



国家重点基础研究发展计划



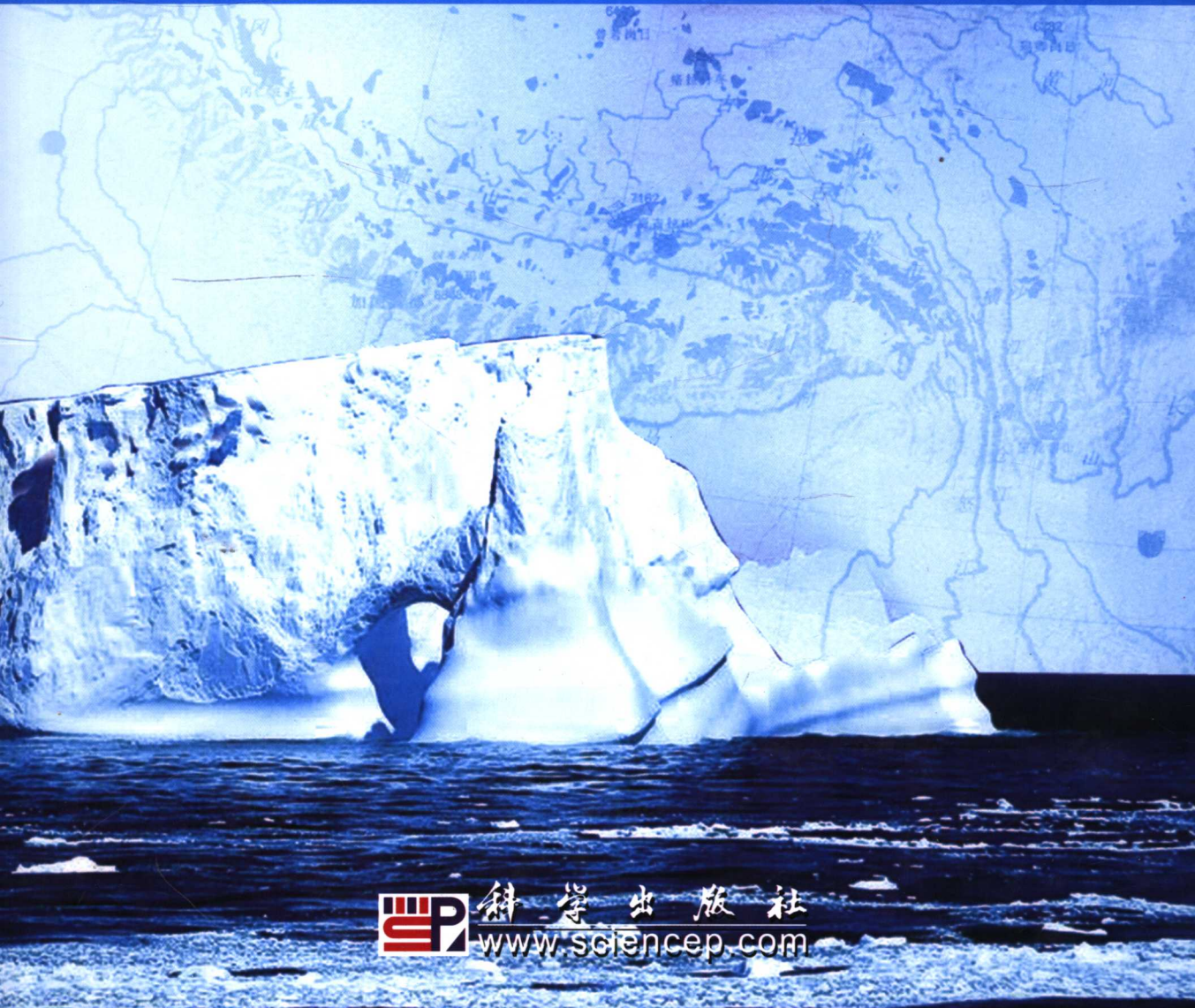
NSFC

Remote Sensing of Cryosphere

# 冰冻圈遥感

曹梅盛 李新 陈贤章 王建 车涛 著

Cao Meisheng Li Xin Chen Xianzhang  
Wang Jian Che Tao



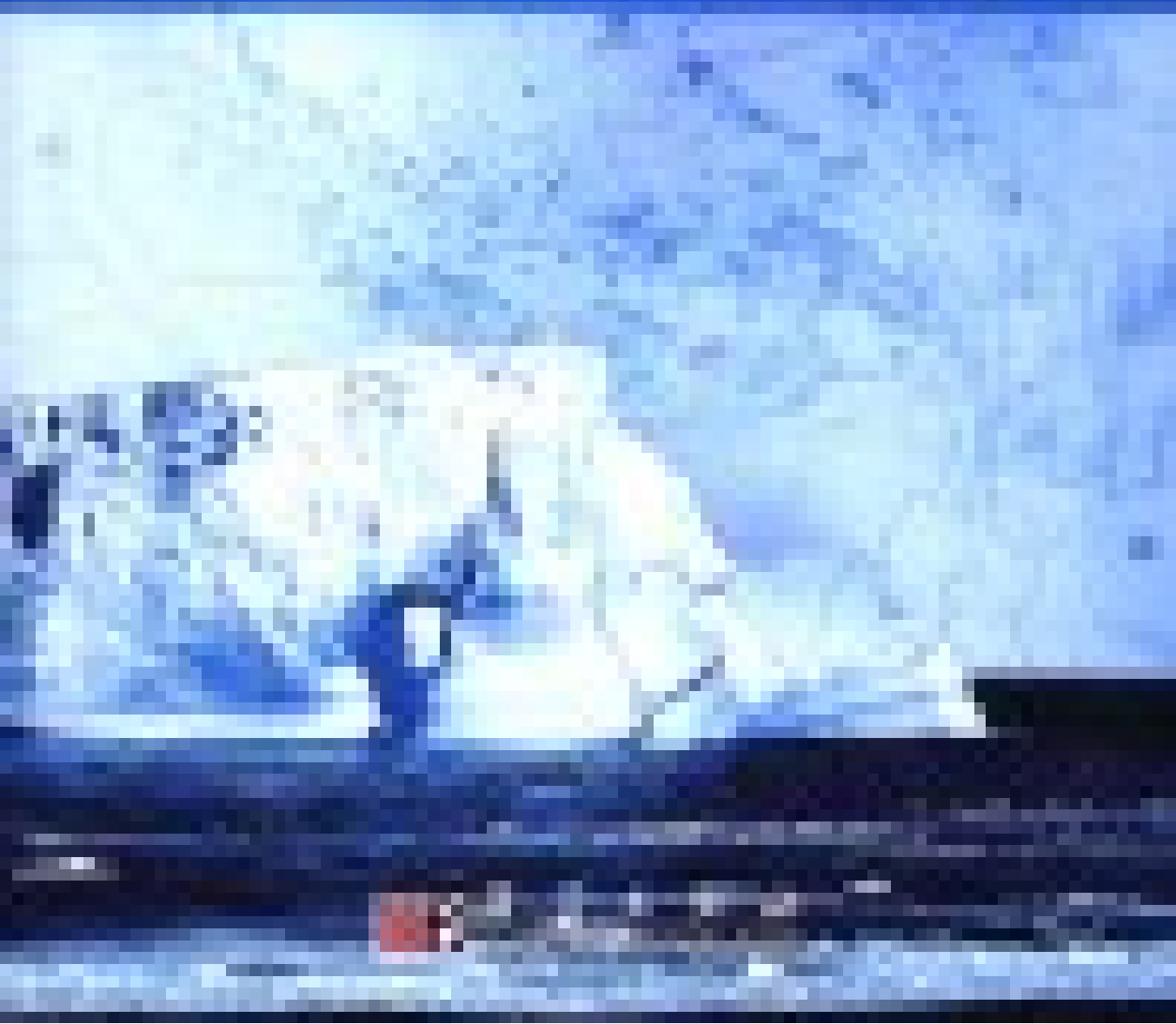
科学出版社

[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)



# 冰凍圓遊藝

2014年12月19日 星期六 11:00 AM



# 冰冻圈遥感

曹梅盛 李新 陈贤章 王建 车涛 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书全面反映了20世纪90年代以来国内外冰冻圈遥感研究的最新进展和应用现状。根据冰冻圈特点、监测需求以及遥感特色,综合论述探讨了现代冰冻圈遥感的测量能力、局限性、未来应用潜力及发展趋势。具体内容包  
括:冰冻圈地物测量需求及现代遥感测量准确性;根据实测和理论模式分析结果,系统总结了冰、雪和冻土在可见近红外、热红外、微波及无线电波段内的反射与发射波谱特征;从测量原理、方法及应用效果分别讨论了冰冻圈各组分——积雪、海冰、冰川冰盖、河湖冰及冻土的遥感监测。

本书旨在为遥感及其相关专业高年级本科生和研究生提供专业课程教材,也适合环境、气候、水文、交通和农牧业研究人员以及与遥感有关的工程技术人员作为参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

冰冻圈遥感 / 曹梅盛等著. —北京:科学出版社,2006

ISBN 7-03-017829-7

I. 冰… II. 曹… III. 遥感技术-应用-冰川-测量 IV. P343.6-39

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第094223号

责任编辑:韩 鹏 朱海燕 李久进 / 责任校对:鲁 素  
责任印制:钱玉芬 / 封面设计:王 浩

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2006年12月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2006年12月第一次印刷 印张:18 插页:6

印数:1—2 000 字数:394 000

定价:68.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈科印〉)

## 致 谢

本书的撰写和出版得到了以下项目的资助,作者谨致谢忱。

- 国家自然科学基金委员会“特殊学科人才培养基金”(J0530185)
- 国家重点基础研究计划项目“复杂自然环境时空定量信息的获取与融合处理的理论和应用”(2001CB309400)
- 国家自然科学基金项目“中国西部地区陆面数据同化系统研究”(90202014)
- 世界数据中心中国雪冰冻土学科中心(WDCD-GG)

# 序

由积雪、冰川、海冰、河湖冰、冻土所组成的冰冻圈是地球系统的重要组成部分，它不仅是古气候、古环境变化的重要信息库，也是现代气候变化的灵敏指示器；它不但对气候有重大反馈作用，其自身变化也会对环境产生显著的影响。最近几年美国 20 世纪福克斯公司先后推出的电影《冰河世纪》和《后天》给大家留下了颇为深刻的印象，影片中冰川消融引起的气候环境骤变给地球生命所带来的巨大灾难引起了人们内心强烈的震撼。虽然故事是虚构的，但并非完全耸人听闻。今天如果我们不未雨绸缪，明天我们也许就得为亡羊补牢，去苦苦寻觅拯救地球生命的“诺亚方舟”。

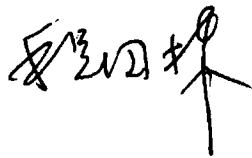
值得庆幸的是，冰冻圈研究业已引起科学界乃至全社会的广泛关注，其研究手段也日新月异。20 世纪 60 年代以来，卫星遥感技术的迅猛发展给冰冻圈的监测带来了蓬勃生机，它帮助科学家们在短短几十年里取得了令人瞩目的丰硕成果。现在，科学家对冰冻圈的研究除了继续沿用以往的路线考察、定位站观测及实验室测试外，还广泛使用卫星遥感技术，因为遥感所具有的宏观、综合、快速、可视化、穿透性、动态监测等特点，使之不仅能减少实地采样、监测的繁重劳动，而且还极大地丰富了冰冻圈的研究内容。在当前蓬勃开展的全球变化研究中，遥感更是显示出其大尺度监测的无可比拟的优势。

近 20 年来，我国冰冻圈遥感应用也取得不少重要实用成果。例如，雪灾监测、冰坝及冰湖溃决监测、南极冰盖局地表面测绘以及在地理信息系统支持下逐步建成的包括遥感资料的“中国冰冻圈信息系统”等，都为有关部门及国际合作研究与交流提供了有用的研究成果。但相当部分的研究只是沿用国外同行的方法或技术，原创性工作不多。随着经济建设的发展，我国主要冰冻圈作用区及南北极地科考活动也日益活跃，尤其在党中央提出的 2020 年左右把我国建成创新型国家这一宏伟目标鼓舞下，如何在不断实践中奉献具有较高水平的创新研究成果，是我们面临的大好机遇，同时也是严峻挑战。

该书作者都是活跃在冰冻圈遥感第一线的科研人员。第一作者曹梅盛研究员虽患严重眼疾，但仍怀着对冰冻圈遥感的赤子之情，历时数年，披阅数次而完成本书 4 个章节的内容。其他作者都为年轻的科研人员，他们是中国科学院寒区旱区环境与工程研究所遥感与地理信息科学研究所的骨干力量，从事冰冻圈遥感已有所积累，也将铢积寸累的心得汇集为相关章节，望他们能够厚积薄发，为发展我国冰冻圈遥感事业做出更多贡献。

面向创新的未来，必须很好总结过去。该书的出版一定程度上适应了这一需求，相信它能够成为冰冻圈和相关领域的研究人员提供一扇了解这一领域最新发展的窗口。我也衷心地希望该书的出版能为我国冰冻圈遥感的发展添上一砖一瓦。

中国科学院院士



2006 年 4 月 20 日



# 前 言

地表水体低温下成冰冻状态的冰冻圈,它的组成部分包括积雪、海冰、河湖冰、冰川冰盖及冻土等。它们大都位于气温长期低于零度、环境恶劣及人迹罕至的高山高纬度地区。20 世纪前数百年,只有少量目视观测冰冻圈特征的零星记录,因而无法形成它是地表一个独特圈层的认知。20 世纪初,人类经济活动逐渐推向高山高纬度地区,冰冻圈的局地观测资料开始有较系统的积累。即使这些只是时空尺度有限的观测及总结,也足以证明存在一个独立的冰冻圈;所以,20 世纪 70 年代初世界气象组织正式将其从水圈划分出来成为一个独立的地表圈层,认为它与其他地表圈相互作用,决定着地球气候的形成与演变。

20 世纪 60 年代遥感技术的出现与发展,为冰冻圈全球监测提供了一个前所未有的高技术手段。遥感的宏观、综合、快速和动态监测能力,可获得甚至连地面观测也无法获取的冰冻圈信息。所以 20 世纪 60 年代后一些发达国家的科研机构均投入人力物力,积极开展冰冻圈遥感应用研究,并在理论和实践两方面都取得很大进展,促进了冰冻圈研究的进展,也使冰冻圈遥感成为冰冻圈研究的一个分支。

面对冰冻圈遥感高速发展的态势,为及时开展我国冰冻圈遥感应用研究,1978 年施雅风院士在中国科学院兰州冰川冻土研究所(现为中国科学院寒区旱区环境与工程研究所)内首先组建了冰雪遥感小组。1983 年改为遥感应应用研究室,并领导开展了国际国内合作研究。其后,随着地理信息系统与遥感紧密结合的发展趋势,程国栋院士又及时将原研究室改组成遥感与地理信息科学研究室。本书正是在程国栋院士的倡议及支持下撰写的。

本书内容力求系统反映 20 世纪 90 年代以来国内外冰冻圈遥感应用研究的最新进展及发展趋势,为 21 世纪我国本领域的进一步开展搭建一个参照平台,并为本专业研究生提供一本参考书。为此,除引用我国取得的一些成果外,还引用国外文献 300 余篇。

全书共 8 章,第 1 章除简要叙述冰冻圈地学意义、全球及我国冰冻圈各地物分布区域及冰冻圈遥感现代主要卫星平台与传感器外,主要介绍遥感监测冰冻圈地物某些参数的准确度和地球观测系统(EOS)预期的准确度及其时空分辨率。第 2 章阐述和遥感直接有关的积雪、海冰、冰川冰盖、河湖冰及冻土与可见光近红外、热红外、微波及无线电波相互作用的辐射特性。这是冰冻圈遥感的基础。然后分章叙述五大地物遥感应用具体内容与实例。其中积雪分可见光近红外遥感与微波遥感两章。

本书撰写过程强调了下述几个要点:①对冰冻圈地物常规基础资料的遥感监测予以重点阐述,例如,第 3 章和第 4 章的雪盖制图,第 5 章的冰川编目,第 6 章的海冰制图和第 8 章的多年冻土制图;②重视模式研究最核心理论基础的阐述,例如,第 2 章的积雪反射波谱 Wiscombe-Warren 理论及第 4 章微波矢量辐射传输(VRT)理论;③一些需掌握的先进遥感技术,如第 5 章合成孔径雷达干涉法测量冰面地形和运动,都从原理、算法、误差源、测量准确度、优缺点及发展趋势方面作了概要叙述;④对与现代工农业生产和人类生

存直接有关的水资源和冰雪冻土灾害等实用专题也予以较详细叙述,例如,第3章的融雪径流预测预报遥感模式、雪灾的遥感监测与评估及第7章河湖冰灾害遥感监测方法;⑤一些较普遍采用的实用算法,例如,第4章被动微波遥感监测雪深的NASA算法及第6章海冰密集度NASA算法,对有关原理及算法演变过程都给予适度介绍,使读者应用时有较丰富背景知识的支撑;⑥列入一些实用的计算公式和数值表格供使用,也介绍国外一些冰冻圈遥感产品目录。

本书撰写人第1、2、5及6章为曹梅盛;第3章为王建;第4和8章为李新,其中第4章第4节为车涛;第7章为陈贤章。全书由晋锐博士及科学出版社编辑精心编辑完成;第1、2、5和6章撰写中还得到周慧玲女士的帮助和支持,特此向他们表示深切谢意,因为他们的支持帮助,才使本书如期出版。

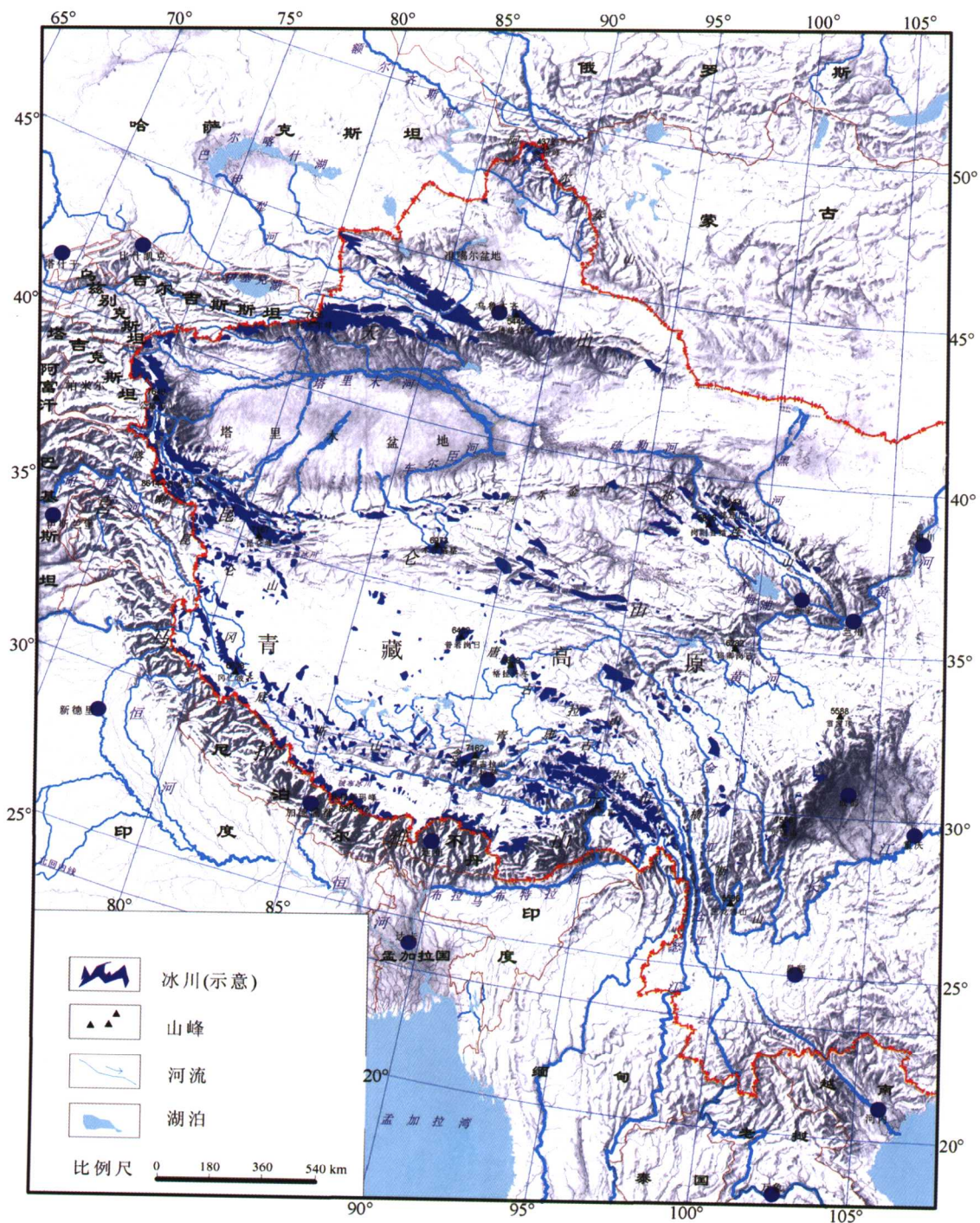
本书的顺利完成,始终都得到了程国栋院士的鼓励、支持和指导,从提纲的拟定直至定稿,他都多次提出宝贵意见;施雅风院士阅读了部分章节,并提出修改意见;复旦大学金亚秋教授对微波辐射传输等内容的撰写给予了诸多指正。在此向他们表示衷心的感谢。

撰写过程中,尽管我们力求使本书内容能真实反映20世纪90年代以来冰冻圈遥感主要进展,但受制于我们的能力及掌握资料有限,书中难免会出现一些错误或不足之处,还请读者谅解并来函指正。

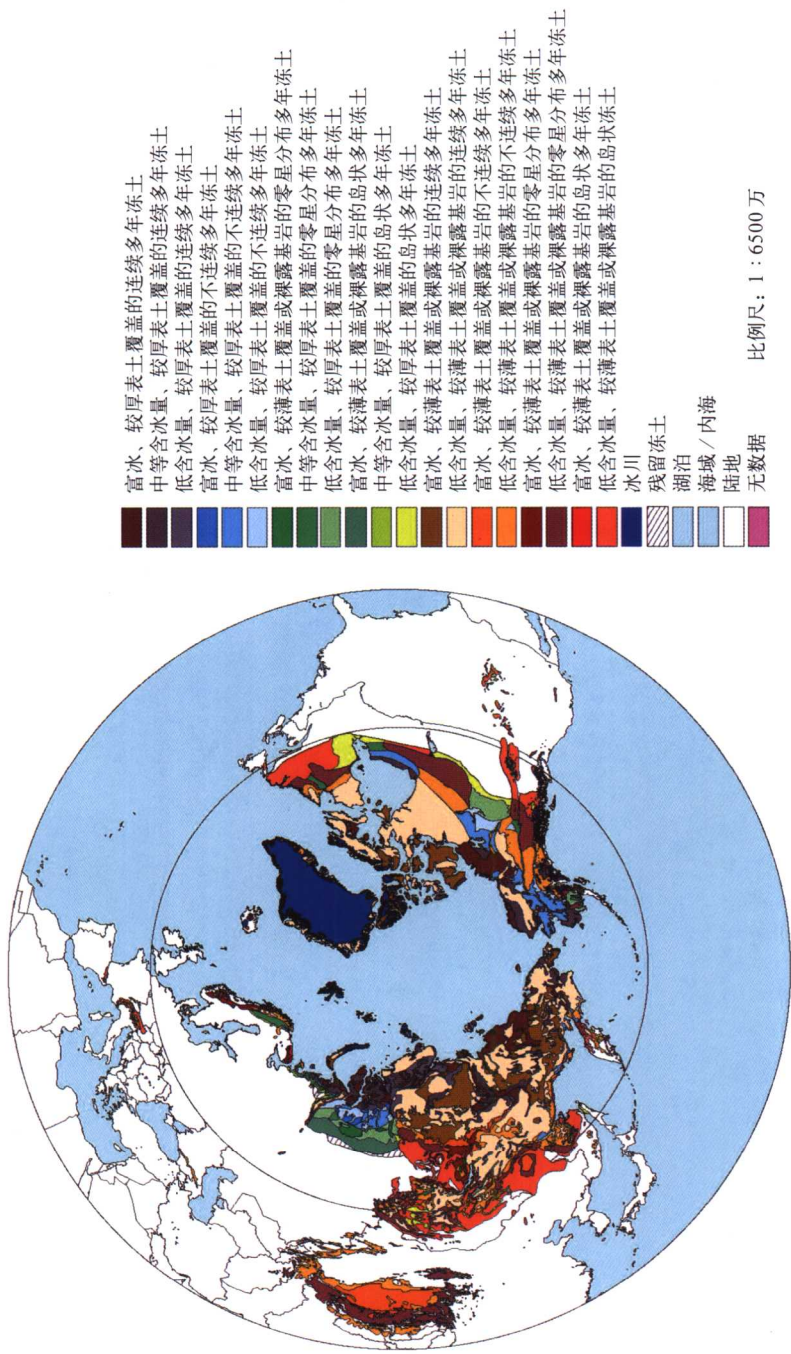
作者

2006年4月



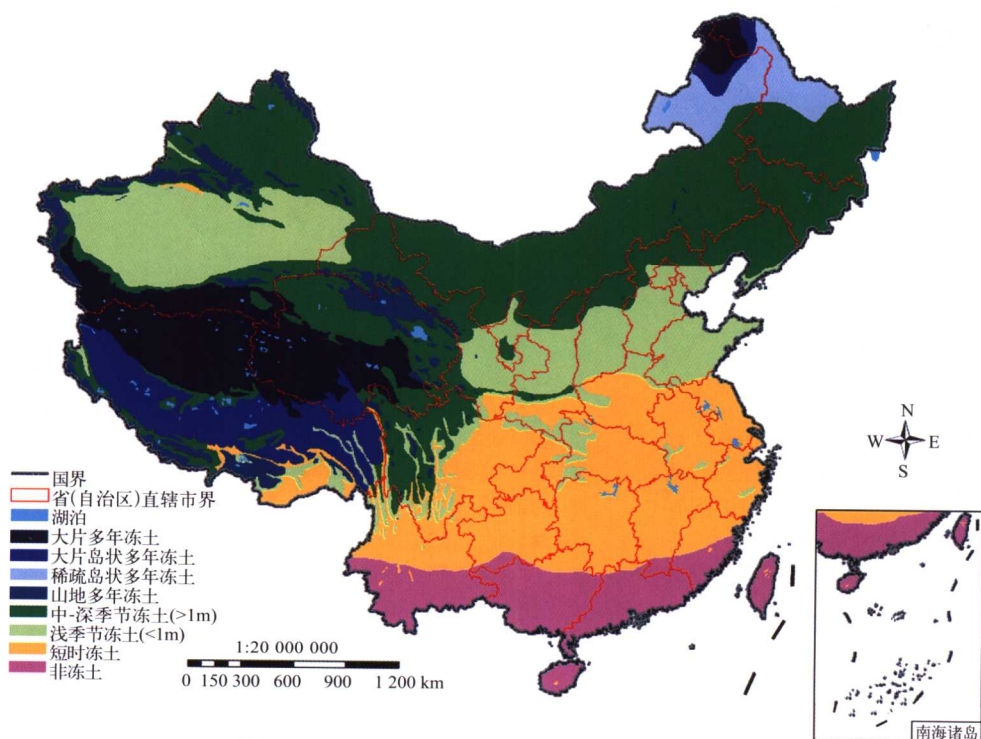


彩图 1 中国西部冰川分布区略图 (施雅风, 2005)

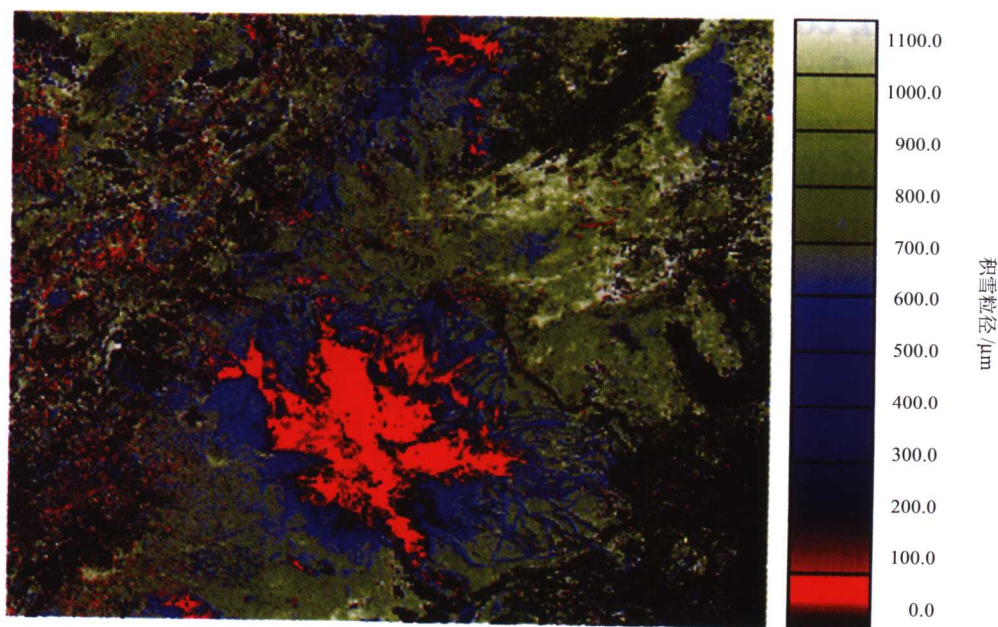


彩图 2 北半球多年冻土分布图 (Brown et al., 1998)

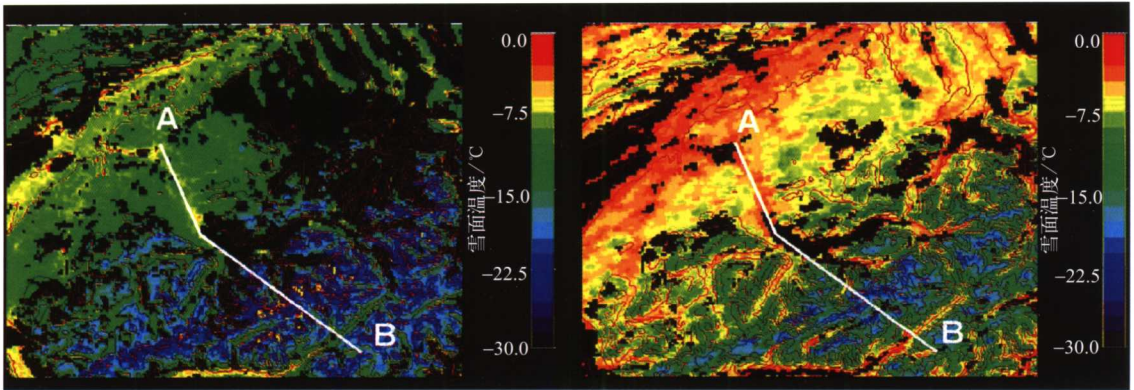




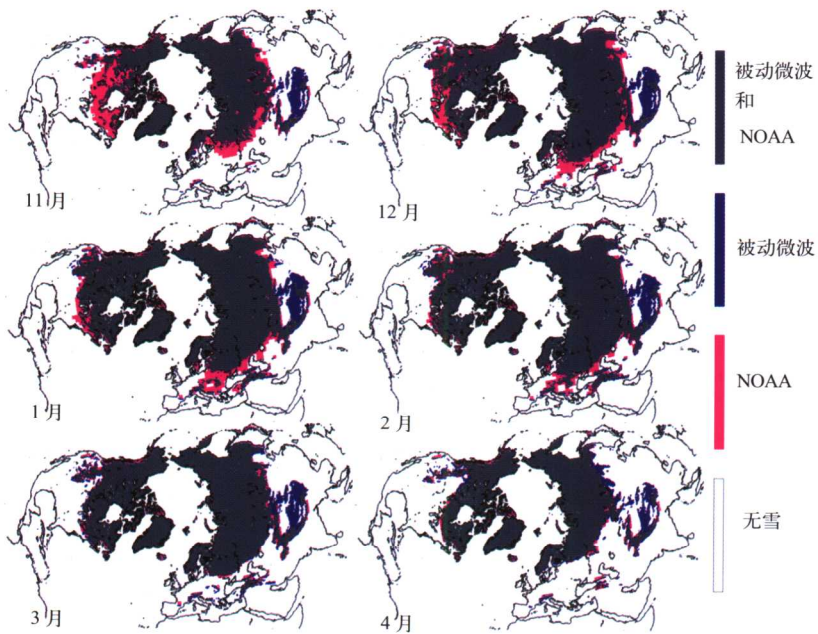
彩图 3 我国冻土分布示意图 (周幼吾等, 2000)



彩图 4 Nolin-Dozier 模型反演的雪粒径图  
 遥感数据为 AVIRIS 1994 年 4 月 5 日美国加利福尼亚州 Mammoth 山区

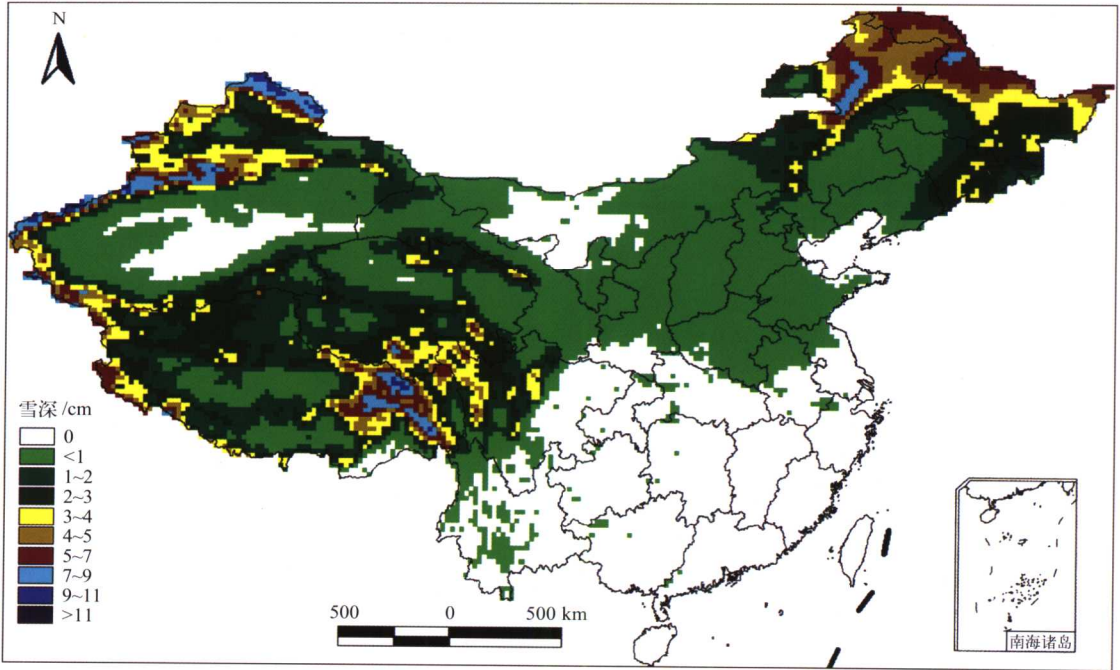


彩图 5 瑞士阿尔卑斯山 Bern 实验区 AVHRR 数据用 Becker-Li 模型计算的雪表面温度分布图  
 右图为 1999 年 2 月 12 日的降雪日，左图为 1999 年 2 月 15 日积雪已经融化。  
 图中可以直观看出雪表面温度的上升。图中剖面线的黑色为云的覆盖

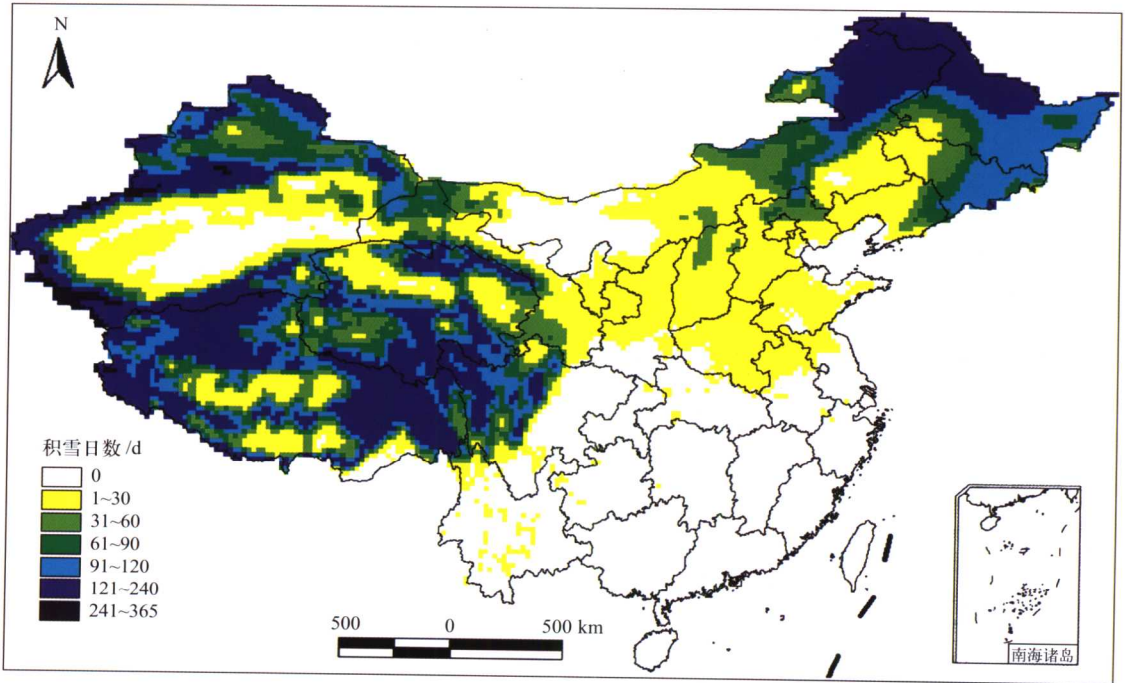


彩图 6 被动微波数据和 NOAA 数据提取的 1978~1999 年月度雪盖范围  
 (Armstrong et al., 2001)

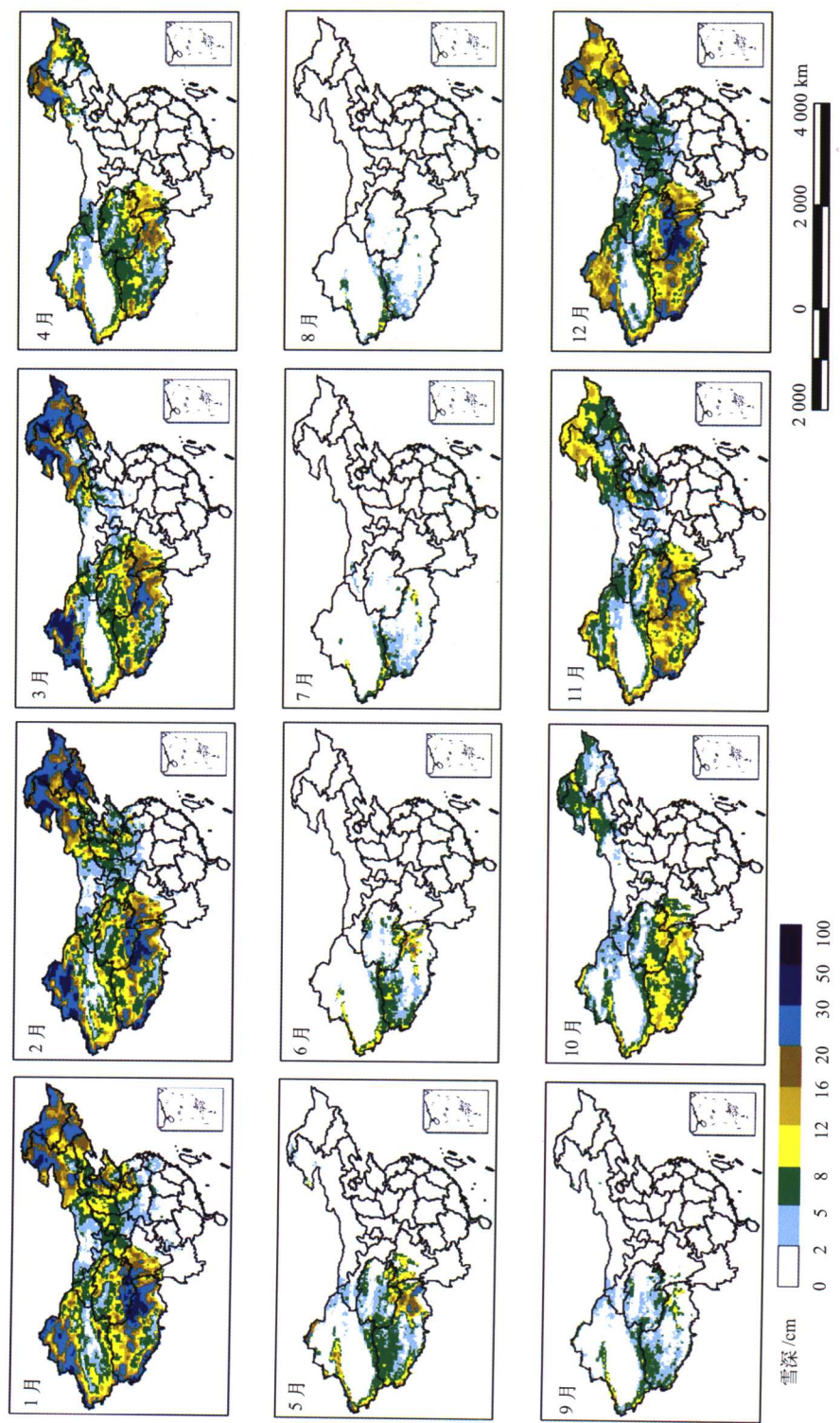




彩图 7 利用 SMMR 和 SSM/I 数据获取的近 27 年来我国平均积雪深度图

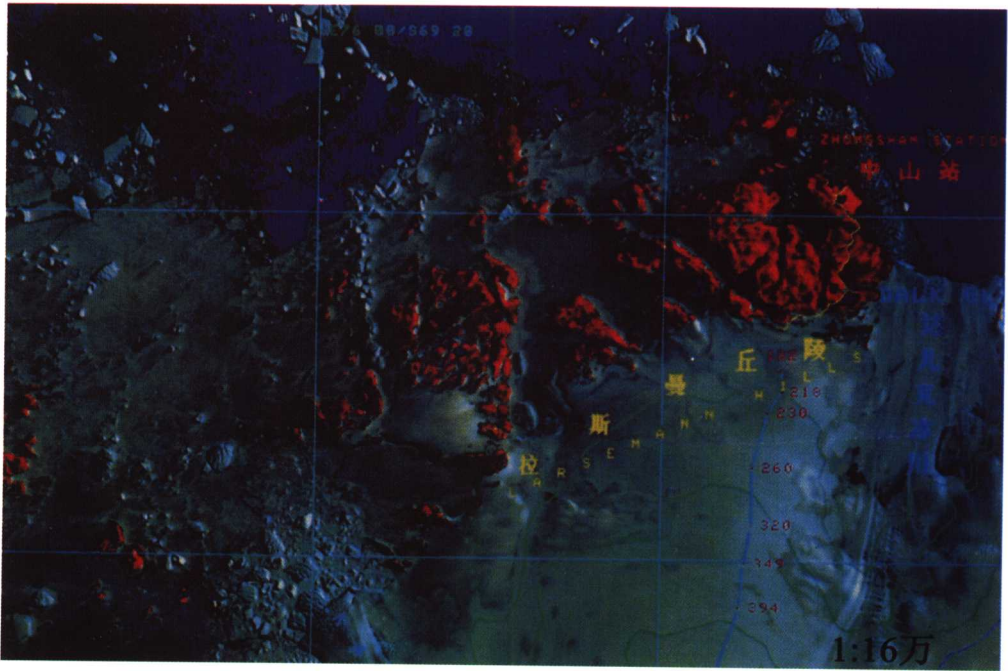


彩图 8 利用 SMMR 和 SSM/I 数据获取的近 27 年来我国积雪日数图

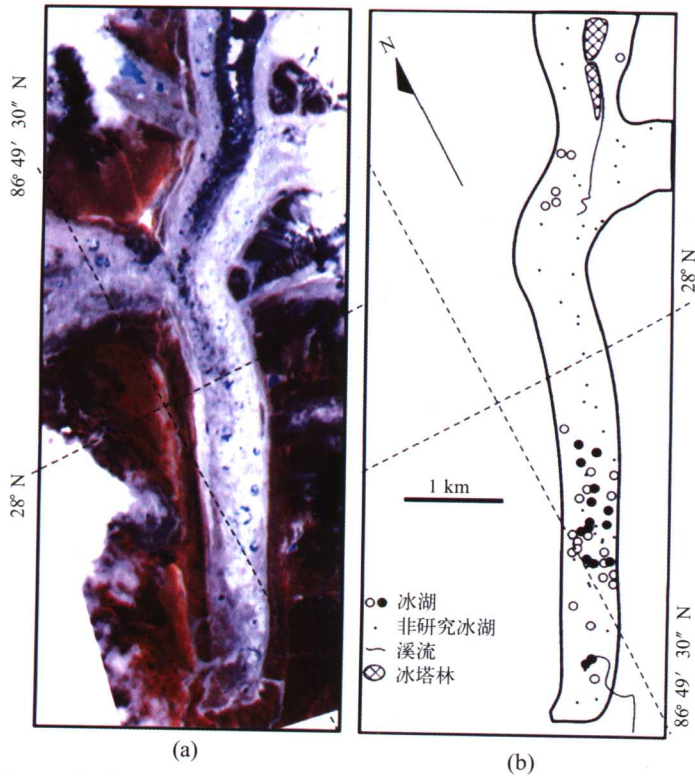


彩图9 利用 SMMR 和 SSM/I 数据获取的近 27 年来中国逐月最大积雪深度图



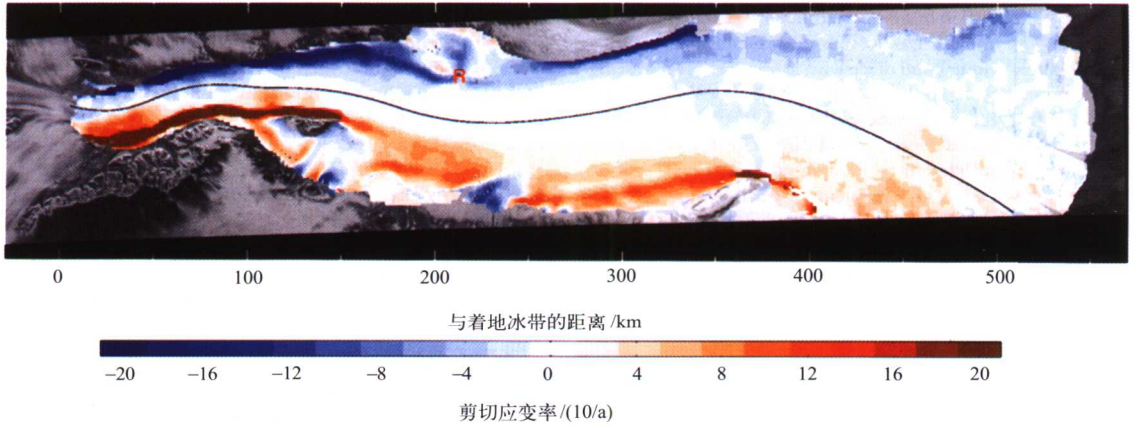


彩图 10 南极中山站地区 TM2、3 及 4 经分类反差增强等各种处理后的假彩色合成图（孙家柄等，1995），图上海面呈亮蓝色；裸地为红色；冰雪为青色

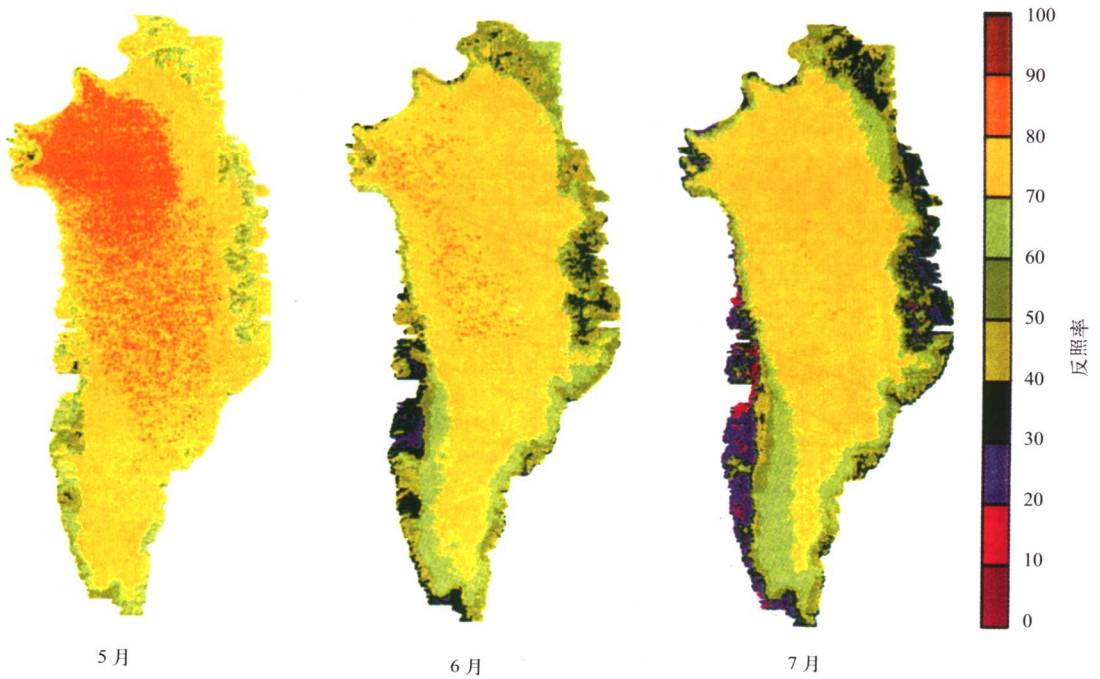


彩图 11 喜马拉雅山珠峰南坡孔布冰川 2000 年 5 月 23 日 ASTER L1A 3、2 和 1 波段假彩色合成图(a)及据该图解译的悬浮物浓度小于 30mg/L(◦)和大于 30mg/L(●)的冰面湖分布图示（Wessles et al., 2002）

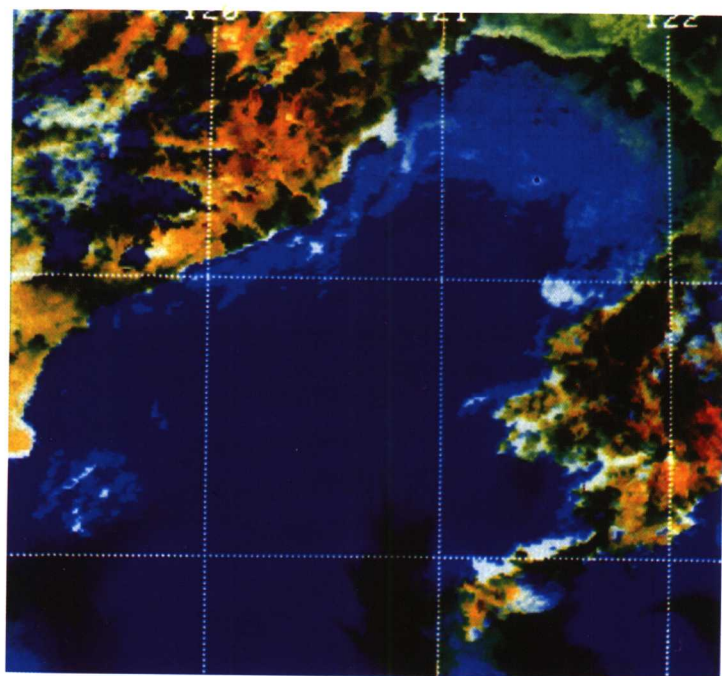




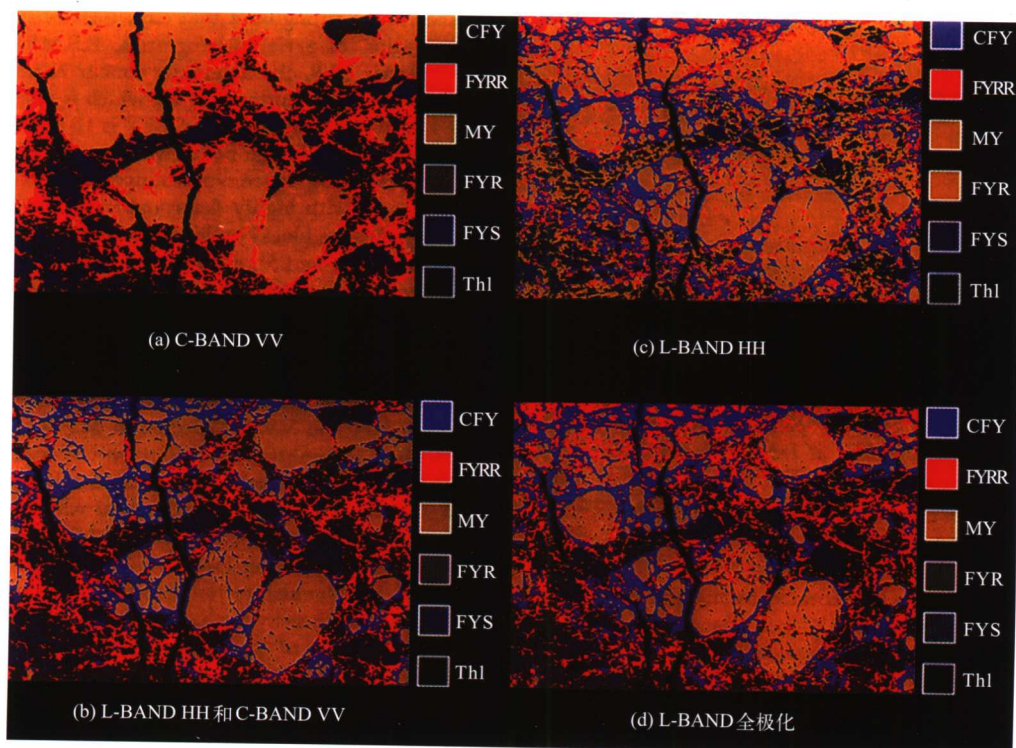
彩图 12 横越 Amery 冰棚表面流向的剪切应变率空间分布图示 (Young et al., 2002)  
该分布型由图上 R 处巨大褶皱所致



彩图 13 AVHRR  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  用式 (5.21) 计算所得格陵兰冰盖表面 1991 年 5~7 月的月平均反照率分布及其逐月变化 (Stroeve et al., 1997)



彩图 14 1987 年 1 月 17 日辽东湾海冰区彩色合成图像 (龚家龙等, 1988)



彩图 15 航空多参数 SAR 不同频率、极化及其组合下划分六种冰型效果的比较 (Rignot et al., 1994)

(a) C 波段 VV 极化; (b) L 波段 HH 极化; (c) C 波段 VV 和 L 波段 HH 极化的组合; (d) L 波段全极化。

符号 CFY 为压缩一年冰; FYRR 为乱石状或脊状一年冰; MY 为多年冰; FYR 为粗糙一年冰;

FYS 为光滑一年冰; THI 为薄一年冰