

天山南、北坡河流出山径流对气候变化的敏感性分析 ——以开都河与乌鲁木齐河出山径流为例

蓝永超¹, 钟英君², 吴素芬³, 沈永平¹, 王国亚¹

(1 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000;

2 新疆水利水电学校, 新疆 乌鲁木齐 830000; 3. 新疆水文水资源局, 新疆 乌鲁木齐 830000)

摘 要: 选取开都河与乌鲁木齐河山区流域为研究区域, 利用有关水文气象台站 1960~2005年的观测资料, 对研究区域的气温、降水与出山径流的变化特征及趋势进行了分析, 并根据研究区域气候变化的特征与趋势及出山径流与山区降水、气温之间的关系, 假定不同的气候情景组合, 建立山区径流对气候变化的响应模型, 以揭示天山南、北坡河流出山径流对气候变化的响应及其差异。结果表明, 开都河与乌鲁木齐河山区径流与气温、降水量均呈正相关关系, 受山区降水、气温持续增加和上升的影响, 出山径流总体呈上升趋势, 1990年代以后的升幅尤为显著; 相对而言, 乌鲁木齐河山区径流对降水变化更为敏感, 而开都河出山径流对气温变化的敏感性略甚于气温。

关键词: 天山南北坡; 乌鲁木齐河; 开都河; 气候变化; 敏感性

中图分类号: P339 P343

文献标识码: A

根据 IPCC第4次气候变化评估报告等^[1-4], 预计21世纪全球气温将进一步变暖, 预测平均气温上升1.5~4.5℃, 未来我国西北等地区夏季增温大, 而降水变化却存在着很大的不确定性。位于我国西北部的新疆深居欧亚大陆腹地, 远离海洋, 故该区大部分地区年降水量在200 mm以下, 但横贯于新疆中部的天山山区, 由于其东西走向, 对大西洋、北冰洋气流的阻挡和抬升作用, 山区降水比较充沛。天山北坡某些区域年降水量可达500~700 mm, 西段个别迎风坡可达1000 mm, 形成西北荒漠中的湿岛, 素有新疆“湿岛”之称, 新疆65%的河流源于此区域, 其径流量占全疆总径流量的54%^[5-8], 提供了新疆58个市、县和兵团100多个团场的工农业生产与城镇生活用水, 所以天山南北麓是中国干旱区经济最发达的地区之一, 也是目前被世界公认为干

旱区开发比较成功的地区。除了降水比较丰沛之外, 天山山区的高山地带还分布有丰富的现代冰川与永久性积雪^[9-10], 冰川积雪融水是源于天山南北坡的诸条河流出山径流的重要组成部分。上世纪80年代以来, 全球变暖加剧对天山山区水循环过程产生了重要的影响, 该区域来水量一旦出现较大波动, 将会引起新疆社会经济发展的强烈反响。因此, 分析气候变暖对天山南、北坡河流出山径流的影响, 不仅是水科学发展的热点和前沿课题, 而且也是制定气候变化的适应与减缓对策亟需解决的现实问题。

1 研究区域概况

1.1 开都河流域

开都河流域位于新疆天山南坡焉耆盆地北缘,

收稿日期 (Received date): 2009-03-02; 改回日期 (Accepted): 2009-05-13.

基金项目 (Foundation item): 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KZCX2-YW-328)、国家自然科学基金重点项目 (90702001)、国家自然科学基金面上项目 (40675066)、(40777047)资助。[This research is supported by the funding of the Innovation Program of the Chinese Academy of Sciences (Grant No. KZCX2-YW-328), the Key Program of National Natural Science Foundation of China (Grant No. 90702001), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 40777047 and Grant No. 40675066).]

作者简介 (Biography): 蓝永超 (1957-), 男 (汉族), 四川资阳人, 研究员, 主要从事气候变化与水文水资源方面的研究工作。[Yongchao Lan (1957-), Professor specialized in water resources and hydrology in Northwestem China.] Tel + 86-931-4967161; Fax + 86-931-8275241; Mobile 13893218304; E-mail: ly@lzb.ac.cn

介于 $82^{\circ}52' \sim 86^{\circ}55'E$ $41^{\circ}47' \sim 43^{\circ}21'N$ 之间, 河流发源于天山中部海拔 5 000 m 的萨尔明山的哈尔尕特和扎克斯台沟, 主流自东向西经小尤尔都斯盆地至巴音布鲁克水文站, 而后折转东南, 经大尤尔都斯盆地至呼斯台西里, 再经峡谷部至大山口水文站后流出山口。从河源至呼斯台西里为开都河上游, 之后至出山口为中游。出山口以上流域集水面积 19 022 km², 山区流域平均海拔 3 100 m。流域总地势是北面高, 南面低, 高山、峡谷和盆地交错, 地形复杂。该河属雪冰融水和雨水混合补给为主的河流: 4月随气温升高, 季节性积雪融化补给河流; 进入夏季, 高山冰川融水和降雨补给河流。流域山区降雨丰富, 诸河源冰川积雪主要集中分布在海拔 4 000 ~ 4 500 m 的艾尔宾、依连哈比尔尕、科克铁克和那拉提等山脉, 分布有冰川 473.97 km², 年冰川融水量约 5.14×10^8 m³, 冰川融水占年出山径流的比重达 15.2%^[11]。开都河全长 530 km, 年径流量达 34.4×10^8 m³, 其径流量约占博斯腾湖入湖流量的 85% 左右^[12]。

1.2 乌鲁木齐河流域

乌鲁木齐河位于天山天格尔山北坡, 西接头屯河流域, 东邻板房沟流域, 流域总面积为 4 684 km²。英雄桥以上流域面积为 924 km², 平均海拔 3 083 m。流域最高点天格尔 II 峰海拔 4 479 m, 最低点西白杨沟口海拔 1 670 m。流域景观分为: 1)高寒砾漠带(海拔 3 600 m 以上); 2)高山草原草甸区(3 500~2 600 m); 3)中低山森林区(2 500~1 600 m)。气候分区为: 1)高山冰雪区, 为现代冰川区, 平均雪线高度 4 050 m, 雪线以上面积 102.2 km², 冰川 124 条, 冰舌末端海拔 3 440~4 050 m, 年均气温 -6.0℃, 降雪量占年降水量的 75% 以上; 2)亚高山冻土区, 年均气温 -2.5~-1.22℃, 降雪量占年降水量的 50%; 3)中高山寒温区, 年均气温 0~4.0℃, 降雪量占年降水量的 20%~30%, 为山区最大降水

地带, 一般年降水量为 400~500 mm。英雄桥以上山区多年平均出山口径流量 2.40×10^8 m³^[13]。

2 基本资料及分析方法

选用了开都河出山口径流控制站大山口水文站、乌鲁木齐河出山口控制站英雄桥水文站以上山区流域内的大西沟气象站、巴音布鲁克气象站和大山口站(1959~2005年)的径流、气温和降水观测资料。上述资料均为新疆维吾尔自治区气象局和新疆维吾尔自治区水文水资源局经过整编的数据。研究区域水文、气象观测站和资料序列详见表 1。对水文气象要素变化特征与趋势的分析计算主要采用线性趋势法及多元线性与非线性回归方法^[14 15]。

3 近 50 年来山区流域气候与出山径流的变化

由表 2 可以观察到, 在全球变暖背景下, 位于天山南、北坡的开都河、乌鲁木齐河山区流域气温与全球平均气温上升相对应, 总体上呈震荡递升的态势, 其中 1990 年代气温的升幅尤为显著; 山区降水不同区域差别较大, 开都河河源区降水以 1990 年代为界, 1990 年代以前均小于 1960 年代均值, 1990 年代之后则均大于 1960 年代均值; 在开都河出山口, 从 1960 年代起降水持续增加, 1990 年代以后增幅均超过 1960 年代的一半以上。与气温升高、降水增加相对应, 乌鲁木齐河与开都河出山径流总体上均呈增加的态势, 但进入 2000 年代后乌鲁木齐河出山径流的后迅速回落至 1960 年代均值水平之下。

3.1 气温变化

乌鲁木齐河流域、开都河流域气温均从 20 世纪 80 年代中后期开始明显回升。近几十年来, 乌鲁木齐河源区最高、最低气温及年平均气温均呈上升趋势

表 1 研究区域水文、气象观测站和资料序列
Table 1 Hydrological and weather stations and data sequences in studying areas

流域	站点	E	N	海拔 (m)	资料	年限
乌鲁木齐河	大西沟气象站	86°50′	43°06′	3 539	气温、降水	1961~2005 年
	山区流域	英雄桥水文站	87°12′	43°22′	气温、径流	1958~2005 年
开都河	巴音布鲁克气象站	84°09′	43°02′	2 458	气温、降水	1960~2005 年
	巴音布鲁克水文站	84°08′	43°01′	2 440	径流	1960~2005 年
	山区流域	大山口水文站	85°44′	42°13′	气温、降水、径流	1957~2005

势,其线性趋势分别为 $0.21\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})$ 、 $0.26\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})$ 和 $0.18\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})$ 。最低气温的上升幅度大于最高气温的上升幅度,呈非对称性变化趋势,冬季和夜间的升温是河源区升温的主要原因。分析表明,1960~1970年代气温较低;1980年代是气温升高的转折期,除上游高山区气温仍下降外,中游山带气温已经明显回升;1990年代至21世纪初,气温上升显著,是近50年来气温相对较高的时期。

3.2 降水变化

乌鲁木齐河流域和开都河流域1960~1980年代的降水量均偏少,1980年代是降水量变化的转折时期,前期降水偏少,后期降水增加明显。1990年代是降水量增多的时期。降水具有明显的空间差异

性。近几十年来,英雄桥降水量呈不断减少趋势,其余各站降水量均呈增加趋势,尤其1990年代降水量增加显著。大山口站1970年代至21世纪初降水量增加幅度较大,1990年代的降水量增加达56.5%。巴音布鲁克1960年代的平均降水量正常;1970~1980年代巴音布鲁克降水量减少。

3.3 出山径流的变化

从出山径流距平的年际变化过程(图1)来看,乌鲁木齐河出山径流的年际变化过程的大体上可分两个阶段,20世纪50年代中期至80年代中期,径流量大部分时间处在多年平均水平以下,其中,50年代中期至70年代中期径流持续递减下降段,70年代中期至80年代中期径流开始回升,1986年是径

表 2 研究区域各年代水文气象要素值相对于 1960年代平均值的

Table 2 Variations of each hydrological and climatic factor in various ages relative to 1960s' averageson in studying areas

要素	站点	1960年	1970年	1980年	1990年	2001~2005年
气 温	大西沟(℃)	-5.3	-0.1	-0.2	+0.5	+0.7
	英雄桥(℃)	0.8	+0.3	+0.5	+1.3	+1.6
	巴音布鲁克(℃)	-4.6	+0.4	-0.5	+0.3	+1.2
	大山口(℃)	8.05	-0.16	+0.57	+0.9	+0.45
降 水	大西沟	433.8(mm)	-2.01%	-2.95%	+18.5%	+11%
	巴音布鲁克	280.33(mm)	-3.49%	-9.75%	+8.62%	+4.62%
	大山口	86.9(mm)	+11.5%	+31.4%	+56.6%	+53.7%
径 流	1号冰川径流深	$0.252\times10^8(\text{m}^3)$	-3.4%	+32.3%	+86%	+68.5%*
	英雄桥	$2.313\times10^8(\text{m}^3)$	0.83%	4.11%	18.7%	-1.9%
	巴音布鲁克	$10.43\times10^8(\text{m}^3)$	-0.2%	-8.5%	+17.5%	+4.1%
	大山口	$33.08\times10^8(\text{m}^3)$	-0.19%	-8.48%	+18.4%	+25.26%

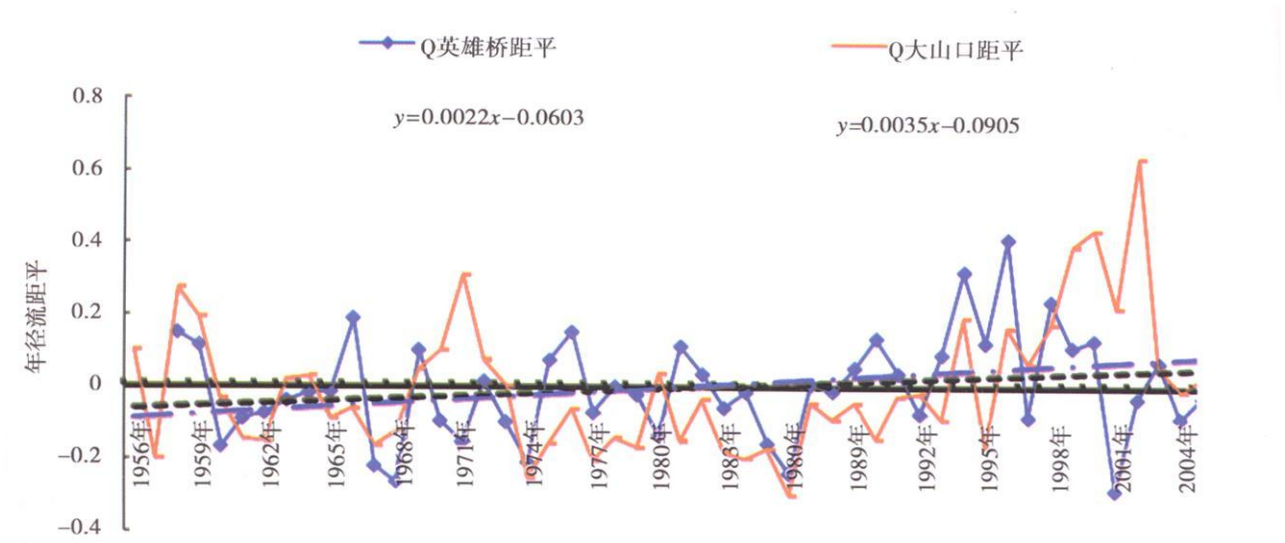


图 1 开度河与乌鲁木齐河出山径流年平均流量距平年际变化过程

Fig 1 Yearly variation processes of the mountainous runoff of Maoli and Urumqi River

流由少变多的转折点。1986年起至上个世纪末, 径流量大部分时间处在多年平均水平以上, 但 2000 年后又有回落至均线以下。开都河与乌鲁木齐河出山径流的年际变化过程有着较大的差异, 1950 年代中期水量较丰; 1950 年代末至 1960 年代后期水量偏枯; 1960 年代末至 1970 年代前期水量又偏丰; 1970 年代中期至 1990 年代初有一个长度超过 20 a 的枯水期, 此后径流迅速增加, 至 2001 年达到近 50 年来的最大值, 此后几年又迅速回落, 但仍在多年平均水平之上。从径流量年际变化的线性趋势上看, 位于天山南北的两条河流近 50 a 出山来径流的线性变化率分别为 3. 5% /(10 a) 和 2. 2% /(10 a), 显示出径流量总体上均呈增长的态势。

4 径流对气候变化敏感性的分析

4.1 径流变化敏感性的定义

径流对气候变化的敏感性是指流域的径流对假定的气候变化情景响应的程度^[16]。假定的气候变化情景由给定的降水变化 (如: 0 ±10%, ±20% ……) 和气温升高 (如: 0 °C, 1 °C ……) 组合成。径流等水文要素对不同气候情景的响应以下式表示

$$\Delta W_{\Delta P, \Delta T} = (W_{P+\Delta P, T+\Delta T} - W_{P, T}) / W_{P, T} \times 100\%$$

(1)

式中 $W_{P, T}$ 为现状径流量, $W_{P+\Delta P, T+\Delta T}$ 为降水变化 ΔP 同时气温变化 ΔT 情景下的径流量, $\Delta W_{\Delta P, \Delta T}$ 为径流量在降水变化 ΔP 同时气温变化 ΔT 情况下的变化量。

在敏感性研究中, 假定气候变化情景不改变历史气候的时空分布, 且未来将重现降水, 气温和蒸发缩放后的序列。在相同的气候变化情景下, 响应的程度愈大, 水文要素愈敏感; 反之则不敏感。敏感性研究可提供气候变化影响的重要信息, 对于揭示不同流域水文要素响应气候变化的机理和差异有一定的作用。径流敏感性的分析可以确定影响径流变化的主要因素和次要因素^[17]。

4.2 径流响应模型

分析表明, 河源区径流与降水、气温之间存在着比较密切的关系, 故通过建立统计方程近似地去模拟原型仍然是一种合理可行的途径。本文中采用幂函数连乘的形式来描述黄河源区及各分区径流深 R (mm) 与流域平均降水量 P (mm) 和平均气温 T (°C), 之间的关系, 即

$$W(P, T) = e^k \cdot P^\alpha \cdot T^\beta$$

(2)

式中 P 、 T 、 R 分别为年平均降水量、年平均气温和年平均径流量; k 、 α 、 β 为回归系数。该模型体现了气候变化与水资源系统之间的非线性关系, 具有一定的物理意义^[17]。根据开都河与乌鲁木齐河山区流域近 50 a 来的年平均气温、年平均降水量和年平均径流深的数据, 利用统计软件, 就可以求出 k 、 α 、 β , 建立各流域的径流响应模型, 以分析出山径流对不同气候情景的敏感性。

根据以上两河近 50 a 来的年平均气温、年平均降水量和年平均径流深的数据, 利用统计软件, 就可以求出 k 、 α 、 β , 便可获得河源区各分区径流深对气候变化的响应模型 (表 2)。显著性检验的结果表明, 乌鲁木齐河与山区径流深与年降水量和年平均气温的拟合方程的复相关系数 R 分别为 0. 753 和 0. 670 8, 显著性水平值 $\text{Sig} F$ 远 < 0. 01, F 值均通过了 $\alpha = 0. 01$ 的显著性检验, 说明山区径流量的变化与降水与气温有着非常显著的正相关关系。表 3 中 R^2 为可决系数^[15], N 为观测资料年数。由于 P 和 T 是独立的自变量, 将温度与降水的可能变化对径流的影响叠加起来, 就可得出径流对未来各种气候变化情景的响应。

4.3 气候变化情景

据 2007– 02 IPCC 发布的第四次气候变化科学评估报告^[1]及 2006– 01 中国气象局发布的首份全球气候变化及其影响的国家评估报告^[2– 4], 预估未来气候将持续变暖, 到 2020 年中国年平均气温将增加 1. 3~ 2. 1 °C, 2030 年增加 1. 5~ 2. 8 °C, 2050 年增加 2. 3~ 3. 3 °C。预计到 2020 年, 全国平均年降水量将增加 2% ~ 3%, 到 2050 年可能增加 5% ~ 7%。

表 3 新疆天山南、北坡代表性河流出山径流深对气候变化的响应模型

Table 3 Responding models of themountain runoff of the representative rivers located at the Tian shan Mountains of Southside and Northside in Xinjiang to climate change

区域	响应模型	k	α	β	R^2	F	$\text{Sig} F$	N
乌鲁木齐河山区流域	$R = e^{1.3515} \cdot P^{0.68733} \cdot T^{0.086254}$	1.351 5	0.687 33	0.036 254	0.567	25.49	8.33E-08	46
开都河山区流域	$R = e^{1.2042} P^{0.32931} T^{0.4738}$	1.204 2	0.329 30	0.473 800	0.450	17.59	2.62E-6	46

基于上述报告中全球与中国的气候变化趋势,假定乌鲁木齐河山区未来可能出现的气候情景方案分别为:降水变化为零、±5%、±10%,同时气温变化为零、+ 0.5℃、+ 1.0℃、+ 1.5℃、+ 2.0℃、+ 2.5℃;开都河未来可能出现的气候情景方案分别为:降水变化为零、±5%、±10%,同时气温变化为零、+ 0.5℃、+ 1.0℃、+ 1.5℃。

4.4 出山径流对气候变化的敏感性分析

利用表 2 中的模型,根据假定的气候变化情景,便可得到河源区各分区径流深对气候变化的敏感性分析结果(ΔW、ΔP、ΔT 分别为未来不同气候情景下的乌鲁木齐河、开都河山区径流、河源区和河源区各分区平均年降水量与年平均气温的变化量)(表 4 表 5)。

表 4 乌鲁木齐河出山径流对气候变化的敏感性分析

<div><div><div><div><div></div><div>$\Delta W(\%)$</div></div><div><div>$\Delta P(\%)$</div><div></div></div></div></div></div> <th colspan="7">$\Delta T(^{\circ}C)$</th>	$\Delta T(^{\circ}C)$						
	0	0.1	0.5	1	1.5	2	2.5
-10	-6.99	-6.76	-5.99	-5.22	-4.58	-4.04	-3.57
-5	-3.46	-3.23	-2.43	-1.63	-0.97	-0.41	0.08
-1	-0.69	-0.45	0.37	1.20	1.88	2.45	2.95
0	0.00	0.24	1.07	1.90	2.58	3.16	3.67
1	0.69	0.93	1.76	2.60	3.29	3.87	4.38
5	3.41	3.66	4.51	5.37	6.08	6.68	7.20
10	6.77	7.02	7.91	8.80	9.53	10.15	10.69
15	10.08	10.35	11.26	12.17	12.93	13.56	14.12
20	13.35	13.62	14.56	15.50	16.28	16.94	17.51

表 5 开都河出山径流对气候变化的敏感性分析

ΔW (%)		ΔT (℃)			
ΔP (%)	0	0.1	0.5	1	1.5
− 10	− 3.41	− 2.87	− 0.73	1.87	4.41
− 5	− 1.68	− 1.13	1.05	3.70	6.28
− 1	− 0.33	0.23	2.43	5.12	7.74
0	0.00	0.56	2.77	5.47	8.09
1	0.32	0.89	3.11	5.82	8.45
5	1.62	2.19	4.44	7.18	9.84
10	3.19	3.77	6.05	8.83	11.54
15	4.71	5.30	7.61	10.44	13.18
20	6.18	6.78	9.13	12.00	14.78

从表 4 表 5 中可以观察到,在气温不变的情景下,山区降水减少或增加 1%、10% 1% 和 10% 时,乌鲁木齐河山区径流减少 0.69%、6.99% 或增加 0.69%、6.77%,而开都河山区径流减少 0.33%、3.41% 或增加 0.32%、3.19%;若降水量不变,当气温上升 0.10℃、10℃,乌鲁木齐河与开都河山区径流将分别增加 0.24%、1.90% 和 0.56%、5.47%。说

明在全球气候变暖的大背景下,天山南、北坡的河流的山区径流对气候变化的响应既有着较好的一致性,又有着区域上的差异,其一致性在于山区径流的变化与降水变、气温变化均亦呈正相关关系;而差异性表现在,乌鲁木齐河山区径流对于降水的变化的响应程度要强于开都河山区径流,而开都河山区径流对气温变化的响应程度要强于乌鲁木齐河山区径

流; 地理位置、海拔、冰雪面积覆盖的不同均是这些差异产生的驱动因子因素。

5 结语

1. 近 50 年来天山南、北坡的开都河与乌鲁木齐河山区流域气温与降水量总体上均呈显著的上升趋势, 1990 年代以后的升幅尤为显著, 但气温、降水的变化过程与特征都有着明显的区域性差异;

2. 开都河、乌鲁木齐河山区径流对降水、气温变化呈正相关关系, 受山区降水增加和气温上升的影响, 天山南、北坡的开都河与乌鲁木齐河开都河出山径流总体上均呈增加的趋势, 1990 年代以后的增幅尤为显著, 1990 年代两河出山径流量均达到近 50 年来的最大值; 进入 2000 年代后, 北坡乌鲁木齐河出山径流有明显的回落;

3. 天山南、北坡的开都河、乌鲁木齐河山区径流对降水、气温变化均十分敏感, 但相对而言, 乌鲁木齐河山区径流对于降水的变化的响应程度要强于开都河山区径流, 而开都河山区径流对气温变化的响应程度要强于乌鲁木齐河山区径流; 地理位置、海拔、冰雪面积覆盖的不同均是这些差异产生的驱动因子因素。

参考文献 (References)

- [1] IPCC. Summary for Policymakers of Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [2] Qin Dahe. An Assessment of Western China Environment Evolution [M]. Beijing: Science Press, 2002: 32~57 [秦大河. 中国西部环境演变评价 [M]. 北京: 科学出版社, 2002: 32~57]
- [3] Qin Dahe, Ding Yihui, Su Jilan. Assessment of climate and environment changes in China (I): climate and environment changes in China and their projection [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2005, 1(1): 4~9 [秦大河, 丁一汇, 苏纪兰, 等. 中国气候与环境评估 (I): 中国气候与环境及未来变化趋势 [J]. 气候变化研究进展, 2005, 1(1): 4~9]
- [4] Xu Yinlong, Huang Xiaoying, Zhang Yong, et al. Statistical analyses of climate change scenarios over China in the 21st century [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2005, 1(2): 80~83 [许吟隆, 黄晓莹, 张勇, 等. 中国 21 世纪气候变化情景的统计分析 [J]. 气候变化研究进展, 2005, 1(2): 80~83]
- [5] He Xinlin, Guo Shenglian. The mechanism of abrasion and material abrasion [J]. *Water Resources and Water Engineering*, 1996, 7(3): 8~15 [何新林, 郭生练. 天山山区水平衡法径流模型的研究 [J]. 西北水资源与水工程, 1996, 7(3): 8~15]

- [6] Yuan Yujiang, He Jie, Mu Guijin. Summer precipitation change for recent 40 years in the Tianshan Mountains and compared with southern and northern Xinjiang regions [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25(3): 331~336 [袁玉江, 何清, 穆桂金. 天山山区近 40a 夏季降水及与南北疆的比较 [J]. 冰川冻土, 2003, 25(3): 331~336]
- [7] Xinjiang Geographic Society. Xinjiang Geographic Manual [M]. Urumqi: Xinjiang People Press, 1993: 84~94 [新疆地理学会. 新疆地理手册 [M]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 1993: 84~94]
- [8] Water Conservancy Bureau of Xinjiang and Water Conservancy Society of Xinjiang. River Hydrology and Water Resources in Xinjiang [M]. Urumqi: Xinjiang Technology and Health Press, 1999: 333~429 [新疆水利厅, 新疆水利学会. 新疆河流水文水资源 [M]. 乌鲁木齐: 新疆科技卫生出版社, 1999: 333~429]
- [9] Deng Mingjiang, Wang Shijiang, Dong Xinguang, et al. The water resource in Xinjiang and Its Sustainable Utilization [M]. China Water Conservancy and Hydropower Press, 2005: 150~167 [邓铭江, 王世江, 董新光, 等. 新疆水资源及可持续利用 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005: 150~167]
- [10] Hu Ruji, Jiang Fengqing, Wang Yajun. Assessment on the glacial water resources in Xinjiang, China [J]. *Arid Zone Research*, 2003, 20(3): 187~188 [胡汝骥, 姜逢清, 王亚俊. 新疆雪冰水资源的环境评价 [J]. 干旱区研究, 2003, 20(3): 187~188]
- [11] Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, CAS Editor. Glacier Inventory of China. III. Tianshan Mountain (Inter Drainage Area of Scattered Flow in East) [R]. Beijing: Science Press, 1987: 61~84 [中国科学院兰州冰川冻土研究所. 中国冰川目录. III. 天山山区 (东部散流内流区) [C]. 北京: 科学出版社, 1987: 61~84]
- [12] Wang Run, Sun Zhandong, Gao Qianzhao. Water level change in Bosten Lake under the climatic variation background of Central Asia around 2002 [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, 28(3): 324~329 [王润, 孙占东, 高前兆. 2002 年前后博斯腾湖水位变化和中亚气候 [J]. 冰川冻土, 2006, 28(3): 324~329]
- [13] Wu Sufen, Lin Zhihui, Han Ping. Impact of Climate Change on Water Resources of the Urumqi River Basin [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, 28(5): 702~706 [吴素芬, 刘志辉, 韩萍. 气候变化对乌鲁木齐河流域水资源的影响 [J]. 冰川冻土, 2006, 28(5): 702~706]
- [14] Li Lin, Wang Qinchun, Zhang Guosheng, et al. Impact of climate change to surface runoff in the upper Yellow River [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(5): 716~722 [李林, 汪青春, 张国胜, 等. 黄河上游气候变化对地表水的影响 [J]. 地理学报, 2004, 59(5): 716~722]
- [15] Wang Meihua, Xie Qiang, Wang Hongya. Impact of future climate change on runoff depth of the Huaihe drainage basin [J]. *Geographical Research*, 2003, 22(1): 79~88 [汪美华, 谢强, 王红亚. 未来气候变化对淮河流域径流深的影响 [J]. 地理研究, 2003, 22(1): 79~88]
- [16] IPCC. Climate Change 1995: Impacts, Adaptation, and Mitigation [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.

[17] Chen Lingfei, Wang Hongya. Sensitivity of runoff to climate change in small drainage basins in China[J]. Resources Science, 2004,

26(6): 62~ 68[陈玲飞, 王红亚. 中国小流域径流对气候变化的敏感性分析[J]. 资源科学, 2004, 26(6): 62~ 68]

Sensitivity of Mountain Runoff of Rivers Originated from the South Slope and the North Slope of the Tianshan Mountain to Climate Change

——Taking Mountain Runoff of Urumqi River and Kaidu River for Example

LAN Yongchao¹, ZHONG Yingjun², WU Sufen³, SHEN Yongping¹, WANG Guoya¹

(1 Key Laboratory of Ecohydrology and Integrated Basin Management, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, Gansu, China;

2 Xinjiang Bureau of Hydrology and Water Resources, Urumqi 830000, Xinjiang, China;

3 Xinjiang Hydrology and Water Resources Bureau, Urumqi 830000, Xinjiang, China)

Abstract The mountain watersheds of Maidu river and Urumqi river, which are respectively located at the south slope and north slope of the Tianshan Mountains, are selected as a studying area, and the characteristics and trends on variation of temperature, precipitation and runoff and the relationships between temperature, precipitation and runoff were analyzed based on the past 50 years observational data at some relevant hydrological and weather stations in the area, and the various weather scene combination were assumed and the responding models of runoff to climate change were established in the area to reveal sensitivity of runoff in the area to climate change on the basis of the foregoing analysis. The results show that all variations of temperature, precipitation and runoff in the area have been presenting an oscillating and rising trend as a whole since 1960s, and the rising ranges are quite obvious since 1990s. However, there are also some territorial variances between the response of mountain runoff of Kaidu river and the that of Urumqi river basin. Relatively, the mountain runoff of Urumqi river basin is more sensitive to precipitation change than temperature change and the runoff all have a positive correlative relationship with temperature and precipitation, and change of runoff rests with mainly change of precipitation, and that the mountain runoff of Kaidu river basin has a positive correlative relationship with precipitation and it has a negative correlative relationship with temperature, and the runoff increases along with precipitation increase and it decreases along with temperature rising.

Key words the south slope and north slope of the Tianshan Mountains, Kaidu river, Urumqi river, climate change, sensitivity