Q_t 为 t 时刻的流量(m³/s);R_t 为 t 时刻的地表径流量(m³/s);Q_b 为 t 时刻的基流流量(m³/s);a 为滤波参数,Nathon 和 McMahon 研究得出,滤波参数 a 取 0.925 能够得到基流分割的最佳结果^[26]。

2.1.2 Chapman-Maxwell 数字滤波法

Chapman 与 Maxwell 在 1991 年对 Lyne-Hollick 数字滤波法进行了改进,该方法能够在高频的

地表径流停止的时候,消除基流不变所带来的误差,具体公式为

$$Q_{b(k)} = \frac{f}{2-f} Q_{b(k-1)} + \frac{1-f}{2-f} Q_k \quad (3)$$

式中: Q_k 为第 k 时刻的流量(m^3/s); $Q_{b(k)}$ 为第 k 时段内的基流流量(m^3/s); f 为退水系数。退水系数的计算方法由 Eckhardt^[30] 提出,主要是利用每个时刻的流量数据,整个退水时间序列不得少于 5 d,并且数据序列必须保证 $Q_{k-3} > Q_{k-2} > Q_{k-1} > Q_k > Q_{k+1} > Q_{k+2}$ 。 y 轴为退水曲线 $k+1$ 时刻的流量, x 轴为退水曲线 k 时刻的流量,虚线通过坐标轴原点,虚线的斜率即为退水系数的取值。

2.1.3 Boughton-Chapman 数字滤波法

Boughton-Chapman 数字滤波法是 Boughton 于 1993 年提出的方法,特点是具有两个滤波参数,能够增加分割过程中的稳定性,Chapman 于 1996 年对该式进行了改进,具体公式为

$$Q_{b(k)} = \frac{f}{1+f} Q_{b(k-1)} + \frac{f_1}{1+f_1} Q_k \quad (4)$$

式中: f_1 为滤波参数一般取 0.15,其余符号含义同上。

2.1.4 基流系数(BFI)

$$BFI = \frac{W_b}{W} \quad (5)$$

式中:BFI 为基流系数,为对应时段内基流总量与径流总量的比值; W_b 为基流总量(m^3); W 为径流总量(m^3)。

2.2 Mann-Kendall 趋势检验法

Mann-Kendall 检验法不需要对数据序列进行特定的分布检验,并且数据序列中有缺失值也不会影响趋势检测,目前已被广泛应用于降水、气温、径流以及水质等因素的时间序列的分析^[29]。其基本原理如下:原假设 H_0 为原始序列数据(x_1, \dots, x_n),并且这 n 个样本是独立随机同分布的;备择假设 H_1

是原始序列有减少或者增大的趋势,为双边检验,而对于所有的 $a, b \leq n$,且 $a \neq b$, x_a 与 x_b 的分布互不相同,检验的统计变量 S 使用公式(6)计算

$$S = \sum_{b=1}^{n-1} \sum_{a=b+1}^n \text{Sgn}(x_a - x_b) \quad (6)$$

$$\text{其中, } \text{Sgn}(x_a - x_b) = \begin{cases} 1 & (x_a - x_b) > 0 \\ 0 & (x_a - x_b) = 0 \\ -1 & (x_a - x_b) < 0 \end{cases}$$

S 呈现出正态分布,且其均值为 0,方差 $\text{Var}(S) = n(n-1)(2n+5)/18$ 。当 $n > 10$ 的时候,标准的正态统计变量通过式(7)进行计算

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (7)$$

通过上式,在双边的趋势检验中,并且在给定的 α 置信水平上,如果 $|Z| \geq Z_{1-\alpha/2}$,则原假设是不可接受的,即在 α 的置信水平上,时间序列数据存在明显的上升或者下降趋势。而对于统计变量 $Z > 0$ 时,呈现出上升趋势; $Z < 0$ 则呈现出下降趋势。 Z 的绝对值大于或等于 1.96 时,表示通过了置信度 95% 的显著性检验水平。

3 结果与分析

3.1 基流系数和基流量

3.1.1 退水系数

使用各站点退水序列计算出的退水系数过程和数值见图 2 和表 2。研究区内 7 个站点的退水系数取值范围在 0.960~0.980,其中沙颖河水系站点退水系数最大值位于白龟山站,为 0.976;淮河干流站点中退水系数最大值位于王家坝,为 0.973。各退水系数在不同站点内差异性并不明显。

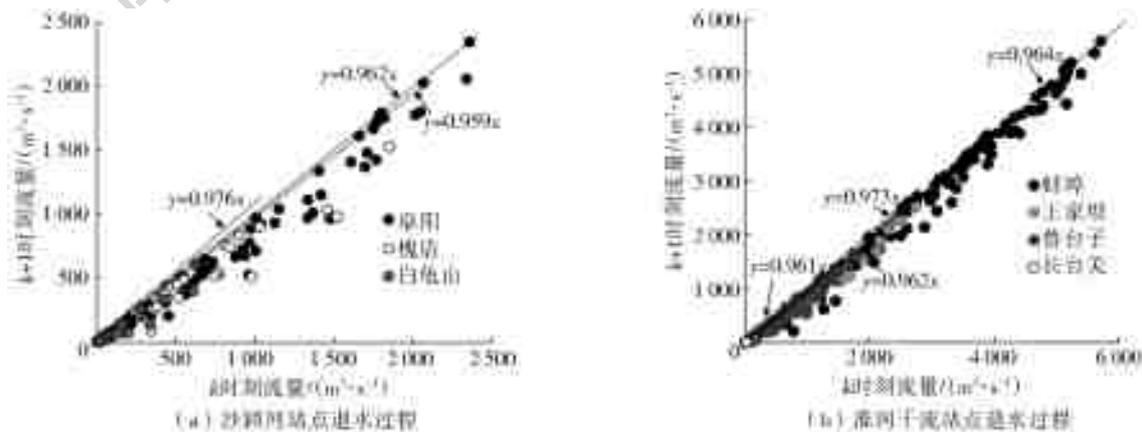


图 2 沙颖河和淮河干流站点退水过程

Fig. 2 Recession processes at different stations in the Shaying River and Huai River

表 2 各站点退水系数

Tab. 2 Recession constant for each station

河流	沙颍河			淮河干流			
站点名称	白龟山	槐店	阜阳	长台关	王家坝	鲁台子	蚌埠
退水系数	0.976	0.959	0.962	0.961	0.973	0.962	0.964
平均值	0.967			0.965			

3.1.2 基流分割结果

采用 3 种数字滤波法对径流进行基流分割,得到的各时期各个站点 BFI 取值范围见图 3 及表 3。Chapman-Maxwell、Lyne-Hollick 和 Boughton-Chapman 数字滤波法得出的 BFI 取值范围分别为 0.20~0.50、0.40~0.70 和 0.10~0.40。为了减少不同数字滤波法分割带来的不确定性,本文选取 BFI 取值范围适中的结果,即 Chapman-Maxwell 数字滤波法分割结果。

由 Chapman-Maxwell 数字滤波法得出的结果可知,沙颍河(白龟山、槐店、阜阳闸)的年际 BFI 值

范围为 0.28~0.40,其中上游白龟山 BFI 值变化情况小于其余两个站点的 BFI 值变幅,而淮河干流(长台关、鲁台子、王家坝、蚌埠闸)年际 BFI 值范围为 0.39~0.49。由沙颍河和淮河干流站点 BFI 值对比可知,沙颍河年际 BFI 值明显小于淮河干流 BFI 值,说明在年际基流空间分布上,沙颍河的基流对总径流的贡献小于淮河干流基流对总径流的贡献。在汛期和非汛期,尽管沙颍河站点 BFI 值小于淮河干流站点,但其变化幅度要大于淮河干流的站点,主要原因是淮河干流流量大,BFI 值在一定程度上受到了径流量大小的影响。相比各站点的汛期和非汛期 BFI 值,非汛期时值均大于汛期,如槐店 BFI 汛期(0.23~0.35)和非汛期(0.35~0.46)、长台关 BFI 汛期(0.36~0.40)和非汛期(0.41~0.45),表明非汛期时基流对河川径流的贡献程度均大于汛期。

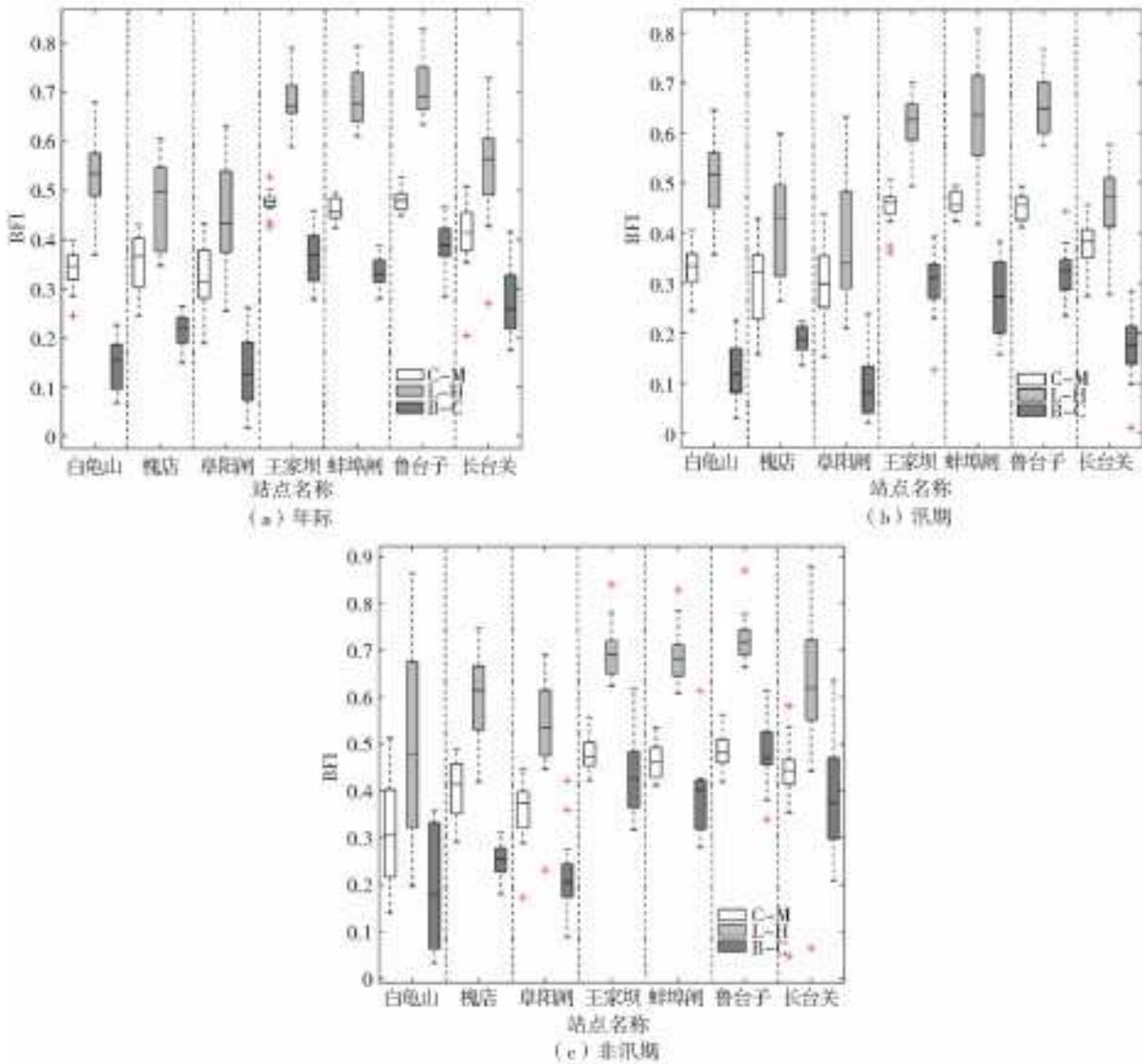


图 3 3 种方法年际、汛期和非汛期 BFI 取值

Fig. 3 Annual, flood season and non-flood season BFI ranges obtained by three methods

表 3 3 种方法基流系数平均值

Tab. 3 Average BFI values obtained by three methods

站点所在河流	站点名称	Chapman-Maxwell			Lyne-Hollick			Boughton-Chapman		
		年际	汛期	非汛期	年际	汛期	非汛期	年际	汛期	非汛期
沙颍河	白龟山	0.34	0.33	0.32	0.53	0.50	0.51	0.15	0.13	0.19
	槐店	0.35	0.30	0.40	0.48	0.42	0.60	0.21	0.19	0.25
	阜阳	0.32	0.30	0.36	0.45	0.38	0.53	0.13	0.10	0.22
淮河干流	长台关	0.40	0.38	0.43	0.54	0.46	0.61	0.25	0.18	0.36
	王家坝	0.47	0.45	0.48	0.68	0.62	0.70	0.37	0.30	0.43
	鲁台子	0.48	0.45	0.49	0.69	0.66	0.71	0.39	0.32	0.46
	蚌埠	0.46	0.43	0.47	0.69	0.63	0.69	0.34	0.27	0.39

注:加粗为所选取最佳数字滤波法 BFI 结果。

3.2 不同站点不同时期基流量变化特征

基流量年际变化见表 4、图 4(a)。从图表中可以看出,流域内所有站点的基流量均呈现减少趋势。各站点基流量减少幅度在 $0.05 \sim 0.91 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{a})$,其中沙颍河站点和淮河干流站点的平均减幅分别为 $0.41 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{a})$ 和 $0.64 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{a})$;另外,从减幅占年均基流总量百分比来看,变幅在 $0.15\% \sim 0.71\%$,其中沙颍河站点和淮河干流站点的减幅占比均值分别为 0.46% 和 0.38% 。基流量减幅及其占年均基流总量的百分比最小位于沙颍河白龟山站,最大位于沙颍河槐店站,这主要是由于沙颍河流域闸坝调控强烈,闸坝的修建和调控会在一定程度上减少基

流量^[21]。

表 4 各站点年际、汛期及非汛期基流量 Mann-Kendall 趋势检验 Z 值

Tab. 4 Mann-Kendall Test Z values for base flow in annual, flood and non-flood seasons at different stations

所在河流	站点名称	年际	汛期	非汛期
沙颍河	白龟山	-1.19	-2.08	-0.79
	阜阳闸	-1.68	-2.28	0
	槐店	-2.40	-2.40	-1.58
淮河干流	长台关	-0.69	-0.69	-0.49
	王家坝	-1.78	-1.58	-1.58
	鲁台子	-1.19	-1.48	-1.29
	蚌埠闸	-0.99	-1.39	-0.79

注:加粗为具有显著性趋势($|Z| \geq 1.96$)。

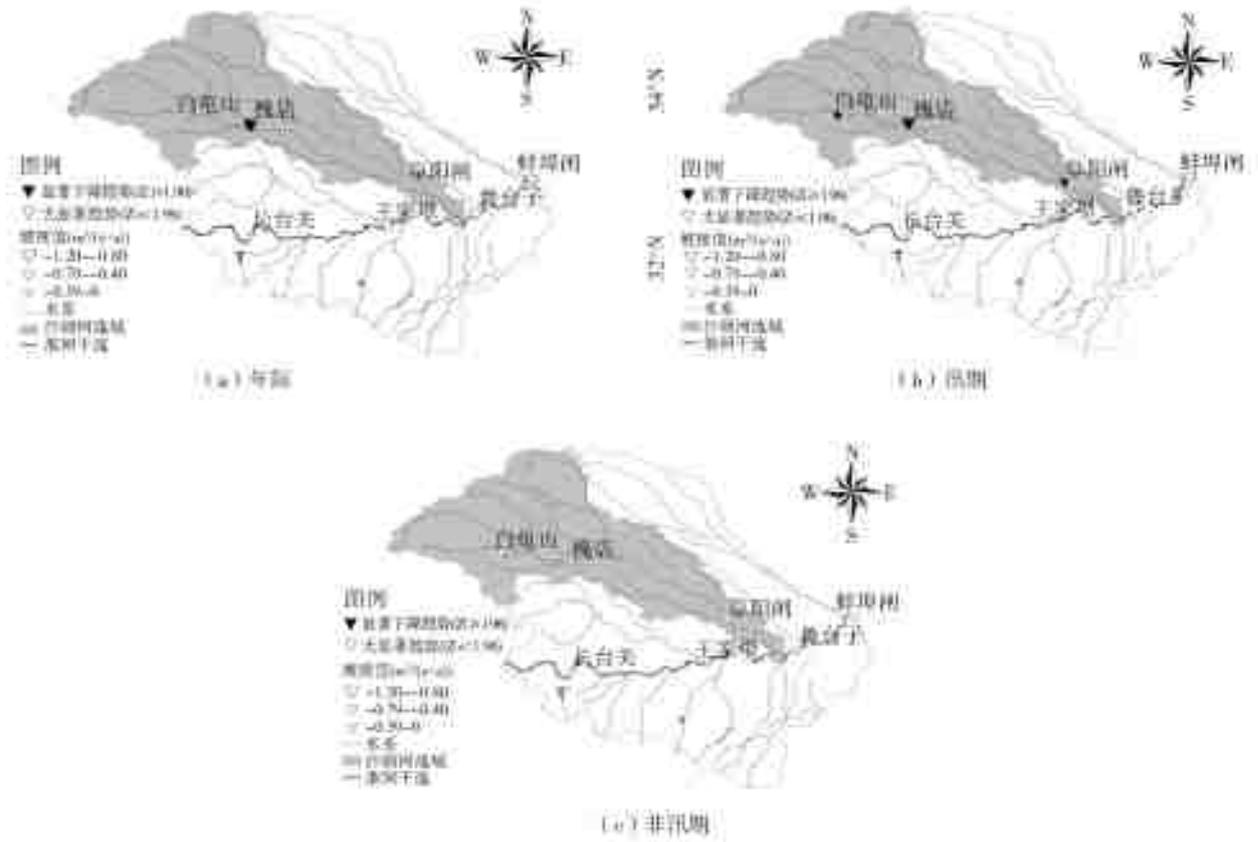


图 4 不同站点年际、汛期及非汛期基流量的时间变化趋势

Fig. 4 Temporal trends of annual average baseflow, baseflow in flood and non-flood seasons at different stations

从汛期基流量变化来看(表 4、图 4(b)),所有站点也均呈现减少趋势。各站点汛期基流量减少幅度在 $0.08 \sim 1.04 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{a})$,其中沙颍河站点和淮河干流站点的平均减幅分别为 $0.50 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{a})$ 和 $0.67 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{a})$;另外,从减幅占汛期基流总量百分比来看,变幅在 $0.05\% \sim 0.55\%$,其中沙颍河站点和淮河干流站点的减幅占比均值分别为 0.35% 和 0.32% 。基流量减幅及其占年均基流总量的百分比最小位于沙颍河白龟山站,最大位于沙颍河槐店站。汛期闸坝以防汛安全为主要目的,以关闸调蓄为主。沙颍河是淮河流域闸坝调控强烈的区域^[22],3 个站点基流均呈现显著减少的趋势;而淮河干流闸坝调控力度较小,基流量减少趋势并不显著。

从非汛期基流量变化来看(表 4、图 4(c)),所有研究站点也呈现减少的趋势,但是趋势均不显著。从各站点基流量减少幅度与非汛期基流总量的占比来看,各站点的变化幅度也并不明显,减少幅度仅在 $0.06 \sim 0.36 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{a})$,其中沙颍河站点和淮河干流站点的平均减幅分别为 $0.22 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{a})$ 和 $0.24 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{a})$;从减幅占非汛期基流总量百分比来看,变幅在 $0.07\% \sim 0.49\%$,其中沙颍河站点和淮河干流站点的减幅占比均值分别为 0.30% 和 0.27% 。减幅及变幅最小和最大分别在白龟山站和槐店站。可能是由于在非汛期,闸坝的调控能力相对较弱,也导致基流量变化的幅度没有汛期那么明显。

综上所述,从时间变化特征来看,研究区内所有站点从 2001—2015 年基流量均呈现减少的趋势,其中仅沙颍河白龟山、槐店及阜阳站基流量在汛期减少趋势具有统计显著性。从空间分布来看,沙颍河中下游槐店和阜阳站基流量减少幅度最明显,而沙颍河上游白龟山站、淮河干流站点基流量减少幅度较小。基流的时空变化特征与闸坝的调控呈现明显的一致性。

3.3 闸坝调控对基流的影响

为了更深入探讨闸坝调控对基流量的影响,进一步对各月降水、径流和基流的时间变化趋势和闸坝调控进行了分析(图 5、6)。沙颍河干流自上游游到下游白龟山水库、槐店及阜阳站点大部分月份降水量(除白龟山水库站 4 和 6 月、槐店站 4 和 7 月、阜阳站 7 月)没有明显的变化,但径流量和基流量均呈减少的趋势,特别是在汛期减少趋势具有统计显著性(如 8 月),而在非汛期趋势并不显著。主要是由于在汛期沙颍河闸坝为保障下游防洪安全,以关闸调洪为主^[18-19]。闸坝拦蓄阻断了径流的连续性,导致下游的径流量逐渐减少,拦蓄也导致地下径流的补给存留在闸坝上游,流入下游的径流中基流部分也呈现减少的趋势。另外,降水的减少也是引起汛期特定月份(如 7 月)径流量和基流量减少的原因之一。在非汛期,闸坝常以兴利、农业灌溉为主,对径流的调控能力相对较弱^[20],因此径流量和基流量的减少趋势并不显著。

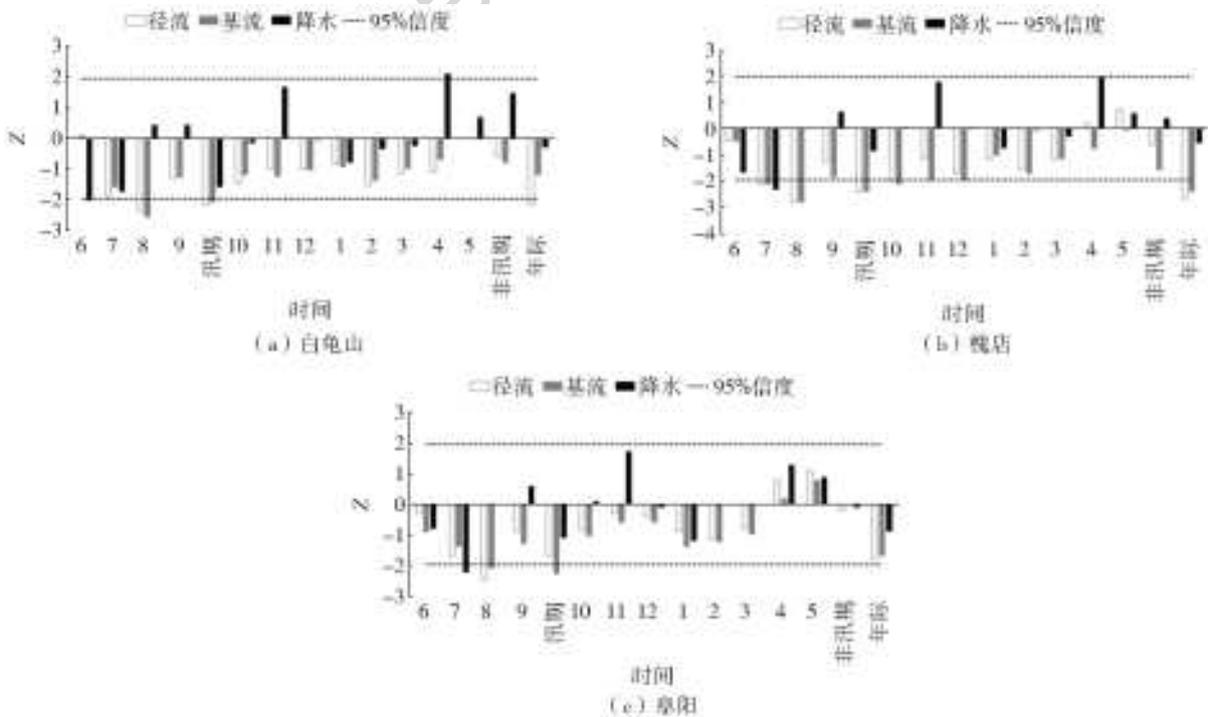


图 5 沙颍河各站点径流、基流和降水序列 Mann-Kendall 趋势检验 Z 值

Fig. 5 Mann-Kendall Test Z values for runoff, baseflow and precipitation series at the selected stations in the Shaying River

淮河干流自上游到下游分别为长台关、王家坝、鲁台子和蚌埠,其中王家坝、蚌埠两个站点受闸坝调控。4个站点大部分月份的降水量(除长台关12月、蚌埠7和8月)、径流量和基流量(除王家坝站2和3月、蚌埠站8月)等均未有显著性的变化特征。上游长台关站受闸坝调控弱,虽然12月降水呈现减少的趋势,但径流量和基流量变化趋势不显著,可能原因是12月份长台关处于枯水期,流量仅为 $0.0\sim 68.7\text{ m}^3/\text{s}$,而基流系数 BFI 在 $0.40\sim 0.64$,因此基流对河道径流的补给比重较大,降水减少对基流量的影响并不显著。王家坝站2—3月径流量

呈现减少趋势,主要是由于为保障农业灌溉需水,闸坝以关闸蓄水为主,由此也导致基流量也呈现减少趋势,特别是3月减少最显著。蚌埠闸是淮河流域中游重要的防洪工程,在汛期为保障下游防洪安全以调节洪水为主^[18],导致径流量和基流量呈现减少的趋势,尤其是在8月;另外,降水量的显著减少也对蚌埠站径流量和基流量有着一定的影响(如7月)。与沙颍河站点相比,淮河干流流量较大而闸坝调控能力相对较弱,对径流量和基流量年际变化影响并不显著,但仍能减少典型月份径流量和基流量,特别是在汛期。

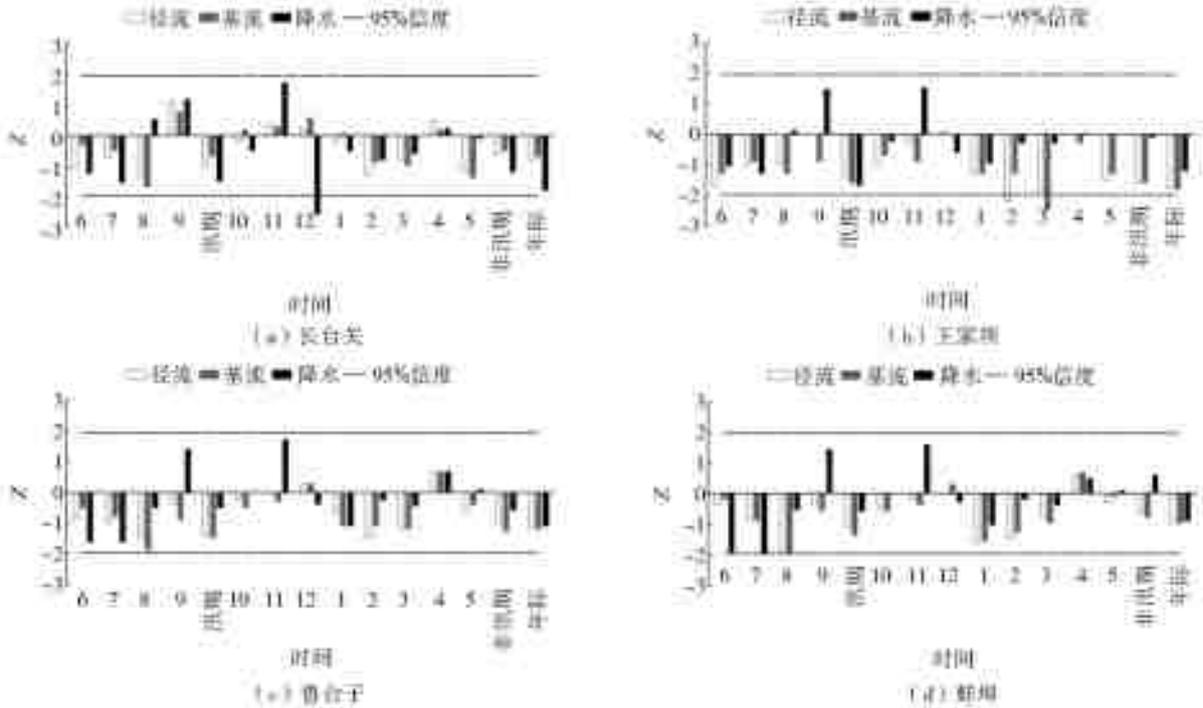


图6 淮河干流站点径流、基流和降水序列 Mann-Kendall 趋势检验 Z 值

Fig. 6 Mann-Kendall Test Z values for runoff, baseflow and precipitation series at the selected stations in the Huai mainstream

因此,沙颍河水系径流量和基流量在汛期典型月份(7、8月)呈现出显著下降趋势,主要是由于沙颍河白龟山水库、阜阳站和槐店站汛期为防洪安全的需要,以关闸调蓄为主,导致汛期径流量和基流量显著减少;部分闸坝调控站点(白龟山和槐店)在非汛期受农业因素的影响,需要通过关闸蓄水保障上游农业灌溉用水,从而使径流量和基流量出现减少趋势但并不显著;少数站点(如阜阳和蚌埠)在非汛期4月份受降水增加和开闸放水的影响,径流量和基流量呈现增加趋势;而淮河干流闸坝调控较弱,对径流和基流量影响都较小,但王家坝站和蚌埠站受闸坝调控的影响,径流量和基流量典型月份(如3、8月)呈现出显著减少的趋势。

4 结论

本文主要采用 Chapman-Maxwell、Lyne-Hollick、

Boughton-Chapman 等多种数字滤波法对淮河流域不同调控站点的基流过程进行分割,并采用 Mann-Kendall 趋势检验法分析了各站点的基流时间变化趋势和空间差异性,从而得出了闸坝调控对基流的影响。具体结论如下。

(1)对比3种数字滤波法得到的基流系数,Chapman-Maxwell 数字滤波法的分割结果比较适中。沙颍河水系站点的基流系数普遍小于淮河干流站点的基流系数,而沙颍河水系站点无论是年际、汛期还是非汛期,基流系数的变化幅度较大,淮河干流站点基流系数变化幅度较小。

(2)流域所有站点2001—2015年基流量呈现减少趋势。但从不同时间段来看,在年际与汛期时期,沙颍河水系站点大都呈现显著减少的趋势;而淮河干流站点基流量有减少趋势,但并不显著;在非汛期,沙颍河和淮河干流站点基流量变化也并不显著。

(3) 闸坝调控在一定程度上改变了站点的不同时间尺度的径流量和基流量变化,其中在汛期影响最明显(如 8 月),呈现显著减少趋势,主要因为闸坝调控以防汛为主,关闸调洪导致基流量减少显著。在非汛期,闸坝关闸蓄水以保障上游农业灌溉用水,导致径流量和基流量呈现减少趋势,但由于调控能力相对较弱,减少趋势并不显著。沙颖河为闸坝调控强烈区域,径流量和基流量减少趋势比闸坝调控较弱的淮河干流更为明显。

参考文献(References):

- [1] ARNOLD J G, MUTTIAH R S, SRINIVASAN R, et al. Regional estimation of base flow and groundwater recharge in the upper Mississippi River basin[J]. Journal of Hydrology, 2000, 227(1): 21-40. DOI: 10.1016/S0022-1694(99)00139-0.
- [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. DOI: 10.1006/jare.2001.0947.
- [3] 陈利群, 刘昌明, 李发东. 基流研究综述. 地理科学进展[J]. 2006, 25(1): (1-15). (CHEN L Q, LIU C M, LI F D. Review on baseflow researches [J]. Progress in Geography, 2006, 25(1): 1-15. (in Chinese))
- [4] MCNAMARA J P, KANE D L, HINZMAN I. D. Hydrograph separations in an Arctic watershed using mixing model and graphical techniques [J]. Water Resources Research, 1997, 33(7): 1707-1719. DOI: 10.1029/97wr01033.
- [5] PARTINGTON D, BRUNNER P, SIMMONS C T, et al. Evaluation of outputs from automated base flow separation methods against simulated base flow from a physically based, surface water-groundwater flow model [J]. Journal of Hydrology, 2012, 458-459: 28-39. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2012.06.029.
- [6] LYNE V, HOLLICK M. Stochastic time-variable rainfall-runoff modeling [C]. Institute Engineer Australia National Conference, Canberra: Institution of Engineers, Australia, 1979.
- [7] SLOTO R A, CROUSE M Y. HYSEP: A computer program for stream flow hydrograph separation and analysis [R]. US Geological Survey Water-Resources Investigations Report 96-4046, 1996.
- [8] RUTLEDGE A. Computer programs for describing the recession of ground-water discharge and for estimating mean ground-water recharge and discharge from stream flow records-update [R]. US Geological Survey Water-Resources Investigations Report 98-4148, 1998.
- [9] WAHL K L, WAHL T L. Water-use data for water resources management. Proceedings of a Symposium [C]. American Water Resources Association, Bethesda, Maryland, 1988.
- [10] NATHAN R J, MCMAHONS T A. Estimating low flow characteristics in ungauged catchments [J]. Water Resources Manage. 1990, 6(2): 85-100. DOI: 10.1007/bf00872205.
- [11] CHAPMAN T. A comparison of algorithms for stream flow recession and baseflow separation [J]. Hydrological Process, 1999, 13(5): 701-714. DOI: 10.1002/(SICI) 1099-1085 (19990415) 13: 5 < 701:: AID-HYP774 > 3.0.CO;2-2.
- [12] 焦玮, 朱仲元, 宋小园, 等. 基流分割方法在锡林河流域适用性分析 [J]. 干旱区研究, 2017, 34(1): 26-35 (JIAO W, ZHU Z Y, SONG X Y, et al. Suitability analysis of baseflow separation methods in the Xilin River basin [J]. Arid Zone Research, 2017, 34(1): 26-35. (in Chinese)) DOI: 10.13866/j.azr.2017.01.04.
- [13] 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 S Z, WANG Z G, LIU C M. Base flow separation and its characteristics in the upper reaches of the Heihe River basin [J]. Resources Science, 2011, 33(12): 2232-2237. (in Chinese)) DOI: http://159.226.115.200/handle/311030/19291.
- [14] 王敬哲, 刘志辉, 塔西甫拉提·特依拜, 等. 呼图壁河基流变化及其影响因素 [J]. 中国沙漠, 2017, 37(4): 793-801. (WANG J Z, LIU Z H, TASHPOLAT · T, et al. Variation of the baseflow and its causes of Hutubi River [J]. Journal of Desert Research, 2017, 37(4): 793-801. (in Chinese)) DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2016.00067.
- [15] 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. (ZHANG H, ZHANG B, ZHAO C Y. Annual base flow change and its causes in the upper reaches of Heihe River [J]. Geographical Research, 2011, 30(8): 1421-1430. (in Chinese)) DOI: 10.11821/yj2011080008.
- [16] 董薇薇, 丁永建, 魏霞. 祁连山疏勒河上游基流变化及其影响因素分析 [J]. 冰川冻土, 2014, 36(3): 661-669. (DONG W W, DING Y J, WEI X. Variation of the base flow and its causes in the upper reaches of the Shule River in the Qilian Mountains [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(3): 661-669. (in Chinese)) DOI: 10.7522 /j.issn.1000-0240.2014.0079.
- [17] 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 J T, ZHANG Z Q, WANG S P, et al. Features of baseflow 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)) DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2011.01.024.

- [18] 刘柏君,周广钰,雷晓辉,等. 海流兔河基流特征及其对气候变化和人类活动的响应分析[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(5): 56-61. (LIU B J, ZHOU G Y, LEI X H, et al. Analysis of base flow characteristics and its responses to climatic change and human activities in Hailiutu River basin[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2015, 26(5): 56-61. (in Chinese)) DOI: 10. 11705 /j. issn. 1672-643X. 2015. 05. 11.
- [19] 白乐,李怀恩,何宏谋. 降水和人类活动对秃尾河流域基流的影响[J]. 自然资源学报, 2014, 29(12): 2078-2088. (BAI L, LI H E, HE H M. Assessing the impacts of precipitation and human activities on base flow in the Middle Tuwei River basin of the Yellow River[J]. Journal of Natural Researches. 2014, 29(12): 2078-2088. (in Chinese)) DOI: 10. 11849/zrzyxb. 2014. 12. 0009.
- [20] 王曼玉,蔡永茂,李春征,等. 气候变化和人类活动对基流的影响:以密云水库上游潮河流域为例[J]. 中国水土保持科学, 2018, 16(6): 15-23. (WANG M Y, CAI Y M, LI C Z. et al. Impact of climate change and human activities on watershed baseflow: A case study of the upstream of Miyun reservoir in Chaohe watershed[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2018, 16(6): 15-23. (in Chinese)) DOI: 10. 16846/j. sswc. 2018. 06. 003.
- [21] 亢小语,张志强,陈立欣,等. 黄土高原中尺度流域基流变化驱动因素分析[J]. 自然资源学报, 2019, 34(3): 563-572 (KANG X Y, ZHANG Z Q, CHEN L X, et al. Baseflow variation and driving factors for the last six decades in a watershed on the Loess Plateau, northern China [J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(3): 563-572. (in Chinese)) DOI: 10. 31497/zrzyxb. 20190310.
- [22] ZHANG Y Y, SHAO Q X, XIA J, et al. Changes of flow regimes and precipitation in Huai River basin in the last half century [J]. Hydrological Processes, 2011, 5(2): 246-257. DOI: 10. 1002/hyp. 7853.
- [23] ZHANG Y Y, XIA J, LIANG T, et al. Impact of water projects on river flow regimes and water quality in Huai River basin [J]. Water Resources Management 2010, 24(5): 889-908. DOI: 10. 1007/s11269-009-9477-3.
- [24] ZHANG Y Y, ZHAI X Y, SHAO Q X, et al. Assessing temporal and spatial of flow regime alterations in the regulated Huai River basin, China [J]. Journal of Hydrology, 2015 (529): 384-397. DOI: 10. 1016/j. jhydrol. 2015. 08. 001.
- [25] 张永勇,花瑞祥,夏瑞. 气候变化对淮河流域水量水质影响分析[J]. 自然资源学报, 2017, 32(1): 114-126. (ZHANG Y Y, HUA R X, XIA R. Impact analysis of climate change on water quantity and quality in the Huaihe River basin [J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(1): 114-126. (in Chinese)) DOI: 10. 11849/zrzyxb. 20160184.
- [26] 郑明国,孙莉英. 气候变化和人类活动影响下澧水流域径流及其不同组分的变化[J]. 地理研究, 2014, 33(2): 237-250. (ZHENG M G, SUN L Y. Recent change of runoff and its components of baseflow and surface runoff in response to climate change and human activities for the Lishui watershed of southern China [J]. Geographical Research, 2014, 33(2): 237-250. (in Chinese)) DOI: 10. 11821/dlyj201402004.
- [27] 潘扎荣,阮晓红,朱愿福,等. 近 50 年来淮河干流径流演变规律分析[J]. 水土保持学报, 2013, 27(1): 51-55, 59. (PAN Z R, RUAN X H, ZHU Y F, et al. Analysis of variation in runoff of the main stream of Huaihe River in the past 50 years [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(1): 51-55, 59. (in Chinese)) DOI: 10. 13870/j. cnki/stbxb/2013. 01. 007.
- [28] 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. (LIN K R, ZHANG W H, GUO S L. A new method for base flow hydrograph separation [J]. Journal of China Hydrology, 2006, 26(4): 15-20. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/J. ISSN. 1000-0852. 2006. 04. 004.
- [29] 于延胜,陈兴伟. 基于 Mann-Kendall 法的径流丰枯变化过程划分[J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24(1): 60-63. (YU Y S, CHEN X W. Division of variation process of high and low runoff based on Mann-Kendall method [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2013, 24(1): 60-63. (in Chinese))
- [30] 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. DOI: 10. 1016/j. jhydrol. 2008. 01. 005.