

船运铁矿粉污染海冰反射光谱特征研究

刘丙新¹, 郭刚¹, 吴东来¹, 刘成玉^{2*}, 谢锋²

1. 大连海事大学航海学院, 辽宁 大连 116026

2. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083

摘要 国际防止船舶造成污染公约(MARPOL)中关于防止船舶垃圾污染的附则 V 规定, 对含有海洋环境有害的物质(HME)的干燥残留物必须在适当的港口接收设施中排放, 但因费用等因素影响, 很多船只将废弃物直接抛弃于海洋中。散落于海冰表面的船运铁矿粉会污染海冰品质, 并加速海冰融化, 对海洋环境造成一定的污染。对铁矿粉污染海冰的光谱反射率特征的研究, 能够为利用光学遥感影像进行海冰品质监测提供数据基础。通过现场测量覆盖不同面积比例铁矿粉颗粒的海冰和清洁海冰之间光谱特征差异, 为港口附近铁矿粉污染的范围以及沉降量的估算提供参考和依据。该研究是在渤海海域天然海冰条件下进行的, 获取并分析了不同污染程度的海冰光谱特征, 探讨这些光谱特征与铁矿粉颗粒几何截面积比例的相关性。为了反演海冰表面铁矿粉面积比例, 利用光谱矢量角余弦值和光谱吸收指数阈值法进行了海冰、铁矿粉端元提取, 根据混合像元线性解混模型理论, 建立基于特征光谱波段反射率值的海冰表面铁矿粉面积比例反演模型。所研究海冰表面铁矿粉面积比例分为 0 (洁净海冰), 25.8%, 37.2%, 46.1%, 52.1%, 65.1%, 72.5%, 82.3%, 92.3%, 93.1% 和 100% (纯铁矿粉) 等, 数据采集波长范围 350~2 500 nm。结果表明, 利用 1 460 nm 波段处的吸收指数(SAI)进行海冰和铁矿粉端元提取效果最佳, 反射率与铁矿粉面积在 918~1 400, 1 500~1 780 和 2 250~2 300 nm 波段, 相关系数都大于 0.90, 86% 以上波段范围的反射率与铁矿粉面积的相关系数在 0.90 以上, 91.75% 以上的波段范围相关系数在 0.80 以上。选取 1 610~1 630 nm 波段的平均反射率估算铁矿粉面积比例, 几何截面积较小的误差一般大于几何截面积较大的, 在克服海冰背景反射率的影响下, 比较精确地估算了海冰-铁矿粉像元中铁矿粉颗粒的几何截面积比例, 平均反演精度达到 94.23%。

关键词 海冰; 铁矿粉; 光谱

中图分类号: TP722.4 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2021)02-0489-05

引言

环渤海地区是我国最具经济发展活力的地区之一, 有秦皇岛港、黄骅港、京唐港、曹妃甸港和天津港等大型港口, 每年都有大量铁矿运输船舶进出^[1]。根据 MARPOL 关于防止船舶垃圾污染的附件 V, 国际海事组织引入了新的分类标准, 以便能够识别对海洋环境有害的物质(HME)^[2], 对于含有来自 HME 残留物的干燥残留物和/或洗涤水必须在适当的港口接收设施中排放。一些研究数据表明铁矿在港口船舶转运过程中, 产生的铁矿粉、铁渣等会对海洋环境带了影响^[3-5]。

目前, 对海冰表面船运铁矿粉的污染监测研究较少。澳大利亚国家研究机构联邦科学与工业研究组织利用光学方法评估港口附近粉尘的成分及比例以及他们的大小分布, 但对于铁尘沉降的范围和数量没有相关的研究^[6]。利用遥感技术对海冰表面的铁矿粉污染情况进行监测, 能够获取其面积、范围等信息, 是最具潜力的方法。应用光学遥感进行海冰信息提取^[7-8]、海洋溢油监测^[9]、海冰中塑料污染^[10]以及土壤中物质反演都有较多研究^[11], 但海面(海冰、海水)的矿物粉污染研究仍然较少。

本文旨在提取铁矿粉与海冰的光谱反射特征, 找出有效识别海冰表面铁矿粉污染的波段范围, 并探讨光谱特征与铁矿粉颗粒几何截面积比例的相关性, 建立海冰表面铁矿粉面

收稿日期: 2019-12-31, 修订日期: 2020-04-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(51509030), 辽宁省自然科学基金项目(20180550362)及大连市科技创新基金项目(2017RQ065)资助

作者简介: 刘丙新, 1984 年生, 大连海事大学航海学院副教授 e-mail: gisbingxin@dlmu.edu.cn

* 通讯作者 e-mail: liuchengyu@mail.sitp.ac.cn

积比例反演模型,为海冰受铁矿粉污染的范围以及沉降量的估算提供参考和依据。

1 实验部分

1.1 实验环境

选取位于中国渤海湾海域进行实地测量,研究区内的海冰是由一年生海冰组成,平均厚度为 28 cm。为了减少反射阳光对实验结果的干扰,实验者穿着深色衣服。该实验是在晴天,无云的天气条件下进行的,以确保充足和稳定的照明,现场温度为 $-11\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

1.2 材料

实验所使用的铁矿粉为来自鞍钢鲅鱼圈分公司生产使用的铁矿石(Fe_2O_3),经过粉碎后,用细筛筛选,所使用的筛子为 100 目。将铁矿粉放到漏网里洒到海冰表面,尽量接近实际冰区的铁矿粉洒落过程,共有 109 个样区,每个样区洒落的铁矿粉面积比例见表 1。

表 1 样本面积分布情况

Table 1 Area fraction distribution of the observed samples

样本编号	面积比例	样本编号	面积比例
海冰	0	6	0.725
1	0.258	7	0.823
2	0.372	8	0.923
3	0.461	9	0.931
4	0.521	铁矿粉	1
5	0.651		

1.3 仪器及光谱采集

光谱测量设备为 ASD FieldSpec[®]3 地物光谱仪,光谱范围为 350~2 500 nm,重采样后光谱分辨率 1 nm。测量时 FieldSpec 3 光谱仪的视场角为 25° ,观测天顶角为 0° 。探头距离冰面约为 45 cm,那么,探头实际覆盖的冰面范围是一个半径约为 10 cm 的圆。圆内由裸冰和铁矿粉覆盖,对于不同样本来说,洒在冰面的铁矿粉面积比例不同。光谱测量时,先测量参考白板的辐射,然后顺次测量 11 个样本的光谱,每个样本大约需要 40 s 左右,最后测量参考白板的辐射。重复测量三次,整个实验进行了约 28 min,在此过程,太阳高度角变化小于 2° 。为了避免铁矿粉对海洋环境的污染,整个实验结束之后,将铁矿粉收集并带回实验室。

1.4 数据处理

在野外反射率光谱测量中,部分近红外和短波红外波段会受到水汽强烈的吸收作用,所获取数据的噪声很大,所以需要去除这些噪声较大的波段,最终选取 350~1 300,1 420~1 780 和 2 050~2 300 nm 三个区域,每一条反射率光谱曲线共计 1 563 个数据。将所选取的反射率光谱曲线用进行均值滤波,去除噪声,窗口大小设置为 5。

1.5 端元提取

为了尽可能克服不同厚度和不同内部结构的海冰对海冰-铁矿粉像元的提取的干扰,考虑使用光谱曲线的形状来

提取铁矿粉-海冰像元。

(1) 光谱矢量角余弦

选取若干个铁矿粉、海冰(包括不同厚度海冰)反射率曲线的特征波长(包括吸收、反射、跃升等)。将选取的波长反射率作为矢量,每个波段为矢量的一个维度,计算待提取像元与铁矿粉光谱的光谱矢量角。根据阈值,判定是否为铁矿粉-海冰像元。矢量角的计算式为

$$A_{\cos} = \frac{\sum_{i=1}^N \rho^f(\lambda_i) \rho(\lambda_i)}{|\rho^f| |\rho|} \quad (1)$$

其中, A_{\cos} 为光谱矢量角余弦值; λ_i 为第*i*波段的波长; N 为波段数; $\rho^f(\lambda_i)$ 为铁矿粉在 λ_i 的反射率; $\rho(\lambda_i)$ 为待定像元在 λ_i 的反射率; $|\cdot|$ 为对矢量求模。

(2) 光谱吸收指数

海冰在短波红外波段反射率很小,也可以考虑单独使用短波红外来提取铁矿粉-海冰像元,海冰在 1 460 nm 处有一个吸收谷,选取 1 425,1 550 和 1 460 nm 三个波段计算,1 460 nm 波段的吸收指数 SAI(spectral absorption index),计算式为

$$\text{SAI} = \frac{0.72\rho_{1425} + 0.28\rho_{1550}}{\rho_{1460}} \quad (2)$$

1.6 混合像元分解

线性混合光谱模型认为混合像元的光谱吸收、反射强度等于内部各端元的光谱吸收、反射强度的光谱矢量与各端元面积系数矢量的乘积。

$$x = \sum_{k=1}^M a_k s_k + w = S a + w \quad (3)$$

式(3)中, x 为观测的混合光谱向量; S 为端元光谱向量; a 为丰度(即面积比例系数); w 为噪声光谱向量(即误差项); M 为端元数量; k 为端元序号。

求解各端元面积比例系数即:立足于混合光谱和端元光谱,通过方程组解算得到结果。但在实际自然环境中,线型混合模型受到两个约束条件的限制

$$\begin{cases} a_k \geq 0, k = 1 \cdots M \\ \sum_{k=1}^M a_k = 1 \end{cases} \quad (4)$$

2 结果与讨论

2.1 反射光谱特征

图 1 为根据覆盖不同面积比例铁矿粉的海冰反射率光谱曲线图,纯净海冰的反射率有两个大的反射峰(590,1 090 nm 左右),一个小的反射峰(802 nm 左右),两个吸收相对较强的谷(805,1 015 nm 左右)。在 1 220 nm 之后,海冰的反射率基本呈现一条缓慢下降的直线,在 1 500~1 780 和 2 050~2 300 nm 两个波段,其反射率不足 0.01。铁矿粉的反射率波变化也较大,有三个吸收峰(598,720 和 1 110 nm),在 885 nm 附近有一个很强的吸收谷,在 1 460 nm 附近有一个较小的吸收谷,铁矿粉的最大反射率为 0.193,最小值为 0.048。9 个样本的反射率曲线则基本介于海冰和铁矿粉的反

射率之间。

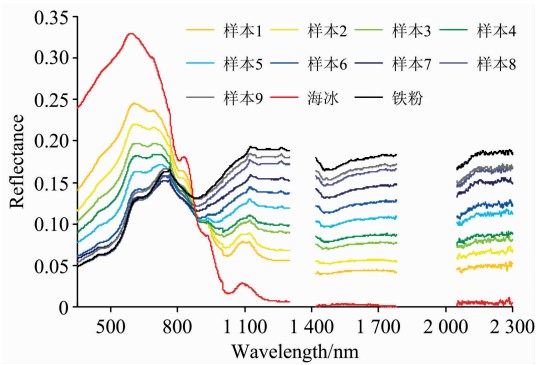


图 1 不同面积比例铁矿粉覆盖海冰反射率光谱曲线
Fig. 1 Reflectance spectra of iron-powder covered sea ice

2.2 端元提取

表 2、表 3 分别是观测样本和不同厚度海冰的 A_{cos} 和 SAI。根据式(1)计算样本的光谱适量角余弦得到海冰 A_{cos} 最小, 为 0.588, 样本 1 至样本 9 的 A_{cos} 值位于海冰和铁矿粉之间, 随着铁矿粉面积的增大而增大。铁矿粉的光谱曲线形状

表 2 不同样本的 A_{cos} 和 SAI

Table 2 A_{cos} and SAI values of samples

	海冰	1	2	3	4	5	6	7	8	9	铁矿粉
A_{cos}	0.588	0.781	0.838	0.904	0.932	0.968	0.989	0.998	0.999	0.999	1
SAI	0.812	1.04	1.048	1.058	1.061	1.06	1.065	1.065	1.063	1.056	1.064

表 3 不同厚度海冰 A_{cos} 和 SAI

Table 3 A_{cos} and SAI values of sea ice with different thicknesses

	A_{cos}	SAI
海冰(28 cm)	0.671	0.965
海冰(42 cm)	0.672	0.910
海冰(6 cm)	0.622	1.000
均值(M)	0.638	0.924
标准差(SD)	0.029	0.046
$M+2SD$	0.696	1.017

2.4 面积比例反演

海冰-铁矿粉像元是线性混合像元, 在提取出了海冰-铁矿粉像元之后, 可通过选取一个或多个波段的组合参量估算铁矿粉面积比例。经过多次试验, 最终选取 1 610~1 630 nm 波段的平均反射率来估算铁矿粉比例。根据线性混合像元理论可以得到如方程组(5)

$$\begin{cases} a_s \rho_{1610-1630}^s + a_c \rho_{1610-1630}^F = \rho_{1610-1630} \\ a_s + a_c = 1 \end{cases} \quad (5)$$

其中, $\rho_{1610-1630}^s$, $\rho_{1610-1630}^F$, $\rho_{1610-1630}$ 分别为海冰、铁矿粉和海冰-铁矿粉像元的平均反射率, a_s 和 a_F 分别为海冰-铁矿粉像元中海冰和铁矿粉的面积比例。由式(5)可以得到铁矿粉

近似呈现倒立三角形, 海冰的呈直线或者顶角极大的正立三角形。铁矿粉的 SAI 都大于 1, 海冰的 SAI 小于铁矿粉。

经对比不同厚度海冰的 A_{cos} 和 SAI 发现, 利用 SAI 的 $M+2SD$ 作为阈值, 可以将所有观测厚度的海冰与铁矿粉进行区分, 而 A_{cos} 的 $M+2SD$ 无法将所有海冰都与铁矿粉区分开, 因此, 在进行端元提取时, 采用的是 SAI 的 $M+2SD$ 作为阈值。

2.3 光谱特征与面积相关性

图 2 分别为面积比例与反射率的相关系数, 在 350~698 nm, 反射率与铁矿粉面积的相关系数绝对值都大于 0.90, 在 918~1 400, 1 500~1 780 和 2 250~2 300 nm 波段, 相关系数都大于 0.90。86% 以上波段范围的反射率与铁矿粉面积的相关系数在 0.90 以上, 91.75% 以上的波段范围相关系数在 0.80 以上。铁矿粉面积与反射率在可见光近红外波段的下降和在短波红外波段内的上升呈现出强线性相关。随着铁矿粉的面积的增大, 样本在可见光波段的吸收逐渐增强, 而在短波红外波段的反射逐渐增强, 由于铁矿粉吸收系数较大, 太阳辐射无法透过铁矿粉颗粒层, 冰底海水反射和冰内粒子散射的能量也无法透过铁矿粉颗粒层。铁矿粉在传感器视场中的面积对反射率的变化起主要作用, 海冰-铁矿粉混合像元的反射特征可以用线性混合像元来描述^[12-13]。

面积比例的计算式

$$a_F = a \rho_{1610-1630}^F - \beta \quad (6)$$

其中, $a = 1 / (\rho_{1610-1630}^F - \rho_{1610-1630}^s)$, $\beta = \rho_{1610-1630}^s / (\rho_{1610-1630}^F - \rho_{1610-1630}^s)$ 。分别确定铁矿粉和海冰在 1 610~1 630 nm 波段的平均反射率, 就可估算海冰-铁矿粉像元中铁矿粉的面积比例。

如果已知铁矿粉(可以根据先验知识得知)厚度 h_F 、孔隙率 P 、密度 D_F , 就可以估算铁矿粉的体积, 计算式为

$$m_F = A a_s h_F P D_F \quad (7)$$

其中, A 为像元面积, 具体的误差模型可以由式(7)得出。自然撒落时, h_F 服从随机分布的 $f(h_F)$, 所以应用均值 \bar{h}_F 代替式(7)中的 h_F , 且 $\bar{h}_F = \int h_F f(h_F) dh_F$ 。

图 3 为样本的铁矿粉面积比例反演及其误差, 面积较小的误差一般大于面积较大的。可以看出, 在克服海冰背景反射率的影响下, 可比较精确地估算海冰-铁矿粉像元中铁矿粉面积比例, 平均反演精度可达 94.23%。

3 结 论

开展了真实海冰条件下散落铁矿粉的反射光谱观测实验, 提取分析了不同面积比例覆盖海冰的光谱曲线特征。

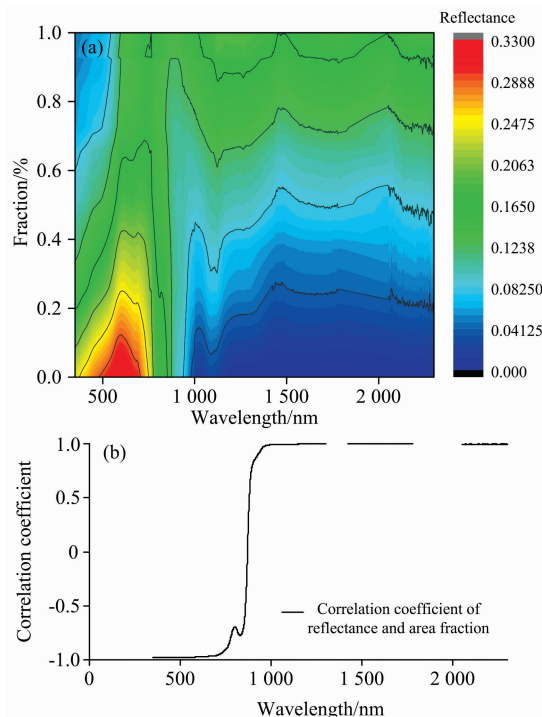


图 2 铁矿粉覆盖面积比例与光谱特征相关性

(a): 面积比例与波长相关性; (b): 面积比例与反射率相关性

Fig. 2 Correlation of iron-powder covered area fraction and spectral features

(a): Correlation of area fraction and wavelength; (b): Correlation of area fraction and reflectance

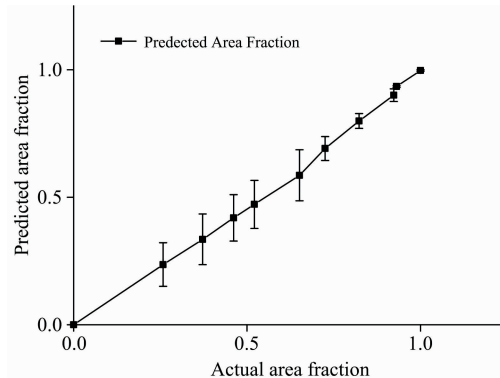


图 3 样本的铁矿粉面积比例反演及其误差

Fig. 3 Predicted area fraction and the error

利用反射光谱的 SAI 能够将测试所用不同厚度海冰和被铁矿粉污染的海冰进行区分, 实现海冰端元提取。海冰表面的铁矿粉截面面积比例与 918~1 400, 1 500~1 780 和 2 250~2 300 nm 波段的反射率有强相关性, 相关系数都大于 0.90。其中, 1 610~1 630 nm 波段的平均反射率对铁矿粉面积比例的估算精度较高, 平均反演精度达到 94.23%。

本工作仅考虑了海冰表面受到铁矿粉污染的情况, 未对铁矿粉进入海冰内部的情况进行考虑。未来工作中, 将逐步完善海冰受污染场景的研究, 为海冰受铁矿粉污染的监测提供技术参考。

References

[1] Wang C, Ducruet C. Journal of Transport Geography, 2014, 40: 3.
 [2] Walker T R. Marine Pollution Bulletin, 2016, 105(1): 199.
 [3] Grote M, Mazurek N, Gräbsch C, et al. Marine Pollution Bulletin, 2016, 110(1): 511.
 [4] Walker T R, Adebambo O, Del Aguila Feijoo M C, et al. Chapter 27-Environmental Effects of Marine Transportation: Academic Press, 2019. 505.
 [5] Huertas J I, Huertas M E, Cervantes G, et al. Science of The Total Environment, 2014, 493: 1047.
 [6] Koval S, Krahenbuhl G, Warren K, et al. Journal of Environmental Management, 2018, 223: 196.
 [7] Liu B, Li Y, Liu C, et al. SENSORS, 2018, 18(1): 1.
 [8] Saltymakova D, Desmond D S, Isleifson D, et al. Marine Pollution Bulletin, 2019, 142: 216.
 [9] Liu B, Li Y, Li G, et al. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2019, 8(4): 1.
 [10] Goddijn-Murphy L, Williamson B. Remote Sensing, 2019, 11(18): 1.
 [11] LIU Yan-guo, LIU Yan-qiu, OUYANG Li-li, et al(刘延国, 刘艳秋, 欧阳莉莉, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2018, 38(11): 3516.
 [12] Johannessen O M, Sandven S, Chunchuzov I P, et al. Tellus Series A-Dynamic Meteorology and Oceanography, 2019, 71(1): 1.
 [13] Warren S G. Philosophical Transactions of the Royal Society A—Mathematical Physical and Engineering Sciences, 2019, 377(2146): 17.

Study on Reflection Characteristics of Sea Ice Contaminated by Shipping Iron Ore Powder

LIU Bing-xin¹, GUO Gang¹, WU Dong-lai¹, LIU Cheng-yu^{2*}, XIE Feng²

1. Navigation College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China

2. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China

Abstract Annex V of the Convention on the Prevention of Pollution from Ship (MARPOL) stipulates that dry residues containing substances harmful to the marine environment (HME) must be discharged at port reception facilities. However, many ships discard the waste directly into the ocean. Shipment of iron ore powder scattered on the surface of sea ice will pollute the sea ice and accelerate the melting of it, causing pollution to the marine environment. The research on the spectral reflectance of sea ice contaminated by iron ore powder can provide data basis for sea ice quality monitoring using optical remote sensing images. The purpose of this paper is to provide a reference and basis for the estimation of the range of iron powder pollution by measuring on-site spectral differences between sea ice and that covered iron ore powder particles with different area proportions. The experiment was conducted on natural sea ice in the Bohai Sea. The spectral characteristics of sea ice with iron ore powder were obtained and analyzed, and the correlation between these spectral characteristics and the area fraction of iron ore powder particles was discussed. In order to retrieve the fraction of the area of iron ore powder on the surface of sea ice, the end-member extraction of sea ice and iron ore powder was performed using the spectral vector angle cosine value (Acos) and the spectral absorption index (SAI) threshold. Based on the linear spectral unmixing theory, a feature-based inversion model of iron powder fraction on the surface of sea ice was proposed. The proportion of iron ore powder on the surface of sea ice in this paper is 0 (clean sea ice), 25.8%, 37.2%, 46.1%, 52.1%, 65.1%, 72.5%, 82.3%, 92.3%, 93.1%, and 100% (Pure iron ore powder), etc., the data collection wavelength range is 350~2 500 nm. The results show that the absorption index at 1 460 nm band is the best for extraction of sea ice and iron ore powder. The reflectance in the range of 918~1 400, 1 500~1 780 and 2 250~2 300 nm have a great correlation with the area fraction, which are all greater than 0.90. The correlation coefficients of reflectance and area fraction at more than 86% are above 0.90, and more than 91.75% of bands have a correlation coefficient that above 0.80. The average reflectance of 1 610 to 1 630 nm was selected to estimate the proportion of iron ore powder area. The predicted results of samples with larger area performed better than these of smaller. The average accuracy of area fraction prediction of the iron ore powder on the sea ice is 94.23%.

Keywords Sea ice; Iron ore powder; Spectra

(Received Dec. 31, 2019; accepted Apr. 14, 2020)

* Corresponding author