

DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2018.0024

HE Haidi, LI Zhongqin, YE Wanhua, et al. Comparative studies of the glacier mass balance in Svalbard, High Asia and Alps [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(2): 205-213. [何海迪, 李忠勤, 叶万花, 等. 北极斯瓦尔巴、高亚洲和阿尔卑斯山冰川物质平衡对比研究 [J]. 冰川冻土, 2018, 40(2): 205-213.]

# 北极斯瓦尔巴、高亚洲和阿尔卑斯山 冰川物质平衡对比研究

何海迪<sup>1</sup>, 李忠勤<sup>1,2</sup>, 叶万花<sup>1</sup>, 梁鹏斌<sup>1</sup>, 牟建新<sup>1</sup>, 张明军<sup>1</sup>

(1. 西北师范大学地理与环境科学学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 中国科学院西北生态环境资源研究院  
冰冻圈科学国家重点实验室/天山冰川观测试验站, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** 基于冰川物质平衡和平衡线高度数据, 对北极斯瓦尔巴、高亚洲和阿尔卑斯山的冰川物质平衡变化和平衡线高度空间分布特征进行了对比分析, 得出以下结论: (1) 阿尔卑斯山冰川年均负物质平衡值最大, 为 -907 mm; 斯瓦尔巴为 -431 mm; 高亚洲最小, 为 -264 mm。(2) 高亚洲和斯瓦尔巴冰川物质平衡年振幅较小, 年际变化较小; 阿尔卑斯山冰川物质平衡年振幅较大, 年际变化较大。斯瓦尔巴冰川物质平衡趋向正平衡, 阿尔卑斯山和高亚洲冰川物质平衡趋向负平衡。(3) 斯瓦尔巴内陆的冰川平衡线高度高于沿海地区, 高亚洲冰川平衡线高度呈纬向地带性、经向地带性和区域地带性的分布规律, 阿尔卑斯山的冰川平衡线高度主要受冰川所处海拔的影响。

**关键词:** 斯瓦尔巴; 高亚洲; 阿尔卑斯山; 冰川; 物质平衡; 平衡线高度

**中图分类号:** P343.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2018)02-0205-09

## 0 引言

冰川物质平衡是单位时间内冰川上以固态降水形式为主的物质收入(积累)和以冰川消融为主的物质支出(消融)的代数和<sup>[1]</sup>, 是冰川反映气候变化的最敏感的指标之一<sup>[2-3]</sup>, 而且冰川物质平衡的气候敏感性研究是冰川未来变化趋势预测的关键因素<sup>[4-5]</sup>。自20世纪50年代世界范围内开展冰川监测以来, 冰川物质平衡就是一项非常重要的研究内容, 随着全球变暖被广泛关注, 冰川物质平衡研究在全球气候变化研究中尤为重要。冰川表面平衡线所对应的平均海拔高度称为平衡线高度, 是冰川积累区和消融区分界线的海拔, 对气候的变化十分敏感, 是一个地区能否发育冰川的标志<sup>[6-8]</sup>。平衡线高度的变化与冰川的前进、后退或消亡联系密切,

是气候变化最直接的反映<sup>[9]</sup>, 是衡量冰川变化的重要指标。对冰川物质平衡动态变化进行研究有利于正确认知冰川响应全球气候变化的机理及气候变化的总趋势, 捕捉全球气候变化的初始信号, 为我国生态环境的可持续发展提供决策依据。

近年来关于冰川物质平衡方面的研究较多<sup>[10-13]</sup>, 但仅限于单条冰川年际物质平衡变化分析, 缺乏对整个区域以及不同区域之间冰川物质平衡变化的分析, 对冰川平衡线高度变化的研究相对较少。董志文等<sup>[14]</sup>和王宁练等<sup>[15]</sup>分别研究了乌源1号和七一冰川近50年来的平衡线高度变化。叶万花等<sup>[16]</sup>研究了高亚洲定位监测冰川平衡线高度时空分布特征。本文从冰川物质平衡和平衡线高度两个指标入手, 对比分析斯瓦尔巴、高亚洲和阿尔卑斯山三个地区的冰川物质平衡特征和平衡线高度

收稿日期: 2017-07-29; 修订日期: 2017-10-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(41471058); 中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA2006020103)资助

作者简介: 何海迪(1990-), 女, 甘肃民勤人, 2015年在兰州城市学院获学士学位, 现为西北师范大学在读硕士研究生, 从事冰川变化研究。E-mail: 18298339647@163.com

通信作者: 李忠勤, E-mail: lizq@lzb.ac.cn.

变化，以便全面认识北半球的冰川变化。

### 1 研究区与数据

#### 1.1 研究区概况

斯瓦尔巴群岛 [图 1 (a)] 位于北冰洋上，隶属于挪威，总面积为 62 248 km<sup>2</sup>。北部盛行的东风和东北风与北大西洋暖流汇合，易形成极峰，在冬季发生极端天气和气候波动的概率较大。斯瓦尔巴有众多的海湾，冰川总数为 2 100 多条<sup>[17]</sup>，冰体覆盖面积约为 34 560 km<sup>2</sup>，即 60% 的陆地为冰川所覆盖，冰川类型多样<sup>[18]</sup>。末端伸入海洋且由崩解脱落形成的冰川被称为潮汐型冰川，通常是一块巨大的脱落冰体，末端有一个陡峭的、近乎垂直的冰塔存在，冰川长度和物质损失主要受冰川崩解的影响，变化速率极快<sup>[19]</sup>。20 世纪初之前，该地区的冰川规模和它们在末次小冰期时的最大规模相当，20 世纪增温最为显著，冰川发生普遍退缩。

高亚洲 [图 1 (c)]，也称为中央亚洲，是以青藏高原为中心的位于亚洲中央的高山及高原。高亚洲西南部受印度季风的影响，东南部受东亚季风的影响，北部和西部主要受西风环流的影响，还受到青藏高原隆升产生的高原季风的影响<sup>[20]</sup>。高亚洲是中低纬度地区最大的现代冰川区，冰川总面积为 5.94 × 10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>，占全球山地冰川面积的 25%，是亚

洲中部干旱半干旱地区宝贵的淡水资源。19 世纪 60 - 90 年代时其冰川退缩对全球海平面上升的贡献可达 20%<sup>[21]</sup>；20 世纪的全球变暖已导致山地冰川发生显著的变化，高亚洲冰川与全球其他区域一样，呈现出明显的退缩和物质亏损。

阿尔卑斯山 [图 1 (b)] 是世界上最有名的褶皱山系之一，是欧洲中部最高大的山脉，面积约为 2.1 × 10<sup>5</sup> km<sup>2</sup>。阿尔卑斯山濒临地中海，距大西洋较近，受大西洋暖流的影响，气温温和，降水丰沛，发育有许多高山冰川，总覆盖面积达 3 600 km<sup>2</sup>，冬、春季有深厚的积雪。近 30 年来，阿尔卑斯山中段瑞士地区冰川面积减少了 364 km<sup>2</sup>，退缩速率为 12.6 km<sup>2</sup> · a<sup>-1</sup><sup>[22]</sup>。

#### 1.2 数据来源

本研究选用斯瓦尔巴 (7 条)、高亚洲 (19 条) 及阿尔卑斯山 (10 条) 共 36 条冰川近 60 年的物质平衡和平衡线高度资料。除乌鲁木齐河源 1 号冰川 (乌源 1 号冰川)、七一冰川、小冬克玛底冰川、帕隆 94 号冰川资料来自野外观测、天山冰川观测试验站年报和各类文献及专著外，其余冰川年均物质平衡数据均来自世界冰川监测服务处 (WGMS)。所选冰川基本覆盖了研究区，能较好地代表相应区域冰川变化的基本情况。冰川空间位置分布见图 1，冰川基本信息见表 1。

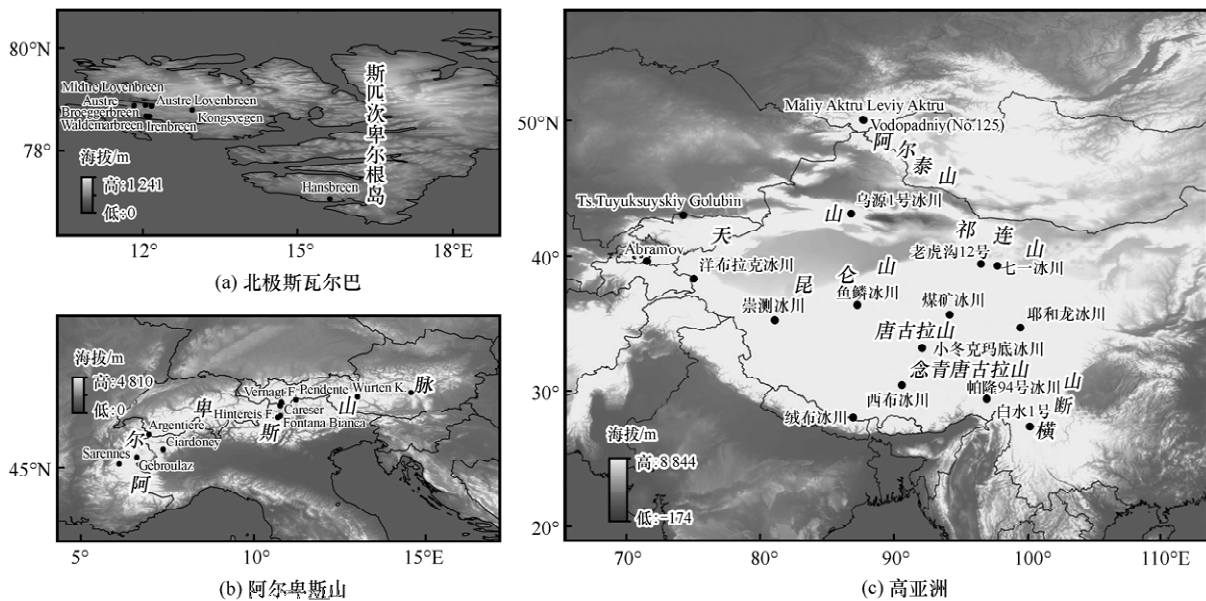


图 1 研究区概况

Fig. 1 Map showing the location of the glaciers in Svalbard (a), Alps (b) and High Asia (c), of which the mass balance have or had been studied

表 1 斯瓦尔巴、高亚洲、阿尔卑斯山 36 条冰川基本信息  
Table 1 Information of the 36 glaciers in Svalbard, High Asia and Alps

冰川名称	所在国家	海拔范围/m	长度/km	面积/km <sup>2</sup>	观测年份
斯瓦尔巴					
Austre Broeggerbreen	挪威	60 ~ 600	6.0	6.12	1967 - 2015
Austre Lovénbreen	挪威	107 ~ 550	3.7	4.49	2005 - 2016
Hansbreen	挪威	0 ~ 510	15.4	56.69	1989 - 1995, 1998 - 2015
Irenbreen	挪威	125 ~ 650	3.9	4.05	1995 - 2015
Kongsvegen	挪威	0 ~ 1 050	27.0	101.87	1967 - 2015
Midtre Lovénbreen	挪威	50 ~ 650	4.8	5.52	1968 - 2015
Waldemarbreen	挪威	150 ~ 570	3.3	2.59	1995 - 2015
高亚洲					
Leviy Aktru	俄罗斯	2 575 ~ 4 043	5.8	5.95	1977 - 2012
Maliy Aktru	俄罗斯	3 077 ~ 1 959	4.2	2.73	1962 - 2012
Vodopadnyi ( No. 125)	俄罗斯	3 038 ~ 3 552	1.4	0.75	1977 - 2012
Ts. Tuyuksuyskiy	哈萨克斯坦	3 486 ~ 4 219	2.6	2.27	1957 - 2015
Abramov	吉尔吉斯斯坦	3 659 ~ 4 918	7.8	23.90	1968 - 1996, 2012 - 2015
Golubin	吉尔吉斯斯坦	3 325 ~ 4 350	4.7	5.44	1969 - 1994, 2012 - 2015
白水 1 号	中国	4 350 ~ 4 950	3.0	1.52	2009 - 2013
崇测	中国	5 750 ~ 6 374		16.40	
老虎沟 12 号	中国	4 260 ~ 5 481		20.40	2011 - 2015
煤矿	中国	4 790 ~ 5 520		1.10	
帕隆 94 号	中国	5 080 ~ 5 635	2.9	2.35	2006 - 2015
七一	中国	4 324 ~ 5 145	3.7	2.93	2001 - 2013
绒布	中国	5 145 ~ 7 260			
乌源 1 号	中国	3 736 ~ 4 486	2.1	1.58	1959 - 2016
小冬克玛底	中国	5 380 ~ 5 926	2.8	1.72	1989 - 2013
西布	中国	5 842			
洋布拉克	中国	6 061			
耶和龙	中国	5 181			
鱼鳞	中国	5 757			
阿尔卑斯山					
Argentiere	法国	1 500 ~ 3 500	9.0	13.50	2003
Gébroulaz	法国	2 600 ~ 3 400	3.0		2003
Sarennes	法国	2 848 ~ 2 960	0.6	0.12	1949 - 2016
Hintereis F.	奥地利	2 453 ~ 3 715	6.6	6.66	1953 - 2016
Vernagt F.	奥地利	2 802 ~ 3 619	2.6	7.92	1965 - 2016
Wurten K.	奥地利	2 380 ~ 3 120	1.5	1.09	1983 - 2015
Careser	意大利	2 911 ~ 3 297	1.0	1.35	1967 - 2016
Ciardoney	意大利	2 870 ~ 3 130	1.7	0.83	1992 - 2015
Fontana Bianca	意大利	2 890 ~ 3 350	1.1	0.39	1984 - 2015
Pendente	意大利	2 625 ~ 2 980	1.4	0.85	1996 - 2016

## 2 结果与分析

### 2.1 冰川物质平衡变化

#### 2.1.1 斯瓦尔巴

Austre Broeggerbreen 冰川净平衡为  $-453$  mm, Kongsvegen 冰川净平衡为  $42$  mm, Midtre Lovenbreen 冰川净平衡为  $-380$  mm, 上述 3 条冰川物质平衡年际波动较大但负平衡趋势较弱, 冰川消融保持平稳状态, Austre Broeggerbreen 冰川物质平衡较其他 2 条冰川大。Austre Lovenbreen 冰川物质平衡年际变化波动大且呈负平衡发展的趋势, 年均物质平衡为  $-372$  mm, 2014 年达极大正平衡值  $82$  mm, 其余均为负平衡年。Irenbreen 冰川年均物质平衡为  $-840$  mm, Waldemarbreen 冰川年均物质平衡为  $-700$  mm, 上述 2 条冰川物质平衡年际变化波动大且负平衡趋势明显, 冰川处于强烈消融状态。Irenbreen 冰川是斯瓦尔巴消融最强烈的冰川之一, 2010 年后该冰川消融进一步加剧。Hansbreen 冰川年均物质平衡为  $-298$  mm, 2005 年之后出现较多正物质平衡值, 但该冰川仍处于退缩状态。

Austre Broggerbreen、Midtre Lovenbreen 和 Austre Lovenbreen 冰川位置相邻且均为山谷型冰川, 累积物质平衡变化呈相似波动特征, 物质平衡年际变化主要受夏季气温的影响。由于冬季积累相对较少, 夏季消融较大, Irenbreen 冰川和 Waldemarbreen 冰川一直处于退缩状态且具有较高的消融量。位于南部的潮汐型冰川 Hansbreen 冰川自身活动性较强, 受风潮影响物质平衡年际变化较大<sup>[23]</sup>, 累积物质平衡为  $-7.15$  m, 年均亏损相对较慢。Kongsvegen 冰川具有面积大、海拔高的特征, 且粒雪带分布范围广, 是该区变化最不稳定的冰川之一。Hansbreen 和 Kongsvegen 冰川在 1997 - 2004 年物质损失呈加速趋势, 2005 - 2008 年出现物质积累, 2009 年后呈较小的负物质平衡<sup>[24]</sup>。

斯瓦尔巴冰川物质平衡变化主要呈负平衡/平衡、略微增长两种状态, 冰川物质平衡年际变化波动大且呈负平衡趋势, 累积物质平衡表现出长期稳定的负平衡增长趋势。

#### 2.1.2 高亚洲

Ts. Tuyuksuyskiy、乌源 1 号、Golubin、Abramov、Maliy Aktru、Vodopadny (No. 125)、Leviy Aktru、帕隆 94 号、小冬克玛底和七一冰川年均物质平衡分别为  $-395$ 、 $-320$ 、 $-346$ 、 $-445$ 、 $-183$ 、 $-139$ 、 $-170$ 、 $-356$ 、 $-166$  和  $-116$  mm。

Abramov 冰川负物质平衡值最大, 七一冰川最小。高亚洲所选冰川物质平衡整体呈下降趋势, 冰川处于退缩状态, 位于青藏高原的帕隆 94 号冰川退缩速率最大, 位于帕米尔高原的 Abramov 和阿尔泰山的 Maliy Aktru 冰川退缩最慢。

Ts. Tuyuksuyskiy 冰川累积物质平衡值为  $-23.71$  m, 1971 年起冰川加速消融, 物质损失由  $76$  mm  $\cdot$  a<sup>-1</sup> 增至  $502$  mm  $\cdot$  a<sup>-1</sup>。乌源 1 号冰川累积物质平衡为  $-18.57$  m, 1986 年出现第一次加速消融, 1997 年出现第二次加速消融, 物质亏损达  $674$  mm  $\cdot$  a<sup>-1</sup>。Golubin 冰川累积物质平衡为  $-10.72$  m, 冰川一直处于强烈消融期。Abramov 冰川累积物质平衡为  $-15.57$  m, 1967 - 1985 年冰川消融较为强烈, 年均亏损为  $544$  mm; 1987 - 1993 年出现了短暂的冰川前进, 年均物质积累为  $44$  mm; 1994 - 2015 年冰川进一步加速消融, 物质亏损达  $580$  mm  $\cdot$  a<sup>-1</sup>。Maliy Aktru 冰川累积物质平衡为  $-9.51$  m, 该冰川 1962 - 1983 年呈消融状态, 年均物质亏损为  $278$  mm; 1984 - 1998 年出现短暂的冰川前进, 年均物质积累为  $79$  mm; 1999 - 2013 年冰川加速消融, 物质亏损达  $306$  mm  $\cdot$  a<sup>-1</sup>。Vodopadny (No. 125) 和 Leviy Aktru 冰川累积物质平衡分别为  $-5.02$  m 和  $-6.11$  m, 两条冰川均于 1997 年出现加速消融, 年均物质亏损分别为  $284$  mm 和  $328$  mm。帕隆 94 号冰川累积物质平衡为  $-12.81$  m, 1980 - 1990 年和 1995 - 2003 年出现短暂的冰川前进, 2004 年起冰川加速消融, 年均物质亏损达  $799$  mm。小冬克玛底和七一冰川累积物质平衡分别为  $-9.81$  m 和  $-6.28$  m, 两条冰川均于 1994 年出现加速消融, 不同的是小冬克玛底冰川一直处于消融状态, 而七一冰川在 1957 - 1993 年处于冰进期。

高亚洲冰川年均物质平衡均为负值, 整体处于退缩状态。但部分冰川在 20 世纪 80 - 90 年代出现短暂的冰川前进, 90 年代中后期出现加速消融趋势。

#### 2.1.3 阿尔卑斯山

Sarennes、Ciardoney、Fontana Bianca、Pendente、Careser、Hintereis F.、Wurten K. 和 Vernagt F. 冰川的年均物质平衡分别为  $-1095$ 、 $-1291$ 、 $-856$ 、 $-1052$ 、 $-1071$ 、 $-607$ 、 $-881$  和  $-406$  mm, Ciardoney 冰川负物质平衡值最大, Vernagt F. 冰川最小。位于阿尔卑斯山中部的 Careser 冰川退缩速率最快, 东部的 Wurten K. 冰川退缩最慢。

Sarennes、Ciardoney、Fontana Bianca、Pendente、Careser、Hintereis F.、Wurten K. 和 Vernagt F. 冰川的累积物质平衡值分别为 -74.46、-30.99、-25.68、-22.08、-53.56、-38.82、-29.08 和 -22.79 m。该地区冰川在 20 世纪均处于稳定的退缩状态,2000 年之后开始出现加速消融的趋势,自 2002 年开始 Sarennes 冰川物质亏损较其他冰川明显,达  $2\ 617\ \text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

阿尔卑斯山的冰川年均负物质平衡值最大,为 -907 mm; 其次是斯瓦尔巴,为 -431 mm; 高亚洲最小,为 -264 mm。

2.1.4 区域对比分析

把斯瓦尔巴、高亚洲、阿尔卑斯山各区域内冰川物质平衡观测数据通过算术平均法计算出各区域冰川物质平衡和累积物质平衡,三者变化趋势特征各异(图 2)。斯瓦尔巴和高亚洲冰川物质平衡年振幅较小、年际变化较小,年均物质平衡分别为 -431 mm 和 -258 mm。阿尔卑斯山冰川物质平衡年振幅较大、年际变化较大,年均物质平衡为 -864 mm。斯瓦尔巴冰川物质平衡趋于正平衡,阿尔卑斯山和高亚洲冰川物质平衡趋于负平衡。三个区域物质平衡出现最大值或较大值的时段各不相同,斯瓦尔巴出现在 20 世纪 80 年代中期至 90 年代末,高亚洲出现在 20 世纪 60 年代初至 70 年代初,阿尔卑斯山出现在 20 世纪 60 年代中期至 80 年代初。

斯瓦尔巴和高亚洲冰川近 48 年均呈消融趋势,阿尔卑斯山冰川在 1975 - 1982 年出现短暂的物质积累,但总体上也呈物质亏损加速的态势。斯瓦尔巴和高亚洲冰川消融速率变化趋势相似,消融较快

的时段均在 20 世纪 70 年代初至 80 年代中期。斯瓦尔巴冰川在 1987 - 1997 年间有个短暂稳定期,累积物质平衡自 1997 年开始保持稳定的负平衡状态,年物质亏损最慢。高亚洲冰川 20 世纪 90 年代中期开始加速消融,年均物质亏损达 433 mm。阿尔卑斯山冰川 20 世纪 80 年代初起物质亏损加速,年均物质亏损达 920 mm,消融速率远大于斯瓦尔巴和高亚洲。这可能与阿尔卑斯山自 20 世纪 80 年代初出现的气温大幅度升高有关,其气温总体平均升高  $1\ ^\circ\text{C}$ ,单个站点的升温可达到  $2\ ^\circ\text{C}$ ,对冰川和冰缘带产生显著的影响<sup>[25]</sup>。自小冰期末欧洲阿尔卑斯山冰川区面积减小了 30% ~ 40%,冰川体积减少了约一半<sup>[26]</sup>。

2.2 冰川平衡线高度变化

2.2.1 斯瓦尔巴

如图 3 所示,自观测以来, Austre Broeggerbreen 冰川平衡线高度波动范围为 200 ~ 695 m,均平衡线高度为 429 m,至 2015 年平衡线高度升高了 51 m。Austre Lovenbreen 冰川平衡线高度波动范围为 330 ~ 550 m,均平衡线高度为 431 m,至 2016 年平衡线高度升高了 76 m。Hansbreen 冰川平衡线高度波动范围为 240 ~ 600 m,均平衡线高度为 358 m,至 2015 年平衡线高度下降了 124 m。Irenbreen 冰川平衡线高度波动范围为 380 ~ 674 m,均平衡线高度为 473 m,至 2015 年平衡线高度升高了 211 m。Midtre Lovenbreen 冰川平衡线高度波动范围为 225 ~ 650 m,均平衡线高度为 407 m,至 2015 年平衡线高度升高了 14 m。Kongsvegen 冰川平衡线高度波动范围为 400 ~ 705 m,至 2015 年平衡线高度升高了 54 m。Waldemarbreen 冰川平衡线高度

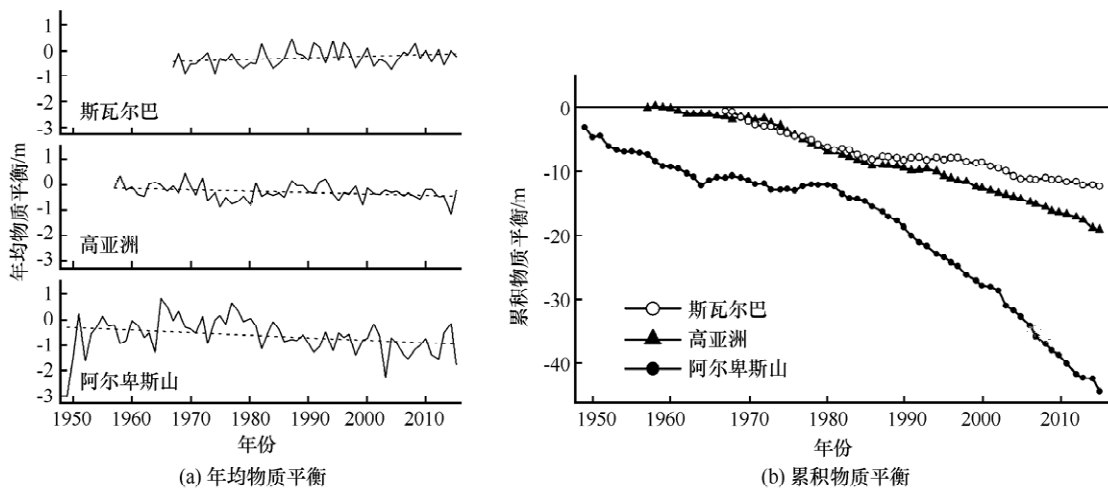


图 2 斯瓦尔巴、高亚洲、阿尔卑斯山年均物质平衡(a)和累积物质平衡(b)

Fig. 2 The annual mass balance ( a ) and cumulative mass balance ( b ) of Svalbard , High Asia and Alps

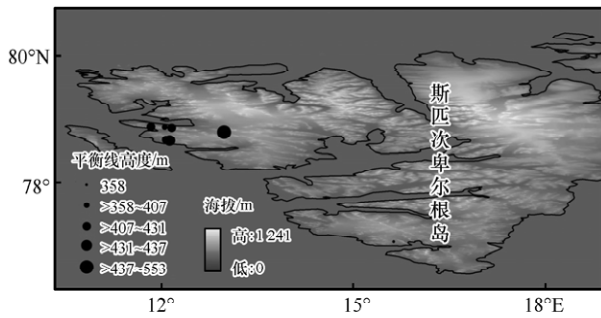


图3 斯瓦尔巴冰川平衡线高度空间分布

Fig. 3 Map showing the spatial distribution of the equilibrium line altitude of the glaciers in Svalbard

波动范围为 270 ~ 591 m, 均平衡线高度为 427 m, 至 2015 年平衡线高度升高了 105 m。

斯瓦尔巴所选冰川只有南部的 Hansbreen 冰川平衡线高度下降, 其余冰川均升高。Irenbreen 冰川平衡线高度升高最大, 冰川物质负平衡最大, 说明该冰川消融最为强烈。比较发现, 斯瓦尔巴内陆的冰川平衡线高度高于沿海地区, 斯匹次卑尔根岛西海岸北部海拔较高的冰川平衡线高度低, 南部海拔较高的冰川平衡线高度高。这与冰川所处位置的气候有关, 在斯匹次卑尔根岛西海岸, 年降水量约 400 mm, 年平均气温约为  $-6^{\circ}\text{C}$ , 由沿海向内陆地区降水量下降至 200 mm, 气温略微变冷, 气候更具大陆性<sup>[27]</sup>。

### 2.2.2 高亚洲

如图 4 所示, 从喜马拉雅山的绒布冰川 (6 420 m) 到昆仑山的煤矿冰川 (5 278 m)、天山乌源 1 号冰川 (4 054 m), 直至阿尔泰山 Maliy Aktru 冰川 (3 213 m), 随着冰川所处纬度的升高, 平衡

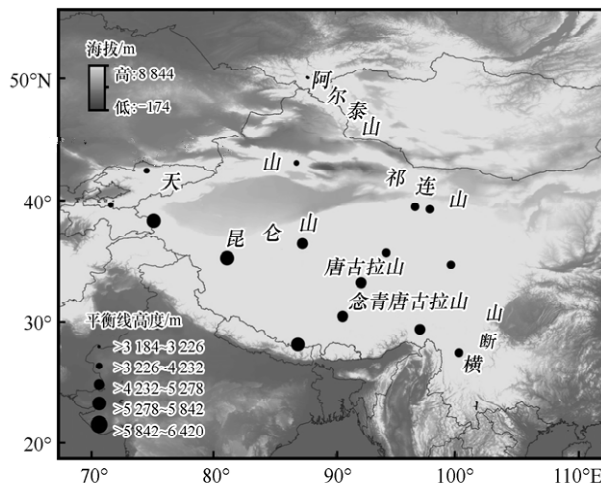


图4 高亚洲冰川平衡线高度空间分布

Fig. 4 Map showing the spatial distribution of the equilibrium line altitude of the glaciers in High Asia

线高度降低, 说明气温是影响平衡线高度变化的重要因素之一。这与 Wang 等<sup>[28]</sup> 利用 NCEP/NCAR 再分析数据与探空资料计算的 1971 - 2010 年夏季自由大气平均  $0^{\circ}\text{C}$  层高度呈自南向北逐渐降低的变化趋势一致。

如图 4 所示, 从高原东部的祁连山老虎沟 12 号冰川 (4 900 m) 到中部的昆仑山东段煤矿冰川 (5 278 m)、昆仑山中段鱼鳞冰川 (5 757 m)、昆仑山西段崇测冰川 (6 151 m), 直至高原西部喀喇昆仑山洋布拉克冰川 (6 061 m), 冰川平衡线高度随着冰川所处位置呈升高趋势, 距海越远大气携带的水汽越少<sup>[29]</sup>, 对冰川的补给越小, 冰川平衡线高度越高, 说明降水是影响平衡线高度的另一个重要因素。

从青藏高原周边的祁连山老虎沟 12 号冰川 (4 900 m)、横断山白水 1 号冰川 (5 025 m) 到昆仑山耶和龙冰川 (5 181 m)、煤矿冰川 (5 278 m), 再到高原内部的念青唐古拉山西布冰川 (5 842 m), 直至喜马拉雅山绒布冰川 (6 420 m), 冰川平衡线高度逐步升高。青藏高原在抬升的过程中, 一方面伴随降温过程, 另一方面阻挡了来自海洋的暖湿气流, 使高原内部出现寒旱化, 降水对冰川的补给减少, 高原边缘山地降水较多<sup>[30]</sup>, 说明地势起伏变化也是影响平衡线高度分布的重要因素。

高亚洲冰川平衡线高度变化呈现明显的纬度地带性、经度地带性和区域地带性。

### 2.2.3 阿尔卑斯山

如图 5 所示, 自有观测记录以来, Sarennes 冰川平衡线高度波动范围为 2 937 ~ 3 150 m, 至 2015 年平衡线高度升高了 177 m。Ciardoney 冰川平衡线高度波动范围为 2 900 ~ 3 150 m, 至 2015 年平衡线高度上升了 35 m。Fontana Bianca 冰川平衡线高度约为 3 325 m, 该冰川平衡线高度呈下降趋势, 至 2016 年下降了 77 m。Pendente 冰川平衡线高度约 2 987 m, 至 2015 年上升了 36 m。Careser 冰川平衡线高度约 3 276 m, 至 2016 年上升了 239 m。Hintereis F. 冰川平衡线高度约 3 078 m, 至 2016 年上升了 377 m, 是该地区所选冰川中平衡线高度上升最多的冰川, 说明该冰川消融强烈。Wurten K. 冰川平衡线高度约 3 001 m, 自观测以来平衡线高度呈下降趋势, 说明冰川处于积累期。Ver-nagt F. 冰川平衡线高度约 3 186 m, 至 2015 年上升了 272 m。Argentiere 和 Gebroulaz 冰川平衡线高度分别约为 2 421 m 和 2 632 m, 上升了 232 m

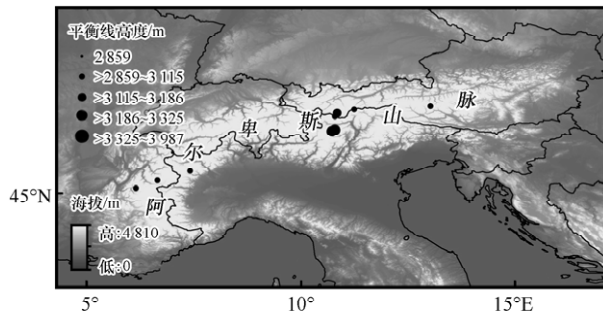


图5 阿尔卑斯山冰川平衡线高度空间分布

Fig.5 Map showing the spatial distribution of the equilibrium line altitude of the glaciers in Alps

和 287 m。

阿尔卑斯山的冰川平衡线高度主要受冰川所处海拔的影响。东部冰川海拔低于中部冰川(除了 Pendente 冰川),其平衡线高度也低于中部; Argentiere 冰川海拔最低(2 500 m),该冰川的平衡线高度也最低。中部海拔较高的冰川平衡线高度较高,海拔较低的 Pendente 冰川(2 802 m)平衡线高度也较低。

#### 2.2.4 区域对比分析

选择三个区域中有较长时间序列平衡线高度资料的 8 条冰川,分析其平衡线高度变化(图 6)。阿尔卑斯山冰川平衡线高度升高幅度最大,Hintereis F.、Careser 和 Vernagt F. 冰川平衡线高度分别升高了 449 m、300 m 和 255 m;其次为高亚洲 Maliy Aktru 冰川,平衡线高度升高了 198 m,乌源 1 号冰川升高了 109 m,斯瓦尔巴 Austre Broeggerbreen 和 Midtre Lovenbreen 冰川平衡线高度分别升高了 54 m 和 8 m,平衡线高度升高最小的是高亚洲 Ts. Tuyuksuyskiy 冰川,升高了约 1 m。

上述分析发现,同位于天山的 Ts. Tuyuksu-

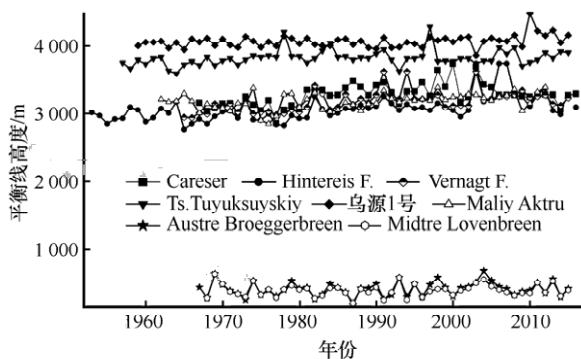


图6 斯瓦尔巴、高亚洲、阿尔卑斯山冰川平衡线高度变化对比

Fig.6 Comparison of the equilibrium line altitude among Svalbard, High Asia and Alps

yskiy 冰川平衡线高度增幅远小于乌源 1 号冰川,甚至小于 Austre Broeggerbreen 和 Midtre Lovenbreen 冰川。这与其所处的气候模式以及东、西天山冰川水汽交换特征及其对气候变化响应的敏感性不同有关<sup>[31]</sup>。天山受西风环流控制,大量水汽自西向东运动,随着距离的增加,降水量自西向东减少<sup>[32]</sup>。

高亚洲天山冰川均平衡线高度(乌源 1 号冰川为 4 074 m, Ts. Tuyuksuyskiy 冰川为 3 847 m)高于阿尔卑斯山(Hintereis F. 冰川为 3 118 m、Careser 冰川为 3 283 m、Vernagt F. 冰川为 3 201 m)和高亚洲阿尔泰山(Maliy Aktru 冰川为 3 185 m)的冰川平衡线高度,斯瓦尔巴平衡线高度最低(Austre Broeggerbreen 和 Midtre Lovenbreen 冰川平衡线高度分别为 428 m、405 m)。

### 3 结论

(1) 斯瓦尔巴冰川物质平衡变化主要呈负平衡/平衡、略微增长两种状态,冰川净平衡年际变化波动幅度较大且呈负平衡趋势;累积物质平衡表现出长期稳定的负平衡增长态势,除 Kongsvegen 冰川外,其他冰川不存在短期内的平衡波动。高亚洲冰川年均物质平衡均为负值,整体处于退缩状态;部分冰川在 20 世纪 80-90 年代出现短暂的冰川前进,90 年代中后期出现加速消融趋势。阿尔卑斯山的冰川年均负物质平衡值最大,为 -907 mm;其次是斯瓦尔巴,为 -431 mm;高亚洲最小,为 -264 mm。

(2) 高亚洲和斯瓦尔巴冰川物质平衡年振幅较小,年际变化较小;阿尔卑斯山冰川物质平衡年振幅较大,年际变化较大。斯瓦尔巴冰川物质平衡趋向正平衡,阿尔卑斯山和高亚洲冰川物质平衡趋向负平衡。斯瓦尔巴和高亚洲冰川 20 世纪 90 年代中期开始加速消融,阿尔卑斯山冰川 20 世纪 80 年代初起物质亏损加速。

(3) 斯瓦尔巴内陆的冰川平衡线高度高于沿海地区,斯匹次卑尔根岛西海岸北部海拔较高的冰川平衡线高度低,南部海拔较高的冰川平衡线高度高。高亚洲冰川平衡线高度呈纬向地带性、经向地带性和区域地带性的分布规律。阿尔卑斯山的冰川平衡线高度主要受冰川所处海拔的影响。

(4) 对三个区域 8 条冰川平衡线高度对比分析发现,高亚洲天山冰川均平衡线高度高于阿尔卑斯山和高亚洲阿尔泰山,斯瓦尔巴平衡线高度最低。

## 参考文献(References):

- [1] Qin Dahe. Glossary of cryosphere science [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2014. [秦大河. 冰冻圈科学词典 [M]. 北京: 气象出版社, 2014.]
- [2] Cao Meisheng. Abrupt changes in glacier mass balance over Northern Hemisphere [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1999, 21(3): 249-259. [曹梅盛. 北半球冰川物质平衡的突变 [J]. 冰川冻土, 1999, 21(3): 249-259.]
- [3] Ding Yongjian, Bing Hongtao. Variations of glacier mass balance and their response to climatic change [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1996, 18(Suppl 1): 23-32. [丁永建, 炳洪涛. 近 40 年来冰川物质平衡变化及对气候变化的影响 [J]. 冰川冻土, 1996, 18(增刊 1): 23-32.]
- [4] Oerlemans J. Quantifying global warming from the retreat of glaciers [J]. Science, 1994, 264(5156): 243-245.
- [5] Hoelzle M, Haeberli W, Dischl M, et al. Secular glacier mass balances derived from cumulative glacier length changes [J]. Global and Planetary Change, 2003, 36(4): 295-306.
- [6] Kang Ersi. Characteristics of energy balance and computation on the mass balance change of the High-Asia cryosphere [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1996, 18(Suppl 1): 12-22. [康尔泗. 高亚洲冰冻圈能量平衡特征和物质平衡变化计算研究 [J]. 冰川冻土, 1996, 18(增刊 1): 12-22.]
- [7] 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. [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.]
- [8] Wang Weidong, Zhang Guofei, Li Zhongqin. Study on equilibrium line altitude and its relationship with climate change of Ürtümqi Glacier No. 1 in Tianshan Mountains in recent 52 years [J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(1): 124-132. [王卫东, 张国飞, 李忠勤. 近 52 a 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川物质平衡线高度及其与气候变化关系研究 [J]. 自然资源学报, 2015, 30(1): 124-132.]
- [9] Qin Dahe, Stocker T. Highlights of the IPCC Working Group I fifth assessment report [J]. Advances in Climate Change Research, 2014, 10(1): 1-6. [秦大河, Stocker T. IPCC 第五次评估报告第一工作组报告的亮点结论 [J]. 气候变化研究进展, 2014, 10(1): 1-6.]
- [10] 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. [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.]
- [11] Wang Sheng, Pu Jianchen, Wang Ninglian, et al. Study of mass balance and sensibility to climate change of Qiyi Glacier in Qilian Mountains [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(6): 1214-1221. [王盛, 蒲建辰, 王宁练, 等. 祁连山七一冰川物质平衡及其对气候变化的敏感性研究 [J]. 冰川冻土, 2011, 33(6): 1214-1221.]
- [12] Zhang Jian, He Xiaobo, Ye Baisheng, et al. Recent variation of mass balance of the Xiao Dongkemadi Glacier in Tanggula Range and its influencing factors [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(2): 263-271. [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.]
- [13] Zhang Guofei, Li Zhongqin, Wang Wenbin, et al. Change processes and characteristics of mass balance of the Ürtümqi Glacier No. 1 at the headwaters of the Ürtümqi River, Tianshan Mountains, during 1959-2009 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 34(6): 1301-1309. [张国飞, 李忠勤, 王文彬, 等. 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 [J]. 冰川冻土, 2012, 34(6): 1301-1309.]
- [14] Dong Zhiwen, Qin Dahe, Ren Jiawen, et al. Variations in the equilibrium line altitude of Ürtümqi Glacier No. 1, Tianshan Mountains, over the past 50 years [J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(36): 4776-4783. [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.]
- [15] Wang Ninglian, He Jianqiao, Pu Jianchen, et al. Variations in equilibrium line altitude of the Qiyi Glacier, Qilian Mountains, over the past 50 years [J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(33): 3810-3817. [王宁练, 贺建桥, 蒲建辰, 等. 近 50 年来祁连山七一冰川平衡线高度变化研究 [J]. 科学通报, 2010, 55(32): 3107-3115.]
- [16] Ye Wanhua, Wang Feiteng, Li Zhongqin, et al. Temporal and spatial distributions of the equilibrium line altitudes of the monitoring glaciers in High Asia [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(6): 1459-1469. [叶万花, 王飞腾, 李忠勤, 等. 高亚洲定位监测冰川平衡线高度时空分布特征研究 [J]. 冰川冻土, 2016, 38(6): 1459-1469.]
- [17] Wang Kai, Yang Taibao, Shao Wanwan, et al. Remote sensing monitoring on glacier change in the middle of the Alps in Switzerland from 1984 to 2013 [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015, 22(5): 300-305. [王凯, 杨太保, 邵婉婉, 等. 1984-2013 年阿尔卑斯山中段瑞士地区冰川变化遥感监测 [J]. 水土保持研究, 2015, 22(5): 300-305.]
- [18] Fujita K. Effect of precipitation seasonality on climatic sensitivity of glacier mass balance [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2008, 276(1): 14-19.
- [19] Vieli A. Tidewater glaciers [M] // Reitner J, Thiel V. Encyclopedia of earth sciences series. Berlin: Springer, 2011: 1175-1179.
- [20] Xie Zichu, Zhou Zaigen, Li Qiaoyuan, et al. Progress and prospects of mass balance characteristic and responding to global change of glacier system in High Asia [J]. Advances in Earth Science, 2009, 24(10): 1065-1072. [谢自楚, 周宰根, 李巧媛, 等. 高亚洲冰川系统物质平衡特征及其对全球变化响应研究进展与展望 [J]. 地球科学进展, 2009, 24(10): 1065-1072.]
- [21] Yao Tandong, Liu Shiyin, Pu Jianchen, et al. Recent recession of High Asian glaciers and their impacts on water resources in Northwest China [J]. Science in China: Series D Earth Sciences, 2004, 34(6): 535-543. [姚檀栋, 刘时银, 蒲建辰, 等. 高亚洲冰川的近期退缩及其对西北水资源的影响 [J]. 中国科学: D 辑 地球科学, 2004, 34(6): 535-543.]
- [22] 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): 1131-1139. [苏勃, 李忠勤, 张明军, 等. 大陆性冰川与海洋性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): 1131-1139.]
- [23] Grabiec M, Jania J, Puczek D, et al. Surface and bed morphology of Hansbreen, a tidewater glacier in Spitsbergen [J]. Polish



- Polar Research ,2012 ,33(2) : 111 – 138.
- [24] He Haidi ,Li Zhongqin , Wang Puyu , et al. Variation characteristics of glacier mass balance in Svalbard , Arctic , in recent 50 years [J]. Journal of Glaciology and Geocryology , 2017 , 39 (4) : 701 – 709. [何海迪,李忠勤,王璞玉,等. 近50年来北极斯瓦尔巴地区冰川物质平衡变化特征[J]. 冰川冻土, 2017, 39(4) : 701 – 709. ]
- [25] Haeberli W , Beniston M. Climate change and its impacts on glaciers and permafrost in the Alps [J]. AMBIO A Journal of the Human Environment , 1998 , 27(4) : 258 – 265.
- [26] Paul F , Haeberli W. Spatial variability of glacier elevation changes in the Swiss Alps obtained from two digital elevation models [J]. Geophysical Research Letters , 2008 , 35(21) : 189 – 203.
- [27] Kohler J , James T D , Murray T , et al. Acceleration in thinning rate on western Svalbard glaciers [J]. Geophysical Research Letters , 2007 , 34(18) : 529 – 538.
- [28] Wang Shengjie , Zhang Mingjun , Li Zhongqin , et al. Recent changes in freezing level heights in High Asia and their impact on glacier changes [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres , 2014 , 119(4) : 1753 – 1765.
- [29] Wang Jian. Modern physical geography [M]. Beijing: Higher Education Press , 2010. [王建. 现代自然地理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010. ]
- [30] Li Jijun. The book of *An introduction of glaciers in China* [J]. Journal of Glaciology and Geocryology , 1992 , 14(3) : 287. [李吉均. 《中国冰川概论》[J]. 冰川冻土, 1992, 14(3) : 287. ]
- [31] Wang Shuhong , Xie Zichu , Li Qiaoyuan. Comparison study of glacier variation in east and west Tianshan Mountains [J]. Journal of Glaciology and Geocryology , 2008 , 30(6) : 946 – 953. [王淑红, 谢自楚, 李巧媛. 近期东西天山冰川变化的对比研究[J]. 冰川冻土, 2008, 30(6) : 946 – 953. ]
- [32] Kang Xingcheng , Voloshina A P , Xie Zichu. Climate in Tianshan Mountains [M] // Liu Chaohai , Xie Zichu , Durgerov M B. Glaciations in Tianshan. Beijing: Science Press , 1998: 45 – 60. [康兴成, 沃洛申娜, 谢自楚. 天山山区的气候[M] // 刘朝海, 谢自楚, 久尔盖诺夫. 天山冰川作用. 北京: 科学出版社, 1998: 45 – 60. ]

## Comparative studies of the glacier mass balance in Svalbard , High Asia and Alps

HE Haidi<sup>1</sup> , LI Zhongqin<sup>1,2</sup> , YE Wanhua<sup>1</sup> , LIANG Pengbin<sup>1</sup> , MU Jianxin<sup>1</sup> , ZHANG Mingjun<sup>1</sup>  
( 1. College of Geography and Environment Sciences , Northwest Normal University , Lanzhou 730070 , China; 2. State Key Laboratory of  
Cryospheric Science / Tianshan Glaciological Station , Northwest Institute of Eco-Environment and Resources ,  
Chinese Academy of Sciences , Lanzhou 730000 , China)

**Abstract:** Based on the data of glacier mass balance and equilibrium line altitude , the characteristics of glacier mass balance change and equilibrium line altitude spatial distribution in Svalbard ( Arctic ) , High Asia and Alps were analyzed. The following conclusions can be drawn: ( 1 ) Recently , the glacier mass balance is negative frequently , with the maximum average annual negative mass balance in Alps , reaching to – 907 mm , followed by Svalbard , – 431 mm , and then in High Asia , reaching to – 264 mm. ( 2 ) The annual amplitudes of the mass balance in Svalbard and High Asia are relatively low , with small annual variation. The annual changing amplitude of the glacier mass balance in Alps is higher , with large annual variation. The glacier mass balance in Svalbard tends to be positive , and that in High Asia and Alps tend to be negative. ( 3 ) The glacier equilibrium line altitude in the interior of Svalbard is higher than that in coast. The glacier equilibrium line altitude in High Asia shows a latitudinal zonality , a longitudinal zonality and a regional zonality. The glacier equilibrium line altitude in Alps is mainly controlled by altitude.

**Key words:** Svalbard; High Asia; Alps; glacier; mass balance; equilibrium line altitude

( 本文编辑: 武俊杰)