基于MCT耦合器的WRF-POM区域海气耦合模式构建及应用

刘　武[1], 杨成荫[2], 李耀东[3], 史小康[3]

(1. 中国人民解放军96631部队, 北京　102026; 2. 中国人民解放军93199部队, 黑龙江　哈尔滨　150001; 3. 北京航空气象研究所, 北京　100085)

摘要: 为研究区域海气耦合模式在中尺度海气相互过程中的应用, 利用 MPI(Model Coupling Toolkit)并行通信技术, 构建了基于 MCT 耦合器的 WRF-POM 并行区域海气耦合模式, 并利用该模式对台风"凤凰"进行了一系列的数值模拟试验。试验结果表明: 该耦合模式可以实现稳定高效的并行计算, 并较好地再现了台风"凤凰"的活动过程; 相对单一的大气模式, 耦合模式可以更加准确地模拟出台风"凤凰"的路径和强度, 其中不使用"Bogus 方案"的耦合试验模拟效果最好, 其路径平均绝对误差相对控制试验和使用"Bogus 方案"耦合试验分别减小了 20.1%和 72.5%, 强度的平均均方根误差则分别减小了 41.4%和 17.9%; 耦合模式还能较好地再现表层海洋对大气的响应特征: 台风大风使得表层流速显著增大, 强烈的"抽吸夹卷"效应使得低层较冷海水上翻, 海表温度降低, 混合层深度增加。

关键词: 区域海气耦合模式; 数值模拟; 台风; 中尺度海气相互作用

中图分类号: P47　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-3096(2018)05-0098-10

DOI: 10.11759/hykx20171014001

现阶段, 海气耦合模式已成为研究海气相互作用的重要工具, 其在大尺度海气相互作用的研究中已得到了广泛应用, 例如利用全球海气耦合模式对厄尔尼诺和南方涛动进行研究[1], 对季风环流进行研究[2]等。然而, 大气和海洋间还存在着一些空间、时间尺度较小的海气相互作用现象, 例如台风、入海气旋、风暴潮等, 对于这些中小尺度系统。如果利用分辨率较低的全球海气耦合模式进行模拟, 通常无法再现中小尺度海气相互作用现象[3], 还会存在计算资源浪费的问题。因此, 需要建立高分辨率的区域海气耦合模式来对其进行更为细致全面的研究。

国外关于区域海气耦合模式的研究开展较早, 美国海军在1997年就建立了中尺度区域海气耦合模式 COAMPS[4], 该模型在近岸地区对天气尺度系统的预报能力要明显强于单独的大气模式; 其后, Lars 等[5]、Seo 等[6]、Li 等[7]也分别建立了不同类型的区域海气耦合模式, 并分别对热带气旋、中尺度涡、冬季风暴等天气系统进行了数值模拟; 2010 年, Warner 等[8]利用 MCT (Model Coupling Toolkit)耦合器将 WRF (Weather Research and Forecasting Model)、ROMS (Regional Ocean Modeling System)、SWAN (Simulating Wave Nearshore)相耦合, 构建了一个高分辨率的区域海气浪耦合模式 COAWST, 并用其对北大西洋飓风进行了数值模拟, 该模型也是现阶段最为先进的区域海气耦合模式[9]。

国内关于区域海气耦合模式的研究虽起步较晚, 但近年来发展迅速: 2005 年黄立文等[10]利用 UNIX 系统中的进程通信技术和耦合模块构建了一个双向耦合的中尺度海-气耦合模式 MCM (Mesoscale Coupling Model), 并对台风"Winnie"进行了数值模拟试验, 探讨了海气相互作用对台风暴雨的影响机制; 2009 年蒋小平等[11]利用 Linux 系统中的管道通信技术, 构建了中尺度大气模式 MM5(Mesoscale Model 5)和海洋模式 POM (Princeton Ocean Model)相耦合的区域海气耦合模式, 并利用其对台风"Krovanh"进行了数值模拟试验, 研究了中尺度海气相互作用对台风结构的影响; 2012年刘磊等[12]利用Linux系统中的共享内存及信号量技术, 构建了 WRF-POM-WW3 海气浪耦合模式, 并利用其研究了台风"格美"过程中海温和海浪对大气的反馈。

收稿日期: 2017-10-14; 修回日期: 2018-02-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41405135)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41405135]

作者简介: 刘武(1989-), 男, 安徽六安人, 助理工程师, 硕士, 主要从事中尺度海气相互作用研究, 电话: 010-66340425, E-mail: 799013310@qq.com; 杨成荫, 通信作者, 高级工程师, 主要从事数值模拟及海气相互作用研究, 电话: 18045160182, E-mail: cy-yang0202@sina.com

前人所构建的这些耦合模式大多采用本机进程通信的耦合方式(包括管道通信、共享内存、信号量等), 这种耦合方式较为简单方便, 通信效率也很高, 但是其对环境的依耐性较强(操作系统需支持多进程通信)、可移植性较差, 且由于在一台机器上运行, 对机器性能要求也较高[13]。本文在前人研究的基础上, 建立了基于 MCT 耦合器的 WRF-POM-并行区域海气耦合模式。该耦合模式使用美国阿尔贡国家实验室开发 MCT 耦合器做为消息传递工具, 耦合器封装了模式耦合所需的基本方法和数据, 并提供简单易用的调用接口, 用户可以方便地实现子模式的“加入”或“去除”, 这极大方便了耦合模式的设计; 耦合器还实现了“模式-数据-通信”三者的分离, 这使得子模式具有更好的独立性和可扩展性; 同时, 由于耦合器属于网间进程通信的耦合方式, 耦合模式可以在多台机器上并行, 这更适用于大规模分布式的科学计算[14]。现阶段, 国际上较为先进的耦合模式均采用了这种耦合方式[9, 15]。

1 WRF-POM 区域海气耦合模式的构建

1.1 耦合模式的物理框架

台风是天气尺度上最为强烈的海气相互作用过程[16], 其与海洋的相互作用主要体现为两方面: 一方面, 台风大风驱动表层海水流动, 产生强烈的局地海流, 海水的“抽吸夹卷”效应使得下层较冷海水上翻, 海表温度降低, 海洋混合层深度增加[17]; 另一方面, 海洋是大气的重要热源之一, 海表温度的差异将会造成海洋对大气的感热、潜热输送不同[18], 这将显著影响台风的强度和路径[19]。因此, 在模式耦合过程中将 WRF 模式输出的底层风应力、热通量(感热、潜热通量)、长短波辐射值、E-P 通量(2 m 湿度和降水量)传递给 POM 模式, 作为其上边界强迫, 进而改变海洋的动力、热力过程; 同时将 POM 模式计算出的海表温度传递给 WRF 模式, 作为其下边界强迫, 进而影响大气底层感热通量、潜热通量及辐射通量的计算。整个海气耦合模式的物理框架如图 1。

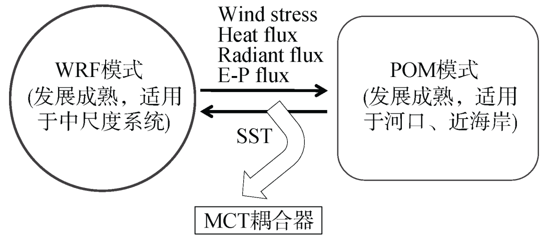

图 1 WRF-POM 区域海气耦合模式物理框架

Fig. 1 Physical framework of the WRF-POM regional air-sea coupled model

1.2 耦合模式的技术框架

本文耦合模式的设计思路是利用一个具备空间、时间差值功能以及并行消息传递功能的耦合器, 实现 WRF 模式和 POM 模式模块化的并行同步耦合, 耦合模式应适用于各类主流计算机(包括巨型机、集群、个人计算机), 并且可以方便地实现子模式的“加入”或“去除”。耦合模式的技术框架如图 2 所示, 整个模式基于消息传递的并行编程环境(MPI, Message Passing Interface)设计, 使用的MCT耦合器做为消息传递工具, 在数据传递过程中使用 Los Alamos 国家实验室开发的 SCRIP(Spherical Coordinate Remapping and Interpolation Package)进行大气和海洋网格点的空间插值(有守恒性、双线性、样条和临近点加权四种方式可选), WRF 模式和 POM 模式按照统一标准编写接口接入耦合器, 并在耦合时间节点上与耦合器进行数据交换[20]。整个耦合模式通过主程序 master. f 来控制运行: 首先主程序会调用头文件 mpif. h, 并定义相关变量; 然后进行 MPI 初始化, 根据用户设定分别为 WRF 模式、POM 模式以及耦合器划分通信域, 并激活各分量; 其后子模式进入各自的运算状态, 并在耦合时间节点上与耦合器进行数据双向交换; 最后是设定阻塞调用函数, 并结束 MPI 程序。

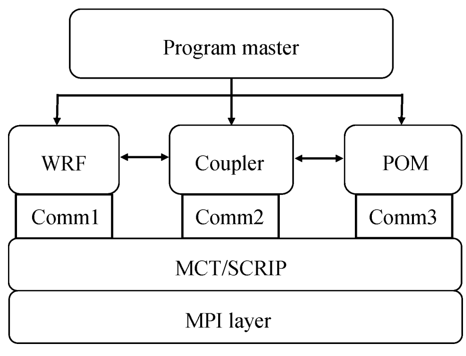

图 2 WRF-POM 海气耦合模式技术框架

Fig. 2 The technical structure of the WRF-POM regional air-sea coupled model

2 对台风“凤凰”的数值模拟试验

2.1 台风凤凰简介

台风“凤凰”是一次典型的“西北向台风”, 其于

2008 年 7 月 25 日下午生成于西北太平洋洋面, 26 日加强为台风, 28 日 06 时 30 分以强台风强度在台湾花莲沿海第一次登陆, 22 时在福建福清东瀚镇再次登陆。“凤凰”在强度上具有“迅速加强”的特点, 在路径上具有“北翘转向”的特点。我们选取 2008 年 7 月 25 日 06 时—28 日 06 时这一时段对其进行数值模拟试验, 主要分析其从生成到加强转向这一过程。

2.2 控制试验

控制试验(Control Experiment, 记为 Ctrl)分为两部分: 一是单独运行大气模式 WRF 对台风进行模拟; 二是单独运行 POM 模式对海洋进行模拟。两者的模拟时间均为 2008 年 7 月 25 日 06 时—28 日 06 时, 模拟区域如图 3 所示, 其中 WRF 模式采用兰伯特投影, 水平分辨率为 15 km, 垂直方向上取不均匀的 33 个 eta 层, 并对下层大气进行了加密, 模式积分步长为 60 s, 采用 1°×1°的 NCEP 再分析资料(每 6 h 一次)做初始场和侧边界强迫; POM 模式采用等经纬网格投影, 水平分辨率为 0.25°×0.25°, 垂直方向上分为不均匀的 40 个 Sigma 层, 其中上层较密, 下层较稀疏, 最大水深设为 4 000 m, 最小水深设为 10 m, 模式和内模式时间步长分别为 30 s 和 300 s, 采用调整运行结果(下节详述)做初始场, 并使用 0.25°×0.25°的 CCMP (Cross Calibrated Multi-Platform)风应力场(每 6 h 一次)做上边界强迫, 使用 0.5°×0.5°的 SODA (Simple Ocean Data Assimilation)月平均流场和温盐场做侧边界强迫。WRF 模式和 POM 模式的参数化方案设置分别见表 1 和表 2。

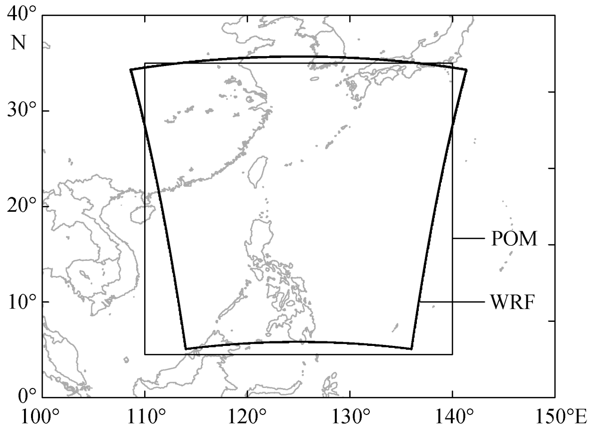

图 3 大气模式和海洋模式的模拟区域

Fig. 3 The simulation area of the atmospheric mode and the ocean model

表 1 WRF 模式参数化方案

Tab. 1 Parameterization schemes used in the WRF model

积云参数化方案	微物理方案	长波辐射	短波辐射	陆面过程	边界层方案
Kain-Fritsch	Single-Moment3-class	RRTM	Dudhia	Noah	MM5 similarity

表 2 POM 模式物理参数设置

Tab. 2 Physical parameters used in the POM model

Jerlov 水型	Smagorinsky 扩散系数	水面光滑度	冯卡门常数	水平反转普朗特数
ia	0.1	0.1	0.4	0.2

2.3 耦合试验

耦合试验分三步进行: 诊断运行、调整运行、耦合运行, 其中子模式的区域选择和参数设置同控制试验完全一致。

诊断运行阶段以 2008 年 1 月 SODA 月平均温盐资料为初始场, 从静止的流场开始使用 2008 年 1 月 SODA 月平均流场做开边界强迫, 使用 2008 年 1 月 SODA 月平均风应力场驱动海洋模式以诊断方式(温盐场不变)运行 1 a, 最终得到与 POM 模式相适应的 2008 年 1 月份稳定海洋场。

调整运行阶段以诊断运行结果为初始场, 从 2008 年 1 月 1 日 00 时开始, 用每 6 h 一次的 CCMP 风应力和每 24 h 一次的 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)最优插值海温(0.25°×0.25°)共同驱动海洋模式运行至 2008 年 7 月 25 日 06 时, 期间每月更新温盐边界场做开边界强迫。海洋模式初始化结果如图 4 所示, 其中 POM 模式模拟出的 2008 年 6 月平均温盐场与实况基本一致, 模拟出的流场略弱于实况流场。

耦合运行阶段以调整运行结果和 NCEP 资料为初始场, 使用 WRF-POM 区域海气耦合模式对大气和海洋进行模拟, 其中大气模式和海洋模式通过 MCT 耦合器每 5 min 进行一次数据交换(具体通量见 1.1 节), 并通过双线性的方式插值到各自的格点上。耦合试验分为两组: 第一组(Coupling Experiment 1,

记为 Coup1)大气子模式使用 NCEP 资料做初始场；第二组(Coupling Experiment 2，记为 Coup2)则在第一组的基础上使用了 Bogus 方案[21]，即根据 JTWCJoint Typhoon Warning Center)资料中的台风最大风速、最大风速半径、中心最低气压以及台风位置等信息构建了初始 Bogus 涡旋。

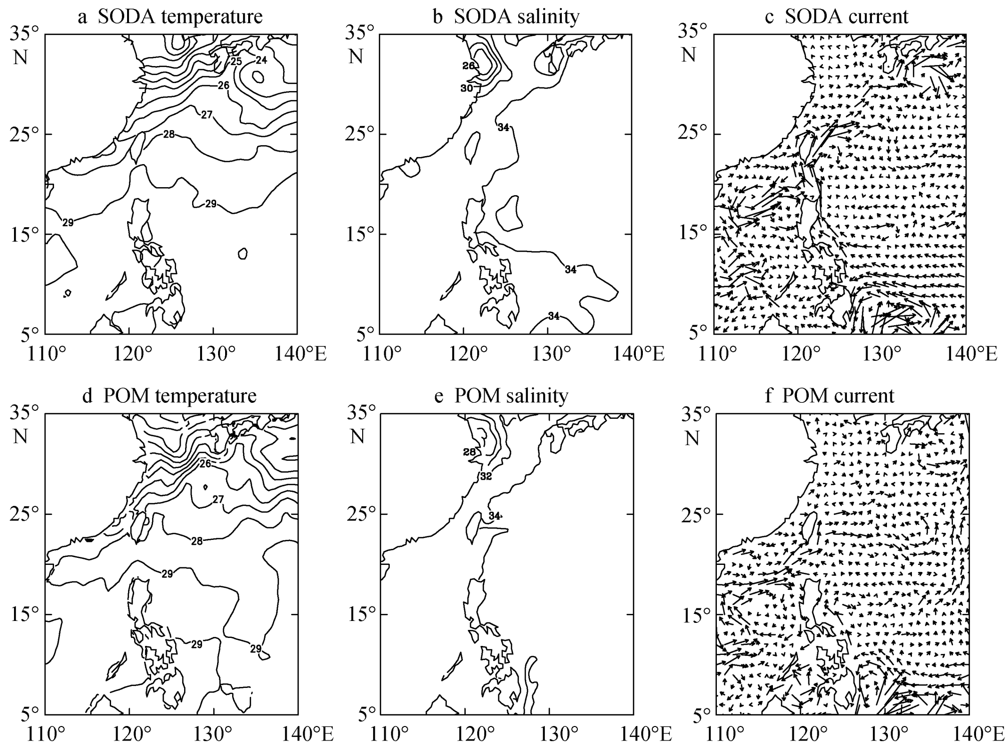

图 4　2008 年 6 月(月平均)海表温度场(℃)、盐度场(g/kg)、流场(m/s)

Fig. 4　Monthly mean fields of SST, salinity and stream current for June 2008

3　试验结果分析

3.1　大气对海洋的响应

3.1.1　台风路径

图 5 给出了三次试验以及 JTWC 实况资料的台风路径，其中 Ctrl 试验和 Coup1 试验均能较好地模拟出台风“凤凰”的移动路径，而使用了 Bogus 方案的 Coup2 试验模拟的台风路径偏差较大。从时间段上来看，在试验前期，模式尚处于调整阶段，Ctrl 试验和 Coup1 试验模拟出的台风中心位置均不太稳定，在有些时次较为准确(第 3 个时次)，在有些时次偏差较大(第 4、5 个时次)，Coup2 试验则在三个时次后发生了路径偏移；在试验中期，模式逐渐趋于稳定，Ctrl 试验和 Coup1 试验模拟的台风在转向后与实况路径基本保持一致，而 Coup2 试验此时已偏差较大；在试验后期，Ctrl 试验和 Coup1 试验的台风路径保持稳定，在登陆后，Coup1 试验效果略优于 Ctrl 试验，而 Coup2 试验模拟的台风路径在这一阶段依然偏差较大。

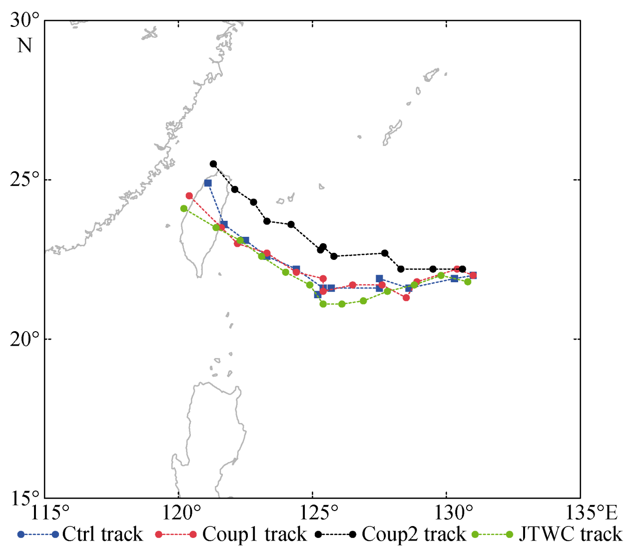

图 5　控制试验和耦合试验的台风路径以及 JTWC 观测结果

Fig. 5　Typhoon tracks of the control experiment, coupled experiment, and JTWC observation

三次试验在各时间段内台风中心位置的平均绝对误差见表 3，其中 Ctrl 试验在前 24 h 模拟效果最好，

其绝对误差相对 Coup1 试验和 Coup2 试验分别减小了 5.28 km、53.38 km; Coup1 试验在中间 24 h 和后 24 h 模拟效果最好, 其绝对误差相对 Ctrl 试验分别减小了 17.4 km、24.1 km, 相对 Coup2 试验分别减小了 183.3 km、126.9 km; Coup1 试验的全程平均绝对误差也是最小的, 其相对 Ctrl 试验和 Coup2 试验分别减小了 20.1%和 72.5%。

表 3　控制试验、耦合试验中台风中心位置的平均绝对误差(单位: km)

Tab. 3　The mean absolute deviation of the typhoon center position in the control and coupled experiments (units: km)

	Ctrl	Coup1	Coup2
前 24 h	56.71	61.99	110.09
中间 24 h	72.52	55.10	204.25
后 24 h	51.01	26.93	210.27
全程平均	60.08	48.01	174.87

3.1.2　台风强度

图 6 给出了三次试验以及 JTWC 实况资料的台风强度演变情况。三次试验均能较好地模拟出台风中心最低气压的变化趋势, 但在不同时段, 各试验准确性有所差异。在试验前期, Coup2 试验由于植入了 Bogus 涡旋, 在初始时刻其气压值更准确, 因此前 30 h 的模拟效果更好, 而 Ctrl 试验和 Coup1 试验在前 30 h 模拟出的中心最低气压较实况明显偏大, 台风强度偏弱。在试验中期, 三次试验的气压变化趋势发生了明显变化, Ctrl 试验中心最低气压下降速度过快, 很快偏离了实况; Coup2 试验最低气压则下降的过于平缓, 在第 48 h 就达到了最小值; Coup1 试验最低气压下降速度介于两者之间, 与实况最为接近。在试验后期, 这种趋势表现的更为明显, Ctrl 试验由于未考虑海气耦合作用, 中心最低气压明显偏低; Coup2 试验虽然考虑了耦合作用的影响, 但其路径模拟的不准确, 当台风登陆时其依然位于海上, 因此其耦合作用过强, 造成了台风强度偏弱; Coup1 试验则在这一阶段与实况最为接近。

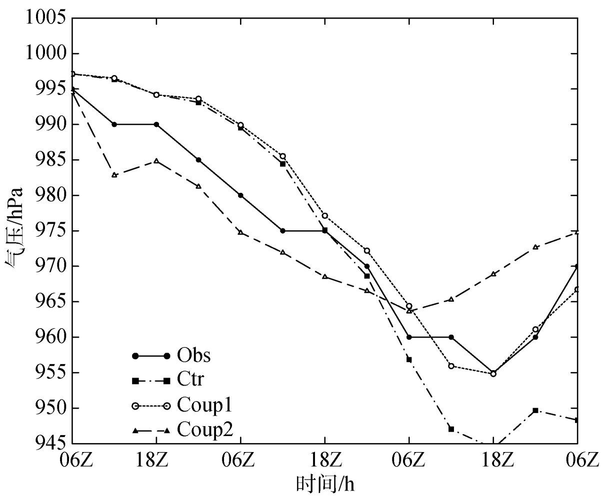

图 6　台风中心最低气压随时间变化(单位: hPa)

Fig. 6　Time series of minimum pressure in the typhoon center (units: hPa)

表 4 和表 5 分别给出了三次试验在各时段内台风中心最低气压的均方根误差和相关系数。在前 24 h, Coup2 试验的均方根误差最小, 其相对 Ctrl 试验和 Coup1 试验分别减小了 3.51 hPa 和 3.74 hPa; 在中间 24 h 和后 24 h, 则是 Coup1 试验的模拟效果最好, 其全程平均均方根误差也最小(相对 Ctrl 试验和 Coup2 试验分别减小了 3.94 hPa 和 1.22 hPa, 减小百分比为 41.4%, 17.9%)。从与实况的相关性上来看, Ctrl 试验和 Coup1 试验的相关系数明显大于 Coup2 试验, 说明两者对气压的变化趋势模拟的更好, 其中 Coup1 试验模拟效果最好, 其相关系数达 0.968。再对比三次试验中心最低气压的均方根误差和位置的绝对误差, 发现当台风位置模拟的较好时(绝对误差小), 中心最低气压也模拟的较好(均方根误差小)。

表 4　控制试验、耦合试验台风中心最低气压均方根误差(单位: hPa)

Tab. 4　The RMSE of minimum pressure in the typhoon center in the control and coupled experiments (units: hPa)

	Ctrl	Coup1	Coup2
前 24 h	5.66	5.89	2.15
中间 24 h	6.19	3.08	4.57
后 24 h	14.65	2.66	10.05
全程平均	9.52	5.58	6.80

表 5　控制试验、耦合试验台风中心最低气压与实况气压相关系数

Tab. 5　The correlation coefficient of the minimum pressure in the typhoon center between the control (coupled) experiment and the observed value

	Ctrl	Coup1	Coup2
相关系数	0.939	0.968	0.865

3.2　海洋对大气的响应

3.2.1　海表流场

海表流场的分布主要受海面风速影响, 而三次

试验中采用了不同的风场去驱动海洋模式运行: Ctrl 试验中采用 NCEP 风场, 其风速相对大气模式提供风场较小, 且主要的风速大值区位于台风路径右侧(图 7a); Coup1 试验(图 7b)和 Coup2 试验(图 7c)采用大气模式提供风场驱动, 在台风外围, 其风速大小与 NCEP 风场相当, 但在台风中心附近, 其风速明显较大, 且主要的风速大值区距离台风中心更近。同时段内海表流场的分布见图 8, Coup1 试验和 Coup2 试验模拟出的海表流速相对 Ctrl 试验较大, 尤其是在台风路径右侧, 出现了流速的极值区, 但是由于缺乏同时段内海表流场的实况资料, 三次试验的模拟准确性还有待进一步检验。

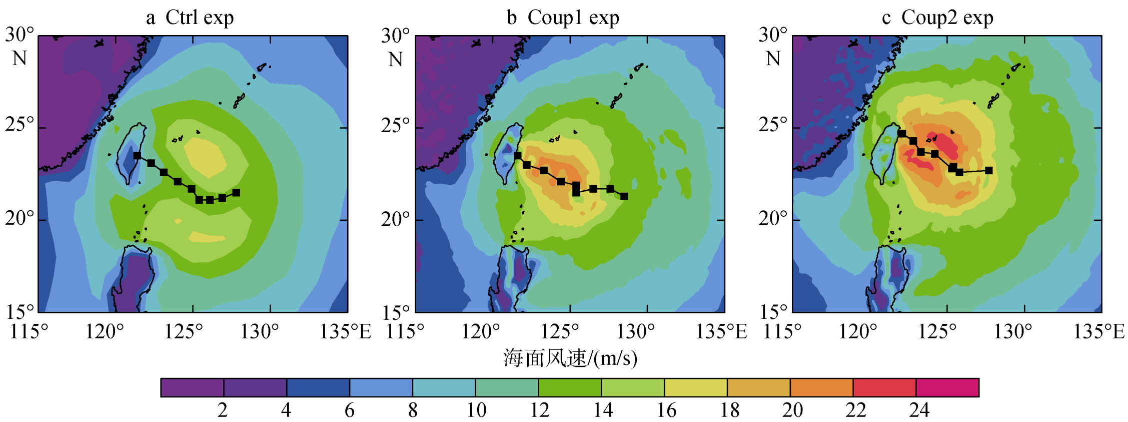

图 7 台风经过区域 26 日 00 时~28 日 00 时平均海表风速分布(单位: m/s)

Fig. 7 The mean surface wind speed from 0000Z 26 July to 0000Z 28 July (units: m/s)

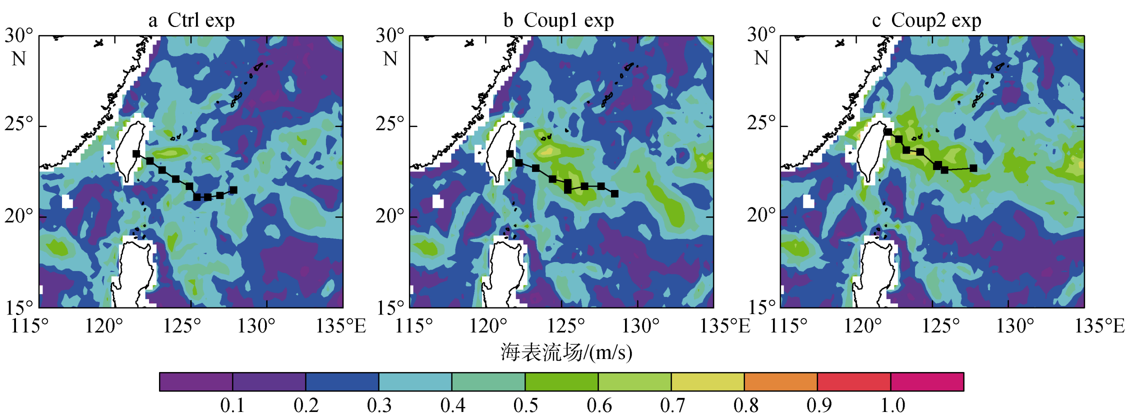

图 8 台风经过区域 26 日 00 时~28 日 00 时平均海表流速分布(单位: m/s)

Fig. 8 The mean surface stream current from 0000Z 26 July to 0000Z 28 July (unit: m/s)

3.2.2 海表温度

海表温度的变化相对缓慢, 因此选择日平均海温进行分析, 并以 NOAA 最优差值海温产品为实况进行对比。图 9 给出了三次试验 26 日日平均海温的分布, 由图可知 Ctrl 试验模拟出的海温相对 NOAA 海温明显偏高, 尤其是在西太海域, 出现了大片大于 30℃的区域; 两次耦合试验模拟出的海温则相对偏低, 其大于 30℃区域明显偏小, 其中 Coup2 试验的海温略低于 Coup1 试验, 但两者的海温分布型式较为类似, 还需通过定量计算来分析其具体差异。

根据距离台风中心的远近程度不同, 选取图 10 中 A、B、C 三块区域, 分别计算 25 日、26 日、27 日日平均海温的均方根误差, 最终得到结果如表 6~表 8 所示。

横向比较看, 在范围较大的 A 区, 三次试验对海温的模拟效果相当, 但在更加靠近台风中心的 B 区和 C 区, 两次耦合试验的模拟效果明显优于控制试验, 其中 Coup1 试验的模拟效果最好, 其在 B 区和 C 区的(三日平均)海表温度均方根误差相对 Ctrl 试验分别减小了 27.9%和 36.0%, 而 Coup2 试验相对 Ctrl 试验也分别减小了 14.4%和 21.6%。纵向上比较看, 耦合试验在 25~27 日同时次的均方根误差 A 区>B 区>

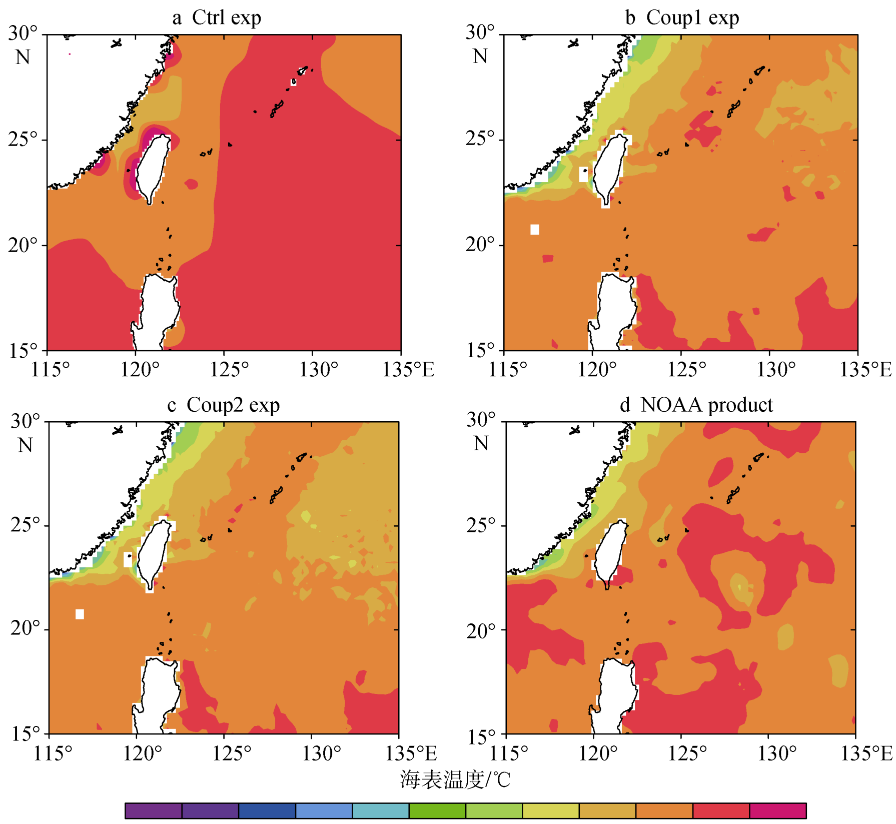

图 9 7 月 26 日日平均海表温度分布(单位: ℃)

Fig. 9 The daily mean SST on 26 July (unit: ℃)

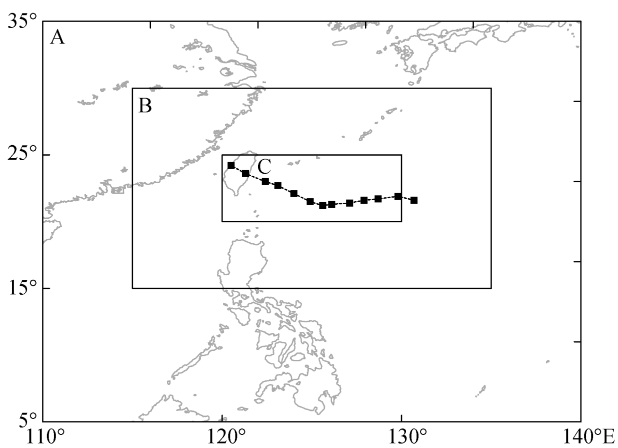

图 10 海表温度检验区域

Fig. 10 The test area of SST

C 区，而控制试验的均方根误差则基本保持不变，说明越是靠近台风中心的区域，耦合试验的模拟效果越好，其相对控制试验的优势也越大。三次试验的日平均均方根误差也体现出“随着模拟区域向台风中心靠近，三次试验模拟效果差异变大”的特征。

3.2.3 混合层深度

在台风经过海域，台风大风通常会引起混合层内流速加快，导致强的抽吸夹卷效应，该效应使得较冷海水上翻，海表温度降低，混合层深度增加[22]。Zendler 等[23]在对飓风 Felix 的观测资料分析中发现，飓风路径右侧的混合层深度 48 h 内增加了 40 m 左右；

表 6 三次试验日平均海表温度均方根误差(A 区，单位：℃)

Tab. 6 The RMSE of the daily mean SST for the control and coupled experiments (area A, units: ℃)

A 区	Ctrl	Coup1	Coup2
25 日	0.96	0.94	0.95
26 日	1.08	1.07	1.14
27 日	1.28	1.31	1.38
三日平均	1.11	1.11(0%)	1.15(–3.6%)

表 7 三次试验日平均海表温度均方根误差(B 区，单位：℃)

Tab. 7 The RMSE of the daily mean SST in the control and coupled experiments (area B units: ℃)

B 区	Ctrl	Coup1	Coup2
25 日	0.95	0.53	0.59
26 日	0.98	0.77	0.95
27 日	1.19	0.96	1.12
三日平均	1.04	0.75(27.9%)	0.89(14.4%)

表 8　三次试验日平均海表温度均方根误差(C 区，单位：℃)
Tab. 8　The RMSE of the daily mean SST in the control and coupled experiments (area C, units: ℃)

C 区	Ctrl	Coup1	Coup2
25 日	0.88	0.52	0.58
26 日	1.09	0.72	0.95
27 日	1.37	0.88	1.08
三日平均	1.11	0.71(36.0%)	0.87(21.6%)

黄立文等[10]利用海气耦合模式对台风经过区域的混合层深度进行了研究，发现台风 Winnie 使黄、东海区域的混合层深度普遍增加了 20~30 m。本文根据“海温相对于表层海温变化不超过 0.5℃”的判据来定义混合层深度[24]，并分析台风经过区域 48 h 内混合层深度的变化。

如图 11 所示，Ctrl 试验由于采用了风速较小的 NCEP 风场驱动海洋模式运行，台风经过区域混合层深度加深并不明显，大多在 0~20 m，在有些区域混合层深度还有所降低；而 Coup1 试验和 Coup2 试验采用了风速较大的大气模式风场驱动海洋模式运行，台风经过区域混合层深度显著加深，在距离台风中心一个经纬度范围内混合层深度普遍增加 20 m 以上，在靠近台风中心的某些区域，增加深度达 50 m 以上。Coup1 试验由于台风强度更强，海表风速更大，相对 Coup2 试验混合层深度加深更多。三次试验中混合层深度增加较大区域基本位于台风路径右侧，这与同时段内海表风速大值区(图 7)、海表流速大值区(图 8)和海表温度降温区(图 12)均有明显对应关系，这说明耦合试验中混合层深度对大气的响应是由于台风大风造成了海表流速增大，强烈的抽吸夹卷效应使得 SST 降低，最终造成了混合层深度的增加。

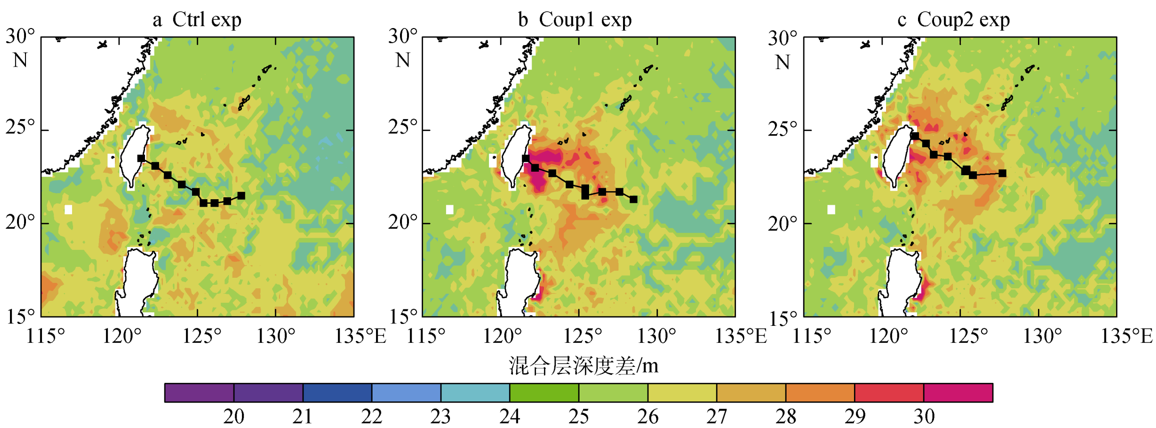

图 11　台风经过区域 28 日 00 时与 26 日 00 时混合层深度之差(单位: m)
Fig. 11　Deep-mixing difference from 0000Z 26 July to 0000Z 28 July (units: m)

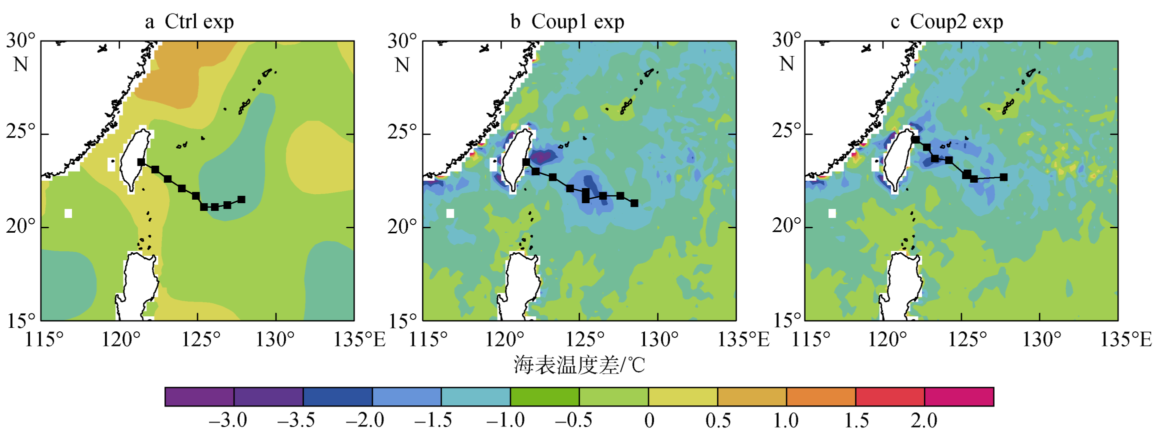

图 12　台风经过区域 28 日 00 时与 26 日 00 时海表温度之差(单位：℃)
Fig. 12　Deep-mixing difference from 0000Z 26 July to 0000Z 28 July (units: ℃)

4 结论

本文利用MCT耦合器，构建了WRF-POM并行区域海气耦合模式，该耦合模式能够稳定高效地运行，并较好地再现了台风“凤凰”的活动过程。

总体来说，耦合模式相对于单一的大气模式，更好的模拟出了台风“凤凰”的路径和强度，其中，不使用Bogus方案的Coup1试验模拟效果最好，其路径平均绝对误差相对Ctrl试验和Coup2试验分别减小了 20.1%和 72.5%，强度平均均方根误差相对Ctrl试验和Coup2试验分别减小了41.4%和17.9%；而使用了Bogus方案的Coup2试验仅在试验前期对台风强度模拟较好，超过一定时间后其模拟的台风路径和强度均出现偏差。耦合过程中海洋对大气的响应明显：两次耦合试验中，海表温度明显降低，对应区域的混合层深度也显著加深。耦合模式还有效地提高海表温度场的模拟准确性，且越靠近台风中心模拟越准确。

本文仅针对台风“凤凰”个例进行了模拟试验，由于大多数海洋要素缺乏相应时刻的实况资料，只进行了各试验间的对比分析，因此模拟的准确性还有待进一步检验。在下一步的工作中，还应对不同区域的更多个例进行试验分析，提取共性，研究差异，才能进一步验证WRF-POM区域海气耦合模式的性能，更深一步探究中尺度海气耦合作用机理。

参考文献:

[1] Zebiak S E, Cane M A. A model El Nino-Southern oscillation[J]. Mon Weather Rev, 1987, 115: 2262-2278.

[2] 徐建霞，孙照渤，雷兆崇．用海-气耦合模式作季风季节平均环流的数值试验[J]．南京气象学院学报，1992, 15: 332-341.
Xu Jianxia, Sun Zhaobo, Lei Zhaochong. A numeical experiment on the monsoon circulation using a coupled ocean-atmosphere model[J]. Journal of Nanjin Institute of Meteorology, 1992, 15: 332-341.

[3] 彭世球，刘段灵，孙照渤，等．区域海气耦合模式研究进展[J]．中国科学：地球科学, 2012, 42(9): 1301-1316.
Peng Shiqiu, Liu Duanlin, Sun Zhaobo, et al. Recent advances in regional air-sea coupled models[J]. Sci China Earth Sci, 2012, 42(9): 1301-1316.

[4] Hodur R M. The naval research laboratory's coupled ocean/atmosphere mesoscale prediction system[J]. Mon weather rev, 1997, 125: 1414-1430.

[5] Lars R S, Kerry A E. The ocean's effect on the intensity of tropical cyclones: results from a simple coupled atmosphere-ocean model[J]. J Atoms Sci, 1998, 56: 642-651.

[6] Seo H, Miller A J, Roads J O. The scripts coupled ocean-atmosphere regional (SCOAR) model with applications in the Eastern Pacific sector[J]. J Clim, 2007, 20: 381-402.

[7] Li Y, Xue H, Bane J M. Air-sea interactions during the passage of a winter storm over the Gulf Stream: A three-dimensional coupled atmosphere-ocean model study[J]. Journal of Geophysical Research Oceans, 2002, 107(C11): 21-1-21-13.

[8] Warner J C, Armstrong B, He R, et al. Development of a coupled ocean–atmosphere–wave–sediment transport (coawst) modeling system[J]. Oocean modelling, 2010, 35(3): 230-244.

[9] Warner J C, Geyer W R, Lerczak J A. Numerical modeling of an estuary: A comprehensive skill assessment[J]. Journal of Geophysical Research Oceans, 2005, 110(C5): 297-314.

[10] 黄立文，吴国雄，宇如聪．中尺度海-气相互作用对台风暴雨过程的影响[J]．气象学报，2005, 63(4): 455-467.
Huang Liwen, Wu Guoxiong, Yu Rucong. The effects ofmesoscale air-sea interaction on heavy rain in two typhoon processes[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2005, 63(4): 455-467.

[11] 蒋小平，刘春霞，齐义泉．用一个海-气耦合模式对台风Krovanh的模拟[J]．大气科学, 2009, 33: 99-108.
Jiang Xiaoping, Liu Chunxia, Qi Yiquan, et al. The impact of air-sea interactions on typhoon structure [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 2009, 33: 99-108.

[12] 刘磊，费建芳，黄小刚，等．大气-海浪-海流耦合模式的建立和一次台风过程的初步试验[J]．物理学报，2012, 61(14): 523-531.
Liu Lei, Fei Jianfang, Huang Xiaogang, et al. The development of atmosphere-current-wave fully coupled model and its application during a typhoon process[J]. Acta Phys, 2012, 61(14): 523-531.

[13] 符晓单，李洪平．MPI环境下基于边界校正方法的海洋模型的并行化[J]．海洋科学, 2015, 39(5): 62-67.
Fu Xiaodan, Li Hongping. A boundary correction method for the parallelization of ocean model under MPI environment[J]. Marine Science, 2015, 39(5): 62- 67.

[14] 邓建．中尺度海-气-浪耦合模式系统的研究与应用[D]．武汉：武汉理工大学, 2007.
Deng Jian. The research and application of a mesoscale scale air-sea-wave coupled model system[D]. Wuhan: Wuhan university of technology, 2007.

[15] 曾庆存，周广庆，浦一芬，等．地球系统动力学模式及模拟研究[J]．大气科学, 2008, 32(4): 653-690.
Zeng Qingcun, Zhou Guangqing , Pu Yifen, et al. Research on the earth system dynamic model and some related numerical simulat ions[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences , 2008 , 32 (4): 653-690.

[16] 关皓，周林，薛彦广，等．南海中尺度大气-海流-海

浪耦合模式的建立及应用[J]. 热带气象学报, 2012, 28(2): 211-218.
Guan Hao, Zhou Lin, Xue Yanguang, et al. An applied study on the atmosphere-ocean-wave coupled model in the south china sea[J]. Journal of tropical meteorology, 2012, 28(2): 211-218.

[17] 刘磊, 费建芳, 马占宏, 等. 区域台风-海洋耦合模式的构建及应用研究[J]. 大气科学, 2017, 41(1): 178-188.
Liu Lei, Fei Jianfang, Ma Zhanhong, et al. Construction and application of a regional typhoon–ocean coupled model[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 2017, 41(1): 178-188.

[18] 关皓, 周林, 王汉杰, 等. 南海中尺度大气-海浪耦合模式及其对该区一次强台风过程的模拟研究[J]. 气象学报, 2008, 66(3): 342-350.
Guan Hao, Zhou Lin, Wang Hanjie, et al. A mesoscale atmosphere-ocean wave coupling model and numerical simulations on a strong typhoon process in South China Sea[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2008, 66(3): 342- 350.

[19] 蒋小平, 刘春霞, 莫海涛, 等. 海气相互作用对台风结构的影响[J]. 热带气象学报, 2010, 26(1): 55-59.
Jiang Xiaoping, Liu chunxia, Mo Haitao, et al. The impact of air-sea interactions on typhoon structure[J]. Journal of tropical meteorology, 2010, 26(1): 55-59.

[20] 杨成荫. 航空短期区域气候预测系统中的模式架构及卫星信息同化研究[D]. 南京: 解放军理工大学, 2013.
Yang Chenying.The model framework and satellite information assimilation in regional aviation short-term climate prediction system[D]. Nanjing: PLA University of Science and Technology, 2013.

[21] Wang Guomin, Wang Shiwen, Li Jianjun. A bogus typhoon scheme and its application to a movable nested mesh model[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 1996, 13(1): 103-114.

[22] 安玉柱, 王彦磊, 张韧. 上层海洋温盐结构对台风的响应[R]. 南京: 解放军理工大学气象海洋学院, 2014.
An Yuzhu, Wang Yanlei, Zhangren. Upper ocean temperature and salinity structure response to typhoon[R]. Nanjing: College of Meteorology and Oceanography, PLA University of Science and Technology, 2014.

[23] Zedler S E, Kanschat G, Korty R, et al. A new approach for the determination of the drag coefficient from the upper ocean response to a tropical cyclone: a feasibility study[J]. Journal of Oceanography, 2012, 68(2): 227-241.

[24] Kelly K A, Qiu B. Heat flux estimates for the western North Atlantic.I : As similation of satellite data into a mixed layer model[J]. J Phys Oceanogr, 1995, 25: 2334-2360.

The development and application of the WRF-POM regional air-sea coupled model based on the MCT coupler

LIU Wu[1], YANG Cheng-yin[2], LI Yao-dong[3], SHI Xiao-kang[3]

(1. Army 96631 of PLA, Beijing 102206, China; 2. Army 93199 of PLA, Harbin 150001, China; 3. Beijing Aviation Meteorological Institute, Beijing 100085, China)

Received: Oct. 23, 2017
Key words: regional air-sea coupled model; numerical simulation; typhoon; mesoscale ocean-air interaction

Abstract: The objective of this paper was to study the application of a regional air-sea coupled model to mesoscale air-sea interactions. Based on the MCT (Model Coupling Toolkit)parallel communication technology (MPI), this paper developed the Weather Research and Forecasting Model/Princeton Ocean Model (WRF-POM) regional air-sea coupled model via the MCT coupler and used this model to carry out a series of numerical simulations on Typhoon "Fung-Wong". The experimental results showed that the coupled model ran stably and efficiently. It also well-simulated Typhoon "Fung-Wong." Compared with the single atmospheric model (WRF), the coupled equations more accurately simulated typhoon track and intensity. Compared with both the control experiment and the coupled experiment that used the "Bogus Schemes", the coupled experiment that did not use the "Bogus Schemes" performed best. Its mean absolute error for storm path was reduced by 20.1% and 72.5% compared with the control and "Bogus Schemes" coupled experiments, respectively, and its average root mean square error for intensity was reduced by 41.4% and 17.9%, respectively. The coupled model could also accurately simulate the feedback systems between the top ocean layer and the atmosphere. For example, model output reflected strong typhoon winds increasing the velocity of the sea surface current, and demonstrated deepening of the mixed-layer and surface cooling through upwelling.

(本文编辑: 李晓燕)