

DOI:10.11737/j.issn.1003-0239.2025.06.008

不同边界层参数化方案对台风“杜苏芮”(202305)路径和强度模拟的影响

张德强^{1,2}, 邢蕊³, 张蕾^{1,2}, 徐晶^{1,4}

(1. 青岛海洋气象研究院, 中国气象科学研究院, 山东 青岛 266404; 2. 青岛海洋气象研究中心, 青岛市气象局, 山东 青岛 266404; 3. 天津市滨海新区气象局, 天津 300457; 4. 灾害天气科学与技术全国重点实验室, 中国气象科学研究院, 北京 100081)

摘要: 利用中尺度数值预报模式 WRFV3.9, 采用美国国家环境预报中心分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 的 FNL 再分析数据作为初始场和边界条件, 选取 6 种边界层参数化方案 (MYJ、MYNN、YSU、Acm2、BouLac 和 SH), 对 2023 年 5 号超强台风“杜苏芮”进行数值模拟, 对比分析不同方案对台风路径和强度模拟的影响。结果表明, 不同边界层方案对台风路径模拟影响较小, 对台风强度模拟影响显著。总体而言, SH 方案模拟的路径和 YSU 方案模拟的强度与实况更接近。从台风强度模拟来看, MYNN 方案模拟的切向风和暖心结构最强, 且台风眼尺寸最小, 对应模拟的台风强度最强, SH 方案次之, MYJ、YSU、Acm2 和 BouLac 方案模拟的台风强度较弱。由于台风强度差异是热力和动力因素共同作用的结果, 在热力因素方面, 潜热通量的大小对台风强度的变化和评估具有重要作用; 在动力因素方面, 台风眼尺寸对台风强度有明显影响, 且在该个例中, 其影响相对于潜热通量更为显著。

关键词: 边界层参数化方案; 数值模拟; 台风路径和强度; 潜热通量; 台风眼尺寸

中图分类号: P444 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2025)06-0065-18

0 引言

台风是发生在热带或亚热带洋面上具有暖心结构的气旋性涡旋, 多在夏秋季节生成于西北太平洋, 是一种破坏力极强的天气系统^[1-2]。西北太平洋是全球热带气旋发生频率最高的海域, 年生成量约为 28 个^[3]; 此外, 我国作为世界上台风登陆最多的国家, 每年登陆的台风近 7 个^[4-5], 约占西北太平洋台风生成总数的 1/4。台风登陆常伴有强风和暴雨, 可导致严重的自然灾害。因此, 准确预报台风路径和强度的变化对于防灾减灾工作具有重要意义。

大气边界层受下垫面热力、动力等作用的影响, 以湍流运动的形式实现下垫面和大气之间的热

量和水汽交换^[6-7]。在数值模式中, 边界层参数化方案是最重要的物理过程之一, 对台风强度和降水等模拟起着重要作用^[8-10]。Nolan 等^[11-12]分别利用天气预报模式 (Weather Research and Forecasting, WRF) 的 YSU 和 MYJ 边界层方案对台风“Isabel”(2003) 进行模拟, 结果显示, 在强度模拟方面, 未修改的 YSU 和 MYJ 边界层方案对台风强度的模拟偏弱, 而修改后的 YSU-D 和 MYJ-D 边界层方案的模拟效果较好; 在外核边界层模拟方面, 修改后的方案模拟结果与观测更接近; 在内核边界层模拟方面, 修改后的 YSU-D 模拟结果最佳。仲鹏志等^[13]对比分析了 6 种边界层参数化方案对台风“利奇马”模拟结果的影响, 结果显示, 不同方案对台风路径模拟的影响

收稿日期: 2024-12-14。

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFC3004200); 中国气象科学研究院基本科研业务费专项基金项目(2024Y017); 2024 年度河北省海洋动力过程与资源环境重点实验室开放基金(HBHY2402); 中国气象局大气化学重点开放实验室开放课题(2025B03); 山东省气象局科学技术研究项目重点项目(2024sdqxz09); 台风北上期间青岛近岸涌浪特征分析及预报着眼点研究(2022qdxm05)。

作者简介: 张德强(1993-), 男, 工程师, 博士, 主要从事海洋与大气的观测与数值模拟工作。E-mail: zhangdeqiang@cma.gov.cn

较小,但对台风强度有显著影响;UW方案模拟的台风强度最强,BouLac次之,MYJ、YSU、Acm2和SH方案较弱。徐亚钦等^[14]选取了近年来在浙江和福建登陆的9个西太平洋台风,采用多种微物理和边界层方案进行数值模拟,结果表明,MYNN2和BouLac方案模拟的最优台风路径和强度比例较高,而BouLac对降水的模拟效果更好。邢蕊等^[15]利用WRF中的8种边界层参数化方案对北上台风“烟花”进行模拟,结果表明,台风“烟花”的路径和降水对边界层参数化方案较为敏感,BouLac方案模拟的路径偏差最小,ACM2方案对降水的模拟效果最优。王叶红等^[16]利用WRF模式7种边界层方案对台风“莫兰蒂”进行了数值模拟,结果显示,不同边界层方案对台风路径、强度和降水量模拟均具有显著影响。温晓培等^[17]采用敏感性试验的方法研究不同边界层方案对台风“三巴”强度和路径的影响,结果显示,QNSE和Acm2方案模拟的台风强度较好,MYJ方案模拟效果最差。丁成慧等^[18]选取两个局地方案(QNSE、MYJ)和两个非局地方案(YSU、Acm2)对台风“莎莉嘉”(2016)进行模拟,结果显示,不同边界层方案对台风路径模拟影响较小,但对台风强度和结构模拟有明显影响,且台风强度与其结构的变化密切相关。王雨星等^[19]采用YSU和MYJ两种边界层方案对2010年超强台风“鲇鱼”进行模拟,结果显示,MYJ方案模拟的台风路径较为准确,YSU方案则出现了提前转向。Smith等^[8]利用第五代中尺度模式(Fifth-Generation Mesoscale Model,MM5)对边界层方案在热带气旋增强过程中的作用进行研究,发现不同边界层方案中的湍流扩散系数不同,进而导致台风强度不同。Zhang等^[20]评估了边界层参数化方案中垂向涡扩散系数的变化对台风强度的影响,结果表明使用较小的涡扩散系数,模拟结果与观测值更吻合,进而可提高台风强度的预报效果。此外,还有很多研究表明,边界层方案的选择对台风强度等的准确模拟具有重要影响^[21-22]。

对于不同地区的台风数值模拟,最佳边界层参数化方案的选择并不一致,需要针对特定区域开展对比评估,从而有针对性地选择合适的方案。因此,通过更多台风个例开展边界层参数化方案对其影响的数值实验是必要的,尤其是在我国台风登陆较密集的华东沿岸区域。此外,台风“杜苏芮”为

1949年以来登陆福建的第二强台风,影响范围大,我国因其造成的经济损失超1 800亿元。为此,本文利用WRF模式对2023年登陆福建的超强台风“杜苏芮”进行模拟,对比分析不同边界层参数化方案的模拟结果,并探讨不同方案导致台风强度模拟出现差异的原因,从而为数值模式选择合适的边界层方案开展超强台风模拟和预报提供理论依据。

1 资料及研究方法

本文所采用的数据包括美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)的格点分析数据FNL(Final Reanalysis Data),水平分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$,时间分辨率为6h;同时采用中央气象台提供的台风路径和强度资料(网址:<http://typhoon.nmc.cn>),作为台风“杜苏芮”的实况路径和强度数据。

本文利用中尺度数值模式WRF V3.9开展数值模拟试验,模式采用Lambert投影和双重嵌套网格,模拟区域见图1。模式水平分辨率分别为10 km和3.33 km,水平格点数分别为 221×182 , 522×441 ,垂直方向共39层,模式顶气压为50 hPa。模式采用Lin微物理方案,仅在第一层网格中采用Kain-Fritsch积云参数化方案,陆面过程方案为Noah方案,长波辐射和短波辐射方案分别为RRTM和Dudhia方案。模式积分时间为2023年7月20日00时(世界时,下同)—29日00时,每3h输出一次模拟结果。

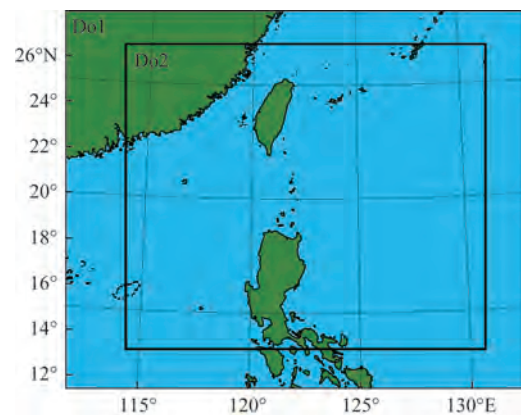


图1 模拟试验两个区域设置

Fig.1 Model domains used in simulation experiments

本文主要采用 MYJ、MYNN、YSU、Acm2、BouLac 和 SH 共 6 种边界层参数化方案对超强台风“杜苏芮”进行数值模拟(见表 1),其中 MYJ、MYNN 和 BouLac 为局地方案;YSU 和 SH 为非局地方案,Acm2 为局地-非局地混合型方案。局地闭合方案指假设每个格点上的湍流通量完全由该格点上物理量的平均值决定;非局地闭合方案指通过引入非局地传输项,考虑边界层内长距离的湍流传输效应及该格点与其周边格点对湍流通量的共同影响;混合型方案则兼顾局地和非局地两种方案的特性,既考虑局地的湍流混合,也考虑非局地的传输效应。各边界层参数化方案简要概述如下:

① MYJ (Mellor-Yamada-Janjic) 方案是经典的 1.5 阶局地闭合边界层参数化方案,其基于 Mellor 等^[23]提出的湍流闭合模型。该方案为基于湍流动能 (Turbulent Kinetic Energy, TKE) 的预测方案,仅计算相邻格点间的通量交换,对大涡旋引发的垂直混合计算不足,更适用于稳定层结环境^[24]。

② MYNN (Mellor-Yamada-Nakanishi-Niino Level) 方案是基于 1.5 阶局地湍流闭合的边界层参数化方案,其对 MYJ 方案进行了优化,显式求解 TKE 方程。它改进了湍流混合长的诊断方程,根据大涡模拟结果重新确定方案系数,对气压相关项进行参数化处理并考虑浮力影响;该方案的通量交换不仅局限于相邻格点,而是基于边界层内湍流特性,提高了垂向湍流混合模拟能力,在流体边界层模拟中表现更活跃、适应性更强^[25-26]。

③ YSU (Yonsei University) 方案是在 MRF 方案的基础上改进的 1 阶非局地闭合边界层参数化方案。该方案以 K 理论为框架,引入逆梯度项和夹卷通量机制,既考虑边界层内局地湍流扩散,又兼顾

对流性大尺度湍流引发的非局地混合效应及边界层顶夹卷过程,能够较好地描述边界层内湍流混合过程^[27]。

④ Acm2 (Asymmetric Convective Model Version 2) 方案是 1 阶局地-非局地混合型边界层参数化方案。该方案结合非局地向上混合和局地向下混合两种湍流机制,通过调节湍流扩散项与非局地项的比例系数,实现稳定条件下涡动扩散算法到不稳定条件下局地-非局地输送算法的平滑转换^[28]。不稳定边界层中,它同时考虑向上(非局地)和向下(局地)湍流混合;稳定边界层中,仅采用局地湍流扩散项。

⑤ BouLac (Bougeault-Lacarrère) 方案是 1.5 阶局地闭合边界层参数化方案,基于 TKE 预报方程描述边界层内湍流混合过程。稳定层结下,湍流交换仅发生在相邻层间;不稳定层结下,地表与边界层各层间均发生湍流交换。此外,该方案还特别考虑地形对 TKE 的激发作用和边界层内热量通量的逆梯度输送作用,对下垫面信息响应更敏感^[29]。

⑥ SH (Shin-Hong) 方案是在 YSU 方案基础上改进的 1 阶非局地闭合边界层参数化方案。该方案引入垂直传输的尺度依赖性,兼顾大尺度湍流引发的非局地输送以及小尺度涡流引发的局地输送,优化了湍流混合机制;同时引入逆梯度输送机制,这些改进显著提升了对流边界层的模拟能力^[30]。

2 台风过程简介

超强台风“杜苏芮”于 2023 年 7 月 21 日在西北太平洋海面生成,7 月 22 日 09 时为热带风暴级别,中心位于 14.4°N、130.5°E;7 月 23 日 09 时加强为台

表 1 模拟试验的参数化方案设置

Tab.1 Parameterization scheme settings for the simulation experiment

实验名称	微物理方案	边界层方案	近地层方案
YSU	Lin	YSU scheme	MO
MYNN	Lin	MYNN 2.5 level TKE	MYNN
MYJ	Lin	Mellor-Yamada-Janjic (Eta) TKE	MO-MYJ
Acm2	Lin	ACM2 (Pleim) scheme	MO
BouLac	Lin	Bougeault and Lacarrère (BouLac) TKE	MO
SH	Lin	Shin-Hong 'scale-aware' PBL scheme	MO

风,中心位于菲律宾马尼拉偏东方向约为760 km的西太平洋洋面上(14.8°N、128°E),中心附近最大风速约33 m/s,中心最低气压为975 hPa;此后,台风以每小时10~15 km的速度向西偏北方向移动,强度持续增强;7月28日02时左右,台风在福建省晋江市沿海登陆,登陆时最大风速约50 m/s,最低中心气压约945 hPa,之后强度持续减弱;7月29日00时,台风在安徽省安庆市宿松县境内减弱为热带低压,并逐渐消亡。

3 模拟结果与讨论

3.1 台风路径的模拟结果分析

图2展示了7月23日09时—28日06时6种边界层参数化方案模拟的台风“杜苏芮”路径与实况路径的对比。结果显示,所有方案都模拟出台风向西北移动并登陆福建,但到达巴士海峡前,模拟路

径普遍偏东;台风经过巴士海峡后,不同方案模拟的路径差异明显,例如MYNN方案最偏东、Acm2方案最偏西。不同方案对台风路径模拟偏差的平均值和标准差见表2,其中SH和BouLac边界层方案模拟效果较好,其偏差平均值分别为43.2 km和48.6 km,均小于50 km。此外,本文增加了两个起报时次(20日12时和21日00时)的模拟试验,结果均表明台风路径模拟偏差较小(图略)。总体而言,不同边界层方案对台风路径的模拟影响较小,这与先前的研究^[2,13,18]结果一致;且非局地方案模拟台风路径的误差总体小于局地方案,这可能是非局地方案考虑了非局地混合效应的原因。此外,SH方案对台风路径的模拟最优,这与仲鹏志等^[13]提出的YSU与MYJ方案、丁成慧等^[18]提出的YSU方案模拟台风路径效果较好的结论存在较大差异,表明台风路径模拟中,不同区域台风对应的最优边界层方案具有差异性。

3.2 台风强度的模拟结果分析

图3对比了不同边界层方案模拟的10 m最大风速与实况资料,结果显示,MYJ、MYNN、YSU和SH方案模拟风速与观测值趋势较为一致。MYNN和SH方案模拟的风速偏大,25日09—17时,两方案模拟的最大风速均超过60 m/s,SH方案接近70 m/s;YSU方案模拟风速与观测值最为接近,MYJ方案模拟的风速偏小。此外,Acm2和BouLac方案模拟的风速在25日09时明显下降,特别是Acm2方案,在25日18时—27日12时的最大风速始终保持在40 m/s以下,这主要是由于其模拟的台风路径靠近吕宋岛,受陆地影响较大(见图2)。表3显示了不同方案模拟的10 m最大风速偏差平均值及相关系数 R ,其中YSU方案的偏差平均值为2.9 m/s, R 为0.89,模拟效果最佳;MYNN方案次之,偏差平均值为3.9 m/s, R 为0.90;Acm2和BouLac方案表现较差,偏差平均值分别为10.3 m/s和7.4 m/s, R 分别为0.36和0.59。

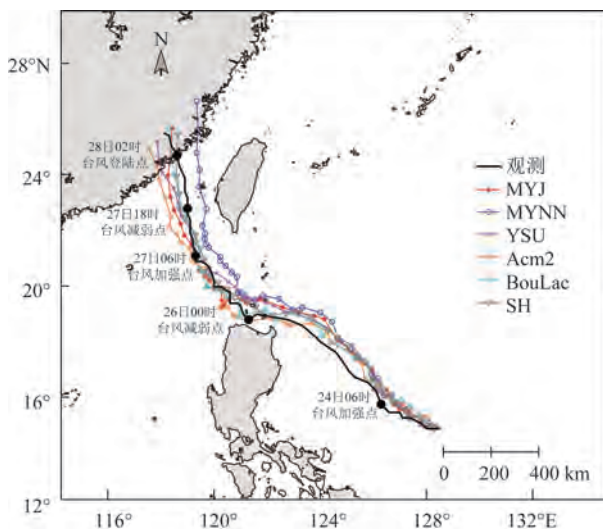


图2 不同边界层参数化方案模拟的台风路径与实况路径
Fig.2 Typhoon tracks simulated by different boundary layer parameterization schemes and the observed typhoon track

表2 不同边界层参数化方案模拟台风路径偏差的平均值和标准差(单位:km)

Tab.2 The mean and standard deviation of typhoon track error simulated by different boundary layer parameterization schemes (unit: km)

名称	MYJ	MYNN	YSU	Acm2	BouLac	SH
偏差平均值	51.1	75.2	55.6	61.3	48.6	43.2
偏差标准差	23.0	31.1	15.6	23.2	19.7	19.1

总体来看,YSU方案最接近观测值,MYNN和SH方案模拟的强度偏弱。

图4展示了不同边界层方案模拟的台风“杜苏芮”中心海平面气压与观测值的对比。台风“杜苏芮”在移动过程中经历了两次增强过程:第一次增

强时,仅MYNN方案模拟的最低海平面气压接近观测值(915 hPa),其他方案均高于观测值;第二次增强时,所有方案模拟的最低气压均高于观测值。表4显示,MYNN和YSU方案的模拟偏差平均值分别为6.5 hPa和7.0 hPa, R 分别为0.86和0.96,模拟效

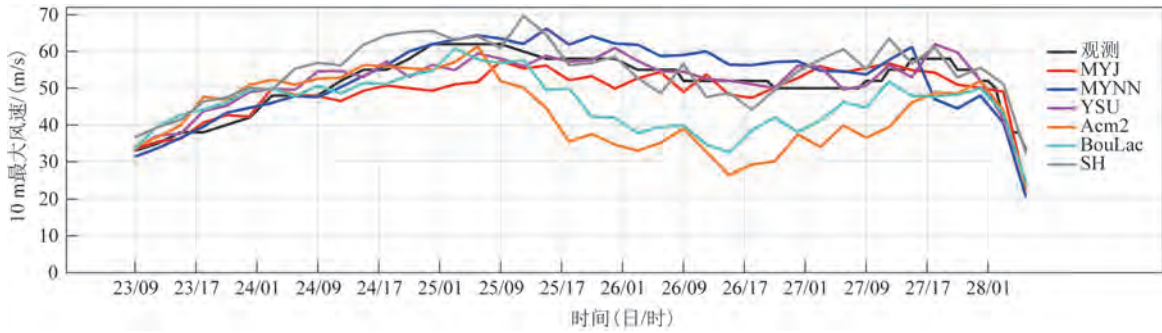


图3 不同边界层参数化方案模拟和观测的10 m最大风速时间序列

Fig.3 The time series of the 10 m maximum wind speed simulated by different boundary layer parameterization schemes and the observed 10 m maximum wind speed

表3 不同边界层参数化方案模拟10 m最大风速偏差平均值和相关系数

Tab.3 The mean deviation and correlation coefficient of the maximum 10 m wind speed simulated by different boundary layer parameterization schemes

名称	MYJ	MYNN	YSU	Acm2	BouLac	SH
偏差平均值/(m/s)	4.1	3.9	2.9	10.3	7.4	4.8
R	0.82	0.90	0.89	0.36	0.59	0.84

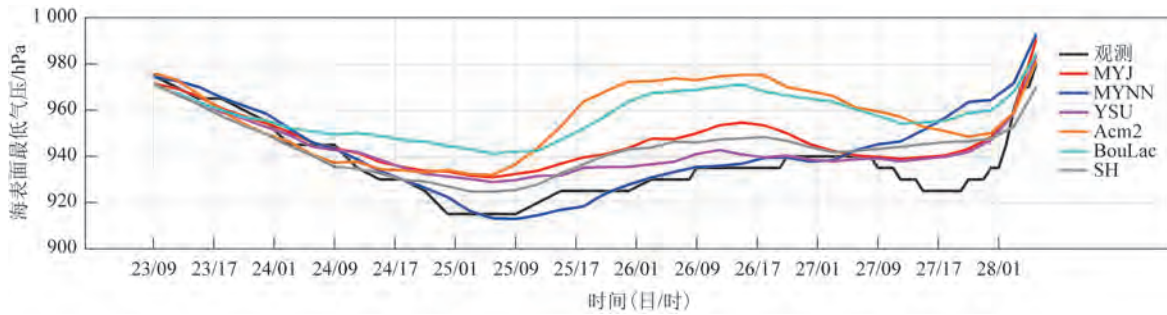


图4 不同边界层参数化方案模拟的台风中心最低海平面气压与观测台风中心海平面气压的时间序列

Fig.4 The time series of the minimum sea level pressure in typhoon center simulated by different boundary layer parameterization schemes and the observed sea level pressure in typhoon center

表4 不同边界层参数化方案模拟台风中心最低海平面气压偏差平均值和相关系数

Tab.4 The mean deviation and correlation coefficient of the minimum sea level pressure in typhoon center simulated by different boundary layer parameterization schemes

名称	MYJ	MYNN	YSU	Acm2	BouLac	SH
偏差平均值/hPa	10.0	6.5	7.0	20.0	21.0	8.9
R	0.91	0.86	0.96	0.46	0.62	0.87

果较好;Acm2 和 BouLac 方案的偏差平均值分别为 20 hPa 和 21 hPa, R 分别为 0.46 和 0.62, 模拟效果较差。此外, YSU 方案在模拟台风第二次强度增强趋势时表现更优(见图 3 和图 4)。新增两个起报时次的模拟结果也显示, 不同边界层方案在不同起报时次对台风强度模拟的差异较大。总体来看, 边界层方案对本次台风强度模拟的影响较为显著。

以上分析表明, YSU 方案对本次台风个例的强度模拟效果最优, 结合以往个例研究结果发现, BouLac 方案更适合台风“利奇马”的模拟^[13]; Acm2 方案在南海秋季台风“莎莉嘉”的模拟中表现最优, YSU 方案次之^[18]; 对 2009 年台风“莫拉菲”进行模拟时则发现, YSU 方案模拟的台风强度最接近实况^[22]。由此可见, 在台风强度模拟方面, 不同地区、不同台风个例对应的最佳边界层方案存在差异。

由图 3 实况台风强度的变化曲线可知, 25 日 00—09 时期间风速达到最大, 约为 62 m/s, MYNN、YSU、Acm2 和 SH 方案均在 25 日 06 时模拟出最大风速。图 5 展示了 25 日 06 时不同边界层方案模拟

的 10 m 风场空间分布, 台风眼内风速较小, 基本都在 10 m/s 以下, 向外风速急剧增大, 至云墙区达到最大, 随后逐渐减小。不同方案模拟的最大风速存在差异, MYNN 方案的最大风速为 64.4 m/s, SH 方案为 64.1 m/s, 两方案云墙区的风速大多超 50 m/s; MYJ 方案云墙区的风速在 40~50 m/s, 最大风速为 51.7 m/s。此外, 不同边界层方案模拟的台风眼大小有明显差异, 例如 MYNN 和 SH 方案模拟的台风眼尺寸较小, BouLac 方案模拟的台风眼尺寸较大。

综上所述, 在台风强度模拟方面, YSU 方案模拟结果最优, MYNN 和 SH 方案模拟的台风强度偏大, MYJ、Acm2 和 BouLac 方案模拟的台风强度偏小。

3.3 卫星云图和雷达反射率的模拟差异表现

图 6 展示了台风“杜苏芮”强度最大时的 FY-4A 可见光卫星云图(见图 6a)和不同边界层方案模拟的向外长波辐射(Outgoing Longwave Radiation, OLR)的空间分布(见图 6b—6g)。图 6a 显示, 台风

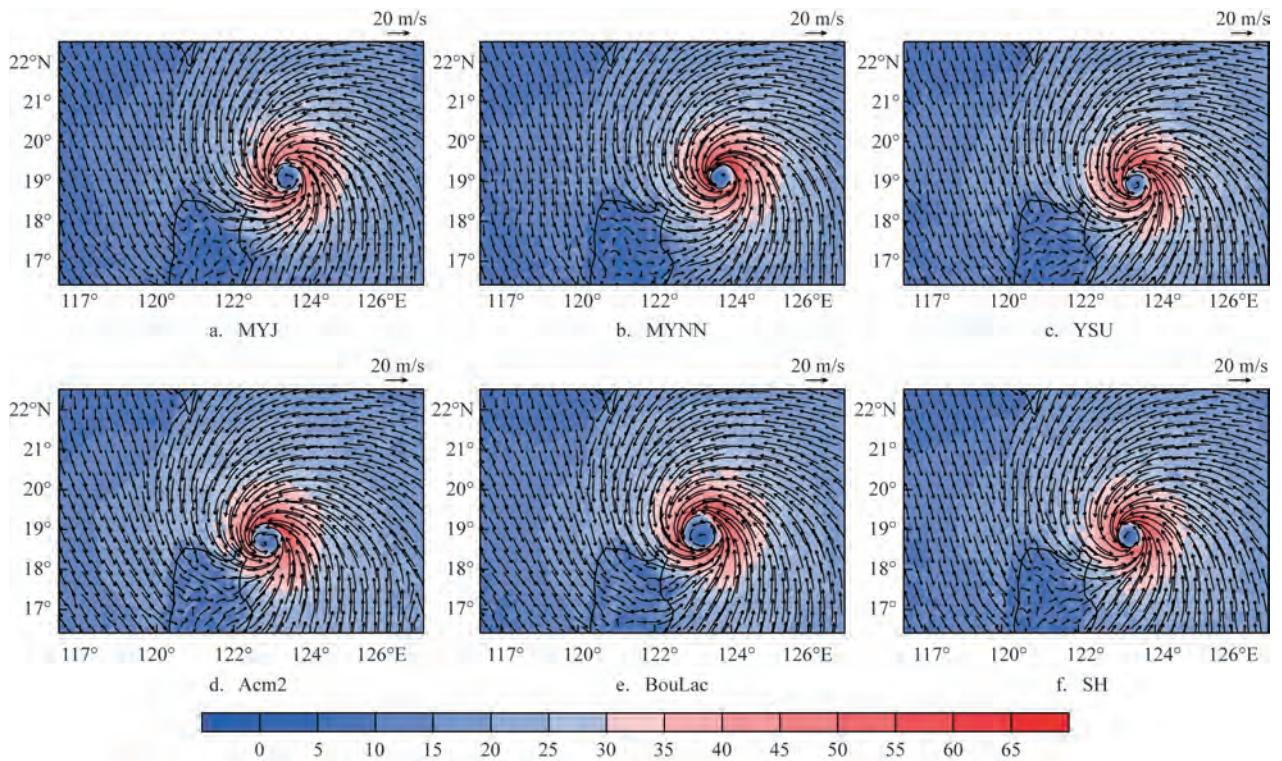


图 5 25 日 06 时不同边界层参数化方案模拟的 10 m 风场空间分布(单位: m/s)

Fig.5 Spatial distribution of 10 m wind field simulated by different boundary layer parameterization schemes at 06:00 on the 25th (unit: m/s)

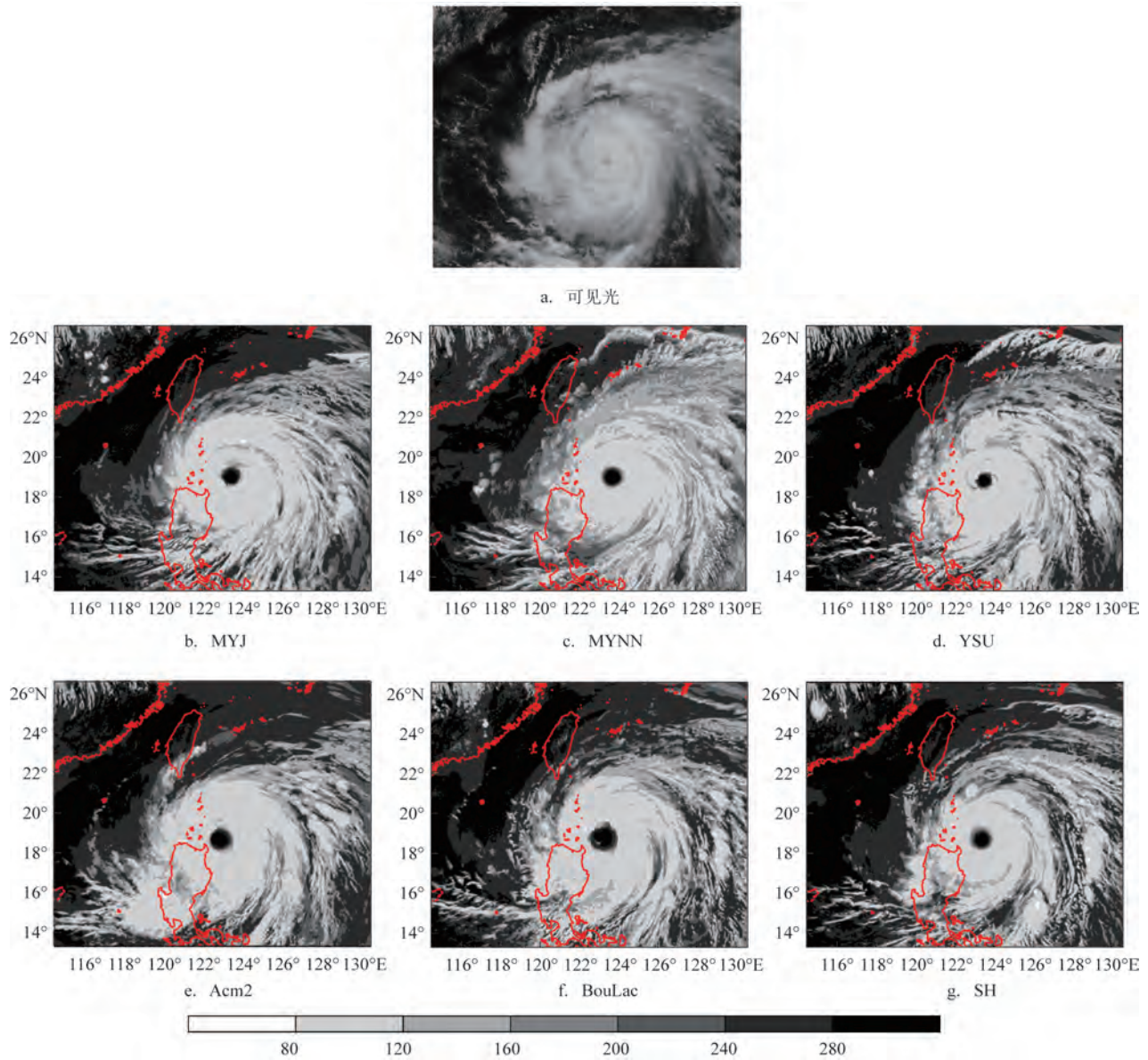


图6 25日04时34分的可见光卫星云图与25日06时不同边界层参数化方案模拟的OLR(单位: W/m^2)
 Fig.6 Visible satellite image at 04:34 on the 25th and the OLR simulated by different boundary layer parameterization schemes at 06:00 on the 25th (unit: W/m^2)

“杜苏芮”具有清晰风眼,流出层环流结构紧实清晰。图6b—6g表明,不同边界层方案模拟的OLR与可见光卫星云图的云层分布都较为接近,台风眼周围均有明显卷云羽,这与高空辐散气流有关。从OLR数值来看,台风眼的OLR较大,基本都在 $240 W/m^2$ 以上,从台风眼—云墙区—螺旋雨带,OLR值逐渐递减。在台风眼尺寸方面,BouLac方案模拟的台风眼最大,Acm2方案次之,其余方案较小。

图7显示,不同边界层方案模拟的反射率分布

存在显著差异。反射率整体空间分布特征为:台风眼处无降水,对应无反射率分布;云墙区反射率达到最大,基本都在 $40 dBz$ 以上,表明此处存在剧烈降水,外围均有螺旋雨带分布。具体而言,MYJ、BouLac、SH方案模拟的云墙结构较为对称,其他方案则存在非对称特征。螺旋雨带模拟方面,外层螺旋雨带的反射率呈明显对流性质,由一个个孤立的对流单体镶嵌在层状云回波中依次排列形成。各方案模拟的螺旋雨带空间分布差异显著,且主要体

现在台风西侧(西南侧),Acm2和BouLac方案在菲律宾群岛北部的雨带较强,MYNN方案最弱。这表明吕宋岛附近,不同方案模拟的台风结构差异更明显,可能与地形相互作用有关。总体来看,各方案对台风结构的模拟存在显著差异。

3.4 边界层方案影响台风强度的原因分析

由上述分析可知,不同边界层参数化方案对台风强度影响显著。以下将通过分析感热通量、潜热通量、地表水汽通量、水汽混合比以及最大风速半径等要素,探讨不同边界层方案导致台风强度模拟差异的原因。

3.4.1 感热通量与潜热通量

以往研究表明,地表感热通量和潜热通量均有利于台风的维持和加强^[31],观测数据与多个边界层方案模拟的风速都在25日06时达到峰值。因此,本文将分析该时刻感热通量和潜热通量的空间分布,结果见图8和图9。

图8显示,台风“杜苏芮”环流范围内感热通量为正值,表明海洋下垫面为台风系统提供能量,负值则代表台风能量损耗。台风眼区域的感热通量较小,大都在 $0\sim 100\text{ W/m}^2$ 之间,随与台风眼距离的增加逐渐增大,在云墙区达到极大值(基本在 200 W/m^2 以上),之后随距离的增加而减小。从数值上看,MYJ和MYNN方案的感热通量显著大于其他方案,其值在 400 W/m^2 以上,大于仲志鹏等^[13]MYJ方案最大值的 250 W/m^2 ,小于丁成慧等^[18]MYJ方案模拟的感热通量;YSU、Acm2、BouLac和SH方案对应的感热通量较小,最大值在 $200\sim 300\text{ W/m}^2$ 之间。Acm2和BouLac方案模拟的感热通量负值区域较大,说明其台风能量损耗较多;MYNN、SH和MYJ方案对应的感热通量负值区域较小,台风能量损耗较小。这在一定程度上也说明MYNN和SH方案模拟的台风强度较强,Acm2和BouLac方案模拟的台风强度较弱。

图9展示了25日06时不同边界层参数化方案模拟的地表潜热通量空间分布,其分布规律与感热通量相似,即台风眼潜热通量较小,云墙区最大,之后逐步递减。潜热通量数值普遍高于感热通量,说明潜热通量对台风能量的贡献更大,这与丁成慧等^[18]、李英等^[31]的研究一致。从数值上看,MYJ方案

模拟的潜热通量最大,大都维持在 $1\ 600\text{ W/m}^2$ 以上,与仲志鹏等^[13]模拟的潜热通量较为相当,显著低于丁成慧等^[18]模拟的潜热通量($3\ 000\text{ W/m}^2$ 以上);BouLac方案次之,潜热通量在 $1\ 200\sim 1\ 400\text{ W/m}^2$ 之间;其他方案的潜热通量较小,基本在 $900\sim 1\ 200\text{ W/m}^2$ 之间。从台风强度角度分析,MYNN和SH方案模拟的10 m最大风速高于其他方案(见图3),但其对应的潜热通量却明显小于MYJ和BouLac方案,这与仲志鹏等^[13]的模拟结果类似。这可能是因为不同方案的能量分配方式存在差异,MYNN和SH方案通过优化湍流混合机制,增强了垂向混合能力,使得潜热释放的能量更多分配给动力过程,进而增大近地面风速;相比之下,MYJ和BouLac方案的潜热释放能量更多消耗在降水过程上,MYJ和BouLac方案对应的雨带明显强于MYNN和SH方案(见图7),故转化为近地面风场的能量较少。

3.4.2 垂向混合和垂向结构

不同边界层参数化方案在垂向上具有不同的扩散过程,会对台风的热力和动力结构产生影响,进而影响台风强度变化。本文以台风中心为圆心,200 km为半径做方位角平均,分析台风的垂向结构特征。

图10显示,台风中心主要以气流下沉为主,云墙区以气流上升为主,且随高度增加,上升速度逐渐向外倾斜。垂直速度的最大值主要分布在距离台风中心 $40\sim 100\text{ km}$ 之间,不同边界层参数化方案对应的最大值存在一定差异。但总体而言,MYNN方案模拟的垂直速度最大,基本都在 1.5 m/s 以上,最大值达到 3.14 m/s ;MYJ方案次之,在 $2\sim 8\text{ km}$ 高度内垂直速度最大值在 2 m/s 以上,这与丁成慧等^[18]的研究结果一致;Acm2方案对应的垂直速度最大值主要分布在 $1\sim 4\text{ km}$ 高度内,其最大值也超过 2 m/s 。此外,YSU、BouLac和SH方案模拟的垂直速度最大值相对较小,大都在 1.5 m/s 以下。总体来讲,局地方案模拟的垂直速度大于非局地方案,其原因是局地方案仅关注局地的湍流混合过程,而非局地方案还考虑了非局地的湍流混合效应,将垂直混合作用分散到更广泛区域,导致垂直速度较小。

切向风作为台风的主环流,主要指围绕台风中心旋转的气流,图11展示了不同边界层参数化方案模拟的切向风方位平均图。总体来看,各方案模拟

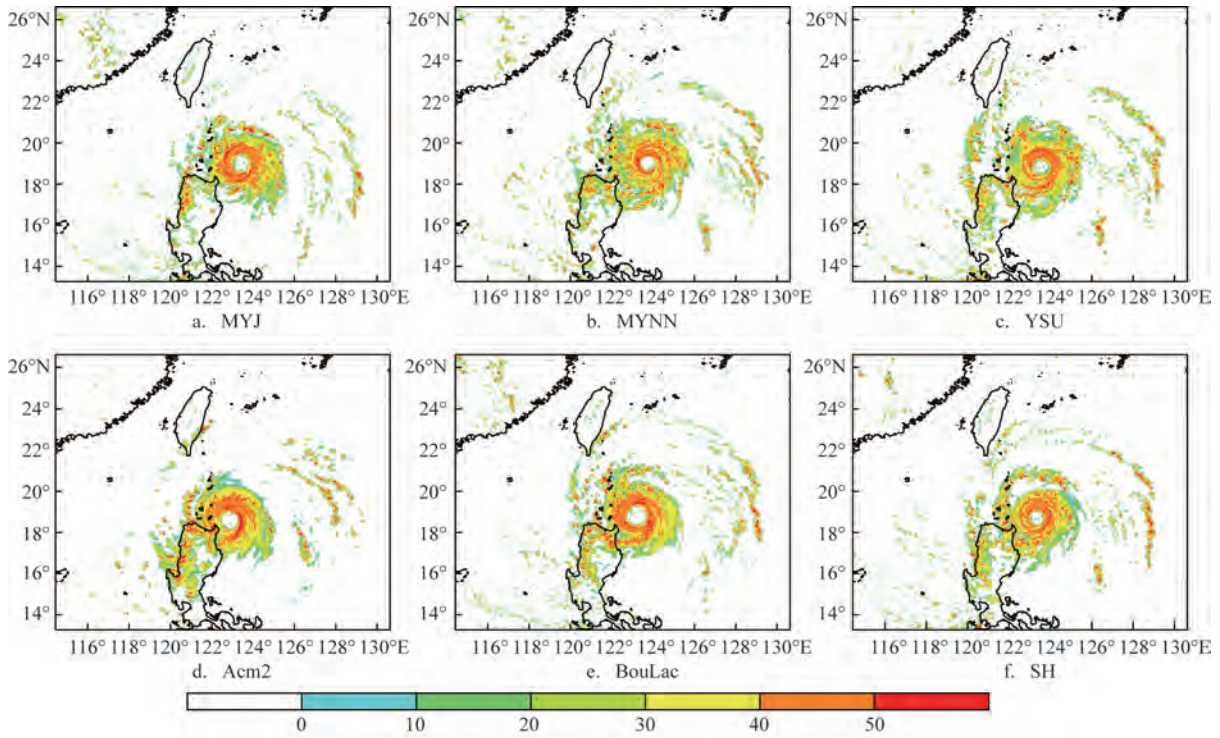


图7 25日06时不同边界层参数化方案模拟的反射率(单位:dBz)

Fig.7 Reflectivity simulated by different boundary layer parameterization schemes at 06:00 on the 25th (unit: dBz)

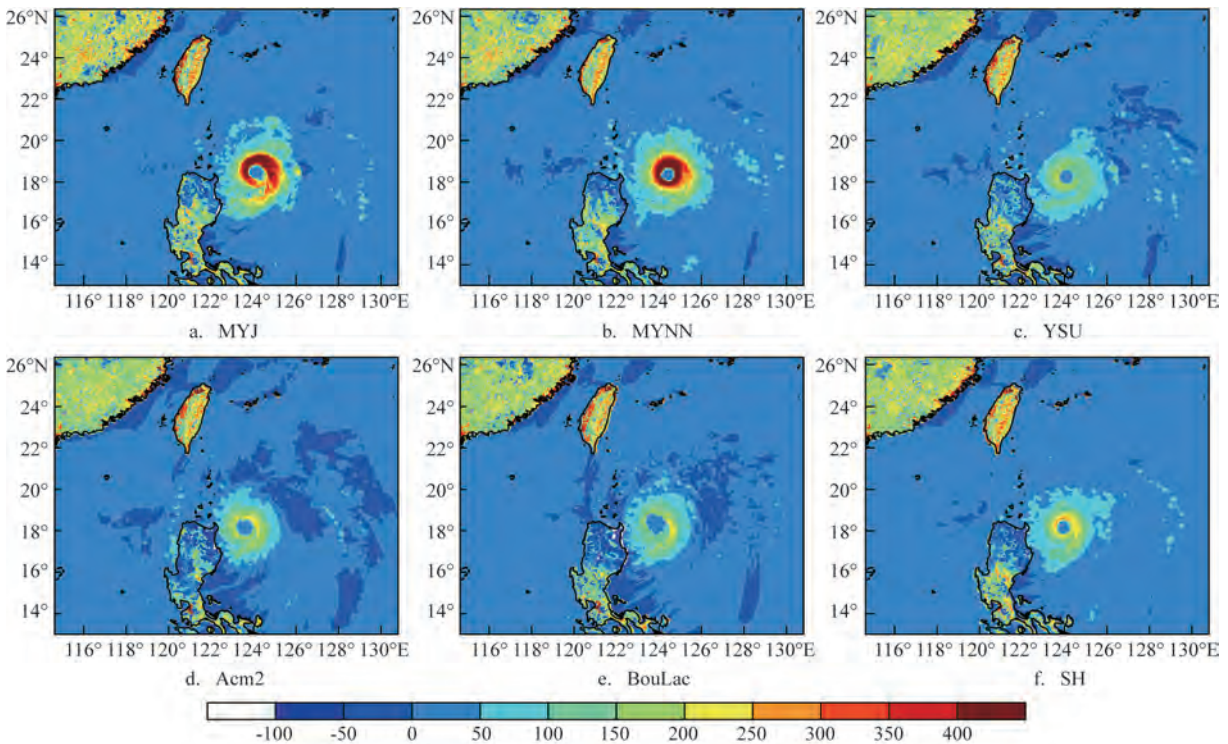


图8 25日06时不同边界层参数化方案模拟地表感热通量的空间分布(单位:W/m²)

Fig.8 Spatial distribution of surface sensible heat flux simulated by different boundary layer parameterization schemes at 06:00 on the 25th (unit: W/m²)

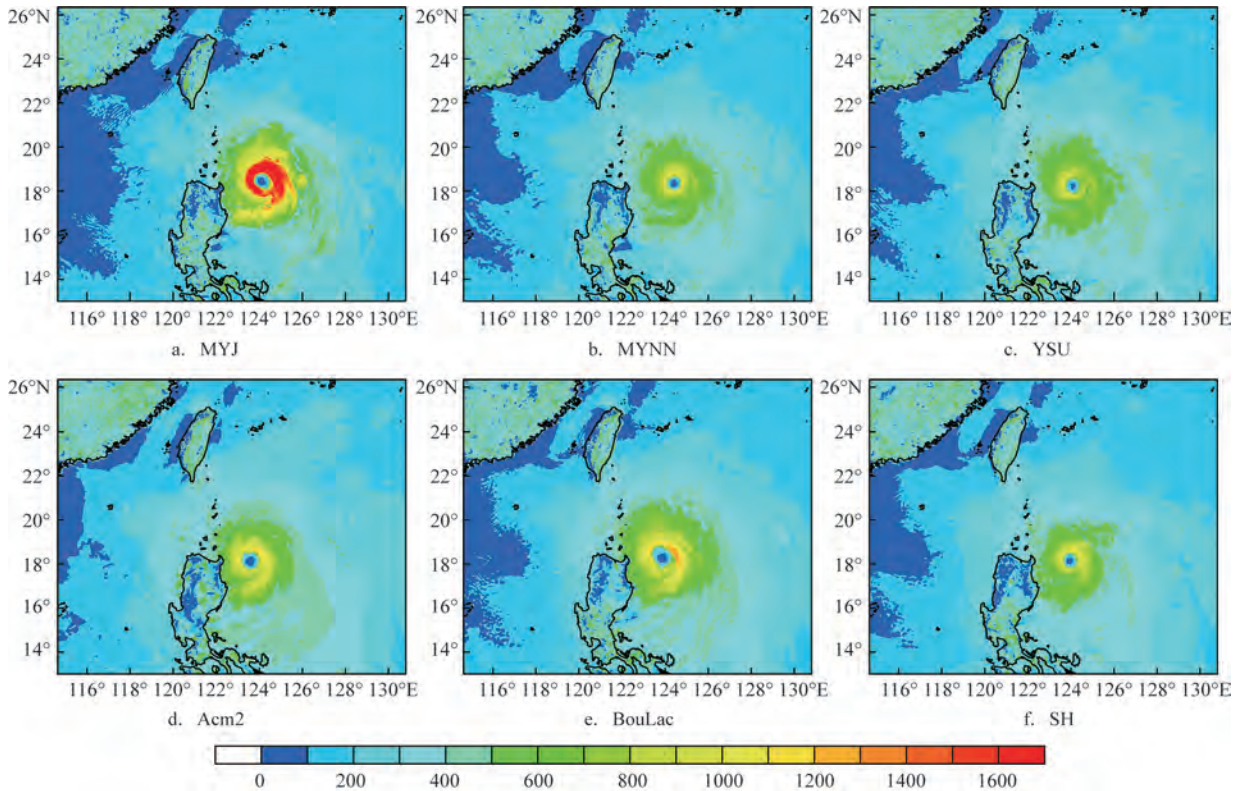


图9 25日06时不同边界层参数化方案模拟地表潜热通量的空间分布(单位:W/m²)

Fig.9 Spatial distribution of surface latent heat flux simulated by different boundary layer parameterization schemes at 06:00 on the 25th (unit: W/m²)

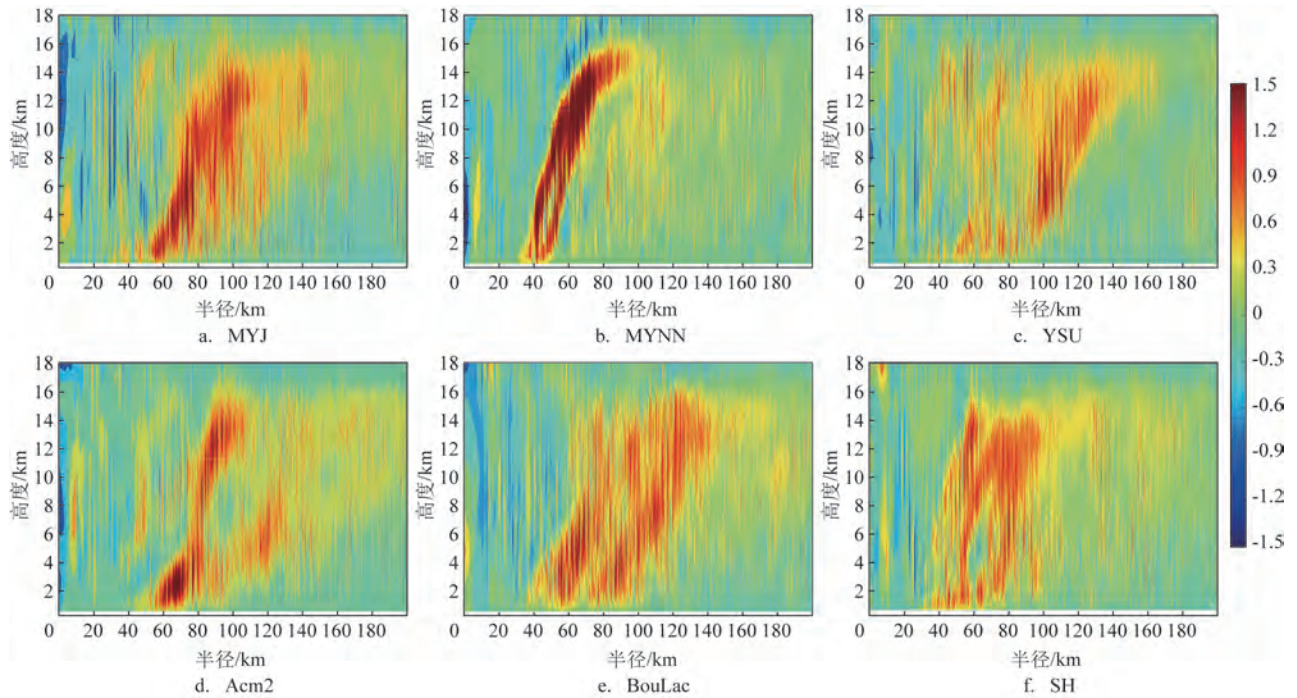


图10 25日06时不同边界层参数化方案模拟的垂直风速方位平均图(单位:m/s)

Fig.10 The azimuth average diagram of vertical wind speed simulated by different boundary layer parameterization schemes at 06:00 on the 25th (unit: m/s)

的切向风在台风中心较小(基本都在3 m/s以下),在云墙区达到最大值。各方案模拟的最大风速半径随高度增加而向外倾斜,这与前人研究一致^[13, 18];且切向风越强,向外倾斜程度越小,台风垂向结构越紧凑(见图11b和11f)。具体而言,MYNN方案模拟的切向风最强(最大值79.7 m/s);SH方案次之(最大值75.7 m/s),均大于仲鹏志等^[13]模拟的切向风最大值(75 m/s);MYJ、YSU和Acm2方案模拟的最大切向风相近,最大值在70 m/s左右;BouLac方案最小(63.4 m/s)。结合图3和图5可知,切向风的强弱与台风强度呈正相关,MYNN方案模拟的台风强度和切向风均为最强,SH方案次之,这一结果进一步证实了切向风的特征对台风强度的指示作用。

径向风是指从台风中心向外延伸且垂直于自转轴的风,可表征低层风流入和高层风流出的特征。图12显示,在低层(2 km以下)出现辐合、高层(12~17 km)出现辐散。低层风流入方面,MYJ、Acm2和BouLac方案模拟的流入径向速度较大,最大值分别为27 m/s、26 m/s和25 m/s;YSU和SH方案较小,最大值为23 m/s,MYNN方案最小,为18 m/s。高层风流出方面,MYJ、Acm2和BouLac方案的流出径向速度较大,最大值分别为24 m/s、22 m/s和23 m/s;YSU和SH方案分别为20 m/s和21 m/s;MYNN方案仍为最小,为19 m/s。结合图10发现,低层辐合和高层辐散之间,垂直风速与径向风存在较好的对应关系,即垂直速度较大的区域对应的径向风也较大。以上结果与丁成慧等^[18]的模拟结果(MYJ方案24 m/s)较为接近,但与仲鹏志等^[13]的研究结果(MYJ方案13 m/s)存在明显差异。综上所述,不同边界层参数化方案对台风垂直速度、径向风和切向风结构的模拟存在显著差异。

图12显示,台风低层为辐合气流,高层为辐散气流,台风眼周围水汽抬升并释放大量潜热,导致台风中心温度显著高于其他区域。图13展示了不同方案模拟的温度偏差方位平均图。总体而言,各方案在高空和低空均出现暖心结构,这与丁成慧等^[18]的研究一致,即低空暖心结构主要分布在3~8 km、高空暖心结构主要分布在14~17 km。从暖心结构强度来看,MYNN方案最强,约5 km高度处暖心强度最大值为11.4 °C;SH方案次之,最大值为9.6 °C;Acm2方案再次之,最大值为8.5 °C;MYJ、

YSU和BouLac方案的温度偏差最大值较小,约为8.0 °C。这与周昊等^[2]的模拟结果不同,其研究显示MYNN方案的暖心结构最弱,MYJ和YSU方案模拟的较强。总体而言,暖心结构与台风强度对应良好,其中MYNN方案暖心结构最强,台风强度也最强,SH方案次之,Acm2方案再次之;MYJ、YSU和BouLac方案模拟的暖心结构较弱,其对应的台风强度也较弱。

基于上述分析,在台风强度模拟方面,不同边界层方案表现出显著差异,MYNN和SH方案模拟的台风强度较强,YSU方案与观测值最接近,MYJ方案偏小,对应的切向风强度和暖心结构强度也呈现类似差异。从理论机制来看,MYNN和SH方案在MYJ和YSU方案基础上优化了湍流混合机制,增强了垂向混合能力,使高层动量更高效传递到低层,从而显著提升低层风速,但也容易高估风速;YSU方案综合考虑了局地和大尺度湍流混合及边界层夹卷作用,更适合模拟湍流混合过程;MYJ方案仅考虑边界层内相邻层的湍流交换,低估了非局地垂向混合作用,导致低层水汽过度积累,提高了降水效率。25日06时之前,BouLac和Acm2方案的最大风速均高于MYJ方案,这可能是由于Acm2方案综合考虑了非局地和局地湍流混合;BouLac方案的湍流交换不仅发生在相邻层之间,还涉及地表和边界层各层,其湍流混合机制均强于MYJ方案。25日06时之后,受下垫面摩擦影响,BouLac和Acm2方案的最大风速明显减弱,其中Acm2方案因最接近吕宋岛,风速下降最显著;BouLac方案次之。值得注意的是,BouLac方案因对下垫面更敏感,其风速下降时间早于Acm2方案(见图3)。这些差异凸显了不同边界层方案选择对台风模拟的关键影响。

3.4.3 热力因素和动力因素

除地表潜热通量、水汽通量^[2,18,31]外,台风眼尺寸也是影响台风强度的重要因素^[18,32]。图7、图9、图10和图11显示,MYNN和SH方案模拟的台风眼尺寸明显小于MYJ和BouLac方案。通常,台风眼尺寸越小,台风强度越大,但鲜有研究对其进行量化分析。图14展示了25日06时不同边界层方案模拟的台风中心区域海平面气压。结果显示:BouLac方案对应的台风眼面积最大,MYNN、YSU和SH方案较小;台风眼的海平面最低气压方面,MYNN方案最

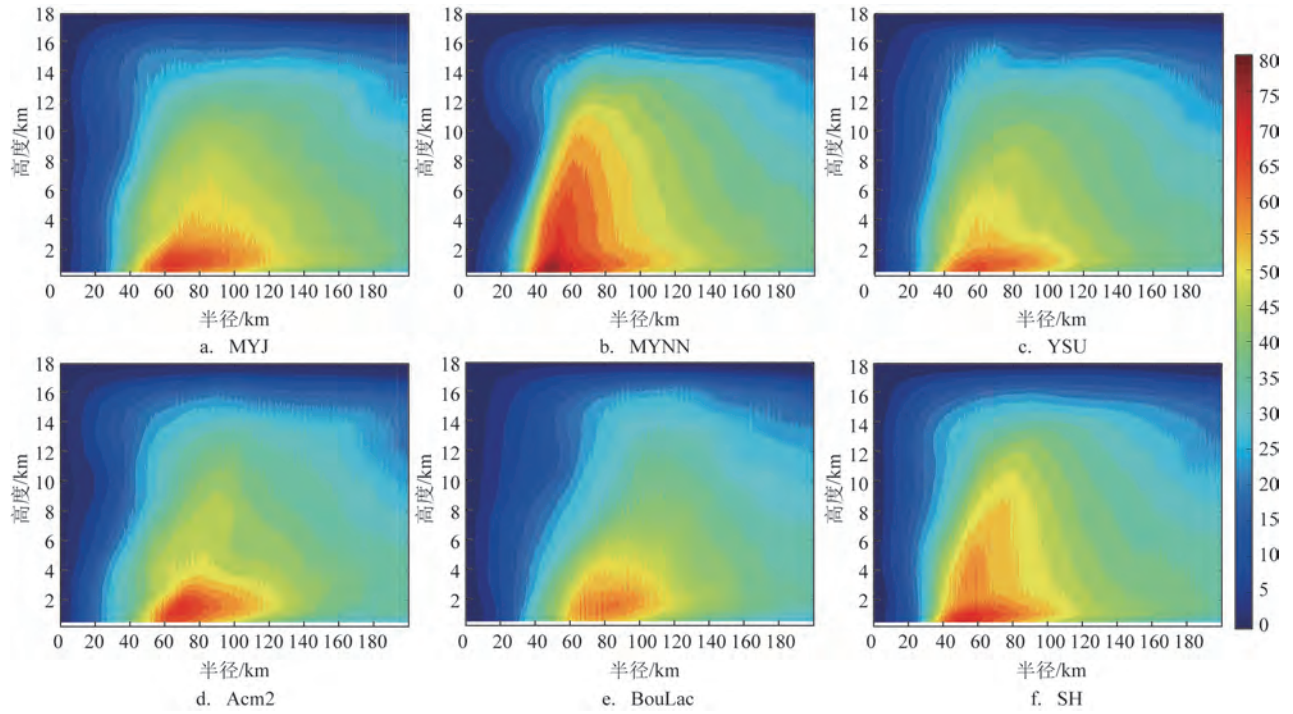


图 11 25日06时不同边界层参数化方案模拟的切向风速方位平均图(单位:m/s)

Fig.11 The azimuth average diagram of tangential wind simulated by different boundary layer parameterization schemes at 06:00 on the 25th (unit: m/s)

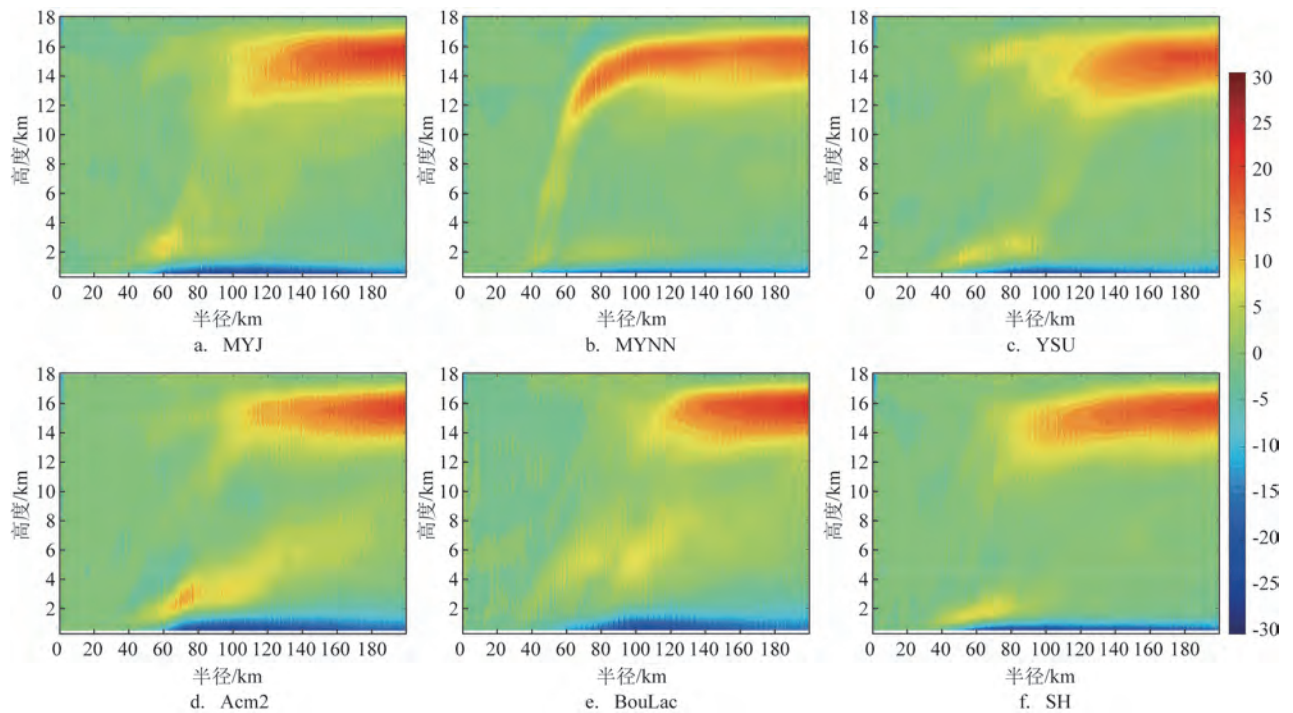


图 12 25日06时不同边界层参数化方案模拟的径向风速方位平均图(单位:m/s)

Fig.12 The azimuth average diagram of radial wind simulated by different boundary layer parameterization schemes at 06:00 on the 25th (unit: m/s)

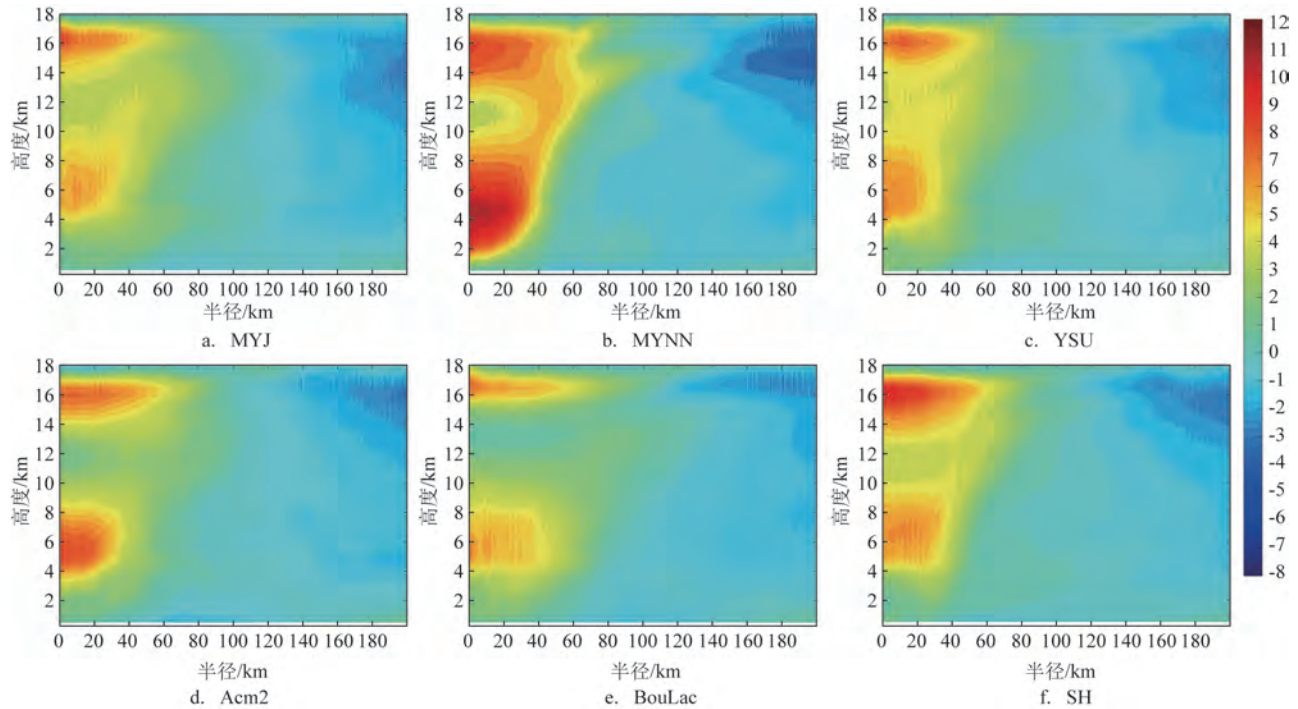


图13 25日06时不同边界层参数化方案模拟的温度偏差方位平均图(单位:℃)

Fig.13 The azimuth average diagram of temperature deviation simulated by different boundary layer parameterization schemes at 06:00 on the 25th (unit:℃)

低(大都在920 hPa以下),SH方案次之(基本在925~930 hPa之间),MYJ、YSU和Acm2方案大多在930~935 hPa之间,BouLac方案最高(基本在940~947 hPa之间),这与图4结果一致。

图14中的网格间距为6',可用于估算台风眼半径。结果显示,MYJ、MYNN、YSU、Acm2、BouLac和SH方案对应的台风眼半径分别约为47.2 km、37.8 km、42.0 km、47.2 km、56.7 km和38.8 km,均在60 km以内,这与向纯怡等^[33]研究的超强台风最大风速半径范围一致。此外,赵鑫等^[34]基于28°~31°N西北太平洋的观测数据,拟合出台风中心气压与最大风速半径的关系式;Zhou等^[35]通过对10个台风的研究,也得到类似的关系式。本文使用赵鑫等^[33]和Zhou等^[35]的公式,分别计算了25日06时6种边界层参数化方案模拟的最大风速半径,并与估算的台风眼半径对比。结果表明,Zhou等^[35]的公式计算结果与估算结果更接近,其相关系数R为0.93(图略)。因此,本文选择Zhou等^[35]的公式计算最大风速半径。

本文利用最大风速半径表征台风眼的尺寸,对

影响台风“杜苏芮”的热力因素(潜热通量)、动力因素(最大风速半径)与10 m最大风速进行对比。图15展示了不同边界层参数化方案模拟的10 m最大风速、最大地表潜热通量和最大风速半径的时间序列。总体来看,潜热通量与10 m最大风速呈正相关关系,其相关系数R1在0.60~0.91之间;最大风速半径与10 m最大风速呈负相关关系,相关系数R2在-0.89~-0.95之间;潜热通量与最大风速半径呈负相关关系,相关系数R3在-0.56~-0.74之间。

总体来看,最大风速半径与10 m最大风速呈显著负相关关系,相关系数R2约为-0.9,其相关性更稳定,且不受下垫面影响。相比之下,相关系数R1与R3的绝对值较小,相关性较弱。对于MYJ方案,R1略大于R2的绝对值,在一定程度上表明潜热通量对10 m最大风速的影响更大,这可能是因为MYJ方案模拟的潜热通量较大,且台风路径受陆地下垫面影响较小。然而,在其他方案中,R1均小于R2的绝对值,表明动力因素(最大风速半径)对台风“杜苏芮”的影响更显著。例如,MYNN和SH方案模拟的10 m最大风速较高,是因为它们的最大风速半径

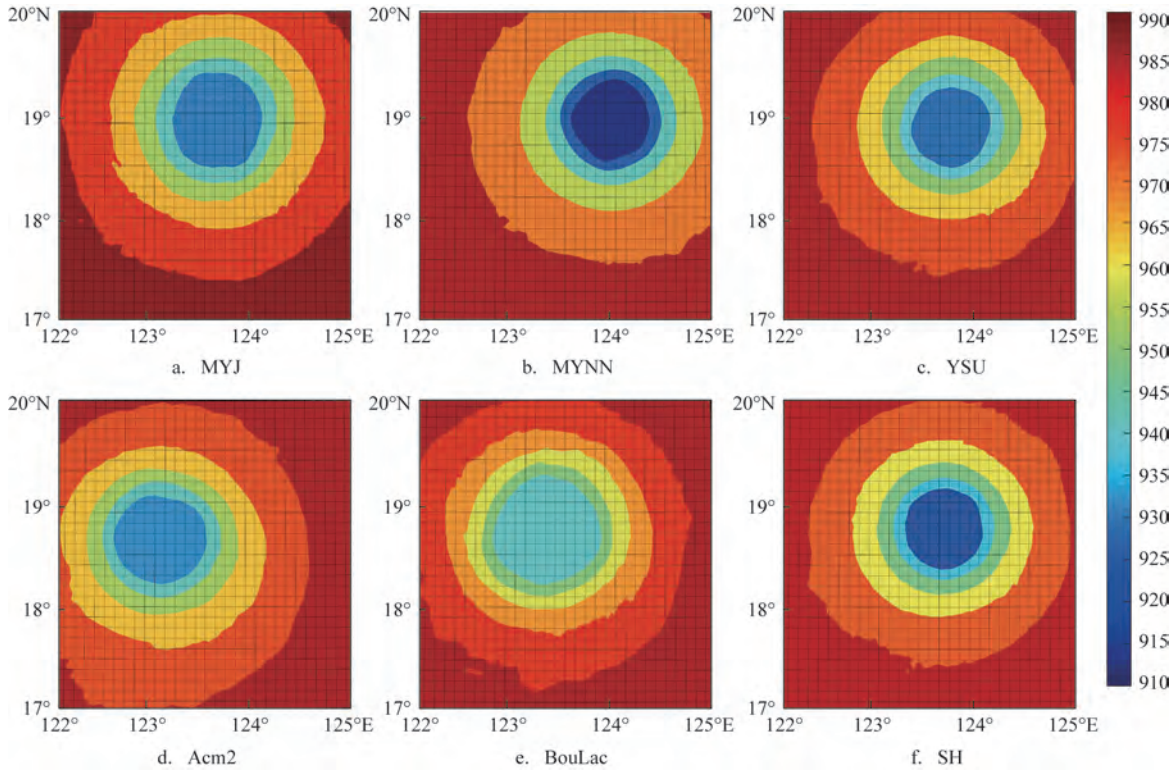


图 14 25日06时不同边界层参数化方案模拟的台风中心区域海平面气压(单位:hPa)

Fig.14 Sea level pressure in typhoon center area simulated by different boundary layer parameterization schemes at 06:00 on the 25th (unit: hPa)

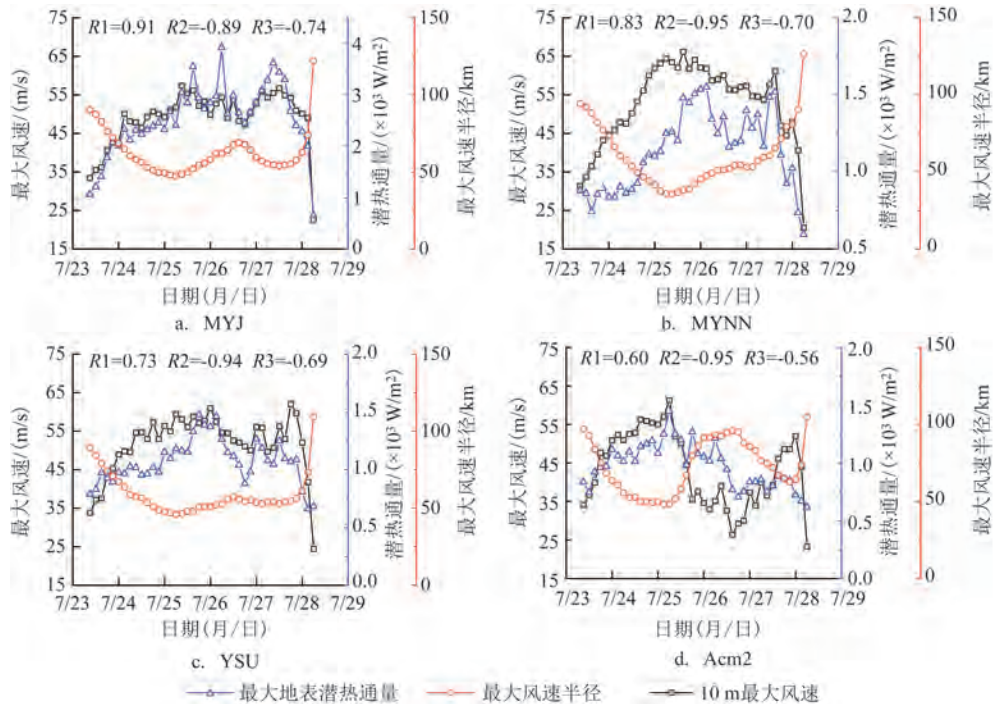


图 15 不同边界层参数化方案模拟的10 m最大风速、最大地表潜热通量和最大风速半径的时间序列

Fig.15 The time series of the maximum wind speed at 10 m, maximum surface latent heat flux, and maximum wind speed radius simulated by different boundary layer parameterization schemes

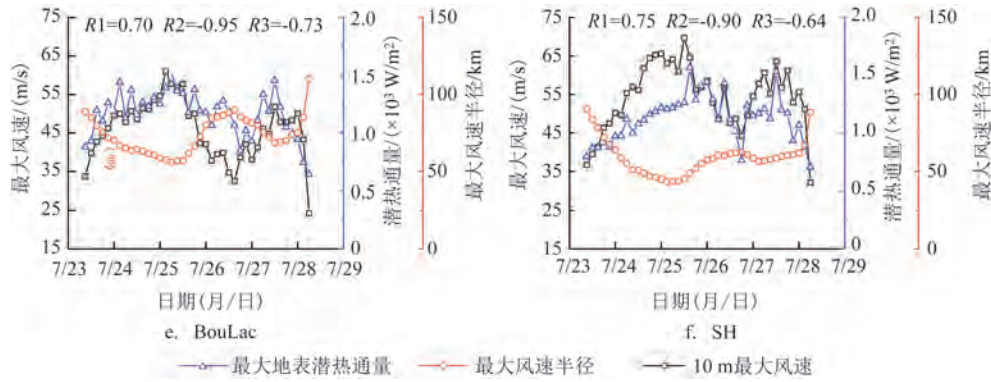


图15 (续)

Fig.15 (Continued)

较小(分别为 35.8 km 和 43.1 km),能量消耗相对较少——尽管其潜热通量低于 MYJ 方案,但模拟的 10 m 最大风速仍高于 MYJ 方案。鉴于最大风速半径与 10 m 最大风速的相关性强,回归分析得到公式:

$$y = -1.60x + 143.5 \quad (R = -0.93)$$

式中: y 为最大风速半径; x 为 10 m 最大风速。

该公式可为已知 10 m 最大风速时估算最大风速半径提供可靠参考依据。

4 总结与讨论

本文利用 WRF3.9 中的 MYJ、MYNN、YSU、Acm2、BouLac 和 SH 边界层参数化方案,对 2023 年超强台风“杜苏芮”进行了数值模拟,对比分析了不同边界层参数化方案对台风路径和强度的模拟结果,并对模拟结果的差异进行了分析。结论如下:

①在超强台风“杜苏芮”路径模拟中,不同边界层方案对台风路径影响较小。整体上看,非局地方案模拟的台风路径误差更小,具体而言,SH 方案模拟的台风路径最优,偏差平均值为 43.2 km。对台风路径进行模拟时,SH 方案可能是更优选择。

②在 10 m 最大风速模拟方面,MYJ、MYNN、YSU 和 SH 方案的模拟结果与观测相符,其中,MYNN 和 SH 方案的模拟值偏高,MYJ 方案偏低,YSU 方案最接近实况(偏差平均值为 2.9 m/s)。在台风中心海平面气压模拟方面,MYNN 和 YSU 方案表现较好,平均偏差分别为 6.5 hPa 和 7.0 hPa。总体来看,不同边界层方案对台风强度模拟的影响显著,其中,YSU 方案的综合模拟表现更出色,能较好

贴合观测值。若侧重提高台风风速模拟进度,MYNN 与 SH 方案凭借其风速模拟的优势值得优先考虑;若追求台风强度模拟的精准度,则推荐 YSU 方案。

③不同边界层方案模拟的台风结构存在明显差异。MYJ、BouLac 和 SH 方案模拟的云墙结构较为对称,其他方案则表现出非对称性。螺旋雨带的空间分布也因方案而异,尤其在台风西侧,Acm2 方案在菲律宾群岛北部模拟的雨带最强,MYNN 方案最弱,这可能与地形相互作用有关。此外,各方案在台风眼区面积模拟方面也有所不同。感热通量方面,MYJ 和 MYNN 方案的模拟结果较大;潜热通量方面,MYJ 方案的模拟结果最大,BouLac 方案次之。

④从台风垂向结构来看,不同边界层方案模拟的垂直速度、切向风速度、径向风速度和暖心结构均有较大差异。切向风速度的大小和暖心结构强弱对台风强度有很好的指示意义,MYNN 方案对应的切向风速度最大、暖心结构最强、台风强度也最强;SH 方案次之;MYJ、YSU、Acm2 和 BouLac 方案则较小。此外,潜热通量和最大风速半径均与 10 m 最大风速密切相关,潜热通量与 10 m 最大风速呈正相关(相关系数在 0.60~0.91 之间);最大风速半径与 10 m 最大风速呈负相关,且相关性更强(相关系数在 -0.89~-0.95 之间),对 10 m 最大风速的影响可能更大,由此得到关系式: y (最大风速半径) = $-1.60x$ (10 m 最大风速) + 143.5。

本文基于台风“杜苏芮”(202305)的移动路径和强度,对 6 种边界层参数化方案进行对比分析,筛选出更适用于台风模拟的边界层方案,为后期业务

预报和研究提供参考依据。但本文仅仅针对一个台风个例开展模拟研究,所得结果的普遍性还需要更多研究对比验证。

参考文献:

- [1] GRAY W M. Global view of the origin of tropical disturbances and storms[J]. *Monthly Weather Review*, 1968, 96(10): 669-700.
- [2] 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 micro-physics 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.
- [3] 陈联寿,丁一汇.西太平洋台风概论[M].北京:科学出版社,1979.
CHEN L S, DING Y H. An introduction to typhoons in the western Pacific[M]. Beijing: Science Press, 1979.
- [4] 李曾中.台风、低纬环流与中国天气[M].北京:气象出版社,2016.
LI C Z. Typhoons, low-latitude circulation, and Chinese weather [M]. Beijing: Meteorological Press, 2016.
- [5] 郭云霞.中国东南沿海区域台风及其风暴潮模拟与危险性分析[D].青岛:中国科学院大学(中国科学院海洋研究所),2020.
GUO Y X. Simulation and risk analysis of typhoon and storm surge in the Southeast China coastal region[D]. Qingdao: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences), 2020.
- [6] 胡非,洪钟祥,雷孝恩.大气边界层和大气环境研究进展[J]. *大气科学*, 2003, 27(4): 712-728.
HU F, HONG Z X, LEI X E. Recent progress of atmospheric boundary layer physics and atmospheric environment research in IAP[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2003, 27(4): 712-728.
- [7] 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.
- [8] SMITH R K, THOMSEN G L. Dependence of tropical-cyclone intensification on the boundary-layer representation in a numerical model[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2010, 136(652): 1671-1685.
- [9] 陈炯,王捷捷.边界层参数化方案对降水预报的影响[J]. *应用气象学报*, 2006, 17(S1): 11-17.
CHEN J, WANG J J. Mesoscale precipitation simulation sensitivity to PBL parameterization[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2006, 17(S1): 11-17.
- [10] 黄泓,李刚,谭言科,等.WRF3.0模式中边界层参数化方案对暴雨预报的影响[C]//第26届中国气象学会年会灾害天气事件的预警、预报及防灾减灾分会场论文集.杭州:中国气象学会天气学委员会,中国气象学会水文气象学委员会,国家气象中心,水利部水文局,2009: 1342-1356.
HUANG H, LI G, TAN Y K, et al. The impact of the PBL parameterization schemes in WRF3.0 model on the numerical simulation of the rainstorm[C]//Proceedings of the 26th Chinese Meteorological Society Annual Conference on Early Warning, Forecast, and Disaster Mitigation of Catastrophic Weather Events. Hangzhou, 2009: 1342-1356.
- [11] Nolan D S, Zhang J A, Stern D P. Evaluation of planetary boundary layer parameterizations in tropical cyclones by comparison of in situ observations and high-resolution simulations of Hurricane Isabel (2003). Part I: initialization, maximum winds, and the outer-core boundary layer[J]. *Monthly Weather Review*, 2009, 137(11): 3651-3674.
- [12] Nolan D S, Stern D P, Zhang J A. Evaluation of planetary boundary layer parameterizations in tropical cyclones by comparison of in situ observations and high-resolution simulations of Hurricane Isabel (2003). Part II: inner-core boundary layer and eyewall structure[J]. *Monthly Weather Review*, 2009, 137(11): 3675-3698.
- [13] 仲鹏志,冶磊,李煜斌,等.不同边界层参数化方案对台风“利奇马”模拟的影响研究[J]. *热带气象学报*, 2022, 38(2): 275-289.
ZHONG P Z, YE L, LI Y B, et al. Impact of different boundary layer parameterization schemes on the simulation of typhoon Lekima[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2022, 38(2): 275-289.
- [14] 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.
- [15] 邢蕊,杨健博,庄庭,等.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[J]. *海洋预报*, 2023, 40(4): 107-121.
XING R, YANG J B, ZHUANG T, et al. Comparison of typhoon "In-Fa" (2021) northward-movement simulation with different planetary boundary layer parameterization schemes[J]. *Marine Forecasts*, 2023, 40(4): 107-121.
- [16] 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.

- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] ZHANG J A, ROGERS R F, TALLAPRAGADA V. Impact of parameterized boundary layer structure on tropical cyclone rapid intensification forecasts in HWRF[J]. Monthly Weather Review, 2017, 145(4): 1413-1426.
- [21] 张建海, 张立波, 庞盛荣. 台风“卡努”(0515)加强过程对边界层参数化方案的敏感性试验[J]. 台湾海峡, 2007, 26(1): 26-35.
ZHANG J H, ZHANG L B, PANG S R. Sensitive experiments on the boundary layer schemes during the strengthening process of typhoon "Khanun" [J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 2007, 26(1): 26-35.
- [22] 赖文锋, 刘阳, 麦健华, 等. 台风“莫拉菲”对不同边界层方案的敏感性数值模拟[J]. 广东气象, 2010, 32(6): 10-14.
LAI W F, LIU Y, MAI J H, et al. Numerical sensitivity experiments with different boundary layer schemes for typhoon "Molave" [J]. Guangdong Meteorology, 2010, 32(6): 10-14.
- [23] MELLOR G L, YAMADA T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems [J]. Reviews of Geophysics, 1982, 20(4): 851-875.
- [24] JANJIC Z I. Nonsingular implementation of the Mellor-Yamada level 2.5 scheme in the NCEP meso model [R]. NCEP Office Note, 2001: 437.
- [25] NAKANISHI M, NIINO H. An improved Mellor-Yamada level-3 model: its numerical stability and application to a regional prediction of advection fog [J]. Boundary-Layer Meteorology, 2006, 119(2): 397-407.
- [26] 吴冰雪, 苗峻峰, 杨薇. 边界层参数化对海南岛山地环流结构和湍流特征模拟的影响[J]. 地球物理学报, 2023, 66(5): 1888-1910.
WU B X, MIAO J F, YANG W. Impact of planetary boundary layer parameterizations on simulated mountain circulation structure and turbulence characteristics over the Hainan Island[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2023, 66(5): 1888-1910.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] BOUGEALT P, LACARRERE P. Parameterization of orography-induced turbulence in a mesobeta-scale model [J]. Monthly Weather Review, 1989, 117(8): 1872-1890.
- [30] SHIN H H, HONG S Y. Representation of the subgrid-scale turbulent transport in convective boundary layers at gray-zone resolutions[J]. Monthly Weather Review, 2015, 143(1): 250-271.
- [31] 李英, 陈联寿. 湿地边界层通量影响热带气旋登陆维持和降水的数值试验[J]. 气象学报, 2005, 63(5): 683-693.
LI Y, CHEN L S. Numerical study on impacts of boundary layer fluxes over wetland on sustention and rainfall of landfalling tropical cyclone [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2005, 63(5): 683-693.
- [32] 钟茜, 魏凯, 沈忠辉, 等. 台风“玛莉亚”风场WRF模拟及最大风速半径的非对称特性[J]. 工程力学, 2022, 39(S1): 389-396.
ZHONG Q, WEI K, SHEN Z H, et al. WRF-based simulation of wind field and asymmetry feature of radius to maximum winds during typhoon "Maria"[J]. Engineering Mechanics, 2022, 39(S1): 389-396.
- [33] 向纯怡, 吴立广, 田伟, 等. 多平台热带气旋表面风场资料在台风结构分析中的应用[J]. 气象, 2016, 42(11): 1315-1324.
XIANG C Y, WU L G, TIAN W, et al. Applications of MTCSSWA data to the characteristic analysis of tropical cyclone structure [J]. Meteorological Monthly, 2016, 42(11): 1315-1324.
- [34] 赵鑫, 姚炎明, 黄世昌, 等. 超强台风“桑美”及“韦帕”风暴潮预报分析[J]. 海洋预报, 2009, 26(1): 19-28.
ZHAO X, YAO Y M, HUANG S C, et al. Analysis of storm surge forecast for super typhoons 'Saomai' and 'Wipha' [J]. Marine Forecasts, 2009, 26(1): 19-28.
- [35] ZHOU T Y, TAN Y, CHU A, et al. Integrated model for astronomic tide and storm surge induced by typhoon for Ningbo coast [C]//Proceedings of the 28th International Ocean and Polar Engineering Conference. Sapporo, Japan: International Society of Offshore and Polar Engineers, 2018.

The impacts of different boundary layer parameterization schemes on the track and intensity simulation of Typhoon "DokSuri" (202305)

ZHANG Deqiang^{1,2}, XING Rui³, ZHANG Lei^{1,2}, XU Jing^{1,4}

(1. Qingdao Institute of Marine Meteorology, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Qingdao 266404, China; 2. Qingdao Research Center of Marine Meteorology, Qingdao Meteorological Bureau, Qingdao 266404, China; 3. Tianjin Binhai New Area Meteorological Service, Tianjin 300457, China; 4. State Key Laboratory of Disaster Weather Science and Technology, CAMS, Beijing 100081, China)

Abstract: In this paper, based on the mesoscale numerical forecast model WRFV3.9 with the NECP FNL reanalysis data at a resolution of $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ as initial field and boundary condition, the No.5 super Typhoon "Doksuri" in 2023 is simulated with six boundary layer parameterization schemes (MYJ, MYNN, YSU, Acm2, BouLac and SH) to investigate the impacts of different schemes on the simulation of the typhoon track and intensity. The results show that boundary layer schemes have a little effect on the typhoon track but a significantly impact on the typhoon intensity. In general, the typhoon track simulated with the SH scheme and the typhoon intensity simulated with the YSU scheme are most consistent with the best track. From the perspective of typhoon intensity, the MYNN scheme simulates the strongest tangential wind, the strongest warm core structure, and the smallest typhoon eye size. The MYNN scheme produces the strongest typhoon intensity, followed by the SH scheme, and then other schemes. As a combined result of thermal and dynamic factors, the latent heat flux plays an important role in evaluating the typhoon intensity in terms of thermal factors, and the typhoon eye size has a significant impact on typhoon intensity evaluation in terms of dynamic factors.

Key words: boundary layer parameterization schemes; numerical simulation; typhoon track and intensity; latent heat flux; typhoon eye size