

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2020.03.010

北冰洋海平面变化的观测和研究现状

陈美香¹, 肖凯¹, 王雪竹¹, 程旭华¹, 李娟²

(1. 河海大学海洋学院, 江苏南京 210098; 2. 山东科技大学海洋科学与工程学院, 山东青岛 266590)

摘要: 回顾北冰洋海平面观测和研究现状,总结了北冰洋海平面变化特征和变化机制。北冰洋海平面季节变化受海冰消融、蒸发降水和陆地径流季节变化的影响,由比容变化主导;年际到年代际海平面变化受北极涛动影响显著,可用风场异常导致的淡水分布来解释。盐比容变化是深水洋盆海平面变化的主导因素,由之引起的质量变化控制陆架海域和北冰洋平均的海平面变化。近期波弗特环流区域海平面上升极快,与波弗特高压持续增强及淡水积聚有关。气候变暖会导致北冰洋海平面持续上升。海冰快速减退和格陵兰岛冰川融化对北冰洋海平面变化的影响有待深入研究。数据的短缺和观测的不确定性目前仍然制约北冰洋海平面变化的研究工作,高分辨率数值模拟有望成为未来研究的重要工具。

关键词: 北冰洋;海平面变化;北极涛动;波弗特环流;数值模拟

中图分类号: TU122 文献标志码: A 文章编号: 1000-1980(2020)03-0252-08

Status of observation and study on level variation of Arctic Ocean

CHEN Meixiang¹, XIAO Kai¹, WANG Xuezhu¹, CHENG Xuhua¹, LI Juan²

(1. College of Oceanography, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Ocean Science and Engineering College, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: The present situation of observation and research on sea level variation in the Arctic Ocean were reviewed in this study, and the characteristics and mechanisms of the Arctic sea level variability based on the analysis of observation data and numerical simulation were summarized. It has been pointed out that the seasonal sea level variability is related to the seasonal variation of sea ice formation and melt, net precipitation minus evaporation and river runoff, and is dominated by halosteric effect. The inter-annual to decadal variability is closely related to the spatial distribution of freshwater caused by anomalous cyclonic and anticyclonic atmospheric circulation associated with the Arctic Oscillation. Halosteric change dominates the low-frequency sea level variability in the deep basin, and consequent ocean mass change dominates the sea level variation on the continental shelf and the average sea level change of the Arctic Ocean. The fast sea level rise in the Beaufort Gyre region recently can be explained by freshwater accumulation due to the enhancement of high and rapid sea ice decline in Beaufort Sea. The mean sea level of the Arctic Ocean will continue rising under the global warming. The influence of recent sea ice decline and the Greenland ice sheet melt on the Arctic sea level change needs further study. The shortage of data and uncertainty of observations still restrict the research on Arctic sea level variation and the high-resolution numerical simulation is expected to be an important tool for future research.

Key words: Arctic Ocean; sea level variation; Arctic Oscillation; Beaufort Gyre; numerical simulation

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFA0604600);国家自然科学基金(41506006, 41576020)

作者简介: 陈美香(1981—),女,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

引用本文: 陈美香,肖凯,王雪竹,等.北冰洋海平面变化的观测和研究现状[J].河海大学学报(自然科学版),2020,48(3):252-259.

CHEN Meixiang, XIAO Kai, WANG Xuezhu, et al. Status of observation and study on level variation of Arctic Ocean [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(3): 252-259.

北冰洋虽是世界上面积最小的大洋,却是全球气候系统的重要组成部分。原因之一为北冰洋大部分海域常年或季节性为海冰覆盖,海冰的变化会引起海洋表面热量吸收和反射的变化,海洋热收支的改变会导致大气环流变化,继而对包括中低纬度在内的全球气候产生影响^[1-8];原因之二为北冰洋冷而淡的水会通过 Fram 海峡和 Davis 海峡输送到北大西洋,进入全球大洋深层水的生成源地,维持着全球热盐环流的存在,而热盐环流是全球气候的掌控者^[9-17]。

观测显示北极近几十年正在经历急剧的气候变化^[18]。2000 年以来北极气温的增温速度是全球平均水平的 2 倍,被称为“北极放大”现象^[1-4]。同时,北冰洋海冰严重减退^[19-23],淡水容量增加^[24-30],暖事件频发^[27, 31-32]。伴随着这些变化,北冰洋海洋环流^[33-35]、物理状况^[24-28, 31-32, 36]和生物地球化学过程都在发生转变^[37-38]。另外,北冰洋周边陆地冰冻圈的变化和格陵兰冰架的快速融化也在影响北冰洋^[39-42]。

在反映海洋状态的众多参量中,海平面是海洋质量分布和热盐结构变化的综合反映,区域海平面变化几乎与海洋中所有的动力热力过程相联系,如海表面加热冷却、海表风应力的变化、海陆和海气淡水交换以及海洋内部混合等,这些过程会改变海水温盐结构和洋流,导致海水密度和质量输送发生变化从而影响海平面升降^[43-45]。因此,海洋受到气候系统各分量影响所产生的几乎所有的变化在海平面中都会有所体现,海平面是气候变化最直接的指示器^[18, 46-47],人们可以通过认识北冰洋海平面变化来发现和深入了解北冰洋和北极气候的变化。

本文将基于北冰洋海平面数据积累的现状,从海平面变化特征和变化机制两个方面,按照时间尺度对北冰洋海平面变化的相关研究进行梳理,分析目前研究存在的主要问题,为研究者进行后续工作提供参考。

1 北冰洋海平面观测现状

与全球其他海区相比,北冰洋积累的海平面观测资料很少^[48-52]。长期验潮站主要分布在挪威和俄罗斯西伯利亚沿岸,高质量数据多从 20 世纪 50 年代开始,西伯利亚沿岸部分站位在 20 世纪 90 年代以后停止运行导致观测数据更加有限。虽然验潮站数据的时间长度能达到 50 a 左右,但它仅能反映北冰洋沿岸且主要是欧亚海盆沿岸的海平面变化,北冰洋内部和美亚海盆沿岸验潮站数据比较稀缺^[45, 53-54]。

20 世纪 90 年代以来高度计观测数据极大推进了全球和中低纬度海域海平面变化的研究,但北冰洋海平面变化研究却没有很大进展。原因之一是很多高度计观测不到纬度太高的区域。如 TOPEX/Poseidon 及其后继卫星 Jason-1/2 能观测到的最大纬度为 66°N,基本没有覆盖北冰洋。其他少量卫星虽然可以观测到北冰洋部分海域,如 GFO 可以观测到 72°N,ERS-1/2 和 Envisat 可以观测到 82°N,2003 年发射的 ICESat 可以观测到 86°N,2010 年以来 CryoSat 能观测到 88°N^[48-50, 55],但由于北冰洋大部分海区常年或季节性被海冰覆盖,除北欧海和巴伦支海无冰区域高度计能常年进行有效观测,其他海域高度计有效数据一般不足 1 a 的 30%^[48-52]。像法国空间局发布的 AVISO(archiving, validation and interpretation of satellite oceanographic data)这样的被广泛应用于海平面研究的多卫星融合高度计数据集,虽然可以提供 1993 年以来 82°N 以南的海面高度数据,由于其数据提取方式针对的是开阔水域的观测信号,在北冰洋海冰覆盖区域是没有数值的^[49, 50],因此这些高度计数据并没有推动北冰洋海平面变化的研究。

冰覆盖区的海面高度提取需要采用与常规无冰海域不同的处理技术。Laxon 等^[56-57]最早进行了高度计数据在有冰区域的海面高度反演,Peacock 等^[58]利用 ERS-2 高度计资料得到了北冰洋第一套包含冰覆盖区在内的空间连续的海面高度数据集。在此基础上,研究者相继给出了利用不同高度计得到的北冰洋平均动力地形^[51, 59-62]。Prandi 等^[48-51]将多颗卫星高度计融合分别得到了北冰洋大面连续的高度计观测数据集。目前涵盖冰区的北冰洋高度计数据长度大约为 20 a(Armitage 等^[51]仅提供了 2003—2014 年共 12 a 的数据),空间范围最北能达到 81.5°N。

总体而言,目前北冰洋海平面观测数据比较短缺。验潮站数据虽然长度达 50 a 左右,但仅限于北冰洋沿岸尤其是欧亚大陆沿岸;高度计数据长度只有 20 a 左右,且尚未实现北冰洋全域覆盖,北极点附近海域仍然没有观测数据。除海平面以外,北冰洋的温盐也缺乏长期连续的大面观测资料,仅在个别海域有零星的锚定观测数据,难以大范围估算海平面变化中的比容变化分量。GRACE 重力卫星能提供 2003 年以来北冰洋的海洋质量变化数据,可用于分析海平面变化中的质量变化分量,但资料长度较短,不足以支撑海平面年代际变化的分析。

海平面及相关要素观测数据的短缺为全面认识北冰洋海平面变化带来了极大挑战,海洋海冰模式的快速发展为北冰洋海平面变化研究提供了有力支撑。Proshutinsky 等^[63-64]分析了 AOMIP(Arctic Ocean Model Intercomparison Project)计划中 5 个海洋海冰模式结果,Griffies 等^[65]分析了 CORE-II(Coordinated Ocean-sea ice Reference Experiments-II)计划中 13 个全球海洋海冰模式结果,证明当前的海洋海冰模式已经具备了较好再现全球及北冰洋海平面变化的能力,尽管模式与实测之间及不同模式之间仍有差异^[59,63,65],但这并不影响数值模拟成为北冰洋海平面变化研究特别是机制研究的主要手段,Koldunov 等^[45]的工作就是很好的证明。

2 北冰洋海平面变化特征

高度计数据显示,北冰洋海平面气候态的空间分布与北冰洋上空的气压场和大尺度海洋环流有很好的对应关系^[29,45,51,59-62]。北冰洋年均海平面表现为波弗特海最高,其次是格陵兰岛北侧海域和东西伯利亚海及拉普捷夫海,欧亚海盆大部分海域较低,格陵兰海海平面最低。波弗特海的海平面高值与波弗特高压和反气旋式的波弗特环流有关,格陵兰海的海平面低值对应着冰岛低压和气旋式海洋环流,美亚海盆和欧亚海盆之间的海平面梯度对应着穿极流。数值模式得到的结果与观测基本一致^[45,63]。

北冰洋海平面具有显著的季节变化特征。Armitage 等^[51]分析了高度计数据发现季节变化为北冰洋海平面变化的最主要模态,海平面分别于 5 月份和 11 月份达到年最低值和最高值,平均海平面的年较差约为 10 cm,与 Bacon 等^[66]利用液态淡水储量变化推算得到的 8 cm 以及 Aagaard 等^[67]基于淡水收支估计的 9 cm 结果非常接近。海平面季节变化振幅从沿岸向中央洋盆逐渐减小,西伯利亚沿岸季节变化的振幅最大^[51,68-69]。

北冰洋海平面还存在典型的年际和年代际变化特征,受资料长度影响二者通常被放在一起作为低频变化讨论^[45,51,70-71]。研究表明,北冰洋海平面年际到年代际变化与北极涛动^[72](Arctic Oscillation, AO)和北大西洋涛动^[73](North Atlantic Oscillation, NAO)密不可分。AO 和 NAO 最显著的变率为年际到年代际变率,二者在一定程度上难以区分,这和研究发现的北冰洋海平面年际到年代际变化与 AO 和 NAO 都存在很强的联系是一致的^[34,45,53,68]。验潮站数据显示,北冰洋沿岸的海平面变化在年际到年代际尺度上与 AO 存在密切联系,特别是挪威海、巴伦支海和喀拉海沿岸^[53,68,70-71]。与沿岸有较长的验潮站资料不同,北冰洋深水区海平面变化直到最近才有高度计数据,且尚未实现全域覆盖。基于高度计观测和数值模拟结果,北冰洋海平面年际到年代际变化具有深水洋盆与陆架浅水区反位相变化的特征,与北冰洋上空大气环流的气旋/反气旋形态存在很好的对应关系,而上述大气环流形态对应的气压场和风场的变化主要受 AO 和 NAO 的影响^[34,45,51]。

不同时期的海平面变化趋势也备受关注。验潮站数据显示北冰洋沿岸海平面自 20 世纪 50 年代以来整体呈现上升趋势。西伯利亚沿岸 1954—1989 年海平面上升速率为 1.85 mm/a^[68],挪威海沿岸 1960—2010 年海平面上升速率为 1.3~2.3 mm/a^[69]。Henry 等^[53]综合俄罗斯和挪威沿岸所有的验潮站数据,认为北冰洋沿岸 1950—1980 年海平面并无明显的趋势变化,1980—2009 年才显示出明显的上升趋势,其上升速率与全球平均海平面上升速率接近。高度计观测以来北冰洋平均海平面仍保持显著上升趋势,上升速率从 (2.10±0.63) mm/a 到 (3.6±1.3) mm/a^[49-50,52],其中 1993—2003 年上升较快,2003 年以后上升速度减慢。波弗特环流区域在该时段海平面上升极快,速率高达 15~20 mm/a^[49-50,61]。由于时间较短,这种趋势可能仅仅是年代际变化上升位相的一部分^[49-52]。

3 北冰洋海平面变化机制

目前北冰洋海平面变化机制的研究较为零碎。从本质上讲,海平面变化是海水比容变化和质量变化的总和^[46,65]。比容变化来源于海水的温度变化和盐度变化,实为海水密度变化导致海水体积变化造成的海平面升降。北冰洋海水温度和盐度都较低,海水热膨胀系数很小而盐收缩系数却很大,因此大部分区域比容变化中盐度占主导^[65]。质量变化通俗来说就是海水水量的变化。对全球海洋而言,随着全球变暖,陆地冰川融化导致大量淡水进入海洋,引起海洋质量增加导致海平面上升。对区域海洋来说,质量变化来源于动力过程导致的海水质量在空间上重新分布,比如风的 Ekman 输运引起海水从沿岸向洋盆中央堆积,或海洋与陆地或大气的水交换,如陆地冰川融化和径流增加导致区域海洋水量增加等。海水质量变化会引起海底压强

的改变,可以通过海底压强的变化来推算海水质量变化^[46,65],这是 GRACE 重力卫星数据用于海洋质量变化研究的理论基础。不管影响北冰洋海平面变化的过程有多复杂,所有过程最终都会归结到比容变化或质量变化两个方面,但早期的研究存在将比容和质量变化与各种动力过程等同看待的情形,严格来讲并不合理。尽管如此,通过梳理前人的研究结果,仍可以对北冰洋海平面变化的原因有所了解。

北冰洋海平面季节变化来源于北冰洋淡水收支的季节变化^[51,73,66-67]。海冰的融冰结冰、陆地径流量以及蒸发降水等过程导致盐度存在显著的季节变化,主要通过比容效应影响海平面的季节变化。陆地径流同时引起北冰洋海水质量变化,可以解释每年6月份海平面出现季节变化的较小峰值^[51]。

北冰洋海平面的年际到年代际变化受与 AO 相关的大气环流变化的影响^[34,45,70-71]。AO 正位相时北极上空出现气旋式环流异常^[45],Ekman 抽吸在洋盆中部引起盐跃层抬升,风场的 Ekman 输运导致表层淡水由中央的深水洋盆向沿岸堆积,造成海平面在北冰洋中部下降沿岸上升;AO 负位相时出现反气旋式大气环流异常,洋盆中部深水区海平面升高而沿岸海平面降低;这就造成了年际到年代际时间尺度上北冰洋中部和沿岸海平面反位相变化的形态,体现了动力过程对水体在北冰洋半封闭海域重新分布的影响^[24,45,48,51,63-64]。从质量和比容变化的角度来看,深水洋盆的盐比容变化在上述过程中占主导,而沿岸的海平面变化主要来自深水洋盆淡水的辐聚辐散引起的海水质量在陆架上的变化^[45,65,74]。分区域来看,Calafet 等^[70]认为受 AO 影响较为显著的挪威海、巴伦支海和喀拉海沿岸,海平面年代际变化的主要影响因素是局地风和北大西洋东边界传播过来的信号;而与 AO 相关不大的东西伯利亚海、楚科奇海和拉普捷夫海沿岸,1950—1999 年间沿岸风是主要影响因素,1999 年以后沿岸风和波弗特环流的加强作用比较显著^[70-71]。

海水质量变化是引起北冰洋平均海平面低频变化特别是趋势变化的主导因素,通过北冰洋同太平洋和北大西洋水交换的变化来实现^[30,45,51-52,65]。Wang 等^[29,30]基于模式结果发现近期北冰洋加拿大海盆液态淡水增加,与北冰洋向外的淡水输出量减少有关。Woodgate 等^[75]分析观测资料发现 2001—2011 年太平洋通过白令海峡向北冰洋的年平均入流量增加了 50%。CORE-II 多模式平均结果显示,1993—2009 年北冰洋整体质量有增加趋势,是由全球热比容变化导致的北冰洋同外界的水位差引起的^[65]。这些过程都对高度计观测以来北冰洋海平面整体上升的趋势有贡献^[48-50,52]。近期波弗特环流区海平面出现快速上升是海冰快速融化^[29]和波弗特高压增强导致的淡水积聚^[30]的结果。沿岸验潮站结果显示,1954—1989 年俄罗斯沿岸的海平面上升热比容作用占 35%,气压降低占 30%,气旋式风场的作用占 10%,另有 25% 来自海水质量增加^[68],当然该结果存在将比容和质量变化与各种过程等同看待的问题,只能作为参考。

另外,北冰洋周边陆地冰冻圈的变化和格陵兰冰架的快速融化也会影响北冰洋的海平面^[39,42]。由于缺乏观测数据,目前只能给出一些定性结论,如数值模拟结果显示,格陵兰冰川的融化会造成大量淡水注入北大西洋,通过经向翻转环流的变化引起热量收支的改变和北大西洋入流的调整导致北冰洋海平面出现上升。

4 讨 论

北冰洋海平面变化的研究工作由于资料和数值模拟技术所限起步较晚,目前人们对北冰洋海平面变化的时空特征和机制的了解尚浅,前人的研究工作主要存在以下几个方面的问题。

a. 高度计数据的系统分析还很少。目前公开的北冰洋包含冰覆盖区的高度计数据有 4~5 套,仅有 Armitage 等^[51]的数据(2003—2014 年)进行过较为系统的分析,但由于其数据长度较短,无法揭示海平面变化的年代际特征。其他数据大多只进行了粗略的趋势分析且从结果来看,不同数据之间还存在差异,因此有必要将所有数据集进行分析对比,获取北冰洋实测海平面的变化规律。

b. 比容变化和质量变化对北冰洋海平面变化的影响研究不够深入。尽管已经认识到以盐比容为主的比容变化对北冰洋局域海平面变化非常重要,但关于比容变化对海平面变化的影响,目前还停留在从海表到海底的比容总和的阶段,不同层次比容变化的重要性还不清楚。北冰洋温盐观测资料稀缺,目前利用再分析数据直接计算的比容变化和通过高度计与 GRACE 观测数据推算的结果相差很大。依据高度计和 GRACE 卫星数据推算的比容变化,虽是基于观测资料的结果,首先存在长度较短的缺陷(GRACE 数据始于 2003 年),其次推算出来的结果是一个总比容,无法进行热比容和盐比容的分离以及不同层次比容变化的分离。像表层淡化^[24,29-30,61]和中层大西洋水增暖事件^[27,32]等可能对海平面变化有重要影响的信号,采用上述推算方法显然无法分离这些信号。另外,目前北极的 GRACE 重力卫星数据虽然已被用于海平面变化收支研究,但 Carret

等^[52]发现不同机构发布的 GRACE 数据产品在北冰洋存在差异,特别是在质量变化趋势方面,不同数据产品甚至出现趋势相反的情况,这提示在利用 GRACE 数据对北冰洋进行质量变化的分析时需要慎重。

c. 借助数值模式进行北冰洋海平面变化的研究亟待加强。由于北冰洋海平面变化的相关观测资料稀缺,借助数值模拟来进行海平面变化研究是比较可取的一种方法,它不仅可以获得北冰洋全域长时间序列的海面高度数据,而且还可以获取同步的三维温盐场和流场数据,有助于进行海平面变化机制的深入分析。遗憾的是,目前利用海洋海冰模式开展北冰洋海平面变化的研究不多。Griffies 等^[65]虽然分析了 CORE-II 模式对全球海平面变化的模拟结果,但并未对北冰洋海平面变化进行详细讨论。目前已有的研究结果大多基于北冰洋较低空间分辨率的模式输出,当模式在北冰洋的空间分辨率较低时普遍存在 2 个问题,一是模拟的大西洋水层偏深偏厚,二是加拿大群岛的狭窄水道无法分辨造成北冰洋环流、淡水容量和重要通道的水交换存在较大偏差^[29,45],这 2 个偏差可能对海平面变化有重要影响;当将水平网格分辨率提高时上述模式偏差能得到较好的控制^[74]。因此,未来北冰洋海平面变化的数值模拟最好采用高分辨率网格。

5 结 论

近期北极气候急剧变化,对北冰洋的海洋环境产生了显著影响。北冰洋海平面是反映北极气候变化的重要物理量,由于观测资料和数值模拟技术的限制,目前对北冰洋海平面变化的了解还很少。

基于验潮站、高度计观测资料分析和数值模拟结果,北冰洋海平面具有显著的季节、年际到年代际变化特征。季节变化受陆地径流、蒸发降水和融冰结冰等过程导致的海水盐比容和质量变化的影响,分别在 5 月份和 11 月份出现海平面的年最低值和最高值。季节变化的振幅从沿岸向深水洋盆逐渐减小。整个北冰洋海平面季节变化的年较差大约为 10 cm。年际到年代际尺度上 AO 对应的大气环流异常引起的淡水分布主导北冰洋区域海平面变化,深水洋盆与沿岸陆架海平面呈反位相变化特征。深水洋盆海水的盐比容变化决定深水区的海平面变化,由之产生的质量变化主导沿岸的海平面变化和北冰洋平均海平面变化。这些特点与北冰洋半封闭海域特征密不可分。1950 年以来北冰洋沿岸海平面有上升趋势,且在 1980 年以后上升更为明显,速率为 1.3 ~ 2.3 mm/a;1993 年以来高度计观测到北冰洋平均海平面仍呈上升趋势,速率大约为 2.1 ~ 3.6 mm/a,2003 年以后速率有所减慢。波弗特环流区海平面上升迅速,最高速率可达 15 ~ 20 mm/a。长期来看,气候变暖导致全球海水热膨胀,流入北冰洋的水量增加会造成北冰洋整体海平面抬升。

目前观测资料短缺仍然是制约北冰洋海平面研究的主要问题,即使冰覆盖区高度计数据已实现提取,不同机构发布的数据产品仍存在较大差异,GRACE 重力卫星不同数据产品也存在显著不一致。温盐观测数据短缺使得比容变化对海平面变化影响的研究难以深入。综合来看,数值模拟是进行北冰洋海平面变化研究最好的方法,但目前已有研究可能存在水平分辨率不够的情况。另外近期海冰的快速减退和格陵兰岛冰川融化对北冰洋海平面变化影响的研究还不多。这些都是未来北冰洋海平面变化应该重点关注的内容。

参考文献:

- [1] SERREZE M C, BARRETT A P, STROEVE J C, et al. The emergence of surface-based Arctic amplification[J]. *Cryosphere*, 2009, 3(1): 11-19.
- [2] 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.
- [3] RHEIN M, RINTOUL S R, AOKI S, et al. Observations: Ocean[C]//Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. New York: Cambridge University Press, 2013: 255-315.
- [4] VAUGHAN D G, COMISO J, ALLISON I, et al. Observations: Cryosphere[C]//Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. New York: Cambridge University Press, 2013: 319-382.
- [5] VIHMA T. Effects of Arctic sea ice decline on weather and climate: a review[J]. *Surveys in Geophysics*, 2014, 35(5): 1175-1214.
- [6] WALLACE J M, HELD I M, THOMPSON D W J, et al. Global warming and winter weather[J]. *Science*, 2014, 343(6172): 729-730.

- [7] HE Shengping, GAO Yongqi, FUREVIK T, et al. Teleconnection between sea ice in the Barents Sea in June and the Silk Road, Pacific-Japan and East Asian rainfall patterns in August[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2018, 35(1): 52-64.
- [8] 赵进平, 史久新, 王召民, 等. 北极海冰减退引起的北极放大机理与全球气候效应[J]. *地球科学进展*, 2015, 30(9): 985-995. (ZHAO Jinping, SHI Jiuxin, WANG Zhaomin, et al. Arctic amplification produced by sea ice retreat and its global climate effects[J]. *Advances in Earth Science*, 2015, 30(9): 985-995. (in Chinese))
- [9] AAGAARD K, SWIFT J H, CAMACK E C. Thermohaline circulation in the Arctic Mediterranean Seas [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1985, 90(C3): 4833-4846.
- [10] AAGAARD K, CAMACK 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.
- [11] GOOSSE H, FICHEFET T, CAMPIN J M. The effects of the water flow through the Canadian Archipelago in a global ice-ocean model[J]. *Geophysical Research Letters*, 1997, 24(12): 1507-1510.
- [12] HÄKKINEN S. Variability of the simulated meridional heat transport in the North Atlantic for the period 1951—1993 [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1999, 104(C5): 10991-11007.
- [13] HOLLAND M M, BITZ C M, EBY M, et al. The Role of ice-ocean interactions in the variability of the North Atlantic thermohaline circulation[J]. *Journal of Climate*, 2001, 14(5): 656-675.
- [14] WADLEY M R, BIGG G R, ROHLING E J, et al. On modelling present-day and last glacial maximum oceanic $\delta^{18}\text{O}$ distributions[J]. *Global and Planetary Change*, 2002, 32(2/3): 89-109.
- [15] JUNGCLAUS J H, HAAK H, LATIF M, et al. Arctic-North Atlantic interactions and multidecadal variability of the meridional overturning circulation[J]. *Journal of Climate*, 2005, 18(19): 4013-4031.
- [16] ARZEL O, FICHEFET T, GOOSSE H, et al. Causes and impacts of changes in the Arctic freshwater budget during the twentieth and twenty-first centuries in an AOGCM[J]. *Climate Dynamics*, 2008, 30(1): 37-58.
- [17] JAHN A, HOLLAND M M. Implications of Arctic sea ice changes for North Atlantic deep convection and the meridional overturning circulation in CCSM4-CMIP5 simulations[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(6): 1206-1211.
- [18] CHURCH J A, CLARK P U, CAZENAVE A, et al. Sea level change [C]// Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate change 2013: The physical science basis*. New York: Cambridge University Press, 2013: 1137-1216.
- [19] 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: C07005.
- [20] COMISO J C. Large decadal decline of the Arctic multiyear ice cover[J]. *Journal of Climate*, 2012, 25(4): 1176-1193.
- [21] CAVALIERI D J, PARKINSON C L. Antarctic sea ice variability and trends, 1979—2006[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2008, 113: C07004.
- [22] STROEVE J C, KATSOV V M, BARRETT A, et al. Trends in Arctic sea ice extent from CMIP5, CMIP3 and observation[J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39: L16502.
- [23] LAXON S W, GILES K, RIDOUT A L, et al. CryoSat-2 estimates of Arctic sea ice thickness and volume[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(4): 732-737.
- [24] 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: C00A10.
- [25] 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): 92-103.
- [26] RABE B, KARCHER M, SCHAUER U, et al. 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.
- [27] 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.
- [28] HAINE T W, CURRY B, GERDES R, et al. Arctic freshwater export: status, mechanisms, and prospects[J]. *Global and Planetary Change*, 2015, 125: 13-35.
- [29] WANG Qiang, WEKERLE C, DANILOV S, et al. Arctic sea ice decline significantly contributed to the unprecedented liquid freshwater accumulation in the Beaufort Gyre of the Arctic Ocean[J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(10): 4956-4964.
- [30] 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.
- [31] DMITRENKO I A, KILLOV S A, TREMBLAY L B. The long-term and interannual variability of summer fresh water storage over the eastern Siberian shelf; Implication for climatic change[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2008, 113: C03007.
- [32] POLYAKOV I V, PNYUSHKOV A V, TIMOKHOV L A. Warming of the intermediate Atlantic water of the Arctic Ocean in the 2000s[J]. *Journal of Climate*, 2012, 25(23): 8362-8370.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] POLYAKOV I V, BESZCZYNSKA A, CARMACK E C, et al. One more step toward a warmer Arctic[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(17): 1-4.
- [37] ARRIGO K R, VAN DIJKEN G L. Continued increases in Arctic Ocean primary production[J]. *Progress in Oceanography*, 2015, 136: 60-70.
- [38] TREMBLAY J É, ANDERSON L G, MATRAI P, et al. Global and regional drivers of nutrient supply, primary production and CO₂ drawdown in the changing Arctic Ocean[J]. *Progress in Oceanography*, 2015, 139: 171-196.
- [39] VELICOGNA I. Increasing rates of ice mass loss from the Greenland and Antarctic ice sheets revealed by GRACE[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(19): 158-168.
- [40] RIGNOT E, VELICOGNA I, VAN DEN BROEKE M R, et al. Acceleration of the contribution of the Greenland and Antarctic ice sheets to sea level rise[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38: L05503.
- [41] SHEPHERD A, IVINS E R, GERUO A, et al. A reconciled estimate of ice-sheet mass balance[J]. *Science*, 2012, 338(6111): 1183-1189.
- [42] 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.
- [43] CAZENAVE A, LLOVEL W. Contemporary sea level rise[J]. *Annual Review of Marine Science*, 2010, 2: 145-173.
- [44] WUNSCH C, PONTE R M, HEIMBACH P. Decadal trends in sea level patterns; 1993–2004[J]. *Journal of Climate*, 2007, 20(24): 5889-5911.
- [45] KOLDUNOV N V, SERRA N, KOEHL 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.
- [46] STAMMER D, CAZENAVE A, PONTE R M, et al. Causes for contemporary regional sea level changes[J]. *Annual Review of Marine Science*, 2013, 5: 21-46.
- [47] LEGEAIS J F, ABLAIN M, ZAWADZKI L, et al. An improved and homogeneous altimeter sea level record from the ESA Climate Change Initiative[J]. *Earth System Science Data*, 2018, 10: 281-301.
- [48] PRANDI P, ABLAIN M, CAZENAVE A, et al. Sea level variability in the Arctic Ocean observed by satellite altimetry[J]. *Ocean Science Discussions*, 2012, 9(4): 2375-2401.
- [49] 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(Sup1): 61-81.
- [50] CHENG Yongcun, ANDERSEN O B, KNUDSEN P. An improved 20-year Arctic Ocean altimetric sea level data record[J]. *Marine Geodesy*, 2015, 38(2): 146-162.
- [51] 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.
- [52] CARRET A, JOHANNESSEN J A, ANDERSON O B, et al. Arctic sea level during the satellite altimetry era [C]// CAZENAVE A, CHAMPOLLION N, PAUL F, et al. Integrative Study of the Mean Sea Level and Its Components. Cham: Springer, 2017: 255-279.
- [53] 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: C06023.
- [54] 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*, 2012, 29(3): 493-504.
- [55] 李建成, 金涛勇. 卫星测高技术及应用若干进展[J]. *测绘地理信息*, 2013, 38(4): 1-8. (LI Jiancheng, JIN Taoyong. On the main progress of satellite altimetry and its applications[J]. *Journal of Geomatics*, 2013, 38(4): 1-8. (in Chinese))
- [56] LAXON S W. Sea ice altimeter processing scheme at the EODC[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1994, 15(4): 915-924.
- [57] LAXON S W, MCADOO D C. Arctic ocean gravity field derived from ERS-1 satellite altimetry [J]. *Science*, 1994, 265(5172): 621-624.
- [58] 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: C07001.
- [59] FORSBERG R, SKOURUP H, ANDERSEN O B, et al. Combination of spaceborne, airborne and in-situ gravity measurements in support of Arctic sea ice thickness mapping[J]. *Danish National Space Center Technical Report*, 2007 (7): 137.
- [60] KWOK R, MORISON J H. Dynamic topography of the ice-covered Arctic Ocean from ICESat [J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38: L02501.
- [61] 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.
- [62] FARRELL S L, MCADOO D C, LAXON S W, et al. Mean dynamic topography of the Arctic Ocean [J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39: L01601.
- [63] 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: C04S08.
- [64] PROSHUTINSKY A, KWALIK Z. Preface to special section on Arctic Ocean Model Intercomparison Project (AOMIP) studies and results [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2007, 112: C04S01.
- [65] GRIFFIES S M, YIN Jiangjun, 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.
- [66] BACON S, ASKENOV Y, FAWCETT S, et al. Arctic mass, freshwater and heat fluxes: Methods, and modelled seasonal variability [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2015, 373(2052): 20140169.
- [67] 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.
- [68] PROSHUTINSKY A, ASHIK I M, DVORKIN E N, et al. Secular sea level change in the Russian sector of the Arctic Ocean [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2004, 109: C03042.
- [69] RICHTER K, NILSEN J E Ø, DRANGE H, et al. Contributions to sea level variability along the Norwegian coast for 1960-2010 [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2012, 117: C05038.
- [70] CALAFET 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.
- [71] HAN Weiqing, MEEHL G A, STAMMER D, et al. Spatial patterns of sea level variability associated with natural internal climate modes [J]. *Surveys in Geophysics*, 38(1): 217-250.
- [72] 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.
- [73] BARNSTON A G, LIVEZEY R E. Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns [J]. *Monthly Weather Review*, 1987, 115(6): 1083-1126.
- [74] WANG Qiang, WEKERLE C, DANILOV S, et al. A 4.5 km resolution Arctic Ocean simulation with the global multi-resolution model FESOM 1.4 [J]. *Geoscientific Model Development*, 2018, 11: 1229-1255.
- [75] WOODGATE R A, WEINGARTNER T J, LINDSAY R. Observed increases in Bering Strait oceanic fluxes from the Pacific to the Arctic from 2001 to 2011 and their impacts on the Arctic Ocean water column [J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39: L24603.