

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2019.06.008

北洛河流域分期径流变异诊断及成因分析

孔波,樊晶晶,黄强

(西安理工大学西北旱区生态水利国家重点实验室,陕西 西安 710048)

摘要:采用 Mann-Kendall 变异诊断法和有序聚类法,诊断了北洛河流域枯汛交替期、汛期、汛枯交替期、枯期等分期径流系列变异点并划分了变异等级,采用基于 SIMHYD 模型的径流还原方法,计算并区分气候变化和人类活动对分期径流变异的贡献率。结果表明:各分期径流变异等级从 0 级无变异到 4 级较强变异,排除 0 级的无变异点,各时期均发生了变异;径流变异程度与径流量有关,径流量较大时期(汛期、汛枯交替期)的变异等级低,径流量小的时期(枯汛交替期、枯期)变异等级高,径流量最小的枯期为 4 级较强变异;人类活动对枯汛交替期径流变异的贡献率较大,人类活动是主要驱动力;其余 3 个时期气候变化的贡献率较大,气候变化是主要驱动力。

关键词:分期径流;径流变异;气候变化;人类活动;北洛河流域

中图分类号:TV121;P333.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2019)06-0052-06

Diagnosis of runoff variation in different periods in Beiluo River Basin and its causes analysis // KONG Bo, FAN Jingjing, HUANG Qiang (State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Mann-Kendall mutation diagnosis method and serial cluster analysis method were employed to diagnose the variation points of runoff series in the Beiluo River Basin during dry-flood alternating period, flood period, flood-dry alternating period, and dry season, and the variation grades were classified. The runoff reduction method based on SIMHYD model was applied to calculate and distinguish the contribution rates of climate change and human activities to runoff variation in different periods. The results show that the runoff variation grade in different periods ranges from grade zero to grade four. Excluding the non-variation point of grade 0, the variation occurred in all periods. The runoff variation grade is related to runoff. The runoff variation grade is lower in the period of large runoff (flood season, dry-flood alternating period) and higher in the period of small runoff (flood-dry alternating period, dry season). The lowest dry period of runoff is 4-level strong variation. The contribution rate of human activities to the variation of runoff in the dry-flood alternating period is larger, and human activities are the main driving force. The contribution rate of climate change in the remaining three periods is larger, and climate change is the main driving force.

Key words: runoff in different periods; runoff variation; climatic change; human activities; Beiluohe River Basin

近年来,越来越多的学者开始关注变化环境对水文变异的影响^[1]。联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)在 1990 年就提出了气候变化问题,2014 年发布的报告^[2]则明确指出,全球性的水循环系统、冰雪消融情况、海平面变化以及极端天气出现的频率、程度都发生了显著变化,与之关系紧密的气候变化和人类活动引发了水文系列变异问题。国内外的相关研究表明,美国多条河流的水文系列在 20 世纪后期发生了明显变异^[3],我国的海河、黄河、渭

河等流域的径流系列均发生了显著变异^[4-7]。在实际生产应用中,水文气象资料的可靠性、一致性、代表性是水文水利计算的基础。但变化环境往往会导致水文系列出现变异,破坏水文系列一致性,变异点前后的系列具有显著不同的特征。在工程水文水利计算中,如果采用非一致性的水文系列进行计算,计算结果将会出现偏差,可能会给水利工程规划、设计、管理带来风险,可见,诊断水文系列变异具有重要意义。

基金项目:国家自然科学基金(51190093);水利部公益性行业科研专项(201501058)

作者简介:孔波(1983—),男,博士研究生,研究方向为水文水资源系统工程。E-mail: kongbo0000@163.com

通信作者:黄强,教授。E-mail: wresh@mail.xaut.edu.cn

目前,关于径流变异的研究有很多,如张强等^[8]采用滑动 T 检验和 Mann-Whitney U 检验对黄河干流 7 个水文站月均流量进行了水文变异诊断分析,认为黄河干流 7 个水文站径流存在变异现象,且下游变异时间要早于中上游。杜建等^[9]认为东江流域在 1972—1973 年水文系列发生了变异,变异后径流的枯水变幅增大,且与降水的相关性明显减弱。谢平等^[10-11]于 2008 年使用 Hurst 系数诊断了无定河流域降雨时空变异,于 2012 年研究了乌力吉木仁河的径流系列变异,结果发现这两个流域的降雨、径流系列均出现了变异。已有的研究大多针对年径流系列变异问题,缺乏对年内分期径流系列变异的研究,如缺乏对汛期、汛枯交替期、枯期、枯汛交替期径流变异的研究。本文以北洛河流域为研究对象,将一年划分为枯汛交替期(5—6 月)、汛期(7—9 月)、汛枯交替期(10—11 月)、枯期(12 月至次年 4 月)4 个时期来研究流域分期径流系列的变异问题,定量分析各时期的径流变异时间、变异程度以及主要驱动力,旨在为北洛河流域水资源开发利用提供参考。

1 研究区概况

北洛河也称洛河,古称洛水或北洛水,为黄河二级、渭河一级支流,是陕西省最长的河流,发源于陕西定边县白于山南麓的草梁山,全长 680.3 km,全都位于陕西省境内。河源分 3 支,西支为石涝川,中支为水泉沟,东支为乱石头川,在吴旗汇流后称为北洛河,河流自西北向东南流经志丹、甘泉、富县、洛川、黄陵、宜君、澄城、白水、蒲城、大荔,至三河口入渭河,水系呈明显的羽毛型,流域总面积 2.69 万 km²。状头水文站位于北洛河下游,控制面积为 2.52 万 km²,占北洛河流域的 94%^[12]。本文采用相关水文手册状头水文站 1956—2016 年径流资料,该资料可以充分反映北洛河流域的变化情况,可靠且具代表性。

2 研究方法

水文序列变异的诊断方法^[4]有很多,大致可分为 3 类^[13]。第 1 类是定性方法,如过程性法、滑动平均法、Hurst 系数法等,这类方法计算简单,但计算过程中人为干扰较强,适用于定性诊断,只能判断系列是否出现变异,但诊断不出确切的变异点;第 2 类是趋势诊断方法,如 Kendall 法、Spearman 法等,这类方法可以判断趋势的显著性,但无法找到确切的变异点;第 3 类是跳跃诊断方法,如 Mann-Kendall 法、有序聚类法、滑动 T 检验法、滑动 F 检验法等,这类方法不但能诊断系列是否出现变异,而且可以

找到确切的变异点。本研究采用 Mann-Kendall 法和有序聚类法进行变异点诊断。

2.1 Mann-Kendall 法

Mann-Kendall 法是水文变异诊断常用的非参数检验方法^[13],其优点是不需要样本遵从一定的分布,也可以排除少数异常值干扰。分析统计系列构成的两组曲线,如果曲线出现交叉点,则判断系列发生变异,交叉点对应的的时间即为变异点时间。该方法计算过程简单,结果明确,但对系列长度要求较高,不同长度的系列,结果可能不同。其计算公式比较常用,本文不再赘述。

2.2 有序聚类法

传统的有序聚类法通过计算离差平方和,寻求同类之间最小离差平方和,以最优分割点来确定变异点。该方法仅考虑了同类之间离差最小原则,诊断的变异点不全,可能有缺失^[14]。因此,本研究在此基础上,对公式做了改进,在保持同类之间离差最小的同时,还考虑了不同类之间的离差最大。改进后的公式如下:

假定水文系列 $\{x_i\}$ ($i=1,2,\dots,n$) 最可能的变异点是 τ ,不同类之间的离差用 d 来表示:

$$d = |\bar{x}_\tau - \bar{x}_{n-\tau}| \quad (1)$$

式中 $\bar{x}_\tau, \bar{x}_{n-\tau}$ 分别为 τ 前后两个系列的均值,也就是前后两个系列的聚类中心。

为了保持量纲的统一,同类之间离差用均方差 $\bar{\sigma}_\tau$ 和 $\bar{\sigma}_{n-\tau}$ 表示:

$$\bar{\sigma}_\tau = \sqrt{\sum_{i=1}^{\tau} (x_i - \bar{x}_\tau)^2 / \tau} \quad (2)$$

$$\bar{\sigma}_{n-\tau} = \sqrt{\sum_{i=\tau+1}^n (x_i - \bar{x}_{n-\tau})^2 / (n - \tau)} \quad (3)$$

目标函数为

$$S_n(\tau) = \bar{\sigma}_\tau + \bar{\sigma}_{n-\tau} - d \quad (4)$$

当 S_n 取值为最小时,对应的 τ ($2 \leq \tau \leq n-1$) 为变异点。改进后的有序聚类法可避免诊断变异点缺失的问题。

2.3 变异等级划分

不同的变异诊断方法得出的变异点可能不同,其变异程度也不尽相同。本文采用变异等级划分方法,找出系列变异程度最大的变异点,该方法基于均值和变差系数 C_v 的改变程度来划分等级。首先,按照式(5)(6)对序列变异点前后的均值和 C_v 值进行计算,得到均值和 C_v 值的变化系数^[13]:

$$\eta_{\bar{x}} = |(\bar{X}_1 - \bar{X}_0) / \bar{X}_0| \quad (5)$$

$$\eta_{\bar{C}_v} = |(\bar{C}_{v1} - \bar{C}_{v0}) / \bar{C}_{v0}| \quad (6)$$

式中: $\eta_{\bar{x}}$ 为系列均值变化系数; $\eta_{\bar{C}_v}$ 为系列 C_v 值变化

系数; $\bar{X}_1$ 为系列变异前均值; $\bar{X}_0$ 为系列变异后均值; $\bar{C}_{v1}$ 系列变异前变差系数; $\bar{C}_{v0}$ 为系列变异后变差系数。

按照两种变化系数的值,将变异程度分为了7个等级^[15]:无变异(0级)、弱变异(1级)、轻变异(2级)、中变异(3级)、较强变异(4级)、强变异(5级)和重变异(6级),其划分标准见表1。统计所有变异点对应的变异等级,并选取每个时期变异等级最高的点作为本时期的变异点。

表1 基于均值和 C_v 值变化系数的变异等级划分

均值变化系数	等级			
	$C_v < 0.2$	$0.2 \leq C_v < 0.4$	$0.4 \leq C_v < 0.8$	$C_v \geq 0.8$
< 0.2	0级	1级	2级	3级
$[0.2 \sim 0.4)$	1级	2级	3级	4级
$[0.4 \sim 0.8)$	2级	3级	4级	5级
≥ 0.8	3级	4级	5级	6级

2.4 贡献率计算

目前,国内外研究者提出了很多方法定量分析气候变化和人类活动对径流变异的贡献率^[16-19]。本文参考张建云等^[19]提出的基于SIMHYD模型的径流还原方法来计算气候变化和人类活动对径流变异的贡献率。此方法的计算原理为:假设还原后的径流量与基准期天然径流量的差值 ΔR_c 为气候变化导致,则人类活动导致的实测径流量与基准期天然径流量的差值 ΔR_T 分为两部分,一部分是人类活动影响部分 ΔR_H ,另外一部分是气候变化影响部分 ΔR_C ,计算公式为

$$\Delta R_T = R_{HR} - R_N \tag{7}$$

$$\Delta R_H = R_{HR} - R_{HN} \tag{8}$$

$$\Delta R_C = R_{HN} - R_N \tag{9}$$

$$\eta_H = \frac{\Delta R_H}{\Delta R_T} \times 100\% \tag{10}$$

$$\eta_C = \frac{\Delta R_C}{\Delta R_T} \times 100\% \tag{11}$$

式中: ΔR_T 为径流变化总量; R_{HR} 为人类活动影响阶段实测径流量; R_N 为基准期的天然径流量; ΔR_H 为

人类活动的径流影响量; R_{HN} 为人类活动影响阶段天然径流量; ΔR_C 为气候变化的径流影响量; η_H 为人类活动对径流影响的贡献率; η_C 为气候变化对径流影响的贡献率。

3 变异诊断结果及分析

3.1 资料分析

图1为北洛河流域1956—2016年各时期降水、径流深的变化情况。由图1可知,降水和径流都集中在汛期出现,各分期降水都呈现下降趋势,汛期最明显;径流在汛期为下降趋势,其余均为上升趋势,其中枯期上升明显;降水为减少趋势,而径流呈现了增加趋势,说明降水径流产流关系发生了变化。

3.2 变异诊断及分析

a. Mann-Kendall 诊断结果。采用Mann-Kendall法对北洛河流域各分期径流序列进行变异点诊断,结果如图2所示,图2中M-K值为通过计算得到的 U_F (按时间顺序计算得到的统计量序列)、 U_B (按逆时间顺序计算得到的统计量序列)的值。由图2可以看出,不同时期变异点如下:枯汛交替期1964年、1980年;汛期1962年、1986年、1994年;汛枯交替期1969年;枯期2001年。

b. 有序聚类法诊断结果。采用有序聚类法对北洛河流域各分期径流诊断,结果如图3所示。其中,数值最小的点对应的年份为变异点的年份。由图3可以看出,不同分期变异点如下:枯汛交替期1966年;汛期1994年;汛枯交替期1970年;枯期2001年。

3.3 变异等级划分

统计所有变异点对应的变异等级,Mann-Kendall法和有序聚类法得到的变异点对应的变异等级结果分别见表2和表3。

由表2和表3可以看出,两种变异诊断方法得出的变异点略有不同,变异等级从0级到4级,0级是干扰性虚假变异点,可以排除;Mann-Kendall法诊断的变异点较全,枯汛交替期、汛期、汛枯交替期变

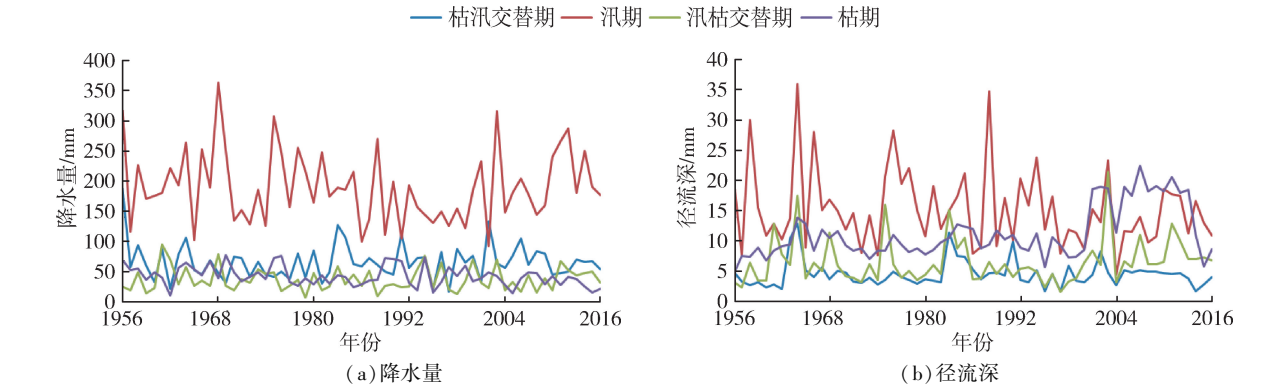


图1 北洛河流域1956—2016年不同分期的降水量和径流深

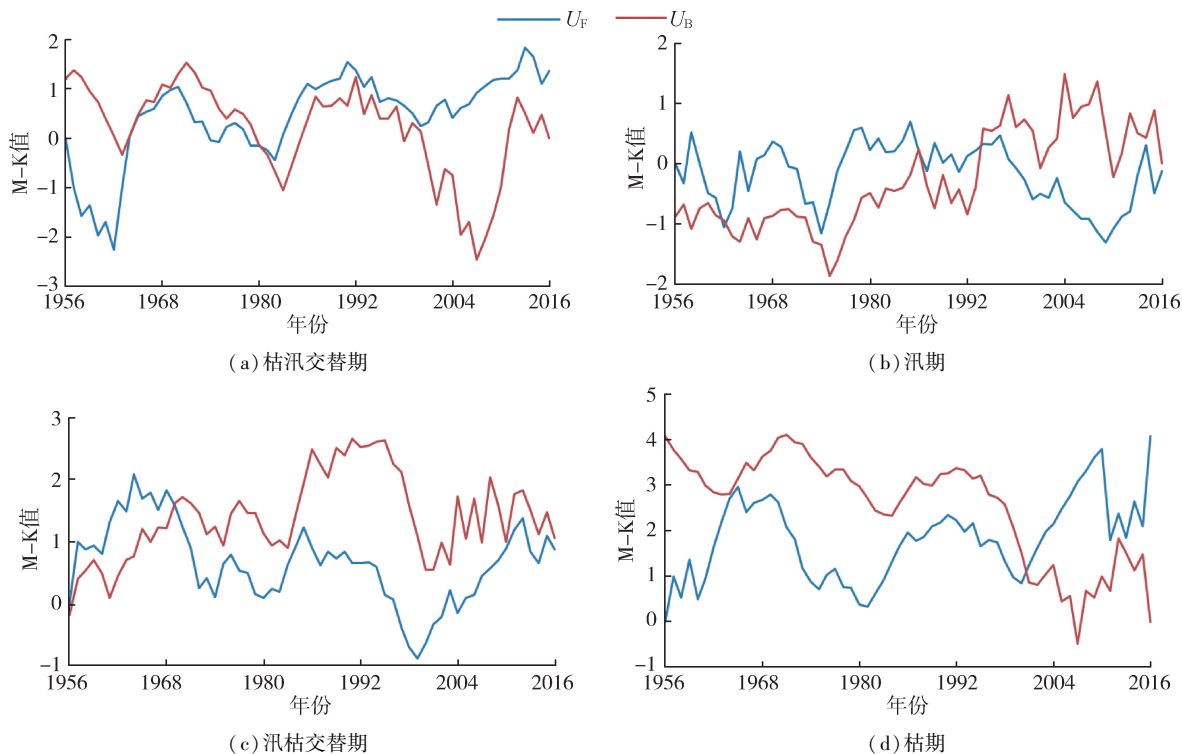


图2 北洛河流域 Mann-Kendall 法径流变异诊断结果

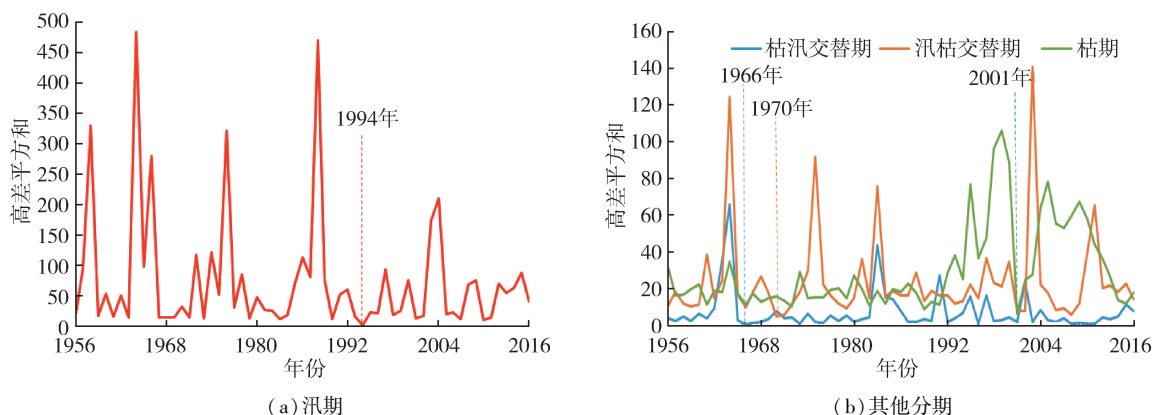


图3 北洛河流域有序聚类法径流变异诊断结果

表2 各时期变异程度 Mann-Kendall 法计算结果

时 期	变异年份	均值变化系数	C_v 变化系数	变异等级
枯汛交替期	1964 年	0.17	0.25	1 级
	1980 年	0.06	0.17	0 级
汛 期	1962 年	0.04	0.17	0 级
	1986 年	0.07	0.41	2 级
	1994 年	0.15	0.28	1 级
汛枯交替期	1969 年	0.15	0.63	2 级
枯 期	2001 年	0.96	0.29	4 级

表3 各时期变异程度有序聚类法计算结果

时 期	变异年份	均值变化系数	C_v 变化系数	变异等级
枯汛交替期	1966 年	0.42	0.21	3 级
汛 期	1994 年	0.15	0.28	1 级
汛枯交替期	1970 年	0.07	0.11	0 级
枯 期	2001 年	0.96	0.29	4 级

异等级都比较低,为弱变异和轻变异,枯期变异等级最高,为较强变异;有序聚类法得到的变异点较少,汛期为弱变异,枯汛交替期为中变异,枯期变异等级

最高,为4级。两种方法诊断的结果基本一致。

综上所述,北洛河流域分期径流变异等级与径流量有关,径流量较大时期(汛期、汛枯交替期)的变异等级低,径流量小的时期(枯汛交替期、枯期)变异等级高,径流量最小的枯期变异程度最高。

从两种方法诊断的结果中选取各分期变异等级最高的点作为本时期的变异点:枯汛交替期选定的变异点为1966年、汛期选定的变异点为1986年、汛枯交替期选定的变异点为1969年、枯期选定的变异点为2001年。

4 变异归因分析

4.1 贡献率

气候变化与人类活动对北洛河分期径流变异的贡献率计算结果见表4。从表4可以看出,气候变化与人类活动共同影响导致了径流变异,但各分期

贡献率不等。其中,枯汛交替期变异后的径流深增大,人类活动的贡献率为 75.5%,而气候变化的贡献率为 24.5%,说明人类活动是枯汛交替期径流变异的主要驱动力;其余 3 个分期变异后的径流深都减小,气候变化在汛期、汛枯交替期和枯期的贡献率分别为 58.9%、60.7% 和 74.2%,在这 3 个分期气候变化贡献率大、人类活动贡献率小,说明气候变化是影响这 3 个分期变异的主要因素。

表 4 气候变化和人类活动的贡献率

时 期	径流深 总变化量/ mm	气候变化对径流的 贡献		人类活动对径流的 贡献	
		径流深/ mm	贡献率/ %	径流深/ mm	贡献率/ %
枯汛交替期	0.572	0.140	24.5	0.432	75.5
汛 期	-4.491	-2.645	58.9	-1.846	41.1
汛枯交替期	-1.617	-0.982	60.7	-0.635	39.3
枯 期	-1.949	-1.447	74.2	-0.502	25.8

4.2 径流变异原因

a. 气候变化。洛河流域的气候在近几十年发生了较大变化,20 世纪 70 年代、90 年代 ENSO 事件致使大气环流和我国气候异常,径流变异。

b. 人类活动。近几十年来,随着人口增长,人们生产、生活的需水量增大,北洛河流域人类活动越来越频繁,为了满足用水需求,大量修建水库(总库容达到 19321 万 m³)、引水工程(568 座)、提水工程(973 座)和集雨工程(年利用量 1034.36 万 m³)等水利工程^[20];同时,流域内水资源开发利用不合理,缺乏统筹安排^[21]。为了满足生存需求,北洛河流域大量陡坡(7.3 万 hm²)被开垦成农田,引起水土流失等严重生态问题^[22]。为了解决这些生态问题,北洛河流域 20 世纪 90 年代开展了退耕还林工作并在 1999 年完成,流域径流在 2001 年后发生显著变化^[23-25]。因此,枯期径流在 2001 年表现出较强变异(4 级)。

5 结 论

a. 北洛河流域降水和径流都集中在汛期出现,各分期降水量都存在不同程度的下降趋势,汛期最明显;径流量在汛期为下降趋势,其余均为上升趋势,其中枯期上升明显;降水量为减少趋势,而径流量呈现了增加趋势,说明降水径流产流关系发生了变化,下垫面发生了变化。

b. 北洛河流域各分期变异等级从 0 级到 4 级,排除 0 级的无变异点,各分期均发生了变异;其变异程度与径流量有关,径流量较大的分期(汛期、汛枯交替期)的变异等级低,径流量小的分期(枯汛交替期、枯期)变异等级高,径流量最小的枯期为 4 级较

强变异。

c. 枯汛交替期变异后的径流深增大,人类活动对枯汛交替期径流变异的贡献率较大,是径流变异的主要驱动力;汛期、汛枯交替期和枯期变异后的径流深都减小,在这 3 个分期气候变化贡献率大、人类活动贡献率小,气候变化是这 3 个分期径流变异的主要驱动力。

参考文献:

[1] 曹永强,袁立婷,王飞龙. 基于文献计量学的洪涝灾害研究现状及发展趋势分析[J]. 水利经济,2018,36(4):33-39. (CAO Yongqiang, YUAN Liting, WANG Feilong. Current research situation and development trend of flood and waterlogging disasters based on bibliometrics [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2018, 36(4):33-39. (in Chinese))

[2] IPCC. Climate change 2013: the physical science basis [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2013.

[3] BARNETT T P, PIERCE D W, HIDALGO H G, et al. Human-induced changes in the hydrology of the western United States[J]. Science, 2008, 319:1080-1083.

[4] 谢平,陈广才,雷红富,等. 水文变异诊断系统[J]. 水力发电学报, 2010, 29(1):85-91. (XIE Ping, CHEN Guangcai, LEI Hongfu, et al. Hydrological alteration diagnosis system [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(1):85-91. (in Chinese))

[5] 王国庆,张建云,贺瑞敏. 环境变化对汾河流域径流量的影响[J]. 水科学进展, 2006, 17(6):851-858. (WANG Guoqing, ZHANG Jianyun, HE Ruimin. Impact of environmental change on runoff in the Fenhe River basin [J]. Advances in Water Science, 2006, 17(6):851-858. (in Chinese))

[6] FU G, CHEN S, LIU C, et al. Hydro-climatic trends of the Yellow River basin for the last 50 years [J]. Climatic Change, 2004, 65(1/2):149-178.

[7] FAN J, HUANG Q, CHANG J, et al. Detecting abrupt change of streamflow at lintong station of Wei river[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2013(1):211-244.

[8] 张强,李剑锋,陈晓宏,等. 水文变异下的黄河流域生态流量[J]. 生态学报, 2011, 31(17):4826-4834. (ZHANG Qiang, LI Jianfeng, CHEN Xiaohong, et al. Evaluation of the ecological instream flow in the Yellow River basin with hydrological alterations [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(17):4826-4834. (in Chinese))

[9] 杜建,陈晓宏,陈栋为,等. 水文变异下东江流域枯水径流风险率分析[J]. 生态环境学报, 2012, 21(3):496-502. (DU Jian, CHEN Xiaohong, CHEN Dongwei, et al. Analysis on low flow risk of runoff in the East River Basin [J]. Acta Geographica Sinica 2012, 21(3):496-502. (in Chinese))

- [10] 谢平,雷红富,陈广才,等. 基于 Hurst 系数的流域降雨时空变异分析方法[J]. 水文,2008,28(5):6-10. (XIE Ping, LEI Hongfu, CHEN Guangcai, et al. A Spatial and temporal variation analysis method of watershed rainfall based on Hurst Coefficient [J]. Journal of China hydrology, 2008, 28(5):6-10. (in Chinese))
- [11] 谢平,刘媛,杨桂莲,等. 乌力吉木仁河三级区水资源变异及归因分析[J]. 水文,2012,32(2):40-43. (XIE Ping, LIU Yuan, YANG Guilian, et al. Attribution analysis of water resources alteration in the third grade Wulijimurenhe [J]. Journal of China Hydrology, 2012, 32(2):40-43. (in Chinese))
- [12] 刘奎建,丁志宏. 基于 EMD 的北洛河天然年径流量变化特征分析[J]. 中国农村水利水电,2008,10:36-38. (LIU Kuijian, DING Zhihuang. Fluctuation characteristic analysis of natural annual runoff time series in the beiluhe river based on EMD [J]. China Rural Water and Hydropower, 2008, 10:36-38. (in Chinese))
- [13] 黄强,孔波,樊晶晶. 水文要素变异综合诊断[J]. 人民黄河,2016,10(38):18-22. (HUANG Qiang, KONG Bo, FAN Jingjing. Comprehensive diagnosis of variation of hydrological elements [J]. Yellow River, 2016, 10(38):18-22. (in Chinese))
- [14] 郭巧玲,韩振英,丁斌,等. 窟野河流域径流变化及其影响因素研究[J]. 水资源保护,2017,33(5):75-80. (GUO Qiaoling, HAN Zhenying, DING Bin, et al. Study of runoff variation characteristics and influence factors in Kuye River [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(5):75-80. (in Chinese))
- [15] 谢平,张波,李彬彬,等. 基于极值同频率法的非一致性年径流过程设计方法:以跳跃变异为例[J]. 水利学报,2015,46(7):828-835. (XIE Ping, ZHANG Bo, LI Binbin, et al. Inconsistent annual runoff process design method based on extreme value with common frequency: a case study in jump variation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(7):828-835. (in Chinese))
- [16] 樊晶晶,黄强,刘登峰,等. 人类活动和气候变化对北洛河径流变化的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2016,44(1):221-234. (FAN Jingjing, HUANG Qiang, LIU Dengfeng, et al. Impact of climate change and human activity on the variation of runoff in Beiluhe River [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2016, 44(1):221-234. (in Chinese))
- [17] YUE S, PILON P, PHINNEY B, et al. The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series [J]. Hydrological Processes, 2002, 16(9):1807-1829.
- [18] HAMED K H, RAMACHANDRA R A. A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data [J]. Journal of Hydrology, 1998, 204(1):182-196.
- [19] 张建业,王国庆. 气候变化对水文水资源影响研究[M]. 北京:科学出版社,2007.
- [20] 吴丽,张爱静. 气候变化和人类活动对大凌河上游流域径流的影响[J]. 水利水电科技进展,2016,36(2):10-15. (WU Li, ZHANG Aijing. Effects of climate change and human activities on runoff in upper Daling River Basin [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36(2):10-15. (in Chinese))
- [21] 樊晶晶. 变化环境下水文要素变异研究[D]. 西安:西安理工大学,2016.
- [22] 刘斌,李欣. 人类活动对北洛河流域水土流失治理的影响[J]. 人民黄河,2001,23(2):15-17. (LIU Bin, LI Xin. Influence of human activities on control of soil and water loss in Beiluo River Basin [J]. Yellow River, 2001, 23(2):15-17. (in Chinese))
- [23] 秦伟,朱清科,刘广全,等. 北洛河上游生态建设的水沙调控效应[J]. 水利学报,2010,41(11):1325-1332. (QIN Wei, ZHU Qinke, LIU Guangquan, et al. Regulation effects of runoff and sediment of ecological conservation in the upper reaches of Beiluo River [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(11):1325-1332. (in Chinese))
- [24] 栗晓玲,梁箴. 关中地区气象水文综合干旱指数及干旱时空特征[J]. 水资源保护,2019,35(4):17-23. (SU Xiaoling, LIANG Zheng. Meteorology-hydrology drought index and spatial and temporal characteristics of drought in Guanzhong area [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(4):17-23. (in Chinese))
- [25] 徐宗学,顾晓昀,刘麟菲. 渭河流域河流健康调查与评价[J]. 水资源保护,2018,34(1):1-7. (XU Zongxue, GU Xiaoyun, LIU Linfei. Investigation and assessment on river health of Weihe River Basin [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(1):1-7. (in Chinese))

(收稿日期:2019-06-29 编辑:彭桃英)

(上接第24页)

- [71] 胡林凯,崔东文. 基于 SBO-PP 模型的水资源可持续发展能力评价模型及应用[J]. 水利经济,2017,35(5):7-11. (HU Linkai, CUI Dongwen. Evaluation model for sustainable development capacity of water resources based on SBO-PP model and its application [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2017, 35(5):7-11. (in Chinese))

- [72] 王晗,余文学,贾亦真. 郑州市水资源承载力综合评价[J]. 水利经济,2018,36(6):57-61. (WANG Han, YU Wenxue, JIA Yizhen. Comprehensive evaluation of carrying capacity of water resources in Zhengzhou City [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2018, 36(6):57-61. (in Chinese))

(收稿日期:2019-01-26 编辑:彭桃英)