

沂沭泗流域年径流非一致性变化规律分析

杜瑶¹, 赵静^{1*}, 黄强¹, 赵艳红²

¹西安理工大学, 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安

²水利部淮河水利委员会沂沭泗水利管理局, 江苏 徐州

收稿日期: 2022年3月2日; 录用日期: 2022年4月13日; 发布日期: 2022年4月29日

摘要

在人类活动和气候变化的共同扰动下, 沂沭泗流域的自然水文循环受到影响。因而, 对流域水文序列进行非一致性分析有助于科学有效的评估流域水资源量的变化情况。本研究以沂沭泗流域王庄闸水文站上游作为研究区域, 收集水文站点及泄洪闸1956~2015年的年径流总量资料及50年代以后长序列年最大洪水资料, 采用Mann-Kendall检验方法进行趋势分析, 利用Pettitt检验方法进行突变点检验。结果表明: 1) 沂沭泗流域年径流总量呈显著减少趋势; 2) 流域各站点年最大洪水序列均呈下降趋势, 且大部分站点通过了显著性0.05的检验。3) 流域年径流总量序列突变时间为1975年。4) 流域年最大洪水的突变时间为1975年前后。

关键词

趋势性, 一致性, 年最大洪水, 沂沭泗流域

Non-Stationary Variation Analysis of Annual Runoff in Yishusi Watershed

Yao Du¹, Jing Zhao^{1*}, Qiang Huang¹, Yanhong Zhao²

¹State Key Laboratory of Eco-Hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an Shaanxi

²The Yi-Shu-Si River Basin Administration of Huaihe River Commission of the Ministry of Water Resources, Xuzhou Jiangsu

Received: Mar. 2nd, 2022; accepted: Apr. 13th, 2022; published: Apr. 29th, 2022

Abstract

Under the combined disturbance of human activity and climate change, the natural hydrological cycle of Yishusi River Basin has been destroyed. Therefore, the non-stationary analysis of the watershed hydrological sequence is helpful to better understand the change of water resources in the watershed. In this

作者简介: 杜瑶(1998-), 女, 硕士研究生, 主要从事水文学与水资源研究, Email: dy792727@163.com

*通讯作者 Email: zhaojing3942727@xaut.edu.cn

文章引用: 杜瑶, 赵静, 黄强, 赵艳红. 沂沭泗流域年径流非一致性变化规律分析[J]. 水资源研究, 2022, 11(2): 119-127.

DOI: 10.12677/jwrr.2022.112013

study, the upstream of Wangzhuang Sluice hydrological station in the Yishusi River basin was taken as the research area, and the long-term annual maximum flood data after the 1950s and the annual runoff data of each hydrological station from 1956 to 2015 were collected. The trend analysis was conducted by Mann-Kendall test method, and the change point test was conducted by Pettitt test method. The results showed that: 1) The total annual runoff in Yishu River Basin showed a significant decreasing trend; 2) The annual maximum flood series of each station in the basin showed a downward trend, and most of the stations passed the significance of 0.05; 3) The abrupt change of total annual runoff in the study area was 1975; 4) The mutation time of annual maximum flood in the study area was around 1975.

Keywords

Test Trend, Consistency Analysis, Annual Maximum Flood, Yishusi River Basin

Copyright © 2022 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

水资源合理开发利用是实现区域生态-经济健康可持续发展的关键[1]。流域发生洪水、干旱等极端水情会为居民生命财产安全带来严重危害,然而在城镇化、工业化等人类活动的作用下,流域自然水文循环发生了巨大变化,进而导致水文序列非一致性等水文变异情况,使得流域内极端水情发生概率提升[2]。水文变异是指水文序列在受到外界条件干扰后发生了质的改变,变异点前后水文序列的特性表现出了明显的差异[3]。进行各种水利工作的重要前提是水文序列具有一致性等特性。然而,水文变异致使水文序列的一致性遭到破坏,从而为水利工程建设、管理等工作带来诸多问题[4]。因此,对流域的水文特征进行一致性分析对于科学有效的评估流域水资源量的变化情况具有重要意义。

水文序列变异诊断方法主要有 Pettitt 检验[5], Lepage 检验[6], 滑动 T 检验法[7], R/S 法[8], Mann-Kendall (M-K)法[9]等。秦琳琳[10]等人选用 M-K 检验等方法分析黄泽江流域 1958~2017 年径流和降水的变化趋势和变异情况,结果表明,研究时段内径流呈减少趋势并且在 1963、2008 和 2009 发生突变,降雨呈不显著增加趋势;王栋[11]等人采用 Pettitt 检验等方法分析了黄河源区 1961~2016 年气温、径流等的趋势、突变情况,结果显示,在研究时段内气温升高,并在 1997 年发生突变,年径流量减少,并且突变点为 1989 年。

沂沭泗流域是我国重要的棉粮油生产基地和煤电能源基地,人类活动频繁,使得当地的水生态情况紧张,流域内频繁遭遇水资源短缺、洪涝等问题。张仙娥[12]等人研究表明沂沭泗流域 1956~2010 年的年降水和年地表水资源均呈下降趋势;薛丽芳[13]等人研究指出沂河流域 1951~2002 年的洪峰流量等水文资料在人类活动的影响呈现下降趋势。

以往学者对沂沭泗流域径流的研究多为趋势分析,且研究时段较早。流域的水资源情况对当地的经济的发展十分重要,对流域径流资料进行变异分析,有助于更好的进行流域水资源规划管理工作。因此,本研究将以沂沭泗流域王庄闸水文站上游区域为研究区域,基于各水文站点 1956~2015 年年径流总量资料和长序列年最大洪水资料,采用 Mann-Kendall 检验法和 Pettitt 检验法分别对其进行趋势分析和变异分析。

2. 研究区概况与数据来源

沂沭泗流域位于东经 114°45'~120°20', 北纬 33°30'~36°20'之间,隶属于淮河流域,流域相对比较独立,位于淮河流域的东北部。流域横跨我国四个省份,分别是山东、江苏、安徽、河南[14]。沂沭泗流域属于我国缺水地

区,人均地表水资源量不足国内平均水平的 1/6,多年平均水资源总量为 210.8 亿 m³,其中地表水资源量为 142.6 亿 m³ [15]。

本文所选研究区域为沂沭泗流域王庄闸水文站上游(图 1),集水面积约 1.4 万 km²。研究中所用数据资料为大官庄站、临沂站、新沭河泄洪闸、人民胜利堰闸 1956~2015 年月径流资料和 20 世纪 50 年代以来长序列年最大洪水序列资料。大官庄站是由人民胜利堰闸和新沭河闸站组合而成,是沂河东调的水利枢纽,人民胜利堰闸控制从沂河东调西来水流,新沭河闸站控制沭河北来的水流,故本研究中大官庄站年径流量为新沭河泄洪闸和人民胜利堰闸年径流量之和。本研究中水文资料均来自淮河流域水文年鉴,DEM 数据来自地理空间数据云网站。

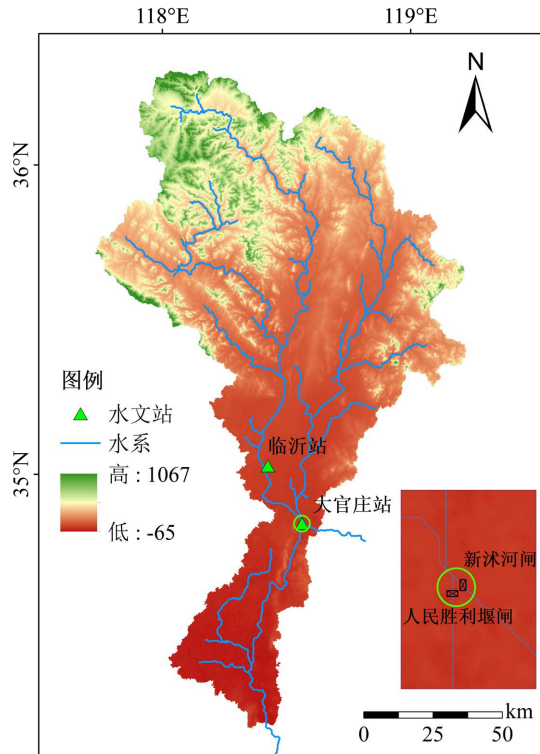


Figure 1. Location of study area
图 1. 研究区示意图

3. 研究方法

3.1. Mann-Kendall 检验法

M-K 检验法具有不受少数异常值的干扰等优点,常用于检测水文时间序列的趋势[16]。假定时间序列变量为 x_1, x_2, \dots, x_n , 其样本容量为 n , 统计量 S 计算公式如下:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (1)$$

其中,

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1 & \text{if } (x_j - x_i) > 0 \\ 0 & \text{if } (x_j - x_i) = 0 \\ -1 & \text{if } (x_j - x_i) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

方差 $Var(S)$ 的计算公式如下:

$$Var(S) = \frac{n \times (n-1) \times (2n+5)}{18} \tag{3}$$

统计量 Z 计算公式如下:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{Var(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{Var(S)}} & S < 0 \end{cases} \tag{4}$$

根据 Z 值正负判别变化趋势, 大于零为上升趋势, 反之则为下降趋势。当 $|Z| \geq 1.96$ 时, 即为通过了置信水平为 0.05 的显著性检验[17]。

3.2. Pettitt 检验法

Pettitt 检验法是一种非参数变异诊断方法。该方法具有物理意义清晰等优点, 常被用于水文序列的突变点检验。操作原理为假设将时间序列数据随机分割为均值相等的两部分, 当前后两部分数据的分布函数不相等时, 则认为分割点为突变点[18]。计算公式如下:

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1 & \text{if } (x_j - x_i) > 0 \\ 0 & \text{if } (x_j - x_i) = 0 \\ -1 & \text{if } (x_j - x_i) < 0 \end{cases} \tag{5}$$

$$U_{i,T} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^T \text{sgn}(x_i - x_j) \tag{6}$$

当序列为连续分布时, $U_{i,T}$ 可由下式递推计算

$$U_{i,T} = U_{i-1,T} + V_{i,T} \quad t = 2, 3 \dots T \tag{7}$$

其中,

$$V_{i,T} = \sum_{j=1}^T \text{sgn}(x_i - x_j) \tag{8}$$

$$U_{1,T} = V_{1,T} \tag{9}$$

$$K_t = \text{Max} |U_{i,T}| \tag{10}$$

其对应的显著性概率计算公式为:

$$P = 2e^{\frac{-6K_t^2}{T^2+T^3}} \tag{11}$$

当 $|U_{i,T}|$ 取得峰值时, 该点即为可能的突变点, 当对应的 P 值小于 0.05 时该突变点为有效突变点。

4. 结果与讨论

4.1. 趋势性分析

采用 M-K 趋势检验法对沂沭泗流域各水文站点和整个研究区域的年径流量序列进行趋势分析, 结果见表 1。

Table 1. Trend analysis of the annual runoff
表 1. 年径流量的趋势分析

站点	检验统计量 Z	显著水平 α	临界值 $Z_{\alpha/2}$	判断结果	趋势性	显著性
新沭河闸	-0.9886	0.05	1.96	$ Z < Z_{\alpha/2}$	递减	不显著
人民胜利堰闸	1.5818	0.05	1.96	$ Z < Z_{\alpha/2}$	递增	不显著
临沂站	-2.4364	0.05	1.96	$ Z > Z_{\alpha/2}$	递减	显著
大官庄站	-0.9248	0.05	1.96	$ Z < Z_{\alpha/2}$	递减	不显著
全区域	-2.2323	0.05	1.96	$ Z > Z_{\alpha/2}$	递减	显著

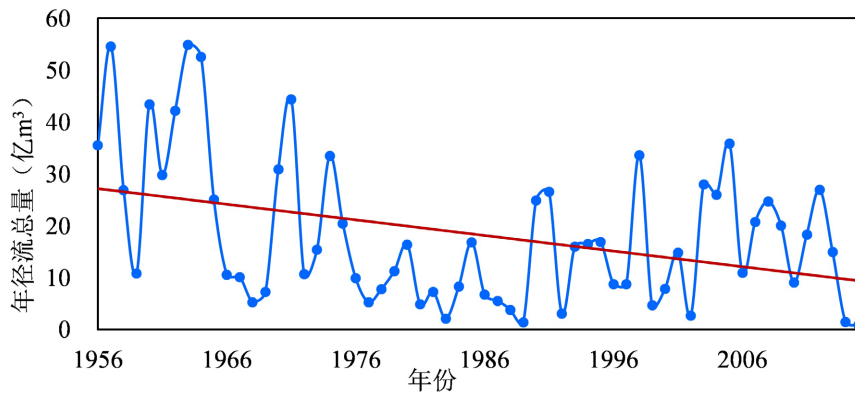


Figure 2. The variation trend of annual runoff in the study area
图 2. 研究区域年径流量变化趋势

由表 1 可知,除人民胜利堰闸站外,各站点呈现出不同的减少趋势。其中新沭河闸站径流呈不显著减少趋势;人民胜利堰闸站径流呈增加趋势,但未通过显著检验;临沂站径流呈减少趋势,并且通过了所设定的显著性检验,减少趋势显著;大官庄站呈减少趋势但未通过显著性检验,减少趋势不明显;1956~2015 年间整个研究区域年径流量序列呈减少趋势,且减少趋势显著(图 2),与潘扎荣[19]等人得出的结论一致。流域内降水量减少等气候条件变化和城镇化等人类活动均会使得径流减少。沂沭泗流域过去几十年降水呈减少趋势,并且占研究区域大部分面积的临沂市自 1978 年以来城镇化速度较快,城镇建设用地面积明显增加[20]。此外,随着经济增长,流域内各产业用水量也随之增加,这些原因均导致了研究区域年径流的减少。

Table 2. Trend analysis of the annual maximum peak discharge
表 2. 年最大洪水序列的趋势分析

站点	检验统计量 Z	显著水平 α	临界值 $Z_{\alpha/2}$	判断结果	趋势性	显著性
新沭河闸	-2.1418	0.05	1.96	$ Z > Z_{\alpha/2}$	递减	显著
人民胜利堰闸	-2.0809	0.05	1.96	$ Z > Z_{\alpha/2}$	递减	显著
临沂站	-2.4032	0.05	1.96	$ Z > Z_{\alpha/2}$	递减	显著
大官庄站	-0.8285	0.05	1.96	$ Z < Z_{\alpha/2}$	递减	不显著

表 2 为年最大洪水序列的趋势检验结果,除大官庄站呈小幅下降趋势外,新沭河闸、人民胜利堰闸及临沂站均呈下降趋势,并且都通过了显著性检验,下降趋势显著;因此,研究区域年最大洪水呈下降趋势,且下降显著;研究区域年最大洪水与年径流总量的变化趋势相同。研究表明[13]研究区域多年典型暴雨-洪峰流量关系具有一致性,张爱军[21]等人分析沂沭泗流域 1960~2011 降水特性,得出结论流域极端降水特征值呈下降趋势,

这与本研究中年最大洪水的变化趋势一致。由于流域气候特点、黄河改道、农业开发等原因致使流域内水患频发。为了缓解流域内水灾害等问题,自 1957 年以来,沂沭泗流域进行了修建水库、泄洪道、水坝等水利建筑以及增加灌溉水源等规划建设[22],并且成效明显。同时,由于流域内降水量减少等原因共同导致了年最大洪水的下降。

4.2. 变异分析

采用 Pettitt 检验对沂沭泗流域各站点及全区域年径流总量序列进行一致性检验,结果见表 3。

Table 3. Abrupt change of the annual runoff

表 3. 年径流总量突变检验结果表

站点	突变年份	k	$U_{i,T}$	P	显著性
新沭河闸站	1975	20	492	0.0027	显著
人民胜利堰闸站	1969	14	-406	0.0221	显著
临沂站	1975	20	444	0.0092	显著
大官庄站	1976	21	361	0.0568	不显著
全区域	1975	20	438	0.0106	显著

由表 3 可以看出,新沭河闸站和临沂站突变时间都为 1975 年,人民胜利堰闸站突变时间为 1969 年;大官庄站未见明显突变;全区域年径流总量序列突变时间为 1975 年。潘扎荣[19]等人研究指出沂沭泗流域内临沂站径流突变时间为 1976 年。结合研究区域实际情况,该流域于 1958 年启动蓄水工程的修建,1964 年前后完成了流域内第一批水库的蓄水工作,在 1965~1975 年之间流域内蓄水工程进一步扩大,因此,本研究中年径流总量突变时间为 1975 年,研究结果符合流域实际情况。

Table 4. Abrupt change analysis of the annual maximum peak discharge

表 4. 年最大洪水突变检验结果表

站点	突变年份	k	$U_{i,T}$	P	显著性
新沭河闸站	1976	24	472	0.0205	显著
人民胜利堰闸站	1963	11	313	0.2669	不显著
临沂站	1974	24	499	0.0185	显著
大官庄站	1976	17	247	0.1791	不显著

年最大洪水序列 Pettitt 检验结果见表 4,在显著性水平 0.05 下,新沭河闸站和临沂站突变显著,且突变年份分别为 1976 年和 1974 年,人民胜利堰闸站和大官庄站没有显著的突变点。薛丽芳[13]等人分析发现临沂站年最大洪水与同期的雨量特征变化基本一致。而研究区域 20 世纪 50~70 年代中期降水比较丰沛,70 年代中期到 80 年代后期降水偏少,80 年代后期以后为平水期。因此,研究区域年最大洪水突变时间为 1975 年前后。

4.3. 讨论

本研究采用 M-K 检验法分析研究区域水文特征序列的变化趋势,结果显示研究区域年径流和年最大洪水序列均呈下降趋势。M-K 检验法是由世界气象组织推荐使用的一种趋势分析方法,该方法不受少数异常值干扰的特点,使其非常适用于水文序列的趋势分析,因而被众多学者用于水文、气象时间序列的趋势研究,并取得一定成果[23]。但该方法仍然有未考虑序列自相关性等局限性。

同时,采用 Pettitt 检验方法分析发现,研究区域年径流序列在 1975 年发生突变,年最大洪水序列在 1975 年前后发生突变。Pettitt 检验在水文序列变异诊断方面被广泛应用,其优点在于物理意义清晰、突变点识别准确等,帮助众多学者在不同流域的水文变异分析中取得进展[24]。但该方法仍然有只能单点检测、易受序列长度影响等局限性。采用了 M-K 检验和 Pettitt 检验分析沂沭泗流域水文特征序列,以后的研究中要采用多种方法展开研究区域水文特征序列分析。

5. 结论

为了研究沂沭泗流域水文特征的非一致性,本文收集了沂沭泗流域王庄闸水文站上游区域 4 个站点 1956~2015 年的年径流总量和年最大洪水资料,采用 Mann-Kendall 检验法和 Pettitt 检验法对特征序列进行了趋势检验和突变检验,具体结论如下:

1) 研究区域年径流总量序列呈显著减少趋势,其中临沂站呈显著减少趋势,新沭河闸站和大官庄站呈不显著减少趋势,人民胜利堰闸站呈不显著增加趋势。

2) 各站点年最大洪水序列均呈下降趋势,并且其中临沂站、新沭河闸站、人民胜利堰闸站三个站点通过所设定的显著性检验,表现出明显的下降趋势。

3) 研究区域年径流总量突变时间为 1975 年,其中人民胜利堰闸站突变时间为 1969 年,临沂站突变时间为 1975 年,突变原因主要为研究区域水利工程建设等人类活动,其余站点无显著突变。

4) 研究区域年最大洪水突变时间为 1975 年左右,其中临沂站突变时间为 1974 年,新沭河闸站突变时间为 1976 年,突变原因为气候变化引起的降雨特征改变,其余站点无显著突变。

综上所述,沂沭泗流域的径流量近几十年以来呈现出减少趋势,故水资源量逐渐减少。此外,由于流域下垫面条件发生变化,从而改变了流域的气候条件,由此影响了流域自然的水文循环,致使流域径流的一致性也遭到了破坏。本研究揭示了研究区域内径流变化特征,以期沂沭泗流域水资源的科学开发利用提供依据,进而为应对流域内可能出现的旱涝灾害提供科学支撑。

基金项目

国家自然科学基金青年项目(52009102)。

参考文献

- [1] 潘争伟,金菊良,王晶,等. 变化环境下流域水资源系统适应性机理及定量分析[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31(6): 9-16.
PAN Zhengwei, JIN Juliang, WANG Jing, et al. Mechanism and quantitative analysis of water resources system adaptability under changing environment. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2020, 31(6): 9-16. (in Chinese)
- [2] 唐小雨,高凡,孙晓懿,等. 基于滑动偏相关法的水文气象序列变异诊断[J]. 人民黄河, 2020, 42(5): 13-18+23.
TANG Xiaoyu, GAO Fan, SUN Xiaoyi, et al. Variation diagnosis of hydrological and meteorological joint sequences in Tarim River based on sliding partial correlation coefficient method. *Yellow River*, 2020, 42(5): 13-18+23. (in Chinese)
- [3] 曹巍,张洪波,任冲锋,等. 陕北榆林地区河川径流变异类型的识别方法[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(3): 138-154.
CAO Wei, ZHANG Hongbo, REN Chongfeng, et al. Identification of hydrological variation types in river streamflow series in Yulin, northern Shaanxi. *Journal of Northwest A&F University (Nat. Sci. Ed.)*, 2019, 47(3): 138-154. (in Chinese)
- [4] 冯平,黄凯. 水文序列非一致性对其参数估计不确定性影响研究[J]. 水利学报, 2015, 46(10): 1145-1154.
FENG Ping, HUANG Kai. A study about the impacts of non-stationary characteristic on the uncertainties of parameters estimation in hydrological series. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2015, 46(10): 1145-1154. (in Chinese)
- [5] 刘嘉琦,龚政,张长宽. 长江入海径流量突变性和趋势性分析[J]. 人民长江, 2013, 44(7): 6-10.
LIU Jiaqi, GONG Zheng and ZHANG Changkuan. Mutability and variation trend of discharges into sea from Yangtze River. *Yangtze River*, 2013, 44(7): 6-10. (in Chinese)
- [6] 冯志刚,梁树献,徐胜,等. 近 60 年淮河流域夏季降水的变化特征[J]. 水文, 2019, 39(6): 85-89.

- FENG Zhigang, LIANG Shuxian, XU Sheng, et al. Variation characteristics of summer precipitation in Huaihe River basin in recent 60 Years. *Journal of China Hydrology*, 2019, 39(6): 85-89. (in Chinese)
- [7] 陈立华, 刘为福, 张利娜. 西江下游年月径流变化特征研究[J]. *水力发电*, 2018, 44(6): 38-43.
CHEN Lihua, LIU Weifu and ZHANG Lina. Characteristics of annual and monthly runoff variation in Xijiang River basin. *Water Power*, 2018, 44(6): 38-43. (in Chinese)
- [8] 陈子豪, 李莹莹, 李凯, 等. 基于 M-K、小波和 R/S 方法的黑河上游来水预测[J]. *人民黄河*, 2021, 43(12): 29-34.
CHEN Zihao, LI Yingying, LI Kai, et al. Trend prediction of incoming water process in the upper reaches of Heihe River based on M-K, Wavelet and R/S Method. *Yellow River*, 2021, 43(12): 29-34. (in Chinese)
- [9] 刘涛, 杨银科, 王天尧. 乌江水系典型小流域年径流序列变化规律及周期特征分析[J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(9): 3744-3749.
LIU Tao, YANG Yinke and WANG Tianyao. Annual runoff series variation and periodic characteristics of typical small watershed in Wujiang River system. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(9): 3744-3749. (in Chinese)
- [10] 秦琳琳, 过寒超. 近 60 年黄泽江流域降雨径流变化趋势及突变分析[J]. *人民珠江*, 2019, 40(7): 30-36.
QIN Linlin, GUO Hanchao. Variation trend and mutation analysis of the rainfall and runoff in Huangze River basin during the last 60 years. *Pearl River*, 2019, 40(7): 30-36. (in Chinese)
- [11] 王栋, 吴栋栋, 解效白, 等. 黄河源区水文气象要素时空变化特征分析[J]. *人民珠江*, 2020, 41(3): 66-72+84.
WANG Dong, WU Dongdong, XIE Xiaobai, et al. Study on spatiotemporal variation characteristics of hydro-meteorological factors in the source region of Yellow River. *Pearl River*, 2020, 41(3): 66-72+84. (in Chinese)
- [12] 张仙娥, 刘妞, 仇亚琴, 等. 沂沭泗流域年降水和年地表水资源量演变趋势[J]. *南水北调与水利科技*, 2015, 13(1): 24-28.
ZHANG Xiane, LIU Niu, QIU Yaqin, et al. Variation trend analysis of annual precipitation and surface water resources in the Yi-Shu-Si basin. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2014, 13(1): 24-28. (in Chinese)
- [13] 薛丽芳, 谭海樵. 沂河流域水文特征变化及其驱动因素[J]. *地理科学进展*, 2011, 30(11): 1354-1360.
XUE Lifang, TAN Haiqiao. Variations of the hydrological characteristics and driving factors in the Yihe River basin. *Progressing in Geography*, 2011, 30(11): 1354-1360. (in Chinese)
- [14] 张静, 刘琳, 窦俊伟, 等. 科学治水保安澜——山东省治淮 70 年历程综述[J]. *中国防汛抗旱*, 2020, 30(8): 8-13.
ZHANG Jing, LIU Lin, DOU Junwei, et al. Ensure local security through flood management—a summary of the 70 years of harnessing Huaihe River in Shandong Province. *China Flood & Drought Management*, 2020, 30(8): 8-13. (in Chinese)
- [15] 刘义. 基于 MODIS 产品的沂沭泗流域蒸散量时空变化特征[J]. *湖南生态科学学报*, 2021, 8(2): 54-59.
LIU Yi. Temporal and spatial variation of evapotranspiration in Yishusi River basin based on MODIS. *Journal of Hunan Ecological Science*, 2021, 8(2): 54-59.
- [16] 刘燕萍, 万丹, 赵军凯, 等. 近 60 年来滦河径流变化特征分析[J]. *水资源研究*, 2021, 10(5): 500-508.
LIU Yanping, WAN Dan, ZHAO Junkai, et al. Analysis of the runoff characteristics variation of Liao River in recent 60 years. *Journal of Water Resources Research*, 2021, 10(5): 500-508. (in Chinese)
- [17] 黄璐, 王鼎, 朱文彪, 等. 基于 R/S 和 M-K 分析的高良涧闸年径流量变化趋势研究[J]. *江苏水利*, 2019(11): 38-40+45.
HUANG Lu, WANG Ding, ZHU Wenbiao, et al. Study on annual runoff trend of Gaoliangjian Gate based on R/S and M-K analysis. *Jiangsu Water Resources*, 2019(11): 38-44. (in Chinese)
- [18] 黄珂珂, 董晓华, 陈亮, 等. 黄柏河流域近 40 年极端降水变化特性分析[J]. *三峡大学学报(自然科学版)*, 2019, 41(5): 19-24.
HUANG Keke, DONG Xiaohua, CHEN Liang, et al. An analysis of extreme precipitation characteristics in Huangbai River basin in recent 40 years. *Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences)*, 2019, 41(5): 19-24. (in Chinese)
- [19] 潘扎荣, 郭东阳, 唐世南. 淮河流域径流时空变化特征分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2017, 28(5): 8-14.
PAN Zharong, GUO Dongyang and TANG Shinan. Spatial-temporal variability of streamflow in Huaihe River. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2017, 28(5): 8-14. (in Chinese)
- [20] 薛丽芳. 面向流域的城市化水文效应研究[D]: [博士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2009.
XUE Lifang. Study on basin-oriented hydrological effects of urbanization. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2009. (in Chinese)
- [21] 张爱军, 韩刚, 范荣亮. 沂沭泗流域降水变化特征分析[J]. *水电能源科学*, 2012, 30(7): 34-36.
ZHANG Aijun, HAN Gang and FAN Rongliang. Analysis of precipitation variation characteristics in Yi-Shu-Si basin. *Water Resources and Power*, 2012, 30(7): 34-36. (in Chinese)
- [22] 沈雨珣. 近代以来治淮思想变迁研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京农业大学, 2017.
SHEN Yuxun. On thought changes of the Huai River regulation in modern times. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [23] 时召军. 气候变化环境下皖中地区水文要素动态规律研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 安徽农业大学, 2015.
SHI Zhaojun. Research on dynamic laws of hydrological elements in middle Anhui under climate change. Hefei: Anhui Agri-

cultural University, 2015. (in Chinese)

- [24] 田小靖, 赵广举, 穆兴民, 等. 水文序列突变点识别方法比较研究[J]. 泥沙研究, 2019, 44(2): 33-40.
TIAN Xiaojing, ZHAO Guangju, MU Xingmin, et al. Comparison study on hydrological time series change-point testing methods. Journal of Sediment Research, 2019, 44(2): 33-40. (in Chinese)