

淮河流域径流时空变化特征分析

潘扎荣, 郭东阳, 唐世南

(水利部水利水电规划设计总院, 北京 100120)

摘要: 基于淮河流域主要干支流 26 个水文站点 1956–2008 年的实测径流资料, 针对不同时间尺度, 采用 Mann–Kendall、Sequential Mann–Kendall 和 Distribution–free CUSUM 等多种非参数检验方法对径流年际变化的趋势性和突变性进行分析。结果表明: 流域径流年际变化趋势存在一定空间差异, 除上游区表现出不显著的上升趋势外, 大部分地区呈现出下降趋势, 其中淮河水系中游以北地区与沂沭泗水系表现出显著的下降趋势; 淮河水系径流量在春季(尤其 4–5 月份)表现出最大范围的下降趋势, 在夏季(尤其 7–8 月份)呈现出以上升趋势为主的变化趋势, 径流量年内分布不均匀化将进一步加大, 可能加剧地区水资源供需矛盾和旱涝灾害; 沂沭泗水系径流量在夏季表现出最大范围的下降趋势, 7 月份径流量的趋势值中值最小, 达到了 95% 的显著水平; 受到强烈的人类活动影响, 流域年径流突变年份存在一定的时空差异, 总体主要发生在 20 世纪 70、80 年代。

关键词: 径流量; 趋势分析; 突变分析; 淮河流域

中图分类号: TV121

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2017)05-0008-07

Spatial-temporal variability of streamflow in Huaihe River

PAN Zharong, GUO Dongyang, TANG Shinan

(General Institute of Water Resources and Hydropower Planning and Design, Beijing 100120, China)

Abstract: This study is based on the measured streamflow data from 1956–2008 from 26 hydrometric stations across Huaihe River Basin (HRB). The Mann–Kendall, Sequential Mann–Kendall and distribution–free CUSUM tests were employed to detect the trends of streamflow and the abrupt change points of annual streamflow at different spatial scales. The results showed that: except in the headwater catchment of the basin with an insignificant increasing trend, the annual streamflow decreased across the basin, especially in the mainstreams of the northeast part of the Huaihe River System (HRS) and the Yishusi River System (YRS); most stations in the HRS showed decreasing streamflow in spring (i. e. April to May) and rising streamflow in summer (i. e. July and August), indicating that drought and flood in the HRS could be more serious; the decreasing streamflow trend in summer was the strongest as compared to other seasons in the YRS, and the streamflow in July reached the lowest, with 95% significant level. affected by strong human activities, the change points of annual streamflow was relatively complex and shows spatial and temporal variability, which mainly happened between 1980–1990.

Key words: Streamflow; Trend analysis; abrupt change; Huaihe River Basin

1 研究背景

在气候、地貌、土壤、植被等自然因素以及人类活动的耦合作用下, 河川径流的演变过程既表现出确定性的规律, 也具有强烈的随机性^[1–2]。随着气候变化和人类活动影响的加剧, 河川径流的时空特征发生了明显变化^[3–4], 直接影响流域或区域水资

源的开发利用与合理配置、洪旱灾害的频率与强度以及生态系统的物理、化学和生物过程, 并进一步影响流域或区域经济社会的可持续发展^[5–8]。因此, 不同时空尺度的径流变化分析研究受到学术界的广泛重视^[7–11]。

基于长期的水文气象资料, 众多学者针对我国各流域径流量的变化特征开展了研究, 结果表明, 黄

收稿日期: 2017-07-02; 修回日期: 2017-07-25

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0401300)

作者简介: 潘扎荣(1985-), 男, 福建南平人, 博士, 工程师, 主要从事水资源规划及管理方面的研究。

河^[12]、海河^[13]和辽河^[14]等北方流域的径流主要呈现出下降趋势,长江^[15]和珠江^[16]等南方流域主要表现出增加趋势,塔里木河等西北流域^[17]径流的变化特征则较为复杂。可见我国河流径流发生了显著变化,并存在明显空间差异。目前,由于受到资料的限制^[18-20],在流域尺度上开展淮河流域径流时空变化特征分析的研究成果少有报道。淮河流域位于我国南北气候过渡带,是我国年径流量对气候变化最敏感的地区之一^[21-22]。为了解决流域洪水和水资源短缺等问题,流域修建了众多蓄水水库和拦河节制闸蓄水工程,对河道径流实行高度调节控制,引起了河道径流过程的大幅度改变,加上气候原因与水资源利用超过其承载能力,带来了突出的水资源与生态环境问题,严重威胁了流域经济社会可持续发展和生态安全^[22-23]。因此,开展淮河流域径流演变规律分析,有助于深入了解流域水资源特性,对流域水资源的可持续开发利用和生态环境保护等方面具有重要意义。

2 研究区域

淮河流域地处我国东部,介于黄河和长江两流域之间,位于东经 $111^{\circ}55' \sim 121^{\circ}25'$,北纬 $30^{\circ}55' \sim 36^{\circ}36'$,位于我国南北气候、高低纬度和海陆相3种过渡带的重叠地区(图1)。淮河干流以北属暖温带半湿润气候区,以南属亚热带湿润型季风气候区,主要受季风气候的影响,年均气温在 $11 \sim 16^{\circ}\text{C}$ 之间,最高月均气温 25°C 左右,最低月均气温在 0°C 左右。流域多年平均降水量 898 mm 。在流域自然气候、地理特征和人类活动影响下,降水时空分布不均匀,空间上由东南向西北递减,同纬度地区山区大于平原,沿海大于内陆,由北向南呈递增趋势,降水量的季节分布很不均衡,夏季降水量最多,约占年降水量的 $40\% \sim 67\%$ 。淮河流域多年平均径流深约 231 mm ,流域内 70% 的年径流量集中在汛期,以暴雨形式产生。非汛期径流量仅占 30% 左右。

3 数据资料与研究方法

3.1 数据资料

选取淮河流域主要干支流上的26个水文站1956-2008年的实测月均径流资料,针对月份、季度和年度等不同时间尺度,开展流域径流时空变化特征分析。根据淮河流域的气候特征,四季划分如下:春季(3-5月)、夏季(6-8月)、秋季(9-11月)和冬季(12-次年2月)。水文站基本情况见图

1和表1。

3.2 研究方法

运用Mann-Kendall非参数检验法(简称M-K法)对淮河流域径流年际变化进行趋势分析^[24-25]。该方法不需要样本遵从一定的分布,也不受少数异常值的干扰,人为干扰少,定量化程度高,计算简便^[26-27]。因此,该方法已经成为世界气象组织推荐并已经广泛使用的评估环境数据时间序列变化趋势的一种方法^[17,28]。数据时间序列的自相关性对M-K法检验结果有一定影响^[29-30],Yue Sheng等^[29]认为在进行M-K法检验之前必须对时间序列进行“预白化”(Pre-Whitened)处理。在数据时间序列突变点识别中,采用单一的统计方法得到的结果可能并不准确^[31-32]。因此,本文采用Sequential Mann-Kendall非参数检验法^[26]和Distribution-free CUSUM非参数检验法^[31-32]进行流域径流年际变化突变分析。

4 结果和讨论

4.1 趋势分析

4.1.1 年(季)径流变化趋势 淮河流域年(季)均径流变化趋势及其显著性见图2。从年均径流变化趋势上看,流域有20个水文站的径流变化表现出了下降趋势,其余6个表现出上升趋势的水文站主要集中在分布于流域上游地区。其中,包含7个水文站的径流下降趋势呈现出 95% 显著水平,主要分布于淮河水系中游北部地区和沂沭泗水系。淮河干流以北地区的径流变化特征由上游区的不显著上升趋势向中游区的显著下降趋势转变,这是造成淮河干流径流变化趋势由上游至中游发生转变的直接原因。

从季均径流变化趋势上看,流域在春季、夏季、秋季和冬季,径流呈现下降趋势的水文站个数分别占总数的 96.2% , 61.5% , 73.1% 和 65.4% 。可见,在春季和秋季径流呈现出下降趋势的水文站较多,而夏季最少,这表明流域径流年内分配有进一步不均匀的趋势。涡河玄武和蒙城、惠济河砖桥、沱河水城以及大运河运河等5个水文站在4个季节的径流均表现出显著的下降趋势,这将进一步加剧区域水资源供需矛盾,并对河流生态系统造成严重危害。与淮河水系相比较,沂沭泗水系径流变化趋势特征具有明显不同。在夏季,不仅所有水文站径流均表现出下降趋势,而且呈现显著下降趋势的水文站也是四个季节中最多。该现象表明沂沭泗水系在夏季的径流下降趋势最强烈。

表1 淮河流域主要干支流水文站基本信息

序号	河流名称	控制断面	东经/(°)	北纬/(°)	集水面积/km ²	实测径流序列
1	淮河	长台关	114.07	32.32	3090	1956-2000年
2		息县	114.73	32.33	10190	1956-2008年
3		淮滨	115.42	32.43	16005	1956-2008年
4		王家坝	115.60	32.43	30630	1956-2008年
5		润河集	116.10	32.48	40360	1956-2008年
6		鲁台子	116.63	32.57	88630	1956-2008年
7		蚌埠(吴家渡)	117.37	32.95	121330	1956-2008年
8	洪河	庙湾	114.68	33.08	2660	1956-2008年
9		新蔡	114.98	32.77	4110	1956-2008年
10		班台	115.07	32.72	11280	1956-2008年
11	颍河	周口	114.65	33.63	25800	1956-2008年
12		阜阳	115.83	32.90	35246	1956-2008年
13	泉河	沈丘	115.12	33.17	3094	1956-2008年
14	史河	蒋家集	115.73	32.30	5930	1956-2008年
15	淝河	横排头	116.37	31.60	4370	1956-2008年
16	惠济河	砖桥	115.35	34.02	3410	1956-2000年
17	涡河	玄武	115.28	33.98	4020	1959-2000年
18		蒙城	116.55	33.28	15475	1956-2008年
19	沱河	永城	116.40	33.93	2237	1956-2000年
20	池河	明光	117.97	32.78	3501	1956-2008年
21	三河	中渡	118.77	33.10		1956-2008年
22	沂河	临沂	118.40	35.02	10315	1956-2008年
23	老沭河	新安	118.35	34.37		1956-2008年
24	新沭河	莒县	118.87	35.58	1676	1956-2008年
25		大官庄	118.55	34.80	4529	1956-2008年
26	大运河	运河	117.93	34.33		1956-2008年

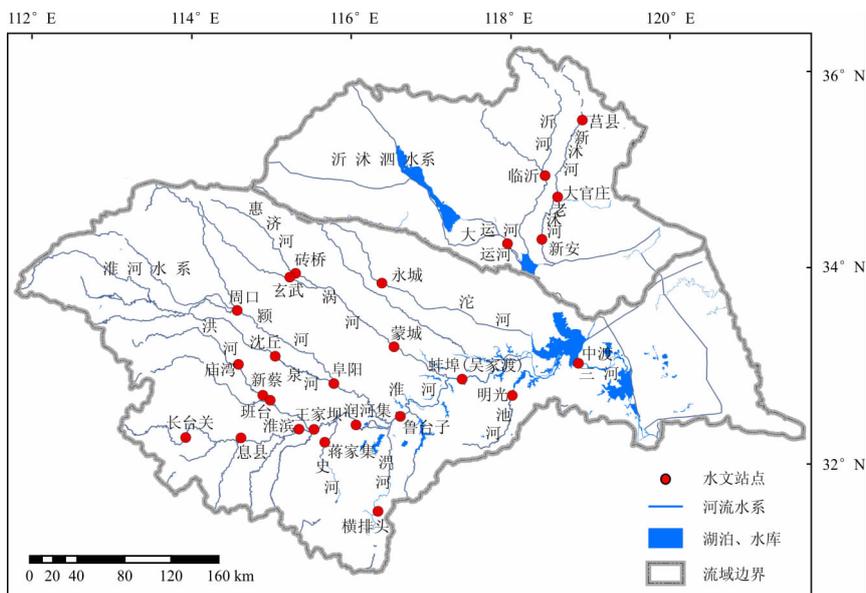


图1 淮河流域主要干支流水文站分布示意图

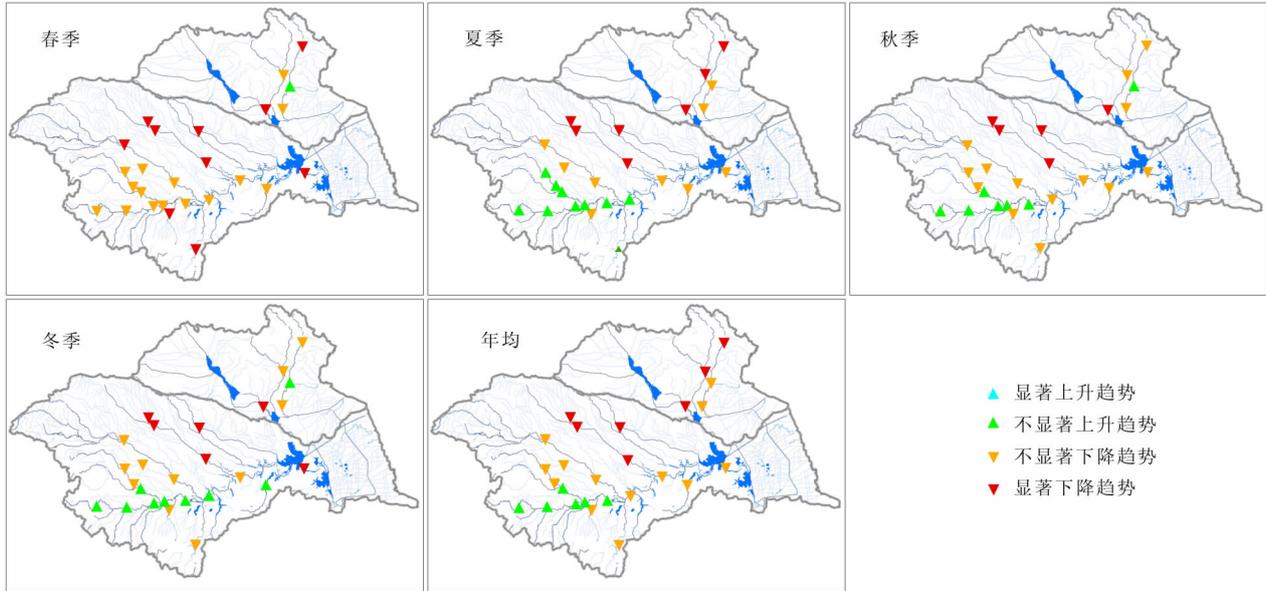


图 2 淮河流域年(季)均径流序列变化趋势

4.1.2 月均径流变化趋势 月均径流的变化趋势分析能够提供更加详细的信息,帮助揭示和理解四季及年径流变化趋势的原因。淮河流域 26 个水文站月均径流趋势分析结果见图 3,而各水文站在相同月份的径流变化趋势值(Z)的分布情况见图 4。

总体来说,除了 4 月和 5 月份,流域上游区及淮河干流的各月月均径流表现出了不显著的上升趋势。而在 4-5 月份,流域具有 25 个水文站的径流呈现出了下降趋势,并分别有 13、14 个站点表现出了显著的下陷趋势。可见,4-5 月份是流域径流下降趋势最强烈的月份,同时也是造成流域春季径流下降的直接原因。

从图 4(a)可以看出,流域 26 个水文站径流变化的趋势值中值(即 50% 保证率)在 12 个月份中均呈现负值,说明流域各月径流变化总体以下降趋势为主导。其中,4 月份的趋势值中值最小,达到了 95% 的显著水平。对于淮河水系而言(图 4(b)),19 个水文站在 12 个月份中的趋势值分布情况与淮河流域相似,也是在 4 月份的趋势值中值最小,且达到了 95% 的显著水平。但淮河水系在 7、8 月份的趋势值中值呈现正值,说明在该时期淮河水系的径流变化总体以上升趋势为主导。因此,淮河水系各月径流量的变化不仅增加了该地区径流量在年内的差异性,同时也增加了区域的洪旱灾害风险。从图 4(c)可以发现,沂沭泗水系各月径流变化的趋势值中值也是呈现负值。但各月径流变化的趋势值中值最小发生在 7 月份,且达到了 95% 的显著水平,这应该是导致沂沭泗水系夏季径流发生最显著下降趋

势的主要原因。

4.2 突变分析

针对流域年径流量序列呈现出显著变化趋势的 7 个水文站,应用 Sequential Mann - Kendall 非参数检验法和 Distribution - free CUSUM 非参数检验法对其年径流量序列进行突变性分析,结果见表 2 和图 5。

表 2 淮河流域 7 个水文站年均径流序列的突变年份

断面名称	趋势	Sequential Mann - Kendall	Distribution - free CUSUM
莒县	显著下降	1965	1976
临沂	显著下降	1965	1965
运河	显著下降	1976	1976
永城	显著下降	1982	1985
蒙城	显著下降	1976	1976
玄武	显著下降	1988	1987
砖桥	显著下降	1987	1980

由 Sequential Mann - Kendall 法得到的结果表明,位于沂沭泗水系的莒县站和临沂站的突变年份均为 1965 年,而运河站的突变年份为 1976 年。由 Distribution - free CUSUM 法得到的结果表明,莒县站和运河站的突变年份发生在 1976 年,而临沂站的突变年份发生在 1965 年。薛丽芳等^[34]利用聚类分析法分析了沂河临沂站的径流变化特征,指出其存在 1964 年和 1975 年两个突变年份。结合沂河流域实际情况,1958 年开始修建蓄水工程,1964 年前后

流域第一批水库蓄水完成,1965 - 1975 年流域蓄水工程进一步扩张,下垫面条件因人类活动发生巨大变化。因此,本文认为沂沭泗水系径流变化存在两个突变年份,分别为 1965 年和 1976 年。淮河水系不同河流,甚至相同河流的不同河段,其代表水文站

径流量的突变年份存在一定差异。其中,沱河永城站、涡河砖桥和玄武站的突变年份主要发生在 1980s,而位于涡河中下游的重要入淮控制站蒙城站的突变年份发生得更早,为 1976 年,这可能与人类活动的空间差异有关。

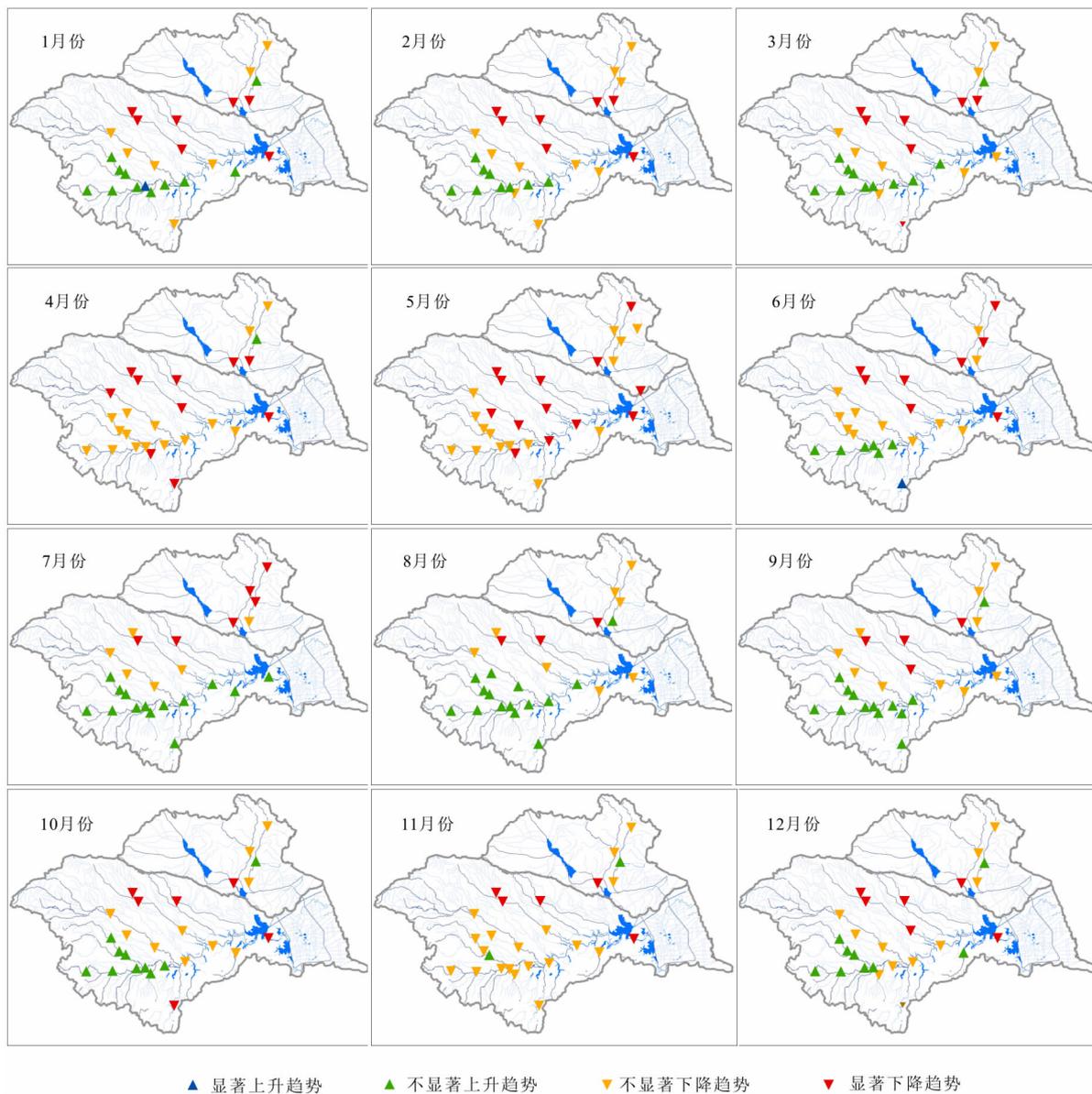


图3 淮河流域各水文站月均径流序列变化趋势

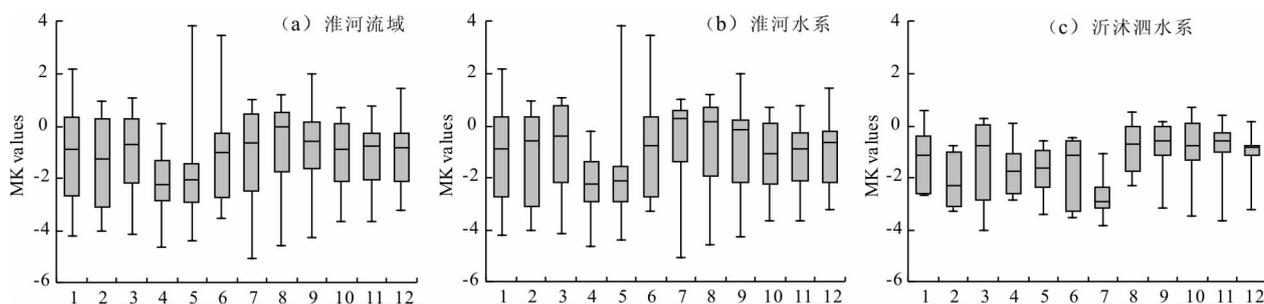
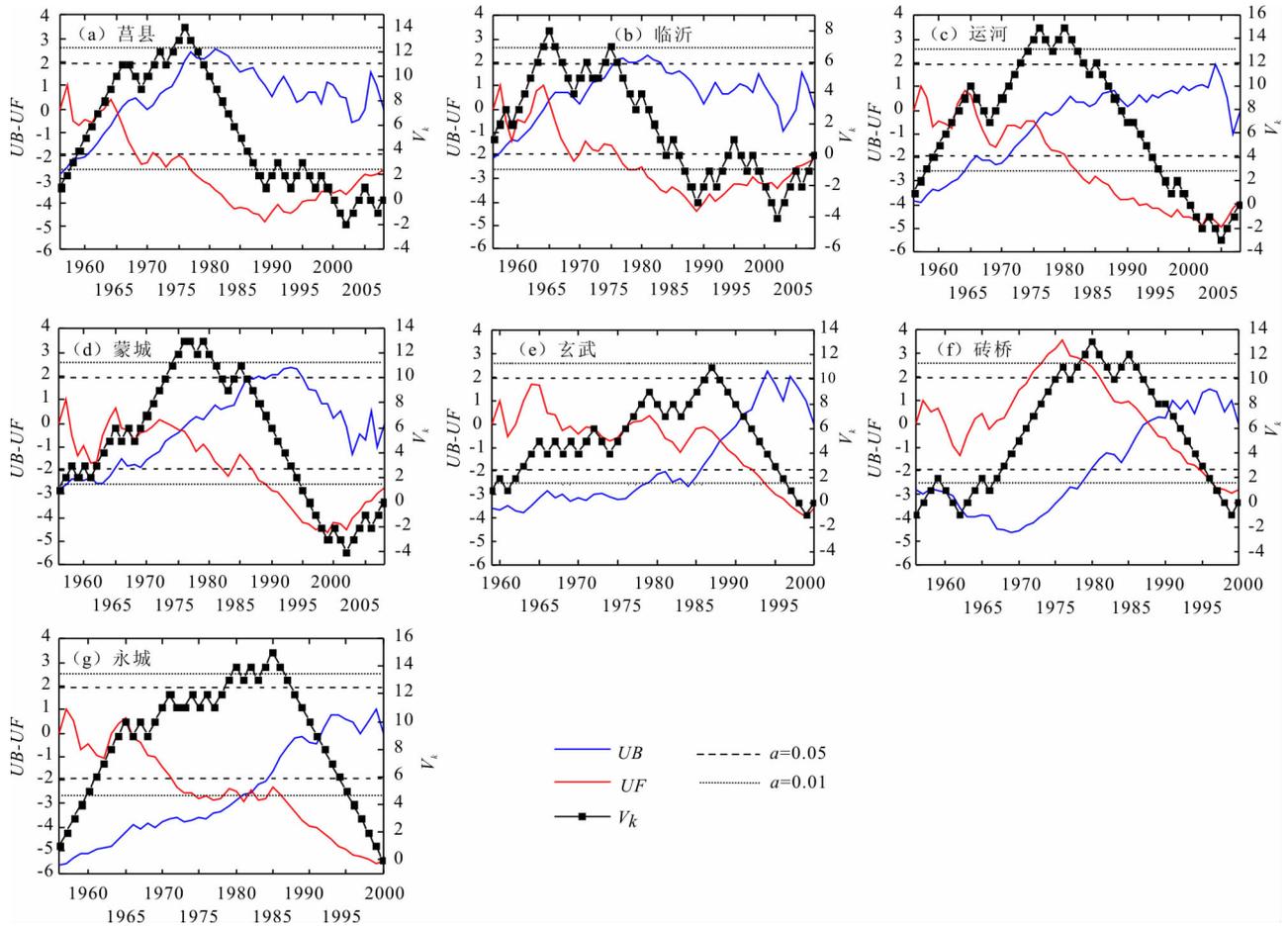


图4 淮河流域各水文站月均径流序列的变化趋势值分布情况



注: UB 和 UF 为 Sequential Mann - Kendall 非参数检验法的统计量,两者位于临界线内的交点所对应年份为突变年;
 V_k 为 Distribution Free CUSUM 方法的统计量,其最大值所对应年份为突变年。

图 5 淮河流域 7 个水文站年均径流序列的突变分析示意图

5 结 论

基于淮河流域主要干支流 26 个水文站点 1956 - 2008 年的实测径流资料,针对不同时间尺度,采用多种非参数检验方法对径流量年际变化的趋势性和突变性进行分析。得出以下几个重要结论:

(1) 近 50 年来,除流域上游地区的年径流量变化呈现出了不显著的上升趋势外,流域大部分地区的年径流量变化均呈现出下降趋势,特别是在淮河水系中游北部地区和沂沭泗水系,年径流量下降趋势达到了 95% 的显著水平。

(2) 流域径流量变化在 4 - 5 月呈现出最广泛和最强烈的下降趋势,达到了 95% 显著水平,这直接造成流域径流量变化在春季表现出明显的下降趋势。然而,径流量在 7 - 8 月呈现出以上升为主导的变化趋势。可见,淮河水系径流量年内分布将进一步地不均匀化,枯水期径流量进一步减少可能加剧地区水资源供需矛盾,丰水期径流量的进一步增加

可能使得该地区未来面临更加严峻的洪水灾害。

(3) 与淮河水系相比较,沂沭泗水系径流变化特征具有明显不同,所有水文站的径流量变化均在夏季表现出下降趋势。其中,7 月份径流量的趋势值中值最小,达到了 95% 的显著水平。

(4) 受到强烈的人类活动影响,流域年径流量突变年份较为复杂,主要发生在 20 世纪 70、80 年代。

参考文献:

[1] 孙新国, 彭 勇, 周惠成. 基于 SWAT 分布式流域水文模型的下垫面变化和水利工程对径流影响分析[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(1): 33 - 39.

[2] 景亚平, 张 鑫, 冯天梅. 基于小波和 GIS 分析的河川径流时空变化规律研究[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(3): 107 - 111.

[3] Huntington T G. Evidence for intensification of the global water cycle: Review and synthesis[J]. Journal of Hydrology, 2006, 319(1): 83 - 95.

[4] Raneesh K Y, Santosh G T. A study on the impact of climate change on streamflow at the watershed scale in the humid tropics

- [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2011, 56(6): 946-965.
- [5] 游志康,刁秀媚,刘俊,等. 考虑降雨的下垫面变化对径流的影响分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2016, 27(6): 79-82.
- [6] 林榕杰,方国华,郭玉雪,等. RCP情景下都柳江上游气候变化及径流响应分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2017, 28(1): 74-80.
- [7] Zhang Qiang, Singh V P, Xu Chongyu, et al. Abrupt behaviours of streamflow and sediment load variations of the Yangtze River basin, China [J]. *Hydrological Processes*, 2013, 27(3): 444-452.
- [8] Zhang Xuebin, Harvey K D, Hogg W D, et al. Trends in Canadian streamflow [J]. *Water Resources Research*, 2001, 37(4): 987-998.
- [9] 董才文,张正栋,杨传训,等. 1960-2013年广东省梅江流域径流特征及其对降水的滞后效应[J]. *水土保持通报*, 2016, 36(3): 38-45.
- [10] 李斌,解建仓,胡彦华,等. 基于集对分析法的渭河中下游径流变化特征研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2016, 27(1): 20-25.
- [11] Zhang Qiang, Xu Chongyu Y, Tao Yang. Variability of water resource in the Yellow River basin of past 50 years, China [J]. *Water Resources Management*, 2009, 23(6): 1157-1170.
- [12] Yang Yonghui, Tian Fei. Abrupt change of runoff and its major driving factors in Haihe River Catchment, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 374(3-4): 373-383.
- [13] Jiang Shanhu, Ren Liliang, Yong Bin, et al. Quantifying the effects of climate variability and human activities on runoff from the Laohahe basin in northern China using three different methods [J]. *Hydrological Processes*, 2011, 25(16): 2492-2505.
- [14] Ye Xuchun, Zhang Qi, Liu Jian, et al. Distinguishing the relative impacts of climate change and human activities on variation of streamflow in the Poyang Lake catchment, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 494(12): 83-95.
- [15] Zhang Shurong, Lu Xixi, Higgitt D L, et al. Recent changes of water discharge and sediment load in the Zhujiang (Pearl River) Basin, China [J]. *Global & Planetary Change*, 2008, 60(3): 365-380.
- [16] Tao Hui, Gemmer M, Bai Yungang, et al. Trends of streamflow in the Tarim River Basin during the past 50 years: Human impact or climate change? [J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 400(1-2): 1-9.
- [17] 郝婷婷,钟平安,魏蓬. 淮河流域近50年天然径流演变规律分析[J]. *水电能源科学*, 2011, 29(9): 4-7+27.
- [18] 史红玲,胡春宏,王延贵,等. 淮河流域水沙变化趋势及其成因分析[J]. *水利学报*, 2012, 43(5): 571-579.
- [19] Xia Jun, Du Hong, Zeng Sidong, et al. Temporal and spatial variations and statistical models of extreme runoff in Huaihe River Basin during 1956-2010 [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2012, 22(6): 1045-1060.
- [20] 刘春蓁. 气候变化对我国水文水资源的可能影响[J]. *水科学进展*, 1997, 8(3): 220-225.
- [21] Gao Chao, Gemmer M, Zeng Xiaofan, et al. Projected streamflow in the Huaihe River Basin (2010-2100) using artificial neural network [J]. *Stochastic Environmental Research & Risk Assessment*, 2010, 24(5): 685-697.
- [22] Yang Chuanguo, Lin Zhaohui, Yu Zhongbo, et al. Analysis and simulation of human activity impact on streamflow in the Huaihe River basin with a large-scale hydrologic model [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2010, 11(3): 810-821.
- [23] 严栋飞,解建仓,姜仁贵,等. 汉江上游径流变化趋势及特征分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2016, 27(6): 13-19.
- [24] 毛德华,曹艳敏,李锦慧,等. 洞庭湖入湖径流泥沙年内变化规律及成因分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2017, 28(1): 32-39.
- [25] Partal T, Kahya E. Trend analysis in Turkish precipitation data [J]. *Hydrological Processes*, 2010, 20(9): 2011-2026.
- [26] 马瑞婷,黄领梅,沈冰. 秦岭北麓典型流域年径流序列的突变分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2016, 27(2): 76-79.
- [27] 曹建廷,秦大河,罗勇,等. 长江源区1956-2000年径流量变化分析[J]. *水科学进展*, 2007, 18(1): 29-33.
- [28] Storch H V. Misuses of Statistical Analysis in Climate Research [M]// *Analysis of Climate Variability*. Springer Berlin Heidelberg, 1995: 11-26.
- [29] Yue Sheng, Wang Chunyuan. Applicability of prewhitening to eliminate the influence of serial correlation on the Mann-Kendall test [J]. *Water Resources Research*, 2002, 38(6): 4-1-4-7.
- [30] Paton F L, Maier H R, Dandy G C. Relative magnitudes of sources of uncertainty in assessing climate change impacts on water supply security for the southern Adelaide water supply system [J]. *Water Resources Research*, 2013, 49(3): 1643-1667.
- [31] Potter N J, Chiew F H S, Frost A J. An assessment of the severity of recent reductions in rainfall and runoff in the Murray-Darling Basin [J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 381(1-2): 52-64.
- [32] Chiew F H S, McMahon T A. Detection of trend or change in annual flow of Australian rivers [J]. *International Journal of Climatology*, 2010, 13(6): 643-653.
- [33] Kundzewicz Z W, Robson A J. Change detection in hydrological records - a review of the methodology / *Revue méthodologique de la détection de changements dans les chroniques hydrologiques* [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2004, 49(1): 7-19.
- [34] 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.