

文章编号 :1000-0240(2009)01-0011-08

乌鲁木齐河源 1 号冰川冰芯剖面物理特征及其形成机理研究

王 林¹, 李忠勤^{1,2}, 王飞腾¹, 李慧林¹, 张明军²

(1. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所 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;
2. 西北师范大学 地理与环境科学学院, 甘肃 兰州 730070)

摘 要: 冰芯中的化学成分, 记录了古环境和古气候的诸多信息, 已有广泛研究. 而冰芯剖面的物理特征, 由冰芯形成时的水热条件和冰川运动变质作用所决定, 同样记录了气候、环境和冰川运动的诸多信息. 根据在乌鲁木齐河源 1 号冰川钻取的 6 根冰芯的详尽资料, 结合冰流模式对冰芯冰龄的估算, 分析研究了不同冰川带冰芯剖面的物理特征、形成机理和相应的水热条件. 结果表明: 积累区冰芯以粒雪-冰交替的原生沉积层为主, 受冰川流动引起的动力变质作用影响较小, 与该区成冰环境和冰川温度密切相关; 平衡线附近的冰芯 4 3 m 以上主要是由渗浸冻结冰组成的原生沉积层, 与附近的成冰环境相吻合, 以下部分主要是经过动力变质作用的冰体, 源于冰川上部的积累物; 消融区冰芯主要由冰川上部下流的冰川冰组成, 模拟显示该区冰芯冰龄较长, 受局部成冰环境的影响很小. 通过对不同区域冰芯特征比较, 发现各成冰带的冰芯组成及污化层差别较大; 在东、西支冰川同时期冰芯剖面的对比中, 发现海拔相近点冰芯剖面组构相近, 说明通过冰芯资料来探讨冰川内部特征以及该区域气候环境演变历史等较具代表性.

关键词: 1 号冰川; 冰芯剖面; 物理特征; 成冰过程; 冰流模式

中图分类号: P343.6 **文献标识码:** A

0 引言

冰芯化学记录, 在古环境和古气候重建方面发挥着重要作用, 已广为人知. 而冰芯剖面的物理特征记录, 包括粒雪种类、冰片厚度、气泡形状与大小、污化层形态、冰芯的密度、硬度和固体电导率等, 不仅包含了降雪沉积时的水、热等环境信息, 而且包含了沉积后的消融变化和冰川动力变质方面的信息, 是冰川与全球变化研究的重要内容之一. 具体来讲, 冰芯的物理特征剖面记录了两方面信息, 一是冰芯钻取处的成冰过程; 二是冰芯所经历的运动变质作用. 在积累区钻取的冰芯, 通常的组成是成冰深度以上部分为粒雪或粒雪-冰交替的原生沉积层, 由积雪的自然密实化或在融水的渗浸冻结以及相变潜热的改造过程中形成的, 与该区成冰

环境相适应; 而成冰深度以下的冰芯, 不一定形成于原处, 并且会受到不同类型和程度变质作用的影响, 其反映的信息也十分复杂^[1]. 在消融区钻取的冰芯, 由于钻取处的成冰量为负值, 冰芯包含的冰体形成于积累区, 并经过了冰川动力变质作用, 所以对其剖面特征的解释则更为复杂.

冰芯剖面物理特征的特殊环境指示意义, 在冰川与全球变化研究中发挥着独特的作用. 例如, 通过格陵兰冰盖和欧洲阿尔卑斯山冰川冰芯中的冰片研究, 重建了这些地区数十至数百年的消融记录, 发现了温度升高的直接证据^[2-3]; 在格陵兰 GISP 冰芯研究中, 通过冰芯剖面物理特征的季节变化, 准确地划定出冰芯 2 000 a 内的年层, 为该冰芯记录重建奠定了基础^[3]. 在我国, 伴随着冰芯研究的深入, 有关冰芯剖面物理特征的研究也有 20 多

收稿日期: 2008-11-17; 修订日期: 2008-12-15
基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划) 项目(2007CB411501); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX-YW-127); 国家自然科学基金项目(40631001; 40571033; 40701034; 40701035; 40121101; J0630966) 资助
作者简介: 王林(1980 —), 女, 山东枣庄人, 2005 年毕业于济南大学, 现为中国科学院寒区旱区环境与工程研究所硕士研究生, 主要从事雪冰物理及冰川变化方面研究. E-mail: tingting729@163.com

年的历史,但由于受条件所限,这些研究多在冰川的积累区,缺乏对不同冰川带冰芯的系统研究.天山乌鲁木齐河源1号冰川(以下简称1号冰川)是最初利用雪层和冰芯剖面物理特征研究成冰作用的冰川之一.20世纪60年代通过雪层剖面的观测分析,得出1号冰川积累区新雪转化为粒雪冰需要3~5 a时间^[4],20世纪90年代中期通过冰芯剖面的研究,将成冰作用年限延长至十年左右^[1].2002年以来,我们对雪-冰转换的物理化学过程进行了深入研究,在积累区4 130 m处建立了研究观测场(简称PGPI观测场)^[5-6],2006年又开展了大规模的冰芯钻取工作(图1).本研究从2006年钻取的9支冰芯和在1990年、1996年、1998年钻取的4支冰芯中选择了典型的且记录完备的6支冰芯,结合野外观测和冰川动力学理论,首次系统研究了不同冰川带冰芯剖面的物理特征和形成机理.

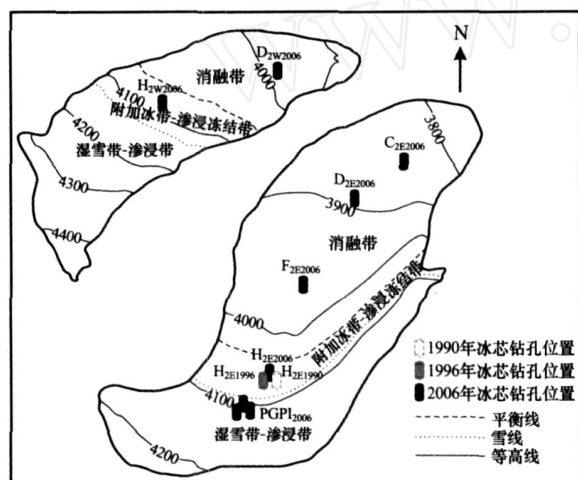


图1 1号冰川冰芯钻孔位置示意图

Fig.1 The sketch map showing the ice core sites on the G. lacier No. 1

1 资料及研究方法

积累区冰芯:本区选取了1根冰芯,该冰芯位于1号冰川东支PGPI(the Program for Glacier Progresses Investigation)观测场处,海拔4 130 m,钻取于2006年,冰芯长度23.5 m,称为PGPI₂₀₀₆.

平衡线附近冰芯:本区选取了3根冰芯,其中2根位于1号冰川东支H₂处(H₂为冰川物质平衡观测花杆,下同),海拔4 043 m,1根位于西支H₂处,海拔4 073 m.东支H₂冰芯钻取时间为1990年和2006年,前者冰芯长度为91.6 m,为便于比较取前20 m,后者冰芯长度为20 m,分别称为H₂E₁₉₉₀,

H₂E₂₀₀₆.西支H₂冰芯钻取时间为2006年,冰芯长度20 m,称为H₂W₂₀₀₆.

消融区冰芯:本区选取了2根冰芯,钻取于2006年,分别位于1号冰川东、西支D₂处.东支D₂冰芯位于海拔3 890 m处,冰芯长度为20 m,称为D₂E₂₀₀₆.西支D₂冰芯位于海拔3 926 m处,冰芯长度20 m,称为D₂W₂₀₀₆.

冰芯剖面物理特征直接在钻取现场进行描述,参照国内外常见的雪冰分类标准^[1,4]和实际可操作性,规定了如何记录冰芯剖面的特征层位,包括新雪、粒雪、污化层、冰层等.对雪的类型按变质程度分为新雪、细粒雪(<1 mm)、中粒雪(1~2 mm)与粗粒雪(2~4 mm)四种.由于冰芯钻取位置位于冰川不同成冰带内,冰的种类较为复杂,为便于比较本文通称为冰层.

2 结果与讨论

2.1 积累区冰芯物理特征及其形成机理探讨

积累区冰芯以PGPI₂₀₀₆冰芯为例,如图2所示,该处冰芯剖面的物理特征为粒雪层与冰层交互出现.上部粒雪层最厚达1.2 m,并夹有薄的冰片层,最深的粒雪出现在21.1~21.9 m处.

该处冰芯剖面中的粒雪-冰交替的原生沉积层,与该区域的成冰环境和水热条件密不可分.根据前期PGPI的研究^[5-6],从成冰环境讲,该区域属于渗浸带,上覆雪层,温度较低,除在夏季温度可至0以上外,其它季节均在0或0以下,成冰作用以暖型为主.在消融期间,上覆雪层会产生少量融水,但不足以渗透粒雪层,在下渗过程中遇冷形成冰片.由于这些冰片密度较高、硬度较大,在雪层中相当于一个特殊的“隔板”,在一定程度上阻碍了上部热量、水分及其它物质向下部传输,保护了下部的粒雪,从而出现粒雪-冰交替的现象.从水热条件讲,该区域固态降水的数量和能量的盈亏是决定冰芯剖面特征的主要因素.根据Shumskii的成冰理论^[7],在成冰环境能量分布中,积累区下限为 $F_T > W_T + 80 N_{Hq} < 0.4 \times 80 N_{sol}$ (式中: F_T 为热量的流失; W_T 为除潜热以外的热量获取; N_{Hq} 为液态降水的数量; N_{sol} 为固态降水的数量),即能量的获取既小于能量的流失又小于粒雪的形成量.由于物质平衡与能量平衡间是反比例关系,所以该成冰带积累量大于消融量,位于粒雪线以上.在消融期间,雪层表面的融水不断下渗,在此过程中遇冷发生冻结,释放相变潜热,引起周围雪层表面温度升

高, 导致消融期末雪层温度接近 0 (图 3), 从而出现粒雪-冰交替的状态。

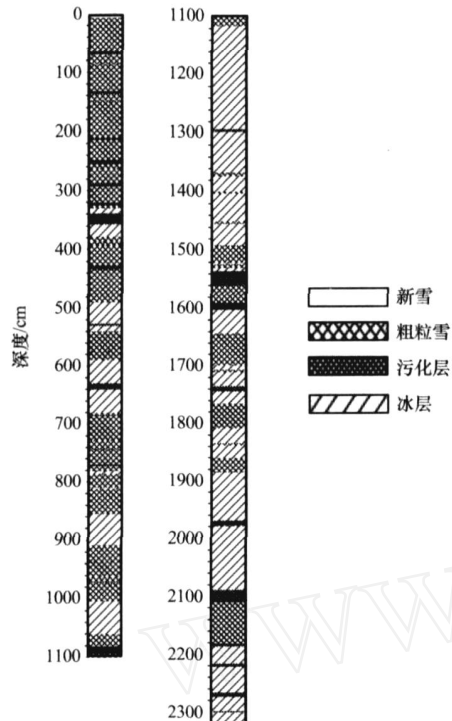


图 2 PGPI₂₀₀₆ 冰芯剖面示意图

Fig. 2 The ice core profile of PGPI₂₀₀₆

同时, 根据物质平衡和冰川运动等观测资料^[8], 该处表面年运动速度在 $0 \sim 4 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ 间, 且是在较高海拔的冷状态下进行, 冰川运动对该处的成冰作用影响不大. 进而确认该冰芯剖面范围以内 ($0 \sim 23.3 \text{ m}$) 为最新年层, 尚不具备动力变质作用。

2.2 平衡线附近冰芯

2.2.1 冰芯物理特征及其形成机理探讨

平衡线附近以 H₂EI₁₉₉₀ 冰芯为例, 如图 4 所示. 该处冰芯组成中渗浸冰层有清晰的薄的层状结构, 粒雪比例大为减少, 最深仅出现在 4.3 m 处. 4.3 m 以下为密度较高、硬度较大的冻结冰层, 6~10 m 处发育最好. 污化层在上部出现较多, 最厚达 35 cm.

该冰芯处地势较为平缓, 但上部地势较陡, 根据物质平衡和冰川运动等观测资料^[8], 钻孔以上区域表面流速为 $6.5 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$, 钻孔处流速为 $2.5 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$, 但都处于下降和拉伸运动区. 根据前人研究^[4], 该处活动层底部约位于 15 m 处, 成冰深度为 4.3 m. 根据冰川动力学模式的估算(见下节), 该处冰层上部的成冰年代较短, 从表面到基岩的整个深度中有 50% 左右的冰龄小于 200 a. 由于该处积累量有限, 冰芯中除表层外的大部分冰体来自上

游冰流, 从而粒雪成冰受制于两个过程, 一是融水的渗浸冻结以及相变潜热的改造过程; 另一个是运动中的拉伸挤压过程. 因此, 冰芯剖面的特征分析需要从这两个方面予以考虑。

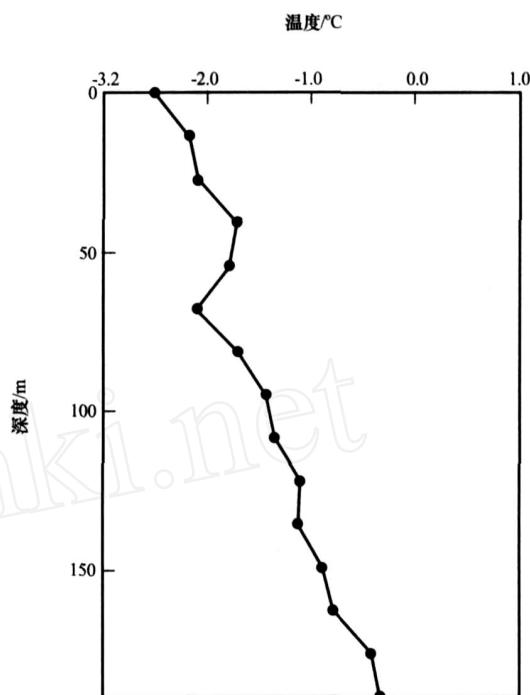


图 3 PGPI 雪坑消融期(2006 年 8 月 31 日)温度曲线

Fig. 3 Temperature profile of Snow

Pit PGPI on Aug. 31, 2006

4.3 m 以上部分为粒雪-冰交替的原生沉积层, 主要是由积雪在融水的渗浸冻结以及相变潜热的改造过程中形成, 与该区域成冰环境相适应. 该区域在成冰环境能量分布中^[7], 位于 $F_T > W_T + 80 N_{Hq}$ $< 0.4 \times 80 N_{sol}$ 和 $W_T < F_T + 80 N_{sol}$ 间, 即: 该区域上部能量的获取既小于能量的流失, 又小于粒雪的形成量, 位于粒雪线以下; 下部能量的获取小于能量的流失, 且没有粒雪的形成. 当活动带的冬季冻结冷储多于消融热量和液态降水时, 垂直分布中可由冷渗浸带直接转变为渗浸冻结带. 1 号冰川已具有由冷型向暖型转化的趋势^[9-11].

成冰深度 4.3 m 以下部分, 主要是冰川上游冰层向下游运动过程中经过拉伸挤压形成的. 冰体发生运动时, 冰内应力特别大, 使冰层在沉积过程中发生倾斜以及晶体的拉伸断裂和气泡的压缩闭合. 在运动压力下, 冰层密实化作用增强, 逐渐形成冰川冰. 由于该处冰层受到不同类型和程度的变质作用影响, 所以不能像原生冰那样仅从宏观层位变化来解释其成因. 但粒雪-冰的初始成因条件痕迹可

以保存相当的深度和时间,表现在不同成因的冰具有不同密度、气泡含量及分布、冰的微观组构等,由此可以间接推测其沉积时的水热条件^[4].

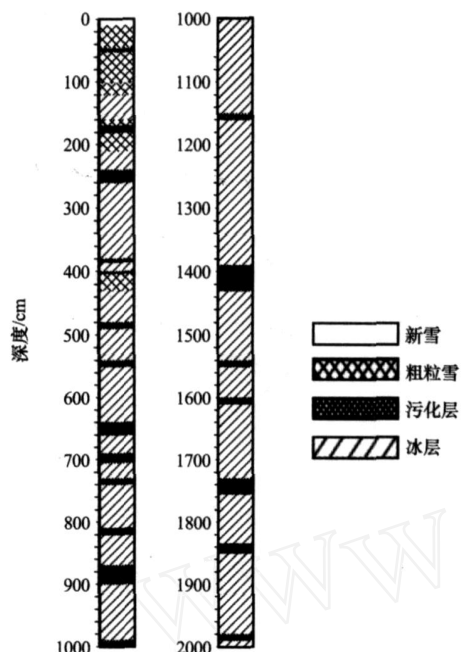


图 4 H₂E1990 冰芯剖面示意图

Fig. 4 The ice core profile of H₂E1990

2.2.2 平衡线处不同时期冰芯对比

由于东支 H₂ 观测花杆处地势较平缓,运动速度较慢^[12],冰川下部变化不大,所以仅选择时间跨度较大的 H₂E1990 和 H₂E2006 冰芯对其上部进行成冰条件对比(图5). H₂E1990 冰芯上部仍有粒雪存在,深

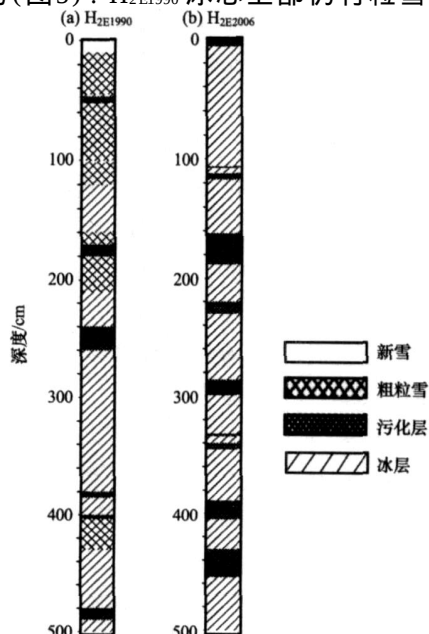


图 5 H₂E1990 (a) 和 H₂E2006 (b) 冰芯剖面对比示意图

Fig. 5 A Comparison of the ice core profiles of H₂E1990 (a) and H₂E2006 (b)

度可达 4.3 m,最大厚度为 70 cm,而 H₂E2006 冰芯剖面中已不存在粒雪.

在污化层方面两时期冰芯区别也较明显,1990 年冰芯剖面 5 m 以内含有 6 条污化层,其中 3 条为强污化面;而 H₂E2006 冰芯剖面仅 5 m 以内就含有 10 条污化层,且其中有 5 条为强污化面.

上述现象表明,该研究区域已逐渐向消融带转化,这与近期观测到的 1 号冰川成冰带谱上移趋势相吻合^[13-14].

2.3 消融区冰芯

消融区以 D₂E2006 冰芯为例.该区域位于平衡线以下,主要从上部区域得到物质补给.如图 6 所示,冰芯组成中显然没有粒雪的存在,冰层与污化层相隔出现.冰层较之积累区、平衡线附近冰芯明显加厚,最厚达 6.4 m.

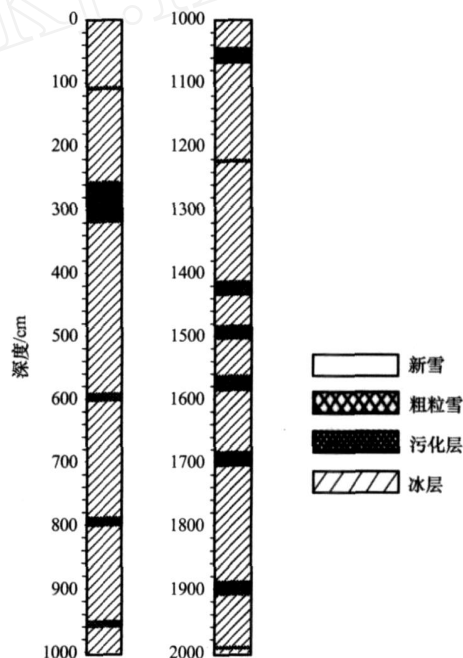


图 6 D₂E2006 冰芯剖面示意图

Fig. 6 The ice core profile of D₂E2006

该区域污化层形成于冰川上游,在冰川的运动和融水的参与过程中,污化层迁移叠加作用增强,较之冰川上游区域明显加厚(最厚达 80 cm).由于冰川各海拔各深度的冰有不同程度的纵向流动,冰川某点冰层的形成地点往往更靠近冰川源头,这种机制给判断该处冰芯的年代,进而恢复冰芯的形成条件造成了一定困难.

冰川动力学模型是估算这一冰芯的形成年代的有效工具.陈克恭^[15]曾利用 Nye 的流动理论模型估算出 1 号冰川东支主流线的时间范围,本研究则选用目前国际上使用较多,结果更为可靠的一维

冰流模式来估算冰川的等龄线以及不同位置冰芯的年代剖面。冰流模式依据应力平衡方程、格伦定律和应变与速度转化定律来量化不同厚度不同深度冰层的运动特征^[16-20]，其方程如下：

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = -\rho g_x$$
$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} = -\rho g_y \tag{1}$$

$$\frac{\partial \tau_{yz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = -\rho g_z$$
$$\Lambda = A\tau^n \tag{2}$$

$$\Lambda_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \tag{3}$$

将 1 号冰川运动速度、冰川物质平衡、冰川厚度等观测资料运用于上述方程，得到其物理解^[21]，如图 7 所示。这一结果显示，平衡线处深度 > 45 m 左右的冰有可能运动到末端，其余则将在向下运动的过程中逐渐裸露于表面融化为径流。两支冰芯所在处的年代剖面图中^[21]（图 7），所示年代系指冰由平衡线运动到冰芯所在位置所用的时间。该区域与平衡线的距离较长，整个深度中 70 % 以上的冰层有千年历史，而冰芯所对应 20 m 处的冰龄超过 500 a，因而受该区域成冰环境的影响较小。

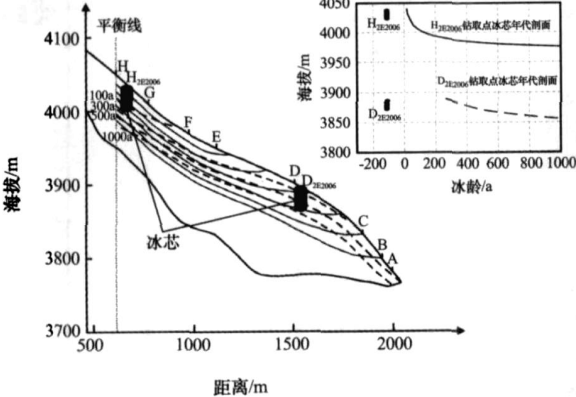


图 7 1 号冰川东支主流线方向流线图
注：实线为冰质点的流动轨迹，虚线为等龄线
其中右上图为两支冰芯所在处年代剖面图

Fig. 7 The particle path and the age profile along the main flow line on the Glacier No. 1

在冰川上游部分，每年积累到冰川表面的雪量超过由于融化、径流及蒸发而损失的雪量；而在冰川下游部分，前一年冬季降下的全部雪及一部分冰会在每年夏季消失。但是，由于积累区的冰会向消融区流去，因而冰川剖面逐年变化不大，使冰芯剖面特征在该区域的研究得以实现。该区域冰体主要是由上游冰川向下流动形成，根据 1 号冰川多年冰

川表面运动速度资料^[8]，该区域运动速度最大，因此冰内的应力特别大，变质作用几乎完全为动力变质，即在高压影响下进行的变质作用，压力来源主要是冰的自重。冰芯剖面特征对这一动力变质作用过程进行了记录，从而使针对冰层在沉积过程中发生倾斜以及晶体的拉伸断裂和气泡的压缩闭合，并在拉伸、挤压作用下逐渐具备动力变质特征的研究提供了依据。

2.4 不同区域冰芯特征层位特征比较

由于 1 号冰川东支观测资料丰富、系统，因此，选取东支的冰芯资料对其剖面成分进行研究。如图 8 所示，积累区冰芯剖面由新雪、冰层、粒雪和污化层组成，其中粒雪占 43.7%，冰层占 49.2%；平衡线附近冰芯剖面成分与积累区相似，但组构发生了明显变化，其中粒雪占 8.4%，冰层占 77.2%。消融区冰芯与积累区及平衡线附近冰芯成分明显不同，该处冰芯成分中不存在粒雪，仅由冰层和污化层组成，其中冰层占 86.9%，污化层占 13.1%。消融区位于平衡线以下，积累量小于消融量，不存在粒雪，该处冰层主要由上游冰川向下运动形成。渗浸冰的比例随海拔降低呈递增趋势，由 49.2%增至 86.9%，说明粒雪-冰层在拉伸、挤压作用下逐渐具备动力变质的特征，渗浸冰夹层中的粒雪则在同一作用下以尖灭的方式最终成冰，增加了冰层厚度。

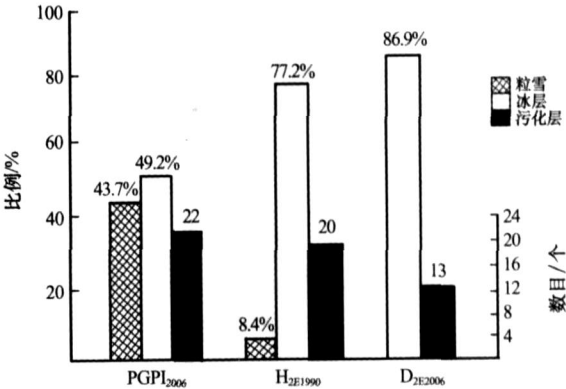


图 8 冰芯剖面对比示意图

Fig. 8 A comparison of different ice core profiles

污化层反映了冰川在过去历史中的逐渐积累过程，是冰芯剖面中较显著的特征^[22]。它主要是由上部融水携带杂质下移，在粒雪层中部形成的一个特征层面。如图 8 所示，积累区冰芯剖面中污化层条数为 22；而平衡线附近冰芯剖面中污化层条数有所减少，为 20 条；消融区冰芯剖面仅存 13 条。可见，东支不同冰芯剖面中污化层条数随海拔降低呈递减

趋势. 积累区尽管污化层条数较多, 但多为弱污化层, 一个年层中还常存在两个污化层, 其中较弱的为冬末形成, 较强的形成于夏末. 平衡线附近主要在融水渗浸作用的参与下, 较弱的污化层在融水作用中消失, 不溶性粉尘颗粒随融水不断下移, 形成强污化层; 消融区的污化层则形成于冰川上游, 在冰体流动的动力变质作用下, 污化层厚度增加, 间隔增大.

2.5 东西支冰川冰芯特征对比

西支 H_2 花杆处 (海拔 4 073 m) 与东支 H_2 花杆处 (海拔 4 043 m) 海拔相当, 均位于平衡线附近. 不同之处在于西支 H_2 点地势较东支该点陡峭, 钻孔表面流速约 $4.39 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$, 比东支同海拔高度表面流速约增加 $1.89 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ [8]. 从而东西支相同海拔的位置, 西支的表面冰龄要小一些, 相当于东支相同点以上 30 m 的地方, 因此东西支海拔相近处的冰芯在组构上存在一定差异, 表现在 H_{2W2006} 冰芯剖面中没有粒雪, 仅由冰层和污化面组成. 但由于其同处于下降和拉伸运动区, 所以在冰芯剖面特征分析上仍具有可比性. H_{2W2006} 冰芯剖面中含有 18 条污化层, 与 H_{2E2006} 冰芯剖面中的污化层条数相差不大 (20 条). 而污化层的形成主要与融水的渗浸淋溶作用有关, 因此可推断 H_{2W2006} 与 H_{2E2006} 冰芯钻取处的成冰环境和水热条件基本相似.

西支 D_2 花杆处 (海拔 3 926 m) 与东支 D_2 花杆处 (海拔 3 890 m) 海拔相当, 同属于消融带. D_{2E2006} 和 D_{2W2006} 冰芯剖面中污化层条数均为 13 条, 从而推断东、西支消融区的冰体形成机理相似, 主要来自于冰川上游, 表面冰龄较长, 受该区域成冰环境影响较小.

由此发现, 不同区域海拔相近点冰芯剖面组构相近, 从而推断其成冰环境、水热条件及冰川运动状况基本相似. 说明通过冰芯资料来探讨冰川内部特征以及该区域气候环境演变历史等问题较具代表性.

3 结论

本文根据在乌鲁木齐河源 1 号冰川钻取的 6 根冰芯的详尽资料, 结合冰流模式对冰芯冰龄的估算, 分析研究了不同冰川带冰芯剖面的物理特征、形成机理和相应的水热条件. 初步得出以下结论:

(1) 积累区冰芯的组成以粒雪-冰交替的原生沉积层为主, 受冰川流动引起的动力变质作用影响较小, 与积累区成冰环境和水热条件密切相关.

(2) 平衡线附近的冰芯, 4.3 m 以上主要是由渗浸冻结冰组成的原生沉积层, 与附近的成冰环境相吻合; 4.3 m 以下主要是经过动力变质作用的冰体, 源于冰川上部的积累物. 通过对东支 H_2 花杆处不同时期冰芯剖面的对比分析, 发现该处已逐渐向消融带特征转化, 成冰带谱上移.

(3) 消融区的冰芯主要由冰川上部流下的冰川冰组成, 通过对冰川流线的一维模拟估算冰川的等龄线分布情况及不同位置冰芯的年代剖面, 发现该区域受成冰环境的影响很小, 冰龄较长, 冰芯所对应 20 m 处的冰龄超过 500 a.

(4) 通过对不同区域冰芯特征比较, 发现各成冰带的冰芯组成及污化层差别较大; 在东、西支冰川同时期冰芯剖面的对比中, 发现海拔相近点冰芯剖面组构相近, 从而推断其成冰环境、水热条件及冰川运动状况基本相似, 说明通过冰芯资料来探讨冰川内部特征以及该区域气候环境演变历史等问题较具代表性.

致谢: 本项研究是天山冰川观测试验站开展的雪冰现代过程研究项目的一部分, 是在全体观测和研究人员集体努力下完成的. 没有观测人员长期全年度在冰川区的辛勤观测, 便不会有本研究所需的第一手资料. 谨此对参加本项研究的每一位成员以及项目组人员王文彬、张坤、董志文、周在明、赵淑惠、王璞玉、周平、金爽等表示衷心感谢.

参考文献 (References):

- [1] Wang Xiaojun, Han Jiankang, Xie Zichu, *et al.* Stratigraphic and structural analysis on an ice core to the bedrock in the accumulation area of glacier No. 1 at the headwaters of Ürümqi River[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1996, **18** (4): 337 - 346. [王晓军, 韩健康, 谢自楚, 等. 乌鲁木齐河源 1 号冰川积累区透底冰芯底层及冰结构分析[J]. *冰川冻土*, 1996, **18** (4): 337 - 346.]
- [2] Peter G K. The basal ice layer of glaciers and ice sheets [J]. *Quaternary Science Reviews*, 1997, **16** (9): 975 - 993.
- [3] Alley R B, Shuman C A, Meese D A, *et al.* Visual-stratigraphic dating of the GISP2 ice core: Basis, reproducibility, and application[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, **102**: 26367 - 26381.
- [4] Xie Zichu, Huang Maohuan. A evolution of the snow-snow grains layer and ice formation in the Glacier No. 1 at the headwaters of the Ürümqi River, Tianshan [C]// *A Studier of Glaciology and Hydrology on the Ürümqi River, Tianshan*. Beijing: Science Press, 1965: 1 - 14. [谢自楚, 黄茂桓. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川雪-粒雪层的演变及成冰作用[C]// *天山乌鲁木齐河冰川与水文研究*. 北京: 科学出版社, 1965: 1 - 14.]
- [5] Li Xiangying, Li Zhongqin, You Xiaoni, *et al.* Study of the

- ice formation zones and stratigraphy profiles of snow pits on the Glacier No.1 at the headwaters of the Ür ümqi River[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, 28(1): 37 - 44. [李向应, 李忠勤, 尤晓妮, 等. 近期乌鲁木齐河源 1 号冰川成冰带及雪层剖面特征研究[J]. 冰川冻土, 2006, 28(1): 37 - 44.]
- [6] Wang Feiteng, Li Zhongqin, You Xiaoni, *et al.* Snow to ice evolution process observation and study at percolation zone in the Glacier No.1 at the headwaters of the Ür ümqi River, the east Tianshan [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, 28(1): 45 - 53. [王飞腾, 李忠勤, 尤晓妮, 等. 乌鲁木齐河源 1 号冰川积雪区表面雪层演化成冰过程的观测研究[J]. 冰川冻土, 2006, 28(1): 45 - 53.]
- [7] Shumskii P A. Principles of Structural Glaciology[M]. New York: Dover Publications, 1964: 407 - 440.
- [8] Tianshan Glaciological Station. Annual Report on the Work at Tianshan Glaciological Station[R]. Lanzhou: State Key Laboratory of Cryospheric Science, CAREERI, CAS, 1980—2004, Vol.1 - 17. [天山冰川观测实验站. 天山冰川观测实验站年报[R]. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, Vol.1 - 17, 1980—2004.]
- [9] Li Zhongqin, Han Tianding, Jing Zhefan, *et al.* A summary of 40-year observed variation facts of climate and Glacier No. 1 at the headwaters of Ür ümqi River, Tianshan, China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(2): 117 - 123. [李忠勤, 韩添丁, 井哲帆, 等. 乌鲁木齐河源区气候变化和 1 号冰川 40 年观测事实[J]. 冰川冻土, 2003, 25(2): 117 - 123.]
- [10] Li Zhongqin. A glacier melt water pool was discovered at summit of the east branch of the Glacier No.1 at the headwaters of Ür ümqi River, Tianshan [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, 27(1): 150 - 152. [李忠勤. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川东支顶部出现冰面湖[J]. 冰川冻土, 2005, 27(1): 150 - 152.]
- [11] Shi Yafeng, Shen Yongping, Hu Ruji. Preliminary study on signal, impact and foreground of climate shift from warm-dry to warm-humid in the Northwest China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(3): 220 - 226. [施雅风, 沈永平, 胡汝骥. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景逐步探讨[J]. 冰川冻土, 2002, 24(3): 220 - 226.]
- [12] Sun Zuozhe, Chen Yaowu, You Genxiang, *et al.* Flow characteristics of the Glacier No.1 at the headwaters of Ür ümqi River, Tianshan[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1985, 7(1): 27 - 40. [孙作哲, 陈要武, 尤根祥, 等. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川的运动特征[J]. 冰川冻土, 1985, 7(1): 27 - 40.]
- [13] Li Chuanjin, Li Zhongqin, Wang Feiteng, *et al.* A contrast of the ice forming time, Ice formation zones and the stratigraphic profiles of snow pits in different time of the Glacier No.1 at the headwaters of Ür ümqi River, Tianshan [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007, 29(2): 169 - 175. [李传金, 李忠勤, 王飞腾, 等. 乌鲁木齐河源 1 号冰川不同时期雪层剖面及成冰带对比研究[J]. 冰川冻土, 2007, 29(2): 169 - 175.]
- [14] Wang Feiteng, Li Zhongqin, Edwards R, *et al.* Long term changes in the snow-firn pack stratigraphy on Glacier No.1, Eastern Tianshan Mountains [J]. Annals of Glaciology, 2007, 46: 331 - 334.
- [15] Chen Kegong. The research of flow lines on the Glacier No. 1 at the headwaters of Ür ümqi River [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1989, 11(4): 363 - 371. [陈克恭. 乌鲁木齐河源 1 号冰川流线的研究[J]. 冰川冻土, 1989, 11(4): 363 - 371.]
- [16] Bert D S, Frank P. Numerical modelling of historical front variations and dynamic response of Sofiyskiy glacier, Altai mountains, Russia[J]. Annals of Glaciology, 2003, 37: 143 - 149.
- [17] Oerlemans J. Response of the Antarctic ice sheet to a climatic warming: a model study [J]. Journal of Climate, 1982, 2: 1 - 11.
- [18] Mahaffy M A W. A three-dimensional numerical model of ice sheets: tests on the Barnes ice cap, Northwest Territories [J]. Journal of Geophysical Research, 1976, 81(6): 1059 - 1066.
- [19] Huybrechts P. A 3-D model for the Antarctic ice sheet: a sensitivity study on the glacial-interglacial contrast [J]. Climate Dynamics, 1990, 5: 79 - 92.
- [20] Aelgeirsdóttir G, Jónhannesson T, Björnsson H, *et al.* The response of Hofsjökull and southern Vatnajökull, Iceland, to climate change [J]. Journal of Geophysical Research, 2006, 111, doi: 10.1029/2005JF000388.
- [21] Li Huilin, Li Zhongqin, Shen Yongping, *et al.* Glacier dynamic models and their applicability for the glaciers in China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007, 29(2): 201 - 208. [李慧林, 李忠勤, 沈永平, 等. 冰川动力学模式及其对中国冰川变化预测的适应性[J]. 冰川冻土, 2007, 29(2): 201 - 208.]
- [22] Wang Xiaojun, Wang Zhongxiang, Wang Chunzu. Stratigraphic and structural analysis on an ice core to the bedrock in the accumulation area of Glacier No.1 at the headwaters of Ür ümqi River [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1996, 18(4): 337 - 346. [王晓军, 王仲祥, 王纯足. 乌鲁木齐 1 号冰川的积消特征及成冰过程[J]. 冰川冻土, 1996, 18(4): 337 - 346.]

Physical Characteristics and Formation Mechanisms of the Ice Cores Abstracted from the Glacier No. 1 at Ür ümqi River Head

WANG Lin¹, LI Zhong-qin^{1,2}, WANG Fei-teng¹, LI Hui-lin¹, ZHANG Ming-jun²

(1. State Key Laboratory of Cryospheric Science/ Tianshan Glaciological Station, CAREERI, CAS, Lanzhou Gansu 730000, China;

2. College of Geography and Environment Science, Northwest Normal University, Gansu Lanzhou 730070, China)

Abstract: Ice core chemistry records contain climatic and environmental information over a wide range of timescales. However, physical characteristics of ice cores, which are depended on water-temperature condition and glacier transformation during the ice formation, also contain climate, circumstance and glacier movement information. But less study on the physical characteristics and formation mechanisms of ice cores has been done at home owing to the research condition limitation. In this paper, physical characteristics of ice cores in difference glacier zones, formation mechanisms and heat-moisture conditions are analyzed for the six particular ice cores drilled from the Glacier No. 1 at Ür ümqi River Head. It is suggested that the ice core in accumulation area is characterized by the alternation of coarse-grained firn and ice with origi-

nal depositional features, the impact of the glacier flow on ice core is little. The ice core around the equilibrium line is composed of infiltration-congelation ice in the top 4.3 m. The ice core in ablation area is composed of the ice which flow from the up part of the glacier. The flow mold indicates that the age of ice core in this area is old, which is impacted little by the environment of snow to ice transformation. Comparison of the ice cores in different areas shows that the compositions of those ice cores have a large difference. The ice cores located in the east branch and west branch show the similar characteristics in the same times, which means that the physical characteristics of ice cores can be applied to study the climatic and environmental evolution.

Key words: Glacier No. 1; ice core profile; physical characteristics; transformation from snow to ice; ice flow model