

## 1956 – 2016 年黄河流域河川径流演变规律

鲍振鑫<sup>1,2,3</sup>, 严小林<sup>1,2</sup>, 王国庆<sup>1,2</sup>, 关铁生<sup>1,2</sup>, 金君良<sup>1,2</sup>, 李淼<sup>4</sup>

(1. 南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029;  
2. 水利部应对气候变化研究中心, 江苏 南京, 210029; 3. 水利部黄土高原水土流失过程与  
控制重点实验室, 河南 郑州 450003; 4. 河海大学, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 黄河流域水资源短缺问题突出, 深入分析河川径流的演变规律对于流域水资源管理具有重要的指导意义。基于黄河干流上、中、下游不同位置的代表性水文站实测径流, 利用 Mann - Kendall 非参数趋势检验方法分析了 1956 - 2016 年期间黄河流域年、月径流的历史演变规律。结果表明: 1956 - 2016 年, 除源头区年径流变化不显著以外, 黄河流域径流呈现出显著的下降趋势, 达到了 1% 的显著性水平。从上游到下游, 河川径流下降幅度越来越大, 趋势越来越显著。1980 - 2000 和 2001 - 2016 年的多年平均入海径流比 1956 - 1979 年分别减少了 50.07% 和 59.67%。径流演变呈现出 3 阶段特征, 20 世纪 50、60 年代属于丰水期; 随后在 70 至 90 年代径流持续下降; 在 2000 年以后径流有所回升。除源头区以外, 黄河流域的月径流总体呈现减少趋势; 上游和中游地区的月径流占年径流的比例枯增丰减; 下游地区月径流占年径流的比例在冬季、夏季增大, 春季、秋季减小。

**关键词:** 河川径流; 演变规律; Mann - Kendall 趋势检验; 黄河流域

中图分类号: TV121.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)05-0052-06

### The trend in streamflow of the Yellow River Basin during 1956 – 2016

BAO Zhenxin<sup>1,2,3</sup>, YAN Xiaolin<sup>1,2</sup>, WANG Guoqing<sup>1,2</sup>, GUAN Tiesheng<sup>1,2</sup>, JIN Junliang<sup>1,2</sup>, LI Miao<sup>4</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydrology - Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Research Center for Climate Change of MWR, Nanjing 210029, China; 3. MWR Key Laboratory of Soil and Water Loss Process and Control in the Loess Plateau, Zhengzhou 450003, China; 4. Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** The water shortage is severe in the Yellow River basin, and in - depth analysis of the evolution of river runoff is of great guiding significance to the management of water resources in the basin. Based on the measured runoff of representative hydrological stations at different locations at the upper, middle and lower reaches of the Yellow River, the historical evolution of monthly and annual run flow of the Yellow River basin during the period 1956 - 2016 were analyzed using the Mann - Kendall non - parameter trend test method. The results indicated that the annual and monthly streamflow has a statistically significant decreasing trend in the Yellow River during 1956 - 2016 at the 1% level, except for the source area. The decrease of stream flow became more obvious from the upper to the lower reach. Compared to the period in 1956 - 1979, the water flow into the sea decreased by 50.07% and 59.67% in 1980 - 2000 and 2001 - 2016, respectively. The evolution of runoff is characterized by three stages, with wet season in the 1950s and 1960s, and the streamflow decreased in 1970s to 1990s, but increased again after 2000. The monthly runoff of the Yellow River basin showed a decreasing trend overall, except for the source area. The proportion of monthly runoff in upstream and midstream areas increased in dry seasons and decreased in wet seasons. The proportion of monthly runoff in the downstream area increased in winter and summer and decreased in spring and autumn.

收稿日期: 2019-02-14; 修回日期: 2019-05-07

基金项目: 国家重点研发计划课题(2017YFA0605002、2017YFA0605004、2016YFA0601501); 国家自然科学基金项目(51779145、41330854); 江苏省“六大人才高峰”资助项目(RJFW-031); 水利部黄土高原水土流失过程与控制重点实验室开放课题基金项目(Qs515002)

作者简介: 鲍振鑫(1985-), 男, 江苏南通人, 博士, 教授级高工, 研究方向: 流域水文模拟、气候变化影响评价以及水资源管理等。

**Key words:** streamflow; evolution rule; Mann - Kendall's trend test; Yellow River Basin

## 1 研究背景

河川径流是陆地水循环过程的关键环节,是地表水资源最重要的来源。近几十年来,以气温升高和降水变化为主要特征的气候变化对流域水循环过程产生了显著的影响,进而改变了河川径流的时空分布特征<sup>[1-2]</sup>。与此同时,在强烈的人类活动干扰下,一方面流域的下垫面特征剧烈变化,在一定程度上改变了流域的产汇流过程;另一方面水库调蓄、取水等涉水行为直接扰动了河川径流的原有规律<sup>[3]</sup>。过去几十年中受自然变化和人类活动的双重影响,在中国<sup>[4-6]</sup>、美国<sup>[7-8]</sup>、欧洲<sup>[9]</sup>和澳大利亚西南部<sup>[10]</sup>等地方,很多河流的径流量发生了显著的变化,影响了区域水资源量。因此科学识别河川径流的演变规律,对于支撑经济社会可持续发展和人类生存具有重要意义。

黄河是中华民族的“母亲河”,全长 5 464 km,流域面积  $79.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。流域内人口占全国总人口的 8.6%,土地和能源资源丰富,是我国重要的粮食主产区。然而黄河流域水资源短缺,河川径流量仅占全国总量的 2.6%,人均和耕地亩均水资源量为全国平均水平的 30% 和 17%。因此研究黄河流域河川径流的演变规律尤为重要,并引起了水文学者的广泛关注。例如 Fu 等<sup>[11]</sup>分析了 1952-1997 年黄河干流的兰州、花园口和利津 3 个水文站实测径流的演变规律,结果表明 3 个站的河川径流量都呈现出下降趋势,其中代表上游兰州站的变化趋势不显著,代表中游花园口站和代表下游利津站的变化趋势显著。Li 等<sup>[12]</sup>研究了 1961-1997 年黄河中游无定河径流量的变化,结果表明其呈现出显著的下降趋势,1972-1997 年的径流量比 1961-1971 年的径流量减少了 42%。Zhang 等<sup>[13]</sup>分析了 1956-2000 年黄土高原 10 条河流径流量的变化,结果显示其都呈现出显著的下降趋势。Cuo 等<sup>[14]</sup>分析了 1956-2009 年黄河上游 5 个代表性水文站径流变化特征,结果表明径流呈现下降趋势。Gao 等<sup>[15]</sup>分析了 1957-2010 年黄河中游径流的变化特征,结果表明 1979-2010 年径流比 1957-1978 年减少了 65%。

以往对黄河上游和中游等典型地区径流变化的研究较多,大多数采用的是 2010 年以前的水文资料,对整个黄河流域关注的较少。近十几年来黄河流域的河川径流是否有新的变化特征,在空间分布上从上游到下游有何异同,在年内分配上从春季到

冬季有何差别,这些问题需作进一步深入的研究,是本文拟解决的主要问题。

## 2 研究区概况与资料来源

黄河是中国第二长河,发源于巴颜喀拉山脉,流经青海、四川等 9 省区,于山东省东营市注入渤海,流域概况见图 1。黄河流域位于东经  $96^\circ \sim 119^\circ$ 、北纬  $32^\circ \sim 42^\circ$  之间,流域面积  $79.5 \times 10^4 \text{ km}^2$  (包括内流区面积  $4.2 \times 10^4 \text{ km}^2$ )。河口镇以上为黄河上游,河口镇至桃花峪为中游,桃花峪以下为下游。黄河流域地域广阔,气候空间差异显著,年、季变化大。流域大部分地区年降水量在 200~650 mm 之间,冬干春旱夏秋多雨,其中 6-9 月降水量占全年的 70% 左右。流域蒸发能力强,年水面蒸发量达 1 100 mm。黄河流域水资源短缺,多年年平均天然径流量  $580 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,人均水资源量和耕地亩均水资源量分别仅占全国平均水平的 30% 和 17%。

在黄河干流上选择唐乃亥、头道拐、潼关、花园口和利津 5 个控制性水文站来反映流域不同区域的径流变化特征。唐乃亥位于流域上游,主要反映天然状态下源头区的径流特征;头道拐位于上中游的分界线,主要反映上游的径流特征;潼关位于流域中游,主要反映黄土高原区的径流特征;花园口位于中下游的分界线,主要反映中游的径流特征;利津是黄河入海前的最后一个水文站,主要反映下游的径流特征。5 个水文站的年和月尺度的径流数据来自于水利部发布的《中国水文年鉴》,资料年限为 1956-2016。



图 1 黄河流域概况及选取的 5 个控制性水文站位置

## 3 研究方法

利用广泛应用于时间序列趋势检验的 Mann - Kendall 非参数趋势检验方法来分析黄河流域径流变化的显著性水平。具体的计算步骤如下:

(1) 首先,假设待分析的径流序列变化趋势不

显著 ( $H_0$ )。

(2) 其次,建立 Mann - Kendall 统计量  $UF_i$  (见式(1)) 来检验  $H_0$  是否成立。

$$UF_i = \frac{S_i - E(S_i)}{\sqrt{\text{Var}(S_i)}} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

$$S_i = \sum_{j=1}^i r_j \quad (i = 2, 3, \dots, n) \quad (2)$$

$$r_i = \begin{cases} 1 & x_i > x_j \\ 0 & x_i \leq x_j \end{cases} \quad (j = 1, 2, \dots, i-1) \quad (3)$$

式中:  $x_i$  为样本容量为  $n$  的径流系列。如果它是服从同一分布的独立随机变量,则  $S_i$  的期望值和方差计算公式为:

$$E(S_i) = \frac{i(i-1)}{4} \quad (4)$$

$$\text{Var}(S_i) = \frac{i(i-1)(2i+5)}{72} \quad (5)$$

(3) 在某一个显著性水平  $\alpha$  下,查得正态分布的临界值  $U_{\alpha/2}$ 。如果  $|UF_i| < U_{\alpha/2}$ ,接受原假设,即径流变化趋势不显著;如果  $|UF_i| > U_{\alpha/2}$ ,则拒绝原假设,即径流变化趋势显著。 $UF_i > 0$  表明径流呈现上升趋势; $UF_i < 0$  表明径流呈现下降趋势。

Mann - Kendall 方法还能够用来检验系列的突变点。其计算方法为,首先逆序排列原始样本系列,然后按照上述计算方法计算新序列的 Mann - Kendall 检验值,并对其倒序得到  $UB_i = -UF_i$ , ( $i = n, n-1, \dots, 2, 1$ ),最后查看  $UF_i$  和  $UB_i$  两条曲线的交点。如果原始系列的变化趋势显著,则判定两条曲线的交点为原始系列的突变点。

## 4 结果与分析

### 4.1 年径流演变规律

1956 - 2016 年黄河流域 5 个控制性水文站实测年径流演变特征和 M - K 趋势检验结果见图 2 ~ 4,变化趋势见表 1。总体上,1956 - 2016 年黄河流域河川径流呈现出显著的下降趋势。空间上,从上游到下游,河川径流下降幅度越来越大,下降趋势越来越显著。时间上,黄河流域河川径流的突变点位于 20 世纪 80 年代;20 世纪 50、60 年代属于丰水期,河川径流较多年平均值偏高;随后在 70 - 90 年代受气候变化和人类活动等因素的影响,径流持续下降;在 2000 年以后径流减少趋势变缓并有所回升。这主要受近十几年来黄河流域降水开始回升,以及国家实行最严格的水资源管理制度,严格控制用水量等因素的影响<sup>[16]</sup>。

黄河流域源头区年径流变化趋势不显著,代表水文站唐乃亥站年径流下降速率仅为  $1.07 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{a})$ , M - K 检验值为  $-0.95$ ,下降趋势不显著;年径流先增大后减少,1980 - 2000 年多年平均径流量比 1956 - 1979 年增加 1.79%,2001 - 2016 年多年平均径流量比 1956 - 1979 年减少 8.23%。整个上游区年径流量显著下降,代表水文站头道拐站年径流量下降速率为  $7.09 \text{ m}^3/\text{s}/\text{年}$ , M - K 检验值为  $-3.70$ ,下降趋势超过 1% 的显著性水平;1980 - 2000 和 2001 - 2016 年多年平均径流量分别比 1956 - 1979 年减少 21.49% 和 33.50%。唐乃亥水文站以上是黄河流域的源头区,人烟稀少,径流量的年际和年代际变化主要受降水和冰川融雪的影响,人类活动的影响较小,径流量变化趋势不显著。从唐乃亥到头道拐水文站区间,分布着宁蒙河套平原等重要的粮食产区,径流量受河道取水影响程度大,随着经济社会的发展,径流量呈现出显著的下降趋势。

黄河中游区年径流量显著下降,代表水文站潼关站和花园口站年径流量下降速率分别为  $15.06 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{a})$  和  $15.39 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{a})$ , M - K 检验值分别为  $-5.19$  和  $-5.13$ ,下降趋势超过 1% 的显著性水平;潼关站 1980 - 2000 和 2001 - 2016 年多年平均径流分别比 1956 - 1979 年减少 24.31% 和 41.83%;花园口站 1980 - 2000 和 2001 - 2016 年多年平均径流分别比 1956 - 1979 年减少 26.68% 和 41.57%。黄河中游径流量变化影响因素较多,成因十分复杂;一是受上游来水减少的影响;二是受近几十年中游降水减少的影响;三是中游修建了大量的梯田、淤地坝等水土保持设施,拦蓄了部分水量;四是中游植被覆盖增加,导致蒸散发和蓄水能力增强,径流量减少;五是随着经济社会发展的河道取水增加,导致径流量减少。

黄河下游区年径流量显著下降,代表水文站利津站年径流下降速率高达  $21.04 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{a})$ , M - K 检验值为  $-5.61$ ,下降趋势超过 1% 的显著性水平;1980 - 2000 和 2001 - 2016 年多年平均径流分别比 1956 - 1979 年减少 50.07% 和 59.67%。黄河下游汇水区极小,来水主要受小浪底出库径流调节,同时为了满足沿岸河南与山东经济社会发展,河道取水量较大,径流量下降程度最大。

根据年径流量的突变点检验结果,分析突变点前后年径流量的变化。结果表明唐乃亥、头道拐、潼关、花园口和利津 5 个控制性水文站突变点之后的年平均径流量分别比突变点之前减少了 14.3%、33.2%、37.6%、40.8%、54.4%。从上游到下游,黄

河径流量减少幅度越来越大,径流量变化的突变点越来越提前。

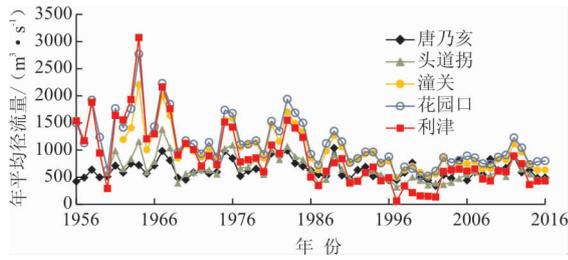


图 2 黄河流域主要控制站实测年径流量演变规律

### 4.2 月径流演变规律

根据年径流量的突变点检验结果,分析突变点前后月径流量年内分配的变化,结果见图 5。总体上枯水期的月径流量占年径流量的比例增大,丰水

期的月径流量占年径流的比例减少。

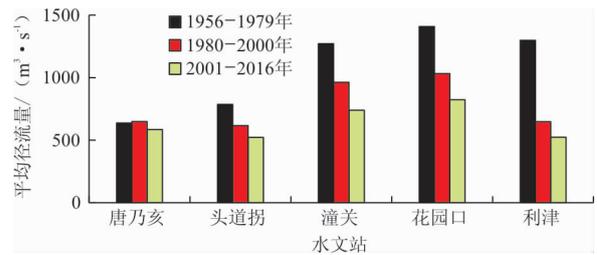


图 3 黄河流域主要控制站实测年径流量多年平均变化特征

表 1 黄河流域主要控制站实测年径流量下降速率  $m^3/(s \cdot a)$

唐乃亥	头道拐	潼关	花园口	利津
-1.07	-7.09	-15.06	-15.39	-21.04

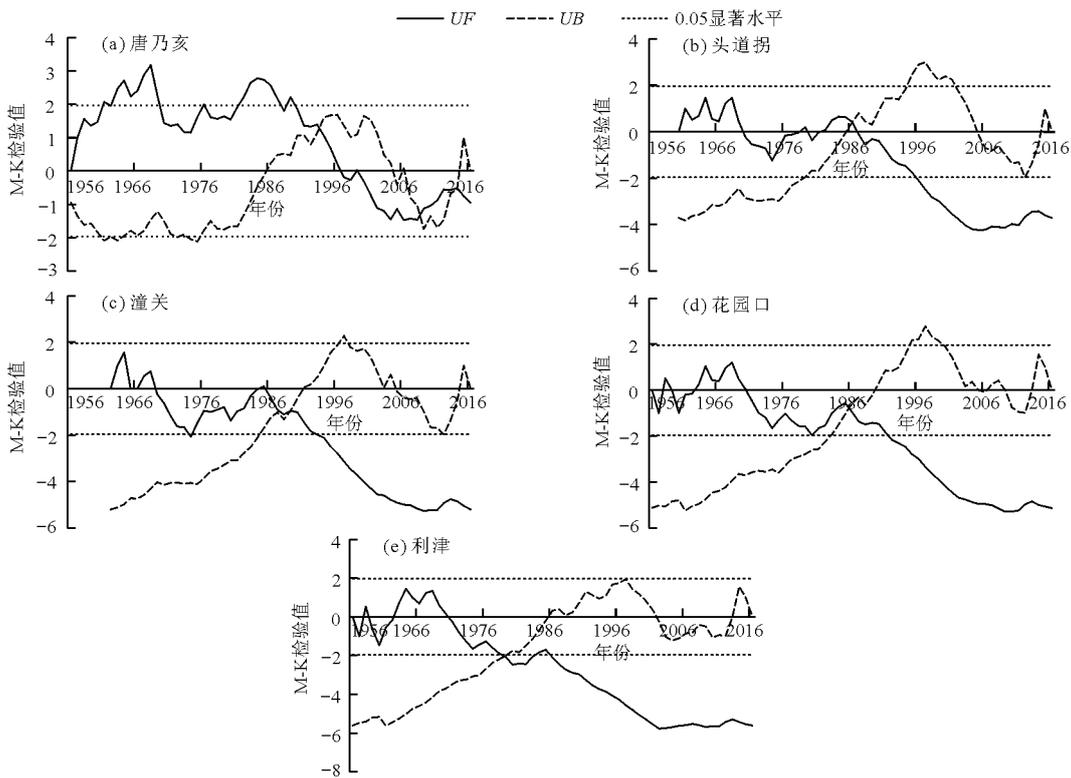


图 4 黄河流域主要控制站实测年径流量 M-K 趋势和突变检验结果

在黄河源头区的唐乃亥水文站,由于人类活动影响较小,突变点前后月径流量占年径流量的比例变化较小。例如在枯水期的 3 月份,月径流量比例从 2.82% 增加为 3.11%;在丰水期的 7 月份,月径流量比例从 17.09% 增加为 17.81%。但是反映整个上游水文特征的头道拐水文站的月径流量占年径流量的比例变化较大,总体呈现出枯增丰减的特征。例如在枯水期的 3 月份,月径流量比例从 6.72% 增加为 12.76%;在丰水期的 8 月份,月径流量比例从 15.02% 减少为 12.36%。这主要是受上游龙羊峡、

刘家峡等水库削峰增枯调蓄作用的影响。

在反映黄河中游的潼关和花园口水文站,突变点前后的月径流量占年径流量的比例变化较大,总体呈枯增丰减的特征。例如在花园口水文站枯水期的 3 月份,月径流量比例从 5.96% 增加为 9.02%;在丰水期的 9 月份,月径流量比例从 16.25% 减少为 10.43%。这主要是受中游万家寨、小浪底等水库削峰增枯调蓄作用的影响,以及流域内植被覆盖度增加导致调蓄作用增强的影响。

在反映黄河下游的利津水文站,突变点前后的

月径流量占年径流量的比例变化大,总体呈冬季(12 - 次年1月)和夏季(6 - 8月)增加,春季(3 - 5月)和秋季(9 - 11月)减少的特征。例如在利津水文站1月径流量比例从3.11%增加为4.89%;4月径流量比例从5.54%减少为2.94%;7月径流量比例从11.58%增加为13.39%;10月径流量比例从14.78%减少为13.42%。下游月径流量的变化主要受中游水库汛前放水、汛末蓄水等年内调蓄,以及下游河道春季取水灌溉等多种因素的影响。

5个水文站的实测月径流量趋势 M - K 检验结果见图6。从图6可以看出,在源头区的唐乃亥水文站,12个月中有4个月的径流量增加,8个月的径流量减少,但是变化趋势都不显著,其主要受自然因素波动影响,人类活动干扰较少。在上游区的头道拐水文站,除了2月和3月的径流量增加,其余10个月的径流量减少,其中有6个月的径流量呈显著的下降趋势,达到了5%的显著性水平,这主要受上游水库年内调蓄和人为取水影响。中游潼关水文站的12个月

径流量都呈现出下降趋势,其中有8个月达到了5%的显著性水平。在花园口水文站,除了2月和6月的径流量增加,其余10个月的径流量减少,其中有7个月达到了5%的显著性水平。下游利津水文站的12个月径流量都呈现出下降趋势,除了6月份其余11个月的下趋势达到了5%的显著性水平,主要受小浪底水库出库径流量控制和下游取水影响。

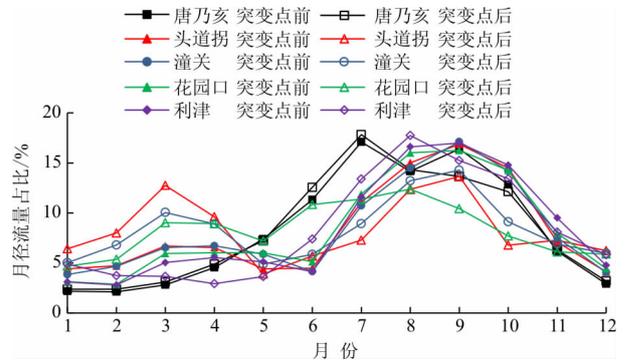


图5 黄河流域主要控制站实测月径流量占年径流量比例变化特征

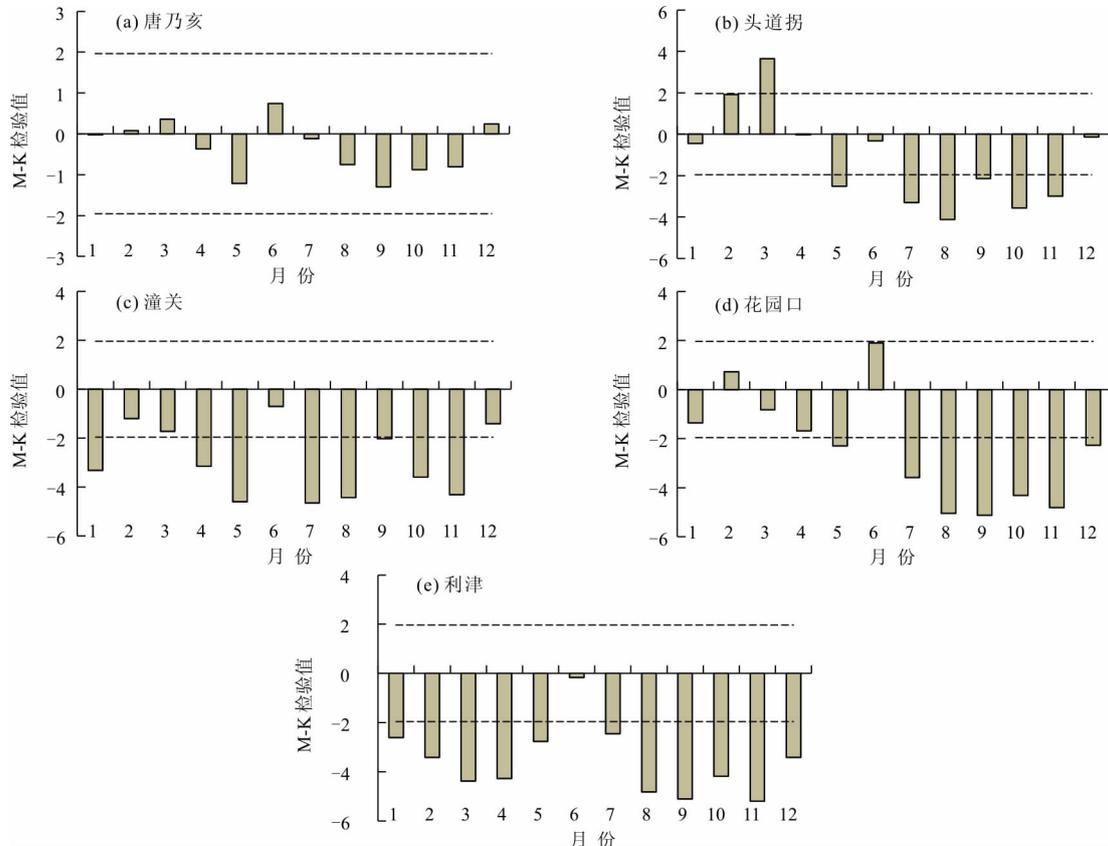


图6 黄河流域主要控制站实测月径流量 M - K 趋势检验结果

### 5 结论

基于黄河干流上、中、下游不同位置的代表性水文站实测径流量,利用 Mann - Kendall 非参数趋势

检验方法分析了1956 - 2016年期间黄河流域年、月径流量的历史演变规律,主要结论如下:

(1)1956 - 2016年除了源头区年径流量在均值附近波动变化趋势不显著以外,黄河流域河川径流

量呈现出显著的下降趋势,从上游到下游,河川径流量下降幅度越来越大,下降趋势越来越显著,达到了1%的显著性水平。1980-2000和2001-2016年的多年平均入海径流量分别比1956-1979年减少了50.07%和59.67%。

(2)黄河流域的河川径流量演变呈现出较为明显的3阶段特征,20世纪50、60年代属于丰水期,河川径流量较多年平均值偏高;随后在70-90年代受气候变化和人类活动等因素的影响,径流量持续下降;在2000年以后径流量减少趋势变缓并有所回升。

(3)黄河流域源头区的径流量年内分配变化不大;上游和中游地区的枯水期月径流量占年径流量的比例增大,丰水期月径流量占年径流量的比例减少;下游地区冬季和夏季径流量占年径流量的比例增加,春季和秋季径流量占年径流量的比例减少。除了源头区以外,黄河流域的月径流量总体呈现减少趋势,大部分月份达到了1%的显著性水平。

黄河源头区人烟稀少,径流量的年际和年代际变化主要受降水和冰川融雪的影响,人类活动的影响较小,径流量变化趋势不显著。上游区下段径流量受河道取用水影响程度大,随着经济社会的发展,径流量呈现出显著的下降趋势。黄河中游径流量变化影响因素较多,成因十分复杂,一是受上游来水减少的影响;二是受近几十年中游降水减少的影响;三是中游修建了大量的梯田、淤地坝等水土保持设施,拦蓄了部分水量;四是中游植被覆盖增加,导致蒸散发和蓄水能力增强,径流量减少;五是随着经济社会发展的河道取水增加,导致径流量减少。黄河下游汇水区极小,来水主要受小浪底出库径流量调节,同时河道取水量较大,径流量下降程度最大。

河川径流量变化受到气候变化、下垫面变化、水库调蓄、取用水等多种因素的影响和制约,每个因子的变化如何引起河川径流量的变化,其在径流量演变中起了多大的作用,将在后续的研究工作中进一步深入分析。

#### 参考文献:

- [1] 张建云,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.
- [2] BAO Zhenxin, Zhang Jianyun, Liu Jiufu, et al. Sensitivity of hydrological variables to climate change in the Haihe River basin, China[J]. Hydrological Processes, 2012,26(15):2294-2306.
- [3] BAO Zhenxin, Zhang Jianyun, Wang Guoqing, et al. Attribution for decreasing streamflow of the Haihe River basin, northern China: Climate variability or human activities? [J]. Journal of Hydrology, 2012,460-461:117-129.
- [4] 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.
- [5] REN Liliang, WANG Meirong, LI Chunhong, et al. Impacts of human activity on river runoff in the northern area of China[J]. Journal of Hydrology,2002,261(1-4):204-217.
- [6] CONG Zhentao, ZHAO Jingjing, YANG Dawen, et al. Understanding the hydrological trends of river basins in China [J]. Journal of Hydrology,2010,388(3-4):350-356.
- [7] LINS H F, SLACK J R. Streamflow trends in the United States[J]. Geophysical Research Letters, 1999,26(2):227-230.
- [8] DOUGLAS E M, VOGEL R M, KROLL C N. Trends in floods and low flows in the United States: impact of spatial Correlation[J]. Journal of Hydrology, 2000,240(1-2):90-105.
- [9] STAHL K, HISDAL H, HANNAFORD J, et al. Streamflow trends in Europe: evidence from a dataset of near-natural catchments[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2010,14(12):2367-2382.
- [10] DURRANT J, BYLEVELD S. Streamflow trends in south-west Western Australia [R]. Department of Water, Westerm Australia,2009.
- [11] FU Guobin, CHEN Shulin, LIU Changming, et al. Hydro-climatic trends of the Yellow River basin for the last 50 years[J]. Climatic Change,2004,65(1-2):149-178.
- [12] LI Lijuan, ZHANG Lu, WANG Hao, et al. Assessing the impact of climate variability and human activities on streamflow from the Wuding River basin in China[J]. Hydrological Processes,2007,21(25):3485-3491.
- [13] ZHANG Xiaoping, ZHANG Lu, ZHAO Jing, et al. Responses of streamflow to changes in climate and land use/cover in the Loess Plateau, China[J]. Water Resources Research,2008,44(7):W00A07.
- [14] CUO Lan, ZHANG Yongxin, GAO Yanhong, et al. The impacts of climate change and land cover/use transition on the hydrology in the upper Yellow River Basin, China [J]. Journal of Hydrology,2013,502:37-52.
- [15] GAO Zhaoliang, ZHANG Lu, ZHANG Xiaoping, et al. Long-term streamflow trends in the middle reaches of the Yellow River Basin: detecting drivers of change[M]. 4th ed. London Processes,2016,30(9):1315-1329.
- [16] 张建云,贺瑞敏,齐晶,等.关于中国北方水资源问题的再认识[J]. 水科学进展,2013,24(3):303-310.