

doi: 10.13866/j.azr.2018.01.02

中国大陆型冰川和海洋型冰川变化比较分析 ——以天山乌鲁木齐河源 1 号冰川和玉龙雪山白水河 1 号冰川为例^①

李开明¹, 陈世峰¹, 康玲芬¹, 李忠勤^{1,2}, 李生德¹, 文强¹

(1. 兰州城市学院地理与城乡规划学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 以天山乌鲁木齐河源 1 号冰川和玉龙雪山白水河 1 号冰川为例, 比较分析了全球变暖背景下中国大陆型冰川和海洋型冰川自 20 世纪中期以来的变化。结果表明: 物质平衡亏损、平衡线高度上升、活动层温度升高、厚度减薄、运动速度降低、末端退缩、面积和冰储量减少是两类冰川的主要变化趋势; 大陆型冰川变率有加大或者大于海洋型冰川的表现, 并且两类冰川的变化幅度差距有逐渐缩小或趋稳的迹象。进一步分析认为: 两类冰川消融退缩的主要原因是气温上升, 重要因素是冰面反照率降低, 而气候环境、响应气候变化的敏感性、加速消融机理等差异, 是造成两者变化差异性的主要原因。

关键词: 冰川变化; 大陆型冰川; 海洋型冰川; 物质平衡; 冰川厚度; 乌鲁木齐河源 1 号冰川; 玉龙雪山白水河 1 号冰川

冰川是气候的产物。中国是世界上中低纬度山岳冰川最发育的国家⁽¹⁾。依据冰川发育条件及其物理性质, 中国冰川分为大陆型冰川和海洋型冰川两大类, 其中大陆型冰川又可分为亚大陆型与极大陆型⁽²⁾(表 1)。大陆型冰川分布范围北起阿尔泰山, 南到喜马拉雅山中段北坡, 西自帕米尔, 东至冷龙岭和阿尼玛卿山, 具有补给少、消融弱、雪线高、温度低、运动速度慢、地质地貌作用弱等特点, 条数(37 770 条)和面积(46 200 km²)分别占中国冰川条数和面积的 81.4% 和 77.8%; 海洋型冰川主要分布在青藏高原东南部喜马拉雅山脉东段和南坡、念青唐古拉山脉东段和中段以及横断山脉, 具有补给充分、消融强烈、雪线分布低、温度高、运动速度快、地

质地貌作用强等特点, 条数(8 607 条)和面积(13 203 km²)分别占中国冰川条数和面积的 18.6% 和 22.2%⁽⁷⁻⁹⁾。

20 世纪以来, 随着全球性升温和降水变化, 冰川热力学和动力学特征发生改变, 世界上大多数山岳冰川处于退缩状态, 并且在 20 世纪 80 年代后呈现加速趋势⁽¹⁰⁻¹¹⁾。1993—2009 年, 全球山岳冰川的冰损失量达到了 $2.75 \times 10^{11} \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, 较 1971—2009 年增加了 22%⁽¹²⁾。20 世纪 50 年代中后期以来, 中国冰川面积缩减了 18% 左右, 年均缩小 243.7 km², 消融退缩态势严峻。冰川变化对局地气候、生态环境、水资源、旅游资源、重大工程建设、冰雪灾害以及海平面升降均有重大影响。在中国西部干旱区,

表 1 中国大陆型冰川和海洋型冰川的主要特征⁽³⁻⁶⁾

Tab. 1 The main features of continental glacier and temperate glacier in China⁽³⁻⁶⁾

冰川类型	气候	平衡线高度			成冰作用	冰层温度 / °C	运动速度 / (m · a ⁻¹)	
		年平均降水量 / mm	年平均气温 / °C	夏季平均气温 / °C				
海洋型冰川	季风环流气候	1 000 ~ 3 000	> -6	1 ~ 5	暖渗浸 - 重结晶	-1 ~ 0	> 100	
大陆型冰川	亚大陆型冰川	高原季风与大陆性气候	500 ~ 1 000	-6 ~ -12	0 ~ 3	渗浸 - 冻结	-1 ~ -10	30 ~ 100
	极大陆型冰川		200 ~ 500	< -10	< -1		< -10	10 ~ 30

① 收稿日期: 2017-02-27; 修订日期: 2017-06-08
基金项目: 国家自然科学基金(41661014); 兰州城市学院博士科研启动基金(LZCU-BS2013-06)和兰州城市学院第四届“挑战杯”大学生课外学术科技作品竞赛资助
作者简介: 李开明(1974-)男, 博士, 主要研究寒旱区水资源及冰川变化, E-mail: lkm_wd@126.com

冰川变化直接影响着以冰雪融水为主要补给地区的人民生活和经济建设⁽¹³⁻¹⁶⁾。全面比较分析中国大陆型和海洋型冰川变化及其原因,不仅具有重要的科学意义,更具有重大的现实价值。

1 参照冰川及数据来源

选取天山乌鲁木齐河源 1 号冰川(以下简称乌源 1 号冰川)和玉龙雪山白水河 1 号冰川(以下简称白水 1 号冰川)作为中国大陆型和海洋型冰川的参照冰川(图 1),一是其规模相当,具有可比性;二是资料序列长;三是均为冰斗—山谷冰川。其中乌源 1 号冰川(43°06′N, 86°49′E)位于天山中段天格尔 II 峰北坡,1959 年长度为 2.41 km、面积 1.95 km²、平衡线高度 4 060 m、末端海拔 3 736 m,属于夏季补给型冰川,是中国监测时间最长、研究最为系统的冰川,也是世界冰川监测服务处(WGMS)设立的全球 10 条重点观测的参照冰川之一⁽¹⁷⁻¹⁹⁾。白水 1 号冰川(27°07.26′N, 100°12.27′E)位于横断山脉玉龙雪山主峰扇子陡南坡,1982 年长度为 1.52 km、面积 2.70 km²、平衡线高度 4 800 m、末端海拔 4 100 m,属于冬春季积累型冰川⁽²⁰⁻²¹⁾;粒雪盆广阔,表面崎岖不平,裂隙发育,冰崩、雪崩时常发生⁽²²⁾,是玉龙雪山最大的冰川,也是中国冰川旅游开发最早的一条⁽²³⁾。

乌源 1 号冰川的物质平衡、平衡线高度和末端

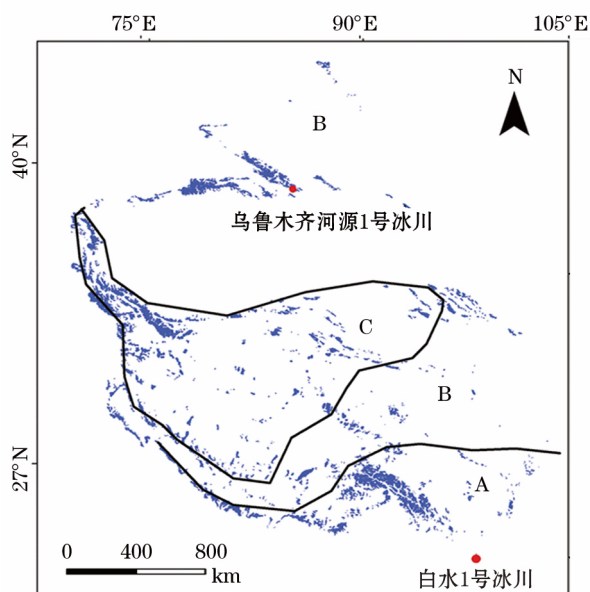


图 1 中国大陆型冰川和海洋型冰川分布及参照冰川位置
Fig. 1 Distribution of continental glacier and temperate glacier in China and locations of reference glacier

表 2 1957—2012 年乌源 1 号冰川和白水 1 号冰川基本情况
Tab. 2 Basic information of Glacier No. 1 at the headwaters of the Urumqi River and Baishui Glacier No. 1 during the period of 1957 - 2012

年份	乌源 1 号冰川			白水 1 号冰川		
	面积 /km ²	平均厚度 /m	冰储量 /10 ⁴ m ³	面积 /km ²	平均厚度 /m	冰储量 /10 ⁴ m ³
1957				1.52	49.0	7 448
1962	1.91	55.1	10 736.7			
1981		55.1	10 296.2			
1992	1.83					
2001	1.71	51.5	8 797.9	1.361	47.0	6 396.7
2006	1.68	48.4	8 115.0			
2009				1.229	45.3	5 567.4
2012	1.59					

变化数据来源于天山冰川观测试验站的观测数据;活动层温度⁽²⁴⁾、厚度⁽¹⁷⁾、运动速度⁽²⁵⁾、面积⁽²⁶⁾和储量⁽¹⁷⁾数据来源于文献;气象数据采用大西沟气象站(距乌源 1 号冰川约 2 km,海拔 3 539 m)观测数据。白水 1 号冰川的物质平衡^(20, 27-28)、平衡线高度^(21, 27)、活动层温度⁽²⁹⁾、运动速度^(20, 22)、面积⁽²⁹⁾和末端位置⁽³⁰⁾数据参阅相关文献,以及中国科学院玉龙雪山冰川与环境观测研究站观测数据;2001 年和 2009 年的冰川平均厚度与冰储量由经验公式 $H = -11.32 + 53.21S^{0.3}$ 和 $V = S \cdot H$ (H 为冰川平均厚度 (m), V 为冰储量 (m³), S 为冰川面积 (km²)] 计算得到(表 2);气象数据采用中国气象科学数据共享服务网丽江站(海拔 2 393 m)气象数据。

2 结果分析

2.1 冰川物质平衡变化

冰川物质平衡是冰川积累量与消融量的代数和,是冰川发育水热条件的综合反映⁽³¹⁾,也是联结气候变化和冰川变化的中间环节。图 2 表明,乌源 1 号冰川在 20 世纪 60—80 年代中期年物质平衡正负波动,累积物质平衡亏损逐渐增大,但增幅不大;80 年代中期开始,年物质平衡和累积物质平衡亏损进一步加大;90 年代中后期,年物质平衡和累积物质平衡均呈大幅度亏损。1958/1959—2012/2013 年,乌源 1 号冰川年均物质平衡值为 -312 mm,累积物质平衡值达 -17 171 mm。白水 1 号冰川在 20 世纪 60—80 年代年物质平衡正负波动,累积物质平衡基本为负值,表明总体上冰川物质亏损大于收入;80 年代后,年物质亏损加大,累积物质平衡呈剧烈

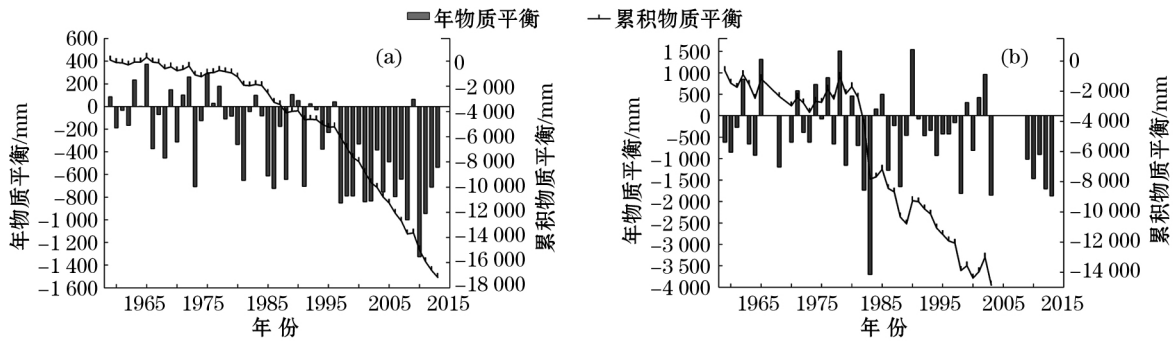


图2 乌源1号冰川(a)和白水1号冰川(b)年物质平衡和累积物质平衡变化

Fig. 2 Variations of annual mass balance and cumulative mass balance of Glacier No. 1 (a) at the headwaters of the Urumqi River and Baishui Glacier No. 1 (b)

表3 乌源1号冰川和白水1号冰川阶段平均物质平衡值对比⁽²¹⁻²⁷⁾

Tab. 3 Comparison of the mean mass balance between Glacier No. 1 at the headwaters of the Urumqi River and Baishui Glacier No. 1⁽²¹⁻²⁷⁾

时间段	乌源1号冰川/mm	白水1号冰川/mm	差距/倍
1961/1962-1970/1971	-52	-933	17.9
1971/1972-1980/1981	-126	-941	7.5
1981/1982-1990/1991	-273	-1 169	4.3
1991/1992-2000/2001	-417	-1 075	2.6
2008/2009-2012/2013	-692	-1 394	2.0

的下降趋势;90年代以来,虽然累积物质平衡亏损速率较80年代小,但年物质平衡亏损非常严重。20世纪中期以来,物质平衡亏损是乌源1号冰川主要态势,并且均在80年代出现了加速趋势;而白水1号冰川年物质平衡波动幅度较大,并且物质平衡亏损差距有逐渐缩小和趋稳的趋势(表3)。

2.2 冰川平衡线高度变化

冰川平衡线高度是指冰川上年物质积累与年物质损耗相等位置处的海拔高度,控制着冰川的规模和类型⁽³²⁾。乌源1号冰川平衡线高度在1959—1985年呈平稳波动趋势,1985年后呈上升趋势,1995年后上升趋势更加明显⁽¹⁹⁾。2010/2011年超出了冰川顶端,整个冰川已处于消融区。白水1号冰川平衡线高度也呈上升趋势,1982年为4 800 m,2009年为4 972 m,之后整个冰川处于消融区⁽²¹⁻²⁷⁾。比较发现,20世纪中期以来,两条冰川平衡线高度整体在波动中上升,近几年有超出冰川顶端的现象。乌源1号冰川平衡线高度在1958/1959—2008/2009年的波动范围为3 948~4 192 m,白水1号冰川平衡线高度在1951/1952—2008/2009年的

波动范围为4 500~4 972 m⁽²⁷⁾,几乎是乌源1号冰川平衡线高度波动幅度的2倍。段克勤等⁽³³⁾研究表明,自1970年以来,青藏高原东部冰川平衡线高度以2~8 m·a⁻¹的速率上升,高原北部比南部升高快。

2.3 冰川温度变化

冰川温度是冰川物理状态的一种表现,反映冰川发育的水热条件和动力条件,其变化表明冰川内部冷储的变化,预示着冰川对气候响应敏感性的变化⁽²⁴⁾。1986—2001年,乌源1号冰川在海拔3 840 m左右,深约10 m处的冰温升高了约0.9℃(0.06℃·a⁻¹);2006年又升高了约0.4℃(0.08℃·a⁻¹)。20 a间平均升高速率为0.061 9℃·a⁻¹。白水1号冰川在1982年7月11日,海拔4 600 m处的表层最低温度(4.3 m处)为-0.8℃;2009年7月10日,海拔4 621 m处的表层最低温度为-0.39℃,较1982年升高了0.41℃⁽²⁹⁾。27 a间平均升高速率为0.014 6℃·a⁻¹。表明自20世纪80年代以来,两条冰川活动层温度均呈上升趋势,并且乌源1号冰川的升高幅度大于白水1号冰川。

2.4 冰川厚度和运动速度变化

冰川厚度是冰川的重要物理参数之一,与冰川运动速度变化呈指数变化。从表2可知,乌源1号冰川厚度在1962—1981年变化率较小,1981—2001年的减薄速率为0.18 m·a⁻¹,2001—2006年为0.62 m·a⁻¹,减薄呈加速趋势⁽¹⁷⁾;白水1号冰川的减薄速率在1957—2001年为0.05 m·a⁻¹,2001—2009年为0.21 m·a⁻¹,也呈加速减薄趋势。但白水1号冰川的减薄量(3.7 m)和减薄速率(0.07 m·a⁻¹)均小于乌源1号冰川的减薄量(6.7 m)和减薄速率(0.15 m·a⁻¹)。

表 4 乌源 1 号冰川和白水 1 号冰川表面运动速度变化
Tab. 4 Variation of surface movement of Glacier No. 1 at the headwaters of the Urumqi River and Baishui Glacier No. 1

时间	乌源 1 号冰川 /($\text{m} \cdot \text{a}^{-1}$)	白水 1 号冰川	备注
1959—1962	11.95		文献(26)
1973	9.52		文献(26)
1980—1990	5.27	1.06~1.07 $\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$	文献(21, 26), 白水 1 号冰川为 1982 年数据
1991—2000	4.70		文献(26)
2011		28.08~56.88 $\text{m} \cdot \text{a}^{-1}$	文献(23)

尽管冰川温度升高产生的冰川融水有利于冰川运动速度的增加,但冰川厚度的减薄大大减轻了冰川的重力势能,降低了乌源 1 号冰川和白水 1 号冰川的表面运动速度^(22-23, 34)。乌源 1 号冰川表面运动速度在 20 世纪 80 年代后减缓趋势更加明显,1980—2000 年的运动速度仅是 1959—1973 年的 46.7%⁽²⁵⁾,但 21 世纪初运动速度趋于稳定⁽³⁴⁾。两条冰川的表面运动速度差距在逐年缩小,乌源 1 号冰川的运动速度变率更大(表 4)。若将运动速度换算为年尺度比较,目前白水 1 号冰川(28.08~56.88 $\text{m} \cdot \text{a}^{-1}$)是乌源 1 号冰川(4.7 $\text{m} \cdot \text{a}^{-1}$)的 6~12 倍。

2.5 冰川规模变化

冰川长度的变化反映在冰川末端位置的变化上,其变化幅度因气候环境、地理位置、冰川规模和冰川形态等不同而存在区域性差异和阶段性差异⁽³⁵⁾。乌源 1 号冰川在 1962—1992 年退缩了 138.71 m,速率为 4.3 $\text{m} \cdot \text{a}^{-1}$,1993 年分离为东、西两支。1993—2013 年,退缩速率东支为 3.98 $\text{m} \cdot \text{a}^{-1}$,西支为 5.86 $\text{m} \cdot \text{a}^{-1}$ 。随着冰川后退,其末端海拔高度从 1962 年的 3 736 m 上升到 1980 年的 3 746 m,2005 年东支为 3 777 m,与 1980 年相比上升了 31 $\text{m}^{(24)}$ 。白水 1 号冰川末端海拔在 1957—1982 年下降了 435 m,冰舌前进了 800 m,1982 年之后冰川退缩成为主要趋势。末端海拔上升速率在 1982—1997 年为 -7.3 $\text{m} \cdot \text{a}^{-1}$,1998—2013 年为 14.8 $\text{m} \cdot \text{a}^{-1}$ 。同时冰舌退缩速度也不断加快,1982—1997 年为 -9.4 $\text{m} \cdot (10\text{a})^{-1}$,1998—2008 年为 -23 $\text{mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ ⁽³⁰⁾。表明 20 世纪中期以来,两条冰川末端整体上呈加速退缩趋势,并且白水 1 号冰川的退缩速度大于乌源 1 号冰川。

冰川末端的退缩往往伴随着冰川面积的减小。1962—2012 年,乌源 1 号冰川面积缩减了 0.32 km^2 ,平均每年减少约 0.006 4 km^2 。其中 1962—1992 年缩减了 0.07 km^2 ,1992—2012 年缩减了 0.24 km^2 ,是 1962—1992 年的 3.4 倍。白水 1 号冰川在 1957—2009 年缩减了 0.29 km^2 ,平均每年减少约 0.005 5 km^2 。其中 1957—2001 年缩减了 0.16 km^2 ,2001—2009 年缩减了 0.132 km^2 ,是 1957—2001 年的 4.3 倍。比较发现,20 世纪中期以来,两条冰川面积呈加速减小趋势,白水 1 号冰川相对量变化(19%)大于乌源 1 号冰川(16.8%),但面积变化的年平均速率上乌源 1 号冰川大于白水 1 号冰川。

冰储量的变化与冰川厚度(或面积)变化呈正相关。乌源 1 号冰川储量在 1962—2006 年减少了 $2\ 621.7 \times 10^4 \text{ m}^3$,减少量 $59.6 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ (0.6%),其中 1962—1981 年减少 $23.2 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$,2001—2006 年达 $136.6 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$,增加了 5 倍之多⁽¹⁷⁾。白水 1 号冰川在 1957—2009 年减少了 $1\ 880.6 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$,减少 $36.2 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ (0.5%),其中 1957—2001 年减少 $22.4 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$,2001—2009 年达 $103.7 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$,增加了 4 倍之多。比较发现,20 世纪中期以来,两条冰川的冰储量均呈加速减少趋势,在相对量上白水 1 号冰川(25.2%)大于乌源 1 号冰川(24.4%),但在年变化率上乌源 1 号冰川大于白水 1 号冰川。

3 讨论与结论

3.1 讨论

3.1.1 中国大陆型冰川和海洋型冰川消融退缩的原因 水、热条件是影响冰川发育的主要气候因子。降水决定冰川积累,气温决定冰川消融,其共同决定着冰川的性质、发育和演化⁽³⁶⁾。大西沟气象数据表明(图 3a、图 4a),乌源 1 号冰川区的气温和降水在 1959—2009 年呈波动上升趋势,1985 年前后均处于一个较低的时期,1997 年以来上升趋势比较明显,50 a 间平均气温和降水量分别为 -5.1 $^{\circ}\text{C}$ 和 457.9 mm。丽江市的气温和降水在也波动中上升(图 3b、图 4b),其中 1983 年的降水量为研究时段内的最低值,1998 年后该区域升温幅度加快,1951—2011 年平均气温和降水量分别为 12.77 $^{\circ}\text{C}$ 和 959.03 mm。气温上升,尤其是正积温的上升,直接会造成冰川加

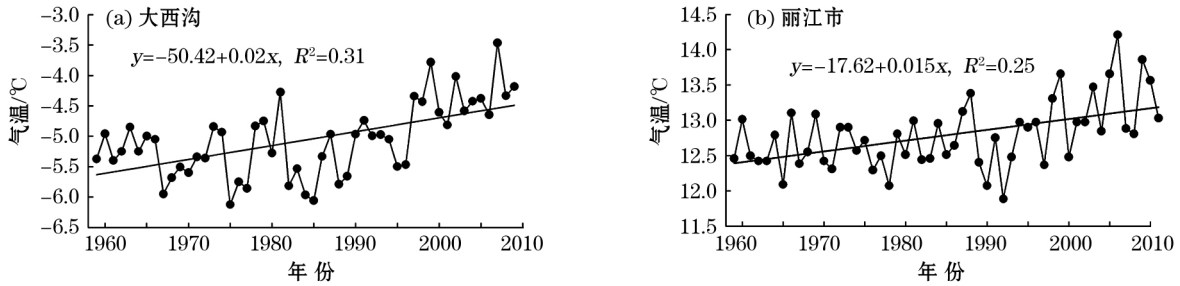


图3 1959—2009年大西沟(a)和丽江市(b)年平均气温变化

Fig. 3 Change of annual average temperature in Daxigou (a) and Lijiang City (b) during the period of 1959–2009

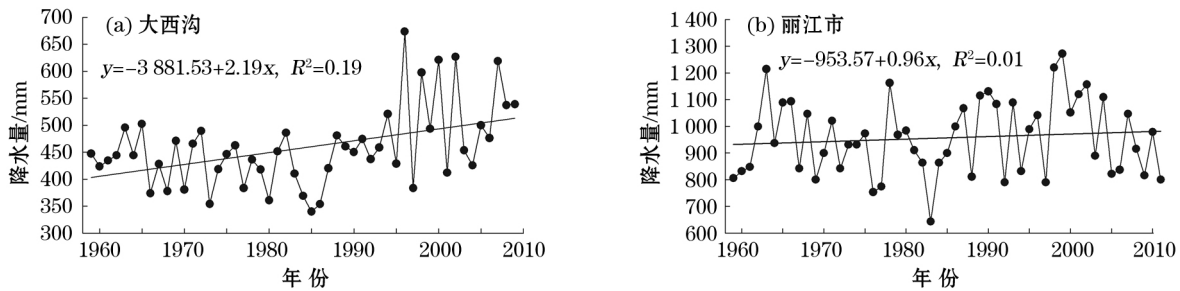


图4 1959—2009年大西沟(a)和丽江市(b)降水变化

Fig. 4 Change of precipitation in Daxigou (a) and Lijiang City (b) during the period of 1959–2009

速消融⁽³⁷⁾。而当气温上升到一定程度后,冰川对气温的敏感性会大于对降水的敏感性⁽²⁴⁾。气温升高和降水变化,直接导致了乌源1号冰川和白水1号冰川积累量的减少和消融量的增加,并且物质平衡呈加速亏损态势。冰川物质平衡的亏损,进一步导致了冰川平衡线高度上升、活动层温度升高、厚度减薄、表面运动速度降低、末端退缩、面积减小和储量减少。也就是说,20世纪中期以来,中国大陆型冰川和海洋型冰川消融退缩的主要原因是气温上升。气温上升对冰川的消融量大于降水对冰川的积累量,促使中国大陆型冰川和海洋型冰川以消融退缩为主。

冰面反照率降低的正反馈作用也加速了中国大陆型冰川和海洋型冰川的消融⁽³⁸⁾。冰面反照率下降,冰川对太阳辐射能量的吸收就会增强,引起冰川加速消融。已有研究表明,乌源1号冰川表面反照率由于受到高含量的冰尘和矿物粉尘的影响而显著降低⁽¹⁷⁾;唐古拉山小冬克玛底冰川物质平衡受到青藏公路维修导致表面反照率急剧降低的影响⁽³⁹⁾。中国西部雪冰黑碳的平均浓度为 $63 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$,平均辐射强度为 $(+4.0 \pm 2.0) \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,与周边的排放源(中亚、南亚等)密不可分,并且对目前冰川表面辐射平衡有一定影响⁽⁴⁰⁾。

3.1.2 中国大陆型冰川和海洋型冰川变化差异性分析

(1) 气候环境不同。在降水上,以乌源1号冰川为代表的大陆型冰川区,主要受西风环流影响(在青藏高原及局部山地,也受到高原季风环流和山区局地气流影响),远离水汽来源,冰川的补给量小。并且随着大陆度增强,在青藏高原内部山地、西昆仑山东段和祁连山西段,出现中国西部降水量最少的山区,冰川补给也愈加集中在夏季⁽²⁾。而以白水1号冰川为代表的海洋型冰川区,在夏季有西南季风携带的孟加拉湾和印度洋水汽,东南季风携带的西太平洋水汽⁽⁴¹⁾,降水充沛,冰川积累量大。在气温上,大陆型冰川位于更高的海拔或纬度地区,拥有更低的温度条件,冷储条件更加丰富。气候环境的差异,导致了两类冰川积累和消融的初始差异。

(2) 对气候变化敏感性不同。大陆型冰川物质平衡水平低、冰川作用能小,稳定性系数大,响应气候变化相对缓慢⁽³¹⁾。而海洋型冰川与此相反,冰川的稳定性系数小,所以响应气候变化更加敏感,气候的微小波动就会引起冰川的大幅度变化⁽⁴²⁾。研究表明,中国海洋型冰川、亚大陆型冰川、极大陆型冰川平衡线高度对气温的敏感性分别为 $140 \text{ m} \cdot \text{°C}^{-1}$ 、 $80 \text{ m} \cdot \text{°C}^{-1}$ 、 $55 \text{ m} \cdot \text{°C}^{-1}$ ⁽³⁾。平衡线高度

的变化作为冰川响应气候变化最直接的指标,表明不同类型冰川响应气候变化的差异。

(3) 加速消融机理不同。冰川的冰体温度升高,减少了冰川冷储,提高了冰川响应气候变化的敏感性,这是大陆型冰川的一个加速消融机理⁽³⁷⁻³⁸⁾。而海洋型冰川区的降雨量增加、降雪量减少,以及冰川的破碎和崩塌加剧,破坏了冰川的整体性和自适应机制,增加了冰川的消融面积,这是海洋型冰川不同于大陆型冰川的另一个加速消融机理⁽³⁸⁾。

(4) 大气环流变化和气温升温速率及波动振幅不同。近 50 a 来,喜马拉雅山(除喀喇昆仑山外)和阿尔泰山冰川退缩幅度为全国之最,除了气温升高因素外,分别与印度洋季风减弱、固态降水量减少和北极地区暖流增强有关;而帕米尔东部地区冰川退缩相对缓慢,可能与西风环流加强导致的高海拔降水量增加有关⁽⁴³⁾。从升温速率看,1959—2009 年,大西沟和丽江市的升温速率分别为 $0.23\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 和 $0.15\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$,气温变化幅度分别为 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。气温的升温速率及波动振幅对冰川系统的变化具有明显的影响⁽⁴³⁾。大气环流变化、大陆型冰川区的升温速率及波动振幅大于海洋型冰川区⁽⁸⁾,是大陆型冰川变率增大或者大于海洋型冰川,造成与海洋型冰川变化幅度有逐渐缩小或趋稳迹象。

苏珍等⁽⁵⁾研究表明,中国海洋型冰川区从小冰期盛时至今平均气温升高较我国其他冰川区小,同期冰川面积减小的相对量比其他冰川区大。而 19 世纪末以来,全球气温升高尤以北半球中、高纬度陆地地区明显⁽¹⁴⁾。这意味着,中国大陆型冰川和海洋型冰川变化机理,在一定程度上可以反映北半球,甚至全球大陆型冰川和海洋型冰川变化机理。

3.2 结论

(1) 大陆型冰川和海洋型冰川物质平衡整体上处于亏损状态,尤其是 20 世纪 80 年代以来,加速亏损趋势显著;大陆型冰川年物质平衡变化幅度小于海洋型冰川,但年物质平衡亏损加大,导致与海洋型冰川物质平衡差距有逐渐缩小和趋稳的趋势。

(2) 大陆型冰川和海洋型冰川平衡线高度总体上处于上升态势,近几年有超出冰川顶端的现象;大陆型冰川平衡线高度波动幅度小于海洋型冰川,但升高速度有快于海洋型冰川的表现。

(3) 大陆型冰川和海洋型冰川活动层温度在 80 年代以来均有升高,大陆型冰川活动层温度升高

幅度略大于海洋型冰川。

(4) 大陆型冰川和海洋型冰川厚度逐年减薄、运动速度逐年降低;某些大陆型冰川的厚度和运动速度变化率可能较大,不同性质但规模相当的冰川之间的运动速度差距逐渐缩小。

(5) 大陆型冰川和海洋型冰川以末端退缩、面积减小和储量减少为主要趋势,20 世纪 80 年代以来有显著加速趋势;大陆型冰川面积和储量年变化率大于海洋型冰川,但相对量变化小于海洋型冰川;海洋型冰川末端变化幅度大于大陆型冰川。

(6) 大陆型冰川和海洋型冰川消融退缩的主要原因是气温上升,重要影响因素是冰面反照率降低,而气候环境、响应气候变化的敏感性、加速消融机理、大气环流变化和升温速率及波动幅度等差异,是造成两者变化差异性的主要原因。

参考文献(References):

- (1) 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(J).地理学报,2015,70(1):3-16. (Liu Shiyin, Yao Xiaojun, Guo Wanqin et al. The contemporary glaciers in China based on the second Chinese glacier inventory (J). Acta Geographica Sinica 2015, 70(1): 3-16.)
- (2) 施雅风,黄茂桓,任炳辉,等.中国冰川与环境:现在、过去和未来(M).北京:科学出版社,2000:12-285. (Shi Yafeng, Huang Maohuan, Ren Binghui, et al. Glaciers and Their Environment in China: The Present, Past and Future (M). Beijing: Science Press, 2000: 12-285.)
- (3) 丁一汇.中国西部环境变化的预测(M).北京:科学出版社,2002:166-173. (Ding Yihui. Environmental Characteristic of West China and Its Evolution (M). Beijing: Science Press, 2002: 166-173.)
- (4) 施雅风,谢自楚.中国现代冰川的基本特征(J).地理学报,1964,30(3):183-208. (Shi Yafeng, Xie Zichu. The characteristics of existing glaciers in China (J). Acta Geographica Sinica, 1964, 30(3): 183-208.)
- (5) 苏珍,施雅风.小冰期以来中国季风温冰川对全球变暖的响应(J).冰川冻土,2000,22(3):223-229. (Su Zhen, Shi Yafeng. Response of monsoonal temperate glaciers in China to global warming since the little ice age (J). Journal of Glaciology and Geocryology 2000, 22(3): 223-229.)
- (6) 杨针娘.中国冰川水资源(M).兰州:甘肃科学技术出版社,1991. (Yang Zhenliang. Glacier Water Resources in China (M). Lanzhou: Gansu Science and Technology Press, 1991.)
- (7) 刘时银,蒲健辰,邓晓峰,等.中国冰川图鉴(M).上海:上海科学普及出版社,2014:38-41. (Liu Shiyin, Pu Jianchen, Deng Xiaofeng et al. Glaciers and Glacier Landscapes in China (M). Shanghai: Shanghai Popular Science Press, 2014: 38-41.)
- (8) 秦大河,董文杰,罗勇.中国气候与环境演变(M).北京:气象出版社,2012:116-121. (Qin Dahe, Dong Wenjie, Luo Yong. Climate and Environment Change in China (M). Beijing: China Meteorological Press, 2012: 116-121.)
- (9) 李吉均,郑本兴,杨锡金,等.西藏冰川(M).北京:科学出版

- 社,1986:33. (Li Jijun,Zhen Benxing,Yang Xijin,et al. Glaciers in Tibet (M). Beijing: Science Press,1986:33.)
- (10) 李慧林,李忠勤,沈永平等. 冰川动力学模式及其对中国冰川变化预测的适应性(J). 冰川冻土,2007,29(2):201-208. (Li Huilin,Li Zhongqin,Shen Yongping,et al. Glacier dynamics models and their applicability for the glacier in China (J). Journal of Glaciology and Geocryology,2007,29(2):201-208.)
- (11) Haeberli W,Barry R,Ciblar J. Glacier monitoring within the global climate observing system (J). Annals of Glaciology,2000,31:241-246.)
- (12) Stocker T D,Qin G Plattner,Tignor M,et al. IPCC,2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis (M). Cambridge,UK: Cambridge University Press,2013.
- (13) 李开明,李忠勤,高闻宇等. 近期新疆东天山冰川退缩及其对水资源影响(J). 科学通报,2011,56(32):2708-2716. (Li Kaiming,Li Zhongqin,Gao Wenyu,et al. Recent glacial retreat and its effect on water resources in Eastern Xinjiang (J). Chinese Science Bulletin,2011,56(32):2708-2716.)
- (14) 刘时银,丁永建,李晶等. 中国西部冰川对近期气候变暖的响应(J). 第四纪研究,2006,26(5):762-771. (Liu Shiyin,Ding Yongjian,Li Jing,et al. Glaciers in response to recent climate warming in Western China (J). Quaternary Sciences,2006,26(5):762-771.)
- (15) 秦大河,效存德,丁永建等. 国际冰冻圈研究动态和我国冰冻圈研究的现状与展望(J). 应用气象学报,2006,17(6):649-656. (Qin Dahe,Xiao Cunde,Ding Yongjian,et al. Progress on cryospheric studies by international and chinese communities and perspectives (J). Journal of Applied Meteorological Science,2006,17(6):649-656.)
- (16) 王宗太,苏宏超. 世界和中国的冰川分布及其水资源意义(J). 冰川冻土,2003,25(5):498-503. (Wang Zongtai,Su Hongchao. Glaciers in the world and China: Distribution and their significance as water resources (J). Journal of Glaciology and Geocryology,2003,25(5):498-503.)
- (17) 李忠勤. 天山乌鲁木齐河源1号冰川近期研究与应用(M). 北京:气象出版社,2011:1-66. (Li Zhongqin. Recent Study and Application of Tianshan Urumqi River Source Glacier No.1 (M). Beijing: China Meteorological Press,2011:1-66.)
- (18) 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40 a 观测事实(J). 冰川冻土,2005,25(2):117-123. (Li Zhongqin,Han Tianding,Jing Zhefan,et al. A summary of 40 year observed variation facts of climate and Glacier No.1 at the headwaters of Urumqi River,Tianshan,China (J). Journal of Glaciology and Geocryology,2005,25(2):117-123.)
- (19) 董志文,秦大河,任贾文等. 近50年来天山乌鲁木齐河源1号冰川平衡线高度对气候变化的响应(J). 科学通报,2013,58(9):825-832. (Dong Zhiwen,Qin Dahe,Ren Jiawen,et al. Variations in the equilibrium line altitude of Urumqi Glacier No.1,Tianshan Mountains,over the past 50 years (J). Chinese Science Bulletin,2013,58(9):825-832.)
- (20) 李吉均,苏珍. 横断山冰川(M). 北京:科学出版社,1996:1-132. (Li Jijun,Su Zhen. Glaciers in the Hengduan Mountains (M). Beijing: Science Press,1996:1-132.)
- (21) 杜建括,何元庆,李双等. 横断山区典型海洋型冰川物质平衡研究(J). 地理学报,2015,70(9):1415-1422. (Du Jiankuo,He Yuanqing,Li Shuang,et al. Mass balance of a typical monsoonal temperate glacier in Hengduan Mountains Region (J). Acta Geographica Sinica,2015,70(9):1415-1422.)
- (22) 刘力,井哲帆,杜建括. 玉龙雪山白水1号冰川运动速度测量与研究(J). 地球科学进展,2012,27(9):987-992. (Liu Li,Jing Zhefan,Du Jiankuo. A study of velocity of Baishui No.1 Glacier,Mt.Yulong (J). Advances in Earth Science,2012,27(9):987-992.)
- (23) 谢自楚,刘潮海. 冰川学导论(M). 上海:上海科学普及出版社,2010. (Xie Zichu,Liu Chaohai. Introduction of Glaciology (M). Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers,2010.)
- (24) 李忠勤,沈永平,王飞腾等. 冰川消融对气候变化的响应:以天山乌鲁木齐河源1号冰川为例(J). 冰川冻土,2007,29(3):333-342. (Li Zhongqin,Shen Yongping,Wang Feiteng,et al. Response of glacier melting to climate change: Take Urumqi Glacier No.1 as example (J). Journal of Glaciology and Geocryology,2007,29(3):333-342.)
- (25) 焦克勤,井哲帆,韩添丁等. 42 a 来天山乌鲁木齐河源1号冰川变化及趋势预测(J). 冰川冻土,2004,26(3):253-260. (Jiao Keqin,Jing Zhefan,Han Tianding,et al. Variation of the Glacier No.1 at the headwaters of the Urumqi River in the Tianshan Mountains during the past 42 years and its trend prediction (J). Journal of Glaciology and Geocryology,2004,26(3):253-260.)
- (26) 姚红兵,李忠勤,王璞玉等. 近50 a 天山乌鲁木齐河源1号冰川变化分析(J). 干旱区研究,2015,32(3):442-447. (Yao Hongbin,Li Zhongqin,Wang Puyu,et al. Area variation analysis of Urumqi Glacier No.1 in past 50 decades (J). Arid Zone Research,2015,32(3):442-447.)
- (27) 张忠林. 中国代表性海洋型冰川对气候变化的数值模拟与敏感性分析(D). 兰州:中国科学院寒区旱区环境与工程研究所,2005:75-76. (Zhang Zhonglin. Numerical Simulation and Sensitivity Analysis of Representative Temperate-glacier to Climate Change in China (D). Lanzhou: Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute,Chinese Academy of Sciences,2005:75-76.)
- (28) 秦大河,周波涛,效存德. 冰冻圈变化及其对中国气候的影响(J). 气象学报,2014,72(5):869-879. (Qin Dahe,Zhou Botao,Xiao Cunde. Progress in studies of cryospheric changes and their impacts on climate of China (J). Acta Meteorologica Sinica,2014,72(5):869-879.)
- (29) 杜建括,辛惠娟,何元庆等. 玉龙雪山现代季风温冰川对气候变化的响应(J). 地理科学,2013,33(7):890-896. (Du Jiankuo,Xin Huijuan,He Yuanqing,et al. Response of modern monsoon temperate glacier to climate change in Yulong Mountain (J). Scientia Geographica Sinica,2013,33(7):890-896.)
- (30) 辛惠娟,何元庆,张涛等. 青藏高原东南缘丽江玉龙雪山气候变化特征及其对冰川变化的影响(J). 地球科学进展,2013,28(11):1257-1268. (Xin Huijuan,He Yuanqing,Zhang Tao,et al. The features of climate variation and glacier response in Mt.Yulong,Southeastern Tibetan Plateau (J). Advances in Earth Science,2013,28(11):1257-1268.)
- (31) 谢自楚. 冰川物质平衡及其与冰川特征的关系(J). 冰川冻土,1980,2(4):1-10. (Xie Zichu. Mass balance of glaciers and its relationship with characteristics of glaciers (J). Journal of Glaciology and Geocryology,1980,2(4):1-10.)
- (32) 苏珍,赵井东,郑本兴. 中国现代冰川平衡线分布特征与末次冰期平衡线下降值研究(J). 冰川冻土,2014,36(1):9-19. (Su Zhen,Zhao Jingdong,Zheng Benxing. Distribution and features of the glaciers' ELAs and the decrease of ELAs during the Last Glaciation in China (J). Journal of Glaciology and Geocryology,2014,36(1):9-19.)

- (33) 段克勤, 姚檀栋, 石培宏, 等. 青藏高原东部冰川平衡线高度的模拟及预测 (J). 中国科学: 地球科学, 2017, 47(1): 104–113. (Duan Keqin, Yao Tandong, Shi Peihong, et al. Simulation and prediction of equilibrium line altitude of glaciers in the eastern Tibetan Plateau (J). *Scientia Sinica Terrae*, 2017, 47(1): 104–113.)
- (34) 周在明, 井哲帆, 赵淑惠, 等. 冰川运动速度对气候变化的响应: 以天山乌鲁木齐河源 1 号冰川为例 (J). 地球学报, 2010, 31(2): 237–244. (Zhou Zaiming, Jing Zhefan, Zhao Shuhui, et al. The response of glacier velocity to climate change: A case study of Urumqi Glacier No. 1 (J). *Acta Geoscientica Sinica*, 2010, 31(2): 237–244.)
- (35) 李珊珊, 张明军, 李忠勤, 等. 1960—2009 年中国天山现代冰川末端变化特征 (J). 干旱区研究, 2013, 30(2): 378–384. (Li Shanshan, Zhang Mingjun, Li Zhongqin, et al. Variation of glacier terminuses in the Tianshan Mountains, China, during the period of 1960–2009 (J). *Arid Zone Research* 2013, 30(2): 378–384.)
- (36) 施雅风, 刘潮海, 王宗太, 等. 简明中国冰川目录 (M). 上海: 上海科学普及出版社, 2005. (Shi Yafeng, Liu Chao Hai, Wang Zongtai, et al. A Concise China Glacier Inventory (M). Shanghai: Shanghai Science Popularization Press, 2005.)
- (37) 李忠勤. 中国冰川定位观测研究 50 年: 中国科学院天山冰川观测试验站建站 50 周年文集 (M). 北京: 气象出版社, 2011: 3–20. (Li Zhongqin. 50-year Study of the Location Observation of the Tianshan Glacier in China: The 50th Anniversary of Curpus of Test Station of the Tianshan Glacier Observation of the Chinese Academy of Sciences (M). Beijing: China Meteorological Press, 2011: 3–20.)
- (38) 苏勃, 李忠勤, 张明军, 等. 大陆型冰川与海洋型冰川物质平衡对比研究: 以天山和阿尔卑斯山典型冰川为例 (J). 冰川冻土, 2015, 37(5): 1131–1140. (Su Bo, Li Zhongqin, Zhang Mingjun, et al. A comparative study on mass balance between the continental glaciers and the temperate glaciers: Taking the typical glaciers in the Tianshan Mountains and the Alps as examples (J). *Journal of Glaciology and Geocryology* 2015, 37(5): 1131–1140.)
- (39) 张健, 何晓波, 叶柏生, 等. 近期小冬克玛底冰川物质平衡变化及其影响因素分析 (J). 冰川冻土, 2013, 35(2): 263–271. (Zhang Jian, He Xiaobo, Ye Baisheng, et al. Recent variation of mass balance of the Xiao Dongkemadi Glacier in the Tanggula Range and its influencing factors (J). *Journal of Glaciology and Geocryology* 2013, 35(2): 263–271.)
- (40) 明镜, 效存德, 杜振彩, 等. 中国西部雪冰中的黑碳及其辐射强迫 (J). 气候变化研究进展, 2009, 5(6): 328–335. (Ming Jing, Xiao Cunde, Du Zhencai, et al. Black carbon in snow/ice of West China and its radiative forcing (J). *Advances in Climate Change Research* 2009, 5(6): 328–335.)
- (41) 何元庆, 张忠林, 姚檀栋, 等. 中国季风温冰川区近代气候变化与冰川动态 (J). 地理学报, 2003, 58(4): 550–558. (He Yuanqing, Zhang Zhonglin, Yao Tandong, et al. Modern changes of the climate and glaciers in China's monsoonal temperate-glacier region (J). *Acta Geographica Sinica* 2003, 58(4): 550–558.)
- (42) 施雅风, 刘时银. 中国冰川对 21 世纪全球变暖响应的预估 (J). 科学通报, 2000, 45(4): 434–438. (Shi Yafeng, Liu Shiyin. Estimate No. 1 the response No. 1 glaciers in China to the global warming-up in the 21th century (J). *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(4): 434–438.)
- (43) 李巧媛, 谢自楚. 周期性升温下冰川系统的变化预测研究: 以长江流域冰川系为例 (J). 冰川冻土, 2008, 30(4): 583–589. (Li Qiaoyuan, Xie Zichu. Prediction of the glacier system's variation under periodical warming: Taking the glacier system in Yangtze valley as an example (J). *Journal of Glaciology and Geocryology* 2008, 30(4): 583–589.)

Variation of Continental Glacier and Temperate Glacier in China: A Case Study of Glacier No. 1 at the Headwaters of the Urumqi River and Baishui Glacier No. 1

LI Kai-ming¹, CHEN Shi-feng¹, KANG Ling-fen¹, LI Zhong-qin^{1,2}, LI Sheng-de¹, WEN Qiang¹

(1. School of Geography and Urban-rural Planning Lanzhou City University Lanzhou 730070 Gansu, China;

2. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences Lanzhou 730000 Gansu, China)

Abstract: It is of great scientific significances and realistic values to comparatively research continental glacier and temperate glacier change. As an indicator of climate change, glacier change has attracted many researchers to pay great attentions for a long time. This paper carried out a comparative study on the changes of Glacier No. 1 (a continental glacier) at the headwaters of the Urumqi River and of Glacier No. 1 (a temperate glacier) in the Baishui River Basin in the Yulong Mountain under global warming since the 1950s. The results showed that the glacial mass loss and equilibrium-line altitude as well as the temperature in mobile layer increased, glacier depth thinned, flow velocity slowed down, glacier terminus retreated, and the glacier area and volume reduced. The change rate of continental glacier increased or higher than that of temperate glacier, and the change gaps of two type glaciers reduced gradually or stabilized. Further analysis revealed that the ablation and retreat of two type glaciers was mainly caused by temperature increase, and then by the reduction of ice-surface albedo, and the differences between two type glaciers were the climatic environment, sensitivity of response to climate change, the mechanism of accelerated ablation, and others.

Key words: glacier change; continental glacier; temperate glacier; mass balance; glacier depth; Urumqi River Glacier No. 1; Yulong Mountain Baishui River Glacier No. 1