

多微物理参数化方案对飓风“艾克” 路径和强度的数值模拟研究

苏蓉

云南机场集团有限责任公司文山机场, 云南 文山

收稿日期: 2023年11月7日; 录用日期: 2024年1月17日; 发布日期: 2024年1月30日

摘要

本文采用水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$, 时间间隔为6 h的NCEP GFS再分析资料作为模拟的初始场和边界条件。以2008年北大西洋09号四级飓风“艾克”为个例, 利用WRF中尺度模式以不同微物理参数化方案进行模拟, 对比分析发现: 不同微物理参数化方案对飓风路径模拟影响较为显著, 除Ferrier方案外, 其余微物理方案下模拟的路径几乎都较实际路径偏东, 其中, WSM6微物理方案的试验对飓风“艾克”路径的模拟与实际路径整体偏差较小; 不同微物理参数化方案对飓风强度模拟影响不显著, 各微物理参数化方案下飓风“艾克”的模拟强度均与实际观测强度相差较大, Lin微物理参数化方案下, 最后6 h的飓风中心海平面气压模拟结果与实际观测气压较为接近, 是本次强度模拟试验中最好的方案。

关键词

飓风, 微物理参数化, 路径, WRF

Numerical Simulation Study of Path and Intensity of Hurricane Ike Based on Multi-Micro-Physical Parameterization Scheme

Rong Su

Wenshan Airport, Yunnan Airport Group Co., Ltd., Wenshan Yunnan

Received: Nov. 7th, 2023; accepted: Jan. 17th, 2024; published: Jan. 30th, 2024

Abstract

In this paper, the NCEP GFS reanalysis data with horizontal resolution of $1^\circ \times 1^\circ$ and time interval of 6h is used as the initial and boundary conditions of the simulation. Based on the four-level hurricane Ike of North Atlantic 09 in 2008, the WRF mesoscale model is used to simulate hurricane Ike by different microphysics parameterization schemes. The results show that the influence of different microphysics parameterization schemes on hurricane path simulation is significant. In addition to the Ferrier microphysical parameterization scheme, the simulation path of the other micro-physics schemes is almost the same as that of the east side. Among them, the WSM6 microphysical parameterization scheme has a small deviation from the overall deviation of the Hurricane Ike track. The effect of different microphysical parameterization scheme on the simulation of hurricane intensity is not significant. The simulated intensity of Hurricane Ike is different from the actual observation intensity all the microphysical parameterization schemes. The simulated results of the central sea level pressure of hurricane using the Lin microphysical parameterization scheme are close to the actual observed pressure in the last six hours, making it the best scheme in this intensity simulation experiment.

Keywords

Hurricane, Microphysical Parameterization, Track, WRF

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

热带洋面上，常常会产生一种具有暖中心结构的强烈气旋性涡旋，我们称之为热带气旋。在西北太平洋产生的强热带气旋，被称为台风；发源于大西洋和北太平洋等热带海面的强热带气旋被称为飓风；印度洋地区称为热带风暴。平均每年全球共有 80 多个热带气旋生成，50 多个国家和地区受到其影响，热带气旋以登陆陆地时造成的破坏最大，常常在登陆地区域引发海啸、河水泛滥、山体滑坡、泥石流等直接破坏，以及因农牧业受损带来的粮食短缺等若干间接破坏。近几十年来，世界范围内有关热带气旋路径、强度的分析讨论不断升温，在热带气旋研究领域已经成为了一个不可忽视的分支。

明确地分析和认知影响热带气旋的因子以及其作用，可以帮助我们更好地对热带气旋的路径和强度进行预报。贺海晏，董惠菁[1]经过对台风的移动特性的研究，指出台风的加速、减速和转向，都与非轴对称的非绝热引导作用有关；肖伟生,袁金南[2]在对台风数值模拟的试验里指出，海温的变化对台风的移动路径有一定影响，并得出台风有趋暖移动的特性。余贞寿，郝增周等[3]在台湾岛地形对台风“海棠”(0505)移动路径影响的数值试验研究中，指出台湾岛地形不仅可以直接对台风路径造成影响，还可以通过影响台风的非对称结构来改变台风的移动路径。热带气旋强度和路径的改变，从理论上我们大致可以总结为以下几类原因：一、热带气旋自身的结构发生变化，比如眼壁置换、非对称分布[3]的对流配置；二、热带气旋周边的环流形势，比如水平和垂直切变，和气旋环流系统的内外反馈；三、下垫面，如海洋和陆地地形等与飓风系统的交换影响。由此可见，一个热带气旋实例过程的强弱起伏和路径转换，往往是由多个因子同时作用的综合体现，在这一系列因子的交互作用的过程中也包含了诸多的复杂的诸如云微物理、积云对流等物理过程，因为模式的空间分辨率的制约以及我们目前对这些物理过程的认识的不到

位, 现在的数值模式一般对这些物理过程采用参数化的方式进行模拟。

近十几年来, 国内外已经有不少人做过微物理参数化对热带气旋路径和强度的研究。林惠娟, 冀春晓等[4]在 2010 年对比分析不同微物理过程和积云参数化方案的组合对台风“莫拉克”强度与路径的影响中, 发现 WSM6 微物理方案与 BM 积云参数化方案相结合的试验组合模拟的“莫拉克”的路径与实际路径更相近; 周昊, 朱伟军[5]等人在 2012 年以 2010 年 1013 号超强台风“鲑鱼”为例, 利用 WRF 模式研究了不同微物理方案和边界层方案对台风“鲑鱼”路径和强度模拟的影响分析, 发现与 Ferrier 方案相结合的试验模拟的台风路径的平均偏差最小; 2011 年 Pemmani V. S. Raju [6]等人, 以孟加拉湾形成的热带风暴“纳尔吉斯”为例, 利用 WRF 探究物理参数化过程对其影响, 发现云微物理方案和 Ferrier 方案相结合能较好的预测路径和强度; 2016 年, Kelvi CHAN [7]等人运用 WRF 模式研究了热带气旋对微物理参数化方案的敏感性, 其研究表明: 在模拟前期特别是在开阔的洋面上, 热带气旋路径对微物理参数化方案的选择不太敏感。大量关于 WRF 模式微物理参数化对热带气旋路径和强度的模拟研究, 证明了该模式具有通用性以及预报的准确性。

尽管国内外的研究人员针对微物理参数化对热带气旋路径和强度的影响做了大量的工作, 然而就不同微物理参数化方案对热带气旋影响的差异性比较以及原因分析的研究工作开展的还比较少, 人们在微物理参数化细节对热带气旋所产生的影响仍不是十分清楚, 仍然有很多问题值得进一步探究。为了能更准确的预测热带气旋的路径和强度变化, 加深对热带气旋活动的认识, 本文拟选用中尺度数值模式 WRF 为研究工具, 采用不同的微物理参数化方案对 2008 年北大西洋 09 号飓风“艾克”进行数值模拟, 研究不同的微物理参数化方案对热带气旋的强度和路径的影响。

2. 飓风“艾克”个例简介

本次所选的研究个例是 2008 年于古巴东北海岸登陆的北大西洋 09 号四级飓风“艾克(Ike)”。飓风“艾克”的起源可以追溯到 08 月 28 日, 美国国家飓风中心(NHC)首先在非洲西海岸、大西洋中部发现了一个热带扰动, 之后此扰动在佛得角群岛附件的有利条件下发展为低压区, 低压区持续向西走, 在 09 月 01 日 06UTC 被认定为热带低压, 并在 09 月 01 日 12UTC 发展为热带风暴强度, 三小时后即 09 月 01 日 15UTC, NHC 将这个热带风暴命名为“艾克”。

09 月 03 日, 随着风暴中心周围雨带的加强, “艾克”增强的速度开始加快, 在 09 月 03 日 18UTC, “艾克”正式升级为飓风。09 月 04 日 06UTC, 飓风“艾克”达到最高持续风速 233 km/h, 中心最低海平面气压为 935 hPa, 发展为四级飓风。09 月 07 日至 13 日, 飓风“艾克”先后三次分别于巴哈马的伊纳瓜岛、古巴霍尔金省海岸的卡布卢西亚及德克萨斯州的加尔维斯顿岛北端登陆。09 月 13 日晚在德克萨斯州巴勒斯坦东部的减弱为热带风暴, 随后于 09 月 14 日在奥扎克斯群岛又发展为强大的热带气旋, 接着进入稳定的弱化阶段, 掠过整个南安大略省和魁北克省。09 月 15 日弱化后的“艾克”在圣劳伦斯河附近被另一个热带低压所吸收。

3. 资料来源和试验方案

3.1. 资料来源

本文所用到的资料来自: 美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)所提供的 GFS (Global Forecast System)再分析资料, 水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$, 时间频率间隔为 6 h。

3.2. 模式介绍

WRF (Weather Research Forecast)模式系统, 是由美国国家环境预测中心(NCEP), 美国国家大气研究

中心(NCAR)以及众多科研机构所共同参与研究开发的新一代集数值天气预报、大气模拟及数据同化于一体的中尺度模式系统。WRF 模式系统是一种完全可压非静力的模式系统, 计算网格形式采用荒川 C 网格[8], 支持更高的网格分辨率, 结合先进的数值方法和资料同化技术, 很好的适应了从理想化研究到业务预报等应用的需求, 为改进中尺度天气模拟和预报精度做出巨大的贡献。WRF 模式内部的参数化, 相比其他中尺度模式而言更加丰富, 考虑的物理过程也比其他中尺度模式更为细致[9]。对于 WRF 模式的研究, 主要是围绕不同的参数化方案的选择问题展开的。选用何种参数化方案能达到最优的模拟效果, 也是一直以来研究的重点之一。WRF 模式系统中引入的物理参数化方案[10]主要有: 微物理过程方案、边界层参数化方案、积云对流参数化方案、近地面层过程参数化方案、陆面过程参数化方案、长波辐射过程参数化方案、短波辐射过程参数化方案以及次网格尺度扩散参数化方案等[11]。

微物理过程主要是对水汽, 云水, 云冰, 雨, 雪, 霰, 冰雹等降水粒子的产生、发展、转化等过程进行描述。本次集中展开研究讨论的微物理参数化方案主要包括了:

(a) Purdue Lin 方案: 基于 Lin 等人的参数化方案基础得到的参数化项, 采用 Tao 的方法进行饱和修正, 微物理过程中预报水汽、云水、雨、云冰、雪和霰, 结冰点以下时, 将云水作为云冰处理, 将雨水作为雪处理。Lin 方案是 WRF 中较为成熟的方案, 更加适用于理论研究[12]。

(b) Eta Ferrier 方案: 微物理过程中预报平流项中水汽以及总凝结降水的变化。通常以一个局域数组的变量来保存初始的猜测场信息, 之后再从里面分解出云水, 雨水, 云冰及降水(包括雪, 霰或冰雹)变化的密度。随着对快速微物理过程处理方法的改进, 这种处理方法可以使方案在大时间步长时计算结果稳定[12]。

(c) WSM5 (WRF Single_Moment_5_class)方案: 源于对 NCEP5 方案进行修正, 包括了冰的沉降以及冰相的参数化。本方案包括水汽, 云水或云冰, 雨水或雪三种水物质, 将云水和云冰划分为一同类来计算。代替了 NCEP5 版本[12]。

(d) WSM6(WRF Single_Moment_6_class)方案: 包括了霰和一些相关过程, 对 WSM5 方案进行了扩充。扩充的过程的参数化与 Lin 等人的方案大部分相似, 但在计算增长和部分参数化上有些许差别。并且在下降的过程中将凝结或者融化的过程也考虑进去, 使垂直廓线的精度得到了提升[12]。

3.3. 试验方案

本文对飓风“艾克”进行模拟研究, 运用了中尺度数值模式 WRF, 采用水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$, 时间间隔为 6 h 的 NCEP GFS 再分析资料作为模拟的初始场和边界条件。选取 2008 年 09 月 12 日 18UTC 到 2008 年 09 月 14 日 06UTC, 记录了飓风“艾克”第三次登陆前后过程的 36 h 作为本次的模拟时段, 以(30°N, 94°W)中心(22°N~38°N, 86°W~102°W)范围的区域进行模拟, 网格点数为 401×401 , 格局为 5 km, 垂直层数为 41 层, 顶层气压 100 hPa, 积分步长为 30 s, 积分时长为 36 h。

Table 1. The numerical simulation schemes

表 1. 数值模拟方案

试验组合	微物理方案	边界层方案	近地面层方案
1	Lin	MYJ	MO-MYJ
2	WSM5	MYJ	MO-MYJ
3	Ferrier	MYJ	MO-MYJ
4	WSM6	MYJ	MO-MYJ

为了探究不同微物理参数化方案对飓风“艾克”的强度和路径的影响, 本文选用了 Purdue Lin 方案、Eta

Ferrier 方案、WSM5 方案和 WSM6 方案四种不同的微物理参数化方案，设计了如表 1 所示四种试验组合。各组试验中，除微物理方案外，其他参数化方案均保持一致，包括 Eta Mellor-Yamada-Janjic TKE (湍流动能) 边界层参数化方案，MYJ Monin-Obukhov 近地面层参数化方案，5 层热量扩散陆面过程方案，RRTM 长波辐射参数化方案，Dudhia 短波辐射参数化[12]等。通过不同微物理参数化方案模拟的各时刻的飓风中心位置以及中心海平面气压确定各方案模拟所得路径和强度，再分别与飓风实际路径和强度进行对比分析其影响。

4. 试验结果

4.1. 不同微物理参数化方案对飓风路径的影响

不同微物理参数化方案模拟的飓风路径与实际观测路径的对比如图 1 所示，从图中可知，几乎所有的模拟路径相比实际观测路径都偏东，并且移动速度都较实际移速偏慢。飓风前 24 h 向西北移动，预测的第 24 h 为转折点，从第 25 h 起至第 36 h，飓风转向东北移动，且移动速度开始加快。WSM5 微物理参数化方案整体路径相比实际路径偏东最多。预测的前 6 h，即 2008 年 09 月 12 日 18UTC~2008 年 09 月 13 日 00UTC 期间，Lin 微物理参数化方案的模拟路径与实际路径几乎重合，此时段内模拟效果较好；Ferrier 微物理方案模拟路径在大概 09 月 13 日 03UTC 至 09 月 13 日 20UTC，总计 17 h 左右的模拟路径较实况偏西；WSM6 方案模拟路径在大概 09 月 13 日 05UTC 至 09 月 13 日 18UTC 时段，总计 13 h 与实际观测路径吻合度较高。

为了能定量比较不同微物理参数化方案对飓风路径影响，在表 2 中列出了不同微物理参数化方案模拟的飓风中心位置在不同时刻与实际观测飓风中心位置间的距离偏差、平均距离偏差以及距离偏差的均方差。在四种微物理方案中，WSM6 方案模拟飓风的平均距离偏差最小仅为 26.743 km，均方差也最小仅为 16.624 km。从整体来看，在四种方案中 WSM6 微物理参数化方案对飓风“艾克”路径的模拟效果最好。

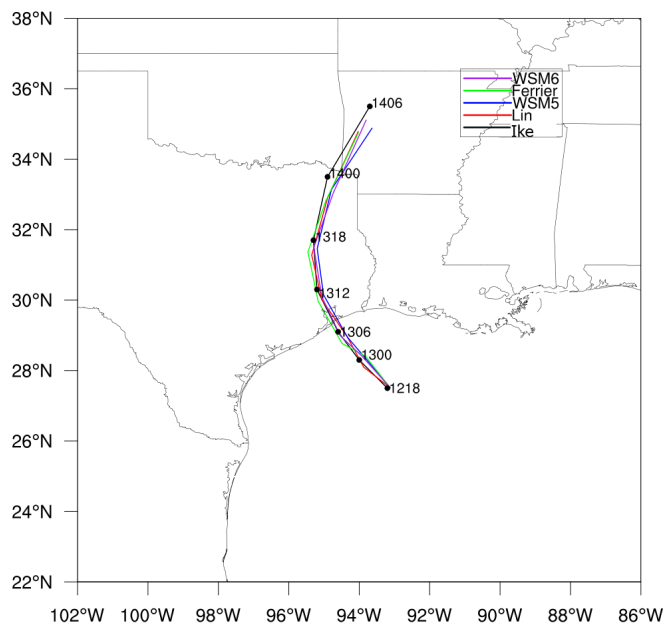


Figure 1. Comparison of simulated hurricane movement paths and actual hurricane Ike movement paths under different microphysical parameterization schemes (from 18UTC on September 12, 2008, with a cumulative prediction of 36 h to 06UTC on September 14, 2008, the hurricane path is represented by the line connecting the lowest sea level pressure at the center of the hurricane, and the hurricane center is determined every 6 h)

图 1. 不同微物理参数化方案下模拟飓风移动路径与实况飓风“艾克”移动路径对比(从 2008 年 09 月 12 日 18UTC 起，累计预测 36 h 到 2008 年 09 月 14 日 06UTC，飓风路径以飓风中心海平面最低气压的连线来表示，每 6 h 确定一次飓风中心)

Table 2. Distance deviation, mean, and mean square deviation (in kilometers) between simulated hurricane paths and actual observed paths under different microphysical parameterization schemes**表 2.** 不同微物理参数化方案下模拟飓风路径与实际观测路径距离偏差、平均值和均方差(单位: km)

微物理参数化方案	Lin	WSM5	Ferrier	WSM6
09 月 12 日 18UTC	7.77564	7.77564	7.77564	7.77564
09 月 13 日 00UTC	25.79161	17.37946	21.21970	14.25055
09 月 13 日 06UTC	31.23673	31.23673	38.90451	13.79669
09 月 13 日 12UTC	34.14706	24.26480	36.85331	25.11271
09 月 13 日 18UTC	47.48352	28.70786	40.21225	29.56944
09 月 14 日 00UTC	65.24662	41.13680	75.55771	52.25260
09 月 14 日 06UTC	84.54721	69.22164	89.33831	44.44165
平均偏差	42.318	31.389	44.265	26.743
均方差	25.793	19.741	28.791	16.624

4.2. 不同微物理参数化方案对飓风强度的影响

如图 2 所示, Lin、WSM5、Ferrier、WSM6 四种微物理参数化方案下, 以 2008 年 09 月 12 日 18UTC 的 NCEP GFS 的再分析资料作为试验的启动资料, 预测到 2008 年 09 月 14 日 06UTC 累计 36 h 过程的飓风“艾克”中心海平面气压。四种微物理方案下模拟得出的中心海平面气压大部分时间较实况更高, 强度弱于实际观测强度。并且在预测 14 h 即登陆一小时之后, 四种方案模拟的中心海平面气压差异开始增大。

其中, Lin 微物理参数化方案下, 飓风在预测 12 h 后即 09 月 13 日 06UTC 时达到中心海平面气压最小值 971.0049 hPa; WSM5 微物理方案下, 飓风在预测 12 h 后即 09 月 13 日 06UTC 时达到中心海平面气压最小值 969.947 hPa; Ferrier 微物理方案下, 飓风在预测 12 h 后即 09 月 13 日 06UTC 时达到中心海平面气压最小值 970.405 hPa; WSM6 微物理参数化方案下, 飓风在预测 12 h 后即 09 月 13 日 06UTC 时达到中心海平面气压最小值 969.981 hPa。

在模拟的 36 h 的不同微物理参数化下飓风“艾克”中心海平面气压连线图中, 所有微物理参数化模拟的中心气压连线都呈现“漏斗”状, 其中 WSM5 方案下气压连线“漏斗”陡降陡升最为明显, 气压变化最为剧烈。

在预测的前 14 h, 四种微物理参数化方案模拟得出飓风中心海平面变化相差不大, Lin 微物理参数化方案、WSM5 微物理方案、Ferrier 微物理方案、WSM6 微物理方案下, 均在预测 12 h 后即 09 月 13 日 06UTC 达到飓风中心海平面气压最小值。在飓风登陆后 1 h, 四种微物理参数化方案的模拟结果开始逐渐出现差异, 其中 WSM5 和 WSM6 微物理参数化方案的强度以及变化趋势最为相似, 且较其他方案模拟中心海平面气压偏高, 强度偏弱; Ferrier 微物理参数化方案下前 25 h 的模拟中, 中心海平面气压比实际观测气压高, 强度较实际强度更弱, 后 11 h 的模拟中, 中心海平面气压比实际中心海平面气压低, 强度比实际观测强度强, Ferrier 方案对飓风的模拟强度整体比其他三种方案的都要强; Lin 微物理参数化方案下, 模拟的前 30 h 中心海平面气压高于实际中心海平面, 强度弱于实际观测强度, 后 6 h 中心海平面气压较为接近实际观测中心海平面气压。从整个模拟时间过程来看, Lin 微物理参数化方案对飓风强度的模拟比其他三种方案更接近实际观测强度。

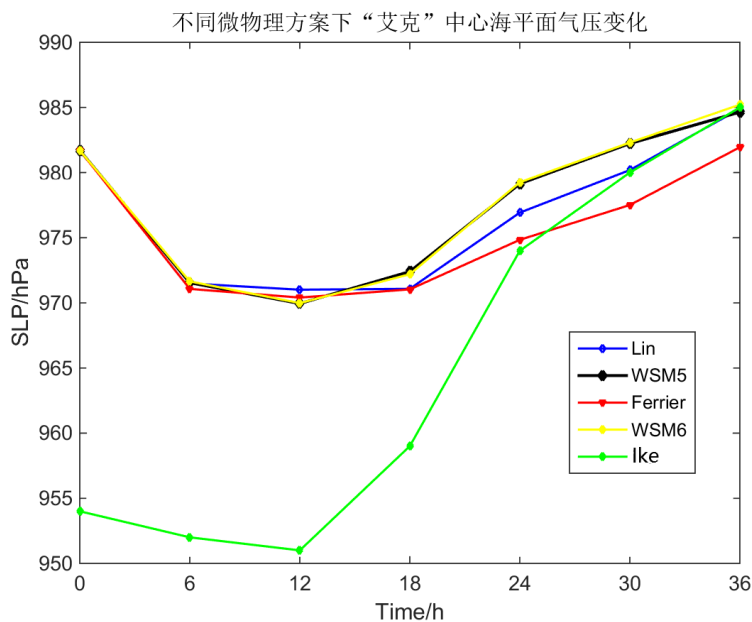
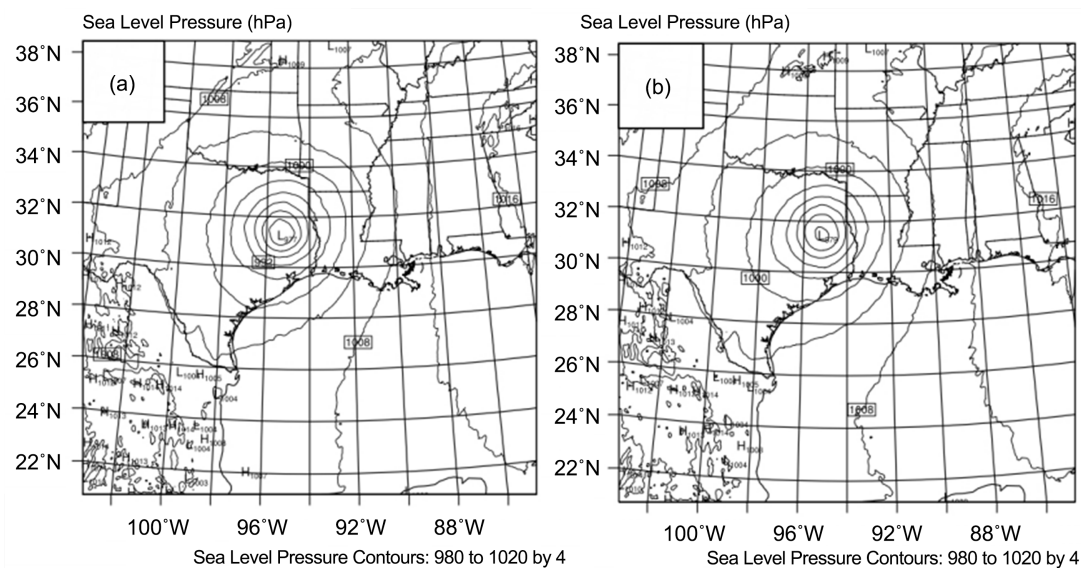


Figure 2. The variation trend of central sea level pressure of hurricane Ike under different microphysical parameterization schemes and the actual situation
图 2. 不同微物理参数化方案下与实况飓风“艾克”中心海平面气压的变化趋势

在此，我们选取四种微物理参数化方案模拟飓风中心海平面气压差异较大的 09 月 13 日 18UTC，来进行不同微物理参数化方案模拟飓风强度差异的比较分析。首先选取 2008 年 09 月 12 日 18UTC 的 NCEP GFS 的再分析资料作为试验的启动资料，预报 24 h，以 09 月 13 日 18UTC 的海平面气压作为强度分析时刻。如图 3，Lin 方案下最低海平面气压为 976.926 hPa，位于(31.2755°N, 95.349°W)；WSM5 方案下中心海平面气压为 979.142 hPa，位于(31.4586°N, 95.1935°W)；Ferrier 方案下，中心海平面气压为 974.838 hPa，位于(31.3644°N, 95.4568°W)；WSM6 方案下中心海平面气压为 979.257 hPa，位于(31.5051°N, 95.0881°W)。09 月 13 日 18UTC，Ferrier 方案下模拟出的飓风中心海平面气压最低，等压线较其他微物理参数化方案更为密集。



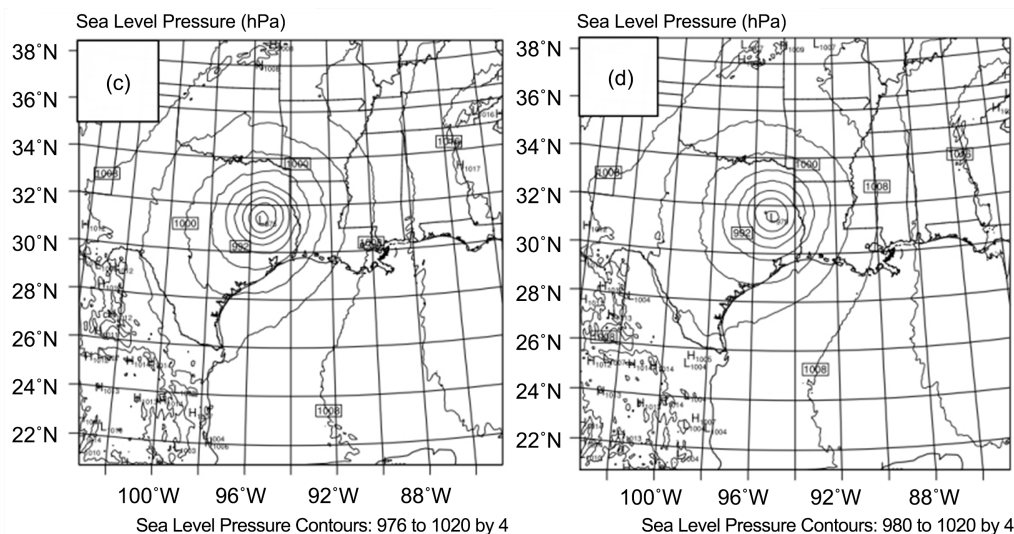
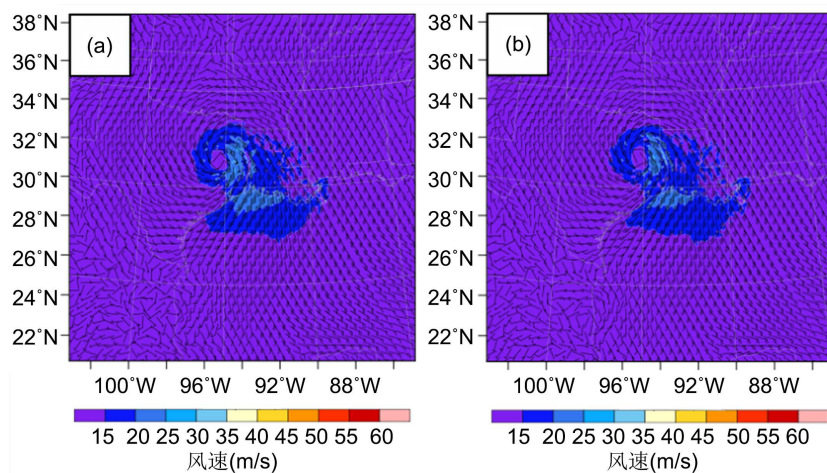


Figure 3. Simulated sea level pressure in the range of 22°N~38°N, 86°W~102°W at 18UTC Lin microphysical parameterization scheme (a), Ferrier microphysical parameterization scheme (b), WSM5 microphysical parameterization scheme (c), and WSM6 microphysical parameterization scheme (d) on September 13, 2008

图 3. 2008 年 09 月 13 日 18UTC Lin 微物理参数化方案(a)、Ferrier 微物理参数化方案(b)、WSM5 微物理参数化方案(c)、WSM6 微物理参数化方案(d)模拟(22°N~38°N, 86°W~102°W)范围的海平面气压

然后截取不同微物理参数化方案下不同高度的风场来对飓风进行进一步的分析。从 1000 hPa 的风场(图 4)可知四种微物理参数化方案下, 飓风旋涡区附近风速普遍在 15~30 m/s, 四个方案都有明显的向中心辐合的气流, 属于飓风的流入层。750 hPa 的风场(图 5)相比 1000 hPa 的风场, 四个微物理参数化方案下的飓风旋涡区风速都有明显的提升, 且四个微物理参数化方案下风场都明显呈现出了不对称结构, 飓风风速大值明显集中分布在飓风中心东侧, Ferrier 微物理参数化方案下德克萨斯州东部(30°N~32°N, 93°W~95°W)地区, 风速高达 50~55 m/s, 明显大于其他三个方案, Lin 方案次之, WSM5 和 WSM6 方案最小。375 hPa 的风场(图 6)相比 750 hPa 的风场, 四种微物理参数化方案下飓风旋涡区的风速大值都有所减小, 飓风中心东北方都出现了一个反气旋, 且只有 Lin 和 Ferrier 方案下出现了完整紧凑的飓风眼, 其中 Ferrier 方案下的飓风眼小而圆, 旋涡区风速大值也大于其他方案。125 hPa 风场中(图 7)四种方案模拟的飓风顶部都出现了巨大的反气旋, 层内气流主要都向外辐散, 是飓风的流出层, 与低层的流入层形成闭合环流[13], 其中 Ferrier 方案的辐散区域风速明显大于其他方案, 且反气旋的结构更为完整紧凑。



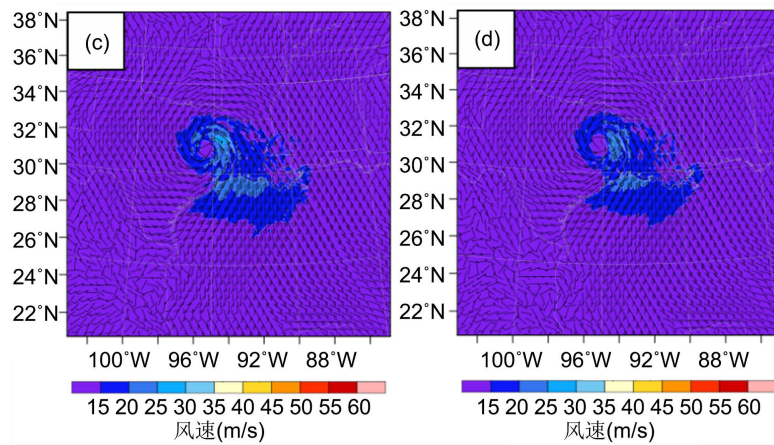


Figure 4. Simulated wind field of Lin microphysical parameterization scheme (a), Ferrier microphysical parameterization scheme (b), WSM5 microphysical parameterization scheme (c), and WSM6 microphysical parameterization scheme (d) at 18UTC 1000 hPa on September 13, 2008

图 4. 2008 年 09 月 13 日 18UTC 1000 hPa 的 Lin 微物理参数化方案(a)、Ferrier 微物理参数化方案(b)、WSM5 微物理参数化方案(c)、WSM6 微物理参数化方案(d)模拟的风场

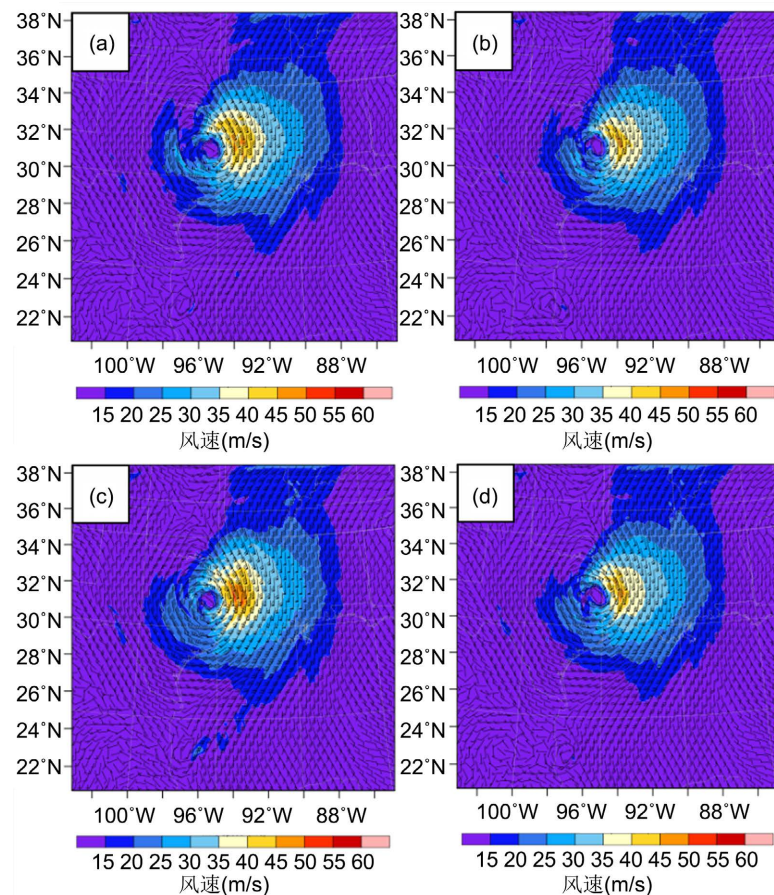


Figure 5. Simulated wind fields of Lin microphysical parameterization scheme (a), Ferrier microphysical parameterization scheme (b), WSM5 microphysical parameterization scheme (c), and WSM6 microphysical parameterization scheme (d) at 18UTC 750 hPa on September 13, 2008

图 5. 2008 年 09 月 13 日 18UTC 750 hPa 的 Lin 微物理参数化方案(a)、Ferrier 微物理参数化方案(b)、WSM5 微物理参数化方案(c)、WSM6 微物理参数化方案(d)模拟的风场

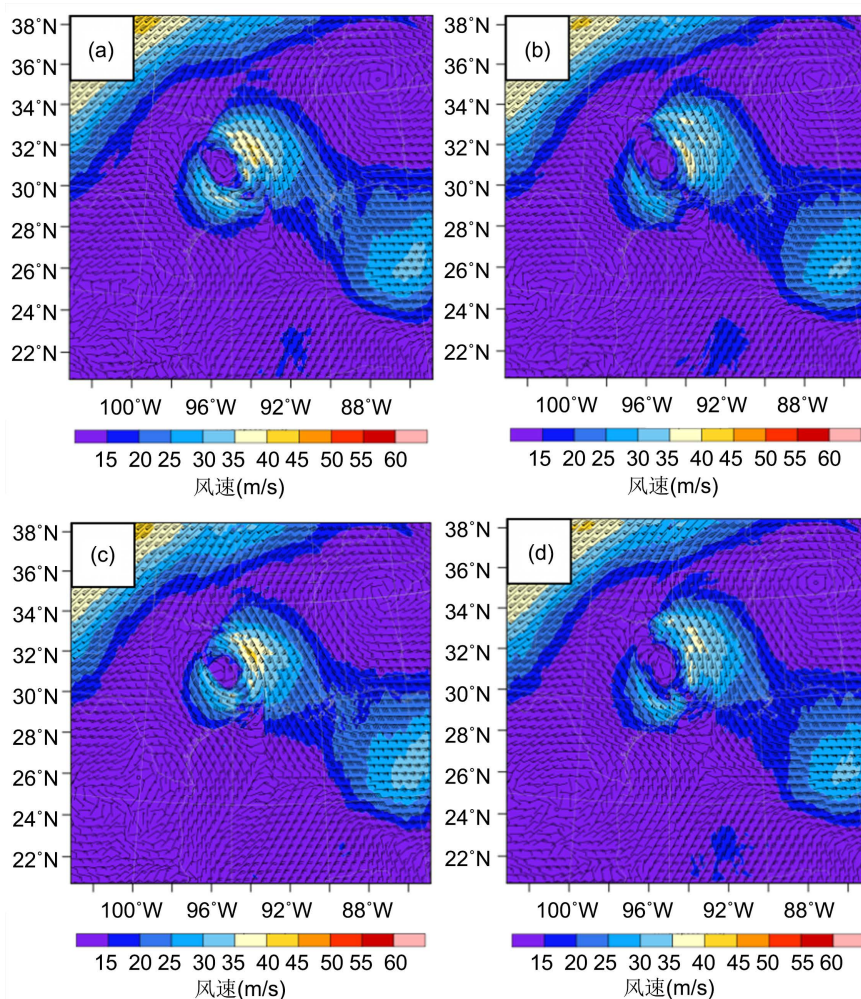
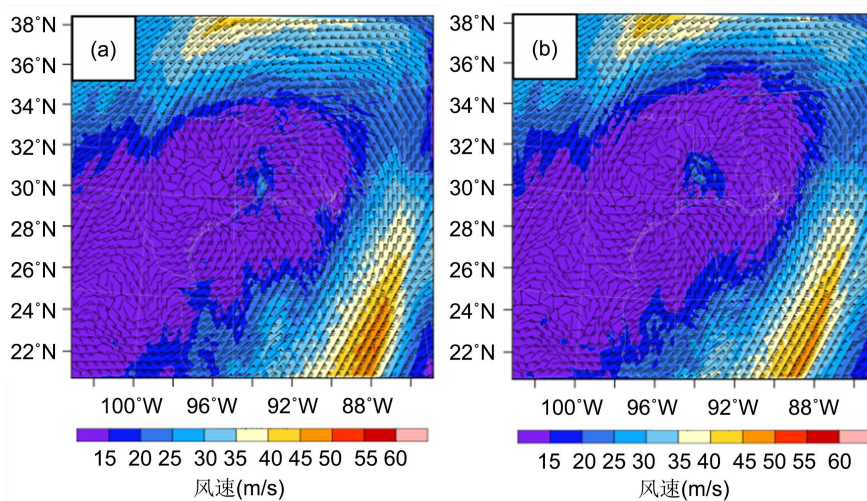


Figure 6. Wind field simulated by Lin microphysical parameterization scheme (a), Ferrier microphysical parameterization scheme (b), WSM5 microphysical parameterization scheme (c), and WSM6 microphysical parameterization scheme (d) at 18UTC 375 hPa on September 13, 2008

图 6. 2008 年 09 月 13 日 18UTC 375 hPa 的 Lin 微物理参数化方案(a)、Ferrier 微物理参数化方案(b)、WSM5 微物理参数化方案(c)、WSM6 微物理参数化方案(d)模拟的风场



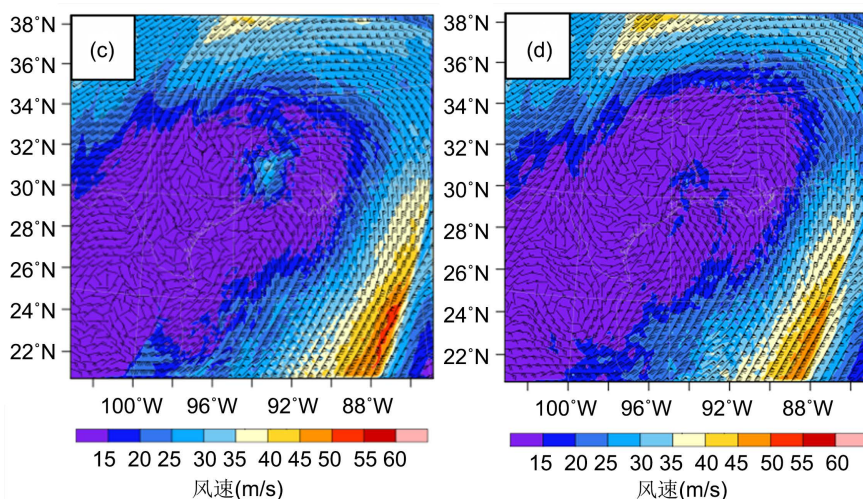
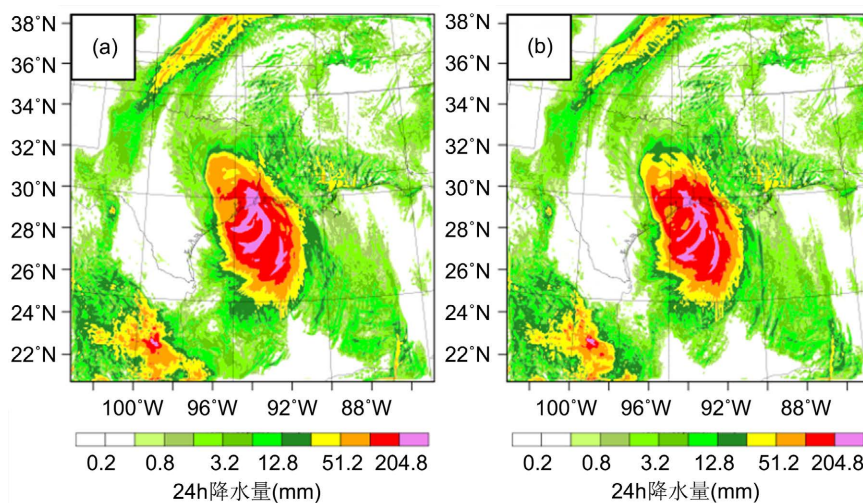


Figure 7. Wind fields simulated by Lin microphysical parameterization scheme (a), Ferrier microphysical parameterization scheme (b), WSM5 microphysical parameterization scheme (c), and WSM6 microphysical parameterization scheme (d) at 18UTC 125 hPa on September 13, 2008

图 7. 2008 年 09 月 13 日 18UTC 125 hPa 的 Lin 微物理参数化方案(a)、Ferrier 微物理参数化方案(b)、WSM5 微物理参数化方案(c)、WSM6 微物理参数化方案(d)模拟的风场

综上，由各微物理参数化方案在 2008 年 09 月 13 日 18UTC 不同高度的风场图，可以看出在四种微物理参数化方案下，飓风都呈现低层辐合，高层辐散，垂直方向由低到高都呈向北倾斜的结构，且风速从低到高都呈现先增后减的变化趋势。综合来讲，在 09 月 13 日 18UTC，Ferrier 微物理参数化方案下模拟飓风的飓风眼清晰、小而圆，飓风风速都大于其他方案，表明 Ferrier 方案下飓风的强度也最强，Lin 方案次之。

另外，本次还选取 2008 年 09 月 12 日 18UTC 的 NCEP GFS 的再分析资料作为试验的启动资料，累计预报 24 h，到 2008 年 09 月 13 日 18UTC 的累计降水量来进行分析。如图 8，各种微物理参数化方案下模拟的飓风“艾克”都带来了强烈的降水，部分地区达到 24 h 累计降水量达到 200 mm 以上的大暴雨，大暴雨雨带尤其集中在飓风眼壁东南侧。其中值得我们注意的是在 Ferrier 微物理参数化方案下的降水量图中，达到大暴雨量级降水的雨带面积略大于其他三个微物理方案下的大暴雨雨带面积，而在 WSM5 方案下，达到大暴雨降水量级的雨带面积是最小的。



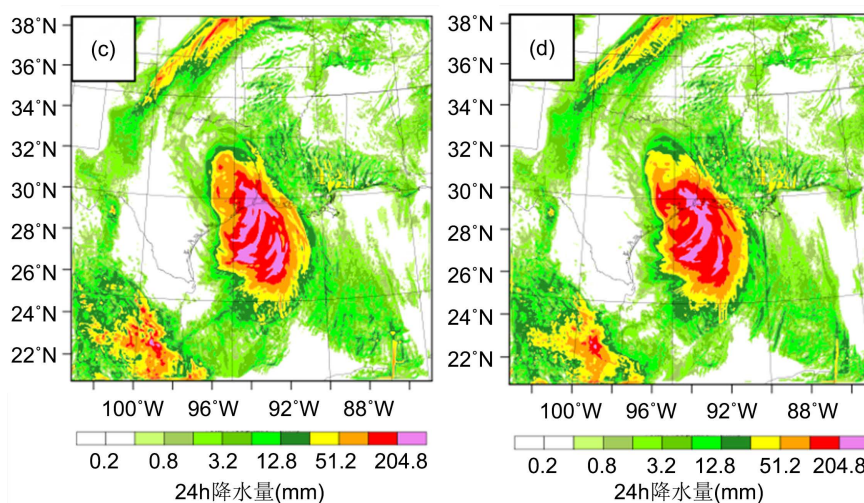


Figure 8. Simulated 24-hour precipitation in the Lin microphysical parameterization scheme (a), Ferrier microphysical parameterization scheme (b), WSM5 microphysical parameterization scheme (c), and WSM6 microphysical parameterization scheme (d) from September 12, 2008 to September 13, 2008 (22°N~38°N, 86°W~102°W) region

图 8. 从 2008 年 09 月 12 日 18UTC 日到 2008 年 09 月 13 日 18UTC Lin 微物理参数化方案(a)、Ferrier 微物理参数化方案(b)、WSM5 微物理参数化方案(c)、WSM6 微物理参数化方案(d)模拟的(22°N~38°N, 86°W~102°W)地区的 24 h 降水量

5. 初步原因分析

5.1. 飓风路径模拟差异原因的初步分析

从 750 hPa 的风场(图 5)可以看出各微物理方案下, 在 2008 年 09 月 13 日 18UTC 各方案下飓风风场中都出现了明显的气旋性环流, 但是环流中心的东侧和东北侧风速明显大于其他方位, 表现出了明显的不对称分布特征, 图中飓风外围存在一支 10 m/s 左右的环境风场引导气流, 因此飓风中心东侧风速极值大于其他方位的不对称分布可能是由环境风场与飓风本身两方面造成的。由地面附近 1000 hPa 风场图(图 4)可以看到地面的大风区主要集中在飓风的东侧, 风速大值都在 25~30 m/s 左右, 其他方位风速较小仅为 15~20 m/s, 这种分布有利于维持飓风向东移动[14]。750 hPa 的风场(图 5)四种方案下, 风速大值主要集中在飓风中心的东侧和东北侧且最大风速都在 40~45 m/s 左右, 由南向北的引导气流为飓风中心东侧带来了充沛的水汽(图 10), 使飓风中心东侧发展更加强盛, 而飓风登陆之后西侧的水汽供应被阻断, 抑制了飓风中心西侧的发展, 使飓风中心东西侧的差距逐渐增大, 因而导致飓风移向东折。地面附近 1000 hPa 风场(图 4)中, Ferrier 方案下飓风中心东侧风速大值明显大于其他方案, 达到 30~35 m/s, 750 hPa 风场(图 5)中, Ferrier 方案飓风中心东侧和东北侧风速最大值也远超其他方案, 达到 50~55 m/s, 飓风中心东西两侧风场不对称结构最明显, 风速相差最大达到 25 m/s 左右, 是四种方案中相差最大的, 所以飓风移向也较其他方案偏东。

5.2. 飓风强度模拟差异原因的初步分析

由图 9 的地面温度可知 Ferrier 方案下飓风眼区(31°N, 95.5°W)内部分区域达到 22°C~23.5°C 的低温, 飓风旋涡区西南侧温度高于其他方案, 且很强的温度径向梯度。飓风中心的冷空气扩散到飓风外围造成暖湿空气(图 10)抬升, 同时使潜热释放加强, 激发飓风的发展。且 Ferrier 方案下, 大暴雨雨带面积最大, 雨带外部非绝热加热最强(图 8 和图 9), 使对流层低层流入加强(图 4 和图 5), 对流层上部流出加强(图 6 和图 7), 上升运动更强, 飓风的发展的高度也更高。

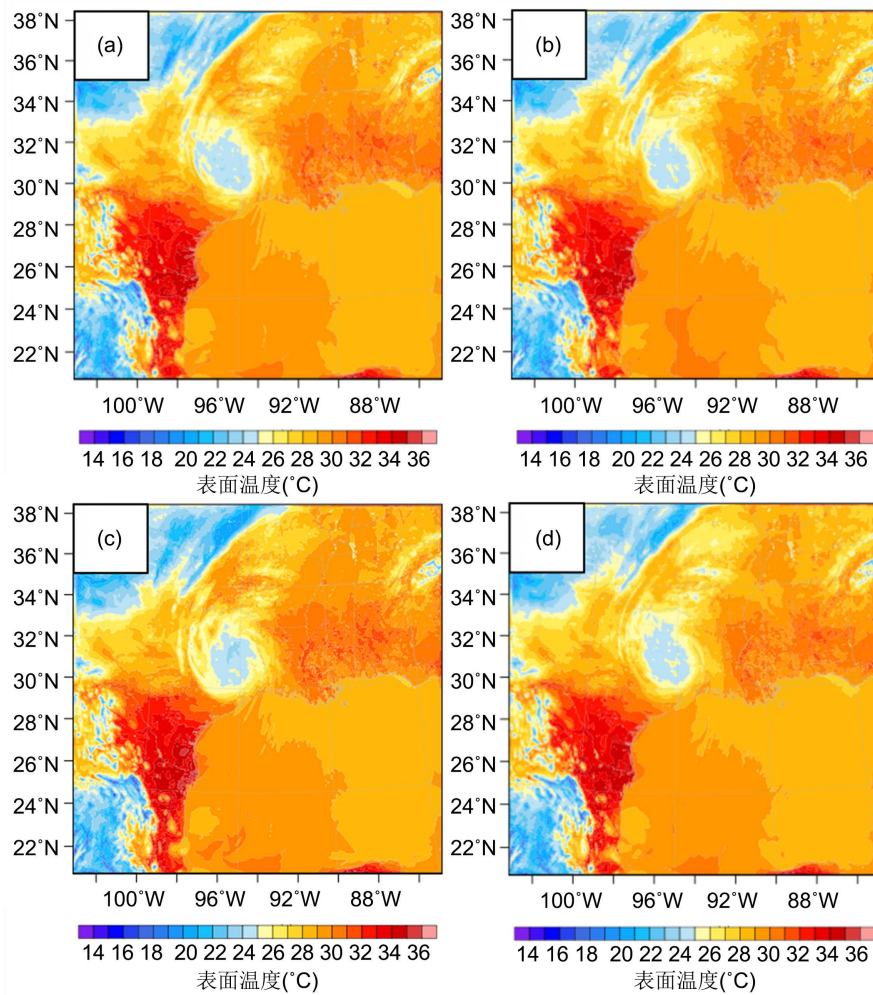
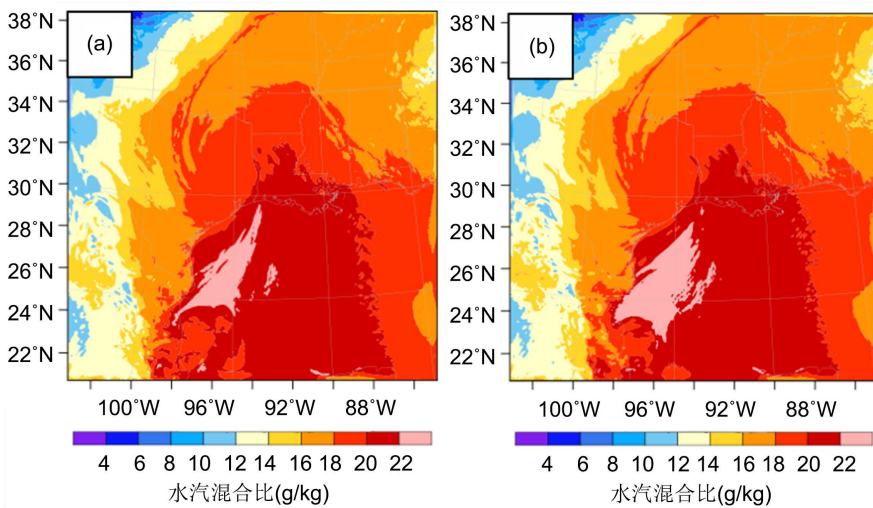


Figure 9. Surface and sea level temperatures simulated by Lin microphysical parameterization scheme (a), Ferrier microphysical parameterization scheme (b), WSM5 microphysical parameterization scheme (c), and WSM6 microphysical parameterization scheme (d) at 18UTC on September 13, 2008

图 9. 2008 年 09 月 13 日 18UTC, Lin 微物理参数化方案(a)、Ferrier 微物理参数化方案(b)、WSM5 微物理参数化方案(c)、WSM6 微物理参数化方案(d)模拟的地表及海平面温度



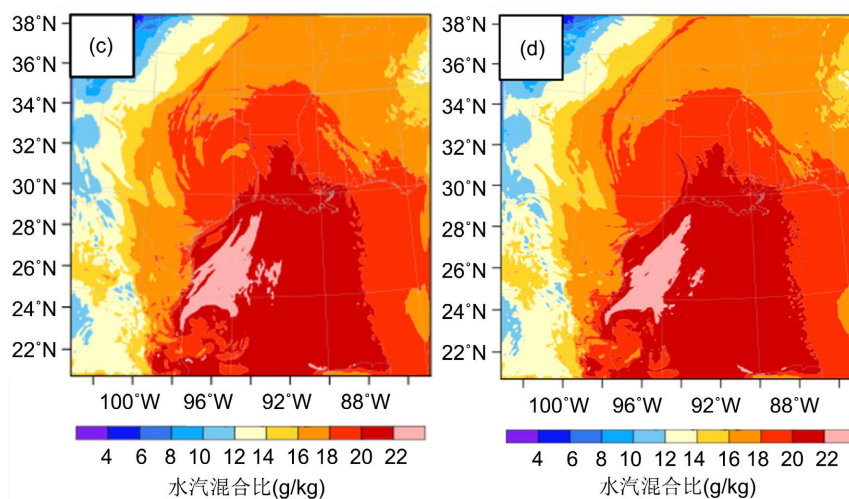


Figure 10. Water vapor mixing ratio simulated by Lin microphysical parameterization scheme (a), Ferrier microphysical parameterization scheme (b), WSM5 microphysical parameterization scheme (c), and WSM6 microphysical parameterization scheme (d) at 1000 hPa near the ground on September 13, 2008 at 18UTC

图 10. 2008 年 09 月 13 日 18UTC, 地面附近 1000 hPa, Lin 微物理参数化方案(a)、Ferrier 微物理参数化方案(b)、WSM5 微物理参数化方案(c)、WSM6 微物理参数化方案(d)模拟的水汽混合比

6. 总结

利用 WRF 中尺度模式, 以 2008 年北大西洋 09 号四级飓风“艾克”为个例, 对比分析了不同的微物理参数化方案对飓风路径和强度模拟结果的异同, 并初步分析了不同微物理参数化方案对飓风路径和强度的模拟出现差异的原因。

不同微物理参数化方案对飓风路径模拟影响较为显著, 飓风的路径对微物理参数化方案的选择有较强的敏感性。其中, WSM6 微物理方案的试验对飓风“艾克”路径的模拟效果较好。

四种微物理参数化方案下模拟飓风和实际飓风一样, 在登陆后 11 h 后路径发生东折, 除 Ferrier 方案模拟路径部分较实际观测路径偏西外, 其余方案几乎都较实况偏东, 四种方案模拟飓风移速都较实际观测偏慢。

不同微物理参数化方案对飓风强度模拟影响不显著。四个方案模拟的强度几乎在整个模拟时段都与实际观测强度相差较大, 模拟结果不理想。Lin 微物理参数化方案下, 最后 6 h 的飓风中心海平面气压模拟结果与实际气压较为接近, 是本次强度模拟试验中最好的方案。

四种微物理参数化方案下模拟飓风强度在飓风登陆前相差不大, 在飓风登陆后 1 h 逐渐形成差异, 说明当飓风在开阔的洋面上时, 飓风强度对微物理参数化方案的选择最不敏感[7]。

7. 讨论

在现实情况下, 热带气旋的移动路径及强度是由诸多复杂的因素所影响和决定的, 而在此次对飓风路径和强度的模拟中, 微物理方案只是众多影响结果的因素之一。与此同时, 飓风等热带气旋存在个体差异性, 换言之, 本文的所有结论也只是基于本次的飓风个例“艾克”的模拟研究而总结得出的, 并非对所有的热带气旋都适用, 结论在其他案例身上适用与否, 还需要对更多的热带气旋进行更加广泛的模拟试验研究才能得出结论。

参考文献

- [1] 贺海晏, 董惠菁. 台风移动规律的研究III. 台风与外界水平动量交换的影响[J]. 热带气象学报, 1995(3): 193-202.

-
- [2] 袁金南, 肖伟生. 海温变化对台风路径的影响[J]. 广东气象, 2002(3): 1-2.
- [3] 余贞寿, 郝增周, 谢海华, 张天河. 台湾岛地形对台风“海棠”(0505)移动路径影响的数值试验研究[J]. 热带气象学报, 2007(6): 575-580.
- [4] 林惠娟, 冀春晓, 滕代高. WRF 物理参数化方案在台风路径和强度预报中的比较分析[C]//中国气象学会. 第 27 届中国气象学会年会灾害天气研究与预报分会场论文集. 2010: 1-8.
- [5] 周昊, 朱伟军, 彭世球. 不同微物理方案和边界层方案对超强台风“鲇鱼”路径和强度模拟的影响分析[J]. 热带气象学报, 2013(5): 803-812.
- [6] Raju, P.V.S., Potty, J. and Mohanty, U.C. (2011) Sensitivity of Physical Parameterizations on Prediction of Tropical Cyclone Nargis over the Bay of Bengal Using WRF Model. *Meteorology and Atmospheric Physics*, **113**, 125. <https://doi.org/10.1007/s00703-011-0151-y>
- [7] Chan, K.T.F. and Chan, J.C.L. (2016) Sensitivity of the Simulation of Tropical Cyclone Size to Microphysics Schemes. *Advances in Atmospheric Sciences*, **33**, 1024-1035. <https://doi.org/10.1007/s00376-016-5183-2>
- [8] 沈菲菲, 闵锦忠, 许冬梅, 等. 双多普勒雷达资料同化在飓风“艾克”预报中的应用研究[J]. 海洋学报, 2016(11): 60-72.
- [9] 杨明祥, 蒋云钟, 王忠静, 等. 雅砻江流域 WRF 模式构建及应用[J]. 天津大学学报, 2016, 49(4): 349-354.
- [10] 河惠卿, 王振会, 金正润, 等. 积云参数化和微物理方案不同组合应用对台风路径模拟效果的影响[J]. 热带气象学报, 2009, 25(4): 435-441.
- [11] 余贞寿, 王红雷. 微物理过程和对流参数化对台风“莫拉克”(0908)路径模拟影响研究[C]//浙江省气象学会, 上海市气象学会, 江苏省气象学会. 第七届长三角气象科技论坛论文集. 2010: 148-155.
- [12] 胡向军, 陶健红, 郑飞, 等. WRF 模式物理过程参数化方案简介[J]. 甘肃科技, 2008, 24(20): 73-75.
- [13] 朱乾根. 天气学原理和方法[M]. 北京: 气象出版社, 2007: 508-555.
- [14] 史得道, 易笑园, 刘彬贤. 台风“达维”不对称结构特征分析[J]. 气象与环境学报, 2014(3): 10-17.