DOI: 10.7522/j. issn. 1000-0240. 2017. 0031

LI Yuan, DU Zhiheng, XIAO Cude. Analyzing characteristically on ice fabric and microstructure of Miaoergou glacier top-flatted, East Tianshan [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(2): 273–280. [厉愿,杜志恒,效存德. 东天山庙儿沟平顶冰川冰组构和微构造的特征分析 [J]. 冰川冻土, 2017, 39(2): 273–280.]

东天山庙儿沟平顶冰川冰组构和微构造的特征分析

厉 愿^{1,3}, 杜志恒¹, 效存德²

 (1.中国科学院西北生态环境资源研究院冰冻圈科学国家重点实验室,甘肃兰州730000; 2.北京师范大学 地表过程与资源生态国家重点实验室,北京100875; 3.中国科学院大学,北京100049)

摘 要: 在德国 Alfred-Wegener 极地与海洋研究所用自动组构分析仪 G50 测试了东天山庙儿沟冰芯 (43°03′19″ N,94°19′21″ E,4 512 m a.s.l.; 2005 年钻取,长 58.7 m)冰微构造和组构,分析其特征并 解释其所蕴含的意义。冰微构造和组构随深度的演变总体相似于其他中国山地冰川冰的观测结果,同 时展示了其季节性特征。部分样品的测试结果有所波动,可能是样品在运输和存储过程中的热力学性 质发生改变所致。组构型反应的力场较为简单,主要为中下部的单轴压应力作用。正常晶粒生长、多 边形化作用和应变导致的边界迁移再结晶不能解释其在某一深段占据主导,而可能是三者共同作用于 所有冰芯深部。

关键词:冰芯;组构;微构造;再结晶

中图分类号: P343.6 文献标志码: A

文章编号: 1000-0240(2017) 02-0273-08

0 引言

冰是已知最古老的矿物之一^[1-2],并以多种形态存在于自然界中,如雪、霜、冰雹、冰椎、地下冰、河冰、湖冰、海冰和冰川冰。冰被广泛应用于地质和材料等科学研究,并且其对环境和经济的重要影响也备受关注^[3-8]。地球表面的自然冰以六方晶系存在,冰分子展示类氧原子的四面体配位结构,但在所有温度下处于亚稳态^[9]。由 X-射线衍射实验证实陆地冰川冰的晶格构造呈四面体排列, 且氧原子以分离的层状(层间距为 0. 276 nm)排列^[10],这些层被称作晶体基面。实际上,基面由两层间隔为 0. 0923 nm 的紧邻面构成。垂直于基面的方向称为晶体学 c 轴,它们在空间的取向排列形式常被称作组构。微构造主要包括晶粒的尺寸及形态等。

自然冰在漫长的地质年代中和接近融点的高温 下,仍然能保持其多晶的蠕变特性和强烈的各向异 性粘塑性变形等^[3-5]。冰微构造和组构特征能反应 应力和温度等冰物理性质,对提高冰盖或冰川流体 的流动律、晶体学材料的晶粒生长机制及其对气候 变化响应的认识颇有裨益。理解冰芯冰微构造和组 构随深度的变化几十年来一直是个颇具挑战性的任 务。至今,关于此议题的认识仍不充分^[3]。不同冰 芯得出的结论不总是一致:一是,极地冰芯冰的三 段范式^[8-17],包括正常晶粒生长(Normal Grain Growth, NGG)、多边形化作用/旋转再结晶(Polygonization / Rotation Recrystallization, RRX) 和应变 导致的边界迁移(Strain-Induced Boundary Migration, SIBM) 再结晶^[18-19]分别主导多数冰芯的上中 下三个深部(由顶到底),常被用于解释其随深度的 演化;再则,一些冰川学家主张上述三种晶粒生长 机制共同作用(不存在主导机制)于整支冰芯深 部[3 20-21]。这些工作仅仅针对极地冰芯冰而言,关 于中低纬度的山地冰川冰关注极少。1962年,我国 展开山地冰川冰在此方面的研究工作^[22],集中于 二十世纪八九十年代^[20-25]。先后在西昆仑山崇测 冰帽(海拔6130m, 1987年)、天山乌鲁木齐河源

收稿日期: 2017-01-04; 修订日期: 2017-02-20

基金项目: 重大科学研究计划项目(2013CBA01804); 国家自然科学基金项目(41425003)资助

作者简介: 厉愿(1979 -),男,江苏徐州人,地质工程师,2012年在山东科技大学获硕士学位,从事冰冻圈与环境变化研究. E-mail: liyuan0614@163.com.

1 号冰川(海拔 4 050 m, 1990 年)、喜马拉雅山希 夏邦马峰那克多拉 7 号冰川(海拔 6 030 m, 1991 年)和西昆仑山古里雅冰帽(海拔 6 200 m, 1992 年)钻取长 32.5 m、90.24 m、39 m 和 309 m 的冰 芯^[23 26-28],后面 3 支冰芯均为透底冰芯。此后,我 国对其的相关研究近乎中断。因此,笔者认为有必 要加强该方面的基础性研究。

2005 年 8 月,在中国东天山的庙儿沟平顶冰川 (面积约3.45 km^{2[29]}; 平衡线高程约4 100 m^[30]) 顶部海拔4 512 m(43°03′19″ N,94°19′21″ E) 处钻 取了长 58.7 m 的透底冰芯^[29](图1)。该区域的年 平均气温和夏季平均气温分别是 – 11.8 ℃和 -3 ℃,年降水量约 600 mm 并多数集中于夏秋两 季^[31],年平均净累积率在(229 ± 7) ~ 269 mm





w.e.间^[29,32]。钻取后的冰芯样品被冷冻运送至兰 州中国科学院寒区旱区环境与工程研究所的冰冻圈 科学国家重点实验室,并被存放于约-20℃的低 温实验室中。

本文的目的是观测中国山地冰川冰组构和微构 造特征并分析其蕴含的意义。

1 样品的制备和测量

±

本研究的样品深度范围是 33.58~58.15 m。 垂直干芯轴水平切取 12 块样品,每块样品的尺寸 为厚约1 cm, 横截面半径约为3 cm 的近半圆形。 其所在深部分别为 33.58 m、35.66 m(含2个连续 切片,即此处总的切取厚度约为2 cm。然后,将其 厚度平分为二,使每块样品厚度仍约为1 cm)、 36.25 m(含4个连续切片)、37.04 m、45.59 m、 50.42 m、55.60 m 和 58.15 m(图 2)。2015 年 6 月,将其放于低温箱(全程温度保持在约-19℃) 中并空运至德国 Alfred-Wegener 极地与海洋研究所 的约-20℃的低温实验室。并即刻按标准切片程 序^[33]制作了12个水平冰薄片。每冰薄片的观测厚 度在 0.2~0.4 mm 间。使用的仪器是澳大利亚产 自动组构分析仪 G50, Auto Fabric Analyzer G50, AFAG50),设置的分辨率为10 μm。接着,用 Eichler 软件^[34]把 AFAG50 测得的冰组构统计数据 转化为新的数据集。最后,冰组构型用 Openstereo 软件展布于水平 Schimd 极图中; 粒径的尺寸和形 态也用 Eichler 软件处理。



(a) 水平冰薄片的切割深度示意图

(a) 自动组构分析仪G50

图 2 水平冰薄片的切割深度示意图(a) 及澳大利亚产自动组构分析仪 G50(b)

Fig. 2 The sketch of thin section horizontally cut along the core depth; The auto fabric analyzer G50 made by Australia

2 结果

沿芯从上到下粒径平均横截面面积(表1和图

mm²(35.66 m)和4.36 mm²(35.67 m);又减小到 2.57 mm²(36.25 m),比最初深部的粒径还略小。

3) 为 2.8 mm²(33.58 m); 往下分别增大到 5.72

					core samp.			_L #A
件品深度/m	傾截面面积/mm ²	12回度/%	极图中心浓度	扎住度/(°)	e_1	e_2	<i>e</i> ₃	水政
33.58	2.80	64.64	5.66	36.49	0.10	0.20	0.70	1870AD
35.66	5.72	73.00	7.41	31.30	0.09	0.15	0.76	1857AD
35.67	4.36	67.41	6.14	34.81	0.09	0.20	0.71	1857AD
36.25	2.57	47.48	3.81	46.45	0.17	0.23	0.60	1859AD
36.26	3.41	59.21	4.90	39.69	0.13	0.20	0.67	1859AD
36.27	2.74	67.65	6.18	34.66	0.11	0.16	0.73	1859AD
36.28	8.73	62.80	5.38	37.58	0.12	0.20	0.68	1859AD
37.04	15.07	57.26	4.67	40.82	0.04	0.32	0.64	1856AD
45.59	9.19	75.63	8.21	29.58	0.07	0.15	0.78	1821AD
50.42	9.20	94.04	33.59	14.12	0.01	0.04	0.95	1802AD
55.60	12.73	89.87	19.74	18.56	0.02	0.07	0.91	1782AD
58.15	5.99	89.35	18.78	19.05	0.02	0.07	0.91	-

表1 庙儿沟冰样品的相关信息 Table 1. The relevant information of Missourgen gave comple

然而,下面3 cm 深度中,粒径先增大到3.41 mm², 后降至2.74 mm²,再突然增大到8.73 mm²(图 3b);随后继续增大到15.07 mm²(37.04 m);接着 减小到9.20 mm²(50.42 m);后又增大到12.73 mm²(55.60 m);但在近于底部时,粒径再次突然 减小到5.99 mm²(表1和图3)。36.27 m 以后的平 均粒径总体大于其之前的。粒径随深度的变化也可 能反应季节性的变化(图3b),即在约4 cm(小于年 层平均厚度)的深度中,粒径横截面面积呈现明显 波动。

组构型沿芯从上到下分别为强单极大(33.58 ~35.66 m)、弱双极大(35.67 m)、拉长单极大 (36.25~36.28 m)、多极大(37.04 m)、弱双极大 (45.59 m)、强单极大(50.42 m)、单极大(55.60 m)和弱双极大(58.15 m)(图4)。组构特征值 e₁和 e₂沿冰从上到下总体随深度而降低,e₃总体随深度 增加而增大(图5和表1),组构强度基本呈现随深 度增加而增强的趋势。然而,连续切片中出现了复 杂的波动(图5b)。35.67 m处开始减小,直到 36.25 m;接着增大,直到36.27 m;之后又减小, 直到37.04 m;随后又增大直至50.42 m;最后再减 小。极图中心浓度与位向度的总体变化基本相似于 特征值 e₃的变化,而圆孔度的总体变化趋势与前两 者近乎相反(图6和表1)。







3 讨论

以 Wang 等^[32] 对庙儿沟 35.2 m w.e. 深度的



图 4 组构随深度的演变(*n* 是晶粒数) Fig. 4 The evolution of fabric with depth (*n* grain number)

冰龄(1851±6) AD 作为基准,标定年平均净累积 率约为249 mm i.e.,该值为庙儿沟冰帽的年平均 净累积率249~293 mm i.e.^[32]的低值,且在33.58 ~38.4 m 间冰层没有显著减薄^[32]。因此,冰芯深 度与年平均净累积率的比值可以作为冰龄的估计值 (表1)。假设55.60 m 以上的冰层减薄仍不显著, 依上述方法估计此深部的冰龄值(表1)。可见,本 研究深段冰芯冰龄除最后一样品外均在小冰期中, 晶粒尺寸整体较小也可以印证其是在相对低的温度 下形成。此期间的晶粒尺寸变化整体没有呈现显著 线性关系。但是,总体而言,1859年之前的粒径尺 寸大于其后的,可能表明该年是小冰期中冷暖气候 转化的年份。同时还展示了一定的粒径波动(可能 由小冰期中的相对暖期引起),如在55.60 m 和 37.04 m。王邵武等^[35] 划分小冰期中第三阶段的两 个冷期分别是 1790 – 1819 年和 1830 – 1899 年,而 其间为其暖期。粒径在 55.60 m(1782 年)处增大, 可能意味着该年气候转暖,一致于王邵武等^[35]的 观点;而在 37.04 m(1856 年)处的粒径变化也可能 表明气候转暖事件的发生,但不同于王邵武等^[35]的结论。上述由粒径变化反应的冷暖期(1859 年) 也与王邵武等^[35] 对冷暖期的划分不一致。这些差 异可能是定年精度不够或样品自身温度的变化所 致。4 个连续切片(36.25 ~ 36.28 m; 总长 40 mm 小于年均净累积率约 249 mm i.e.)的平均粒径也 展现了由小到大的波动,可能是季节性波动的反 应,并且一致于雪冰中粉尘浓度的季节性变化(冬 春季高和夏季低^[36])。其对应的组构特征值 *e*₃从



图 5 组构特征值随深度的变化(a); (b)为(a)中灰色框部分的放大



0.73 减小到 0.68(对应的组构强度从大到小),表 明粒径可能从小到大,此变化特征与世纪营地、 Byrd、GRIP 和古里雅等冰芯的观测一致。同时, 它的极图中心浓度和位向度减小,圆孔度增加(图 6)。晶粒生长除了受温度和应力影响外,还与杂 质、微粒、气泡和空气水合物等有关。粒径突变还 可能与融水再结晶相关,夏季表面的融水渗透作用 很强烈(调查期间日平均气温高于 0 ℃^[31])。

通常,当 $e_1 > 0.10$ 且与其对应的位向度 <70%、极图中心浓度<8及圆孔度>30°时,基本 约束了组构为同性、拉长单极大和双极大型;当 e_2 >0.10并与其对应的位向度<85%、极图中心浓度 <15及圆孔度>21°时,基本限定了组构为同性、 弱单极大、双极大、拉长单极大和多极大型。当 e_1 和 e_2 同时<0.1并与其对应的位向度>85%、极图 中心浓度>15及圆孔度<21°时,组构为强单极大 型。但是,弱双极大型的出现可能是样品在运储中 的温度发生改变所致。古里雅芯从上到下的组构演 变为:随机型-竖直环型-单极大型-多极大型^[23];河 源1号的为:随机型-单极大型-多极大型^[27];那



图 6 极图中心浓度、圆孔度(°)与位向度(%)随深度的变化(a); (b)为(a)中灰色框部分的放大 Fig. 6 The evolution of concentration, spherical aperture (°) and regelungsgrad (%) with depth (a); (b) the enlargement of gray frame in (a)



图 7 36.25 m、58.15 m 的晶粒边界(a)、(b)和55.60 m 的晶粒间取向误差角(c) Fig.7 The grain boundary map at 36.25 m (a) and 58.15 m (b), respectively and the grain misorientation map at 55.60 m (c)

克多拉7号的为:随机型-单极大型-多极大型^[28]。 它们的底部均为粗粒的多极大型组构。其中,仅在 古里雅芯中上部的 63~135 m 出现竖直环型组构。 庙儿沟的多极大型组构并未出现于冰芯近底部,而 是在中部偏下,也可能由样品的温度发生变化引 起。单极大型组构出现于庙儿沟芯的中下部,而其 他3支冰芯仅出现于其中部。实验室测试和现场观 测均证实: 单极大型组构由单轴压缩或简单剪切形 成。然而,庙儿沟芯的冰床温度约-8℃^[29],属于 冻结基底的冷冰川,发生显著简单剪切滑动的可能 性较小。所以,该组构型可能反应了庙儿沟芯在其 中下部仅受如上述冰芯冰所受的单轴压缩应力作 用,同时也反应了典型的水平扩张流较为符合庙儿 沟冰帽的实际冰流特征。目前认为多极大型组构经 常发生于温型冰川中^[37]。多极大型组构未被充分 认识,但可能由复杂的应力系统引起,如综合的剪 和压垂直于剪切面并联系着活动的迁移再结晶和成 核再结晶作用。中国山地冰川冰出现的多极大也可 能与冰床底部复杂的地形起伏有关。

庙儿沟冰芯冰粒径尺寸随深度的增大受到一定 限制,可能由多边形化作用引起。古里雅冰芯中段 167 m 出现显著的多边形化作用^[23]。河源1号冰 芯的 65.7 m 处晶粒突然变细(异常细粒破碎 带^[27]),可能是多边形化作用的反应。由于庙儿沟 芯中晶粒间取向误差角<5°^[38],所以,它也有多边 形化作用(图7c)。Jacka等^[39]提出快速变形导致 高压下的晶粒频繁成核再结晶。换言之,晶粒尺寸 依靠成核和边界迁移的比率,即成核作用相对边界 迁移的速率越快,平均粒径越小。本芯冰体厚度不 可能产生高压应力(>400 kPa)。所以,它不可能 是庙儿沟冰芯冰粒径减小的原因,而唯能用多边形 化作用解释。

NGG 晶粒生长律,即晶粒平均横截面面积与 冰龄呈线性关系^[37]:

$$D^2 = D_0^2 + k_g t (1)$$

$$x_g = k_0 \exp(-Q_b/RT) \tag{2}$$

式中: D^2 为 t 时刻的晶粒平均面积; D_0^2 为初始时刻 的晶粒平均面积; t 为冰龄; k_g 为生长率; k_0 为常系 数; Q_b 为晶粒边界自扩散表观激活能; R 为气体常 数; T 为绝对温度。 D^2 和 t 的线性关系基于 k_g 和 T保持常数的假设。当极地冰芯冰存在同温层时,此 条件能被满足。由于庙儿沟芯的温度剖面没有同温 层热结构,所以,NGG 不宜解释它的晶粒生长。但 是,从晶粒形态来看它又具有 NGG 特征,如 36.25 m 处的晶粒边界规整平滑,且具类泡沫状构 造(图7)。再则,58.15 m 处晶粒边界相互交错呈 互锁型构造(图7b),它展现了典型的边界迁移再 结晶特征,庙儿沟芯钻孔温度均高于 – 10 °C,它是 边界迁移再结晶的临界值^[13]。因此,三种再结晶 可能同时发生于本芯各深部,而不是某一种再结晶 机制主导某深度段。

4 结论

庙儿沟冰芯冰的粒径和组构随深度的总体演化 基本相似于其他中国山地冰川冰随深度的演变特 征,同时展示了其季节性的变化。然而,组构沿芯 轴演化中的局地波动可能是运输和存储中样品的温 度变化导致的。冷暖气候期的粒径和组构变化基本 一致于当前的认识。由组构型反应的力场性质较为 简单,冰芯中下部主要受单轴压缩应力作用。本研

究深度冰芯冰的晶粒生长机制不能单独用某一种机制在某一深段主导解释而可能是 NGG、RRX 和 SIBM 三种机制的共同作用。

参考文献(References):

- Adams F D. The birth and development of the geological sciences [M]. New York: Dover Press, 1990: 64 – 66.
- [2] Faria S H , Hutter K. The challenge of polycrystalline ice dynamics [J]. Advances in Thermal Engineering and Sciences for Cold Regions ,2001 ,5: 3-31.
- [3] Faria S H , Weikusat I , Azuma N. The microstructure of polar ice. Part I: highlights from ice core research [J]. Journal of Structural Geology 2014 , 61: 2 – 20.
- [4] Llorens M G , Griera A , Bons P D , et al. Dynamic recrystallisation of ice aggregates during co-axial viscoplastic deformation: a numerical approach [J]. Journal of Glaciology ,2016 ,62(232): 359 – 377.
- [5] Llorens M G , Griera A , Steinbach F , et al. Dynamic recrystallization during deformation of polycrystalline ice: insights from numerical simulations [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A ,2017 ,375: 101 – 109.
- [6] Huang Jifeng, E Dongchen, Zhang Shengkai. Surface flow features of the Dark Glacier in East Antarctica from in situ observation [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(5): 1150-1159. [黄继锋,鄂栋臣,张胜凯.东南极达尔克冰川表面运动速度特征研究[J].冰川冻土,2015,37(5): 1150-1159.]
- [7] Chen Hongju, Yang Jianping, Tan Chunping. Responsivity of glacier to climate change in China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology. 2017, 39(1): 16-23. [陈虹举,杨建平,谭春萍. 中国冰川变化对气候变化的响应程度研究[J]. 冰川冻土, 2017, 39(1): 16-23.]
- [8] Qi Dongmei, Li Yueqing, Chen Yongren, et al. Changing characteristics and cause analysis of the runoff in the regions of the Yangze River under the background of climate change [J]. Journal of Glaciology and Geocryology. 2015, 37(4): 1075 1086.
 [齐冬梅,李跃清,陈永仁,等. 气候变化背景下长江源区径流变化特征及其成因分析[J]. 冰川冻土, 2015, 37(4): 1075 1086.]
- [9] Bartels-Rausch T, Bergeron V, Cartwright J H E, et al. Ice structures, patterns, and processes: a view across the ice fields [J]. Review of Modern Physics 2012, 84(2): 885 – 944.
- [10] Bragg W H. The crystal structure of ice[J]. Process of Physics , 1922 , 34: 98 - 103.
- [11] Alley R B. Flow-law hypotheses for ice-sheet modeling [J]. Journal of Glaciology , 1992 , 38(129): 245-256.
- [12] Alley R B , Gow A J , Meese , D A. Mapping c axis fabrics to study physical processes in ice[J]. Journal of Glaciology ,1995 , 41(137): 197 – 203.
- [13] Duval P , Castelnau O. Dynamic recrystallization of ice in polar ice sheets [J]. Le Journal de Physique IV , 1995 , 5(C3) : C3 – 197 – C3 – 205.
- [14] Thorsteinsson T, Kipfstuhl J, Miller H. Textures and fabrics in the GRIP ice core [J]. Journal of Geophysical Research , 1997 , 102: 26583 – 26599.
- [15] De la Chapelle S, Castelnau O, Lipenkov V, et al. Dynamic recrystallization and texture development in ice as revealed by the study of deep ice cores in Antarctica and Greenland [J]. Journal of Geophysical Research, 1998, 103(B3): 5091-5105.

- [16] Duval P. Deformation and dynamic recrystallization of ice in polar ice sheets [C]//Physics of Ice Core Records. Hokkaido University Press, 2000: 103 – 113.
- [17] Montagnat M, Duval P. Rate controlling processes in the creep of polar ice: influence of grain boundary migration associated with recrystallization [J]. Earth and Planet Scientific Letter, 2000, 183(1/2): 179-186.
- [18] Urai J L , Means W D , Lister G S. Dynamic recrystallization of minerals [J]. Mineral and Rock Deformation , 1986 , 3: 161 – 199.
- [19] Stipp M , Tullis J. The recrystallized grain size piezometer for quartz [J]. Geophysical Research and Letter ,2003 ,30(21): 20 -28.
- [20] DiPrinzio C L , Wilen L A , Alley R B , et al. Fabric and texture at siple dome , antarctica [J]. Journal of Glaciology , 2005 , 51 (173): 281 – 290.
- [21] Kipfstuhl S. Evidence of dynamic recrystallization in polar firm [J]. Journal of Geophysical Research 2009, 114(B5): 35 – 48.
- [22] Huang Maohuan, Xie zichu, Mi Aili. The preliminary study on ice texture from Ürümqi Heyuan No. 1 Glacier in Tianshan [M]//The study on hydrology and glacier from Ürümqi Heyuan No. 1 Glacier. Beijing: Science Press, 1965: 31 37. [黄茂桓, 谢自楚,米・艾里. 天山乌鲁木齐河源1号冰川冰结构的初步研究[M]//天山乌鲁木齐河源冰川与水文研究.北京:科学出版社, 1965: 31 37.]
- [23] Huang Maohuan. The climatological condition on polar-type glaciers in China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology ,1994 , 16(3): 218-223. [黃茂桓. 我国极地型冰川发育的气候条件 [J]. 冰川冻土 ,1994 ,16(3): 218-223.]
- [24] Huang Maohuan, Gao Xiangqun, Jin Zhenmei. Ice textures and their development of an ice core extracted from the Guliya ice cap, Kunlun Mountains [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1995, 17: 39-44. [黃茂桓,高向群,金正妹. 从昆仑 山古里雅冰帽提取的冰芯冰结构及它们的发展 [J]. 冰川冻 土, 1995, 17: 39-44.]
- [25] Huang Maohuan, Wang Wenti. The advancement on ice texture researches in China [C]//The symposium on the 5th Chinese Glaciology and Geocryology Conference. Lanzhou: Culture Press, 1996: 547-555. [黄茂桓,王文悌. 我国冰芯冰结构 研究进展[C]//第五届全国冰川冻土学大会论文集. 兰州: 文化出版社,1996: 547-555.]
- [26] Han Jiankang , Zhou Tao , Nakawo M. Stratigraphic and structural features of ice cores from Chongce ice cap , West Kunlun Mountain [J]. Bulletin of Glacier Research , 1989 , 7: 21 – 28.
- [27] Zhang Wanchang , Han Jiankang , Xie Zichu , et al. A preliminary study of ice texture and fabrics on an ice core to the bedrock extracted from Glacier No. 1 at the headwaters of Ürümqi River , Tianshan , China [J]. Bulletin of Glacier Research ,1993 ,11: 9 -15.
- [28] Shi Aiping. The basic characteristics of glaciers Nakeduola No.7 in Xixiabangma and Hailuogou in Gongga [D]. Lanzhou: Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, Chinese Academy of Sciences, 1992. [师爱平. 希夏邦马峰北坡那克多拉7 号冰川及贡嘎山海螺沟冰川的基本特征[D]. 兰州: 中国科 学院兰州冰川冻土研究所, 1992.]
- [29] Liu Yaping , Hou Shugui , Hong Sungmin , et al. High resolution trace element records of an ice core from the eastern Tien Shan , central Asia , since 1953AD [J]. Journal of Geophysical Research , 2011 , 116(D12) : 119 – 125.

- [30] Liu Yaping, Hou Shugui, Ren Jiawen, et al. Distribution features of borehole temperatures in the Miaoergou flat-topped glacier, East Tianshan Mountains [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, 28(5): 668-671. [刘亚平,候书贵,任 贾文,等. 东天山庙儿沟平顶冰川钻孔温度的分布特征[J]. 冰川冻土,2006,28(5): 668-671.]
- [31] Liu Yaping, Hou Shugui, Wang Yetang, et al. Distribution of borehole temperature at four high-altitude alpine glaciers in Central Asia [J]. Journal of Mountain Science, 2009, 6(3): 221 – 227. [刘亚平,候书贵,王叶堂,等.中亚四支高纬度阿尔卑 斯型冰川的钻孔温度分布[J].山地科学,2009,6(3): 221 – 227.]
- [32] Wang Chaomin , Hou Shugui , Pang Hongxi , et al. ²¹⁰Pb dating of the Miaoergou ice core from the eastern Tien Shan , China [J]. Annual of Glaciology , 2014 , 55(66) : 105 – 110.
- [33] Langway C C , Shoji H , Azuma N. Crystal size and orientation patterns in the Wisconsin-age ice from Dye 3 , Greenland [J]. Annals of Glaciology , 1988 , 10(1): 109 – 115.
- [34] Eichler J. C-axis analysis of the NEEM Ice core: an approach based on digital image processing [D]. Bremerhaven: Fachbe-

reich Physik , Freie Universit t Berlin , 2013.

 \pm

- [35] Wang Shaowu ,Wen Xinyu , Luo Yong , et al. Construct the series of the temperature in China in the recent 1 ka[J]. Scientific Report ,2007 ,52(8): 958 964. [王绍武,闻新宇,罗勇,等. 近千年中国温度序列的建立[J]. 科学报导,2007 ,52 (8): 958 964.]
- [36] Song Linlin, Hou Shugui, Liu Yaping. δ¹⁸O from 1953AD recorded in Miaoergou ice core, in Mountain Haerlike, East Tienshan [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2011,47(5): 36-41. [宋琳琳,候书贵,刘亚平.东天山哈尔里克山庙儿沟冰芯 1953 年以来的δ¹⁸O 记录[J]. 兰州大学 学报(自然科学版),2011,47(5): 36-41.]
- [37] Cuffey , K M , Paterson , W S B. The physics of glaciers [M]. 4nd ed. Oxford: Elsevier , Inc. , 2010: 33 – 46.
- [38] Thorsteinsson, T. Fabric development with nearest-neighbor interaction and dynamic recrystallization [J]. Journal of Geophysical Research , 2002, 107: 1-13.
- [39] Jacka T H , Jun L. The steady-state crystal size of deforming ice [J]. Annals of Glaciology , 1994 , 20(1): 13-18.

Analyzing characteristically on ice fabric and microstructure of Miaoergou glacier top-flatted , East Tianshan

LI Yuan^{1,3}, DU Zhiheng¹, XIAO Cunde²

(1. State Key Laboratory of Cryospheric Sciences, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;
 2. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;
 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In 2015, ice microstructure and fabric of Miaoergou ice core (43 03'19" N, 94 19'21" E, 4 512 m a. s. l.; extracted in 2005, the length is 58.7 m), East Tianshan were measured by Auto Fabric Analyzer G50 at Alfred-Wegener Institute for Polar and Marine, and then collected with the relevant characteristics to analyze and explain their implications. Both fabric and microstructure changes with depth show overall similar characteristics to other mountain glaciers, China, meanwhile they exhibit seasonal features. Certain fluctuations from parts of samples may be related to the change of thermal-dynamics during periods in which samples were transported and stored. The mechanical fields inferred using fabrics are quite simple and the uni-axis compression may dominate in the middle-low portions of this core. The normal grain growth, the rotation recrystallization or the strain-induced boundary migration recrystallization is not suitable to be used to address which one dominates in some depth. So, it is possible that three processes co-operate in all depth.

Key words: ice core; fabric; microstructure; recrystallization

(本文编辑: 周成林)