

郑璐曦, 陈美香, 任杰, 等. 基于观测数据的 2003–2014 年北冰洋海平面时空特征[J]. 海洋学报, 2022, 44(3): 25–39, doi:10.12284/hyxb2022027

Zheng Luxi, Chen Meixiang, Ren Jie, et al. Characteristics of the sea level in the Arctic Ocean based on observation data from 2003 to 2014[J]. Haiyang Xuebao, 2022, 44(3): 25–39, doi:10.12284/hyxb2022027

基于观测数据的 2003–2014 年北冰洋海平面时空特征

郑璐曦^{1,2,3}, 陈美香^{1,2*}, 任杰^{1,2}, 余佳霖^{1,2}, 陈宇洁^{1,2}, 季韬⁴, 王雪竹^{1,2}, 杨洁⁵

(1. 河海大学 自然资源部海洋灾害预报技术重点实验室, 江苏 南京 210024; 2. 河海大学 海洋学院, 江苏 南京 210024; 3. 上海交通大学 海洋学院, 上海 200240; 4. 河海大学 环境学院, 江苏 南京 210024; 5. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210024)

摘要: 本文对比了 3 个不同机构提供的北冰洋月均高度计数据, 发现英国极地观测与建模中心和丹麦科技大学空间中心两套数据比较一致且空间覆盖率高, 适用于北冰洋海平面变化研究, 而前者在数据分辨率、平滑性和与验潮站的符合程度方面均更优。对高度计和验潮站数据的分析表明, 北冰洋海平面的气候态特征表现为加拿大海盆的高值和欧亚海盆的低值之间形成鲜明对比; 海平面的变化以季节变化和北极涛动引起的低频变化为主, 加拿大海盆的季节和年际振幅均较大, 俄罗斯沿岸海平面季节变化显著。2003–2014 年, 北冰洋平均海平面呈上升趋势, 其中加拿大海盆海平面上升最快, 而俄罗斯沿岸海平面有微弱下降趋势。加拿大海盆和俄罗斯沿岸由于海冰变化显著, 不同高度计产品以及高度计与验潮站数据之间差别较大, 使用时需慎重。

关键词: 北冰洋; 海平面; 季节变化; 低频变化; 北极涛动

中图分类号: P727; P731.23

文献标志码: A

文章编号: 0253–4193(2022)03–0025–15

1 引言

在众多反映气候变化的因子中, 海平面是一个非常综合的自然指标, 它能反映陆地、海洋、大气和冰冻圈中几乎所有动力热力过程的变化^[1–3], 因而在政府间气候变化专门委员会(IPCC)报告中被作为气候变化的重要表现进行专门论述。最近几十年北极气候出现急剧变化^[4], 如 21 世纪以来北极地区的升温速度是全球其他地区的两倍^[5], 被称为“北极放大现象”^[6–7], 北极冰冻圈如格陵兰冰盖、阿拉斯加冰川以及永久冻土都在持续融化^[8–10], 湖泊冰层和海冰的覆盖范围在不断减小^[11–16]。同时, 北冰洋的温盐结构^[17–21]和海洋环流^[22–24]也在经历不同程度的变化。北冰洋与北大西洋联通, 向北大西洋不断输出出低温淡

水至大洋深层水生成地, 不仅影响北大西洋的盐度, 而且对北大西洋的经向翻转环流和全球大洋热盐环流都有重要影响, 这二者都是全球气候的重要调控者^[25–26]。北冰洋海平面变化与其海洋环流^[27]、淡水分布和海冰的变化关系紧密, 同时与沿岸居民的生活息息相关, 因此研究北冰洋海平面变化具有重要意义。

然而北冰洋海平面观测状况并不乐观。其验潮站观测始于 19 世纪末 20 世纪初, 第二次世界大战结束后, 前苏联沿岸设立大量验潮站用于军事和科学研究, 使得北冰洋沿岸验潮站数量达到峰值(65°N 以北共 106 个), 随着前苏联解体许多验潮站在 20 世纪 90 年代关闭, 目前在北冰洋沿岸的验潮站不足 40 个。这些验潮站主要集中于欧亚海盆沿岸, 加拿大海盆沿岸站位很少, 而洋盆内部则没有验潮站。北欧和

收稿日期: 2021–04–15; 修订日期: 2021–09–26。

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFA0604600); 国家自然科学基金(42076233, 41806218); 江苏省自然科学基金(BK20180510)。

作者简介: 郑璐曦(1999—), 女, 江苏省南京市人, 主要从事北极海平面和海冰研究。E-mail: luxizheng@163.com

* 通信作者: 陈美香(1981—), 女, 山东省高密市人, 副教授, 博士, 主要从事气候与海平面变化研究。E-mail: chenmeixiang@hhu.edu.cn

俄罗斯沿岸大约有 70 个验潮站记录了从 20 世纪 50 年代到 90 年代北冰洋沿岸的海平面变化^[28-30], 但 90 年代以后俄罗斯沿岸大部分站位停测, 使得我们无法得知近 30 年这里的海平面情况。在高度计出现以前, 北冰洋内部的海平面观测几乎是空白。1991 年以来, 欧洲航天局的卫星 ERS-1、ERS-2 和 Envisat 能提供北到 81.5°N 的高度计数据^[31]。2000 年以后卫星高度计对极地海洋的观测范围不断扩大, ICESat 和 ICESat-2 分别能提供 2002–2009 年和 2016 年至今最北到 86°N 的海面高度计数据, CryoSat-2 能提供 2010 年以来 88°N 以南的 SAR 测高数据, 中国的 HY-2 卫星可提供 2011 年以来 81°N 以南的数据, 法国/印度的 Alti-Ka 卫星可提供 2012 年以来沿 Envisat 地面轨道的测高数据^[32]。尽管如此, 高度计数据却迟迟没有被广泛应用于北冰洋海平面变化的研究, 主要原因是海冰的存在, 海冰会影响卫星的雷达回波波形^[32], 常规的卫星雷达测高数据处理技术在海冰区域会失效。北冰洋除挪威海和巴伦支海部分区域常年无冰, 大部分海域被季节性或永久性海冰覆盖, 因此很长一段时间基于高度计数据的北冰洋海平面变化的研究被限制在纬度较低的开阔海域^[33]。针对海冰覆盖区域, 有研究者利用沿岸水道、冰间道等开阔水域数据通过一定的算法进行了海面高度的提取。如 Peacock 和 Laxon^[34] 利用 ERS 高度计数据成功构建了北冰洋第一个涵盖海冰区域的空间连续的海面高度数据集, Prandi 等^[31]、Cheng 等^[32]、Armitage 等^[33] 和 Giles 等^[35] 也相继基于不同的高度计得到了北冰洋空间连续的海面高度数据集并用于研究。

从已有的研究来看, 不同研究者得到的高度计产品时间段不同, 研究结果也存在一定差异, 目前并未有相关工作对北冰洋包含冰区的高度计产品进行比较。因此, 本文将对多套公开的北冰洋高度计数据集进行对比, 分析其差异并基于对比结果结合北冰洋沿岸的验潮站数据对北冰洋海平面变化特征进行研究, 为深入了解北极近期的气候变化对北冰洋的影响提供依据。

2 资料介绍

2.1 卫星数据

本文对比了 3 套公开的北冰洋高度计数据。Armitage 数据集^[33] 来源于英国极地观测与建模中心 (Centre for Polar Observation and Modelling, http://www.cpom.ucl.ac.uk/dynamic_topography/) 提供的绝对动力地形和地转流速的月均数据, 数据覆盖范围为 60°~

81.5°N、环全球经度, 分辨率为 0.75°×0.25°, 时间跨度为 2003–2014 年, 其中 2003–2011 年数据来自卫星 Envisat, 2012–2014 年数据来自卫星 CryoSat-2。

Copernicus 数据集来源于哥白尼海洋环境监测服务中心 (Copernicus Marine Environment Monitoring Service, <http://marine.copernicus.eu/>) 提供的绝对动力地形日均数据, 我们下载的数据覆盖范围为 55°~90°N, 环全球经度, 分辨率为 0.25°×0.25°, 时间跨度为 1993–2016 年, 数据由 ERS1、ERS2、Envisat 和 CryoSat-2 等多颗卫星高度计融合得到。

DTU 数据集来源于丹麦科技大学空间中心 (ftp://ftp.space.dtu.dk/pub/ARCTIC_SEALEVEL/) 提供的海平面距平的月均数据, 空间覆盖范围为 60°~81.5°N, 环全球经度, 分辨率为 0.5°×0.25°, 时间跨度为 1991 年 9 月至 2018 年 9 月, 其中 1991–1995 年的数据来自 ERS1, 1996–2001 年的数据来自 ERS2, 2003–2011 年的数据来自 Envisat, 2012–2014 年的数据来自 CryoSat-2。

本文还使用了丹麦科技大学提供的基于 1993–2012 年总共 20 年的高度计和 GOCE (Gravity Field and steady-state Ocean Circulation Explorer) 重力卫星观测得到的全球平均动力地形数据——DTU_13MDT 数据集, 其空间分辨率为 0.02°×0.02°, 选取了 65°~90°N, 环全球经度的北冰洋区域结果。

上述卫星数据均已将潮汐信号从海面高度中剔除, 其中 Armitage 和 DTU 的月均数据还进行了海冰覆盖区域海面高度的特别提取, Copernicus 数据在海冰覆盖区域为缺省值。另外, Armitage 和 Copernicus 提供的都是从大地水准面起算的绝对动力地形数据, 进行时间平均可以得到从大地水准面起算的平均动力地形, 与 DTU 提供的平均动力地形数据的起算面相同, 可以进行比较。前两者的原始数据减掉平均动力地形数据后得到的海面高度距平值与 DTU 提供的海面高度距平值本质上也是同样的起算面, 因此也具有可比性。

2.2 验潮站数据

验潮站数据来源于平均海平面永久服务网站 (Permanent Service for Mean Sea Level, <https://www.psmsl.org/data/obtaining/map.html/>), 选取了 65°N 以北 106 个验潮站的月均海面高度数据 (站位分布如图 1), 时间序列覆盖 1948–2000 年, 但各站的观测时段有差异 (图 2)。俄罗斯沿岸验潮站数量最多, 加拿大海盆沿岸验潮站很少, 整体来看 1950–2000 年的验潮站资料最充足。

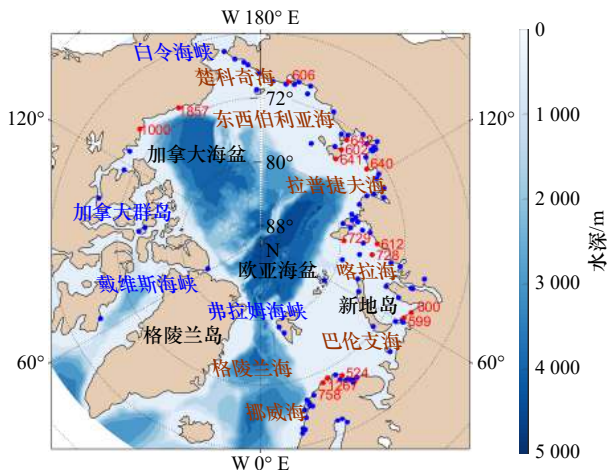


图1 北冰洋地理概况和验潮站分布
Fig. 1 Geography of the Arctic Ocean and location of tide gauges

图中红点和蓝点为验潮站位置, 其中红点是与高度计对比的站位
Tide gauges are marked with dots, data of red dots are compared with altimeters

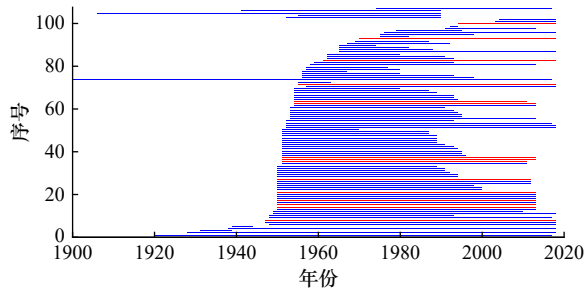


图2 北冰洋沿岸验潮站数据时间跨度(序号对应的站位信息见附录)

Fig. 2 Time span of the tide gauge records along the coast of the Arctic Ocean (see appendix for detailed information of the tide gauges)

需要说明的是, 由于涉及不同数据集的对比, 这里选取的数据分析时段为3套高度计数据集中最短的 Armitage 数据时段(2003–2014年), 因此本文中的海平面严格而言应为海面高度(Sea Surface Height, SSH)。

2.3 海冰数据

月均海冰面积观测数据来源于美国国家冰雪数据中心(National Snow and Ice Data Center, <https://nsidc.org/>), 纬度范围为 $31^{\circ}\sim 90^{\circ}\text{N}$, 环全球经度, 分辨率为25 km, 时间跨度为1978年11月至2018年12月, 数据来自于 Nimbus-7 卫星上的 SMMR 传感器和 DM-SP 卫星上的 SSM/I、SSMIS 传感器。

3 北冰洋海平面观测数据的对比验证

3.1 卫星数据产品的对比

我们选取 Armitage 和 Copernicus 两套数据共同

时段2003–2014年, 对12年的月均数据进行时间平均得到该时段平均的SSH, 并与DTU提供的平均动力地形数据DTU_13MDT进行了比较, 三者的空间分布如图3a至图3c所示。尽管3套数据给出的平均SSH数值大小存在差异, 但空间形态具有很好的一致性, 即以波弗特海为中心的加拿大海盆SSH最高, 东西伯利亚海和拉普捷夫海次之, 欧亚海盆SSH较低, 格陵兰海SSH最低。从Armitage数据提供的平均地转流速(图3a中矢量箭头所示)来看, 北冰洋平均SSH的空间分布与大尺度海洋环流存在很好的对应关系, 即波弗特海的SSH高值和格陵兰海的SSH低值分别与区域的反气旋式和气旋式环流对应, 加拿大海盆和欧亚海盆之间存在的显著SSH梯度与穿极流对应, 该结果与 Proshutinsky 等^[36]、Farrell 等^[37]和 Xiao 等^[38]的研究结果是一致的。

从空间覆盖情况来看, DTU提供的平均动力地形数据由于结合了重力卫星观测, 实现了北冰洋全域覆盖, 而其海面高度距平数据是单纯的高度计数据, 空间覆盖范围与 Armitage 数据相同, 最高纬度为 81.5°N , 且二者均已进行了海冰覆盖区域海面高度的专门提取, 因此在空间上都具有较好的连续性。而广泛用于中低纬度海区海平面变化研究的 Copernicus 数据仅在北冰洋开阔海域或季节性海冰覆盖区域的融冰季节有数值, 在海冰覆盖情况下是没有数值的, 故 81.5°N 以南由于存在大范围缺测而无法分析, 所以在后面的研究中我们将只使用 Armitage 和 DTU 两套数据。将上述两套数据的海面高度距平(SSHA)统一插值到 0.75° (经度) $\times 0.25^{\circ}$ (纬度)网格上, 得到二者SSHA的差异如图3d所示, 图中数据的空间平滑性与图3a、图3b两图相比稍差, 与DTU海面高度距平数据存在明显的沿轨痕迹有关。两套数据SSHA的差异比SSH小一个数量级, 在海冰变化较大的区域(如加拿大海盆和俄罗斯沿岸)差异最大, 不过这两个区域也是海平面变化最为剧烈的海域(见后面分析), 其数据差异相对于海平面本身的变化是个小值。

通过比较, 我们认为 Armitage 数据在北冰洋具有更高的精度, DTU 数据的空间平滑性稍差, 而 Copernicus 数据由于海冰覆盖区域缺测, 不太适用于北冰洋大范围海平面变化的研究。

3.2 高度计与验潮站数据的对比

我们选择了北冰洋沿岸15个缺测较少(缺测数据不超过总数的30%)且长度超过8年的验潮站数据, 进行冰川均衡调整(Glacial Isostatic Djustment)订

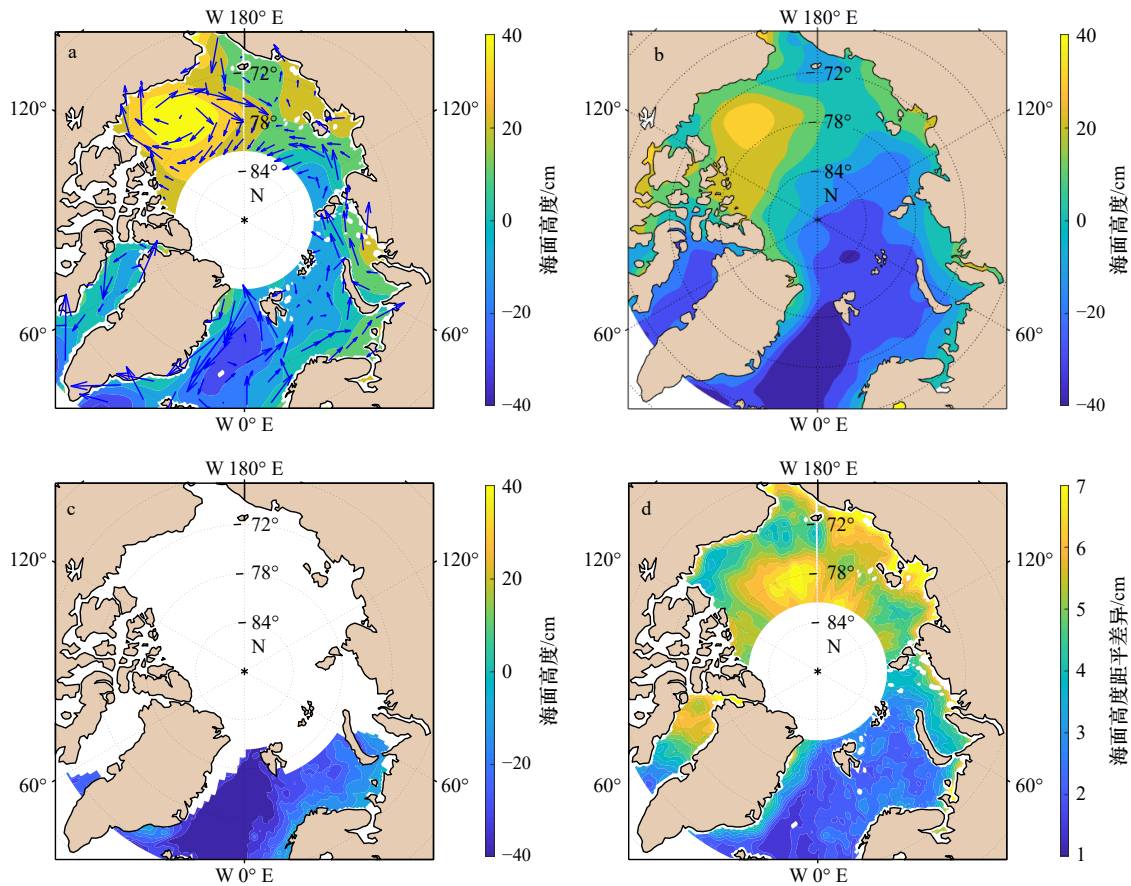


图3 北冰洋 2003–2014 年平均海面高度空间分布 (Armitage(a)、DTU(b)、Copernicus(c)) 及 Armitage 与 DTU 海面高度距平数据差异 (d)

Fig. 3 Spatial distribution of the mean sea surface height for the period 2003–2014 in the Arctic Ocean (Armitage (a), DTU (b), Copernicus (c)) and the difference of sea surface height anomaly between Armitage and DTU datasets (d)

正 (采用 Peltier^[39]ICE-4G 模型结果) 和气压校正后与距离各站最近的两套高度计网格点数据进行了对比 (表 1), 采用的方法与文献 [33] 相同, 而 Armitage 数据与验潮站比较的结果也与文献 [33] 相似。在开阔海域面积较大的巴伦支海, 两套高度计数据与验潮站数据表现出较高的一致性, 相关系数超过 0.6, 线性拟合斜率和残差在所有海域都是最好的。俄罗斯沿岸的喀拉海、拉普捷夫海和东西伯利亚海, 高度计和验潮站数据的一致性较差, 表现为散点图的斜率较小且残差标准差较大, 相关系数也降低, 这与部分站位处于陆地径流入海处, 一方面海平面变化受季节性径流影响大, 另一方面验潮站基准存在一定的变动有关 (如 600 号站、640 号站)^[33]。总体来看, Armitage 数据与验潮站更为接近, 即使在海冰覆盖严重的波弗特海也是如此。

4 北冰洋海平面变化的时空特征

4.1 海平面季节变化特征

图 4 为两套高度计数据 2003–2014 年月均 SSH

距平的标准差, 它可以很好地反映海平面季节变化的幅度, 图中的黄色点给出了验潮站计算的结果。北冰洋海平面季节变化的振幅在欧亚海盆沿岸较大, 其中楚科奇海和东西伯利亚海沿岸最大, 其次是喀拉海、巴伦支海沿岸, 波弗特海附近的加拿大海盆的季节变化振幅也很大; 欧亚海盆季节变化的振幅最小。Armitage 数据显示, 俄罗斯沿岸和加拿大海盆海平面季节变化振幅平均值为 8~9 cm, 最大值达到 15 cm, 而欧亚海盆平均振幅仅有 3 cm (图 4a)。DTU 数据 (图 4b) 的空间分布与 Armitage 类似, 但数值却小很多, 二者的差异最明显的位置仍然在海冰变化较大的波弗特海和东西伯利亚海周边 (图 4c), 两个区域 DTU 数据的量值仅有 Armitage 数据的一半左右。相比之下, Armitage 数据与验潮站数据的振幅大小更接近 (图 4a 和图 4b)。

按照惯例, 我们将加拿大群岛、弗拉姆海峡、巴伦支海开口和白令海峡包围的海域作为北冰洋^[33,38], 将两套数据进行 EOF 分解来分析该海域大尺度海平面变化特征。利用两套数据原始的月均值分解得到

表1 高度计与验潮站月均海面高度距平数据的比较

Table 1 Comparison of monthly sea surface height anomaly from altimeter and tide gauges

站位名称	站位序号	位置	观测年数	距离/km (Armitage)	斜率 (Armitage)	标准差/cm (Armitage)	相关系数 (Armitage)	距离/km (DTU)	斜率 (DTU)	标准差/cm (DTU)	相关系数 (DTU)
SANNIKOVA	602	74.7°N, 138.9°E	11	17	0.31	12.01	0.35(0.01)	11	0.17	8.29	0.27(0.10)
PEVEK	606	69.7°N, 170.3°E	10	78	0.30	9.88	0.48(0.01)	89	0.22	8.16	0.42(0.01)
DUNAI	640	73.9°N, 124.5°E	8	83	0.15	7.15	0.38(0.01)	111	0.08	6.24	0.22(0.03)
KOTELNYI	641	76.0°N, 137.9°E	11	72	0.28	8.36	0.40(0.01)	100	0.17	5.82	0.35(0.01)
KIGILIAH	642	73.3°N, 140.0°E	11	111	0.65	12.93	0.66(0.01)	111	0.31	8.29	0.50(0.01)
拉普捷夫海和东西伯利亚海			10	72	0.34	10.07	0.45	84	0.19	7.36	0.35
AMDERMA	599	69.8°N, 61.7°E	11	22	0.40	8.39	0.59(0.01)	133	0.25	5.88	0.54(0.01)
UST	600	69.3°N, 64.5°E	11	83	0.17	10.09	0.24(0.01)	111	0.17	6.47	0.38(0.01)
STERLEGOVA	612	75.4°N, 88.9°E	10	122	0.26	9.63	0.44(0.01)	100	0.15	9.46	0.27(0.01)
IZVESTIA	728	76.0°N, 83.0°E	11	27	0.37	8.28	0.53(0.01)	0	0.26	7.62	0.41(0.01)
GOLOMIANYI	729	79.6°N, 90.6°E	8	16	0.21	4.84	0.32(0.01)	122	0.24	6.71	0.26(0.01)
喀拉海			11	54	0.28	8.25	0.42	93	0.21	7.23	0.37
VARDO	524	70.4°N, 31.1°E	12	122	0.44	5.34	0.63(0.01)	122	0.54	6.18	0.67(0.01)
HAMMERFEST	758	70.7°N, 23.7°E	12	50	0.43	5.33	0.65(0.01)	133	0.56	6.94	0.64(0.01)
HONNINGSVAG	1267	71.0°N, 26.0°E	12	111	0.42	5.08	0.63(0.01)	0	0.57	6.74	0.64(0.01)
巴伦支海			12	94	0.43	5.25	0.64	85	0.56	6.62	0.65
TUKTOYAKTUK	1000	69.4°N, 227.0°E	12	111	0.31	6.95	0.62(0.01)	56	0.17	8.81	0.27(0.01)
ALASKA	1857	70.4°N, 211.5°E	12	167	0.29	5.04	0.63(0.01)	111	0.16	7.70	0.23(0.01)
波弗特海			12	139	0.30	6.00	0.63	84	0.17	8.26	0.25

注: 对于每个验潮站, 表中显示了站点的名称、序号、位置、2003–2014年的资料重叠年数、高度计网格点与验潮站位置之间的距离、高度计和验潮站月均数据散点图的线性拟合斜率、高度计数据与线性拟合值的残差标准差以及高度计与验潮站时间序列的相关系数, 相关系数括号内数值表示显著性水平。拉普捷夫海和东西伯利亚海、喀拉海、巴伦支海、波弗特海的平均值均以加粗显示。

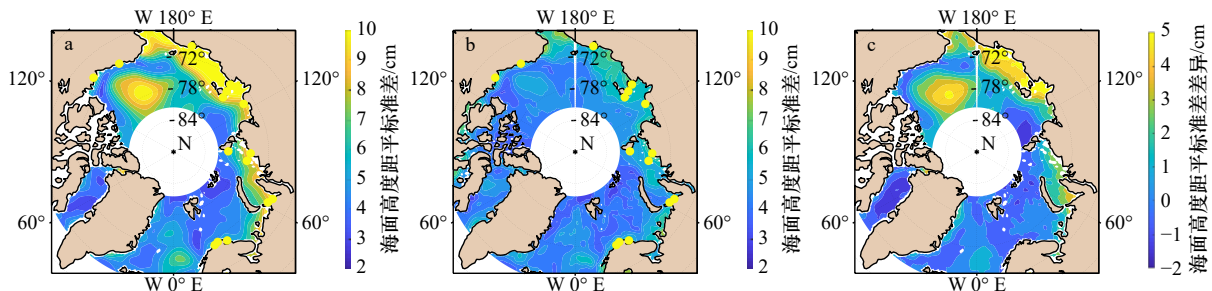


图4 月均海面高度距平的标准差

Fig. 4 Standard deviation of monthly sea surface height anomaly

a. Armitage; b. DTU; c. Armitage 与 DTU 的差异

a. Armitage; b. DTU; c. difference between Armitage and DTU

北冰洋海平面变化的第一模态(EOF1)方差贡献率分别为38%(Armitage数据)和30%(DTU数据), 空间分布均表现为整个海域海平面同位相变化, 东西伯利亚海具有最大振幅(图5a和图5b), 与图4中海平面季

节变化振幅的分布很像, 特别是Armitage数据(图5a)显示的加拿大海盆和俄罗斯沿岸的振幅大于DTU数据(图5b)也与图4高度一致。两套数据EOF1的时间序列(PC1)都具有12个月的显著周期, 海平面最低

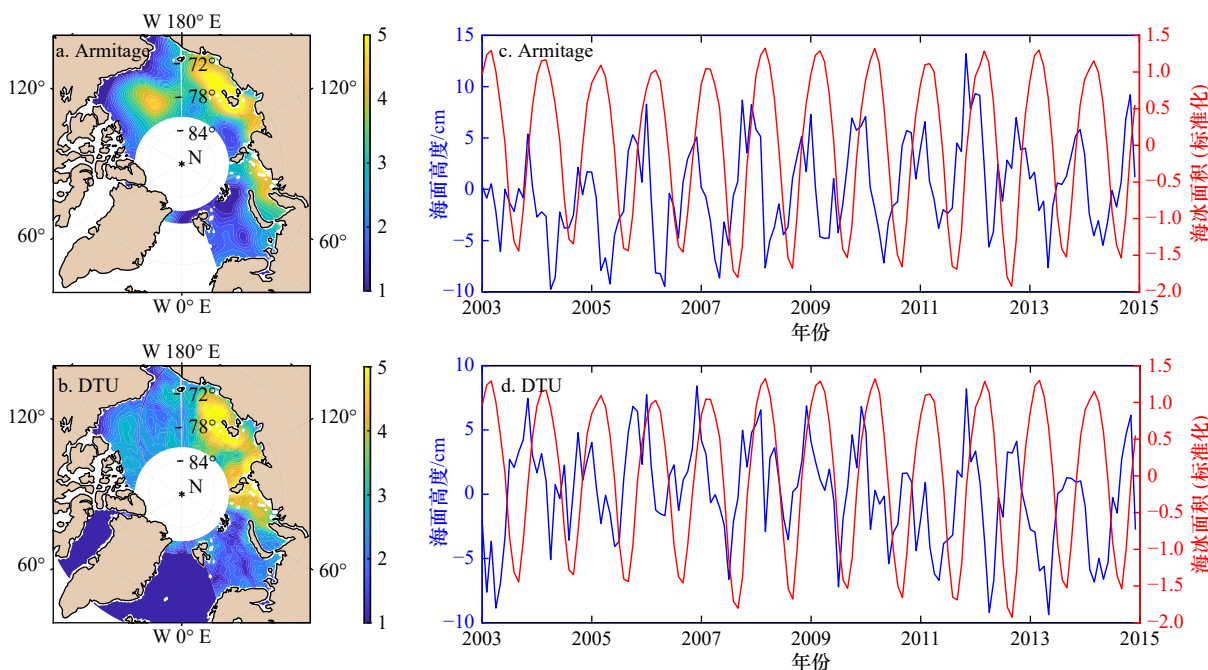


图 5 北冰洋海平面变化的季节模式

Fig. 5 Seasonal modes of sea level variability in the Arctic Ocean

值出现在每年的 3-4 月, 最高值出现在 10-11 月; 我们将同时段的北冰洋月均海冰面积与之进行对比, 发现二者具有较高的相关性, 海平面变化大约滞后海冰变化两个月二者达到最大相关, 相关系数分别为-0.88 (Armitage) 和-0.95 (DTU)。以上分析表明, 北冰洋海平面最显著的变化特征为季节变化, 且海平面的季节变化与海冰的季节变化联系密切, 这与前人研究显示的盐冰容对北冰洋海平面变化的主导作用是不矛盾的^[3,38,40]。另外, Armitage 等^[33]指出每年 6 月份北冰洋海平面出现的小峰值可能受到陆地径流汛期入海流量增加的影响, 这一特点在 DTU 数据中也很明显。

4.2 海平面低频变化特征

对年均 SSH 数据求标准差可以反映海平面低频变化幅度(图 6)。Armitage 数据显示, 北冰洋海平面

低频变化幅度在加拿大海盆最大, 其量值比季节变化稍小, 平均幅度超过 6 cm, 波弗特海的振幅极大值达 8 cm; 东西伯利亚沿岸的变化幅度也较大, 平均值在 4 cm 上下, 与验潮站数据的结果接近; 欧亚海盆及其他海区变化幅度都很小(图 6a)。DTU 数据得到的海平面低频变化幅度空间分布是相似的, 但数值要小一些(图 6b), 同样在极值区域(波弗特海和东西伯利亚海)两套数据表现出较大的差异(图 6c)。海平面低频变化的两个高值区体现了波弗特高压、北极涛动和偶极子异常等大气环流形态的综合影响^[17,38,41-43]。

将原始月均数据去掉 12 个月周期的季节信号后进行 EOF 分解, 得到北冰洋海平面低频变化的第一模态(图 7), 该模态对应原始月均数据 EOF 分解的第二模态。该模态方差贡献率为 34%(Armitage 数据)

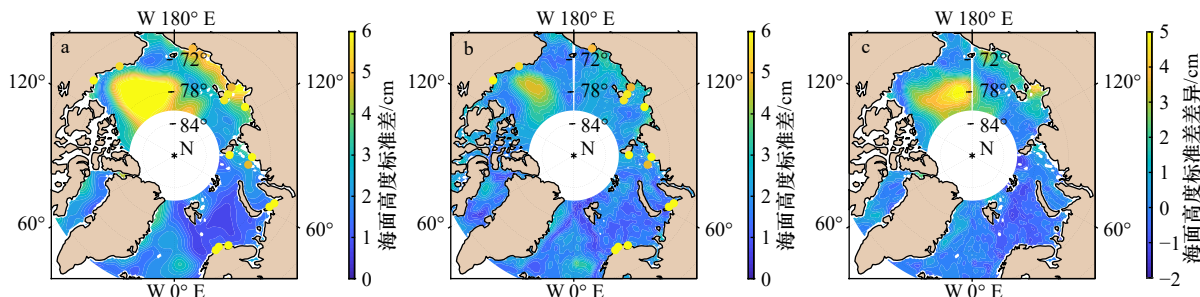


图 6 年均海面高度的标准差

Fig. 6 Standard deviation of annual sea surface height

a. Armitage; b. DTU; c. Armitage 与 DTU 的差异

a. Armitage; b. DTU; c. difference between Armitage and DTU

和25%(DTU数据),其空间形态表现为以加拿大海盆为中心的深水区域与周边陆架区域海平面的反相变化(图7a),DTU数据由于波弗特海区数值较小反相特征不如Armitage数据明显,模态的时间序列表现为明显的低频振荡(图7c和图7d)。该模态与北极涛

动(AO)^[41,44]不同位相对应的气旋式和反气旋式大气环流异常有密切关系,而这种关系在之前的观测资料分析和数值模拟中均有发现^[23,27,31,38,43],可以用AO不同位相下风场的埃克曼抽吸和埃克曼输运导致的淡水的重新分布进行解释^[38]。

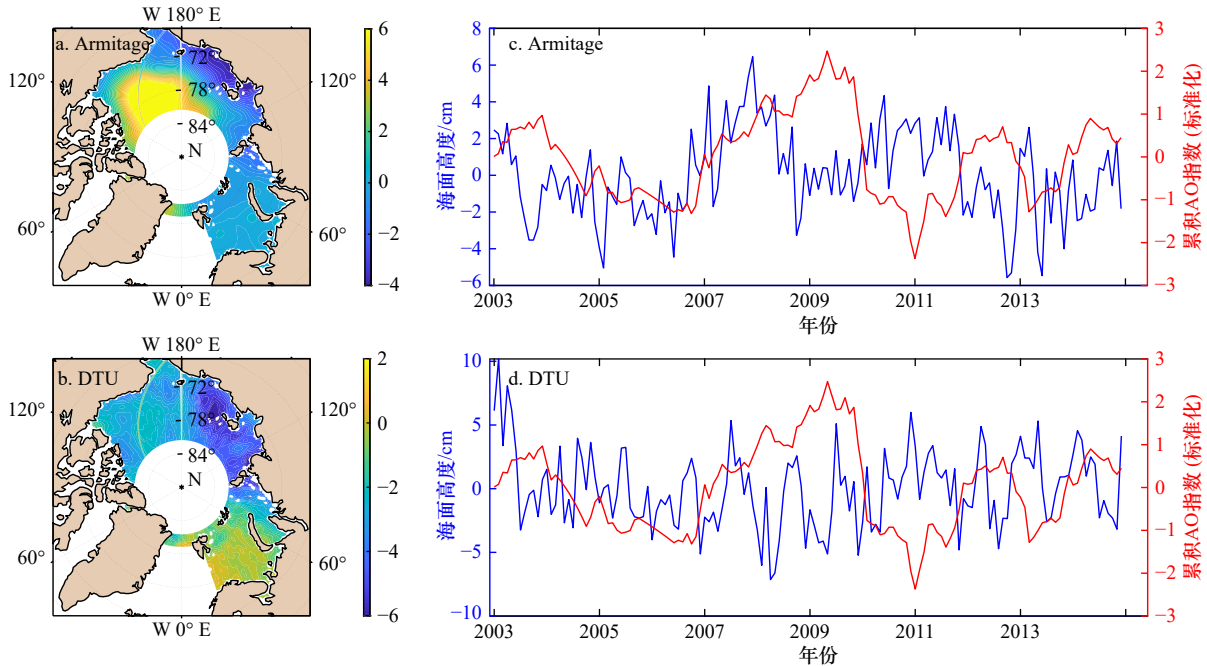


图7 北冰洋海平面的低频变化模态

Fig. 7 Low-frequency modes of sea level variability in the Arctic Ocean

考虑到海洋对外界强迫响应缓慢,我们用时间累积的AO指数来表征一段时间内AO不同位相对应的气旋式或反气旋式风场异常对北冰洋海平面变化的影响^[38],逐月累积AO指数的时间起点选在1993年1月,我们通过试验发现不同时间起点对累积AO指数的影响不显著。将累积AO指数与海平面时间序列进行相关分析表明,以加拿大海盆为中心的深水区海平面的低频变化与累积AO指数呈负相关,而周边陆架海域与累积AO指数呈正相关(图8)。需要指出的是,尽管两套数据的EOF模态存在一定差异(图7),但相关分析的结果表现出较高的一致性。这一结论与Armitage等^[23]进行的不同AO位相SSH距平的合成结果以及Xiao等^[38]利用数值模拟结果基于更长的海平面时间序列得到的结论相符。

从累积AO指数与两套数据PC1的对比来看(图7c和图7d),二者的反相关关系在2003–2005年以及2008年以后更为明显,而在2005–2008年并不显著,同样的情况在前人的研究中也出现过,如Henry等^[28]和Koldunov等^[30]分别利用数值模式结果和观测数据也发现在某些时段北冰洋区域海平面变化与大

气环流形态的对应关系不显著。另外,Xiao等^[38]利用40年的数值模拟结果分析表明,AO对北冰洋海平面低频变化影响的典型时间尺度为年代尺度,而本文所使用的资料长度较短,在一定程度上对分析结果有影响。

4.3 2003–2014年北冰洋海平面变化速率

图9为两套数据得到的2003–2014年北冰洋SSH的变化速率,可以看出二者的空间分布具有较高的一致性,均显示以波弗特海区为中心的加拿大海盆海平面呈快速上升趋势,而欧亚海盆及其沿岸海平面出现不同速率的下降,验潮站数据在这些下降区域显示出非常微弱的上升或者下降趋势。Armitage数据得到的SSH变化速率整体大于DTU数据(图9c),其数值与验潮站结果更为接近(图9a,图9b)。根据Armitage数据,波弗特海SSH上升速率约为16.9 mm/a,而东西伯利亚沿岸的SSH下降速率约为6.3 mm/a,DTU数据给出的两个海域的上升和下降速率分别约为5.7 mm/a和11.4 mm/a,这与Carret等^[40]发现的2003–2010年波弗特海域SSH呈上升趋势,西伯利亚沿岸SSH呈下降趋势是吻合的。Cheng等^[32]给出的1992–

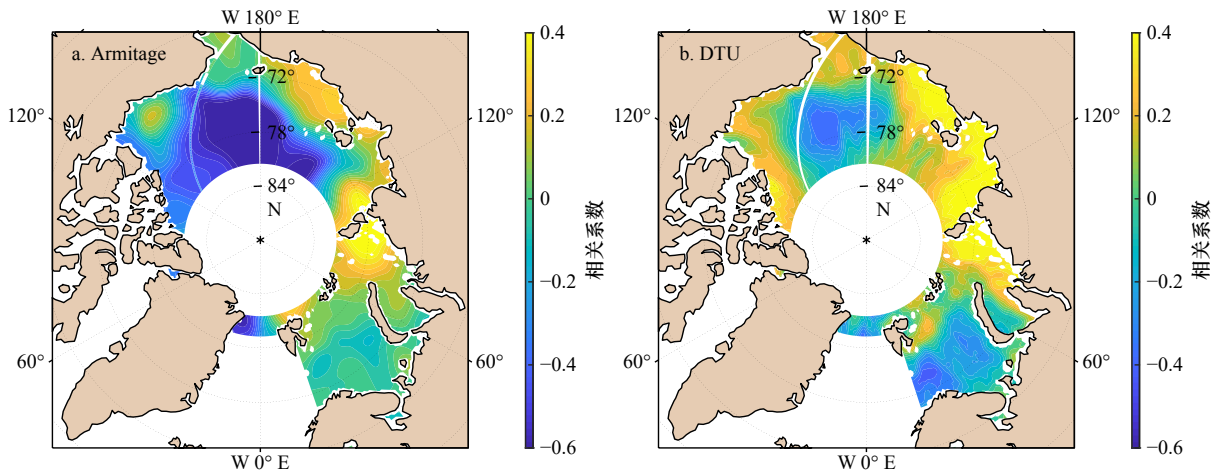


图 8 累积北极涛动指数与海面高度的相关系数

Fig. 8 Correlation coefficient between cumulative Arctic Oscillation index and sea surface height

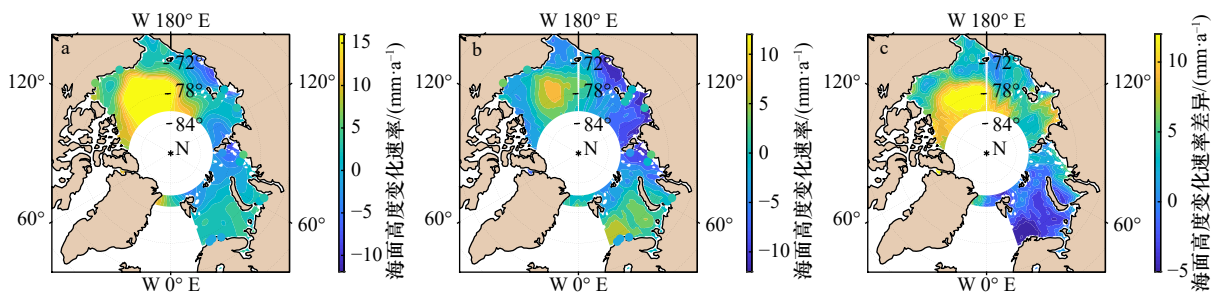


图 9 2003-2014 年北冰洋海面高度变化速率

Fig. 9 Rate of sea surface height in the Arctic Ocean from 2003 to 2014

a. Armitage; b. DTU; c. Armitage 与 DTU 的差异

a. Armitage; b. DTU; c. difference between Armitage and DTU

2012 年波弗特海域的 SSH 上升速度超过 15 mm/a, 与 Armitage 的结果更接近。从 AO 对北冰洋海平面低频变化的影响来看, 2000 年以后 AO 以负位相为主, 导致更多的淡水在波弗特海汇集, 利于该海域的 SSH 上升, 同时引起周边海域 SSH 上升较慢甚至下降^[33,35,45-46]。需要说明的是, 这里分析的海平面变化速率局限于研究时段, 局部海域的快速上升或者下降可能恰好处于海平面更低频变化(如年代际变化)的上升或者下降期。

4.4 北冰洋区域海平面变化特征

从前文的分析可以看出, 北冰洋海平面变化具有显著的空间差异, 这里我们按照 Carret 等^[40]的做法, 将北冰洋划分为 4 个区域——波弗特海、俄罗斯沿岸、北欧海以及巴芬湾(图 10a), 连同整个北冰洋来分析北冰洋整体及区域平均的海平面变化特征并结合验潮站数据对比不同数据的差异。巴芬湾由于岛屿密集地形复杂, 高度计数据分辨率不够, 暂不做分析。北冰洋平均海平面的计算选取的空间范围与 4.2 节和 4.3 节一致。这里我们主要关注不同区域的海平面

低频变化, 因此采用 SSH 年均值进行分析。

图 10b 至图 10e 为两套高度计数据刻画的北冰洋及 3 个区域的海平面变化, 可以看出两套数据在北欧海的差异不大, 而在有海冰覆盖的北冰洋及其所属海域均有明显差异, 差异最大的海区波弗特海实际主要为加拿大海盆(图 10a), 该海域的夏季海冰范围变化剧烈, 两套数据的差异极值都出现在海冰面积较大的时段, 说明海冰覆盖区域海面高度提取存在较大的不确定性, 而北欧海之所以不同产品差异不大与该区域的海冰较少有关。整体来看, 尽管两套数据在年际尺度上表现出较大甚至反相的差异, 但各区域整个时段的海平面变化趋势基本一致, 只是数值不同。

海冰数据表明北冰洋夏季海冰面积在 2003-2014 年呈现减小趋势(图 10b), 这一减小趋势利于北冰洋表层淡水增加, 同时伴随 AO 负位相对应的反气旋异常风场的作用, 淡水辐聚利于海平面上升, 已有研究显示, 受该作用影响最大的区域在波弗特海^[33,35,45-46]。Armitage 数据将波弗特海近期海平面的快速上升(15.4 mm/a)和整个北冰洋海平面的持续上升(3.9 mm/a)

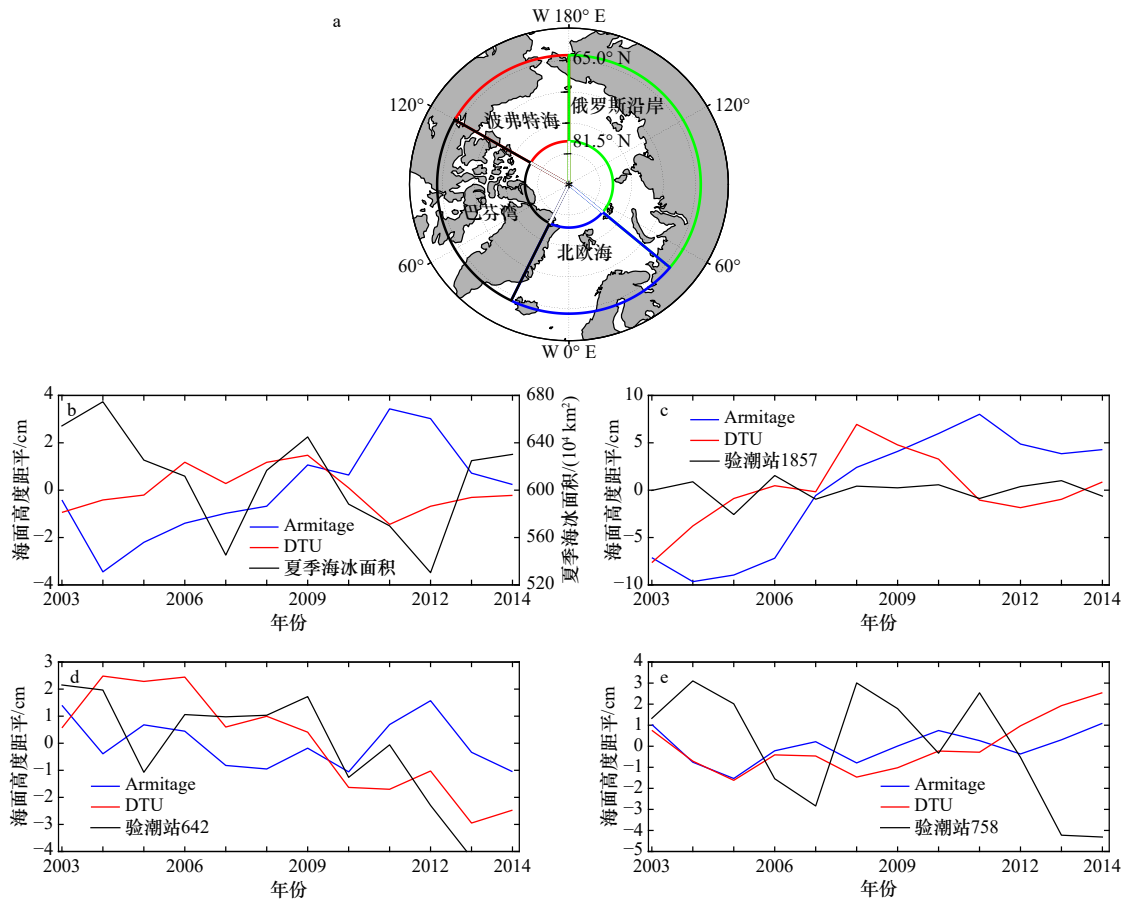


图 10 北冰洋区域划分及区域年均海面高度时间序列

Fig. 10 Regional division of the Arctic Ocean and time series of regional annual-mean sea surface height

a. 区域划分; b. 北冰洋平均海面高度与夏季海冰面积; c. 波弗特海区; d. 俄罗斯沿岸区; e. 北欧海区

a. Regional division; b. mean sea surface height and summer sea ice area of the Arctic Ocean; c. Beaufort Sea; d. Russian coastal area; e. Nordic sea area

都表现了出来。而 DTU 数据显示的波弗特海的海平面上升速率明显较低 (3.9 mm/a), 北冰洋海平面甚至出现了下降趋势 (-0.3 mm/a)。波弗特海区位于北极几个主要气候模态 (北极涛动、偶极子异常和波弗特高压) 的主要作用区域 [23,42,47], 同时它处于海冰存储量巨大从而淡水容量变化剧烈的加拿大海盆, 是北冰洋海平面变化的主要贡献者 [38], 这一点从图 10b 和图 10c 的对比可以看出来。根据 Xiao 等 [38] 的解释, 主导北冰洋海平面低频变化的应为加拿大和欧亚两个深水洋盆, 由于本文所用的高度计数据包含的深水区域主要是波弗特海所在的加拿大海盆, 因此看似是加拿大海盆的海平面变化占主导。

俄罗斯沿岸的海平面低频变化与波弗特海具有一定程度的反相特征, 可以用前文的 AO 模态来解释 [23,38], 只是由于本文选取的俄罗斯沿岸包含了部分欧亚海盆, 导致该反相特征不够明显 (图 10c 和图 10d)。与波弗特海和整个北冰洋相反, 2003–2014 年俄罗斯沿岸的海平面在缓慢下降, Armitage 和 DTU 数据得

到的变化速率分别为 -0.7 mm/a 和 -4.7 mm/a, 俄罗斯沿岸验潮站得到的海平面变化速率是 -4.5 mm/a, 与 DTU 数据接近。俄罗斯沿岸海平面的反相变化在一定程度上削弱了波弗特海区的作用, 因此北冰洋平均海平面年际变化幅度较波弗特海要小 (图 10b 和图 10c), 2011 年以前北冰洋海平面上升速率低于波弗特海, 与俄罗斯沿岸海平面的缓慢下降趋势有关。

我们在 3 个海域同时挑选了连续性较好的代表性验潮站数据, 与区域平均的高度计数据进行对比, 发现验潮站与高度计数据显示的海平面变化周期和趋势是相符的。北欧海和俄罗斯沿岸的海平面低频变化表现出较强的年际特征 (图 10d 和图 10e), 而波弗特海与北冰洋的低频变化周期要更长 (图 10b 和图 10c), 显示了陆架区域的海平面变化的影响因素较深水洋盆更复杂, 如 Calafat 等 [48] 就提出北冰洋沿岸的海平面变化受到沿岸风、来自北大西洋的近岸波动和风应力旋度等众多因素影响, 同时还有陆地径流、长期陆地沉降的作用。在海平面低频变化的振幅和位相

上,高度计数据和验潮站数据存在较大差异,与验潮站仅仅反映了单点且局限于岸边有关。如波弗特海所在的加拿大海盆,近期由于淡水汇聚出现海平面快速上升,但位于波弗特海岸边的 1875 号验潮站远离洋盆中央,其海平面上升速率仅有 0.3 mm/a。北欧海验潮站得到的海平面变化趋势与高度计有很大不同,2003–2014 年高度计数据显示北欧海海平面呈缓慢上升趋势(Armitage 数据为 0.8 mm/a, DTU 数据为 2.2 mm/a),而验潮站数据却得到海平面下降的结论(速率为-4.2 mm/a),这里的海平面下降很大程度上来源于北欧陆地冰川融化导致的局部陆地抬升。

5 结论

本文对北冰洋 3 套高度计数据产品进行了系统对比,结合验潮站数据综合分析了北冰洋海平面多尺度变化特征,并利用北极涛动指数和海冰面积数据对主要变化机制进行了初步的探讨,得到以下结论:

(1)北冰洋多年平均海平面的空间分布表现为加拿大海盆的高值和欧亚海盆的低值,与大尺度海洋环流有很好的对应关系。Armitage 和 DTU 数据集由于进行了海冰覆盖区域海面高度的特别提取,在空间上实现了连续性,更适合用于北冰洋海平面变化的研

究。Armitage 数据在分辨率和空间场的平滑性方面都优于 DTU 数据,且与验潮站观测更为接近。

(2)北冰洋海平面变化的主要模态为季节变化。季节变化的振幅在俄罗斯沿岸较大,其次是海冰常年覆盖的加拿大海盆,欧亚海盆的季节变化振幅最小。海平面在每年的 3–4 月最低,10–11 月最高,其变化大约滞后海冰季节变化 2 个月。

(3)北冰洋海平面低频变化的振幅在加拿大海盆出现最大值。海平面低频变化的主要模态与 AO 关系密切,以加拿大海盆为中心的深水区海平面低频变化与累积 AO 指数呈负相关,而周边陆架海域的海平面变化与累积 AO 指数呈正相关关系。AO 不同位相风场的埃克曼抽吸和输运作用可以解释这一特征。

(4)2003–2014 年北冰洋海平面整体呈上升趋势,其中波弗特海区的海平面上升最快,与俄罗斯沿岸的海平面下降趋势形成鲜明对比,与近期海冰退化和 AO 处于负位相有很大关系。

(5)数据集对比结果显示,不同的高度计数据之间以及高度计与验潮站数据之间的最大差异主要出现在海冰常年覆盖且淡水容量变化剧烈的加拿大海盆和海冰季节变化显著的俄罗斯沿岸,说明海冰覆盖区域的海面高度提取仍然存在很大的不确定性,在上述两个海区使用时需谨慎。

参考文献:

- [1] Proshutinsky A, Pavlov V, Bourke R H. Sea level rise in the Arctic Ocean[J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(11): 2237–2240.
- [2] Stammer D, Cazenave A, Ponte R M, et al. Causes for contemporary regional sea level changes[J]. *Annual Review of Marine Science*, 2013, 5(1): 21–46.
- [3] Griffies S M, Yin Jianjun, Durack P J, et al. An assessment of global and regional sea level for years 1993–2007 in a suite of interannual CORE-II simulations[J]. *Ocean Modelling*, 2014, 78: 35–89.
- [4] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge, USA: Cambridge University Press, 2013.
- [5] Rhein M, Rintoul S R, Aoki S, et al. Observations: Ocean Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013: 255–316.
- [6] Serreze M C, Barrett A P, Stroeve J C, et al. The emergence of surface-based Arctic amplification[J]. *The Cryosphere*, 2009, 3(1): 11–19.
- [7] Serreze M C, Barry R G. Processes and impacts of Arctic amplification: a research synthesis[J]. *Global and Planetary Change*, 2011, 77(1/2): 85–96.
- [8] Shepherd A, Ivins E R, Geruo A, et al. A reconciled estimate of ice-sheet mass balance[J]. *Science*, 2012, 338(6111): 1183–1189.
- [9] Velicogna I, Sutterley T C, Van Den Broeke M R. Regional acceleration in ice mass loss from Greenland and Antarctica using GRACE time-variable gravity data[J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(22): 8130–8137.
- [10] Gardner A S, Moholdt G, Cogley J G, et al. A reconciled estimate of glacier contributions to sea level rise: 2003 to 2009[J]. *Science*, 2013, 340(6134): 852–857.
- [11] Kouraev A V, Papa F, Mognard N M, et al. Sea ice cover in the Caspian and Aral Seas from historical and satellite data[J]. *Journal of Marine Systems*, 2004, 47(1/4): 89–100.
- [12] Kwok R, Cunningham G F, Wensnahan M, et al. Thinning and volume loss of the Arctic Ocean sea ice cover: 2003–2008[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2009, 114(C7): C07005.
- [13] Comiso J C. Large decadal decline of the Arctic multiyear ice cover[J]. *Journal of Climate*, 2012, 25(4): 1176–1193.
- [14] Cavalieri D J, Parkinson C L. Antarctic sea ice variability and trends, 1979–2006[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2008,

- 113(C7): C07004.
- [15] 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.
- [16] Laxon S W, Giles K A, Ridout A L, et al. CryoSat-2 estimates of Arctic sea ice thickness and volume[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(4): 732–737.
- [17] Proshutinsky A, Krishfield R, Timmermans M L, et al. Beaufort Gyre freshwater reservoir: state and variability from observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2009, 114(C1): C00A10.
- [18] McPhee M G, Proshutinsky A, Morison J H, et al. Rapid change in freshwater content of the Arctic Ocean[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(10): L10602.
- [19] Rabe B, Karcher M, Schauer U, et al. An assessment of Arctic Ocean freshwater content changes from the 1990s to the 2006–2008 period[J]. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2011, 58(2): 173–185.
- [20] Polyakov I V, Bhatt U S, Walsh J E, et al. Recent oceanic changes in the Arctic in the context of long-term observations[J]. *Ecological Applications*, 2013, 23(8): 1745–1764.
- [21] Haine T W N, Curry B, Gerdes R, et al. Arctic freshwater export: status, mechanisms, and prospects[J]. *Global and Planetary Change*, 2015, 125: 13–35.
- [22] Armitage T W K, Bacon S, Ridout A L, et al. Arctic Ocean surface geostrophic circulation 2003–2014[J]. *The Cryosphere*, 2017, 11(4): 1767–1780.
- [23] Armitage T W K, Bacon S, Kwok R. Arctic sea level and surface circulation response to the Arctic Oscillation[J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(13): 6576–6584.
- [24] Regan H C, Lique C, Armitage T W K. The Beaufort Gyre extent, shape, and location between 2003 and 2014 from satellite observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2019, 124(2): 844–862.
- [25] Manabe S, Stouffer R J. Simulation of abrupt climate change induced by freshwater input to the North Atlantic Ocean[J]. *Nature*, 1995, 378(6553): 165–167.
- [26] Belkin I M. Propagation of the “Great Salinity Anomaly” of the 1990s around the northern North Atlantic[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(8): L08306.
- [27] Proshutinsky A Y, Johnson M A. Two circulation regimes of the wind-driven Arctic Ocean[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1997, 102(C6): 12493–12514.
- [28] Henry O, Prandi P, Llovel W, et al. Tide gauge-based sea level variations since 1950 along the Norwegian and Russian coasts of the Arctic Ocean: contribution of the steric and mass components[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2012, 117(C6): C06023.
- [29] Holgate S J, Matthews A, Woodworth P L, et al. New data systems and products at the permanent service for mean sea level[J]. *Journal of Coastal Research*, 2013, 29(3): 493–504.
- [30] Koldunov N V, Serra N, Köhl A, et al. Multimodel simulations of Arctic Ocean sea surface height variability in the period 1970–2009[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2014, 119(12): 8936–8954.
- [31] Prandi P, Ablain M, Cazenave A, et al. A new estimation of mean sea level in the Arctic Ocean from satellite altimetry[J]. *Marine Geodesy*, 2012, 35(S1): 61–81.
- [32] Cheng Yongcun, Andersen O, Knudsen P. An improved 20-year Arctic Ocean altimetric sea level data record[J]. *Marine Geodesy*, 2015, 38(2): 146–162.
- [33] Armitage T W K, Bacon S, Ridout A L, et al. Arctic sea surface height variability and change from satellite radar altimetry and GRACE, 2003–2014[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2016, 121(6): 4303–4322.
- [34] Peacock N R, Laxon S W. Sea surface height determination in the Arctic Ocean from ERS altimetry[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2004, 109(C7): C07001.
- [35] Giles K A, Laxon S W, Ridout A L, et al. Western Arctic Ocean freshwater storage increased by wind-driven spin-up of the Beaufort Gyre[J]. *Nature Geoscience*, 2012, 5(3): 194–197.
- [36] Proshutinsky A, Ashik I, Häkkinen S, et al. Sea level variability in the Arctic Ocean from AOMIP models[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2007, 112(C4): C04S08.
- [37] Farrell S L, McAdoo D C, Laxon S W, et al. Mean dynamic topography of the Arctic Ocean[J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(1): L01601.
- [38] Xiao Kai, Chen Meixiang, Wang Qiang, et al. Low-frequency sea level variability and impact of recent sea ice decline on the sea level trend in the Arctic Ocean from a high-resolution simulation[J]. *Ocean Dynamics*, 2020, 70(6): 787–802.
- [39] Peltier W R. Global sea level rise and glacial isostatic adjustment[J]. *Global and Planetary Change*, 1999, 20(2/3): 93–123.
- [40] Carret A, Johannessen J A, Andersen O B, et al. Arctic sea level during the satellite altimetry era[J]. *Surveys in Geophysics*, 2017, 38(1): 251–275.
- [41] Thompson D W J, Wallace J M. The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields[J]. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25(9): 1297–1300.
- [42] Wu Bingyi, Wang Jia, Walsh J E. Dipole anomaly in the winter Arctic atmosphere and its association with sea ice motion[J]. *Journal of*

Climate, 2006, 19(2): 210–225.

- [43] Wang Qiang. Stronger variability in the Arctic Ocean induced by sea ice decline in a warming climate: Freshwater storage, dynamic sea level and surface circulation[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2021, 126(3): e2020JC016886.
- [44] Wang Jia, Ikeda M. Arctic Oscillation and Arctic sea-ice oscillation[J]. *Geophysical Research Letters*, 2000, 27(9): 1287–1290.
- [45] Morison J, Kwok R, Peralta-Ferriz C, et al. Changing Arctic ocean freshwater pathways[J]. *Nature*, 2012, 481(7379): 66–70.
- [46] Wang Qiang, Wekerle C, Danilov S, et al. Recent sea ice decline did not significantly increase the total liquid freshwater content of the Arctic Ocean[J]. *Journal of Climate*, 2019, 32(1): 15–32.
- [47] Aagaard K, Carmack E C. The role of sea ice and other fresh water in the Arctic circulation[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1989, 94(C10): 14485–14498.
- [48] Calafat F M, Chambers D P, Tsimplis M N. Inter-annual to decadal sea-level variability in the coastal zones of the Norwegian and Siberian Seas: the role of atmospheric forcing[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2013, 118(3): 1287–1301.

附录:

表 A1 北冰洋沿岸验潮站的主要信息

Table A1 Main information of tide gauges along the Arctic Ocean

序号	站名	站位号	纬度	经度	所属国家	观测年数
1	KABELVAG	45	68.213°N	14.482°E	NOR	91
2	OULU / ULEABORG	79	65.04°N	25.418°E	FIN	11
3	KEMI	229	65.673°N	24.515°E	FIN	1
4	NARVIK	312	68.428°N	17.426°E	NOR	81
5	LINAKHAMARI	365	69.65°N	31.367°E	RUS	25
6	ANDENES	425	69.326°N	16.135°E	NOR	41
7	BERLEVAG	442	70.85°N	29.1°E	NOR	11
8	VARDO	524	70.375°N	31.104°E	NOR	1
9	EVENSKJAER	531	68.583°N	16.55°E	NOR	71
10	BARENTSBURG	541	78.067°N	14.25°E	SJM	1
11	BARENTSBURG II (SPITSBERGEN)	547	78.067°N	14.25°E	SJM	2
12	BODO	562	67.288°N	14.391°E	NOR	101
13	TIKSI (TIKSI BUKHTA)	569	71.583°N	128.917°E	RUS	447
14	AMDERMA	599	69.75°N	61.7°E	RUS	310
15	UST KARA	600	69.25°N	64.517°E	RUS	315
16	FEDOROVA (CHELUSKIN MYS)	601	77.717°N	104.3°E	RUS	392
17	SANNIKOVA (SANNIKOVA PROLIV)	602	74.667°N	138.9°E	RUS	480
18	SHALAUROVA (SHALAUROVA MYS)	603	73.183°N	143.233°E	RUS	516
19	AMBARCHIK	604	69.617°N	162.3°E	RUS	535
20	RAU-CHUA	605	69.5°N	166.583°E	RUS	556
21	PEVEK	606	69.7°N	170.25°E	RUS	567
22	VANKAREM	607	67.833°N	175.833°W	RUS	630
23	VRANGELIA (VRANGELIA OSTROV)	608	70.983°N	178.483°W	RUS	620
24	MALYE KARMAKULY	609	72.367°N	52.7°E	RUS	16
25	UST OLENEK	610	73°N	119.867°E	RUS	435

续表 A1

序号	站名	站位号	纬度	经度	所属国家	观测年数
26	DIKSON	611	73.5°N	80.4°E	RUS	345
27	STERLEGOVA (STERLEGOVA MYS)	612	75.417°N	88.9°E	RUS	365
28	NETTEN	613	66.967°N	171.933°W	RUS	650
29	PRAVDY (PRAVDY OSTROV)	615	76.267°N	94.767°E	RUS	378
30	MYS SHMIDTA	616	68.9°N	179.367°W	RUS	610
31	RATMANOVA	617	65.85°N	169.133°W	RUS	670
32	MALYI TAIMYR (MALYI TAIMYR OSTROV)	620	78.083°N	106.817°E	RUS	414
33	KOLUCHIN	621	67.483°N	174.65°W	RUS	640
34	UGORSKII SHAR (UGORSKII SHAR PROLIV)	622	69.817°N	60.75°E	RUS	308
35	DUNAI (DUNAI OSTROV)	640	73.933°N	124.5°E	RUS	440
36	KOTELNYI (KOTELNYI OSTROV)	641	76°N	137.867°E	RUS	475
37	KIGILIAH	642	73.333°N	139.867°E	RUS	485
38	ANDREIA (ANDREIA OSTROV)	646	76.8°N	110.75°E	RUS	410
39	ZHELANIA II (ZHELANIA MYS)	647	76.95°N	68.55°E	RUS	321
40	GEIBERGA (GEIBERGA OSTROV)	648	77.6°N	101.517°E	RUS	387
41	MUOSTAH (MUOSTAH OSTROV)	649	71.55°N	130.033°E	RUS	455
42	CHETYREHSTOLBOVOI	650	70.633°N	162.483°E	RUS	550
43	BOLVANSKII NOS (FEDOROVA)	651	70.45°N	59.083°E	RUS	305
44	PREOBRAZHENIA (PREOBRAZHENIA OSTROV)	652	74.667°N	112.933°E	RUS	418
45	POPOVA (BELYI OSTROV)	653	73.333°N	70.05°E	RUS	325
46	LESKINA (LESKINA MYS)	654	72.317°N	79.567°E	RUS	340
47	RUSSKII (RUSSKII OSTROV)	655	77.167°N	96.433°E	RUS	380
48	SOLNECHNAIA (SOLNECHNAIA BUKHTA)	656	78.2°N	103.267°E	RUS	390
49	SVIATOI NOS (SVIATOI NOS MYS)	657	72.833°N	140.733°E	RUS	397
50	ZEMLIA BUNGE	658	74.883°N	142.117°E	RUS	510
51	MARII PRONCHISHEVOI (BUKHTA)	667	75.533°N	113.433°E	RUS	420
52	TROMSO	680	69.647°N	18.961°E	NOR	31
53	HARSTAD	681	68.801°N	16.548°E	NOR	61
54	MURMANSK	684	68.967°N	33.05°E	RUS	18
55	MURMANSK II	687	68.967°N	33.05°E	RUS	19
56	WISE (WISE OSTROV)	704	79.5°N	76.983°E	RUS	338
57	UEDINENIA (UEDINENIA OSTROV)	707	77.5°N	82.2°E	RUS	348
58	BILLINGA	708	69.883°N	175.767°E	RUS	578
59	UADEI	709	71.517°N	136.417°E	RUS	468
60	RUSSKAIA GAVAN II	710	76.183°N	62.583°E	RUS	3
61	RUSSKAYA GAVAN	711	76.2°N	62.583°E	RUS	1

续表 A1

序号	站名	站位号	纬度	经度	所属国家	观测年数
62	IZVESTIA TSIK (IZVESTIA TSIK OSTROVA)	728	75.95°N	82.95°E	RUS	360
63	GOLOMIANYI (GOLOMIANYI OSTROV)	729	79.55°N	90.617°E	RUS	374
64	AION	730	69.933°N	167.983°E	RUS	560
65	MORZHOVAIA (HARASAVEI MYS)	732	71.417°N	67.583°E	RUS	318
66	ISACHENKO (ISACHENKO OSTROV)	734	77.15°N	89.2°E	RUS	370
67	BUORHAIA (BUORHAIA MYS)	735	71.95°N	132.767°E	RUS	464
68	KOSYSTYI (KOSYSTYI MYS)	736	73.65°N	109.733°E	RUS	394
69	KRASNOFLOTSKIE (KRASNOFLOTSKIE OSTROVA)	738	78.6°N	98.833°E	RUS	385
70	MALYSHEVA (MALYSHEVA OSTROV)	741	72.067°N	129.833°E	RUS	452
71	HAMMERFEST	758	70.665°N	23.683°E	NOR	21
72	TADIBE-IAHA	767	70.367°N	72.567°E	RUS	328
73	MOSJOEN	781	65.85°N	13.2°E	NOR	121
74	TERPIAI-TUMSA	790	73.55°N	118.667°E	RUS	430
75	VALKARKAI	792	70.083°N	170.933°E	RUS	570
76	NEMKOVA (NEMKOVA OSTROV)	797	71.417°N	150.75°E	RUS	521
77	BRONNOYSUND	803	65.483°N	12.217°E	NOR	131
78	BELYI NOS	859	69.6°N	60.217°E	RUS	7
79	RESOLUTE	863	74.683°N	94.883°W	CAN	151
80	SOPOCHNAIA KARGA	917	71.867°N	82.7°E	RUS	351
81	ZHOHOVA (ZHOHOVA OSTROV)	937	76.15°N	152.833°E	RUS	528
82	TUKTOYAKTUK	1000	69.417°N	132.967°W	CAN	211
83	PESCHANYI (PESCHANYI MYS)	1006	79.433°N	102.483°E	RUS	405
84	KRENKELIA (HEISA OSTROV)	1012	80.617°N	58.05°E	RUS	14
85	SAGYLLAH-ARY	1019	73.15°N	128.883°E	RUS	443
86	ALERT	1110	82.49°N	62.32°W	CAN	162
87	ANTIPAIUTA	1128	69.083°N	76.85°E	RUS	335
88	CAMBRIDGE BAY	1132	69.117°N	105.067°W	CAN	191
89	SANDNESSJOEN	1137	66.017°N	12.633°E	NOR	117
90	SE-LAHA	1200	70.15°N	72.567°E	RUS	331
91	VADSO	1257	70.067°N	29.75°E	NOR	5
92	HONNINGSVAG	1267	70.98°N	25.973°E	NOR	15
93	CAPE PARRY	1282	70.15°N	124.667°W	CAN	201
94	BYKOV MYS (BYKOV MYS)	1399	72°N	129.117°E	RUS	449
95	NY-ALESUND	1421	78.929°N	11.938°E	SJM	21
96	NAIBA	1497	70.85°N	130.75°E	RUS	460
97	ANABAR	1780	73.217°N	113.5°E	RUS	425

续表 A1

序号	站名	站位号	纬度	经度	所属国家	观测年数
98	LITTLE CORNWALLIS ISLAND	1822	75.383°N	96.95°W	CAN	156
99	PRUDHOE BAY, ALASKA	1857	70.4°N	148.527°W	USA	2
100	ULUKHAKTOK (FORMERLY HOLMAN)	1930	70.736°N	117.761°W	CAN	199
101	QIKIQTARJUAQ	1935	67.867°N	64.117°W	CAN	135
102	BUGRINO	2025	68.8°N	49.333°E	RUS	10
103	MYS PIKSHUEVA	2026	69.55°N	32.433°E	RUS	30
104	POLYARNIY	2027	69.2°N	33.483°E	RUS	20
105	TERIBERKA	2028	69.2°N	35.117°E	RUS	23
106	KALIX	2101	65.697°N	23.096°E	SWE	205

注: 所属国家一栏中, RUS表示俄罗斯, NOR表示挪威, CAN表示加拿大, SJM表示斯瓦尔巴群岛和扬马延岛, USA表示美国, SWE表示瑞典。

Characteristics of the sea level in the Arctic Ocean based on observation data from 2003 to 2014

Zheng Luxi^{1,2,3}, Chen Meixiang^{1,2}, Ren Jie^{1,2}, Yu Jialin^{1,2}, Chen Yujie^{1,2}, Ji Tao⁴, Wang Xuezhu^{1,2}, Yang Jie⁵

(1. Key Laboratory of Marine Hazards Forecasting, Ministry of Natural Resources, Hohai University, Nanjing 210024, China; 2. College of Oceanography, Hohai University, Nanjing 210024, China; 3. School of Oceanography, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 4. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210024, China; 5. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China)

Abstract: Three monthly altimeter datasets of the Arctic Ocean are compared in this paper. The datasets provided by the Centre for Polar Observation and Modelling (CPOM) and Technical University of Denmark (DTU) are found to be consistent with each other and due to their high space coverage, are more suitable for the study of the sea level variation in the Arctic Ocean, the former is better in terms of spatial resolution, smoothness, and consistency with the tide gauge observation. Based on the data of both altimeter and tide gauge, the temporal and spatial characteristics of sea level in the Arctic Ocean are analyzed and the results show that the climatological sea level in the Arctic Ocean is represented by the striking contrast between the high values in the Canadian Basin and low values in the Eurasian basin. The variation of sea level in the Arctic Ocean is dominated by the seasonal variability and low-frequency variability associated with the Arctic Oscillation, large amplitudes of both the seasonal and inter-annual sea level variability are found in the Canadian Basin, and large seasonal variability occurs along the coast of Russia. During the period 2003–2014, the mean sea level of the Arctic Ocean is rising with the largest rising rate is found in the Canadian Basin, while the sea level in the Russian coastal area is declining slightly. It is also found that large uncertainty exists in the altimetry products of the Canadian Basin and the coast of Russia, as the difference both between altimetry products and between altimeter and tide gauge data cannot be ignored, data in these areas should be used with caution.

Key words: Arctic Ocean; sea level; seasonal variability; low-frequency variability; Arctic Oscillation