

近51a来乌鲁木齐河源区径流特征及对气候变化的响应^{*}折远洋¹, 李忠勤^{1, 2}, 张明军^{1, 2}, 王圣杰¹, 孙美平²

(1. 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070; 2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000)

提 要: 基于天山乌鲁木齐河源区 1959-2009 年的径流与气象记录, 采用线性回归、M-K 突变检验法和水量平衡模型分析了河源区气候、冰川及融水量的变化特征。研究发现: 河源区冰川径流量与冰川物质平衡成负相关关系, 过去 51a 间河源 1 号冰川融水径流共增加 $157.48 \times 10^4 \text{ m}^3$, 冰川融水径流量增加主要是由冰川退缩和降水量增加造成的。自 20 世纪 90 年代以后, 冰川融水径流量增加显著, 但整个河源区径流量却在减少, 与气温升高导致蒸散能力增强、地下冰结构变化及冰川融水补给能力下降等有关。

关键词: 气候变化; 径流; 冰川融水; 乌鲁木齐河源区

中图分类号: P343.6

文献标识码: A

20 世纪后期以来全球持续变暖使得山岳冰川普遍呈现出消融状态^[1]。冰川是重要的陆地淡水资源, 几乎所有的大江大河都源于冰川区。冰川的变化受水热条件综合影响, 长期监测典型冰川径流对于区域水资源及气候评估而言是非常必要的^[2]。我国西北地区气候普遍干旱, 河流多为冰川与降水补给的内流河, 冰川水资源的变化对于区域发展具有重要的现实意义。

中国境内天山山脉有现代冰川 9035 条, 面积 9225 km^2 , 储量约 1011 km^3 ^[3]。位于天山北坡的乌鲁木齐河流域, 发育有冰川 150 条, 2005 年冰川面积为 32 km^2 , 比 1964 年减少了 34.2%^[4]。乌鲁木齐河是乌鲁木齐市的重要水源之一, 冰川与径流的变化影响着区域可持续发展, 因而备受关注。自 20 世纪 50 年代以来, 学者们已对该流域的河源 1 号冰川的物质平衡、径流、面积和末端变化等进行了系统的科学研究^[5, 6]。然而, 河源区最近几年的冰川、气候、水文变化都反映了我国高海拔冰川区气候环境变化的最新状况和趋势, 在近年来乌鲁木齐河流域气候暖湿化背景下, 冰川区径流也表现出了一些新的特点。文中根据 1959~2009 年长序列观测资料, 系统地分析了河源区气候以及径流变化, 与前人的研究相比, 补充和使用了最新的水文气象观测资料, 有很好的延续性和比较性, 是对过去 51 年乌鲁木齐河源气候、冰川、径流变化的综合分析和研究。

表 1 乌鲁木齐河源区水文气象站点信息

Tab. 1 Informations of the hydrometeorological and the meteorological stations

1 研究区概况

乌鲁木齐河源区地处天山中部天格尔 II 峰 (海拔 4476m) 北坡, 东接板房沟流域, 西邻头屯河流域。河源区共有 7 条冰川, 其中最大的 1 号冰川 ($43^{\circ}06'N$ $86^{\circ}49'E$), 面积 1.677 km^2 , 属于山谷冰川, 由东、西两支组成 (图 1), 是世界冰川监测服务处 (WGMS) 在中亚内陆干旱区的“参照冰川”和全球重点监测的十大现代冰川之一。

为了对乌鲁木齐河源区冰川与径流进行定位观测, 1959 年以来中国科学院天山冰川观测试验站在河源区先后建立了 3 个水文气象观测点 (表 1)。其中, 1 号冰川水文气象点位于 1 号冰川末端下游 300m 处,

站 点	海拔 (m)	集水区面积 (km^2)	冰川面积所 占比例(%)	资料起 始年份
1 号冰川水文气象点	3693	3.34	54.0	1959
空冰斗水文气象点	3804	1.68	0	1982
总控水文气象点	3404	28.9	18.5	1983
大西沟气象站	3539			1959

^{*} 收稿日期: 2011-11-11; 修改日期: 2011-12-10。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (2010CB951003); 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KZCX2-EW-311); 国家自然科学基金项目 (40631001, 91025012, 41001040, J0630966) 和冰冻圈科学国家重点实验室自主课题 (SKLCS-ZZ-2010-04) 资助。

作者简介: 折远洋 (1987-), 男, 甘肃成县人, 硕士研究生, 主要从事干旱区水资源研究。E-mail: yuanyanshe@163.com

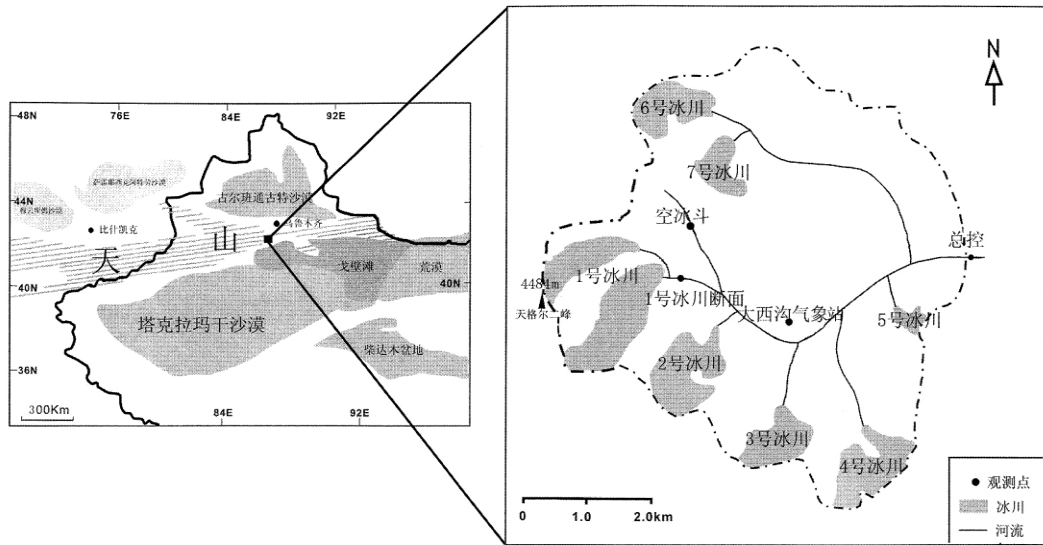


图1 乌鲁木齐河源区观测站点的分布

Fig. 1 Locations of observations at the headwaters of the Urumqi River

监测冰川区气象及冰川融水径流;空冰斗和总控水文气象点分别用于监测非冰川区和整个河源区气象及径流量状况。此外,1959年中国气象局也在河源区设立了大西沟气象站,距1号冰川末端3km,进行气温、降水、辐射等常规气象观测。

2 材料与方法

2.1 数据

主要选用了乌鲁木齐河源1号冰川1959~2009年物质平衡资料、天山冰川站1号冰川水文气象点(资料时段为1959~2009年)、空冰斗水文气象点(1982~1995年)和总控水文气象点(1983~2009年)的水文气象观测资料以及中国气象局大西沟气象站1959~2007年气温和降水资料。

2.2 研究方法

2.2.1 线性趋势分析

水文气象要素的倾向率采用一次线性方程表示,即: $Y_i = a_0 + a_1 t_i$ (1)

式中: Y_i 为要素的拟合值, t_i 为时间序列, a_1 为线性趋势项(即为每年的倾向率)。

2.2.2 M-K 突变检验

利用M-K方法对1号冰川径流和物质平衡进行了突变检验,此方法是一种非参数统计检验方法,是提取序列变化趋势的有效工具,被广泛应用于气候参数和水文序列的分析,M-K法还能大体确定突变发生的位置^[7]。

2.2.3 水量平衡模型

冰川区水量平衡方程^[8]即为: $R_a = R - R_b$ (2)

式中: R_a 、 R 和 R_b 分别指冰川融水径流、观测到的总径流和流域内非冰川径流。

在理想条件下, R_b 可以通过以下方程计算: $R_b = P \times (A_c - A_g) \times \alpha$ (3)

式中: P 为集水区降水量, A_c 和 A_g 分别表示集水区总面积和冰川面积, α 为径流比(非冰川区表面径流和降水比率),该流域径流系数取0.7。

非冰川区水量平衡方程^[9]为: $R = P - E - \Delta S$ (4)

式中: R 、 P 和 E 分别表示径流量、降水量和蒸发量(包括升华), ΔS 表示流域内雪、地下冰储量及土壤水分的变化量。

3 结果分析

3.1 气候变化特征

3.1.1 气温变化

温度是水文循环中的动力因子,也是影响冰川和积雪消融的热力因子,冰川对气温变化响应极其敏感,冰川变化直接影响径流量^[5]。根据大西沟气象站 1959~2007 年间的长期资料发现,乌鲁木齐河源区气温呈现出上升态势,气温线性倾向率为 $0.22^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$ (相当于气温升高了 1.1°C) ,年均气温最高值和最低值分别出现在 2007 年(-3.8°C)和 1984 年(-6.7°C) (图 2)。李瑞雪等^[10]指出乌鲁木齐河源区气温在 20 世纪末发生明显的突变,若按照 1997 年划分,1997~2007 年间的年均气温(-4.3°C)比 1959~1996 年(-5.3°C)升高了 1°C ,这也说明近年来河源区气温呈加速上升趋势。Aizen 等^[11]在 2007 年指出,1940~1991 年间,整个天山山脉气温平均每十年升高 0.1°C ; Wang 等^[12]在 2011 年对新疆天山 14 个气象站的观测研究表明,1960~2009 年间气温变化倾向率达到了 $0.34^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$,由此可见乌鲁木齐河源区的气温变化趋势与整个天山地区是一致的。

3.1.2 降水变化

基于大西沟气象站降水资料(图 2)分析发现,1959~2007 年间降水量整体呈增加趋势,年均降水量增加了 124.3mm (线性倾向率为 $2.5\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$) ,降水量最低值出现在 1985 年,为 293.4mm ,最高值在 1996 年出现(634.4mm)。李忠勤等^[5]在之前的研究中发现,河源区降水在 1986 年以前基本上处于正常波动变化,而 1986 年以后呈上升趋势。按照 1986 年划分,1987~2007 年间年平均降水量为 496.5mm ,比 1959~1986 年间的 426mm 增加了 16.9% ,增幅比较明显,尤其是 2006 年以来。上述观测事实也是西北地区气候由暖干向暖湿转型^[13]的重要表现。

3.2 径流变化对气候的响应

3.2.1 冰川融水径流

冰川融水径流是指冰川冰和冰川表面雪融水汇入河道形成的径流,大多为季节性径流,是高寒地区重要的水资源。文中研究涉及的 1 号冰川融水径流量是指在 1 号冰川水文气象点的测值。通过冰川区水量平衡方程^[9]得出 1959~2009 年冰川融水径流年均值为 $139.4 \times 10^4\text{m}^3$,1976 年出现最小值($22.8 \times 10^4\text{m}^3$) ,最大值是在 2006 年($304.5 \times 10^4\text{m}^3$)。线性趋势分析表明该水文断面径流量总体呈上升趋势,2009 年冰川融水径流比 1959 年增加了 $157.48 \times 10^4\text{m}^3$,1986~2009 年间平均冰川融水径流量($187.1 \times 10^4\text{m}^3$)与 1959~1985 年间($97.0 \times 10^4\text{m}^3$)相比,共增加了 $90.0 \times 10^4\text{m}^3$,增长率达到 90% (图 3a)。

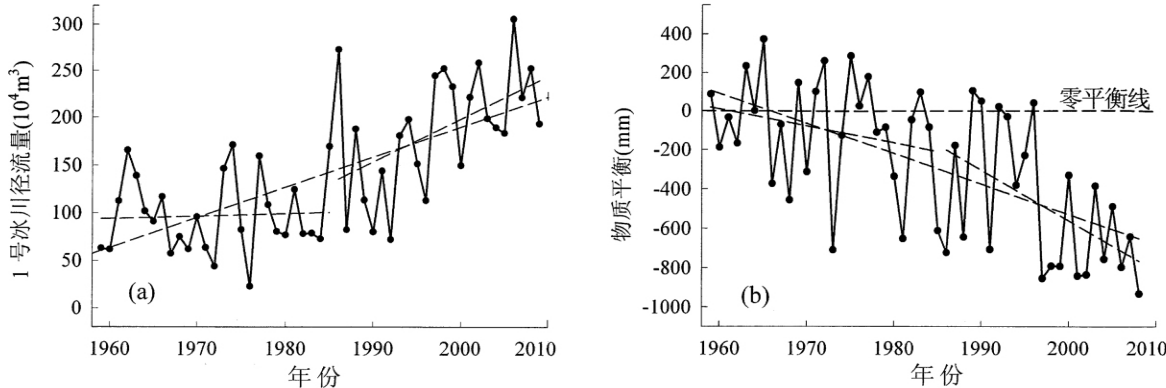


图 3 1959~2009 年 1 号冰川融水径流量(a)和物质平衡(b)变化

Fig. 3 Glacier melt runoff(a) and mass balance(b) of Glacier No. 1 during 1959~2009

冰川物质平衡可以反映冰川绝对量的变化情况,物质平衡的亏损必然会导致冰川融水径流的增加。图 3b 表明,自 1959 年以来 1 号冰川物质平衡总体处于负增长趋势,负平衡年比例逐渐增多,特别是在

1986 年后尤为明显,负增长呈加速状态,自 1996 年出现过正平衡以来,近十几年,一直呈负平衡状态。一般而言,冰川变化受气温和降水共同作用,然而,随着天山地区气温的持续升高,降水量的变化远不能比拟气温升高带来的影响^[12]。就乌鲁木齐河源区而言,20 世纪 80 年代末以后气温对物质平衡量的变化起到了主导的作用,即使在强降水年份,只要气温较高,仍呈负平衡状态^[6]。

对 1 号冰川融水径流量和冰川物质平衡进行 M-K 突变分析。不难发现,冰川物质平衡和冰川融水径流有着反向相关变化,物质平衡的绝对值与冰川径流的变化呈正相关,二者均在 20 世纪 90 年代初发生了突变(图 4)。1 号冰川在物质连续亏损的情况下,最终在 90 年代初东西支彻底分离^[6],这与 1 号冰川融水径流和物质平衡发生突变时间基本一致。

3.2.2 非冰川区径流

为了与 1 号冰川水文气象点控制的冰川区对比,文中选取了临近的空冰斗水文气象点控制区作为非冰川监测区。图 5 表明:该研究区降水和径流都呈上升趋势,而且有很好的对应关系。该区由于没有现代冰川分布,因此径流主要由降水、季节性融雪以及地下水组成。以往研究^[14,15]表明,该区域的年平均降雪量大约 560mm,比大西沟气象站的降雪量高 33%,加上该区地表粗糙导致下渗较快,流域内雪、地下冰储量及土壤水分的变化量相应增加,对蒸发量的影响相对较小。通过 1982~1995 年间实测资料以及非冰川水量平衡方程^[9]分析得出其径流比率(P/R)为 0.7,表明降水是该区径流量的主要贡献者之一。但是由于高寒地区气温变化幅度较大,异常低温或高温积雪融水分别会以地下冰形式储存或融化,从而影响径流量。具体而言,1984 年气温较低,积雪融水变成地下冰被有效地储存在地表活动层,加上降水相对较小使 1985 年径流量出现新低;后来随着气温上升,之前储存的地下冰融化流出和同年降水量相对增加使 1987 年径流量达到高值(图 5)。因此气温对径流的影响也不容忽视。

3.2.3 河源区径流特征

在总控水文气象点监测的整个河源区,冰川面积大约占 18.5%,比例介于其他 2 个水文气象点之间。通过线性回归分析发现,1983~2009 年河源区径流量和降水量变化趋势相似,总体处于上升状态,26 年径流量共增加了 $201.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ (图 6)。但是,1996 年是一个明显的拐点,之前的径流量和降水量都呈增加趋势,之后转为下降。结合大西沟气象站降水量和 1 号冰川融水资料,在其共同增加的背景下,近年来总控水文气象点的径流量并没有大幅度增加,2000 年以后的平均径流量反而比多年平均值减少了 3%(图 6a)。

4 讨论

气候变化会对河源区径流产生深远而复杂的影响。就冰川区而言,气温通过对降水和冰川融水产生

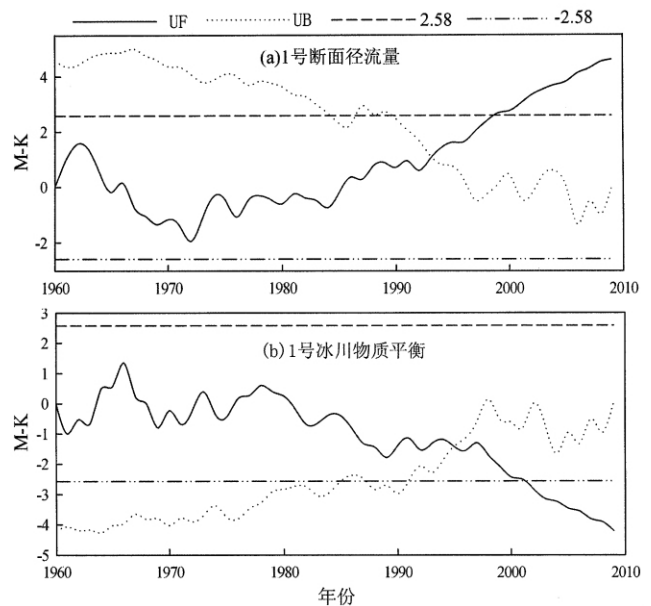


图 4 1960~2009 年 1 号冰川融水径流量(a)和物质平衡(b)的 M-K 曲线图

Fig. 4 M-K test of the melt runoff(a) and mass balance(b) of Glacier No. 1 during 1960~2009

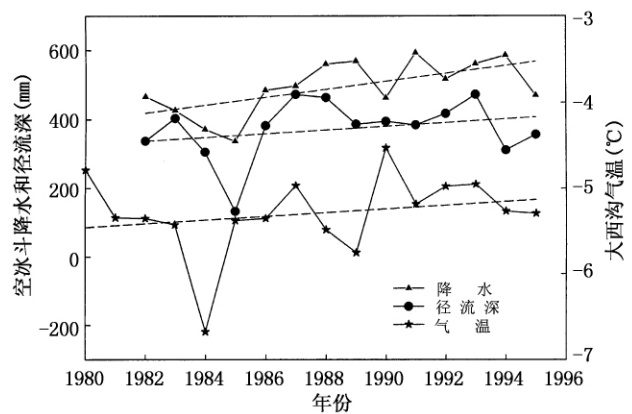


图 5 1980~1995 年空冰斗水文气象点径流深、降水量与大西沟气象站气温的关系

Fig. 5 Runoff depth and precipitation at Empty Cirque Station, temperature at Daxigou Station during 1980~1995

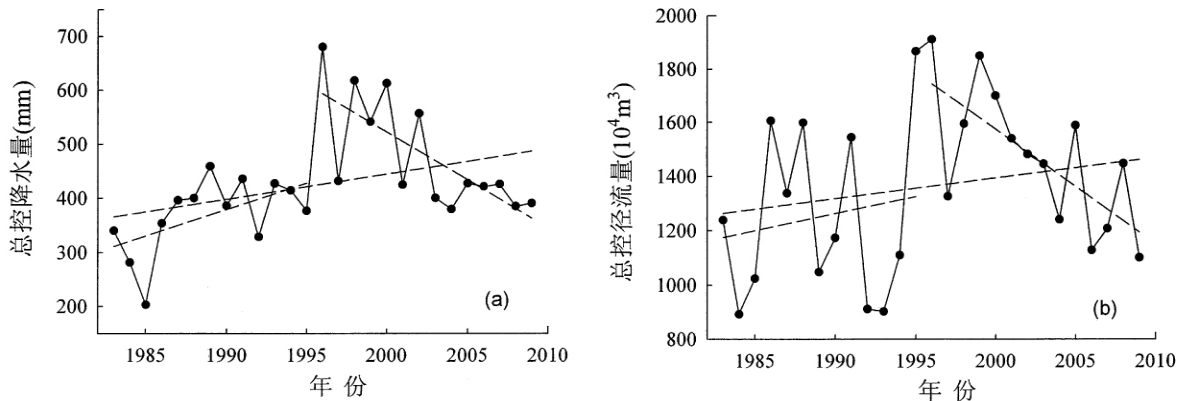


图 6 1983 ~ 2009 年总控点径流量和降水量关系

Fig. 6 Runoff and precipitation at Zongkong Station during 1983 ~ 2009

影响,从而调节径流量大小^[16]。王璞玉等^[17]在 2011 年研究表明 1962 ~ 2006 年间,在气候变暖的背景下,1 号冰川冰储量亏损 24.4%,厚度减薄 12.1%,面积减小 14.0%,最大长度缩短 7.6%,且均呈加速趋势。1959 ~ 2009 年间冰川融水径流量大小和冰川物质平衡呈负相关对应关系(图 3),持续冰川物质平衡加速亏损必然导致冰川融水量增加。然而对于非冰川区,由于径流组成中没有冰川融水,径流对气候的响应表现出不同模式,降水是其径流的主要补给源,气温主要通过改变地下冰和降水形式,影响径流量变化。

值得注意的是,总控水文气象点测得的径流量并非持续上升,近年来趋于减小(图 6),这可能是由多方面因素造成的。普宗朝等^[8]2008 年研究指出,在 1971 ~ 2000 年间秋冬季节,大西沟气象点参考作物蒸散量均呈现出了增大趋势,即气温升高,导致蒸发能力增强,植物对水分的需求量也增加。空冰斗冻土层温度的变化使径流量改变的事实已被前人研究所证实^[19, 20],因此地温升高,地下隔水层冰的融化导致渗入地下的水量增加,地表径流相应减小。加上近年来,河源区的其他 6 条小冰川(平均每条冰川面积为 0.61 km²)面积普遍呈现出加速退缩的态势^[21],导致冰川融水补给能力下降。

河源区径流量的总体上升趋势是全球变暖趋势下中亚天山地区冰川区变化的一个反映,表现了我国典型大陆型冰川区径流变化对气候变化的响应。施雅风等^[13, 22]研究指出,1987 年以后天山东部地区气候模式正是由暖干转向暖湿阶段,并预测了 1986 年后冰川融水径流量增加,这与文中研究的结果相吻合。在全球气温持续变暖的背景下,未来高寒区冰川变化和对水资源的影响是科学界十分关注的问题。考虑未来气候变化的不确定性及冰川对气候响应的敏感性,冰川区径流的预测亟待进一步研究。

5 结论

(1) 河源区 1959 ~ 2007 年间的年均气温和降水量总体呈上升趋势,特别是 20 世纪 90 年代以来增幅最为显著,气温累积升高 1.1℃,年降水量增加 124.3 mm。

(2) 51a 以来 1 号冰川融水量共增加 $157.48 \times 10^4 \text{ m}^3$,冰川融水和物质平衡成负相关关系,与降水量成正相关关系,冰川融水增加是冰川退缩和降水增加的综合结果。

(3) 非冰川区径流量变化与降水和气温都有关,但降水影响更大。如果气温异常的高或低,储存的地下冰就会融化释放或者雪冰融水储存成地下冰,从而影响径流。

(4) 总控水文气象点径流对气候的响应比较复杂,在冰川融水也增加的情况下,径流总量增加低于同期预测值。这可能有以下几点原因:随着气温升高和降水量增加,蒸发也在增强;地下隔水层冰的融化导致下渗增强;流域内的植物体对水分的需求量增加;近年来,随着流域内其他小冰川面积的迅速减少,冰川融水对径流的补给率减小。

参考文献

- [1] Oerlemans J, Fortuin J P F. Sensitivity of glaciers and small ice caps to greenhouse warming[J]. Science, 1992, 258: 115 - 117.
- [2] Dyurgerov M B, Meier M F. Twentieth century climate change: evidence from small glaciers[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2000, 97(4): 1406 - 1411.
- [3] 施雅风. 简明中国冰川目录[M]. 上海: 上海科学普及出版社, 2005: 1 - 194.

- [4]李忠勤,李开明,王林.新疆冰川近期变化及其对水资源的影响研究[J].第四纪研究,2010,30(1):96-106.
- [5]李忠勤,韩添丁,井哲帆,等.乌鲁木齐河源区气候变化和1号冰川40a观测事实[J].冰川冻土,2003,25(2):117-123.
- [6]李忠勤,沈永平,王飞腾,等.冰川消融对气候变化的响应—以乌鲁木齐河源1号冰川为例[J].冰川冻土,2007,29(3):333-342.
- [7]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.
- [8]杨针娘.中国冰川水资源[M].兰州:甘肃科学技术出版社,1991:1-158.
- [9]Woo M K, et al. Streamflow processes in an alpine permafrost catchment, Tianshan, China[J]. Permafrost and Periglacial Processes, 1994, 5: 71-85.
- [10]李瑞雪,张明军,金爽,等.乌鲁木齐河流域气候变化的区域差异特征及突变分析[J].干旱区地理,2010,33(2):243-250.
- [11]Aizen V B, Aizen E M, Melack J M, et al. Climatic and hydrologic changes in the Tien Shan, Central Asia[J]. Journal of Climate, 1997, 10(6): 1393-1404.
- [12]WANG Shengjie, ZHANG Mingjun, LI Zhongqin, et al. Glacier area variation and climate change in the Chinese Tianshan Mountains since 1960[J]. Journal of Geographical Sciences, 2011, 21(2): 263-273.
- [13]施雅风,沈永平,胡汝骥.西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨[J].冰川冻土,2002,24(3):220-226.
- [14]王德辉,张丕远.天山乌鲁木齐河谷气候特征[J].冰川冻土,1985,7(3):239-247.
- [15]杨大庆,姜彤,张寅生,等.天山乌鲁木齐河源降水观测误差分析及其改正[J].冰川冻土,1988,10(4):384-399.
- [16]蓝永超,沈永平,钟英君,等.乌鲁木齐河出山径流对气候变化的敏感性分析[J].干旱区资源与环境,2011,25(11):50-55.
- [17]王璞玉,李忠勤,李慧林.气候变暖背景下典型冰川储量变化及其特征—以天山乌鲁木齐河源1号冰川为例[J].自然资源学报,2011,26(7):1189-1198.
- [18]普宗朝,张山清,李景林,等.乌鲁木齐河流域参考作物蒸散量时空变化特征[J].沙漠与绿洲气象,2008,2(1):41-45.
- [19]金会军,刘宗香,曾根敏雄.天山乌鲁木齐河源冰达坂多年冻土温度监测[J].冰川冻土,1998,20(1):25-29.
- [20]韩添丁,李忠勤,叶柏生.乌鲁木齐河源空冰斗径流增大的原因分析[J].冰川冻土,2003,25(4):389-393.
- [21]李忠勤,李开明,王林.新疆冰川近期变化及其对水资源的影响研究[J].第四纪研究,2010,30(1):96-106.
- [22]施雅风,沈永平,李栋梁,等.西北气候由暖干向暖湿转型问题研究[M].北京:气象出版社,2003:1-124.

Response of streamflow to climate change at the headwaters of Urumqi River in the Tianshan mountains over the recent 51 years

SHE Yuanyang^{1,2}, LI Zhongqin^{1,2}, ZHANG Mingjun^{1,2}, WANG Shengjie¹, SUN Meiping²

(1. College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, P. R. China; 2. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou 730000, P. R. China)

Abstract: According to the hydrological and meteorological records at the headwaters of the Urumqi River in Tianshan Mountains from 1959 to 2009, the climatic and glacial influences on patterns of streamflow were analyzed by linear regression, M-K trend test and water balance model. This study revealed that the runoff of glacier negatively correlated with the glacier mass balance, and the glacier melt runoff increased by $157.48 \times 10^4 \text{ m}^3$ over the recent 51 years, and the increasing runoff was mainly resulted from glacier melt and precipitation enhancement. After 1990s, the glacier runoff increased quickly, but the runoff of the whole headwaters region was decreasing, which was influenced by ground ice formation, the evapotranspiration, and the decreased glacier melt water supply caused by climatic changes.

Key words: climate change; runoff; glacier melt water; the Headwaters of the Urumqi River