

1956—2016 年大通河温度和降水及其与径流变化的关系

赵美亮^{1,2,3}, 曹广超^{2,3,4}, 曹生奎^{1,2,3}, 刘富刚⁵,
李洋洋⁵, 张卓^{1,2,3}, 刁二龙^{1,2,3}, 陈治荣^{1,2,3}

(1.青海师范大学 地理科学学院, 西宁 810008; 2.青海省自然地理与环境过程重点实验室, 西宁 810008;
3.青藏高原地表过程与生态保育教育部重点实验室, 西宁 810008; 4.青海省人民政府—北京师范大学
高原科学与可持续发展研究院, 西宁 810008; 5.德州学院 资源环境与规划学院, 山东 德州 253000)

摘 要:大通河流域位于祁连山南坡,是青海省东北部和甘肃西部重要的地表水源地,明晰大通河径流变化规律对其下游水资源开发利用和管理具有重大的意义。基于 1956—2016 年大通河尕日得、青石嘴和享堂水文站径流数据及其附近区域 7 个气象基站的气象数据,采用趋势分析、MK 分析、小波分析及相关分析等数理统计方法,研究大通河径流变化及其与气温和降水的关系。结果表明:(1) 1956—2016 年大通河流域气候呈现暖湿化趋势,气温变化速率为 $0.22^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})$ ($p<0.01$),降水变化速率为 $26.78\text{ mm}/(10\text{ a})$ ($p<0.01$);(2) 尕日得和青石嘴站径流量分别以 $0.1\text{ 亿 m}^3/(10\text{ a})$, $0.3\text{ 亿 m}^3/(10\text{ a})$ 的速率上升,享堂站以 $-0.87\text{ 亿 m}^3/(10\text{ a})$ ($p<0.05$)的速率下降,三站均存在 22 a 尺度的主周期变化,分别在 2010 年、2001 年、2000 年发生突变;(3) 3 个水文站径流量与降水量均呈显著正相关关系。总的来看降水是其主要补给来源;跨流域调水是引起大通河径流减小的主要人为因素。

关键词:气候变化;径流量;敏感性;大通河

中图分类号:P333

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)03-0111-07

Temperature and Precipitation and Their Relationship with Runoff Change in Datong River from 1956 to 2016

ZHAO Meiliang^{1,2,3}, CAO Guangchao^{2,3,4}, CAO Shengkui^{1,2,3}, LIU Fugang⁵,
LI Yangyang⁵, ZHANG Zhuo^{1,2,3}, DIAO Erlong^{1,2,3}, CHEN Zhirong^{1,2,3}

(1.School of Geographical Science, Qinghai Normal University, Xining 810008, China; 2.Qinghai Province
Key Laboratory of Physical Geography and Environmental Process, Xining 810008, China; 3.MOE Key
Laboratory of Tibetan Plateau Land Surface Processes and Ecological Conservation, Xining 810008, China;
4.Academy of Plateau Science and Sustainability People's Government of Qinghai Province & Beijing Normal University,
Xining 810008, China; 5.College of Resources, Environment and Planning, Dezhou University, Dezhou, Shandong 253023, China)

Abstract: Datong River valley which is located in the south slope of Qilian Mountains, is an important water source area for the northeast Qinghai Province and the western Gansu Province. It is of great significance to the development, utilization and management of the downstream water resources to clarify the change rule of Datong river runoff. Based on the runoff data of Garyide, Qingshizui and Xiangtang hydrological stations and meteorological data of 7 meteorological base stations nearby from 1956 to 2016, the trend analysis method, MK analysis, wavelet analysis and correlation analysis were used to study the runoff change and its relationship with temperature and precipitation in Datong River. The results show that: (1) a warm and humid climate of Datong river valley revealed from 1956 to 2016 with the temperature change rate of $0.22^{\circ}\text{C}/\text{decade}$ ($p<0.01$) and the precipitation change rate of $26.78\text{ mm}/\text{decade}$ ($p<0.01$); (2) the runoff of Garyide and

收稿日期:2020-06-30

修回日期:2020-07-29

资助项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0404304);青海省科技厅重大专项项目(2019-SF-A12);青海省自然科学基金资助项目(2018-ZJ-903)

第一作者:赵美亮(1995—),男,山东临沂人,硕士研究生,研究方向为地表环境过程。E-mail:zhaomeiliang2014@163.com

通信作者:曹广超(1971—),男,山东苍山人,教授,博士生导师,主要从事青藏高原地区环境变化与地理信息系统应用研究。E-mail:caoguangchao@126.com

Qingshizui station increased at a rate of 10 million m³/decade and 30 million m³/decade, respectively, while the runoff of the Xiangtang station decreased at a rate of −87million m³/decade ($p < 0.05$). 22-year scale major periodic change occurred in the stations, and abrupt change was found in 2010, 2001 and 2000, respectively; (3)there was a significant positive correlation between runoff and precipitation in the three hydrological stations. In general, precipitation is the main supply source; inter-basin water transfer is the main human factor causinh the decrease of runoff in Datong River.

Keywords:climate change; runoff; sensitivity; Datong River

近年来,气候变化吸引了全球的普遍关注,成为国际科学研究的热点。第五次发布的 IPCC 报告指出地球表面的平均温度自 1880—2012 年大约升温 0.85℃,中国同期气温上升约 0.65℃^[1]。气候变化通过影响陆面水文循环的过程使区域水资源在时空分布发生变化,进而对地表水资源产生重要影响^[2-3]。因此,国内外众多学者从不同的角度持续关注气候变化与河川径流之间的关系^[4-5]。王珂等人通过对澜沧江源区气候和径流的研究发现,降水量是影响年径流量的主控因素,而冬季和初春季节,气温升高加剧研究区内冰雪的消融,进而导致流域径流的增加^[4]。孙栋元等人通过对疏勒河干流径流的变化特征研究指出,5—9 月份径流量占全年的 50%以上,径流年内分配极不均匀^[6]。张雪琪等人对叶尔羌河流域的气候变化及径流响应分析发现,径流量与湿季气温呈正相关,与湿季平均风速、相对湿度呈负相关,干季的降水量与上游径流呈正相关关系^[7]。李云武等人通过对祁连山八宝河流域的气候和径流研究发现,干季径流量较小,主要受气温上升、冻土退化的影响,降水量则是导致湿季径流量变化的主要原因^[8]。

大通河是黄河的二级支流,发源于祁连山南坡沙杲林那穆吉木岭,河流落差大,水资源丰富,是青海省东北部和甘肃西部重要的水源地,在青海、甘肃两省社会和生态中具有十分重要的地位^[9-13]。近年来随着跨流域调水及水利水电站等工程的开放建设,造成河流流量不断下降、水质恶化等一系列的生态环境问题。黄维东等^[14]研究表明大通河流域水资源开发导致水文过程及生态环境恶化。张晓晓等^[15]对大通河径流量变化特征研究发现大通河流域年径流在 1950—2005 年呈微弱减少趋势,并指出未来一段时间内径流仍然会呈现减少趋势。刘赛艳等^[16]对大通河上游径流量研究发现气温升高和人类活动共同导致了径流量的减少。前人对大通河的研究多集中在源头或流域径流变化特征^[9,12]及流域水资源开发引起的水文生态环境等方面^[11,14-17],而围绕径流对气候变化响应角度的研究相对较少。因此,本文采取趋势分析、MK 突变检验及小波分析等研究方法对流域内

具有代表性的尕日得、青石嘴及享堂水文站 1956—2016 年径流数据和附近 7 个气象站点的气温、降水气象数据进行定量分析气候变化特征,探讨气候变化背景下径流的演变规律,研究结果为该区域的水资源管理及今后相关研究提供科学参考。

1 资料与方法

1.1 研究区概况及数据来源

大通河流域(36°30′—38°25′N,98°30′—103°15′E)位于青藏高原东北部,北抵祁连山脉,南临大通山,是黄河的二级支流。大通河全长 554 km,发源于祁连山南坡沙杲林那穆吉木岭,自西北向东南流经青海省和甘肃省两省的 9 个县,最后由民和县境内注入湟水河。大通河径流补给来源以降水为主。流域内 1956—2016 年多年平均气温约 1.95℃,多年平均降水约 380 mm,植被类型以林地、草地和高山灌丛草甸等为主。根据流域地形地貌特征,以尕日得、青石嘴和享堂水文站将流域划分为上、中、下游。

本文选用大通河流域尕日得、青石嘴和享堂水文站 1956—2016 年逐月径流数据,数据来源于青海省水文与水资源局;选取大通河流域及其附近地区 7 个气象站同期气候数据,来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)。所有数据经过极值和一致性检验。站点分布见图 1。

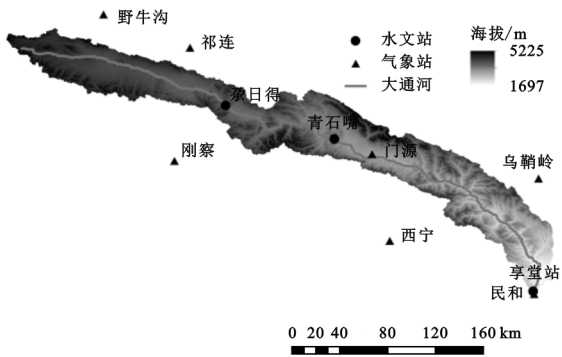


图 1 研究区域及气象、水文站点分布

1.2 研究方法

1.2.1 Mann-Kendall 突变检验 采用 Mann-Kendall 突变检验方法(下称 M-K 检验)分析气候及径流

要素的突变特征,M-K 方法是一种广泛用于气候水文分析的非参数统计检验方法,其主要优势是样本不需要服从正态分布^[18-20]。

首先,对于含有 n 个样本量的时间序列 x ,构造一秩序列:

$$S_K = \sum_{i=1}^k r_{ij} \quad (2 \leq k \leq n)$$

(1)

式中: $r_{ij} = \begin{cases} 1 & x_i > x_j \\ 0 & x_i \leq x_j \end{cases} \quad (1 \leq j \leq i)$

(2)

其次,定义统计变量: $UF_k = \frac{[s_k - \bar{s}_k]}{\sqrt{\text{var}(s_k)}}$ $(1 \leq k \leq n)$

(3)

给出显著性水平 0.05,得到 U_a 两条临界值线为 ± 1.96 。若正向序列 $UF > 0$,表明序列呈明显的上升趋势,反之,呈下降趋势。当超出 U_a 临界值线时,趋势显著。正向序列 UF 与逆向序列 UB 在置信区间内的交点是突变开始的时间^[18]。本文中根据 MK 突变检验曲线和累积距平曲线对突变点进行综合判断。

1.2.2 小波分析 小波分析是目前在气候、水文学中广泛应用的一种时频分析方法^[21],它可以根据小波基的变换反映气候及径流要素在时间序列的周期震荡,揭示其变化趋势^[22]。表达式为^[23]:

$$\text{cmor}(x) = \frac{\sigma^{2i\pi x F_c} \frac{x^2}{F_b}}{\sqrt{\pi F_b}}$$

(4)

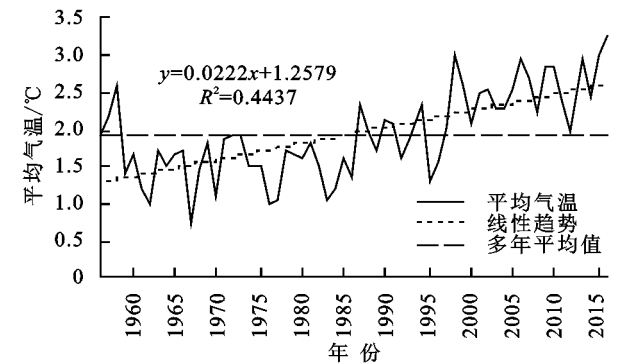
式中: π, e 为常数; F_b, F_c 分别表示频带宽度系数和 wavelet 的中心频率。

小波方差 var 是对时间尺度上小波系数的平方值进行积分,即^[23]:

$$\text{var}(a) = \int_{-\infty}^{\infty} W_f | (a, b) |^2 db$$

(5)

小波方差能直观的反映信号在时间尺度的分布情况,可用于确定某一现象的震荡的主周期,小波方差图体现出信号在时间尺度上的分布情况。因此,信号中主



要时间尺度周期可由小波方差图检验得到^[23]。

1.2.3 相关分析 相关系数是用来衡量两个要素之间密切程度的统计量。其公式为^[24-26]:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

(6)

式中: r 为两个变量 x 与 y 的相关系数,其取值介于 $[-1, 1]$; n 为样本量; x_i, y_i 分别代表第 i 个序列值。当 $r > 0$ 时,表明两变量呈正相关;反之,为负相关。给定显著性水平 α ,若 $|r| > r_\alpha$ 。表明相关是显著的,否则是不显著的。

2 结果与分析

2.1 气候变化特征

2.1.1 趋势分析 通过线性回归分析确定 1956—2016 年大通河流域气温、降水变化特征,从图 2 可以看出:

(1) 气温:1956—2016 年大通河流域平均气温为 1.95°C ,最低气温出现在 1967 年的 0.75°C ,最高气温出现在 2016 年的 3.27°C ,极差达到 2.52°C 。大通河流域多年平均气温变化倾向率为 $0.22^\circ\text{C}/10\text{ a}$ ($p < 0.01$)。在 1956—1985 年平均气温低于多年平均气温,在 1986—1996 年平均气温波动剧烈,1997—2016 年超过多年平均气温,以 $0.34^\circ\text{C}/10\text{ a}$ ($p < 0.01$) 的速度上升,升温趋势明显。

(2) 降水:1956—2016 年大通河流域多年平均降水量为 379.96 mm ,最低降水量出现在 1962 年,低至 237.06 mm ,最高降水量出现在 2014 年,高达 520.41 mm ,极差达到 283.35 mm 。大通河流域多年降水变化倾向率为 $26.78\text{ mm}/10\text{ a}$ ($p < 0.01$)。其在 1981 年以前(除 1958 年、1961 年、1964 年、1967 年外)低于多年平均值,1981—2016 年(除 1982 年、1984 年、1987 年、1990 年、1991 年、2001 年、2002 年外)基本处于多年平均值以上。

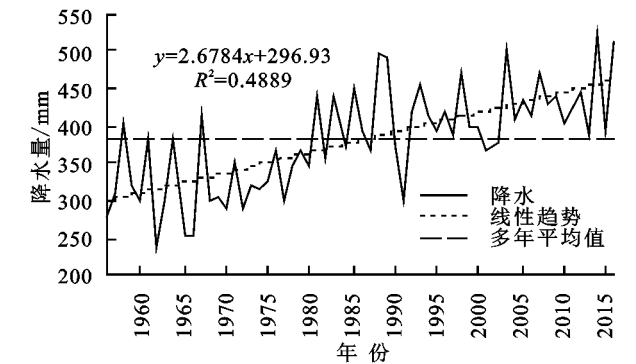


图 2 1956—2016 年大通河流域气温降水变化特征

2.1.2 突变分析 通过上述 MK 检验方法(公式 1—3)确定 1956—2016 年大通河流域气温、降水突变特征。

(1) 气温:大通河流域多年平均气温在研究时段内均发生由低温向高温的突变(图 3A)。平均气

温 1999 年突变前后分别为 1.7℃ 和 2.58℃, 突变后上升了 0.88℃; 通过分析 UF 曲线可知, 在 1960—1972 年、1973—1989 年 $UF < 0$, 气温处于下降状态; 1956—1959 年、1990—2016 年 $UF > 0$, 气温处于增加状态, 并且在 2000 年以后超过信度曲线, 增温显著。

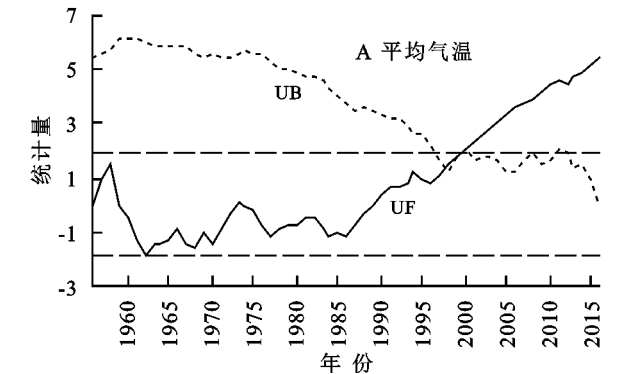
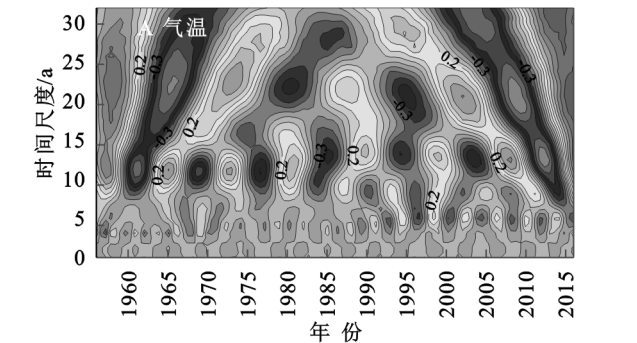


图 3 大通河流域 1956—2016 年气温、降水突变特征

2.1.3 周期分析 以大通河流域 1956—2016 年气温、降水数据为基础, 基于 Morlet 复小波函数分析 (公式 4, 5) 其气候周期性变化特征。

(1) 气温: 根据气温小波分析结果 (图 4A) 可知, 1956—2016 年大通河流域平均气温存在 6 a、13 a 及 22 a 尺度的周期变化, 结合小波方差图可知, 22 a 尺度的周期变化占据主周期, 1956—2016 年共经历了 5 个正相位, 分别为 1956—1961 年、1970—1976 年、1985—1991 年、1999—2006 年、2014—2016 年; 4 个负相位、分别为 1962—1969 年、1977—1984 年、1992—1998 年、2007—2013 年。此外,



2.2.2 年际变化特征

(1) 径流变化趋势特征。1956—2016年大通河尕日得、青石嘴和享堂3个水文站多年平均径流量分别为8.53亿 m^3 , 16.39亿 m^3 、27.52亿 m^3 。其中, 尕日得站年均径流量最大值出现在1989年的16.28亿 m^3 , 最小值出现在1973年的3.87亿 m^3 , 极差为12.41亿 m^3 ; 青石嘴站年均径流量最大值出现在1989年的29.3亿 m^3 , 最小值出现在1979年的8.64亿 m^3 , 极差为20.66亿 m^3 ; 享堂站年均径流量最大值出现在1989年的50.19亿 m^3 , 最小值出现在2015年的19.95亿 m^3 , 极差为30.24亿 m^3 。由图6可知, 除享堂站径流量呈现出下降趋势外(倾向率为 -0.87 亿 $\text{m}^3/10\text{a}$ ($p < 0.05$)), 尕日得和青石嘴站均呈现出一定的上升趋势, 其上升速率分别为0.1亿 $\text{m}^3/10\text{a}$, 0.3亿 $\text{m}^3/10\text{a}$ 。分析得到大通河上游、中游的尕日得和青石嘴站径流量呈增加趋势, 这得益于近年来降水的增加及温度升高引起的冰雪融水消融, 下游的享堂站受人类活动的影响(跨流域调水及下垫面的改变)径流量呈现下降趋势, 这与董军等^[9]关于大通河的研究结论基本一致, 但其变化速率与之不同, 主要是本文所选用的站点及研究时段不同导致的。气候因素一直影响大通河径流变化, 但在一定的条件下, 人类活动因素反而占据主导地位, 人类活动与气候变化对大通河径流影响的具体细节仍需进一步工作。

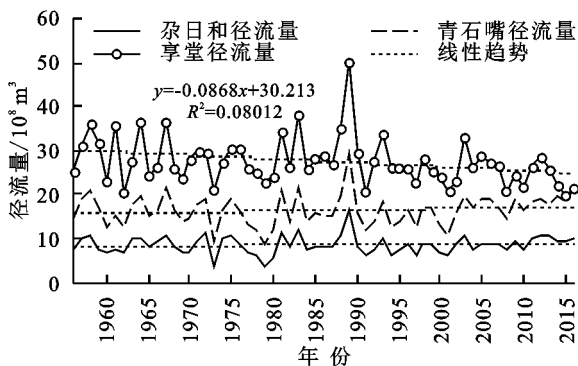


图6 大通河1956—2016年径流量变化特征

(2) 突变分析。运用M-K检验法对大通河1956—2016年径流量进行突变分析(图7), 可以看出: 尕日得站的UF与UB曲线在置信区间内存在多个交点, 通过对累积距平和变化趋势进行分析后发现, 尕日得径流量在2010年前后发生突变, 突变前平均径流量为8.37亿 m^3 , 突变后平均径流量为9.98亿 m^3 , 突变后较突变前增加了1.61亿 m^3 。通过分析其UF变化曲线可知, 尕日得站在1956—1977年UF曲线波动剧烈, 在1978—1987年和1994—2011年 $UF < 0$, 径流量下降; 在2012—2016年 $UF > 0$, 年径流量上

升。根据青石嘴站M-K检验曲线、累积距平曲线及趋势特征综合分析判定其突变发生于2001年, 突变前平均径流量为15.83亿 m^3 , 突变后平均径流量为18.13亿 m^3 , 突变后较突变前增加了2.3亿 m^3 。通过分析其UF变化曲线可知, 青石嘴站在1956—1959年、1964—1969年和2007—2016年 $UF > 0$, 年径流量上升, 但未超过信度曲线, 增加趋势不显著; 1960—1963年、1977年、2006年 $UF < 0$, 年径流量下降; 1970—1976年波动起伏剧烈。享堂站UF, UB曲线在置信区间内相交于2000年, 结合累积距平曲线及其径流变化趋势特征认定2000年为享堂站的突变点, 突变前平均径流量为28.59亿 m^3 , 突变后平均径流量为24.75亿 m^3 , 突变后较突变前减少了3.84亿 m^3 。通过分析其UF变化曲线可知, 享堂站UF曲线在1956—1976年波动起伏剧烈, 1988—1995年 $UF > 0$, 年径流量上升, 1977—1987年和1996—2016年 $UF < 0$, 径流量呈现出明显的下降趋势, 其中2014—2016年超过信度曲线, 下降趋势显著。

(3) 周期变化特征。以大通河尕日得、青石嘴和享堂水文站1956—2016年径流量数据为基础, 基于Morlet复小波函数对其年际变化特征进行分析并通过小波方差检验, 小波分析结果见图8。

大通河尕日得水文站年净流量存在13a和22a尺度的周期震荡, 经小波方差检验发现, 22a尺度的周期震荡是其第一主周期, 在整个研究时段内经历了4个“丰—枯”转换期; 13a尺度的周期变化在20世纪90年代以前表现较为强烈, 研究时段内经历了6个“丰—枯”转换期。青石嘴水文站存在6a, 10a和22a尺度的周期震荡, 22a尺度是其第一主周期, 共经历了4个“丰—枯”转换期, 在10a尺度上经历了8个“丰—枯”转换期, 在6a尺度上波动不明显。享堂水文站存在5a, 9a和22a尺度的周期变化, 经小波方差检验22a是其第一主周期, 在整个研究时段内均有体现, 而5a的周期震荡出现在1970年以前, 1970年以后这种周期震荡逐渐被9a左右的周期震荡所取代。

通过上述分析可知, 大通河3个水文站均存在22a尺度的主周期变化, 在此周期内, 均经历了4个“丰—枯”交替循环过程。其次, 3个水文站中, 尕日得水文站的周期变化与气温的周期变化呈现出较好的关系, 说明其可能受气温的影响较大; 另外青石嘴和享堂站的周期变化较为复杂, 存在多尺度的周期震荡, 这可能受其他补给方式及水资源开发利用的影响。

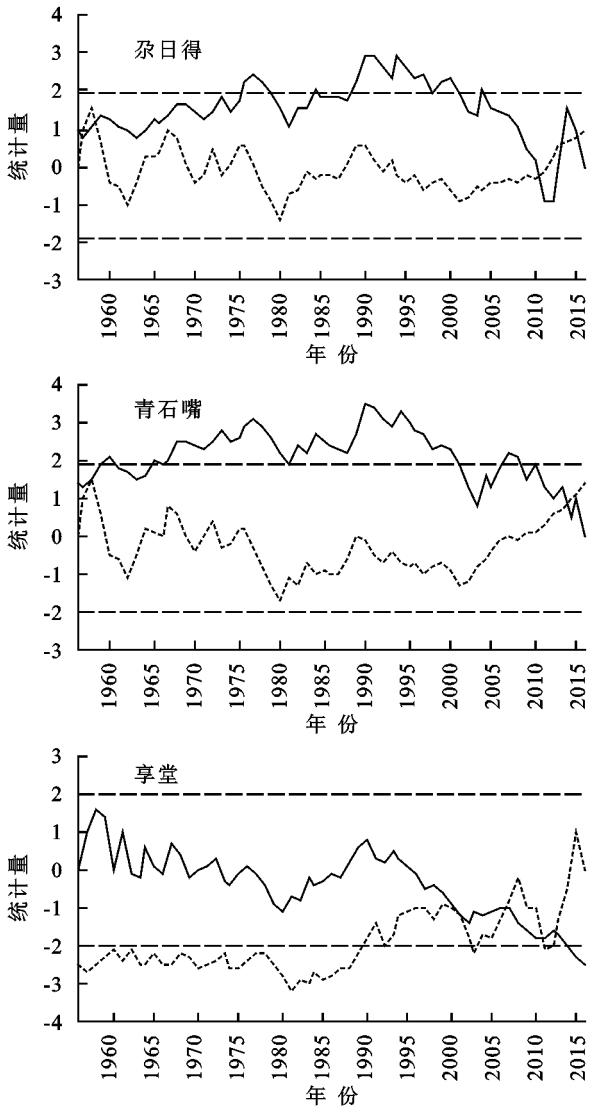


图 7 1956—2016 年大通河径流量突变特征

2.3 影响因素

2.3.1 相关性分析 选取大通河尕日得、青石嘴和享堂站 1956—2016 年径流量数据与同期大通河流域气象数据进行相关性分析(表 1),以揭示气候要素对大通河径流的影响。

由表 1 可知,尕日得站除平均最高气温外,与其他气候要素呈正相关关系,其中与降水量相关系数最大,为 0.395($p<0.01$);青石嘴站与尕日得站相关系数趋同,除平均最高气温外,与其他气候要素呈现出正相关关系,其中与降水量相关系数最大,为 0.5($p<0.01$),其次为平均最低气温 0.385($p<0.01$);享堂站由于跨流域调水等人类活动的影响,径流变化的影响因素较为复杂,与降水量相关系数为 0.301($p<0.05$),与其他气象要素均为负相关关系。综上所述,大通河 3 个水文站径流量与降水的相关性较好,这表明降水是大通河径流的主要补给方式,气温通过影响冰雪融水和蒸散发来作用径流量。

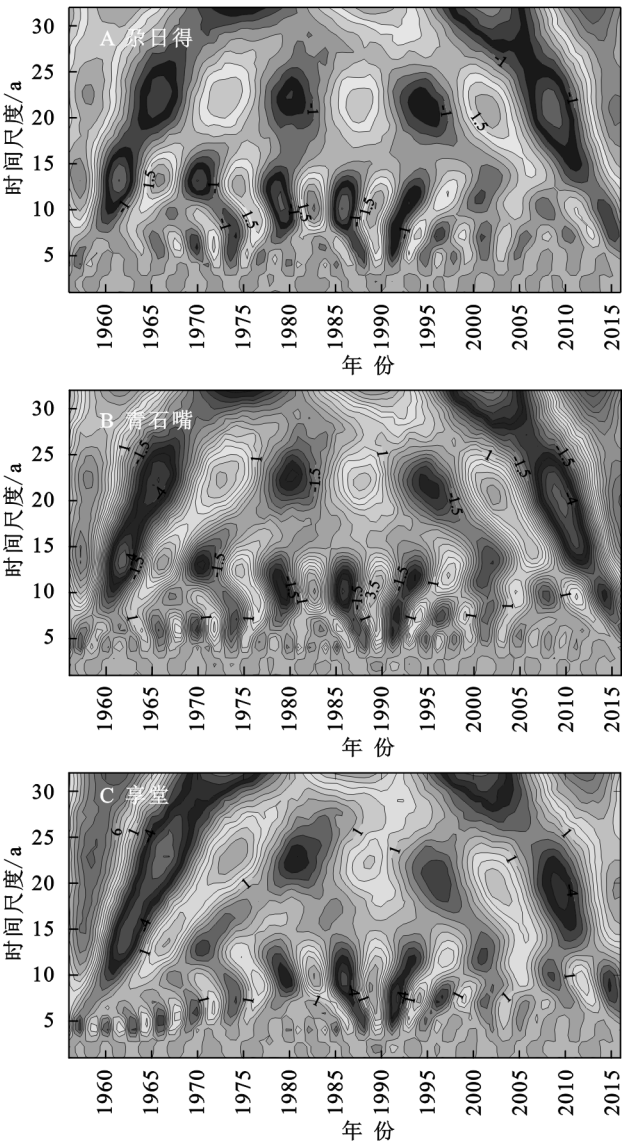


图 8 1956—2016 年大通河径流周期性 Morlet 小波分析

此外,刘赛艳等^[12]研究认为自 20 世纪 90 年代以来,在全球气候变暖的大背景下,大通河源区雪线的不断上移甚至消失导致了径流量的显著减少;说明温度对径流变化减小的作用一方面体现在影响冰川积雪的储量来作用径流量,另一方面则是通过影响蒸发作用进而减少径流量,但就其在径流变化中所贡献的程度仍需进一步研究。

表 1 径流量与气温、降水相关系数

站点	平均气温	平均最低气温	平均最高气温	降水量
尕日得	0.099	0.287*	-0.079	0.395**
青石嘴	0.187	0.385**	-0.007	0.500**
享堂	-0.299*	-0.099	-0.467**	0.301*

注: **、* 分别表示通过 0.01、0.05 显著性检验。

2.3.2 人为因素的影响分析 人为因素对大通河流域径流的影响主要来自于两方面,一是跨流域调水引起径流量下降。流域内目前已建成跨流域调水工程 3 处,

分别为 1995 年“引大入秦”工程,设计引水量 4.43 亿 m^3 ; 2003 年“引疏济金”工程,设计引水量 0.4 亿 m^3 ; 2016 年“引大济湟”一期工程,设计引水量 3.5 亿 m^3 。随着生产、生活用水的增加及社会经济的发展,人们对大通河的取水量势必会增加,这也将导致大通河径流量逐年减少。二是流域地表覆被变化也会对径流产生一定的影响,朱丽蓉等人^[27]对干旱区的昌化江径流研究发现,大规模经济作物的种植、大型水利工程建设 and 土壤侵蚀造成的下垫面变化间接导致了昌化江径流量下降;代晓颖等人^[28]通过对秦淮河流域的研究发现随着城市化进程的发展,1987—2013 年流域内建设用地大幅度增加,植被覆盖度呈减少趋势,使得其调节径流的功能减弱,洪涝风险增加。总体上来看,大通河流域人类活动对径流的影响主要体现在跨流域调水工程和地表覆被变化两方面。根据相关研究可知^[13],大通河流域自 20 世纪 90 年代以来,土地利用类型以草地和林地为主,没有发生大的变化,因此地表覆被变化对径流的影响作用较弱,引起大通河径流变化的主要人为因素是跨流域调水工程。

3 结论

(1) 1956—2016 年大通河流域气候呈现暖湿化趋势,气温变化速率为 $0.22^\circ\text{C}/10\text{ a}$ ($p < 0.01$),降水变化速率为 $26.78\text{ mm}/10\text{ a}$ ($p < 0.01$);气温、降水分别在 1999 年、1982 年发生变暖、增加性突变;且两者小波主周期分别为 22 a, 20 a。

(2) 大通河流域年内径流量呈现出均匀分布状态,尕日得、青石嘴和享堂 3 个水文站在汛期(5—10 月)的径流量分别占其年径流量的 89.56%, 87.33% 和 81.97%。1956—2016 年,大通河尕日得和青石嘴站的径流量以 $0.1\text{ 亿 m}^3/10\text{ a}$, $0.3\text{ 亿 m}^3/10\text{ a}$ 上升,享堂站径流量以 $-0.87\text{ 亿 m}^3/10\text{ a}$ ($p < 0.05$) 的速率下降;且尕日得、青石嘴和享堂三站分别在 2010 年、2001 年、2000 年发生突变,除享堂站外,其余两站突变后径流量均增加;大通河 3 个水文站均存在 22 a 尺度的主周期变化,且周期内均经历了 4 个“丰—枯”交替循环。

(3) 大通河 3 个水文站径流量与降水量均呈显著的正相关关系,降水是其主要补给来源;与平均最高气温呈现出负相关关系;尕日得和青石嘴站与平均气温、平均最低气温呈现出正相关关系。这表明径流变化除受气候变化的影响外,还受人类活动等因素的影响。由于尕日得和青石嘴站处于河流中上游,人为因素干扰较小,气候变化是其径流的主要影响因素。一方面气温升高导致的冰雪融水补给径流,另一方面

可能存在温度升高加快河流的蒸发导致径流减小的影响。下游的享堂站则由于跨流域调水等人类活动的影响,径流变化较为复杂。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2013: The physical science basis [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [2] 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.
- [3] 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): 121-125.
- [4] 王珂, 蒲焘, 史晓宜, 等. 澜沧江源区气温与降水对径流变化的影响[J]. 气候变化研究进展, 2020, 16(3): 306-315.
- [5] Gao J, Yao T D, Masson-Delmotte V, et al. Collapsing glaciers threaten Asia's water supplies [J]. Nature, 2019, 565: 19-21.
- [6] 孙栋元, 齐广平, 马彦麟, 等. 疏勒河干流径流变化特征研究[J]. 干旱区地理, 2020, 43(3): 557-567.
- [7] 张雪琪, 满苏尔·沙比提, 刘海涛, 等. 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, 2019, 36(1): 58-66.
- [8] 李云武, 崔力超, 王冠星. 黑河上游八宝河流域径流变化及其对气候变化的响应[J]. 水文, 2019, 39(2): 39-43.
- [9] 董军, 胡进宝, 魏国孝. 大通河流域径流变化及特征分析[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(6): 75-80, 87.
- [10] Zheng S, Cheng H, Shi S, et al. Impact of anthropogenic drivers on subaqueous topographical change in the Datong to Xuliujing reach of the Yangtze River[J]. Science China Earth Sciences, 2018, 61(7): 940-950.
- [11] 黄维东, 牛最荣, 刘彦娥, 等. 梯级水电开发对大通河流域洪水过程的影响分析[J]. 水文, 2016, 36(4): 58-65.
- [12] 刘赛艳, 黄强, 解阳阳, 等. 大通河流域上游径流变化特征与突变分析[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2016, 44(3): 219-226.
- [13] 王大超. 大通河径流变化特征及其影响因素探析[D]. 兰州: 兰州大学, 2019.
- [14] 黄维东, 牛最荣, 马正耀, 等. 大通河流域水能水资源开发对河流水文过程和环境的影响[J]. 冰川冻土, 2013, 35(6): 1574-1581.
- [15] 张晓晓, 张钰, 徐浩杰. 1950—2005 年大通河流域径流变化特征及影响因素[J]. 水文, 2013, 33(6): 90-96.
- [16] 刘赛艳, 黄强, 王义民, 等. 大通河流域土地利用/覆被变化的水文响应[J]. 冰川冻土, 2016, 38(6): 1658-1665.
- [17] 王伟. 上游大通河流量对长江盐水入侵影响研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(3): 106-111.
- [18] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 2007.