

近 20 年乌鲁木齐河源 1 号冰川东支和西支物质平衡变化^{*}

张国飞^{1**} 李忠勤^{1,2} 王卫东¹ 王文彬²

(¹西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070; ²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/中国科学院天山冰川站, 兰州 730000)

摘 要 利用乌鲁木齐河源 1 号冰川东支和西支 1990/1991—2009/2010 年的物质平衡资料, 对比分析了东、西支的物质平衡变化。结果表明: 东支的物质亏损量大于西支, 平衡线高度 (ELA) 总体上低于西支, 积累区比率 (AAR) 下降幅度大于西支; 东支平均物质平衡 $-582 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, 累积物质平衡为 -11638 mm , 西支平均物质平衡 $-485 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, 累积物质平衡 -9692 mm ; 东、西支平衡线高度均呈现升高趋势, 分别升高了 143、131 m; 东、西支 AAR 下降了 29.8%、19.6%。分析表明, 物质平衡与 ELA 呈显著负相关, 与 AAR 呈显著正相关, 东、西支物质平衡减小 100 mm, ELA 分别升高 19、23 m, AAR 减小 4.5%。物质平衡对气候变化的敏感性分析表明, 当降水量不变时, 夏季气温升高 1°C , 东支物质平衡减小 487 mm, 西支减小 398 mm; 当夏季气温不变时, 降水量增加 100 mm, 东支物质平衡增大 164 mm, 西支增大 185 mm。在未来全球持续升温背景下, 东、西支物质平衡将会继续减小。

关键词 物质平衡; 1 号冰川东支和西支; 乌鲁木齐河源

中图分类号 S963 文献标识码 A 文章编号 1000-4890(2013)9-2412-06

Mass balance change in east and west branches of Glacier No. 1 at Urumqi riverhead, China, during last 20 years. ZHANG Guo-fei^{1**}, LI Zhong-qin^{1,2}, WANG Wei-dong¹, WANG Wen-bin² (¹College of Geography and Environmental Sciences, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China; ²State Key Laboratory of Cryospheric Sciences/Tianshan Glaciological Station, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(9): 2412–2417.

Abstract: Based on the mass balance data of east and west branches of Glacier No. 1 at Urumqi riverhead during 1990/1991–2009/2010, this paper analyzed the mass balance change in these branches. In the east branch, the amount of mass loss was greater than that in the west branch. The equilibrium line altitude (ELA) of the east branch was generally lower than that of the west branch, and the downward trend of accumulation area ratio (AAR) was greater in the east branch than in the west branch. During 1990/1991–2009/2010, the average mass balance and cumulative mass balance in the east branch were $-582 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ and -11638 mm , and those in the west branch were $-485 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ and -9692 mm , respectively. The ELA of east and west branches showed a rising trend, with an increase of 143 m and 131 m, the AAR decreased by 29.8% and 19.6%, respectively. The mass balance was significantly negatively correlated with ELA, and significantly positively correlated with AAR. When the mass balance in east and west branches decreased by 100 mm, the ELA was decreased by 19 m and 23 m respectively, and the AAR decreased by 4.5%. The sensitivity analysis of glacier mass balance response to climate change showed that when the precipitation unchanged, and if the summer temperature raised 1°C , mass balance in the east branch would be decreased by 487 mm, and that in the west branch would be decreased by 398 mm; when the summer temperature unchanged, and if precipitation

* 国家重大科学研究计划项目(2013CBA01801)、冰冻圈国家重点实验室项目(SKLCs-22-2012-01-01)、国家自然科学基金创新研究群体项目(41121001)和国家自然科学基金项目(41001040、41161012)资助。

** 通讯作者 E-mail: zhangguofei_lz@126.com

收稿日期: 2013-03-30 接受日期: 2013-05-14

increased 100 mm, mass balance in the east branch would be increased by 164 mm, and that in the west branch would be increased by 185 mm. In the context of future global warming, mass balance in the east and west branches of Glacier No. 1 would be continued to decrease.

Key words: mass balance; east and west branches of Glacier No. 1; Urumqi riverhead.

冰冻圈由于对气候的高度敏感性和重要的反馈作用而与大气圈、水圈、岩石圈、生物圈一起被认为是影响气候系统的5大圈层,是影响全球和区域气候变化的重要因子,也是对全球气候变化最为敏感的一个圈层(张建国等,2012)。20世纪以来,人类活动对周边环境污染不断增加,全球气温持续升高,由此引发的冰川退缩及环境问题,已为全球所广泛关注(秦大河和康世昌,1997;沈永平和梁红,2001)。冰川是气候的产物,冰川活动与气候和当地地理环境、生态系统等密切相关,且是山地环境因素的重要标志之一(姚檀栋,1987;胡汝骥等,2003)。

天山地区冰川是中国西部干旱与半干旱地区的重要水资源,制约该区人类的生存和社会经济的发展(李忠勤等,2007)。近年来,气温的升高导致该区的冰川发生强烈消融,许多冰川退缩并减薄。山地冰川因其规模远小于极地冰盖,对全球气候变化的反应更敏感、更直接(沈永平和梁红,2001)。物质平衡是冰川反应其环境状况最为敏感的指标之一,是冰川对所在地区气候状况的直接的、不滞后的反应,是连接冰川作用区能量-物质-水交换的纽带。研究冰川物质平衡变化,对研究该地区气候环境变化有重要的意义。

乌鲁木齐河源1号冰川(以下简称1号冰川)是由东、西两支冰流汇流而成的双冰斗——山谷冰川,由于气温的不断升高,冰川退缩,面积减少,物质负平衡持续增加,冰舌末端位置海拔升高,1993年该冰川完全分离,形成两条完全独立的冰川体系,即1号冰川东支和1号冰川西支。鉴于东、西支完全分离且地形、坡度坡向、冰川面积等存在着差异,在气候变暖情景下,探讨冰川物质平衡变化时,有必要对其进行对比研究。本文利用东、西支长时间序列的物质平衡观测资料,对其进行了分析研究,并结合气象观测资料,探讨了东、西支物质平衡对气候变化的敏感性。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

1号冰川目前已成为国际公认的全球重点监测

冰川,是世界冰川监测组织(WGMS)设立的全球10条重点观测的参照冰川之一(Zemp *et al.*, 2009; 李忠勤, 2011)。地理位置 $43^{\circ}07'N$, $86^{\circ}49'E$,地处亚洲中部,位于天山中部天格尔山II峰北坡,乌鲁木齐河源,是乌鲁木齐河流域发育规模最大的双冰斗形态的现代冰川。该冰川规模较小,按形态属双冰斗——山谷冰川,按冰川物理特性分类,属大陆型冰川。1号冰川1959年面积 1.95 km^2 ,随着冰川的持续退缩,1993年分离为两条完全独立的冰川体系,东、西支面积分别为 1.163 km^2 和 0.677 km^2 (杨惠安等,2005)。据2010年最新资料,东支面积 1.068 km^2 ,冰川下界至上界的高度为 $3743\sim 4267\text{ m}$,长度 2.028 km ,西支面积 0.577 km^2 ,冰川高度为 $3845\sim 4484\text{ m}$,长度 1.714 km 。

自20世纪80年代中期西北地区气候由暖干向暖湿发生转型以来(施雅风等,2003),1号冰川迅速退缩和减薄,尤其是1996/1997年以来,冰川消融极为强烈,物质平衡呈大幅度亏损,造成这种结果的主要原因是夏季气温的显著升高(Li *et al.*, 2011)。据邻近1号冰川的气象站资料(图1),近20年的夏季气温介于 $2.0\sim 4.8^{\circ}\text{C}$,平均为 3.5°C ,升高了 0.6°C (较1958/1959—1989/1990年平均值),降水量介于 $383\sim 674\text{ mm}$,平均 504 mm ,增多了18%。用线性拟合其变化趋势,该区夏季气温上升了约 1.6°C ,降水量增加了 24 mm 。

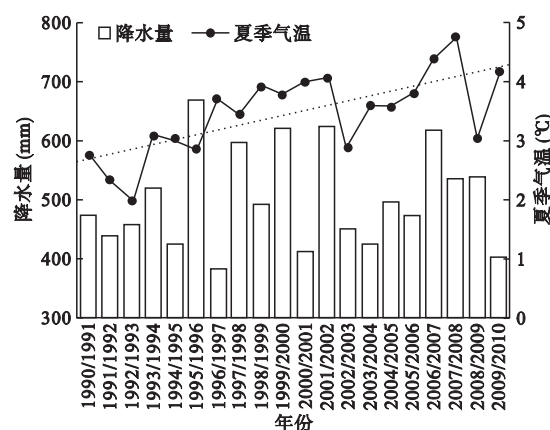


图1 1号冰川邻近气象站的气温和降水

Fig. 1 Temperature and precipitation of meteorological station near Urumqi Glacier No. 1

1.2 研究方法

东、西支物质平衡均采用花杆-雪坑法观测(张国飞等, 2012)。根据观测资料计算出各个点的单点物质平衡, 以此为基础绘制出物质平衡等值线图, 利用面积加权法计算出物质平衡(谢自楚和刘潮海, 2010), 而平衡线高度(ELA)则是物质平衡等值线图中物质平衡为零所在位置的海拔, 平衡线高度以下为消融区, 以上为积累区, 积累区面积与冰川面积之比则为积累区比率(AAR)。

WGMS从1990/1991年开始对东支和西支的物质平衡数据进行了单独报道, 故本文选取1990/1991—2009/2010年为研究时段, 研究所用数据来源于天山冰川站年报和WGMS冰川波动及物质平衡通报。采用SPSS和线性倾向率对东、西支物质平衡及其对气候变化敏感性进行了相关分析。

2 结果与分析

2.1 物质平衡与累积物质平衡

图2为1号冰川东、西支物质平衡及累积物质平衡的变化, 东支和西支物质平衡在1991/1992年与1995/1996年均均为微弱的正平衡(物质平衡均不足50 mm), 2008/2009年分别为微弱的负平衡(物质平衡为-57 mm)和微弱的正平衡(物质平衡为289 mm), 其余年份物质平衡亏损严重, 多为强负平衡, 且物质平衡仍将朝着继续减少的趋势发展。

研究时段内, 东、西支物质平衡变化介于-1441~46和-1116~289 mm, 平均物质平衡为-582和-485 mm·a⁻¹, 累积物质平衡为-11638和-9692 mm, 东、西支物质平衡的变化可分为两个阶段: (1) 1990/1991—1995/1996年, 物质平衡为正负

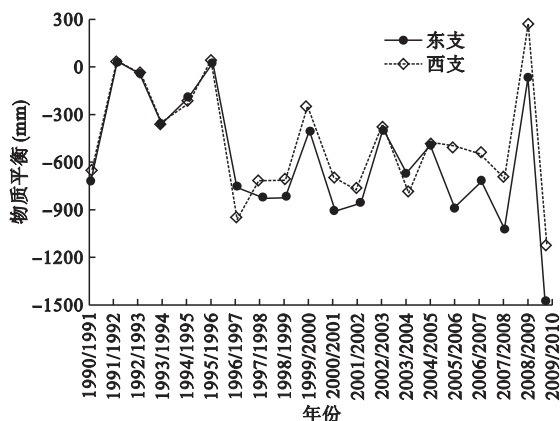


图2 1号冰川东支和西支物质平衡和累积物质平衡
Fig. 2 Mass balance and cumulative mass balance

交替变化, 表现为弱的负平衡, 东、西支平均物质平衡为-219和-201 mm·a⁻¹; (2) 1996/1997—2009/2010年, 物质平衡呈大幅度亏损, 东、西支平均物质平衡减小为-737和-606 mm·a⁻¹。2009/2010年, 东、西支物质平衡达到了历史最低值, 分别为-1441和-1116 mm, 这是由于该年度全球气温达到了最高值, 致使冰川强烈消融, 物质亏损严重。

此外, 东、西支物质平衡亏损量是不同的, 20 a东支物质亏损总量比西支多1946 mm, 平均单位面积上比西支多亏损97 mm·a⁻¹。为研究东、西支物质亏损量间的关系, 对二者年物质平衡进行了相关分析:

$$b_w = 0.85b_e + 9.2 \quad (1)$$

式中 b_w 为西支年物质平衡, b_e 为东支年物质平衡, 相关性系数 $R = 0.91$ (图3), 表明二者显著相关。从式(1)可知, 西支的年物质平衡约为东支的0.85倍, 也表明东支的物质亏损量要大于西支。

2.2 平衡线高度变化

平衡线高度(ELA)是冰川上年积累量等于年消融量位置所在的海拔, 是冰川发育的枢纽, 与物质平衡、当地气候条件等因素密切相关, 其高度取决于气候、地形、冰川三者的相互作用(王欣等, 2003)。平衡线高度变化是一定区域气候在冰川状态上的反映, 是区别冰川性质、类型及其活动性的重要气候指标(鞠远江等, 2004)。

研究时段内, 东、西支ELA变化总趋势是一致的, 均呈现升高趋势(图4), 分别升高了143和131 m。东、西支ELA变化也分为两个阶段: (1) 1990/1991—1995/1996年, 变化不是很大, 平均ELA为3994和4061 m; (2) 1996/1997年以来, 呈迅速升高趋势, 平均ELA为4091和4152 m, 较

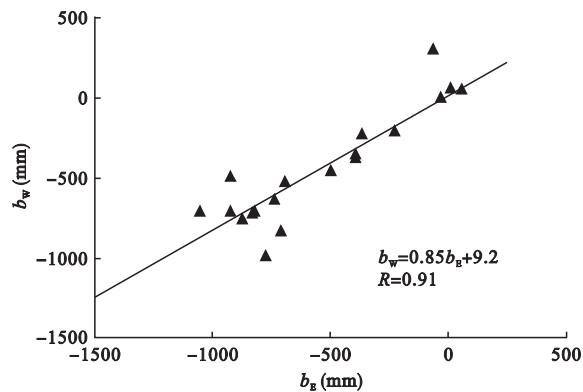


图3 1号冰川东、西支物质平衡间的相互关系
Fig. 3 Mass balance relationship between east and west branches

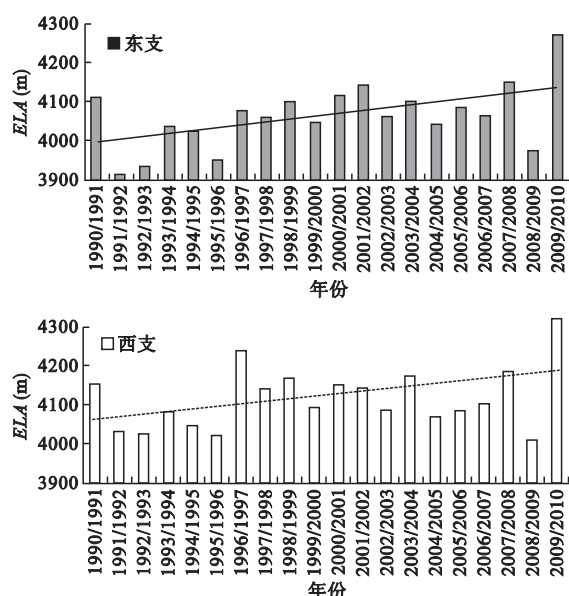


图 4 1 号冰川东支和西支平衡线高度的变化
Fig. 4 ELA variations of east and west branches

1990/1991—1995/1996 年的平均值升高了 97 和 91 m,且在 2009/2010 年,东、西支的平衡线高度均超出了冰川的上界。1990/1991—2009/2010 年,东支 ELA 变化范围为 3918 ~ 4267 m,多年平均为 4062 m,西支则为 3910 ~ 4484 m,平均为 4125 m,较东支高出 63 m,表明西支平衡线高度总体上高于东支。东、西支 ELA 的统计关系:

$$ELA_w = 1.12ELA_e - 405 \quad (2)$$

式中, ELA_e 、 ELA_w 为东、西支平衡线高度,相关性系数 $R=0.87$ 。由式(2)可知,西支的平衡线高度约为东支的 1.12 倍,表明东支平衡线高度总体低于西支,这与东、西支本身的海拔、坡度等因素有关。据有关观测,东、西支垂直高差约为 750 m(李旭亮等, 2013),平均坡度为 0.2547 和 0.3449(王宁练等, 1998),东支积累区降水量比西支多(夏明营等, 2012)。

2.3 积累区比率变化

积累区比率(AAR)是冰川积累区面积在总面积中的比率,其大小反映冰川补给条件的优劣(杨惠安等 2005)。因此, WGMS 将积累区比率作为衡量冰川物质平衡变化一个重要指标。通过分析可知, 1990/1991—2009/2010 年,东支 AAR 变化介于 0 ~ 69%, 平均为 38%, 西支介于 0 ~ 81%, 平均为 46%。分析发现, 研究时段内, 东、西支 AAR 的变化趋势保持一致, 均呈现明显的下降趋势, 分别下降了 29.8% (倾斜率为 $-1.49\% \cdot a^{-1}$) 和 19.6%

($-0.98\% \cdot a^{-1}$), 表明东支 AAR 下降幅度大于西支。东、西支积累区比率也存在显著的相关性:

$$AAR_w = 0.86AAR_e - 13.6 \quad (3)$$

其中, AAR_e 、 AAR_w 分别为东、西支的积累区比率, 相关性系数 $R=0.90$ 。西支 AAR 变化约为东支的 0.86 倍, 东支 AAR 下降幅度大于西支。对比式(1)和(3), 可以看出, AAR 的变化与物质平衡结果同步变化, 积累区比率的减小会导致物质平衡不断减少, 原因可能是当积累区面积减小时, 冰川的消融区面积就会扩大, 冰面反照率就会下降, 加速了冰川的消融。

2.4 物质平衡与平衡线高度、积累区比率

已有研究表明, 物质平衡(b_n)与平衡线高度(ELA)呈负相关, 与积累区比率(AAR)呈正相关(王宁练等, 1998; 谢自楚等, 1996), 基于 1990/1991—2009/2010 年的观测数据, 建立东、西支 ELA、AAR 分别与它们各自物质平衡之间的相互关系(图 5):

$$\text{东支: } ELA = 3951 - 0.19b_n \quad (R=0.95) \quad (4)$$

$$AAR = 0.044b_n + 64 \quad (R=0.95) \quad (5)$$

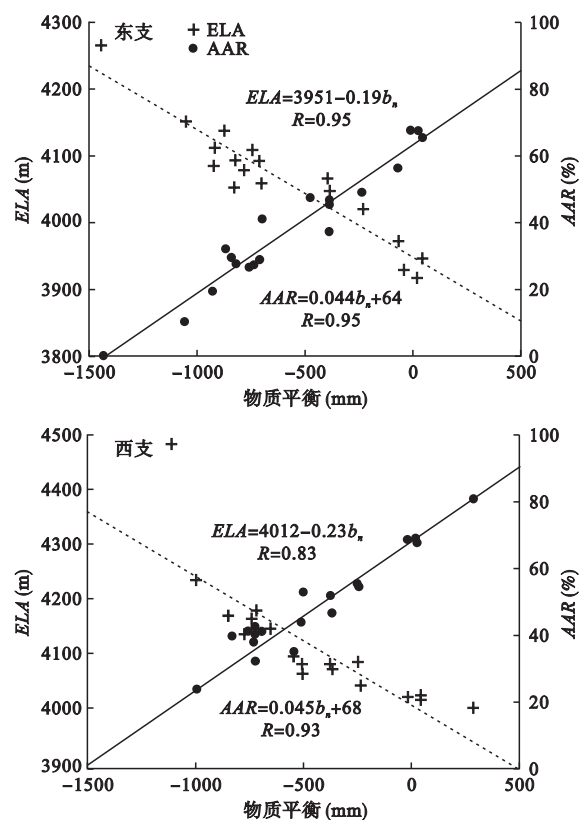


图 5 东支和西支物质平衡与平衡线高度(ELA)、积累区比率(AAR)的关系
Fig. 5 Mass balance versus ELA and AAR

$$\text{西支: } ELA = 4012 - 0.23b_n \quad (R=0.83) \quad (6)$$

$$AAR = 0.045b_n + 68 \quad (R=0.93) \quad (7)$$

由式(4)、(6)可知,当 $b_n = 0$ 时,东、西支处于稳定状态时的平衡线高度,即零平衡线高度 ELA_0 分别为3951和4012 m,且式(6)的斜率大于式(4),表明西支平衡线高度对物质平衡变化的敏感性要大于东支,东、西支处于平衡状态时的积累区比率,即零积累区比率 AAR_0 分别为64%和68%。

根据上述关系可知,物质平衡与 ELA 呈显著的负相关,即 ELA 随物质平衡的减小(增大)而上升(下降),当物质平衡减小到一定程度时, ELA 就会超出冰川的上界,整个冰川将会处于消融状态。物质平衡与 AAR 呈显著的正相关,即 AAR 随物质平衡的减小(增大)而减小(增大),同样,当物质平衡减小到一定程度时, AAR 就会等于零,整个冰川都会成为消融区。分析表明,东、西支物质平衡减小(增大)100 mm, ELA 分别升高(下降)19 m、23 m, AAR 减小(增大)4.5%。

2.5 东、西支物质平衡对气候变化的敏感性

物质平衡与降水呈正相关,与夏季气温呈负相关(李忠勤等,2007;张国飞等,2013)。为研究东、西支物质平衡对气候变化的敏感性,本文利用线性函数,结合气象站的夏季平均气温(5—8月)、降水量数据,建立了东(式8)、西支(式9)物质平衡(b_n)与夏季平均气温(T_s)、降水量(P)的统计关系:

$$b_n = 281.5 - 487T_s + 1.64P \quad (R=0.86) \quad (8)$$

$$b_n = 35.8 - 398T_s + 1.85P \quad (R=0.79) \quad (9)$$

结果表明,当降水量不变时,夏季气温升高1℃,东支物质平衡减小487 mm,西支减小398 mm;当夏季气温不变时,降水量增多100 mm时,东支物质平衡增大164 mm,西支增大185 mm。相对于夏季气温而言,东、西支物质平衡对降水量的敏感性比较弱(降水量的增加不是很明显,近20 a仅增加24 mm)。从物质平衡对夏季气温、降水量的敏感性程度可知,夏季气温是影响物质平衡变化的主控因子。IPCC第4次评估报告预测,未来100年全球气温可能升高1.1~6.4℃(IPCC,2007),可以推断,在全球持续升温的未来,东、西支物质平衡将会继续减小,且东支的物质亏损要大于西支。

3 结 论

1990/1991—2009/2010年,1号冰川东支平均物质平衡为 $-582 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$,累积物质平衡 -11638

mm,西支平均物质平衡为 $-485 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$,累积物质平衡 -9692 mm ,东支的物质亏损量要大于西支,单位面积上多亏损97 mm·a⁻¹。东、西支平衡线高度均呈现升高趋势,分别升高了143和131 m。东支平均 ELA 为4062 m,西支平均为4125 m,较东支高出63 m,东支平衡线高度总体上低于西支。东、西支 AAR 分别下降了29.8%和19.6%,东支 AAR 平均为38%,西支为46%,东支 AAR 下降幅度大于西支。

物质平衡与 ELA 呈显著的负相关,与 AAR 呈显著的正相关, ELA 随物质平衡的减小而上升, AAR 随物质平衡的减小而减小,分析表明,东、西支物质平衡减小100 mm, ELA 分别升高19和23 m, AAR 减小4.5%。

物质平衡对气候变化的敏感性研究表明,当降水量不变时,夏季气温升高1℃,东支物质平衡减小487 mm,西支减小398 mm;当夏季气温不变时,降水量增多100 mm,东支物质平衡增大164 mm,西支增大185 mm。从物质平衡对夏季气温、降水量的敏感性程度可知,夏季气温是影响物质平衡变化的主控因子。在全球持续升温的未来,东、西支物质平衡将会继续减小。

综上所述,1号冰川东支的物质亏损量大于西支,东支平衡线高度总体上低于西支,东支积累区比率下降幅度大于西支,这种差异主要与东、西支所处的地形、海拔、坡度坡向、规模、剖面结构、几何形态等有关。

参考文献

- 胡汝濮,姜逢清,王亚俊. 2003. 新疆雪冰水资源的环境评估. 干旱区研究,20(3): 187-191.
- 鞠远江,刘耕年,张晓咏,等. 2004. 山地冰川物质平衡线与气候. 地理科学进展,23(3): 43-49.
- 李旭亮,李忠勤,王文彬,等. 2013. 1959—2009年乌鲁木齐河源1号冰川零平衡线高度变化研究. 干旱区资源与环境,27(2): 83-88.
- 李忠勤,沈永平,王飞腾,等. 2007. 冰川消融对气候变化的响应——以乌鲁木齐河1号冰川为例. 冰川冻土,29(3): 334-342.
- 李忠勤. 2011. 天山乌鲁木齐河源1号冰川近期研究与应用. 北京: 气象出版社.
- 秦大河,康世昌. 1997. 现代冰川过程与全球环境气候演变. 地学前缘,4(1/2): 85-94.
- 沈永平,梁红. 2001. 全球冰川消融加剧使人类环境面临威胁. 冰川冻土,23(2): 208-211.
- 施雅风,沈永平,李栋梁,等. 2003. 中国西北气候由暖干

- 向暖湿转型的特征和趋势探讨. 第四纪研究, **23**(2): 152–163.
- 王 欣, 谢自楚, 冯清华, 等. 2003. 塔里木河流域冰川系统平衡线的计算及其分布特征. 冰川冻土, **25**(4): 380–388.
- 王宁练, 姚檀栋, 田立德, 等. 1998. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川的气候敏感性研究. 干旱区地理, **21**(4): 34–40.
- 夏明营, 李忠勤, 王文彬. 2012. 乌鲁木齐河源 1 号冰川东西支变化特征研究. 干旱区资源与环境, **26**(9): 40–44.
- 谢自楚, 丁良福, 刘潮海. 1996. 冰川零平衡线处的物质平衡及其应用. 冰川冻土, **18**(1): 1–9.
- 谢自楚, 刘潮海. 2010. 冰川学导论. 上海: 上海科学普及出版社.
- 杨惠安, 李忠勤, 叶佰生, 等. 2005. 过去 44 年乌鲁木齐河源 1 号冰川物质平衡结果及其过程研究. 干旱区地理, **28**(1): 76–80.
- 姚檀栋. 1987. 冰川物质平衡、零平衡线及气候间的关系——以天山乌鲁木齐河源 1 号冰川为例. 冰川冻土, **9**(4): 289–300.
- 张国飞, 李忠勤, 王文彬, 等. 2012. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川 1959—2009 年物质平衡变化过程及特征研究. 冰川冻土, **34**(6): 1301–1309.
- 张国飞, 李忠勤, 王文彬, 等. 2013. 乌鲁木齐河源 1 号冰川 2009 年出现物质正平衡. 干旱区地理, **36**(2): 263–268.
- 张建国, 陆佩华, 周忠浩, 等. 2012. 西藏冰冻圈消融退缩现状及其对生态环境的影响. 干旱区资源与环境, **33**(5): 703–709.
- IPCC. 2007. Climate change 2007: The physical science basis. Report of working group II of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge: Cambridge University Press.
- Li ZQ, Li HL, Chen YN. 2011. Mechanisms and simulation of accelerated shrinkage of continental glaciers: A case study of Urumqi Glacier No. 1 in Eastern Tianshan, Central Asia. *Journal of Earth Science*, **22**: 423–430.
- Zemp M, Hoelzle M, Haeberli W. 2009. Six decades of glacier mass balance observations: A review of the worldwide monitoring network. *Annals of Glaciology*, **50**: 101–111.
-
- 作者简介 张国飞 男, 1989 年生, 硕士研究生, 主要从事冰川物质平衡方面的研究。E-mail: zhangguofei_lz@126.com
责任编辑 李凤芹
-