

过去千年尺度北极夏季海冰面积数据集的研发

任 帅¹, 郭 辉^{2*}

1. 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100101;

2. 清华大学水利水电工程系, 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084

摘 要: 北极海冰是地球系统的重要组成部分。海冰的变化对极地地区, 乃至中纬度地区(北美、欧亚大陆等)气候至关重要。近30年遥感观测发现北极海冰正在快速消融, 而这一变化趋势是否超过了海冰变化的历史波动仍不清楚。厘清这一问题需要重建北极海冰的长时间变化序列。已有的诸多研究通常使用代用指标进行海冰范围或海冰密度的重建, 然而这些研究多反映局部海域的海冰变化, 缺乏北极海冰整体变化的信息。基于此, 本研究尝试探索新的海冰重建方法, 基于北极海冰高反照率的特点, 构建海冰反照率-大气环流统计模型, 据此重建过去千年尺度北极地区夏季海冰面积的时空变化。结果显示, 该方法所模拟的北极地区夏季海冰面积的时空动态变化特征与遥感观测高度吻合。重建的过去千年海冰变化序列显示, 近30年海冰快速消融趋势远超过了历史时期海冰面积的波动。本研究提出的海冰重建方法, 为进一步重建历史时期更长尺度海冰变化奠定了基础。数据集表明, 最大面积出现在1259年, 面积约为870万 km^2 ; 面积最小年份出现在2003年, 面积约为538万 km^2 , 在700余年间, 北极海冰最小面积与最大面积相差约为332万 km^2 , 面积减少了38%。

关键词: 北极地区; 夏季; 海冰面积; 海冰反照率-大气环流模型

DOI: <https://doi.org/10.3974/geodp.2022.03.06>

CSTR: <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.14.2022.03.06>

数据可用性声明:

本文关联实体数据集已在《全球变化数据仓储电子杂志(中英文)》出版, 可获取:

<https://doi.org/10.3974/geodb.2022.05.01.V1> 或 <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2022.05.01.V1>.

1 前言

北极海冰是地球系统的重要组成部分, 因其高反照率的特点, 北极海冰面积的变化直接影响北极地区能量平衡, 对北极气候产生正向反馈^[1]。同时, 区域能量平衡的变化进一步影响北极涛动(Arctic Oscillation, AO)和北大西洋涛动(North Atlantic Oscillation, NAO)等环流系统, 从而对中纬度地区(如北美、欧亚大陆)的气候造成极大影响^[2-4]。遥感观测显示, 过去30年北极地区海冰面积呈现出显著的下降趋势, 其9月海冰面积下降速率

收稿日期: 2022-05-12; 修订日期: 2022-07-11; 出版日期: 2022-09-25

基金项目: 中华人民共和国科学技术部(2017YFA0603303)

*通讯作者: 郭辉 0000-0002-4333-6167, 清华大学水利水电工程系, 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, ghui@tsinghua.edu.cn

数据引用方式: [1] 任帅, 郭辉. 过去千年尺度北极夏季海冰面积数据集的研发[J]. 全球变化数据学报, 2022, 6(3): 366-373. <https://doi.org/10.3974/geodp.2022.03.06>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.14.2022.03.06>. [2] 任帅, 郭辉. 北极夏季海冰面积重建数据集(850-2005)[J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2022. <https://doi.org/10.3974/geodb.2022.05.01.V1>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2022.05.01.V1>.

达到每 10 年 12.4%，到 2012 年末已减少了近一半^[5-7]。这一快速变化趋势是否超过了海冰历史变率仍不清楚。回答这一问题需要重建历史北极海冰面积变化的时间序列。以往诸多研究对北极海冰变化进行了重建。例如，Walsh 和 Chapman 等^[8]基于器测资料重建了楚科奇海域 1953–2007 年海冰覆盖面积变化；de Vernal 等^[9]基于孢粉资料重建了楚科奇海域 1327–1952 年海冰覆盖面积资料；Bonnet 等^[10]基于海洋沉积物资料重建了弗拉姆海峡 579–1943 年海冰覆盖面积资料。代用指标可以很好地反映出局部海域较长历史时期海冰面积或海冰密度的变化，但缺乏北极地区整体海冰变化信息。基于此，本研究尝试探索新的海冰重建方法，基于北极海冰高反照率的特点，构建海冰反照率-大气环流统计模型，据此重建公元 850–2000 年间北极海冰面积时序变化。本文所述海冰面积是指海冰范围所对应的面积大小，与遥感观测的海冰范围指标含义相同。

2 数据集元数据简介

《北极夏季海冰面积重建数据集（850–2005）》^[11]的名称、短名、作者、数据年代、时间分辨率、数据格式、数据量、数据集组成、数据出版与共享服务平台及数据共享政策列于表 1。

表 1 《北极夏季海冰面积重建数据集（850–2005）》元数据简表

条目	描述
数据集名称	北极夏季海冰面积重建数据集（850–2005）
数据集短名	ArcticSeaIceArea850-2005
作者信息	任帅 0000-0002-6190-755X，中国科学院青藏高原研究所，shuairen@itpcas.ac.cn 郭辉 0000-0002-4333-6167，清华大学水利水电工程系，水沙科学与水利水电工程国家重点实验室，ghui@tsinghua.edu.cn
数据年代	公元 850–2005 年
时间分辨率	年
数据格式	.xlsx、.nc
数据量	1.01 MB，压缩后 684 KB
出版与共享服务平台	全球变化科学研究数据出版系统 http://www.geodoi.ac.cn
地址	北京市朝阳区大屯路甲 11 号 100101，中国科学院地理科学与资源研究所
数据共享政策	全球变化科学研究数据出版系统的“数据”包括元数据（中英文）、通过《全球变化数据仓储电子杂志（中英文）》发表的实体数据集和通过《全球变化数据学报（中英文）》发表的数据论文。其共享政策如下：（1）“数据”以最便利的方式通过互联网系统免费向全社会开放，用户免费浏览、免费下载；（2）最终用户使用“数据”需要按照引用格式在参考文献或适当的位置标注数据来源；（3）增值服务用户或以任何形式散发和传播（包括通过计算机服务器）“数据”的用户需要与《全球变化数据学报（中英文）》编辑部签署书面协议，获得许可；（4）摘取“数据”中的部分记录创作新数据的作者需要遵循 10% 引用原则，即从本数据集中摘取的数据记录少于新数据集总记录量的 10%，同时需要对摘取的数据记录标注数据来源 ^[12]
数据和论文检索系统	DOI, CSTR, Crossref, DCI, CSCD, CNKI, SciEngine, WDS/ISC, GEOSS

3 数据研发方法

3.1 算法原理

考虑到海冰变化不仅受到北冰洋地区近地表温度的影响，中低纬度地区通过环流变化

向高纬度地区的能量传输也会影响海冰的年际波动。此外，北极海冰面积具有空间差异，不同区域的海冰受到不同区域气候系统的控制。为准确模拟海冰的时空变化，选用海冰反照率来表征海冰面积变化，以全球海平面气压作为指标反映全球其他区域环流变化信息，在每个格点使用经验统计模型（Lasso）方法建立海冰反照率与其他区域海平面气压之间的统计关系模型。Lasso 方法基于高维变量的稀疏性假设，能够有效压缩变量信息，从而实现变量选择的快速求解，被广泛应用于气候变量的重建和预测。本研究中，基于遥感观测海冰反照率数据与再分析海平面气压数据，在每个格点建立海冰反照率与海平面气压（sea level pressure, SLP）之间的统计关系模型，进而将 CMIP6 past1000 实验和 CMIP5 historical 实验中地球系统模式模拟的公元 850–2005 年间全球 SLP 数据驱动该模型，重建公元 850–2005 年间北极夏季海冰反照率变化。由于海冰与海水之间具有明显的反照率差异，通过对比重建的反照率结果与遥感观测的海冰范围确定反照率与海冰范围之间的转换阈值，并据此提取公元 850–2005 年间北极海冰面积时序变化。

3.2 技术路线

本数据集基于气候监测卫星应用设施项目（Climate Monitoring Satellite Application Facility, CMSAF）最新发布的搭载在 NOAA 卫星上通过高分辨率传感器（Advanced Very High Resolution Radiometer Sensor, AVHRR）获取的 CLARA-A2-SAL 黑空地表反照率作为观测的海冰反照率数据与大规模环流指数 SLP 建立关系，进而重建过去千年北极地区夏季海冰面积。该算法主要包括四个步骤（图 1）：首先，为了对回归系数有一个可靠的估计，回归方程中自变量因子增加被重建月的前一个月和后一个月数据，具体而言：如果回归方程中 8 月份数据作为自变量因子，那么在使用回归模型时 7 月份和 9 月份数据也会作

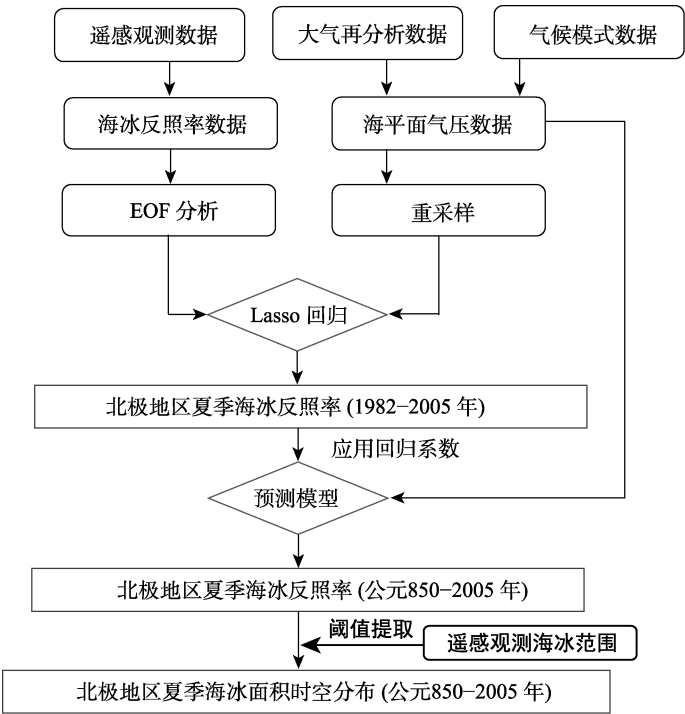


图 1 过去千年北极夏季海冰面积数据集研发技术路线

为自变量因子进行运算（6 月与 9 月份数据类似方法）；其次，基于经验正交函数分解分析方法（Empirical Orthogonal Function, EOF），提取北极地区 1982–2015 年 CMSAF 中被选择月份反照率数据的前 30 个主成分（principal components, PC）信息，并将 SLP 数据重采样到 $10^{\circ}\times 10^{\circ}$ 。然后，将 SLP 作为自变量因子，利用 Lasso 回归方法，建立反照率 PC 信息与 SLP 月归一化时间序列之间的经验统计模型，并进行迭代运算，求出最优回归系数。基于此，将地球气候系统模式数据中全球 SLP 数据输入预测模型中，重建公元 850–2005 年北极地区夏季海冰反照率数据；最后，通过对比重建的反照率结果与遥感观测的海冰范围确定反照率与海冰范围之间的转换阈值，并据此提取过去 1000 年以来北极海冰面积时序变化。

4 数据结果与验证

数据结果压缩在一个数据文件中（ArcticSeaIceArea850-2005.rar），解压后的数据放在一个数据统计表和 4 个数据文件夹中（表 2）。

表 2 《北极夏季海冰面积重建数据集（850–2005）》数据文件组成表

数据文件、文件夹	数据文件名称	数据量（KB）
ArcticSeaIceArea850-2005.rar		684.85
1_Arctic_Sea_Ice_Area_850-2005.xlsx		54,864
2_ValidationData		
SeaIceAlbedo1982-2005_Observed&Reconstructed	Observed.txt	1,210
	Reconstructed.txt	1,225
SeaIceArea1982-2005_Observed&Reconstructed	Observed&Reconstructed.txt	784
SpatialSeaIce1259-2003_Reconstructed	1259.nc	32,308
	2003.nc	32,308
SpatialSeaIceAlbedo2005_Observed&Reconstructed	Observed.nc	473,440
	Reconstructed.nc	473,440

重建的 850–2005 年北极地区夏季海冰面积浮动范围在 870 万 km^2 （1259 年）至 539 万 km^2 （2003 年）之间，平均海冰面积 755 万 km^2 （图 2）

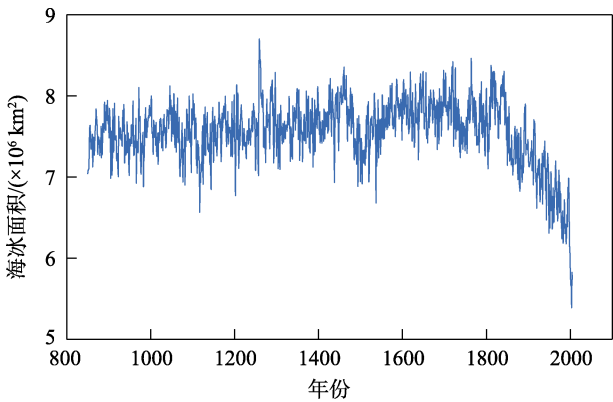


图 2 公元 850–2005 年北极地区夏季海冰面积

重建的北极地区夏季海冰反照率序列与遥感观测序列数据列于图 3。从图 3 可以看出，基于 Lasso 方法重建的北极地区海冰反照率变化与遥感观测一致，说明模型能够很好地模拟出近 30 年随着海冰消融，海冰反照率快速下降的趋势，并能够捕捉到反照率变化的年际波动。空间上，以 2005 年夏季海冰反照率为例，重建的海冰反照率能够模拟出海冰覆盖区域的高反照率和附近海域的低反照率（图 4）。

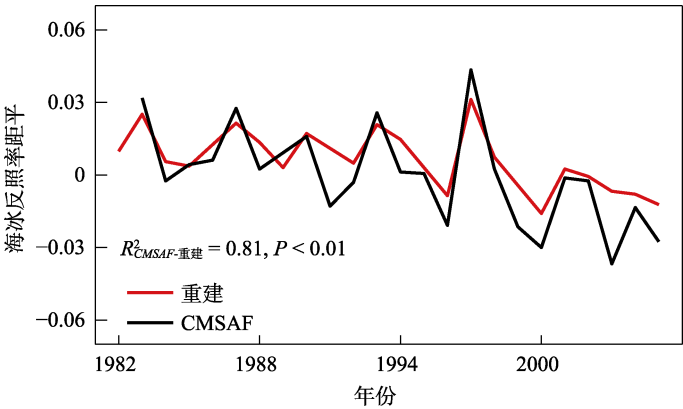


图 3 重建的北极地区夏季海冰反照率序列与遥感观测序列（CMSAF）对比图

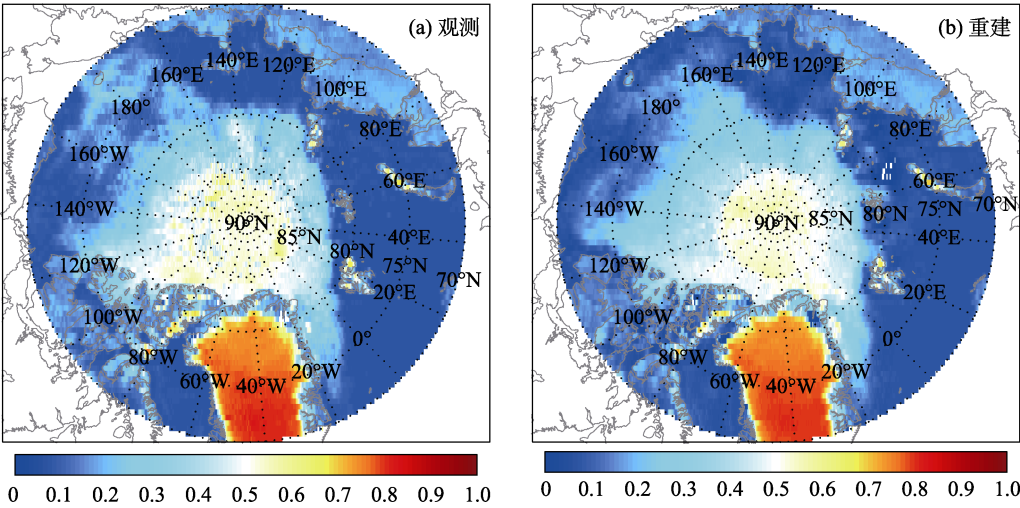


图 4 遥感观测（a）与重建的 2005 年北极地区夏季海冰反照率空间分布（b）对比图

由于海冰与周边海水的反照率特征差异较大，通过对比重建结果与遥感观测数据，可提取出海冰-海水变化的反照率阈值。通过该阈值，可将重建的过去 30 年反照率变化转化为海冰范围变化，从而提取出过去 30 年海冰面积时序变化。由图 4 可知，近 30 年，基于 Lasso 方法重建的北极地区海冰面积与遥感观测一致。由图 5 可知，近 30 年，基于 Lasso 方法重建的北极地区海冰面积与遥感观测一致。该重建方法能够较好地反映 1980 年以来海冰面积的持续下降趋势，并捕捉到了 1996 年及 1997 年夏季海冰面积的低值与高值。以上

结果表明该方法可用于历史时期更长尺度海冰面积的重建。

基于本研究提出的重建算法，结合 CMIP5 多模式比较计划提供的 past1000 实验和 historical 实验模拟的 SLP 数据，重建了公元 850–2005 的千年尺度北极海冰面积变化序列。

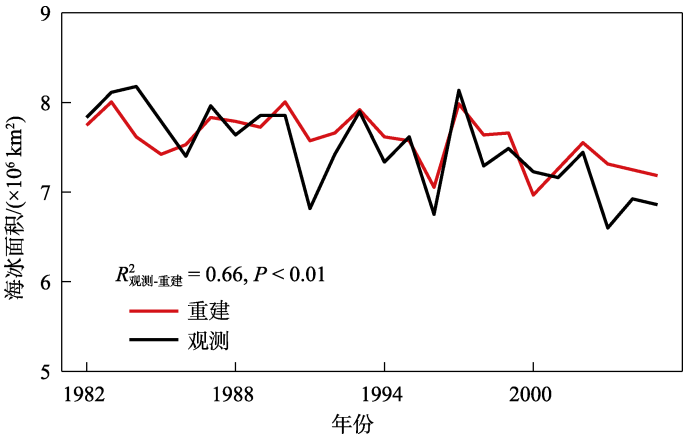


图 5 重建的北极地区夏季海冰面积序列与遥感观测序列对比图

重建结果显示（图 6），过去千年中（公元 850–2005）海冰面积变化存在一定程度的波动，且海冰面积变化的长期趋势与北极温度变化相关。在中世纪暖期（Medieval Warm Optimum，公元 800–1300），随着北极地区温度逐渐下降，北极海冰面积呈现缓慢扩张趋势，这与 Kinnard 等^[13]基于代用指标重建的海冰面积变化趋势是一致的。十九世纪以来，北极地区温度快速上升，是导致海冰范围退缩的重要原因之一。重建结果也显示，近两个世纪以来北

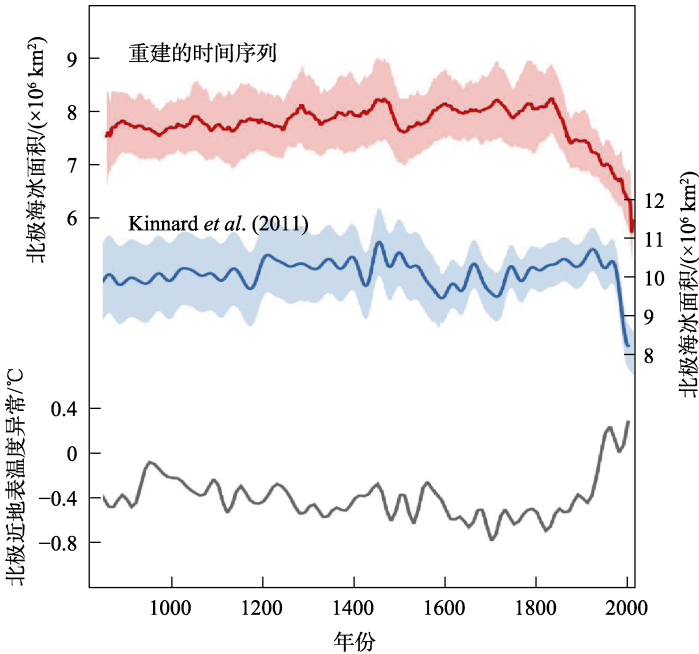


图 6 重建的千年尺度海冰面积时间序列（红色）、代用指标重建的海冰面积时间序列（蓝色）和北极近地表温度时间序列（灰色）^[14]

极海冰面积快速下降，特别是近 30 年海冰面积减小的速度超过了过去千年海冰变化的范围，这与基于代用指标重建的序列的结论一致^[13]。空间分布上，以 1259 年与 2003 年为例，过去千年中，北极夏季海冰范围已经退缩到 75°N 以北地区（图 7）。

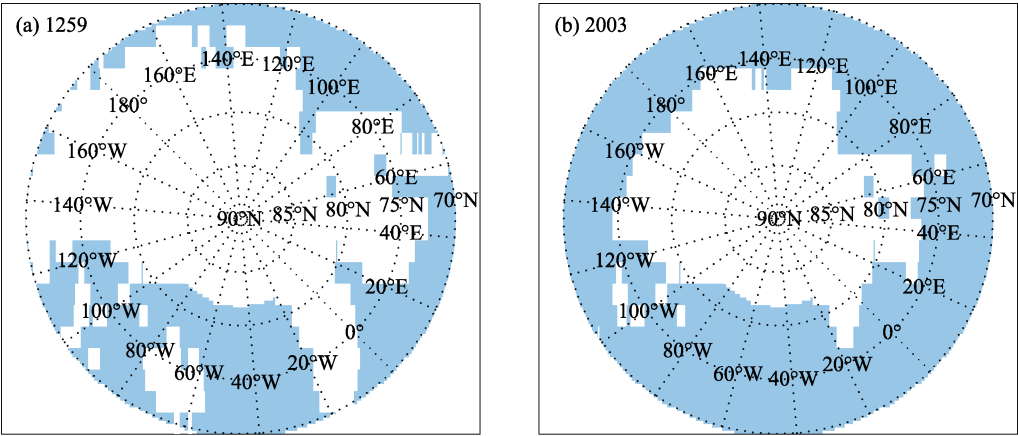


图 7 重建的 1259 年与 2003 年北极夏季海冰范围分布（白色为重建海冰范围）

5 讨论与结论

基于 Lasso 方法构建的海冰-大气统计模型能够很好的模拟北极地区由于海冰消融而导致的反照率变化。基于此方法重建的近 30 年海冰面积变化与遥感观测具有很好的一致性。一方面，该模型能够模拟出近 30 年海冰快速消融的变化趋势，其空间范围与遥感观测一致；另一方面，该模型能够较好地反应海冰面积的年际波动，例如模型能够捕捉到 2007 年和 2012 年海冰面积的极低值。重建的过去千年（公元 850–2005）海冰面积变化存在一定程度的波动，但与 Kinnard 等^[13]基于代用指标重建的海冰面积变化趋势是一致的。重建结果也显示，近两个世纪以来北极海冰面积快速下降，特别是近 30 年海冰面积减小的速度超过了过去千年海冰变化的范围，表明由于大气温室气体浓度上升导致的气候变化对海冰面积变化起着至关重要的作用。值得注意的是，虽然历史时期温度是影响海冰面积变化长期趋势的主要因素，但海冰面积序列与北极地区温度序列并非完全对应。例如，在小冰期（公元 1450–1850），北极地区温度呈下降趋势，但重建的海冰资料并没有发现显著的海冰面积增加，而呈现波动变化。总体而言，本研究重建的千年尺度海冰序列能够反映中世纪随着温度下降，海冰面积增加趋势，以及近几十年海冰的快速下降趋势。未来将进一步研究重建方法的不确定性，提高重建结果的精度。

作者分工：郭辉负责了海冰反照率-大气环流统计模型构建和历史海冰变化序列模拟，并撰写了数据论文；任帅参与论文撰写，并制作和整理数据集。

利益冲突声明：本研究不存在研究者以及与公开研究成果有关的利益冲突。

参考文献

- [1] 武丰民, 李文凯, 李伟. 北极放大效应原因的研究进展[J]. 地球科学进展, 2019, 34(3): 232–242.
- [2] Hilmer, M., Jung, T. Evidence for a recent change in the link between the North Atlantic Oscillation and Arctic Sea ice export [J]. *Geophysical Research Letters*, 2000, 27(7): 989–992.
- [3] Rigor, I. G., Wallace, J. M., Colony, R. L. Response of sea ice to the Arctic oscillation [J]. *Journal of Climate*, 2002, 15(18): 2648–2663.
- [4] Nakamura, T., Yamazaki, K., Iwamoto, K., *et al.* A negative phase shift of the winter AO/NAO due to the recent Arctic sea-ice reduction in late autumn [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, 120(8): 3209–3227.
- [5] 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.
- [6] Cavalieri, D. J., Parkinson, C. L. Antarctic sea ice variability and trends, 1979–2006 [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2008, 113: C07004.
- [7] 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.
- [8] Walsh, J. E., Chapman, W. L. 20th-century sea-ice variations from observational data [J]. *Annals of Glaciology*, 2001, 33: 444–448.
- [9] de Vernal, A., Hillaire-Marcel, C., Solignac, S., *et al.* Arctic Sea Ice Decline: Observations, Projections, Mechanisms, and Implications [M] (eds. DeWeaver, E. T., Bitz, C. M. & Tremblay, L. B.) (Geophysical Monograph Series Vol. 80) 2008: 27–45 (American Geophysical Union).
- [10] Bonnet, S., de Vernal, A., Hillaire-Marcel, C., *et al.* Variability of seasurface temperature and sea-ice cover in the Fram Strait over the last two millennia [J]. *Marine Micropaleontology*, 2010, 74(3/4): 59–74.
- [11] 任帅, 郭辉. 北极夏季海冰面积重建数据集(850–2005)[J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2022. <https://doi.org/10.3974/geodb.2022.05.01.V1>. <https://cstr.science.org.cn/CSTR:20146.11.2022.05.01.V1>.
- [12] 全球变化科学研究数据出版系统. 全球变化科学研究数据共享政策[OL]. <https://doi.org/10.3974/dp.policy.2014.05> (2017年更新).
- [13] Kinnard, C., Zdanowicz, C. M., Fisher, D. A., *et al.* Reconstructed changes in Arctic sea ice over the past 1,450 years [J]. *Nature*, 2011, 479(7374): 509–512.
- [14] Kaufman, D. S., Schneider, D. P., McKay, N. P., *et al.* Recent warming reverses long-term Arctic cooling [J]. *Science*, 2009, 325(5945): 1236–1239.