

中亚天山山区冰雪变化及其对区域水资源的影响

邓海军^{1,2,3,4}, 陈亚宁²

(1. 福建省陆地灾害监测评估工程技术研究中心, 福州 350007; 2. 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; 3. 湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地,
福州 350007; 4. 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007)

摘要: 冰川和积雪是构成山区固体水库的主体, 对区域水资源稳定性具有调节功能, 但深受气候变化的影响。以中亚天山为研究区域, 基于长时间序列的观测数据, 分别从冰川、积雪、水储量、径流等方面进行分析, 并选取阿克苏河、开都河及乌鲁木齐河3个典型流域, 研究天山山区冰雪变化对流域水资源的影响。结果表明: ① 冰川退缩速率与面积的函数关系为 $f(x) = -0.53 \times x^{-0.15}$ ($R^2 = 0.42$, $RMSE = 0.086$), 说明小型冰川对气候变化的响应更为敏感。同时, 中低海拔区域的冰川退缩速率大于高海拔区域; ② 2003-2015年天山山区水储量的递减速率为 -0.7 ± 1.53 cm/a, 天山中部区域的递减速率最大, 这一结果与该区域冰川急剧退缩相吻合; ③ 近半个多世纪以来, 冰雪融水径流增加是这3个典型流域径流量增加的主要原因, 其中阿克苏河增幅最大(达 0.4×10^8 m³/a)。但自20世纪90年代中期以来, 3个流域的径流量都呈减少趋势, 与流域内冰川面积减少、厚度变薄及平衡线海拔升高的关系密切。研究结果揭示了气候变化驱动下的山区固态水体储量变化对流域水资源的影响机制, 以为流域水资源管理提供有价值的决策参考。

关键词: 气候变化; 冰雪; 水资源; 冰冻圈; 天山

DOI: 10.11821/dlxb201807010

1 引言

全球气候变暖^[1-2]加剧了山区冰川退缩^[3], 对区域水资源产生深远影响^[4-5], 受到社会的高度关注。山区冰川退缩和积雪消融, 一方面导致冰川储量减少^[6-7], 山区水资源储量减少^[8], 进而影响区域水资源利用^[4, 9]; 另一方面随着冰川和积雪面积减少, 原冰川和积雪覆盖区域反射率降低, 从而吸收更多的太阳辐射量, 使得冰冻圈的升温加速, 进一步加剧冰雪消融^[2]。

山区水储量变化的计算是一项富有挑战性的工作, 主要因为山区观测站点稀疏, 且建站时间短, 大部分区域属于无资料区域。传统方法估算水储量是根据水量平衡公式, 即 $\Delta S = P - E - R$ (ΔS 是水储量, P 为降水量, E 为蒸发量, R 为径流量), 该方法只适合于有观测数据的流域, 对于无观测资料的流域, 基于传统方法的计算结果的不确定性较大。值得一提的是, 2002年3月由美国 and 德国共同开发研制的重力恢复和气候实验卫星计划 (GRACE) 成功实施 (<http://www.csr.utexas.edu/grace/>), 为研究陆地水储量变化提

收稿日期: 2017-08-31; 修订日期: 2018-04-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(41630859, 41471030) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41630859, No.41471030]

作者简介: 邓海军(1987-), 男, 湖南隆回人, 博士, 讲师, 中国地理学会会员(S110010707M), 主要从事山区气候水文过程及流域水循环研究。E-mail: denghj@fjnu.edu.cn

供了全天候、连续及较高时空分辨率的数据。自重力卫星发射以来,涌现出一系列开创性的研究成果,例如分析水储量变化^[10-12]、监测山区冰川物质平衡变化^[13]、蒸散发估算^[14]、地下水变化^[15]、干旱监测^[16]等。

中亚天山(简称“天山”)深居亚欧大陆内部,东西延伸超过2500 km,南北平均跨度在250~350 km左右^[17],受西风气流影响^[18],降水量较多,山岳冰川广泛发育,是中纬度地区山岳冰川的主要分布区域之一,并为中亚的社会经济、绿洲农业及生态环境提供水资源保障^[17]。天山冰川面积约13566 km²,体积约1840 km³^[19-20],主要分布在海拔2800 m到7400 m之间^[21]。在全球变暖的驱动下,山区冰川处于退缩状态^[22],自20世纪70年代以来,天山冰川总面积减少了8.5%^[21],但区域差异显著^[17]。冰川退缩已对该区域的河流水文特性、水资源、生态环境及社会经济发展等方面产生重大影响。

因此,本文以中亚天山为例,系统分析了天山山区冰川和积雪的时空变化特征,解读气候变化驱动下天山山区冰雪变化对区域水资源的影响机制,力求从“大气圈—冰冻圈—水圈”之间相互关系,探究气候变化对天山山区水资源变化的影响机理,以期干旱区河流流域的综合水资源管理提供决策参考。

2 研究区域、数据及方法

2.1 研究区域

天山位于欧亚大陆腹地,介于37°N~46°N和66°E~96°E之间(图1),气候垂直分带明显,冰川广泛发育。天山的冰川类型多样,从大面积的谷冰川和枝状冰川到小面积的裂片冰川和陡崖冰川都有分布,其中谷冰川最为广泛,面积约占总面积的82%^[21]。据最新的世界冰川编目数据(RGI 5.0)^[23],中亚天山总共有冰川10778条,总面积约为13566 km²,其中单条最大冰川面积达374 km²,单条最小冰川面积仅为0.079 km²,单条最长冰川长度达61445 m,单条最短冰川长度仅230 m。同时,面积小于1 km²的冰川有8264条,占冰川总数的76.67%;面积在1~10 km²之间的冰川有2397条,占冰川总数的22.23%;面积在10~100 km²之间的冰川有110条;面积大于100 km²的冰川仅有7条。由

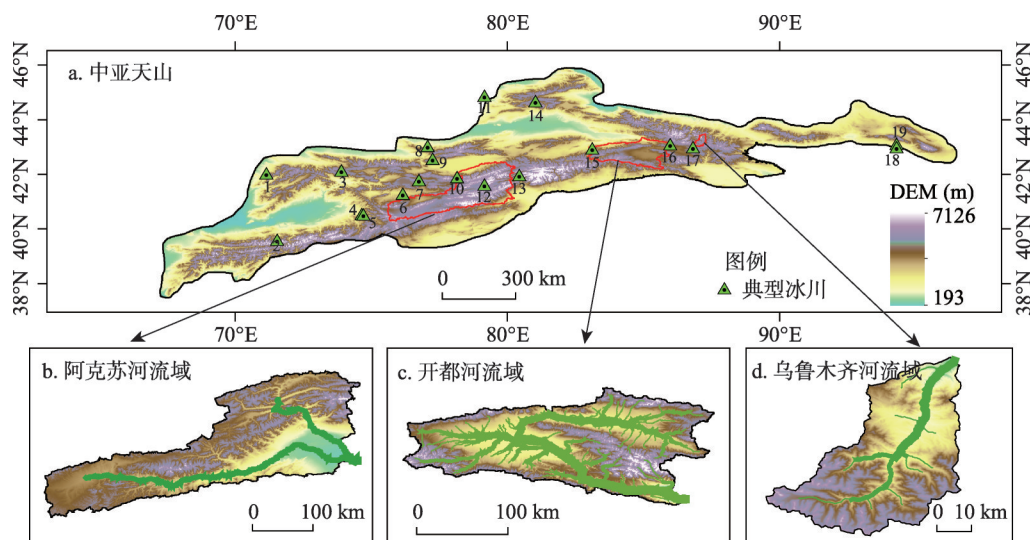


图1 研究区域图

Fig. 1 The study area

此可知,天山山区发育的众多冰川中,以小面积冰川为主。此外,文中选取了阿克苏河流域、开都河流域、乌鲁木齐河流域的出山口水文站以上流域作为研究的典型流域(图1)。它们的共同特点是,均发源于冰雪覆盖区,冰雪融水在河川径流中占有重要比例,且河流下游区域都分布着大面积的耕地^[24],在西北干旱区具有代表性。

2.2 研究数据

2.2.1 冰川和积雪数据 冰川数据源于冰川编目数据和文献研究成果,其中,冰川面积数据源于最新世界冰川编目数据 RGI 5.0^[23],1961-2010年的冰川物质平衡数据来自文献研究结果^[22]。另外,19个典型流域(或冰川)的冰川变化数据源于已有的文献研究成果^[25-35]。阿克苏河流域、开都河流域及乌鲁木齐河流域的冰川面积变化数据来自中国第一次和第二次冰川编目数据^[36-37],由国家地球系统科学数据平台寒区旱区科学数据中心提供(<http://westdc.westgis.ac.cn>)。

积雪覆盖面积数据源于MODIS Terra 8 d的积雪覆盖产品(MOD10A2),空间分辨率为500 m,时间尺度是2001-2013年,由NASA积雪和冰川数据中心提供(<http://dx.doi.org/10.5067/C574UGKQQUIT>)。

2.2.2 GRACE水储量数据 GRACE重力卫星数据由JPL(Jet Propulsion Laboratory)数据中心提供(<https://grace.jpl.nasa.gov/data/get-data/monthly-mass-grids-land/>),空间分辨率为 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$,时间范围是2003年1月-2015年12月,有13个月的数据缺失值(2003年6月,2011年1月、6月,2012年5月、10月,2013年3月、8月、9月,2014年2月、12月,2015年6月、10月、11月),根据数据缺失月份的多年累积平均^[38]和相邻月份的平均值对缺值月份进行填补。

2.2.3 径流数据 径流数据来自3个典型流域的出山口水文站的监测资料,分别是阿克苏河的沙里桂兰克站和协合拉站,开都河的大山口站,乌鲁木齐河的英雄桥站。数据为1960-2010年月尺度监测数据,由新疆维吾尔自治区水文局提供。

2.3 研究方法

2.3.1 Mann-Kendall趋势检验 文中气温、降水、积雪及水储量等变量的趋势分析方法均采用Mann-Kendall(M-K)非参数检验方法^[39]。同时,趋势率的估计采用Sen's估计^[40]。

2.3.2 水储量反演 基于GRACE重力卫星数据反演陆地水储量变化的方法可分为两个阶段:在重力卫星观测的前10年(约2003-2013年),标准的球面谐波方法^[41]最为常用,该方法的特点是利用重力卫星的全球观测数据解算重力模型^[42],进而计算水储量变化;此后,引入新的计算方法——Mascons(Mass Concentration blocks)方法,基于星际距离变率来反演陆地水储量变化^[43],该方法的特点是用重力卫星飞临区域的观测数据建模,从而减少感兴趣区域外的质量变化对区域内的水储量计算结果的影响^[42, 44]。天山山区水储量变化是基于Mascons方法得到的,距平基准期为时间序列完整的2004年1月-2009年12月,同时,对C20项进行替换和C10项修正,并运用了冰川均衡调整模型(GIA)对冰川回弹影响进行处理。最后,结合尺度因子对原始计算结果进行修正,并根据Wahr等1998年^[41]方法评估水储量变化结果的不确定性。

2.3.3 径流变差系数(Cv值) 径流变差系数Cv值,是评价径流年际变化特征的重要指标^[45]。Cv值大小与降水的变率关系密切,湿润区的Cv值小,而干旱区Cv值较大。

3 理论框架

山区作为一个独特的地理单元,在区域自然环境变化过程中具有重要地位。同时,

现代冰川广泛发育,具有“水塔”功能,为山区及其下游区域的生态环境和社会经济发展提供水资源保障^[4]。冰川和积雪对山区流域的水文过程具有缓冲作用^[46],以调节因降水季节不均而引发的河川径流不稳定性。自 20 世纪中期来,以气温显著上升为主要特征的全球气候变化加速了山区冰雪消融^[21-22, 47-49],使得山区成为全球关注的重点区域。

理论框架是基于“大气圈—冰冻圈—水圈”之间相互关系,探究山区气候变化对区域水资源的影响机制(图 2),具体过程可分为:① 山区若以升温过程为主,山区降水形式将由降雪向降雨转变^[46, 50],降雪率减少,导致冰川和积雪积累的物质来源减少。同时,气温上升也直接加速山区冰川和积雪消融。这两方面导致山区固态水体的消融速度大于积累速度,导致山区水储量减少,进一步影响流域水资源。此外,冰川和积雪消融使得原冰雪覆盖区域对太阳短波辐射的反射率降低,从而吸收更多的太阳辐射量,加剧高寒山区的升温速度,加速山区冰雪消融。因此,该过程对山区升温过程具有“增强”效应。② 山区若以降温过程为主,降雪率将随之增加,且冰雪消融速度减缓,使得山区固态水体的积累大于消融。此时,随着冰雪面积的增加,地表反射率也增加,冰冻圈吸收的太阳辐射量则减少,从而减缓高寒山区的升温速度,并抑制山区冰雪消融。因此,该过程对山区升温过程具有“抑制”效应。

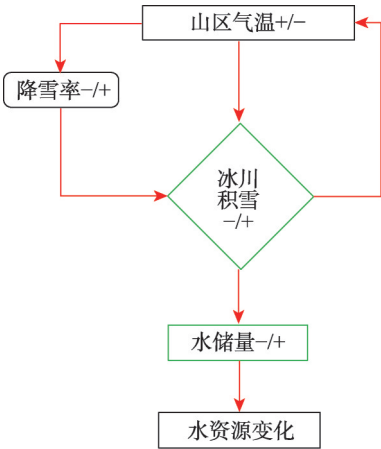


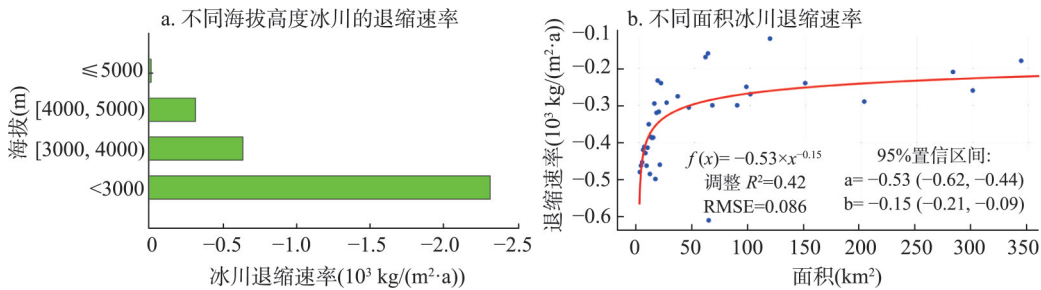
图 2 理论框架图
Fig. 2 Theoretical framework in this study

4 结果与分析

4.1 冰川变化

不同海拔高度的冰川退缩速率差异显著。图 3a 结果表明,冰川的退缩速率随海拔的升高而降低,因为海拔越高气温越低,冰川退缩速率减缓。海拔 3000 m 以下区域的冰川退缩速率最大,达 $-2.3 \times 10^3 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ (图 3a); 3000~4000 m 海拔区域的冰川退缩速率次之,约 $-0.6 \times 10^3 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$; 4000~5000 m 海拔区域的冰川退缩速率约 $-0.3 \times 10^3 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$; 而 5000 m 以上海拔区域的冰川退缩速率非常小。天山山区的冰川主要分布在 3000~4000 m 海拔区域^[17],因此该区域应作为冰川物质平衡观测的重点监测区域。

冰川面积不同对气候变化的响应程度不同。为研究冰川面积和冰川退缩速率之间的关系,将冰川面积划分为不同的等级,具体为小于 10 km^2 的冰川中每 1 km^2 为一个等级,



注: 数据来源于 Farinotti 等^[22]。

图 3 1961-2012 年天山山区冰川变化特征

Fig. 3 Glacial variations in Tianshan Mountains during 1961-2012

因为大部分冰川面积都位于这一个区间; 10~50 km²的冰川中每 10 km²为一个等级; 大于 50 km²的冰川以原面积为准不再分级。再对每一个等级内的冰川退缩速率求平均值, 得到每一个等级相对应的冰川退缩速率。最后, 用幂指数函数 $f(x) = a \times x^b$ (其中 x 为冰川面积, a 和 b 为拟合参数) 拟合冰川面积与退缩速率之间的关系, 拟合结果为 $f(x) = -0.53 \times x^{-0.15}$, a 和 b 的 95% 置信区间为: $a = -0.53(-0.62, -0.44)$, $b = -0.15(-0.21, -0.09)$, 拟合效果较好。这一函数关系说明冰川的退缩速率与面积呈负相关 (图 3b), 即小型冰川对气候变化的响应更为敏感, 大型冰川则相对稳定。面积大于 50 km²的冰川, 退缩速率稳定在 -0.3×10^3 kg/(m² · a) 以内 (图 3b), 而天山山区 98% 的冰川面积小于 10 km², 因此这种消融特征将对流域水资源产生重大影响。

为进一步揭示天山山区的冰川变化特征, 对天山山区 19 个典型流域 (或冰川) 的冰川面积 (图 1) 变化展开进一步研究, 结果显示 (表 1), 20 世纪 60 年代/70 年代-2000 年期间天山西部区域的冰川年均退缩速率要快于东部区域, 而 2000-2010 年期间东部区域冰川年均退缩速率要快于西部区域。与此同时, 更有趣的发现是, 大概以 79°E 经线为界, 以西区域的 10 条冰川中有 6 条冰川在 2000-2010 年期的退缩速率慢于 20 世纪 60 年代/70 年代-2000 年期间的退缩速率; 以东区域的 9 条冰川在 2000-2010 年期间的退缩速率全部要快于 20 世纪 60 年代/70 年代-2000 年期间的退缩速率 (图 1, 表 1)。该研究结果在一定程度上可以代表天山山区当前冰川变化趋势。

天山山区的冰川物质平衡表现为强物质负平衡。研究选取天山西部的 Tuyuksuyskiy 冰川, 物质平衡监测时段为 1957-2012 年, 和东部的乌鲁木齐河源 1 号冰川 (Urumqi glacier No.1), 物质平衡监测时段为 1980-2012 年。这两条冰川在图 1 中的序号分别为 17

表 1 20 世纪 60 年代/70 年代-2010 年天山山区典型流域(或冰川)的冰川面积变化
Tab. 1 Variations of glaciated area in typical river basins (or glaciers) in Tianshan Mountains during 1960s/70s-2010

序号	典型流域(或冰川)	1960s/70s- 2000 (km ² /a)	2000-2010 (km ² /a)	1960s/70s- 2000 (%/a)	2000-2010 (%/a)	文献来源
1	Pskem	-1.08	-1.11	-0.52	-0.63	[25]
2	Abramov	-0.02	-0.01	-0.08	-0.04	[25]
3	Lower Nargn	-0.29	-0.23	-0.35	-0.30	[27]
4	At-Bashi Kirkasi	-1.06	-0.13	-0.70	-0.10	[27]
5	SE-Fergana	-0.66	0.00	-0.27	0.00	[25]
6	At-Bashy	-0.39	-0.51	-0.35	-0.50	[25]
7	Dzhetim	-6.12	-4.51	-1.15	-1.10	[28]
8	Tuyuksuyskiy	-0.02	-0.02	-0.56	-0.82	[29,30]
9	Lli-Kungoy	-2.19	-2.83	-0.35	-0.50	[25]
10	Akshiirak	-1.22	-0.18	-0.60	-0.10	[28]
11	Karatal river	-1.71	-1.17	-0.86	-0.96	[31]
12	Tomr	-0.32	-0.47	-0.08	-0.11	[32]
13	West	-11.24	-13.85	-0.50	-0.65	[33,34]
14	North	-1.47	-3.52	-0.44	-1.10	
15	West-central	-0.73	-0.72	-1.33	-1.51	
16	East-central	-4.87	-8.61	-0.88	-1.71	[29,30,33,34]
17	Urumqi glacier No.1	-0.004	-0.01	-0.29	-0.59	
18	East	-0.38	-0.80	-0.31	-0.68	[33,34]
19	Miaoergou	-0.01	-0.03	-0.34	-0.80	[35]

注: 冰川的序号与图 1 中的点是一一对应。

和8。结果显示,1957-2012年期间,Tuyuksuyskiy冰川呈现为物质负平衡,年均物质平衡趋势为-13.44 mm/a(图4a)。乌鲁木齐河源1号冰川也表现为物质负平衡,年均物质平衡趋势为-17.18 mm/a(图4b)。累积物质平衡量结果显示,Tuyuksuyskiy冰川在1957-2012年期间变薄了25 m左右(图4a),同样乌鲁木齐河源1号冰川在1980-2012年期间变薄了约15 m(图4b)。

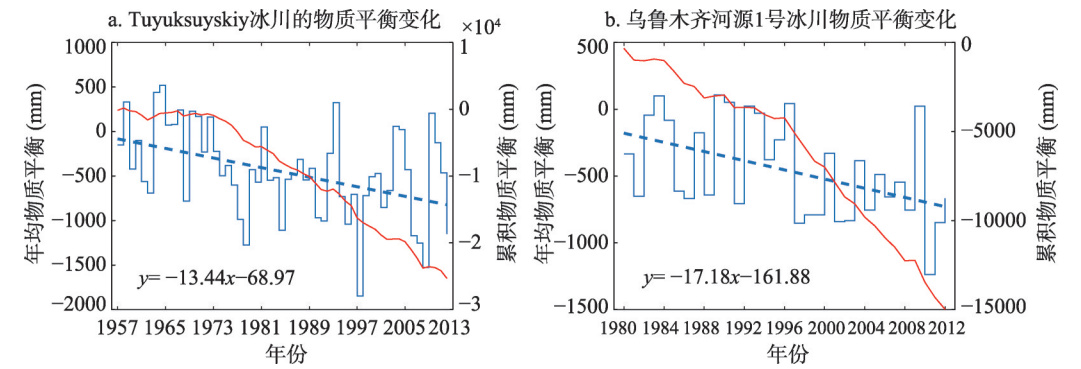


图4 1957-2012年期间Tuyuksuyskiy冰川与1980-2012年期间乌鲁木齐河源1号冰川的物质平衡变化
Fig. 4 Analysis of glacier mass balance change in the Tuyuksuyskiy glacier during 1957-2012, and the Urumqi Glacier No.1 during 1980-2012

4.2 积雪变化

积雪是全球冰冻圈的重要组成部分,在全球气候变化和水能循环中扮演重要角色。积雪相变过程的能量交换、积雪层的绝热效应以及季节性的消融和积累等对区域气候有显著影响。天山山区分布有大面积的季节性积雪和永久积雪^[51]。因此,详细分析天山山区的积雪变化对于了解区域水资源的变化具有重要指导意义。

积雪变化主要受山区太阳辐射量的影响,根据MODIS积雪数据分析可得,天山的积雪最大面积一般出现在1月份,最小面积为7月份。2004年是最大积雪覆盖率最高的年份,达84.9%,而2009年为最小积雪覆盖率最低的年份,仅为2.59%(图5)。同时,天

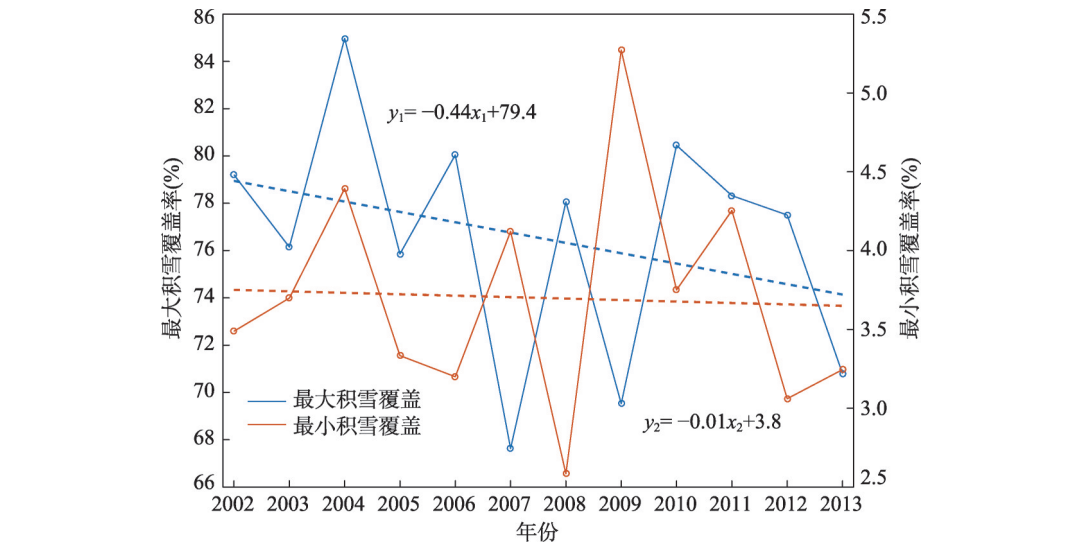


图5 2002-2013年天山山区最大积雪覆盖率和最小积雪覆盖率的变化结果
Fig. 5 Variations of maximum snow cover rate and minimum snow cover rate in Tianshan Mountains during 2002-2013

山山区最大积雪覆盖率和最小积雪覆盖率变化的分析结果表明, 2002-2013年天山山区最大积雪覆盖率呈减少趋势, 减少速率为 $0.44\%/a$, 而最小积雪覆盖率变化不明显, 减少速率为 $0.01\%/a$ (相当于 $-47 \text{ km}^2/a$) (图5), 因为最小积雪覆盖率的海拔分布比较高, 且实际面积小, 使得最小积雪覆盖率的递减速度比最大积雪覆盖率要慢。天山山区最大积雪覆盖率递减速度较快的原因是山区升温加速, 使得山区积雪的融化速度加快^[9, 17]。

积雪的年内覆盖历时缩短。文中将一年当中从积雪覆盖最大到积雪覆盖最小的时间长度定义为积雪覆盖历时, 即年内积雪在地面的滞留时间。积雪对水文系统起到一定缓冲作用, 能够缓和因气候条件变化对水文系统的影响, 如果积雪覆盖历时长, 那么积雪对水文系统的调节作用就更明显, 反之亦然。结果表明, 年内积雪覆盖历时从2002年的216 d, 到2013年208 d, 缩短了8 d (表2)。年内积雪覆盖历时变短, 意味着积雪对年内水文系统的缓冲作用减弱, 加大了天山山区水资源的变率, 将对绿洲区的水资源利用带来不利影响。

表2 2002-2013年天山山区年内积雪覆盖历时

Tab. 2 The days of snow cover in Tianshan Mountains during 2002-2013

年份	Max	Min	Days	年份	Max	Min	Days
2002	2002017	2002233	216	2008	2008049	2008209	160
2003	2003065	2003249	184	2009	2009001	2009201	200
2004	2004017	2001193	176	2010	2010041	2010225	184
2005	2005001	2005209	208	2011	2011041	2011209	168
2006	2006017	2006209	192	2012	2012017	2012225	208
2007	2007001	2007201	200	2013	2013009	2013217	208

注: Max表示年内最大的积雪面积的日期; Min表示年内最小的积雪面积的日期; Days表示从最大积雪面积到最小积雪面积经历的天数。

4.3 水储量变化

4.3.1 时空特征分析 天山山区水储量年际变化存在显著的空间差异 (图6a)。天山大部分区域的水储量减少速率不足 $1 \text{ cm}/a$, 但中部表现为水储量的急剧减少, 达 $-8 \sim -6 \text{ cm}/a$, 这一速率非常惊人, 可能与该区域的冰川急剧退缩有关^[8]。

2003-2015年期间, 整个区域的水储量平均递减速率约为 $-0.7 \pm 1.53 \text{ cm}/a$ (图6b)。不确定性分析结果表明, 2003-2015年期间水储量变化的不确定性在 $1 \sim 2 \text{ cm}$ 左右 (图6b)。不确定性主要来源两个方面: 一方面是机械和计算精度误差; 另一方面是大气质量扰动和冰川质量回弹影响。

山区固态水体积积累和消融的季节差异导致了水储量变化的季节差异。山区不同季节的水热组合条件不一样, 使得不同季节的冰川和积雪的积累和消融差异比较明显。图7中a1和a2结果表明春季为正距平, 秋季为负距平, 而冬季和夏季处于二者之间。春季水储量为正距平, 是因为天山山区整个冬半年固态水资源一直处于积累过程, 到春季达到最大值, 因此春季水储量表现为正距平。同样, 夏半年一直处于消融过程, 到秋季消融累积达到最大值, 因此水储量在秋季表现为负距平。冬季和夏季处于正、负距平的过渡阶段, 是因为气温和降水组合的年际差异导致。同时, 天山山区每个季节的水储量都呈减少趋势, 因为在全球变暖大背景下, 天山山区固态水体处于退缩状态^[8], 故水储量呈减少趋势。图7b结果表明2007年以前天山山区的水储量以正距平为主, 而2013年以后以负距平居多。从月份的年际变化来看, 冬半年的水储量变化为正距平, 夏半年的水储量

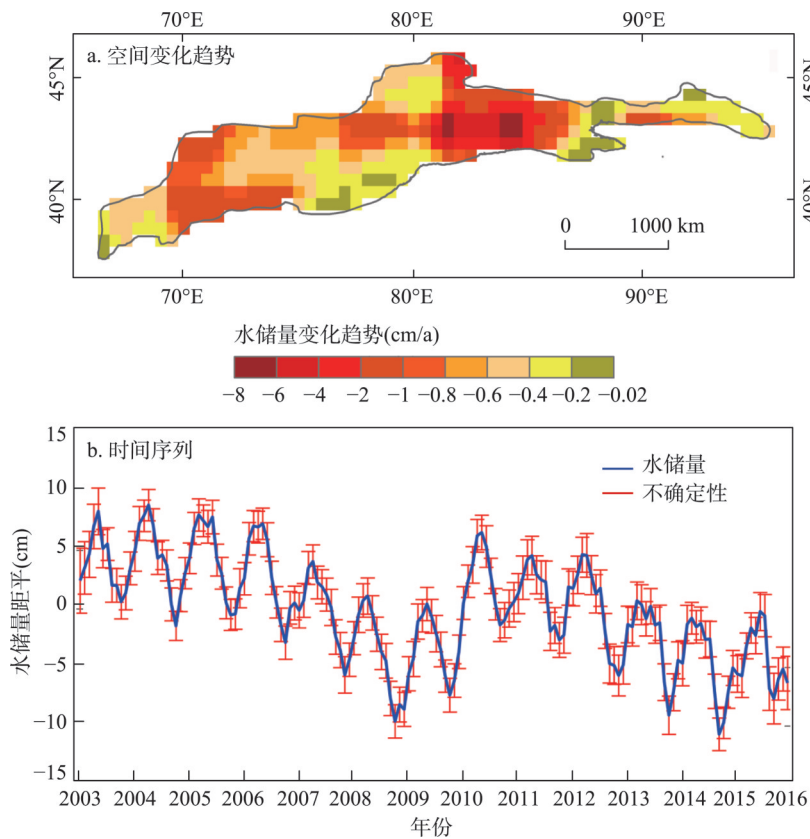


图6 2003-2015年天山水储量变化
Fig. 6 The variations of TWS in Tianshan Mountains during 2003-2015

变化为负距平。此外，图7b还给出另一个信息，即天山山区月尺度水储量距平变化的年际趋势也呈递减趋势。

4.3.2 原因分析 天山山区的气象观测站点稀少，因此基于观测站点同化的气温数据（APHRO-Temperature数据集^[52]）分析天山山区的气温变化趋势。图8a结果显示天山中东部的升温速率较大，达0.02~0.04℃/a，而天山西部的局部区域气温呈递减趋势，其速率为-0.016~0℃/a。

气温变化的空间差异驱动了冰川和积雪的空间差异（图8）。山区冰川变化对气温的敏感性较降水要高^[6, 53]。天山中部的冰川退缩速率大，达 $-3.01\sim-1.2\times10^3\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ ，而天山西部的退缩速率小，约 $-1.2\sim-0.4\times10^3\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 。同时，在天山西部有部分冰川呈增加趋势，其速率为 $0\sim0.22\times10^3\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 。冰川是天山山区最主要的水资源储量^[17]，因此冰川退缩速率大的区域，水储量的递减速率也大，例如天山中东部的冰川退缩速率大（图8b），其水储量递减速率也大，达 $-7.95\sim-4\text{ cm}/\text{a}$ （图8c）。冰川退缩速率较小的区域，水储量的递减速率也小，例如天山西部的冰川退缩速率小（图8b），其水储量递减速率也小，在 $-1\text{ cm}/\text{a}$ 以内（图8c）。另外，天山东部的博格达山的升温速率较大（图8a），但是该区域的水储量递减速率比较小（图8c），主要是因为该区域的冰川分布面积较小，冰川退缩严重^[54]，而剩下的冰川末端海拔较高，在当前升温趋势下退缩速率较慢，因而即使升温其水储量的递减速率也相对较小。

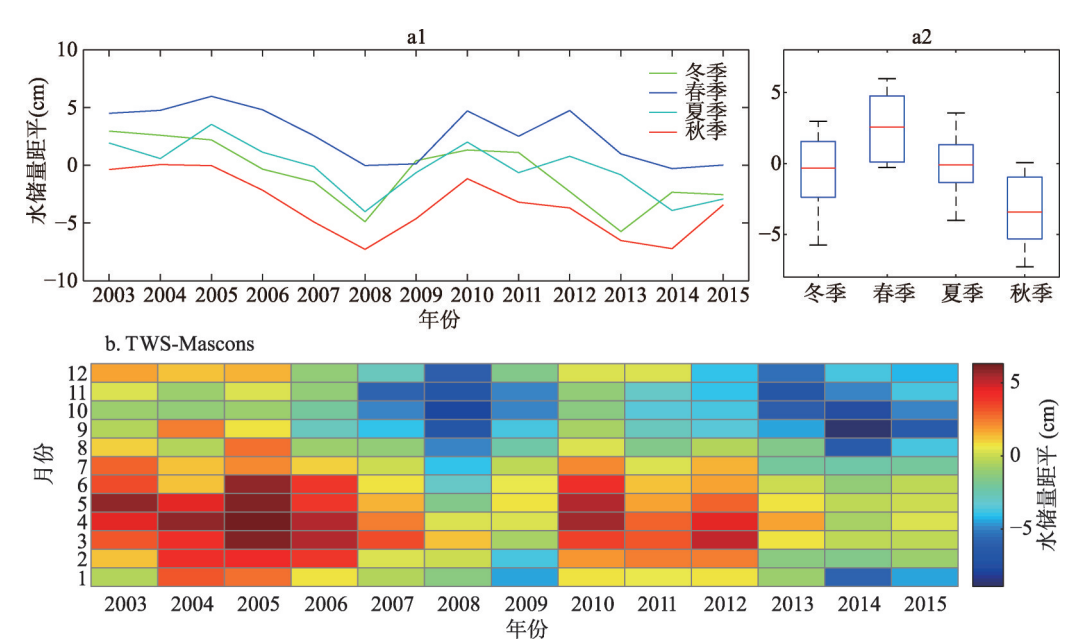


图7 2003-2015年天山山区水储量的季节和月尺度变化(a1和a2为季节变化，b为月变化)
Fig. 7 The TWS variations at seasonal and monthly scales in the Tianshan Mountains during 2003-2015
(a1 and a2 are at seasonal scale, and b is at monthly scale)

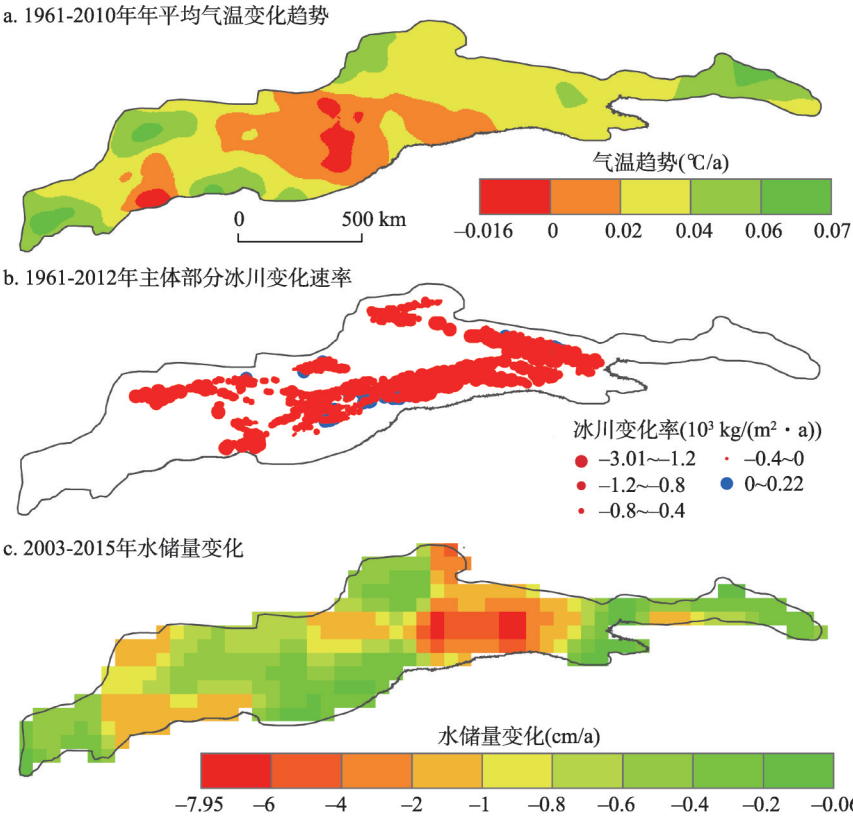


图8 天山山区年平均气温、冰川以及水储量的变化
Fig. 8 Variation of annual mean temperature, glaciers and TWS in the Tianshan Mountains

4.4 径流变化

径流变差系数 (Cv 值) 计算结果 (表3) 显示, 3 个流域都在 0.1~0.2 之间, 符合冰雪融水补给河流径流变差系数的范围^[55]。冰雪融水对山区流域径流量变化具有明显的调节作用, 冰川面积占整个流域总面积比重越大的流域, 径流年际变化越稳定。表3 结果表明阿克苏河流域冰川面积占流域总面积的 3.8%, 开都河流域为 2.2%, 乌鲁木齐河流域为 2.75%。相应地, 开都河流域的 Cv 值大, 而阿克苏河流域和乌鲁木齐河流域的 Cv 值小。

表3 典型流域径流特征分析
Tab. 3 Characteristics of runoff at the three typical river basins

流域	流域面积 (10 ⁴ km ²)	冰川面积/流域面积 (%)	年均径流量 (10 ⁸ m ³)	径流标准差 (10 ⁸ m ³)	Cv 值
阿克苏河	4.1932	3.8	76.15	11.61	0.15
开都河	1.8631	2.2	35.53	6.78	0.19
乌鲁木齐河	0.1114	2.75	7.93	1.09	0.14

1960-2010 年期间, 3 个流域的出山口径流都呈增加趋势, 其中阿克苏河的增幅最大, 达 $0.4 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ($P < 0.01$, 图 9a1), 其次是开都河流域 (图 9b1), 乌鲁木齐河流域的增幅最小, 为 $0.04 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ($P < 0.01$, 图 9c1), 这与乌鲁木齐河流域的流域面积在这三条河流中是最小的有关。同时, 据中国第一次冰川编目和第二次冰川编目数据, 计算了近半个多世纪以来阿克苏流域 (国内流域部分)、开都河流域及乌鲁木齐河流域的冰川面积变化, 结果显示, 阿克苏河流域冰川面积减少了 29.7%, 开都河流域减少近 64%,

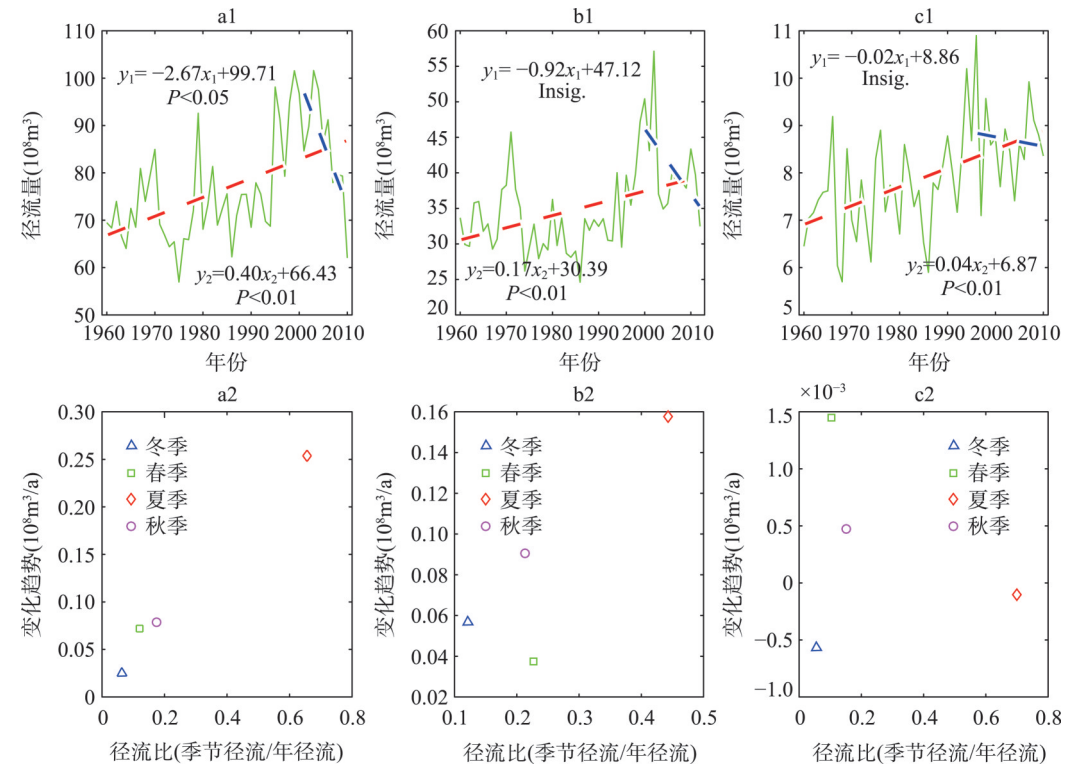


图9 1960-2010年阿克苏河流域(a1, a2)、开都河流域(b1, b2)及乌鲁木齐河流域(c1, c2)径流变化
Fig. 9 The results of runoff changes in the Akesu river basin (a1, a2), Kaidu river basin (b1, b2), and Urumqi river basin (c1, c2) during 1960-2010

乌鲁木齐河流域减少了57.7%。因此,这3个流域径流量增加可能是由冰川融水径流量增加所致。但自20世纪90年代中期以来,径流量都呈递减趋势,阿克苏河流域递减速率达 $2.67 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,并通过 $P = 0.05$ 水平下的显著性检验,而开都河流域和乌鲁木齐河流域的下降趋势并不显著。

夏季径流量占全年径流量的比重最大,阿克苏河流域(图9a2)和乌鲁木齐河流域(图9c2)都在0.6以上,而开都河流域不到0.5(图9b2),因为开都河流域源流区的大、小尤勒都斯盆地,对流域径流起到调蓄作用。阿克苏河流域(图9a2)和开都河流域(图9b2)夏季径流的增加趋势最大,主要是由冰川融水径流增加所致。但乌鲁木齐河流域的夏季径流呈微弱减少趋势(图9c2),通过对比第一次和第二次冰川编目数据,发现乌鲁

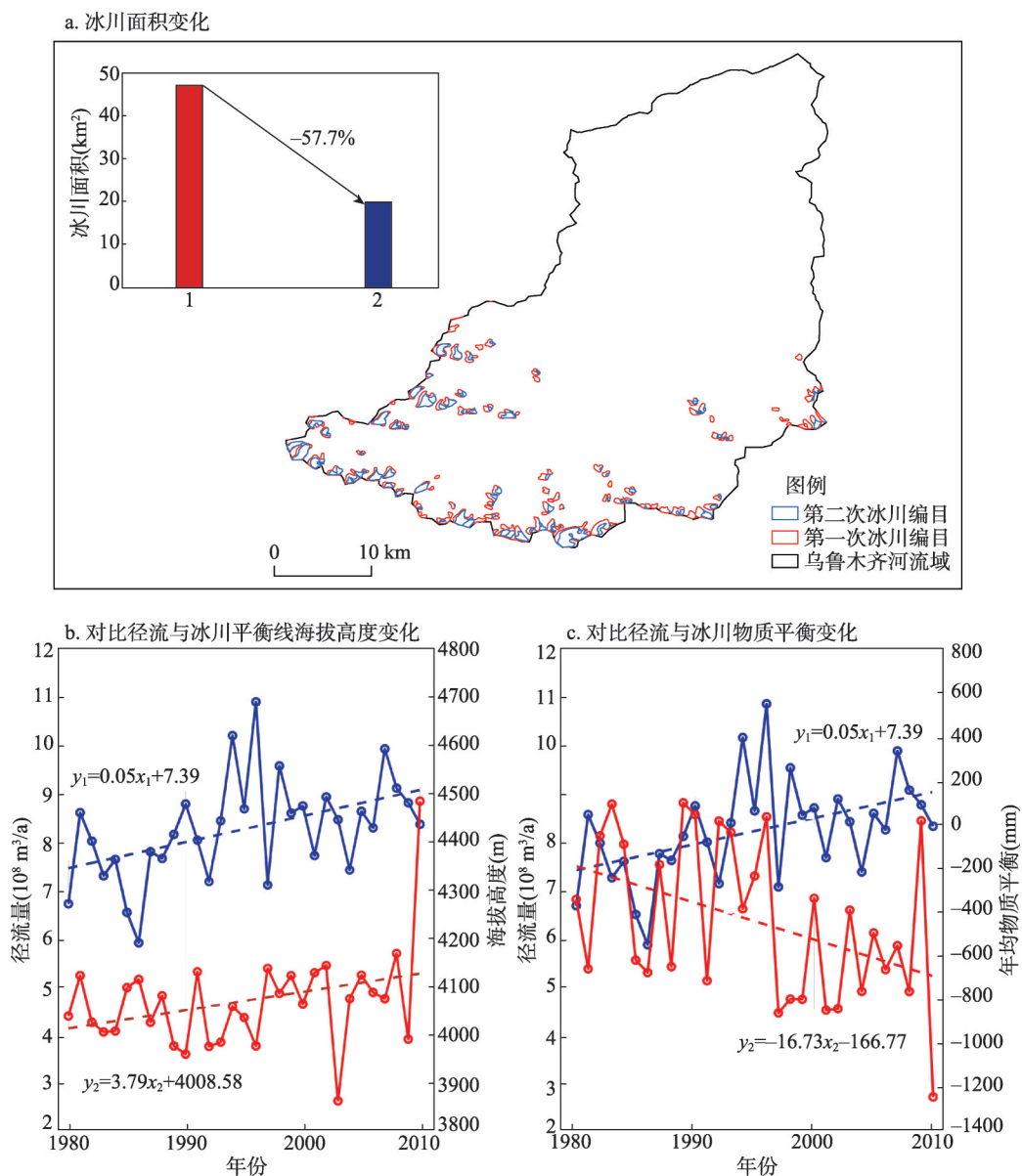


图10 乌鲁木齐河流域冰川变化与径流变化的关系

Fig. 10 The relationship between glaciers variations and runoff changes in the Urumqi river basin

木齐河流域的冰川面积减少 57.7% (图 10a), 特别是流域内小面积冰川基本消失殆尽。同时分析了乌鲁木齐河源 1 号冰川平衡线海拔高度和物质平衡变化, 结果显示 1980-2012 年期间冰川零平衡线高度呈上升趋势, 约 3.8 m/a (图 10b), 且处于强物质负平衡状态 (图 10c)。1980-2012 年乌鲁木齐河源 1 号冰川变薄了大约 15 m (图 4b)。因此, 乌鲁木齐河流域夏季径流减少, 与河源区冰川面积减少、平衡线海拔升高及厚度变薄引起的冰雪融水减少密切相关。

5 结论

(1) 天山以冰雪为主体的固态水库处于持续亏缺状态。冰川退缩速率与面积呈负相关, 表明小型冰川对气候变化的响应更为敏感; 不同的海拔区域退缩速率差异明显, 海拔 3000 m 以下区域的冰川退缩速率最大, 达 $-2.3 \times 10^3 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。积雪覆盖面积同样呈减少趋势, 且年内积雪覆盖历时缩短。

(2) 冰川急剧退缩加速了山区水储量减少。2003-2015 年, 天山山区的水储量递减速率为 $0.7 \pm 1.53 \text{ cm/a}$ 。天山中部区域的水储量递减速率最大, 达 $-8 \sim -6 \text{ cm/a}$, 与该区域冰川急剧退缩吻合。

(3) 出山口径流量变化特征与流域内冰川变化关系密切。1960-2010 年期间, 阿克苏河流域、开都河流域及乌鲁木齐河流域的径流均呈增加趋势, 主要是由冰川融水径流增加所致。但自 20 世纪 90 年代中期以来, 3 个流域的径流量呈减少趋势, 与河源区冰川严重退缩关系密切, 即冰雪消融初期, 出山口径流随冰雪融水的增加而增加; 冰雪消融中后期, 冰雪融水随着冰川面积减小、平衡线海拔升高及厚度变薄而减少, 出山口径流也随之减少。

参考文献(References)

- [1] Hansen J, Makiko S, Reto R, et al. Global temperature change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2006, 103(39): 14288-14293.
- [2] Mountain Research Initiative. Elevation-dependent warming in mountain regions of the world. *Nature Climate Change*, 2015, 5(5): 424-430.
- [3] Jacob T, Wahr J, Pfeffer W, et al. 2012. Recent contributions of glaciers and ice caps to sea level rise. *Nature*, 482: 514-518.
- [4] Immerzeel W, Beek L, Bierkens P. Climate change will affect the Asian water towers. *Science*, 2010, 328(5984): 1382-1385.
- [5] Lutz A, Immerzeel W, Shrestha A, et al. Consistent increase in High Asia's runoff due to increasing glacier melt and precipitation. *Nature Climate Change*, 2014, 4: 587-592.
- [6] 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. *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. *冰川冻土*, 2009, 31(5): 792-800.]
- [7] Gao Xing, Ye Baisheng, Zhang Shiqiang, et al. Glacier runoff variation and its influence on river runoff during 1961-2006 in the Tarim River Basin, China. *Science China Earth Sciences*, 2010, 40(5): 654-665. [高鑫, 叶柏生, 张世强, 等. 1961-2006 年塔里木河流域冰川融水变化及其对径流的影响. *中国科学: 地球科学*, 2010, 40(5): 654-665.]
- [8] Deng Haijun, Chen Yaning. Influences of recent climate change and human activities on water storage variations in Central Asia. *Journal of Hydrology*, 2017, 544: 46-57.
- [9] Chen Yaning, Li Zhi, Fang Gonghuan, et al. Impact climate change on water resources in the Tianshan Mountains, Central Asia. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 18-26. [陈亚宁, 李稚, 方功焕, 等. 气候变化对中亚天山山区水资源影响研究. *地理学报*, 2017, 72(1): 18-26.]
- [10] Lee H, Beighley R E, Alsdorf D, et al. Characterization of terrestrial water dynamics in the Congo Basin using GRACE

- and satellite radar altimetry. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(12): 3530-3538.
- [11] Schmidt R, Schwintzer P, Flechtner F, et al. GRACE observations of changes in continental TWS. *Global Planet Change*, 2006, 50(1/2): 112-126.
- [12] Xavier L, Becker M, Cazenave A, et al. Interannual variability in water storage over 2003-2008 in the Amazon Basin from GRACE space gravimetry, in situ river level and precipitation data. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(8): 1629-1637.
- [13] Matsuo K, Heki K. Time-variable ice loss in Asian high mountains from satellite gravimetry. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, 290(1/2): 30-36.
- [14] Rodell M, Famiglietti J, Chen J, et al. Basin scale estimates of evapotranspiration using GRACE and other observations. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(20): L20504.
- [15] Rodell M, Velicogna I, Famiglietti J. Satellite-based estimates of groundwater depletion in India. *Nature*, 2009, 460(7258): 999-1002.
- [16] Chen J, Wilson C R, Tapley B D, et al. 2005 drought event in the Amazon River basin as measured by GRACE and estimated by climate models. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2009, 114(B5): B05404.
- [17] Chen Yaning, Li Weihong, Deng Haijun, et al. Changes in Central Asia's Water Tower: Past, present and future. *Scientific Reports*, 2016, 6: 35458.
- [18] Yao Junqiang, Yang Qing, Hu Wenfeng, et al. Characteristics analysis of water vapor contents around Tianshan Mountains and the relationships with climate factors. *Scientia Geographica Sinica*, 2013, 33(7): 859-864. [姚俊强, 杨青, 胡文峰, 等. 天山山区空中水汽含量及与气候因子的关系. *地理科学*, 2013, 33(7): 859-864.]
- [19] Aizen V, Aizen E, Surazakov A, et al. Is Central Asia really exsiccated? *Proceedings of AGU Fall Meeting*, San Francisco, 2008, GC53C-07.
- [20] Aizen V, Aizen E, Melack J. Climate, snow cover, glaciers, and runoff in The Tien Shan, Central Asia. *Journal of the American Water Resources Association*, 1995, 31: 1113-1129.
- [21] Aizen V. Tien Shan glaciers//Singh V P, Singh P U K. *Encyclopedia of Snow, Ice and Glaciers*. Haritashya. Dordrecht, Springer: Netherlands, 2011: 1179.
- [22] Farinotti D, Longuevergne L, Moholdt G, et al. Substantial glacier mass loss in the Tien Shan over the past 50 years. *Nature Geoscience*, 2015, 8(9): 716-722.
- [23] Pfeffer W, Arendt A, Bliss A, et al. The Randolph Glacier Inventory: A globally complete inventory of glaciers. *Journal of Glaciology*, 2014, 60(221): 537-552.
- [24] Xu Changchun, Chen Yaning, Chen Yapeng, et al. Responses of surface runoff to climate change and human activities in the arid region of Central Asia: A case study in the Tarim River Basin, China. *Environmental Management*, 2013, 51(4): 926-938.
- [25] Narama C, Kääb A, Duishonakunov M, et al. Spatial variability of recent glacier area changes in the Tien Shan Mountains, Central Asia, using Corona (~1970), Landsat (~2000), and ALOS (~2007) satellite data. *Global Planet. Change*, 2010, 71(1/2): 42-54.
- [26] Barandun M, Huss M, Sold L, et al. Re-analysis of seasonal mass balance at Abramov glacier 1968-2014. *Journal of Glaciology*, 2015, 61(230): 1103-1117.
- [27] Kriegel D, Mayer D, Hagg W, et al. Changes in glacierisation, climate and runoff in the second half of the 20th century in the Naryn basin, Central Asia. *Global Planet. Change*, 2013, 110: 51-61.
- [28] Hagg W, Mayer C, Lambrecht A, et al. Glacier changes in the Big Naryn basin, Central Tian Shan. *Global and Planetary Change*, 2013, 110, Part A: 40-50.
- [29] Volume X. Zemp M, Frey H, et al. *Fluctuations of Glaciers 2005-2010*. Zurich, Switzerland: World Glacier Monitoring Service, 2012.
- [30] Zemp M, Nussbaumer S U, Naegeli K, et al. *Glacier Mass Balance Bulletin No. 12 (2010-2011)*. Roer, 2013.
- [31] Kaldybayev A, Chen Y, Vilesov E. Glacier change in the Karatal river basin, Zhetysay (Dzhungar) Alatau, Kazakhstan. *Annals of Glaciology*, 2016, 57(71): 11-19.
- [32] Huai B, Li Z, Sun M, et al. Change in glacier area and thickness in the Tomur Peak, western Chinese Tien Shan over the past four decades. *Journal of Earth System Science*, 2015, 124(2): 353-363.
- [33] He Yi, Yang Taibao, Ji Qin, et al. Glacier variation in response to climate change in Chinese Tianshan Mountains from 1989 to 2012. *Journal of Mountain Science*, 2015, 12(5): 1189-1202.
- [34] Wang Puyu, Li Zhongqin, Wang Wenbin, et al. Changes of six selected glaciers in the Tomor region, Tian Shan, Central Asia, over the past ~50 years, using high-resolution remote sensing images and field surveying. *Quaternary*

- International, 2013, 311: 123-131.
- [35] Xie Wei, Jiang Fengqing. Change trend of glaciers in the Hami region. *Arid Zone Research*, 2014, 31(1): 27-31. [谢伟, 姜逢清. 哈密地区冰川变化趋势分析. 干旱区研究, 2014, 31(1): 27-31.]
- [36] Guo Wanqing, Xu Junli, Liu Shiyin, et al. The Second Glacier Inventory Dataset of China (Version 1.0). Cold and Arid Regions Science Data Center at Lanzhou, 2014. doi: 10.3972/glacier.001.2013.db.
- [37] Liu Shiyin, Yao Xiaojun, Guo Wanqin, et al. The contemporary glaciers in China based on the Second Chinese Glacier Inventory. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(1): 3-16. [刘时银, 姚晓军, 郭万钦, 等. 基于第二次冰川编目的中国冰川现状. 地理学报, 2015, 70(1): 3-16.]
- [38] Long Di, Yang Yuting, Wada Y, et al. Deriving scaling factors using a global hydrological model to restore GRACE total water storage changes for China's Yangtze River Basin. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 168: 177-193.
- [39] Hirsch R, Slack J. A nonparametric trend test for seasonal data with serial dependence. *Water Resources Research*, 1984, 20(60): 727-732.
- [40] Sen P. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association*, 1968, 63(324): 1379-1389.
- [41] Wahr J, Molenarr M. Time variability of the earth's gravity field: Hydrological and oceanic effects and their possible detection using GRACE. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1998, 103(B12): 30205-30229.
- [42] Zou Xiancai, Jin Taoyong, Zhu Guangbin. Research on the MASCON method for the determination of local surface mass flux with satellite-satellite tracking technique. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, 59(12): 4623-4632. [邹贤才, 金涛勇, 朱广彬. 卫星跟踪卫星技术反演局部地表物质迁移的 MASCON 方法研究. 地球物理学报, 2016, 59(12): 4623-4632.]
- [43] Watkins M, Wiese D N, Yuan D N, et al. Improved methods for observing Earth's time variable mass distribution with GRACE using spherical cap mascons. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2015, 120: 2648-2671.
- [44] Guo Feixiao, Xiao Yun, Wang Feifei. Mascon inversion method of earth surface mass anomaly using GRACE range rate data. *Progress in Geophysics*, 2014, 29(6): 2494-2497. [郭飞霄, 肖云, 汪菲菲. 利用 GRACE 星间距离变率数据反演地球表层质量变化的 Mascon 方法. 地球物理学进展, 2014, 29(6): 2494-2497.]
- [45] Li Xiuyun. Regularity of perennial variations in annual runoff for northeastern China and its prognosis. *Scientia Geographica Sinica*, 1982, 2(3): 238-246. [李秀云. 东北地区年径流的多年变化规律及预测. 地理科学, 1982, 2(3): 238-246.]
- [46] Deng Haijun, Pepin N, Chen Yaning, et al. Changes of snowfall under warming in the Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2017, 122(14): 7323-7341.
- [47] Liu Shiyin, Sun Wenxin, Shen Yongping, et al. Glacier changes since the Little Ice Age maximum in the western Qilian Shan, northwest China, and consequences of glacier runoff for water supply. *Journal of Glaciology*, 2003, 49(164): 117-124.
- [48] Jacob T, Wahr J, Pfeffer T, et al. Recent contributions of glaciers and ice caps to sea level rise. *Nature*, 2012, 482(7386): 514-518.
- [49] Paul F, Bolch T, Kaab A, et al. The glaciers climate change initiative: Methods for creating glacier area, elevation change and velocity products. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 162: 408-426.
- [50] Berghuijs W, Woods R, Hrachowitz M, et al. A precipitation shift from snow towards rain leads to a decrease in streamflow. *Nature Climate Change*, 2014, 4(7): 583-586.
- [51] Li Baofu, Chen Yaning, Chen Zhongsheng, et al. The effect of climate change during snowmelt period on streamflow in the mountains areas of Northwest China. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(11): 1461-1470. [李宝福, 陈亚宁, 陈忠升, 等. 西北干旱区山区融雪期气候变化对径流量的影响. 地理学报, 2012, 67(11): 1461-1470.]
- [52] Yatagai A, Kamiguchi K, Arakawa O, et al. Aphrodite: Constructing a long-term daily gridded precipitation dataset for asia based on a dense network of rain gauges. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2012, 93(9): 1401-1415.
- [53] Liu Shiyin, Wang Ninglian, Ding Yongjian, et al. On the characteristics of glacier fluctuations during the last 30 years in Urumqi river basin and the estimation of temperature rise in the high mountain area. *Advance in Earth Sciences*, 1999, 14(3): 279-285. [刘时银, 王宁练, 丁永建, 等. 近 30 年来乌鲁木齐河流域冰川波动特征与流域高山带升温幅度的估算. 地球科学进展, 1999, 14(3): 279-285.]
- [54] Li Jia, Yang Taibao, He Yi, et al. Response of glacier retreat to climate in Eastern Tianshan from 1990-2011. *Research of Soil and Water Conservation*, 2014, 21(3): 212-216. [李佳, 杨太保, 何毅, 等. 1990-2011 年天山东部冰川退缩对气候的响应. 水土保持研究, 2014, 21(3): 212-216.]
- [55] Yang Zhenning. Mountain stream types in Northwest China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1981, 3(2): 14-31. [杨钟娘. 我国西北山区河流类型. 冰川冻土, 1981, 3(2): 14-31.]

The glacier and snow variations and their impact on water resources in mountain regions:

A case study in Tianshan Mountains of Central Asia

DENG Haijun^{1, 2, 3, 4}, CHEN Yaning²

(1. Fujian Provincial Engineering Research Center for Monitoring and Assessing Terrestrial Disasters, Fuzhou 350007; 2. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China; 3. State Key Laboratory Breeding Base of Humid Subtropical Mountain Ecology, Fuzhou 350007, China; 4. College of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

Abstract: Strongly impacted by climate change, glacier and snow, as major parts of solid reservoirs in mountains, can regulate the local water sources. This study uses glacier and snow datasets to analyze the variations of glaciers, snow, water storage, and runoff in the Tianshan Mountains, and selects three typical river basins (Aksu River, Kaidu River, and Urumqi River) to interpret the impact of glacier and snow changes on regional water resources in this region. Results indicate that: (1) the functional relationship between glaciers retreat and glaciers area is $f(x) = -0.53 \times x^{-0.15}$ ($R^2 = 0.42$, RMSE = 0.086), and small glacier retreat is more sensitive under climate change. Meanwhile, glacier retreat rate at the low-middle elevation bands is faster than that of the high elevation band; (2) the decreasing rate of regional average total water storage (TWS) is -0.7 ± 1.53 cm/a in the study area during 2003-2015. The maximum of TWS deficit region was mainly observed in the central part of the mountains, which is closely related with accelerated glacier retreats; (3) during the past half century, the increased melting of glacier and snow melt led to a runoff increase in the three typical river basins, especially in the Aksu river basin (0.4×10^8 m³/a). The area decreasing, thinning, and rising equilibrium line altitude (ELV) of glaciers are the major factor contributing to the decreasing trend of runoff in the three river basins since the mid-1990s. Therefore, results revealed that the mechanism of influence of solid water reserves reduction in mountains on regional water resources under climate change, and also provided references for water resources management in the mountainous river basin.

Keywords: climate change; glacier and snow; water resources; cryosphere; Tianshan Mountains