

边界层参数化方案对台风“烟花”北上阶段模拟影响的差异比较

邢蕊^{1,2}, 杨健博^{1,3*}, 庄庭⁴, 王庆元⁵, 邱晓滨^{1,3}, 田梦^{1,3}

(1. 天津市海洋气象重点实验室, 天津 300074; 2. 天津市滨海新区气象局, 天津 300457; 3. 天津市气象科学研究所, 天津 300074; 4. 天津市气象探测中心, 天津 300061; 5. 天津市气象台, 天津 300074)

摘 要: 利用中尺度数值预报模式(WRF)中的8种边界层参数化方案(ACM2、Boulac、GBM、MYJ、MYNN、QNSE、UW、YSU), 采用高分辨率数值试验的方法研究不同边界层参数化方案对台风“烟花”(2021)北上影响环渤海区域阶段的路径、强度、降水及动热力结构等方面的模拟差异。结果表明: 台风北上后的路径模拟对边界层参数化方案较敏感, 其中Boulac方案模拟的路径误差最小, 随着积分时间延长, 各试验的路径差异也越来越显著; 由于台风北上阶段强度较弱, 模拟的最低气压绝对误差总体偏小, 基本分布在2~6 hPa之间; 各试验对累积降水极值大小和位置的模拟存在较大差异, 通过分析24 h累积降水的TS评分可知, Boulac方案在中雨以上量级的模拟中表现最优, 而ACM2方案则在大雨及暴雨以上量级的模拟中表现最优; 各试验对于台风动热力结构的模拟存在差异, 其中动力结构的差异更加明显, 并且低层大气比高层大气差异更显著。造成这种差异的原因可能是由于各方案对边界层热通量以及动热力结构的模拟存在差异, 并通过边界层顶的夹卷过程将这种差异引入高层大气。

关键词: 边界层参数化方案; 北上台风; 数值模拟; 环渤海区域

中图分类号: P456.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2023)04-0107-15

0 引言

我国是世界上受台风影响最严重的国家之一^[1]。台风登陆过程中带来的强风暴雨常常会诱发严重的自然灾害, 给人民的生命和财产安全构成巨大威胁^[2-3]。受三维观测资料的限制, 对台风的深入研究主要依靠高分辨率的数值模拟手段。在数值模式中, 大气中的许多重要物理过程由于受到模式分辨率等因素的影响, 一般通过参数化的方法来进行刻画, 如边界层湍流参数化方案、积云对流参数化方案等, 不同的参数化方案对模拟结果会产生不同的影响^[4-7]。

观测分析表明, 台风边界层中存在尺度为几百米~几千米的小尺度系统, 近地面阵风与台风边界

层的精细结构有关^[8], 台风边界层作为台风结构的一个重要组成部分, 其动力和热力过程较为复杂, 可直接影响到台风的结构和强度^[9-10]。显而易见, 边界层参数化方案在台风数值模拟中具有重要作用, 也是造成台风强度和结构预报不确定性的来源之一。研究表明, 在数值模式中是否考虑边界层参数化方案可显著影响台风的模拟结果^[10-11], 不同的参数化方案由于对边界层中水汽等物理量以及垂直混合等物理过程描述存在差异, 也会导致台风路径和强度的模拟结果出现显著差异^[12-13]。

前人已针对边界层参数化方案对台风生命史不同阶段的影响开展了研究。例如: 温晓培等^[14]研究了边界层参数化方案对台风“SANBA”(2012)初生阶段的影响, 结果表明在台风形成初期, 不同边

收稿日期: 2022-04-21。

基金项目: 天津市自然科学基金(20JCYBJC00640、20JCYBJC00780); 天津市海洋气象重点实验室开放基金项目(2022TKLOM05); 天津市气象局科研项目(202114zdxm01、202115dghm04)。

作者简介: 邢蕊(1985-), 女, 高级工程师, 博士, 主要从事台风及灾害性天气高分辨率数值模拟研究。E-mail: nuistxr@163.com

*通信作者: 杨健博(1989-), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事大气边界层数值模拟研究。E-mail: iamjyb.happy@163.com

界层方案对台风的强度和路径模拟具有明显影响,其中QNSE和ACM2方案对该台风发展初期边界层过程的处理较完善,能够较好地反映边界层热带扰动的形成和发展;张福青等^[14]利用TL6模式研究了成熟台风边界层的作用,他指出在24 h内,台风边界层内各种通量的垂直输送对其路径影响很小而对成熟台风的维持非常重要,其中潜热输送是成熟台风的主要能源,影响最为重要,而感热输送对成熟台风几乎无影响;王叶红等^[15]研究了边界层参数化方案对台风“莫兰蒂”(2016)登陆阶段的模拟影响,定量分析了中尺度数值预报(Weather Research and Forecasting, WRF)模式WRFv3.8中7种边界层参数化方案在台风登陆减弱阶段的移动路径、强度、结构、降水量以及近地层有关物理量场等方面的差异,并指出不同的边界层参数化方案对于台风路径、强度、降水等方面的模拟具有不同的优势。

此外,还有学者针对不同季节、不同影响区域以及不同初始强度的台风展开边界层参数化方案的研究。例如:丁成慧等^[16]利用WRF模式研究了两个局地闭合(QNSE、MYJ)和两个非局地闭合(YSU、ACM2)的边界层参数化方案对南海秋季台风“莎莉嘉”(2016)模拟的影响,指出不同边界层方案对于台风路径的影响较小,但对台风强度和结构有明显的影响,非局地闭合方案明显优于局地闭合方案;徐亚钦等^[17]利用WRF模式对强影响浙江的9个西太平洋台风进行多种微物理和边界层参数化方案的模拟,定量评估不同方案下的台风路径、强度和降水的模拟性能,并指出SBU-YLin微物理和Boulac边界层方案相对更适合浙江台风模拟;王晨稀^[18]以GRAPES-TCM为试验模式,分析了两种边界层参数化方案对1109号台风“梅花”预报的影响,并按起报时刻台风强度的不同分为“强台风”和“弱台风”,对比分析了边界层参数化方案对不同强度台风的影响,结果表明YSU方案对弱台风的路径强度预报效果更优,MRP方案对强台风的路径预报效果更好,方案的强度预报效果则与对流参数化方案的选择有关。

以上研究表明边界层参数化方案对生命史不同阶段、不同影响地区、不同季节以及不同初始强度的台风模拟均具有重要影响,并且对不同台风的

影响存在显著差异,因此针对更多台风以及台风生命史不同阶段开展数值试验来加深边界层参数化方案对台风模拟影响的认识具有重要意义。台风登陆北上后受中纬度斜压性复杂环境及环渤海地区海陆共存下垫面的共同影响,边界层过程较为复杂,模式预报的不确定性较大,风雨精细化预报难度大,因此,准确的边界层垂直湍流输送模拟对台风减弱及陆上结构的预报有重要影响^[19]。然而,目前针对北上影响环渤海区域的台风开展边界层参数化方案数值试验的研究相对较少,不同边界层方案针对北上台风模拟的适用性特征尚不明确。另外,近年来台风北上的频率相对较高,往往会造成暴雨以上的量级,并且有造成严重灾害的可能(如1975年3号台风、1978年5号台风北上后引发的特大暴雨分别给河南和华北东部造成严重灾害),因此针对北上影响环渤海地区的台风开展不同边界层参数化方案影响的研究具有重要意义,可为数值模式选择合适的边界层参数化方案提供参考依据,从而提高北上台风的预报准确率,有助于政府部门开展防灾减灾决策工作。

本文使用的资料包括欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)的全球气候第五代大气再分析资料ERA5(Fifth Generation ECMWF Atmospheric Reanalysis),分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$;中央气象台的台风“烟花”实时路径强度资料;中国气象局CMPA实况降水资料,分辨率为 $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ 。利用WRFv4.3模式对台风“烟花”北上影响环渤海阶段进行高分辨率数值模拟,采用8种边界层参数化方案进行数值试验,研究不同方案对台风“烟花”北上阶段路径、强度、降水、动力、热力结构的影响,选取表现最优的北上台风数值模拟边界层参数化方案,为提高北上台风风雨预报准确率及业务应用提供参考。

1 个例简介

2021年第6号台风“烟花”于7月18日生成于西北太平洋洋面,先后以西北、偏西、西北偏北路径逼近大陆沿岸,并于25日04时30分(世界时,下同)在浙江舟山普陀沿海登陆,26日01时50分在浙江嘉

兴平湖市沿海再次登陆,是有气象记录以来首个在浙江两次登陆的台风,随后台风在陆上向西北以及偏北方向移动,先后进入浙江、江苏、安徽、山东及河北境内,并最终移入渤海湾。台风“烟花”于30日变性为温带气旋,12时停止编号,在中国陆上滞留时间长达95 h,成为1949年以来滞留时间最长的台风^[20]。

7月28日00时,台风“烟花”位于500 hPa等压面上低涡的西侧、高空槽的东南方向(图略),之后台风逐渐北移并嵌入到高空槽中,导致高空槽加深,随着台风进一步东移北上,30日00时,低层台风涡旋位于高空槽前,200 hPa有西风带环境位涡侵入到台风环流中(图略),850 hPa相当位温分布图上显示有干冷空气卷入到台风环流中(图略),以上分析表明台风“烟花”在北上过程中逐渐与西风带系统发生相互作用,并最终导致变性。

受台风“烟花”影响,海河流域大部分地区出现明显降雨,流域东部普降暴雨—大暴雨,其中各有809站(18.1%)出现暴雨和大暴雨,1站出现特大暴雨。7月27日23时—30日23时最大降雨量为250.7 mm,出现在河北省沧州市,最大小时降雨量为54.3 mm,出现在山西省大同市。

另外,经统计分析知,1949—2019年6—9月登陆北上后影响环渤海地区的台风共25例,按首次登陆点的不同,可将这25例台风分为山东及山东以北登陆(第一类,11个)和山东以南登陆(第二类,14个)两类(图略)。第一类台风北上时路径所经下垫面为先海洋后陆地,发生变性的几率较小且北上后无加强,第二类台风路径所经下垫面为先陆地后海洋,移入环渤海区域后发生变性的几率增大,部分个例存在强度加强现象^[21]。本文中研究的台风“烟花”首次登陆点在浙江北部地区,属于第二类,移动路径所经下垫面为先陆地后海洋,在台风移动后期发生了变性,北上过程中强度无加强,但在环渤海地区造成了区域性的暴雨天气,因此对台风“烟花”进行研究可为相似路径台风的风雨预报提供参考依据,具有一定的代表性。

2 模式简介及数值试验设计

利用中尺度数值模式WRFv4.3对台风“烟花”

进行三重双向嵌套以及追随台风中心的移动嵌套方案,模拟区域中心位于37°N,120°E,水平分辨率为18 km/6 km/2 km,水平方向格点数为414×372、226×226、412×412,垂直方向共42层,模式顶气压为50 hPa。仅在最外层使用Kain-Fritsch积云对流参数化方案,云微物理过程选取WSM6方案,短波辐射用Dudhia方案,长波辐射用RRTM方案,陆面过程选取Noah方案。积分时段为2021年7月28日18时—30日00时,共30 h,积分时间步长为30 s,积分过程中未使用动力初始化方案及Spectral Large-scale Nudging方法。模式采用ERA5再分析资料作为初始场和侧边界条件。

模式分别采用ACM2、Boulac、GBM、MYJ、MYNN、QNSE、UW、YSU 8个边界层参数化方案对台风“烟花”北上影响环渤海区域阶段的路径强度及风雨过程进行数值试验。由于给定的边界层参数化方案只能与有限的地面层方案配合,为排除地面层参数化方案的影响,在试验中尽量选择较为一致的地面层方案(见表1)。为便于与ERA5资料进行对比,本文使用与ERA5资料分辨率较为接近的D01网格数据进行分析。

目前,常用的边界层参数化方案主要可分为3种,即局地闭合、非局地闭合以及(局地-非局地)混合型方案。局地闭合方案假设每个格点上的脉动通量完全由该格点上物理量的平均量决定;非局地闭合方案综合考虑该格点及周边格点对脉动通量的影响;而混合型方案综合考虑了以上两种闭合机制的影响。各边界层参数化方案简要概述如下:

①YSU方案^[22]:YSU方案是一阶非局地闭合方案。该方案是建立在K理论(类比于分子扩散理论,认为湍流通量正比于网格平均量的垂直梯度)的基础上,显示引入了对逆梯度输送过程以及夹卷通量的考虑,以表征大尺度湍涡的非局地输送作用。YSU方案是目前应用最广泛的边界层方案,但一些研究指出,该方案针对夜间边界层的模拟还存在较大偏差,并会高估稳定边界层内垂直混合作用的强度^[23]。

②ACM2方案^[24-25]:ACM2方案是局地-非局地混合型方案,该方案在显式考虑非局地传输作用的基础上,引入了一个一阶涡旋扩散项,实现了对非局地向上混合以及局地向下混合两种湍流混合机

表 1 数值试验方案设计

Tab.1 Designs of numerical experiments

试验名称	边界层参数化方案	地面层参数化方案
ACM2	ACM2 (Pleim) scheme	Revised MM5 Monin-Obukhov
Boulac	Bougeault and Lacarrere (BouLac) TKE	Revised MM5 Monin-Obukhov
GBM	GBM TKE-type scheme	Revised MM5 Monin-Obukhov
MYJ	Mellor-Yamada-Janjic (Eta) TKE	Monin-Obukhov (Janjic Eta)
MYNN	MYNN 2.5 level TKE	Revised MM5 Monin-Obukhov
QNSE	QNSE-EDMF	QNSE
UW	Bretherton-Park/UW TKE scheme	Revised MM5 Monin-Obukhov
YSU	YSU scheme	Revised MM5 Monin-Obukhov

制的综合表征,改进了对近地层气象要素垂直分布的模拟效果。对于稳定或中性边界层,ACM2方案会关闭非局地传输项,仅使用局地闭合机制。ACM2方案的缺点主要在于往往明显高估了边界层高度,这可能与该方案采用了与其他边界层方案均不相同的边界层高度计算方法有关^[26-27]。

③MYJ方案^[28-29]:MYJ方案是1.5阶局地湍流动能(TKE)闭合方案,认为湍流动量交换系数与TKE的平方根成正比,且边界层高度也由TKE的垂直廓线决定。该方案对于稳定和弱不稳定条件下的边界层都有较好的模拟效果,但在对流边界层中误差较大,容易低估对流边界层内的垂直混合作用强度,导致边界层的偏冷和偏湿。因MYJ方案具有较高的计算效率,是目前应用最广泛的局地闭合型边界层方案。

④MYNN方案^[30]:MYNN方案是在MYJ方案的基础上提出的湍流主长度尺度的诊断方程,其加入了水汽凝结过程,为了确保数值积分的稳定性还加入了限定条件以及重新确定了一组更加合理的湍流闭合常数。ROMÁN-CASCÓON等^[31]指出,MYNN方案针对雾过程的模拟效果优于包括MYJ方案在内的其他边界层方案。

⑤Boulac方案^[32]:Boulac方案是1.5阶局地闭合方案,该方案考虑了地形对湍流动能的激发作用以及对流边界层(包括弱稳定边界层)内热量通量的逆梯度输送作用。与其他边界层方案相比,Boulac方案对于下垫面信息更加敏感,因此适用于受地形影响较大的地区和事件的模拟。

⑥QNSE方案^[33]:QNSE方案是1.5阶局地闭合

方案。该方案在不稳定条件下采用TKE闭合方案,而在稳定条件下,采用湍流谱闭合模式发展而来的K-ε模式。其优势在于保留了更接近真实大气的物理过程,并且考虑了湍流和波的共同作用。徐慧燕等^[34]指出,QNSE方案针对暴雨过程的模拟效果优于其他边界层方案。

⑦GBM方案^[35]:GBM方案是1.5阶局地闭合方案,针对边界层顶物理过程的计算采用了夹卷闭合技术。该方案适用于干对流条件下边界层垂直结构的模拟。目前针对GBM边界层方案的应用研究开展的还相对较少。

⑧UW方案^[36]:UW方案是1.5阶局地闭合方案。该方案是在GBM方案基础上,改进了针对气候模式较长时间步长的数值积分稳定性,并提高了计算效率,同时显式地考虑了对流层的夹卷闭合过程,并且针对所有柱状大气中的湍流层采取统一处理。UW方案对于大风条件下的边界层结构的模拟效果较好,因此多应用于风能资源的预测与评估。

3 各试验台风路径、强度、降水的对比分析

3.1 台风路径

各试验都模拟出了台风北上阶段的路径,模拟的台风中心整体较实况偏东(见图1a)。29日03时前,各个边界层参数化方案的模拟路径差异十分微小,总体路径误差为30~90 km,其中29日00—03时误差较显著(见图1a、1b,两个时次各试验的平均

误差为 74.2 km); 29 日 06—12 时, 模拟与实况路径的误差为 30~60 km (见图 1b), 各试验之间的路径差异略有增大; 29 日 12 时之后, 各试验之间的路径差异显著增大, 其中, MYNN 和 GBM 方案在 29 日 12 时—30 日 00 时之间的平均路径误差最大 (分别为 96.6 km 和 95.5 km), Boulac 方案则最小 (此时段的平均路径误差为 35.5 km), 同样, MYNN 和 GBM 方案在 29 日 00 时—30 日 00 时的 24 h 平均路径误差依然最大 (分别为 76.2 km 和 77.7 km), 而 Boulac 方案最小 (47.5 km)。

由台风路径误差的标准差时间序列图 (见图 1c) 也可清晰地看出各试验之间路径误差差异的变化趋势: 随着台风向北移动, 路径误差的标准差整体随时间呈增大趋势, 表明随着积分时间的延长, 各试验之间的路径差异增大, 在 29 日 08 时之前, 各试验的路径误差标准差小于 10 km, 之后标准差陡增, 在 29 日 17 时达到最大, 为 51.1 km, 之后标准差又呈下降趋势, 但均在 20 km 以上, 可见随着积分时

间延长, 边界层参数化方案对台风路径的模拟产生影响。另外, 通过引入海陆分布指数 (Sea-Land Ratio), 即台风半径 300 km 范围内海洋面积所占台风环流总面积的比例^[37]分析也可知, 各试验台风环流 300 km 半径范围内的海洋和陆地下垫面分布比例的差异随积分时间延长逐渐增大, 可见随着积分时间的延长, 不同方案表现出来的差异不断叠加, 导致台风路径的模拟差异逐渐增大。

3.2 台风强度

台风“烟花”在北上影响环渤海区域阶段的强度基本维持在 15 m/s (热带低压级), 中心最低气压则基本维持在 988 hPa 左右。由于 10 m 风场受海陆共存下垫面影响较大, 因此从最低气压的角度来分析各试验台风强度的差异。从图 2 可以看出, 8 种方案模拟的最低气压所代表的台风强度均弱于实况 (中央气象台发布的台风实时路径), 但各参数化方案均模拟出了较为平缓的气压变化趋势, 除 GBM

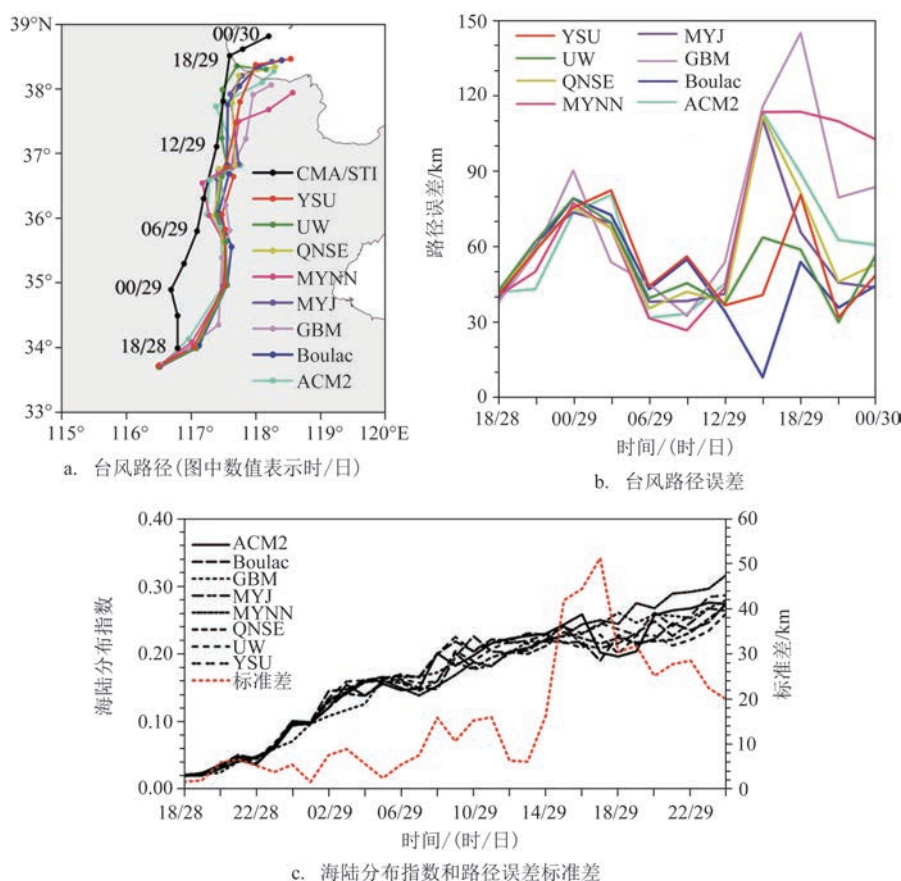
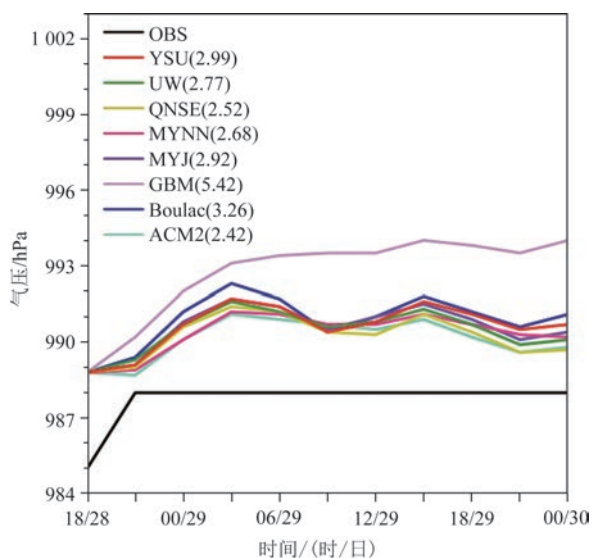


图1 各试验台风移动路径、台风路径误差、海陆分布指数和路径误差标准差分布
Fig.1 Typhoon track, track error, the sea-land ratio and track error standard deviation



注:括号中的数字代表29日00时—30日00时的平均绝对误差
图2 观测值与边界层参数化方案模拟的3 h间隔的最低海平面气压

Fig.2 Observed and simulated minimum sea level pressure with PBL schemes with a temporal interval of 3 h

方案外,其余7种方案最低气压分布的差异较微小,GBM方案在29日00时—30日00时的平均绝对误差最大,达到5.42 hPa,误差最大值则约为6 hPa,其余方案在这一时段平均绝对误差基本在2~4 hPa左右,其中ACM2方案最小,为2.42 hPa。由于台风北上阶段强度较弱,模拟的绝对强度误差总体偏小,WRF模式中的边界层参数化方案对于台风北上阶段强度的模拟误差基本为2~6 hPa。

3.3 台风降水

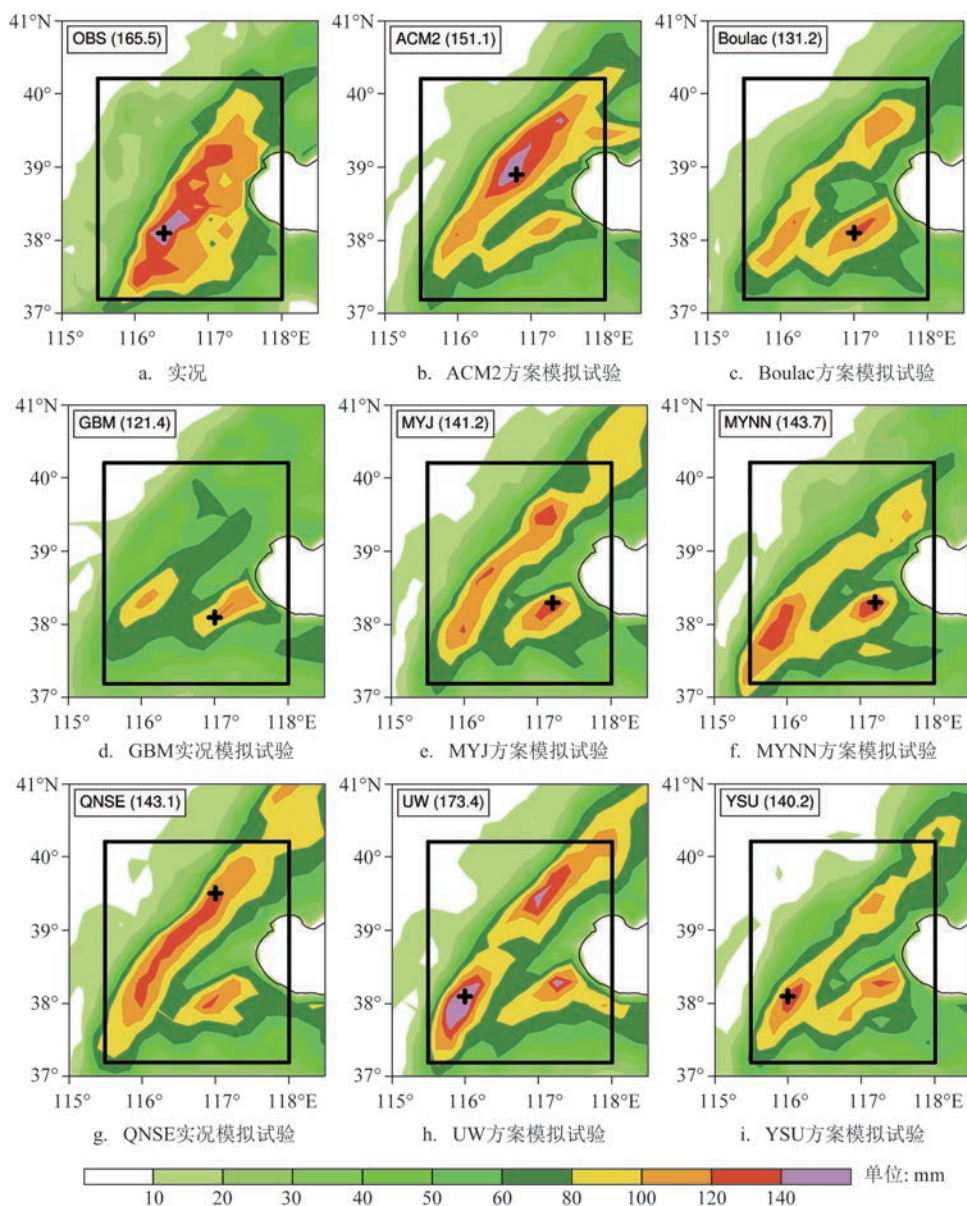
图3为实况与各试验模拟的2021年7月29日00时—30日00时24 h累积降水分布,为便于比较,此处将实况降水插值到与模拟降水一致的D01网格上,分辨率为18 km。由图可见,实况24 h累积强降水区呈东北—西南带状分布,累积降水极值为165.5 mm,出现在天津西南。就降水落区而言,各试验大于10 mm的降水区分布形态与实况较为一致,均模拟出了东北—西南带状的强降水区,但各试验在强降水极值大小与分布位置等方面存在显著差异,其中UW方案的累积降水极值大于实况值,其余方案均小于实况,UW和ACM2方案与实况最接近。图3a主要降水区(黑色方框,37.2°~40.2°N,

115.5°~118°E)平均实况降水量为58.1 mm,ACM2、Boulac、GBM、MYJ、MYNN、QNSE、UW和YSU方案相应的区域平均降水量分别为54.67 mm、51.05 mm、46.30 mm、52.02 mm、52.99 mm、54.88 mm、54.98 mm和48.19 mm,结合图中各试验的累积降水分布情况也可见,GBM方案模拟的降水最弱,ACM2、QNSE和UW方案模拟的累积降水相对较强,但各试验模拟的累积降水均弱于实况。

将实况降水插值到图3黑色方框区域内D01网格点上,并计算各试验在此黑色方框区域内各量级降水的TS评分,结果见表2。通过分析可知,当累积降水 ≥ 10 mm时,Boulac方案的TS评分约为0.942,表现最优;当累积降水 ≥ 25 mm、 ≥ 50 mm、 ≥ 100 mm时,ACM2方案的评分均为最高。因此,对于台风“烟花”的北上阶段,Boulac方案适合于中雨以上量级的模拟,而ACM2方案适合于大雨及暴雨以上量级的模拟。

4 各试验台风动、热力结构的对比分析

为考察各试验模拟的台风动力结构的差异,将2021年7月29日06时和18时的975~100 hPa的风速在实况降水极值附近区域(116.2°~116.6°E, 37.9°~38.3°N)内做平均,得到图4。由图4a可见,29日06时900 hPa以下ERA5资料的区域平均风速随高度的增加逐渐增大,最大可达19.9 m/s(925 hPa处);在900~650 hPa呈减小趋势,其中825~650 hPa的风速迅速减小,减小幅度为每100 hPa约5.5 m/s;650~500 hPa风速基本维持不变;500 hPa以上风速先增大,而后维持不变,最后逐渐减小。各试验模拟的区域平均风速随高度的变化趋势与ERA5资料的基本一致,但彼此之间存在显著差异。在700 hPa以下,ACM2和GBM方案的区域平均风速变化趋势和风速增减幅度与ERA5资料最接近,ACM2方案在875 hPa处风速增加到最大,为21.8 m/s,而GBM方案在875 hPa处风速增加到最大,为20.4 m/s,其余方案模拟的风速随高度增加的幅度更大,最大增加幅度为每100 hPa约8 m/s(风速最大约28 m/s);在700~350 hPa,除GBM和MYNN方案的区域平均风速变化趋势与ERA5资料差异较大外,其余各方案之间差别不大,变化趋势与ERA5



注:括号中数值代表24 h累积降水极值,“+”代表极值降水出现的位置,黑色方框代表主要降水区

图3 2021年7月29日00时—30日00时实况及边界层参数化方案模拟的24 h累积降水量分布

Fig.3 24 h accumulated rainfall observation and simulations with PBL schemes during 0000UTC 29 to 0000UTC 30 July, 2021

表2 8种边界层参数化方案模拟的各量级24 h累积降水的TS评分

Tab.2 Threat scores of 4 magnitudes 24 h accumulated rainfall from eight PBL scheme simulations.

降水等级/mm	ACM2	Boulac	GBM	MYJ	MYNN	QNSE	UW	YSU
$R \geq 10$	0.929	0.942*	0.938	0.925	0.915	0.938	0.924	0.843
$R \geq 25$	0.862*	0.834	0.789	0.859	0.849	0.849	0.842	0.821
$R \geq 50$	0.765*	0.730	0.548	0.692	0.707	0.686	0.716	0.725
$R \geq 100$	0.234*	0.129	0.016	0.016	0.054	0.054	0.083	0.104

注: *表示方案中最优者

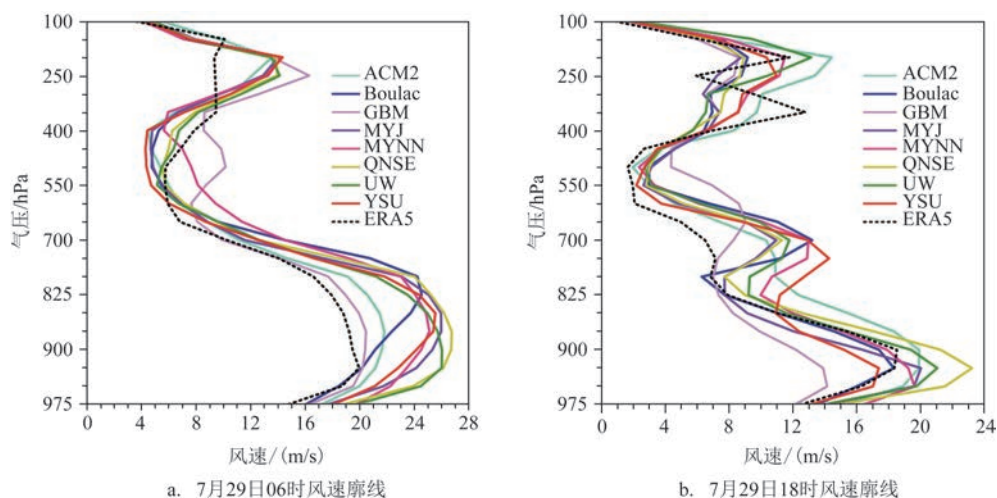


图4 各试验及ERA5资料区域平均风速廓线

Fig.4 Regional mean profiles of wind speed from ERA5 and simulations

资料也较为类似;300 hPa以上各试验的区域平均风速变化趋势为先增大后减小,ERA5资料则表现为先维持不变而后减小的趋势;另外,各试验在700 hPa以下的低层区域平均风速的差异比高层大气更显著。由各试验与ERA5资料所有层次的平均风速差异来看,ACM2方案与ERA5资料的平均风速相差约为1 m/s,两者结果最接近。

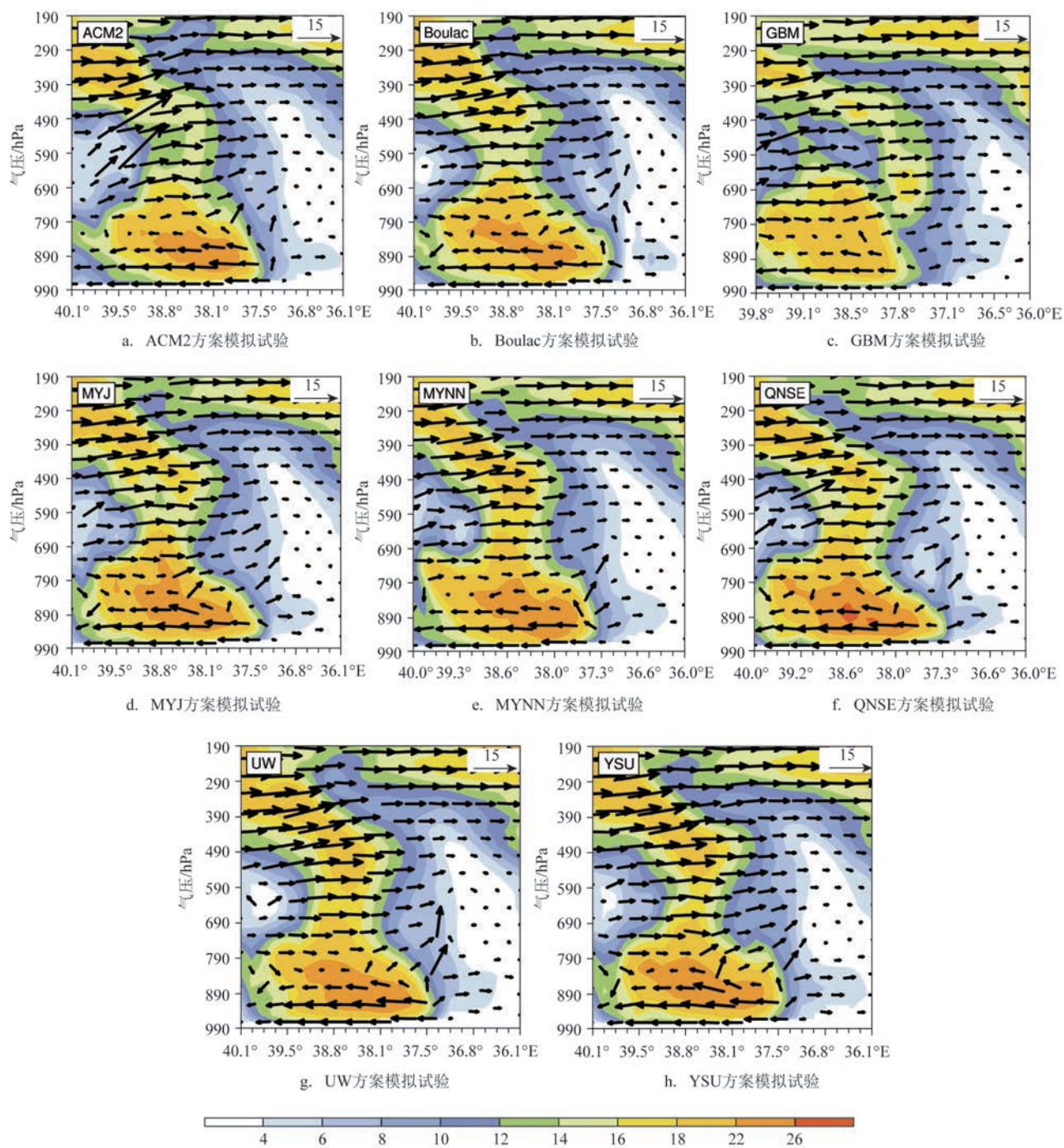
与29日06时相比,各试验对29日18时(见图4b)模拟的区域平均风速垂直廓线差异增大,其中,ACM2方案的整体变化趋势与ERA5资料最接近,尤其在825~700 hPa,仅有ACM2方案模拟出了风速随高度基本维持不变而后减弱的趋势,其余方案的模拟风速均为随高度的增加先增大后减小,与ERA5资料差异较大。

以上分析表明,除边界层外,在数值模拟中不同边界层参数化方案对于边界层以上大气风速的模拟也存在较明显差异,并且随着积分时间的延长,各试验之间的差异越来越显著。ACM2方案总体与ERA5资料的风速垂直廓线分布形式较为接近。

图5为各试验在29日06时沿模拟的台风中心所在经度的全风速与经向环流剖面。由图可见,各试验在890 hPa以下的边界层均为由南向北的流出气流,790 hPa以上则为偏北气流流向台风中心,890~790 hPa之间气流的流入、流出较弱,气流的这种分布形式可能是由于台风中心随高度向

东倾斜造成的;各试验在台风中心向北约1经纬度左右的范围内为弱风速区,风速低于4 m/s;低层大风速区基本分布在690 hPa以下,其中QNSE方案低层风速极值中心超过26 m/s(890 hPa处),在所有方案中最强,除GBM方案风速最弱外,其余方案风速极值分布在22~26 m/s;各试验在590 hPa以上存在一个随高度向北倾斜的风速大值带,GBM方案的风速同样是最弱的。由以上分析可见,各边界层参数化方案所模拟的风场经向剖面虽总体分布形势较为一致,但高层和低层风速的强度均存在显著差异,表明边界层参数化方案不仅对低层大气的风速产生显著影响,对高层大气同样会产生影响。

为考察各试验模拟的低层大气辐合、辐散的差异,图6计算了各试验区平均850 hPa散度随时间的变化,由于台风雨带主要出现在台风中心以北400 km半径范围内(图略),因此选取这一区域范围进行研究。由图6可见,各边界层参数化方案所模拟的区域平均850 hPa散度均为负值,表明在台风中心以北400 km半径范围内存在明显的辐合,各试验的区域平均850 hPa散度存在显著差异,其中GBM方案模拟的低层大气辐合最弱,对应累积降水也最弱。29日00—12时(定义为白天时段),ACM2和UW方案的850 hPa辐合相对较强,29日12时—30日00时(定义为夜间时段),QNSE方案的辐合则最强,对应UW、QNSE和ACM2方案模拟的累积降水



注:图中横坐标右侧终端点为台风中心所在纬度

图5 2021年7月29日06时各试验沿模拟的台风中心所在经度的全风速(填色,单位:m/s)和经向环流剖面(矢量,垂直速度扩大30倍,单位:m/s)

Fig.5 The profiles of wind speed (shaded area, unit: m/s) and longitudinal circulation (vector, The vertical speed increases by 30 times, unit: m/s) along the longitude of TC center of PBL scheme simulations on 0600 UTC 29 July, 2021

均较强。各参数化方案对低层大气辐合辐散模拟的差异是造成降水模拟差异的原因之一。

为对比各试验对北上台风热力结构模拟的差异,将各试验与ERA5资料的温度和相对湿度在各

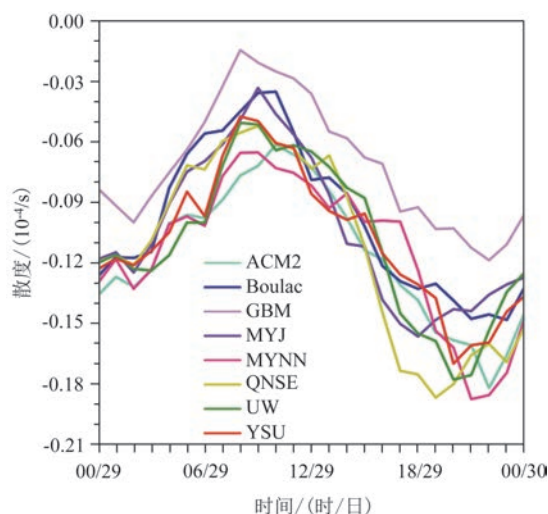


图6 8种边界层参数化方案模拟的区域平均850 hPa散度时间序列图

Fig.6 Time series of zone averaged 850 hPa divergence from eight PBL scheme tests

等压面(116.2°~116.6°E, 37.9°~38.3°N)区域内做平均,得到温度和相对湿度随高度变化的垂直廓线图。由图7a和7b可见,各试验与ERA5资料的温度垂直廓线总体差异不大,温度误差绝对值分布在0~2.5 K之间,温度随高度增加均为递减趋势,700 hPa高度以下的温度递减率显著小于700 hPa以上。同样,各试验相对湿度的变化趋势与ERA5资料较为一致,500 hPa以下相对湿度随高度变化不大,基本分布在90%~100%之间(见图7c、7d),表明北上台风环流的湿层较为深厚。由以上分析可知,各边界层参数化方案对于北上台风热力结构模拟造成的差异小于动力结构的差异。结合图8a温度误差标准差的垂直分布可见,29日06时,随着高度的增加,各试验的温度误差的离散度逐渐减小,各参数化方案对北上台风热力结构模拟的差异在大气低层更显著;29日18时温度误差的标准差大于06时,表明随着积分时间的延长,各试验表现出来的差异也越来越明显。对于相对湿度,700 hPa以下的低层两个时次的误差标准差均较小,700 hPa以上则逐渐增大(见图8b),表明各试验的相对湿度在高层的差异大于低层,这与图7c、7d的表现较为一致。

从各试验850 hPa区域平均相当位温随时间变化的情况看(见图9),除GBM方案显著偏低、随时

间呈现逐渐减小的趋势以外,其余各试验850 hPa区域平均相当位温基本分布在342.0~346.0 K,变化趋势较为类似。29日12时之前(白天时段),各试验区域平均相当位温随时间逐渐增大,差异较小;29日12时之后(夜间时段),相当位温随时间短暂增大后维持基本不变,但各试验之间的差异增大,位温最高的MYNN方案与位温最低的Boulac方案的最大差异达2.2 K。与温度的垂直分布特征类似,随着积分时间的延长,各试验850 hPa区域平均相当位温的差异也越来越大。

为分析边界层参数化方案对台风结构模拟造成差异的原因,将各试验在各时次边界层顶的向上垂直质量通量^[38]($VMT = \rho \times w$, VMT代表垂直质量通量, ρ 代表空气密度, w 代表垂直速度)在(116.2°~116.6°E; 37.9°~38.3°N)区域内做平均,得到图10。通过分析可知,各试验在边界层顶向上的垂直质量通量具有显著差异,其中QNSE方案的垂直质量通量明显强于其他各方案,表明该方案的垂直混合较强,边界层高度也高于其他各方案(图略),较强的垂直混合能够把边界层内的能量带到高空,从而对台风结构产生影响;相比而言,GBM方案的垂直质量通量最弱,对应边界层高度最低,表明边界层顶的夹卷和垂直混合最弱。从图4中也可看出,QNSE方案在低层的风速强于其他各方案,而GBM方案的风速最弱,表明边界层顶的垂直质量输送和夹卷过程会对台风结构产生影响。

另外,感热和潜热的海气交换和动量交换对台风的发生、发展十分重要,感热和潜热输送是边界层的主要物理过程^[15]。通过分析发现,各方案潜热通量的数值显著大于感热通量,表明潜热通量对台风发展的作用更大^[10]。潜热通量和感热通量的分布形式较为类似,海洋上热通量均明显大于陆地,但各方案在量值上具有显著差异(图略),其中QNSE方案的感热和潜热通量明显大于其他方案。有文献指出^[10],成熟台风的主要能量来源于潜热释放,水汽由边界层辐合上升,释放大量的凝结潜热,为台风的维持和发展提供能量,同时在洋面上通过感热的方式加热台风,为台风继续供给能量。从最低海平面气压的时间序列图中也可以看出(见图2),QNSE方案的台风中心最低气压在所有方案中相对最低,这可能与潜热释放加热大气导致气压降

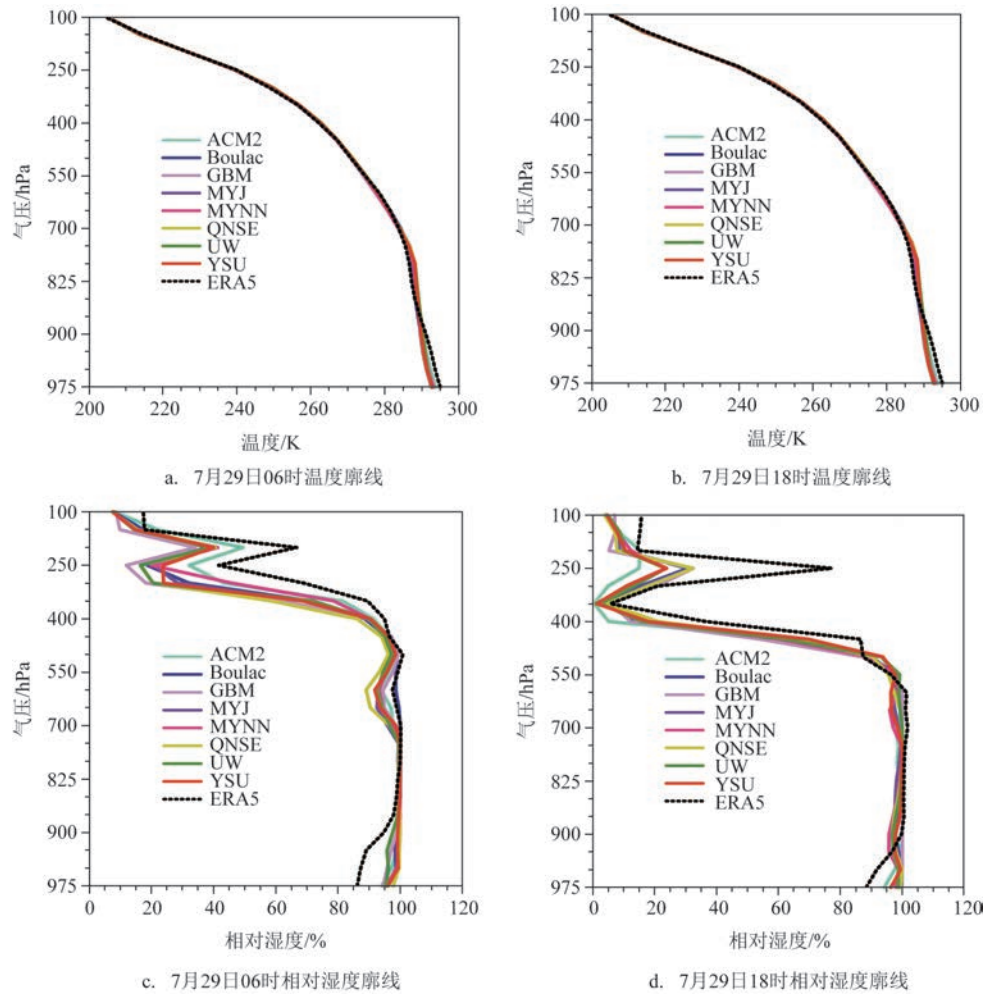


图7 区域平均温度和相对湿度的垂直廓线分布

Fig.7 Regional mean profiles of temperature and relative humidity

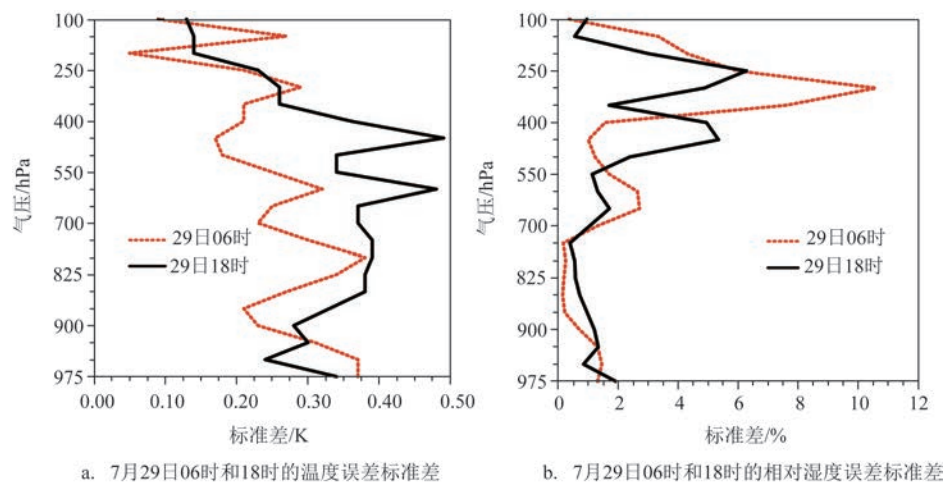


图8 各试验与ERA5资料的温度误差标准差和相对湿度误差标准差的垂直廓线图

Fig.8 Profiles of standard deviation of temperature error and relative humidity error between ERA5 and simulations of eight PBL schemes

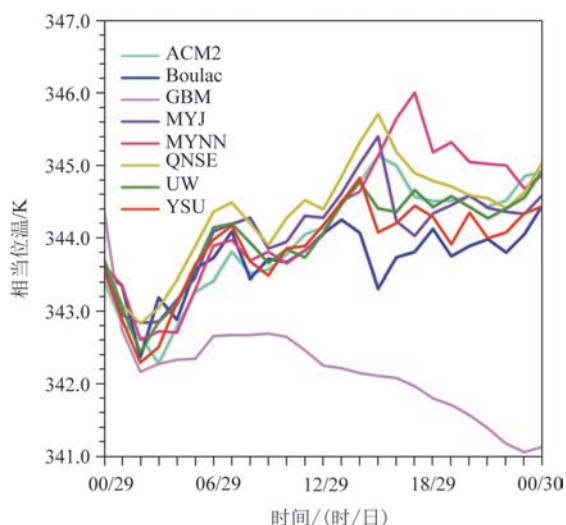


图9 8种边界层参数化方案模拟的区域平均850 hPa相当位温时间序列图

Fig.9 Time series of zone averaged 850 hPa equivalent potential temperature from eight PBL scheme tests

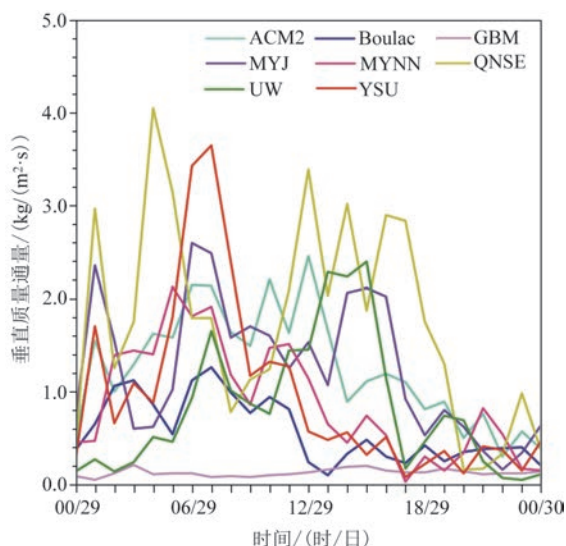


图10 8种边界层参数化方案模拟的区域平均边界层顶向上的垂直质量通量时间序列图

Fig.10 Time series of zone averaged upward vertical mass flux on the top of the boundary layer from eight PBL scheme tests

低有关。

综上所述,由于各方案模拟的边界层热通量具有较大差异,对台风发展和结构变化产生影响,通过边界层顶的夹卷和垂直质量输送过程从而对台风整体结构造成影响,各种差异不断累积,最终导

致各方案的台风结构产生显著差异。

5 结论与讨论

本文利用中尺度数值模式 WRFv4.3 中的 ACM2、Boulac、GBM、MYJ、MYNN、QNSE、UW、YSU 8 种不同边界层参数化方案,采用高分辨率数值试验的方法研究了边界层参数化方案对台风“烟花”北上移入环渤海区域阶段的模拟影响。结果表明,不同边界层参数化方案对台风路径、降水及动热力结构的模拟差异显著。具体表现为:

①台风北上后的路径模拟对边界层参数化方案较敏感,其中 Boulac 方案模拟的路径误差最小(24 h 平均路径误差为 47.5 km),而 MYNN 和 GBM 方案模拟的路径误差最大(24 h 平均路径误差为 76.2 km 和 77.7 km)。随着台风向北移动,各边界层参数化方案模拟的路径差异也越来越显著,表现为路径误差标准差随时间积分呈增加趋势。

②除 GBM 方案对台风最低气压的模拟显著偏大(强度偏弱)外,其余 7 种方案模拟的差异较小,其中 ACM2 方案在所有试验中的时间平均绝对误差最小,为 2.42 hPa。由于台风北上阶段强度较弱,模拟的台风最低气压绝对强度误差总体偏小,基本在 2~6 hPa。

③各试验对台风降水的模拟存在显著差异,主要体现在强降水极值大小和位置方面,其中 UW 和 ACM2 方案的累积降水极值与实况最接近。通过计算 24 h 累积降水的 TS 评分可知,Boulac 方案在中雨以上量级的模拟中表现最优,而 ACM2 方案则在大雨及暴雨以上量级的模拟中表现最优。

④从区域平均风速的垂直廓线及风场经向环流剖面来看,各试验对台风动力结构的模拟具有显著差异,这种差异不仅存在于边界层中,还存在于边界层以上的自由大气中,并且随着积分时间的延长,各试验之间的差异也越来越明显;另外,相比于其他方案,ACM2 方案的风速廓线分布变化趋势总体与 ERA5 资料更接近;各方案对于 850 hPa 大气辐合辐散的描述也存在较为明显的差异,辐合较强的方案对应模拟的累积降水也较强。

⑤通过分析各试验温湿特征量的水平与垂直结构可知,各边界层参数化方案对北上台风热力结

构模拟的差异小于动力结构的差异,从温度误差标准差的分布情况来看,低层热力结构的模拟差异比高层大气更加明显,且随着积分时间的延长,各试验表现出的差异越来越显著。进一步分析表明,各方案对于边界层中热通量和动热力结构的模拟产生的差异,可以通过边界层顶的夹卷过程被扩散到高层大气,最终导致各方案对台风结构的模拟出现明显差异。

本文的研究基于台风“烟花”登陆后影响环渤海区域阶段的数值模拟,在比较了各方案对于台风路径、强度、降水及动力、热力结构模拟的差异后,认为Boulac方案对于台风路径及中雨以上量级的模拟表现最优,而ACM2方案对于台风最低气压及大雨和暴雨以上量级降水的模拟中表现最优;另外,各参数化方案对北上台风动力结构模拟的差异比热力结构的差异更显著,而热力结构的差异在低层大气表现更明显。

本文仅针对单个台风个例进行数值模拟研究,所得结论的普适性还需进行验证,后续将基于塔基垂直湍流观测资料,分析北上台风边界层内的湍流运动特征和演变规律,改进边界层湍流参数化方案,以期提高北上台风的模拟性能。

参考文献:

- [1] 陈联寿, 孟智勇. 我国热带气旋研究十年进展[J]. 大气科学, 2001, 25(3): 420-432.
CHEN L S, MENG Z Y. An overview on tropical cyclone research progress in China during the past ten years[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2001, 25(3): 420-432.
- [2] 李英, 陈联寿, 张胜军. 登陆我国热带气旋的统计特征[J]. 热带气象学报, 2004, 20(1): 14-23.
LI Y, CHEN L S, ZHANG S J. Statistical characteristics of tropical cyclone making landfalls on China[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2004, 20(1): 14-23.
- [3] 邢蕊, 徐晶, 林瀚. 热带气旋过台湾后再次登陆的路径强度变化统计分析[J]. 气象, 2020, 46(4): 517-527.
XING R, XU J, LIN H. Statistical analysis of track and intensity variations of tropical cyclone landing mainland after passing through Taiwan[J]. Meteorological Monthly, 2020, 46(4): 517-527.
- [4] 蔡芎宁, 寿绍文, 钟青. 边界层参数化方案对暴雨数值模拟的影响[J]. 南京气象学院学报, 2006, 29(3): 364-370.
CAI X N, SHOU S W, ZHONG Q. Impact of different boundary layer parameterization schemes on the numerical simulation for a rainstorm[J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2006, 29(3): 364-370.
- [5] 崔驰潇, 包云轩, 袁成松, 等. 不同边界层参数化方案对江苏地区一次平流雾过程的模拟影响[J]. 大气科学, 2018, 42(6): 1344-1362.
CUI C X, BAO Y X, YUAN C S, et al. Influence of different boundary layer parameterization schemes on the simulation of an advection fog process in Jiangsu[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2018, 42(6): 1344-1362.
- [6] 刘伟光, 陈海山, 俞森. 积云对流参数化方案对东亚夏季环流和降水模拟的影响[J]. 大气科学, 2019, 43(1): 64-74.
LIU W G, CHEN H S, YU M. Impacts of cumulus convective parameterization schemes on simulation of East Asian summer circulation and rainfall[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2019, 43(1): 64-74.
- [7] 庞琦烨, 平凡, 沈新勇, 等. 不同微物理方案对台风“彩虹”(2015)降水影响的比较研究[J]. 大气科学, 2019, 43(1): 202-220.
PANG Q Y, PING F, SHEN X Y, et al. A comparative study of effects of different microphysics schemes on precipitation simulation for typhoon Mujigae (2015) [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2019, 43(1): 202-220.
- [8] 吴立广, 刘青元, 周星阳. 热带气旋边界层精细结构研究综述[J]. 气象科学, 2020, 40(1): 1-10.
WU L G, LIU Q Y, ZHOU X Y. A review on fine-scale structures in tropical cyclone boundary layer[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2020, 40(1): 1-10.
- [9] BRAUN S A, TAO W K. Sensitivity of high-resolution simulations of hurricane Bob (1991) to planetary boundary layer parameterizations[J]. Monthly Weather Review, 2000, 128(12): 3941-3961.
- [10] 邓国, 周玉淑, 李建通. 台风数值模拟中边界层方案的敏感性试验I. 对台风结构的影响[J]. 大气科学, 2005, 29(3): 417-428.
DENG G, ZHOU Y S, LI J T. The experiments of the boundary layer schemes on simulated typhoon Part I. the effect on the structure of typhoon[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2005, 29(3): 417-428.
- [11] 张福青, 杜华武, 蒋全荣. 成熟台风边界层作用的数值研究[J]. 热带气象学报, 1994, 10(2): 107-114.
ZHANG F Q, DU H W, JIANG Q R. A numerical study of the boundary layer effect on mature typhoon[J]. Journal of Tropical Meteorology, 1994, 10(2): 107-114.
- [12] 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, 29(5): 803-812.
ZHOU H, ZHU W J, PENG S Q. The impacts of different microphysics schemes and boundary layer schemes on simulated track and intensity of super typhoon Megi (1013) [J]. Journal of Tropical Meteorology, 2013, 29(5): 803-812.
- [13] 王雨星, 钟中, 孙源, 等. 两种边界层参数化方案模拟热带气旋Megi (2010)路径差异的机理分析[J]. 地球物理学报, 2017, 60(7): 2545-2555.

- WANG Y X, ZHONG Z, SUN Y, et al. The mechanism analysis of the track deviation of tropical cyclone Megi (2010) simulated with two planetary boundary layer schemes[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017, 60(7): 2545-2555.
- [14] 温晓培, 隆霄, 张述文, 等. 边界层参数化方案对台风 SANBA 初生阶段影响的数值模拟研究[J]. 热带气象学报, 2016, 32(3): 346-357.
- WEN X P, LONG X, ZHANG S W, et al. Parameterization schemes on typhoon SANBA during its initial phase[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2016, 32(3): 346-357.
- [15] 王叶红, 赵玉春. 边界层参数化方案对“莫兰蒂”台风(1614)登陆阶段影响的数值模拟研究[J]. 大气科学, 2020, 44(5): 935-959.
- WANG Y H, ZHAO Y C. Numerical investigation of the effects of boundary layer parameterization schemes on typhoon Meranti (1614) landing process[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2020, 44(5): 935-959.
- [16] 丁成慧, 李江南, 赵杨洁, 等. 边界层参数化方案对南海秋季台风“莎莉嘉”(2016)模拟的影响[J]. 热带气象学报, 2018, 34(5): 657-673.
- DING C H, LI J N, ZHAO Y J, et al. The influence of boundary layer parameterization schemes on autumn typhoon Sarika (2016) in south china sea[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2018, 34(5): 657-673.
- [17] 徐亚钦, 翟国庆, 李国平, 等. WRF 模式对高影响浙江型台风微物理和边界层参数化方案的优化试验[J]. 热带气象学报, 2017, 33(2): 201-211.
- XU Y Q, ZHAI G Q, LI G P, et al. Optimization test for microphysical and boundary layer parameterization of high-impact Zhejiang typhoons by WRF model[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2017, 33(2): 201-211.
- [18] 王晨稀. 边界层参数化影响“梅花”台风的敏感性试验[J]. 地球科学进展, 2013, 28(2): 197-208.
- WANG C X. Experiments of influence of planetary boundary layer parameterization on Muifa typhoon prediction[J]. Advances in Earth Science, 2013, 28(2): 197-208.
- [19] TANG J, ZHANG J A, ABERSON S D, et al. Multilevel tower observations of vertical eddy diffusivity and mixing length in the tropical cyclone boundary layer during landfalls[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2018, 75(9): 3159-3168.
- [20] 唐飞, 陈凤娇, 诸葛小勇, 等. 利用卫星遥感资料分析台风“烟花”(202106)的影响过程[J]. 大气科学学报, 2021, 44(5): 703-716.
- TANG F, CHEN F J, ZHUGE X Y, et al. Analysis of influence process of Typhoon In-fa (202106) based on satellite remote sensing data[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2021, 44(5): 703-716.
- [21] 邢蕊, 邱晓滨, 孙瑜, 等. 环渤海地区下垫面对北上热带气旋强度变化的影响分析[J]. 热带气象学报, 2023, 39(2): 193-204.
- Xing R, QIU X B, SUN Y, et al. Analysis of the impact of underlying surface on the northward-traveling tropical cyclone intensity change in the Bohai coastal region[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2023, 39(2): 193-204.
- [22] HONG S Y, NOH Y, DUDHIA J. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes[J]. Monthly Weather Review, 2006, 134(9): 2318-2341.
- [23] HU X M, KLEIN P M, XUE M. Evaluation of the updated YSU planetary boundary layer scheme within WRF for wind resource and air quality assessments[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2013, 118(18): 10490-10505.
- [24] PLEIM J E. A combined local and nonlocal closure model for the atmospheric boundary layer. Part I: model description and testing [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2007, 46(9): 1383-1395.
- [25] PLEIM J E. A combined local and nonlocal closure model for the atmospheric boundary layer. Part II: application and evaluation in a mesoscale meteorological model[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2007, 46(9): 1396-1409.
- [26] CONIGLIO M C, CORREIA J JR, MARSH P T, et al. Verification of convection-allowing WRF model forecasts of the planetary boundary layer using sounding observations[J]. Weather and Forecasting, 2013, 28(3): 842-862.
- [27] HUANG M, GAO Z Q, MIAO S G, et al. Sensitivity of urban boundary layer simulation to urban canopy models and PBL schemes in Beijing[J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 2019, 131(5): 1235-1248.
- [28] MELLOR G L, YAMADA T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems[J]. Reviews of Geophysics, 1982, 20(4): 851-875.
- [29] JANJIC Z I. Nonsingular implementation of the Mellor-Yamada Level 2.5 scheme in the NCEP MESO model[R]. Office Note No. 437, NCEP, 2001: 61.
- [30] NAKANISHI M, NIINO H. Development of an improved turbulence closure model for the atmospheric boundary layer[J]. Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II, 2009, 87(5): 895-912.
- [31] ROMÁN-CASCÓN C, YAGÜE C, SASTRE M, et al. Observations and WRF simulations of fog events at the Spanish Northern Plateau[J]. Advances in Science and Research, 2012, 8(1): 11-18.
- [32] BOUGEALT P, LACARRERE P. Parameterization of orography-induced turbulence in a mesobeta-scale model[J]. Monthly Weather Review, 1989, 117(8): 1872-1890.
- [33] SUKORIANSKY S, GALPERIN B, PEROV V. Application of a new spectral theory of stably stratified turbulence to the atmospheric boundary layer over sea ice[J]. Boundary-Layer Meteorology, 2005, 117(2): 231-257.
- [34] 徐慧燕, 朱业, 刘瑞, 等. 长江下游地区不同边界层参数化方案的试验研究[J]. 大气科学, 2013, 37(1): 149-159.
- XU H Y, ZHU Y, LIU R, et al. Simulation experiments with

- different planetary boundary layer schemes in the lower reaches of the Yangtze River[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2013, 37(1): 149-159.
- [35] GRENIER H, BRETHERTON C S. A moist PBL parameterization for large-scale models and its application to subtropical cloud-topped marine boundary layers[J]. Monthly Weather Review, 2001, 129(3): 357-377.
- [36] BRETHERTON C S, PARK S. A new moist turbulence parameterization in the community atmosphere model[J]. Journal of Climate, 2009, 22(12): 3422-3448.
- [37] LI Q L, LI Z L, PENG Y L, et al. Statistical regression scheme for intensity prediction of tropical cyclones in the Northwestern Pacific[J]. Weather and Forecasting, 2018, 33(5): 1299-1315.
- [38] LI Q Q, WANG Y Q. A comparison of inner and outer spiral rainbands in a numerically simulated tropical cyclone[J]. Monthly Weather Review, 2012, 140(9): 2782-2805.

Comparison of Typhoon "In-Fa" (2021) northward-movement simulation with different planetary boundary layer parameterization schemes

XING Rui^{1,2}, YANG Jianbo^{1,3}, ZHUANG Ting⁴, WANG Qingyuan⁵, QIU Xiaobin^{1,3}, TIAN Meng^{1,3}

(1. Tianjin Key Laboratory for Oceanic Meteorology, Tianjin 300074, China; 2. Tianjin Binhai New Area Meteorological Service, Tianjin 300457, China; 3. Tianjin Institute of Meteorological Science, Tianjin 300074, China; 4. Tianjin Meteorological Observation Centre, Tianjin 300061, China; 5. Tianjin Meteorological Observatory, Tianjin 300074, China)

Abstract: Eight planetary boundary layer (PBL) parameterization schemes (ACM2, Boulac, GBM, MYJ, MYNN, QNSE, UW and YSU) in the mesoscale numerical model WRFv4.3 are used to simulate the track, intensity, precipitation, dynamical and thermodynamical structures in the boundary layer of Typhoon "In-Fa" (2021) during its northward-movement phase to the coastal regions of the Bohai Sea. The results show that the simulated track of the typhoon is sensitive to the PBL schemes. The simulated track using the Boulac scheme shows the smallest error. The differences between simulated tracks amplify along with the prolong of integral time. The absolute errors (between 2~6 hPa) of the simulated minimum pressure are small because of the weak intensity of the typhoon in the northward-movement period. The maximum value and position of the accumulated rainfall show significant differences in the eight PBL schemes tests. Based on the analysis of the 24 h accumulated rainfall threat scores, the Boulac scheme shows the optimal performance on the simulation of moderate rain and above, while the ACM2 is the best in simulating heavy and torrential rain. The eight PBL schemes show significant differences in the simulation of dynamical and thermodynamical structures, and the discrepancies in the dynamical structures are more obvious. The simulation differences are more significant on the atmosphere at the lower levels compared to the higher levels. The main reason for those differences may be due to the simulation discrepancies in the heat flux, dynamic and thermodynamic structures of the PBL in the eight simulations, which affect the higher atmosphere through the entrainment process at the top of the PBL.

Key words: PBL parameterization scheme; typhoon; northward-movement phase; numerical simulation; Bohai coastal region