网络出版时间：2019-01-09 09:22:22
网络出版地址：http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1215.Q.20190109.0921.001.html

第 37 卷 第 6 期 生 态 科 学 37(6): 1–8
2018 年 11 月 Ecological Science Nov. 2018

王鹏赫, 赵成义, 王丹丹, 等. 气候变化对叶尔羌河流域极端水文事件的影响[J]. 生态科学, 2018, 37(6): 1–8.
WANG Penghe, ZHAO Chengyi, WANG Dandan, et al. Influence of climate change on hydrological extremes of Yarkant River Basin[J]. Ecological Science, 2018, 37(6): 1–8.

气候变化对叶尔羌河流域极端水文事件的影响

王鹏赫[1,2], 赵成义[1,*], 王丹丹[1,2], 马晓飞[1,2]

1. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 乌鲁木齐 830011
2. 中国科学院大学, 北京 100049

【摘要】通过选取叶尔羌河流域 4 个典型气象、水文观测站点的月值数据, 对比分析了气候变化背景下叶尔羌河流域气温、降水及径流的演变特征, 并探究了其对极端水文事件响应。结果表明: (1)气候变化中, 近 55 a 叶尔羌河流域气候变化整体呈增暖增湿趋势, 以 1998 年变化最为显著, 且 4 个典型观测站中库鲁克栏杆站气温及降水变化率最大(0.24 ℃·10a^{-1}, 7.41 mm·10 a^{-1}); (2)径流变化整体呈线性增加趋势且年内变化显著, 其中叶尔羌河及提孜那普河年内径流量最大值分布集中于 7 月和 8 月; (3)近 55 a 叶尔羌河流域极端水文事件呈显著增加趋势, 且以 6 月径流变化最为显著, 降水增加及冰川加速消融是流域极端水文事件频发的主导因子。因此, 加强水文事件对气候变化的应对措施和洪水灾害的影响评估, 对提高叶尔羌河流域水资源的利用效率, 减少其气候变化的危害具有重要意义。

关键词：气候变化; 径流变化; 极端水文事件; 叶尔羌河流域

doi:10.14108/j.cnki.1008-8873.2018.06.001 **中图分类号：**P467/P337 **文献标识码：**A **文章编号：**1008-8873(2018)06-001-08

Influence of climate change on hydrological extremes of Yarkant River Basin

WANG Penghe[1,2], ZHAO Chengyi[1,*], WANG Dandan[1,2], MA Xiaofei[1,2]

1. *State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology*, *Xinjiang Institute of Ecology and Geography*, *Chinese Academy of Sciences*, *Urumqi* 830011, *China*
2. *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049, *China*

Abstract: Through selecting four typical weather of Yarkant River basin and the monthly data observed from hydrometric station, this paper makes a contrastive analysis of the evolution characteristics of air temperature, rainfall, and runoff of Yarkant River basin against the background of climate change, and explores the influence of climate change on hydrological extremes. The results are as follows. (1)During climate change, there was an overall trend towards warming and humidification in almost 55 a of Yarkant River basin, among which the climate change in 1998 was the most prominent. As for the four typical observation stations, the station of Kuluklangan witnessed the biggest change in air temperature and rainfall (0.24 ℃·10 a^{-1}, 7.41 mm·10 a^{-1}). (2) The runoff variation was increased linearly on the whole and saw a significant change within the year. Among which the highest runoff volumes of Yarkant river and Tizinafu river were respectively concentrated in July and August. (3)There was a remarkably growing trend in terms of the number of hydrological extremes in almost 55 a of Yarkant River basin, and the runoff change in June witnessed the biggest change. The increasing of precipitation and the accelerating melt of glacier was the leading factors of the frequent occurrences of hydrological extremes. Therefore, we should improve the solutions of hydrological events to climate change and strengthen the impact evaluation over flood damage, which is of great importance to increasing the use efficiency of the water resource of Yarkant River basin and decreasing the negative effect of climate change on it.

Key words: climate change; runoff change; extreme hydrological events; Yarkant River Basin

---

收稿日期: 2017-12-03; **修订日期:** 2018-01-08
基金项目: 国家自然科学重点基金项目(U1403281, 41671030); 国家 973 项目(2013CBA429905)
作者简介: 王鹏赫(1990—), 男, 河南新乡人, 硕士研究生, 主要从事干旱区生态水文方面的研究, E-mail: 1322127617@qq.com
***通信作者:** 赵成义(1966—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事干旱区生态水文方面的研究, E-mail: zcy@ms.xjb.ac.cn

1 前言

全球气候变暖可对水资源系统的水文循环产生重大影响[1–2], 致使山区流域径流过程发生明显变化, 海拔越高其受气候变化影响越显著[3]。在全球增暖大背景下, 气候变化引起的水资源储量及时空分布特征可导致流域内绿洲-荒漠生态系统的水资源供需矛盾更加突出。极端水文事件是指在一定时期内发生频率低且突发性强且对人类社会有重要影响的灾害性水文事件[4]。自 20 世纪 60 年代以来, 全球气候变暖导致的极端天气、气候事件和重大自然灾害频繁发生[5], 严重影响着人类生产生活。大量研究表明[6-8], 世界各地因极端水文事件所造成的直接经济损失呈指数上升趋势。极端降水事件较一般水文事件的成因及预测都更加复杂和困难, 对地球下垫面的影响也较一般水文事件更加深远。因此, 针对气候变化与水文水资源响应方面的研究, 已成为当今关注的热点和焦点。

新疆位于中国西北部, 属干旱荒漠区, 径流产源以山区降水和冰川融雪为主, 区域生态系统脆弱, 为气候变化响应最为敏感的区域[9]。然而, 随着国民经济的发展及人类活动加剧, 区域洪水及洪峰造成的灾害事件频发[10]。因此, 对新疆典型流域的治理及供水安全防范方面的研究迫在眉睫[11-12]。在国外, Tank 等研究发现 1946—1999 年欧洲强降水以正的变化趋势为主, 对于大多数站点, 强降水量随着总降水量的增多而增多, 但并不随总降水量的减少而减少[13]。IPCC(Intergovermental Panel on Climate change)的研究表明全球变暖将导致全球水文的加强, 全球平均降水量及蒸发量可能趋于增加, 同时降水变率可能发生变化, 从而可能使未来旱涝等极端水文事件出现频率增加[14]。在国内, 统计表明, 新疆全疆区域洪水呈显著增加趋势, 尤其是南疆区域洪水明显加剧。孙桂丽等[15]研究新疆极端水文事件的时空分布特征、年际变化及其对气候变化的响应, 结果表明极端水文事件增长趋势与气温、降水变化一致。随着全球气候变化, 我国新疆高山冰雪流域水文循环变化对此反映敏感, 特别是冰川和积雪加速消融和最大径流引发的洪水可能危及民生并导致经济损失[16-17]。综合以上表明, 自 20 世纪 90 年代中期以后新疆大部分山区河流年极端洪峰量增大, 洪水量增多, 最大洪峰流量的年际间变化幅度呈增大趋势[18]。叶尔羌河是全国最长内流河塔里木河河源流区最长的河流, 也是塔里木河干流水资源重要的补给来源, 对于整个新疆气候变化及径流响应尤为敏感[19]。因此, 本文通过选取叶尔羌河流域 4 个典型气象、水文观测站点的月值数据, 对比分析了气候变化背景下叶尔羌河流域气温、降水及径流的演变特征, 旨在为叶尔羌流域水资源管理和调控, 防灾减灾应急方面提供理论依据。

2 研究区概况

叶尔羌河流域位于新疆维吾尔自治区的西南部, 塔里木盆地的西南边缘。流域范围介于东经 74°28′—80°54′, 北纬 34°50′—40°31′之间, 叶尔羌河流域的总面积为 8.58 万 km^2, 其中我国境内为 8.44 万 km^2, 境外面积为 0.14 万 km^2。山区面积占 66.9%, 为 5.74 万 km^2; 平原区面积占 33.1%, 为 2.84 万 km^2。叶尔羌河流域地形由南向东北急剧倾斜, 由 8000—6000 m 的极高山区降至平原区的 1500—1050 m, 海拔 8611 m 的世界第二高峰乔戈里峰位于本区内, 与现今尾闾上游水库的海拔高程相比, 两者高差约达 7570 m。流域位于欧亚大陆中心, 由于南、西、北三面分别受喀喇昆仑山、帕米尔高原和南天山的阻挡, 终年处于极端干旱状态, 形成了具有典型大陆性气候的温带、暖温带干旱区。平原降水极少, 高山区的冰雪积累则成了河川径流几乎唯一的补给来源, 是典型的雪冰补给河流, 流域多年平均冰川消融量约占出山口卡群站多年平均径流量的 64.0%, 雨雪混合补给占 13.4%, 地下水补给占 22.6%[20]。

3 资料与方法

本文分析的数据主要包括水文数据和气象数据。其中, 水文数据为叶尔羌河流域卡群站、库鲁克栏杆站和玉孜门勒克水文站 1960—2015 年的月均径流和流量数据; 气象数据为中国气象科学数据共享网(http://cdc.cma.gov.cn/home.do)1960—2014 年的年均气温和降水数据。数据资料完整、一致, 达到分析用标准。

4 结果

4.1 流域水文特征与洪水灾害变化

影响叶尔羌河流域降水的主要因素是西风环流所携带大西洋水气, 沿途得到地中海、里海等水气补充, 经中亚入新疆后若遇冷空气入侵, 在南疆就造

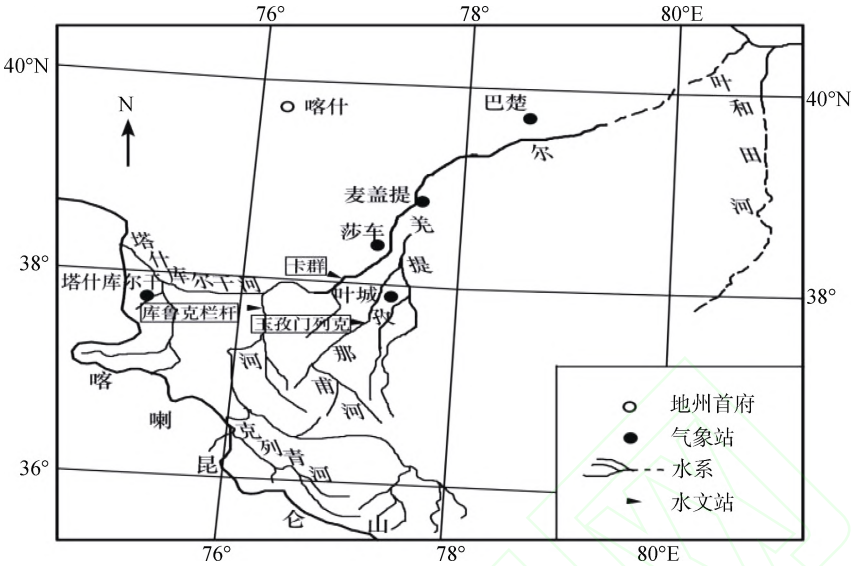

图 1　叶尔羌河流域的河流分布及其主要水文站位置图

Fig. 1　Map showing river network and locations of hydrological station in the regions of Yarkant River Basin

成降水天气。年降水量地区分布特征呈现明显的垂直地带性分布。叶尔羌河流域冰川区雪线附近年降水量可达 600 mm 以上, 向下塔什库尔干(海拔 3000 m)减到 69 mm, 库鲁克栏干(海拔 1960 m)93 mm, 叶尔羌河山口卡群站(海拔 1450 m)和莎车气象站(海拔 1231 m)仅为 66 mm 和 43 mm, 最少是东部麦盖提 30 mm。流域年降水量不但年际变化较大, 如山区的库鲁克栏干站年最大降水量 149.8 mm(1982 年), 最小 48.3 mm(1961 年)。叶尔羌河出山口的卡群站年最大降水量 141.2 mm(1974 年), 最小 26.1 mm (1983 年), 最大值与最小值两者差 5 倍, 且年内分配很不均匀。在海拔低于 2000 m 的地区, 降水量分布具有明显的递减特点, 总的分布特点是由北面向南面、由东面向西面逐步增加, 高度每增加 100 m, 降水就会增加 6 mm。卡群站最大年降水量是最小年降水量的 16 倍, 平原区的巴楚站最大年降水量为最小年降水量的 8.2 倍, 降水量分配主要集中在夏季 5—8 月[21]。流域年降水量较小, 但也会出现强度较大的暴雨。高强度的暴雨多集中在河流出山口一带的暴雨中心区。这样丰富的降水产流, 形成了叶尔羌河流域巨大的水资源, 但也产生了破坏性巨大的洪水灾害。

分析 1980—1990 年和 1990—2001 年期间的强对流暴雨次数[22], 新疆大部分地区 1990 年代比 1980 年代对流暴雨明显增多, 增多幅度为 20%—83.3%。随着气候变暖, 暴雨型的降水增加, 必然引发洪水频率的增加。叶尔羌河突发性洪水自 1800 年以来发生频率呈显著上升趋势, 洪水发生间隔的年数也越来越短[23]: 由 60 a 一遇到 30 a、到 10 a, 再到现在的几年一遇。在流域气温波动上升的情况下, 叶尔羌河突发性洪水频率显著增加, 且与气温变化一致。

4.2　流域气候变化特征

塔什库尔干气象站位于流域上游, 可以代表流域山区的气象条件, 莎车气象站位于流域下游, 可以代表平原的气象条件。利用新疆叶尔羌河流域 1960—2014 年塔什库尔干和巴楚气象站的年平均气温和年际降水资料(图 2—图 5)可知, 近 55 年来年平均气温线性增暖极显著, 其中库鲁克栏杆站气温增温率为 0.24 ℃·10 a^{-1}, 降水量增加量 7.41 mm·10 a^{-1}, 莎车站气温增温率为 0.22 ℃·10 a^{-1}, 降水量增加量 6.48 mm·10 a^{-1}。总体来讲, 叶尔羌河流域气候变化和新疆及全国变化趋势一致[24], 随全球气候变暖, 气温在不断上升, 到目前几乎一直处于上升趋势, 平均升温近 2.0 ℃多。孙本国等[25]利用叶尔羌河地区 1961—2004 的年平均气温降水资料指出, 全流域气温从 20 世纪 60 年代到 21 世纪初均呈连续上升趋势, 降水在 60—70 年代减少, 之后呈连续上升趋势, 验证了本文的结论。温度升高最直接的效应是水循环加快, 平均降水量发生变化, 水文极端事件发生频率增加[26]。

4.3　主要流域洪水变化特征及其对气候变化的响应

4.3.1　径流分布和变化特征

通过对叶尔羌河流域干流 3 个典型控制断面(叶尔羌河流域卡群站、库鲁克栏杆站和玉孜门勒克站)

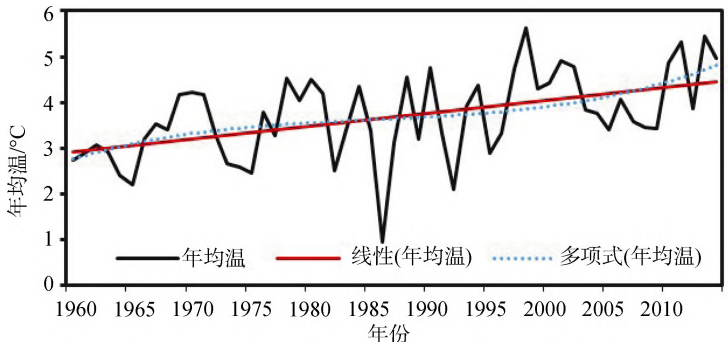

图 2 1960—2014 年塔什库尔干年平均气温变化

Fig. 2 Changes in yearly air temperature at Taxkorgan during 1960-2014

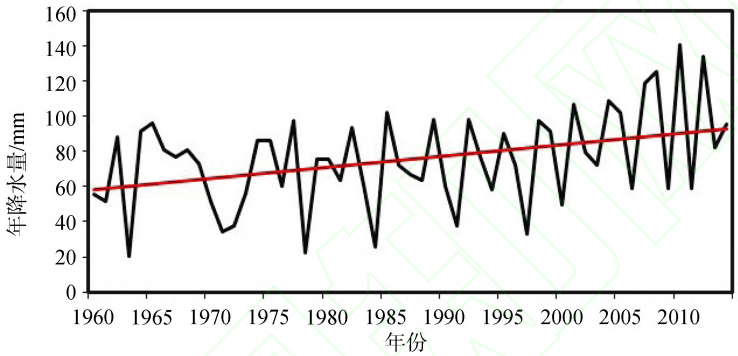

图 3 1960—2014 年塔什库尔干年际降水变化

Fig. 3 Changes in yearly precipitation at Taxkorgan during 1960-2014

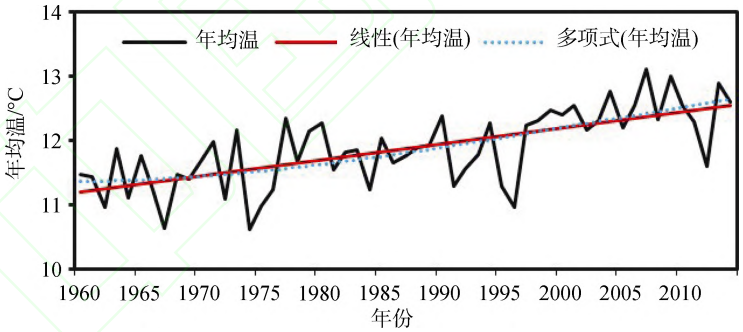

图 4 1960—2014 年莎车年平均气温变化

Fig. 4 Changes in yearly air temperature at Shache during 1960-2014

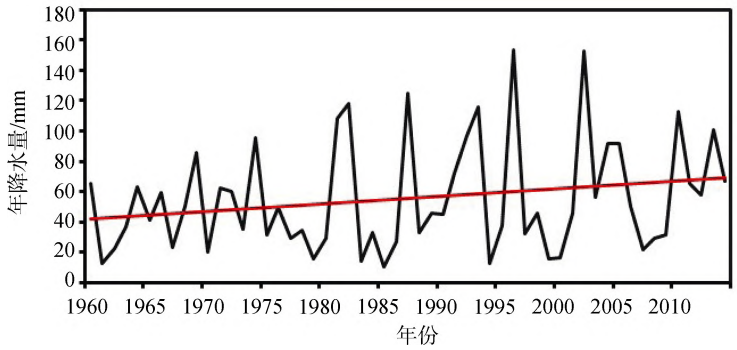

图 5 1960—2014 年莎车年际降水变化

Fig. 5 Changes in yearly precipitation at Shache during 1960-2014

的月均径流年代际变化分析发现(图 6—图 7)：自 20 世纪 50 年代以来，干流年径流量均随着气温的上升而增加；年内融水径流量在 6 月份出现上升趋势，且 8 月份以后明显下降。叶尔羌河的径流最大值出现在 7 月份，提兹那普河出现在 8 月份。据上述可知，叶尔羌河流域年内来水量主要集中在 6—9 月份，最大流量发生在 7 月和 8 月份。6 月份降雨量最多，但年最大流量出现在 8 月份，造成这个现象的原因是叶尔羌河流域河流径流主要以雪冰融水补给为主，属于融雪水和雨水混合补给型河流，夏季消融期(6—8 月份)河道的冰川融化量增加；冬季为枯水期，径流量较为稳定，无明显变化。

4.3.2　年极端水文事件

随着气候变化，叶尔羌河流域的径流过程发生了很大变化，不但年径流量发生变化，而且最大洪峰和极端水文事件也呈显著变化。对天山南坡黄水沟冰川冻土区域以降水为主要径流的河流，极端水文事件主要表现为夏季降水时间提前，洪峰流量加大，破坏性加大[27]。而对于叶尔羌河流域降水极少，高山区的冰雪积累成了河川径流几乎唯一的补给来源，所以年最大洪水一般和融雪季时段有关。叶尔羌河流域从 1959—2014 年，在温度升高降水增加的情况下，洪水最大出现提前的趋势，从主要在 8 月上旬提前到 7 月中旬(图 8)。

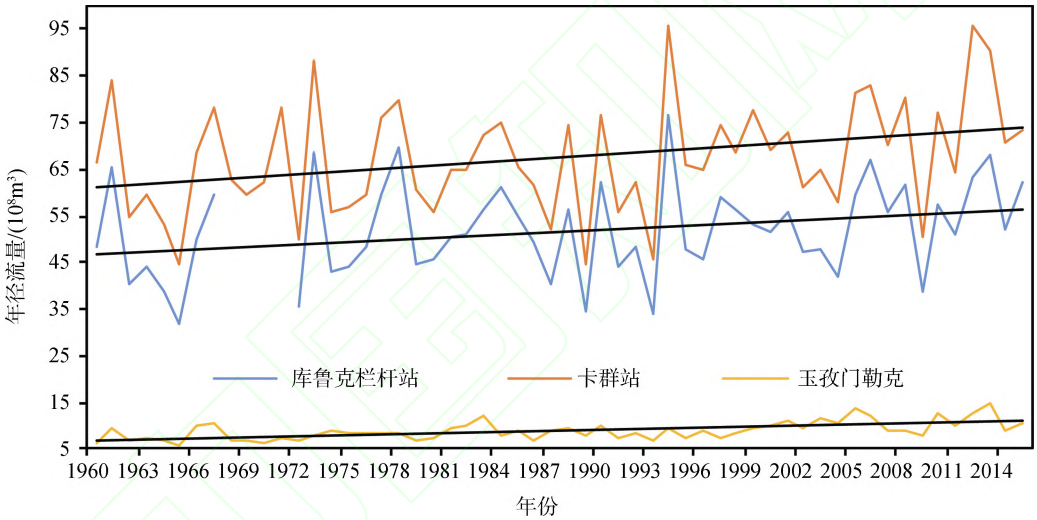

图 6　1960—2015 年库鲁克栏杆站、卡群站、玉孜门勒克站年径流量年代际变化

Fig. 6　Decade yearly steamflow changes at Kuluklangan station, Kaqun station and Yuzimenleke station during 1960-2015

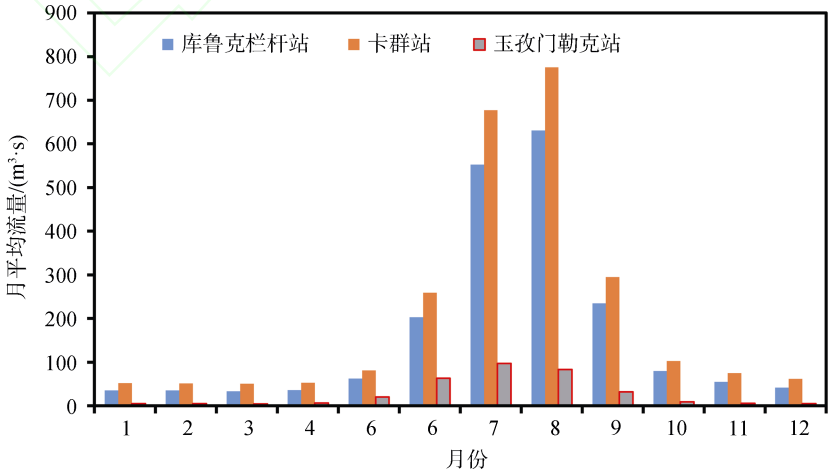

图 7　1960—2015 年库鲁克栏杆站、卡群站、玉孜门勒克站月平均流量变化

Fig. 7　Decade average monthly steamflow changes at Kuluklangan station, Kaqun station and Yuzimenleke station during 1960-2015

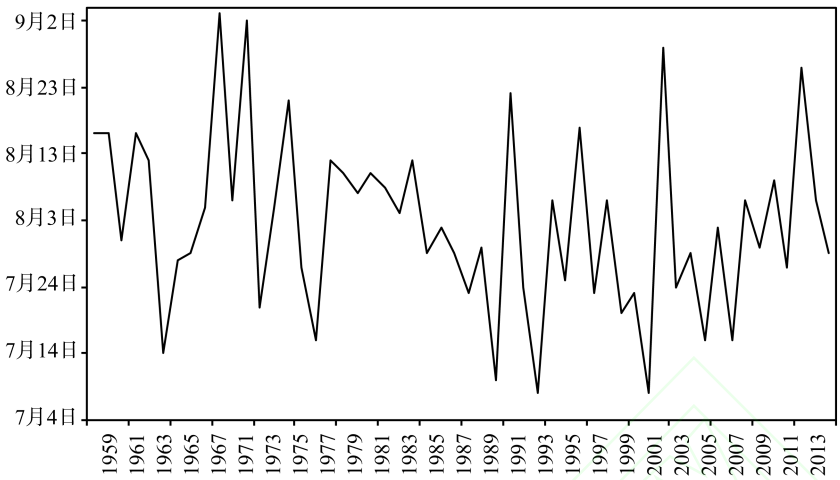

图 8 叶尔羌河流域年洪峰出现日期变化

Fig. 8 Occurred date of annual peak discharge in the regions of Yarkant River Basin

叶尔羌河流域的洪水类型按其成因和灾害特点可分为 4 种类型[28]: 冰雪消融型洪水、冰川“溃坝型”洪水、暴雨型洪水和混合型洪水。消融型洪水年际变化相对平缓, 发生时间集中于 6—9 月, 过程具有明显日变化, 洪水历时较长, 涨落较平缓; 溃坝型洪水峰值年际变化大, 洪水时空分布十分特殊, 不仅在汛期会发生, 冬季枯水季节也会发生, 洪水涨落迅速, 过程较短; 暴雨型洪水发生时间较集中, 较大的暴雨型洪水几乎全部发生于 7 月中旬至 8 月上旬, 峰值较低, 场次洪量小, 洪水过程单一, 陡涨陡落, 洪水历时短; 混合型洪水一种是暴雨型洪水与消融型洪水遭遇形成, 一般洪峰量级较低, 另一种是溃坝型洪水与消融型洪水遭遇形成, 此类型洪水峰高量大、来势凶猛, 危害极大。

统计叶尔羌河 1959—2014 年的三类洪水的最大洪峰流量变化可以看出(图 9—图 11): 在 20 世纪 60 年代到 70 年代是一个洪水流量较低的阶段, 80 年代后期流量呈现增大的趋势。叶尔羌河的消融型洪峰流量从 1400 $m^3 \cdot s^{-1}$(60—70 年代)增加到 1600 $m^3 \cdot s^{-1}$ 左右(90 年代); 溃坝型洪水发生频率呈显著上升趋势; 暴雨型洪水洪峰流量发生频率上升、强度增大。叶尔羌河高、中山区冰川、永久性和季节性积雪极为发育, 这为冰雪消融型洪水提供了丰富的物质条件, 消融型洪水是发生频次最高、最基本的一类洪水, 也是叶尔羌河径流的主要构成。在春季和汛期, 随着气温上升, 加大了冰雪融化速率, 补给河流, 引起消融洪水发生并量级加大。总之, 每次大的升温过程, 必会伴随消融洪水的发生[29]。夏季流域中低山区局部范围易发生暴雨, 形成洪水。暴雨型洪水规模一般较小, 量级有限, 发生时间较集中, 较大的几乎全部发生在 7 月中旬—8 月上旬, 且主要受中低山和局部降雨的影响。其最大流量略大于消融型洪水, 这是由于大范围降雨造成洪峰流量大幅度增加。总体而言, 叶尔羌河是以冰雪融雪为主要径流的内陆河流, 其消融型洪水峰值相对于其他类型较稳定, 暴雨洪水洪峰流量最小, 但其最大流量略大于消融型洪水。溃坝型洪水洪峰流量最大值远远高于以上两者, 反映出溃坝型洪水陡涨陡落, 峰高量大的特点。

4.3.3 极端水文事件对气候变化的响应

统计卡群站的年洪峰流量与年径流的关系如图 12 所示, 年径流量随着年内最大洪峰流量的增加而增加, 呈正比例关系。卡群站的月径流与洪峰流量统计结果表明(图略), 6 月份的月径流是影响最大洪峰流量的主要因子, 也反映了在叶尔羌河流域, 冰川消融是本区域的主要径流类型。统计数据表明, 主要的洪水事件主要出现在 6—8 月, 因此关注 6—8 月的气温变化对于预防洪水灾害至关重要。

5 结论

(1)新疆叶尔羌河流域气温呈缓慢上升的趋势, 年降水量也是增加的, 其中山区年平均气温从 1960 年代的 3.0 ℃上升到 2010 年代的 4.8 ℃, 平原年平均气温从 1960 年代的 11.2 ℃上升到 2010 年代的 12.7 ℃。随着降水、气温的增加, 河流径流量呈增加趋势; 最大径流量出现在 6—8 月份, 最大径流与夏季降水关系密切, 最小径流与冬春季的气温有关。

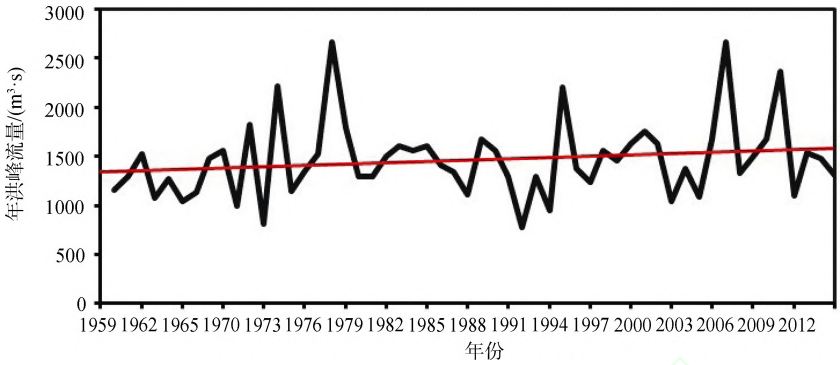

图 9　叶尔羌河消融型洪水年最大洪峰流量变化

Fig. 9　The changes of ablation flood in yearly peak streamflow in Yarkant River

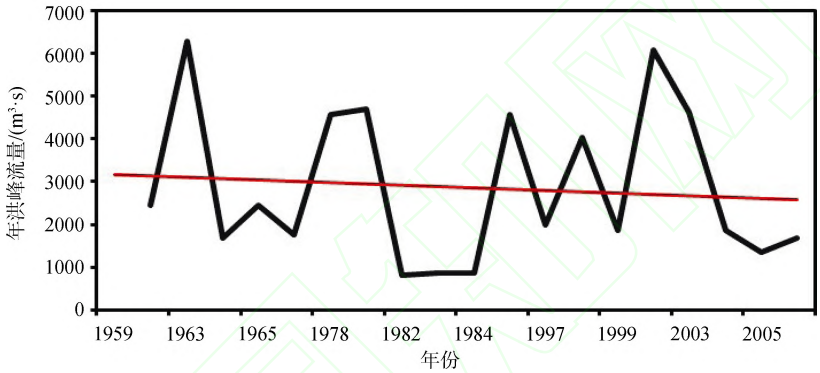

图 10　叶尔羌河溃坝型洪水年最大洪峰流量变化

Fig. 10　The changes of dam breaking flood in yearly peak streamflow in Yarkant River

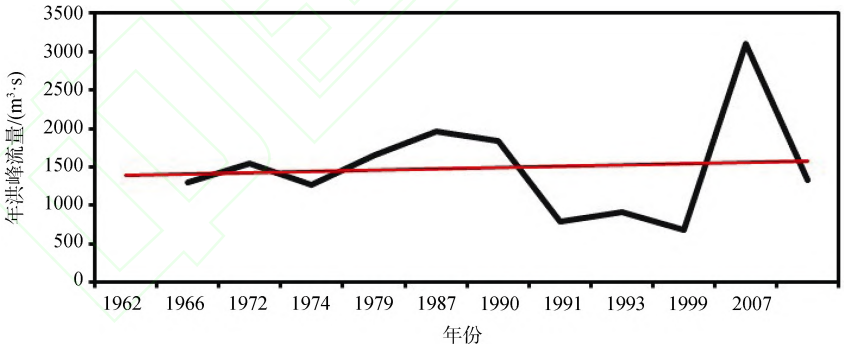

图 11　叶尔羌河暴雨型洪水年最大洪峰流量变化

Fig. 11　The changes of storm flood in yearly peak streamflow in Yarkant River

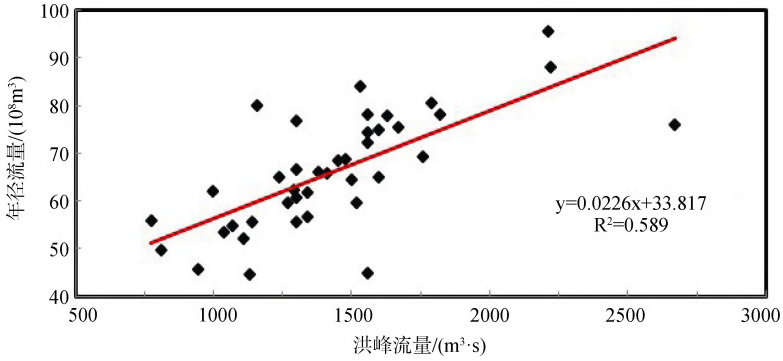

图 12　卡群站洪峰流量与年径流的关系

Fig. 12　Relation of yearly peak streamflow and yearly mean discharge at Kaqun station

(2)随着全球气候变暖, 叶尔羌河流域升温明显; 年降水量呈增加趋势, 降水变化决定着年径流量增加, 使年最大径流集中出现在夏季且量级增大, 洪峰流量从 1960 年代的 1400 $m^3 \cdot s^{-1}$ 增加到 1990 年代的 1600 $m^3 \cdot s^{-1}$ 左右。河流主要由融雪径流补给, 冰川消融量约占出山口多年平均径流量的 64.0%, 气温升高和冬、春季积雪的增加, 导致消融洪水增加且洪峰流量增大, 破坏性加大。

(3)夏季极端降水增多, 使得暴雨洪水增多, 极端水文事件引起的自然灾害已经威胁到叶尔羌河流域农牧业、生产、交通安全和水资源供给, 应加强气候背景下的水文水资源安全及应对措施研究, 提高水资源安全保障, 减缓气候变化带来的可能危害。

参考文献

[1] SOLOMO S. IPCC: Climate change the physical science basis[C]// AGU Fall Meeting. AGU Fall Meeting Abstracts, 2007: 123–124.

[2] BATES B, KUNDZEWICZ Z W, WU Shaohong, et al. Climate change and water: technical Paper VI[J]. Environmental Policy Collection, 2008, 128(5): 343–355.

[3] SOON W, DUTTA K, LEGATES D R, et al. Variation in surface air temperature of China during the 20th century[J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2011, 73(16): 2331–2344.

[4] 李志, 刘文兆, 郑粉莉. 1965-2005 年泾河流域极端温度事件变化特征[J]. 地理科学, 2010(3): 469–474.

[5] 徐华, 徐伟. 阿勒泰地区地表水资源现状分析[J]. 广东水利电力职业技术学院学报, 2009, 7(2): 65–68.

[6] AKHTAR M, AHMAD N, BOOIJ M J. The impact of climate change on the water resources of Hindukush-Karakorum-Himalaya region under different glacier coverage scenarios[J]. Journal of Hydrology, 2008, 355(1-4): 148–163.

[7] 赵庆云, 张武, 王式功, 等. 西北地区东部干旱半干旱区极端降水事件的变化[J]. 中国沙漠, 2005, 25(06): 904–909.

[8] 张明军, 汪宝龙, 魏军林, 等. 近 50 年宁夏极端气温事件的变化研究[J]. 自然灾害学报, 2012(4): 152–160.

[9] 陈亚宁, 杨青, 罗毅, 等. 西北干旱区水资源问题研究思考[J]. 干旱区地理, 2012, 35(1): 1–9.

[10] 周平, 陈刚, 刘智勇, 等. 东江流域降水与径流演变趋势及周期特征分析[J]. 生态科学, 2016, 35(2): 44–51.

[11] 王国亚, 沈永平, 苏宏超, 等. 1956—2006 年阿克苏河径流变化及其对区域水资源安全的可能影响[J]. 冰川冻土, 2008, 30(4): 562–568.

[12] 贾利民, 郭中小, 龙胤慧, 等. 干旱区地下水生态水位研究进展[J]. 生态科学, 2015, 34(2): 187–193.

[13] MOBERG A, JONES P D. Trends in indices for extremes in daily temperature and precipitation in central and western Europe, 1901–99[J]. International Journal of Climatology, 2005, 25(9): 1149–1171.

[14] OFIPCC W G I. Climate Change 2013: The Physical Science Basis[J]. Contribution of Working, 2013, 43(22): 866–871.

[15] 孙桂丽, 陈亚宁, 李卫红. 新疆极端水文事件年际变化及对气候变化的响应[J]. 地理科学, 2011, 31(11): 1389–1395.

[16] 毛炜峄, 樊静, 沈永平, 等. 近 50a 来新疆区域与天山典型流域极端洪水变化特征及其对气候变化的响应[J]. 冰川冻土, 2012, 34(5): 1037–1046.

[17] 沈永平, 王国亚, 丁永建, 等. 1957—2006 年天山萨雷扎兹-库玛拉克河流域冰川物质平衡变化及其对河流水资源的影响[J]. 冰川冻土, 2009, 31(5): 792–800.

[18] 沈永平, 苏宏超, 王国亚, 等. 新疆冰川、积雪对气候变化的响应(II): 灾害效应[J]. 冰川冻土, 2013, 35(6): 1355–1370.

[19] 刘晓梅, 闵锦忠, 刘天龙. 新疆叶尔羌河流域温度与降水序列的小波分析[J]. 中国沙漠, 2009, 29(3): 566–570.

[20] 程其畴. 塔里木河研究[M]. 南京: 河海大学出版社, 1993: 1–76.

[21] 满苏尔·沙比提, 阿吉尼沙·托呼提. 叶尔羌河流域水资源及其水文特征分析[J]. 新疆师范大学学报(自然科学版), 2005, 24(1): 74–78.

[22] 杨涛, 杨莲梅. 新疆强对流暴雨的气候特征和概率分布模式研究[J]. 灾害学, 2003, 18(1): 47–52.

[23] 孙桂丽, 陈亚宁, 李卫红, 等. 新疆叶尔羌河冰川湖突发洪水对气候变化的响应[J]. 冰川冻土, 2010, V32(3): 580–586.

[24] 孙本国, 毛炜峄, 冯燕茹, 等. 叶尔羌河流域气温、降水及径流变化特征分析[J]. 干旱区研究, 2006, 23(2): 203–209.

[25] 李永坤, 薛联青, 丁晓洁, 等. 塔里木河流域上游径流变化特征分析[J]. 水电能源科学, 2011, 29(7): 10–12.

[26] 张家宝, 史玉光. 新疆气候变化及短期气候预测研究[M]. 北京: 气象出版社, 2002.

[27] 周京武, 高鹰, 沈永平, 等. 天山南坡黄水沟与清水河寒区流域极端水文事件对气候变化的响应[J]. 冰川冻土, 2014, 36(4): 1042–1048.

[28] 新疆维吾尔自治区、水利部水利水电设计研究院. 新疆叶尔羌河流域规划报告[R].2005.

[29] 丁辉, 蔡向辉. 新疆叶尔羌河洪水发生规律分析[J]. 中国防汛抗旱, 2011, 21(1): 35–36.