

大靖河径流变化特征及其对气候变化和人类活动的响应

孙红月，贾飞飞，李 鑫，孙翠洋

辽宁师范大学 地理科学学院，大连 116029

摘要：流域径流变化及其影响因素的研究对流域水资源的可持续开发利用以及改善流域的生态环境具有重要意义。以大靖河流域1956—2016年水文气象数据为基础，分析了近61年来大靖河径流的年内、年际变化特征，并定量评估了气候变化和人类活动对径流变化的影响。结果表明：大靖河径流年内分配不均，主要集中在7—10月，占全年径流的60.98%；1956年以来大靖河径流以 $1.1 \times 10^5 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ 的速率递减，Hurst指数为0.69，表明大靖河径流在未来一段时间将继续呈递减趋势；大靖河径流存在4个震荡周期，分别为2—5 a、8—13 a、17—24 a及35—45 a左右，降水的震荡周期（8—13 a、17—24 a及35—47 a）与径流周期具有较好的一致性；气候变化对大靖河径流减少的贡献率为4.7%，人类活动的贡献率为95.3%，这可能与研究区土地利用方式变化有关。

关键词：径流；气候变化；人类活动；大靖河

The variation characteristics of runoff in Dajing River and its response to climate change and human activities

SUN Hongyue, JIA Feifei, LI Xin, SUN Cuiyang

School of Geography, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China

Abstract: *Background, aim, and scope* In recent years, with global climate change and the intensification of human activities, the runoff of many rivers has decreased. This not only aggravates the contradiction between supply and demand of water resources, but also brings many ecological and environmental problems. Dajing River, located in the southeast of Gulang County, Gansu Province, is a tributary of the Shiyang River system. This study analyzes the runoff variation characteristics and its influencing factors of Dajing River, which is of great significance to the sustainable development of the basin. *Materials and methods* Based on the hydrological and meteorological data from 1956 to 2016 in the Dajing River Basin, we first analyzed the annual and interannual characteristics of runoff variation in Dajing River using R/S analysis, Morlet wavelet analysis, sliding correlation method, cumulative anomaly method, and Mann-Kendall mutation test method. Then we quantitatively evaluated the effect of climate and human activities on the runoff using the method of cumulant slope change rate. *Results* The

收稿日期：2019-05-09；录用日期：2019-07-22；网络出版：2019-07-29

Received Date: 2019-05-09; **Accepted Date:** 2019-07-22; **Online first:** 2019-07-29

基金项目：国家自然科学基金（41601190）

Foundation Item: National Natural Science Foundation of China (41601190)

通信作者：贾飞飞，E-mail: jiafeifei15@163.com

Corresponding Author: JIA Feifei, E-mail: jiafeifei15@163.com

引用格式：孙红月, 贾飞飞, 李 鑫, 等. 2020. 大靖河径流变化特征及其对气候变化和人类活动的响应 [J]. 地球环境学报, 11(4): 364–375.

Citation: Sun H Y, Jia F F, Li X, et al. 2020. The variation characteristics of runoff in Dajing River and its response to climate change and human activities [J]. *Journal of Earth Environment*, 11(4): 364–375.

Dajing River runoff is unevenly distributed within a year. The peak period of the runoff is from July to October, accounting for 60.98% of the total amount of the annual runoff; since 1956, the Dajing River runoff has decreased at a rate of $1.1 \times 10^5 \text{ m}^3$ per year, and the Hurst index is 0.69, indicating that the Dajing River runoff will continue to decrease trend in future days. There are four oscillation periods in the Dajing River runoff, 2—5 a, 8—13 a, 17—24 a and 35—45 a, respectively, which are consistent with the oscillation period of precipitation (8—13 a, 17—24 a and 35—47 a). **Discussion** The year of abrupt change of Dajing River runoff is 2004. The whole runoff series is divided into two stages according to the abrupt change year. Compared with the base period, the runoff in the variation period has decreased, while the precipitation and evaporation have increased. Climate change and human activities are the main factors leading to the runoff change of Dajing River. The contribution rates of climate change and human activities to runoff change are 4.7% and 95.3% respectively. **Conclusions** The Dajing River runoff will continue to decline in the future. Through a periodic analysis, we found a relatively consistent periodic change rule between the runoff and the precipitation. However, even though the Dajing River runoff shows a positive response to precipitation and temperature, human activities still play a leading role in the reduction of the Dajing River runoff. **Recommendations and perspectives** The results from analyses of the characteristics of the Dajing River runoff and its influencing factors may help us understand more about the law of runoff variation in the Dajing River, as well as may play an important role in rationally allocating water resources in this area and predicting future runoff changes.

Key words: runoff; climate change; human activity; Dajing River

河流径流在维持流域水量平衡中发挥了重要的作用, 对改善地区生态环境和扩大经济发展规模具有重要意义(陈亚宁等, 2009; 徐万玲等, 2013; 刘艺等, 2016; 于婵等, 2019)。随着人类活动对径流产生的影响不断增强, 一些河流的径流明显减少, 甚至出现干涸或断流的现象, 这不仅削弱了河流的生态功能, 还带来了很多生态问题(丁爱中等, 2013; 姚正学等, 2016; 杨思雨等, 2019)。针对我国各大江河的径流变化规律及其驱动因子, 国内许多学者已经开展了深入研究(曾思栋等, 2013; 陈亚宁等, 2014; 马龙等, 2015; 张倩等, 2016)。李二辉等(2014)在研究黄河上中游径流演变规律时表明, 1958年以来黄河径流持续递减, 1972—1998年甚至出现了多年断流现象, 而这种现象在20世纪90年代更为突出, 其中降水减少和水利工程的影响是导致黄河上中游径流减少的两大影响因子(陈霖巍和穆兴民, 2000)。代稳等(2016)对长江中游1961—2014年径流变化的研究也表明, 伴随着降水的减少, 长江中游地区径流多年来一直处于持续减少的状态, 2006—2014年人类活动对径流减少发挥了主导作用。目前, 我国许多河流都面临着径流减少的问题, 虽然自然因素是径流变化的主要驱动因子, 但近几年人类活动对径流的影

响正在逐渐增大。

我国西北干旱区河流主要依靠降水、冰雪融水和地下水补给, 径流变化波动性较大; 同时区域生态系统较脆弱, 受全球气候变暖影响, 河流径流减少导致的生态问题在干旱区尤为突出(陈忠升, 2016)。大靖河是甘肃河西走廊内陆河石羊河的一条支流, 为当地居民各种生产和生活提供用水, 但近年来随着人类经济活动规模的加大, 流域下游地区增加地下水开采量维持生产生活(张宏, 2012), 而大靖河流域地下水资源含量也较为紧缺, 仅约为 $20 \times 10^5 \text{ m}^3$, 从而导致本区水资源供需矛盾突出(刘明春等, 2013)。因此本文利用大靖河流域水文和气象数据分析大靖河径流年内、年际变化特征, 并定量评估气候变化和人类活动对径流变化做出的贡献, 不仅可以深入认识大靖河径流变化规律, 对本区水资源的合理配置以及未来径流变化预测也具有重要作用。

1 研究区概况、数据和研究方法

1.1 研究区概况

大靖河地处甘肃省古浪县东南部大靖盆地, 是石羊河八大支流之一, 发源于祁连山东部毛毛山北麓, 由支流大直沟、酸茨沟、条子沟、庄浪沟组成, 主河道全长约45 km, 河水并入大靖水库后, 又经

大靖峡出山流入平原，消失于海子滩、腾格里沙漠（马德芬，2012；甘肃省水利厅石羊河流域管理局，2016）。流域地势南高北低，面积为 460 km^2 ，地表水资源总量为 0.13 亿 m^3 （王志梅，2014）。本区属温带大陆性干旱气候，多年平均气温 8.55℃，多年平均降水量 182.29 mm，主要集中在 6—9 月；多年平均蒸发量 1627 mm，年日照时数

2346 h（张建军，2011）。大靖河主河道流经横梁、民权、大靖以及海子滩等乡镇，其中大靖镇是甘肃省四大古镇之一，历史悠久，曾是古代丝绸之路河西走廊东线所经过的重镇，目前已经成为古浪县东部 12 个乡镇的文化、商贸以及经济中心（祁兴川和李晓云，2010；申培德和张晟福，2012）。

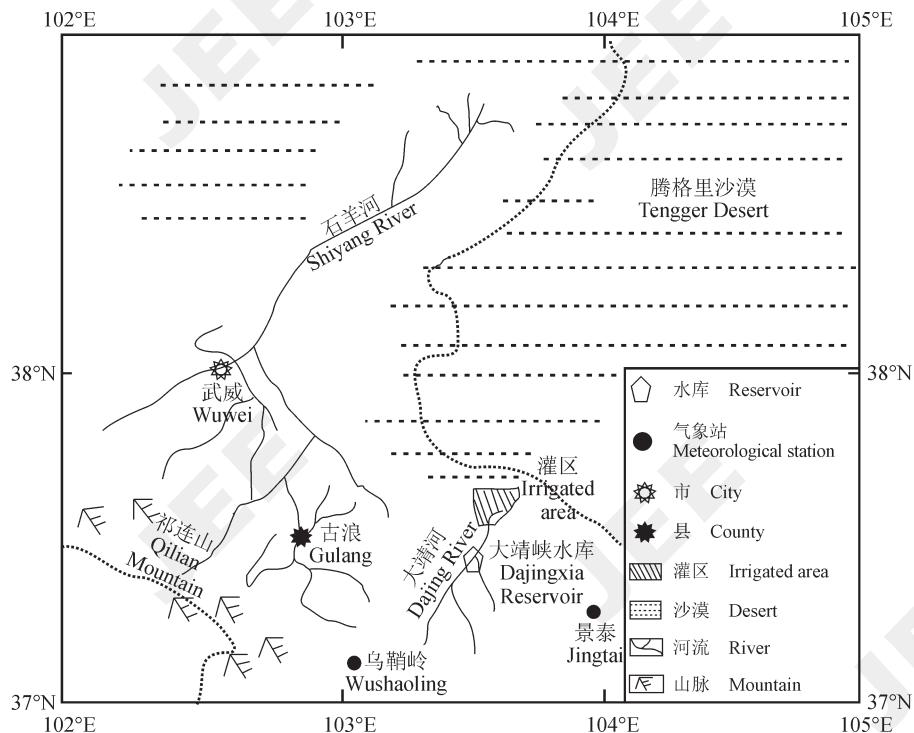


图 1 研究区概况图
Fig.1 Survey map of study area

1.2 数据来源

大靖峡水库水文站数据来自甘肃省水文水资源局 (<http://slt.gansu.gov.cn/>)，时间区间为 1956—2016 年，1986—1988 年各月平均径流量数据缺失，利用线性插值法对缺失的月均径流量数据进行了补充。气象数据来源于中国气象科学服务网 (<https://data.cma.cn/>)。大靖河流域内气象站点十分稀疏，本文选用位于河源附近的乌鞘岭气象站 (102°52'E, 37°07'N) 以及位于河流中游地区的景泰气象站 (104°01'E, 37°10'N) 的气象数据进行分析，时间序列为 1956—2016 年。相同时序的水面蒸发量数据通过高桥公式（高桥浩一郎和王长根，1980）计算得出。

1.3 研究方法

本文利用变异系数和年极值比来判断大靖河径流的波动幅度（王绪娟和门宝辉，2013），同时依据 R/S 分析法（潘国营等，2015；刘星根，2019）求出的 Hurst 指数 (H) 预测未来大靖河径流变化趋势。当 $0.5 < H \leq 1$ 时，表明径流未来变化趋势将与之前的趋势相同； $0 < H \leq 0.5$ 时，径流将呈现与过去相反的趋势； $H=0.5$ 时，无法确定径流未来的变化趋势（姚俊强等，2015）。通过距平百分比对大靖河年径流进行干枯特性分析（张雪琪等，2019），利用 Morlet 小波分析法（祁文燕等，2018；冯禹昊和朱江玲，2019）对大靖河径流和降水变化进行周期分析，采用滑动相关法

(林学椿, 1978) 分析多年径流与降水和气温之间的响应关系, 最后, 综合运用累积距平法(焦玮等, 2015) 和 Mann-Kendall 突变检验法(郭爱军等, 2014; 陈致君等, 2018) 判断径流突变年份。利用累积量斜率变化率比较法, 定量评估气候变化和人类活动对径流的贡献率, 计算出的贡献率不是各个影响因素对总径流量的贡献率, 而是对径流实际发生变化部分的贡献率(王随继等, 2012, 2013), 具体计算步骤如下:

假设在拐点前年份与累积径流、累积降水以及累积蒸发量的线性关系的斜率分别为 K_{R1} (单位为 10^8 m^3)、 K_{P1} (单位为 $\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$) 以及 K_{E1} (单位为 $\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$), 在拐点后的斜率分别为 K_{R2} (单位为 10^8 m^3)、 K_{P2} (单位为 $\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$) 以及 K_{E2} (单位为 $\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$), 那么降水对径流量变化的贡献率(W_p , 单位为 %) 的表达式为:

$$W_p = (|K_{P2} - K_{P1}| - 1) / (|K_{R2} - K_{R1}| - 1) \times 100 \quad (1)$$

蒸散发对径流变化的贡献率(W_e , 单位为 %) 的表达式为:

$$W_e = (|K_{E2} - K_{E1}| - 1) / (|K_{R2} - K_{R1}| - 1) \times 100 \quad (2)$$

人类活动对径流变化的贡献率(W_h , 单位为 %) 的表达式为:

$$W_h = 1 - (W_p + W_e) \quad (3)$$

2 结果与分析

2.1 径流年内变化特征

从图 2 可知, 大靖河径流各月分配较不均匀, 呈单峰型分布, 2 月径流最小, 为 $26.80 \times 10^4 \text{ m}^3$, 随后开始增加, 9 月达到最大, 为 $218.05 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。3 月下旬, 随着气温的回升, 祁连山低山带的积雪开始融化, 积雪融水开始不断补给径流, 同时降水也逐渐增多, 从而使大靖河 3—5 月的径流不断增加, 形成大靖河的春汛。随着气温继续上升, 6 月下旬至 8 月下旬, 海拔 4200 m 以上, 除了冰川粒雪盆地区以外, 所有积雪都融化殆尽(曾群柱等, 1985), 而且本区一年中 6—9 月的降水最为集中, 从而使大靖河径流在 9 月达到了峰值, 从 10 月份开始, 伴随着降水的减少, 径流也开始快速减少。

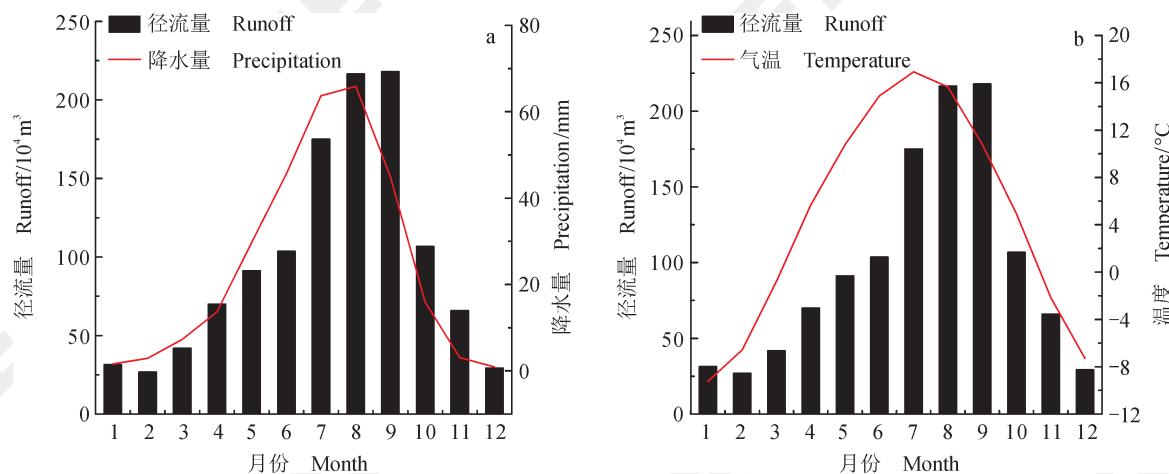


图 2 1956—2016 年大靖河月均径流量与降水量、气温关系

Fig.2 The relationship between monthly mean runoff and precipitation and temperature in Dajing River from 1956 to 2016

大靖河径流季节分配不均(表 1), 夏秋两个季节径流较为集中, 分别占全年径流量的 42.15% 和 33.26%, 这主要是由于夏秋两季暴雨频发, 降水充沛(图 2a), 补给河流的水源充足。冬季径流量仅占全年的 7.44%, 春季径流较冬季有所增加, 占全年径流量的 17.15%。这是因为在冬季降水较少(图 2a), 而春季气温上升(图 2b)、高山冰雪融化, 因此其径流量与冬季相比有所增加。

2.2 径流年际变化特征

由图 3 可以看出, 1958 年大靖河平均径流量最大, 为 $0.33 \times 10^8 \text{ m}^3$, 2009 年平均径流量最小, 为 $0.03 \times 10^8 \text{ m}^3$, 1956 年以来径流以 $1.1 \times 10^5 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ 的速率呈递减趋势, 根据计算, 大靖河径流的 Hurst 指数为 0.69, 因此, 在未来一段时期, 大靖河径流将继续保持递减趋势。变异系数值和年极值比可以用来判定径流年际波动幅度, 两个值

越大，表明径流波动幅度越大（马浩波和唐斌，2017）。通过计算，大靖河年径流变异系数值高达 0.52，极值比也达到 12.05，表明大靖河径流年际波动幅度很大。5 年滑动曲线也显示（图 3），大靖河径流呈减少（1959—1972 年）—增加（1973—1978 年）—减少（1979—1988 年）—增加（1989—1995 年）—减少（1996—2014 年）的变化趋势。

流域距平百分比可以用来表征河流年际丰枯状况（孟庆兰等，2017）。由图 4 可知，大靖河径流在 1956—1965 年丰—枯水年大致交替出现，1966—1969 年为连续 4 a 丰水期，1970—1972 年为连续 3 a 平水期，而 1973—1975 年为连续 3 a 枯水年，在 1976—1997 年丰—平—枯水年大致循环出现，但自 1998 年开始至 2016 年结束，径流枯水年出现的年份大幅增加，出现了 12 a，而丰水年和平水年仅分别出现 3 a 和 4 a，表明自 20 世纪 90 年代中期开始，大靖河径流量减少的状况更为突出。从代际变化来看，20 世纪 50 年代的距平

百分比为 68.17%，为丰水期，到 20 世纪 60 年代急速降低到 9.41%，为平水期，20 世纪 70 年代、80 年代、90 年代的数值极为接近，均为平水期，21 世纪 00 年代和 21 世纪 10 年代的距平百分比分别为 -16.50% 和 -20.81%，分别为偏枯期和特枯期，这也意味着大靖河径流呈递减趋势。

表 1 1956—2016 年大靖河各季节径流分配情况
Tab.1 Distribution of runoff in each season of Dajing River from 1956 to 2016

季节 Season	径流量 Runoff /(10 ⁴ m ³)	占全年比重 Account for the whole year/%
春季（3—5月） Spring (Mar.—May)	202.89	17.15
夏季（6—8月） Summer (Jun.—Aug.)	495.04	42.15
秋季（9—11月） Autumn (Sep.—Nov.)	390.61	33.26
冬季（12—2月） Winter (Dec.—Feb.)	87.36	7.44

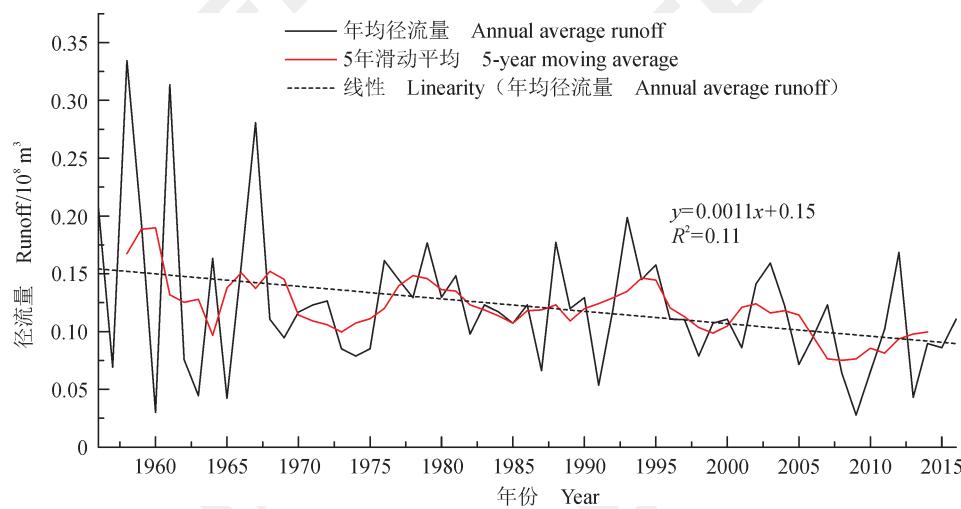


图 3 1956—2016 年大靖河多年径流量变化趋势图
Fig.3 Trends in the long-term runoff of the Dajing River from 1956 to 2016

2.3 径流与降水周期性分析

根据图 5a，大靖河径流存在 35—45 a，8—13 a 以及 2—5 a 的周期。其中 35—45 a 的周期最明显，呈现出丰—枯—丰的震荡规律，在 8—13 a 时间尺度上出现 5.5 个丰—枯循环，在 2—5 a 的尺度上，1956—1975 年以及 2005—2016 年周期性较为明显。图 5b 径流小波方差图显

示：大靖河径流在 2—5 a、8—13 a、17—24 a 及 35—45 a 左右出现 4 个比较明显的峰值，其中 35—45 a 左右小波方差的数值最大，为第一主周期，8—13 a 为第二主周期，但由于本文研究的时间序列为 61 年，而 35—45 a 的周期在整个时间序列中只出现一个完整的周期，所以此周期可能并不可靠。

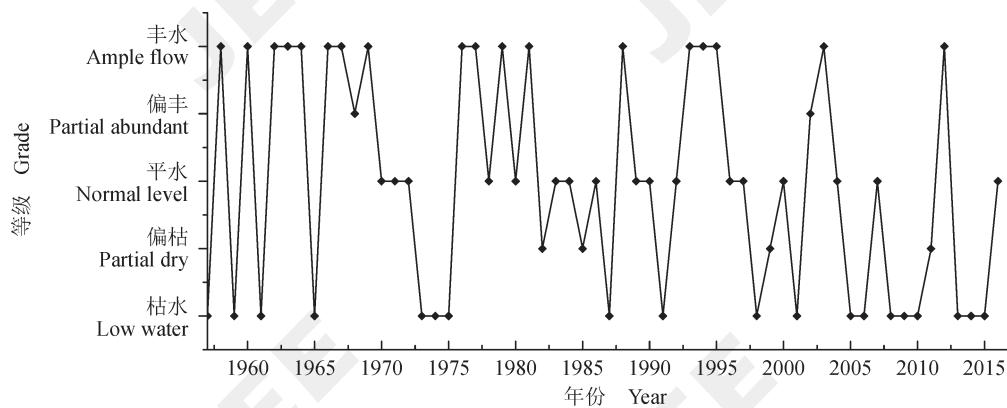


图 4 1956—2016 年大靖河径流丰枯变化
Fig.4 Variation of runoff in Dajing River from 1956 to 2016

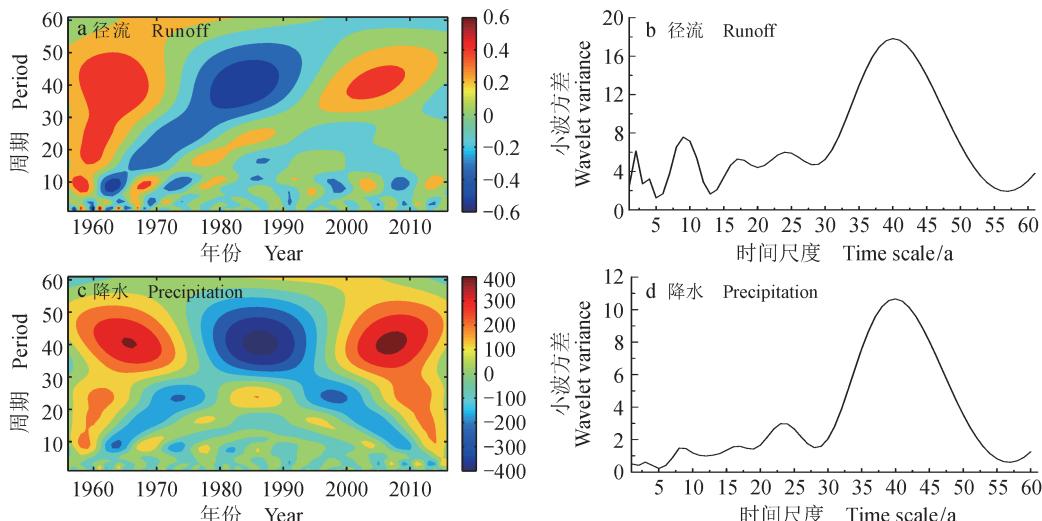


图 5 1956—2016 年大靖河径流与降水的小波分析图
Fig.5 Wavelet analysis of runoff and precipitation in Dajing River from 1956 to 2016

由图 5c 可知: 流域降水存在 35—47 a, 17—24 a 以及 8—13 a 的周期。其中最强震荡周期 (35—47 a) 也呈现出丰—枯—丰变化规律, 17—24 a 时间尺度上出现 2.5 个丰—枯交替循环, 降水与径流在 8—13 a 时间尺度上表现出较为一致的 5.5 次丰—枯交替循环。根据流域降水的小波方差图 (图 5d), 35—47 a 为第一主周期, 17—24 a 为第二主周期, 8—13 a 为第三主周期。大靖河径流与流域降水存在较为一致的周期变化规律, 并且在不同时间尺度上的丰枯交替也较为一致, 表明大靖河径流与本流域降水之间存在一定的响应关系, 降水对大靖河径流发挥着重要作用。

2.4 径流与气候因子的相关性分析

气温和降水是引起径流变化的主导气候因

子, 因此本文选用滑动相关分析来探究大靖河径流与降水和气温之间的响应关系。研究表明气候要素的滑动相关窗口以 15—20 a 效果较好 (杨春利等, 2017), 所以本文选择以 20 a 为滑动窗口, 得到大靖河径流与气温和降水之间的滑动相关系数 (图 6)。多年来大靖河径流与降水之间一直呈现显著的正相关关系 (0.05 显著性水平), 1958—1966 年二者的滑动相关系数不断减小, 相关性减弱, 但 1967—1973 年二者相关性又开始逐渐增大, 自 1974 年开始, 相关性水平趋于稳定。而大靖河径流与气温之间一直呈现负相关关系, 1958—1967 年呈显著负相关, 相关性强度呈现先增大后减小的趋势, 1968—1984 年相关性较弱, 之后相关性波动增强。

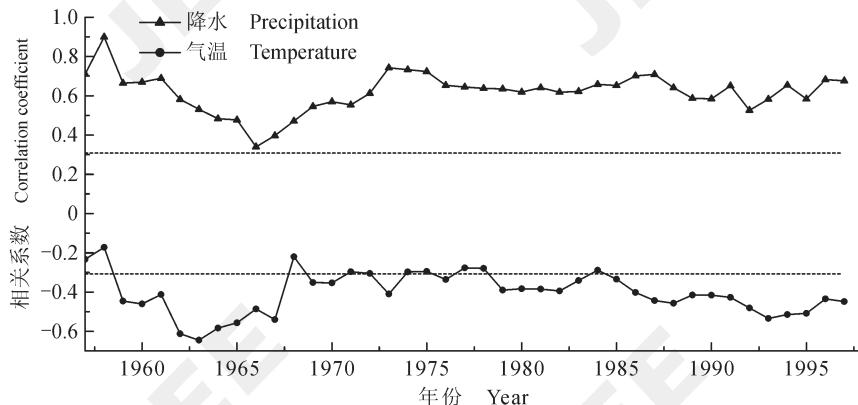


图 6 大靖河径流与降水和气温的滑动相关系数图
Fig.6 Sliding correlation coefficient of runoff and precipitation and temperature in Dajing River

3 讨论

综合运用累积距平法和 Mann-Kendall 突变检验法判断径流突变年份。Mann-Kendall 突变结果（图 7）显示，径流在 2001 年、2002 年和 2004

年发生了突变，而累积距平法（图 8）则显示，径流在 2004 年前后出现了由逐渐增加到急剧降低的趋势，因此，结合两种方法结果，将 2004 年作为大靖河径流的突变点。

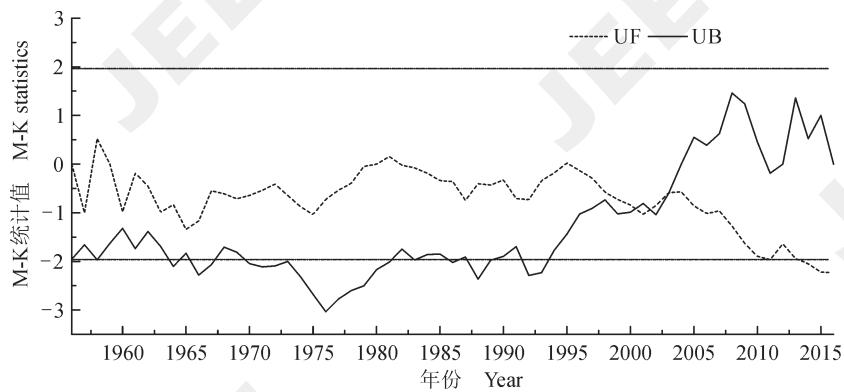


图 7 1956—2016 年大靖河径流量 M-K 突变检验图
Fig.7 M-K mutation test of Dajing River runoff from 1956 to 2016

根据分析出的突变年份，将大靖河的整个径流序列划分为基准期（1956—2004 年）和变异常期（2005—2016 年）两个阶段，建立两个时期的累积径流量、累积降水量及累积蒸发量与年份之间的线性拟合方程。三个拟合方程的 R^2 均大于 0.997， p 值均小于 0.01（图 9），表明方程拟合效果很好。表 2 为大靖河流域径流、降水以及蒸发与不同年份之间的斜率以及斜率变化率，从表 2 可以看出：基准期（1956—2004 年）与变异常期（2005—2016 年）的累积径流量一年份线性关系式的斜率分别为 $0.40 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $0.27 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ，其斜率变

化率为 -32.5% 。累积降水量一年份线性关系式的斜率分别为 $291.19 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $310.44 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ ，其斜率变化率为 6.6% ，累积蒸发量一年份线性关系式的斜率分别为 $519.34 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $561.14 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ ，斜率变化率为 8.1% 。以上分析表明：相较于基准期，变异常期的径流量有所减少，而降水量和蒸发量都有所增加。计算各影响因子对径流变化的贡献率，由于大靖河流域降水量增加而径流量却出现减少的状况，使得降水对大靖河径流变化的贡献出现了负值，为 -20.33% 。王彦君等（2015）在研究引起松花江径流变化的各影响因

子贡献率时就指出, 若径流量减少, 而此时降水量在不断增大, 会使得降水量对径流量变化部分产生负值的影响。同时计算得出蒸发对大靖河径流变化的贡献率为 25%, 因此综合考虑降水和蒸发对径流的影响, 得出气候变化对径流变化的贡献率约为 4.7%。人类活动是大靖河径流减少的关键性因子, 其贡献率为 95.3%。祁连山东部山区植被整体处于退化趋势(戴声佩等, 2010), 2012 年分布在祁连山东部乌鞘岭、大

通河谷地、冷龙岭等地区的植被面积与 2000 年相比减少了 24149 km²(武正丽, 2014)。2013 年祁连山东部乌鞘岭及毛毛山海拔高度 2700 m 以上地区的草甸类草地面积为 7497.11 hm², 与 19 世纪 80 年代相比 (8349.87 hm²), 减少了 852.76 hm²(俞慧云等, 2016)。张永(2018)也发现, 分布在石羊河上游东部地区的植被出现了严重的退化现象。这些地区土地利用状态和方式的改变, 可能会对大靖河径流产生一定的影响。

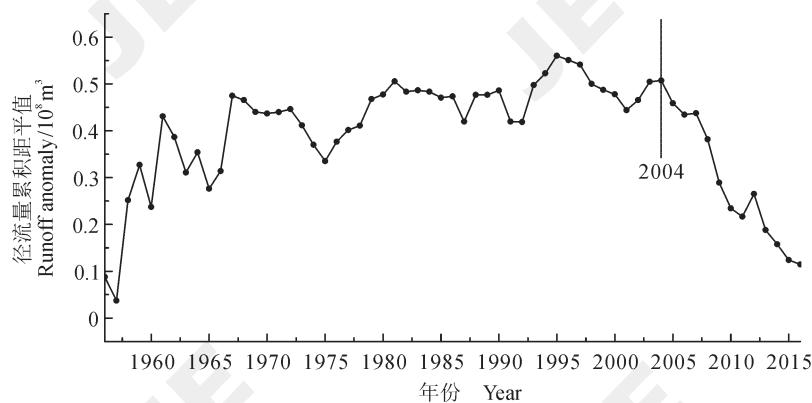


图 8 1956—2016 年大靖河径流累积距平图
Fig.8 Dajing River runoff cumulative anomaly map from 1956 to 2016

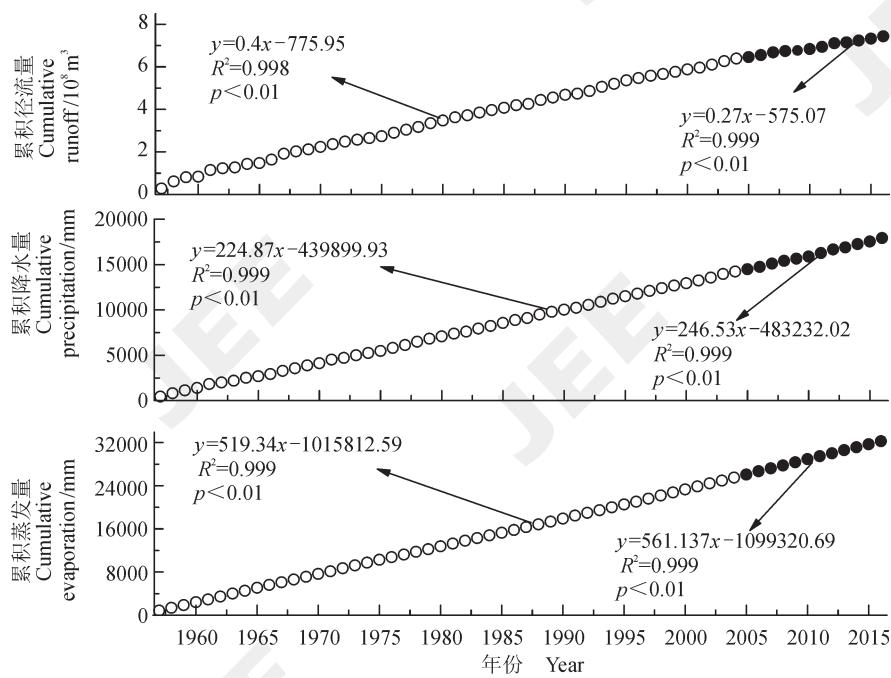


图 9 各累积量与年份之间的关系图
Fig.9 The relationship between each cumulant and the year

表 2 各累积量与不同年份的斜率及变化率
Tab.2 Slope change ratio of cumulative quantity in different periods

时段 Period	各累积量与年份之间的斜率 Slope between each cumulant and year			斜率变化率 Slope change rate/%		
	径流 Runoff $(10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1})$	降水 Precipitation $(\text{mm} \cdot \text{a}^{-1})$	蒸发 Evaporation $(\text{mm} \cdot \text{a}^{-1})$	径流 Runoff	降水 Precipitation	蒸发 Evaporation
	1956—2004 0.40	291.19	519.34	—	—	—
2005—2016 2005—2016	0.27	310.44	561.14	-32.5	6.6	8.1

4 结论

采用多种研究方法分析了 1956—2016 年大靖河径流变化特征，并对其驱动因子进行定量评估，得出如下结论：

(1) 大靖河流域径流年内分配不均，季节变化明显，夏季径流量占全年比重最大，为 42.15%，而冬季径流量仅占全年的 7.44%。

(2) 大靖河年际径流每年以 $1.1 \times 10^5 \text{ m}^3$ 的速率在逐渐减少，Hurst 指数显示大靖河径流将继续保持递减的状态。1958 年径流量最大，最小值出现在 2009 年。其变异系数和年极值比分别高达 0.52 和 12.05，表明大靖河径流年际变化不稳定。1956—1997 年大靖河径流呈现出丰—平—枯水年循环交替，丰水年出现的次数大于枯水年。但自 1998 年开始，枯水年出现的次数大幅度增加，出现了 12 a，表明自 20 世纪 90 年代中期开始大靖河径流量减少的趋势更为明显。

(3) 大靖河径流存在 2—5 a、8—13 a、17—24 a 及 35—45 a 左右的震荡周期，而降水存在 8—13 a、17—24 a 及 35—47 a 左右的震荡周期，二者具有较为一致的震荡规律，表明径流与降水之间存在一定的响应关系。由滑动相关系数可知径流与降水之间存在显著正相关关系，而与气温之间存在负相关关系。

(4) 大靖河径流发生突变的年份在 2004 年前后，变异性期（2005—2016 年）相较于基准期（1956—2004 年）的累积径流量、累积降水量及累积蒸发量与年份线性关系的斜率变化率分别为 -32.5%、6.6% 及 8.1%。在造成大靖河径流减少的影响因素中，气候变化发挥了 4.7% 的作用，人类活动发挥了 95.3% 的主导性作用，这可能与研究区土地利用方式变化有关。

参考文献

- 陈霖巍, 穆兴民. 2000. 黄河断流的态势、成因与科学对策 [J]. 自然资源学报, 15(1): 31—35. [Chen J W, Mu X M. 2000. Tendency, causes and control measures on Yellow River dry-up [J]. *Journal of Natural Resources*, 15(1): 31—35.]
- 陈政君, 穆兴民, 高鹏, 等. 2018. 北洛河上游径流变化特征及其驱动因素研究 [J]. 中国水土保持科学, 16(6): 1—8. [Chen M J, Mu X M, Gao P, et al. 2018. Characteristics and driving factors of runoff changes in the upper reach of the Beiluo River basin [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 16(6): 1—8.]
- 陈亚宁, 李稚, 范煜婷, 等. 2014. 西北干旱区气候变化对水文水资源影响研究进展 [J]. 地理学报, 69(9): 1295—1304. [Chen Y N, Li Z, Fan Y T, et al. 2014. Research progress on the impact of climate change on water resources in the arid region of Northwest China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 69(9): 1295—1304.]
- 陈亚宁, 徐长春, 杨余辉, 等. 2009. 新疆水文水资源变化及对区域气候变化的响应 [J]. 地理学报, 64(11): 1331—1341. [Chen Y N, Xu C C, Yang Y H, et al. 2009. Hydrology and water resources variation and its responses to regional climate change in Xinjiang [J]. *Acta Geographica Sinica*, 64(11): 1331—1341.]
- 陈忠升. 2016. 中国西北干旱区河川径流变化及归因定量辨识 [D]. 上海: 华东师范大学. [Chen Z S. 2016. Quantitative identification of river runoff change and its attribution in the arid region of Northwest China [D]. Shanghai: East China Normal University.]
- 代稳, 吕殿青, 李景保, 等. 2016. 气候变化和人类活动对长江中游径流量变化影响分析 [J]. 冰川冻土, 38(2): 488—497. [Dai W, Lü D Q, Li J B, et al. 2016. The effect of climate change and human activities on runoff in the middle reaches of the Yangtze River [J]. *Journal of*

- Glaciology and Geocryology*, 38(2): 488–497.]
- 丁爱中, 赵银军, 郝弟, 等. 2013. 永定河流域径流变化特征及影响因素分析 [J]. 南水北调与水利科技, 11(1): 17–22. [Ding A Z, Zhao Y J, Hao D, et al. 2013. Analysis of variation characteristics of runoff and their influencing factors in the Yongding River basin [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 11(1): 17–22.]
- 戴声佩, 张勃, 王强, 等. 2010. 祁连山草地植被NDVI变化及其对气温降水的旬响应特征 [J]. 资源科学, 32(9): 1769–1776. [Dai S P, Zhang B, Wang Q, et al. 2010. Variation in grassland vegetation NDVI and its ten-day response to temperature and precipitation in the Qilian Mountains [J]. *Resources Science*, 32(9): 1769–1776.]
- 冯禹昊, 朱江玲. 2019. 基于 Morlet 小波的辽河径流量变化及其成因分析 [J]. 水土保持研究, 26(2): 208–215. [Feng Y H, Zhu J L. 2019. Analysis on runoff change and the driving force of the Liaohe River basin based on Morlet wavelet [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 26(2): 208–215.]
- 高桥浩一郎, 王长根. 1980. 根据月平均气温、月降水量推算蒸散量 [J]. 气象科技, 8(S4): 48–50. [Takahashi K, Wang C G. 1980. Estimate evapotranspiration based on monthly mean temperature and monthly precipitation [J]. *Meteorological Science and Technology*, 8(S4): 48–50.]
- 郭爱军, 畅建霞, 黄强, 等. 2014. 渭河流域气候变化与人类活动对径流影响的定量分析 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 42(8): 212–220. [Guo A J, Chang J X, Huang Q, et al. 2014. Quantitative analysis of the impacts of climate change and human activities on runoff change in Weihe Basin [J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 42(8): 212–220.]
- 甘肃省水利厅石羊河流域管理局. 2016. 石羊河流域水资源公报 [M]. 兰州: 甘肃文化出版社. [Shiyang River Basin Administration, Water Resources Department of Gansu Province. 2016. Shiyang River basin water resources bulletin [M]. Lanzhou: Gansu Culture Publishing House.]
- 焦玮, 朱仲元, 宋小园, 等. 2015. 近50年气候和人类活动对锡林河流域径流的影响 [J]. 中国水土保持科学, 13(6): 12–19. [Jiao W, Zhu Z Y, Song X Y, et al. 2015. Impacts of climate change and human activities on runoff yield of the Xilin River Basin over nearly 50 years [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 13(6): 12–19.]
- 李二辉, 穆兴民, 赵广举. 2014. 1919—2010年黄河上中游区径流量变化分析 [J]. 水科学进展, 25(2): 155–163. [Li E H, Mu X M, Zhao G J. 2014. Temporal changes in annual runoff and influential factors in the upper and middle reaches of Yellow River from 1919—2010 [J]. *Advances in Water Science*, 25(2): 155–163.]
- 林学椿. 1978. 统计天气预报中相关系数的不稳定性问题 [J]. 大气科学, 2(1): 55–63. [Lin X C. 1978. Instability of correlation coefficient in statistical weather forecast [J]. *Scientia Atmospherica Sinica*, 2(1): 55–63.]
- 刘艺, 雷晓云, 马红刚, 等. 2016. 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, 23(2): 139–142. [Liu Y, Lei X Y, Ma H G, et al. 2016. Characteristics of runoff from mountainous watershed of Bayingou River basin in recent 60 years [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 23(2): 139–142.]
- 刘明春, 李玲萍, 史志娟, 等. 2013. 石羊河流域径流量分布特征及对气候变化的响应——以西营河为例 [J]. 干旱地区农业研究, 31(1): 193–198. [Liu M C, Li L P, Shi Z J, et al. 2013. Distribution characteristics of runoff in Shiyang River basin and its responses to climate change—the case study of Xiying River [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 31(1): 193–198.]
- 刘星根. 2019. 赣江流域年降雨和径流量的周期特征分析 [J]. 人民珠江, 40(6): 54–60. [Liu X G. 2019. Analysis on the periodic characteristics of annual rainfall and discharge in the Ganjiang River basin [J]. *Pearl River*, 40(6): 54–60.]
- 马龙, 刘廷玺, 马丽, 等. 2015. 气候变化和人类活动对辽河中上游径流变化的贡献 [J]. 冰川冻土, 37(2): 470–479. [Ma L, Liu T X, Ma L, et al. 2015. The effect of climate change and human activities on the runoff in the upper and middle reaches of the Liaohe River, Inner Mongolia [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 37(2): 470–479.]
- 马德芬. 2012. 大靖河地表水资源演变分析 [J]. 农业科技与信息, (8): 44–46. [Ma D F. 2012. Analysis on the evolution of surface water resources in the Dajing River [J]. *Agricultural Science-Technology and Information*, (8): 44–46.]
- 马浩波, 唐斌. 2017. 渭河流域径流变化及驱动机制研究 [J]. 地下水, 39(6): 163–167. [Ma H B, Tang B. 2017. And the driving mechanism of the runoff change in Weihe Basin [J]. *Ground Water*, 39(6): 163–167.]

- 孟庆兰, 赵赫, 高军凯, 等. 2017. 科尔沁地区年降水波动与空间分异特征 [J]. 高原气象, 36(5): 1234–1244. [Meng Q L, Zhao H, Gao J K, et al. 2017. Differentiation characteristic of the annual precipitation pulse in Kerqin sandy land region [J]. *Plateau Meteorology*, 36(5): 1234–1244.]
- 潘国营, 秦永泰, 马亚芬, 等. 2015. 基于 R/S 和 Morlet 小波分析的丹河径流变化特征研究 [J]. 水资源与水工程学报, 26(3): 41–45, 50. [Pan G Y, Qin Y T, Ma Y F, et al. 2015. Research on variation characteristics of runoff in Danhe River basin based on R/S and Morlet wavelet analysis [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 26(3): 41–45, 50.]
- 祁文燕, 钱鞠, 葛雷, 等. 2018. 湟水干流近 60 年径流变化特征分析 [J]. 水资源与水工程学报, 29(3): 45–49. [Qi W Y, Qian J, Ge L, et al. 2018. Runoff variation analysis on main stream of Huangshui River in recent 60 years [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 29(3): 45–49.]
- 祁兴川, 李晓云. 2010. 大靖河河道岸线利用现状分析及管理建议 [J]. 甘肃水利水电技术, 46(8): 37–38. [Qi X C, Li X Y. 2010. Analysis on current situation of utilization of Dajing River channel and management suggestions [J]. *Gansu Water Conservancy and Hydropower Technology*, 46(8): 37–38.]
- 申培德, 张晟福. 2012. 甘肃大靖镇: 中国西部特色城镇化建设显成效 [J]. 大陆桥视野, (7): 76–77. [Shen P D, Zhang S F. 2012. Dajing Town, Gansu Province: the urbanization of China's western characteristics has achieved remarkable results [J]. *New Silk Road Horizon*, (7): 76–77.]
- 王随继, 李玲, 颜明. 2013. 气候和人类活动对黄河中游区间产流量变化的贡献率 [J]. 地理研究, 32(3): 395–402. [Wang S J, Li L, Yan M. 2013. The contributions of climate change and human activities to the runoff yield changes in the middle Yellow River Basin [J]. *Geographical Research*, 32(3): 395–402.]
- 王随继, 闫云霞, 颜明, 等. 2012. 皇甫川流域降水和人类活动对径流量变化的贡献率分析——累积量斜率变化率比较方法的提出及应用 [J]. 地理学报, 67(3): 388–397. [Wang S J, Yan Y X, Yan M, et al. 2012. Contributions of precipitation and human activities to the runoff change of the Huangfuchuan drainage basin: application of comparative method of the slope changing ratio of cumulative quantity [J]. *Acta Geographica Sinica*, 67(3): 388–397.]
- 王绪娟, 门宝辉. 2013. 乌云河流域径流变化及其影响因子分析 [J]. 南水北调与水利科技, 11(4): 35–40. [Wang X J, Men B H. 2013. Analysis of runoff variation and its impact factors in the Wuyun River basin [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 11(4): 35–40.]
- 王彦君, 王随继, 苏腾. 2015. 降水和人类活动对松花江径流量变化的贡献率 [J]. 自然资源学报, 30(2): 304–314. [Wang Y J, Wang S J, Su T. 2015. Contributions of precipitation and human activities to runoff change in the Songhua river basin [J]. *Journal of Natural Resources*, 30(2): 304–314.]
- 王志梅. 2014. 古浪县水资源供需与开发利用调查分析 [J]. 甘肃农业, (1): 22–24. [Wang Z M. 2014. Investigation and analysis of water supply and demand, development and utilization in Gulang County [J]. *Gansu Agriculture*, (1): 22–24.]
- 武正丽. 2014. 2000—2012 年祁连山植被覆盖变化及其对气候的响应研究 [D]. 兰州: 西北师范大学. [Wu Z L. 2014. The research of the vegetation change and the sensitivity between NDVI and climatic factors in Qilian Mountains from 2000 to 2012 [D]. Lanzhou: Northwest Normal University.]
- 徐万玲, 满卫东, 朱卫红, 等. 2013. 图们江干流区间流域径流变化特征 [J]. 干旱区研究, 30(5): 927–932. [Xu W L, Man W D, Zhu W H, et al. 2013. Variation of runoff volume of mainstream of the Tumen River [J]. *Arid Zone Research*, 30(5): 927–932.]
- 杨春利, 蓝永超, 王宁练, 等. 2017. 1958—2015 年疏勒河上游出山径流变化及其气候因素分析 [J]. 地理科学, 37(12): 1894–1899. [Yang C L, Lan Y C, Wang N L, et al. 2017. Mountainous runoff changes and climate factors analysis of the Shule River basin in 1958—2015 [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 37(12): 1894–1899.]
- 杨思雨, 姜仁贵, 解建仓, 等. 2019. 渭河上游径流变化特征及归因研究 [J]. 水资源与水工程学报, 30(2): 37–42. [Yang S Y, Jiang R G, Xie J C, et al. 2019. Research on the characteristics and attribution analysis of runoff in the upstream of Weihe River Basin [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 30(2): 37–42.]
- 姚俊强, 杨青, 刘志辉, 等. 2015. 中国西北干旱区降水时空分布特征 [J]. 生态学报, 35(17): 5846–5855. [Yao

- J Q, Yang Q, Liu Z H, et al. 2015. Spatio-temporal change of precipitation in arid region of the Northwest China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 35(17): 5846–5855.]
- 姚正学, 杨军, 刘迪. 2016. 1956—2005年渭河流域降水与径流的变化特征 [J]. 人民黄河, 38(1): 12–18. [Yao Z X, Yang J, Liu D. 2016. Regularity of precipitation and runoff in the Weihe River basin from 1956 to 2005 [J]. *Yellow River*, 38(1): 12–18.]
- 于婵, 王威娜, 高瑞忠, 等. 2019. 变化环境下半干旱草原流域径流变化特征及其影响因子定量分析 [J]. 水文, 39(1): 78–84. [Yu C, Wang W N, Gao R Z, et al. 2019. Variation characteristics of runoff and quantitative analysis of its affected factors under changing environment in typical steppe basin of semiarid region [J]. *Journal of China Hydrology*, 39(1): 78–84.]
- 俞慧云, 陈本建, 俞联平. 2016. 古浪县草原区植被盖度及生产力评价 [J]. 中国草地学报, 38(3): 42–49, 100. [Yu H Y, Chen B J, Yu L P. 2016. Evaluation of vegetation coverage and productivity in steppe in Gulang County [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 38(3): 42–49, 100.]
- 曾群柱, 张顺英, 金德洪. 1985. 祁连山积雪卫星监测与河西地区河流融雪径流特征分析 [J]. 冰川冻土, 7(4): 295–304. [Zeng Q Z, Zhang S Y, Jin D H. 1985. Satellite monitoring of snow cover in Qilian Mountain and analysis on snowmelt runoff in Hexi district [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 7(4): 295–304.]
- 曾思栋, 张利平, 夏军, 等. 2013. 永定河流域水循环特征及其对气候变化的响应 [J]. 应用基础与工程科学学报, 21(3): 501–511. [Zeng S D, Zhang L P, Xia J, et al. 2013. Water cycle characteristic and its responses to climate change of the Yongding River basin [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 21(3): 501–511.]
- 张宏. 2012. 浅析大靖峡水库除险加固的必要性及途径 [J]. 甘肃农业, (2): 71–72. [Zhang H. 2012. Discussion on necessity and ways of danger removal and reinforcement of Dajing Gorge Reservoir [J]. *Gansu Agriculture*, (2): 71–72.]
- 张倩, 张正栋, 杨传训. 2016. 梅江流域1958—2000年径流量变化特征分析 [J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 48(2): 74–80. [Zhang Q, Zhang Z D, Yang C X. 2016. Analysis on feature of runoff change in Meijiang river basin from 1958 to 2000 [J]. *Journal of South China Normal University (Natural Science Edition)*, 48(2): 74–80.]
- 张建军. 2011. 古浪县节水农业发展现状及思路 [J]. 甘肃农业科技, (8): 45–47. [Zhang J J. 2011. Development status and thoughts of water saving agriculture in Gulang County [J]. *Gansu Agricultural Science and Technology*, (8): 45–47.]
- 张雪琪, 满苏尔·沙比提, 刘海涛, 等. 2019. 1957—2015年叶尔羌河流域气候变化特征及其径流响应 [J]. 干旱区研究, 36(1): 58–66. [Zhang X Q, Mansur Shabit, Liu H T, et al. 2019. Response of runoff volume to climate change in the Yarkant River basin during the period of 1957—2015 [J]. *Arid Zone Research*, 36(1): 58–66.]
- 张永. 2018. 石羊河流域植被覆盖与荒漠化动态研究 [D]. 兰州: 甘肃农业大学. [Zhang Y. 2018. Dynamics of vegetation cover and desertification in Shiyang River basin [J]. Lanzhou: Gansu Agricultural University.]