

魏彬航, 李宝辉, 刘煜, 等. 辽东湾海冰分布面积历史数据重构及其影响因素分析[J]. 海洋学报, 2023, 45(11): 20–33, doi:10.12284/hyxb2023170

Wei Binhang, Li Baohui, Liu Yu, et al. Reconstruction of sea ice extent in the Liaodong Bay and analysis of its impact factors[J]. Haiyang Xuebao, 2023, 45(11): 20–33, doi:10.12284/hyxb2023170

# 辽东湾海冰分布面积历史数据重构及其影响因素分析

魏彬航<sup>1</sup>, 李宝辉<sup>1</sup>, 刘煜<sup>1</sup>, 王安良<sup>1\*</sup>

(1. 国家海洋环境预报中心 自然资源部海洋灾害预报技术重点实验室, 北京 100081)

**摘要:** 辽东湾是我国冬季冰情最严重的海区, 大面积海冰覆盖会对海上经济活动产生严重影响。本文以辽东湾海冰为研究对象, 基于 MODIS 卫星影像资料重构了辽东湾 2001–2021 年海冰分布面积时间序列。同时, 确定了辽东湾浮冰范围与海冰分布面积的非线性关系式, 并利用此关系式将辽东湾历史海冰最大分布面积延拓至 1953 年。通过对其年际变化趋势进行研究, 获得工程设计重现期辽东湾海冰分布面积。进一步分析了辽东湾海冰最大分布面积的影响因子, 结果表明海冰最大分布面积与冻冰度日及北风分量的相关系数达 0.96。此外, 分析了秋季北极部分海区海冰密集度与辽东湾冬季海冰覆盖程度的相关性。本文成果可为辽东湾海冰长期趋势研究和海冰灾害的预报预警工作提供基本数据支撑。

**关键词:** 辽东湾; 海冰; 分布面积; 影响因子

中图分类号: P731.15

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2023)11-0020-14

## 1 引言

每年冬季辽东湾都有不同程度的结冰现象, 海面覆冰会对海上航运、水产养殖和油气开采等经济活动产生不同程度的影响, 严重时会造成重大经济损失<sup>[1-2]</sup>。自有记录以来, 辽东湾共发生 6 次严重冰情, 其中 1969 年最为严重, 整个辽东湾全部冰封, 秦皇岛和营口等港口受到海冰阻塞, 导致船舶被困, 自此我国开始注重海冰调查、监测和预报工作<sup>[3]</sup>。最近一次冰灾发生在 2010 年<sup>[4-5]</sup>, 整个渤海共损毁船只 7 000 余艘, 港口码头封冻 296 个, 因灾经济损失 63.18 亿元<sup>[6]</sup>。即使在冰情常年偏轻或者常冰年, 海冰对经济活动的影响也不可忽视。根据 2022 年《中国海洋灾害公报》, 近 10 年我国海冰灾害年均造成直接经济损失 8 718.77 万元<sup>[7]</sup>。尤其, 近年来随着辽东湾沿岸风电、光伏和核

电等新能源工程的兴起, 海冰致灾机理表现出新的形式<sup>[8]</sup>, 需要大量海冰分布面积历史数据支撑海冰灾害预警报。因此, 利用海冰分布面积历史数据分析辽东湾海冰发展变化趋势及其影响因素, 可为海冰预警报及工程设计提供数据和理论支持, 具有重要的现实意义。

海冰监测是深入研究渤海海冰生消规律与防治海冰灾害发生的必要手段<sup>[9]</sup>。我国海冰监测始于 20 世纪 60 年代, 目前已形成由卫星遥感、雷达、岸基、破冰船和海上平台观测等多种监测方式组成的海冰立体观测网, 其中卫星遥感是最主要的观测手段。卫星遥感受人为因素与地理环境影响较小, 多源海洋卫星组网后, 可快速获得高频次、多尺度的海冰分布面积信息<sup>[10-11]</sup>。尽管如此, 由于时空分辨率较低、云覆盖等, 卫星遥感通常不足以支撑对海冰的全

收稿日期: 2023-05-23; 修订日期: 2023-09-04。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(42176208)。

作者简介: 魏彬航(1999—), 女, 天津市人, 研究方向为渤海海冰数值预报。E-mail: wbh12419957@163.com

\* 通信作者: 王安良(1982—), 高级工程师, 研究方向为工程海冰预报。E-mail: wangal@nmefc.cn

天候监测。因此,一些学者利用气象资料与卫星遥感图像结合,重构部分时间段的海冰分布面积,为海冰分布面积及冰情预报提供技术支撑。王萌等<sup>[12]</sup>基于MODIS、FY3和NOAA系列卫星影像,结合气象资料重构1996–2011年逐日海冰面积;同时,也有研究基于平均气温<sup>[13–14]</sup>、累积温度<sup>[15–16]</sup>和累积冰冻度日<sup>[17–18]</sup>构建出渤海及辽东湾海冰面积的经验公式,通过回归分析预估海冰面积变化趋势。李宁等<sup>[13]</sup>利用辽东湾沿岸的气象站冰期气温数据,初步建立了辽东湾沿岸冬季平均气温与渤海海冰面积的关系。随后,作为影响海冰分布面积的重要气候因子,旬平均气温和日平均气温的积温<sup>[15–16]</sup>被引入到海冰面积经验公式的计算中。此外,冻冰度日、融冰度日与冻冰阶段、融冰阶段辽东湾海冰面积也存在线性关系<sup>[17–18]</sup>。以上研究主要针对辽东湾海冰分布面积和气温进行回归分析研究,得出的经验公式为计算辽东湾海冰分布面积提供了依据。目前利用辽东湾沿岸气象站气温代表海面气温具有一定的局限性,仍需要其他资料的补充以获得辽东湾海冰分布面积的经验公式,以进一步建立可信而连贯的辽东湾历史海冰分布面积时间序列。

此外,由于辽东湾所处的地理位置和较小的地理尺度,该海域海冰生消影响因素较为多样和复杂。其中,我国东北地区的气温与辽东湾海冰分布面积联系最为密切,而西伯利亚高压、北极涛动和北极海冰变化又是影响我国东北地区气候的重要因素<sup>[19]</sup>。冬季西伯利亚高压强度增强时,东北地区寒潮频次也有较大可能增多<sup>[20]</sup>,冷空气将会使海冰表现出较为剧烈的热力和动力过程。北极涛动位相的变化调节着北半球中纬度的大气环流,当北极涛动处于正位相时,西伯利亚高压强度减小,经向环流减弱,不利于冷空气向南侵入东北地区<sup>[21–22]</sup>。近年来,北极海冰的变化可改变大西洋经向翻转环流,影响到大气环流进而遥相关北半球其他地区的气候态势<sup>[23–26]</sup>,比如欧亚大陆频发冬季极端气象事件<sup>[27]</sup>。以往文献对影响东北地区气候的因素已展开研究,初步阐明了各因子和辽东湾浮冰范围的可能联系<sup>[28]</sup>,但缺乏影响因子对辽东湾海冰最大分布面积的定量分析。

本文将建立基于浮冰范围推算海冰分布面积的方法,重构历史海冰分布面积时间序列并进行趋势分析,计算应用于工程设计的重现期海冰分布面积。根据影响海冰生消的热力学和动力学因子,建立气温、风场与辽东湾海冰最大分布面积的多元线性回归公式。此外,分析北极海冰密集度与辽东湾海冰最大分布面积的相关性,为预判当年冬季辽东湾海冰最大分

布面积提供可靠依据。

## 2 研究区域和数据

### 2.1 研究区域介绍

本文研究区域为辽东湾,根据国家卫星海洋应用中心发布的海冰遥感监测通报<sup>[29]</sup>,辽东湾是指位于 $38^{\circ}44' \sim 40^{\circ}57'N$ ,  $119^{\circ}16' \sim 122^{\circ}17'E$ 的海域,其面积约为 $30\,605\text{ km}^2$ 。根据国家标准,辽东湾基线以陆地点 $40^{\circ}51'N$ ,  $121^{\circ}52'E$ 为测量起点,  $39^{\circ}00'N$ ,  $120^{\circ}00'E$ 为测量终点,辽东湾浮冰范围是从辽东湾底部沿辽东湾基线至海冰外缘线的距离<sup>[30]</sup>。例如图1,当海冰覆盖整个辽东湾时,浮冰范围为 $252\text{ km}$ 。

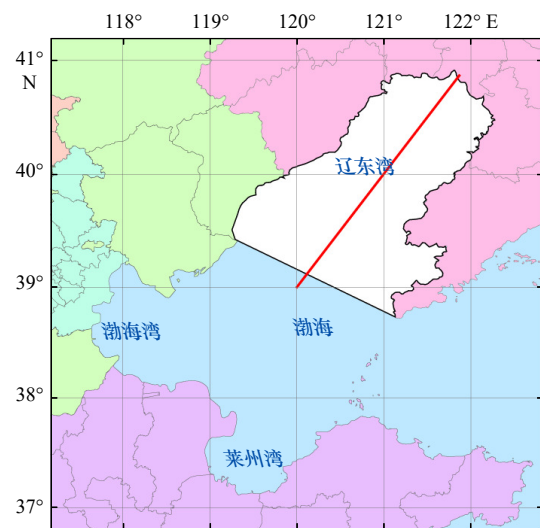


图1 辽东湾(白色区域)及测量基线(红色线)

Fig. 1 Liaodong Bay (white area) and the base line

### 2.2 气象和海洋数据

本文所采用的气温数据为欧洲中期天气预报中心的ERA5全球大气再分析数据(<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=form>),该数据集提供了大量大气、陆地和海洋要素的逐小时数据,这些数据在 $30\text{ km}$ 网格上覆盖全球,时间跨度上从1940年至今。本文采用2001–2021年辽东湾 $2\text{ m}$ 气温和 $10\text{ m}$ 风场数据,时间分辨率为 $1\text{ h}$ ,空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。

月平均海平面气压数据来源于美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP),数据每月发布一次,时间范围为1950年至今,空间分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。为与浮冰外缘线离岸最大距离数据保持一致,本文选取1953–2021年冬季(12月、1月和2月)的月平均海平面气压数据(<https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html>)。北极海冰密集度数据为欧洲气象卫星应用组织(EU-

METSAT)提供的 OSI-450-a 数据 (<https://osi-saf.eumetsat.int/products/osi-450-a>), 该数据包含自 1979 年至今 北极范围内的海冰密集度数据, 空间分辨率为  $25\text{ km} \times 25\text{ km}$ , 时间分辨率在 1987 年之前为 2 d, 1987 年至今为 1 d。

浮冰外缘线离岸最大距离数据由国家海洋环境预报中心提供, 该数据包含 1953–2021 年共 69 年的历年浮冰外缘线离岸最大距离。2012–2021 年的辽东湾海冰最大分布面积数据来自自然资源部发布的《中国海洋灾害公报》<sup>[31]</sup>。

### 2.3 MODIS 卫星影像资料

本研究整理分析了 2001–2021 年辽东湾 2 210 幅冬季 MODIS 卫星影像。MODIS 传感器采用太阳同步近极地圆轨道, 搭载于 Terra 和 Aqua 两颗卫星上。MODIS 传感器刈幅为 2 330 km, 具有 36 个离散光谱波段, 光谱范围从  $0.4\ \mu\text{m}$  (可见光) 到  $14.4\ \mu\text{m}$  (热红外), 其时间分辨率为 1 d, 具有 3 种不同的空间分辨率: 250 m (频带 1~2)、500 m (频带 3~7) 和 1 000 m (频带 8~36)。其中 500 m 分辨率频带既保证了清晰度, 又保证具有足够数量的回传图像。因此本文采用数据分辨率为 500 m 的 MODIS 卫星影像, 图像来源于 NASA WorldView 网站 (<https://worldview.earthdata.nasa.gov/>)。

## 3 辽东湾历史海冰分布面积数据重构

### 3.1 MODIS 卫星影像数据资料处理

冰水分类是获取海冰分布面积信息的重要步骤, MODIS 卫星影像则是冰水分类的重要数据来源。MODIS 是国际上较为先进的遥感成像仪器之一, 具有高时间分辨率、高光谱分辨率、中等空间分辨率、大规模覆盖、波段多和应用范围广等优势<sup>[32–33]</sup>。将极地海区的海冰反演算法应用于辽东湾海区时, 存在剔除云覆盖不准确、受近岸地形和泥沙悬浮物影响等问题<sup>[34]</sup>, 计算辽东湾海冰要素时会出现误差。以往研究中已经应用 MODIS 通道比值法<sup>[35]</sup> 以及通过亮温、反射率的显著差异<sup>[36]</sup> 剔除云覆盖进行冰水识别, 但这些反演算法参数多是经验性的, 且这些参数对不同海域和不同时期的海冰较为敏感而导致较大误差。本文采用人机交互方式提取海冰外缘线并计算浮冰范围和海冰分布面积, 尽管工作量较大, 但可最大程度地减小反演算法自动处理引发的误差。

本研究采用人机交互方式提取海冰外缘线, 然后通过 Python 程序计算出浮冰范围和海冰分布面积, 具体流程如下: (1) 导入 MODIS 卫星影像、辽东湾海

岸线和辽东湾基线数据后, 人工绘制辽东湾海冰外缘线; (2) 将数据保存为带地理信息坐标的 kml 文件; (3) 利用 Python 代码将海冰外缘线和海岸线组合, 形成一个封闭多边形图形, 储存到 kml 文件中, 然后计算出浮冰范围和海冰分布面积。以 2016 年 2 月 1 日的 MODIS 卫星影像 (图 2) 为例, 通过人机交互提取辽东湾海冰外缘线, 并利用 Python 程序计算得到的封闭区域得到该日浮冰范围为 157 km, 海冰分布面积为  $21\ 723\ \text{km}^2$ 。

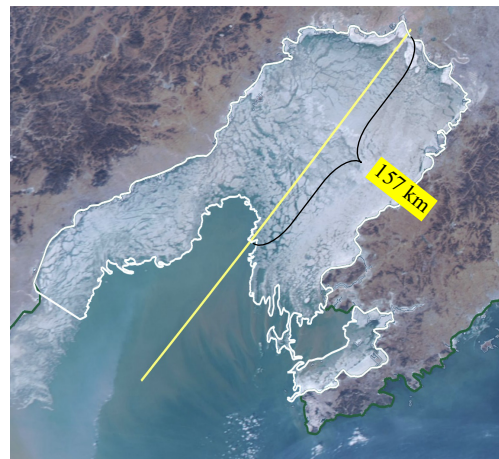


图 2 2016 年 2 月 1 日 MODIS 卫星影像与海冰边缘分析  
Fig. 2 Analysis of MODIS satellite images and sea ice edge on February 1st, 2016

MODIS 卫星影像资料存在无冰、云覆盖、海冰边缘密集度低、冰水无法区分等问题, 这些问题会影响人机交互提取海冰外缘线精度。本文整理了 2 210 幅图像, 图像完全清晰的共有 989 幅, 占比 44.8% (图 3)。影响 MODIS 卫星影像海冰外缘线识别工作的主要因素是有云覆盖; 另一影响外缘线识别的因素是无法区分冰水, 初冰期和融冰期冰厚较薄, 在 MODIS 卫星影像上难以与海水区分。此外, 辽东湾海冰受到风和潮流的影响, 在动力和热力共同作用下发生破碎堆叠<sup>[37–38]</sup>, 冰区边缘有碎冰出现, 海冰密集度低进而影响冰水分类。针对存在问题的影像, 若该影像基线处海冰外缘线清晰, 则绘制出基线附近的外缘线, 利用 Python 程序得出浮冰范围; 若该影像基线处无清晰海冰外缘线, 则判定图片数据完全缺失。

通过上述方法构建浮冰范围以及海冰分布面积原始资料数据集。原始数据存在 5 种类型: 无冰导致没有数据、数据完全缺失、仅面积缺失、浮冰范围为 0 和数据完整。导致浮冰范围为 0 的可能原因是冬季我国东北地区盛行西北风, 在西北季风的作用下, 浮冰向辽东湾东岸漂移堆积<sup>[9]</sup>, 进而导致基线处无冰。

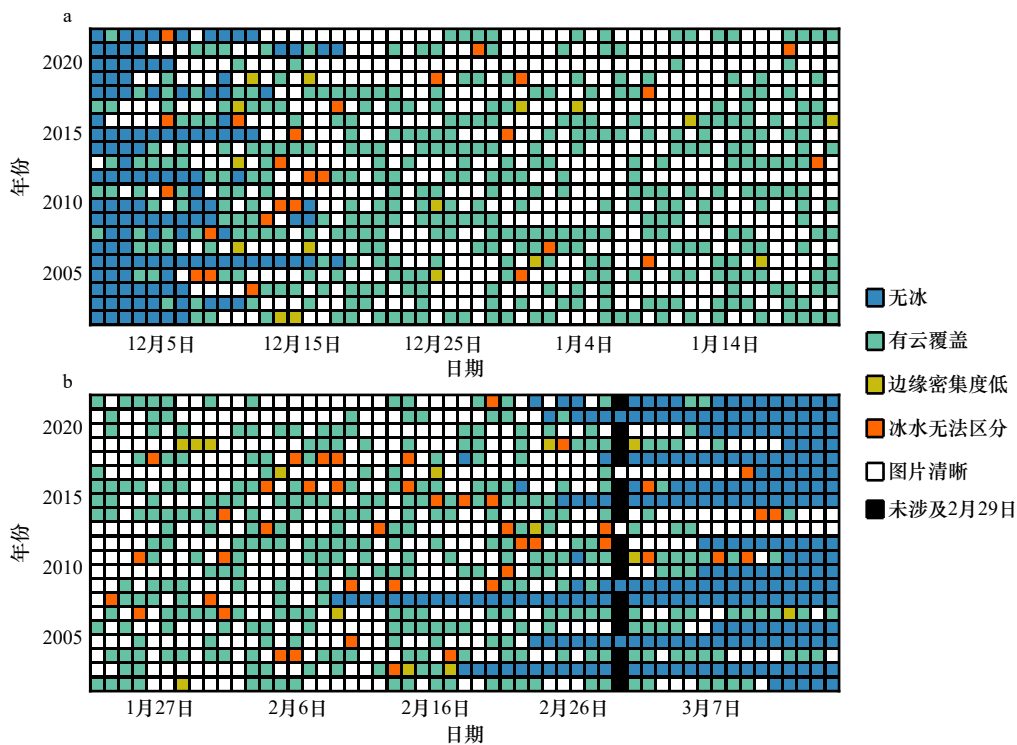


图3 2001–2021年12月1日至翌年1月22日(a)和1月23日至3月15日(b)的MODIS卫星影像海冰监测质量情况分布  
Fig. 3 The quality of sea ice images from MODIS for December 1st to January 23rd of the following year (a) and January 23rd to March 15th (b) from 2001 to 2021

这种情况主要存在于初冰期和融冰期。2001–2021年原始资料数据集的数据情况见图4, 仅有1/4的日期数据完全缺失, 完整数据、基线处无冰和无冰或冰量小的数据已覆盖66.8%的日期。剔除384幅无冰或冰量小的数据资料, 在剩余数据中面积缺失的数据占比9.5%, 基线处无冰导致浮冰范围为0和完整数据占比59.8%。

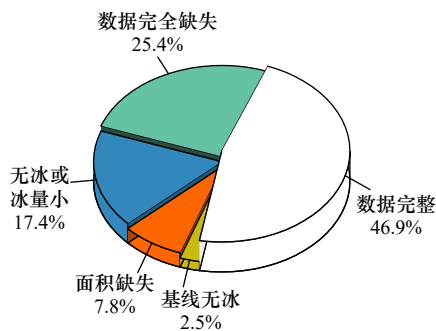


图4 2001–2021年间不同质量海冰数据的占比分布  
Fig. 4 The percentage of sea ice data for different qualities from 2001 to 2021

### 3.2 浮冰范围与海冰分布面积的关系

受地形和海岸不规则分布的影响, 辽东湾浮冰范围( $D$ )与海冰分布面积( $A$ )的关系不是简单的线性关系, 而是大致呈幂函数分布。幂函数具有简洁、通俗

易懂等特点, 但在物理意义上不易符合本文数据特征。本文采用Langmuir函数对数据进行拟合, Langmuir函数相比幂函数增加了一个拟合自由度。Langmuir函数最早由美国物理化学家朗格缪尔于1916年提出, 目前广泛应用于物理化学及化学工程中, 常被用作表示吸附等温线<sup>[39]</sup>。Langmuir函数的物理意义为当压力较小或适中时, 表面覆盖度随压力的增加而增加, 而当表面吸附达到平衡状态时, 表面覆盖度不再改变。将此物理意义移植于辽东湾海冰的生消中, 可解释为辽东湾浮冰范围较小时, 海冰分布面积随浮冰范围的增加而增加, 而当浮冰范围增长到一定程度时, 辽东湾海冰分布面积受地形影响增长缓慢甚至不再增加。本文选取2001–2021年989幅完全清晰的MODIS卫星影像提取结果, 分别采用幂函数和Langmuir拟合浮冰范围和海冰分布面积, 迭代算法为Levenberg-Marquardt。辽东湾浮冰范围与海冰分布面积具有如下关系(图5):

$$A = 46.32D^{1.20}, \quad (1)$$

$$A = \frac{5.08D^{1.77}}{1 + 10^{-4}D^{1.77}}, \quad (2)$$

式中,  $A$  为辽东湾海冰分布面积, 单位为  $\text{km}^2$ ;  $D$  为浮冰范围, 单位为  $\text{km}$ 。图5给出了利用幂函数和Langmuir函数拟合辽东湾浮冰范围和海冰分布面积的结

果。幂函数拟合的拟合优度为  $R^2 = 0.86$ , Langmuir 函数拟合的拟合优度为  $R^2 = 0.87$ , 通过了 99.9% 置信水平的显著性检验。

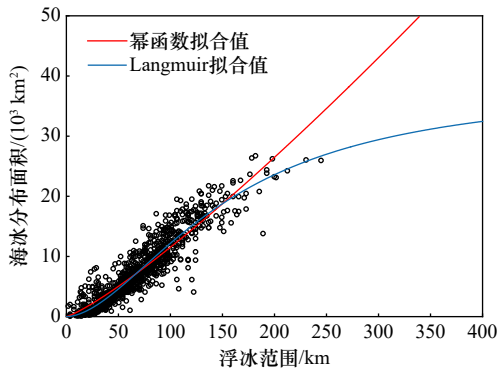


图 5 浮冰范围与海冰分布面积的幂函数、Langmuir 函数拟合结果

Fig. 5 Power law and Langmuir function fitting results for the relationship between the distance of floating ice and sea ice extent

从图 5 可以看出, 在浮冰范围  $D \leq 50$  km 或  $D \geq 200$  km 的情况下, 幂函数不能很好地展现浮冰范围与海冰分布面积的关系: 当  $D \leq 50$  km 时, 薄冰易被季风驱动, 使得辽东湾湾底东部冰量多于西部, 海冰自西向东堆积叠加, 面积增长速率较小; 当  $D \geq 200$  km 时, 辽东湾面积有限, 总面积约为  $30\,605$  km<sup>2</sup>, 此时渤海中部的海冰不能归为辽东湾的海冰。Langmuir 函数在浮冰范围  $D \leq 50$  km 或  $D \geq 200$  km 时对海冰分布面积拟合效果较好, 具有更加明确的物理意义, 因此本文选用 Langmuir 函数的拟合结果。

MODIS 卫星影像存在基线处海冰外缘线清晰但部分云覆盖的情况, 从而导致无法准确识别海冰外缘线, 对于此类数据采用式(2)拟合补充其面积。除无冰或冰薄情况外, 仅 2005 年第 16 候 (2005 年 2 月 14–18 日) 会出现天气过程导致的数据缺失, 其余候均有数据覆盖。此外, 由于辽东湾基线处云覆盖和冰水无法区分等问题, MODIS 卫星影像无法判别基线附近外缘线导致部分日期外缘线数据缺失。利用该数据之前 1 天和之后 1 天的浮冰范围进行线性插值作为该日的浮冰范围。若该日前后 1 天数据缺失, 则在距该日最近有数据的日期和下一个有数据的日期之间进行线性插值, 辅助判断浮冰范围。将浮冰范围插值后, 根据式(2)可构建出对应日期的面积, 最终形成辽东湾历史海冰分布面积时间序列, 时间分辨率为 1 d。

### 3.3 海冰分布面积的验证

利用 2012–2021 年的辽东湾海冰最大分布面积

对经验公式进行对比验证, 如图 6 所示。图 6 将拟合计算和《中国海洋灾害公报》(2012–2021)<sup>[31]</sup> 等途径得到的近 10 年辽东湾海冰最大分布面积进行对比, 拟合整体结果与公报数据一致性较好, 仅有 2016 年误差较大。根据《中国海洋灾害公报》, 2016 年冬季辽东湾海冰最大分布面积出现在当年 2 月 1 日 (图 2), 该日海冰分布面积为  $21\,594$  km<sup>2</sup>。在本次研究中提取出的浮冰外缘线离岸最大距离是 157 km, 根据式(2)拟合出的海冰最大分布面积为  $19\,544$  km<sup>2</sup>。这是因为 2016 年 2 月 1 日  $39.9^\circ\text{N}$  附近的辽东湾东岸和西岸均有海冰堆积, 仅基线附近无冰, 从而导致浮冰外缘线离岸最大距离偏小, 拟合出的海冰分布面积结果偏小。

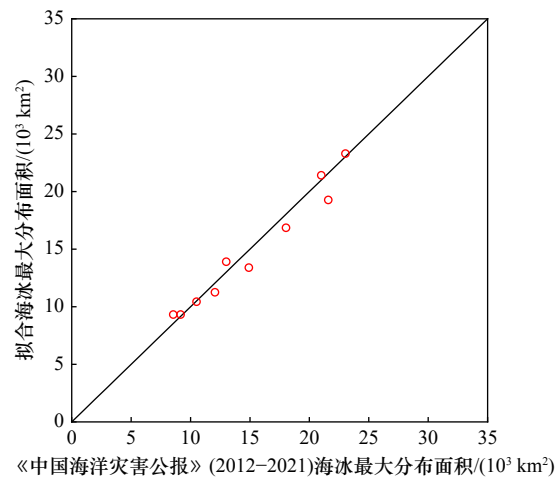


图 6 2012–2021 年通过拟合计算和《中国海洋灾害公报》(2012–2021)<sup>[31]</sup> 获得海冰最大分布面积结果对比  
Fig. 6 Comparison of maximum sea ice extent from fitting calculation and China's Ocean Disaster Report (2012–2021)<sup>[31]</sup> from 2012 to 2021

## 4 辽东湾海冰分布面积结果分析

### 4.1 海冰分布面积的时间及年际变化规律

本文利用 MODIS 卫星影像提取海冰外缘线, 以辽东湾基线计算出浮冰范围并提取海冰分布面积, 进而建立海冰分布面积经验公式。通过线性插值方式获得缺测的浮冰范围, 构建出辽东湾海冰分布面积历史数据时间序列。图 7 给出了 2001–2021 年典型年份的海冰分布面积时间序列。

辽东湾海区大多于每年 12 月上旬进入初冰期, 受冷空气影响, 辽东湾气温与海温下降明显, 辽东湾海冰在北部沿岸浅水区生成, 随后海冰分布面积随水温变化不断振荡。12 月中旬至翌年 1 月上旬, 伴随冷空气侵袭, 海水温度不断下降, 海冰分布面积迅速增

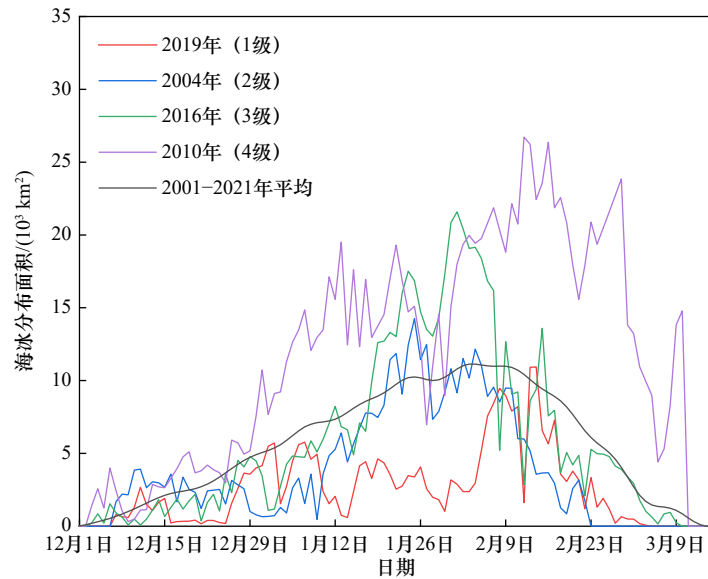


图7 辽东湾典型年份逐日海冰分布面积对比

Fig. 7 The comparison of daily sea ice extent in Liaodong Bay for typical years

加。1月中旬至2月中上旬,辽东湾进入盛冰期。连续低温使得辽东湾海冰由北部沿岸浅水区向海上深水区扩展,在此期间,辽东湾海冰分布面积达到一年中的最大值。近10年辽东湾海冰在每年1月下旬或2月上旬存在一次面积突然缩小的过程,这种过程与气温迅速回升有关。2月中旬至3月上旬为辽东湾融冰期,此时辽东湾海冰受西北季风作用,在融化过程中自西北向东岸堆积,一般在3月中旬之前海冰完全消融。

从年际角度来看,在整个冰期内2011年后辽东湾海冰分布面积相比2011年前呈现下降趋势,特别是在2017-2021年,仅有4d海冰分布面积超过了 $15\,000\text{ km}^2$ 。在冰情较常年偏重的年份,例如2010年(冰级为4级),冰期内多数日期的海冰分布面积均大于平均值,严重时辽东湾几乎全部冰封;而在冰情较常年偏轻的年份(2004年,冰级为2级),冰期内大部分日期的海冰分布面积比平均值小或接近平均值。轻冰年的典型年份选取了2019年,1月的海冰分布面积呈现出振荡下降的趋势,约有96%的时间海冰分布面积低于平均值。而在常冰年,辽东湾初冰期和融冰期的海冰分布面积接近于平均值,但盛冰期海冰分布面积高于平均值。这是因为一些年份(2002年、2004年、2007年和2015年等)辽东湾海冰盛冰期和融冰期提前,海冰最大分布面积出现时间偏早,影响了盛冰期海冰分布面积的平均值。

#### 4.2 海冰最大分布面积年际变化规律

根据浮冰外缘线离岸最大距离数据,通过式(2)构建出1953-2021年的辽东湾海冰最大分布面积

(图8a)。1953年至今辽东湾海冰最大分布面积平均值为 $14\,948\text{ km}^2$ ,海冰最大分布面积呈波动下降趋势。海冰严重时于1957年和1969年两次覆盖整个辽东湾;冰情较轻的年份海冰最大分布面积则不足 $5\,000\text{ km}^2$ 。冬季受较强冷空气影响,在沿岸海域生成大面积浮冰,冷空气影响期间以偏西北风为主,因此东部近岸区域海冰分布面积往往比西岸大,天气回暖后海冰维持的时间较短。

1990年后辽东湾海冰最大分布面积明显下降,这期间最大分布面积超过 $20\,000\text{ km}^2$ 的仅发生在2001年、2010年、2013年和2016年。从两组数据统计箱型图(图8b)中也可以发现,1991-2021年海冰最大分布面积中位数较1951-1990年降低了近 $3\,000\text{ km}^2$ 。最近20年,最严重的冰情发生在2010年,冰情等级达到了4级,此年度绝大部分日期的海冰分布面积在平均线以上。最近3个冰期辽东湾海冰最大分布面积集中在平均值以下,这表明海冰分布面积仍然处于一个下降趋势中。

近年来,盛冰期持续时间存在缩短的趋势,同时在盛冰期内海冰经常会因短暂升温而剧烈消融,导致海冰分布面积回缩。即使存在相同的海冰分布面积,现实中也存在冰厚不同的现象,盛冰期内在出现短暂回温时,冰厚逐渐减小。因此,即使在相同海冰分布面积的情况下,近些年来辽东湾的冰厚也相对较薄。

#### 4.3 海冰分布面积重现期计算

本节利用Pearson-III型分布对辽东湾海冰最大分布面积重现期进行计算。Pearson-III型最早被作为一种统计分布形式用于产品检验,广泛应用于水文、陆

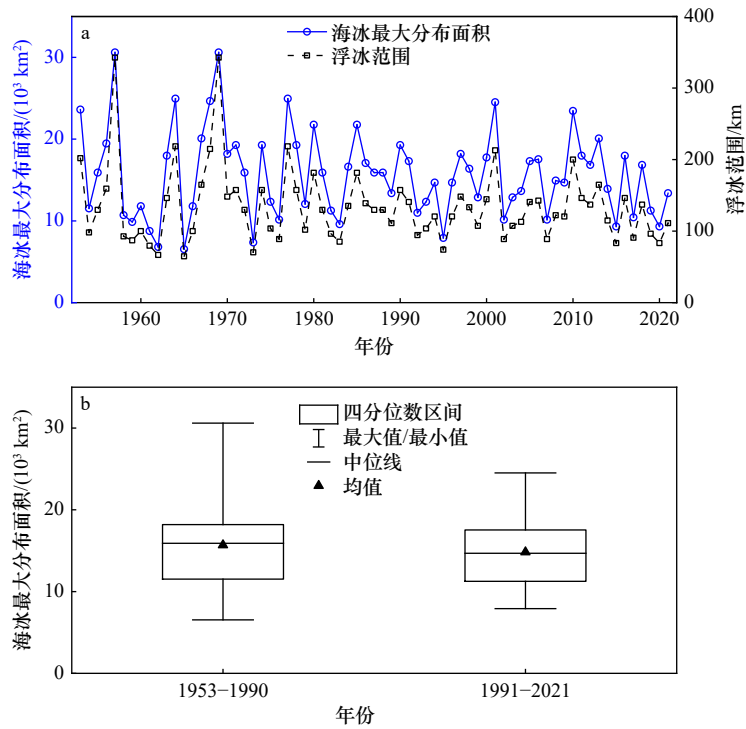


图 8 1953–2021 年辽东湾浮冰外缘线离岸最大距离数据和海冰最大分布面积的年际变化

Fig. 8 Interannual variations of the maximum offshore distance of the marginal ice zone and the maximum ice extent in the Liaodong Bay from 1953 to 2021

地和生物统计,也应用于气象要素和海洋随机变量重现期极值的推算,又被称为 $\Gamma$ -分布,其概率密度函数形式为

$$f(x) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\beta x} \quad (0 < x < \infty), \quad (3)$$

式中, $\alpha$ 是形状参数; $\beta$ 是尺度参数,需由实测数据来确定; $\Gamma$ 代表伽马函数,系数 $\beta^\alpha/\Gamma(\alpha)$ 保证了 $\int_0^\infty f(x) dx = 1$ 。由于条件 $0 < x < \infty$ 的限制,该分布形式只适用于非负的随机变量。延拓辽东湾海冰最大分布面积时,由于由遥感或破冰船直接测量的辽东湾浮冰外缘线离岸最大距离数据可靠,因此,本文基于历史年份辽东湾浮冰外缘线离岸最大距离数据推算出重现期海冰最大分布面积。首先利用式(3)计算出重现期浮冰范围,然后通过式(2)推算重现期辽东湾海冰分布面积,可减少重现期海冰分布面积计算过程中的误差。图9给出了浮冰外缘线离岸最大距离的 Pearson-III 型分布拟合曲线。

由图9可推测,1年、5年、10年和20年一遇的浮冰范围分别为40 km、167 km、203 km和239 km,根据式(2),可推算辽东湾1年、5年、10年和20年重现期海冰最大分布面积为3 090 km<sup>2</sup>、20 270 km<sup>2</sup>、23 690 km<sup>2</sup>和26 380 km<sup>2</sup>。然而,辽东湾面积约为30 605 km<sup>2</sup>,重现期为25年时,浮冰范围为252 km,此

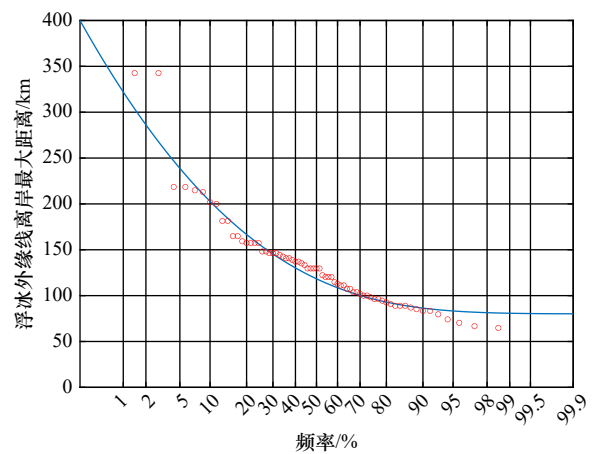


图 9 辽东湾浮冰外缘线离岸最大距离 Pearson-III 型分布拟合曲线和经验点分布

Fig. 9 The Pearson-III distribution fitting curve and the empirical point distribution of the maximum offshore distance of the marginal ice zone in the Liaodong Bay

时整个辽东湾均有海冰分布。因此,重现期为25年以上时,辽东湾海冰最大分布面积可参照整个渤海计算。

## 5 辽东湾海冰最大分布面积与影响因子的相关性分析

### 5.1 辽东湾海冰最大分布面积与气温和风场的关系

辽东湾冰情的轻重主要取决于每年11月至翌年

3月的冷空气活动强度<sup>[40]</sup>,天气变化直接影响海冰的生消。每年冬季伴随冷空气连续入侵,辽东湾海水在冷空气作用下不断降温直至冰点。辽东湾海冰发展总体趋势是由湾底逐渐增长扩展,冰厚也随之增加<sup>[41-42]</sup>。不同学者已基于各气象站的实测温度资料,针对辽东湾沿岸各气象站气温与冰情的关系做了大量研究<sup>[13-18]</sup>。除气温外,海面大风也体现着冷空气活动的频次,冷空气增强海面变压场,整层大气有强冷平流和下沉运动,导致高空动量下传,势能转化为动能引发海面大风<sup>[43]</sup>。本研究考虑到气象站资料的单一性,利用辽东湾的海面气温和风场数据,分析气温和北风分量与辽东湾海冰最大分布面积的相关性。

首先分析辽东湾海冰最大分布面积与冻冰度日(FDD)的关系。冻冰度日定义为统计范围内低于冰点日平均温度的积温,根据相关资料<sup>[44]</sup>,渤海冰点可取 $-1.6^{\circ}\text{C}$ 。在本文中,累积冻冰度日(CFDD)是指从

初冰日到海冰最大分布面积的出现时,小于 $-1.6^{\circ}\text{C}$ 的日平均气温累积值,可用下式表示:

$$\text{CFDD} = \sum_{D_s}^{D_m} T_a \quad (T_a \leq -1.6^{\circ}\text{C}), \quad (4)$$

式中, $D_s$ 是初冰日; $D_m$ 是辽东湾海冰最大分布面积出现日期; $T_a$ 为日平均气温。本文选择辽东湾全部场点的日平均气温与辽东湾海冰最大分布面积进行相关性分析。由于2000年之前无MODIS卫星影像资料,通过MODIS卫星影像无法得出海冰最大分布面积出现的日期,因此,本文仅计算了2001-2021年的CFDD。结果表明,辽东湾海冰最大分布面积与CFDD呈正相关关系,相关系数为0.95,通过了95%置信水平的显著性检验(图10a)。

同时,冬季风也是影响辽东湾海冰变化的重要因子之一<sup>[45]</sup>。辽东湾冬季北风分量的大小直接反映冷空气活跃的频次,例如2010年冬季,辽东湾海面平均

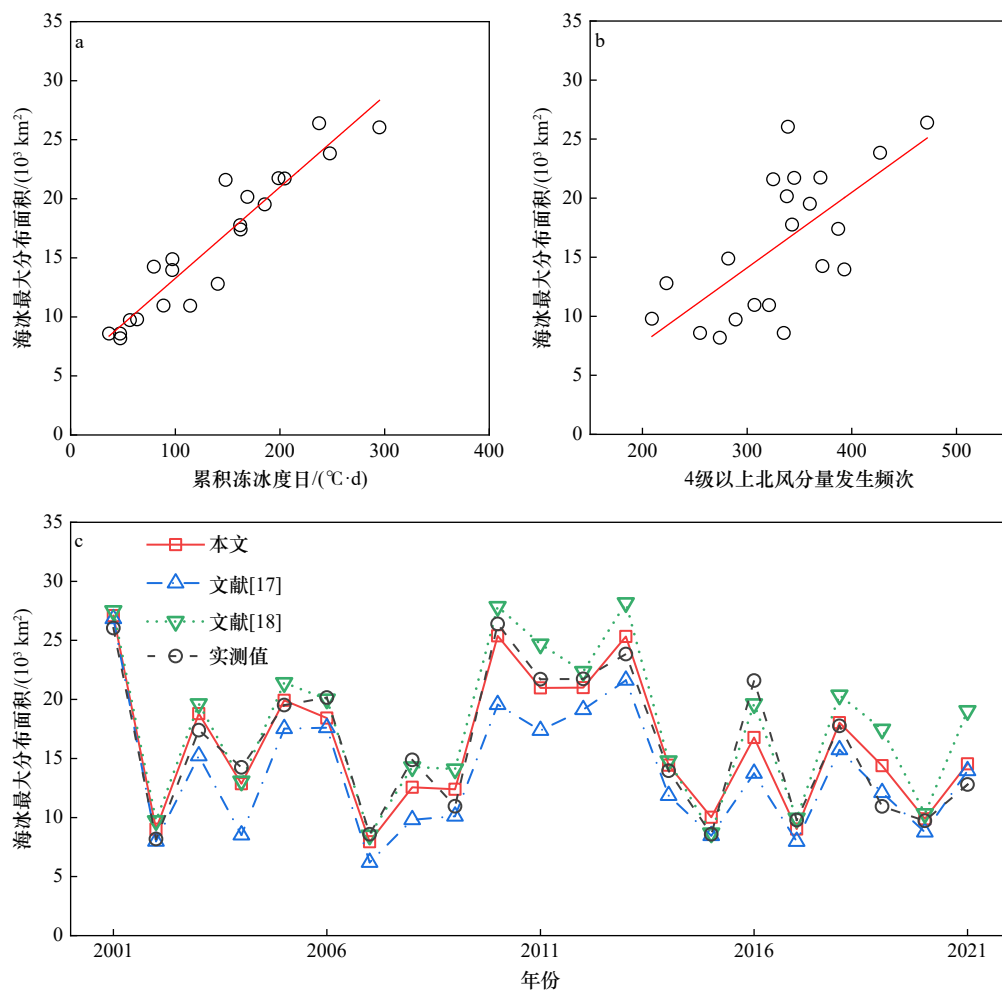


图10 海冰最大分布面积与累积冻冰度日(a)、海冰最大分布面积与4级以上北风分量频次(b)的关系和2001-2021年辽东湾海冰最大分布面积(c)

Fig. 10 The relationship between maximum sea ice extent with cumulative freezing degree (a), maximum sea ice extent days with the frequency of wind speeds above level 4 (b), and the maximum annual sea ice extent in Liaodong Bay from 2001 to 2021 (c)

北风分量共有 472 时次达到 4 级以上, 来自西伯利亚的冷空气受辽东湾海底持续偏北风的影响南下, 造成整个辽东湾海面气温较常年偏低。为此, 本文统计了 2001–2021 年辽东湾冰期中 4 级以上的北风分量发生频次 (FNW), 分析该频次与辽东湾海冰最大分布面积的相关性, 结果如图 10b 所示。其中, 2013 年辽东湾海冰最大分布面积为 21 年来的第三高, 而当年冰期微风以上北风分量达到 427 h, 为 21 年第二高频。2002 年为轻冰年, 辽东湾海冰最大分布面积为 21 年同期最低, 其 4 级以上北风分量仅发生 274 次。总体而言, 辽东湾海冰年最大分布面积与 FNW 呈正相关关系, 相关系数为 0.68, 并通过了 95% 置信水平的显著性检验。但因结果离散程度较高, FNW 不适合作为单独预判辽东湾海冰最大分布面积的因子。因此, 本文将辽东湾 CFDD 与 FNW 做多元线性回归处理, 最终得到辽东湾海冰最大分布面积与 CFDD 和 FNW 的关系为

$$A = 68.6CFDD + 16.9FNW + 1128.1. \quad (5)$$

通过上式计算出的 CFDD、FNW 与海冰最大分布面积实测值的相关系数达到 0.96, 与前人计算方式相比拟合效果有显著提升 (图 10c)。利用文献 [17] 基于海面单点提出的公式拟合出的海冰最大分布面积与实测值的均方根误差为 2 660 km<sup>2</sup>; 利用文献 [18] 基于沿岸气象站提出的公式计算 CFDD 拟合海冰最大分布面积与实测值的均方根误差为 3 347 km<sup>2</sup>。而利用本文公式计算的海冰分布面积与实测值相比离散程度最小, 均方根误差为 1 723 km<sup>2</sup>。

## 5.2 辽东湾海冰最大分布面积与北极海冰密集度的关系

在全球变暖的大背景下, 北极秋季海冰分布面积和海冰密集度相比以往迅速下降 [46–47], 造成北半球中纬度地区极端天气现象频发。北极海冰和冰川的不断融化, 导致大西洋经向翻转环流 (AMOC) 的减弱, 进而影响北半球甚至全球的气候 [48]。近年来, 北极海冰分布面积及海冰密集度变化对欧亚大陆气候的影响备受关注。研究表明, 秋、冬季北极海冰量减少时, 北极海洋与大气环流发生变化, 甚至会导致欧亚大陆出现冷冬 [27, 49–54]。对于辽东湾海冰与北极海冰的相关性, 以往研究指出辽东湾冬季浮冰外缘线离岸最大距离与秋季前期 (9 月、10 月) 欧亚大陆北部边缘海区的海冰密集度呈显著的负相关关系 [28]。

图 11 给出了辽东湾海冰最大分布面积与北极海冰密集度的相关系数, 绿色范围通过了 90% 置信水平的显著性检验。从图中可以看出, 10 月和 11 月巴

伦支海–喀拉海的海冰密集度与辽东湾海冰最大分布面积呈负相关, 这种相关性于 12 月减弱, 说明辽东湾海冰对秋季巴伦支海–喀拉海的海冰响应更为显著, 与冬季巴伦支海–喀拉海海冰关联较弱。该结论印证了 Francis 等 [55] 的结论, 即秋季巴伦支海–喀拉海海冰对欧亚大陆冬季大气环流有重要影响。此外, 10 月北极群岛北部海域的海冰密集度与辽东湾海冰最大分布面积的相关系数可达 0.4 以上。

巴伦支海–喀拉海的海冰与欧亚大陆冬季气候相关联, 该海域海冰冰情与入侵我国冷空气的频次呈反位相变化: 巴伦支海–喀拉海的海冰偏多 (少), 会削弱 (增强) 东亚大槽, 进而减弱 (增强) 西伯利亚高压和东亚季风, 减少 (增多) 入侵我国的天气过程 [56–58]。为明确巴伦支海–喀拉海海冰对辽东湾海冰作用机制, 利用偏相关系数排除冬季西伯利亚高压的影响, 计算区域为巴伦支海–喀拉海显著性高于 90% 且相关系数小于 -0.4 的海区。首先排除整个冬季平均的西伯利亚高压, 该海区 10 月海冰密集度与辽东湾海冰最大分布面积的偏相关系数为 -0.40, 依次排除 12 月、翌年 1 月和 2 月的西伯利亚高压影响, 偏相关系数分别为 -0.43、-0.42 和 -0.36。而未排除冬季西伯利亚高压的情况下, 该海区 10 月海冰密集度与辽东湾海冰最大分布面积的相关系数为 -0.41。偏相关系数的变化表明, 巴伦支海–喀拉海海冰在冬季前期 (12 月和翌年 1 月) 影响西伯利亚高压, 使得西伯利亚高压强度偏强, 进而影响辽东湾海冰。

本研究结果显示, 10 月加拿大北极群岛附近海域海区海冰密集度与冬季辽东湾海冰最大分布面积显著正相关, 相关系数可达 0.4 以上。据此, 计算 10 月北极群岛附近该相关系数大于 0.4 的海域海冰密集度平均值, 计算结果表明, 该海域 10 月海冰密集度平均值与辽东湾海冰最大分布面积的相关系数达到 0.72。10 月北极群岛附近海域海冰密集度与冬季辽东湾冰情可能通过极涡关联。秋季强烈的阻塞高压在巴芬湾生成, 迫使北极涡旋分裂, 部分极涡被阻塞高压向北挤压至北极群岛, 使得北极群岛附近海域海冰密集度增加。这种情况下巴芬湾呈现出 500 hPa 平均高度正距平, 西伯利亚北部的极涡位置比常年偏南 [57], 在冬季出现两种影响欧亚大陆气温的运动路径。一种经挪威海和格陵兰海进入北大西洋, 影响北大西洋沿岸的欧亚大陆西部, 使该地气温下降, 冷空气自西路侵袭我国; 另一种路径自冰岛北部海区南下至欧洲, 随后东移影响到贝加尔湖地区, 冷空气通过中路影响到我国东北地区的气温 [58]。而东北地区气温与海冰

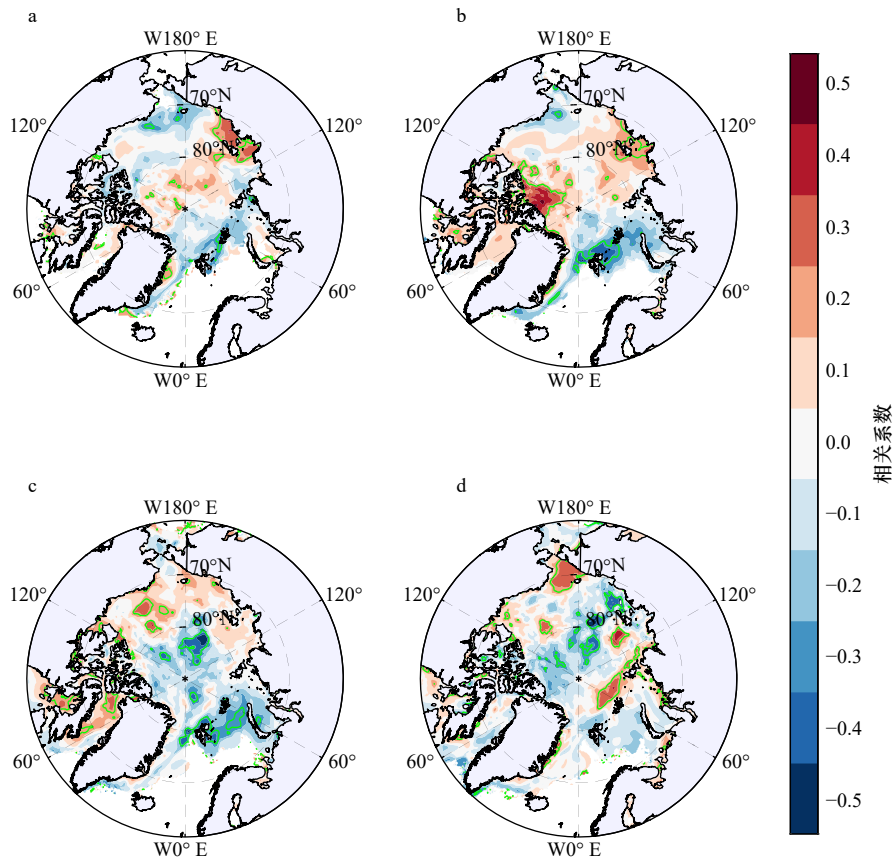


图 11 辽东湾海冰最大分布面积与 9 月(a)、10 月(b)、11 月(c)和 12 月(d)北极海冰密集度相关系数分布

Fig. 11 Correlation coefficient distribution between maximum sea ice extent in Liaodong Bay and Arctic sea ice concentration on September (a), October (b), November(c), and December (d)

分布面积直接相关<sup>[59]</sup>,因此当加拿大北极群岛附近海域海冰密集度增加时,我国东北地区冬季气温降低,使得辽东湾海冰分布面积增加。当 10 月相关海域海冰密集度减小时,即北半球极涡冷空气集中于北极地区上空<sup>[60]</sup>,南下受到遏制,导致我国东北地区冬季气温偏高,辽东湾海冰最大分布面积随之下降。因此,通过加拿大北极群岛附近海域 10 月海冰密集度可预估翌年辽东湾海冰最大分布面积。

综上所述,巴伦支海-喀拉海与加拿大北极群岛附近海域 10 月的海冰密集度可为预报辽东湾海冰最大分布面积提供依据。通过选择 1979-2008 年辽东湾海冰最大分布面积和相关海域海冰密集度构建预报方程,其关系可用下式表示:

$$A = -2287.2co(BK) + 115049.9co(AA) - 83802.4, \quad (6)$$

式中,  $co(BK)$  和  $co(AA)$  分别为巴伦支海-喀拉海与加拿大北极群岛附近海域的 10 月平均海冰密集度,利用上式计算 1979-2008 年海冰最大分布面积的结果如图 12a 所示。将 2009-2021 年的相关数据作为测试集,图 12b 对比了利用上式与利用式(2)计算测试年份辽东湾海冰最大分布面积的结果,二者均方根误

差为 2820 km<sup>2</sup>。辽东湾海冰最大分布面积预测结果与 Langmuir 函数模拟值相比偏小,其可能原因是气候变暖导致  $co(AA)$  较以往明显降低。该结果说明基于 10 月北极相关海区的海冰密集度能够预测出冬季辽东湾海冰覆盖程度。

## 6 结论

本文研究了辽东湾浮冰范围和海冰分布面积的关系,结合经验插值重构了 2001-2021 年辽东湾海冰分布面积历史数据集,并将辽东湾海冰最大分布面积延拓至 1953 年。对模拟结果和影响辽东湾海冰最大分布面积的影响因子进行了相关性分析,主要结论如下:

(1) Langmuir 函数更适合描述辽东湾浮冰范围( $D$ )与海冰分布面积( $A$ )的关系为  $A = \frac{5.08D^{1.77}}{1 + 10^{-4}D^{1.77}}$ 。

(2) 近 69 年辽东湾海冰最大分布面积总体呈下降趋势;辽东湾 1 年、5 年、10 年和 20 年一遇海冰分布面积约为 3090 km<sup>2</sup>、20270 km<sup>2</sup>、23690 km<sup>2</sup> 和 26380 km<sup>2</sup>。

(3) 辽东湾海冰最大分布面积( $A$ )与累积冻冰度

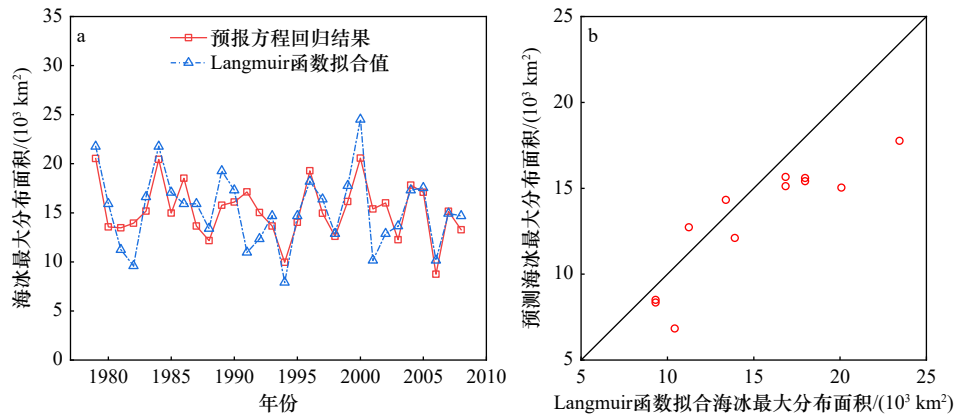


图 12 巴伦支海-喀拉海与加拿大北极群岛附近海域 10 月海冰密集度预判 1979–2008 年辽东湾海冰最大分布面积结果 (a) 和 2009–2021 年的拟合结果验证 (b)

Fig. 12 Maximum sea ice extent prediction in the Liaodong Bay in 1979–2008 (a) and validation of the fitted results for 2009–2021 (b) based on October sea ice concentration of the Barents Sea-Kara Sea and the Arctic archipelago

日 (CFDD) 和冰期 4 级以上的北风分量发生时次 (FNW) 的关系为  $A = 68.6CFDD + 16.9FNW + 1128.1$ 。该计算结果与实测结果相关系数为 0.96, 这表明辽东湾海冰最大分布面积与海表气温和风场具有较强相关性。

(4) 秋季巴伦支海-喀拉海海冰与西伯利亚高压相关联, 从而影响南下至我国东北地区的冷空气, 进而影响冬季辽东湾海冰。秋季北极群岛附近海域的海冰密集度与辽东湾海冰最大分布面积具有显著正

相关性, 相关系数为 0.72, 二者可能通过极涡产生关联。

以上研究基于浮冰范围和海冰分布面积的关系, 重构了辽东湾历史海冰分布面积时间序列, 并分析辽东湾海冰最大分布面积与辽东湾海面气温、风场以及北极部分海区海冰密集度等影响因素的相关性。本文提出的浮冰范围和海冰分布面积的关系, 可有效补充历史海冰监测资料的不足, 提升海冰分布面积的监测效率; 通过对特定影响因子与辽东湾海冰最大分布面积的相关性分析, 可为当年冰情预测提供参考。

#### 参考文献:

- [1] 白珊, 吴辉庭. 渤海的海冰数值预报 [J]. 气象学报, 1998, 56(2): 139–153.  
Bai Shan, Wu Huiding. Numerical sea ice forecast for the Bohai Sea [J]. Acta Meteorologica Sinica, 1998, 56(2): 139–153.
- [2] 徐欢, 任沂斌. 基于混合损失 U-Net 的 SAR 图像渤海海冰检测研究 [J]. 海洋学报, 2021, 43(6): 157–170.  
Xu Huan, Ren Yibin. Detecting sea ice of Bohai Sea using SAR images based on a hybrid loss U-Net model [J]. Haiyang Xuebao, 2021, 43(6): 157–170.
- [3] 赵倩, 刘煜, 唐茂宁, 等. 2012–2013 年冬季渤海海冰数值预报 [J]. 海洋预报, 2014, 31(2): 73–79.  
Zhao Qian, Liu Yu, Tang Maoning, et al. Numerical sea ice forecast for the Bohai Sea in the winter of 2012–2013 [J]. Marine Forecasts, 2014, 31(2): 73–79.
- [4] 郭可彩, 商杰, 黎舸, 等. 2009–2010 年冬季渤海及黄海北部冰情分析 [J]. 海洋预报, 2011, 28(2): 35–40.  
Guo Kecai, Shang Jie, Li Ge, et al. The analysis of the sea ice status on the Bohai Sea and northern Yellow Sea in the winter of 2009/2010 [J]. Marine Forecasts, 2011, 28(2): 35–40.
- [5] 刘煜, 唐茂宁. 2009–2010 年冬季渤海海冰监测与预警报 [C]//国家综合防灾减灾与可持续发展论坛论文集. 北京: 国家减灾委员会, 2010: 641–645.  
Liu Yu, Tang Maoning. Sea ice observations and forecasts of the Bohai and the Yellow Sea in the winter of 2009/10 [C]//National Forum on Comprehensive Disaster Risk Reduction and Sustainable Development. Beijing: National Disaster Reduction Commission, 2010: 641–645.
- [6] 国家海洋局. 中国海洋灾害公报 (2010) [M]. 北京: 海洋出版社, 2010.  
State Oceanic Administration. China's Ocean Disaster Report (2010) [M]. Beijing: China Ocean Press, 2010.
- [7] 国家海洋局. 中国海洋灾害公报 (2022) [M]. 北京: 海洋出版社, 2022.  
State Oceanic Administration. China's Ocean Disaster Report (2022) [M]. Beijing: China Ocean Press, 2022.
- [8] 马玉贤, 谭红建, 于福祥, 等. 基于海冰热力学原理的营口海域冰厚演变规律及工程应用 [J]. 海洋环境科学, 2022, 41(6): 930–936.  
Ma Yuxian, Tan Hongjian, Yu Fuxiang, et al. The evolution law and engineering application of ice thickness in Yingkou sea area based on the thermodynamic of sea ice [J]. Marine Environmental Science, 2022, 41(6): 930–936.
- [9] 隋俊鹏, 李子牛, 王兆宇, 等. 2018/2019 年冬季渤海海冰情分析 [J]. 海洋预报, 2019, 36(3): 49–55.

- Sui Junpeng, Li Ziniu, Wang Zhaoyu, et al. Ice condition analysis for the Bohai Sea and Yellow Sea in the winter of 2018/2019[J]. *Marine Forecasts*, 2019, 36(3): 49–55.
- [10] 刘建强, 叶小敏, 宋庆君, 等. HY-1C/D 海洋水色卫星产品体系及其典型应用 [J]. *遥感学报*, 2023, 27(1): 1–13.  
Liu Jianqiang, Ye Xiaomin, Song Qingjun, et al. Products of HY-1C/D ocean color satellites and their typical applications[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2023, 27(1): 1–13.
- [11] 林明森, 张有广, 袁欣哲. 海洋遥感卫星发展历程与趋势展望 [J]. *海洋学报*, 2015, 37(1): 1–10.  
Lin Mingsen, Zhang Youguang, Yuan Xinzhe. The development course and trend of ocean remote sensing satellite[J]. *Haiyang Xuebao*, 2015, 37(1): 1–10.
- [12] 王萌, 武胜利, 郑伟, 等. 长时间序列卫星遥感渤海海冰时空分布特征及与气温关系分析 [J]. *气象*, 2016, 42(10): 1237–1244.  
Wang Meng, Wu Shengli, Zheng Wei, et al. Temporal-spatial distribution of Bohai Sea sea-ice in long-time series and its correlation with air temperature[J]. *Meteorological Monthly*, 2016, 42(10): 1237–1244.
- [13] 李宁, 雷颀, 顾卫, 等. 环辽东湾地区冬季平均气温对渤海海冰面积的影响 [J]. *资源科学*, 2008, 30(12): 1818–1824.  
Li Ning, Lei Yang, Gu Wei, et al. Impact of average winter temperatures around Liaodong Gulf region on the sea ice area of Bohai Sea[J]. *Resources Science*, 2008, 30(12): 1818–1824.
- [14] 王相玉, 张惠滋, 严素, 等. 渤、黄海北部海冰年代时空变化特征分析 [J]. *海洋预报*, 2007, 24(2): 26–32.  
Wang Xiangyu, Zhang Huizi, Yan Su, et al. The characteristic of the spatio-temporal transformation of the sea-ice in northern part of the BO-HAI sea and the Yellow Sea[J]. *Marine Forecasts*, 2007, 24(2): 26–32.
- [15] 顾卫, 史培军, 刘杨, 等. 渤海和黄海北部地区负积温资源的时空分布特征 [J]. *自然资源学报*, 2002, 17(2): 168–173.  
Gu Wei, Shi Peijun, Liu Yang, et al. The characteristics of temporal and spatial distribution of negative accumulated temperature in Bohai Sea and north Yellow Sea[J]. *Journal of Natural Resources*, 2002, 17(2): 168–173.
- [16] 左涛, 郭玉娣, 刘彬贤, 等. 基于 MODIS 数据的辽东湾海冰面积特征分析及与气温关系的探讨 [J]. *海洋预报*, 2021, 38(5): 47–52.  
Zuo Tao, Guo Yudi, Liu Binxian, et al. Characteristics analysis of the sea ice area based on MODIS satellite data in Liaodong Bay and its correlation with air temperature[J]. *Marine Forecasts*, 2021, 38(5): 47–52.
- [17] Su Hua, Wang Yunpeng, Yang Jingxue. Monitoring the spatiotemporal evolution of sea ice in the Bohai Sea in the 2009–2010 winter combining MODIS and meteorological data[J]. *Estuaries and Coasts*, 2012, 35(1): 281–291.
- [18] Zhang Na, Zhang Qinghe. Evolution of sea ice area in the Liaodong Bay during the winter of 2009–2010[C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering. Nanjing: IEEE, 2012: 1196–1199.
- [19] 朱星源, 苏洁, 宋梅, 等. 基于 MODIS 数据的渤海海冰厚度反演算法优化 [J]. *海洋学报*, 2022, 44(12): 70–83.  
Zhu Xingyuan, Su Jie, Song Mei, et al. Optimization of the Bohai Sea ice thickness retrieval algorithm based on MODIS data[J]. *Haiyang Xuebao*, 2022, 44(12): 70–83.
- [20] 王遵娅, 丁一汇. 近 53 年中国寒潮的变化特征及其可能原因 [J]. *大气科学*, 2006, 30(6): 1068–1076.  
Wang Zunya, Ding Yihui. Climate change of the cold wave frequency of China in the last 53 years and the possible reasons[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2006, 30(6): 1068–1076.
- [21] 王月, 李辑, 焦敏, 等. 中国大范围极端低温事件的特征分析 [J]. *气象与环境学报*, 2020, 36(6): 74–81.  
Wang Yue, Li Ji, Jiao Min, et al. Analysis of characteristics of large-scale extreme cold events in China[J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2020, 36(6): 74–81.
- [22] Petoukhov V, Semenov V A. A link between reduced Barents-Kara sea ice and cold winter extremes over northern continents[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115(D21): D21111.
- [23] Ártun M, Eldevik T, Smedsrud L H. The role of Atlantic heat transport in future Arctic winter sea ice loss[J]. *Journal of Climate*, 2019, 32(11): 3327–3341.
- [24] Li Hui, Fedorov A, Liu Wei. AMOC stability and diverging response to Arctic sea ice decline in two climate models[J]. *Journal of Climate*, 2021, 34(13): 5443–5460.
- [25] Li J L F, Lee W L, Xu Kuanman, et al. The role of falling ice radiative effects on climate projections over Arctic under global warming[J]. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2020, 31(6): 633–648.
- [26] Deser C, Tomas R A, Peng Shiling. The transient atmospheric circulation response to north Atlantic SST and sea ice anomalies[J]. *Journal of Climate*, 2007, 20(18): 4751–4767.
- [27] 武炳义, 苏京志, 张人禾. 秋-冬季节北极海冰对冬季西伯利亚高压的影响 [J]. *科学通报*, 2011, 56(27): 2335–2343.  
Wu Bingyi, Su Jingzhi, Zhang Renhe. Effects of autumn-winter Arctic sea ice on winter Siberian high[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(30): 3220–3228.
- [28] 唐茂宁, 洪洁莉, 刘煜, 等. 气候因子对渤海冰情影响的统计分析 [J]. *海洋通报*, 2015, 34(2): 152–157.  
Tang Maoning, Hong Jieli, Liu Yu, et al. Statistical analysis of climatic factors impacting on the Bohai sea ice[J]. *Marine Science Bulletin*, 2015, 34(2): 152–157.
- [29] 国家卫星海洋应用中心. 海冰遥感监测通报 [R]. 北京: 国家卫星海洋应用中心, 2010.  
National Satellite Ocean Application Service. Sea ice remote sensing monitoring bulletin[R]. Beijing: National Satellite Ocean Application Service, 2013.

- [30] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. GB/T 42254-2022, 渤海和黄海北部冰情等级 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.  
State Administration of Market Supervision and Administration of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 42254-2022, Sea ice grade of Bohai Sea and northern Yellow Sea[S]. Beijing: Standards Press of China, 2022.
- [31] 国家海洋局. 中国海洋灾害公报 (2012-2021)[M]. 北京: 海洋出版社, 2022.  
State Oceanic Administration. China's Ocean Disaster Report (2012-2021)[M]. Beijing: China Ocean Press, 2022.
- [32] 黄冬梅, 李明慧, 宋巍, 等. 卷积神经网络和深度置信网络在 SAR 影像冰水分类的性能评估 [J]. 中国图象图形学报, 2018, 23(11): 1720-1732.  
Huang Dongmei, Li Minghui, Song Wei, et al. Performance of convolutional neural network and deep belief network in sea ice-water classification using SAR imagery[J]. Journal of Image and Graphics, 2018, 23(11): 1720-1732.
- [33] Mäkynen M, Karvonen J. MODIS sea ice thickness and open water-sea ice charts over the Barents and Kara seas for development and validation of sea ice products from Microwave Sensor Data[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(12): 1324.
- [34] 李彦青, 苏洁, 汪洋, 等. 渤海海冰外缘线候平均离岸距离的变化及其关键影响因子 [J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2013, 43(7): 7-16.  
Li Yanqing, Su Jie, Wang Yang, et al. Variability of the pentadly average distance between the sea ice edge and the coast in the Bohai Sea and its key impact factors[J]. Periodical of Ocean University of China, 2013, 43(7): 7-16.
- [35] 张文奇, 张胜茂, 樊伟, 等. 南极磷虾捕捞区独立海冰提取 [J]. 遥感信息, 2017, 32(3): 54-59.  
Zhang Wenqi, Zhang Shengmao, Fan Wei, et al. Extraction of independent ice in Antarctic krill fishing area[J]. Remote Sensing Information, 2017, 32(3): 54-59.
- [36] 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(自然科学版), 2006, 36(2): 173-179.  
Wu Longtao, Wu Huiding, Sun Lantao, et al. Retrieval of sea ice in the Bohai Sea from MODIS data[J]. Periodical of Ocean University of China, 2006, 36(2): 173-179.
- [37] 李海, 白珊, 张占海, 等. 渤海潮汐对冰作用的数值模拟 [J]. 海洋预报, 1999, 16(3): 39-47.  
Li Hai, Bai Shan, Zhang Zhanhai, et al. Numerical simulation of tidal effects on ice for the Bohai Sea[J]. Marine Forecasts, 1999, 16(3): 39-47.
- [38] 刘煜, 吴辉碁. 第 1 讲 渤、黄海的海冰 [J]. 海洋预报, 2017, 34(3): 94-101.  
Liu Yu, Wu Huiding. Sea ice in the Bohai Sea and the northern Yellow Sea[J]. Marine Forecasts, 2017, 34(3): 94-101.
- [39] Langmuir I. The constitution and fundamental properties of solids and liquids. Part I. Solids[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 1916, 38(11): 2221-2295.
- [40] 张云吉, 金秉福, 冯雪. 近半个多世纪以来渤海冰情对全球气候变化的响应 [J]. 海洋通报, 2007, 26(6): 96-101.  
Zhang Yunji, Jin Bingfu, Feng Xue. Response of the sea ice conditions in the Bohai Sea to global climate change in the last over half century[J]. Marine Science Bulletin, 2007, 26(6): 96-101.
- [41] 刘煜, 李宝辉, 李春花, 等. 2006-2007 年冬季渤海天气与冰情分析 [J]. 海洋预报, 2009, 26(1): 1-6.  
Liu Yu, Li Baohui, Li Chunhua, et al. Analysis of weather and ice conditions for the Bohai Sea in the winter of 2006-2007[J]. Marine Forecasts, 2009, 26(1): 1-6.
- [42] Galbraith P S, Larouche P. Sea-surface temperature in Hudson Bay and Hudson Strait in relation to air temperature and ice cover breakup, 1985-2009[J]. *Journal of Marine Systems*, 2011, 87(1): 66-78.
- [43] 黄彬, 杨超, 朱男男, 等. 渤海冷空气大风过程中 3 次风速波动的原因分析 [J]. 气象科技, 2017, 45(3): 499-507.  
Huang Bin, Yang Chao, Zhu Nannan, et al. Cause analysis of three wind speed fluctuation events during a cold air gale process over Bohai Sea[J]. Meteorological Science and Technology, 2017, 45(3): 499-507.
- [44] 李志军, 严德成. 关于现场海冰导热系数测试的讨论 [J]. 海洋环境科学, 1989, 8(1): 90-94.  
Li Zhijun, Yan Decheng. Discussion on field testing of thermal conductivity of sea ice[J]. Marine Environmental Science, 1989, 8(1): 90-94.
- [45] 梁军, 陈长胜, 秦玉琳, 等. 1981-2011 年中国近海海冰变化特征及其与东亚冬季风的关系 [J]. 气象灾害防御, 2016, 23(3): 1-5, 13.  
Liang Jun, Chen Changsheng, Qin Yulin, et al. Characteristics of China's nearshore sea ice changes and the relationship with the East Asian winter monsoon from 1981 to 2011[J]. Meteorological Disaster Prevention, 2016, 23(3): 1-5, 13.
- [46] 董绍顷, 路晓庆, 石立坚, 等. 不同 MSS 模型及其北极海冰干舷的多时空差异分析 [J]. 海洋学报, 2021, 43(7): 183-193.  
Dong Zhaoqing, Lu Xiaoqing, Shi Lijian, et al. Multi temporal and spatial difference analysis of various MSS models and Arctic sea ice freeboard[J]. Haiyang Xuebao, 2021, 43(7): 183-193.
- [47] 张培宣, 陈晓东, 孔帅, 等. 基于 Hough 变换原理的海冰厚度识别方法 [J]. 海洋学报, 2022, 44(7): 161-169.  
Zhang Peixuan, Chen Xiaodong, Kong Shuai, et al. Research on sea ice thickness identification method based on Hough transform principle[J]. Haiyang Xuebao, 2022, 44(7): 161-169.
- [48] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术 [M]. 2 版. 北京: 气象出版社, 2007.  
Wei Fengying. Modern Climatic Statistical Diagnosis and Prediction Technology[M]. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press, 2007.
- [49] Wu Bingyi, Wang Jia. Possible impacts of winter Arctic Oscillation on Siberian high, the East Asian winter monsoon and sea-ice

- extent[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2002, 19(2): 297–320.
- [50] Liu Zhongfang, Risi C, Codron F, et al. Acceleration of western Arctic sea ice loss linked to the Pacific North American pattern[J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 1519.
- [51] 武炳义. 北极海冰融化影响东亚冬季天气和气候的研究进展以及学术争论焦点问题 [J]. 大气科学, 2018, 42(4): 786–805.  
Wu Bingyi. Progresses in the impact study of Arctic sea ice loss on wintertime weather and climate variability over East Asia and key academic disputes[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2018, 42(4): 786–805.
- [52] Honda M, Inoue J, Yamane S, et al. Influence of low Arctic sea-ice minima on anomalously cold Eurasian winters[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(8): L08707.
- [53] Perlwitz J, Hoerling M, Dole R. Arctic tropospheric warming: causes and linkages to lower latitudes[J]. *Journal of Climate*, 2015, 28(6): 2154–2167.
- [54] Wu Qigang, Zhang Xiangdong. Observed forcing-feedback processes between northern hemisphere atmospheric circulation and Arctic sea ice coverage[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2010, 115(D14): D14119.
- [55] Francis J A, Chan Weihan, Leathers D J, et al. Winter northern hemisphere weather patterns remember summer Arctic sea-ice extent[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(7): L07503.
- [56] Wu Bingyi, Huang Ronghui, Gao Dengyi. Effects of variation of winter sea-ice area in kara and barents seas on East Asia winter monsoon[J]. *Journal of Meteorological Research*, 1999, 13(2): 141–153.
- [57] 张江涛, 李勇. 强冷空气影响我国大部全国降水分布不均匀 [J]. 气象, 2010, 36(3): 136–139.  
Zhang Jiangtao, Li Yong. Strong cold air affects most parts of China, causing uneven distribution of precipitation across the country[J]. *Meteorological Monthly*, 2010, 36(3): 136–139.
- [58] 梁苏洁, 赵南, 丁一汇. 北极涛动主模态下北极冷空气的优势路径和影响地区的研究 [J]. 地球物理学报, 2019, 62(1): 19–31.  
Liang Sujie, Zhao Nan, Ding Yihui. Dominant trajectories and influenced regions of the near-surface cold air in the Arctic during positive and negative AO/NAM events[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2019, 62(1): 19–31.
- [59] Yue Haibo, Ji Yonggang, Zhang Xi. Analysis of effect of environment factors on spatio-temporal distribution of ice in Liaodong Bay with Envisat Asar and Modis imagery[C]//Proceedings of the SeaSAR 2008. Frascati, Italy: ESA ESRIN, 2008.
- [60] 沈柏竹, 封国林, 廉毅. 1 月北极涛动异常程度特征及其对北半球同期温度的影响 [J]. 地理科学, 2015, 35(10): 1299–1305.  
Shen Baizhu, Feng Guolin, Lian Yi. Abnormal characteristics and its influence on the northern hemisphere temperature of Arctic Oscillation in January[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2015, 35(10): 1299–1305.

## Reconstruction of sea ice extent in the Liaodong Bay and analysis of its impact factors

Wei Binhang<sup>1</sup>, Li Baohui<sup>1</sup>, Liu Yu<sup>1</sup>, Wang Anliang<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Marine Hazards Forecasting, Ministry of Natural Resources, National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Liaodong Bay is the most severely ice-covered sea waters in China during winter. The large area of sea ice on the sea surface has significant impacts on maritime economic activities. This study focuses on reconstructing a time series of sea ice extent from 2001 to 2021 for Liaodong Bay based on MODIS satellite images. Meanwhile, a nonlinear relation between the floe ice distance and sea ice extent in Liaodong Bay is figured out, which is used to extend the historical maximum sea ice extent of Liaodong Bay back to 1953. Then, the interannual variation of the maximum sea ice extent is researched to obtain the sea ice extent in Liaodong Bay in the return period of engineering design. The impact factors of the maximum sea ice extent in Liaodong Bay are analyzed, and the results show that the correlation coefficient between the maximum sea ice extent and the freezing degree-days, as well as northerly wind component, reached 0.96. Furthermore, the correlation between the sea ice concentration in some regions of the Arctic during autumn and the winter sea ice extent in the Liaodong Bay is analyzed. Our results provide valuable insights for understanding the trend of sea ice extent in Liaodong Bay and formulating measures for sea ice disaster prevention.

**Key words:** Liaodong Bay; sea ice; sea ice extent; impact factor