
试验研究

1969—2018 年黄河实测径流与天然径流的变化

于海超, 张 扬, 马金珠, 郭嘉兵, 陈沛源

(兰州大学 资源环境学院 西部环境教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: [目的] 分析黄河实测径流与天然径流的变化规律, 为探究人类活动对径流的影响提供依据。[方法] 基于 1969—2018 年黄河干流 8 个水文站的天然径流和实测径流数据, 使用 Mann-Kendall 趋势检验与突变检验法, 对比分析近 50 a 黄河干流实测径流和天然径流的变化规律。并结合近 15 a 各分区耗水数据探讨人类活动对于径流的影响。[结果] ① 1969—2018 年黄河上中下游实测径流整体呈降低趋势, 兰州、花园口、利津 3 个代表站多年平均降低速率分别为 5.10×10^7 , 3.55×10^8 , 4.13×10^8 m^3/a 。② 近 50 a 天然径流和实测径流趋势突变主要集中在 1986 和 1990 两个年份, 结合前人研究和重要水事分析, 1986 年突变可能与 1984 年以来一系列水土保持措施实施以及 1986 年龙羊峡水库修建有关; 而造成 1990 年径流突变的原因可能是 80—90 年代黄河流域用水量激增和流域下垫面改变。③ 天然径流与实测径流的差值从上游至下游水文站断面逐渐增大, 这主要与近 15 a 平均耗水量也沿程增大相一致; 另外多年平均实测径流在利津站仅占天然径流的 42%。耗水量最大的两个分区为花园口以下和兰州—头道拐段, 分别达到了 1.06×10^{10} 和 1.04×10^{10} m^3 。[结论] 人类活动中的各项耗水(尤其是农田灌溉)是造成兰州站以下地区天然径流与实测径流差值大的主要原因, 因此, 应进一步推进黄河流域节水农业的发展, 合理分配各项耗水量。

关键词: 黄河; 实测径流; 天然径流; 耗水

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2020)05-0001-07

中图分类号: P333

文献参数: 于海超, 张扬, 马金珠, 等. 1969—2018 年黄河实测径流与天然径流的变化[J]. 水土保持通报, 2020, 40(5): 1-7. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2020.05.001; Yu Haichao, Zhang Yang, Ma Jinzhu, et al. Variation of observed and natural runoff of Yellow River from 1969 to 2018 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(5): 1-7.

Variation of Observed and Natural Runoff of Yellow River from 1969 to 2018

Yu Haichao, Zhang Yang, Ma Jinzhu, Guo Jiabing, Chen Peiyuan

(MOE Key Laboratory of Western China's Environmental Systems, College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: [Objective] The variation of the observed runoff and natural runoff of the Yellow River was analyzed to explore the impact of human activities on runoff in the study area. [Methods] Based on the natural runoff and observed runoff of eight hydrological stations in the main stream of the Yellow River from 1969 to 2018, the variation of the observed natural runoff in the last 50 years was analyzed using a Mann-Kendall trend test and mutant test. In addition, the impact of human activities on runoff was considered based on the water consumption data of each region in the last 15 years. [Results] ① The observed runoff in the upper, middle, and lower reaches of the Yellow River all decreased from 1969 to 2018. The average annual reduction rates at the Lanzhou, Huayuankou, and Lijin stations were 51, 355, and 413 million m^3/a , respectively. ② In the last 50 years, the greatest alteration of natural runoff and observed runoff occurred during 1986 and 1990. Combined with previous studies and important water events of the Yellow River, the runoff alteration in 1986 may have been related to the implementation of soil and water conservation measures since 1984 as well as the construction of Longyangxia Reservoir in 1986. The runoff alteration in 1990 may have been due to the surge of water consumption in the 1980s and 1990s in addition to the underlying surface water variation of the basin. ③ The difference between the natural and observed runoff gradually increased from the upper

收稿日期: 2020-02-17

修回日期: 2020-06-28

资助项目: 教育部高等学校学科创新引智计划“西部环境变化化学科创新引智基地”(BP2018001); 2020 年度自然科学类中央高校基本科研业务费专项资金, 重点研究基地建设项目“敦煌水文—气候—生态科学观测站”(lzujbky-2020-kb54)

第一作者: 于海超(1994—), 男(汉族), 黑龙江省绥化市人, 硕士研究生, 研究方向为水文学及水资源。Email: yuhch18@lzu.edu.cn。

通讯作者: 马金珠(1968—), 男(汉族), 甘肃省静宁县人, 教授, 博士研究生导师, 主要从事水文学及水资源研究。Email: 1669693346@qq.com。

reach to the lower reach, which was generally consistent with the increased average water consumption over the past 15 years. In addition, the annual average observed runoff only accounted for 42% of natural runoff at Lijin Station. The two regions with the highest water consumption were the lower part of Huayuankou and the area between Lanzhou and Toudaoguai, reaching $1.06 \times 10^{10} \text{ m}^3$ and $1.04 \times 10^{10} \text{ m}^3$, respectively. [Conclusion] The main reason for the large difference between the natural and observed runoff in the area below Lanzhou station was the water consumption associated with human activities, especially for farmland irrigation. Therefore, it is necessary to promote the development of water-saving agriculture in the Yellow River basin and to reasonably allocate water consumption.

Keywords: the Yellow River; observed runoff; natural runoff; water consumption

黄河是中国北方地区的重要水源,以其占全国 2% 的径流量承担了全国 15% 耕地和 12% 人口的用水需求^[1],被喻为沿黄地区的生命线^[2-3],然而近年来,随着黄河流域工农业生产迅速发展,人口急剧增长,加之气候变化的影响,黄河流域径流量发生了显著改变^[4-7],甚至断流现象增加^[8],这也引起了许多学者对于黄河流域径流量变化的关注。其中,鲍振鑫等^[9]指出黄河自 1956 年以来,其径流量除源区外,整体呈显著下降趋势;马柱国^[10]指出黄河径流量从 20 世纪 80 年代开始呈减少趋势,且下游比上游减少更显著;张国宏等^[11]通过对黄河流域环境因子的分析,发现黄河径流量变化与气温和降水均有较好的相关性。但是,目前对黄河径流量的分析大部分集中在实测径流,而对其天然径流研究还相对较少,天然径流量是指在没有人类活动影响的情况下河流出口断面的径流量,即天然径流量主要包括实测径流量和人类活动影响的径流量两部分^[12-13],其变化同样是沿黄地区合理利用黄河水资源的基础,另外,其与实测径流量的差值变化可以反映人类活动为主的几个因子对黄河水资源的调配情况。因此,本文选取 1969—2018 年黄河干流 8 个水文站的天然径流与实测径流数据,对比分析二者的多年变化规律,并结合近 15 a 黄河各分区耗水数据,分析其近年来各段受人为活动

影响的程度,以期探讨影响黄河径流量变化的人类活动要素,研究结果可为黄河流域合理开发利用水资源,制定水资源规划和决策提供科学的指导价值。

1 研究区概况

黄河是中国第二大河,自西向东经过 9 省(区),流经中国青藏高原、黄土高原和内蒙古高原以及华北平原,最终于山东省垦利县流入渤海^[14-15],干流全长 5 464 km,流域面积 $7.95 \times 10^5 \text{ km}^2$ (包括内流区面积 $4.20 \times 10^4 \text{ km}^2$),气候区由上游到下游依次为干旱区、半干旱区和半湿润区,流域大部分地区年降水量在 200~650 mm 之间,流域蒸发能力强,年水面蒸发量达 1 100 mm^[9,16]。

2 材料与方法

2.1 数据来源

数据来源于黄河水利委员会的 1969—2018 年黄河干流 8 个水文站(依次为上游的唐乃亥、兰州、头道拐、龙门、三门峡、花园口水文站以及下游的高村、利津水文站)实测径流和还原的天然径流数据以及 2003—2017 年流域各分区耗水量。其中,兰州、花园口、利津分别为上、中、下游的代表站,各水文站控制面积见表 1。

表 1 黄河各水文站控制面积

| 水文站 | 唐乃亥 | 兰州 | 头道拐 | 龙门 | 三门峡 | 花园口 | 高村 | 利津 |
|---------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 控制面积/ 10^4 km^2 | 12.20 | 22.26 | 36.79 | 49.76 | 68.84 | 73.00 | 73.41 | 75.19 |

2.2 方法

(1) Mann-Kendall 趋势检验法。使用 Mann-Kendall 趋势检验法分析径流的多年变化趋势。该法是当前广泛使用的一种非参数统计检验方法。若统计量 Z 为正值,表明呈增加趋势,若为负值,则呈减少趋势,同时根据 Z 值大小确定显著性水平^[17]。

(2) Mann-Kendall 突变检验法。采用 Mann-Kendall 突变检验法进行径流的趋势突变检验。该方法是在 Mann-Kendall 趋势检验法的基础上发展起来的一种方

法,可以确定变化趋势突变的时间,计算方法如下^[18]:

构造一秩序列(n 个样本):

$$S_k = \sum_{i=1}^k r_i \quad (k=2, 3, \dots, n) \quad (1)$$

式中:

$$r = \begin{cases} 1 & (X_i > X_j) \\ 0 & (X_i \leq X_j) \end{cases} \quad (j=1, 2, \dots, i) \quad (2)$$

假定时间序列随机独立,定义统计量 UF_k

$$UF_k = \frac{[S_k - E(S_k)]}{\sqrt{\text{var}(S_k)}} \quad (k=1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

利用公式(3)计算出逆序时间的 UB_k , UF 和 UB 2 条曲线的交点对应的时刻便是突变时间。

(3) 天然径流量还原计算方法。天然径流量主要由实测径流量、地表水耗水量和蓄变量等还原计算得到,其中地表水耗水量是指地表水取水量扣除其回归到黄河干、支流河道后的水量,在 2003 年前分为 4 类(农业、工业、城镇生活、农村人畜),2003 年后则划分为 6 类(农田灌溉、林牧渔畜、工业、城镇公共、居民生活、生态环境),本研究结合 2003 年后的各分区耗水情况,分析近 15 a 人类活动对天然径流和实测径流的影响。天然径流量还原见下式(4)~(5)^[19]:

$$W_{\text{天然}} = W_{\text{实测}} + W_{\text{耗水}} + W_{\text{蓄变}} \quad (4)$$

$$W_{\text{耗水}} = W_{\text{农}} + W_{\text{林}} + W_{\text{工}} + W_{\text{城}} + W_{\text{居}} + W_{\text{生}} \quad (5)$$

式中: $W_{\text{天然}}$ 为天然径流量, $W_{\text{实测}}$ 为实测径流量, $W_{\text{耗水}}$ 为地表水耗水量, $W_{\text{蓄变}}$ 为地表水蓄变量; $W_{\text{农}}$, $W_{\text{林}}$, $W_{\text{工}}$, $W_{\text{城}}$,

$W_{\text{居}}$, $W_{\text{生}}$ 分别为农田灌溉、林牧渔畜、工业、城镇公共、居民生活和生态环境耗水量;所有耗水量单位均为 10^8 m^3 。

3 结果与分析

3.1 多年实测径流和天然径流趋势变化

3.1.1 多年实测径流量趋势分析 黄河 1969—2018 年上中下游多年实测径流变化均呈降低趋势(见图 1),对 8 个水文站多年实测径流变化趋势进行 Mann-Kendall 趋势检验(见表 2),除上游唐乃亥和兰州站减少速率较缓外,其余各站均明显减少,且通过了 0.01 水平的显著性检验。其中,以兰州、花园口、利津 3 个代表水文站为例,多年平均降低速率分别为 5.10×10^7 , 3.55×10^8 , $4.13 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。同时,利津站变差系数 C_v 值为 0.53,较兰州和花园口站大,表明下游实测径流年际变化幅度较大。

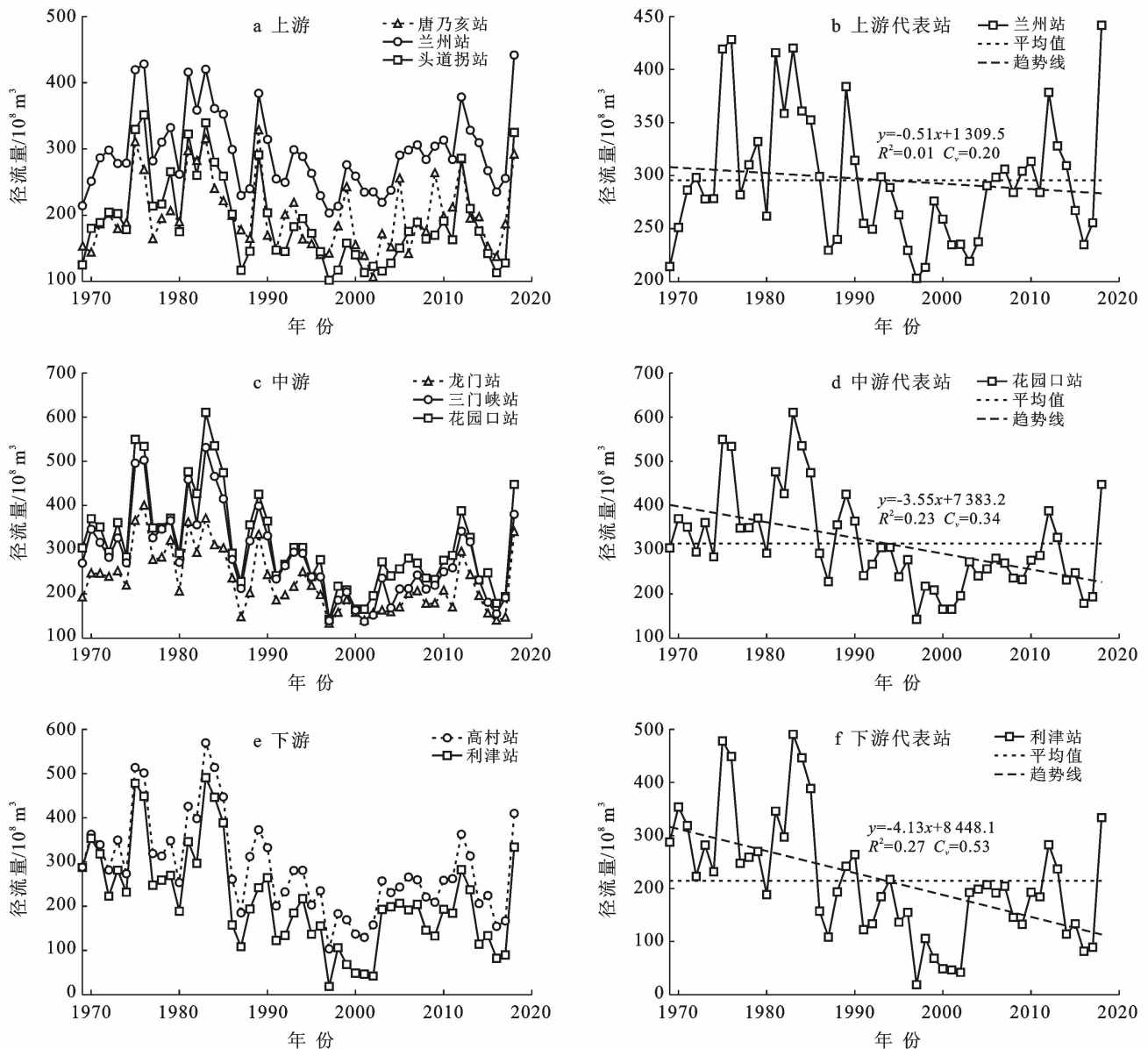


图 1 1969—2018 年黄河上中下游各站实测径流变化

表 2 1969—2018 年黄河各站实测径流变化趋势检验

| 项目 | 唐乃亥 | 兰州 | 头道拐 | 龙门 | 三门峡 | 花园口 | 高村 | 利津 |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 变化速率($10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$) | -0.41 | -0.51 | -1.47 | -2.29 | -3.59 | -3.55 | -3.50 | -4.13 |
| 检验统计量 | -0.85 | -0.52 | -2.44 | -3.55 | -3.80 | -3.65 | -3.51 | -3.83 |
| 信度 | — | — | 99% | 99% | 99% | 99% | 99% | 99% |

通过分析发现,各站在 1997 年前后两段量值发生明显变化,进一步分段来看,3 个代表水文站实测径流变化见图 2。在 1997 年以前,黄河实测径流整体偏丰,其多年(1969—1997 年)平均径流量分别为 3.19×10^{10} , 3.91×10^{10} , $2.97 \times 10^{10} \text{ m}^3$;就变化趋势来看,均呈现减少趋势,减少速率分别为 -1.15×10^8 , -4.45×10^8 , $-7.61 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,仅利津站通过了 0.01 水平的显著性检验。

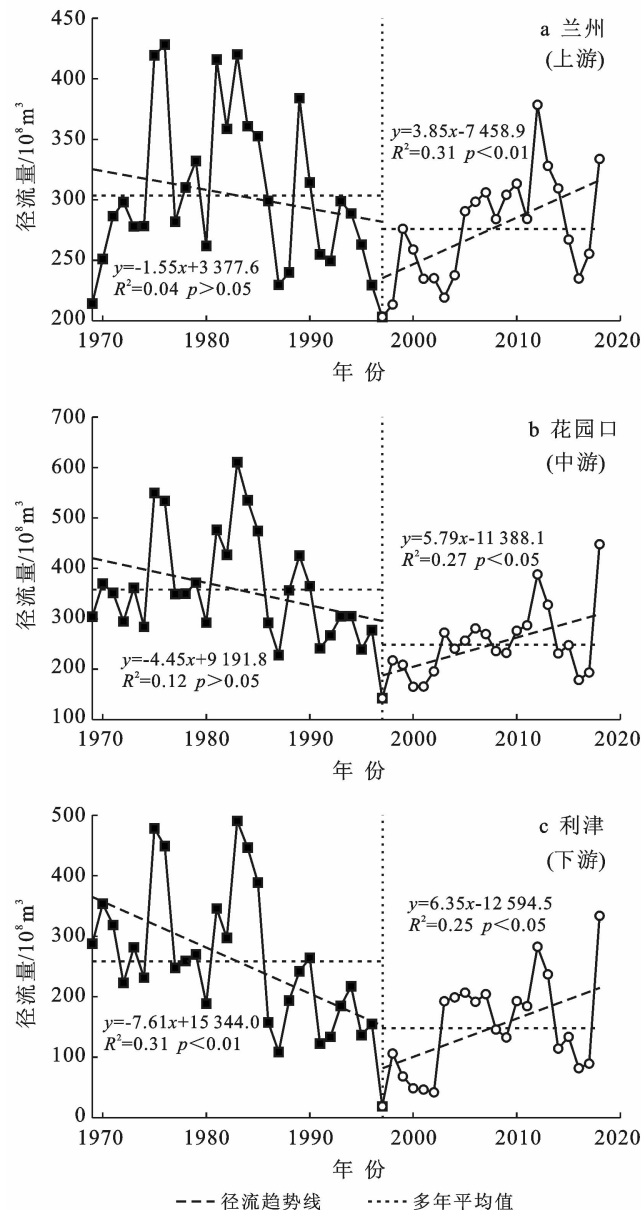


图 2 1969—2018 年黄河上中下游代表站实测径流变化

而自 1997 年以后,3 个代表水文站的多年平均实测径流较 1997 年前明显减少,分别减少了 9.2%, 30.6%和 42.8%,其中利津站减少最多,利津站实测径流量甚至低于上游兰州站和中游花园口;从变化趋势来看,3 站均有增加的趋势,增速依次增大,分别为 3.85×10^8 , 5.79×10^8 , $6.35 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,并且均通过了 0.05 水平的显著性检验。

3.1.2 多年天然径流量趋势分析 1969—2018 年黄河干流沿程 8 个水文站的天然径流变化见图 3。河流的天然径流自上游的唐乃亥站至下游的利津站依次增大,且除唐乃亥外,各站天然径流年际变化幅度较实测径流小,同时除唐乃亥和兰州站外各站变化均通过了检验(见表 3)。其中兰州、花园口、利津站多年平均天然径流分别为 2.98×10^{10} , 5.07×10^{10} , $5.10 \times 10^{10} \text{ m}^3$,变差系数 C_v 值分别为 0.210, 0.213, 0.216。其中兰州站多年平均天然径流为花园口的 58.78%,是利津站的 58.34%,表明黄河径流量主要来自兰州站以上地区。

3.2 多年实测径流和天然径流的突变分析

1969—2018 年黄河干流各水文站实测径流和天然径流突变分析结果见表 4,黄河实测径流仅在兰州和利津站于 1986 年发生突变,其余各站均在 1990 年发生突变。而对于天然径流而言,兰州站在 1986 年发生突变,其余各站均在 1990 年发生突变。本研究表明黄河径流突变主要发生在 1986, 1990 年,这与李勃等^[16]研究结果相似,其研究表明 1956—2017 年除唐乃亥站没有出现明显的突变年,其余各站发生突变的年份主要集中在 1985, 1990 年。

径流的形成过程是多种因素相互作用和联系的复杂自然现象,可以分为自然因素和人为因素^[20]。刘昌明等^[21]通过对 1950—2017 年黄河干流 4 个水文站实测径流序列进行 Pettitt 突变检验,指出兰州站在 1986 年出现显著突变,利津站在 1985 年出现显著突变,主要原因可能是 1984 年以来一系列水土保持措施的实施,尤其是 1985 年黄河中游治理局编制的《黄河中游水土保持治沟骨干工程建设规划》得到实施。同时结合黄河干流水库的修建时间,发现龙羊峡水库是 1986 年 10 月开始蓄水使用,因此兰州水文站断面处的径流突变也与龙羊峡水库修建有一定的

相关性。另外,胡慧杰等^[22]则指出造成1989,1990年径流突变的主要原因是人为因素导致的用水量增

加(80—90年代黄河流域用水量激增)和流域下垫面改变。

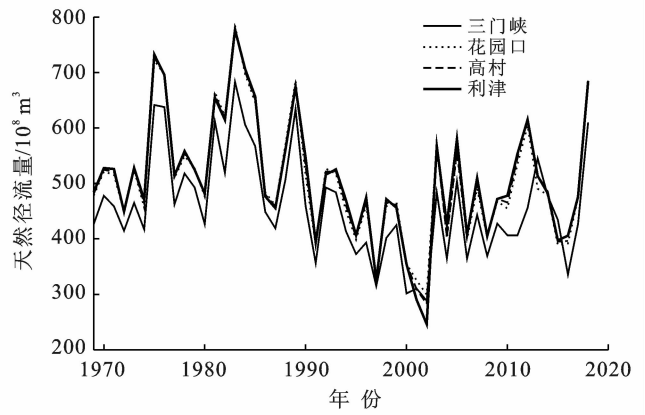
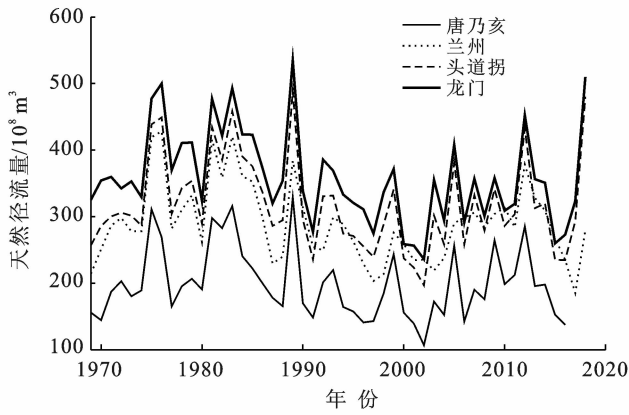


图3 1969—2018年黄河各水文站的天然径流变化

表3 1969—2018年黄河各站天然径流变化趋势检验

| 项目 | 唐乃亥 | 兰州 | 头道拐 | 龙门 | 三门峡 | 花园口 | 高村 | 利津 |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 变化速率/($10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$) | -0.68 | -0.25 | -0.84 | -1.46 | -2.09 | -2.45 | -3.06 | -2.35 |
| 检验统计量 | -1.24 | -0.13 | -1.37 | -2.41 | -2.27 | -2.19 | -2.06 | -2.16 |
| 信度 | — | — | 90% | 99% | 95% | 95% | 95% | 95% |

表4 1969—2018年各水文站实测径流和天然径流趋势突变年份

| 项目 | 唐乃亥 | 兰州 | 头道拐 | 龙门 | 三门峡 | 花园口 | 高村 | 利津 |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 实测值年份 | 1990 | 1986 | 1990 | 1990 | 1990 | 1990 | 1990 | 1986 |
| 天然值年份 | 1990 | 1986 | 1990 | 1990 | 1990 | 1990 | 1990 | 1990 |

3.3 多年实测径流与天然径流对比及其与人类活动的关系

1969—2018年黄河干流各水文站多年平均天然径流量与实测径流量对比结果见图4。黄河干流天然径流量沿程逐渐增加,然而实测径流量沿程基本稳定,无明显增加的趋势。同时,天然径流量与实测径流量的差值自头道拐开始沿程逐渐增大,至利津水文站,多年实测平均径流量仅为天然径流量的42%,另外在头道拐水文站断面处实测径流量较低。天然径流量与实测径流量的差值为耗水量和蓄变量之和,结合近十五年来各站断面以上耗水量和蓄水量平均值看(见表5),主要是由于各站断面以上耗水量在逐渐增加。

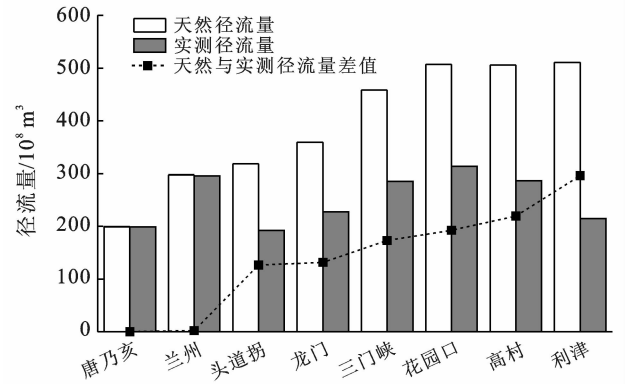


图4 1969—2018年各站平均天然径流与实测径流对比

表5 2003—2017年各站断面以上平均耗水量和蓄变量

| 项目 | 兰州 | 头道拐 | 龙门 | 三门峡 | 花园口 |
|-------------------------|-------|--------|--------|--------|--------|
| 耗水量/ 10^8 m^3 | 24.49 | 128.41 | 136.83 | 177.24 | 194.40 |
| 蓄变量/ 10^8 m^3 | 7.45 | 7.49 | 7.79 | 8.21 | 12.29 |

为了探讨人类活动如何影响径流量,结合各分区平均耗水情况(见图5)来看,2003—2017年平均耗水量最大的两个分区为花园口以下和兰州—头道拐段,分别达到了 1.06×10^{10} , $1.04 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 。各分区中耗水最大项均为农田灌溉,兰州—头道拐段多年平均农田灌溉耗水量达到了 $8.41 \times 10^9 \text{ m}^3$,其宁夏和内蒙古灌区属于中国农业耗水大区;花园口以下区域则达到了

$8.04 \times 10^9 \text{ m}^3$, 这与河南、山东农业发展密切相关。而工业耗水量则主要是花园口以下段最多, 为 $9.76 \times 10^8 \text{ m}^3$; 林牧渔畜耗水量以兰州—头道拐段最大, 约为 $8.79 \times 10^8 \text{ m}^3$; 城镇公共、居民生活和生态环境耗水量均以花园口以下段最大, 分别为 1.88×10^8 , 5.00×10^8 , $6.12 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。可见, 区域天然径流量和实测径流量会受到强烈的人类活动的影响, 主要包括农田灌溉、工业、城镇公共、居民生活等方面, 且不同区域的耗水结构具有较大差异。

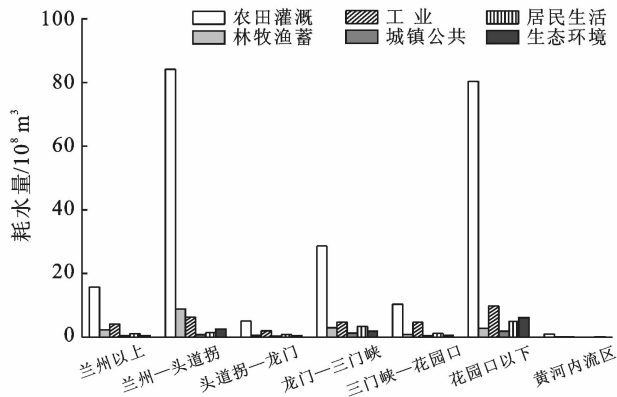


图 5 2003—2017 年黄河流域各分区平均耗水情况

4 讨论与结论

4.1 讨论

河流的天然径流和实测径流变化受人类活动加剧和气候变化的共同影响, 降水量和气温直接影响河流天然径流量, 而人类活动主要是通过水利工程建设、水土保持措施建设等影响实测径流量^[16]。本文对比黄河上中下游 8 个水文站的天然径流与实测径流发现, 兰州站以上二者大致相同, 主要是由于该段耗水量较小, 仅 $2.45 \times 10^9 \text{ m}^3$; 而兰州站以下, 二者差值逐渐增大, 这与其耗水量沿程逐渐增大相一致。同时, 结合近 15 a 来黄河流域各分区耗水情况(见图 5), 各分区中耗水最大项均为农田灌溉, 兰州—头道拐段多年平均农田灌溉量达 $8.41 \times 10^9 \text{ m}^3$, 占该区总耗水量的 80.92%, 主要是该区宁夏和内蒙古灌区属于中国农业耗水大区; 花园口以下区域则达到 $8.04 \times 10^9 \text{ m}^3$, 占该区总耗水量的 75.86%, 这与河南、山东等省份农业发展密切相关。另外, 工业、城镇公共、居民生活和生态环境多年平均耗水量均为花园口以下分区最大, 分别为 9.76×10^8 , 1.88×10^8 , 5.00×10^8 , $6.12 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。因此, 黄河流域人类活动中各项耗水(尤其是农田灌溉)是造成兰州站以下地区天然径流与实测径流差值大的主要原因。同时, 区域天然径流和实测径流会受到强烈的人类活动的影响, 且不同区

域的耗水情况具有较大差异, 需要结合当地的农业、工业、城镇等方面综合分析。

除人类活动明显改变黄河流域径流量的变化以外, 黄河径流量也受到气候变化的影响。Wu 等^[23]通过 SWAT 模型对黄河源区(唐乃亥水文站以上)径流的影响因素进行分析, 发现该区降水在径流变化中起主要作用, 占 64.2%, 温度对径流变化的影响占 25.93%。Shi 等^[24]通过对黄河下游径流分析, 发现 1950—2014 年降水减少和耗水量增加是下游径流下降的主要原因。本研究由于缺乏相应站点的降水和温度数据, 未能结合降水和气温变化分析径流的多年变化, 仅着重探讨了人类活动为主要的各项耗水分量对于径流的影响。

本文发现各站在 1997 年前后两段量值发生明显变化, 1997 年以前河流实测径流量整体偏丰, 于 1997 年达到历史最低, 1997 年后径流量较稳定。杨春华等^[25]对黄河上游区域降水量分析发现, 黄河上游地区降水量在 80 年代后期至 90 年代末呈下降趋势, 从 90 年代末至今较稳定; 万欣^[8]对黄河中下游地区降水量分析发现, 1995, 1996, 1997 年降水量达到低值, 自 1997 年后降水量稳定。研究中结合已有研究降水量情况, 以 1997 年为界进一步细化实测径流量的变化分析。然而降水对于流域产流是一个复杂的过程, 我们仅结合了有关文献资料来分析降水量对径流影响, 在后续研究中仍需进一步探究各站降水量对实际径流和天然径流量的影响, 以便全面解读黄河径流量的变化机制。

4.2 结论

(1) 1969—2018 年黄河上中下游实测径流整体呈降低趋势, 兰州、花园口、利津 3 个代表站多年平均降低速率分别为 5.10×10^7 , 3.55×10^8 , $4.13 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。1997 年以前, 黄河 3 个代表水文站实测径流整体偏丰; 而 1997 年以后, 3 个代表水文站多年平均实测径流量较 1997 年之前明显减少, 分别减少了 9.2%, 30.6% 和 42.8%。

(2) 黄河径流突变主要集中在 1986, 1990 两个年份, 结合前人研究和重要水事分析, 1986 年突变可能与 1984 年以来一系列水土保持措施实施以及 1986 年龙羊峡水库修建有关; 而造成 1990 年径流突变的原因可能是人为因素导致的用水量增加(20 世纪 80—90 年代黄河流域用水量激增)和流域下垫面改变。

(3) 黄河天然径流沿程逐渐增加, 而实测径流沿程基本稳定, 二者差值从上游至下游水文站断面逐渐增大, 这与其耗水量沿程逐渐增大相一致。因此, 人

类活动中的各项耗水(尤其是农田灌溉)是造成兰州站以下地区天然径流与实测径流差值大的主要原因。

[参 考 文 献]

- [1] 管晓祥,金君良,黄爱明,等. 黄河流域典型流域水文气象变化与径流过程模拟[J]. 水利水运工程学报, 2019(5):36-43.
- [2] 陈敏建,王浩,王芳. 内陆干旱区水分驱动的生态演变机理[J]. 生态学报, 2004, 24(10):2108-2114.
- [3] 陈霁巍,穆兴民. 黄河断流的态势、成因与科学对策[J]. 自然资源学报, 2000, 15(1):31-35.
- [4] 丁艳峰,潘少明,许祝华. 近50年来黄河入海径流量变化的初步分析[J]. 海洋开发与管理, 2009, 26(5):67-73.
- [5] 匡晓为. 全球变化背景下黄河流域径流变化特征及其插值预测研究[D]. 江苏南京:南京信息工程大学, 2015.
- [6] 刘秀,刘永和,赵建民,等. 1998年以来黄河干流水资源量变化特征分析[J]. 人民黄河, 2019, 41(2):70-75.
- [7] 冯家豪,赵广举,穆兴民,等. 黄河中游区间干支流径流变化特征与归因分析[J]. 水力发电学报, 2020(8):1-15.
- [8] 万欣. 1951—2010年黄河中下游地区的降水场分析[J]. 河北农机, 2019(5):117-118.
- [9] 鲍振鑫,严小林,王国庆,等. 1956-2016年黄河流域河川径流演变规律[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(5):52-57.
- [10] 马柱国. 黄河径流量的历史演变规律及成因[J]. 地球物理学报, 2005, 48(6):1270-1275.
- [11] 张国宏,王晓丽,郭慕萍,等. 近60年黄河流域地表径流变化特征及其与气候变化的关系[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(7):91-95.
- [12] 朱东彪,胥洪军. 天然径流量还原与修正方法[J]. 河南水利与南水北调, 2013(14):22-23.
- [13] 李东,蒋秀华,王玉明,等. 黄河流域天然径流量计算解析[J]. 人民黄河, 2001, 23(2):35-37.
- [14] 卢秀娟,张耀存,王国刚. 黄河流域代表水文站径流和降水量变化的初步分析[J]. 气象科学, 2003, 23(2):192-199.
- [15] 陈效述,尉杨平,李静,等. 黄河流域天然径流量与气候因子的小波分析[J]. 人民黄河, 2012, 34(1):1-4, 13.
- [16] 李勃,穆兴民,高鹏,等. 1956-2017年黄河干流径流量时空变化新特征[J]. 水土保持研究, 2019, 26(6):120-126, 132.
- [17] 何毅,穆兴民,赵广举,等. 基于黄河河潼区间输沙量过程的特征性降雨研究[J]. 泥沙研究, 2015(2):53-59.
- [18] 田志会,李晓雪. 1949—2016年我国粮食主产区旱灾变化趋势分析[J]. 中国农业大学学报, 2019, 24(12):159-167.
- [19] 沈宏. 天然径流还原计算方法初步探讨[J]. 水利规划与设计, 2003(3):15-18, 47.
- [20] 张晓伟,沈冰,黄领梅. 和田河年径流变化规律研究[J]. 自然资源学报, 2007, 22(6):974-979.
- [21] 刘昌明,田巍,刘小莽,等. 黄河近百年径流量变化分析与认识[J]. 人民黄河, 2019, 41(10):11-15.
- [22] 胡慧杰,崔凯,曹茜,等. 黄河近百年径流演变特征分析[J]. 人民黄河, 2019, 41(9):14-19.
- [23] Wu Jingwen, Zheng Haiyan, Xi Yang. SWAT-based runoff simulation and runoff responses to climate change in the headwaters of the Yellow River, China [J]. Atmosphere, 2019, 10(9):509.
- [24] Shi Hongling, Hi Chunhong, Wang Yangui, et al. Analyses of trends and causes for variations in runoff and sediment load of the Yellow River. International Journal of Sediment Research, 2017, 32(2):171-179.
- [25] 杨春华,燕振宁,周丹,等. 1967—2016年黄河上游河曲地区降水变化特征研究[J]. 沙漠与绿洲气象, 2020, 14(2):43-49.