

2016 年苏北近海风场和波浪场多时间尺度变化的数值模拟研究

徐 瑾¹, 曹玉晗², 杨永增³, 董昌明², 王 锦², 朱伟军^{1*}

(1. 气象灾害教育部重点实验室, 江苏 南京 210044; 2. 南京信息工程大学 海洋科学学院, 江苏 南京 210044;
3. 自然资源部 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061)

摘 要: 利用高分辨率的大气和波浪数值模式, 模拟了 2016 年苏北近海的风场和波浪场, 并与卫星高度计资料、散射计风场、再分析资料以及实测浮标资料进行了比较, 验证了模式的准确性。基于这套模式结果, 系统地分析了江苏近海的风场和波浪场的多时间尺度变化: 季节变化、日变化以及季节内变化(台风、寒潮)。分析结果表明: 苏北近海海域的风速、有效波高和涌浪在冬季和秋季较大、春季和夏季较小; 冬季盛行西北风, 常浪向为西北向, 夏季盛行东南风, 常浪向为东南向。风场和波浪场还具有显著的日变化特征, 且日变化存在季节变化规律, 离岸越近海域日变化特征越明显。同时, 江苏近海还会经历季节内尺度的强天气过程的影响, 比如台风和寒潮。

关键词: 苏北近海; 风场; 波浪场; 多时间尺度变化

中图分类号: P731

文献标识码: A

文章编号: 1671-6647(2020)04-0600-24

doi: 10.3969/j.issn.1671-6647.2020.04.006

引用格式: XU J, CAO Y H, YANG Y Z, et al. Numerical simulation of multi-scale temporal variations of sea surface wind and wave field in the offshore area of the northern Jiangsu province[J]. Advances in Marine Science, 2020, 38(4): 600-623. 徐瑾, 曹玉晗, 杨永增, 等. 2016 年苏北近海风场和波浪场多时间尺度变化的数值模拟研究[J]. 海洋科学进展, 2020, 38(4): 600-623.

江苏北部地区(简称苏北)海洋资源丰富,是我国重要的沿海经济带之一。苏北海域(图 1)隶属于南黄海,其水下地貌是我国特有的辐射沙洲地形^[1-2]。该海域的季风影响是不容忽视的^[3];此外,由于海洋和陆地的热容量的不同,海陆热力性质差异导致苏北地区的风场具有明显的日变化特征;同时,由于其他复杂的地质因素以及气象因素使得该海域存在季节内^[4]等多时间尺度变化。风是产生和驱动海浪的主要动力,风场的多时间尺度变化又会引起波浪场的多时间尺度变化^[5-6]。因此,深入研究苏北近海的风场和波浪场的多时间尺度变化,对沿海工程建设、海洋环境保护以及该地区经济发展均有重要的指导意义。

由于苏北特殊的地理位置以及经济发展战略的需求,前人对苏北近海的风场和波浪场开展了很多方面的研究工作。对于苏北近海的风场和波浪场的观测研究,陈燕^[7]利用合成孔径雷达(Advanced Synthetic Aperture Radar, ASAR)资料研究苏北近海风场,并将卫星反演风场同化至数值模式,改进海上风场模拟效果。齐义泉和施平^[8]以 1987—1988 年的卫星高度计遥感资料为主,分析了海面风和波浪基本统计特征及季节分布特征。对于苏北近海的风场和波浪场的数值模拟研究,梅婵娟等^[9]利用第三代海浪模式 WAVEWA-

收稿日期: 2019-07-06

资助项目: 国家重点研发计划“全球变化及应对”重点专项——高分辨率海洋模式关键物理过程参数化方案的研发(2017YFA0604100); 国家全球变化与海气相互作用专项——印-太海洋环境变异与海气相互作用项目(GASI-03-IPOVAI-05); 大洋“十三五”环境资源类项目——西太海山区物理海洋环境及典型海山场流结构(DY135-E2-2-02)和西太平洋上层海洋环流变异海气相互作用过程(DY135-E2-3-01); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目——基于 SWAN 模型的江苏近海风浪时空变化特征研究(SJKY19_0950)

作者简介: 徐 瑾(1995-),女,硕士研究生,主要从事大气和波浪的相互作用方面研究. E-mail: xujin19950308@126.com

*** 通信作者:** 朱伟军(1969-),男,博士,教授,主要从事大气环流异常方面研究. E-mail: weijun@nuist.edu.cn

(李 燕 编辑)

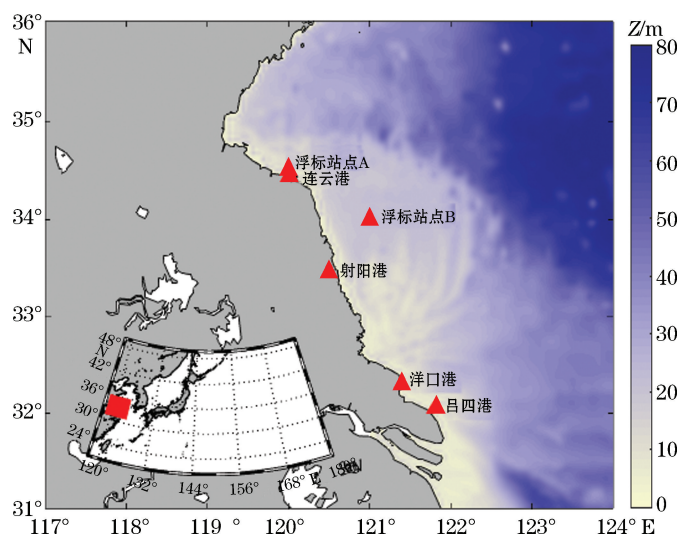
TCH-III 和 SWAN(Simulating Waves Nearshore)模式,分别对黄海海区进行了理想模拟和实际海浪场的模拟,通过与实测资料对比,SWAN 模式能更好地模拟该海区的波浪的基本要素。谭凤^[5]采用中尺度大气模式 WRF(Weather Research and Forecast)来模拟高精度风场数据,采用 FVCOM(Finite Volume Coastal Ocean Model)二维潮流模式模拟近岸流场,采用第三代浅水波浪数值模型 SWAN 海浪模式模拟波浪场,建立了大气-海洋-海浪模型系统,对台风及温带风暴过程中的近岸波浪进行模拟。对于苏北近海风场和波浪场的过程研究,姚琪等^[10]利用 QSCAT/NECP(Quick Scatterometer/National Centers for Environmental Prediction)混合风场数据驱动第三代海浪模式 WAVEWATCH-III,对 2009-01-12 前后的一次冷空气所致的中国海海浪场进行数值模拟,并在国内首次利用来自朝鲜半岛的观测资料对模拟数据的有效性进行检验。谭凤等^[11]建立了 WRF-SWAN 大气海浪模式,以 WRF 模式计算所得的海面以上 10 m 高度处的台风风场过程作为驱动风场,提供给第三代浅水波浪数值模型 SWAN 模型进行波浪计算,并模拟了韦帕台风作用下的波浪过程。徐福敏等^[12]将第三代浅水波浪数值模型 SWAN 模式嵌套于东中国海范围内的 WAVEWATCH-III 模型,模拟了东中国海至长江口的台风浪。对于苏北近海风场和波浪场的季节变化研究,邱桔斐^[13]根据江苏省沿岸各测站实测的多年风资料,分析了江苏沿海风特性,并对江苏海岸风浪数值模式进行了研究,根据风浪相关关系确定了深水区波浪要素,通过第三代浅水波浪数值模型 SWAN 模拟了江苏沿海风浪场,并对江苏沿海的波浪场季节特征进行了分析研究。陈国光等^[14]利用第三代海浪数值模式 SWAN,研究了黄海海浪有效波高的季节变化特征及相关的物理过程。对于苏北近海风场和波浪场的年际变化研究,He 和 Xu^[15]对黄海和渤海进行了 1988—2002 年的风和波浪的后报,并分析了区域波浪波候特征,模式结果与卫星数据得到的结果一致。Zhi 等^[16]利用 NECP/NCAR(National Centers for Environmental Prediction/National Center For Atmospheric Research)再分析资料和 JMA(Japan Meteorological Agency),NECP-GFS(Global Forecast System)模式模拟资料分析了渤海和黄海地区的风场,结果显示其具有明显的年际变化和季节变化。范飞和朱志夏^[17]以 WRF 风场为驱动,运用第三代波浪模型 SWAN 采用嵌套结构,模拟研究了 1990 年 1 月至 2011 年 12 月苏北海域的波浪场,并考虑潮位对波浪的影响,提高了近岸波浪模拟的精度。从以上文献回顾中,我们可以看到前人对苏北近海的风场和波浪场进行了大量的数值模拟和观测研究,对该区域波浪和风场时空变化及其相互关系取得了较深入的了解,但是前人的研究多集中于过程研究、季节变化和年际变化,而对日变化研究较少,从多时间尺度角度研究该区域风场和波浪场的变化也较少。

本文利用 WRF 和 SWAN 模式对苏北近海风场和波浪场进行数值模拟,并将此高精度数据用于研究苏北近海的多时间尺度变化:季节变化、日变化和季节内变化,从而加强对苏北近海的风浪变化规律的认识。

1 研究方法和资料

1.1 研究方法

本研究利用数值模拟的方法来研究苏北近海的风场和波浪场的多时间尺度变化。研究范围选取为(119°~124°E, 31°~36°N),见图 1。综合考虑前人的经验,选择 WRF 和 SWAN 模式来模拟该海区的风场和波浪场的多时间尺度变化:季节变化、日变化和季节内变化。



注:左下角小图为研究海域在太平洋中的位置

图 1 江苏北部近海地区的地形水深

Fig.1 Bathymetry of the offshore area to the north of Jiangsu Province

1.1.1 WRF 模式以及参数设置

WRF 模式是由美国大气研究中心(National Center for Atmospheric Research, NCAR)、美国大气海洋局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)等研究部门共同参与开发研究的新一代中尺度预报模式和数据同化系统,在全球得到了广泛地研究和应用^[18]。WRF 为完全可压的非静力原始方程模式,垂直坐标采用追随地形高度和质量坐标(也称为静压坐标),水平网格采用 Arakawa C-grid^[19],可用于数值天气预报的研究与业务化,数据同化、区域和全球范围的气候模拟和大气-海洋模式的耦合模拟^[20-21]等。

WRF 模式的模拟区域为(117°~130°E, 28°~38°N),见图 2。空间分辨率设置为 $dx=dy=8\ 000\text{ m}$ 。数值模拟范围比研究区域(119°~124°E, 31°~36°N)稍大,其原因是考虑涌浪对近岸波浪的影响。WRF 模式时间积分步长为 30 s,时间积分跨度为 2015-12-27T00:00—2016-12-31T23:00,这是由于 SWAN 模式需要积分一段时间才能达到稳定,前人经验表明提前计算 5 d 模式趋于稳定,所以分析数据是从 2016-01-01T00:00 开始的 1 a 数据。由于需要考虑风场的日变化, WRF 模式模拟设置的输出时间间隔为 1 h。模式中的三维大气初始条件以及随时间变化的边界条件是由美国环境预报中心提供的 FNL(Final Operational Global Analysis data)数据^[22]。

1.1.2 SWAN 海浪模式以及参数设置

荷兰的 Delft 理工大学针对近岸波浪计算的应用,总结了历年波浪能量的输入,耗散和转化的研究成果,对已有的第三代波浪模型特别是基于 WAM(Wave Modelling)模型进行了修改,建立了适用于海岸和河口地区的 SWAN 模型^[23]。第三代海浪模式 SWAN 是目前国际上最通用的波浪数值模式之一^[24],采用谱作用量平衡方程描述风浪生成及其在近岸区的演化过程^[25-26]:

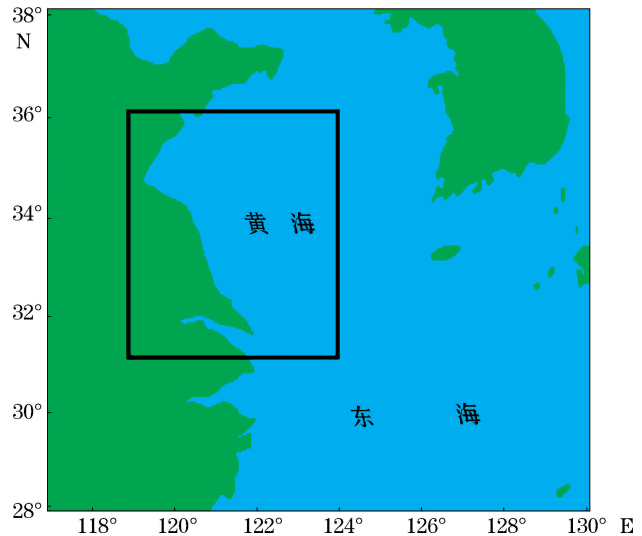
$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} C_x N + \frac{\partial}{\partial y} C_y N + \frac{\partial}{\partial \sigma} C_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta} C_\theta N = \frac{S_{\text{tot}}}{\sigma}, \quad (1)$$

式中, N 为谱作用量; C_x 和 C_y 为波浪在 x 方向和 y 方向的空间传播速度; C_σ 和 C_θ 为波浪在 σ 和 θ 方向的传播速度;方程左边第 1 项表示 N 在时间上的变化率,第 2,3 项为 N 在空间 x 方向和 y 方向上的传播,第 4,5 项为波浪受地形及海流作用在 σ 和 θ 方向的传播变形; S_{tot} 为控制物理过程的源函数项。在浅水中,6 个物理过程决定了源项^[27]:

$$S_{\text{tot}} = S_{\text{in}} + S_{\text{nl3}} + S_{\text{nl4}} + S_{\text{ds,w}} + S_{\text{ds,b}} + S_{\text{ds,br}}, \quad (2)$$

式中, S_{in} 为由风能输入引起的波能增加, S_{nl3} 为三波非线性相互作用项, S_{nl4} 为四波非线性相互作用项, $S_{\text{ds,w}}$ 为白帽破碎引起的波浪衰减, $S_{\text{ds,b}}$, $S_{\text{ds,br}}$ 分别为底摩擦耗散和深度变化诱导的波能损耗。

SWAN 模式模拟的区域为(117°~124°E, 31°~36°N),如图 2 所示。模式空间分辨率为 $0.01^\circ \times 0.01^\circ$ 。所选用的苏北近海的地形水深数据由华东师范大学提供。风场数据采用的是本文运行的 WRF 模式模拟的 10 m 高处风场,模式设置的时间步长为 1 min,时间积分是 1 a, 2015-12-27T00:00—2016-12-31T23:00,模式输出的时间间隔为 1 h。模式边界场资料为美国大气海洋局 NOAA 提供的 WAVEWATCH-III 模拟的全球波浪数据集。初始和边界谱形为 JONSWAP 谱^[28],考虑非线性四波相互作用、水深变化造成的破碎以及底摩擦效应,其波浪破碎指数取为 0.68;选择的数值方案为非稳定的 2 维数值计算,风与波浪方向选择航海



注:全图区域为 WRF 模式模拟的区域,

黑框内区域为 SWAN 模式模拟的区域

图 2 WRF 和 SWAN 模式模拟区域

Fig.2 Simulation domains of WRF and SWAN models

公约确定的方向,即来向;离散频率范围为 0.04~1.00 Hz。

1.2 资料收集

1) 浮标站点的实测资料

本文收集了图 1 所示的浮标站点 A 和 B 的风速和有效波高实测资料,验证大气和波浪模式模拟的风速和有效波高结果的准确性。资料采样的时间间隔为 1 h。

2) 卫星高度计资料

本文使用卫星高度计资料验证 SWAN 模拟的有效波高。作为研究海洋海面特征以及其变化的新手段,近年来卫星高度计资料在海洋波浪研究中的应用日渐增多。卫星高度计是一种指向星下的主动式雷达,通常工作在 Ku 波段或者 C 波段,高度计垂直向下发射脉冲信号经过地球表面反射后回到接受天线,通过测量脉冲的往返时间可以确定卫星质心到星下点的距离,进而计算星下点的海平面高度,通过分析雷达后向散射截面和波形,可以获取海面风速和有效波高信息。海平面高度、海面风速和有效波高是卫星测量的 3 个基本参数,而波浪跨零周期、谱峰周期和波龄是由卫星测量基本参数雷达散射截面、海面风速和有效波高的衍生量。

3) 卫星遥感风场资料

本文使用 ASCAT 卫星散射计资料验证大气模式模拟的风场。ASCAT 海洋风场产品是通过获取后向散射系数来探测海洋表面的粗糙度,再根据海洋表面粗糙度通过地球物理模型来反演海洋表面的风速和风向,所得到的风场产品为 10 m 高度的风。ASCAT 的工作频率为 C 波段(5.255 GHz),C 波段的海面向后散射系数对于海面风矢量的变化和降水都较为敏感,但是 C 波段的散射计性能受降雨的影响要小于 Quick-SCAT 所使用的工作频率 Ku 波段的散射计^[29]。ASCAT 卫星遥感风资料时间分辨率为 12 h,空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。

4) NECP 再分析产品

本文使用再分析产品 FNL 数据作为 WRF 模式的初始条件和边界条件。FNL 数据包含 27 个大气层与地面层,每日有 4 个时次数据,分别是 00:00,06:00,12:00 和 18:00,空间分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 。

5) ECMWF (European Centre for Medium Range Weather Forecasts) 再分析资料

ECMWF 再分析资料 ERA5 (ECMWF Reanalysis 5) 是由欧盟资助、ECMWF 运营的哥白尼气候变化服务 (Copernicus Climate Change Service, C3C) 打造的最新一代再分析资料。ERA5 数据水平分辨率为 31 km,包含从地表至 0.01 hPa(距地面约 80 km)共 137 个模式层,时间分辨率为 3 h。ERA5 将更多的历史观测数据尤其是卫星数据利用到先进的数据同化和模式系统中,用以估计更为准确的大气状况。ERA5 提供的变量 240 种,其中包括耦合的海浪模式所提供的波高、波向等变量,方便用户更准确地分析过去大气至海洋的状态^[30]。在本文中,ERA5 数据用于验证 WRF 和 SWAN 模式模拟结果。

6) WAVEWATCH-III 数据

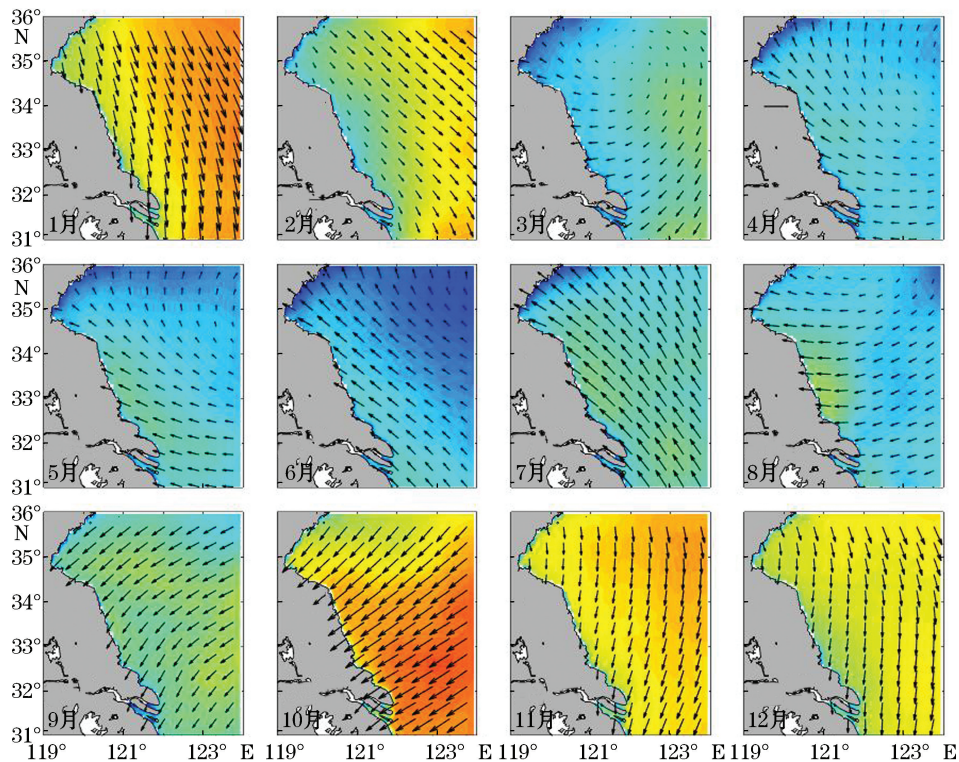
本文使用美国大气海洋局 NOAA 提供的 WAVEWATCH-III 模拟的波向、波周期以及有效波高作为 SWAN 模式的边界条件。WAVEWATCH-III 是 NOAA/NECP 在 WAM 模式的基础上发展的第三代海浪模式,使用了能量平衡方程,可以应用于任意浅水区^[31]。该数据时间分辨率为 1 h,空间分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$,可提供区域或全球范围内的有效波高、波向和峰值波周期等波浪参数。

2 模式结果验证

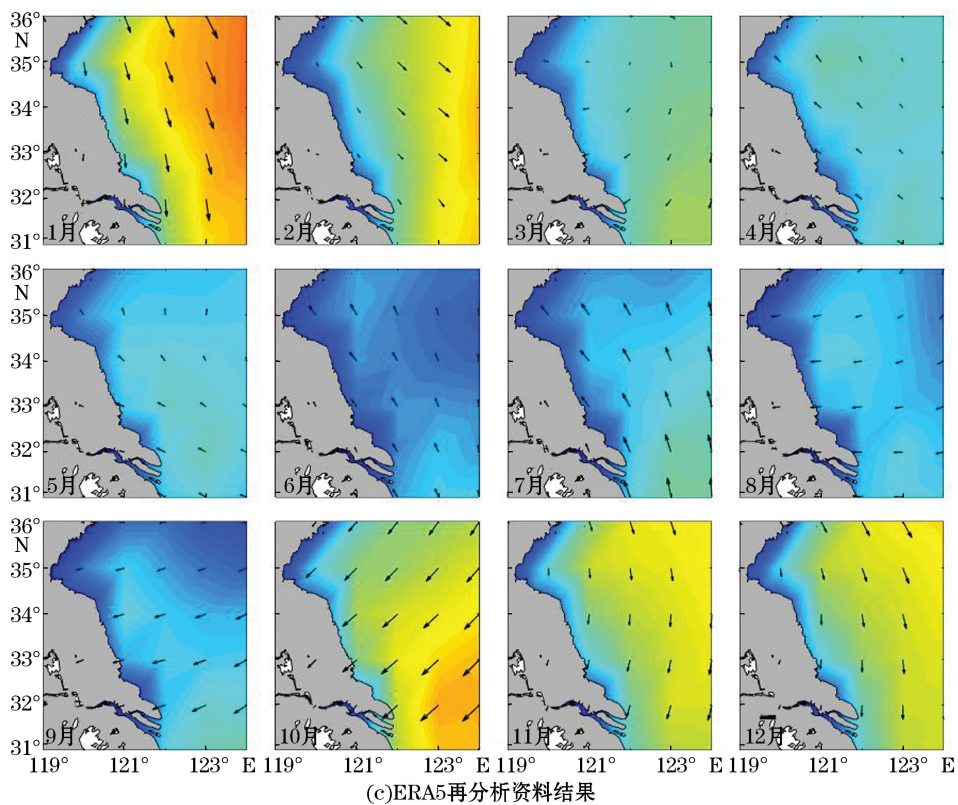
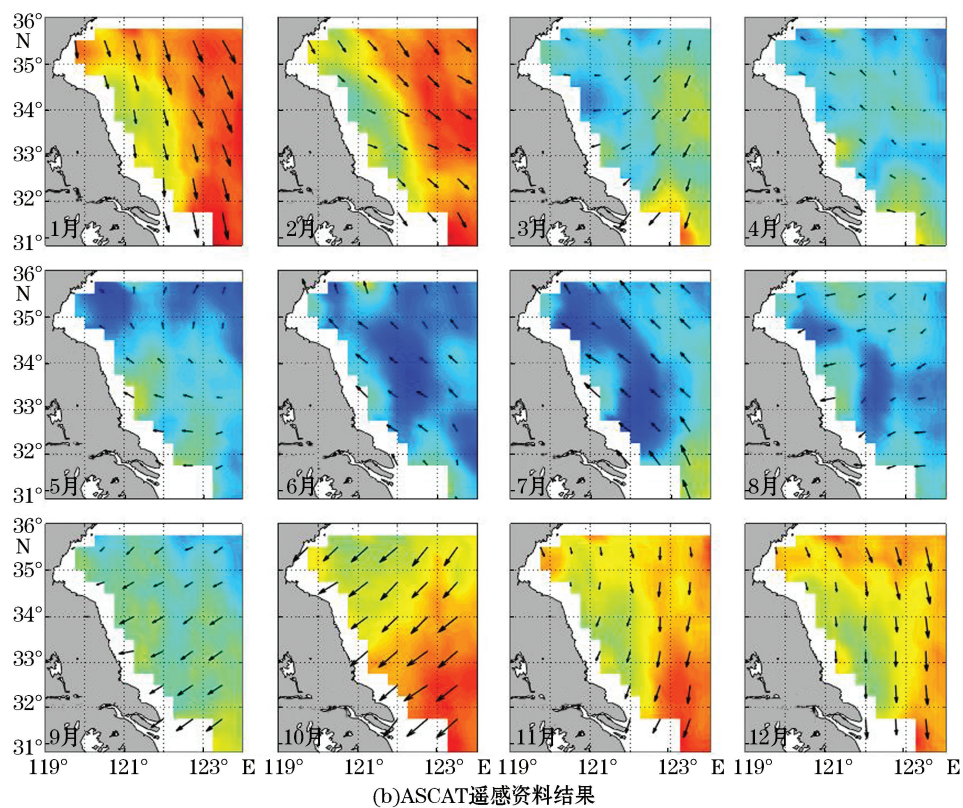
2.1 与卫星遥感资料和再分析资料的比较

为了证明模式结果的准确性,本文选取了卫星散射计资料 ASCAT 的风场、卫星高度计资料的有效波高

以及再分析 ERA5 的风场和波浪场资料与 WRF 和 SWAN 模式分别模拟的风场和波浪场结果进行比较。图 3 为 WRF 模式模拟的 12 个月月平均风场、ASCAT 的 12 个月月平均风场以及 ERA5 再分析风场资料 12 个月月平均风场。在时间分布上, WRF 模式模拟的风速 1 月、2 月、10 月、11 月、12 月偏大, 而 3—9 月的风速偏小, 这与 ASCAT 遥感资料和 ERA5 再分析资料在 12 个月风速的时间变化一致; 在空间分布上, WRF 模式模拟的 1 月、2 月、3 月、9 月、10 月、11 月、12 月风速自西向东逐渐增大, 而 4—8 月风速在岸线附近较大, 在外海风速较小, 这与 ASCAT 遥感资料和 ERA5 再分析资料在 12 个月风速的空间分布一致; WRF 模式模拟的风向在 1 月、2 月、12 月为西北向, 3 月、8 月、9 月、10 月、11 月为东北向和偏北向, 4 月、5 月、6 月、7 月、8 月为东南向, 这与 ASCAT 遥感资料和 ERA5 再分析资料在 12 个月风向分布一致。图 4 为 SWAN 模式模拟的 12 个月月平均波浪场、卫星高度计的 12 个月月平均有效波高以及 ERA5 再分析风场资料 12 个月月平均波浪场。该图表明在时间分布上, SWAN 模式模拟的 1 月、2 月、3 月、9 月、10 月、11 月、12 月有效波高偏大, 而 4—8 月的有效波高偏小, 这与卫星高度计及 ERA5 再分析资料的有效波高时间变化一致; 在空间分布上, SWAN 模式模拟的有效波高自西向东逐渐增大, 这与卫星高度计及 ERA5 再分析资料在 12 个月有效波高的空间分布一致; 由于卫星高度计遥感资料没有波向数据, 模式波向结果的对比只能与 ERA5 再分析资料进行对比, SWAN 模式模拟的波向在 1 月、2 月、12 月为西北向, 3 月、8 月、9 月、10 月、11 月为东北向和偏北向, 4 月、5 月、6 月、7 月为东南向, 8 月为东向, 与 ERA5 再分析资料在 12 个月波向分布大致一致。因此, 通过以上将 WRF 和 SWAN 模式模拟的风场和波浪场的结果与 ASCAT 卫星散射计风场资料、卫星高度计遥感的有效波高资料和 ERA5 再分析资料的风场和波浪场进行比较, 可以得到结论: 模式模拟的高精度风场和波浪场的结果是可靠的。

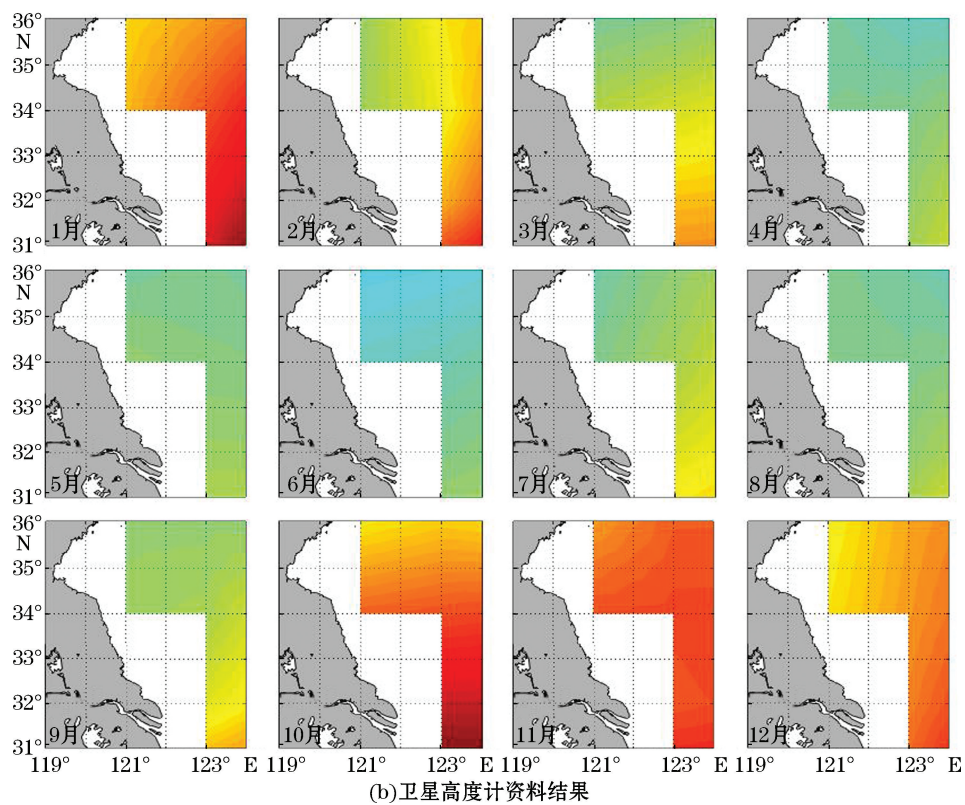
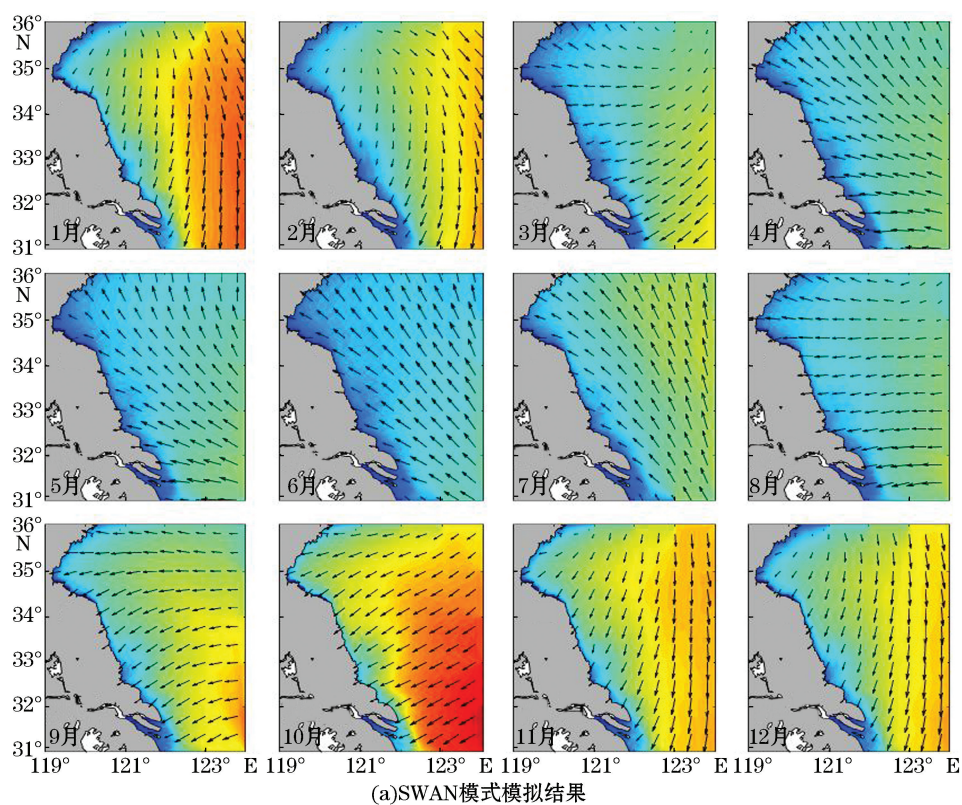


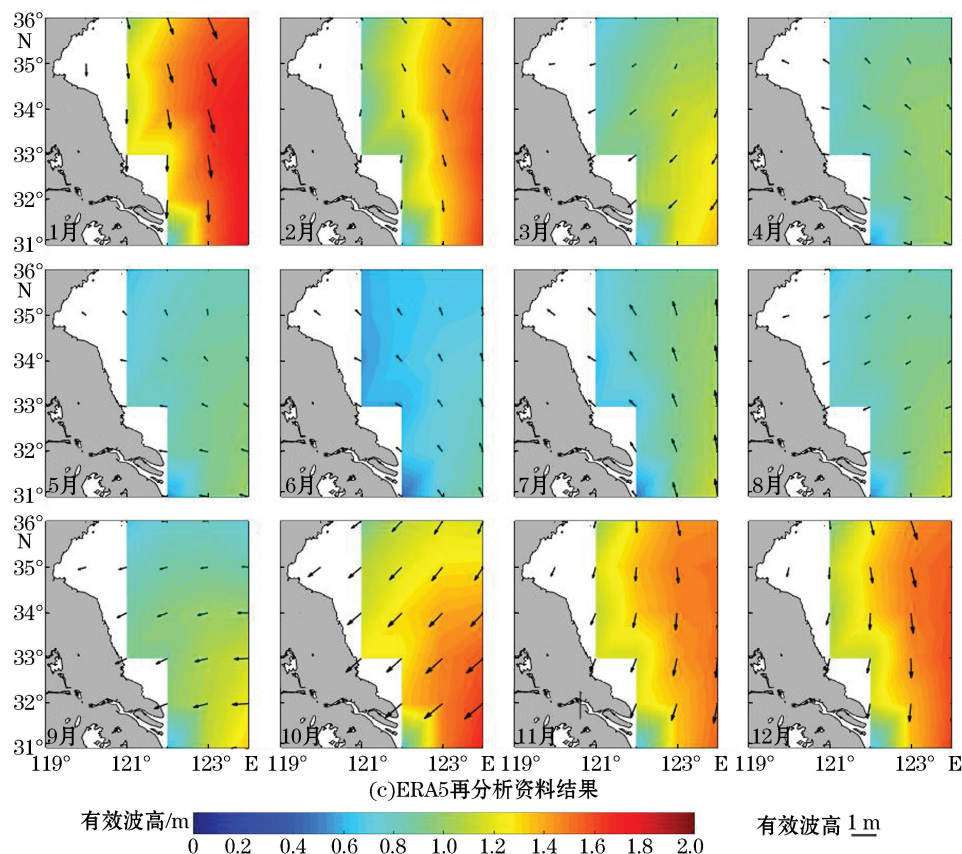
(a) WRF 模式模拟结果



风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) 3 4 5 6 7 8 9 10 风速 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

图3 WRF,ASCAT 和 ERA5 苏北近海 2016 年 12 个月月平均风场对比
Fig.3 Comparison of monthly wind fields of WRF, ASCAT and ERA5 in offshore areas to the north of Jiangsu Province in the year 2016





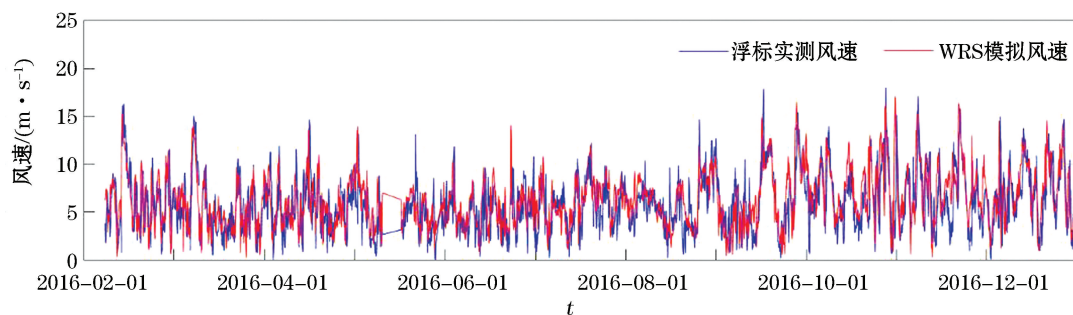
注:等值线表示为有效波高的高度,流线的方向表示波向,流线的长度表示为有效波高

图 4 SWAN、卫星高度计和 ERA5 苏北近海 12 个月月平均波浪场对比

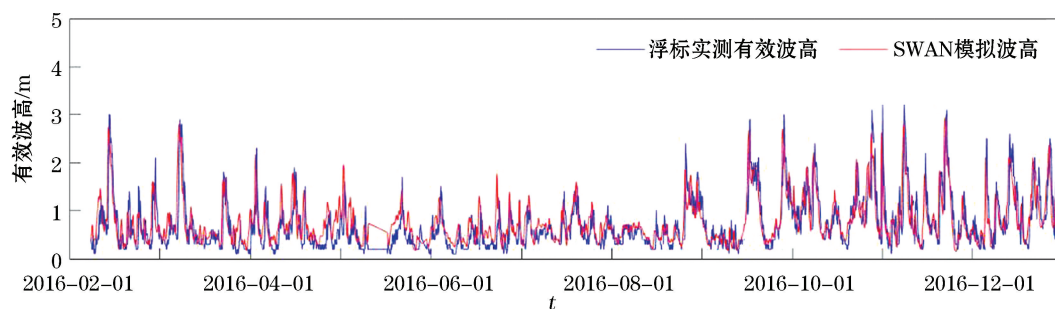
Fig.4 Comparison of monthly wave fields of WRF, Satellite Altimeter and ERA5 in offshore areas to the north of Jiangsu Province in the year 2016

2.2 与实测浮标资料的比较

为进一步证明模式结果的可靠性,本文收集了浮标站点 A 和 B 的实测资料,用于和模式结果进行比较。图 5 和图 6 分别为浮标站点 A 和 B 的风场和波浪场的观测值和模拟值对比图,该图表明,2 个浮标站点的风速和有效波高变化趋势一致,风速和有效波高的最大值较为接近,差别主要体现在浮标站点 B 的实测有效波高峰值普遍比模拟结果的有效波高峰值要大。总体上结果较好,但是模拟结果还是存在一定的误差,这主要是由于模式边界条件和物理过程的参数化以及地形精度等因素所致。表 1 展示了实测的 2 个浮标站点和模式资料对比后的相关系数、平均值、误差和标准差,从图中可以看出,浮标站点 A 的风速和模式结果的相关系数为 0.43,浮标站点 A 的有效波高、浮标站点 B 的风速和有效波高的相关系数都超过 0.6,结果较好。从平均值上看,模拟的风速和有效波高在浮标站点 B 与实测资料较为接近,在浮标站点 A 的风速与实测资料较为接近,有效波高的误差偏大。从标准偏差上看,模拟的风速和有效波高在浮标站点 B 标准偏差较小,在浮标站点 A 的风速和有效波高的标准偏差偏大。综上所述,通过与浮标站点 A 和 B 的实测资料比较,可以看到在浮标站点 B 模拟结果与实测较为接近,在浮标站点 A 模拟结果误差偏大。图 7 为浮标实测资料的观测结果与模式模拟结果的相关性散点图,该图表明实测结果与模拟结果相关性较好,尤其是实测风速与模拟风速的相关性,这进一步验证了模式模拟的高精度风场和波浪场的结果是可靠的。



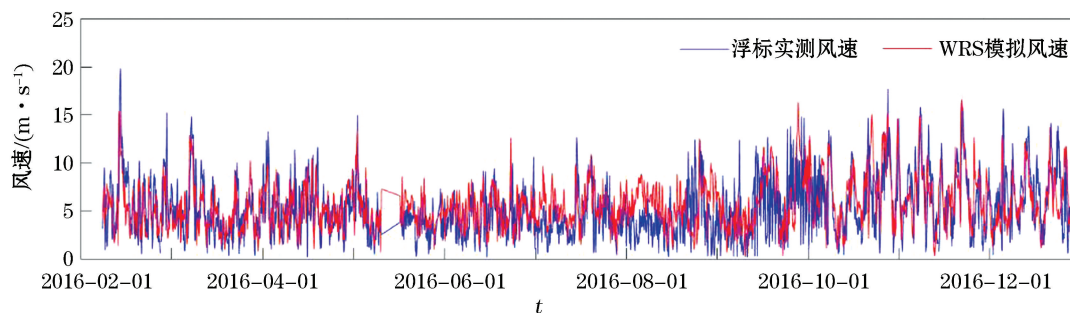
(a) 实测风速与WRF模式模拟风速



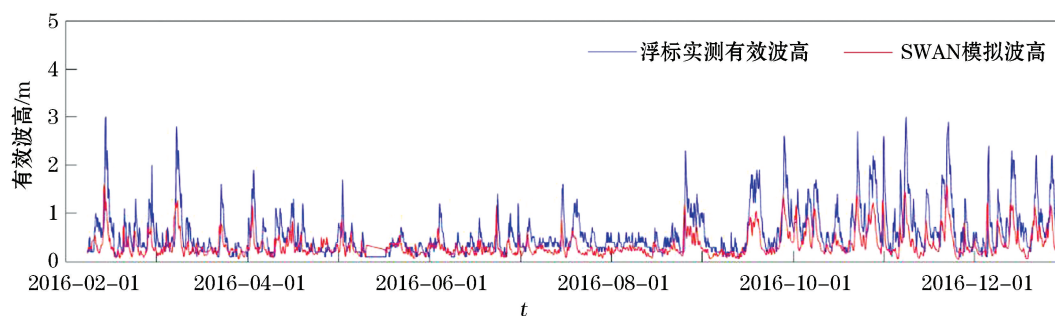
(b) 实测有效波高与SWAN模式模拟有效波高

图 5 浮标站点 A 的实测资料与 WRF、SWAN 模拟资料的时间序列对比

Fig.5 Comparison of wave height between observations and WRF and SWAN simulations at the buoy station A



(a) 实测风速与WRF模式模拟风速



(b) 实测有效波高与SWAN模式模拟有效波高

图 6 浮标站点 B 的实测资料与 WRF、SWAN 模拟资料的时间序列对比

Fig.6 Comparison of wave height between observations and WRF and SWAN simulations at the buoy station B

表 1 两个浮标站点与模式资料模拟的风速和有效波高对比

Table 1 Comparisons between measured data and model simulated results of two buoy stations

浮标站点名称以及变量	相关系数	模式平均值	实测平均值	误差(模式平均—实测平均)	标准差
浮标站点 A 的风速	0.43	5.24	5.64	−0.40	1.74
浮标站点 A 的有效波高	0.69	0.59	0.34	0.25	0.17
浮标站点 B 的风速	0.62	5.87	6.26	−0.39	1.60
浮标站点 B 的有效波高	0.73	0.70	0.76	−0.06	0.13

注:其中风速平均值和误差的单位为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,有效波高平均值和误差的单位为 m

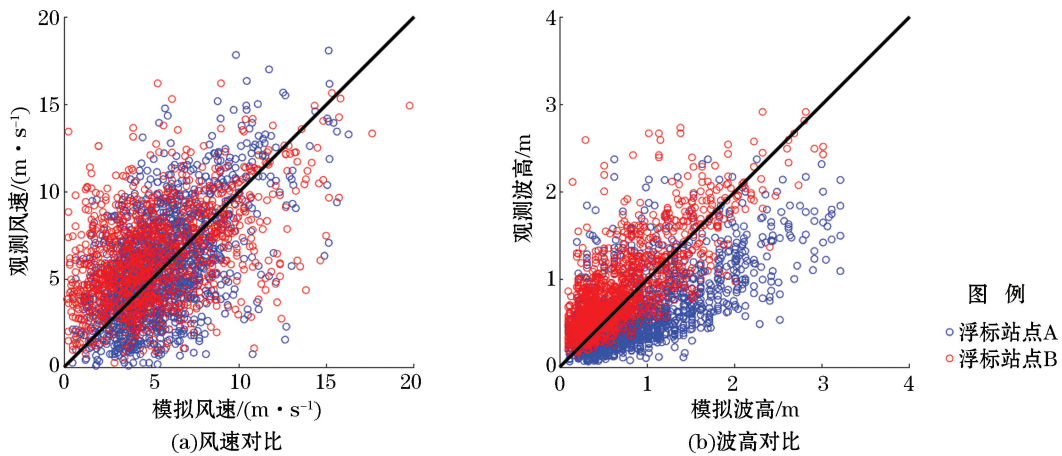


图 7 实测资料与模式结果对比验证

Fig.7 Comparisons between the measured data and model simulated results

3 结果分析

3.1 年平均态

对研究区域的风场和波浪场两个矢量场进行年平均。矢量的时间平均有 2 种计算方法:一种是标量平均法,分别计算速度大小和方向的平均值;另一种是矢量平均法,即先对东分量(u)和北分量(v)进行平均,然后计算平均风速的大小和方向^[32]。本文采用第一种方法,即标量平均。2016 年苏北近海的风场、波浪场、涌浪场和波周期的年平均空间分布如图 8 所示,结果表明,苏北近海海域全年平均风速自西北向东南逐渐增加,最大平均风速不超过 7.5 m/s ,全年平均风向为东北向,呈顺时针旋转。苏北近海海域全年平均有效波高自西北向东南逐渐增加,最大平均有效波高不超过 2 m ,全年平均波向为东北向,呈顺时针旋转;将全年平均的风场和波浪场进行比较,全年平均的风速和有效波高的分布以及风向和波向的分布特征一致,因为风是驱动波浪运动的主要动力。涌浪场自东向西逐渐升高,大值区位于东南部的外海海域,涌浪的平均有效波高不超过 0.5 m 。波周期的变化自西向东逐渐增加,且平均波周期不超过 8 s ,且波周期多在 $4 \sim 8 \text{ s}$,表明苏北近海的波浪多为风生浪。

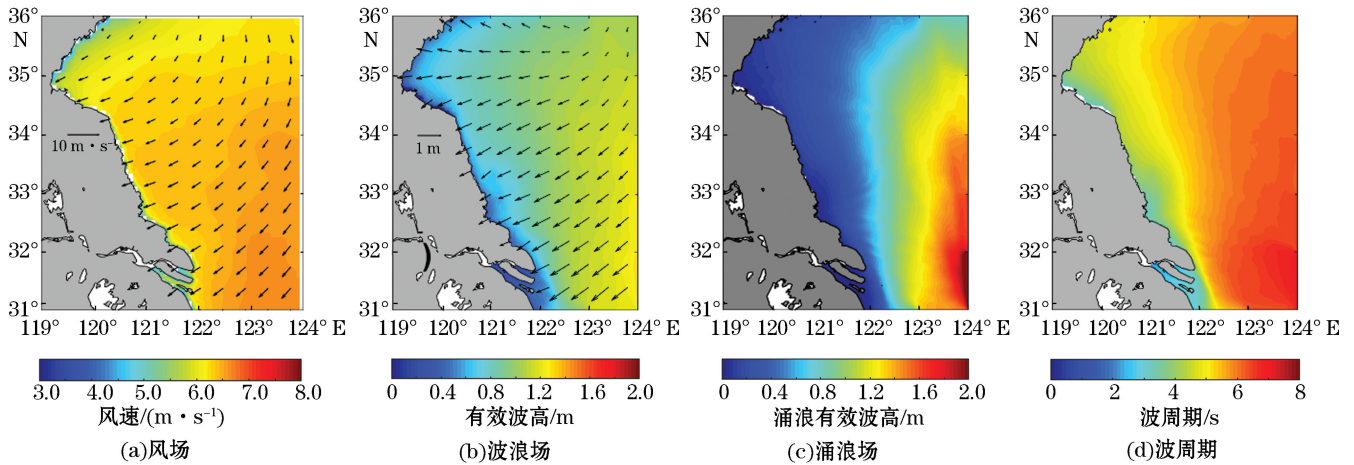


图8 苏北近海 2016 年年平均风场、波浪场、涌浪场和平均波周期

Fig.8 Annual averaged wind field, wave field, swell field and average wave period in 2016

3.2 季节变化

由于苏北近海处于东亚季风区,风场、波浪场和涌浪场存在着明显的季节变化。图 9 为 2016 年苏北近海的季节平均风场图。由图 10 可见,苏北近海海域冬季盛行西北风,风速最大,这是由于海陆热力性质的差异导致冬季亚洲大陆上生成了一个强大的冷性高压(蒙古高压),而苏北近海地区位于高压的顶前部以及前部,盛行西北风及北风;苏北近海海域春季盛行东风以及偏东风,风速较低;苏北近海海域夏季盛行东风和东南风,这是由于地球的公转导致夏季太阳直射点集中在北半球,太平洋上的副热带高压加强,从海上向大陆西伸北抬,苏北近海海域位于副热带高压的底后部,夏季风速较小,在陆地和近海的交界处存在着大值区,原因是夏季大陆和海洋的温差较大,从而温度及气压梯度在岸线处大导致近岸风速较大;苏北近海海域秋季盛行东北风,风速较大,自西向东逐渐增加。对比 4 个季节的平均风场图,可以得到如下结论:冬季风速最大,且冬季风速梯度也最大,其次秋季的风速较大,而春季和夏季风速较小,且风速梯度也较小。原因是冬季极涡分裂南下造成中纬度地区斜压性比夏季更强,因此冬季更多的斜压能转为动能,导致冬季温度梯度大、气压梯度大,从而风速及其梯度大,而夏季则相反。

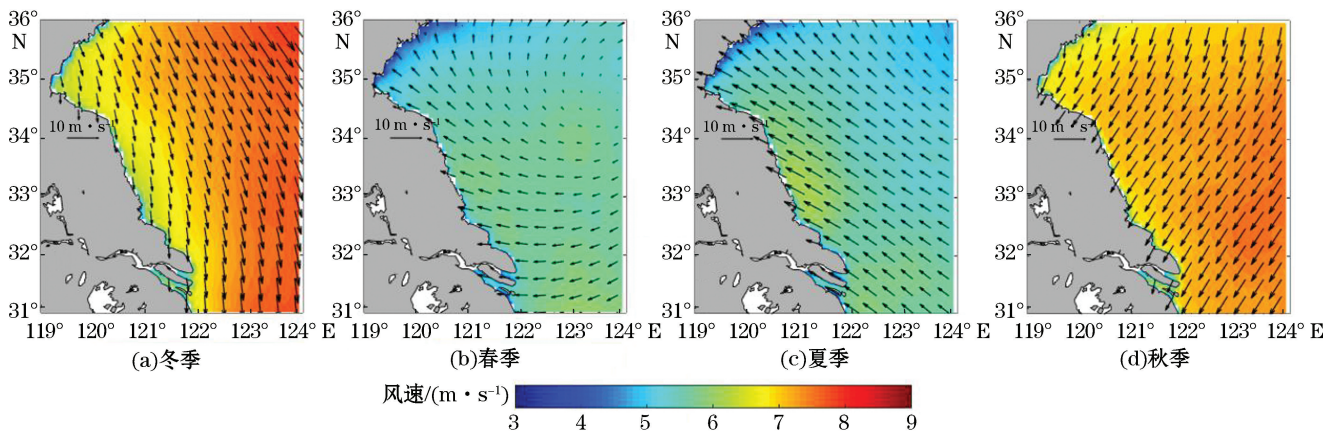


图9 苏北近海地区 2016 年季节平均的风场图

Fig.9 Seasonal wind fields of 2016

图 10 为 2016 年苏北近海的季节平均波浪场。由图 10 可见,2016 年苏北近海 4 个季节的有效波高自西向东逐渐增大;冬季的有效波高最高,秋季次之,春季和夏季的有效波高最小;最大季节平均有效波高不超过 2 m;冬季和秋季的有效波高梯度较大,春季和夏季的有效波高梯度较小。冬季的常浪向为北向,春季的常浪向为偏东向,夏季的常浪向为东南向,秋季的常浪向为东北向。

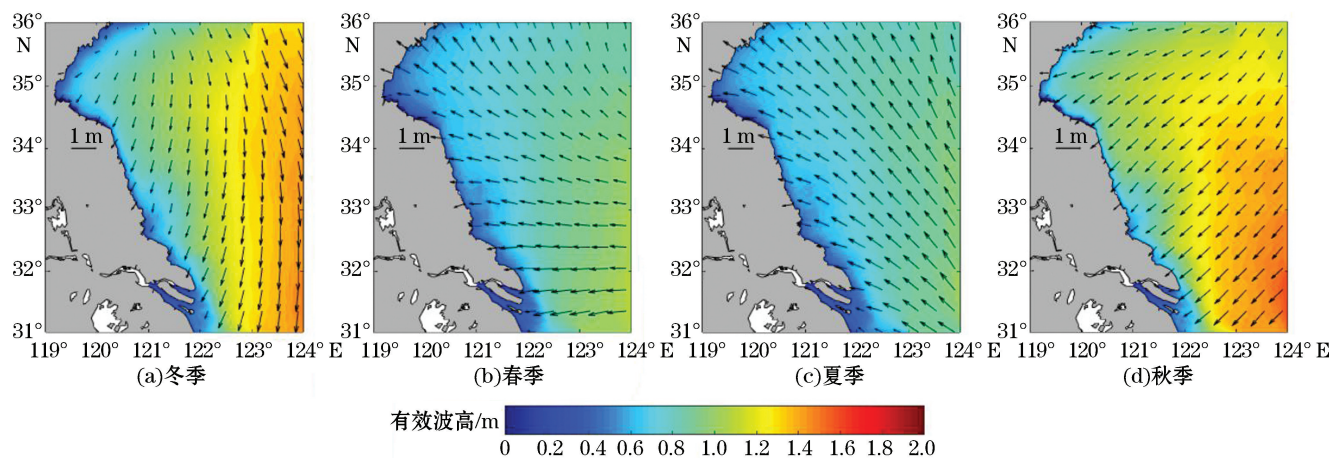


图 10 苏北近海地区 2016 年季节平均的波浪场

Fig.10 Seasonal wave fields of 2016

图 11 为 2016 苏北近海的季节平均涌浪场。由图 11 可见,涌浪场的有效波高自近海至外海逐渐增大,在苏北近海的东南海域存在着大值区;冬季和秋季的涌浪较高,夏季和春季的涌浪较低。原因为冬季北半球的极涡分裂南下导致等压线密集,大气的斜压性增强从而导致风的梯度增加,北半球海域上空局地风场的增大,会导致传播至苏北近海的涌浪场增大。

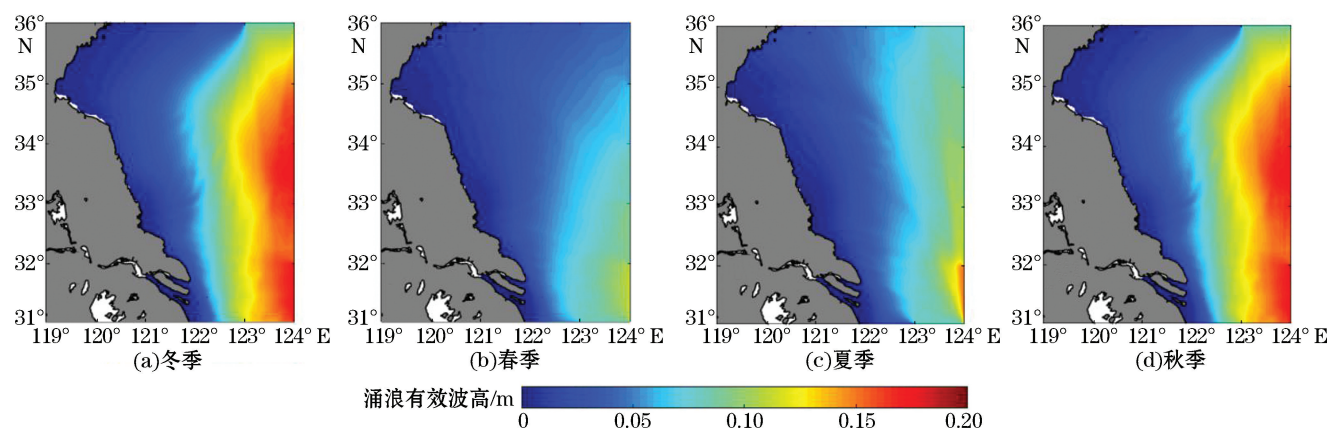
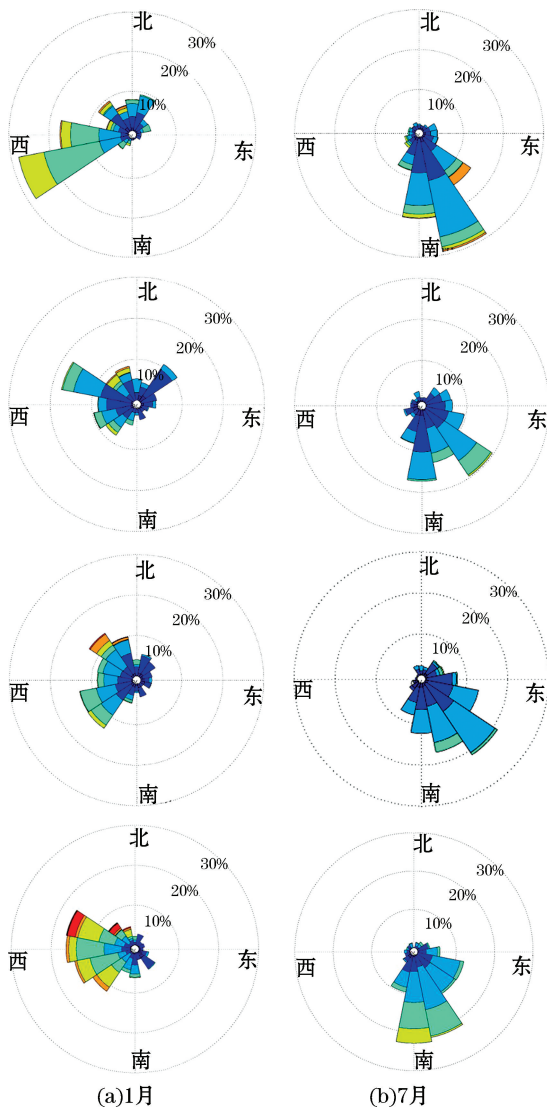


图 11 苏北近海地区 2016 年季节平均涌浪场

Fig.11 Seasonal swell fields of 2016

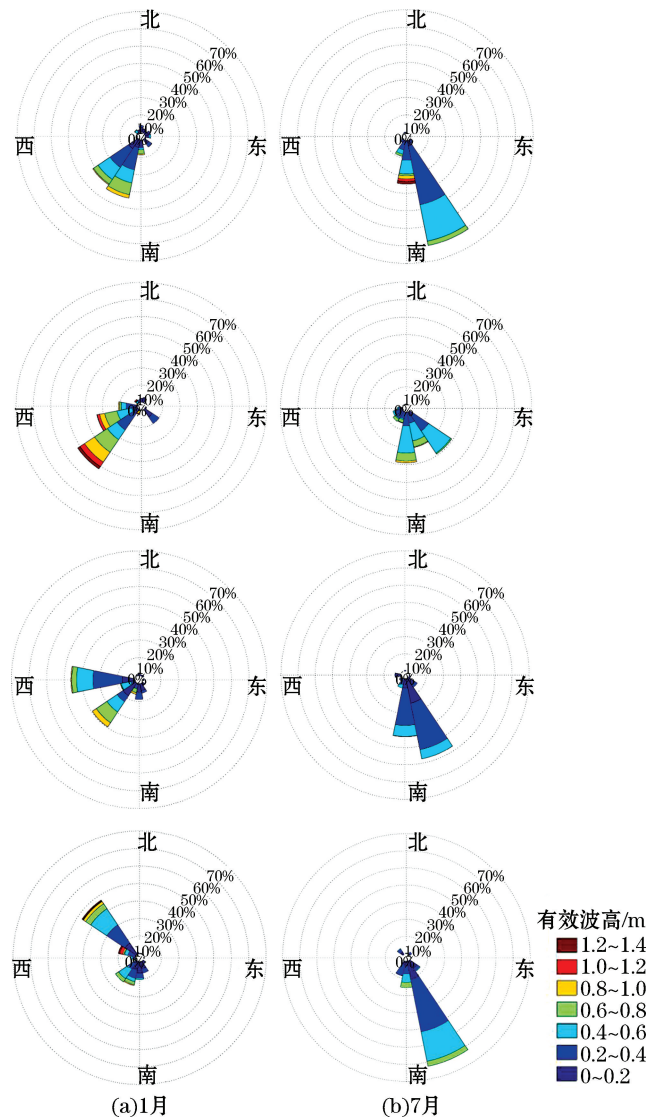
为了进一步研究苏北近海海域风场和波浪场的季节变化特征,本文选取了连云港、射阳港、洋口港和吕四港作为主要研究站点,分别展示了这 4 个站点风场和波浪场的风玫瑰图,见图 12 和 13。图 12 为 4 个港口风场的玫瑰图,结果表明,冬季的风速偏大,夏季的风速偏小;冬季 4 个港口盛行偏西风,也有东风分量存在,但出现的频次较少;夏季 4 个港口盛行东南风,北风出现的频次较少,这与图 9 的风场季节平均图结果一致。图 13 为 4 个港口波浪场的玫瑰图,该图表明,冬季的有效波高较大,夏季的有效波高较小;冬季的常浪向为偏西向,有部分东南向存在,但出现频次较少,夏季的常浪向为东南向,出现频次最高,次常浪向为南向,这与

图 10 的波浪场季节平均图一致。



注:各分图中从上到下依次为连云港、射阳港、洋口港、吕四港
图 12 苏北近海地区 4 个港口 1 月和 7 月的风玫瑰图

Fig.12 Rose maps of wind in January and July at the four ports



注:各分图中从上到下依次为连云港、射阳港、洋口港、吕四港
图 13 苏北近海地区 4 个港口 1 月和 7 月的波浪玫瑰图

Fig.13 Rose maps of waves in January and July at the four ports

3.3 日变化

苏北近海海域不仅由于季风而存在着明显的季节变化,还由于海陆热力性质差异,导致白天和夜晚的海陆热力分布不均匀。因此在近岸附近海域存在着很强的斜压性,导致冬季白天吹陆风、晚上吹海风,而夏季白天吹海风、晚上吹陆风,风场存在着日变化。海陆风的存在会对波浪场产生影响,波浪场也存在日变化。

本文首先研究苏北近海风速和有效波高的日变化。选取苏北海域 4 个重要港口:连云港、射阳港、洋口港以及吕四港,参照 Hughes^[33] 的做法,将一天分为 24 个时刻得到每个时刻的年平均风速(图 14a)。由图 14a 可见,风速有明显的日变化。4 个港口的年平均风速在 24 个时刻的变化中,连云港和吕四港的变化十分接近,射阳港和洋口港的变化相似。连云港和吕四港的日变化年平均风速明显大于射阳港和洋口港的日变

化年平均风速。连云港和吕四港的年平均风速最大时刻为 16:00—18:00,射阳港和洋口港的年平均风速最大时刻为 14:00—16:00;连云港和吕四港的年平均风速最小时刻为 00:00—02:00,洋口港和吕四港的年平均风速最小时刻为 02:00—04:00。最大日变化的年平均风速处的变化较剧烈,而最小日变化的年平均风速处的变化较缓。出现这种现象的原因为日出时太阳的短波辐射作用于海表面,太阳的短波辐射和下垫面的长波辐射加热大气使得大气迅速升温,从而海陆间温度梯度增大,根据理想气体公式 $P = \rho RT$ 可得,温度梯度的增大会导致气压梯度的增大,从而使得风速增大;日落后太阳短波辐射消失,海表面的长波辐射加热大气,但不足以抵消掉大气冷却的热量,因此日落后温度梯度会缓慢减小,风速也缓慢降低。

选取苏北地区 4 个重要港口,将一天分为 24 个时刻得到每个时刻的年平均有效波高(图 14b)。该图表明,有效波高也存在着日变化,但并没有风速的日变化明显。4 个港口的年平均有效波高在 24 个时刻的变化中,连云港和洋口港的变化十分相近,射阳港和吕四港的变化相似。连云港和洋口港日变化的年平均有效波高最大,其次为射阳港,日变化的年平均有效波高最小为吕四港。连云港和洋口港日变化的年平均有效波高最大时刻在 16:00—18:00,射阳港和吕四港日变化的年平均有效波高最大时刻在 14:00—16:00;连云港和洋口港日变化的年平均的有效波高最小时刻在 04:00—06:00,射阳港和吕四港日变化的年平均有效波高最小时刻在 00:00—02:00。最大日变化的年平均有效波高处的变化较剧烈,而最小日变化的年平均有效波高处的变化较缓,与年平均风速的日变化特征一致。

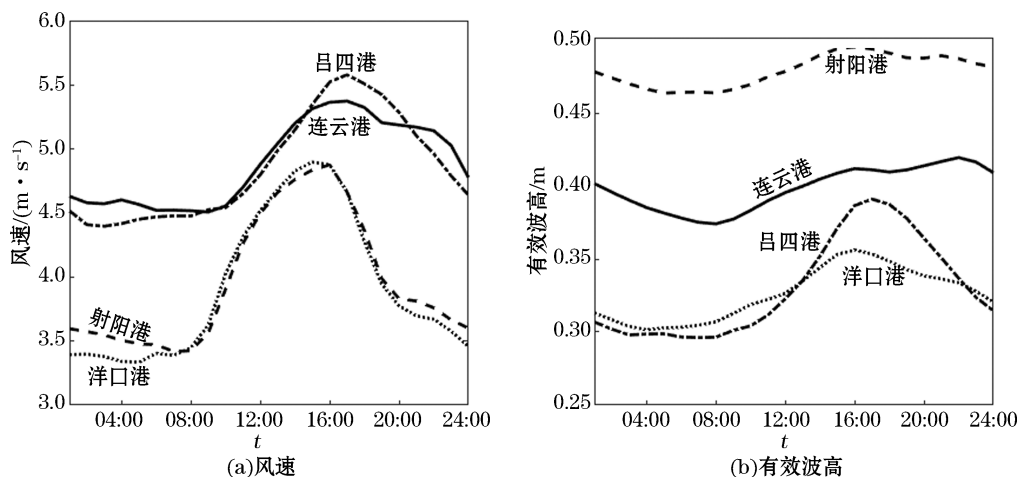


图 14 苏北近海地区 2016 年 4 个港口年平均风速和有效波高 24 个时刻的变化

Fig.14 Diurnal variations of wind speed and significant wave height at the four ports

由于苏北近海的风场和波浪场存在着季节变化,苏北近海风速和有效波高的日变化也会存在季节变化。如图 15,将 4 个港口(连云港、射阳港、洋口港以及吕四港)一天分为 24 个时刻得到每个时刻的四季平均风速和有效波高。连云港春季和夏季的季节平均风速在 16:00 存在极大值,08:00 存在极小值;秋季和冬季的季节平均风速在 09:00—10:00 存在极大值,15:00—16:00 存在极小值;图中明显表明连云港春夏季的季节平均日变化强于秋冬季。射阳港和洋口港的风速日变化相似,射阳港和洋口港春季和夏季的季节平均风速在 18:00 存在极大值,08:00 存在极小值;冬季和秋季的季节平均风速在 16:00 存在极大值,00:00 存在极小值;图中明显表明射阳港和洋口港的春夏季的季节平均日变化强于秋冬季。吕四港春季和夏季的季节平均风速在 16:00—17:00 存在极大值,9:00 存在极小值;秋季和冬季的季节平均风速日变化不明显;图中明显表明吕四港的春夏季的季节平均日变化强于秋冬季。综上所述,苏北近海四个港口的风速日变化存在着季节变化,春季和秋季的风速日变化剧烈,秋冬季的日变化较缓。连云港和射阳港的季节平均有效波高变化相似,连云港和射阳港夏季的季节平均有效波高在 19:00—20:00 存在极大值,极小值不明显;其余季节的季节平均有效波高的日变化不明显;洋口港和吕四港春季和夏季的季节平均有效波高在 17:00—18:00 存在极大

值,极小值不明显;秋季和冬季的季节平均有效波高的日变化不明显。对于有效波高,苏北近海四个港口的有效波高日变化存在着季节变化,夏季的有效波高的日变化最剧烈,其次为秋季,秋冬季的季节平均有效波高的日变化不明显。对于有效波高,苏北近海四个港口的有效波高日变化存在着季节变化,夏季的有效波高的日变化最剧烈,其次为秋季,秋冬季的季节平均有效波高的日变化不明显。风速和波高的日变化存在季节变化的原因是春夏季北半球温度升高,导致下垫面升温从而会破坏稳定大气的“上热下冷”结构,导致春夏季的大气层结不稳定,天气系统活动频繁,因此风速和有效波高会随着天气系统活跃产生剧烈的变化,秋冬季与之相反,因此日变化也较为平缓。

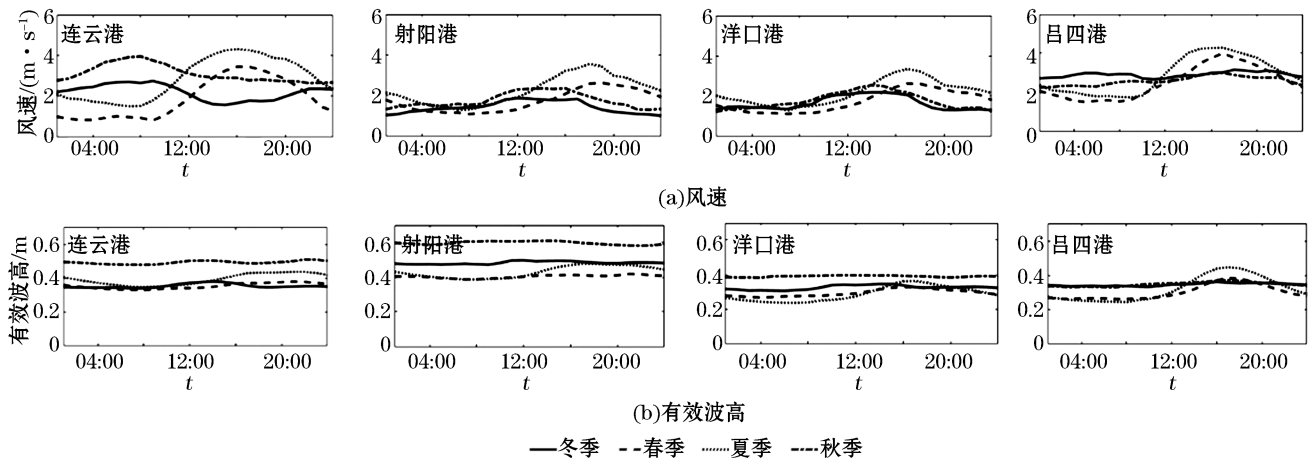


图 15 苏北近海地区 2016 年分别在 4 个港口 4 个季节的 24 个时刻风速和有效波高变化

Fig.15 Diurnal variations of wind speed and significant wave height at the four ports in four seasons

苏北近海的风向和波向也存在着日变化和日变化的季节变化。图 16 为 2016-12-16 和 2016-07-15 的风和波的罗盘图,图中表明,2016-12-16 一天中风向的旋转不超过 60° ,波向的旋转不超过 40° ;2016-07-15 一天中风向的旋转为 180° ,波向的旋转为 180° 。按照这个例子的方法,分别统计了在 4 个港口冬季(1 月,2 月和 12 月)和夏季(6 月,7 月和 8 月)在一天中风向和波向的转向在不同角度下出现的天数,见图 17。

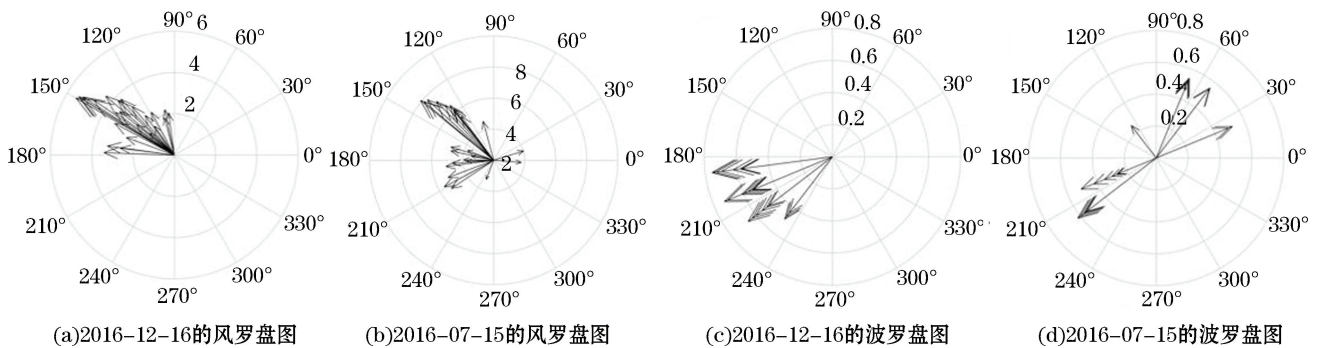


图 16 2016-12-16 与 2016-07-15 的风和波向罗盘图

Fig.16 Wind and wave compass on December 16, 2016 and July 15, 2016

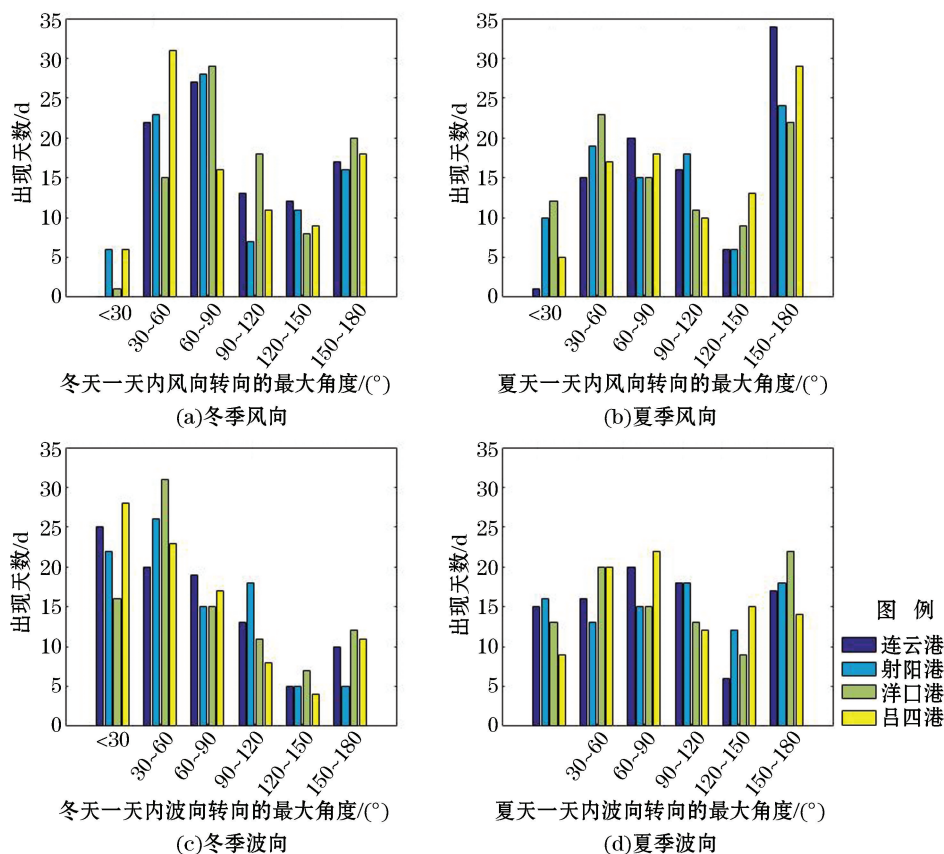
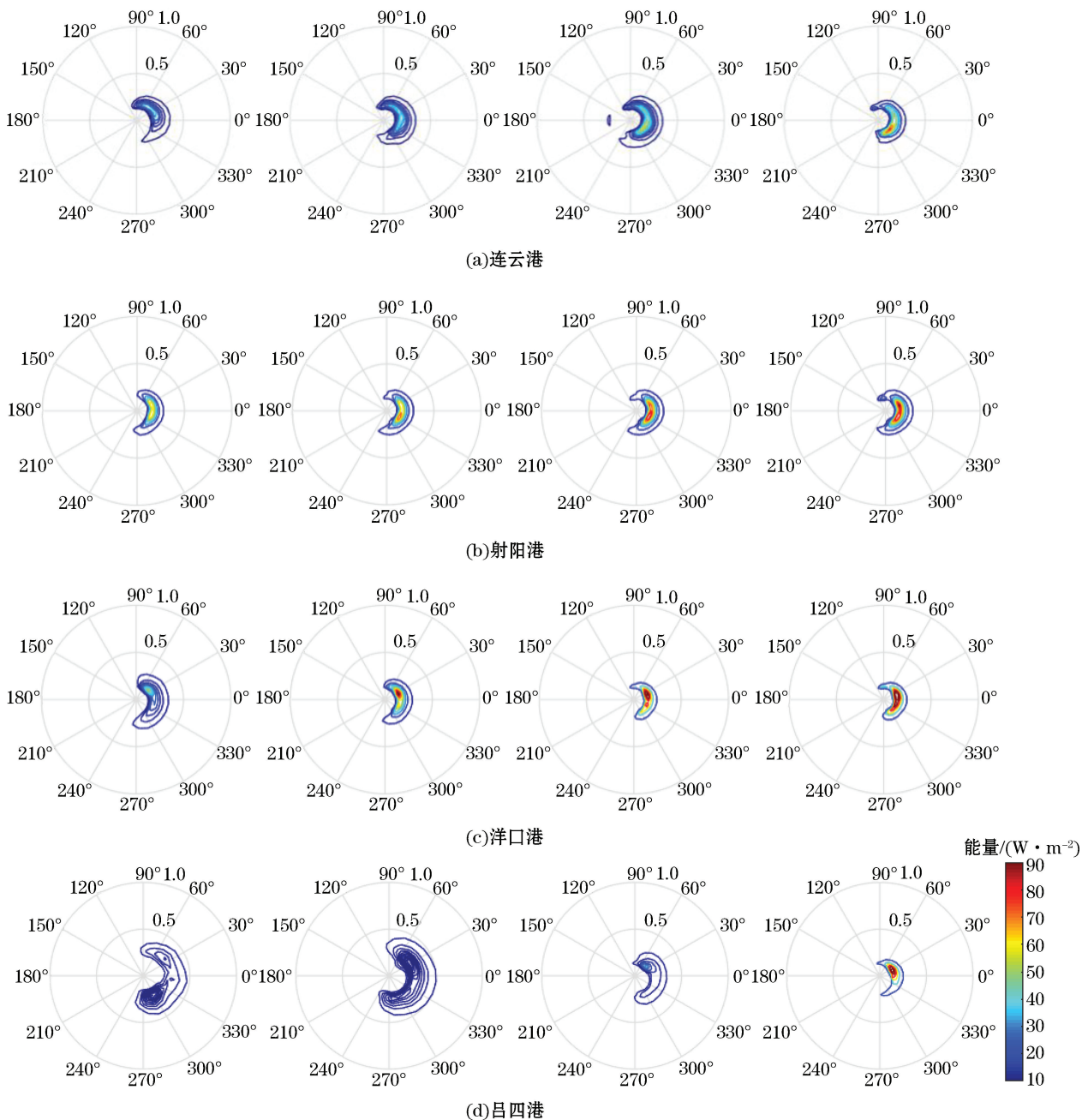


图 17 4 个港口冬季和夏季风向和波向在不同转向角度下出现的天数
Fig.17 Statistical chart of the number of days with different wind and wave directions at the four ports in winter and summer

本文参照季风的冬季与夏季盛行风向的变化超过 120° 的标准,根据此标准定义一天中风向或者波向转向角度超过 120° 时,认为其存在着明显的日变化。图中 4 个港口冬季和夏季出现 120° 以上风向和波向转向的天数较多,从而表明苏北近海风向和波向在冬季和夏季存在着日变化。通过比较一天中风向和波向转向的不同角度出现的天数可知,夏季风向和波向出现 120° 以上转向的天数大于冬季,说明风向和波向的日变化在夏季较为明显,因此风向和波向的日变化存在季节变化且夏季的日变化明显,冬季日变化较不明显。在冬季,风向转向出现 120° 以上的天数大于波向转向出现 120° 以上的天数,夏季亦然,说明风向的日变化比波向的日变化更明显。风向和波向存在日变化的原因是海陆风,风向和波向的日变化存在季节变化的原因是夏季天气系统活跃,日变化明显,冬季则相反。

为了进一步研究苏北近海波向的日变化,分别对苏北近海 4 个港口及其同一纬度上向外海方向每隔 3 经度取一个点,即同一纬度上包括港口共 4 个点,使用 SWAN 模式模拟所取点的 1 月和 7 月的波浪方向谱,见图 18 和图 19。图 18 所取点的方向谱能量集中于 0° 附近即波向为偏西向,越向外海方向,向西方向的谱能量越强且越向 0° 收缩。图 19 所取点的方向谱能量大部分位于 180° 附近即波向为偏东向,但在 4 个港口处,在 0° 附近即波向为西存在能量分布,越向外海方向,向西方向的谱能量逐渐减小,向东方向的谱能量逐渐增强且向 180° 收缩。通过比较图 18 和 19,可以得到结论:苏北近海的波向存在日变化;波向的日变化存在季节变化:夏季波向的日变化明显,冬季相反;波向的日变化在近岸处明显,在外海处不明显。其原因为在近岸附近,海陆热力性质导致的温度梯度差会使波向的日变化在近岸处较为明显,但越远离近岸,海陆热力性质差异的影响变小,波向的日变化也会逐渐不明显。

本文选取了苏北近海的从北到南四个重要港口(连云港、射阳港、洋口港和吕四港)研究苏北近海风场和波浪场日变化的在时间上的变化,又选取了4个港口及其同一纬度上向外海方向的3个站点研究苏北近海波向的日变化的在空间上变化。从时间上看,由于海陆风的影响,风场和波浪场存在日变化;由于季节变化的影响,风场和波浪场的日变化存在季节变化;春秋季节日变化剧烈,秋冬季节日变化不明显。从空间上看,由于海陆热力性质差异的影响,离岸越近日变化越明显,离岸越远日变化会逐渐减弱。

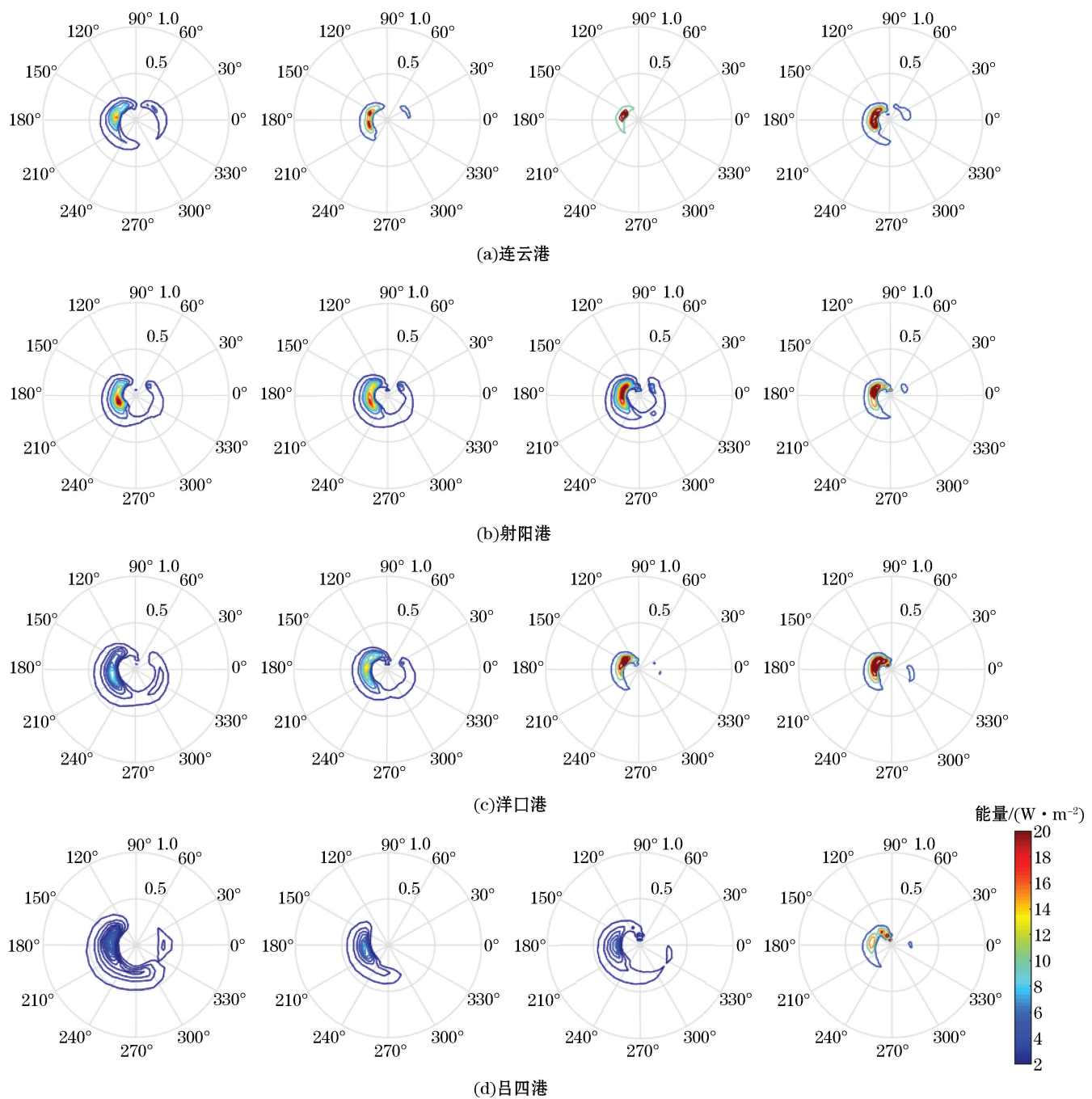


注:同心圆表示从中心输出的波浪频率,间隔为 0.5 Hz;角度表示波浪来向;等值线表示相应波向的能量;

每张分图从左到右为各港口在同一纬度上向外海方向每隔 3° 取一个点,共 4 个点

图 18 1 月四个港口以及在同一纬度上其余 3 个点的方向谱

Fig.18 Directional spectrum analysis of the four ports and the other three points in the same latitude in January



注:同心圆表示从中心输出的波浪频率,间隔为 0.5 Hz;角度表示波浪来向;等值线表示相应波向的能量;
每张分图从左到右为各港口在同一纬度上向外海方向每隔 3°取一个点,共 4 个点

图 19 7 月四个港口以及在同一纬度上其余 3 个点的方向谱
Fig.19 Directional spectrum analysis of the four ports and the other three points in the same latitude in July

3.4 季节内变化

苏北近海海面风场和波浪场不仅具有季节变化和日变化,还经历天气过程的影响,这种天气过程的影响为几天的持续时间。我们为区别季节变化和日变化,定义这种变化为季节内变化。本文选取了 2016-09-

14T00:00—2016-09-19T12:00 的双台风个例以及 2016-01-22T12:00—2016-01-24T00:00 的寒潮个例分别进行分析。

3.4.1 台风下的风场和波浪场的变化

本文选取的双台风个例为 2016 年 14 号台风“莫兰蒂”以及 16 号台风马勒卡。14 号台风“莫兰蒂”在 2016-09-16T12:00 由陆地进入苏北近海,并在 2016-09-17T12:00 转为温带气旋;16 号台风马勒卡的台风中心并未进入苏北近海,但外围大风区影响了苏北近海。因此在 16 到 19 日期间苏北近海存在双台风个例,如图 20 所示。

图 21 为 2016-09-14T00:00—2016-09-19T12:00 风场和波浪场每隔 12 h 的时间变化图。图中表明,14 日,苏北近海风场和波浪场没有出现极大值区;15 日,即将进入苏北近海的 14 号台风“莫兰蒂”的风场与 16 号台风“马勒卡”的外围大风在研究海域交汇,在 $(120^{\circ}\text{E}, 31^{\circ}\text{N})$ 至 $(124^{\circ}\text{E}, 35^{\circ}\text{N})$ 这两点间的斜线两侧分别存在 2 个风速和有效波高的大值区;16 日,“莫兰蒂”进入苏北近海,斜线北部的风速和有效波高的大值区随着“莫兰蒂”的移动逐渐增大且范围也不断扩大;17 日,“莫兰蒂”的风场和波浪场逐渐减弱,2 个风速和有效波高大值区逐渐合并,随着“莫兰蒂”风力等级的下降,苏北近海的风场逐渐被“马勒卡”台风风场占据,风速和有效波高的大值区随着“马勒卡”逐渐向东南方向移动;18 日,苏北近海的风场受“马勒卡”控制,风速和有效波高大值区继续向东南移动,风场和波浪场逐渐减弱;19 日,天气过程结束。综上所述,台风经过的海域特别是外围大风区,风速大值区对应有效波高大值区,且在风速最大值超过 18 m/s 处,有效波高最大值超过了 4 m 。因此,在出现台风过程时,苏北近海的风场会受台风影响,波浪场也会响应风场,在风速大值区,有效波高值也会迅速增加,具有强大的破坏性。

3.4.2 寒潮下的风场和波浪场的变化

2016 年 1 月由于全球温度的正异常导致 2 个大洋的温度脊北伸,挤压北极极涡使其南下且在西伯利亚地区积聚了强大的冷空气,1 月下旬冷空气南下,寒潮爆发。

图 21 为 2016-01-22T12:00—2016-01-24T00:00 风场、波浪场和涌浪场每隔 12 h 的时间变化图。21 日,寒潮过程没有到达苏北近海,风向和波向为偏北向和东北向,风速和有效波高较小,没有明显的涌浪大值区;22 日,寒潮过程到达苏北近海,该海域风场转为强大的西北风,波向转为西北向和偏北向,风速和有效波高迅速增加,苏北近海的东部涌浪开始出现大值区;23 日,整个苏北近海上空被强大的西北气流控制,波向为西北向,大部分海域风速超过了 18 m/s ,有效波高超过了 4 m ,苏北近海的东南部存在涌浪大值区,涌浪的有效波高超过了 2 m ;24 日,冷空气离开苏北近海,苏北近海上空为较弱的西北风,波向为西北向,风速和有效波高大值区向东南移动且逐渐减弱,涌浪的有效波高也逐渐降低。综上所述,此次寒潮过程中的强风过程,波浪场会迅速响应,风速达到 20 m/s 以上,有效波高达到 5 m 以上,具有强大的破坏性。

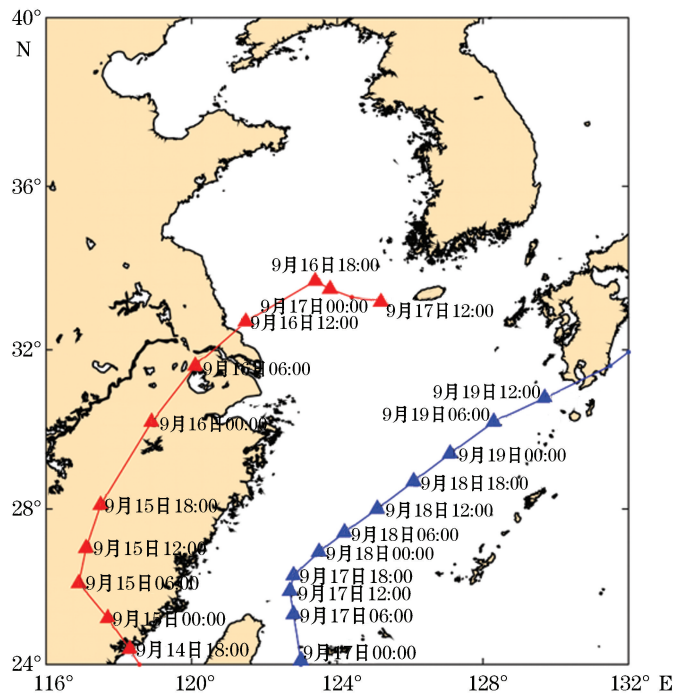


图 20 2016 年第 14 号台风“莫兰蒂”和 16 号台风“马勒卡”的路径

Fig.20 Routines of typhoon Moranti and Maleka in 2016

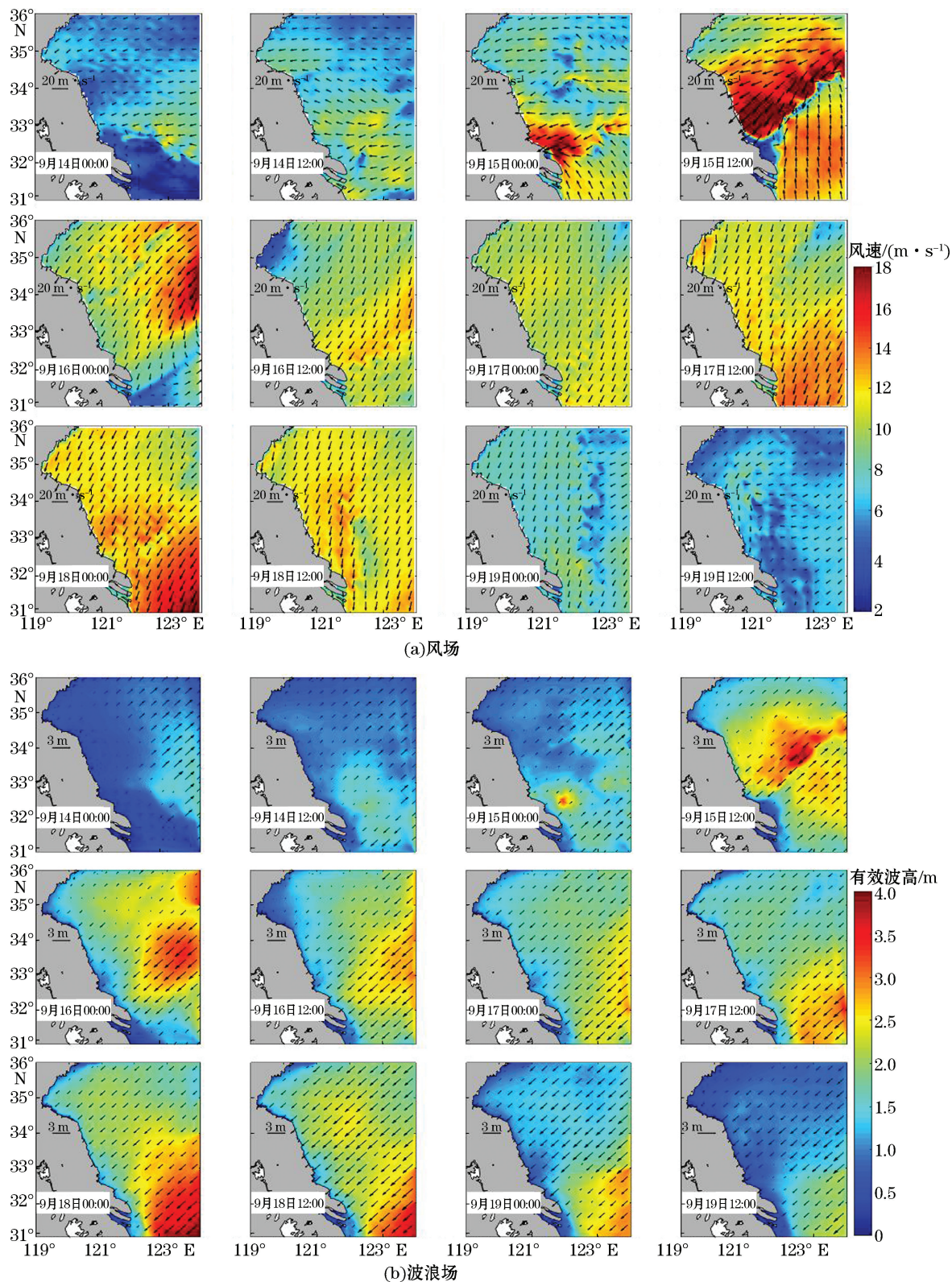


图 21 2016-09-16T00:00—2016-09-19T12:00 时每隔 12 h 的苏北近海地区风场和波浪场

Fig.21 Wind and wave fields every 12 hours from T00:00 of September 16 to T12:00 of September 19, 2016

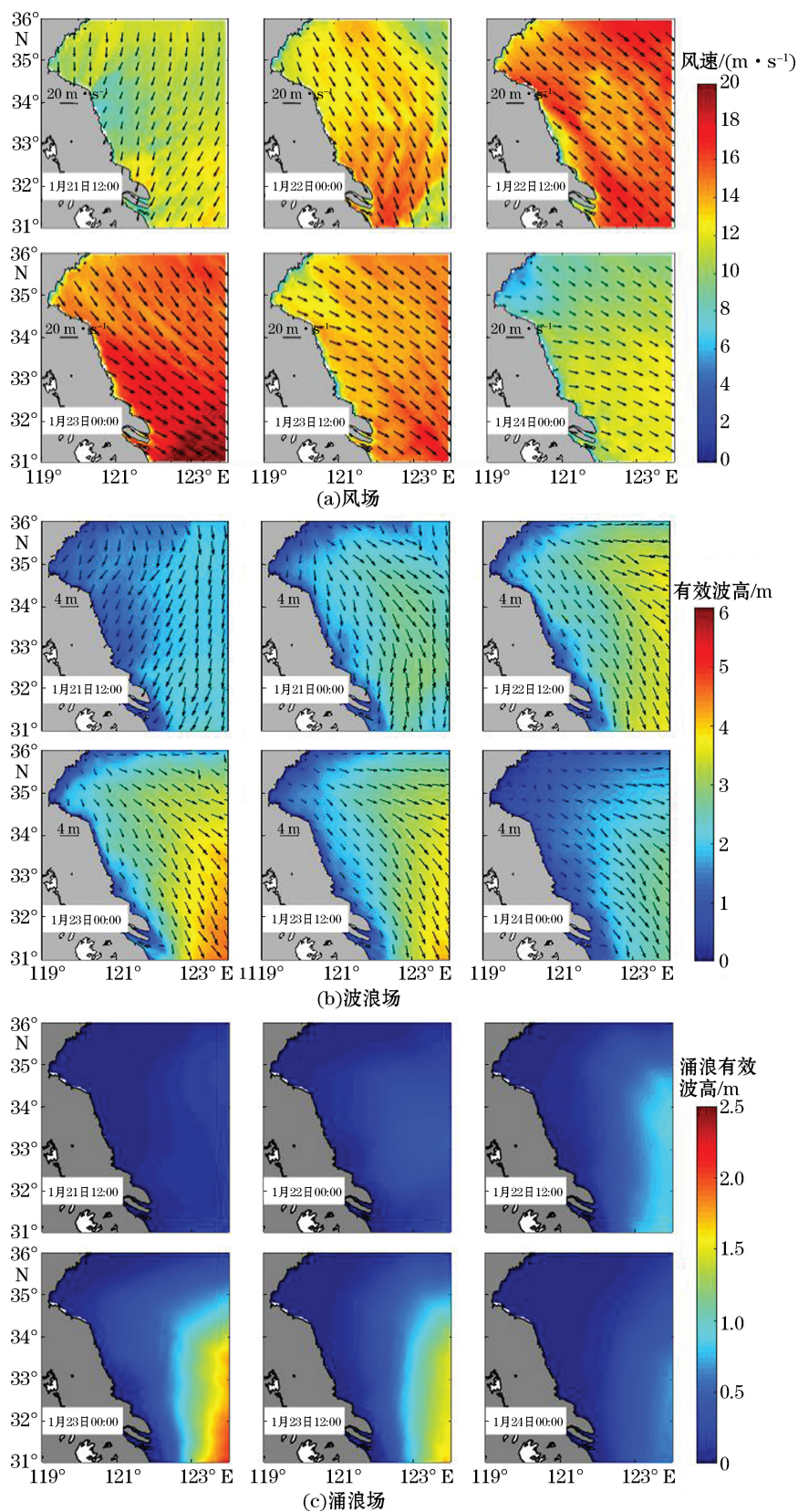


图 22 2016-01-22T00:00—2016-01-24T00:00 每隔 6 h 的苏北近海地区风场、波浪场和涌浪场

Fig.22 Wind, wave and swell fields every 6 hours from T12:00 of January 22 to T00:00 of January 24, 2016

4 结 论

本文将 WRF 模式模拟的 10 m 风场资料作为 SWAN 模式的驱动风场,模拟苏北近海海域的 2016 年的波浪场,数值模拟得到的高精度的结果用于分析苏北近海地区风场和波浪场的年平均态和多时间尺度变化:季节变化、日变化、季节内变化。得到如下结论:

1) 苏北近海的年平均风场和波浪场分布特征一致:年平均风速和有效波高自西北向东南逐渐增加,年平均风向和波向为东北向;年平均涌浪场自动向西逐渐增加,涌浪的年平均有效波高不超过 0.5 m;年平均波周期自西向东逐渐增加,平均波周期不超过 8 s。

2) 苏北近海海域风场、波浪场和涌浪场存在着季节变化。风速、有效波高和涌浪有效波高季节变化特征一致:冬季最大,春秋季次之,夏季最小;风向和波向的季节变化特征一致:冬季为西北向,春季为偏东向,夏季为东南向,秋季为东北向。

3) 苏北近海 4 个重要港口(连云港、射阳港、洋口港和吕四港)风场和波浪场日变化研究结果表明:风场和波浪场存在着日变化;风场和波浪场日变化存在季节变化,夏季和春季的日变化剧烈,冬季和秋季的日变化平缓。四个港口及其同一纬度上向外海方向的点研究苏北近海波向的日变化:波向存在日变化研究结果表明:波向的日变化存在季节变化:夏季日变化明显,冬季日变化不明显;离岸越近日变化越明显,离岸越远日变化会逐渐减弱。

4) 苏北近海在经历强天气过程(如台风和寒潮)时存在季节内变化,强天气过程中波浪场会快速响应风场,在强风过程风速能达到 20 m/s,有效波高能达到 4~5 m,涌浪达到 2.5 m,具有强大的破坏性。

参考文献(References):

- [1] YANG B, FENG W B, YU D J. Analysis on the relationship between wind and waves in the northern sea area of radial sandbank in Jiangsu Province[J]. Waterway Port, 2014(6): 578-581. 杨斌, 冯卫兵, 虞丹君. 江苏辐射沙洲北部海域风浪关系分析[J]. 水道港口, 2014(6): 578-581.
- [2] PAN X S, SHENG J M, HAN X, et al. A study on the refined prediction model of sea waves in the radial sand ridges of Jiangsu Province[J]. Journal of Huaihai Institute of Technology (Natural Science Edition), 2017(3): 85-92. 潘锡山, 盛建明, 韩雪, 等. 江苏辐射沙脊群海域海浪精细化预报模型研究[J]. 淮海工学院学报(自然科学版), 2017(3): 85-92.
- [3] HE X Y, HU T, WANG Y P, et al. Spatiotemporal distribution characteristics of Hydrometeorological elements in Jiangsu coastal waters[J]. Marine science, 2010, 34(9): 44-54. 何小燕, 胡挺, 汪亚平, 等. 江苏近岸海域水文气象要素的时空分布特征[J]. 海洋科学, 2010, 34(9): 44-54.
- [4] BAOREN Z, DANYA X, YULING Y, et al. Characteristics of current and temperature variations in the west part of the Southern Yellow Sea under strong wind action of the cold waves in the late autumn[J]. Studia Marina Sinica, 2000(42): 48-54.
- [5] WANG J, DONG C M, HE Y. Wave climatological analysis in the East China Sea[J]. Continental Shelf Research, 2016, 120: 26-40.
- [6] TAN F. Wave simulation of Gale Process Based on WRF atmospheric model[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012. 谭凤. 基于 WRF 大气模式的大风过程波浪模拟[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [7] CHEN Y, XU X Z, HUANG J F, et al. Preliminary study on the application of ENVISAT satellite borne synthetic aperture radar inversion wind field in the study of Jiangsu Offshore Wind Field[J]. Plateau Meteorology, 2017(3): 268-280. 陈燕, 许遐祯, 黄敬峰, 等. ENVISAT 星载合成孔径雷达反演风场在江苏近海风场研究中的应用初探[J]. 高原气象, 2017(3): 268-280.
- [8] QI Y Q, SHI P. A preliminary analysis of wind and wave characteristics in the central Yellow Sea[J]. Ocean Bulletin, 1997, 16(6): 1-6. 齐义泉, 施平. 黄海中部风、浪特征的初步分析[J]. 海洋通报, 1997, 16(6): 1-6.
- [9] MEI C J, ZHAO D L, SHI J. Comparison of wave height simulation capabilities of two wave models in the Yellow Sea of China[J]. Ocean prediction, 2008, 25(2): 92-98. 梅婵娟, 赵栋梁, 史剑. 两种海浪模式对中国黄海水域浪高模拟能力的比较[J]. 海洋预报, 2008, 25(2): 92-98.
- [10] YAO Q, ZHENG C W, SU Q, et al. Simulation of wave field in a cold air process based on WAVEWATCH-III model[J]. Ocean prediction, 2013, 30(2): 49-54. 姚琪, 郑崇伟, 苏勤, 等. 基于 WAVEWATCH-III 模式的一次冷空气过程海浪场模拟研究[J]. 海洋预报, 2013, 30(2): 49-54.

- 2013, 30(2): 49-54.
- [11] TAN F, ZHANG Q H, PANG Q X. Wave field simulation of typhoon Vespa based on WRF-SWAN model[J]. Waterway Port, 2012, 33(1): 14-18. 谭凤, 张庆河, 庞启秀, 等. 基于 WRF-SWAN 模式的韦帕台风波浪场模拟[J]. 水道港口, 2012, 33(1): 14-18.
- [12] XU F M, HUANG Y F, SONG Z Y. Numerical simulation of typhoon wave characteristics from the East China Sea to the Yangtze River Estuary[J]. Hydrodynamic Research and Progress, 2008, 23(6): 12-19. 徐福敏, 黄云峰, 宋志尧. 东中国海至长江口海域台风浪特性的数值模拟研究[J]. 水动力学研究与进展, 2008, 23(6): 12-19.
- [13] QIU J F. A study on the characteristics of wind and wave in Jiangsu coastal area[D]. Nanjing: Hohai University, 2005. 邱桔斐. 江苏沿海风、浪特征研究[D]. 南京: 河海大学, 2005.
- [14] CHEN G G, QU F G, LI P L, et al. Numerical simulation of wave seasonal variation in the Yellow Sea[J]. Marine Science, 2016(11). 陈国光, 翟方国, 李培良, 等. 黄海海浪季节变化的数值模拟研究[J]. 海洋科学, 2016(11): 155-168.
- [15] HE H, XU Y. Wind-wave hindcast in the Yellow Sea and the Bohai Sea from the year 1988 to 2002[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2016, 35(3): 46-53.
- [16] ZHI X F, ZHU H, YU Y Q. Statistical features of strong wind over the Bohai and Yellow Sea and its multi-model ensemble prediction during boreal summer[C]. IEEE Fifth International Conference on Advanced Computational Intelligence. IEEE, 2012.
- [17] FAN F, ZHU Z X, et al. Numerical simulation of waves in Jiangsu sea area[J]. Ocean Limnology Bulletin, 2014(3): 22-28. 范飞, 朱志夏, 等. 江苏海域波浪数值模拟研究[J]. 海洋湖沼通报, 2014(3): 22-28.
- [18] TANG H, JIA L H. A brief introduction of American ARW model system[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2006, 29(6): 24-26. 汤浩, 贾丽红. 美国 ARW 模式系统简介[J]. 沙漠与绿洲气象, 2006, 29(6): 24-26.
- [19] KLEPSOVA O, PIETRZAK J D, STELLING G S. On the accurate and stable reconstruction of tangential velocities in C-grid ocean models[J]. Ocean Modelling, 2009, 28(1): 118-126.
- [20] TOLMAN H L, CHALIKOV D. Source terms in a third-generation wind wave model[J]. Journal of Physical Oceanography, 1996, 26(26): 2497-2518.
- [21] LIU B. Physical basis and numerical study of coupled atmosphere wave model[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2007. 刘斌. 大气-海浪耦合模式的物理基础以及数值研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2007.
- [22] DENG W, CHEN H B, MA Z S, et al. Decoding and graphical display of NCEP FNL global analysis data[J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2009(3): 82-86. 邓伟, 陈海波, 马振升, 等. NCEP FNL 全球分析资料的解码及其图形显示[J]. 气象与环境科学, 2009(3): 82-86.
- [23] AKPNAR A, VLEDDER G P V, MURAT HSAN KMURCU, et al. Evaluation of the numerical wave model (SWAN) for wave simulation in the Black Sea[J]. Continental Shelf Research, 2012(50-51): 80-89.
- [24] LI Y. Third generation shallow water wave numerical prediction model and its application in the yellow and Bohai Sea area[C]. Annual meeting of China Meteorological Society, 2004. 李燕. 第三代浅水波浪数值预报模式及其在黄渤海的应用[C]. 中国气象学会年会, 2004.
- [25] LI J, YUAN J Z. Study on the application of wind wave spectrum model in the radiated sandbank area of Northern Jiangsu[J]. Water conservancy economy, 2012, 30(4): 53-56. 李杰, 袁建忠. 风浪谱模型在苏北辐射沙洲海域的应用研究[J]. 水利经济, 2012, 30(4): 53-56.
- [26] SIADATMOUSAVI M, STONE F J W. The effects of bed friction on wave simulation: implementation of an unstructured third-generation wave model, SWAN[J]. Journal of Coastal Research, 2011, 27(1): 140-152.
- [27] KATSARDI V, SWAN C. The evolution of large waves in shallow water[C]. Proceedings of the 29th International Conference on Coastal Engineering, ICCE2004, 2004.
- [28] KHARIF C, PELINOVSKY E. Physical mechanisms of the rogue wave phenomenon[J]. European Journal of Mechanics, B/Fluids, 2003, 22(6): 603-634.
- [29] JIANG H Y. A comparative analysis of the wind field retrieved by ASCAT and predicted by numerical model[D]. Lanzhou: Lanzhou university, 2017. 姜皓严. ASCAT 洋面卫星反演风场资料与数值模式 10 米预报风场的对比分析[D]. 兰州: 兰州大学, 2017.
- [30] MENG X G, GUO J J, HAN Y Q. Preliminary evaluation of applicability of reanalysis data of ERA5[J]. Journal of Oceanography and Meteorology, 2018, 38(1): 91-99. 孟宪贵, 郭俊建, 韩永清. ERA5 再分析数据适用性初步评估[J]. 海洋气象学报, 2018, 38(1): 91-99.
- [31] MONDON E, WARNER P. Synthesis of a validated nearshore operational wave database using the archived NOAA Wave Watch III ocean model data and SWAN nearshore model[J]. Journal of Coastal Research, 2009, 45(10): 1015-1019.
- [32] QIU S Y, LIANG C J, DONG C M. Analysis of the temporal and spatial variation characteristics of the sea surface wind and wave field in the South China Sea and their relationship[J]. Oceanographic research, 2013(4): 3-11. 裘沙怡, 梁楚进, 董昌明, 等. 南海海面风、浪

场时空变化特征及其关系分析[J]. 海洋学研究, 2013(4): 3-11.

[33] HUGHES M R A. Mesoscale dynamics of southern California's climate[D]. Los Angeles: University of California, 2008.

Numerical Simulation of Multi-scale Temporal Variations of Sea Surface Wind and Wave Field in the Offshore Area of the Northern Jiangsu Province

XU Jin¹, CAO Yu-han¹, YANG Yong-zeng², DONG Chang-ming¹, WANG Jin¹, ZHU Wei-jun¹

(1. *Key Laboratory of Meteorological Disasters, Ministry of Education, Nanjing 210044, China;*

2. *School of Marine Science, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;*

3. *First Institute of Oceanography, MNR, Qingdao 266061, China*)

Abstract: The sea surface wind and wave fields in the offshore area of the northern Jiangsu Province in the year 2016 are simulated with high-resolution atmospheric and wave numerical models and compared with observations including satellite altimetry data, scattermeter wind data, reanalysis products and in-situ buoy data. The results show that the multi-scale temporal variations exist in sea surface wind and wave fields, such as seasonal, diurnal and intra-seasonal scales. Analysis shows that the sea surface wind, significant wave height and swell are larger in winter and fall than in spring and summer, and northwestern (southeastern) wind and wave prevail in winter (summer). It is found that significant diurnal variation exist in the wind and wave fields and exhibit seasonality. The diurnal variation is stronger in nearshore areas than offshore areas. It is also found that the offshore area of Jiangsu Province may subject to the impacts of strong synoptic processes, such as cold waves and tropical cyclones.

Key words: offshore of northern Jiangsu Province; wind field; wave field; multi-scale temporal variation

Received: July 6, 2019