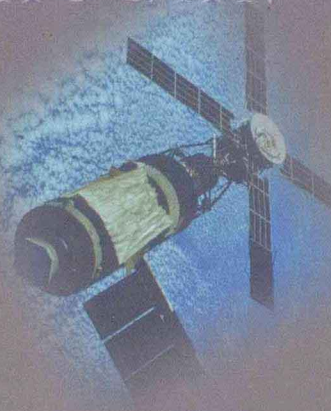


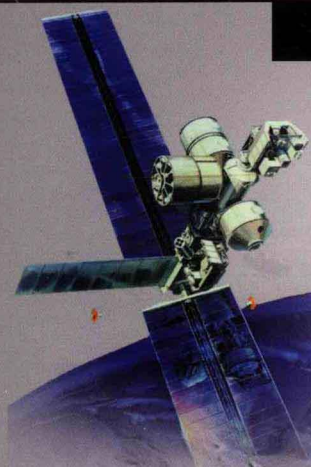
XUEBING YAOGAN
XUEBING YAOGAN



雪冰遥感

W. Gareth Rees 著

车涛 高峰 等译



黄河水利出版社

雪 冰 遥 感

W. Gareth Rees 著

车 涛 高 峰 等译

黄 河 水 利 出 版 社

· 郑 州 ·

图书在版编目(CIP)数据

雪冰遥感 / (英)里斯 (Rees, W.G.) 著; 车涛等译
郑州: 黄河水利出版社, 2011.10
书名原文: Remote Sensing of Snow and Ice
ISBN 978-7-5509-0120-9

I. ①雪… II. ①里… ②车… III. ①遥感技术-应用-冰川地貌 IV. ①P343.6-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 185774 号

Authorized translation from English language edition published by CRC Press, part of Taylor & Francis Group LLC.

出版社: 黄河水利出版社

地址: 河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 14 层

邮政编码: 450003

发行单位: 黄河水利出版社

发行部电话: 0371-66026940、66020550、66028024、66022620(传真)

E-mail: hhslebs@126.com

承印单位: 河南省瑞光印务股份有限公司

开本: 787 mm × 1 092 mm 1 / 16

印张: 16.25

插页: 8

字数: 375 千字

印数: 1—1 000

版次: 2011 年 10 月第 1 版

印次: 2011 年 10 月第 1 次印刷

著作权合同登记号: 图字 16 - 2011 - 196

定价: 45.00 元

序 言

尽管行星地球的特色在于水,但是冻结状态的水在地球上的作用并没有得到正确的评价。地球表面的 1/6 被雪冰覆盖,它们存在的形式包括:地表积雪、冰川和更大的陆地冰(如南极和格陵兰冰盖)、海冰、河湖冰和冰山。这些冰体与地下的多年冻土共同组成了地球的冰冻圈。冰冻圈在全球气候系统中有着重要的意义,它是气候变化的指示器,而且在各种空间尺度上对生态、水文、经济、运输、娱乐等众多领域产生重要影响。

地球上大部分的雪冰位于人类难以到达、气候极端的偏远地区,而且极夜现象使信息获取工作更加复杂。基于这些原因,加之雪冰覆盖区域广袤,遥感观测技术特别是卫星遥感技术在获取冰冻圈信息方面发挥着关键作用。这些技术可以在较短时间内收集大量信息。某些星载系统对地球表面的观测速度高达每秒 $100\,000\text{km}^2$, 因此很容易提供地球表面大部分地区的宏观观测,但是常用系统大多比其观测速度要小,为其观测速度的 1/10 或 1/100。某些遥感系统能透过云层观测地球表面;有些系统不依赖太阳光,因而可在极夜期间工作。实际上,目前所有的遥感系统都能够获取适合计算机存储和分析的数字信息。雪冰方面的研究者早已意识到了这些优点。自从 1970 年左右冰冻圈监测的星载技术出现以来,新的研究方法不断发展,传感器数量不断增加,而且时间序列数据不断延长。

本书的目的是向读者较为全面地介绍冰冻圈遥感。本书将提供足够的背景信息来解释冰冻圈观测为什么重要,遥感观测为什么是可取甚至是必需的。本书也将提供遥感常用的技术方法,涉及的主要领域包括:冰雪基本物理属性的各种测量,以及目前已有的和正在发展的遥感技术。本书专门讨论了积雪、陆地冰(冰川、冰盖和冰架)、海冰、河湖冰和冰山。我希望本书能接替 Hall 和 Martinec 于 1985 年编著的《冰雪遥感》(Remote Sensing of Ice and Snow, Hall and Martinec, Chapman & Hall, 1985)一书,因此书名也有意与其相似。多年来,我一直推荐 Hall 和 Martinec 的书给我的学生,但是,在它出版之后,遥感技术和数据分析方面都有了很大变化和进步,而且对冰冻圈的认识也比以前更为丰富。因此,本书试图反映出这些进展。当然,1985 年以来,本领域已经出版了大量成果,但大部分局限在研究期刊(尤其是冰川年鉴(Annals of Glaciology),虽然并不全面,但是它记录了国际冰川学会不定期的冰川遥感国际会议的进展)和讨论领域内某些特别问题的专辑上。这些研究成果不能提供一致的论述,也无法将主题和思想都统一起来,但是这些问题可以在一本书里解决。最后强调的是,我写本书的动机,就是因为我遗憾地发现目前还没有这样一本书。

如何组织一本以雪冰遥感为题目的书?作者应该认为读者很熟悉冰冻圈方面的知识但一点都不懂遥感技术和图像分析,还是认为读者是遥感专家但不懂冰冻圈?这本书应该是最新研究成果的纲要吗?这些好像都不理想。因此,本书假设读者在冰冻圈或者冰冻圈的某些方面及遥感技术两个领域都有一定的知识,这个假设贯穿于本书各章节之中。

第 1 章是冰冻圈现象及其重要性的简要回顾。第 2 章简要地论述了主要卫星遥感的基本方法。如果没有后续处理, 遥感数据的使用就会受到限制, 因此第 3 章概述了数字图像分析方法。这一章的重点是介绍冰冻圈研究中已经使用的或正在发展中的图像处理方法, 本书后半部分将在一定的背景下对其中许多方法进行补充说明。从这一点上看, 本书回归到了雪冰的主题上。第 4 章是对雪冰物理性质和遥感观测技术的简要回顾。因此, 第 4 章涉及传感器探测过程中将地球物理信息转化为电磁辐射的原理, 它与第 1 章密切相关。接下来的五章分别详细论述遥感方法在不同冰冻圈要素研究中的应用: 积雪(第 5 章)、海冰(第 6 章)、淡水冰(第 7 章)、冰川(第 8 章)和冰山(第 9 章)。本书不涉及多年冻土, 其原因在第 1 章中有论述。最后一章是本书的总结, 讨论了遥感能够揭示冰冻圈的哪些内容, 该领域存在的主要技术难题, 以及针对这些问题的思考。考虑到平衡, 本书 1/4 的篇幅用于冰冻圈的全面介绍, 1/4 的篇幅用于介绍遥感和图像处理方法, 另外一半详细论述遥感方法在冰冻圈各个要素中的应用。

本书为从事一般性的环境科学及特殊的冰冻圈的研究工作者而写, 也适合硕士生和高年级本科生阅读。虽然没有呈现最新研究成果的纲要, 但本书引用了 650 篇最近的科技文献著作, 文献列表虽谈不上全面(难免漏掉一些重要文献, 我提前表示抱歉), 但是希望读者能熟悉某一特定领域的最新进展。本书从头到尾都是一般性的描述, 但是第 4 章讨论冰雪物理特性及其与遥感观测的关系时, 用到较多的数学知识。这些数学细节不会影响到对其他内容的理解。

本人希望这本书可以作为您工作参考的一部分。作为一本参考书, 最好有一个好的索引, 为交叉引用提供方便。基于这个想法构建了本书索引, 它包含卫星及其传感器的名称, 这样便于找到某一传感器的应用实例。它也包含地理名字, 这样有关某一冰川的实例就能找到, 如斯瓦尔巴群岛的米德特拉文伯林冰川。这些例子也在“斯瓦尔巴群岛”下建立了索引。

W.G.Rees

剑桥

作者简介: W.G.Rees 博士毕业于英国剑桥大学, 攻读自然科学, 在卡文迪什实验室获得射电天文学博士学位。1985 年起任剑桥大学斯科特极地研究所遥感组负责人。

他当前的研究兴趣包括冰川、积雪与高纬度植被遥感。他多次去北极地区开展野外工作, 出版专著 5 部, 发表论文 80 余篇。

致 谢

一如寻常，首先感谢我的妻子 Christine，她曾给予我百般鼓励与支持。感谢剑桥大学斯科特极地研究所的 Neil Arnold 博士，我们在斯瓦尔巴和剑桥曾多次进行学术上的合作与交流。感谢 Taylor & Francis 出版集团给予的细心帮助。

以下个人或组织都曾为本书提供数据或插图，在此一并表示感谢：美国地球物理学会（图 6.8，图 6.11，图 6.12，图 6.16，图 9.6）；北美北极研究所（图 7.3~图 7.5）；荷兰 Elsevier 有限公司（图 4.14）；美国寒区研究与工程实验室（图 7.8）；欧洲联合遥感实验室（图 4.3）；欧洲空间局（图 2.23，图 2.24，图 5.3，图 6.6，图 8.5）；阿拉斯加图利克地面站的 Richard Flanders（图 1.20）；加拿大地质调查局（图 1.10）；加拿大阿尔伯塔大学全球陆地冰空间测量加拿大区域中心（图 1.8）；加拿大阿尔伯塔大学土木与环境工程学院的 Faye Hicks(图 1.19)；IEEE（图 8.11）；南极站的 J. Dana Hrubes(图 1.17)；国际冰川学会（图 5.6，图 6.7，图 6.14，图 8.2，图 8.6~图 8.10，图 8.12~图 8.14）；国际近海与极地工程学会（图 9.4）；剑桥大学的 John Lin(图 2.24)；挪威卑尔根的南森环境与遥感中心（图 6.6）；NASA 地球观测台（图 1.7）；NASA 可视地球（图 5.1）；科罗拉多大学国家雪冰数据中心（图 1.2，图 1.14，图 1.15，图 5.5）；敦提大学 NERC 卫星接收站（图 2.7）；莫斯科行星研究中心（图 6.6）；极地数据中心（图 7.6，图 7.7）；卢瑟福阿普顿实验室（图 2.9）；Taylor & Francis 出版集团(图 6.1，图 6.13，图 6.15，图 6.18，图 9.3，图 9.5)；挪威特隆索卫星地面站（图 6.6）；莱斯特大学地球观测科学组（图 2.9）；美国海岸护卫队国际冰巡查组（图 1.13）；基勒大学的 Richard Waller(图 1.6)。

译者的话

研读完 W.G.Rees 博士所著 *Remote Sensing of Snow and Ice* 一书后,我产生了一个强烈的愿望,那就是特别希望将这部论著推荐给雪冰遥感领域的的朋友和同事,尤其是刚刚进入该领域的研究生。原因大概有以下几个方面:

首先,随着冰冻圈研究的不断深入,具有冰冻圈研究背景的科学家不断地要用到遥感技术。他们极其需要利用遥感数据来验证其野外观测结果或者各种区域模型,更需要利用遥感反演的雪冰数据来补充他们的研究成果,更有一些学者则直接将遥感作为他们研究工作中的主要研究手段。经常碰到没有遥感背景的学者或者研究生和我们讨论如何在他们的研究工作中引入遥感技术,但因为他们对遥感技术的优势和不足缺乏基本的认识,往往存在期望过高或者过低的误解。

其次,长期从事其他领域遥感的学者,尤其是有遥感背景、刚刚进入冰冻圈遥感领域的研究生,面对冰冻圈方面的课题或研究方向,由于对冰雪的物理特性了解甚少而一筹莫展。虽然通过阅读文献可以获取相关信息,但受限于篇幅,期刊文章往往不会系统全面地解释有关冰冻圈物理特性,而本书却几乎涵盖了所有的雪冰物理特性。

再次,碰巧的是,我参与编著的中文版《冰冻圈遥感》与该英文专著几乎同时出版。虽然两部专著有一定的内容交叉,但是各有不同的侧重点。英文专著更多地阐述了欧美地区的研究成果,而中文专著在分析国际上重要成果的同时,对我国科学家在该领域的研究成果进行论述。虽然侧重点有所不同,但是如果读者能同时阅读两部著作,通过对比分析就可以获得更为全面的认识。此外,两部专著均用到冰冻圈的概念。但是英文专著没有涉及冻土遥感,更确切地说,英文专著作者更加强调多年冻土(permafrost),认为其本身埋在地表以下,不能被遥感监测。而中文专著中不但涵盖多年冻土的遥感(例如探底雷达),还将冻土的概念扩展为 frozen ground(而不仅仅局限于 permafrost)。这样一来,多年冻土行为引起的地表变形也是遥感可以发挥作用的研究领域,而且地表的冻融循环还可由主被动微波遥感观测。值得一提的是,英文专著中将陆地冰分为冰川、冰盖和冰架,并专门提出了冰山遥感,也体现了国际上在两极地区的工作要比我国提前一步。

最后,该专著的一个特点在于非常全面地涉及雪冰遥感的各个领域,但是有些内容并没有展开论述,而是给出了相关的参考文献,这对刚刚涉足雪冰遥感领域的学者和研究生无疑是一个快速掌握知识的捷径。正如原序言中提到,650 篇参考文献是一个很大的信息库,对某些研究细节感兴趣的读者,可以快速找到相关的文献进行研读。

本书初稿翻译由车涛、高峰、戴礼云、王增艳和欧阳斌完成,车涛和高峰负责审校并统稿,薛振和对书中有关海冰等方面的专业术语进行修正,本书的翻译得到了国家自然科学基金项目(40601065 和 40971188)和冰冻圈科学国家重点实验室开放基金(SKLCS 08-01)的资助。

由于译者水平有限,书中难免有错误和不当之处,敬请读者批评指正。

车 涛

2011 年 5 月

目 录

序言

致谢

译者的话

1 冰冻圈	1
1.1 引言	1
1.2 积雪	1
1.3 冰盖与冰川	3
1.4 冰山	9
1.5 海冰	11
1.6 淡水冰	15
1.7 多年冻土	16
2 对地遥感观测系统	19
2.1 引言	19
2.2 航空摄影	20
2.2.1 摄影胶片	20
2.2.2 光学成像原理	22
2.2.3 航空摄影几何学	23
2.2.4 制图、地形、立体与正射影像	23
2.2.5 实例	25
2.2.6 小结	26
2.3 可见与近红外光电系统	26
2.3.1 扫描几何学	26
2.3.2 空间分辨率	27
2.3.3 光谱分辨率	28
2.3.4 可见光/红外制图几何	28
2.3.5 实例	28
2.3.6 小结	31
2.4 热红外系统	31
2.4.1 空间分辨率	32
2.4.2 光谱分辨率	32
2.4.3 辐射分辨率	32
2.4.4 大气校正	32
2.4.5 实例	33
2.4.6 小结	34

2.5 被动微波系统	34
2.5.1 空间分辨率与扫描带宽	34
2.5.2 光谱分辨率与频率范围	35
2.5.3 辐射分辨率	35
2.5.4 实例	35
2.5.5 小结	36
2.6 激光剖面探测	36
2.6.1 空间分辨率	37
2.6.2 大气校正	38
2.6.3 实例	39
2.6.4 小结	40
2.7 雷达高度计	40
2.7.1 空间分辨率	40
2.7.2 波形信息	42
2.7.3 坡度影响	42
2.7.4 高度突变的影响	43
2.7.5 大气校正	43
2.7.6 实例	44
2.7.7 小结	44
2.8 无线电回波探测	45
2.9 成像雷达与散射计	45
2.9.1 成像几何学与空间分辨率	46
2.9.2 雷达图像变形	47
2.9.3 辐射分辨率	49
2.9.4 干涉 SAR	50
2.9.5 实例	51
2.9.6 小结	54
3 图像处理技术	55
3.1 引言	55
3.2 预处理	56
3.3 图像增强	57
3.3.1 对比度变换	57
3.3.2 空间滤波	58
3.3.3 波段变换	60
3.4 图像分类	63
3.4.1 密度分割方法	63
3.4.2 多光谱分类方法	64
3.4.3 基于纹理特征的分类方法	64
3.4.4 神经网络方法	67

3.5 几何特征检测	68
3.6 图像分割	68
3.7 变化检测	69
4 雪冰的物理特征	73
4.1 引言	73
4.2 积雪	73
4.2.1 物理特性	73
4.2.2 表面几何	74
4.2.3 积雪的热特性	76
4.2.4 可见光与近红外波段积雪的电磁特性	77
4.2.5 热红外波段积雪的电磁特性	79
4.2.6 微波波段积雪的电磁特性	80
4.2.7 积雪的微波后向散射	83
4.2.8 积雪的微波辐射	85
4.3 河湖冰	86
4.3.1 物理特性	86
4.3.2 可见光与近红外波段淡水冰的电磁特性	87
4.3.3 淡水冰的热红外辐射特性	87
4.3.4 淡水冰的微波电磁特性	87
4.4 海冰	88
4.4.1 物理特性	88
4.4.2 可见光与近红外波段海冰的电磁特性	89
4.4.3 海冰的热红外辐射特性	91
4.4.4 海冰的微波电磁特性	91
4.5 冰川	93
4.5.1 物理特性	93
4.5.2 可见光与近红外波段冰川的电磁特性	95
4.5.3 冰川的热红外辐射特性	96
4.5.4 冰川的微波特性	96
4.5.5 冰川在 VHF 和 UHF 的辐射传输	98
4.6 冰山	98
4.6.1 物理特性	98
4.6.2 可见光与近红外波段冰山的电磁特性	99
4.6.3 冰山的微波电磁特性	99
5 积雪遥感	101
5.1 引言	101
5.2 空间范围	102
5.2.1 小尺度	102
5.2.2 中尺度	105

5.2.3 全球尺度	107
5.3 雪水当量与雪深	109
5.3.1 小尺度与中尺度	109
5.3.2 全球尺度	110
5.4 融雪和径流模拟	112
5.5 积雪的物理特征	112
5.5.1 反射率与反照率	112
5.5.2 粒径大小	113
5.5.3 温度	114
5.5.4 雷达特性	114
6 海冰遥感	115
6.1 引言	115
6.2 海冰范围与密集度	116
6.3 海冰类型	121
6.4 融水池及其表面反照率	126
6.5 海冰厚度	126
6.6 海冰运动	129
6.7 海冰温度	132
7 淡水冰遥感	133
7.1 引言	133
7.2 范围	133
7.3 冰类型分类	139
7.4 冰厚度	139
7.5 淡水冰运动	141
8 冰川、冰盖与冰架遥感	143
8.1 引言	143
8.2 空间范围与表面特性	143
8.3 表面地形	149
8.4 冰厚度与岩床地形	152
8.5 表面温度与表面融化	154
8.6 累积速率	157
8.7 表面分带	157
8.8 冰运动	162
8.9 质量平衡	163
9 冰山遥感	165
9.1 引言	165
9.2 冰山探测与监测	165
9.2.1 可见光与近红外观测	165
9.2.2 被动微波辐射计	167

9.2.3 合成孔径雷达.....	167
9.3 冰山厚度	171
10 总结	173
10.1 遥感揭示了冰冻圈的哪些方面?.....	173
10.2 还有什么技术上的挑战?.....	173
10.2.1 普遍难题	173
10.2.2 特殊难题	175
10.3 近期趋势和未来发展方向	176
参考文献	179
索引	223

1 冰冻圈

1.1 引言

地球上雪冰覆盖的地区统称为冰冻圈(cryosphere), cryosphere 来自希腊语 krios, 是“寒冷的”意思。冰冻圈要素包括积雪、海冰、淡水冰(冻结的湖泊和河流)、陆地上大的冰体(冰盖、冰川, 以及相关现象如冰架和冰山)和多年冻土。随着与赤道距离的增加, 地球表面的温度通常会降低, 因此冰冻圈主要是高纬度现象(见彩图 1.1)。

地球上的冰和雪在许多时空尺度上有重要意义。在局部和区域尺度上, 冰冻圈以正负两种方式与人类和自然环境进行相互作用。在全球尺度上, 冰冻圈是地球气候系统中的重要组成部分。冰和雪通常是入射(短波)太阳辐射的高反射体, 因此它们给系统提供了反馈机制(通常, 冰冻圈面积越大, 地球吸收太阳辐射越少)。冰冻圈及其年际和长期的变化, 改变着水的分布和流动。总体上, 全球气候变化模型预测到的最大变化出现在高纬度地区(即所谓的极地放大, polar amplification), 因此广泛地监测极地地区, 尤其是冰冻圈, 对探讨全球气候变化现象很重要。大部分冰冻圈远离人口中心, 而且环境恶劣, 这就意味着利用遥感方法开展调查研究, 特别是卫星数据的应用具有重要价值(Derksen 等, 2002; Massom, 1991)。事实上, 自 19 世纪 60 年代中期, 人类已经开始了从空间监测冰冻圈的研究(Foster 和 Chang, 1993)。

本章描述冰冻圈的主要要素及其空间分布和重要性, 分析监测冰冻圈的需求和可能性。

1.2 积雪

雪可以定义为主要由升华物形成的正在降落或者堆积的冰颗粒(Unesco/IAHS/WMO, 1970)。本书中我们关心的是积雪(snow cover), 而不是降雪(图 1.1)。全球约 5%的降水以雪的形式到达地球表面(Hoinkes, 1967), 但是在北极区该比例达到 50%~90%(Winther 和 Hall, 1999)。区分永久性(permanent)、季节性(seasonal)和瞬时(temporary)积雪很容易。瞬时和季节性积雪不会经历夏季而存在, 而永久性积雪则可以保持许多年。永久性积雪主要出现在南极和格陵兰, 因此永久性积雪大多数是南半球现象, 而瞬时和季节性积雪^①主要是北半球现象。概略地讲, 瞬时和季节性积雪的分布呈现出如下特点: 在北美, 瞬时积雪出现在纬度 30°~ 40°, 而季节性积雪出现在纬度 40°以北; 在西欧, 季节性

^① 根据积雪持续时间的长短来区分瞬时和季节性积雪。典型地, 季节性积雪持续几个月, 通常在整个冬季都有补给, 而瞬时积雪持续大约几天。

积雪出现在纬度 60° 以北和山区, 而瞬时积雪(除了伊比利亚半岛西南地区)可以出现在任何地方; 在东欧, 季节性积雪从纬度 50° 向北延伸, 瞬时积雪则向南延伸直到纬度 30° 的中东地区; 亚洲的季节性积雪向南可到纬度 30° ; 在南半球, 多数积雪仅限于山区(安第斯山脉、德拉肯斯堡山脉、雪山和新西兰南部阿尔卑斯山)。图 1.2 给出了全球的积雪分布。



图 1.1 苏格兰高地的积雪(作者拍摄)

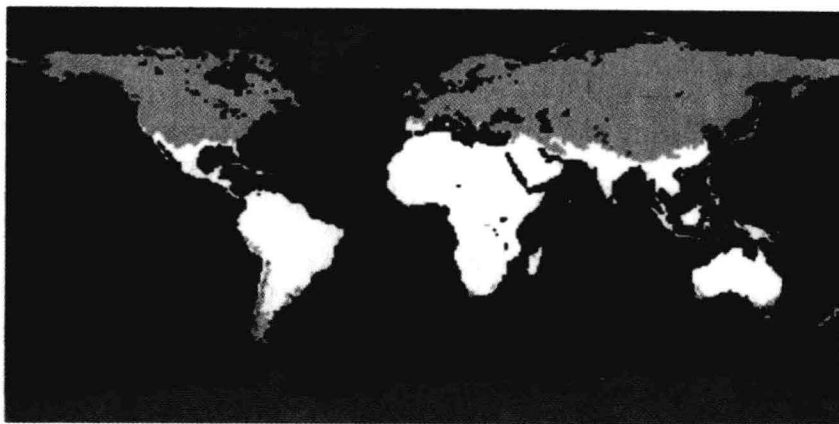


图 1.2 全球 1° 格网的积雪大致分布

浅灰色是指有积雪出现的地方, 较黑的阴影表示基本上是永久性积雪 (计算北半球积雪的数据来自美国国家雪冰数据中心 Richard L. Armstrong 提供给国际卫星陆面气候项目(ISLSCP)二期数据归档(http://islscp2.sesda.com/ISLSCP2_1/html_pages/islscp2_home.html)。南半球的数据来自 MODIS 积雪和海冰全球制图项目(<http://modis-snow-ice.gsfc.nasa.gov/intro.html>))

除去格陵兰岛外, 北半球积雪的空间范围在 8 月的 400 万 km^2 和 1 月的 $4\,600 \text{ 万 km}^2$ (约

占陆地面积的 40%)内变化(Fei 和 Robinson, 1999) (图 1.3)。北半球非永久性积雪的最大水量大约为 3×10^{15} kg(Foster 和 Chang, 1993), 或者说在积雪覆盖区大约 65 kg/m^2 , 相当于 65 mm 水。雪水当量(SWE)的最大值在一年中出现的时间依赖于地理位置。例如, 在芬兰南部一般出现在 2~3 月, 而芬兰北部大约出现在 2 个月以后, 一般为几百毫米(Koskinen, Pulliainen 和 Hallikainen, 1997)。

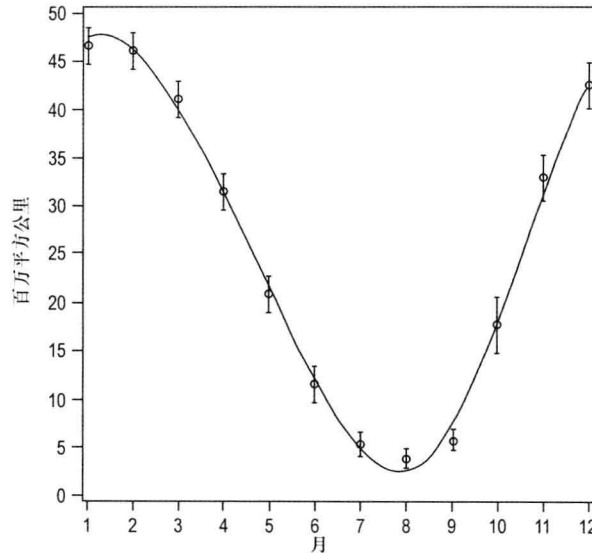


图 1.3 1972~1991 年北半球的平均积雪面积, 不包括格陵兰岛(Robinson, 1993)

圆圈表示平均值; 误差条显示 ± 1 个标准差的年际变化;

曲线是第 1、2 项每年循环的最优拟合谐波

积雪在所有空间尺度上都非常重要。对于气候(尤其是在控制地表反照率方面(Nolin 和 Stroeve, 1997))和水文(Ross 和 Walsh, 1986; Barnett 等, 1989), 积雪都是一个重要的地球物理变量。季节性积雪是造成地表反照率出现最大年内变化与年际变化的原因(Armstrong 和 Brodzik, 2002), 并且对全球气候系统有重要的反馈机制。另外一个重要的气候影响是积雪产生的绝热作用, 它减少了地表与大气的热交换。在局部尺度, 积雪也很重要, 因为它能为饮用、灌溉和水力发电积蓄水, 也可产生洪水(Rango, 1993; Rango 和 Shalaby, 1998)。积雪的绝热作用在冬季低温时保护植被。通过冬季滑雪等娱乐项目, 积雪提供经济效益, 同时由于对公路和铁路运输的潜在破坏对经济产生了负面影响。

因此, 有必要监测积雪空间范围、深度和雪水当量, 而且地表反照率的测量对积雪能量平衡建模很重要。

1.3 冰盖与冰川

永久性积雪最终形成冰川, 即在自身的重力作用下慢慢移动的冰雪积累物。雪的积累转化为冰川的过程将在第 4 章中讨论。冰川大小不等且差异很大, 最大冰川的面积大

概是最小冰川的 10^8 倍。最小冰川的面积为 $10 \text{ hm}^2 (10^5 \text{ m}^2)$ ，而地球上最大的冰体是南极和格陵兰岛的冰盖(图 1.4~图 1.6)，占地球上陆地冰总量的 99%，占总面积的 97%。表 1.1 给出了全球的陆地冰分布。由表可知，全球的陆地冰总体积是 $3.30 \times 10^{16} \text{ m}^3$ ，占地球淡水资源的 77%，剩下的 23%包括 22%的地下水，湖、河、雪、土壤水分及水蒸气占 1%(Thomas, 1993)。据估计，假设冰存在的平均时间(水分子仍是冰川的一部分)为 10^4 年(Hall 和 Martinec, 1985)，全球陆地冰的排水量每年是 $3 \times 10^{12} \text{ m}^3$ (Kotlyakov, 1970)。与冰的存在相比，瞬时和季节性积雪仅有数周或数月。

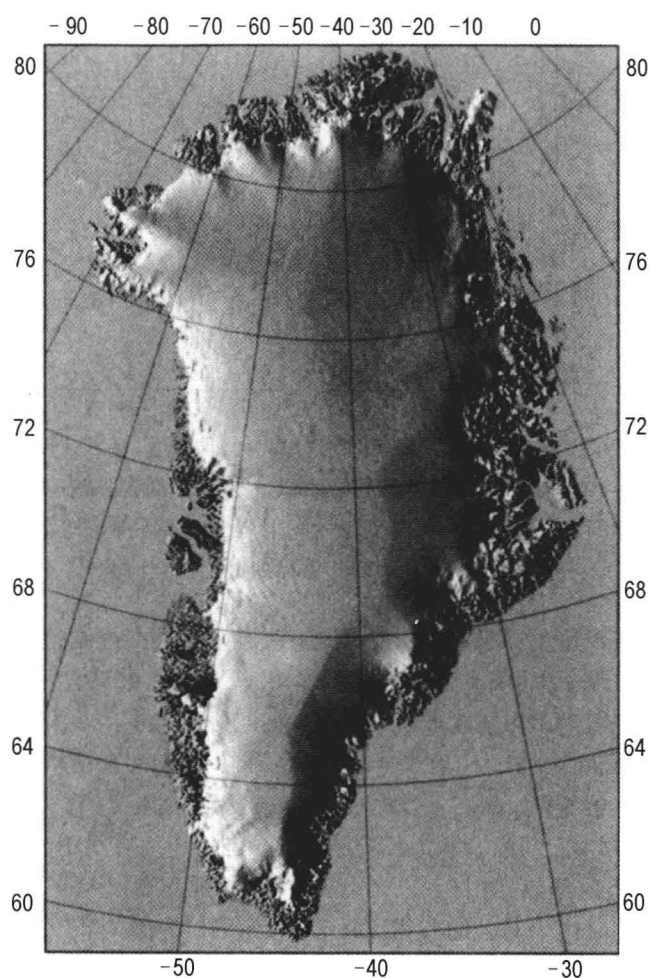


图 1.4 格陵兰岛冰盖的地貌图(由丹麦极地中心提供)

(http://www.kms.dk/research/geodesy/index_en.html?nf=http://www.kms.dk/research/geodesy/geoid/geoid_en.html)

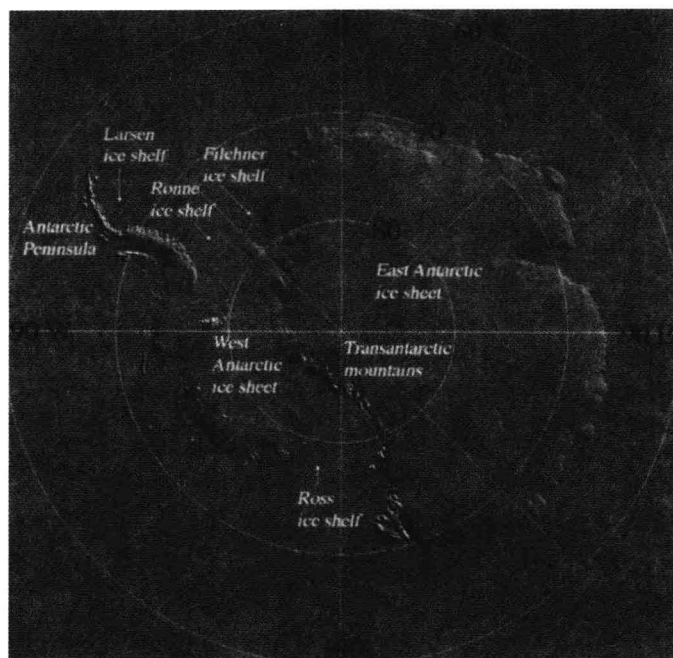


图 1.5 南极阴影地貌图

图中显示了一些主要特征(并不是所有的冰架都被识别)

(该图由 GTOPO30 全球数字高程模型提取(<http://edcdaac.usgs.gov/gtopo30/gtopo30.asp>))

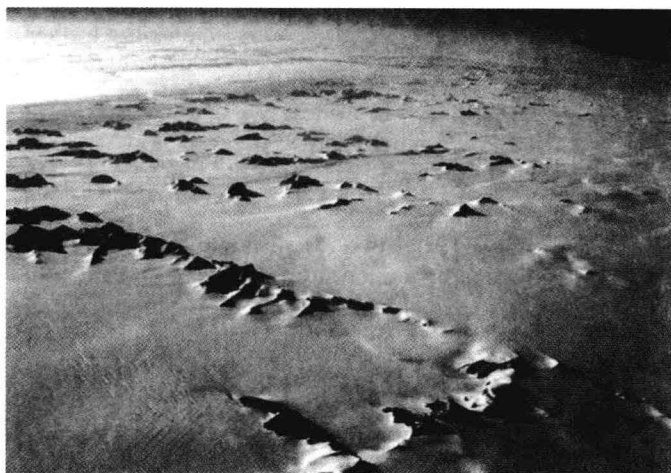


图 1.6 格陵兰岛冰盖东缘

在这个区域,到处都是冰源岛峰 (Keele 大学地球科学与地理学院 Richard Waller 拍摄)

如表 1.1 所示,这两个冰盖非常厚——平均超过 1 km,而且在南极最大厚度达到 4 500 m,在格陵兰最大厚度约为 3 000 m。事实上,南极冰盖由东南极和西南极冰盖组成,被横贯南极山脉隔开。东南极冰盖比西南极冰盖大、厚且久远。前者基本上都在海平面以上,而后者几乎都在海平面以下。