

山地温性积雪内液体水含量的测定方法^{*}

何元庆¹ W. H. Theakstone²

(1 中国科学院兰州冰川冻土研究所冰芯与寒区环境实验室 兰州 730000;

(2 Department of Geography, University of Manchester, Manchester M13 9PL, England)

提 要 通过在北欧 Austre Okstindbreen 冰川积雪内的实际测定结果,证明野外测量积雪内液体水含量的新方法——酒精量热法是可行和适用的,解决了过去测定积雪内液体水含量时遇到的困难。5 个雪坑剖面的测定结果清楚地显示出雪内液体水含量的区带性和随高度的变化,积雪内液体水含量的垂直变化与雪层中物理结构、温度和密度的分布有关。

关键词 温性积雪 液体水含量 酒精量热法

分类号 《中图法》P343.6 **文献标识码** A

山地温性冰川一般分布在比较温和与湿润的海洋型气候区,这种冰川比极地冰川积雪消融量大,温度高,冰川上的积雪内含有一定量的液态水,存在着融水渗透作用,通过对温性雪层中液体水含量的测定,可以了解融水渗透对冰雪记录的影响程度进而全面解释温性冰雪内的环境信息,它也是冰雪覆盖区水文和雪崩预告的一项重要参数,另外在冰川研究中应用某些微波技术时,例如测量积雪厚度或水当量,雪内液体水的多少将影响到微波的传播,所以说温性积雪内液体水含量的测定是冰雪研究方面的一项重要指标。

过去,有些学者曾试图利用不同方法测定积雪内液体水的含量,但都遇到了一定的困难,如 Jones 等^[1]应用冻结量热法测定雪中的液体水含量,这种方法从理论上讲比较准确,问题是固态雪与冷冻介质之间不易进行热量转换,从而造成与实际情况不同的测量结果,并且需要一个高技术操作的仪器,工作起来比较复杂,野外测量速度也很慢。融化量热法^[2]优点是可以连续地从热水向雪内传送热量,测量速度也比较快,但是 Colbeck^[3]认为这种方法不够准确。

1992 年我们应用酒精量热法测量了挪威北部 Okstindbreen 冰帽最大的溢出冰川 Austre Okstindbreen (66°00'N, 14°16'E)温性积雪内的液体水含量,基本原理是通过测量雪样品完全融化在液体甲醇过程中的温度变化,来计算雪内的液体水含量,这样可以解决冻结量热法存在的热传递问题。实践证明,这种方法具有精确性较高(精度可达 1%),野外测量速度快,设备轻便容易操作,计算简捷等优点,是一种可行的雪内液体水测量方法。本文概述了该方法的理论依据、工作步骤以及 1992 年的野外测量结果和讨论。

1 原理和工作程序

用酒精量热法测定积雪中的液体水含量的基本原理为:固态雪在液体酒精(甲醇)内融化的过程中会发生两步变化,第一步是破坏固体分子间的吸引力,使雪分子在甲醇中逐渐扩散混合,这一步消耗能量,也就是溶解固体冰所需要的热量,从而使雪与甲醇混合体的温度逐渐降低;第二步是当雪在甲醇溶

^{*} 基金项目:英国环境部和曼彻斯特大学科研基金资助。

收稿日期:1999-01-22; 改回日期:1999-03-10

剂中完全融化后,液体溶质(水)在溶剂(甲醇)中溶解时就会产生释放热量的现象而使溶液的温度逐渐回升^[4]。对于许多混合体来说,例如 NaCl 和水,上述两步的能量变化大致是相等的,即混合前后的纯温度变化值很小。但是,当冰在甲醇中溶化时,所需要的热量比等量水所需要的热量要大得多,也就是说,溶解前后的温度变化幅度很大,由于雪内的冰和液体水在甲醇中溶化时所需要的热量不同,假如雪放入甲醇内立即就能溶化,那么两种物质混合体理论上的起始温度就与雪内液体水含量的多少有关。因此,通过记录雪在甲醇内溶化过程中的温度变化,找到假设雪样在甲醇液体内即刻溶化时的起始温度,经过关系换算,就可以得到雪内液体水的含量。

我们在野外用一个简单的酒精量热器来记录雪在甲醇中溶化时的温度变化值。这种仪器构造是一个用绝热材料制成的反应杯和可以密封的杯盖,类似保温瓶,杯盖下方装置有一个搅拌器和一个白金电阻测温器,杯盖在反应杯上扣紧后,搅拌器和测温器就自动开始工作。量热器和甲醇都放在雪坑内,保持在 0℃ 的环境下。野外具体工作程序为: 1. 在雪坑壁上选取剖面采样,由上而下每 20 cm 采取一个样品; 2. 每次测量用电子称取 25 g 雪样和 80 g 甲醇,然后同时装入反应杯内,扣紧杯盖,盖下装置的搅拌器即开始工作,缓慢搅动使两种物质均匀混合,测温器也同时开始工作,用跑表计时,每 30 s 从反应杯外的测温表上记录一次温度读数,每次测量约持续 6 min~ 8 min,即每个样品大约需要 12~ 16 个温度读数,如果是粗粒雪,则需要较长的时间。以上采样和称重要快速进行,以免雪样在这两步操作中产生融化而改变原来的液体水含量。根据测量时温度和时间的记录,以时间为横坐标,温度为纵坐标,可以点出雪样和甲醇混合过程中温度随时间的变化曲线。图 1 为一典型的例图。

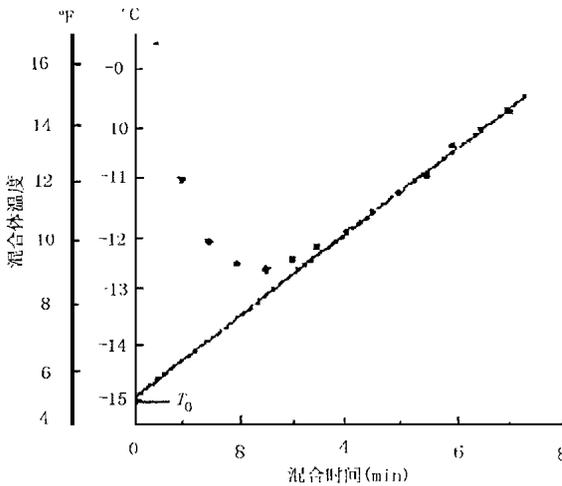


图 1 雪样在液体甲醇中混合融化时,温度随时间变化典型曲线

Fig.1 Typical plot of mixture temperature for alkohol calorimeter test

图 1 雪样在液体甲醇中混合融化时,温度随时间变化典型曲线

Fig.1 Typical plot of mixture temperature for alkohol calorimeter test

从图 1 可见,在开始后 4 分钟以前是雪与甲醇混合时的固体冰融化阶段,温度持续下降,到 4 分钟以后,冰完全融化,水—甲醇溶液开始释放能量,温度转为线型上升,把 4 分钟以后的温度上升直线作反向延伸至时间为 0 时与 -15℃ 相交,此温度即为需要寻找的起始温度 T_0 ,假如雪放入甲醇内后就能立即溶化, T_0 就是理论上的起始温度。实际上雪与甲醇混合时会发生前述从降低到回升两个阶段的温度变化,把温度回升以后的直线作反向延伸就可以找到 T_0 。因为雪和甲醇的质量为常数,甲醇原来的温度为 0℃,所以雪内液体水的含量就是唯一的变量。在 0℃ 甲醇中溶化 25 g 雪(含液体水)所需要的热为一常数,但是溶化雪内固体冰所需要的能量则与雪内固体冰的量呈线型函数关系,固体冰在甲醇中融化时所需的能量表现为初始阶段内混合体温度的下降。因此,雪和甲醇溶液理论上的起始温度 T_0 与雪内液体水的含量也存在着线型相关关系。计算关系式为

$$L_m = (T_0 - T_{0i}) / (T_{0w} - T_{0i})$$

式中 L_m 为 25 g 雪样内液体水含量的百分数, T_{0i} 和 T_{0w} 分别代表 25 g 干雪和 25 g 水在 0℃ 环境下与甲醇混合时的理论起始温度,即液体水含量在 0%~ 100% 之间的两个极端值。

根据我们在野外的设备条件和实验结果,上式可写为

$$L_m = (T_0 - 2.1) / (46.4 - 2.1)$$

式中 温度值以华氏(°F)计,这样计算起来更为方便。最大的温度测量误差为 0.3°F, T_0 误差为 0.1°F,所以计算出来的液体水含量的最大误差为 1.0%。

2 结果和讨论

我们于 1992 年 7 月用上面介绍的酒精量热器分别在 Austre Okstindbreen 冰川积累区和消融区的不同高度带上的 5 个雪坑内进行了液体水含量的测量, 从上到下雪坑的深度分别是 2 m, 2 m, 1.8 m, 1.6 m 和 0.6 m, 测定结果见表 1。

表 1 1992 年夏季 Austre Okstindbreen 冰川不同高度带 5 个雪坑剖面内液体水含量的测定结果

Table 1 The measured results of liquid water content from five snow pits at different elevation of the Austre Okstindbreen in the summer of 1992

深度 (m)	雪坑 92.1 (1450 m a. s. l.) Lm (%)	雪坑 92.2 (1350 m a. s. l.) Lm (%)	雪坑 92.3 (1230 m a. s. l.) Lm (%)	雪坑 92.4 (1000 m a. s. l.) Lm (%)	雪坑 92.5 (850 m a. s. l.) Lm (%)
0~0.2	4.8	6.2	11.1	16.8	20.9
0.2~0.4	4.1	5.4	9.9	15.7	19.7
0.4~0.6	3.1	5.5	12.3	13.7	30.8
0.6~0.8	4.9	4.8	8.6	10.6	—
0.8~1.0	2.8	5.2	7.3	14.9	—
1.0~1.2	4.6	4.2	10.6	10.4	—
1.2~1.4	2.3	3.9	6.9	9.6	—
1.4~1.6	2.8	3.1	5.3	11.3	—
1.6~1.8	2.5	3.0	8.7	—	—
1.8~2.0	2.3	2.5	—	—	—
平均	3.4	4.4	8.9	12.9	23.8

从上表可以清楚地看到冰川上积雪内液体水含量从高至低逐步升高的规律, 特别是积累区(海拔 $> 1200\text{ m}$)和消融区($< 1200\text{ m}$)积雪之间的液体水含量差异巨大, 前者的平均值为 5.6%, 后者的平均值为 18.3%, 后者为前者的 3.3 倍。从表 1 可见, 除了消融区下部很浅的雪坑 92.5 以外, 其它各个雪坑不同深度上的液体水含量都不是连续递减或递增的, 这种不均匀的变化主要是由积雪内部的结构, 雪的密度和雪层中温度分布等物理因素引起的, 而雪内的物理结构则由不同的降水事件之间的融水再冻结作用形成的, 雪的密度则主要由雪的压实和冻结程度所决定。例如, 在雪坑 92.1 中, 较高的液体水含量分别出现在表层 0.2 m, 0.6 m~0.8 m 和 1.0 m~1.2 m 深度处, 表面 4.8% 的较高含水量是由于测量时正逢夏季日照强烈期, 直接的太阳辐射造成的表面消融使表层雪内的含水量较高, 以下的含水量逐步降低, 到 0.6 m~0.8 m 处, 含水量又出现一个 4.9% 的较高值, 这是由于在 0.8 m~1.0 m 深度处, 存在着一个约 2 cm 厚的薄冰层, 它起到了阻挡上面融水下渗的作用, 使较多的融水聚集在冰层上部, 所以冰层含水量较高, 反之, 冰层下边则出现了 2.8% 的较低含水量, 1.0 m~1.2 m 处 4.6% 的较高值和 1.2 m~1.4 m 处 2.3% 的较低值也是因为这两个雪层之间出现了另一个薄冰层引起的。这些薄冰层是两个降雪事件之间表面的融水再冻结形成的, 所以通过积雪剖面中液体水含量的垂直变化, 也大概可以估计所测积雪由几次较大降水形成。雪层内液体水含量类似变化也同样可以在积累区的另外两个雪坑剖面中发现, 如雪坑 92.2 表层有 6.2% 的最高含水量, 从大趋势看含水量向下是逐步降低的, 但不是连续递减的, 深度 0.4 m~0.6 m 之间 5.8% 的较高值由 0.6 m 处的一个 1 cm 厚的薄冰层阻挡聚集作用引起的。另外雪层内液体水的分布变化似乎也与雪坑剖面的温度和积雪密度的垂直变化有关, 在海拔 1450 m 处 2 m 的雪坑剖面内, 从表面到 1.2 m 的深度内, 温度变化值大约在一 0.5 °C~3.0 °C 的范围内, 密度在 0.3 g/cm³~0.5 g/cm³ 之间, 液体水含量变化值在 2.8%~4.9% 间。在 1.2 m 以下, 温度

连续从 -3.0°C 递减到底部的 -6.0°C ，雪密度从 0.5 g/cm^3 左右增加到底部的 0.65 g/cm^3 ，液体水含量的变化范围也减低到 $2.3\% \sim 2.8\%$ 。

其它雪坑剖面内液体水含量分布也存在着与温度和密度相关的变化趋势。平衡线以下的两个雪坑剖面内的液体水含量有较大幅度的增加，主要是从积累区到消融区，消融量显著增加的缘故。这两个雪坑的温度从表面到底部基本保持在 0°C 左右恒温状态。雪坑 92.4 内液体水含量由上而下基本是连续递减的，除过 $0.8\text{ m} \sim 1.0\text{ m}$ 处出现的一个较高值，与其下的一个薄冰层有关，采样位置处在冰川西边的一个哑口之下，积雪大多是哑口频繁的西风吹来的，所以此地尽管已到消融区，积雪厚度仍较大，雪的结构与降水事件关系不大，加之整个积雪剖面为恒温，所以液体水含量大体是连续减低的。只有 0.6 m 深的雪坑 92.5（此处积雪也大部由风吹而来）内的液体水含量最高，特别在底部与冰面相贴的雪层，含水量达到 30.8% ，因为在此高度位置上，雪内温度保持在融化点 0°C 左右，底部有冰面流水侵入，从而使底层雪的含水量很高。

3 小 结

积雪内液体水含量的测定是雪层内物理化学研究的一项重要指标，用酒精量热器在野外测量积雪液体水含量是一种快速简捷的方法，其原理是根据雪样在液体甲醇中混合溶解过程中温度随时间变化可以寻找到理论起始温度 T_0 值，而 T_0 的大小则与雪内的液体水含量成线性关系，所以通过 T_0 可以推算雪样中液体水的含量。Austre Okstindbreen 冰川 5 个雪坑剖面的测定结果清楚地显示出液体水含量随高度的变化，特别是积累区和消融区之间差异盛大。积累区液体水含量在雪坑剖面上的不均匀分布是由雪内薄冰层对融水的阻挡和聚集作用引起的，而这些薄冰层的形成则与各个降水事件之间的融水再冻结作用有关。另外液体水含量的变化也与积雪内的温度和密度分布有关。

致谢：施雅风先生和姚檀栋先生提出指导意见，谨此致谢。

参 考 文 献

- [1] Jones E. B., et al. Snowpack liquid water determinations using freezing calorimetry. *Nordic Hydrology*, 1983, 14 (3): 113 ~ 126
- [2] Yosida Z., Free water content of wet snow. in: Quia, H., ed. *Physics of snow and ice: International Conference on Low Temperature Science—1966 Proceedings*, Vol. 1, Pt 2 (Sapporo), Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, 1967, 773 ~ 784
- [3] Colbeck, S. C. The difficulties of measuring the water saturation and porosity of snow. *Journal of Glaciology*, 1978, 20 (82): 189 ~ 201
- [4] Steiner, L. *Introduction to chemical thermodynamics*, Second edition. New York, McGraw—Hill. 1984

第一作者简介 何元庆(1957—)，男，博士，回国高级访问学者。1982年毕业于西北大学地理系，1985年在中国科学院兰州冰川冻土研究所获硕士学位，1993年在英国曼彻斯特大学获博士学位，现主要从事冰川与寒区环境研究工作。

A METHOD FOR MEASURING LIQUID WATER CONTENT IN THE ALPINE TEMPERATE SNOWPACK

HE Yuan-qing¹ W. H. Theakstone²

(¹ *Laboratory of Ice Core and Cold Regions Environment, Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, CAS, Lanzhou 73000, China;*

(² *Department of Geography, University of Manchester, M139PL, England*)

Abstract Interpretation of climatic and environmental records in the snow pack covered on alpine temperate glaciers, such as isotopic and ionic changes, is an important part in the field of glaciological studies. For this objective, measurement of liquid water content in the temperate snow pack (melting snow) is a critical index for analyzing the influence of meltwater in snow on climatic and environmental information. In addition, the amount of liquid water that represents the liquid phase of the snow pack is an important parameter in forecasting runoff and in predicting the timing of wet slab avalanche release. A method of field measurements of the liquid water content, the alcohol calorimetric method, has been developed with high precision and simple operation. Then the liquid water content could be calculated through the linear relation between T_0 and liquid water fraction. The procedure of field measurement is: 1. collecting snow samples from the wall of each snow pit at interval of 20 cm; 2. mixing 25 g snow sample and 80 g methanol by gently stirring, to assure the dissolution of snow; 3. recording the temperature of the mixture 30 s once and taking measurement once in 6 ~ 8 minutes. Field measurement of liquid water content in the snow covered on the temperate glacier Austre Okstindbreen shows that the content changed in different glacial areas with different elevations. Vertical variations profile was associated with the distribution of snow structure, temperature and density in snow stratigraphy.

Key Words temperate snow pack, liquid water content, methanol calorimetric method