

遥感技术在我国海冰研究方面的进展

国巧真, 陈云浩, 李 京, 格日乐, 史晓霞

(北京师范大学 资源学院 环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京 100875)

摘 要: 本文首先对遥感技术在我国海冰研究中的发展情况作了详细地论述, 并介绍了几种常用于海冰研究的遥感数据; 其次, 从海冰厚度识别、海冰运动速度矢量计算、海冰资源量测算以及海冰灾害监测等四个方面, 简单论述了遥感技术在海冰研究中的应用。最后, 以渤海海冰为例, 阐述了遥感技术的具体应用, 同时指出了今后的发展方向。

关键词: 海冰; 遥感技术; AVHRR; MODIS; SAR; TM

中图分类号: P731 文献标识码: A 文章编号: 1003 - 0239(2006)4 - 0095 - 09

1 引言

海冰作为全球海-气系统的一员, 与海洋和大气相互作用, 对全球气候变化产生了重大影响。我国渤海和黄海北部历年出现不同程度的冻结, 其冰情的变化与全球气候变化有密切关系。遥感技术在海冰灾害监测和资源测算方面起到很大作用。如历史上多次出现的冰情, 造成钻井平台倒塌、船舶破坏、航运中断等严重海冰灾害。自 1969 年特大冰封以来, 我国海冰监测、预报和研究工作全面地开展起来。在海冰常规观测基础上, 进一步开展了卫星和航空遥感技术的应用研究。由于我国北方沿海地带淡水资源缺乏, 海水又是该地区不可直接利用的水资源, 而海冰作为淡水资源, 利用遥感影像数据测算海冰资源量是非常可行的。可见, 遥感技术在海冰研究方面应用前景广阔。

2 遥感技术在我国海冰研究方面的情况

(1) 我国自 1949 年扩充和建立了一些海洋站、逐渐完善了海洋观测网, 标志着海冰观测、调查和预报逐步开展起来。1958 年进行了全国性海洋普查, 其中冬季海冰观测是主要任务之一。1969 年 2 ~ 3 月渤海大冰封期间, 使用了船舶和飞机进行冰情观测。1971 年开始使用破冰船调查, 1973 年起飞机航测被正式列入海冰监测业务。

(2) 1973 年开始, 接收卫星图像进行冰情分析和利用卫星遥感时空图像, 对 NOAA 卫星的 AVHRR 五个通道数据进行分析研究, 得到了海冰分布与分类, 提取了在晴空天气下的海冰特征参数, 初步建立了渤海海冰卫星遥感监测业务化系统, 完成了 NOAA/GMS 卫星数据采集自动化, 遥感产品实现部门间的资源共享和网络传输。并利用 ERS_1

收稿日期: 2006-03-14; 修订日期: 2006-11-07

作者简介: 国巧真 (1979-), 女, 现就读于北京师范大学资源学院, 博士研究生, 从事资源与环境遥感监测方面的研究, 正在做海冰方面的项目。

微波辐射计(ATSR/M)和高度计及 SAR 数据进行渤海海冰遥感分析。

- (3) 1985 年 2 月，国家海洋局在渤海辽东湾和渤海湾使用国产设备进行了我国首次海冰航空遥感试验，对多种航空遥感测冰传感器(如侧视雷达、多光谱扫描仪、彩红外相机、微波辐射计、红外辐射计等)测冰技术进行了研究，并获得了渤海海冰类型、冰块大小、冰厚和冰温等遥感数据和图像资料^[1]。
- (4) 1995 年，海冰航空遥感监测技术实时传输系统用在了我国渤海和黄海北部及辽东湾每年冬季的结冰监测，对海上港湾建设，交通运输，油气开发等有直接影响。特别是遇灾害冰情年份，决策部门及用户能够快速准确观察到冰情发展等多种信息。该系统填补了国内航空遥感监测短波实时传输数据的空白，解决了远距离移动通信及采用多种纠错方法的数据传输^[2]。

3 常用的几种遥感数据

3.1 NOAA/AVHRR 数据

NOAA/AVHRR 改进型甚高分辨率辐射仪是一台旋转平面式光学机械扫描仪。扫描角 $\pm 55.4^{\circ}$ ，扫描带宽 2800km，成像面积大，利于获得宏观同步信息。它有四个特点：(1) AVHRR 选用可见光 - 热红外 (0.58 ~ 12.5 μm) 5 个波段；(2) AVHRR 的空间分辨率是变化的，星下点处为 1.1km，远离星下点处约为 4km；(3) AVHRR 具有较高的辐射分辨率；(4) NOAA/AVHRR 的扫描角大 ($\pm 55.4^{\circ}$)，扫描带宽 (约 2800km)。鉴于 NOAA/AVHRR 数据的这些特点，用此数据进行海冰的研究工作是可行的。表 1 为 NOAA/AVHRR 数据的波段与应用领域，图 1 和图 2 是渤海海冰的 NOAA/AVHRR 数据。

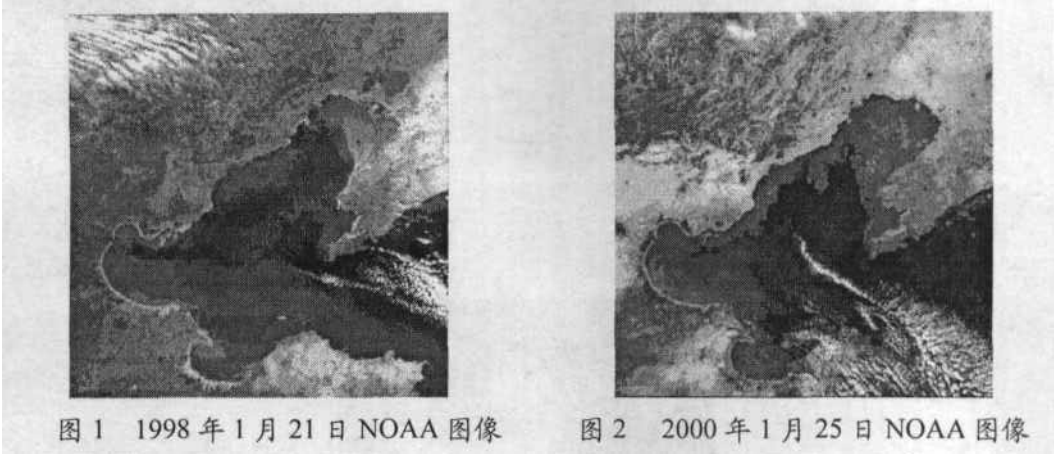
表 1 NOAA/AVHRR 数据的波段(μm)与应用领域

NOAA/AVHRR	主要应用领域
0.58 ~ 0.68	海洋水色、叶绿素、泥沙、海冰、海洋污染、陆地表面、植被
0.725 ~ 1.10	植被、水陆边界、海冰、滩涂、大气状况
1.58 ~ 1.68	土壤湿度、植物含水量、云雪识别、高温热点、夜间成像
3.55 ~ 3.93	
10.5 ~ 11.3	地球背景湿度场、热污染、海温、海流和涡旋
11.5 ~ 12.5	

3.2 MODIS 数据

MODIS 是中等分辨率的航天成像光谱仪，具有 5 个特点：(1) 36 个光谱通道 (0.4 ~ 14.3 μm)；(2) 空间分辨率 CH1 ~ 2 为 250m；CH3 ~ 7 为 500m，其余为 1000m；(3) 宽视域 (扫描角 $\pm 55^{\circ}$)，太阳天顶角与观测天顶角变化大；(4) MODIS 在对地观测中，每秒可同时获得 6.1MB 的来自大气、海洋、陆地表面的信息；(5) 具有较高的辐射分辨率^[3]。目前国家卫星海洋应用中心可以获得 Terra 和 Aqua 两颗卫星的 MODIS 实时数据，两颗卫

星在时间上具有补充作用，增强了渤海海冰遥感资料。同时，通过渤海海冰监测的图像产品和数值产品，可以获得定性和定量两个方面的渤海海冰的实时信息，增加了海冰预报的手段和方法，为海冰预报的实时性和准确性提供了大量有用信息，图 3 和图 4 为渤海海冰的 MODIS 图像，图 5 为辽东湾海冰的 TM 图像^[4]。



3.3 星载 SAR 数据

目前，用于海洋探测的雷达主要是合成孔径雷达 (SAR)。海面散射截面与诸多因素有关，包括雷达因素和海面因素：雷达因素包括频率、极化、功率及视角等；海面因素包括粗糙度、复介电常数等。当雷达因素确定时，海面散射截面主要取决于海面粗糙度。冰面因素包括冰面粗糙度、雪覆盖、几何形状和复介电常数等，冰面粗糙度与冰类型直接关联^[5]，主要星载 SAR 的比较见表 2。SAR 监测海冰是极为有效的方法，主要是 SAR 具有区分冰和水的能力，可以获得海冰覆盖的准确面积。不同类型的海冰，其雷达散射和截面有明显的差别，所以，不同类型海冰的图像清晰，可以获得不同海冰块之间缝隙的准确信息，用于破冰船导航。利用 SAR 时序图像可获得冰川运动信息，用于船舶的冰区导航^[6]。

表 2 主要星载 SAR 的比较

星载 SAR	JERS-1 SAR	AMI-SAR	Radarsat-1
卫 星	JERS-1 (日本)	ERS-1&2 (欧空局)	Radarsat-1 (加拿大)
发射时间	1992 年 2 月至 1998 年 10 月	1991 年 7 月 (ERS-1)	1995 年 11 月
设计寿命	2	3	5
高度/km	568	785	798
波 段	L	C	C
频 率	1.275G(L)	5.3G	5.3G
极 化	HH	VV	HH
视 角	35°	23°	10° ~ 60°
视角数	1	1	4
分辨率/m	18×18	30×30	28×30
量化/bits	3	5	4



图 3 2005 年 1 月 29 日 MODIS 图像

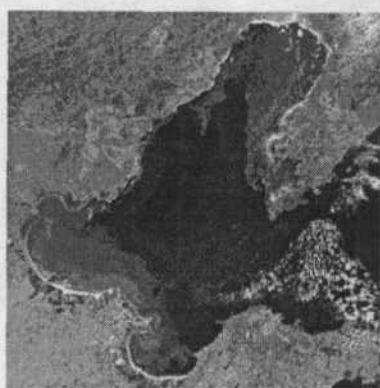


图 4 2005 年 2 月 11 日 MODIS 图像



图 5 2003 年 2 月 5 日辽东湾图像

4 遥感技术在海冰研究中的应用

4.1 遥感技术在海冰厚度识别中的应用

海冰的厚度说明了吸收热量的多少,对气候、海上交通、海上工程均有重大的影响,1999 年国家海洋局海洋技术研究所吴明钰的研究表明,以海冰和海水的微薄热辐射为源,并通过位于海面遥感海冰的 3 层分层介质系统的分析,取得了中间介质与所接收到的辐射亮温(TB), $TB=A+Be^{-C\varpi}$,其中 A 、 B 、 C 与遥感系统的极化,使用角度和角频率有关,可以通过实际地面的海冰测试试验获得,并指出使用该辐射传输模式来遥感海冰厚度是符合实际的,有实用意义。海冰厚度的被动微波遥感是以海冰和海水的微波段热辐射为电磁波源,分析这些热辐射通过冰层厚的关系。微波段热辐射可用量子物理学的普朗克(Planck)电磁辐射定律说明。根据量子物理学的普朗克电磁辐射定律,对于黑体来说,其谱亮度为:

$$B_f = 2hf^3/[c^2(e^{hf/kT} - 1)] \quad (1)$$

其中: h 为 Planck 常数 ($6.634 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$); k 为 Boltzman 常数 ($1.38 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$); T 为物理学温度 (单位为绝对温度 K); f 为频率 (Hz); c 为光速 (m/s)。在微波频段, 因 $hf/kT \leq 1$, 利用近似公式 $e^x - 1 = (1 + x + x^2/2 + \dots) - 1 \approx x (x \leq 1)$, 则上式可以简化为瑞利-琼斯(Rayleigh-Jeans)电磁辐射定律, 波长为 λ 处辐射功率谱亮度为:

$$B_f = 2kT_b/\lambda^2 \quad (2)$$

对黑体: $T_b = eT$, $e=1$; 对非黑体: $T_b = eT$, $0 < e < 1$;
其中: e 为辐射率; T 为物体的物理温度 (单位以 K 表示)。
本研究导出了辐射传输物理模式:

$$T_b(f, \theta, P) = A(f, \theta, P) - B(f, \theta, P) \times e^{-C(f, P)/D} \quad (3)$$

其中 A 、 B 、 C 均与频率、观测角和极化方式有关, D 为冰厚。

根据这个基本物理模式对实地测试数据进行分析处理, 统计拟合。几年来在中国冰区进行实验, 表明使用 10cm 波段工作基本上可以满足中国一年冰厚度遥感的要求。从 1989 ~ 1996 年冬季实施海冰监测航空遥感飞行后, 利用该方法取得的冰厚数据服务于渤海和黄海北部冰情数值预报取得较好的效果^[8]。

4.2 卫星遥感图像序列在海冰运动速度矢量计算中的应用

卫星遥感是获取大范围海冰运动信息的一种有效方法。Ninnis 等人曾用模板匹配最大互相关方法 (MCC) 进行遥感海冰表现漂移的实验。近年 Wu 等人针对模板匹配法的固有缺点进行了改进, 提出了相关-张弛 (C-R) 的迭代方法, 成功地从热红外图像上提取了南大洋海域信息。此外, 黄润恒等用相关-张弛 (C-R) 法和凡函分析法 (FAM) 从序列的卫星遥感图像上推导出了辽东湾海冰运动速度矢量场^[9]。

4.3 遥感技术在海冰资源量测算中的应用

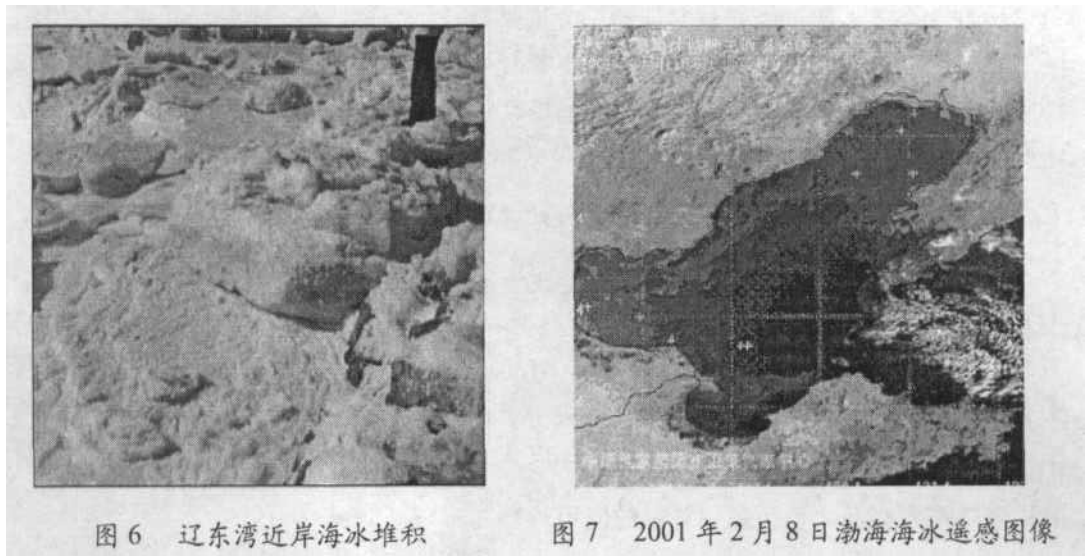
遥感技术在测算海冰资源量方面有很大的优势。2002 年史培军等研究表明: 若以结冰时间为 50 d 和开采后的海冰在 10 d 后可恢复到可以重复开采的状态为标准, 则可开采海冰资源量的计算公式为:

$$P = \sum_{i=1}^n P_i \quad (4)$$

式中, n 为可开采次数, 根据前面的假设, 取值 5; P_i 为第 i 次可开采的海冰资源量。利用 NOAA/AVHRR 数据和 EOS/MODIS 数据监测海冰空间分布和测算海冰资源量是可行的, 由于 MODIS 数据在空间分辨率和光谱分辨率方面都优于 AVHRR 数据, 因此其监测结果精度更高。利用分层提取策略, 可以简化海冰信息的提取过程, 提高海冰信息提取精度^[10]。

4.4 遥感技术在海冰灾害监测中的应用

海冰的冻结、融化和漂流不仅会影响气候的变化，而且还会妨碍海上交通、危及海上油气开发。2004 年在冰情严重期间，辽东湾最大浮冰范围 76 n mile；渤海湾最大浮冰范围 14 n mile；莱州湾最大浮冰范围 8 n mile(见图 6 ~ 7)。冬季严重冰情期间，辽东湾沿岸港口均处于封冻状态。由于较准确的海冰监测预报信息和有关部门采取的有利预防措施，没有造成明显的直接经济损失。海洋航空遥感技术是对海冰灾害进行快速监视监测的有效手段。通过对海冰、海水的反射特征进行统计分析，在正态分布假定下得到冰、水反照率的概率密度分布曲线，由该概率密度分布曲线进行冰水区分，并计算海冰密集度^[11]。在灾害发展过程中，利用遥感技术可以不断监测灾害的进程和态势，及时把信息传送到各级抗灾指挥部门，以便有效地组织抗灾活动。在成灾后，利用遥感技术可以在大范围内迅速、准确地查明灾区受损情况，以便组织救灾，恢复生产^[12]。



5 实例分析

为把握渤海不同海区海冰面积的分布状况，以离岸距离 10km 为间距划分出 5 个区。在此基础上，分别统计了不同时段、不同区域的海冰面积。以离岸距离 10km 为间距，沿海岸线做出等距离线，将海区分为离岸距离<10km ()、11km ~ 20km ()、21km ~ 30km ()、31km ~ 40km ()、>40km () 5 个部分，研究分区见图 8。利用这种分区方法，得到了 1999 年 1 月 8 日、2000 年 1 月 25 日和 2001 年 2 月 8 日的渤海海冰面积遥感分布图(见图 9 ~ 11)。并在此基础上，以 NOAA 卫星资料像元点 (1.1×1.1km²) 为最小统计单位，得出了这三天的海冰面积值。

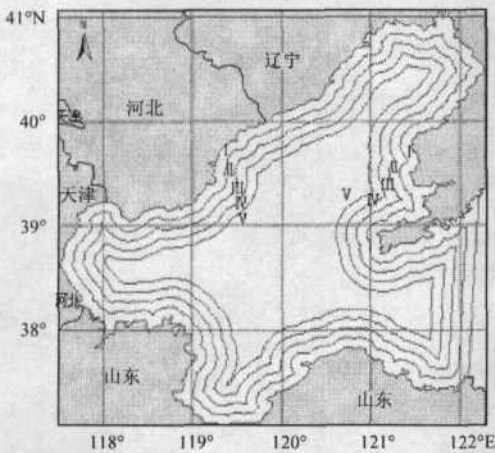


图 8 渤海分区图

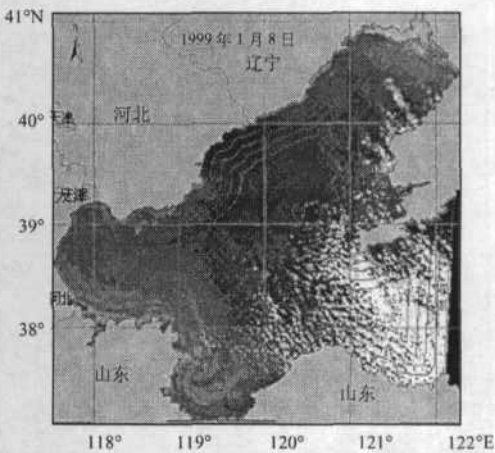


图 9 1999 年 1 月 8 日渤海海冰分布图

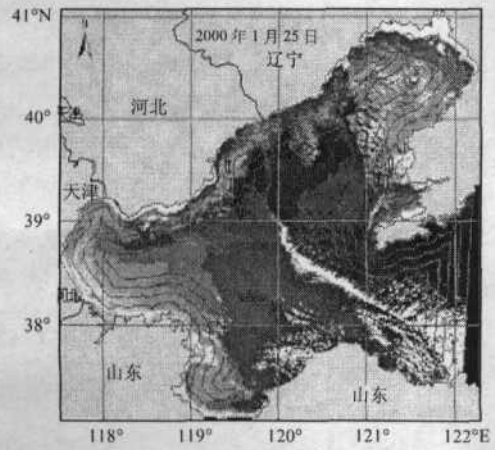


图 10 2000 年 1 月 25 日渤海海冰分布图

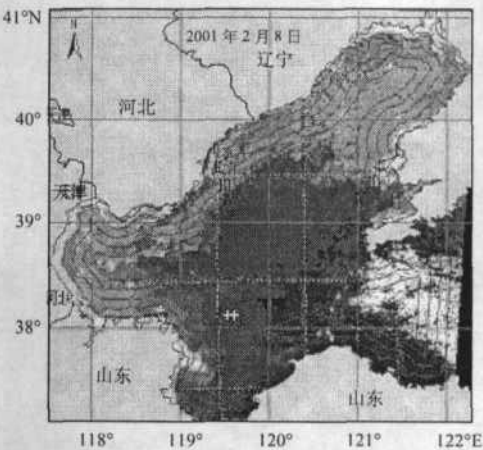


图 11 2001 年 2 月 8 日渤海海冰分布图

将渤海海冰分别按不同离岸距离算出面积，再与渤海海冰总面积进行统计比较，得表 3。从表 3 可以看出，从 区到 区，海冰面积总体上呈现递减的特征，即岸边的海冰面积多于海中。1999 年 1 月 8 日 海冰面积 区是 3347.01km^2 ，占总面积比例的 54.22%，是 区的 22 倍；2000 年 1 月 25 日 海冰面积 区是 6317.06km^2 ，占总面积比例的 29.66%，是 区的 3 倍；2001 年 2 月 8 日，海冰面积 区是 8615.71km^2 ，占总面积比例的 23.33%，是 区的 1.3 倍。可见，随着离岸距离的增加，海冰面积呈现逐渐减少的趋势。

表 3 不同离岸距离的渤海海冰面积及所占比例

	离岸距离 (km)	1999 年 1 月 8 日	2000 年 1 月 25 日	2001 年 2 月 8 日
面积 (km ²)	I (< 10)	3347.01	6317.06	8615.71
占总面积比例 (%)		54.22	29.66	23.33
面积 (km ²)	(10 ~ 20)	1298.95	6070.58	7924.42
占总面积比例 (%)		21.04	28.50	21.46
面积 (km ²)	(20 ~ 30)	801.90	4345.99	7477.85
占总面积比例 (%)		12.99	20.41	20.25
面积 (km ²)	(30 ~ 40)	573.46	2449.59	6279.09
占总面积比例 (%)		9.29	11.50	17.00
面积 (km ²)	(> 40)	152.03	2114.79	6630.94
占总面积比例 (%)		2.46	9.93	17.96

6 展望

遥感技术以应用为导向，技术方法和手段已日臻完善，形成了比较系统的技术方法体系。遥感技术正在向多尺度、多分辨率、全天候、高精度和快速灵活的方向发展。遥感技术应用于我国海冰研究方面的发展，应针对自身的特点，从下面几点进行：(1) 中国在该领域方面的应用还刚刚起步，没有形成系统的技术方法和规范。(2) 增加经费的投入，加强海冰遥感理论的基础研究，从而实现海冰遥感从定性到定量、从研究到应用的过渡。(3) 重视海冰信息系统的建设，积极有效的接收和使用外国先进的卫星资料，以填补我国海冰遥感的空缺，从而满足国内的应用需要。(4) 在技术上做到地理信息系统(GIS) 和全球定位(GPS) 的紧密结合，充分利用 GPS 多元信息复合的优势，实现海洋观测由静态到动态、由准实时到实时的转变。

参考文献：

[1] 刘钦政, 白 珊, 吴辉旋. 中国海冰研究[J]. 海洋预报, 1998, 15 (4) :8 ~ 13 .
[2] 国家海洋局网址 : http: //www.soa.gov.cn
[3] 赵英时, 等. 遥感应用分析原理与方法 [M]. 北京 : 科学出版社, 2004 .
[4] 吴奎桥, 徐 莹, 郝轶萌. MODIS 数据在海冰遥感中的应用[J]. 海洋预报, 2005, 22 (增刊) :44 ~ 49 .
[5] O M Johannessen, S Sandven, L H Pettersson, etal. Near-real-time Sea Ice Monitoring in the Northern Sea Route Using ERS-1 SAR and Dmsp SSM/I Microwave Data, 46th IAF Congress. 1996,38 :457 ~ 465.
[6] 吴培中. 世界卫星海洋遥感三十年[J]. 国土资源遥感, 2000, (1) :2 ~ 10 .
[7] 孙家柄, 刘继琳. 南极拉斯曼丘陵周围地区卫星影像的冰貌信息提取 [J]. 南极研究 (中文版), 1996, 8 (4) :20 ~ 30 .
[8] 吴明钰, 罗 贤. 海冰微波辐射传输模式和实验研究[J]. 遥感学报. 1999, 3 (1) :16 ~ 22 .
[9] 朱君艳, 沈琼华, 王 珂. 海洋遥感的研究进展[J]. 浙江海洋学院学报 (自然科学版). 2000, 19 (1) :77 ~ 80 .
[10] 史培军, 范一大, 哈斯等. 利用 AVHRR 数据和 MODIS 数据测算海冰资源量[J]. 自然资源学报. 2002, 17 (2) : 138 ~ 143 .
[11] 马 毅, 张 杰, 张汉德, 等. 中国海洋航空高光谱遥感应用研究进展 [J]. 海洋科学进展, 2002, 20 (4) :94 ~ 98 .
[12] 韩玺山, 赵大庆. 辽宁海洋灾害遥感技术的应用研究[J]. 辽宁气象, 1994 (4) :41 ~ 43 .

The progress of remote sensing on sea ice research in China

GUO Qiao-zhen , CHEN Yun-hao , LI Jing, GE Ri-le , SHI Xiao-xia

(College of Resources Science and Technology, Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster of Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875 China)

Abstract : In this paper, firstly, the development of remote sensing on sea ice research was elaborated in china, and several kinds of common remote sensing data used to sea ice were introduced. Secondly, the application of remote sensing on sea ice research was discussed from four sides which are ice thickness identification, vector calculus of movement velocity, gross sea ice resource calculation and disaster monitoring. At last, the specific application of remote sensing was expounded taking Bohai sea ice as a case study, and the developing direction was pointed out.

Key Words : sea ice ; RS ; AVHRR; MODIS ; SAR ; TM