

基于多源遥感数据的渤海海冰动态监测 方法设计及验证

王林^{1,2}, 周忠玉², 张小坡², 周玉海², 张俊伟²

(1. 国华投资绿色能源与建筑研究中心, 山东 济南 250000;

2. 山东国华时代投资发展有限公司, 山东 济南 250000)

摘要: 渤海海域海冰的形成、发展过程较为复杂, 在设计渤海海域海冰动态监测方法时, 容易出现因遥感数据质量低, 降低监测精度的问题。对此, 提出基于多源遥感数据的渤海海域海冰动态监测方法。利用雷达获取渤海海域海冰遥感数据, 并对其进行辐射定标、数据配准和数据校正, 再计算海冰的密集度、海冰厚度和海冰温度, 提取多个海冰信息, 通过计算海冰状态的多个参数, 实现对海冰的动态监测。试验结果表明, 基于多源遥感数据的渤海海域海冰动态监测方法在实际应用中监测精度高。

关键词: 多源遥感数据; 渤海海域; 海冰动态监测; 数据校正; 信息提取

中图分类号: U612.23

文献标志码: A

文章编号: 2095-7874(2025)03-0032-06

doi: 10.7640/zggwjs202503005

Design and verification of dynamic monitoring method for sea ice in Bohai sea based on multi-source remote sensing data

WANG Lin^{1,2}, ZHOU Zhong-yu², ZHANG Xiao-po², ZHOU Yu-hai², ZHANG Jun-wei²

(1. GuoHua Investment Green Energy and Building Research Center, Jinan, Shandong 250000, China;

2. GuoHua Investment Development Co., Ltd., Jinan, Shandong 250000, China)

Abstract: The formation and development process of sea ice in the Bohai Sea is relatively complex. When designing dynamic monitoring methods for sea ice in the Bohai Sea, it is easy to encounter problems such as low quality remote sensing data and reduced monitoring accuracy. A dynamic monitoring method for sea ice in the Bohai Sea based on multi-source remote sensing data was proposed. The remote sensing data of sea ice in the Bohai Sea was obtained by radar, and radiometric calibration, data registration, and data correction were carried out on it, then the density, thickness, and temperature of sea ice were calculated, multiple sea ice information was extracted, and multiple parameters of sea ice status were calculated to realize dynamic monitoring of sea ice. The experimental results show that the designed sea ice dynamic monitoring method based on multi-source remote sensing data in the Bohai Sea has high monitoring accuracy in practical applications.

Key words: multi-source remote sensing data; Bohai sea area; dynamic monitoring of sea ice; data correction; information extraction

0 引言

渤海海域作为中国北方重要的海域之一, 其海冰的动态变化对于海洋环境、气候变化以及沿

海地区的经济活动具有重要影响。然而, 由于渤海海域冬季气温低, 海冰的形成、发展和消融过程复杂多变, 给海上交通、渔业生产等活动带来

了不小的挑战^[1]。因此,对渤海海域海冰进行动态监测显得尤为重要。现有的海冰监测方法主要依赖于实地考察和观测,但这种方法不仅费时费力,而且难以实现对海冰变化的实时跟踪。

在上述背景下,张鹏飞^[2]利用海洋一号 C/D 卫星的遥感技术获取辽东湾海域的海冰数据,并对获取的数据进行投影转换和数据拼接,再分区开展云监测阈值设置和判识,并进行云掩膜处理,消除云层对海冰监测的干扰,基于遥感观测值生成彩色合成图,从而提取出初步的海冰信息,通过计算海冰参数,实时监测海冰的动态变化。该方法虽然对云层的穿透能力较强,但其分辨率较低,会影响到海冰监测的精度。陈璐等^[3]利用环境减灾二号 A/B 卫星的 16 m 分辨率多光谱数据,再对数据进行大气校正,利用 DeepLab V3 模型进行语义分割,识别海冰和海水,提取海冰的边界和范围,并对其动态变化规律进行分析,确保日常对海冰变化的实时监测。该方法利用 DeepLab V3 模型进行识别,其模型自身的参数设定不合理,会导致模型存在局限性,从而影响到海冰数据提取的准确性和效率。尹艳华等^[4]采用多时相合成孔径雷达获取海面图像,并采用多尺度超像素重建方式增强图像边缘,有效提取海冰边界,再设定约束聚类条件,对图像进行预分类,引入卷积小波神经网络,实时对海面图像进行分类,有效实现对海冰的监测。该方法采用了多尺度重建来抑制噪声,但在某些情况下,噪声和异常值仍可能对监测过程造成一定影响。宋丽娜等^[5]选择船载雷达实时采集海域的海冰情况,并将采集到的雷达回波数据进行滤波和降噪处理,提取出海冰的特征,如位置、面积等,设定海冰安全阈值,实时分析海冰的特征,实现对海冰的动态监测。但该方法在实际应用中可能会受到天气、海浪等多种因素的影响,导致获取的数据存在误差,从而影响到监测结果。王翼飞等^[6]采集海冰密集度数据,对海冰风险预警模型进行构建,通过空间投影转换不同空间分辨率海冰数据,并提取海冰特征,设置船舶和海冰位置关系聚类特征向量,采用 GMM 模型聚类网格,将高斯分布重叠率设为指标,分类海冰网格实现动态监测,但多源数据缺乏互通性,导致数据无法有效融合与挖掘,从而无法为动态监测提供全面、多角度的信息服务。多源遥感数据融合的海冰分类研究是很有必要

的^[7]。基于多源数据融合方法中的融合特征包含的信息较为丰富,现有的研究大多未能对其进行有效的分析,限制了分类精度的进一步提高^[8]。

在以往研究的基础上,本文结合当前方法的不足设计了基于多源遥感数据的渤海海域海冰动态监测方法。本研究通过遥感技术可以快速获取大范围的海冰信息,避免了传统方法的局限性和低效性,可以提供及时的海冰情报,以应对可能的海冰灾害,保障沿海地区的经济安全和人民生命财产安全。

1 渤海海域海冰动态监测方法设计

1.1 基于多源遥感数据的渤海海域海冰数据校正

渤海海冰主要集中于北部,这是因为该区域的温度较低,存在浮冰,且邻近北冰洋,在洋流的作用下,北冰洋的冰会漂到渤海地区^[9]。在季节、天气等多种因素的影响下,该海域的海冰覆盖范围和厚度会有非常显著的变化。

为了更好地监测渤海海域海冰的动态变化,需要利用遥感技术实时获取渤海海域的海冰遥感数据^[10]。考虑到获取的海冰遥感数据来源不一,为提高遥感数据的质量,需要先对其进行辐射定标^[11]。遥感数据来源主要包括 AVHRR、MODIS、GOCI,辐射定标的具体目的是将接收到的原始辐射值转换为地表反射率或辐射亮度等物理量,这些物理量能够更直接地反映地表特性。对于海冰遥感数据而言,辐射定标的结果能够消除数据之间的响应差异、大气吸收和散射、太阳角度变化等因素对原始数据的影响,使不同时间、不同状态下获取的数据具有可比性,从而更准确地反映海冰的动态变化。具体处理过程见式(1):

$$L_r = G_c L_o + B_p \quad (1)$$

式中: L_r 为海冰遥感数据的辐射定标的结果; G_c 为遥感数据定标系数增益; L_o 为原始海冰遥感数据的亮度灰度值; B_p 为原始海冰遥感数据的偏移量。

通过上述辐射定标,提高原始海冰遥感数据的亮度,减少遥感数据自身的辐射误差,更加真实地反映渤海海域海冰的真实情况。在监测渤海海域海冰动态变化的场景中,配准处理的目的在于确保不同时间、不同视角下获取的海冰遥感图像数据在空间位置上能够精确对齐,从而能够准确地进行后续的分析 and 比较。为此,在上述基础上,对上述遥感数据进行配准处理^[12]。具体配准过程见式(2):

$$\begin{cases} R(A, B) = \frac{\sum_i \sum_j [A(i, j) - u_A][B(i, j) - u_B]}{\sqrt{\sum_i \sum_j [A(i, j) - u_A]^2 [B(i, j) - u_B]^2}} \\ g(m, n) = \frac{1}{2} [g_A(m, n) + g_B(m, n)] R(A, B) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $R(A, B)$ 为 A、B 两个海冰遥感图像数据的相关系数; (i, j) 、 (m, n) 为二维图像数据中的不同像素位置编号; $A(i, j)$ 为 A 海冰遥感图像数据; $B(i, j)$ 为 B 海冰遥感图像数据; u_A 为 A 海冰遥感图像数据的均值; u_B 为 B 海冰遥感图像数据的均值; $g(m, n)$ 为上述 2 幅图像的配准结果; $g_A(m, n)$ 为 A 海冰遥感图像数据的亮度值; $g_B(m, n)$ 为 B 海冰遥感图像数据的亮度值。

不同的遥感系统具有不同的光谱响应特性、灵敏度、动态范围等, 这些差异会导致同一地表在不同遥测状态下获取的数据存在差异。通过校正处理, 可以消除或减小这种差异, 使数据具有可比性。为此, 基于上述海冰遥感图像的配准结果对其进行校正^[13]。具体校正过程见式(3):

$$\begin{cases} F(i, j) = w_c g(m, n) \cdot \delta_o \\ \delta_o = \delta_c \cos \theta \end{cases} \quad (3)$$

式中: $F(i, j)$ 为海冰遥感图像数据在 (i, j) 像素点的校正结果; w_c 为校正系数; δ_o 为校正后的散射系数; δ_c 为原始的散射系数; θ 为获取遥感图像时的入射角。

在式(1)、式(2)和式(3)的作用下, 对获取的海冰多源遥感数据进行校正处理, 有效提高遥感数据的质量^[14]。至此, 基于多源遥感数据的渤海海域海冰遥感数据校正的设计完成。

1.2 渤海海域海冰信息提取

在处理过的海冰遥感数据中提取相应的海冰信息。在提取海冰信息时, 根据遥感图像自身的参数, 如冰面反照率、冰厚度、冰温度等参数信息, 计算出多个海冰信息, 如海冰密度、厚度、温度等^[15]。海冰密集度的计算公式见式(4):

$$\begin{cases} C_s = \frac{\gamma_i}{\gamma_a} \\ \rho_b = \frac{A_c - A_w}{A_i - A_w} C_s \end{cases} \quad (4)$$

式中: C_s 为海冰遥感数据的灰度像素比; γ_i 为研究区域冰像素点的数量; γ_a 为研究区域所有像素点的数量; ρ_b 为计算的海冰密集度; A_c 为冰水混合物的综合反照率; A_w 为冰水混合物的海水反照率; A_i 为冰水混合物的海冰反照率。

在上述基础上计算海冰的厚度^[16]。海冰厚度

的计算公式见式(5):

$$\begin{cases} H = \beta_{\max} (1 - \kappa_c e^{-u_c H}) \\ \kappa_c = 1 - \frac{\beta_g}{\beta_{\max}} \end{cases} \quad (5)$$

式中: H 为海冰厚度; β_{\max} 为海冰的最大反射率; κ_c 为海冰厚度与太阳光的相关系数; u_c 为海冰厚度对太阳光进行折射的衰减系数; β_g 为当前情况下的海水折射率。

基于上述计算结果计算海冰温度。在计算的过程中, 需要将海冰遥感数据中的参数进行换算, 将原本的亮温值转换成海冰的直接温度值^[17]。转换过程见式(6):

$$\begin{cases} \alpha_0 = \frac{a_{31} M_{32} (1 - N_{31} - M_{31})}{M_{32} N_{31} - M_{31} N_{32}} \\ \alpha_1 = \frac{1 + M_{31} - b_{31} M_{32} (1 - N_{31} - M_{31})}{M_{32} N_{31} - M_{31} N_{32}} \\ \alpha_2 = \frac{M_{31} + b_{31} M_{32} (1 - N_{31} - M_{31})}{M_{32} N_{31} - M_{31} N_{32}} \\ N_i = \delta_i \cdot v_i(\theta) \\ M_i = [1 - v_i(\theta)] [1 + (1 - \delta_i) \cdot v_i(\theta)] \end{cases} \quad (6)$$

式中: α_0 、 α_1 、 α_2 分别为海冰遥感数据的换算系数; N_i 为海冰遥感数据的反演系数; M_i 为海冰遥感数据的辐射系数; δ_i 为地表发射率; $v_i(\theta)$ 为大气透过率; a_{31} 、 b_{31} 为分裂参数; M_{31} 、 M_{32} 为辐射系数的对应数值; N_{31} 、 N_{32} 为反演系数的对应数值。

基于式(6)来计算海冰的温度。具体计算过程见式(7):

$$T_b = \alpha_0 + (\alpha_1 - \alpha_2) \cdot T \quad (7)$$

式中: T_b 为计算出的海冰温度; T 为海冰遥感数据的亮温值。

通过计算, 提取出多个海冰信息, 为后续监测渤海海域海冰动态变化奠定基础。至此, 渤海海域海冰信息提取的设计完成。

1.3 渤海海域海冰动态变化监测

在上述设计的基础上实现对渤海海域海冰动态变化的监测。海水的结冰温度受到多种因素的影响, 如盐度、压力(与海水深度相关)等。在渤海这样的海域, 由于海水盐度的存在, 其结冰温度通常低于纯水的冰点。因此, 准确计算海水在特定条件下的结冰温度, 对于判断海冰是否开始形成以及预测其形成速度至关重要。海冰强度是衡量海冰物理特性的重要参数, 它反映了海冰的抗压、抗弯和抗剪等力学性能。这些性能对于评估海冰对海上交通、海洋工程设施以及海洋

生态系统的影响具有重要意义。

为此, 在监测过程中, 通过计算海水结冰时的温度和海冰强度 2 个参数, 实时监测当前状态下海冰的变化^[18]。具体计算过程见式(8):

$$\begin{cases} t_c = T_0 - \frac{h_c p_c C_w (t_a - T_0)}{t^c} \\ p_q = \rho_k H \cdot \exp[-C_k(1 - \rho_b)] \end{cases} \quad (8)$$

式中: t_c 为结冰时的温度; T_0 为海水初始的温度; h_c 为海水深度; p_c 为海水密度; C_w 为海水比热容; t_a 为海水结冰时的温度; t^c 为海水结冰所花费的时间; p_q 为海冰的强度; ρ_k 为随机常数; H 为海冰的厚度; C_k 为海冰变化的常数。

根据上述参数数值的变化分析海冰的动态变化。至此, 基于多源遥感数据的渤海海域海冰动态监测方法的设计完成。

2 试验测试

在上述理论设计的基础上展开试验测试。试验过程中, 将本文设计的方法作为方法 1, 文献[2]中提出的方法作为方法 2, 文献[3]中提出的方法作为方法 3。对比上述 3 种方法在实际应用中的效果。

2.1 试验准备

为验证本文设计方法在实际应用中的效果, 进行试验测试。试验中, 以渤海西部海域为研究区域, 并设置 5 个重点监测区域, 利用雷达系统采集渤海海域的海冰遥感数据。选择 5.6 GHz 作为雷达系统的工作频率是基于该频段在穿透海冰和海水时具有较好的性能, 能够获取到较为清晰的海冰遥感图像。同时, 该频段也避免了部分大气干扰和地面杂波的影响。发射功率设定为 500 MW 是为了确保雷达系统能够产生足够的能量, 穿透一定厚度的海冰和海水, 获取到足够强度的回波信号。较高的发射功率有助于提高信号的信噪比和探测距离。脉冲宽度的选择需要权衡探测距离和分辨率, 12.3 μ s 的脉冲宽度能够在保证一定探测距离的同时获得较好的距离分辨率。较宽的脉冲宽度有助于增加雷达的能量积累, 提高探测灵敏度, 但过宽的脉冲宽度会降低距离分辨率。脉冲重复频率设定为 200 Hz 是为了在保证数据连续性的同时避免脉冲之间的干扰。最大探测距离达到了 120 m, 分辨率为 0.01, 这 2 个参数是根据雷达系统的性能和研究需求设定的。120 m 的最大探测距离能够满足对渤海海域海冰的监测需

求, 而 0.01 的分辨率则能够确保在监测过程中捕捉到海冰的细微变化。

基于上述参数, 在监测范围内获取大量的渤海海域海冰遥感数据, 然后对获取的遥感数据进行校正处理, 并将处理后的海冰遥感数据作为试验数据。

试验中需要设定相应的试验参数, 具体的试验参数如表 1 所示。

表 1 试验参数

Table 1 Experimental parameters

序号	试验参数	参数设置
1	试验时间	1 个月
2	定标系数增益 G_c	1.42
3	原始散射系数 δ_c	2.56
4	衰减系数 u_c	0.25
5	校正系数 w_c	0.44
6	海水比热容 $C_w / (J \cdot (kg \cdot ^\circ C)^{-1})$	4.20×10^3

基于上述参数, 利用本文设计的方法计算出渤海海域不同位置的海冰密集度、海冰厚度和海冰温度。具体如表 2 所示。

表 2 渤海海域部分位置的各项参数

Table 2 Parameters of some locations in the Bohai sea area

经度/ $^\circ$ E	纬度/ $^\circ$ N	海冰密集度/%	海冰厚度/cm	海冰温度/ $^\circ$ C
119.288	44.732 5	100.00	1.245	-3.425
119.385	44.658 4	100.00	1.368	-3.215
119.812	44.103 4	92.45	1.421	-3.254
119.812	44.362 5	93.68	1.256	-3.666
119.812	44.265 4	95.44	1.366	-3.698
119.826	44.362 4	100.00	1.254	-3.425
119.826	44.125 1	100.00	1.254	-3.415
119.872	44.325 4	100.00	1.366	-3.754

基于上述参数, 对渤海海域海冰的动态变化进行监测, 统计其监测结果。

将本文方法的监测结果与其余 2 种方法的监测结果进行对比, 验证本文设计的方法。

2.2 试验结果讨论

试验中, 利用 3 种方法对渤海海域的海冰进行监测, 统计其连续 8 d 的监测结果, 并将其监测结果与利用无人机实地观测的实际结果进行比较, 验证 3 种方法的监测精度。3 种方法的监测结果如表 3 所示。

表3 3种方法的监测结果
Table 3 Monitoring results of three methods

监测时间	实际结果		方法 1		方法 2		方法 3	
	$t_c/^\circ\text{C}$	p_q/MPa	$t_c/^\circ\text{C}$	p_q/MPa	$t_c/^\circ\text{C}$	p_q/MPa	$t_c/^\circ\text{C}$	p_q/MPa
第 1 天	-3.45	1.23	-3.44	1.26	-1.22	0.23	-0.36	1.11
第 2 天	-2.78	1.44	-2.78	1.48	-1.35	0.44	-0.45	1.12
第 3 天	-3.22	1.36	-3.22	1.36	-1.45	0.32	-0.12	1.13
第 4 天	-4.13	1.25	-4.12	1.25	-1.42	0.25	-0.23	1.25
第 5 天	-5.23	1.36	-5.23	1.39	-1.25	0.33	-0.14	1.23
第 6 天	-4.98	1.42	-4.98	1.42	-1.36	0.25	-0.23	0.99
第 7 天	-3.65	1.36	-3.67	1.36	-2.33	0.26	-0.24	0.98
第 8 天	-2.55	1.54	-2.55	1.57	-2.35	0.27	-0.55	1.01

在本次研究中,实际结果是通过无人机实地观测获得的。无人机作为现代遥感技术的重要工具,具有高精度、高分辨率和实时性强的特点。通过无人机搭载的专业传感器,可以准确测量海水温度、海冰厚度等关键参数,并结合图像处理技术提取海冰强度信息。因此,无人机观测数据作为基准数据具有较高的可靠性和准确性。如表3所示,根据上述监测结果可以看出,和实际的监测结果相比,方法1大部分监测数据与实际数据相符,仅存在较小误差。方法2和方法3的监测结果与实际结果则存在较大差距。因此,本文设计的方法在实际应用中监测精度较高。

为进一步验证上述3种方法在实际应用中的效果,以3种方法的Kappa系数为评价指标,对比3种方法的监测精度。Kappa系数是衡量分类精度的一个指标,该系数同时考虑对角线以外的各种漏分和错分像元,全面评价分类效果。试验中,利用3种方法对渤海海域海冰状态进行监测,统计其连续8d监测结果的监测精度。3种方法的Kappa系数统计结果如图1所示。

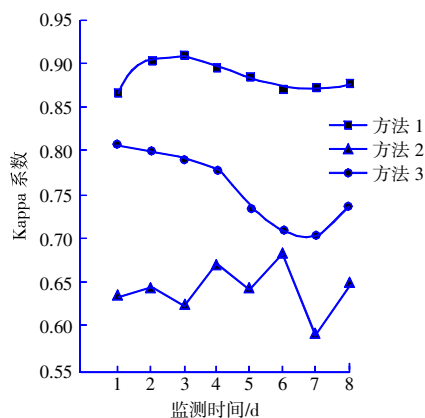


图1 3种方法的Kappa系数

Fig. 1 Kappa coefficients of three methods

由图1可知,方法1的Kappa系数较高,且始终在0.85以上,说明其在实际应用中能够准确监测出海冰的变化,具有较高的监测精度。且方法1的数值浮动较小,表明监测结果具有一定的可靠性和稳定性,在实际应用中能够取得较好的效果。

3 结语

本研究充分利用遥感技术提供的信息实现了对海冰分布、面积、厚度等关键参数的准确监测。通过精确掌握海冰的动态变化,相关部门能够更有效地制定应对策略,减少因海冰灾害带来的损失,也能够为海洋气象预报、海上交通安全以及渔业生产等提供及时、准确的海冰信息。此外,对于气候变化研究而言,这一方法也提供了宝贵的数据支持,有助于更深入地了解海冰在全球气候变化中的作用。

参考文献:

- [1] 黄睿,王常颖,李劲华,等. 三种海冰密集度产品的北极海冰监测能力比较分析[J]. 极地研究, 2022, 34(4): 471-484.
HUANG Rui, WANG Chang-ying, LI Jin-hua, et al. Comparative analyses of Arctic sea ice monitoring capability of three sea ice concentration products[J]. Chinese Journal of Polar Research, 2022, 34(4): 471-484.
- [2] 张鹏飞. 基于海洋1号C/D卫星的辽东湾海冰遥感监测[J]. 测绘与空间地理信息, 2022, 45(11): 89-91.
ZHANG Peng-fei. Remote sensing monitoring of sea ice in Liaodong Gulf based on Haiyang-1 C/D satellite[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2022, 45(11): 89-91.
- [3] 陈璐,胡凯龙,刘明博. 环境减灾二号A/B卫星在辽东湾海冰监测中的应用[J]. 航天器工程, 2022, 31(3): 147-152.
CHEN Lu, HU Kai-long, LIU Ming-bo. Application of hj-2A/B satellites in sea ice monitoring in Liaodong Bay[J]. Spacecraft Engineering, 2022, 31(3): 147-152.
- [4] 尹艳华,张云鹏,肇同斌,等. 基于多尺度重建和约束聚类海冰变化检测算法[J]. 测试技术学报, 2023, 37(3): 199-207.

- YIN Yan-hua, ZHANG Yun-peng, ZHAO Tong-bin, et al. Sea ice change detection algorithm based on multi-scale reconstruction and constrained clustering[J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2023, 37(3): 199–207.
- [5] 宋丽娜, 王紫竹, 赵博强, 等. 面向核电冷源安全的雷达海冰监测系统[J]. *海洋环境科学*, 2021, 40(4): 619–624.
- SONG Li-na, WANG Zi-zhu, ZHAO Bo-qiang, et al. Design of the radar monitoring system of sea ice for the safety of nuclear power cold source[J]. *Marine Environmental Science*, 2021, 40(4): 619–624.
- [6] 王翼飞, 谢宗轩. 基于多源数据的北极东北航道冰情示警方法[J]. *上海海事大学学报*, 2023, 44(2): 30–37.
- WANG Yi-fei, XIE Zong-xuan. Ice warning method of northeast passage of arctic based on multi-source data[J]. *Journal of Shanghai Maritime University*, 2023, 44(2): 30–37.
- [7] HAN Y, LIU Y, HONG Z, et al. Sea ice image classification based on heterogeneous data fusion and deep learning[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(4): 592.
- [8] 沈航. 基于深度学习的异源遥感影像多特征融合海冰分类方法研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2023.
- SHEN Hang. Research on multi feature fusion sea ice classification method for heterogeneous remote sensing images based on deep learning[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2023.
- [9] 胡媛, 华曦帆, 刘卫, 等. 应用卷积神经网络 VGG16 的星载 GNSS-R 海冰检测[J]. *遥感信息*, 2024, 39(2): 28–35.
- HU Yuan, HUA Xi-fan, LIU Wei, et al. Sea ice detection using spaceborne GNSS-R data by VGG16[J]. *Remote Sensing Information*, 2024, 39(2): 28–35.
- [10] 李安忠, 赵楷宾, 王在峰, 等. 基于卫星遥感监测的渤海海域海冰冰情年际变化分析[J]. *中国水运(下半月)*, 2022, 22(10): 70–72.
- LI An-zhong, ZHAO Kai-bin, WANG Zai-feng, et al. Analysis of interannual variations in sea ice conditions in the Bohai Sea based on satellite remote sensing monitoring[J]. *China Water Transport*, 2022, 22(10): 70–72.
- [11] 孟强, 张宇庭, 张婷婷, 等. 基于无人机巡检技术的海冰厚度探测方法[J]. *科学技术创新*, 2024, 44(7): 201–204.
- MENG Qiang, ZHANG Yu-ting, ZHANG Ting-ting, et al. Sea ice thickness detection method based on unmanned aerial vehicle mounted inspection equipment[J]. *Scientific and Technological Innovation*, 2024, 44(7): 201–204.
- [12] 陈星哲, 谢涛, 王明华, 等. 利用全极化 SAR 数据的极化特征获取海冰密集度的算法[J]. *测绘通报*, 2024, 33(2): 80–84, 89.
- CHEN Xing-zhe, XIE Tao, WANG Ming-hua, et al. Algorithm of obtaining sea ice concentration using polarization features from fully polarimetric SAR data[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2024, 33(2): 80–84, 89.
- [13] 李静悦, 雷瑞波, 李娜, 等. 基于冰基浮标数据的 2018–2019 年北极海冰运动特性时空变化分析[J]. *海洋学报*, 2023, 45(8): 31–45.
- LI Jing-yue, LEI Rui-bo, LI Na, et al. Analysis of spatiotemporal changes in Arctic sea ice motion characteristics in 2018–2019 using ice-based buoy data[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2023, 45(8): 31–45.
- [14] 武苏辉, 邹斌, 石立坚, 等. 基于 Bootstrap 算法的 FY-3/MWRI 北极海冰密集度反演[J]. *遥感学报*, 2023, 27(4): 973–985.
- WU Su-hui, ZOU Bin, SHI Li-jian, et al. Arctic sea ice concentration retrieval study of FY-3/MWRI based on the Bootstrap algorithm[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2023, 27(4): 973–985.
- [15] 岳瀚栋, 窦挺峰, 李润奎, 等. 基于多种机器学习及其堆叠式集成方法的月尺度北极海冰预测研究[J]. *冰川冻土*, 2023, 45(3): 893–901.
- YUE Han-dong, DOU Ting-feng, LI Run-kui, et al. Monthly-scale Arctic sea ice extent prediction based on multiple machine learning and stacking ensemble methods[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2023, 45(3): 893–901.
- [16] 方岩, 王雪, 陈卓奇, 等. 2011–2020 年弗拉姆海峡夏季海冰漂移跟踪及变化分析[J]. *地球物理学报*, 2023, 66(7): 2726–2740.
- FANG Yan, WANG Xue, CHEN Zhuo-qi, et al. Summer sea ice drift tracking and variation analysis in Fram Strait from 2011 to 2020[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2023, 66(7): 2726–2740.
- [17] 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 Yu-di, WANG Tie, CHENG Shan-jun, 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.
- [18] 叶世榕, 罗歆琪, 南阳, 等. 一种改进的星载 GNSS-R 卷积神经网络海冰检测方法[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2024, 49(1): 90–99.
- YE Shi-rong, LUO Xin-qi, NAN Yang, et al. An improved sea ice detection method based on spaceborne GNSS-R using CNN[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(1): 90–99.