

# 遥感反演渤海辽东湾海冰厚度及时空分布特征

岳政名<sup>1</sup>, 姜涵哲<sup>2</sup>, 孙晟好<sup>2</sup>, 孙也涵<sup>2</sup>, 王紫一<sup>2</sup>, 蒋立军<sup>2\*</sup>, 潘军<sup>2</sup>

1. 中国人民解放军 92493 部队, 辽宁 葫芦岛 125000;
2. 吉林大学 地球探测科学与技术学院, 长春 130026

**摘要:** 为探讨海冰时空分布特征对海洋灾害预警、资源开发和全球气候变化研究的重要性, 在海冰厚度遥感反演建模的基础上, 笔者利用多时相遥感数据进行冬季不同月份渤海辽东湾海冰空间分布范围、海冰厚度信息提取及规律分析。首先基于方差分析方法筛选对海冰厚度差异具有显著响应的敏感波段, 并基于回归分析方法构建海冰厚度-敏感波段反射率统计关联模型, 然后利用多时相遥感数据进行渤海海域海冰厚度反演和海冰时空分布特征分析。实验结果表明, Landsat 卫星的红光波段数据在反演海冰厚度方面表现出较高的敏感性, 利用该波段数据所建立的回归统计模型, 其线性拟合回归平方和高达 0.975 1, 表明模型具有较高的精度和可靠性。采用 Landsat 红光波段数据反演渤海辽东湾海域海冰时空分布结果显示: 从每年 12 月下旬开始, 渤海盘锦和营口等区域率先结冰, 而到翌年 1 月下旬, 渤海各区域的海冰达到最厚、分布面积最大。随着气温逐渐回升, 2 月上旬各区域海冰开始逐渐消退, 至 3 月上旬基本完成消退过程。冬季各月份的薄冰占比普遍较高, 而厚冰则较低; 空间上, 纬度较高或靠近岸边的区域结冰时间较早、冰层厚度大、退冰时间较晚, 反之, 在低纬度区域海冰结冰较晚, 且退冰较早。

**关键词:** 海冰厚度; 关联模型; 时空分布; 辽东湾; 渤海

## Remote sensing inversion on sea ice thickness and spatio-temporal distribution characteristics in Liaodong Bay of Bohai Sea

YUE Zhengming<sup>1</sup>, JIANG Hanzhe<sup>2</sup>, SUN Shengyu<sup>2</sup>, SUN Yehan<sup>2</sup>, WANG Ziyi<sup>2</sup>, JIANG Lijun<sup>2\*</sup>, PAN Jun<sup>2</sup>

1. Unit 92493 of Chinese People's Liberation Army, Huludao 125000, Liaoning, China;
2. College of Geo-Exploration Science & Technology, Jilin University, Changchun 130026, China

**Abstract:** In order to study the importance of the spatial and temporal distribution characteristics of sea ice in the marine disaster warning, resource development and global climate change research, the authors use multi-tem-

收稿日期/Received: 2024-03-15; 修订日期/Revised: 2024-09-01; 出版日期/Published: 2025-05-25

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFC2907105)

第一作者: 岳政名 (1987—), 男, 工程师, 硕士, 主要从事水文气象保障方面的研究。E-mail: yuezhengming110@163.com

\* 通信作者: 蒋立军 (1984—), 男, 讲师, 博士, 主要从事遥感地质、卫星产品真实性检验方面的研究。E-mail: jlijun@jlu.edu.cn

© Editorial Office of World Geology. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

poral remote sensing data to extract and analyze the spatial distribution range and sea ice thickness information in Liaodong Bay of Bohai Sea during winter months based on the remote sensing inversion modeling of sea ice thickness. First, the sensitive wavebands that have a significant response to differences in sea ice thickness were screened based on the variance analysis method, and a sea ice thickness-sensitive band reflectance statistical correlation model was constructed based on the regression analysis method. The multi-temporal remote sensing data were used further to reflect the sea ice thickness in Bohai Sea and to analyze the spatial and temporal distribution characteristics of sea ice. Experimental results show that the red-light band data of Landsat satellites have high sensitivity in retrieving sea ice thickness, and the regression statistical model established on the red-light data has a linear fitting regression sum of squares as high as 0.975 1, which indicates that the model has high accuracy and reliability. The result of Landsat red-light band data used for retrieval on the sea ice thickness and spatiotemporal distribution of sea ice in Liaodong Bay of Bohai Sea indicates that the sea ice begins in late December every year at Panjin and Yingkou in Bohai Sea, and reaches the thickest and largest distribution area by January. As the temperature gradually rises, sea ice gradually recedes in early February, and completely disappears by early March. In addition, the proportion of thin ice is generally high in each winter month, while that of thick ice is relatively low. The sea ice in Bohai Sea freezes earlier and thicker in higher latitude areas or closer to the coast, and retreats later. On the contrary, the ice in the low latitude areas freezes later and retreats earlier.

**Keywords:** sea ice thickness; correlation model; spatio-temporal distribution; Liaodong Bay; Bohai Sea

## 0 引言

渤海是全球冬季结冰海域中纬度最低的地区之一,每年冬季都会有一定程度的结冰现象<sup>[1]</sup>,海冰的形成及其时空分布态势影响着渤海军事航运、近海油气勘探、生产和民生,迫切需要开展海冰监测及时空分布规律方面的研究。

早期的海冰监测主要通过建立观测站、雷达站和巡逻,并与海洋监测观测平台、船舶和潜艇合作开展<sup>[2]</sup>,但这种方法相对耗时耗力,而且不支持大规模监控。随着航天和航空技术的发展,遥感技术已成为海冰监测的重要技术。其中,海冰对可见光-近红外谱段电磁波的散射机理、海冰厚度与可见光-近红外波谱数据的数学关联形式等均为亟待解决的科学问题。

目前,利用光学遥感卫星开发了多种海冰识别和分类方法。Grenfell<sup>[3]</sup>基于海冰的光学理论,建立了海冰反照率与海冰厚度的关系模型,并建立了海冰遥感反演的理论研究基础;Riggs等<sup>[4]</sup>利用MODIS海冰反射和温度特征建立了海冰范围制图和海冰广义分类的算法,并测定了北极地区的海冰范围和广义海冰类型;Trishchenko等<sup>[5]</sup>利用MODIS数据分析了加拿大博福特海地区20年来的冰层特性;Cooleyca等<sup>[6]</sup>则研究了加拿大北部和格陵兰岛

西部冰层破裂的时间,并发现冰季的持续时间显著缩短;Jiang<sup>[7]</sup>建立了基于MODIS数据的海冰图生成模型,获取了高时空分辨率的海冰数据。然而MODIS数据的分辨率较低,且国外对海冰的研究主要集中在北极地区以及宏观的全球冰雪覆盖地区,但不适用于局部区域的精细化研究,对中国渤海地区研究较少。

郭玉娣等<sup>[8]</sup>利用MODIS数据,统计分析了渤海海冰面积的年际变化特征和不同冰情年在初冰期、盛冰期和消融期的变化特征。李涛等<sup>[9]</sup>利用风云4号A星(FY-4A)多通道扫描成像辐射计(AGRI)数据,结合海冰综合检测算法、云检测去除算法和冰密度估算算法,实现了海冰反演,并显著提高了反演精度;孙静琪等<sup>[10]</sup>基于AVHRR、MODIS、GOCI遥感数据解译,构建了1988—2018年非连续日尺度冰情序列数据集,分析了渤海海冰冰情年际和年内时空变化特征;罗亚威等<sup>[11]</sup>利用“海洋1号”卫星反演渤海海冰密集度与厚度等信息;Liu等<sup>[12]</sup>提出了利用GOCI数据估算渤海海冰厚度的方法,建立了海冰厚度与短波宽带反照率之间的关系模型;吴龙涛等<sup>[13]</sup>基于MODIS数据,提取了渤海海冰各参数的信息;Su等<sup>[14]</sup>利用MODIS数据基于反照率和海冰厚度之间的指数关系模型估算了渤海海冰厚度并监测其时空演变。

以往研究中, 学者们更注重反照率与海冰厚度的关联关系研究。然而, 云层的存在会导致传感器接收到的信号与海冰本身的信号混合, 使得海冰厚度的估计可能不够准确。为了克服这种影响, 笔者基于波段反射率指标进行海冰厚度反演建模的研究, 同时对于渤海海冰厚度的时空分布规律及影响因素等问题尚需开展深入研究。首先基于方差分析方法筛选对海冰厚度差异具有显著响应的敏感波段, 并基于回归分析方法构建海冰厚度-敏感波段反射率统计关联模型, 进而利用研究区多时相遥感数据进行渤海海域海冰厚度反演、海冰空间分布范围及其与气温的关联分析, 确定海冰时空分布特征。

## 1 海冰厚度遥感反演原理

海冰由六方晶系体构成, 主要成分是纯冰晶、水、固体盐和气泡<sup>[15]</sup>。海冰的生成与生长通常使得海冰面积增大、厚度增加, 同时其结构也由松散稀薄渐变为细粒密实, 即海冰厚度的变化与其物理结构组成及变化密切相关, 主要表现为冰型、色调、结构的变化, 从而对入射电磁波能量产生不同程度的吸收与散射, 即海冰厚度的变化直接影响遥感传感器接收到的光谱反射率等数据<sup>[7]</sup>。一般情况下, 越厚的海冰将导致越高的太阳光谱反射率和反照率, 薄冰相比厚冰能吸收更多的太阳能量用于融化自身, 从而表现为太阳光谱反射率、反照率的相对降低<sup>[16]</sup>。

光学遥感反演海冰厚度就是对海冰覆盖区域利用遥感技术进行光学遥感探测, 通过分析反射、散射、透射等光学特性参数, 推算出海冰的厚度信息。海冰的光学特性主要取决于海冰的折射率和厚度, 折射率又取决于海冰对入射电磁波的吸收与散射特性, 由此导致海冰对不同波长入射电磁辐射产生不同程度的吸收、散射<sup>[17]</sup>, 这种吸收与散射作用统称为消光, 其发生在海冰表层及其内部各个层位, 即垂直方向上某一层位接收到来自上一层位的消光之后的能量, 其中一部分能量被当前层位吸收、一部分能量以前向散射的形式继续向下传输、一部分能量以后向散射的形式向上传输, 如此, 诸多层位海冰对入射电磁辐射的整体吸收、散射最终使得一部分能量向上传输并为遥感传感器探测单元所收集<sup>[18]</sup>, 从而遥感数据中蕴含了海冰厚度信息。

综上, 海冰对入射电磁辐射(通常为来自太阳等自然辐射源的电磁波)的吸收、散射机理决定了遥感数据与海冰厚度存在某种程度的映射关联, 通过对物理机理模型的深入剖析可建立遥感数据与海冰厚度的物理关联模型, 亦可通过遥感数据与海冰厚度观测数据建立二者的统计关联模型。

## 2 研究区概况、数据源及数据处理

### 2.1 研究区概况

渤海为中国最北的近岸海域, 位于中国大陆的东北端, 地理坐标范围为  $37^{\circ}07' \sim 40^{\circ}56'N$  和  $117^{\circ}33' \sim 122^{\circ}08'E$ <sup>[19]</sup>。渤海海域地处北温带, 年均气温  $10.7^{\circ}C$ , 年均降水量  $500 \sim 600$  mm。渤海丰富的渔业、港口、石油、旅游、海盐等资源及其宜人的自然环境条件, 为渤海地区的经济发展注入了无限生机<sup>[20]</sup>(图1)。



图1 研究区位置图

Fig. 1 Location of study area

### 2.2 遥感数据源

通常情况下, 渤海北部沿岸地区12月初开始出现海冰, 至翌年的3月中旬左右海冰完全消退。综合考虑现有数据积累及影像云量等因素, 同时为获取时间尺度上的海冰分布规律, 重点选择3个时相段(1998年底~1999年初、2015年底~2016年初、2020年底~2021年初, 月份主要为12月、1月、2月)的Landsat5、Landsat8遥感数据<sup>[21]</sup>(条带号为120、行编号为32)作为数据源(表1), 其多光谱数据空间分辨率为30 m, 对海冰空间分布特征识别效果良好, 同时可基于其光学波段数据

进行海冰厚度反演。

表 1 多时相遥感数据源

Table 1 Multi-temporal remote sensing data source

时相段	日期	遥感数据 (卫星)
1998 年底至 1999 年初	1998 年 12 月 24 日	Landsat5
	1999 年 01 月 09 日	Landsat5
	1999 年 02 月 26 日	Landsat5
2015 年底至 2016 年初	2015 年 12 月 07 日	Landsat8
	2016 年 01 月 08 日	Landsat8
	2016 年 01 月 24 日	Landsat8
	2016 年 02 月 09 日	Landsat8
	2016 年 02 月 25 日	Landsat8
	2016 年 03 月 12 日	Landsat8
2020 年底至 2021 年初	2020 年 12 月 20 日	Landsat8
	2021 年 01 月 05 日	Landsat8
	2021 年 02 月 22 日	Landsat8

2.3 数据预处理

大气散射、大气吸收、信号传输畸变等多种因素易导致遥感数据不能真正代表地表目标地物的真实状态,需进行必要的预处理工作,主要包括辐射定标、大气校正以及必要的影像镶嵌、裁剪等预处理操作。

辐射定标是将数字化值(DN值)转化为辐射亮度值的过程<sup>[22]</sup>。辐射定标的目的是尽可能地减少传感器测量值与实际地物光谱反射率或辐射亮度之间的差异,这些差异由传感器自身条件、太阳高度角、卫星扫描角和其他不可避免的噪声等因素引起,以尽可能接近理想图像。

大气校正是高光谱遥感数据中地表参数定量分析的必要步骤,其主要目的是消除大气和光照因素对地表物体反射的影响,获得地表物体的真实物理模型参数<sup>[23]</sup>,包括反射率、发射率、表面温度等。在大气校正过程中,需要消除大气中的氧气、二氧化碳、水蒸气和臭氧对地物反射的影响,减少大气分子和气溶胶散射的影响<sup>[24]</sup>。本文采用 FLAASH 模型<sup>[24]</sup>进行图像大气校正。

在辐射定标、大气校正的基础上,基于阈值分割并结合目视解译方法进行海陆分界线提取,以其对遥感影像进行掩膜,保留海水区域作为海冰厚度反演、时空分布规律分析的最终影像。

3 海冰厚度遥感反演模型构建

已有学者<sup>[25]</sup>在海冰散射、吸收机理分析基础上开展了海冰厚度反演的物理关联模型研究,笔者在海冰散射、吸收物理机理分析的基础上,考虑到遥感数据中单波段反射率与海冰厚度的关联性,采用波段敏感分析、回归分析方法进行海冰厚度反演指标筛选及模型构建。

3.1 反照率-海冰厚度物理关联模型分析

海冰厚度与反照率有一定的关系,Grenfell<sup>[25]</sup>依据海冰光学理论提出海冰反照率与海冰厚度的理论模型,海冰反照率与海冰厚度之间的关系式为<sup>[26]</sup>:

$$\alpha = \alpha_{\max} [1 - k \exp(-\mu_{\alpha} h)]$$

(1)

式中: $\alpha_{\max}$ 为无限厚海冰所对应的反照率(无量纲),经验值取 0.7; $k$ 为相关系数, $k=1-\alpha_{\text{sea}}/\alpha_{\max}$ ;  $\alpha_{\text{sea}}$ 为海水反照率,经验值取 0.06; $\mu_{\alpha}$ 为反照率的衰减系数,经验值取 1.209; $\alpha$ 为海冰对太阳短波辐射波段的反照率(本文为 Landsat 反照率)。当  $\alpha_{\max}$ 、 $k$ 、 $\mu_{\alpha}$ 、 $\alpha$  各参数已知时,即可基于此公式反演海冰厚度  $h$  (m)。

太阳短波辐射波段的反照率  $\alpha$  可由反射率求得,Liang 等<sup>[27]</sup>通过大量实验得到 Landsat 卫星数据反射率与反照率转化模型:

$$\alpha = 0.356\alpha_1 + 0.130\alpha_3 + 0.373\alpha_4 + 0.085\alpha_5 + 0.072\alpha_7 - 0.0018$$

(2)

式中: $\alpha_1$ 为蓝波段反射率; $\alpha_3$ 为红波段反射率; $\alpha_4$ 为近红外波段反射率; $\alpha_5$ 为短波红外 1 波段反射率; $\alpha_7$ 为短波红外 2 波段反射率。

3.2 波段反射率-海冰厚度统计关联模型

海冰散射、吸收物理机理表明,海冰厚度与波段反射率存在密切物理关联,海冰厚度敏感波段筛选、敏感波段与海冰厚度的数学关联形式是海冰厚度遥感反演建模的关键。

研究中首先通过目视解译方法对海冰厚度进行量化分级(厚度级别 0 代表未结冰海水,厚度级别 1~5 代表海冰厚度渐增),并在遥感影像中分别选择一定数量的各厚度级别像元样本,通过统计分析及可视化制图,进行各波段海冰厚度敏感性分



析、各波段反射率-海冰厚度关联形式分析。

波段敏感性指波段光谱反射率对海冰厚度差异的响应敏感程度, 其可基于不同厚度级别海冰之间的光谱反射率差异进行度量, 不同厚度级别海冰像元样本光谱曲线图见图 2。海岸波段、蓝光波段、绿光波段、红光波段、摄影红外波段的光谱反射率随海冰厚度变化表现为较为显著的差异, 即随海冰冰厚度的增加, 上述波段反射率均呈单调递增趋势, 而短波红外波段则并未表现出上述特征。

为进一步对比各波段的光谱差异规律, 将各厚度级别海冰的光谱反射率减去未结冰海水的光谱反射率, 以此作为光谱差异曲线图, 用以突出各波段反射率随海冰冰厚度的光谱递增特征 (图 3)。上述波段中, 红光波段的光谱差异曲线表现为更大的斜率, 表明其具有更优的海冰厚度敏感性。

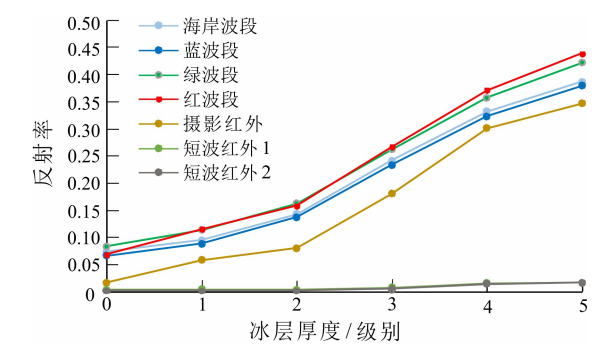


图 2 不同厚度级别海冰像元样本光谱曲线图  
Fig. 2 Spectral curves of sea ice pixel samples of different thickness levels

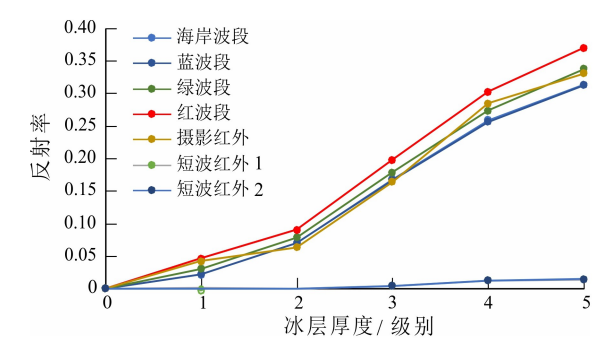


图 3 不同厚度级别海冰像元样本光谱差异曲线图  
Fig. 3 Spectral differences curves of sea ice pixel samples of different thickness levels

但这仅仅是定性研究, 还需要定量研究的支撑, 因此采用方差分析方法进行了各波段的敏感性

分析, 计算各波段厚度级别的可分性度量。方差分析方法将各厚度级别的海冰像元样本视为不同分组, 将组间离差与组内离差之比作为波段敏感性的定量度量。可分性度量计算公式为: 可分性度量 = 组间离差/组内离差。

由于相邻的海冰厚度等级较难区分, 因此主要计算相邻海冰冰厚的可分性度量。且短波红外对厚度变化非常不敏感, 因此对海岸波段、蓝波段、绿波段、红波段和摄影红外波段进行分析 (表 2)。

表 2 各波段相邻海冰厚度等级可分性度量表  
Table 2 Separability of adjacent sea ice thickness levels in each band

波段 厚度等级	海岸波段	蓝波段	绿波段	红波段	摄影红外
0 ~ 5	15.70	16.94	18.13	<b>20.13</b>	10.83
0 ~ 1	1.13	1.18	1.43	<b>1.74</b>	1.58
1 ~ 2	1.47	1.54	<b>1.62</b>	1.39	1.09
2 ~ 3	2.36	2.41	2.57	<b>2.66</b>	2.34
3 ~ 4	1.69	1.72	1.80	<b>1.88</b>	1.84
4 ~ 5	1.23	1.26	1.31	<b>1.31</b>	1.09

注: 加粗部分为同一厚度等级组合中的最大值。

结果表明, 红光波段在厚度等级 0 与 5 之间具有最大的可分性度量, 且红光波段在相邻厚度等级可分性度量中也基本是最大的。与上述可视化分析结果吻合, 其可作为海冰厚度反演的敏感波段 (图 4)。

在波段敏感性分析的基础上, 基于像元样本统计分析数据进行红光波段反射率与海冰冰厚的关联形式分析。其中, 将海冰厚度级别代码数字作为海冰厚度数值, 并采用回归分析方法以海冰厚度为自变量、红光波段反射率为因变量进行关联分析。

结果表明, 红光波段反射率与海冰冰厚具有显著的线性关系 (图 4), 回归平方和为 0.975 1。二者线性拟合关系式为:

$$y = 0.0779h + 0.0415$$

(3)

式中:  $y$  为红光波段反射率 (无量纲);  $h$  为冰层厚度 (等级)。红光波段反射率可由预处理后的遥感影像数据获取, 由此可实现海冰厚度反演。

红光波段与海冰冰厚的相关性最高, 主要原因

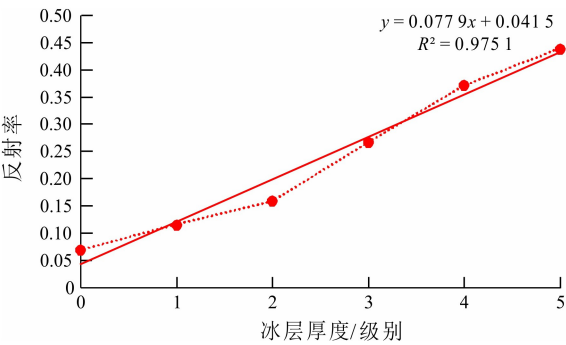
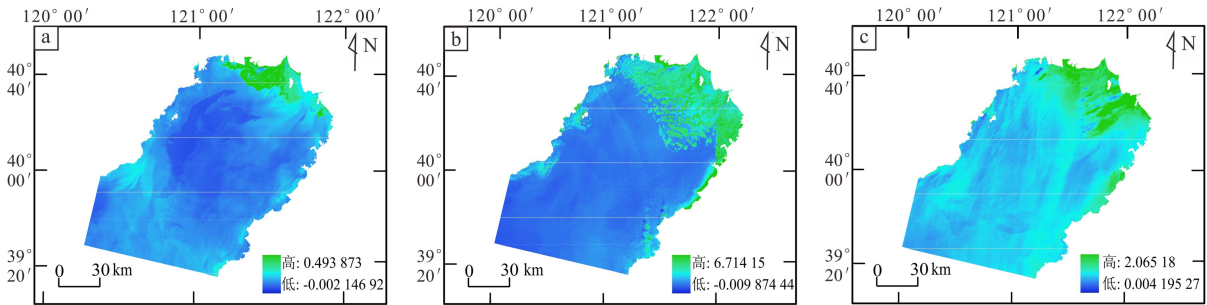


图4 红光波段反射率-海冰厚度线性关联图  
Fig.4 Linear correlation plot of red band reflectivity and sea ice thickness

在于海水呈蓝色，这使得海冰在红光波段的传感器下更为显著。同时，随着悬浮泥沙浓度的增加，光的波长会发生“红移”现象<sup>[28]</sup>，即向长波段移动。这种波长峰值的移动增强了海冰厚度与红光波段反射率之间的相关性。

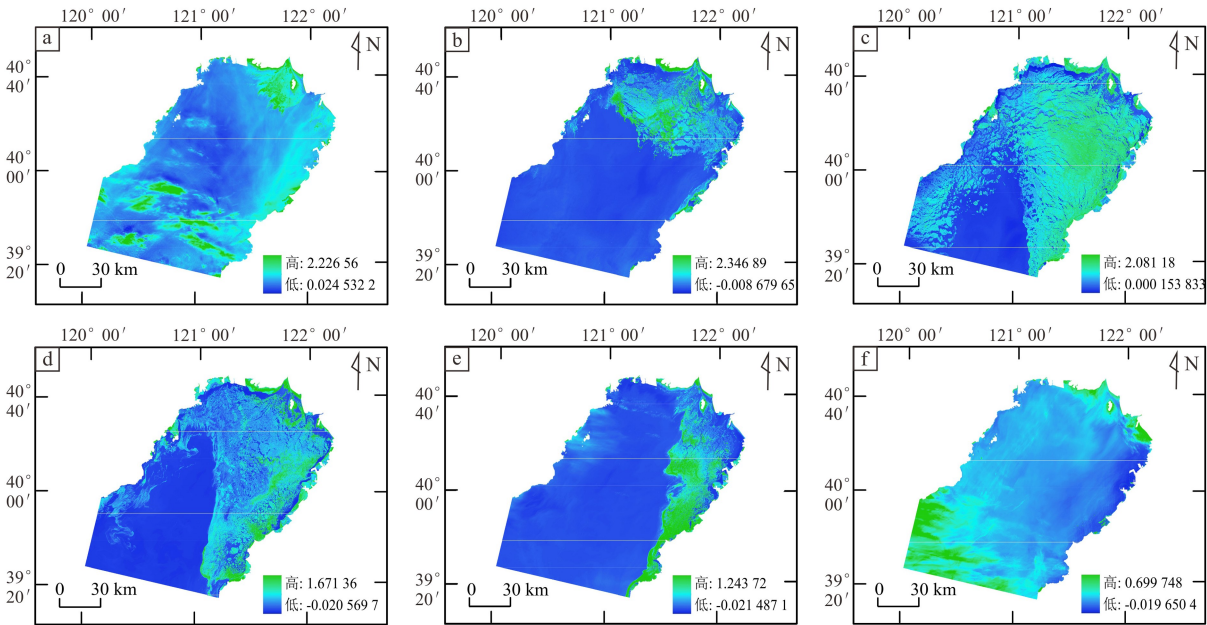
4 海冰时空分布特征分析

利用前述反照率-海冰厚度物理关联模型、波段反射率-海冰厚度统计关联模型分别进行研究区海冰厚度反演，并对两个模型反演所得的海冰厚度等级图进行对比分析（图5~10）。



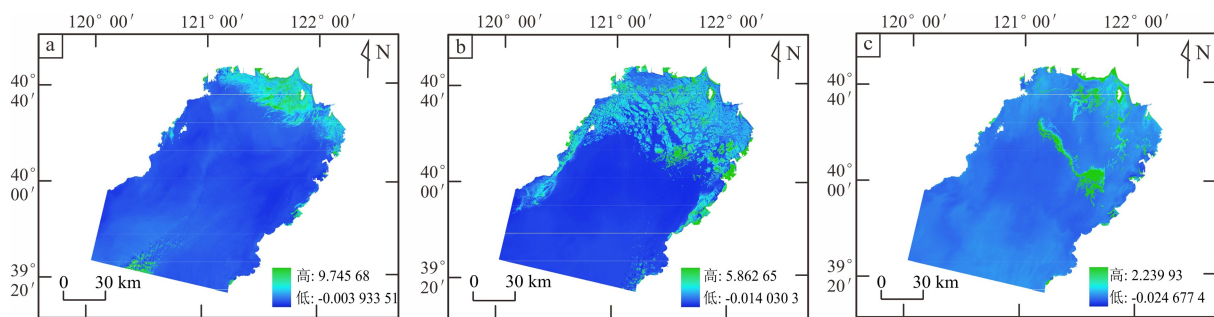
a. 1998 年 12 月 24 日；b. 1999 年 01 月 09 日；c. 1999 年 02 月 26 日。

图5 1998 年底至 1999 年初海冰厚度等级图（反照率-海冰厚度物理关联模型）  
Fig.5 Sea ice thickness grade maps from the end of 1998 to early 1999 (albedo-sea ice thickness physical correlation model)



a. 2015 年 12 月 07 日；b. 2016 年 01 月 08 日；c. 2016 年 01 月 24 日；d. 2016 年 02 月 09 日；e. 2016 年 02 月 25 日；f. 2016 年 03 月 12 日。

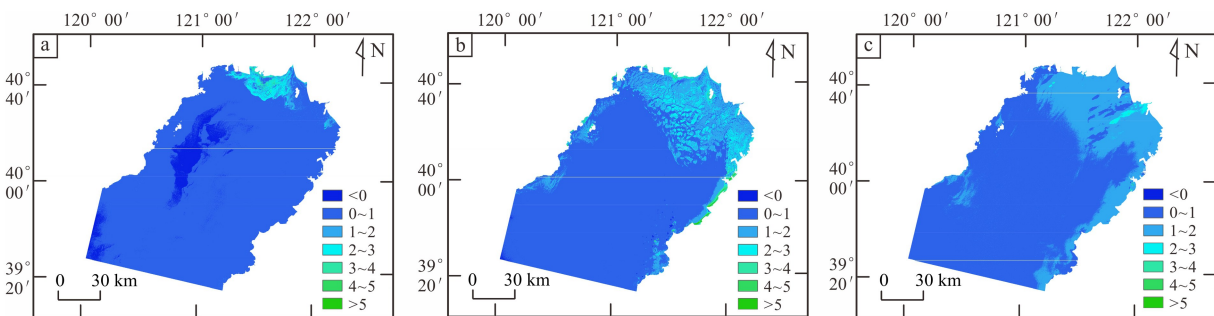
图6 2015 年底至 2016 年初海冰厚度等级图（反照率-海冰厚度物理关联模型）  
Fig.6 Sea ice thickness grade maps from the end of 2015 to early 2016 (albedo-sea ice thickness physical correlation model)



a. 2020 年 12 月 20 日; b. 2021 年 01 月 05 日; c. 2021 年 02 月 22 日。

图 7 2020 年底至 2021 年初海冰厚度等级图 (反照率-海冰厚度物理关联模型)

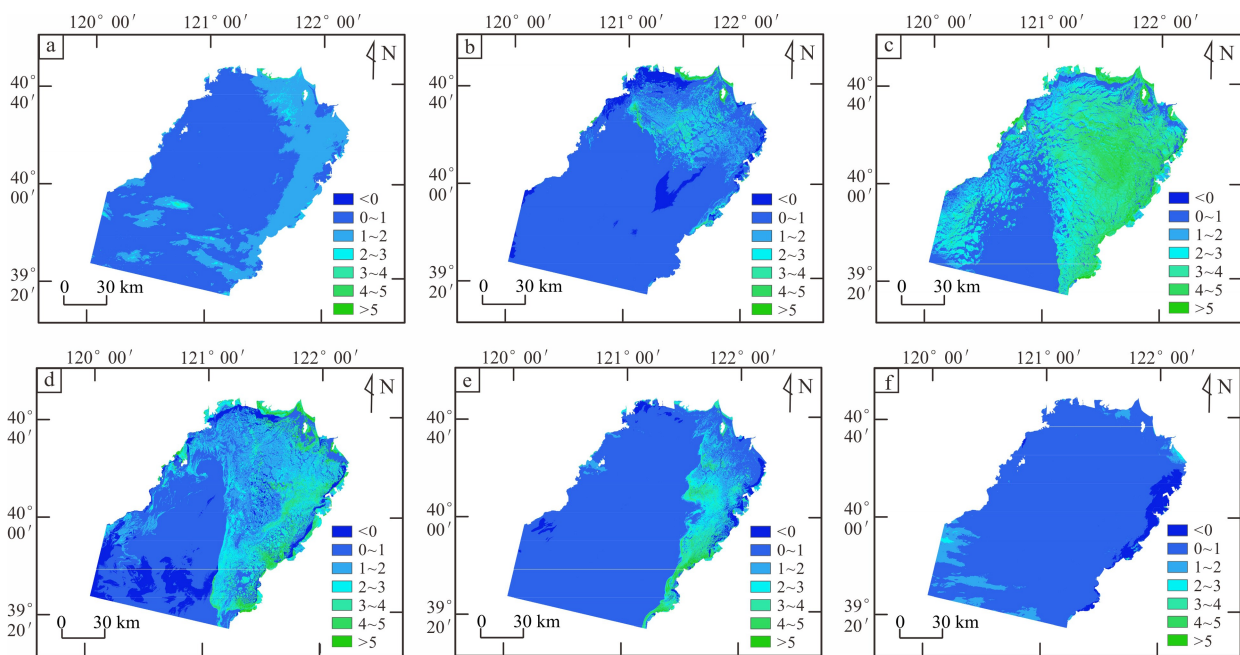
Fig. 7 Sea ice thickness grade maps from the end of 2020 to early 2021 (albedo-sea ice thickness physical correlation model)



a. 1998 年 12 月 24 日; b. 1999 年 01 月 09 日; c. 1999 年 02 月 26 日。

图 8 1998 年底至 1999 年初海冰厚度等级图 (波段反射率-海冰厚度统计关联模型)

Fig. 8 Sea ice thickness grade maps from the end of 1998 to early 1999 (band reflectance-sea ice thickness statistical correlation model)



a. 2015 年 12 月 07 日; b. 2016 年 01 月 08 日; c. 2016 年 01 月 24 日; d. 2016 年 02 月 09 日; e. 2016 年 02 月 25 日; f. 2016 年 03 月 12 日。

图 9 2015 年底至 2016 年初海冰厚度等级图 (波段反射率-海冰厚度统计关联模型)

Fig. 9 Sea ice thickness grade maps from the end of 2015 to early 2016 (band reflectance-sea ice thickness statistical correlation model)

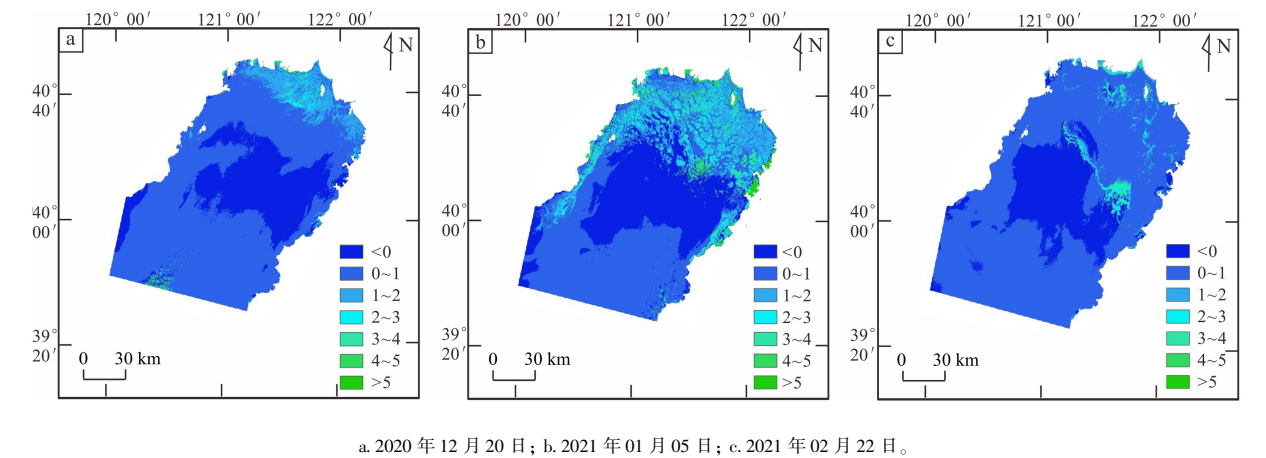


图 10 2020 年底至 2021 年初海冰厚度等级图（波段反射率-海冰厚度统计关联模型）

Fig. 10 Sea ice thickness grade maps from the end of 2020 to early 2021 (band reflectance-sea ice thickness statistical correlation model)

分析结果表明，两个模型所得的海冰厚度等级图结果相近，均与目视分析结果和实际资料吻合。相比而言，反照率-海冰厚度物理关联模型的反演结果易受到影像中云的干扰（图 5 ~ 7），尤其在 1999 年初（1999. 02. 26）时相的反演结果中表现更甚，而波段反射率-海冰厚度统计关联模型的反演结果相对所受云的干扰较小（图 8 ~ 10），反演效果良好。此结果应与红光波段受云层的散射、吸收影响特性相关。

由海冰厚度反演结果可知，各时相段 12 月下

旬仅盘锦、营口区域有海冰出现，至翌年 1 月上旬其他区域开始结冰，1 月下旬各区域海冰厚度达最大级别；2 月上旬各区域海冰开始逐渐消退，至 2 月下旬，盘锦、营口、大连区域尚有海冰未退，直至 3 月上旬，各区域海冰全部消退。

同时，各厚度级别的海冰分布面积在时间上亦呈现一定规律，即由 12 月下旬至翌年 1 月下旬，各厚度级别的海冰面积均呈逐渐递增趋势，之后由 1 月下旬至 3 月上旬，各厚度级别的海冰面积均呈递减趋势（表 3、图 11）。其中，1 月下旬厚度级

表 3 各厚度级别海冰分布面积与气温对应关系表

厚度级别时相	1 ~ 2	2 ~ 3	3 ~ 4	4 ~ 5	> 5	最低气温/℃
1998 年 12 月 24 日	333. 48	290. 28	54. 19	5. 22	0. 43	- 8. 00
1999 年 01 月 09 日	2 600. 75	904. 50	105. 64	34. 62	27. 01	- 13. 00
1999 年 02 月 26 日	—	100. 89	4. 46	0. 49	0. 25	- 1. 00
2015 年 12 月 07 日	—	219. 29	30. 02	10. 43	3. 49	- 7. 00
2016 年 01 月 08 日	1 568. 59	591. 68	260. 65	109. 70	95. 13	- 13. 00
2016 年 01 月 24 日	1 830. 83	2 980. 50	3 643. 81	2 662. 44	494. 76	- 23. 00
2016 年 02 月 09 日	3 491. 97	2 267. 91	1 001. 24	483. 26	386. 59	- 8. 00
2016 年 02 月 25 日	1 008. 41	907. 94	628. 79	279. 30	97. 82	- 8. 00
2016 年 03 月 12 日	0. 00	0. 00	0. 00	0. 00	0. 00	- 2. 00
2020 年 12 月 20 日	1 180. 16	219. 00	52. 32	26. 69	45. 37	- 11. 00
2021 年 01 月 05 日	2 132. 00	1 222. 97	565. 07	209. 76	218. 47	- 18. 00
2021 年 02 月 22 日	365. 19	276. 15	149. 59	31. 19	8. 63	- 11. 00

注：单位为 km<sup>2</sup>；—表示 1999 年 2 月 26 日与 2015 年 12 月 7 日受云层影响较大，主要影响厚度级别 1 ~ 2 区域，故未予计算，亦未参与海冰厚度-气温关联分析。



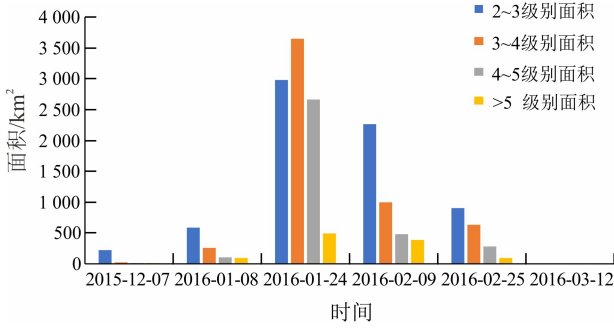


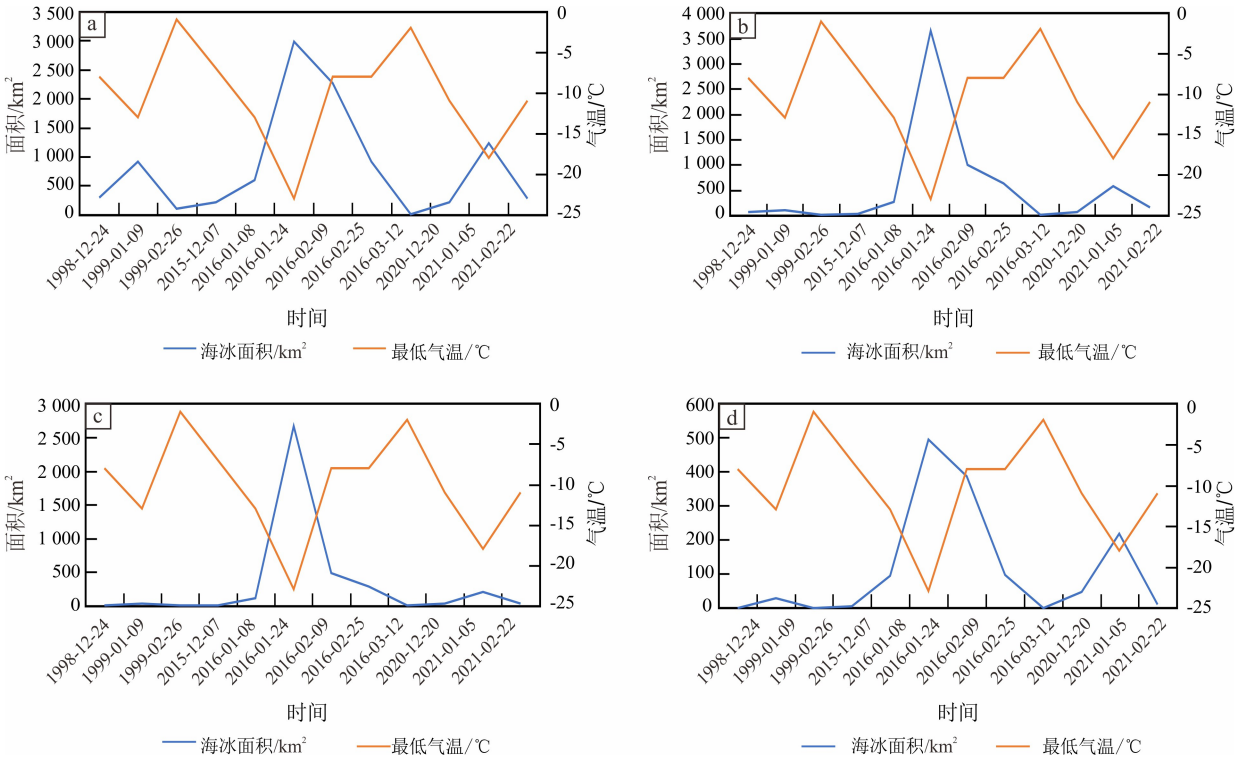
图 11 2015 年底至 2016 年初不同厚度级别海冰面积的时间变化图

Fig. 11 Sea ice acreage variation at different thickness levels from the end of 2015 to early 2016

别 3~4 的海冰在所有厚度级别中面积占比最大, 其余时间厚度级别 2~3 的海冰分布面积占比最大; 整个冬季, 厚度级别 >5 的海冰面积均占比最小。海冰的形成与空间分布范围与气温高低密切相

关, 笔者以盘锦区域的最低气温为代表进行海冰分布面积与气温关联分析。海冰分布面积与气温关联图解如图 12 所示, 各厚度级别的海冰面积均与气温呈较显著的反相关关系, 即气温相对较高时无海冰或各厚度级别海冰面积较小, 气温相对较低时各厚度级别海冰面积较大。

同时, 不同厚度级别条件下, 海冰面积与气温的反相关规律又存在一定差异, 总体规律为: 厚度级别较小的海冰 (薄冰) 面积对气温的响应更加敏感, 而厚度级别较大的海冰 (厚冰) 对气温的响应较为迟缓。具体表现为: 厚度级别较小的海冰 (海冰厚度级别 2~3) 在最低气温为  $-5 \sim -10^{\circ}\text{C}$  时即表现为随温度变化海冰面积的显著变化; 而厚度级别较大的海冰 (海冰厚度级别 3~4、4~5、>5) 在最低气温为  $-5 \sim -10^{\circ}\text{C}$  时未表现出面积的显著变化, 只有当最低气温降至  $-15^{\circ}\text{C} \pm$  时, 海冰面积才表现出显著的变化趋势。此种规律与水体比热及结冰物理过程密切相关。



a. 海冰厚度级别 2~3; b. 海冰厚度级别 3~4; c. 海冰厚度级别 4~5; d. 海冰厚度级别 >5。

图 12 海冰面积-气温关联图解

Fig. 12 Correlation diagram of sea ice acreage with temperature

## 5 结论

(1) 海冰厚度遥感反演建模的关键在于敏感波段筛选和敏感波段与海冰厚度的数学关联。研究表明, 红光波段为海冰厚度反演的敏感波段, 其反射率与海冰厚度之间存在显著的线性相关关系, 构建的反演模型具有良好精度。

(2) 渤海辽东湾海域海冰的时空分布规律为: 海冰在 12 月下旬开始结冰, 1 月下旬达到最大厚度和分布面积, 2 月上旬逐渐消退, 至 3 月上旬基本消失。空间分布上, 高纬度和近岸区域结冰较早且较厚, 退冰相对较晚。海冰面积与气温显著负相关, 薄冰面积对气温变化更加敏感。

## 参考文献:

- [1] WANG A, ZHAO Q, SUI J, et al. The trend of sea ice design thickness for the Bohai Sea and northern Huanghai Sea [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2024, 45 (4): 659–664.
- [2] 邢治瑞, 粮时楠, 赵博, 等. 极地冰雪探测冰雷达技术发展回顾与展望 [J]. *极地研究*, 2023, 35 (4): 591–606.  
XING Z R, LIANG S N, ZHAO B, et al. Review and prospect of ice radar technology for polar ice and snow detection [J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2023, 35 (4): 591–606.
- [3] GRENFELL T C. A theoretical model of the optical properties of sea ice in the visible and near infrared [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1983, 88 (14): 9723–9735.
- [4] RIGGS G A, HALL D K, ACKERMAN S A. Sea ice extent and classification mapping with the moderate resolution imaging spectroradiometer airborne simulator [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1999, 68 (2): 152–163.
- [5] TRISHCHENKO A P, KOSTYLEV V E, LUO Y, et al. Landfast ice properties over the Beaufort Sea region in 2000–2019 from MODIS and Canadian Ice Service data [J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 2022, 59 (11): 847–865.
- [6] COOLEYCA S W, RYAN J C, SMITH L C, et al. Coldest Canadian arctic communities face greatest reductions in shorefast sea ice [J]. *Nature Climate Change*, 2020, 10 (6): 533–538.
- [7] JIANG L Y. Automatic high-accuracy sea ice mapping in the Arctic using MODIS data [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13 (4): 550.
- [8] 郭玉娣, 王铁, 程善俊, 等. 渤海海冰时空分布特征和大气环流对渤海海冰的强迫作用 [J]. *自然资源遥感*, 2024, 36 (1): 242–249.  
GUO Y D, WANG T, CHENG S J, et al. Sea ice in Bohai Sea: spatio-temporal distribution and the forcing effects of atmospheric circulation [J]. *Remote Sensing for Natural Resources*, 2024, 36 (1): 242–249.
- [9] 李涛, 王凌云, 王磊, 等. 一种基于 FY-4A 遥感数据的渤海海冰反演算法 [J]. *电子设计工程*, 2022, 30 (1): 1–6.  
LI T, WANG L Y, WANG L, et al. An inversion algorithm of Bohai Sea ice based on FY-4A remote sensing data [J]. *Electronic Design Engineering*, 2022, 30 (1): 1–6.
- [10] 孙静琪, 陈笑娟, 李倩, 等. 基于遥感技术的 1988—2018 年渤海海冰冰情时空变化特征 [J]. *灾害学*, 2022, 37 (1): 178–184, 191.  
SUN J Q, CHEN X J, LI Q, et al. Temporal and spatial variation characteristics of sea ice conditions in the Bohai Sea from 1988 to 2018 based on remote sensing technology [J]. *Journal of Catastrophology*, 2022, 37 (1): 178–184, 191.
- [11] 罗亚威, 张蕴菲, 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): 7–17.  
LUO Y W, ZHANG Y F, SUN C R, et al. Application of the “HY-1” satellite to sea ice monitoring and forecasting [J]. *Haiyang Xuebao*, 2005, 27 (1): 7–17.
- [12] LIU W S, SHENG H, ZHANG X. Sea ice thickness estimation in the Bohai Sea using geostationary ocean color imager data [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2016, 35 (7): 105–112.
- [13] 吴龙涛, 吴辉璇, 孙兰涛, 等. MODIS 渤海海冰遥感资料反演 [J]. *中国海洋大学学报 (自然科学版)*, 2006, 36 (2): 173–179.  
WU L T, WU H D, SUN L T, et al. Retrieval of sea ice in the Bohai Sea from MODIS data [J]. *Periodical of Ocean University of China (Natural Science Edition)*, 2006, 36 (2): 173–179.
- [14] SU H, WANG Y P. Using MODIS data to estimate sea ice thickness in the Bohai Sea (China) in the 2009–2010 winter [J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2012, 117 (10): 995–1000.
- [15] 谢锋, 顾卫, 袁艺, 等. 辽东湾海冰资源量的遥感

- 估算方法研究 [J]. 资源科学, 2003, 25 (3): 17–23.
- XIE F, GU W, YUAN Y, et al. Estimation of sea ice resources in Liaodong gulf using remote sensing [J]. Resources Science, 2003, 25 (3): 17–23.
- [16] 刘少伟. 分层多孔海冰覆盖下水声传播特性研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2022.
- LIU S W. Research on the characteristics of acoustic propagation under multi layered porous sea ice cover [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2022.
- [17] 周顺博. 基于 Kirchhoff 近似方法的浮冰体冰水混合界面声散射模型 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2022.
- ZHOU S B. Study on acoustic scattering model of ice-water mixing interface based on Kirchhoff [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2022.
- [18] 石焱. 考虑海水与浮冰作用的跨海大桥地震响应研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2022.
- SHI Y. Studying the influence of seawater and floating ice on seismic response analysis of cross-sea bridge [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2022.
- [19] 陈晓辉, 李日辉, 温珍河, 等. 渤海海域地质环境稳定性定量评价 [J]. 海洋地质前沿, 2024, 40 (3): 14–21.
- CHEN X H, LI R H, WEN Z H, et al. Quantitative evaluation of the geological environment stability in the Bohai Sea [J]. Marine Geology Frontiers, 2024, 40 (3): 14–21.
- [20] 潘书策. 渤海污染的预测及防治 [D]. 大连: 大连海事大学, 2010.
- PAN S C. Prediction and control of pollution in the Bohai Sea [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2010.
- [21] XU Z X, SHEN X, GE S, et al. An advanced TSMK–FVC approach combined with Landsat 5/8 imagery for assessing the long-term effects of terrain and climate on vegetation growth [J]. Frontiers in Plant Science, 2024, 15: 1363690.
- [22] 尤孟. 西藏唐家地区综合信息 GIS 矿产模型找矿研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2018.
- YOU M. Research on comprehensive information prospecting of GIS technology in Tangjia minerals model [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018.
- [23] 孔卓, 杨海涛, 郑逢杰, 等. 高光谱遥感图像大气校正研究进展 [J]. 自然资源遥感, 2022, 34 (4): 1–10.
- KONG Z, YANG H T, ZHENG F J, et al. Research advances in atmospheric correction of hyperspectral remote sensing images [J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2022, 34 (4): 1–10.
- [24] 赵彦军. 乌鲁木齐河源区冰川粒雪线遥感提取方法比对研究 [D]. 兰州: 西北师范大学, 2021.
- ZHAO Y J. Firm line of glacier in headwaters of Urumqi River comparison of remote sensing extraction methods [D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2021.
- [25] GRENFELL T C. A radiative transfer model for sea ice with vertical structure variations [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1991, 96 (9): 16991–17001.
- [26] 孙静琪, 陈笑娟, 李倩, 等. 基于遥感技术的 1988—2018 年渤海海冰冰情时空变化特征 [J]. 灾害学, 2022, 37 (1): 178–184, 191.
- SUN J Q, CHEN X J, LI Q, et al. Temporal and spatial variation characteristics of sea ice conditions in the Bohai Sea from 1988 to 2018 based on remote sensing technology [J]. Journal of Catastrophology, 2022, 37 (1): 178–184, 191.
- [27] LIANG S L. Narrowband to broadband conversions of land surface Albedo algorithms [J]. Remote Sensing of Environment, 2000, 76 (2): 213–238.
- [28] KWON S, NOH H, SEO I W, et al. Effects of spectral variability due to sediment and bottom characteristics on remote sensing for suspended sediment in shallow rivers [J]. The Science of the Total Environment, 2023, 878: 163125.