

中天山冰冻圈 地貌过程与沉积特征

崔之久 熊黑钢 刘耕年 朱 诚 易朝路 著



河北科学技术出版社

责任编辑 李向海 封面设计 寇 菁



Landform Processes and Sedimentary Features on the Cryosphere of the Central Tianshan

ISBN 7-5375-1725-8



9 787537 517256 >

ISBN 7-5375-1725-8/P • 42 定价:32.00 元(平装)

P

中天山冰冻圈 地貌过程与沉积特征

崔之久 熊黑钢 刘耕年 朱 诚 易朝路 著

国家自然科学基金委员会

高等学校博士学科点专项科研基金 资助项目

中国科学院天山冰川观测研究站基金

河北科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

中天山冰冻圈地貌过程与沉积特征/崔之久等著. —石家庄:河北科学技术出版社,1998
ISBN 7-5375-1725-8

I. 中… II. 崔… III. 冰川-地貌学-天山 N. P942.076

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 29924 号

中天山冰冻圈地貌过程与沉积特征

崔之久 熊黑钢 刘耕年 朱 诚 易朝路 著

河北科学技术出版社出版发行(石家庄市和平西路新文里 8 号)

河北新华印刷一厂印刷 新华书店经销

787×1092 1/16 20.75 印张 10 插页 500 000 字 1998 年 12 月第 1 版

1998 年 12 月第 1 次印刷 印数:1 1 000 定价:32.00 元(平装)

内 容 介 绍

本书是作者对我国境内天山山脉中段冰冻圈地貌进行长期研究的总结，是一部研究天山冰缘、冰川地貌发育过程与沉积相特征的科学专著。

冰缘方面包括从寒冻风化到块体运动等地貌和沉积全过程，重点是对石冰川的研究（第四章）；冰川方面包括从基本特性、侵蚀地貌到沉积全过程，重点是对冰蚀地貌动力机制（第七章）、冰碛沉积宏观和微观特征（第八、九章）的研究；最后是对山地自然灾害发生、发展与防治的全面评说（第十章）。

本书可供地貌、地质、自然地理、沉积学等专业人员以及区域规划、铁路、公路、旅游、水利、防灾等建设部门参考。

Introduction

This dissertation mainly discusses glacial-geomorphic process and formative mechanism in modern-glacier area. From various glacial-vestiges, we can probe into geological-geomorphic function at glacial base, understand the condition of ice-rock interface and build up the dynamic model of glacial sole cooperated with research of modern glacier. The main conclusions are as follows:

1. At the across sections of glacial sills and troughs, the density of striations increases gradually from the side to the centre. The turning place from the glacial trough wall to base is a sudden changing point at which the striation-density changes from small to big, which show the enhancement of abrasive streng then constrantly. The distribution of glacial-erosion traces on the roche moutonnee has fairregularity, that is to say the long-straight striations were often formed on the top of stoss side and the crescentic scars, crescentic wedges, chatter marks and shorted striations on the end of stoss side and striations of many groups on the flanks, which can show the condition of glacial division-flow. The statistics of cracked density on roche moutonnee reflect the very strong plucking function on the lee side of its longitudinal profile with high density, width, depth of crack, the striations developed very well on the stoss side of it. The vertical profile of lee side can divided into extrusive broken zone, strong shear-broken zone and weak extrusion shear zone from the top to bottom.

2. The distributive law of roche moutonnee and whale back form is controlled by ice temperature and dynamic process at glacial bottom. In the space, the whale back form is distributed in the centre of trough base, which is the abrasive zone and has high ice-temperature, quick ice-velocity and strong ice-plasticity. So the developmental degree of whaleback form is the sign of erosive landform by which we can judge whether the temperature of ice sole is at pressure melt point or not in an early period. On the contrary, some positions of roche moutonnee are not at the pressure melt point, and the temperature of ice base has cold and temperate alternately. They belong to the pluck-abrasion zone. In addition, the specific position of roche moutonnee is related with the local climate, structure and relationship between the primary trough and tributaory trough.

3. The distributive change of the dynamic process of glacial based decide for the feature, distributive law of basilar glacial-erosion landform and the longitudinal section and cross section of glacial troughs. From the both sides of a trough cross-section to the centre of the ice temperature increase gradually. According to this change the cross section can be divided into four zone, including weather zone, plucking zone, pluck-abrasion (roche mou-

tonnee zone) and abrasion (whale back zone) zone. At the longitudinal profile the extension-flow and compressed flow emerge alternately and it is composed of weather-pluck zone, abrasion zone and plucking zone. Because the different glacial landforms and deposits reflect the different types of valley glaciers, base temperature, the scale of dynamic process and erosive intensity, we suggest a primary criterion which can infer different types of glaciers, so we can rebuild ancient climate.

4. Dynamic processes in glacial environment are various and complex. Generally the squeezed-abrasion impetus develops at the glacial sole and slope-processes occur at the other places. The former can really represent the essence of glacial dynamic process. In all processes of landform (erosion, transport and sedimentation), the sedimentary process controls the structure, stratigraphic succession, fabric and facies model of till.

5. The transported till is a solid debris flow. Most of its sedimentary structure, such as indining-layer structure, beited structure, surface structure, thin-bed deformed structure, pressed-fold structure, and overlapped structure, are related to the roll of slope scraps and to the glacial pressure. The sedimentary process of debris flow which has fundamental dynamic mechanism of flowing and creeping formed mainly various flowing structures, such as half-ring flowline structure, divided-flowing structure, bag-shaped flowing structure, load-structure, multiple-layered structure, washed gravel bed and lens-soiled-bed structure. All of these structure have the significance of facies. In a word, the debris flow deposit is marked by flowing structure while the till is characterized by pressed structures.

6. Based on field observation and statistical analysis of the textural, structural grain size and stratigraphic relationship data of the profiles, we found that the facies model of till includes subglacier-melt-out till and lodgement till. Their own layered-sequence structure in the facies model is decided by their all processes of dynamics. The vertical layered succession in the facies is not random. On the contrary, it is formed by the pattern of forecast and mutually combination. From this we can reconstruct detailed pattern of mutual impact and connection subcircumstance. These facies models are fundamental by which we can interpret its forming environment and sedimentary process.

As for the definition "periglacial region", this book agrees with A. L. Washburn's opinion (see Washburn's "Geocryology", 1979, pp. 4), that is, "the term periglacial designates primarily terrestrial, non-glacial processes and features of cold climates characterized by intense frostaction, regardless of age or proximity to glaciers".

It is worth notice that since 1986 the 21st Congress of ICSU (International Committee of Scientific Union) founded the IGCP (International Geosphere-Biosphere Programme), the "Global Change" has become a kind of world front science. The scientific destination of the IGBP especially emphasizes to study the following problems, that is, their research time scale from several decades to several hundreds, the most important influence to the biosphere, they are the most susceptible to human activities, they can practise to make the forecast to the global and the large scale environmental changes. For the global change re-

search, its "Core Project", for example, GCTE (Terrestrial Geosystem), PAGES (Past Global Change) and its "Framework Activities" (including "Regional Data & Information" and "Analysis & Modelling") which all have close relationship with periglacial research. It is not only decided by periglacial region has a larger area which occupies the global land area more than 20%, what is more, on fact periglacial regions one of the most susceptible region to climate and human activities on the land, there are an abundant resources and energy sources like forest, grassland, mineral products and water et al. in periglacial region, it has an very important significance to tap the natural resources and energy sources for the middle and high latitudinal countries, on the other hand, since periglacial region has particular permafrost environment and landform fast changing features by frost and thawing actions, so it makes the periglacial region to form an frail ecological region which is most susceptible to climate change and human activities, and its nature environment is very easy to be destroyed but recovery is very difficult.

Just because periglacial region has the special features of the landform fast change and frail ecological environment, so that the periglacial region has become one of the most important research objects for global change now. Since 1990's, not only the International Permafrost Association (IPA) established the Working Group on Present Global Change and permafrost, but also, some developed countries with larger periglacial area like Canada, USA, Russia, Switzerland, France and European as American developed countries have paid more attention to further streng then the exchange of observation data and study results among each country and region based upon fixed system observation to periglacial processes in 1980's. Therefore, the exchange has provided plentiful data and information for "Framework Activities" to large scale background of global change, it has made the global changing research to continuously obtain break throughs in study of periglacial and ice-snow cryosphere, so that the study has also laid an essential foundation for numeral model simulation to modern surficial changing processes and coupling of earth-atmosphere system and human-earth relationship in global scale.

Based upon the starting point that is theory and productive practice to combine and promote Chinese periglacial research to make progress, since 1985, the authors and domestic colleagues have established many fixed-position points for observation periglacial landform processes in the Central Tianshan (China), The Changbaishan (China), The Daxinganling Mountains (China) and the Antarctic Great Wall Station area (Filds Peninsula, King George Island). By using such means like repeated fixed-position survey, blast pilting combined with thermometry sampling, resistivity sounding, debris fabric, lichenometry, airphoto analysis and computer data processing et al., the frost weathering rates of periglacial tors and bedrock cracks, the moving rates of talus, block slopes and gelifluction lobes (terraces), the changing rates and the geneses of stone circle, sorted stripes and nets, rock glacier, thermokarst and frost heaved mounds have been obtained in recent decades. Based upon the above research, the authors further investigated the mountain periglacial zone of

the Andes in the South American, and comprehensively collected and absorbed the recent information about the global periglacial landform distribution, periglacial processes intensity and their relationship with climate. Thus, it makes it to objectively reveal the inner relationship among geographical position, periglacial landform types, periglacial process intensity and climatic types. Just so, the above study results provide evidence and data for constructing and maintaining the highway in domestic cold region, these works not only take a great step forward based upon the former colleagues' research foundation, but also, guide the Chinese periglacial study from local part to regional comparison, from static to dynamic state, from qualitative to quantitative analysis, from surfacial analysis to fixed observation, from outer shape to inner process and forming mechanism inquiry. Therefore these works forcefully promote the Chinese periglacial study to joint track with the present international front science-global change research. It should be pointed out, in the authors' periglacial research in recent years, especially the work in the Central Tianshan is the most meticulous, of course, the success would have been impossible if no energetically supports and co-operations from the following domestic and foreign colleagues and specialists.

In the authors' periglacial studying works in the Central Tianshan recent decades, Academician Shi Yafeng repeatedly listens to the authors' working report, and put forward some very kind concrete suggestions. The leaders of Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, Tianshan Glacial Station of Academia sinica-Professor Chen Guodong XieZichu and Professor Kang Ersi et al. provide a large number of precious manpower and material support. Professor A. L. Washburn, the former chief of the American Quaternary Research Centre gave the authors' earnest guide and help in his visit to China and in his letters. Professor W. Haeberli from Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology, Federal Institute of Technology (ETH), Zurich, Switzerland, provided his important data and information about the Alps rock glacier research and did profitable academic exchanges with the authors in his letters. Professor S. A. Harris from Department of Geography, University of Calgary, Alberta, Canada, exchanged precious experience with the authors about mountain periglacial zone research in his visit to China. Professor P. E. Calkin from department of Geology, New York State University, Buffalo, U. S. A, exchanged important lichenometry information in his letters. When the book is published, the authors are indebted to above colleagues and specialists for their help.

by Cui zhijiu etc.

June 30, 1997

序 言

《中天山冰冻圈地貌过程与沉积特征》一书，系北京大学博士生导师崔之久教授及其研究生近 20 年辛勤劳动的结晶，是一部研究天山冰缘、冰川地貌发育过程与沉积相特征的力作。它标志着我国在这个研究领域，已由单纯的现象描述转入形成过程与机制研究，从定性分析转向定量量测，从宏观研究进入微观研究的良好开端，使这个研究领域跃上新的台阶，给人以面目一新之感。

全书资料丰富，叙述翔实可信，观测深入细致，行文自然流畅。它不仅对促进我国冰缘、冰川地貌学迅速发展有重要的理论意义，而且对地貌学的其他研究领域亦有相当的借鉴作用。书中附有大量的照片和插图，读者可以看到许多前所未见、闻所未闻的有趣的自然现象。应该说，这是我国冰缘、冰川地貌与沉积研究方面一部十分出色的专著。

（原中国科学院兰州冰川冻土研究所学委会主任、研究员）

张祥松

自序

冰冻圈是指地球表层年均温在 0°C 或 -2°C 以下（视不同区域而异，也有人认为每年至少部分时间在 0°C 以下）、水主要以冰的方式贮存于地表或地下的圈层（如积雪、冰川、河湖海冰、地下冰等）。冰冻圈是水圈的组成部分，具有形成永久积雪、出现雪线和形成冰川以及多年冻土等特殊的地貌过程。

在此谈一点对冰冻圈地貌过程研究的体会，请同行指正。

国际上研究冰冻圈地貌过程和沉积的人多少不一。一般而言，前者多，后者少。作为前者仅研究冰川地貌或冰缘地貌的人多。对两者同时进行研究也就是以冰冻圈地貌过程作为统一研究对象的人少。此外，作为沉积学者专门研究冰川沉积的大有人在，但多以研究大陆冰盖和冰水沉积为主，且达到相当的深度和广度，鲜有专门研究冰缘沉积者。作者从一开始从事此项研究时就认识到冰川冰缘地貌过程与沉积是一个整体，是一个统一的系统，故对冰川冰缘地貌与沉积之研究始终并行不悖。不能说作者的研究在各个方面都可与国际同行们媲美，但作者在以冰冻圈地貌是一统一整体的思想指导下进行研究时确实体会到一些其他人所没有得到的认识。

一、冰川冰缘作用的时间分异

人们早就认识到冰川具有超强的侵蚀能力（当然是限定在一定地区）。在冰期，当全球冰川覆盖范围达到陆地面积的 30% 时，它在全球地貌作用的规模是可以想见的。目前，北美北部和北欧宏观上到处可见的浑圆的山峰和缓起伏的丘陵都是它的遗留。而给人深刻印象的尖峰和深宽槽谷也只是在局部外围地区因冰退一抬升一下切的最新过程中才形成的。但与此同时人们很少强调冰川外围地区（即冰缘地区）由寒冻风化—冻融（蠕流）作用所造成的高夷平作用（altiplanation）。事实上其规模和强度要大得多。有对此怀疑者只要去青藏高原和加拿大北部、西伯利亚等地区看一下就会明白，现代冰川作用已所剩无几，而冰缘—夷平作用却广泛而持久地进行着。似乎可以眼看着一座座山峰丘陵在寒冻—冻融作用下很快地被剥蚀而降低高度，而盆地则同时被很快地填平。当冰期时冰缘区的面积也曾占据陆地面积的 30% 以上，它总是比冰川区大。此外，地球上陆地面积进入冰缘环境比进入冰川环境的时间要长好多倍。它理所当然地占据着冰川出现前的一段时间，也就是说一个地区进入冰期时，先有冰缘环境而后才有冰川环境。冰期时冰川扩展，冰缘区也同样扩展，间冰期时冰川退出的地区又成为冰缘环境（视气候环境不同而有不同幅度）。故在时间上一次冰期在某地只有一次冰川作用，却可以有三次冰缘过程，时间可以是前者的三倍以上。这种关系在天山望峰道班剖面有清晰的显示。该剖面共有四层，基座是石英片岩；往上是末次间冰期的冲积砾石层，厚 10 余米；中部是末次间冰期来临的序幕——冰缘坡积（厚 30 余米）及末次冰期望峰冰砾层，厚 40 米；顶部为冰后期至现代的冰缘坡积层。显示了末次冰期时完整的冰缘沉积旋回。

二、冰川冰缘作用的区域与环境分异

现今的青藏高原和西伯利亚，因为是大陆性气候区，它们在第四纪期间始终是以冰缘作用为主，尽管山地上部有过不同规模的冰川作用。又如在北美和北欧，由于是海洋性气候占优势，冰期时曾发育大规模冰盖。外围的冰缘环境虽受海洋性气候制约，但也有小规模扩展。中天山山地地处大陆性气候区，按作者所作中国冰缘区划，大部分属过渡性冰缘区（崔之久，1981），即既有相当的冰川作用强度也有较丰富的冰缘作用类型。读者在本书中当可看到这一特点。

作者在研究中国冰冻圈地貌特点时认识到大陆性气候类型区冰川温度低（ -5°C 以下），雪线温度也低（ -10°C 以下）（崔之久，1981）。故从垂直带看冰川区以下有大幅度的冻土和冰缘区（垂直幅度1000m以上），冰缘过程强烈而多样，如青藏高原北部。相反，在海洋性气候类型区，冰川温度高（ -0.2°C 左右），雪线温度也高（ $-2^{\circ}\text{C}\sim 3^{\circ}\text{C}$ 左右）。雪线以下留给冻土和冰缘作用的空间几乎没有或很窄，故冰缘过程很弱，类型也少。在一定程度上讲，愈是大陆性气候对冰缘过程愈有利，但对冰川过程愈不利；而愈是海洋性气候对冰川过程愈有利，而对冻土和冰缘过程愈不利。何以要加一句“在一定程度上讲”？因为从理论上讲，在极端寒冷和干燥的气候下，地表以下皆缺少水分，冻土将演变为寒土，冰缘过程由于无冻融作用也将自动停止。天山最东端的哈尔里克山处在中国干旱中心区，其冰缘过程就远较中天山弱而且类型单调，可能即显示出前述规律。故中天山是一典型的二者得兼的地区。

三、寒冻风化（雪蚀作用）是主导营力

就冰冻圈地貌过程而言，在此可以不用习惯上的冰川地貌和冰缘地貌的体系来讨论（有时为表达简捷起见，仍用此术语），因为两者不是同一性质的概念。冰川地貌既具有一定地域的概念，也具有其单一外营力过程的概念。冰缘则仅具有一定区域的概念，然而却包含了多种外营力过程，如寒冻风化、冻胀、雪蚀、冻融（蠕流）、热融（塌陷）以及风和流水作用等。因此，若把冰冻圈作为统一体来考察，则其地貌过程可依次归纳为寒冻风化作用、冻融蠕流作用、冰川作用（滑动与拔蚀）、冻胀作用、热融作用等。风和流水作用虽在冰冻圈也有一些特点，在此也略有涉及，但不拟作专门讨论。本书也正是按上述原则安排章节的。寒冻风化过程，包括碎屑形成脱离母岩并经重力和冰川搬运，是冰冻圈最重要的地貌营力之一，也是其他地貌过程的先导。其剥蚀夷平作用体现在山体内部高处，则是形成山地顶部的角峰和刃脊及山坡坡地—冰斗后壁。而以前许多人把角峰、刃脊、冰斗后壁等的形成都归功于冰川作用，这是一种极大的误解，是需要正名的。充其量也只能说冰川仅作为搬运工具，帮助寒冻风化塑造了此类地貌。因真正的冰川地貌仅限于冰斗和槽谷底部或大陆冰盖中心区面状、线状侵蚀部分。而上述各类地貌从未被冰川冰直接接触过，它们对冰川而言只是冰川未能剥蚀掉的剩余部分。也许勉强可以说它是一种“被动的”冰川地貌，但却实在是“主动的”寒冻风化地貌，就像人们公认的冰缘岩柱（tor）地貌一样。此外还应注意，寒冻风化作用占据了冰冻圈的最大空间。它可以作用在冰川作用上限（uplimit of glaciation）以上，也可以在其以下。就现在地球最高山地珠穆朗玛峰而言，8700m高度上仍可见到相当丰富的寒冻风化碎屑（崔之久，1981），故可以说它在现在地球上是没有上限的。寒冻风化—雪蚀作用是名副其实的冰冻圈地貌过程的“起搏器”，从本书第七章“冰川侵蚀地貌及其动力机制”一章中，读者可以看到，所述冰斗或粒雪盆后壁之后退不仅仅

是造成冰斗的主因之一，它也是整个冰川槽谷溯源延伸的主力，是作者提出的槽谷“溯源延伸-冰舌侵蚀”演化模式中的主角。因为“冰舌侵蚀”在间冰期到来后已大大削弱或停止，而冰斗的溯源作用可一直进行到冰川全部消亡为止。这就纠正了以前讨论槽谷演化时只注意横剖面从V型变成U型的片面倾向，启发我们从三维的角度来认识槽谷的演化过程（崔之久，1981a、b）。当然，作为地貌外营力之一，寒冻风化等的地貌作用似乎有些“抽象”，它不如冰川作用那么“具体”。冰川具有强大而具体的剥蚀和搬运力量，一方面形成冰斗、槽谷、冰坎、冰盆、羊背石、鲸背岩等，一方面又形成大规模的堆积。而寒冻风化、冻融蠕流、热融滑塌、沉陷等空间范围虽然大，但其本身直接的侵蚀和剥蚀作用有时仅明显地局限于当地。

冰川和一系列因寒冻风化、冻融蠕流作用而形成的石冰川、泥流舌、泥流席（gelifluction sheet）等都呈舌状或饼状（如大陆冰盖和泥流席），这一点从形态上看也是很有趣的。当大陆冰盖在高纬区呈舌状或饼状时，冻融蠕流的形成物——泥流席也呈盾状或饼状，面积都很大。当高度地带的山地区出现舌状冰川时，也就伴随着由冻融蠕流而形成的舌状石冰川和泥流舌等，面积都很小。这些当然都是受宏观气候和具体的地形条件所控制的。此外，作为特殊类型的冻胀作用及其所形成的地貌如冰丘、泥炭丘、冻胀丘和在中天山可以见到的冻疤以及各种各样的成型土（pattern grounds）则基本上都是就地形成和消亡，不存在显著的剥蚀、搬运和堆积作用。

四、冰川谷纵、横剖面动力地貌模式及其环境涵义

当然，在槽谷纵剖面演化的“溯源延伸-冰舌侵蚀”模式中，我们通过对天山的多年观测认识到冰舌前进的地貌过程也是极重要的。强大的冰川磨蚀-拔蚀作用不仅造成一系列冰坎、冰盆、羊背石、鲸背岩，同时还发现槽谷横断面上各类冰蚀地貌和冰川动力过程的分带规律，即谷地中心部位是磨蚀作用带，相应的地貌以鲸背岩为主；槽谷两侧近谷肩部位是拔蚀带，基岩受冻结-拔蚀作用而被撕裂并进入冰体；在上两带之间为磨蚀-拔蚀带，即羊背石分布区。冰川动力机制的横向分异主要受冰川物理性质控制。冰川主流线上，冰川厚度大，冰温稍高，易达到压力熔点，故磨蚀占据优势。即使在大陆性冰川的天山，也无例外。当然，从冰川纵剖面上看，还是在基岩突起（如羊背石）的迎冰面应力集中带上容易达到压力熔点。而在背冰面应力释放带上肯定存在再冻结即复冰作用。1号冰川冰洞中和末端出露的厚达1米、富含碎屑的复冰层就是证据。在冰川两侧近崖壁处，冰川薄，压力小，且富含碎屑，受气温影响大，冰川温度低而变化大，不存在压力熔点，故易冻结。而在前两者的过渡地带，则遵循迎冰面压融背冰面再冻结的规律，多形成羊背石。可见，冰川底部运动机制和地貌特征与分布构成一个统一的体系。同时，以天山1号冰川谷为例，其现代冰川性质为亚大陆性，而谷地内的象征冰川磨蚀作用的地貌发育程度却表明颇具海洋性冰川特征。这启示我们设想，1号冰川内部或底部还保留着某些表征过去较为近海洋性气候的特点，显示冰川性质具有二重性。

五、冰碛物与其他混杂堆积（diamiction）的成因判别

无论从宏观或微观看，冰碛物（指冰体内碎屑直接融出沉积而未经水体改造的冰碛）的各种亚相如冰上融出碛、冰下融出碛等冰碛沉积主体的沉积动力是坠落、滚动和滑动，多数具有坡积和崩塌的过程及类似的同生或准同生沉积构造，如斜层构造等。而滞积因遭受后期冰体的推挤、侧压、上压和剪切等则表现为特别致密，具有一系列准同生结构，如平

行易裂面和直立裂面等。融出碛在遭受后期冰川挤压后也会产生后生构造如剪裂面、同生的斜层构造变形或褶曲构造等。相应的在砾石组构上也有反映,如各种冰川前进路上的障碍物迎冰面上有良好的叠瓦构造,ab面倾向上游。其他部位则没有。滞积中ab面多平行地面,倾角小,但倾向优势方位不明显。可以说,冰碛物是一种在沉积结构构造上完全不反映冰川本身动力特征的沉积物,和流水及风沙沉积构造全面反映各自运动特征有完全不同的内在特性。但惟有两点例外:其一,滞积物中砾石A轴因流动所致多平行冰川流向(故冰川擦痕绝大多数平行于A轴);其二,以小型透镜状产出的流碛实为冰面小股泥石流的产物,与泥石流沉积在本质上并无二致。它们虽反映了冰川和冰面达到液限的流体的流动特征,但不占主导地位。也正因为如此,利用冰碛物的一系列结构构造特征,与以流动为主、并在沉积构造中充分体现其动力特征的泥石流沉积区分开来。如流线构造、石线构造(皆空间排列)普遍的ab面倾向上游并呈较高角度($>20^\circ$)倾斜的叠瓦构造。少量擦痕平行于C轴(因滚动所致)。利用同样的道理并遵循多指标和环境-成因原则,冰碛物也可以与其他混杂堆积或混杂岩(崩塌、滑坡堆积、坡积、蚀余堆积等)区别开来(崔之久,1988)。

六、冰冻圈、全球变化、环境与灾害治理

就冰冻圈与全球变化的关系而言,由于它对全球变化的敏感性已成为当前研究的热点。联合国政府间气候变化委员会(IGCP)的年度报告每次都把冰冻圈对全球变化的响应材料放在第一位。应该承认,冰川的高度和厚度变化反映最明显而易见,而冻土和各类冰缘地貌的变化则隐秘得多。然而,从一定的时间尺度(如几十年)看,其变化也是显而易见的,只是需要经过某些特定的现场观测方可提高精度。而从更长的时间尺度(10^2 年、 10^3 年、 10^4 年)看,各种冰缘过程由于其分布范围较冰川大,作用时间长,很多遗迹被埋于地下而易于保存,且又多分布在人类较易活动的地区,故更能在全球变化特别是过去全球变化(pages)的研究中发挥特殊作用(崔之久,1981)。

地球上的高山高原地区随着人类经济活动的扩大已不像从前那样好像离我们很远。由于道路、工矿、国防以及旅游业的发展,冰冻圈灾害性地貌现象如风吹雪、雪崩、冰崩、冰川泥石流等已形成的灾害链,日益引起人们的重视。它们在成因上互相联系,在空间上交叉出现,在时间上互相更替,这一切都显示出必须把冰冻圈视为一个整体,从流域体系、区域特征、时空耦合等系统论观点出发从事灾害研究和防治才能事半功倍。就事论事的单纯治理,效果是不好的。

此书恰逢1998年出版,谨以它献给北京大学建校100周年。

崔之久

1997.6.30. 燕园

前 言

尽管作者提出把冰冻圈作为统一的整体进行地貌与沉积的研究作为本书的主导思想，但由于国际上迄今为止仍然是分别对冰川地貌与沉积以及冰缘地貌进行单独研究为主，因而在谈到国际研究现状和历史时也只能仍分别叙述之。

冰川是大自然的固体水库。第四纪冰期最盛时，冰川所覆盖的范围达 $44 \times 10^6 \text{km}^2$ ，占陆地面积的 29% (R. F. Flint, 1971)。世界上现代冰川主要分布在两极和一些高山地区，冰川面积约 $15 \times 10^6 \text{km}^2$ ，约占陆地面积的 10%。地球上 4/5 的淡水资源集中在冰川上。人类进行的各种政治、经济和社会活动都离不开水。随着人口增长、技术进步和生活水平的提高，人类对水的需求猛增。许多地方已出现了水的危机。经济、合理地使用水和开辟新的水源已成为全球所关心的问题。因此，对冰川的开发和利用尤其在干旱和半干旱地区意义十分重大。冰川和冰水沉积物对水文地质和工程地质性质影响很大，在地下水的寻找、大型工程建设等方面都必须充分研究其特点。冰川作用对生物演化、古人类进化、古气候、第四纪地层以及地貌形态都有很大的影响。冰川研究人员对古冰川及现代冰川的研究在第四纪地质史的研究中均具有重要的地位。

虽然人类对冰、冰川及其所塑造的地貌早已有了大量的记载，但这些记录大多是零碎的和无联系的，缺乏深入的系统观测、研究。1837 年阿加西 (Agassin) 在瑞士自然历史学会上提出第一个冰川学说 (glacial theory) 即大冰期的概念，是冰川学创建初期的大事件。早期魏列茨 (Venetz) 和阿加西提出的第四纪时期阿尔卑斯冰川曾大规模地扩展，欧洲也被冰川覆盖的观点受到反对和冷遇。其后托列尔 (Torell)、奥托 (Otto) 等科学家对冰岛、西斯匹次卑尔根、格陵兰等处现代冰盖和欧洲冰川遗迹进行了详细研究，证实了第四纪时期欧洲大部分地区都存在过大规模的冰川活动。这一观点才逐渐被大多数学者接受。从而揭示出大规模的冰川活动是第四纪历史的主要特征之一。在对阿尔卑斯山地冰川地貌、冰碛物与冰水沉积物接触关系以及冰碛物的风化程度详细研究之后，A·彭克 (Penck) 和布留克纳 (Brüchner) 将该地区第四纪冰川活动历史划分为三次间冰期和四次冰期。此方案对后期各国第四纪冰川研究影响很大。它第一次较系统地揭示了第四纪冰川活动的规律，为冰川地质学研究奠定了基础。此后，欧洲其他地区、北美、亚洲 (中国) 等地都建立了自己的冰期划分方案。随着研究的深入和基础自然科学的发展，在北美等地冰川地貌与沉积的研究得到了长足的发展。在欧洲，继 A·彭克之后有人经过研究把老的阿尔卑斯冰期细分为多次冰阶，并提出更老的“多瑙冰期”和“拜伯冰期”。与此同时 Richter (1932) 利用冰碛物组构分析德国古冰盖冰的运动方向，并发表了许多冰碛物组构研究的论文 (波特和 J·裴蒂庄, 1977)。他是最早进行这方面定量研究的学者。冰川作用过的地区，有很多的冰川擦痕。人们开始在大范围内对冰川擦痕的方向进行制图，以便阐明冰川搬运的形式，定出冰川作用中心，划出多种冰舌的范围等。这对古代大陆冰川移动形式的研究要算是最早的努力了。对碎屑颗粒的分散形式和指向构造进行制图，能够重建古代碎屑物的流动体系。冰

磧研究者是最早进行碎屑颗粒分散形式研究的。1937年 Krumbein 就对来自点状供给源的冰川分散形式进行了定量分析。冰川分散形式的原理和概念在芬兰斯堪的纳维亚地区已经成功地应用于找矿 (波特和 J·裴蒂庄, 1977)。

德·格尔和他的学生对芬兰、丹麦、前苏联 (列宁格勒) 等地的冰川纹泥进行了艰苦细致的研究。前后用了十几年时间, 首先推算冰后期距今约为 10 500 年。这一成果至今仍是推断冰后期年代很重要的参考资料。此外, 对沉积进行制图, 并编制与冰磧密切相关的地貌形态 (如鼓丘、蛇形丘、各类冰磧垄、冰水沉积扇) 图, 讨论它们在时间和空间上有规律的排列方式与冰川进退演化的关系。通过上述对地貌形态、沉积、基岩特征构成一个有机整体的研究, 在北美洲和欧洲都建立了很好的晚冰期大陆冰川模式。波特和 J·裴蒂庄 (1977) 认为这可能是经过研究的第一个模式。

19 世纪末 20 世纪初, 少数地质、地理学家到我国边远地区考察, 对一些冰川地貌和第四纪冰川现象进行了观察和研究。考察文献中主要涉及的地区有阿尔泰山、天山的汗腾格里山、博格达山、祁连山、昆仑山、喀拉昆仑山、横断山等等 (施雅风等, 1983)。Klebsberg 对我国各山区的资料进行了极全面的综述。Wisman 也对青藏高原为主的亚洲冰川分布及雪线高度进行了系统的论述 (Wisman. H. V., 1936)。

本世纪 20 年代初, 著名学者李四光就撰写了“华北晚近冰川作用遗迹”一文 (李四光, 1922), 提出华北地区和欧、美一样, 曾发生过第四纪冰川。李四光对庐山、黄山等地考察后, 1937 年撰写的《冰期之庐山》 (李四光, 1947) 是他对中国第四纪冰川研究的总结。但这些都引起很多不同的意见。袁复礼 30 年代曾测绘过天山博格达北坡的冰川地形 (1984)。黄汲清 (1941) 撰写的“中国的冰川”最早系统地介绍了中国的现代冰川。此外他还对天山南麓的第四纪冰川堆积及非冰川沉积进行了深入研究 (黄汲清, 1944)。解放以后, 在一些综合考察中对冰川地貌和第四纪冰川沉积也进行了观察。罗来兴 (1963) 研究了川西、滇北的冰川地貌和沉积。杨怀仁 (1963)、许世远 (1963)、施雅风 (1965)、李吉均 (1984) 等均对天山现代冰川冰期与冰缘地貌等进行了开拓性研究。崔之久 (1958) 对贡嘎山地区的冰川进行了初步的研究, 撰写了解放后第一篇现代冰川研究论文, 随后又进行了大量的冰川冰缘地貌研究 (1958, 1975, 1980, 1981, 1981a、b、c)。

随着现代科学技术的发展而产生出的信息论、控制论和系统论标志着现代思维方式转向既谨严精细又具整体观。各种学科交叉并高度融合 (福雷斯特, 1987; 王雨田等, 1988)。作者正是在此思想指导下把冰冻圈作为一个整体进行地貌过程和沉积学的研究。即把我们研究的对象作为一个由若干部分组合而成的、相互依赖、有不同层次的、具有特定功能的有机整体——系统来研究。我们得到的是关于某一研究方向的一套紧密相连的完整体系。另一方面是更加深入的学科分化, 一面向纵向发展, 一面又横向沟通。

针对近几十年来人们对冰川物理性质的深入研究 (Paterson, 1981; Boulton, 1975, 1979; Weertman, 1957, 1979), 也促使本书着重讨论现代冰川区的冰川地貌动力过程、形成机制, 从各种冰川遗迹探讨冰川底部的地貌作用, 了解冰岩界面物理化学的情况, 结合对现代冰川的研究建立冰川底部动力模型。对此本书的主要结论是:

1. 在冰坎和槽谷的横剖面上, 擦痕密度从侧部向中部逐渐增加, 槽谷的谷壁向谷底的转折处是擦痕密度由小转大的突变点, 反映了磨蚀作用逐渐增强。羊背石上冰蚀痕迹的分布有一定的规律性。迎冰面的顶部为长度大且平直的擦痕, 尾部为新月形裂纹、新月形凿

口、颤痕和较短的擦痕；侧部常有多组擦痕。它可指示冰川分流的方向。羊背石上的裂隙密度表明，其纵剖面上背冰面受拔蚀作用强，裂隙的密度、宽度和深度大；迎冰面则擦痕发育良好。背冰面的垂直横剖面，从上到下可分为挤压强烈破碎带、强烈剪切破碎带和微弱挤压-剪切破碎带。

2. 羊背石和鲸背岩的分布规律是受底部冰温和动力过程控制的。空间上，鲸背岩多分布在谷底的中心附近，这里是磨蚀作用带，冰温高，冰的流速快，塑性强。因此，鲸背岩的发育程度是判断冰底温度是否处在压力融点的侵蚀地貌标志。形成羊背石的部位则靠近冰川各侧面。一些地方没有达到压力融点，冰底温度有冷、温交替，是拔蚀作用带。此外，羊背石分布的具体地点还与局部气候、构造以及主支谷之间的关系相关。

3. 冰川底部动力过程分布的变化决定了冰蚀地貌的特点、分布规律和槽谷的纵、横剖面。槽谷的横剖面上，从两侧向中心冰温逐渐升高。它可分为风化、拔蚀、拔蚀与磨蚀（羊背石带）和磨蚀（鲸背岩带）四种动力作用带。纵剖面上伸张流和压缩流交替出现，它由拔蚀-寒冻风化、拔蚀和磨蚀三种作用带组成。由于不同的冰川地貌和沉积反映不同类型的山地冰川的底部温度、动力过程的规模和侵蚀强度，因而我们提出了一个初步的推测不同类型冰川的地貌和沉积标志，可用以重建古气候。

4. 冰川环境中的动力过程种类多而且很复杂，一般冰底以挤压、磨蚀动力为主，其他部位以斜坡过程最多。前者能真正反映冰川动力过程的本质。在地貌全过程（侵蚀、搬运、堆积）中，堆积过程控制了冰碛的构造、层序、组构和相模式。

5. 被搬运的冰碛是一种固体碎屑流。它的大多数沉积构造与斜坡碎屑的滚动和冰川的挤压有关，例如似斜层构造、带状构造、表皮构造、薄层变形构造、推挤褶皱构造和超覆构造。而以流动和蠕动为基本动力机制的泥石流堆积过程多形成各种定向的流动构造，例如半环状流线构造、多层构造、冲刷砾石层和透镜状土层构造。所有这些构造均具有指相意义。总之，泥石流沉积以流动构造为特征而冰碛以推挤构造为特征，两者可以区别。

6. 根据野外观察和剖面结构、构造、粒度以及地层学关系的统计分析，由冰上融出碛、流碛、冰下融出碛和滞碛构成冰碛沉积相模式。它们各自在相模式中的垂直程序不是随机的，而是以互相结合和可以预测的方式组成的。可以用它们重建相互影响和相互联系的亚环境的详细图景。这些相模式是我们解释其生成环境与沉积过程的基础。

各种新技术、新方法不断地被采用使研究不断向更深的方向发展。例如，电子显微镜使人们观察了冰碛中薄片层理结构，揭示了目前尚鲜为人知的某些微观特征。各种数理方法在地貌和沉积研究中应用日益增多。利用计算机进行地貌和沉积分析，在地理信息系统支持下研究其形态、物质成因、分布特征、成因机制、发生发展规律及其对人类生活、生产环境的影响，在灾害防治、资源开发、环境治理和生产建设中发挥了更大作用，也促使从定性研究逐步走向定量研究。

因为古气候的研究对最终解释环境变化、地貌和自然地理带的形成以及气候变化规律与趋势有着极为重要的意义，故古气候的研究已经有了很大的发展，突破了 A·彭克的阿尔卑斯山的经典系列。科学家们正努力在短期内把中国东西部确凿的冰川遗迹和黄土记录、深海沉积及冰心记录合理地联系起来，建立中国新的冰川沉积-气候变化系列（李吉均，1989），为未来气候和环境变化的预测提供更可靠的依据。

冰川地貌、沉积和泥石流的理论研究在不断发展中，其应用也日益受到重视。它们在