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¹, 李忠勤¹², 王璞玉², 张明军¹, 王 林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[1]。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[2],因此对它的研究备受关注[3]。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[4]。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[5]。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[6-7]。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[8]。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.

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^[9],该冰川更加接近稳定态的平衡^[10]。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^[9]。

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[13] 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[4] 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[14]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[1] 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[16]在 Austre Lovénbreen 冰川上 B2、E2 和 F点开展了20 m 千层冰温监测工作,3点处冰温活 动层下界的深度均为 14 m, 冰温年平均值分别为

 $-2.76 \, ^{\circ} \, ^{\circ}$

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 km²,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^[18],总的冰体积约为7000 km³。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 km²) [19]。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 ℃ [18]。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[13]。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^[20]。 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。

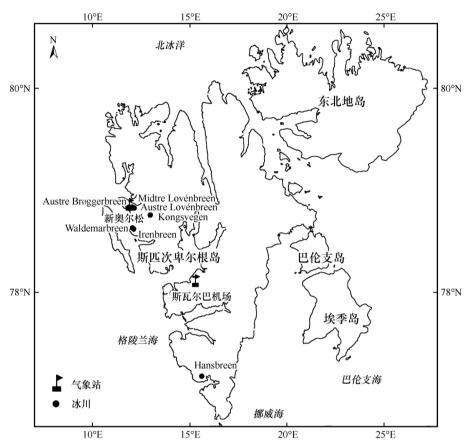


图 1 斯瓦尔巴地区冰川物质平衡观测点分布

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

表1 斯瓦尔巴地区冰川基本信息

Table 1 Basic information of the seven glaciers in Svalbard

| | | | C | | |
|---------------------|-------|-----|------|------------------|--|
| 冰川名称 | 海拔/m | | 长度 | 面积 | ************************************** |
| | 最高 | 最低 | /km | $/\mathrm{km}^2$ | 数据年份 |
| 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 |

表 2 斯瓦尔巴地区气象站信息

Table 2 Information of the two meteorological stations in Svalbard

| 气象站名称 | 经度/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 |

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15 m· s-1,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[12]。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。

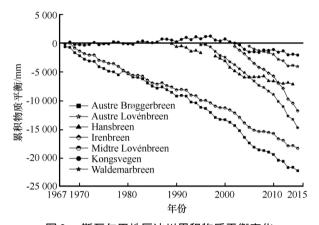


图 2 斯瓦尔巴地区冰川累积物质平衡变化

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

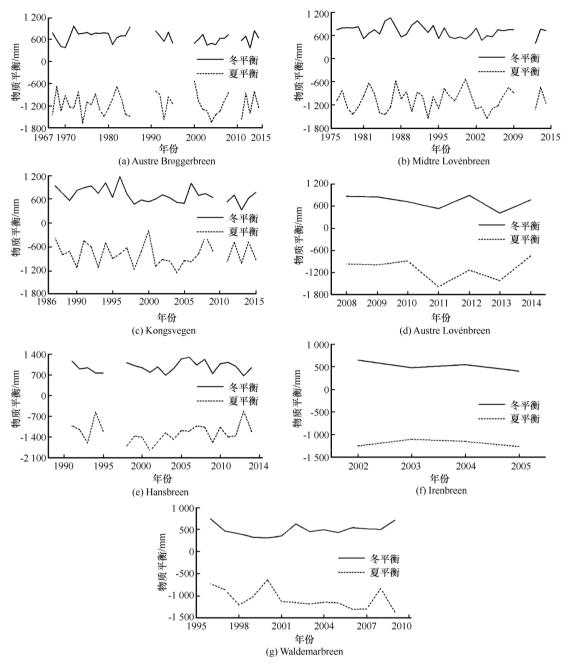


图 3 斯瓦尔巴地区冰川物质平衡季节变化

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^[22-23]。冰川净平衡与平衡线高度之间具有高度相关性。徐明星等^[12]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

表 3 斯瓦尔巴地区冰川物质平衡信息

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 /mm | 年均亏损 /mm | 平均平衡线高度 /m | 零平衡线高度 /m | 平衡线高度上升值 /m |
|---------------------|-------|---------------|-------------|---------------|--------------|----------------|
| Austre Brøggerbreen | -453 | -22 170 | 439 | 428 | 331 | 47 |
| Austre Lovénbreen | -387 | -3 510 | 297 | 431 | 360 | 57 |
| Hansbreen | - 298 | -7 150 | 272 | 358 | 314 | -3 |
| Irenbreen | - 840 | - 11 760 | 796 | 437 | 308 | 231 |
| Kongsvegen | -40 | -2 080 | 39 | 553 | 535 | 56 |
| Midtre Lovénbreen | -380 | - 18 250 | 380 | 407 | 302 | 14 |
| Waldemarbreen | -700 | - 14 740 | 685 | 427 | 292 | 103 |

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[12] 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。

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^[24],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。

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) ⁻¹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[17]。新奥尔松站的气温资料[图 4(a)]显 示,该区域有0.79 ℃·(10a) ⁻¹的增温趋势,夏季 呈 0.21 °C · (10a) ⁻¹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[12]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

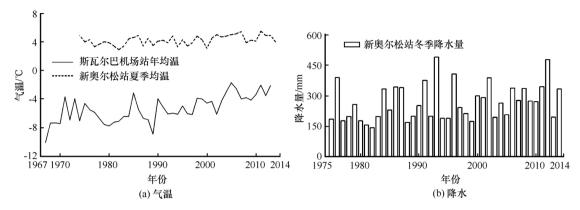


图 4 新奥尔松站夏季均温和斯瓦尔巴机场站年均温变化(a)及新奥尔松站冬季降水变化(b)

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^[25]。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^[12]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^[26]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^[27]。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^[28]。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 ℃^[27],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

- glacier terminus variation based on GIS: a case study on Austre Lovénbreen in Arctic[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012,34(2): 367-374. [李鹏,闫明,徐跃通,等. 基于GIS 冰川末端变化计算方法研究: 以北极 Austre Lovénbreen 冰川为例[J]. 冰川冻土,2012,34(2): 367-374.]
- [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 JO, Ørbæk JB, 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 JO, 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 , Liest

 øl 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 Haidi¹, LI Zhongqin¹², WANG Puyu², ZHANG Mingjun¹, WANG Lin²
(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 mass balance and the accumulation area ratio (AAR) , there is a positively correlation (mean R = 0.84). Most 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)