#### DOI: 10.7522/j. issn. 1000-0240. 2017. 0080

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.]

# 近 50 年来北极斯瓦尔巴地区冰川物质平衡变化特征

# 何海迪<sup>1</sup>, 李忠勤<sup>12</sup>, 王璞玉<sup>2</sup>, 张明军<sup>1</sup>, 王 $M^2$

(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:利用长时间序列的冰川物质平衡资料,详细分析了北极斯瓦尔巴地区冰川的物质平衡变化特 征以及气候因子对物质平衡的影响。结果表明:近 50 年来斯瓦尔巴地区冰川物质平衡变化主要呈负 平衡、零平衡/略微增长两种状态。冰川净平衡一般为负值,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。季节变化表现为夏季消融、冬季积累,且夏季消融比冬季积累波动更大,冰川净平衡与夏季 消融保持同步变化趋势。冰川净平衡与平衡线高度(ELA)呈负相关(平均相关系数为-0.89),与积累 区面积比率(AAR)呈正相关(平均相关系数为0.84),该地区大多数冰川 AAR 减小,说明冰川物质补 给处于劣势,冰川物质平衡向负平衡发展。夏季气温升高是斯瓦尔巴地区冰川表面物质加速亏损的直 接原因。

关键词:北极;斯瓦尔巴;冰川物质平衡;平衡线高度(ELA);气候变化 中图分类号: P343.6 文献标志码: A 文章编号: 1000-0240(2017)04-0701-09

# 0 引言

20世纪以来全球气温持续升高,导致冰川面 积急剧萎缩、厚度迅速变薄、冰储量严重亏损,冰 川变化已引起全球人们的广泛关注<sup>[1]</sup>。冰川变化 对气候变化非常敏感,而冰川物质平衡的变化对气 候变化响应最明显。冰川物质平衡是联系气候和冰 川变化的纽带,是冰川对所在地区气候状况直接 的、不滞后的反映,是连接冰川作用区能量-物质-水交换的纽带<sup>[2]</sup>,因此对它的研究备受关注<sup>[3]</sup>。气 候变暖背景下研究北极小冰川物质平衡变化及其对 气候变化的响应,对于认知未来海平面变化具有重 要价值<sup>[4]</sup>。斯瓦尔巴地区位于北大西洋暖流的最 北端,其冰川物质平衡对北大西洋暖流的波动和相 应的气候变化十分敏感,是国际上监测研究的重点 区域之一。

挪威极地研究所最早于 1950 在 Finsterwalder-

been 冰川上开展了系统的物质平衡观测,计算出了 冰体长度、汇水面积和冰川面积,1950-1968年期 间冰川体积减小,表面高程降低,冰川稳定退 缩<sup>[5]</sup>。之后,分别干1966年和1967年对具有最长 物质平衡观测序列的 Austre Brøggerbreen 冰川和 Midtre Lovénbreen 冰川开展物质平衡观测。研究显 示, 自小冰期结束以来几乎所有的观测年中夏季消 融比冬季积累更大,导致冰体稳定地减小。虽然两 条冰川均呈负物质平衡状态,但无明显的增减趋 势。Austre Brøggerbreen 冰川在 1966 – 1988 年间累 积物质损失量超过 1967 年冰川体积的 10%, Midtre Lovénbreen 冰川在 1967 - 2002 年间没有明 显的变化趋势<sup>[6-7]</sup>。苏联从 1974 年开始陆续对斯 瓦尔巴地区 3 条山谷冰川开展短期的物质平衡观 测。结果显示,冬季积累相对稳定,夏季消融波动 较大,而冰川净物质平衡与夏季消融保持同步变化 的趋势<sup>[8]</sup>。1987年挪威冰川学家对面积更大、海

收稿日期: 2017-03-13; 修订日期: 2017-04-30

基金项目:国家重大科学研究计划项目(2013CBA01801);国家自然科学基金项目(41301069;41641003)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.

±

39 卷

拔更高的 Kongsvegen 冰川进行物质平衡和运动速 度观测,发现1987-1999年该冰川物质平衡呈略 微增长的态势,且冬季积累和夏季消融没有趋势性 表现<sup>[9]</sup>,该冰川更加接近稳定态的平衡<sup>[10]</sup>。波兰 冰川学家于 1989 年对 Hansbreen 冰川进行观测研 究,发现1989-2001年期间冰川稳定退缩<sup>[9]</sup>。

我国学者于 2004 年 7 月在斯瓦尔巴群岛新奥 尔松(Ny-Ålesund, 78.55°N、11.56°E) 建立黄河 站并进行了首次冰川考察,深入了解了站区附近的 冰川分布、冰川类型、到站区距离、正在开展的冰 川监测。根据后勤保障条件和冰川学研究意义选择 了 Austre Lovénbreen 冰川和 Pedersenbreen 冰川作 为监测对象,弥补了我国冰川学研究在北极地区的 空白。艾松涛等[11]在2005年第二次北极黄河站考 察期间,分析了利用差分 GPS 进行北极冰川运动 监测的可行性和优越性,初步处理了首期 GPS 监 测的数据,得出了较为满意的结果,并讨论了在北 极冰川上进行 GPS 测量应该注意的问题。徐明星 等[12]总结了北极斯瓦尔巴地区自 1950 年以来冰川 物质平衡的主要特征,冰川净平衡、冬季积累和夏 季消融没有明显的长期变化趋势,净平衡一般为负 值,导致冰体不断缩减;净平衡与冰川平衡线高度 具有良好的负相关性。程振波等<sup>[13]</sup>对斯瓦尔巴群 岛的地理、历史、气候环境、矿产资源和动植物等 进行了概述。徐明星等<sup>[4]</sup>对比分析了 1946 - 2005 年斯瓦尔巴地区、斯堪的纳维亚与挪威南部冰川的 物质平衡,发现斯瓦尔巴地区冰川物质平衡具有较 低的年振幅和较小的年际变化; 越是趋向海洋型的 冰川其气候敏感性越高。徐明星等<sup>[14]</sup>对斯瓦尔巴 地区 Austre Lovénbreen 冰川和 Pedersenbreen 冰川 表面物质平衡进行了分析, Austre Lovénbreen 冰川 和 Pedersenbreen 冰川物质平衡分别为 - 440 mm 和 -200 mm, 消融量分别为 990 mm 和 940 mm, 冰 川零平衡线高度分别为478 m 和 494 m。李鹏等<sup>[1]</sup> 以北极 Austre Lovénbreen 冰川为例对基于 GIS 的 冰川末端变化计算方法进行了研究,建议用最短距 离的特征点法计算冰川末端变化量。艾松涛等[15] 研究了 Pedersenbreen 冰川变化,发现该冰川从20 世纪初小冰期结束以后经历了一个明显的退缩,冰 舌退缩了0.6 km 以上,体积减少了近13%,且在 最近 20 年出现了加速消融的趋势。2009-2011 年 孙维君等<sup>[16]</sup>在 Austre Lovénbreen 冰川上 B2、E2 和 F点开展了20m 千层冰温监测工作,3点处冰温活 动层下界的深度均为14m,冰温年平均值分别为

-2.76 ℃、-3.23 ℃和-2.84 ℃。丁一等[17]利用 斯瓦尔巴地区 1901 - 2014 年的月平均气温资料分 析了该地区的气候特征及趋势变化,发现年平均气 温呈现上升趋势, 增温率为 0.27 ℃ ·(10a)<sup>-1</sup>, 春、冬季增温明显, 气温序列在1999年发生突变, 增温速率明显加快。

鉴于此,本文综合已有研究,并选取斯瓦尔巴 地区监测序列较长的7条冰川的物质平衡观测资料 以及冰川附近气象站资料,分析了冰川年物质平衡 和累积物质平衡变化、季节物质平衡变化、平衡线 高度和积累区面积比率变化,以及冰川物质平衡与 气候变化的关系。本研究对斯瓦尔巴地区生态环境 监测和全球气候预测,以及冰川物质平衡动态监测 和研究具有重要意义。

#### 1 研究区概况

斯瓦尔巴是北冰洋上的一个群岛,属于挪威领 土,位于北大西洋暖流的最北端。整个岛屿被浅海 大陆架包围,总面积为 62 248 km<sup>2</sup>,主要岛屿有斯 匹次卑尔根岛、东北地岛、巴伦支岛、埃季岛。其 地貌由许多陡峭崎岖的山脉和冰川侵蚀的峡湾组 成,东部的岛屿临近巴伦支海,地形平坦,以低海 拔的冰帽为主。该地区约60%的地表被冰川(帽) 覆盖,冰川总数超过2100条,普遍发育山谷或冰 斗冰川<sup>[18]</sup>,总的冰体积约为7000 km<sup>3</sup>。境内几乎 涵盖了所有类型的冰川,大部分为亚极地型或多热 型的小冰川( $<5 \text{ km}^2$ )<sup>[19]</sup>。受大西洋暖流的影响, 斯瓦尔巴地区实际气温较同纬度其他地区偏高。在 斯匹次卑尔根岛西海岸,年均温为-6℃,最暖月 (7月) 气温可达 5~6 ℃, 最冷月(1-3月) 气温为 -15 ℃<sup>[18]</sup>。内陆地区气温略微低于沿海地区,而 且更具大陆性特点。斯匹次卑尔根岛属于苔原气 候,海洋性气候特征显著,多雾<sup>[13]</sup>。冰川及气象站 点分布如图1所示。

#### 2 数据来源

冰川物质平衡数据来自世界冰川监测服务处 (WGMS),包括冰川净平衡、夏平衡、冬平衡以 及平衡线高度和积累区面积比率。Austre Lovénbreen 冰川数据来自于李忠勤研究团队的观 测。冰川基本信息见表1。斯瓦尔巴机场站已经 恢复了斯瓦尔巴地区 1912 年以来的气温资料,本 文选取该气象站 1965 - 2015 年的气温资料作为 研究对象。斯瓦尔巴机场站的气温变化与格陵兰 地区具有较好的一致性,而且与斯堪的纳维亚地 区具有一定的相似性。由此,斯瓦尔巴机场站气 温资料在斯瓦尔巴地区乃至格陵兰等地区都具有 一定的代表性,能够反映当地气候变化特征<sup>[20]</sup>。 1975 – 2015 年的降水资料来自于新奥尔松气象 站。两气象站信息见表2。



# 图1 斯瓦尔巴地区冰川物质平衡观测点分布

Fig. 1 Map showing the Svalbard archipelago and the location of glaciers whose mass balance had been studied

王 1	能互复口地区冰川其木信目	
18 1		

Table 1	Basic	info	ormation	of t	he	seven	g	laciers	in	Sval	bard	l
---------	-------	------	----------	------	----	-------	---	---------	----	------	------	---

冰川名称	海拔/m		长度	面积		
	最高	最低	/km	$/\mathrm{km}^2$	数据中切	
Austre Brøggerbreen	600	60	6.0	6.1	1967 - 2015	
Austre Lovénbreen	550	107	3.7	4.5	2005 - 2014	
Hansbreen	510	0	15.4	56.7	1989 – 1995 , 1998 – 2014	
Irenbreen	650	125	3.9	4.1	1995 - 2015	
Kongsvegen	1 050	0	27.0	101.9	1967 - 2015	
Midtre Lovénbreen	650	50	4.8	5.5	1968 - 2015	
Waldemarbreen	570	150	3.3	2.6	1995 – 2015	

<b>表</b> 2	斯万尔巴地区气象站信息
18 4	新加小口地区(家如旧志

Table 2 Information of the two meteorological stations in Svalbard					
气象站名称	<b>经度</b> /E°	纬度/N°	海拔/m	数据年份	
斯瓦尔巴机场( Svalbardairport)	15.28	78.15	28	1965 – 2015	
新奥尔松( Ny-Ålesund)	11.55	78.55	8	1975 – 2015	

 $\pm$ 

## 3 冰川物质平衡变化特征

# 3.1 年际变化

斯瓦尔巴地区冰川物质平衡年际变化波动较大 且呈负平衡趋势。对比观测结果发现,该地区冰川 物质平衡变化主要呈负平衡、零平衡/略微增长两 种状态。Austre Brøggerbreen 冰川、Kongsvegen 冰 川和 Midtre Lovénbreen 冰川具有较长的物质平衡 观测序列,1968-2015年期间冰川净物质平衡分别 为-453 mm、42 mm 和-380 mm, 仅在 1987 年和 1991 年3 条冰川同时显示出正物质平衡状态,说明 这两年为异常冷夏, 消融量比平均年份少。虽然3 条冰川均呈负物质平衡状态,但并未呈现明显的增 减趋势。2005 – 2014 年, Austre Lovénbreen 冰川主 要呈负物质平衡状态,物质平衡呈波动变化,年际 变化显著,且有负平衡发展的趋势,2014年达极大 正平衡值,其余年份一直呈负平衡状态。Irenbreen 冰川和 Waldemarbreen 冰川物质平衡年际变化波动 较大且负平衡趋势明显,冰川净平衡分别为 -840 mm 和 -700 mm, 说明冰川一直处于退缩状 态。Irenbreen 冰川消融最强烈,自 2010 年起该冰 川出现加速消融趋势。位于斯瓦尔巴地区南部的 Hansbreen 冰川,属于较为平坦的潮汐型冰川。在 风潮的影响下冰川自身的活动性较强,极地东风盛 行,风力强劲,每年至少有40天风力超过15m・ s<sup>-1</sup>,风吹雪现象严重,导致冰川表面积雪覆盖极不 均匀,加之末端崩解严重,对该冰川物质平衡变化 影响较大[21]。Hansbreen 冰川自观测以来冰川年物 质平衡在 -1 100~150 mm 间波动,年均净平衡为 -298 mm。1989-2005 年净平衡呈显著下降趋势, 2005年之后该冰川净平衡出现较多正值。2005-2014 年净平衡也呈下降趋势,但负平衡趋势较 1989-2005年弱。该冰川物质平衡年际变化主要 受夏季积雪消融的影响。

图 2 为冰川净物质平衡累积曲线。这些冰川大 多面积较小,海拔较低,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。Kongsvegen 冰川面积较大,海拔较高(0~1050 m),且具有大 范围的粒雪带,是斯瓦尔巴地区变化最不稳定的冰 川之一<sup>[12]</sup>。1978 – 2002 年累积物质平衡值呈正平 衡增长,期间有两次明显的波动,1996 年达到峰值 1470 mm,1997 – 2004 年物质亏损加速,2005 – 2008 年保持稳定的负平衡。Kongsvegen 冰川累积 物质平衡为 - 2 082 mm,年均物质亏损仅为 39 mm。 Hansbreen 冰川累积物质平衡为 - 7 153 mm,年均 亏损相对较慢,为 272 mm。2004 - 2008 年保持稳 定的负平衡,2009 年后物质亏损速率减缓。Irenbreen 冰川和 Waldemarbreen 冰川累积物质平衡曲 线斜率较其他冰川大,反映出具有较高的冰川消融 量。这是因为这两条冰川冬季积累相对较少,且夏 季消融较大。Austre Lovénbreen 冰川 2005 - 2010 年累积物质平衡呈稳定负平衡变化,2011 年开始冰 川物质亏损加速。



图 2 期 LL小口地区小川系积初原平衡受化 Fig. 2 Variations of the cumulative mass balances of the seven glaciers in Svalbard

# 3.2 季节变化

斯瓦尔巴地区冰川冬平衡均值为 672 mm,夏 平衡均值为 -1 095 mm, 季节差异明显(图 3)。 Austre Brøggerbreen 冰川、Kongsvegen 冰川和 Midtre Lovénbreen 冰川冬季积累和夏季消融没有趋 势性的表现,且冬季积累波动亦小于夏季消融。 Hansbreen 冰川冬平衡均值为 963 mm, 夏平衡均值 为-1 279 mm, 是所选冰川中冬季积累量和夏季消 融最量大的冰川。Austre Lovénbreen 冰川、Irenbreen 冰川和 Waldemarbreen 冰川同样显示出冬季 积累相对稳定、夏季消融波动较大,而冰川净平衡 与夏季消融保持同步变化的趋势。而且 Irenbreen 冰川和 Waldemarbreen 冰川冬季积累相对较少,夏 季消融较大,冰川年消融量较高。斯瓦尔巴地区冰 川物质平衡季节变化总体上表现出夏季消融、冬季 积累,且夏季消融比冬季积累波动更大,冬季积累 相对稳定的变化趋势。冰川净平衡与夏季消融保持 同步变化趋势,即年变化主要受夏平衡变化的 影响。

# 3.3 冰川物质平衡与平衡线高度

平衡线高度(ELA) 是冰川积累区与消融区的



图3 斯瓦尔巴地区冰川物质平衡季节变化

Fig. 3 Variations of the seasonal mass balances of the seven glaciers in Svalbard

重要分界线,也是冰川对气候变化响应的一个重要 参数<sup>[22-23]</sup>。冰川净平衡与平衡线高度之间具有高 度相关性。徐明星等<sup>[12]</sup>将Austre Brøggerbreen 冰 川、Midtre Lovénbreen 冰川、Kongsvegen 冰川和 Hansbreen 冰川历年净物质平衡与平衡线高度实测 资料通过回归分析得出简单线性方程,相关系数分 别为-0.96、-0.95、-0.97和-0.95,表明冰川 净平衡与平衡线高度之间具有良好的负相关性。 本文对斯瓦尔巴地区冰川净平衡和平衡线高度 数据(表3)回归分析发现,Austre Brøggerbreen 冰 川净平衡与平衡线高度相关系数为-0.95,49年间 平衡线高度上升47 m,且正平衡年比负平衡年高 出178 m。Austre Lovénbreen 冰川净平衡与平衡线 高度相关系数为-0.95,平衡线在212~571 m之 间震荡,正平衡年比负平衡年高出70 m。Hansbreen 冰川净平衡与平均平衡线高度相关系数为 -0.69,自观测以来平衡线高度下降了2.5 m,风 吹雪导致雪再沉积,该冰川平衡线向西部低海拔的 Aust

Irenbreen

Kongsvegen

Midtre Lovénbreen

Waldemarbreen

主 3

-11 760

-2 080

-18 250

-14 740

斯瓦尔巴地区冰川物质亚海信自

农。——新加尔巴地区外川10灰千度旧心								
Table 3 Information of mass balances of the seven glaciers in Svalbard								
冰川名称	年均净平衡	累积物质平衡	年均亏损	平均平衡线高度	零平衡线高度	平衡线高度上升值		
	/mm	/mm	/mm	/ m	/ m	/ m		
re Brøggerbreen	- 453	- 22 170	439	428	331	47		
tre Lovénbreen	- 387	-3 510	297	431	360	57		
Hansbreen	- 298	-7 150	272	358	314	- 3		
Hansbreen	- 298	-7 150	272	358	314	- 3		

796

39

380

685

437

553

407

427

冰川中心线倾斜。Irenbreen 冰川净平衡与平衡线高 度相关系数为-0.92,该冰川是所选冰川中平衡线 高度变化幅度最大的(上升 230 m)。Kongsvegen 冰川净平衡与平衡线高度相关系数为-0.97,正平 衡年与负平衡年之比为 20:29,是所选冰川中平衡 线海拔最高和正物质平衡年最多的冰川。Midtre Lovénbreen 冰川净平衡与平衡线高度相关系数为 -0.94,48 年来平衡线高度上升14 m,正平衡年比 负平衡年高 140 m。Waldemarbreen 冰川净平衡与 平衡线高度相关系数为-0.87,近20年平衡线高 度上升 103 m。相关系数说明斯瓦尔巴地区冰川净 平衡与平衡线高度具有高度的负相关性,与徐明星 等<sup>[12]</sup>研究结果一致。Austre Brøggerbreen 冰川、 Irenbreen 冰川、Midtre Lovénbreen 冰川和 Waldemarbreen 冰川的平均平衡线高度远高于其稳定状态 的平衡线高度(零平衡线高度),说明冰川消融强 烈。Kongsvegen 冰川平均平衡线高度接近其稳定 状态的平衡线高度,与该冰川观测期间处于平衡或 略微增长状态相一致。

- 840

-40

- 380

-700

## 3.4 积累区面积比率变化

积累区面积比率(accumulation area ratio, AAR)作为平衡线高度变化的一个重要指标,其大 小可反映冰川补给条件的优劣<sup>[24]</sup>,因此WGMS将 AAR作为衡量冰川物质平衡变化的重要指标。斯 瓦尔巴地区冰川净平衡与AAR呈正相关(平均相 关系数为0.84)。当AAR减小到零时,整条冰川 均为消融区。Austre Brøggerbreen冰川49年间 AAR下降了16%,其中有6年AAR等于零,整条 冰川均为消融区。Hansbreen冰川的AAR呈上升趋 势,增加了12%,2000年和2001年整条冰川均为 消融区。Irenbreen冰川的AAR是所选冰川中下降 趋势最明显的,缩小了30%。Kongsvegen冰川的 AAR 下降了 28%,截至 2015 年该冰川一直有积累 区存在。Midtre Lovénbreen 冰川的 AAR 下降了 23%,其中有 3 年整条冰川均为消融区。Waldemarbreen 冰川的 AAR 减小了 18%,1998 年和 2013 年该冰川平衡线高度超出了冰川上界,AAR 为零, 整条冰川处于消融状态。斯瓦尔巴地区大多数冰川 的 AAR 减小,说明冰川物质补给处于劣势,冰川 物质平衡向负平衡发展。

308

535

302

292

# 4 气候因子对冰川物质平衡的影响

### 4.1 气温

斯瓦尔巴地区是20世纪增温最显著区域之一。 斯瓦尔巴机场站的气温资料[图4(a)]显示,该区 域有0.27 ℃・(10a)<sup>-1</sup>的增温趋势,1901-2014 年 气温增长3.05 ℃,多年平均气温为-6.01 ℃。四 季气温均呈升高趋势,其中冬季升温最明显,夏季 升温速度最慢,年内最高温出现在7月。Mann-Kendall 突变性检验结果表明,在0.01 水平的显著 性检验之下,气温在1999年发生突变,之后增温趋 势显著<sup>[17]</sup>。新奥尔松站的气温资料 [图 4( a) ]显 示,该区域有0.79 ℃·(10a)<sup>-1</sup>的增温趋势,夏季 呈 0.21 ℃ ·(10a)<sup>-1</sup>的增温趋势, 气温升高加剧了 冰川物质亏损。将新奥尔松站的夏季气温与冰川物 质平衡进行相关性分析,发现冰川物质平衡亏损与 夏季气温升高有很好的相关性(R = 0.73)。因此, 夏季气温升高是斯瓦尔巴地区冰川表面物质加速亏 损的直接原因,与徐明星等<sup>[12]</sup>研究结果一致。

# 4.2 降水

北极地区的降水通常较小,斯匹次卑尔根岛西 海岸的年降水量约为400 mm,内陆地区仅有 200 mm。受低压槽的作用,巴伦支海峡东风频繁, 使得巴伦支岛东海岸具有斯瓦尔巴地区最高的年降

231

56

14

103

39 卷



图 4 新奥尔松站夏季均温和斯瓦尔巴机场站年均温变化(a)及新奥尔松站冬季降水变化(b) Fig. 4 Annual variations of summer mean temperature in Ny-Ålesund Station and annual mean temperature in Svalbardairport Station (a) and winter precipitation in Ny-Ålesund Station

水量<sup>[25]</sup>。夏季降水占年降水总量的 20% 且呈下降 的趋势,说明夏季降水对冰川积累影响较小。选取 1975 - 2014 年冬平衡年(10 月至翌年 4 月) 降水数 据[图 4(b)]分析冬季降水对该地区冰川物质积累 的影响。结果表明,该地区近 40 年的降水呈缓慢 的增加趋势,降水量增加了 116 mm,且冬季降水 增量最大,1993 年出现最大值 490 mm,最小值 (143 mm)出现在 1982 年,冬季多年平均降水量为 268 mm。但冬季降水对该地区冰川物质平衡变化 影响并不显著,与徐明星等<sup>[12]</sup>研究结果(冬季降水 导致各冰川净平衡显著变化)不一致。这可能与近 年来冬季升温明显、积雪的年际变化主要受夏季消 融的影响、强劲的极地东风对降雪分布的影响<sup>[26]</sup> 有关。

# 4.3 环流

格陵兰岛以东包括挪威海、格陵兰海、巴伦支 海以及相关联的北欧大陆沿海及其岛屿,因为全年 都能受到北大西洋暖流的影响,使其成为北极圈里 最暖的地方<sup>[27]</sup>。近年来一项新的研究认为,北大 西洋暖流正在得到来自非洲南部的洋流"支援",受 气候变化影响,这一趋势可能会进一步加强,同时 厄加勒斯暖流正在给北大西洋经向翻转环流补充越 来越多的盐分,增强了北大西洋暖流的稳定性<sup>[28]</sup>。 北大西洋暖流使北极圈内增温作用明显,1月平均 气温比同纬度的亚洲海岸高出15~20 ℃<sup>[27]</sup>,导致 斯瓦尔巴地区冰川冬季积累对年平衡影响较小,夏 季消融强烈,冰川物质平衡呈负平衡发展。

# 5 结论

(1)近50年来斯瓦尔巴地区冰川物质平衡变 化主要呈负平衡、零平衡/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。

(2)斯瓦尔巴地区冰川冬平衡均值为 672 mm, 夏平衡均值为 -1 095 mm,季节差异明显。冰川物 质平衡季节变化总体上表现为夏季消融、冬季积 累,且夏季消融比冬季积累波动更大,冬季积累相 对稳定的变化趋势。冰川净平衡与夏季消融保持同 步变化趋势,即物质平衡年变化主要受夏平衡变化 的影响。

(3)回归分析发现斯瓦尔巴地区冰川净平衡与 平衡线高度具有高度的负相关性(平均相关系数为 -0.89),与积累区面积比率呈正相关(平均相关系 数为0.84)。如果物质平衡增加(减少)100 mm, 冰川平衡线高度将平均升高(下降)21 m,积累区 面积比率将平均增大(减小)4.5%。该地区大多数 冰川积累区面积比率减小,说明冰川物质补给处于 劣势,冰川物质平衡向负平衡发展。

(4) 斯瓦尔巴地区是 20 世纪增温最显著的区域之一,分析发现冰川物质平衡亏损与夏季气温升高有很好的相关性(*R*=0.73),夏季气温是影响该地区冰川物质平衡变化的主控因子。虽然该地区的降水也呈缓慢的增加趋势,但由于近年来该地区冬季升温明显、强劲的极地东风对降雪分布的影响、积雪的年际变化主要受夏季消融的影响等多种原因,冬季降水对该地区冰川净平衡变化影响较小。北大西洋暖流增温作用加剧了该地区冰川物质平衡向负平衡发展。

## 参考文献(References):

[1] Li Peng , Yan Ming , Xu Yuetong , et al. Calculation methods of

 $\pm$ 

- [2] Zhang Guofei, Li Zhongqin, Wang Weidong, et al. Mass balance change in east and west branches of Glacier No.1 at Ürümqi riverhead, China, during last 20 years [J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(9): 2412 - 2417. [张国飞,李忠勤,王卫 东,等. 近 20 年乌鲁木齐河源1号冰川东支和西支物质平衡 变化[J]. 生态学杂志, 2013, 32(9): 2412 - 2417.]
- [3] 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): 1131-1139.]
- [4] Xu Mingxing, Yan Ming, Kang Jiancheng, et al. Comparative studies of the glacier mass-balance and their climatic implications in Svalbard, Scandinavia and southern Norway [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(4): 641-648. [徐明 星,闫明,康建成,等. 北极 Svalbard、斯堪的纳维亚与挪威 南部冰川物质平衡对比及其气候意义[J]. 冰川冻土,2010, 32(4): 641-648.]
- [5] Hagen J O , Liestøl O. Long-term glacier mass-balance investigations in Svalbard , 1950 – 88 [J]. Annals of Glaciology , 1990 , 14: 102 – 106.
- [6] Hodson A, Kohler J, Brinkhaus M, et al. Multi-year water and surface energy budget of a high-latitude polythermal glacier: evidence for overwinter water storage in a dynamic subglacial reservoir [J]. Annals of Glaciology ,2005,42(1): 42-46.
- [7] Lefauconnier B , Hagen J O , Ørbæk J B , et al. Glacier balance trends in the Kongsfjorden area , western Spitsbergen , Svalbard , in relation to the climate [J]. Polar Research , 1999 , 18(2): 307 -313.
- [8] Jania J , Hagen J O. Report on mass balance of Arctic glaciers [R]. Cieszyn , Poland: International Arctic Science Committee , 1996: 28 - 54.
- [9] Svendsen H, Beszczynskamøller A, Hagen J O, et al. The physical environment of Kongsfjorden-Krossfjorden, an Arctic fjord system in Svalbard [J]. Polar Research, 2002, 21(1): 133 – 166.
- [10] Yan Ming, Ren Jiawen, Zhang Zhanhai, et al. The progress of glaciological studies in Svalbard and Chinese construction of glacier monitoring system close to Yellow River Station, Ny-Ålesund, Svalbard [J]. Chinese Journal of Polar Research, 2006, 18(2): 137-147. [闫明,任贾文,张占海,等. 斯瓦尔巴群岛冰川学研究进展与我国北极冰川监测系统建设[J].极地研究,2006,18(2): 137-147.]
- [11] Ai Songtao, E Dongchen, Yan Ming, et al. Arctic glacier movement monitoring with GPS method in 2005 [J]. Chinese Journal of Polar Research, 2006, 18(1): 1-18. [艾松涛,鄂栋臣, 闫明,等. 2005 年北极冰川首期 GPS 监测[J]. 极地研究, 2006, 18(1): 1-18.]
- [12] Xu Mingxing, Yan Ming, Kang Jiancheng, et al. Progress in studies on mass balance of glaciers, Svalbard, Arctic [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007, 29(5): 730 - 737. [徐明星,闫明,康建成,等. 北极 Svalbard 地区冰川物质平

衡研究进展[J]. 冰川冻土,2007,29(5):730-737.]

- [13] Cheng Zhenbo, Shi Xuefa, Wu Yonghua, et al. A survey of Norwegian Svalbard islands and glacial geomorphology in the Arctic regions [J]. Advances in Marine Science, 2008, 26(2): 260-265. [程振波,石学法,吴永华,等. 北极地区挪威斯 瓦尔巴德群岛及冰川地貌综述[J]. 海洋科学进展, 2008, 26 (2): 260-265.]
- [14] Xu Mingxing, Yan Ming, Ren Jiawen, et al. The studies of surface mass balance and ice flow on glaciers Austre Lovénbreen and Pedersenbreen, Svalbard, Arctic [J]. Chinese Journal of Polar Research, 2010, 22(1): 10 18. [徐明星, 闫明, 任贾文, 等. 北极 Svalbard 地区 Austre Lovénbreen 和 Pedersebreen 冰川 表面物质平衡和运动特征分析[J]. 极地研究, 2010, 22(1): 10 18.]
- [15] Ai Songtao, Wang Zemin, Tan Zhi, et al. Mass change study on Arctic Glacier Pedersenbreen, during 1936 – 1990 – 2009 [J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(25): 3148 – 3154. [艾松 涛,王泽民,谭智,等. 北极 Pedersenbreen 冰川变化(1936 ~ 1990 ~ 2009 年) [J]. 科学通报, 2013, 58(15): 1430 – 1437.]
- [16] Sun Weijun, Yan Ming, Ai Songtao, et al. Ice temperature characteristics of the Austre Lovénbreen Glacier in Ny-Ålesund, Arctic region[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2016, 41(1): 79 85. [孙维君, 闫明, 艾松涛,等. 北极新奥尔松地区 Austre Lovénbreen 冰川温度变化特征[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2016, 41(1): 79 85.]
- [17] Ding Yi, Xu Yuetong. Analysis on the characteristics of temperature change from 1901 to 2014 in Svalbard in the Arctic Pole
  [J]. Journal of Green Science and Technology, 2016(2): 15 18.
  [丁一,徐跃通.北极 Svalbard 地区 1901 2014 年气温变化特征分析[J].绿色科技,2016(2): 15 18.]
- [18] Hagen J O , Liestøl O , Roland E , et al. Glacier atlas of Svalbard and Jan Mayen [M]. Oslo , Norway: Norsk Polarinstitutt ,1993: 12 – 13.
- [19] Björnsson H , Gjessing Y , Hamran S E , et al. The thermal regime of sub-polar glaciers mapped by multi-frequency radio-echo sounding [J]. Journal of Glaciology , 1996 , 42(140): 23 – 32.
- [20] Kang Shichang, Yao Tandong, Qin Dahe. Characteristics of climatic change in Svalbard in the Arctic and comparison with the Qinghai-Xizang Plateau [J]. Scientia Geographica Sinica, 1998, 18(4): 312-319. [康世昌,姚檀栋,秦大河.北极 Svalbard 地区气候变化特征及其与青藏高原对比[J].地理科学, 1998,18(4): 312-319.]
- [21] Grabiec M , Jania J , Puczko D , et al. Surface and bed morphology of Hansbreen , a tidewater glacier in Spitsbergen [J]. Polish Polar Research , 2012 , 33(2): 111-138.
- [22] Wang Weidong, Zhang Guofei, Li Zhongqin. Study on equilibrium line altitude and its relationship with climate change of Ürümqi 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.]
- [23] 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.]
- [24] Zhang Guofei , Li Zhongqin , Wang Wenbin , et al. Change

processes and characteristics of mass balance of Glacier No.1 at the headwaters of the Ürümqi 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.]

- [25] Jiskoot H , Murray T , Boyle P. Controls on the distribution of surge-type glaciers in Svalbard [J]. Journal of Glaciology , 2000 ,46(154): 412 - 422.
- [26] Jaedicke C , Gauer P. The influence of drifting snow on the location of glaciers on western Spitsbergen , Svalbard [J]. Annals of Glaciology , 2005 , 42(1): 237 - 242.
- [27] Chen Jianwei. North-Atlantic current [J]. Man and the Biosphere, 2016(1): 33. [陈建伟. 北大西洋暖流[J]. 人与生物 圈, 2016(1): 33.]
- [28] North-Atlantic current have a new "support" [J]. Ocean World, 2009(12): 5. [北大西洋暖流有了新"支援" [J]. 海洋世界, 2009(12): 5.]

# Variation characteristics of glacier mass balance in Svalbard , Arctic , in recent 50 years

HE Haidi<sup>1</sup>, LI Zhongqin<sup>1,2</sup>, WANG Puyu<sup>2</sup>, ZHANG Mingjun<sup>1</sup>, WANG Lin<sup>2</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**: This research aims at analyzing mass balances of seven glaciers in Svalbard , Arctic , including Austre Brøggerbreen , Austre Lovénbreen , Hansbreen , Irenbreen , Kongsvegen , Midtre Lovénbreen and Waldemarbreen , by using their long-time series of mass balance. Also , the effects of temperature and precipitation on the mass balance are discussed. Results show that: In recent 50 years , glacier mass balance in Svalbard has been mainly in negative balance and zero balance with slightly positive balance two states. Cumulative mass balance has showed a negative balance without fluctuation in a short term , except for Kongsvegen. Seasonally , there has been ablation in summer and accumulation in winter , with ablation in summer more than accumulation in winter. Between glacier mass balance and the equilibrium line altitude (ELA) , there is a negatively correlation ( mean R = -0.89); between glacier accumulation area ratio is going to decrease , showing glacier mass supply is in a disadvantage , resulting in a negative balance of glacier mass. Summer temperature increasing is probably a direct cause for accelerating glacier mass loss.

Key words: Arctic; Svalbard; glacier mass balance; equilibrium line altitude (ELA); climate change

(本文编辑:武俊杰)