维普资讯 http://www.cqvip.com

#### **文章编号:** 1000-0240(2005)06-0853-08

# 利用雪层层位跟踪法研究暖型成冰作用的年限 ——以乌鲁木齐河源1号冰川为例

# 尤晓妮, 李忠勤, 王飞腾

(中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所天山冰川观测试验站,冰芯与寒区环境实验室,甘肃 兰州 730000)

摘 要:降雪通过冷型或暖型成冰作用转化为冰川冰,中国冰川以暖型成冰作用为主.利用在雪层中插 置竹板,通过竹板进行层位跟踪的方法,历时 24 个月连续观测,研究了 1 号冰川积累区(海拔 4 130 m)降雪演化为粒雪冰的时间问题.结果表明:夏季,新雪转化为细粒雪约需要 7 d,细粒雪转化为粗粒 雪约 20 d 到 3 个月;同样的转化在冬季分别需要约 2.5 个月和 2~4.5 个月.粗粒雪转化成粒雪冰的时 间大约 40 个月.由此得到该处新雪演化为粒雪冰历时约 41~47 个月.8~9 月为雪粒演化的主要成冰 期.不同层位雪层的密实成冰速率因粒雪性质和密度的不同而有很大差别,融水是影响成冰时间及成 冰量的重要因素.

关键词:1 号冰川;成冰年限;层位跟踪 中图分类号: P343.6 文献标识码:A

# 1 引言

成冰年限是指降雪演化成冰川冰这一过程所需 的时间,是冰川学研究的基本内容之一,同时对于 冰芯记录的形成恢复研究意义重大.成冰作用有暖 型和冷型两种<sup>[1]</sup>,冷型成冰是负温下的一种成冰方 式,极地冰川多以此方式成冰<sup>[2]</sup>.Robert *et al*.<sup>[3]</sup>利 用垂直挤压速率和密度得出雪层的垂直速度,以此 计算出南极 Taylor Dome 冰川稳定状态下的深度-时间范围.暖型成冰作用则是在温度高于0℃、有 融水参与下的一种成冰方式.除了达索普<sup>[4, 5]</sup>等少 数冰川外,中国山地冰川多以暖型成冰为主.

我国对成冰年限的研究始于 1962 年,谢自楚 等利用雪层剖面和年层特征得出乌鲁木齐河源 1 号 冰川(以下简称 1 号冰川)新雪转化为粒雪冰需要 3 ~5 a<sup>[6]</sup>.此后谢自楚等<sup>[7~10]</sup>对珠穆朗玛峰北坡、祁 连山地区以相同的方法进行层位定年,分别得出 2 a、2 a 以上的成冰时间.王晓军等<sup>[11~13]</sup>对 1 号冰川 进行了多次观测,根据冰板和污化面推测 1 号冰川 成冰历时不少于 10 a,不同之处在于王晓军等<sup>[13]</sup>是 通过冰芯资料对冰川冰定年.1994 年,李忠勤等<sup>[14]</sup> 对古里雅冰帽海拔 6 400 m 高度的积累区进行了雪 冰转化机制研究,认为该处夏季融水渗浸冻结速度 快,在当年的雪层内即可冻结成为粒雪冰.

事实上,成冰年限除了受成冰作用影响外,与 海拔等诸多因素有关.同一条冰川,成冰年限因海 拔高度的不同有很大差异.如在消融区,附加冰的 形成和破坏在一个夏季就可以完成<sup>[15]</sup>,这主要是 因为不同的海拔高度其剖面厚度、水热条件及下伏 冰的特性不同.本项研究所挖雪坑位于渗浸带内(海 拔 4 130 m)<sup>[16]</sup>,完整的雪层组成自上而下依次为: 表层新雪,细粒雪,粗粒雪,粒雪冰,冰川冰.新雪 降落到冰川表面,在重力和表面微融水的作用下朝 着自由能减小的方向密实化.融水在这一过程中起 到了重要作用.一方面融水的参与加速了上述过程, 另一方面融水冻结产生的相变潜热加剧了对雪层的 改造.当融水下渗到粗粒雪下部,对该层粒雪进行 改造并与之胶结形成粒雪冰,粒雪冰的平均密度约

收稿日期: 2005-06-15;修订日期: 2005-09-23

**基金项目:**中国科学院寒区旱区环境与工程研究所引进国外杰出人才基金项目(CACX2003101);国家自然科学基金项目(40371028; 40301009;90102005);国家自然科学基金创新群体项目资助

作者简介:尤晓妮(1980一),女,甘肃陇南人,中国科学院寒区旱区环境与工程研究所硕士生,主要从事冰雪化学与环境研究.E-mail: zhuatang@tom.com

冻

维普资讯 http://www.cqvp.com

0.8g·cm<sup>-3</sup>,微白色,冰体中充满大量圆形细密 气泡[17,18]. 粒雪成冰后继续压缩气泡内的气体使得 冰密度进一步上升,并在拉伸、挤压作用下逐步具 备动力变质的特征,形成冰川冰,密度约 0.9 g· cm<sup>-3</sup>. 当雪-粒雪层吸收的热量增加,产生的融水下 渗到冰川冰面,一部分依附其上形成附加冰,一部 分沿冰面流失.

本文所指的冰为粒雪冰,成冰年限即新雪转化 为粒雪冰的时间<sup>[19]</sup>.

研究基于对多种方法的比较分析,确定利用竹 板对雪层质点进行跟踪,首次比较准确的揭示 了1号冰川成冰年限问题.较之前人的研究,雪层 层位跟踪法可以对雪层准确定位,并通过速度计算 将成冰过程定量化,使得成冰年限的研究更具有准 确性.本文重点对成冰年限、雪层密实成冰速度及 其影响因素、夏季成冰量等问题进行讨论.

2 研究方法

利用竹板研究成冰过程,依据的原理是:当某 一根竹板的初始位置是新降雪,经过时间  $T_{m \to w}$ 之 后被粒雪冰包裹,时间 T<sub>新→冰</sub>即为新雪演化为粒雪 冰的时间. 基于现有 24 个月的观测资料, 新雪→ 细粒雪、细粒雪→粗粒雪的转化时间 T<sub>新→细</sub>、T<sub>细→粗</sub> 可结合剖面观测得到, 而粗粒雪→粒雪冰的转化时 间 T<sub>和→\*</sub> 尚不能直接获得. 我们利用相同雪层深度 代表相似变质程度的原理及粗粒雪层的稳定性,对 竹板变化进行叠加累计.具体方法是:选取位于粗 粒雪最上层的竹板,记录其下移时间  $\Delta T_1$ ,依据该 竹板变化后的位置找到与之具有相同深度的竹板, 并记录其下移时间 ΔT<sub>2</sub>. 依此类推, 直到有一根竹 板位于粒雪冰.其间每根竹板变化的时间依次记做  $\Delta T_1$ 、 $\Delta T_2$ 、 $\Delta T_3$ ··· $\Delta T_n$ ,对其求和即可得到粗粒雪 成冰的时间:

±.  $T_{\texttt{H} \rightarrow \texttt{i}} = \Delta T_1 + \Delta T_2 + \Delta T_3 + \dots + \Delta T_n$ (1) 由此得到新雪转化为粒雪冰的时间:  $T_{\mathrm{ff} \to \mathrm{ff}} = T_{\mathrm{ff} \to \mathrm{ff}} + T_{\mathrm{ff} \to \mathrm{ff}} + T_{\mathrm{ff} \to \mathrm{ff}}$ (2)

基于上述原理,我们在1号冰川粒雪盆附近开 挖雪坑,将竹板等距离(10 cm)水平插至选定的雪 坑中.定期对竹板到冰面的距离进行跟踪观测,从 2002年12月5日至2004年12月,已有2a的竹板 变化资料.为了防止小环境造成的观测差异,使进 一步的剖面化学变化过程研究与竹板变化研究具有 一致性,雪坑的位置选取在常年取样雪坑附近.将 竹板按照插入雪坑的先后次序进行标号,依次为 L1, L2, L3, …, 并相间涂上红, 蓝两色, 以便于 辨认.当有新雪覆盖或者竹板下移,在雪坑上部继 续以 10 cm 的起始间距插入竹板. 随着雪层厚度的 增加,竹板数量也不断增加,最多的时候达到27 根.夏季消融强烈,部分竹板因出露表层,或与下 方竹板发生重叠而被撤去.夏季雪层变化剧烈,观 测为1周1次;冬季较稳定,观测间隔期是2~3 周.为防止剖面因太阳照射而融化,观测结束后迅 速将雪坑填平.

结果与讨论 3

### 3.1 成冰年限

#### 3.1.1 新雪到细粒雪的演化时间

新雪密实化程度低,转化为细粒雪的时间序列 短,在现有竹板变化资料的基础上结合雪层剖面记 录即得到演化时间.图1显示了新雪到细粒雪的变 化情况,黑色加粗直线表示竹板.由图 1(a)可得, 竹板 L18 在 2003 年 12 月 5 日位于新雪层, 2004 年 1月31日位于风板,到2004年2月28日即位于细 粒雪,说明竹板 L18 所在雪层到此已经完成了新雪 到细粒雪的演变.图1(b)给出了夏季的变化情况,



Fig. 1 Sketches showing the evolutional process from new snow to fine firm

27卷

855

#### 6 期

尤晓妮等:利用雪层层位跟踪法研究暖型成冰作用的年限——以乌鲁木齐河源1号冰川为例

表 1 新雪到细粒雪的转化时间	
-----------------	--

Table 1 Time for new snow transferring to fine firm

	新雪/(年-月-日)	细粒雪/(年-月-日)	Τ新→细
L16	2003-05-16	2003-05-22	约6a
L18	2003-12-05	2004-02-28	约 2.5 个月
L23	2004-03-27	2004-05-07	约 1.5 个月
L14	2003-05-08	2003-05-16	约 8 d

具体的转化时间见表 1.。

由表1可以看出,新雪转化为细粒雪的时间  $T_{m+m}$ 约1周~2.5个月,有明显的季节差异,夏、 冬所需时间比约1:11、这是因为夏季气温较高,雪 层因接收来自大气中的热量而迅速升温,产生的表 面融水垂直下渗,使得粒雪化过程加剧.冬季整个 雪层处于稳定的负温状态,主要依靠雪层自身的压 力作用,以重结晶的方式成冰,成冰时间较长;其 次,新雪密度较小,空隙度大,其垂直压应力大于 水分量,因此在重力作用下易发生沉陷.据谢自楚 的研究<sup>[20]</sup>,沉陷的结果可使粒雪的密度增加到550 (或580)kg·m<sup>-3</sup>左右.而夏季融水的出现使晶粒 被水膜包裹,增加晶粒活动的自由度,促发雪的沉 陷<sup>[6]</sup>.

# 3.1.2 细粒雪到粗粒雪的演化时间

本阶段的演化依然可以通过雪层剖面记录得 到.如图 2 所示: 2003 年 9 月 13 日竹板 L15 处于较 新的细粒雪层, 10 月 31 日该层细粒雪已转化为中 粒雪, 2004 年 1 月 31 日观测发现被粗粒雪包裹(图 2(a)),其间经历了大约 4.5 个月.图 2(b)所示的转 化发生在春季.表 2 给出了不同竹板细粒雪到粗粒 雪的演化时间.

表 2 表明: 细粒雪转化为粗粒雪的时间  $T_{m\to n}$ 约为 20 d~4.5 个月. 该阶段的季节差异也很大, 夏、冬转化时间比约 1:7. 然而较之新雪转化为细 粒雪, 差异有所减小. 这是由于比起新雪, 细粒雪 孔隙度减小、密度增加,粒雪层在重力作用下的垂 直向下运动受到制约.此外由于上覆新雪,夏季融 水的作用程度也相对减弱.

表 2 细粒雪到粗粒雪的转化时间

Table 2Time for fine firm transferring to coarse firm

	细粒雪	粗粒雪	Τ 细→粗
I.4	2003-02-13	2003-03-20	约1个月零1周
L6	2003-03-13	2003-04-10	约1个月
L15	2003-09-13	2004-01-31	约 4.5 个月
L14	2003-05-16	2003-06-06	约 20 d

# 3.1.3 粗粒雪到粒雪冰的演化时间

粗粒雪在晶粒性质上(硬度,密度,粒径等)与 新雪和细粒雪有着较大差异,其密实化程度高,转 化时间序列长,雪层相对稳定.粗粒雪层中竹板的 位置,基本反映了该雪层的变质程度.本阶段,我 们根据前述原理,利用竹板叠加累计的方法计算转 化时间.即将具有相同位置的竹板依次替换叠加, 累计其变化时间.具体方法如下(图 3):

根据竹板资料,首先对竹板 L14 进行跟踪观 测.L14 的初始位置位于最新形成的粗粒雪中,距 冰面 149 cm,经过约 11 个月的连续变化于 2004 年 8月 18 日到达距冰面 98 cm 处.在 2003 年 9月 13 日的资料中找到具有相似雪层位置的竹板 L9(距冰 面 99 cm).根据前述原理,此时的 L9 与 2004 年 8 月 18 日的 L14 具有相近的变质程度.对 L9 跟踪观 测得到其末端位置(2004 年 8 月 18 日位置,下同) 距冰面 55 cm,历经约 11 个月.同理找到具有近似 位置的竹板 L5(2003 年 9 月 21 日距冰面 55 cm), 经过约 11 个月得到其末端位置距冰面 20 cm,具有 相似高度的竹板为 L1(距冰面的初始距离为 18 cm).继续跟踪 L1,经过约 6.5 个月,于 2004 年 4 月24 日发现其被粒雪冰包裹,表明该层粗粒雪已



图 2 细粒雪到粗粒雪演化示意图

Fig. 2 Sketches showing the evolutional process from fine firn to coarse firn



经完成了到粒雪冰的改造.  $\Delta T_1$ 、 $\Delta T_2$ 、 $\Delta T_3$ 、 $\Delta T_4$ 分别表示每根竹板的演化时间(如图 3 所示),利用 式(1)即可得到粗粒雪成冰的时间  $T_{a\to w}$ 约为 40 个 月. 用同样方法依次叠加竹板 L15、L11、L7 和 L3, 得到上述过程历时仍为 40 个月.

粗粒雪转化为粒雪冰的时间是跨越季节的,其 转化阶段主要发生在夏季消融期.早期研究通过在 典型剖面撒人工污化模拟融水的下渗过程,得出融 水影响的深度可达 20 m<sup>[20]</sup>,因此融水依然是粗粒 成冰的主要因素.夏季消融强烈,融水在密度较大、 温度较低的粗粒雪层受阻发生冻结并释放潜热,释 放的潜热又成为加热该冰层的主要热力来源<sup>[21]</sup>. 冬季低温期,由于粗粒雪所处层位靠下,上覆新雪 及细粒雪的压力作用较大,以冷型变质为主.

基于上述各阶段的转化时间,利用式(2)即可 得到1号冰川海拔4130m处成冰年限 T<sub>新→w</sub>为41 ~47个月.浮动范围由新雪转化为粗粒雪的季节差 土

冻

27卷

维普资讯 http://www.covip.com

异引起.而粗粒雪演化为粒雪冰的时间则跨越了季节,在整个成冰历时中占到85%~97%.这与本项研究中用污化层定年得到的结果(3~4 a)十分吻合<sup>[16]</sup>.此外,与谢自楚等<sup>[6]</sup>所指的成冰时间(3~5 a)亦相似.表3列出了雪、粒雪和粒雪冰各阶段的转化时间.

#### 表 3 雪一粒雪一粒雪冰演化时间

Table 3 Time for snow-firn-ice transformation

	夏半年(5~9月)	冬半年(10~4月)
新降雪→细粒雪 T <sub>新→細</sub>	约1周	约 2.5 个月
细粒雪→粗粒雪 T <sub>细→粗</sub>	约 20 天~3 个月	约 2~4.5 个月
新降雪→粗粒雪 T <sub>新→粗</sub>	约 1~5 个月	_
粗粒雪→粒雪冰 T <sub>粗→冰</sub>	约 40 个月	·
新降雪→粒雪冰 T 新→冰		约 41~47 个月

## 3.2 雪层密实成冰速度及其影响因素

为使本研究适用于更大范围并对不同季节成冰 特点进行具体分析,以下对密实成冰速度进行讨 论.由于竹板位置始终代表其所在雪层,竹板下移 速度即雪层密实化快慢的表征.

## 3.2.1 季节变化

竹板在雪坑中的移动是一个由时间、深度和速 度构成的三维轨迹.将竹板到冰面的距离与观测时 间间隔做一个简单的速度运算,得出竹板下移的速 度值并加上深度维和时间维便得到一幅竹板移动的 三维图(图 4).根据本项研究对成冰期的划分<sup>[15]</sup>, 将图所示的时段划分为冬季稳定期 wi(11 月中旬~ 次年 3 月下旬)、春季波动期 sp(4 月初~5 月底)、



色填充的部分放大为原值的 4 倍; 左上方图例显示了圆的直径与速度的比例关系; 虚线之间的区域代表不同的成冰期 Fig. 4 The moving velocity of bamboo slices changing with depth and time

夏季剧变期 su(6 月初~9 月底)、秋季波动期 au (10 月初~11 月中旬), 如虚线所示.

依据图 4, 对不同成冰期内雪层密实成冰具有 如下特点:

(1)冬季稳定期.由图4可得,该段时期竹板下 移速度极为缓慢,有时连续几次观测到冰面距离均 没有变化,速度随深度变化趋势不明显.原因是冬 季风力较大,降雪少,表面或形成密度较大的风 板,或细粒直接出露表层.冬季粒雪成冰速度有以 下特点:雪层处于稳定状态,成冰速度缓慢.成冰 作用以冷型为主;随深度增加,不同性质粒雪成冰 速度没有明显变化.

(2)春季波动期.如图4所示,在雪坑上部接近 表面位置竹板下移速度出现明显的峰值,且随深度 增加,速度递减显著.这是由于本时期内雪坑表面 温度昼夜变化剧烈,融化再冻结作用频繁.且由于 降水较多,密度较低的新雪开始在表面积累.这段 时期成冰特征是:雪层密实成冰速度开始增大,有 随深度递减的趋势;融水作用使得局部雪层成冰加 速.

(3) 夏季剧变期.6、7月份,表层竹板下移剧 烈,但仍可以看到随深度递减的规律.到了8、9月, 竹板出现剧烈波动.2003年8月23和2004年8月 18的两次观测中发现,随着到冰面距离增加,竹板 下移速度起初增大,接着开始变小,继而又增大, 两种趋势交替进行,表现出无规律性.速度极大值 不是出现在表层新雪而以中部或中上部居多.这种 现象与该时段内融水强烈渗浸有关.本期温度较高, 消融量大,融水可以渗透几个年层的粒雪.由此得 出:夏季,雪层在雪坑中的位置变化剧烈,成冰速 度快,以融水的渗浸冻结成冰为主;夏季初期成冰 速度随深度减缓的趋势到末期变得无规律;8、9月 是主要成冰期.

(4)秋季波动期.是夏季成冰期向冬季过渡的时期.竹板下移速度转入低值,随深度的衰减趋势 又开始明显起来.少量的降雪使得雪层表面竹板下 移速度出现极大值.本阶段雪层密实成冰速度减小, 开始趋于稳定.

3.2.2 速度随深度变化

利用叠加的方法得到一套完整的新雪转化为粒 雪冰的竹板速度图,基本反映了竹板下移速度随深 度变化的趋势.将其与不同粒雪平均密度变化比较 分析,发现二者具相反的变化趋势(图 5).

如图 5 所示,实线代表竹板下移速度随深度的

变化, 虚线表示不同雪层(新雪, 细粒雪, 粗粒雪) 的平均密度. 总的说来, 随竹板到冰面距离的减小, 其下移速度呈波动状减小, 密度则出现增大的趋势. 由此可见, 雪层的密度是影响竹板移动速度的 一个重要原因. 这是由于成冰过程其实就是雪密度 不断趋于冰密度的过程<sup>[22]</sup>.



图 5 竹板下移速度及密度随深度变化曲线 Fig. 5 The moving velocity of bamboo slices and snow density changing with depth

对速度-深度曲线分析发现,在新雪中速度随 深度增加而减小.到细粒雪上部出现一个急剧的速 度回升.结合剖面分析发现,该处是一个类似深霜 的松散层,孔隙度大、硬度低,一般位于粗粒雪上 部.认为其形成是由于深霜在融水作用下体积减小, 空隙增大所致.当细粒雪与粗粒雪发生临界变化时, 速度开始急剧回落.竹板在粗粒雪中的变化相对平 稳,这也是本研究利用竹板叠加的方法探讨粗粒成 冰的重要依据.分析表明,雪层密实成冰速度在新 雪和细粒雪阶段比较快、波动大,粗粒雪中则较为 平缓,细粒雪与粗粒雪边界层的转化是重要转折. 3.2.3 融水对成冰速度的影响

(1)融水是雪层逐渐下移的原因之一.对于以 暖型成冰作用为主的1号冰川来说,融水一方面通 过加速雪的密实化过程使得雪层下移,另一方面由 于造成物质损失而使雪层向下运动.融水主要以两 种方式在某层位消失:一是下渗,融水下渗是雪层 中物质重新分配的重要方式,对冰川内补给量的影 响巨大<sup>[23]</sup>;二是冰面径流,当融水下渗至冰面一部 分冻结成冰,而另一部分以冰面径流的形式消失. 不同的是,冰面径流造成了冰川物质的直接损失, 而融水渗浸冻结只是物质的再分配.

857

27 卷

土

(2) 其次,融水通过密度影响成冰速度.融水 的渗浸再冻结对粒雪形态、密度、硬度等物理特性 的改造是显著的.姚檀栋等<sup>[24]</sup>对祁连山冰帽顶部的 冰芯进行研究得出:融水是导致粒雪层密度加大的 重要原因.对1号冰川而言,融水造成雪层密度加 增加主要表现在两个方面:一是融水对晶粒的包裹 导致粒雪在沉陷过程中变紧密,从而使容重增加, 孔隙率减少<sup>[6]</sup>;二是融水通过下渗再冻结作用填充 于孔隙,使得发生冻结的层位(冰片层)密度值明显 较大.有研究表明<sup>[2]</sup>,融水区内的晶粒密实化所能 得到的最大密度,要比干雪带内的高.

(3)融水造成雪层成冰速度的季节变化.由于 融水出现主要以温度较高的夏季为主,使得粒雪的 密实化速度具有显著的季节变化.

在观测中我们发现,竹板除了按照理想状态向 下移动外,还有间或的上移.该现象多发生在雪坑 中部,以变化较剧烈的夏季出现相对频繁.对此认 为可能由于:冰川运动产生拉伸和挤压作用,从而 造成竹板上下移动<sup>[25]</sup>;而雪层因重力作用向下运 动、填充,亦有可能引起竹板上浮.同时,野外观测 时人为导致的参照系误差也是在所难免的.此外, 2003 年 5 月 16 日的一次观测资料中发现,竹板 L5、L6、L7 发生了重叠.这是由竹板间物质的流失 引起.

### 4 夏季成冰量

本区的夏季成冰量由融水下渗冻结形成,主要 取决于冰川活动层中冰的冷储量、夏季降雪量、冰 川表面热量平衡、融水渗浸特点及冰面排水条件 等[9],具有较大的年际变化和季节变化.本文根据 进入冰层的竹板距粒雪冰面的距离变化即可直接得 到夏季成冰量,它包括融水下渗到粒雪冰面遇冷冻 结形成的冰,亦包括粒雪冰自身融化再冻结形成的 冰,而雪层上部或中部形成的渗浸冰片不在本研究 的范畴.对已进入冰层的竹板 L1 进行跟踪观测发 现 2004 年 5 月 28 日距冰面 10 cm, 7 月 28 日增至 12 cm, 表明在 6、7 两月约有 2 cm 粗粒雪成冰; 9 月底 L1 距冰面 22 cm, 表明 8、9 月约有 10 cm 粗 粒雪成冰(见图 6). 由此得到, 1 号冰川夏季(6~9 月)成冰量约为12 cm, 而8、9 月为主要成冰期, 占 到夏季成冰量的 83%. 这与根据雪层下移速度的变 化特征得出的结果十分吻合. 由于竹板进入冰层 后,相对下移速度非常缓慢,L1在冰层中的下移可



5 结论

基于 2 a 的连续观测资料,利用雪层层位跟踪 法对以暖型成冰作用为主的乌鲁木齐河源 1 号冰川 积累区(海拔 4 130 m)的成冰年限问题进行了研 究,得出以下结论:

(1) 新降雪转换为粒雪冰的时间. 研究表明, 1 号冰川新雪演化成粗粒雪的时间因季节不同而有很 大差异. 夏季, 新雪转化为细粒雪仅需要 1 周的时 间, 细粒雪转化为粗粒雪约 20 d~3 个月. 冬季, 上 述过程分别需要约 2.5 个月和 2~4.5 个月. 粗粒雪 演化成粒雪冰大约需要 40 个月, 在整个成冰过程 中占到 85%~97%. 由此得到 1 号冰川新雪转化为 粒雪冰历时约 41~47 个月.

(2)雪层层位下移速度特征.分析得到,雪层 层位下移速度具有明显的季节和深度变化.夏季 8、 9月,下移迅速,纵向变化紊乱,是主要的成冰期; 冬季则较为稳定,几乎不成冰.随深度增加,雪层 下移速度有减小趋势,与密度呈相反变化.

(3) 融水是影响成冰时间的重要原因.

(4) 夏季(6~9月)约有12 cm 粗粒雪成冰.

总体上看,成冰年限是一个诸多要素综合作用的结果,包括温度,海拔及融水对粒雪的改造等. 本文仅对1号冰川海拔4130m处的成冰年限进行 了分析讨论.事实上,雪层下移速度V是一个关于 雪层密度P,温度T及融水M的函数V=f(P,T, M).进一步的研究可将这些参数定量化,建立四者 的函数关系,便可利用公式 dT=dh/v(式中:h为 雪层厚度;T为成冰年限)计算出不同地区、不同 海拔的冰川成冰年限.进一步的研究正在开展,我 们已在不同高度利用此方法进行成冰历时的观测, 并进行密度和温度的连续记录.融水在成冰过程中 的作用研究也在试验当中,相信这项研究将具有更 6 期

859

# 大推广意义.

致谢:对参加本项研究的每一位观测人员以及 项目组人员焦克勤、杨惠安、韩添丁、李向应、李 传金、赵中平、钱军、张明军等,表示衷心感谢.

#### 参考文献(References):

- [1] Shi Yafeng, Huang Maohuan, Ren Binghui. An Introduction to the Glaciers in China [M]. Beijing: Science Press, 1988. 55 一65. [施雅风,黄茂桓,任炳辉. 中国冰川概论[M]. 北京: 科学出版社, 1988. 55-65.]
- [2] Qing Dahe. Densification process of snow firn in the surface layer of the Antarctic ice [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1987, 9(3): 193-204. [秦大河. 南极冰盖表面层 内雪的密度化过程[J]. 冰川冻土, 1987, 9(3): 193-204.]
- [3] Hawley R L, Waddington E D. Dating firn cores by vertical strain measurements [J]. Journal of Glaciology, 2002, 48 (162): 401-406.
- [4] Yao Tandong, Pu Jianchen, Wang Ninglian, et al. A new type of ice formation zone found in the Himalayas [J]. Chinese Science Bulletin, 1998, 44 (5): 467-473. [姚檀栋, 薄健辰, 王宁练,等.中国境内又一种新成冰作用的发现[J].科学通 报,1998,43(1):94-97.]
- [5] Xu Baiqing, Yao Tandong. A study on the air-bubble formation process at altitude of 7100 m a. s. l. in the Dasuopu Glacier [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1999, 21(2): 120-124.「徐伯青,姚檀栋.达索普冰川海拔 7100 m 处气泡 封闭过程研究[J]. 冰川冻土, 1999, 21(2): 120-124.]
- [6] Xie Zichu, Huang Maohuan. An evolution of the snow-snow grains layer and ice formation in the Glacier No. 1 at the headwaters of the Ürümqi River, Tianshan [A]. Studies of glaciology and hydrology on the Ürümqi River, Tianshan [C]. Beijing: Science Press, 1965. 1-14. [谢自楚, 黄茂恒. 天山乌 鲁木齐河源1号冰川雪一粒雪层的演变及成冰作用[A]. 天山 乌鲁木齐河冰川与水文研究[C].北京:科学出版社,1965.1 -14.7
- [7] Xie Zichu. Snow and ice formation process in northern Xixabangma Peak [A]. Investigation Reports in Xixabangma Area [C]. Beijing: Science Press, 1982. 45-59. [谢自楚. 希夏邦 马峰北坡的积雪和成冰作用[A].希夏邦马峰地区科学考察 报告[C]. 北京:科学出版社, 1982. 45-59.]
- [8] Xie Zichu, Wang Zongtai. Ice formation process in northern Everest area [A]. Investigation Reports in Everest Area [C]. Beijing: Science press, 1975. 8-13. [谢自楚, 王宗太. 珠穆 朗玛峰地区北坡成冰作用[A]. 珠穆朗玛峰地区科学考察报 告[C]. 北京:科学出版社, 1975. 8-13.]
- [9] Xie Zichu, Wu Guanghe, Wang Lilun. Ice formation process in glacier of Qilian Mountains [A]. Memoirs of Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, CAS, No. 5 [C]. Beijing: Science Press, 1984. 27-40. [谢自楚, 伍光和, 王立伦, 等. 祁连山冰川的成冰作用[A]. 中国科学院兰州冰川冻土所集 刊, No. 5 [C]. 北京:科学出版社, 1984. 27-40.]
- [10] Xie Zichu. Snow stratigraphy and ice formation on Law Dome, Antarctica [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1984, 6(1):1-21. [谢自楚. 南极洲洛多姆冰帽学的地层学及成冰 作用研究[J]. 冰川冻土, 1984, 6(1): 1-21.]

- [11] Wang Xiaojun, Zhang Jinhua. Observation on the stratification of snow and accumulation in the accumulation area of Glacier No. 1 at the head of Ürümqi River[J], Annual Report on the Work At Tianshan Glaciological Station, 1982, 1: 11-15. [王晓军,张金华. 乌鲁木齐河源 1 号冰川积累区雪层剖面和 积累量的观测[J]. 天山川观测实验站年报, 1982, 1, 11-15.7
- [12] Wang Xiaojun, Wu Guanghe, Wang Xinzhong, et al. Observation on accumulation and melt of Glacier No. 1 at the head of Ürümgi River [J]. Annual Report on the Work at Tianshan Glaciological Station, 1984, 3: 1-15. [王晓军, 伍光和, 王 新中,等.乌鲁木齐河源1号冰川积累消融观测[J].天山冰 川观测试验站年报, 1984, 3:1-15.]
- [13] 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 Ürümqi 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.]
- [14] Li Zhongqing, Yao Tandong, Huang Cuilan. Modern atmospheric environmental records in Guliya Ice Cap of Qing-Zang Plateau [J]. Chinese Science Bulletin, 1994, 40(10): 874-875. [李忠勤,姚檀栋,皇翠兰、青藏高原古里雅冰帽中的现 代环境记录[J]. 科学通报, 1994, 40(10): 874-875]
- [15] Liu Chaohai, Xie Zichu, Wang Chunzu. A research on the mass balance processes of Glacier No. 1 at the headwaters of the rÜrümgi River, Tianshan Mountains [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1997, 19(1): 17-24. [刘潮海,谢 自楚,王纯足.天山乌鲁木齐河源1号冰川物质平衡研究[J]. 冰川冻土, 1997, 19(1): 17-24.]
- [16] Wang Feiteng, Li Zhongqin, You Xiaoni. Studying on ice formation process of surface snow layer in accumulation area of Glacier No. 1 at the Ürümqi River head, Tianshan Mts. [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, 28, in press. [王飞腾,李忠勤,尤晓妮.天山乌鲁木齐河源1号冰川积累 区表面雪层演化成冰过程的观测研究[J].冰川冻土,2006, 28:待发.]
- [17] Kaliesinik S V. An Introduction to Glaciology [R]. Glaciology and Geocryology Institute, 1982. 32 [卡列斯尼克,冰川学概 论[R]. 中国科学院兰州冰川冻土研究所,1982. 32.]
- [18] Kaliesinik S V. General Glaciology [M]. Geography Institute, CAS, 1965. 12. [卡列斯尼克, 普通冰川学[M]. 中国科学院 地理研究所冰川冻土研究室,1965,12.]
- [19] 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.]
- [20] Shi Yafeng. Glaciers and Their Environments in China [M]. Beijing: Science Press, 2000. 54-73. [施雅风. 中国冰川与 环境[M].北京:科学出版社,2000.54-73.]
- [21] Kattelmann R, Dozier J. Observations of snowpack ripening in the Sierra Nevada, California, U.S.A [J]. Journal of Glaciology, 1999, 45(151): 409-416.
- [22] Cai Baolin, Xie Zizhu, Huang Maohuan. Mathematical models

维普资讯 http://www.cqvip,com

860 -

冻

土

27 卷

维普资讯 http://www.coaip.com

for the temperature and water—heat transfer in the percolation zone of a glacier [J]. Cold Regions Science and Technology, 1988, 12(1), 39-47.

[23] Zhang Jinhua, Wang Xinzhong. Observation on the stratification of snow in the accumulation area of Glacier No. 1 at the head of Ürümqi River [J]. Annual Report on the Work at Tianshan Glaciological Station, 1984, 3: 19-27. [张金华, 王新中. 乌鲁木齐河源 1 号冰川积累区雪层剖面资料说明 [J]. 天山川观测实验站年报, 1984, 3: 19-27.]

# Study on Time Scale of Snow-Ice Transformation through Snow Layer Tracing Method——Take the Glacier No. 1 at the Headwaters of Ürümqi River as an Example

YOU Xiao-ni, LI Zhong-qin, WANG Fei-teng (Tianshan Glaciological Station/Key Laboratory of Ice Core and Cold Regions Environment, CAREERI, CAS, Lanzhou Gansu 730000, China)

Abstract: Fresh snow transfers to glacier ice through a cold or a warm ice formation process. In China, the transformation of most glaciers takes place following a warm ice formation process. However, the time scale of the transformation from snow to ice is poorly documented in literatures. The main reason for it is of lack of long term field observation data. In this paper, an explicit transformation period from snow to ice on the accumulation zone (4 130 m) of the Glacier No. 1 is given out based on a 24- month continuous observation of snow pits profiles by employing snow layer-tracing method. The study demonstrates that, in summer, the time for snow developing to fine firn is about 7 days, and the time for fine firn turning to coarse firn is about 20 days $\sim$ 3 months. The same transformation processes take about 2. 5 months and 2 $\sim$ 4. 5 months in winters. Thus, the total snow to ice transformation age at this site is about 41 $\sim$ 47 months. In this paper, the seasonal variability of snow layer's movement, the relationship between movement velocity changing with snow depth and density, and the magnitude of ice formation in summer are also discussed. It is concluded that the late summer (August-September) is a main period for ice formation, and melting water greatly affects the snow to ice transformation process.

Key words; Tianshan Mountains; Glacier No. 1; ice formation age; transformation of snow to ice

<sup>[24]</sup> Yao Tandong, Thompson L G. Densification process in filtration zone on the Dunde Ice Cap, China [A]. Proceedings of the Fourth National Conference on Glaciology and Geocryology [C]. Beijing: Science Press, 1992. 34-40. [姚檀栋, T Thompson L G. 敦德冰帽冷渗浸带雪密实化过程研究[A]. 第四界全国冰川冻土学术会议论文集(冰川学)[C]. 北京:科学出版社, 1992. 34-40.]

<sup>[25]</sup> Paterson W S B. The Physics of Glaciers (Second Edition)[M]. New York: Pergamon Press, 1981.