

doi: 10.7522/j.issn.1000-0240.2014.0082

Zhou Jingwu, Abulimiti Ablilikim, Mao Weiyi, et al. The responses of the runoff processes to climate change in the Qingshuihe River watershed on the southern slope of Tianshan Mountains [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(3): 685–690. [周京武, 阿不力米提·阿不力克木, 毛炜峰等. 天山南坡清水河流域径流过程对气候变化的响应[J]. 冰川冻土, 2014, 36(3): 685–690.]

# 天山南坡清水河流域径流过程对气候变化的响应

周京武<sup>1</sup>, 阿不力米提·阿不力克木<sup>2</sup>, 毛炜峰<sup>3</sup>, 焦梦婕<sup>4</sup>, 安曼榕<sup>5</sup>, 沈永平<sup>6\*</sup>

(1. 新疆巴音郭楞水文水资源勘测局, 新疆 库尔勒 842000; 2. 新疆吐鲁番水文水资源勘测局, 新疆 吐鲁番 838000;  
3. 新疆气候中心, 乌鲁木齐 830001; 4. 华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510641; 5. 天水师范学院,  
甘肃 天水 7410004; 6. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000)

**摘 要:** 干旱区的高山寒区水文过程对气候变化特别敏感, 冰川、积雪和冻土变化产生的水文效应对下游水资源供给具有重要影响. 以天山南坡清水河流域为研究区域, 通过分析水文站径流变化, 结合流域上游山区巴伦台的气象资料, 研究了高寒流域在气候变化背景下径流过程的响应特征. 结果表明: 降水变化决定着径流过程, 但气温上升对径流产生额外影响; 气温变化产生的径流变化对径流产生延迟效应, 冬季径流明显增加. 南疆天山地区冬季积雪较少, 产生的春季融水径流不明显; 夏季降水和径流同期出现, 使得高寒山区水文过程对固体降水变化不敏感; 冻土退化产生的水文效应使冬季径流增加明显. 为应对气候变化对水文过程产生的影响, 应加强山区水库建设, 通过工程措施调节, 保障持续的水资源供给和利用.

**关键词:** 寒区; 水文过程; 气候变化; 调节; 天山

**中图分类号:** P339 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0240(2014)03-0685-06

## 0 引言

在中高纬度以积雪为主的流域, 由于全球变暖改变了积雪作为天然水资源存储水库的能力, 形成河川径流的机制对冬季期间温度的上升极为敏感<sup>[1-5]</sup>. 中国西北具有降水稀少、冬天寒冷的特点, 大量的水资源冬季以固态水的形式存储在积雪、冻土中. 随着春季气温升高, 伴随积雪融化和土壤水分相变, 地-气间水热交换、生态-水文过程发生改变, 最直接的反映是河川径流量和径流年内分配的改变<sup>[6]</sup>. 在未来气候条件下, 人口更多、经济发展更为迅速, 水资源的供给量将远远小于需求量, 尤其是在以冰川积雪融水为河流主要补给来源的地区<sup>[7-8]</sup>. 由于全球变暖, 且没有足够的天然水库来存储径流季节循环转变的水量, 河川流量在水文循环中发生季节性的转变, 这种转变直接导致了地区水资源的短缺<sup>[9-11]</sup>.

新疆巴音郭楞蒙古自治州境内的河流均属内陆河, 共有大小河流 54 条, 清水河就是其中之一. 清水河发源于天山南部山区, 主要以冰雪融水和降雨补给. 河流出山口以上为山区, 降水较多, 是径流形成区, 山口以下为散失区, 降水较少, 水量逐渐干涸. 对清水河河流特性进行分析, 分析其对气候变化的响应, 对预防洪水、减少旱灾有着十分重要的意义.

## 1 流域概况和资料

### 1.1 流域概况

清水河流域位于巴州和硕县北部, 发源于中天山支脉的天格尔山南麓, 流域东面与曲惠沟流域接壤, 西面与黄水沟流域毗邻, 北界阿拉沟流域, 流域最高点海拔 4 594.4 m. 地理位置介于 86°35′~87°10′E, 42°10′~42°50′N, 山口以上为山区产流区, 海拔多在 1 510 m 以上, 山口以下为径流散失

收稿日期: 2014-01-10; 修订日期: 2014-03-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(41201062; 41271083; 41271035) 资助

作者简介: 周京武(1961-)男, 河南南阳人, 工程师, 2006年毕业于新疆农业大学, 现主要从事水文水资源研究和利用工作.

E-mail: 1519652560@qq.com

\* 通讯作者: 沈永平, E-mail: shenyp@lzb.ac.cn

区,海拔多在 1 000 m 以下,海拔 4 000 m 以上终年积雪.清水河河流发源于天格尔山海拔 4 265 m 的阿勒古达板,从河源至出山口河长 60.2 km,流域平均宽度 22.1 km,最大宽度 36.0 km,流域平均海拔为 3 110 m,河道平均坡度 3.7%,流域发育冰川面积 5.64 km<sup>2</sup>,占流域总面积的 0.56%.目前,随着气候变暖,本区的冰川消融退缩很快.流域内地势北高南低向西倾斜,海拔在 2 500 ~ 3 800 m 的地带降水较多,气候湿润,海拔在 1 000 ~ 2 500 m 的低山带,降水量较少,气候干燥.清水河河流上有 22 条冰川,冰川面积 5.64 km<sup>2</sup>,冰川融水量  $0.16 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,占河川径流量的 13%,冰川素有高山固体水库之称,对河流水量具有调节作用.高山区有多年区有多年冻土分布.

清水河的径流量主要是由冰雪融水和降雨补给,还有少量的地下水补给组成.夏季降水大部分直接补给径流,因而降水是影响清水河径流大小的主要因素之一,山区降雨大小直接影响河道径流量的大小.清水河属山溪性河流,河流流程短,坡降大,洪水暴涨暴落,挟带大量泥沙、漂浮物奔腾而下,对人民生命财产形成重大威胁.清水河洪水主要由融雪洪水、暴雨洪水和混合型洪水组成.单纯的融雪洪水,水位涨落缓慢,历时较长,一般为春汛洪峰;暴雨洪水,降水强度大,水位陡涨陡落,历时较短,洪峰流量大,破坏力很大;融雪水和暴雨混合型洪水,洪水起涨较快,涨率大,洪量大,持续历时长,形成特大洪峰,对下游造成重大破坏和威胁.清水河枯水时间比较长,一般为 12 月至次年 5 月,河流大部分时间处在冰期,最枯水期一般为 4 ~ 5 月,地表径流补给中断,靠地下水补给,这时河水径流量比较稳定,但流量小.据清水河克尔古提站实测分析,历年年最小流量(枯水期)出现在 4 ~ 5 月的频率为 81.8%,其中 4 月份为 45.5%.这时正是农业播种期,对农作物产生不利影响.

## 1.2 资料

气象资料采用新疆气象局巴仑台站(42°40' N、86°20' E,海拔 1 752.5 m)的气象观测资料,测站未曾迁站,距克尔古提水文站垂直距离 50 km,且位于流域上游的侧沟,海拔较高,可以代表流域山区的气象条件.该站的资料时段为 1961 ~ 2013 年.

水文资料采用克尔古提水文站资料.克尔古提水文站(86°54' E,42°22' N,海拔 1 515 m)是该河唯一的水文站,位于和硕县塔哈其乡,1956 年建站,位于清水河出山口处,水文站以上流域集水面

积为 1 016 km<sup>2</sup>.资料时段为 1956 ~ 2012 年,水文要素齐全.

## 2 降水和温度变化

克尔古提水文站年平均气温 9.4 °C,近几年气温有缓慢上升的趋势,年较差达 34 ~ 38 °C,大于 10 °C 积温 3 400 ~ 3 600 °C,无霜冻日 170 d 左右.夏季 7 月平均气温 22.3 °C,极端最高温度 38.3 °C,1 月平均气温 -13 °C,极端最低温度 -35 °C.流域山区随海拔增高,气温逐渐降低,山区年平均气温 0 ~ -4 °C,大于 10 °C 积温逐渐减少至 2 000 °C 以下,极端最低温度低于 -40 °C.克尔古提水文站多年平均降水量为 146.6 mm,最大年降水量为 253.8 mm(1987 年),最小年降水量为 51.3 mm(1977 年),年内降水量集中在夏季,6 ~ 8 月降水量占年降水量的 62.5%.

巴伦台气象站资料表明,1961 ~ 2003 年降水多年平均为 208 mm,从 1961 ~ 1985 年降水处于较低水平,年平均为 186 mm,从 1986 年开始气候发

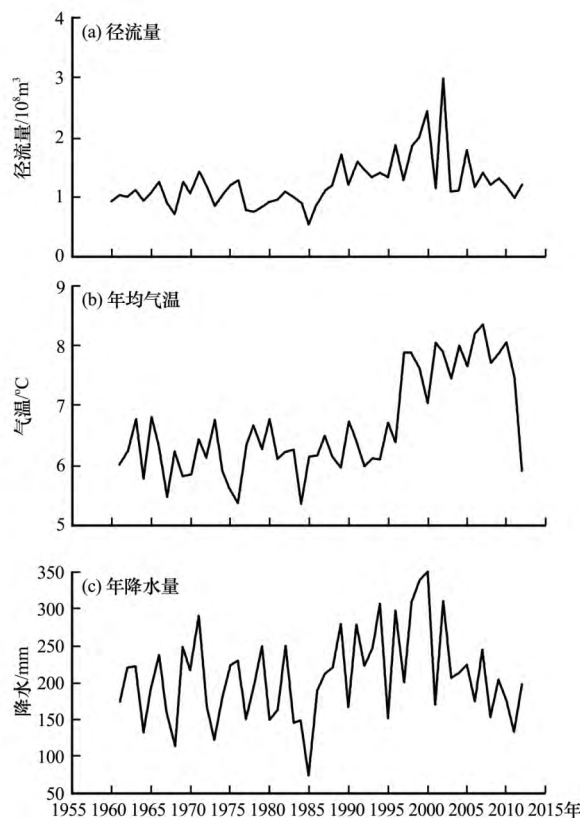


图 1 1961 ~ 2012 年清水河流域年径流量、年平均气温和年降水年变化

Fig. 1 Annual variations of runoff, mean temperature and precipitations in Qingshuihe River watershed during 1961 ~ 2012

表 1 清水河流域年代际月均径流变化  
Table 1 Decadal mean monthly runoff in Qingshuihe River watershed

年代	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
1961 – 1970/( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	1.64	1.60	1.48	1.38	1.64	4.63	7.58	8.04	4.02	2.99	2.36	1.84
1971 – 1980/( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	1.68	1.51	1.39	1.31	1.42	4.01	7.97	7.46	4.92	3.14	2.49	1.92
1981 – 1990/( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	1.59	1.47	1.32	1.22	1.65	5.50	8.83	6.77	4.70	2.87	2.28	1.78
1991 – 2000/( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	2.14	1.86	1.73	1.60	1.88	7.07	16.89	12.08	7.36	4.65	3.60	2.90
2001 – 2010/( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	2.37	2.06	1.90	1.74	1.73	5.61	12.98	10.64	6.81	4.78	3.71	2.94

生转型,降水不断攀升,一直到 2002 年,维持在较高水平,年均 250 mm. 从 2003 年开始,降水开始下降,目前维持在年均 197 mm. 1961 – 2013 年多年平均气温为 6.64 ℃,气温变化可以分为两个时段,其中,1961 – 1994 年气温维持在年均 6.16 ℃,1995 – 2011 年维持在 7.66 ℃,年均气温相差 1.5 ℃. 总体来讲,最近 20 多年,降水和气温变化呈同步上升趋势,这对径流形成具有积极意义,这段径流增加明显.

3 径流变化

3.1 径流的年内变化

清水河径流的年内分配不均匀(图 2),主要是由于流域的降水时空分布不均、且季节变化明显所致. 径流主要集中在汛期(6 – 9 月),约占全年的 64%,最大月径流量一般出现在 7 月份,占年径流量的 23%,最小月径流量多出现在 4 – 5 月份,只占年径流量的 3%,多年年平均径流量为  $1.23 \times 10^8 \text{ m}^3$ . 历年最大流量出现在 2012 年 7 月 28 日为  $355 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ,最小流量出现在 1956 年 5 月 31 日为  $0.48 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . 由月径流过程可见(表 1 和图 2),因为进入春季后,3 月末气温开始回升,上游积雪融化以及各支流先后开河,但春汛水量不大,而且由于冬季积雪较少,春季降水较少,反而在 4 – 5 月径流达到一年中最小值. 进入夏季后,径流量继续

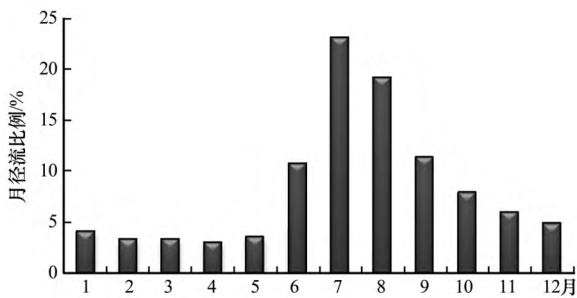


图 2 清水河流域径流的年内分配  
Fig. 2 Monthly frequency distribution of runoff in Qingshuihe River watershed

增加,7 月达到峰值.

3.2 年际及年代际变化

清水河径流的年际变化比较小(图 1),变差系数  $C_v$  为 0.29,主要与径流补给来源有关. 多年平均径流量年际变化小的原因是受山区降水年际变化小的直接影响;冰川、积雪和冻土是“高山固体水库”,可进行年际降水量调节;地下水补给占一定比例.

径流的年代际变化主要表现在 1991 年以后(表 1,图 3),在 1991 – 2000 年期间,各月径流都急剧增加,尤其是 7 月径流增加 90% 以上;进入 21 世纪之后,汛期径流有一些下降,但冬季和春季径流继续增加. 汛期径流变化主要受控于降水变化,从图 4 可以看出,1991 – 2000 年期间降水增加明显,导致径流也明显增加. 但在 1981 – 1990 年期间,流域降水也处于第二大,但径流却并不是第二多,这是由于 1981 – 1990 年期间的气温较低,使得高山流域降水以固体出现的几率大,冰川和冻土消融不强造成. 而在进入 21 世纪,虽然降水减少,但冰川消融补给和冻土退化融水释放作用持续,径流依然维持在高位,尤其是冬季和春季径流持续保持增加态势.

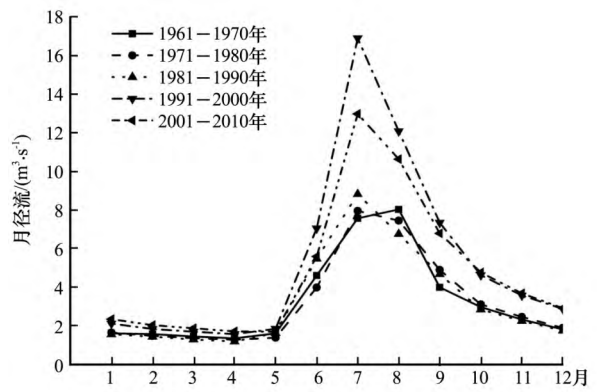


图 3 清水河流域径流年内分布年代际变化  
Fig. 3 Decadal mean monthly runoff change in Qingshuihe River watershed during 1960 – 2010

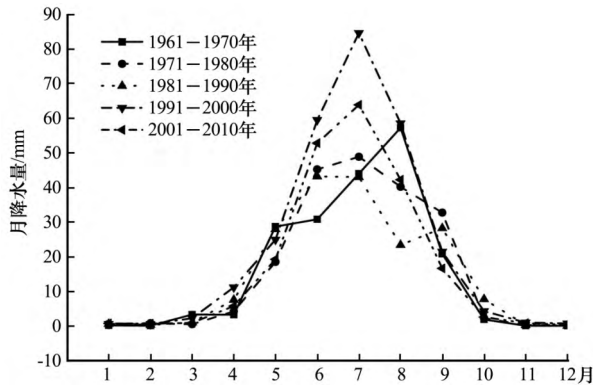


图4 巴伦台气象站降水年内分布的年代际变化

Fig. 4 Decadal mean monthly precipitation change in Baluntai meteorological station during 1960–2010

#### 4 径流对气候变化的响应

流域降水增多有利于径流的形成和来水量增加,根据流域径流量与降水的关系(图5),降水增加100 mm 大约可以引起年径流量增加  $0.6 \times 10^8 \text{ m}^3$ . 所以,随着1986年以来降水的增加,径流增加明显(图1),大约从1987年开始径流进入丰水期. 尤其是夏季降水增加明显,从而直接造成汛期径流增大.

气温与径流成正比,气温升高也是径流增加的一个重要因素(图6). 这是因为流域有冰川分布,冰川退缩补给河流径流;另一方面,流域有季节冻土和多年冻土分布,冻土退化释放地下水,补给河流,尤其是在冬季和春季,冻土释放地下水补给枯季径流明显. 另外,冬暖有利于短期内冰雪消融,但冬季降雪量减少导致冰雪贮量减少,使得春季成为径流枯水期.

气温上升引起冬季最小径流增大,表现为年最

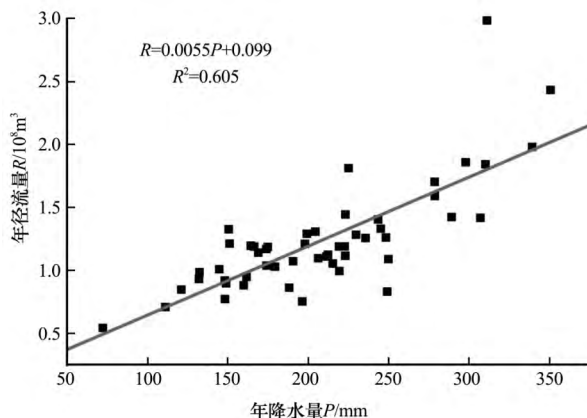


图5 清水河流域年降水量与年径流量关系

Fig. 5 Relationship of annual precipitation change with annual runoff in Qingshuihe River watershed

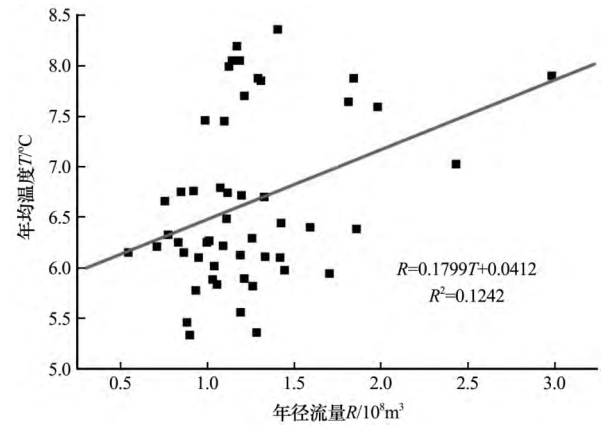


图6 清水河流域年均气温与年径流量关系

Fig. 6 Relationship of annual mean temperature change with annual runoff in Qingshuihe River watershed

小径流年与年气温同步增加(图7). 这主要是由于冻土退化,引起地下水储存在枯季补给河流表现明显.

影响流域径流变化的因素众多,且形成机制复杂,受各气象因子和流域自然地理因素的影响较大,因此,其对气候变化的响应是一个极其复杂的过程. 目前,我们只是针对气温和降水进行了研究,对于冰川和冻土变化引起的径流变化没有给出定量的描述,这在以后的研究中将进一步加强.

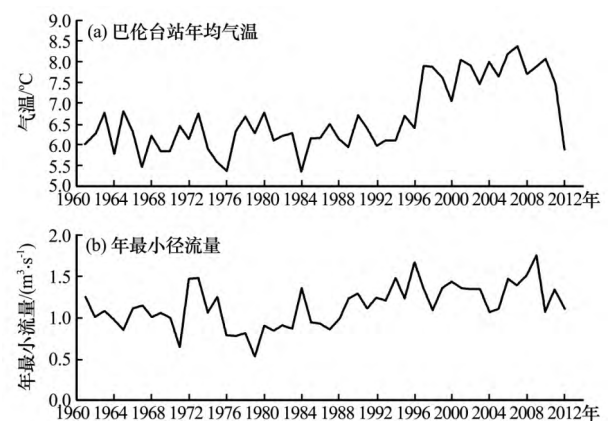


图7 清水河流域年最小流量过程对年均气温的响应

Fig. 7 Compares of annual minimum discharge and average annual temperature in Qingshuihe River watershed

#### 5 结论

干旱区的高山寒区水文过程对气候变化特别敏感,冰川、积雪和冻土变化产生的水文效应对下游水资源供给具有重要影响. 以天山南坡清水河流域为研究区域,通过分析水文站径流变化,研究了高寒流域在气候变化背景下径流过程的响应特征. 主

要结论如下:

(1) 降水变化决定着径流过程, 但气温上升对径流产生额外影响; 气温变化产生的径流变化对径流产生延迟效应, 冬季径流明显增加。

(2) 南疆天山地区冬季积雪较少, 产生的春季融水径流不明显; 夏季降水和径流同期出现, 使得高寒山区水文过程对固体降水变化不敏感; 冻土退化产生的水文效应使冬季径流增加明显。

(3) 为应对气候变化对水文过程产生的影响, 应加强山区水库建设, 通过工程措施调节, 保障持续的水资源供给和利用。清水河虽然年径流量比较小, 但由于它特殊的地理位置, 肩负着县、二乡、三个团场和农场的工农业用水及人蓄饮水的重任。由于其年内分配不均匀, 常有春旱夏洪之灾, 而春、夏季正是农作物需水季节, 对农业灌溉不利。故建议修建蓄水工程, 防洪抗旱, 对河流来水量进行年内调节, 合理利用有限的水资源造福人民。

#### 参考文献 (References):

- [1] Adam J C, Hamlet A F, Lettenmaier D P. Implications of global climate change for snowmelt hydrology in the twenty-first century [J]. *Hydrological Processes*, 2009, 23: 962–972.
- [2] Su Hongchao, Shen Yongping, Han Ping, *et al.* Precipitation and its impact on water resources and ecological environment in Xinjiang Region [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, 29(3): 343–350. [苏宏超, 沈永平, 韩萍, 等. 新疆降水特征及其对水资源和生态环境的影响 [J]. 冰川冻土, 2007, 29(3): 343–350.]
- [3] Mao Weiyi, Fan Jing, Shen Yongping, *et al.* Variation of extreme flood of the rivers in Xinjiang region and some typical watersheds from Tianshan Mountains and their response to climate change in recent 50 years [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(5): 1037–1046. [毛伟峰, 樊静, 沈永平, 等. 近 50 a 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.]
- [4] Shen Yongping, Wang Shunde, Wang Guoya, *et al.* Response of glacier flash flood to global warming in Tarim River Basin [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2006, 2(1): 32–35. [沈永平, 王顺德, 王国亚, 等. 塔里木河流域冰川洪水对全球变暖的响应 [J]. 气候变化研究进展, 2006, 2(1): 32–35.]
- [5] Shen Yongping, Wang Guoya, Ding Yongjian, *et al.* Changes in glacier mass balance in watershed of Sary Jaz-Kumarik Rivers of Tianshan Mountains in 1957–2006 and their impact on water resources and trend to end of the 21st century [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, 31(5): 792–800. [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.]
- [6] Zhou Jian, Zhang Wei, John W Pomeroy, *et al.* Simulating the cold regions hydrological processes in Northwest China with modular modeling method [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(2): 389–400. [周剑, 张伟, John W Pomeroy, 等. 基于模块化建模方法的寒区水文过程模拟在中国西北寒区的应用 [J]. 冰川冻土, 2013, 35(2): 389–400.]
- [7] Wang Guoya, Shen Yongping, Su Hongchao, *et al.* Runoff changes in Aksu River Basin during 1956–2006 and their impacts on water availability for Tarim River [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, 30(4): 562–568. [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.]
- [8] Shen Yongping, Wang Guoya, Su Hongchao, *et al.* Hydrological processes responding to climate warming in the upper reaches of Kelan River Basin with snow-dominated of the Altay Mountains Region, Xinjiang, China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, 29(6): 845–854. [沈永平, 王国亚, 苏宏超, 等. 新疆阿尔泰山区克兰河上游水文过程对气候变暖的响应 [J]. 冰川冻土, 2007, 29(6): 845–854.]
- [9] Shen Yongping, Su Hongchao, Wang Guoya, *et al.* The responses of glacier and snow cover to climatic change in Xinjiang (I): Hydrological effects [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(3): 513–527. [沈永平, 苏宏超, 王国亚, 等. 新疆冰川、积雪对气候变化的响应 (I): 水文效应 [J]. 冰川冻土, 2013, 35(3): 513–527.]
- [10] Shen Yongping, Su Hongchao, Wang Guoya, *et al.* The responses of glaciers and snow cover to climate change in Xinjiang (II): Hazards Effects [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(6): 1355–1370. [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.]
- [11] Shen Yongping, Wang Guoya. Key findings and assessment results of IPCC WGI Fifth Assessment Report [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(5): 1068–1076. [沈永平, 王国亚. IPCC 第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点 [J]. 冰川冻土, 2013, 35(5): 1068–1076.]

## The responses of the runoff processes to climate change in the Qingshuihe River watershed on the southern slope of Tianshan Mountains

ZHOU Jingwu<sup>1</sup>, Abulimiti Ablikim<sup>2</sup>, MAO Weiyi<sup>3</sup>, JIAO Mengjie<sup>4</sup>,  
AN Manrong<sup>5</sup>, SHEN Yongping<sup>6</sup>

( 1. Bayingolin Hydrology and Water Resources Reconnaissance Bureau , Korla 842000 , Xinjiang , China; 2. Turpan Hydrology and Water Resources Reconnaissance Bureau , Turpan 838000 , Xinjiang , China; 3. Xinjiang Climate Center , Ürümqi 830001 , China; 4. Civil and Traffic College of South China University of Technology , Guangzhou 510641 , China; 5. Tianshui Normal University , Tianshui 741000 , Gansu , China; 6. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute , Chinese Academy of Sciences , Lanzhou 730000 , China )

**Abstract:** The hydrological processes of the alpine cold regions are particularly sensitive to climate change in arid areas. The hydrological effects of glaciers , snow and permafrost changes have produced a significant impact on the downstream water supply. Take the Qingshuihe River Basin which located on the southern slope of Tianshan Mountains as the study area ,by the analysis of the runoff changes ,and combined with the meteorological data of the Baluntai Meteorological Stations in the upstream mountainous ,the response characteristics of the alpine watershed runoff process in the context of climate change was studied. The results showed that ,the runoff process is subject to the changes in precipitation ,but there is an additional influenced on runoff by the temperature increasing. The runoff change resulted from climate change is delayed; there is a significant increase in winter runoff. The snow cover is less in Tianshan Mountains in the southern Xinjiang ,and the runoff in spring is not obvious. The precipitation and runoff in summer occurs at the same time ,which result in the hydrological process of alpine mountain is insensitive to changes in solid precipitation. The winter runoff increased significantly by the permafrost degradation. It should be strengthened to cope with the impact of climate change on hydrological processes that the mountain reservoir construction. And by the engineering measures regulation to safeguard sustainable water supply and use.

**Key words:** cold regions; hydrological processes; climate change; regulation; Tianshan Mountains