

大通河流域径流变化及特征分析

董军¹, 胡进宝¹, 魏国孝²

(1. 中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司, 陕西 西安 710032;

2. 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: 根据大通河流域尕大滩和享堂两个水文站 1952-2014 年的逐月径流量资料, 用不均匀性分析了径流量的年内分配情况, 使用 Mann-Kendall 检验方法和 Morlet 小波变换对径流量突变和周期性分别进行了分析。结果表明: 大通河流域的汛期主要为 5-10 月, 尕大滩站和享堂站汛期径流量分别占全年的 87.81% 和 81.9%。越向下游, 大通河径流年内分配越均匀; 1991 年之前, 大通河上游和下游径流变化都呈下降趋势, 1994 年之后, 上游尕大滩站径流量呈微弱的增加趋势, 下游享堂站径流量呈快速下降趋势; 上游尕大滩站径流量存在 4、8、21a 左右的周期震荡, 下游的享堂站径流量则存在着 3、6、31a 左右的周期震荡; 1994 年之前径流主要受气温和降水等气象的影响, 之后人类活动占主导地位。

关键词: 径流变化; Mann-Kendall 检验; Morlet 小波分析; 大通河流域

中图分类号: TV121; P333

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2018)06-0075-06

Analysis of runoff variation and characteristics in Datong River Basin

DONG Jun¹, HU Jinbao¹, WEI Guoxiao²

(1. Northwest Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Consulting Group, Xi'an 710032, China;

2. Key Laboratory of Western China Environmental Systems, Ministry of Education / College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Based on the runoff data measured by Gadatan hydrological station and Xiangtang hydrological station in the Datong River Basin from 1952 to 2014, the distribution of runoff during the year was analyzed using unevenness, the mutation and periodicity of runoff in the basin were analyzed respectively by Mann-Kendall nonparametric test method and Morlet wavelet transform method. The results show that The flood season of the Datong River Basin was mainly from May to October, with a runoff proportion of 87.81% in Gadatan hydrological station and 81.9% in Xiangtang hydrological station. The upstream area presented a more uneven coefficient and a higher concentration rate than the downstream area. Before 1991, the runoff changes in the upper and lower reaches of the Datong River both showed a downward trend. After 1994, the flow of the Gadatan station showed a slight increase trend, and the runoff at the Xiangtang Station still showed a rapid downward trend. There are periodic oscillations around 4a, 8a, 21a in the Gadatan station, with 3a, 6a, and 31a occurred in the Xiangtang station. Before 1994, runoff was mainly affected by temperature and precipitation. After 1994, it was mainly affected by human activities.

Key words: runoff variation; Mall-Kendall test; morlet wavelet analysis; Datong River Basin

1 研究背景

伴随着社会经济的快速发展, 水资源的消耗量

日益俱增^[1-3]。水资源短缺问题主要有水量供给不足和水质污染严重, 尤其是在缺水严重的西北干旱半干旱区, 淡水资源变得更加珍贵。径流过程主要

收稿日期: 2018-04-21; 修回日期: 2018-06-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(41471023)

作者简介: 董军(1989-), 男, 河南三门峡人, 硕士, 助理工程师, 主要从事工程水文学方面的研究。

通讯作者: 魏国孝(1966-), 男, 甘肃会宁人, 博士, 教授, 主要从事干旱区水资源与环境方面的研究。

是流域下垫面与气候条件综合作用的结果,其时空演化规律是水文水资源学研究的重点^[4-6]。在人类活动和气候变化的影响下,径流的年内分配等也会发生变化。研究表明大通河流域周边流域的径流量均发生了显著的时空变化^[7-10]。

大通河为黄河一级支流湟水的最大支流,也是海东地区的主要河流,多年平均径流量 $28 \times 10^8 \text{ m}^3$,水量相对丰富,大通河流域先后规划并建设了“引大入秦”、“引大济湟”、“引大济西”等跨流域调水工程,成为青海东部和甘肃中西部重要的水源地,引起了越来越多学者的关注^[11-13]。张晓晓等^[14]对大通河的径流进行了分析,结果表明在研究时段大通河流域年径流量呈微弱减小趋势,王丽君等^[15]则研究了大通河流域径流溯源度与河长的关系,刘赛艳等^[16]则对大通河上游的径流量变化进行了分析,结果发现上游径流量呈减小趋势。近些年水利工程的修建和生态环境的变化对径流量的影响越来越大,但是对大通河不同河段分别进行研究的成果较少,而这些研究对大通河流域水资源配置和综合治理至关重要。

本文在收集大通河流域天然径流资料的基础上,借助滑动平均、Mann-Kendall(M-K)检验和小波分析等方法,对大通河流域不同段水文站径流的年内年际变化特征和趋势及周期性进行分析,旨在为大通河流域水资源的开发利用与综合治理提供合理依据,为当地的生态环境保护提供参考。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

大通河位于 $36^{\circ}30' \sim 38^{\circ}25' \text{ N}$ 、 $98^{\circ}30' \sim 103^{\circ}15' \text{ E}$ 之间,是黄河的二级支流,如图1所示。大通河发源于祁连山脉东段拖来南山与大通山之间的沙果林那穆吉木岭,自西北向东南流经青海省刚察、祁连、海晏、门源、互助、乐都等县和甘肃省的天祝、永登,于青海省的民和县享堂村汇入湟水。

大通河整个流域呈东西长、南北窄的狭长带状,海拔介于 $1\,700 \sim 5\,000 \text{ m}$,流域面积 $15\,133 \text{ km}^2$,干流全长 560.7 km ,河道坡降为 4.65% 。多年平均流量约 $89.3 \text{ m}^3/\text{s}$,年平均径流量为 $28 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

大通河流域地处内陆高原,周围群山环抱,东与黄土高原接壤,西面毗邻柴达木盆地,以南是湟水谷地,北与河西走廊相连,气候类型为大陆性气候,日照时间长,辐射强度大,昼夜温差大,年平均气温为 $-1 \sim 8 \text{ }^{\circ}\text{C}$,年平均降水量为 $400 \sim 500 \text{ mm}$,其中

汛期5-10月的降水量占全年降水量的80%以上。

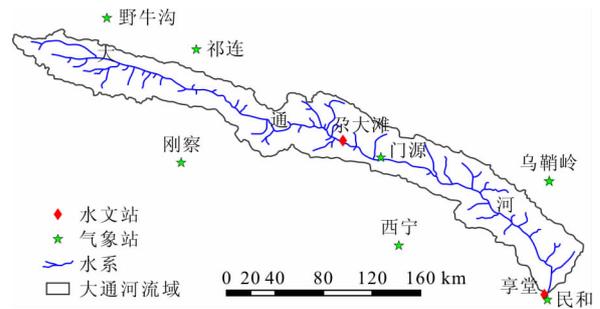


图1 大通河流域示意图

2.2 数据来源

大通河流域上游尕大滩站和下游享堂站1952-2014年的径流资料来自水文年鉴。大通河流域及周边气象站(野牛沟、祁连、刚察、门源、西宁、民和、乌鞘岭等)的1960-2013年的年平均气温和年降水资料来自中国气象数据中心。

2.3 研究方法

本文使用年内分配不均匀系数 C_v ^[17]来分析大通河流域径流量的年内分配情况,使用滑动平均和M-K秩次检验^[18]来分析大通河径流的年际变化趋势,并对径流的突变性进行了分析研究,使用Morlet小波分析^[19]来研究径流的丰枯变化和周期规律。

3 结果与分析

3.1 径流的年内变化

大通河上游和中游以尕大滩水文站为分界点,该站以上区域为高海拔山区和草原,主要以冰川沼泽及降水补给为主,中游和下游主要以降水补给为主。大通河尕大滩站和享堂站流量的年内分配如表1所示。

由表1可以看出大通河流量在年内的变化呈现出明显的单峰曲线,上游尕大滩站流量在1月和2月最小,占全年比重的 1.66% ,3月份到4月份随着冰川的融化,流量逐渐增加,5月份随着温度的快速升高和降水量的逐渐增多,流量也迅速增加,在7月达到最大,为 $133.4 \text{ m}^3/\text{s}$,径流量占全年比重的 22% ,从9月开始逐渐减小,10-11月份急剧减小,到12月降低到低值水平。春季(3-5月)、夏季(6-8月)、秋季(9-11月)、冬季(12-2月)流量分别占全年流量的 14.7% 、 54.6% 、 27.7% 和 3.0% 。汛期(5-10月)径流占全年径流的 87.81% 。下游享堂站的流量变化趋势与尕大滩站相同,也呈单峰

曲线,在 7 月和 8 月最大,分别为 201.5 和 198.6 m^3/s ,在 1 月和 2 月最小,分别为 20.2 和 20.1 m^3/s 。享堂站四季的流量分别占全年流量的

15.7%、48.9%、29.0%、6.5%。汛期流量占全年的 81.9%。

表 1 大通河流域流量年内分配特征

月份	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	
尕大滩站	流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	5.0	5.1	8.6	27.8	52.5	79.2	133.4	118.7	100.7	48	19.3	8.1
	百分比/%	0.82	0.84	1.43	4.59	8.66	13.06	22.0	19.58	16.61	7.92	3.18	1.34
享堂站	流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	20.2	20.1	26.1	51.6	87.7	116.8	201.5	198.6	171.7	89.9	44.9	28.0
	百分比/%	1.91	1.9	2.47	4.88	8.3	11.05	19.06	18.78	16.24	8.5	4.25	2.65

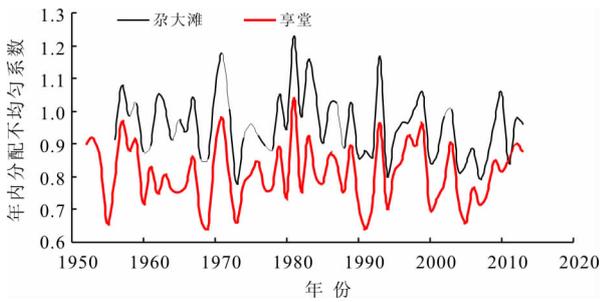


图 2 大通河流域径流量年内分配不均匀系数变化

此外,本文对大通河流域两个水文站径流量的年内分配不均匀系数进行了分析,结果如图 2 所示。从图 2 可以看出大通河流域径流量年内分配比较不均匀,尕大滩站和享堂站的多年年内分配不均匀系数分别为 0.89 和 0.75。两个水文站径流量的年内分配不均匀系数变化趋势相同,从 1980 年以后有下降趋势,这主要是受人类活动影响。尕大滩站不均匀系数较享堂站大,这是因为在尕大滩站至享堂站之间修建了较多水电站,玉龙滩、东旭、雪龙滩、王天沟、连城、享堂峡等电站的水量调节对享堂站径流量的年内分配影响很大,涂新军等^[20]、黄生志等^[21]等研究表明水利工程水量调节降低了径流的年内集中程度和不均匀性,这与本文的结论一致。另外尕大滩站位于高海拔地区,其径流主要集中在汛期,这在一定程度上增加了径流年内分配的不均匀性,这与表 1 中两个水文站在汛期的径流量占比相一致。

3.2 径流的年际变化

为了研究大通河径流的年际变化,对尕大滩站和享堂站的年径流量及 5 a 滑动平均进行分析,得到的径流量年际变化如图 3 所示。

从图 3 看出,1956 - 2013 年尕大滩站年径流量呈微弱的增加趋势,变化率为 $0.19 \times 10^8 \text{ m}^3/10\text{a}$,多年平均径流为 $16.04 \times 10^8 \text{ m}^3$,径流量最大值和最小值分别出现在 1989 和 1979 年,径流量分别为 29.2

$\times 10^8$ 和 $8.54 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。从 5 a 滑动平均可以看出,1956 - 1975 年,1990 - 2013 年尕大滩站径流量波动较为平缓,1975 - 1990 年径流量波动较为剧烈。享堂站的径流量呈减小趋势,变化率为 $0.91 \times 10^8 \text{ m}^3/10\text{a}$,多年平均径流量为 $27.71 \times 10^8 \text{ m}^3$,径流最大值出现在 1989 年,为 $50.2 \times 10^8 \text{ m}^3$,最小值出现在 2004 年,仅为 $13.22 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。从 5 a 滑动平均值可以看出享堂站径流量从 1952 - 1977 年逐年减小,1978 - 1986 年径流量逐年增加,1987 - 2014 年径流量逐渐减小。两个水文站的径流量都在 1989 年出现极大值,这是因为在 1989 年黄河上游地区发生了大面积降水,出现了洪水过程,所以该突变不具备连续性。

本文的研究结果与张晓晓等^[14]对大通河的研究结果相一致,享堂站径流量呈减小趋势,而与刘赛艳^[16]得到的结果不同,本文研究结果表明上游尕大滩站径流量呈微弱增加趋势,而刘赛艳的研究结果是大通河上游径流量呈减小趋势,分析其原因,首先是使用的研究方法不同,刘赛艳研究线性趋势的对象是径流量的累积距平,而本文研究线性趋势的对象是 5 a 滑动平均,另外使用的径流量时间序列不同,本文使用的时间序列比刘赛艳的研究序列长。

本文还采用 M - K 秩次检验方法来检验大通河上游尕大滩水文站和下游享堂水文站径流序列的显著性和突变点,将计算得到的 UF_k 和 UB_k 曲线绘制在统一坐标范围内,显著性水平取 $\alpha = 0.05$,临界值 $U_{0.05} = \pm 1.96$ 。若两条曲线超过临界线,则说明上升或者下降趋势明显,若没有通过 $\alpha = 0.05$ 的显著性检验,则表明流量可能在该时段发生了突变,以此来鉴别自然因素和人类活动对径流量的影响。尕大滩和享堂站径流量的 M - K 检验结果如图 4 所示。

从图 4 可以看出,尕大滩的 UF 和 UB 曲线在 1959 和 2011 年有两个交点,对这两个可能的突变点

进行分析后发现,尕大滩站径流量在1959和2011年附近并无显著性趋势变化,说明上游尕大滩站径流量并未出现真正的突变,而享堂站的 UF 和 UB 曲线在1994年临界线之间有一个交点,并且在2000年超出了临界线,因此享堂站径流量在2000年后显著下降,在1994年发生突变,引大入秦工程的建成通水是引起突变的原因。

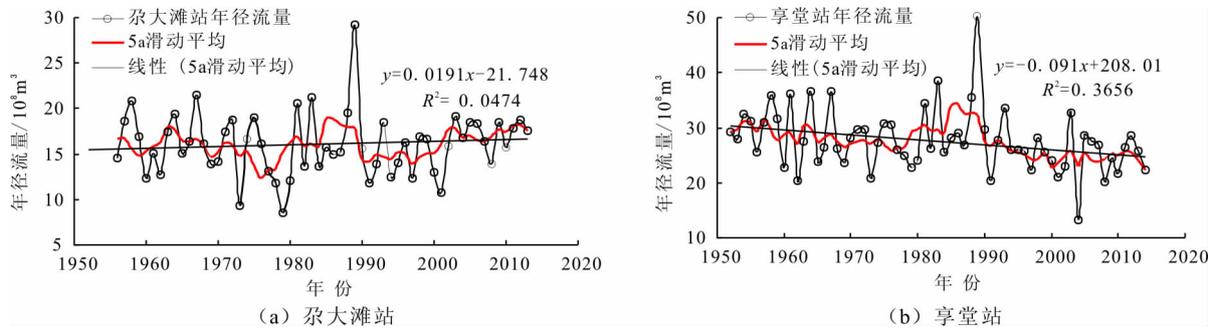


图3 大通河流域径流量年际变化

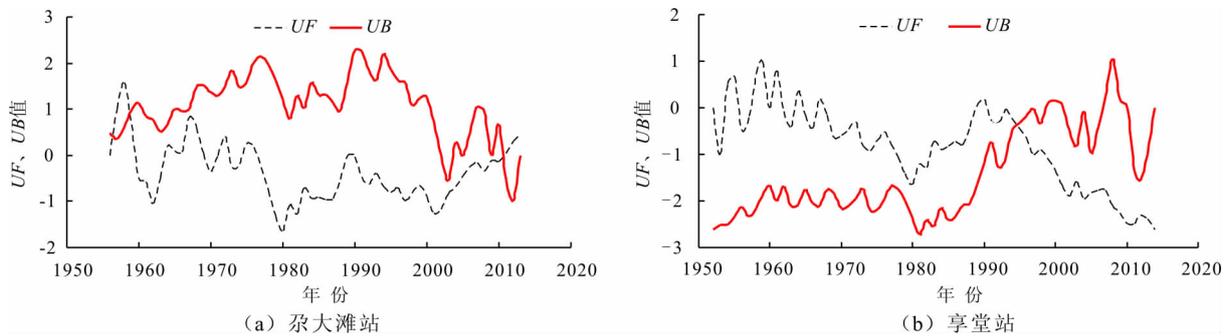


图4 大通河流域年径流量 $UF-UB$ 变化

图5表明大通河流域的年径流具有明显的周期性。大通河上游的尕大滩站径流量存在4、8、21 a左右的周期震荡。最大峰值出现在21 a左右,说明21 a左右的周期震荡最为明显,为其第1主周期,其次是8和4 a左右的短周期。在特征时间为4 a的尺度下,年径流经历了多次循环交替,主要分布在1970年之前和2000年之后,在8 a左右的特征时间尺度下,周期循环主要分布在1975-1995年,在21 a的特征时间尺度下,径流规律较明显。1956-1965年偏少,1966-1975年偏多,1976-1984年偏少,1985-1993年偏多,1994-2003年偏少,2004-2014年偏多。大通河下游的享堂站径流量则存在着3、6、31 a左右的周期震荡。其中31 a为第1主周期,3和6 a时间尺度下的循环交替时间与尕大滩站相同,31 a时间尺度下,从1952-1965年偏多,1966-1982年偏少,1983-1995年偏多,1996-2011年偏少。由此可见同一条河流的上游和下游

3.3 径流的周期性变化

小波分析方法是在傅里叶分析方法上发展而来,可以提供序列变化的尺度和时间,目前已广泛的应用于水文气象要素的变化特征中。本文使用Morlet小波变换对尕大滩站和享堂站1952-2014年的年径流序列进行周期性特征分析,得到的结果如图5所示。

径流变化的周期性不完全一致,越到下游,其主周期越长。

3.4 径流变化影响因素

引起径流变化的因素主要有自然因素和人类活动,在自然因素中,气温主要是通过影响冰川融水等补给源和蒸发来间接影响径流量,降雨量则是直接引起径流量的变化,人类活动一方面通过增加河道外引用水量直接导致径流量变化,另外人类活动还可以通过生产等活动改变流域下垫面间接改变径流量。本文对大通河流域气象站的气温和降水量进行分析,来反映自然因素对大通河径流量的影响。大通河上游和整个流域的气温和降水的年际变化如图6所示。

图6(a)、6(b)为尕大滩站以上流域的气温和降水量变化趋势,图6(c)、6(d)为大通河整个流域的气温和降水量变化趋势。尕大滩站以上的多年平均气温和降水量分别为 -0.7°C 和401 mm,整个流

域的多年平均气温和降水量分别为 1.9℃ 和 408 mm。尕大滩站上游的气温和降水量变化趋势与整个流域变化趋势相同。1960 - 2013 年,大通河流域的年平均气温呈上升趋势,其增温率为 0.27℃/10a,5 a 滑动平均由 1960 年的 1.4℃ 增加到 2013 年的 3.0℃。从 5 a 滑动平均的趋势线可以看到,从 1960 - 1982 年大通河流域气温呈现出微弱的

上升趋势,增温率为 0.078℃/10a,1983 - 2013 年大通河流域气温升高较快,变化率为 0.429℃/10a。其中最低气温出现在 1967 年,为 0.7℃,最高气温出现在 1988、2006 和 2013 年,均为 3.0℃,最高气温的出现都在近 20 年,这是因为 1981 年之后中国西北地区气温大幅增加,大通河流域气温处于相对高温状态^[22]。

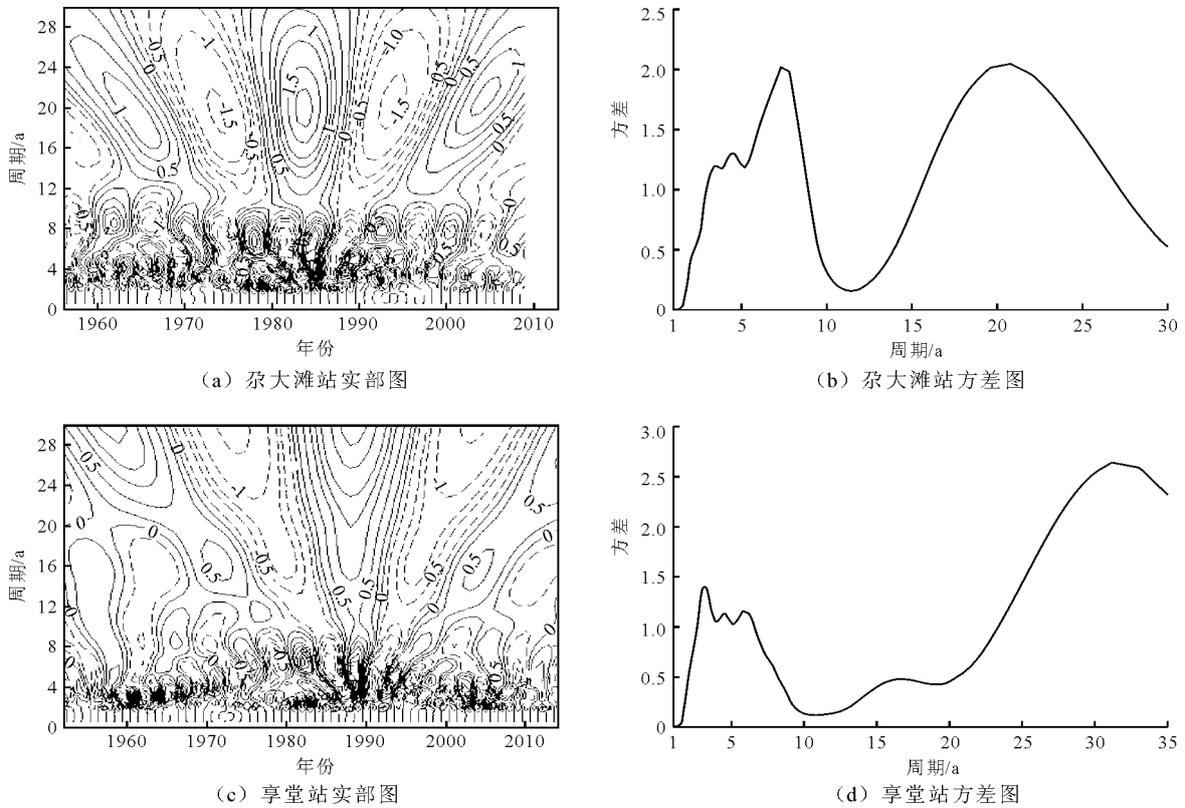


图 5 大通河流域尕大滩站和享堂站年径流量小波变换实部及方差图

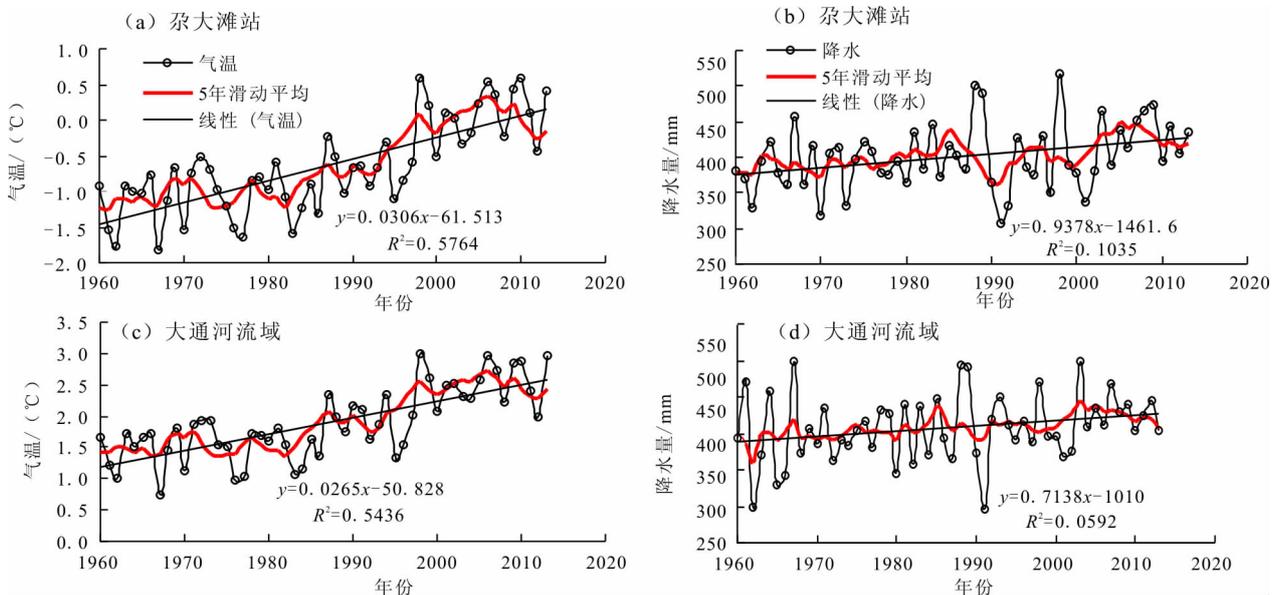


图 6 大通河流域尕大滩站以上流域及整个大通河流域气温和降水量年际变化

1960-2013年大通河流域的降水量整体呈上升趋势,变化率为7.1 mm/10a,其中1960-1982年降水量增加率为2.34 mm/10a,2003年后降水量变化率为6.40 mm/10a。1967、1988和2003年的降水量较大,分别为499、494和499 mm,降水量极小值出现在1962和1991年,分别为299和297 mm。

对尕大滩站和享堂站的径流量分别与大通河上游和全流域的气温和降水进行相关性分析,结果表明两个站的径流量与降水的相关性较好,相关系数分别为0.69和0.60,而与气温的相关性较差,分别为0.05和0.28。这是因为大通河径流与降水量直接相关,而气温则是通过影响其他气象要素来间接影响径流量。通过对比发现享堂站与气温的相关性好于尕大滩站,而与降水的相关性比尕大滩站差。另外人类活动对大通河流域径流量的影响很大。1960-1993年尕大滩站和享堂站的径流量变化趋势基本相同,但是1994年之后,尕大滩站的径流量逐年增加,而享堂站的径流量逐渐减小,这是因为从大通河向甘肃秦王川输水的“引大入秦”工程在1994年总干渠建成通水,输水渠首枢纽位于大通河下游的天堂寺,引大入秦工程的通水对大通河下游径流量影响很大。1994年以后气温和降水量的变化都呈升高趋势,气温的升高加快了冰川积雪的融化,在一定程度上增加了河流的径流,而降水量的升高直接导致径流量增加,然而由于人类活动,大通河下游的径流量依然呈减小趋势,这说明人类活动对径流量的影响超过了降水量和气温,是导致这段时间内径流变化的主要因素^[23-24]。

4 结论

本文利用大通河流域上游尕大滩站和下游享堂站的径流数据和大通河流域的气象站数据,对大通河流域径流变化特征及驱动因素进行了分析,得到以下结论:

(1)大通河流域径流量年内分配不均匀,享堂站四个季节的径流分别占全年径流的15.7%、48.9%、29.0%、6.5%。尕大滩站和享堂站汛期径流分别占全年的87.81%和81.9%。受水利工程的影响,大通河上游径流年内分配不均匀性高于下游。

(2)1952-1991年,大通河上游和下游径流变化趋势相同,基本呈上升趋势,1994年以后,受气温和降水影响,上游径流量呈微弱的增加趋势,1994年“引大入秦”工程建成通水后,下游享堂站径流量依然呈下降趋势。

(3)小波分析结果表明上游尕大滩站径流量存在存在4、8、21 a左右的周期震荡,21 a为第1主周期;下游的享堂站径流量则存在着3、6、31 a左右的周期震荡,其中31 a为第1主周期。

(4)影响大通河流域径流的主要影响因素为气温、降水量和人类活动。受径流补给方式的影响,大通河流域下游径流量与气温和降水的相关性好于上游。人类活动对径流量的影响超过气温和降雨量,成为影响径流变化的最主要因素。

参考文献:

- [1] SHARMA R H, SHAKYA N M. Hydrological changes and its impact on water resources of Bagmati watershed, Nepal [J]. *Journal of Hydrology*, 2006,327(3): 315-322.
- [2] 李艳,陈晓宏,张鹏飞. 北江流域径流序列年内分配特征及其趋势分析[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2007,46(5):113-116.
- [3] 陈晓宏,涂新军,谢平,等. 水文要素变异的人类活动影响研究进展[J]. *地球科学进展*,2010,25(8):800-811.
- [4] 陈志恺. 中国水资源的可持续利用问题[J]. *水文*, 2003,23(1): 1-5.
- [5] 张士锋,华东,孟秀敬,等. 三江源气候变化及其对径流的驱动分析[J]. *地理学报*,2011,66(1): 13-24.
- [6] 王国庆,金君良,林锦,等. 山西省中西河流域降水径流演变特征及响应关系[J]. *水资源与水工程学报*,2017,28(3): 1-4.
- [7] 周俊菊,石培基,师玮. 1960-2009年石羊河流域气候变化及极端干湿事件演变特征[J]. *自然资源学报*, 2012,27(1): 143-153.
- [8] 王钧,蒙古军. 黑河流域近60年来径流量变化及影响因素[J]. *地理科学*,2008,28(1): 83-88.
- [9] 蓝永超,胡兴林,肖生春,等. 近50年疏勒河流域山区的气候变化及其对出山径流的影响[J]. *高原气象*, 2012,31(6): 1636-1644.
- [10] 曹辉,黄强,畅建霞,等. 黑河径流时空演变规律分析[J]. *水资源与水工程学报*,2008,19(5): 69-72.
- [11] 姚进忠,牛最荣,黄维东. 引大入秦工程水资源优化配置研究[J]. *干旱区地理*,2005,28(3): 295-299.
- [12] 沙金霞,谢新民,张守平,等. 引大济湟工程受水区水量分配的重新调整与优化研究[J]. *水利水电技术*, 2012,43(9): 1-3+7.
- [13] 任松长,曹俊峰. 引大济西是解决西大河流域严重干旱缺水的重大措施[J]. *人民黄河*,1997,19(12): 45-46.
- [14] 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.

(下转第87页)

