

乌鲁木齐河源1号冰川积累区透底冰芯 地层及冰结构分析

王晓军¹ 韩建康¹ 谢自楚¹ A lbert L luberas²

(1 中国科学院兰州冰川冻土研究所, 730000; 2 乌拉圭东岸共和国海军海洋水文气象中心)

摘 要 对乌鲁木齐河源1号冰川积累区一支深达 91.64 m 的透底冰芯进行了详细的层位及冰结构分析, 结果表明, 在 20 m 深度以内, 很好地保存了原始沉积的特征, 但在 70~80 m 深处还发现小密度的乳白色冰占优势的冰层, 可能形成于小冰期, 中层具有动力变质及再结晶作用共存及反复消长的结构特征(冰晶尺寸、气泡), 未见单极大型结构, 但出现弱竖环形结构, 底层出现弱宝石状的多极大结构。

关键词 乌鲁木齐河源 1 号冰川 冰芯 地层学 冰结构

1 引言

冰川的层位及冰结构的研究有助于恢复冰川积累年层, 提取某些古气候及环境信息。针对冰川内部的应力及变形机制对极地冰盖及山地冰川的野外观测及室内实验, 已经阐明了许多冰结构型式和演变的规律, Paterson (1981) 作了较为系统的总结。近 10 余年来, 我国冰川学者陆续进行了南极及中国冰川较深剖面的层位及冰结构分析和实验室的研究(谢自楚, 1984; 李军等, 1988; 黄茂桓等, 1988; 韩建康等, 1988; 黄茂桓等, 1994), 增进了我们对于深层冰结构的认识。1990 年 11 月, 我们在天山乌鲁木齐河源 1 号冰川东支积累区用 BZXJ 超轻型冰芯钻(朱国才等, 1991), 取得了一支长 91.64 m、直径 6.6 cm 的完整透底冰芯(H₁), 这使我们有可能对冰斗-山谷型冰川积累区冰结构连续剖面有所了解, 初步研究结果曾在海外发表(Zhang W anchang *et al.*, 1993)。本文拟对该冰芯的分析结果作较全面的介绍。

钻孔位于 1 号冰川东支粒雪盆陡峻后壁(45°)下部与较平缓(15°)的粒雪盆底的转折处(海拔 4 058 m), 钻孔以上表面流速约 6.5 m/a, 钻孔处(H₁)流速最小, 为 2.5 m/a(孙作哲等, 1985), 但都处于下降和拉伸运动区(韩建康等, 1985)。东支冰川稳定状态下的平衡线平均高度为海拔 3 939 m(谢自楚等, 1996)。但近数十年来冰川处于退缩状态, 1958 年以来的多年平均平衡线上升到约海拔 4 000 m。因此, H₁ 钻孔处于较稳定的积累区内, 但强烈负平衡年(如 1984/1985 和 1985/1986)平衡线上升到 H₁ 钻孔位置以上。据 30 a 的物质平衡观测, H₁ 处平均年净积累量约 200 mm 水层, 粒雪盆

后壁最大为 500 mm 左右。

由于融水的渗浸作用, 钻孔处冰层温度较该处年平均气温高得多。据对 H_1 钻孔的测温资料 (图 1), 活动层底部 (约 15 m) 冰温为 -1.7 , 接近底部 (90 m) 为 -1.1 , 估计冰川底部与冰床冻结在一起。

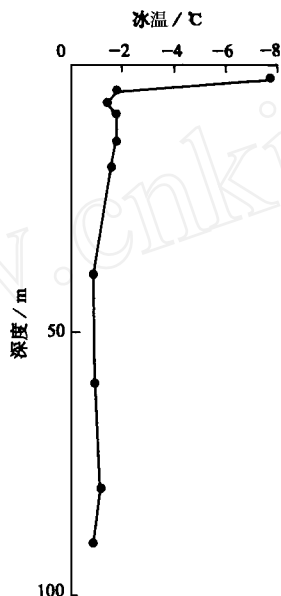


图 1 H_1 钻孔温度随深度的变化

Fig. 1 Temperature versus depth in drilling Site H_1

2 冰芯的层位观测

2.1 成冰类型 (图 2)

除表面约 10 cm 的新雪外, 4.3 m 以上为粒雪-冰交替的原生沉积层, 并含有 5 个污化面, 表层粒雪最厚达 1.2 m, 并夹有薄的冰片层, 底部有强污化面, 并含有深霜晶体, 对照物质平衡观测资料, 可确认为 1989~1990 年的最新年层。以下冰层厚度逐渐增厚, 最厚的连续冰层为 1.8 m, 其中含有多个污化面, 冰体为含有粗大的不规则气泡的半透明的渗浸冻结冰 (上部) 及含有众多细小而不规则气泡的呈乳白色的渗浸冰 (下部)。最深的粒雪出现在 3.9~4.3 m, 因此可将 4.3 m 作为该剖面的成冰深度, 参照前几年物质平衡观测资料, H_1 处曾几度处于平衡线以下, 因此多次出现年层缺失, 一个较强的污化面可能是几个年层污化面的叠加, 估计成冰深度处的冰龄在 10 a 以上。上述剖面特征说明, H_1 冰芯现在处于典型的渗浸带内。

2.2 冰层的宏观特征

4.3 m 以下直至冰川底部均为连续的由不同透明程度相间冰层组成的层状构造。除

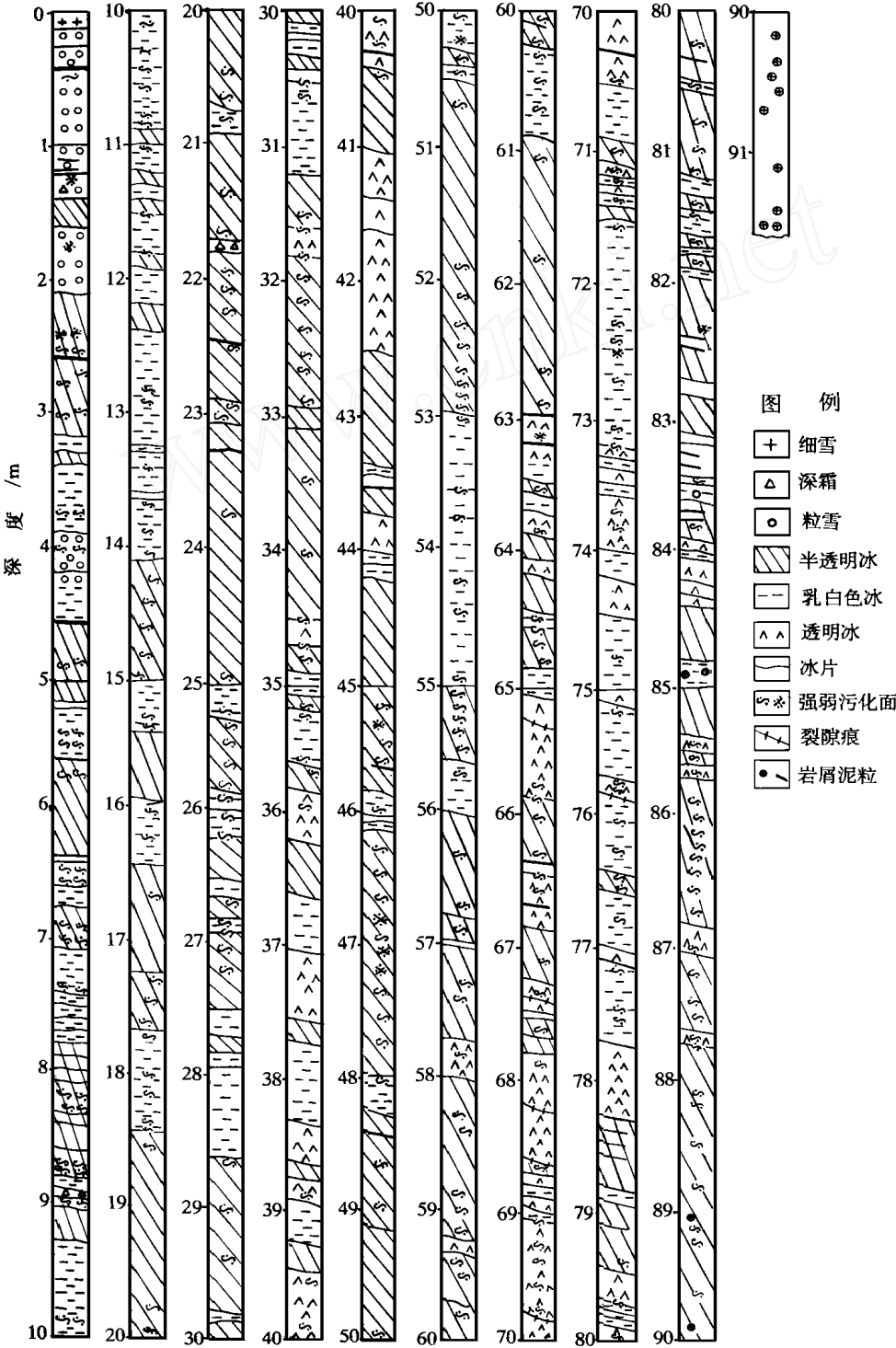


图 2 H₁ 冰芯地层剖面图

Fig. 2 Stratigraphic profile of Ice Core H₁

上述半透明及乳白色冰外, 还出现气泡含量很少的透明冰层, 以 10 m 为间距, 将 3 种冰所占百分比随深度的变化绘于图 3a。从总冰量看, 半透明冰最多, 占 58.6%, 乳白色冰占 25.7%, 透明冰最少, 仅占 15.7%。在不同深度上各种冰所占比例不同, 半透明冰层数量有自表层向下增多的趋势, 透明冰出现于 30 m 以下, 乳白色冰层在不同深度上变化较大, 其中以 70~80 m 深度处所占比例最大, 在 50~60 m 和 90 m 以下缺失。

成冰深度以下的冰均受到不同类型和程度的变质作用的影响, 不能像原生冰那样仅从宏观层位变化解释其成因。但其它地区冰芯的研究表明, 在一定深度内, 不同透明程度的冰与成冰类型有关。因为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, 这些原生痕迹可以较长时间、不同程度地被保留下来, 由此可以间接推测其沉积时的水热条件(谢自楚, 1988)。

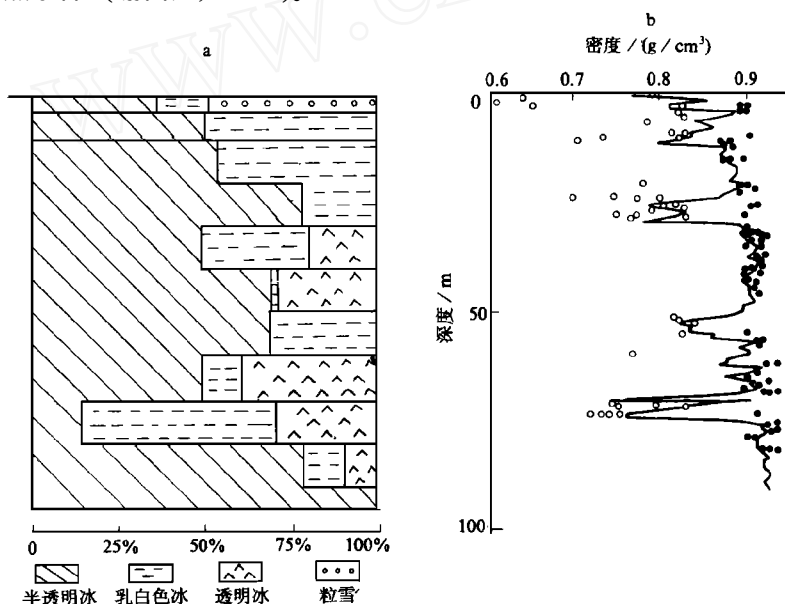


图 3 H₁ 冰芯各种冰的比率 (a) 和密度 (b) 随深度的变化

Fig. 3 Percentage of various ices and density profile for Ice Core H₁

2.3 密度随深度的变化

在图 3b 中, 以曲线表示粒雪-冰层每米的平均密度, 以空心圆表示粒雪或乳白色冰的密度, 以实心圆表示透明、半透明状冰的密度。结果表明, 密度随深度增加呈增长趋势, 但密度随深度的变化与冰的类型有关, 多气泡乳白色冰的密度明显小于气泡较少的半透明及透明冰, 且后者的密度自表层开始就很高, 其密度随深度变化呈较稳定状态, 这说明冰的密度主要取决于初始成因条件。在沉积过程中压力对其密实化过程的影响不明显, 在平均密度曲线中, 出现了 4 个低值区, 它们正好对应于乳白色冰出现的层位, 特别在 70~80 m 深度处, 出现密度很小 ($\leq 0.80 \text{ g/cm}^3$) 的冰层, 这类情况在崇测冰帽上也出现过(韩建康, 1989)。粒雪的密实化过程表现出双重性, 一方面由于融水参与, 粒雪很快达到冰的密度; 另一方面冰夹层中的粒雪密度由于融水渗浸深度的限制以及剪应

力不够大, 沉积时间不够长, 其密实化过程又显得异常缓慢。这类情况笔者在 1 号冰川西支粒雪线以下很厚的冰层中也观测到 (王晓军等, 1988)。表层冰夹层中的粒雪层, 容易解释深层乳白色冰的成冰特征。

2.4 污化面及其它可见杂质

H_1 冰芯中有众多的污化面, 共 267 层, 平均间距 24.7 cm, 污化面分布在上述 3 类冰中, 但其疏密不一, 有时连续分布, 有间隔数米, 最大间隔达 3 m, 冰芯中还有 7 个强污化面。一般认为, 污化面是积累区积累年层的标志。1 号冰川物质平衡和层位观测表明, 每一个污化面并不完全对应一个年层, 在渗浸带中部以上, 一个年层中还常存在两个污化面, 其中较弱的为冬末形成, 较强的形成于夏末。渗浸带中部以下, 由于平衡线波动的影响, 往往几个污化面叠加在一起, 在多雪的夏季, 没有明显的污化面。

深层冰受动力变质的影响, 仅仅以污化面恢复冰川的年层须十分小心。但污化面随深度分布的疏密程度可以反映冷 (湿) 期和暖 (干) 期的交替, 如 40~45 m 缺失污化面的冰, 并重新出现随机组构, 可反映一个连续的冷湿期; 在 80 m 以下, 除污化面以外, 还发现长轴方向与流向一致的岩屑和与冰层位倾斜方向一致的呈树根状的泥粒。它们可能来自冰床基岩, 是冰川底部侵蚀作用的产物, 这与在 1 号冰川西支冰舌末端人工冰洞中所观测的现象相似 (王仲祥, 1983)。

在 65 m 以下还发现 5 道裂隙痕, 其弥合处分布着许多细小的黑色砂粒, 周围气泡密集, 其长轴方向与裂隙痕方向垂直, 这可能是积累区上部边缘裂隙闭合后的痕迹。

2.5 层位的倾斜

由于不同冰层和污化面组成的冰的层状构造随着深度而逐渐倾斜, 0~10 m 倾斜角

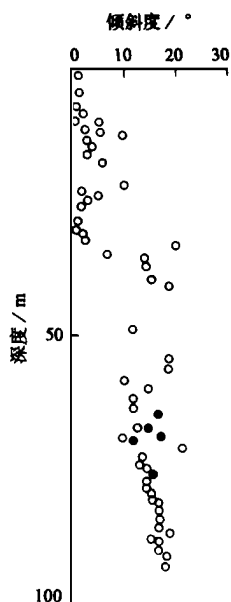


图 4 H_1 冰芯层理倾斜度随深度的变化及裂隙痕倾斜度

Fig. 4 Angle of foliation inclination change with depth for Ice Core H_1

不大, 为 $0 \sim 5^\circ$; $10 \sim 30 \text{ m}$ 达 10° ; $30 \sim 70 \text{ m}$ 最大, 可达 22° ; 70 m 以下保持在 $15 \sim 20^\circ$ 之间。裂隙痕比相邻层理倾斜度大 $3 \sim 4^\circ$; 均不超过粒雪盆后壁的坡度 (图 4), 其倾斜率较南极洛多姆冰帽大 (韩建康等, 1988), 而较阿尔卑斯山谷冰川 (Vallon, 1979) 和西昆仑山崇测冰帽 (Han Jiankang *et al.*, 1989) 为小。在冰川流动情况下, 原始沉积时所形成的层状构造均演变成叶理, 表现为层的厚度减薄及层位倾斜, 后者与冰面及冰床坡度应力方向及总应变率有关 (Paterson, 1981)。

3 冰芯微观结构

微观结构观测是利用冰薄片在正常光和偏光下进行, 观测室温度保持在 -15° 。

3.1 气泡

H_1 冰芯 20 m 以上冰内气泡较大, 且不规则。多数呈蝌蚪状或由若干小气泡聚合成大的不规则气泡, 反映原生沉积时渗浸-冻结成冰作用的痕迹。这些气泡呈随机分布, 晶界间气泡较多, 与在南极洛多姆冰帽 BHC₂ 钻孔原生冰层中所见类似 (谢自楚, 1988)。 $20 \sim 40 \text{ m}$ 出现较多不规则圆形气泡, 并表现出随深度而增强的定向排列趋势, 但伸长率 (气泡长轴与短轴之比 L/W) 不大。

$40 \sim 80 \text{ m}$ 间, 除大量分布于冰晶内的准球形气泡和圆形气泡外, 开始出现向流动方向伸长的气泡。从气泡随深度变化的曲线 (图 5a) 可见, 在 42 m , 66 m 和 $71 \sim 76 \text{ m}$ 之间伸长率有 3 个高峰值, 最大达 11.6 (42 m 处), 低峰处为 $3 \sim 4$ 之间, 但在深层伸长气泡的数量随深度减小, 气泡的尺寸及数量也有随深度减少的趋势。

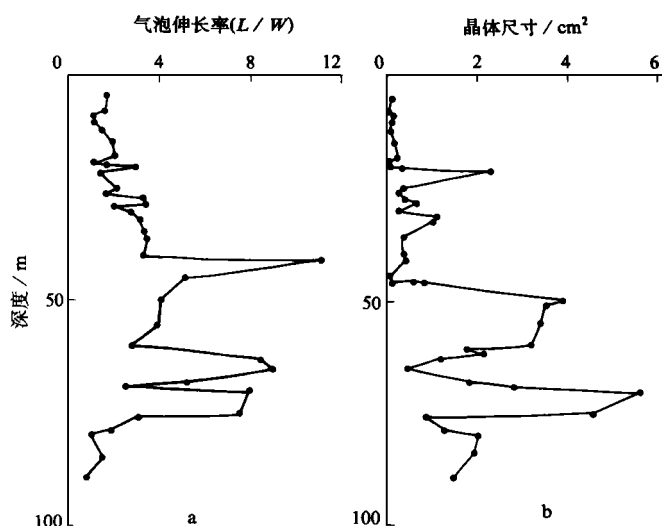


图 5 H_1 冰芯气泡伸长率 (a) 和冰晶尺寸 (b) 随深度的变化

Fig. 5 Bubble elongation ratio and crystal size versus depth in Ice Core H_1

在 70~80 m 之间, 有一些沿流向分布的串珠状小气泡, 似乎是由拉伸太长的气泡演变而成的。多数气泡呈准球形, 尺寸很小, 大多位于冰晶内, 接近底部, 气泡数量减少, 尺寸减小, 直径 ≤ 0.1 mm。在深层冰中, 气泡的形状、大小及伸长率受应力变形及气泡本身的表面张力和扩散作用的双重影响。H₁ 冰芯中气泡特征随深度的这些变化与冰晶尺寸及组构的变化似乎有一定的关系, 如几处气泡伸长率大的深度与冰晶尺寸减小处相吻合, 而组构也表现得较强, 可能与剪应力在该处增大有关。

3.2 冰晶尺寸及形状

冰晶截面积按谢自楚 (1988) 方法从水平薄片量得。图 5 是冰晶尺寸随深度的变化, 由图 5b 可见, 0~20 m 之间均为较细小的 ($0.1 \sim 0.2$ cm²) 不规则多边形等轴等粒冰晶组成。根据冰中气泡形状、大小及分布, 可以确认其为基本上未受动力变质作用影响的原生渗浸冰 (晶粒较小) 及渗浸-冻结冰 (晶粒较大)。

20~45 m 间, 冰晶尺寸波动较大, 出现几个峰值, 最大的冰晶平均尺寸达 2 cm² 以上 (约 25 m 处), 较小的冰晶平均尺寸均在 $0.2 \sim 0.5$ cm², 即比 20 m 以上冰晶平均尺寸略有增大, 冰晶的不等粒性增大, 晶界变得圆滑复杂。该段气泡伸长率不大, 可以认为其剪应力不大, 以冰晶的自然生长为主。

45~75 m, 冰晶尺寸急剧增大, 大多数冰晶平均尺寸保持在 3 cm², 峰值达 5 cm² 以上, 其中最大达 5.6 cm² (约 70 m 深处)。晶形也变得更加复杂, 冰晶互相交叉出现增多。65 m 又重新出现 ≤ 1.0 cm² 的较小冰晶。

75 m 以下直至底部, 冰晶尺寸略有减小, 平均 $1.5 \sim 2.0$ cm², 间或夹着近似多边化的细冰晶 (≤ 1.0 cm²), 大部分冰晶具有曲折的互相交叉的冰形, 以致同一冰晶在薄片上多次出现。这种情况与南极洛多姆冰帽 BHC₂ 冰芯底部类似 (谢自楚, 1988)。但冰晶尺寸比后者小得多。对应于气泡伸长率变化的这类冰晶尺寸的上述波折式变化反映在总应变随深度不断增加的情况下, 剪应力与重结晶作用的增减变化, 细的冰晶层可能与多边形化作用有关。

3.3 冰晶方位组构

冰晶方位的测量采用 Langway 的方法在 Rigsby 万向旋转台上进行。现选择随深度分布的 18 个有代表性的冰晶 c 轴方位组构图 (图 6)。

20 m 以上冰晶基本是随机型组构, 反映 c 轴方位未受到调整。20 m 以下出现经调整的优势方位开始出现弱竖环形 (20~30 m), 在个别深度上出现弱竖环形 (20.59 m) 和弱双极大 (25.27 m) 组构。40~45 m 间组构又返回随机型, 50 m 以下晶轴方位又重新调整到弱双极大和弱环形, 在最底层 80 m 以下出现弱的类似宝石状的多极大组构。但未发现极地冰盖和山地冰帽在一定深度内普遍存在的单极大组构, 可能与冰川中剪应力没有大到可与正压力相比的程度有关 (Paterson, 1981)。

综上所述, 我们可以从 H₁ 冰芯中看出如下特点:

(1) 粒雪- 冰的初始成因条件痕迹可以保存相当的深度和时间。原生冰的结构在 20 m 深度内均保存较好, 很少发生变质作用。位于 70~ 80 m 深处的冰虽然已发生了动力变质及重结晶作用, 冰晶的结构发生了很大的变化, 但仍保留了某些沉积时的痕迹。如较多的乳白色冰 (其密度低, 某些冰原生粒雪颗粒界限清楚, 冰晶小、气泡多且分布均匀), 它反映出粒雪成冰时的初始成因条件将长期影响冰层在以后沉积过程中的状态。根据 1 号冰川东支粒雪盆的积累率 (200~ 500 mm 水层) 和冰川的运动速度等推测, 它可能是它 300~ 500 a 前小冰期时所沉积的。

(2) 中层 (20~ 70 m) 的冰, 随正压力的加大, 总变形量增大, 冰的组构变化趋势是从随机型- 弱环形- 弱多极大- 弱宝石状型过渡, 冰晶尺寸和气泡伸长率呈增大趋势, 但多次出现反复, 与我国已有的几支透底冰芯结构相比, 总体来看, c 轴优势方位组构均表现得很弱, 未出现单极大组构。

(3) 深层 (70 m 以下) 冰层温度较高, 总变形量大, 组构向宝石状的多极大型发展, 这与许多透底冰芯底部出现粗大冰晶和宝石状组构情况相似, 但在 80 m 深处发现较细的类似多边化的冰层, 反映底层剪切带存在。

参 考 文 献

- 王晓军, 王仲祥, 谢自楚. 1988. 从乌鲁木齐河源 1 号冰川 28 年来的变化看天山地区近期气候变化趋势. 科学通报, 33 (9): 693~ 694.
- 王仲祥. 1983. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川人工冰洞初步观测. 冰川冻土, 5 (1): 89~ 91.
- 孙作哲, 陈要武, 尤根祥等. 1985. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川的运动特征. 冰川冻土, 7 (1): 27~ 40.
- 李军, 谢自楚, 黄茂桓. 1988. 南极洛多姆冰帽 BHQ 钻孔冰结构研究. 见: 南极科学考察论文集 (五) · 冰川学研究. 北京: 科学出版社, 119~ 131.
- 朱国才等. 1991. BZXJ 超轻型冰岩芯钻机. 冰川冻土, 13 (3): 261~ 266.
- 黄茂桓, 王文梯, 李军等. 1988. 南极天然冰的反复压缩- 退火实验研究. 见: 南极科学考察论文集 (五) · 冰川学研究. 北京: 科学出版社, 141~ 152.
- 黄茂桓, 周韬, 井晓平等. 1994. 乌鲁木齐河源 1 号冰川 2 号冰洞的冰川学研究. 冰川冻土, 16 (4): 289~ 300.
- 韩建康, 陈晓梅, 孙作哲. 1985. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川表面应变率的初步研究. 冰川冻土, 7 (10): 41~ 50.
- 韩建康, N W Young 等. 1988. 南极洛多姆冰帽 BHC1 冰岩芯冰晶结构、气泡性质和地层学研究. 见: 南极科学考察论文集 (五) · 冰川学研究. 北京: 科学出版社, 153~ 163.
- 谢自楚. 1984. 南极洛多姆冰帽的成冰作用和冰结构研究. 冰川冻土, 6 (1): 1~ 21.
- 谢自楚. 1988. 南极洲洛多姆冰帽的地层学及成冰作用研究. 见: 南极科学考察论文集 (五) · 冰川学研究. 北京: 科学出版社, 1~ 21.
- 谢自楚等. 1996. 冰川零平衡线处的物质平衡及其应用. 冰川冻土, 18 (1): 1~ 9.
- Vallon M *et al.* 1979. Study of an ice core to the bedrock in accumulation zone of ALPINE glacier. Journal of Glaciology, 7 (75): 13~ 26.
- Han Jiangkang *et al.* 1989. Stratigraphic and structured feature of ice core from chongce ice cap, west Kulun Mountain. Bulletin of Glacier Research, 7: 21~ 28.
- Paterson. 1981. The Physics of Glaciers 2nd Edition pergamon.
- Zhang Wanchang and Han Jiangkang *et al.* 1993. Preliminary study of ice texture and fabric on an ice core to the bedrock extracted from Glacier No. 1 at the headwater of Urumqi River, Tianshan. Bulletin of Glacier Research, 11: 9~ 16.

Stratigraphic and Structural Analysis on An Ice Core to the Bedrock in the Accumulation Area of Glacier No. 1 at the Headwaters of Urumqi River

Wang Xiaojun¹, Han Jiankang¹, Xie Zichu¹ and Albert Luberas²

(1 Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, Chinese Academy of Sciences, 730000; 2 Oceanographic, Hydrographic and Meteorological Service of Navy, Uruguay)

Abstract

An ice core 91.64 m in Length, to the bedrock extracted from the accumulation area of the Glacier No. 1 at the headwater of the Urumqi River was analysed for its stratigraphy and structure in detail. The original depositional features are well preserved within the top 20 m, but milk-like white ice with lower density is discovered in the depth of 70~80 m. It is suggested that the ice at this depth was deposited in the Little Ice Age. The ice at the middle part of the core is characterized by dynamic metamorphism and recrystallization, displaying repeatedly reducing-growing features in crystal size and air bubble. No single-maximum fabric can be seen but a weak vertical circle fabric is observed. Weak diamond-like multiple maximum fabric appears only in the bottom part.

Key word: Glacier No. 1 at the headwaters of the Urumqi River, ice core, stratigraphy, ice structure

第一作者简介: 王晓军, 男, 40岁, 助理研究员, 1980年毕业于兰州大学地质地理系自然地理专业。现主要从事现代冰川及冰物理研究。