

北极新奥尔松地区 Austre Lovénbreen 冰川温度变化特征

孙维君¹ 闫明² 艾松涛³ 朱国才⁴ 王泽民³
刘雷保² 徐跃通¹ 任贾文⁴

1 山东师范大学地理与环境学院, 山东 济南, 250014

2 中国极地研究中心, 上海, 200136

3 武汉大学中国南极测绘研究中心, 湖北 武汉, 430079

4 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州, 730000

摘要:冰川温度是冰川最重要的物理参数之一。2009~2011 年间,在北极新奥尔松地区 Austre Lovénbreen 冰川上 B_2 、 E_2 和 F 点开展了 20 m 浅层冰温监测工作。结果表明,三点冰温曲线在春季 5 月表现为冷季型,秋季 9 月属于暖季型。在 9 m 深度以下, E_2 点冰温总是要比 B_2 和 F 点低。三点处冰温活动层下界的深度都为 14 m,冰温年平均值分别为 -2.76 、 -3.23 和 -2.84 $^{\circ}\text{C}$ 。随着海拔的升高, B_2 和 E_2 点之间 20 m 深处冰温递减率(0.3 $^{\circ}\text{C} \cdot 100$ m^{-1})要大于 10 m 深处的(0.15 $^{\circ}\text{C} \cdot 100$ m^{-1})。三点在 10 m 深处冰温比近地层气温要高 $1\sim 4$ $^{\circ}\text{C}$,这也显示了冰川融水再冻结释放的潜热导致冰川升温的重要性。

关键词:北极地区;Austre Lovénbreen 冰川;冰川温度

中图法分类号:P237.9

文献标志码:A

冰川是一定气候条件下的产物,是气候变化敏感的指示器。在气候变暖背景下,随着物质平衡亏损,冰川出现不同程度的退缩现象^[1]。冰川变化研究一直是冰冻圈科学领域的热点,而冰川温度研究是其中最重要的组成部分之一。冰川温度是冰川特性的重要参数之一,反映了冰川基本的物理特征,不仅可以反映冰川发育的水热条件,而且还显示了冰川变化的动力条件,因此,冰川温度成为冰川动力模型中最关键的参数之一^[2]。有关冰温变化,国内在天山^[3]、祁连山^[4-5]、喜马拉雅山^[5]和玉龙雪山^[6]等地区开展了相关研究,其中天山乌鲁木齐河源 1 号冰川最为详细。此外,中国冰川科研人员还在南极开展了冰川温度研究^[7-8]。

北极斯瓦尔巴群岛总面积为 62 248 km^2 ,59% 以上被冰川(帽)覆盖,是冰川最发育的地区之一,冰川数量超过 2 100 条^[9]。从物理特性上看,大部分冰川属于亚极地型,对于气候变化极为敏感,是探讨冰川对气候变化响应研究的理想场

所^[10]。2004 年 7 月 28 日中国黄河站建立,2005 年首次在 Austre Lovénbreen 冰川(以下简称 A 冰川)上开展研究工作^[9-11]。目前,已经在冰川运动^[12-13]、物质平衡变化^[13]、冰面 DEM 高程测量^[11]以及冰川动力学^[14]等方面取得了相应成果,但是有关冰川温度变化的研究还很少。因此,选择 Austre Lovénbreen 冰川,在 B_2 、 E_2 和 F 点开展 20 m 深度冰温监测(图 1),对于探讨大气与冰温之间的关系,开展冰川动力模型研究,预测未来冰川对气候变化的响应研究具有重要意义。

1 研究区与数据处理

1.1 研究区概况

新奥尔松地区(Ny-Ålesund)位于斯瓦尔巴群岛的西北部,是目前纬度最靠北的站区($78^{\circ}55'$ N, $11^{\circ}56'$ E),已经有 10 个国家在此地建立了考察站,同时也是中国黄河站的所在地。受北大西洋暖流的影响,该地区气候相对温暖湿润,是北极同纬

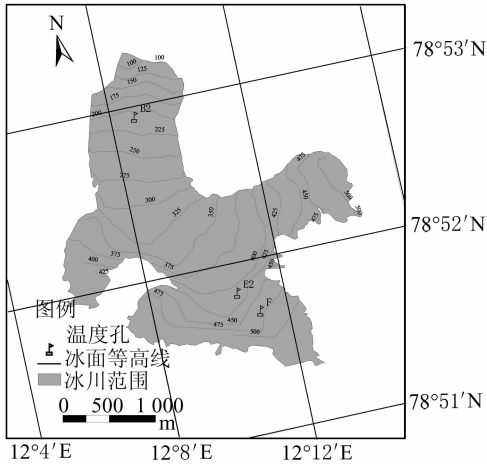


图1 Austre Lovénbreen 冰川 B_2 、 E_2 和 F 点分布图
Fig. 1 Distribution of the Points B_2 , E_2 and F on the Austre Lovénbreen Glacier

度气温最高的地区之一,同时也是北极增温最快的地区之一,平均增温速率达到 $1.35\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ (1994~2010年)^[15]。Austre Lovénbreen 冰川(见图1)位于新奥尔松地区,距离黄河站直线距离为 6.2 km ,从物理特性上属于多热型山谷冰川^[9],冰川长度和面积分别为 4.8 km 和 5.7 km^2 。A 冰川表面 B_2 断面以下坡度较大,有少量碎屑物分布, B_2 断面上冰川表面比较平坦,在 E_2 与 F 断面之间发育冰裂隙,最大宽度超过了 1 m ^[14]。

1.2 资料获取与处理

2009年4月北极考察队员朱国才研究员利用自主研发的不足 15 kg 的手提钻单人分别在 Austre Lovénbreen 冰川 B_2 (海拔 210 m)、 E_2 (海拔 410 m) 和 F (海拔 473 m) 点钻取了3个 20 m 冰温孔。 B_2 和 F 点 20 m 冰温探头分布相同,共有5个,分别分布在 2 m 、 5 m 、 10 m 和 15 m 深度。 E_2 点 20 m 冰温探头共有12个,分别分布在 1 m 、 2 m 、 4 m 、 7 m 、 9 m 、 10 m 、 11 m 、 12 m 、 13 m 、 14 m 、 16 m 和 20 m 。因此,根据3个冰温钻孔探头分布的情况,把 E_2 点冰温进行了单独分析,把 B_2 和 F 点放在一起进行冰温变化分析。

测温探头是由高精度的热敏电阻材料(国家二等标准铂电阻)制作而成,配有高精度的数字测量仪器 FLUKE187 万用表(美国产)测量探头电阻值。测温过程中,当万用表显示的最后一位读数在 5 s 内不再跳动时($1\text{ }\Omega$ 表示 $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$),表示测温结束,这样大大提高了冰温测量精度。利用标定热敏电阻的计算公式,把万用表测量的电阻值转换成温度值,测温分辨率可达到 $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。由于积雪的热传导性很差,三处冰温孔深度坐标零点定到表层冰面上,季节性积雪深度忽略不计。

由于同一地点、同一季节观测的不同次数冰温值变化极小,本着拉大观测时间间隔的原则,温度值只抽取考察期间的最后一次数据作为原始数据进行分析。冰川运动和冰川表面积与消融会影响冰温探头的位置,因此需要对获得的测温数据做归一化处理。通过绘制观测期间的温度曲线,查算出所需深度的冰川温度值,并对其进行比较^[16]。在 F 点处,由于2011年春季冰川表面积雪较深,没有找到冰温探头,因此5月冰温数据缺失。

2 新奥尔松地区气温条件

图2显示的是2009~2011年新奥尔松地区气温日平均值变化,呈现出明显的季节变化特征。夏季短暂而且气温变化幅度小,气温超过 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的时期主要出现在5~9月份。7月气温最高,气温日平均最高值可达到 $10.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。2009~2011年的正积温值分别为 537.6 、 519.1 、 $689.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。冬季漫长而且气温变化幅度大,最冷月一般出现在3月或4月,比大陆最冷月出现的时间滞后,可能是受海洋的影响。这3a的气温年较差分别为 21.3 、 19.6 、 $20.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,年均值分别为 -3.8 、 -4.1 、 $-3.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。通过与A冰川自动气象站观测的气温对比,按照随海拔升高气温降低 $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot 100\text{ m}^{-1}$ 推算其他3点处近地表气温。

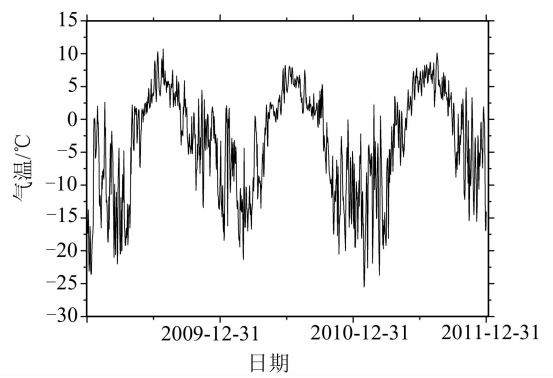


图2 北极新奥尔松地区气温日平均值
Fig. 2 Daily Mean Values of Air Temperature in the NY-Ålesund of the Arctic Region

3 冰温结果分析与讨论

冬春季节是A冰川物质平衡积累期,积雪深度较厚,一般在 B_2 点达到 1 m 以上,在 E_2 点和 F 点达到 1.5 m 以上,有些年份积雪深度超过了 2 m 。进入夏季,冰川近地表气温超过了 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$,积雪快速消融,以径流方式流失。夏末秋初,冰川表

面积雪基本全部消融, 甚至还会融化老冰。由于积雪和冰川冰以融水径流方式流失, 使得冰温保持在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下。

3.1 E_2 点冰温变化特征

图 3 显示的是 A 冰川 E_2 点 20 m 深度冰温剖面, 可以看出冰温具有明显的季节变化特征。2009-05 和 2010-05 的属于冷季型, 随着深度增加, 冰温先是快速增加, 随后到达某一深度后转变成缓慢增加。2009-09、2010-09 和 2011-09 以及 2011-05 的冰温分布都属于暖季型, 随着不断加深, 冰温先是不断降低, 在某一深度出现拐点, 然后随着深度的增加, 冰温也不断增加。受近地表大气与冰川热量交换的影响, 春季 5 月份 2009 年的冰温总体上要高于 2010 年。在 $0\sim 4\text{ m}$ 间, 2009 年的增温速率大于 2010 年, 分别达到 0.46 和 $0.28\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$ 。 $4\sim 9\text{ m}$ 间, 2009 年的增温速率同样高于 2010 年, 只是增温速率有所减小, 分别达到了 0.2 和 $0.18\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$ 。 10 m 深度以后, 这两年的增温速率都非常小而且非常接近, 相同深度冰温非常接近, 彼此之间的差值非常小, 都在 $0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内。在 20 m 深处, 2009 年和 2010 年的冰温分别为 -3.01 和 $-2.99\text{ }^{\circ}\text{C}$, 两者仅相差 $0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

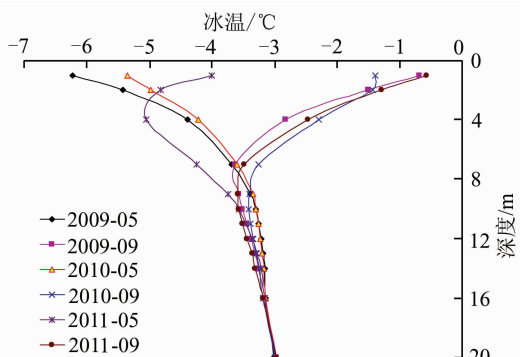


图 3 Austre Lovénbreen 冰川 E_2 点 20 m 深度冰温剖面
Fig. 3 Ice Temperature Profile in Glacier Layer 20 m Below the Surface at Point E_2 on Austre Lovénbreen Glacier

秋季 9 月份, 受冰川融水渗透作用和近地表气温共同作用的影响, 2009 年、2010 年和 2011 年冰温变化曲线趋势一致, 冰温数值也非常接近。 $0\sim 7\text{ m}$ 间, 随深度增加冰温不断降低, 2009 年的冰温在 7 m 处达到最低值, 为 $-3.64\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2010 年和 2011 年的冰温在 9 m 处才达到最小值, 分别为 -3.41 、 $-3.58\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。随后冰温出现拐点, 随深度增加, 冰温也缓慢增加, 相同深度处的冰温差值很小, 在 20 m 深处 3 a 的冰温分别达到 -2.97 、 -3 、 $-2.96\text{ }^{\circ}\text{C}$,

年与年之间的温度差值都在 $0.04\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之内。

2011-05 冰温变化曲线属于暖季型, 与 2009-05 和 2010-05 的完全不同。 $0\sim 3\text{ m}$ 间, 随着深度的增加, 冰温不断降低, 在 3.2 m 深处达到最低值并出现拐点, 为 $-5.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。 3.2 m 以下随深度加深, 冰温先是快速升高, 直到 10 m 深处, 10 m 以下显示出缓慢增加的趋势。这种反常的变化主要是由于气温在 2011 年 4 月中旬开始升温 (见图 2), 要比 2009 年和 2010 年的升温时间提前半月左右, 导致 $0\sim 3\text{ m}$ 间浅层冰温随气温上升。与其他两年的相比较, 越靠近冰川表面, 相同深度升温幅度越大。

3.2 B_2 和 F 点冰温变化特征

与 E_2 点相比较, B_2 点和 F 点 20 m 深度冰温剖面在相同的年份具有相似的变化趋势 (图 4 和图 5), 不再重复分析。尽管 B_2 点和 F 点具有明显的海拔差异, 但是两个冰温孔相同深度处的冰温差异不大, F 点冰温基本上都比 B_2 点的冰温低, 但是差值都在 $0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内, 远小于两地气温差值 $1.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。这可能主要是由于 5 月份积雪覆盖较厚 (1 m 以上), 有一定的保温效果, 使得 F 点的冰温与 B_2 点相差不大。在 9 月份, 处于渗浸带的 F 点受到冰川融水下渗的影响, 融水再冻结释放潜热使 F 点冰温升高, 这也导致了 F 点与 B_2 点冰温相差不大。在 10 m 深处, B_2 点和 F 点冰温 3 a 平均值分别为 -3.15 和 $-3.12\text{ }^{\circ}\text{C}$, 相差仅仅 $0.03\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在 20 m 深处, 两点的冰温有所差异, 分别为 -2.4 和 $-2.56\text{ }^{\circ}\text{C}$, 差值达到了 $0.16\text{ }^{\circ}\text{C}$, 也可以看出随深度增加夏季冰川融水的作用影响越小。

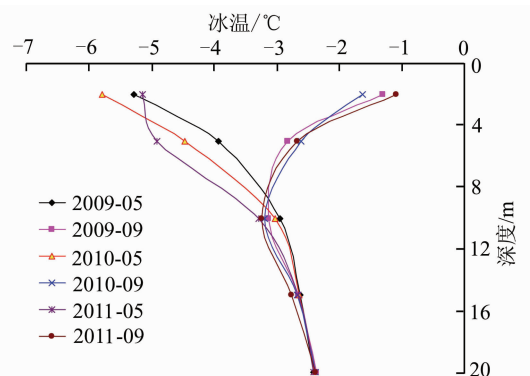


图 4 Austre Lovénbreen 冰川 B_2 点 20 m 深度冰温剖面
Fig. 4 Ice Temperature Profile in Glacier Layer 20 m Below the Surface at Point B_2 on Austre Lovénbreen Glacier

3.3 冰温随海拔变化

在同一条冰川上, 冰川活动层冰温会随着海拔的升高而降低, 在平衡线附近达到一个低值, 在

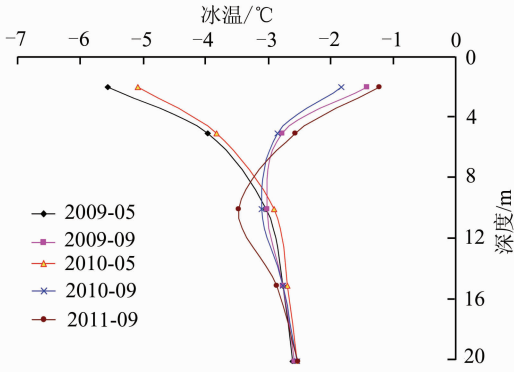


图5 Austre Lovénbreen 冰川 F 点 20 m 深度冰温剖面
Fig. 5 Ice Temperature Profile in Glacier Layer 20 m Below the Surface at Point F on Austre Lovénbreen Glacier

渗透带又有所升高^[2]。图6显示的是春季5月和秋季9月 B_2 、 E_2 和F点10 m和20 m深处冰温对比。在冰温10 m深处,不管5月还是9月 E_2 点的冰温都是最低的,平均值分别为 $-3.39\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $-3.5\text{ }^\circ\text{C}$;F点尽管海拔最高,但是在5月和9月冰温与 B_2 点的差值非常小,分别为 $0.03\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $0.01\text{ }^\circ\text{C}$ 。在冰温20 m深处,冰温最低点同样出现在 E_2 点,5月和9月的数值分别是 $-2.99\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $-2.98\text{ }^\circ\text{C}$;与10 m深处不同的是,不管在5月还是9月,20 m处 E_2 点冰温与 B_2 点的差值都有增大的趋势。

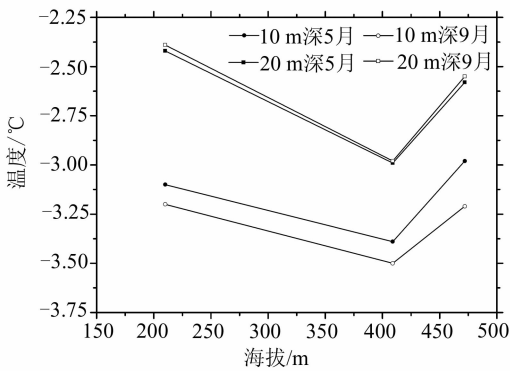


图6 B_2 、 E_2 和F点5月和9月10 m和20 m深处冰温平均值

Fig. 6 Ice Temperature Mean Values of Points B_2 , E_2 and F at Depth of 10 m and 20 m in May and September

从随海拔升高冰温降低的速率上来看, B_2 点到 E_2 点之间,10 m深处冰温在5月和9月的递减率基本一致,都为 $0.15\text{ }^\circ\text{C}\cdot 100\text{ m}^{-1}$;20 m深处冰温递减率要比10 m处的大,分别达到 0.29 和 $0.3\text{ }^\circ\text{C}\cdot 100\text{ m}^{-1}$,但是仍然低于A冰川近地层气温随海拔降低的速率($0.6\text{ }^\circ\text{C}\cdot 100\text{ m}^{-1}$),这也

看出来活动层冰温和冰川近地层气温变化的差异性。与中国境内山地冰川10 m处冰温递减率比较,A冰川的要远远小于慕士塔格冰川($0.83\text{ }^\circ\text{C}\cdot 100\text{ m}^{-1}$)^[17]、珠峰北坡绒布冰川($1\text{ }^\circ\text{C}\cdot 100\text{ m}^{-1}$)和古里雅冰帽($0.6\text{ }^\circ\text{C}\cdot 100\text{ m}^{-1}$)^[18]。这可能与冰川的物理特性有关,A冰川属于亚极地型的多热型冰川,而其他冰川都属于大陆型冰川。

3.4 冰川活动层下界温度

作为冰川发育面与边界面,冰川活动层是最为活跃的层面,其温度对气候变化影响最敏感。因此,研究活动层冰温和近地表大气之间的关系对于探索深层冰川保留的古气候信息具有重要参考价值,还可以为未来预测冰川对气候变化的响应提供基础数据^[2]。活动层位于冰川表层,受冰川表面气温直接影响,具有年变化,其下界的温度是决定冰川物理特征的基本因素。由于 B_2 和F点冰温探头太少,冰温分布有一定的失真,因此,以 E_2 点冰温变化为例分析活动层。

根据冰温活动层划分标准,可把 E_2 点20 m冰温孔分成两部分: E_2 点冰温孔9 m以上为活动层上部。受冰川近地层气温变化的影响,冰温季节变化明显,由于春季5月份气温要低于冰温,活动层上部热传导方向向上,而到了秋季9月份,气温高于冰温并且向冰川传递热量,活动层上部热传导方向向下。9 m以下为活动层下部,受近地层气温影响较小,冰温季节变化不明显,温度梯度符号基本不变,热传导方向总是向上的。

根据冰温变化曲线(图3~5)以及活动层下界温度变化幅度小于此处冰温5%推断^[2], B_2 、 E_2 和F点活动层下界深度都为14 m,三点冰温平均值分别为 $-2.76\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $-3.23\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $-2.84\text{ }^\circ\text{C}$ 。从冰温随海拔变化曲线上来看,在消融区 B_2 点,随着海拔的升高,冰温不断降低,直到平衡线附近 E_2 点达到最低值。再随着海拔的升高,冰温不断升高,在F点可以得到验证。A冰川随海拔呈现出来的变化特征与中国大陆型冰川冰温分布非常相似^[3]。究其原因,主要是因为消融区 B_2 点,由于裂隙的存在,冰川融水顺着裂隙进入冰川深处,加热了冰川,使冰温升高。在平衡线以上的渗透带F点,是因为夏季冰川融水下渗,融水再冻结释放潜热,渗透作用的特殊水热输送过程使得冰温升高。

与中国大陆型冰川平衡线附近活动层下界冰温比较, E_2 点冰温要远高于天山乌鲁木齐河源1号冰川东支($-6.6\text{ }^\circ\text{C}$)^[19]、阿尔泰喀纳斯冰川($-3.5\text{ }^\circ\text{C}$)、祁连山老虎沟12号冰川($-8.2\text{ }^\circ\text{C}$)和七一冰川($-9\text{ }^\circ\text{C}$)以及喜马拉雅山野博康加勒

冰川($-5.8\text{ }^{\circ}\text{C}$)^[20]的冰温。

3.5 10 m 深海处冰温与气温的关系

10 m 深度处冰温是表征冰川物理学特征最重要的参数之一。对纯冰介质, 表面温度年变化值为 20 K 的情况下, 10 m 深处冰温年变化一般不超过 1 K^[20], 因此通常将 10 m 深度处的冰温看成冰川活动层温度的特征值与冰川近地层年平均气温进行比较。表 1 显示的是 2009~2011 年

表 1 2009~2011 年 B_2 、 E_2 和 F 点 10 m 深处冰温和冰川表面气温以及新奥尔松地区气温年均值/ $^{\circ}\text{C}$

Tab. 1 Annual Mean Values of Ice Temperature of the Points B_2 , E_2 and F at 10 m Glacial Surface Air Temperature and Air Temperature in the NY- Ålesund During the Period from 2009 to 2011/ $^{\circ}\text{C}$

年份	10 m 深处冰温			冰川近地层气温			新奥尔松地区气温
	B_2	E_2	F	B_2	E_2	F	
2009	-3.06	-3.41	-3.04	-5	-6.2	-6.6	-3.8
2010	-3.12	-3.35	-3.02	-5.3	-6.5	-6.9	-4.1
2011	-3.28	-3.57	-	-4.4	-5.6	-6	-3.2

注: 2011 年 F 点 10 m 深处冰温数据缺失。

与冰川近地层气温相比, 三个点 10 m 深处冰温都高于气温。2011 年, B_2 点 10 m 深处冰温与气温差值达到最小, 为 $1.12\text{ }^{\circ}\text{C}$, 2010 年最大, 达到 $2.18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。 E_2 点冰温与气温差值最小值也出现在 2011 年, 差值达到 $2.03\text{ }^{\circ}\text{C}$, 最大差值也出现在 2010 年, 差值达到 $3.15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。 F 点冰温与气温差值都在 $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上, 最高值达到 $3.88\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。由此可看出, A 冰川 3 个点 10 m 深处冰温都比近地层气温要高 $1\sim 4\text{ }^{\circ}\text{C}$, 这也显示出在冰川渗浸带, 冰川融水下渗冰川内部, 再冻结作用释放的潜热导致冰川升温的重要性。

与斯瓦尔巴群岛上的冰川 10 m 深处冰温相比, A 冰川三个点的冰温要比新奥尔松地区 Kongsvegen 冰川($-4.75\text{ }^{\circ}\text{C}$)高, 比 Holtedahl fonna 冰川($-2.6\text{ }^{\circ}\text{C}$)低, 与 Hornsund 地区的 Hansbreen 冰川($-3.15\text{ }^{\circ}\text{C}$)非常接近^[21], 与 Irenebreen 冰川积累区的冰温($-3.3\text{ }^{\circ}\text{C}$)相差不大^[22]。与中国大陆境内冰川 10 m 深处冰温比较, 不管是 A 冰川 B_2 点和 F 点还是 E_2 点冰温都要高于阿尔泰 Tsambagarav 冰川($-12.9\text{ }^{\circ}\text{C}$)、天山庙儿沟冰川($-7.2\text{ }^{\circ}\text{C}$)、祁连山疏勒南山冰川($-8.6\text{ }^{\circ}\text{C}$)和喜马拉雅山 Gyabrag 冰川($-8\text{ }^{\circ}\text{C}$)^[20]。这也体现出冰川物理特性的差异性, 斯瓦尔巴群岛地区的冰川主要是多热型冰川, 冰温较高, 而中国境内的这几条冰川都是大陆型冰川, 冰温较低。

4 结 语

冰川温度是冰川最基本的物理特征, 反映了

A 冰川上 B_2 、 E_2 和 F 点 10 m 深处冰温和近地层气温以及新奥尔松地区气温年均值。从表 1 中可看出, 除了 2011 年 B_2 、 E_2 和 F 点冰温低于新奥尔松地区的气温外, 2009 和 2010 年三个冰温孔的温度都比气温高。从温度的数值上看, 3 a 三个冰温孔的温度与相对应年份新奥尔松地区的气温年均值非常接近, 差值都在 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内。

冰川发育的水热条件。本文选择 Austre Lovénbreen 冰川, 在 B_2 、 E_2 和 F 点开展 20 m 深度冰温监测工作, 得到以下结论: (1) 4 m 深度以上冰温受近地层气温影响很大, 具有明显的季节变化; 10 m 深度以下, 冰温缓慢增温, 变化波动很小。 B_2 、 E_2 和 F 点冰温曲线在春季 5 月表现为冷季型。秋季 9 月属于暖季型。(2) 不管是春季 5 月还是秋季 9 月, 在 10 m 和 20 m 深处, E_2 点冰温都是最低的, B_2 和 E_2 点之间 20 m 深处冰温递减率(0.29 和 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot 100\text{ m}^{-1}$)要大于 10 m 深处的($0.15\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot 100\text{ m}^{-1}$); (3) 以 9 m 深度为界, 把 E_2 点活动层分成两部分, 三点处冰温活动层下界的深度都为 14 m, 冰温平均值分别为 $-2.76\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-3.23\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-2.84\text{ }^{\circ}\text{C}$; (4) 三处 10 m 深度冰温与新奥尔松地区的气温非常接近, 差值都在 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内, 但是比近地层气温要高 $1\sim 4\text{ }^{\circ}\text{C}$, 这也显示出冰川表面融水再冻结释放的潜热导致冰川升温的重要性。

尽管在 Austre Lovénbreen 冰川上开展了 3 a 以上的 20 m 深度冰川温度监测工作, 但是 B_2 和 F 点由于温度探头较少, 冰温曲线有一定的失真性, 因此有必要增加测温探头分布, 丰富 B_2 和 F 点冰温监测。另外, 有必要在 B_2 点开展透底冰孔工作, 不仅可以完善深冰温孔观测体系, 还可以验证雷达测厚深度。

致谢: 感谢国家海洋局极地考察办公室对冰川考察的资助, 感谢丁明虎副研究员提供数据支持, 感谢北极黄河站考察队员李斐教授、董利处长、周春霞教授、张胜凯副教授、马红梅副研究员

和李鹏协助野外工作。

参 考 文 献

- [1] Yao T, Thompson L, Yang W, et al. Different Glacier Status with Atmospheric Circulations in Tibetan Plateau and Surroundings[J]. *Nature Climate Change*, 2012, 1 580: 1-5
- [2] Paterson W S B. *The Physics of Glaciers* (3rd Edition) [M]. UK: Pergamon Press, 1994
- [3] Ren Jiawen, Zhang Jinhua, Huang Maohuan. A Study of the Ice Temperature in No. 1 Glacier in the Brômqi River Headwaters, Tianshan[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1985, 7(2): 141-151 (任贾文, 张金华, 黄茂桓. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川温度研究[J]. 冰川冻土, 1985, 7(2): 141-151)
- [4] Yao Tandong, Jiao Keqing, Zhang Xinping, et al. Glaciologic Studies on Guliya Ice Cap[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1992, 14(3): 233-241(姚檀栋, 焦克勤, 章新平, 等. 古里雅冰帽冰川学研究[J]. 冰川冻土, 1992, 14(3): 233-241)
- [5] Liu Yaping, Hou Shugui, Wang Yetang, et al. Distribution of Borehole Temperature at Four High-altitude Alpine Glaciers in Central Asia [J]. *Journal of Mountain Science*, 2009, 6: 221-227
- [6] Du Jiankuo, He Yuanqing, Li Shuang, et al. Mass Balance and Near-Surface Ice Temperature Structure of Baishui Glacier No. 1 in Mt. Yulong [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2013, 23(4): 668-678
- [7] Chen Bailian, Zhang Renhe, Sun Shufen, et al. A One-Dimensional Heat Transfer Model on Antarctic Ice Sheet and Modeling of Near-Surface Temperatures at Dome A, the Summit of Antarctic Plateau [J]. *Science China Earth Science*, 2010, 40(1): 84-93(陈百炼, 张人禾, 孙菽芬, 等. 一个冰盖近表层热传输模式及其对南极 DomeA 的温度模拟[J]. 中国科学:地球科学, 2010, 40(1): 84-93)
- [8] Wang Yetang, Hou Shugui. Spatial Distribution of 10 m Firn Temperature in the Antarctic Ice Sheet [J]. *Science China Earth Science*, 40(11): 1 489-1 503(王叶堂, 侯书贵. 南极冰盖 10 m 深度处粒雪温度空间分布[J]. 中国科学:地球科学, 2010, 40(11): 1 489-1 503)
- [9] 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)
- [10] Ren Jiawen, Yan Ming. Glaciological Investigation During the First Scientific Expedition of Chinese Arctic Yellow River Station, 2004[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2005, 27(1): 124-127(任贾文, 闫明. 中国北极黄河站首次科学考察队冰川考察[J]. 冰川冻土, 2005, 27(1): 124-127)
- [11] Ai Songtao, Wang Zemin, E Dongchen, et al. Topographic Survey on the Surface of Glacier Austre Lovénbreen and Pedersenbreen in Svalbard based on GPS method [J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2012, 24(1): 53-59(艾松涛, 王泽民, 鄂栋臣, 等. 基于 GPS 的北极冰川表面地形测量与制图[J]. 极地研究, 2012, 24(1): 53-59)
- [12] Ai Songtao, Wang Zemin, E Dongchen, et al. Surface Movement Research of Arctic Glaciers Using GPS Method [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(11): 1 337-1 340(艾松涛, 王泽民, 鄂栋臣, 等. 利用 GPS 的北极冰川运动监测与分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2012, 37(11): 1 337-1 340)
- [13] 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*, 22(1): 9-19(徐明星, 闫明, 任贾文, 等. 北极 Svalbard 地区 Austre Lovénbreen Pedersenbreen 冰川表面物质平衡和运动特征分析[J]. 极地研究, 2010, 22(1): 9-19)
- [14] Li Peng. Studies of Surface Ice Flow and Dynamics on the Glaciers Austre Lovénbreen and Pedersenbreen, Svalbard, Arctic [D]. Jinan: Shandong Normal University, 2013(李鹏. 北极 Svalbard 地区 Austre Lovénbreen 和 Pedersenbreen 冰川冰流动力学分析研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2013)
- [15] Maturilli M, Herber A, König-Langlo G. Climatology and Time Series of Surface Meteorology in Ny-Ålesund, Svalbard [J]. *Earth System Science Data*, 2013, 5: 155-163
- [16] Liu Shiyin. *Field Observations in Glaciological Research* [M]. Beijing: Science Press, 2012(刘时银. 冰川观测研究方法[M]. 北京: 科学出版社, 2012)
- [17] Li Zhen, Yao Tandong, Tian Lide, et al. Borehole Temperature at the Ice-core Drilling Site in the Muztag Ata Glacier, East Pamirs [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, 26(3): 284-288(李真, 姚檀栋, 田立德, 等. 慕士塔格冰川海拔 7 000 m 处冰芯钻孔温度[J]. 冰川冻土, 2004, 26(3): 284-288)
- [18] Yao Tandong, JiaoKeqing, ZhangXinping, et al.

- Glaciological Studies on Guliya Ice Cap [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1992, 14(3): 233-241 (姚檀栋, 焦克勤, 章新平, 等. 古里雅冰帽冰川学研究[J]. 冰川冻土, 1992, 14(3): 233-241)
- [19] Cai Baolin, Huang Maohuan, Xie Zichu. A Preliminary Research on the Temperature in Deep Borehole of Glacier No. 1, Ortimqi River Headwaters [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1988, 33(22): 1732-1733 (蔡保林, 黄茂桓, 谢自楚. 乌鲁木齐河源 1 号冰川深孔温度的初步研究[J]. 科学通报, 1987, 32(22): 1732-1733)
- [20] Huang Maohuan, Wang Zhongxiang, Ren Jiawen. Ice Temperature of Glaciers in China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1982, 4(1): 20-28 (黄茂桓, 王仲祥, 任贾文. 我国冰川的温度[J]. 冰川冻土, 1982, 4(1): 20-28)
- [21] Jania J, Mochnacki D, Gadek B. The Thermal Structure of Hansbreen, a Tidewater Glacier in Southern Spitsbergen, Svalbard [J]. *Polar Research*, 1996, 15(1): 53-66
- [22] Sobota I. Snow Accumulation, Melt, Mass Loss, and the Near-Surface Ice Temperature Structure of Irenebreen, Svalbard [J]. *Polar Science*, 2011, 5: 327-336

Ice Temperature Characteristics of the Austre Lovénbreen Glacier in NY-Ålesund, Arctic Region

SUN Weijun¹ YAN Ming² AI Songtao³ ZHU Guocai⁴ WANG Zemin³
LIU Leibao² XU Yuetong¹ REN Jiawen⁴

1 College of Geography and Environment, Shandong Normal University, Jinan 250014, China

2 Polar Research Institute of China, Shanghai 200136, China

3 Chinese Antarctic Center of Surveying and Mapping, Wuhan University, Wuhan 430079, China

4 Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

Abstract: Ice temperature is one of the most important physical parameters, during the period from 2009 to 2011, observations of ice temperature were carried out on the Austre Lovénbreen glacier in the NY-Ålesund of the arctic region at the points B_2 , E_2 and F , in the layer 20 m below the surface. Ice temperature curves at these three points showed a cold season in May and warm season in September. Below the 9 m depth, the ice temperature at the point E_2 was lower than that at points B_2 and F . The lower boundary depth of active ice temperature layer at the three points was 14 m deep, with annual mean temperature of -2.76 、 -3.23 and -2.84 °C. With increasing altitude, the lapse rate in the ice temperature at the 20 m depth (0.3 °C · 100m^{-1}) was higher than that at 10m depth (0.15 °C · 100m^{-1}). Ice temperatures at the 10m depth were higher than the calculated mean annual air temperatures by $1\sim 4$ °C, demonstrating the impact of refreezing melted glacier surface water on the release of latent heat, causing increasing ice temperature.

Key words: Arctic Regions; Austre Lovénbreen Glacier; ice temperature

First author: SUN Weijun, PhD, lecturer, specializes in glacier and climate change. E-mail: sun1982wj@163.com

Corresponding author: YAN Ming, PhD, professor. E-mail: yanming@pric.org.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41476162, 41401074; China Postdoctoral Science Foundation, No. 2014M551952; the National Social Science Foundation of China, No. 12BJY058.