

谱松弛同化技术对台风季节活动数值模拟的影响

渠鸿宇, 李响, 凌铁军, 张蕴斐

(国家海洋环境预报中心 自然资源部海洋灾害预报技术研究重点实验室, 北京 100081)

摘 要: 采用 COAWST 模式针对 2015 年 5 月 1 日—11 月 1 日的台风季节活动设计了两组对比试验, 探讨谱松弛同化技术对台风季节活动数值模拟的影响。通过比较两种试验结果中的台风季节信息发现: 谱松弛能够显著提高对台风频数、强度、气旋累积能量分布以及路径密度分布的模拟。这种改善与模式中大尺度场如环流场、位势高度场、海温的改善息息相关。由于谱松弛的作用, 模式能够基本再现边界场中的大尺度信息, 避免台风活动导致大尺度场发生严重漂移, 同时模式自身中小尺度过程能够自由发展, 这使得模拟的台风季节活动更加符合观测。

关键词: 台风季节活动; COAWST 模式; 谱松弛

中图分类号: P444 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2020)03-0018-11

1 引言

发生在热带海洋上的, 具有暖中心结构的强烈性涡旋被称作台风(Typhoon, TY)。通常台风并非特指某一等级的热带气旋, 而是对中心持续风速达到 17.2 m/s 及以上热带气旋的统称^[1]。世界上台风生成最多的区域位于西北太平洋, 每年生成频次高达 28.2 个^[2], 而我国毗邻西北太平洋, 平均每年有 7 个登陆台风^[3]。由台风造成的狂风暴雨和风暴潮会给沿海地区带来重大的财产损失甚至人员伤亡^[4]。

台风是一个海气相互作用的天气过程, 台风的强风会引起海浪, 海浪增加了海平面的摩擦力, 加大海气之间的热量和动量交换, 同时摩擦力增大会消耗台风的动能; 台风对海表温度的变化也会有响应, 如海表温度降低, 将会使台风强度变小, 台风风速降低^[5]; 另外, 台风活动具有显著的季节和年际变化, 大部分台风发生在 5—11 月份, 1977—2016 年间, 平均每年生成热带风暴(Tropical Storm, TS)等级之上的台风数 26 个, 年频数最大值 37 个, 最小值

14 个。这些明显的季节和年际变化受具有缓慢变率的外部强迫场控制, 如海表面温度(Sea Surface Temperature, SST)、大尺度大气环流型和各种气候变率模态。

依据台风季节活动和强迫场的显著关系, 建立统计模型进行台风季节预报, 即统计预报方法。统计预报方法是基于观测数据和再分析数据建立的, 由于历史台风样本有限, 通过统计模型的台风季节预报具有很大的时间局限性^[6]。随着计算机计算能力的提高, 数值模式迅速发展, 动力方法也逐渐发展起来。动力方法即通过数值模式进行台风季节预报。近年来, 使用动力方法进行台风季节预报的研究也逐渐增多。全球模式首先被用来进行台风季节预报的研究。Chen 等^[7]使用地球物理流体力学实验室高分辨率大气模型(25 km)对北半球三大海域北大西洋、东太平洋和西太平洋 1990—2010 年 6—11 月的 TS 和飓风(台风)频数进行了回报试验, 试验包括 5 个集合成员。在北大西洋海域(North Atlantic, NA), TS 和飓风频数具有很高的预报效

收稿日期: 2019-03-22; 修回日期: 2019-05-20。

基金项目: 全球变化与海气相互作用专项(GASI-IPOVAI-06)。

作者简介: 渠鸿宇(1994-), 男, 助理工程师, 硕士, 主要从事台风天气、季节尺度数值模拟研究。E-mail: 1030184860@qq.com

通讯作者: 李 响(1986-), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事海气相互作用研究。E-mail: lixiang@nmefc.cn

果,相关系数高达0.89(TS)和0.88(飓风),但在西北太平洋海域(Western North Pacific, WNP)较低,分别为0.36(TS)和0.34(TY)。虽然全球模式的精度不断提高,但同时也需要耗费巨大的计算资源。区域模式具有高分辨率的同时,大大降低了计算量。区域模式还具有更完备的物理过程,能更好地模拟出中小尺度过程^[8],另外,台风活动具有一定的区域特征,全球模式的台风季节活动预报技巧在不同海域存在差别,用区域模式研究特定海域台风季节活动则更具针对性。因此,很多学者开始使用区域模式,以全球模式的预报结果作为初边界场,进行台风季节活动的模拟。但是,区域模式中的大尺度场会在模拟过程中发生漂移现象^[9],这会给长时间的台风动力季节预报带来巨大误差。因此,如何准确预报出区域模式中的大尺度场,是提高区域模式对台风季节预报准确率的关键。

区域气候模式的大尺度场主要靠边界场提供,所以,早期研究工作采用优化侧边界方案来达到这种目的。Davies等^[10]使用了边界松弛技术,使沿着模拟区域边界的缓冲区松弛逼近到大尺度驱动场,这种方法有效地解决了区域气候模式和驱动场中信息的不连续性,且有效提高了边界场中大尺度信息的再现能力。后来也有学者对这种方法做出改善,如加大缓冲区圈数,松弛强度采用自然指数的权重函数,但这种方法仍会使区域内大尺度场出现间断偏移^[11]。Stauffer等^[12]采用了格点松弛,即在区域内的每个网格点上松弛逼近到大尺度场来进行空气质量的模拟。Waldron等^[13]和 Von Storch等^[14]采用了另一种松弛方法——谱松弛,即只对区域内特定的纬向和经向的波进行松弛。很多研究证明了以上技术能够有效提高区域气候模式对大尺度场的模拟效果。Liu等^[15]用天气预报模式(Weather Research and Forecasting, WRF)对谱松弛和格点松弛在降尺度过程中的不同效果进行了研究,发现格点松弛在过度地还原大尺度场特征的同时抑制了中小尺度的自由发展,而谱松弛则既能防止偏离大尺度场,又能保留中小尺度的特征。Knutson等^[16]使用地球物理流体动力学实验室的高分辨率大气模式,采用谱松弛(波数为3)方法对1980—2006年7月29日—10月31日大西洋飓风活动进行了模拟,模式结果不仅再现了飓风频数的年际变化,而且

模拟出观测接近的4级飓风频数,但是对5级飓风频数以及飓风生成地的模拟仍存在不足。曹剑等^[17]使用 $1^\circ \times 1^\circ$ 的全球分析资料(Final Operational Global Analysis, FNL)数据驱动WRF(27 km)模式,在格点 nudging 方法下,对2006年7—9月WNP的台风活动进行了模拟,模式结果不仅较好地模拟出了季节内震荡(Madden-Julian Oscillation, MJO)和准双周振荡,而且对台风频数、移动路径和强度的模拟都与观测接近。Wang等^[18]使用WRF模式在对台风个例进行模拟过程中,使用谱松弛方法松弛逼近最外层网格中高层风场,结果表明谱松弛能够显著优化台风路径和强度的模拟效果。Choi等^[19]研究了谱松弛对西北太平洋2002年6月18日—9月18日台风活动模拟的影响,研究结果证明谱松弛对台风频数、路径分布以及模拟区降水等信息的模拟具有显著改善效果。渠鸿宇等^[20]使用WRF模式对比了谱松弛与格点松弛对台风路径和强度模拟的影响发现:谱松弛和格点松弛都能显著优化台风路径和强度的模拟,但谱松弛方法模拟的台风强度更加符合观测,这是因为谱松弛只对高层的大尺度场进行松弛逼近,使得模式的中小尺度过程能够自由发展。后来,Peng等^[21]又提出了与谱松弛类似的选尺度同化方法,与谱松弛方法通过添加一个松弛项来改善区域模式大尺度长模拟的方法不同,选尺度同化方法基于三维变分同化技术和低通滤波技术,将全球模式的大尺度场与区域模式的中小尺度场混合有效缓解了谱松弛方法中的动力不协调问题。已有研究证明选尺度同化方法在改善台风路径和强度预报上较谱松弛方法更具优越性^[22]。

从上述研究可以看出,相比而言,选尺度同化方法作为新发展的方法,具有一定的优势,但还未被广泛应用。相比而言,谱松弛方法已经广泛应用于多种模式中并取得一定的改善效果,但对于西北太平洋台风季节活动的数值模拟及预测,之前的研究多基于单一的大气模式实现。台风作为一个海气浪相互作用的过程,主要发生在每年的5月1日—11月1日,因此有必要以全球大尺度场数据驱动区域耦合模式,考察谱松弛对长达6个月的西北太平洋台风季节活动模拟的改进能力,为提高基于区域耦合模式的台风动力季节预报的预报技巧进行

阶段性的探索。

本文主要包含5部分内容:第二部分介绍了本文使用的模式、数据和方法;第三部分考察了谱松弛对台风动力季节模拟的影响;第四部分对影响台风季节活动的背景场进行了对比分析;最后,第五部分为全文的总结。

2 模式、数据及方法

2.1 模式

本文使用的模式是由Warner等^[23]提出发展的海洋-大气-海浪耦合模式系统(Coupled Ocean-Atmosphere-Wave-Sediment Transport, COAWST)。该耦合模式的3个分量模式分别为大气模式(Weather Research and Forecasting Model, WRF-ARW)、海洋模式(Regional Ocean Modeling System, ROMS)和海浪模式(Simulated WAVes Nearshore, SWAN),耦合器为(Model Coupling Toolkit, MCT)。图1为模式模拟区域的地形高度,模式区域覆盖了西北太平洋台风活动的全部区域。

大气模式WRF-ARW是由美国国家环境预报中心(National Center for Environmental Prediction, NCEP)、美国国家大气研究中心(National Center for Atmospheric Research, NCAR)和俄克拉荷马大学共同开发的新一代中尺度预报模式^[24]。WRF模式对大气运动的关键物理过程提供了多种物理参数化方案,不同方案的选取会导致不同的模拟结果。本文选用了如下的物理过程参数化方案:

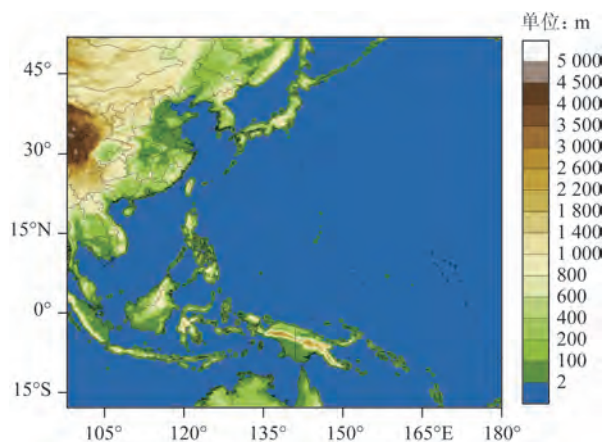


图1 模式模拟区域的地形高度

RRTM长波辐射方案、Ferrier微物理方案、Noah陆面方案、Dudhia短波辐射方案、Kain-Fritsch积云对流方案、MYNN 2.5层TKE边界层方案等。模式的水平分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,垂直方向分为61层,积分步长为60 s。

海洋模式ROMS为加利福尼亚大学(University of California)与罗格大学(Rutger University)共同开发完成^[25]。动力框架采用自由表面、三维非线性的斜压原始方程。ROMS既可以模拟全球尺度的环流系统,又可以模拟由天文潮或气象因素引起的中尺度流场变化,还可以模拟小尺度的渠道、河川等。与其他海流模式相比,ROMS使用了S(Stretched)坐标系,这种坐标系能够描述流场受地形的影响;与POM模式不同,ROMS模式垂向上采用非等比例的分层方式,能更好地解析底边界层和温跃层;另外,ROMS使用的新的水平压力梯度演算明显减少了水平压力梯度计算误差的累积^[26]。本文中,ROMS水平分辨率为 $1/20^\circ \times 1/20^\circ$,垂直方向上分为40层。

海浪模式SWAN是由代尔夫特科技大学(Delft University of Technology)研发的第三代近岸海浪数值计算模式,被广泛应用于浅海数值研究中。SWAN模式的动力框架为基于能量守恒的平衡方程,以具有无条件稳定特点的全隐式有限差分格式进行计算,在平衡方程的各源项中,除了考虑四波相互作用、风输入、破碎和摩擦项等,还加入了三波相互作用以及深度破碎(Depth-induced wave breaking)作用。

各模式通过MCT^[27]进行变量传递,WRF主要向ROMS传递风速、水汽和热量等变量,向SWAN传递风速等变量;ROMS向WRF传递SST等变量,向SWAN传递流速、海平面高度等变量;SWAN向WRF和ROMS传递有效波高、波长等变量。

2.2 数据

本文使用NCEP的气候预报系统再分析(Climat Forecast System Reanalysis, CFSR)数据^[28-29]作为模式的初边界场。CFSR再分析数据是NCEP最新的全球再分析产品,其同化了大量常规观测和卫星数据,并考虑了 CO_2 浓度的变化,数据包括1979—2011年海洋、大气以及地表和辐射通量数据。在2011年之后,以CFSv2业务分析数据作为

CFSR的补充,并进行实时更新。本文使用了2015年CFSv2业务分析数据作为模式的初边界场,海洋和大气数据的水平分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$,时间分辨率为6 h,海洋垂直层数为40层,大气垂直层数为37层,最高层为1 hPa。

本文使用中国气象局(China Meteorological Administration, CMA)热带气旋最佳路径数据集^[30]对模拟结果中的台风信息进行评估。数据集记录了1949年之后西北太平洋区域所有热带气旋的经纬度、最低海平面气压、最大风速和台风等级等信息,时间间隔为6 h。

本文使用美国NOAA气候预测中心(Climate Prediction Center, CPC)制作的CPC MORPHing technique (CMORPH)降水数据^[31]检验模式中的降水分布。CMORPH是利用多平台卫星观测资料制作而成高分辨率产品。本文采用的CMORPH数据为日平均数据,空间分辨率为 0.25° 。

2.3 谱松弛

本文区域模式在模拟过程中需打开谱松弛^[15],谱松弛是一种同化方案,能够显著优化区域模式大尺度场的模拟。谱松弛只对模式中的特定长波进行松弛逼近,以下为需要进行松弛逼近的长波预报方程:

$$\varphi = \varphi_r + \alpha(\varphi_g - \varphi_r) \quad (1)$$

式中: φ 为逼近后的长波, φ_g 、 φ_r 分别代表驱动场的长波和区域模式预报的长波。在波数选择上,Von Storch等^[14]选择保留模式区域的前3个波,在本文试验中,截断波长同样设置为3,即只对波长大于2 500 km的长波进行松弛逼近,小于该波长的部分在区域模式更完备的物理过程下自由发展。谱松弛另外一个重要参数为强度系数,对于台风路径和强度模拟,较大或较小的强度系数都会使模拟误差偏大。经过一系列试验证明,当强度系数设置为0.0003时,对应的衰减时间(时间间隔与强度系数的比值,时间间隔为6 h)为11.5 d,台风路径和强度模拟具有较小的误差。另外,谱松弛只同化高层的大尺度场,在保证模式高层大尺度场不发生严重漂移情况下,模式自由发展低空的中小尺度过程。

3 谱松弛对台风季节活动数值模拟的影响

3.1 试验设计

为了探讨谱松弛对台风动力季节预报的影响,设计两组不同的试验:

(1)在模拟过程中不使用谱松弛的试验(NO_SN)。

(2)在模拟过程中打开谱松弛的试验(SN),即大气模式在积分过程向边界场松弛逼近,其中谱松弛参数选取为:经纬向的截断波数为3,强度系数为0.0003,松弛变量包括经纬向风、温度、比湿以及高度场。

两组试验均使用CFSv2业务分析数据作为初边界场,海洋模式的初始场采用集合最有插值(EnOI)同化后的初始场。模式积分时间为2015年5月1日—11月1日。

3.2 结果对比

图2给出了2015年5月1日—11月1日期间观测数据、CFSR数据以及两组试验诊断出的台风频数的对比。CMA观测数据一共记录了20个强于TS等级的台风,其中7月、8月、9月、10月生成较多,5月、6月较少;达到TY等级的台风有16个,其中7月和10月生成较多,都达到4个。CFSR数据诊断出17个强于TS等级的台风,13个达到台风等级,各月的分布情况和观测基本一致,5月、6月偏少,7月、8月、9月、10月偏多。在未使用谱松弛的试验中,共模拟出30个强于TS等级的台风,其中达到台风等级的只有5个,可见,在未使用谱松弛的模拟中,生成了多个弱台风,而强台风却明显偏少;另外,各个月的分布情况与观测存在明显偏差,台风生成频数最高的月份为6月,达8个,而观测中6月只生成了两个台风,强于TY等级的台风的月变化也存在明显的负偏差。使用谱松弛后,模式的大尺度场在模拟过程中不断向CFSR数据调整,台风频数较NO_SN试验明显改善,共模拟出22个强于TS等级的台风,其中达到台风等级的有12个,各个月的台风分布情况与观测也很接近,7月、8月、9月、10月份模拟出了较多的台风,强于TY等级的台风在各月频数上

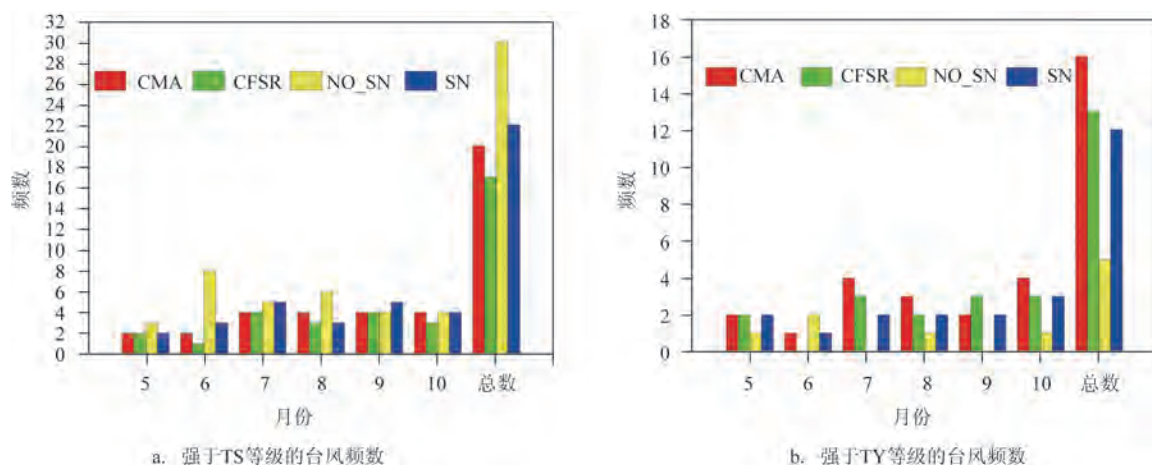


图2 两组试验方案模拟的台风频数月变化与CFSR数据及CMA观测的台风频数月变化的对比

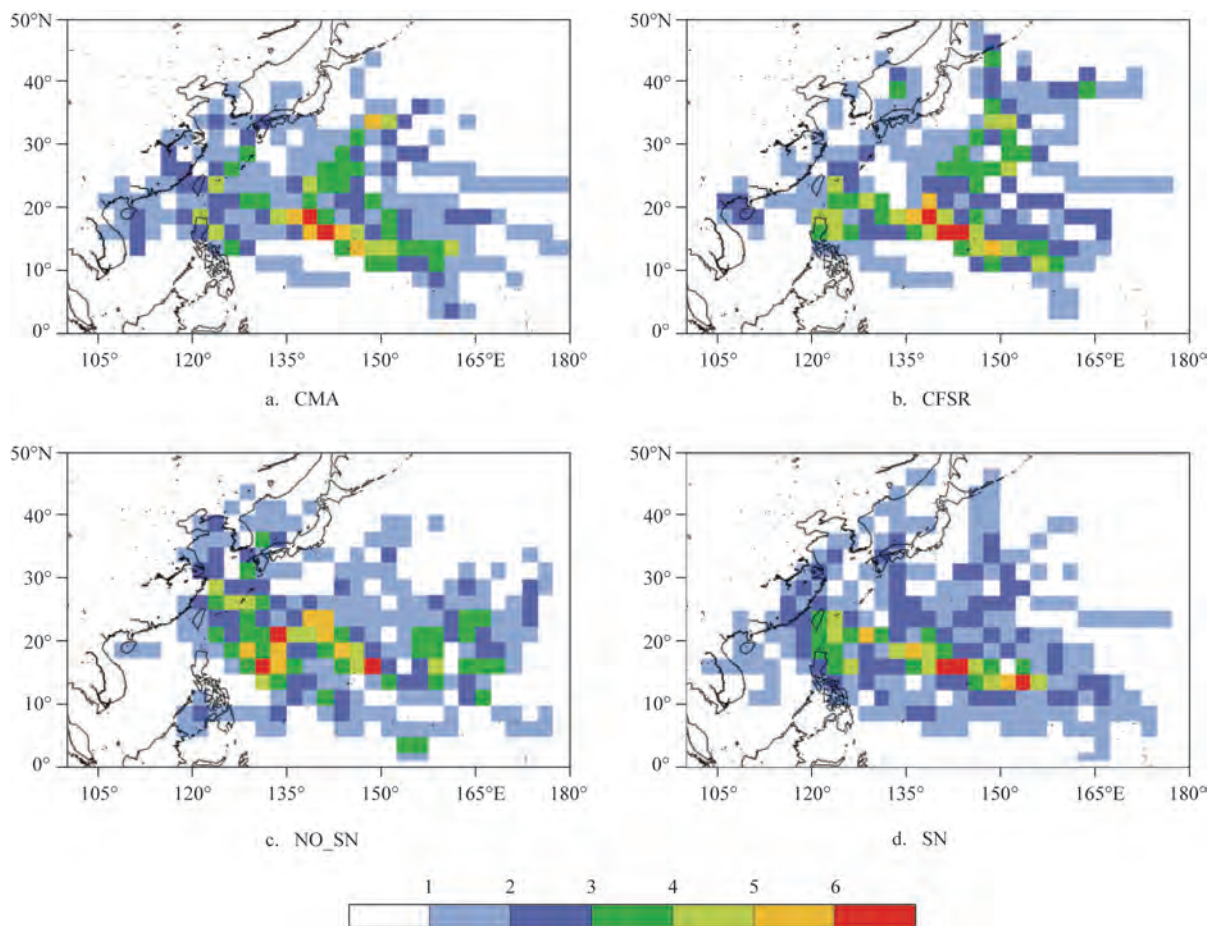


图3 两组试验方案模拟的与CFSR数据及CMA观测的台风路径密度(格距 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$)对比

也存在负偏差,但比NO_SN试验更加接近观测。

如图3所示,为2015年5月1日—11月1日期间观测数据以及CFSR数据、两组试验模拟结果中台

风路径密度的分布状况。观测数据中,台风多于低纬度生成,而后向西北行进或于 20°N 向东北转向,路径密度分布存在两个高值区分别位于菲律宾东

北至日本以南区域和 $135^{\circ}\sim 160^{\circ}\text{E}$, $10^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{N}$ 区域。CFSR 数据中的路径密度分布与观测基本一致。在 NO_SN 试验中, TS 生成位置偏东, 其中有多台风在 150°E 以东生成后直接向北或东北方向移动, 路径密度在南海区域出现明显负偏差, 在 150°E 以东区域出现明显正偏差, 另外在 $135^{\circ}\sim 150^{\circ}\text{E}$, 20°N 附近存在明显正偏差。在 SN 试验中, 台风路径密度高值区与观测基本对应, NO_SN 试验中的路径密度偏差得到明显改善, SN 试验模拟的台风路径密度较 NO_SN 试验更加贴近观测。

图4为2015年5月1日—11月1日期间CMA观测数据以及CFSR数据、两组试验模拟结果中气旋累积能量(Accumulated Cyclone Energy, ACE)的分布状况。观测数据中, 高值主要分布在 $120^{\circ}\sim 145^{\circ}\text{E}$, 20°N 附近, 最高值达到 $2.4\times 10^4\text{ m}^2/\text{s}^2$, CFSR

中的ACE与观测几乎一致, 高值区基本对应, 最高值同样高达 $2.4\times 10^4\text{ m}^2/\text{s}^2$ 。在NO_SN试验中, ACE的分布与观测相差较大, 在菲律宾东北部的值很小, 在观测的高值区出现了较大的负偏差, ACE最大值约为 $1\times 10^4\text{ m}^2/\text{s}^2$, 这与NO_SN试验中的台风路径偏差较大且强度偏弱有关。与NO_SN试验相比, SN试验中, ACE的分布得到明显改善, 分布与观测一致, 高值区与观测中的高值区基本对应, 但仍然存在负偏差, ACE最高值约达 $1.5\times 10^4\text{ m}^2/\text{s}^2$ 。

如图5所示为2015年5月1日—11月1日期间观测数据以及CFSR数据、两组试验中台风中心最低气压最低值的频数直方图。观测数据中, 超过50%的台风最低气压低于940 hPa, 强于970 hPa的台风占总台风数的75%, 最低的达到900~910 hPa。由于CFSR数据和模式分辨率较低, 无法再现台风

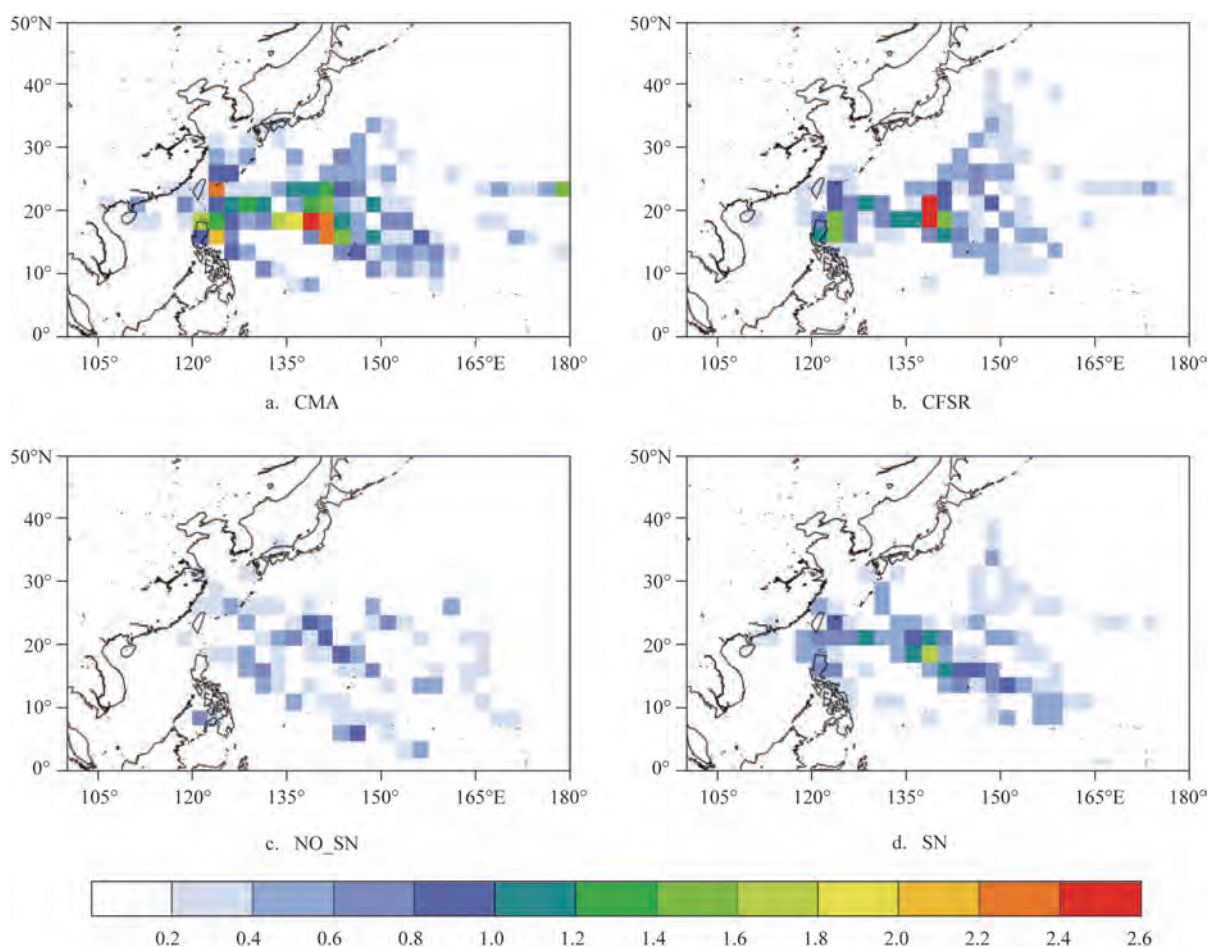


图4 两组试验方案模拟的与CFSR数据及CMA观测的ACE的对比(格距 $2.5^{\circ}\times 2.5^{\circ}$,单位: $10^4\text{ m}^2/\text{s}^2$)

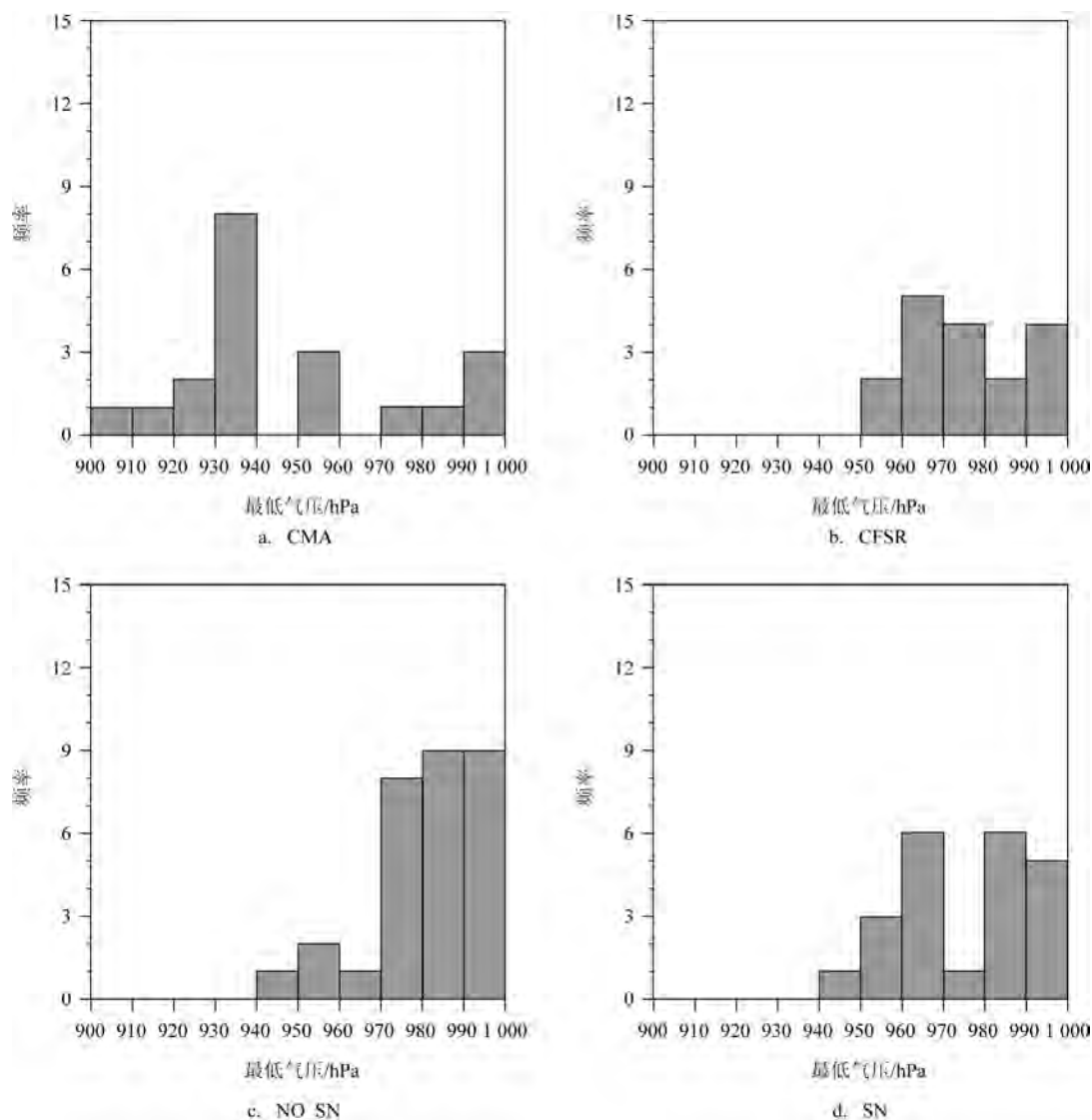


图5 两组试验方案模拟的与CFSR数据及CMA观测的台风中心最低气压的最低值的频率分布直方图的对比

真实强度。在CFSR数据中,最低气压只达到950~960 hPa,强于970 hPa的台风占41%。在NO_SN试验中,模拟的弱台风偏多,强台风偏少,台风最低达到940~950 hPa,强于970 hPa的台风仅占13%。在使用谱松弛下,对台风强度的模拟有所改善,虽然最低气压同NO_SN试验相同也只达到940~950 hPa,但模拟出了多个较强的台风,强于970 hPa的台风占比45%,明显高于NO_SN试验。说明使用谱松弛同化方案,通过动力降尺度的方法,以CFSR数据作为初边界场驱动区域耦合模式进行台风季节活动的模拟,可以明显改善台风强度的模拟效果。

4 原因分析

上面分析已经证明了谱松弛对台风季节活动数值模拟的改善作用,下面对其原因进行分析。如图6所示为两组试验方案模拟的与CFSR数据500 hPa位势高度场的日平均相关系数,其中黑点表示在此刻有台风存在。在NO_SN试验中,相关系数变化幅度较大且值偏低,在8月份达到最低值0.52,表明NO_SN试验中500 hPa位势高度场的模拟存在较大误差。值得注意的是,在偏移较严重的时刻总是伴随着台风的出现,在偏移最严重的8月

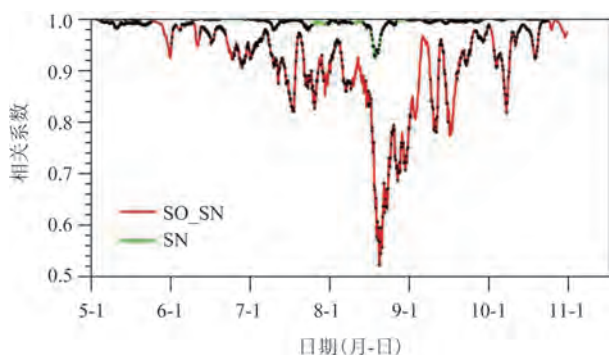


图6 两组试验方案模拟的与CFSR数据中500 hPa位势高度场的日平均相关系数(黑点代表在此刻有台风)

份共生成5个台风,其中包含台风季最强台风,强度达到948 hPa。在SN试验中,相关系数一直保持在0.9以上,同样在8月份,由于强台风的出现使得相关系数变小,之后谱松弛的调整作用,又将相关系数提高至近1。在没有使用谱松弛的试验中,500 hPa位势高度场与观测存在较大偏差,导致模拟的台风也出现较大偏差。而在SN试验中,由于高度场的松弛逼近,模式基本再现了观测的500 hPa位势高度场,这在一定程度上提高了台风模拟的准确性,尤其是台风路径方面的准确性。

图7为两组试验方案模拟的与CNORPH中降

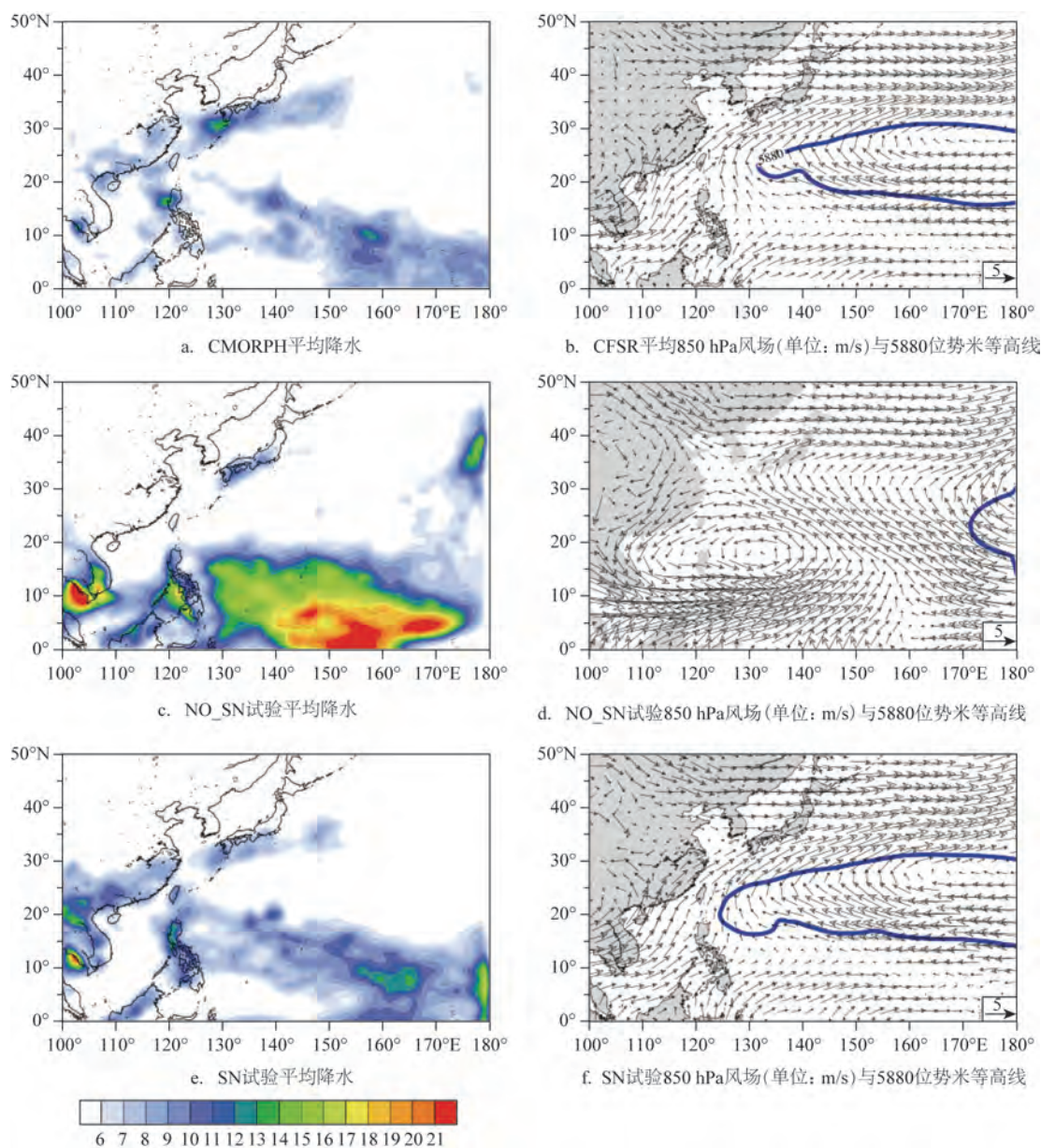


图7 两组试验模拟的与观测的降水(单位:mm/d)和形势场分布

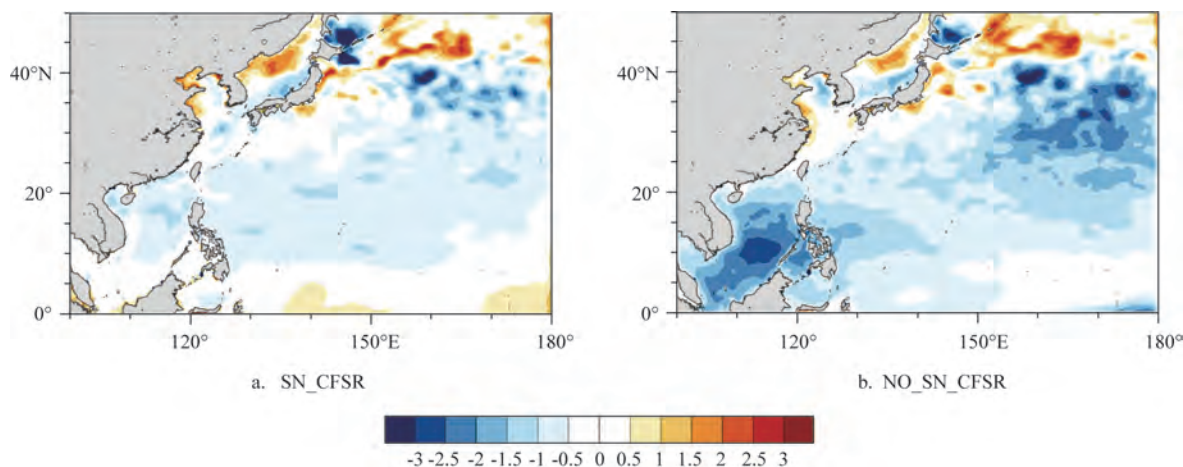


图8 两组试验方案模拟的与CFSR数据中6个月平均SST的差异分布(单位:℃)

水分布(左列)和850 hPa风场和5880位势米等高线(右列)的分布。在CMORPH数据的降水分布中,主要存在两条雨带,一个与西南季风相对应,从中南半岛延伸到韩国、日本区域,呈西南-东北走向,另一条与东南季风相对应,位于西北太平洋,副高以南,呈东南-西北走向;西北太平洋上的干旱区对应西北太平洋的副热带高压。在NO_SN试验中,西南-东北走向的雨带在中国东部地区存在明显负偏差,而在中南半岛附近出现明显正偏差,东南-西北走向的雨带也存在明显的正偏差,这与NO_SN试验模拟的西南季风明显偏强,季风槽偏强,位置偏东,并在中国东部模拟出正气旋性环流有关,另外强季风槽使得副高位置偏东,这些都是模式大尺度场发生漂移的表现,而这种850hPa环流场的漂移有利于台风活动发展,造成NO_SN试验中总频数偏多,同时致使正气旋性环流附近的台风路径密度增大,而副高位置偏东也会造成台风路径的误差,致使台风活动范围向东偏移,这种台风活动的误差会直接导致降水分布的误差。在SN试验中,大尺度场向CFSR数据不断调整,环流与副高的模拟较NO_SN试验改进明显,降水分布与CFSR数据基本相同,两条雨带基本对应,环流场和副高的位置也与CFSR数据基本吻合。SN试验较NO_SN试验在大尺度场模拟上的改善,使得SN试验模拟的台风的频数、路径密度、ACE强度较NO_SN试验更加接近观测,同时使与台风和环流有关的降水分布也更加准确。

台风路径和强度的模拟对SST的分布非常敏感,SST温度升高将使台风强度增强,整体海温升高1℃,可造成台风强度增强数十百帕,另外台风路径具有向暖区偏移的趋势^[32-33],因此模式SST的计算误差势必造成台风强度和台风路径出现偏差。图8给出了两组试验方案模拟的与CFSR数据中6个月平均SST的差异分布。在NO_SN试验中,南海区域至模式的东北区域存在一条明显的负偏差带,在高纬度有明显正偏差;在SN试验中,虽然高纬度仍存在正偏差,但由于纬度较高,台风过程多发生在30°N以南,因此这种高纬度误差对台风影响不大;而在中低纬度,NO_SN试验中西南东北走向的负偏差得到明显改善,这使得台风强度增强,路径也更加贴合观测。因此可知,谱松弛可以改善模式中的SST分布,进而影响台风的路径和强度,使台风更加贴近观测。

5 总结与展望

台风动力季节预报是近年来台风研究的一个重点和热点。本文采用COAWST模式对2015年5月1日—11月1日的台风活动设计了两组模拟试验,用于探讨谱松弛对台风季节活动数值模拟的影响,并得到了以下结论:

(1)谱松弛可以明显改善台风频数、强度的模拟,频数的改善包括总频数以及频数的月变化,强度的改善主要表现在SN试验较NO_SN试验模拟

出较多的强台风,与此同时,对于描述台风季节活动的重要指标ACE分布以及台风路径密度分布,SN试验的模拟效果都较NO₂SN试验有明显改善。

(2)谱松弛可以有效优化区域模式中的大尺度场,SN试验模拟的低空环流场、500 hPa位势高度场较NO₂SN试验更加符合观测,这使得台风的生成以及移动路径更加准确,而大尺度场以及台风活动模拟效果的优化也使得降水分布更加接近观测;另外,谱松弛明显改善模式低纬度海温中的负偏差,促使台风强度增强,模拟出更多的较强台风。

本文的研究仅限于在考察谱松弛对台风季节活动数值模拟的影响,而谱松弛这种通过添加一个松弛项来改善区域模式中大尺度场模拟效果的方法缺乏相关的物理意义,因此该方法具有一定的局限性。Peng等^[21]提出与谱松弛具有类似效果的选尺度同化方法,该方法基于三维变分同化技术和低通滤波技术,将全球模式的大尺度场与区域模式的中小尺度场混合,有效缓解了谱松弛方法中的动力不协调问题。下一步我们将引进该方法,考察该方法对台风季节活动数值模拟的影响。另外,模式结果中存在强度偏低的现象,这与模式分辨率较低有关,而这种偏低的现象以及台风季节活动的其他特征如频数、台风路径密度等的模拟是否可以通过物理参数化方案的优选得到改善,是值得探索的一项工作。因此,为了进一步改善台风动力季节预报的结果,我们将进行台风季节活动数值模拟对物理参数化方案的敏感性试验,以找到针对台风季节预报最优的物理参数化方案。

参考文献:

- [1] 朱乾根. 天气学原理和方法[M]. 4版. 北京: 气象出版社, 2007.
- [2] 郑文荣, 李江南, 蔡建春, 等. 西北太平洋超强台风时空分布特征及其成因[J]. 海洋预报, 2009, 26(4): 19-24.
- [3] 许映龙, 张玲, 高拴柱. 我国台风预报业务的现状及思考[J]. 气象, 2010, 36(7): 43-49.
- [4] 王喜年. 风暴潮灾害及其预报与防御对策[J]. 海洋预报, 1998(3): 26-31.
- [5] 丁亚梅, 董克慧, 周林, 等. 大气-海浪耦合模式对台风“碧利斯”的数值模拟[J]. 海洋预报, 2009, 26(2): 15-26.
- [6] Zhan R F, Wang Y Q, Ying M. Seasonal forecasts of tropical cyclone activity over the western North Pacific: a review[J]. Tropical Cyclone Research and Review, 2012, 1(3): 307-324.
- [7] Chen J H, Lin S J. Seasonal predictions of tropical cyclones using a 25-km-resolution general circulation model[J]. Journal of Climate, 2013, 26(2): 380-398.
- [8] 高学杰, 赵宗慈, 丁一汇, 等. 温室效应引起的中国区域气候变化的数值模拟 I: 模式对中国气候模拟能力的检验[J]. 气象学报, 2003, 61(1): 20-28.
- [9] Giorgi F, Marinucci M R, Bates G T. Development of a second-generation regional climate model (RegCM2). Part I: boundary-layer and radiative transfer processes[J]. Monthly Weather Review, 1993, 121(10): 2794-2813.
- [10] Davies H C. A lateral boundary formulation for multi-level prediction models[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1976, 102(432): 405-418.
- [11] 魏和林, 符淙斌, 王维强. 区域气候模式侧边界的处理对东亚夏季季风降水模拟的影响[J]. 大气科学, 1998, 22(5): 779-790.
- [12] Stauffer D R, Seaman N L, Binkowski F S. Use of four-dimensional data assimilation in a limited-area mesoscale model part II: effects of data assimilation within the planetary boundary layer[J]. Monthly Weather Review, 1991, 119(3): 734-754.
- [13] Waldron K M, Paegle J, Horel J D. Sensitivity of a spectrally filtered and nudged limited-area model to outer model options[J]. Monthly Weather Review, 1996, 124(3): 529-547.
- [14] Von Storch H, Langenberg H, Feser F. A spectral nudging technique for dynamical downscaling purposes[J]. Monthly Weather Review, 2000, 128(10): 3664-3673.
- [15] Liu P, Tsimpidi A P, Hu Y, et al. Differences between downscaling with spectral and grid nudging using WRF[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2012, 12(8): 3601-3610.
- [16] Knutson T R, Sirutis J J, Garner S T, et al. Simulation of the recent multidecadal increase of Atlantic hurricane activity using an 18-km-grid regional model[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2007, 88(10): 1549-1565.
- [17] 曹剑, 吴立广, 潘维玉. 2006年7—9月西北太平洋热带气旋季节活动的数值模拟[J]. 大气科学学报, 2012, 35(2): 148-162.
- [18] Wang H, Wang Y Q, Xu H M. Improving simulation of a tropical cyclone using dynamical initialization and large-scale spectral nudging: a case study of typhoon Megi (2010)[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2013, 27(4): 455-475.
- [19] Choi S J, Lee D K. Impact of spectral nudging on the downscaling of tropical cyclones in regional climate simulations[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2016, 33(6): 730-742.
- [20] 渠鸿宇, 李响, 凌铁军, 等. 谱松弛同化技术对台风路径及强度模拟的影响[J]. 海洋预报, 2018, 35(3): 17-29.
- [21] Peng S Q, Xie L, Liu B, et al. Application of scale-selective data assimilation to regional climate modeling and prediction[J]. Monthly Weather Review, 2010, 138(4): 1307-1318.
- [22] Lai Z J, Hao S, Peng S Q, et al. On improving tropical cyclone track forecasts using a scale-selective data assimilation approach: a case study[J]. Natural Hazards, 2014, 73(3): 1353-1368.
- [23] Warner J C, Armstrong B, He R Y, et al. Development of a

- Coupled Ocean-Atmosphere-Wave-Sediment Transport (COAW-ST) modeling system[J]. *Ocean Modelling*, 2010, 35(3): 230-244.
- [24] Skamarock W C, Klemp J B, Dudhia J, et al. A description of the advanced research WRF version 3[R]. NCAR Tech Note NCAR/TN- 475+STR. Boulder, Colorado, USA: NCAR, 2008: 113.
- [25] Shchepetkin A F, McWilliams J C. The Regional Oceanic Modeling System (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model[J]. *Ocean Modelling*, 2005, 9(4): 347-404.
- [26] Shchepetkin A F, McWilliams J C. A method for computing horizontal pressure-gradient force in an oceanic model with a nonaligned vertical coordinate[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2003, 108(C3): 3090.
- [27] Larson J W, Jacob R L, Foster I, et al. The model coupling toolkit [C]//International Conference San Francisco on Computational Science. CA, USA: Springer, 2001: 185-194.
- [28] Saha S, Moorthi S, Pan H L, et al. The NCEP climate forecast system reanalysis[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2010, 91(8): 1015-1057.
- [29] Saha S, Moorthi S, Wu X R, et al. The NCEP climate forecast system version 2[J]. *Journal of Climate*, 2014, 27(6): 2185-2208.
- [30] Ying M, Zhang W, Yu H, et al. An overview of the china meteorological administration tropical cyclone database[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2014, 31(2): 287-301.
- [31] Joyce R J, Janowiak J E, Arkin P A, et al. CMORPH: a method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2004, 5(3): 487-503.
- [32] Chang S W, Madala R V. Numerical simulation of the influence of sea surface temperature on translating tropical cyclones[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1980, 37(12): 2617-2630.
- [33] Ren X J, Perrie W. Air-sea interaction of typhoon Sinlaku (2002) simulated by the Canadian MC2 model[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2006, 23(4): 521-530.

The influence of spectral nudging assimilation technology on simulation of typhoon seasonal activity

QU Hong-yu, LI Xiang, LING Tie-jun, ZHANG Yun-fei

(Key Laboratory of Marine Hazards Forecasting, National Marine Environmental Forecasting Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081 China)

Abstract: Spectral nudging is one of the assimilation schemes, which plays an important role in improving the simulation of large-scale fields in a regional model. In this paper, COAWST model is used to design two sets of comparative experiments for typhoon seasonal activity from May 1 to November 1, 2015, and the influence of spectral nudging assimilation technology on simulation of typhoon seasonal activity is investigated. By comparing the typhoon seasonal information in the two experiments, it is found that spectral nudging can significantly improve the simulation of typhoon frequency, intensity, accumulated cyclone energy distribution and track density distribution. The improvement is closely related to the improvement of the large-scale fields in the model, such as the circulation field, the potential height field and the sea surface temperature. Due to the effect of spectral nudging, model can largely reproduce the large-scale information in the boundary field and avoid serious drift of the large-scale field caused by typhoon activity. Meanwhile, the small-scale process of the model itself can freely develop, which makes the simulated typhoon seasonal activity agree well with the observation.

Key words: typhoon seasonal activity; COAWST model; spectral nudging