

基于北部湾水文观测资料的模式产品温盐数据评估

于杰¹, 封宝鑫¹, 李逸文², 谢玲玲^{1*}

(1. 广东海洋大学海洋与气象学院, 广东 湛江 524088; 2. 中国地质大学(北京)海洋学院 北京 100083)

摘 要: 基于2023年夏季和冬季北部湾海域的温盐观测数据,系统评估全球海洋物理再分析数据集(GLORYS)、全球海洋物理分析与预报数据集(Glo-anfc)、全球海洋集合物理再分析数据集(ENS)等5套哥白尼海洋环境监测服务(CMEMS)提供的数据产品、以及全球大洋环流数据同化模式系统数据产品(ECCO2)和中国科学院大气物理研究所预报产品(LFS)共7套模式产品在浅水海湾的温盐模拟性能。研究结果表明:7套模式均能有效模拟冬夏两季北部湾不同深度层的温盐分布趋势,但存在显著的系统性偏差:北部湾北部温度低估、盐度高估,南部则表现为温度高估、盐度低估;季节对比显示,7套模式在夏季的模拟表现显著优于冬季,其中GLORYS和GLO-anfc两套模式数据在夏季各深度层的结构相似性指数(SSIM)均大于0.5,冬季SSIM值也稳定维持在0.5左右,表明这两套模式在空间结构的模拟效果上表现较为突出,而ENS的3套数据与ECCO2模式数据在冬季与盐度观测数据的相关性较差,部分深度层相关系数甚至为负值,说明其在北部湾的适用性有待提升。

关键词: 北部湾;温盐特征;数值模式;评估

中图分类号: P731.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2026)04-0024-19

0 引言

北部湾位于中国南海的西北部陆架海域,介于105.5°~110°E、16°~22°N之间,是一个半封闭的浅水海湾,东北西三面被陆地和岛屿包围,通过南部的湾口和东部的琼州海峡与南海相通。北部湾平均水深约40 m,最深处约100 m,湾内地形复杂,等深线基本与岸线平行。北部湾受东亚季风控制,每年5—8月主要受南风影响,10月—翌年3月多为东北季风。北部湾渔业和油气资源丰富,海洋生物和生态系统多样,是国家和地方战略实施、海洋资源开发和生态环境保护的重要海域。

北部湾作为南海半封闭性边缘海,其温盐分布受多重动力过程调控。沿岸径流的季节性脉冲、琼州海峡输入的粤西沿岸水、湾口外海高盐水的入侵,叠加风场与太阳辐射的季节演变,共同塑造了

北部湾海域复杂多变的水文环境。大量基于现场调查、遥感监测与数值模拟的研究已证实,该海域温盐结构呈现显著的季节性变换特征^[1-4]。流域水系对北部湾近岸水文环境的塑造作用尤为突出,红河、九洲江、大风江等河流在汛期形成的入海径流,驱动夏季型水文特征的形成:充沛的淡水输入致使表层盐度显著降低,呈现“北低南高”的水平梯度,等盐线与等深线近乎平行分布;同时,强烈的太阳辐射使表层水温升高,形成“北高南低”的温度格局,垂向出现明显的温跃层。冬季,尽管表层盐度仍保持“北低南高”的态势,但强劲的东北季风驱动水体强烈垂向混合,盐度剖面趋于均匀;低温、高风速环境下,海表温度梯度出现反转,呈现“北低南高”特征,等温线与等深线高度吻合^[1,5]。

前人通过不同的分析方法探讨了北部湾水体结构的分布特征。陈波^[1]基于“水团浓度混合法”,

收稿日期: 2025-06-16。

基金项目: 国家重点研发课题(2022YFC3104805);国家自然科学基金(42276019,42249911)。

作者简介: 于杰(1987-),女,讲师,博士,主要从事海洋多尺度动力学研究。E-mail: yujie@gdou.edu.cn

*通信作者: 谢玲玲(1983-),女,教授,博士,主要从事多尺度动力学研究。E-mail: llingxie@163.com

首次将北部湾水体划分为沿岸水、外海水和混合水三大水系,并对各水系的形成及其性质进行了初步的探讨;姜景忠等^[6]利用1994年5—6月的水文观测数据进一步将北部湾的水体划分琼州海峡水、底层冷水团、琼西暖流水和北部混合水;陈胜利等^[7-8]借助温盐频率统计和聚类分析,将北部湾水团详细划分为近岸冲淡水、混合水、外海上层水、中北部冷水、外海次表层水、外海中层水以及外海下层水;曹振铎等^[3]基于2016年9月—2017年8月共9个航次的北部湾水文调查数据,通过*K-mean*动态聚类分析方法将北部湾北部海域水团分成沿岸水、陆架深层水和陆架混合水,根据来源不同,陆架混合水又可分成来自琼州海峡方向的陆架混合水和由南海进入并演变而成的陆架混合水。Lao等^[9]利用双同位素技术(即同时分析水体的氢氧同位素)定量分析了北部湾水体的季节性入侵情况及其对营养盐的影响,结果表明,红河作为北部湾主要淡水输入,其径流量占入海径流的75%左右,对北部湾的温盐分布具有重要影响。这些成果为深入理解北部湾水文动力过程奠定了坚实基础。

北部湾环流受南海高盐水混合、北部沿岸河流淡水输入、密度梯度、潮汐以及季风等多因素共同影响,呈现出复杂多变的时空变异特征^[10-19]。有关北部湾冬季呈气旋式环流的观点较为统一,但夏季环流形态存在诸多分歧,目前主要有3种观点:第一种观点认为北部湾夏季为反气旋环流^[10-11];第二种观点认为北部湾夏季为气旋式环流^[12-13];第三种观点则认为北部湾北部为气旋式、南部为反气旋式的双环流^[14-15]。此外,北部湾环流的动力机制也存在较大争议:高劲松等^[15]通过位涡收支分析,发现北部湾北部的气旋式环流受正的风应力旋度驱动;陈波等^[16]则认为北部湾夏季大量淡水在入海口堆积导致的斜压效应是气旋式环流形成的主要驱动机制;夏华永等^[17]则指出密度梯度是夏季北部湾逆时针环流产生的主导因素;Shi等^[18]通过37年(1963—1999年)的历史资料分析发现琼州海峡终年存在西向平均余流,该余流是夏季北部湾气旋式环流形成的主要原因之一;Gao等^[19]结合普林斯顿海洋模型(Princeton Ocean Model, POM)与历史观测数据验证了北部湾夏季存在双环流结构,北部环流主要受季风影响,南部环流则由季风和南海环流共同驱动。

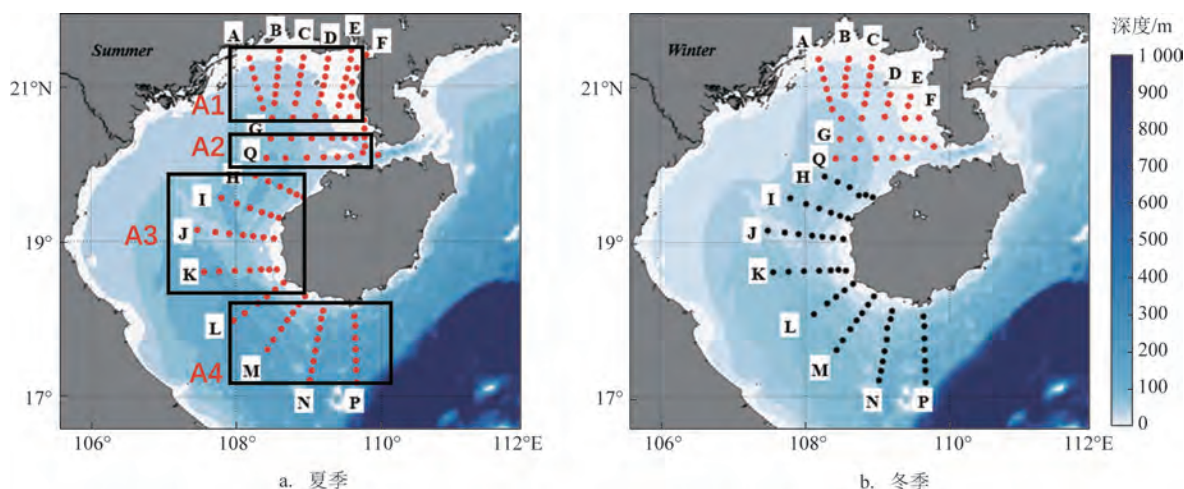
可靠的水文模拟数据是北部湾海洋学研究的核心基础,是维护生态系统平衡与渔业资源可持续发展、增强台风和风暴潮及咸潮入侵预警能力、指导港口建设和航道维护及油气资源开发、促进区域经济发展的重要支撑;同时为跨境生态保护协定和“一带一路”倡议提供科学依据。数据偏差可能导致气候误判、生态管理失效或工程损失。因此检验现有模式的模拟精度、评估数据产品在北部湾海域的适用性,是提升模拟预测精度、促进区域海洋学研究、推动精准海洋决策的迫切需求。

本研究基于2023年北部湾冬夏两季断面观测数据,构建多模式集合评估框架,综合应用均方根误差、结构相似性指数(Structural Similarity, SSIM)及水团聚类分析等多维度诊断方法,系统评估了7类主流海洋数值模式对温盐三维结构的模拟性能。通过揭示温盐误差的空间分布特征及其与水团迁移的耦合机制,为区域海洋动力过程解析、高分辨率模式参数优化及生态模型驱动场校准提供了关键数据支撑和优化路径。

1 资料与方法

1.1 走航观测数据

2023年7月22日—8月10日、2023年12月9—18日以及2024年1月11—16日,在国家自然科学基金委共享航次项目支持下,广东海洋大学在北部湾海域开展了冬夏两个航次的科研考察(见图1)。考察覆盖北部湾东侧区域,共包含32个调查断面,其中夏季和冬季各16个,旨在系统探究该海域不同季节的水体特性及垂直结构。研究团队借助搭载于天龙号、粤湛渔运01018号、粤湛渔科6号和雷渔12086号科考船的SBE19Plus型温盐深仪(CTD),对海域进行全水深探测。该设备垂直分辨率为1 m,可精确测量剖面温度和盐度。SBE19Plus型CTD仪器采样频率为4 Hz,温度分辨率可达0.000 1 °C,测量精度达0.005 °C,电导率分辨率为0.000 05 S/m,测量精度为0.000 5 S/m,为获取高精度的海洋水文数据提供了有力保障。夏季走航期间天气以晴为主,2023年8月1—3日出现多云和短时降雨,风浪总体较弱,海况介于1~3级;冬季走航期间天气晴或阴,风浪较大,海况介于2~5级。



注:A1—北部湾北部沿岸海域;A2—琼州海峡西口海域;
A3—海南岛西侧海域;A4—海南岛南部海域

注:红色点为2023年12月9—18日采样点;
黑色点为2024年1月11—16日采样点

图1 北部湾地形与观测断面分布图

Fig.1 Topography of the Beibu Gulf and distribution of observation sections.

1.2 数据产品

本研究系统评估了7套海洋数据产品,包含哥白尼海洋环境监测服务(The Copernicus Marine Environment Monitoring Service, CMEMS)提供的5套数据产品、美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)等机构参与研发的ECCO2数据产品以及中国科学院大气物理研究所自主研发的LFS全球海洋环流模式产品。这7套数据产品在水平分辨率、垂向分层、时

间覆盖范围、数据同化方法、大气强迫场设置以及温盐初始场构建等关键参数上存在差异,详细信息见表1。以下将对各数据产品的技术特征和应用背景进行详细阐述。

全球海洋再分析产品GLORYS(Global Ocean Physics Reanalysis)是CMEMS推出的全球海洋涡旋解析再分析数据集,覆盖了自1993年以来的高度计数据。该产品主要基于欧洲中期天气预报中心CMEMS实时全球海洋预报系统构建,其模型核心采用NEMO平台,表层驱动数据初期使用欧洲中期

表1 数据产品的水平分辨率、垂向分层、时间范围、同化方法、大气强迫场和温盐初始场

Tab.1 Horizontal resolution, vertical stratification, time range, assimilation method, atmospheric forcing field and thermohaline initial field of the considered data products

数据产品	水平分辨率	时间分辨率/d	时间范围(年)	同化方法	大气强迫场	温盐初始场
GLORYS	0.083°	1	1993—2025	Kalman filter	ERA-Interim、ERA5	EN4.2.0
Glo-anfc	0.083°	1	2022—2025	Kalman filter	ECMWF-IFS	EN4
ENS-glor	0.25°	1	1993—2023	Kalman filter SAM	ERA-Interim	EN4.2.0
ENS-cglo	0.25°	1	1993—2023	3D-Var/FGAT (OceanVar)	ERA-Interim	EN4.2.0
ENS-oras	0.25°	1	1993—2023	3D-Var/FGAT (NEMOVAR)	ERA-Interim	EN4.2.0
ECCO2	0.25°	1	1998—2025	4D-Var	NCEP/NCAR	WOA2001
LFS	0.1°	1	2020—2025	Nudging	GFS	Mercator PSY4

天气预报中心(European Center for Midium Range Weather Forecast, ECMWF)ERA-Interim 再分析资料,近年转为ERA5 再分析资料。通过降阶卡尔曼滤波实现多源观测数据同化,同步同化沿轨卫星高度计数据(海平面异常)、卫星海表面温度数据、海冰浓度数据以及现场温盐垂直剖面数据。此外,采用三维变分同化方案(3D-VAR)对温度和盐度场中缓变的系统性偏差进行三维校正。该产品包含了从海洋表层到海底的温度、盐度、海流、海平面高度、混合层深度以及海冰参数的日平均和月平均数据文件。全球海洋输出文件采用标准规则网格,水平分辨率为 $1/12^\circ$ (约8 km),垂向分为50个标准层。

全球海洋物理分析与预报(Global Ocean Physics Analysis and Forecast, Glo-anfc)的数据分辨率为 $1/12^\circ$,通过ECMWF的综合预报系统(Integrated Forecast System, IFS)进行驱动,该系统每日更新,提供为期10天的全球三维海洋预报产品,包含从海洋表层到底层的日平均和月平均温度、盐度、海流、海平面高度、混合层深度以及海冰参数等数据文件。垂直方向共50层,深度范围从0~5 500 m。

对比数据还包含CMEMS的全球海洋集合再分析系列产品(Global Ocean Ensemble Physics Reanalysis, ENS),其空间分辨率为 $1/4^\circ$,包含温度、盐度、海流和海冰变量的月平均数据,垂直方向分为75层,时间覆盖自1993年至今。ENS是基于数值海洋模型、通过同化卫星及现场观测数据生成的长时间序列(数十年尺度)三维网格化数据集,旨在系统描述海洋物理状态。这些再分析产品在符合模型物理规律的基础上,力求最大程度接近观测结果(即具备真实可靠性)。多模型集合方法的使用为海洋状态不确定性或误差的估算提供可能,对于某些特定区域或时段,集合平均结果可能比任何单一再分析产品提供更可靠的评估。本文使用的3个集合再分析产品包含法国墨卡托国际海洋中心的GLORYS2V4(记为ENS-glor)、ECMWF的ORAS5(记为ENS-oras)和意大利地中海气候研究中心(CMCC)的C-GLORSv7(记为ENS-cglo)。

对比资料还包括由NASA等机构参与研发的全球大洋环流数据同化模式系统数据产品(the Estimating the Circulation and Climate of the Ocean

Phase II project, ECCO2),该数据融合了大量的海洋观测数据(包括卫星观测、现场观测等),经过数值模型和数据同化技术的复杂计算处理生成。ECCO2可提供全球海洋温度、盐度、密度、压力、流速等丰富的海洋物理变量信息,空间分辨率为 $1/4^\circ$,能够较好地解析海洋中尺度涡旋等精细结构。

此外,本研究使用的LICOM预报产品LFS是基于中国科学院大气物理研究所自主研发的LICOM3.0全球海洋环流模型建构的全球涡旋分辨海洋预报系统。LFS基于原始方程、连续性方程、海水状态方程和温盐守恒方程,采用有限差分方法求解的高分辨率海洋环流模型,标准分辨率为 $1/10^\circ$,局部加密可达 $1/20^\circ$,能够模拟百年尺度的大洋环流和热盐环流以及中尺度过程。此外,LFS还结合LICOM3.0模型,通过“nudging”方法生成初始条件,并利用全球预报系统(Global Forecast System, GFS)预报数据进行每日更新,以提供未来1~7天的海洋环境要素预报,包括三维温盐流、海面温度、海面高度异常等^[20]。

1.3 模式评估指标

本文主要通过以下指标进行模式产品模拟能力的评估:

①均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE, 记作 E_{RMS})

$$E_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_i - O_i)^2} \quad (1)$$

式中: M_i 和 O_i 分别代表模式数据和观测数据; N 为有效的空间点数量。均方根误差可直观反映模式数据与观测数据之间的偏差:均方根误差越小,模式的模拟效果越好。均方根误差可以有效反映模式数据与观测数据整体的偏差程度,考虑到模式与观测在空间分布上的匹配度,还需要更多的指标来对模式产品进行评估。

②相关系数(R)

$$R = \frac{\text{Cov}(M, O)}{S_{\text{id}}(M) \cdot S_{\text{id}}(O)} \quad (2)$$

式中: $\text{Cov}(M, O)$ 表示观测与模式之间的协方差; $S_{\text{id}}(M)$ 和 $S_{\text{id}}(O)$ 分别代表模式和观测的标准差,具体计算公式为:

$$\text{Cov}(M, O) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M})(O_i - \bar{O}) \quad (3)$$

$$S_{\text{id}}(M) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M})^2} \quad (4)$$

$$S_{\text{id}}(O) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \quad (5)$$

式中: $\bar{M}$ 和 $\bar{O}$ 分别代表模式和观测的平均值。 R 的计算结果理论值在 $[-1, 1]$ 之间, 它核心反映模拟与观测数据在空间分布或时间变化趋势上的一致性: $R > 0$ 表示两者变化趋势相同, $R < 0$ 则表示两者变化趋势相反, R 越接近 1 或 -1, 说明模式数据能准确捕捉观测数据的整体变化规律, R 趋于 0 则说明模拟与观测的变化趋势无明显关联, 模式对温盐分布的再现能力较差。

③ 结构相似性指数 (SSIM)

SSIM 是一种基于人眼对结构信息提取原理来衡量两幅图像相似性的评估指标^[21]。SSIM 指标通过计算亮度、对比度和结构的相似性来衡量物理空间场 (如温度、盐度) 的结构相似性, 其计算公式为:

$$\text{SSIM} = \frac{(2\bar{M}\bar{O} + C_1) \cdot [2\text{Cov}(M, O) + C_2]}{(\bar{M}^2 + \bar{O}^2 + C_1) \cdot [S_{\text{id}}^2(M) + S_{\text{id}}^2(O) + C_2]} \quad (6)$$

式中: C_1, C_2 为稳定常数, $C_1 = (k_1 L)^2$, $C_2 = (k_2 L)^2$, 其中 $k_1=0.01, k_2=0.03$ (经验值, 防止分母接近 0 时不稳定), 根据变量的动态范围可调整 L 的取值, 通常取变量的实际物理范围 (如温度: $L = T_{\text{max}} - T_{\text{min}}$)。SSIM 可有效反映模拟与观测数据的局部结构在亮度、对比度和信息结构上的匹配度: SSIM = 1 时, 代表模式数据与观测数据在结构、对比度和亮度上完全一致; SSIM ≈ 0 时, 说明模式和观测的结构相似性较低; SSIM < 0 时, 代表模式和观测的空间分布趋势完全相反。一般认为 SSIM > 0.6 代表模式在空间结构表现良好。虽然 SSIM 在图像质量评估中被广泛采用, 并且在许多情况下表现良好, 但它仍具有一定的局限性, 即 SSIM 对数据噪声较为敏感, 且观测数据的样本量不足时会对模式的表现产生误判^[21]。在本次评估中, 已将观测数据中的异常值剔除, 排除了数据噪声对评估的影响; 另外, 2023 年北部湾走航观测中夏季的 16 个断面共计有 114 个有效站点, 冬季的 16 个断面共计有 93 个有效站点, 每

个站点在垂直方向上进行全水深观测, 观测数据量可观, 为有效评估各模式产品的表现提供了数据支撑。

2 结果分析

将观测时间跨度内的模式数据进行季节内算术平均, 对不同季节观测与模式的温盐分布开展对比分析, 通过不同的评估指标量化各模式的模拟结果。基于不同季节内的温盐分布特征, 结合北部湾海域的环流特性, 将研究区域划分为北部湾北部沿岸海域 (A1)、琼州海峡西口海域 (A2)、海南岛西侧海域 (A3) 和海南岛南部海域 (A4) 4 大典型区域 (见图 1a), 系统剖析各区域温盐差的垂向分布特征和水团结构特征, 从而实现不同模式资料的系统评估。

2.1 温盐模拟性能评估

2.1.1 夏季分布对比

观测数据显示, 夏季北部湾北部温度跃层在 10~20 m 深度, 为此取混合层 5 m、跃层附近 15 m 和深层 40 m 进行分析。如图 2 所示, 北部湾在 5 m、15 m 和 40 m 深度层的夏季温度水平分布呈现显著的“北高南低”的格局。上 15 m 层的冷暖水大约在 18.5°N 分界, 形成明显温度锋面, 南北温差达到 4 °C; 40 m 层的冷暖水锋面界限北移到 19.5°N, 南北温差达到 7 °C。对比观测结果, 7 套模式结果均能呈现“北高南低”的温度分布特征, 然而温度绝对值和南北温差值还在存在一定差异。图 3 展示出夏季各模型与观测温度偏差值 (模式值减去观测值) 的水平分布, 可见: 7 套模式资料的温度偏差分布具有一定的相似性, 即在 19°N 以北的湾北海域, 各深度层的温度均存在不同程度的低估; 而在 19°N 以南的南部海域, 则呈现温度高估现象, 且偏差范围集中在 -2~2 °C 区间内。相对而言, 上 15 m 层的北部负温差基本小于 1 °C, 尤其是 15 m 层, 基本小于 0.5 °C; 南部的暖偏差普遍强于 1 °C。在 40 m 深层, GLORYS、Glo_anfc、ENS-glor、ENS-cglo 模拟的北侧冷偏差显著增大, 超过 1.5 °C; ENS-oras 和 ECCO2 模拟的南侧暖偏差则显著增大至 1.5 °C 以上。

进一步对混合层 5 m、跃层附近 15 m 和深层

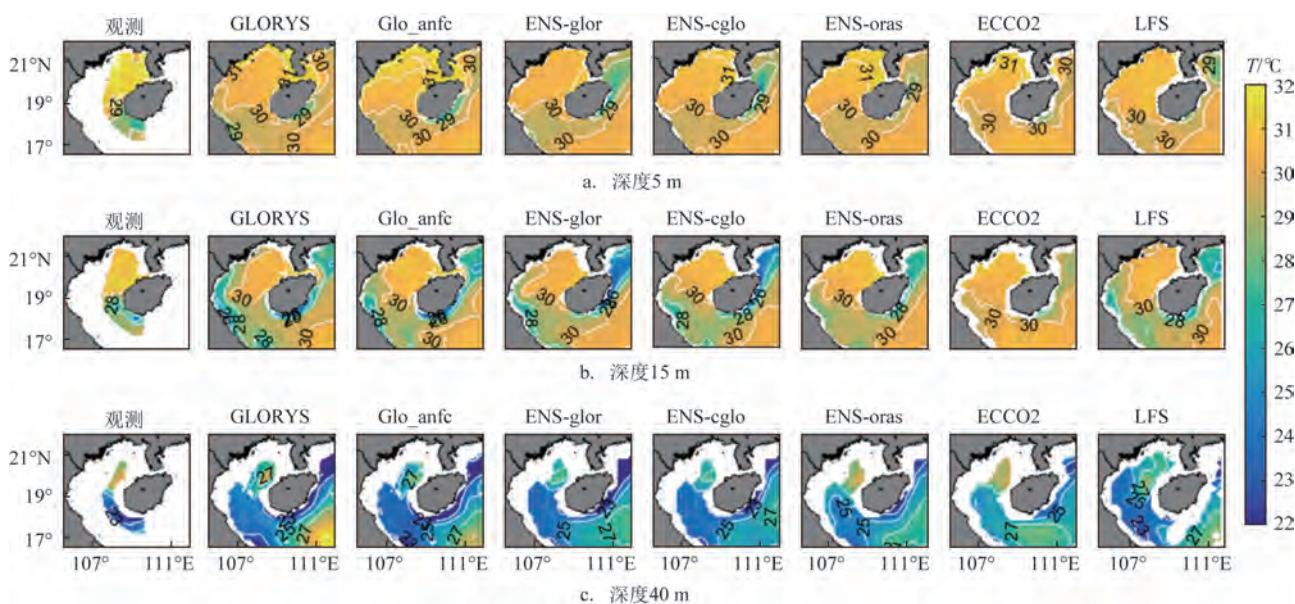


图2 夏季观测与各模式在不同水深的温度分布

Fig.2 Temperature distributions of the observations and products in summer

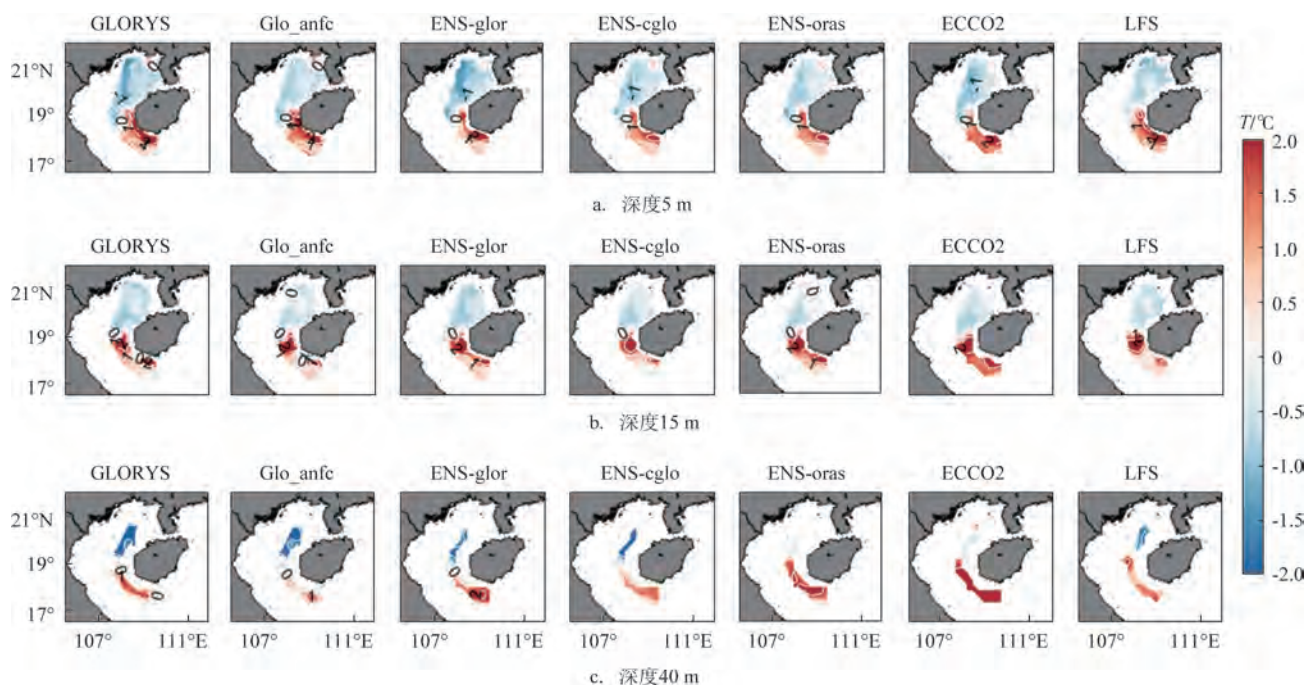


图3 夏季各模式在不同水深的温度偏差(模式-观测)分布

Fig.3 Distribution of temperature bias of each product in summer

40 m的夏季盐度分布进行分析,结果见图4。受夏季陆源淡水输入的显著影响,各深度层的盐度水平分布呈现出“北低南高”的典型特征。在5 m层,33 psu等盐度线约在18.5°N,南北盐度差达5 psu,南北形成显著的盐度锋面;15 m层的咸淡水分界线北

移至19°N,南北盐度差降至2.5 psu;40 m层的咸淡水锋面界限继续北移到19.5°N,南北盐度差降为1 psu。通过观测数据和模式数据的对比结果可以看出,7套模式均能呈现夏季盐度“北低南高”的水平分布特征,但盐度绝对值仍存在差异,尤其湾北盐度偏差较大。

在 5 m 和 15 m 的上层(见图 5), 7 套模式资料的盐度偏差具有一定的相似性: 19°N 以北盐度被严重高估, 5 m 层的最大偏差超过 6 psu, 15 m 层的降至 2 psu; 19°N 以南的盐度偏差则普遍为负, 最大达 -1 psu。40 m 层的盐度偏差进一步下降, GLORYS、ENS-glor 和 ECCO2 三套模式的模拟结果由正偏差转

为负偏差, 偏差范围都在 -0.5~0.5 psu 之间。由此可见, 盐度偏差随深度的增加呈现出明显的递减趋势。

2.1.2 冬季分布对比

北部湾冬季的温度分布特征与夏季显著不同。观测数据表明, 5 m、15 m 及 40 m 深度层的温度水平分布南北差异不大, 主要集中在 24~25 °C 之

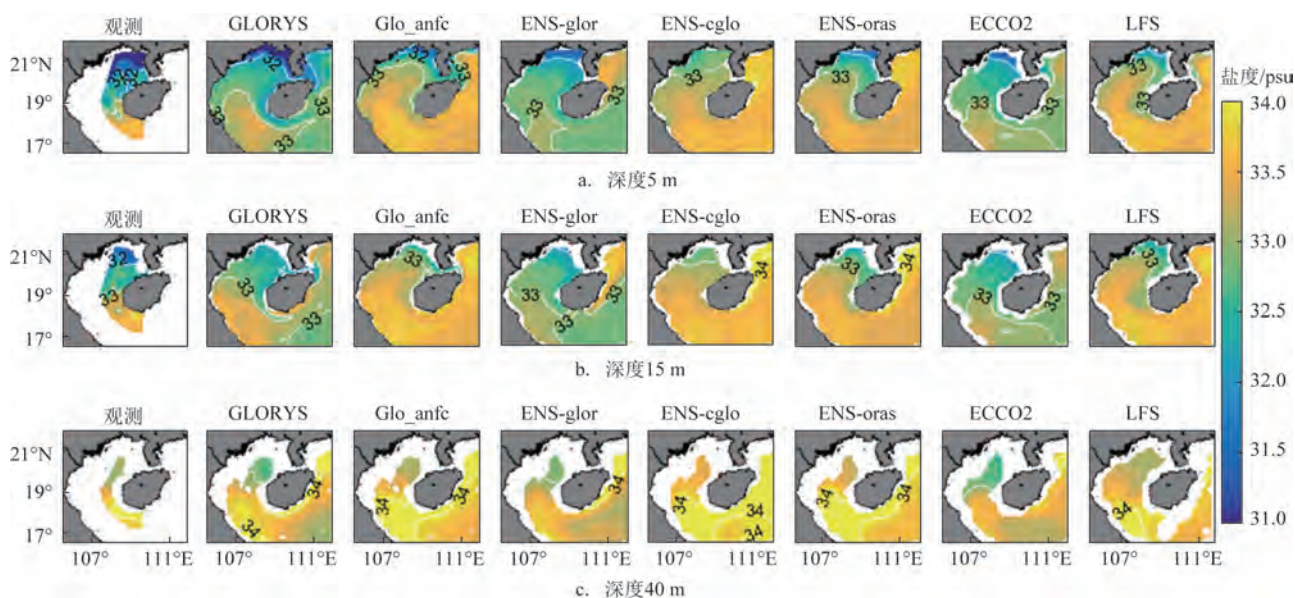


图 4 夏季观测与各模式在不同水深的盐度分布

Fig.4 Salinity distributions of the observations and products in summer

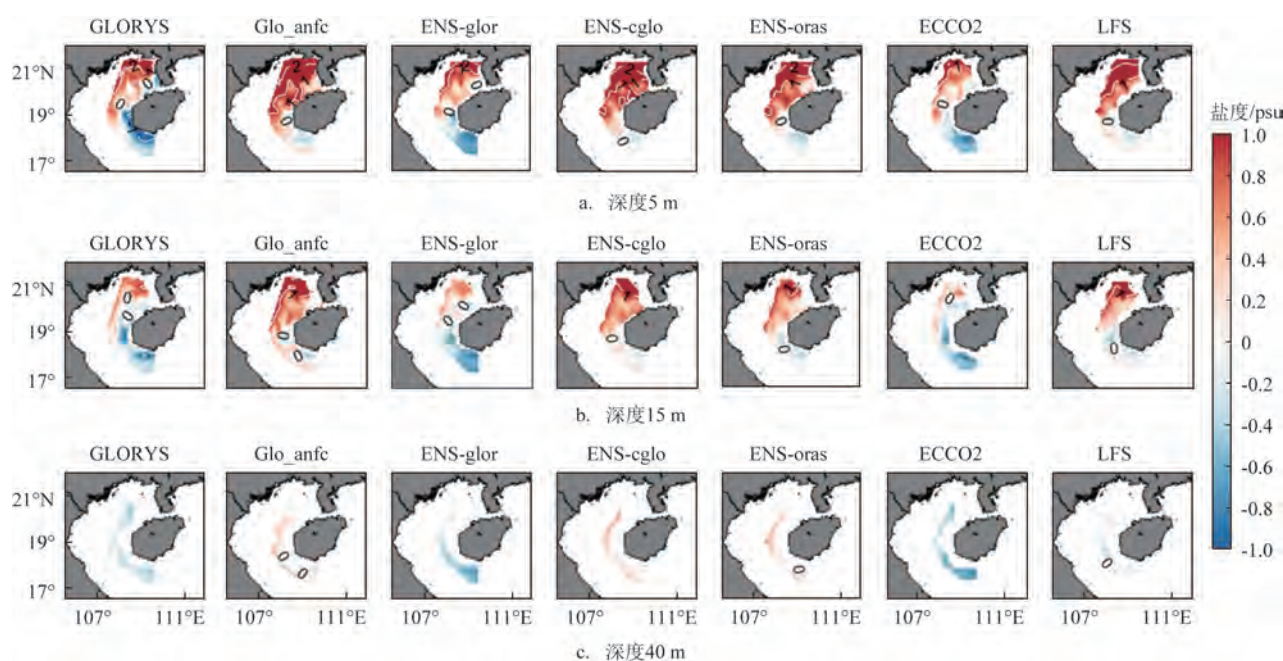


图 5 夏季各模式在不同水深的盐度偏差(模式-观测)分布

Fig.5 Distribution of salinity bias of each product in summer

间,湾北及湾南的中部海域存在局部温度高值区($>25.5^{\circ}\text{C}$)。与观测数据中温度分布较为均一形成鲜明对比的是,7套模式的模拟结果均呈现出典型的“北低南高”的温度梯度特征(见图6)。进一步对冬季温度偏差值(模式值减去观测值)的水平分布

(见图7)进行分析发现:在 20°N 以北的湾北沿岸5 m层深度,7套模式均表现出不同程度的温度低估现象,偏差值主要集中于 $-1.5\sim 0^{\circ}\text{C}$;而在 20°N 以南的中部及南部海域,模拟结果则呈现显著的温度高估,其中ENS-glor和ENS-cglo两套模式在5 m、15 m

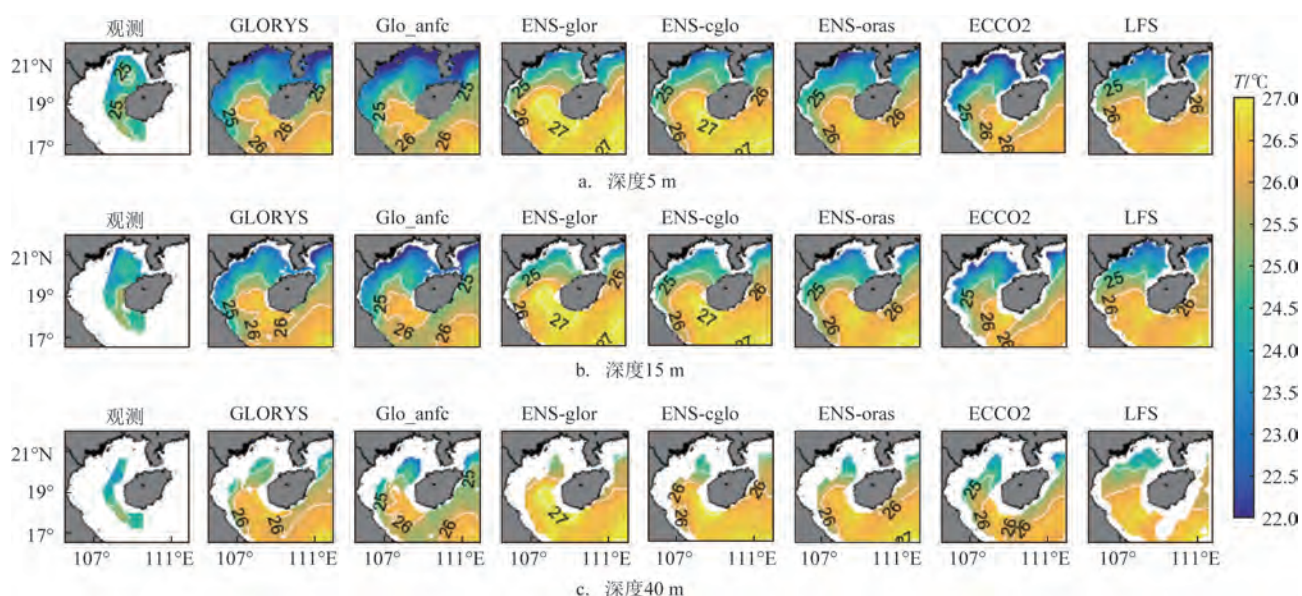


图6 冬季观测与各模式在不同水深的温度分布

Fig.6 Temperature distributions of the observations and products in winter

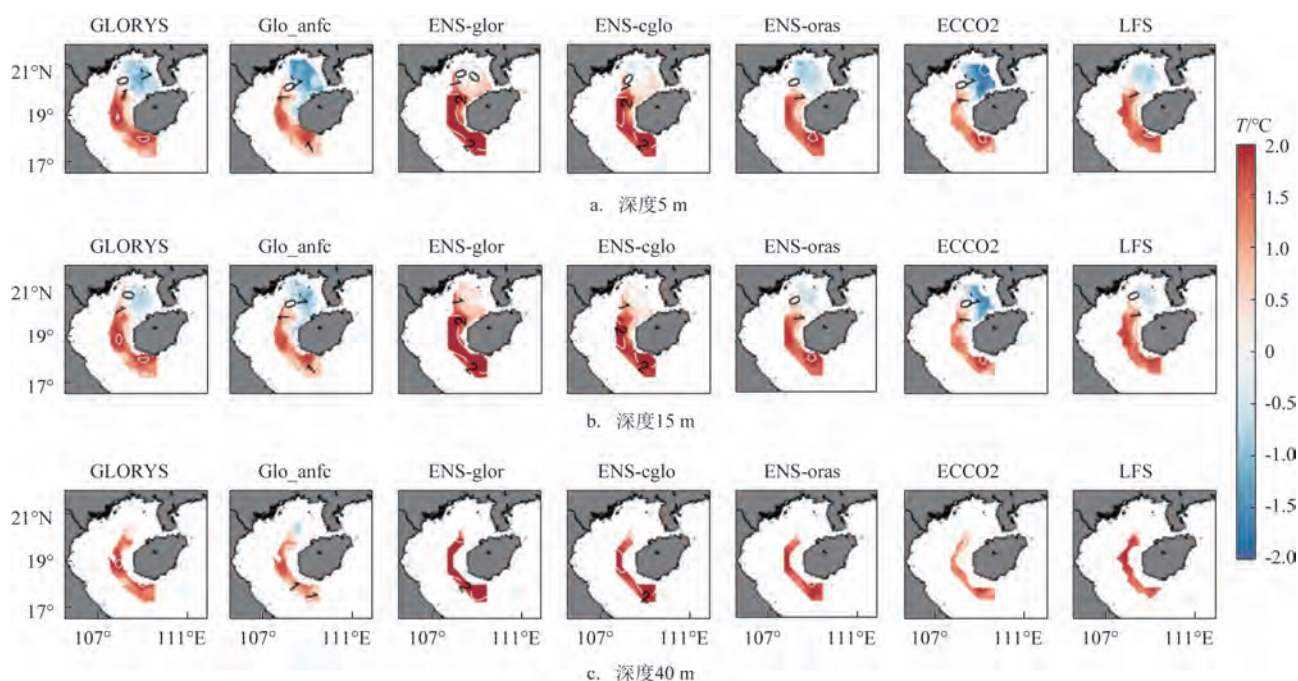


图7 冬季各模式在不同水深的温度偏差(模式-观测)分布

Fig.7 Distribution of temperature bias of each product in winter

及40 m深度层的最大温度偏差均超过 2°C 。这种南部海域的偏差特征,揭示了不同模式在不同区域对温度场的模拟能力存在显著差异。

北部湾冬季盐度的水平分布特征与夏季类似,5 m、15 m和40 m深度层均呈现典型的“北低南高”特征,且各深度层的33 psu等盐度线都在 20°N 附近,南北最大盐度差约为2 psu。对比观测数据和模式数据的结果(见图8)发现,GLORYS、Glo_anfc和LFS模式资料对冬季盐度的水平分布特征的刻画更为精准,能够有效捕捉到北部湾南北海域的盐度梯度特征;而其余4套模式的结果显示,各深度层的盐度分布较为均一,未能充分体现南北海域的盐度差异,与实际观测存在一定的偏差。值得关注的是,受冬季水体垂向混合加剧影响,5 m、15 m和40 m深度层的盐度值差异较小,垂向分布趋于均匀。在盐度偏差(模式值减去观测值)方面,GLORYS模式几乎在整个北部湾海域上15 m层均呈现低估,低估范围在 1°C 以内;其余6套模式在冬季的盐度偏差分布特征与夏季表现一致,尤其在上15 m层,均呈现湾北海域盐度严重高估、南部海域盐度低估的态势;在40 m层,ENS-glor模式在海南岛南部海域的盐度偏差仍有 -1°C ,而各模式模拟的盐度偏差显著下降。

2.1.3 分区对比

前文分析显示,北部湾海域温度与盐度的平面

分布及模拟差异分布呈现出显著的南北向梯度变化特征,因此我们深入探究4个区域的温度、盐度的垂向分布规律及水团性质。由图10a可知,在夏季,各模式的模拟结果与观测数据的温度偏差随深度的变化特征显著。具体而言,在A1、A2和A3区域20 m以深海域,温度偏差波动剧烈,除A2外,温度偏差的波动范围均介于 $-2\sim 2^{\circ}\text{C}$ 之间;而A2的30~50 m深海域的温度偏差急剧增大至 -4°C ;在A4海域,除GLORYS、Glo-anfc和LFS三套模式外,其余模式在全水深范围内几乎均呈现出明显的正温度偏差。相较于温度偏差显著的垂向变化特征,盐度偏差的垂向变化相对平缓(见图10b)。然而,在A1海域,7套模式在20 m以浅海域均存在盐度高估现象,海表处平均高估幅度约为2 psu,并且随着深度的增加,盐度偏差逐渐减小,模式结果趋近于观测数据。

如图10c所示,冬季A1和A2表层海温模拟存在明显差异,ENS-glor和ENS-cglo两套模式呈现出温度正偏差,其余5套模式则表现为海表温度低估,温度偏差分布于 $-2\sim 0^{\circ}\text{C}$ 之间;与之形成对比的是,A3和A4的7套模式模拟结果均呈现温度正偏差,且在50 m以浅海域各模式温度偏差随深度变化不显著,差值主要介于 $1\sim 2^{\circ}\text{C}$ 之间。在盐度偏差的垂向分布上(见图10d),A1和A2表现出显著的模式分

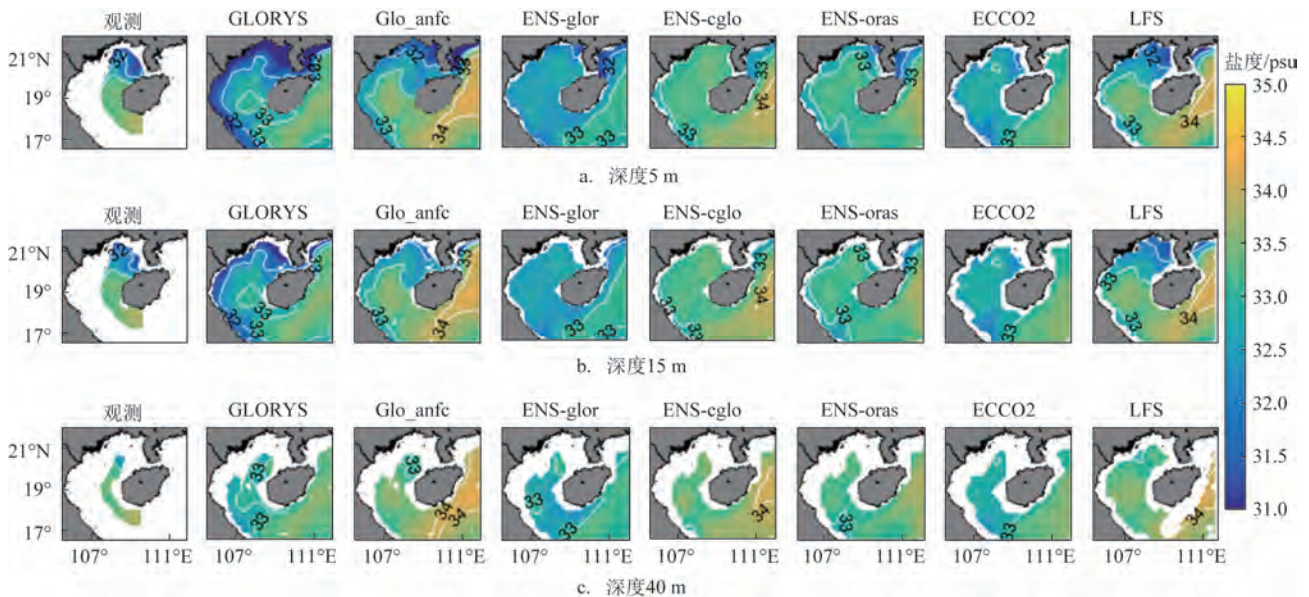


图8 冬季观测与各模式在不同水深的盐度分布

Fig.8 Salinity distributions of the observations and products in winter

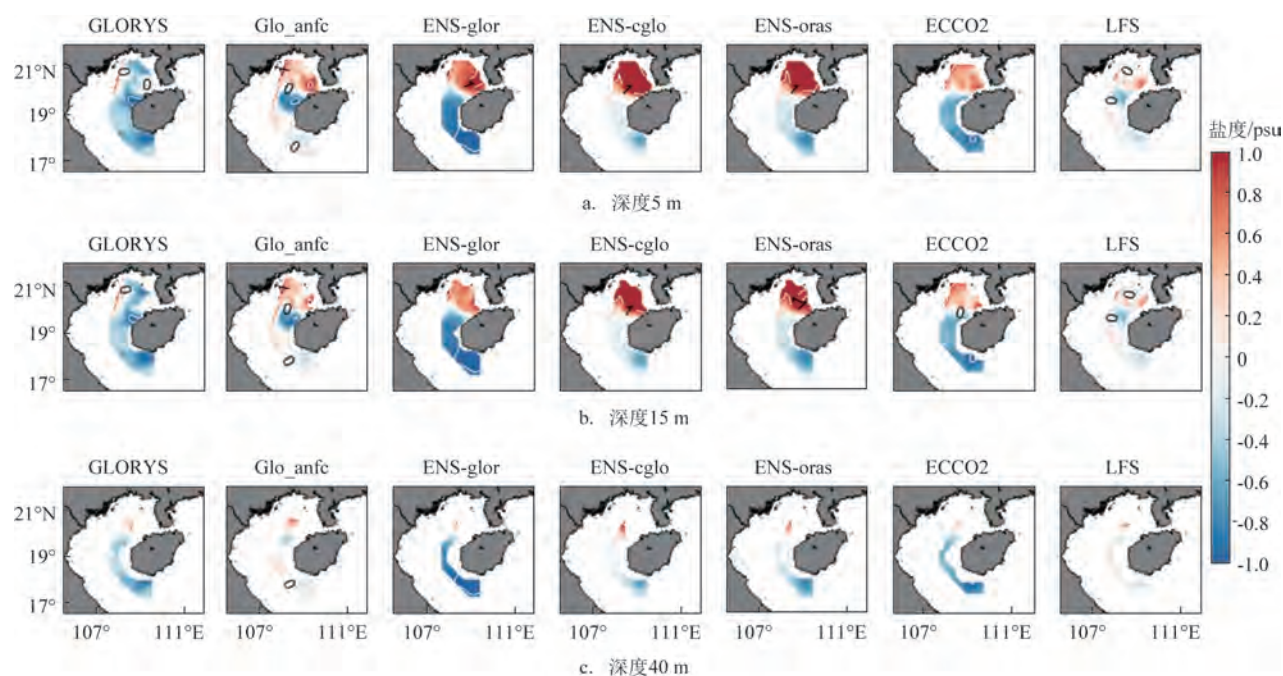


图9 冬季各模式在不同水深的盐度偏差(模式-观测)分布

Fig.9 Distribution of salinity bias of each product in winter

化, GLORYS模式在该海域上30 m的盐度负偏差小于0.5 psu,其余6套模式在这两个区域的全水深海域均表现为显著的盐度正偏差,偏差范围介于0~2 psu;在A3和A4海域,7套模式的盐度主要呈现负偏差,且不同深度间的变化不显著。

2.1.4 评估指标情况

本研究基于式(1)、式(2)和式(6),分别计算观测数据与7套模式产品数据的均方根误差(RMSE)、相关系数(R)和结构相似性指数(SSIM),以此实现对北部湾海域温盐模拟结果的量化评估。夏季(见图11a),7套模式产品在表层5 m深度层的温盐相对误差和均方根误差分布较为集中,相对误差主要介于0.02~0.04之间,均方根误差则集中在0.8~1.4 °C(或psu)。随着深度的增加,温度的相对误差和均方根误差呈上升趋势,盐度的相对误差和均方根误差则逐渐降低。这一现象可能受海水温盐自身的垂向变化特征影响导致,即温度随深度的增加而降低,盐度随深度的增加而增大。值得关注的是,在40 m深度层,ECCO2的温度相对误差和均方根误差显著高于其他模式产品,相对误差达到0.14,均方根误差则为3.7 °C,表明该模式在北部湾海域深层温度模拟中存在一定局限性。

在北部湾夏季温盐特征分析中,7套模式资料均能较好体现北部湾夏季温度“北高南低”、盐度“北低南高”的南北空间分布格局,模式与观测数据在5 m、15 m和40 m深度层的温盐相关性均超过0.6,其中40 m深度层的温盐相关系数平均值达0.85。相较于单纯的的相关系数,SSIM能够更全面地量化模式与观测数据的二维空间分布差异,从图11a的分析结果来看, GLORYS和GLO-anfc两套模式数据在北部湾夏季各深度层的SSIM值均大于0.5,表明这两套模式在空间结构的模拟效果上表现较为突出。

冬季北部湾海域不同模式的模拟结果呈现出显著差异(见图11b)。在误差评估指标中,ENS-glor模式在各深度层的温盐相对误差和均方根误差显著高于其他模式,反映出该模式在冬季温盐模拟上存在较大偏差。相关性分析表明,ENS系列3套模式与观测数据的盐度相关性均表现欠佳,部分深度层的相关系数甚至呈现负值,意味着这些模式与实际观测存在着反向的空间分布特征。从SSIM结果来看,ENS系列3套模式和ECCO2模式在深度层的SSIM值普遍较低,部分数据出现负值,显示其模拟结果与观测数据的二维空间结构差异显著;而

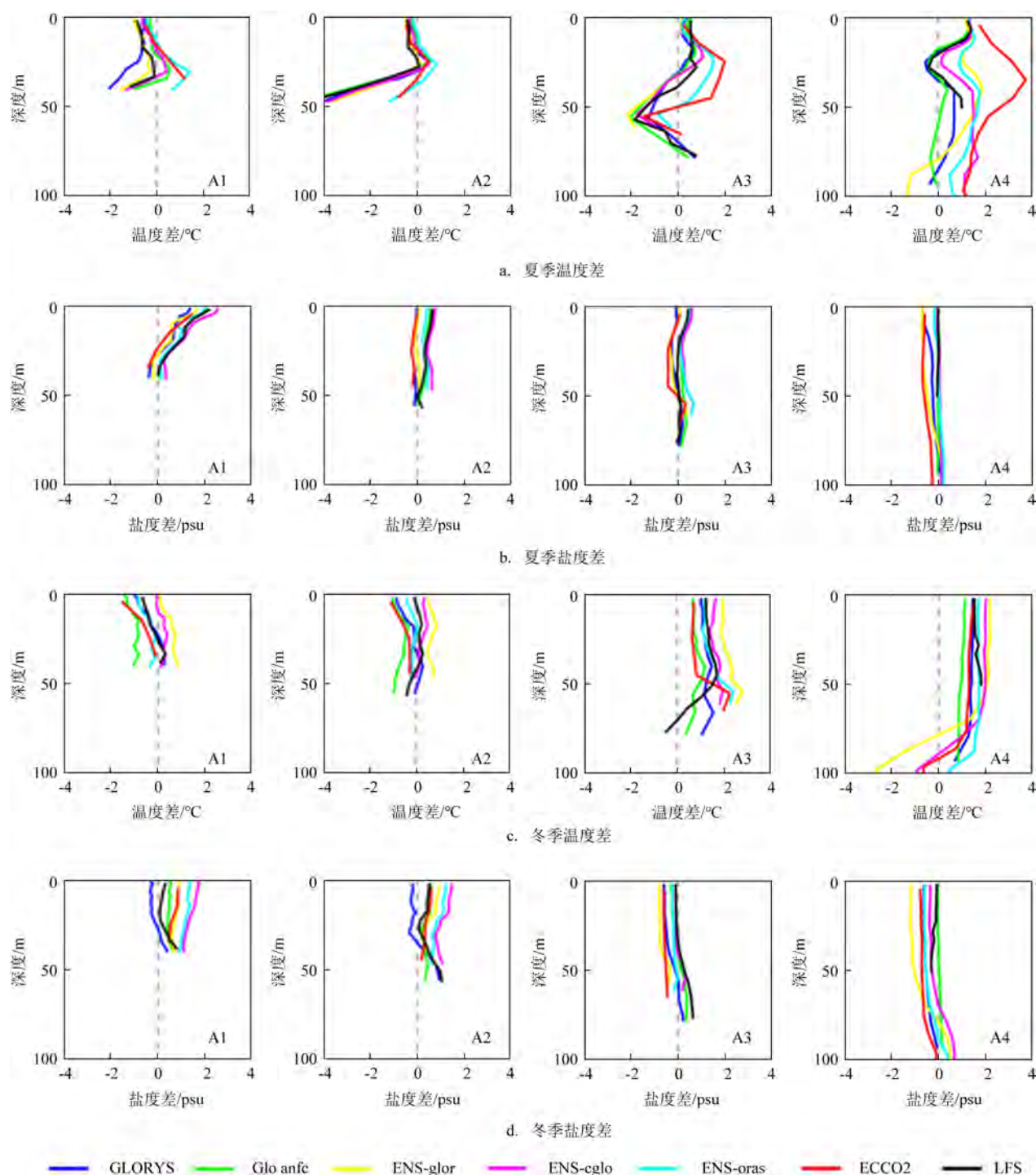


图 10 北部湾 4 个不同海域观测与模式的温盐差随深度的分布

Fig.10 Distribution of temperature and salinity bias with depth between observations and products in the four regions of Beibu Gulf

GLORYS、GLO-anfc 和 LFC 模式的 SSIM 值稳定维持在 0.5 左右,表明这 3 套模式在冬季北部湾海域温盐空间结构的模拟效果上具有较高的可信度与稳定性。

2.2 水团分布模拟能力评估

本研究针对 A1—A4 这 4 个区域观测与模式的

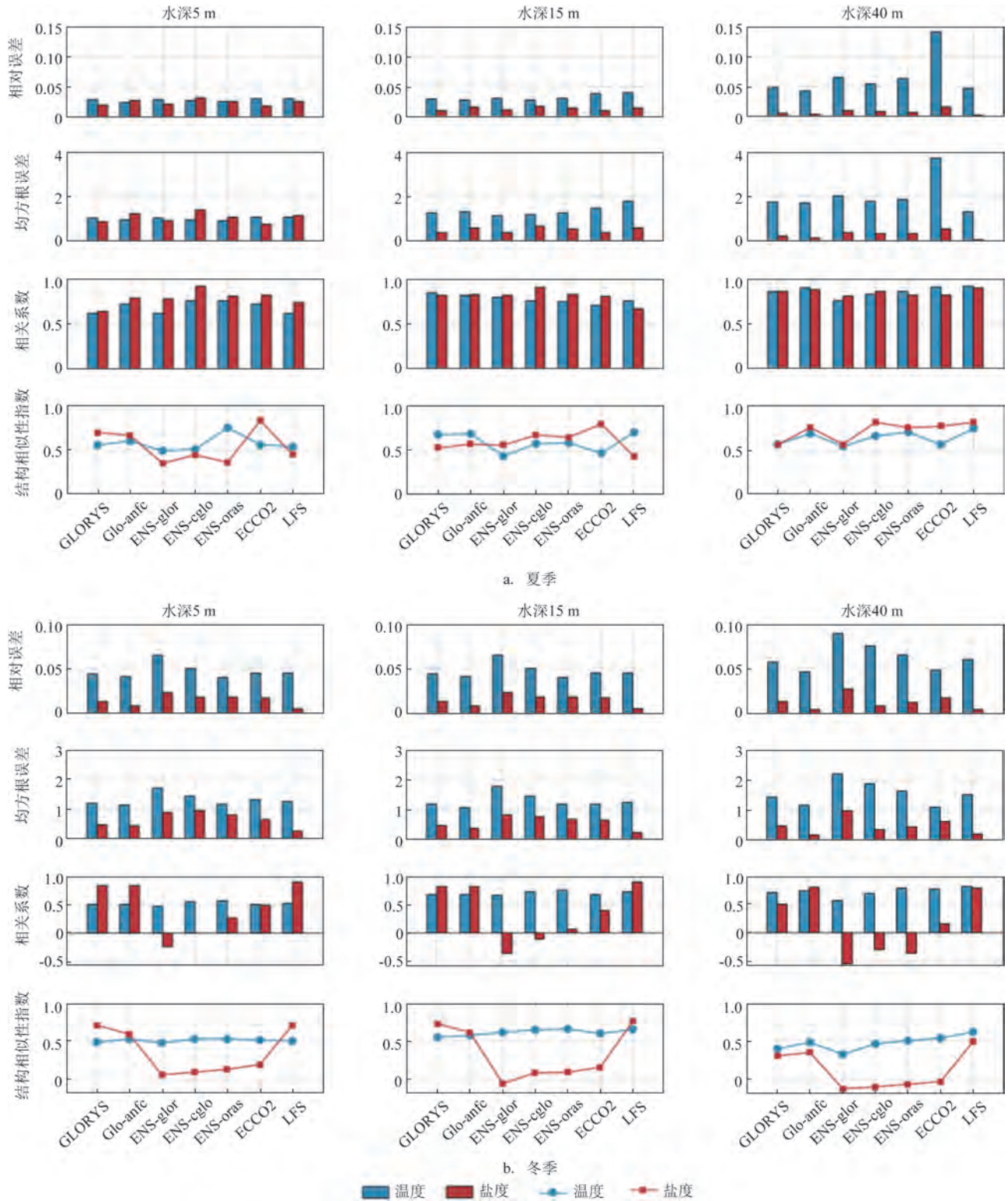


图 11 冬夏季温盐的指标结果

Fig.11 Indicator results of temperature and salinity in summer and winter

海温盐分布进行对比分析。夏季观测数据显示(见图 12a), A1 呈现显著的垂向分布特征:上层水体

(20 m 以浅)盐度范围为 28.0~32.5 psu, 受沿岸径流输入影响, 呈现典型的北部湾沿岸水特征。由于 7

套数值模式均缺乏径流过程模块,导致对该海域近岸上层水体盐度的模拟值显著高于实测值,这与图10的结果是一致的;下层水体(20 m以深)中,7套模式模拟的水团特性与观测结果吻合良好。A2的上层水体盐度主要分布于32~33 psu,属于北部湾混合水团,该水团由海南岛以东沿岸水经琼州海峡进入北部湾混合而成^[1],各模式均能有效刻画该水团的特性;但在下层水体中,各模式模拟的温盐值与观测数据存在较大差异,尤其是GLORYS、GLO-anfc、ENS-cglo以及LFS模式存在明显的温度低估。A3和

A4的水团盐度范围大致为32~34.5 psu,以北部湾混合水与外海水占主,各模式的温盐分布特征与观测结果呈现较高的一致性。

受冬季强风驱动,研究海域海水垂向混合显著增强,温盐剖面呈现均匀化特征,A1—A4四个区域全水深的温盐分析结果表明(见图12b),相较于夏季,冬季各模式模拟的温盐分布与实测数据在各区域均存在显著差异。A1和A2海域GLORYS模式所呈现出的水团特性与观测吻合度较高,表现出较好的温盐刻画能力,而其他模式则普遍呈现温度低

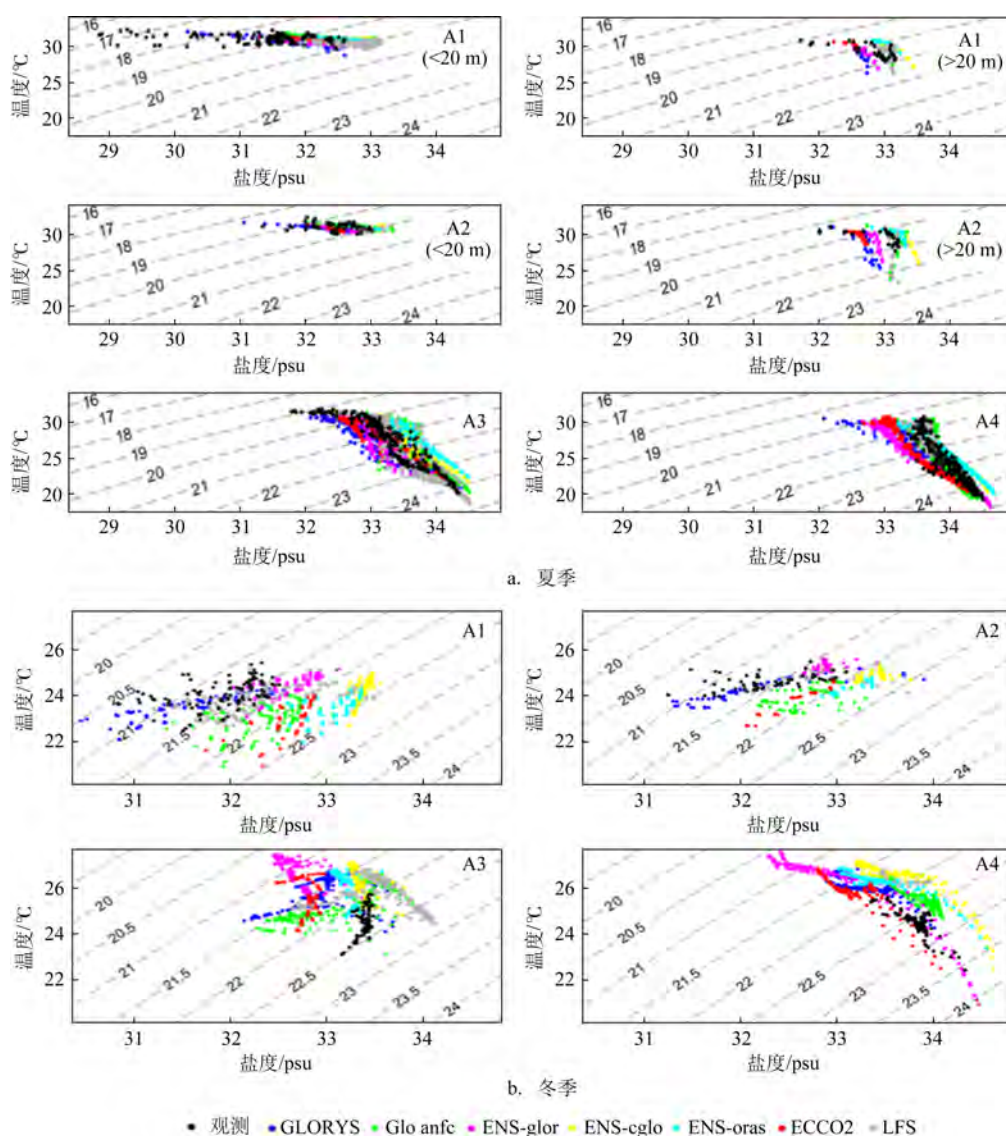


图12 冬夏季北部湾4个海域观测与模式的温度-盐度分布

Fig.12 Temperature-salinity distributions between observations and products in the four regions of Beibu Gulf during summer and winter

估与盐度高估的现象;在A3和A4海域,各模式均表现出不同程度的温度高估特征,其盐度模拟值离散程度较大,反映出模式对该区域盐度分布模拟存在较大的不确定性。

3 讨论

3.1 评估指标使用说明

纳什系数(Nash-Sutcliffe Efficiency, NSE)用于量化模型预测值与实际观测值的吻合程度,是衡量模型预测效果的常用统计指标^[22],其计算公式为:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{O})^2} \quad (7)$$

式中: M_i 和 O_i 分别代表模式数据和观测数据; $\bar{O}$ 是观测的平均值;NSE取值介于 $(-\infty, 1)$,约接近1,模型模拟效果越好。本研究初期也使用了NSE来评估各模式,但结果表明NSE不能有效评估各模式的表现。例如ECCO2模式和LFS模式在40 m深度和15 m深度的NSE出现负值(见表2),说明模式模拟效果较差,模型误差大于基准误差,但从图2可以看出,ECCO2模式和LFS模式能够模拟出温度“北高南低”的空间分布特征;通过图5还可以看出,盐度偏差随深度的增加呈现出明显的递减趋势,图11的指标结果也显示夏季各模式盐度的均方根误差随深度增加而降低, R 和SSIM指数的增加也可以证实这一点,但夏季各深度层温盐NSE的对比结果(见表2)无法表征这一特征。

此外,采用NSE的核心优势在于其可以评估具

有时间连续性的动态过程数据(如时序序列的模拟与观测一致性),而本文的数据评估聚焦于“季节内平均意义下,观测与模式在空间分布特征上的对比”,评估目标与NSE的适用场景不匹配,因此文中未将该指标纳入本次评估体系。

3.2 观测与模式的可比性分析

海洋模拟中的网格化处理会将次网格过程(如湍流、混合)的物理效应简化为平均值,这使得模型输出的变量(如温度、盐度等)变率可能小于实际观测数据^[23-24]。而观测数据涵盖了多尺度过程(如小尺度混合、对流、风驱混合等)的影响,因此其变率通常更大。夏季不同深度层观测数据的温盐标准差均大于模式结果(见表3),且相较于 0.083° 水平分辨率的海洋模式(GLORYS、Glo-anfc), 0.25° 的低分辨率模式(ENS、ECCO2、LFS)的空间变率更低,这可能是造成低分辨率模式产品模拟结果不理想的主要原因。但从表4中可以看出,冬季不同深度层观测数据的温盐标准差并没有显著偏大,相反,温度标准差均小于各模式结果。

为更好进行对比,以ENS-glor模式为例,我们重新将夏季表层5 m的观测数据平均在 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 分辨率的模式网格中再进行对比分析。相较于观测结果,模式在北部湾北部海域温度低估,南部海域温度高估,这与图2和图3的分析一致;进一步计算观测与模式的相对误差、均方根误差、相关系数和空间相似指数,观测平均结果与观测插值结果均相差不大(见表5)。因此,通过将观测数据插值至对应模式的网格以实现数据空间匹配,再开展模式与观测的对比分析,最终完成对模式的评估,该方

表2 夏季观测数据和各模式数据在不同深度层的温盐纳什系数

Tab.2 NSE coefficients of temperature and salinity from observed data and various products at the different depth layers in summer

类别	深度/m	GLORYS	Glo-anfc	ENS-glor	ENS-cglo	ENS-oras	ECCO2	LFS
温度	5	0.32	0.43	0.30	0.43	0.45	0.28	0.26
	15	0.31	0.27	0.38	0.36	0.26	0.19	-0.26
	40	0.46	0.47	0.22	0.39	0.33	-1.37	0.67
盐度	5	0.45	-0.03	0.32	-0.49	0.05	0.55	0.14
	15	0.57	0.02	0.49	-0.22	0.15	0.57	-0.01
	40	0.39	0.61	-0.38	-0.24	-0.34	-0.85	0.82

法具备可行性。

3.3 模式系统偏差分析

本研究基于北部湾冬夏季的温盐观测对7套模式产品进行了横向比较,结果显示,GLORYS、Glo-anfc和LFS模式的温盐模拟效果相对较好,对比各模式设置,这3套模式的空间分辨率明显优于其他模式,高分辨率模式除了具有更精细的地形刻画能力和动力结构捕捉能力,还能有效地将Argo浮标、卫星遥感等同化数据融入模型中,从而更准确地反映实际海洋状态。陈飞等^[25]利用Argo数据同化南海北部海区后的结果表明,高分辨率模式在海洋混合层和温跃层附近的均方根误差显著降低。相比之下,ENS-glor、ENS-cglo、ENS-Oras和ECCO2模式由于未能有效模拟冬季北部湾盐度的水平分布特征,导致模式整体表现较差,模式空间分辨率相对较粗糙,对于北部湾这样的小尺度、地形复杂的浅海区域,难以精确模拟湾内的关键动力过程。

北部湾的水团分布受到沿岸径流、经琼州海峡输入的粤西沿岸水和南海水的共同作用,季节更替

引起的风、太阳辐射变化与潮汐动力作用交织^[3],现有的模式产品在这些关键过程的表征上仍存在不足,导致输出的温度、盐度等关键变量出现系统误差。当前,海洋模型常采用原始方程模型NEMO (Nucleus for European Modelling of the Ocean)模拟海洋运动和热盐交换过程,但该模型在模拟复杂动力过程时存在明显局限:湍流、混合、边界层过程等许多物理过程需要通过参数化方案进行近似,而这类方案多基于简化假设,难以反映实际物理过程的复杂性^[26];模型的初始条件和边界条件的设置对模拟结果的可靠性存在显著影响^[27];针对浅水海湾特性,模型对河流输入、季风驱动与环流交换的相互作用可能被简化甚至忽略,进一步降低模拟结果的准确性。本文评估模式所使用的集合卡尔曼滤波、变分同化等同化方法虽然是提升模式模拟精度的重要手段,但这类方法在处理多尺度过程和非线性相互作用时,难以完全复现实际物理过程;同时,同化资料依赖于观测数据的质量和覆盖范围,本文评估模式产品融合了来自卫星观测、现场观测、历史气候数据等不同来源的观测资料,观测数据受仪器

表3 观测数据和各模式数据在夏季不同深度层的温盐标准差

Tab.3 The standard deviations of temperature and salinity for observations and products at the different depth layers in summer

类别	深度/m	观测	GLORYS	Glo-anfc	ENS-glor	ENS-cglo	ENS-oras	ECCO2	LFS
温度/℃	5	1.49	0.63	0.76	0.74	0.74	0.54	0.52	0.68
	15	1.77	1.41	1.47	1.73	1.63	1.13	0.63	1.20
	40	2.89	2.39	2.31	2.05	1.55	1.65	1.54	2.04
盐度/psu	5	1.65	0.66	0.73	0.49	0.33	0.57	0.35	0.51
	15	0.84	0.38	0.28	0.33	0.27	0.31	0.26	0.28
	40	0.50	0.43	0.30	0.38	0.22	0.28	0.28	0.31

表4 观测数据和各模式数据在冬季不同深度层的温盐标准差

Tab.4 The standard deviations of temperature and salinity for observations and products at the different depth layers in winter

类别	深度/m	观测	GLORYS	Glo-anfc	ENS-glor	ENS-cglo	ENS-oras	ECCO2	LFS
温度/℃	5	0.62	1.39	1.52	1.17	1.2	1.33	1.37	1.19
	15	0.67	1.19	1.27	0.99	1.02	1.13	1.19	1.17
	40	0.48	0.68	0.73	0.56	0.59	0.68	0.69	0.72
盐度/psu	5	0.99	1.04	0.94	0.54	0.43	0.54	0.48	0.73
	15	0.89	0.72	0.63	0.38	0.37	0.4	0.41	0.66
	40	0.43	0.3	0.33	0.32	0.28	0.31	0.33	0.34

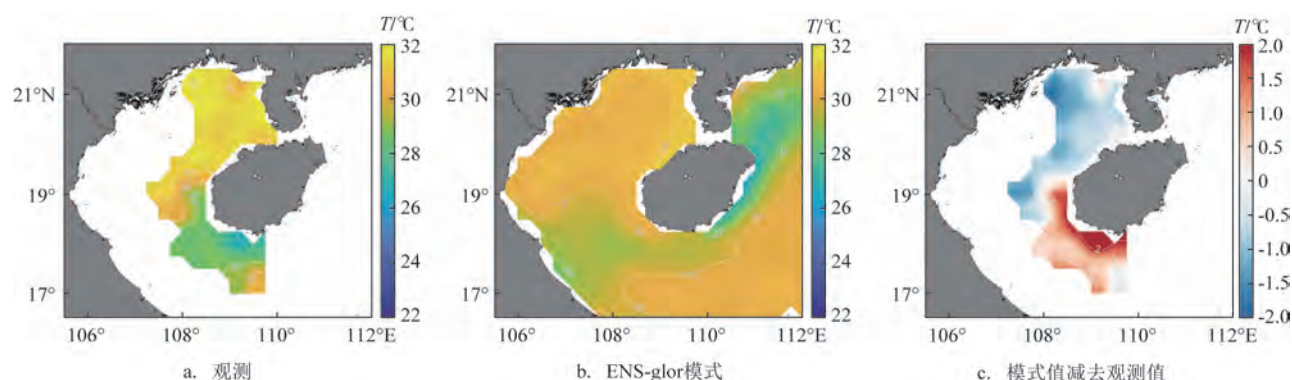


图13 观测值平均到 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 网格中与模式(ENS-glor)的对比

Fig.13 Comparison between the product (ENS-glor) and the observations averaged into a $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ grid

表5 观测插值和观测平均值与模式 ENS-glor 的对比

Tab.5 Comparison between the observational data (after interpolation and averaging) and the ENS-glor product

类别	RE	RMSE/ $^{\circ}\text{C}$	R	SSIM
观测插值	0.031	1.07	0.61	0.49
观测平均	0.032	1.10	0.68	0.47

性能、观测频率及空间分辨率的限制,也会导致同化结果产生较大的不确定性。GLORYS、ECCO2等模式采用气候态月平均径流量作为强迫项,完全忽略了汛期洪水过程和台风驱动强降水等突发性事件,导致近海出现高盐偏差^[28-29]。Zheng等^[30]在对LFS进行全面评估时指出,由于LFS在大气强迫中对入射太阳辐射略有高估,导致海表温度模拟产生一定偏差。ENS系列和ECCO2模式产品受分辨率限制,无法捕捉北部湾的次尺度环流,导致温盐偏差较大。此外,琼州海峡余流成因可分解成低频的风生流部分和背景流,余流既受到天气过程的影响,又受到潮致余流、密度流和临近河流淡水注入的影响,情况复杂多变,这也为模式的准确模拟增加了难度^[3]。

本研究所评估的GLORYS、GLO-anfc、ENS-glor、ENS-cglo、ENS-Oras、ECCO2和LFS七套模式资料都属于全球范围的海洋数值模式数据,北部湾是全球海域中典型的陆架海域。虽然陆架海(水深通常 $<200\text{ m}$)仅占全球海洋面积的7.6%,却承载着全球约20%的初级生产力、50%的渔业资源和90%的人类海洋活动^[31]。陆架海区域因其独特的物理、

生物地球化学过程及其与大洋的强耦合性,会通过多重机制影响全球模型的精度和可靠性,因此陆架海区域数值模拟的精确性对全球范围的数值模拟具有重要作用。陆架海区域的数值模拟需特别关注径流输入的时空变化、季风驱动的垂向混合季节变化及水团边界动态演变等过程的参数化改进。未来需通过高分辨率区域模型嵌套、多源观测数据同化(如卫星遥感、Argo浮标)及跨尺度过程的参数化,提升陆架海模拟的可靠性,从而夯实全球模型的物理基础。

4 总结

本文基于2023年冬夏在北部湾海域进行的温盐现场观测,利用绝对误差、相对误差、均方根误差、相关系数和结构相似性指数等指标,详细评估了GLORYS、GLO-anfc、ENS-glor、ENS-cglo、ENS-Oras、ECCO2和LFS 7套模式产品在北部湾的温盐模拟性能,并基于北部湾北部沿岸海域(A1)、琼州海峡西口海域(A2)、海南岛西侧海域(A3)和海南岛南部海域(A4)的温盐分布,分区进行水团观测与模式的对比分析。主要结论概括如下:

①7套模式均能有效模拟冬夏两季北部湾在5 m、15 m和40 m深度层的温盐分布趋势,即夏季温度“北高南低”,冬季温度“北低南高”,盐度在不同季节都呈现“北低南高”的南北分布特征;

②温度(盐度)差在不同的季节具有相似的模拟偏差,即北部湾北部温度低估、南部高估,而北部

盐度高估、南部低估,模式中缺少径流模块可能是这一结果的主要原因;

③7套模式与观测数据在夏季的5 m、15 m和40 m深度层的温盐相关性均超过0.6,其中GLORYS和GLO-anfc模式数据在北部湾夏季各深度层的SSIM值均大于0.5,表明这两套模式在空间结构的模拟效果上表现较为突出;

④冬季ENS系列3套模式和ECCO2模式与观测数据的盐度相关性表现欠佳, GLORYS、GLO-anfc和LFC模式的SSIM值稳定维持在0.5左右,表明这3套模式在冬季北部湾海域温盐空间结构的模拟效果上具有较高的可信度与稳定性;

⑤水团分析结果表明夏季各模式的温盐分布与观测数据较为吻合,冬季各模式盐度模拟的离散程度较大, GLORYS资料在整体上能更好地刻画北部湾冬夏季的水团特征。

参考文献:

- [1] 陈波. 北部湾水系形成及其性质的初步探讨[J]. 广西科学院学报, 1986, 2(2): 92-95, doi: 10.13657/j.cnki.gxkxyxb.1986.02.018.
Chen Bo. Preliminary discussion on the formation and nature of Beibu Gulf water system[J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 1986, 2(2): 92-95, doi: 10.13657/j.cnki.gxkxyxb.1986.02.018.
- [2] 牙韩争, 高劲松, 董德信. 北部湾海表面温度变化特征及其影响因素分析[J]. 广西科学, 2015, 22(3): 260-265, doi: 10.13656/j.cnki.gxkx.20150708.004.
Ya Hanzheng, Gao Jinsong, Dong Dexin. Analysis of variation characteristics and driving factors of sea surface temperature in Beibu Gulf[J]. Guangxi Sciences, 2015, 22(3): 260-265, doi: 10.13656/j.cnki.gxkx.20150708.004.
- [3] 曹振轶, 鲍敏, 管卫兵, 等. 北部湾东北部水团分布及季节变化分析[J]. 海洋与湖沼, 2019, 50(3): 532-542, doi: 10.11693/hyhz20190100007.
Cao Zhentie, Bao Min, Guan Weibing, et al. Water-mass evolution and the seasonal change in northeast of the Beibu Gulf, China[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2019, 50(3): 532-542, doi: 10.11693/hyhz20190100007.
- [4] 李明明, 谭可易, 黄家辉, 等. 北部湾东北部水团和流场季节变化: 2018-2019年观测数据分析[J]. 海洋学研究, 2022, 40(3): 73-85, doi: 10.3969/j.issn.1001-909X.2022.03.007.
Li Mingming, Tan Keyi, Huang Jiahui, et al. Seasonal variation of water masses and current field in the northeastern Beibu Gulf based on observations in 2018-2019[J]. Journal of Marine Sciences, 2022, 40(3): 73-85, doi: 10.3969/j.issn.1001-909X.2022.03.007.
- [5] Chen Zhenhua, Qiao Fangli, Xia Changshui, et al. The numerical investigation of seasonal variation of the cold water mass in the Beibu Gulf and its mechanisms[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2015, 34(1): 44-54, doi: 10.1007/s13131-015-0595-x.
- [6] 姜景忠, 朱兆方. 春末夏初北部湾的水文特征[C]//第十一届全国水动力学研讨会暨第四届全国水动力学学术会议. 无锡: 中国力学学会, 1997: 200-207.
Jiang Jingzhong, Zhu Zhaofang. The hydrological characteristics of the Beibu Gulf in late spring and early summer[C]//The 11th national symposium on hydrodynamics and the 4th national academic conference on hydrodynamics. Wuxi: The Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics, 1997: 200-207.
- [7] 陈胜利, 胡建宇, 朱佳, 等. 2006年夏季北部湾东部海区水团的分析[M]//胡建宇, 杨圣云. 北部湾海洋科学研究论文集(第1辑). 北京: 海洋出版社, 2008: 88-97.
Chen Shengli, Hu Jianyu, Zhu Jia, et al. Water mass analysis in the eastern Beibu Gulf in summer of 2006[M]//Hu Jianyu, Yang Shengyun. Proceedings of marine scientific research in the Beibu Gulf (Vol.1). Beijing: Ocean Press, 2008: 88-97.
- [8] 陈胜利, 胡建宇, 孙振宇, 等. 2006年冬季北部湾东部海区的水团分析[M]//李炎, 胡建宇. 北部湾海洋科学研究论文集(第2辑). 北京: 海洋出版社, 2009: 120-126.
Chen Shengli, Hu Jianyu, Sun Zhenyu, et al. Analysis of water masses in the eastern Beibu Gulf in winter 2006[M]//Li Yan, Hu Jianyu. Proceedings of marine scientific research in the Beibu Gulf (Vol.2). Beijing: Ocean Press, 2009: 120-126.
- [9] Lao Qibin, Zhang Shuwen, Li Zhiyang, et al. Quantification of the seasonal intrusion of water masses and their impact on nutrients in the Beibu Gulf using dual water isotopes[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2022, 127(7): e2021JC018065, doi: 10.1029/2021jc018065
- [10] 国家科委海洋组海洋综合调查办公室. 中越合作北部湾海洋综合调查报告[R]. 北京: 国家科委, 1964.
Science and Technology Committee of the People's Republic of China (STCPRC). Report of Sino-Vietnamese joint comprehensive marine survey in the Beibu Gulf[R]. Beijing: Science and Technology Committee of the People's Republic of China, 1964.
- [11] 俞慕耕, 刘金芳. 南海海流系统与环流形势[J]. 海洋预报, 1993, 10(2): 13-17.
Yu Mugeng, Liu Jinfang. Current system and circulation in the South China Sea[J]. Marine Forecasts, 1993, 10(2): 13-17.
- [12] 苏纪兰, 袁业立. 中国近海水文[M]. 北京: 海洋出版社, 2005: 285-301.
Su Jilan, Yuan Yeli. China offshore hydrology[M]. Beijing: China Ocean Press, 2005: 285-301.
- [13] 姐婷婷. 北部湾环流及其机制的分析[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2005.
Zu Tingting. Analysis of the current and its mechanism in the

- Gulf of Beibu[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2005.
- [14] 杨士瑛, 鲍献文, 陈长胜, 等. 夏季粤西沿岸流特征及其产生机制[J]. 海洋学报, 2003, 25(6): 1-8.
- Yang Shiying, Bao Xianwen, Chen Changsheng, et al. Analysis on characteristics and mechanism of current system in west coast of Guangdong Province in the summer[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2003, 25(6): 1-8.
- [15] 高劲松, 陈波, 侍茂崇. 北部湾夏季环流结构及生成机制[J]. 中国科学: 地球科学, 2015, 45(1): 99-112, doi: 10.1007/s11430-014-4916-2.
- Gao Jinsong, Chen Bo, Shi Maochong. Summer circulation structure and formation mechanism in the Beibu Gulf[J]. *Science China Earth Sciences*, 2015, 58(2): 286-299, doi: 10.1007/s11430-014-4916-2.
- [16] 陈波, 侍茂崇. 北部湾海洋环流研究进展[J]. 广西科学, 2019, 26(6): 595-603, doi: 10.13656/j.cnki.gxkx.20200103.001.
- Chen Bo, Shi Maochong. Advances in study of Beibu Gulf circulation[J]. *Guangxi Sciences*, 2019, 26(6): 595-603, doi: 10.13656/j.cnki.gxkx.20200103.001.
- [17] 夏华永, 李树华, 侍茂崇. 北部湾三维风生流及密度流模拟[J]. 海洋学报, 2001, 23(6): 11-23.
- Xia Huayong, Li Shuhua, Shi Maochong. A 3-D numerical simulation of wind-driven currents in the Beibu Gulf[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2001, 23(6): 11-23.
- [18] Shi Maochong, Chen Changsheng, Xu Qichun, et al. The role of Qiongzhou strait in the seasonal variation of the South China Sea circulation[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2002, 32(1): 103-121, doi: 10.1175/1520-0485(2002)032.
- [19] Gao Jingsong, Mo Lingqing, Lu Hanfang, et al. Spring circulation characteristics and formation mechanism in the Beibu Gulf[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2024, 11: 1398702, doi: 10.3389/fmars.2024.1398702.
- [20] Liu Hailong, Lin Pengfei, Zheng Weipeng, et al. A global eddy-resolving ocean forecast system in China - LICOM Forecast System (LFS)[J]. *Journal of Operational Oceanography*, 2021, 16(1): 15-27, doi: 10.1080/1755876X.2021.1902680.
- [21] Wang Zhou, Bovik A C, Sheikh H R, et al. Image quality assessment: From error visibility to structural similarity[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, 13(4): 600-612, doi: 10.1109/tip.2003.819861.
- [22] Nash J E, Sutcliffe J V. River flow forecasting through conceptual models part I-A discussion of principles[J]. *Journal of Hydrology*, 1970, 10(3): 282-290, doi: 10.1016/0022-1694(70)90255-6.
- [23] 骆明钧, 李骏旻, 丁扬, 等. 基于FVCOM的夏季珠江冲淡水年际变化特征[J]. 海洋科学进展, 2024, 42(2): 221-237, doi: 10.12362/j.issn.1671-6647.20221221001.
- Luo Mingjun, Li Junmin, Ding Yang, et al. Inter-annual variation of the Pearl River diluted water in summer based on FVCOM[J]. *Advances in Marine Science*, 2024, 42(2): 221-237, doi: 10.12362/j.issn.1671-6647.20221221001.
- [24] Large W G, McWilliams J C, Doney S C. Oceanic vertical mixing: A review and a model with a nonlocal boundary layer parameterization[J]. *Reviews of Geophysics*, 1994, 32(4): 363-403, doi: 10.1029/94rg01872.
- [25] 陈飞, 施平, 杜岩, 等. 基于Cressman客观分析的南海北部海区数据同化实验[J]. 热带海洋学报, 2010, 29(4): 1-7, doi: 10.3969/j.issn.1009-5470.2010.04.001.
- Chen Fei, Shi Ping, Du Yan, et al. Assimilation of hydrographic data in the northern South China Sea based on the Cressman objective analysis[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2010, 29(4): 1-7, doi: 10.3969/j.issn.1009-5470.2010.04.001.
- [26] Mellor G L, Yamada T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems[J]. *Reviews of Geophysics*, 1982, 20(4): 851-875, doi: 10.1029/rg020i004p00851.
- [27] 戚蕾, 鲍献文, 丁扬, 等. 渤海海峡水体通量季节和年际变化的数值模拟研究[J]. 海洋科学进展, 2025, 43(3): 552-568, doi: 10.12362/j.issn.1671-6647.20231219001.
- Qi Lei, Bao Xianwen, Ding Yang, et al. Numerical modeling of the seasonal and interannual variability of the water transport through the Bohai Strait[J]. *Advances in Marine Science*, 2025, 43(3): 552-568, doi: 10.12362/j.issn.1671-6647.20231219001.
- [28] Dossa A N, Alory G, Da Silva A C, et al. Global analysis of coastal gradients of sea surface salinity[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(13): 2507, doi: 10.3390/rs13132507.
- [29] 陈昌刚, 丁扬, 姚志刚, 等. 基于FVCOM多种定解条件的数值分析与评估[J]. 海洋科学进展, 2023, 41(3): 397-411, doi: 10.12362/j.issn.1671-6647.20220707001.
- Chen Changgang, Ding Yang, Yao Zhigang, et al. Numerical analysis and evaluation based on multiple definite solution conditions of FVCOM[J]. *Advances in Marine Science*, 2023, 41(3): 397-411, doi: 10.12362/j.issn.1671-6647.20220707001.
- [30] Zheng Weipeng, Lin Pengfei, Liu Hailong, et al. An assessment of the LICOM Forecast System under the IVTT class4 framework[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2023, 10: 1112025, doi: 10.3389/fmars.2023.1112025.
- [31] 黄邦钦, 刘媛, 陈纪新, 等. 东海、黄海浮游植物生物量的粒级结构及时空分布[J]. 海洋学报, 2006, 28(2): 156-164, doi: 10.3321/j.issn:0253-4193.2006.02.021.
- Huang Bangqin, Liu Yuan, Chen Jixin, et al. Temporal and spatial distribution of size-fractionized phytoplankton biomass in East China Sea and Huanghai Sea[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2006, 28(2): 156-164, doi: 10.3321/j.issn:0253-4193.2006.02.021.

Evaluation of modeled temperature and salinity data based on hydrographic observations in the Beibu Gulf

YU Jie¹, FENG Baoxin¹, LI Yiwen², XIE Lingling^{1*}

(1. College of Ocean and Meteorology, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China; 2. School of Ocean Sciences, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: This study systematically evaluates the temperature and salinity simulation performance of seven model products, including five CMEMS (The Copernicus Marine Environment Monitoring Service) data products: GLORYS, Glo-anfc, ENS, and two others, as well as ECCO2 and LFS, in shallow bays based on the temperature and salinity observation data in the Beibu Gulf in summer and winter 2023. The results show that: All seven products can effectively simulate the distribution trends of temperature and salinity in different depth layers of the Beibu Gulf in winter and summer, but there are significant systematic deviations: the temperature is underestimated and the salinity is overestimated in the northern Beibu Gulf, while the temperature is overestimated and the salinity is underestimated in the southern Beibu Gulf; Seasonal comparison shows that the performance of the seven products in summer is significantly better than that in winter. Among them, the Structural Similarity Index (SSIM) values of the GLORYS and GLO-anfc data in each depth layer of the Beibu Gulf in summer are all greater than 0.5, and the SSIM values in winter are also stably maintained at about 0.5, indicating that these two products perform more prominently in the simulation of spatial structure. However, the salinity correlation between the three ENS, ECCO2 data and the observation data in winter are poor, and the correlation coefficients in some depth layers are even negative, indicating that their applicability in the Beibu Gulf needs to be improved.

Key words: Beibu Gulf; temperature and salinity characteristics; numerical models; evaluation