



引文格式:江萌,周春霞,张腾,等.北极海冰区 1981—2020 年辐射通量的时空变化特征与分析[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(9):1914–1927.DOI:10.13203/j.whugis20220630

Citation:JIANG Meng,ZHOU Chunxia,ZHANG Teng,et al.Spatial-Temporal Variation of Surface Radiation Budget over the Arctic Sea Ice Region from 1981 to 2020[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2025,50(9):1914–1927.DOI:10.13203/j.whugis20220630

# 北极海冰区 1981—2020 年辐射通量的 时空变化特征与分析

江萌<sup>1,2</sup> 周春霞<sup>1,2</sup> 张腾<sup>1,2</sup> 陈晓丽<sup>1,2</sup>

1 武汉大学中国南极测绘研究中心,湖北 武汉,430079

2 极地环境监测与公共治理教育部重点实验室,湖北 武汉,430079

**摘要:**北极海冰快速消退,表面净辐射及云辐射强迫变化显著,综合分析其时空变化特征对认识全球气候环境变化具有重要意义。基于欧洲中期天气预报中心第 5 代气候再分析数据集分析了 1981—2020 年北极海冰区域表面净辐射(短波净辐射、长波净辐射和总净辐射)及云辐射强迫(短波云辐射强迫、长波云辐射强迫和总云辐射强迫)的季节、年际和年代际变化特征。结果表明,1981—2020 年北极夏季海冰区域总净辐射的均值为  $84.16 \text{ W/m}^2$ ,其对地表起加热作用;总云辐射强迫均值为  $-16.78 \text{ W/m}^2$ ,云对地表起冷却作用。相较于长波辐射,短波辐射对表面净辐射和云辐射强迫的贡献更为显著。1981—2020 年短波净辐射呈明显的上升趋势,10 年变化速率达  $2.22 \text{ W/m}^2$ ,在 2011—2020 年却转为急剧下降趋势,10 年下降速率可达到  $6.58 \text{ W/m}^2$ ;短波云辐射强迫在 1981—2020 年夏季均值为  $-67.91 \text{ W/m}^2$ ,以  $-2.75 \text{ W/m}^2$  的 10 年变化速率显著下降,表明云对地表的冷却效应增强。北极边缘海域辐射通量变化剧烈,特别是巴伦支海-喀拉海,该海域夏季总净辐射与总云辐射强迫变化速度最快。

**关键词:**北极海冰区域;表面净辐射;云辐射强迫;ERA5;时空变化特征

中图分类号:P237

文献标识码:A

收稿日期:2024-09-10

DOI:10.13203/j.whugis20220630

文章编号:1671-8860(2025)09-1914-14

## Spatial-Temporal Variation of Surface Radiation Budget over the Arctic Sea Ice Region from 1981 to 2020

JIANG Meng<sup>1,2</sup> ZHOU Chunxia<sup>1,2</sup> ZHANG Teng<sup>1,2</sup> CHEN Xiaoli<sup>1,2</sup>

1 Chinese Antarctic Center of Surveying and Mapping, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 Key Laboratory of Polar Environment Monitoring and Public Governance(Wuhan University), Ministry of Education, Wuhan 430079, China

**Abstract: Objectives:** The Arctic sea ice region is rapidly decline, and the surface net radiation and cloud radiative forcing are of great importance to understand global climate and environment change. **Methods:** A long-term dataset of 40 years (1981—2020) from the European centre for medium-range weather forecasting reanalysis v5 is adopted to investigate the seasonal, annual and decadal variations in surface net shortwave radiation, surface net longwave radiation, surface net all-wave radiation, shortwave cloud radiative forcing, longwave cloud radiation forcing, and all-wave cloud radiative forcing. **Results:** The results show that the surface net all-wave radiation exhibited a warming effect in summer over the Arctic sea ice region from 1981 to 2020 and the average value was  $84.16 \text{ W/m}^2$ . In contrast, the all-wave cloud radiative forcing caused  $-16.78 \text{ W/m}^2$  of cooling in summer. **Conclusions:** Shortwave radiation contributed most to the surface net radiation and cloud radiative forcing. The shortwave net radiation showed a significant increasing trend from 1981 to 2020 with decadal change rate of  $2.22 \text{ W/m}^2$ , while declined at a decadal

**基金项目:**国家重点研发计划(2021YFC2803303);国家自然科学基金(42171133);湖北省自然科学基金(2019CFA057)。

**第一作者:**江萌,硕士,研究方向为极地遥感。917691947@qq.com

**通信作者:**周春霞,博士,教授。zhoucx@whu.edu.cn

change rate of  $-6.58 \text{ W/m}^2$  from 2011 to 2020. The summer average of shortwave cloud radiative forcing was  $-67.91 \text{ W/m}^2$ , and it decreased deeply at a decadal rate of change of  $-2.75 \text{ W/m}^2$ , indicating that the cooling effect of cloud on the surface was enhanced. The spatial distribution of summer trends showed that the highest changing rate of surface radiation fluxes existed in the Arctic marginal sea area, especially in the Barents-Kara Sea, where the surface net all-wave radiation and all-wave cloud radiation forcing changed fastest in summer.

**Key words:** Arctic sea ice region; surface net radiation; cloud radiative forcing; ERA5; spatial-temporal variation characteristics

近几十年来全球持续变暖,北极作为全球气候变化的指示器,其气温变化速率约是全球平均增长速率的 4 倍,被称为“北极放大”现象<sup>[1]</sup>。受快速升温影响,北极夏季海冰覆盖范围不断减小<sup>[2-3]</sup>、厚度变薄<sup>[4]</sup>、季节性海冰增多<sup>[5-6]</sup>,融化提前<sup>[7-8]</sup>、地表反照率降低<sup>[9]</sup>,导致海冰-海洋系统吸收的太阳辐射增多<sup>[10-11]</sup>,进一步加剧海冰融化。地表辐射能量作为反映地-气系统能量交换和物质循环的关键指标,其平衡状态主要取决于短波辐射(shortwave, SW)与长波辐射(longwave, LW)的相互作用,而 SW 和 LW 又会受到地表上空云的影响<sup>[12]</sup>。通过系统分析地表辐射能量平衡,可深化对北极地区气候环境演变的理解。

表面净辐射(surface net radiation, SNR)通量是衡量全球气候变化的关键变量,其数值由下行辐射与上行辐射的差值决定<sup>[13]</sup>,根据辐射波段特征可分为短波净辐射(surface net shortwave radiation, SWnet)和长波净辐射(surface net longwave radiation, LWnet)。太阳高度角、地表反照率以及云层特性是影响 SWnet 的关键因素;而地表温度、下垫面性质以及云量、云光学厚度和云粒子有效半径等云参数的综合作用显著影响 LWnet 的变化<sup>[14-18]</sup>。云作为地表辐射平衡的重要调节因子,它们通过反射太阳辐射减少到达地表的 SWnet,对地-气系统起降温作用;通过吸收地表发射的 LW,向下发射 LW,对地-气系统起增温作用<sup>[19-22]</sup>。云辐射强迫(cloud radiative forcing, CRF)是表征云层对地表辐射收支影响的关键参数,其值定义为实际天空下的总净辐射(surface net all-wave radiation, Rnet)与理想晴空条件下 Rnet 的差值<sup>[19]</sup>,包括短波云辐射强迫(SW CRF)和长波云辐射强迫(LW CRF)。北极地区全年云量分布密集,年均覆盖率高达 74%<sup>[23]</sup>。盛夏时期,云层的辐射效应尤为显著,主要表现为:下行长波辐射(downwelling longwave, DLW)增强约  $81 \text{ W/m}^2$ ,而下行短波辐射(downwelling shortwave, DSW)减少近  $185 \text{ W/m}^2$ <sup>[24]</sup>。

北极地区云辐射反馈过程非常复杂,已有研究综合利用地面观测、卫星遥感、再分析数据及数值模拟等多种方式,探讨了海冰区域表面辐射收支的时空变化特征。基于北冰洋地表热收支实验、北极夏季云和海洋研究实验以及新奥勒松站点的实测数据,研究发现盛夏时期云层在地表辐射平衡中起显著的冷却作用,其他时期均呈保温作用<sup>[14,21,25-26]</sup>。文献[27]基于 1998-06—2008-05 阿拉斯加北坡站和巴罗站的辐射数据,分析了该区域 DSW、上行短波辐射(upwelling shortwave, USW)、DLW、上行长波辐射(upwelling longwave, ULW)、SW CRF、LW CRF 及总云辐射强迫(all-wave cloud radiative forcing, AW CRF)的季节和年际变化,发现夏季 DLW 呈下降趋势,而 DSW 呈增加趋势。现有卫星遥感、再分析数据和数值模拟获得的辐射数据突破了传统地面观测数据在时空覆盖范围上的局限性,为分析北极海冰区域辐射通量长时序时空变化提供了重要的数据支撑和技术途径。已有研究多关注 USW、DSW、ULW 与 DLW 的长时序月均值变化<sup>[18,28-30]</sup>。文献[31-32]基于 APP-x 数据发现,1982—1999 年 SNR 无明显季节性年际变化特征,但 SW CRF 以每 10 年  $-6.60 \text{ W/m}^2$  的速度显著下降,LW CRF 以每 10 年  $1.13 \text{ W/m}^2$  的速度增加,在 SW CRF 和 LW CRF 的综合作用下,AW CRF 以每 10 年  $-5.74 \text{ W/m}^2$  的速度下降。文献[33]基于 ERA-Interim 数据将研究时间扩展为 1982—2015 年,对 SWnet、LWnet、SW CRF 和 LW CRF 的长期时空变化特征进行了研究。文献[34]通过 CMIP6 模型系统评估了北极盆地区域各云辐射通量,包括 USW、DSW、SWnet、ULW、DLW、LWnet、Rnet、SW CRF、LW CRF 和 AW CRF 的季节变化和空间分布特征。

近几十年北极夏季海冰呈显著减少趋势,除长期变化趋势外,显著的年际变化表明海冰对短期气候波动敏感<sup>[15]</sup>。已有多个研究聚焦于 SNR (SWnet、LWnet 和 Rnet)和 CRF (SW CRF、LW

CRF和AW CRF)的月均值变化,对年际变化的研究时段相对有限,且未能系统探讨辐射通量的短期波动与长期趋势之间的关系。本文利用1981—2020年ERA5辐射数据,获取北极海冰区域云辐射通量的空间分布特征及其季节、年际和年代际变化特征,并对其进行分析。

## 1 数据和方法

### 1.1 数据

美国国家冰雪数据中心提供了1978-11—2024-03逐日和逐月的海冰密集度(sea ice concentration, SIC)产品。该产品基于多源卫星微波遥感亮温数据,采用Bootstrap算法反演生成,采用极方位立体投影,空间分辨率为25 km×25 km<sup>[35]</sup>。该数据集具有较高的可靠性,与北极东北航道实测的SIC数据一致性较高,其偏差较低且均方根偏差控制在12%以内<sup>[36]</sup>。本文采用该产品1981—2020年的月平均数据。

欧洲中期天气预报中心(European centre for medium-range weather forecasting, ECMWF)融合多种观测与模型数据生成的第5代气候再分析数据集(ECMWF reanalysis v5, ERA5),提供了1979年至今覆盖大气、陆地和海洋的全球气候变量,空间分辨率为0.25°×0.25°,其提供的北极地区辐射数据与实测数据具有较好的一致性<sup>[37-38]</sup>,与地面站点实测辐射数据差异为-0.26±19.02 W/m<sup>2</sup>。本文采用1981—2020年每月地表辐射数据,使用了实际天空下地表SWnet、晴朗天空下地表SWnet、实际天空下地表LWnet和晴朗天空下地表LWnet共4种辐射产品<sup>[39]</sup>。

### 1.2 方法

SNR与CRF的计算公式如下:

$$R_{\text{SWnet}} = R_{\text{DSW}} - R_{\text{USW}} \quad (1)$$

$$R_{\text{LWnet}} = R_{\text{DLW}} - R_{\text{ULW}} \quad (2)$$

$$R_{\text{Rnet}} = R_{\text{SWnet}} + R_{\text{LWnet}} \quad (3)$$

$$R_{\text{SW CRF}} = R_{\text{SWnet}_{\text{all sky}}} - R_{\text{SWnet}_{\text{clear sky}}} \quad (4)$$

$$R_{\text{LW CRF}} = R_{\text{LWnet}_{\text{all sky}}} - R_{\text{LWnet}_{\text{clear sky}}} \quad (5)$$

$$R_{\text{AW CRF}} = R_{\text{SW CRF}} + R_{\text{LW CRF}} \quad (6)$$

式中, $R_{\text{SWnet}}$ 、 $R_{\text{DSW}}$ 、 $R_{\text{USW}}$ 分别为SWnet、DSW、USW的值; $R_{\text{LWnet}}$ 、 $R_{\text{DLW}}$ 、 $R_{\text{ULW}}$ 分别为LWnet、DLW、ULW的值; $R_{\text{Rnet}}$ 为Rnet的值; $R_{\text{SW CRF}}$ 、 $R_{\text{SWnet}_{\text{all sky}}}$ 、 $R_{\text{SWnet}_{\text{clear sky}}}$ 分别为SW CRF、实际天空下SWnet和晴朗天空下SWnet的值; $R_{\text{LW CRF}}$ 、 $R_{\text{LWnet}_{\text{all sky}}}$ 、 $R_{\text{LWnet}_{\text{clear sky}}}$ 分别为LW CRF、实际天空下

LWnet和晴朗天空下LWnet的值; $R_{\text{AW CRF}}$ 为AW CRF的值。本文定义下行方向的辐射通量为正值,上行方向为负值。当CRF值为正时,相对于晴朗的天空,云对地表起保温作用;CRF为负值时,云对地表起冷却作用。

本研究采用多种统计方法对时间序列的变化特征进行分析,包括Mann-Kendall(MK)趋势检验法、滑动平均法、最小二乘线性回归以及斜率检测法。MK趋势检验法作为一种非参数统计方法,主要通过Z值评估时间序列趋势的显著性<sup>[40]</sup>。Z值的具体计算式为:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{n(n+1)(2n+5)/18}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{n(n+1)(2n+5)/18}}, & S < 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(X_j - X_i) \quad (8)$$

式中, $n$ 为时间序列的长度; $X_i$ 、 $X_j$ 分别为时间序列中第*i*个和第*j*个数据值,且*i*<*j*;sgn是符号函数,当*X<sub>i</sub>*<*X<sub>j</sub>*时,取值为1;当*X<sub>i</sub>*=*X<sub>j</sub>*时,取值为0;当*X<sub>i</sub>*>*X<sub>j</sub>*时,取值为-1。Z为正值代表时间序列呈上升趋势,Z为负值代表呈下降趋势。在特定置信水平下,若统计量Z的绝对值超过临界值,则可判定该时间序列具有显著的变化趋势。本文采用95%置信水平,对应阈值为1.96。

本文采用滑动平均法对时间序列数据进行平滑处理,以5年为固定步长逐步计算局部平均值,从而有效降低随机波动的影响,突显数据的长期变化规律<sup>[41]</sup>。运用斜率检测法分析回归模型系数的变化特征,设定10年为特定时间窗口进行连续斜率计算,依据相邻时段斜率符号的改变识别趋势突变位置<sup>[13,42]</sup>。基于上述方法,对北极地区近40年辐射通量数据进行趋势分析,探究其变化过程中可能存在的显著转折特征。

为确保不同数据集间的空间一致性,采用重采样方法将SIC和辐射数据统一转换至极方位立体投影(25 km×25 km)。应用陆地掩膜和海冰掩膜技术,剔除了海冰密集度低于15%的开阔水体的干扰,从而构建准确的海冰区域辐射数据集。在此基础上,对云辐射通量的数据进行时空平均处理,系统研究其季节、年际及年代际变化特征。本文将1981—2020年观测数据划分为4个10年期进行分析,分别为1981—1990年、1991—2000年、2001—2010年以及2011—2020年。

## 2 结果与分析

本文研究区域为  $45^{\circ}\text{N}$  以北的常年海冰覆盖区域, 如图 1 所示, 包括北极中央海域、加拿大北极群岛、哈德逊湾、巴芬湾、格陵兰海和巴伦支海-喀拉海, 不涉及夏季海冰完全融化的海域, 即白令海、鄂霍茨克海和圣劳伦斯湾<sup>[43]</sup>。

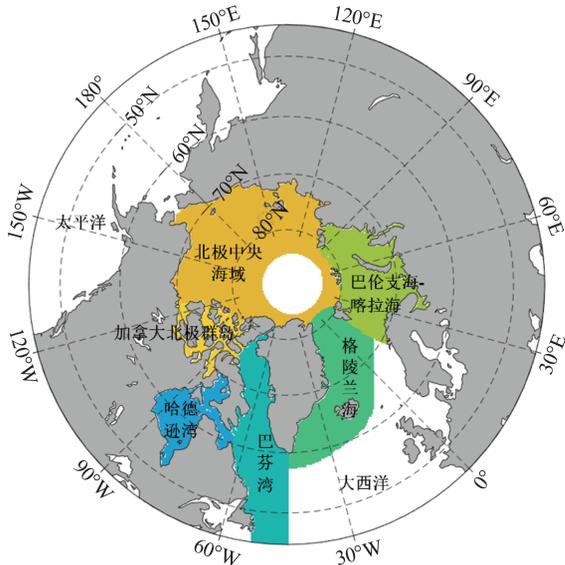


图 1 研究区域

Fig. 1 The Study Area

### 2.1 时序变化特征分析

#### 2.1.1 季节变化

根据 1981—2020 年北极海冰区域 SNR 和 CRF 月均值变化图(图 2)可以看出, 北极海冰区域 SNR 与 CRF 呈显著的季节性变化特征。SWnet 全年均为正值, 地表通过吸收 SW 持续累积热量; LWnet 为负值, 地表通过发射 LW 向外释放热量, 一定程度上抵消了 SW 所产生的增温效应; 在 5 月—8 月期间, Rnet 为正值, 地表处于热量累积状态, 此时 SWnet 主导地表辐射平衡; 其余月份 Rnet 呈现负值, 地表处于热量损失状态, 该时段内 LWnet 的释放量超过 SWnet 的吸收量。北极海冰区域 SWnet、LWnet 和 Rnet 均呈典型的单峰分布。冬季极夜期间, SWnet 接近  $0\text{ W/m}^2$ , 夏季受太阳辐射增强及海冰消融引起的地表反照率降低影响, SWnet 在 6 月和 7 月达到峰值, 超过  $100\text{ W/m}^2$ 。LWnet 的季节波动相对平缓, 其最大值出现在 7 月, 为  $-18\text{ W/m}^2$ , 主要是由于云量增加引起的 DLW 增幅超过了地表温度升高导致的 ULW 增幅<sup>[18]</sup>。

北极海冰区域 CRF 月均值变化如图 2 中虚

线所示, 云层通过削弱 DSW, 显著减少地表吸收的 SWnet, 因此 SW CRF 在一年中均为负值, 对地表产生持续的冷却效应。云层通过增强 DLW, 使 LW CRF 表现为正值, 对地表产生增温效应。夏季 SW CRF 的冷却效应与 LW CRF 的增温效应均达到峰值, SW CRF 在云辐射平衡中起主导作用, 因此 AW CRF 为负值, 云对地表总体呈冷却效应, 有效减缓海冰的消融过程。本文研究分析的 SNR 与 CRF 季节性变化规律与已有研究结论一致<sup>[17,31,38]</sup>。

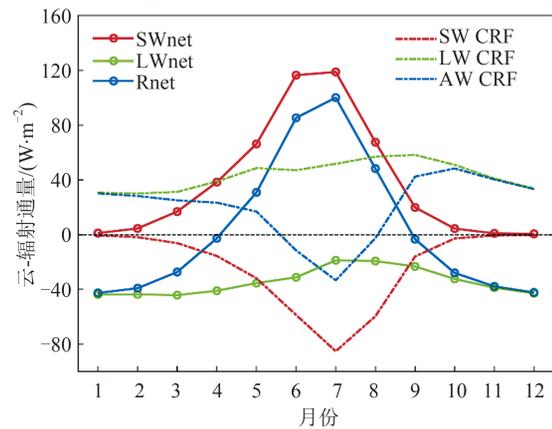


图 2 1981—2020 年北极海冰区域 SNR 和 CRF 月均值变化

Fig. 2 Monthly Variation of SNR and CRF over Arctic Sea Ice Region from 1981 to 2020

为分析辐射通量的年代际变化特征, 本文基于 1981—2020 年云辐射通量数据, 计算了每 10 年月平均辐射通量与 40 年月均值的偏差, 即距平值, 结果如图 3 所示。LWnet 和 LW CRF 的 10 年距平值变化幅度较小, 其绝对值普遍低于  $3\text{ W/m}^2$  (图 3(b)、3(e))。SWnet、Rnet、SW CRF 和 AW CRF 夏季年代际变化幅度大, 其绝对值最大可达  $8\text{ W/m}^2$  (图 3(a)、3(c)、3(d)、3(f))。从 4 个 10 年期的距平值变化可见, 夏季 SWnet 和 Rnet 距平值由负值增长为正值, 增加近  $10\text{ W/m}^2$ , 表明 SWnet 对地表的增温效应逐渐增强; SW CRF 和 AW CRF 的距平值则呈现相反的变化趋势, 由正值减小至负值, 表明云层对地表的冷却效应逐渐加强。

#### 2.1.2 年际及年代际变化

夏季云辐射通量变化最为剧烈, 本文根据 6 月—8 月北极海冰区域的辐射通量数据计算每年夏季的均值, 得到 40 年的夏季均值。1981—2020 年北极地区 SNR 和 CRF 的夏季均值年际变化如图 4 所示, 总变化趋势和 10 年变化趋势见表 1。

由图 4 和表 1 可知, SWnet 年际变化显著(图 4(a)), 1989 年达到低谷 ( $100.67\text{ W/m}^2$ ), 2013 年

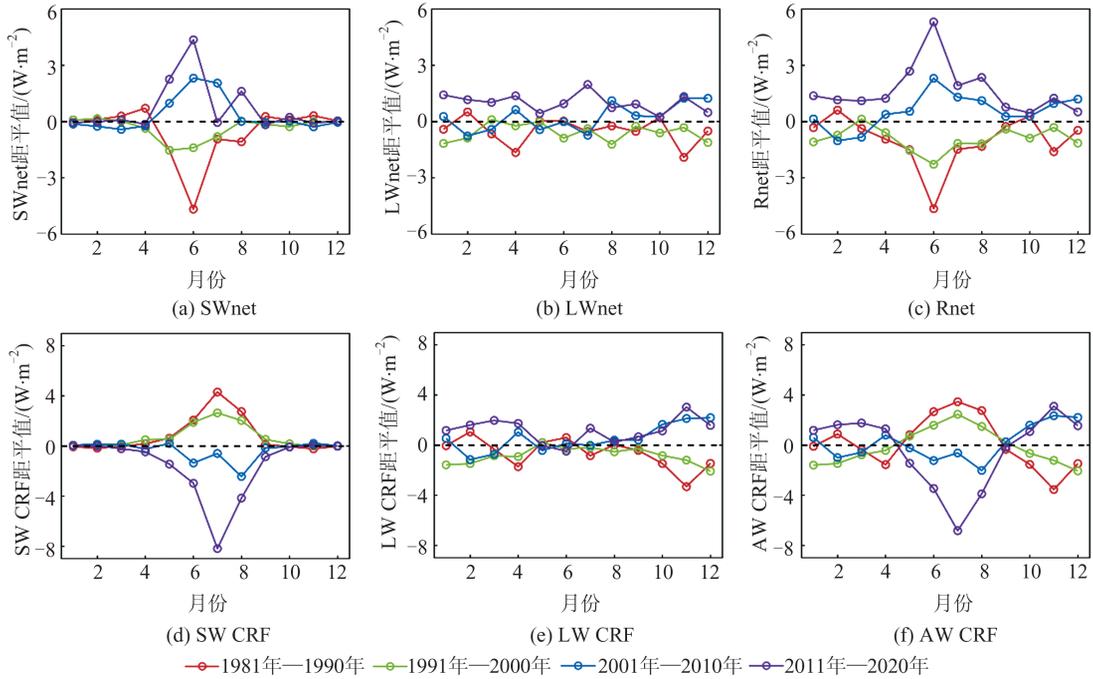


图3 北极海冰区域SNR和CRF年代际距平值月变化

Fig. 3 Monthly Variation of Decadal SNR and CRF Anomaly over Arctic Sea Ice Region

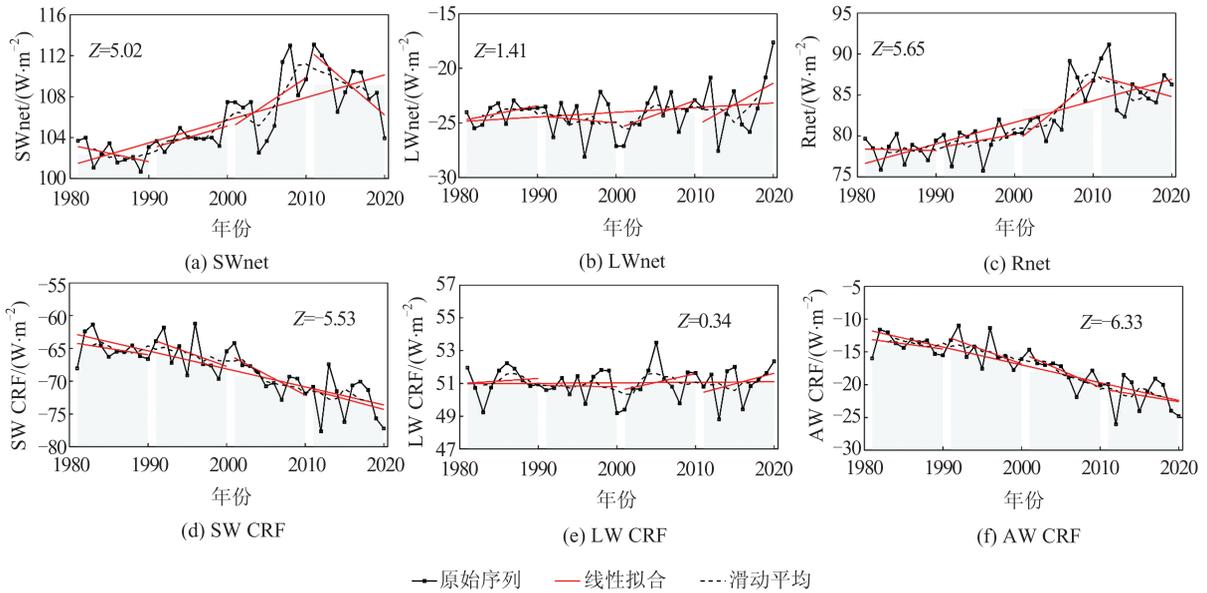


图4 1981—2020年北极海冰区域SNR和CRF夏季均值年际变化

Fig. 4 Interannual Variation of Summer Average of SNR and CRF over Arctic Sea Ice Region from 1981 to 2020

达到峰值( $110.69 \text{ W/m}^2$ )。1981—2020年SWnet呈显著上升趋势,10年变化速率为 $2.22 \text{ W/m}^2$ ,各海域中巴伦支海-喀拉海区域的增幅最为显著,10年增加速率可达到 $6.88 \text{ W/m}^2$ ,与该区域强烈的海冰消融过程有关<sup>[44-45]</sup>。从第1个10年至第4个10年,SWnet的均值总体呈增加趋势,但其年代际变化趋势存在明显差异:第1个、第4个10年呈下降趋势,第2个、第3个10年呈增加趋势,且第4个10年的下降速度通过了95%的显著性检验,以每10年 $6.58 \text{ W/m}^2$ 的速率下降。在1991—

2000年和2001—2010年,除格陵兰海,北极各海域SWnet均呈增加趋势。弗拉姆海峡持续输出的海冰堆积在格陵兰海区域,导致该海域反照率增强,因此SWnet表现出相反的下降趋势<sup>[46]</sup>。LWnet夏季均值在 $-24 \text{ W/m}^2$ 附近波动,在年际和年代际尺度上均无显著的变化趋势。LWnet的变化主要取决于云、气温变化以及下垫面特征等因素的影响,夏季DLW与ULW增长幅度基本一致<sup>[18]</sup>,因此LWnet无显著年际与年代际变化特征。受SWnet显著增加的影响,Rnet呈现明显的

表 1 1981—2020 年北极海冰区域 SNR 和 CRF 夏季均值总变化趋势和 10 年变化趋势/( $W \cdot m^{-2}$ )Tabel 1 Overall and Decadal Trends of Summer Average SNR and CRF in Arctic Sea Ice Region from 1981 to 2020/( $W \cdot m^{-2}$ )

类别	海域	1981—2020 年	1981—1990 年	1991—2000 年	2001—2010 年	2011—2020 年
SWnet	全北极	2.22**	-1.64	2.24	5.10	-6.58*
	北极中央海域	2.21**	-0.33	1.70	2.83	-3.96
	巴芬湾	5.20**	4.26	13.94	8.47	-3.09
	加拿大北极群岛	3.14*	-2.71	14.15*	23.84*	-27.35*
	格陵兰海	1.56	-7.60	-4.83	-5.30	-20.23*
	哈德逊湾	5.34**	-1.50	18.04	5.42	-7.26
	巴伦支海-喀拉海	6.88**	-7.21	4.92	13.00	-7.36
LWnet	全北极	0.43	1.41	-0.65	2.61	3.96
	北极中央海域	0.51	1.46	-0.20	3.85	3.21
	巴芬湾	-0.26	-2.74	-6.29	2.11	-1.22
	加拿大北极群岛	1.15**	1.92	-2.79	-3.03	10.41**
	格陵兰海	0.30	10.01**	1.33	0.06	9.01
	哈德逊湾	-0.94	-2.72	-3.40	2.88	5.58
	巴伦支海-喀拉海	-0.24	1.87	-1.07	0.74	-0.44
Rnet	全北极	2.63**	-0.19	1.64	7.69*	-2.69
	北极中央海域	2.71**	1.17	1.51	6.69	-0.78
	巴芬湾	4.94**	1.52	7.65	10.59	-4.31
	加拿大北极群岛	4.28**	-0.80	11.36	20.81*	-16.97
	格陵兰海	1.84**	2.42	-2.71	-5.24	-11.22
	哈德逊湾	4.43**	-4.22	14.65	8.39	-1.61
	巴伦支海-喀拉海	6.68**	-5.35	3.86	13.64*	-7.26
SW CRF	全北极	-2.75**	-1.91	-4.31	-6.30*	-3.22
	北极中央海域	-3.18**	-2.66	-5.34	-6.80*	-3.86
	巴芬湾	-1.44	3.91	4.20	-8.58	8.45
	加拿大北极群岛	-3.03**	1.60	-0.30	-0.56	-12.09*
	格陵兰海	-0.94	-11.44*	-4.91	4.93	-11.20
	哈德逊湾	-0.75	2.92	-3.60	-4.55	0.72
	巴伦支海-喀拉海	-5.73**	-1.81	-4.94	-18.64	9.17
LW CRF	全北极	0.03	0.32	-0.08	1.07	1.30
	北极中央海域	-0.04	-0.41	0.22	1.35	1.07
	巴芬湾	-0.84**	-2.92	-4.17	-0.03	1.23
	加拿大北极群岛	0.26	0.16	-3.74	-4.85	6.91
	格陵兰海	-0.14	6.12**	1.55	1.91	3.57
	哈德逊湾	-0.92	-1.59	-3.43	2.03	0.70
	巴伦支海-喀拉海	0.08	3.68	-0.35	3.58	-1.80
AW CRF	全北极	-2.72**	-1.59	-4.37	-5.20*	-1.96
	北极中央海域	-3.22**	-3.06	-5.12	-5.44	-2.80
	巴芬湾	-2.22**	0.92	0.42	-8.56	9.86
	加拿大北极群岛	-2.78**	1.71	-4.01	-5.31	-5.10
	格陵兰海	-1.02	-5.30	-3.42	6.96*	-8.06
	哈德逊湾	-1.68**	1.35	-7.11	-2.58	1.41
	巴伦支海-喀拉海	-5.66**	1.87	-5.26	-15.03*	7.35

注: \*和\*\*分别代表通过了 95% 和 99% 的显著性检验。

增长趋势,其变化速率为每 10 年  $2.63 W/m^2$ ,特别是在 2001—2010 年间,增速最为显著,达到每 10 年  $7.69 W/m^2$ 。从表 1 中可以看到,大部分的年代际变化趋势结果未通过 95% 显著性检验,且数值普遍偏高,每 10 年变化幅度超过  $10 W/m^2$ 。

这可能是由于研究时间尺度较短,短期气候波动对长期变化趋势的研究造成了干扰。

根据图 4(d)、图 4(e)、图 4(f)和表 1 分析北极海冰区域 CRF 长时序变化,在 1981—2020 年期间,SW CRF 以每 10 年  $2.75 W/m^2$  的速率显著下

降,而LW CRF年际波动幅度较为剧烈,但变化趋势在统计上并不显著,AW CRF受SW CRF影响,以每10年 $2.72 \text{ W/m}^2$ 的速率显著下降。SW CRF与AW CRF在各年代际均呈下降趋势,同40年整体变化趋势一致,但阶段性差异显著,其中第1个、第4个10年变化相对平缓,而第2个、第3个10年表现出更为急剧的下降趋势。各海域中,巴伦支海-喀拉海区域AW CRF下降趋势最剧烈,该区域云对地表的冷却效应增强也最为突出。

北极海冰区域夏季SWnet和Rnet在2011—2020年呈现下降趋势,与1981—2020年的增加趋势形成鲜明对比。本文采用滑动平均方法对SWnet和Rnet数据进行平滑处理,并以10年为时间窗口计算其变化趋势斜率,以识别SNR时间序列的趋势转折点,结果如图5所示。由图5可知,SWnet和Rnet趋势变化相似,在2011年之前的趋势为正值,呈持续上升状态,其变化速率在2000年后显著增加,随后SWnet和Rnet的变化趋势分别于2005年和2006年开始减缓,至2010年减为负值,其变化趋势发生逆转,表明该时段存在明显的突变特征。尽管2010年后SWnet和Rnet呈下降趋势,且下降速率不断变大,2011—2020年平均值仍高于2001—2010年平均值(图4(a)、4(c)),说明北极海冰区吸收的太阳辐射总量仍在累积,仅增加速率有所降低。与1981—2010年相比,近10

年海冰消减速率明显减缓,反照率相应升高,导致海冰吸收的短波辐射减少<sup>[47-48]</sup>。从40年尺度来看,北极地区SWnet和Rnet总体保持增长趋势,但2011年后出现的下降趋势是否改变长期变化格局,仍需更长时间序列数据进一步验证。

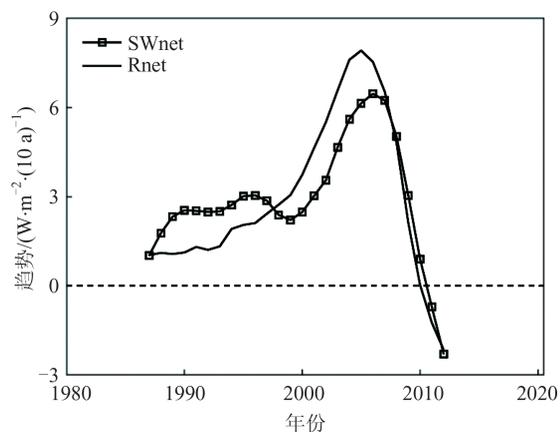


图5 SWnet和Rnet趋势检测

Fig. 5 Trend Detection of SWnet and Rnet

## 2.2 空间变化特征分析

### 2.2.1 辐射通量空间分布

1981—2020年北极海冰区域SNR和CRF夏季均值空间分布如图6所示。由图6可以看出,SNR和CRF夏季均值具有明显的纬圈分布特征,SNR随着纬度的升高呈递减趋势,而CRF则呈现相反的递增趋势。

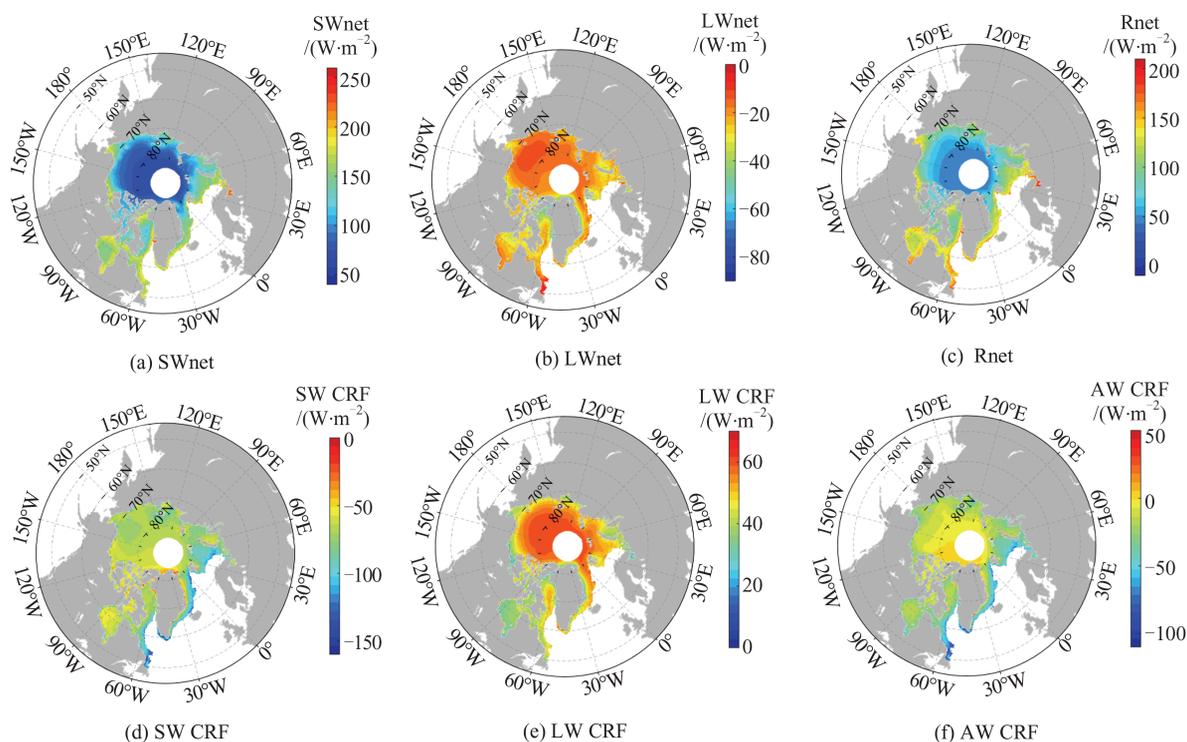


图6 1981—2020年北极海冰区域SNR和CRF夏季均值空间分布

Fig. 6 Spatial Distribution of Summer Pixel Average of SNR and CRF over Arctic Sea Ice Region from 1981 to 2020

通过计算各海域不同时间段内像元的云辐射通量平均值,获得了各海域 SNR 和 CRF 的 40 年和每 10 年的夏季平均值,结果见表 2。由 1981—2020 年北极海冰区域 SWnet 夏季均值空间分布(图 6(a))可知,在各海域中,哈德逊湾由于 SIC 值

较低,其 SWnet 值最高,为 156.24 W/m<sup>2</sup>;北极中央海域因 SIC 较高,SWnet 在各海域中最低,仅为 88.76 W/m<sup>2</sup>[49]。近 40 年间北极海冰区 SWnet 整体呈上升趋势,由 1981—1990 年的 102.38 W/m<sup>2</sup> 增长至 2011—2020 年的 109.18 W/m<sup>2</sup>。除格陵

表 2 1981—2020 年北极海冰区域 SNR 和 CRF 夏季均值/(W·m<sup>-2</sup>)

Table 2 Summer Average of SNR and CRF over Arctic Sea Ice Region from 1981 to 2020/(W·m<sup>-2</sup>)

类别	海域	1981—2020 年	1981—1990 年	1991—2000 年	2001—2010 年	2011—2020 年
SWnet	全北极	105.55	102.38	104.12	107.48	109.18
	北极中央海域	88.76	84.80	87.84	91.49	91.42
	巴芬湾	145.03	139.87	139.73	152.18	153.12
	加拿大北极群岛	121.24	116.37	121.14	120.71	127.26
	格陵兰海	123.85	120.23	121.95	129.04	125.72
	哈德逊湾	156.24	148.75	155.40	158.47	165.45
	巴伦支海-喀拉海	118.31	112.71	113.09	123.05	133.00
LWnet	全北极	-24.09	-24.07	-24.75	-24.17	-23.22
	北极中央海域	-20.82	-20.81	-21.52	-21.15	-19.67
	巴芬湾	-32.90	-32.40	-33.04	-33.22	-33.14
	加拿大北极群岛	-31.92	-33.40	-32.88	-30.85	-30.42
	格陵兰海	-29.49	-28.53	-30.63	-30.16	-28.66
	哈德逊湾	-28.62	-26.54	-29.43	-29.27	-29.96
	巴伦支海-喀拉海	-25.14	-24.83	-24.88	-25.45	-25.82
Rnet	全北极	81.46	78.31	79.38	83.28	85.94
	北极中央海域	67.94	63.99	66.31	70.34	71.74
	巴芬湾	112.13	107.47	106.69	118.96	119.98
	加拿大北极群岛	89.32	82.97	88.26	89.86	96.84
	格陵兰海	94.47	91.71	91.74	98.89	97.05
	哈德逊湾	127.65	122.20	125.97	129.23	135.64
	巴伦支海-喀拉海	93.14	87.82	88.21	97.49	107.26
SW CRF	全北极	-67.91	-65.07	-65.72	-69.18	-72.77
	北极中央海域	-67.42	-63.77	-65.42	-68.16	-73.08
	巴芬湾	-69.93	-69.03	-67.45	-72.17	-72.59
	加拿大北极群岛	-60.63	-56.73	-57.83	-63.32	-65.02
	格陵兰海	-72.28	-73.33	-69.60	-72.07	-74.45
	哈德逊湾	-64.56	-66.32	-59.09	-66.51	-66.40
	巴伦支海-喀拉海	-75.25	-68.87	-73.92	-79.25	-85.42
LW CRF	全北极	51.03	51.15	50.82	51.10	51.03
	北极中央海域	55.23	55.65	54.98	54.87	55.40
	巴芬湾	43.18	44.24	43.41	42.62	41.77
	加拿大北极群岛	43.12	42.90	42.23	44.05	43.32
	格陵兰海	47.41	48.32	47.00	46.98	47.17
	哈德逊湾	37.84	39.54	36.95	38.50	35.83
	巴伦支海-喀拉海	49.55	48.89	50.52	49.50	49.21
AW CRF	全北极	-16.78	-13.82	-14.80	-17.97	-21.64
	北极中央海域	-12.17	-8.10	-10.41	-13.27	-17.65
	巴芬湾	-26.35	-24.46	-23.65	-29.09	-30.34
	加拿大北极群岛	-17.43	-13.70	-15.54	-19.17	-21.66
	格陵兰海	-24.25	-24.49	-22.03	-24.40	-26.55
	哈德逊湾	-26.75	-26.78	-22.15	-28.05	-30.61
	巴伦支海-喀拉海	-25.67	-19.96	-23.35	-29.71	-36.19

兰海和北极中央海域外,其余区域SWnet增加幅度普遍达到 $10\text{ W/m}^2$ 以上。这种空间差异主要源于:在低纬边缘海域,海冰快速消融导致开阔水域面积扩大,地表反照率呈显著下降趋势,进一步增强了地表对太阳辐射的吸收能力;而在海冰分布密集的北极中央海域及格陵兰海部分区域<sup>[9]</sup>,SWnet增幅相对有限。夏季LWnet在 $-30\sim-20\text{ W/m}^2$ 范围内波动,北极中央海域夏季均值最高,可达 $-20.82\text{ W/m}^2$ ,受太平洋海域的暖湿空气影响,楚科奇海和东西伯利亚海DLW显著增强,导致北极中央海域LWnet值较高<sup>[50-53]</sup>(图6(b))。夏季LW对地表的冷却效应可部分抵消SW的增温作用,由于SWnet占据主导地位,Rnet在多数地区仍表现为正值,且空间分布与SWnet相似,值低于SWnet(图6(c))。

云通过反射SW和阻碍LW射出,在北极海冰区域辐射平衡中发挥着关键调节作用。1981—2020年北极海冰区域夏季SW CRF多年均值为 $-67.91\text{ W/m}^2$ ,格陵兰海和巴伦支海-喀拉海受海域上空较高云量影响反射大量SW<sup>[54]</sup>,SW CRF的值最低,云对地表的冷却效应也更显著;各海

域SW CRF的年代际平均值均为负值,且绝对值呈持续增大趋势,表明云对地表辐射平衡的冷却效应在近40年显著增强(图6(d))。北极海冰区域夏季LW CRF多年平均值为 $51.03\text{ W/m}^2$ ,各海域均呈现正值,且差异较小(图6(e))。AW CRF的空间分布如图6(f)所示,同SW CRF分布相似,夏季平均值为 $-16.78\text{ W/m}^2$ ,表明云对地表的冷却效应起主导作用,且其值从1981—1990年的 $-13.82\text{ W/m}^2$ 持续降低,2011—2020年平均值下降至 $-21.64\text{ W/m}^2$ ,说明云对地表的冷却作用不断增强。

## 2.2.2 夏季变化趋势空间分布

本文采用逐像素线性回归方法,分析了北极海冰区域夏季辐射通量在1981—2020年40年及每10年的SNR与CRF变化趋势空间分布,分别如图7和图8所示,其中,黑色圆点区域表示其变化趋势达到了95%的置信水平。为减小海冰冻融的干扰,本文设置了以下数据筛选标准:对于40年时间序列,仅选取出现频次高于30次的像元;对于10年的时间序列,则筛选频次高于8次的像元数据。

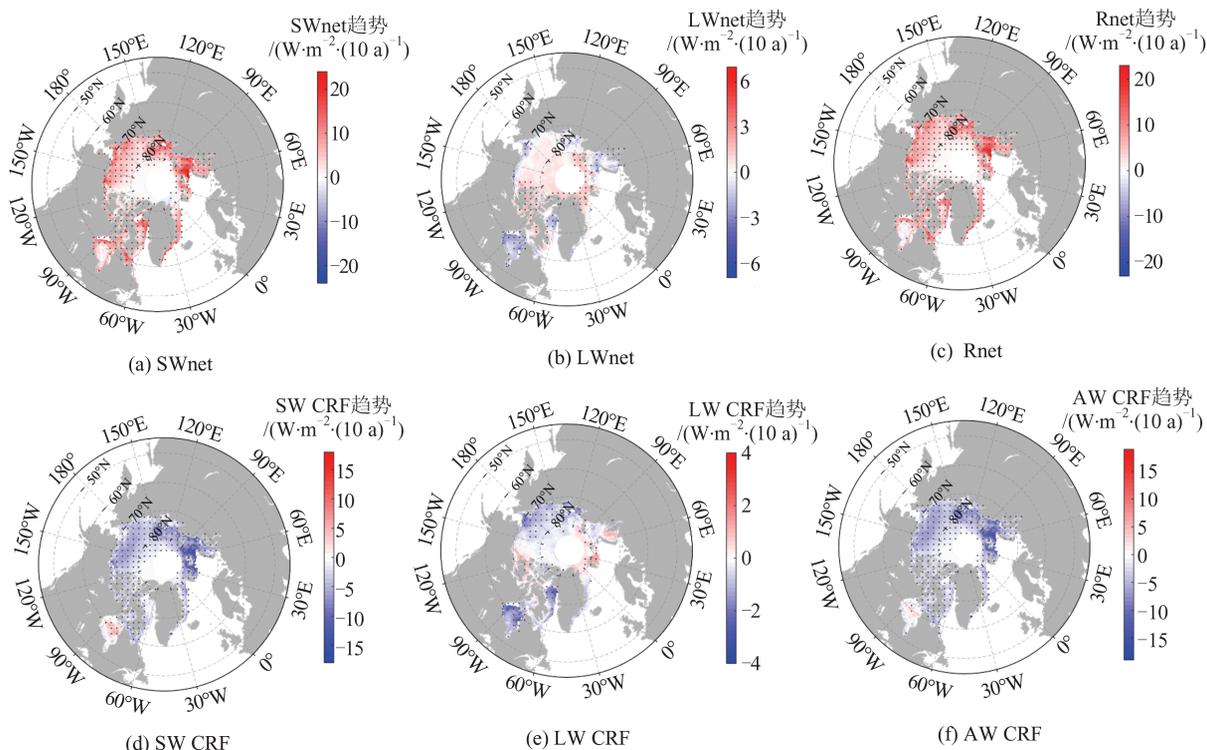


图7 1981—2020年北极海冰区域SNR和CRF夏季变化趋势空间分布

Fig. 7 Spatial Distribution of Summer Pixel-Based Trend of SNR and CRF over Arctic Sea Ice Region from 1981 to 2020

由图7(a)所示,1981—2020年北极海冰区域夏季SWnet总体呈增长趋势,但各海域之间存在显著差异。低纬区域SWnet增加速率尤为显著,其中巴伦支海-喀拉海区域10年变化速率可超过

$15\text{ W/m}^2$ ,而北极中央海域部分区域却呈下降趋势。SWnet在某些区域存在显著的年代际波动特征,10年变化速率可达 $80\text{ W/m}^2$ 以上,这种强烈的年代际变化特征与短期气候变化密切相关。

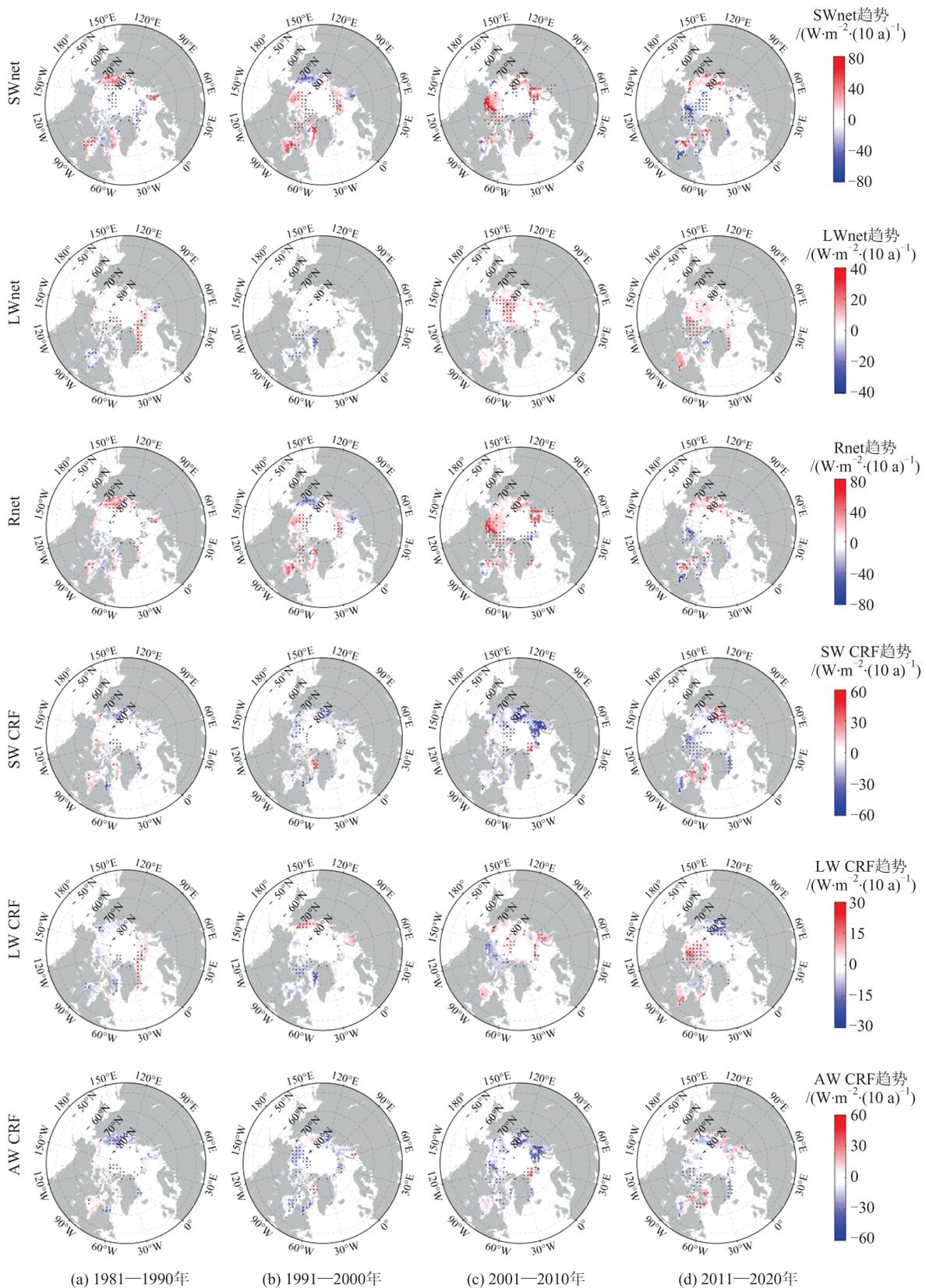


图 8 每 10 年北极海冰区域 SNR 和 CRF 夏季变化趋势空间分布

Fig. 8 Spatial Distribution of Summer Pixel-Based Trend of SNR and CRF per 10 Years over Arctic Sea Ice Region

不同海域的年代际变化趋势存在显著空间差异性,部分区域甚至表现出相反的变化趋势。以北极中央海域为例,楚科奇海与波弗特海在 2001—

2010 年和 2011—2020 年 SWnet 分别呈上升和下降趋势。根据表 1 可知,全北极地区 SWnet 的 10 年变化速率依次为  $-1.64 \text{ W/m}^2$ 、 $2.24 \text{ W/m}^2$ 、

5.10 W/m<sup>2</sup>和-6.58 W/m<sup>2</sup>,模式变化表现为下降-上升-上升-下降。由图8可以看出,LWnet的变化趋势较SWnet相对稳定,其边缘海区表现为下降趋势,而加拿大北极群岛及北极中央海域则呈现增长趋势。LWnet在4个10年的变化速率分别为1.41 W/m<sup>2</sup>、-0.65 W/m<sup>2</sup>、2.61 W/m<sup>2</sup>、3.96 W/m<sup>2</sup>,模式变化表现为上升-下降-上升-上升。Rnet的空间分布特征与SWnet较为一致,其年代际变化速率分别为-0.19 W/m<sup>2</sup>、1.64 W/m<sup>2</sup>、7.69 W/m<sup>2</sup>和-2.69 W/m<sup>2</sup>,模式变化表现为下降-上升-上升-下降的波动特征。

CRF的时空变化特征与云的种类及云量密切相关<sup>[55]</sup>。由图7(d)所示,1981—2020年北极海冰区域夏季SW CRF总体呈现显著下降趋势,其中拉普捷夫海和巴伦支海-喀拉海每10年降幅可超过10 W/m<sup>2</sup>,除哈德逊湾部分海域表现为微弱的上升趋势。研究表明,巴伦支海-喀拉海海域海冰消退,低云增多,导致大量DSW被反射回大气层,显著影响该区域的辐射平衡,其中层状云对辐射收支的调节作用尤为关键<sup>[21,55-56]</sup>。如图7(e)所示,各海域LW CRF变化趋势差异大,云对北极中央海域、巴芬湾和哈德逊湾的增温效应正在减弱,而加拿大北极群岛和巴伦支海-喀拉海区域表现出相反的效果,其增温效应正在加强,与该区域云量显著增加密切相关<sup>[54]</sup>。1981—2020年LW CRF变化趋势通过95%置信度检验的区域占比较少,其年代际变化趋势差异较大,且在不同的10年中甚至呈现相反的变化趋势。1981—2020年AW CRF呈下降趋势,表明云对地表起持续增强的冷却作用(图7(f))。从第1个10年至第4个10年,AW CRF年代际变化趋势在大多数区域表现为下降趋势,但2011—2020年间呈现上升趋势的海域范围较前3个10年有所增加。由于时间序列的年代际跨度有限,本文分析的年代际趋势结果存在一定波动性,但其仍能有效揭示长期变化过程中的阶段性特征。

### 3 结 语

本文基于ERA5再分析资料综合分析了1981—2020年北极海冰区域SNR和CRF的季节、年际和年代际变化。研究表明:

1)1981—2020年北极夏季海冰区域SWnet整体呈显著增加趋势,每10年变化速率可达2.22 W/m<sup>2</sup>,但在2011—2020年呈相反变化趋势,以-6.58 W/m<sup>2</sup>的10年变化速率下降。LWnet无

显著的年际与年代际变化趋势。Rnet平均值为81.46 W/m<sup>2</sup>,以每10年2.63 W/m<sup>2</sup>的速率显著增加,且随着纬度的升高,Rnet对地表的加热作用越弱。SWnet对夏季Rnet起主导作用,LWnet的影响相对有限。

2)1981—2020年北极夏季海冰区域SW CRF和LW CRF的均值分别为-67.91 W/m<sup>2</sup>和51.03 W/m<sup>2</sup>,AW CRF均值为-16.78 W/m<sup>2</sup>,表明云对地表的冷却效应强于保温效应。在年际与年代际尺度上,夏季SW CRF以每10年-2.75 W/m<sup>2</sup>的速率减小,LW CRF无明显变化趋势,AW CRF以每10年-2.72 W/m<sup>2</sup>的速度显著下降,因此云对地表的冷却作用不断增强。

SNR与CRF年际变化显著,去除某些点或改变趋势分析的开始和结束时间,可以改变趋势的显著性,甚至完全改变趋势的方向。后续将对短期的时序变化进行更多的分析,并结合反照率、表面温度、云和水汽等因素,探究北极海冰区域云辐射通量的变化机制及其对海冰融化的影响。

### 参 考 文 献

- [1] RANTANEN M, KARPECHKO A Y, LIPPONEN A, et al. The Arctic Has Warmed Nearly Four Times Faster than the Globe Since 1979[J]. *Communications Earth & Environment*, 2022, 3(1): 168.
- [2] STROEVE J, NOTZ D. Changing State of Arctic Sea Ice Across all Seasons[J]. *Environmental Research Letters*, 2018, 13(10): 103001.
- [3] 刘婷婷,刘一君,王泽民,等. 基于多源遥感数据的北极新冰提取及范围时序变化分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2015, 40(11): 1473-1478. LIU Tingting, LIU Yijun, WANG Zemin, et al. Time Series Analysis of Arctic New Ice Extent by Using Multi-Source Remotely Sensed Data [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(11): 1473-1478.
- [4] KWOK R. Arctic Sea Ice Thickness, Volume, and Multiyear Ice Coverage: Losses and Coupled Variability (1958 - 2018) [J]. *Environmental Research Letters*, 2018, 13(10): 105005.
- [5] MASLANIK J, STROEVE J, FOWLER C, et al. Distribution and Trends in Arctic Sea Ice Age Through Spring 2011[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(13): L13502.
- [6] WANG X J, LIU Y H, KEY J R, et al. A New Perspective on Four Decades of Changes in Arctic

- Sea Ice from Satellite Observations [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(8):1846-1846.
- [7] MARKUS T, STROEVE J C, MILLER J. Recent Changes in Arctic Sea Ice Melt Onset, Freezing, and Melt Season Length[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2009, 114 (C12) : C12024.
- [8] STROEVE J C, MARKUS T, BOISVERT L, et al. Changes in Arctic Melt Season and Implications for Sea Ice Loss[J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(4): 1216-1225.
- [9] PENG H T, KE C Q, SHEN X Y, et al. Summer Albedo Variations in the Arctic Sea Ice Region from 1982 to 2015[J]. *International Journal of Climatology*, 2020, 40(6) : 3008-3020.
- [10] NICOLAUS M, KATLEIN C, MASLANIK J, et al. Changes in Arctic Sea Ice Result in Increasing Light Transmittance and Absorption[J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(24): L24501.
- [11] WANG C X, GRANSKOG M A, HUDSON S R, et al. Atmospheric Conditions in the Central Arctic Ocean Through the Melt Seasons of 2012 and 2013: Impact on Surface Conditions and Solar Energy Deposition into the Ice-Ocean System[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, 121 (3): 1043-1058.
- [12] CHOI Y S, HWANG J, OK J, et al. Effect of Arctic Clouds on the Ice-Albedo Feedback in Midsummer [J]. *International Journal of Climatology*, 2020, 40(10): 4707-4714.
- [13] ZHANG T, ZHOU C X, ZHENG L. Analysis of the Temporal-Spatial Changes in Surface Radiation Budget over the Antarctic Sea Ice Region[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 666: 1134-1150.
- [14] SEDLAR J, TJERNSTRÖM M, MAURITSEN T, et al. A Transitioning Arctic Surface Energy Budget: The Impacts of Solar Zenith Angle, Surface Albedo and Cloud Radiative Forcing [J]. *Climate Dynamics*, 2011, 37(7): 1643-1660.
- [15] KAPSCH M L, GRAVERSEN R G, TJERNSTRÖM M, et al. The Effect of Downwelling Longwave and Shortwave Radiation on Arctic Summer Sea Ice[J]. *Journal of Climate*, 2016, 29(3) : 1143-1159.
- [16] MORTIN J, SVENSSON G, GRAVERSEN R G, et al. Melt Onset over Arctic Sea Ice Controlled by Atmospheric Moisture Transport [J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(12): 6636-6642.
- [17] BARZIN R, SHIRVANI A, LOTFI H. Estimation of Daily Average Downward Shortwave Radiation from MODIS Data Using Principal Components Regression Method: Fars Province Case Study [J]. *International Agrophysics*, 31(1): 23-34.
- [18] WANG X, LIU J, YANG B Y, et al. Seasonal Trends in Clouds and Radiation over the Arctic Seas from Satellite Observations During 1982 to 2019 [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(16): 3201.
- [19] RAMANATHAN V, CESS R D, HARRISON E F, et al. Cloud-Radiative Forcing and Climate: Results from the Earth Radiation Budget Experiment [J]. *Science*, 1989, 243(4887): 57-63.
- [20] RAMANATHAN V, SUBASILAR B, ZHANG G J, et al. Warm Pool Heat Budget and Shortwave Cloud Forcing: A Missing Physics [J]. *Science*, 1995, 267(5197): 499-503.
- [21] SHUPE M D, INTRIERI J M. Cloud Radiative Forcing of the Arctic Surface: The Influence of Cloud Properties, Surface Albedo, and Solar Zenith Angle [J]. *Journal of Climate*, 2004, 17 (3) : 616-628.
- [22] ALKAMA R, TAYLOR P C, GARCIA-SAN MARTIN L, et al. Clouds Damp the Radiative Impacts of Polar Sea Ice Loss [J]. *The Cryosphere*, 2020, 14(8): 2673-2686.
- [23] CHERNOKULSKY A, MOKHOV I I. Climatology of Total Cloudiness in the Arctic: An Intercomparison of Observations and Reanalyses[J]. *Advances in Meteorology*, 2012, 2012(1): 542093.
- [24] TSAY S C, STAMNES K, JAYAWEEERA K. Radiative Energy Budget in the Cloudy and Hazy Arctic [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1989, 46 (7): 1002-1018.
- [25] INTRIERI J M, FAIRALL C W, SHUPE M D, et al. An Annual Cycle of Arctic Surface Cloud Forcing at SHEBA [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2002, 107 (C10) : SHE13-1-SHE13-14.
- [26] EBELL K, NOMOKONOVA T, MATURILLI M, et al. Radiative Effect of Clouds at Ny-Alesund, Svalbard, as Inferred from Ground-Based Remote Sensing Observations [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2022, 59(1): 3-22.
- [27] DONG X Q, XI B K, CROSBY K, et al. A 10 Year Climatology of Arctic Cloud Fraction and Radiative Forcing at Barrow, Alaska [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2010, 115 (D17): D17212
- [28] HUANG Y Y, DONG X Q, XI B K, et al. Quantifying the Uncertainties of Reanalyzed Arctic Cloud and Radiation Properties Using Satellite Surface Ob-

- servations[J]. *Journal of Climate*, 2017, 30(19): 8007-8029.
- [29] HUANG Y Y, DONG X Q, XI B K, et al. The Footprints of 16 Year Trends of Arctic Springtime Cloud and Radiation Properties on September Sea Ice Retreat [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2017, 122(4): 2179-2193.
- [30] RIIHELA A, KEY J R, MEIRINK J F, et al. An Intercomparison and Validation of Satellite-Based Surface Radiative Energy Flux Estimates over the Arctic[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2017, 122(9): 4829-4848.
- [31] WANG X J, KEY J R. Arctic Surface, Cloud, and Radiation Properties Based on the AVHRR Polar Pathfinder Dataset. Part I: Spatial and Temporal Characteristics [J]. *Journal of Climate*, 2005, 18(14): 2558-2574.
- [32] WANG X J, KEY J R. Arctic Surface, Cloud, and Radiation Properties Based on the AVHRR Polar Pathfinder Dataset. Part II: Recent Trends [J]. *Journal of Climate*, 2005, 18(14): 2575-2593.
- [33] 彭海涛. 夏季北极海冰区域反照率变化与气候因素的关系研究[D]. 南京: 南京大学, 2020.  
Peng Haitao. Study on the Variation of Summer Arctic Sea Ice Region Albedo and its Relationship with Climate Factors[D]. Nanjing: Nanjing University, 2020.
- [34] WEI J F, WANG Z M, GU M Y, et al. An Evaluation of the Arctic Clouds and Surface Radiative Fluxes in CMIP6 Models[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2021, 40(1): 85-102.
- [35] IVANOVA N, JOHANNESSEN O M, PEDERSEN L T, et al. Retrieval of Arctic Sea Ice Parameters by Satellite Passive Microwave Sensors: A Comparison of Eleven Sea Ice Concentration Algorithms [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(11): 7233-7246.
- [36] 赵杰臣, 周翔, 孙晓宇, 等. 北极遥感海冰密集度数据的比较和评估[J]. *遥感学报*, 2017, 21(3): 351-364.  
ZHAO Jiechen, ZHOU Xiang, SUN Xiaoyu, et al. The Inter Comparison and Assessment of Satellite Sea-Ice Concentration Datasets from the Arctic[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2017, 21(3): 351-364.
- [37] WANG G F, WANG T X, XUE H Z. Validation and Comparison of Surface Shortwave and Long-wave Radiation Products over the Three Poles[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2021, 104: 102538.
- [38] SEO M, KIM H C, LEE K S, et al. Characteristics of the Reanalysis and Satellite-Based Surface Net Radiation Data in the Arctic[J]. *Journal of Sensors*, 2020, 2020(1): 8825870.
- [39] HERBACH H, BELL B, BERRISFORD P, et al. The ERA5 Global Reanalysis [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2020, 146(730): 1999-2049.
- [40] GOCIC M, TRAJKOVIC S. Analysis of Changes in Meteorological Variables Using Mann-Kendall and Sen's Slope Estimator Statistical Tests in Serbia [J]. *Global and Planetary Change*, 2013, 100: 172-182.
- [41] 裴益轩, 郭民. 滑动平均法的基本原理及应用[J]. *火炮发射与控制学报*, 2001, 22(1): 21-23.  
PEI Yixuan, GUO Min. The Fundamental Principle and Application of Sliding Average Method [J]. *Journal of Gun Launch & Control*, 2001, 22(1): 21-23.
- [42] HAWKINS D M. Fitting Multiple Change-Point Models to Data[J]. *Computational Statistics & Data Analysis*, 2001, 37(3): 323-341.
- [43] CAVALIERI D J, PARKINSON C L. Arctic Sea Ice Variability and Trends, 1979 - 2010 [J]. *The Cryosphere*, 2012, 6(4): 881-889.
- [44] PEROVICH D K, RICHTER-MENGE J A. Loss of Sea Ice in the Arctic[J]. *Annual Review of Marine Science*, 2009, 1: 417-441.
- [45] 邓娟. 北半球海冰变化及其与气候要素的关系 [D]. 南京: 南京大学, 2014.  
DENG Juan. Northern Hemisphere Sea Ice Variability and Its Relationship with Climate Factors [D]. Nanjing: Nanjing University, 2014.
- [46] LAINE V. Arctic Sea Ice Regional Albedo Variability and Trends, 1982-1998[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2004, 109(C6): C06027.
- [47] MEIER W, STROEVE J. An Updated Assessment of the Changing Arctic Sea Ice Cover [J]. *Oceanography*, 2022: 35(2): 1527-1546.
- [48] MATSUMURA S, YAMAZAKI K, SUZUKI K. Slow-down in Summer Warming over Greenland in the Past Decade Linked to Central Pacific El Niño [J]. *Communications Earth & Environment*, 2021, 2(1): 257.
- [49] 柯长青, 金鑫, 沈校熠, 等. 南北极海冰变化及其影响因素的对比分析[J]. *极地研究*, 2020, 32(1): 1-12.  
KE Changqing, JIN Xin, SHEN Xiaoyi, et al. Comparison of Antarctic and Arctic Sea Ice Variations and Their Impact Factors[J]. *Chinese Journal*

- of Polar Research*, 2020, 32(1): 1-12.
- [50] 温世强, 常亮. 北极水汽输送的时空分布特征研究 [J]. 极地研究, 2022, 34(3): 265-277.  
WEN Shiqiang, CHANG Liang. Temporal and Spatial Distributions of Water Vapor Transport in the Arctic [J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2022, 34(3): 265-277.
- [51] DONG X Q, ZIB B J, XI B K, et al. Critical Mechanisms for the Formation of Extreme Arctic Sea-Ice Extent in the Summers of 2007 and 1996 [J]. *Climate Dynamics*, 2014, 43(1): 53-70.
- [52] WANG Z, WALSH J, SZYMBORSKI S, et al. Rapid Arctic Sea Ice Loss on the Synoptic Time Scale and Related Atmospheric Circulation Anomalies [J]. *Journal of Climate*, 2020, 33(5): 1597-1617.
- [53] SERREZE M C, CRAWFORD A D, STROEVE J C, et al. Variability, Trends, and Predictability of Seasonal Sea Ice Retreat and Advance in the Chukchi Sea [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2016, 121(10): 7308-7325.
- [54] BOCCOLARI M, PARMIGGIANI F. Trends and Variability of Cloud Fraction Cover in the Arctic, 1982—2009 [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2018, 132(3): 739-749.
- [55] FU Y H, LIU P, TANG M Y. The Arctic Sea Ice-Cloud Radiative Negative Feedback in the Barents and Kara Sea Region [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2022, 150(1): 1-11.
- [56] EASTMAN R, WARREN S G. Interannual Variations of Arctic Cloud Types in Relation to Sea Ice [J]. *Journal of Climate*, 2010, 23(15): 4216-4232.