

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0009

LIU Bin, JI Honglan, ZHAI Yongguang, et al. Ice thickness inversion and ice storage estimation of Yellow River based on satellite radar characteristic parameters[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(5):1470-1481. [刘斌, 冀鸿兰, 翟涌光, 等. 基于星载雷达特征参数的黄河冰厚反演及冰储量估算[J]. 冰川冻土, 2022, 44(5):1470-1481.]

基于星载雷达特征参数的黄河冰厚反演 及冰储量估算

刘 斌¹, 冀鸿兰¹, 翟涌光¹, 张宝森², 郜国明²

(1. 内蒙古农业大学 水利与土木建筑工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010018; 2. 黄河水利委员会 黄河水利科学研究院, 河南 郑州 450003)

摘 要: 冰厚是冰凌成因分析及预报的重要基础信息, 可为防凌减灾提供重要依据。以黄河内蒙古段包头至头道拐水文站为例, 利用 Sentinel-1 雷达影像结合 Sentinel-2 光学影像对研究区河冰厚度进行估算, 首先对 Sentinel-2 光学影像进行处理, 提取凌汛期前黄河主河道边界; 然后对 Sentinel-1 雷达影像进行处理, 提取 2 个强度信息和 4 个极化分解参数, 分析 6 个雷达特征参数与河冰厚度的相关性; 选择相关性最高的参数, 采用统计回归方法建立冰厚反演线性回归模型, 模型的调整 R^2 为 0.657, 验证 RMSE 为 9.82 cm, MRE 为 13.46%, MAE 为 8.26 cm; 对凌汛期黄河冰厚进行反演, 分析冰厚时空变化特征, 并估算冰储量, 同时讨论了河冰的散射机制。研究证明了主动微波遥感数据在黄河冰厚反演中的可行性, 可为黄河内蒙古段防凌减灾提供科学参考。

关键词: Sentinel-1; Sentinel-2; 遥感; 河冰厚度; 冰储量; 黄河内蒙古段

中图分类号: P343.6⁺3; P416 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2022)05-1470-12

0 引言

冰凌洪水是高纬度河流所特有的一种自然灾害, 严重威胁着河道水工建筑物的安全与河岸生态系统的稳定^[1-2]。冰厚是冰凌成因分析、冰情模拟及预报的重要基础信息, 可为防凌减灾提供重要依据^[3-4]; 无论是冰的防治, 还是冰的利用, 冰厚均是一个关键的参数, 也是比较难以监测的物理指标, 如何对其进行准确、有效地估算一直是河冰研究中的重点和难点^[5]。黄河内蒙古段每年凌汛期长达 4 个月, 河道蜿蜒曲折, 是凌灾重点防控河段, 其冰厚信息的获取对黄河防凌减灾具有重要意义^[6]。

目前, 现场人工钻孔测量冰厚是最为可靠的测量手段, 但受自然环境和交通条件等因素的限制, 耗时费力, 成本较高, 且具有一定的危险性^[7]。度日法冰厚估算模型自 Stefan^[8]提出以来, 在冰工程领域

得到广泛应用^[9-10], 国内学者王军等^[11]对该模型进行改进, 用以估算黄河内蒙古段的河冰冰层厚度, 该方法虽能较好地反映河冰的生消趋势, 却难以体现冰厚的空间分布。近年来, 探地雷达^[12-14]、机载雷达^[15]在黄河冰厚监测中的应用, 极大地促进了河冰研究的发展, 但仍难以进行大范围的河冰厚度时空监测。遥感技术的飞速发展, 使得以非接触手段进行大范围冰厚监测成为可能^[16], 遥感估算冰厚主要采用光学遥感、被动微波遥感和主动微波遥感相结合等方法开展^[17]。光学遥感法一般基于海冰厚度反照率反演模型, 在渤海海冰研究中取得了一系列进展^[18-21], 由于河冰的类型比海冰复杂得多, 不同厚度的河冰光谱曲线规律性较差, 且光学遥感数据易受天气影响, 限制了光学遥感法在河冰厚度反演中的应用。被动微波遥感法一般基于不同频率的亮温差来进行冰厚的反演, 由于当前被动微波遥感数

收稿日期: 2021-09-10; 修订日期: 2022-02-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(51969020); 国家重点研发计划项目(2018YFC1508401); 2018 内蒙古自治区应用技术与开发资金项目(201802104); 国家自然科学基金项目(52069020)资助

作者简介: 刘斌, 硕士研究生, 主要从事河冰遥感监测研究. E-mail: liubin_rs@163.com

通信作者: 冀鸿兰, 教授, 主要从事河冰水力学和冰工程防灾减灾研究. E-mail: honglanji@sina.com

据空间分辨率较低,多应用在海冰或湖冰厚度的研究中^[22-24]。主动微波遥感法一般通过分析星载雷达参数与冰厚的相关性,进而建立经验模型反演冰厚,由于主动微波遥感数据拥有媲美光学遥感数据的空间分辨率,且不受天气影响,有利于进行全天候、全天时的冰情监测,在加拿大河流的冰厚反演中应用较多^[25-27],但国内相关研究极少,因此探究主动微波遥感法在黄河冰厚反演中的可行性尤为迫切。

Sentinel-1 遥感数据作为目前使用最广泛的免费星载合成孔径雷达(SAR)数据,对河冰厚度的反演有巨大潜力。本文基于黄河凌汛期野外冰厚实测数据,分析 Sentinel-1 雷达特征参数与河冰厚度之间的相关性,并建立冰厚反演经验模型,最后对黄河凌汛期冰厚进行反演,分析冰厚的时空分布特

征,并对冰储量进行估算,以期为黄河内蒙古段防凌减灾提供参考依据。

1 研究区及数据来源

1.1 研究区概括

黄河内蒙古段地处黄河流域最北端,介于 $39^{\circ}\sim 41^{\circ}\text{N}$, $106^{\circ}\sim 112^{\circ}\text{E}$ 之间,海拔在1 000 m左右,2016—2021年5个凌汛期平均气温为 -6.5°C ,依次流经石嘴山、巴彦高勒、三湖河口、包头及头道拐5个水文站。因其地理位置特殊、气象条件复杂,导致凌汛期封开河逆序。凌汛期一般从11月下旬开始,到翌年3月中下旬结束,历时100余天。本研究区范围选取包头与头道拐水文站之间(图1),该河段为弯曲型河段,易发生卡冰结坝现象^[28]。

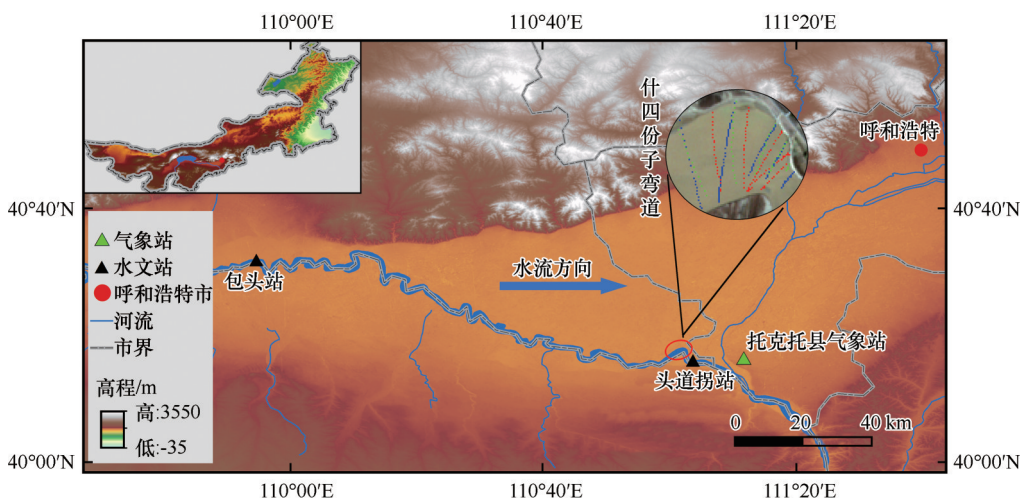


图1 研究区概况

Fig. 1 Overview map of the study area

1.2 数据来源

1.2.1 野外实测数据

野外实测地点位于头道拐水文站附近的什四份子弯道处,该河段稳封期河冰冰层较厚,便于野外踏勘,在此进行连续三年的河冰厚度信息采集,采集日期分别为2019年1月9日至13日、2020年1月16日至20日、2021年1月12日至16日。依照中华人民共和国水利行业标准《河流冰情观测规范》进行断面布置,勘测过程中每隔10~20 m布设1个采样点,进行人工钻孔测量冰厚,共选取15个断面合计300多个采样点(图1中断面按年份顺序分别用红、蓝、绿三种颜色进行标注),出于安全考虑,未对清沟附近冰厚进行人工测量。利用RTK采集冰厚采样点的地理坐标,便于后期与遥感影像进行空

间匹配;利用量冰尺测量采样点的河冰厚度,有积雪的同时测量雪深。

1.2.2 卫星遥感数据

Sentinel-1 是欧空局进行的哥白尼计划中的第一个任务,该任务是由A、B两颗卫星在同一轨道平面组成的星座。A星和B星分别于2014年4月和2016年4月发射,单星重返周期为12天,双星组合重返周期为6天,均载有波长约5.6 cm的C波段合成孔径雷达,可提供全天候、全天时的高分辨率双极化产品。Sentinel-1 雷达影像包含强度与极化信息,用于分析星载雷达特征参数与河冰厚度的相关性。

Sentinel-2 是欧空局进行的哥白尼计划中的第二个任务,该任务目前也是由A、B两颗卫星在同一

轨道平面组成的星座。A星和B星分别于2015年6月和2017年3月发射,单星重返周期为10天,双星组合重返周期为5天,均携带多光谱成像仪,可覆盖13个光谱波段,影像幅宽为290 km,空间分辨率最高可达10 m。各波段详细信息见表1。Sentinel-2光学影像在本文用于提取黄河的主河道。

表1 Sentinel-2各波段详细参数

Table 1 Sentinel-2 detailed parameters of each waveband

波段	中心波长/ μm	分辨率/m	波段	中心波长/ μm	分辨率/m
B1	0.443	60	B8	0.842	10
B2	0.490	10	B8A	0.865	20
B3	0.560	10	B9	0.945	60
B4	0.665	10	B10	1.375	60
B5	0.705	20	B11	1.610	20
B6	0.740	20	B12	2.190	20
B7	0.783	20			

本文选取研究区2016—2021年5个凌汛期的57景Sentinel-1雷达影像及对应精密轨道数据、5景Sentinel-2光学影像。5景Sentinel-2光学影像均在凌汛期前采集,采集时间分别为2016年10月27日、2017年10月31日、2018年10月26日、2019年11月10日、2020年11月4日。卫星遥感数据均来源于欧空局官网(European Space Agency, ESA, [\[hub.copernicus.eu/dhus/#/home/\]\(http://hub.copernicus.eu/dhus/#/home/\)\)。](https://sci-</p></div><div data-bbox=)

1.2.3 气象数据

研究区的凌汛期日均气温数据来自黄河网(<http://www.yrcc.gov.cn/>),降雨和降雪数据来自托克托县气象站。气象数据的详细信息见图2,以2019—2020年凌汛期为例。已有研究表明,雷达特征参数对气温、降水变化较为敏感,故需获取气温和降水数据以保证研究的准确性^[27]。

河冰生消过程与气温息息相关,尤其是累积冻冰度日(cumulative freezing degree day, CFDD)与累积融冰度日(cumulative thawing degree day, CTDD)等参数,CFDD和CTDD分别为日均气温低于和高于冰点的度数在一定时间范围的累积^[29],计算公式定义如下:

$$\text{CFDD} = \sum_{d_i}^d (T_f - T_a)$$
(1)

$$\text{CTDD} = \sum_{d_i}^d (T_a - T_f)$$
(2)

$$\theta = \text{CFDD} - 3 \times \text{CTDD}$$
(3)

式中:CFDD和CTDD分别是累积冻冰度日与累积融冰度日($^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$); θ 为累积冻冰度日与3倍累积融冰度日的差值($^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$); T_a 为研究区日均气温($^{\circ}\text{C}$); T_f 为冰冻结和融化的临界温度($^{\circ}\text{C}$),本文采用 -5°C ^[30-31]; d_s 和 d_e 分别为黄河内蒙古段凌汛期的开始和结束日期。

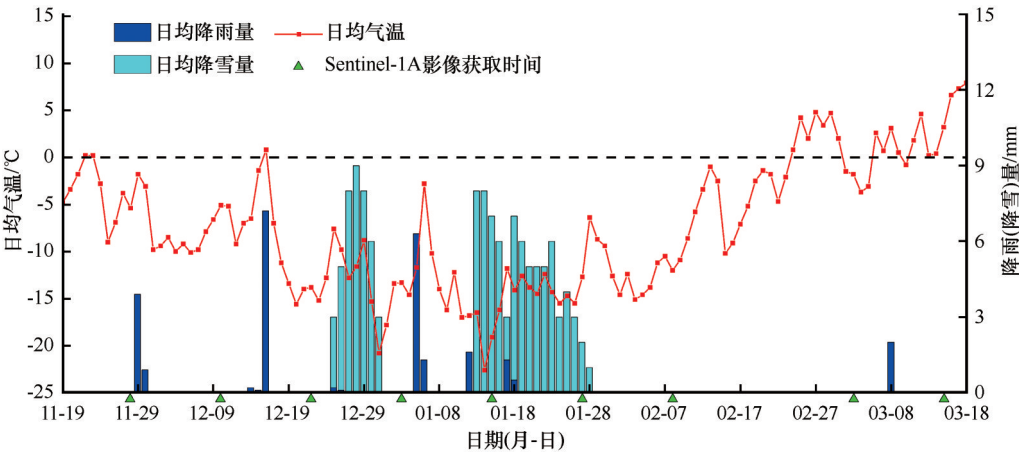


图2 2019—2020年黄河内蒙古段凌汛期气象信息及雷达影像获取时间

Fig. 2 Meteorological information and radar image acquisition time during the ice flood season of the Inner Mongolia section of the Yellow River from 2019 to 2020

2 研究方法

2.1 基于Sentinel-2的河道边界提取

2.1.1 预处理

大气校正的目的是消除大气和光照等因素对

地物反射的影响,获得地物真实的表面反射率。从欧空局获取的Sentinel-2影像L1C级数据是已完成辐射校正与几何校正的大气顶层(TOA, top of atmosphere)反射率产品,需对其进行大气校正得到大气底层(BOA, bottom of atmosphere)反射率产品,

以表征地物真实的光谱特性。SNAP(Sentinel application platform)软件的大气校正插件 sen2cor 结合了用于执行大气校正的先进技术,这些技术是针对 Sentinel-2 制定的,可对 L1C 级数据进行大气、地形和卷云校正,得到 L2A 级数据。

2.1.2 黄河主河道提取

为获取黄河主河道边界,需剔除陆地区域,消除陆地对河冰信息提取的干扰。利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)可以突出光学影像中的水体,且能够抑制植被信息^[32],计算公式如下^[33]:

$$\text{MNDWI} = (\text{Green} - \text{SWIR}) / (\text{Green} + \text{SWIR}) \quad (4)$$

式中:Green 为绿色波段的像素值;SWIR 为短波红外波段的像素值。

然后通过目视解译选择合适的阈值,使水体与陆地区分明显,对经过处理的影像进行二值化及矢量化处理。将初步获取的河道矢量与 Sentinel-2 影像中的真实水陆分界线对比,对分界线进行精细化修改,误差控制在一个像素以内,即小于 10 m,最终获得黄河主河道边界。

2.2 基于 Sentinel-1 的河冰厚度反演及验证

2.2.1 预处理

(1) 后向散射系数提取

采用 SNAP 软件的流程图工具对 Sentinel-1 影像的 SLC 数据依次进行轨道校正、去噪噪声、辐射定标、Deburst、多视、极化滤波、地形校正及分贝化处理,最终获得 VV 与 VH 两种极化方式的后向散射系数。地形校正采用美国宇航局(National Aeronautics and Space Administration, NASA, <http://srtm.csi.cgiar.org/srtmdata/>)发布的空间分辨率为 30 m 的 SRTM DEM 数据。

(2) 极化特征参数提取

利用 PolSARpro 软件对 Sentinel-1 影像的 SLC 数据依次进行轨道校正、辐射定标、Deburst、生成极化矩阵、地形校正、极化滤波及极化分解处理,获取 4 种极化特征参数: α 、极化熵、 λ_1 、 λ_2 。 α 描述了探测目标内部的自由度,说明了目标平均散射的“类型”^[34]。极化熵较好地反映了目标散射的随机性^[35]。 λ_i 表示极化相干矩阵的第 i 个特征值^[36]。

2.2.2 冰厚反演

本研究采用统计回归方法建立冰厚反演模型,主要包括 3 个步骤,分别是:相关性分析、模型建立、模型验证。首先绘制雷达特征参数与实测冰厚的散点图,并计算雷达特征参数与实测冰厚之间的

Pearson 相关系数,分析雷达特征参数与冰厚的相关性,公式如下:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\left[\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (5)$$

式中: r 为 Pearson 相关系数; \bar{x} 为变量 x 的均值; \bar{y} 为变量 y 的均值。

选择与冰厚相关性最高的雷达特征参数建立线性回归模型,从经时空匹配的野外实测冰厚数据中随机选取 2/3 作为模型构建数据,用于确定模型的待定系数,其余 1/3 作为模型的验证数据,采用均方根误差 RMSE、平均相对误差 MRE、平均绝对误差 MAE 等表征模型精度。

2.2.3 冰储量估算

根据反演的河冰厚度可对研究区的冰储量进行估算,如公式(6):

$$V = \sum_{i=1}^N A \cdot h_i \quad (6)$$

式中: V 为冰储量(m^3); A 为遥感影像中单个像元表示的地面面积(m^2); h_i 为遥感影像所反演的冰厚(m)。

3 结果与分析

3.1 黄河主河道提取结果

研究区 2016—2021 年 5 个凌汛期前的黄河主河道如图 3 所示,该河段为弯曲型河段,弯多且弯曲系数大,主河道边界年际变化显著。整体来看,凌汛期前主河道宽度逐年增大,2016—2017 年变化最为显著;弯道数量呈减小趋势,河道摆动幅度减小并逐步趋于稳定。

3.2 冰厚反演模型建立及验证

以往的研究通常采用归一化技术来限制卫星轨道不同所引起的雷达特征参数差异^[37],本文在每个凌汛期均采用同一轨道的影像进行研究。雷达特征参数与实测冰厚的散点图如图 4 所示,2020 年各雷达特征参数与实测冰厚的一致性均较差,分布比较散乱。这是由于 2020 年在冰期野外踏勘期间,试验区河冰冰层均被较厚的积雪覆盖,且期间有降雨现象,冰层上方形成了湿雪,影响了各雷达特征参数与冰厚之间的相关性。2019 年、2021 年在冰期野外踏勘期间,冰层上无积雪。雷达特征参数与实测冰厚的 Pearson 相关系数见表 2,对于无湿雪覆盖的冰而言,VV 极化后向散射系数与河冰厚度的相关性最高, λ_1 次之。

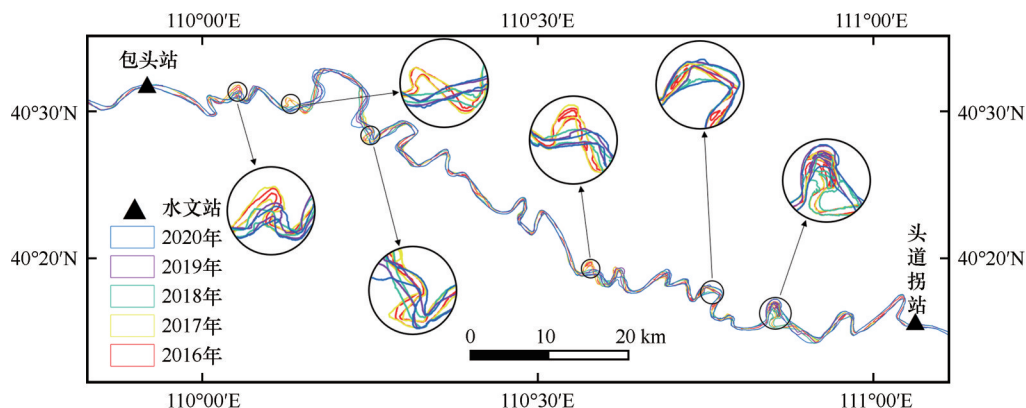


图3 2016—2021年5个凌汛期前的黄河主河道

Fig. 3 The main channels of the Yellow River before the 5 ice flood seasons from 2016 to 2021

两种基本的数值模拟方法通常被用来估算冰层厚度:基于冰记录的随机技术和基于物理冰生长和消融原理的参数化方法^[38]。这两种模型都需要大量的参数输入,主要是环境数据^[39],却都无法提供冰厚的空间分布信息。本文选择与河冰厚度相关性最高的VV极化后向散射系数建立冰厚反演模型,在雷达特征参数与河冰厚度的相关性分析中,已将SAR影像的各特征参数与实测冰厚数据进行了时空匹配,基于Sentinel-1 VV极化后向散射系数和野外实测冰厚的反演模型如图5所示,得到公式(7):

$$y = 5.036x + 122.923 \quad (7)$$

冰层的后向散射系数每增加1 dB,冰层的厚度增加5.036 cm,所拟合线性模型的调整 R^2 值为0.657,适用于10~100 cm的冰厚反演,10 cm以下的冰厚认为是水体或薄冰。图6表明验证数据的均方根误差RMSE为9.82 cm,平均相对误差MRE为13.46%,平均绝对误差MAE为8.26 cm。

3.3 冰厚反演结果

图7显示了2019—2020年黄河凌汛期包头至头道拐水文站河段的冰厚反演结果,河冰厚度平均值见于表3。研究区的河冰平均厚度范围为6.9~58.2 cm,2019年11月16日为凌汛期前3天,此时河道以水体为主,弯道处存在少量薄冰;2019年11月中下旬至2020年1月初为河冰生长期,河冰平均厚度从6.9 cm增加到58.2 cm,清沟逐步减小;2020年1月初至2月初为河冰完全冻结期,河冰平均厚度基本稳定在55 cm左右;2020年2月初至3月中旬为河冰消融期,河冰平均厚度从53.2 cm减小到16.1 cm。表3显示,在河冰生长与消融期,气温参数 θ 与河冰厚度的增减一致,较好地反映了河冰的生消变化,但是气温参数 θ 无法判断河冰完全冻结期。

图8显示了2019—2020年黄河凌汛期什四份子弯道处的冰厚反演结果。河冰生长期,弯道处首先发生冻结,凹岸早于凸岸;河冰完全冻结期,弯道处冰厚分布基本稳定,凸岸冰厚相对较小,冰厚在30~50 cm居多,凹岸冰厚相对较大,冰厚在70~80 cm居多,清沟大小略有变化;河冰消融期,凸岸融化早于凹岸。冰层下测速后发现弯道处的主流在凸岸侧,流速较大,因此冰底冲刷侵蚀严重,水流带来的浮冰和冰花无法平稳堆积;由于弯道独特的地形,大量冰盘、浮冰及冰花向凹岸移动并堆积,且凹岸流速较小冰盘并置,造成凹岸冰层较厚。

图9显示了2016—2021年5个黄河稳封期的平均冰厚、平均封冻面积及平均气温,2016—2019年各稳封期平均冰厚呈增大趋势,分别为40.4 cm、49.3 cm、49.7 cm、55.7 cm,同时期平均封冻面积也持续增大,应该是由同时期平均气温逐年下降所致;2019—2021年稳封期由于平均气温上升,导致平均冰厚减小,而平均封冻面积不降反增,可能是由于该河段河势、水力等条件变化所致。

3.4 冰储量估算结果

本文冰储量通过河冰厚度与封冻面积的乘积计算,冰储量估算的误差可通过误差传播公式确定,河冰厚度反演的均方根误差 Δh 为9.82 cm,封冻面积 A 的误差主要由冰水分类的精度确定,此处不做考虑,因此冰储量估算的中误差为 $\Delta V = A \cdot \Delta h = 9.82 \times 10^{-2} A \text{ m}^3$,下面对年内冰储量与年际冰储量进行分析。

图10显示了2019—2020年黄河凌汛期包头至头道拐水文站河段的冰储量,河冰生长期,随气温降低,2019年11月16日至2020年1月3日冰储量从 $(280 \pm 162) \times 10^4 \text{ m}^3$ 增加到 $(2437 \pm 412) \times 10^4 \text{ m}^3$;河冰

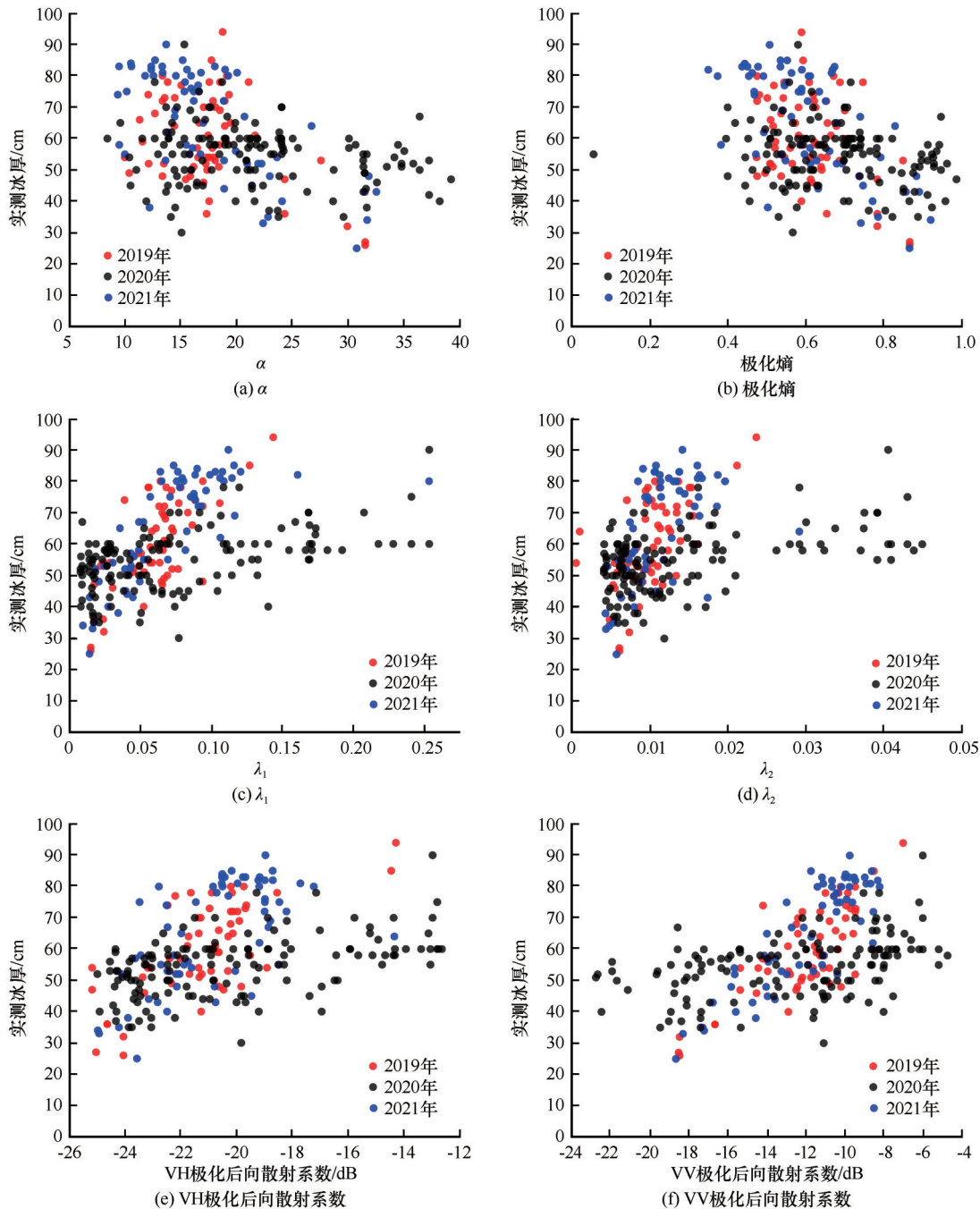


图4 极化特征参数与实测冰厚的散点图

Fig. 4 Scatter plot of polarization characteristic parameters and measured ice thickness

表2 极化特征参数与实测冰厚的 Pearson 相关系数

年份	α	极化熵	λ_1	λ_2	σ_{VH}	σ_{VV}
2019, 2020, 2021	-0. 41280	-0. 39343	0. 46338	0. 29954	0. 42380	0. 51639
2019, 2021	-0. 54579	-0. 53318	0. 72409	0. 58233	0. 64799	0. 81077

完全冻结期,冰储量无较大变化;河冰消融期,气温开始回暖,2020 年 2 月 8 日至 3 月 15 日冰储量从 $(2\,238\pm413)\times10^4\,\text{m}^3$ 减小到 $(474\pm289)\times10^4\,\text{m}^3$ 。2016—2021 年 5 个凌汛期的冰储量变化如图 11 所

示,各年凌汛期内冰储量随时间呈先增加,后保持相对稳定,最后减小的整体变化特征,这与凌汛期的气温变化是相符的,2016—2021 年各年度冰储量逐年增加,各年度稳封期平均冰储量分别为 $1\,070\times10^4$ 、

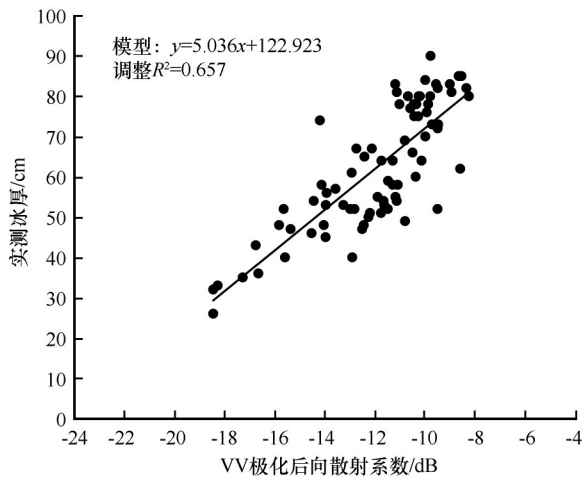


图5 冰厚反演模型

Fig. 5 Ice thickness inversion model

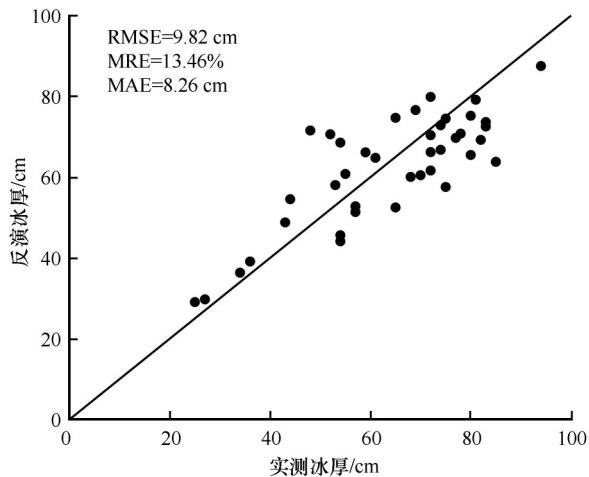


图6 冰厚反演结果

Fig. 6 Ice thickness inversion results

$1\,882\times10^4$ 、 $2\,124\times10^4$ 、 $2\,335\times10^4$ 、 $2\,500\times10^4\text{ m}^3$,结合图9可以发现2016—2020年各稳封期平均气温持续下降,与同时期平均冰储量变化相符;2019—2021年稳封期平均气温升高、平均冰厚减小,而平均封冻面积增大,导致同时期平均冰储量不仅没有减小,反而有所增加。

4 讨论

一般来说,雷达后向散射系数的大小取决于成

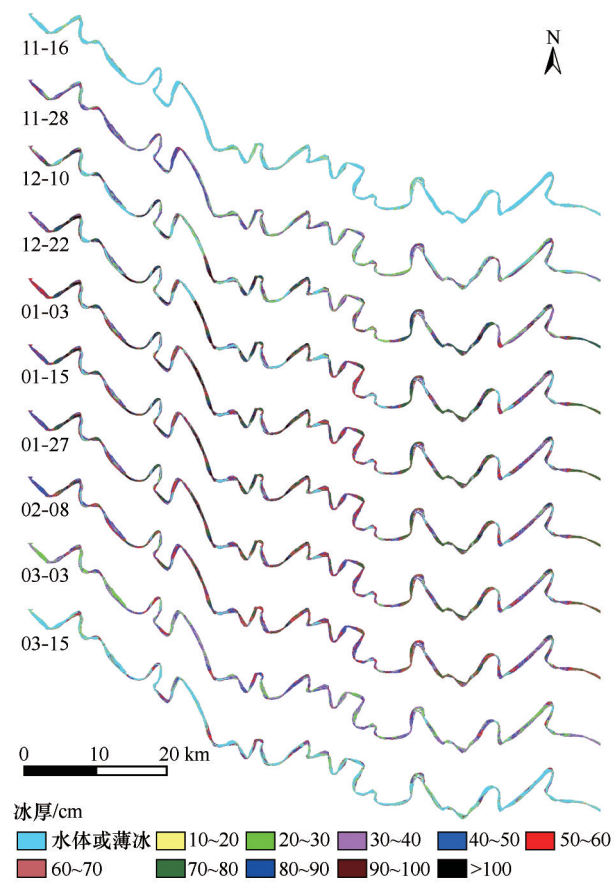


图7 2019—2020年黄河凌汛期冰厚反演结果

Fig. 7 Ice thickness inversion results of the Yellow River during the ice flood season from 2019 to 2020

像目标的介电特性、散射特性和传感器特性^[40]。材料的介电特性是由其介电常数表征的。对于淡水冰来说,这个常数几乎不随冰温而变化^[41],与海冰不同^[42],但覆盖雪的含水量对其影响较大^[43]。表4总结了淡水冰研究中几种重要物质的介电常数^[40,44-47]。电磁波在介质中的传播过程所引起的电磁损耗由介质的介电常数决定。当介质的介电常数较大时,电磁损耗高,穿透深度小,例如,液态水是一种高损耗介质,当雪或冰中的水分含量很高时,电磁波的穿透深度就会减小,对于5 GHz的C波段电磁波而言,积雪中仅5%的体积含水量就会使穿透深度减小到10 cm左右^[48]。相反,低介电常数意味着低水分含量,例如,淡水冰是一种低损耗

表3 2019—2020年黄河内蒙古段凌汛期冰厚与气温参数 θ

Table 3 Ice thickness and air temperature parameters θ of the Inner Mongolia section of the Yellow River during the ice flood season from 2019 to 2020

日期(月-日)	11-16	11-28	12-10	12-22	01-03	01-15	01-27	02-08	03-03	03-15
冰厚/cm	6.9	35.4	47.8	52.2	58.2	56.4	55.2	53.2	36.6	16.1
$\theta/(^{\circ}\text{C}\cdot\text{d})$	—	-50.1	-29	-4.3	94.9	204.2	312.3	393.6	162.9	-45.6

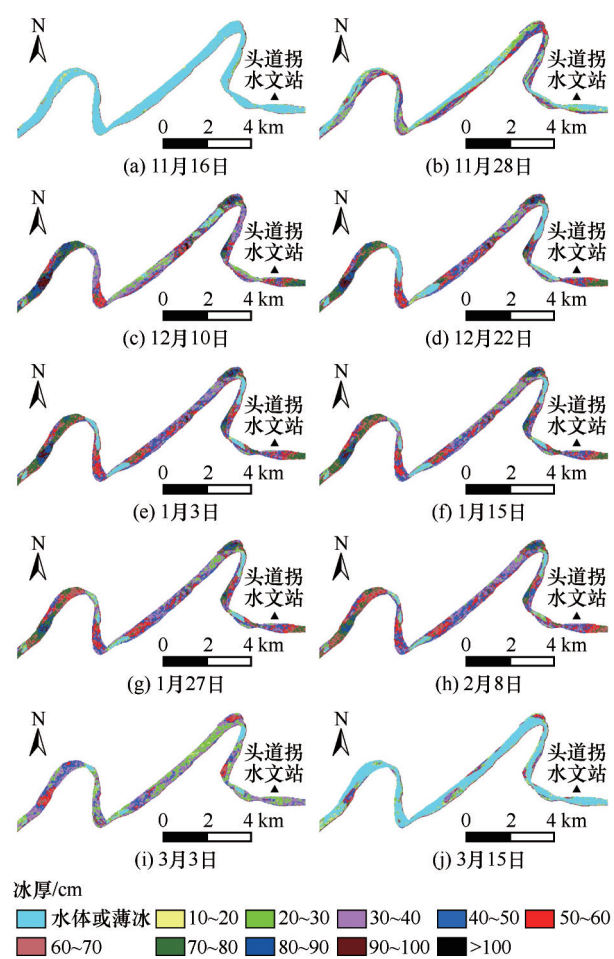


图8 2019—2020年黄河凌汛期什份子弯道冰厚反演结果
Fig. 8 Ice thickness inversion results of Shisifenzi Bend of the Yellow River during the ice flood season from 2019 to 2020

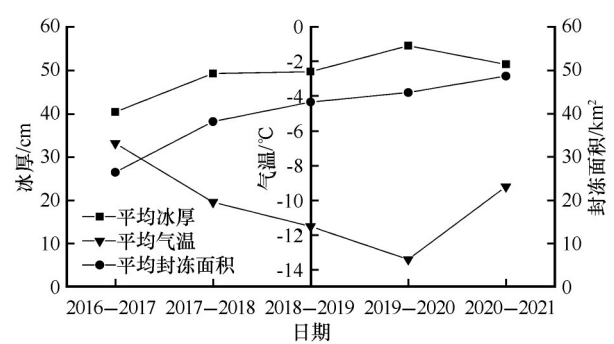


图9 2016—2021年5个黄河稳封期平均冰厚、平均封冻面积及平均气温
Fig. 9 Average ice thickness , average frozen area and average temperature of the Yellow River during the five frozen periods from 2016 to 2021

介质,频率在1~10 GHz下的电磁波,对淡水冰的穿透深度从100 m到10 m^[48],这给微波探测冰物候及冰厚变化提供了可能性^[49]。

河冰的散射特性主要由两方面决定:表面散射和体积散射。表面散射以镜面反射和漫反射为主。

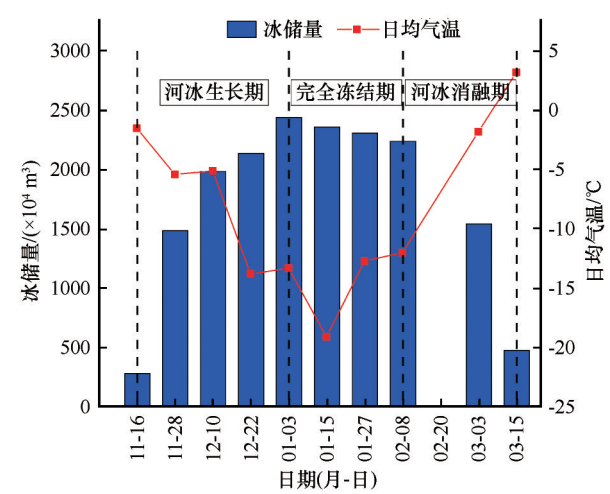


图10 2019—2020年凌汛期冰储量
Fig. 10 Ice storage during the ice flood season from 2019 to 2020

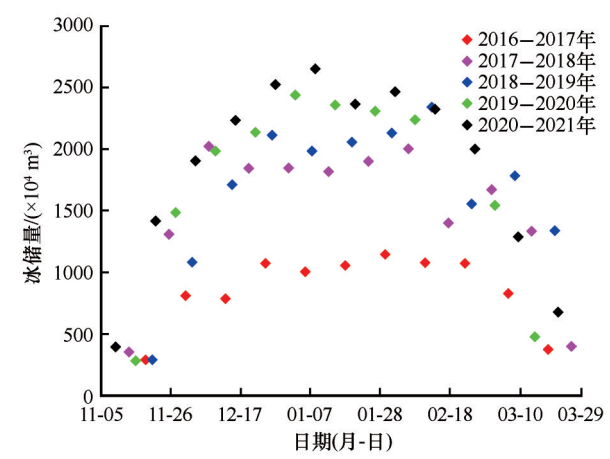


图11 2016—2021年5个凌汛期的冰储量
Fig. 11 Ice storage of 5 ice flood seasons from 2016 to 2021

表4 淡水冰研究中重要物质的介电常数 Table 4 Dielectric constants of important substances in freshwater ice research		
介质	介电常数	来源
空气	1	Evans ^[44] (1965)
淡水冰-有气泡	2.99	Cooper等 ^[45] (1976)
淡水冰-无气泡	3.17	Evans(1965)
干雪	1.2~2.0	Hallikainen等 ^[46] (1986)
湿雪	>35	Hall ^[47] (1998)
水	81	Henderson等 ^[40] (1998)

镜面反射发生在较为光滑的冰表面,在微波的入射波长尺度内,可认为是光滑的。光滑潮湿的冰面(即冰层上有积水)和平静的水面,都会远离微波入射方向处镜面反射入射微波的能量,因此后向散射响应较弱,雷达图像中显示较暗。相反,漫反射发生在相对粗糙的表面,在所有方向上几乎均匀的反

射微波,并将其中一部分入射能量反射回传感器,因此一般粗糙的冰面在雷达图像中会显得相对明亮。当入射波穿透冰面或干燥的薄雪,并在冰层内的介电不连续处重复反射时,就会发生体积散射,这些不连续处物质的尺寸需与入射微波的波长相似^[43],河冰中影响体散射的主要因素有:裂缝、气泡和杂质,张邀丹等^[50]对黄河冰内的气泡已有较为深入的研究。也有研究表明,微波在管状气泡的前向散射与冰水界面的高介电对比度相结合,会发生一种“双反射机制”,进而产生较强的雷达回波^[51],而河冰的电磁辐射传输建模研究发现冰水界面对雷达后向回波贡献较大^[52]。

合成孔径雷达的传感器特性主要由其波长、极化方式和入射角决定。前两者对于传感器来说是固定的,这里主要讨论入射角的影响。星载雷达通过改变不同的微波入射角进而以短于重返周期的时间间隔对同一地理区域成像,增强其动态监测的潜力。已有研究发现,同一目标的后向散射信号随其微波入射角的变化而变化^[53]。

本文仅从星载雷达特征参数与河冰厚度的相关性出发,探究河冰厚度反演的有效手段,反演结果虽较好地反映了河冰生消变化,但河冰空间分布的合理与准确性仍有待商榷。关于本次研究,以下几点需要重点思考:(1)出于野外工作的安全考虑,冬季对河冰厚度信息进行采集时,河冰已生长了一段时间,厚度基本在 30 cm 以上,而以采样数据所建立的冰厚反演模型是否也符合河冰生长初期冰厚的变化规律。(2)河冰类型复杂多样,其内部结构也相差甚远,采用单一方法的河冰厚度反演可能会在部分类型的河冰上出现较大误差。如果先对河冰类型进行判断、再赋以经验厚度值,结合模型反演结果综合判断河冰厚度,有助于进一步提升冰厚反演精度。(3)河冰厚度的变化与流量、水位、气温、降水等因素息息相关,将相关水文、气象因素与遥感模型相结合,有助于更好地了解河冰生消机理。(4)目前,对河冰散射机制的研究还不够完善,这也限制了冰厚反演精度的提高。河冰生消比海冰、湖冰复杂得多,受水动力条件、热力学条件、河道形态等多因素共同控制,需进一步开展试验研究与理论分析,为黄河冰凌探测提供科学的理论依据。

5 结论

本文基于黄河凌汛期野外实测冰厚数据,分析

Sentinel-1 雷达特征参数与河冰厚度的相关性,并建立冰厚反演模型,估算黄河凌汛期的河冰厚度及冰储量变化,得到如下结论:

(1)通过分析雷达特征参数与实测冰厚的相关性,发现 VV 极化后向散射系数与黄河冰厚相关性最高, λ_1 次之,Pearson 相关系数分别为 0.81077、0.72409。

(2)经验证,基于 VV 极化后向散射系数建立的冰厚反演经验模型的均方根误差为 9.82 cm,平均相对误差为 13.46%,平均绝对误差为 8.26 cm。

(3)2019—2020 年凌汛期研究区河冰平均厚度范围为 6.9~58.2 cm,2019 年 11 月 16 日为凌汛期前 3 天,此时河道以水体为主,弯道处存在少量薄冰;2019 年 11 月中下旬至 2020 年 1 月初为河冰生长期,河冰平均厚度从 6.9 cm 增加到 58.2 cm,清沟逐步减小;2020 年 1 月初至 2 月初为河冰完全冻结期,河冰平均厚度基本稳定在 55 cm 左右;2020 年 2 月初至 3 月中旬为河冰消融期,河冰平均厚度从 53.2 cm 减小到 16.1 cm。

(4)河冰生长期,随气温降低,2019 年 11 月 16 日至 2020 年 1 月 3 日冰储量从 $(280 \pm 162) \times 10^4 \text{ m}^3$ 增加到 $(2\,437 \pm 412) \times 10^4 \text{ m}^3$;河冰完全冻结期,冰储量无较大变化;河冰消融期,气温开始回暖,2020 年 2 月 8 日至 3 月 15 日冰储量从 $(2\,238 \pm 413) \times 10^4 \text{ m}^3$ 减小到 $(474 \pm 289) \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

(5)2016—2021 年各年度内冰储量随时间呈先增加,后保持相对稳定,最后减小的整体变化特征,2016—2021 年的年际冰储量逐年增加。

参考文献(References):

- [1] Chu T, Lindenschmidt K E. Integration of space-borne and air-borne data in monitoring river ice processes in the Slave River, Canada [J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 181: 65-81.
- [2] Zhai Yongguang, Zhang Xin, Ji Honglan, et al. Study on ice-water classification in Inner Mongolia Reach of the Yellow River based on remote sensing images[J]. Arid Land Geography. [翟涌光, 张鑫, 冀鸿兰, 等. 基于遥感影像的黄河内蒙古段冰-水分类研究[J]. 干旱区地理: 1-16 [2021-11-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/65.1103.X.20211021.1138.005.html>.]
- [3] Zhao Shuixia, Li Changyou, Li Chao, et al. Processes of river ice and ice-jam formation in Shensifenzi Bend of the Yellow River[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(3): 351-358. [赵水霞, 李畅游, 李超, 等. 黄河什份子弯道河冰生消及冰塞形成过程分析[J]. 水利学报, 2017, 48(3): 351-358.]
- [4] Li Chao, Li Changyou, Zhao Shuixia, et al. Interpretation and analysis of river ice process based on remote sensing data[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,

- 2016, 36(3): 52-56. [李超, 李畅游, 赵水霞, 等. 基于遥感数据的河冰过程解译及分析[J]. 水利水电科技进展, 2016, 36(3): 52-56.]
- [5] Luo Hongchun, Ji Honglan, Gao Guoming, et al. Application of airborne radar in ice thickness measurement during stable freezing period of Yellow River[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2020, 40(3): 44-49. [罗红春, 冀鸿兰, 郜国明, 等. 机载雷达在黄河稳封期冰厚测量中的应用[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(3): 44-49.]
- [6] Wang Tao, Yu Hongjing, Guo Xinlei, et al. Numerical modeling of typical ice processes in the Inner Mongolia reach of the Yellow River[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2021, 52(5): 535-545. [王涛, 余弘婧, 郭新蕾, 等. 黄河内蒙古河段典型凌情过程模拟[J]. 水利学报, 2021, 52(5): 535-545.]
- [7] Wang Enliang, Yu Jun. Analysis on the advantages and disadvantages of several common ice thickness observation methods[J]. *Hydro Science and Cold Zone Engineering*, 2019, 2(4): 48-54. [汪恩良, 于俊. 几种常见冰厚观测方法的优劣分析[J]. 水利科学与寒区工程, 2019, 2(4): 48-54.]
- [8] Stefan J. Über die Theorie der Eisbildung, insbesondere über die Eisbildung im Polarmeere[J]. *Annalen der Physik*, 1891, 278(2): 269-286.
- [9] Shen H T, Yapa P D. A unified degree-day method for river ice cover thickness simulation[J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 1985, 12(1): 54-62.
- [10] Lian Jijian, Zhao Xin. Radiation degree-day method for predicting the development of ice cover thickness under the hydrostatic and non-hydrostatic conditions[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, 42(11): 1261-1267. [练继建, 赵新. 静动水冰厚生长消融全过程的辐射冰冻度-日法预测研究[J]. 水利学报, 2011, 42(11): 1261-1267.]
- [11] Wang Jun, Hou Zhixing. Simulation of ice cover thickness in Inner Mongolia section of Yellow River[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2021, 19(5): 921-929. [王军, 侯智星. 黄河内蒙古段冰盖厚度模拟[J]. 南水北调与水利科技, 2021, 19(5): 921-929.]
- [12] Cao Xiaowei, Li Chunjiang, Yan Xiaofei, et al. Measuring ice thickness around the curve and piers in the Yellow River with ground penetrating radar[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2016, 14(6): 91-95. [曹晓卫, 李春江, 颜小飞, 等. 利用探地雷达探测黄河弯道及桥墩周围冰层厚度[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(6): 91-95.]
- [13] Liu Xiaofeng. Application of radar technology in ice thickness measuring[J]. *Journal of China Hydrology*, 2016, 36(4): 66-69. [刘晓凤. 雷达技术在水文冰厚测量上的应用试验[J]. 水文, 2016, 36(4): 66-69.]
- [14] Zhang Baosen, Zhang Fangxiu, Liu Ziyang, et al. Field experimental study of the characteristics of GPR images of Yellow River ice[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2017, 15(1): 121-125. [张宝森, 张防修, 刘滋洋, 等. 黄河河道冰层雷达波特征图谱的现场实验研究[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(1): 121-125.]
- [15] Liu Hui, Ji Honglan, Mou Xianyou, et al. Experimental study on Yellow River ice thickness monitoring test based on UAV Radar technology[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2020, 18(3): 217-224. [刘辉, 冀鸿兰, 牟献友, 等. 基于无人机载雷达技术的黄河冰厚监测试验[J]. 南水北调与水利科技, 2020, 18(3): 217-224.]
- [16] Li Haojie, Li Hongyi, Wang Jian, et al. Advances in remote sensing of river ice[J]. *Advances in Earth Science*, 2020, 35(10): 1041-1051. [李浩杰, 李弘毅, 王建, 等. 河冰遥感监测研究进展[J]. 地球科学进展, 2020, 35(10): 1041-1051.]
- [17] Murfitt J, Duguay C R. 50 years of lake ice research from active microwave remote sensing: Progress and prospects[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 264: 112616.
- [18] Xie Feng, Gu Wei, Yuan Yi, et al. Estimation of sea ice resources in Liaodong Gulf using remote sensing[J]. *Resources Science*, 2003, 25(3): 17-23. [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.]
- [19] Yuan S, Gu W, Xu Y, et al. The estimate of sea ice resources quantity in the Bohai Sea based on NOAA/AVHRR data[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2012, 31(1): 33-40.
- [20] Yan Yu, Xu Li, Xu Yingjun, et al. The estimate of sea ice resources in the Bohai Sea based on MODIS data[J]. *Resources Science*, 2017, 39(11): 2166-2175. [颜钰, 徐粒, 许映军, 等. 基于 MODIS 的渤海海冰资源量估算[J]. 资源科学, 2017, 39(11): 2166-2175.]
- [21] Wang Zhiyong, Wang Lihua, Liu Jian, et al. Extraction of sea ice element information in Liaodong Bay of the Bohai sea based on multi-source medium and high resolution remote sensing data[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2021, 30(1): 174-182. [王志勇, 王丽华, 刘健, 等. 基于多源中高分辨率遥感数据提取渤海辽东湾海冰要素信息[J]. 自然灾害学报, 2021, 30(1): 174-182.]
- [22] Liu Ziyuan, Pang Xiaoping, Zhao Xi, et al. Estimation of thin ice thickness in the ross ice shelf polynya based on AMSR-E data[J]. *Geospatial Information*, 2018, 16(6): 54-57. [刘紫媛, 庞小平, 赵羲, 等. 基于 AMSR-E 的冬季罗斯冰架冰间湖薄冰冰厚反演[J]. 地理空间信息, 2018, 16(6): 54-57.]
- [23] Kang K K, Duguay C R, Lemmetyinen J, et al. Estimation of ice thickness on large northern lakes from AMSR-E brightness temperature measurements[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 150: 1-19.
- [24] Wang Guanxin, Zhang Tingjun, Li Xiaodong, et al. Detecting changes of ice phenology using satellite passive microwave remote sensing data in Qinghai Lake[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2021, 43(1): 296-310. [汪关信, 张廷军, 李晓东, 等. 利用被动微波探测青海湖冰物候变化特征[J]. 冰川冻土, 2021, 43(1): 296-310.]
- [25] Lindenschmidt K E, Syrenne G, Harrison R. Measuring ice thicknesses along the Red River in Canada using RADARSAT-2 satellite imagery[J]. *Journal of Water Resource and Protection*, 2010, 2(11): 923.
- [26] Mermoz S, Allain-Bailhache S, Bernier M, et al. Retrieval of river ice thickness from C-band PolSAR data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 52(6): 3052-3062.
- [27] Zhang F, Li Z, Lindenschmidt K E. Potential of RADARSAT-2 to improve ice thickness calculations in remote, poorly accessible areas: a case study on the Slave River, Canada[J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2019, 45(2): 234-245.
- [28] Luo Hongchun, Ji Honglan, Gao Guoming, et al. Study on the characteristics of flow and ice jam in Shisifenzi bend in the Yellow River during the freeze-up period[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020, 51(9): 1089-1100. [罗红春, 冀鸿兰, 郜国明, 等. 黄河什四份子弯道冰期水流及冰塞特征研究[J]. 水利学报, 2020, 51(9): 1089-1100.]
- [29] Zhang N, Wu Y, Zhang Q. Forecasting the evolution of the sea ice in the Liaodong Bay using meteorological data[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2016, 125: 21-30.

- [30] Gong Deji, Bai Meilan, Wang Qiuchen. Forecasting research on ice run of the Yellow River[J]. Meteorological Monthly, 2001, 27(5): 38-42. [宫德吉, 白美兰, 王秋晨. 黄河凌汛及其预报研究[J]. 气象, 2001, 27(5): 38-42.]
- [31] Kang Zhiming, Zhang Fanghua, Li Jintian, et al. Research on freezing up and melting forecast of Ningxia-Inner Mongolia section of the Yellow River[J]. Meteorological Monthly, 2006, 32(10): 41-45. [康志明, 张芳华, 李金田, 等. 黄河宁夏河段封河和开河预报方法初探[J]. 气象, 2006, 32(10): 41-45.]
- [32] Xu Hanqiu. A study on information extraction of water body with the modified normalized difference water index (MNDWI) [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2005, 9(5): 589-595. [徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究[J]. 遥感学报, 2005, 9(5): 589-595.]
- [33] Xu H. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery[J]. International Journal of Remote Sensing, 2006, 27(14): 3025-3033.
- [34] Liu Meijie, Dai Yongshou, Zhang Jie, et al. First-year level sea-ice thickness retrieval in Labrador Sea using C-band polarimetric SAR data[J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2014, 38(3): 186-192. [刘眉洁, 戴永寿, 张杰, 等. 拉布拉多海一年平整冰厚度 SAR 反演算法[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2014, 38(3): 186-192.]
- [35] Jiao Zhihao, Yang Jian, Ye Chunmao, et al. Scattering component consistency based parameter for polarimetric SAR image classification[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2016, 56(8): 908-912. [焦智灏, 杨健, 叶春茂, 等. 基于散射成分一致性参数的极化 SAR 图像分类[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2016, 56(8): 908-912.]
- [36] Wang Xuesong, Chen Siwei. Polarimetric synthetic aperture radar interpretation and recognition: advances and perspectives [J]. Journal of Radars, 2020, 9(2): 259-276. [王雪松, 陈思伟. 合成孔径雷达极化成像解译识别技术的进展与展望[J]. 雷达学报, 2020, 9(2): 259-276.]
- [37] Murfitt J, Brown L C, Howell S E L. Evaluating RADARSAT-2 for the monitoring of lake ice phenology events in mid-latitudes[J]. Remote Sensing, 2018, 10(10): 1641.
- [38] Chokmani K, Khalil B, Ouarda T, et al. Estimation of river ice thickness using artificial neural networks [C]//Proc. 14th Workshop Hydraulics Ice Covered Rivers. CGU HS/CRIPE. 2007: 12.
- [39] Stefan H G, Fang X. Simulated climate change effects on ice and snow covers on lakes in a temperate region[J]. Cold Regions Science and Technology, 1997, 25(2): 137-152.
- [40] Henderson F M, Lewis A J. Principles and applications of imaging radar. manual of remote sensing: Volume 2[M]. Published in Cooperation with the American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, John Wiley and Sons, New York, 1998.
- [41] Sandven S, Johannessen O M. Sea ice monitoring by remote sensing [C]//The American Society for Photogrammetry & Remote Sensing, 2006.
- [42] Barber D G, Flett D G, De Abreu R A, et al. Spatial and temporal variation of sea ice geophysical properties and microwave remote sensing observations: the SIMS'90 experiment[J]. Arctic, 1992: 233-251.
- [43] Unterschultz K D, Van der Sanden J, Hicks F E. Potential of RADARSAT-1 for the monitoring of river ice: results of a case study on the Athabasca River at Fort McMurray, Canada[J]. Cold Regions Science and Technology, 2009, 55(2): 238-248.
- [44] Evans S. Dielectric properties of ice and snow: a review[J]. Journal of Glaciology, 1965, 5(42): 773-792.
- [45] Cooper D W, Mueller R A, Schertler R J. Remote profiling of lake ice using an S-band short-pulse radar aboard an all-terrain vehicle[J]. Radio Science, 1976, 11(4): 375-381.
- [46] Hallikainen M, Ulaby F T. Dielectric and scattering behavior of snow at microwave frequencies [C]//ESA Proceedings of the 1986 International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'86) on Remote Sensing: Today's Solutions for Tomorrow's Information Needs, 1986: 87-91.
- [47] Hall D K, Henderson F M, Lewis A J. Manual of remote sensing[J]. 1998.
- [48] Hallikainen M, Winebrenner D P. The physical basis for sea ice remote sensing[J]. Microwave Remote Sensing of Sea Ice, 1992, 68: 29-46.
- [49] Qiu Yubao, Wang Xingxing, Ruan Yongjian, et al. Passive microwave remote sensing of lake freeze-thawing over Qinghai-Tibet Plateau [J]. Journal of Lake Sciences, 2018, 30(5): 1438-1449. [邱玉宝, 王星星, 阮永俭, 等. 基于星载被动微波遥感的青藏高原湖冰物候监测方法[J]. 湖泊科学, 2018, 30(5): 1438-1449.]
- [50] Zhang Yaodan, Li Zhijun, Li Chunjiang, et al. Microstructure characteristics of river ice in Inner Mongolia section of the Yellow River and its influencing factors[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(12): 1418-1429. [张邀丹, 李志军, 李春江, 等. 黄河内蒙段河冰微结构特性及影响因素分析[J]. 水利学报, 2021, 52(12): 1418-1429.]
- [51] Duguay C R, Pultz T J, Lafleur P M, et al. RADARSAT backscatter characteristics of ice growing on shallow sub-Arctic lakes, Churchill, Manitoba, Canada[J]. Hydrological Processes, 2002, 16(8): 1631-1644.
- [52] Gherboudj I, Bernier M, Leconte R. A backscatter modeling for river ice: Analysis and numerical results[J]. IEEE Transactions on Geoscience and remote sensing, 2009, 48(4): 1788-1798.
- [53] Surdu C M, Duguay C R, Pour H K, et al. Ice freeze-up and break-up detection of shallow lakes in Northern Alaska with spaceborne SAR[J]. Remote Sensing, 2015, 7(5): 6133-6159.

Ice thickness inversion and ice storage estimation of Yellow River based on satellite radar characteristic parameters

LIU Bin¹, JI Honglan¹, ZHAI Yongguang¹, ZHANG Baosen², GAO Guoming²

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China;

2. Yellow River Institute of Hydraulic Research, YRCC, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: Ice flood is a natural disaster unique to high-latitude rivers, which seriously threatens the safety of river hydraulic structures and the stability of river bank ecosystems. Ice thickness is an important basic information for ice formation analysis, ice condition simulation and forecasting, and it can provide an important basis for ice prevention and disaster mitigation. Whether it is ice prevention or ice utilization, ice thickness is a key parameter and a physical indicator that is difficult to monitor. How to estimate it accurately and effectively has always been the focus and difficulty in river ice research. The Inner Mongolia section of the Yellow River has a cold flood season of up to 4 months each year. The river is meandering and is a key section for prevention and control of floods. The acquisition of its ice thickness information is of great significance to the prevention and mitigation of floods in the Yellow River. This paper aims to use Sentinel-1 radar image combined with Sentinel-2 optical image to estimate the thickness of river ice in the Inner Mongolia section of the Yellow River. Taking the Baotou to Toudaoguai hydrological station in Inner Mongolia as an example, the Sentinel-2 optical image is first processed to extract the boundary of the Yellow River main channel before the ice flood season. Then the Sentinel-1 radar image is processed, 2 intensity information and 4 polarization decomposition parameters are extracted, and the correlation between the 6 radar characteristic parameters and the thickness of the river ice is analyzed. The parameters with the highest correlation were selected, and the linear regression model of ice thickness inversion was established by statistical regression method. The adjusted R^2 of the model was 0.657, and the RMSE was verified to be 9.82 cm, MRE was 13.46%, and MAE was 8.26 cm. Inversion of ice thickness during the ice flood season, analysis of the characteristics of temporal and spatial changes of ice thickness, and estimation of ice storage, while discussing the scattering mechanism of river ice. It proves the feasibility of active microwave remote sensing data in the inversion of river ice thickness, and provides a reference for blizzard prevention and disaster reduction in the Inner Mongolia section of the Yellow River.

Key words: Sentinel-1; Sentinel-2; remote sensing; river ice thickness; ice storage; Inner Mongolia section of the Yellow River

(责任编辑: 江利明)