

DOI:10.13476/j.cnki.nsbtdqk.2020.0022

裴宏伟,杨佳,张红娟,等.变化环境下清水河流域径流演变特征及驱动力[J].南水北调与水利科技(中英文),2020,18(2):1-13. PEI H W, YANG J, ZHANG H J, et al. Characteristics and driving forces of runoff evolution under changing climate in the Qingshui River basin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(2): 1-13. (in Chinese)

变化环境下清水河流域径流演变特征及驱动力

裴宏伟¹, 杨佳¹, 张红娟¹, 郝桂珍¹, 刘昌明^{2,3}, 杜娟¹, 沈彦军²

(1. 河北建筑工程学院, 河北 张家口 075000; 2. 中国科学院 遗传与发育生物学研究所 农业资源研究中心/中国科学院 农业水资源重点实验室, 石家庄 050021; 3. 中国科学院 地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要:海河上游清水河流域地处我国北方半干旱半湿润过渡带,水资源短缺且生态环境极为脆弱,对气候变化和人类活动高度敏感。明晰变化环境下清水河流域的径流演变规律及气候变化和人类活动的贡献,对实现流域内水资源的可持续利用以及确保本流域作为首都地区生态屏障的功能定位具有重要的意义。根据清水河张家口水文站和陶来庙水文站近70年的实测径流资料,利用有序聚类分析、小波分析和双累积曲线等方法,系统分析了清水河流域径流演变特性及气候变化和人类活动的影响。结果表明:近70年清水河流域径流呈显著减少趋势,径流深年均减少0.6 mm;各月径流亦均呈显著减少趋势,其中以春夏两个汛期的减少最为显著;径流在1979年前后发生突变,径流变化的第一、二主周期分别为27 a、8 a;径流年内分布的不均匀程度明显增加,春汛(3—4月)占全年径流总量的比例增加,而夏汛(7—8月)占全年径流总量的比例则呈现减少态势;双累积曲线分析结果表明径流演变的主要驱动因素为人类活动(89%)。

关键词:气候变化;人类活动;清水河流域;径流演变;驱动力

中图分类号:P339 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Characteristics and driving forces of runoff evolution under changing climate in the Qingshui River basin

PEI Hongwei¹, YANG Jia¹, ZHANG Hongjuan¹, HAO Guizhen¹, LIU Changming^{2,3}, DU Juan¹, SHEN Yanjun²

(1. Hebei Institute of Architecture and Civil Engineering, Zhangjiakou 075000, China;

2. Center for Agricultural Resources Research, Shijiazhuang 050021, China;

3. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Beijing 100101, China)

Abstract: The Qingshui River basin in the upper reaches of the Hai River is located in the semi-arid and semi-humid transition zone of north China. In this basin, water resources are scarce, and the ecological environment is extremely fragile. Both water resources and ecological environment are highly sensitive to climate change and human activities. The analysis of characteristics and driving forces of runoff evolution under changing climate is of great significance for the sustainable use of water resources, and for maintaining the ecological barrier function for the capital region. To identify the variability of runoff in Qingshui River, long term daily runoff data from 1950-2016 for the Zhangjiakou and Taolaimiao stations were analyzed. To quantify the runoff evolution and its hydrological response to climate change and human activities, order cluster analysis, wavelet analysis and double accumulation curve methods were applied. The results are as follows: The mean annual runoff in the Qingshui River basin decreased significantly in the last 70 years, and the average runoff depth decreased at a rate of 0.6 mm/a. The monthly runoff also

收稿日期:2019-08-15 修回日期:2019-09-25 网络出版时间:2019-10-12

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20191012.1527.008.html>

基金项目:国家自然科学基金(41701017;41807177);河北省科技厅重点研发计划项目(18397002D);张家口市科技计划项目(17111027C;17111052J);河北建筑工程学院研究生创新基金项目(XA201921);国家重点研发计划课题(2016YFC0401403)

作者简介:裴宏伟(1987—),男,河北张家口人,博士,主要从事于干旱半干旱区生态水文过程研究。E-mail:hwpei@sjziam.ac.cn

通信作者:沈彦军(1986—),男,河北张家口人,研究员,博士,主要从事流域生态水文模拟与水环境管理研究。E-mail:shenyanjun@sjziam.ac.cn

decreased significantly, especially in the spring and summer flood seasons; An abrupt change was observed in 1979 in the Qingshui River, while the first and second main periods of runoff evolution were 27 a and 8 a, respectively. The non-uniformity of runoff distribution increased significantly during the year, and spring floods (March-April) accounted for the entire year. The proportion of total runoff has increased, while the proportion of summer flood (July to August) in the total runoff has decreased. The results of double mass curve analysis indicated that human activities were the main driving factors for the runoff variability, accounts for approximately 89%.

Key words: climate change; human activities; the Qingshui River watershed; runoff evolution; driving forces

变化环境下的水循环演变是一个极为复杂的过程,气候变化和人类活动是其中最重要的驱动因子^[1]。径流作为水循环的基本环节之一,是表征水资源丰欠程度的主要指标^[2]。分析变化环境下流域径流量的时间演变特征及影响因素,对科学认识水循环过程、全面理解水资源特性和实现水资源的可持续利用具有重要的理论和现实意义^[3]。

在我国北方,水资源短缺已成为制约社会经济发展的关键因素^[4],其中以海河流域的人水矛盾最为尖锐^[5]。近年来,诸多学者对变化环境下海河流域的水资源问题进行了广泛研究,指出人类活动是海河径流锐减的主要原因^[6-8],且未来海河流域的水资源短缺可能会进一步加剧^[9]。滦河流域近 50 年的径流演变呈减少趋势,气候变化与人类活动皆对径流演变产生了重要影响,特别是在 20 世纪 80 年代后,其中人类活动是径流减少的主要原因^[10-12]。目前,虽然关于海河流域整体的水文循环演变研究已经较为充分,但是对小流域尺度上径流演变的细节刻画及驱动力的研究仍较为薄弱^[13-15]。清水河作为海河上游的一条支流,人类活动长期保持较低且比较稳定的强度。然而,随着近 20 年社会经济发展和城市化进程加快,流域内的人水矛盾日渐突出^[16]。特别是成功申办 2022 年冬奥会后,场地场馆以及配套基础设施的建设和大量游客涌入,给流域水资源带来了空前的压力,严重影响该流域作为“首都地区水源涵养功能区和生态环境支撑区”的生态功能定位。此外,清水河流域地处半干旱半湿润过渡区,区域生态环境脆弱,生态系统对气候变化及人类活动的影响都极为敏感^[17],是研究变化环境下水循环演变过程的绝佳实验流域。

近年来,应用 Mann-Kendall 检验法、有序聚类法、小波分析法和双累积曲线法分析水文气象时序长期演变特征的研究很多^[2-3,8,18-19],其中包括对降水和径流的趋势^[2]、突变^[3,19]、周期^[2]以及其演变驱动力^[20]的分析。本研究以 Mann-Kendall 检验法、

有序聚类法、小波分析法和双累积曲线法为主,根据清水河流域内 2 个水文站近 70 年的实测径流资料(张家口水文站:1951—2016 年;西沟陶来庙水文站:1959—2016 年),对变化环境下小流域径流的演变特征以及驱动力进行系统分析,以期为实现流域水资源合理配置和可持续利用提供科学依据。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 研究区概况

海河上游清水河流域位于燕山山脉北侧、内蒙古高原向华北平原的过渡带,流域边界几乎与张家口市崇礼区的行政边界重叠,流域内主要产业类型为农业。清水河是洋河的主要支流,其上游无其他来水,流域面积 2 326 km²^[21],海拔高度 780~1 800 m。清水河发源于张北县与崇礼区交界的桦皮岭一带^[22],西南流向,其自东向西分别有东沟、正沟和西沟三条支流,最终流经张家口市后汇入洋河(图 1)。流域内土壤类型以棕壤土、褐土和栗褐土等为主;植被类型有阔叶林、针阔混交林、落叶针叶林、灌丛、草甸等^[23]。该流域为大陆性季风气候,雨热同期,冬季干冷多风,多年平均降水量约 442 mm,多年平均气温 8.6 °C,夏季最高月均温 27 °C,冬季最低月均温 -13 °C。

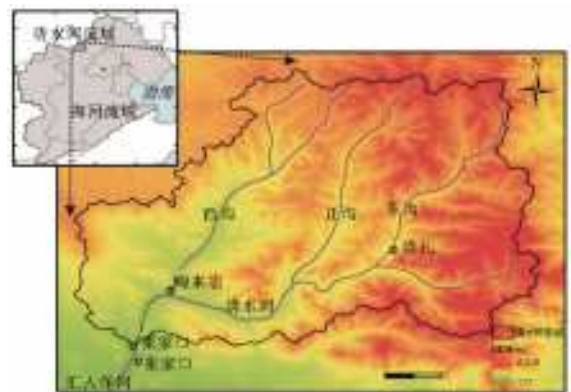


图 1 清水河流域示意图

Fig. 1 Location of the Qingshui River basin

张家口水文站为清水河控制站^[24],该站以上集水面积2 300 km²,河道纵坡 0.02~0.005;西沟啣来庙站以上流域面积 706 km²,流域平均坡度 0.15。

1.2 研究数据

气象数据采用张家口气象站(1956—2016年)和崇礼气象站(1960—2016年)有观测数据以来的日降水、日均气温资料,该资料来源于河北气象局与中国气象数据共享网。水文数据采用了张家口水文站 1951—2016年、西沟啣来庙站 1959—2016年的日均径流观测数据,数据来源于《中华人民共和国水文年鉴》。其中张家口站缺失径流数据主要通过缺失年份降水数据和数据缺失年份前后年的平均径流系数推算,啣来庙站缺失径流数据则利用本站已有实测数据与张家口站实测数据之间构建的回归方程进行数据插补。

1.3 研究方法

1.3.1 径流演变的趋势检验

依据清水河流域张家口站和啣来庙站的水文气象资料,选用国际气象组织推荐的 Mann-Kendall (M-K)检验法对水文气象数据进行水文年、丰枯水期和四季等不同尺度的趋势分析。M-K 非参数检验可适用于不具有正态分布的特征变量,并且不受少数异常值的影响,在水文气象序列趋势的分析中得到广泛应用^[25-27]。该方法计算原理如下^[28]。

假设 X_1, X_2, \dots, X_n 为时间序列变量, n 为时间序列长度,定义检验统计量 S 为

$$S = \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} \text{sign}(X_i - X_j) \quad (1)$$

式中: $\text{sign}()$ 为符号函数; X_i 为第 i 个样本变量 ($1 \leq j \leq i \leq n$)。令 $X_i - X_j = \theta$ (θ 为中间变量),则

$$\text{sign}(\theta) = \begin{cases} 1 & \theta > 0 \\ 0 & \theta = 0 \\ -1 & \theta < 0 \end{cases} \quad (2)$$

M-K 统计量 $S > 0, S = 0, S < 0$ 时分别有统计量 Z 为

$$Z = \begin{cases} (S-1)/\sqrt{n(n-1)(2n+5)/18} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ (S+1)/\sqrt{n(n-1)(2n+5)/18} & S < 0 \end{cases} \quad (3)$$

Z 为正值表示增加趋势,负值表示减少趋势。 Z 的绝对值在大于等于 1.28、1.64、2.32 时表示分别通过了置信度 90%、95%、99% 显著性检验。

1.3.2 径流影响因素分析

目前,双累积曲线法是在水文气象要素一致性或长期演变趋势分析中最简单、直观和广泛应用的

方法^[18],可用于评价人类活动和气候变化对水文过程的影响^[20]。当径流-降水双累积曲线近似一条直线时,表明只有降水变化而无其他因素影响,当人类活动等其他因素影响时,曲线将发生偏移。

双累积曲线法的计算过程分为以下三步。

(1) 设基准期累积径流量 ($\sum Q$) 与累积降水量 ($\sum P$) 线性关系为

$$\sum Q = k \sum P + b \quad (4)$$

(2) 在假设变化期与基准期的气候变化同步前提下,该线性关系得到的变化期模拟径流与实测径流的差值即为径流受人类活动影响的变化量 ΔQ_{human}

$$\Delta Q_{\text{human}} = \text{mean}(Q_{2c}) - \text{mean}(Q_{2m}) \quad (5)$$

(3) 变化期实测径流与基准期实测径流的差为径流受气候变化与人类活动共同影响的变化量 ΔQ 为

$$\Delta Q = \text{mean}(Q_{2m}) - \text{mean}(Q_{1m}) \quad (6)$$

式中: k, b 分别为线性模型的斜率与截距参数; Q_{2c}, Q_{2m}, Q_{1m} 分别代表变化期模拟值、变化期实测值和基准期实测值。

1.3.3 径流演变的突变点检验

突变点检测的方法有很多,但不同的检验其结果可能存在差异。刘剑宇等^[19]比较了 8 种常用的突变检测方法,其中,有序聚类分析能有效检测出径流突变点。选取常用的双累积曲线法和有序聚类分析法对流域内张家口站与西沟啣来庙站(因缺少降水观测数据该站仅采用有序聚类法分析)进行径流序列的突变点检验。

以有序聚类来推求最可能的干扰点 τ_0 ,其实质是求最优分割点,使同类之间的离差平方和较小。将有序样品数据 $R_i (i=1, 2, \dots, n)$ 进行正则化得到序列 $x_t (t=1, 2, \dots, n)$,设序列 x_t 可能分割点为 τ ,则分割点前后离差平方和分别表示为^[29]

$$V_\tau = \sum_{t=1}^{\tau} (x_t - \bar{x}_\tau)^2 \text{ 和 } V_{n-\tau} = \sum_{t=\tau+1}^n (x_t - \bar{x}_{n-\tau})^2 \quad (7)$$

式中: $\bar{x}_\tau = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} x_t$ 为分割点前序列均值; $\bar{x}_{n-\tau} =$

$\frac{1}{n-\tau} \sum_{t=\tau+1}^n x_t$ 为分割点后序列均值。

总离差平方和为

$$S_n(\tau) = V_\tau + V_{n-\tau} \quad (8)$$

最优二分割结果为

$$S_n^* = \min_{2 \leq \tau \leq n-1} \{S_n(\tau)\} \quad (9)$$

满足上述条件的 τ 记为 τ_0 ,作为最可能的分割点, S_n^* 则为该点对应的总离差平方和。最终确定

是否为突变点,需要进一步对分割样本进行检验,考虑 τ 前后系列样本容量 $n_1、n_2$ ($n_1 + n_2 = n$) 均大于 20,本文采用游程检验方法^[29]。

1.3.4 径流演变的周期性研究

对于非平稳性的水文序列研究,往往需要一种同时满足时频域分析的函数^[30],来刻画时序的变动信息。小波分析(Wavelet Analysis)可反映时间序列的局部变化特征^[31],通过对小波母函数的伸缩和平移实现对待分析信息的提取,经小波变换得到小波系数,以小波系数二维等值线图来表征不同时间尺度下周期的演变特征。笔者选用 Morlet 连续复小波变换来分析清水河流域径流量的周期变化特征,分别通过径流时序的小波实系数、系数模方值和小波方差来体现。Morlet 小波函数 $\Psi(t)$ 为

$$\Psi(t) = e^{ict} e^{-t^2/2} \quad (10)$$

式中: t 为时间变量; c 为常数; i 为虚部。

小波实系数等值线图反映径流系列不同时间尺度的周期变化及其在时域中的分布,正负实系数的转折点对应着突变点。实系数绝对值越大,表明该时间尺度变化越显著。小波方差图反映了波动能量随尺度的分布情况,可以用来确定一个时间序列中存在的主要周期成分^[32]。

1.3.5 径流的年内演变分析

采用年内分配不均匀系数 C_v (即变差系数) 来分析研究区径流的年内变化^[33],公式为

$$C_v = \sigma / \bar{R} \quad (11)$$

$$\bar{R} = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} R_i \quad (12)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} (R_i - \bar{R})^2} \quad (13)$$

式中: \bar{R} 为月平均径流量; R_i 为第 i 月的径流量; σ 为均方差。

2 结果分析

2.1 径流演变特征

2.1.1 径流演变的趋势特征

1951—2016 年清水河流域年径流量呈显著减少趋势 ($Z_{\text{年}} = -5.086$), 径流深平均每年约减少 0.6 mm (表 1, 图 2)。流域支流西沟陶来庙站年径流量的下降趋势在 0.01 水平上显著 ($Z = -5.944$), 年均径流深约减少 0.6 mm。流域内春、夏、秋、冬、丰枯水期径流量皆呈显著下降趋势 (表 1), 其中春季与丰水期径流深下降趋势最明显, 平均每年下降 0.12、0.10 mm。张家口站与陶来庙站径流量的极值比大 (表 1), C_v 值分别为 0.71、0.66, 即流域年径流总体系列变化剧烈, 对流域水资源利用不利。清水河流域 1979 年前径流系列基本大于多年均值 (图 2), 而其后则相反, 1980—2016 年径流量相比 1980 年以前径流均值, 减少了约 57%。

表 1 张家口站、陶来庙站径流量的 M-K 趋势法检验结果

Tab. 1 Runoff trend of the Zhangjiakou station and Taolaimiao station by using M-K test

| 水文站 | C_v | 极值比 | 均值/mm | $Z_{\text{年}}$ | $Z_{\text{丰水期}}$ | $Z_{\text{枯水期}}$ | $Z_{\text{春}}$ | $Z_{\text{夏}}$ | $Z_{\text{秋}}$ | $Z_{\text{冬}}$ |
|-------|-------|-------|-------|----------------|------------------|------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 张家口 | 0.71 | 44.9 | 28.51 | -5.086*** | -4.981*** | -4.815*** | -5.578*** | -4.793*** | -4.77*** | -4.676*** |
| 西沟陶来庙 | 0.66 | 104.6 | 26.19 | -5.944*** | — | — | — | — | — | — |

注:“ C_v ”为年径流变异系数;“***”为在显著性水平 $\alpha = 0.01$ 下趋势显著,“—”表示下降趋势。

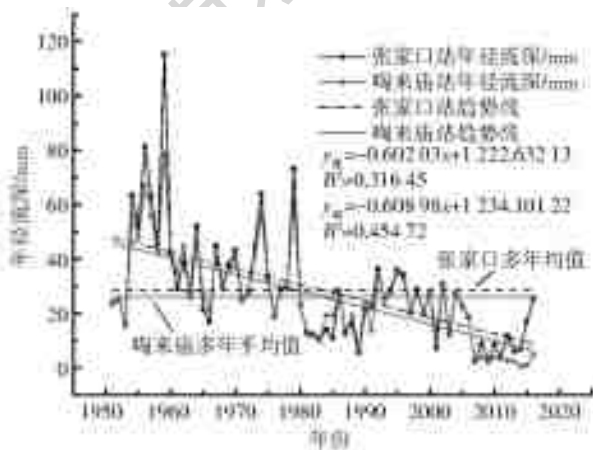


图 2 1951—2016 年张家口站、陶来庙站年径流深度变化

Fig. 2 Annual runoff depth of the Zhangjiakou station and Taolaimiao station from 1951 to 2016

2.1.2 径流演变的突变特征

径流量与降水量的变化规律不一致, 突变拐点不显著 (图 3)。选取清水河流域径流—降水双累积曲线与有序聚类分析确定突变点, 由表 2、图 3 可知, 张家口站水文序列最优分割点 ($U = -7.11$) 发生在 1979 年 $S^* = 1.36$; 流域支流西沟陶来庙站 (因缺少降水观测数据该站仅采用有序聚类法分析) 水文序列突变点亦发生在 1979 年, 突变点显著 $U = -6.09$ 。经 M-K 趋势分析 (表 3), 两个水文站突变年后径流量均呈跌落式减少, $Z_{\text{后, 张}} = -1.71, Z_{\text{后, 陶}} = -3.09$, 但两个站点的突变年前后减少趋势程度不一致。西沟陶来庙站相比张家口站在突变点后下降趋势更显著, 这可能是人类活动的差异造成的。清水

表 2 有序聚类分析结果

Tab. 2 The results of the sequential clustering method

| 水文站 | S* | 突变点 | 游程个数 k | 统计量 U | U _{a/2} | 显著性分析 |
|--------|------|--------|--------|-------|------------------|-------|
| 张家口站 | 1.36 | 1979 年 | 5 | -7.11 | 1.96 | 突变点显著 |
| 西沟响来庙站 | 1.80 | 1979 年 | 9 | -6.09 | 1.96 | 突变点显著 |

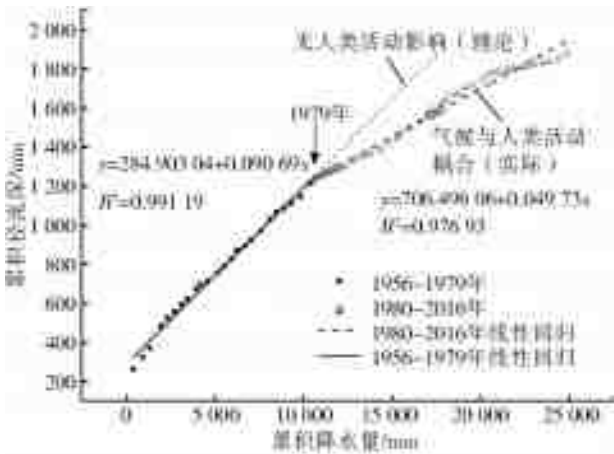


图 3 研究区流域径流-降水双累积曲线

Fig. 3 The double mass curve of runoff and precipitation in the study area

河流域突变点前的径流变化主要受降水变化的影响,而在突变点 1979 年之后,人类活动影响逐渐凸显,径流变化除了受到降水等自然因素的影响外,同时还叠加了人类活动的影响。

表 3 突变点前后 M-K 趋势检验结果

Tab. 3 Runoff trend before and after the mutation point by using MK test

| 水文站 | Z _前 | Z _后 |
|--------|----------------|----------------|
| 张家口站 | -0.89 | -1.71* |
| 西沟响来庙站 | -1.17 | -3.09*** |

注:“*”为在显著性水平 $\alpha=0.1$ 下趋势显著,“-”表示下降趋势。

2.1.3 径流演变的周期特征

径流周期变化结构复杂,往往是大尺度变化规律下镶嵌着小尺度周期变化。Morlet 小波分析结果显示,张家口站与西沟响来庙站年径流周期变化在整个时域上主要受 4、8、27 a 三个明显的主周期控制,27 a 为第一主周期(图 4 (a3)、4(b3))。自 1951 年开始,张家口站径流量存在 3~8 a 周期,振荡中心发生在 8 a,这一周期在 20 世纪 50 年代后期和 20 世纪 70—80 年代振荡明显,于 20 世纪 80 年代末消失;与此周期大致同时出现的是 21~32 a 周期,其振荡中心为 27 a,该周期在 20 世纪 50—60 年代振荡强烈,随 20 世纪 80 年代后径流量锐减而明显减弱(图 4(a1)、4(a2))。响来庙站 3~8 a 周期的出现、消失时间与张家口站相同,但这一周期仅在 20 世纪 70—80 年代振荡明显;与该周期同时存在的 24~30 a 周期振荡,在 20 世纪 50—60 年代振荡强烈,20 世纪 80 年代后出现明显减弱,并在 2005 年后周期振荡出现不稳定(图 4(b1)、4(b2))。

为了解清水河径流的年内周期性波动特征,以 7—10 月、11 月一次年 2 月分别为径流的丰水期与枯水期并进行小波分析。结果显示,二者周期振荡与年径流有所不同,特别是枯水期,其周期振荡更为复杂,在整个时域内主要受 10 a、27 a 两个明显的

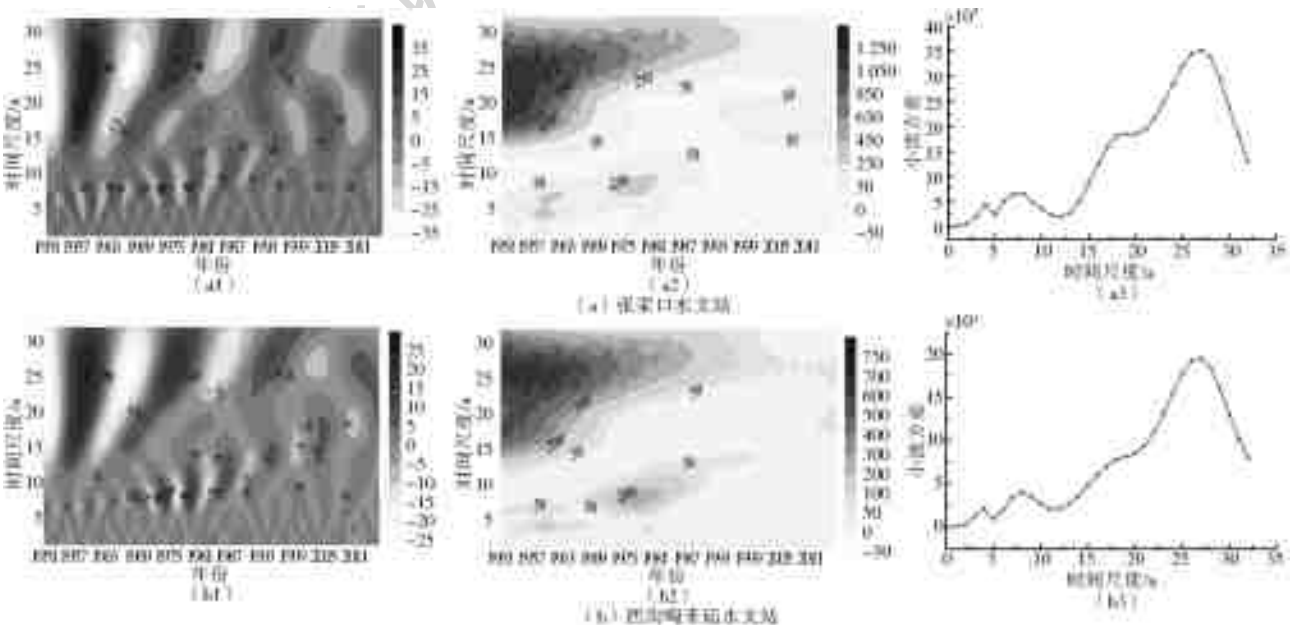


图 4 张家口站和响来庙站年径流序列的小波实系数(a1 和 b1)、模方值(a2 和 b2)与小波方差(a3 和 b3)

Fig. 4 Real part (a1 and b1) and Modular part time-frequency (a2 and b2) of wavelet transformation and wavelet variance (a3 and b3) of runoff of the Zhangjiakou and the Taolaimiao gauging station

主周期控制(图 5(b3));其同时期发生的周期振荡约 3 类,21~32 a 周期存在于整个时域,在 20 世纪 50—60 年代振荡强烈,于 20 世纪 80 年代后开始明显减弱;10 a 周期在 1970—2005 年振荡明显,其后消失;10~15 a 准周期从 20 世纪 60 年代到 20 世纪 70 年代中期振荡明显,20 世纪 80 年代后消失(图 5(b1)、5(b2))。丰水期周期振荡与张家口站年径流周期变化大体一致(图 5(a)),而不同的是丰水期周期振荡的第一主周期为 26 a。此外,由图 4、5 得知,

近 10~20 a 清水河流域除了存在具有全域性的 21~32 a 周期振荡外,还开始出现了 17~20 a 准周期变化,且现正处于径流偏多期。

综上所述,清水河流域西沟支流与干流周期演变整体上一致,但相比下,年内径流周期变化存在一定差异。1979 年突变后,随径流量的锐减,各尺度周期振荡明显减弱,小尺度周期振荡消失;近 10~20 a,流域径流正经历着 27 a 周期、19 a 准周期变化。

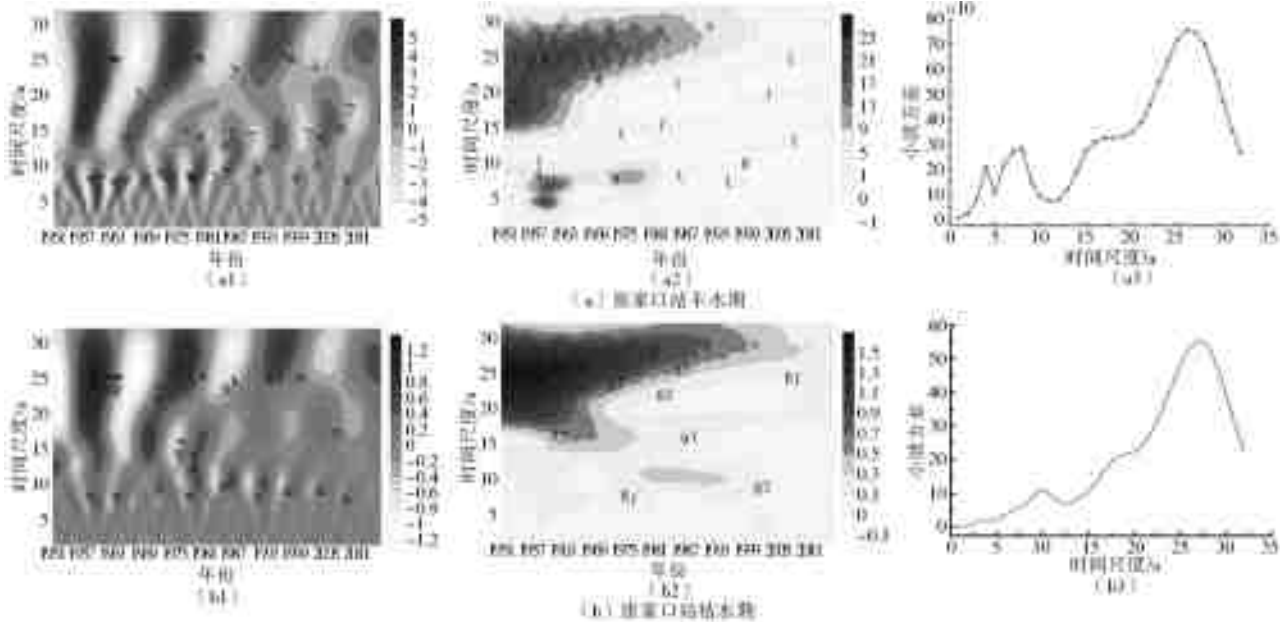


图 5 张家口站丰、枯水期径流序列的小波实系数(a1 和 b1)、模方值(a2 和 b2)与小波方差(a3 和 b3)

Fig. 5 Real part (a1 and b1) and Modular part time-frequency (a2 and b2) of wavelet transformation and wavelet variance (a3 and b3) of the low and high flow periods of the Zhangjiakou station

2.1.4 月径流量的演变特征

分析张家口站水文序列的各月多年平均值,清水河流域径流量年内分布呈双峰型(图 6),即峰值分别出现在 3 月和 8 月的两个汛期。春汛发生在 3 月,冬季融雪是清水河春汛形成的主要原因;夏汛发生在 8 月,主要是流域内降雨所致,这一时期的降水

比较频繁,径流量明显大于春汛。径流序列突变前后,月均径流总量减少了 59%,春、夏汛峰值则分别减少了 54%、64%。近 70 年,清水河流域年内分配不均匀系数呈波动增加趋势(图 7),表明年内径流不均匀性加剧,可能是近几年某些月份断流或植被覆盖变化造成。统计意义上,整个时域上年径流深与

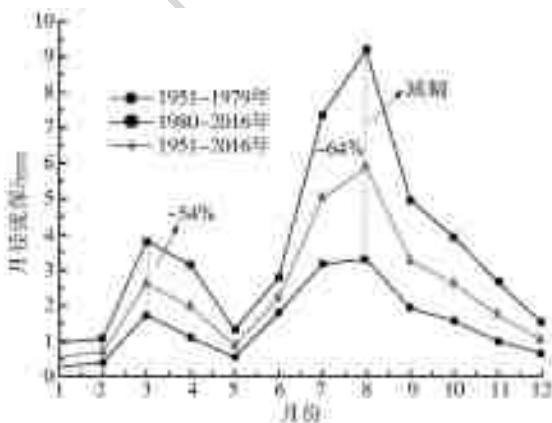


图 6 清水河流域月径流过程线

Fig. 6 Monthly runoff in the Qingshui River basin

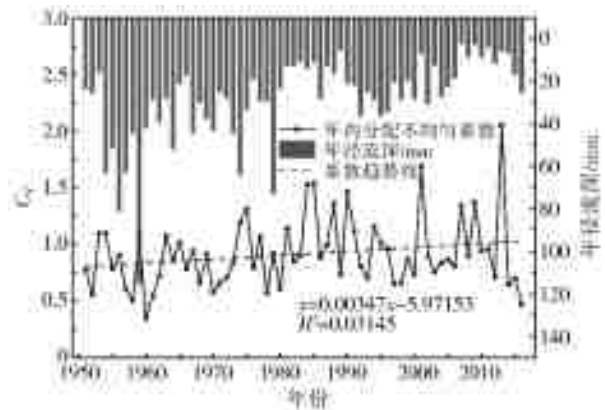


图 7 张家口水文站年内分配不均匀系数

Fig. 7 Unevenness of annual runoff distribution of Zhangjiakou station

年内不均匀系数呈负相关,随年径流量的剧烈减小,年内不均匀系数呈增加趋势,这对流域内水资源的开发利用极为不利。

流域内各月径流量皆呈显著减少趋势,而汛期径流的减少程度尤为剧烈。将3、4月径流量之和与水文年径流量的比值定义为春汛径流权重,同理,以7、8月计算夏汛径流权重。近70年,清水河流域春

汛权重为增加趋势(图8(a)),夏汛径流权重为减少趋势(图8(b)),而春(3、4月)、夏(7、8月)汛期径流总量在整个时域上皆呈减少趋势(图8(c)、(d)),且夏汛总量减少幅度相比春汛更大。由此可知,春汛期径流量对全年径流量贡献呈增加趋势,而夏汛期贡献呈减少趋势。

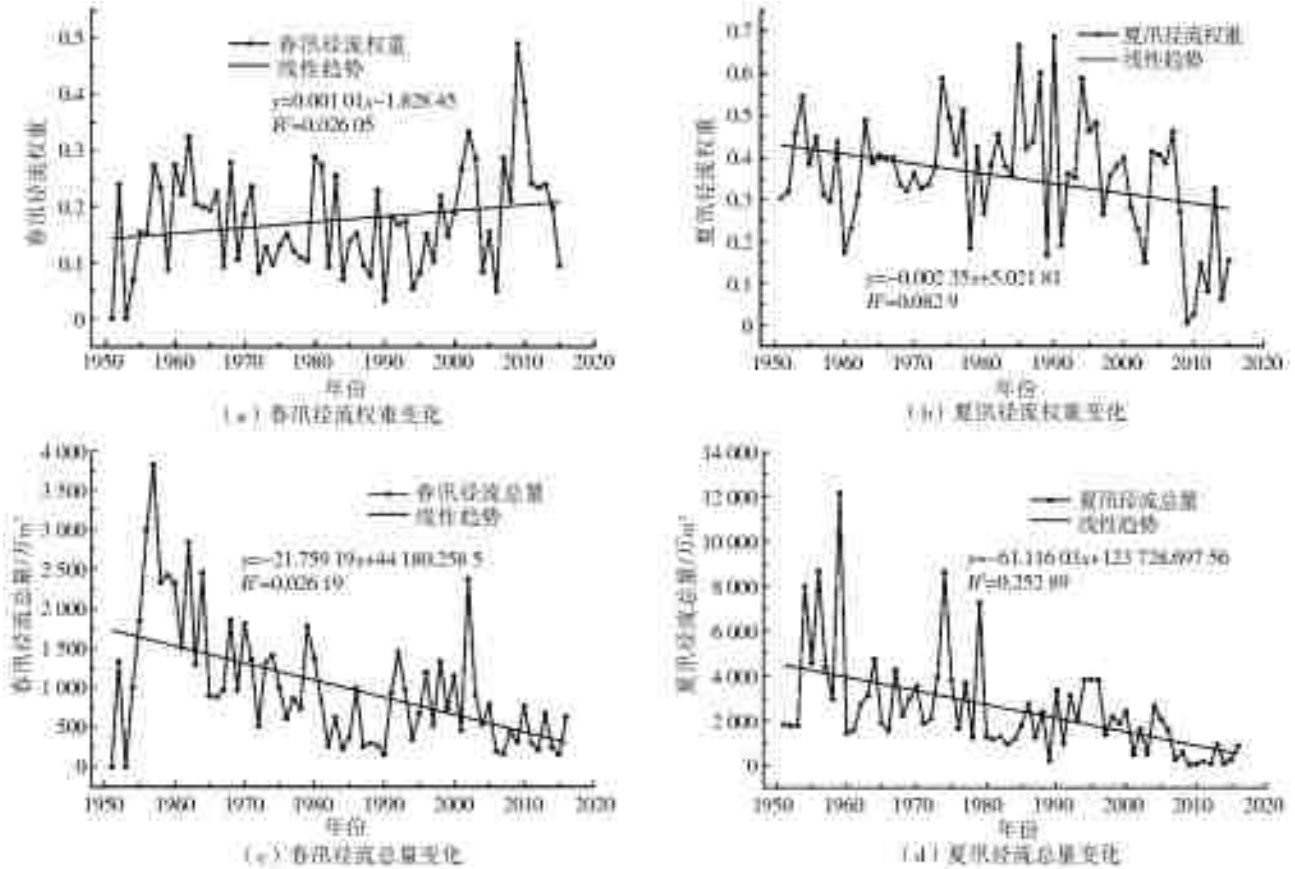


图8 研究区径流汛期变化

Fig. 8 Variation of runoff flood season in the study area

2.2 径流影响驱动力分析

2.2.1 气候变化的影响

寒区流域每完成一个水文周期要经过汛期、积雪与冻土形成、积雪与冻土融化,然后再进入另一个汛期3个阶段^[34]。清水河有明显的两个汛期,积雪与冻土融化、降雨是分别形成春夏两个汛期的主要原因。1960—2016年,流域多年平均降水量为438.5 mm,年降水量变化无明显趋势。秋、冬、春季降水增加(表4),其中秋季降水通过了置信度95%的显著性检验,春季降水的增加、夏季降水的减少皆趋于显著。20世纪80年代中期后,东亚夏季风的减弱可能是形成这一降水变化规律的主要原因^[35-36]。在空间分布上,流域内年均降水量呈现自东向西逐渐减少^[37]的规律。

流域内多年平均气温为8.6℃,年均气温呈显

表4 降水、气温 M-K 结果统计

Tab. 4 Statistics analysis of rainfall and temperature using M-K test

| 指标 | Z值 | | | | |
|----|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 年 | 春 | 夏 | 秋 | 冬 |
| 降水 | 0 | 1.033 | -1.246 | 2.106** | 0.53 |
| 气温 | 6.391*** | 4.985*** | 3.964*** | 4.462*** | 4.748*** |

注:“-”表示减少趋势,“**”表示0.05水平下显著。

著增加的趋势[Z=6.39,0.4℃/(10a)]。长周期下,流域累积降水气温曲线的斜率皆近似为直线,无明显变化(图9),即降水气温变化对径流的影响不明显。M-K结果显示,春夏秋冬四季气温均为显著增加趋势(表4),冬、春气温增加趋势比秋、夏更显著。冬季冻结期气温升高[约0.6℃/(10a)],季节性冻土退化可能减少对径流的补给,但气温升高导致的融雪增加可加大对径流的补给。冬春季融雪和降水的增加为加大春汛径流量对年径流量的贡献

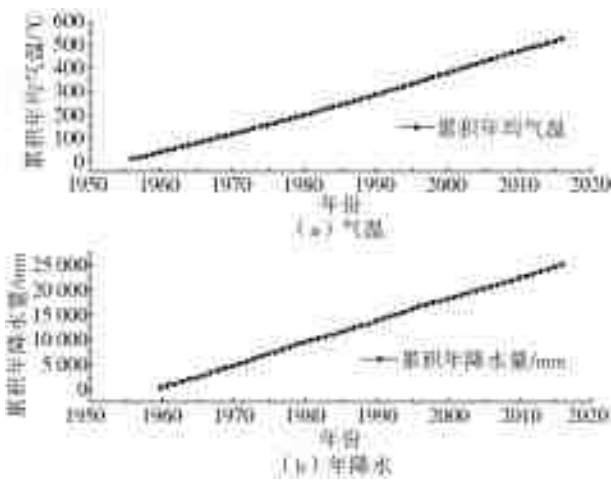


图 9 清水河流域累积气温、年降水过程线
Fig. 9 Cumulative annual runoff and temperature in the Qingshui River basin

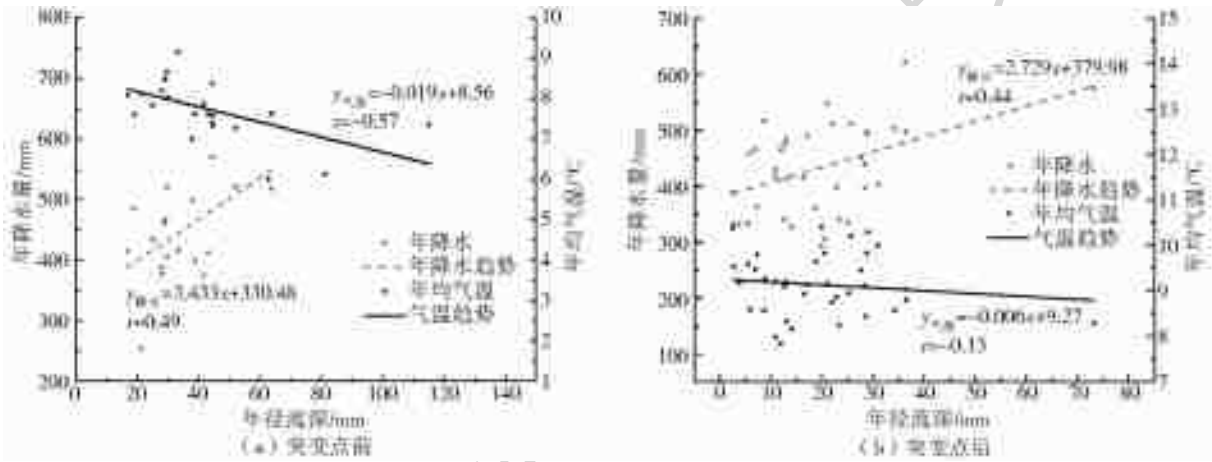


图 10 突变点前后相关性分析
Fig. 10 Results of correlation analysis before and after mutation point

径流量变化具有重要意义。

2015 年张家口市市区年末常住人口约 66.2 万人;随着城乡人口的不断增长(2013 年常住人口相比 1995 年增加 31.1%),社会经济的迅猛发展(2015 年 GDP 相比 2009 年增加了 85.4%),清水河流域土地利用的方式变化较大^[38]。由图 11 可知,流域上游常用耕地面积从 1949 年以来呈递减趋势,2013 年常用耕地面积相比 1949 年减少了 30.5%^[38],近 20 年耕地面积变化较小,耕地面积比较稳定。虽然常用耕地面积相对减少了,但有效灌溉面积 2016 年相比 1949 年增加了 8.8 倍,并呈增加趋势(约 1.8 km²/a)^[39]。粮食总产量自 1949 年到 20 世纪末呈现增加趋势,21 世纪以来逐渐稳定。1949—2016 年蔬菜总产量呈明显增加趋势,2016 年蔬菜总产量相比 1949 年增加了 186.8 倍^[39],致使蔬菜需水量大幅增加。蔬菜种植需水量与有效灌溉面积的成倍增加皆加大了对地表水资源的索取,导致清水河流域内农业用水需求量急剧增加。

提供了自然条件。据突变年前后年径流深、年降水、年均气温序列的相关性分析(图 10),突变前年径流与年降水的 Pearson 相关系数 r 为 0.49,与年均气温的相关系数 r 为 -0.57,相关性均显著,其中与气温的相关性通过了 0.01 显著性水平;突变年后年径流与年降水和年均气温的相关性都有所减弱,其相关系数分别为 0.44、-0.13,但径流与降水的相关性仍显著。

综上所述,清水河径流的减少是与该地区的气候变化(主要是降水)分不开的。但是,在相当程度上,径流的演化规律和气候的变化并不完全一致。

2.2.2 人类活动影响

人为因素中土地利用变化是影响河流径流量变化的主要因素之一。由于清水河流域大部分在崇礼县内,分析崇礼县土地利用变化对分析清水河

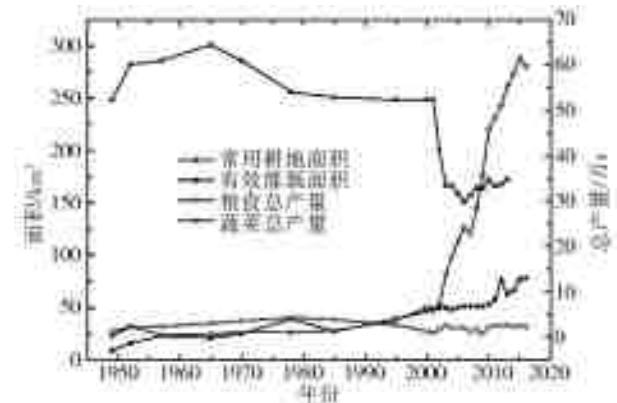


图 11 崇礼区耕地规模和农作物产量变化
Fig. 11 Change of land use and crop production in Chongli District

清水河三条支流虽然在地质地形上差别不大,但植被覆盖率大不相同。清水河上游流域植被覆盖空间差异大,植被覆盖自东向西逐渐降低,东沟流域的植被明显好于西沟植被^[37]。西沟流域内山岩裸露,植被最差,树木稀少不足 10%,植被覆盖率相比东沟、正沟都低,约为 2%^[22];而正沟植被覆盖率约

4.5%,植被条件介于东沟西沟之间^[40]。

在植被变化对流域径流量影响方面,国内外学者作了大量研究。Calder^[41]与 Sahin 等^[42]指出森林比灌木、作物、草地对径流量的影响大,森林面积增加,流域径流量减少,反之增加。贾静等^[43]也得出相似结论,林地具有涵养水源、减少径流量的作用。清水河上游流域 85%的区域受人为正向干扰,部分受负向干扰^[37]。流域内覆被变化大,树冠、草地和林地对降水和地表径流存在阻滞作用^[24],使洪峰发生时间延迟,自 2012 年后清水河流域夏汛径流已存在明显的滞后。1990—2015 年清水河流域林地(63.43%~44.09%)、草地(18.15%~30.09%)、耕地(17.00%~21.96%)土地利用类型占比大,同时,流域径流量与林地和草地变化成反向关系,即林地、草地面积增加,径流量减少,反之,径流量增加^[44]。在半干旱地区,蒸发能力远大于陆面蒸发量,植被蒸散所消耗的水量大于无林地区^[24]。因此,剧烈的人类活动对清水河流域径流演变产生了深刻的影响,特别是林地、草地面积占比大且草地占比增加对流域径流量减少的影响。

水利工程建设往往将改变区域内河流的水文情势,譬如通过改变河流下垫面,影响河流自然径流,从而影响区域水循环过程。北水源位于张家口水文站上游,日均处理水量 4 万 m³,是供张家口市区用水的主要供水厂,枯水期取水量约 3 万 m³/d,丰水期取水量约 6 万 m³/d。上游引水工程对下游张家口水文站的径流量变化形成了直接的影响,是影响张家口站径流量减少的重要因素。

2.2.3 径流影响定量分析

图 3 为清水河流域径流—降水双累积曲线。据径流—降水双累积曲线斜率发生变化的位置和有序聚类分析确定 1979 年为突变点,将流域径流序列分为基准期 1960—1979 年和变化期 1980—2016 年。在两个阶段的曲线拟合中,曲线斜率从 0.090 7 降至 0.049 73,衰减率为 45.2%,说明随着社会经济的急速发展和城镇化程度的加深,人类活动对流域径流产生了极大的影响。表 5 结果显示,人类活动影响径流减少量为 16.52 mm,贡献率为 88.88%,气候变化贡献率为 11.12%。因此,人类活动是导致清水河流域径流量减少的主要因素。

表 5 双累积曲线法定量分析结果

Tab. 5 Quantitative result analyzed by double mass curve method

| 水文站 | 时间 | 实测/mm | 模拟/mm | 气候 | | 人类活动 | |
|-----|-------------|-------|-------|--------|-------|--------|-------|
| | | | | 变化量/mm | 比例/% | 变化量/mm | 比例/% |
| 张家口 | 1960—1979 年 | 36.56 | 36.56 | -2.07 | 11.12 | 16.52 | 88.88 |
| | 1980—2016 年 | 17.97 | 34.50 | | | | |

3 结论与讨论

3.1 结论

(1)近 70 年来,清水河流域不同时间尺度、水文站的径流变化均呈显著减少趋势。其中,上游支流西沟陶来庙站的减少程度比张家口水文站大,同时,流域内春季径流深减少趋势最为强烈,丰枯水期次之,平均每年分别减少 0.12、0.1、0.02 mm。可能原因是更显著的人类活动干扰,关于人为因素的分解量化尚待进一步分析。

(2)流域张家口水文站与上游支流西沟陶来庙站均在 1979 年前后发生突变,突变后的径流量显著减少,但两个站点突变前后减少趋势程度不一致,西沟陶来庙站相比张家口站在突变点后下降趋势更剧烈,这可能是上游人类活动干扰差异所致。

(3)清水河流域年径流存在三个明显主周期(4,8,27 a),控制流域年径流在整个时间域内的变

化特征,其中 27 a 为第一主周期,贡献最大;丰枯水期的第一主周期分别为 26、27 a。随 20 世纪 80 年代后径流量的锐减,各尺度周期振荡明显减弱,小尺度周期振荡消失。近 10~20 a,流域径流正经历着 27 a 周期、19 a 准周期变化。

(4)清水河流域径流量年内分布呈双峰型,春夏汛分别发生在 3 与 8 月。突变后月径流总量相比突变前减少了 59%,汛期峰值分别减少了 54%、64%。整个时间域上,伴随年径流量的剧烈减小,年内不均匀系数呈增加趋势,径流年内不均匀性加剧。流域内各月径流均呈显著减少趋势,而汛期径流的减少程度尤为剧烈。同时,在年径流减少过程中,春汛径流对年径流量的贡献趋大,而夏汛在逐渐减弱。

(5)流域内径流的演化规律在一定程度上与气候的变化不完全一致,径流的变化主要受剧烈的人类活动影响,该影响对径流减少的贡献率约为 89%。

3.2 讨论

近几十年,在气候变化与人类活动的双重影响下,流域下垫面条件和产汇流机制发生明显变化^[45]。在这些变化中,以人类活动的影响最为显著,对生态环境的影响也日益加深,而降水等气候要素对径流的影响正在逐渐减弱^[46-48]。本研究表明,近 70 年清水河流域径流的年内分配不均匀性加剧,径流年际变化显著减小,且自突变点 1979 年后径流周期变化减弱,人类活动成为径流异变的主要原因,而流域内降水成为影响径流变化的次要因素。其他学者在本研究区周边流域也得到类似结果:例如,张树磊等^[49]研究指出,植被覆盖变化对径流过程的改变作用相比降水变化更为显著。张利茹^[8]等的研究也表明,年径流减小主要跟人类活动有关;其中潮白河流域下会站径流受人类活动影响最大,占比高达 81.7%。秦丽欢等^[33]也指出了人类活动对白河、潮河径流变化的贡献分别达到 90%和 75%左右。

气候变化与人类活动对径流的影响往往是综合的,如何实现这种综合影响的科学分解是研究中的一个关键问题^[50]。目前,对于清水河流域,有研究初步分析了清水河流域径流的年内年际变化^[21-22],而笔者则在前人的研究基础上,着重对影响径流演变的气候变化和人类活动因素进行了定量分析。考虑到人类活动对径流的影响既包括取用水产生的直接影响,也包括改变流域下垫面等活动产生的间接影响,笔者运用径流-降水双累积曲线法对气候变化和人类活动总体的相对贡献进行了量化,而如农业开发、植树造林和城市建设等更为细致的人类活动对径流过程的影响还有待进一步的研究。

参考文献(References):

[1] 宋晓猛,张建云,占车生,等. 气候变化和人类活动对水文循环影响研究进展[J]. 水利学报, 2013, 44(7): 779-790. (SONG X M, ZHANG J Y, ZHAN C S, et al. Review for impacts of climate change and human activities on water cycle[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(7): 779-790. (in Chinese)) DOI: 10. 13243/j. cnki. slxb. 2013. 07. 001.

[2] 高彦春,王金凤,封志明. 白洋淀流域气温、降水和径流变化特征及其相互响应关系[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(4): 467-477. (GAO Y C, WANG J F, FENG Z M. Variation trend and response relationship of temperature, precipitation and runoff in Baiyangdian Lake basin[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(4): 467-477. (in Chinese)) DOI: 10. 13930/j.

cnki. cjea. 160784.

[3] 刘艺,雷晓云,马红刚,等. 巴音沟河近 60 年出山口年径流量演变规律[J]. 水土保持研究, 2016, 23(2): 139-142. (LIU Y, LEI X Y, MA H G, et al. Characteristics of runoff from mountainous watershed of Bayingou River basin in recent 60 years[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(2): 139-142. (in Chinese)) DOI: 10. 13869/j. cnki. rswc. 2016. 02. 026.

[4] 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. (ZHANG J Y, HE R M, QI J, et al. A new perspective on water issues in north China[J]. Advances in Water Science, 2013, 24(3): 303-310. (in Chinese)) DOI: 10. 14042/j. cnki. 32. 1309. 2013. 03. 001.

[5] 刘家宏,秦大庸,王浩,等. 海河流域二元水循环模式及其演化规律[J]. 科学通报, 2010, 55(6): 512-521. (LIU J H, QIN D Y, WANG H, et al. The pattern and evolution of binary water cycle in Haihe River basin[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(6): 512-521. (in Chinese)) DOI: 10. 1007/s11434-010-0043-4.

[6] XU X Y, YANG D W, YANG H B, et al. Attribution analysis based on the Budyko hypothesis for detecting the dominant cause of runoff decline in Haihe basin[J]. Journal of Hydrology, 2014, 510: 530-540. DOI: 10. 1016/j. jhydrol. 2013. 12. 052.

[7] BAO Z X, ZHANG J Y, WANG G Q, et al. Attribution for decreasing streamflow of the Haihe River basin, northern China: Climate variability or human activities[J]. Journal of Hydrology, 2012, 460(3): 117-129. DOI: 10. 1016/j. jhydrol. 2012. 06. 054.

[8] 张利茹,贺永会,唐跃平,等. 海河流域径流变化趋势及其归因分析[J]. 水利水运工程学报, 2017(4): 59-66. (ZHANG L R, HE Y H, TANG Y P, et al. Analysis of runoff change trend and its attribution in Haihe River basin[J]. Hydro-Science and Engineering, 2017(4): 59-66. (in Chinese)) DOI: 10. 16198/j. cnki. 1009-640X. 2017. 04. 009.

[9] 鲍振鑫,张建云,严小林,等. 环境变化背景下海河流域水文特征演变规律[J]. 水电能源科学, 2014, 32(10): 1-5. (BAO Z X, ZHANG J Y, YAN X L, et al. Evolution law of hydrologic elements under environmental change in Haihe River basin[J]. Water Resources and Power, 2014, 23(10): 1-5. (in Chinese))

[10] 山成菊,董增川,付晓花,等. 近 50 年来滦河流域径流演变规律研究[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(4): 5-8. (SHAN C J, DONG Z C, FU X H, et al. Rules of runoff variation in Luanhe River basin in recent 50 years[J]. South-to-North Water Transfers

- and Water Science & Technology, 2013, 11(4): 5-8. (in Chinese)) DOI: 10. 3724/SP. J. 1201. 2013. 04005.
- [11] 付晓花,董增川,刘晨,等. 滦河流域径流变化及其驱动力分析[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(5): 6-10. (FU X H, DONG Z C, LIU C, et al. Analysis of runoff variation and its related driving forces in the Luanhe River basin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 11(5): 6-10. (in Chinese)) DOI: 10. 3724/SP. J. 1201. 2013. 05006.
- [12] 袁喆,杨志勇,董国强. 近 47 年来降水变化和人类活动对滦河流域年径流量的影响[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(4): 66-69. (YUAN Z, YANG Z Y, DONG G Q. Impacts of precipitation changes and human activities on annual runoff in the Luanhe River basin during recent 47 years [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2012, 10(4): 66-69. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1672-1683. 2012. 04. 016.
- [13] 褚永军,李明,原彪,等. 永定河上游清水河年径流序列特性分析及其随机模拟[J]. 水文, 2011, 31(2): 35-37. (ZHU Y J, LI M, YUAN B, et al. Analysis of annual runoff series of Qingshuihe River and concerned random simulation[J]. Journal of China Hydrology, 2011, 31(2): 35-37. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-0852. 2011. 02. 008.
- [14] 万思成,张建云,王国庆,等. 漳河上游径流变化特性分析[J]. 水资源与水工程学报, 2015(6): 7-11, 18. (WAN S C, ZHANG J Y, WANG G Q, et al. Characteristics of runoff variation in upper Zhanghe River watershed[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2015(6): 7-11, 18. (in Chinese)) DOI: 10. 11705/j. issn. 1672-643X. 2015. 06. 02.
- [15] 刘宏权. 张家口市永定河流域气候变化及其对水文水资源系统的影响[D]. 保定: 河北农业大学, 2013. (LOU H Q. Regional climatic variability and its influence on hydrology and water resources in Yongding River basin of Zhangjiakou[D]. Baoding: Agricultural University of Hebei, 2013. (in Chinese))
- [16] 张克阳,陈沫宇. 近 30 年来清水河上游西沟降水径流变化及原因分析[J]. 海河水利, 2016(3): 37-39. (ZHANG K Y, CHEN M Y. Analysis on the change and reasons for the change of rainfall-runoff in Xigou basin in the upstream of Qingshui River in the past three decades[J]. Haihe Water Resources, 2016(3): 37-39. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1004-7328. 2016. 03. 013.
- [17] 符淙斌,温刚. 中国北方干旱化的几个问题[J]. 气候与环境研究, 2002, 7(1): 22-29. (FU C B, WEN G. Several issues on aridification in the northern China [J]. Climatic and Environmental Research, 2002, 7(1): 22-29. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1006-9585. 2002. 01. 003.
- [18] 穆兴民,张秀勤,高鹏,等. 双累积曲线方法理论及在水文气象领域应用中应注意的问题[J]. 水文, 2010, 30(4): 47-51. (MU X M, ZHANG X Q, GAO P, et al. Theory of double mass curves and its applications in hydrology and meteorology[J]. Hydrology, 2010, 30(4): 47-51. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-0852. 2010. 04. 011.
- [19] 刘剑宇,张强,顾西辉. 水文变异条件下鄱阳湖流域的生态流量[J]. 生态学报, 2015, 35(16): 5477-5485. (LIU J Y, ZHANG Q, GU X H. Evaluation of ecological flow with considerations of hydrological alterations in the Poyang Lake basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(16): 5477-5485. (in Chinese)) DOI: 10. 5846/stxb201404080664.
- [20] 邱玲花,彭定志,林荷娟,等. 气候变化与人类活动对太湖西苕溪流域水文水资源影响甄别[J]. 水文, 2015, 35(1): 45-50. (QIU L H, PENG D Z, LIN H J, et al. Quantitative discrimination of climate change and human activities impacting on runoff in Xitiaoxi River basin[J]. Journal of China Hydrology, 2015, 35(1): 45-50. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-0852. 2015. 01. 008.
- [21] 何挺. 清水河流域多年径流量变化特征分析[J]. 海河水利, 2017(3): 8-11, 14. (HE T. Characteristics of runoff variation in Qingshui River basin over the years[J]. Haihe Water Resources, 2017(3): 8-11, 14. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1004-7328. 2017. 03. 002.
- [22] 刘三龙. 清水河张家口以上流域径流变化分析[A]. 中国水利学会 2010 学术年会论文集(上册)[C]. 贵阳, 2010. (LIU S L. Runoff variation analysis of Qingshui River above Zhangjiakou watershed [A]. China Water Conservancy Institute of 2010 Academic Essays (I)[C]. Guiyang, 2010. (in Chinese))
- [23] 丁杰,杨新兵,朱辰光,等. 崇礼清水河流域土壤侵蚀空间格局及其影响因素研究[J]. 水土保持学报, 2018, 32(4): 73-80. (DING J, YANG X B, ZHU C G, et al. Spatial pattern and influence factors of soil erosion of Qingshui River basin in Chongli[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(4): 73-80. (in Chinese)) DOI: CNKI: SUN: TRQS. 0. 2018-04-012.
- [24] 王焕榜,石玉波. 以清水河流域为例看森林在干旱

- 地区的水文效应[J]. 地理与地理信息科学, 1985 (1):45-50. (WANG H B, SHI Y B. Take Qingshui River basin as an example to study the hydrological effects of forests in semi-arid areas[J]. Geography and Geo-information Science, 1985 (1):45-50. (in Chinese))
- [25] CHEBANA F, OUARDA T B M J, DUONG T C. Testing for multivariate trends in hydrologic frequency analysis[J]. Journal of Hydrology, 2013, 486: 519-530. DOI:10.1016/j.jhydrol.2013.01.007.
- [26] 潘娅英, 骆月珍, 王亚男, 等. 新安江流域降水、径流演变特征分析[J]. 水土保持研究, 2018, 25(6): 125-129. (PAN Y Y, LUO Y Z, WANG Y N, et al. Characteristics of evolution of precipitation and runoff in Xin'An River basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(6): 125-129. (in Chinese)) DOI:CNKI;SUN;STBY. 0. 2018-06-018.
- [27] 王豪杰, 左其亭, 罗增良. 沙颍河代表站径流演变特征及归因分析[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(5): 36-42. (WANG H J, ZUO Q T, LUO Z L. Runoff evolution characteristics of a typical station in Shayinghe River basin and attribution analysis[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(5): 36-42. (in Chinese)) DOI:10.13476/j.cnki.nsbdkq.2017.05.006.
- [28] MANN H B. Nonparametric tests against trend[J]. Econometrica, 1945, 13(3): 245-259. DOI: 10.2307/1907187.
- [29] 袁满, 王文圣, 叶濒麟. 有序聚类分析法的改进及其在水文序列突变点识别中的应用[J]. 水文, 2017, 37(5): 8-11. (YUAN M, WANG W S, YE B L. Improvement of sequential clustering method and its application to diagnose jump points of hydrological series[J]. Journal of China Hydrology, 2017, 37(5): 8-11. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-0852.2017.05.002.
- [30] 古丽孜巴·艾尼瓦尔, 麦麦提吐尔逊·艾则孜, 米热古丽·艾尼瓦尔, 等. 基于小波分析 1956-2010 年焉耆盆地清水河径流量季节变化规律[J]. 水土保持研究, 2016, 23(1): 210-214. (ANWAR G L Z B, EZIZ M M T T E X, ANWAR M R G L, et al. The seasonal runoff variation of Qingshui River in Yanqi basin during period from 1956 to 2010 based on Wavelet analysis[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(1): 210-214. (in Chinese)) DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2016.01.032.
- [31] 刘二佳, 张晓萍, 张建军, 等. 1956—2005 年窟野河径流变化及人类活动对径流的影响分析[J]. 自然资源学报, 2013, 28(7): 1159-1168. (LIU E J, ZHANG X P, ZHANG J J, et al. Variation of annual streamflow and the effect of human activity in the Kuye River during 1956 to 2005 [J]. Journal of Natural Resources, 2013, 28(7): 1159-1168. (in Chinese)) DOI: 10.11849/zrzyxb.2013.07.008.
- [32] 王欢, 李栋梁, 蒋元春. 1956—2012 年黄河源区流量演变的新特征及其成因[J]. 冰川冻土, 2014, 36(2): 403-412. (WANG H, LI D L, JIANG Y C. Characteristics and reasons of the runoff variation in source regions of the Yellow River during 1956 to 2012[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(2): 403-412. (in Chinese)) DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2014.0049.
- [33] 秦丽欢, 周敬祥, 李叙勇, 等. 密云水库上游径流变化趋势及影响因素[J]. 生态学报, 2018, 38(6): 1941-1951. (QIN L H, ZHOU J X, LI X Y, et al. Attribution analysis of changes in runoff in the upstream of the Miyun Reservoir[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(6): 1941-1951. (in Chinese)) DOI: 10.5846/stxb201609301980.
- [34] 关志成. 寒区流域水文模拟研究[D]. 南京: 河海大学, 2004. (GUAN Z C. Modeling the hydrological process of drainages in cold regions[D]. Nanjing: Hohai University, Doctoral Dissertation, 2004. (in Chinese))
- [35] YANG H, ZHI X F, GAO J, et al. Variation of East Asian summer monsoon and its relationship with precipitation of China in recent 111 years[J]. Agricultural Science & Technology, 2011, 12(11): 1711-1716. DOI: 10.3969/j.issn.1009-4229-B.2011.11.038
- [36] 丁一汇, 司东, 柳艳菊, 等. 论东亚夏季风的特征、驱动力与年代际变化[J]. 大气科学, 2018, 42(3): 533-558. (DING Y H, SI D, LIU Y J, et al. On the characteristics, driving forces and inter-decadal variability of the East Asian summer monsoon [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2018, 42(3): 533-558. (in Chinese)) DOI:CNKI;SUN;DQXK. 0. 2018-03-006.
- [37] 蔺星娜, 牛健植, 贾京伟, 等. 张家口清水河上游流域植被指数时空变化特征[J]. 中国水土保持科学, 2018, 16(1): 123-130. (LIN X N, NIU J Z, JIA J W, et al. Spatial-temporal variation of vegetation in Qingshui River basin, Zhangjiakou[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2018, 16(1): 123-130. (in Chinese)) DOI:10.16843/j.sswc.2018.01.016
- [38] 方继斌. 张家口经济年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2016. (FANG J B. Zhangjiakou Economy Yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2016. (in Chinese))
- [39] 张文浩. 张家口经济年鉴[M]. 北京: 中国统计出版

- 社, 2017. (ZHANG W H. Zhangjiakou Economy Yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2017. (in Chinese))
- [40] 班富孝. 清水河流域上游水土流失及其治理措施探讨[J]. 地下水, 2010, 32(3): 171-172. (BAN F X. Discussion on soil erosion and its control measures in the Upper Qingshui River basin[J]. Underground Water, 2010, 32(3): 171-172. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1004-1184. 2010. 03. 070.
- [41] CALDER I R. Land use impacts on water resources [A]. Background Paper No. 1. In Land-water Linkages in Rural Watersheds [C]. Electronic Workshop, FAO: Rome, 18 September-27 October, 2000.
- [42] SAHIN V, HALL M J. The effects of afforestation and deforestation on water yields [J]. Journal of Hydrology, 1996, (178): 293-309.
- [43] 贾静, 石晓丽. 土地利用/覆被变化对区域径流的影响——以秦皇岛地区为例[J]. 地理与地理信息科学, 2017, 33(2): 108-114. (JIA J, SHI X L. Impacts of land use/land cover change on the runoff of Qinhuangdao area [J]. Geography and Geo-Information Science, 2017, 33(2): 108-114. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1672-0504. 2017. 02. 018.
- [44] 王磊. 清水河流域土地利用变化对径流的影响研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2018. (WANG L. Impacts of land use change on runoff in Qingshui River basin [D]. Baoding: Agricultural University of Hebei, Master Dissertation, 2018. (in Chinese))
- [45] 李继清, 朱一鸣, 李建昌, 等. 变化环境对潮河下游径流一致性的影响[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(3): 5-12. (LI J Q, ZHU Y M, LI J C, et al. Impacts of changing environment on runoff consistency in the lower reaches of Chao River [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(3): 5-12. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2017. 03. 002.
- [46] 张敬平, 黄强, 赵雪花. 漳泽水库水文序列突变分析方法比较[J]. 应用基础与工程科学学报, 2013, 21(5): 837-844. (ZHANG J P, HUANG Q, ZHAO X H. Comparative research on abrupt change analysis methods for hydrological time series in Zhangze Reservoir[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2013, 21(5): 837-844. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1005-0930. 2013. 05. 004.
- [47] 高迎春, 姚治君, 刘宝勤, 等. 密云水库入库径流变化趋势及动因分析[J]. 地理科学进展, 2002, 21(6): 546-553. (GAO Y C, YAO Z J, LIU B Q, et al. Evolution trend of Miyun Reservoir inflow and its motivating factors analysis[J]. Progress in Geography, 2002, 21(6): 546-553. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1007-6301. 2002. 06. 004.
- [48] 李子君, 李秀彬. 水利水保措施对潮河流域年径流量的影响: 基于经验统计模型的评估[J]. 地理学报, 2008, 63(9): 958-968. (LI Z J, LI X B. Impacts of engineering measures for water conservancy on annual runoff in the Chaohe River basin based on an empirical statistical model[J]. Acta Geographica Sinica, 2008, 63(9): 958-968. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn. 0375-5444. 2008. 09. 006.
- [49] 张树磊, 杨大文, 杨汉波, 等. 1960—2010年中国主要流域径流量减小原因探讨分析[J]. 水科学进展, 2015, 26(5): 605-613. (ZHANG S L, YANG D W, YANG H B, et al. Analysis of the dominant causes for runoff reduction in five major basins over China during 1960 to 2010[J]. Advances in Water Science, 2015, 26(5): 605-613. (in Chinese)) DOI: 10. 14042/j. cnki. 32. 1309. 2015. 05. 001.
- [50] 夏军, 马协一, 邹磊, 等. 气候变化和人类活动对汉江上游径流变化影响的定量研究[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(1): 1-6. (XIA J, MA X Y, ZOU L, et al. Quantitative analysis of the effects of climate change and human activities on runoff in the upper Hanjiang River basin [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(1): 1-6. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2017. 01. 001.