

文章编号:1000-0240(2009)05-0792-09

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

沈永平¹, 王国亚¹, 丁永建¹, 毛炜峰², 刘时银¹,
王顺德³, Duishen M Mamatkanov⁴

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所 冰冻圈科学国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 新疆气象局气候中心, 新疆 乌鲁木齐 830002; 3. 阿克苏水文水资源勘测局, 新疆 阿克苏 843000; 4. Institute of Water Problems and Hydropower of the National Academy of Sciences of the Republic of Kyrgyzstan, Bishkek 720033, Kyrgyz Republic)

摘要: 天山南坡的萨雷扎兹-库玛拉克河流域在中国阿克苏河协合拉水文站以上面积为12 816 km², 发育有冰川3 195.41 km², 冰川覆盖率25%。根据1957—2006年流域站点观测的降水、气温及其径流资料, 通过最大熵方法计算了流域冰川物质平衡的逐年变化。结果表明: 流域冰川径流深约为895 mm, 全流域冰川径流深为381.3 mm, 冰川融水占协合拉站控制流量的58.65%, 冰川融水变化对流域水资源量的影响非常明显。1957—2006年平均年径流量为48.64 × 10⁸ m³, 径流在1993年后急剧增加, 1994—2006年的平均年径流量比1957—1993年的增加了10.56 × 10⁸ m³, 即增加了23%。由于负物质平衡消耗了大量过去积累的冰川冰, 冰川融化对河流额外补给。初步计算, 在过去50 a由于气温升高引起的冰川净消融额外补给河流的径流量达309.47 × 10⁸ m³, 相当于每年径流增加达6.19 × 10⁸ m³, 约为年径流量的13%。1957—1993年流域冰川消融对河流的额外净补给量为5.3 × 10⁸ m³, 占河流总径流量的11%; 1994—2006年流域冰川消融对河流的额外净补给量为8.8 × 10⁸ m³, 占河流总径流量的18%。随着气候变暖, 虽然降水量增加, 但冰川对气温的敏感性更大, 冰川消融量加快, 冰川融水量持续增加。到21世纪末, 随着气温上升和降水增加, 年均径流相对1991—2006年将增加11.75 × 10⁸ m³, 增幅为22%。

关键词: 冰川物质平衡; 融水; 气候变化; 水文影响; 未来趋势; 阿克苏河

中图分类号: P339:P343.6 **文献标识码:** A

0 引言

作为中亚“水塔”的天山, 发源于天山的河流均有冰雪融水补给, 山区的冰川融水与每年出流的积雪融水和降雨径流, 成为天山南北平原经济发展的主要水源, 约占全疆水资源的70%以上^[1]。随着全球升温和气候变化, 位于亚欧内陆腹地的中亚天山对此反映敏感^[2]。气候变化影响水文过程, 改变河流径流的年内分配。随着全球变暖, 水循环加剧, 在高纬度和高山寒区表现尤为明显。1986/1987年西北地区气候发生转型以来^[3], 冰川加速退缩, 物

质亏损严重。塔里木盆地内陆流域共有现代冰川14 285条, 面积23 628.98 km², 冰储量2 669.435 km³^[4]; 1957—2006年流域多年平均天然径流量为398.3 × 10⁸ m³^[5], 主要以冰川融雪补给为主, 冰川融水径流量约占流域地表总径流量的48%, 冰川融水在本区的水资源组成中占据重要的地位^[4]。随着全球变暖, 主要依赖于冰川融水的地区将面临更加严峻的问题。因为冰川作为干旱区的“固体水塔”, 一旦失去, 则无可替代。阿克苏河是塔里木河最大的一条源流, 而且是唯一一条常年向塔里木河供水的河流, 占阿克苏河、叶尔羌河和和田河3条源流

收稿日期: 2009-05-07; 修订日期: 2009-08-06

基金项目: 科技部国际科技合作项目(2008DFA20400); 国家自然科学基金项目(40771047); 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2007CB411507); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-301; KZCX2-YW-127)资助

作者简介: 沈永平(1961—), 男, 陕西西安人, 编审/研究员, 1985年在中国科学院兰州冰川冻土研究所获硕士学位, 目前主要从事寒区水文与全球变化研究及科技期刊编辑。E-mail: shenyp@lzb.ac.cn

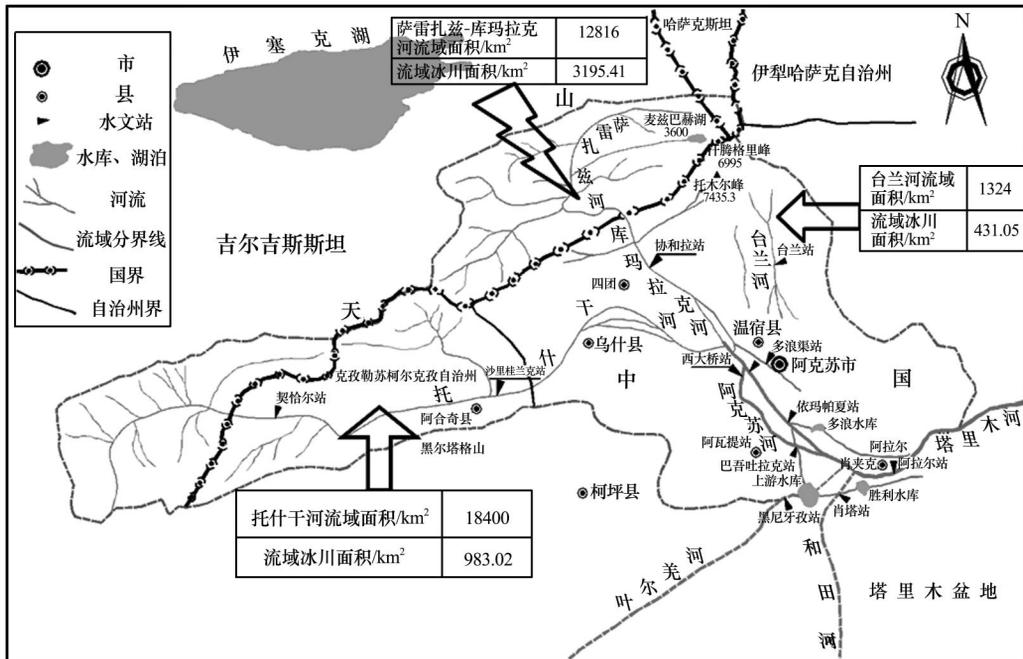


图 1 阿克苏河流域水系分布

Fig. 1 Map showing river system distribution in Aksu River basin, Xinjiang

向塔河输水量的 73.5%，占阿克苏河、叶尔羌河、和田河和开都-孔雀河 4 条源流的 67.1%^[5]。阿克苏河在塔里木河的形成、发展和演化中发挥着主要作用^[6]，对塔里木河生态环境的变化举足轻重。

近 50 a 的天山山区气温呈上升趋势^[4, 7]，但升温主要是在冬、春季节，夏季小有降温，冬春升温使得冰川冷储减少，冰温升高，夏季很短的升温都会使冰川大量消融^[8]。受气候变暖影响，河源冰川融水增加，塔里木河四条源流天然来水近 50 a (1957—2006 年) 来呈增加趋势^[5]，从 20 世纪 50 年代平均 $216.0 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ 增加到 2000—2006 年的 $260.3 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ ，增加了 $44.30 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ 。急剧的升温可能引起冰川洪水的发生，产生严重的灾害^[4]。天山以南地区呈现气温升高，降水增多的变化。萨雷扎兹-库玛拉克河是一条国际河流，是阿克苏河的最大支流，也是塔里木河主要的补给水源(图 1)。麦兹巴赫湖位于吉尔吉斯斯坦共和国境内的库玛拉克河主要支流伊内尔切克河北伊内尔切克冰川上，最大库容曾达 $5 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，最大水深 140 m。随着气温的变暖，冰川消融加强，冰湖库容已由 1950 年代的几千万方增加到 1990 年代的近 $3 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，洪峰流量也逐年增大^[4]。据协合拉水文站资料分析，萨雷扎兹-库玛拉克河年径流量 1990 年代与 1950 年代相比增多 $10 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，增加了 25%，年最大流量 1990 年代较 1950 年代增多 32%，洪水频率

也在不断增加^[6]。这些变化已经威胁到萨雷扎兹-库玛拉克河、阿克苏河及塔里木河水系的防洪安全。

为此，开展高山冰川物质平衡恢复，进行融水径流对气候变化的响应及其对河流水资源的影响研究，揭示水资源区域变化和山地水循环的变化规律，了解寒区气候变化影响下的水循环响应机理，可以为经济发展提供水资源综合利用的科学依据，并且气候变化对河流水文情势影响已成为把握新疆经济水资源命脉的使然。

1 流域概况

萨雷扎兹-库玛拉克河发源于天山西段中部的汗腾格里峰的西北坡，上游在吉尔吉斯斯坦境内称为萨雷扎兹河，有奎柳河、卡英德河、乌利乔利河、阿克西牙克河、伊内尔切克河等 13 条支流^[9]；在我国境内称为库玛拉克河，主要有托木尔河、英沿河、阿合奇河 3 条支流^[10](图 1, 图 2)。萨雷扎兹河长 188 km，落差约 1 600 m，平均坡降为 8‰；库玛拉克河河道长 118 km，落差 609 m。萨雷扎兹-库玛拉克河全长 306 km，落差 2 209 m，平均坡降为 7.2‰。从萨雷扎兹河进入我国境内库玛拉克河的水量为 $36.43 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，占库玛拉克河水量的 76%。萨雷扎兹河诸支流中水量最大的是伊内尔切克河，年径流量为 $9.8 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，占入境总水量的 25%^[9, 11]。



图2 萨雷扎兹河-库玛拉克河流域冰川分布

Fig. 2 Glaciers distribution in the watershed of Sary Jaz- Kumarik Rivers of Aksu River

库玛拉克河在协合拉水文站以上集水面积 12 816 km², 其中在吉尔吉斯斯坦境内集水面积 10 510 km² (占 82%), 中国境内集水面积 2 306 km² (占 18%)。

萨雷扎兹河流域地处天山山区中部, 四周高山环绕, 山地海拔 2 000 ~ 7 000 m, 最高山峰可达 7 435 m (托木尔主峰)。整个流域呈东高西低地势, 平均海拔高度 3 820 m。萨雷扎兹河流域的气候特征为典型的大陆性气候, 并显示出明显的垂直地带性。整个流域中, 具有降水多、气温低、蒸发小, 太阳辐射强等特点。水汽主要来源于西风环流, 山区降水比较集中, 特别是在萨雷扎兹河流域降水形成较多, 是整个阿克苏河流域降水最为丰富的地区, 最大降水高度带海拔高程为 3 500 ~ 4 500 m 左右^[11]。托木尔峰和汗腾格里峰附近的高山区年降水量在 900 mm 以上, 在迎风坡可达 1 000 mm 左右, 是中亚山区几个高降水中心之一; 海拔 2 650 ~ 3 500 m 的地带, 平均年降水量为 300 ~ 400 mm^[2]。流域降水的年内分配很不均匀, 主要集中在夏季, 6—8 月的降水量约占全年降水总量的 55% ~ 60%, 春季 (3—5 月) 约占 24% 左右。萨雷扎兹河流域高山区气候寒冷, 年平均气温在 -1 ~ -8 左右, 蒸

发量在 200 ~ 400 mm 左右。流域高山区降水量大而气温又低, 具有形成冰川的良好条件, 也是中亚冰川最发育的地区之一。据吉尔吉斯斯坦科学院天山自然地理观测站 1979—1983 年实测资料^[12], 萨雷扎兹河流域, 共有冰川 1 461 条, 总面积 2 653.7 km²。据中国冰川目录的统计资料^[13], 库玛拉克河流域的托木尔河冰川面积 531.7 km², 萨雷扎兹-库玛拉克河流域共有冰川面积 3 185.4 km² (图 2), 约占流域面积的 25%。

2 流域冰川物质平衡计算

冰川是气候的产物, 冰川的积累和消融强度受降水和气温的控制。气候变化影响冰川融水径流的产生, 从而对下游水资源的变化和利用产生影响。冰川物质平衡是联接冰川波动与气候变化的关键因子, 冰川物质平衡的变化直接反映在冰川融水对河流水资源的影响^[14]。因此, 监测和估算冰川物质平衡的变化, 进而计算冰川融水补给的变化, 对于了解本地区水资源的变化特征、合理利用冰川融水资源具有重要的现实意义。

冰川物质平衡监测的传统方法是以实测为主, 还有通过物质平衡与气象要素的关系来估算, 这些

方法都需要投入大量的人力、物力和时间, 因而限制了冰川物质平衡资料在大范围内的获取. 全世界有连续观测的单个冰川也仅 50 多条, 而我国有连续观测的冰川仅 3~4 条, 其中在天山地区也只有乌鲁木齐河 1 号冰川进行连续的观测, 其他几条仅有短期的观测. 因此, 如何获取大范围内冰川物质平衡的波动数据, 尤其是具有连续序列的变化数值, 从而了解冰川动态变化成为人们关注的焦点问题之一.

统计发现, 在流域尺度范围内, 冰川物质平衡变化具有相似的时空变化特征. 在研究中国冰川水文和气候的分布特征时, 我们发现在我国西部的高山、高原地区, 流域范围内的降水和径流的分布等值与其所占面积之间都呈负指数关系^[15]. 有冰川分布的流域中, 冰川覆盖区是流域内降水量、径流量和径流系数分布的最大区域. 从统计力学和最大熵原理出发, 依据以上的降水和径流分布特征, 推导出了一组以水文、气象观测数据计算流域冰川平均物质平衡的公式^[15-16]. 依据这些公式, 应用有多年观测的水文站记录的径流和降水资料, 就可以恢复流域冰川平均物质平衡各分量的逐年值序列. 具体的公式和计算方法参见文献[15-16].

在流域冰川物质平衡计算中, 我们应用了协和拉水文站的径流资料, 对于高山冰川区的降水计算(积累量)萨雷扎兹-库玛拉克河流域采用托云站, 天山巴音布鲁克站和阿合奇站 3 站降水的平均来代表上游山区的降水资料.

通过计算获得流域的水文和冰川多年平均特征值(表 1), 并依据降水和径流的年变化资料, 恢复了流域逐年平均冰川物质平衡变化序列(图 3).

以上结果显示, 萨雷扎兹河-库玛拉克河流域冰川 1957—2006 年平均年物质平衡为 $-194 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, 50 a 来累积冰川物质平衡为 -9.7 m . 阿克苏河流域 1956—2006 年的近 50 a 来年径流量变化十分显著, 年径流量在 1993 年之前呈波浪式下降趋势, 1993 年之后则表现为较快的上升趋势. 径流距平累积过程线表明^[6], 1993 年是径流变化的转折点, 1994—2006 年径流量发生了增多的跃变. 库玛拉克河 1994—2006 年的年平均径流量为 $56.63 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$, 1957—1993 年平均年径流为 $45.83 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$, 相比增加了 23.6% (表 2, 图 4). 1957—1993 年流域平均冰川消融为 $1192 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, 1994—2006 年为 $1483 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, 年均增加 291 mm, 增加幅度为 24%; 冰川积累也在气候变

表 1 萨雷扎兹-库玛拉克河流域冰川物质平衡计算的特征值

Table 1 Mean annual values of hydrological and glacier mass balance calculated in the watershed of Sary Jaz- Kumarik River, Tianshan

流域特征值	萨雷扎兹-库玛拉克河流域
控制流域水文站	协合拉
流域总面积 (F) / km^2	12816
流域冰川总面积 (F_g) / km^2	3195.41
平均径流深 (R) / mm	381.3
平均降水量 (P) / mm	508.3
平均径流系数 (λ)	0.7
最小径流深 (R_0) / mm	10
最小降水量 (P_0) / mm	100
最小径流系数 (λ_0)	0.2
冰川区径流深 (R_g) / mm	895
冰川区降水量 (P_g) / mm	1074
比率 (K_{GR})	0.3
冰川总积累 (C) / mm	1074
冰川总消融 (A) / mm	1268
冰川物质平衡水平 / mm	1171
物质平衡 (B_n) / mm	-194
冰川融水占河流量比率 / %	58.65

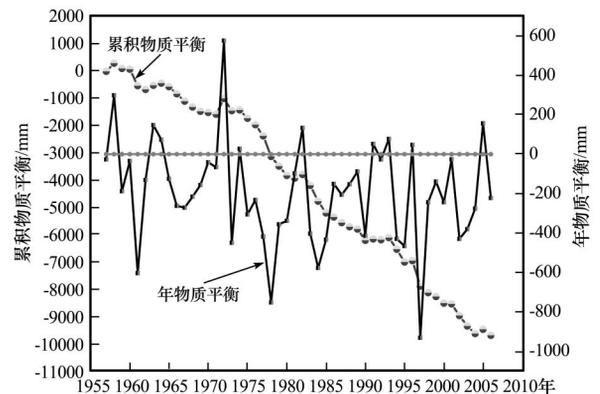


图 3 1957—2006 年萨雷扎兹河-库玛拉克河流域平均物质平衡变化及其累积

Fig. 3 Mean annual glacier mass balance and accumulative mass balance in Sary Jaz- Kumarik River basin in 1957—2006
化转型的暖湿化中增加, 1957—1993 年流域平均年冰川积累量 $1027 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, 1994—2006 年为 $1208 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, 年均增加 181 mm, 增加幅度为 18%. 相应的冰川物质平衡也发生明显变化, 1957—1993 年流域平均年冰川物质平衡 $-165 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, 1994—2006 年为 $-275 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, 年均增加 -110 mm , 增加幅度为 67% (表 2).

表 2 萨雷扎兹河-库玛拉克河流域径流量
对冰川物质平衡变化的响应

Table 2 The response of runoff to changes in glacier mass balance in Sary Jaz- Kumarik River basin

年 份	年均径流量 / 10^8 m^3	年均径流 深/mm	年均最大流 量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	年均物质 平衡/mm
1957—1960	41.21	321.58	1084.75	13.36
1961—1970	45.60	355.84	1101.40	-157.89
1971—1980	46.50	362.82	1158.60	-230.67
1981—1990	47.49	370.49	1524.00	-238.13
1991—2000	54.88	411.00	1380.00	-243.05
2001—2006	53.73	425.92	1589.33	-195.99
1957—1993	45.83	357.59	1245.54	-165.09
1994—2006	56.63	444.98	1726.62	-275.16

3 冰川融水变化对河流水资源的影响

冰川是固体高山水库,对河流的水文变化起调节作用^[17-18].萨雷扎兹-库玛拉克河流域冰川融水占协合拉站控制流量的比率达 58.65%(表 1),冰川融水的变化对流域的水资源量的影响是非常明显的.萨雷扎兹-库玛拉克河流域 1957—2006 年的平均年径流量为 $48.64 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$,年径流量在

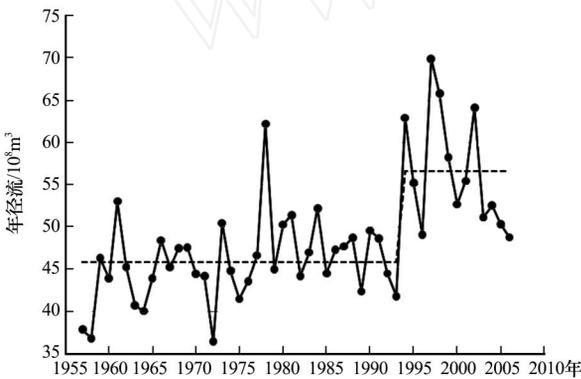


图 4 1957—2006 年萨雷扎兹-库玛拉克河
年径流变化及突变

Fig. 4 Annual runoff changes and runoff jump point in Sary Jaz- Kumarik River basin in 1957—2006

表 3 1957—2006 年萨雷扎兹-库玛拉克河冰川融水变化及其对河流径流增加的贡献

Table 3 Glacier meltwater changes and its contribution to runoff of Sary Jaz- Kumarik Rivers in 1957—2006

时段	年均径流量 / 10^8 m^3	年均纯冰消融量 / 10^8 m^3	纯冰融化补给 比例/%	补给河流的冰 川融水比例/%	补给河流的冰川 融水/ 10^8 m^3
1957—2006	48.64	6.19	13	58	28.36
1957—1993	45.83	4.59	10	58	26.66
1994—2006	56.63	10.74	19	59	33.18
增加量	10.80	6.15	9	60	6.52

1993 年后急剧增加,1994—2006 年的平均年径流量比 1957—1993 年年平均增加了 $10.56 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$,即增加了 23%(表 3).年最大洪峰流量也相应发生变化,1957—1993 年的平均年最大洪峰流量为 $1262.76 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$,1994—2006 年为 $1726.62 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$,年平均增加了 $463.85 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$,增加幅度为 37%(表 2).

根据敏感性分析,萨雷扎兹-库玛拉克河流域冰川物质平衡变化 100 mm,可引起流域平均径流深变化 14 mm(图 3)或径流量变化 $1.81 \times 10^8 \text{ m}^3$ (图 4).1957—2006 年的 50 a 流域冰川年均物质平衡为 $-194 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$,累积冰川厚度平均减薄了 9.7 m 水当量,相当于冰面降低 10.76 m.由于负物质平衡消耗了大量过去积累的冰川冰,给河流额外补给,初步计算在过去 50 a 由于气温升高引起的冰川净消融额外补给河流的径流量达 $309.47 \times 10^8 \text{ m}^3$,相当于每年增加 $6.19 \times 10^8 \text{ m}^3$ 径流,约为年径流的 13%.1957—1993 年流域冰川消融对河流的额外净补给量 $5.3 \times 10^8 \text{ m}^3$,占河流总径流量的 11%;1994—2006 年流域冰川消融对河流的额外净补给量为 $8.8 \times 10^8 \text{ m}^3$,占河流总径流量的 18%.分析表明(图 5),气温变化 1,库玛拉克河径流变化 $7.2 \times 10^8 \text{ m}^3$,而降水变化 100 mm 只能引起 $0.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的径流变化.这意味着,随着新疆气候由暖干向暖湿转型^[3],虽然降水量增加,但冰川对气温的敏感性更大,冰川消融量加快,冰川融水量持续增加^[4,6,18].

随着气温上升与降水增多,近几十年来萨雷扎兹-库玛拉克河流域 7—8 月的径流量呈持续增加态势(图 6),这是因为冰川补给的河流,随着气温升高,冰川消融加剧,融水量增加^[6].从表 4 可以看到,7—8 月的径流量从 1950 年代的平均 $21.18 \times 10^8 \text{ m}^3$,增加到 1994—2006 年的 $31.69 \times 10^8 \text{ m}^3$,增加达 $10.51 \times 10^8 \text{ m}^3$.而同期年径流量也从 $41.21 \times 10^8 \text{ m}^3$ 增加到 $56.63 \times 10^8 \text{ m}^3$,增加了 $15.42 \times$

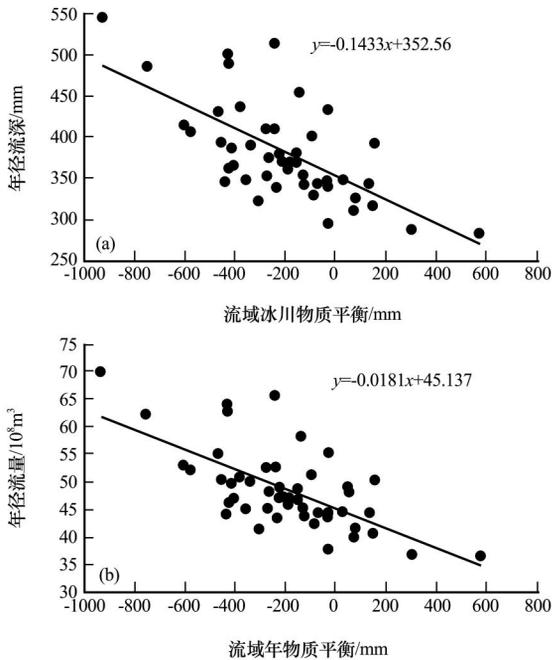


图 5 萨雷扎兹-库玛拉克河流域冰川物质平衡与协合拉站径流深 (a) 和径流量 (b) 关系

Fig. 5 The relationship between glacier mass balance in Sary Jaz- Kumarik River basin and runoff in Shehel Hydrological Station

表 4 萨雷扎兹-库玛拉克河流域 7—8 月径流量年代际变化及其占年径流的比例

Table 4 The decadal change in total runoff of July—Aug and its proportion in annual runoff in Sary Jaz- Kumarik River basin

时段	年均径流 / 10 ⁸ m ³	7—8 月径流量 / 10 ⁸ m ³	7—8 月径流量占年径流比例
1957—1960	41.21	21.18	0.51
1961—1970	45.60	23.83	0.52
1971—1980	46.50	25.63	0.55
1981—1990	47.49	27.18	0.57
1991—2000	54.88	30.78	0.56
2001—2006	53.73	29.27	0.54
1957—1993	45.83	24.93	0.54
1994—2006	56.63	31.69	0.55

10⁸ m³, 说明 7—8 月汛期的径流增加贡献达 68.2%。这些贡献主要来源于冰川的消融, 尤其是是负的物质平衡的贡献。从表 3 可以看出, 由于负物质平衡产生的年均纯冰消融量在同期也增加了 6.15 × 10⁸ m³, 对夏季 7—8 月径流增加的贡献可以达 58.5%。另一方面, 洪峰流量也在不断加大 (表 2), 从而使阿克苏河流域在汛期的洪水压力剧增, 各种防洪设施将面临更大的压力。

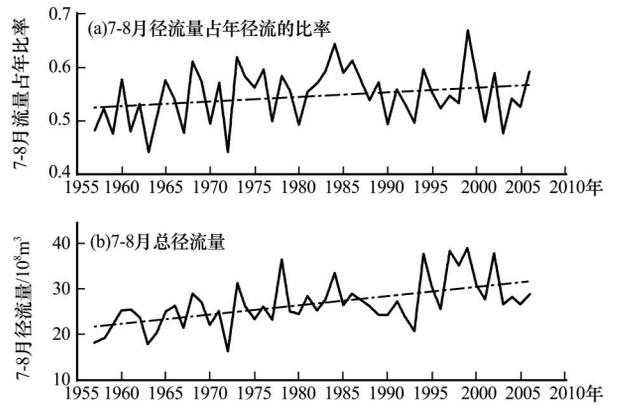


图 6 萨雷扎兹-库玛拉克河 7—8 月径流量及其占年径流的比例

Fig. 6 Runoff of July—Aug and its proportion in annual runoff in Sary Jaz- Kumarik River basin

4 未来气候变化对河流水资源的影响

根据中国气象局国家气候中心发布的中国区域 RegCM3 未来气候预估资料, 数据为中国及周边区域在 IPCC SRES A2 温室气体排放情景下 21 世纪后期 2071 年 1 月 1 日—2100 年 12 月 31 日的预估试验结果, 区域数据按照 0.25° × 0.25° 格点划分, 12 个月各月 30 a 的平均值数据。根据提供的这些预估数据, 我们对研究区的数值进行平均处理。结果显示, 在新疆阿克苏河流域, 相对于 1960—1990 年均值, 2071—2100 年阿克苏河山区流域各点平均的年降水增加为 5%~25%, 平均 10%; 年气温增加 3.6~4.2, 平均 4.0。

根据建立的萨雷扎兹-库玛拉克河山区来水与托云站年平均气温和托云站、天山巴音布鲁克站和阿合奇站 3 站年平均降水的关系:

$$Q_a = 7.189 T_a + 0.002 P_a + 37.372 \quad (1)$$

式中: Q_a 为协合拉站年出山径流量 (10⁸ m³); T_a 为托云站年平均气温 (°C); P_a 为托云站、天山巴音布鲁克站和阿合奇站 3 站年平均降水 (mm)。在未来流域冰川面积变化不大的情况下, 萨雷扎兹-库玛拉克河流域协和拉水文站以上山区来水的变化估算结果为: 到 2071—2100 年, 气温上升 4, 降水增加 25 mm, 年均径流将达到 66.2 × 10⁸ m³ · a⁻¹, 相对 1960—1990 年, 径流增加 19.75 × 10⁸ m³ · a⁻¹, 增加幅度为 43%; 相对 1991—2006 年, 径流增加 11.75 × 10⁸ m³ · a⁻¹, 增加幅度为 22%。

根据我们对阿克苏河的径流变化研究^[6], 随着气温上升与降水增多, 近 10 多年来阿克苏河流域主要水系 5—9 月的径流量增加显著, 以冰川融水

补给为主的萨雷扎兹-库玛拉克河径流增加主要都在汛期的7月和8月(图6),萨雷扎兹-库玛拉克河协合拉站1994—2006年7、8月平均径流分别比1956—1993年增加了约30%和24%。这是因为7、8月是冰川的主要消融期,气温升高使冰川融水径流增加显著,并且萨雷扎兹-库玛拉克河汛期径流有提前增大的趋势,这与新疆阿勒泰山以融雪水补给为主的克兰河最大径流变化趋势一致^[19]。所以,在未来几十年来,随着萨雷扎兹-库玛拉克河径流量的不断增大,增加的水量可能主要集中在7—8月的汛期,这就使得阿克苏河夏季发生洪水灾害的可能性增加^[6],而且量级加大,发生时间有所提前。这就要求有关管理部门调整防洪规划,不仅要在洪峰流量上,而且要在洪水出现的时间上做好预警和预防。

5 结论

通过最大熵方法计算了萨雷扎兹-库玛拉克河流域冰川物质平衡的逐年变化,计算结果表明,流域多年平均冰川融水占河流径流量的58.65%。由于气候变化引起的冰川退缩,使得目前冰川主要呈负物质平衡状态。1957—2006年的50a流域冰川年物质平衡为-194mm,累积冰川厚度平均减薄了9.7m水当量,相当于冰面降低10.76m。由于负物质平衡消耗了大量过去积累的冰川冰,增加了河流额外的补给。经初步计算,在过去50a冰川额外补给河流的径流量达 $309.47 \times 10^8 \text{ m}^3$,相当于每年增加 $6.19 \times 10^8 \text{ m}^3$ 径流,约为年径流的13%。随着冰川退缩,冰川洪水也在发生变化,洪峰量有增大趋势。据统计^[7],河源区的麦茨巴赫冰湖在1932—2005年间,有90%的年份都会发生冰湖溃决洪水,对下游产生了巨大的威胁。随着气温升高,冰川湖突发洪水可能会变得更加危险^[20]。因此,要加强冰川消融观测及冰湖水位的监测,建立预警系统,进行冰川消融和冰湖溃决洪水预报,为下游的防洪安全和水库安全提供科技支持。

致谢:区域气候变化模拟结果(RegCM3_2071-2100(SRESA2))由国家气候中心高学杰研究员提供,数据从国家气候中心网站(<http://ncc.cma.gov.cn/cn>)下载,在此表示衷心感谢。

参考文献(References):

[1] Shen Yongping. Central Asia Tianshan Mountains as hotspots region for the global climate change and the water cycle chan-

ges[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, 31(4): 780. [沈永平. 中亚天山是全球气候变化和水循环变化的热点地区[J]. *冰川冻土*, 2009, 31(4): 780.]

- [2] Gao Qianzhao, Wang Run, Giese. Impact of Climate change on surface runoff of Tarim River originating from the south slopes of the Tianshan Mountains[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, 30(1): 1-11. [高前兆, 王润, Ernst Giese, 等. 气候变化对塔里木河来自天山的地表径流影响[J]. *冰川冻土*, 2008, 30(1): 1-11.]
- [3] Shi Yafeng, Shen Yongping, Hu Ruji. Preliminary study on signal, impact and foreground of climatic shift from warm-dry to warm-humid in Northwest China[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, 24(3): 219-226. [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): 219-226.]
- [4] Shen Yongping, Wang Shunde. New progress in glacier and water resources changes in Tarim Basin, Xinjiang[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, 24(6): 819. [沈永平, 王顺德. 塔里木盆地冰川及水资源变化研究新进展[J]. *冰川冻土*, 2002, 24(6): 819.]
- [5] Duan Jianjun, Wang Yanguo, Wang Xiaofeng, et al. Impact of climate change and human activities on the water resources and ecological environment of Tarim River Basin in 1957—2006[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, 31(5): 781-791. [段建军, 王彦国, 王晓风, 等. 1957—2006年塔里木河流域气候变化和人类活动对水资源和生态环境的影响[J]. *冰川冻土*, 2009, 31(5): 781-791.]
- [6] 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.]
- [7] 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.]
- [8] Barnett T P, Adam J C, Lettenmaier D P. Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions[J]. *Nature*, 2005, 438(17): 303-309.
- [9] Mamatkanov D M, Bazhanov L V, Romanovsky V. Water Resources of Kyrgyzstan at the Current Stage[M]. Bishkek: Ilim, 2006.
- [10] He Daming, Tang Qicheng. Transboundary Rivers in China[M]. Beijing: Science Press, 2000. [何大明, 汤奇成. 中国国际河流[M]. 北京: 科学出版社, 2000.]
- [11] Liu Chaohai, Xie Zichu, Durgerov M B, et al. Glaciation in Tianshan[M]. Beijing: Science Press, 1998: 1-227. [刘潮海, 谢自楚, 久尔盖诺夫 M B. 天山冰川作用[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 1-227.]
- [12] Liu Chaohai, Kuzmichienok V A. Glacier resources in Tianshan Mountains and its distribution regularity[M]//Liu Chaohai, Xie Zichu, Durgerov M B, et al. Glaciation in Tianshan. Beijing: Science Press, 1998: 18-44. [刘潮海, 库兹明乔纳克. 天山冰川资源及其分布规律[M]//刘潮海, 谢自楚,

- 久尔盖诺夫 M B. 天山冰川作用. 北京: 科学出版社, 1998: 18 - 44.]
- [13] Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, Chinese Academy of Sciences. Glacier Inventory of China, , Tianshan Mountains (Interior Drainage Area of Tianshan Basin in Southwest) [M]. Beijing: Science Press, 1987. [中国科学院兰州冰川冻土研究所. 中国冰川编目, , 天山山区(西南部塔里木内流区) [M]. 北京: 科学出版社, 1987.]
- [14] Xie Zichu, Su Zhen, Shen Yongping, *et al.* Mass balance and water exchange of Hailuogou Glacier in Mount Gongga and their influence on glacial melt runoff[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2001, **23**(1): 7 - 15. [谢自楚, 苏珍, 沈永平, 等. 海螺沟冰川物质平衡、水交换特征及其对径流的影响[J]. 冰川冻土, 2001, **23**(1): 7 - 15.]
- [15] Shen Yongping, Xie Zichu, Ding Liangfu, *et al.* Estimation of average mass balance for glacier in a watershed and its application[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1997, **19**(4): 302 - 307. [沈永平, 谢自楚, 丁良福, 等. 流域冰川平均物质平衡的计算方法及其应用[J]. 冰川冻土, 1997, **19**(4): 302 - 307.]
- [16] Shen Yongping, Liu Shiyin, Wang Genxu, *et al.* Fluctuations of glacier mass balance in watersheds of Qilian Mountain and their impact on water resources of Hexi Region[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2001, **23**(3): 244 - 250. [沈永平, 刘时银, 王根绪, 等. 祁连山北坡流域冰川物质平衡波动及其对河西水资源的影响[J]. 冰川冻土, 2001, **23**(3): 244 - 250.]
- [17] Xie Changwei, Ding Yongjian, Liu Shiyin, *et al.* Runoff change on the south slopes of Mount Tomur and its response to climatic variation[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, **27**(2): 269 - 275. [谢昌卫, 丁永建, 刘时银, 等. 托木尔峰南麓径流变化的气候因素分析[J]. 冰川冻土, 2005, **27**(2): 269 - 275.]
- [18] Shen Yongping, Liu Shiyin, Ding Yongjian, *et al.* Glacier mass balance change in Tailanhe river watersheds on the south slope of the Tianshan Mountains and its impact on water resources[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, **25**(2): 124 - 128. [沈永平, 刘时银, 丁永建, 等. 天山南坡台兰河流域冰川物质平衡变化与其对径流的影响[J]. 冰川冻土, 2003, **25**(2): 124 - 128.]
- [19] 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.]
- [20] Mao Weiyi, Li Hongde, Jiang Jun, *et al.* Flood patterns and 500 hPa circulation patterns of flooding formation in Aksu River Basin, Xinjiang[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, **27**(4): 574 - 581. [毛炜峰, 李红德, 蒋军, 等. 阿克苏河洪水类型及其形成的 500 hPa 环流特征[J]. 冰川冻土, 2005, **27**(4): 574 - 581.]

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 21th Century

SHEN Yong-ping¹, WANG Guo-ya¹, DING Yong-jian¹, MAO Wei-yi², LIU Shi-yin¹,
WANG Shur-de³, Duishen M Mamatkanov⁴

(1. State Key Laboratory of Cryospheric Sciences, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou Gansu 730000, China; 2. Xinjiang Climate Center, Ür ümqi Xinjiang 830002, China; 3. Aksu Hydrology and Water Resource Bureau, Aksu Xinjiang 843000, China; 4. Institute of Water Problems and Hydropower of the National Academy of Sciences of the Republic of Kyrgyzstan, Bishkek 720033, Kyrgyz Republic)

Abstract: The drainage area is 12 816 km² above Shehel Hydrological Station (Aksu River, China) in Sary Jaz - Kumarik River Basin in which glacier area occupies 25 % with an area of 3 195.41 km². The Glacier runoff is about 895 mm, river runoff is 381.3 mm. Ice melt contributed about 58.65 % of the total runoff in the Shehel hydrological Station, so the effects of changes in glacier meltwater on water resources is very vital. The mean annual runoff is 48.64×10^8 m³ in the period of 1957—2006. The mean annual runoff is increasing dramatically since 1993. The mean annual runoff increased by 10.56×10^8 m³, also is 23 % in 1994—2006 than one in 1957—1993. As a result of a large number of glacier ice melting which were accumulated in the past, by preliminary calculations, mass balance wastages supply additionally 309.47×10^8

m³, an increase of 6.19×10^8 m³, about 13 % of annual runoff to the river due to climate warming in the past 50 years. The supply additionally of glacier melt is 5.3×10^8 m³, and occupies 11 % of the mean annual river runoff in 1957—1993, and is 8.8×10^8 m³ and 18 % in 1994—2006. With climate warming, although precipitation increasing, glaciers is more sensitive to temperature, the glacial meltwater will be increasing continually.

To presume a little change in glacier area in the future, the temperature rise 4 °C, precipitation increased by 25 mm in 2071—2100, an average annual runoff will be 66.2×10^8 m³, which increases by 19.75×10^8 m³ and the rate of increase is 43 % than 1960—1990, and increases by 11.75×10^8 m³ and 22 % than 1991—2006.

Key words: glacier mass balance; meltwater; climate change; response of runoff; future trend; Aksu River