

珠穆朗玛峰北坡东绒布冰川成冰作用的新认识

康世昌^{1,2}, 秦大河², 任贾文², 张东启^{2,3}, 秦 翔²

(1. 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100085 2 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冰芯与
寒区环境开放实验室, 甘肃 兰州 730000 3 中国气象科学研究院, 北京 100081)

摘要: 冰川成冰作用的研究对于选择冰芯钻取点具有重要的科学意义。前人对珠穆朗玛峰北坡冰川成冰作用的研究, 由于缺少高海拔区域的实测资料而具有一定的局限性。文章通过 1998 年东绒布冰川垭口处 (6 500 m a s l) 11 m 冰芯和海拔 6 450 m 处 20 m 冰芯剖面的成冰作用过程研究, 认识到由于水、热条件的逐年波动, 冰川成冰作用也处于变化之中。珠穆朗玛峰北坡东绒布冰川高海拔区域, 在一定的水、热条件下 (如气温较低和降水量较大等), 再冻结 - 重结晶作用依然占主导地位, 该成冰作用至少在垭口部位是有分布的。而一般在气温较高或降水量较少等条件下, 冰川的成冰作用则以冷渗浸 - 重结晶作用为主。

关 键 词: 珠穆朗玛峰北坡; 冰川成冰作用

中图分类号: P542 文献标识码: A 文章编号: 1000-0690(2005)04-0415-05

1 问题的提出

山地冰川的成冰作用研究, 特别是山地冰川成冰作用带的分布, 对于选择冰芯钻取的位置至关重要。为确保冰芯对气候环境记录的高保真性和准确性, 冰芯钻取点一般选择在冰川的重结晶带或再冻结 - 重结晶带, 以避免逐年的雪冰气候环境信息因冰川淋溶作用而缺失。

20 世纪 50 年代原苏联学者推测, 在喜马拉雅山一些极高峰地区, 由于极高海拔和终年低于 0℃ 的气温, 其降雪一般不发生或很少发生融化, 如同南极冰盖中心区域一般, 只有通过重结晶作用 (或以其为主) 雪逐渐变成冰, 因而在这些地区存在着重结晶带及再冻结 - 重结晶带。1966~1968 年珠穆朗玛峰地区科学考察中, 中国学者否定了上述推测, 认为在珠穆朗玛峰地区并不存在重结晶带及再冻结 - 重结晶带^[1]。1964 年的希夏邦马峰科学考察也仅是推断达索普冰川粒雪盆可能存在再冻结 - 重结晶作用, 但缺乏实测资料^[2]。近年研究表明: 希夏邦马峰北坡达索普冰川海拔 7 000 m 处大平台的成冰作用为再冻结 - 重结晶作用, 即该平台位于再冻结 - 重结晶带^[3], 从而发现了中国境

内的一种新成冰作用。对于珠穆朗玛峰北坡的冰川, 在较高海拔处不存在如同希夏邦马峰达索普冰川的较大积雪平台, 冰川的粒雪盆海拔相对较低, 其成冰作用将是如何呢? 再冻结 - 重结晶带及重结晶带是否存在? 1998 年 9 月, 笔者等考察了东绒布冰川并在其垭口 (海拔 6 500 m) 和海拔 6 450 m 处分别钻取 11 m 和 20 m 冰芯两支, 从而对上述问题有了进一步的认识。

2 冰川成冰作用带

冰川由积雪变质而形成, 冰川表面的降水量及热量条件决定了冰川成冰作用的特征, 并具有较明显的地带性规律。Paterson^[4]对冰川的这种带谱作了分类。在冰川的积累区自上而下有干雪带 (或重结晶带), 渗浸带 (或再冻结 - 重结晶带), 湿雪带 (或冷渗浸 - 重结晶带), 附加冰带 (或渗浸冻结带)。干雪带全年气温均在 0℃ 以下, 即使在夏季也不发生融化, 成冰作用是在很厚的雪层压力下完成, 形成重结晶冰。干雪带是冰芯钻取最理想的地点。渗浸带在干雪带以下, 每年的最暖月雪层表面发生一些融化事件, 形成冰层或冰透镜体, 但绝大部分雪仍是通过重结晶作用成冰, 在该成冰带提取

收稿日期: 2004-07-13 修订日期: 2004-09-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40401054 40121101)、中国科学院知识创新资助项目 (KZCX3-SW-339 KZCX1-10-09)、中国科学院“百人计划”和院长基金资助项目。

作者简介: 康世昌 (1969-), 男, 甘肃陇西人, 研究员, 博士生导师, 中国科学院“百人计划”获得者, 主要从事冰芯与气候环境记录研究。Email: Shichang_kang@ipc.ac.cn

的冰芯也比较完整的保存了气候环境的信息。湿雪带处在渗浸带以下,其特点是前一年所堆积的雪到夏末已全部升温到 0℃,当融化较弱时,融水未渗透整个年层,但融水渗透层所占比例很大;当融化较强时,融水可以充填整个粒雪孔隙,形成渗浸冰,多余融水变成径流流失。附加冰带在湿雪带以下,由于融化强烈可产生大量融水,使渗浸冰层和冰川冰面冻结在一起形成附加冰,多余融水随径流流失。

这里对本文涉及的粒雪和冰类型做一简介。粒雪是接近圆粒的失去骸晶残余的雪,它是由雪经过烧结、重结晶、渗浸或再冻结等作用形成,根据其粒径可分为细粒雪 (< 1 mm),中粒雪 (1~ 2 mm) 和粗粒雪 (> 2 mm)。渗浸粒雪是指粒雪中央有一些较薄的透明冰层。粒雪冰是含有一些不连续的冰层和冰透镜体的粒雪。相对于渗浸粒雪,粒雪冰是在融水稍多的情况下形成,粒雪冰中仍存在大量的孔隙,气泡未完全封闭,属粒雪范畴。冰层是当下渗的融水较多,并在某一层位上释热冻结而形成的较为连续透明的冰体。深霜为粗大具有杯状或柱状的粒雪晶体,它是由雪层内水汽迁移及凝华作用形成,密度和硬度很小。粒雪(或冰层)中有可见细微尘埃的层位为污化层。融水下渗充填粒雪之间的孔隙并以粒雪为结晶核再次冻结便形成渗浸冻结冰,其气泡已全部封闭。

3 东绒布冰川垭口 (6 500 m)处成冰作用

东绒布冰川发源于珠穆朗玛峰北坡,长 14 km,宽 0.8 km,面积 48.45 km²,末端海拔 5 520 m,雪线最高达 6 250 m,该冰川是历次从北坡攀登珠穆朗玛峰的必经之路。1966~ 1997 年东绒布冰川在强烈的气候变暖条件下其冰塔林已退缩 170 m,退缩速率为 5.5 m/a^[5]。东绒布冰川末端位置保持稳定,是因为末端上伏有较厚的冰碛物,对冰川起到保护作用。1998 年 9 月考察队到达了东绒布冰川的垭口 (6 500 m)并钻取 11 m 冰芯(图 1)。该垭口平台东西长约 400 m,西北宽约 100 m,为南北向分冰岭,南坡为康雄冰川。图 2 为该垭口平台 11 m 冰芯成冰作用过程剖面图。

图 2 所示,东绒布冰川垭口处冰芯 120~ 150 cm 之间为深霜和污化层,可以判断为 1997 年秋末形成,150~ 180 cm 处粒雪冰则为 1997 年夏季形

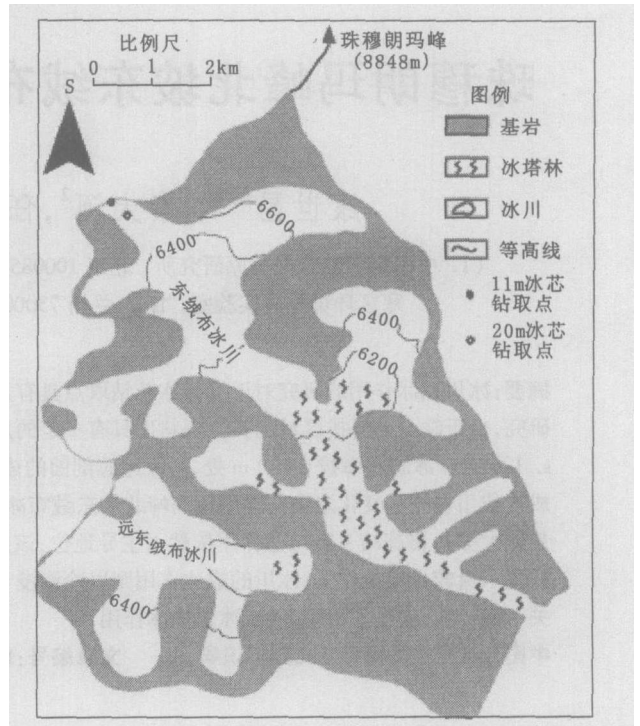


图 1 东绒布冰川及冰芯钻取点位置图

Fig 1 Sketch of the East Rongbuk Glacier and ice coring sites

成,因而可以推断 1997~ 1998 年的雪层厚度约为 180 cm,即积累量为 822 mm 水当量。冰芯剖面大致可分为 3 部分:(1) 0~ 250 cm,出现 4 个冰层(或冰壳),厚度在 0.5~ 5 cm 之间变化,4 个冰层总厚度 10 cm,占剖面厚度的 4%,粒雪层则占 96%,该部分冰芯密度较小,上部为 0.38~ 0.44 g/cm³,下部稍大为 0.51 g/cm³;(2) 250~ 610 cm,剖面主要以渗浸冻结冰和冰层为主,二者总厚度占剖面厚度的 61%,而粒雪只占 39%,渗浸冻结冰和冰层出现层位的密度在 0.74~ 0.79 g/cm³ 之间变化,粒雪密度在 0.60 g/cm³ 左右;(3) 610~ 1 100 cm,冰层总个数为 16 总厚度为 70 cm,占剖面厚度的 14%,而粒雪层占主体为 86%,特别在 865 cm 以下为连续分布的粒雪。图 3 为该冰芯钻孔温度随深度的分布图。钻孔温度在 1 m 深度接近 0℃,说明 1998 年夏季表层雪中可能发生消融事件。随着深度增加,温度近似直线下降,在钻孔 10 m 深度处温度降至 - 6℃。

为进一步认识东绒布冰川垭口以下的成冰作用,另一支冰芯于海拔 6 450 m 处钻取,其钻孔点距垭口冰芯约 350 m,坡度约 5°。该冰芯上部 20 m 成冰作用过程剖面如图 4。在该冰芯 20 m 的剖面

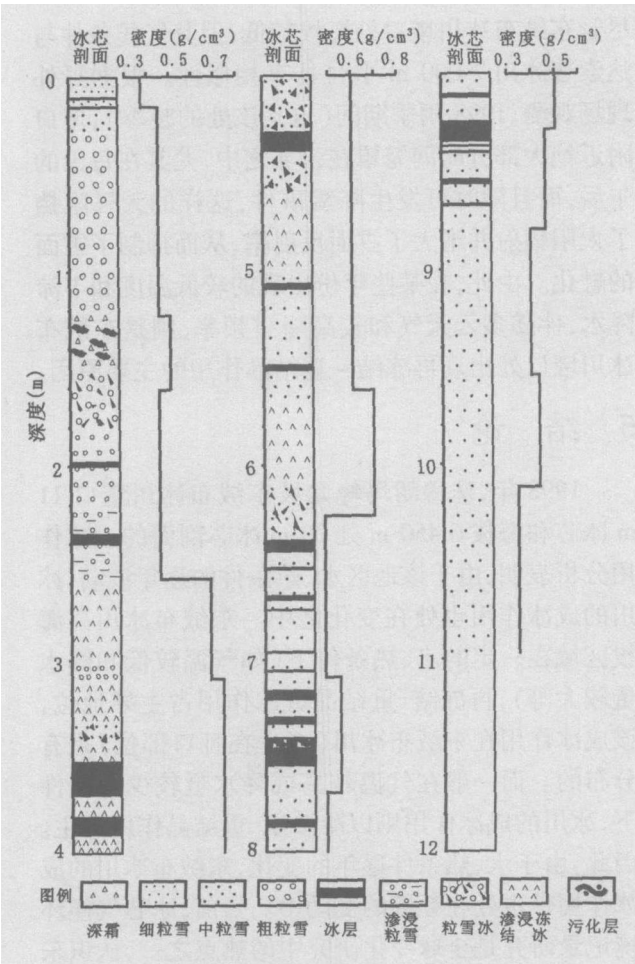


图 2 东绒布冰川垭口 6 500 m
成冰作用过程冰芯剖面

Fig 2 Transformation of snow to ice at the East
Rongbuk Glacier Col (6500 m a s l)

上,粒雪厚度合计为 952 cm,占冰芯深度的 48%,而冰层和渗浸冻结冰厚度略占上风为冰芯深度的 52%,并以渗浸冻结冰为主。冰芯剖面上部粒雪所占比例略高一些,主要以中粒雪和粗粒雪为主,而剖面下部则以粒雪冰为主。

4 讨 论

东绒布冰川垭口 11 m 冰芯大致可分为 3 部分,各部分具有不同的成冰作用特征,冰芯上部冰层仅占 4%,其主体为较厚的粒雪层,成冰作用应当是再冻结 - 重结晶作用;冰芯中部冰层和渗浸再冻结冰厚度大于粒雪厚度,则为冷渗浸 - 重结晶带成冰作用特征,即某些年份粒雪在较多融水的参与下全部变质成渗浸冻结冰,而融水较少的年份还有部分粒雪被保存下来;冰芯下部又以粒雪为主体,特别在 865 cm 以下全部为粒雪,则又是再冻结 -

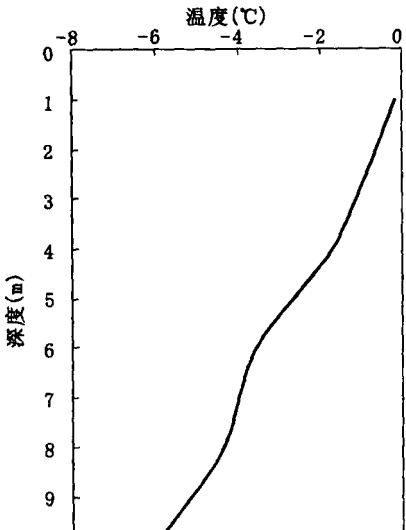


图 3 东绒布冰川垭口(海拔 6 500 m) 钻孔
温度随深度的分布

Fig 3 Temperature profile at the East
Rongbuk coring site (6500 m a s l)

重结晶带的特征,早期微弱的融化事件形成一些较薄的冰层,而冰芯 10 m 处深度具有较低的温度 (- 6℃) 则表明该处成冰作用不可能再有融水的参与,因而绝大部分粒雪要通过重结晶作用成冰。有趣的是同一地点出现不同的成冰作用,事实上水、热条件决定了成冰作用特征,而同一地点逐年的降水量和气温存在一定差异。如果某一年份的水、热条件使得融水渗透本年度积雪或透过大部分雪层,则为渗浸冻结成冰作用,剩余的雪则需后期重结晶变质成冰;当某一年的水、热条件决定了融水量较少,而且对绝大部分雪层没有影响时,重结晶成冰作用占主导。由此,垭口冰芯不同部分成冰作用的差异反映了该点不同年代成冰作用的差异,可以推断在气温较低的年份成冰作用以再冻结 - 重结晶作用占主导地位,气温较高年代则以冷渗浸 - 重结晶成冰作用占主导。

图 4 所示东绒布冰川海拔 6 450 m 处的成冰作用,20 m 冰芯剖面以渗浸冻结成冰作用占主导地位,并且剩余的粒雪层绝大部分已有融水参与,只在个别年份保留了较厚的粒雪层。这说明在海拔 6 450 m 处(即比垭口海拔低 50 m)成冰作用带已过渡为完全的冷渗浸 - 再冻结带(湿雪带),重结晶作用已是较为微弱了。

因此,在珠穆朗玛峰北坡东绒布冰川上一定的水、热条件下,再冻结 - 重结晶成冰作用亦然占主

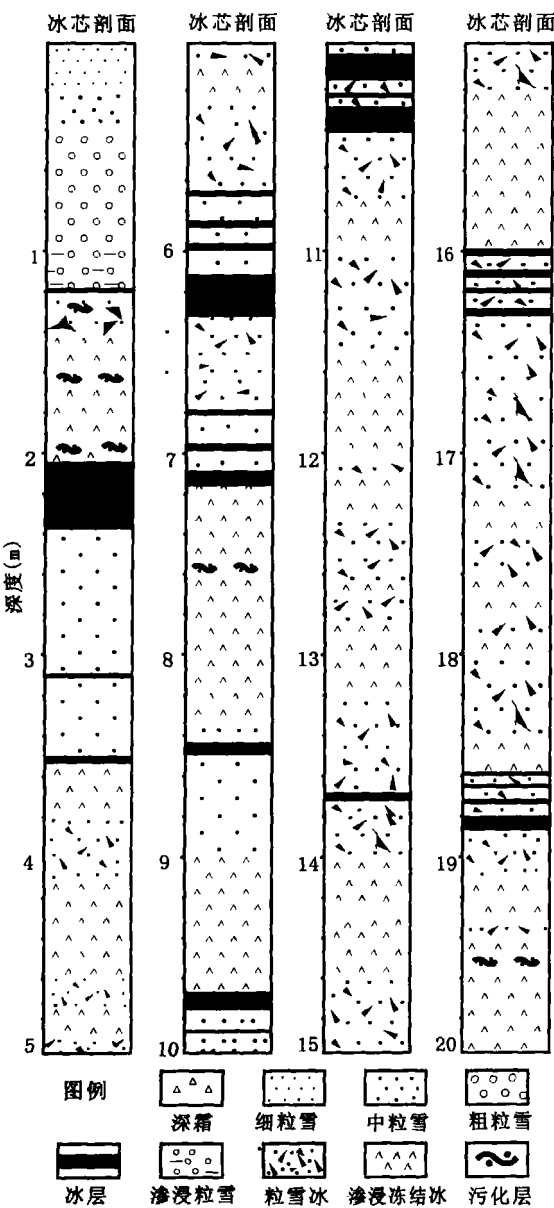


图 4 东绒布冰川海拔 6 450 m 处成冰作用过程冰芯剖面图

Fig 4 Transformation of snow to ice at an elevation of 6450 m on the East Rongbuk Glacier

尽管东绒布冰川垭口处海拔较低,但其气候条件与达索普冰川 7 000 m 平台具有相似性。根据野外现场观测,1998 雨季期间(也是该处的暖季),垭口附近绝大部分时间笼罩在云雾之中,尤其在每天的午后,而且随时可发生降雪事件,这样的天气阻挡了太阳辐射并增大了雪面反射率,从而抑制了雪面的融化。由此,在某些年份出现的较低温度和丰沛降水,伴随多云天气和较高降雪频率,则是东绒布冰川垭口处出现再冻结-重结晶作用的主要原因。

5 结 论

1998 年,珠穆朗玛峰北坡东绒布冰川垭口 11 m 冰芯和海拔 6 450 m 处 20 m 冰芯剖面的成冰作用分析表明,由于该地区水、热条件的逐年波动,冰川的成冰作用也处在变化之中。东绒布冰川高海拔区域在一定的水、热条件下(如气温较低和降水量较大等),再冻结-重结晶成冰作用占主导地位,该成冰作用在东绒布冰川(至少在垭口部位)是有分布的。而一般在气温较高或降水量较少等条件下,冰川的成冰作用则以冷渗浸-重结晶作用为主。因此,由于水、热条件逐年的变化,东绒布冰川的成冰作用带也处在频繁的变动中。目前,冰芯气候环境记录研究是全球变化研究中的热点之一,认识东绒布冰川的成冰作用带将是在该地区选择理想冰芯钻取点的基础。

参考文献:

[1] 谢自楚,王宗太. 珠穆朗玛峰北坡成冰作用 [A]. 见: 中国科学院西藏科学考察队 (主编). 珠穆朗玛峰地区科学考察报告 (1966~1968 现代冰川与地貌) [C]. 北京: 科学出版社, 1975. 14~25

[2] 谢自楚. 希夏邦马峰北坡的积雪和成冰作用 [A]. 见: 希夏邦马峰登山队科学考察队 (主编). 希夏邦马峰地区科学考察报告 [C]. 北京: 科学出版社, 1982. 45~58

[3] 姚檀栋, 蒲建成, 王宁练. 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

[4] Paterson W S B. The Physics of Glacier [M]. 3rd Edition Oxford: Pergamon, 1994. 9~10

[5] 任贾文, 秦大河, 王哲帆. 气候变暖使珠穆朗玛峰地区冰川处于退缩状态 [J]. 冰川冻土, 1998, 20(2): 184~185

导地位,再冻结-重结晶带在东绒布冰川(至少在垭口部位)是有分布的。更确切地说,由于水、热条件逐年的波动,冰川上成冰作用带也处在变化之中。相对于希夏邦马峰达索普冰川 7 000 m 平台,

**New Knowledge of Transformation of Snow to Ice
in the East Rongbuk Glacier, Northern Slope
of Mount Qomolangma (Everest)**

KANG Shi-Chang^{1, 2}, QIN Da-Hu², REN Jia-Wen², ZHANG Dong-Qi^{2, 3}, QIN Xiang²

(1. *Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085*

2. *Key Laboratory of Ice Core and Cold Regions Environment, Cold and Arid Regions
Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou,
Gansu 730000* 3. *Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*)

Abstract Researches in transformation of snow to ice are significant for choosing ice coring site. Due to lacking of observed data at higher elevation, earlier studies on the transformation of snow to ice were very limited in the East Rongbuk Glacier, northern slope of Mount Qomolangma. During September, 1998, the ice coring project has been carried out on the northern slope of Mount Qomolangma. The analysis of an 11 m ice core at the col (6500 m a.s.l.) and a 20 m ice core at an elevation of 6450 m in the East Rongbuk Glacier indicates that transformation of snow to ice is varying annually, which may depend on variation of air temperature and precipitation amount. In the high elevation region of the East Rongbuk Glacier, the refrozen-recrystallization is dominant in transforming of snow to ice at the certain conditions, such as low summer temperature or high precipitation. In another word, the refrozen-recrystallization zone does exist in the East Rongbuk Glacier (at least at the col of the glacier). The cold percolation-recrystallization is a major transforming process from snow to ice when summer temperature is high or precipitation is low. The result clarifies the uncertainties of transformation of snow to ice in the high elevation over the Himalayas. It also encourages us to recover ice cores that have reliable records from the accumulation area of glacier at the high elevation of the Himalayas.

Key words northern slope of Mount Qomolangma, transformation of snow to ice, East Rongbuk Glacier