

文章编号:1004-9045(2008)02-0114-07

AREM 中尺度大气模式与海浪模式双向耦合预报试验

赵伟¹, 徐幼平², 程锐², 杨支中², 杨磊¹

(1.解放军理工大学气象学院, 南京 211101; 2.北京应用气象研究所, 北京 100029)

摘要:利用中尺度大气模式 AREM 与国际上比较成熟的海浪模式 WAVEWATCH-III 进行双向耦合, 应用管道通信技术建立区域中尺度大气-海浪耦合模式预报系统, 充分考虑中尺度海-气间的相互作用, 即大气低层风场驱动海浪并影响海浪状态变化, 海浪通过与波龄密切相关的海表粗糙度和海洋飞沫来改变海气间动量、感热和潜热交换从而实现对大气的反馈。文中利用该耦合预报系统对发生在东南沿海的“威马逊”台风过程进行数值试验, 重点分析海表粗糙度和海洋飞沫两个耦合因子对台风数值预报的影响。主要结论是: 在台风高海况下, 海浪引起的海表粗糙度和海洋飞沫的增加对台风数值预报影响均较为显著。海表粗糙度加大了海气间动量通量(摩擦作用), 其阻碍台风的发展, 但对台风路径预报影响不大; 海洋飞沫贡献的感热和潜热为台风发展提供能量, 从而使台风强度增强, 降水显著增加, 并使台风路径预报更加接近实况; 两者共同的作用, 使台风强度增强, 台风路径预报也更为合理。

关键词: 台风数值预报; 台风降水; 大气-海浪耦合; AREM; 海浪模式

中图分类号: P456.7 **文献标识码:** A

1 引言

我国是滨海大国, 拥有漫长的海岸线和辽阔的海域。来自海上的热带气旋和台风常侵袭我国的沿海和内陆地区, 引起强暴雨和洪涝, 加之其伴随的大风及引发的风暴潮, 往往给我国沿海和内陆地区带来巨大的灾难和经济损失。由于海上资料的缺乏, 迄今为止, 人们对台风结构的认识和研究都比较欠缺, 因此对台风及其暴雨的预报都不太理想, 许多从事气象研究的学者, 分别应用不同的模式对台风进行数值研究, 以求找到更好的预报方法。台风的发生发展与海气相互作用密切相关, 数值模式中充分考虑海气相互作用机制及其对台风发生发展的影响, 现成为改进台风及其暴雨数值预报的一个新途径。

众所周知, 台风系统往往与剧烈的海浪密切伴随。大气与海浪相互耦合作用对海上台风发生发展具有明显影响。以往大气模式与海浪模式耦合主要考虑的是, 海浪引起的与波龄相关的海表粗糙度变化对大气过程的影响。Doyle^[1](2002)应用 COAMPS(Coupled Ocean Atmosphere Prediction System)模式和海浪模式进行耦合, 得出结论: 模式耦合作用主要体现在海表的热量、动量和水汽通量的计算上, 耦合模式中引入新的粗糙度计算方案, 使得在高海况下各通量的计算

结果在某部分区域要大很多甚至几个量级; 从对气旋强度、降水以及有效波高的模拟结果来看, 都比单一模式取得更为接近观测资料的预报结果。刘春霞、齐义泉等^[2](2005)应用大气模式 WRF(Weather Research and Forecast)与海浪模式耦合并研究它对台风的影响, 指出: 耦合模式对台风路径模拟的改进不大, 对于台风强度影响比较明显, 在海浪成长前期对台风强度变化正反馈, 在风浪充分增长后对台风强度变化负反馈; 另一方面, 海浪作用下台风的中尺度雨带特征更加清晰。关皓^[3](2005)通过 MM5 (Mesoscale Model 5)与海浪模式进行双向耦合, 得出结论: 耦合模式能较好的模拟台风过程, 对台风的强度、移动路径以及台风发生时的海面有效波高的模拟比单一模式都有一定的改善; 考虑了海浪反馈作用的大气-海浪耦合模式对台风降水的模拟影响显著; 大气与海浪相互作用有利于台风系统的发展和维持; 该文认为, 海浪引起海表粗糙度变化对台风过程影响是一种正反馈作用, 耦合模式对粗糙度方案的选择敏感。

在最近的中尺度大气-海浪耦合研究中, 除海表粗糙度作用外, 海洋飞沫作为海浪对大气反馈作用的另一重要因子, 其水汽和感热贡献也被引入到耦合模式中。张伟庆、William Perrie、黎伟标等^[4], 应用加拿大尺度大气模式 MC2(Mesoscale Compressible Community)

收稿日期: 2008-02-29; 定稿日期: 2008-04-20

基金项目: 国家“973”项目“我国南方致洪暴雨监测与预测的理论和研究方法研究”第四课题(2004CB418304)和国家公益性行业专项“AREM 中尺度数值预报模式资料同化及关键物理过程技术研究”(GYHY(QX)2007-6-12)共同资助

作者简介: 赵伟, 男, 1982年生, 硕士研究生, 主要从事中尺度气象学研究。E-mail: davidgll@163.com

和海浪模式进行耦合, 耦合因子除考虑了海浪曳力(粗糙度)外, 还将海洋飞沫作用加入其中, 并针对三个大西洋台风个例进行数值试验。他们认为, 无论是海洋飞沫还是海浪曳力作用对台风路径预报的影响都很微弱, 但对台风强度预报却都表现了显著的作用, 粗糙度的作用会使台风强度减弱, 低层风场变小, 而飞沫作用会使得台风有加强的趋势。两者共同作用, 其中的两个个例的总体耦合结果使台风强度增强。

由上可见, 大气与海浪相互作用对台风过程具有明显影响, 但各影响因子的作用并无定论, 有待研究。尤其对于我国东亚季风区台风过程, 该方面的研究和预报试验较少。本文的工作是采用目前较先进的有限区域中尺度大气数值模式 AREM 和第三代海浪数值模式 WAVEWATCH-III, 利用管道通信技术建立一个合理考虑大气与海浪相互作用的东亚季风区中尺度海气耦合模式预报系统, 通过该系统对我国沿海台风实例的数值试验, 探讨季风区大气与海浪相互作用对我国台风及其暴雨模拟和预报的影响。

2 耦合思想和耦合技术

2.1 耦合思想

当前普遍接受的耦合机制是: 海浪和大气耦合主要发生在海气界面上, 大气对海浪的作用体现在强风驱动海浪, 从而不断改变海浪的状态; 海浪对大气的反馈作用体现在两个方面, 一是海浪通过由波龄决定的海表面粗糙度来改变大气边界层的湍流输送, 进而影响大气; 二是由于海浪破碎和“白冠”效应而不断产生的海洋飞沫, 因为具有和海洋表面相同的温度, 所以能直接将水汽和热量带入大气边界层, 可以有效增加大气底层的温度和湿度, 进而对台风产生影响。考虑了大气和海浪耦合作用后, 海浪和大气间不断地相互反馈, 最终会影响到整个海洋、大气系统。

本文中考虑海浪反馈作用中的两个耦合因子, 即海表粗糙度以及海洋飞沫的共同作用。耦合计算中采用了沙文钰和潘玉萍通过 COARE 算法测试的最新海面空气动力粗糙度参数化方案^[9]:

$$Z^0 = 10 \exp[-k(B/2\pi a_1)^{1/2}(c_w/u)^{1/4}] + 0.11\gamma/u \quad (1)$$

其中 u/c_w 表示海浪的波龄。该方案中粗糙度的计算与海浪的状态参数波龄密切相关, 不同于传统大气模式中粗糙度计算方案。以往的 Charnock 方案只是简单的通过风场来诊断海表面粗糙度, 并不考虑海浪的状态, 只有在发展成熟的海浪的计算中才有相对准确的结果, 而对于高海况, 局部实际粗糙度是 Charnock 方案计算结果的 2~5 倍左右^[9], 这必然会影响到海表各通量的计算, 从而影响对台风的模拟。

本文选用了 Andreas 等最新海洋飞沫参数化方案 Andreas3.1^[7-8](2006), 该方案应用了 Fairall 的飞沫产生函数及 Andreas 和 DeCosmo 关于海洋飞沫的理论。新方案综合了 HEXOS(Humidity Exchange Over the Sea) 和“锋和大西洋风暴路径实验(FASTEX)”的观测数据, 对参数化方案进行了验证和调试, 使其能更加真实地描述海洋飞沫的作用, 该方案尤其适合较强风速情况下海气交换的计算。Andreas 等认为, 海气间总的动量、感热和潜热传输包括湍流(界面)传输和海洋飞沫传输。 τ_{sp} 、 H_{sp} 和 E_{sp} 分别为海洋飞沫引起的动量、感热和潜热通量变化, 它们的计算公式如下^[9]:

$$\tau_{sp} = 6.25 \times 10^{-5} \rho_w u_*^4 \quad (2)$$

$$H_{sp} = \rho_w L_v \left[1 - \left(\frac{r_{eq,50}}{50 \mu m} \right)^3 \right] V_l(u_*) \quad (3)$$

$$E_{sp} = \rho_w c_w (T_s - T_{eq,100}) V_s(u_*) \quad (4)$$

式中 u_* 是摩擦速度, ρ_w 是海水密度; c_w 是海水的比热; $T_{eq,100}$ 是初始半径为 $100 \mu m$ 的飞沫雾滴的平衡温度; $r_{eq,50}$ 是初始半径为 $50 \mu m$ 的飞沫雾滴的平衡半径; $V_l(u_*)$ 和 $V_s(u_*)$ 为与摩擦速度有关的经验函数。具体计算方案见文献^[10-11]。由于海洋飞沫对动量通量的贡献是十分微小的, 该方案实际计算中并未考虑。

2.2 耦合技术

本文选择管道通信作为耦合数值模式的信息交换方式。Linux 平台进程间通信的方式很多, 其中以管道通信最能体现 Linux 平台的特色, 它具有方便、节约、稳定等特点^[3]。管道通信具有如下四个突出的特征: (1)发送进程能以比较简单的方式, 源源不断地把产生的消息以自然流的方式写入管道, 而不需要考虑对每次传送的信息长度的限制; (2)接收进程能在适当的时机从管道按需提取信息, 同样也不必以固定的消息长度为单位进行; (3)发送和接收进程都能以一定的方式了解对方进程是否存在, 并且可以通过管道的现存消息情况(管道空、管道有信息、管道满)等相互协调动作。(4)数据的读出和写入: 一个进程向管道中写的内容被管道另一端的进程读出, 写入的内容每次都添加在管道缓冲区的末尾, 并且每次都是从缓冲区的头部读出数据。管道的这四个突出特征在下面数值模式的耦合中都有很好的体现。

2.3 耦合实现

尽管海洋飞沫由海浪产生, 但海浪模式中没有直接的相关计算和输出, 海洋飞沫的作用是直接参数化到大气模式中的, 但需要从海浪模式里得到实时的海浪有效波高来参与计算。耦合模式运行时, 大气模式和海浪模式分别同时运行, 是两个完全独立的进程,

在运行过程中,大气模式积分步长为 225 s,海浪模式为 900 s,大气模式每积分 4 步后,输出 10 m 高度处海表面风场,通过管道传给海浪模式,用于计算下一时步的海浪特征(波龄、有效波高等),同时海浪模式会通过管道把用于计算海表粗糙度的海浪波龄和计算海洋飞沫通量贡献的海浪有效波高传输给大气模式。与此同时大气模式的每个积分步里都会在地表通量参数化方案中调用新的粗糙度方案和海洋飞沫参数方案,利用大气底层的温、压、湿、风,计算实时海表粗糙度和海洋飞沫的感热和潜热贡献,两者的计算结果都将参与到大气模式下垫面通量计算中。需要注意的是,由于两个模式积分步长不同,两个参数化方案在计算中实际每四个积分步应用的都是相同的海浪反馈参量。至此海气界面间的所有参数交换完成,周而复始,进行数值模拟和预报。其耦合过程见图 1。

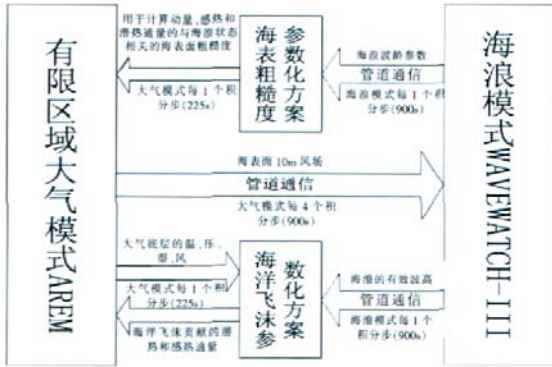


图 1 大气模式与海浪模式耦合框架

3 模式及资料简介

选用 AREM2.3 版本和海浪模式 WAVEWATCH-III 作数值模拟。

3.1 大气模式 AREM 简介

AREM 是基于中国科学院大气物理研究所大气科学和地球物理流体力学数值模拟国家重点实验室 (LASG)REM 发展的新一代 η 坐标区域中尺度暴雨数值预报模式^[12-13]。

数值试验中,模式水平分辨率约为 37 km,垂直方向分为 32 层,模式模拟范围是 95°~145 E, 5°~45 N, 网格点数为 101 × 161 个。模拟中,模式的侧边界处理选用时变边界条件,物理过程分别选取了显式冷云微物理过程^[14-15]、CCM3 非局地边界层过程、采用基于 Zeng 方法改进的多层结通量廓线方案^[13]及 Benjamin 地表辐射参数化方案。

3.2 海浪模式简介

WAVEWATCH-III(简称 WW3)是美国国家环境预报中心 (NCEP) 下 MMBA (Marine Modeling and Analysis Branch)发展的全谱空间的第三代海浪模式。

现已被美国国家环境预报中心用作业务化的全球和区域海浪预报模式^[16-17]。该模式合理地考虑了风浪相互作用、非线性相互作用、耗散及底摩擦等作用,能比较准确的模拟复杂的潮流、地形、风场环境下的波浪场;输入风场、流场、海面高度场,冰覆盖点时,能得到多种计算域内诸如波高、波向、波长、波周期等重要海洋参数^[18]。模式采用半隐式有限差分格式,无条件稳定,与采用显式有限差分格式的传统谱波浪模型相比,即使在较浅水域,其时间步长也可以更大。

文中海浪模式空间分辨率为 0.25°×0.25°;模拟范围和大气模式一致,为 95°~145 E, 5°~45 N, 格点总数为 201 × 161,其中海点占 56.8%。选择的海浪谱为 25 × 24,其频率分布从 0.0418 Hz 到 0.41 Hz,共 25 个频段 ($f_{n+1}=1.1f_n$);共 24 个波向,分辨率为 15°。源函数项采用 DIA 非线性相互作用、Tolman 和 Chalikov 的输入和耗散方案以及有限风区 JONSWAP 谱的底摩擦方案。

3.3 应用资料

本文采用 NCEP 提供的每天四次 1°×1° 的全球分析资料作为大气模式的初始场,并应用 'BOGUS' 技术构造了台风初值;海温采用 NCEP 日平均资料,其分辨率为 0.5°×0.5°;海浪模式的初值也采用 NCEP 海表面 10 m 风场;海底地形资料采用了 ETOPO 海底地形资料,其分辨率为 5°×5°;由于海上水文、气象要素实测资料有限,本文以热带气旋年鉴中收录的关于 0205 号台风的记录为标准,评价模拟和预报效果。

4 耦合预报试验

4.1 试验设计

本文利用建立的耦合模式系统对 2002 年发生于东南沿海的 0205 号“威马逊”台风进行数值预报试验。试验的预报时段为 2002 年 7 月 3 日 08 时到 7 月 5 日 08 时(北京时,下同),共计 48 h。这里设计了如下 4 种预报试验方案:

- (1) 对照试验:以单一大气模式预报该台风过程。
- (2) 粗糙度耦合试验:以仅考虑海表粗糙度反馈作用的耦合模式预报该台风过程。
- (3) 飞沫耦合试验:以仅考虑海洋飞沫作用的耦合模式预报该台风过程。
- (4) 全耦合试验:以考虑海表粗糙度和海洋飞沫共同作用的耦合模式预报该台风过程。

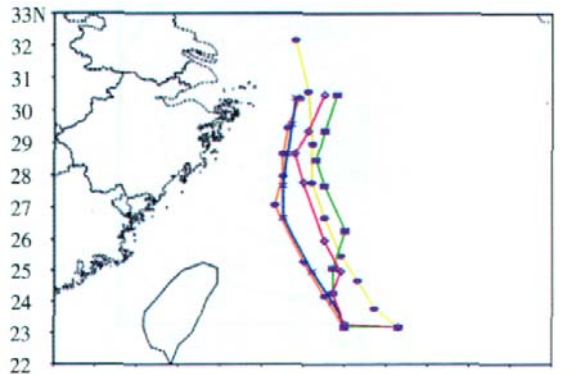
下面将通过四组试验方案预报结果的对比分析,来说明海洋飞沫和海表粗糙度等耦合因子在中尺度大气与海浪耦合预报中的作用及其对台风强度、路径和降水预报的影响。

4.2 试验结果分析

2002 年 0205 号台风威马逊 (Rammasun), 6 月 28 日生成在 9.8 N、138.0 E 洋面, 生成后, 边向西北方向移动边加强, 到 7 月 20 日凌晨加强为台风, 并且很快发展, 到 3 日台风移至师桓岛附近时, 中心最大风速达 45 m/s, 中心最低气压为 950 hPa, 同时移向右折, 沿着东海北上, 最后转向东北, 登陆朝鲜半岛, 消失在日本海^[19]。

4.2.1 各耦合因子对台风路径及强度预报的影响

(1) 台风路径预报。图 2 为四组试验预报的台风路径与实况的比较。从图中可以看到, 粗糙度耦合试验中的台风路径和对照试验路径无论是在速度上还是在移向上都基本一致, 均较实况路径偏西且移速偏慢, 可以说海表粗糙度对于台风路径的影响很微弱; 不难看出在 6 h 后的预报结果里, 考虑飞沫作用的后两组耦合试验的预报路径都开始迅速东偏, 且幅度不断加大, 其中, 飞沫耦合试验中的台风路径在 18~36 h 和实况路径较一致, 只是速度偏慢, 但之后路径有些偏东, 但总体来看相对于对照试验更为接近实况; 但在全耦合试验中, 由于包含了海表粗糙度和海洋飞沫综合因素影响, 台风路径预报最为接近实况, 其使飞沫耦合试验中台风路径偏东部分得到很好修正。可见, 海洋飞沫对台风路径的预报有显著影响。



118 119 120 121 122 123 124 125 126 127 128 129 130E
图 2 四组试验预报的台风路径与实况的对比图 (其中黄线代表实况路径, 橙线代表对照试验路径, 蓝线代表粗糙度耦合试验路径, 绿线代表飞沫耦合试验路径, 紫线代表全耦合试验路径)

(2) 台风中心海平面气压预报。图 3a 为对照试验的台风中心海平面气压预报值与实况值之差随时间的变化曲线。由图可以看到, 对照试验中各时刻台风中心的海平面气压值都高于实况, 预报后期比前期更接近实况, 但整体上预报的台风强度比实况要弱, 这也是目前数值模式预报的通病。图 3b 为各耦合试验预报结果与对照试验的比较。为了更清晰地说明不同试验的情况, 这里给出的是耦合试验和对照试验预报的台风中心海平面气压值的差值。由图可看到, 粗糙度耦合试验中台风中心海平面气压值有着最大为 0.7

hPa 的升高, 这说明采用与波龄相关的海表粗糙度方案对台风强度增加起负反馈作用; 而飞沫耦合试验中台风中心海平面气压预报值有着最大 1.5 hPa 减小 (即系统加深), 其使得台风强度预报更为接近实况; 全耦合试验结果中, 台风中心的海平面气压值则有 1 hPa 左右的降低。可见考虑了海洋飞沫作用后的两组耦合试验, 对台风强度预报都有一定的改善。

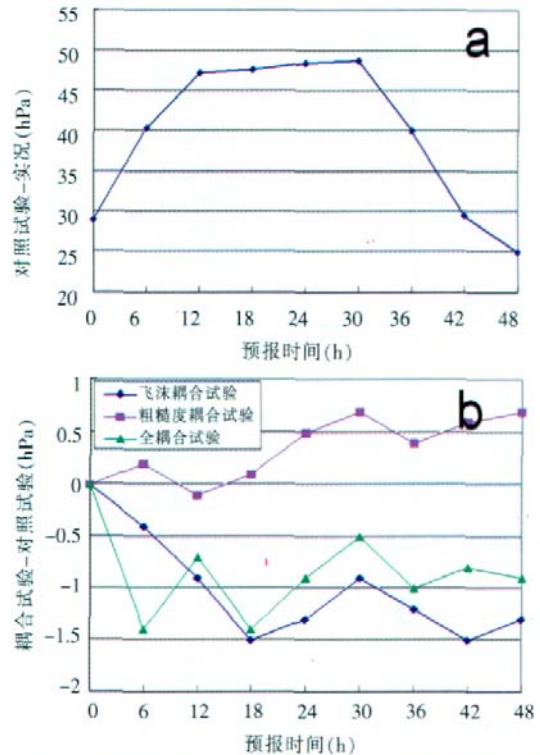


图 3 四组试验的台风中心海平面气压值对比分析图 (a 对照试验海平面气压中心值与实况的差值, b 各耦合试验海平面气压中心值相对对照试验的改变)

(3) 海表面风场预报。图 4 中给出了耦合试验与对照试验 10 m 高度处海表面最大风差值时间演变。从图中可以看到, 粗糙度耦合试验所得风场强度较对照试验要弱些, 前 39 h 的预报结果, 几乎每一时刻的 10 m 海表面风最大值都有 0.5 m/s 的减弱。飞沫耦合试验中低层风速有了一定程度的加强, 而风场的加强也是台风强度增加的一种表现。由此可见, 两个耦合

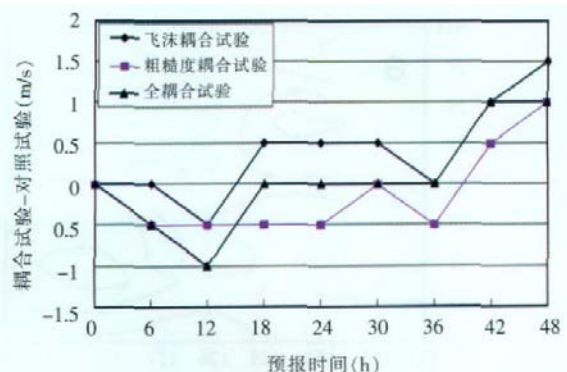


图 4 耦合试验与对照试验 10 m 高度海表最大风差值变化图

因子对台风风场影响具有相反作用。从全耦合试验看,由于两个耦合因子共同作用,其预报结果有相互抵消的趋势。

4.2.2 各耦合因子对低层大气动量和热量交换的影响

(1) 粗糙度耦合试验中动量通量和热通量变化。

图 5 为粗糙度耦合试验和对照试验 2002 年 7 月 3 日 10 时(模式预报 2 h)海表粗糙度值分布。可以看到在

预报的初始阶段,两组试验中的海表粗糙度值就有很大差别。从分布上看,对照试验的粗糙度最大值分布在台风移动方向右侧的最大风速区,而在粗糙度耦合试验中,粗糙度最大值区出现在台风移向的右后侧;从强度上看,粗糙度耦合试验的海表粗糙度比对照试验大很多,其中心最大值为 0.0026 m,对照试验中心值 0.0008 m,前者比后者大 3 倍。

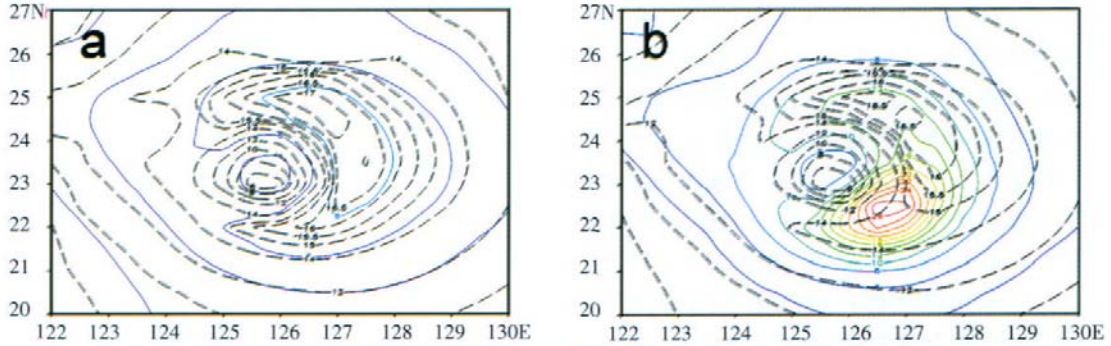


图 5 2002 年 7 月 3 日 10 时的粗糙度值分布图

(a 对照试验,b 粗糙度耦合试验,图中实彩线为粗糙度值(单位: 10^{-4} m),长虚线为 10 m 高度海表风场(单位:m/s))

图 6 为 2002 年 7 月 3 日 10 时粗糙度耦合试验和对照试验的动量通量分布。在粗糙度耦合试验中,粗糙度增加使动量通量增大,动量通量大值区的范围

比对照试验扩大,并沿台风最大风速区延伸,其中动量通量 0.7 N/m^2 和 0.75 N/m^2 等值线包围区变化较为明显。

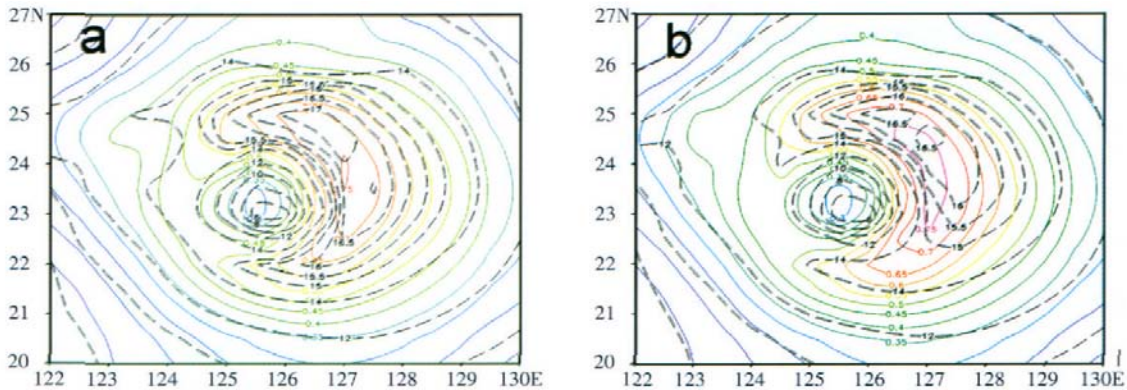


图 6 2002 年 7 月 3 日 10 时动量通量分布图

(a 对照试验,b 粗糙度耦合试验,图中实彩线代表动量通量(单位: 10^{-4} N/m^2),长虚线为 10 m 高海面风场(单位:m/s))

粗糙度耦合试验中潜热通量和感热通量相对于对照试验改变并不明显(图略)。因此,耦合试验中引入与波龄相关的粗糙度计算方案后,在高风速条件下

计算的海表粗糙度比对照试验中不考虑海浪的传统计算方案所得结果有显著增加,它使低层大气动量通量加强,进而对台风风场和强度起阻碍作用。

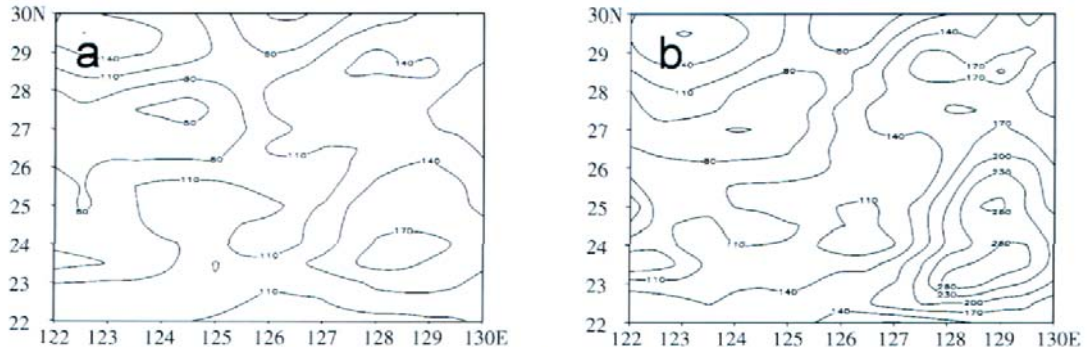


图 7 2002 年 7 月 4 日 08 时潜热通量对比图(a 对照试验,b 泡沫耦合试验 单位: W/m^2)

(2) 飞沫耦合试验中潜热通量和感热通量的变化。图 7 给出了 2002 年 7 月 4 日 08 时飞沫耦合试验和对照试验的潜热通量分布。可以看到, 两试验中潜热通量的区域分布形态相差不大, 但大小差异却极为明显, 飞沫耦合试验中, 整个台风区域的潜热通量均有显著增加, 飞沫耦合试验和对照试验潜热通量中心最大值分别为 260 W/m^2 和 170 W/m^2 , 飞沫的作用使得

潜热通量中心值增加了 50% 以上。

图 8 给出了 2002 年 7 月 4 日 08 时飞沫耦合试验和对照试验的感热通量分布。可以看到, 考虑飞沫作用使感热通量增大, 中心值由 20 W/m^2 增大到 25 W/m^2 , 而且大值区范围也更加广阔。以上说明, 海洋飞沫的作用, 会显著增加台风区海气间的感热和潜热交换, 使台风强度和路径预报得到改善。

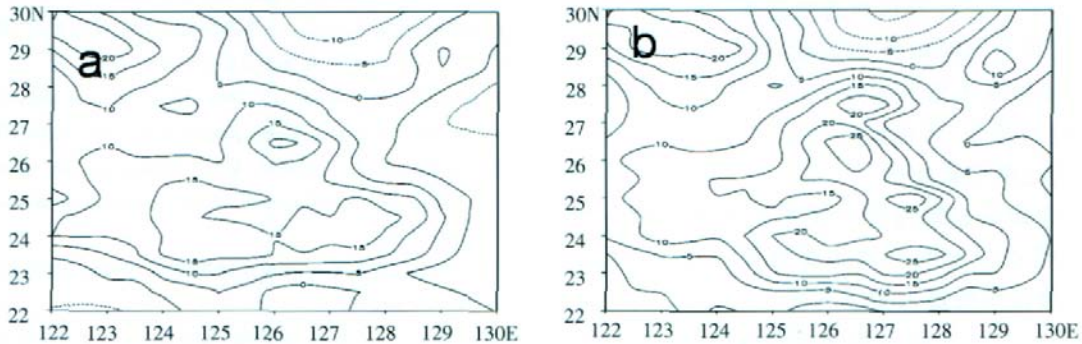


图 8 2002 年 7 月 4 日 08 时感热通量对比图(a 对照试验, b 飞沫耦合试验, 单位: W/m^2)

4.2.3 各耦合因子对降水预报的影响

图 9 给出了四组试验预报的 24 h 累积降水量分布, 从降水型态看, 各试验预报的雨带都基本相似。从降水强度看, 粗糙度耦合试验预报的降水强度比对照试验偏弱, 这说明由海浪引起的海表粗糙度的作用有使台风

降水预报偏弱的趋势; 考虑飞沫影响的两组耦合试验所预报的 24 h 累积降水量都有明显增强, 250 mm 等值线区域均比对照试验大许多, 中心最大降水值分别为 450 mm 和 500 mm , 大大高于对照试验的 350 mm 。可见海洋飞沫的作用使预报的台风降水显著增加。

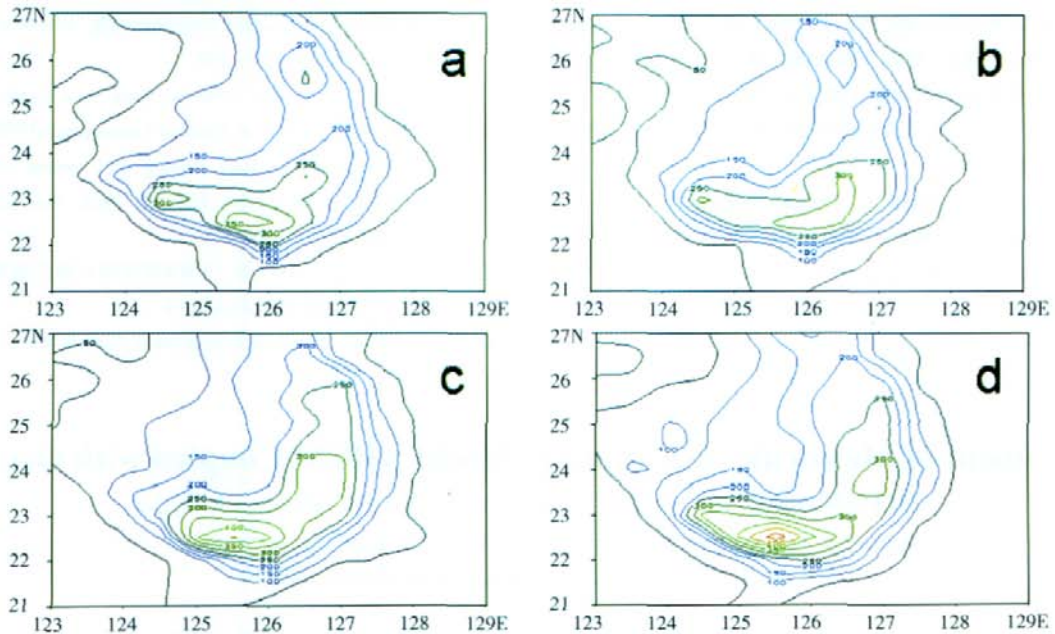


图 9 四组试验预报的台风 24 h 累积降水图(a 对照试验, b 粗糙度耦合试验, c 飞沫耦合试验, d 全耦合试验, 单位: mm)

因此可以得出如下结论: 中尺度大气与海浪耦合预报中, 海洋飞沫对降水预报影响显著。海洋飞沫通过增加感热通量和潜热通量, 使得台风区大气底层有更多的水汽和热量进入, 从而大大增强台风降水。

5 结论

本文将 AREM 模式与 WAVEWATCH-III 海浪模

式进行双向耦合, 建立区域中尺度大气与海浪耦合数值预报系统, 并对发生于东南沿海的 0205 号“威马逊”台风过程进行了数值预报试验。试验中, 较系统地分析了海表粗糙度和海洋飞沫两个耦合因子对台风发生发展过程的影响。初步结论如下。

(1) 大气与海浪相互作用对台风发生发展过程影响显著。数值模式中考虑大气与海浪相互作用对提高

模式台风数值模拟和预报能力将是有益的。

(2) 引入与海浪波龄相关的粗糙度方案, 会使大气模式海表粗糙度在高海况下有显著增加, 这使低层大气与海洋间的动量通量增加, 台风低层风场减弱。台风强度会因此减弱, 降水减少。但海表粗糙度的改变对台风路径预报的影响较小。

(3) 对海浪引起的海洋飞沫过程进行参数化, 使得台风低层海表面大气感热和潜热通量明显增加, 台风因此将得到更充沛的水汽和热量供应, 台风强度会明显增加, 风场和降水得到加强。同时, 海洋飞沫对台风路径影响较为显著, 考虑海洋飞沫过程将改进大气模式对台风路径模拟和预报。

(4) 综合考虑海表粗糙度和海洋飞沫两个耦合因子影响, 将使模式预报的台风强度有较大增加, 降水加强, 且台风路径预报最为接近实况。

上述结论仅是个例数值预报试验的结果, 其是初步的。今后将采用更高分辨率模式, 结合更多台风实例开展试验。大气与海浪相互作用的机理及其对台风降水预报影响也将作更深入的研究。

参考文献:

- [1] JAMES D. DOYLE. Coupled Atmosphere-Ocean Wave Simulations under High Wind Conditions[J]. *Mon.Wea.Rev.*, 2002, 130:3087-3099.
- [2] 刘春霞, 齐义泉, 梁建茵. WRF 与海浪模式耦合及其对台风的影响 [C]. 中国气象学会 2005 年年会论文集. 苏州, 2005.
- [3] 关皓. 南海中尺度大气-海浪耦合模式的初步研究[D]. 南京: 解放军理工大学气象学院, 2006.
- [4] Zhang Weiqing, William Perrie, Li Weibiao. Impacts of Waves and Sea Spray on Midlatitude Storm Structure and Intensity[J]. *Mon.Wea.Rev.*, 2006, 134:2418-2442.
- [5] 沙文钰, 杨支中, 冯芒, 等. 风暴潮、浪数值预报[M]. 北京: 海洋出版社, 2004, 11:16-22.
- [6] Sejjadi S G, Bettencourt M T, Fitzpatrick Pat J, et al. Sensitivity of coupled tropical cyclone/ocean wave simulation to different energy transfer schemes [C]. Proceedings of 25th AMS Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology. San Diego, 2002.
- [7] Andreas E L. Sea spray and the turbulent air-sea heat fluxes[J]. *J. Geophys.Res.*, 1992, 97:11429-11441.
- [8] Andreas E L. A bulk air-sea flux algorithm for high-wind, spray conditions, version 2.0 [C]. 13th Conference on Interactions of the Sea and Atmosphere. Casco Bay, 2004.
- [9] 黎伟标, 何溪澄, 唐洁. 台风森拉克的数值模拟研究: 海洋飞沫的作用[J]. *热带海洋学报*, 2004, 23(3):58-65.
- [10] Andreas E L, DeCosmo J. The signature of sea spray in the HEXOS turbulent heat flux data[J]. *Bound. Layer Meteor.*, 2002, 103:303-333.
- [11] Andreas E L, Emanuel K A. Effects of sea spray on tropical cyclone intensity[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2001, 58: 3741-3751.
- [12] 宇如聪. 陡峭地形有限区域数值预报模式设计 [J]. *大气科学*, 1989, 13:139-149.
- [13] 宇如聪, 薛纪善, 徐幼平, 等. AREMS 中尺度暴雨数值预报模式系统[M]. 北京: 气象出版社, 2004.
- [14] Xia Daqing, Xu Youping. The water-bearing numerical model and its operational forecasting experiments. Part I: The water-bearing numerical model[J]. *Advances of Atmospheric Sciences*, 1998, 15(2): 221-232.
- [15] Xu Youping, Xia Daqing, Qian Yueying, et al. The water-bearing numerical model and its operational forecasting experiments. Part II: The operational forecasting Experiments[J]. *Advances of Atmospheric Sciences*, 1998, 15(3):321-336.
- [16] Tolman H L, Chalikov D. Source terms in a third-generation wind wave model[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1996, 26:2497-2518.
- [17] Tolman Hendrik L. User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 2.22 [M]. Tech. Note 222, NOAA/NWS/NCEP/OMB, 133pp, 2002.
- [18] 齐义泉, 朱伯承, 施平, 等. WWATCH 模式模拟南海海浪场的结果分析[J]. *海洋学报*, 2003, 25(4): 1-9.
- [19] 中国气象局. 热带气旋年鉴[M]. 北京: 气象出版社, 2002:32-37.

An Experiment of Mesoscale Atmospheric Model AREM Coupled with Ocean Wave

ZHAO Wei¹, XU You-ping², CHENG Rui², YANG Zhi-zhong², YANG lei¹

(1. Institute of Meteorology, PLA University of Science and Engineering, Nanjing 211101;

2. Beijing Institute of Applied Meteorology, Beijing 100029)

Abstract: Based on the mesoscale atmospheric model AREM and the popular wave model WAVEWATCH-III, a two-way regional mesoscale atmosphere-ocean wave coupling model has been built with pipe communication technology considered the air-sea interaction fully. The near-surface wind directly drove the state of ocean wave; on the other hand, the ocean wave energy fed back to air by changing the momentum, sensible heat and latent heat between air and sea through the spray and the roughness related with the wave age. The coupled system has successfully forecasted No. 0205 typhoon Rammasun. It has been found that under high wind conditions, both the roughness and spray had a large effect on the typhoon system. Sea spray increased the intensity and precipitation of typhoon through enhancing the latent heat flux and sensible heat flux, while the roughness enhances air-sea momentum exchange (friction) to decrease the intensity and precipitation of typhoon. Moreover, the typhoon track was sensitive to sea spray but little to roughness.

Key words: Simulation of typhoon; Typhoon precipitation; Atmosphere-ocean wave coupling; AREM; WAVEWATCH-III