

1956 – 2016 年沔河径流量变化特征分析

欧阳卫^{1,2}, 王筱^{1,2}, 周维博^{1,2}

(1. 长安大学 水利与环境学院, 陕西 西安 710054; 2. 长安大学 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘要: 以沔河流域内秦渡镇水文站 1956 – 2016 年实测径流数据为基础, 分析年内变化特征; 用 M – K 方法对沔河年际、丰水期、枯水期 3 个时期的径流量进行了突变分析, 再用滑动 t 检验突变点的可信度。结果表明: 沔河年径流量在 1956 – 2016 年中整体呈减少趋势, 减少率为 $175.71 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$; 径流年内分配在 20 世纪 70、80 年代较为集中, 主要在 7 – 9 月, 全年占比达 43.87%, 2006 年以后年内分配较为均匀; 沔河年径流量在 1982 年发生突变; 丰水期在 1977 和 1985 年各发生 1 次突变, 其中 1977 年的丰水期径流量全年占比从 15.2% 增加至 64.4%; 枯水期在 2001 年发生 1 次突变。研究结果可以为沔东、沔西新城的防洪和海绵城市建设以及陕西省斗门水库的正常运行提供参考。

关键词: 径流量; M – K 法; 滑动 t 检验; 趋势分析; 突变分析; 沔河

中图分类号: TV121; P333 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2021)03-0118-06

Variation characteristics of Fenghe River runoff from 1956 – 2016

OUYANG Wei^{1,2}, WANG Xiao^{1,2}, ZHOU Weibo^{1,2}

(1. School of Water and Environment, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effect in Arid Region (Chang'an University), Ministry of Education, Xi'an 710054, China)

Abstract: Based on the measured runoff data from the Qindu County Hydrological Station in the Fenghe River Basin from 1956 to 2016, the annual variation characteristics was analyzed and the abrupt changes of runoff in three periods (interannual, rainy and drought period) were discussed, which were then verified using sliding t test. Results showed that the annual runoff of Fenghe River showed an overall decreasing trend from 1956 to 2016, and the decreasing rate was $1.7571 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$. The annual distribution of runoff was more concentrated in the 1970s and 1980s, mainly from July to September, accounting for 43.87%. After 2006, the annual distribution was more homogeneous. An abrupt change of annual runoff occurred in 1982, and that of the runoff in the rainy period occurred in 1977 and 1985, among which the annual proportion of runoff in 1977 increased from 15.2% to 64.4%. In the drought period, the abrupt change appeared in 2001. The results can provide a practical reference for the flood control, sponge city construction of Fengdong and Fengxi New Town and the proper operation of Doumen Reservoir in Shaanxi Province.

Key words: runoff; M – K method; sliding t test; trend analysis; abrupt change analysis; Fenghe River

1 研究背景

江河径流是地表水资源的重要组成部分, 直接关系到自然生态和人类社会。江河径流量的显著变化一直是水文学者和流域管理者的关注重点^[1-4]。

近年来, 国内外许多学者做了大量关于流域径流量变化的研究。如张建云等^[5]初步分析了中国江河近 60 年的径流演变趋势以及中国十大水资源区的地表水演变特征; 田晶等^[6]通过模拟汉江流域未来的径流变化, 探究了径流变化的主因; 王国庆等^[7]

收稿日期: 2020-09-29; 修回日期: 2021-02-20

基金项目: 陕西省水利科技项目(2018slkj-10)

作者简介: 欧阳卫(1997-), 男, 江西新余人, 硕士研究生, 研究方向为水生态及水环境。

通讯作者: 周维博(1956-), 男, 陕西乾县人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为水资源、水环境及节水灌溉。

通过归因识别对中国南北方江河径流量变化成因进行了分析;Yang等^[8]建立了一种更为灵活的改良布迪克互补关系,可以将长序列径流资料合理划分为不同的组分,便于分析径流量变化成因;Awotwi等^[9]的研究表明,人类活动对加纳南部森林径流量变化的贡献率达82.2%。观测资料和已有研究表明^[10-13],江河径流量在过去几十年发生了不同程度的变化,因此科学分析流域内径流量的演变和趋势显著性可以为流域内防洪减灾、合理开发水资源等提供支撑。

沔河,“西安八水”之一,作为沔东新城和沔西新城的“城中河”,在城市防洪和海绵城市建设过程中起着至关重要的作用;同时作为陕西省斗门水库的引水源之一,其径流量变化和斗门水库的运行息息相关^[14]。本文基于秦渡镇水文站1956-2016年共计61a的逐月径流量实测数据,利用集中度和不均匀性分析、M-K检验、滑动 t 检验等方法研究沔河径流量的年内分配情况、年际变化幅度及3个时期(年际、丰水期、枯水期)的突变特征、突变时间和突变前后年内径流分配变化情况,旨在揭示沔河近60年来径流量的演变规律和突变特征。

2 资料来源与研究方法

2.1 研究区概况

沔河地处西安西部,源于秦岭北坡沔峪南研子沟^[15],系渭河一级支流,流域横跨东经 $108^{\circ}69' \sim 109^{\circ}10'$ 、北纬 $33^{\circ}60' \sim 34^{\circ}15'$,属暖温带半湿润季风气候,研究区水系分布及水文站位置见图1。



图1 研究区流域水系及水文站位置图

2.2 资料来源

沔河在中下游与沔漓河交汇口以下无水文观测站,流域内建有秦渡镇水文站、大峪水文站、高桥水文站^[16]。秦渡镇水文站与其他两个站点相比,距沔西新城、沔东新城和陕西省斗门水库较近,更具代表性。沔河秦渡镇水文站以上取水量很小,且未修建大型水利工程,径流量未发生显著改变,因而不需要对年径流资料进行还原计算和一致性处理。故本文选取秦渡镇水文站1956-2016年共计61a的逐月径流量资料。

2.3 研究方法

2.3.1 径流量年内分配分析方法 采用不均匀系数 C_v ^[17]、完全调节系数 C_r 、集中度 C_d ^[18]和相对变化幅度 C_m ^[19]来描述径流量的年内分配情况。

$$C_m = \arctan(C_{\max}/C_{\min}) \quad (1)$$

式中: C_{\max} 和 C_{\min} 分别为月平均径流量与年径流量比值的最大值和最小值。

2.3.2 径流年际变化分析方法 本文先采用距平累积法、线性倾向估计法对年径流量的变化进行趋势分析^[20]。M-K突变检验是基于时间序列秩次的一种统计检验方法,对数据分布形态没有特定要求,广泛应用于水文趋势研究^[21]。

该方法将水文序列 $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ 假设为一秩序列^[22-23]。定义 d_k 为:

$$d_k = \sum_{i=1}^k m_i \quad (2 \leq k \leq n) \quad (2)$$

$$m_i = \begin{cases} 1 & (x_i > x_j) \\ 0 & (x_i \leq x_j) \end{cases} \quad (3)$$

式中: k 为计算年份; m_i 为秩序列中 x_i 大于 x_j 的样本累积数。

计算 d_k 的均值 $E(d_k)$ 和方差 $\text{Var}(d_k)$,定义统计量:

$$UF_k = \frac{d_k - E(d_k)}{\sqrt{\text{Var}(d_k)}} \quad (k = 2, 3, \dots, n) \quad (4)$$

再按逆序排列水文序列,重新计算,并使:

$$UB_k = -UF_{k'} \quad (k = n + 1 - k') \quad (5)$$

再联合滑动 t 验证 UF_k 和 UB_k 两线在显著趋势线之间的交点是否为突变开始时刻^[24-25]。

3 结果与分析

3.1 径流量年内分配

鉴于研究区内水文站的实测径流资料较长,为便于分析,将1956-2016年以10a分段进行计

算^[26],结果见表1。绘制 C_v 、 C_r 及 C_d 曲线,见图2。多年月平均径流量见图3。

由表1和图2可以看出:沱河径流量的 C_v 值偏大且呈波动下降,说明年内分配较为集中,2006年以后 C_v 值较小,年内分配较为均匀; C_d 与 C_r 在各年代之间的变化大致相同, C_d 值偏大意味着年内径流分配集中,且由径流量合成向量方位角得出,最大年内月径流量峰值在9月20日左右,这与图3中实际

多年月平均流量最大为9月相一致; C_m 值在20世纪70年代和80年代都较大,表明该时段径流量分配不均。结果表明:(1)9月为年内径流峰值月份,达 $4\,287 \times 10^4 \text{ m}^3$,占全年径流量的18.2%,2月最小,为 $293 \times 10^4 \text{ m}^3$,占全年径流量的1.2%。其中,7-9月径流量全年占比最大,达43.87%,12-翌年2月占比最小,为4.9%。(2)沱河径流量在70年代和80年代个别年份 C_m 较大,年内径流分配集中。

表1 1956-2016年不同时段沱河径流量年内分配统计结果

时段 (年份)	C_v	C_r	C_d	合成向量 方位角/(°)	合成向量对应 日期/(月-日)	C_m	C_{\max}	C_{\min}
1956-1965	1.08	0.42	0.49	238.60	09-14	19.97	1.84	0.09
1966-1975	0.99	0.40	0.34	258.00	10-13	23.83	2.52	0.11
1976-1985	1.08	0.43	0.47	254.70	09-30	35.45	3.06	0.09
1986-1995	0.97	0.38	0.44	241.70	09-17	13.71	1.89	0.14
1996-2005	1.00	0.38	0.43	234.90	09-10	8.52	2.04	0.24
2006-2016	0.96	0.36	0.44	237.75	09-13	9.98	3.22	0.32
平均	1.01	0.40	0.44	244.28	09-20	18.58	2.43	0.16

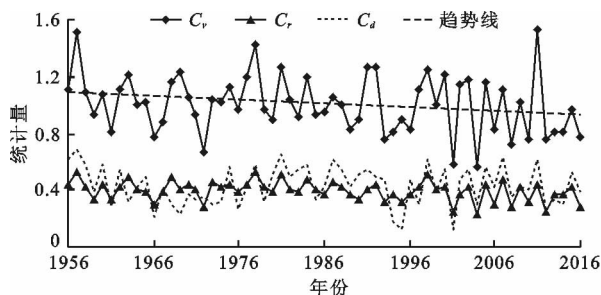


图2 1956-2016年沱河径流年内分配参数曲线

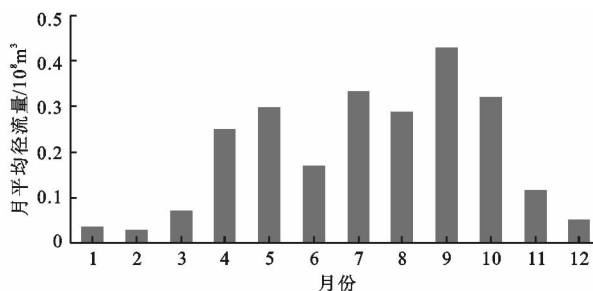


图3 1956-2016年沱河多年月平均径流量

3.2 径流年际变化

3.2.1 趋势分析 采用距平累积法分析沱河1956-2016年的径流量资料,绘制出沱河年径流量距平累积曲线,见图4;年径流量过程线及径流量线性趋势线见图5。

由图4可得,沱河多年径流量呈现明显的4阶段特征,即增加-波动-增加-减少的变化。由图5中可看出,年径流量曲线起伏较大,沱河径流量在研究时段内整体呈减少趋势,下降率为 $175.71 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ 。研究时段内年径流量平均为 $23\,567 \times 10^4 \text{ m}^3$,其中,26 a的径流量高于平均水平,35 a低于平均水平。沱河径流量在序列前期均偏丰,在1983年达到最大值,为 $53\,800 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。近30年来,径流量明显偏小。1956-1969年和1970-1989年的平均径流量分别为 $28\,131 \times 10^4$ 、 $25\,713 \times 10^4 \text{ m}^3$,均高

于多年平均年径流量,而1990-2016年平均径流量为 $19\,612 \times 10^4 \text{ m}^3$,低于平均径流量。体现了在不同年代之间,沱河径流量呈现减小趋势。

3.2.2 突变分析

(1) M-K 突变检验。本文从3个时期对沱河的年径流量进行突变分析,分别为年际、丰水期(7-9月)和枯水期(12-翌年1月),为了更直观地找到突变点,绘制其径流量突变图,见图6。显著水平取0.05,临界值 $U_{0.05} = \pm 1.96$ 。

由图6(a)可以看出,沱河年际径流量在20世纪70年代末以前,统计曲线 UF 呈波动下降,表明径流量呈现减少趋势。80年代统计曲线 UF 转为上升状态。从90年代初至今,统计曲线 UF 呈下降状态,表明径流量呈减少趋势。特别是1990年以后,曲线下降至显著性水平的临界线下,表明20世纪末,

沱河径流量减少趋势十分明显。两条统计曲线 UF 、 UB 分别在 1977、1982、1985、1990 年相交。

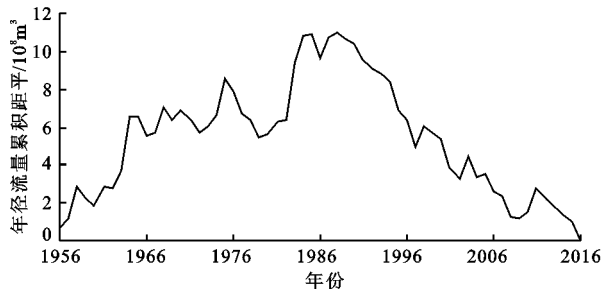


图 4 1956 - 2016 年沱河年径流量距平累积曲线

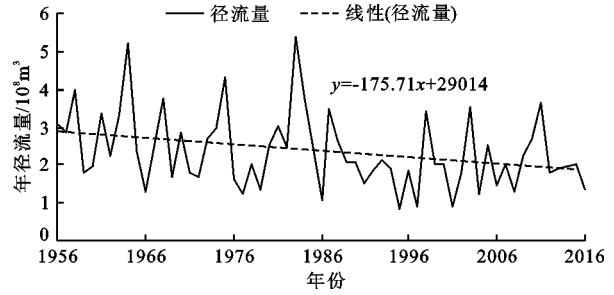


图 5 1956 - 2016 年沱河年径流量过程及变化趋势线

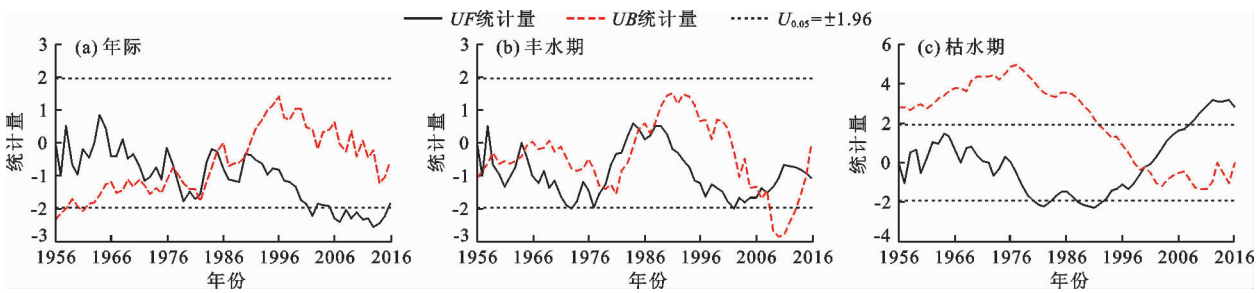


图 6 1956 - 2016 年沱河径流量 M - K 检验图

由图 6(b) 可得, 20 世纪 60 年代以前, 曲线波动上升, 在 60 年代到 80 年代, 沱河丰水期径流量统计曲线 UF 为波动下降状态; 80 年代至 90 年代, 统计曲线 UF 为上升状态并逐渐大于 0, 表明径流由减小趋势转为增加趋势; 90 年代至 21 世纪初, 统计曲线 UF 下降, 表明径流呈减少趋势; 进入 21 世纪以后, 统计曲线 UF 为上升状态; 在 1957、1959、1963、1964、1977、1985、2007、2008 年处, 两条统计曲线 UF 、 UB 相交。

由图 6(c) 分析得, 在 70 年代中期以前, 沱河枯水期径流量统计曲线 UF 为上升状态, 表明径流在此时段呈增加趋势; 70 年代以后, 统计曲线 UF 大体为下降状态, 在个别年份有所上升, 表明径流在 70 年代后呈减少趋势; 1990 年至今, 统计曲线 UF 持续上升, 且超过 0.05 显著水平线。在 2001 年两条统计曲线出现交叉。

通过上述分析得出: 沱河年径流量在研究时段内发生 4 次突变, 分别在 1977、1982、1985、1990 年; 丰水期径流量在 1957、1963 (相邻交点以年份靠前的为突变年份)、1977、1985、2007 年发生突变; 枯水期在 2001 年发生突变。上述突变点中, 个别可能是杂点, 所以需要联合滑动 t 检验法验证突变点的可信度。

(2) 滑动 t 检验。为了对 M - K 突变检验的突变点可进行信度检验, 本文依据滑动 t 检验法对上

述 3 个时期的突变点进行检验, 绘制径流量突变图, 见图 7, 显著水平取 ± 2.306 。

分析图 7(a) 可得, 沱河年际流量在研究时段前期呈波动上升的状态, 随后下降, 在 1982 年, 沱河径流量年际变化突破临界值, 说明此处可能发生了突变, 对比之前的 M - K 突变分析结果, 由此可得沱河年际径流量在 1982 年发生了 1 次突变。由图 7(b) 可得, 研究时间序列内沱河丰水期径流量有 3 次变化突破临界值, 对比 M - K 突变分析结果, 得沱河丰水期径流量在 1977 和 1985 年有突变点。由图 7(c) 可以看到, 沱河枯水期时径流量有 6 次变化突破临界值, 说明在这期间径流量变化较为剧烈, 其中 2001 年处的变化点与 M - K 检验结果吻合, 由二者联合分析可得, 沱河枯水期的径流量在 2001 年发生了 1 次突变。

(3) 突变前后的径流年内分配变化。由于枯水期径流较小以及丰水期 2 个突变点离得较近, 所以选择年际突变点和丰水期突变点中较为明显的点位 1977 年分析。绘制突变前后的年内径流变化图, 如图 8 所示。

与图 3 的多年月平均流量相比, 当沱河径流量发生年际突变时, 径流量峰值后移, 各月径流占比变化较大, 其中以 9 和 10 月变化较大, 9 月径流量全年占比从 31.7% 降低至 18.6%, 10 月径流量全年占比从 10.9% 增加至 23.1%; 当沱河径流量发生丰

水期突变时,7-9月的径流量全年占比从15.2%增加到64.4%。

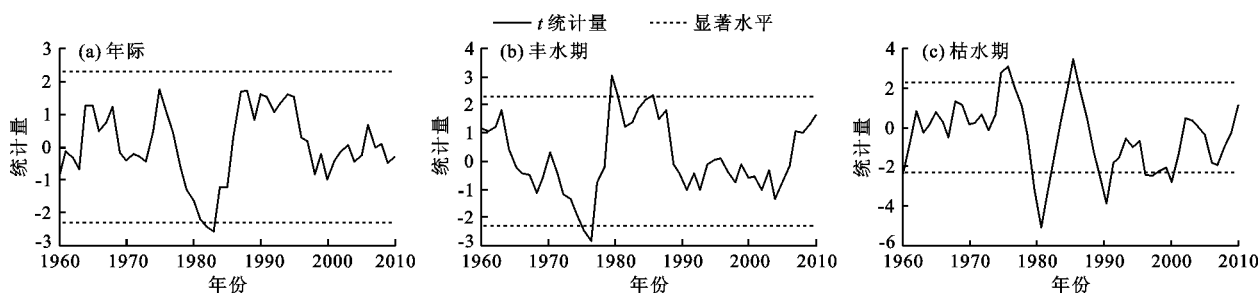


图7 1956-2016年沱河径流量滑动 t 检验

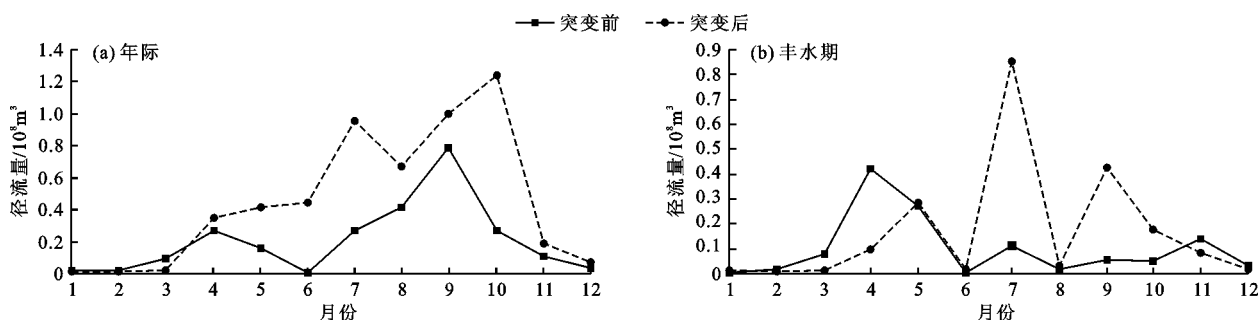


图8 1956-2016年沱河径流量突变前后的年内径流量变化

3.3 讨论

将本文所得突变结果与文献[27]进行对比,如表2所示。

表2 沱河径流量不同时段突变点对比分析

文献	时间序列	年际	丰水期	枯水期
本文	1956-2016年	1982年	1977年 1985年	2001年
文献[27]	1956-2006年	1978年 1987年	1975年 1988年	2003年

从表2中可以看出,本文与文献[27]的结果差异较大,这是因为文献[27]只是对M-K检验图分析,没有排除杂点,本文将M-K检验与滑动 t 检验联合,得出1982年为年径流量突变点,突变前后差值为 $29\,066 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。从图4中可以看出,1987年后径流量开始下降,但是下降幅度相对较小,不足以定为突变点。本文与文献[27]在丰水期突变点的差异主要在于研究时间序列和丰水期的界定不同,本文时间序列为1956-2016年,将7-9月作为丰水期,而文献[27]时间序列为1956-2006年,将7-10月作为丰水期;本文与文献[27]在枯水期的结果较为一致。本文突变分析是采用M-K突变检验分析资料,滑动 t 检验验证结果既说明了突变时间,又确定了结果的准确性。因而所得结果得到了

充分的验证,求得的突变点均为有效突变点。

4 结论

本文根据沱河内秦渡镇水文站1956-2016年逐月径流量资料,采用集中度和不均匀性分析、M-K检验、滑动 t 检验等方法,分析沱河径流年内分配情况并从年际、枯水期、丰水期3个时期对沱河径流量进行突变分析,用滑动 t 检验进行可信度检验。结果表明:

(1)沱河径流量在20世纪70、80年代中,大部分年份年内分配较为集中,2006年以后分配较为均匀,且 C_d 与 C_r 在各年代之间变化大致相同,沱河主要径流集中在7-9月,年内最大月径流量一般出现在9月。

(2)研究区年际径流量在1956-2016年呈增加—波动—增加—减少4阶段变化,整体为减少趋势,1956-2016年平均年径流量为 $23\,567 \times 10^4 \text{ m}^3$,其中,有26a大于平均年径流量,有35a小于平均年径流量。

(3)对沱河径流量的突变分析表明:研究区年际流量在1982年发生了1次突变,突变前后差值为 $29\,066 \times 10^4 \text{ m}^3$,年内径流分配变化主要集中在9-10月,9月径流量全年占比从31.7%降低至18.6%,10月径流量全年占比从10.9%增加至23.1%;研究区丰水期径流量在1977年和1985年

各发生了1次突变,其中1977年突变较为明显,7-9月径流量全年占比从15.2%增加到64.4%;枯水期径流量在2001年发生了1次突变。

参考文献:

- [1] 周维博. 水资源综合利用[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2013.
- [2] 杨佳,郝桂珍,张婧,等. 1960-2016年冀西北地区降水时空变化特征研究[J]. 水资源与水工程学报, 2019,30(5):117-123+133.
- [3] 董起广,周维博,刘雷,等. 北洛河径流量变化特征分析[J]. 人民黄河, 2014,36(2):20-22+29.
- [4] HE Yi, WANG Fei, MU Xingmin, et al. Human activity and climate variability impacts on sediment discharge and runoff in the Yellow River of China[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2017, 129(1-2):645-654.
- [5] 张建云,王国庆,金君良,等. 1956-2018年中国江河径流演变及其变化特征[J]. 水科学进展, 2020,31(2):153-161.
- [6] 田晶,郭生练,刘德地,等. 气候与土地利用变化对汉江流域径流的影响[J]. 地理学报, 2020,75(11):2307-2318.
- [7] 王国庆,张建云,管晓祥,等. 中国主要江河径流变化成因定量分析[J]. 水科学进展, 2020,31(3):313-323.
- [8] YANG Han, XIONG Lihua, XIONG Bin, et al. Separating runoff change by the improved Budyko complementary relationship considering effects of both climate change and human activities on basin characteristics[J]. Journal of Hydrology, 2020,591:125330.
- [9] AWOTWI A, ANORNU G K, QUAYE - BALLARD J, et al. Analysis of climate and anthropogenic impacts on runoff in the Lower Pra River Basin of Ghana[J]. Heliyon, 2017,3(12):e00477.
- [10] 窦小东,黄玮,易琦,等. LUCC及气候变化对澜沧江流域径流的影响[J]. 生态学报, 2019,39(13):4687-4696.
- [11] 王晓颖,宋培兵,廖卫红,等. 气候变化和人类活动对白河流域径流变化影响的定量研究[J]. 水资源与水工程学报, 2020,31(4):50-56.
- [12] 王乐扬,李清洲,杜付然,等. 20年来中国河流水质变化特征及原因[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2019,40(3):84-88.
- [13] 刘禹. 人类活动导致500年来黄河径流和泥沙空前减少[J]. 科学通报, 2020,65(32):3504-3505.
- [14] 夏伟,周维博,李文溢,等. 气候变化和人类活动对沱河流域径流量影响的定量评估[J]. 水资源与水工程学报, 2018,29(6):47-52.
- [15] YANG Yang, ZHOU Zhengchao, BAI Yanying, et al. Risk assessment of heavy metal pollution in sediments of the Fenghe River by the fuzzy synthetic evaluation model and multivariate statistical methods[J]. Pedosphere, 2016,26(3):326-334.
- [16] 智建辉,师泽鹏,赵蕾,等. 沱河流域水系中的硝酸盐来源时空解析[J]. 山西大学学报(自然科学版), 2020,43(3):660-669.
- [17] 郭彦,侯素珍,夏润亮,等. 1955-2014年黄河内蒙古河段水沙变化特征分析[J]. 水资源与水工程学报, 2020,31(4):70-77.
- [18] 李浩,牛乾坤,王宣宣,等. 1961-2015年雅鲁藏布江流域径流演变规律分析[J]. 水土保持学报, 2021,35(1):110-115.
- [19] 王国庆,张建云,李岩,等. 海河流域基于多模式的未来气候变化趋势[J]. 资源科学, 2014,36(5):1043-1050.
- [20] 田鹏,穆兴民,赵广举,等. 近549年来黄河天然径流量时间变化特征研究[J]. 水土保持学报, 2020,34(6):65-69.
- [21] 姜瑶,徐宗学,王静. 基于年径流序列的五种趋势检测方法性能对比[J]. 水利学报, 2020,51(7):845-857.
- [22] 董弟文,阿布都热合曼·哈力克,王大伟,等. 近60年和田河源区径流特征及对气候变化的响应[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2018,6(6):536-543.
- [23] 徐幸仪,伍佑伦,盛东,等. 1960-2015年洞庭湖水资源演变特征分析[J]. 水资源与水工程学报, 2020,31(4):57-62.
- [24] 王未,张永勇. 黄河流域径流情势区域变化特征分析[J]. 水资源与水工程学报, 2020,31(3):59-65.
- [25] 王乐扬,李清洲,王金星,等. 变化环境下近60年来中国北方江河实测径流量及其年内分配变化特征[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2020,41(2):36-42.
- [26] 刘爽爽,李忠勤,张慧,等. 天山典型冰川区径流年内变化分析[J]. 干旱区研究, 2020,37(6):1388-1395.
- [27] 舒媛媛. 城市化对降雨、径流影响的研究[D]. 西安:长安大学, 2014.