

南四湖流域降水与天然径流量变化特征分析

陈吉星¹, 颜志庆², 陈祥宇³

(1. 济宁市水利事业发展中心, 山东 济宁 272000;
2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 3. 济宁市水文中心, 山东 济宁 272000)

摘 要: 利用多种数理统计方法对南四湖流域代表站 2000—2016 年降水和天然径流量变化特征进行分析, 并从降水角度对分阶段天然径流量变化的成因进行解析。结果表明: 除鱼台站外, 南四湖流域降水逐年下降, 但趋势性不显著; 所有站点降水的突变点均为 2002 年和 2011 年; 各水文站点天然径流量的均表现为下降趋势, 西苇水库与后营站分别有 1 种和 2 种方法通过了显著性检验; 孙庄和鱼台站径流突变点与降水保持一致, 其余站点不一致。

关键词: 南四湖流域; 降水; 天然径流量; 变化特征; 趋势; 突变

中图分类号: P333

文献标识码: A

文章编号: 1000-0852(2022)02-0080-05

0 引言

南四湖水系属淮河流域, 是我国北方典型的干旱缺水型流域。由于气候变化和近几十年流域人口和经济的持续增长, 水资源过度开发利用, 导致了河流干涸与断流等现象^[1-2]。已有文献对南四湖流域降水和径流变化规律开展了一定研究。如张玮采用 MK 非参数检验和 Morlet 小波变换等分析方法, 分析了南四湖流域 1952—2015 年降水、径流、蒸发等水循环要素变化时空特征^[3]。田莉娟基于水文特征时间序列法、Co-Kriging 插值、小波分析等方法, 分析了近 60 年来流域降水的时空演变特征^[4]。龚道勇等采用经验正交函数 (EOF) 分解和线性趋势分析了汛期降水的空间分布特征, 并借助 Spearman 秩次相关法、小波分析和 MK 突变检验等方法, 对流域汛期降水的多尺度时间演变规律进行了研究, 初步预测了其未来变化特征^[5]。本文分析南四湖 2000—2016 年降雨、天然径流变化特征, 并初步解析其变化成因, 以及对水资源开发利用的影响。

1 研究区域、序列与方法

1.1 研究区域

南四湖位于山东微山县境内, 为南阳、独山、昭阳、微山四个串连湖泊的总称, 是中国北方最大的淡水湖, 流域面积为 $3.17 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。针对南四湖流域水文控制站孙庄、西苇水库、后营、梁山闸、鱼台, 解析南四湖流域 2000—2016 年的降水和径流量时程演变规律。

1.2 研究序列

南四湖流域降水整体呈不显著增加趋势, 径流和蒸发呈显著减少趋势, 水循环要素的变化没有固定的周期, 是多种时间尺度的相互嵌套, 降水、径流和蒸发的第一主周期分别是 25a、31a 和 25a^[6]。以南四湖 2000—2016 年降雨、天然径流数据为研究对象, 主要探究一个主周期内的变化规律。采用水文序列趋势变化检验方法虽然受到序列长度的影响, 检验能力存在些许差异, 张应华等针对不同时间序列长度, 对比分析了各种方法所获得的趋势变化时间点之间的差异,

明趋势显著变化年份均不受时间序列长度影响^[6],本文选用研究序列合理。

1.3 研究方法

国内外学者对于水文气象序列数据开展了大量的研究,由于各自研究的方法的假设和适用条件都有所不同,因此本文采用线性趋势法、TFPW-MK、Spearman方法检验各站降水、天然径流量的趋势性,并采用有序聚类法、LeeHeghinian法、滑动T检验法诊断年降水、天然径流量的突变性。

1.3.1 线性趋势法

把水文气象要素 x 当作因变量,观测时间作为自变量,计算线性相关系数 r^2 采用线性回归方程进行描述,常用于水文气象特征以及演变趋势的研究^[9]。

1.3.2 TFPW-MK 法

与经典的 MK 方法相比,TFPW-MK (Trend-free pre-whitening Mann-Kendall) 先将数据进行预空白处理,消除序列正向自相关性,避免趋势显著性被放大,较传统的 MK 法更为有效^[10]。

1.3.3 Spearman 法

Spearman 方法在分析序列 x_t 与时序 t 的相关关系时,将 x_t 用其秩次 R_t (即把序列 x_t 从小到大排列时, x_t 对应的序号)代表, t 仍为时序,然后秩次相关系数来分析是否具有趋势性,钱光兴等^[9]根据盘龙河流域的资料分析了其水文气象要素的变化趋势。

1.3.4 有序聚类法

该方法以有序分类手段推求最可能的干扰点 τ_0 ,其实质是确定最优分割点,使同类之间离差平方和最小,而类与类之间的离差平方和最大。该方法已有很多学者^[10-12]应用于径流量和降水量序列突变点的分析中。

1.3.5 LeeHeghinian 法

对于样本序列 $x_t(t=1,2,L,n)$,假定其总体服从正态分布且分割点 τ 的先验分布为均匀分布,推导得到分割点的后验条件概率密度函数,由后验概率密度函数推求出满足 $\max_{1 \leq \tau \leq n-1} \{f(\tau/x_1, x_2, L, x_n)\}$ 条件的 τ ,即为最可

能的分割点,记为 τ_0 。范小黎等^[13]采用 Lee-Heghinian 法检验了黄河宁蒙段洪水流量的突变现象。

1.3.6 滑动 T 检验

滑动 T 检验法是把水文气象一连续的序列分成 2 个子序列,判断其均值差异是否超过了一定的显著性水平,确定有无突变发生^[14-15]。

2 结果与分析

2.1 年降水变化特征分析

2.1.1 年代均值对比分析

南四湖流域各站不同年代平均降雨的均值如图 1 所示。2000—2016 年各站降水基本呈现逐年代减少态势。总体上,南四湖流域在 2000—2005 年处于平水期,2010 年以后属于枯水期。

2.1.2 降水趋势检验

南四湖流域各站 2000—2016 年降水线性趋势见图 2,孙庄、西苇水库、后营、梁山闸 4 站降水均为下降趋势,鱼台站降水为上升趋势。为进一步分析降水趋

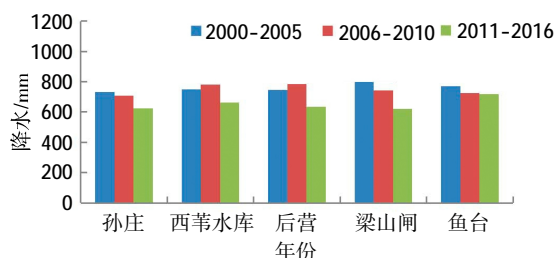


图 1 南四湖流域各站不同年代平均降雨分布

Fig.1 The average rainfall distribution of Nansi Lake basin in different years

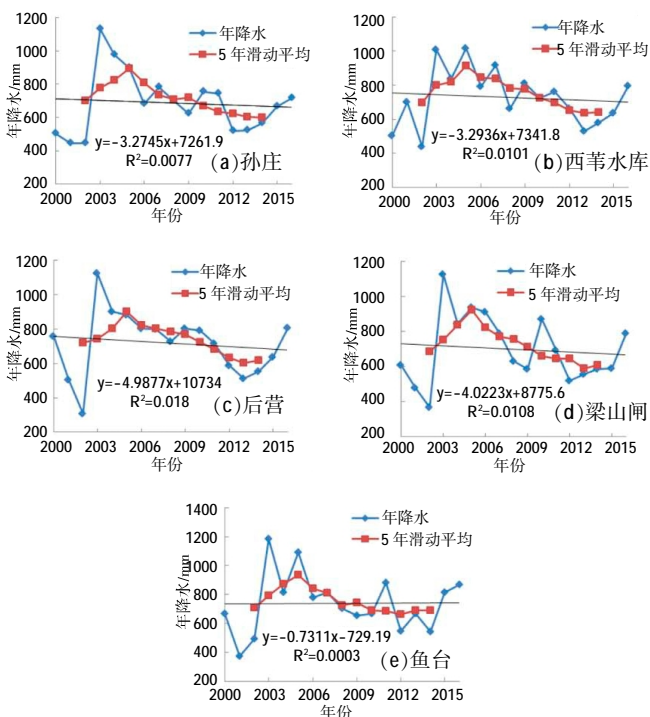


图 2 南四湖流域代表站降水线性趋势检验

Fig.2 Linear trend test of precipitation at representative stations in Nansi Lake basin

表1 3种降水线性趋势检验方法结果($\alpha=0.05$)

Table1 The results of three linear trend test methods for precipitation

站点	线性趋势	临界值	TFPW-MK	临界值	Spearman	临界值
孙庄	-0.09	-0.48	-0.63	-1.96	-0.19	-1.75
西苇水库	-0.10	-0.48	-1.62	-1.96	-0.42	-1.75
后营	-0.13	-0.48	-1.08	-1.96	-0.51	-1.75
梁山闸	-0.10	-0.48	-0.63	-1.96	-0.30	-1.75
鱼台	+0.02	+0.48	+0.09	+1.96	+0.27	+1.75

注:-表示下降趋势,+表示上升趋势。

势的显著性,采用线性趋势法、TFPW-MK、Spearman 3种检验方法进行综合检验,结果如表 1 所示,南四湖流域孙庄、西苇水库、后营、梁山闸 4 站降水 3 种检验方法均处于下降趋势,但统计量均在临界值以内,下降趋势不显著;鱼台站降水有上升的趋势,也不显著,此结果与图 1 结果基本一致。

2.1.3 降水突变检验

各站 2000—2016 年降水突变趋势见表 2,5 个代表站的突变点均为 2002 和 2011 年,其中孙庄、西苇水库、后营、梁山闸 2002 年的降水量均为研究期内最低值,鱼台站 2002 年降水也仅比 2003 年高;所有站点 2011 年至 2012 年均有明显的下降,两个突变点均符合实际降雨检验。

2.2 径流年际变化特征分析

2.2.1 年代均值与距平百分比

各站不同年代天然平均径流量与距平百分比如图 3 所示。各站天然径流量基本呈现逐年代减少态势,南四湖流域在 2000—2005 年处于丰水期,2010 年以后属于枯水期。

2.2.2 天然径流量趋势检验

各站天然平均径流量线性趋势见图 4,5 个代表站天然平均径流量均为下降趋势。采用线性趋势法、TFPW-MK、Spearman 3 种检验方法进一步检验天然平均径流量的突变显著性,结果如表 3 所示。西苇水库站在 TFPW-MK 检验方法有显著的下降趋势,梁山闸站

在 TFPW-MK、Spearman 检验方法有显著的下降趋势,其余统计量均在临界值以内,下降趋势不显著。

2.2.3 天然径流量突变检验

各站 2000—2016 年天然径流量突变检验结果见

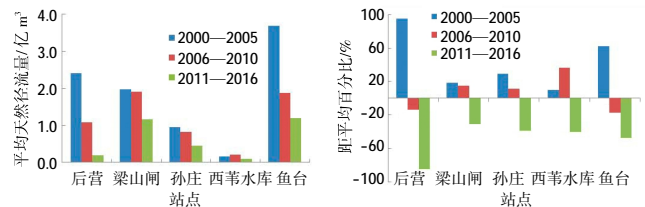


图 3 南四湖流域代表站天然平均径流量均值与距平百分比

Fig.3 Mean values and anomalous percentage of natural mean runoff at the representative stations of Nansi Lake basin

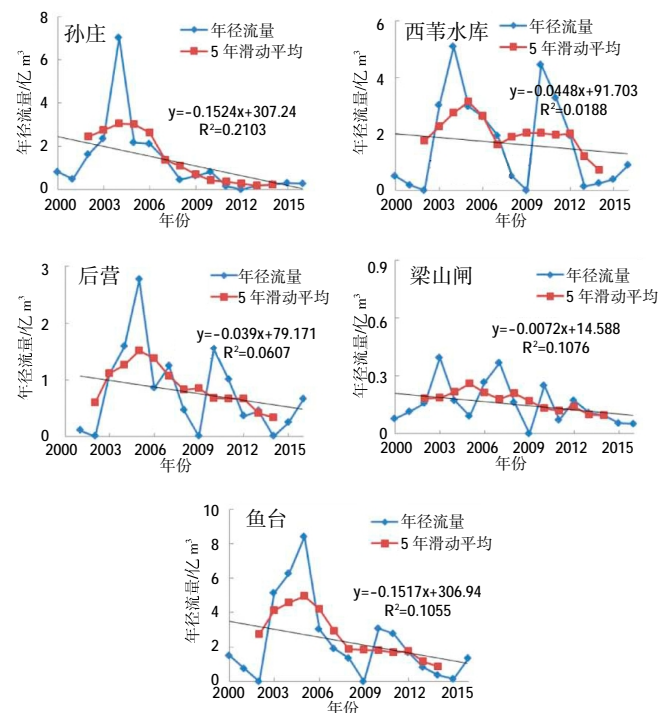


图 4 南四湖流域代表站天然径流量线性趋势检验

Fig.4 Linear trend test of natural runoff at the representative stations of Nansi Lake basin

表2 3种降水突变检验方法结果($\alpha=0.05$)

Table2 The results of three precipitation abrupt test methods 2007

站点	有序聚类法	LeeHeghinian	滑动 T 检验法
孙庄	2002/2011	2002/2011	2002/2011
西苇水库	2002/2011	2002/2011	2002/2011
后营	2002/2011	2002/2011	2002/2011
梁山闸	2002/2011	2002/2011	2002/2011
鱼台	2002/2011	2002/2011	2002/2011

表3 3种天然平均径流量趋势检验方法结果($\alpha=0.05$)

Table3 The results of three trend test methods for natural average runoff

站点	线性趋势	临界值	TFPW-MK	临界值	Spearman	临界值
孙庄	-0.14	-0.48	-0.63	-1.96	-0.12	-1.75
西苇水库	-0.33	-0.48	-1.98*	-1.96	-1.40	-1.75
后营	-0.46	-0.48	-2.88*	-1.96	-3.77*	-1.75
梁山闸	-0.14	-0.48	-0.81	-1.96	-0.27	-1.75
鱼台	-0.32	-0.48	-1.53	-1.96	-0.86	-1.75

注:-表示下降趋势,+表示上升趋势。

表 4,由表 4 可知,各站点 3 种检方方法结果一致,孙庄站天然径流量突变点为 2002 与 2011 年,西苇水库站为 2008 年,后营站为 2007 年,梁山闸为 2002 与 2012 年,鱼台站为 2006 年。径流量的突变一方面受降水的影响,有一定的滞后性,一方面受工程调度的影响。受两者共同影响,部分站点的径流量与降水的突变点规律存在差异。

2.3 降水与径流时空分析

南四湖流域水循环要素的时空变化受到气候变化和人类活动的双重影响,在短时间尺度上高强度的人类活动对水循环要素的变化影响更甚,在较长时间尺度上,气候变化是影响水循环要素变化的主导因素^[3]。

2000 年和 2001 年发生全国范围的干旱 2002 年南四湖地区发生了新中国成立一来最为严重的特大干旱,上下湖区基本干涸^[16]。当我国夏季汛期发生干旱灾害时容易发生旱涝急转,2011 年发生过较大范围的旱涝急转。2011 年北方地区发生严重的春夏连旱,6 月开始连续降水后才结束。由于 2000 年后的干旱灾害,降水一直下降的趋势与干旱背景一致;在 2002 年与 2011 年发生了降水突变。

径流的分布格局基本符合于降水的分布规律,但在多年变化趋势上与降水不同,说明径流除了受降水影响以外,还受到土地利用类型改变、水利工程建设、用水量变化等人类活动的影响。2000 年和 2014 年南

四湖流域土地利用以耕地和建设用地为主,且建设用地发展迅速。受土地利用变化影响,2000—2014 年径流深变化幅度为-1.49%^[17]。近 40 年流域内共建立水库 300 余座,拦河闸 20 余座。随着人口增加,生产生活用水增加,水资源过度开发利用,也是径流量减少的重要原因。

3 结论

本文利用多种统计方法对南四湖流域孙庄、西苇水库、后营、梁山闸、鱼台代表站 2000—2016 年降水与天然径流量时程变化特征进行了解析并初步分析其形成原因,主要研究结论如下:

(1)南四湖流域降水除鱼台站有上升的趋势外,其余 4 站均表现为下降趋势,且均没有通过显著性检验,降水趋势变化与气候、地形、水生态环境有较为直接的关系。副热带高压北上往往受泰沂山脉影响,逆旋东移入海。鱼台站位于最南端,滨湖区区内,离雨带较近,雨量多,而其他站雨量少。

(2)南四湖流域 5 个代表站降水突变点均为 2002 年与 2011 年,这与实际背景的降水相符合。

(3)南四湖流域 5 个代表站天然年平均径流量均表现为下降趋势,其中西苇水库与后营站分别有 1 种和 2 种方法通过了显著性检验。径流量的减小主要与降水有关,同时也与土地类型、地形变化、水利工程、地下水位有明显的关系,后营站上游流域内煤矿塌陷地的出现,西苇水库上游水景观工程的建设,都影响了两站的径流值。

(4)南四湖流域天然年平均径流量突变检验中,孙庄和鱼台站径流突变点与降水保持一致,其余站点径流与降水突变点不一致。径流量的突变一方面受降水的影响,有一定的滞后性,一方面受工程调度的影响。受两者共同影响,部分站点的径流量与降水的突变点规律存在差异。

表4 3种天然径流量突变检验方法结果($\alpha=0.05$)

Table4 The results of three natural runoff abrupt test methods

站点	有序聚类法	LeeHeghinian	滑动 T 检验法
孙庄	2002/2011	2002/2011	2002/2011
西苇水库	2008	2008	2008
后营	2007	2007	2007
梁山闸	2002/2012	2002/2012	2002/2012
鱼台	2006	2006	2006

参考文献:

- [1] 张建云,章四龙,王金星,等.近 50 年来中国六大流域年际径流变化趋势研究[J].水科学进展,2007,18(2):230-234. (ZHANG Jianyun, ZHANG Silong, WANG Jinxiang, et al. Study on runoff trends of the six larger basins in China over the past 50 years[J]. Advances in Water Science, 2007,18(2):230-234. (in Chinese))
- [2] 北京市永定河管理处. 永定河水旱灾害[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2002:1-205. (Beijing Yongding River Administration Office. Flood and Drought Disaster in Yongding River [M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2002:1-205. (in Chinese))
- [3] 张玮,薛丽芳,杜杰. 南四湖流域水循环要素的时空变化特征[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2020,18(3):65-72. (ZHANG Tu, XUE Lifang, DU Jie. Spatial and temporal variation characteristics of water cycle elements in Nansi Lake basin [J]. South-North Water Diversion and Water Conservancy Science and Technology, 2020,18(3):65-72. (in Chinese))
- [4] 田娟娟. 南四湖流域城镇扩展的时空演变及其模式优化[D]. 徐州:中国矿业大学, 2018. (TIAN Lijuan. Spatial and Temporal Evolution of Town Expansion in the South Four Lakes Basin and Its Model Optimization [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018. (in Chinese))
- [5] 龚道勇,王宗志,王海元,等.南四湖流域 1964-2008 年汛期降水时空演变规律[J]. 中国农村水利水电, 2015(11):48-54. (GONG Daoyong, WANG Zongzhi, WANG Haiyuan, et al. Spatial and temporal evolution of precipitation in the South Four Lakes basin during the 1964-2008 flood period [J]. China Rural Water Conservancy and Hydropower, 2015(11):48-54. (in Chinese))
- [6] 张应华, 宋献方. 水文气象序列趋势分析与变异诊断的方法及其对比[J]. 干旱区地理, 2015,38(4):652-665. (ZHANG Yinghua, SONG Xianfang. Methods of hydro-meteorological series trend analysis and variability diagnosis and their comparison [J]. Arid Zone Geography, 2015,38(4):652-665. (in Chinese))
- [7] INGRAM O, JOHN W P. Unbiased estimation of certain correlation coefficients [J]. Annals of Mathematical Statistics, 1958,29(1): 201-211.
- [8] 罗先超,魏怀斌.乌裕尔河流域水文气象要素演变特征分析[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2015,36(4):8-11. (LUO Xianchao, WEI Huaibin. Analysis on meteorological and hydrological evolution characteristics in wuyuer river basin [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2015,36(4):8-11. (in Chinese))
- [9] 钱光兴,崔东文. 盘龙河流域水文气象要素变化趋势分析研究[J]. 广东水利水电, 2011(4):32-34+59. (QIAN Guangxing, CUI Dongwen. Analysis on the trend of hydrometeorological elements in Panlong River basin [J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2011(4):32-34+59. (in Chinese))
- [10] 张献志,汪向兰,王春青,等. 黄河源区气象水文序列突变点诊断[J]. 人民黄河, 2020,42(11):22-26. (ZHANG Xianzhi, WANG Xianglan, WANG Chunqing, et al. Diagnosis of abrupt change point of the meteorological and hydrological series in the source area of the Yellow River [J]. Yellow River, 2020,42(11):22-26. (in Chinese))
- [11] 李保敏,张俊芝,吴旭,等. 基于 Mann-Kendall 法和有序聚类法的径流变化特征研究[J]. 海河水利, 2012(2):37-38+44. (LI Baomin, ZHANG Junzhi, WU Xu, et al. Runoff change characteristics based on Mann-Kendall method and ordered clustering method [J]. Haihe Resources, 2012(2):37-38+44. (in Chinese))
- [12] 曹明亮,张弛,周惠成,等. 丰满上游流域人类活动影响下的降雨径流变化趋势分析[J]. 水文, 2008(5):86-89. (CAO Mingliang, ZHANG Chi, ZHOU Huicheng, et al. Effects of human activities on rainfall and runoff in the upper reaches of Fengman basin [J]. Journal of China Hydrology, 2008(5):86-89. (in Chinese))
- [13] 范小黎,师长兴,周园园,等. 黄河宁蒙段洪水过程变化特点[J]. 资源科学, 2012,34(1):65-73. (FAN Xiaoli, SHI Changxing, ZHOU Yuanyuan, et al. Characteristics of flood regime in Ningxia-Inner Mongolia reaches of the upper Yellow River [J]. Resources Science, 2012,34(1): 65-73. (in Chinese))
- [14] MORRILL C, OVERPECK J T, COLE J E. A synthesis of abrupt changes in the Asian summer monsoon since the last deglaciation [J]. The Holocene, 2003,13(4):465-476.
- [15] ZHAO F, XU Z, HUANG J. Long-term trend and abrupt change for major climate variables in the upper Yellow River Basin [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2007,21(2):204-214.
- [16] 吕娟,高辉,孙洪泉. 21 世纪以来我国干旱灾害特点及成因分析[J]. 中国防汛抗旱, 2011,21(5):38-43. (LV Juan, GAO Hui, SUN Hongquan. Analysis of the characteristics and causes of drought disasters in China since the 21st century [J]. China Flood Control and Drought Relief, 2011,21(5):38-43. (in Chinese))
- [17] 于红学. 南四湖流域土地利用变化的水文效应研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2016. (YU Hongxue. Study on the Hydrological Effect of Land Use Change in the Nansi Lake Watershed [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2016. (in Chinese))

(下转第 90 页)