

1979—2022年北极海冰范围变化特征及趋势分析

孙晓宇¹, 孙启振¹, 沈辉^{1*}, 李春花^{1,2}

(1. 国家海洋环境预报中心, 北京 100081; 2. 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: 利用被动微波辐射计海冰范围遥感数据产品开展了1979—2022年北极海冰范围的变化特征及趋势分析。结果表明: 研究期海冰范围明显呈现逐渐减少趋势, 2004年之前海冰范围呈增减交替式的缓慢减少模式, 2004年之后夏秋季海冰范围呈现多年连续减少、间隔单年大幅增加的振动衰减模式; 1979年3月海冰范围最大, 达到 $16.15 \times 10^6 \text{ km}^2$, 2012年9月海冰范围最小, 仅为 $3.49 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。通过海冰范围变化速度的趋势线分析可知海冰的减少速度正在逐渐减小, 但夏秋季的减少速度变化微弱。按照当前的海冰范围减少趋势推断, 21世纪60年代初期北极夏秋季大规模的当年冰将基本消失。通过距平分析, 10月海冰范围波动逐渐加大, 融冰期呈延长趋势。

关键词: 北极; 海冰; 遥感

中图分类号: P731.32; P727 **文献标识码:** A

文章编号: 1003-0239(2023)05-0049-07

0 引言

北冰洋地处地球最北端, 是纬度最高的大洋, 常年被海冰所覆盖, 是地球的冷源之一, 也是地球气候系统的重要组成部分^[1-4]。北极海冰不仅是全球气候变化的指示器, 更是放大器。在全球气候变暖的大环境下, 北极成为全球气温上升最显著的区域, 北极海冰体量逐年显著减少^[5-8], 特别是在北半球的夏秋季节, 北极海冰范围减少的趋势不断加剧^[9-11], 融冰期逐渐延长, 多年冰的范围逐渐减少^[12]。据联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)气候模式预测, 到21世纪中期, 夏季北极海域海冰将完全消失^[13-14]。北极海冰的减少可以归结为由温室效应、大气环流、大洋间热输送、太阳辐射等众多因素共同作用的结果, 而人类活动对自然界平衡状态的破坏和规律的改变是北极海冰减少的最根本原因。北极海冰的减少虽然有利于北极自然资源和航道资源等的开发利用, 但又会直接或间接对北

极生态环境、全球海洋和大气环流、全球天气和气候变异产生重要的负面影响^[15-19]。北极对全球气候变化的响应和反作用周期较短, 从20世纪中期开始, 北极海冰范围的原有变化规律逐渐发生改变, 随着气温的逐渐升高, 海冰范围迅速减少^[20-23]。固有规律的打破给中纬度地区甚至全球的天气和气候带来的反馈效应日益显著, 近年来, 北极海冰的减少也直接或间接对我国的气候和天气产生了一定的负面影响^[24-26]。本研究利用长时间序列遥感资料开展了北极海冰范围变化规律和趋势分析, 同时也对未来发展趋势进行了剖析。

1 研究区及数据情况

北极主要由北冰洋和周边的陆地、岛屿构成(见图1)。北极地区气候寒冷, 北冰洋常年被海冰覆盖, 其周围是亚洲、欧洲和北美洲北部的多年冻土区, 总面积约为 $2.1 \times 10^7 \text{ km}^2$ 。近年来, 全球气候变化对北极生态环境的影响引起了世界各国多领

收稿日期: 2023-06-14。

基金项目: 国家重点研发项目(2022YFF0802002); 极地考察业务化与科研(2023)。

作者简介: 孙晓宇(1977-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事海岸带遥感与极地海冰研究。E-mail: sunxy@lreis.ac.cn

*通信作者: 沈辉(1987-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事极地气象海冰研究。E-mail: shenh@nmeic.cn

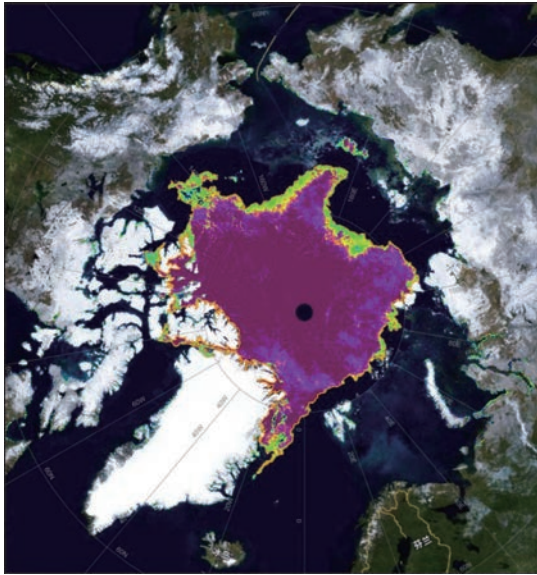


图1 研究区及数据情况

Fig.1 Study area and data information

域的关注。

本文应用的海冰范围数据均为被动微波辐射计月均值数据产品,数据来源于不来梅大学环境物

理研究所 (University of Bremen's Institute of Environmental Physics, IUP)与阿尔弗雷德·韦格纳研究所 (Alfred Wegener Institute, Helmholtz Centre for Polar and Marine Research, AWI)。数据由不同卫星传感器的观测数据组成,使用不同的海冰密集度反演算法,采用15%海冰密集度作为海冰范围边界的判别条件,数据在空间上覆盖了除极点之外的北极全部区域,时间跨度从1979年至今,期间不同时期采用了不同的卫星传感器(见表1),在新旧数据源更替时,对新数据源进行了线性变换处理,使得新数据源在重叠时段中与旧数据源的平均值和标准偏差相匹配,做到了数据的无缝衔接^[20,27]。

2 数据分析

2.1 海冰范围变化基本特征

通过对44 a海冰范围月均值趋势线(见图2)、重点年份月均值变化趋势线(见图3a)和11 a均值年际变化趋势线(见图3b)的综合分析可知,9月海

表1 数据传感器及算法

Tab.1 Remote sensing sensors and algorithms

时间	传感器及波谱频率	算法
1972—2002年	SMMR & SSM/I, 19 GHz、37 GHz	NASA Team
1978年10月—2010年10月	NIMBUS-7 SMMR & DMSP SSM/I-SSMIS, 19 GHz、37 GHz	NASA Team
2002年6月1日—2011年10月4日	AMSR-E, 89 GHz	ASI
2011年10月5日—2012年7月2日	SSMIS F-17, 91 GHz	ASI
2012年7月3日至今	AMSR2, 89 GHz	ASI

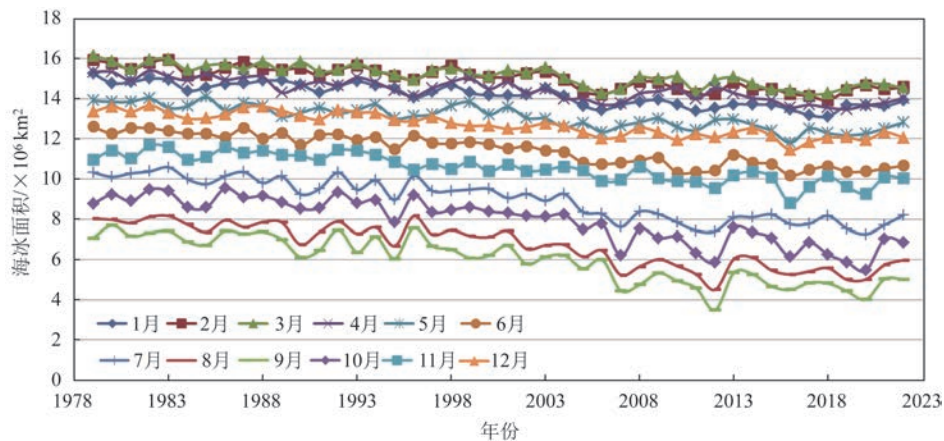


图2 逐月海冰范围变化趋势

Fig.2 Variation trends of monthly sea ice extent

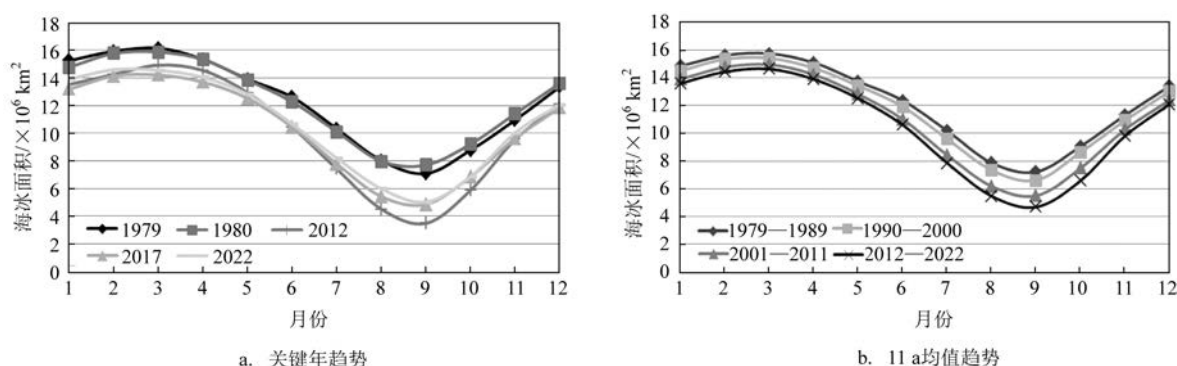


图3 海冰范围年际趋势线

Fig.3 Trends of annual sea ice extent

冰范围最小,由小到大依次是9月、8月、10月、7月、11月、6月、12月、5月、1月、4月、2月和3月,即以9月份为中心,相邻月份海冰范围依次逐渐增大,海冰范围的季节性变化规律较强,尤其是在海冰范围较小的6—12月的顺序完全稳定。9月海冰范围多年平均值仅为 $6.00 \times 10^6 \text{ km}^2$,最小年份为2012年的 $3.49 \times 10^6 \text{ km}^2$,最大年份为1980年的 $7.71 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。3月海冰范围最大,多年平均值为 $15.16 \times 10^6 \text{ km}^2$,最小年份为2017年的 $14.21 \times 10^6 \text{ km}^2$,最大年份为1979年的 $16.15 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。同期海冰范围的年际差异较大,但每年海冰的变化规律较为一致,3—4月海冰范围缓慢减少,4—8月海冰范围呈加速减少趋势,8—9月海冰范围减少速度明显减缓,9月海冰范围达到年度最小值,9—12月海冰范围快速增长,12月—次年3月海冰范围缓慢增长至当年最大值。研究期初期海冰范围的逐月变化量较为平稳,很少出现大幅变化,2004年之后随着夏秋季节海冰范围的剧烈减少,6—12月海冰范围月度差异逐渐加大。

2.2 海冰范围变化关键节点分析

对44 a海冰范围数据做年度平均处理(见图4),通过以4 a为时间窗口进行滑动平均获取趋势线,可以发现北极海冰范围整体上呈明显的逐年减少趋势。2004年是海冰范围剧烈变化的关键节点,在此之前,海冰范围呈小幅度波动减少趋势,海冰范围增加和减少的年份基本处于持平状态,海冰范围年均值保持在 $11.92 \times 10^6 \text{ km}^2$ 左右,其中3月均值为 $15.54 \times 10^6 \text{ km}^2$,9月均值为 $6.83 \times 10^6 \text{ km}^2$,2004

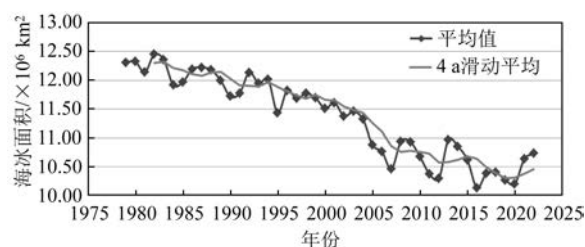


图4 海冰范围年均值变化趋势

Fig.4 Variation trend of annual mean sea ice extent

年之后海冰范围年均值为 $10.59 \times 10^6 \text{ km}^2$,其中3月均值为 $14.65 \times 10^6 \text{ km}^2$,9月均值仅为 $4.84 \times 10^6 \text{ km}^2$,两个时期全年均值差为 $1.33 \times 10^6 \text{ km}^2$,3月均值差为 $0.89 \times 10^6 \text{ km}^2$,而9月均值差达到 $1.99 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。由此可见,两个时期海冰范围出现了剧烈变化,夏秋季节的变化尤为显著。2004年之后海冰范围呈现了单年度大幅增加、多年连续小幅减少的衰减趋势,但海冰范围减少速度逐渐放缓。

2.3 海冰范围变化速度及海冰变化趋势分析

对海冰范围的年均值和最大值、最小值月份进行趋势线分析(见图5),结果表明,在研究期内,年均海冰范围的减少速度为 $5.26 \times 10^4 \text{ km}^2/\text{a}$,9月海冰减少速度最大,为 $7.75 \times 10^4 \text{ km}^2/\text{a}$,3月最小,为 $3.54 \times 10^4 \text{ km}^2/\text{a}$ 。通过海冰范围增量趋势分析可见(见图6),海冰范围减少速度呈明显的逐渐减缓趋势,3月减缓趋势最为显著,表明冬季海冰范围将逐渐向稳定趋势发展,9月呈微弱减缓趋势,长周期的海冰范围减少速度较为稳定,表明夏季海冰范围还将保持稳定减少的趋势。

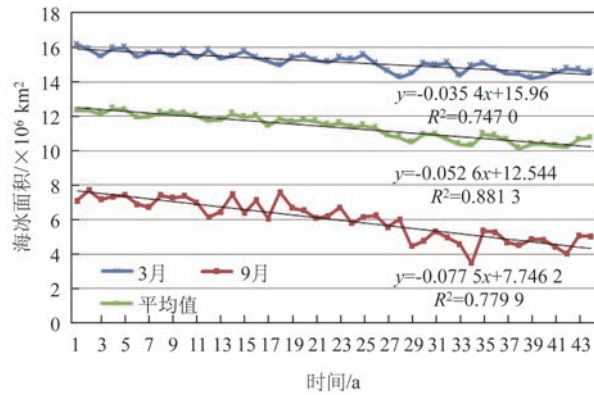


图5 海冰范围年平均、3月和9月变化趋势

Fig.5 Trends of sea ice extent in March, September, and annual averages

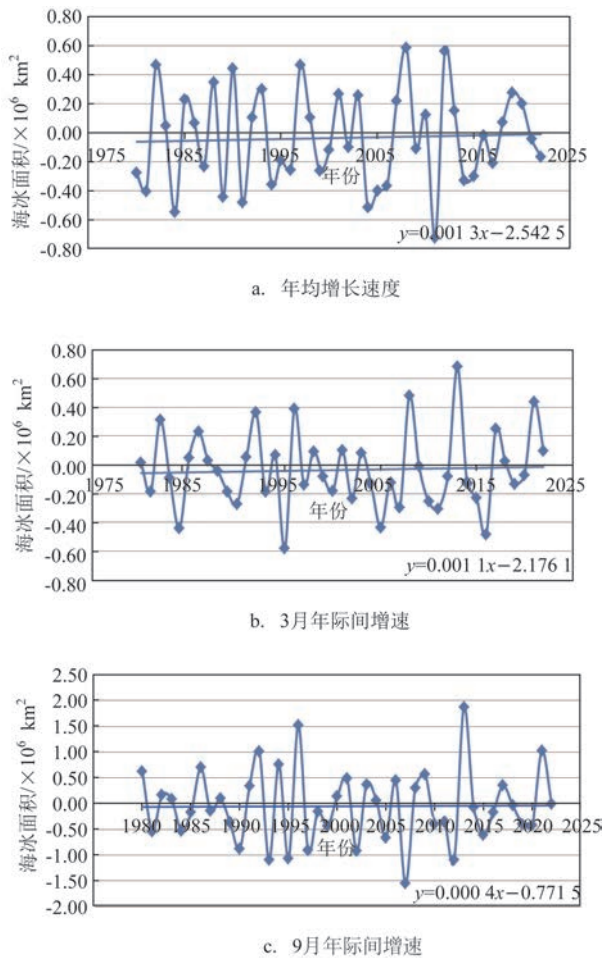


图6 海冰范围变化速度分析

Fig.6 Change rate of sea ice extent

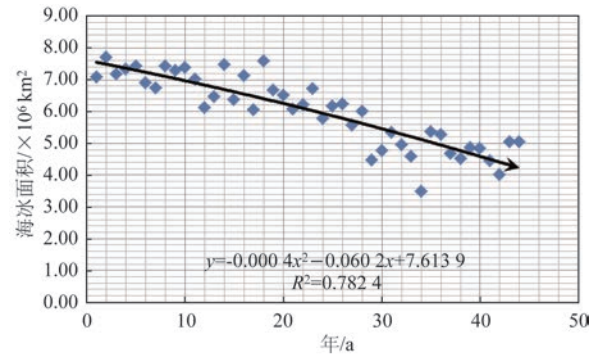


图7 9月海冰范围变化趋势预测分析

Fig.7 Prediction and analysis of the trend of sea ice extent in September

对9月海冰范围做趋势线拟合分析,如果采用线性拟合方式,自1979年开始,按照当前发展趋势,需要经过100 a即2078年左右海冰将完全消失;选择拟合精度更高的二次多项式进行趋势分析(见图7),按照当前的海冰范围减少趋势,无冰状态将出现的更早,仅需要经过82 a即2060年左右北极夏秋季大规模当年冰将会消失殆尽。

2.4 海冰范围季节性距平分析

按照北半球的四季划分方法对海冰范围进行季节性距平分析。由图8可见,在研究期内,各季节海冰范围均呈明显的减少趋势,春季(3—5月)和冬季(12月—次年2月)海冰范围年际间差异较小,夏季(6—8月)和秋季(9—11月)海冰范围距平曲线明显具有较大的波动性,夏初(6月)海冰范围距平波动逐渐开始加大,9月达到最大值并逐渐减小。从时间维度上看,2004年前后是正负距平值变化的拐点,2004年之前以正距平为主,之后以负距平为主,研究期内负距平超过 $2 \times 10^6 \text{ km}^2$ 的月份一共出现5次,其中2012年8月、9月、10月各一次,另外两次是2019年10月和2020年10月。通过统计可知,海冰范围距平最大值逐渐由9月过渡到10月,说明随着全球气候变化的进一步影响,10月的海冰范围与历史均值相比发生了剧烈变化,虽然10月整体上已经进入了海冰增长过程,但增长速度非常不稳定,其中2018年、2019年和2020年是历史上10月海冰增长最慢的3个年份,通过近年10月海冰范围的距平变化情况,可以推测北极海冰融冰期处于逐渐延长的趋势。

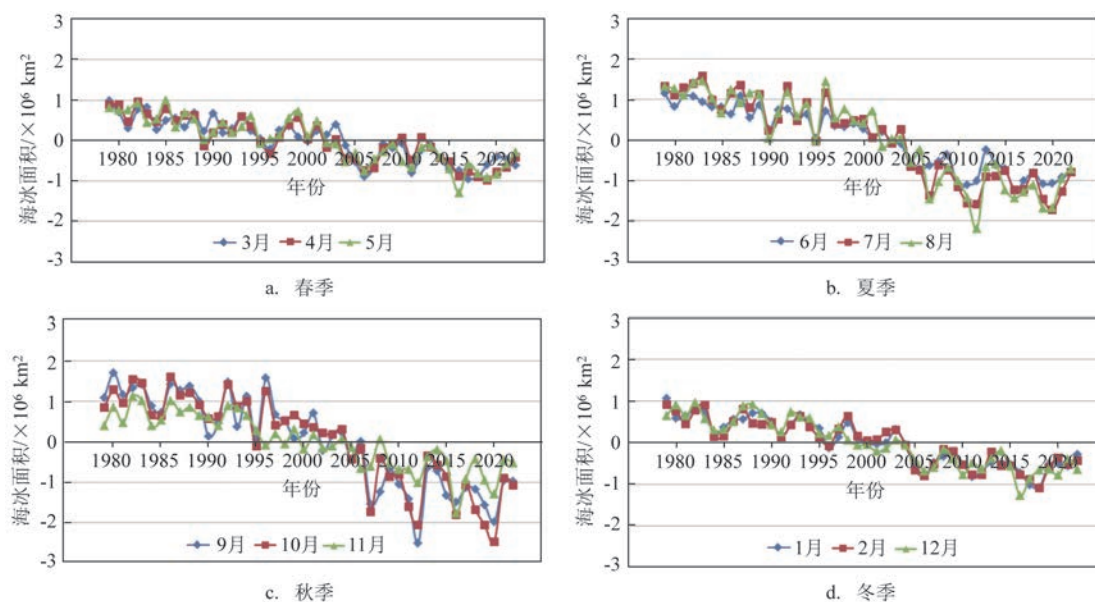


图8 海冰范围距平分析曲线

Fig.8 Trends of sea ice extent anomalies

3 结论

本文利用被动微波辐射计海冰范围遥感数据产品完成了1979—2022年北极海冰范围在时间维度上的变化特征及趋势分析。研究结果表明:

①研究期内海冰范围明显呈逐年减少的趋势。2004年是北极海冰范围变化的关键年,在此之前,海冰范围呈小幅度波动缓慢减少趋势,海冰范围增加和减少的年份基本处于持平状态,海冰范围年度均值为 $11.92 \times 10^6 \text{ km}^2$; 2004年之后海冰范围均值仅为 $10.59 \times 10^6 \text{ km}^2$, 且呈现多年连续小幅减少、间隔单年度增加的快速减少模式。

②3月海冰范围达到年度最大值,9月海冰范围最小,海冰范围年际差异较大,但变化规律较为稳定。研究期内海冰范围最小值出现在2012年9月,仅为 $3.49 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。研究期初期海冰范围很少出现月度间的大幅变化,2004年之后随着夏秋季节海冰范围的大幅减少,6—12月海冰范围月度差异逐渐加大。

③通过趋势分析可见,海冰范围减少速度呈明显的逐渐减缓趋势,3月减缓最为显著,表明冬季海冰范围将逐渐向稳定趋势发展,9月呈微弱减缓趋势,长周期海冰减少速度较为稳定,表明夏季海冰范围还将保持稳定减少的状态。

④春季和冬季海冰范围年际间差异较小,夏季和秋季海冰范围距平曲线明显具有较大的波动性,9月海冰范围距平波动达到最大值并逐渐减小。从时间维度上看,2004年前后是正负距平值变化的拐点,通过统计可知,海冰范围距平最大值已经逐渐由9月过渡到10月,北极海冰融冰期处于逐渐延长的趋势。

⑤通过趋势分析,2060年前后北极海域夏秋季节大规模的当年冰将完全消失。

参考文献:

- [1] PARKINSON C L, DIGIROLAMO N E. Sea ice extents continue to set new records: Arctic, Antarctic, and global results[J]. Remote Sensing of Environment, 2021, 267: 112753.
- [2] PARKINSON C L, DIGIROLAMO N E. New visualizations highlight new information on the contrasting Arctic and Antarctic sea-ice trends since the late 1970s[J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 183: 198-204.
- [3] COMISO J C, PARKINSON C L, GERSTEN R, et al. Accelerated decline in the Arctic sea ice cover[J]. Geophysical Research Letters, 2008, 35(1): L01703.
- [4] HAAS C, PFAFFLING A, HENDRICKS S, et al. Reduced ice thickness in arctic transpolar drift favors rapid ice retreat[J]. Geophysical Research Letters, 2008, 35(17): L17501.
- [5] NGHIEM S V, RIGOR I G, PEROVICH D K, et al. Rapid reduction of Arctic perennial sea ice[J]. Geophysical Research

- Letters, 2007, 34(19): L19504.
- [6] LEI R B, XIE H J, WANG J, et al. Changes in sea ice conditions along the Arctic northeast passage from 1979 to 2012[J]. Cold Regions Science and Technology, 2015, 119: 132-144.
- [7] XIE H, LEI R, KE C, et al. Summer sea ice characteristics and morphology in the Pacific Arctic sector as observed during the CHINARE 2010 cruise[J]. The Cryosphere, 2013, 7(4): 1057-1072.
- [8] RODRIGUES J. The rapid decline of the sea ice in the Russian Arctic[J]. Cold Regions Science and Technology, 2008, 54(2): 124-142.
- [9] CAVALIERI D J, PARKINSON C L. Arctic sea ice variability and trends, 1979-2010[J]. The Cryosphere, 2012, 6(4): 881-889.
- [10] PARKINSON C L, COMISO J C. Antarctic sea ice parameters from AMSR-E data using two techniques and comparisons with sea ice from SSM/I[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2008, 113(C2): C02S06.
- [11] STROEVE J C, SERREZE M C, HOLLAND M M, et al. The Arctic's rapidly shrinking sea ice cover: a research synthesis[J]. Climatic Change, 2012, 110(3): 1005-1027.
- [12] MARKUS T, STROEVE J C, MILLER J. Recent changes in Arctic sea ice melt onset, freezeup, and melt season length[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2009, 114(C12): C12024.
- [13] STROEVE J C, KATTSOV V, BARRETT A, et al. Trends in Arctic sea ice extent from CMIP5, CMIP3 and observations[J]. Geophysical Research Letters, 2012, 39(16): L16502.
- [14] OVERLAND J E, WANG M Y. When will the summer Arctic be nearly sea ice free? [J]. Geophysical Research Letters, 2013, 40(10): 2097-2101.
- [15] VIHMA T. Effects of Arctic sea ice decline on weather and climate: a review[J]. Surveys in Geophysics, 2014, 35(5): 1175-1214.
- [16] SCREEN J A. Far-flung effects of Arctic warming[J]. Nature Geoscience, 2017, 10(4): 253-254.
- [17] SÉVELLEC F, FEDOROV A V, LIU W. Arctic sea-ice decline weakens the Atlantic meridional overturning circulation[J]. Nature Climate Change, 2017, 7(8): 604-610.
- [18] STRAWA A W, LATSHAW G, FARKAS S, et al. Arctic ice loss threatens national security: a path forward[J]. Orbis, 2020, 64(4): 622-636.
- [19] RAHMSTORF S, BOX J E, FEULNER G, et al. Exceptional twentieth-century slowdown in Atlantic Ocean overturning circulation[J]. Nature Climate Change, 2015, 5(5): 475-480.
- [20] GROSFELD K, TREFFEISEN R, ASSENG J, et al. Online sea-ice knowledge and data platform <www.meereisportal.de> [J]. Polarforschung, Bremerhaven, Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research & German Society of Polar Research, 2016, 85(2): 143-155.
- [21] 刘忠方. 北极海冰消退及其主要驱动机制[J]. 自然杂志, 2022, 44(1): 39-46.
- LIU Z F. Arctic sea ice decline and its driving mechanisms[J]. Chinese Journal of Nature, 2022, 44(1): 39-46.
- [22] 刘艳霞, 王泽民, 刘婷婷. 1979~2014年南北极海冰变化特征分析[J]. 遥感信息, 2016, 31(2): 24-29.
- LIU Y X, WANG Z M, LIU T T. Change analysis for Antarctic and Arctic sea ice concentration and extent[J]. Remote Sensing Information, 2016, 31(2): 24-29.
- [23] 魏立新, 张占海. 北极海冰变化特征分析[J]. 海洋预报, 2007, 24(4): 42-48.
- WEI L X, ZHANG Z H. Analysis of Arctic sea ice variability[J]. Marine Forecasts, 2007, 24(4): 42-48.
- [24] 杨建玲, 何金海, 赵光平. 宁夏春季沙尘暴与北极海冰之间的遥相关关系[J]. 南京气象学院学报, 2003, 26(3): 296-307.
- YANG J L, HE J H, ZHAO G P. Telecorrelation of Arctic sea-ice with spring sandstorm in Ningxia[J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2003, 26(3): 296-307.
- [25] 王乐, 杨文发, 张录军, 等. 北极海冰对长江流域主汛期降雨的影响[J]. 水科学进展, 2019, 30(5): 623-631.
- WANG L, YANG W F, ZHANG L J, et al. Effect of Arctic sea ice on precipitation in the main flood season of the Yangtze River Basin[J]. Advances in Water Science, 2019, 30(5): 623-631.
- [26] 张若楠, 孙丞虎, 李维京. 北极海冰与夏季欧亚遥相关型年际变化的联系及对我国夏季降水的影响[J]. 地球物理学报, 2018, 61(1): 91-105.
- ZHANG R N, SUN C H, LI W J. Relationship between the interannual variations of Arctic sea ice and summer Eurasian teleconnection and associated influence on summer precipitation over China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018, 61(1): 91-105.
- [27] SPREEN G, KALESCHKE L, HEYGSTER G. Sea ice remote sensing using AMSR-E 89-GHz channels[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2008, 113(C2): C02S03.

Analysis of characteristics and trends of Arctic sea ice extent changes from 1979 to 2022

SUN Xiaoyu¹, SUN Qizhen¹, SHEN Hui^{1*}, LI Chunhua^{1,2}

(1. National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 100081, China; 2. Key Laboratory of Marine Hazards Forecasting, National Marine Environmental Forecasting Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China)

Abstract: The characteristics and trends of Arctic sea ice extent from 1979 to 2022 are analyzed using passive microwave radiometer remote sensing data products. The results show that the Arctic sea ice extent exhibits a clear decreasing trend during the study period. Prior to 2004, the sea ice extent displays a slow decreasing pattern with alternating increases and decreases. After 2004, there is a vibrational attenuation pattern that the sea ice extent decreases continuously for several years before experiencing a single-year large increase. The maximum sea ice extent occurs in March 1979, reaching 16.15 million square kilometers, while the minimum extent appears in September 2012, at only 3.49 million square kilometers. Trend line analysis of sea ice extent change speed indicates that the annual decrease rate is gradually slowing down, but the decrease rate in summer and autumn remains weak. According to current trend of sea ice reduction, the amount of first year ice in summer and autumn in the Arctic will basically disappear by early 2060s. Anomaly analysis shows that fluctuation in October sea ice extent is increasing, and the melting season is prolonging.

Key words: Arctic; sea ice; remote sensing