

刘志强, 苏洁, 时晓旭. 渤海 AVHRR 多通道海冰密集度反演算法试验研究[J]. 海洋学报, 2014, 36(11): 74—84, doi. 10. 3969/j. issn. 0253-4193. 2014. 11. 009

Liu Zhiqiang, Su Jie, Shi Xiaoxu. Study on the multi-band retrieval algorithm for the Bohai Sea ice concentration using AVHRR data [J]. Acta Oceanologica Sinica (in Chinese), 2014, 36(11): 74—84, doi. 10. 3969/j. issn. 0235-4193. 2014. 11. 009

# 渤海 AVHRR 多通道海冰密集度反演算法试验研究

刘志强<sup>1</sup>, 苏洁<sup>1</sup>, 时晓旭<sup>1,2</sup>, 赵进平<sup>1</sup>

(1. 中国海洋大学 海洋环境学院, 山东 青岛 266100; 2. 中国科学院 大气物理研究所, 北京 100029)

**摘要:** 为了得到更精确的渤海海冰密集度反演参数, 采用辽东湾不同类型海冰 ASD 实测数据, 在分析光谱特征的基础上, 针对 NOAA/AVHRR 数据确定出合适海冰密集度反演算法阈值。继而, 基于线性光谱混合模型的多通道反演算法进行了一系列算法试验。同时实现了基于 Landsat5-TM 数据的渤海海冰密集度场反演, 并利用该结果与 AVHRR 单通道和多通道算法得到的海冰密集度反演结果进行比对分析。定量误差分析结果表明, 当单通道算法或组合算法中包含 1 通道时, 与 Landsat5-TM 反演结果的平均误差为正值, 包含 2 通道且不包含 1 通道时, 平均误差为负值; 同时使用这两个通道较只包含其一的各种组合算法的平均误差明显偏小; 在各种组合算法中, 1245 四个通道组合反演的海冰密集度结果误差最小, 可应用于渤海 AVHRR 数据海冰密集度反演。

**关键词:** 渤海; 海冰密集度反演; 线性光谱混合模型; NOAA/AVHRR; Landsat5-TM

中图分类号: P731.15

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2014)11-0074-11

## 1 引言

渤海是北半球纬度最低的季节性结冰海域, 通常有 3~4 个月的结冰期。由于每年冬季的气候差异, 海冰冰情具有较强的年际变化, 冰情严重时, 海冰覆盖面积超过渤海海域面积的 70% 以上。海冰密集度、海冰外缘线位置和海冰覆盖面积等是反映渤海海冰冰情的重要指标。其中海冰密集度指一定范围内海冰所占的面积百分比, 用来描述海冰的空间密集程度, 它直接影响着海洋和大气的热量交换强度, 因此, 海冰密集度不仅是表征海冰特征的重要参数, 也是很多海洋和大气环流模式的输入参数<sup>[1-2]</sup>。

卫星遥感技术的发展, 为海冰监测和预报提供了时空连续的实时资料来源。卫星遥感技术的基础是

地物光谱特征, 不同地表的光谱特征是选择和设计传感器波段的依据, 同时也是对遥感数据进行定标和真实性检验的依据, 据此可以建立地面实测数据和卫星遥感数据之间的桥梁<sup>[3]</sup>。1988 年 NOAA/AVHRR (National Oceanic and Atmosphere Administration/Advanced Very High Resolution Radiometer) 的可见光和红外图像被用于渤海和黄海北部的海冰监测和业务预报<sup>[4]</sup>。2002 年我国首次使用“海洋 1 号”卫星的 COCTS (Chinese Ocean Color and Temperature Scanner) 和 CCD (Charge Coupled Device) 可见光数据进行渤海海冰的监测和预报, 提供了海冰图像及海冰密集度、冰厚和冰外缘线等产品, 也作为渤海海冰监测和数值预报初始场的重要信息来源<sup>[5]</sup>。MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer) 多通

收稿日期: 2014-03-09; 修订日期: 2014-06-05。

基金项目: 国家海洋局公益项目(201105016); 气象公益性行业项目(GYHY201306049)。

作者简介: 刘志强(1987—), 男, 安徽省淮北市人, 主要从事卫星海洋学研究。E-mail: zhiqiang39@163.com

\* 通信作者: 苏洁, 副教授, 从事冰-海洋耦合模式研究。E-mail: sujie@ouc.edu.cn

道可见光数据对不同密集度和厚度的海冰有较好的区分和识别,可以提供较 NOAA/AVHRR 分辨率高的海冰参数信息,被用作海冰预报质量检验的参考依据之一<sup>[6]</sup>。尽管近年来 MODIS 卫星数据的应用非常广泛,也可以得到 LandSat5-TM(Thematic Mapper)等更高分辨率的遥感数据,但考虑到时间序列长度的问题,NOAA/AVHRR 数据仍具有不可替代的应用价值。

在针对可见光数据的海冰密集度算法中,通常根据传感器不同通道数据(如反射率、亮温)的特征<sup>[7]</sup>及其之间的差值<sup>[8]</sup>或比值<sup>[9]</sup>等,采用阈值算法来区分云、海冰和海水。但是由于地表覆盖类型的复杂性,这些阈值的确定会存在一定程度上的误判。在应用这些算法时,能否找到合理准确的阈值会直接影响海冰卫星遥感信息提取的准确性。

目前渤海海冰密集度反演通常采用单通道算法<sup>[4-6]</sup>,本文基于 AVHRR 可见光卫星数据,配合 2013 年冬季渤海辽东湾海冰科学考察获得的 ASD(Analytical Spectra Device)实测光谱数据,确定海冰密集度反演算法的阈值。进而,基于线性光谱混合模型(LSMM)<sup>[10]</sup>,进行海冰密集度多通道反演算法试验。

反演结果的验证也一直是海冰遥感算法研究中比较困难的环节。在缺乏现场数据的情况下,采用较高分辨率的遥感数据进行比对分析不失为一种合理有效的方法。本文实现了基于 LandSat5-TM 数据的渤海海冰密集度场反演,并利用该结果与单通道算法和 LSMM 模型多通道算法 AVHRR 数据渤海海冰密集度反演结果进行比对分析,进行了一系列算法试验,旨在通过定量的分析确定更为合理的渤海海冰密集度反演算法,为渤海海冰冰情监测提供基础数据。

## 2 数据来源及处理

### 2.1 AVHRR 数据

计算渤海海冰密集度使用的主要数据为经过大气校正的 AVHRR HRPT(High Resolution Picture Transmission)L1B 数据,在同一地点一天可获得两次过境观测数据,从可见光到热红外共 5 个通道,星下点分辨率 1.1 km,通道范围 0.58~12.50  $\mu\text{m}$ ,时间范围为 1981 年至今。数据预处理包括太阳高度角订正、辐射定标及地理校正<sup>[7]</sup>。

### 2.2 Landsat5-TM 数据

采用从中科院对地观测与数字地球科学中心购买的 Landsat5-TM 数据(FASTB 格式 L1 级产品)作

为比对和验证数据。该数据共 7 个波段,通道范围 0.45~12.50  $\mu\text{m}$ ,除波段 6 分辨率为 120 m 外,其余波段分辨率均为 30 m。采用美国地质调查局(USGS)在 2007 年 4 月发布的辐射定标公式进行辐射定标,获得光谱辐亮度,并利用下式计算不同通道的反照率<sup>[11]</sup>,

$$\rho_{\lambda} = \frac{\pi L_{\lambda} d^2}{ESUN_{\lambda} \cos \theta_s}, \quad (1)$$

式中,下标  $\lambda$  代表不同波长通道, $\rho_{\lambda}$  为反照率, $L_{\lambda}$  为定标后传感器入瞳处的光谱辐亮度, $d$  表示日地距离, $ESUN_{\lambda}$  表示大气层顶平均太阳辐照度, $\theta_s$  表示太阳天顶角。

### 2.3 ASD 实测光谱数据

本文采用 ASD 实测海冰光谱数据作为确定密集度算法阈值的参考数据。2013 年 1 月 5-8 日使用 ASD FieldSpec 3 便携式地物光谱仪分别对辽东湾 3 个站点不同类型冰面(积雪覆盖的海冰、光滑的裸冰等)进行了现场光谱测量,站点分别位于葫芦岛(40°47'2.2"N,120°59'48"E)、营口(40°13'12.3"N,122°03'53.5"E)和鲅鱼圈(40°00'35.4"N,121°49'1.7"E)结冰海区(图 1)。

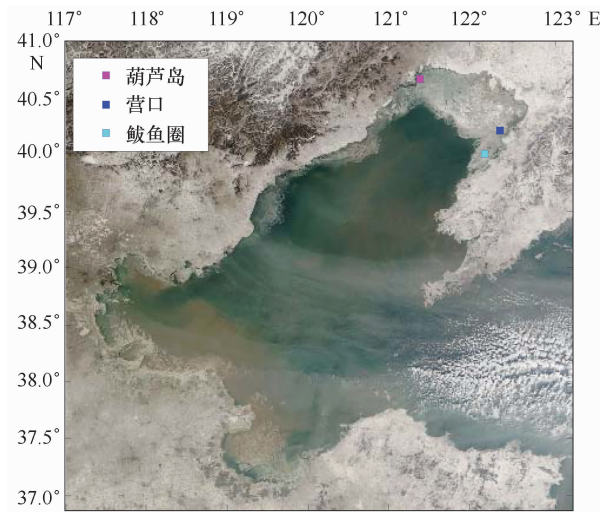


图 1 ASD 实测站点位置和 2013 年 1 月 5 日渤海海冰 MODIS 真彩图

Fig. 1 The positions of observation stations of ASD and MODIS true color image of the Bohai Sea ice on January 5th 2013

ASD 测量波段范围为 350~1 050 nm,光谱采样间隔为 1 nm。所有站点的海冰光谱测量均在当地时间 12 点后开始,且均在自然光照状态下进行,每次测

量前,使用参考板对光谱仪进行标定,且保证四周无障碍物遮挡,同时最大限度的减小测量者对光谱的影响。测量过程中保持探头垂直向下,距离海冰反射面 30 cm 左右。ASD 数据处理主要包括:(1)进行时间

平滑去除光谱曲线上的噪声;(2)计算海冰反射亮度的平均值;(3)计算测量对象的实际光谱反照率(海冰反射亮度的平均值与参考板反射太阳光谱的平均值之比)并绘制光谱特征曲线。

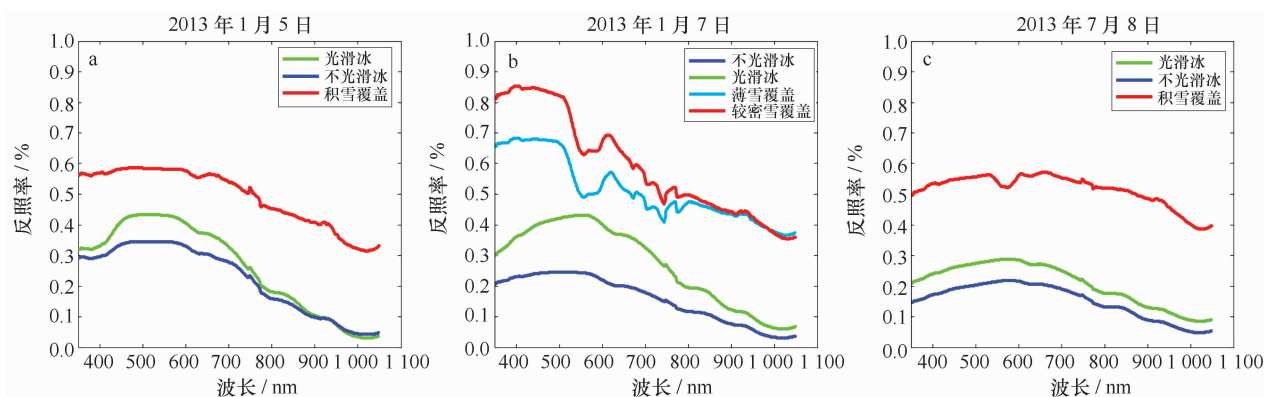


图 2 2013 年 1 月 5—8 日辽东湾 3 个站点海冰光谱特征曲线

Fig. 2 Sea ice spectrum characteristic curves of three stations in the Liaodong Bay during 5—8, January 2013

1 月 5 日为葫芦岛站(a),1 月 7 日为营口站(b),1 月 8 日为鲅鱼圈站(c)

a is Hu Ludao station on Jan 5th, b is Ying Kou station on Jan 7th, and c is Ba Yuquan station on Jan 8th

图 2 为 3 个站的 ASD 光谱特征曲线。由图可见,有积雪覆盖海冰的反照率最高,而且积雪越密集,反照率越高;其次是光滑裸冰;反照率最低的是表面凹凸不平的非光滑裸冰。反照率光谱特征曲线在可见光波段内(350~770 nm)达到峰值,而在近红外短波段(780~1 100 nm)则显著降低,光谱特征曲线整体上随着波长的增加而降低,这符合光谱特征曲线的一般规律。不同环境条件下,同一类型海冰的光谱特征曲线存在差异。如 1 月 7 日积雪覆盖海冰的光谱曲线值与其他两日相比偏大,根据现场观测记录分析,主要是由于该日所测站点的积雪更加密集。再如,站点光照条件的变化及人工选择测量点产生的误差等也会使各类光谱特征曲线的吸收峰谷的数量及位置不同、光谱曲线随波长衰减的速率不同,即使对于相同波长,同一类型海冰的光谱反照率也不同。总体来看,渤海海冰的光谱反照率小于极区海冰,原因在于极地区域的海冰较纯净,而渤海海冰中存在较多的杂质,造成渤海海冰的 ASD 光谱数据低于相同厚度和表面粗糙度条件下的极区海冰。为了尽量减小观测数据受到杂质的影响,我们选择离岸较远的区域获取 ASD 海冰实测数据。

### 3 AVHRR 海冰密集度反演算法

为了确定更为合理的渤海海冰密集度反演算法,

本文根据 AVHRR 各通道光谱特征,在云检测和冰水识别的基础上,结合 ASD 现场观测数据确定算法阈值,应用单通道算法和基于 LSMM 模型的多通道算法分别进行海冰密集度反演,作为进一步的算法试验的基础。

#### 3.1 云检测

对可见光数据而言,云的存在容易产生对海冰的误判,有效排除云的干扰对海冰参数反演的准确性十分重要。经预处理后,AVHRR 数据海冰密集度反演的第一个步骤即为云检测。针对下垫面是陆地或者海洋的情况,AVHRR 数据的云检测通常采用 APOLLO(The AVHRR Processing scheme Over Land, cloud and Ocean)算法<sup>[7]</sup>和 CLAVR(Clouds from AVHRR)算法<sup>[9]</sup>,两种算法都是采用对单通道反照率及亮温差等判据进行组合的方法来对有云像元进行判别;针对冰雪下垫面情况,Key 等在进行多种算法试验的基础上提出了 ISCCP(International Satellite Cloud Climatology Project)算法<sup>[8]</sup>,即通过使用 1、3、4 单通道和 3、4 通道的亮温差进行云检测。徐栋等在此基础上提出针对北极区域的 AVHRR 可见光数据云检测方案<sup>[12]</sup>。对渤海来说,海区较小,因此目前多数海冰反演是基于晴空下的情况。实际上,结冰海区只有部分被云覆盖,这时就需要采用合理的云识别算

法进行云剔除,以保留未被云覆盖海区的反演数据连续性。

本文以 AVHRR 假彩图和 MODIS 真彩图作为依据,比较分析 NDVI、Q 指数、不同通道差值、比值等多种判据的有云像元识别效果,最后确定基于 ISCCP 算法的渤海海区云检测方法,即采用 1、4 通道及 3、4 通道的亮温差来检测有云像元。

### 3.2 冰水识别

在云剔除的基础上,根据冰和水反照率及亮温的差异对冰水像元进行识别,这是海冰密集度反演的关键步骤。海冰反照率与亮温表现的是相反的光谱辐射特征,亮温越高反照率越低。各通道反照率或亮温分布曲线的峰值分别对应着冰和水出现概率最大的反照率或亮温值, Bayes 分类准则<sup>[13]</sup>指出取谷值作为冰水分界点的误判率最小。

针对渤海海冰反演,以往的可见光冰水识别的判据包括: AVHRR 的 band1 和 band4 组合<sup>[4]</sup>、COCTS 的 band5 与 CCD 的 band2 和 band4 通道组合<sup>[5]</sup>、MODIS 的 band1 和 band31 组合<sup>[6]</sup>。本文依据 Bayes 分类准则对不同冰水识别判据的统计分布曲线进行了分析,筛选峰谷分布明显的判据。同时,通过 AVHRR 可见光图像目视选取了包含有不同厚度海冰、含有泥沙海水和纯净海水的像元集合,分析组合判据的散点图分布特征,并将冰水识别结果与当天 AVHRR 假彩图和 MODIS 真彩图进行目视比较,结果显示利用 Band4 和 Band3-Band1 来进行冰水识别,具有较好的判别效果。以 1 月 5 日数据为例,图 3 为在 AVHRR 2 通道反照率分布图上的不同地表类型取样区域位置。图 4 为本文所使用冰水识别算法的散点示意图。可以看出,该判据对各类地表类型具有较好的识别能力。

### 3.3 海冰密集度计算

基于冰水识别结果,对判识为冰点的格点,可以利用单通道和多通道的反照率和亮温数据计算海冰密集度。

#### 3.3.1 单通道算法

目前在渤海海冰实时监测方面,针对单通道的系数法<sup>[14]</sup>是较为普遍使用的提取海冰密集度参数的算法公式:

$$c = \begin{cases} 0\% & A \leq A_w, \\ (A - A_w)/(A_i - A_w) & A_w < A < A_i, \\ 100\% & A \geq A_i, \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $c$  为冰水混合像元的海冰密集度,  $A$  为像元的实

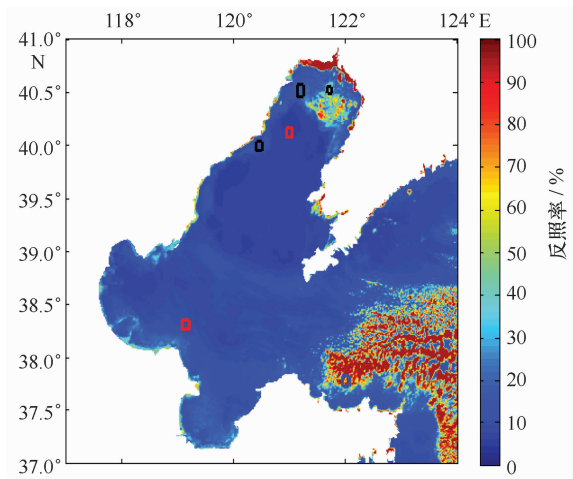


图 3 AVHRR 2 通道反照率及不同地表类型取样区域位置

Fig. 3 Albedo distribution of AVHRR band2 and the sample locations of different surface features

黑色实线区域为不同厚度的海冰,红色实线区域为不同性质的海水(纯净海水与含泥沙海水),蓝色实线区域为厚云  
The area with black solid line represents different thickness of sea ice; the area with red solid line represents sea water with different properties (clean sea water and the one containing sediment); the area with blue solid line area represents cloud

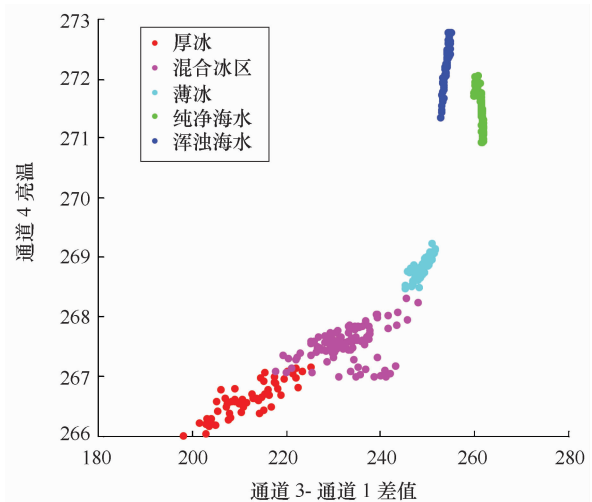


图 4 不同地表类型通道 4 亮温和通道 3-1 差值散点分布图

Fig. 4 Scatter plot of different surface features of band4 and band3-band1

际反照率,  $A_i$  和  $A_w$  分别表示混合像元中纯冰和纯水的反照率值。

算法中纯冰、纯水阈值的选取最为重要。阈值不仅因海区而不同,也因过境时的天气及环境条件而不

同,因此在渤海海冰日常可见光数据监测处理中,要想得到较为可信的海冰密集度反演结果,通常要对每幅数据绘制分布曲线、分别进行阈值判断。

以 2013 年 1 月 5 日 AVHRR 的 2 通道数据为例,该通道反照率(见图 3)能够较好的区分出冰水像

元。虽然密集冰和云的反照率比较接近,但借助亮温数据(见 3.1 节云检测算法)可以有效的去除有云像元。图 5 中黑线为云剔除后的反照率数据分布曲线,谷值两侧的峰值分别对应着最大概率的海水(6.4%~7.1%)和海冰(9.0%~9.5%)反照率值。

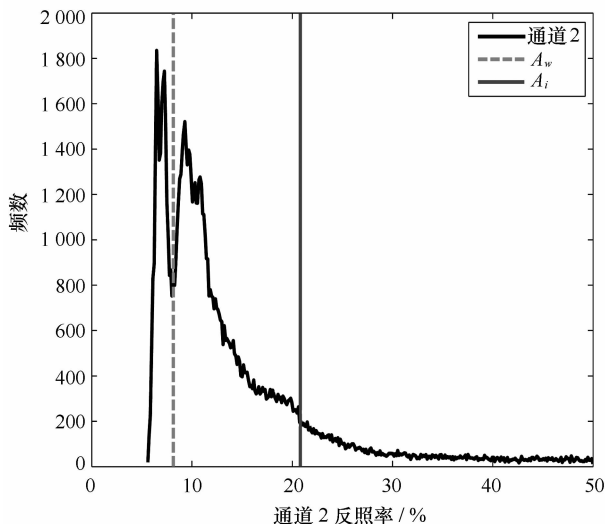


图 5 AVHRR 通道 2 反照率直方图分布曲线

Fig. 5 Distribution curves of AVHRR band2

红色点和蓝色虚线为选取确定的的纯水像元反照率  $A_w$  和纯冰像元反照率  $A_i$

The red dash line and blue dash line represent  $A_w$  and  $A_i$

通常利用该分布图可以经验地给出  $A_i$  和  $A_w$  阈值。这里利用 2.3 节给出的 ASD 数据配合图 5 的分布曲线,综合确定阈值。ASD 测量波段范围为 350~1 050 nm,其中包含了 AVHRR 的 Band1 和 Band2 两个通道的波段范围。图 6 给出了 2013 年 1 月 5 日观测的不同类型冰面的 ASD 实测光谱特征曲线与 AVHRR 通道数据的比较。由于实测数据和可见光遥感数据的空间尺度差别很大,难以进行同一个格点的匹配和比较,因此本文通过人工识别,选取 AVHRR 数据中具有更明显表面类型的特征小区的光谱值进行比对。特征小区的选取见图 3。由图 6 可见,很明显,海水的反照率值最低(黑色),云的反照率值最高(枚红色),有积雪覆盖的海冰反照率其次(红色),对于无积雪覆盖裸冰(绿色),由于卫星分辨率的原因,从 AVHRR 通道数据(见图 3)中无法区分 ASD 数据对应的光滑和非光滑海冰(见图 6 中的绿线和蓝线曲线)。

结合 AVHRR 通道 2 光谱分布曲线(图 5)可以判断选择适合海冰密集度反演的最佳阈值。本文针

对 2013 年 1 月 5 日数据所给出的纯水和纯冰阈值,  $A_w$  和  $A_i$  分别为 8.13% 和 20.30%。见图 5、6 中的红色虚线和蓝色虚线。

图 7 为采用系数公式基于 AVHRR 通道 2 数据反演的海冰密集度结果。与同日 MODIS 真彩图(见图 1)对比可见,反演结果能够较好的区分冰水像元,也能去除大部分泥沙像元,但是对某些区域(如莱州湾和渤海湾沿岸处)的薄冰存在误判,在靠近岸边的区域存在一些密集度高值冰区,很有可能是由于沿岸堆积冰所造成。与 ASD 实测数据对应的其他两天的反演场也有类似结果,图略。由于在反演计算时,阈值是根据整幅图像的反照率分布确定的,而辽东湾中东部存在的积雪客观上会对阈值的选取造成一定的影响。基于目前的反演方法,尚无法在这个环节去除积雪的影响,因此造成了辽东西岸和湾底海冰密集度略有偏低。所幸对于渤海来说,积雪现象并不多见,在无积雪的时段不会出现这样的问题。

### 3.3.2 基于 LSMM 模型的多通道算法

单通道的反演算法的优点是简单易行,缺陷是只

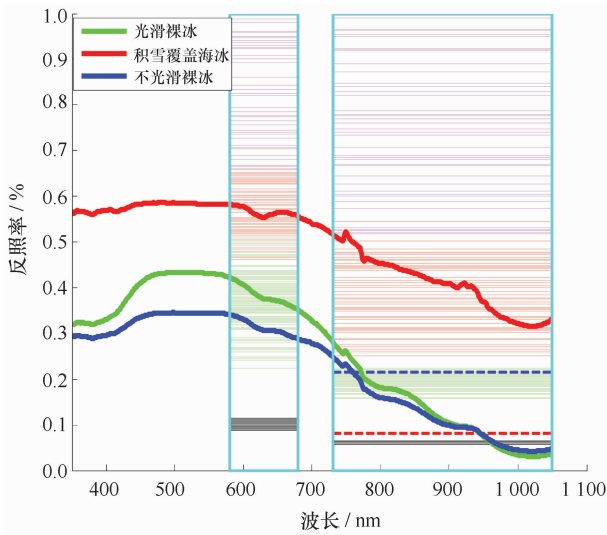


图6 1月5日 AVHRR 与 ASD 实测数据对比

Fig. 6 Comparison of AVHRR and ASD data on Jan 5th  
三色曲线为不同类型冰面的实测光谱特征曲线,其中包含了 AVHRR 的 Band1 和 Band2 两个通道的波段范围,见图中青色框中的细横线,不同颜色对应着对应图 3 中选择的海冰,海水和有云区域

Three curves represent ASD measured spectral characteristic of different types of ice, its bandwidth covers band1 and band2 of AVHRR; the horizontal lines with different colors in the cyan box represent sea ice, sea water and cloud areas as shown in Fig. 3

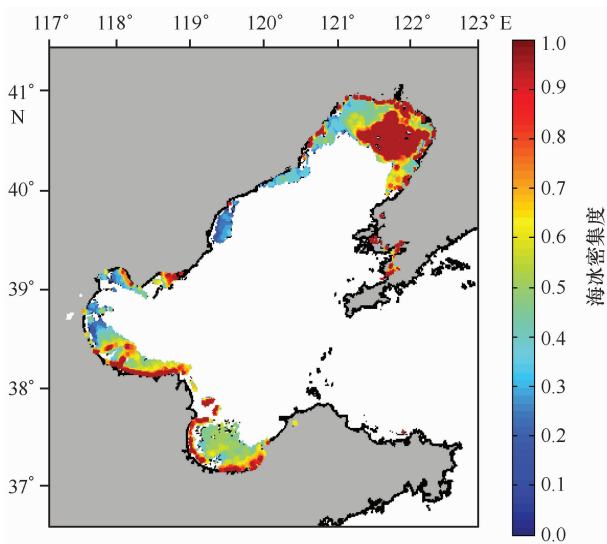


图7 2013年1月5日 AVHRR 通道2反演海冰密集度

Fig. 7 SIC retrieved from AVHRR single band 2 on Jan 5th 2013

考虑了反照率的特性。从理论上,多通道反演算法可以弥补这个不足。基于线性光谱混合模型 (LSMM)<sup>[10]</sup> 可以进行混合像元的分解,目前多用于卫

星数据的陆地不同地表类型的分离提取<sup>[15]</sup>。LSMM 模型假定像元的光谱特征可以表征为像元内各端元的光谱特征和其所占面积百分比的线性函数,定义如下:

$$L_{i\lambda} = \sum_{k=1}^n f_{ki} R_{k\lambda} + \epsilon_{i\lambda},$$

$$\sum_{k=1}^n f_{ki} = 1 \text{ 且 } f_{ki} \geq 0, \quad (3)$$

$$RMS = \left[ \sum_{k=1}^{\lambda} (\epsilon_{i\lambda})^2 / n \right]^{1/2},$$

式中,  $L_{i\lambda}$  表示第  $\lambda$  波段第  $i$  个像元的光谱辐射值;  $f_{ki}$  为第  $i$  像元内第  $k$  个端元组分所占的面积百分比;  $R_{k\lambda}$  表示第  $\lambda$  波段第  $k$  个端元组分的光谱辐射值;  $\epsilon_{i\lambda}$  表示第  $\lambda$  波段第  $i$  个像元对应的误差值;  $n$  为像元内的端元组分个数。RMS 为像元  $i$  的均方根误差,表征与真值的接近程度, RMS 越小说明线性分解的精度越高。

首先从混合像元中提取各端元光谱特征,对于渤海海冰密集度,端元实际只有两个,即海水与海冰。然后利用最小二乘法求解海冰和海水组分在像元中的面积百分比。根据多通道的原理,可以选择 2、3、4 或 5 个通道的数据进行反演。下一节将利用不同的通道进行比较试验。

#### 4 多通道海冰密集度试验及与 Landsat 5-TM 数据的比对分析

在缺乏现场数据的条件下,可以采用更高分辨率的遥感数据作为各种算法比对分析的数据。本文采用了 Landsat5-TM 数据,在冰水识别的基础上,统计计算海冰密集度<sup>[8,16]</sup>,并投影到与 AVHRR 数据的网格中,对 AVHRR 数据的各种反演算法得到的海冰密集度结果进行比对分析。

##### 4.1 Landsat5-TM 海冰密集度计算

TM 数据比 AVHRR 数据的空间分辨率高 300 多倍,但时间分辨率较低,过境同一地点的时间间隔约为 17 d,而 AVHRR 则可以在一天之内对同一地点进行两次观测。由于无法获得与 ASD 实测资料相同日期的 TM 数据,本文另选取了 2010 年 1 月 23 日的数据进行比对试验。图 8 为该日的渤海 AVHRR 假彩图和辽东湾 TM 真彩图。在此基础上,利用 TM 第 2 通道(波段范围 0.52~0.60  $\mu\text{m}$ )光谱数据,采用阈值法进行冰水识别,采用系数法<sup>[16]</sup> 计算得到 TM 海冰密集度场。

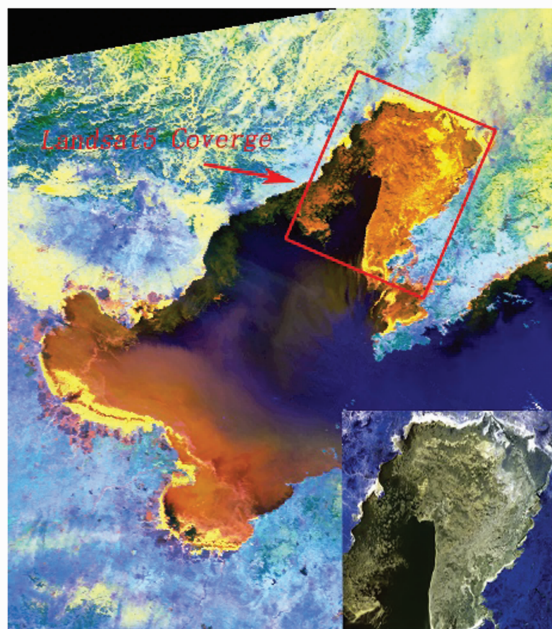


图8 2010年1月23日 AVHRR(底图,分辨率 1.1 km)和 Landsat5-TM(右下小图,分辨率 30 m)卫星图像  
Fig.8 The satellite image of AVHRR (base image, resolution 1.1 km) and Landsat5-TM (subset image, resolution 30 m) on January 23th 2010

图 9a 为 TM 通道 2 的反照率分布曲线。图中左边第一个峰值(0.108)对应着水点的集合,右边的两个主峰值,对应着不同冰厚和密集程度的海冰。对应主体海水和海冰的反照率分布曲线谷值为 0.12。同时考虑到以下依据:(1)实验室中观测到的在可见光波段中海冰的最低光谱反照率约为 0.08<sup>[17]</sup>;(2)在 Perovich 的反照率-冰厚关系中,海冰厚度为 0 cm 时,对应的海冰反照率为 0.1<sup>[18]</sup>;(3)Cavalieri 在采用 MPA 算法计算 TM 海冰密集度时采用的海冰反照率也为 0.1<sup>[19]</sup>;(4)本研究对人工可判识为海水的像元进行统计,海水及海水与海冰边界处的最大反照率不超过 0.12;因此最终本文采用 0.12 作为 TM 数据冰水识别阈值。图 9b 为利用系数法计算的 TM 海冰密集度,计算时  $A_i$  取为 0.35。前人分别采用海冰最小观测反照率值 0.08 和 0.10 作为冰水阈值,计算得到的 TM 海冰密集度差别只有 2%~4%<sup>[14,16]</sup>。

#### 4.2 比对分析试验

将图 9b 的 TM 数据密集度反演结果(分辨率 30 m)投影到 AVHRR 网格上,计算每个格点的平均密集度,得到 1.1 km 空间分辨率的海冰密集度分布场(见图 10a)。由于密集度计算公式为线性的,这种投

影方式与 Cavalieri 等<sup>[19]</sup>直接投影 TM 反照率数据的方式结果相同。以此为标准,分别对 AVHRR 单通道算法和基于 LSMM 线性光谱模型的多通道算法得到的海冰密集度结果进行比对分析。由于篇幅限制,这里只给出了通道 2 和通道 1245 海冰密集度反演结果与 TM 海冰密集度的差异分布图(图 10b,c)。

表 1 给出了不同 AVHRR 通道组合算法的海冰密集度反演结果与 TM 反演结果的平均误差(ME)、平均绝对误差(MAE)和均方根误差(RMSE)。AVHRR 通道 3 为中红外波段,虽然在进行冰水识别方面有一定优势,但该波段既有太阳辐射能量,也有地表辐射能量,较为复杂,会影响海冰密集度的计算结果,因此多通道密集度计算试验并未使用该通道数据。

表 1 显示,各通道试验结果的均方根误差(6.35%~7.59%)和平均绝对误差(3.41%~4.69%)比较接近;针对单通道反演算法,采用通道 1 的反演结果各误差均较采用通道 2 小,且二者的平均误差的符号相反,即 1(2)通道反演结果与 TM 比较偏大(小);各算法平均误差范围为 -8.03%~6.52%,当单通道算法或组合算法中包含 1 通道时,平均误差为正值,包含 2 通道且不包含 1 通道时,平均误差为负值;同时使用 1、2 通道的算法(如 12、124、125、1245 通道组合)所得到的反演结果平均误差(1.50%~2.03%)比其他算法明显偏小;使用两个通道算法的反演结果不是都比单通道结果误差更小,而使用 3 个通道组合算法的反演结果比使用单通道和双通道的结果误差都小;采用 1245 四通道所反演出的海冰密集度结果各误差在所有的试验中都是最小的(RMSE 6.35%,ME 1.50%,MAE 3.41%)。采用不同通道进行试验时误差大小不同,主要原因可能是由于不同通道的光谱特性不同,仅仅使用单通道的反照率信息,在线性光谱模型的假定下并不能完全准确的反映出在每个卫星像元内的海冰元素对该像元的总体光谱特性的贡献程度。

基于 AVHRR 各种算法与 TM 反演密集度反演之间的误差可能主要来自以下几个方面:(1)来自卫星传感器空间分辨率的差异造成卫星数据重采样投影时产生的误差;(2)卫星过境时间(UTC)不同,AVHRR 数据为 23 日 05:04-05:11,而 TM 数据为 23 日 03:25-03:27,两套数据时间差距为 90 min 左右,期间海洋或气象条件的变化可能会对海冰密集度产生影响;(3)基于线性光谱模型,冰水反照率阈值的选取所产生的误差。

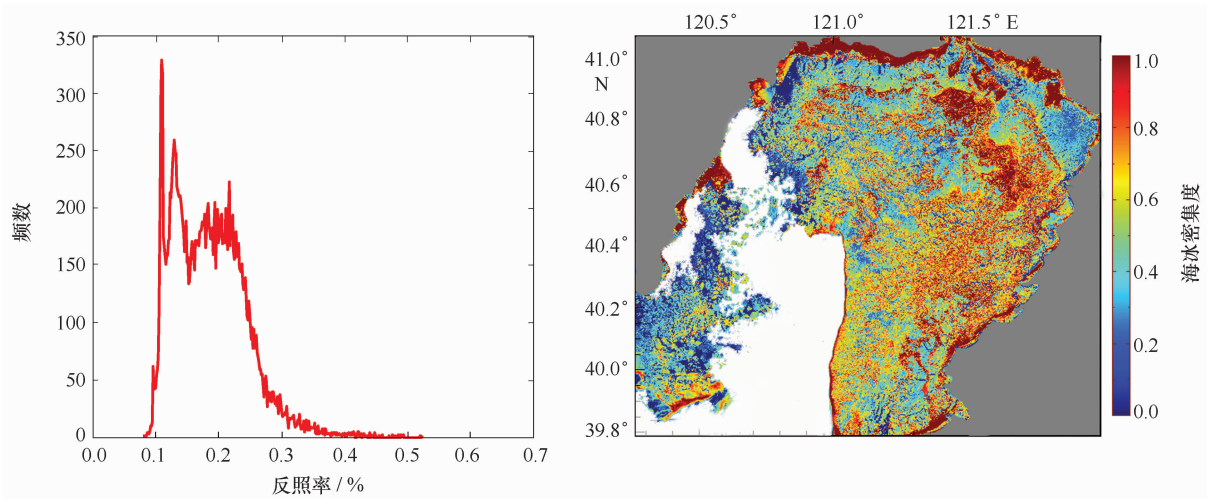


图 9 Landsat5-TM 通道 2 反照率分布(a)和 TM 海冰密集度分布(30 m 分辨率)(b)

Fig. 9 Albedo distribution curve of Landsat5-TM band2(a) and SIC of Landsat5-TM with 30 m resolution(b)

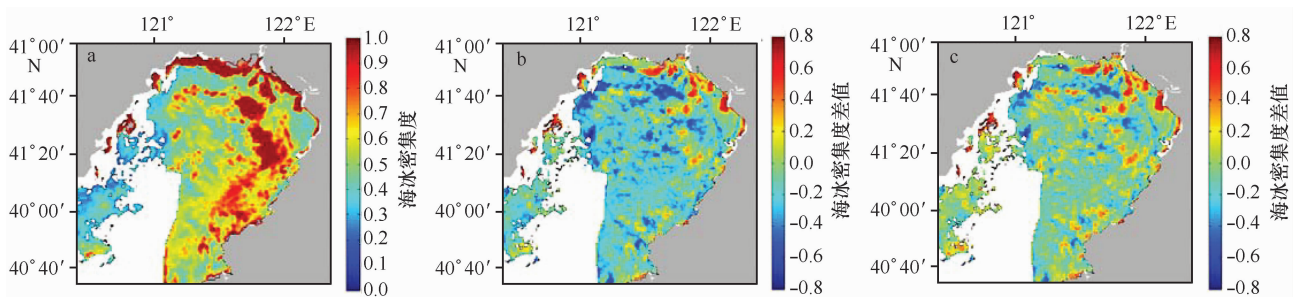


图 10 Landsat5-TM 投影海冰密集度场(a), AVHRR band2 与 TM 海冰密集度场差异比较 (AVHRR-TM)(b)和 AVHRR band1245 与 TM 海冰密集度场差异比较 (AVHRR-TM)(c)

Fig. 10 Projected SIC field of Landsat5-TM(a), SIC comparison between AVHRR band2 and TM (AVHRR-TM)(b), and SIC comparison between AVHRR band1245 and TM (AVHRR-TM)(c)

表 1 单通道和多通道冰密集度反演实验比较结果

Tab. 1 Comparison of SIC for single band and multi-band algorithm

AVHRR BAND	RMSE	ME	MAE
1	7.02%	6.52%	3.96%
2	7.59%	-8.03%	4.69%
12	7.11%	1.73%	4.14%
14	6.87%	6.50%	3.72%
15	6.69%	6.20%	3.67%
24	7.19%	-6.42%	4.28%
25	6.83%	-5.56%	3.70%
124	6.62%	2.03%	3.66%
125	6.52%	1.94%	3.55%
145	6.55%	6.77%	3.60%
245	6.46%	-4.36%	3.51%
1245	6.35%	1.50%	3.41%

在多通道各种算法中,利用 AVHRR 的 1245 四个通道计算的结果与 TM 海冰密集度偏差最小,将 2013 年 1 月 5 日的 1245 通道计算结果(见图 11a)与单通道反演结果(见图 7)进行比较(LSMM-SINGLE),图 11b 为 LSMM 多通道与单通道反演海冰密集度场的差值场。由图可见,两种算法反演结果的差值场存在空间不一致。在大部分冰区多通道算法反演的海冰密集度结果大于单通道算法结果,如辽东湾海冰外缘线附近、渤海湾南部和莱州湾东岸,部分海区差别可达 20% 以上;而对于辽东湾西岸和渤海湾北部,多通道算法反演的海冰密集度结果较单通道算法结果偏小 2%~8%。

不同算法反演结果的差值场呈不一致的空间分布,渤海湾莱州湾冰区的差异较大,原因可能在于:从 MODIS 真彩图像可以看出,渤海湾和莱州湾两个海



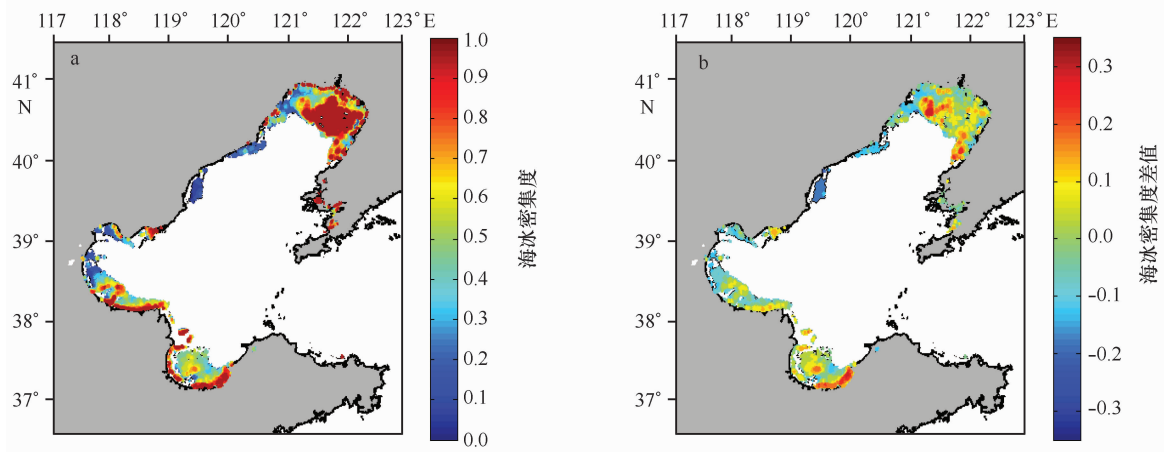


图 11 LSMM 四个通道海冰密集度反演结果(a)和 LSMM 四个通道与单通道反演场比较(LSMM-Single)(b)

Fig. 11 SIC with four band algorithm of LSMM(a) and the difference of SIC between LSMM multi-bands and single band algorithm(LSMM-Single)(b)

区中的悬浮泥沙含量明显增多,这必然对海冰的光谱信息产生影响。研究发现在物理特性相似的条件下降海冰光学层颗粒物的含量与其反照率存在着反比的关系,颗粒物浓度越高,海冰反照率越低<sup>[20]</sup>。受到泥沙等物质的影响,这两个海区的海冰表层很有可能会存在较多的杂质颗粒物,造成海冰表面非常粗糙,进而海冰镜面反射减弱,体散射增强,总的效果是减弱了冰面反射,因此实际反照率低于相同条件下的光滑海冰,另一方面,含泥沙的海水比洁净的海水反照率高,也会造成将海水误判为海冰的情况。在热红外通道,悬浮泥沙的亮温与海水的亮温接近,与海冰的亮温有明显的差别。以上原因可以造成单通道反演结果偏小。同时可以看到,该海区正经历一些复杂气象条件如海雾或者薄云的影响,这会造成地表实际反照率偏高,因此仅使用单通道反照率反演出的海冰密集度将会偏高。

## 5 结论与讨论

### 5.1 结论

利用 AVHRR 遥感数据进行了渤海海冰密集度单通道和 LSMM 模型多通道算法较系统的试验和研究。分析了辽东湾 ASD 实测数据的海冰光谱特征变化,并通过与 AVHRR 可见光通道数据的比对分析,确定出海冰密集度反演算法中的合理阈值。为了对 AVHRR 海冰密集度反演结果进行对比分析,实现了基于 Landsat5-TM 高分辨率数据的渤海海冰密集度反演,并以此为标准对 AVHRR 海冰密集度多种反演算法的结果进行比对,给出渤海海冰密集度反演算法

的合理建议。具体结论如下:

(1)将 AVHRR 不同地表光谱分布与 2013 年 1 月 5 日辽东湾实测 ASD 光谱反照率数据进行对比,确定出当日渤海海冰密集度适合的反演阈值,该阈值也可用于多通道算法。

(2)各种算法的定量比较分析结果显示:当单通道算法或组合算法中包含 1 通道时,与 Landsat5-TM 反演结果的平均误差为正值,包含 2 通道且不包含 1 通道时,平均误差为负值;同时使用 1、2 通道组合算法的反演结果相比其他算法平均误差小;采用 3 个通道组合的结果普遍比单通道和双通道的结果误差偏小;采用 1245 四通道反演的海冰密集度结果比其他算法结果误差都小。因此综合以上分析,本文建议基于 AVHRR 数据的渤海海冰密集度反演算法可以采用 1245 通道组合进行反演计算。

### 5.2 讨论

本文在反演计算渤海海冰密集度的过程中,尝试使用 ASD 实测数据与遥感数据作为计算反演海冰密集度时确定阈值的依据,ASD 数据能够反映出海冰的总体光谱特征,缺陷在于实测数据与卫星数据的空间匹配度差异太大,因此在未来的地物实地光谱测量中应采用对一定的海冰区域范围进行测量后平均的光谱数据,以达到最佳的比对参考效果。同时针对渤海各海区海冰不同特点进行反演和比对验证,以此来检验本文初步提出的结论是否具有更广泛的适用性。

积雪的存在会对阈值的选取造成影响,因此在一定程度上影响到海冰密集度的反演,为了准确的反演海冰密集度,在将来的研究中,还需要进一步考虑如

何去除积雪效应带来的影响。

在海冰密集度反演结果的验证方面,样本的代表性、时空匹配问题都一直是难题。随着新一代卫星和可见光传感器的使用,在将来的研究中需进一步研究探索利用更高分辨率遥感产品验证反演结果的方法,从而为渤海海冰的监测工作提供更有价值的参考。

**致谢:**本研究 ASD 数据由中国海洋大学极地组 2013 年冬季辽东湾海冰科学调查获得;参与 ASD 数据获取和处理的还有王维波和陈萍博士;与赵进平和管磊老师的讨论对本文完成有不少帮助,特此感谢!

#### 参考文献:

- [1] 白珊,刘钦政,吴辉碁,等. 渤海、北黄海海冰与气候变化的关系[J]. 海洋学报,2001,23(5):33-41.
- [2] 苏洁,郝光华,叶鑫欣,等. 极区海冰密集度 AMSR-E 数据反演算法的试验和验证[J]. 遥感学报,2013,17(3):459-513.
- [3] 柯长青,谢红接,雷瑞波,等. 北极海冰的光谱特征分析[J]. 光谱学与光谱分析,2012,32(4):1081-1084.
- [4] 郑新江,邱康睦,陆风. 定量计算渤海海冰参数的遥感方法[J]. 应用气象学报,1998,9(3):359-363.
- [5] 罗亚威,张蕴斐,孙从容,等. “海洋 1 号”卫星在海冰监测和预报中的应用[J]. 海洋学报,2005,27(1):7-18.
- [6] 吴龙涛,吴辉碁,孙兰涛,等. MODIS 渤海海冰遥感资料反演[J]. 中国海洋大学学报,2006,36(2):173-179.
- [7] Gesell G. An algorithm for snow and ice detection using AVHRR data An extension to the APOLLO software package[J]. International Journal of Remote Sensing,1989,10(4): 897-905.
- [8] Key J,Barry R G. Cloud cover analysis with Arctic AVHRR data; 1. Cloud detection[J]. Journal of Geophysical Research; Atmospheres (1984 - 2012),1989,94(15): 18521-18535.
- [9] Stowe L,Davis P A,McClain E P. Scientific basis and initial evaluation of the CLAVR-1 global clear/cloud classification algorithm for the Advanced Very High Resolution Radiometer[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology,1999,16(6): 656-681.
- [10] Settle J,Drake N A. Linear mixing and the estimation of ground cover proportions [J]. International Journal of Remote Sensing,1993,14(6): 1159-1177.
- [11] Chander G,Markham B L,Helder D L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS,TM,ETM+,and EO-1 ALI sensors[J]. Remote sensing of environment,2009,113(5): 893-903.
- [12] Xu Dong,Su Jie,Liu Zhiqiang,et al. Application of cloud detection algorithm in the Arctic region based on AVHRR satellite data[C]//Proceedings of the International Conference on Remote Sensing Environment and Transportation Engineering. 2011(2): 1026-1030.
- [13] 马开玉,丁裕国,屠其璞,等. 气候统计原理与方法[M]. 北京:气象出版社,1993.
- [14] Steffen K,Maslanik J A. Comparison of Nimbus 7 scanning multichannel microwave radiometer radiance and derived sea ice concentrations with Landsat imagery for the North Water area of Baffin Bay[J]. Journal of Geophysical Research; Oceans (1978-2012),1988,93(C9): 10769-10781.
- [15] Rober D A,Gardner M,Church R,et al. Mapping Chaparral in the South Honica Mountains using multiple endmember spectralmixture models[J]. Remote Sens,Environ,1998,65:267-279.
- [16] Steffen K,Schweiger A. NASA team algorithm for sea ice concentration retrieval from Defense Meteorological Satellite Program special sensor microwave imager; Comparison with Landsat satellite imagery[J]. Journal of Geophysical Research,1991,96(C12): 21971-21987.
- [17] Grenfell T C,Barber D G,Fung A K,et al. Evolution of electromagnetic signatures of sea ice from initial formation to the establishment of thick first-year ice[J]. Geoscience and Remote Sensing,1998,36(5): 1642-1654.
- [18] Perovich D K,Maykut G A,Grenfell T C. Optical properties of ice and snow in the polar oceans. I: Observations[C]// Technical Symposium Southeast International Society for Optics and Photonics,1986: 232-241.
- [19] Cavalieri D J,Markus T,Hall D K,et al. Assessment of EOS Aqua Amsr-E arctic sea ice concentrations using landsat-7 and airborne microwave imagery[J]. Geoscience and Remote Sensing,2006,44(11): 3057-3069.
- [20] Light B,Eicken H,Maykut G A,et al. The effect of included participates on the spectral albedo of sea ice[J]. Journal of Geophysical Research; Oceans (1978-2012),1998,103(C12): 27739-27752.

## Study on the multi-band retrieval algorithm for the Bohai Sea ice concentration using AVHRR data

Liu Zhiqiang<sup>1</sup>, Su Jie<sup>1</sup>, Shi Xiaoxu<sup>1,2</sup>, Zhao Jinping<sup>1</sup>

(1. *College of Environmental Oceanography, Ocean University of China, Qingdao 266100, China*; 2. *Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*)

**Abstract:** To achieve the improved retrieval parameter of sea ice concentration(SIC) in the Bohai Sea, spectral characteristics of different types of sea ice are obtained and analyzed using in-situ ASD measurements in the Liaodong Bay. Appropriate threshold is thus determined for the retrieval of AVHRR data and then the SIC is calculated. In this paper, muti-band retrieval algorithm based on linear spectral mixture model (LSMM) is used for conducting a series of band experiments. The retrieved SIC using LandSat5-TM data is used to compare with the AVHRR SIC of different combinational algorithms. The results of error quantitative analysis indicate that the mean error (ME) of the algorithms involving band1 is positive, but the ME turns to negative when the algorithms involve band2 instead of band1; the ME of the algorithms which include both of two bands is less than the those which include only band1 or band2; among these algorithms, the 1245 joint-band algorithm has the minimum errors; it is concluded that the 1245 joint-band algorithm can be used for the retrieval of AVHRR SIC in the Bohai Sea.

**Key words:** Bohai Sea; SIC retrieval; LSMM; NOAA-AVHRR; LandSat5-TM