

doi: 10.7522/j.issn.1000-0240.2013.0012

Yang Kang. The progress of Greenland Ice Sheet surface ablation research [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(1): 101–109. [杨康. 格陵兰冰盖表面消融研究进展[J]. 冰川冻土, 2013, 35(1): 101–109.]

格陵兰冰盖表面消融研究进展

杨 康^{1, 2}

(1. 南京大学 地理与海洋科学学院地理信息科学系, 江苏 南京 210093; 2. Department of Geography, University of California, Los Angeles CA 90095, USA)

摘 要: 冰盖表面消融是格陵兰冰盖物质平衡的重要组成部分, 已成为近年来格陵兰冰盖研究的热点。格陵兰冰盖表面消融研究的关键在于理解冰盖融水的产生、运移和释放等水文过程, 需要解决如下关键科学问题: 1) 冰盖表面产生了多少融水; 2) 冰盖表面水文系统具有什么特征; 3) 冰盖表面融水如何影响冰盖运动; 围绕这些科学问题, 总结了格陵兰冰盖表面消融的研究进展。冰盖表面消融建模、冰盖表面湖的信息提取与面积特征变化、深度反演与体积量算等是目前研究冰盖表面融水量的主要途径, 冰盖表面湖、冰盖表面径流、锅穴与冰裂隙等表面水文要素的空间分布规律研究则可用于揭示冰盖表面水文系统特征, 冰盖表面融水与冰盖运动速率的关系、表面融水进入冰盖内部与底部的水文过程是目前揭示表面融水如何影响冰盖运动的主要手段。

关键词: 冰盖表面消融; 冰盖物质平衡; 冰盖表面湖; 冰面径流; 格陵兰

中图分类号: P343.6 **文献标识码:** A

0 引言

格陵兰冰盖是仅次于南极冰盖的世界第二大陆地冰盖, 如果格陵兰冰盖全部消融, 全球海平面将上升约 7 m^[1]。近年来, 以位置平衡法、高程变化测量法、质量称重法等方法为代表的格陵兰冰盖物质平衡研究, 揭示了格陵兰冰盖整体处于加速消融的状态, 这将加快海平面上升, 对全球气候变化产生重要影响^[2–5]。相关研究进一步指出, 溢出冰川崩解与冰盖表面消融是造成冰盖物质损失的主要原因。溢出冰川崩解引起的冰盖物质损失, 很早就受到广泛关注, 大量研究从冰川运动速度监测、数值建模等多个方面分析了格陵兰冰盖主要溢出冰川的动态与变化趋势^[6–8]。相比而言, 冰盖表面消融引起的冰盖动态响应机制较为复杂, 研究起步较晚, IPCC 第四次评估报告并未将其纳入冰盖物质平衡影响分析^[9]。近年来, 越来越多的研究指出, 冰盖表面消融及其作用机制是分析格陵兰冰盖物质平衡不能回避的重要问题^[10], Van den Broeke 等^[11]提

出了冰盖表面消融对格陵兰冰盖物质损失的贡献约占 40%; Mernild 等^[12]将冰盖表面消融纳入了格陵兰冰盖物质平衡建模; Parizek 等^[13]模拟了不同全球气候变暖模式下表面消融对格陵兰冰盖的影响。研究格陵兰冰盖表面消融及其对冰盖物质平衡的影响与作用机制, 已成为目前格陵兰冰盖研究的热点^[14–16]。

格陵兰冰盖表面接受太阳短波辐射后升温, 温度达到融点后形成融水, 融水具有较低反射率能更快升温并导致周围冰雪的融化, 形成正反馈机制, 加速冰盖融化。冰盖表面融水在地形等因素的作用下运移, 形成包括冰盖表面湖(以下简称冰面湖)(supra-glacial lake)、冰盖表面径流(以下简称冰面径流)(supra-glacial stream)、锅穴(moulin)、冰裂隙(crevasse)等水文要素在内的冰盖表面水文系统, 通过以下两种形式影响冰盖: 1) 部分融水沿冰盖表面运动, 最终再冻结或汇入海洋, 汇入大洋的融水会引起冰盖物质的损失^[17–18]; 2) 另外一部分融水进入冰盖内部, 促进冰盖内部通道发育, 沿通道

收稿日期: 2012-08-13; 修订日期: 2012-12-02

基金项目: 教育部博士学术新人奖项目; 江苏省研究生科研创新计划项目(CXLX12-0039)资助

作者简介: 杨康(1986—), 男, 甘肃庆阳人, 2008年毕业于南京大学, 现为博士研究生, 主要从事资源环境遥感方面的研究。

E-mail: yk_nju@163.com

抵达冰盖底部后产生润滑作用使得冰盖运动阻力减小,加速冰盖运动,促进溢出冰川的崩解,造成冰盖物质的损失^[19-20](图1)。但这只是表面消融作用于冰盖物质平衡的理想模式,理解格陵兰冰盖表面冰盖融水实际的产生、运移和释放等水文过程,需要回答如下关键科学问题:1)冰盖表面产生了多少融水;2)冰盖表面水文系统具有什么特征;3)冰盖表面融水如何影响冰盖运动。

本文围绕格陵兰冰盖表面消融研究的3个关键科学问题,从数据、方法、作用机制等多个方面,总结了格陵兰冰盖表面消融研究的进展。

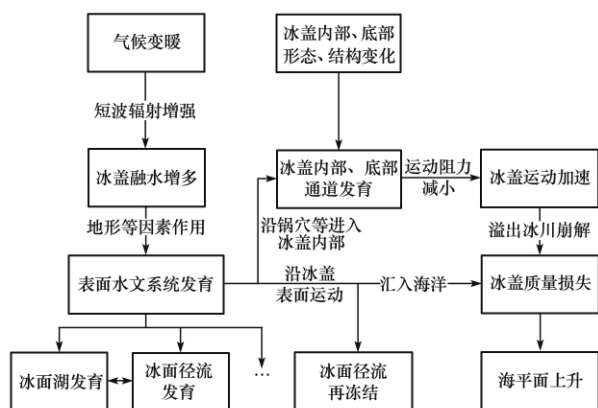


图1 格陵兰冰盖表面消融理想模式示意图

Fig. 1 Ideal pattern of the Greenland Ice Sheet surface ablation

1 冰盖表面产生了多少融水

在消融期,格陵兰冰盖表面会产生大量融水,分析表面融水对冰盖的影响,首先就要掌握冰盖表面的融水量。模拟冰盖水文气象条件的消融模型是获取冰盖表面融水量的重要手段。此外,融水量会对冰盖水文系统产生直接影响,从而与冰盖水文要素的特征具有良好的对应关系,通过遥感影像监测这些冰盖水文要素特征的变化,也能够揭示冰盖表面融水量信息。其中,冰面湖是最易被识别提取的水文要素,冰面湖的数量、面积、深度、体积等是研究中最为常用的指标。

1.1 冰盖表面消融建模

消融模型通过建立表面消融与水文气象条件之间的关系,获取冰盖表面模拟消融量或消融率,主要包括度日模型(Degree-day Model)和能量平衡模型(Energy-balance Model)两类模型^[21]。

度日模型又称气温指标模型(Temperature-index Model),通过建立冰盖近地表温度与消融状况

的经验关系,以近地表温度反映冰盖表面消融状况,是对冰盖表面消融的简化描述^[22-24]。度日模型仅需要温度测量数据作为输入,有较为合理的理论假设,在实际研究中被广泛使用。但此类模型将冰盖消融简化归并为地表温度主导的过程,且只能得到气象观测站点附近的消融状况模拟结果,有较多研究对该模型进行了修正。Tedesco等^[25]指出,冰盖近地表温度与消融状况并不完全对应,可能存在异常情况,应考虑冰盖表面的反射和积累特征来对冰盖表面消融情况作进一步分析。Janssens等^[18]考虑再冻结等因素对度日模型进行了修正。

能量平衡模型是模拟冰盖表面消融的物理过程,确定冰盖表面能量收入与支出项,建立冰盖表面能量收支平衡公式,从中导出消融量或消融率的表达式^[26]。相比于度日模型,能量平衡模型更为复杂,能够更为全面准确的模拟冰盖表面消融情况。度日模型逐日模拟冰盖表面消融,能量平衡模型则可模拟一天中的消融状况。此外,分布式的能量平衡模型能够反映冰盖表面消融的空间变化,而传统的度日模型仅能反映气象监测站点附近的消融情况。但能量平衡模型需要的输入数据较多,且很多数据难以通过实际测量获取。在实际应用中,根据研究区域消融过程的特征,能量平衡公式通常会被简化后使用。McGrath等^[27]提出了格陵兰冰盖一个锅穴主导的流域能量平衡模型,模拟该流域2009年表面消融量。

消融模型能够模拟大区域、长时间序列的冰盖表面消融,但模型往往仅考虑冰盖表面接收能量对消融过程的影响,缺少对融水再冻结、进入冰盖内部等水文过程的考虑,如何将这与冰盖表面气象条件并不直接对应的因素纳入模型,将会是此类模型今后研究的热点。此外,度日模型和能量平衡模型均认为太阳辐射是引起冰盖表面消融的主导因素,在今后的研究中,对引起格陵兰冰盖表面消融的因素还应重新审视,以获取对冰盖表面消融过程更为深入的认识,从而更为准确的模拟这一过程。例如,Rennermalm等^[28]分析了1979—2007年北极海冰与格陵兰冰盖消融范围的相关关系,指出海冰边缘的消退可能是加速冰盖表面消融的原因之一。

1.2 冰面湖提取与面积特征变化

通过遥感影像特征提取方法提取冰面湖,量算

面积,统计冰面湖数量、面积随季节、年份、高程、模拟表面径流量等的变化,是估算冰盖表面消融量的重要手段。McMillan 等^[29]利用 2001 年 12 景 Landsat ETM+、ASTER 影像研究格陵兰西南部的冰面湖变化特征,分析了冰面湖数量的逐月变化及其与度日因子的对应关系,并根据冰面湖不同的水文特征,将其划分为扩张湖(Filling Lakes)、正在干涸的湖(Draining Lakes)和已干涸的湖(Drained Lakes)三类,分析各类冰面湖的面积变化特征。Sundal 等^[30]利用 2003—2007 年的 268 景 250 m 分辨率 MODIS 影像,分析不同高程范围内冰面湖面积的逐月变化,并与模拟表面径流量进行对比,揭示出二者具有较好的正相关对应关系。Box 等^[31]指出格陵兰冰盖西部冰面湖直径从几百米到 2 km 不等。Selmes 等^[32]利用 3704 景 MODIS 影像,提取了 2005—2009 年全格陵兰冰面湖,指出平均每年出现 2 038 个冰面湖,其中 55% 分布于格陵兰西南区域。这些研究揭示了冰面湖数量、面积等特征可以作为揭示冰盖表面消融量的指标,反映冰盖表面消融情况。

冰面湖的提取方法包括人工数字化^[29]与自动提取方法两类。其中,自动提取方法又可划分为影像分类方法与波段比值方法两类。Sundal 等^[30]利用模糊逻辑隶属函数(Fuzzy Logic Membership Functions)对 MODIS 红光波段进行分类提取冰面湖;Box 等^[31]使用 MODIS 蓝光与红光波段的比值波段,设定阈值提取冰面湖。Selmes 等^[32]在此基础上提出使用搜索窗口实现阈值的自动选取。

冰面湖形态变化快,利用 MODIS 的高重访周期,可以有效地揭示冰面湖的变化特征。但由于其空间分辨率较低,而冰面湖的面积通常较小,利用 MODIS 提取的冰面湖面积的精确度需要验证,例如 Sundal 等^[30]利用 ASTER 影像对 MODIS 影像提取的冰面湖面积进行了验证。另外,如何发展高空间分辨率遥感影像特征提取方法,从这些影像中自动、准确地提取冰面湖特征,并与 MODIS 等中低空间分辨率影像的提取结果有效结合,是今后值得关注的研究方向。再者,冰面湖变化迅速,例如 Das 等^[33]观测到 2 h 内完全干涸的冰面湖,如何提取并有效利用影像中干涸冰面湖的信息,也值得关注。

1.3 冰面湖深度反演与体积量算

获取冰面湖面积,再得到冰面湖深度,就能够

获取冰面湖的体积信息。冰面湖深度的提取,主要包括遥感影像反演、实地测量和 DEM 建模三种方法。

(1) 遥感影像反演。包括了使用 Bouguet-Lambert-Beer 定律和经验公式两种方法。Bouguet-Lambert-Beer 定律是冰面湖深度反演使用较多的方法,描述了入射辐射量穿过介质时的衰减规律。这种反演方法需要影像经过大气校正,并且根据影像提供光学深水反射率,对于中低分辨率遥感影像,光学深水反射率通常由影像中大洋水体像素单元获取。Sneed 等^[34]最早将该方法应用于冰面湖的深度反演,通过对冰面湖底部反射率与冰面湖水体光学衰减特性的假设,利用 Bouguet-Lambert-Beer 定律实现了 ASTER 影像的冰面湖深度反演。Georgiou 等^[35]验证了在无云条件下,ASTER 影像反演冰面湖深度的精度可以达到 0.3 m。

Box 等^[31]提出了一种经验公式的方法来反演冰面湖的深度,该方法首先获得典型冰面湖的实测深度,再建立 MODIS 红光波段与深度关系的经验公式,实现深度反演。

对于 WorldView-2 等具有立体像对的高空间分辨率影像,由于影像带宽较窄、覆盖范围小,难以从影像中标识大洋水体像素单元,如何从这类影像中反演冰面湖深度,还有待进一步研究。

(2) 实地测量。它是最为准确但成本最高的一种冰面湖深度测量方法。Box 等^[31]利用测深器在 2005 年 8 月测量了西格陵兰地区的 2 个冰面湖的深度,测量精度达到 0.1 m。Tedesco 等^[36]利用架设了 GPS、声纳、光谱仪等设备的遥控船,在 2010 年 7 月实测了西格陵兰 Olivia 湖的深度,指出实测深度与遥感影像反演深度之间存在约 15% 的差异。

(3) DEM 建模。该方法利用地形对冰面湖深度的影响,通过 DEM 与冰面湖面积掩膜来计算冰面湖深度。McMillan 等^[29]通过几期航空 LiDAR 测高数据,利用度日模型判定早期没有融水汇聚的位置作为湖泊的基底地形,再利用后期有冰面湖形成的测高数据,通过比较来计算冰面湖深度。该方法对 DEM 数据精度要求高,现有的几种格陵兰冰盖 DEM 数据产品都难以满足,通常使用航空 LiDAR 测高数据。对于 WorldView-2 等难以通过遥感反演方法获得冰面湖深度的高空间分辨率影像,DEM 建模方法提供了一个新的选择,通过多期 World-

View-2 等影像构建米级精度的 DEM, 通过比较冰盖融水填充/未填充的 DEM 数据, 能够获取精度较高的冰面湖深度数据。

在以上 3 种冰面湖测深方法中, 实地测量和 DEM 建模方法都难以获取大范围的冰面湖测深结果。所以, 在今后的研究中, 应以这两种方法得到的测深结果对遥感影像反演方法进行校正, 通过遥感影像反演获取满足精度要求的冰面湖测深结果。

冰面湖体积是衡量冰盖表面融水量更为直观准确的指标。Alder^[37]利用 MODIS 影像、LiDAR 航空测高数据、GDEM 数据, 通过 DEM 建模方法提取了西格陵兰地区消融期 4 个典型冰面湖的体积, 通过冰面湖附近冰盖高程变化速率 dH/dt 模拟了消融期冰盖表面消融量, 分析冰面湖体积所占的比例, 结果显示冰面湖体积与消融量具有显著的正相关关系。

2 冰盖表面水文系统具有什么特征

冰面湖、冰面径流、锅穴与冰裂隙等水文要素共同构成了格陵兰独特的冰盖表面水文系统。东格陵兰地区地形坡度大, 不利于冰盖表面水文系统的发育。因此, 目前关于冰盖表面水文系统的研究, 大都以西格陵兰地区, 尤其是消融区面积较大的西南格陵兰地区作为研究区域。格陵兰冰盖表面水文系统是融水运移与释放的载体, 它的发育、空间分布与演化会对冰盖物质平衡产生重要影响, 但目前对这一系统的研究才刚刚起步。

2.1 冰盖表面水文系统的形成

进入消融期后, 如果冰盖表面融水的下切速率大于冰盖消融速率, 就会在融水下切位置产生冰面径流^[38], 在地形主导作用下融水开始运移, 并在地形相对低洼的区域形成冰面湖^[29-32, 36]或沿锅穴进入冰盖内部^[39-41], 另外一部分则汇入冰盖边缘的大径流而进入大洋。McGrath 等^[27]指出格陵兰冰盖表面存在冰面湖或锅穴主导的两种流域。冰面湖流域能够汇集融水, 锅穴流域则直接将融水运移至冰盖内部; 但大量的冰面湖快速干涸现象说明部分冰面湖底部会产生类似锅穴或冰裂隙的垂直运移通道, 融水沿这些湖底通道同样能够到达冰盖内部^[32]。冰裂隙是不同于冰面径流的一种融水运移通道。Colgan 等^[42]指出格陵兰冰盖存在分别以冰裂隙或冰面径流为主导的两种融水运移通道。由此

可见, 冰盖表面水文要素相互联系, 共同作用于冰盖表面融水的运移与释放。因此, 分析冰盖表面水文系统的特征, 本质上就是分析冰盖表面水文要素的特征及其相互联系。

2.2 冰盖表面融水的运移

冰面径流在消融期刚开始时呈现为彼此不相连的小细流, 随着表面消融的增强, 小细流逐渐连接构成树状的径流网络。除连接冰面湖的少数较宽的径流外, 大部分径流都不能在中低空间分辨率遥感影像中识别。另外, 冰面径流形态结构复杂, 注水、干涸变化迅速, 难以开展具有代表性的实测研究。因此, 相比于冰面湖等水文要素, 冰面径流的形态结构、运移特征等相关研究尚不深入。利用高空间分辨率影像的识别能力, 从遥感影像中提取冰面径流, 将是冰面径流研究的第一步。例如, McGrath 等^[27]在研究锅穴流域时, 从 WorldView-1 影像中数字化勾绘了该流域中的冰面径流, 将其与早期的地形图进行比较, 指出冰面径流的位置具有年际重现的特征。Yang 等^[43]提出了一种综合光谱与空间特征, 从高空间分辨率遥感影像中自动提取冰面径流的方法。

冰裂隙是冰盖表面重要的融水运移通道, 当冰的纵向应变力超过临界断裂韧性时, 就会形成冰裂隙。冰裂隙多呈现为直线段状, 融水会在冰裂隙内部产生季节性的再冻结。部分冰裂隙自身也是融水在冰盖表面运移的终点, 融水会沿这些冰裂隙进入冰盖内部, 但不同于锅穴, 冰裂隙能够汇集融水的流域面积一般较小, 它是通过一种更加分散的方式将融水运移至冰盖内部, 并且运移效率低于锅穴主导的流域^[42]。在西格陵兰地区, 以冰裂隙为主导的水文系统和以冰面湖或锅穴为主导的水文系统位置上相互独立^[39]。冰裂隙分布较多的区域, 其冰盖表面融水的运移特征会与其他水文要素主导的区域存在显著区别。因此, 分析冰裂隙的分布与演化能够揭示这些区域的冰盖表面融水运移特征。Colgan 等^[42]提取了 1985 年和 2009 年两期西格陵兰 Sermeq Avannarleq 消融区影像中的冰裂隙, 揭示了在 24 a 间该区域宽度大于 2 m 的冰裂隙分布区域面积增加了 9%~17%, 并指出冰裂隙分布区域面积的增大, 会使得融水进入冰盖内部的速率降低。

2.3 冰盖表面融水的释放

在消融期冰面湖将融水汇集在冰盖表面, 大量

冰面湖快速干涸的现象显示融水通过冰面湖湖底进入冰盖内部^[32]。冰面湖的空间分布与演化特征,对于揭示冰盖表面水文系统释放融水的过程,具有重要意义。冰面湖的空间分布会受到地形、纬度、高程与时间的影响。McMillan 等^[29]统计分析了不同高程范围内冰面湖的面积,指出高程较高的地区消融期冰面湖面积变化较大;Sundal 等^[30]则进一步分析了不同高程范围冰面湖的面积随时间的变化规律,指出了高程较低的冰面湖具有先生成、先消失的特征。Luthje 等^[44]利用冰盖表面消融模型模拟了冰面湖在西格陵兰可能出现的位置,并与遥感影像对比分析,指出冰面湖出现的位置在一定程度上独立于夏季冰盖消融率,主要受冰盖表面地形的影响。Lampkin 等^[45]则同时考虑了冰盖表面地形与基岩地形对冰面湖分布的影响,认为基岩地形能影响冰盖表面粗糙度,从而间接作用于冰面湖。

锅穴是与冰盖表面垂直的表面融水运移终点,由充水的冰盖冰裂隙发育而成,表面融水会通过锅穴快速进入冰盖内部。锅穴是点状的水文要素,早期多采用实地测量定位,近年来从航空影像或高空分辨率遥感影像中目视解译成为了锅穴提取的新方法^[39],但大都以目视解译提取为主,自动提取方法尚未出现。锅穴是表面融水运移的终点,能够汇集较大流域内的融水通过表面一点流入冰盖内部,而且往往多年出现在相同的位置。因此,准确提取冰盖表面锅穴的位置,对于分析冰盖表面水文系统释放融水的方式、能力等具有重要意义。Phillips 等^[39]利用高程、坡度、坡向等地形因子,通过模糊叠置分析模型(Fuzzy Set Overlay Model)模拟了西格陵兰地区锅穴的空间分布概率,成功预测了 88% 的锅穴的空间位置。锅穴是联系冰盖表面水文系统与冰盖内部、底部水文系统的纽带,处于冰盖内部的锅穴通道对于融水在冰盖内部的运移具有重要影响^[33]。

冰盖边缘汇入大洋的径流是融水释放的第三种途径。通过测量径流入海口附近沉积物含量、径流量等指标,能够反映通过这种途径释放的融水量。但这类径流大多属于辫状径流,流速变化快,给实地测量带来了困难。Mernild 等^[46]对格陵兰西南部 Watson 河径流量的测量和 McGrath 等^[27]对 Watson 河沉积物羽流(Sediment Plumes)的测量是为数不多的径流实测研究。在实地测量难以广泛开展

的情况下,通过遥感手段获取辫状径流的径流量的技术方法,应该受到今后研究的关注^[47]。在格陵兰冰盖表面各个地区,更为广泛的开展此类径流相关指标的测量将推动冰盖表面融水释放研究。

2.4 冰盖表面水文系统综合研究

目前,冰盖表面水文系统研究大都针对某种单独的水文要素开展,较少分析各种水文要素构成的整体系统的特征。McGrath 等^[27]探讨了格陵兰冰盖一个锅穴主导的流域的物质平衡特征,整体分析了流域内的锅穴、冰面径流、冰裂隙等水文特征,为今后的冰盖表面水文系统综合研究提供了有益参考。

基于 DEM 的冰盖表面地形分析为冰盖表面水文系统综合研究提供了新的思路。地形是决定融水在冰盖表面运移的主导因素,如果冰面径流、冰面湖、锅穴(以下简称实际水系)在地形作用下形成了“有组织的”水系网络,那么它将与从 DEM 中提取的水系(以下简称模拟水系)具有良好的对应关系,如果二者差别较大,实际径流将会呈现为“无组织的”水系。因此,分析模拟水系与实际水系的对应关系,将有助于揭示冰盖表面水文体系的形成过程和空间分布特征。Lewis 等^[48]使用 5 km 的表面和基岩 DEM 提取了大尺度的格陵兰冰盖模拟水系,将格陵兰划分为 293 个汇水盆地并分析其消融特征,这是到目前为止为数不多的对格陵兰模拟水系的研究。冰盖表面水文系统的演化特征复杂,综合实际监测和模拟水系建模结果的分析将成为今后研究的主要方向。

3 冰盖表面融水如何影响冰盖运动

3.1 影响模式

冰盖表面融水释放并进入冰盖内部后,会对冰盖运动产生影响^[49]。在实际研究中,很难直接建立冰盖表面消融与冰盖运动之间的作用模式,现有方法更多的是分别对二者进行统计,再分析其潜在联系,揭示冰盖表面消融对于冰盖运动的作用。

冰盖表面消融建模的主要方法在上面已经论述。冰盖表面运动监测的主要对象是溢出冰川,因为这些溢出冰川所在位置,往往是冰盖运动速度最快的区域。Joughin 等^[50]的研究表明格陵兰冰盖最大、最具代表性的溢出冰川 Jakobshavn Isbrae 在 2003 年的运动速率达到了 $1.3 \times 10^4 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ 。溢出

冰川的运动速率是分析溢出冰川崩解引起冰盖物质损失的主要依据,同时也是分析冰盖表面消融与冰盖运动之间作用模式的重要指标^[20]。Bartholomew等^[51]在西格陵兰冰盖长 35 km 的冰川横截线上布设了 4 个 GPS 接收器,在 2008 年开展持续的冰川运动速率监测,结果显示 2008 年冰盖消融期的运动速率达到了冬季背景值的 2 倍多。Rignot 等^[52]利用 2000 年和 2005 年两期 Radarsat-1 InSAR 数据对格陵兰冰盖主要溢出冰川的运动速率进行了研究,揭示了加速运动的冰川的范围从 2000 年的 66° N,扩展到 2005 年的 70° N。

3.2 矛盾观点

在格陵兰冰盖表面融水及其作用的理想模式中,融水进入冰盖内部甚至到达冰盖底部后,能够起到润滑作用,加速冰盖运动。Zwally 等^[20]最早提出了这一观点,并以夏季西南格陵兰冰盖表面消融率与同期冰盖运动速率呈现正相关的特征论证了这一观点。Shepherd 等^[53]监测到冰盖运动速率在表面消融达到峰值的 2 h 后增大了 100%,在 12 h 后恢复至冬季背景值。Palmer 等^[54]利用 InSAR 监测西格陵兰夏季末期 10 个冰川集水区的运动速率,发现其与模拟的表面融水量呈现正相关,并指出其中面积最大的冰川集水区夏季末期运动速率比冬季背景值高出 48%,同时论述了冰盖加速区域与冰盖表面水文要素分布区的潜在对应关系。Bartholomew 等^[55]进一步分析了水文要素对于冰盖加速的驱动作用,指出不同高程冰盖的加速受到不同水文驱动因素的影响。

在接下来的研究中,这一理论受到了挑战,部分研究质疑冰盖表面融水对冰盖加速的贡献程度,认为这种加速作用并不显著,部分研究甚至提出相反理论,认为冰盖表面融水进入冰盖内部后,实际上减缓了冰盖的运动速度。Joughin 等^[56]论证了润滑作用的存在,但指出在夏季消融期,Jakobshavn Isbrae 冰川运动仅加速了 10%~20%,冰盖运动的加速与冰盖表面融水的增多并不显著相关。van de Wal 等^[19]指出冰盖表面消融对加速冰盖运动只是呈现出季节性正反馈作用,17 a 长期监测结果则显示冰盖运动速率实际上有所减小。Sundal 等^[16]的研究表明在温暖的年份,冰盖运动速度反而较低。Adler^[37]指出表面融水进入冰盖内部后,能够促进冰盖内部融水运移通道的发育,而复杂稳健的运移

通道实际上能够增大冰盖运动的摩擦系数,从而减缓冰盖运动速度。

出现以上矛盾观点是因为模拟冰盖表面消融、测量冰盖运动速率,再统计分析二者之前的对应关系,虽然能够表明二者的潜在联系,但并不能揭示内在的作用机制,也不能回答融水是否加速冰盖运动这一关键问题。要解决这些问题,就要研究冰盖表面融水进入冰盖内部,甚至到达冰盖底部之后的作用过程。Pimentel 等^[57]按照运移速率大小将冰盖内部管道划分为两种类型,Creyts 等^[58]进一步研究了运移速率较小的管道的作用机制。Das 等^[33]提出冰盖内部发育充分的通道能够将冰面湖融水快速的运送至冰盖底部;Wingham 等^[59]研究了冰盖内部湖的水量交换;Bell 等^[60]指出冰盖内部水文系统的几何形态决定了其影响冰盖运动的方式。冰盖表面融水释放进入冰盖内部后的作用机制今后将成为分析融水与冰盖运动关系的研究热点。

4 总结

格陵兰冰盖表面消融是造成冰盖物质损失的重要原因,为研究格陵兰冰盖物质平衡提供了独特的视角。冰盖表面融水的产生、运移与释放是尚未被深入认识的水文过程,只有理解这些水文过程,才能更为准确的研究格陵兰冰盖物质平衡及其对全球气候变化的影响。本文围绕冰盖表面消融的 3 个关键科学问题,总结了冰盖表面消融研究的进展。

(1) 冰盖表面产生了多少融水。消融模型是获取冰盖表面融水量的主要手段。其中,度日模型被广泛使用,但仅使用近地表温度来反映消融状况存在不足,如何增加影响因素更为合理的模拟表面消融,将是此类模型今后的发展方向。相比之下,能量平衡模型更为复杂,模拟了冰盖表面消融的物理过程,但要求输入多类数据,如何获取能量平衡公式中的各类指标,将是能量平衡模型的研究方向。同时,高精度的分布式能量平衡模型能够获取消融状况的时空变化信息,值得进一步关注。冰面湖的面积、深度、体积等信息也能够揭示冰盖表面融水量,高空间分辨率遥感影像在冰面湖信息提取中的应用需要进一步加强,实地测量、遥感监测与 DEM 建模方法的综合使用将为冰面湖信息的高精度提取提供新方法。

(2) 冰盖表面水文系统具有什么特征。冰盖表

面水文系统是格陵兰冰盖特有的水文系统,是运移和释放冰盖表面融水的载体。冰面径流与冰裂隙是表面融水的运移通道,锅穴与冰面湖则是释放融水的主要方式。冰盖表面会形成分别以锅穴或冰面湖为主导的流域,锅穴流域会将融水快速运移至冰盖内部,冰面湖流域会汇集融水至冰面湖,部分冰面湖底部会形成锅穴而快速排水。目前的研究大都单以某个水文要素作为研究对象,如何开展冰盖表面水文系统的整体研究将是以后研究的主要方向。

(3) 冰盖表面融水如何影响冰盖运动。冰盖表面融水释放进入冰盖内部后会产生复杂的相互作用机制,目前的研究分别统计分析冰盖表面消融与冰盖运动特征,再分析二者的潜在联系,研究结果产生了关于冰盖表面融水是否能加速冰盖运动速率的矛盾观点,部分研究指出融水进入冰盖内部或底部后能够起到润滑作用而加速冰盖运动,另外部分研究则认为这种加速运动的效果并不显著或并不存在加速作用。为了解决这一问题,研究冰盖表面融水进入冰盖内部,甚至到达冰盖底部之后的作用过程将是今后研究的主要方向。

参考文献 (References):

- [1] Gregory J M, Huybrechts P. Ice-sheet contributions to future sea-level change [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A-Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 2006, **364**(1844): 1709—1732.
- [2] Dowdeswell J A. The Greenland Ice Sheet and global sea-level rise [J]. *Science*, 2006, **311**: 963—964.
- [3] Vaughan D G, Arthern R. Why is it hard to predict the future of ice sheets? [J]. *Science*, 2007, **315**(5818): 1503—1504.
- [4] Rignot E, Thomas R H. Mass balance of Polar ice sheets [J]. *Science*, 2002, **297**: 1502—1506.
- [5] Nicholls R J, Cazenave A. Sea-level rise and its impact on coastal zones [J]. *Science*, 2010, **328**: 1517—1520.
- [6] Howat I M, Joughin I, Tulaczyk S, *et al.* Rapid retreat and acceleration of Helheim Glacier, east Greenland [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, **32** (22), DOI: 10.1029/2005 GL024737.
- [7] Joughin I, Howat I M, Fahnestock M, *et al.* Continued evolution of Jakobshavn Isbrae following its rapid speedup [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, **113** (F4), DOI: 10.1029/2008JF001023.
- [8] Thomas R, Frederick E, Krabill W, *et al.* Recent changes on Greenland outlet glaciers [J]. *Journal of Glaciology*, 2009, **55** (189): 147—162.
- [9] IPCC. Climate Change 2007: the Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [10] Alley R B, Fahnestock M, Joughin I. Understanding glacier flow in changing times [J]. *Science*, 2008, **322**: 1061—1062.
- [11] van den Broeke M, Bamber J, Ettema J, *et al.* Partitioning recent Greenland mass loss [J]. *Science*, 2009, **326**: 984—986.
- [12] Mernild S H, Liston G E, Hiemstra C A, *et al.* Greenland Ice Sheet surface mass-balance modelling and freshwater flux for 2007, and in a 1995—2007 perspective [J]. *Hydrological Processes*, 2009, **23** (17): 2470—2484.
- [13] Parizek B R, Alley R B. Implications of increased Greenland surface melt under global-warming scenarios: ice-sheet simulations [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2004, **23** (9—10): 1013—1027.
- [14] Luthcke S B, Zwally H J, Abdalati W, *et al.* Recent Greenland ice mass loss by drainage system from satellite gravity observations [J]. *Science*, 2006, **314**: 1286—1289.
- [15] Schoof C. Ice-sheet acceleration driven by melt supply variability [J]. *Nature*, 2010, **468**: 803—806.
- [16] Sundal A V, Shepherd A, Nienow P, *et al.* Melt-induced speed-up of Greenland ice sheet offset by efficient subglacial drainage [J]. *Nature*, 2011, **469**: 521—524.
- [17] Pfeffer W T, Meier M F, Illangasekare T H. Retention of Greenland runoff by refreezing: Implications for projected future sea level change [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*(1978—2012), 1991, **96** (C12): 22117—22124.
- [18] Janssens I, Huybrechts P. The treatment of meltwater retention in mass-balance parameterizations of the Greenland ice sheet [J]. *Annals of Glaciology*, 2000, **31**: 133—140.
- [19] van de Wal R S W, Boot W, van den Broeke M R, *et al.* Large and rapid melt-induced velocity changes in the ablation zone of the Greenland Ice Sheet [J]. *Science*, 2008, **321** (5885): 111—113.
- [20] Zwally H J, Abdalati W, Herring T, *et al.* Surface melt-induced acceleration of Greenland ice-sheet flow [J]. *Science*, 2002, **297** (5579): 218—222.
- [21] Hock R. Glacier melt: a review of processes and their modelling [J]. *Progress in Physical Geography*, 2005, **29** (3): 362—391.
- [22] Qiao Chengjun, He Xiaobo, Ye Baisheng. Study of the degree-day factors for snow and ice on the Dongkemadi Glacier, Tanggula [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, **32**(2): 257—264. [谯程骏, 何晓波, 叶柏生. 唐古拉山冬克玛底冰川雪冰度日因子研究[J]. *冰川冻土*, 2010, **32**(2): 257—264.]
- [23] Cui Yuhuan, Ye Baisheng, Wang Jie, *et al.* Analysis of the spatial-temporal variations of the positive degree-day factors on the Glacier No. 1 at the headwaters of the Ürümqi River [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, **32** (2): 265—274. [崔玉环, 叶柏生, 王杰, 等. 乌鲁木齐河源1号冰川度日因子时空变化特征[J]. *冰川冻土*, 2010, **32** (2): 265—274.]
- [24] Wu Qianru, Kang Shichang, Gao Tanguang, *et al.* The characteristics of the positive degree-day factors of the Zhadang Glacier on the Nyainqentanglha Range of Tibetan Plateau, and its application [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, **32** (5): 891—897. [吴倩如, 康世昌, 高坛光, 等. 青藏高原纳木错流域扎当冰川度日因子特征及其应用]

- [J]. 冰川冻土, 2010, **32** (5): 891—897.]
- [25] Tedesco M, Fettweis X, van den Broede M R, *et al.* The role of albedo and accumulation in the 2010 melting record in Greenland. *Environmental Research Letters*, 2011, **6** (1), DOI: 10.1088/1748-9326/6/1/014005.
- [26] Sun Weijun, Qin Xiang, Ren Jiawen, *et al.* Surface energy balance in the accumulation zone of the Laohugou Glacier Nq 12 in the Qilian Mountains during ablation period [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, **33** (1): 38—46. [孙维君, 秦翔, 任贾文, 等. 祁连山老虎沟 12 号冰川积累区消融期能量平衡特征[J]. 冰川冻土, 2011, **33** (1): 38—46.]
- [27] McGrath D, Colgan W, Steffen K, *et al.* Assessing the summer water budget of a moulin basin in the Sermeq Avannarleq ablation region, Greenland Ice Sheet [J]. *Journal of Glaciology*, 2011, **57** (205), DOI: 10.1088/1748-9326/4/2/024011.
- [28] Rennermalm A K, Smith L C, Stroeve J C, *et al.* Does sea ice influence Greenland Ice Sheet surface-melt? [J]. *Environmental Research Letters*, 2009, **4** (2): 024011.
- [29] McMillan M, Nienow P, Shepherd A, *et al.* Seasonal evolution of supra-glacial lakes on the Greenland Ice Sheet [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, **262** (3—4): 484—492.
- [30] Sundal A V, Shepherd A, Nienow P, *et al.* Evolution of supra-glacial lakes across the Greenland Ice Sheet [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, **10** (113): 2164—2171.
- [31] Box J E, Ski K. Remote sounding of Greenland supraglacial melt lakes: implications for subglacial hydraulics [J]. *Journal of Glaciology*, 2007, **53** (181): 257—265.
- [32] Selmes N, Murray T, James T D. Fast draining lakes on the Greenland Ice Sheet [J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, **38** (15), DOI: 10.1029/2011GL047872.
- [33] Das S B, Joughin I, Behn M D, *et al.* Fracture propagation to the base of the Greenland Ice Sheet during supraglacial lake drainage [J]. *Science*, 2008, **320**: 778—781.
- [34] Sneed W A, Hamilton G S. Evolution of melt pond volume on the surface of the Greenland Ice Sheet [J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, **34** (3), DOI: 10.1029/2011GL028697.
- [35] Georgiou S, Shepherd A, McMillan M, *et al.* Seasonal evolution of supraglacial lake volume from ASTER imagery [J]. *Annals of Glaciology*, 2009, **50** (52): 95—100.
- [36] Tedesco M, Steiner N. In-situ multispectral and bathymetric measurements over a supraglacial lake in western Greenland using a remotely controlled watercraft [J]. *The Cryosphere*, 2011, **5** (1): 479—498.
- [37] Adler J J. Assessing Supraglacial Water Volume and the Changing Dynamics of the Surface Topography near the Jakobshavn Glacier, Greenland [D]. PhD Thesis, Colorado: University of Colorado, 2010.
- [38] Nolin A W, Payne M C. Classification of glacier zones in western Greenland using albedo and surface roughness from the Multi-angle Imaging SpectroRadiometer (MISR) [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, **107** (1—2): 264—275.
- [39] Phillips T, Leyk S, Rajaram H, *et al.* Modeling moulin distribution on Sermeq Avannarleq glacier using ASTER and WorldView imagery and fuzzy set theory [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, **115** (9): 2292—2301.
- [40] Catania G A, Neumann T A. Persistent englacial drainage features in the Greenland Ice Sheet [J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, **37** (2), DOI: 10.1029/2009GL041108.
- [41] Alley R B, Dupont T K, Parizek B R, *et al.* Access of surface meltwater to beds of sub-freezing glaciers: preliminary insights [J]. *Annals of Glaciology*, 2005, **40** (1): 8—14.
- [42] Colgan W, Steffen K, McLamb W S, *et al.* An increase in crevasse extent, West Greenland: Hydrologic implications [J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, **38** (18), DOI: 10.1029/2011GL048491.
- [43] Yang K, Smith L C. Supraglacial streams on the Greenland Ice Sheet delineated from combined spectral-shape information in high resolution satellite imagery [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* (in press), 2013.
- [44] Luthje M, Pedersen L T, Reeh N, *et al.* Modelling the evolution of supraglacial lakes on the West Greenland ice-sheet margin [J]. *Journal of Glaciology*, 2006, **52**: 608—618.
- [45] Lampkin D J, VanderBerg J. A preliminary investigation of the influence of basal and surface topography on supraglacial lake distribution near Jakobshavn Isbrae, western Greenland [J]. *Hydrological Processes*, 2011, **25** (21): 3347—3355.
- [46] Mernild S H, Hasholt B, Kane D L, *et al.* Jökulhlaup observed at Greenland Ice Sheet [J]. *EOS, Transactions American Geophysical Union*, 2008, **89** (35): 321—322.
- [47] Smith L C. Satellite remote sensing of river inundation area, stage, and discharge: a review [J]. *Hydrological Processes*, 1997, **10** (11): 1427—1439.
- [48] Lewis S M, Smith L C. Hydrologic drainage of the Greenland Ice Sheet [J]. *Hydrological Processes*, 2009, **14** (23): 2004—2011.
- [49] Liu Qiao, Liu Shiyin. Progress in the study of englacial and subglacial drainage system of glaciers [J]. *Advances in Earth Sciences*, 2012, **27** (6): 660—669. [刘巧, 刘时银. 冰川冰内及冰下水系研究综述[J]. 地球科学进展, 2012, **27** (6): 660—669.]
- [50] Joughin I, Abdalati W, Fahnestock M. Large fluctuations in speed on Greenland's Jakobshavn Isbrae glacier [J]. *Nature*, 2004, **432**: 608—610.
- [51] Bartholomew I, Nienow P, Mair D, *et al.* Seasonal evolution of subglacial drainage and acceleration in a Greenland outlet glacier [J]. *Nature Geoscience*, 2010, **6** (3): 408—411.
- [52] Rignot E, Kanagaratnam P. Changes in the velocity structure of the Greenland Ice Sheet [J]. *Science*, 2006, **311**: 986—990.
- [53] Shepherd A, Hubbard A, Nienow P, *et al.* Greenland ice sheet motion coupled with daily melting in late summer [J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, **36**, DOI: 10.1029/2008GL035758.
- [54] Palmer S, Shepherd A, Nienow P, *et al.* Seasonal speedup of the Greenland Ice Sheet linked to routing of surface water [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, **302** (3—4): 423—428.
- [55] Bartholomew I D, Nienow P, Sole A, *et al.* Seasonal variations in Greenland Ice Sheet motion: Inland extent and behaviour at higher elevations [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, **307** (3—4): 271—278.
- [56] Joughin I, Das S B, King M A, *et al.* Seasonal speedup along the western flank of the Greenland Ice Sheet [J]. *Science*,

- 2008, **320**: 781—783.
- [57] Pimentel S, Flowers G E. A numerical study of hydrologically driven glacier dynamics and subglacial flooding [J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 2011, **467**: 537—558.
- [58] Creyts T T, Schoof C G. Drainage through subglacial water sheets [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, **114** (F4), DOI: 10.1029/2008JF001215.
- [59] Wingham D J, Siegert M J, Shepherd A, *et al.* Rapid discharge connects Antarctic subglacial lakes [J]. *Nature*, 2006, **440**: 1033—1036.
- [60] Bell R E. The role of subglacial water in ice-sheet mass balance [J]. *Nature Geoscience*, 2008, **1** (5): 297—304.

The Progress of Greenland Ice Sheet Surface Ablation Research

YANG Kang^{1, 2}

(1. Department of Geographic Information Science, School of Geographic & Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing Jiangsu 210093, China; 2. Department of Geography, University of California, Los Angeles CA 90095, USA)

Abstract: Surface ablation has great impact on the Greenland Ice Sheet (GrIS) mass balance and becomes the focus of GrIS research in recent years. The production, transportation and release of meltwater are the keys to understand the potential impact of the GrIS surface ablation. These hydrological processes could illustrate the following problems: How much meltwater is produced atop the GrIS? What are the characteristics of meltwater-formed supraglacial hydrological system? How does the meltwater influence the GrIS motion? Ablation modeling is an important approach to acquire surface ablation information. Areas, depths, and

volumes of supraglacial lakes extracted from remotely sensed imageries provide direct meltwater information. The spatial distribution of supraglacial lakes, supraglacial streams, moulins and crevasses demonstrates the characteristics of supraglacial hydrological system, which is in charge of meltwater transportation. The release of meltwater into englacial and subglacial ice sheet has important but undetermined impact on the GrIS motion. The relationship between surface meltwater volume and GrIS motion velocity is employed to understand the impact.

Key words: ice sheet surface ablation; ice sheet mass balance; supraglacial lake; supraglacial runoff; Greenland