

罗晓凡, 胡宪敏, 聂红涛, 等. 北冰洋与邻近海区海洋-海冰模式的试算与校验[J]. 海洋学报, 2019, 41(9): 1-12. doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2019.09.001

Luo Xiaofan, Hu Xianmin, Nie Hongtao, et al. Evaluation of hindcast simulation with the ocean and sea-ice model covering the Arctic and adjacent oceans[J]. Haiyang Xuebao, 2019, 41(9): 1-12. doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2019.09.001

北冰洋与邻近海区海洋-海冰模式的试算与校验

罗晓凡¹, 胡宪敏², 聂红涛¹, 赵伟¹, 张永莉¹, 王雅丽¹,
秦钰¹, 董春明¹, 鹿有余², 魏皓^{1*}

(1. 天津大学海洋科学与技术学院, 天津 300072; 2. 加拿大国家渔业与海洋部 贝德福德海洋研究所, 新斯科舍 达特茅斯 B2Y 4A2)

摘要: 本文将目前先进的大尺度海洋、海冰模式 (NEMO3.6 和 LIM3) 应用于北大西洋-北冰洋-北太平洋 (简称 NAPA), 并进行了试验后报模拟。所建立的模式 NAPA1/4 和 NAPA1/12 的水平分辨率分别为 $(1/4)^\circ$ 和 $(1/12)^\circ$ 经、纬度, 计算范围覆盖太平洋 45°N 以北海区、整个北冰洋及北大西洋; 其中, NAPA1/4 和 NAPA1/12 在北大西洋的边界分别为 26°N 和 7°N 。目前, 已利用 NAPA1/4 完成了 1993-2015 年的后报模拟。本文基于观测数据和已发表文献对模拟结果中的北冰洋海冰变化、环流结构以及水文特征进行了校验。结果表明, NAPA1/4 能够再现北冰洋的主要热力与动力过程, 可以用来分析海冰、水团、大西洋/太平洋入/出流等的季节与年际变化规律。利用 NAPA1/12 进行了 1993-1996 年的模拟计算。初步结果分析表明, 提高分辨率可更为精细地刻画北冰洋的海冰、水团和环流的结构。

关键词: 海洋-海冰模式; 模式校验; 北冰洋

中图分类号: P731.15

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2019)09-0001-12

1 引言

北极地区是全球气候变化的敏感区和放大区^[1-2], 其海洋-海冰环境的快速变化及其对生态系统的影响引起了全球范围的广泛关注, 是当前海洋科学研究的前沿^[3-9]。近 30 年, 极区观测技术不断发展, 高质量观测数据的积累揭示北冰洋正在经历冰雪快速消融^[5]、水体层结改变^[3]、海水酸化^[9]等过程。探寻这些变化的驱动机制是预测未来北冰洋环境变化的基础, 将观测数据与海洋-海冰模拟结果结合分析是研究机制、预测未来的主要手段之一。

北极海区研究的不断深入, 对北冰洋模式不断提出新的需求。一系列大型国际合作项目如: “海洋-

冰耦合模式第二阶段参考试验”(Coordinated Ocean-ice Reference Experiments, phase II, CORE II)^[10-12]、“北冰洋模式比较项目”(Arctic Ocean Model Intercomparison Project, AOMIP)及其后续项目“北冰洋模式与观测集成论坛”(Forum for Arctic Modeling and Observational Synthesis, FAMOS)^[13]、加拿大业务化环境预报系统(Canadian Operational Network of Coupled Environmental Prediction Systems, CONCEPTS)^[14-15]以及哥白尼海洋环境监测服务项目中北冰洋相关产品(Copernicus Marine Environment Monitoring Service, CMEMS, <http://marine.copernicus.eu/>), 推动了海洋-海冰模式的快速发展。目前全球海洋-海冰模式的水平空间分辨率为 10~200 km、区域模式的水平空间分

收稿日期: 2018-08-04; 修订日期: 2018-11-30。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41630969, 41806225)。

作者简介: 罗晓凡(1987—), 女, 内蒙古自治区通辽市人, 讲师, 主要从事海洋生态动力学模拟方面研究。E-mail: xiaofan.luo@tju.edu.cn

* 通信作者: 魏皓(1964—), 女, 天津市人, 教授, 从事物理海洋学和海洋生态动力学方面研究。E-mail: hao.wei@tju.edu.cn

辨率为 2~50 km, 尽管这些模式都能模拟出泛北冰洋海冰、水文要素、海流分布的主要特征, 但 FAMOS 指出北冰洋高分辨率区域模式的模拟能力优于全球模式。大部分模式获得的海冰面积以及北冰洋淡水通量的年际变化一致, 但与观测数据仍存在一定偏差^[11]。中尺度涡是影响陆架-海盆热盐运输的重要过程, 其水平尺度与第一斜压罗斯贝半径相当^[16]。该半径在北冰洋强层化区域, 如加拿大海盆, 约为 15 km; 在弱层化区域, 如陆架海, 大约为 1~7 km^[17]。目前的大多数模式, 尚不能完全分辨北冰洋海区的中尺度涡^[13]。此外, 北冰洋与太平洋和大西洋的物质交换(热通量、淡水通量、营养盐通量等)需通过许多狭窄的海峡, 这也对模式的分辨率提出了要求。为了较为精细化地模拟北冰洋海洋-海冰及生物地球化学循环, 本研究构建了 NAPA 系列海洋-海冰耦合模式, 包括中和高两个水平分辨率, 分辨率在北冰洋分别达到了约 12 km 和 4~5 km, 与目前国际上主要模式的水平分辨率相当。

2 模式简介与配置

本研究采用的是 NEMO 3.6 海洋模式 (Nucleus for European Modelling of the Ocean)^[18] 和 LIM3 海冰模式 (Louvain-la-Neuve Sea Ice Model)^[19-20], 计算区域包含北大西洋-北冰洋-北太平洋 (North Atlantic, North Pacific and Arctic Oceans, NAPA)。模式的水平网格取自欧洲高分辨率海洋模拟国际合作工作组 (即 DRAKKAR, <https://www.drakkar-ocean.eu/what-is-drakkar>) 所构建的 ORCA 全球三极点网格^[21]。NAPA1/4 的水平空间分辨率为 $(1/4)^\circ$ (经、纬度), 高纬海区分辨率约 12 km, 模拟范围覆盖北太平洋 (45°N 以北)、整个北冰洋以及北大西洋 (26°N 以北) (图 1a)。NAPA1/12 的水平空间分辨率为 $(1/12)^\circ$, 高纬海区分辨率可达 4~5 km, 模拟范围在 NAPA1/4 的基础上将大西洋南边界拓展到 7°N (图 1b)。两者海洋模块的垂向网格均为 75 层, 50 m 以浅共分 19 层; 层厚在近海面处为 1 m, 随深度逐渐增加, 至 6 000 m 水深约 200 m, 最后一层的层厚根据地形而变化。NAPA1/4 模式地形数据截取自 DRAKKAR 工作组全球 $(1/4)^\circ$ 海洋-海冰模式 ORCA025 的地形数据^[22], 该数据融合了全球地形数据 ETOPO 和全球海洋通用水深数据 GEBCO; NAPA1/12 则截取自 DRAKKAR 工作组全球 $(1/12)^\circ$ 模式 ORCA12 的地形数据。

大气强迫采用 DRAKKAR 工作组的高分辨率再分析数据 (DFS v5.2)^[23], 其水平分辨率约 0.7° , 包括

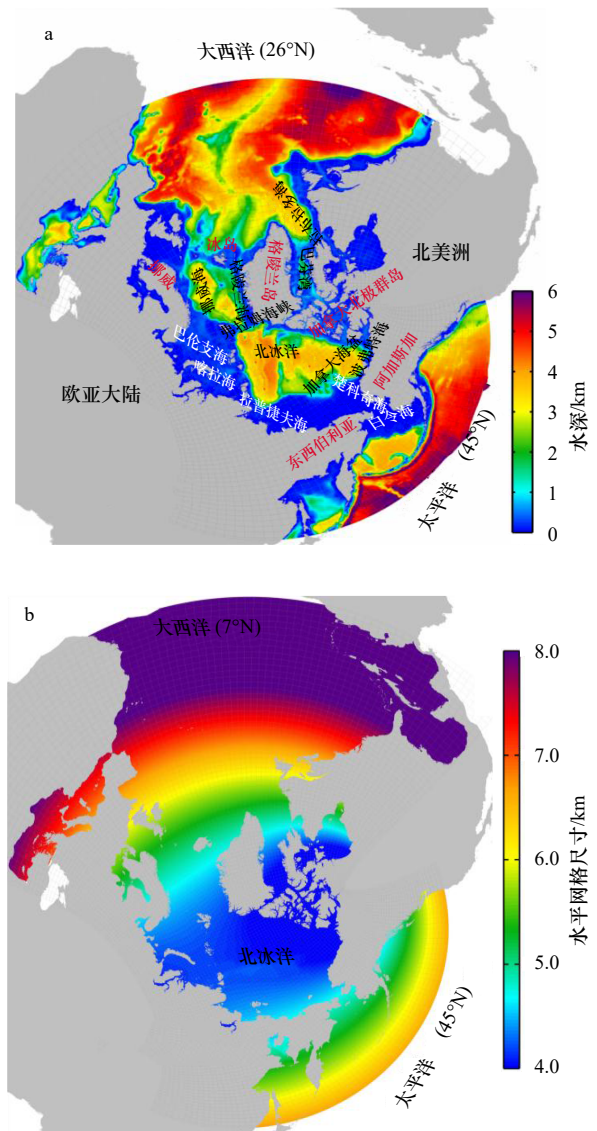


图 1 NAPA1/4 模拟海区及水深(a)和 NAPA1/12 模拟海区及水平网格尺寸(b)

Fig. 1 Domain and bathymetry of NAPA1/4 (a), and domain and horizontal grid size of NAPA1/12 (b)

1958-2015 年 1 天 8 次的海面 10 m 高度风速场、气温和湿度数据, 以及逐日的短波辐射、长波辐射和降水数据。河流淡水输入来自包含年际变化的月平均全球陆地径流数据^[24], 采取体积守恒的方式将原始 1° 分辨率的河流数据合理分配到模式网格 (NAPA1/4 使用气候态月均径流数据)。初始的三维海洋温度和盐度场来自世界海洋图集, 即 WOA 13-v2 版本的气候态数据, 其水平分辨率为 $(1/4)^\circ$, 垂向标准 102 层^[25-26]。初始的三维海洋水平流速场、海表面高度以及海冰数据来自法国 Mercator-Ocean 发布的应用数据同化所得到的全球再分析 (GLORYS) 之 2v4 版本数据集, 其全球空间分辨率为 $(1/4)^\circ$, 垂向分为 75 层^[27]。开边

界温度、盐度、海表面高度和水平流速场采用 GLORYS 2v4 的月平均数据,开边界潮流由 M_2 、 S_2 、 N_2 、 K_1 、 O_1 共 5 个分潮驱动,潮汐数据提取自俄勒冈州立大学(OSU)的全球海洋潮汐模式结果的 TPXO8 版本(<http://volkov.oce.orst.edu/tides>)。开边界条件的设置对正压和斜压模态区别对待,正压模态沿法向深度平均流速采用 Flather^[28] 辐射边界条件,斜压流速、温、盐在开边界以内的 10 个网格间距设置“海绵层”。

LIM3 海冰模块包含雪和多类海冰,可以较好地模拟薄海冰的快速生消,以及海冰重叠和成脊导致薄冰向厚冰转变的物理过程^[29]。海洋模块的温盐水平混合采用拉普拉斯(Laplace)黏性系数方案,混合系数与网格大小成正比,最大混合系数在 NAPA1/4 中取为 $300 \text{ m}^2/\text{s}$,在 NAPA1/12 中取为 $50 \text{ m}^2/\text{s}$ 。动量混合采用双拉普拉斯(bi-Laplace)水平黏性系数方案,混合系数与网格大小的 3 次方成正比,最大混合系数在 NAPA1/4 中取为 $-10^{11} \text{ m}^4/\text{s}$,在 NAPA1/12 中取为 $-10^{10} \text{ m}^4/\text{s}$ 。对于垂向混合方案,NAPA1/4 在调试过程中曾选用 NEMO 默认的基于湍动能(Turbulent Kinetic Energy, TKE)的闭合方案^[30],但该方案导致陆架混合作用较强,难以抓住夏季层结现象,故现改用基于湍动能-耗散率($k-\epsilon$)^[31] 方程的通用尺度(Generic Length Scale, GLS)闭合方案^[32],其中的 Galerpin 系数取 0.267,内波破碎湍动能背景场值取为 $10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}^2$ 。

NAPA1/4 包含 $528 \times 735 \times 75$ 个计算网格,计算步长为 600 s,外模时间步长约 32 s,使用 245 个计算核进行了 1993 年 10 月 1 日至 2015 年 12 月 31 日共 22

年的后报模拟;NAPA1/12 包含 $1\,632 \times 2\,432 \times 75$ 个计算网格,计算步长为 360 s,外模时间步长 10 s,使用 941 个计算核完成了 1993 年 10 月 1 日至 1996 年 12 月 31 日共 3 年的后报模拟。两者模拟结果输出均为 5 d 平均。

3 NAPA1/4 模式校验

3.1 海冰密集度及海冰面积

从美国国家冰雪数据中心(National Snow and Ice Data Center, NSIDC)获得 1994–2015 年的逐日和逐月微波遥感海冰密集度数据(Climat Data Record(CDR) of Passive Microwave Sea Ice Concentration),其水平分辨率为 25 km。图 2a、图 2b、图 2e、图 2f 比较了 2007 年 3 月和 9 月观测与模拟的海冰密集度,两者季节变化的主要特征一致。3 月,两者的区别主要体现在格陵兰海区,NAPA1/4 模拟的海冰覆盖范围在该海区略大;9 月,两者主要差别在加拿大海盆靠近欧亚大陆一侧。图 2c、图 2d、图 2g、图 2h 显示了 2009 年和 2012 年 9 月观测与模拟的海冰密集度分布。将 2007 年、2009 年和 2012 年的 9 月份相比,2007 年和 2012 年是历史观测中海冰面积出现极小值的年份,2009 年是近期海冰面积相对较大的年份,NAPA1/4 抓住了这一显著的夏季海冰年际变化特征。

图 3 比较了 CDR 卫星遥感数据、GLORYS 2v4 再分析资料和 NAPA1/4 的海冰面积的季节变化与年际变化。海冰总面积的逐月序列是选取海冰密集度大于等于 15% 的网格,将每个网格的面积乘以对应的

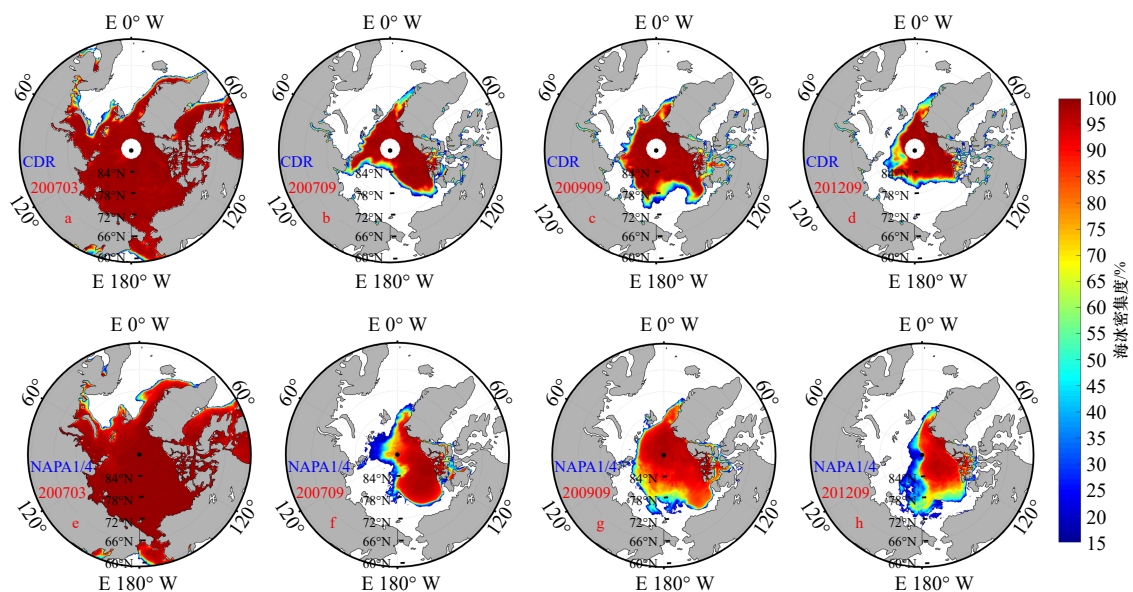


图 2 基于 CDR(a-d)与 NAPA1/4(e-h)所得海冰密集度空间分布

Fig. 2 Spatial distributions of sea-ice concentration based on CDR (a-d) and NAPA1/4 (e-h)

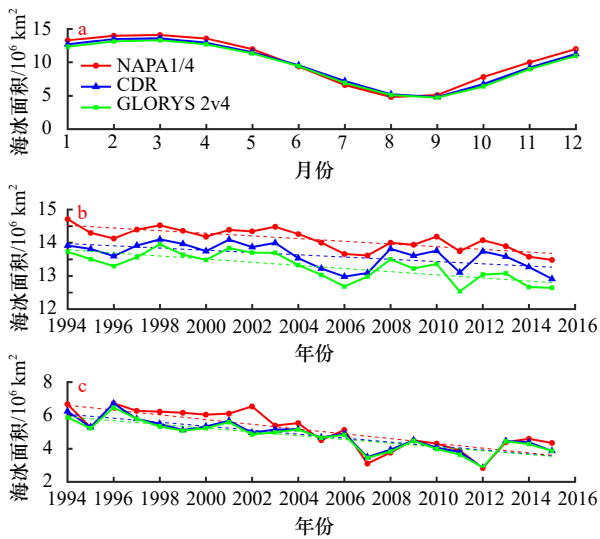


图3 海冰面积时间序列

Fig. 3 Time series of sea-ice area

a. 1994–2015年多年平均海冰面积逐月变化; b. 3月海冰面积年际变化; c. 9月海冰面积年际变化。红色圆点实线代表模拟结果; 蓝色三角实线表示CDR观测数据; 绿色方形实线表示GLORYS 2v4再分析数据; 图中虚线表示对应颜色数据的线性拟合趋势

a. Annual cycle averaged over 1994–2015; b, c. interannual variation in March and September. The solid lines with red dots, blue triangles and green squares represent NAPA1/4 hindcast, CDR and GLORYS 2v4 reanalysis, respectively. The coloured dotted lines represent long-term trends obtained through linear fitting

海冰密集度, 进行空间积分所得到的。进一步, 对每个月在不同年份的数据进行平均, 即得到气候态海冰总面积的季节循环序列。对气候态海冰面积的季节变化, 3组数据一致(图3a): 在冬季2–3月间出现高值, 约为 $14 \times 10^6 \text{ km}^2$; 在夏季8–9月间出现低值, 约为 $5 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。图3b和图3c分别显示了3月和9月海冰面积的逐年时间序列, 观测和模拟结果都表明1994–2015年间海冰面积呈现减少趋势, 9月份尤为明显。NAPA1/4模拟的9月份海冰面积减少趋势为 $-0.14 \times 10^6 \text{ km}^2/\text{a}$, 与观测相当($-0.12 \times 10^6 \text{ km}^2/\text{a}$)。总体而言, NAPA1/4再现了海冰面积主要的年际变化规律, 可以准确抓住2007年和2012年在9月呈现海冰面积积极小值的年份。自2003年起, NAPA1/4模拟的海冰面积年际变化与观测结果一致性尤为显著。

3.2 温盐结构

中国北极科学考察(CHINARE)在1999–2017年间对北冰洋太平洋扇区进行了8次综合调查, 相关水文数据已公开发布在中国南北极数据中心(<http://www.chinare.org.cn/>)。本文选取2010年夏季第四次北极考察航次的温盐数据与同期模拟结果进行比

较。北极考察数据按月份分为7月和8月两组, 7月份有效观测站点共计97个, 8月份有效观测站点共计32个(图4a)。NAPA1/4结果采用2010年7月和8月的月均值。图4显示在5 m和50 m层, NAPA1/4模拟的水温虽然在楚科奇海陆架北部比观测略低, 但整体水平空间分布特征与观测一致。在5 m层, 白令海水温最高, 为 $7 \sim 8^\circ\text{C}$ 之间; 在内陆架(50 m以浅)靠近西伯利亚沿岸海区呈现低温斑块; 白令海峡以北, 水温由南向北逐渐降低, 至楚科奇海陆坡和加拿大海盆处, 由于海冰覆盖, 水温接近冰点。在50 m层, 白令海冷水团清晰可见, 北冰洋大部分站点的水温在 -1°C 至冰点之间。此外, 本文在白令海、楚科奇海、加拿大海盆选取3个站位, 对模拟的温度剖面与极地考察数据和GLORYS 2v4再分析资料结果进行了比较(图4c)。结果表明, NAPA1/4模拟的温度垂向结构与极地考察结果较为一致, 再现了夏季陆架海区的强层结现象, 并抓住了海盆区在约300–500 m层的大西洋暖水; GLORYS 2v4再分析资料对陆架温跃层的刻画存在一定偏差, 而对深海盆水温垂向结构的模拟与极地考察结果一致。

图5比较了模拟与观测的盐度分布。由图5b可见NAPA1/4模拟的5 m层盐度整体偏高, 在楚科奇海外陆架、陆坡和海盆区域的偏差约为2; 在50 m层, 模拟盐度相对观测的偏差降低。就分布特征而言, 从白令海到加拿大海盆, NAPA1/4重现了与观测一致的盐度“高–低–高”整体空间分布特征。盐度剖面分布再次显示NAPA1/4对上层盐度的模拟偏高, 随着深度的增加, 盐度模拟值与观测值逐渐接近(图5c)。NAPA1/4盐度偏差形成的原因目前尚不明确, 有待深入探讨。GLORYS 2v4再分析资料对海盆区盐度垂向结构的刻画与极地考察基本一致(图5c)。整体而言, GLORYS 2v4再分析资料可作为模式校验的参考。

选取自白令海峡邻近海区、穿过楚科奇海至加拿大海盆的典型断面, 图6比较了GLORYS 2v4再分析资料与NAPA1/4模拟的温盐结构。选取的时间为1996年7月中旬, 后文将进一步与NAPA1/12的模拟结果进行比较。结果表明, NAPA1/4模拟的温度和盐度与GLORYS 2v4再分析数据的分布特征基本一致, 在陆架海区呈现明显的层化现象。NAPA1/4模拟的内陆架温度整体偏高, 但仍清晰可见白令海峡南部的低温水团($2 \sim 3^\circ\text{C}$)。在楚科奇海外陆架–陆坡处模拟出低温水团(温度小于 -1.6°C), 以及在海盆区上层50–100 m水层间呈现的暖水, 该暖水被认为来自于太平洋夏季暖水^[33]。相较于GLORYS 2v4再分析数

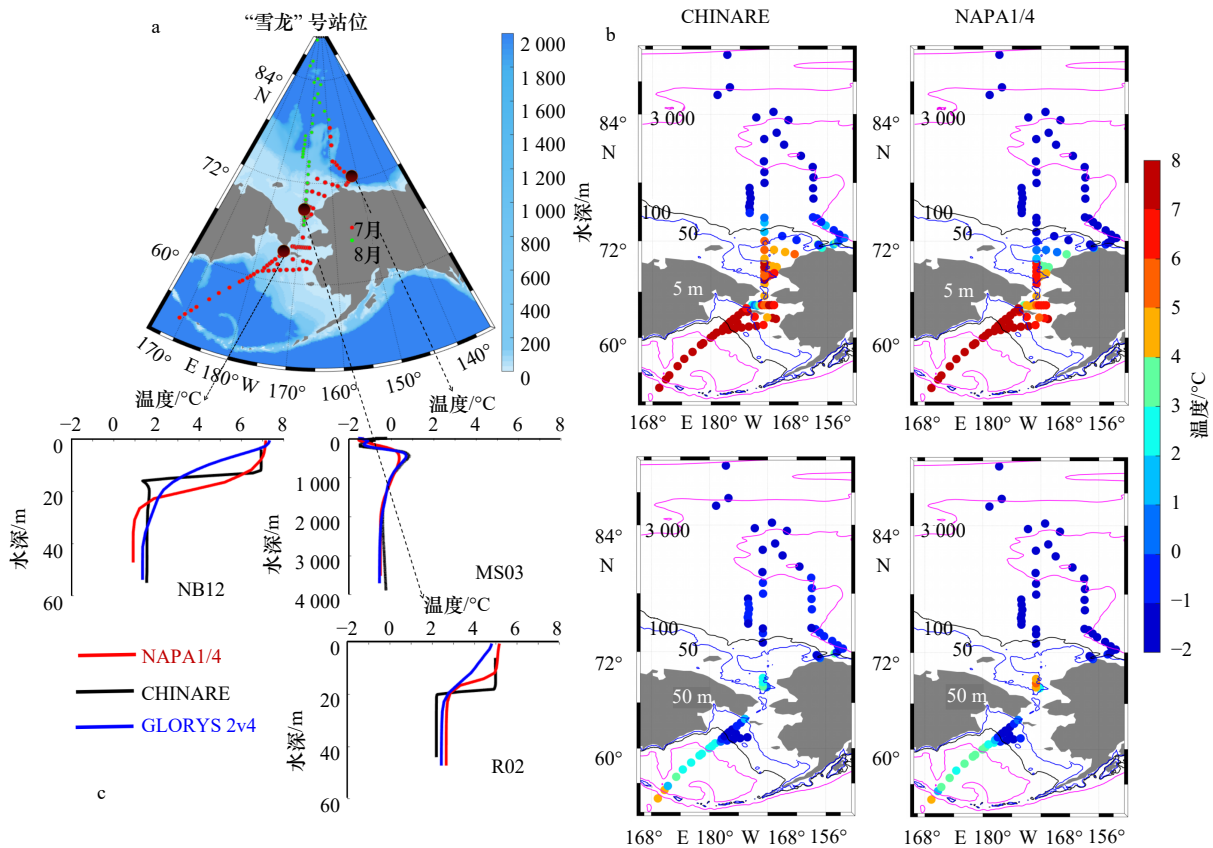


图4 白令海-楚科奇海-加拿大海盆水温分布

Fig. 4 Water temperature in the area covering Bering Sea, Chukchi Sea and Canada Basin

a. 第四次北极考察站位分布, 红色为7月调查站位, 绿色为8月调查站位; b. 观测与NAPA1/4模拟的5 m层和50 m层温度分布的比较; c. 白令海、楚科奇海、加拿大海盆3个站位观测、GLORYS 2v4再分析与NAPA1/4模拟的温度剖面

a. Locations of sampling stations from the fourth CHINARE-Arctic expedition with red and green dots denoting samples deployed in July and August, respectively; b. temperature distribution at depths of 5 m (upper) and 50 m (lower) from CHINARE (left) and NAPA1/4 (right); c. temperature profiles at 3 stations in Bering Sea, Chukchi Sea and Canada Basin based on CHINARE, GLORYS 2v4 and NAPA1/4

据, NAPA1/4 模拟的盐度在陆架-陆坡处偏高, 盐度为 33 的等值线明显向陆架延伸, 但整体垂向分布一致, 陆架-陆坡处 150 m 水深以下可见高盐的大西洋水 (盐度大于 33.6)。总体而言, NAPA1/4 得到了与 GLORYS 2v4 一致的温、盐垂向结构及跨陆架至深海盆的分布特征。

3.3 环流结构

北冰洋的表层环流主要包括从拉普捷夫海流经北极点流向格陵兰岛方向的穿极漂流, 以及加拿大海盆内反气旋方向的波弗特流涡^[34]。大西洋一侧, 北冰洋的入流主要包括挪威-北大西洋流的 2 个分支——进入巴伦支海的北角海流和通过弗拉姆海峡东侧的西斯匹次卑尔根流; 北冰洋出流包括从弗拉姆海峡西侧流出的东格陵兰流和通过加拿大北极群岛海域的贯穿流。太平洋一侧, 主要体现的是通过白令海峡的太平洋入流。该入流由白令海西侧的阿纳德尔流与

东侧的阿拉斯加沿岸流汇入白令海峡形成, 并在楚科奇海地形诱导下形成 3 个主要分支最后进入北冰洋^[35]。NAPA1/4 模拟的夏季上层 (30 m) 环流 (图 7) 与上述基于观测得到的北冰洋环流结构一致。总体而言, 大西洋一侧流系比较复杂, 多不稳定的涡旋结构, 东格陵兰流和加拿大北极群岛贯穿流流速较大; 太平洋一侧环流结构相对稳定, 波弗特流涡中心位于加拿大海盆邻近楚科奇海东北部海区, 流速明显小于楚科奇海陆架环流。经初步计算 (1994–2014 年平均), 巴伦支海水道的净流量为 $2.48 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$, 方向由北欧海进入巴伦支海, 该流量略大于基于观测估计的 $2.3 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ ^[36], 与近期高分辨率模式模拟的结果 ($2.52 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$)^[37] 相近; 通过弗拉姆海峡的净流量为 $1.27 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$, 方向由北冰洋向南流入大西洋, 该流量低于基于观测的估计 ($(2.0 \pm 2.7) \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$)^[38], 更接近部分数值模拟的结果, 如 $1.34 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ ^[39] 和 $1.1 \times$

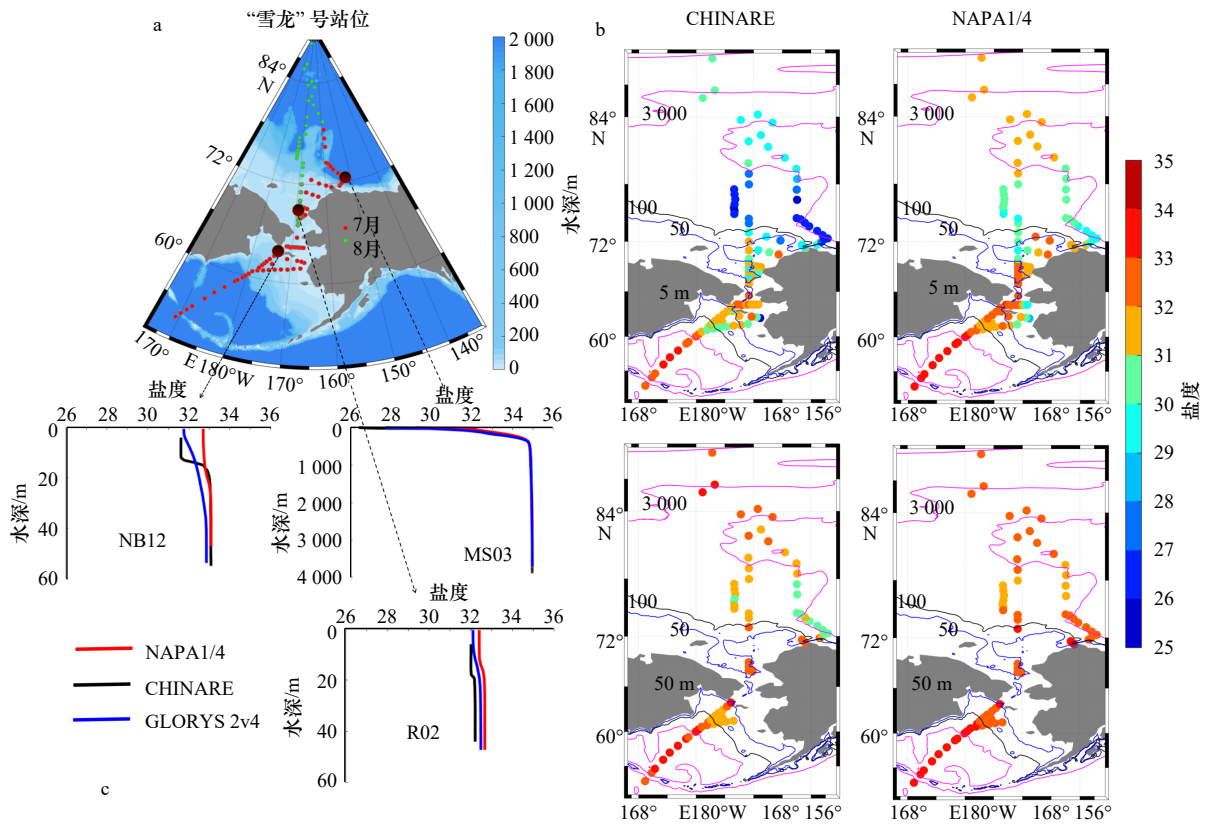


图 5 白令海-楚科奇海-加拿大海盆盐度分布

Fig. 5 Water salinity in the area covering Bering Sea, Chukchi Sea and Canada Basin

a. 第四次北极考察站位分布, 红色为 7 月调查站位, 绿色为 8 月调查站位; b. 观测与 NAPA1/4 模拟的 5 m 层和 50 m 层盐度分布的比较; c. 白令海、楚科奇海、加拿大海盆区 3 个站位观测、GLORYS 2v4 再分析与 NAPA1/4 模拟的盐度剖面

a. Locations of sampling stations from the fourth CHINARE-Arctic expedition with red and green dots denoting samples deployed in July and August, respectively; b. salinity distribution at depths of 5 m (upper) and 50 m (lower) from CHINARE (left) and NAPA1/4 (right); c. salinity profiles at 3 stations in Bering Sea, Chukchi Sea and Canada Basin based on CHINARE, GLORYS 2v4 and NAPA1/4

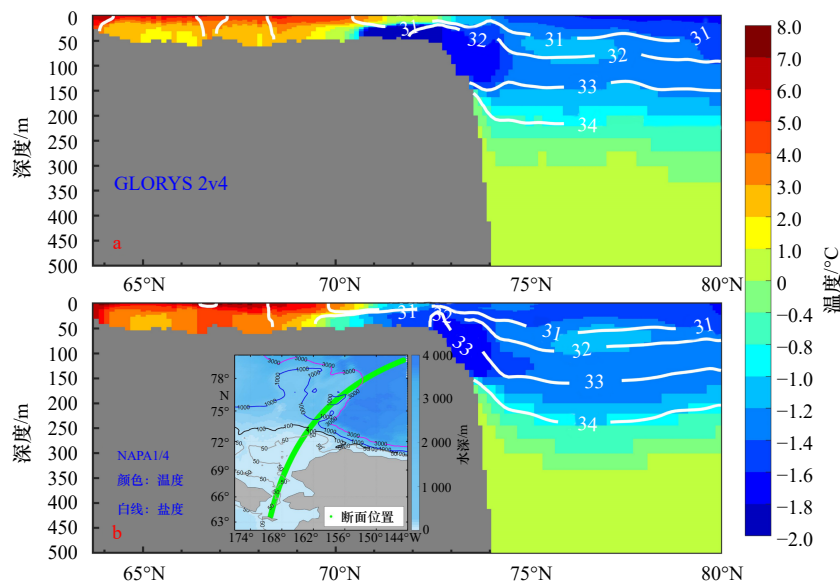


图 6 1996 年 7 月中旬 GLORYS 2v4(a) 与 NAPA1/4(b) 温盐断面分布 (断面位置见 b 图中的子图)

Fig. 6 Temperature and salinity in mid-July of 1996 from GLORYS 2v4 reanalysis (a) and NAPA1/4 (b) along the section (thick green line) shown in the inserted figure of b

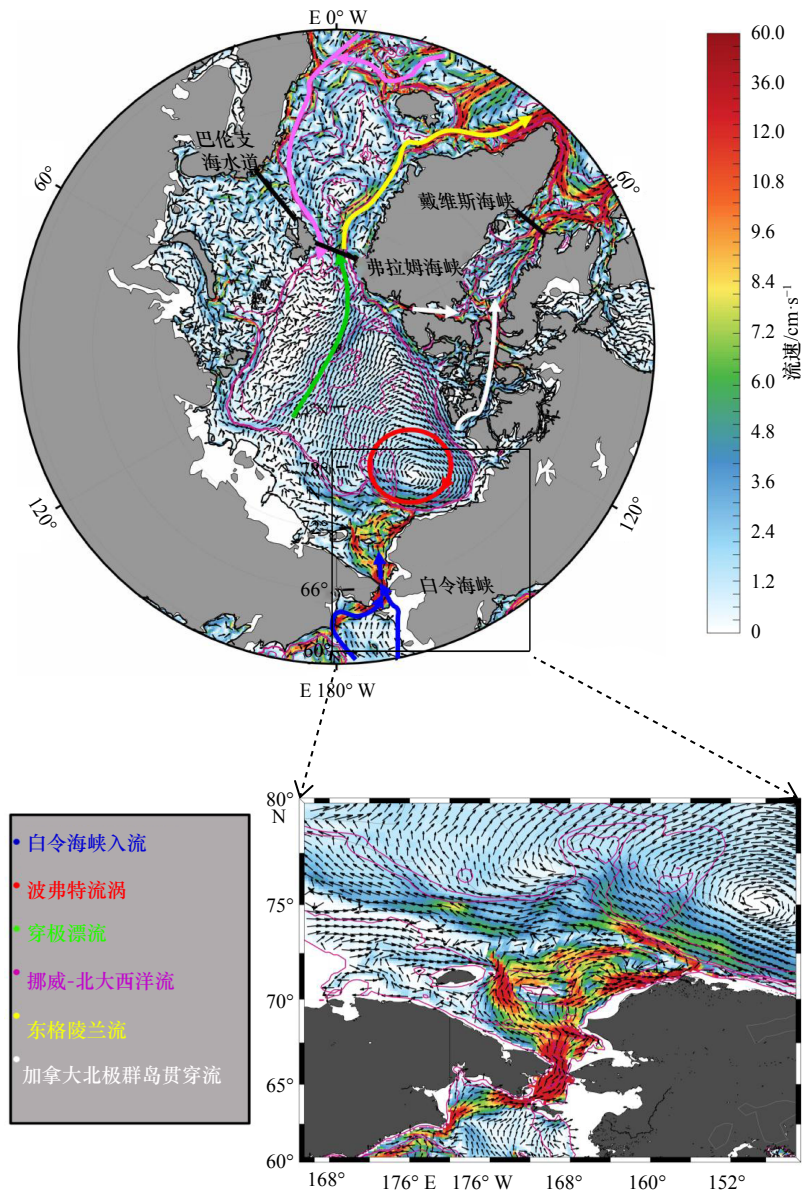


图7 NAPA1/4夏季30m层环流结构

Fig. 7 NAPA1/4 summer ocean circulation at 30 m depth

黑色箭头为流速方向,颜色为流速大小。蓝色、红色、绿色、粉色、黄色、白色箭头分别表示白令海峡入流、波弗特流涡、穿极漂流、挪威-北大西洋流、东格陵兰流、加拿大北极群岛贯穿流

The ocean circulation direction denoted by black arrow and speed by colour shading. The blue, red, green, pink, yellow and white arrows represent Bering Strait inflow, Beaufort Gyre, Transpolar Drift, Norwegian-Northern Atlantic Current, East Greenland Current and Canadian Arctic Archipelago throughflow, respectively

$10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ ^[40]; 通过戴维斯海峡的净流量为 $2.23 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$, 方向由巴芬湾流向拉布拉多海, 该流量接近早期基于锚系观测估计的 $(2.6 \pm 1.0) \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ ^[41] 和 $(2.3 \pm 0.7) \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ ^[42], 但是高于近期估计的 $(1.6 \pm 0.5) \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ ^[43]; 通过白令海峡的净流量为 $1.08 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$, 方向由太平洋进入北冰洋, 该流量与基于锚系观测的估计值相当^[44-45]。因白令海峡处具有长期连续观测基础, 后文将对白令海峡流通量的季节与年节变化进行详细说

明。综上所述, NAPA1/4 可抓住北极海区与太平洋和大西洋重要的交换过程。

3.4 太平洋入流

白令海峡连接太平洋与北冰洋, 约 $0.8 \times 10^6 \sim 1.0 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ ^[44-45] 的太平洋水经此海峡进入北冰洋, 相应的热、淡水与营养盐通量对北冰洋海冰^[46-47]、层结^[48-49]以及初级生产^[50-51]等具有重要影响。白令海峡流通量的观测估计是通过假定海峡断面流速一致

且正压,海峡断面面积为 $4.25 \times 10^6 \text{ m}^2$, 利用白令海峡中部 (66.3°N , 169°W) 的锚系浮标 (约 45 m 水深) 流速数据计算得到的^[45]。基于 NAPA1/4 模拟结果, 本文使用与观测估计同样的方法, 选取与锚系浮标相同位置的流速估算了白令海峡的流通量。此外, 本文也利用 NAPA1/4 白令海峡断面的流场直接计算了流通量。图 8a 显示上述 3 种方法估算的流量具有一致的季节循环, 春、夏季流通量高于冬季。基于 NAPA1/4 单站流速估算的多年平均太平洋入流与基于锚系观测数据的估算结果较为接近, 分别为 $0.99 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $0.95 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$, 而基于白令海峡断面流场估算的流通量则为 $1.08 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$, 这表明利用单站流速数据估算白令海峡流通量可能存在约 8% 的低估。将三者同时段 (1998–2015 年) 的逐月流量进行逐年平均后可见 3 种方法估算的太平洋入流年际变化也基本一致, 且三者均在 1998–2015 年间均呈现上升趋势 (图 8b)。自 2003 年起, 基于 NAPA1/4 单站流速估算的太平洋入流通量与锚系观测结果一致性更为显著。综上所述, NAPA1/4 可以用来进行太平洋入流年际变化与机制分析, 并可用于探讨其变化对下游海洋–海冰环境以及生态系统的影响。

4 NAPA1/12 初步结果

目前已利用 NAPA1/12 进行了 3 年的模拟计算,

本文仅对第 3 年即 1996 年的模拟结果与 NAPA1/4 进行比较。两者模拟的海冰密集度、海冰厚度、环流结构、温盐结构等的季节分布与变化的整体特征基本一致, 但在细节上的差异。

图 9 比较了海冰融化期 6 月初 (6 月 7–11 日平均) 2 个模式获得的海冰厚度。NAPA1/4 和 NAPA1/12 的结果都表明多年冰位于加拿大群岛和格陵兰岛一侧, 厚度约 5~6 m; 楚科奇海此时已部分融化; 大西洋一侧的巴伦支海、格陵兰海海冰厚度在 2 m 以下。此外, 两者都模拟出一些类似冰隙与冰脊的结构, 但 NAPA1/12 更为明显, 尤其是在靠近陆地边缘的厚冰区以及正在融化的薄冰区, 如楚科奇海、拉普捷夫海、喀拉海等。这个对比结果, 与近期德国模式的结果一致^[52]。

图 10 比较了 NAPA1/4 和 NAPA1/12 模拟的海洋 30 m 层的涡度场 (选用日期与图 9 一致)。该对比可以清楚地显示出高空间分辨率在模拟海洋流场空间细节上的优势。NAPA1/12 模拟出的流场细节不仅体现在相对低纬度的海域 (如北大西洋, 北欧海, 巴伦支海, 白令海), 在北冰洋穿极漂流区域、楚科奇海北部陆坡和加拿大海盆南部也表现地很明显。这对于更真实地模拟陆架–陆坡物质交换过程以及北冰洋环流结构都非常重要。

前文显示中等分辨率的 NAPA1/4 已可以获得与

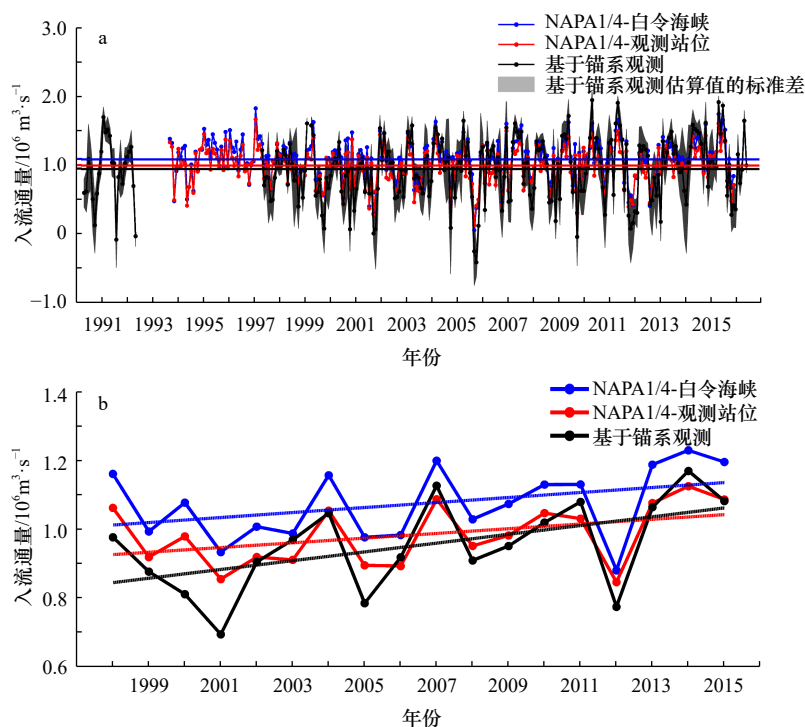


图 8 基于 NAPA1/4 与锚系观测数据估算的太平洋入流通量逐月 (a) 和年均 (b) 时间序列

Fig. 8 Monthly (a) and annual-mean (b) Pacific inflow volume flux estimated from NAPA1/4 and mooring observations

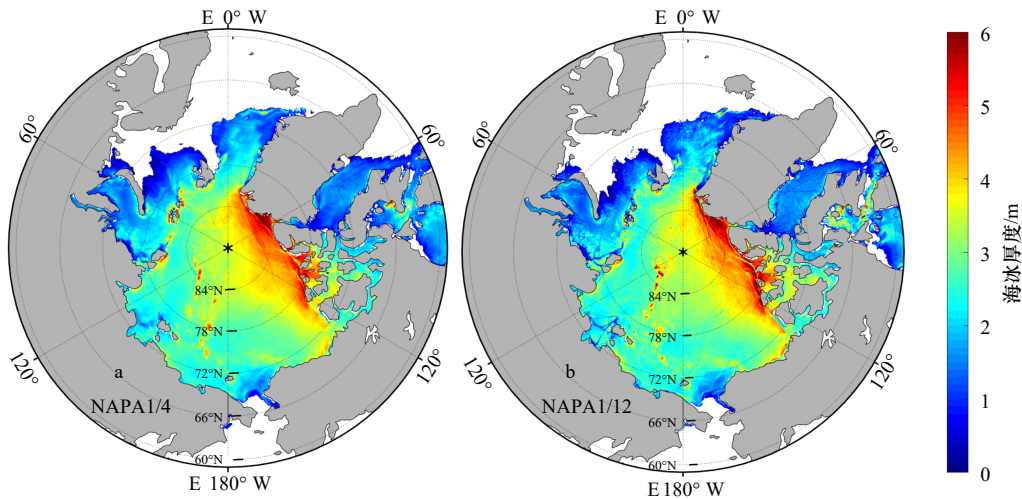


图9 NAPA1/4(a)和NAPA1/12(b)模拟的1996年6月初海冰厚度

Fig. 9 Sea-ice thickness in early June of 1996 simulated by NAPA1/4 (a) and NAPA1/12 (b)

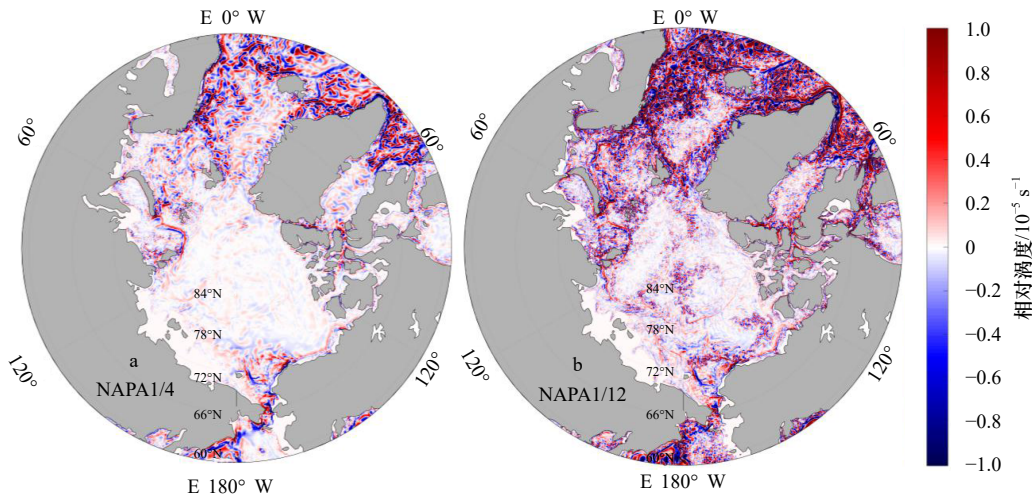


图10 NAPA1/4(a)和NAPA1/12(b)模拟的1996年6月初30 m层相对涡度

Fig. 10 Relative vorticity at 30 m depth in early June of 1996 simulated by NAPA1/4 (a) and NAPA1/12 (b)

观测和 GLORYS 2v4 基本一致的温盐结构特征。与 NAPA1/4 相比, NAPA1/12 得到的温盐结构在大尺度上的分布特征基本一致, 但细节更为丰富。GLORYS 2v4 再分析数据(图 6a)显示在白令海和楚科奇海内陆架存在两个低温水团, 二者独立于外陆架-陆坡的冷水。对于楚科奇海内陆架的低温水团, 在 NAPA1/4 中并没有清晰显示, 而在 NAPA1/12 的结果中不仅有所体现, 而且比 GLORYS 2v4 更为明显(图 11a)。对于模拟的外陆架-陆坡的冷水团边缘线, NAPA1/4 的结果过于光滑, 而 NAPA1/12 的结果呈现波动状。NAPA1/12 与 NAPA1/4 都模拟出了 50~100 m 层之间的暖水, 但 NAPA1/12 暖水团更为明显, 其温度约在 $-1\sim 0^{\circ}\text{C}$ 间, 这与冰基浮标剖面数据结果(<http://www.whoi.edu/website/itp/overview>)较为一致(图未给出)。对于盐度, 2 个模式都得到了如下特征(图 11b): 白令海低

温水团因其所在位置偏向高盐的阿纳德尔流^[53]而呈现盐度高值; 近表层因受到海冰融化的影响而呈现盐度低值; 陆架-陆坡处 150 m 以下可见高盐的大西洋水。两者区别之处在于 NAPA1/12 模拟的外陆架-陆坡上层盐度等盐面呈波动状, 且存在独立高盐斑块。结合上文水平涡度模拟(图 10), 虽然 NAPA1/12 的水平分辨率尚不能完全刻画中尺度涡, 但其一定程度上模拟出了中尺度过程对热盐运输的影响。

5 结论

本研究构建了水平空间分辨率分别为约 12 km 和 4~5 km 的中等分辨率和高分辨率的 NAPA 系列海洋-海冰模式, 并进行了多年后报模拟。通过与观测数据及再分析资料进行比较, 表明中等分辨率的 NAPA1/4 可以再现海冰密集度季节变化的主要特征

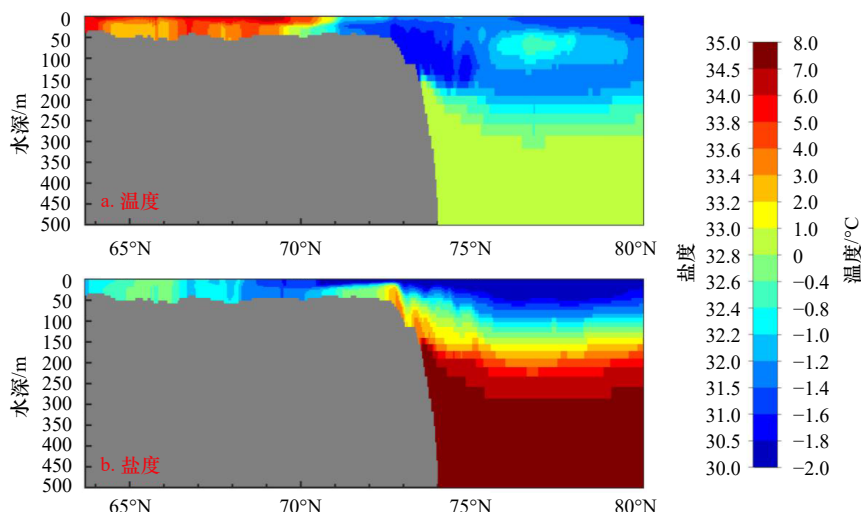


图 11 NAPA1/12 模拟的 1996 年 7 月中旬温度(a)和盐度(b)的断面分布(断面位置见图 6b 子图)

Fig. 11 Distribution of temperature (a) and salinity (b) in mid-July of 1996 from NAPA1/12 along the section shown in the inserted figure of Fig. 6b

以及海冰面积的年际变化规律;再现了跨陆架至深海盆断面水体温盐的垂向结构以及北冰洋主要的环流结构;估算的太平洋入流季节与年际变化与基于锚系观测估算结果一致,可较好地反映北极海区与太平洋重要的交换过程等。NAPA1/4 具备了对北极海区海洋-海冰环境要素季节与年际变化的模拟能力。基于该模式,本团队正在开展北冰洋海冰变化及其机制、环流、太平洋水团运输路径的分析研究以及生物地

球化学循环的模拟等工作。高分辨率的 NAPA1/12 与 NAPA1/4 模拟的海洋-海冰环境要素的主要特征基本一致,但可以更为细致地刻画海冰的类似冰隙与冰脊的结构,得到更加细致的环流结构,并显示能部分刻画中尺度过程对水团结构的影响。我们计划用 NAPA1/12 开展环流以及陆架-陆坡物质交换动力过程的精细化研究。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] Carmack E, McLaughlin F. Towards recognition of physical and geochemical change in Subarctic and Arctic Seas[J]. *Progress in Oceanography*, 2011, 90(1/4): 90-104.
- [4] 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.
- [5] Wood K R, Bond N A, Danielson S L, et al. A decade of environmental change in the Pacific Arctic region[J]. *Progress in Oceanography*, 2015, 136: 12-31.
- [6] 陈立奇, 祁第, 高众勇, 等. 快速融冰背景下北冰洋夏季表层海水 CO_2 分压的变异假设[J]. *科学通报*, 2016, 61(21): 2419-2425.
Chen Liqi, Qi Di, Gao Zhongyong, et al. A hypothesis on variability of surface water $p\text{CO}_2$ under the rapid sea-ice retreat during summer in the Arctic Ocean[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2016, 61(21): 2419-2425.
- [7] Zhuang Yanpei, Jin Haiyan, Li Hongliang, et al. Pacific inflow control on phytoplankton community in the Eastern Chukchi Shelf during summer[J]. *Continental Shelf Research*, 2016, 129: 23-32.
- [8] 聂红涛, 王蕊, 赵伟, 等. 北冰洋太平洋扇区碳循环变化机制研究面临的关键科学问题与挑战[J]. *地球科学进展*, 2017, 32(10): 1084-1092.
Nie Hongtao, Wang Rui, Zhao Wei, et al. Key scientific problems and challenges of studying carbon cycle mechanism in Pacific sector of the Arctic[J]. *Advances in Earth Science*, 2017, 32(10): 1084-1092.
- [9] Qi Di, Chen Liqi, Chen Baoshan, et al. Increase in acidifying water in the western Arctic Ocean[J]. *Nature Climate Change*, 2017, 7(3): 195-199.
- [10] Ilicak M, Drange H, Wang Qiang, et al. An assessment of the Arctic Ocean in a suite of interannual CORE- II simulations. Part III: Hy-

- drography and fluxes[J]. *Ocean Modelling*, 2016, 100: 141–161.
- [11] Wang Qiang, Ilicak M, Gerdes R, et al. An assessment of the Arctic Ocean in a suite of interannual CORE-II simulations. Part I: Sea ice and solid freshwater[J]. *Ocean Modelling*, 2016, 99: 110–132.
- [12] Wang Qiang, Ilicak M, Gerdes R, et al. An assessment of the Arctic Ocean in a suite of interannual CORE-II simulations. Part II: Liquid freshwater[J]. *Ocean Modelling*, 2016, 99: 86–109.
- [13] Proshutinsky A, Steele M, Timmermans M L. Forum for Arctic modeling and observational synthesis (FAMOS): past, current, and future activities[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2016, 121(6): 3803–3819.
- [14] Dupont F, Higginson S, Bourdallé-Badie R, et al. A high-resolution ocean and sea-ice modelling system for the Arctic and North Atlantic oceans[J]. *Geoscientific Model Development*, 2015, 8(5): 1577–1594.
- [15] Paquin J P, Lu Youyu, Higginson S, et al. Modelled variations of deep convection in the Irminger sea during 2003–10[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2016, 46(1): 179–196.
- [16] Chelton D B, deSzoeke R A, Schlax M G, et al. Geographical variability of the first baroclinic Rossby radius of deformation[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1998, 28(3): 433–460.
- [17] Nurser A J G, Bacon S. The Rossby radius in the Arctic Ocean[J]. *Ocean Science*, 2014, 10(6): 967–975.
- [18] Madec G. NEMO Ocean Engine[M]. France: Institut Pierre-Simon Laplace, 2008.
- [19] Vancoppenolle M, Fichefet T, Goosse H, et al. Simulating the mass balance and salinity of Arctic and Antarctic sea ice. 1. Model description and validation[J]. *Ocean Modelling*, 2009, 27(1/2): 33–53.
- [20] Rousset C, Vancoppenolle M, Madec G, et al. The Louvain-La-Neuve sea ice model LIM3.6: global and regional capabilities[J]. *Geoscientific Model Development*, 2014, 8(10): 2991–3005.
- [21] Madec G, Imbard M. A global ocean mesh to overcome the North Pole singularity[J]. *Climate Dynamics*, 1996, 12(6): 381–388.
- [22] Molines J M, Barnier B, Penduff T, et al. Definition of the interannual experiment ORCA025-G70, 1958–2004[R]. Grenoble, France: Laboratoire des Ecoulements Géophysiques et Industriels, 2007.
- [23] Dussin R, Barnier B, Brodeau L, et al. The Making of the DRAKKAR FORCING SET DFS5[R]. Stockholm, Sweden: Stockholm University, 2016.
- [24] Dai Aiguo, Qian Taotao, Trenberth K E, et al. Changes in continental freshwater discharge from 1948 to 2004[J]. *Journal of Climate*, 2009, 22(10): 2773–2792.
- [25] Locarnini R A, Mishonov A V, Antonov J I, et al. WORLD OCEAN ATLAS 2013. Volume 1: temperature[R]. Silver Spring, MD: NOAA, 2013.
- [26] Zweng M M, Reagan J R, Antonov J I, et al. WORLD OCEAN ATLAS 2013. Volume 2: salinity[R]. Silver Spring, MD: NOAA, 2013.
- [27] Ferry N, Parent L, Garric G, et al. GLORYS2V1 global ocean reanalysis of the altimetric era (1993–2009) at meso scale[J]. *Mercator Quarterly Newsletter*, 2012, 44: 28–39.
- [28] Flather R A. A tidal model of the Northeast Pacific[J]. *Atmosphere-Ocean*, 1987, 25(1): 22–45.
- [29] Uotila P, Iovino D, Vancoppenolle M, et al. Comparing sea ice, hydrography and circulation between NEMO3.6 LIM3 and LIM2[J]. *Geoscientific Model Development*, 2017, 10(2): 1009–1031.
- [30] Blanke B, Delecluse P. Variability of the tropical Atlantic Ocean simulated by a general circulation model with two different mixed-layer physics[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1993, 23(7): 1363–1388.
- [31] Rodi W. Examples of calculation methods for flow and mixing in stratified fluids[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1987, 92(C5): 5305–5328.
- [32] Umlauf L, Burchard H. A generic length-scale equation for geophysical turbulence models[J]. *Journal of Marine Research*, 2003, 61(2): 235–265.
- [33] Timmermans M L, Proshutinsky A, Golubeva E, et al. Mechanisms of Pacific summer water variability in the Arctic's Central Canada Basin[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2014, 119(11): 7523–7548.
- [34] Talley L D, Pickard G L, Emery W J, et al. *Descriptive Physical Oceanography*[M]. 6th ed. Amsterdam: Elsevier, 2011.
- [35] Corlett W B, Pickart R S. The Chukchi slope current[J]. *Progress in Oceanography*, 2017, 153: 50–65.
- [36] Smedsrud L H, Esau I, Ingvaldsen R B, et al. The role of the Barents Sea in the Arctic climate system[J]. *Reviews of Geophysics*, 2013, 51(3): 415–449.
- [37] 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(4): 1229–1255.
- [38] Schauer U, Beszczynska-Möller A, Walczowski W, et al. Variation of measured heat flow through the Fram Strait between 1997 and 2006[M]//Dickson R R, Meincke J, Rhines P. Arctic-Subarctic Ocean Fluxes: Defining the Role of the Northern Seas in Climate. Dordrecht: Springer, 2008: 65–85.
- [39] Wekerle C, Wang Qiang, Danilov S, et al. The Canadian Arctic archipelago throughflow in a multiresolution global model: Model assessment and the driving mechanism of interannual variability[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2013, 118(9): 4525–4541.
- [40] Zhang Yu, Chen Changsheng, Beardsley R C, et al. Studies of the Canadian Arctic archipelago water transport and its relationship to basin-local forcings: Results from AO-FVCOM[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2016, 121(6): 4392–4415.

- [41] Cuny J, Rhines P B, Kwok R. Davis Strait volume, freshwater and heat fluxes[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2005, 52(3): 519–542.
- [42] Curry B, Lee C M, Petrie B. Volume, freshwater, and heat fluxes through Davis Strait, 2004–05[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2011, 41(3): 429–436.
- [43] Curry B, Lee C M, Petrie B, et al. Multiyear volume, liquid freshwater, and sea ice transports through Davis Strait, 2004–10[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2014, 44(4): 1244–1266.
- [44] Coachman L K. On the flow field in the Chirikov basin[J]. *Continental Shelf Research*, 1993, 13(5/6): 481–508.
- [45] Woodgate R A, Stafford K M, Prah F G. A synthesis of year-round interdisciplinary mooring measurements in the Bering Strait (1990–2014) and the RUSALCA years (2004–2011)[J]. *Oceanography*, 2015, 28(3): 46–67.
- [46] Shimada K, Kamoshida T, Itoh M, et al. Pacific Ocean inflow: influence on catastrophic reduction of sea ice cover in the Arctic Ocean[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(8): L08605.
- [47] Woodgate R A, Weingartner T, Lindsay R. The 2007 Bering Strait oceanic heat flux and anomalous Arctic sea-ice retreat[J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(1): L01602.
- [48] Steele M, Morison J, Ermold W, et al. Circulation of summer Pacific halocline water in the Arctic Ocean[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2004, 109(C2): C02027.
- [49] Aagaard K, Weingartner T J, Danielson S L, et al. Some controls on flow and salinity in Bering Strait[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(19): L19602.
- [50] Rudels B, Larsson A M, Sehlstedt P I. Stratification and water mass formation in the Arctic Ocean: some implications for the nutrient distribution[J]. *Polar Research*, 1991, 10(1): 19–32.
- [51] Carmack E C, Yamamoto-Kawai M, Haine T W N, et al. Freshwater and its role in the Arctic marine system: Sources, disposition, storage, export, and physical and biogeochemical consequences in the Arctic and global oceans[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2016, 121(3): 675–717.
- [52] Wang Q, Danilov S, Jung T, et al. Sea ice leads in the Arctic Ocean: model assessment, interannual variability and trends[J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(13): 7019–7027.
- [53] Cooper L W, Whitlege T E, Grebmeier J M, et al. The nutrient, salinity, and stable oxygen isotope composition of Bering and Chukchi Seas waters in and near the Bering Strait[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1997, 102(C6): 12563–12573.

Evaluation of hindcast simulation with the ocean and sea-ice model covering the Arctic and adjacent oceans

Luo Xiaofan¹, Hu Xianmin², Nie Hongtao¹, Zhao Wei¹, Zhang Yongli¹, Wang Yali¹,
Qin Yu¹, Dong Chunming¹, Lu Youyu², Wei Hao¹

(1. School of Marine Science and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Bedford Institute of Oceanography, Fisheries and Oceans Canada, Dartmouth B2Y 4A2, Canada)

Abstract: Coupled ocean and sea-ice models, developed based on Version 3.6 of the Nucleus for European Modelling of the Ocean (NEMO), with the sea-ice component being Version 3 of Louvain-la-Neuve Sea Ice Model (LIM), are applied for hindcast simulations covering the North Atlantic-North Pacific-Arctic Oceans (NAPA). The two model configurations, NAPA1/4 and NAPA1/12, have nominal horizontal resolutions of (1/4)^o and (1/12)^o in latitude/longitude, respectively. The model domains cover the Pacific Ocean north of 45°N, the whole Arctic, and the North Atlantic north of 26°N for NAPA1/4 and 7°N for NAPA1/12. A decade-long hindcast from 1993 to 2015 using NAPA1/4 has been completed. The hindcast results of sea-ice, circulation and hydrography variations in the Arctic Ocean are evaluated with available observational data and previously published results. The evaluation suggests that NAPA1/4 possesses reasonable skills in reproducing the key thermal and dynamic processes, and can be applied to study the seasonal and inter-annual variations of sea-ice, water masses, and Atlantic/Pacific inflows/outflows. Preliminary analysis of the NAPA1/12 hindcast during 1993–1996 suggests that increasing horizontal resolution simulates more details of the spatial structures of sea-ice, water-mass properties, and ocean circulation.

Key words: coupled ocean and sea-ice models; model evaluation; Arctic Ocean