

博尔塔拉河径流过程对气候变化的响应

魏天锋^a, 刘志辉^{a,b,c,d}, 姚俊强^a

(新疆大学 a. 资源与环境科学学院; b. 绿洲生态教育部重点实验室; c. 干旱生态环境研究所;
d. 旱半干旱区可持续发展国际研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830046)

摘要:以博尔塔拉河上游和中游为研究区,利用温泉站、博乐站 1992–2012 年月经流、降水、温度数据,采用统计分析、Mann–Kendall 非参数检验、水文特征分析参数分析了博河流域气候变化对径流的影响,得出以下结论:①20 世纪 90 年代以来,博尔塔拉河上游和中游径流量均呈波动上升趋势,其中近 10 年径流量增加趋势明显。②径流年际变化上游较稳定,而径流年内变化正好相反,且上游径流变化具有水热同期的特点,而中游具有滞后性。③温度是引起上游径流变化的主要因素,而农业灌溉、温度、降水的变化对中游径流变化有重要影响,其中温度的影响最为显著。

关键词:径流;气候变化;Mann–Kendall 法;博尔塔拉河

中图分类号:P333.1

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2014)05-0073-05

Response of runoff process on climate change in Boertala river

WEI Tianfeng^a, LIU Zhihui^{a,b,c,d}, YAO Junqiang^a

(a. School of Resources and Environment Science; b. Key Laboratory of Oasis Ecology of Ministry of Education;
c. Institute of Arid Ecology and Environmen; d. International Center for Desert Affairs – Research on Sustainable
Development in Arid and Semi-arid Lands, Xinjiang University, Urumqi 830046, China)

Abstract: Taking the midstream and upstream of Bortala river as the study area, the paper used the methods which are statistical analysis, Mann-Kendall nonparametric test and analysis parameters of hydrological characteristics and the data that are monthly runoff, precipitation and temperature on Wenquan and Bole station in 1992 ~ 2012 to analyze the impact of climate change on runoff. The results showed that runoff in midstream and upstream of the Bortala river appeared a trend of increase since 1990s. Runoff increased obviously in nearly 10 years. The interannual variability of runoff at upstream was stable. The annual variability of runoff was opposite, and runoff change at upstream had characteristic of hydrothermal same period. however, that of the midstream had a lag. The temperature is the main factor which causes runoff change at the upstream. The agricultural irrigation, temperature and precipitation are the main reasons of runoff change at the midstream. The influence of temperature on runoff is the most significant.

Key words: runoff; climate change; Mann–Kendall method; Bortala river

气候变暖已成为不争的事实,过去百年(1906–2005)全球平均气温约升高 0.74°C ^[1],进入21世纪以来,全球气温上升更加明显,研究表明,全球地表平均增温 $1.1\sim 6.4^{\circ}\text{C}$ ^[2]。在全球气候变暖的大背景下,不同国家或地区的气候都发生不同程度的变化,加剧了区域水循环,引起水资源在时空上的重新分布和水资源数量的改变,进而影响生态环境和

社会经济的发展^[3]。

河川径流作为地表水资源的重要组成部分,是支撑区域经济发展和生态环境改善的重要因素^[4]。然而随着气候的变化,这种因素变得越来越不确定。王国庆^[5]等对中国主要河流近六十年径流变化的研究表明,径流普遍呈减少趋势。同时,新疆地区在20世纪80~90年代气候变暖,造成冰川融化加强,

收稿日期:2014-06-01; 修回日期:2014-06-09

基金项目:国家自然科学基金重点项目(41130531);绿洲生态重点实验室2012年开放课题(XJDX0201–2012–09)

作者简介:魏天锋(1988–),男,甘肃庆阳人,硕士研究生,研究方向为自然地理学。

通讯作者:刘志辉(1957–),男,新疆乌鲁木齐人,教授,博士生导师,主要从事水资源与环境、生态及环境规划、土地资源规划与评价等研究。

降水部分增多,从而形成了径流增加的趋势^[6-7],然而径流量的增加不足以抵消蒸发量的增加,气候变化造成了严重的生态环境问题。艾比湖湖泊生态系统的退化就是气候变化和人类活动共同作用的缩影。从 20 世纪 50 年代以来,在区域气候波动和人类活动的双重影响下,艾比湖湖面急剧萎缩^[8]。其中人类活动对艾比湖的演化影响较大^[9],人类活动的影响主要表现在入湖水量的减少。而博尔塔拉河作为艾比湖的主要补给河流,在中下游地区,由于大面积的引水灌溉,加上流域的气候变化,河流流量显著减少,这不仅威胁着艾比湖生态系统的稳定,同时对河流自身健康形成严峻挑战。目前,有关博尔塔拉河的研究相对较少,大多集中在径流演变趋势分析^[10]、输沙率与流量的关系分析^[11]、地表水资源现状分析^[12]和流域水文特性研究^[13]等方面,而径流对气候变化的响应等方面的研究较少。考虑到博尔塔拉河下游地区受人类活动影响较大,因此,本文选择博尔塔拉河中上游为研究区,利用 Mann - Kendall 非参数检验对博尔塔拉河多年径流进行趋势分析及突变点检验,然后对径流突变年降水、温度与径流量做相关性分析,得出流域降水、温度变化对径流量的贡献,这些研究对于未来径流变化的预测及博尔塔拉河生态系统保护措施的提出具有参考意义。

1 资料与方法

1.1 研究区概况

博尔塔拉河地处新疆维吾尔自治区西北部,地理位置东经 79°53′~83°53′,北纬 44°02′~45°23′,位于新疆博州境内,东北部与塔城地区托里县相连,南部与伊犁哈萨克自治州相邻,西部、北部以别珍套山和阿拉套山为界,与哈萨克斯坦共和国接壤,海拔最高 4053m。山势总体西高东低。干流流经温泉县、博乐市,最后注入艾比湖,博乐水文站以上集水面积 6 637 km²(图 1)。

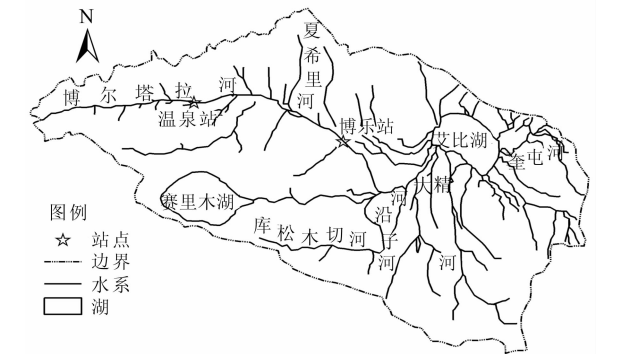


图 1 艾比湖流域水系图

源头至入湖口河流全长 252 m。沿流向分布的温泉隆起、博乐断隆,形成了上、中、下游 3 个盆地,各盆地的水资源转化均呈现上部渗漏下部溢出、基岩隆起成为盆地的天然地下坝体,在中游形成天然的地下水库。流域气候表现为冬夏漫长,春秋短暂,年平均气温 5.6℃。极端最高气温 44.2℃,极端最低气温 -36.4℃。温泉和博乐水文站、气象站是中上游的主要站点(见表 1)。

表 1 温泉站和博乐站信息 km², m

站名	水文站			气象站		
	经度	纬度	集水面积	经度	纬度	海拔
温泉站	81°02′	44°59′	2206	81°01′	44°58′	1354.6
博乐站	82°03′	44°52′	6637	82°04′	44°54′	531.9

1.2 数据资料

本文选取博尔塔拉河流域温泉和博乐水文站、气象站 1992 - 2012 年月径流、降水和月均温度数据。资料来源于新疆维吾尔自治区气象信息中心和水文水资源局。

1.3 研究方法

利用一元回归分析法对年降水、温度序列进行倾向趋势分析。同时,利用模比系数、变差系数、极值比等水文参数对年径流系列进行特征分析。然后利用 Mann - Kendall 非参数检验对年径流量进行突变点检验,对突变年的径流量与降水、温度进行相关性分析,分析降水、温度对径流的影响。

2 径流特征分析

2.1 径流年际变化特征

博乐站、温泉站是博尔塔拉河中上游代表性站点。由表 2 可知,博乐站、温泉站的多年平均径流量分别为 5.03 亿和 3.18 亿 m³;其中博乐站最大年径流量出现在 2002 年,为 7.71 亿 m³,最小年径流量出现在 2010 年,为 2.27 亿 m³;温泉站最大年径流量出现在 2002 年,为 3.94 亿 m³,最小年径流量出现在 1992 年,为 2.54 亿 m³;径流极值比分别为 0.29、0.65;变差系数(C_v)分别为 0.20、0.12。枯水年占系列年的比例均为 43%,其中博乐站、温泉站近 10 年枯水年占整个枯水年的比例分别为 33%、11%(图 2)。综上所述,博河径流年际变化上游较稳定,且整个系列年枯水年相对较少,其中近 10 年枯水年的减少趋势明显。

2.2 径流年内变化特征

博河属于季节性河流,径流随季节变化显著。

博乐站季节最小径流量出现在夏季,为 0.99 亿 m³;最大径流量出现在秋季,为 1.47 亿 m³,其中年内最大径流量出现在 11 月份,为 0.52 亿 m³;最小径流量出现在 5 月份,为 0.24 亿 m³。温泉站季节最小径流量出现在春季,为 0.59 亿 m³;最大径流量出现在夏季,为 1.31 亿 m³;其中年内最大径流量出现在 7 月份,为 0.51 亿 m³;最小径流量出现在 5 月份,为 0.19 亿 m³。博乐站、温泉站季节径流极值比分别为 0.67、0.45(见表 3)。同时,博乐站月径流模比系数曲线变化较平缓,而温泉站呈单峰型(图 3)。综上所述,博尔塔拉河径流年内变化中游较稳定,且温泉站径流变化具有水热同期的特点,而博乐站径流变化具有滞后性。

2.3 径流变化趋势及突变点分析

2.3.1 径流变化趋势分析 由图 4 可知,博乐站径流变化过程呈“M”型,温泉站呈“对数”型。整个系

表 2 径流年际特征							亿 m ³
站名	多年 平均 径流量	极值 比	变差 系数 C _v	最大年		最小年	
				年份	径流量	年份	径流量
博乐站	5.03	0.29	0.20	2002	7.71	2010	2.27
温泉站	3.18	0.65	0.12	2002	3.94	1992	2.54

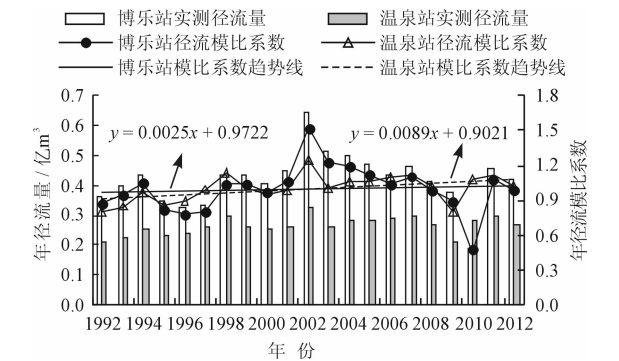


图 2 系列年径流量、径流模比系数随时间变化

表 3 径流年内特征									亿 m ³
站名	多年季节平均径流量				径流极 值比	最大径流量		最小径流量	
	春季	夏季	秋季	冬季		径流量	月份	径流量	月份
博乐站	1.15	0.99	1.47	1.43	0.67	0.52	11	0.24	5
温泉站	0.59	1.31	0.65	0.63	0.45	0.51	7	0.19	5

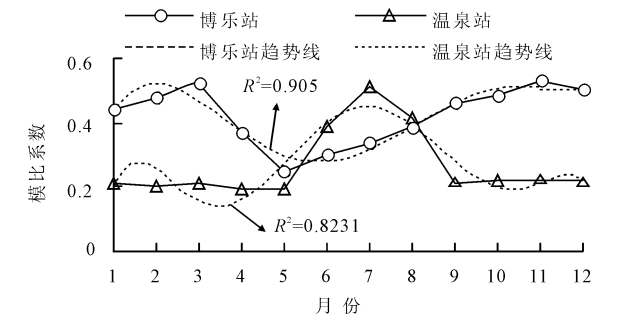


图 3 月径流模比系数随时间变化

列年温泉站、博乐站年径流量均呈波动上升趋势,且温泉站径流上升趋势较明显。

2.3.2 突变点分析 用 Mann - Kendall 检验了博河温泉站、博乐站 1992 - 2012 年径流变化趋势,结果如图 4 所示。博乐站和温泉站 UF 与 UB 两条曲线分别在 1993、1995、1998 和 1996 年相交,且交点均在临界线之内,即交点对应年份为突变发生的时间。博乐站和温泉站 UF 曲线分别于 2005 - 2007、1998 - 1999 和 2002 - 2012 年超出了临界线,说明 2005 - 2007、1998 - 1999 和 2002 - 2012 年径流上升显著,通过了 0.01 的显著性检验。

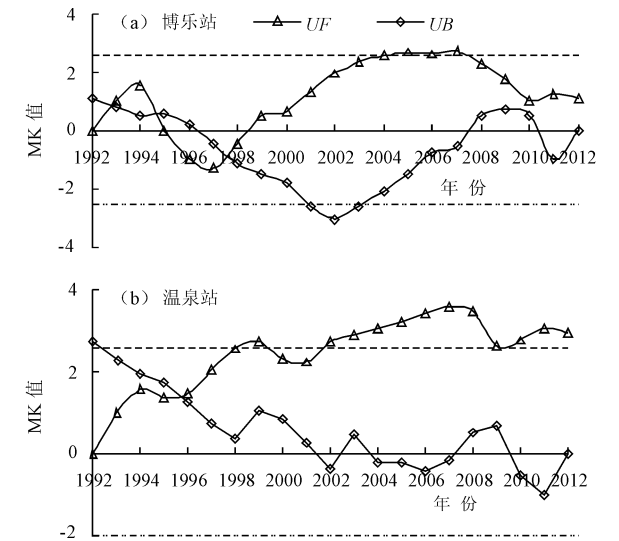


图 4 1992 - 2012 年径流量统计值随时间变化

3 降水、温度变化趋势及其对径流量响应分析

3.1 降水趋势变化

由图 5 可知,博河流域上游和中游降水均呈双谷型,温泉站 1992 - 1995 年、2001 - 2007 年降水量

呈现下降趋势,1996 - 2000 年、2008 - 2012 年呈现上升趋势;博乐站 1992 - 1996 年、2002 - 2006 年降水量呈现下降趋势,1997 - 2001 年、2007 - 2012 年降水量呈上升趋势,系列年降水整体表现为温泉站呈微弱下降趋势而博乐站呈上升趋势,且博乐站、温泉站降水变化过程同步,系列年降水量温泉站大于博乐站。

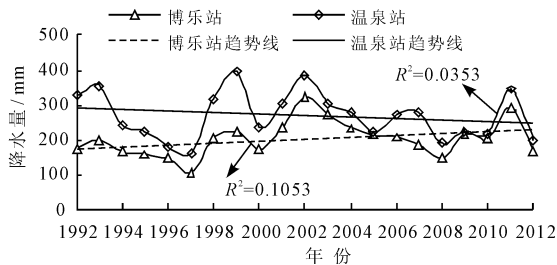


图5 多年降水量随时间变化

3.2 温度趋势变化

博尔塔拉河温泉站和博乐站系列年温度变化均呈双峰双谷型,博乐站 1992 - 1994 年、2000 - 2006 年、2011 - 2012 年温度呈波动下降,1995 - 1999 年、2007 - 2010 年温度呈波动上升;温泉站 1992 - 1993 年、1999 - 2002 年、2008 - 2012 年呈波动下降趋势,1994 - 1998 年、2003 - 2007 年呈波动上升趋势。温泉站和博乐站温度系列均呈上升趋势,且温泉站小于博乐站,仅 2006 - 2007 年温泉站温度高于博乐站(见图 6)。

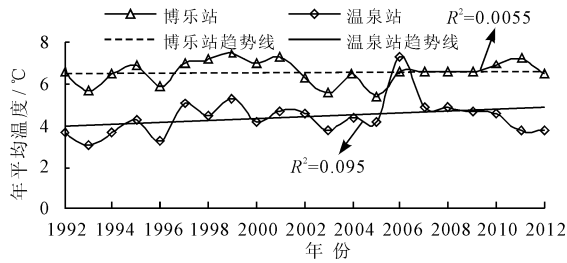


图6 年平均温度随时间变化

3.3 降水、温度对径流变化的响应分析

博尔塔拉河为降水、冰雪融水、地下水混合补给的河流^[10],温度和降水量的变化会对其造成很大的影响。为了分析年降水、温度对博河年径流的贡献,本文选取径流突变点为典型年,然后统计分析各站径流与降水、温度的相关性。由表 4 可知:

径流是气候与下垫面综合作用的产物,气候变化是径流变化的主要原因^[14-15]。博乐站 1993、1995 年径流量与温度均呈负相关,相关系数分别为 -0.68、-0.85,前者相关系数通过了 0.05 的显著

性检验,后者相关系数通过了 0.01 的显著性检验,这是因为博乐站位于蒸发量较大的平原区^[13],温度上升引起蒸发量增加是径流发生变化的主要原因;而 1998 年径流量与温度呈正相关性,相关性系数为 0.35,这说明中游地区 1998 年温度上升引起的蒸发量不足以抵消高山融雪径流量。1993、1995 年径流量与降水量均呈负相关,相关性系数分别为 -0.71、-0.28,前者通过了 0.01 的显著性检验,因为中游地区具有灌溉用水与降雨同期的特点,年内降水最集中的月份正好为农业灌溉的高峰时节。

综上所述,农业灌溉、降水、温度是引起中游地区径流变化的主要原因,而温度是引起中游地区径流变化的主要因素,其中温度的影响最为显著。

表 4 降水量、温度与径流量相关性分析

站名	年份	相关系数/ R^2	
		径流量 - 降雨量	径流量 - 温度
博乐站	1993	-0.71 **	-0.68 *
	1995	-0.28	-0.85 **
	1998	0.30	0.35
温泉站	1996	-0.08	0.52

注: * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$ 。

4 分析与讨论

由上述分析可知,博河 1992 - 2012 年径流量温泉站、博乐站均呈波动上升趋势,且温泉站径流上升趋势明显,上游径流的年际变化较为稳定,这是因为中游地区大面积的农业灌溉影响了博乐站的径流变化。整个系列年枯水年相对较少,其中近 10 年枯水年的减少趋势显得尤为显著,这与新疆北部地区 20 世纪 90 年代以来温度、降水的持续增加^[16]具有一致性。中游径流的年内变化较为稳定,上游径流变化具有水热同期的特点,而中游径流变化具有滞后性,这是因为河道地质构造的作用,使上游径流量最大出现在夏季,中游径流最大出现在冬季^[17]。

大气降水是河川径流演变的驱动因子。气温升高引起地表蒸发增加,也会使冰雪融水补给增多,从而改变径流的形成条件,是河川径流的重要影响因素^[18]。由上述对温泉站、博乐站系列年降水、温度分析可知,降水量的变化呈双谷型,整体呈波动上升趋势,且上游大于中游;同时,温度的变化呈双峰双谷型,整体呈波动上升趋势。这与 20 世纪 90 年代以来艾比湖流域向温湿变化的趋势^[19]一致。而对突变年径流量与降水量、温度进行相关性分析得出,农业灌溉、降水、温度是引起中游地区径流变化的主

要原因,而温度是引起中游地区径流变化的主要因素,其中温度的影响最为显著。

5 结 语

本文利用 Mann - Kendall 非参数检验、一元回归分析法、径流特征分析因子(变差系数、模比系数、极值比等)分析了博河流域 1992 - 2012 年径流与降水、温度的关系,同时结合流域历史文献资料,得到以下结论。

(1)20 世纪 90 年代以来,博河上游和中游径流量均呈波动上升趋势,其中中游 2005 - 2007 年径流上升显著,上游 1998 - 1999 年、2002 - 2012 年径流量上升显著,均通过了 0.01 的显著性检验。

(2)系列年径流年际变化上游较稳定,而径流年内变化正好相反,且枯水年所占比例呈减少趋势,其中近 10 年减少趋势显著;且上游径流变化具有水热同期的特点,而中游具有滞后性。

(3)径流突变发生在上游的 1996 年和中游的 1993、1995、1998 年。降水量、温度、人类活动是引起径流变化的主要原因,而温度是引起上游径流变化的主要原因,其中温度对其影响显著。

参考文献:

- [1] 刘艳丽,张建云,王国庆,等. 气候自然变异在气候变化对水资源影响评价中的贡献分析——I. 基准期的模型与方法[J]. 水科学进展,2012,23(2):147 - 155.
- [2] IPCC. Climate change 2007: Impacts, adaptation, and vulnerability: Contribution of working Group II to the forth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [3] 王涛. 干旱区主要陆表过程与人类活动和气候变化研究进展[J]. 中国沙漠,2007,27(5):711 - 718.
- [4] 王国庆,张建云,李岩,等. 窟野河流域径流演变及其驱动因素分析[J]. 水资源与水工程学报,2014,25(2):7 - 11 + 16.
- [5] Wang Guoqing, Yan Xiaolin, Zhang Jianyun, et al. Detecting evolution trends in the recorded runoffs from the major rivers in China during 1950 - 2010[J]. Journal of Water

and Climate Change, 2013,4(3):252 - 264.

- [6] 焦克勤,井哲帆,韩添丁,等. 42a 来天山乌鲁木齐河源 1 号冰川变化及趋势预测[J]. 冰川冻土,2004,26(3):253 - 260.
- [7] 龚原,袁玉江,何清. 气候转暖及人类活动对北疆中小河流降水 - 径流关系的影响[J]. 中国沙漠,2003,23(5):569 - 572.
- [8] 吉力力·阿不都外力,米热班·阿布里米提,刘伟东,等. 艾比湖干涸湖底不同景观类型下富盐沉积物盐分积聚特征[J]. 中国沙漠,2013,33(5):1426 - 1432.
- [9] 张庆,黄若行,袁新春. 艾比湖 1961 - 2001 年的演化特点及机制分析[J]. 沙漠与绿洲气象,2010,4(2):51 - 53.
- [10] 张立山,张庆. 博尔塔拉河近 50 a 径流过程演变趋势分析[J]. 甘肃水利水电技术,2010,46(4):5 - 6 + 11.
- [11] 张莉萍,朱健,朱永生,等. 博尔塔拉河温泉水文站输沙率与流量异步施测法分析[J]. 沙漠与绿洲气象,2007,1(1):36 - 38.
- [12] 朱永生,张莉萍. 博尔塔拉河及精河流域地表水资源现状分析[J]. 水利科技与经济,2011,17(6):67 - 68.
- [13] 陈志军,张晶,卡米拉,等. 博尔塔拉河流域水文特性[J]. 水资源研究,2007,28(1):25 - 28.
- [14] Kang Ersi, Cheng Guodong, Lan Yongchao, et al. A model for simulating the response of runoff from the mountainous watersheds of inland river basins in the arid area of north-west China to climatic changes[J]. Science in China(Series D),1999,42(1):52 - 63.
- [15] Huang Qiang, Zhao Xuehua. Factors affecting runoff change in the upper reaches of the Yellow River[J]. Progress in Natural Science,2004,14(9):811 - 816.
- [16] 曹丽青,林振山,葛朝霞,等. 新疆北部气候变化及其对水资源的影响分析[J]. 水资源保护,2008,24(6):28 - 30 + 35.
- [17] 赵顺阳,王文科,乔冈,等. 地质构造对生态环境的控制作用分析——以博尔塔拉河为例[J]. 新疆地质,2006,24(1):67 - 70.
- [18] 孙卫国,程炳岩,李荣. 黄河源区径流量的季节变化及其与区域气候的小波相关[J]. 中国沙漠,2010,30(3):712 - 721.
- [19] 张小龙. 艾比湖流域气候变化及其径流响应[J]. 盐湖研究,2011,19(2):11 - 15 + 24.