

文章编号: 1004-8166(2007)04-0386-10

中国境内冰川成冰作用的研究进展^{*}

李向应^{1,2}, 永建^{1,2}, 刘时银^{2,3}

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所寒旱区流域水文与应用生态实验室, 甘肃 兰州 730000;

2 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冰冻圈与环境联合重点实验室, 甘肃 兰州 730000;

3 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100085)

摘 要: 冰川是由降雪积累形成, 具有一定规模且运动着的自然冰体, 是气候变化最敏感的指示器。从雪演化成冰的过程、机理和结果统称为成冰作用。成冰作用的研究可以揭示冰川的发育条件、形成过程和物理特征等; 成冰作用的空间变化又是冰川变化的一种反映, 对气候变化具有很好的指示作用。中国境内冰川的成冰作用研究开始于 1962 年谢自楚等对天山乌鲁木齐河源 1 号冰川开展的成冰作用研究, 随后不同学者对祁连山等地区冰川的成冰作用亦进行了研究。随着研究的深入和发展现已形成具有中国特色的冰川成冰作用概念。主要回顾了冰川成冰带研究的发展历程和在中国的发展状况以及自 20 世纪 60 年代开始中国境内祁连山、天山、阿尔泰山、西昆仑山、喜马拉雅山、藏东南地区和横断山区冰川的成冰作用研究的主要成果, 展望了今后冰川成冰作用研究的发展及其重要意义, 并提出了以前研究中存在的缺陷和不足以及今后在成冰作用研究中应该注意的问题。

关 键 词: 成冰作用; 冰川; 中国境内

中图分类号: P343.6 **文献标识码:** A

1 引 言

冰川是寒冷地区多年降雪积累、经变质作用形成、在重力作用下有一定运动的自然冰体; 冰川以冰为主体, 还包含一定数量的空气、液体物质、岩屑和人类活动所释放的微量物质^[1]。冰川的形成是通过不同的雪冰转化过程将雪转变成冰而实现的, 雪—粒雪是雪冰转化过程中的一个重要环节^[2]。雪—粒雪的转化过程是通过 3 种不同的变质作用实现的: 融化—冻结变质作用(暖型变质作用)、等温变质作用(冷型变质作用)和温度梯度变质作用。因吸收和释放热量的程度不同, 融化—冻结变质作用再分为再冻结作用、渗浸作用和渗浸—冻结作用。

等温变质作用发生在温度低于熔点、温度梯度很小的雪层里面, 晶粒的分子较容易发生迁移, 通过凸面上水分子的升华和凹面上的凝华作用也可造成分子迁移, 舒姆斯基^[3]把发生在深处的等温变质作用称为重结晶作用。温度梯度变质作用表现在雪层表面和内部出现明显的温度梯度, 通过变质作用形成一种晶面清晰的棱柱状、棱锥状和空心六棱玻璃杯状晶体“深霜”^[1]。

冰川是气候的产物, 也是很好的气候指示器; 气候影响冰川, 冰川反过来又作用于气候, 两者间的关系较为密切。冰川变化(面积、长度等)是降水和温度变化的替代信息, 降水、气温及其组合是影响冰川发育的主要气候因子, 降水决定冰川积累, 气温决定

^{*} 收稿日期: 2006-12-20 修回日期: 2007-03-09

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目“冰川作用区融雪径流过程及其影响研究”(编号: 40571034); 中国科学院知识创新工程重要方向项目“西部冰川变化监测及其评估方法研究”(编号: KZCX2-YW-301); 国家自然科学基金项目“台兰河流域冰川能量与物质平衡研究”(编号: 40601022)资助。

作者简介: 李向应(1978), 男, 陕西蒲城人, 博士研究生, 主要从事寒区水文水资源与环境研究。E-mail: lixiangying@lzb.ac.cn

冰川消融。因而降水的多寡与其年内分配和年际变冰作用和冰川融水^[4]。由雪到冰是一个复杂而漫长的过程,雪怎样转化成冰,需要多长时间才能转化成冰,主要受制于当地的水热平衡条件,它影响着冰川的物质平衡、温度状况、运动条件和其它物理特性。研究冰川的成冰作用可以揭示冰川的发育条件、形成过程和物理特征,可以作为冰川分类的依据,而且其空间上的变化又是冰川变化的一种反映,对气候变化具有很好的指示作用。因此,冰川成冰作用的研究是冰川学研究的重要组成部分。中国境内冰川的成冰作用研究开始于 1962 年谢自楚等^[5]在天山乌鲁木齐河源 1 号冰川开展的成冰作用研究,随着研究的深入和发展,现已形成具有中国特色的冰川成冰作用概念。本文对在中国境内冰川上开展的冰川成冰作用研究成果进行了回顾和总结,并对今后冰川成冰作用研究的发展及其重要意义进行了展望。

2 成冰作用的研究方法

研究冰川成冰作用的主要方法是挖雪坑,对雪、粒雪层剖面作层位描述和测定各层的物理指标(颗粒形状、粒径、密度、自由含水量、温度和硬度等)。根据联合国教科文组织的推荐,雪颗粒形状可分为 5 类:很细、细、中等、粗和很粗^[1],仇家琪^[6]对其含义作过介绍。近期在天山冰川观测试验站进行的雪—冰现代过程研究中,为在长期观测中使用统一的观测、采样记录和满足计算机绘图软件的要求,对雪的类型按粒径大小和变质程度重新划分为新雪、

化影响着冰川的补给和活动性,气温的高低影响成细粒雪($<1\text{ mm}$)、中粒雪($1\sim2\text{ mm}$)和粗粒雪($>2\text{ mm}$)^[7,8]。在研究成冰作用的过程中,密度和温度应该实测,自由含水量和硬度最好实测,在仪器缺乏时另有一些定性分级的办法^[6]。薄冰壳、辐射壳、风板、污化层、冰片、冰柱和冰透镜体等是作层位描述时必须抓住的现象。从雪—粒雪剖面取样进行稳定同位素(O^{18} 等)、微粒、 β 活化度、固体电导、放射性物质(氡等)、可溶性杂质、 H_2O_2 和孢粉分析等都可用来辨认年层^[1,9];由于局部融化和融水渗浸作用,雪—粒雪层内的稳定同位素、放射性物质、孢粉等可能随融水转移到更深的层位,分析研究时应提高警惕。成冰作用的研究要尽可能与冰川温度、物质平衡、冰川区气候及热量平衡的研究相结合,以便综合分析、全面认识成冰作用的条件和物理过程^[1]。

3 冰川成冰带

冰川自它的源头到末端可穿越数千米的高度,水热条件存在相当大的差别,在不同的高度带上成冰作用也不同^[1];因而可从边缘向顶部划分出一系列主要成冰过程有差异的区带,通常称为成冰带^[9]。关于极地冰盖和高山冰川的成冰带划分曾有许多学者给予评述^[10~14]。成冰带的概念首先由苏联的舒姆斯基^[3]提出,根据成冰作用的不同划分出 7 种成冰带:重结晶带、再冻结—重结晶带、冷渗浸—重结晶带、暖渗浸—重结晶带、渗浸带、渗浸—冻结带和消融带。之后欧美一些学者亦对冰川成冰带进行了划分,并逐渐定型化^[13,15,16](表 1)。

表 1 苏联及欧美一些学者对成冰带的划分
Table 1 Classification of ice formation zones in Soviet Union and the Occident

П. А. Шумский (1955 年)	Benson (1959 年, 1961 年)	Muller (1962 年)	Paterson (1987 年)	Williams and others (1991 年)
干雪带或重结晶带	干雪相	干雪带	干雪带	干雪相
雪—粒雪带或再冻结—重结晶带	渗浸相	渗浸带 A	渗浸带	渗浸相
冷粒雪带或冷渗浸—重结晶带				
暖粒雪带或暖渗浸—重结晶带	渍水相	渗浸带 B	湿雪带	雪浆带、湿雪相
渗浸带或粒雪—冰带		雪浆带		
附加冰带或渗浸—冻结带	消融相	附加冰带	附加冰带	附加冰带
消融区		消融区	消融区	冰相

其中, Paterson^[13]对成冰带的划分结果为:①干雪带。在夏季不发生融化,与渗浸带的界限称为干雪线;②渗浸带。发生一些表面融化,融水在未冻结之前能渗入温度低于 0°C 的雪层到一定温度;若遇到一相对不透水层,融水可侧向延伸若干距离,再冻

结时便形成冰层或冰透镜体;③湿雪带。前一年夏末以来所堆积的雪到夏末已全部升温到 0°C , 部分融水能渗入前几年沉积的下面的雪层;④附加冰带。在渗浸带和湿雪带海拔较低处可产生大量融水,使冰层与连续的冰块并为一体形成附加冰;⑤消融区。

指平衡线以下的地区。对于不同的成冰带而言,只有干雪带分布在格陵兰与南极洲的内部地区以及阿拉斯加和育空地区最高山的峰顶附近。格陵兰的干雪带大致与年平均气温为 -25°C 或更低一些的地区相吻合^[17],有许多个夏季,甚至在格陵兰的最高海

拔处出现了少量融化^[18],因此,在格陵兰和南极洲的部分地区均可见到全序列的成冰带。积累区成冰带的范围和界限如图 1 所示^[13]。

成冰带的概念是在 20 世纪 60 年代引进中国的^[19],80 年代谢自楚等^[14]参考舒姆斯基和车

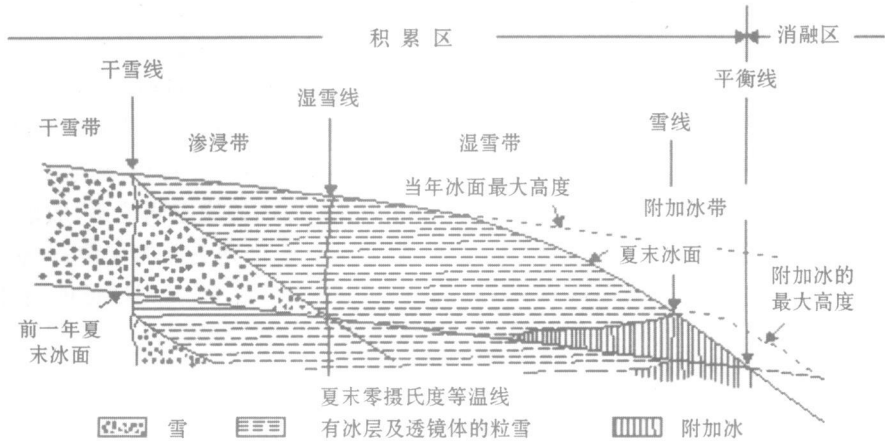


图 1 积累区各成冰带^[13]

Fig 1 Ice formation zones in the accumulation area

津^[20]、本森^[17]和牟勒^[11]的区划,结合中国的实际情况将中国冰川分为大陆型冰川和海洋型冰川两大类,对各主要冰川区的成冰带谱进行了较为详细的划分(表 2)。大陆型冰川是气候严寒、降水少和冰川温度低的产物,典型的大陆型冰川自下而上可划分为消融带、附加冰带、渗浸带、冷渗浸带和干雪带。海洋型冰川存在于气候温和、降水充沛、冰川温度高的地区,典型的海洋型冰川自下而上可划分为消融带、暖渗浸带、冷渗浸带和干雪带。暖渗浸带为海洋型冰川的特征成冰带,有厚层粒雪,除冬季易失热的表面层外均处于融点状态。渗浸活动强烈,可以渗进下面老的年层内,在粒雪层下部粒雪层中的水分未能全部冻结,靠晶粒之间的相对移动和晶粒内部变形封闭孔隙成冰,冰内含有一定量的液相水。海洋型冰川的消融带、冷渗浸带和干雪带同大陆型的基本相同,两者间不存在不可逾越的鸿沟,在过渡地带两者兼有的情况也有出现。另外,某些成冰带、特别是亚带缺失和倒置的情况是常见的^[4]。

海洋型冰川在消融带之上为宽广的暖渗浸带(暖渗浸—重结晶带)^[14 21],附加冰带在大陆型冰川上广泛分布。附加冰带通常在表面坡度较小、运动速度缓慢、年积累量小的大陆型冰川上更为发育^[11]。一般发育大陆型冰川的地区,年降水量少、气候干燥,冰川积累区不同的物质平衡年积累的雪

表 2 中国冰川成冰带谱的划分

Table 2 Classification of ice formation zones on glaciers in China

大陆型冰川	干雪带	海洋型冰川
	冷渗浸带	
	渗浸带	
	附加冰带	
	消融带	

层较薄,到了夏季太阳辐射增强、气温升高,可使较薄的雪层转化成附加冰,特别是在接近平衡线处。发育在季风气候条件下的我国海洋型冰川同发育大陆型冰川的地区相比,气候温和、年降水量大。在同一条冰川上,由于气候的波动各成冰带的高度和范围也在波动,某些亚带可能消失或重新出现。大陆型冰川和海洋型冰川的成冰带谱分布不可能完全相同,大陆型气候和海洋型气候条件下的冰川成冰带如表 3 所示^[22],同表 2 相比表 3 更接近我国冰川成冰带分布的实际^[23]。此外在对我国冰川成冰带谱研究的同时,谢自楚^[24]将其成功的应用于南极洲洛多姆冰帽标志了我国对冰川成冰作用研究的发展。

4 不同冰川区的成冰作用

4.1 祁连山区

祁连山的大多数冰川发育于气候干燥、严寒、地

表 3 Цыкин 对成冰带谱的划分^[22]

Table 3 Classification of ice formation zones

湿雪带			
再冻结—重结晶带			
大陆性气候	冷渗浸带		海洋性气候
	渗浸带		
	附加冰带		
消融带			

形起伏相对较小的山区内部, 附加冰分布广泛, 积累区的雪—粒雪层厚度不大; 冰舌表面比较洁净, 冰面坡度较小, 雪崩补给微不足道^{[25 26]①②}。如水管河冰川消融区发育有较厚的季节性附加冰^[27]。冰舌下部冬、春积雪一般厚 20~30 cm, 夏初全部转变为附加冰(厚 10~15 cm), 夏末露出强烈污化的消融面。冰舌中部的冰面平坦、洁净, 冬、春季积雪厚 20~40 cm, 附加冰厚 10~20 cm, 夏末全部消融。冰舌上部除积雪和附加冰层更厚、保存时间更长、冰面更平坦外, 还出现反映雪线波动变化的具有不整合接触面的附加冰层。如“七一”冰川海拔 4 580 m 的雪坑中和北大河上游的几条冰川上均发现这种现象。在粒雪区下部, 夏末仍保留未被融尽的、厚度一般为 20~30 cm 的粒雪层; 多年附加冰在 2 层以上, 附加冰层之下缺乏明显的动力变质冰, 附加冰层的新老顺序自上而下排列; 由于雪线波动, 剖面中可能缺失某一年的积累层。在积累区中部, 存在多年粒雪层, 曾观测到“七一”冰川粒雪年层的最大厚度为 180 cm, 粒雪层总厚度 400~600 cm; 老虎沟 12 号冰川的最大粒雪年层厚度达 200 cm, 羊龙河 5 号冰川雪崩锥处厚度达 329 cm。冰川上部和顶部的粒雪层厚度较小, 冰川表层构造与积累区下部相似; 在远离裸露岩石的雪原上, 没有融水流失迹象。根据消融、渗浸和再冻结作用表现的程度, 一年内的成冰过程可分为春、夏、秋、冬 4 个时期^[22]。

祁连山冰川可分为 4 个成冰带:

(1) 消融带。暖季冰川表面收入的热量足以融化全部季节积雪和部分动力变质冰并消耗活动层部分冷储。按消融期末附加冰的保存状况再分为: ①消融下带。消融期末由季节积雪形成的附加冰全部消融殆尽, 仅在个别裂隙及阴暗冰洞中可能存在少量冻结冰; ②消融上带。消融期末仍可保存由当年季节积雪形成的往往呈斑状分布的附加冰。

(2) 渗浸—冻结带。消融期末新降积雪以下为多年性的附加冰层, 每层附加冰间有明显的污化面, 较新的附加冰层没有明显变质作用, 更老的年层中

有微弱的动力变质作用; 夏季收入的热量足以融化全部积雪及消耗活动层的部分冷储, 但不能再融化动力变质冰。按产生的径流情况再分为: ①下带。融水量大于剩余粒雪的孔隙, 多余水量形成冰面径流; 此带分布于积累区下部或向阳陡坡上, 夏末附加冰面出露; ②上带。融水完全在剩余粒雪孔隙中成冰, 无径流产生。

(3) 渗浸带。存在 1 年以上的粒雪层, 活动层下部为多年性附加冰层。剩余粒雪孔隙大于每年形成的冰量, 有明显的春、夏、秋季成冰期, 成冰年龄在 2 年以上。夏季热量收入只能融化部分积雪和消耗部分活动层冷储, 活动层冰温在 0℃以下。按径流产生情况和结构特点再分为: ①渗浸下带。存在 1 个粒雪年层, 夏末最新年积累层由粒雪和附加冰两部分组成, 成冰年龄为 2 年, 融水量多于成冰量, 部分融水形成径流; 粒雪层有自上而下的冻结, 可形成较厚的附加冰; ②渗浸中带。有 2 个以上的粒雪年层, 主要形成渗浸冰, 在粒雪层底部的冰面上可形成渗浸—冻结冰。在祁连山的中、小型冰斗冰川和山谷冰川上, 此带一般分布于粒雪盆中部和后壁下部; ③渗浸上带。粒雪层较薄, 不超过 1 个年层, 成冰时间为 1 年, 不产生径流。此带一般分布于冰川积累区上部, 与渗浸—冻结上带交替出现。

(4) 冷渗浸—重结晶带。具有多年的雪—粒雪层, 融水未能渗浸全部年层, 年层下部保存着未融化的雪。终年保持负温, 不产生渗浸—冻结冰, 没有夏季成冰期, 不产生径流。除渗浸作用外, 还依靠雪层压力发生重结晶作用, 成冰期在 5 年以上, 夏季的热量收入不足以融化积累的年层。活动层底部温度很低, 接近年平均气温。此带出现在祁连山西部海拔 5 100~5 200 m 以上的积累区中、上部。由于高度的限制, 冷渗浸—重结晶带只分布在个别高峰的附近。在同一条冰川上, 由于气候波动, 各成冰带的位置、范围也相应发生变化, 亚带可能消失或重新出现^[28]。此外, “七一”冰川和羊龙河 5 号冰川缺失冷渗浸—重结晶带, 水管河 4 号冰川缺失消融上带和渗浸—冻结上带^[27]。老虎沟 12 号冰川的成冰带谱较完整, 可分为消融带(消融下带和上带)、附加冰带(附加冰下带和上带)、渗浸带(渗浸下带、中带和

① 任炳辉. 祁连山现代冰川的成冰作用、积累与消融. 冰川学与冻土学研究资料, 1963

② 郑本兴. 祁连山现代冰川作用特征与分布. 冰川学与冻土学研究资料, 1963

上带)和冷渗浸带(海拔 5 100~5 200 m 以上)^[23]。

4.2 天山区

天山冰川分布的垂直高差大, 积累量变化也很大, 成冰作用类型多样化, 具有完整的成冰带谱^[3]。估计在托木尔峰南坡海拔 5 900 m 以上可能出现重结晶带^[29], 此带主要分布于中央天山部分, 垂直高差最大可达 2 000 m^[30]。除中央天山外, 内天山、南天山、博格达山等海拔超过 5 400 m 以上的高峰可能出现重结晶带^[31]。重结晶带以下一般存在着重结晶一再冻结带, 这里冰川表面在最暖时刻可出现正温而产生微弱的融化, 形成薄的再冻结冰片, 而绝大部分雪层终年保存着很低的负温, 基本成冰类型仍然是重结晶作用。这个带的下界海拔 4 800~5 000 m, 垂直高差为 400~500 m, 天山地区超过海拔 4 800~5 000 m 的山峰上部均可能有此带的存在。重结晶一再冻结带以下广泛分布着冷渗浸一重结晶带, 雪面可产生较强的消融, 融水渗入雪层内部形成渗浸冰片。在融水渗浸过程中, 雪晶体很快变质为粒雪, 但融水最多不超过整个年积累层的孔隙。这时全部融水均在年层中重新冻结成渗浸冰, 强烈消融时部分融水可渗入较早的年层中, 但整个粒雪层均保持负温状态, 不产生径流。这个带的下界一般为海拔 4 000~4 200 m, 垂直高差最大可达 1 000 m。冷渗浸带广泛分布于天山冰川的粒雪盆中部, 也是冰川积累量最大处。冷渗浸一重结晶带的主要成冰类型仍然是重结晶作用, 成冰时间较长。这个带只分布于最西部的边缘山区, 分布海拔为 3 700~4 200 m。在一般情况下, 冷渗浸一重结晶带以下广泛分布着一个渗浸一冻结带, 其地层剖面是缺失多年粒雪层, 成冰时间只有 1~2 年。根据附加冰发育程度及是否产流, 渗浸一冻结带又可分为上带和下带。由于冰面地形改变了积累状态, 上带往往分布于渗浸带以上的平坦的分水岭附近^[27]。这种成冰带的倒置或交错现象在天山冰川上是很常见的。渗浸一冻结带的垂直宽度取决于气温和降水比例的变化, 少雪、低温地区宽度增大。在东天山一般为数十米至 100 m, 在托木尔峰南坡冰川上可达 300 m^[29]。

托木尔峰地区南坡西琼台兰冰川可划分为 5 个成冰带^[29]:

(1) 消融带(海拔 3 150 m 的冰舌末端至 4 500 m 的平衡线之间)。夏初在其中、上部可见到厚数厘米至数十厘米的附加冰。

(2) 附加冰带(积累区下部海拔 4 500~4 800 m 之间)。估计成冰量为总积累量的 20%~50%。

(3) 渗浸带(海拔 4 800~5 200 m 之间)。估计成冰时间 2~5 年, 成冰量为总积累量的 50% 以上。

(4) 冷渗浸带(海拔 5 200 m 以上的积累区)。年层厚 250~300 cm, 估计年积累量为 1 300~1 550 mm。

(5) 干雪带(估计在海拔 5 900 m 以上)。常年低温, 夏季平均气温低于 -9.5°C , 不存在融化。

1962 年谢自楚等^[5]将乌鲁木齐河源 1 号冰川自下而上划分为 4 个成冰带: 消融带、渗浸一冻结带、渗浸带(雪一粒雪层厚 1~5 m, 成冰历时 3~5 年)和冷渗浸一重结晶带。1981 年王晓军等发现 1 号冰川西支渗浸带 4 226 m 处的粒雪层厚度大于 7 m, 成冰年龄超过 10 年^[32]。由于气候变暖, 上部的冷渗浸一重结晶带被渗浸带所取代^[33], 1989 年刘潮海等^[34]将 1 号冰川自下而上划分为 3 个成冰带: 消融带(消融下带的上界高度东、西支分别为 3 880 m 和 3 980 m, 消融上带的垂直高度东、西支分别为 50 m 和 60 m)、渗浸一冻结带(东、西支分别在海拔 3 925~4 075 m 和 4 036~4 130 m, 接近东、西支源头区分别在 4 200 m 和 4 450 m 以上)和渗浸带(东、西支垂直高度分别为 125 m 和 320 m)。近期研究^[7]发现, 1 号冰川的成冰带谱和雪层剖面特征具有由冷向暖的转化趋势^[35]。雪层剖面以粒雪(细粒雪和粗粒雪)为主, 深霜、冰片和冰透镜体较以前大为减少, 仅在部分渗浸带区域的雪层中有发育; 渗浸冻结作用较以前增强, 污化层数目减少, 颜色变深, 强度更高; 成冰时间约 41~47 个月^[36]。成冰带谱可划分为: 消融带(东支在海拔 4 066 m 以下和顶部的局部区域, 西支在海拔 4 089 m 以下)、渗浸一冻结带(东支在海拔 4 066 m~4 098 m 和渗浸带上限至顶部的局部消融区下限之间, 西支在海拔 4 089 m~4 136 m 和顶部的局部区域)和渗浸带(东支在海拔 4 098 m 至粒雪盆上部的渗浸一冻结带下限之间; 西支在海拔 4 136 m 至顶部的局部渗浸一冻结区下限之间)。值得关注的是东支顶部的局部区域现已转化为具有强烈消融特征的局部消融区^[37]。

博格达峰北坡的四工河 4 号冰川比乌鲁木齐河源 1 号冰川的气温略低, 降水较多, 平衡线低, 粒雪层的厚度大。成冰带的分布特点为: 缺失冷渗浸带, 附加冰带厚(垂直厚度 100 m), 消融带可分为上带和下带, 上带狭长, 以具有斑状附加冰区别于下带。四工河 5 号冰川的积累区上限高, 估计存在冷渗浸带^[38]。博格达峰南坡的黑沟, 8 号冰川的附加冰带

更厚, 垂直厚度 $150 \sim 200 \text{ m}$ [39]。哈密庙儿沟冰川在高海拔 $4\,253 \text{ m}$ 左右及其以下区域, 冰川冰面直接外露; 在海拔 $4\,343 \text{ m}$ 左右及其以下区域, 雪层剖面主要由细粒雪和粗粒雪组成; 在海拔 $4\,453 \text{ m}$ 左右至顶部海拔 $4\,513 \text{ m}$ 区域, 主要由新雪、细粒雪和粗粒雪组成。成冰带主要由消融带和渗浸—冻结带组成。据估计, 渗浸—冻结带的垂直高度在 60 m 左右或者更大一点 [40]。奎屯河哈勒希根 51 号冰川积累区 $3\,680 \text{ m}$ 处的雪层剖面主要由细粒雪和粗粒雪组成。粗粒雪层较厚, 类似于 1 号冰川西支渗浸带积累区的雪层剖面, 雪坑中的污化层数目较多。成冰带主要由消融带、渗浸—冻结带和渗浸带组成。根据 2002 年的雪线位置判断, 渗浸—冻结带的垂直高度不大于 70 m [40]。

4.3 阿尔泰和西昆仑山区

阿尔泰山主峰友谊峰南坡的喀纳斯冰川可分为 4 个成冰带 [41]: ①消融带; ②附加冰带, 左支冰流在海拔 $3\,150 \sim 3\,200 \text{ m}$ 之间, 右支冰流在 $3\,240 \sim 3\,280 \text{ m}$ 之间, 垂直厚度 $40 \sim 50 \text{ m}$, 附加冰层厚 $6 \sim 19 \text{ cm}$; ③渗浸带, 左支冰流在 $3\,200 \sim 3\,400 \text{ m}$ 之间, 右支冰流在 $3\,280 \sim 3\,480 \text{ m}$ 之间, 垂直厚度达 200 m ; ④冷渗浸带, 渗浸带以上相对高差 $1\,000 \text{ m}$ 的积累区中、上部估计存在冷渗浸带。西昆仑山崇测平顶冰川的平衡线接近海拔 $6\,000 \text{ m}$, 冰川上的纯积累量估计只有 $200 \sim 400 \text{ mm}$, 海拔 $6\,000 \sim 6\,300 \text{ m}$ 之间为附加冰带; 海拔 $6\,300 \text{ m}$ 处的粒雪层厚度大于 20 m , 存在冷渗浸带 [1]。

4.4 喜马拉雅山区

希夏邦马峰北坡海拔 $5\,800 \text{ m}$ 以下 3~4 月的降雪为板状晶体, 推测夏季 $6\,000 \text{ m}$ 以下降雪为板状晶体, 冬季或夏季的山顶部分可能有柱状晶体降落。4 月中旬以前所见的雪层构造属冷型变质成冰作用, 3 月末在第二高山侧碛 (海拔 $5\,820 \text{ m}$) 阴坡的积雪厚 $35 \sim 70 \text{ cm}$ 。雪层中大部分为粗雪, 出现深霜层, 表面为新降雪, 有的地方为细雪。冰川上积雪较厚, 冰塔区上部积雪一般厚 $50 \sim 100 \text{ cm}$ 大部分已演变成深霜; 表面新雪以下普遍有一层厚 $5 \sim 7 \text{ cm}$ 的由密细雪组成的“风板”。雪线附近 (海拔 $5\,900 \text{ m}$) 的积雪, 5 月初尚未发生融化, 雪层中仍可见到“深霜”。冰川的雪层构造特征与天山乌鲁木齐河源 1 号冰川相似, 但积雪表面融化开始较早, 后者冰舌上直到 5 月上旬仍有“深霜”。在冰川雪线附近广泛分布着一个渗浸—冻结带, 以那克多拉 7 号平顶冰川最为典型 [42]。那克多拉 7 号平顶冰川位于

强烈抬升的古冰碛平台上 [43], 最高点海拔 $6\,170 \text{ m}$, 末端约 $5\,700 \text{ m}$, 有 1 个或 2 个成冰带。当平衡线抬升超过 $6\,150 \text{ m}$ 时, 整个冰川为消融带; 当平衡线下降到 $5\,950 \text{ m}$ 左右时, 平衡线以上为附加冰带, 以下为消融带。多年及 1991 年平衡线在 $5\,950 \text{ m}$ 附近, 平衡线以上全为附加冰带, 以下为消融区, 有时当平衡线达到或超过冰川顶部 $6\,150 \text{ m}$ 时, 整个冰川为消融区。冰川下部附加冰厚 $5 \sim 10 \text{ cm}$, 其下为碎石和团粒状粘土组成的强烈污化面 (消融区); 附加冰带内的成冰机制为渗浸—冻结成冰, 所形成的冰一般垂直方向粒径大于水平方向, 其密度可以直接达到或超过第二临界密度 830 kg m^{-3} [23]。

那克多拉 6 号冰川表面的雪—粒雪层厚 $30 \sim 50 \text{ cm}$, 附加冰分布广泛, 积累区完全属于渗浸—冻结带。野博康加勒冰川上的积雪分布很不均匀, 如冰塔顶部冰体裸露, 冰塔间的洼地 4 月底积雪最大厚度可达 2.2 m , 非冰川区积雪仅分布于背风坡或阴坡。4 月底, 冰舌区的雪层表面开始融化, 融水渗入雪层内部, “深霜”和其它类型的雪迅速演变成粒雪, 较大的融水在下渗过程中遇冷冻结, 形成一层层冰片。冰舌上的冻结冰分布较普遍, 冻结冰的广泛分布、那克多拉河谷中冰锥的普遍发育以及各种冰缘现象的分布说明希夏邦马峰北坡存在着一个辽阔的冻结成冰带 (包括多年冻土), 垂直宽度可达 $1\,000 \text{ m}$ 以上。冰塔以上 $5\,900 \sim 6\,000 \text{ m}$ 间的附加冰分布是不连续的, 附加冰层底部为强烈污化的冰川面。在那克多拉 2 号冰川上, 这个带分布于 $5\,950 \sim 6\,100 \text{ m}$ 间, 附加冰多分布于坡度为 10 度左右的斜坡下部。野博康加勒冰川和那克多拉 2 号冰川的渗浸—冻结带分布于 $6\,000 \sim 6\,100 \text{ m}$ 之间。野博康加勒冰川粒雪盆分布于海拔 $6\,000 \sim 7\,350 \text{ m}$ 之间, 粒雪盆粒雪分布普遍, 厚度很大, 与那克多拉 7 号冰川主要依靠冰补给相反, 这条冰川主要依靠粒雪补给。但粒雪层的厚度变化很大, 在坡坎处粒雪层很薄 (仅数十厘米), 有时露出附加冰面。在野博康加勒冰川和那克多拉 2 号冰川上, 雪线附近冰川表面地形的起伏, 对积雪的分布有很大影响, 使附加冰不连续的分布, 仅分布于积雪较厚处。因此这些冰川上雪线不能用一条线来表示, 而是一个或宽或窄的带。在这个带内积累区 (附加冰) 与消融区 (强烈污化面) 是交错分布的。在野博康加勒冰川上, 这个带的垂直宽度为 100 m (海拔 $5\,900 \sim 6\,000 \text{ m}$), 那克多拉 2 号冰川上为 150 m (海拔 $5\,950 \sim 6\,100 \text{ m}$) [42]。野博康加勒冰川和绒布冰川的成冰带可分

为消融带、附加冰带(直至海拔 7 450 m 处均见附加冰)、渗浸带和冷渗浸带^[42-44]。谢自楚等^[42-44]怀疑喜马拉雅山极高峰区干雪带存在的可能性,否定这里有干雪带的推测。

在希夏邦马峰最高部分,冰川表面有粒雪分布,有些地区有渗浸冰(或渗浸—冻结冰)出露,融化再冻结作用是普遍存在的,不存在重结晶带和再冻结—重结晶带。希夏邦马峰北坡的成冰作用自下而上可分为消融带(下限可能在海拔 5 000 m 左右)、渗浸—冻结带(垂直距离为 100~200 m)、渗浸带和冷渗浸—重结晶带。据登山运动员提供的资料和在希夏邦马峰北坡的观察推测珠穆朗玛峰不存在类似南极中央的重结晶带和再冻结—重结晶带^[42]。李吉均^[21]证实,东段羊卓雍错附近枪勇冰川的积累区附加冰带广泛存在,是主要补给带。雪层剖面的特点是年层厚,但不是雪崩或风吹雪补给所致,说明它处于大陆型冰川边缘地带,降水丰富。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,从而发现了中国境内的一种新成冰作用^[47]。而珠穆朗玛峰北坡东绒布冰川垭口再冻结—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。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^[48]。

4.5 藏东南和横断山区

藏东南地区的若果冰川、拉古冰川等海洋型冰川存在暖渗浸带,推测其上限至少达到 6 000 m,干雪带分布在 7 000 m 以上。除南伽巴瓦峰地区外,西藏东南部大多数冰川上限不超过 6 000 m,某些冰川或冰川的某些部位出现渗浸—冻结作用的产物,在秋、冬、春季有许多脉冰、深霜、渗浸冰片和冰透镜体形成^[21]。横断山区基本上是海洋型冰川分布区^[49],贡嘎山和玉龙山冰川的积累区广泛存在暖渗浸带,成冰深度估计有十多米至二三十米^[46-50]。其中海螺沟冰川的雪线高度为 4 700~5 200 m,积累区广泛存在暖渗浸带,成冰深度约有十多米至二三十米^[46-51]。海螺沟冰川积累区的雪层多为当年积雪,平衡线之上大范围内存在附加冰带,一年成冰,垂直厚度约 400 m,上界超过海拔 5 300 m,不同于欧洲的温冰川^[23]。

5 结 语

成冰作用是从雪演化成冰的过程、机理和结果。

它受制于当时当地的水热平衡条件,影响冰川的物质平衡、温度状况、运动等物理特征,是冰川分类的主要依据之一。研究冰川的成冰作用可以揭示冰川的发育条件、形成过程和物理特征,可以作为冰川分类的依据;而且其空间上的变化又是冰川变化的一种反映,对气候变化具有很好的指示作用。中国境内冰川的成冰作用研究集中于 20 世纪 60~80 年代,主要集中在祁连山、天山、阿尔泰山、西昆仑山、喜马拉雅山、藏东南地区和横断山区等地区的冰川上。到目前为止,关于冰川成冰作用的研究已取得大量的研究成果,但因当时落后的工作条件和冰川区复杂的地形以及气象因素等的制约,致使研究者未能亲临研究地点,对某些冰川成冰作用的研究仅限于由登山运动员所提供的资料和对周围以及附近其它冰川的观测研究来进行推测和估计,因而存在一定的局限性和不确定性。近年来,随着气候变暖,冰川消融加剧,不同冰川区各冰川的成冰作用随之发生了很大变化。为此,对不同冰川区各冰川的成冰作用重新进行研究,探讨冰川成冰作用变化对气候变化的响应具有重要的理论意义和现实意义。此外,在进行冰川成冰作用研究时应尽可能的亲临研究地点挖取雪坑对雪层剖面进行层位观测,并运用相应的仪器设备测定各层的物理指标(颗粒形状、粒径、密度、自由含水量、温度和硬度等),提高冰川成冰作用研究的精度,进而弥补和纠正前人研究的空白、缺陷和不足。

参考文献 (References):

- [1] Shi Yafeng Huang Maohua Ren Binghui *et al* An Introduction to the Glaciers in China [M]. Beijing: Science Press, 1988: 55-57. [施雅风, 黄茂桓, 任炳辉, 等. 中国冰川概论 [M]. 北京: 科学出版社, 1988: 55-57.]
- [2] Kalesnik C U. An Introduction to Glaciology [M]. Lanzhou: Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, CAS, 1982: 13-17, 28-40. [C B 卡列斯尼克. 冰川学概论 [M]. 兰州: 中国科学院兰州冰川冻土研究所, 1982: 13-17, 28-40.]
- [3] Ш Умсий П. А. Основы структурного оледоветения [M]. Изд. АН СССР, Москва, 1955: 401-464.
- [4] Li Xiangying The present environmental processes of snow-ice on Glacier No. 1 at the Unm qi river head, Tianshan: a. Ice formation zones and stratigraphy profile; b. Seasonal variations and elution processes of pH and electrical conductivity [D]. Lanzhou: Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS, 2006: 1-5. [李向应. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川雪冰现代过程研究: a 成冰带与雪层剖面特征; b pH 值和电导率的季节变化和淋溶过程 [D]. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2006: 1-5.]

- [5] Xie Zichu Huang Maohuan Mi Aili *et al* An evolution of the snow fin layer and ice formation in the Glacier No 1 at the head waters of the Unumqi River Tianshan[C] // Studies of Glaciology and Hydrology in the Unumqi River Tianshan Mountains Beijing Science Press 1965: 1-14. [谢自楚, 黄茂恒, 米艾里, 等. 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.]
- [6] Qiu Jiaqi Expression and meanings of routine terms of snow—an introduction to terms and classes in avalanches charts[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology* 1986 8(1): 89-96 [仇家琪. 积雪常规术语的含义及其表达—介绍联合国教科文组织雪崩图集的术语和分类 [J]. 冰川冻土, 1986 8(1): 89-96.]
- [7] Li Xiangying Li Zhongqian 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 Unumqi River[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology* 2006 27(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 27(1): 37-44.]
- [8] Wang Feiteng Li Zhongqian You Xiaoni *et al* Studying on ice formation process of surface snow layer in accumulation area of Glacier No 1 at the Unumqi river head Tianshan Mts[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology* 2006 27(1): 45-53 [王飞腾, 李忠勤, 尤晓妮, 等. 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 27(1): 45-53.]
- [9] Qin Dahua Ren Jiaven Antarctic Glaciology[M]. Beijing Science Press 2001: 61-62 65-69 [秦大河, 任贾文. 南极冰川学 [M]. 北京: 科学出版社, 2001: 61-62 65-69.]
- [10] Benson C S Stratigraphic Studies in the Snow and Firn of Greenland Ice Sheet[R]. SIFPE Research Report 70 1962
- [11] Muller F. Zonation in the accumulation area of the glaciers of Axel Heiberg Island N.W.T. Canada[J]. *Journal of Glaciology* 1962 (4): 302-313
- [12] Shumsky P A. Principles of Structural Glaciology[M]. New York: Dover 1964
- [13] Paterson W S B. The Physics of Glaciers[M]. Beijing Science Press 1987 3-12 [W S B 佩特森. 冰川物理学 [M]. 北京: 科学出版社, 1987 3-12.]
- [14] Xie Zichu Huang Maohuan The Ice Formation of Glaciers in China[C] // Shi Yafeng *et al* The Overview of Glaciers in China Beijing Science Press 1988 55-68. [谢自楚, 黄茂恒. 中国冰川的成冰作用 [C] // 施雅风等著. 中国冰川概论. 北京: 科学出版社, 1988 55-68.]
- [15] Под ред. Котляков В. М. Гляциологический словарь [M]. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1984: 144-147.
- [16] Williams R S Jr Hall D K Benson C S. Analysis of glacier facies using satellite techniques[J]. *Journal of Glaciology* 1991 37 (125): 120-128.
- [17] Benson C S Stratigraphic studies in the snow and firn of the Greenland Ice Sheet[J]. *Folia Geographica Danica* 1961 9: 13-37
- [18] Langway C C. Stratigraphic analysis of a deep ice core from Greenland[R]. CRREL Research Report 1967
- [19] Shi Yafeng Xie Zichu General features of modern glaciers in China[J]. *Acta Geographica Sinica* 1964 30(3): 83-208. [施雅风, 谢自楚. 中国现代冰川的基本特征 [J]. 地理学报, 1964 30(3): 83-208.]
- [20] Шумский П. А. Цыкин Е. П. К вопросу гляциологической зональности, материалы гляциологических исследований, хроника, обсуждения, вын. 5[Z]. Москва: 1962
- [21] Li Jijun The distribution and characters of modern glaciers[C] // Tibetan Plateau Exploration Team, CAS Tibetan Glaciers Beijing Science Press 1986 6-36. [李吉均. 现代冰川的分布与性质 [C] // 中国科学院青藏高原综合科学考察队. 西藏冰川. 北京: 科学出版社, 1986 6-36.]
- [22] Цыкин Е. П. Приход вещества в фирновые и зонах ледников. № 8[M]. изд. АН СССР Москва 1962
- [23] Shi Aiping General features of Nakeduo Glacier No 7 in the north slope of Mt Xixiabangma and Haihougu Glacier in Gongga Mountains(master paper) [D]. Lanzhou Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute CAS 1992 42-45. [师爱平. 希峰北坡那克多拉 7 号冰川及贡嘎山海螺沟冰川的基本特征 [D]. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 1992 42-45.]
- [24] Xie Zichu Studies of ice formation and ice fabric on the Law Dome Antarctica[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology* 1984 6(1): 1-23 [谢自楚. 南极洛多姆冰帽的成冰作用和冰结构研究 [J]. 冰川冻土, 1984 6(1): 1-23.]
- [25] Dolgushin L D. Main Particularities of Glaciation of Central Asia AHS. No 54 1961.
- [26] Liu Zechun. Modern glaciers in Qilian mountains[C] // Friborium of Papers in National Geographical Meeting(physiognomy). Beijing Science Press 1960. [刘泽纯. 祁连山的现代冰川. 1960 年全国地理学术会议论文集(地貌). 北京: 科学出版社, 1960.]
- [27] Xie Zichu Wang Lihua Wu Guanghe *et al* The ice formation of glaciers in Qilian Mountains[C] // The collected publication of Lanzhou Institute of Glaciology and Cryopedology Academicia Sinica(No 5), 1985: 27-40. [谢自楚, 王立伦, 伍光和, 等. 祁连山冰川的成冰作用 [C] // 中国科学院冰川冻土所集刊(第 5 号), 1985: 27-40.]
- [28] The utilization and variations of glaciers in Qilian mountains [C] // The collected publication of Lanzhou Institute of Glaciology and Cryopedology Academicia Sinica(No 5). Beijing Science Press 1985 1-40 [祁连山冰川变化及利用 [C] // 中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊(第 5 号). 北京: 科学出版社, 1985 1-40.]
- [29] Wang Lihua Zhang Wenjing The Modern Glaciers in Tianshan Peaks Meteorology and Glaciers in Tianshan Peaks[M]. Unumqi Xinjiang People's Publishing House 1985 43-49 [王立伦, 张文敬. 托木尔峰地区的现代冰川. 托木尔峰地区的冰川与气象 [M]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 1985 43-49.]
- [30] Liu Chaohai Ding Liangfu A primary calculation of temperature

- and precipitation in Tianshan mountains, China[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology* 1988 10(2): 151-159 [刘潮海, 丁良福. 中国天山冰川区气温和降水的初步估算 [J]. 冰川冻土, 1988 10(2): 151-159]
- [31] Liu Chaohai Xie Zichu Djo P ePoB M B, *et al* Glacial action in Tianshan Mountains[M]. Beijing Science Press, 1996 96-115. [刘潮海, 谢自楚, M B 久尔盖诺夫, 等. 天山冰川作用 [M]. 北京: 科学出版社, 1996 96-115.]
- [32] Wang Xiaojun Zhang Jinhua The observations on accumulation and stratigraphy profiles on Glacier No. 1 at the Unmqi River head[C] // Annual report of Tianshan Glaciological Station Lanzhou Institute of Glaciology and Cryopedology Academia Sinica 1982 1: 11-21 [王晓军, 张金华. 乌鲁木齐河源 1 号冰川积雪区雪层剖面和积累量的观测 [C] // 天山冰川站年报. 中国科学院兰州冰川冻土研究所, 1982 1: 11-21.]
- [33] Wang Xiaojun Wang Zhongxiang Xie Zichu A Change trend of recent climatic on the Tianshan regions from the change of the past 28 years of the glacier No. 1 at the Unmqi river headwater Tianshan[J]. *Chinese Science Bulletin* 1988 (9): 693-696 [王晓军, 王仲祥, 谢自楚. 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 [J]. 科学通报, 1988 (9): 693-696]
- [34] Liu Chaohai Djo P ePoB M B. Study on processes of mass balance of Glacier No. 1 at the headwaters of Unmqi River Tianshan[C] // Annual Report of Tianshan Glaciological Station Lanzhou Institute of Glaciology and Cryopedology Academia Sinica 1989 (8): 1-23 [刘潮海, M B 久尔盖洛夫. 乌鲁木齐河源 1 号冰川物质平衡过程研究 [C] // 天山冰川站年报, 中国科学院兰州冰川冻土研究所, 1989 (8): 1-23.]
- [35] Han Tianding Liu Shiyin Ding Yongjian *et al* A characteristics mass balance of Glacier No. 1 at the headwaters of the Unmqi river Tianshan mountain[J]. *Advances in Earth Science* 2005 20(3): 298-303. [韩添丁, 刘时银, 丁永建, 等. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川物质平衡特征研究 [J]. 地球科学进展, 2005 20(3): 298-303.]
- [36] You Xiaoni Li Zhongqin Wang Feiteng Study on Time Scale of Snow-Ice transformation through Snow Layer tracing method—Take Glacier No. 1 at the Headwaters of Unmqi river as an Example[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology* 2005 27(6): 853-860 [尤晓妮, 李忠勤, 王飞腾. 利用雪层层位跟踪法研究暖型成冰作用的年限问题——以乌鲁木齐河源 1 号冰川为例 [J]. 冰川冻土, 2005 27(6): 853-860]
- [37] Li Zhongqin A Glacier Melt Water Pool Was Discovered at Summit of East Branch of Glacier No. 1 at Unmqi River Head Tianshan Mts, Xinjiang[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]
- [38] Xie Zichu Wu Guanghe Wang Zhongxiang *et al* The ice formation of north slope of Bogeda peaks Tianshan[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology* 1983 5(3): 37-46 [谢自楚, 伍光和, 王仲祥, 等. 天山博格达峰北坡的成冰作用 [J]. 冰川冻土, 1983 5(3): 37-46]
- [39] Wang Zongtai Shao Wenzhang Zhang Jinhua The characteristics of Heigou No. 8 glacier in south slope of Bogeda Mountains[Z]. 1986. [王宗太, 邵文章, 张金华. 博格达山南坡黑沟 8 号冰川的某些特征 [Z]. 1986]
- [40] Li Xiangying Ding Yongjian Liu Shiyin *et al* Primary Study of Stratigraphy Profiles and pH and electrical conductivity in Snow pits on Miaoengou Flat Topped Glacier Hami and Glacier No. 51 at Haxilegen of the Kuytun river Tianshan[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology* 2007 [李向应, 丁永建, 刘时银, 等. 天山哈密庙儿沟平顶冰川和奎屯河哈希勒根 51 号冰川雪层剖面及雪坑中 pH 值和电导率的初步研究 [J]. 冰川冻土, 2007 (已接收).]
- [41] Wang Lihua Liu Chaohai Kang Xingcheng *et al* Fundamental features of modern glaciers in the Altay Shan of China[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology* 1983 5(4): 27-38 [王立伦, 刘潮海, 康兴成, 等. 我国阿尔泰山现代冰川的基本特征 [J]. 冰川冻土, 1983 5(4): 27-38.]
- [42] Xie Zichu Snow and ice formation in north slope of Xixiabangna peak[C] // Exploration Reports of Xixiabangna Area Beijing Science Press 1982 45-59 [谢自楚. 希夏邦马峰北坡的积雪和成冰作用 [C] // 希夏邦马峰地区科学考察报告. 北京: 科学出版社, 1982 45-59.]
- [43] Shi Yafeng Ji Zixiu The distribution and types of modern glaciers in Xixiabangna area[C] // Exploration Reports of Xixiabangna Area Beijing Science Press 1982 24-39 [施雅风, 季子修. 希夏邦马峰地区现代冰川的分布和形态类型 [C] // 希夏邦马峰地区科学考察报告. 北京: 科学出版社, 1982 24-39]
- [44] Xie Zichu Wang Zongtai Ice formation of glaciers in north slope of Everest area[C] // Exploration Report of Everest Area (1966-1968). Beijing Science Press 1975 8-25. [谢自楚, 王宗太. 珠穆朗玛峰地区北坡成冰作用 [C] // 珠穆朗玛峰地区科学考察报告 (1966-1968). 北京: 科学出版社, 1975 8-25.]
- [45] Zhang Wenjing Xie Zichu New data and variations of some glaciers in the southern Tibetan[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology* 1981 3(4): 61-64 [张文敬, 谢自楚. 西藏南部某些冰川近年来的变化及若干新资料 [J]. 冰川冻土, 1981 3(4): 61-64]
- [46] Xie Zichu Zheng Benxing Li Jijun *et al* The variations characteristics and distribution of glaciers in China[C] // Collected Publication of Glaciology and Geocryology Meeting (Glaciology). Beijing Science Press 1982 1-13. [谢自楚, 郑本兴, 李吉均, 等. 中国冰川的分布、特征及变化 [C] // 中国地理学会冰川冻土学术会议论文选集 (冰川学). 北京: 科学出版社, 1982 1-13.]
- [47] Yao Tandong Pu Jianchen Wang Ninglian *et al* A new type of ice formation zone found in the Hailuoguo[J]. *Chinese Science Bulletin* 1998 43(1): 94-97 [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.]
- [48] Kang Shichang Qin Dahe Ren Jiawen *et al* New knowledge of transformation of snow to ice in the east Rongbuk glacier northern slope of mount Qomolangma (Everest) [J]. *Scientia Geographica*

- Sinica* 2005 25(4): 415-419. [康世昌, 秦大河, 任贾文, 等. 珠穆朗玛峰北坡东绒布冰川成冰作用的新认识 [J]. 地理科学, 2005 25(4): 415-419.]
- [49] The Exploration Teams of Tibetan Plateau Academia Sinica Hengduan Mountains [M]. Beijing Science Press 1996 1-26. [中国科学院青藏高原综合科学考察队. 横断山冰川 [M]. 北京: 科学出版社, 1996 1-26.]
- [50] Su Zhen Wang Lihui Pu Jianhua *et al* The primary study of basic characteristics of modern glaciers in Hengduan Mountains [C] // Collected Publication of Glaciology Meeting (Glaciology), Lanzhou Gansu People's Publishing House 1987 96-103. [苏珍, 王立伦, 蒲建辰, 等. 横断山现代冰川基本特征的初步研究 [C] // 中国地理学会第二届全国冰川学术会议论文选集 (冰川学), 兰州: 甘肃人民出版社, 1987 96-103.]
- [51] Li Jijun *et al* The investigation of glaciers in Gonggashan [C] // The Exploration Team of Tibetan Plateau Academia Sinica Research on Tibetan Plateau Special Volume of Hengduan Mountains (1) [M]. Kunming Yunnan People's Publishing House 1983 140-153. [李吉均, 等. 贡嘎山冰川考察 [C] // 中国科学院青藏高原综合科学考察队编. 青藏高原研究, 横断山专集 (一). 昆明: 云南人民出版社, 1983 140-153.]

Progresses in the Ice Formation Process on Glaciers in China

LIXiang-yin^{1, 2}, DING Yong-jian¹, LIU Shi-yin^{2, 3}

(1 Hydrology and Ecology Laboratory of Watershed Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute CAS, Lanzhou 730000 China; 2 Key Laboratory of Cryosphere and Environment Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute CAS, Lanzhou 730000 China; 3 Institute of Tibetan Plateau Research CAS Beijing 100085 China)

Abstract Glacier derived from accumulated snow and characterized by movement and certain size to some extent is one of the most sensitive indicators to climate. Ice formation processes include the process mechanism and results of snow to ice transformation. Ice formation process can indicate the growth conditions, formation processes, physical characteristics of glacier and so on; spatial variations of ice formation process can also reflect glacier change and can indicate climate change. First study of ice formation process on glacier in China was performed in 1962 when Xie Zichu *et al*, studied the ice formation process on Glacier No. 1 at the Urumqi river head Tianshan mountain and subsequently scholars studied the ice formation process on glacier in Qilian mountain and so on. With the development of studying on ice formation process the conception of ice formation process with China's features comes into being. This paper reviewed the development process of ice formation zones and its further development in China and the study results of ice formation process on glaciers in China after the 1960s and these studies mainly focused on Qilian mountain, Tianshan mountain, Altay mountain, West Kunlun mountain, Himalaya mountain, South-East Tibetan and Hengduan mountains, and the prospects of the development and significance of ice formation process studies, the limitation and deficiency of previous studies and the watchful aspects in future studies all have been put forward at the end of the paper.

Key words Ice formation process; Glaciers; China