



珠穆朗瑪峰地區

科學考察報告

1964—1968

現代科學與地質

# 珠穆朗玛峰地区 科学考察报告

1966—1968

## 现代冰川与地貌

中国科学院西藏科学考察队

---

科学出版社

1975

## 内 容 简 介

《珠穆朗玛峰地区科学考察报告》是中国科学院组织的西藏科学考察队于1966—1968年间在我国西藏自治区珠穆朗玛峰地区进行的综合考察工作总结，是无产阶级文化大革命期间的科研成果。《报告》按地质、古生物（一、二、三册）、第四纪地质（包括新构造）、自然地理、现代冰川与地貌、生物与高山生理、气象与太阳辐射等专题分册出版。

本书所刊载的论文主要是考察队第三专题组1966—1968年冰川部分的考察总结（兼及1959—1960年的部分工作）。共分三部分：1. 珠穆朗玛峰地区的现代冰川；2. 珠穆朗玛峰地区冰、雪、水中氘和重氧的分布；3. 珠穆朗玛峰地区的地貌。共十七篇文章。书中提出了若干关于珠峰地区冰川和地貌的新论点，同时还对绒布冰川的一些物理特征及珠峰地区的几种地貌现象进行了专文记述与探讨。

## 珠穆朗玛峰地区科学考察报告

1966—1968

### 现代冰川与地貌

中国科学院西藏科学考察队

\*

科学出版社出版

北京朝内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

1975年7月第 一 版 开本：787×1092 1/16  
1975年7月第一次印刷 印张：11 1/8  
印数：报精1—3,250 插页：精2，平21  
报平1—1,380 字数：290,000

统一书号：12031·3

本社书号：462·12

定 价：精 装 本 3.00 元  
平 装 本 2.20 元

# 前 言

发育在世界最高峰——珠穆朗玛峰地区的冰川和地貌是什么样子的？具备哪些特点？这是本文集所要回答的问题。1921年以来，认识和征服世界最高峰的实践活动有着很大进展，但在相当长的时间内，这项活动完全为西方的登山探险家和科学考察者所垄断。中华人民共和国成立以后，在毛主席和中国共产党的领导下，中国人民才有可能向世界最高峰进军，进行科学考察。通过1959—1960年与1966—1968年两次考察，使我们对于珠穆朗玛峰地区冰川和地貌的知识领域扩大了。本书所刊载的论文主要是中国科学院西藏科学考察队第三专题组1966—1968年冰川和地貌部分的考察总结，其中涉及1959—1960年的部分工作。

毛主席教导我们：“人类总得不断地总结经验，有所发现，有所发明，有所创造，有所前进。”通过本文集，我们获得了若干关于珠穆朗玛峰地区冰川和地貌的新观念：

1. 珠穆朗玛峰的低温条件，有利于冰川发育，但降水量较少，限制了冰川规模，在以珠峰为中心的5,000平方公里范围，有大小冰川600多条，冰川面积1,600平方公里，最大冰川长度不超过23公里，冰川的补给量不大，消融量较小，运动速度中等，冰川的进退变化较弱，一般的具有大陆性冰川特征。

2. 冰雪层剖面和冰结构观测资料表明，珠穆朗玛峰冰川自雪线以上直到顶峰的积雪变质成冰作用属于渗浸-冻结类型，不存在某些外国学者所推测的类似于两极冰盖地区的重结晶类型，从低纬高山区极其强烈的太阳辐射和陡峻山势不利于积雪的条件看，珠穆朗玛峰地区也不可能存在重结晶类型。

3. 冰川消融区特别引人入胜的相对高度达30—50米的冰塔林是在强烈的高角度的太阳辐射和干燥气候下差别消融特殊发展的结果，冰川的构造与运动始终参与冰塔的塑造过程，使冰塔形态多样化。从冰塔开始发育到消亡要经过数十年以至一百年以上的时间。迄今所知，完整的冰塔林景象只存在于喜马拉雅和喀喇昆仑某些大山谷冰川上。

4. 山谷冰川的冰舌表面，除冰塔林外，大部分为表碛所覆盖，在绒布冰川5,440米处有薄表碛覆盖的冰舌面上，进行消融期的热量平衡研究结果，热量收入中89.5%来源于辐射平衡，这和其他低纬高山一致，热量支出则独具一格，湍流失热量占42.8%，消融耗热量占33%，蒸发失热量占15.9%，而其他高山冰川裸露冰面的热量支出，均以消融耗热量占绝对优势，这是绒布冰川消融量不大的重要原因。

5. 对珠穆朗玛峰和希夏邦马峰（简称希峰）北坡的冰、雪、水样品进行同位素氘(D)和重氧(O<sup>18</sup>)的全分析。发现粒雪和冰川冰中所含的氘和重氧较液态天然水中所含的有较高的富集，这可能和冰雪经过反复的融化-冻结过程有关。冰川融水进入内流湖泊后，氘和重氧有较大富集，这显然由于干燥气候下水的蒸发分馏作用。此外，还发现在6,000—7,000米高程，氘和重氧含量随海拔增加而升高，在5,400—5,500米消融区中，氘和重氧随冰川冰年龄增高而富集。

6. 晚更新世冰期以来, 珠穆朗玛峰北坡冰川的波动性退缩幅度不仅在中国西部山地冰川中, 而且在世界山岳冰川中都可能是最小的, 并且有愈来愈趋和缓的特点, 这里现代雪线仅高出晚更新世冰期雪线 300 米左右。这主要由于最高峰强烈的上升运动缩小了冰期后气候转暖使冰川衰退的程度。现在珠峰北坡大冰川末端位于多年冻土带内, 在厚表碛保护下更出现了长时期稳定于原地而不后退的特殊现象。冰川的衰退以逐渐变薄的形式出现。

7. 珠穆朗玛峰地区经历了长期的冰川作用, 地貌上处于冰蚀的“壮年期”, 大规模的发育角峰和冰斗, 珠穆朗玛峰就是一个相对高度达三千米的金字塔形的大角峰, 相邻的几个谷首冰斗都是世界上有数的雄伟大冰斗; 但冰川槽谷在纵剖面上缺乏冰川阶、石盆和串珠状盆地, 槽冰碛成分中粘土含量很少, 泥砾现象不显, 终碛规模不大, 这些冰川侵蚀和堆积作用较弱的特点是和前述大陆性山岳冰川能量相适应的, 而和阿尔卑斯、阿拉斯加等山区海洋性冰川不同, 也和中国东部古冰川研究者叙述的冰川现象有别。

8. 从绒布冰川侧碛、中碛和终碛的岩性分析, 可见到侧碛物质主要来源于当地基岩山坡, 迁移性较差, 中碛成分的迁移性较强, 而终碛成分主要来源于粒雪盆后壁, 部分来源于冰川底床, 发现自晚更新世冰期以来, 珠穆朗玛峰北坡冰川发育的有利条件, 有自东绒布冰川逐渐转移到西绒布冰川的历史过程, 其原因可能为珠穆朗玛峰在冰期后的继续上升更加阻拦印度洋湿润气流北进补给东绒布冰川, 而西绒布冰川源头的山口保持较低高度有利于水分补给的缘故。

除了上述收获以外, 本文集还对绒布冰川一些冰川的物理特征(冰川构造、冰结构、冰川运动、冰层温度等)和珠穆朗玛峰附近地区的几种地貌现象(湖泊、喀斯特、河流阶地等)进行了专文记述与探讨。我国冰川学和冰川冰缘地貌研究还处于年轻的甚至可以说是比较幼稚的阶段, 对于所观察到的某些现象, 理解不深, 尚难做出更深入的科学分析和论述。在如此高峻、不易到达的世界最高峰区, 取得任何实际资料, 都要付出艰辛的劳动, 都是可贵的, 因此, 我们尽量给予整理发表。文中错误缺点, 欢迎读者批评指正。

# 目 录

前言	( i )
珠穆朗玛峰地区冰川的发育条件、数量及分布	( 1 )
珠穆朗玛峰北坡成冰作用	( 14 )
绒布冰川的构造现象	( 27 )
珠穆朗玛峰北坡冰川冰结构	( 34 )
绒布冰川的运动	( 44 )
绒布冰川冰层温度	( 48 )
绒布冰川消融期的热量平衡	( 52 )
绒布冰川的消融特征	( 65 )
珠穆朗玛峰地区冰雪水中氘和重氧的分布	( 71 )
珠穆朗玛峰地区冰川消融区的冰塔林及其它冰面地貌	( 77 )
珠穆朗玛峰地区冰川的变化	( 92 )
久达冰川及格重康冰川	( 106 )
珠穆朗玛峰地区冰川地质地貌作用	( 119 )
从冰碛来源与基岩的关系探讨绒布冰川及其槽谷的演变过程	( 143 )
藏南地区湖泊的成因与演变	( 160 )
珠穆朗玛峰地区的喀斯特	( 169 )
朋曲河流域的阶地	( 180 )
附录：珠穆朗玛峰地区我国境内的现代冰川目录	( 191 )

# 珠穆朗玛峰地区冰川的 发育条件、数量及分布\*

执笔人： 谢自楚 苏 珍

(中国科学院兰州冰川冻土沙漠研究所)

## 一、冰川的发育条件

珠穆朗玛峰(简称珠峰)海拔 8,882 米,位于喜马拉雅山脉中段、我国西藏自治区与尼泊尔王国边境上,它与洛子峰(8,501 米)、马卡鲁峰(8,470 米)、卓奥友峰(8,153 米)及邻近的数十座 7,000 米以上高峰组成世界上最雄伟的高山区,成为低纬地区一个巨大的现代冰川作用中心。

本区河流完全属于阿龙河水系。该河上游朋曲河发源于我国希夏邦马峰(8,012 米)北坡,流经定日汇集珠峰北坡的热久藏布、扎卡曲、卡达河,甘马藏布河,由东面横切喜马拉雅山主脉;该河另一主要支流中科西河发源于希夏邦马峰南坡,经聂拉木从西面横切喜马拉雅山主脉,汇集了珠峰南坡的绒辖河(发源于我国的通泽峰(7,037 米)南坡)、都得科西河,在尼泊尔南部汇入阿龙河。后者南流至印度境内注入恒河。珠峰冰川作用区西起绒辖河谷,东至朋曲河下游,即在东经  $86^{\circ}20'$ — $87^{\circ}15'$  及北纬  $27^{\circ}40'$ — $28^{\circ}20'$  之间,山区总面积约 5,000 平方公里。

珠峰地区的喜马拉雅山主脉走向自西向东由北东转为正东再转为南东东方向,整个山脉大致成东西走向。除个别山口外,主脉山脊均在海拔 6,000 米以上。在四座极高峰附近,山势海拔高度达到 8,000 米以上。支脉海拔高度一般在 6,000—7,000 米间,如此巨大的海拔高度为现代冰川的发育提供了十分有利的低温条件,这是在较低纬度能出现较大规模冰川作用的基本原因。

但是,极高的山势及大致成东西走向的山脉又是南来印度洋水汽的严重障碍,使珠峰北坡和南坡的中心部分比较干燥,不利于冰川的积累,限制了冰川发育的规模。

珠峰北坡与青藏高原相连,地势比较平缓;南坡及东坡,受河流深切,高差很大,如从珠峰至龙堆,在水平 52.5 公里的距离内,相对高差达 6,000 米以上,与北坡形成鲜明的对照。这是引起珠峰南、北坡冰川规模、形态及分布差异的主要原因。

珠峰地区冰川主要靠印度洋季风补给。由于喜马拉雅山脉的屏障作用,珠峰南坡的降水有随高度递减的趋势。据印度气象学者 O. N. Dhar 等人资料<sup>[1]</sup>,在中科西河支流都得科西河谷距珠峰直线距离 37 公里海拔 2,745 米的羌利卡尔卡站年降水量为 2,283.6 毫米,海拔 3,355 米的南遮巴沙尔站(与珠峰直线距离 28.5 公里)年降水量 939.3 毫米,到了

\* 参加野外工作的还有王宗太、王彦龙同志,参加室内工作的有张志忠、王立伦、王睿同志。

珠峰南坡的孔布冰川海拔 5,300 米处,据 F. Müller 估计,减少到 450 毫米<sup>[1]</sup>。在中科西河上游波曲河谷,本队气象组于 1968 年观测到同样的规律(表 1)。

表 1 波曲河谷降水随高度的变化

测 站	海拔高度 (米)	年 降 水 量
樟 木	2,300	2,817.7*
曲 乡	3,300	1,453.8*
聂 拉 木	3,800	421.8

\* 据本队气象组资料。

珠峰北坡降水更少,定日(海拔 4,300 米)1959—1965 年平均年降水量仅为 242.8 毫米,少于日喀则(海拔 3,800 米)同期降水的一倍。绒布寺(海拔 5,027 米)降水量略有增加,1959 年降水量为 335.1 毫米(表 2),比定日 1959 年(329.0 毫米)多 6.1 毫米。

表 2 绒布寺 1959 年各月降水量

月 份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	全 年
降水量(毫米)	16.4	0	0.3	2.4	0.7	13.0	143.9	80.1	57.9	20.4	0	0	335.1

但在珠峰高处,降水出现异常情况,据气象组按珠峰北坡绒布冰川上 1959 年短期对比观测资料推算,在东绒布冰川积累区海拔 6,500 米处年降水量可达 600 毫米,我们 1968 年观测到东绒布冰川粒雪盆中央平坦冰面年层的纯积累量为 540 毫米,与上述推算结果相近。中绒布冰川积累区由于山口高度较低,南来水汽较易进入,降水量较东绒布冰川为多。据 1959 年在积累区中部海拔 5,900 米处对粒雪年层的观测资料,该处年纯积累量为 790 毫米。据此,估计珠峰北坡雪线附近(5,800—6,200 米)年降水量约为 500—800 毫米。

同样,在珠峰南坡冰川积累区, M. Miller 等据孔布冰川积累区中部海拔 6,160 米处冰裂隙的年层及氡含量分析,确定该处 1954—1958 年及 1958—1962 年平均纯积累量分别为 1,500 毫米及 1,700 毫米<sup>[2]</sup>,如考虑吹雪的影响,此处实际降水量可能小于上述数值。估计该冰川雪线附近(海拔 5,500 米)年降水量可能为 1,000 毫米以上。因而继 2,500 米左右第一个最大降水带之上,可能存在的第二个大的降水带。

珠峰地区东南及西南部由于深切的甘马藏布河谷及绒辖河谷带来较丰沛的水汽,冰川区的降水量可能超过 1,000 毫米。

珠峰地区降水的特点之一是高度集中于夏季。据 1959—1960 年观测资料定日 7、8、9 三个月的降水量占全年的 97%,绒布寺为 84%,冰川区夏季降水的集中程度按上述趋势,可能降到 80% 左右。这个特点显然会使固体降水的比重减少,不利于冰川的积累,但是,夏季频繁的降雪必然使冰川表面的反照率大大增加,从而减弱冰川的消融。因此,不能笼统地说,夏季降水是冰川发育的不利因素。

总之,珠峰地区冰川位置远高出喜马拉雅南坡最大降水带之上,可能依赖于第二个较大降水带的补给,补给量与我国天山中、西段接近,而远不及欧洲阿尔卑斯山脉的海洋性冰川。在世界山岳冰川中,它的补给量属于中等偏低水平。

珠峰地区的温度,据 1959 年绒布寺气象观测资料,年平均气温为  $-0.5^{\circ}\text{C}$ ,最热月(七月)平均气温为  $6.4^{\circ}\text{C}$ ,比我国天山冰川观测站(海拔 3,540 米)高,后者年平均气温为  $-5^{\circ}\text{C}$ ,最热月平均气温为  $5.2^{\circ}\text{C}$ 。

据 1959—1960 年在东绒布冰川 6,500 米处短期观测资料, 珠峰北坡海拔 5,000—6,500 米间的气温递减率约为  $0.7^{\circ}\text{C}/100$  米, 据此推算珠峰地区雪线附近(5,500 米—6,200 米)年平均气温约为  $-4^{\circ}\text{C}$ — $-9^{\circ}\text{C}$ 。冰川发育的热量条件与我国天山冰川相近。

但是, 珠峰地区极高的海拔及较低的纬度使其热量交换过程与中纬山区有很大的不同, 主要表现为强烈的太阳辐射、温度昼夜的剧烈变化、较强烈的蒸发等。这些特点直接影响积雪的变质成冰作用、冰川的消融等一系列过程。关于这些影响将在本集的有关部分作较详尽的分析。

## 二、冰川的数量及分布

在伟大的无产阶级文化大革命运动中我国在珠峰北坡进行了大面积的地面立体摄影测量, 编制了大比例尺的包括冰川在内的地形图, 同时国外编制的珠峰南坡的大比例尺地形图也陆续出版, 这使我们可以利用这些地形图资料, 对珠峰地区的冰川数量、面积及几何特征进行较精密的统计。

珠峰北坡冰川的计量主要利用本队测绘组 1972 年编制的珠穆朗玛峰地区地形图。珠峰南坡主要利用 1968 年德国出版的孔布喜马拉雅五万分之一地形图<sup>[1]</sup>。珠峰边缘地区则还参考了 1961 年英国出版的珠穆朗玛峰地区十万分之一地形图<sup>[4]</sup>。统计结果表明, 珠峰北坡冰川总面积为 772.32 平方公里, 南坡 684.75 平方公里, 总计 1,457.07 平方公里。冰川总条数(绒辖河流域未计入)为 548 条, 其中北坡 217 条, 南坡 331 条。各流域冰川条数及面积统计见表 3。珠峰最西的绒辖河流域因缺乏大比例尺地形图未作统计, 如加上这条流域冰川则珠峰地区全部冰川约 600 余条, 面积可达 1,600 平方公里, 占整个珠峰地区面积的 32%。

珠峰地区冰川面积虽不及天山汗腾格里峰地区(3,764 平方公里<sup>[2]</sup>), 但大于整个祁连山地区(1,316 平方公里<sup>[6]</sup>), 是中、低纬地区一个大的山岳冰川作用中心。

表 3 珠峰地区各流域冰川条数及面积统计(绒辖河流域未计入)

流 域	条 数	面积(平方公里)	地形图资料
北 坡			
热久藏布	34	191.15	1:50,000
扎卡曲	119	326.48	1:50,000
卡达河	28	94.74	1:50,000
甘马藏布河	36	159.95	1:100,000 <sup>[4]</sup>
总 计	217	772.32	
南 坡			
乃库河	5	18.61	1:100,000 <sup>[4]</sup>
索鲁河	4	4.68	1:100,000 <sup>[4]</sup>
鲁姆且格河	4	10.46	1:100,000 <sup>[4]</sup>
部得科西	105	119.59	1:50,000 <sup>[2]</sup>
大科西	55	99.79	1:50,000 <sup>[2]</sup>
英贾河	62	158.30	1:50,000 <sup>[2]</sup>
艾纽库河	23	41.34	1:100,000 <sup>[4]</sup>
宏古河	36	79.95	1:50,000
却杨河	2	5.42	1:100,000 <sup>[4]</sup>
阿斯瓦河	5	29.57	1:100,000 <sup>[4]</sup>
巴伦河	30	117.04	1:100,000 <sup>[4]</sup>
总 计	331	684.75	1:50,000 <sup>[2]</sup>
总 计			
	548	1,457.07	

珠峰地区冰川分布相当集中,以大型山谷冰川为主(图1)。面积在20平方公里以上的大山谷冰川共15条,占全部冰川条数的2.7%,但其面积达715.54平方公里,占全部冰川面积49.1%;而占全部冰川条数65.7%的面积不到1平方公里的小冰斗及悬冰川仅占全部冰川面积的8.1%(表4),平均每条冰川面积2.66平方公里,比以小型冰斗冰川作用为主的祁连山冰川约大3.2倍,后者冰川平均面积只有0.82平方公里。

面积在1—5平方公里的冰川主要为冰斗冰川及小的山谷冰川,这类冰川无论从数量上或所占面积上均处于第二位,其所占百分比分别为25.4及19.6。面积在5—10平方公里的冰川主要是大的冰斗—山谷冰川及山谷冰川,面积在10—20平方公里的冰川主要是中型山谷冰川。这两类冰川共34条占总条数的6.2%,面积为338.04平方公里,占总面积的23.2%。以上冰川面积的结构特点与珠峰地区海拔极高,山势变化大及冰川退缩、分化不强烈等有关,因此冰川规模变化悬殊,各类冰川的数量与其所占的面积很不适应,并少中型的冰川。

表4 珠峰地区冰川面积结构统计

冰川规模 (平方公里)	<1	1—5	5—10	10—20	>20	总 计
北 坡						
条 数	118	76	8	8	7	217
百 分 比	54.4	35.0	3.7	3.7	3.2	100
面 积	51.96	162.40	51.97	123.39	382.60	772.32
百 分 比	6.7	21.0	6.7	16.0	49.6	100
南 坡						
条 数	242	63	13	5	8	331
百 分 比	73.0	19.0	3.9	1.6	2.5	100
面 积	65.53	123.6	88.38	74.3	332.94	684.75
百 分 比	9.6	18.1	12.9	10.9	48.5	100
全 区						
条 数	360	139	21	13	15	548
百 分 比	65.7	25.4	3.8	2.4	2.7	100
面 积	117.49	286.00	140.35	197.69	715.54	1457.07
百 分 比	8.1	19.6	9.6	13.6	49.1	100

珠峰地区大的山谷冰川大部分均分布于四座高峰的周围和喜马拉雅山主脉的两侧。如在15条面积为20平方公里以上的冰川中只有4条冰川分布于主脉以外的山峰附近。

南、北坡比较,北坡冰川面积略大于南坡,占全区的53%,但冰川条数只占全区的39.5%,因此,冰川的平均面积,北坡比南坡大75%。这主要是南、北坡地形的差异造成的。南坡地形十分陡峻,河谷坡降大,尽管其雪线高度比北坡低得多,但补给区狭窄,落差大,加以温度高,消融强,限制了冰川发育的规模;北坡河谷比降较小,较宽阔,主山脊线以北的山峰和山脊比较平缓,补给区较大。

珠峰地区各条冰川的延伸幅度相差很悬殊,如康雄冰川的源头一直伸到珠峰峰顶,而

其冰舌则下降到海拔 4,450 米处,冰川作用的垂直高差达 4 千 4 百多米,这种现象在其他山区是很少见的,这显然是世界最高峰地区高差大,地形复杂的缘故。

### 三、冰川的形态类型及主要特征

珠峰地区的冰川形态类型主要是规模较大的山谷冰川,其次为冰斗山谷冰川,小的冰斗冰川及悬冰川数量较多,但面积很少。此外还有少数的平顶冰川。

据统计(表 5),长度在 5 公里以上的山谷冰川及冰斗-山谷冰川共 35 条(北坡 16 条,南坡 19 条),总面积 1,000.99 平方公里,占全部冰川面积的 69%,可见这两类冰川为珠峰地区的主要冰川类型。

珠峰地区最大的冰川为发育于珠峰北坡的绒布冰川,长 22.2 公里,冰舌平均宽 1.4 公里,面积达 86.89 平方公里(照片 1,2),其次为卓奥友峰南坡的格重巴冰川,面积 80.83 平方公里,长 23 公里,宽 1.2 公里。卓奥友峰北坡的加布拉冰川面积 76.09 平方公里,长 21 公里,宽 2 公里,这三条冰川均拥有多级支流,为树枝状的山谷冰川。

在中、低纬各山区中,珠峰地区冰川具有中等程度的规模(表 6),小于帕米尔、喀喇昆仑山、天山,大于祁连山、阿尔泰山、高加索山,而与阿尔卑斯山相当;在喜马拉雅山脉中,亦不是最大的,次于恒河上游的干戈特利冰川及世界第三高峰干城章嘉峰(海拔 8,579 米)的热母冰川。

珠峰地区山谷冰川的末端,北坡一般为 5,000—5,250 米,南坡为 4,500—5,000 米。珠峰东坡冰川的末端下降较低,马卡鲁峰东北坡的沙基塘冰川下降到海拔 3,600 米的甘马藏布河谷,南坡的舒尔莫契冰川也下降到海拔 3,600 米处,为全区最低者。沙基塘冰川几乎完全依靠雪崩补给,河谷深而窄,冰川表面满布冰碛。

洛子峰—努子峰南坡的数条山谷冰川,也几乎完全依靠雪崩补给,冰面形态与沙基塘冰川相似。许多较小的山谷冰川大多属于这种情况,如南坡阿玛大布拉姆峰(海拔 6,856 米)西侧的特苏洛冰川(长 2.8 公里,面积 1.03 平方公里),末端下降到 4,200 米的英贾河谷,大量的、延续到雪线附近的表碛,限制了冰塔的开发,因此,在以雪崩补给为主的冰川上几乎均无冰塔。由于直接降雪补给的面积很小,这类冰川的冰川系数——粒雪盆面积和冰舌面积之比很小,一般均不超过 1,缺乏正常的粒雪盆。

主要靠降雪直接补给的山谷冰川与上述情况不同,一般都具有宽阔的粒雪盆,冰川系数大于 1,如珠峰北坡的加布拉冰川,绒布冰川及东绒布冰川,冰川系数分别为 1.5, 1.9, 及 3.4。冰舌中上段普遍发育着高大的奇异多姿的冰塔,只有冰川下段出现表碛丘陵的冰面地形。这是珠峰地区山谷冰川的特殊形态。

由于珠峰地区的渗浸冻结成冰作用,冰川上的雪线一般比粒雪线低 100—200 米,在缺乏详细的观察资料时可从地形图上表碛出现的高度判断,在发育冰塔的冰川上,它一般分布于锥形冰塔之上数十至 100 米的高度上。

珠峰地区的雪线分布高,变化大,这是珠峰地区冰川作用的一个突出的特点。山谷冰川雪线一般为 5,500—6,000 米,雪线最高的东绒布冰川达 6,200 米,是目前所知的世界上最高的雪线,最低的为 5,000 米(沙基塘冰川及舒尔莫契冰川),在 5,000 平方公里的范围

表5 珠峰地区较大冰川的主要形态特征

冰川名称	位置	长度 (公里)	宽度 (公里)	面积 (平方公里)	末端 (米)	顶端 (米)	雪线 (米)	冰川作用差 (米)	形态类型
北 坡									
绒布冰川	扎卡曲河源	22.2	1.4	86.89	5,154	7,260	5,800	2,106	树枝状山谷冰川
加布拉冰川	热久藏布河源	21.0	2.0	76.09	4,980	7,200	5,700	2,220	树枝状山谷冰川
康雄冰川	甘乌藏布河源	19.5	1.0	65.52	4,450	8,882	5,500	4,432	复式山谷冰川
沙基塘冰川	甘乌藏布河右支流	17.0	0.3	19.28	3,600	8,470	5,000	4,920	双支山谷冰川
蚌鲤冰川	热久藏布左支流	15.3	0.8	30.60	5,000	7,037	6,000	2,037	山谷冰川
东绒布冰川	绒布冰川右侧	14.0	0.8	48.45	5,520	7,600	6,200	2,080	复式山谷冰川
格重康冰川	扎卡曲左支流	13.7	1.0	54.27	5,220	7,300	6,050	2,050	复式山谷冰川
西光冰川	热久藏布右支流	10.4	0.8	17.43	5,240	7,023	5,900	1,783	山谷冰川
久达冰川	扎卡曲左支流	10.4	0.5	13.95	5,400	6,900	6,050	1,500	山谷冰川
错戈康冰川	热久藏布左侧	10.0	0.5	9.88	5,210	6,500	6,000	1,290	山谷冰川
卡达冰川	卡达河右源	9.6	1.0	19.45	5,600	7,011	6,000	1,411	大冰斗-山谷冰川
马卡鲁冰川	康雄冰川右侧	8.0	0.5	20.78	4,450	8,470	5,600	3,520	再生山谷冰川
卡尔达章格里冰川	卡达河左源	7.7	0.8	14.11	5,480	7,056	5,950	1,576	冰斗-山谷冰川
南卡尔达章格里冰川	卡达河中段	7.4	0.8	16.85	5,830	7,056	6,100	1,226	冰斗-山谷冰川
卡占冰川	康雄冰川右侧	7.0	0.5	7.86	4,360	7,157	5,200	2,651	山谷冰川
龙江3号冰川	热久藏布右支流	6.2	1.5	11.88	5,700	6,520	5,900	820	冰斗-山谷冰川
南 坡									
格重巴冰川	都得科西河源	23.0	1.2	80.83	4,700	8,153	5,600	3,453	树枝状山谷冰川
兰巴冰川	都得科西河源	20.0	0.8	55.49	4,480	7,433	5,500	2,957	树枝状山谷冰川
孔布冰川	英贾河右支流	18.0	0.8	39.24	4,870	8,300	5,500	3,430	复式山谷冰川
巴仑冰川	巴仑河源	16.6	0.8	51.36	5,000	8,470	5,600	3,470	复式山谷冰川
下巴仑冰川	巴仑河右支流	16.0	0.8	32.16	4,550	7,000	5,600	2,450	双支山谷冰川
艾斯瓦冰川	艾斯瓦河源	14.0	1.0	28.22	4,730	7,000	5,400	2,270	复式山谷冰川
艾纽库冰川	艾纽库河源	11.0	0.5	22.37	4,800	6,809	5,450	2,009	复式山谷冰川
英贾冰川	英贾河源	11.0	0.6	27.77	5,010	8,000	5,600	2,990	双支山谷冰川
洛子冰川	英贾河右支流	9.1	1.0	12.12	4,940	8,400	5,500	3,460	山谷冰川
旁格普克冰川	都得科西右支流	8.5	0.5	8.52	5,100	6,389	5,350	1,289	山谷冰川
舒尔莫斯冰川	乃库河源	8.5	0.5	15.9	3,600	6,660	5,550	3,060	
努子冰川	英贾河右支流	7.8	0.3	6.12	4,960	7,800	5,600	2,840	山谷冰川
西路子冰川	英贾河右支流	6.5	0.5	5.28	4,960	7,800	5,600	2,840	山谷冰川
金格久克冰川	都得科西河右支流	6.4	0.5	7.50	4,840	6,801	5,300	1,961	山谷冰川
且格波冰川	都得科西河右支流	6.0	0.6	7.49	4,320	6,718	5,250	2,398	山谷冰川
宏古冰川	宏古河源	6.0	0.8	16.40	5,250	7,220	5,600	1,970	冰斗-山谷冰川
西宏古冰川	宏古河右支流	6.0	1.0	8.20	5,000	6,419	5,450	1,419	冰斗-山谷冰川
东宏古冰川	宏古河左支流	5.8	1.0	10.70	5,350	6,830	5,650	1,480	冰斗-山谷冰川
阿马大布拉姆冰川	英贾河左支流	5.5	0.5	4.75	4,810	6,756	5,400	1,946	山谷冰川

内,雪线相差达 1,200 米,这种现象是世界上罕见的。

在珠峰地区,雪线分布规律是北坡高于南坡,中央高于边缘(图 2)。这显然是由降水的分布状态决定的。珠峰南坡由于接受较丰富的印度洋季风降水的补给,其雪线比干燥的北坡低 200—500 米。中央山区比较干燥,其雪线亦比较湿润的边缘山区高 200—300 米。在山口的南北两侧,雪线的高差与山口的高度关系密切。如本区西段的兰巴山口海

表6 喜马拉雅山与欧亚大陆中纬度山脉最大冰川比较

山 脉	冰 川	长 度 (公里)	面 积 (平方公里)	资 料 来 源
喜马拉雅山	绒布冰川	22.2	86.89	本 文
	干戈特利冰川	32	300	C. В. Калесник [7]
	热母冰川	31	100	同 上
喀喇昆仑山	厦呈冰川	75	1,150	徐近之* [8]
帕米尔	费得钦柯冰川	77	992	И. Г. Дорофеев [8]
天山	雨依诺尔切克冰川	59.5	284	В. И. Радек [5]
阿尔卑斯山	大阿列茨冰川	26.8	115.1	C. В. Калесник [7]
阿尔泰山	巴达宁冰川	19	50	同 上
高加索山	戴雷-苏冰川	13.8	46.7	同 上
祁连山	老虎沟 20 号冰川	9.6	17.45	任炳辉**

\* 徐近之:《青藏高原自然地理资料》(地文部分),1960年。

\*\* 任炳辉:祁连山的现代冰川,1962年。

拔 5,717 米,两侧雪线差 200 米;中段中绒布冰川源头山口海拔 5,997 米,两侧雪线差 300 米;东段海拔 6,490 米的山口,两侧雪线差达到 700 米。

冰川分布的上限与流域的最高山峰往往不一致。许多高峰上部由于坡度极大,没有连续的冰雪覆盖,珠峰的南坡及北坡均是这种情况,因此在地形图上确定冰川的上限往往不够精确。总的说来,珠峰地区冰川的上限及冰川作用差均是世界上最高的。在中央山区冰川作用差一般为 2,000—3,000 米,且南坡大于北坡,东坡又大于南坡;在边缘山区,随着山脉高度的降低,冰川作用差也减少到 2,000 米以下。

冰斗山谷冰川的规模较山谷冰川为小,珠峰地区最大的冰斗冰川为卡达河源头的卡达冰川,长 9.6 公里,面积 19.45 平方公里,它具有广阔的粒雪盆及宽而短的冰舌,冰川表面比较洁净,有冰塔发育。冰斗冰川末端,位于北坡的一般在海拔 5,500 米以上,南坡的在 5,250 米以上,冰斗冰川的雪线一般也高于山谷冰川,位于南坡的在 5,600 米左右,北坡的约 6,000 米。冰川作用差一般在 1,500 米左右。较小的冰斗-山谷冰川在 1,000 米以下。这类冰川主要分布于北坡边缘山区。

冰斗冰川和悬冰川的数量约占总条数的 80%,但大多为面积不到 1 平方公里的小冰川,这两类冰川面积约占冰川总面积的 20%,最小的悬冰川面积只有数千平方米。它们主要分布在山谷冰川两侧的山坡上或边缘山区较低的分水岭两侧(照片 3)。海拔 6,000 米左右的山脉的冰川多属这种类型。珠峰南坡这类冰川数量最多。

这类冰川的末端在北坡的为 5,600—5,900 米之间,南坡的为 5,400—5,600 米,雪线分别在 6,000 米及 5,600 米左右。冰川作用差一般为数百米。

平顶冰川完全分布在北坡的边缘山区。热久藏布的东侧有三条较大的平顶冰川。最大的一条平顶冰川面积达 7.96 平方公里。它发育于海拔 6,100—6,500 米的平缓的分水岭上,冰面洁净,平缓,末端向四周分离或汇入相邻的山谷冰川。

#### 四、冰川的厚度及储量估计

1968年4月,本队重力组在绒布冰川上观测了两个重力横断面,第一个断面设在绒布冰川下游距冰川末端5公里海拔5,350米处,第二个断面设于中线布冰川汇入绒布冰川(海拔5,500米)处,距冰川末端8公里。起点均在冰川右侧碛上,测定相对高差的基准面则设在冰川的中部。测点之间的高差及距离均用经纬仪测定。

冰川厚度的计算公式为:

$$2\pi f\delta H = \Delta g$$

$$H = \frac{\Delta g}{2\pi f\delta}$$

式中,  $H$ ——测点处冰川相对厚度,  $\Delta g = \Delta g_1 - g_n$ , 即起点与所测点之重力异常值之差;  $f$ ——万有引力常数;  $\delta$ ——岩石与冰之密度差, 即  $\delta = \delta_{\text{石}} - \delta_{\text{冰}}$ ,  $\delta_{\text{石}}$  为 2.67 克/厘米<sup>3</sup>,  $\delta_{\text{冰}}$  为 0.9 克/厘米<sup>3</sup>,  $2\pi f = 0.418 \times 10^{-5}$  厘米<sup>-3</sup>/秒<sup>2</sup> 克, 测点冰川的实际厚度  $H_n = H + \Delta H$ , 其中  $\Delta H$  为相对高差。因为每个断面的起点和始点均位于冰川边缘的岩石上, 冰川厚度为零, 因此所测重力值无实际意义。现将各断面冰川厚度计算结果列于表 7。

从图 2 中可见, 第一断面冰川底部比较平坦, 起伏不大, 冰川西侧厚度较东侧大, 最大厚度为 145.9 米, 平均厚度为 110 米。第二断面冰川中央底部存在着一个高约 30 米的突出部分, 成因不详, 最大厚度为 147.8 米, 偏于西侧, 平均厚度为 91.5 米。这个断面位于连座冰塔区, 由于测点均位于冰塔底部, 因此, 计算冰川的实际厚度还需考虑冰塔的高度。冰塔平均高度以 30 米计则此处冰川实际平均厚度应为  $91.5 + \frac{30}{2} = 106.5$  米。第二断面冰川平均厚度较第一断面小, 这是由于第二断面为冰川的主流, 反映西绒布冰川的补给较中绒布大。

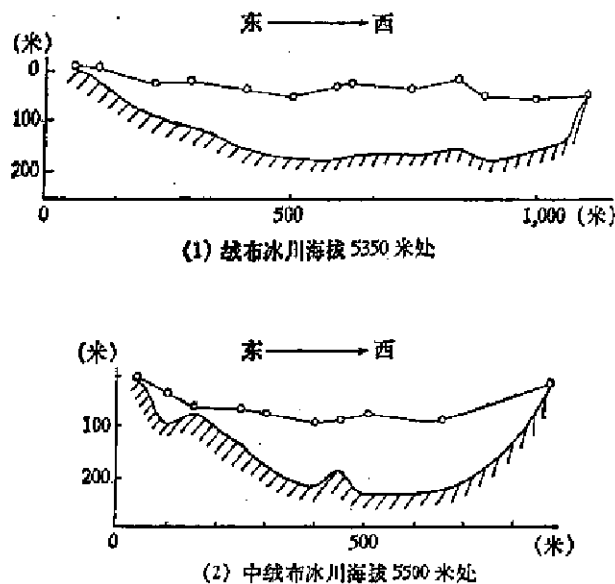


图 2 绒布冰川重力测量横剖面图

表7 冰川厚度计算表

测点号	$\Delta g_1 - g_2$ (毫伽)	$2\pi/\delta$	$\Delta H$ (米)	$H$ (米)	$H_0$ (米)
第一断面 (海拔 5,350 米)					
1			62.2		0
2	-2.6	0.0656	53.4	-39.6	13.8
3	2.6	0.0740	22.6	35.1	57.7
4	4.4	0.0740	27.5	59.4	86.9
5	7.6	0.0740	11.0	102.7	113.7
6	9.4	0.0740	0.0	127.0	127.0
7	8.9	0.0740	18.6	120.3	138.9
8	8.5	0.0740	29.6	114.9	144.5
9	9.2	0.0740	17.2	124.3	141.5
10	8.1	0.0740	36.5	109.4	145.9
11	10.0	0.0740	6.5	135.1	141.6
12	8.3	0.0740	6.5	112.2	118.7
13			6.5		0
第二断面 (海拔 5,500 米)					
1			81.9		0
2	0.5	0.1116	53.3	4.5	57.8
3	-0.8	0.0656	29.9	-12.2	17.6
4	3.3	0.0740	21.6	44.6	66.2
5	7.2	0.0740	14.5	97.3	111.8
6	9.5	0.0740	0.0	128.4	128.4
7	6.7	0.0740	7.1	90.5	97.6
8	10.0	0.0740	12.7	135.1	147.8
9	9.6	0.0740	7.3	129.7	137.0
10			75.9		0

一些悬冰川及冰斗冰川可按直接暴露出来的冰崖测定其厚度。考察期间,地面立体摄影测量组按摄影照片直接测定了若干冰崖的高度(表8),这为我们了解此类冰川的厚度提供了宝贵的资料。

表8 冰崖高度野外实测结果

冰川名称	类型	部位	冰崖高度(米)	观测方法
远西绒布冰川	冰帽	7975米峰顶	104	摄影测量
格重康冰川	冰帽	7975米峰顶	62	摄影测量
久达冰川	山谷冰川	上部	48	摄影测量
绒布6号冰川	悬冰川	末端	25	摄影测量
绒布9号冰川	悬冰川	末端	41	摄影测量
东绒布1号冰川	冰斗冰川	上部	50	摄影测量
东绒布5号冰川	悬冰川	末端	16	摄影测量
久达9号冰川	冰斗冰川	末端	20	野外观测
大庆2号冰川	冰斗冰川	末端	30	野外观测

### 关于珠峰地区各种类型冰川厚度的估算

冰川的厚度主要取决于冰川的规模及类型。冰川的规模大,厚度也大。不同类型冰川相比,山谷冰川最大,冰斗冰川次之,悬冰川以及平顶冰川(或冰帽)最小。由于实际上不可能对每条冰川的厚度进行测量,因此,只能依据对少数冰川的实际观测资料,估算不同等级、规模和类型的冰川平均厚度。这个方法虽然比较粗略,但仍然是目前国际上进行大面积冰川储量估算时所普遍采用的方法。

珠峰地区冰川可按上述原则分为四级:

(1) 面积在 20 平方公里以上的山谷冰川可以绒布冰川为代表,用重力法测得该冰川下游(距末端 5 公里处)平均厚度为 110 米,1965 年印度人 R. N. Bose 等曾用地震法测得干城章嘉峰最大之热姆冰川下游(距末端 5 公里)冰川中央最大厚度为 300 米<sup>[9]</sup>比绒布冰川下游的最大厚度大约一倍。由于观测方法不同,不便严格比较,但按拉加里公式\*推算,绒布冰川下游海拔 5,320 米处冰川的平均厚度为 219 米,亦比该断面附近重力法所测断面平均厚度大一倍。据此推测,重力法所测绒布冰川厚度可能偏小,有待今后进一步观测比较。

目前,我们暂以这次重力观测结果作为推算珠峰地区大型山谷冰川厚度的基础。按山谷冰川的一般规律,在纵剖面上冰川厚度最大处出现在雪线附近,据此推测绒布冰川的最大厚度可能超过 300 米。此种类型冰川的平均厚度肯定要大于 110 米,因此,我们暂时采用 120 米。

(2) 面积为 5—20 平方公里的山谷冰川及冰斗冰川,从长度为 10.4 公里的久达冰川形态看,其厚度略小于绒布冰川,平均厚度可取 100 米。

(3) 面积为 1—5 平方公里的小山谷冰川及冰斗冰川。这类冰川厚度更小,天山乌鲁木齐河 1 号冰川(长 2.41 公里)曾用拉加里法算得雪线附近冰川平均厚度为 84.95 米,据此推测珠峰地区此类冰川的平均厚度为 80 米可能比较合适。

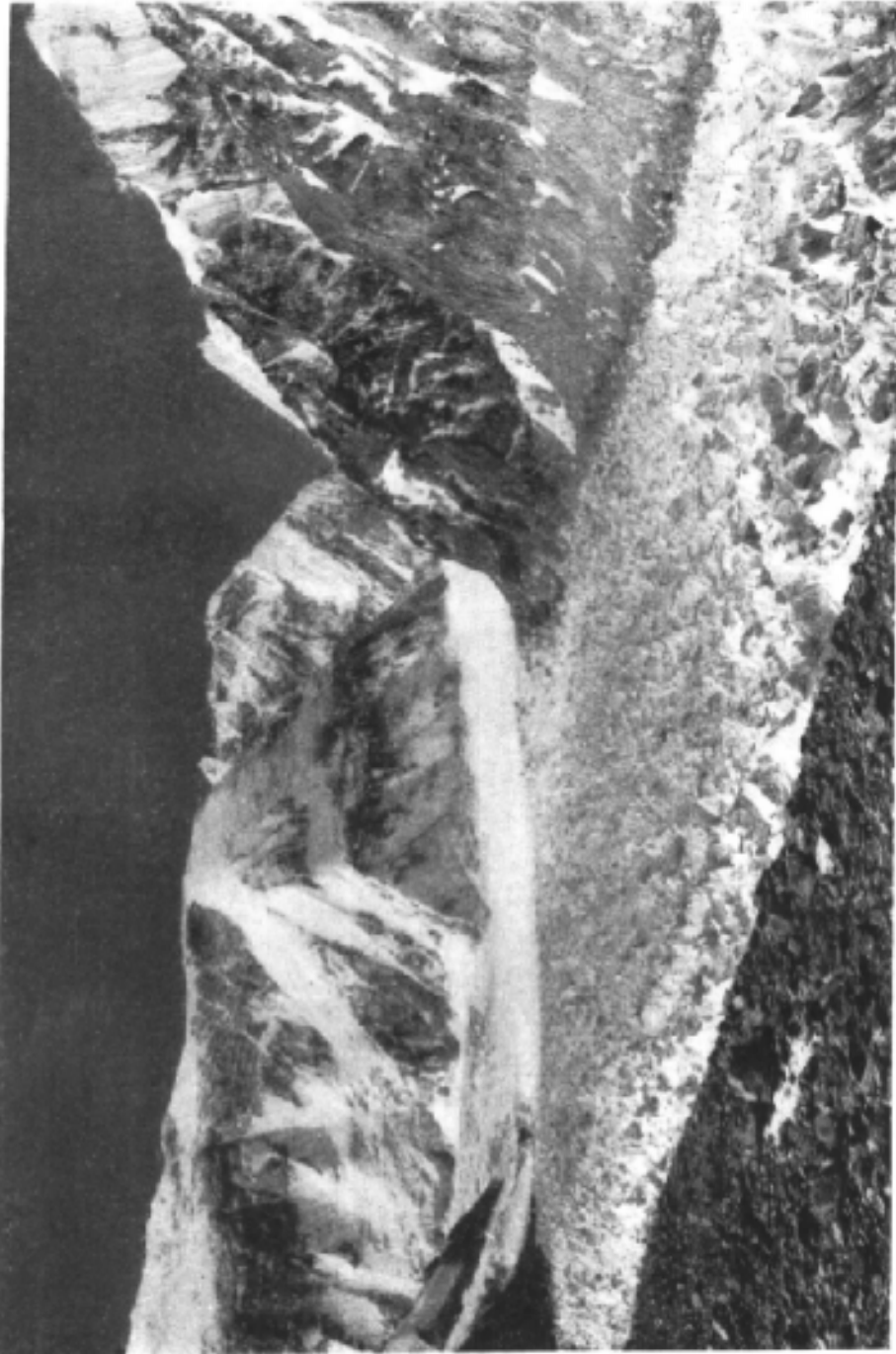
(4) 面积为 1 平方公里以下的小冰斗冰川及悬冰川。上述实测冰崖厚度之冰川多为此种类型,因此,其平均厚度取 40 米。

冰川的平均密度为 0.9 克/厘米<sup>3</sup>,则按上述原则可以估算出珠峰地区的冰川储量(表 9)。

表 9 珠峰地区冰川储量估算表(单位:亿公方)

冰川等级 (平方公里)	<1	1—5	5—20	>20	总计	
平均厚度(米)	40	80	100	120	约 102	
北坡 {	冰储量	20.78	129.92	175.26	459.12	785.08
	水储量	18.70	116.92	157.73	413.21	706.56
南坡 {	冰储量	26.21	99.88	162.68	399.52	688.29
	水储量	23.59	89.89	146.41	359.57	619.46
总计 {	冰储量	46.99	229.80	337.94	858.64	1473.37
	水储量	42.29	206.81	304.14	772.78	1326.02

\* 拉加里公式:  $A = 8.4 \sqrt{\frac{V}{\sin \alpha}}$  断面  $V$ —冰川年平均流速(27.2 米/年),  $\alpha$ —断面处冰面平均坡度( $2^{\circ}18'$ )。



照片 1 中绒布冰川上游 (陈建明摄)